



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박사학위논문

제주도 북동부 월정-행원 지역의
화산층서와 용암류 각력화작용을
동반한 해안 지역의 성장

제주대학교 대학원

지구해양학과

고 창 성

2020년 8월

제주도 북동부 월정-행원 지역의 화산층서와 용암류 각력화작용을 동반한 해안 지역의 성장

지도교수 윤 석 훈

고 창 성

이 논문을 이학 박사학위 논문으로 제출함

2020년 8월

고창성의 이학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장

이 준 백

위 원

백 준 백

위 원

전 용 문

위 원

안 우 산

위 원

윤 석 훈

제주대학교 대학원

2020년 8월

Volcanic Stratigraphy of Woljeong–Haengwon
Area and Coastal Growth with Lava Brecciation
in the Northeastern Jeju Island, Korea

Chang–Seong Koh
(Supervised by professor Seok–Hoon Yoon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Doctor of Science

2020. 8.

DEPARTMENT OF EARTH AND MARINE SCIENCES
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목차

List of Figures	vi
List of Tables	ix
Abstract	xi
I. 서론	1
II. 지질 개요	5
1. 제주도	5
1) 지형	5
(1) 분석구	6
(2) 응회구, 응회환, 마르	7
(3) 용암돔	8
(4) 순상화산	8
2) 지질층서	9
(1) 기반암	9
(2) U층	10
(3) 서귀포층	11
(4) 용암류	11
(5) 비화산성 퇴적층 및 고토양층	13
3) 화산활동사	14
2. 월정리-행원리 해안지역	18
1) 지형	18
2) 지표 지질	19
(1) 온평리현무암	19
(2) 덕천리현무암	22
(3) 둔지봉현무암	22

(4) 사구층	23
Ⅲ. 연구재료 및 방법	26
1. 연구재료	26
1) 시추공 코어	26
2) 시추공 지구물리검층	26
2. 연구방법	29
1) 시추코어 현장기재	29
(1) 비각력화 용암류	30
(2) 각력화 용암류	33
(3) 비화산성 퇴적암 및 고토양	33
2) 용암류 지화학 및 광물분석	34
(1) X-선 형광분석	34
(2) 편광현미경 관찰	35
3) 퇴적암 조직분석	35
(1) 입도분석	35
(2) 광물조성 분석	45
4) 3차원 지질 모델링	46
(1) 모델링 작업 흐름도	47
Ⅳ. 시추코어 특징	53
1. 암상 산출 특성	53
1) KIGAM공	53
(1) 지표(해발 5.0m)~해수면 하 43.7m	53
(2) 해수면 하 43.7~60.5m	64
(3) 해수면 하 60.5~62.6m	64
(4) 해수면 하 62.6~93.7m	64
(5) 해수면 하 93.7~125.5m	69
2) 월정1호공(WJ-1)	69
(1) 지표(해발 19.7m)~해수면 하 41.3m	70
(2) 해수면 하 41.3~60.5m	75

(3) 해수면 하 60.5~62.5m	75
(4) 해수면 하 62.5~96.9m	76
(5) 해수면 하 96.9~110.3m	76
3) 월정2호공(WJ-2)	77
(1) 지표(해발 25.2m)~해수면 하 33.4m	77
(2) 해수면 하 33.4~58.6m	82
(3) 해수면 하 58.6~95.8m	82
(4) 해수면 하 95.8~106.1m	83
4) 행원1호공(HW-1)	83
(1) 지표(해발 4.5m)~해수면 하 41.6m	84
(2) 해수면 하 41.6~69.1m	84
(3) 해수면 하 69.1~90.5m	89
(4) 해수면 하 90.5~125.5m	89
5) 행원2호공(HW-2)	90
(1) 지표(해발 7.4m)~해수면 하 30.7m	90
(2) 해수면 하 30.7~58.4m	95
(3) 해수면 하 58.4~59.0m	96
(4) 해수면 하 59.0~90.6m	96
(5) 해수면 하 90.6~107.6m	97
6) 행원3호공(HW-3)	97
(1) 지표(해발 11.8m)~해수면 하 33.8m	97
(2) 해수면 하 33.8~78.4m	102
(3) 해수면 하 78.4~82.5m	103
(4) 해수면 하 82.5~91.8m	104
(5) 해수면 하 91.8~110.2m	104
7) 행원4호공(HW-4)	105
(1) 지표(해발 15.5m)~해수면 하 32.7m	105
(2) 해수면 하 32.7~49.5m	110
(3) 해수면 하 49.5~77.5m	111
(4) 해수면 하 77.5~134.5m	111
2. 지화학적 특성	112

1) 슐레아이트질 현무암	112
2) 슐레아이트질 안산암	112
3) 알칼리 현무암 및 조면현무암	125
4) 해석	125
3. 자연감마선 특성	126
1) 암상별 자연감마선 특성	126
2) 지화학 조성별 자연감마선 특성	129
3) 해석	132
V. 암상 분석	135
1. 비각력화 용암류 암상	135
1) 고다공질 분층	135
2) 다공질 분층	137
3) 치밀질 분층	137
4) 유리질 분층	138
5) 해석	138
2. 각력화 용암류 암상	141
1) 반각력화 용암류	142
2) 역지지 유리질 각력암	145
3) 기질지지 유리질 각력암	146
4) 해석	147
3. 비화산성 암상	149
1) 사암 및 실트암	149
2) 고토양	153
3) 해석	155
VI. 층서 분석	158
1. 층서	158
1) 층단위 I (비화산성 퇴적암층 I)	158
2) 층단위 II (각력화 용암류층 I)	166
3) 층단위 III (비각력화 용암류층 I)	167

4) 층단위Ⅳ(비화산성 퇴적암층Ⅱ)	169
5) 층단위Ⅴ(각력화 용암류층Ⅱ)	170
6) 층단위Ⅵ(비각력화 용암류층Ⅱ)	172
2. 3차원 층서 모델링	173
1) 층경계면의 설정	173
2) 3차원 층서 모델링	174
3) 3차원 격자 모델링	181
4) 3차원 지층 모델링	184
VII. 지질 진화 및 해안의 성장	193
1. 주요 용암류 작용	193
1) 용암누층의 발달	193
2) 용암삼각주의 형성	194
2. 층서 발달사	199
1) 제1단계	199
2) 제2단계	203
3) 제3단계	204
4) 제4단계	205
VIII. 결론	207
참고문헌	211
요약	227
감사의 글	230

List of Figures

Fig. 1-1. Map showing locations of the study area and drilling sites of boreholes.	4
Fig. 2-1. Geologic map of the study area.	20
Fig. 2-2. Photos of morphologies and structures of Onpyeong-ri basalt (pahoehoe lava flows).	21
Fig. 2-3. Outcrop photos of the Dunjibong (scoria cone) area.	24
Fig. 2-4. Photos of sand dune outcrops.	25
Fig. 3-1. Conceptual work flow in this study.	31
Fig. 3-2. Classification and nomenclature of basaltic lava flows based on their texture and mineral composition.	32
Fig. 3-3. Geological modeling domain with digital topographic map and 7 boreholes shown on the GOCAD software.	49
Fig. 4-1. Simplified columnar sections for the boreholes in the study area.	56
Fig. 4-2. Photos showing lithofacies of KIGAM borehole core.	57
Fig. 4-3. Detailed columnar section (1:20 scale) of KIGAM borehole core.	59
Fig. 4-4. Columnar section and photos of lava flow units 26 and 27 from KIGAM borehole core.	61
Fig. 4-5. Photos of lava flow units 26 and 27 and their thin-section photomicrographs.	62
Fig. 4-6. Photos showing the petrographic features of lithofacies.	63
Fig. 4-7. Photos of OTV (optical televiewer) log and drilling core of the brecciated lava flow.	65
Fig. 4-8. Photos showing non-volcanic sedimentary rock intervals of borehole cores and OTV logs.	66
Fig. 4-9. Classification of the non-volcanic sediment rock samples based on	

grain-size distribution.	68
Fig. 4-10. Detailed columnar section (1:20 scale) of WJ-1 borehole core.	71
Fig. 4-11. Photos showing lithofacies of WJ-1 borehole cores.	73
Fig. 4-12. Detailed columnar section (1:20 scale) of WJ-2 borehole core.	79
Fig. 4-13. Photos showing lithofacies of WJ-2 borehole core.	81
Fig. 4-14. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-1 borehole core.	86
Fig. 4-15. Photos showing lithofacies of HW-1 borehole core.	88
Fig. 4-16. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-2 borehole core.	92
Fig. 4-17. Photos showing lithofacies of HW-2 borehole core.	94
Fig. 4-18. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-3 borehole core.	99
Fig. 4-19. Photos showing lithofacies of HW-3 borehole cores.	101
Fig. 4-20. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-4 borehole core. ...	107
Fig. 4-21. Photos showing lithofacies of HW-4 borehole core.	109
Fig. 4-22. Chemical composition of the non-brecciated lava flows and brecciated lava flows in TAS diagram.	120
Fig. 4-23. Subdivision of lava flows depending on chemical composition. ...	124
Fig. 4-24. Comparison between sections of natural gamma-ray log and lithologic core log.	128
Fig. 4-25. Comparison between sections of natural gamma-ray log and chemical composition of lava flows.	131
Fig. 5-1. Columnar sections of brecciated lava flow intervals from OTV logs.	143
Fig. 5-2. Images of OTV logs showing the characteristics of 3 lithologic facies of brecciated lava flow.	144
Fig. 5-3. Schematic illustration of the lava-fed delta and associated hyaloclastite breccias formed by pahoehoe lava flows in coastal area.	148
Fig. 5-4. X-ray diffraction pattern of samples from stratigraphic unit IV (non-volcanic sedimentary rock II) of KIGAM borehole.	151
Fig. 5-5. SEM photography of samples from stratigraphic unit IV (non-volcanic sedimentary rock II) of the KIGAM borehole.	152

Fig. 6-1. Lithology and stratigraphic correlation of boreholes in the study area.	159
Fig. 6-2. Three-dimensional stratigraphy model of the study area with the upper boundaries of units I to VI.	175
Fig. 6-3. Topographic maps of the upper boundaries of units I to VI.	178
Fig. 6-4. Three-dimensional grid model of the study area.	183
Fig. 6-5. Three-dimensional stratigraphic unit models of the study area.	185
Fig. 6-6. Isopach maps of stratigraphic units I to VI.	188
Fig. 7-1. Schematic illustration of the development of pahoehoe lobe.	195
Fig. 7-2. Location of coastline during the progradation of the lava-fed delta in the study area.	198
Fig. 7-3. Global sea-level changes and chronological correlation with the stratigraphic units of the study area.	200
Fig. 7-4. Schematic illustration of the stratigraphic evolution of the study area.	201

List of Tables

Table 2-1. Summary of previous studies on volcanic stratigraphy of the Jeju Island.	15
Table 3-1. General information of boreholes.	27
Table 3-2. Detailed information on samples for XRF analysis in KIGAM borehole.	36
Table 3-3. Detailed information on samples for XRF analysis in WJ-1 borehole.	37
Table 3-4. Detailed information on samples for XRF analysis in WJ-2 borehole.	38
Table 3-5. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-1 borehole.	39
Table 3-6. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-2 borehole.	40
Table 3-7. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-3 borehole.	41
Table 3-8. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-4 borehole.	42
Table 3-9. Basic information on samples for polarizing microscopy (thin section) in KIGAM borehole.	43
Table 3-10. Sampling locations for grain-size analysis.	44
Table 3-11. Location and elevation of stratigraphy modeling domain.	48
Table 3-12. Numerical information on boreholes used in modeling.	50
Table 4-1. Vertical distribution of lithology in boreholes.	54
Table 4-2. Information of lava flow units of KIGAM borehole.	55
Table 4-3. Information of lava flow units of WJ-1 borehole.	74
Table 4-4. Information of lava flow units of WJ-2 borehole.	78

Table 4-5. Information of lava flow units of HW-1 borehole.	85
Table 4-6. Information of lava flow units of HW-2 borehole.	91
Table 4-7. Information of lava flow units of HW-3 borehole.	98
Table 4-8. Information of lava flow units of HW-4 borehole.	106
Table 4-9. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the KIGAM borehole core.	113
Table 4-10. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the WJ-1 borehole core.	114
Table 4-11. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the WJ-2 borehole core.	115
Table 4-12. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-1 borehole core.	116
Table 4-13. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-2 borehole core.	117
Table 4-14. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-3 borehole core.	118
Table 4-15. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-4 borehole core.	119
Table 4-16. Distribution of natural gamma-ray intensity for each rock type classified by geologic logging.	127
Table 4-17. Distribution of natural gamma-ray intensity for each rock type classified by chemical components.	130
Table 5-1. Summary of the lithofacies of non-brecciated lava flow.	136
Table 6-1. Information on the depth of upper boundaries of stratigraphic units.	165
Table 6-2. Number of grids, volumes, and volume fractions of stratigraphic units.	182

Abstract

Jeju Island, the largest volcanic landform in South Korea, has been built by repeated volcanic eruptions from about 1.88 Ma (Pleistocene) to a thousand years ago. As a result, the main body of the island comprises extensive accumulations of plateau- and shield-forming lavas with numerous volcanic cones overlying both hydrovolcanic and marine deposits during the onset of volcanism in a continental shelf setting. This study focuses mainly on the subsurface stratigraphy and geological evolution of the coastal area as a leading edge of the expanding volcanic island. The main materials of the study include 117~150 m long borehole cores, natural gamma-ray logs and optical televiewer (OTV) logs obtained from 7 drilling sites in the northeastern coastal area (Woljeong-ri and Haengwon-ri) of the Jeju Island. The borehole cores were carefully described in terms of mineralogy (phenocryst), texture, structure and color, then summarized into columnar sections of 1:20 scale. For the mineralogical, geochemical and sedimentological analyses, rock and sediment samples were also collected from major lithofacies and stratigraphic units and analyzed by X-ray fluorescence (XRF) spectrometer, X-ray diffraction (XRD) analyzer, polarizing microscope and scanning electron microscope (SEM). All these analysis results were considered in establishing the subsurface stratigraphic framework of the study area. In addition, three-dimensional stratigraphic modeling by SKUA-COCAD was carried out for the quantitative evaluation of spatial distribution of each stratigraphic units.

On the basis of texture, structure and mineral composition of borehole cores, overall four lithological types are identified, including (1) non-brecciated lava-flow volcanic rocks, (2) brecciated lava-flow volcanic rocks, (3) non-volcanic sedimentary rocks, and (4) paleosols.

The non-brecciated lava-flow rocks dominantly occur as thick accumulations of successive units of pahoehoe lava flows. Individual flow units of the non-brecciated rocks characteristically show the internal variations in vesicle occurrence, mineral composition and rock color, which results in 4 divisions in a lava flow unit: (1) highly vesicular division (HV), (2) vesicular division (VS), (3) massive division (MS), and (4) glassy division (GL). Within a lava flow unit, these divisions are generally arranged into GL-VS-MS-HV-GL in ascending order, reflecting a different cooling rate such as chilling in the upper and lower flow boundaries and hampered cooling toward the flow core. Furthermore, P-type (pipe-vesicle-bearing) lavas are dominantly recognized in the study area, which suggesting a low gradient of ground surfaces in a broad coastal plain.

Brecciated lava-flow rocks consist of various-sized breccias with low pore contents. The color of breccias are mostly black due to high proportion of volcanic glass, while the outer rim is covered with light brown palagonite. In OTV logging images, fractured glassy basalt sections are identified not only with the glassy breccias, but also with matrix materials composed of palagonites, glassy fragments and partially fractured glassy basalts. These lithologic features are indicative of hyaloclastite breccias formed by quenching fragmentation caused by interaction with seawater. Based on the size, shape, color and content of hyaloclastite clasts and matrix, 3 types of lithofacies are classified in the brecciated rocks: (1) semi-brecciated basalt, (2) clast-supported breccia, and (3) matrix-supported breccia. The vertical association of these lithofacies are interpreted to represent topset, foreset and bottomset of a lava-fed delta, respectively.

Non-volcanic sedimentary rocks are mainly composed of silt and sand, and some contain carbonate material including shell fragments. They are interpreted to have been deposited in coastal and inner continental shelf environments. In particular, the non-volcanic sedimentary rocks at the deepest

part of the boreholes are correlated with the Seogwipo Formation among the main stratigraphic units of Jeju Island. The paleosols consist mainly of clay particles, and no visible particulate matter is observed.

The results of XRF analysis on rock samples from 152 different brecciated and non-brecciated lava flows show geochemical composition of tholeiitic basalt and tholeiitic andesite. On the other hands, the natural gamma-ray strength does not show any particular correlation with lithology except that the strength is high in some intervals of non-volcanic sedimentary rock and paleosol.

Based mainly on the lithological characteristics and spatial distribution of the lava flows and non-volcanic sedimentary rocks, 6 stratigraphic units are divided, including (1) non-volcanic sedimentary rock I (unit I), (2) brecciated lava flow I (unit II), (3) non-brecciated lava flow I (unit III), (4) non-volcanic sedimentary rock II (unit IV), (5) brecciated lava flow II (unit V), and (6) non-brecciated lava flow II (unit VI) in ascending order. This stratigraphic framework suggests 4 stages of the geological evolution or growth of coastal area in the northeastern Jeju Island.

After the deposition of Seogwipo Formation (unit I) ended in 170 ka, the lava delta (unit II) fed by subaerial eruptions has advanced to about 2 km inland from the present coastline until 144 ka. Since then, most of the study areas have been exposed due to sea-level falling. During the sea-level rise of 130~135 ka, lava plateau (unit III) developed throughout study area, including the upper part of the lava delta. Subsequently, the sea level continued to rise, and the non-volcanic sedimentary rock II (unit IV) were deposited under the coastal environment in 128~130 ka. The inflow of lavas supplied by the reoccurring volcanic activity gave rise to lava delta (unit V) again at the top of unit IV. As a result of the lava delta prograded to about 1~1.5 km behind the present coastline, lava-flow rocks in thickness of 20~30 m accumulated on a gentle coastal plain in 92 ka. After the formation of the unit V, the lava

flow from the inland volcanoes emplaced non-brecciated volcanic rocks (unit VI) with a thickness of 50 to 60 m, and the current coastal landscape was completed.

I. 서론

제주도는 한반도 남서쪽 황해의 대륙붕 상에 위치하고 있는 화산섬으로서, 태평양판, 유라시아판, 필리핀해판이 만나는 일본 해구로부터 서쪽으로 약 1,500km 떨어져 있어 지구조적으로 다소 안정된 환경에 놓여있다. 그럼에도 불구하고 제주도는 1.88Ma부터 홀로세까지 이어진 오랜 화산활동 기간을 통해 형성되었고 (Yi et al., 1995; Kim and Lee, 2000; Koh et al., 2013; Sohn et al., 2015), 제주도의 지질에는 이러한 화산활동의 역사가 잘 기록되어 있다. 그러나 유동성이 좋은 현무암질 조성의 용암류가 지니는 측방으로의 불연속성, 장기간에 걸친 화산활동으로부터 분출된 화산분출물의 지하분포에 따른 조사·연구의 어려움, 형성 초기 화산분출물의 제한적 노출, 한라산 고지대 지역에 대한 시추자료의 절대적 부족 등의 문제는 제주도 지질연구에 해결해야 할 난제로 남아있다.

제주도의 형성과정에 대한 조사 및 연구는 1930년대 Haraguchi (1930)를 시작으로 Won (1975), Lee (1982), Koh et al. (2013), Brenna et al. (2015) 등으로 이어졌다. 이들 연구로부터 제시된 형성모델은 Won (1975)과 Lee (1982)의 경우, 제주도가 순상화산임을 전제로 5단계 및 4단계의 모델을 제시한 반면, Koh et al. (2013)과 Brenna et al. (2015)는 순상화산이 아닌 현무암질 복합화산지대일 가능성을 제시함으로써 제주도 형성과정에 대한 보다 심층적인 연구의 필요성이 제기되었다. 이를 위해서는 제주도가 과거 해수면 변화에 직접적인 영향을 받는 대륙붕상에 위치한 화산섬임을 감안해야 하며, 화산활동과 더불어 해수면의 상승과 하강 현상에 연계된 환경 변화와 이로 인한 화산분출 양식과 분출물의 종류 및 분포 등에 대한 세부적인 이해가 필요하다.

한편, 1970년대부터 제주도에서 지하수 개발 등의 목적으로 시추가 진행되어 왔으며, Son and Lee (1998), Koh (1997), Sohn and Park (2004)에서는 이를 활용하여 제주도의 지하지질을 규명하고자하였다. 이들 연구결과를 보면 제주도의 용암류는 대부분 육상 환경에서 정지된 양상을 보이는데, 이는 제주도와 유사한 화산섬인 하와이섬과는 대조를 이룬다. 즉 하와이섬에서 3.5km에 달하는 심부시

추 조사결과(Jourdan et al., 2012), 해수면 하부의 대부분은 수중화산활동으로부터 생성된 유리쇄설성 각력암과 베개용암으로 이루어진 것으로 확인되었다.

일반적으로 화산섬의 형성과정은 크게 해수면 하부의 수중화산 활동과 육상환경에서의 활동으로 구분할 수 있다. 해수면 하부에서는 수중화산활동에 의해 주로 유리쇄설성 각력암과 베개용암이 만들어지는데 반해, 육상환경으로 바뀐 이후에는 용암류의 분출과 연안에서의 용암-물과의 상호작용, 휴지기의 침식과 퇴적 등의 양상으로 전개된다. 특히, 육상에서 분출된 용암이 바다로의 유입은 화산체의 수평적 성장을 견인하는 주된 현상 중의 하나이다. 이러한 현상에 대해서는 하와이(Jones and Nelson, 1970; Moore et al., 1973; Peterson, 1976; Tribble, 1991; Mattox and Mangan, 1997), 그란 카나리아(Furnes and Sturt, 1976), 아이슬란드 (Jones, 1969; Furnes and Fridleifsson, 1974), 남극대륙(Skilling, 2002), 이탈리아 스트롬볼리섬(Di Traglia et al., 2018) 등에서 보고되었다. 특히, 하와이섬의 경우 1992~1994년 사이에 킬라우에아 Puu Oo 화산에서 분출한 용암류에 의해 길이 2.9km, 폭 500m의 용암삼각주가 만들어졌으며(Mattox and Mangan, 1997), 2018년에도 남동부 열곡대에서 분출한 용암류가 바다로 유입되어 약 3.5km²의 새로운 땅이 만들어졌다. 이때, 고온의 용암류는 물과의 상호작용으로 인해 유리쇄설성 각력암(hyaloclastite breccia)이라고 불리는 유리질의 화산 쇄설물로 발생되며, 이는 화산활동 과정에서 해수면의 변화는 물론 화산체의 수평적 성장에 대한 주요한 근거가 된다(Rittmann, 1962; Honnorez and Kirst, 1975).

제주도의 경우에는 이러한 유리쇄설성 각력암층이 지표에 모두 존재하지 않고 있을 뿐만 아니라, 시추코어로 회수되더라도 분리된 각력의 형태로 회수되어 클링커층 내지 파쇄대가 발달된 것으로 해석하는 경우가 일반적이었다. 지하에 분포하는 유리쇄설성 각력암층에 대해서는 Park et al. (1998)에 의해 처음 보고된 이후 Koh et al. (2013), Koh et al. (2017b), Koh et al. (2019a)의 연구가 수행되었다. 그러나 이들 연구는 1~2개 시추공의 교란된 시추코어를 대상으로 수행되어 이들의 암석학적 특징, 수직적 암상변화, 형성과정, 고환경 등을 상세히 설명하기에는 불충분하였다.

최근 제주특별자치도개발공사가 국토교통부의 지역특성화 연구사업의 일환으로 수행한 제주도 동부 월정리-행원리 지역 7개 지점 시추조사에서는 해수면 하

106.1~134.50m까지 시추코어가 회수되었고(Fig. 1-1), 시추공에 대한 광학영상(optical televiewer; 이하 OTV) 검층 및 자연감마선(natural gamma-ray) 검층이 이루어져 지하의 지층상태를 정밀히 파악할 수 있는 자료가 취득되었다. 특히, 7개 시추공의 시추코어에서는 용암류 사이에 유리쇄설성 각력암층으로 해석된 각력화 용암류 구간의 존재가 확인됨으로써 공간적 분포와 수직적 암상변화를 고려한 화산체의 수평적 확장에 관한 새로운 모델을 정립할 수 있는 계기가 마련되었다.

본 연구는 월정리-행원리 지역 시추공의 시추코어 지질검층, 용암류에 대한 암석화학학적 분석, 물리검층자료 분석, 3차원 층서모델링의 결과를 근거로 이 지역의 지하지질과 화산활동 과정에서 해안지역의 성장모델을 제시하는 데 목적을 두었다.

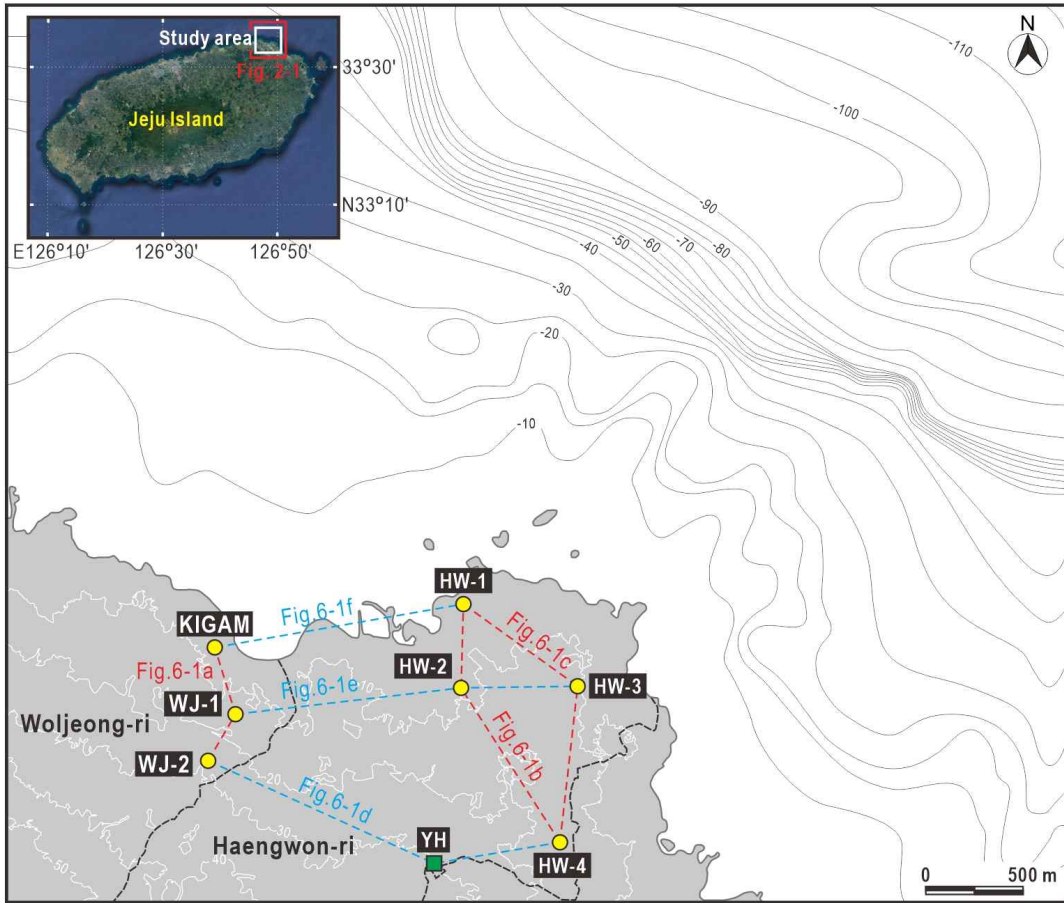


Fig. 1-1. Map showing locations of the study area and drilling sites of boreholes. Contour interval is 10 m.

II. 지질 개요

1. 제주도

1) 지형

제주도는 동-서 길이(약 73km)가 남-북 길이(33km)에 비해 2.3배 가량 긴 타원의 형상을 이루고 있으며 면적은 1,849km²에 달한다. 섬의 중앙에는 해발 1,950m 높이의 한라산이 위치하고 있으며, 정상부를 기준으로 지표의 경사는 동-서 사면이 3~5°인 반면 남-북 사면은 5~10°로 급하게 경사져 있는 외견상 순상화산체의 모습을 보인다. 또한 지형 고도 및 경사도에 따라서 지역을 크게 해안저지대(해발 200m 이하), 중산간지대(해발 200~600m), 고산지대(해발 600m 이상)로 구분하기도 한다. 섬의 가장자리에 해당되는 해안저지대는 대체로 경사도가 4° 이하로 완만한 평지를 이루며, 고도가 높아질수록 경사가 서서히 급해져 중산간지대는 4~10°의 경사도를 보인다. 고산지대는 경사도가 10~20°로 다소 급한 사면의 산악지대가 발달되어 있다(Yoon et al., 2014; Koh et al., 2017b). 이와 같은 제주도의 지형특징은 화학적·물리적 특성이 상이한 암석들이 지역에 따라 차별적으로 분포되어 있기 때문에 나타난 것으로 알려져 있다(Park et al., 1998; Koh et al., 2017a, b). 즉, 상대적으로 경사가 완만한 동-서 사면은 점성이 낮아 유동성이 큰 현무암질 용암류가 우세하게 발달되어 있는데 반해 남-북 사면은 점성이 높은 조면암질 용암류가 지배적으로 분포되어 있어 경사가 급한 지형을 이루게 되었다.

제주도의 화산활동은 플라이스토세부터 홀로세까지 오랜 기간에 걸쳐 발생하였으며 한반도의 화산활동 중에서 가장 젊은 시기에 형성된 것으로 알려져 있다(Lee, 1982; Lee and Son, 1983). 이러한 화산활동 기간 동안 다양한 화산 지형들이 발달되었으며, 이중 단성화산(monogenic volcano)은 제주도의 대표적인 화산 지형으로 꼽힌다. 단성화산은 기생화산, 측화산, 소화산으로도 불리기도 하고, 제주도에서는 ‘오름’이라는 방언을 사용하여 규정하고 있기도 한다(Kim, 1963;

Won, 1976; Park, 1985; Hwang, 2000). Koh et al. (2017b)는 제주도의 오름을 “제주도의 화산활동 동안 만들어진 소형 화산체로서, 백록담 정상부를 제외한 주변보다 높은 봉우리 또는 언덕지형”으로 정의를 하였다. 제주도에 분포되어 있는 오름은 연구자에 따라 그 수가 다르게 보고되었는데, 그 범위는 327~455개(Kim, 1963; Park, 1985; Jeju Special Self-Governing Province, 1997; Lee and Yun, 2012)로 다소 큰 차이를 보인다. 그리고 이들은 성인, 구성암석, 분화구의 형태, 분포지역 등에 따라 ① 분석구, ② 응회구·응회환·마르, ③ 용암돔(또는 종상화산), ④ 용암 순상체로 구분되며 다음과 같은 특징을 갖는다.

(1) 분석구

분석구(cinder cone or scoria cone)는 육상환경에서 발생된 스트롬볼리형 분화(strombolian eruption)로 형성된 분석(스코리아)들이 가파르게 쌓여 만들어진 원뿔형의 소화산체이다. 일반적으로 스트롬볼리형 분화는 다량의 휘발성분을 포함하고 있는 마그마의 팽창에 의해 용암이 공중으로 솟구쳐 나오는 다소 폭발적인 화산활동으로서, 용암은 다양한 크기로 비산되어 마치 분수와 같은 분출양상을 보인다(Wohletz and Sheridan, 1983; Kokelaar, 1986; Cas and Wright, 1987). 가스를 포함하고 있는 분리된 용암 덩어리는 공기 중에서 냉각되어 고화된 후 다공질과 유리질의 조직특성을 갖는 분석으로 바닥에 떨어진다. 이들은 대부분 화도 주변에 쌓이며 30~40°로 다소 급한 경사를 갖는 사면이 발달된 원뿔 모양의 분석구가 형성된다.

제주도의 분석구는 높이가 최소 3m, 최대 340m로 발달되어 있으며, 이중 50m 이내의 높이를 갖는 것이 가장 많다. 기저면의 직경은 88~2,411m의 범위를 가지며, 200~400m 사이의 직경을 갖는 경우가 대부분이다. 또한 분석구의 사면경사도는 약 2~35°로 다소 넓은 범위를 보이고 10~24°의 경사각을 갖는 것이 전체 분석구의 70% 정도를 차지한다(Lee and Yun, 2012). 분석구의 형태는 전형적으로 확인되는 원뿔형이 아닌 대부분 말발굽 모양을 취하고 있는데, 이는 분석구 형성 과정에서 용암이 분수형태가 아닌 용암류로 흘러나와 분화구 한쪽이 붕괴되거나 파괴된 결과이다(Park et al., 2006; Lee and Yun, 2012). 이와 같은 특징을 보이는 제주도의 분석구는 60% 이상이 해발 200m보다 높은 중산간지대에 산재되어 분포해 있다(Yun et al., 2009).

(2) 응회구, 응회환, 마르

응회구(tuff cone), 응회환(tuff ring), 마르(maar)는 마그마와 물이 접촉하여 발생하는 수성화산 분화(hydrovolcanic eruption) 과정에서 만들어진 화산재가 집적되어 형성된 소규모 화산체이다(Cas and Wright, 1987; Schmincke, 2004). 지표로 향해 상승하는 마그마가 지하수, 지표수, 바닷물과 같은 물과 접촉하게 되면, 마그마는 급격하게 냉각됨과 동시에 물은 기화되며 팽창함에 따라 큰 폭발력이 발생한다. 이때 굳어진 마그마는 잘게 부스러져 세립의 화산재로 수증기와 함께 지표로 분출하게 된다. 지표 밖으로 뿜어져 나온 화산재와 수증기의 혼합체는 대기 중으로 높은 분출기동을 형성함과 더불어 대기에 비해 밀도가 높기 때문에 이들은 지면을 따라 빠른 속도로 이동하는 화쇄난류(pyroclastic surge) 또는 기저난류(base surge)의 형태로 흐른다. 이러한 과정의 반복을 통해 유리질의 화산재가 분화구 주변 해저나 육상에 계속해서 쌓여 응회구, 응회환, 마르와 같은 수성화산체가 형성된다.

이중 응회구와 응회환은 주로 화산재가 분출되는 화산활동을 통해 형성되는 반면, 마르는 화산재보다 화산가스가 우세한 화산활동을 통해 형성된다. 아울러 응회환과 응회구는 분화구의 크기, 높이, 사면 경사 등에 차이를 보이는데(Wohletz and Sheridan, 1983; Vespermann and Schmincke, 2000), 응회환은 응회구에 비해 분화구의 높이가 낮고 폭이 넓으며, 낮은 사면 경사를 갖는다. 한편 마르는 분화구 주변에 쌓이는 화산분출물의 양이 적어 낮은 높이의 화구륜이 형성되나 분화구 중심부의 깊이는 주변보다 깊게 발달되어 있으며, 직경은 이보다 훨씬 더 큰 규모로 넓게 나타난다(Waters and Fisher, 1971). 일반적으로 수성화산 분화를 통해 형성된 화산체의 분화구는 폭발심도와 비례관계를 갖는 것으로 알려져 있어(Lorenz, 1986), 마르와 같이 큰 직경의 분화구가 만들어지는 경우에는 폭발심도가 깊었던 것으로 볼 수 있다(Yoon et al., 2006). 대체로 마르가 형성된 이후에는 분화구에 물이 채워져 화구호라 불리는 호수가 형성되기도 한다.

제주도의 응회구는 일출봉과 우도 소머리오름이 대표적이고, 응회환으로는 수월봉, 송악산 등이 있으며, 이들은 대체로 해안선이나 인근 해안저지대에 발달해 있는 분포양상을 보인다. 응회환은 높이가 14~113m로 발달되어 있으며, 분화구 직경은 153~1,608m 사이로 나타난다. 아울러 기저면의 직경은 109~2,450m, 사

면 경사도는 2~30°로 비교적 넓은 범위를 갖는다. 이와는 달리 응회구는 높이가 121~167m, 분화구 직경은 530~557m로 다소 좁은 범위를 갖는다. 또한 기저면 직경은 684~1,276m이고, 사면의 경사는 20~33° 정도로 응회환에 비해 전반적으로 좁은 영역을 보인다(Lee and Yun, 2012). 마르는 제주도에는 유일하게 서귀포시 호근동의 하논 분화구가 이에 해당되는 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2006). 하논 분화구의 높이는 약 30m, 기저면 직경은 1,112m이고, 분화구의 직경은 816m 정도로 발달되어 있다. 분화구의 사면 경사도는 남서측 일부 지역을 제외하고 대체로 10° 이하의 완만한 경사를 이루고 있다.

(3) 용암돔

용암돔(lava dome; 또는 종상화산, tholoide)은 점성이 매우 큰 용암이 분출 후 멀리 흘러가지 못하거나 내부에서부터 계속 축적되어 화구주변에 돔 내지 종 모양의 형상을 하고 있는 단성화산체이다(Schmincke, 2004). 용암돔은 이루고 있는 화산암은 대체로 기공이 결핍된 치밀한 조직을 보이며, 화학조성은 조면암의 특징을 보여 암색 또한 다른 화산체들보다 더 밝게 나타난다(Cas and Wright, 1987). 점성이 높은 용암류는 멀리 퍼져나가지 못하고 수직적으로 팽창되어 용암돔은 보편적으로 높은 경사의 사면을 이룬다.

제주도의 대표적인 용암돔은 주로 남부 해안을 따라 산방산, 화순 월라봉, 범섬, 문섬, 새섬, 섯섬, 신호 월라봉, 예촌망, 앵봉 등이 동일 구조선 상에 분포하고 있다(Yoon et al., 2014). 이들 용암돔은 대체로 높이가 3~350m, 기저면 직경은 122~1,023m로 비교적 넓은 분포범위를 보인다. 용암돔 사면의 경사도는 대부분이 10~24°로 다소 급한 경사를 이루고 있다.

(4) 순상화산

순상화산은 대체로 유동성이 큰 현무암질 용암이 중앙화도(central vent) 또는 사면으로부터 반복·지속적으로 분출되고 넓게 퍼져나가 매우 완만한 경사(<10°)로 발달된 단성화산체로서, 그 형태는 서양의 방패를 얹어놓은 것과 비슷하다(Cas and Wright, 1987). 이와 같은 순상화산은 거의 대부분이 파호이호이 용암류로 이루어져 있으나, 화산체의 외곽에서는 이들이 전이되어 형성된 아아 용암류 또한 나타나기도 한다. 뿐만 아니라 드물게 스트롬볼리형 분화 및 수성화산 분화를 통해 만들어진 화산쇄설물들이 국부적으로 퇴적되어 있거나 다양한 기원

을 갖는 토양층이 용암류 사이에 협재되어 있는 경우도 있다(Porter, 1979; Cas and Wright, 1987).

대표적인 순상화산으로는 하와이의 마우나 로아(Mauna Loa) 화산과 아이슬란드 화산이 있으며, 이중 마우나 로아 화산의 경우 화산체 기저직경이 100km 이상으로 지구상에서 가장 큰 규모의 순상화산체로 알려져 있다(Pike et al., 1981). 제주도에서는 백록담을 정점으로 하여 제주도 거의 전 지역에 걸쳐 분포하는 한라산이 순상화산으로 분류되며, 이 외에도 방주오름, 돈두악, 안오름 등이 이에 해당된다(Lee and Yun, 2012; Yoon et al., 2014). 이러한 제주도의 순상화산체는 그 높이가 2~143m, 기저면 직경은 약 97~1,800m, 사면 경사는 1.5~11.9°의 지형적 특징을 갖는 것으로 보고된 바 있다(Lee and Yun, 2012).

2) 지질층서

제주도의 지질층서는 Haraguchi (1931)를 시작으로 Won (1976), Lee (1982), Lee and Kim (1991), Koh (1997), Park et al. (1998, 2000a, 2000b, 2000c), Oh et al. (2000), Sohn and Park (2004), Yoon and Chough (2006), Sohn et al. (2008), Sohn and Yoon (2010), Koh et al. (2013) 등 여러 연구자에 의해서 제시되었다. 이전의 연구를 종합하면, 제주도의 주요 층서단위는 구성암석에 따라 기반암, U층, 서귀포층, 용암류, 퇴적층 및 고토양층으로 구분된다.

(1) 기반암

제주도의 기반암은 지표에 노출된 것이 없고, 노두 내 포획된 이질 암편과 심부 시추조사를 통해 해수면 하 155~312m 깊이에서 발견되며, 선캠브리아 누대 변성암류 및 중생대 화강암류 화산쇄설암류로 구성되어 있음이 확인되었다. 포획된 기반암이 확인되는 노두는 별도봉 응회암층, 우도 소머리오름 응회암층이고, 나머지는 시추코어 상에서 회수되었다(Koh et al., 2017a).

제주시에 소규모로 발달되어 있는 별도봉 응회암층 내에 다양한 크기의 화강암편이 포함되어 있는데, 화강암의 주성분, 미량원소, 희토류원소, 동위원소 조성은 대체로 한반도 대보화강암류의 특징과 유사함을 보인다. 아울러 K-Ar 및 저어콘 절대연대측정을 통해 화강암은 약 170Ma의 연대로 중생대 쥐라기에 형성된 것으로 보고되었다(Park et al., 1998; Yun et al., 1999; Park, 2000; Kim et

al., 2002). 우도 소머리오름의 응회암층에는 용결응회암, 유문암, 흑운모 화강암이 암편의 형태로 포함되어 있으며, 유문암에 포함된 저어콘(zircon) 연대측정 결과 84Ma로서 백악기에 해당된다(Kim et al., 1986; Yoon et al., 1987; Sohn and Chough, 1993; Lee, 1994; Sohn, 1996; Koh et al., 2005).

성읍, 정실, 하덕천 지역에서 수행된 심부시추에서는 화강암편이 획득되었다. 이들의 주성분, 미량원소, 희토류원소, 동위원소 등의 조성분석과 K-Ar 연대분석 결과, 이들은 백악기말 불국사 화강암류에 해당하는 것으로 보고되었다(Ahn et al., 1995; Yun et al., 1999; Park, 2000). 종달리 지역에서는 해수면 하 312m에서 유문암질 용결응회암이 기반암으로 회수되었다(Lee, 1993; Park and Kwon, 1994).

(2) U층

제주도 기반암의 상부에는 미고결 퇴적층이 평균 150m의 두께로 광범위하게 분포되어 있으며, 과거 세화리층 또는 미고결층으로 불렸으나 Koh (1997)에 의해 Unconsolidated의 첫 글자를 따서 U층으로 명명된 후 현재까지 통용되고 있다(Koh et al., 2017b). 시추조사를 통해 U층의 발달심도는 대체로 해수면 하 100m 이상이고, 대부분이 점토와 세립질 모래로 이루어져 있음이 확인되었다. 아울러 U층 시료에 대한 광물 분석연구에 따르면, U층을 구성하고 있는 광물은 석영과 장석이 지배적이고 교결물질인 스멕타이트(smectite)가 다소 결여된 것으로 보고되었다. 그러나 최근 연구에 따르면(Jeong et al., 2016), 스멕타이트는 U층의 직상부에 발달된 층단위인 서귀포층 노두의 일부 구간에서도 결핍된 특징을 보이기 때문에 해당 물질의 유무만으로 U층을 정의하는 것은 신중을 기할 필요가 있다고 보고 있다. 이러한 특징 이외에도 U층에서는 육안상으로 구분되는 연체동물 패각이나 유공층 등 탄산염 물질이 거의 나타나지 않지만, U층의 상부에는 석회질 초미화석이 일부 포함되어 있기도 한다.

U층의 퇴적환경은 현재까지도 명확하게 밝혀진 바가 없으나, 오늘날 제주도 주변 외해역과 유사한 해파 기저면보다 깊은 원안(offshore) 대륙붕 환경에서 주로 조류의 영향을 받으며 퇴적된 것으로 추정하고 있다(Koh et al., 2017b). 이는 U층을 구성하고 있는 세립질 모래 입자들의 분급도가 양호한 것은 조류에 의해 퇴적물들이 계속 운반되면서 재동되었기 때문이며, 석영 사질 입자는 해수면 하

강기 동안에 주변 대륙으로부터 바람에 의해 운반된 것으로 해석된다(Sohn and Park, 2004).

(3) 서귀포층

U층의 상부에는 천해환경에서 일어난 화산활동으로부터 기원된 화산쇄설물과 화산활동 휴지기에 쌓인 해양퇴적물로 이루어진 서귀포층이 발달되어 있다(Sohn and Park, 2004). 이 층은 서귀포시 새섬 앞 해안 절벽을 따라 약 40m 두께로 1.5km 정도가 노출되어 있으며, 시추조사를 통해서는 지하에 약 100여 m의 층후를 갖는다. 또한 서귀포층의 형성연대는 서귀포층 노두에서 산출되는 패류화석, 유공충, 석회질초미화석에 대한 고생물학적 연구, 서귀포층을 피복하는 용암의 절대연령 측정연구, 고지자기 연구 등을 통해 서귀포층은 1.88Ma 경부터 퇴적되기 시작하여 0.4Ma까지 진행되었던 것으로 밝혀졌다(Tamanyu, 1990; Lee et al., 1994; Yi et al., 1995; Li et al., 1999; Kim and Lee, 2000; Kim et al., 2002; Khim et al., 2001; Sohn and Park, 2004; Kang et al., 2010). 서귀포층은 제주도 화산활동의 초기단계를 반영하고 있는 지층으로, 100만 년 이상의 긴 시간의 형성기간은 제주도 형성사에 절반 이상을 기록하고 있기 때문에 제주도 지질층서에 있어 주요한 층서단위로 간주되고 있다.

서귀포층은 성인에 따라 일차 퇴적상과 이차 또는 재동 퇴적상으로 구분되며, 퇴적환경에 따라서는 육성 퇴적상과 해성 퇴적상으로 구분된다(Yoon and Chough, 2006; Sohn et al., 2008). 일차 퇴적상은 육상환경에서 발생한 수성화산활동에 따라 만들어진 화산쇄설물이 응회구와 응회환을 형성한 것이며, 이차 퇴적상은 육성 및 해성환경에서 재퇴적되어 만들어진 퇴적상이다(Sohn and Park, 2004; Sohn and Yoon, 2010). 특히, 재동되어 해저에 쌓인 퇴적층에는 패각이 다량 포함되어 있기도 하며, 사층리와 연흔 등의 퇴적구조가 잘 발달되어 있다. 이러한 화산활동을 통해 형성된 퇴적층 사이에는 화산활동이 중단된 시기에 만들어져 화산기원 입자가 결핍된 석영질 모래층, 엽층리 이암, 패각층이 협재되어 있다(Sohn and Park, 2004).

(4) 용암류

용암류는 지표면으로 분출된 고온의 용암이 온도가 충분히 낮아져 굳어질 때

까지 액체상태를 유지하며 낮은 지대로 계속 흘러가는 용암의 흐름을 말한다(Cas and Wright, 1987). 서귀포층의 상부는 이러한 용암류로 피복되어 있으며, 제주도 전체 면적의 약 92%가 용암류로 이루어져 있다. 제주도의 용암류는 최소 약 2만 년부터 최대 100만 년 정도의 연대범위를 보이며, 동부지역 2~50만 년, 서부지역 2~80만 년, 남부지역 3~100만 년, 북부지역 2~60만 년의 지역별 연대분포를 보인다(Koh et al., 2013). 이들 용암류는 대부분이 45~66wt.%의 SiO₂ 함량 범위를 갖는 알칼리현무암(alkali basalt), 조면현무암(trachybasalt), 현무암질 조면안산암(basaltic trachyandesite), 조면안산암(trachyandesite)과 같은 조면암 및 알칼리 암류와 더불어 비알칼리암류인 쏘레아이트질 현무암(tholeiitic basalt)과 쏘레아이트질 안산암(tholeiitic andesite)으로 구성된다(Koh et al., 2013).

이러한 현무암질 용암류는 지표를 따라 흐르는 동안 온도, 점성, 지면경사 등의 변화에 의해 크게 파호이호이 용암류와 아아 용암류로 상태가 달라진다. 파호이호이 용암류는 표면이 평탄하고 매끄러운 특징을 보이는 용암류로서, 온도가 높고 점성이 낮은 용암류가 굳어질 때 만들어진다(Cas and Wright, 1987). 때때로 굴곡이 있는 지면을 따라 흘러갈 때는 구간에 따른 유동 속도의 차이가 발생하며, 냉각된 표면의 일부가 접히면서 빗줄구조가 만들어지기도 한다. 뿐만 아니라, 용암류의 선단부가 먼저 굳어져 흐름이 제한되는 경우, 뒤이어 공급된 용암이 누적되고 내부 압력이 증가해 부풀어 올라 투물러스로 불리는 팽창구조가 형성되기도 한다. 일반적으로 이 용암류의 단위두께는 평균 3~5m로 알려져 있으나, 1m 이하의 얇은 두께를 갖는 경우도 종종 나타난다. 또한 파호이호이 용암류의 이동거리는 분출량에 따라 크게 좌우되지만 대체로 50km 내외로 나타나는 사례들이 많다.

제주도에서는 현무암질 용암류가 발달된 규모가 상당하기 때문에 파호이호이 용암류 또한 흔하게 관찰된다. 지역적으로는 완만한 사면이 발달된 동부와 서부 해안지대에 우세하게 발달해 있으며, 용암튜브, 투물러스, 팽창구조 등의 파호이호이 용암류에서 나타날 수 있는 구조들 또한 다수로 나타난다. Koh et al. (2017a)는 심부시추코어에 대한 지질검층 자료를 기초로 파호이호이 용암류의 두께, 용암류 단위 수 및 이들의 두께에 대한 통계분석을 수행하였다. 그 결과, 제

주도의 파호이호이 용암류는 평균 74m의 두께로 발달되어 있으며, 유동단위 수는 9매, 평균 단위두께는 7m로 발달된 것이 확인된다. 지역에 따라서는 동부와 서부 지역이 남부와 북부에 비해 전체 용암류 두께가 1.3~1.5배 정도 두꺼우며, 평균 유동단위 수 및 단위 두께 또한 비슷한 비율차이를 보인다(Koh et al., 2017a).

아아 용암류는 표면이 다양한 크기로 파쇄된 용암편들로 이루어져 있어 거칠게 나타나는 용암류를 말한다. 이러한 거친 용암편들을 총칭하여 클링커라고 하는데, 빠르게 냉각되어 각화된 표면이 계속해서 유동하는 내부 흐름에 의해 깨지는 자파쇄작용을 통해 형성되는 것으로 알려져 있다(Cas and Wright, 1987). 대체로 클링커는 다공질 조직을 보이며, 용암류의 흐름에 의해 상부에 위치하고 있던 클링커가 떨어지고 하부에 깔리면서 클링커는 용암류 상부뿐만 아니라 하부에서도 나타날 수 있다. 이러한 현상이 발생할 수 있는 용암류의 조건은 대체로 파호이호이 용암류에 비해 낮은 온도와 높은 점성도를 갖는다. 따라서 파호이호이 용암류의 형태로 유동하는 용암류의 냉각에 따른 온도 감소와 결정화작용 및 가스 손실에 따른 점성 증가 등으로 인해 아아 용암류로의 전이가 발생할 수 있다(Hon et al., 2003).

제주도의 아아 용암류는 주로 중산간지대에서 해안지역 사이에 분포되어 있으며, 이는 중산간지대의 분화구에서 분출된 용암류가 지형경사가 낮은 해안 지대로 흘러 내려간 용암유역에 해당된다(Koh et al., 2017a). 그러나 아아 용암류의 두께로 비교해 볼 때, 약 70%가 해발 200m 이상 되는 중산간지대에 발달해 있다. 제주도 전 지역에 발달된 아아 용암류의 평균 두께는 123m로 파호이호이 용암류의 2배 가까이 된다. 지역별 유동단위 수는 동부지역이 27매, 서부지역과 남부지역이 40여 매, 북부는 68매가 발달되어 있으나 이들의 두께는 10~17m범위로 큰 차이를 보이지 않는다.

(5) 비화산성 퇴적층 및 고토양층

제주도 지하 또는 표면을 이루고 있는 용암류층 사이에는 화산활동 휴지기 동안 쌓인 비화산성 퇴적층과 원암의 토양화 작용을 거쳐 만들어진 고토양층이 소규모로 협재되어 있다(Park et al., 2006; Koh et al., 2017a). 비화산성 퇴적층은

단속적인 분포를 보이며 그 두께는 최소 약 1m 최대 50m, 연장성은 10~2,000m로 지역적 차이가 심하게 나타난다. 구성 퇴적물의 크기는 점토에서 자갈까지 다양한 입자들로 이루어져 있으며, 대체로 육성 기원의 쇄설성 퇴적물로 이루어져 있으나 일부에서는 해성기원의 패각편이 포함되어 있기도 한다. 퇴적층은 대부분 미고결 상태로 나타나고, 퇴적구조로는 수평층리, 사층리, 점이층리, 괴상구조가 주로 발달되어 있다. 아울러 비교적 침식이 쉽게 일어나는 화산쇄설물로 구성된 응회구와 응회환 주변에는 재동된 퇴적구조가 나타나기도 한다. 이러한 퇴적층은 주로 육상환경에서 발달된 하천이나 저지대 지역 또는 해안에서 형성된 것으로 알려져 있으나(Park et al., 2000a; Sohn and Park, 2004), 층서적 해석에 있어서는 이들의 분포가 매우 제한적이기 때문에 층간의 대비가 어려운 문제가 있다. 제주도의 비화산성 퇴적층은 고산층, 상창리퇴적층, 성천포역암, 월평도역암, 호근동역암, 송산동역암 등 다양한 지역에 발달되어 있음이 보고되었다(Yoon et al., 1987; Park et al., 2000a; Koh et al., 2017a).

고토양층은 화산활동의 휴지기 동안 용암류의 풍화작용 또는 지형기복에 따라 일시적으로 쌓인 퇴적물의 토양화작용과 더불어 풍성기원의 광물먼지가 퇴적되어 형성된 것으로 알려져 있다(Park et al., 2006, Jeong et al., 2015). 고토양층은 대체로 분급이 불량한 니질 내지 사질 퇴적물로 구성되어 있으며, 눈에 띄는 퇴적구조가 나타나지 않는 것이 특징이다. 층의 두께는 대부분 1m 이내로 얇지만 일부는 그 이상으로 나타나기도 한다. 층의 색깔은 대부분이 갈색 및 적색계열을 띠는 경우가 많다.

3) 화산활동사

제주도의 화산활동사는 일본인 지질학자 하라구치(Haraguchi, 1931)에 의해 최초로 제시되었다(Table 2-1). Haraguchi (1931)은 제주도의 화산활동은 순차적으로 조면암, 조면질 안산암, 현무암질 용암류를 분출하였고 이들이 누적되어 한라산을 포함한 현재의 제주도가 형성된 것으로 결론지었다(Yoon et al., 2014). 따라서 하라구치의 주장은 한라산체를 포함하는 조면암질 용암류가 초기에 분출하여 고제주화산체를 형성한 이후 조면질 안산암 및 현무암질 용암류를 분출시킨 화산활동으로 요약할 수 있다. 이는 최근에 연구된 결과와 비교할 때 많은 차이를

Table 2-1. Summary of previous studies on volcanic stratigraphy of the Jeju Island.

		Haraguchi (1931)	Won (1975)	KRCC* (1971)	Lee (1982)	Yoon et al. (1987)	Koh et al. (2013)	
Holocene	upp.	1002, 1007 activities groups of small basalt cones	1002, 1007 activities	Sand dunes Cinder cones	1002, 1007 activities groups of small basalt cones	1002, 1007 activities	Alkali and subalkali lava flow III	
	low.		Volcanic cone 1 Volcanic cone 2					
Pleistocene	upp.	Suikido basalt, Hanlasan basalt, Aphanitic basalt, Augite basalt, Feldspar basalt, Jeju basalt, Alkali basalt,	Raegrodam basalt, Hanlasan trachyandesite, Hanlasan basalt, Seongpanak basalt, Sihungri basalt, Beobjeongri trachyte, Hahyori basalt, Jeju basalt,	Feldsapr basalt VII, Trachy andesite II, III, Feldspar IV, V, VI, Porphyritic augite basalt III, Porphyritic feldspar basalt II, Aphanitic basalt and trachy andesite I,	Sinyangri Formation, Hanlasan trachyte, Hanlasan hwaite, Seongpanak hwaite, Sihungri mugearite, Hahyori hwaite, Jeju hwaite,	Dongnam palaeosol, Basalt flows along the flanks of Hanlasan, Sinyangri Formation	Alkali and subalkali lava flow II	Non-volcanic and volcanic sediment
	mid.	Hornblende trachyandesite, Sanbongsan lava	Sinyangri Formation	Porphyritic augite basalt II and trachyte III, Feldspar basalt II, III, Porphyritic feldspar basalt I, Porphyritic augite basalt I, Sinyangri Formation, Feldspar basalt I, Trachyte II,	Hornblende mugearite, Sanbongsan trachyte	Hanlasan trachyte, Tuff rings (Songaksan, Ilchulbong, Suwolbong), Seogwipo trachyandesite, Tuff rings (Dansan, Dusan), Seogwipo Formation, Pyoseonri basalt	Alkali and subalkali lava flow I, Alkali lava flow III, Alkali lava flow II, Alkali lava flow I	Seogwipo Formation
	low.	Seogwipo Formation	Jungmun trachyte, Seongsanpo Formation, Seogwipo trachyte, Pyoseonri basalt,	Seongsanpo Formation, Trachyte I, Acicular feldspar olivine basalt	Jugmun hwaite, Seongsanpo Formation, Seogwipo hwaite, Pyoseonri alkali basalt	Tuff rings (Hwasoon, Dansan), Sanbongsan trachyte, Marine sediments, Basalts (olivine augite basalt, outcropping under the present see level)	U formation	
Pliocene	upp.		Seogwipo Formation	Seogwipo Formation				
	mid.	Hanlasan alkaline trachyte	Basal basalt	Basal basalt				
	low.			Seogwipo Formation, Olivine augite basalt (basal basalt)				
Older than Pliocene		Granite	Granite	Granite	Granite	Granite in the northern part, Tuff in the eastern and southern parts		

나타낸다. 즉 서귀포층 하위에 조면암 조성의 용암이 분포하고 있는 현상은 아직까지 확인되지 않고 있으며, U층이 분포하고 있는 것으로 밝혀지고 있다(Koh, 1997; Jeong et al., 2016). 다만 산방산, 화순 월라봉, 각수바위, 섯섬, 문섬 등의 조면암질 용암의 절대연대는 대체로 0.8~0.9Ma를 나타내어 육상에 노출된 용암류 중에서 비교적 오래된 연대 값을 보인다.

이후 1960년대부터 활발하게 진행된 지질조사와 시추조사를 토대로 하는 층서 연구(Won, 1976; Lee, 1982, 1994; Lee et al., 1994; Yoon et al., 1995; Son and Lee, 1998; Won et al., 1998; Oh et al., 2000; Kim et al., 2002; Yun, 2004)가 수행되었으며, 이를 바탕으로 몇몇의 화산활동사가 제시되었다. Korea Rural Community Corporation (1971)은 제주도 지하수 부존 및 개발 방안을 수립하기 위하여 제주도지질에 대한 광역조사를 실시하고, 축척 1/100,000 지질도를 최초로 제작하였다. 이때, 암석명은 육안관찰을 통한 20여 개로 세분하고 이를 기준으로 화산층서를 제시하였다(Table 2-1). 그러나 암석명에 대한 구분 기준이 복잡하고 다소 모호하다는 문제점이 제기되었다. 이후 Won (1975)은 농업진흥공사의 조사 결과를 활용하여 제주도의 화산활동과 형성과정을 제시하였다. 구성암석명은 지역명을 붙여(예. 침상장석감람석현무암은 표선리현무암으로 명명) 1~5 단계의 분출기로 구분된 화산활동사를 제시하였다. Won (1975)이 제시한 화산층서를 농업진흥공사가 발간한 지질도상의 층서와 비교할 때, 큰 차이점은 없으나 현재는 사용되지 않는 성산층이 포함되어 있는 것이 특징이다. 상기 두 연구에서는 기반암 직상부에 감람석휘석현무암 또는 기저현무암으로 불리는 용암대지가 발달해 있는 것으로 해석하였으나, 실제로 이들의 존재는 현재까지도 확인되지 않고 있다. 다만, Koh et al. (2013)은 서귀포층 내에 알칼리 현무암질 용암이 협재되어 나타나는 지역도 있는 것으로 보고한 바 있다.

1980년대에 들어와서 화산층서 해석에 변화가 보이기 시작하였다. 우선 암석명에 있어서 이전에는 육안관찰을 통한 야외명 위주로 명명된 것과는 달리, Lee (1982)는 용암류에 대한 암석화학적 분석을 실시하고 이를 근거로 암석화학명의 층서를 설정하였다. 그는 이전의 5단계의 화산활동사를 4단계 형성 모델, 즉 ① 기저현무암 분출기, ② 용암대지 형성기, ③ 한라산체 형성기, ④ 기생화산 형성기로 제주도의 화산활동사를 구분하였다. 특히 이 모델에서는 신양리층으로 불리

는 비화산성퇴적층의 층준이 이전 연구에 비해 훨씬 더 젊은 상부 플라이스토세 지층으로 제시된 것이 특징이다. 또한, 제주도 남부지역의 제4기 지질조사를 실시한 Yoon et al. (1987)은 용머리 응회환층에 포획된 각력질 화산암편을 용머리 응회환이 형성되기 이전의 기저현무암으로 간주하고 그 K-Ar 절대연대 측정 값 ($1.20 \pm 0.05 \text{Ma}$)을 기저현무암 분출시기로 설정하였다. 또 서귀포층 상위 조면안산암의 K-Ar 절대연대 값이 $0.41 \pm 0.01 \text{Ma}$ 임을 제시하면서 제주도 시추공의 심부에 존재하는 해양생물 화석을 포함한 지층은 서귀포층과는 별개의 지층으로 주장하였다. 즉, 서귀포층을 중부 플라이스토세(0.41Ma)의 지층으로 설정하였다. Yoon et al. (1987)의 화산층서에는 기저현무암의 연대를 제시함과 아울러 서귀포층 상위 용암(조면안산암)의 절대연대를 근거로 서귀포층의 시대를 새롭게 제시하였다. 그러나 기저현무암의 존재가 다수의 심부시추공에서 확인되고 있지 않고 있고, 서귀포층과 해양성 퇴적층에 대한 명확한 시대구분과 분포상태, 층서적 대비가 더 이상 연구되지 않아 이를 인용하기에는 무리가 있다.

최근 시추공 및 지표에서 취득된 700여 개의 용암류 시료에 대한 $\text{Ar}^{40}/\text{Ar}^{39}$ 절대연령 측정을 실시한 Koh et al. (2013)에서는 Won (1976)과 Lee (1982)의 4단계 형성 모델에서 약 0.6Ma 전후로 제시된 용암대지의 형성시기는 실제 0.1Ma 이내인 것으로 제시되어 층서적 오류가 있다고 해석하였다. 아울러 Koh et al. (2013)은 제주도는 하와이섬과 같이 섬 전체가 하나의 순상화산체가 아닌 뉴질랜드 오클랜드와 같은 개별의 단성화산들의 집합체인 현무암질 화산지대에 해당한다고 판단하였다. 따라서 기존 화산활동 모델들에서 제주도 전체를 하나의 화산체로 보는 견해는 적합하지 않다고 주장하였고, 이러한 개념을 적용하여 크게 ① 서귀포층 퇴적 동시대 화산활동(약 $1.88 \sim 0.5 \text{Ma}$), ② 서귀포층 퇴적 이후 화산활동기($0.5 \text{Ma} \sim$ 홀로세)의 2단계로 구성된 화산활동 모델을 제시하였다. 또한 뉴질랜드의 화산학자인 M. Brenna는 제주도 용암류의 암석화학적 분석을 통하여 마그마의 특성과 연계된 화산활동 모델을 제시하였다(Brenna et al., 2010, 2011, 2012a, 2012b, 2015). 제주도의 화산활동은 유라시아판 하부로 섭입된 필리핀해판의 침강에 따라 제주도 하부에 전단대가 발달하였으며, 이와 같은 틈새의 발달로 인해 감압용융이 일어나 제주도의 화산활동이 발생한 것으로 해석하고 있다. 아울러 M. Brenna의 화산활동 모델은 Koh et al. (2013)과 동일하게 복합화산체의

개념을 적용하였으며, 감압용융이 발생된 깊이나 지역이 다르게 때문에 마그마의 조성을 달리하는 차별적 화산활동이 나타난 것으로 해석하고 있다. 이러한 분석을 바탕으로 ① 고알루미늄 알칼리(high-Al alkalic) 용암 분출, ② 전이질 알칼리 용암 분출, ③ 저알루미늄 알칼리(low-Al alkalic) 용암 및 비알칼리(subalkalic) 용암 분출과 같이 3단계로 제주도의 화산활동사를 구분하였다(Brenna et al., 2015).

2. 월정리-행원리 해안지역

1) 지형

연구지역인 월정리-행원리 해안지역은 제주도 동북부의 구좌읍 위치한다(Fig. 1-1). 연구지역을 포함한 주변 지역은 점성이 낮은 과호이호이 용암류가 지배적으로 분포하고 있어 3° 이하의 완만한 경사와 기복이 거의 없는 평탄한 대지를 이루고 있다. 이와는 달리 지하에는 만장굴, 당처물동굴, 용천동굴, 김녕사굴 등 다수의 용암튜브(lava tube)가 발달해 있다(Park et al., 1998).

연구지역의 서쪽 김녕리에 위치한 입산봉은 봉우리의 높이가 해발 85m이고 장축 길이 630m, 단축 길이 480m인 타원형의 형상을 하는 응회구(tuff cone)이다. 또한, 연구지역에서 남쪽으로 약 5.9km 떨어진 송당리 지역에 위치한 둔지봉은 해발 282m의 말발굽형 분석구(scoria cone)이다. 이 분석구로부터 분출된 용암류는 두 갈래로 나뉘져 약 6km 하류의 한동초등학교 맞은편 지역까지 연장되며 계단상의 지형을 이룬다(Fig. 2-1).

해안 지형은 김녕 및 월정해수욕장을 제외하면, 모두 암석해안으로 이루어져 있다. 특히 점성이 낮은 과호이호이 용암류의 차별적 분포로 인하여 해안선의 모양은 다소 불규칙하고, 행원리 해안으로부터 약 1km 범위의 해저에는 과호이호이 용암류에서 분기된 용암로브(lava lobe)들이 방사상으로 퍼져있으며, 이들 중 높이가 높은 일부 로브들은 육상에 노출되어 있기도 한다. 해역의 수심은 주로 북북동 방향으로 깊어지는 양상을 보이며 등수심선의 형태는 약 1km 떨어진 지점(수심 10m)까지 해안선과 유사한 형태를 이루고 있다. 이후에 수심은 북동 방

향으로 증가하는 경향을 보이며, 약 50m의 수심을 보이는 2~3km 지점까지 100m 당 약 2m의 수심 증가를 보인다. 특징적으로 수심 50~80m까지의 변화는 500m 내에서 발생되며, 연구지역의 주변 해역 중 가장 급한 경사를 갖는 지형이 발달되어 있다(Fig. 1-1). 그러나 수심 80m 이후에는 100m 당 1m의 수심이 증가하는 완만한 해저지형으로 바뀌는 양상을 보인다(Fig. 1-1).

2) 지표지질

축척 1/50,000의 성산도폭(Ministry of Construction et al., 1993)에 의하면(Fig. 2-1), 연구지역의 지질은 하위에서 상위의 순서로 온평리현무암, 덕천리현무암, 둔지봉현무암, 사구층으로 이루어져 단순한 편이며, 이들 각각의 특징과 분포상태는 아래와 같다.

(1) 온평리현무암

이 암석은 1971년 농업진흥공사가 발간한 축척 1/10만 제주도 지질도에는 ‘침상장석감람석현무암(AFOB)’으로, 1931년 하라구치가 작성한 1/10만 제주도 지질도에는(Haraguchi, 1931) ‘비현정질현무암(aphanitic basalt)’으로 기재된 암석이다. 분포범위를 보면, 연구지역의 서쪽 김녕해수욕장에서부터 구좌읍 종달리에 이르는 해안 저지대를 따라 넓게 분포하며, 내륙 쪽으로는 구좌읍 덕천리와 둔지봉 인근 지역까지 분포한다(Fig. 2-1).

표면이 매끄럽고 밋밋하며, 밧줄구조(ropy structure)와 다공질의 특성을 나타내는 이 암석은 전형적인 파호이호이 용암류(pahoehoe lava flow)에 속한다. 기공은 대체로 용암류의 표면과 상부에 집중적으로 분포하고, 가운데 부분으로 갈수록 크기는 증가하지만 기공의 수는 감소하는 경향을 나타낸다(Fig. 2-2a). 용암류 유동단위(flow unit) 두께는 0.5~5m 범위이나 지역에 따라 가변적이다. 즉 월정하수처리장 서쪽에서는 0.5m 두께의 판상류(sheet flows) 누층이 발달하지만, 행원리 배수로 단면에서는 약 3m를 나타내고, 투물리스와 팽창구조가 발달한 곳에서는 5m를 초과하기도 한다. 용암이 정치되는 과정에서 형성된 용암팽창구조(lava inflation structure)도 발달하고 있다(Fig. 2-2b). 김녕국가풍력실증연구단지 건물 앞 해안에는 폭 5~10m의 용암팽창지형이 200여 m 길이로 발달하기도 하며(Fig. 2-2c), 면적이 약 0.6km²에 달하는 판상의 팽창지형도 발달해 있다. 특히,

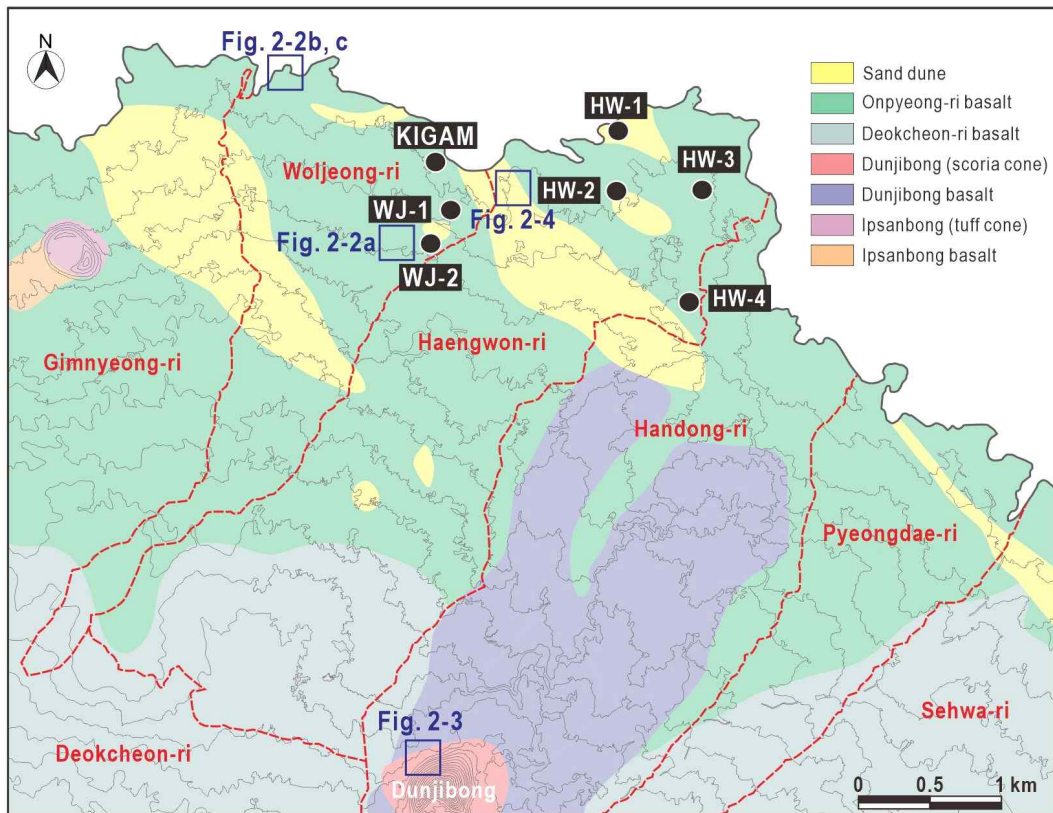


Fig. 2-1. Geologic map of the study area (modified from Ministry of Construction et al., 1993). Contour interval is 10 m.

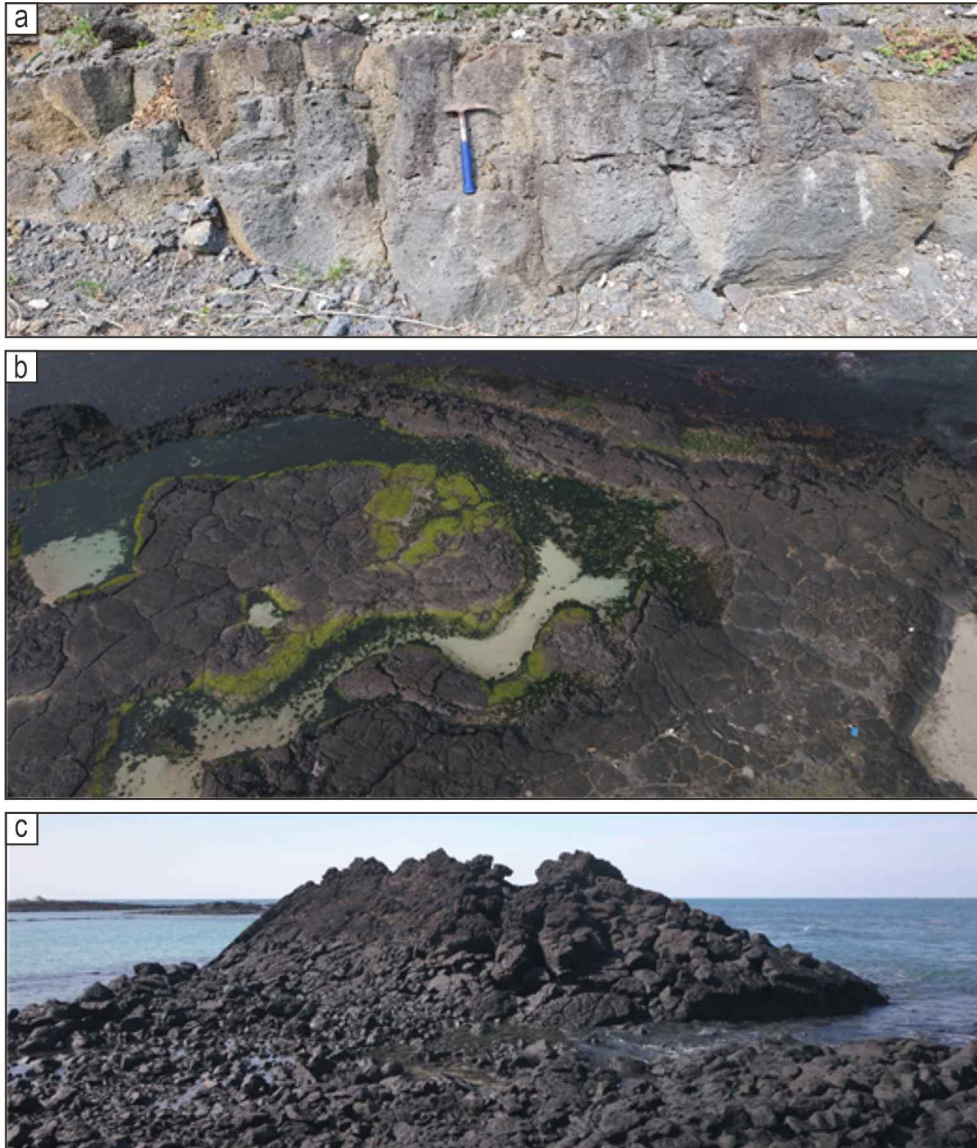


Fig. 2-2. Photos of morphologies and structures of Onpyeong-ri basalt (pahoehoe lava flows). (a) Outcrop showing vesicular internal texture of pahoehoe lava flows. (b) Inflated pahoehoe sheet flows. (c) Tumulus (about 3 m high) in intertidal zone. For location, see Fig. 2-1.

최대 3m 가까이 되는 높이로 블록하게 솟구쳐 오른 언덕모양의 투물러스(tumulus) 지형들이 해안가에 상당수 발달해 있다. 투물러스에는 용암이 팽창할 때 압력에 의해 생긴 깊은 균열이 장축과 양쪽 사면에 발달하고, 냉각과정에서 형성된 다각형의 주상절리도 쉽게 관찰할 수 있다.

이 암석은 미약한 반상구조를 보이는 것이 특징이다. 대체로 0.5~1mm 크기의 침상의 장석과 1~2mm 크기의 담황색 또는 갈색을 띠는 감람석 반정이 10% 이내의 비율로 함유되어 있다. 기공이 거의 없는 중앙부는 감람석 반정이 우세한 피크라이틱(picritic) 조직을 나타낸다.

(2) 덕천리현무암

이 용암류는 연구지역의 남쪽에 위치한 구좌읍 덕천리를 포함한 중산간지역에 분포한다(Fig. 2-1). 성산도폭 지질설명서에 의하면, 이 암석의 암상은 온평리현무암과 유사하여 분별하기 곤란하지만, 기공이 온평리현무암보다 길고 크며, 암이 더 치밀한 특징을 나타낸다. 현미경 하에서 반상조직을 나타내는데, 반정은 사장석과 미반정의 감람석, 그리고 휘석을 함유한다. 그러나, 이들 광물들은 1% 이하의 함량을 나타내어 비반상 조직을 하고 있다.

이 용암류의 정확한 분출지는 알 수 없으나, 거문오름에서 덕천리를 거쳐 김녕리에 이르는 지역에는 용암동굴 천정이 붕괴된 함몰지들이 분포하고 있을 뿐 아니라, 만장굴과 김녕사굴도 위치하고 있어 이 지역에 분포하는 용암류 분출지는 거문오름으로 추정되고 있다. 만장굴 내 측벽에서 채취된 용암의 K-Ar 절대연대 값은 0.42Ma로 보고된 바 있으나, 최근 고토양층에 대한 광여기루미네선스 연대 측정(Ahn et al., 2017) 결과에서는 8Ka로 매우 젊은 연대가 도출되었다.

(3) 둔지봉현무암

이 용암류는 둔지봉에서 분출된 용암을 말한다(Fig. 2-1). 둔지봉 분석구가 형성되는 과정에서 분화구 안에 채워진 용암이 분석구의 남쪽 벽을 깨고 흘러나와 지형경사가 낮은 한동초등학교 방향의 해안으로 두 갈래로 나뉘어 최장 6km 거리를 흐르면서 주변보다 약 5~10m 높은 지형을 형성하였다.

둔지봉 부근에는 분석구를 이루던 분석층의 일부가 분석구를 뚫고 흘러나온 용암과 뒤섞여 마치 뗏목처럼 이동하면서 형성된 높고 낮은 언덕지형들로 인해 복잡한 요철지형을 이루고 있다. 또한, 용암류는 해안 쪽으로 내려오면서 아아

용암류로 바뀌어 상하부에 두터운 클링커층을 형성하였는데(Fig. 2-3a), 둔지봉에서 약 1.7km 떨어진 하류의 절개지에는 적갈색을 띠는 두터운 클링커층이 치밀질 용암 상부에 발달하고 있는 모습이 관찰된다(Fig. 2-3b). 치밀질을 이루는 용암류의 가운데 부분에 반상의 휘석과 미립의 감람석 반정을 관찰할 수 있다(Fig. 2-3c). 휘석반정의 크기는 대체로 2~3mm이나 큰 것은 5mm 이상의 것들도 관찰된다. 둔지봉의 형성 시기는 현무암질 용암류와 분석층 사이에 협재하는 고토양에 대한 광여기루미네선스 연대측정(Yeo et al., 2019)을 통해 대략 7~19Ka 사이인 것으로 보고된 바 있다.

(3) 사구층

연구지역의 지표에는 패각을 함유한 모래언덕(사구)이 발달하고 있다(Figs. 2-1, 2-4). 사구층은 월정리 해수욕장을 기준으로 내륙 약 2.3km 거리까지 분포한다. 사구층을 이루는 모래는 수심이 얇은 해저에 서식하는 패류 등 석회질 생물과편들이 모래와 함께 연안에 퇴적된 후 주로 북서계절풍에 의해 내륙으로 운반·퇴적되었다(Kim, 1974). 최근 Ji et al. (2008)은 김녕리 일대에 분포하는 사구층 기저부 및 사구층 내 발달한 고토양층의 방사성탄소연대 값을 2,900~3,600년 BP와 4,700~6,000년 BP으로 보고하였다. 또한 이 지역 사구층은 마지막 최대빙하기 이후에 해수면이 상승하여 현재의 위치가 되었던 약 6000년 BP 이후에 천해에서 많은 양의 탄산염퇴적물이 생성되었고, 이 퇴적물이 운반되어 사구를 형성하게 된 것으로 해석하였다.

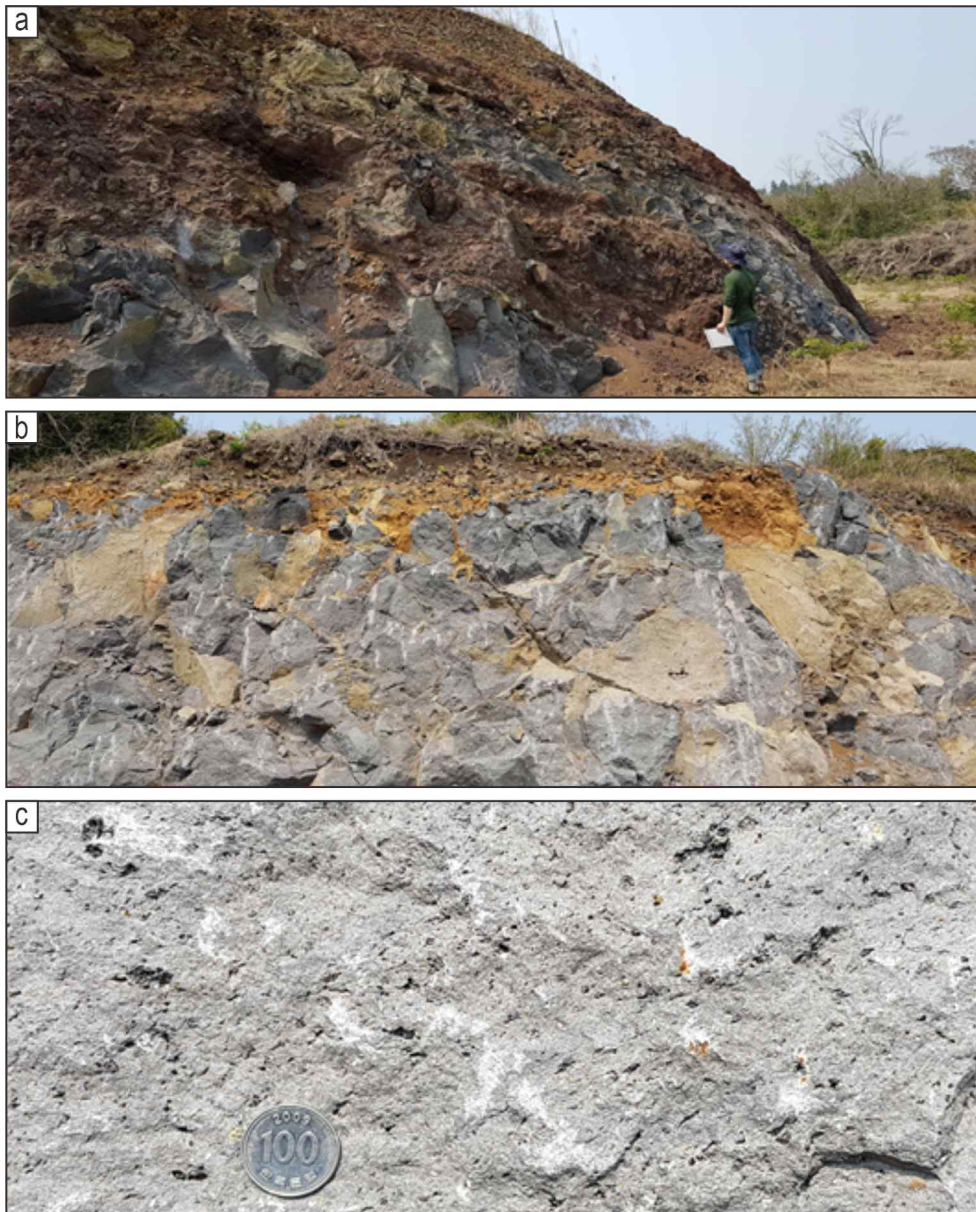


Fig. 2-3. Outcrop photos of the Dunjibong (scoria cone) area. (a) Clinker and massive lava flow layers. (b) Thick and massive lava flows underlying upper clinker layer of roadside cutting on the southern part of Dunjibong. (c) Pyroxene phenocrysts on outcrop of massive lava flow. For location, see Fig. 2-1.



Fig. 2-4. Photos of sand dune outcrops. (a) Paleosol layers and sand dune layers overlying the upper part of the Onpyeong-ri basalt. (b) Sand dune with various mollusc shells. For location, see Fig. 2-1.

Ⅲ. 연구재료 및 방법

1. 연구재료

1) 시추공 코어

연구대상 시추공은 2017~2018년에 제주특별자치도개발공사가 국토교통부의 지역특성화 연구사업의 일환으로 연구지역에 6개소와 한국지질자원연구원에서 1개소를 설치하였다. 이들 시추공은 해발 50m 이하의 월정-행원 해안지역에 위치하는데, 월정리 지역에 3공(KIGAM공, 월정1호공, 월정2호공)이, 행원리 지역에는 4공(행원1호공, 행원2호공, 행원3호공, 행원4호공)이 분포되어 있다(Fig. 2-1).

월정리 지역에 설치된 시추공들은 해안으로부터 약 700m 이내의 거리에 분포한다. 이들 시추공들의 해안으로부터의 이격거리를 살펴보면, KIGAM공은 약 150m(해발 5.0m), 월정1호공 약 300m(해발 19.7m), 월정2호공 약 700m(해발 25.2m)이다. 또한 지표 하 착정심도는 KIGAM공 130.5m(해수면 하 125.5m), 월정1호공 130.0m(해수면 하 110.3m), 월정2호공 131.3m(해수면 하 106.1m)으로 해수면 하 106~126m 사이까지 착정되었다. 시추공의 착정구경은 KIGAM공이 70mm이고 나머지 2개 시추공은 200mm이다(Table 3-1).

행원리 지역의 경우, 행원1호공이 해안선으로부터 75m(해발 4.5m) 거리에 위치하는 것을 비롯하여 행원2호공 650m(해발 7.4m), 행원3호공 760m(해발 11.8m), 행원4호공 약 2,000m(해발 15.5m)로 각각 분포한다. 아울러 이들의 지표 하 착정심도는 행원1호공 130.0m(해수면 하 125.5m), 행원2호공 117.4m(해수면 하 110.0m), 행원3호공 122.0m(해수면 하 110.2m), 행원4호공 150.0m(해수면 하 134.5m)이고, 착정 구경은 행원1호공(70mm)을 제외한 나머지 시추공은 모두 200mm이다(Table 3-1).

2) 시추공 지구물리검층

연구지역 지하지질의 물리적 특성을 확인하기 위해 시추가 종료된 이후 시추공

Table 3-1. General information of boreholes.

Borehole		KIGAM	WJ-1	WJ-2	HW-1	HW-2	HW-3	HW-4
Location (DM)	Lat.	33°33.35'	33°33.06'	33°32.94'	33°33.53'	33°33.17'	33°33.18'	33°32.64'
	Lon.	126°47.70'	126°47.70'	126°47.76'	126°48.83'	126°48.83'	126°49.25'	126°49.26'
Elevation (m)		5.0	19.7	25.2	4.5	7.4	11.8	15.5
Well diameter (mm)		70	200	200	200	200	200	200
Measured depth (m)		130.5	130.0	131.3	130.0	115.0	122.0	150.0
Elevation depth (m)		-125.5	-110.3	-106.1	-125.5	-107.6	-110.2	-134.5
Distance of coastal line (m)		150	300	700	75	650	760	2,000
Narutal gamma-ray (EL. m)		5.0 ~ -95.5	19.7 ~ -95.1	25.2 ~ -93.0	4.5 ~ -85.3	7.4 ~ -94.2	11.8 ~ -92.6	15.5 ~ -128.6
OTV (EL. m)		no recovery	0.0 ~ -96.9	6.2 ~ -94.3	-58.5 ~ -90.3	0.0 ~ -90.6	-3.2 ~ -91.8	0.0 ~ -55.7

지구물리검층이 수행되었다. 검층은 한국지질한국지질자원연구원에 의해 수행되었으며, 자연감마선(natural gamma-ray, 이하 NGR) 검층과 광학영상(optical televiewer, 이하 OTV) 검층이 이루어졌다.

NGR 검층은 지층 또는 암석에 포함되어 있는 방사능 동위원소의 자연적인 붕괴에 따라 방출되는 감마선의 세기를 측정하는 검층방법을 말한다(Asquith et al., 2004). 이와 같은 검층은 시추공에 적용되기 이전에 지표탐사에서 우라늄 등 일부 높은 방사능을 갖는 광체(orebody)탐사에서 활용되었으나, 사례가 많지 않으며 다소 활용도가 낮은 탐사법으로 여겨졌다(Shim et al., 2018). 그러나 1970년대에 들어서면서 지구물리학적 이론을 바탕으로 하는 석유탐사가 활발하게 진행되었고, 이때 탐사대상이 되는 근원암(주로 니 크기의 세립질 퇴적물)과 저류암(모래 크기의 조립질 퇴적물)을 NGR의 세기를 통해 간접적으로 파악할 수 있음이 확인되었다(Selley, 1998). 이처럼 NGR은 구성 광물 또는 암석에 따라 방출 세기가 다르게 나타나는 것으로 알려져(Schlumberger, 1989), 오늘날에는 시추공 검층에 있어서 암상을 구분하는데 유용하게 활용되고 있다.

본 연구에서는 7개소의 모든 시추공에서 NGR 검층이 수행되었으나, 시추공의 최하부에 발달된 퇴적암 구간에서는 KIGAM공, 행원2호공에서만 일부 측정이 이루어졌고 나머지 시추공들에서는 그 전까지만 검층이 이루어졌다. 즉, 해수면 하부로 검층이 수행된 심도를 살펴보면, KIGAM공 95.5m, 월정1호공 95.1m, 월정2호공 93.0m, 행원1호공 85.3m, 행원2호공 94.2m, 행원3호공 92.6m, 행원4호공 128.6m이다(Table 3-1). 검층에는 영국 Robertson사에서 개발한 Triple Gamma를 사용하였으며, 장비의 제원은 길이 2.1m, 구경 38mm, 무게 6kg으로 측정은 최대 70℃의 온도와 20MPa의 압력조건까지 수행될 수 있으며 케이싱이 설치된 상태에서 검층을 진행하였다. 또한 NGR의 측정범위는 100X25mm로 설정하였다.

시추공 OTV 검층은 자연적으로 발생된 물리적 현상의 세기를 측정하여 지질 상태를 추정하는 보편적인 지구물리검층과는 달리, 디지털 카메라를 사용하여 시추공벽의 상태를 영상으로 기록하는 검층방법이다. 따라서 지하지질의 발달상태를 있는 그대로의 모습으로 확인할 수 있다는 장점으로, 지하자원탐사는 물론 절리와 파쇄대 같은 지질구조분석 등에서 주로 활용되고 있다(Li et al., 2013).

이와 같은 시추공 OTV 검층은 KIGAM공을 제외한 6개소의 시추공에서 이루

어졌으며, 검층은 시추공 굴착이 완료된 직후의 나공(open hole) 상태에서 수행되었다. 그러나 공벽의 파쇄가 심해 시추공의 구경이 확대된 구간에서는 취득된 영상자료가 다소 어둡게 나타나 이를 식별하는데 어려움이 있었으며, 심한경우에는 공벽의 붕괴를 방지하기 위해 케이싱이 설치된 구간은 영상자료가 확보되지 않았다. 검층이 실시된 구간은 용암류 단위의 경계면을 비롯하여 용암류의 물리적 특징, 복합용암류의 형태, 유리질 각력암 구간의 암상 변화, 용암류 사이에 협재된 두께가 얇은 퇴적암 및 고토양의 존재 등 자연상태의 지층구조를 확인할 수 있었다. 따라서 시추코어 회수율 내지 회수상태가 불량한 구간에 대한 보충자료로서 활용이 가능하였다.

시추공별 OTV 검층자료가 취득된 구간(해수면 하부)을 보면, 월정1호공 96.9m, 월정2호공 94.3m, 행원1호공 58.5~90.3m, 행원2호공 90.6m, 행원3호공 91.8m, 행원4호공 55.7m이다(Table 3-1). 검층에 사용된 장비는 영국 Robertson사의 High Resolution Optical Televiwer를 사용하였는데, 해당 모델은 길이 2.13m, 구경 58mm, 무게 7.2kg의 규격을 가지며 최대 60℃의 온도까지 견딜 수 있는 내구성을 갖는다. 아울러 선단에 장착되어 있는 디지털 카메라에는 1280X1024 pixels CMOS image sensor가 탑재되어 있으며, 360°로 영상촬영이 가능해 시추공벽 전 구간에 대한 검층이 가능할 뿐만 아니라, 최대 1,440 픽셀의 해상도와 24 bit RGB 색 분해능을 갖는 영상자료가 취득된다. 검층을 통해 얻어진 원시자료(row data)는 WellCad™ Image-processing 소프트웨어를 사용하여 이를 이미지화 시키는 과정을 거쳤다.

2. 연구방법

1) 시추코어 현장기재

연구지역에 설치된 7개소의 시추공에서 회수된 시추코어에 대한 현장기재를 수행하여 구성암석 및 특징, 분포양상, 시추공 대비 및 층서설정 등의 해석에 기초자료로 활용하였다. 회수된 시추코어는 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 비화산성 퇴적암, 고토양으로 대분하고, 그 각각에 대하여 다음과 같은 사항을 현장

에서 기재함과 더불어 1/20 스케일의 지질주상도 작성하였다(Fig. 3-1).

(1) 비각력화 용암류

비각력화 용암류는 화도 또는 틈새(fissure)를 통해 지표로 분출된 용암의 흐름을 말하며, 이러한 상태로 굳어져 용암류의 특징을 보이는 화산암을 지칭하기도 한다(Macdonald, 1953). 이러한 용암류는 주로 점성이 낮은 현무암질 용암이 우세하게 분출되는 분류성 분출 또는 일출식 분출(effusive eruption)로 불리는 비폭발적 화산활동을 통해 발생된다(Swanson, 1973). 용암류의 냉각에 따라 고화된 화산암은 보편적으로 현무암질의 조성을 보이며, 조직은 구성광물 대부분이 입자크기가 1mm 이하로 발달된 비현정질(aphanitic)의 특성을 보인다(Koh et al., 2017b). 뿐만 아니라 용암의 분출량 또는 공급량이 높은 경우 그 흐름은 두께가 수 m로도 나타날 수 있는데, 이는 용암류 표면과 내부의 냉각속도 차이를 야기하여 광물과 기공의 발달 및 분포에 영향을 미친다(Self et al., 1998).

이와 같은 특징을 보이는 시추코어는 Self et al. (1998)과 Katz and Cashman (2003)이 제시한 용암류 기재 및 유동단위 구분방법을 참고하였다. 즉, 기공의 크기, 모양과 분포, 육안으로 관찰이 가능한 광물의 종류, 크기, 함량, 절리 또는 파쇄대의 발달여부, 암색(Goddard et al., 1984), 시추코어 회수율 등을 기재하였다. 또한 용암류간의 경계면을 파악하여 용암류 유동단위를 구분하였다. 이처럼 나누어진 유동단위는 그 두께, 매수, 유형(아아 용암류, 파호이호이 용암류)에 대해 파악하였다. 특히 파호이호이 용암류인 경우에는 구간에 따라 기공분포의 변화가 나타나고, 특히 기저에 수직적으로 신장된 파이프형 기공이 발달되어 있는 경우에는 P형 파호이호이 용암류(pipe-bearing pahoehoe lava flow)로 구분하였다. 이와는 달리 전체적으로 기공함량의 변화가 나타나지 않고 유동단위 하부에 파이프형 기공이 관찰되지 않을 때에는 S형 파호이호이 용암류(s-type pahoehoe lava flow)로 유동단위 유형을 나누었다. 이와 같이 구분된 용암류 유형은 그 당시 용암공급량 또는 지형적 특징에 대해 추정할 수 있는 근거가 될 수 있는 것으로 알려져 있다(Wilmoth and Walker, 1993; Hon et al., 1994; Waichel et al., 2006).

또한 Koh et al. (2017a)에서 제안된 제주도 화산암 명명 기준에 따라 야외명을 부여하였다(Fig. 3-2). 즉 현무암질 용암류에 발달된 구성광물 중 1mm 이상의

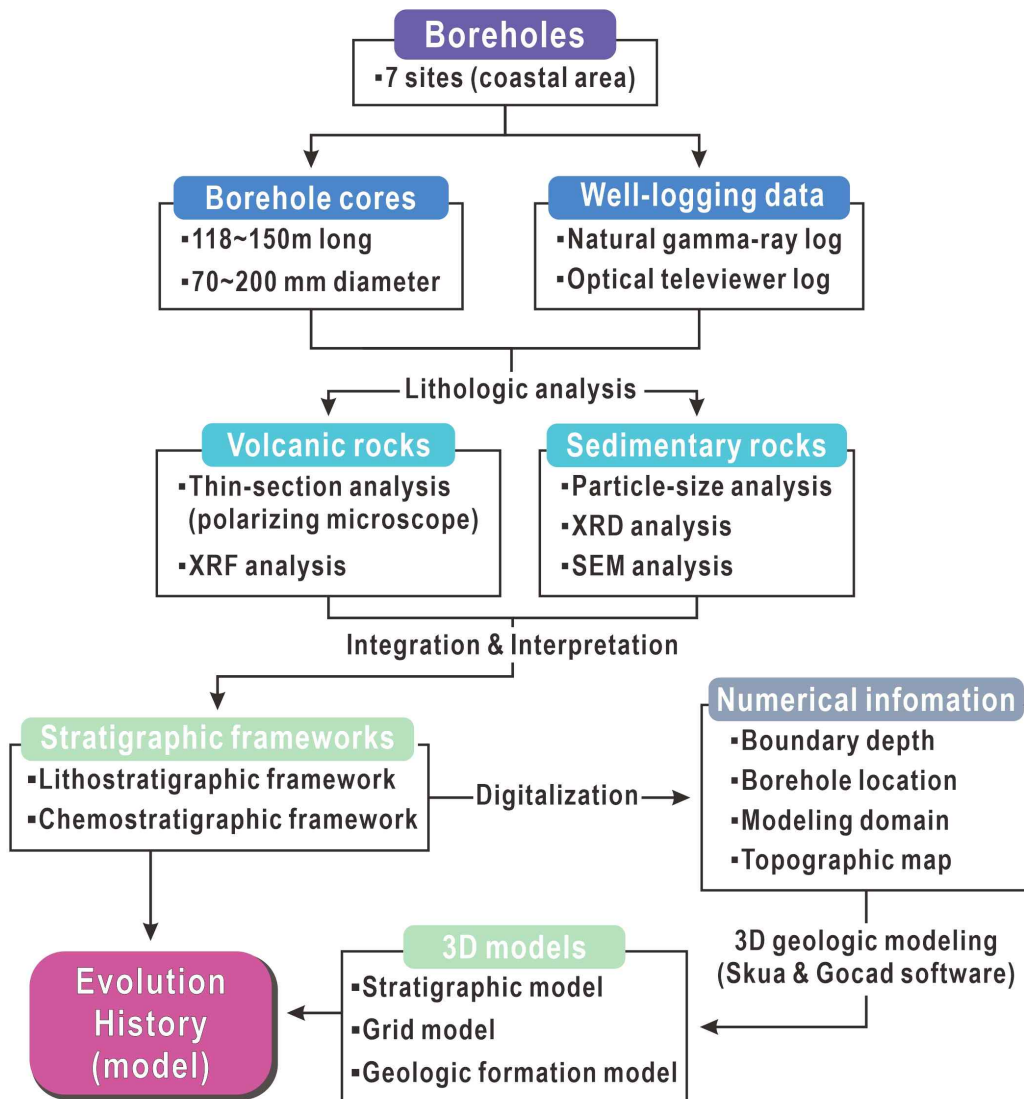


Fig. 3-1. Conceptual work flow applied to the integrated analysis of boreholes and well-logging data in this study.

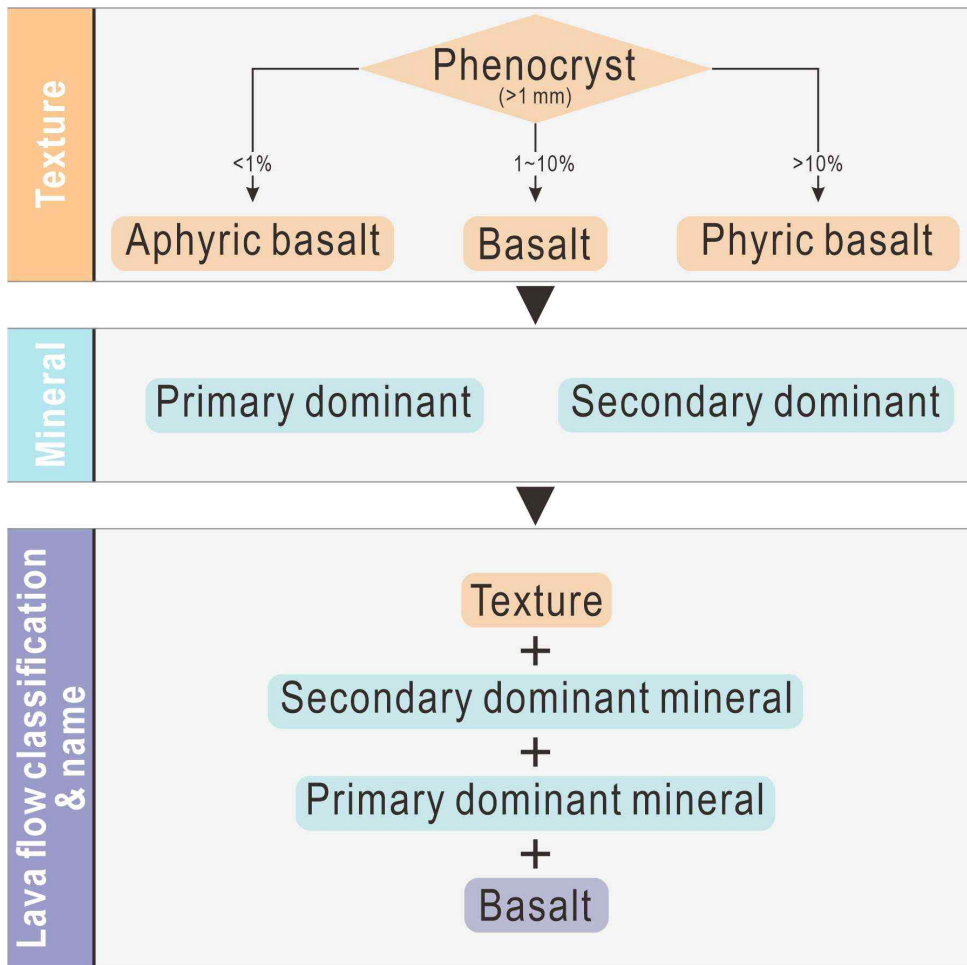


Fig. 3-2. Classification and nomenclature of basaltic lava flows based on their texture and mineral composition (modified from Koh et al., 2017a).

크기를 갖는 반정광물 함량에 따라 1% 이하는 비반상질(aphyric), 10% 이상은 반상질(phyric)로, 1~10%는 일반 현무암으로 조직을 구분하였다. 아울러 반정광물의 종류와 이들의 함량을 기준으로 1차 우세광물과 2차 우세광물을 파악하고, 최종적으로 조직명-2차 우세광물-1차 우세광물-현무암의 순으로 암석명을 부여하였다. 단, ‘침상장석감람석현무암’의 경우에는 침상의 형태로 발달된 장석의 함량이 감람석에 비해 더 우세하여 암석명을 구분하는데 있어 장석이 감람석 뒤에 위치해야 하지만, 기존의 관습적인 명칭을 유지하였다(Koh et al., 2017a).

(2) 각력화 용암류

시추코어에서는 비각력화 용암류의 특징 이외에도 잔자갈(granule)에서부터 거력(boulder)에 이르는 다양한 크기의 분리된 각력들로만 이루어진 각력화 용암류 구간이 나타난다. 각력들은 그 표면에 유리질 조직이 지배적으로 발달되어 있으며, 기공과 광물의 발달양상 또한 용암류와는 차이를 보인다. 이와 같은 암상특성을 갖는 각력들의 존재는 제주도 연안지역에서 이루어진 시추조사에서도 확인된바 있으며(Park et al., 1998; Koh et al., 2013, 2017b), 이를 유리쇄설성 각력암(hyaloclastite)으로 해석하고 있다. 특히 Koh et al. (2017a)은 제주도 시추조사에서 확인된 유리쇄설성 각력암의 특징에 대해 아주 짙은 검정색(유리질)의 표면을 갖는 각력들로서, 단면상 중심부로 갈수록 치밀한 조직이 나타나는 것으로 보고하였다. 이러한 내용은 조사대상 시추코어에서 관찰된 것과 유사하고 용암류와 차이를 보이기 때문에 이를 구분하여 기재하였다. 다만 제주도에서는 아직까지도 연구된 사례가 많지 않을뿐더러 오로지 각력들로 회수된 시추코어를 활용하였다는 한계점이 있다. 그러나 본 연구에서는 각력들뿐만 아니라 부분적으로 각력화된 용암류를 비롯한 기질부 또한 나타나는 것이 OTV 검층영상을 통해 확인되었다. 이러한 각력화 용암류의 암상을 보이는 시추코어는 전반적인 암상의 변화 및 각력의 발달양상, 분포구간 등을 기재하고, 시추에서 그 특징 기재가 불분명한 구간에 대해서는 OTV 검층영상을 활용하여 보충하였다.

(3) 비화산성 퇴적암 및 고토양

시추코어에서는 앞서 설명된 용암류와는 달리 분리되어 있는 입자성 물질로 구성되어 있는 비화산성 퇴적암(물)과 고토양의 암상을 보이는 구간 또한 존재한다. 비화산성 퇴적암은 원암의 풍화와 침식에 의해 생성된 입자성 또는 용해물질

들이 다양한 운반기작·매체(중력, 물, 바람, 빙하 등)에 의해 안정된 장소(하천, 호수, 바다 등)로 이동되어 퇴적된 후 굳어져서 형성된 암석을 말한다(Nichols, 2009). 따라서 화성암 또는 변성암과는 성인에 있어 큰 차이를 보이며, 형성 환경에 따라 독특한 조직, 구조, 광물조성이 나타난다(Leeder, 2012). 따라서 제주도와 같이 화산암과 호층을 이루는 층서적 관계가 나타나는 경우에는 환경변화에 대한 지시자의 역할을 할 수 있기 때문에, 지질학적 진화과정을 논하는데 있어 중요하다 볼 수 있다. 이러한 퇴적암뿐만 아니라 고토양 역시 화산활동의 휴지기를 추정할 수 있는 직접적인 근거가 될 수 있기 때문에 층서학적으로 큰 의미를 갖는다. 조사대상 시추공에서 회수된 퇴적암에 대해서는 암색(Goddard et al., 1984), 두께, 구성입자의 크기, 층리 등의 퇴적구조의 발달여부, 패각편과 같은 화석의 유무 대해 관찰하고 기재하였다. 그러나 퇴적암 구간은 회수율이 지극히 불량하고 시추과정에서 교란이 심하게 발생하여서 상기와 같은 사항들을 모두 관찰·기재하기는 어려웠다. 그럼에도 불구하고 행원1호공에서 용암류 사이에서 회수된 고토양에 대해서는 두께, 암색, 구성 입자의 종류 및 크기 등을 기재하였다. 그리고 나머지 시추공에서의 고토양에 대해서는 OTV 검증영상을 통해 이들의 개괄적인 특징을 기재하였다.

2) 용암류 지화학 및 광물분석

(1) X-선 형광분석

시추코어 현장기재를 통해 구분된 용암류의 지화학적 특성을 파악하기 위해 7개 시추공으로부터 149개의 시료를 채취하여 X-선 형광(X-ray fluorescence, 이하 XRF)분석을 수행하였다. 물질을 구성하고 있는 원소에 짧은 파장의 전자기파인 X선을 쬐이게 되면, 고에너지에 의해 내부 껍질을 이루던 전자가 방출되고 이를 채우기 위해 외곽 껍질의 전자가 전이되면서 나타나는 상차이로 인해 X선(에너지)이 방출된다. 이 X선의 에너지(파장)는 원소마다 다르게 나타나는데, 이를 통해 존재 원소를 정성적으로 알아낼 수 있을 뿐만 아니라 그 세기를 통해서 정량적 분석 또한 가능하다(Jenkins, 1999; Beckhoff et al., 2007).

시료는 시추코어 및 OTV 영상을 통해 구분된 용암류 유동단위별로 각 1점씩 채취하고자 하였으나, 회수가 제대로 이루어지지 않았거나 풍화 내지 변질이 심

하게 나타나는 유동단위는 제외하였다. 또한 시추코어 상으로 유동단위의 구분이 다소 모호한 경우에는 하나의 유동단위로 추정되는 구간에 간격을 달리하며 2~3개의 시료를 채취하여 분석을 진행하였다. 채취된 시료의 수와 지점의 암상은 KIGAM공 35개(용암류 유동단위 33개, 유리질 각력암 2개), 월정1호공 18개(용암류 유동단위 17개, 유리질 각력암 1개), 월정2호공 27개(용암류 유동단위 26개, 유리질 각력암 1개), 행원1호공 20개(용암류 유동단위 19개, 유리질 각력암 1개), 행원2호공 19개(용암류 유동단위 16개, 유리질 각력암 1개, 퇴적암에 포함된 용암류 암편 2개), 행원3호공 14개(용암류 유동단위 12개, 유리질 각력암 2개), 행원4호공 18개(용암류 유동단위 15개, 유리질 각력암 3개)이다(Tables 3-2~3-8).

X-선 형광분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 10개의 주원소(Si, Ti, Al, Mg, Fe, Mn, Ca, Na, K, P)에 대한 분석이 수행되었으며, 이때 사용된 장비는 Philips사의 PW 2404모델이다. 이를 통해 얻어진 성분분석 결과는 Le Bas et al. (1986)이 제안한 실리카(SiO_2)대 알칼리($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 함량 분류도인 TAS 다이어그램을 작성하고 각 시료별 화학적 조성에 따른 암석명을 결정하였다.

(2) 편광현미경 관찰

용암류의 구성광물 및 조직특성을 확인하기 위해, KIGAM공의 비각력화 용암류 4개, 각력화 용암류(유리질 각력암) 2개 지점(Table 3-9)에서 시료를 채취하여 박편을 제작하였다. 박편제작에는 경상대학교 공동실험실습관에 보유하고 있는 BUEHLER사의 PetroThin을 사용하였으며, 제작이 완료된 박편은 편광현미경에서 200 배율로 관찰하였다.

3) 퇴적암 조직분석

(1) 입도분석

퇴적물 입도분석은 해양환경공정시험기준에서 제시된 방법에 따라 실시하였다. 먼저 퇴적암 시추코어의 육안관찰을 통해 조직변화가 나타나는 구간(Table 3-10)을 대상으로 퇴적물 시료 20~30g을 채취하여 500mL 비커에 담은 후 6% 과산화수소를 가해 유기물을 분해하고 입자의 분산을 유도하였다. 유기물 분해가 완전히 끝나 더 이상 시료에서 거품이 올라오지 않으면 시료가 담긴 비커를 가열판 위에 올려놓고 90℃까지 가열하며 재반응시켰다. 반응이 완전히 끝나면 시료를

Table 3-2. Detailed information on samples carried out XRF analysis in KIGAM borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)		
KIGAM	33	Non-brecciated Lava flow	0.7	4.3		
	32		2.2	2.8		
	31		4.2	0.8		
	30		5.6	-0.6		
	29		5.9	-0.9		
	28		7.7	-2.7		
	27		9.9	-4.9		
	26		12	-7.0		
	25		13.9	-8.9		
	24		14.7	-9.7		
	23		17.8	-12.8		
	22		20.6	-15.6		
	21		22.5	-17.5		
	20		24.6	-19.6		
	19		26	-21.0		
	18		27	-22.0		
	17		28.5	-23.5		
	16		36.1	-31.1		
	15		38.7	-33.7		
	14		40.9	-35.9		
	13		42.5	-37.5		
	12		43.8	-38.8		
	11		45.5	-40.5		
	10		46.5	-41.5		
	9		47	-42.0		
	8		48.4	-43.4		
			B(2)	Brecciated	52	-47.0
			B(1)	Lava flow	65	-60.0
			7	Non-brecciated Lava flow	70.2	-65.2
			6		75	-70.0
			5		79.3	-74.3
			4		82.7	-77.7
			3		83.4	-78.4
	2	89.7	-84.7			
	1	96.6	-91.6			

Table 3-3. Detailed information on samples for XRF analysis in WJ-1 borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)
WJ-1	31	Non-brecciated Lava flow	3.7	16.0
	30		9.0	10.7
	29		13.5	6.2
	28		16.0	3.7
	27		20.7	-1.0
	24		28.5	-8.8
	23		31.8	-12.1
	19		35.0	-15.3
	14		39.0	-19.3
	11(2)		49.0	-29.3
	11(1)	60.5	-40.8	
	B	Brecciated Lava flow	66.0~82.0	-46.3~-62.3
	10	Non-Brecciated Lava flow	85.5	-65.8
	9		87.0	-67.3
	6		96.0	-76.3
	5		102.0	-82.3
4	108.0		-88.3	
1	114.0		-94.3	

Table 3-4. Detailed information on samples for XRF analysis in WJ-2 borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)	
WJ-2	25	Non-brecciated Lava flow	3.0	22.2	
	24		11.2	14.0	
	23		13.7	11.5	
	22		17.0	8.2	
	21		19.2	6.0	
	20		21.5	3.7	
	19		23.0	2.2	
	17(2)		27.0	-1.8	
	17(1)		31.2	-6.0	
	16		37.0	-11.8	
	15		41.7	-16.5	
	14		47.3	-22.1	
	13		52.0	-26.8	
	12		57.1	-31.9	
	11		59.2	-34.0	
	B		Brecciated Lava flow	72~77	-46.8~-51.8
	10		Non-brecciated Lava flow	85.6	-60.4
	9	89.2		-64.0	
	8	93.2		-68.0	
	7	94.4		-69.2	
	6	96.4		-71.2	
	5	100.0		-74.8	
	4	107.0		-81.8	
3	111.0	-85.8			
2	114.5	-89.3			
1(2)	118.0	-92.8			
1(1)	120.8	-95.6			

Table 3-5. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-1 borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)
HW-1	19	Non-brecciated Lava flow	10.0	-5.5
	18		16.0	-11.5
	17		19.0	-14.5
	16		21.7	-17.2
	15		24.7	-20.2
	14		26.0	-21.5
	13		29.2	-24.7
	12		38.0	-33.5
	11		42.0	-37.5
	10		45.0	-40.5
	B	Brecciated Lava flow	61.0	-56.5
	9	Non-brecciated Lava flow	75.8	-71.3
	8		79.0	-74.5
	7		82.4	-77.9
	6		85.9	-81.4
	5		87.4	-82.9
	4		88.6	-84.1
	2(2)		91.5	-87.0
	2(1)		93.5	-89.0
	1		94.5	-90.0

Table 3-6. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-2 borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)
HW-2	21	Non-brecciated Lava flow	1.7	5.7
	20		6.9	0.5
	19		8.2	-0.8
	18		12.6	-5.2
	15		27.9	-20.5
	14		31.0	-23.6
	12		36.4	-29.0
	B	Brecciated Lava flow	50.0~55.0	-42.6~-47.6
	11	Non-brecciated Lava flow	69.0	-61.6
	10		73.3	-65.9
	9		74.1	-66.7
	7		76.6	-69.2
	5		82.7	-75.3
	3(3)		89.9	-82.5
	3(2)		92.0	-84.6
	3(1)		93.7	-86.3
	1		97.1	-89.7

Table 3-7. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-3 borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)
HW-3	16	Non-brecciated Lava flow	6.0	5.8
	15		10.4	1.4
	14		13.3	-1.5
	12		19.5	-7.7
	11		25.0	-13.2
	10		29.0	-17.2
	7		37.0	-25.2
	6		40.2	-28.4
	5		45.0	-33.2
	4		51.0	-39.2
	B(2)	Brecciated	60.0	-48.2
	B(1)	Lava flow	90.0	-78.2
	3	Non-brecciated	99.0	-87.2
2	Lava flow	101.4	-89.6	

Table 3-8. Detailed information on samples for XRF analysis in HW-4 borehole.

Borehole	Lava flow unit	Lithology	Measured depth (m)	Elevation depth (m)
HW-4	19	Non-brecciated Lava flow	2.0	13.5
	18		4.5	11
	17		9.0	6.5
	16		14.0	1.5
	14		22.5	-7
	13		30.8	-15.3
	12		34.4	-18.9
	10		38.4	-22.9
	9		40.5	-25
	8		43.7	-28.2
	5	51.0	-35.5	
	B(3)	Brecciated Lava flow	51.0~65.0	-35.5~-41.5
	4	Non-brecciated Lava flow	68.8	-53.3
	3		74.0	-58.5
	2		78.0	-62.5
	1		85.8	-70.3
	B(2)	Brecciated	93.0~128.0	-74.5~-112.5
	B(1)	Lava flow	128.0~150.0	-112.5~-134.5

Table 3-9. Basic information on samples for polarizing microscopy (thin section) in KIGAM borehole.

Bore hole	Figure number	Elevation depth (m)	Measured depth (m)	Lithology
KIGAM	4-5a	-5.0	10.0	Non-brecciated lava flow
	4-5b	-6.0	11.0	
	4-5c	-6.5	11.5	
	4-6a	-63.5	68.5	
	4-6c	-65.3	70.3	
	4-6b	-66.2	71.2	
WJ-1	4-7c, d	-50.3~-55.3	70.0~75.0	Brecciated lava flow

Table 3-10. Sampling locations for grain-size analysis.

Borehole name	Sample number	Measured depth (m)	Elevation depth (m)
KIGAM	1	65.7~67.6	-60.7~-62.6
	2	98.7~99.7	-93.7~-94.7
	3	99.7~101.9	-94.7~-96.9
	4	101.9~104.0	-96.9~-99.0
	5	104.0~122.0	-99.0~-117.0
	6	122.0~130.5	-117.0~-125.5
WJ-1	1	115.0~117.0	-95.3~-97.3
	2	117.0~119.0	-97.3~-99.3
WJ-2	1	121.0~121.6	-95.8~-96.4
	2	121.6~121.9	-96.4~-96.7
	3	121.9~122.3	-96.7~-97.1
HW-1	1	95.0~95.5	-90.5~-91.0
	2	95.5~96.0	-91.0~-91.5
	3	96.0~97.0	-91.5~-92.5
	4	97.0~109.0	-92.5~-104.5
	5	109.0~121.0	-104.5~-116.5
	6	121.0~124.0	-116.5~-119.5
	7	127.0~130.0	-122.5~-125.5
HW-2	1	102.0~104.0	-94.6~-96.6
	2	104.0~106.0	-96.6~-98.6
HW-3	1	103.6~111.0	-91.8~-110.2

실온에서 냉각시킨 후 상등액을 따라버리고 증류수를 채웠다. 증류수를 넣은 뒤 시료가 가라앉으면 다시 상등액을 따라내는 과정을 세 번 반복하고 90℃의 온도로 설정된 건조기에 넣어 시료의 수분을 완전히 제거하였다. 건조된 퇴적물 시료는 우선 건식체질법을 통해 입도분석을 수행하였으며, 1 ϕ 간격의 -2 ϕ ~4 ϕ 규격의 체를 진탕기에 끼우고 시료를 부어 10분 동안 체질을 진행하였다. 체질이 끝난 후 각 체에 담긴 시료는 0.01g까지 무게를 측정하고 이를 입도분석지에 기록하였다.

4 ϕ 체를 통과한 모래 이하의 입도를 갖는 퇴적물 시료는 피펫팅법을 통해서 입도분석을 실시하였다. 1,000mL 매스실린더에 시료를 넣고 증류수로 950mL까지 부피를 맞추었다. 이 후 1,000mL까지 2% 칼콘 용액을 붓고 젓개를 사용하여 매스실린더 안에 시료를 몇 차례 저어준 뒤 24시간 동안 실온에 방치하였다. 실린더 내 시료의 응결이나 침전이 없음을 확인한 다음, 젓개로 1분간 저어주고 50mL 흡피펫을 사용하여 7회(0초, 2분, 8분, 32분, 2시간 8분, 5시간 58분, 24시간)에 걸쳐 피펫팅을 실시하였다. 피펫팅이 모두 끝나면 시료가 담긴 비이커를 90℃로 설정된 건조기에 넣어 말린 후 0.001g까지 무게를 측정하고 이를 입도분석지에 기록하였다. 최종적으로 기록된 자료를 기반으로 퇴적물의 유형을 Folk의 삼각 분류법(Folk, 1954)을 적용하여 결정하였다.

(2) 광물조성 분석

퇴적암 광물조성 분석은 KIGAM공의 용암류와 유리질 각력암 사이에 협재된 퇴적암(해수면 하 60.7~62.6m) 구간을 대상으로 X-선 회절(X-ray diffraction, 이하 XRD)분석과 주사전자현미경(scanning electron microscopy, 이하 SEM) 분석을 실시하였다. XRD 분석은 결정체 물질 분자에 X선을 쏘아 회절 및 산란된 X선의 양상을 통해 결정체의 구조파악하고 이를 기반으로 광물을 동정하는 분석 방법이다(Warren, 1990). 아울러 SEM 분석은 물질 표면에 미세 전자빔을 주사(scanning)하여 이차적으로 발생된 전자를 신호로 표면을 관찰하는 분석법으로서, 배율이 수만 배에 달하기 때문에 육안으로 확인이 불가능한 미세 영역까지 관찰할 수 있다(Flegler and Flegler, 1997; Goldstein et al., 2017).

분석이 수행된 구간은 시추코어 회수율이 10% 미만으로 상당히 낮을 뿐만 아니라 교란이 심하기 때문에 세밀한 분석 간격을 설정하기에 다소 어려움이 있다.

따라서 해당 구간을 상·중·하로 크게 나누어서 시료를 채취하였다. 얻어진 시료는 60℃에서 완전히 건조시킨 후 볼밀(ball mill)을 사용하여 분말화하였고, 분석은 경상대학교 공동실험실습관에서 보유하고 있는 Bruker사의 D8 Advance A25 모델을 이용하여 수행하였다. 분석조건은 니켈 필터를 이용한 구리 파장의 X-선을 이용하여 40kV, 40mA, 4~90. 2-theta 구간에서 0.02. /57.3s로 설정하였다. 아울러 획득된 X-선 회절 자료는 EVA V3.1 소프트웨어를 사용하여 정성분석을 실시하였다.

SEM 관찰을 위해 채취된 시료를 연마편을 제작하였으며, 경상대학교 공동실험실습관의 Jeol사의 JSM-7601F 모델의 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM)과 X-선 에너지 분광기(EDS)를 이용하여 조직관찰과 광물동정을 실시하였다. 분석조건은 가속전압 15kV, 가속전류 5nA, 초점거리 15mm에서 영상관찰을 실시하였다.

4) 3차원 지질 모델링

시추코어 분석을 통해 도출된 결과들은 시추공이 위치한 한 지점을 대표하는 것으로서, 연구지역 지하 지질의 발달상태를 공간적으로 파악하기 위해서는 이를 보충할 수 있는 추가적인 분석방법이 필요하다. 이와 같은 취약점을 보완하기 위한 방법으로서 최근 에너지자원 탐사, 지열 에너지 개발, 방사성 폐기물 지층 처분, 이산화탄소 지중 저장 등에 널리 사용되고 있는 3차원 지질 모델링 기법(Wang et al., 2011; Park et al., 2015)을 본 연구지역에 적용하였다. 3차원 지질 모델링 기법은 지질학적 대상을 분석하여 얻어진 결과들을 수치정보로 가공 및 전산화하고 수리적·지구통계학적 이론을 적용하여 대상의 발달양상과 분포를 예측하여 이를 사실적으로 가시화하고 정량적으로 평가할 수 있는 분석방법이다(Mallet, 2002; Pouliot et al., 2003; Lee et al., 2015). 이 같은 3차원 지질 모델링 기법의 개발은 지질학적 정보들의 수집, 저장, 가공 및 처리, 출력하는 부분에 있어 획기적인 발전을 가져왔다(Wang and Huang, 2012). 본 연구에서 3차원 지질 모델링에 이용된 소프트웨어는 EMERSON사에서 개발한 SKUA-COCAD 2017로서, 지질구조 분석, 층서 분석, 격자모델 분석, 물성 분포 분석, 탄성과 탐사자료 해석 등 다양한 기능을 제공한다(Park et al., 2015).

(1) 모델링 작업 흐름도

본 연구에서의 3차원 지질 모델링은 국내에서 수행된 3차원 지질 모델링 연구(Ahn et al., 2015; Park et al., 2015; Lee et al., 2015)에서 정립된 방법론을 참고하였다. 그 과정은 다음과 같이 ① 모델링 영역 설정, ② 층단위 경계면 설정, ③ 층서 모델링, ④ 격자 모델링, ⑤ 지층 모델링의 순서로 진행되었다(Fig. 3-1).

① 모델링 영역 설정 및 입력자료 전산화: 시추코어 지질검층을 통해 도출된 결과를 바탕으로 3차원 지질 모델링을 수행하기 위해서는 우선적으로 모델링 영역을 설정해야 하며, 해당 영역 안에 포함되는 시추공 기본정보(위치, 표고, 길이)와 지형정보와 같은 모델링 입력자료의 전산화가 이루어져야 한다.

모델링 영역은 연구지역에 분포되어 있는 조사대상 시추공들을 모두 포함할 수 있도록 장방형으로 그 경계를 설정하였으며, 각 끝점에 대한 위치정보를 GRS80 좌표체계로 변환하여 입력하였다(Table 3-11). 영역의 경계는 수평적·수직적 위치정보로 구분되어 입력되는데, 수평적 범위는 동쪽 경계가 183539.2(X좌표)이고, 서쪽은 180781.6(X좌표)으로 이들은 서로 약 3km의 간격을 이루고 있다. 또한 남쪽은 105115.4(Y좌표), 북쪽은 107634.2(Y좌표)의 좌표값을 가지며, 남-북 경계 사이의 거리는 2.5km로 설정되었다. 수직적 범위는 가장 깊게 굴착된 행원4호공(해수면 하 134.5m)을 기준으로 하여 해수면 하 160.0m까지로 지정하였으며, 표고는 범위 안에 지형이 가장 높은 곳까지 반영하기 위해 해발 200.0m로 지정하였다.

모델링 영역에 해당되는 지역의 지표 지형은 수치 지형도를 통해 나타냈다. 수치지형도는 국토교통부 국가공간정보포털에서 제공되는 자료를 사용하였으며, 얻어진 수치지형도는 GRS80 좌표계와 1대25000의 스케일로 설정되어 있다. 아울러 해당 수치지형도가 포함하고 있는 정보들 중 해안선(코드 E0082120), 수심(코드 E0082123), 10m 단위 등고선(코드 F0017111), 100m 단위 등고선(코드 F0017114)을 나타내는 정보들만을 추출하여 모델링에 활용하였다(Fig. 3-3). 시추공 기본정보는 분포되어 있는 지점의 위치, 표고, 시추공 총 길이가 있으며, 위치에 대한 정보는 앞서 설명된 GRS80 좌표체계를 사용하였으며, 나머지 정보들은 m 단위로 입력자료를 생성하였다(Table 3-12). 세부적으로 KIGAM공이 위치한 곳의 좌표는 180935.3(X좌표), 106913.5(Y좌표)이고, 표고는 해발 5.0m, 시추공 길이는

Table 3-11. Location and elevation of stratigraphy modeling domain.

Modeling boundary		
X (GRS80)	Y (GRS80)	Elevation (m)
183539.2	107634.2	200.0
180781.6	105115.4	200.0
180781.6	107634.2	200.0
183539.2	105115.4	200.0
183539.2	107634.2	-160.0
180781.6	105115.4	-160.0
180781.6	107634.2	-160.0
183539.2	105115.4	-160.0

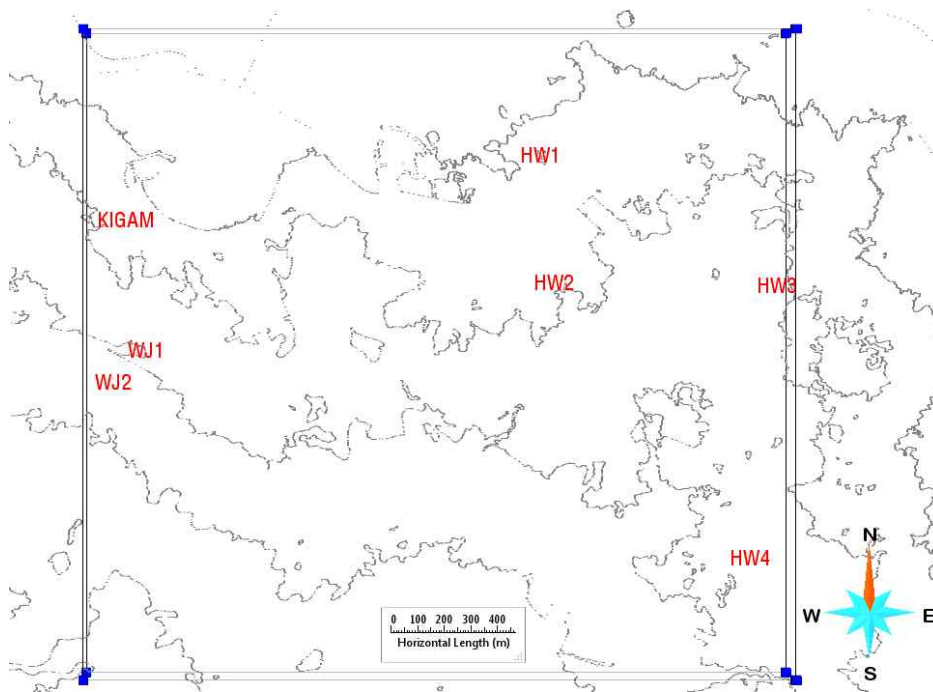


Fig. 3-3. Geological modeling domain with digital topographic map and 7 boreholes shown on the GOCAD software.

Table 3-12. Numerical information on boreholes used in modeling.

Borehole	Elevation (m)	Measured depth (m)	X (GRS80)	Y (GRS80)
HW-1	4.5	130	182554.8	107166.7
HW-2	7.4	115.0	182612.9	106666.5
HW-3	11.8	122.0	183484.8	106653.8
HW-4	15.5	150.0	183378.9	105589.5
WJ-1	19.7	130.0	181009.9	106403.6
WJ-2	25.2	131.0	180889.7	106277.8
KIGAM	5.0	130.5	180935.3	106913.5

130.5m로 설정하였다. 월정1호공의 X좌표는 181009.9, Y좌표는 106403.6으로 확인되었고, 해발 19.7m의 표고와 130.0m의 시추공 길이를 갖는 것으로 나타났다. 월정2호공의 위치는 180889.7(X좌표), 106277.8(Y좌표)로 확인되며, 해발 25.2m의 표고값을 갖는 지점에서 131.0m의 길이로 굴착된 것으로 정보를 입력하였다. 행원1호공은 182554.8(X좌표), 107166.7(Y좌표)의 좌표값을 갖는 지점에 위치하고, 표고는 해발 4.5m, 시추공 길이는 130.0m로 설정하였다. 행원2호공은 X좌표가 182612.9, Y좌표는 106666.5로 그 위치가 확인되었으며, 해발 7.4m의 표고와 115.0m의 길이를 갖는 시추공으로 입력자료를 생성하였다. 행원3호공의 위치는 GRS80 좌표체계에서 183484.8의 X좌표와 106653.8의 Y좌표로 나타나고, 시추공은 11.8m의 해발고도와 122.0m의 길이를 갖도록 정보를 입력하였다. 마지막으로 행원4호공은 X좌표가 183378.9, Y좌표는 105589.5로 위치가 측정되었으며, 표고는 해발 15.5m, 시추공 길이는 150.0m로 시추공 기본정보를 입력하였다.

② 층단위 경계면 설정: 층단위 경계면을 설정하는 것은 지층의 분포를 3차원적으로 가시화하기 위한 기틀을 잡는 단계로서, 본 연구에서는 지질검층을 통해 구분된 암상의 변화가 나타나는 지점을 층단위 경계면으로 설정하였다. 암상에 따라 구분된 층단위는 하부로부터 퇴적암층 I(층단위 A), 유리질 각력암층 I(층단위 B), 용암류층 I(층단위 C), 퇴적암층 II(층단위 D), 유리질 각력암층 II(층단위 E), 용암류층 II(층단위 F)으로 분류하였으며, 고도양의 경우에는 측방으로 대비할 수 있는 근거가 부족하여 층단위에서는 제외하였다. 이와 같이 구분된 층단위들의 경계는 시추공별로 그 심도를 정리하고 생성된 가상 시추공에 입력할 수 있도록 전산화하였다.

③ 층서 모델링: 층서 모델링은 수치지형도와 가상 시추공에 입력된 층단위 경계면 발달 심도를 바탕으로 모델링 영역 전체의 지층 경계면 분포를 예측하는 단계에 해당된다. 이러한 지층 경계면의 분포를 예측하는 방법으로는 공간적으로 이격되어 있는 수치정보 사이를 추정하여 값을 지정하는 보간법(interpolation)이 사용되었다. 특히 기록이 심하고 복잡한 지형을 표현해야 하는 지층 모델링에서는 평면 모델링에서는 보간법 중 불연속 평활 보간법(discrete smooth interpolation)(Mallet et al., 1989)이 이용되어 본 연구에서도 이를 사용하여 모델링을 수행하였다. 또한 일부 시추공들에서만 확인된 지층 경계면들(층단위 B와

층단위 D의 상부 경계면)의 경우에는 국부적인 분포특성을 나타내기 위해 이들 하부에 발달된 층단위 경계면과의 상호관계를 지정해주어야 한다. 층단위 경계면 사이의 상호관계는 탄성과 층서학에서 퇴적시퀀스를 구분할 때 사용되는 반사면의 측면적 종결양상(Vail and Mitchum, 1977)을 구분하여 입력한다. 일반적으로 측면적 종결양상의 유형은 위걸침(onlap), 아래걸침(downlap), 정부걸침(toplap), 등의 랩아웃(lapout)과 침식삭박(erosional truncation)으로 구분되는데(Vail and Mitchum, 1977; Vail, 1987), 본 연구에서는 모두 아래걸침의 종결양상을 갖는 것으로 설정하였다.

④ 격자 모델링: 격자 모델링은 층서 모델링에서 생성된 층단위 경계면들 사이의 공간을 육면체 격자들로 이산(discretization)화하는 단계이다. 모델링 영역 전체를 격자들의 틀로 형성하는 것은 층단위의 공간적인 발달과 분포를 나타냄과 아울러 이들의 두께나 부피에 대한 정량적 평가를 가능케 한다.

⑤ 지층 모델링: 지층 모델링은 앞서 수행된 층서 모델링과 격자 모델링을 통해 형성된 모델들을 중합하여 층단위 분포를 가시화하는 지질 모델링의 최종 단계에 해당된다.

IV. 시추코어 특징

1. 암상 산출 특성

본 연구에서 분석된 7개소의 시추공은 최소 해발 4.5m, 최대 해발 25.2m 지점에 위치하고 있으며(Figs. 1-1, 2-1), 굴착은 지표면 하 106.1~134.5m사이의 심도범위로 이루어졌다. 즉, 시추공들은 115.0~150.0m의 길이로 작성되었으나(Table 3-1), 시추코어 회수율은 65~88% 사이로 확인된다. 따라서 시추코어 암상의 구분과 더불어 이들이 분포되어 있는 심도범위를 정확하게 특정하기 위해서 OTV 검층영상을 함께 활용하여 이를 보완하였다. 시추코어에서 전반적으로 관찰되는 주요 암상은 용암류 화산암, 비화산성 퇴적암, 고토양의 3가지로 구분되며, 이중 용암류는 비각력화 용암류와 각력화 용암류의 암상으로 세분된다.

1) KIGAM공

KIGAM공은 해안에서 150m 떨어진 해발 5.0m 지점에서 해수면 하 125.5m까지 굴착되어 시추공 길이는 총 130.5m에 달한다(Table 3-1). 회수된 시추코어의 총 길이는 약 110m로서, 84% 정도의 시추코어 회수율을 보인다. 시추코어의 암상은 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 비화산성 퇴적암으로 구분되었다. 다만 KIGAM공에서는 OTV 검층이 수행되지 않아 손실 또는 교란된 시추코어에 대해서는 회수된 시추코어에 표기된 심도를 통해 이를 추정하였다. 지표로부터 이들 암상의 수직적 분포상태를 정리하면 다음과 같다(Tables 4-1, 4-2)(Figs. 4-1~4-3).

(1) 지표(해발 5.0m)~해수면 하 43.7m

지표(해발 5.0m)로부터 해수면 하 43.7m까지는 비각력화 용암류가 발달되어 있으며, 시추코어는 길이가 약 48m로서 손실이 거의 없는 양호한 회수율을 보인다. 해당 구간은 파호이호이 용암류 유동단위의 누층으로 이루어져 있으며, 유동단위는 총 26매가 구분된다. 유동단위는 크게 기공분포 특성에 따라 2개의 유형으로

Table 4-1. Vertical distribution of lithology in boreholes. For locations of lithology, see Fig. 4-1.

Borehole	Lithology	Elevation (m)
KIGAM	Non-brecciated lava flow	+5.0 ~ -43.7
	Brecciated lava flow	-43.7 ~ -60.7
	Non-volcanic sedimentary rock	-60.7 ~ -62.6
	Non-brecciated lava flow	-62.6 ~ -93.7
	Non-volcanic sedimentary rock	-93.7 ~ -125.5
WJ-1	Non-brecciated lava flow	+19.7 ~ -41.3
	Brecciated lava flow	-41.3 ~ -60.5
	Non-volcanic sedimentary rock	-60.5 ~ -62.2
	Non-brecciated lava flow	-62.2 ~ -96.9
	Non-volcanic sedimentary rock	-96.9 ~ -110.3
WJ-2	Non-brecciated lava flow	+25.2 ~ -29.0, -30.2 ~ -33.4
	Paleosol	-29.0 ~ -30.2
	Brecciated lava flow	-33.4 ~ -58.6
	Non-brecciated lava flow	-58.6 ~ -95.8
	Non-volcanic sedimentary rock	-95.8 ~ -106.1
HW-1	Non-brecciated lava flow	+4.5 ~ -22.0, -22.1 ~ -41.6
	Paleosol	-22.0 ~ -22.1
	Brecciated lava flow	-41.6 ~ -69.1
	Non-brecciated lava flow	-69.1 ~ -90.5
	Non-volcanic sedimentary rock	-90.5 ~ -125.5
HW-2	Non-brecciated lava flow	+7.4 ~ -13.3, -13.7 ~ -24.5,
		-25.0 ~ -30.7
	Paleosol	-13.3 ~ -13.7
	Paleosol	-24.5 ~ -25.0
	Brecciated lava flow	-30.7 ~ -58.4
	Non-volcanic sedimentary rock	-58.4 ~ -59.0
	Non-brecciated lava flow	-59.0 ~ -90.6
Non-volcanic sedimentary rock	-90.6 ~ -110.0	
HW-3	Non-brecciated lava flow	+11.8 ~ -22.2, -23.2 ~ -31.1,
		-31.4 ~ -33.8
	Paleosol	-22.2 ~ -23.2
	Paleosol	-31.1 ~ -31.4
	Brecciated lava flow	-33.8 ~ -78.4
	Non-volcanic sedimentary rock	-78.4 ~ -82.5
	Non-brecciated lava flow	-82.5 ~ -91.8
	Non-volcanic sedimentary rock	-91.8 ~ -110.2
HW-4	Non-brecciated lava flow	+15.5 ~ -2.7, -3.4 ~ -10.3, -10.5 ~ -32.7
	Paleosol	-2.7 ~ -3.4
	Paleosol	-10.3 ~ -10.5
	Brecciated lava flow	-32.7 ~ -49.5
	Non-brecciated lava flow	-49.5 ~ -77.5
	Brecciated lava flow	-77.5 ~ -134.5

Table 4-2. Information of lava flow units of KIGAM borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-2.

Borehole	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
KIGAM	33 (St)	+4.3	+4.1	0.2
	32 (Pt)	+4.1	+2.1	2.0
	31 (Pt)	+2.1	+0.5	1.6
	30 (Pt)	+0.5	-0.7	1.2
	29 (St)	-0.7	-1.4	0.7
	28 (Pt)	-1.4	-3.3	1.9
	27 (Pt)	-3.3	-6.0	2.7
	26 (Pt)	-6.0	-7.4	1.4
	25 (Pt)	-7.4	-9.7	2.2
	24 (St)	-9.7	-10.5	0.8
	23 (Pt)	-10.5	-13.7	3.2
	22 (Pt)	-13.7	-16.5	2.8
	21 (Pt)	-16.5	-18.0	1.5
	20 (Pt)	-18.0	-20.7	2.6
	19 (St)	-20.7	-21.1	0.5
	18 (Pt)	-21.1	-22.9	1.8
	17 (St)	-22.9	-23.8	0.9
	16 (Pt)	-23.8	-32.1	8.3
	15 (Pt)	-32.1	-35.1	3.0
	14 (Pt)	-35.1	-37.0	1.9
	13 (Pt)	-37.0	-38.0	1.0
	12 (Pt)	-38.0	-39.3	1.3
	11 (Pt)	-39.3	-41.0	1.7
	10 (St)	-41.0	-41.7	0.7
	9 (St)	-41.7	-42.2	0.5
	8 (Pt)	-42.2	-43.7	1.5
	B	-43.7	-60.7	17.0
	N2	-60.7	-62.6	1.9
	7 (Pt)	-62.6	-66.4	3.8
	6 (Pt)	-66.4	-71.1	4.7
	5 (Pt)	-71.1	-75.8	4.8
4 (Pt)	-75.8	-78.1	2.3	
3 (Pt)	-78.1	-79.7	1.6	
2 (Pt)	-79.7	-87.1	7.4	
1 (Pt)	-87.1	-93.7	6.6	
N1	-93.7	-125.5	31.8	

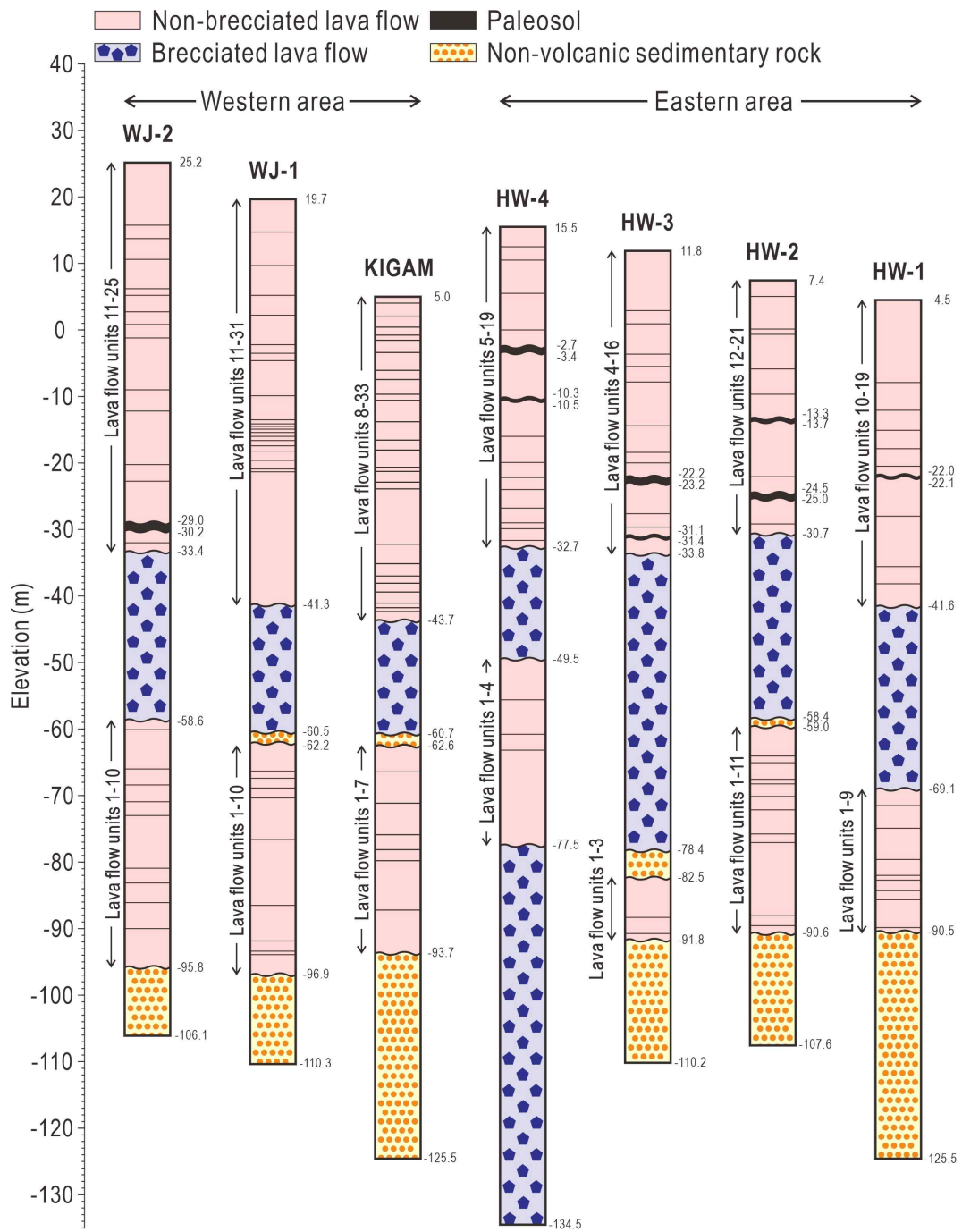


Fig. 4-1. Simplified columnar sections for the boreholes in the study area. For borehole locations, see Fig. 1-1.

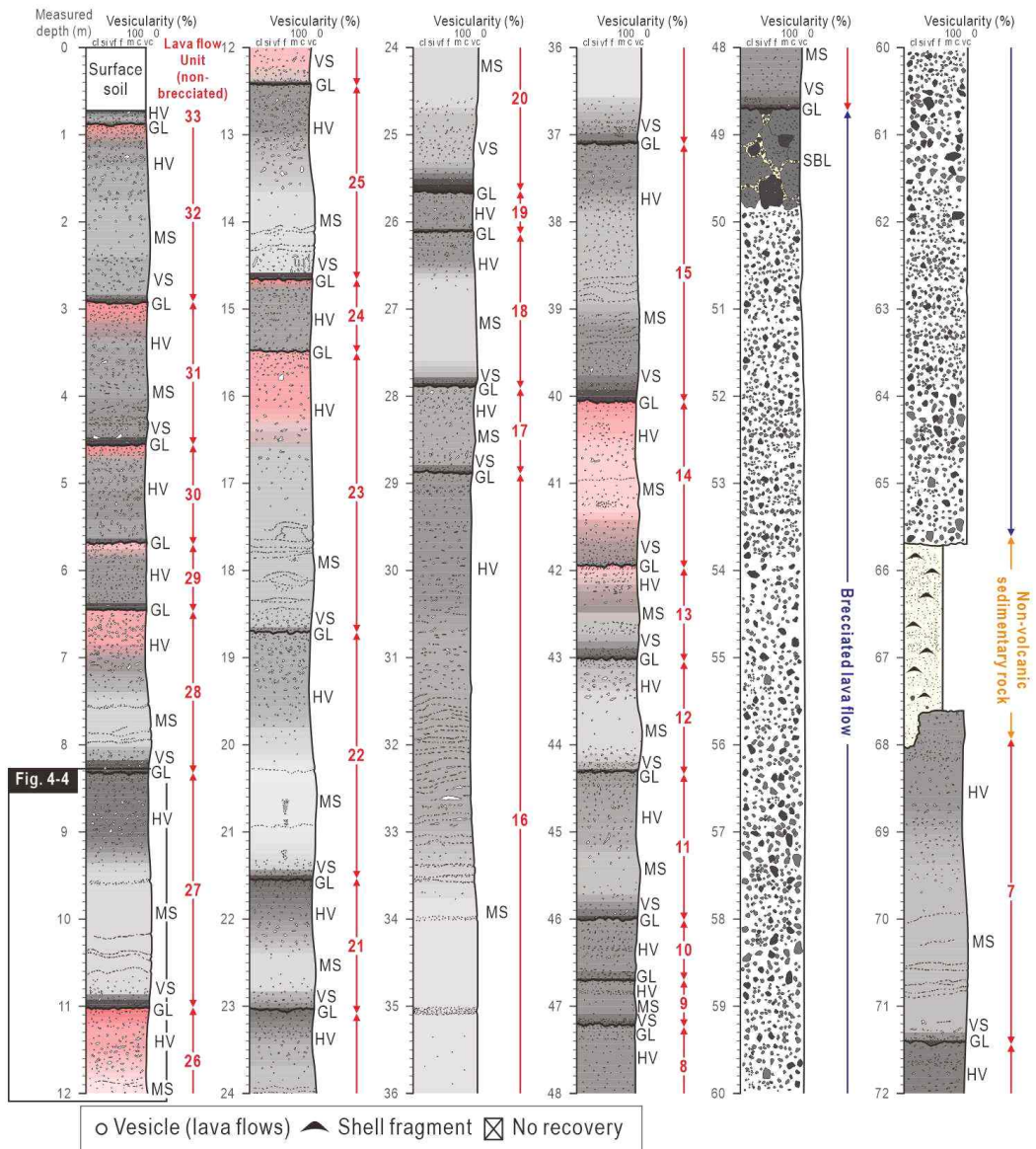


Fig. 4-2. Detailed columnar section (1:20 scale) of KIGAM borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

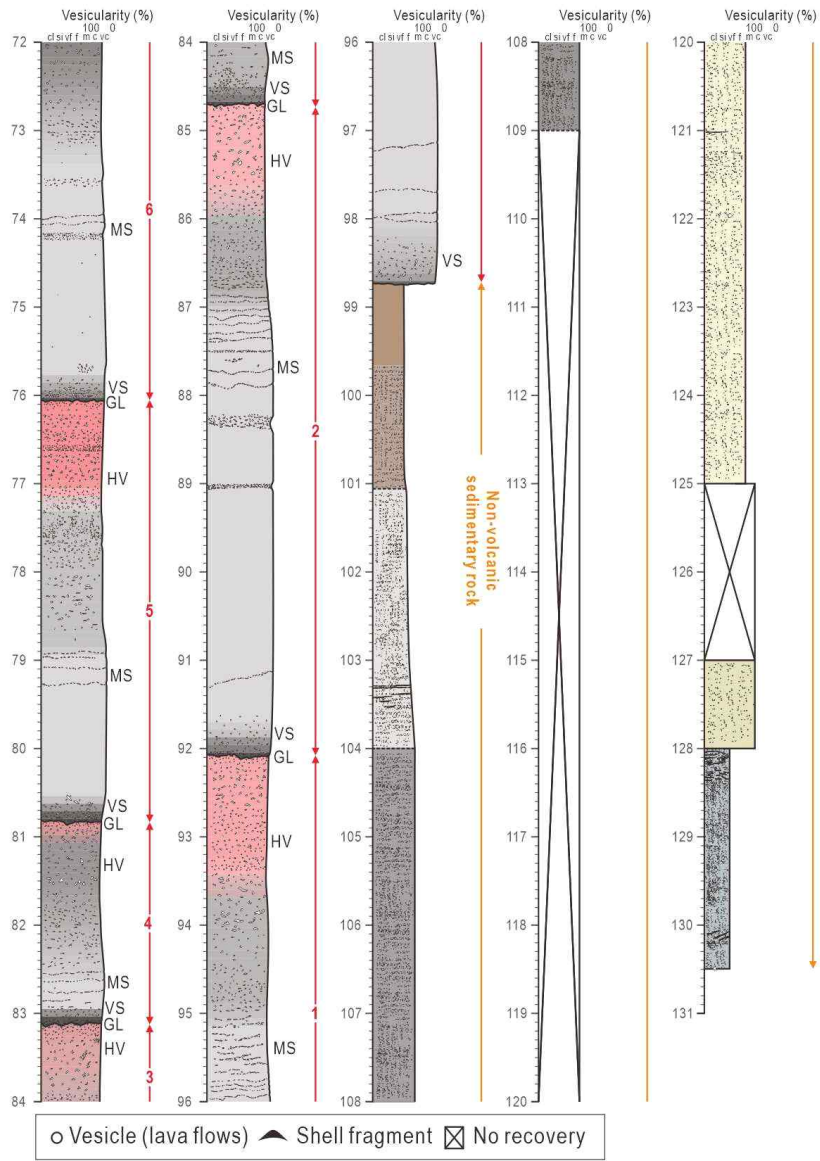


Fig. 4-2. Continued.

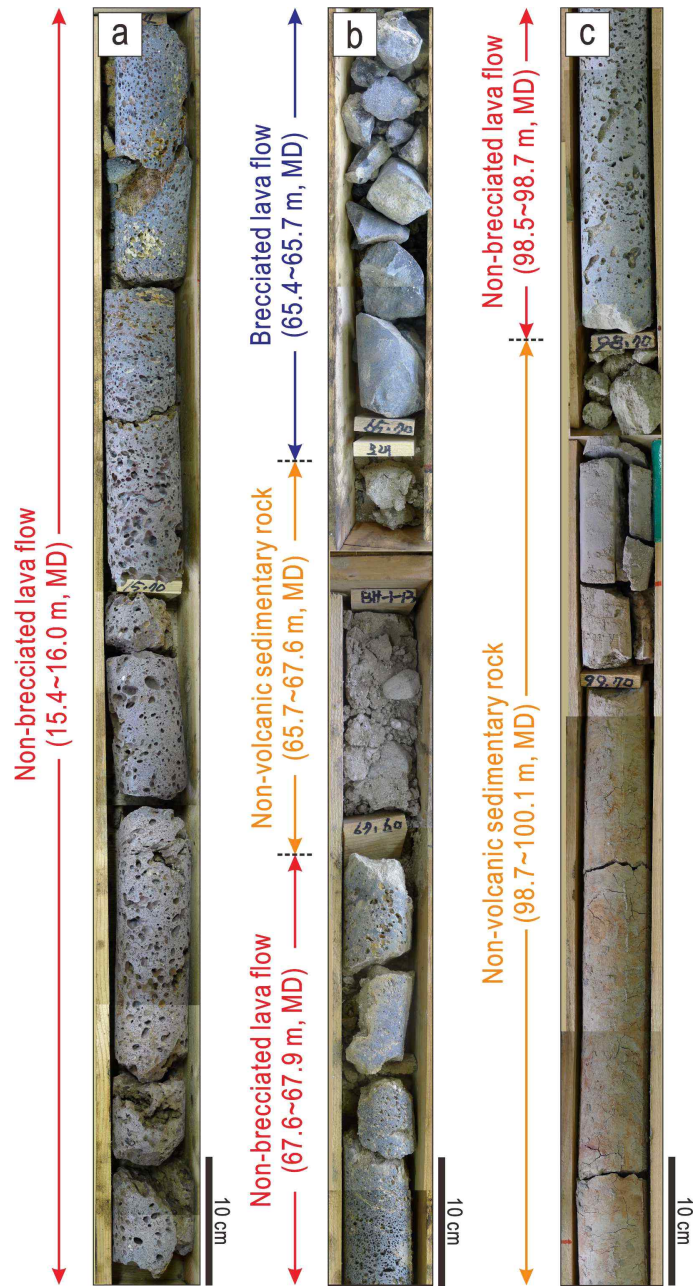


Fig. 4-3. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, and non-volcanic sedimentary rock unit in KIGAM borehole core. For locations, see Fig. 4-2.

구분되는데, 하나는 상부로부터 기공함량이 50% 이상인 고다공질 구간, 15% 이하의 치밀질 구간, 15~50% 사이의 다공질 구간, 10% 이하의 치밀질(또는 유리질) 경계부로 이어지는 기공분포를 보인다(Figs. 4-4, 4-5). 아울러 이 유동단위의 기저에는 파이프형 기공이 발달되어 있어 P형 파호이호이 용암류로 구분된다. 또 다른 유동단위 유형은 구간에 따른 기공분포의 변화가 나타나지 않고 전체적으로 기공함량이 50% 이상의 고다공질의 조직특성을 보인다. 다만 P형 유동단위와 유사하게 유동단위 경계부는 기공함량이 10% 이하로 상당히 치밀한 특징을 보이는데, 이러한 유동단위 유형은 S형 파호이호이 용암류로 분류된다.

비각력화 용암류 유동단위 중 P형의 특징을 보이는 유동단위는 19개로 1.0~8.3m의 두께 범위를 가지며 2.3m의 평균두께를 보인다. 광물조성은 용암류 유동단위 내에서 다소 차이를 보이는데, 대체로 고다공질부와 다공질부에서는 1~2mm 정도의 침상의 장석(acicular feldspar)과 약 1mm 크기의 비정형 감람석(olivine)이 1~10% 사이의 함량을 보인다(Fig. 4-6). 치밀질 조직을 보이는 중부에서도 침상 장석이 동일한 특징으로 나타나지만 여기서는 감람석 대신 휘석이 1mm 미만의 미세결정으로 나타난다. 유동단위의 경계부에는 반정광물이 거의 존재하지 않고 화산유리가 우세하게 발달되어 있으며, 그 두께는 0.1~0.2m 사이로 얇게 나타난다. 이처럼 광물조성은 유동단위 내에서도 발달상태와 분포양상이 상이하지만, 반정은 주로 침상 장석과 감람석으로 확인된다. 이들의 함량은 1~10%로 확인되는데, 이를 Koh et al. (2017a)이 제안한 제주도 화산암 명명 기준에 적용하면 해당 용암류 유동단위는 침상장석감람석현무암(acicular feldspar olivine basalt, AFOB)으로 분류된다. 암색은 고다공질의 상부에서는 회적색(grayish red, 5R 4/2) 또는 회색(medium gray, N5), 다공질의 하부는 회색(medium gray, N5), 치밀질의 중부는 주로 담회색(light gray, N7), 유동단위 경계부에서는 검정색(black, N1)으로 나타난다.

한편, 나머지 7개의 유동단위는 고다공질 조직특성의 S형 파호이호이 용암류로 구분되며, 단위두께는 0.2~0.9m 사이로 나타나고 평균두께는 0.6m로 P형 유동단위에 비해 상대적으로 얇은 두께를 보인다. 광물조성은 1~2mm 크기의 침상 장석과 비정형의 감람석이 10% 미만의 함량을 보이고, P형 유동단위와 같이 침상 장석감람석현무암으로 분류된다. 아울러 암색은 대체로 암회색(med. dark gray, N4)을

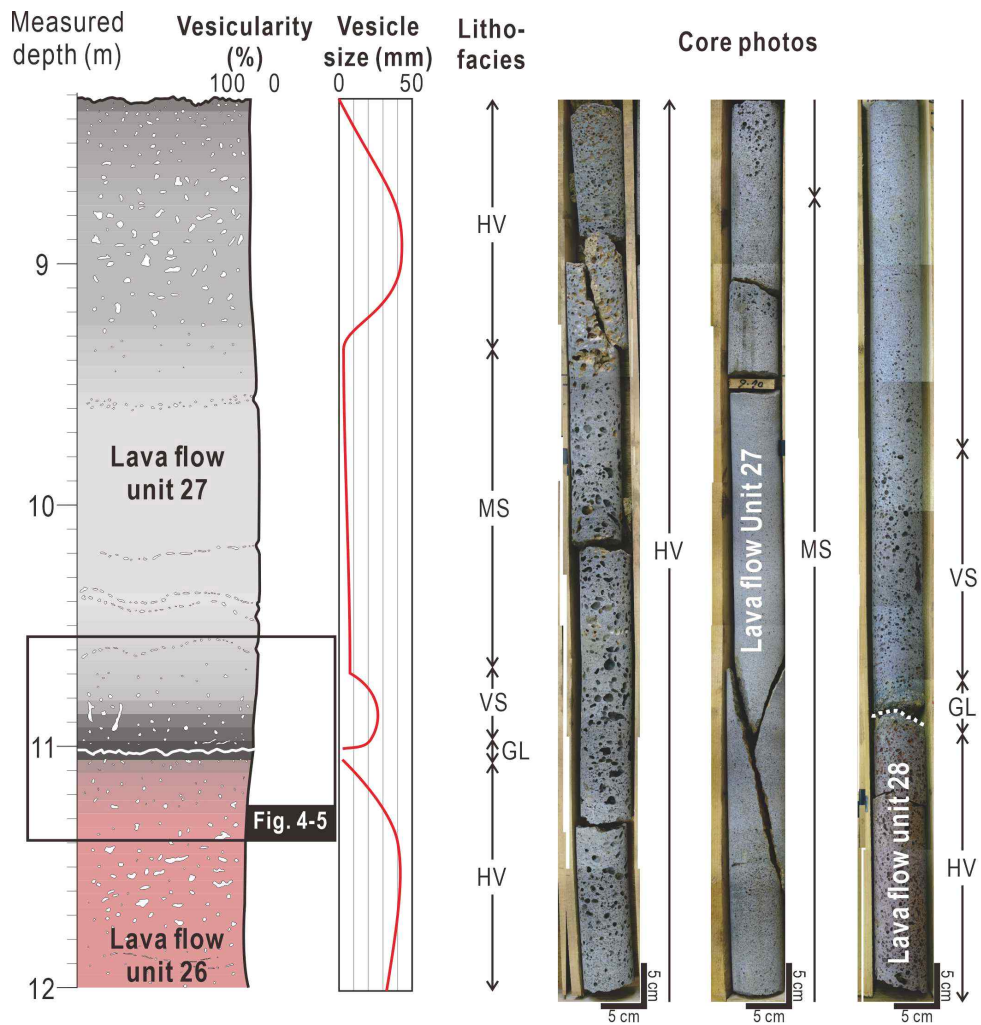


Fig. 4-4. Columnar section and photos of lava flow units 26 and 27 from KIGAM borehole core showing the lithofacies of non-brecciated lava flow depend on vesicles distribution and rock color changes. HV: highly vesicular division, MS: massive division, VS: vesicular division, GL: glassy division. For a location, see Fig. 4-2.

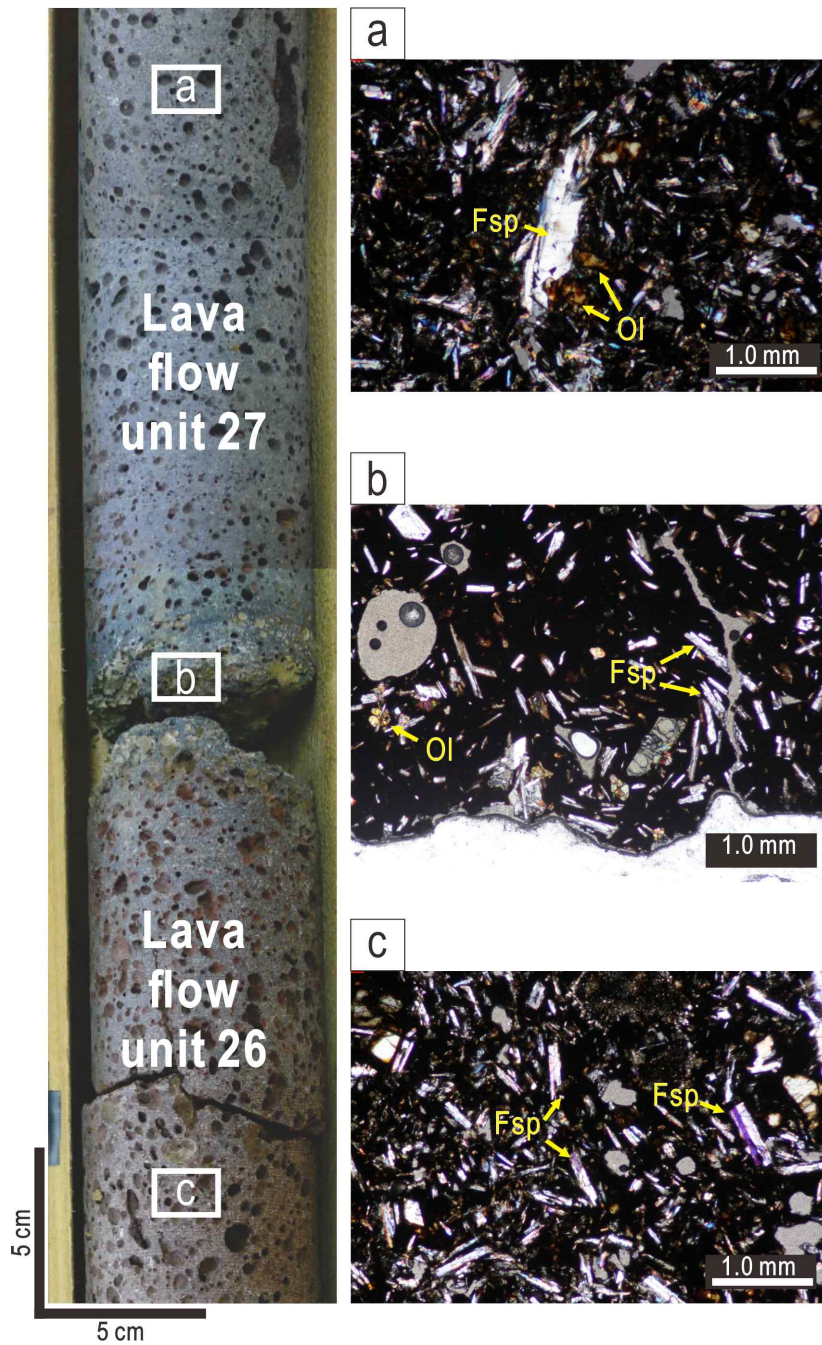


Fig. 4-5. Photos of lava flow units 26 and 27 and their thin-section photomicrographs of unit 26 (a), unit 27 (c), and their boundary under closed nicols (b). The proportion of microcrystalline and/or glassy groundmass gradually increases toward the boundary of lava flow unit. For a location, see Fig. 4-4. Fsp: feldspar, Ol: olivine.

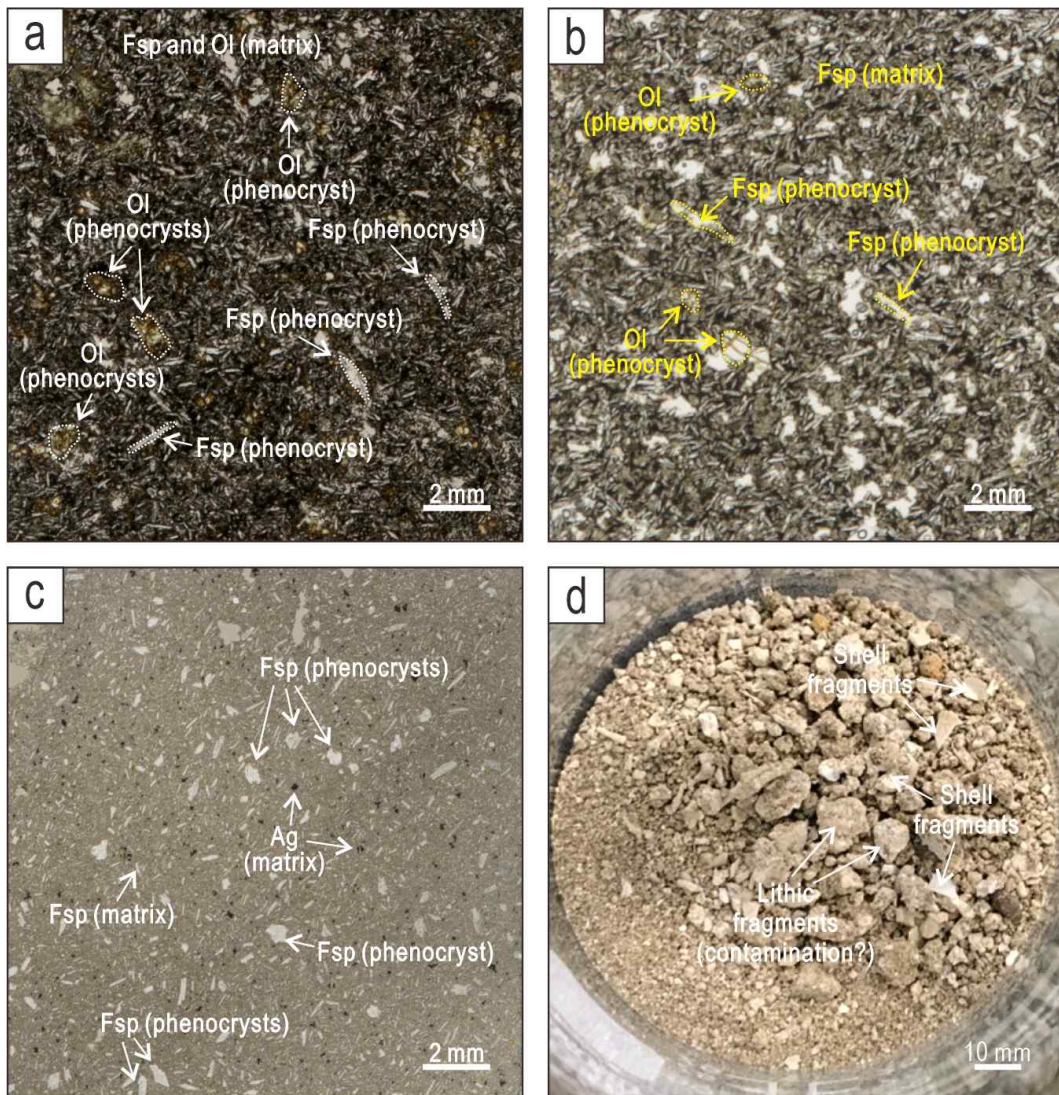


Fig. 4-6. Photos showing the petrographic features of (a) lithofacies HV (highly vesicular division), (b) lithofacies VS (vesicular division), (c) lithofacies MS (massive division), and (d) non-volcanic sedimentary rock which interbedded between lava flows of KIGAM borehole. (a)~(c) are scanned thin-section photos showing lava flow textures. Fsp: feldspar, Ol: olivine, Ag: augite. For scanned thin-section locations, see Table 3-9.

보이지만, 상부 구간에서는 담적색(light red, 5R 6/6) 내지 회적색(grayish red, 5R 4/2)을 띠기도 한다.

(2) 해수면 하 43.7~60.5m

비각력화 용암류 하부에는 수 cm에서 수십 cm 직경을 갖는 분리된 유리질 각력들로 이루어진 각력화 용암류가 약 17m의 두께로 발달되어 있다. 일부 구간에서는 유리질 각력 이외에도 이들을 둘러싸고 있는 오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6) 또는 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)의 점토질 기질부가 확인되며, 유리질 각력의 표면을 피복하는 형태로 나타나기도 한다(Fig. 4-7). 이 물질은 기존 제주도 화산암 연구(Koh et al., 2017b; Koh et al., 2019a)에서 화산유리가 변질되어 만들어진 팔라고나이트로 확인되었다. 유리질 각력의 광물조성은 1~3mm 크기의 침상 장석이 1~10%의 함량범위를 보이며, 나머지는 검정색의 화산유리가 우세하게 발달되어 있다. 이와 같은 조직특성을 기준으로 유리질 각력암은 침상장석현무암으로 분류된다. 또한 각력의 색은 화산유리가 우세하게 발달된 표면에서 암회색(dark gray, N3)에서 회검정색(grayish black, N2)으로 어둡게 나타나지만, 내부로 갈수록 회색(medium gray, N5)까지 밝아지는 색변화를 보인다.

(3) 해수면 하 60.5~62.6m

시추코어 해수면 하 60.5~62.6m 구간에는 비화산성 퇴적암이 나타난다(Fig. 4-8). 퇴적물은 니질사(muddy sand)의 쇄설성 입자들과 함께 다량의 석회질 패각편으로 이루어져 있다(Figs. 4-6, 4-9). 그러나 퇴적구조를 비롯한 조직의 변화는 전 구간이 교란된 상태로 회수되었기 때문에 관찰이 불가하다. 퇴적암의 색깔은 전반적으로 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2) 내지 오렌지색(very pale orange, 10YR 8/2)을 띠고 있다.

(4) 해수면 하 62.6~93.7m

퇴적암 구간의 하부에는 다시 비각력화 용암류가 해수면 하 93.7m까지 나타난다. 이 용암류 구간의 두께는 31.1m로 지표에 위치한 비각력화 용암류에 비해 약 17m 정도가 얇고, 용암류 유동단위 또한 7대로 적은 수로 이루어져 있다. 그러나 단위두께는 1.4~7.4m의 범위로 나타나고 평균 단위두께는 4.4m로 오히려 더 두꺼운 특징을 보인다. 또한 유동단위는 모두 P형 파호이호이 용암류로 분류되며,

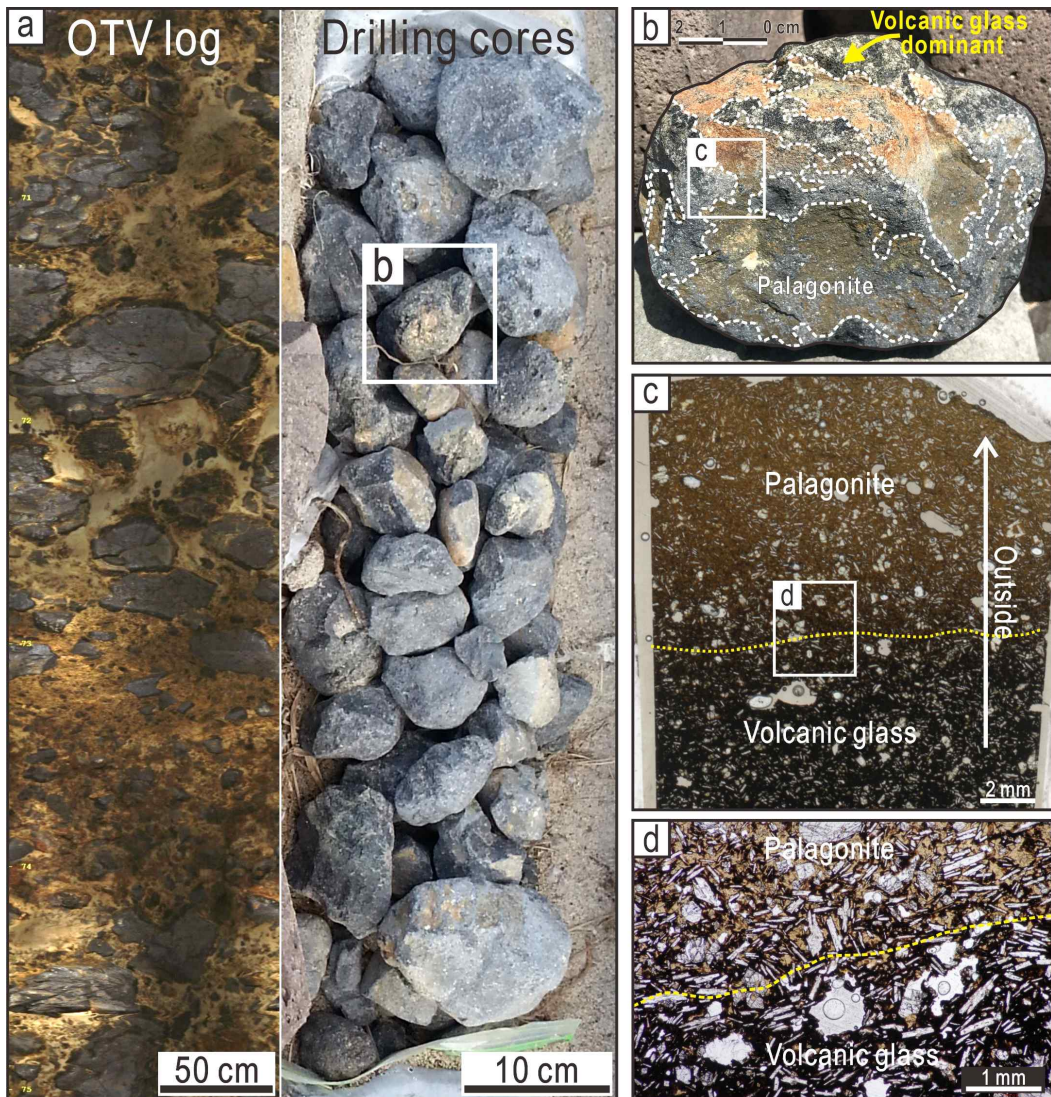


Fig. 4-7. (a) Photos for comparison between OTV (optical televiewer) log and drilling core from the same interval of the brecciated lava flow. (b)~(d) Photos of exterior, scanned thin-section, and microscopic thin-section from a glassy fragment shown in (a).



Fig. 4-8. Photos showing non-volcanic sedimentary rock intervals of borehole core and OTV logs. Triangles indicate sampling points for grain-size analysis.

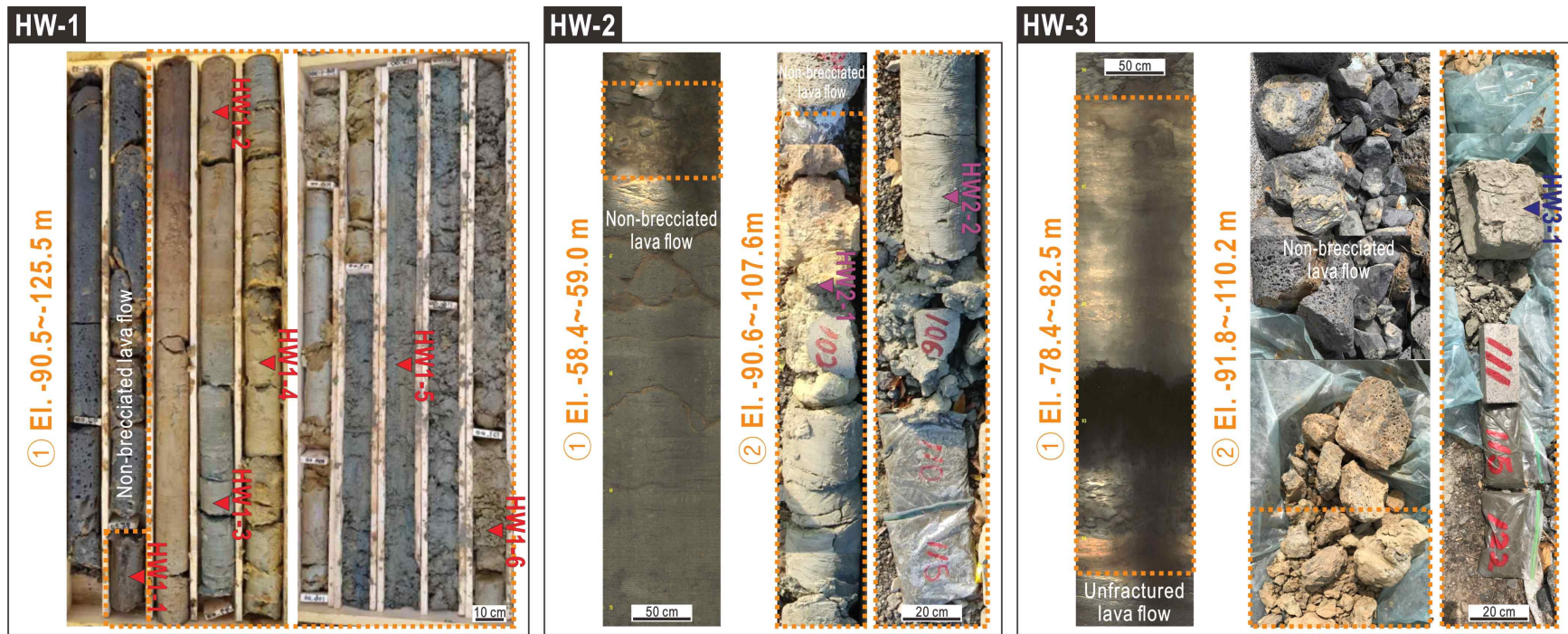


Fig. 4-8. Continued.

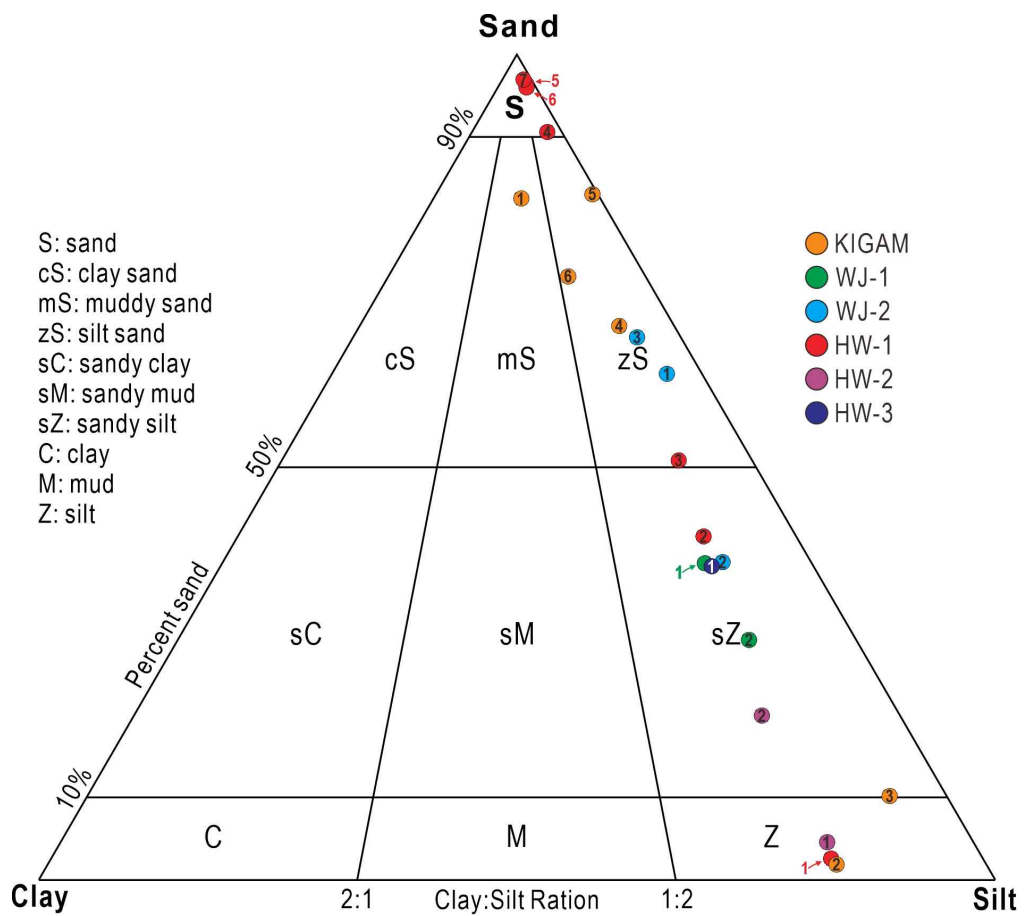


Fig. 4-9. Classification of the non-volcanic sediment rock samples based on grain-size distribution. Triangular diagram is based on Folk (1954).

S형 파호이호이 용암류는 확인되지 않는다. 유동단위의 광물조성은 1~2mm의 침상 장석과 비정형의 감람석 반정이 우세하게 나타나며, 이들은 1~10% 사이의 함량범위를 보인다. 따라서 화산암명은 앞서 기재된 비각력화 용암류와 동일하게 침상장석감람석현무암으로 구분된다. 암색은 회적색(grayish red, 5R 4/2) 또는 회색(medium gray, N5)의 고다공질 상부, 회색(medium gray, N5)의 다공질 하부, 담회색(light gray, N7)의 치밀질 중부, 검정색(black, N1)의 치밀질 경계부로 기공분포에 따라 색을 달리한다.

(5) 해수면 하 93.7~125.5m

비각력화 용암류 직하부에는 비화산성 퇴적암이 시추공 기저까지 존재한다. 구간의 두께가 약 30m에 달하는 것에 비해 시추코어는 약 6m 미만의 길이로 회수되었으며, 상당부분이 교란되어 있다. 구간의 최상부로부터 해수면 하 99.0m 사이의 퇴적암은 수직적으로 연속성이 양호하고, 입도는 하부로 갈수록 실트(silt)-사질 실트(sandy silt)-실트질 사(silty sand)의 순으로 하향 조립화 양상을 보인다(Fig. 4-9). 암색은 최상부 약 1m 정도는 담올리브회색(light olive gray, 5Y 6/1)과 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)이 뒤섞여 나타난다. 그 뒤로는 거의 전 구간이 녹회색(greenish gray, 5GY 6/1)을 띠고 있다.

이후 해수면 하 115.0m까지는 슬라임으로 회수되었으며, 그 아래 해수면 하 115.0~117.0m 사이에는 다시 연속성이 좋은 퇴적암이, 해수면 하 117.0~123.0m 구간은 다시 슬라임, 그 뒤로 시추공 종결심도인 125.5m까지는 0.1m 이하의 길이로 분리된 형태의 퇴적암이 나타난다. 여기서의 퇴적물 입도는 일부 함량 차이는 있으나 모두 실트질 사로 확인되었으며, 일부 구간(해수면 하 115.0~117.0m)에서는 해양기원 패각편이 다량으로 포함된 곳이 나타나기도 한다. 퇴적암의 색상은 위에서 언급된 것과 같이 대부분의 구간이 녹회색(greenish gray, 5GY 6/1)을 띠고 있지만, 패각이 관찰되는 구간에서는 핑크회색(pinkish gray, 5YR 8/1)을 보이기도 한다. 퇴적구조는 전반적으로 괴상으로 나타나지만, 일부 구간에서는 주변과 입도와 색상 차이를 보이는 렌즈형태의 엽층리(lamination) 또는 층리(bedding) 구조가 발달되어 있기도 한다.

2) 월정1호공(WJ-1)

월정1호공은 해안으로부터 약 300m 떨어진 해발 19.7m 지점에 위치하고 있으며, 해수면 하 110.3m까지 시추가 이루어졌으며(Table 3-1), 회수된 시추코어는 약 114m로 87% 정도의 회수율을 보인다. 아울러 OTV 검증영상은 해발 17.7m에서부터 해수면 하 99.9m까지 취득되었다. 시추코어에서 관찰되는 주요 암상은 KIGAM공과 마찬가지로 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 비화산성 퇴적암으로 구분되며(Figs. 4-1, 4-10, 4-11), 이들 암상의 수직적 분포 양상 또한 유사하다(Tables 4-1, 4-3).

(1) 지표(해발 19.7m)~해수면 하 41.3m

시추코어의 상부에는 비각력화 용암류가 61.0m의 두께로 발달되어 있으며, 회수된 시추코어는 그 길이가 60m 가까이 되어 매우 양호한 회수율을 보인다. 해당 용암류 구간은 KIGAM공과 마찬가지로 다수의 유동단위들이 누적되어 있는 모습을 보이며, 그 수는 21개로 구분되었다. 유동단위 중 P형 파호이호이 용암류는 12개로 단위두께는 최소 1.1m, 최대 20.0m, 평균 4.5m로 측정되었다. 유동단위의 광물조성은 고다공질 상부와 다공질 하부에서 1~2mm의 침상 장식과 비정형의 감람석 반정이 1~10% 사이의 함량으로 나타나고, 휘석이 중부 치밀질에 발달되어 있기도 하지만 1mm 이하로 발달되어 있다. 또한 치밀한 유동단위 경계부에는 0.1m 이하의 얇은 두께로 유리질 조직이 발달되어 있는데, 이와 같은 광물조성을 기준으로 P형 파호이호이 용암류는 침상장식감람석현무암으로 분류된다. 암색 또한 기공함량에 따라 색을 달리하며 나타나는데, 고다공질부는 담회색(med. light gray, N6)에서부터 암회색(med. dark gray, N4)과 같이 주로 회색 계열을 띠지만, 일부는 담회갈색(light brownish gray, 5YR 6/1) 내지 회적색(grayish red, 5R 4/2)으로 붉은 색상이 포함되어 나타나기도 한다. 다공질부는 회색(medium gray, N5) 내지 암회색(med. dark gray, N4)을 보이며, 기공이 다소 결핍되어 있고 유리질 조직이 지배적인 유동단위의 경계부는 검정색(black, N1)을 띤다.

S형 파호이호이 용암류는 10개의 유동단위 수를 보이며, 단위두께는 0.4~0.8m 사이로 평균 0.5m의 두께로 P형 파호이호이 용암류 유동단위에 비해 상당히 얇게 나타난다. 광물조성을 살펴보면, 침상 장식과 비정형의 감람석이 1~2mm 사이의 크기로 포함되어 있으며, 이들의 함량은 10% 이하로 화산암명은 침상장식

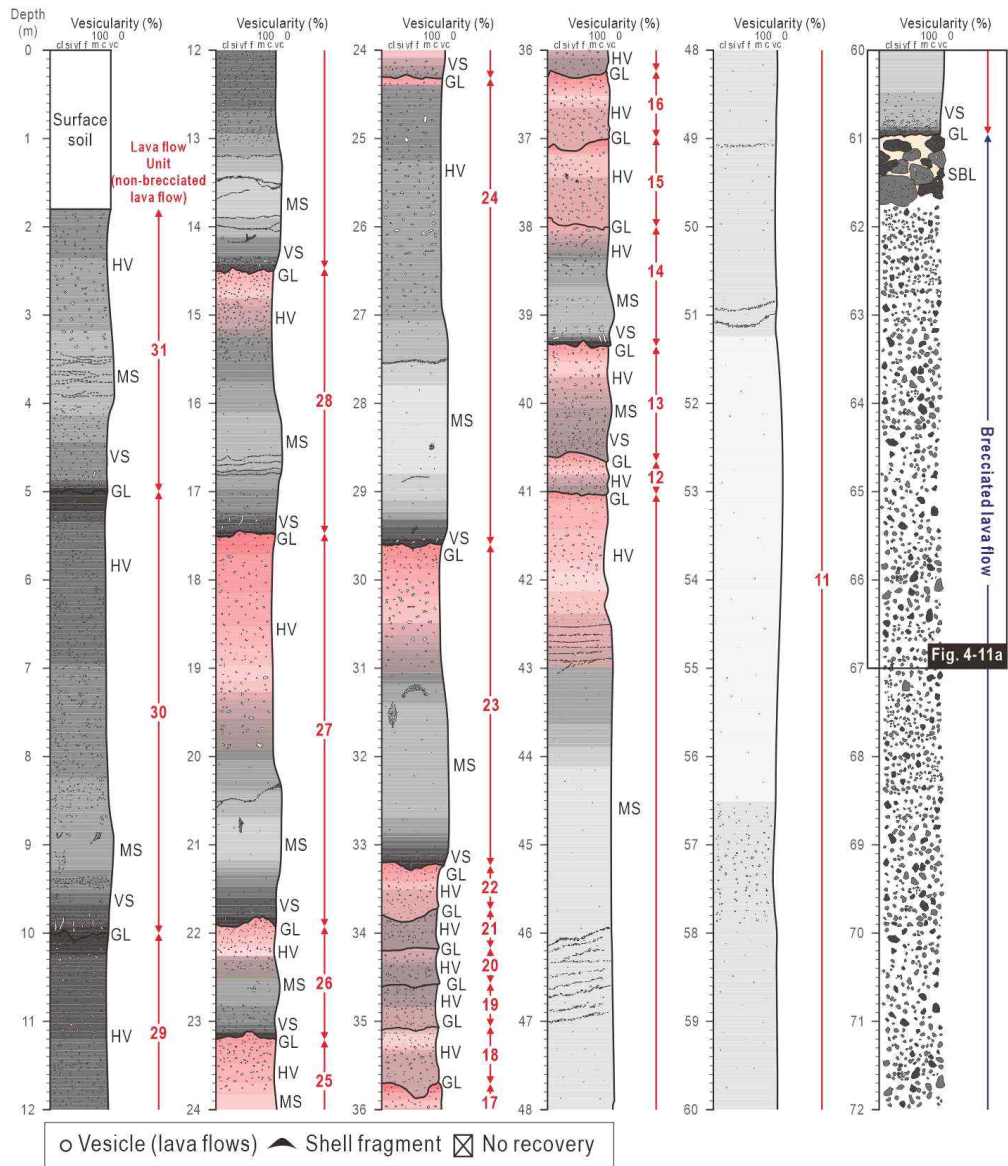


Fig. 4-10. Detailed columnar section (1:20 scale) of WJ-1 borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

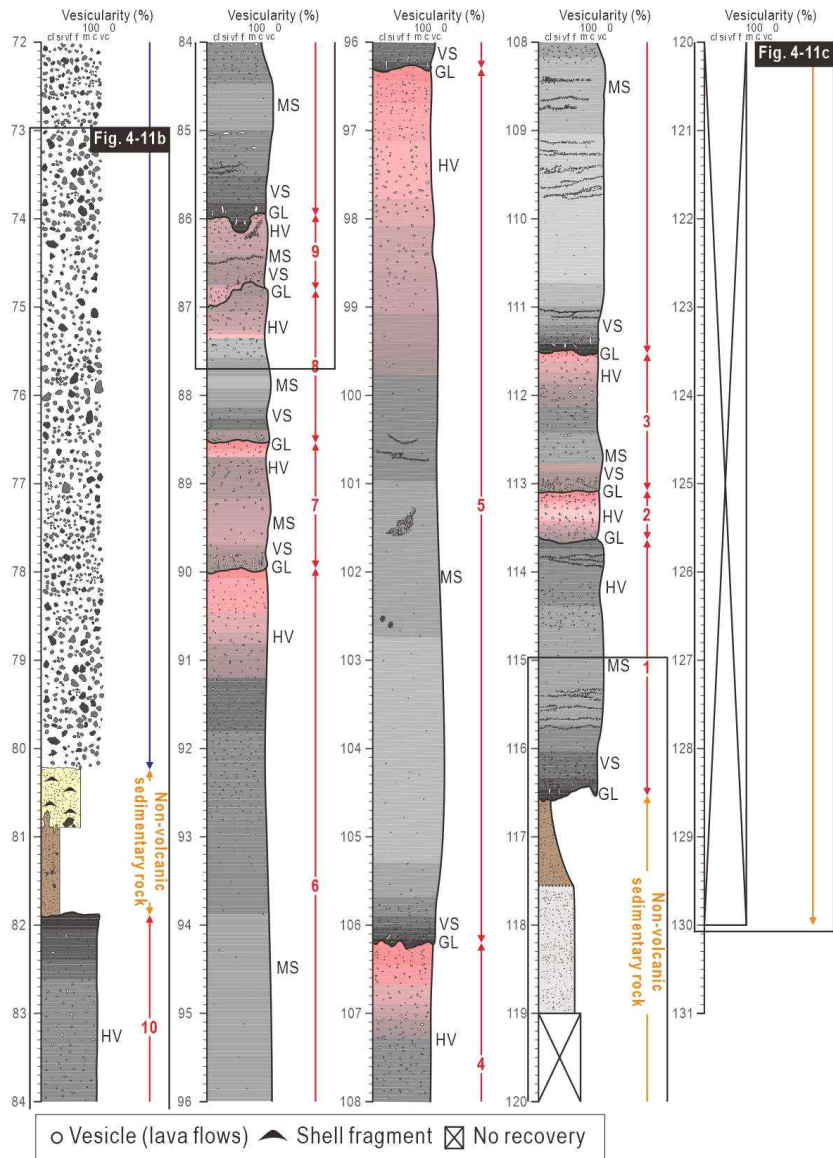


Fig. 4-10. Continued.

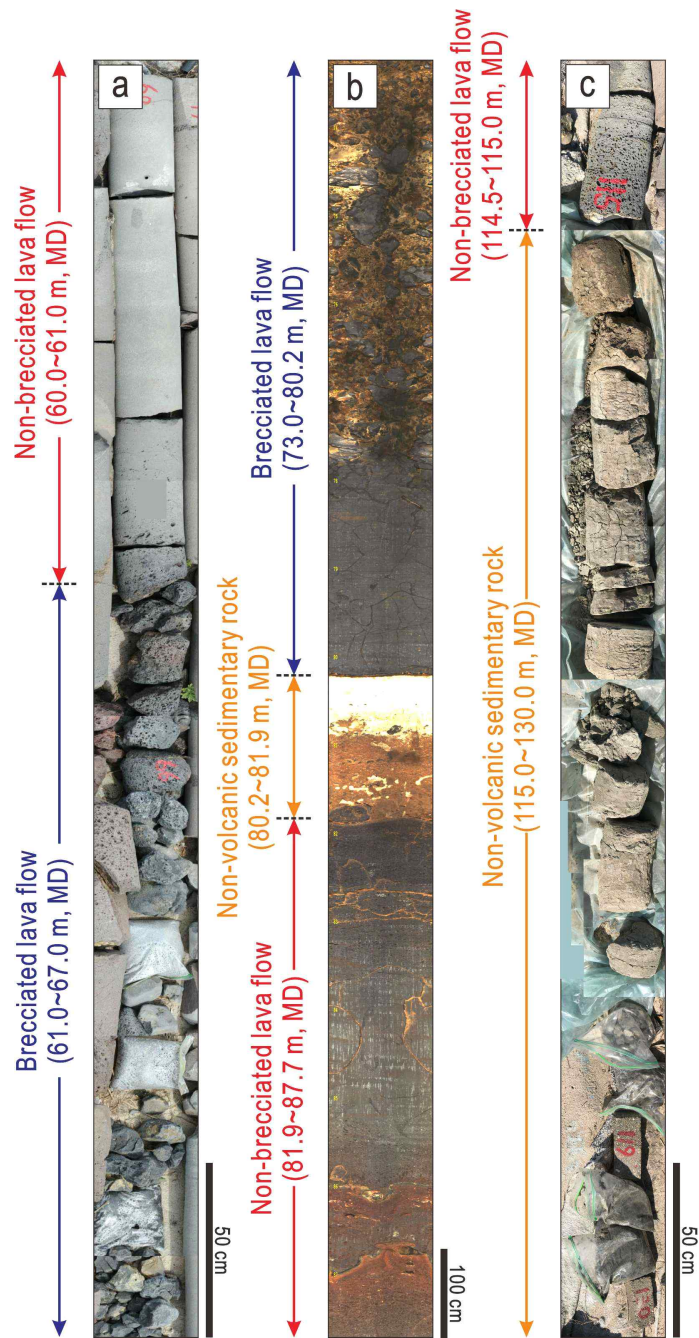


Fig. 4-11. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, and non-volcanic sedimentary rock unit in WJ-1 borehole core. For locations, see Fig. 4-10.

Table 4-3. Information of lava flow units of WJ-1 borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-10.

Borehole	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
WJ-1	31 (Pt)	+17.9	+14.7	3.2
	30 (Pt)	+14.7	+9.7	5.0
	29 (Pt)	+9.7	+5.2	4.5
	28 (Pt)	+5.2	+2.2	3.0
	27 (Pt)	+2.2	-2.2	4.4
	26 (Pt)	-2.2	-3.5	1.3
	25 (Pt)	-3.5	-4.6	1.1
	24 (Pt)	-4.6	-9.9	5.3
	23 (Pt)	-9.9	-13.5	3.6
	22 (St)	-13.5	-14.1	0.6
	21 (St)	-14.1	-14.5	0.4
	20 (St)	-14.5	-14.9	0.4
	19 (St)	-14.9	-15.4	0.5
	18 (St)	-15.4	-16	0.6
	17 (St)	-16	-16.6	0.6
	16 (St)	-16.6	-17.4	0.8
	15 (St)	-17.4	-18.2	0.8
	14 (St)	-18.2	-19.6	1.4
	13 (Pt)	-19.6	-20.9	1.3
	12 (St)	-20.9	-21.3	0.4
	11 (Pt)	-21.3	-41.3	20.0
	B	-41.3	-60.5	19.2
	N2	-60.5	-62.2	1.7
	10 (Pt)	-62.2	-66.3	4.1
	9 (Pt)	-66.3	-67.3	1.0
	8 (Pt)	-67.3	-68.8	1.5
7 (Pt)	-68.8	-70.3	1.5	
6 (Pt)	-70.3	-76.6	6.3	
5 (Pt)	-76.6	-86.5	9.9	
4 (Pt)	-86.5	-91.8	5.3	
3 (Pt)	-91.8	-93.4	1.6	
2 (St)	-93.4	-93.9	0.5	
1 (Pt)	-93.9	-96.9	3.0	
N1	-96.9	-110.3	13.4	

감람석현무암으로 구분된다. 암색은 대체로 암회색(med. dark gray, N4)을 띠지만, 상부에는 황회색(brownish gray, 5YR 4/1) 내지 적색(pale red, 5R 6/2)과 같이 황색과 적색계열의 색을 보이기도 한다.

(2) 해수면 하 41.3~60.5m

비각력화 용암류 구간의 직하부에는 각력화 용암류의 암상을 보이는 구간이 나타나는데, 최대 30cm 정도의 직경을 보이는 다양한 크기의 유리질 각력으로 이루어져 있다. 그러나 OTV 검층영상에서는 유리질 각력뿐만 아니라 최상부에는 상당부분 각력화 내지 파쇄가 진행된 용암류가 3m 가량의 두께로 발달되어 있고, 그 하부에는 유리질 각력을 비롯한 기질이 발달되어 있는 모습이 관찰된다. 부분적으로 각력화되어 있는 용암류는 전 구간이 기공함량 50% 이상인 S형 파호이호이 용암류로 구분된다. 다만 시추코어로는 회수되지 않아 광물조성은 알 수 없으나, 암색은 암회색(dark gray, N3) 또는 회검정색(grayish black, N2)으로 상부에 발달된 비각력화 용암류에 비해서는 어두운 색상을 띠며, 유리질 각력과 비슷하다. 유리질 각력은 KIGAM공에서 관찰된 것과 같이 침상의 장석이 3mm 정도의 크기로 나타나고, 나머지는 화산유리 또는 육안 관찰이 불가능한 미세결정으로 구성되어 있다. 이때 침상 장석의 함량이 1~10% 사이로 나타나 유리질 각력은 침상장석현무암으로 구분된다. 또한 각력의 표면은 회검정색(grayish black, N2)으로 어두운 색깔을 보이지만 내부로 갈수록 서서히 밝아져 담회색(med. light gray, N6)까지도 나타난다. 유리질 각력들을 감싸고 있는 기질부는 황오렌지색(pale yellowish orange, 10YR 8/6) 또는 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6)을 띠는 팔라고나이트를 바탕으로 cm 이하의 미세한 검정색의 화산유리 파편이 무수히 많이 포함되어 있는 모습을 보인다.

(3) 해수면 하 60.5~62.5m

각력화 용암류 직하부에는 비화산성 퇴적암이 2.0m의 두께로 발달되어 있는데 (Fig. 4-8), 시추코어로는 회수가 이루어지지 않아 OTV 검층영상을 통해 그 특징을 기재하였다. 해당 구간은 구성물질과 색상에 따라 크게 상부(해수면 하 60.5~61.1m)와 하부(해수면 하 61.1~62.5m)로 나눌 수 있으며, 그 경계는 다소 기복을 보이거나 육안상으로 구분이 가능할 만큼 뚜렷하다. 상부는 주로 사질의 쇄설성 입자들과 탄산염 물질들로 구성되어 있으며, 다양한 형태와 1~10cm 사이

의 크기를 갖는 소수의 암편들이 이들 사이에 산발적으로 분포되어 있다. 전반적인 색상은 오렌지색(very pale orange, 10YR 8/2)을 띠고 있으나, 탄산염 물질은 흰색(white, N9)으로 나타난다. 그리고 암편들은 회검정색(grayish black, N2) 내지 검정색(black, N1)을 띤다. 퇴적구조는 자료 해상도의 한계로 인해, 상세한 관찰이 곤란하지만 대체로 괴상의 특징을 보인다. 하부 퇴적암에서는 상부에 비해 입도가 줄어든 니질의 쇄설성 입자가 우세하며, 그 안에 탄산염 물질들이 불규칙한 형태로 발달되어 있다. 여기서도 암편들은 소수로 확인되며, 용암류와의 경계에는 암괴 크기까지도 나타난다. 색깔은 니질 입자들이 갈색(moderate brown, 5YR 3/4)을 보이고 있으며, 탄산염 물질들과 암편은 상부와 마찬가지로 각각 흰색(white, N9)과 회검정색(grayish black, N2)을 띠고 있다.

(4) 해수면 하 62.5~96.9m

퇴적암 구간의 하부에는 다시 비각력화 용암류가 나타나며, 상부에 놓인 퇴적암과는 매우 뚜렷한 경계를 이루고 있다. 회수된 시추코어는 30m 정도의 길이를 갖는 것으로 측정되어 회수율은 상당히 양호하다. 해당 구간은 총 10매의 유동단위가 누층을 이루고 있으며, 이는 앞서 기술된 비각력화 용암류 구간에서 구분된 유동단위 수의 절반에 못 미치는 현저히 적은 특징을 보인다. 그러나 유동단위의 평균두께는 3.5m(0.5~9.9m의 단위두께 범위)로 오히려 더 두껍게 발달되어 있다. 유동단위 중 S형 파호이호이 용암류는 1매가 나타나며 0.5m의 두께를 보이며, 나머지는 9매는 P형으로 단위두께는 1.0~9.9m 범위로 평균두께는 3.8m로 나타난다. 광물조성은 P형과 S형 모두 침상의 장석과 비정형의 감람석이 1~2mm 사이의 크기로 발달되어 있으며, 이들은 1~10%의 함량을 보여 침상장석감람석현무암으로 구분된다. 또한 암색은 전반적으로 담회색(med. light gray, N6)에서 암회색(med. dark gray, N4)까지로 나타나나, 유동단위의 상부에는 적갈색(moderate reddish brown, 10YR 4/6, pale reddish brown, 10R 5/4)을 띠는 구간 또한 상당 부분 나타난다.

(5) 해수면 하 96.9~110.3m

비각력화 용암류 이후 시추종료 심도까지는 비화산성 퇴적암이 약 13m의 두께로 발달되어 있다. 이에 반해 시추코어는 2m 정도만이 회수되었으며, 그 형태는 0.3m 이하의 길이로 분리되어 나타나 연속성이 매우 낮다. 뿐만 아니라 해수면

하 99.3m에서부터 시추종료 심도까지는 슬라임으로 회수가 이루어졌다. 퇴적물의 입도는 전 구간이 사질 실트(sandy silt)의 입자들로 구성되어 있는 것으로 분석되었으며(Figs. 4-8, 4-9), 하부로 갈수록 모래의 함량이 약간 증가하는 경향이 확인된다. 암색은 구간의 상부에서는 KIGAM공과 유사하게 담올리브회색(light olive gray, 5Y 6/1)과 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)이 복잡하게 섞여 있으나, 황갈색 부분이 차지하는 비율이 다소 큰 것으로 보인다. 그 뒤에 나머지 구간들은 올리브회색(olive gray, 5Y 3/2) 내지 담올리브회색(light olive gray, 5Y 6/1)을 띠고 있다. 퇴적구조는 구간의 중부에서는 생교란 구조 또는 나무줄기 화석과 같은 선형의 구조가 관찰되고, 두께가 상이(1~2mm)한 엽층리들이 교호하는 양상을 보이기도 하지만, 전반적으로는 괴상의 퇴적구조를 보인다.

3) 월정2호공(WJ-2)

월정2호공은 해안에서 700m 정도 떨어진 해발 25.2m에서 해수면 하 106.1m까지 총131.3m 굴착되었으며(Table 3-1)(Fig. 4-1), 회수된 시추코어는 약 101m로 77%의 회수율을 보인다. OTV 검층은 해발 23.2m에서부터 해수면 하 94.2m까지 수행되어 영상자료가 취득되었다. 시추코어 지질검층을 통해 구분된 주요 암상은 상기 시추공들과 큰 차이가 없지만, 고토양 암상이 추가로 확인된다(Tables 4-1, 4-4)(Figs. 4-12, 4-13).

(1) 지표(해발 25.2m)~해수면 하 33.4m

다른 시추공들에서 관찰된 것과 같이 시추코어 상부에는 비각력화 용암류 암상이 나타나지만 구간의 하부에는 고토양이 약 1m 정도의 두께로 협재되어 있다. 고토양은 시추코어로 회수되지 않았으며, 용암류는 약 56m가 회수되어 매우 높은 회수율을 보인다. 이 용암류 구간은 15매의 유동단위로 이루어져 있으며, 단위두께는 1.0~9.0m, 평균두께는 3.8m를 보인다. 이중 S형 파호이호이 용암류는 1.0m의 두께를 갖는 1매의 유동단위에서만 관찰되고 나머지는 모두 P형의 특징을 보인다. P형 파호이호이 용암류 유동단위는 1.4~9.0m의 두께범위를 가지며 평균두께는 4.0m이다. P형 그리고 S형 파호이호이 용암류 유동단위의 광물조성은 다른 시추공들과 마찬가지로 1~2mm 크기의 침상 장식과 감람석 반정이 10% 이내의 함량을 보여, 침상장식감람석현무암으로 분류된다. 암석의 색은 일부

Table 4-4. Information of lava flow units of WJ-2 borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-12.

Borehole	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
WJ-2	25 (Pt)	+24.7	+15.7	9.0
	24 (Pt)	+15.7	+13.7	2.0
	23 (Pt)	+13.7	+10.6	3.1
	22 (Pt)	+10.6	+6.2	4.4
	21 (St)	+6.2	+5.2	1.0
	20 (Pt)	+5.2	+2.7	2.5
	19 (Pt)	+2.7	+0.8	1.9
	18 (Pt)	+0.8	-1.2	2.0
	17 (Pt)	-1.2	-9.0	7.8
	16 (Pt)	-9.0	-12.2	3.2
	15 (Pt)	-12.2	-20.2	8.0
	14 (Pt)	-20.2	-22.7	2.5
	13 (Pt)	-22.7	-29.0	6.3
	P	-29.0	-30.2	1.2
	12 (Pt)	-30.2	-32.0	1.8
	11 (Pt)	-32.0	-33.4	1.4
	B	-33.4	-58.6	25.2
	10 (Pt)	-58.6	-60.1	1.5
	9 (Pt)	-60.1	-66.0	5.9
	8 (Pt)	-66.0	-68.4	2.4
	7 (Pt)	-68.4	-70.9	2.5
	6 (Pt)	-70.9	-73.0	2.1
	5 (Pt)	-73.0	-80.9	7.9
	4 (Pt)	-80.9	-83.2	2.3
	3 (Pt)	-83.2	-86.1	2.9
2 (Pt)	-86.1	-90.0	3.9	
1 (Pt)	-90.0	-95.8	5.8	
N	-95.8	-106.1	10.3	

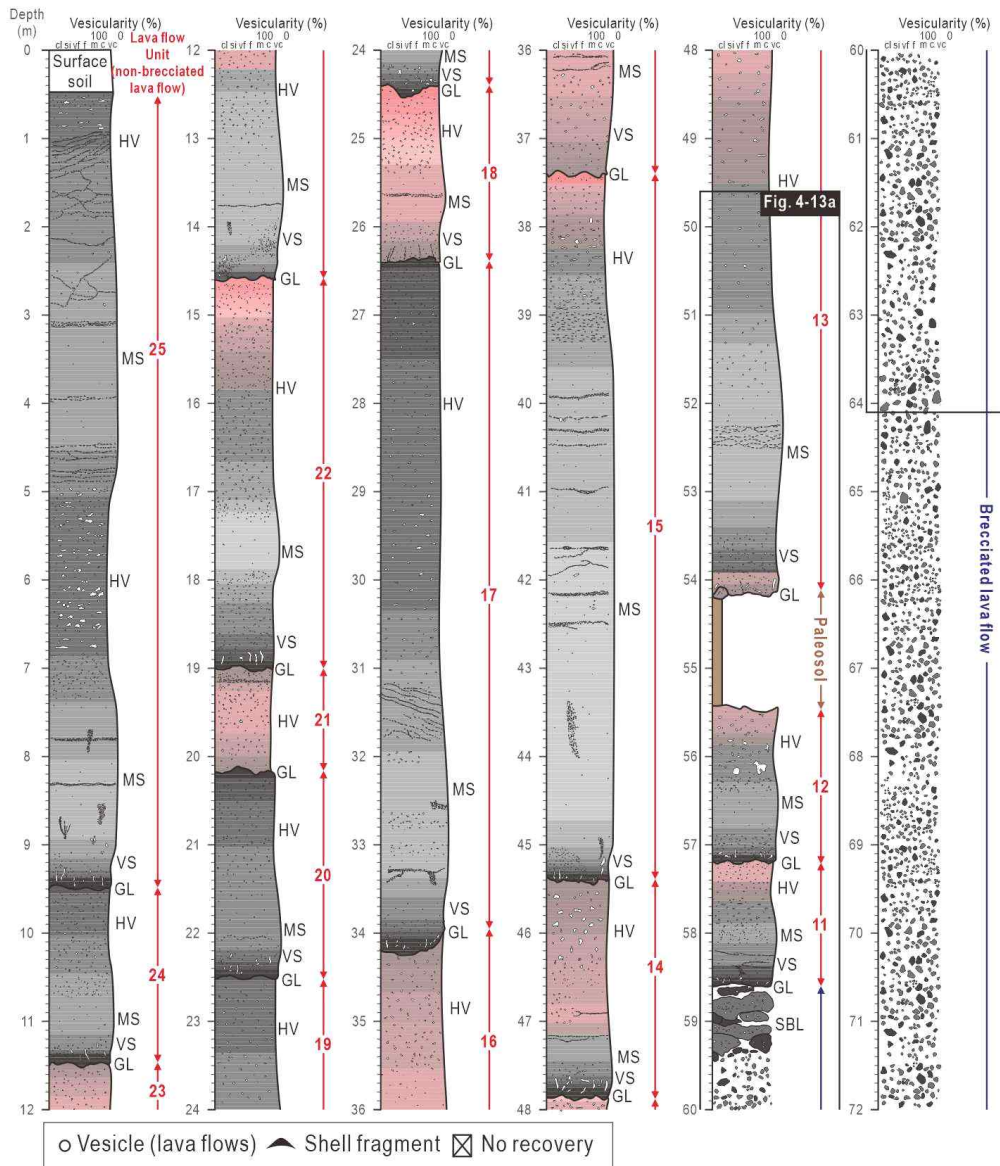


Fig. 4-12. Detailed columnar section (1:20 scale) of WJ-2 borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

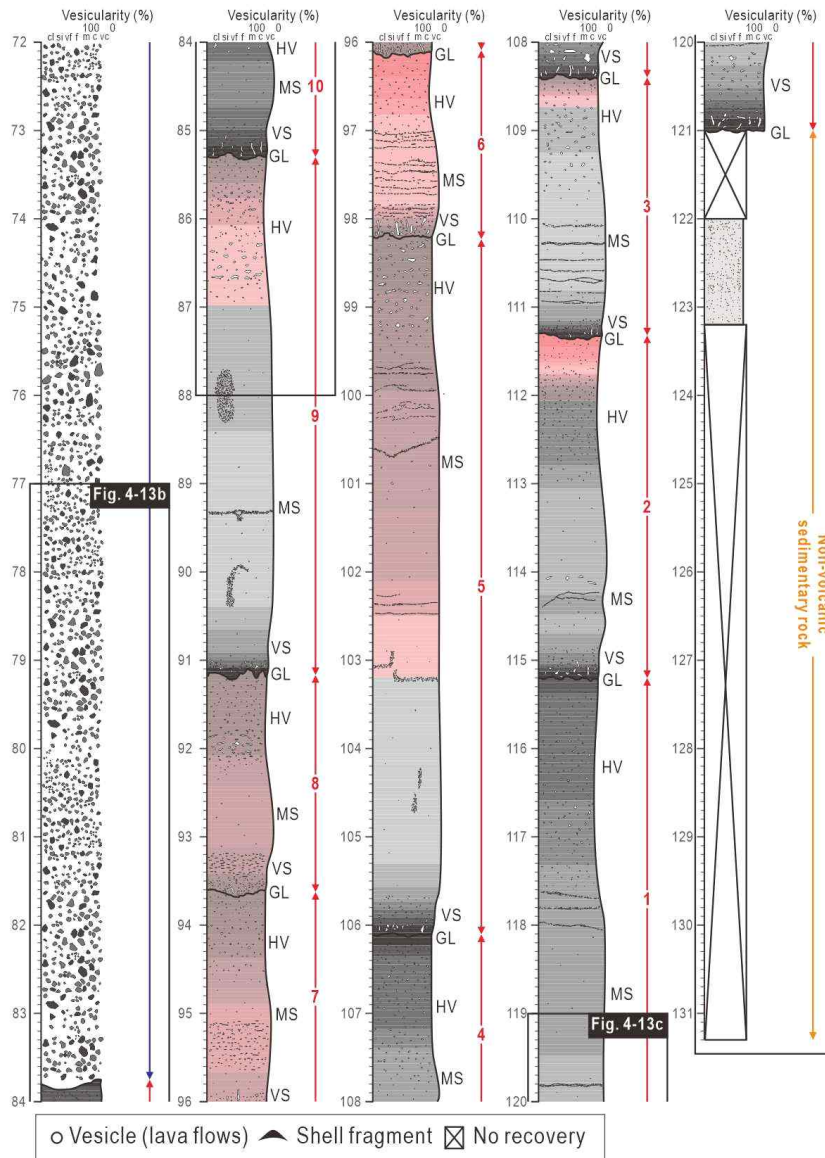


Fig. 4-12. Continued.

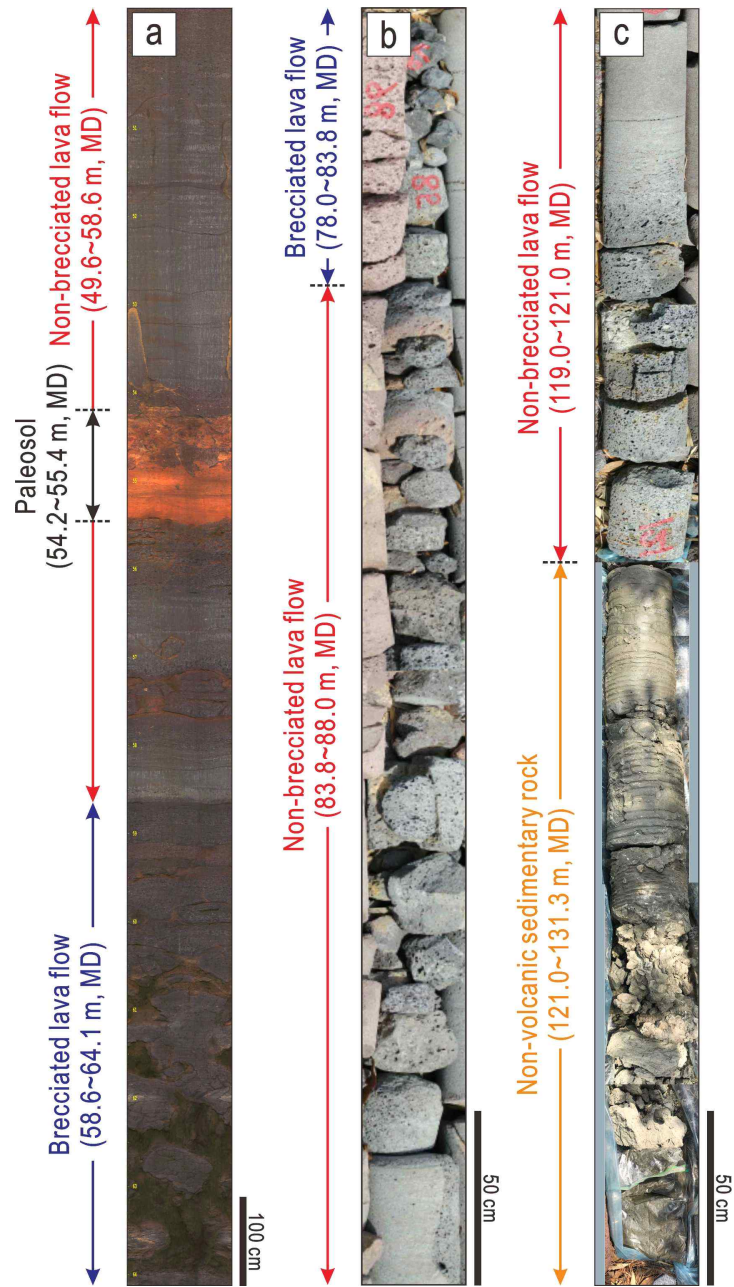


Fig. 4-13. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, non-volcanic sedimentary rock unit, and paleosol in WJ-2 borehole core.

구간에서 암회색(med. dark gray, N4)을 보이긴 하지만 대부분은 담회색(med. light gray, N6)으로 밝게 나타난다. 아울러 유동단위의 상부는 적색(moderate red, 5R 4/6)에서 담적색(light red, 5R 6/6)을 띠기도 한다.

용암류 구간 하부(해수면 하 29.0~30.2m)에 협재되어 있는 고토양은 대체로 육안상 식별 가능한 입자성 물질은 나타나지 않으며, 갈색(moderate brown, 5YR 4/4)의 점토가 주를 이루는 것으로 보인다. 하부에 발달된 용암류 구간과의 경계에서는 예리한 접촉면을 이루고 있는 반면, 상부에서는 크고 작은 용암류 파편들이 혼합되어 있는 페퍼라이트(peperite)와 같은 암상이 나타난다.

(2) 해수면 하 33.4~58.6m

비각력화 용암류 뒤로는 각력화 용암류가 발달되어 있다. 이 구간은 시추코어 상에서 최대 30cm 크기를 보이는 유리질 각력으로만 이루어져 있으나, OTV 검층영상에서는 월정1호공과 마찬가지로 반각력화 S형 파호이호이 또는 P형 파호이호이 용암류가 상부에 5m 정도의 두께로 발달해 있다. 또한 유리질 각력은 10cm 이하로 잘게 부스러진 형태로도 나타나며, 이들은 상대적으로 큰 유리질 각력주변을 고밀도로 채우고 있다. 그러나 월정1호공과는 달리 점토크기의 세립질 물질로 이루어진 기질부는 관찰되지 않는다. 시추코어에서 관찰된 유리질 각력암의 광물조성은 대체로 1~3mm 크기의 침상 장석이 10% 이하로 포함되어 있으며, 그 외에는 유리질 조각을 보이고 있어 화산암명은 침상장석현무암으로 구분된다. 또한 일부 각력의 표면에는 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6) 내지 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)의 팔라고나이트가 얇게 피복되어 있기도 한다. 암석의 색상은 반각력화 용암류와 유리질 각력암이 비슷하게 나타나는데 대체로 암회색(dark gray, N3), 회검정색(grayish black, N2)과 같이 매우 어두운 색을 보인다.

(3) 해수면 하 58.6~95.8m

각력화 용암류 구간 이후에는 다시 비각력화 용암류가 약 37m의 두께로 발달되어 있다. 회수된 시추코어 길이는 26m 정도로 측정되어 10m 가까이 되는 손실이 나타났다. 이 구간은 총 10매의 용암류 유동단위가 구분되며 세부적으로는 모두 P형 파호이호이 용암류에 해당된다. 유동단위의 두께는 1.5~7.9m의 범위를 보이며, 평균 단위두께는 3.7m로 지표에 발달되어 있는 각력화 용암류 구간의 평

균 유동단위 두께와 큰 차이를 보이지 않는다. 용암류의 광물조성은 기공이 결핍된 치밀질 구간에서 휘석이 관찰되기는 하지만, 1mm 이하의 미세결정에 해당되며, 전반적으로는 1~2mm의 침상 장석과 감람석이 반정으로 나타난다. 반정이 차지하는 비율은 1~10% 사이로 해당 구간의 용암류 또한 침상장석감람석현무암으로 구분된다. 암색은 회색(medium gray, N5)과 담회색(med. light gray, N6)이 주로 나타나는데, 고다공질부와 다공질부에서는 치밀질부보다 다소 짙은 색을 띠고 있다. 또한 담갈색(light brown, 5YR 5/6) 또는 적갈색(moderate reddish brown, 10R 4/6)이 고다공질이 발달된 유동단위의 상부에서 나타나기도 한다.

(4) 해수면 하 95.8~106.1m

시추공 최하부에는 비화산성 퇴적암 구간이 약 20m의 두께로 발달해 있으며, 회수된 시추코어는 2m 내외의 길이를 갖는다(Fig. 4-8). 최상부 경계면으로부터 해수면 하 94.6m 사이에서 회수된 시추코어는 서로 다른 크기로 분리되어 나타나고, 약간 부스러져 교란된 상태를 보이기도 한다. 그 다음으로 94.6~98.6m 구간에서는 어느 정도 연속성이 양호한 시추코어가 관찰되고, 이 후 시추공 최하부면까지는 슬라임으로 회수되었다. 해당 퇴적암은 대체로 상부에서는 실트, 하부에서는 사질 실트의 입도를 갖는 쇄설물로 구성되어 있으며(Fig. 4-9), 여기서도 해양성퇴적물은 식별되지 않는다. 상부에 발달된 용암류 구간과의 경계면(해수면 하 90.6m)으로부터 해수면 하 94.6m까지의 색상은 주로 오렌지색(very pale orange, 10YR 8/2)을 띠고 있으며, 여기에 오렌지핑크색(moderate orange pink, 5YR 8/4)이 일부 섞여 나타나는 양상을 보인다. 또한 퇴적구조는 대체로 괴상으로 나타나고 층리 내지 엽층리와 같은 구조들은 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 해수면 하 94.6~98.6m 구간에서 회수된 퇴적암 시추코어는 올리브회색(olive gray, 5Y 3/2)을 띠고 있으며, 퇴적구조는 괴상으로 나타남이 확인된다. 해당 구간 이후에 시추코어는 모두 슬라임으로 나타나는데, 슬라임은 직전 구간에서 관찰된 것과 동일한 입자특성과 색상을 보이는 퇴적물로 이루어져 있다.

4) 행원1호공(HW-1)

행원1호공은 해안에서 75m 떨어진 해발 4.5m의 위치에서 해수면 하 125.5m까지 착정되었으며(Table 3-1)(Fig. 4-1), 시추코어는 약 115m가 회수되어 88%의

회수율을 나타낸다. 아울러 OTV 검층영상은 해수면 하 58.5~90.0m 구간만 취득되었다. 시추코어 지질검층에서 확인된 주요 암상은 월정2호공과 동일하게 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 퇴적암, 고토양의 4가지로 이루어져 있으며 (Tables 4-1, 4-5)(Figs. 4-14, 4-15), 이들의 수직적 분포상태도 월정2호공과 유사하다.

(1) 지표(해발 4.5m)~해수면 하 41.6m

지표면에서부터 해수면 하 41.6m까지는 비각력화 용암류의 암상이 나타나지만, 구간의 중부(해수면 하 22.0~22.1m)에는 고토양이 매우 얇은 두께로 1매가 협재되어 나타난다. 시추코어는 전반적으로 대부분 회수가 이루어졌으며, 시추공 중 유일하게 고토양이 시추코어로 확인된다. 이 구간을 구성하는 유동단위는 총 10매로서, 유동단위의 유형은 모두 P형 파호이호이 용암류로 구분된다. 유동단위의 두께는 최소 1.5m에서 최대 11.9m까지 넓은 범위를 가지며, 평균 4.6m의 두께를 보인다. 용암류의 광물조성은 2m 정도 크기의 침상 장식과 비정형의 감람석이 10% 이내의 비율로 발달되어 있으며, 침상장식감람석현무암으로 분류된다. 암색은 고다공질의 유동단위 상부에서 회색(medium gray, N5) 또는 암회색(med. dark gray, N4)를 주로 띠며, 일부는 적색(moderate red, 5R 4/6) 내지 담적색(light red, 5R 6/6)을 보이기도 한다.

비각력화 용암류 중간에 0.1m 정도의 얇은 두께로 협재되어 있는 고토양은 주로 점토로 이루어져 있다(Fig. 4-8). 색깔은 전체적으로 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)을 띠고, 월정2호공과 같이 상부와 하부에 발달된 비각력화 용암류 구간과는 경계면이 뚜렷하지만 상부에는 적색(pale red, 5R 6/2)을 띠는 용암류 파편들이 혼재되어 있는 페퍼라이트 암상이 관찰된다.

(2) 해수면 하 41.6~69.1m

비각력화 용암류의 직하부에는 각력화 용암류 암상이 나타나는데, 10~30cm 크기의 유리질 각력들과 함께 팔라고나이트와 유리질 파편으로 이루어진 기질까지 회수되었다. 또한 이들의 직상부에는 유리질 각력과는 구분되는 반각력화된 S형 파호이호이 용암류가 약 2m의 두께로 발달되어 있으며 하부의 유리질 각력암 구간과는 뚜렷한 경계 없이 점진적으로 변화를 보인다. 반각력화 용암류는 상부 발달되어 있는 비각력화 용암류와 마찬가지로 침상장식감람석현무암의 광물조성을

Table 4-5. Information of lava flow units of HW-1 borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-14.

Borehole	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
HW-1	19 (Pt)	+4.0	-7.9	11.9
	18 (Pt)	-7.9	-12.1	4.2
	17 (Pt)	-12.1	-15.1	3.0
	16 (Pt)	-15.1	-17.8	2.7
	15 (Pt)	-17.8	-20.5	2.7
	14 (Pt)	-20.5	-22	1.5
	P	-22	-22.1	0.1
	13 (Pt)	-22.1	-28	5.9
	12 (Pt)	-28.0	-35.6	7.6
	11 (Pt)	-35.6	-38.2	2.6
	10 (Pt)	-38.2	-41.6	3.4
	B	-41.6	-69.1	27.5
	9 (Pt)	-69.1	-71.5	2.4
	8 (Pt)	-71.5	-74.9	3.4
	7 (Pt)	-74.9	-79.6	4.7
	6 (Pt)	-79.6	-82	2.4
	5 (St)	-82.0	-82.7	0.7
	4 (Pt)	-82.7	-84.3	1.6
	3 (Pt)	-84.3	-85.6	1.3
	2 (Pt)	-85.6	-89.8	4.2
1 (St)	-89.8	-90.5	0.7	
N	-90.5	-122.6	35.0	

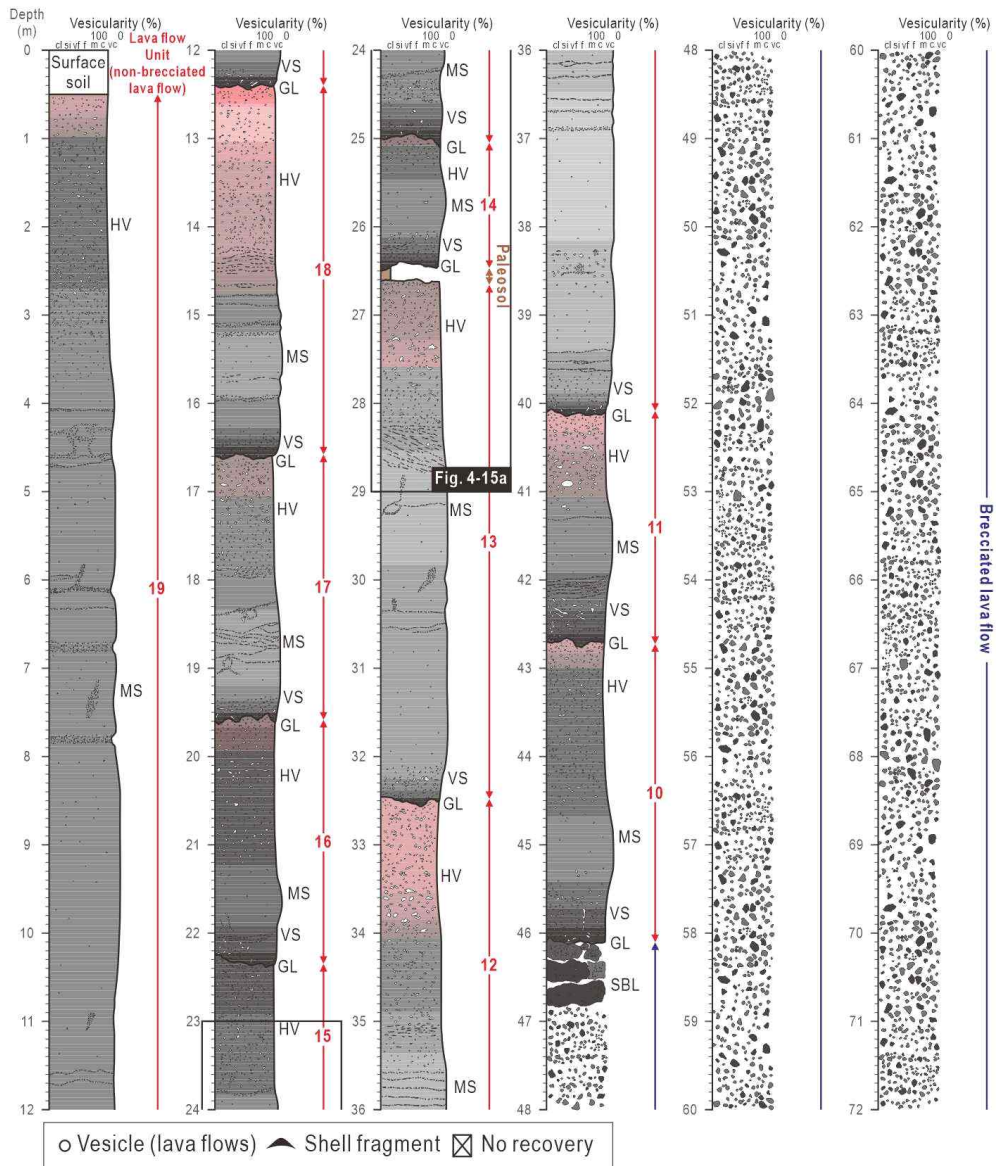


Fig. 4-14. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-1 borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

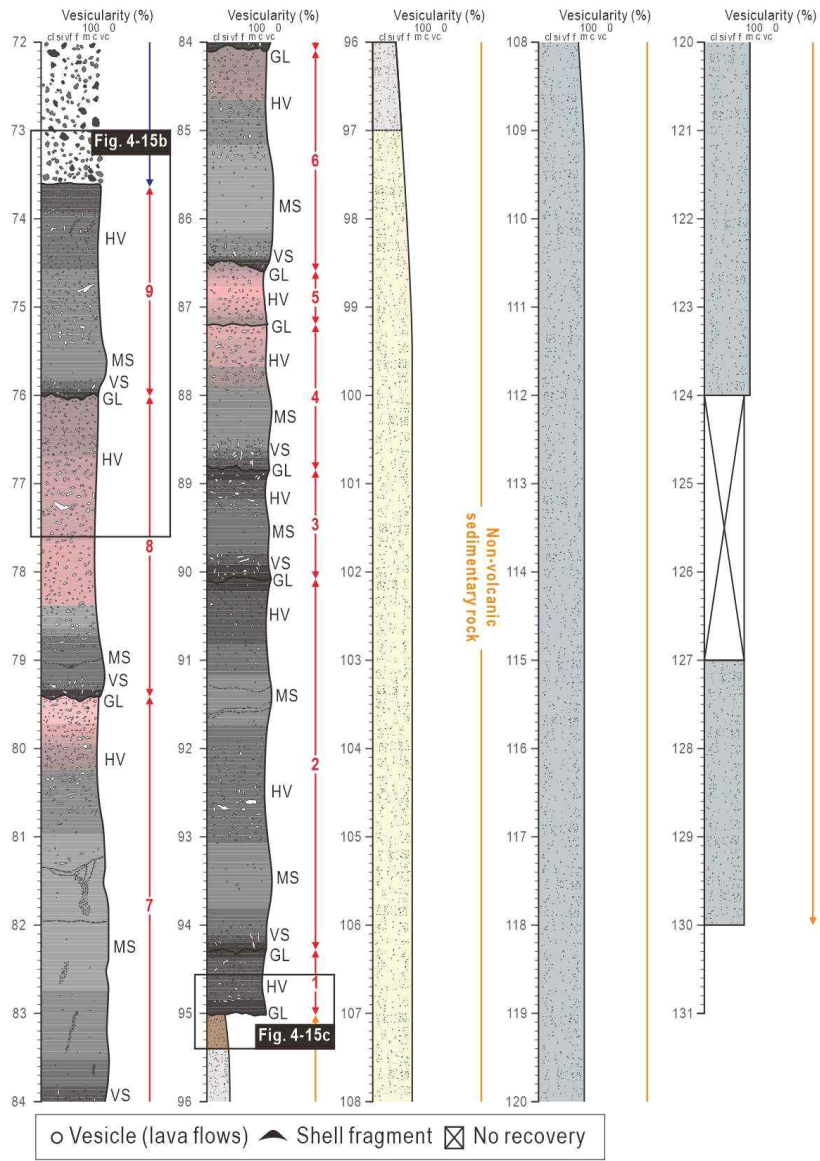


Fig. 4-14. Continued.

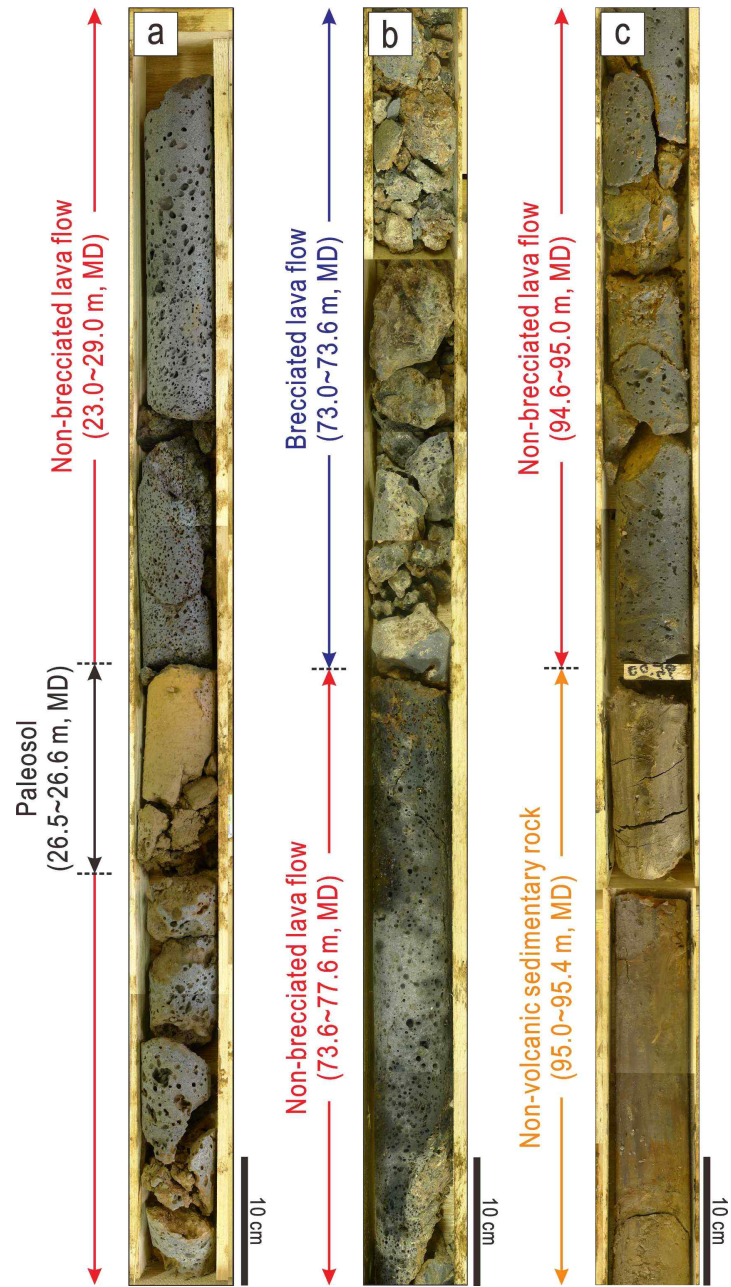


Fig. 4-15. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, and non-volcanic sedimentary rock unit in HW-1 borehole core.

보이지만, 유리질 각력암은 감람석이 관찰되지 않고 1~3mm의 침상 장석이 10% 이내의 비율로 나타나 침상장석현무암으로 구분된다. 아울러 기질부는 팔라고나이트 이외에도 1~2mm 크기의 세립의 유리질 파편들이 다량으로 포함되어 있다. 암색은 반각력화 용암류와 유리질 각력이 암회색(dark gray, N3) 내지 회검정색(grayish black, N2)으로 어둡게 나타나고, 기질은 황오렌지색(pale yellowish orange, 10YR 8/6) 또는 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6)을 띤다.

(3) 해수면 하 69.1~90.5m

각력화 용암류 구간이 직하부에는 비각력화 용암류 암상이 해수면 하 69.1~90.5m까지 나타나는데, 시추코어는 21m 가까이 회수되어 매우 양호한 회수율을 보인다. 이 구간에서의 용암류 유동단위는 총 9매가 구분되었으며, 단위두께는 0.7~4.7m의 범위를 보이고, 평균두께는 2.4m로 상부에 발달된 비각력화 용암류 구간의 평균 유동단위 두께에 비해 다소 얇다. 유동단위 유형은 P형 파호이호이용암류 유동단위가 7매로 단위두께는 최소 1.3m, 최대 4.7m로, 평균 2.9m로 나타나고, 나머지 2매는 S형으로서 단위두께는 모두 0.7m로 확인된다. 용암류 광물조성은 상부에 발달된 비각력화 용암류 구간에서 관찰된 것과 동일하며 모두 침상장석감람석현무암으로 구분된다. 암색은 대체로 암회색(med. dark gray, N4)과 회색(medium gray, N5)이 우세하며, 일부 고다공질부에서는 적색(moderate red, 5R 4/6)에서 암적색(very dark red, 5R 2/6)을 띠기도 한다.

(4) 해수면 하 90.5~125.5m

행원1호공의 최하부에는 비화산성 퇴적암이 발달되어 있으며, 시추코어는 약 9m 정도가 회수되었다(Fig. 4-8). 퇴적암 구간의 상부(해수면 하 90.5~104.5m)에서 회수된 시추코어는 일부 30cm 이하의 길이로 분리되어 나타나기도 하지만, 전반적으로 연속성이 양호하다. 퇴적물 입도는 심도가 증가할수록 실트-사질 실트-실트질 사-모래의 순으로 서서히 모래의 함량이 증가하여 조립화되는 경향을 보인다(Fig. 4-9). 이후의 구간은 90% 이상이 슬라임으로 회수가 이루어져 있는데, 퇴적물은 대체로 모래크기의 입자들로 구성되어 있고 해양성퇴적물은 관찰되지 않는다. 암색은 최상부 약 0.3m 가량은 갈색(dusky brown, 5YR 2/2)을 보이고 그 뒤로는 담올리브회색(light olive gray, 5Y 6/1)과 복잡하게 혼재되어 있는

양상을 보인다. 이후 해수면 하 104.5m까지는 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)의 암색을 띤다. 해수면 하 104.5~119.5m 구간은 올리브회색(olive gray, 5Y 3/2) 내지 암녹회색(dark greenish gray, 5GY 5/1)을 띠고 있다. 행원1호공에서는 괴상의 퇴적구조 이외에 특징적인 구조는 나타나지 않지만, 해수면 하 119.5~122.5m에서는 용암류 구간이 퇴적암 구간 사이에 발달되어 있기도 한다.

5) 행원2호공(HW-2)

행원2호공은 해안에서 내륙으로 650m 떨어진 해발 7.4m 지점에 위치하며, 해수면 하 110.0m까지 시추가 이루어져 시추공 길이는 117.4m에 달한다(Table 3-1)(Fig. 4-1). 그러나 회수된 시추코어는 약 76m로 65%의 낮은 회수율을 보인다. OTV 검층영상은 해발 5.4m에서부터 해수면 하 91.6m까지 취득되었다. 육안 관찰을 통해 구분된 시추코어 주요 암상은 행원1호공처럼 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 비화산성 퇴적암, 고토양으로 구분된다(Tables 4-1, 4-6)(Figs. 4-16, 4-17).

(1) 지표(해발 7.4m)~해수면 하 30.7m

지표면으로부터 해수면 하 30.7m까지는 비각력화 용암류 암상이 나타나고, 용암류 구간의 중부와 하부에는 고토양이 각각 0.4m, 0.5m의 얇은 두께로 협재되어 있다. 시추코어는 대략 35m의 길이로 회수되어 손실률은 매우 낮지만, 고토양은 모두 회수되지 않았다. 용암류 구간에서는 총 10매의 유동단위가 구분되었으며, 단위두께는 최소 1.6m, 최대 8.3m, 평균 3.7m를 보인다. 용암류 유형은 P형 파호이호이 용암류가 9매로 단위두께는 1.6~8.3m이고, 평균 4.0m의 두께를 보이는 반면, S형의 경우에는 0.8m로 상대적으로 매우 얇게 나타난다. 용암류의 광물 조성은 P형과 S형 파호이호이 용암류 모두 1~2mm의 침상 장석과 감람석이 반정으로 관찰되며, 함량은 1~10% 사이로 이는 침상장석감람석으로 구분된다. 아울러 암색은 전반적으로 담회색(med. light gray, N6)을 띠고 있으며, 일부 다공질의 유동단위 상부에서는 황회색(brownish gray, 5YR 4/1)을 보이기도 한다.

비각력화 용암류 구간에 협재되어 있는 2매(해수면 하 13.3~13.7m, 해수면 하 24.5~25.0m)의 고토양은 OTV 검층영상에서 관찰된 특징을 기재하였다. 상위에

Table 4-6. Information of lava flow units of HW-2 borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-16.

Borehole	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
HW-2	21 (Pt)	+7.1	+5.1	2.0
	20 (Pt)	+5.1	+0.2	4.9
	19 (St)	+0.2	-0.6	0.8
	18 (Pt)	-0.6	-5.8	5.2
	17 (Pt)	-5.8	-9.6	3.8
	16 (Pt)	-9.6	-13.3	3.7
	P2	-13.3	-13.7	0.4
	15 (Pt)	-13.7	-22.0	8.3
	14 (Pt)	-22.0	-24.5	2.5
	P1	-24.5	-25.0	0.5
	13 (Pt)	-25.0	-29.1	4.1
	12 (Pt)	-29.1	-30.7	1.6
	B	-30.7	-58.4	27.7
	N2	-58.4	-59.0	0.6
	11 (Pt)	-59.0	-64.0	5.0
	10 (Pt)	-64.0	-65.0	1.0
	9 (Pt)	-65.0	-67.5	2.5
	8 (St)	-67.5	-68.2	0.7
	7 (Pt)	-68.2	-70.1	1.9
	6 (Pt)	-70.1	-72.1	2.0
	5 (Pt)	-72.1	-75.7	3.6
4 (Pt)	-75.7	-77.0	1.3	
3 (Pt)	-77.0	-88.0	11.0	
2 (Pt)	-88.0	-89.5	1.5	
1 (Pt)	-89.5	-91.6	2.1	
N1	-91.6	-107.6	16.0	

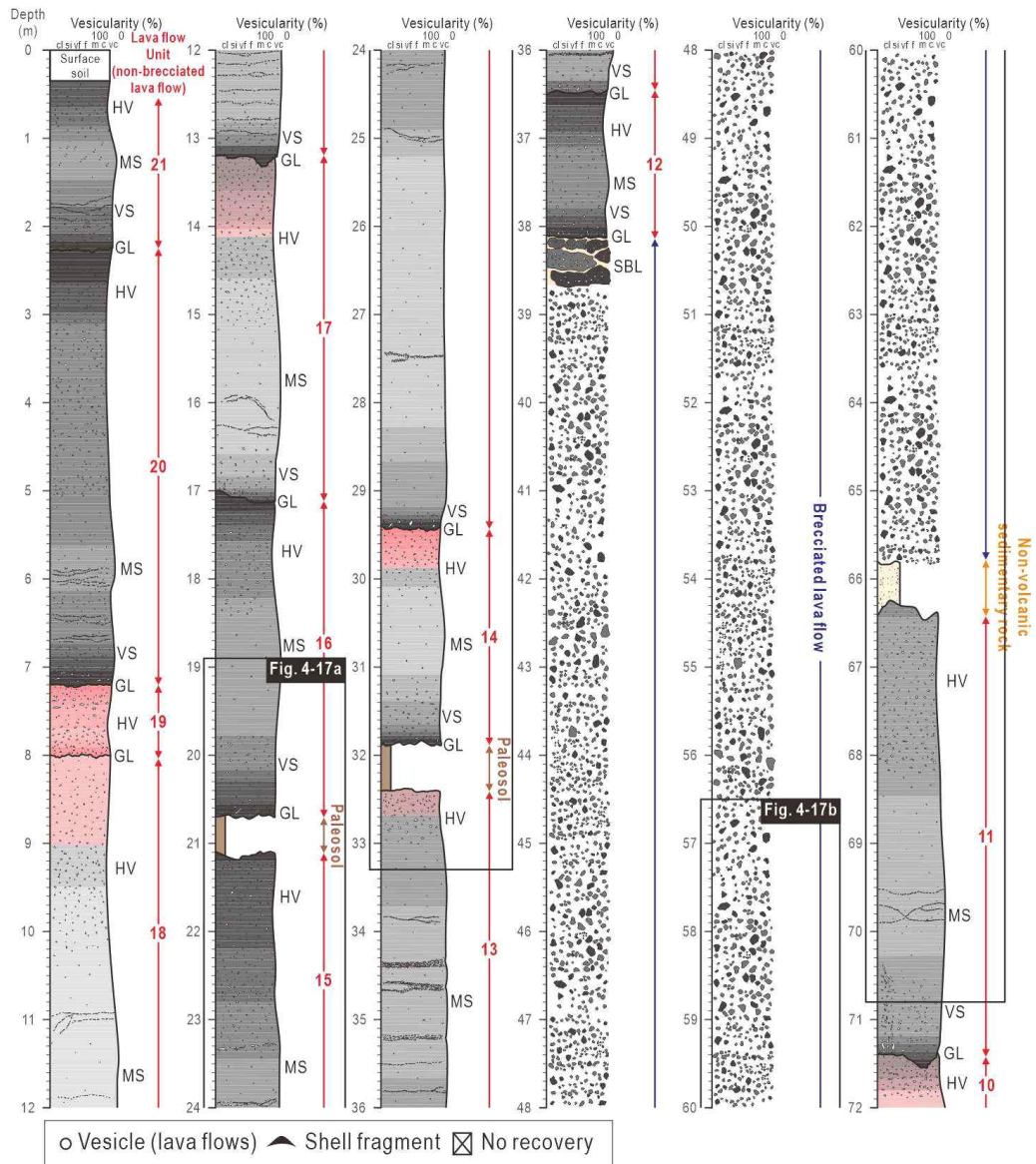


Fig. 4-16. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-2 borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

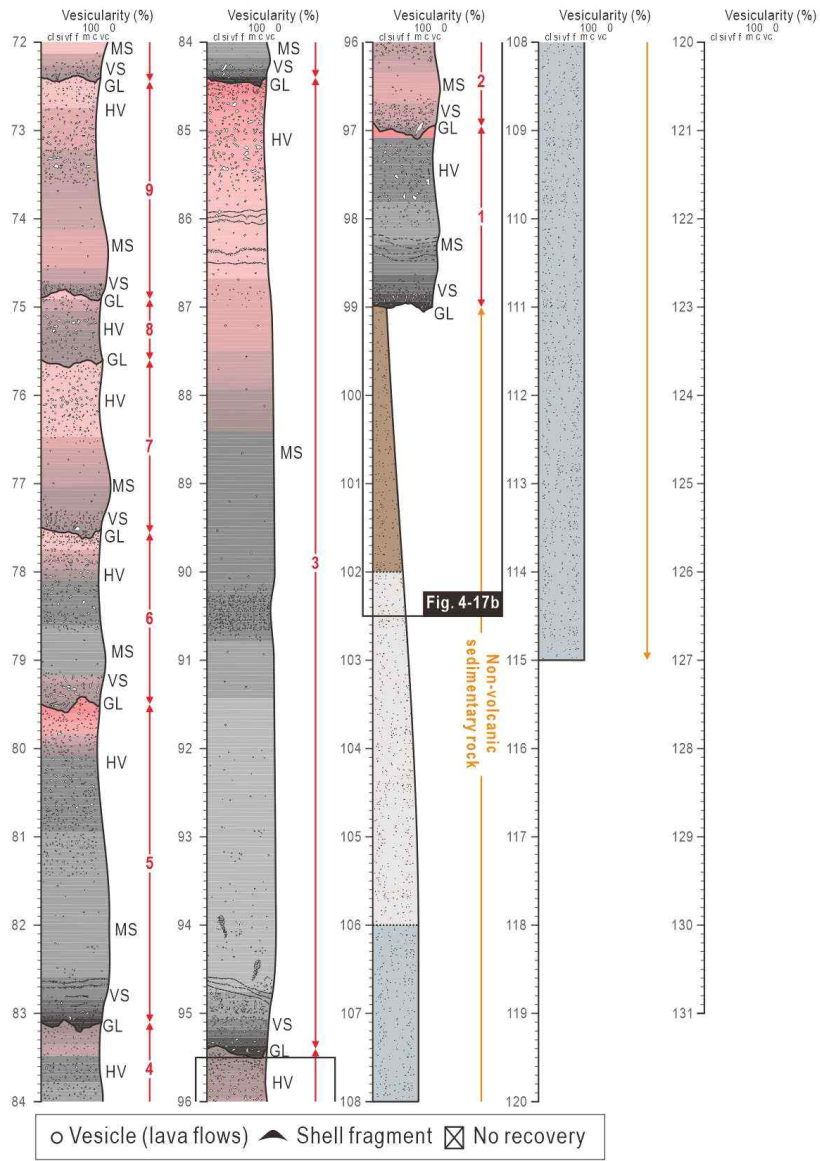


Fig. 4-16. Continued.

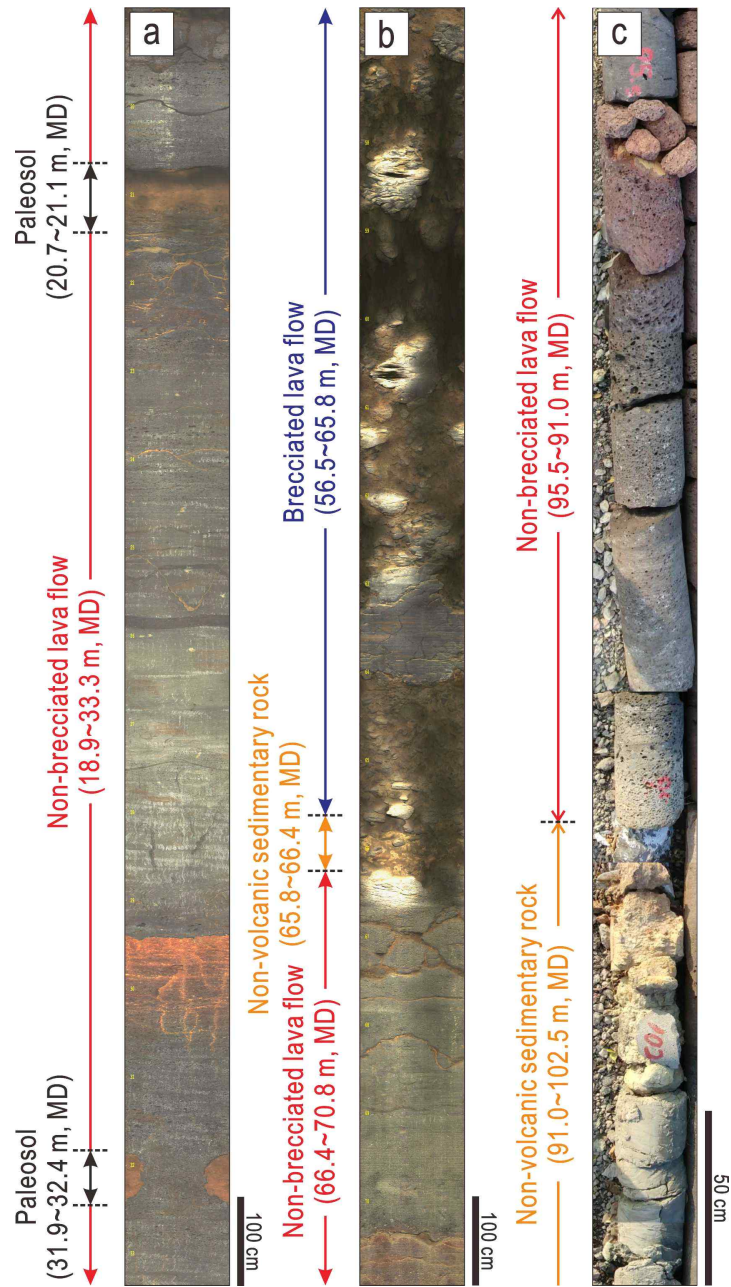


Fig. 4-17. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, non-volcanic sedimentary rock unit, and paleosol in HW-2 borehole core.

위치한 고토양은 0.4m의 두께를 가지며, 대체로 점토로 구성되어 있다. 또한 3~5cm 가량의 크기를 갖는 용암류 암편들이 소수로 포함되어 있는데, 이들은 산발적인 분포를 보인다. 고토양의 색상은 회오렌지색(grayish orange, 10YR 7/4)과 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4) 사이의 색깔을 띠고 있으며, 용암류 암편들은 암회색(dark gray, N3)으로 나타난다. 아울러 상부와 하부에 발달된 용암류 구간과의 경계는 매우 뚜렷하게 나타나며 페퍼라이트의 암상은 확인되지 않는다. 하위에 나타나는 고토양 구간은 0.5m의 두께를 보이지만, 수평적으로는 용암류 구간을 관입하고 있는 형태로 발달해 있다. 입자조성은 점토질의 세립질 입자들이 주를 이루며, 이들은 대체로 암적갈색(dark reddish brown, 10R 3/4)을 띠고 있다. 아울러 용암류 구간과는 매우 뚜렷한 경계를 이루고 있는 경계면 특성을 보인다.

(2) 해수면 하 30.7~58.4m

비각력화 용암류 이후로는 각력화 용암류 암상이 나타난다. 시추코어 상으로는 대략 10~30cm 크기의 유리질 각력들로만 이루어져 있는 것으로 보이지만, OTV 검층영상에서는 월정1호공과 월정2호공에서 관찰된 특징이 모두 나타난다. 즉, 최상부에는 S형과 P형의 파호이호이 용암류가 2~3매로 누층을 이루고 있지만, 부분적으로 파쇄가 진행되어 있다. 이처럼 파쇄된 부분은 팔라고나이트로 보이는 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)의 점토질 물질로 채워져 있기도 한다. 반각력화 용암류의 직하부에는 월정1호공에서 관찰된 것과 같이 최대 30cm 내외의 크기를 보이는 유리질 각력과 1~2mm 크기의 유리질 파편이 무수히 포함되어 있는 팔라고나이트가 함께 나타나는 양상을 보인다. 뿐만 아니라, 월정2호공의 각력화 용암류 구간에서 나타나는 것처럼 팔라고나이트의 기질부 대신 1~5cm로 잘게 부스러져 있는 유리질 각력들이 고밀도로 채워져 있는 구간이 나타나기도 한다. 시추코어로 회수된 유리질 각력암의 광물조성은 침상 장석이 최대 3mm 크기의 반정으로 나타나고 10% 미만의 함량을 보여, 유리질 각력암은 침상장석현무암으로 분류된다. 반각력화 용암류는 시추코어 상으로는 확인이 불가하지만 OTV 검층영상에서는 상부에 발달된 비각력화 용암류와 각력화정도, 암색을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 광물조성 또한 동일한 특징으로 발달되어 있을 것으로 판단되어, 반각력화 용암류는 침상장석감람석현

무암에 해당하는 것으로 추정된다. 아울러 반각력화 용암류와 유리질 각력암은 암회색(dark gray, N3, med. dark gray, N4)으로 유사한 색깔을 띤다.

(3) 해수면 하 58.4~59.0m

이러한 각력화 용암류 구간 이후에는 비화산성 퇴적암이 약 0.6m의 얇은 두께로 발달되어 있음이 OTV 검층영상을 통해서 확인되었으나, 시추코어로는 회수되지 않았다. 퇴적암은 월정1호공에서 관찰된 것과는 달리 암상에 따라 구간이 나누어지지 않고, 하나의 암상으로만 나타난다(Fig. 4-8). 퇴적물은 사질과 니질의 쇄설성 입자들로 이루어진 것으로 보이며 이들은 서로 복잡하게 혼재되어 있는 모습을 보인다. 특히 사질 입자들로 구성된 부분에서는 패각편으로 추정되는 모래 크기 정도의 흰색(white, N9) 입자들이 불규칙하게 분포되어 있기도 한다. 아울러 직상부에 발달된 각력화 용암류 구간으로부터 비롯된 것으로 보이는 유리질의 각력들 또한 퇴적암과 뒤섞여 있는 특징을 보이며, 이로 인해 두 구간 사이의 경계는 다소 모호하다. 반면 하부에 발달된 비각력화 용암류 구간과는 그 경계가 어느 정도 뚜렷하게 관찰된다. 사질의 입자들로 구성된 부분은 회오렌지색(grayish orange, 10YR 7/4) 또는 황오렌지색(pale yellowish orange, 10YR 8/6)을 띠고 있고, 니질 입자들은 암황갈색(dark yellowish brown, 10YR 4/2)의 색깔을 보인다. 여기서 관찰되는 퇴적구조는 주로 괴상으로 보이며, 그 외에 특징적인 구조는 식별되지 않는다.

(4) 해수면 하 59.0~90.6m

퇴적암 구간 이후로는 다시 비각력화 용암류의 암상이 나타나며, 시추코어는 약 26m의 길이로 회수되었다. 용암류 유동단위는 11매가 구분되며 단위두께는 0.7~11.0m로 다소 넓은 범위를 가지며, 평균두께는 3.0m로 상위에 발달된 비각력화 용암류 구간과는 큰 차이를 보이지 않는다. 용암류 유형은 P형 파호이호이용암류가 10매의 유동단위에서 나타나는데, 단위두께는 1.0~11.0m로 평균 3.2m의 두께를 보인다. 한편 S형 파호이호이용암류 유동단위는 0.7m의 두께를 가진다. 광물조성은 두 용암류 유형 모두 동일하게 2mm 내외의 크기를 갖는 침상의 장석과 비정형의 감람석이 1~10%의 비율로 발달되어 있어 침상장석감람석현무암으로 구분된다. 암색은 다른 비각력화 용암류 구간들과는 달리 절반 이상이 적색(moderate red, 5R 4/6) 또는 담적색(light red, 5R 6/6)을 띠며, 나머지는 담회

색(light gray, N7)에서 암회색(med. dark gray, N4) 사이로 나타난다.

(5) 해수면 하 90.6~107.6m

비각력화 용암류의 직하부로부터 굴착 종결심도까지는 비화산성 퇴적암이 약 20m의 두께로 발달해 있으며, 회수된 시추코어는 2m 내외의 길이를 갖는다(Fig. 4-8). 최상부 경계면으로부터 해수면 하 94.6m 사이에서 회수된 시추코어는 서로 다른 크기로 분리되어 나타나고, 약간 부스러져 교란된 상태를 보이기도 한다. 94.6~98.6m 구간에서는 어느 정도 연속성이 양호한 시추코어가 관찰되지만 나머지는 슬라임으로 회수되었다. 해당 퇴적암은 대체로 상부에서는 실트, 하부에서는 사질 실트의 입도를 갖는 쇄설물로 구성되어 있으며(Fig. 4-9), 여기서도 해성 퇴적물은 식별되지 않는다. 상부에 발달된 비각력화 용암류 구간과의 경계면(해수면 하 90.6m)으로부터 해수면 하 94.6m까지의 색상은 주로 옐로우색(very pale orange, 10YR 8/2)과 옐로우핑크색(moderate orange pink, 5YR 8/4)이 섞여 있는 양상을 보인다. 퇴적구조는 대체로 괴상으로 나타나고 층리 내지 엽층리와 같은 구조들은 뚜렷하게 관찰되지 않는다. 해수면 하 94.6~98.6m 구간에서 회수된 퇴적암 시추코어는 올리브회색(olive gray, 5Y 3/2)을 띠고 있으며, 퇴적구조는 괴상으로 나타난다. 슬라임으로 회수된 구간에서는 직전 구간에서 관찰된 것과 동일한 입자특성과 색상을 보이는 퇴적물로 이루어져 있다.

6) 행원3호공(HW-3)

행원3호공은 해안에서 내륙으로 760m 떨어진 해발 11.8m 지점에서 해수면 하 110.2m 깊이까지 시추가 이루어졌으며(Table 3-1)(Fig. 4-1), 시추코어는 약 98m가 회수되어 80%의 회수율을 보인다. 행원3호공에서 OTV 검층은 해발 9.8m에서 해수면 하 91.8m까지 진행되었다. 시추코어의 주요 암상은 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 비화산성 퇴적암, 고토양으로 구분되며(Tables 4-1, 4-7)(Figs. 4-18, 4-19), 암상의 수직적 분포양상은 행원2호공과 유사하다.

(1) 지표(해발 11.8m)~해수면 하 33.8m

지표(해발 11.8m)로부터 해수면 하 33.8m까지는 비각력화 용암류의 암상이 나타나고, 구간의 하부에는 고토양 2매가 각각 1.0m, 0.3m의 두께로 협재되어 있다. 회수된 시추코어의 길이는 약 40m로 양호한 회수율을 보이나, 고토양은 2매

Table 4-7. Information of lava flow units of HW-3 borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-18.

Borehole name	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
HW-3	16 (Pt)	+11.12	+2.8	8.3
	15 (Pt)	+2.8	+0.8	2.0
	14 (Pt)	+0.8	-3.7	4.5
	13 (Pt)	-3.7	-5.6	1.9
	12 (Pt)	-5.6	-7.9	2.3
	11 (Pt)	-7.9	-14.5	6.6
	10 (Pt)	-14.5	-18.5	4.0
	9 (Pt)	-18.5	-20.1	1.6
	8 (Pt)	-20.1	-22.2	2.1
	P2	-22.2	-23.2	1.0
	7 (Pt)	-23.2	-27.7	4.5
	6 (Pt)	-27.7	-29.7	2.0
	5 (Pt)	-29.7	-31.1	1.4
	P1	-31.1	-31.4	0.3
	4 (Pt)	-31.4	-33.8	2.4
	B	-33.8	-78.4	44.6
	N2	-78.4	-82.5	4.1
	3 (Pt)	-82.5	-88.4	5.9
	2 (Pt)	-88.4	-90.8	2.4
	1 (Pt)	-90.8	-91.8	1.0
N1	-91.8	-110.2	18.4	

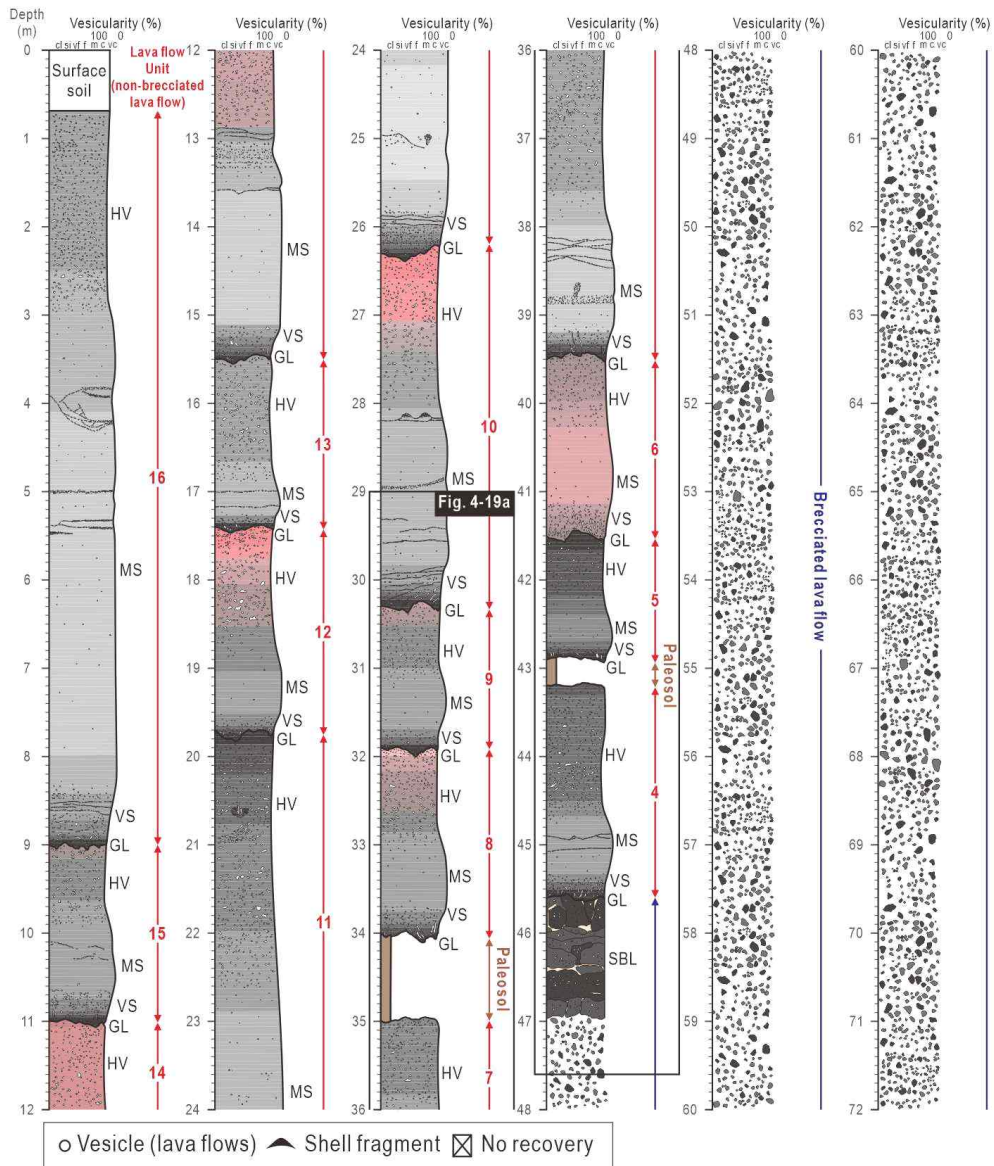


Fig. 4-18. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-3 borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

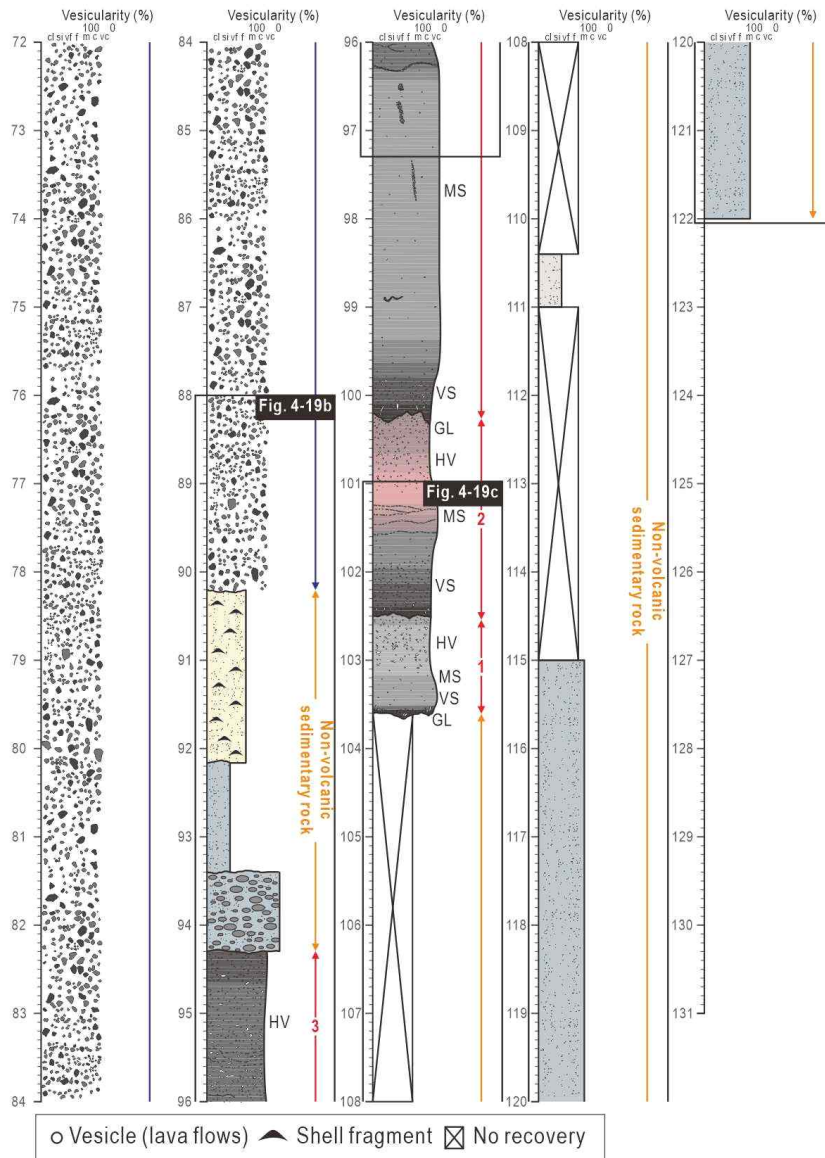


Fig. 4-18. Continued.

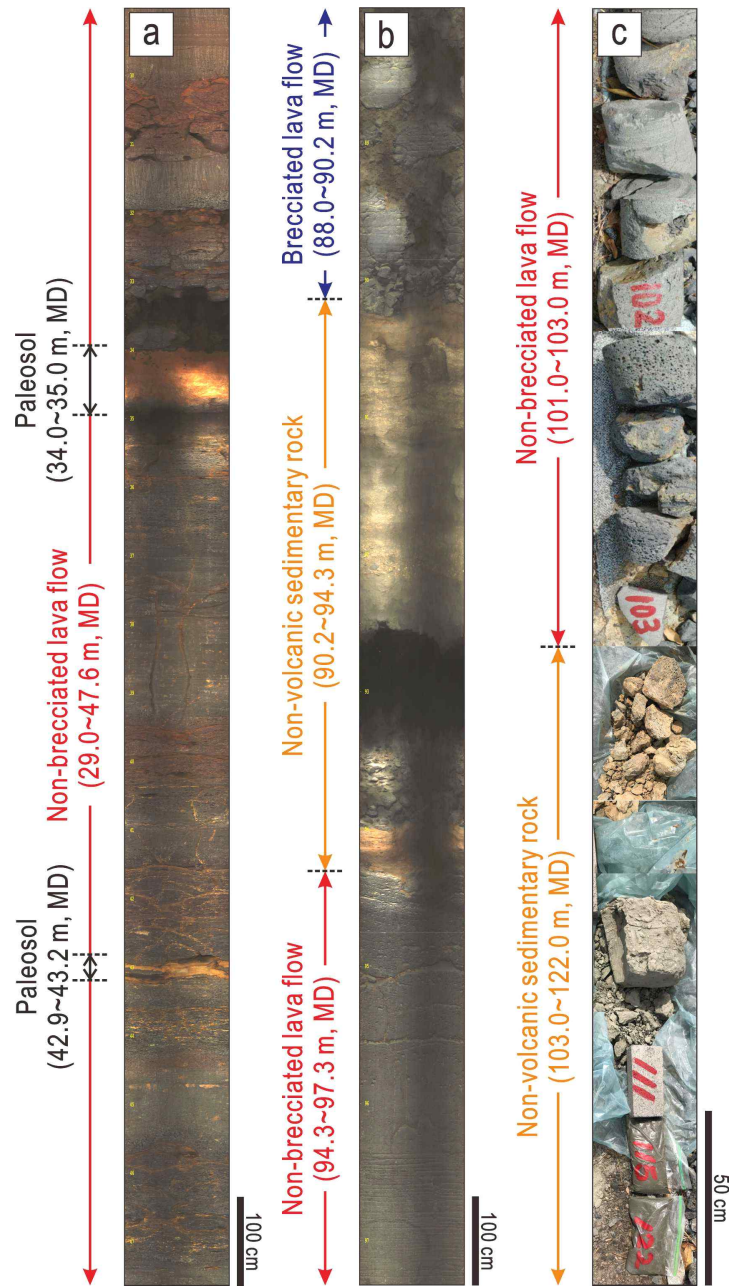


Fig. 4-19. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, non-volcanic sedimentary rock unit, and paleosol in HW-3 borehole core.

모두 회수가 이루어지지 않았다. 용암류 구간에서는 13매의 유동단위가 구분되었으며, 단위두께는 1.4~8.3m의 범위를 보이며 평균두께는 3.4m로 측정된다. 특징적으로 유동단위의 용암류 유형은 모두 P형 파호이호이 용암류로 구분되며, 용암류 광물조성은 주로 1~2mm의 크기로 발달된 침상 장석과 비정형의 감람석이 반정으로 관찰되었다. 아울러 이들은 10% 이내의 비율로 발달되어 있어 화산암명은 침상장석감람석현무암으로 다른 시추공들에서 관찰된 비각력화 용암류 구간과 동일한 특징을 보인다. 암색은 담회색(light gray, N7), 암회색(medium gray, N5), 적색(moderate red, 5R 4/6)이 고루 나타나는데, 주로 고다공질부에서는 회색 및 적색을 주로 띠는 반면 기공이 결핍된 치밀질부에서는 대체로 담회색을 보인다.

이러한 비각력화 용암류 구간에 협재되어 있는 고토양은 행원2호공과 같이 2매(해수면 하 22.2~23.2m, 해수면 하 31.1~31.4m)가 확인된다(Fig. 4-8). 상위에 발달된 고토양은 1m 정도의 두께를 보이며 전반적으로 점토질 세립입자들로 이루어져 있다. 색상은 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6)을 띠고 있다. 구간의 상부에는 10cm 이하의 크기를 갖는 용암류 암편들이 소수 포함되어 있어 페퍼라이트의 암상을 보인다. 한편 하부에 발달된 용암류 구간에서는 이러한 암편들이 관찰되지 않으며, 뚜렷한 경계를 이루고 있다.

하위에 나타나는 고토양 구간은 0.3m 정도로 두께가 발달되어 있으며, 육안상으로는 대부분 점토로 이루어진 것으로 보인다. 또한 구간의 중간에는 판상의 형태(단축 약 10cm, 장축 약 30cm)를 보이는 용암류 기원 암편이 수평적으로 길게 놓여 고토양에 둘러쌓여 있다. 고토양의 색깔은 회오렌지색(grayish orange, 10YR 7/4)을 띠고 있고, 화산암편은 암회색(med. dark gray, N4)으로 나타난다. 해당 구간은 상부와 하부에 발달된 비각력화 용암류 구간과는 매우 예리한 경계면을 이루며 구분된다.

(2) 해수면 하 33.8~78.4m

비각력화 용암류의 직하부에는 비각력화 용암류의 암상을 보이는 구간이 발달되어 있다. 전반적인 암상특성은 행원2호공에 관찰된 내용과 유사하게 나타나는데, 시추코어로는 최대 30cm 정도의 크기의 유리질 각력암만이 회수되었으나 OTV 검층영상에서는 반각력화 용암류, 팔라고나이트 바탕에 미세한 크기의 화

산유리 파편이 다수 포함되어 있는 기질, 10cm 이하로 부스러져 있는 유리질 각력들이 함께 관찰된다. 최상부에는 반각력화 용암류가 약 5m의 두께로 발달되어 있으며, 용암류의 유형은 P형과 S형 모두 확인된다. 아울러 파쇄가 일어난 부분에는 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)의 색깔을 띠는 팔라고나이트로 채워져 있다. 이 용암류의 직하부에는 1~5cm의 크기를 갖는 유리질 각력암과 최대 1m까지 나타나는 유리질 각력암이 고밀도로 혼재되어 있는 구간과, 세립의 유리질 각력암 대신 팔라고나이트 기질을 이루고 있는 구간이 수직적으로 교대하며 발달되어 있는 분포특성을 보인다.

회수된 시추코어를 통해 확인된 유리질 각력암의 광물조성은 1~3mm 크기의 침상 장석이 10% 미만의 비율로 발달되어 있으며, 이는 다른 시추공들에서 회수된 유리질 각력암과 마찬가지로 침상장석현무암으로 구분된다. 반각력화 용암류의 경우에는 시추코어로 회수된 여부를 확인하기 모호하여, OTV 검증영상을 통해 광물조성을 추정하였다. 반각력화 용암류는 그 상부를 피복하고 있는 비각력화 용암류와 색상과 파쇄정도를 제외하고는 동일한 특징을 보이기 때문에 침상장석감람석현무암의 광물조성을 나타내는 것으로 추정된다. 또한 암색은 반각력화 용암류와 유리질 각력암이 암회색(med. dark gray, N4)과 회검정색(grayish black, N2) 사이의 색을 띠고 있으며, 기질은 주로 어두운 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6)을 보인다.

(3) 해수면 하 78.4~82.5m

각력화 용암류 구간의 직하부에는 비화산성 퇴적암이 4m 가까이 되는 두께로 발달되어 있다(Fig. 4-8). 이 퇴적암 구간은 구성 퇴적물의 조직특성에 따라 상부, 중부, 하부로 구분되며 이들의 경계는 퇴적물 입자의 입도차이를 통해서 확인된다. 상부는 주로 사질의 쇄설입자로 이루어져 있으며, 흰색(white, N9)을 띠는 패각편들이 다량 포함되어 있다. 전반적인 퇴적물 색상은 행원2호공에서 관찰된 사질 쇄설입자와 같이 회오렌지색(grayish orange, 10YR 7/4) 내지 황오렌지색(pale yellowish orange, 10YR 8/6)으로 나타난다. 퇴적구조는 전반적으로 피상으로 나타나며, 추가적으로 주목할 만한 퇴적구조는 확인되지 않는다. 중부는 니질의 쇄설성 퇴적물로 구성된 것으로 보이며, 패각편과 같은 해성퇴적물은 포함되어 있지 않다. 색상은 전 구간이 올리브회색(olive gray, 5Y 4/1)을 보이고, 퇴

적구조는 상부와 마찬가지로 층리와 같은 구조는 나타나지 않고 괴상으로 발달해 있다. 하부와는 경계는 공벽의 붕괴로 인해 확인이 불가하나, 하부 구간에서 관찰된 암상으로 미루어 볼 때 점이적인 상변화가 나타날 것으로 추정된다. 하위 퇴적암은 상위 퇴적암 구간 중 유일하게 자갈크기의 입자들이 주 구성 퇴적물로 관찰된다. 입자들은 원마도가 상당히 양호한 특징을 보이고, 중부에서 확인된 것과 같은 니질의 입자들과 혼재되어 있으며 역이 70% 정도의 비율을 차지하고 있다. 역들의 색깔은 암회색(dark gray, N3, med. dark gray, N4)을 띠고 있고, 니질의 입자들은 중부 퇴적암과 동일한 색을 보인다. 해당 구간의 퇴적물들은 배열상태가 불규칙적이며, 괴상의 퇴적구조를 보인다.

(4) 해수면 하 82.5~91.8m

해당 비화산성 퇴적암의 하부에는 다시 비각력화 용암류의 암상을 띠는 구간이 나타나는데, 그 두께가 9.3m로 비각력화 용암류 중에서 가장 얇은 특징을 보인다. 구분된 용암류 유동단위 또한 3매로 시추공들 중 가장 적은 수를 보이며, 단위두께는 상위로부터 5.9m, 2.4m, 1.0m로 발달되어 평균 3.1m의 유동단위 두께를 보인다. 아울러 용암류의 유형은 모두 P형 파호이호이 용암류로 광물조성은 침상장석감람석현무암의 특징을 보인다. 용암류의 암색은 전반적으로 담회색(light gray, N7)을 띠는 부분이 우세하며, 일부는 다소 어둡게 나타나 회색(medium gray, N5) 내지 암회색(med. dark gray, N4)을 보이기도 한다.

(5) 해수면 하 91.8~110.2m

시추공 최하부에는 비화산성 퇴적암 구간이 대략 18m의 두께로 발달되어 있는 것으로 확인되지만, 회수된 시추코어는 약 0.3m 정도로 시추공들 중 가장 낮은 회수율을 보인다(Fig. 4-8). 퇴적암의 최상부는 상부에 놓인 비각력화 용암류가 깨져서 분리되어있는 블록들과 퇴적암의 파편 내지 암분들이 뒤섞여 있는 형상을 보인다. 혼재되어 있는 퇴적암 파편들은 0.1m 이하의 길이를 가지며 암색은 옅은 황오렌지색(pale yellowish orange, 10YR 8/6)을 띠고 있다. 해당 구간의 직 하부에는 퇴적암 시추코어가 해수면 하 99.2m까지 나타나는 것으로 확인된다. 퇴적암 시추코어는 행원2호공의 최하부에서 나타나는 비화산성 퇴적암 구간 중 해수면 하 94.6~98.6m 사이에서 관찰된 것과 같이 올리브회색(olive gray, 5Y 3/2)을 띠는 사질 실트(Fig. 4-9)의 쇄설물들이 괴상을 이루고 있다. 해당 구간 이후

로는 슬라임으로 회수된 퇴적물이 관찰되는데, 앞서 기술된 퇴적암 시추코어에서 관찰된 것과 동일한 입자특성을 갖는 쇄설물들로 이루어져 있다.

7) 행원4호공(HW-4)

행원4호공은 해안에서 2,000m 떨어진 해발 15.5m 지점에 위치한다. 시추심도는 150.0m로 해수면 하 134.5m까지 굴착되어 연구대상 시추공 중 가장 깊은 공에 해당된다(Table 3-1)(Fig. 4-1). 시추코어는 105m 정도가 회수되어 약 70%의 회수율을 보이고, OTV 검층영상은 해발 13.5m에서 지표면 하 55.1m까지 취득되었다. 시추코어에서 관찰되는 주요 암상은 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 고토양이며, 이 시추공에서는 비화산성 퇴적암은 확인되지 않았다(Tables 4-1, 4-8)(Figs. 4-20, 4-21).

(1) 지표(해발 15.5m)~해수면 하 32.7m

지표로부터 해수면 하 32.7m까지는 비각력화 용암류의 암상이 나타나고, 구간의 중부에는 고토양 1매가 0.7m의 두께로 발달되어 있다. 회수된 시추코어 중 용암류는 일부 블록의 형태로 깨져서 나타나기는 하지만 회수된 길이가 약 46m 정도로 매우 양호한 회수율 및 상태를 보인다. 그러나 고토양은 모두 손실되어 회수가 이루어지지 않았다. 용암류 구간은 15매의 유동단위로 이루어져 있으며, 단위두께는 0.9~6.9m사이로 확인되며 평균 3.1m의 두께를 보인다. 용암류 유동단위 중 13매는 P형 파호이호이 용암류의 특징을 갖는 것으로 구분되며, 단위두께는 최소 1.8m, 최대 6.9m로 평균 3.5m의 두께를 가진다. 나머지 2매의 유동단위는 S형 파호이호이 용암류로서, 각각 0.9m, 1.0m의 두께로 발달되어 있다. 광물 조성은 두 유형의 용암류 모두 2mm 내외의 침상 장석과 감람석이 반정으로 관찰되며 이들은 1~10% 사이의 발달 비율을 나타내 화산암명은 침상장석감람석 현무암으로 분류된다. 암색은 전반적으로 고다공질부와 다공질부에서는 암회색(med. dark gray, N4) 또는 회색(medium gray, N5)을 띠며, 특징적으로 고다공질부에서는 회갈색(brownish gray, 5YR 4/1) 내지 담회갈색(light brownish gray, 5YR 6/1)으로 나타나기도 한다. 또한 P형 파호이호이 용암류 유동단위의 중부에서 나타나는 기공이 결핍된 치밀질에서는 담회색(light gray, N7)으로 주변보다 밝게 나타나는 특징을 보인다.

Table 4-8. Information of lava flow units of HW-4 borehole. B: brecciated lava flow, P: paleosol, N: non-volcanic sedimentary rock, Pt: p-type pahoehoe lava flow, St: s-type pahoehoe lava flow. For locations of lava-flow units, see Fig. 4-20.

Borehole	Lava flow unit	Elevation (m)		Thickness (m)
HW-4	19 (Pt)	+15.1	+12.5	2.6
	18 (Pt)	+12.5	+10.5	2.0
	17 (Pt)	+10.5	+5.5	5.0
	16 (Pt)	+5.5	0.0	5.5
	15 (Pt)	0.0	-2.7	2.7
	P2	-2.7	-3.4	0.7
	14 (Pt)	-3.4	-10.3	6.9
	P1	-10.3	-10.5	0.2
	13 (Pt)	-10.5	-16.0	5.5
	12 (Pt)	-16.0	-19.9	3.9
	11 (Pt)	-19.9	-22.2	2.3
	10 (Pt)	-22.2	-24.0	1.8
	9 (Pt)	-24.0	-26.7	2.7
	8 (Pt)	-26.7	-29.0	2.3
	7 (St)	-29.0	-29.9	0.9
	6 (Pt)	-29.9	-31.7	1.8
	5 (Pt)	-31.7	-32.7	1.0
	B2	-32.7	-49.5	16.8
	4 (Pt)	-49.5	-55.6	6.1
	3 (Pt)	-55.6	-60.7	5.1
2 (Pt)	-60.7	-63.2	2.5	
1 (Pt)	-63.2	-77.5	14.3	
B1	-77.5	-134.5	57.0	

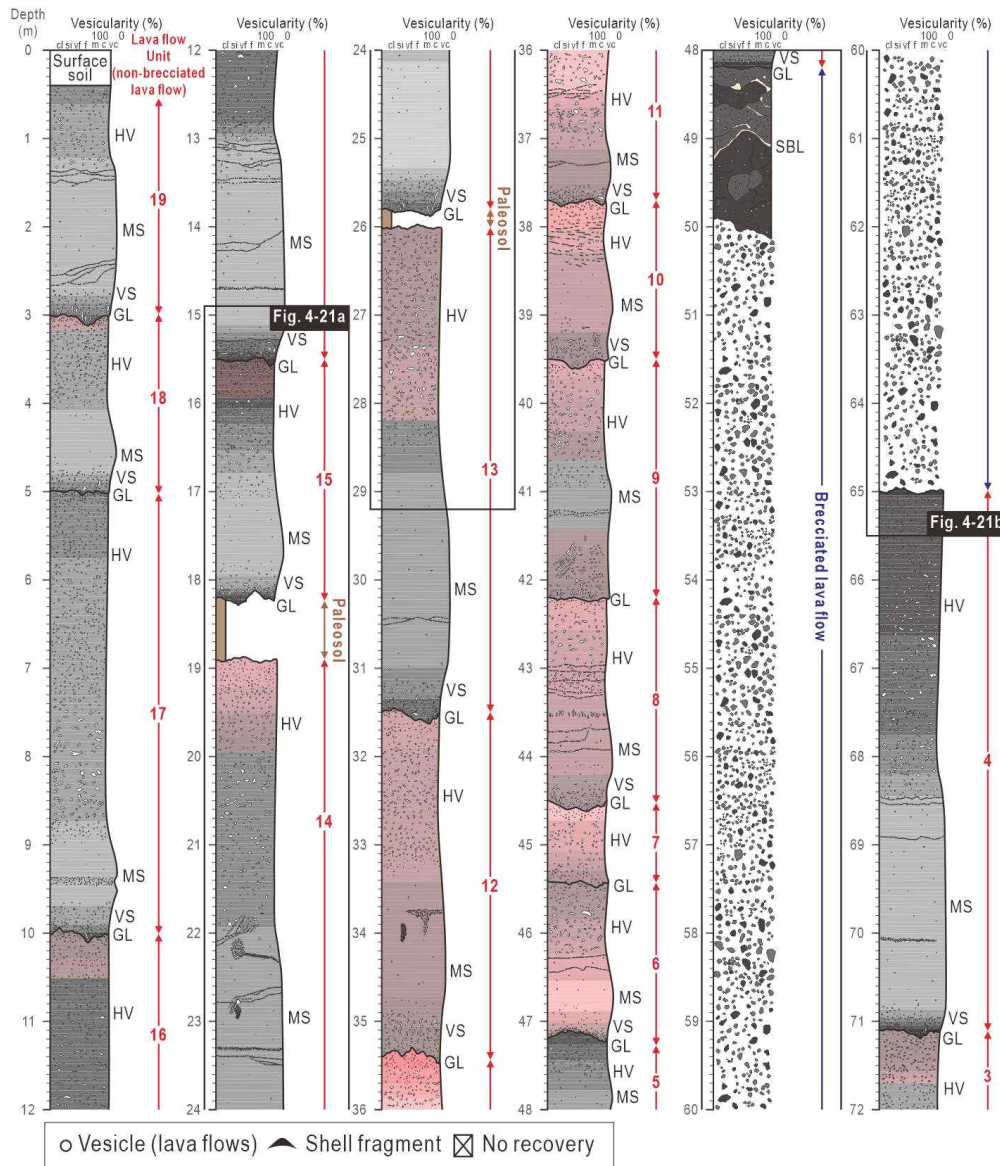


Fig. 4-20. Detailed columnar section (1:20 scale) of HW-4 borehole core. HV: highly vesicular division, VS: vesicular division, MS: massive division, GL: glassy division, SBL: semi-brecciated lava flow.

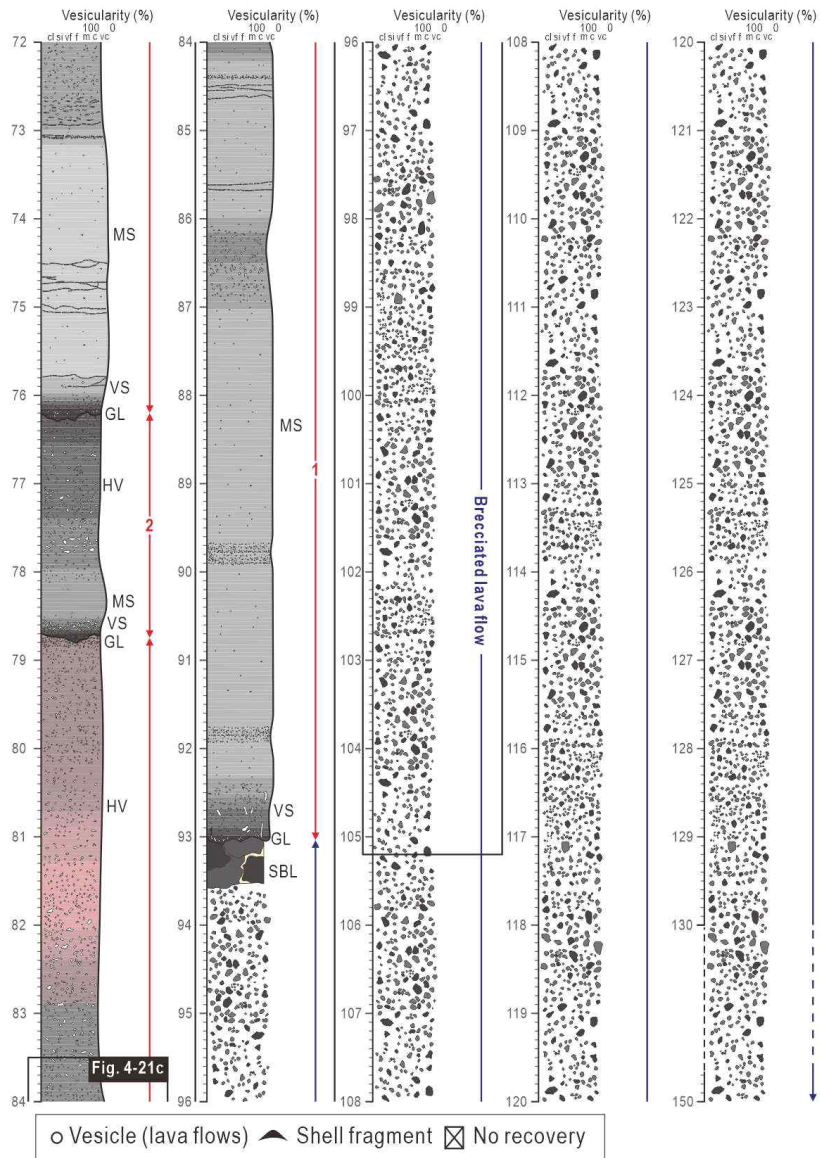


Fig. 4-20. Continued.

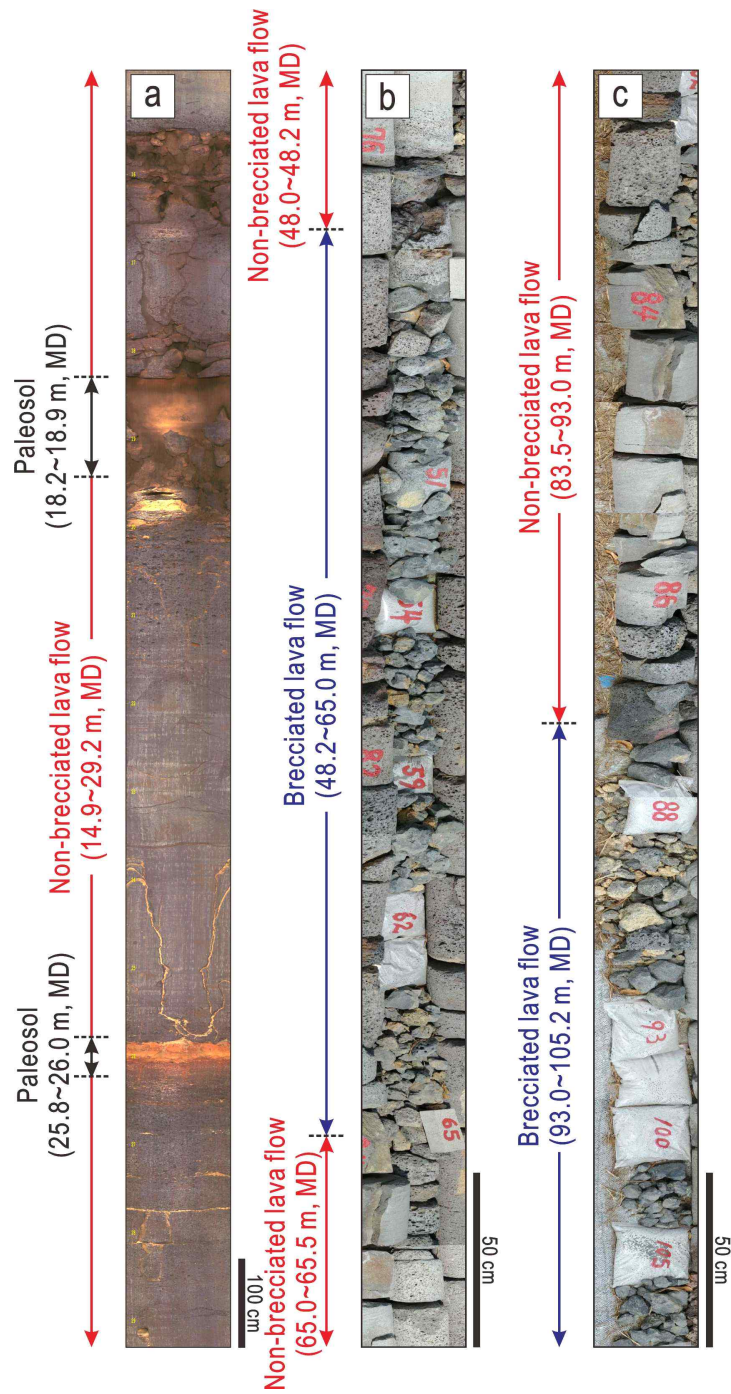


Fig. 4-21. Photos showing non-brecciated lava flow, brecciated lava flow, non-volcanic sedimentary rock unit, and paleosol in HW-4 borehole core.

이와 같은 비각력화 용암류 구간 사이에 협재되어 있는 고토양은 2매로 확인되었는데(해수면 하 2.7~3.4m, 해수면 하 10.3~10.5m), 상위에 위치하는 고토양은 0.7m 정도의 두께로 나타나며, 점토질보다 큰 입자는 육안상 확인되지 않는다. 색상은 암황갈색(dark yellowish brown, 10YR 4/2)과 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)을 띠는 부분이 구분되며, 이들은 서로 불규칙하게 혼재된 양상을 보인다. 비각력화 용암류와의 경계면은 상부와 하부 모두 뚜렷하게 구분되어 나타나지만, 이중 하부 경계부에서는 용암류가 부분적으로 고토양화 되어 암편의 형태로 분리되어 있는 특징이 나타나기도 한다. 이보다 하위에 발달해 있는 고토양은 0.2m 정도의 두께를 보이며, 갈색(moderate brown, 5YR 4/4) 또는 담갈색(light brown 5YR 5/6)을 띠는 점토질 입자들로 이루어져 있다. 비각력화 용암류 구간과의 경계는 상부와 하부 모두 예리한 접촉면이 발달되어 있다.

(2) 해수면 하 32.7~49.5m

비각력화 용암류의 직하부에는 각력화 용암류의 암상을 보이는 구간이 발달되어 있으며, 시추코어로는 30cm 이하의 크기로 분리되어 있는 유리질 각력암이 회수되었다. 그러나 OTV 검층영상에서는 행원2호공과 행원3호공에서 관찰된 것과 유사한 암상특성을 보이는데, 구간 상부에는 다소의 파쇄가 진행된 용암류가 발달되어 있고 그 하부에는 최대 1m의 크기를 보이는 유리질 각력과 더불어 10cm 이하의 유리질 각력암, 팔라고나이트로 이루어진 기질 또한 관찰된다. 반각력화 용암류는 약 5m의 두께로 발달되어 있으며 P형과 S형 유동단위의 누층구조를 보인다. 아울러 파쇄된 부분에는 팔라고나이트로 채워져 있는 모습을 보이기도 한다. 용암류의 암색은 대체로 암회색(med. dark gray, N4)에서 담회색(med. light gray, N6)까지 확인된다. 하부에 발달된 유리질 각력암 구간과의 경계는 다소 모호하며 점진적인 변화를 보인다. 유리질 각력암 구간의 최상부에는 10~20cm의 유리질 각력과 더불어 1mm 이하의 미세한 유리질 파편이 무수히 많이 포함되어 있는 점토질 기질이 우세하게 발달되어 있다. 유리질 각력은 암회색(dark gray, N3, med. dark gray, N4)을 띠며, 기질은 적갈색(pale reddish brown, 10R 5/4, moderate reddish brown, 10R 4/6)으로 나타난다. 이 구간 하부에는 팔라고나이트의 기질 대신 10cm 이하로 잘게 부스러져 있는 세립의 유리질 각력들이 최대 1m의 크기로 발달된 유리질 각력들과 고밀도로 혼재되어 있는 특

정을 보인다. 이들 유리질 각력들의 색깔은 상위에서 관찰된 것과 같이 암회색 (dark gray, N3, med. dark gray, N4)을 띤다. 광물조성은 시추코어로 회수된 유리질 각력암에서 확인되며, 침상 장석이 1~3mm의 반정으로 나타나고 그 비율은 10% 이하로 유리질 각력암은 침상장석현무암으로 구분된다.

(3) 해수면 하 49.5~77.5m

각력화 용암류 구간의 직하부에는 다시 비각력화 용암류의 암상이 28.0m의 두께로 나타난다. 시추코어는 약 17m의 길이로 회수되어 다소 손실되어 있으며 상당 부분이 1m 이하의 길이로 분리되어 나타난다. 여기서는 총 4매의 용암류 유동단위가 구분되었으며, 모두 P형 파호이호이 용암류의 특징을 보인다. 유동단위는 최소 2.5m, 최대 14.3m, 평균 7.0m의 두께를 가지며 상위에 발달된 비각력화 용암류의 유동단위 평균두께에 비해 2배 정도 더 두꺼운 것으로 확인된다. 용암류의 광물조성은 주로 2mm 가량의 크기를 갖는 침상의 장석과 비정형의 감람석이 반정으로 관찰되며, 10% 이하의 발달비율을 보여 용암류는 침상장석감람석현무암에 해당된다. 또한 암색은 전반적으로 시추코어가 온전하게 회수된 치밀질부에서는 담회색 (med. light gray, N6)을 띠고 있으나, 블록으로 분리되어 나타나는 고다공질 내지 다공질부는 암회색 (dark gray, N3, med. dark gray, N4) 또는 회갈색 (light brownish gray, 5YR 6/1, brownish gray, 5YR 4/1)을 띤다.

(4) 해수면 하 77.5~134.5m

행원4호공에서는 다른 시추공들과는 달리 최하부에 비화산성 퇴적암이 나타나지 않고, 각력화 용암류 구간이 존재하고 있다. 해당 구간의 두께는 약 60m에 달하며, 이는 시추공들에서 관찰된 각력화 용암류 구간 중 가장 두껍게 발달되어 있는 특징을 보인다. 다만 OTV 검층이 이루어지지 않아 전반적인 암상특성 및 수직적 분포양상에 대한 확인은 불가하다. 시추코어는 최대 40cm까지의 크기를 갖는 분리된 유리질 각력암으로만 이루어져 있으며, 기질은 관찰되지 않는다. 유리질 각력암은 전반적으로 1~3mm의 크기를 갖는 침상 장석이 반정으로 확인되며 그 함량은 10% 이하로 침상장석현무암의 조직특성을 보인다. 또한 각력의 표면에는 화산 유리가 우세하게 발달되어 있지만, 일부 각력의 표면은 적갈색 (pale reddish brown, 10R 5/4)을 띠는 팔라고나이트로 피복되어 나타나기도 한다.

2. 지화학적 특성

연구대상 7개의 시추공으로부터 회수된 용암류 및 유리질 각력암 시료 152개에 대한 주원소 분석결과(Tables. 4-9~4-15)를 Le Bas et al. (1986)에 의한 실리카(SiO_2) 대 알칼리($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 함량 분류도인 TAS 다이어그램에 도시한 결과, 4가지의 지화학적 조성을 갖는 용암류로 구분할 수 있었다(Figs. 4-22, 4-23). 즉, 쏘레아이트질 현무암(평균 SiO_2 50.6wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3.5wt.%), 쏘레아이트질 안산암(평균 SiO_2 52.7wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 3.4wt.%), 알칼리 현무암(SiO_2 49.4wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 4.8wt.%), 조면현무암(SiO_2 50.2wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.4wt.%)의 조성을 나타내며, 이들 각각의 수직적 분포와 특징을 서술하면 아래와 같다.

1) 쏘레아이트질 현무암

이 조성의 비각력화 및 각력화 용암류는 전체 분석 시료수의 76%(전체 149개 중 112개의 시료)를 차지한다. 조성의 범위를 보면 SiO_2 는 47.7~52.7wt.%이고, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 2.9~4.1wt.%를 나타내었다.

KIGAM공에서는 용암류 유동단위 1~15와 각력화 용암류 구간, 월정1호공은 유동단위 1~13, 29, 31과 각력화 용암류 구간, 월정2호공은 유동단위 1~13, 23, 25이 쏘레아이트질 현무암의 조성을 보인다. 행원지역 시추공들의 경우에는 행원1호공이 유동단위 1~11, 14~19와 각력화 용암류 구간, 행원2호공은 유동단위 1~13, 15~21, 각력화 용암류 구간이 해당 화학조성을 나타내고 있으며, 나머지 행원3호공과 행원4호공은 모든 유동단위를 비롯한 각력화 구간이 쏘레아이트질 현무암의 조성을 갖는다(Figs. 4-22, 4-23).

2) 쏘레아이트질 안산암

쏘레아이트질 안산암의 조성은 전체 분석시료 중 35개(21%)에서 나타나고, 비각력화 용암류에서만 해당 조성을 가지며 이들 조성의 범위는 SiO_2 가 52.0~53.6wt.%이고, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 는 3.0~5.0wt.%를 보인다.

시추공별로 쏘레아이트질 안산암의 조성을 보이는 용암류 유동단위는 KIGAM공 16~33, 월정1호공 14~28, 30, 월정2호공 14~22, 24로 확인되며, 행원지역

Table 4-9. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the KIGAM borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-2.

Lava flow unit	1	2	3	4	5	6	7	B(1)	B(2)	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
SiO ₂	50.07	51.29	50.72	51.73	51.65	51.83	52.25	50.19	49.25	49.80	50.22	51.33	50.09	49.82	50.15	50.88	52.07	52.10	52.98	53.08	53.31	53.16	53.19	53.14	52.94	53.26	53.09	52.61	53.12	52.43	52.47	53.46	53.28	52.20	53.64	
TiO ₂	2.11	1.92	2.14	1.98	1.89	1.83	1.92	2.02	2.06	2.04	2.03	2.03	1.99	2.04	2.01	2.09	1.84	1.82	1.87	1.78	1.93	1.71	1.82	1.87	1.81	1.87	1.86	1.84	1.79	1.80	1.94	1.88	1.88	1.94	1.90	
Al ₂ O ₃	12.71	12.90	13.57	13.13	13.42	13.21	13.54	13.57	13.72	13.61	13.65	13.37	13.54	13.42	13.60	13.41	13.71	13.50	13.53	13.74	13.90	13.90	13.76	13.55	13.91	13.76	13.59	13.72	14.67	13.47	14.04	14.09	13.77	14.71	13.84	
MgO	8.53	8.59	7.31	7.72	7.78	7.84	7.50	8.42	8.62	8.48	8.47	8.36	8.59	8.46	8.66	7.10	7.35	7.64	7.10	6.82	6.69	7.06	6.77	6.73	6.88	6.69	6.74	6.81	5.92	7.49	6.57	6.52	6.79	6.60	6.89	
Fe ₂ O ₃	12.44	12.62	12.76	12.29	12.12	11.97	11.97	11.78	12.19	11.88	11.83	11.77	11.77	11.87	11.94	12.01	11.83	12.09	12.15	11.76	12.18	11.67	11.92	11.97	12.02	11.92	11.98	12.09	11.17	11.99	12.21	12.02	11.90	12.00	11.82	
MnO	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
CaO	8.55	8.37	8.82	8.46	8.61	8.44	8.57	8.67	8.19	8.78	8.76	8.69	8.73	8.66	8.71	8.47	8.20	8.10	8.09	8.15	8.26	8.17	8.10	8.04	8.17	8.12	8.10	8.08	8.52	8.05	8.37	8.27	8.28	8.75	8.36	
Na ₂ O	2.57	2.57	2.74	2.65	2.67	2.62	2.74	2.56	2.63	2.70	2.70	2.71	2.67	2.70	2.68	2.82	2.74	2.65	2.70	2.69	2.55	2.65	2.77	2.68	2.65	2.60	2.72	2.71	2.83	2.67	2.71	2.77	2.71	2.62	2.71	
K ₂ O	0.64	0.52	0.43	0.55	0.50	0.53	0.53	0.96	0.95	0.92	0.95	0.96	0.96	0.99	0.95	0.91	0.68	0.67	0.58	0.56	0.49	0.53	0.57	0.58	0.52	0.55	0.58	0.59	0.55	0.63	0.45	0.59	0.68	0.42	0.73	
P ₂ O ₅	0.29	0.24	0.27	0.25	0.24	0.23	0.24	0.34	0.31	0.34	0.34	0.35	0.34	0.35	0.34	0.33	0.26	0.25	0.25	0.24	0.26	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.26	0.26	0.24	0.25	0.27	0.26	0.26	0.22	0.27	
LOI ¹	0.62	0.47	0.20	0.33	0.18	0.48	0.23	0.49	0.30	0.18	0.30	0.24	0.51	0.62	0.31	0.11	0.45	0.36	0.20	0.42	0.14	0.32	0.26	0.44	0.09	0.34	0.52	0.02	0.36	0.61	0.28	0.42	0.22	0.25	0.05	
Total	98.69	99.65	99.11	99.24	99.22	99.14	99.62	99.15	98.38	98.90	99.41	99.95	99.34	99.09	99.51	98.28	99.28	99.34	99.61	99.39	99.86	99.54	99.54	99.39	99.38	99.53	99.59	98.87	99.31	99.55	99.45	100.42	99.93	99.86	100.35	

¹Loss on ignition

Table 4-10. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the WJ-1 borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-3.

Lava flow unit	1	4	5	6	9	10	B	11(1)	11(2)	14	19	23	24	27	28	29	30	31
SiO ₂	48.35	50.18	51.04	51.45	50.26	50.87	49.76	49.95	51.67	52.16	52.72	52.63	52.67	52.63	52.40	51.95	52.79	48.23
TiO ₂	2.12	2.05	1.88	1.93	1.90	2.08	1.93	2.01	1.85	1.93	1.87	1.86	2.04	1.83	1.83	1.82	1.96	2.16
Al ₂ O ₃	13.45	13.47	13.48	13.41	13.47	13.52	13.51	13.74	13.91	13.58	13.72	13.81	13.30	14.14	14.02	13.72	13.83	13.15
MgO	8.95	8.04	7.94	7.75	8.06	7.36	7.94	7.91	6.93	6.72	6.81	6.70	6.43	6.58	6.18	6.83	6.46	9.98
Fe ₂ O ₃	12.55	12.15	11.86	11.87	12.04	12.17	11.46	11.62	11.50	12.05	11.84	11.78	12.08	11.63	11.39	11.66	11.62	12.02
MnO	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16
CaO	9.18	8.90	8.77	8.59	8.86	8.84	8.73	8.67	8.33	8.24	8.21	8.21	8.04	8.40	8.30	8.17	8.35	8.89
Na ₂ O	2.61	2.63	2.64	2.72	2.58	2.70	2.62	2.79	2.75	2.74	2.75	2.73	2.73	2.77	2.77	2.73	2.71	2.52
K ₂ O	0.43	0.47	0.51	0.52	0.44	0.48	0.95	0.89	0.69	0.55	0.60	0.58	0.66	0.58	0.61	0.62	0.74	1.13
P ₂ O ₅	0.29	0.26	0.23	0.24	0.23	0.26	0.30	0.32	0.26	0.26	0.25	0.25	0.27	0.26	0.25	0.26	0.28	0.33
LOI ¹	0.02	0.24	0.15	0.38	0.23	0.26	0.65	0.55	0.39	0.06	0.17	0.05	0.32	0.28	0.40	0.49	0.23	0.13
Total	98.13	98.56	98.66	99.02	98.21	98.70	98.01	98.60	98.44	98.44	99.09	98.76	98.69	99.25	98.29	98.38	99.12	98.71

¹Loss on ignition

Table 4-11. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the WJ-2 borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-4.

Lava flow units	1(1)	1(2)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B	11	12	13	14	15	16	17(1)	17(2)	19	20	21	22	23	24	25
SiO ₂	50.10	48.92	49.78	51.15	50.69	50.43	50.79	50.04	51.62	51.34	50.54	50.16	50.12	49.94	51.37	52.52	52.72	52.64	52.75	52.54	52.81	52.42	52.06	52.18	51.91	52.21	47.69
TiO ₂	2.08	2.25	2.02	2.04	2.01	1.98	1.91	1.87	2.11	1.85	1.96	1.96	1.91	1.90	1.84	1.93	1.82	1.90	1.89	1.77	1.97	1.86	1.91	1.81	1.74	1.87	1.94
Al ₂ O ₃	12.87	13.40	12.95	13.26	13.49	13.73	13.38	13.41	13.35	13.41	13.43	13.59	13.89	13.81	13.81	13.72	13.91	13.85	14.08	14.04	14.19	14.03	13.99	13.64	13.65	13.84	13.08
MgO	8.89	8.41	9.05	7.73	7.79	7.88	7.95	8.41	7.37	8.15	7.93	8.03	8.00	8.38	7.50	6.65	6.88	6.63	6.54	6.90	5.80	6.28	6.43	7.27	7.72	6.76	10.26
Fe ₂ O ₃	12.12	12.41	12.09	12.00	12.09	12.32	12.18	12.86	12.30	11.79	12.03	11.54	11.31	11.58	11.64	11.94	11.65	11.86	11.76	11.46	11.58	11.47	11.73	11.86	11.73	11.70	11.64
MnO	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
CaO	8.63	8.95	8.53	8.63	8.71	8.93	8.64	8.88	8.54	8.62	8.63	8.84	8.97	8.92	8.35	8.29	8.26	8.29	8.36	8.34	8.45	8.32	8.35	8.13	8.15	8.30	9.64
Na ₂ O	2.90	3.32	2.62	2.71	2.86	2.66	2.95	2.59	2.77	2.70	2.85	4.33	2.74	2.69	2.75	2.77	2.76	2.75	2.79	2.73	2.82	2.82	2.70	2.68	3.07	4.28	2.43
K ₂ O	0.70	0.46	0.65	0.60	0.46	0.36	0.47	0.29	0.55	0.55	0.54	1.05	0.96	0.92	0.69	0.57	0.56	0.56	0.62	0.56	0.59	0.62	0.61	0.63	0.65	0.75	0.97
P ₂ O ₅	0.30	0.33	0.28	0.27	0.25	0.23	0.24	0.22	0.26	0.24	0.25	0.30	0.29	0.29	0.26	0.25	0.24	0.25	0.26	0.24	0.28	0.26	0.27	0.25	0.25	0.26	0.30
LOI ¹	0.50	0.37	0.43	0.34	0.18	0.01	0.18	0.08	0.16	0.37	0.18	0.66	0.49	0.37	0.49	0.02	0.23	0.07	0.06	0.11	0.20	0.03	0.25	0.27	0.15	0.01	0.58
Total	99.25	98.99	98.56	98.89	98.69	98.69	98.83	98.81	99.20	99.16	98.50	100.62	98.82	98.95	98.86	98.82	99.19	98.95	99.25	98.86	98.83	98.25	98.45	98.87	99.17	100.13	98.68

¹Loss on ignition

Table 4-12. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-1 borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-5.

Lava flow units	1	2(1)	2(2)	4	5	6	7	8	9	B	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	50.58	50.90	51.28	51.05	51.26	51.25	51.23	51.51	51.26	49.04	51.16	50.64	51.99	52.23	48.24	47.76	47.84	50.60	50.68	51.95
TiO ₂	2.04	1.96	2.17	2.07	2.02	1.97	1.86	2.22	1.96	1.95	1.98	1.89	2.14	1.95	2.09	2.05	2.08	2.08	2.06	1.94
Al ₂ O ₃	13.77	13.40	13.67	13.69	13.58	13.56	13.72	13.38	13.70	13.90	13.99	13.86	13.74	14.13	13.43	13.40	13.42	13.42	13.51	13.93
MgO	8.23	8.26	7.36	7.67	7.71	7.95	8.12	7.04	7.77	8.48	7.47	7.73	6.93	6.79	9.53	9.58	9.31	7.90	7.95	7.06
Fe ₂ O ₃	12.30	12.11	12.23	12.27	11.97	11.91	11.79	12.21	11.74	11.85	11.76	11.75	11.95	11.48	11.96	11.89	11.93	11.52	11.62	11.35
MnO	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15
CaO	8.88	8.69	8.80	8.76	8.67	8.68	8.78	8.57	8.76	8.34	8.53	8.39	8.28	8.56	9.57	9.66	9.49	8.52	8.55	8.25
Na ₂ O	2.82	2.98	3.10	2.89	2.88	2.92	2.89	3.26	2.86	2.79	2.93	2.91	3.03	2.96	2.78	2.80	2.84	2.93	2.89	2.97
K ₂ O	0.50	0.56	0.55	0.55	0.58	0.58	0.55	0.66	0.63	0.92	0.78	0.75	0.81	0.76	0.98	0.96	0.98	0.97	0.92	0.82
P ₂ O ₅	0.25	0.25	0.28	0.26	0.25	0.25	0.24	0.29	0.26	0.29	0.29	0.28	0.30	0.27	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.28
LOI ¹	0.00	0.06	0.05	0.00	0.24	0.33	0.24	0.59	0.42	0.56	0.36	0.35	0.47	0.16	0.39	0.48	0.45	0.33	0.29	0.33
Total	99.53	99.34	99.65	99.37	99.35	99.55	99.58	99.89	99.51	98.28	99.41	98.69	99.80	99.45	99.47	99.08	98.83	98.74	98.94	99.03

¹Loss on ignition

Table 4-13. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-2 borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-6.

Lava flow units	1	3(1)	3(2)	3(3)	5	7	9	10	11	F	12	14	15	18	19	20	21
SiO ₂	50.73	50.44	51.24	50.50	51.14	50.86	50.89	50.65	49.44	49.70	49.74	49.42	51.66	49.95	51.20	50.92	51.01
TiO ₂	1.97	1.91	2.08	1.93	2.06	2.00	1.96	1.94	1.75	1.88	1.88	2.03	1.76	2.02	2.07	1.91	2.25
Al ₂ O ₃	13.42	13.63	13.28	13.42	13.42	13.46	13.75	13.39	13.45	13.47	13.66	13.65	13.89	13.31	13.73	13.63	13.70
MgO	8.11	7.98	7.51	8.26	7.37	7.21	7.46	7.97	7.41	8.02	8.35	8.03	7.00	8.27	8.12	8.65	7.47
Fe ₂ O ₃	12.09	12.06	12.14	12.21	12.10	11.74	11.78	11.98	10.96	11.46	11.66	12.58	11.50	11.49	11.57	11.52	11.85
MnO	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16
CaO	8.66	8.76	8.48	8.67	8.60	8.61	8.78	8.57	8.72	8.60	8.73	8.43	8.30	8.56	8.64	8.85	8.46
Na ₂ O	2.74	2.79	2.94	2.72	2.83	2.85	2.95	2.74	2.60	3.18	2.78	4.12	2.89	2.76	2.80	2.80	2.90
K ₂ O	0.57	0.46	0.61	0.48	0.57	0.59	0.54	0.57	0.55	0.96	0.90	0.68	0.55	0.95	0.93	0.87	0.88
P ₂ O ₅	0.25	0.24	0.27	0.23	0.26	0.26	0.25	0.26	0.23	0.28	0.28	0.27	0.23	0.32	0.31	0.29	0.29
LOI ¹	0.20	0.10	0.10	0.26	0.11	0.31	0.15	0.24	2.78	0.75	0.38	0.33	0.46	0.42	0.01	0.08	0.17
Total	98.90	98.53	98.80	98.84	98.62	98.04	98.67	98.46	98.03	98.44	98.52	99.70	98.40	98.21	99.55	99.67	99.14

¹Loss on ignition

Table 4-14. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-3 borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-7.

Lava flow units	2	3	B(1)	B(2)	4	5	6	7	10	11	12	14	15	16
SiO₂	51.51	51.13	50.99	50.13	50.25	49.71	49.59	49.22	48.31	51.17	49.74	50.07	50.88	50.87
TiO₂	1.94	1.84	2.05	1.90	1.91	1.83	1.88	1.89	2.02	2.02	2.13	2.07	2.01	1.94
Al₂O₃	13.43	13.25	13.37	13.51	13.49	13.80	13.78	13.56	13.13	13.38	13.32	13.33	13.28	13.42
MgO	7.83	8.01	8.11	7.89	8.23	8.71	8.18	8.98	9.03	7.62	8.31	8.44	7.99	8.14
Fe₂O₃	11.86	11.74	11.38	11.40	11.58	11.69	11.89	11.98	11.99	11.37	11.60	11.67	11.46	11.45
MnO	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15
CaO	8.60	8.52	8.71	8.64	8.68	8.80	8.86	8.41	9.22	8.41	8.81	8.72	8.42	8.52
Na₂O	2.69	2.65	2.62	2.86	2.71	2.63	2.73	2.49	2.58	2.78	2.70	2.71	2.75	2.69
K₂O	0.56	0.53	0.72	0.96	0.93	0.79	0.78	0.74	0.84	0.89	1.03	0.96	0.90	0.83
P₂O₅	0.25	0.24	0.25	0.29	0.29	0.27	0.29	0.29	0.29	0.30	0.34	0.34	0.31	0.29
LOI¹	0.02	0.35	0.22	0.57	0.25	0.12	0.00	0.56	0.55	0.69	0.04	0.01	0.01	0.27
Total	98.84	98.42	98.58	98.31	98.47	98.52	98.12	98.29	98.14	98.78	98.18	98.48	98.16	98.56

¹Loss on ignition

Table 4-15. Contents of major elements (wt.%) of the lava flow units from the HW-4 borehole core. B: brecciated lava flow. For locations of sampling points, see Table 3-8.

Lava flow units	B(1)	B(2)	1	2	3	4	B(3)	5	8	9	10	12	13	14	16	17	18	19
SiO ₂	51.12	51.11	51.34	51.79	51.44	50.49	49.55	49.23	50.05	50.14	50.35	50.42	50.60	49.05	48.87	51.01	50.76	50.39
TiO ₂	2.04	2.05	2.18	2.07	1.98	1.98	2.03	2.06	1.96	1.88	1.88	1.81	1.78	2.20	2.34	2.09	2.01	1.96
Al ₂ O ₃	13.04	13.02	13.21	13.39	13.21	13.33	13.46	13.38	13.67	13.42	13.50	13.69	13.78	13.56	13.19	13.48	13.36	13.37
MgO	7.64	7.65	7.73	7.61	8.24	8.55	9.07	8.76	7.80	8.58	8.30	8.61	8.35	7.95	8.68	8.04	7.91	8.42
Fe ₂ O ₃	11.40	11.48	11.85	11.48	11.39	11.31	12.08	12.00	11.48	11.72	11.62	11.59	11.65	11.49	11.85	11.54	11.42	11.62
MnO	7.64	7.65	7.73	7.61	8.24	8.55	9.07	8.76	7.80	8.58	8.30	8.61	8.35	7.95	8.68	8.04	7.91	8.42
CaO	11.40	11.48	11.85	11.48	11.39	11.31	12.08	12.00	11.48	11.72	11.62	11.59	11.65	11.49	11.85	11.54	11.42	11.62
Na ₂ O	0.15	0.15	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15
K ₂ O	8.36	8.40	8.49	8.59	8.62	8.82	9.08	9.24	8.87	8.65	8.62	8.70	8.66	8.61	8.93	8.64	8.44	8.50
P ₂ O ₅	2.62	2.71	3.18	2.70	2.67	2.67	2.68	2.80	2.92	2.95	2.75	2.71	2.80	2.85	2.74	2.99	2.69	2.73
LOI ¹	0.66	0.68	0.76	0.67	0.71	0.81	0.85	0.87	0.96	0.92	0.92	0.85	0.80	1.06	1.16	1.01	0.89	0.81
Total	0.24	0.25	0.27	0.25	0.25	0.27	0.29	0.31	0.30	0.28	0.27	0.27	0.26	0.42	0.41	0.33	0.30	0.30

¹Loss on ignition

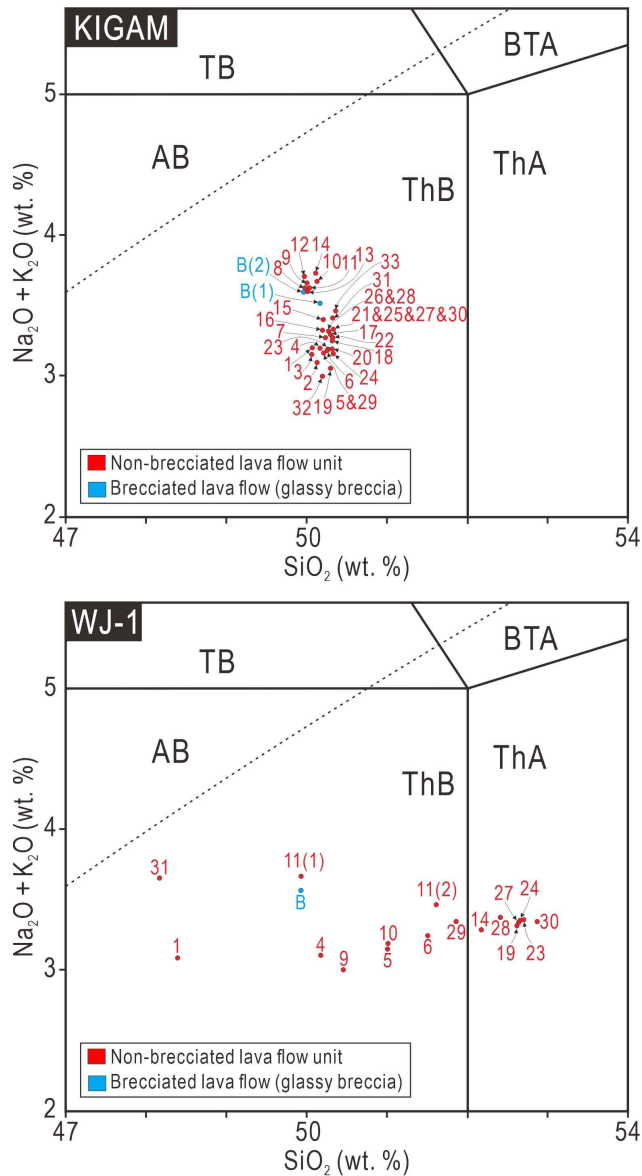


Fig. 4-22. Chemical composition of the non-brecciated lava flows and brecciated lava flows in TAS diagram. B: brecciated lava flow. A dotted line divides alkalic from subalkalic lava flows (Irvine and Baragar, 1971). Numbers denote the lava flow unit numbers shown in Tables 4-9~4-15. TB: trachybasalt, BTA: basaltic trachyandesite, AB: alkali basalt, ThB: tholeiitic basalt, ThA: tholeiitic andesite.

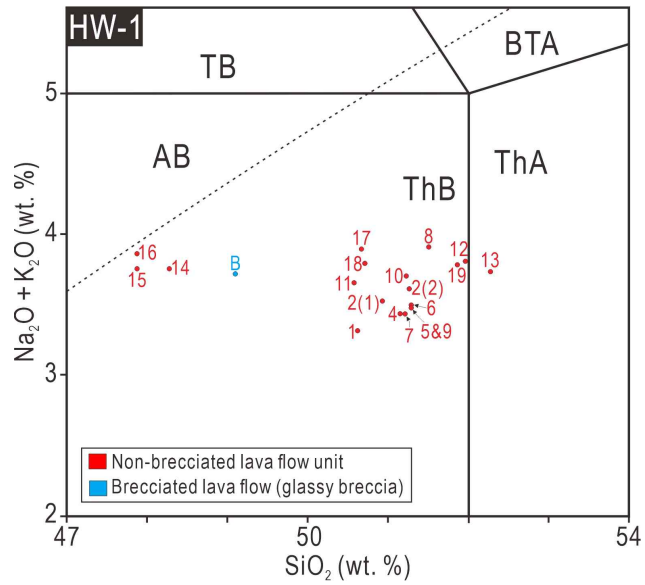
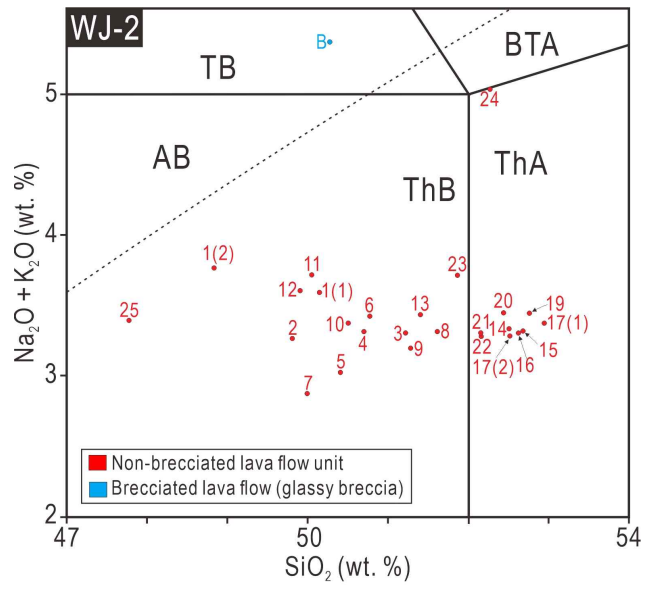


Fig. 4-22. Continued.

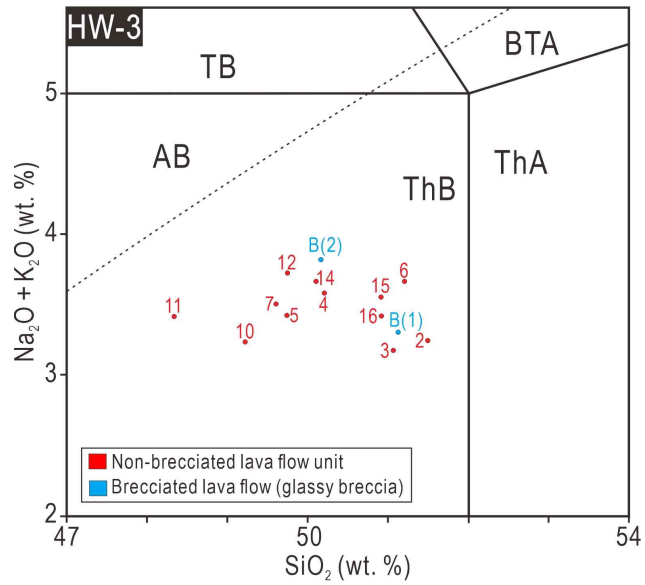
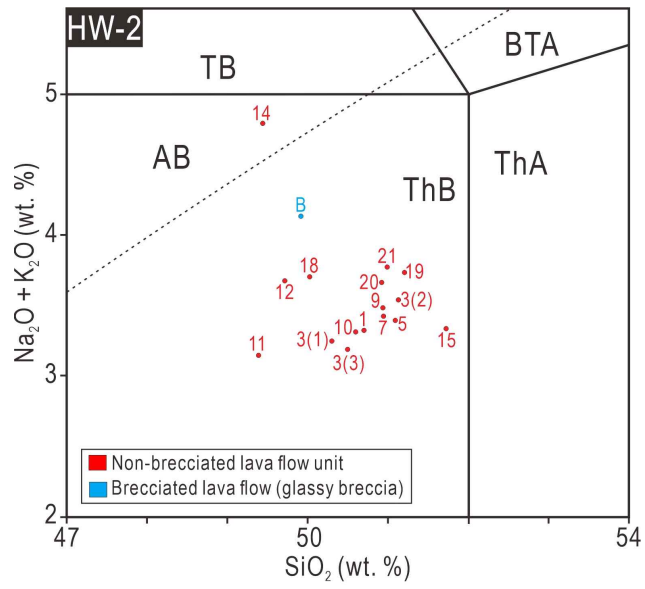


Fig. 4-22. Continued.

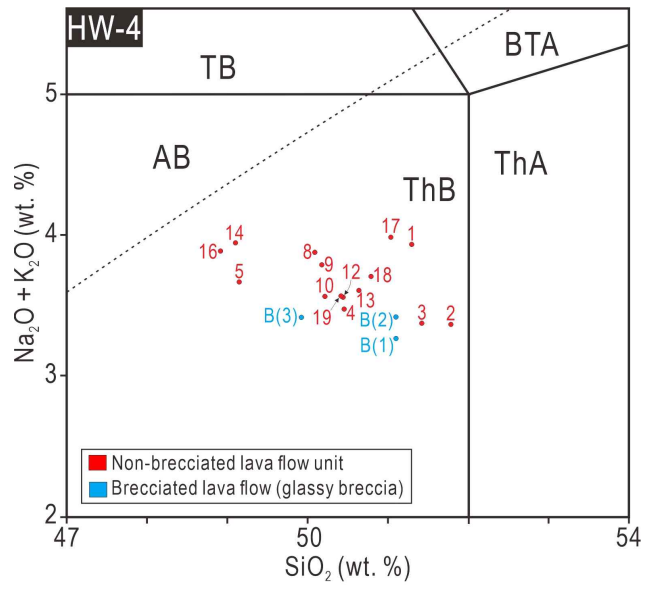


Fig. 4-22. Continued.

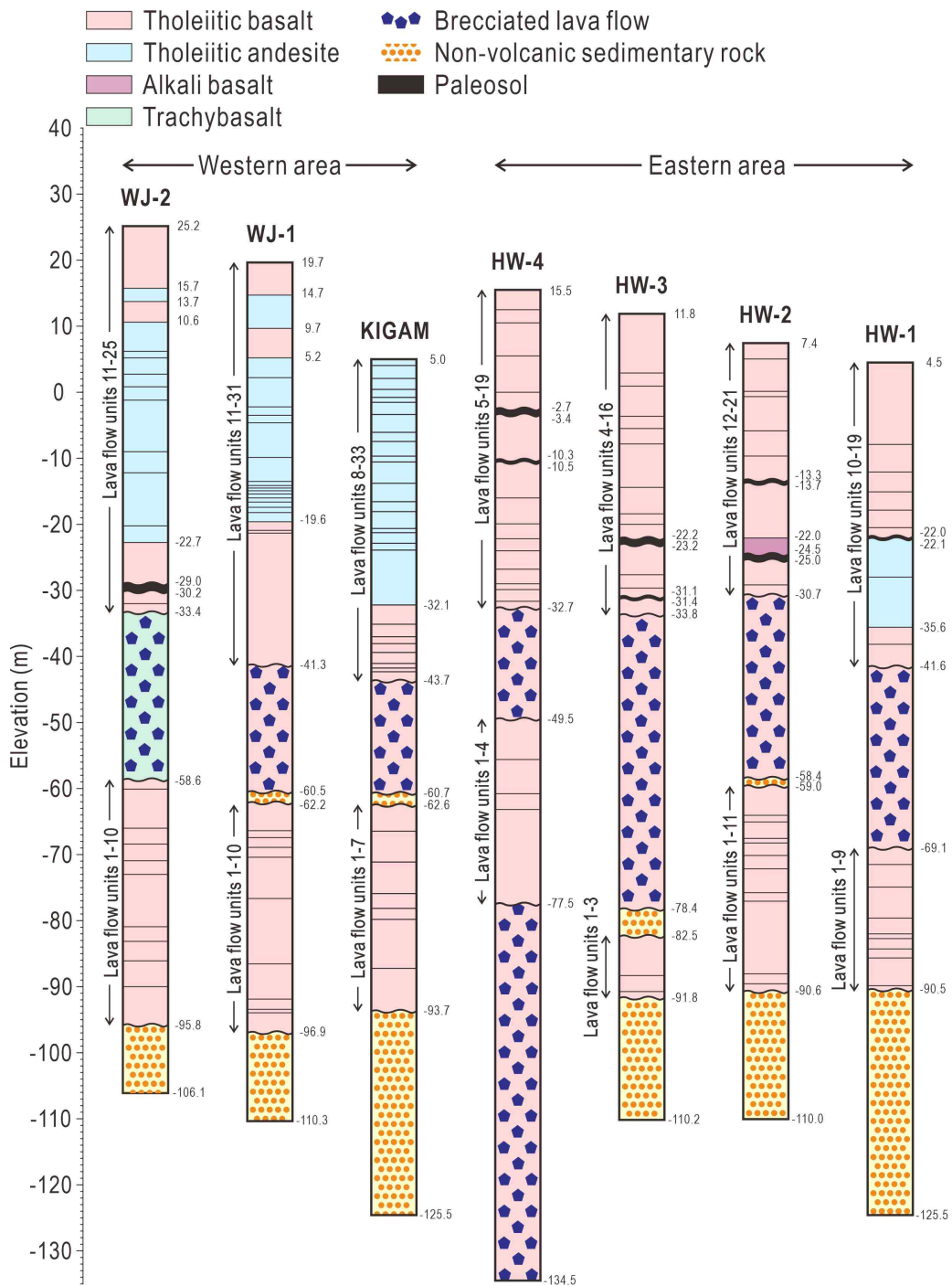


Fig. 4-23. Subdivision of non-brecciated lava flow units and brecciated lava flow depending on chemical composition by TAS diagram analysis.

시추공들에서는 행원1호공의 유동단위 12, 13에서만 해당 조성이 나타난다(Figs. 4-22, 4-23).

3) 알칼리 현무암 및 조면현무암

알칼리 현무암은 행원2호공 비각력화 용암류 1개 시료에서 나타나고, 조면현무암은 월정2호공 각력화 용암류 1개 시료에서만 확인된다. 알칼리 현무암의 조성을 보면, SiO_2 가 49.4wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 4.8wt.%이고, 조면현무암은 SiO_2 50.2wt.%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 5.4wt.%로 나타난다. 월정2호공의 조면현무암은 해수면 하 33.4~58.6m 사이에 발달된 각력화 용암류 구간을 이루고 있고, 알칼리 현무암은 행원2호공 해수면 하 22.0~24.5m 구간을 이루는 비각력화 용암류에 해당된다(Figs. 4-22, 4-23).

4) 해석

시추코어 용암류는 대부분 비알칼리 계열의 쏘레아이트질 현무암과 쏘레아이트질 안산암의 조성을 나타내며, 일부는 알칼리 현무암과 조면현무암의 특성을 보이기도 한다. 이들의 수직적 분포상태는 월정지역과 행원지역에 위치한 시추공에서 상이한 양상을 보이고 있다. 월정지역의 3개 시추공은 해수면 하 약 20~30m 이하구간은 쏘레아이트질 현무암이 지배적인 반면, 그 상위 구간은 쏘레아이트질 안산암과 쏘레아이트질 현무암이 혼재하는 특징을 나타낸다. 그러나 행원지역은 행원1호공과 행원2호공의 각각 1개 시료에서 알칼리현무암, 쏘레아이트질 안산암이 출현하는 것을 제외하면 모두 쏘레아이트질 현무암의 조성을 보이고 있다.

제주도에 분포하는 용암류의 화학조성은 1980년대까지는 알칼리 계열의 용암류로만 구성된 것으로 보고되어 왔으나, Lee (1989)에 의해 처음으로 비알칼리암류가 보고되었다(Park et al., 1999). 이러한 비알칼리 계열의 용암류는 동부와 서부 해안지역을 중심으로 분포하고 있고, 본 연구 대상 시추공에서도 비각력화 용암류 및 각력화 용암류의 거의 대부분은 비알칼리암류인 쏘레아이트질 현무암 및 안산암의 조성을 나타낸다. 이러한 비알칼리 계열의 현무암을 만든 모마그마는 실험을 통해 1GPa 이하의 압력이 발생하는 깊이에서 맨틀 근원지의 부분용융

에 의해 형성되는 것으로 보고된 바 있다(Jaques and Green, 1980). 이때 부분용융 정도는 모마그마의 구성에 영향을 미치지 않으나, 이보다 압력이 증가된 깊이에서는 부분용융이 더 큰 규모로 이루어져야 비알칼리 계열의 모마그마가 형성될 수 있다. 최근 제주도 용암류의 지화학적 분석연구(Brenna et al., 2012; Brenna et al., 2015)에서는 비알칼리 계열의 모마그마는 앞서 보고된 실험결과보다 높은 2.5GPa의 압력이 작용하는 지표 하 약 90km 깊이에서 형성된 것으로 해석하였다. Park and Kwon (1996)은 맨틀의 부분용융 모델링을 통해 해당 깊이에서는 석류석이 잔류광물로 모마그마에 대한 영향이 지배적이었으며, 그 외에는 감람석, 사방회석, 단사회석으로 맨틀 근원지의 광물조합을 추정하였다. 아울러 맨틀의 부분 용융정도는 연구마다 약간의 차이를 보이긴 하지만 대체로 5~8%인 것으로 확인된다. 반면 알칼리암의 모마그마인 경우에는 비알칼리 계열의 마그마보다 형성 깊이가 110km로 더 깊으며, 맨틀의 부분용융은 1~2% 정도로 더 낮을 때 만들어지는 것으로 보고되었다(Brenna et al., 2015).

이전의 연구(Koh et al., 2013)에 의하면, 제주도에서 비알칼리 계열의 용암류가 처음 출현한 화산활동의 시기는 0.5~0.3Ma로서, 동부와 서부 해안지역에 소규모로 분출하였다. 그 후 0.3~0.1Ma 기간에 들어와서는 제주도 남부를 제외한 동부, 북부, 서부 지역에 비교적 넓은 범위에 걸쳐 화산활동이 진행되었고, 동·서부 해안지역 지표에 분포하는 비알칼리 계열의 용암류는 대부분 0.1Ma 이내의 연대 값을 갖는다.

3. 자연감마선 특성

1) 암상별 자연감마선 특성

시추공 지구물리검층을 통해 측정된 수직적 자연감마선(natural gamma-ray, 이하 NGR)의 세기와 시추코어에서 구분된 암상을 대비하여 암상에 따른 NGR 세기를 구하였다(Table 4-16)(Fig. 4-24). 특징적으로 동일 암상이 2구간에 걸쳐 나타나는 경우 이를 하위와 상위로 구분하여 각각의 NGR 세기를 정리하였다.

비화산성 퇴적암이 발달된 구간에서 NGR 세기는 최소 9.0API, 최대 164.0API, 평균 18.3~125.2API의 강도를 나타낸다. 세부적으로 하위에 발달되어 있는 비화산성

Table 4-16. Distribution of natural gamma-ray intensity for each rock type classified by geologic logging.

Classification		Natural gamma-ray intensity (API)																				
		KIGAM			WJ-1			WJ-2			HW-1			HW-2			HW-3			HW-4		
		min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.
Non-volcanic sedimentary rock	upper	20.4	45.8	33.4	23.6	54.9	34.8	-	-	-	19.0	58.7	37.6	17.3	35.4	28.3	9.0	66.7	29.0	-	-	-
	lower	34.9	164.0	125.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.3	34.4	24.5	13.9	26.0	18.3	-	-	-
Total		• Min: 9.0 • Max: 164.0 • Average: 18.3~125.2																				
Brecciated lava flow	upper	26.9	54.9	39.0	18.3	45.6	29.3	10.7	46.2	27.7	34.9	43.3	39.1	7.1	42.1	24.4	12.8	45.8	26.6	10.6	43.5	25.8
	lower	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.8	27.7
Total		• Min: 6.8 • Max: 72.4 • Average: 24.4~46.3																				
Non-brecciated lava flow	upper	15.1	47.8	29.0	10.4	102.5	33.9	12.4	108.8	34.4	20.4	66.5	38.3	15.4	71.2	33.1	12.3	72.8	38.3	19.5	75.2	39.8
	lower	13.9	45.5	25.5	11.3	33.2	20.0	10.3	34.0	19.6	12.8	52.7	27.7	8.1	38.9	19.6	13.0	59.5	22.3	10.4	36.8	23.1
Total		• Min: 8.1 • Max: 102.5 • Average: 19.6~39.8																				
Paleosol		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.9	46.6	27.0	23.2	88.3	48.6	32.1	63.1	46.2
Total		• Min: 23.2 • Max: 88.3 • Average: 27.0~48.6																				

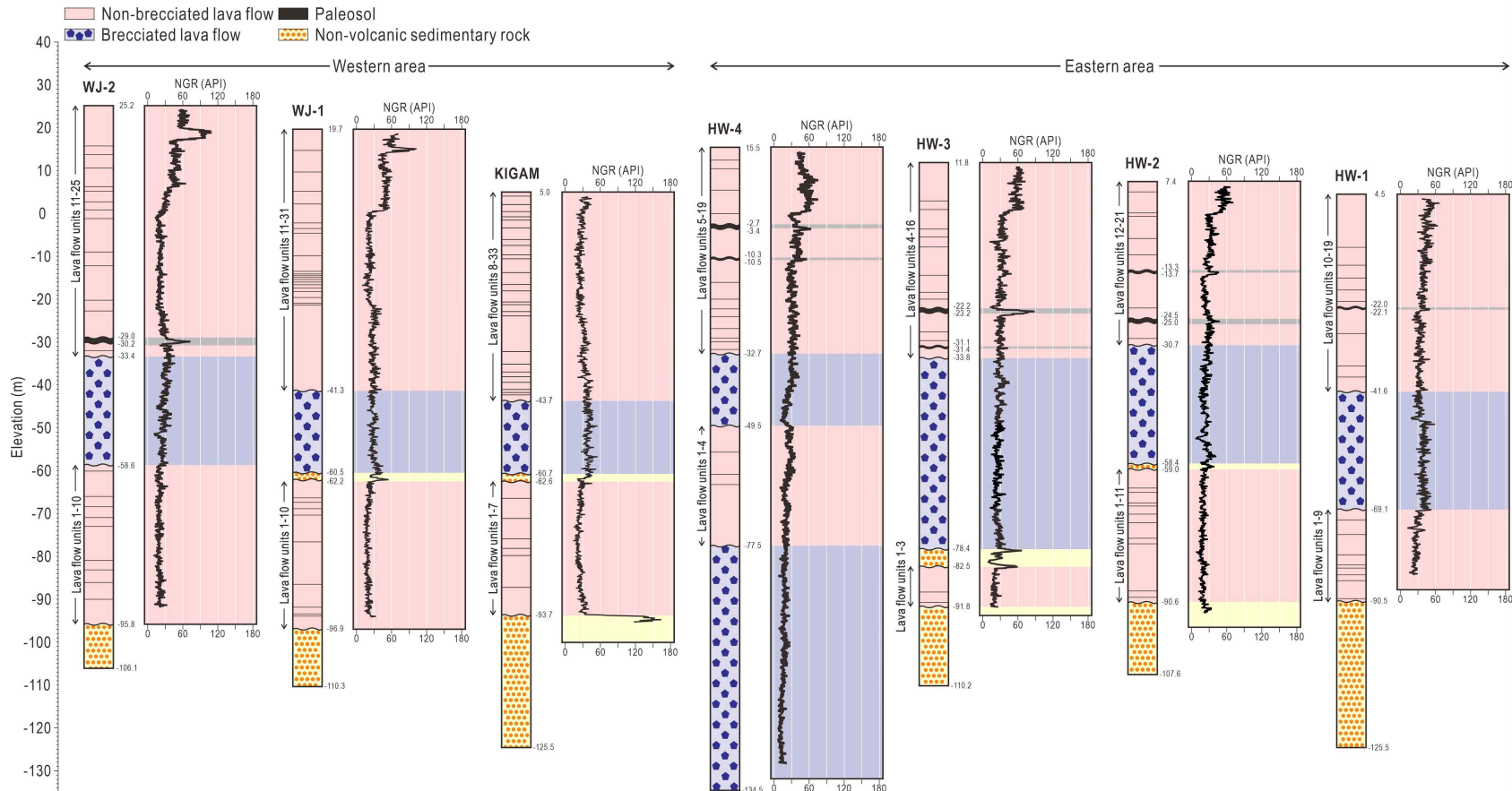


Fig. 4-24. Comparison between sections of natural gamma-ray log and lithologic core log.

퇴적암은 KIGAM공, 행원2호공, 행원3호공, 행원4호공에서 상부 5m 이내의 구간만 측정되었으며, 시추공별 평균 세기는 18.3~125.2API로 매우 넓은 범위 값을 갖는다. 아울러 상위에 비화산성 퇴적암 발달되어 있는 시추공들(KIGAM공, 월정1호공, 행원1호공, 행원2호공, 행원3호공)에서 NGR 세기는 최소 9.0API, 최대 66.7API, 평균 28.3~34.8API로 전반적으로 하위 퇴적암에 비해 낮은 강도를 보인다.

각력화 용암류 암상을 보이는 구간들에서는 NGR 세기가 6.8~72.4API의 넓은 범위로 측정되었으며, 시추공별 평균 강도는 24.4~46.3API로 확인된다. 구간에 따라 행원4호공에서만 관찰되는 하위 각력화 용암류 구간의 NGR 세기는 최소 6.8API, 최대 27.7API, 평균 16.0API로 비교적 좁은 범위의 강도로 나타난다. 한편 모든 시추공에서 확인되는 상위 각력화 용암류 구간에서는 최소 10.6API, 최대 58.7API, 평균 24.4~39.0API로 하위 유리질 각력암보다 전반적으로 큰 수치를 갖는다.

비각력화 용암류 구간은 모든 시추공들에서 2매씩 발달되어 있는 것이 확인되며, 전반적인 NGR 강도는 8.1~102.5API로 넓은 범위로 나타나지만, 시추공별로 평균 범위는 19.6~39.8API로 다소 좁아진 특징을 보인다. 위치상 하위에 발달되어 있는 비각력화 용암류 구간에서는 평균 19.6~27.7API를 나타냈으나, 최소값은 8.1API, 최대값은 59.5API로 다소 편차가 크다. 시추공 최상부를 이루고 있는 상위 비각력화 용암류의 NGR 세기는 10.4~102.5API로 넓은 범위로 분포되어 있지만, 시추공별 평균 세기는 29.0~39.8API로 좁은 범위를 갖는다. 상위 비각력화 용암류 사이에 협재되어 있는 고토양의 경우에는 최소 23.2API, 최대 88.3API, 평균 27.0~48.6API의 NGR 세기를 보인다.

2) 지화학 조성별 자연감마선 특성

TAS 다이어그램을 통해 구분된 비각력화 및 각력화 용암류의 지화학적 조성에 따라 NGR의 세기를 구하였다(Table 4-17)(Fig. 4-25). 시추코어에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 쏘레아이트질 현무암은 NGR의 세기가 6.8~108.8API로 다소 넓은 수치범위를 보이고 있으며, 시추공별 평균은 26.3~36.7API로 나타난다. 그 다음으로 비율이 높은 쏘레아이트질 안산암에서의 NGR 세기는 최소

Table 4-17. Distribution of natural gamma-ray intensity for each rock type classified by chemical components.

Classification	Natural gamma-ray intensity (API)																				
	KIGAM			WJ-1			WJ-2			HW-1			HW-2			HW-3			HW-4		
	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.	min.	max.	ave.
Tholeiitic basalt	13.9	54.9	31.0	11.3	102.5	28.7	10.3	108.8	30.4	12.8	66.5	36.7	7.1	71.2	26.0	12.3	72.8	31.4	6.8	75.2	26.3
Tholeiitic andesite	15.1	44.6	27.4	10.4	79.7	30.6	12.4	64.9	26.8	20.4	50.6	33.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alkali basalt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.8	35.6	27.3	-	-	-	-	-	-
Trachybasalt	-	-	-	-	-	-	10.7	46.2	27.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

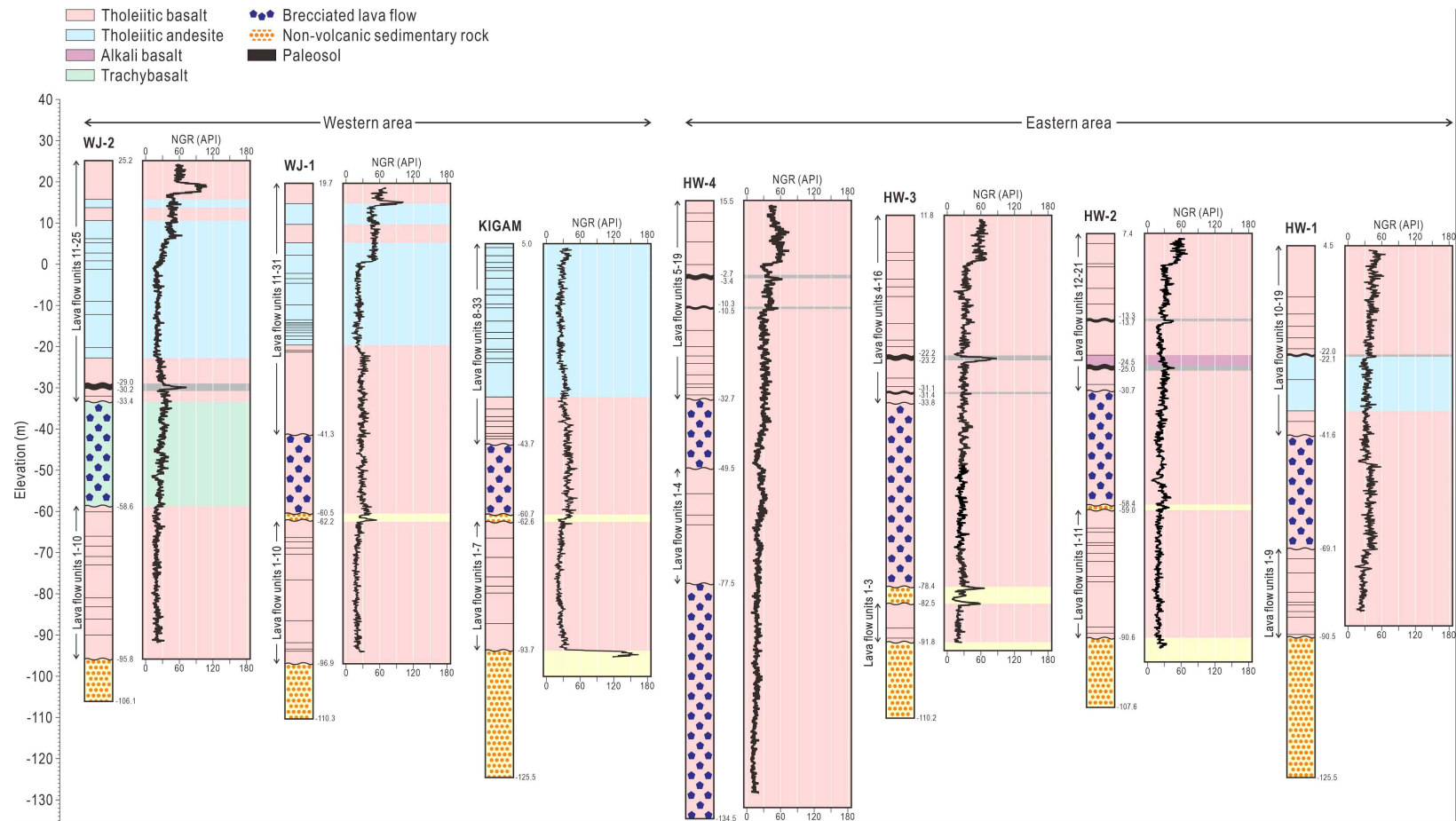


Fig. 4-25. Comparison between sections of natural gamma-ray log and chemical composition of non-brecciated lava flows and brecciated lava flows.

10.4API, 최대 79.7API로 쏘레아이트질 현무암에 비해 좁은 범위를 갖는 것으로 확인되나, 시추공별 평균은 26.8~33.5API로 큰 차이를 보이지 않는다. 행원2호공의 단일 용암류 유동단위에서 나타나는 알칼리 현무암은 19.8~35.6API의 NGR 세기를 보이며, 평균 세기는 27.3API로 계산되었다. 아울러 월정2호공 각력화 용암류 구간의 지화학적 조성에 해당하는 조면현무암은 최대 10.7API, 최소 46.2API, 평균 27.7API의 NGR 세기를 보인다.

3) 해석

시추코어 지질검층을 통해 구분된 암상별로 NGR 세기를 대비한 결과, 비화산성 퇴적암이 가장 높은 강도를 보이며 그 뒤로는 고토양과 각력화 용암류가 다소 비슷한 세기를 보이고 있으며 비각력화 용암류의 경우에는 가장 낮게 나타나는 것이 확인되었다(Table 4-16)(Fig. 4-24).

일반적으로 NGR의 발생은 지층을 구성하고 있는 원소 중 칼륨, 우라늄, 토륨 동위원소의 방사성붕괴로 인해 발생된다(Pirson, 1983). 따라서 지하에 발달되어 있는 지층을 구성하는 물질의 종류에 따라 NGR 세기는 다르게 나타나기 때문에 지층의 암상을 구분할 수 있는 지시자로도 활용되고 있다(Serra, 1983). 그 중에서도 특히, 니질 퇴적물의 주 구성 원소는 칼륨으로서 이로 인해 셰일(shale)과 같은 암상이 발달된 곳에서는 NGR 세기가 높게 나타나는 경향을 보인다(Asquith et al., 2004). Shim et al. (2018)에서는 제주도 전역에 분포되어 있는 시추공들에서 취득된 NGR 세기를 지질층서와 대비한 연구를 수행하였다. 그 결과 해당 연구에서도 제주도 동부지역 시추공의 최하부에 발달된 퇴적암의 경우에는 50~80API 범위로 NGR 세기를 보이지만, 비각력화 용암류의 경우에는 50API 이하의 강도를 보여 두 암상간의 차이점을 확인하였다. Hwang et al. (2006)에서는 비각력화 용암류와 각력화 용암류의 암상을 보이는 구간에서 측정된 NGR 세기를 비교하였으며, 비각력화 용암류의 경우에는 17~39API의 범위로 나타나지만 각력화 용암류의 경우에는 21~54API로 용암류에 비해 다소 높은 세기를 보이는 것으로 보고하였다.

이러한 기존 연구의 결과들을 근거로 시추코어 최하부에 발달된 비화산성 퇴적암의 NGR 강도가 높게 나타나는 것은 해당 구간이 고토양 더불어 실트입자들

로 이루어진 퇴적물이 복잡하게 혼재되어 있는 암상이 나타나기 때문에 해석된다(Figs. 4-8, 4-9). 이와 더불어 비각력화 용암류 사이에 얇게 협재되어 있는 고토양의 경우에도 육안으로 식별되는 입자성 물질은 관찰되지 않고 대부분 세립의 점토로 이루어져 있기 때문에(Fig. 4-8) NGR이 높은 강도로 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

각력화 용암류 구간의 NGR 세기가 비각력화 용암류보다 크게 나타날 수 있는 요인으로는 유리질 각력들 사이를 채우고 있는 팔라고나이트 기질의 발달로 인한 것으로 보인다. 팔라고나이트는 일라이트와 몬모릴로나이트와 같은 점토광물의 혼합체로 구성되어 있어(Kawachi et al., 1983), 상대적으로 용암류보다 더 많은 칼륨 원소를 포함하고 있기 때문에 NGR의 세기가 크게 나타날 수 있을 것으로 추정된다.

용암류의 지화학적 조성에 따라 구분된 NGR 세기는 조성에 따라 구분될 수 있는 특징이 확인되지 않는다(Table 4-17)(Fig. 4-25). 기존 연구와 이론에 의하면, 알칼리 현무암과 조면현무암의 경우에는 칼륨 원소의 함량이 슐레아이트질 현무암 및 안산암에 비해 더 크기 때문에 NGR 세기는 이에 비례하여 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Bartetzko et al., 2001). Shim et al. (2018)에서는 알칼리 현무암은 49.9 ± 9.4 API, 조면현무암이 53.7 ± 8.6 API의 강도를 보이는 것에 반해 비알칼리 계열인 슐레아이트질 현무암이 21.6 ± 5.0 API, 슐레아이트질 안산암은 22.5 ± 7.4 API로 상대적으로 낮은 NGR 세기를 나타내는 것으로 보고되어 이론과 잘 부합하는 결과를 보였다.

본 연구에서도 비알칼리 계열의 용암류에서는 위 연구와 유사하게 26~30API의 NGR 세기를 보이고 있으나, 알칼리 현무암과 조면현무암은 약 27API로 절반 정도의 강도로 측정되었다. 이와 같은 차이는 연구지역에 발달된 알칼리 현무암과 조면현무암은 각각 하나의 유동단위 및 각력화 용암류 구간에서만 나타나기 때문에 해당 결과는 통계적으로 객관성을 나타내기에 무리가 있다고 판단된다.

이처럼 NGR 검층자료는 이론과 잘 부합하는 대비결과를 보이기도 하지만, 정반대의 양상을 나타내기도 하였다. 즉 시추코어의 육안 관찰과 암석의 지화학적 분석이 선행되지 않은 상태에서 NGR 검층자료만을 놓고 암상을 구분하는 것은 위와 같이 해석의 오류를 범할 수 있는 여지가 있다. 현재까지도 제주도 지질층

서분석에 있어 NGR 검증자료는 시추코어의 회수과정에서 손실이 많은 퇴적암 구간의 심도를 보완하는 것을 목적으로 사용되는 것이 권고되고 있는 실정이다 (Hwang et al., 2006). 따라서 이 같은 위험성을 최소화하기 위해서는 최대한 다수의 자료를 분석하여 통계학적으로 객관성을 높여야 할 것으로 판단된다.

V. 암상 분석

1. 비각력화 용암류 암상

비각력화 용암류(non-brecciated lava flow)는 시추코어 또는 OTV 검층영상 상에서 반정광물과 미세결정 또는 화산유리로 이루어진 현무암질 육상 용암류의 형태를 보이고 있는 구간을 말한다. 용암류는 일부 구간에 균열과 절리구조로 인한 파쇄대가 발달해 있기도 하지만, 대부분 수직적으로 연속성이 양호한 현무암체로 나타난다. 이와 같은 현무암체 내에서도 구간에 따라 기공의 함량 및 분포 양상, 풍화정도, 암색, 광물조성 등의 특성이 다르게 나타나며, 이 같은 차이를 고려할 때 ① 고다공질 분층(highly vesicular division, 이하 암상 HV), ② 다공질 분층(vesicular division, 이하 암상 VS), ③ 치밀질 분층(massive division, 이하 암상 MS), ④ 유리질 분층(glassy division, 이하 암상 GL)로 암상이 구분된다(Table 5-1).

1) 고다공질 분층

암상 HV는 기공 함량이 50% 이상으로 다공질의 조직특성을 보이는 암상을 말한다. 상부에서는 5mm 이하의 원형(spheric) 또는 아원형(subspheric)의 기공들이 우세하지만, 하부로 갈수록 크기가 최대 40mm까지 점차 증가하고 그 형태도 불규칙한 특징을 나타낸다(Figs. 4-3, 4-4). 또한 암색은 적색(pale red, 5R 6/2) 내지 회적색(grayish red, 5R 4/2) 또는 회색(medium gray, N5) 내지 담회색(med. light gray, N6)이 우세한데(Figs. 4-3, 4-4), 특히 적색계열의 색을 띠는 경우에는 균열 또는 절리구조가 우세하게 발달해 있다. 일부 구간에서는 시추코어가 풍화정도가 심한 각력들로 회수되어 있기도 하지만, OTV 검층영상에서는 양호한 연속성을 보이고 있어 이는 회수과정에서 파쇄된 것으로 판단된다. 광물 조성은 1차적으로 침상의 장석이 1~2mm 이상의 반정으로 나타나며, 이와 함께 감람석이 1mm 정도의 크기로 발달되어 있다. 이들 광물들은 1~10% 사이의 함량을

Table 5-1. Summary of the lithofacies of non-brecciated lava flow units.

Lithofacies	Description	Interpretation
Facies HV (highly vesicular division)	More than 50% vesicles with diverse shapes including spheric and/or subspheric (<5 mm in size) in the upper part, irregular (<40 mm in size) in the middle part, and spheric (<5 mm in size) in the lower part; classified into acicular feldspar olivine basalt (AFOB) with <10% of acicular feldspar and olivine phenocrysts (1~2 mm in size); high to moderate degree of weathering; reddish or medium to dark gray colors	Upper part of p-type pahoehoe lava flow; inner part of s-type pahoehoe lava flow
Facies VS (vesicular division)	15~50% vesicles are composed mostly of spheric and/or subspheric vesicles (<5 mm in size); few pipe vesicles (>10 mm in length) are developed in the lower part; classified into acicular feldspar olivine basalt (AFOB) with <10% of acicular feldspar and olivine phenocrysts (1~2 mm in size); low degree of weathering; medium to dark gray color	Lower part of p-type pahoehoe lava flow
Facies MS (massive division)	Less than 15% vesicles with spheric and/or subspheric shapes (<5 mm in size); horizontally arranged in band form; classified into acicular feldspar basalt (AFB) with <10% of acicular feldspar phenocrysts (1~2 mm in size); very low degree of weathering; light gray colors	Core of p-type pahoehoe lava flow
Facies GL (glassy division)	Less than 10% vesicles with spheric shapes (<3 mm in size); discontinuity surface in the uppermost or the lowermost parts; light brown material (palagonite) developed on the surface; classified into acicular feldspar olivine basalt (AFOB) with <5% of acicular feldspar and olivine phenocrysts (1~2 mm in size); high degree of weathering; very dark gray to black colors	Upper and Lower boundaries of p-type and s-type pahoehoe lava flows

보이는데, Koh et al. (2017a)가 제안한 제주도 화산암 명명 기준에 의하면 침상 장식감람석현무암으로 분류된다(Fig. 4-6a). 이 암상의 두께는 최소 약 0.1m에서, 최대 5m 정도의 범위를 보인다. 또한 상부로는 암상 GL로, 하부로는 암상 MS로 전이되는 양상을 보인다(Fig. 4-4). 그러나 일부 구간에서는 상부와 하부 모두 암상 GL과 접하여 나타나기도 하는데, 이들 암상 사이의 변화는 뚜렷한 경계면 없이 대체로 점이적인 상변화 특성을 보인다.

2) 다공질 분층

암상 VS는 기공이 15~50%로 비교적 풍부하게 나타나는 있는 용암류를 말한다(Table 5-1). 기공은 대체로 5mm 이하의 원형 또는 아원형이 우세하지만, 수직적으로 10mm 이상의 긴 파이프 형태를 보이는 기공들도 관찰된다(Figs. 4-3, 4-4). 아울러 시추코어의 표면은 대체로 풍화정도가 미약한 신선한 상태를 유지하고 있고, 암색은 암상 HV와 유사한 회색 계열을 띤다(Figs. 4-3, 4-4). 광물조성 또한 암상 HV와 동일한 특징을 보이며 침상장식감람석현무암으로 분류된다(Fig. 4-6b). 암상 VS는 전반적으로 0.1~1.0m 사이의 두께를 보이며, 모든 시추공에서 상부에는 암상 MS, 하부는 암상 GL로의 점이적인 상변화를 보인다(Figs. 4-3, 4-4).

3) 치밀질 분층

암상 MS는 기공 함량이 15% 이하로 치밀한 상태를 나타내는 용암류 구간으로 정의된다(Table 5-1). 이 암상에서 관찰된 기공들은 대부분 5mm 이하의 크기를 갖는 원형 또는 아원형으로 나타나며, 산발적인 분포 양상을 보인다. 다만 일부 구간에서는 이러한 기공들이 수평적으로 배열되어 띠(band) 형태를 이루는 모습이 관찰되기도 한다(Figs. 4-3, 4-4). 암상 MS 시추코어에서는 풍화의 흔적을 비롯한 절리나 균열 또는 파쇄대가 거의 나타나지 않는다. 아울러 암색은 담회색(light gray, N7, very light gray, N8)을 주로 띠고 있으며, 이는 암상 HV와 VS에서 관찰된 것보다 색이 밝은 특징을 보인다. 다른 암상들과는 달리 침상 장식뿐만 아니라 비정형의 휘석이 주로 우세한 광물조성을 보이는데, 이중 침상 장식만이 1~2mm 크기의 반정으로 나타나며, 휘석은 1mm 미만의 미세결정에 해

당된다. 아울러 침상 장식은 1~10%의 함량을 보여 침상장식현무암으로 분류된다(Fig. 4-6). 암상 MS는 대체로 1~3m의 두께로 발달해 있으나, 월정1호공에서는 두께가 최대 15m까지도 관찰된다. 또한 암상 MS는 상부로는 암상 HV, 하부로는 암상 VS로 이어지며, 암상 간에는 뚜렷한 경계가 나타나지 않고 점이적인 상경계 특성을 보인다(Figs. 4-3, 4-4).

4) 유리질 분층

암상 GL은 반정광물이 거의 나타나지 않고 유리질 조직이 우세하여 검정색 계열의 색을 띠는 비각력화 용암류 구간을 말한다(Table 5-1). 암상 GL은 주로 용암류와 용암류 사이에 마치 수평절리처럼 발달된 불연속면의 상부와 하부에서 관찰되는데, 대체로 주변보다 어두운 색으로 나타나며 기공 함량은 10% 미만을 보인다. 암상 GL의 상부와 하부의 표면에는 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6) 내지 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)을 띠는 팔라고나이트가 얇게 피복하고 있는 특징을 보인다. 광물조성은 암상 HV, VS와 유사하게 침상 장식과 비정형의 감람석 반정이 우세하여 침상장성감람석현무암으로 구분되지만, 반정의 함량은 1~5%로 적게 나타난다(Fig. 4-5). 암상GL의 두께는 최대 20cm이지만 대부분은 10cm 정도로 얇게 나타난다. 암상 GL의 상부에는 암상 VS가 발달해 있고, 하부로는 암상 HV로 이어지는 양상을 보이나, 일부 구간에서는 상부와 하부 모두 암상 HV로 바뀌는 상변화 특성을 보이기도 한다(Figs. 4-3, 4-4).

5) 해석

연구대상 시추코어의 비각력화 용암류에서는 구분된 암상은 일부 파쇄된 구간을 포함하고 있기도 하지만, 대부분 수직적으로 연속성이 양호한 현무암체로 나타난다. 일반적으로 육상 환경에서 분출된 현무암질 용암류는 발달 형태에 따라 파호이호이 용암류와 아아 용암류의 두 유형으로 크게 구분된다(Macdonald, 1953; Alexander, 1859; Dutton, 1884). 파호이호이 용암류는 표면이 매끄럽고 부풀어 오른 형태를 보이며, 그 두께는 최대 수십 m까지 연속성이 양호한 암체를 이룬다(Macdonald, 1953). 반면 아아 용암류는 거칠고 톱니처럼 날카로운 각력들

로 구성된 클링커(clinker)층이 상·하부에 발달한다. 암상 HV의 일부 구간에서는 수 cm에서 수십 cm의 크기를 갖는 각력들이 회수되어 있기도 하지만, OTV 검층영상과의 대비를 통해 시추과정에서 발생된 파쇄로 확인되었다. 즉, 수직적으로 연속성이 양호한 암체를 이루고 있고 클링커와 같은 파쇄된 각력들이 나타나지 않는 것으로 미루어 볼 때, 비각력화 용암류는 파호이호이 용암류로 해석된다.

비각력화 용암류에서 구분된 암상은 대부분 암상 GL을 상·하부 경계부로 하여 용암류 유동단위로 구분되며, 하부로부터 암상 GL-암상 VS-암상 MS-암상 HV-암상 GL로 이어지는 점이적인 상변화를 보인다. 일반적으로 파호이호이 용암류는 유동단위 내에서 냉각속도의 차이와 유동에 따른 기공의 크기와 모양 그리고 분포, 광물반정의 발달 및 분포, 암색 등이 수직적으로 상이하게 나타난다(Wilmoth and Walker, 1993). 이는 보편적으로 4개의 구간(경계부, 상부, 중부, 하부)으로 구분되며, 각각은 본 연구에서 식별된 암상과 대비된다.

상·하 경계부를 이루고 있는 암상 GL은 암상들 중 기공과 반정광물 함량이 가장 낮고 화산유리가 차지하는 비율이 높다. 이는 파호이호이 용암류의 경계부에서 나타나는 특징으로서, 지표로 분출된 용암류가 대기와 지면에 접함에 따라 경계부는 빠른 냉각이 발생된다. 빠른 냉각으로 인해 광물의 결정화가 충분히 이루어지지 않기 때문에 화산유리가 지배적으로 발달되고, 용해되어 있던 가스 또한 용출이 발생되기 이전에 용암이 굳어져 경계부는 기공 함량이 낮은 유리질 껍질(glassy crust)이 형성된다(Wilmoth and Walker, 1993; McPhie et al., 1993; Oze and Winter, 2005). 화산유리의 높은 함량으로 인해 암상 GL은 대체로 검정색을 띠지만 상·하부 경계면에는 풍화산물로 보이는 갈색 계열의 점토질 물질로 얇게 피복되어 나타나기도 한다(Fig. 4-5). 이와 같은 물질은 제주도 화산암 시추코어와 관련된 기존 연구(Koh et al., 2017a, Koh et al., 2019a)에서 팔라고나이트(palagonite)로 보고하고 있으며, 유리질 껍질의 풍화로 인해 발생하는 것으로 알려져 있다(McPhie et al., 1993). 팔라고나이트는 몬모릴로나이트(montmorillonite)와 일라이트(illite) 같은 점토광물의 혼합물로서, 화산유리가 물과 접할 때 발생하는 수화작용에 수반된 이온교환을 통해 형성된다(Kawachi et al., 1983).

유리질 껍질은 상승하는 버블들이 지표로 방출되는 것을 방해하는 역할을 하므로, 결과적으로 상부에는 버블들이 정체되어 암상 HV와 같이 기공함량이 50% 이상의 고다공질 조직이 발달하게 된다(Self et al., 1998). 암상 HV는 기공함량 뿐만 아니라 침상 장식과 함께 감람석 반정이 차지하는 비율이 암상 GL보다 높은 특징을 보이는데, 이는 상대적으로 냉각속도가 느려 장식이나 감람석과 같은 반정광물의 발생이 충분히 일어난 것으로 해석된다. 장식과 같은 밝은 색을 띠는 광물의 분포로 암상 HV의 암색은 경계부보다 밝은 특징을 보인다(Oze and Winter, 2005). 그러나 일부 적색계열의 색상(Figs. 4-3, 4-4)을 보이기도 하는 것은 열 산화(thermal oxidation)로 인한 것으로 해석된다(McPhie et al., 1993).

암상 HV의 하부에는 기공함량이 15% 이하로 치밀한 조직을 보이는 암상 MS가 나타난다(Figs. 4-3, 4-4). 기공함량이 급격하게 감소된 것은 대부분의 버블들이 상승되어 암상 HV를 이루고 난뒤 용암류의 중부는 버블이 결핍된 상태로 굳어지기 때문으로 해석된다(Self et al., 1998; Oze and Winter, 2005). 그러나 일부 구간에서는 기공들이 수평으로 배열되어 띠의 형태를 이루고 있는데, 이는 뒤늦게 하부로부터 상승된 버블들이 이미 굳어진 용암류 상부와 경계를 이루며 머물게 되는 경우에 나타날 수 있다(Goff, 1996; Self et al., 1998). 암상 MS의 암색은 구분된 암상들 중 가장 밝게 나타나는데, 다른 구간들보다 상대적으로 느린 냉각속도로 인해 장식과 같은 무색광물이 다량 정출됨에 따른 것으로 해석된다(Oze and Winter, 2005).

암상 VS는 암상 MS의 직하부 또는 암상 GL의 직상부에 발달되어 있으며, 15~50% 기공함량의 다공질 조직과 더불어 수직적 신장된 형태의 파이프 기공이 나타나는 것이 특징이다. 일반적으로 파이프 기공은 빠르게 식어가는 용암류의 하부에서 상승하는 버블들이 지나간 자리가 빈 공동으로 남아 만들어진다(Sahagian, 1985; McPhie et al., 1993). 뿐만 아니라 용암류의 유동이 지속되는 경우, 기공은 수직적으로 길게 발달된 형태 이외에도 용암류 유동 방향에 따라 수평적으로 신장되어 나타나기도 한다(Walker, 1987). 다만 암상 VS에서는 대체로 지면과 수직 방향을 이루고 있는 파이프 기공들이 관찰되고 있어 연구지역 용암류의 정치 환경은 매우 느린 유동속도 하에서 냉각·고화된 것으로 해석된다.

대부분의 파호이호이 용암류 유동단위는 위와 같은 암상분포 특성을 보이며,

이들의 두께는 대체로 1m 이상으로 발달되어 있다. 이와는 달리 두께가 1m 이하로 얇은 유동단위 또한 소수 발달되어 있는데, 특징적으로 이 유동단위에서는 구간에 따라 암상이 구분되어 나타나지 않고 암상 HV로만 이루어진 특징을 보인다. 일반적으로 파호이호이 용암류는 두께와 기공의 발달 및 분포상태에 따라 P (pipe-bearing)형과 S (spongy)형의 2가지 유형으로 구분된다(Wilmouth and Walker, 1993). P형 파호이호이 용암류는 두께가 대체로 1m 이상으로 앞에서 설명된 수직적인 상변화를 보인다. 이와 달리 S형 파호이호이 용암류는 대부분 1m 이하의 얇은 두께를 가지며, 기공의 분포는 구간에 따라 달라지지 않고 상·하 경계부인 암상 GL을 기준으로 다공질의 암상 HV로만 나타난다.

이와 같이 파호이호이 용암류 내에서 유형이 다르게 나타나는 이유는 용암류에 가해지는 압력 차이로 인한 것으로 알려져 있다(Walker, 1987). 파호이호이 용암류 표면에 형성된 유리질 껍질은 용암이 밖으로 새어나오는 것을 저지하는데, 지속적으로 용암이 공급되는 경우 내부 압력은 증가하게 된다. 그 뒤 점진적인 냉각으로 인해 상부 다공질부가 형성되면 아직 고화되지 않은 용암류에 하중을 가해 압력은 더욱 증가하게 된다. 압력의 증가는 용암류 내에 용해되어 있는 가스들을 버블의 형태로 용출되는 것을 저지하기 때문에 기공이 결핍된 치밀한 구간이 만들어지게 된다(Hon et al., 1994; Self et al., 1998;). 이 같은 조건들이 충족된 경우에 용암류가 정치하게 되면, P형의 파호이호이 용암류가 형성된다. 반면 상대적으로 용암 공급량이 적거나 유리질 피각을 뚫고 용암이 새어나오는 경우에는 용암류의 내부 압력이 낮아져 버블이 다량으로 용출되어 다공질의 조직이 우세한 S형 파호이호이 용암류가 만들어지게 된다(Hon et al., 1994; Waichel et al., 2006).

2. 각력화 용암류 암상

각력화 용암류는 시추코어상 수 cm에서 수십 cm까지의 다양한 크기로 분리되어 있는 유리질 각력암으로 이루어져 있으며, 표면에는 화산유리가 우세하게 발달되어 있고 기질(matrix)은 회수되지 않았다(Figs. 4-7a, 4-7b). 각력의 표면에는 5mm 이하의 원형 기공들이 주로 발달해 있으나, 그 함량은 10% 이하로 다소

치밀한 조직을 보인다. 광물조성은 전반적으로 1mm 이상의 크기를 갖는 침상장석 반정과 불투명한 검은색의 화산유리(volcanic glass)로 구성되어 있으며, 반정은 1~10% 사이의 함량을 보인다. 이와 같은 조직특성을 기준으로 할 때, 각력화 용암류는 침상장석현무암으로 분류된다.

일부 각력의 단면에서 관찰되는 암색은 내부에서는 전반적으로 암회색(dark gray, N3, med. dark gray, N4)을 띠지만, 가장자리로 갈수록 더 짙고 어두워져 표면에서는 회검정색(grayish black, N2)에서 검정색(black, N1)으로 바뀌는 양상을 보인다. 일부 각력들의 표면에는 암상 GL에서 관찰된 것과 같이 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6) 또는 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)의 팔라고나이트가 얇게 피복되어 있는데, 박편 상에서는 검정색의 화산유리와 점이적 관계로 나타난다(Figs. 4-7c, 4-7d).

OTV 검층영상 자료에서 구분되는 각력화 용암류 구간의 암상은 시추코어에서 관찰된 모습과는 달리 유리질의 각력뿐만 아니라 미세한 유리질 파편들이 포함된 팔라고나이트의 기질도 함께 나타난다. 아울러 유리질 각력들이 우세하게 발달된 구간 상부에는 부분적으로 각력화가 진행된 용암류 또한 공통적으로 발달되어 있는 모습을 보인다. 또한 전반적으로 교란되지 않고 지층의 특성을 온전하게 유지하고 있어서, 각력(암편)과 기질 구성물의 크기, 형태, 색상을 비롯한 각력과 기질의 비율 및 이들의 배열양상 등을 상세하게 관찰할 수 있다. 따라서 각력화 용암류 구간에 대한 OTV 검층영상 분석을 기초로 하여 ① 반각력화 용암류(semi-brecciated lava flow, 이하 암상 SBL), ② 역지지 유리질 각력암(clast-supported breccia, 이하 암상 CSB), ③ 기질지지 유리질 각력암(matrix-supported breccia, 이하 암상 MSB)과 같이 3개의 세부 암상을 구분하였다(Figs. 5-1, 5-2).

1) 반각력화 용암류

암상 SBL은 비각력화 용암류 암상과 유사한 광물조성, 기공분포, 암색 등의 조직특성을 보이고 있지만, 방향성 없이 발달된 불규칙한 절리들로 인해 부분적으로 불연속적인 파쇄대가 나타난다(Fig. 5-1). 절리는 전반적으로 특정 방향성 없이 불규칙하고 복잡하게 얽혀있고, 절리면은 다소 기복이 있는 곡면을 이루며

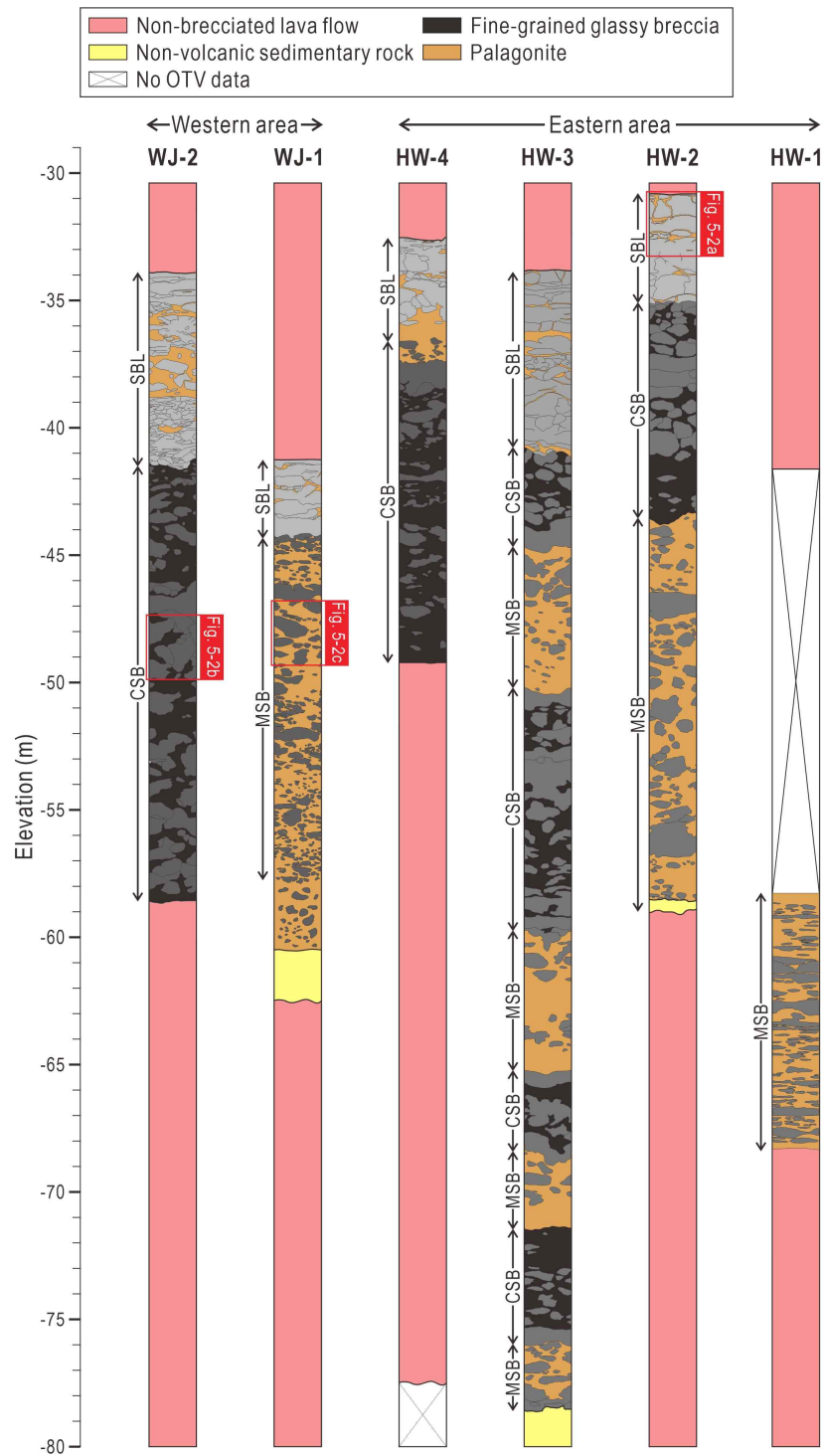


Fig. 5-1. Columnar sections of brecciated lava flow intervals from OTV logs. For location, see Fig. 1-1. SBL: semi-brecciated lava, CSB: clast-supported breccia, MSB: matrix-supported breccia.

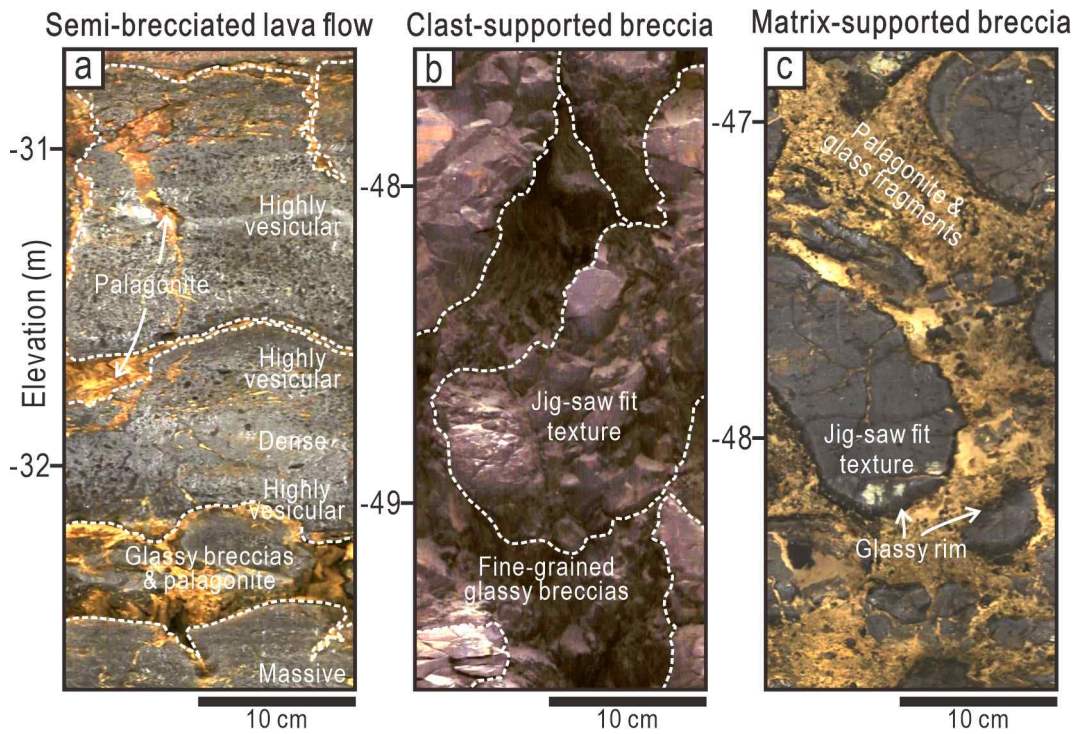


Fig. 5-2. Images of OTV logs showing the characteristics of 3 lithofacies of brecciated lava flow.

최대 1m까지 연장되어 나타나기도 한다. 절리들이 서로 연결되어 있는 경우 암체는 각력들로 분리되어 있지만, 대부분 간극이 5cm 이하로 그다지 넓지 않아서 각력들은 마치 직소퍼즐과 같은 배열 형태를 보인다. 여기서의 각력들은 대부분 10cm 이상의 크기와 다양한 형태로 나타나며, 일부 구간에서는 완전히 독립적으로 분리된 각력들이 팔라고나이트와 혼재되어 있는 모습을 보이기도 한다(Figs. 5-1, 5-2a).

암상 SBL은 행원4호공에서는 3m로 가장 얇고, 월정2호공과 행원3호공은 약 10m의 두께로 가장 두껍게 발달되어 있다. 그리고 해당 구간에 OTV 검층이 이루어지지 않은 KIGAM공, 행원1호공을 제외한 나머지 시추공들에서는 4m 정도의 두께를 갖는다(Fig. 5-1). 암상 SBL의 상부에는 절리구조 또는 파쇄대가 나타나지 않는 용암류가 발달되어 있다. 이 용암류는 암상 SBL과 유사하게 암상 HV와 암상 MS가 나타나지만, 육안으로 구분되는 절리구조나 파쇄대는 나타나지 않는다. 아울러 용암류의 경계부는 적색(dusky red, 5R 3/4)이나 담회색(med. light gray, N6, light gray, N7)을 띠어 암상 SBL과는 뚜렷한 색상 차이를 보인다. 한편, 해당 암상은 하부로 갈수록 점차 파쇄 정도가 증가되면서 암상 CSB나 암상 MSB로 전이된다(Fig. 5-1).

2) 역지지 유리질 각력암

암상 CSB는 작게는 수 cm, 크게는 약 1m까지의 크기를 갖는 다양한 모양의 각력들로 구성되어 있으며, 대체로 기질의 비율이 10% 이하로 매우 적은 함량을 보인다(Figs. 5-1, 5-2b). 각력들은 전반적인 크기에 따라 발달 양상의 차이를 보이는데, 약 10cm 이하의 크기를 보이는 각력들은 개별로 분리되어 있으며, 이때 암상은 시추코어에서 관찰된 것과 유사하나, 여기서의 팔라고나이트의 기질과 혼재되어 있는 양상을 보인다. 반면, 1m 내외의 크기까지 나타나는 큰 각력들은, 암괴 내지 암체 내에 발달된 다수의 절리들로 인해 직소퍼즐의 배열로 쪼개져 나타나며, 간극 없이 매우 밀접하게 맞닿아 있다(Fig. 5-2b). 암색은 상대적으로 세립의 각력들에서는 검정색(black, N1)이 우세하지만, 큰 크기를 갖는 각력들은 어두운 회색(dark gray, N4) 내지 회색 빛 검정색(grayish black, N2)을 띠고 있다. 이와 같은 세립 및 조립의 각력들은 수직·수평적으로 규칙적인 분포나 변화

양상을 보이지 않고 복잡하게 혼재되어 있다.

암상 CSB는 월정2호공과 행원4호공에서 암상 SBL의 하부에서부터 약 15m의 두께로 전 구간에 걸쳐 발달되어 있지만, 월정1호공에서는 확인되지 않는다(Fig. 5-1). 행원2호공과 행원3호공에서도 암상 SBL 하부에 암상 CSB가 분포되어 있고, 행원2호공에서는 약 10m의 두께를 가지며 그 아래는 암상 MSB가 발달되어 있다. 한편 행원3호공에서는 약 5~10m의 두께로 암상 MSB와 교대하며 나타난다.

3) 기질지지 유리질 각력암

기질지지 유리질 각력암상은 기질부가 차지하는 비율이 50% 이상으로 우세하고, 이들에 둘러싸인 각력들이 산재하여 나타나는 것이 특징이다(Fig. 5-1). 기질은 대부분 팔라고나이트로 이루어져 있지만, 여기에는 모래 크기 정도의 검정색 유리질 파편들 또한 무수히 많이 포함되어 있다(Fig. 5-2c). 각력들은 크기가 수 cm에서 수십cm까지 폭넓게 나타나며, 그 형태 또한 다양하게 확인된다. 암색은 대체로 회검정색(grayish black, N2)의 색상을 띠며, 가장자리에는 화산유리로 이루어진 검정색(black, N1) 피각이 2~5cm의 두께로 발달되어 있다(Fig. 5-2c).

일부 1m 가까이 되는 두께 또는 길이를 갖는 큰 규모의 암괴 내지 암체들은 암상 CSB에서 관찰되는 것과 같이 내부에 발달된 절리들로 인해 직소퍼즐 형태로 각력들이 맞물려 있는 모습도 관찰된다. 그러나 전체적으로 암상 MSB에 발달된 각력들은 고밀도로 서로 맞물려 있는 직소퍼즐의 배열구조를 이루지 않고 기질부에 의해 구분되는 독립적 분포양상을 보인다. 일부 장축이 단축에 비해 2배 이상되는 길쭉한 형태의 각력들은 장축이 수직 또는 수평방향으로 놓여 있기도 하지만, 대부분은 불규칙한 배열상태를 보이고 구간에 따른 함량 차이만을 보인다. 암상 MSB는 내부에 층리가 나타나지 않는 피상의 퇴적구조를 이루고 있다(Figs. 5-1, 5-2c).

암상 MSB는 월정2호공, 행원4호공에서는 관찰되지 않으며, 월정1호공은 암상 SBL의 하부에, 행원2호공은 암상 CSB 아래에 약 15m의 두께로, 행원3호공에서는 암상 CSB와 서로 교대하며 2~4m의 두께로 발달하는 양상을 보이지만, 뚜렷한 경계 없이 다소 점이적인 상변화를 보인다(Fig. 5-1). 행원1호공에서도 10m

이상으로 암상 MSB가 발달되어 있는 것이 관찰되나, 유리질 각력암 구간의 상부까지 OTV 검층영상 자료가 회수되지 않아 정확히 발달 구간을 특정하기 어렵다.

4) 해석

연구지역 시추공에서 인지되는 유리질 각력암의 대표적인 암상특성은 직소퍼즐 형태의 절리가 우세하게 발달하고 유리질 조직의 각력암 및 화산유리가 변질된 팔라고나이트 기질을 포함한다는 것이다. 다량의 유리질 각력암을 생성하는 용암류의 파쇄현상은 주로 급랭 파쇄작용(quench fragmentation)에 의해 형성된다(McPhie et al., 1993). 급랭 파쇄작용은 일반적으로 용암류의 빠른 냉각에 따라 발생하는 열응력(thermal stress)으로 인해 일어나는 현상으로서, 주로 물과 빙하와 같은 유체와의 접촉에 의해 일어난다(Rittmann, 1962; Pichler, 1965). 물론, 일반적인 육상 용암류에서도 대기와의 접촉으로 굳어진 피각이 지속적인 내부 유동에 의해 파쇄되어 ‘클링커’라고 하는 다양한 크기와 모양의 각력층이 형성되기도 하지만, 대기 중으로의 열손실이 점진적으로 일어나기 때문에 유리질 암편이나 조직은 매우 제한적으로 나타난다(McPhie et al., 1993).

육상에서 분출한 용암이 해양이나 호수로 흘러들어 가는 경우에 용암류의 선단부에서는 물과의 직접적인 접촉이 지속적으로 유지되면서 급격한 온도변화에 따른 수축 및 팽창 등의 응력과 함께 내부에 유동하는 용암류에 의한 전단력이 복합적으로 작용하여 유리쇄설성 각력암(hyaloclastite)으로 불리는 암편의 형태로 파쇄가 일어난다(Fig. 5-3)(Rittman, 1962; Silvestri, 1963; Pichler, 1965; Honnorez and Kirst, 1975; McPhie et al., 1993). 유리쇄설성 각력암이 만들어지는 과정은 매우 빠르게 진행되며, 형성 초기에 유리쇄설성 각력암은 대부분 처음 발생된 위치에 머물며 직소퍼즐과 같은 경계면(절리면) 배열 구조를 보인다(Figs. 4-7b, 5-2b)(Yamagishi, 1979). 연구지역 시추공에서 관찰되는 유리질 각력암의 산출상은 대체로 육상 용암류의 수중 유입에 따른 유리쇄설성 각력암의 특징과 유사하며, 용암의 수중유동에 의한 베개용암(pillow lava)이나 수분을 함유한 미고화퇴적층으로의 관입에 따른 페퍼라이트(peperite)의 암상특성(Cas and Wright, 1987; McPhie et al., 1993)과는 현저한 차이를 보인다.

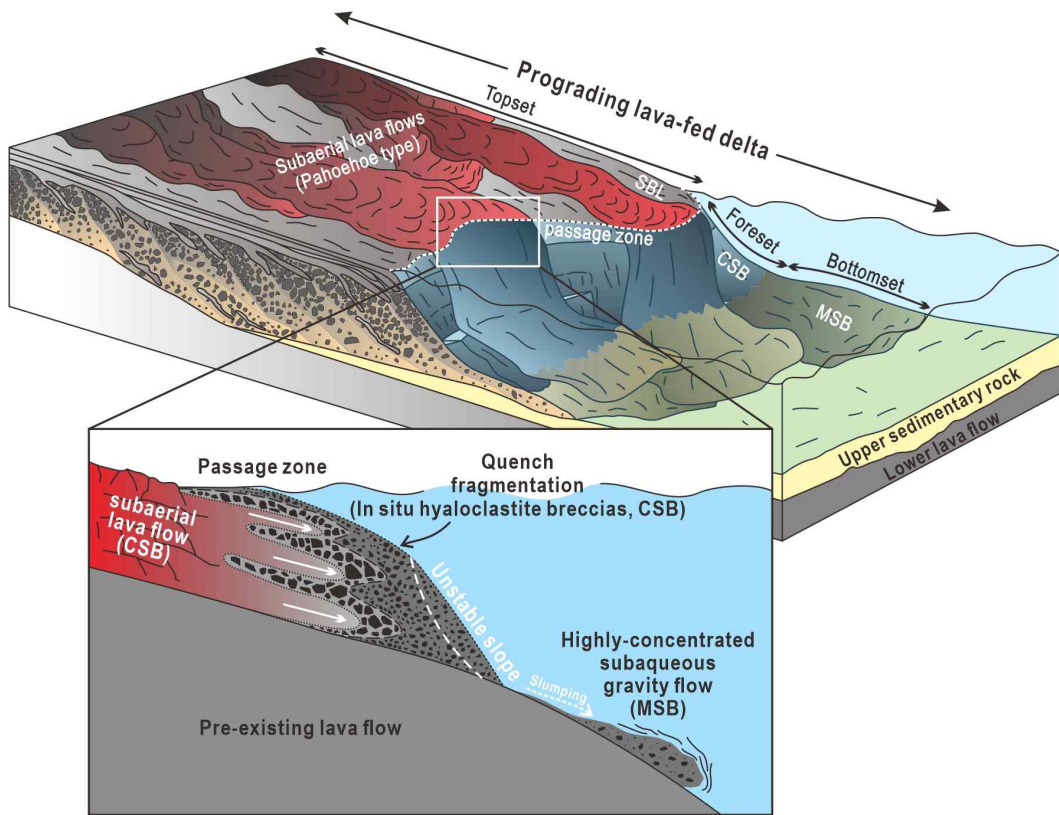


Fig. 5-3. Schematic illustration of the lava-fed delta and associated hyaloclastite breccias formed by pahoehoe lava flows in coastal area. SBL: semi-brecciated lava flow, CSB: clast-supported breccia, MSB: matrix-supported breccia. Modified from McPhie et al. (1993) and Abdelmalak et al. (2016).

3. 비화산성 암상

1) 사암 및 실트암

비화산성 퇴적암은 입도특성에 따라 크게 사암과 실트암으로 구분되는데, 사암은 사암(sandstone), 니질 사암(muddy sandstone), 실트질 사암(silty sandstone)으로, 실트암은 실트암(siltstone), 사질 실트암(sandy siltstone)으로 세분되며 다음과 같은 암상 특징을 보인다(Figs. 4-8, 4-9).

사암의 퇴적물은 모래 90.6~96.9%, 실트 2.2~7.9%, 니 0.8~1.5%의 비율로 이루어져 있으며, 시추공들 중 유일하게 행원1호공의 해수면 하 92.5~125.5m 구간에서 나타난다. 사암을 구성하는 모래는 대체로 세립 내지 중립사의 입도를 보이고 분급은 양호한 것으로 보인다. 실트는 극세립에서 조립 실트의 입도로 나타나고 이들은 유사한 함량비로 포함되어 있다. 또한 석회질 패각편 내지 생물 파편과 같은 해양기원 입자들은 관찰되지 않는다. 시추코어가 다소 온전한 형태를 보이는 구간에서 관찰된 퇴적구조는 내부 구조가 없는 괴상으로 나타나고, 암색은 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2), 올리브 회색(olive gray, 5Y 3/2), 암녹 회색(dark greenish gray, 5GY 5/1)을 띤다.

니질 사암은 KIGAM공에서 비각력화 용암류와 각력화 용암류 사이(해수면 하 60.7~62.6m)에 협재되어 있는 비화산성 퇴적암에서 확인되며, 모래 82.5%, 실트 9.2%, 니 8.3%로 이루어져 있다. 사질 입자는 대체로 조립사 내지 중립사의 입도를 가지며 분급은 다소 양호하게 나타나며, 실트질 입자들은 조립 실트의 비율이 조금 높지만 대체로 극세립 실트 입도까지 고르게 포함되어 있다. 이 퇴적암에서는 mm 크기를 갖는 패각편이 다수 포함되어 있다. 해당 퇴적층은 전 구간이 교란된 상태로 회수되어 퇴적구조에 대한 관찰은 불가하다. 전반적인 암색은 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2) 내지 옐로우색(very pale orange, 10YR 8/2)을 띠고 있다.

추가적으로 니질 사암에서는 구간을 상부, 중부, 하부로 세분하여 X-선 회절분석과 주사전자현미경 분석을 실시하였다. X-선 회절분석 결과, 모든 구간에서 공통적으로 일라이트(illite), 녹니석(chlorite), 석영(quartz), 사장석(plagioclase), 방

해석(calcite)을 지시하는 피크들이 나타난다(Fig. 5-4). 특히 결정질 규산염 광물인 석영과 사장석이 가장 큰 피크를 보이며, 방해석은 구간에 따라 그 수치가 상부에서는 가장 낮고, 중부와 하부에서는 상대적으로 높은 피크를 나타낸다. 그러나 주사전자현미경에서 관찰된 결과는 X-선 회절분석 결과와 다소 차이를 보이는데(Fig. 5-5), X-선 회절분석 결과에서 낮은 방해석 수치를 갖는 상부 구간에서는 폐각편과 같은 다수의 탄산염 물질들이 관찰된다. 아울러 높은 탄산염 수치를 보인 중부에서는 이와 같은 탄산염 물질들이 거의 확인되지 않는다. 한편 하부는 X-선 회절분석 결과와 동일하게 매우 많은 탄산염 물질들을 포함하는 것으로 관찰되었다.

실트질 사암으로 구분된 퇴적암은 KIGAM공, 월정2호공, 행원1호공의 기저를 이루고 있는 비화산성 퇴적암에서 확인되며, KIGAM공은 해수면 하 약 95.7m~125.5m, 행원1호공은 해수면 하 약 92.2~92.5m 구간에서 확인되나 월정2호공은 회수율이 매우 낮고 심도표기가 제대로 이루어지지 않아 발달구간이 정확히 특정되지 않는다. 실트질 사암을 구성하고 있는 퇴적물은 모래가 50.8~83.0%, 실트 16.4~41.5%, 니는 0.6~7.7%로 넓은 범위의 퇴적물 조성을 갖는다. 사질 입자는 대체로 중립사 내지 세립사의 입도를 보이고 분급이 불량하며, 실트는 조립실트와 중립 실트가 우세하지만 극세립 입도까지 포함되어 있다. KIGAM 공에서는 폐각편이 다수 포함되어 있지만 나머지 시추공에서는 폐각편이 확인되지 않는다. 아울러 실트질 사암은 내부에 층리가 발달되어 있지 않는 괴상으로 나타난다.

실트암은 KIGAM공, 행원1호공, 행원2호공의 최하부 비화산성 퇴적암 구간에서 관찰되는데, 시추공별 발달범위는 KIGAM공 해수면 하 약 94.7~95.7m, 행원1호공 해수면 하 약 90.5~90.8m, 행원2호공 해수면 하 90.6~94.6m으로 특정된다. 퇴적물은 모래 1.9~4.6%, 실트 80.1~82.5%, 니 15.3~15.9%의 다소 좁은 범위로 이루어져 있다. 모래는 대체로 극세립사의 입도를 보이고, 실트는 극세립 실트에서 조립 실트까지 다양한 입도로 이루어져 있으며 이들 각각의 함량비는 유사하다. 입자들 중 폐각편과 같은 생물기원 입자는 확인되지 않으며, 내부에는 층리나 엽층리 구조가 나타나지 않고 괴상의 퇴적구조를 보인다. 아울러 색상은 시추공별로 일부 차이를 보이는데, KIGAM공은 담올리브회색(light olive gray, 5Y 6/1)

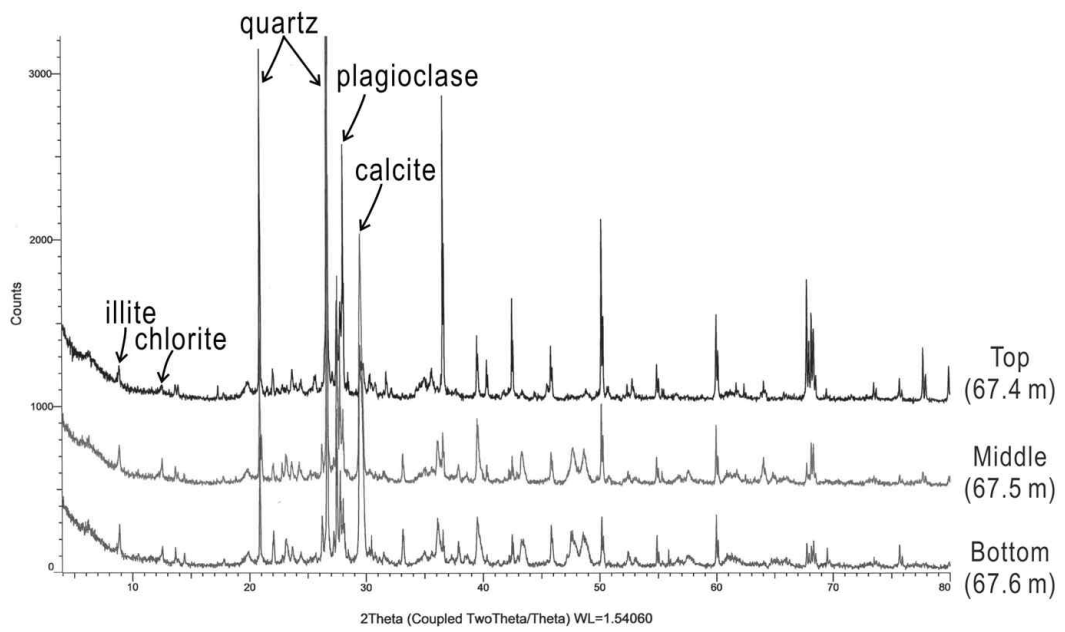


Fig. 5-4. X-ray diffraction pattern of samples from stratigraphic unit IV (non-volcanic sedimentary rock II) of KIGAM borehole.

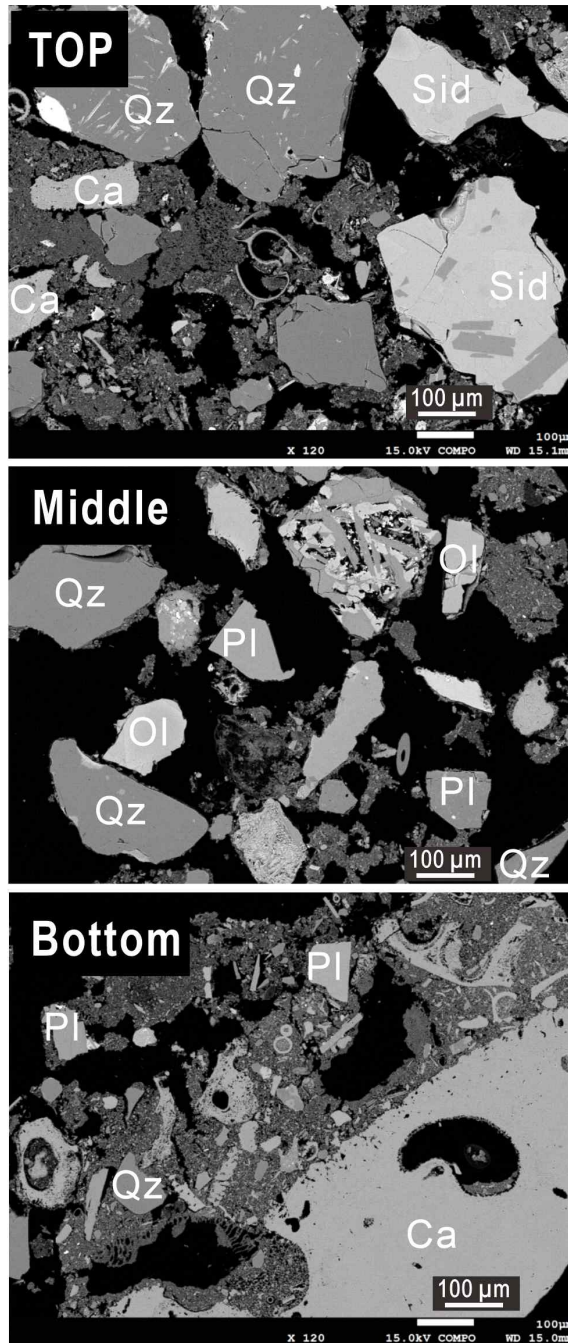


Fig. 5-5. SEM photography of samples from stratigraphic unit IV (non-volcanic sedimentary rock II) of the KIGAM borehole. Qz: quartz, Sid: sideromelane, Pl: plagioclase, Ol: olivine, Ca: carbonate.

과 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)이 혼재되어 나타나고, 행원1호공에서는 갈색(dusky brown, 5YR 2/2), 행원2호공은 오렌지색(very pale orange, 10YR 8/2)을 띠고 있으며 여기에 짙은 오렌지핑크색(moderate orange pink, 5YR 8/4)이 일부 섞여 있는 양상을 보인다.

사질 실트암은 퇴적암이 발달해 있지 않은 행원4호공을 제외한 나머지 모든 시추공들 최하부의 비화산성 퇴적암에서 확인된다. KIGAM공은 해수면 하 약 93.7~94.7m, 월정1호공 해수면 하 약 93.7~99.3m, 월정2호공 해수면 하 약 96.1~96.4m, 행원1호공 해수면 하 약 90.8~92.2m, 행원2호공 94.6~98.6m, 행원3호공 해수면 하 약 91.8~99.2m로 암상이 발달된 구간이 구분된다. 실트암을 구성하는 퇴적물 입도에 따른 함량은 모래 10.2~41.6%, 실트 48.7~83.9%, 니 5.9~14.4%의 범위를 보인다. 전반적으로 사질 입자는 세립 내지 극세립의 입도를 보이며 분급은 다소 불량한 편에 속한다. 또한 실트 입자는 조립 실트와 중립 실트의 비율이 50% 이상을 차지하며 나머지는 세립, 극세립 입자들은 대체로 10% 내외로 포함되어 있다. 특징적으로 실트암에서는 패각편과 같은 생물기원의 입자들은 확인되지 않으며, 괴상으로 나타난다. 아울러 실트암의 색은 KIGAM공과 행원1호공에서는 담올리브회색(light olive gray, 5Y 6/1)띠는 부분과 황갈색(pale yellowish brown, 10YR 6/2)을 보이는 부분이 뒤섞여 나타나지만, 나머지 시추공들에서는 올리브회색(olive gray, 5Y 3/2)을 띠고 있다.

2) 고토양

고토양 구간은 모두 상위에 발달된 비각력화 용암류 사이에 0.1~1.2m 두께로 1~2매가 발달해 있으며, KIGAM공 및 월정1호공을 제외한 5개 시추공에서 확인된다(Fig. 4-1). 이중 시추코어로 회수가 이루어진 것은 행원1호공이고(Fig. 4-14), 나머지 시추공들은 OTV 검층영상으로만 확인이 가능하였다.

월정2호공에서는 1매의 고토양 구간이 1.2m의 두께로 나타나는 것이 확인된다(Fig. 4-12). 고토양을 이루는 입자들은 육안상으로 식별 가능한 입자성 물질은 나타나지 않으며, 갈색(moderate brown, 5YR 4/4)의 점토가 주를 이룬다. 용암류 구간과의 경계부 특성은, 하부에 발달된 용암류 구간과의 하부 경계는 예리한 접촉면을 이루고 있는 반면, 상부 경계에서는 크고 작은 용암류 파편들이 혼합되어

있는 페퍼라이트(peperite)와 같은 암상이 발달되어 있다.

행원1호공에서 회수된 고토양 시추코어는 약 0.1m의 두께를 가지며, 주로 점토질의 쇠설성 입자들로 이루어져 있다(Fig. 4-14). 전반적으로 고토양은 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4)을 띠고 있으며, 월정2호공과 같이 용암류 구간과의 하부 경계는 예리하게 나타나지만, 상부 경계는 적색(pale red, 5R 6/2)을 띠는 용암류 파편들이 혼재되어 있는 페퍼라이트 암상이 관찰된다.

행원2호공에서는 앞서 기술된 시추공들과는 달리 2매의 고토양 구간(해수면 하 13.3~13.7m, 해수면 하 24.5~25.0m)이 확인된다(Fig. 4-16). 상위에 발달된 고토양 구간은 약 0.4m의 두께로 발달되어 있으며, 전반적으로 점토질의 쇠설성 입자들이 우세하게 관찰된다. 또한 3~5cm 가량의 크기를 갖는 불규칙한 형태의 용암류 암편들이 산발적으로 포함되어 있기도 하지만, 10개 미만의 소량이 분포하고 있다. 점토질 구간은 회오렌지색(grayish orange, 10YR 7/4)과 황갈색(moderate yellowish brown, 10YR 5/4) 사이의 색깔을 띠고 있으며, 용암류 암편들은 암회색(dark gray, N3)으로 나타난다. 아울러 용암류 구간과의 상·하 경계는 예리한 접촉면으로 나타나며 페퍼라이트의 암상은 확인되지 않는다. 하위에 나타나는 고토양 구간은 0.5m의 두께를 보이지만, 수평적으로는 용암류 구간을 관입하고 있는 형태로 발달해 있다. 점토질 입자들 외에 눈에 띄는 입자성 물질은 확인되지 않으며, 구간은 대체로 암적갈색(dark reddish brown, 10R 3/4)을 띠고 있다. 아울러 용암류 구간과는 매우 뚜렷한 경계를 이루고 있다.

행원3호공에서도 행원2호공과 같이 고토양 구간은 2매(해수면 하 22.2~23.2m, 해수면 하 31.1~31.4m)가 발달해 있는 것이 확인된다(Fig. 4-18). 상위에 발달된 고토양 구간은 1m 정도의 두께를 가지며 전반적으로 점토질의 세립입자들로 이루어져 있다. 색상은 암황오렌지색(dark yellowish orange, 10YR 6/6)을 띠고 있다. 구간의 상부에는 직경 10cm 이하의 암편들이 소수 포함되어 마치 페퍼라이트와 같은 암상을 보이는데, 암편들은 용암류 구간으로부터 비롯된 것으로 추정된다. 한편 용암류 구간과의 하부 경계부에서는 암편들이 관찰되지 않으며, 경계면은 예리한 접촉면으로 나타나 구간이 서로 구분된다. 하위에 나타나는 고토양 구간은 0.3m 정도로 두께가 발달되어 있으며, 점토질의 입자들이 지배적이다. 또한 구간의 중간에는 판상의 형태(단축 약 10cm, 장축은 길이가 30cm 이상)를 보

이는 용암류 기원 암편이 수평적으로 길게 놓여 고토양에 둘러싸여 있다. 고토양의 색깔은 회오렌지색(grayish orange, 10YR 7/4)을 띠고 있고, 화산암편은 암회색(Med. dark gray, N4)으로 나타난다. 해당 구간은 상부와 하부에 발달된 용암류 구간과는 매우 예리한 경계면을 이룬다.

행원4호공에서는 2개의 구간(해수면 하 2.7~3.4m, 해수면 하 10.3~10.5m)에 고토양이 나타난다(Fig. 4-20). 상부의 고토양 구간은 0.7m 정도의 두께를 가지며, 대부분 점토 혹은 점토질 입자로 구성되어 있다. 색상은 암황갈색(dark yellowish brown, 10YR 4/2)과 황갈색(pale yellowish brown, 10 YR 6/2)이 서로 불규칙하게 혼재된 양상을 보인다. 용암류 구간과의 경계면은 상부와 하부 모두 뚜렷하게 구분되어 나타나지만, 하부 경계부에서는 용암류가 부분적으로 고토양화 되어 암편의 형태로 분리되어 있다. 이보다 하부에 발달해 있는 고토양 구간은 0.2m 정도의 두께를 보이며, 갈색(moderate brown, 5YR 4/4) 또는 담갈색(light brown 5YR 5/6)을 띠는 점토질의 입자들로 이루어져 있다. 상부 및 하부에 발달된 용암류 구간과의 경계는 예리한 접촉면을 이루고 있으며, 상부인 경우 용암류 구간에 발달된 균열면을 따라 고토양이 발달되어 나타나기도 한다.

3) 해석

연구대상 시추공에서 관찰되는 비화산성 퇴적암층은 시추공 최하부 기저를 이루고 있거나, 비각력화 용암류 및 각력화 용암류 사이에 존재하고 있는 것이 확인된다(Fig. 4-1). 그리고 이들 퇴적암층은 입도특성에 따라 사질 입자가 우세한 사암, 실트질 사암, 니질 사암과 더불어 실트질 입자들이 풍부한 실트암, 사질 실트암으로 그 암상이 구분된다. 다만 대부분의 시추코어가 교란된 상태로 회수가 이루어졌기 때문에 퇴적암 사이의 경계면은 확인되지 않는다.

시추공의 하위에 발달된 비화산성 퇴적암층은 해수면 하 최소 90.5m, 최대 140.2m의 심도에서 포착되는데, 제주도 동부지역의 지하에 분포하는 퇴적층에 대한 이전의 연구에서는 해수면 하 평균 110m 내외의 심도에서부터 서귀포층(Seoguipo Formation)이 나타나는 것으로 보고되었다(Koh et al., 2008). 서귀포층은 친해환경 하에 일어난 수성분출로 공급된 화산쇄설물과 휴지기에 쌓인 해성 및 육성의 화산성 또는 비화산성 퇴적물로 구성되어 있으며, 제주도 초기 화

산활동을 대표하는 퇴적층으로 알려져 있다(Sohn and Park, 2004; Koh et al., 2013). Yoon and Chough (2006)은 육상으로 노출되어 있는 서귀포층 노두에서 퇴적물 조직특성, 생물교란 및 화석포함 여부, 퇴적구조 등을 조합하여 총 12개의 퇴적상을 구분하였다. 한편 해당 퇴적암층을 구성하는 퇴적물 내지 퇴적암의 전반적인 조직특성 변화는 하부에서부터 사암-실트질 사암-사질 실트암-실트암과 같이 세립화의 양상이 나타난다. 또한 퇴적구조는 괴상의 퇴적구조만이 나타나는데, 이러한 특징을 Yoon and Chough (2006)이 구분한 퇴적상과 대비해보면 사암은 괴상 사암, 실트질 사암 및 사질 실트암은 생물교란 니질사암, 실트암은 균질이암에 대비될 수 있다.

이들 암상은 연안 및 내대륙붕 환경에서 형성될 수 있으며, 괴상의 사암은 파도와 해류의 영향을 크게 받는 고에너지 환경하에 외해역으로부터 기원된 사질 퇴적물들이 재동되어 퇴적된 것으로 해석하였다. 생물교란 니질사암에 대비되는 실트질 사암과 사질 실트암은 괴상의 사암과 마찬가지로 외대륙붕과 수평적으로 인접한 육지 쪽의 연안 또는 내대륙붕에서 형성된 것으로 추정하였다. 다만 실트질 사암과 사질 실트암에서는 대부분의 구간이 슬라임과 같은 형태로 채워져 있어 생물교란 구조는 관찰되지 않는다. 또한 실트암의 경우에는 사암과는 다르게 세립질의 퇴적물이 보존될 수 있는 저에너지 환경이 발달되어야 하며, 이는 연안의 만이나 폭풍해파기저면 하부의 외해로 해석하였다.

아울러 비각력화 용암류와 각력화 용암류 사이에 얇게 협재되어 있는 비화산성 퇴적암은 4개 시추공(KIGAM공, 월정1호공, 행원2호공, 행원3호공)에서 나타나는 것이 확인된다(Fig. 4-1). 이들 퇴적암을 이루고 있는 퇴적물의 입도와 광물 조성 분석을 실시한 결과, 퇴적물은 전반적으로 니질 사암의 입도를 보이는 결정질의 규산염 광물(석영, 장석) 입자들과 더불어 탄산염 물질(패각편)들로 이루어져 있다(Figs. 4-9, 5-4, 5-5). 아울러 감람석 결정과 더불어 화산유리가 일부 포함되어 있기는 하지만 그 양이 극히 소량인 것으로 미루어 볼 때, 이 퇴적암 구간에는 육상 풍화물질의 유입이 극히 적은 대신 주로 외해로부터 공급되어 연안 환경에 퇴적된 해성 퇴적층으로 해석된다. 또한 행원3호공 OTV 영상에서 확인된 예서는 상기 시추공들보다 약 30m 가량 더 깊은 심도에 상위 퇴적암 구간이 존재하는데, 여기서는 원마도가 양호한 둥근 역들과 함께 패사로 이루어진 퇴적

물이 혼재되어 있는 점을 감안할 때, 당시 환경은 파도의 영향이 컸던 고에너지 환경으로 해석된다(Buscombe and Masselink, 2006). 또한 이들 퇴적암 상부에 유리질 각력암층이 공통적으로 존재하고 있는 점은 상위 퇴적암 구간이 해수면 근처에서 형성되었음을 뒷받침 해주는 증거로 볼 수 있다.

최하위에서 나타나는 퇴적암 구간은 주로 니질 및 사질 퇴적물과 함께 패각들이 괴상의 구조로 나타남과 더불어 고결상태가 낮은 특징을 보인다(Fig. 4-8). 뿐만 아니라 이 퇴적암 구간의 최상부 1m 내외의 구간은 고토양화 된 것과 같은 짙은 갈색계열을 띠는 니질 내지 점토질 퇴적물로 이루어져 있다. 특히 하위 퇴적암 구간은 행원4호공을 제외한 모든 시추공들에서 해수면 하 90m부터 약 30m 이상 굴착이 진행되는 동안 용암류와 같은 상이한 암상이 출현하지 않은 점으로 미루어 볼 때, 하나의 주요한 층단위로 설정될 수 있을 것으로 보인다.

한편, KIGAM공과 월정1호공을 제외한 나머지 시추공들에서는 해수면에서 해수면 하 30m 사이 구간에 1~2매의 고토양층이 용암류 사이에 협재되어 있음이 OTV 검층영상에서 확인된다(Figs. 4-12, 4-14, 4-16, 4-18, 4-20). 이들 층의 두께는 대략 1m 내외이고(Fig. 4-1), 대체로 갈색계열을 띠며, 용암류와의 접촉면은 예리하거나 점이적인 특징을 보인다. 이들 고토양층은 화산활동의 휴지기 또는 중지된 시기에 풍화물질들이 바람 또는 유수에 운반되어 지형이 낮은 곳에 쌓여 형성된 것으로 추정되며, 짙은 오렌지색을 띠는 현상은 상위 용암류의 열에 의한 열변질 고토양을 ‘almagres’ 라고 부르며, 두께는 최소 수 cm에서 최대 1m까지도 나타난다(Ecker, 1976).

VI. 층서 분석

1. 층서

시추코어 및 OTV 검층영상을 통해 암상의 산출특성 차이가 뚜렷하게 나타나는 곳을 주요 경계면으로 설정하였고, 이를 기준으로 6개의 층단위가 구분되었다. 층단위는 하부로부터 층단위 I(비화산성 퇴적암층 I, 서귀포층), 층단위 II(각력화 용암류층 I), 층단위 III(비각력화 용암류층 I), 층단위 IV(비화산성 퇴적암층 II), 층단위 V(각력화 용암류층 II), 층단위 VI(비각력화 용암류층 II)로 이루어져 있다(Fig. 6-1). 층단위 VI에는 고토양이 일부 협재되어 있으나, 연대에 대한 분석이 이루어지지 않은 상태에서 광역적으로 대비할 수 있는 근거가 부족해서 본 연구에서는 주요 층단위로 설정하지 않았다. 층단위의 연대는 행원4호공으로부터 서쪽으로 약 500m 떨어져 있는 용암해수공의 지질주상도 및 Ar^{40}/Ar^{39} 절대연령 분석결과(Koh et al., 2013)와 대비하여 특정하였다.

1) 층단위 I (비화산성 퇴적암층 I)

층단위 I 은 시추코어 최하위에 위치하는 비화산성 퇴적암층에 해당한다. 해당 층단위는 전반적으로 사암과 실트암의 누층으로 이루어져 있으며, 대체로 상부로부터 실트암층-사암층-실트암층 순의 조직변화를 보인다(Figs. 4-8, 4-9). 최상부의 실트암층의 경우 하위에 발달된 실트암층과는 달리 일부 토양화가 진행되어 퇴적물이 고토양과 혼재되어 있는 암상을 보이고, 중간에 사암층에서는 mm 크기의 패각편이 다량 포함되어 있다. 퇴적구조는 교란이 심하게 나타나기 때문에 관찰이 어려우나 대체로 괴상의 구조를 보이고 있으며, 상부에 발달된 실트암에서는 입도의 차이로 인한 엽층리 구조가 나타나기도 한다. 아울러 자연감마선 검층을 통해서 해당 층단위는 평균 125.2API의 다소 높은 세기를 보이는데(Table 6-1)(Fig. 4-24), 이는 시추코어에서 구분된 암상 중 가장 높은 강도로 확인된다.

층단위 I 의 산출 깊이는 대체로 해안선에 가까워질수록 얕아지는 특성을 보이는데,

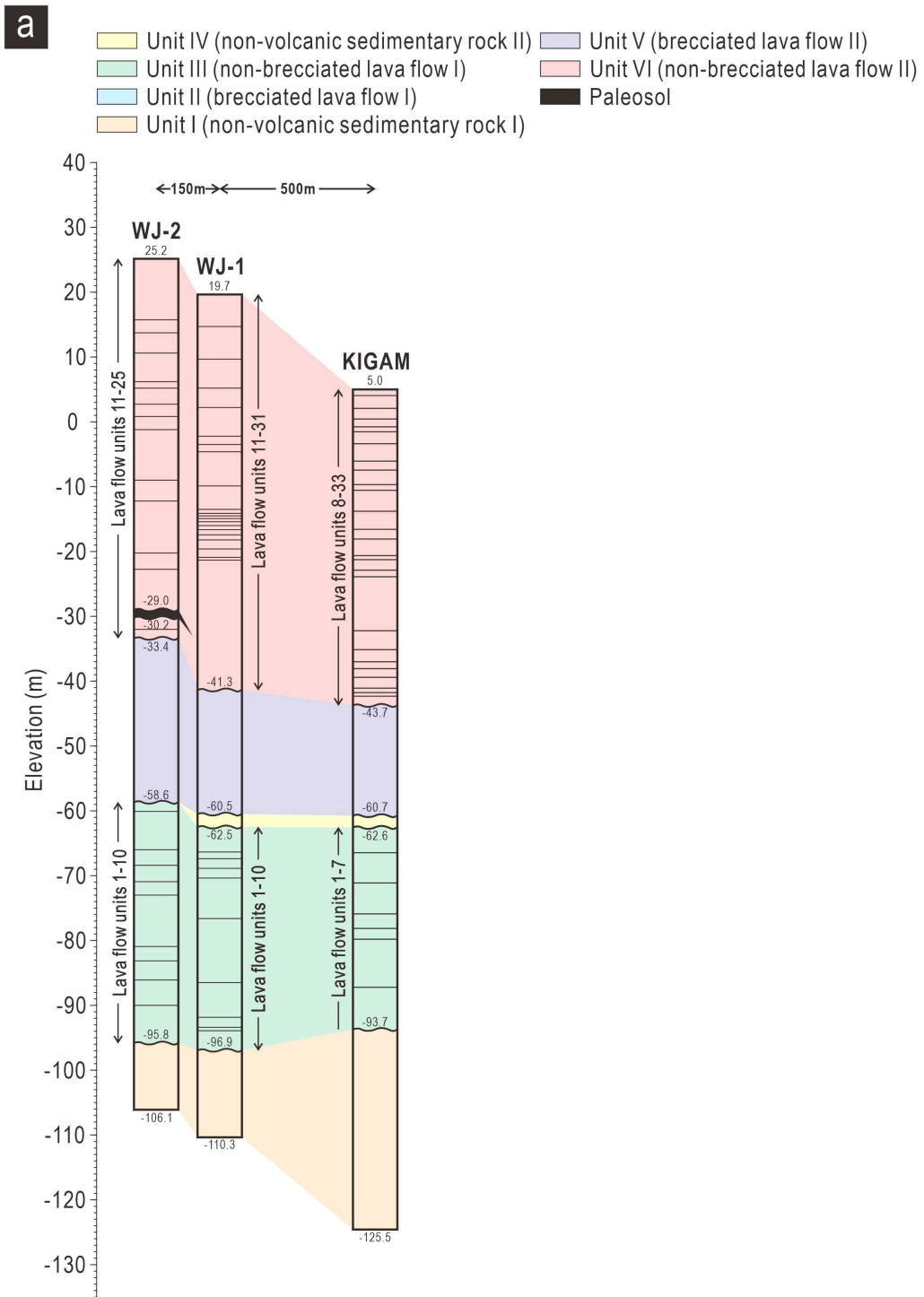


Fig. 6-1. Lithology and stratigraphic correlation of boreholes in the study area. For well locations, see Fig. 1-1.

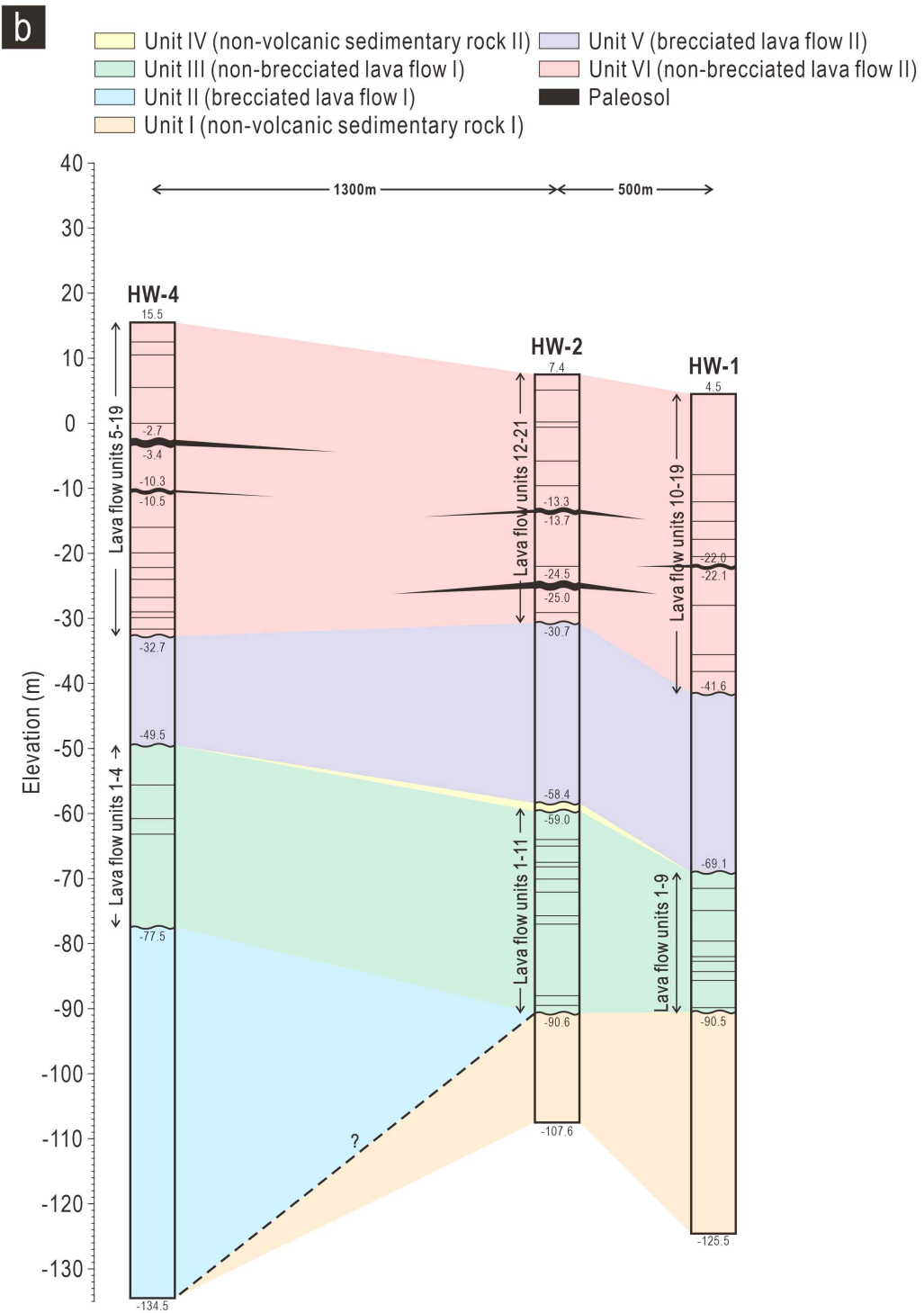


Fig. 6-1. Continued.

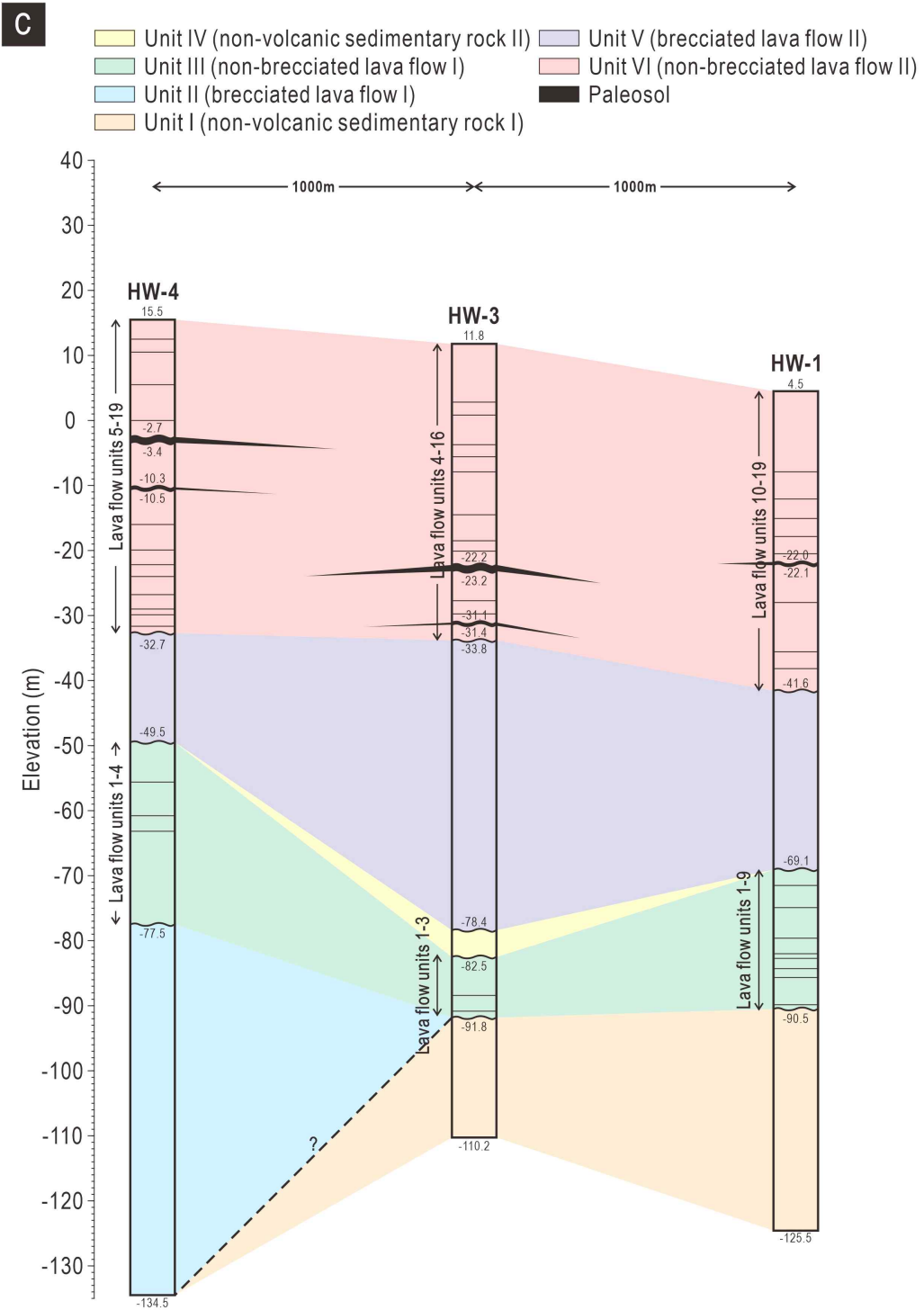


Fig. 6-1. Continued.

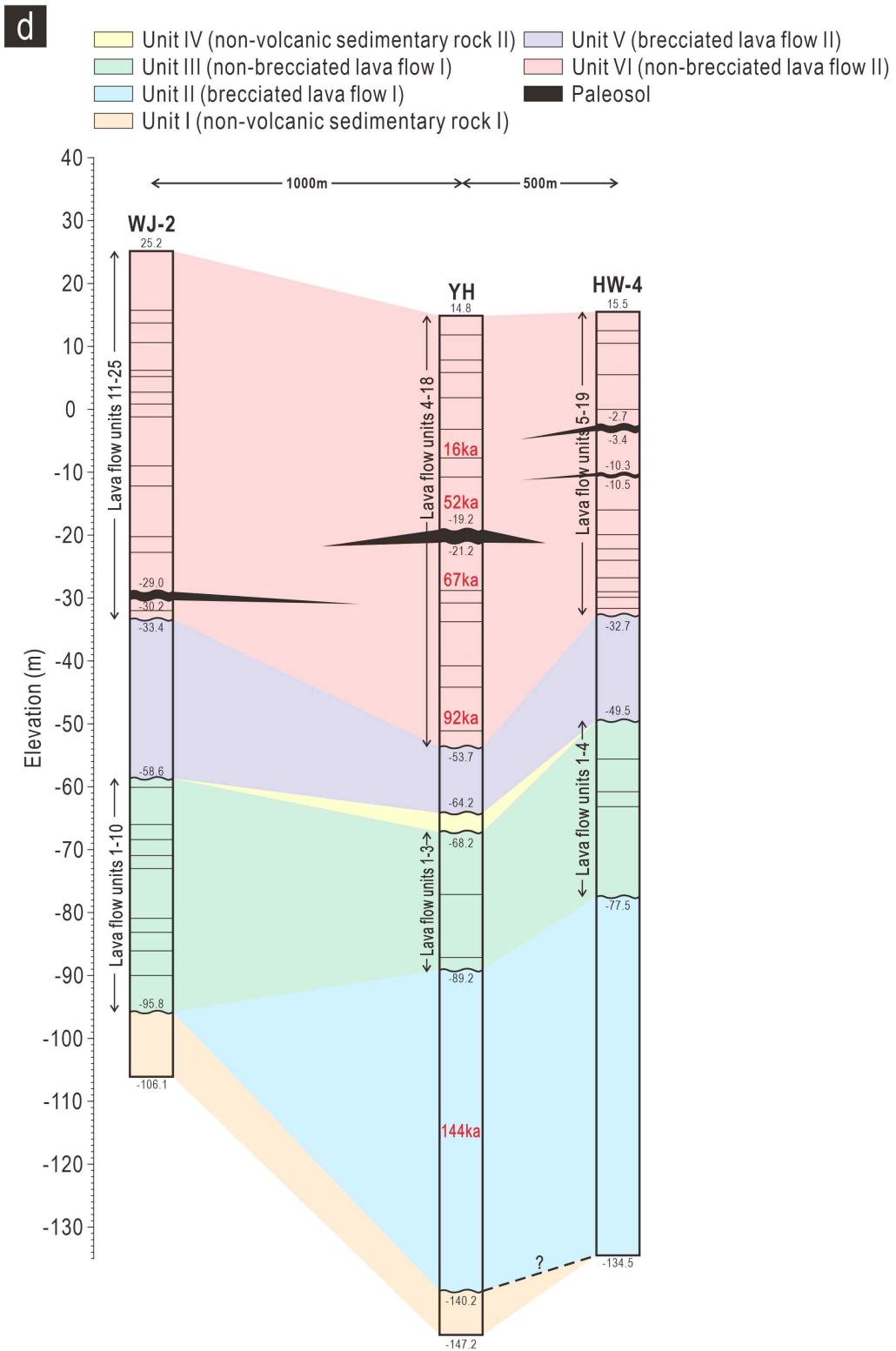


Fig. 6-1. Continued.

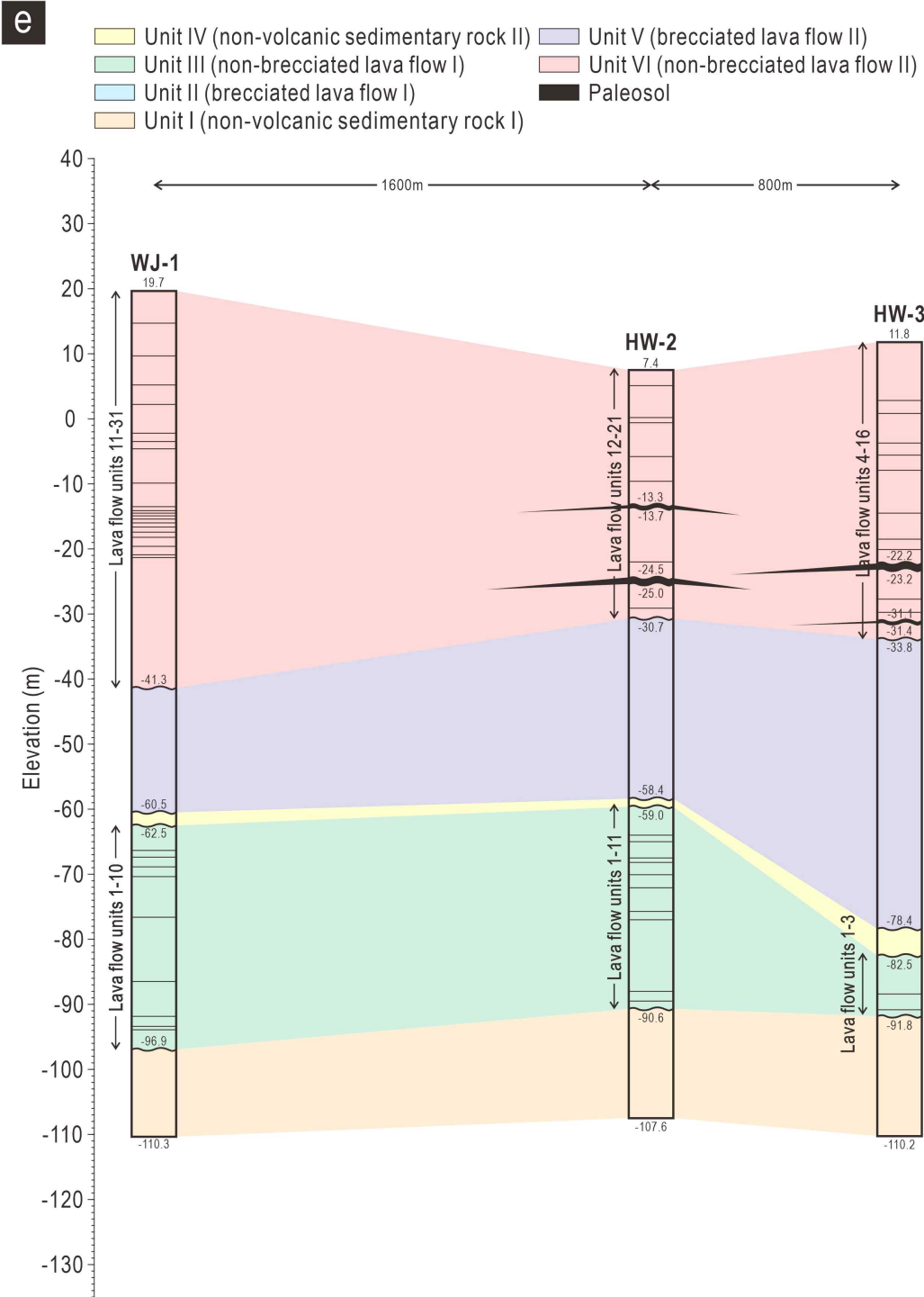


Fig. 6-1. Continued.

f

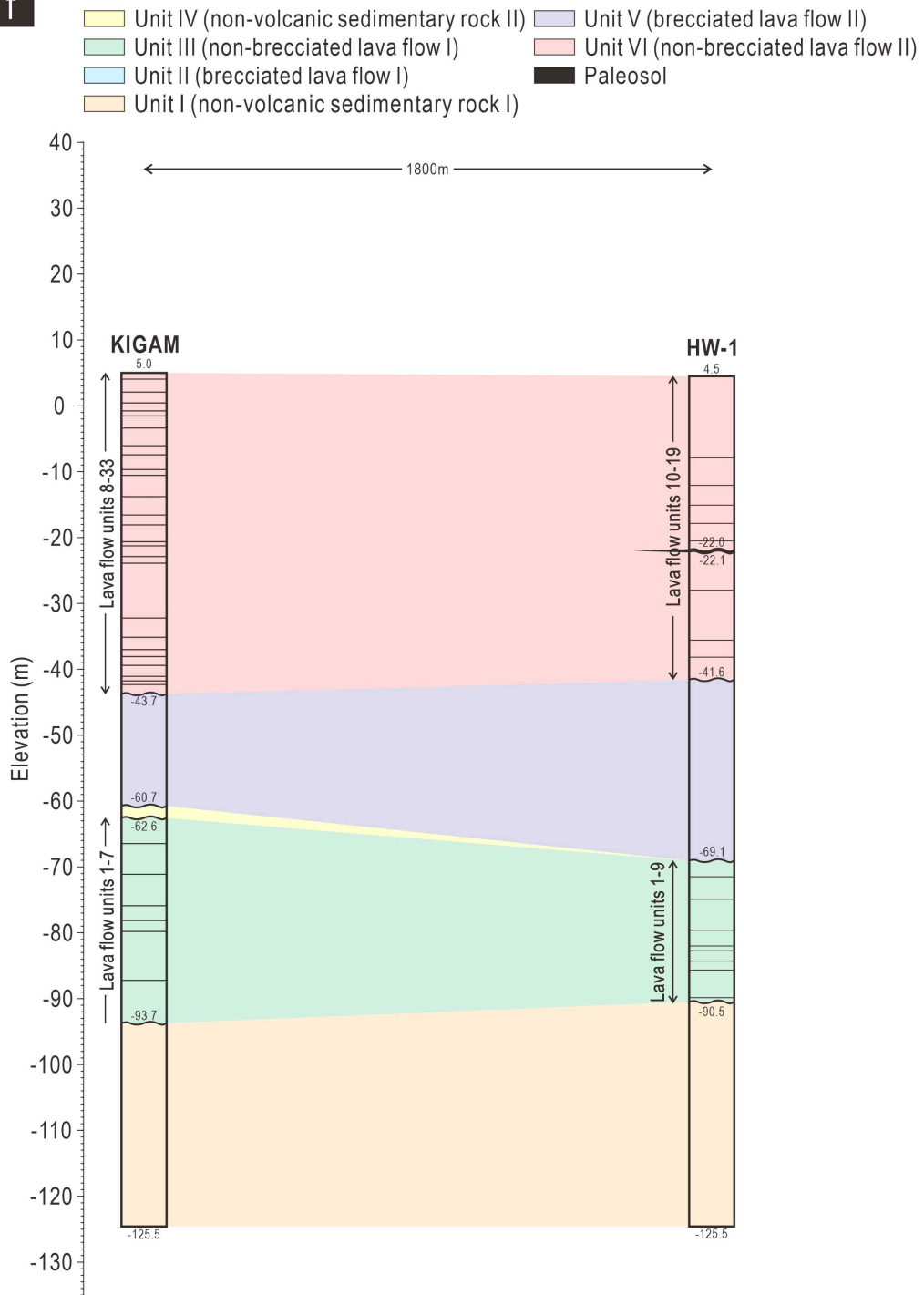


Fig. 6-1. Continued.

Table 6-1. Information on the depth of upper boundaries of stratigraphic units.

Borehole	Stratigraphic unit	Depth of upper boundary (m, measured depth)
KIGAM	Unit VI	0.0
	Unit V	48.7
	Unit IV	65.7
	Unit III	67.6
	Unit I	98.7
WJ-1	Unit VI	0.0
	Unit V	64.0
	Unit IV	80.2
	Unit III	81.9
	Unit I	115.0
WJ-2	Unit VI	0.0
	Unit V	60.6
	Unit III	83.5
	Unit I	121.0
HW-1	Unit VI	0.0
	Unit V	46.1
	Unit III	73.6
	Unit I	95.0
HW-2	Unit VI	0.0
	Unit V	42.2
	Unit IV	65.8
	Unit III	66.4
	Unit I	98.0
HW-3	Unit VI	0.0
	Unit V	52.5
	Unit IV	90.2
	Unit III	94.0
	Unit I	103.6
HW-4	Unit VI	0.0
	Unit V	49.4
	Unit III	65.0
	Unit II	93.0

월정리 시추공들을 연결한 단면(월정2호공-월정1호공-KIGAM공)에서는 해수면 하 95.8~93.7m의 미미한 변화가 나타난다(Fig. 6-1a). 반면 행원리 지역의 경우(행원4호공-행원3호공 및 행원2호공-행원1호공)에는(Fig. 6-1b, c) 행원4호공에서 시추심도 부족에 따른 층단위 I 이 나타나지 않기 때문에, 해수면 하 134.5m보다 더 깊은 심도로부터 해수면 하 90.5m까지의 급격한 변화를 보인다. 또한 월정리 지역과 행원리 지역을 비교해보면, 고도가 가장 높은 월정2호공-용암해수공-행원4호공을 연결한 단면(Fig. 6-1d)에서는 용암해수공으로 가면서 해수면 하 95.8m에서 해수면 하 140.2m까지 깊어지는 양상을 보이지만, 행원4호공에서는 굴착심도의 부족으로 확인이 불가하다. 월정1호공-행원2호공-행원3호공 단면(Fig. 6-1e)에서는 해수면 하 91.8m~96.9m 사이의 발달깊이를 보이며 월정지역이 조금 더 깊게 나타난다. 이와 유사하게 해안선에 가깝게 위치한 KIGAM공-행원1호공(Fig. 6-1f)을 연결한 단면에서도 해수면 하 90.5~93.7m로 월정지역으로 갈수록 깊어지는 양상을 보이지만 큰 차이는 나타나지 않는다. 층단위 I 의 상부에는 각력화 용암류층 I (층단위Ⅱ)과 비각력화 용암류층 I (층단위Ⅲ)이 발달되어 있는데, 행원4호공이 위치한 지역에서는 각력화 용암류층 I 이 나타나지만, 그 외에 시추공들에서는 비각력화 용암류층 I 이 존재한다.

이와 같은 층단위 I 은 용암해수공에서도 해수면 하 140.2m부터 나타나는 것이 확인되었지만(Fig. 6-1d), 해당 구간에서의 절대연대는 분석은 이루어지지 않았다. 그러나 층단위Ⅱ와 대비되는 각력화 용암류 구간이 그 상부를 피복하고 있음이 확인되고 해당 지층의 연대는 144Ka로 제시되었다. 이를 기준으로 할 때, 층단위 I 은 144Ka 이전에 형성이 종료된 것으로 추정된다.

2) 층단위Ⅱ(각력화 용암류층 I)

층단위Ⅱ는 시추공 최하부에 발달된 비화산성 퇴적암층 I (층단위 I)의 직상부에 발달된 각력화 용암류 구간에 해당하는 것으로 구분된다. 특징적으로 이 층단위는 행원4호공에서만 60m 이상의 두께로 발달된 것이 관찰되며, 나머지 시추공들에서는 확인되지 않는다. 층단위Ⅱ 전반적으로 최대 40cm까지의 크기를 갖는 분리된 유리질 각력암으로 구성되어 있는데, 해당 층단위에서는 OTV 검층영상이 취득되지 않아 실제 지층의 암상특성 및 수직적 발달상태가 확인되지 않는다.

그러나 다른 시추공들에서 확인된 각력화 용암류 암상의 특성으로 미루어 볼 때, 점토질의 풍화산물로 이루어진 기질부 또는 10cm 이하의 작은 크기로 부스러져 있는 유리질 각력들이 함께 발달되어 있으며, 그 상부에는 반각력화 용암류가 이들을 피복하고 있을 것으로 추정된다. 또한 유리질 각력에 대한 지화학 분석을 통해 층단위Ⅱ는 암석화학적으로 쏘레아이트질 현무암의 조성을 나타내며(Fig. 4-23), 자연감마선은 평균 16API로 구분된 모든 암상 중 가장 낮은 강도를 보인다(Table 6-1).

시추공별로 암상을 대비시킨 단면상에서 층단위Ⅱ는 행원4호공이 위치된 곳에서 해안선 방향으로 갈수록 발달 심도는 깊어지고(Fig. 6-1b, c), 층단위 두께는 점진적으로 얇아지다 행원2호공과 행원3호공이 부근에서 수렴하며 사라지는 분포특성을 보인다. 이와 유사하게 행원리에서 월정리 지역으로 향하는 경우(Fig. 6-1d)에도 층단위Ⅱ는 서서히 얇아지다 소멸하는 양상이 나타난다.

용암해수공에서도 층단위Ⅱ의 암상과 대비되는 각력화 용암류 구간이 약 50m 가까이 되는 두께로 발달되어 있는 것이 확인되며, 그 상부는 비각력화 용암류로 덮혀 있다(Fig. 6-1d). 해당 지층은 144Ka의 연대를 갖는 것으로 분석되었으나, 직상부의 비각력 용암류 구간에서는 연대측정이 이루어지지 않아 층단위Ⅱ의 정확한 형성 기간의 특징은 곤란하다.

3) 층단위Ⅲ(비각력화 용암류층 I)

층단위Ⅲ은 비화산성 퇴적암층 I(층단위 I)과 각력화 용암류층 I(층단위Ⅱ)의 상부를 피복하고 있는 비각력화 용암류층으로서, 연구지역 전반에 걸쳐 분포되어 있다. 이 층단위는 파호이호이 용암류의 누층으로 시추공별 용암류 유동단위는 적게는 3매, 많게는 10매까지 발달해 있으며, 유동단위의 두께는 최소 0.5, 최대 14.3m, 평균 3.6m로 나타난다. 용암류의 유형은 총 54매의 용암류 유동단위 중 P형이 48매로 지배적이고, 나머지는 S형으로 용암류 유형별 유동단위 수는 큰 차이를 보인다(Fig. 4-1). 또한 용암류 광물조성은 전반적으로 침상 장식과 비정형의 감람석이 1~2mm 크기의 반정광물로 나타나며, 1~10% 사이의 함량비를 보여 모두 침상장식감람석현무암으로 분류된다(Fig. 4-6). 지화학적 분석을 통해 용암류 유동단위는 모두 쏘레아이트질 현무암의 조성으로 구분되었으며, 자연감마

선 세기는 19.6~27.7API 사이의 강도로 나타나는 것이 확인된다(Table 6-1).

시추공별 암상대비 단면을 통해 확인된 층단위Ⅲ의 발달상태를 살펴보면, 월정 지역(월정2호공-월정1호공-KIGAM공)에서는 해안선에 가까워질수록 발달 심도는 해수면 하 58.6m에서 해수면 하 62.6m까지 약간 깊어지고, 두께는 37.2m에서 31.1m로 얇아지는 변화를 보인다(Fig. 6-1a). 반면 행원지역에서는 2가지의 변화 양상이 나타나는데, 행원4호공-행원2호공-행원1호공으로 이어지는 단면에서는 발달 깊이가 행원4호공에서는 해수면 하 49.5m로 나타나지만, 해안선 근처에서는 해수면 하 69.1m로 20m 정도가 더 깊어진다(Fig. 6-1b). 아울러 두께는 행원4호공에서는 28.0m로 나타나고 행원2호공에서는 약 3m 정도가 증가해 31.6m의 두께를 보이지만, 해안선에 위치한 행원1호공에서는 두께가 21.4m로 크게 감소된 모습을 보인다. 반면, 행원4호공-행원3호공-행원1호공의 단면(Fig. 6-1c)에서는 발달심도가 각각 해수면 하 49.5m, 82.5m, 69.1m로 큰 변화폭을 갖는다. 두께 또한 시추공별로 각각 28.0m, 9.3m, 21.4m로 두께변화가 다소 크게 나타난다.

월정리와 행원리 지역의 시추공을 대비해 보면, 월정2호공-용암해수공-행원4호공을 잇는 단면에서 층단위Ⅲ의 발달심도는 월정2호공에서 용암해수공으로 갈수록 발달심도는 10m 정도 깊어져 해수면 하 68.2m로 나타나고, 두께는 37.2m에서 21.0m로 얇아지는 양상을 보인다(Fig. 6-1d). 한편 행원4호공으로 향하면서 발달 심도는 반대로 해수면 하 49.5m까지 상승하며 두께 또한 28.0m까지 증가하는 변화가 나타난다. 월정1호공-행원2호공-행원3호공으로 이어지는 단면상에서는 발달심도가 행원2호공으로 갈수록 서서히 얇아지다(해수면 하 62.5~59.0m) 행원3호공에서는 급격하게 깊어지는(해수면 하 59.0~82.5m) 변화를 보인다(Fig. 6-1e). 층단위의 두께변화 또한 비슷한 양상으로 나타나는데, 월정2호공에서(두께 34.4m) 행원2호공으로 가면서 두께는 약 3m 정도로 미미하게 감소하지만(두께 31.6m) 그 뒤로는 두께가 20m 이상 크게 감소하여 행원3호공에서는 9.3m의 두께를 보인다. 두 지역에서 해안선에 가장 가깝게 위치하는 KIGAM공과 행원1호공 사이에서는 행원1호공으로 갈수록 발달심도는 해수면 하 62.6m에서 69.1m로 소폭 증가하지만, 두께는 31.1m에서 21.4m로 감소하는 변화양상을 보인다(Fig. 6-1f).

용암해수공에서도 층단위Ⅲ과 대비되는 비각력화 용암류 구간이 해수면 하

68.2~89.2m 사이에 발달되어 있으며 하부에는 각력화 용암류, 상부에는 비화산성 퇴적암이 발달되어 있다(Fig. 6-1d). 다만 해당 구간에서는 절대연령 분석이 수행되지 않아 형성시기가 특정되지 않는다.

4) 층단위Ⅳ(비화산성 퇴적암층Ⅱ)

층단위Ⅳ는 비각력화 용암류층Ⅰ(층단위Ⅲ)과 각력화 용암류층Ⅱ(층단위Ⅴ) 사이에 얇은 두께로 발달되어 있는 비화산성 퇴적암층을 말하며, KIGAM공, 월정1호공, 행원2호공, 행원3호공에서 각 0.6m, 1.9m, 2.0m, 4.1m의 두께로 협재되어 있는 것이 확인되었다(Fig. 4-1). 퇴적층을 구성하는 퇴적물은 전반적으로 니에서 모래크기의 입도를 보이는 쇄설성 입자들과 더불어 다수의 석회질의 패각편 또는 탄산염 물질로 구성되어 있다(Fig. 4-6). 다만 층단위Ⅳ의 두께가 가장 두껍게 나타나는 행원3호공의 OTV 검층영상에서는 원마도가 양호한 자갈크기의 입자들이 층단위 하부에 상당수 존재하는 것이 관찰된다(Fig. 4-18). 또한 세부적으로 입도에 따라 구간을 달리하는 누층구조가 나타나기도 하는데, 월정1호공에서 층단위Ⅳ는 사질 입자와 패각편으로 이루어진 상부층, 니질 입자와 탄산염 물질로 구성된 하부층으로 구분되며 이들은 모두 괴상의 퇴적구조를 보인다(Fig. 4-10). 월정3호공의 경우에는 하부층이 추가적으로 나타나며, 이 층은 앞서 기술된 원마도가 양호한 자갈크기의 입자들로 이루어져 있다(Fig. 4-18). 자연감마선 검층을 통해 측정된 층단위Ⅳ의 자연감마선 세기는 평균 27.7~37.6API 사이의 범위를 보이는데, 이는 유사한 비화산성 퇴적암층인 층단위Ⅰ에 비해서 매우 낮은 강도를 나타낸다(Table 6-1).

월정리 지역에 위치한 시추공들을 연결한 단면(월정2호공-월정1호공-KIGAM공)에서 층단위Ⅳ의 발달심도는 월정1호공에서 60.5m, KIGAM공에서는 60.7m로 위치에 따른 심도변화가 거의 없으며, 두께 또한 2m 정도로 일정하게 나타나지만 행원2호공으로 갈수록 점차 얇아지며 수렴한다(Fig. 6-1a). 행원리 지역의 경우 행원4호공-행원2호공-행원1호공을 연결한 단면상에서는 행원2호공에서만 층단위Ⅳ가 0.6m의 두께로 존재하기 때문에 하부에 발달된 층단위Ⅲ의 발달심도를 따라 행원4호공 쪽으로는 깊이가 얕아지며, 행원1호공 방향으로는 발달깊이가 깊어지며 두께가 얇아지는 모습을 보인다(Fig. 6-1b). 행원4호공-행원3호공-행원1

호공을 잇는 단면의 경우에는 행원3호공에서만 층단위Ⅳ가 4.1m의 두께로 협재되어 있고 행원4호공과 행원1호공 방향으로는 발달심도가 얕아지며 수렴하고 소멸되는 양상이 나타난다(Fig. 6-1c). 월정2호공-용암해수공-행원4호공의 단면에서는 용암해수공에서만 층단위Ⅳ의 존재가 확인되며, 해당 시추공을 기준으로 동쪽과 서쪽으로 갈수록 발달심도는 각각 해수면 하 58.6m, 49.5m로 얕아지며 두께는 감소하다 층단위Ⅳ는 사라진다(Fig. 6-1d).

한편 층단위 두께의 지역적 차이는 해안선에서 가장 멀리 위치하고 있는 월정2호공-행원4호공 단면에서는 확인되지 않으며, 월정1호공-행원2호공-행원3호공과 KIGAM공-행원1호공 단면에서만 관찰된다. 월정1호공과 행원2호공 사이에서 층단위Ⅳ는 발달심도(해수면 하 60.5~58.4m)와 두께(2.0~0.6m)에 있어 눈에 띄는 변화는 나타나지 않는다(Fig. 6-1e). 그러나 행원2호공에서 행원3호공으로 갈수록 발달심도가 해수면 하 78.4m까지 급격하게 깊어지는 양상을 보이며, 두께 또한 4.1m로 약 2배가량 증가한다. KIGAM공에서 행원1호공 사이에서 층단위Ⅳ는 KIGAM공에서만 발달되어 있기 때문에 행원1호공으로 가면서 발달심도는 깊어지고 두께는 서서히 감소하며 사라지는 것으로 대비되었다(Fig. 6-1f).

용암해수공에서 층단위Ⅳ와 대비되는 비화산성 퇴적암이 해수면 하 64.2~68.2m 깊이에 걸쳐 약 4m의 두께로 발달되어 있다(Fig. 6-1d). 해당 지층의 상부에는 본 연구에서 설정된 층서체계와 동일하게 각력화 용암류의 암상을 보이는 구간이 나타나지만 모두 연대측정은 이루어지지 않아 형성 시기에 대해 특정하기는 곤란하다.

5) 층단위Ⅴ(각력화 용암류층Ⅱ)

층단위Ⅴ는 비화산성 퇴적암층Ⅱ(층단위Ⅳ)와 비각력화 용암류층Ⅰ(층단위Ⅳ)의 상부를 덮고 있는 각력화 용암류층으로서 행원4호공 주변에 국부적으로 발달해 있는 각력화 용암류층Ⅰ(층단위Ⅱ)과는 다르게 모든 시추공들에 존재하는 것이 확인된다. 층단위Ⅴ는 최상부에 부분적으로 파쇄되어 있는 P형 또는 S형 파호이호이 용암류가 2~5m의 두께로 발달되어 있다. 이 반각력화 용암류의 하부에는 거력 이상의 크기를 보이는 유리질 각력암과 더불어 10cm 이하로 부스러져 있는 유리질 각력암이 고밀도로 혼재되어 있거나, 세립의 유리질 각력암 대신 점

토질 풍화물질의 기질로 채워져 있는 암상이 나타난다(Fig. 4-7). 이러한 암상특징을 보이는 층단위 V는 지화학적으로 월정2호공에서 조면현무암으로 구분되지만, 나머지 시추공들은 모두 쏘레아이트질 현무암의 조성을 보인다(Fig. 4-23). 아울러 자연감마선의 세기는 평균 25.8~46.3API의 범위를 갖는 것으로 확인된다(Table 6-1).

시추공별 암상 대비단면을 통해 층단위 V의 분포현황을 살펴보면, 월정리 지역의 시추공들(월정2호공-월정1호공-KIGAM공)에서는 월정2호공에서 월정1호공으로 갈수록 발달심도는 해수면 하 35.4~44.3m로 깊어지고, 두께는 23.2m에서 16.2m로 다소 얇아진다(Fig. 6-1a). 그러나 이후 KIGAM공까지는 층단위 발달심도와 두께에 큰 변화가 나타나지 않는다. 한편 행원리 지역의 행원4호공-행원2호공-행원1호공을 잇는 단면에서는 해안선에 가까워질수록 발달심도가 해수면 하 33.9m에서부터 41.6m까지 서서히 깊어지고, 두께는 15.6~27.5m로 두꺼워지는 양상을 보인다(Fig. 6-1b). 또한 행원4호공-행원3호공-행원1호공 단면상에서 층단위 V는 발달심도가 해수면 하 33.9~41.6m로 점진적으로 깊어지는 변화를 보이지만, 두께는 행원3호공에서 37.7m로 2배 이상 두꺼워지며 행원1호공에서는 다시 27.5m로 크게 얇아지는 모습을 보인다(Fig. 6-1c).

아울러 월정2호공-행원4호공 단면을 통해 확인된 층단위 V의 지역별 변화는, 행원4호공으로 갈수록 발달심도는 조금 상승하며(해수면 하 35.4~33.9m), 두께는 23.2m에서 15.6m로 줄어드는 변화가 나타난다(Fig. 6-1d). 월정1호공-행원2호공-행원3호공을 연결한 단면에서는 월정1호공에서 행원2호공으로 가면서 발달심도는 해수면 하 44.3~34.8m로 얇아지고 층단위 두께는 23.6m까지 증가한다(Fig. 6-1e). 그리고 행원3호공으로 향하면서 심도는 해수면 하 40.7m까지 깊어지고 두께는 계속해서 두터워져 37.7m로 나타난다. KIGAM공과 행원1호공 사이에서도 발달심도는 43.7~41.6m로 상승하고, 두께 또한 17.0m에서 27.5m로 증가하는 변화양상을 보인다(Fig. 6-1f).

층단위 V와 동일하게 각력화 용암류의 암상이 발달된 구간이 용암해수공에서도 나타나며(해수면 하 53.7~64.2m), 하부에는 비화산성 퇴적암이, 상부로는 비각력화 용암류로 피복되어 있다(Fig. 6-1d). 해당 지층에서는 절대연령 분석이 수행되지 않았으나, 직상부 층단위 VI과 대비되는 비각력화 용암류의 최하부에서

는 92Ka의 연대를 보이는 것으로 분석되었다. 따라서 층단위Ⅲ~Ⅴ까지의 형성 시기는 92~144Ka로 그 범위가 특정된다.

6) 층단위Ⅵ(비각력화 용암류층Ⅱ)

층단위Ⅵ은 연구지역 최상부에 발달되어 있는 비각력화 용암류층으로서, 파호 이호이 용암류가 겹겹이 쌓여있는 누층구조를 이루고 있다. 그리고 특징적으로, 층단위 사이에는 1매 내지 2매의 고토양층이 협재되어 있다(Fig. 4-1). 시추공별로 용암류는 최소10매, 최대 26매의 유동단위로 구성되어 있으며 단위두께는 0.2~20.0m의 범위를 가지며, 평균 3.1m의 두께를 보인다. 용암류 유형은 총 110매의 유동단위 중 91매가 P형 파호이호이 용암류의 특징을 보이며 나머지 19매는 S형으로 구분된다. 용암류 광물조성은 모든 유동단위에서 침상의 장석과 비정형 감람석이 1~2mm 크기의 반정으로 발달되어 있고, 그 비율이 1~10%로 침상장석감람석현무암으로 분류되었다(Fig. 4-6). 용암류의 지화학 조성은 쏘레아이트질 현무암, 쏘레아이트질 안산암, 알칼리 현무암으로 나타난다(Fig. 4-23). 행원3호공과 행원4호공은 모두 쏘레아이트질 현무암의 조성을 보이며, KIGAM공, 월정1호공, 월정2호공은 쏘레아이트질 현무암과 안산암이 교대로 나타난다. 또한 행원2호공의 경우에는 중간에 유동단위 1매가 알칼리 현무암으로 나타나고 나머지는 모두 쏘레아이트질 현무암의 조성을 갖는다. 또한 층단위Ⅵ에서 측정된 자연감마선 세기는 평균 29.0~39.8API의 강도로 나타나는데, 고토양이 협재되어 있는 곳에서는 27.0~48.6API의 강도를 보인다(Table 6-1).

층단위Ⅵ의 지역별 분포상태를 보면, 월정2호공-월정1호공-KIGAM공을 잇는 단면에서는 해안선 방향으로 갈수록 지표면의 고도는 해발 25.2~5.0m로 낮아지며, 층단위 두께는 60.6m, 64.0m, 48.7m 순으로 일부 증가되는 양상이 나타나기는 하지만 전반적으로는 감소경향을 보인다(Fig. 6-1a). 행원리 시추공들의 경우 행원4호공-행원2호공-행원1호공 단면에서는 지표 고도가 15.5~4.5m로 낮아지고, 두께는 49.4m, 42.2m, 46.1m로 변한다(Fig. 6-1b). 행원4호공-행원3호공-행원1호공 사이에서는 위에 단면들과 마찬가지로 지표의 고도는 15.5~4.5m로 서서히 낮아지는 모습을 보이지만, 두께는 행원3호공에서 52.5m로 증가하다 행원1호공으로 갈수록 다시 감소되는 양상을 보인다(Fig. 6-1c). 아울러 지역적으로 비교해 보았

을 때, 월정2호공-행원4호공 단면에서 지표 고도는 행원리 쪽으로 가면서 해발 25.2~15.5m로 낮아지며, 두께는 58.6~48.2m로 약 10m 정도가 줄어드는 변화를 보인다(Fig. 6-1d). 월정1호공-행원2호공-행원3호공 단면상으로는 월정1호공에서 행원2호공으로 갈수록 고도는 해발 19.7~7.4m로 점차 낮아지지만, 이후 다시 증가하여 행원3호공에서는 해발 11.8m로 나타난다. 층단위 두께는 월정1호공에서 61.0m로 발달되어 있으나 행원2호공으로 가면서 38.1m까지 점차 줄어들지만, 행원3호공으로는 45.6m까지 다시 두꺼워지는 변화를 나타낸다(Fig. 6-1e). 해안선에 가장 근접해 있는 KIGAM공과 행원1호공을 연결한 단면에서는 지표 고도(해발 5.0~4.5m)와 더불어 두께(48.7~46.1m)에 큰 변화를 보이지 않는다(Fig. 6-1f).

층단위 VI과 대비되는 용암해수공의 비각력화 용암류 구간은 지표면(해발 14.8m)으로부터 해수면 하 53.7m까지 발달되어 있으며, 중간(해수면 하 19.2~21.2m)에 협재되어 있는 고토양층을 기준으로 상·하부에서 각각 2개의 연대값이 얻어졌다(Fig. 6-1d). 하부는 67~92Ka의 형성시기를 갖는 것으로 확인되었고, 상부는 16~52Ka로 연대가 측정되었으나 최상부에서는 측정되지 않아 정확한 최후기 분출에 대한 시기는 파악이 불가하다.

2. 3차원 층서 모델링

1) 층경계면의 설정

층서 체계를 통해 시추공별로 파악된 층단위 경계면의 심도는 3차원 층서 모델링을 위한 기초자료로 전산화되었으며, 이때 심도는 측정 깊이(measured depth)의 형식으로 나타냈다(Table 6-1). KIGAM공에서의 층단위 경계면은 하부로부터 층단위 I, III, IV, V, VI의 상부면(98.7m, 67.6m, 65.7m, 48.7m, 0.0m)이 확인되었으며, 이와 마찬가지로 월정1호공에서도 층단위 I, III, IV, V, VI 상부면(115.0m, 81.9m, 80.2m, 64.0m, 0.0m)의 심도정보가 입력되었다. 월정2호공에서는 층단위 IV가 발달되어 있지 않기 때문에 층단위 I, III, V, VI의 상부면(121.0m, 83.5m, 60.6m, 0.0m)이, 행원1호공 또한 월정2호공과 같이 층단위 I, III, V, VI 상부면(95.0m, 73.6m, 46.1m, 0.0m)이 확인되어 이들의 심도정보가 입력되었다.

반면 행원2호공과 행원3호공에는 층단위Ⅳ가 발달되어 있어 층단위Ⅰ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ, Ⅵ 상부면(행원2호공: 98.0m, 66.4m, 65.8m, 42.2m, 0.0m, 행원3호공: 103.6m, 94.0m, 90.2m, 52.5m, 0.0m)에 대한 심도정보를 전산화하였다. 마지막으로 행원4호공은 유일하게 층단위Ⅰ이 확인되지 않는 대신에 층단위Ⅱ가 발달되어 있어 층단위Ⅱ, Ⅲ, Ⅴ, Ⅵ의 상부면(93.0m, 65.0m, 49.4m, 0.0m)이 확인된다.

2) 3차원 층서 모델링

3차원 층서 모델링은 시추공에서 구분된 층단위 경계면의 모델링 영역 안에서의 공간적 분포를 예측하여 나타내는 모델링 기법으로서, 층단위 경계면에 대한 정보가 없는 시추공들 사이의 공백은 불연속 평활 보간법(discrete smooth interpolation)(Mallet et al., 1989)을 통해 계산된 수치정보가 입력된다. 모델링에는 앞서 전산화된 시추공 기본정보 및 층단위 상부 경계면의 심도정보와 더불어 가공된 수치지형도 자료가 활용되었다.

생성된 3차원 지층 모델은 하부로부터 층단위Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ, Ⅵ 상부면으로 구성되어 있다(Figs. 6-2, 6-3). 비화산성 퇴적암층Ⅰ의 상부 경계에 해당되는 층단위Ⅰ 상부면은 모델링 영역 전반에 걸쳐 발달해 있는 것이 확인되나, 행원4호공 부근에서는 시추공 심도보다 깊은 위치에서 나타나는 것으로 모델링 되었다. 상부면이 발달된 깊이는 해수면 하 85.1~133.6m의 범위를 보이는데, 행원4호공이 위치한 영역의 북동부에서 가장 깊게 발달해 있으며 남서쪽으로 갈수록 서서히 그 깊이가 얕아지는 분포양상이 확인된다.

층단위Ⅱ(각력화 용암류층Ⅰ) 상부면은 모델링 영역의 북부에서부터 중부까지 발달되어 있으며, 동쪽에서는 행원2호공과 행원3호공, 서쪽에서는 월정1호공 및 월정2호공의 위치 이전까지 분포해 있다. 층단위Ⅱ 상부면은 층단위Ⅰ 상부면과는 반대로 북동부에서 해수면 하 51.6m로 가장 얇은 발달심도를 보이며, 남쪽으로 갈수록 점진적으로 깊어져 해수면 하 97.0m까지 나타난다.

비각력화 용암류층Ⅰ로 구분된 층단위Ⅲ의 상부면은 모델링 영역 전체에 발달해 있으며, 심도는 해수면 하 41.7~87.8m의 범위를 가진다. 가장 얇은 곳은 모델링 영역의 북쪽으로 관찰되며 남쪽 내지 남동쪽으로 갈수록 발달 심도가 깊어지며, 행원3호공 부근에서 가장 깊게 발달되어 있다.

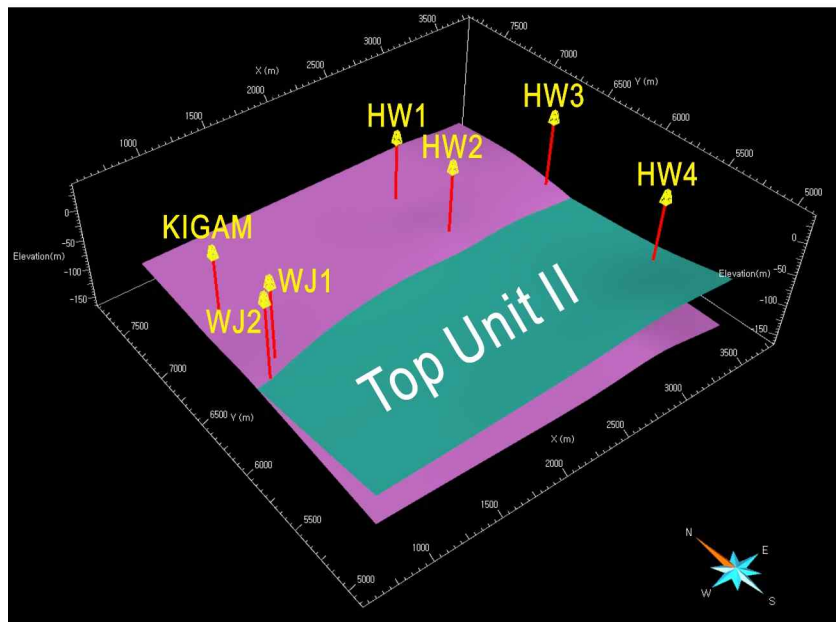
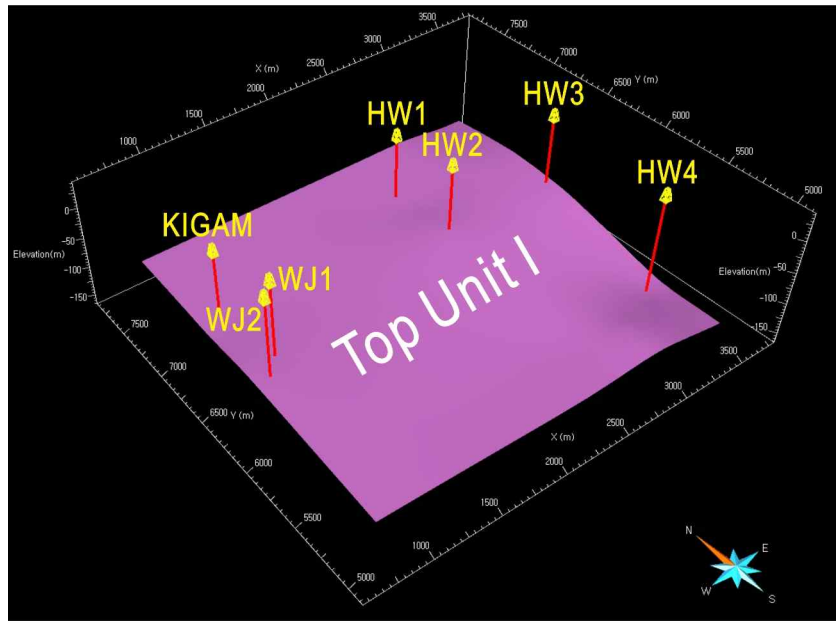


Fig. 6-2. Three-dimensional stratigraphy model of the study area with the upper boundaries of units I (non-volcanic sedimentary rock I) and unit II (brecciated lava flow I), unit III (non-brecciated lava flow I), unit IV (non-volcanic sedimentary rock II), unit V (brecciated lava flow II), and unit VI (non-brecciated lava flow II).

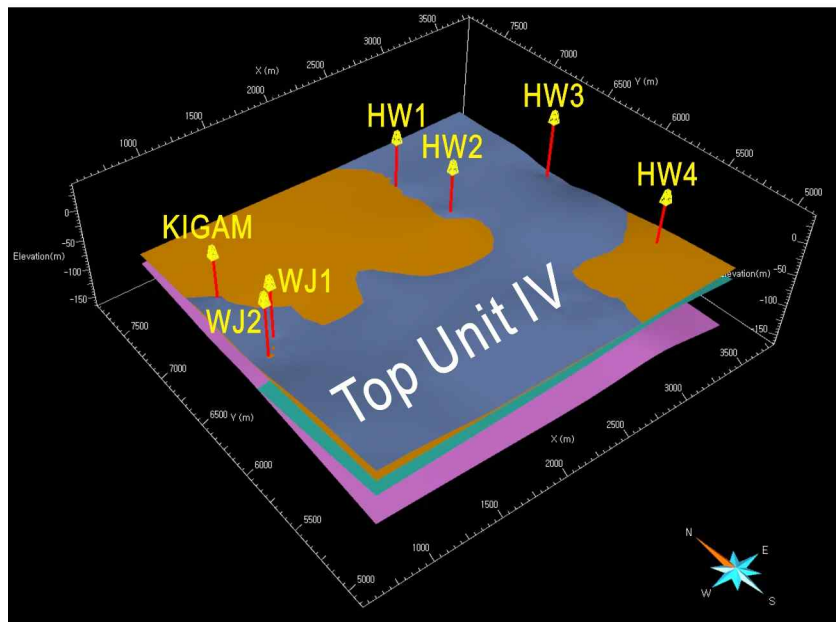
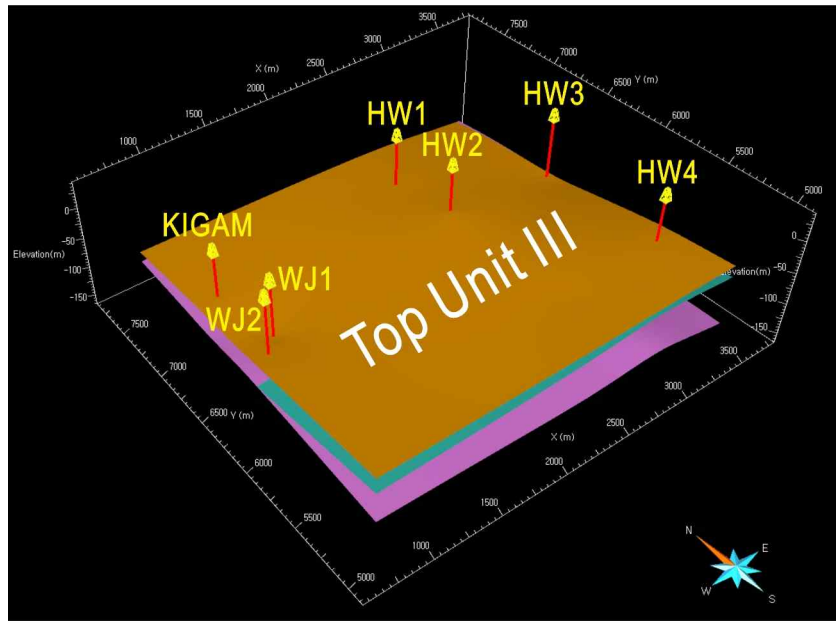


Fig. 6-2. Continued.

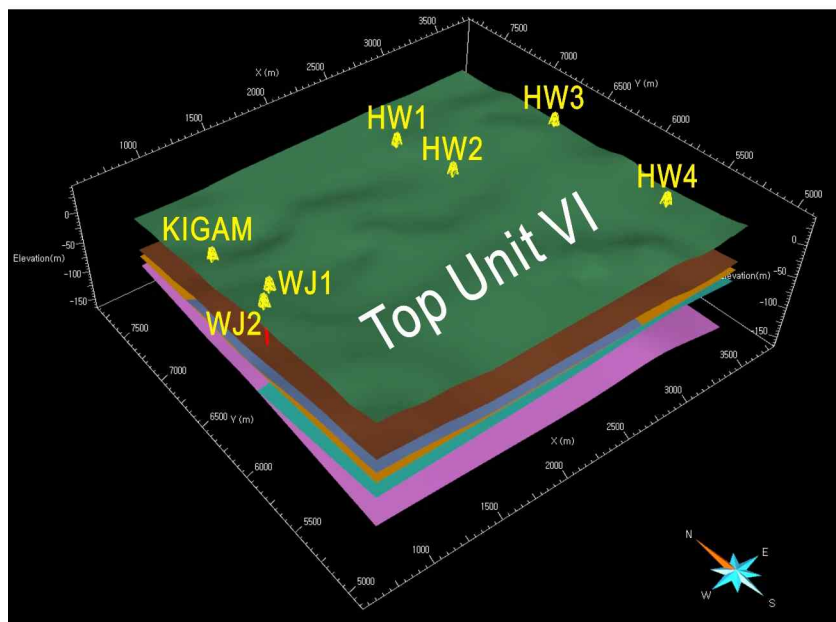
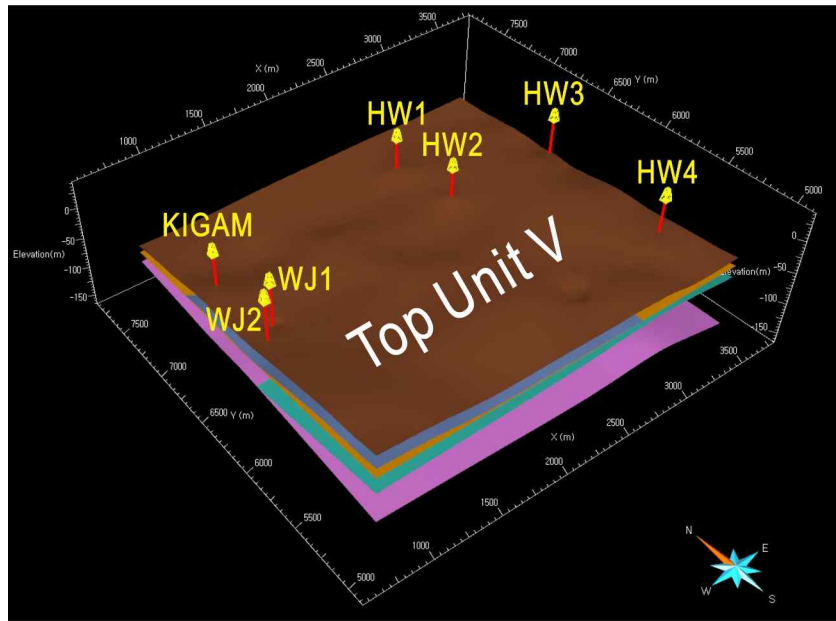


Fig. 6-2. Continued.

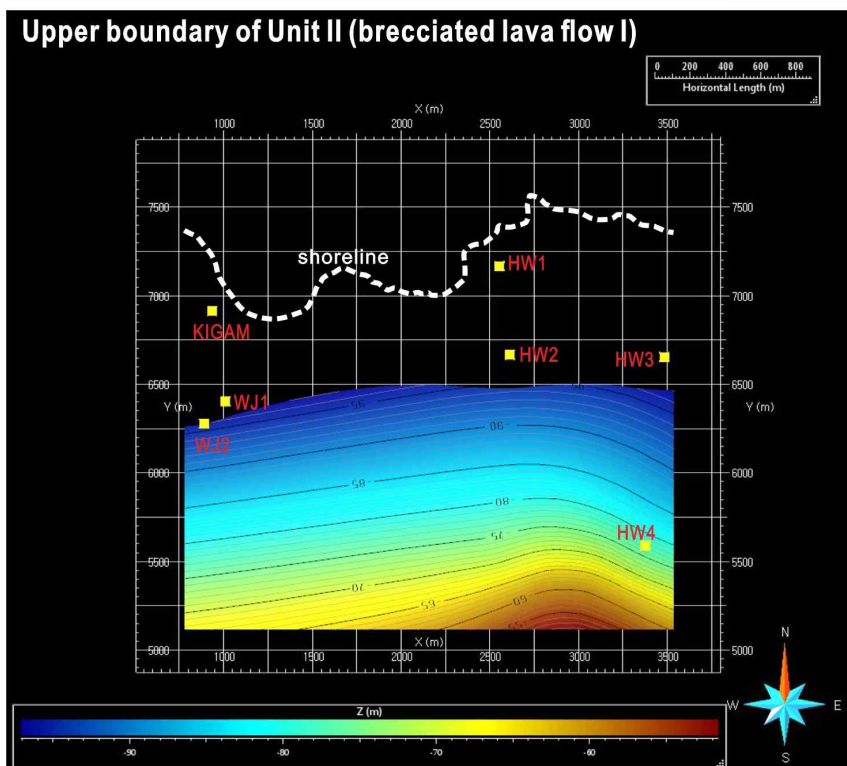
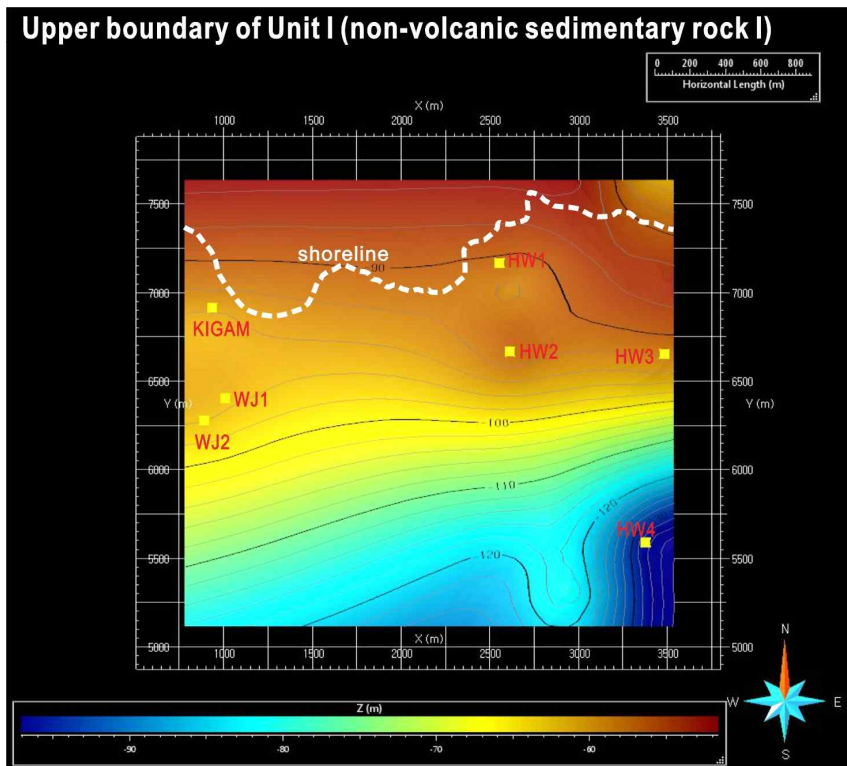


Fig. 6-3. Topographic maps of the upper boundaries of units I to VI. Contours in meters (m).

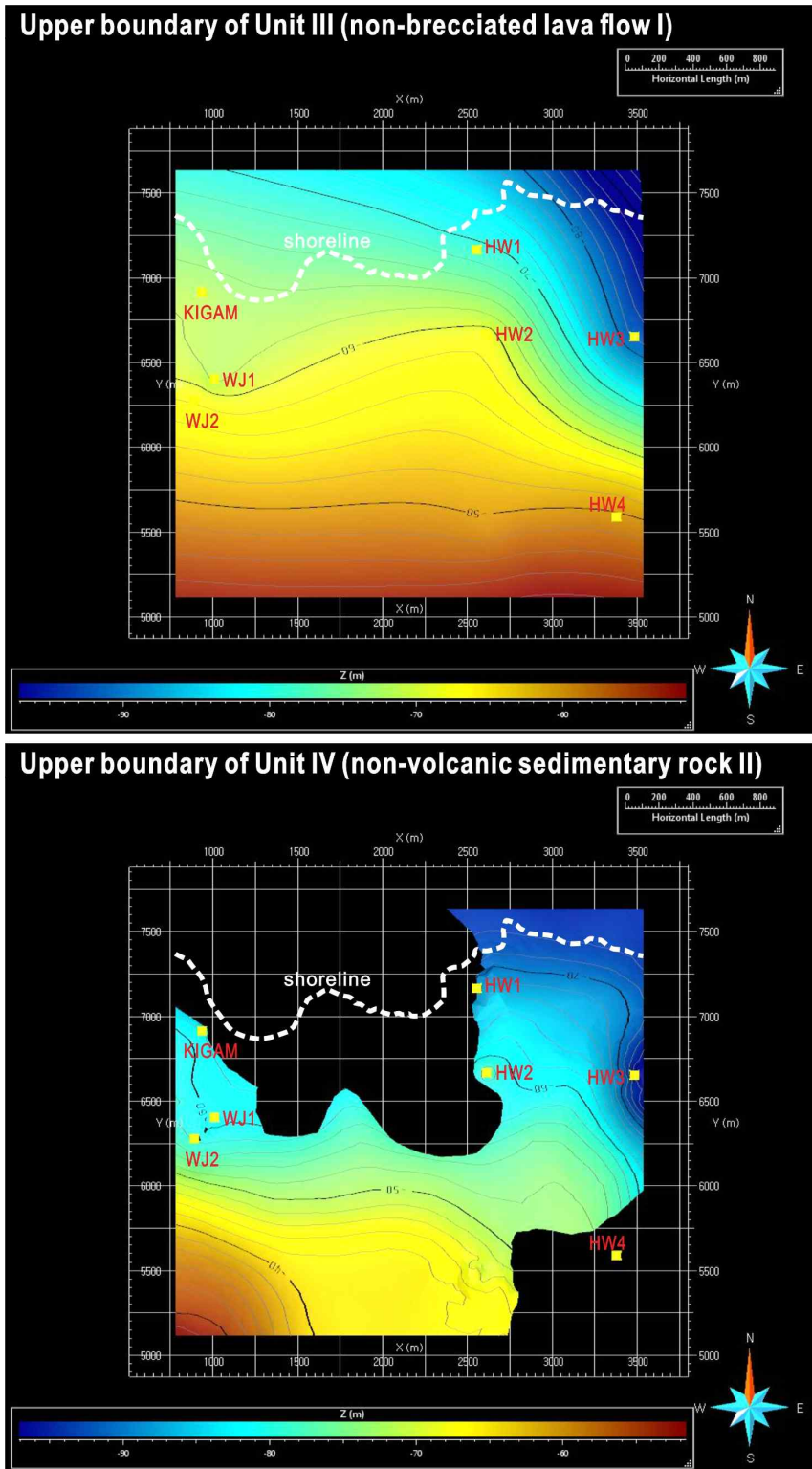


Fig. 6-3. Continued.

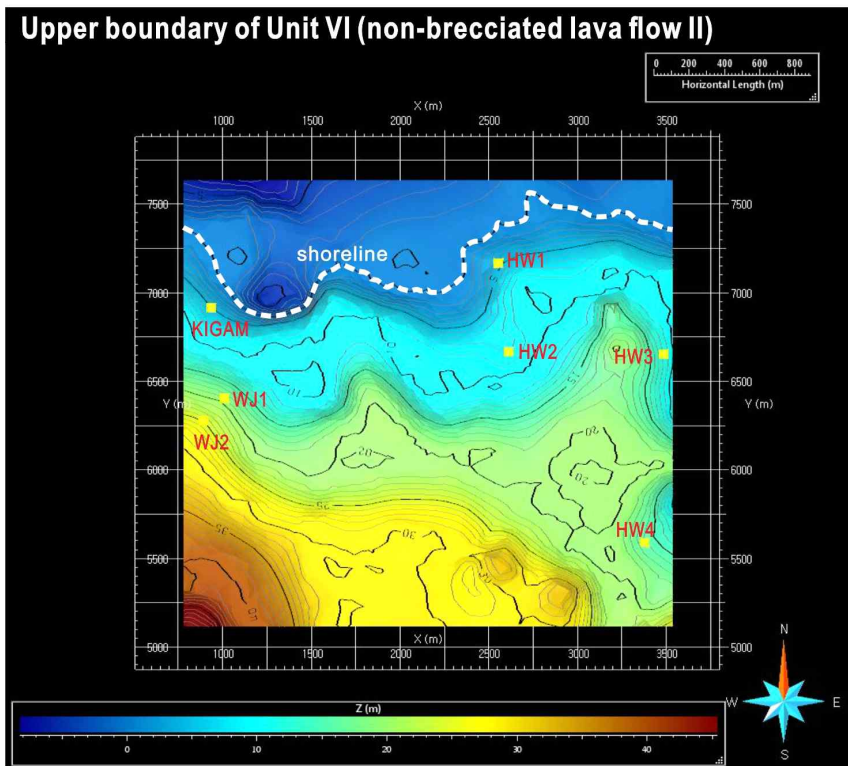
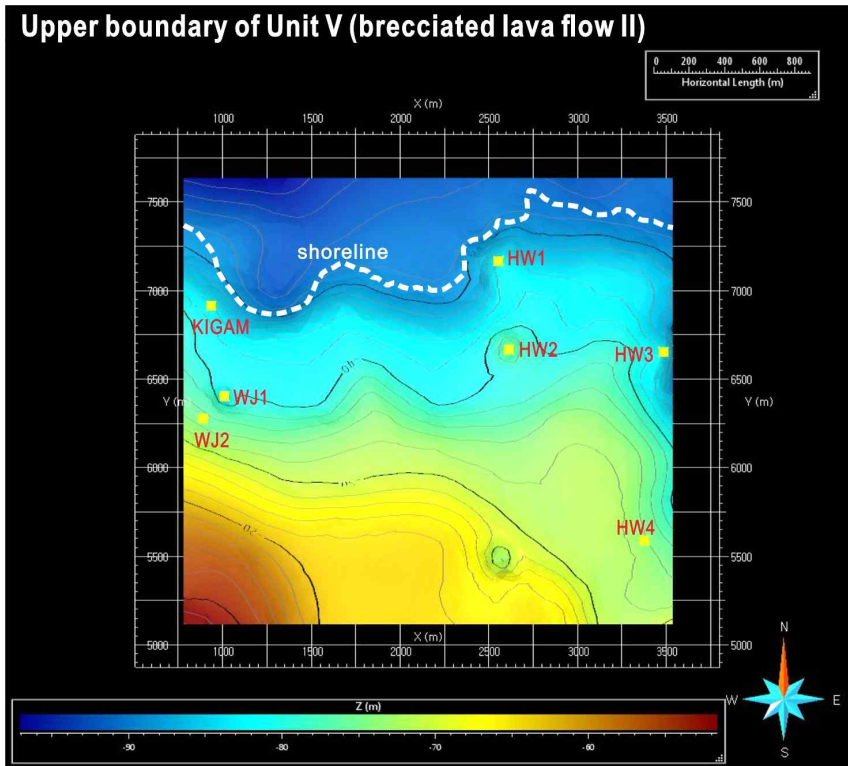


Fig. 6-3. Continued.

비화산성 퇴적암층Ⅱ에 해당되는 층단위Ⅳ의 상부 경계면은 영역의 일부에서만 나타나는 것으로 모델링되었다. 시추공 지질검층을 통해 월정2호공, 행원1호공, 행원4호공에서는 층단위Ⅳ가 확인되지 않았고 생성된 모델에서도 이 같은 사항이 적용되어 해당 시추공들에서는 층단위Ⅳ 상부면이 포착되지 않는다. 다만 월정2호공에서는 해당 지점을 제외한 주변 모두 층단위Ⅳ 상부면이 발달해 있어 다소 부자연스러운 분포양상이 나타나지만, 이를 검증할 수 있는 추가 자료가 부족한 실정이다. 이 같은 층단위Ⅳ 상부면은 연구지역의 북서부와 남동부에 주로 분포되어 있으며, 발달심도는 해수면 하 26.9~78.0m로 관찰된다. 세부적인 분포양상을 살펴보면, 가장 얇은 깊이로 발달된 곳은 북서부로 확인되며 남동부로 갈수록 점차 깊어져 행원3호공에서 가장 깊게 나타난다.

층단위Ⅴ(각력화 용암류층Ⅱ)의 상부면은 대부분의 층단위들과 마찬가지로 모델링 영역 전체에 해수면 하 8.1~59.9m의 깊이로 발달되어 있다. 아울러 분포양상은 층단위Ⅳ 상부면에서 관찰된 것과 유사하게 북서부에서 남동부로 갈수록 깊이가 서서히 깊어지는 점진적인 변화를 보이며 나타난다.

지표면에 해당되는 층단위Ⅵ(비각력화 용암류층Ⅱ) 상부면은 모델링 범위 전반에 걸쳐 45.0~0.0m의 심도범위로 연구지역의 지표 지형을 이루고 있다. 세부적으로는 지역에 따라서 국부적인 기복이 나타나기도 하지만, 전반적으로 하위에 발달된 대부분의 층단위 상부면과 유사하게 영역의 남서쪽에서 북동쪽을 따라 발달 깊이가 깊어지는 양상을 보인다.

3) 3차원 격자 모델링

3차원 층서 모델링을 통해 생성된 층단위 경계면들 사이의 공간을 육면체 격자로 이산화(discretization)하는 격자 모델링을 수행하였다. 만들어진 격자 모델은 동-서 방향으로 109개, 남-북 방향 100개, 수직으로는 28개로 총 305,200개의 육면체 격자들로 이루어졌다(Table 6-2)(Fig. 6-4). 수평 격자들은 약 25m의 크기로 나누어 졌으나, 수직 격자들은 격자의 평균 두께가 10m에 근접하도록 설정하였기 때문에 층단위 경계면들이 이루고 있는 두께에 따라서 그 크기와 수가 다소 다르게 나타난다. 모델링 영역의 최하부 경계면과 층단위Ⅰ 상부면 사이는 평균 10.7m의 두께를 갖는 7개의 육면체 격자들로 나누어졌고, 층단위Ⅰ과 층단위Ⅱ

Table 6-2. Number of grids, volumes, and volume fractions of stratigraphic units.

Stratigraphic unit	Number of grids	Volume (km ³)	Volume fraction (%)
Unit I (non-volcanic sedimentary rock I)	76,300	0.40	33
Unit II (brecciated lava flow I)	87,200	0.12	10
Unit III (non-brecciated lava flow I)	43,600	0.17	14
Unit IV (non-volcanic sedimentary rock II)	21,800	0.02	2
Unit V (brecciated lava flow II)	21,800	0.13	11
Unit VI (non-brecciated lava flow II)	54,500	0.37	30
Total	305,200	1.21	100

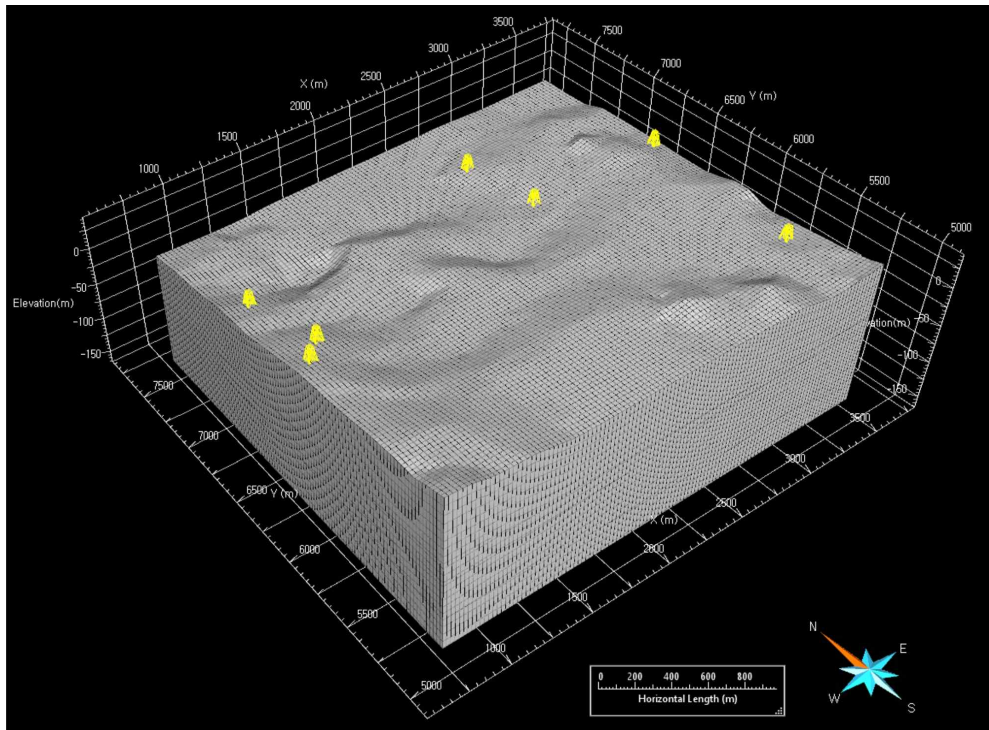


Fig. 6-4. Three-dimensional grid model of the study area based on the upper boundaries of units I to VI.

상부면은 평균 두께 9.7m의 격자 8개로 이루어져 있다. 층단위Ⅱ 상부면과 층단위Ⅲ 상부면 사이 공간은 평균 두께 9.6m인 4개의 육면체 격자들로 채워졌으며, 층단위Ⅲ 상부 경계와 상위에 놓인 층단위Ⅳ 상부면 사이는 2개의 격자가 9.8m의 평균 두께를 갖도록 이산화되었다. 이와 유사하게 층단위Ⅳ 상부면으로부터 층단위Ⅴ 상부 경계까지는 2개의 격자로 나누어졌고 이들의 평균 두께 또한 10.0m로 유사한 특징을 보인다. 층단위Ⅴ의 상부면에서 최상부 지표를 이루고 있는 층단위Ⅵ 상부면 사이 공간은 평균 10.5m의 두께를 갖는 5개의 육면체 격자들로 나누어졌다.

4) 3차원 지층 모델링

3차원 층서 모델링과 격자 모델링을 통해 만들어진 모델들을 하나로 종합하여 연구지역에 발달되어 있는 지층들의 분포를 가시화하는 3차원 지층 모델링을 수행하였다. 생성된 3차원 지층 모델은 하부로부터 비화산성 퇴적암층Ⅰ(층단위Ⅰ)-각력화 용암류층Ⅰ(층단위Ⅱ)-비각력화 용암류층Ⅰ(층단위Ⅲ)-비화산성 퇴적암층Ⅱ(층단위Ⅳ)-각력화 용암류층Ⅱ(층단위Ⅴ)-비각력화 용암류층Ⅱ(층단위Ⅵ) 순의 총 6개의 지층으로 구성되어 있다(Figs. 6-5, 6-6). 세부적으로 각 지층들의 발달양상 및 분포현황을 살펴보면 다음과 같다.

비화산성 퇴적암층Ⅰ은 26.4~74.9m의 두께로 연구지역에 발달되어 있는데, 해안선 부근에서 가장 두껍게 나타나고 내륙으로 갈수록 서서히 얇아지는 경향을 보인다(Fig. 6-5). 이와 같은 지층 두께의 변화는 상부 경계면과 유사하게 북동-남서 방향으로 나타나고 행원4호공이 위치한 부근에서 가장 얇은 두께를 갖는 것이 확인된다. 지층의 부피는 약 0.40km³으로 계산되었으며, 이는 모든 지층들이 발달된 총 부피 중 약 33%를 차지한다(Table 6-2). 다만 비화산성 퇴적암층Ⅰ의 기저면은 시추심도의 부족으로 인해 그 경계가 확인되지 않았기 때문에 지층 최하부 경계는 임의적으로 설정되었다. 따라서 모델을 통해 계산된 비화산성 퇴적암층Ⅰ의 발달두께와 부피는 실제와는 다소의 차이를 가질 수 있다.

각력화 용암류층Ⅰ은 시추코어 지질검층을 통해 행원4호공에만 발달되어 있는 것이 확인 되었지만, 생성된 모델에서는 주변지역까지 그 범위가 확대된 것으로 모사되었다(Figs. 6-5, 6-6). 지층의 두께는 행원4호공에서 77.7m로 가장 두껍게

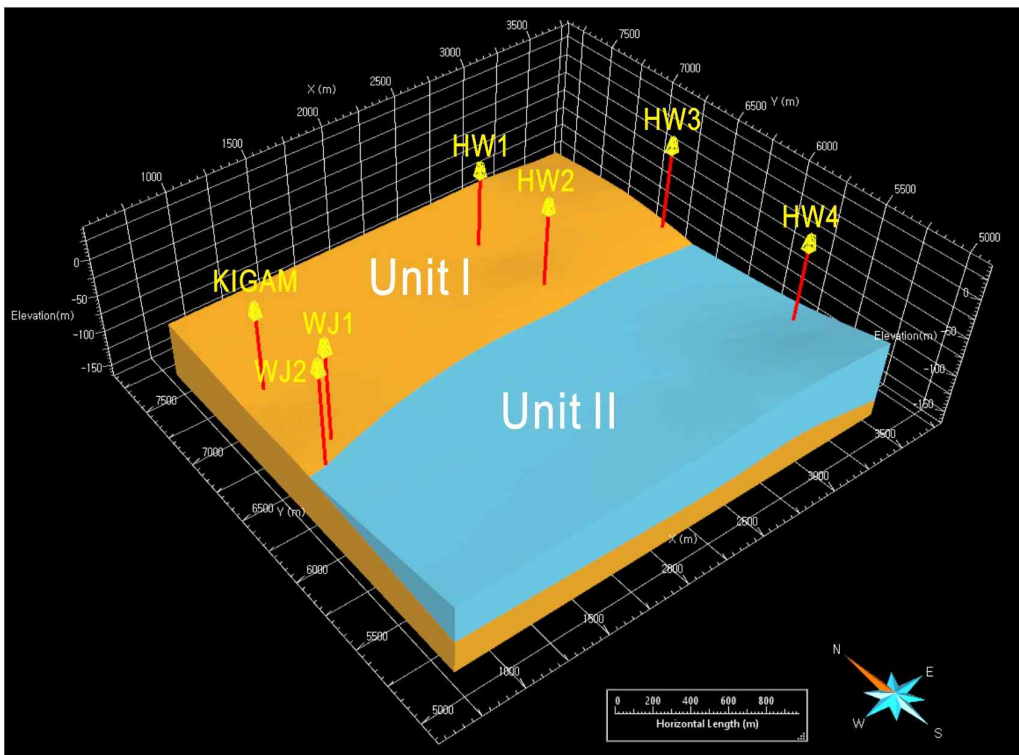
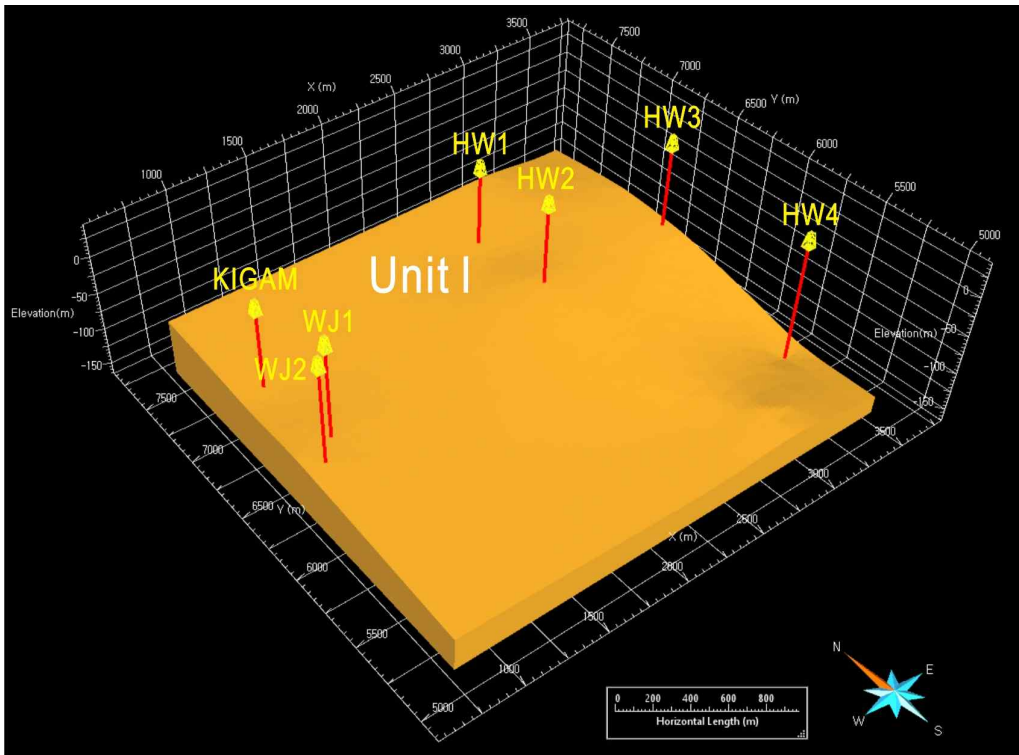


Fig. 6-5. Three-dimensional stratigraphic unit models of the study area with units I to VI.

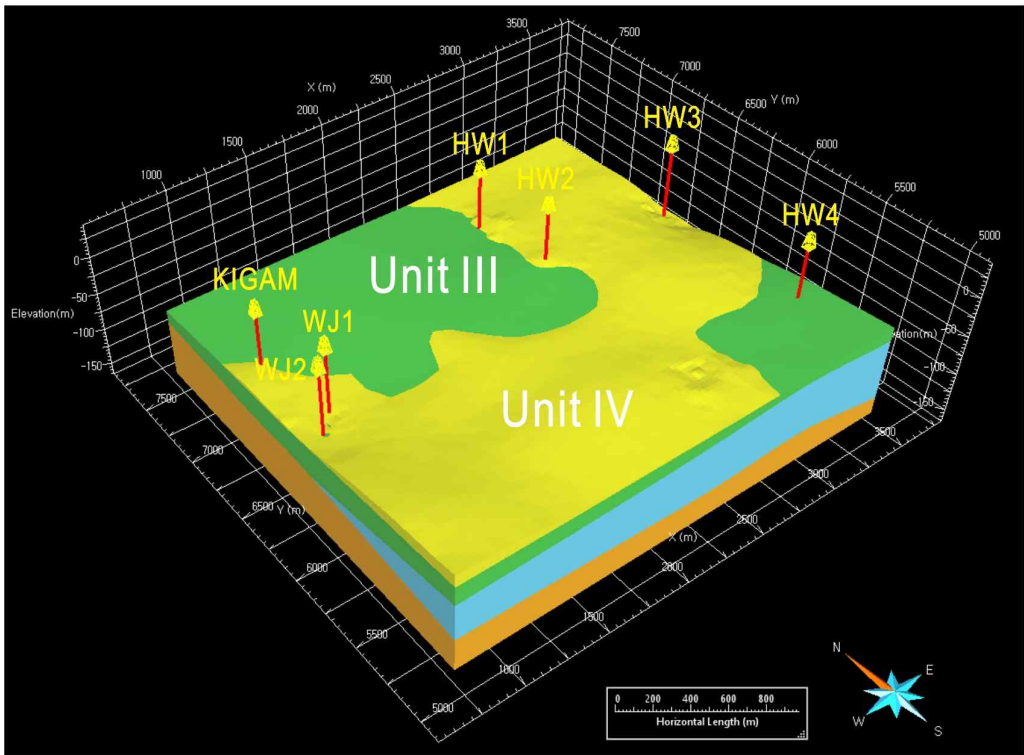
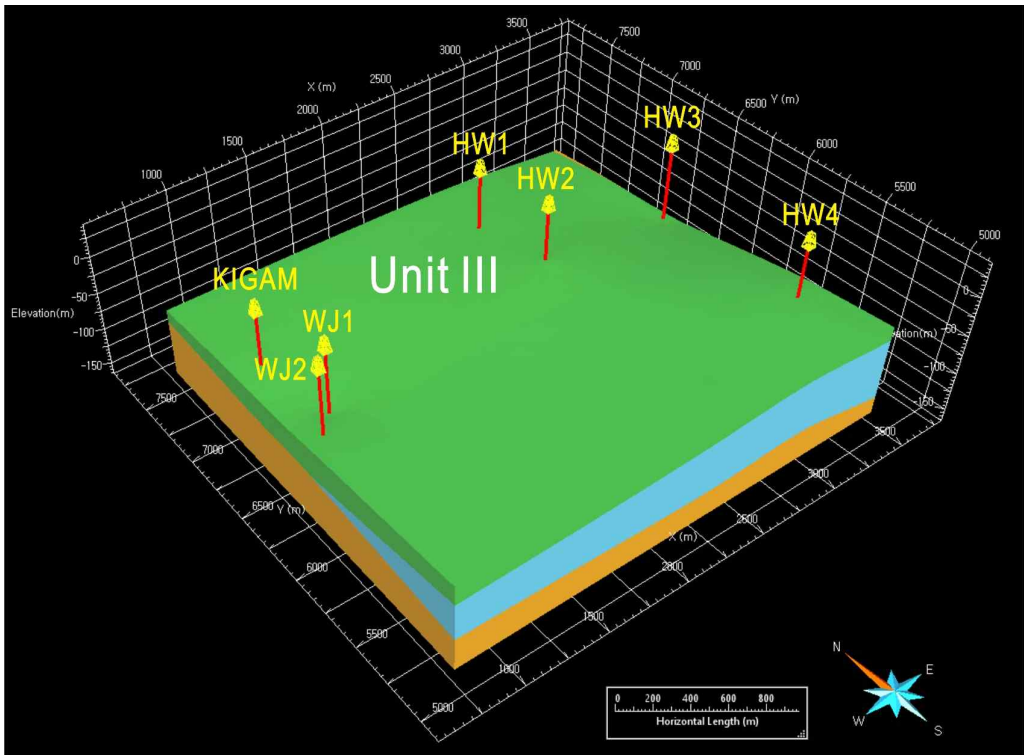


Fig. 6-5. Continued.

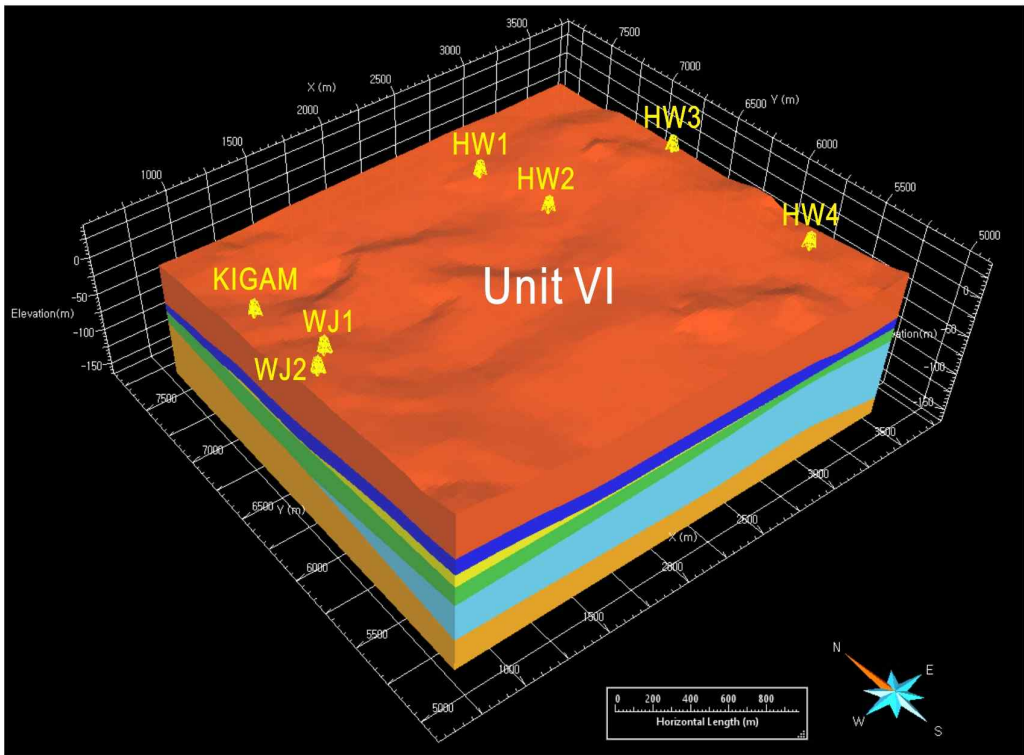
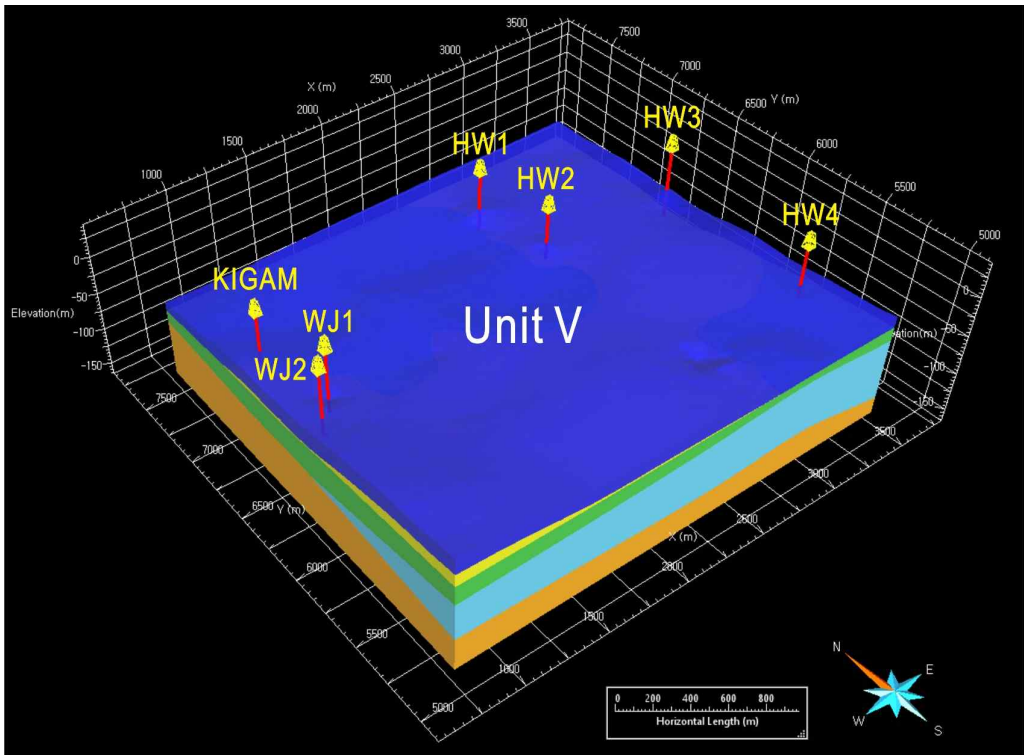


Fig. 6-5. Continued.

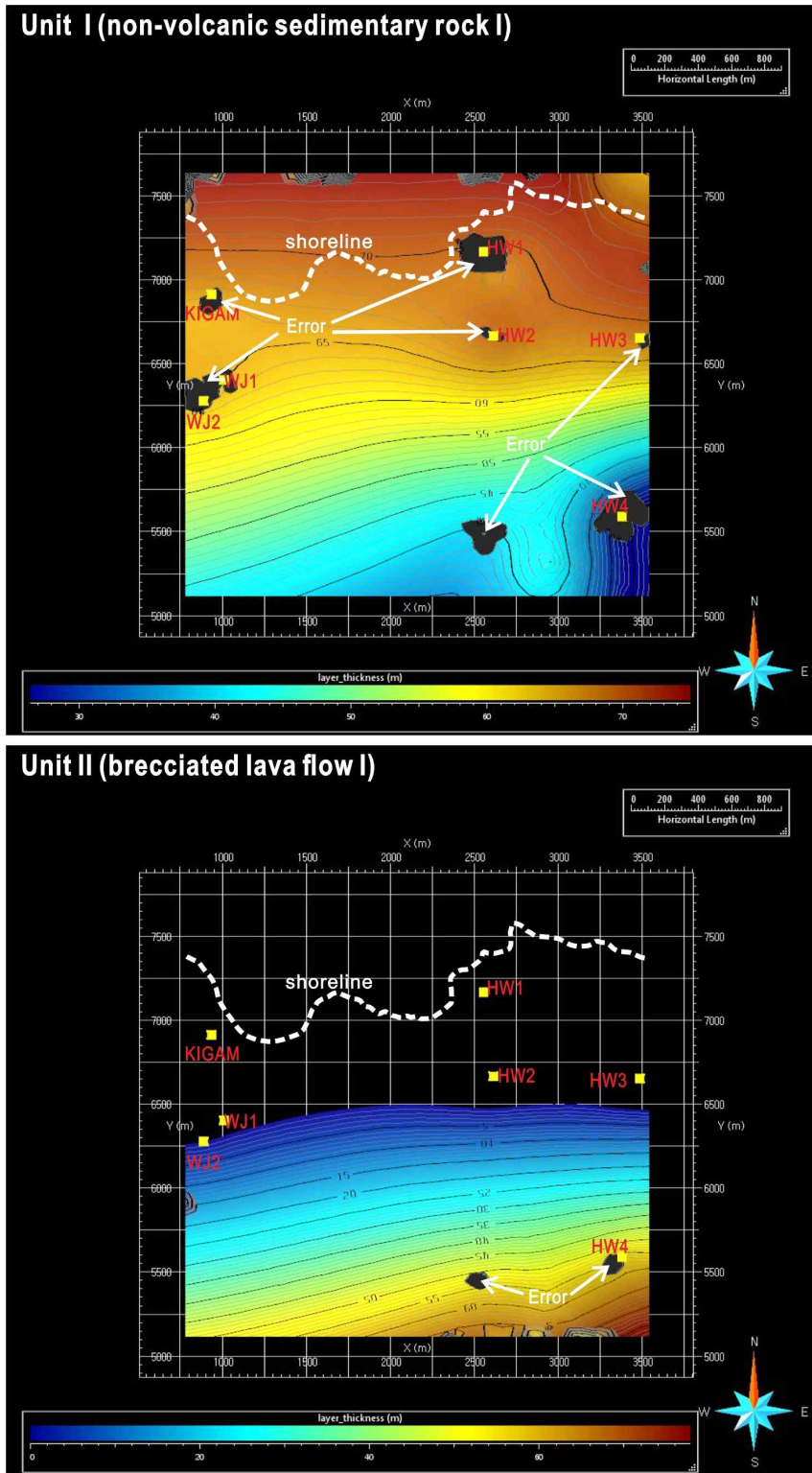


Fig. 6-6. Isopach maps of stratigraphic units I to VI. Contours in meters (m).

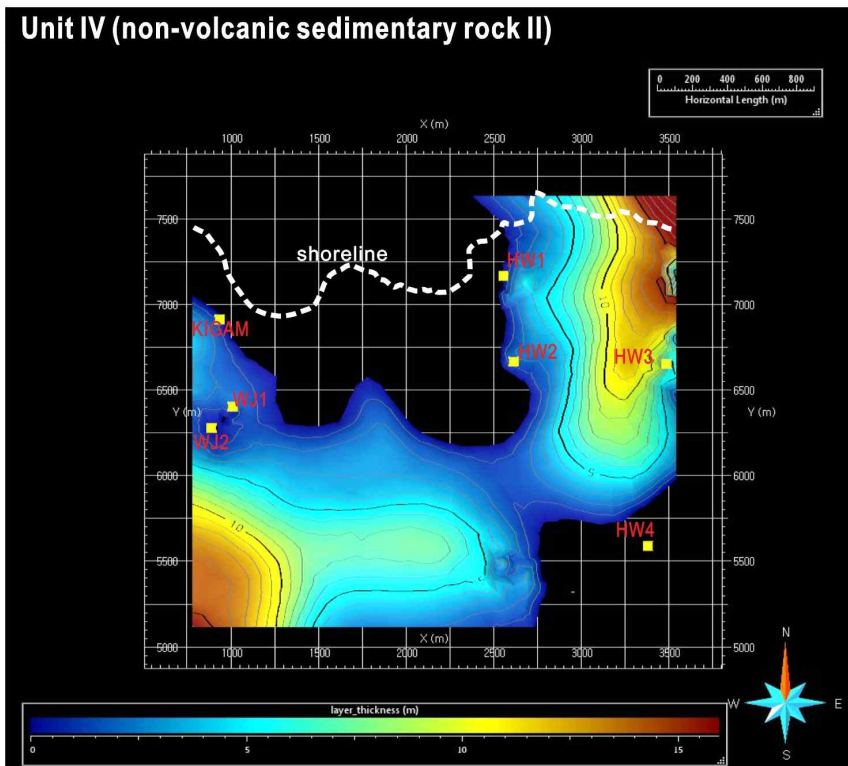
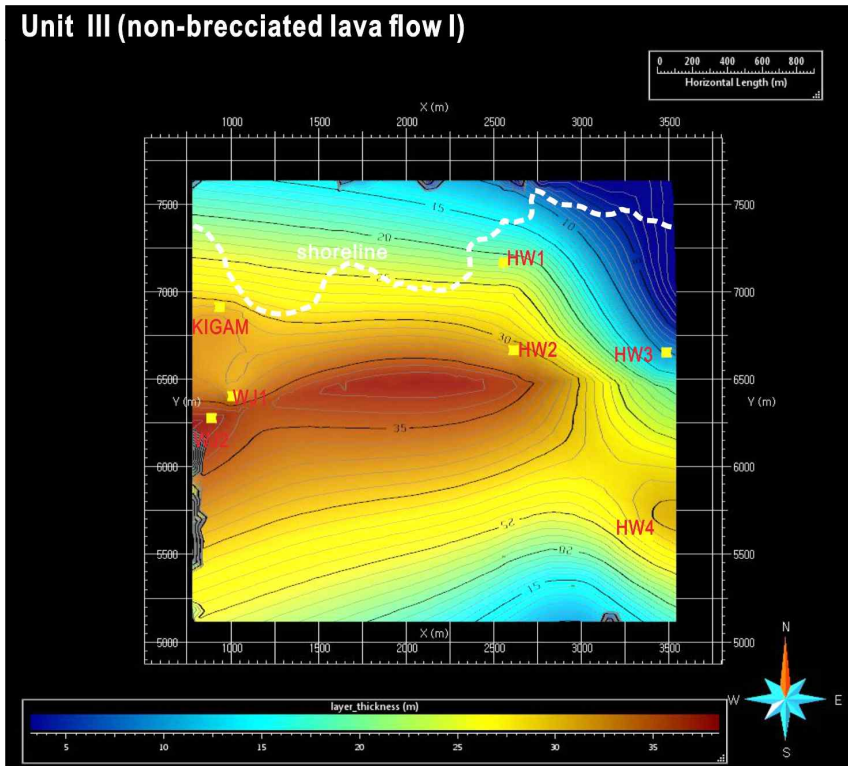


Fig. 6-6. Continued.

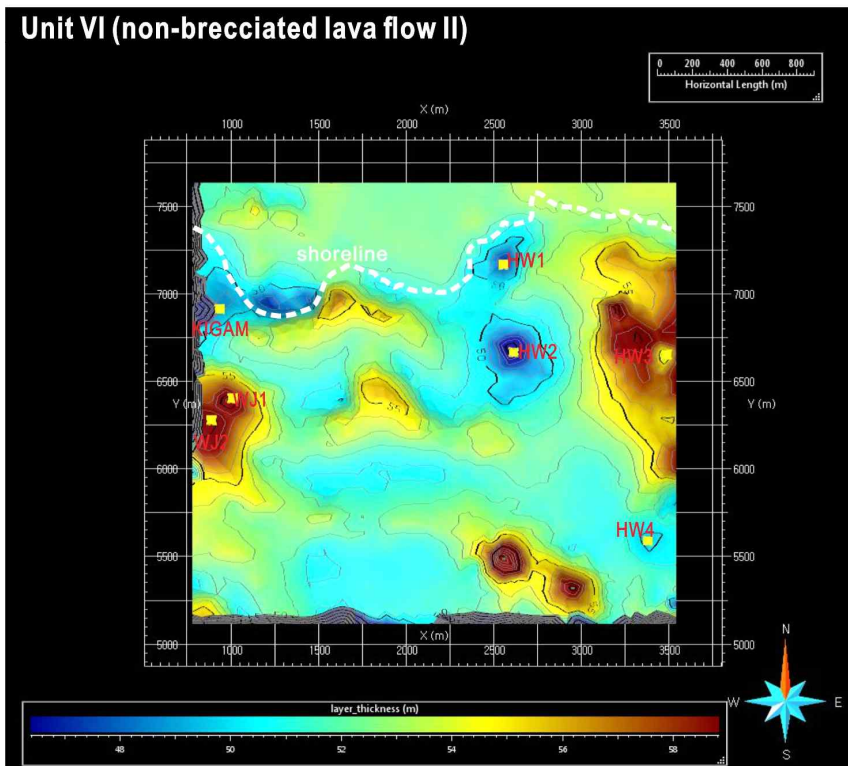
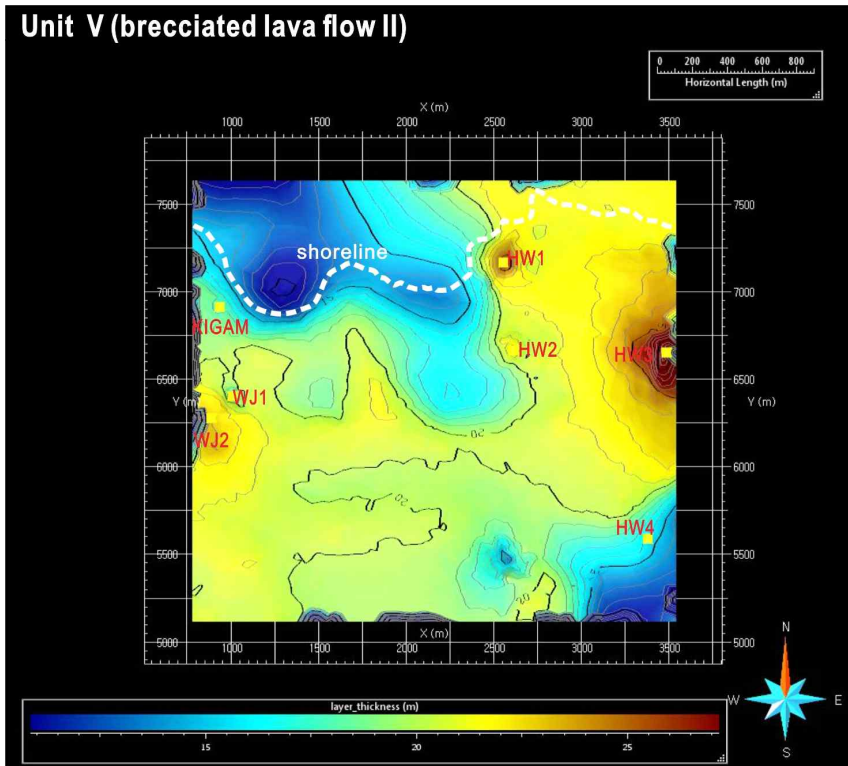


Fig. 6-6. Continued.

나타나고 북쪽으로 갈수록 점차 얇아져 월정2호공, 행원2호공, 행원3호공 부근에서 발달이 종료된다. 즉 각력화 용암류층 I 의 형태는 해안선 방향으로 갈수록 지층의 두께가 줄어들어 수렴하는 썸기 모양을 이루고 있다. 생성된 모델을 바탕으로 계산된 지층 부피는 대략 0.12km^3 로, 발달된 모든 지층들의 부피 중 약 10%를 차지한다(Table 6-2).

비각력화 용암류층 I 은 각력화 용암류층 I 의 상부를 피복하며 연구지역 전반에 걸쳐 발달되어 있다. 지층의 두께는 특징적으로 월정2호공, 월정1호공, 행원2호공을 따라 연구지역 중앙부에서 약 37m로 가장 두껍고 이를 기준으로 바깥쪽으로 갈수록 서서히 얇아져 내륙에서는 10m까지, 해안선 부근에서는 5m 이하로 지층 두께가 줄어드는 양상이 나타난다(Figs. 6-5, 6-6). 아울러 해당 지층의 부피는 전체 지층 부피의 14% 정도에 달하는 0.17km^3 으로 측정되었으며 비화산성 퇴적암층 I 과 파호이호이 용암류층 II 다음으로 큰 규모를 갖는 것으로 확인된다(Table 6-2).

지층 모델에서 비화산성 퇴적암층 II 는 시추코어 지질검층을 통해 확인된 것과 같이 비각력화 용암류층 I 과 각력화 용암류층 II 사이에 협재되어 있는 것으로 나타난다(Figs. 6-5, 6-6). 지층의 분포는 층서 모델링을 통해 예측된 상부 경계면을 따라 지역의 북동쪽과 남서부에 국한되어 나타난다. 이때 지층의 두께는 남서쪽과 북동쪽에서 약 16m 정도로 가장 두껍게 나타나며, 외곽으로 갈수록 점차 얇아지는 경향이 관찰된다. 또한 모델을 통해 측정된 비화산성 퇴적암층 II 의 부피는 0.02km^3 로 지층들 중 가장 작은 규모로 발달되어 있다(Table 6-2).

각력화 용암류층 II 는 국부적으로 발달되어 있는 비화산성 퇴적암층 II 의 상부를 비롯한 연구지역 전체에 발달되어 있다(Figs. 6-5, 6-6). 그러나 지층의 두께는 위치에 따라 일부 차이를 보이는데, 특징적으로 비화산성 퇴적암층 II 가 분포되어 있는 북동부와 남서부에서는 약 20~30m의 범위로 두껍게 발달되어 반면, 이에 반하는 곳(북서부, 남동부)에서는 대략 10m까지 지층이 얇아져 나타나고 있다. 각력화 용암류층 II 는 0.13km^3 의 체적을 가지며, 하위에 발달된 각력화 용암류층 I 에 비해서 약 0.02km^3 가 더 큰 것으로 확인된다(Table 6-2).

지표를 포함한 최상부 층단위에 해당되는 비각력화 용암류층 II 는 앞서 설명된 각력화 용암류층 II 와 동일하게 모델링 영역 전반에 발달되어 있으며, 이때 지층

의 두께는 대략 46~60m의 범위를 갖는다(Figs. 6-5, 6-6). 두께가 가장 두꺼운 곳은 월정1호공과 월정2호공이 위치한 연구지역의 동부와 행원3호공 있는 서부 그리고 행원4호공의 남동쪽 일부로 파악되었다. 반면에 나머지 시추공들(KIGAM 공, 행원1호공, 행원2호공, 행원4호공)의 부근에서는 50m 이하로 상대적으로 얇은 두께를 갖는데, 이처럼 비각력화 용암류층Ⅱ에서는 두께변화가 일련의 방향성 또는 규칙성 없이 위치별로 상이하게 나타난다. 이러한 비각력화 용암류층Ⅱ의 부피는 0.37km³으로 지층들 중 비화산성 퇴적암층 I 다음으로 큰 규모를 갖는다 (Table 6-2).

VII. 지질 진화 및 해안의 성장

1. 주요 용암류 작용

1) 용암누층의 발달

연구지역 시추공의 파호이호이 용암류층은 19~33매의 용암류 유동단위로 이루어져 있다(Tables 4-4~4-9). 지역별로 보면, 월정리 지역에 위치하는 3개의 시추공에서는 25~33매의 유동단위를 나타낸 반면, 행원리 지역 4개 시추공에서는 16~21매로 식별되어 지역 간 차이를 보인다. 이 같은 유동단위 수의 차이는 대부분은 층단위VI에서 나타나는데, 월정리 지역 시추공에서는 행원리 지역보다 유동단위 수가 10여 매 이상 많다. 또한 두께가 1m 이하로 얇은 S형 파호이호이 용암류의 수는 월정리 시추공들에서는 17매가 확인되며, 이들 대부분은 연속적으로 쌓여 있는 모습을 보인다. 그러나 행원리 시추공들에서는 단 3매 만이 S형 파호이호이 용암류로 구분되었으며, 모두 P형 파호이호이 용암류 유동단위 사이에 협재되어 있는 양상을 보인다.

Wilmoth and Walker (1993)은 파호이호이 용암류 유형 중 P형 파호이호이 용암류는 대부분이 사면 경사가 4°이하로 완만한 저지대에 발달해 있는 것을 확인하였다. 지표의 경사는 용암류의 유동속도에 영향을 미치는데, 경사가 가파른 지대를 따라 용암류가 상대적으로 빠르게 이동하는 경우에는 냉각되어 고화된 부분과 아직 유체와 같이 유동하는 용암으로 인해 전단변형이 발생하며 임계치를 넘어서는 경우 아아 용암류의 형태로 전이된다(Duraiswami et al., 2014). 즉, 월정리와 행원리 두 지역 모두에서 P형 파호이호이 용암류가 우세하게 나타나는 것은 과거 용암류가 정지될 당시 이 지역에는 경사가 완만한 저지대가 발달하고 있었음을 지시한다.

육상환경에서 분출된 파호이호이 용암류가 완경사의 평원지역으로 이동하게 되면, 수평적으로 퍼져나감과 동시에 로브(lobe)가 연속적으로 형성되며 용암류 누층으로 이루어진 넓은 용암대지(lava plateau)가 형성된다(Macdonald, 1967;

Self et al., 1998). 지속적으로 용암의 공급이 이루어지는 경우에는 로브의 말단부에서 용암의 일부가 피각을 뚫고 나와 새로운 용암 로브가 만들어지게 된다(Fig. 7-1). 새롭게 만들어진 로브는 기원된 용암 로브에 비해 소규모이고 피각이 얇아 계속해서 용암이 공급되더라도 정체되지 않고 피각을 뚫고 나와 로브가 재차 형성되면서 앞으로 나아간다. 일반적으로 소규모 로브는 대체로 1m 이하의 두께로 발달되며 용암류 내부는 압력이 낮은 상태로 정치된다(Self et al., 1998). 이와 같은 조건에서는 버블들이 다량으로 용출될 수 있지만, 두께가 얇은 관계로 냉각속도는 구간에 따라 큰 차이가 나타나지 않고 전체적으로 빠르게 식어 다공질 조직이 발달한 S형 파호이호이 용암류가 만들어지게 된다(Walker, 1987). 그러나 새롭게 형성된 용암 로브의 피각이 충분한 냉각으로 인해 단단하게 형성될 경우에는 용암류가 정체되고 내부 압력은 상승하여 얇은 두께를 갖는 P형 파호이호이 용암류가 만들어지기도 한다(Walker, 1987; Wilmoth and Walker, 1993; Self et al., 1998).

S형 파호이호이 용암류는 행원리에서는 거의 나타나지 않고 월정리 지역에 위치한 시추공들에서 다수가 관찰되며 수직적으로는 대부분 상위 용암류에서 나타난다. 만약 용암 공급량이 지역별로 큰 차이가 없었다면 상위 용암류가 형성될 당시 월정리 지역은 행원리보다 용암류 근원지로부터 먼 거리에 위치하여 파호이호이 용암류 로브의 말단부가 발달되기에 적합했을 것으로 추정된다. 이와는 다르게 두 지역 모두 용암류 근원지로부터 떨어진 거리가 유사했을 경우에는 행원리 지역의 용암 공급량이 월정리 지역보다 더 많았을 것으로 생각된다. 한편 하위 용암류가 만들어질 때에는 두 지역 모두 근원지로부터의 이격된 거리가 상위 용암류에 비해 상대적으로 가까웠거나 공급된 용암의 양이 많았던 것으로 해석된다.

2) 용암삼각주의 형성

일반적으로 육상 용암류가 해안으로 유입될 때, 물과의 상호작용으로 인해 유리쇄설성 각력들이 만들어지기 시작하는 지점을 ‘통과대(passage zone)’라 하는데, 용암류가 통과대를 지나면서 생성된 다량의 각력과 모래 크기의 쇄설물들은 급격히 해저에 쌓이게 된다(Fig. 4-17)(Long and Wood, 1986; Skilling, 2002;

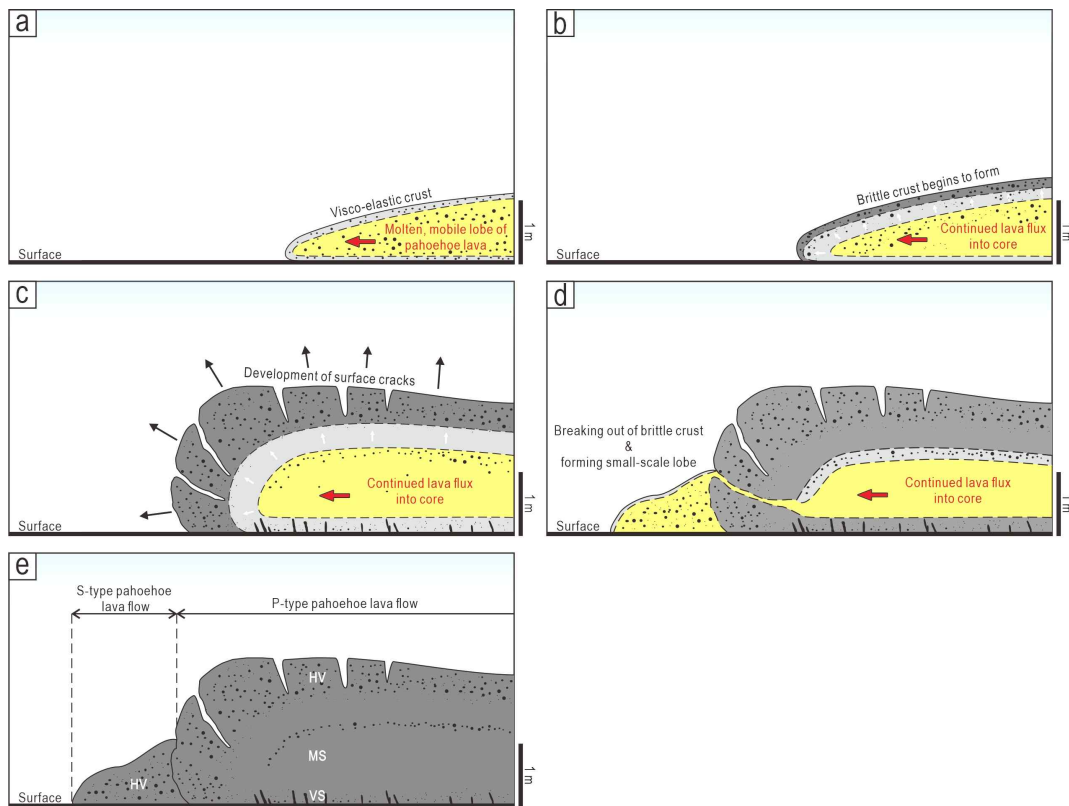


Fig. 7-1. Schematic illustration of the development of pahoehoe lobe. (a) A pahoehoe lobe is formed and emplaced on the ground surface which has gentle slope. (b) A lobe stalls and begins to expand as the brittle crust is formed. Brittle and visco-elastic crusts are sufficiently strong to resist rupture with pressurization. (c) Brittle and visco-elastic crusts are thickening by continued lava flux into the core. Brittle crust respond by fracturing and development of surface cracks. (d) Lava that emerged through the fractures forms a small-scale lobe. (e) If there is not enough supply of lava, the newly formed lobe cool down and forming s-type pahoehoe lobe. On the other hand, a inflated lobe is formed a p-type pahoehoe lobe. HV: highly vesicular division, MS: massive division, VS: vesicular division. Modified from Self et al. (1998) and Harris and Rowland (2015).

Watton et al., 2013). 이와 같은 과정이 해안지역을 따라 광범위하게 일어날 경우, 형성되는 쇄설물들의 퇴적과 뒤이어 지속적으로 공급되는 용암류로 인해 지역은 점차 육상환경으로 바뀌게 된다. 아울러 새롭게 형성되는 육지부로 인해 해안선은 바다 쪽으로 전진하게 된다. 이때 육상 용암류로 피복된 해안지대를 비롯한 해저 또는 해안지대의 지하에 발달된 쇄설성 퇴적물로 이루어진 퇴적체 모두를 총칭하여 용암삼각주(lava-fed delta)라고 한다(Moore et al., 1973; Mattox, 1993).

아이슬란드를 비롯하여 하와이섬 등 화산활동이 진행되고 있는 화산섬의 사례를 보면(Jones, 1969; Furnes and Fridleifsson, 1974; Skilling, 2002; Di Traglia et al., 2018), 화산체가 해수면 상부로 노출된 이후 해안지역은 용암삼각주의 발달과정을 통해 성장하고 있음을 알 수 있다. 즉, 육상에서 분출된 용암류가 바다로 유입되면서 유리쇄설성 각력암이 만들어지고, 이들이 쌓여 용암삼각주를 이루면서 화산체는 성장해나간다. 하와이섬의 경우 1992년과 1994년 사이에 킬라우에아 화산에서 분출한 용암류에 의해 길이 2.9km, 폭 500m의 용암삼각주가 만들어졌으며(Mattox and Mangan, 1997), 2018년에도 남동부 열곡대로부터 분출한 용암류가 바다로 유입되어 약 3.5km²의 용암삼각주가 형성되었다(Liu and Yamazaki, 2019). 제주도의 경우, 지표상에서 유리쇄설성 각력암 노두는 볼 수 없으나, 연구지역을 포함한 일부 지역 시추공에서 보고된 바 있다(Park et al., 1998; Koh et al., 2013; Koh et al., 2019a). 이는 제주도 형성과정에서 해안지역의 용암삼각주 발달과정이 있었음을 시사하는 것으로서, 제주도 화산활동을 더 구체화 할 수 있는 증거로 활용될 수 있다.

초기에 형성된 유리쇄설성 각력들은 암상 CSB와 같이 직소피즐 구조로 맞물려 있어 대체로 높은 안식각을 갖기 때문에 다소 경사진 용암삼각주의 전면층(foreset)을 형성한다(Fig. 4-17)(Colella and Prior, 2009; Watton et al., 2013). 그러나 지속적으로 용암류가 유입되어 압력이 가해지거나 파도에 의한 쇄파작용 또는 지진과 같은 돌발적인 현상의 발생되면, 고각으로 전면층을 이루고 있는 유리쇄설성 각력암의 붕괴를 야기할 수 있다(McPhie et al., 1993; Watton et al., 2013). 용암삼각주 전면층의 붕괴로 유발된 고밀도 저탁류(turbidity current) 또는 암설류(debris flow)의 형태로 재동(reworking)된 쇄설물들은 용암삼각주 기

저부(bottomset)에 쌓이게 되며, 기질지지 각력암과 같이 기질이 풍부한 유리쇄설성 각력암층을 형성시킬 수 있다(Fig. 4-17)(Skilling, 2002; Nehyba and Nyvlt, 2015).

한편, 대기 중에 노출된 삼각주의 표면층(topset)은 육상환경의 특징이 우세하지만, 조석에 의한 해수면의 주기적 변화와 쇄파작용에 의한 해수의 비산운동의 영향도 함께 나타날 수 있다. 육상 용암류가 한 지역에 정치되는 경우 국지적이고 간헐적인 해수와의 접촉으로 용암류에 차별적 냉각이 발생할 수 있으며, 그 결과 불규칙한 형태의 수축절리를 비롯한 유리질 조직이 부분적으로 발달될 수 있다(Fig. 4-17)(Watton et al., 2013). 지속적인 용암류의 유입으로 표면층이 두꺼워지면서 각력암층에 하중이 증가하게 되면 공극수의 상승으로 표면층 용암류 하부에서 급랭과쇄작용이 발생할 수 있다(Long and Wood, 1986; Skilling, 2002; Watton et al., 2013). 그 결과, 암상 SFL과 같이 수직적인 기공함량 변화와 부분적인 파쇄대 발달이 나타나는 것으로 해석된다. OTV 검증영상 자료의 온전한 취득이 이루어지지 않은 KIGAM공과 행원1호공을 제외한 시추공들에서 암상 SFL은 유리쇄설성 각력암(암상 CSB 혹은 암상 MSB) 구간의 상부를 3~10m의 두께로 피복하고 있는 것이 확인된다.

월정2호공, 행원4호공의 유리쇄설성 각력암 구간은 재동층(암상 MSB)의 발달 없이 암상 SFL 및 암상 CSB로 이루어져 있어서 용암삼각주 형성초기의 해안선이 이들 시추공 인근에 위치하였음을 지시한다. 즉, 당시의 해안선은 현재보다 약 1~1.5km 이상 내륙 쪽에 발달했던 것으로 추정된다(Fig. 7-2a). 아울러, 이들 시추공의 유리쇄설성 각력암 구간의 두께로 미루어 볼 때, 연안지역의 수심은 적어도 15m 이상이었던 것으로 판단된다. 한편, 좀 더 바다 쪽에 위치한 행원2호공과 행원3호공에서도 상부에 암상 CSB가 나타나는데, 이는 용암삼각주가 계속해서 외해 쪽으로 전진하였음을 지시한다(Fig. 7-2). KIGAM공과 행원1호공에서도 유리쇄설성 각력암이 시추코어로 약 20m 가까이 회수되었기 때문에, 당시 용암삼각주의 발달은 내륙에 위치한 행원4호공 부근에서부터 최소 현재 해안선 위치의 지역까지 진행되었던 것으로 보인다(Fig. 7-2b).

월정1호공은 암상 SFL 하부에 암상 MSB가 약 15m로 전 구간에 걸쳐 발달되어 있는데, 월정2호공의 위치에서 용암삼각주 전면층을 이루던 유리쇄설성 각력암들이

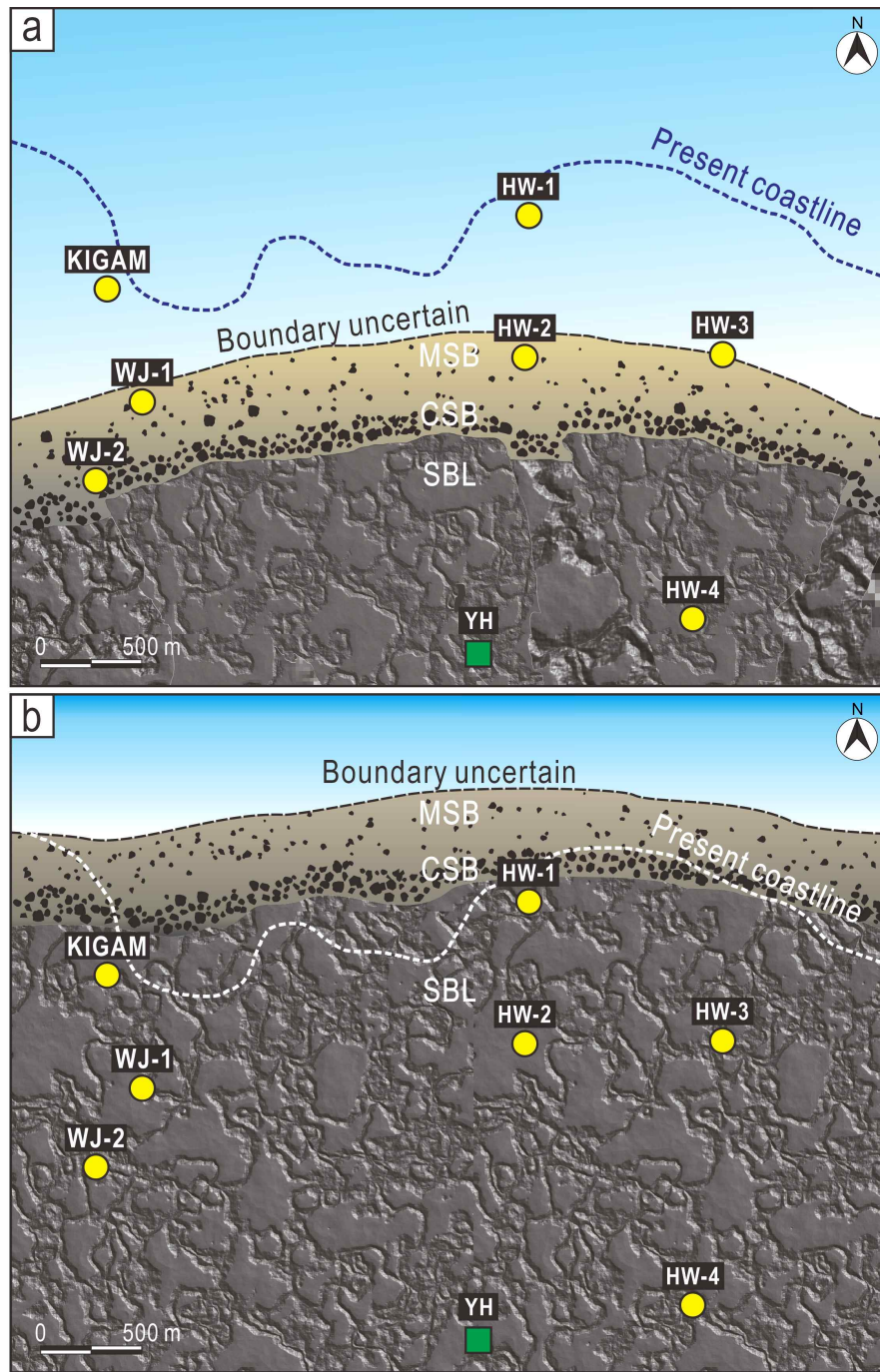


Fig. 7-2. Location of coastline during the progradation of the lava-fed delta in the study area.

재동되어 쌓인 것으로 해석된다(Fig. 7-2a). 다만 월정1호공의 위치가 월정2호공에서 약 200m 떨어져 있고 층의 두께가 14m로 월정2호공의 암상 CSB와 두께가 비슷하다. 따라서 용암삼각주가 월정1호공까지 전진하면서 재동된 암상 MSB의 상부를 암상 CSB가 피복한 이후 기질이 풍부한 암상 MSB로 변질되었을 가능성도 배제하지 못한다. 반면, 동쪽에 위치한 시추공 중에서는 행원1호공이 약 10m의 두께로 전 구간이 암상 MSB로 이루어 졌고, 행원2호공은 암상 CSB 하부에 약 15m로 발달되어 있다. 이는 용암삼각주가 전진하는 과정에서 지속적인 전면층의 붕괴로 인한 쇄설물들의 재동이 일어났고 적어도 행원1호공까지 재동된 쇄설물들이 이동했다는 것으로 볼 수 있다(Fig. 7-2). 그러나 행원3호공은 암상 CSB와 암상 MSB가 수차례 교대하며 발달되어 있고, 유리쇄설성 각력암 구간의 두께도 40m 이상으로 주변 시추공들의 약 2배 정도로 발달되어 있다. 이는 과거 행원3호공이 위치한 곳은 상대적으로 주변보다 저지대를 이루고 있었으며 이로 인해 용암삼각주의 형성 또한 다소 상이하게 나타났던 것으로 보인다.

2. 층서 발달사

비록 연구 대상지역의 범위가 협소하다는 한계점은 있지만, 지역에 설치된 시추공 자료에 대한 조사·분석과 이전의 자료를 종합하여 화산활동에 의한 월정리-행원리 해안지역의 성장과정을 4단계(stage)로 구분하고, 그 각각의 과정을 제시하였다. 각 단계에 해당하는 시기와 해수면 변화에 대해서는 용암해수공의 Ar^{40}/Ar^{39} 절대연대 측정결과(Koh et al., 2013)와 Lea et al. (2002)의 범세계적 해수면 변동 그래프를 대비하여 추정하였다(Fig. 7-3).

1) 제1단계

제1단계는 퇴적이 진행 중인 서귀포층(층단위 I) 상부에 각력화 용암류층 I(층단위 II)이 쌓이면서 1차 용암삼각주가 형성되는 과정이다(Fig. 7-4a). 서귀포층의 퇴적 시기는 보통 육상에 노출된 표식지의 연대를 통해 추정되어 왔는데, 1.88Ma(Kim and Lee, 2000)부터 0.41Ma(Yoon et al., 1987)까지 약 140만 년에 달하며, 그 직상부에는 조면안산암이 발달되어 있는 것으로 알려져 있다. 그러나

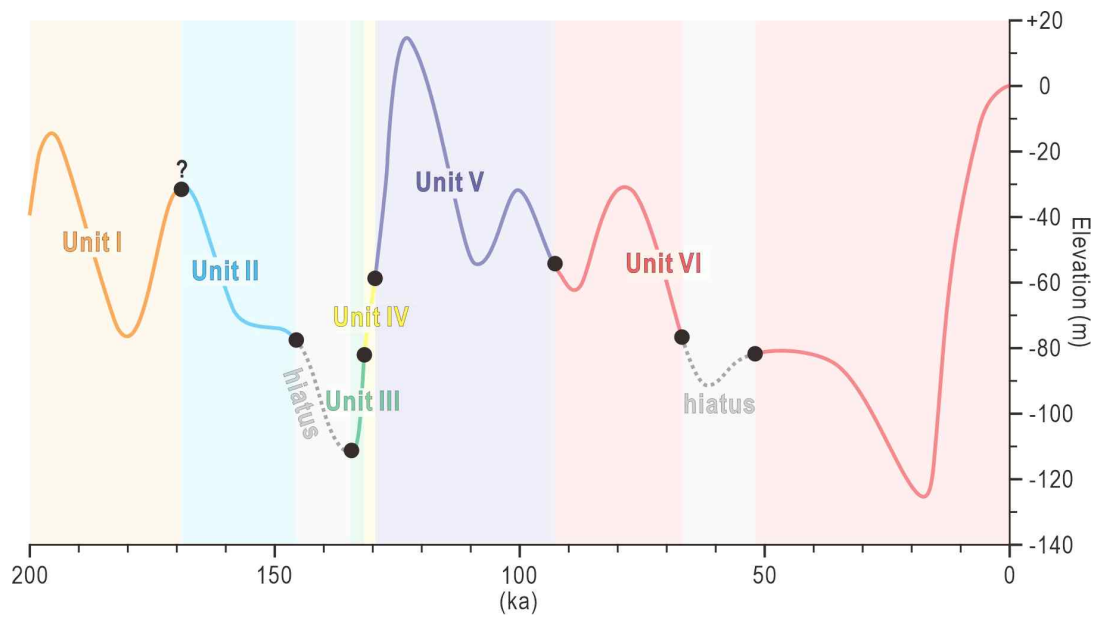


Fig. 7-3. Global sea-level changes (modified from Lea et al., 2002) and chronological correlation with the stratigraphic units of the study area.

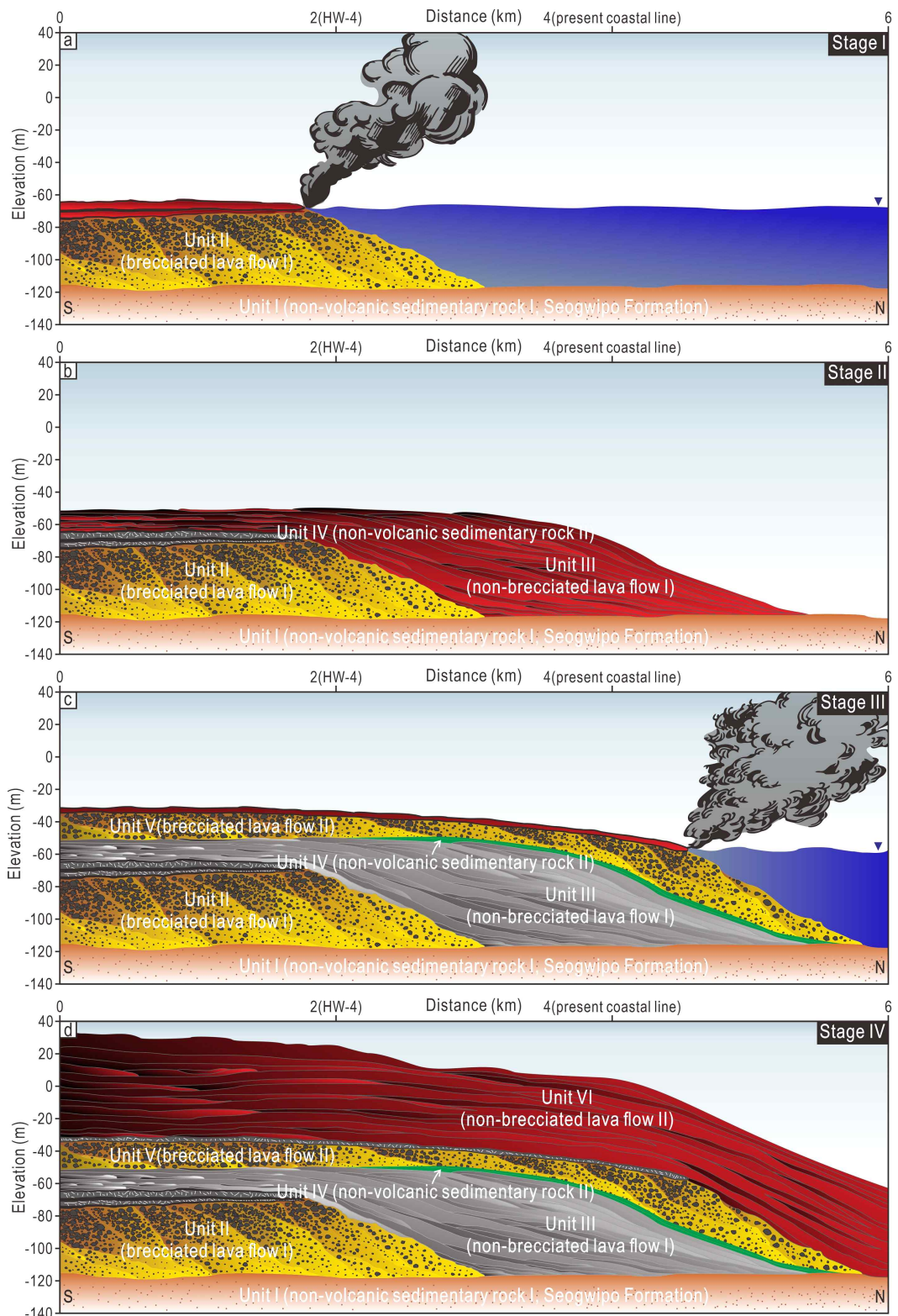


Fig. 7-4. Schematic illustration of the stratigraphic evolution of the study area.

행원4호공으로부터 서쪽으로 약 500m 떨어진 용암해수공의 서귀포층 직상부를 피복하는 유리쇄설성 각력암의 Ar^{40}/Ar^{39} 절대연령은 약 144Ka이며, 쏘레아이트 질 안산암의 조성을 갖는 것으로 보고되었다. 따라서 연구지역 서귀포층 직상부의 구성암석과 절대연령은 서귀포층 표식지에서 분석된 것과는 차이를 보인다. 이와 같은 차이는 서귀포층 직상부를 피복하는 용암류의 화학조성, 분화시기, 분포범위가 지역별로 다를 수 있음을 지시하는 것이다. 즉, 서귀포층 표식지를 포함한 서귀포 일대는 0.41Ma 경에 서귀포층 퇴적이 종료되고 조면안산암이 피복하였지만, 연구지역 일대는 대략 144Ka까지 서귀포층이 형성되었고 이후 층단위Ⅱ가 용암삼각주를 이루며 서귀포층의 상부를 피복하였던 것으로 볼 수 있다. 아울러 그 당시 해수면은 층단위Ⅱ의 발달심도가 해수면 하 77.5m부터 나타나기 때문에, 최소한 이와 유사했거나 이보다 높아야 한다. 그러나 범세계적 해수면 변동 그래프 (Lea et al., 2002) 상에서 144Ka는 현재 해수면에서 약 76m 낮아져 있던 상태이고 이후로는 계속해서 해수면이 하강하는 변화가 나타난다(Fig. 7-3). 따라서 144Ka 이후에 해수면은 층단위Ⅱ를 해수면 하 약 70m까지 형성시킬 수 없는 상태에 해당한다. 그러나 144Ka 이전 약 170Ka까지는 해수면이 상승되어 현재보다 약 34m 낮았던 시기가 나타난다. 따라서 층단위Ⅱ가 현재와 같이 발달될 수 있었던 시기는 대략 170~144Ka인 것으로 판단된다.

또한 해수면의 위치와 서귀포층의 발달심도를 기준으로 그 당시 환경을 유추해 볼 수 있다. 서귀포층은 연구지역에 해수면 하 약 90~140m 사이에 분포하고 있으며, 앞서 추정된 그 당시 해수면은 현재 해수면 하 30~70m에 위치하고 있어, 수심은 최소 20m, 최대 110m까지 형성될 수 있다. 이러한 점으로 미루어 볼 때, 층단위Ⅱ가 만들어질 당시 연구지역 일대는 수심 100m 내의 대륙붕 환경이었던 것으로 판단된다.

아울러 3차원 층서모델에서 보면, 층단위Ⅱ는 월정1호공, 월정2호공, 행원2호공, 행원3호공이 위치한 지점 이전까지 발달되어 있으며(Figs. 6-3, 6-5, 6-6), 두께 또한 해안선 쪽으로 갈수록 서서히 얇아지며 수렴하는 양상을 보인다. 이와 같은 점을 감안 할 때, 용암삼각주 형성에 따라 새롭게 만들어진 고해안선은 현재 해안선에서 내륙으로 최대 약 2km 떨어진 지점에 위치했던 것으로 추정된다.

2) 제2단계

제2단계는 해수면 하강에 의해 이전에 형성되었던 용암삼각주를 포함한 연구지역 대부분이 육상에 노출되고, 그 상부에 넓은 용암대지(층단위Ⅲ)가 형성되는 단계이다(Fig. 7-4b). 비각력화 용암류층 I 에 해당하는 층단위Ⅲ은 모든 연구대상 시추공에서 확인되고 있는데, 이 층단위의 직하부에는 층단위Ⅱ 뿐만 아니라 서귀포층이 나타나는 상·하 관계를 보인다. 층단위Ⅲ과 접하는 서귀포층의 경계부에 발달되어 있는 실트암은 일부분 토양화가 진행되어 있는데(Fig. 4-8), 이는 당시 연구지역 대부분이 해수면 위에 노출된 육상환경이었음을 반영한다. 다만 층단위Ⅱ는 유리질 각력암만이 시추코어로 회수되었으며 OTV 검증영상은 얻어지지 않아 토양화 여부에 대한 확인이 어렵다.

층단위Ⅱ로 피복된 지역을 제외한 연구지역의 서귀포층은 해수면 하 100m 내외의 발달심도를 보이기 때문에, 연구지역에 육상환경이 나타나기 위해서는 해수면이 현재보다 최소 100m 이상 낮아졌던 시기가 있었던 것으로 볼 수 있다. 층단위Ⅱ가 형성된 144Ka 이후 135Ka까지 해수면은 현재 해수면 하 100m 정도까지 계속 하강하였으며, 그 뒤로는 급격한 상승이 나타난다. 따라서 층단위Ⅲ은 서귀포층이 육상으로 노출될 수 있는 135Ka 이후에 형성된 것으로 해석된다. 다만 135Ka 이후에 해수면은 122Ka까지 약 116m가 상승하는 가파른 변화를 보이며(Fig. 7-3), 이처럼 급격한 해수면 상승이 발생하였음에도 불구하고 각력화 용암류가 아닌 비각력화 용암류가 연구지역 전반에 걸쳐 발달되었다. 이는 연구지역이 육화된 이후 층단위Ⅲ의 형성은 매우 짧은 기간에 이루어졌음을 지시한다. 층단위Ⅲ 직상부에는 연안환경에서 형성된 비화산성 퇴적암Ⅱ인 층단위Ⅳ가 발달되어 있는데 해당 지층은 해수면 하 49.5~82.5m 사이의 심도에서 층단위Ⅲ과 경계를 이루고 있다. 해당 깊이까지의 해수면 상승은 해수면이 하강된 135Ka 이후 약 5Ka의 다소 짧은 기간 동안 이루어졌다. 따라서 적어도 연구지역에 한해서는 층단위Ⅲ(해수면 하 49.5~82.5m)은 130Ka 이전에 발달이 완료되었으며, 화산활동이 종료된 이후 연구지역은 빠르게 물에 잠긴 것으로 보인다.

3차원 층서 모델을 통해 층단위Ⅲ의 분포를 살펴보면, 월정리 일대는 층단위Ⅲ의 상부면이 해수면 하 50~60m 내외의 깊이로 나타나며, 단위두께 또한 20~30m 정도로 완만한 용암대지가 발달되어 있다. 반면 행원리 지역에서는 층단위

Ⅲ의 상부 경계가 해수면 하 약 40~80m로 기복이 심한 지형을 이루고 있으며, 두께 또한 5~35m 사이로 발달되어 있다(Figs. 6-3, 6-5, 6-6). 시추공들 중에서는 행원3호공이 가장 깊은 발달심도와 얇은 두께를 보이는데, 이는 화산활동 당시 행원3호공 방향으로 공급된 용암류의 양이 많지 않았음을 지시한다.

아울러 현재 해안선 이후로 퍼져나간 범위는 해양시추조사(Korea Institute of Energy Research, 2006)를 통해서 확인된다. 이 조사에서는 현재 해안선에서 약 1.0~1.5km 떨어진 해수면 하 16.5m 지점에서 시추를 진행하여 약 50m 길이(해수면 하 65.5m까지)의 시추코어를 회수하였다. 시추코어에서는 해수면 하 56.5m 이후로부터 파호이호이 용암류가 나타나며, 이는 층단위Ⅲ이 발달된 심도와 유사하다. 따라서 층단위Ⅲ은 1단계에서 형성된 고해안선으로부터 바다 쪽으로 약 3~4km 지역까지(현재 해안선으로부터는 2km) 확장된 것으로 보인다.

3) 제3단계

이 단계는 해수면이 상승하면서 층단위Ⅲ 위에 모래·자갈·패각 등으로 이루어진 연안 퇴적층인 층단위Ⅳ(비화산성 퇴적암층Ⅱ)가 얇은 두께로 발달되고, 뒤이어서 그 상부에 2차 용암삼각주(층단위Ⅳ)가 형성되는 단계이다(Fig. 7-4c).

층단위Ⅲ이 광역적으로 용암대지를 이루고 난 뒤 화산활동이 종료되고 연구지역에서는 급격한 해수면 상승이 122Ka까지 발생하였다. 이때 해수면은 현재 해수면보다 약 20m 이상 높게 발달되었으며, 그 이후로 해수면은 다시 가파르게 하강된다. 따라서 해수면이 상승되는 동안 연구지역에는 연안환경이 발달하였고, 이러한 환경 하에 층단위Ⅳ가 형성되었다. 층단위Ⅳ는 대체로 해수면 하 60m 내외의 깊이까지 나타나지만, 행원3호공에서는 해수면 하 약 80m 정도로 다소 큰 차이를 보인다. 따라서 층단위Ⅲ의 발달 이후 해수면 상승과 함께 층단위Ⅳ가 해수면 하 60m의 심도에서 눈에 띄는 공백 없이 연속적으로 형성되었으며, 그 시기는 최소 해수면이 현재에 비해 60m 정도 낮았던 128Ka까지였을 것으로 판단된다(Fig. 7-3).

층단위Ⅳ 형성 이후, 연구지역은 해수의 영향을 직접적으로 받는 환경에서 화산활동이 발생하였고, 각력화 용암류에 의해 형성된 2차 용암삼각주(층단위Ⅴ)가 연구지역에 전반에 걸쳐 발달하면서 층단위Ⅳ의 상부를 피복하였다. 층단위Ⅳ의

형성이 종료된 128Ka 이후에도 해수면은 122Ka까지 계속해서 상승하여, 현재 해수면보다 20m 정도 더 높게 발달되었다. 그 뒤로 해수면은 상위에 층단위VI이 발달되기 이전인 92Ka까지 하강-상승-하강하는 변화를 보이며, 해수면은 현재보다 약 35~55m 낮게 위치하였다. 층단위V는 해수면 하 30m 내외로 나타나며 앞서 언급된 해수면 변화 및 상태는 모두 층단위V가 형성 될 수 있는 조건에 부합한다. 또한 층단위V의 암상은 근원지로부터 근거리를 지시하는 역지시 각력암과 그 반대인 기질지시 각력암의 암상이 수직적으로 반복되어 나타나기도 하는데, 이는 해수면 변화로 인한 근원지로부터의 상대적 거리가 달라졌기 때문으로 해석된다. 아울러 층단위V 최상부에 발달된 반각력화 용암류에는 물에 잠겼던 흔적없이 층단위VI로 이어지는 양상을 보인다. 따라서 층단위V가 형성된 시기는 층단위IV가 형성된 이후인 128Ka부터, 층단위VI의 형성 이전까지인 92Ka까지 다소 긴 기간을 갖는 것으로 해석된다.

3차원 층서 모델링으로 분석된 층단위IV는 연구지역 북부와 남동부를 제외하고 해수면 하 30~40m 사이에 발달되어 있으며, 대체로 북동쪽으로 갈수록 심도가 깊어지는 양상을 보인다. 아울러 두께는 남서부와 북동부에서 15m 정도로 가장 두껍게 나타나지만 해안선 이후의 지역까지의 분포 여부는 확인되지 않는다. 한편, 층단위V는 연구지역 전반에 걸쳐 해수면 하 10~50m의 발달심도와 20~30m의 두께로 발달되어 있다. 또한 해양시추조사연구(Korea Institute of Energy Research, 2006)에서도 해수면 하 약 45.5~56.5m 사이에 각력화 용암류의 암상이 나타나며, 상부와 하부에는 비각력화 용암류의 시추코어가 회수되었다. 이러한 층서적 관계로 볼 때, 그 당시 용암삼각주의 성장은 현재 해안선보다 1.0~1.5km 떨어진 외해까지 진행되었던 것으로 판단된다. 아울러 3단계의 화산활동 기간 동안 고지형은 서귀포층이 발달된 심도를 기준으로 할 때, 행원4호공이 위치한 지역은 고도 약 90까지m, 해안선 지역은 약 60m까지 성장하였고, 바다 쪽으로는 약 1.0~1.5km 떨어진 지역까지 완만한 용암삼각주가 형성되어 그 상부가 육상에 노출되었던 것으로 보인다.

4) 제4단계

제4단계는 내륙에서 분출한 용암류(층단위VI)가 다량 유입되면서 층단위V의

상부를 피복하고, 현재의 해안지형이 완성되는 단계이다(Fig. 7-4d). 층단위VI의 형성 초기(80~92Ka)에는 해수면 하 약 54m까지 하강하였던 해수면이 약 20m 정도 상승(현재 해수면 하 31m)하였다. 이러한 해수면 상승에도 불구하고 각력화 용암류가 아닌 육상환경의 비각력화 용암류가 발달되어 있는 것은 해수면의 상승 속도보다 지표의 수직적 성장이 빠르게 일어나서 해수의 영향을 거의 받지 않았다는 것을 지시한다. 그 이후로 19Ka까지는 해수면이 현재보다 약 120m까지 낮아졌는데(Fig. 7-3), 층단위VI의 해수면 하 약 3m에서 측정된 절대연대가 16Ka인 것으로 볼 때, 층단위VI의 대부분은 이와 같은 해수면 하강기에 형성된 것으로 해석된다. 그러나 해당 기간 동안 화산활동은 최소 1~2회의 휴지기를 가졌을 것으로 보이며, 이는 층단위VI 내에 협재되어 있는 고토양층을 통해 추정해 볼 수 있다. 특히 용암해수공에서 관찰된 1매의 고토양층은 5.2~6.7Ka의 연대를 갖는 것으로 확인되어 화산활동의 휴지기가 특정된다. 그 뒤로 해수면은 급격하게 상승하지만, 이미 지표면의 고도는 현재와 같은 수준을 이루고 있었기 때문에 이로 인한 눈에 띄는 암상 변화는 나타나지 않는다.

층단위VI의 상부는 지표면으로서, 연구지역 남서쪽에서 북동쪽으로 지형이 낮아지는 특징을 보이지만, 단위두께는 40~50m로 다소 균일하게 발달되어 있다. 층단위VI의 바다 쪽 경계는 명확하게 정의하기는 곤란하지만, 해양시추조사연구(Korea Institute of Energy Research, 2006)에서는 해수면 하 16.5~45.5m 깊이까지 비각력화 용암류가 확인된다. 따라서 층단위VI은 현재 해안선에서 바다 쪽으로 최소 약 1.0~1.5km 지점까지는 전진하였던 것으로 보인다.

결론적으로 약 170Ka에 시작된 제1단계의 용암류삼각주 형성을 시작으로 제4단계에 이르는 기간 동안 연구지역은 수직으로 100~150m가 성장하였고, 수평적으로는 약 6km의 거리가 바다 쪽으로 확장하는 과정을 통해 성장하여 현재와 같은 모습을 갖추게 되었다. 특히, 이와 같은 해안지역의 성장을 일으킨 화산활동을 통해 약 10km²에 달하는 새로운 땅이 생성되었다.

VIII. 결론

제주도 동북부 월정-행원 지역에 위치한 7개의 시추공에서 회수된 시추코어의 육안관찰 결과, 암상은 비각력화 용암류, 각력화 용암류, 비화산성 퇴적암, 고토양으로 분류된다. 비각력화 용암류는 반정광물과 미세결정 또는 화산유리로 이루어진 현무암질 육상 용암류로서, 수직적으로 연속성이 양호한 현무암체로 나타난다. 이와 같은 비각력화 용암류는 기공함량 및 분포양상, 풍화정도, 암색, 광물조성 등의 조직특성을 기준으로 ① 고다공질 분층, ② 다공질 분층, ③ 치밀질 분층, ④ 유리질 분층으로 암상이 세분된다. 각각의 분층이 갖는 암상은 육상에서 분출된 파호이호이 용암류에서 나타나는 특징으로 해석되며, 암상 조합을 통해 비각력화 용암류 산출구간에서 용암류 유동단위를 구분하였다.

각력화 용암류는 시추코어상 대부분 수 cm에서 수십 cm의 다양한 크기로 분리되어 있는 유리질 각력암으로 이루어져 있고, 일부 구간에서는 다수의 절리와 파쇄대로 인해 반각력화된 용암류도 산출된다. OTV 검층영상에서는 유리질 각력뿐만 아니라 미세한 유리질 파편들이 포함된 팔라고나이트의 기질도 함께 나타나는데, 각력(암편)과 기질 구성물의 크기, 형태, 색상을 비롯한 각력과 기질의 비율 및 이들의 배열양상 등을 기준으로 ① 반각력화 용암류, ② 역지지 유리질 각력암, ③ 기질지지 유리질 각력암과 같이 3개의 세부 암상이 구분된다. 이와 같은 암상은 육상에서 분출된 용암류가 해안으로 흘러들어감에 따른 물과의 접촉으로 인해 급냉파쇄된 유리쇄설성 각력암 및 부분적으로 파쇄된 용암류로 이루어진 용암삼각주로 해석된다.

비화산성 퇴적암은 입도특성에 따라 실트암, 사질 실트암, 니질 사암, 실트질 사암, 사암으로 암상이 분류되며, 퇴적물은 대체로 석영과 장석 입자들로 이루어져 있으며, 다량의 패각편이 포함되어 있기도 한다. 사암류와 실트암류의 퇴적구조는 모두 내부에 층리가 없는 괴상으로 나타나며, 퇴적암 사이의 경계면은 대부분 교란된 상태로 회수가 이루어져 식별이 어렵다. 암상의 특성, 조합, 변화를 근거로 사암류는 파도와 해류의 영향을 크게 받는 고에너지 환경인 연안 또는 내

대륙붕에 외해역으로부터 기원된 사질 퇴적물들이 재동되어 퇴적된 것으로 해석된다. 반면 실트암류는 퇴적물이 보존될 수 있는 저에너지 환경인 연안의 만이나 폭풍해파기저면 하부의 외해에서 형성된 것으로 해석되었다. 고토양은 비각력화 용암류 사이에 1m 내외의 두께로 협재되어 있으며, 화산활동 휴지기에 풍화물질들이 바람 또는 유수에 운반되어 지형이 낮은 곳에 쌓여 형성된 것으로 추정된다. 또한 암색이 옅은색을 띠는 것은 상부를 피복하는 용암류의 열에 의한 변질현상으로 해석된다.

비각력화 및 각력화 용암류 시료에 대한 지화학적 분석 결과, 이들은 비알칼리 계열인 쏘레아이트질 현무암 및 안산암의 조성을 보이며, 알칼리 현무암과 조면 현무암의 조성을 갖는 용암류도 나타난다. 대부분의 용암류 구간은 쏘레아이트질 현무암으로 이루어져 있으며, 쏘레아이트질 안산암은 월정지역 시추공의 상부에 국한되어 나타난다. 암상에 따른 자연감마선 세기는 평균적으로 비화산성 퇴적암이 가장 높은 강도를 보이며, 그 다음으로는 각력화 용암류, 비각력화 용암류 순으로 이어지지만, 이들 모두는 다소 넓은 세기범위를 보이고 있어 특별한 상관관계를 보이지는 않는다. 또한 지화학 조성에 따른 자연감마선 세기는 구분되는 큰 차이를 보이지 않으며 유사한 평균 강도를 보인다.

시추코어암상에 따라 연구지역의 지하지질은 하부로부터 비화산성 퇴적암층 I (층단위 I), 각력화 용암류층 I (층단위 II), 비각력화 용암류층 I (층단위 III), 비화산성 퇴적암층 II (층단위 IV), 각력화 용암류층 II (층단위 V), 비각력화 용암류층 II (층단위 VI)로 구분된다. 층단위 I 은 연안 또는 내대륙붕에서 형성된 사질 퇴적암과 연안의 만이나 외해 환경에서 퇴적된 니질 퇴적암으로 이루어져 있다. 지층의 자연감마선 세기는 평균 125.2API로, 이는 시추코어에서 구분된 암상 중 가장 높다. 기존 시추공 연대분석 자료와 대비를 통해 형성 시기는 144Ka 이전으로 추정되며, 산출심도는 제주도의 주요 층단위 중 서귀포층에 대비된다.

층단위 II는 최대 40cm까지의 크기를 갖는 유리쇄설성 각력암으로 구성되어 있으며, 특징적으로 행원4호공에서만 나타난다. 층단위 II를 구성하는 각력암은 모두 침상장석현무암으로 구분되며, 암석화학적으로는 쏘레아이트질 현무암의 조성을 보인다. 자연감마선은 평균 16API로 구분된 암상 중 가장 낮은 강도를 보이고, 지층의 형성시기는 144Ka 경으로 대비되었다.

층단위Ⅲ은 파호이호이 용암류의 누층으로 시추공별 용암류 유동단위는 적게는 3매, 많게는 10매까지 발달해 있으며, 유동단위의 두께는 최소 0.5, 최대 14.3m, 평균 3.6m로 나타난다. 용암류는 모두 침상장석감람석현무암에 해당하며, 지화학적으로는 쉘레아이트질 현무암의 조성을 갖는다. 자연감마선 세기는 19.6~27.7API 사이의 강도를 갖는 것으로 측정되었고, 지층의 형성 시기는 특정되지 않는다. 층단위Ⅳ는 파도의 영향을 크게 받는 연안환경에서 퇴적되어 형성된 사질 퇴적암으로 이루어져 있다. 자연감마선 세기는 평균 27.7~37.6API 사이로 층단위Ⅰ에 비해서 매우 낮은 강도를 보인다. 층단위Ⅳ의 형성시기는 층단위Ⅲ과 같이 그 연대가 특정되지 않는다.

층단위Ⅴ는 최상부에 반각력화 용암류를 비롯하여 하부에는 최대 1m의 직경을 갖는 유리질 각력암과 더불어 10cm 이하로 부스러져 있는 유리질 각력암이 고밀도로 혼재되어 있다. 뿐만 아니라 세립의 유리질 각력암 대신 점토질 풍화물질의 기질로 채워져 있는 암상이 나타나기도 한다. 유리쇄설성 각력암들은 쉘레아이트질 현무암의 조성이 지배적이고, 자연감마선의 세기는 평균 25.8~46.3API의 범위를 보인다. 해당 지층에서는 절대연령 분석이 수행되지 않았으나, 직상부 층단위Ⅵ의 최하부에서는 92Ka의 연대를 보이는 것으로 대비되었다. 따라서 층단위Ⅲ~Ⅴ까지의 형성시기는 92~144Ka로 그 기간이 특정된다.

층단위Ⅵ은 파호이호이 용암류가 겹겹이 쌓여있는 누층구조를 이루고 있으며, 층단위 사이에는 1m 이하의 얇은 두께로 고토양층이 협재되어 있다. 용암류는 최소10매, 최대 26매의 유동단위로 구성되어 있으며 단위두께는 0.2~20.0m의 범위를 가지며, 평균 3.1m의 두께를 보인다. 광물조성에 따라 용암류는 모두 침상장석감람석현무암으로 분류되었으며, 지화학 조성은 쉘레아이트질 현무암, 쉘레아이트질 안산암, 알칼리 현무암으로 나타난다. 자연감마선 세기는 평균 29.0~39.8API의 강도를 보이며, 고토양이 협재되어 있는 곳에서는 27.0~48.6API의 강도로 나타난다. 층단위Ⅵ이 형성되기 시작한 연대는 92Ka로 대비되었으나, 최후기 분출에 대한 시기는 파악되지 않는다.

이와 같은 층서체계를 기반으로 3차원 층서 모델링을 수행하여 층단위들의 분포범위, 두께, 부피를 정량적으로 평가하였다. 대부분의 층단위들은 연구지역 전반에 걸쳐 발달되어 있지만, 층단위Ⅱ는 연구지역의 남부, 층단위Ⅳ는 북동부 및

남서부에서만 나타난다. 월정지역에서는 내륙에서 해안방향으로 갈수록 대체로 층단위들의 두께가 감소하지만, 행원지역은 층단위별로 두께의 증가와 감소가 상이한 양상을 보인다. 층단위 부피는 층단위 I 과 층단위 II가 가장 크고, 나머지는 유사한 부피로 연구지역에 분포되어 있다.

층서분석 및 세부암상 특성분석 결과를 범세계적 해수면 변동 그래프와 대비하여 월정리-행원리 해안지역의 성장과정을 크게 4단계로 구분하였다.

① 서귀포층(층단위 I)의 형성은 170Ka 이전에 종료되었으며, 이후 144Ka까지 해수면은 현재 해수면 하 70m까지 하강하여 약 20m의 수심을 이루었다. 이와 같은 시기에 발생된 화산분출로 인해 유리쇄설성 각력암층이 약 50~60m의 두께로 형성되었으며, 이로 구성된 1차 용암삼각주(층단위 II)가 현재 해안선에서 내륙으로 최대 약 2km 떨어진 지점까지 발달되었다.

② 용암삼각주가 형성된 이후 135Ka까지도 해수면은 지속적으로 하강하여 연구지역은 육상으로 노출되고 화산활동이 동반되었다. 곧바로 급격한 해수면 상승이 발생하였으나 이보다 빠른 속도로 공급된 용암류는 30~40m 가량의 두께의 용암누층을 이루며 용암대지(층단위 III)가 약 제1단계에서 형성된 고해안선을 기준으로 약 3km 이상 외해로 떨어진 지점까지 발달되었다.

③ 용암대지를 형성시킨 화산활동이 종료되고 연구지역에서는 급격한 해수면 상승이 122Ka까지 계속되었다. 이때 해수면은 현재 해수면보다 약 20m 이상 높게 발달되었으며, 이러한 시기 사이에 연구지역에는 연안환경이 발달하였고 비화산성 퇴적암층(층단위 IV)이 형성되었다. 눈에 띄는 공백기 없이 화산활동이 128~92Ka 사이에 발생하였고, 해수의 영향을 직접적으로 받는 환경에서 형성된 유리쇄설성 각력암이 20~30m의 두께로 쌓여 2차 용암삼각주(층단위 V)가 현재 해안선에서 외해로 약 1~2km 떨어진 지역까지 완만한 경사를 이루며 성장했다.

④ 2차 용암삼각주는 이후에 나타난 해수면 상승에 영향을 받지 않을 정도로 높은 지형을 이루었다. 이때 발생된 화산활동은 다량의 용암류를 공급하면서 50~60m 두께의 용암누층을 이루었고, 연구지역을 포함한 현재 해안선에서 외해로 1~2km 떨어진 지역까지 용암대지(층단위 VI)를 형성시켰고, 이후 해수면 상승으로 인해 현재의 해안지형이 완성되었다.

참고문헌

- Abdelmalak, M.M., Planke, S., Faleide, J.I., Jerram, D.A., Zastrozhnov, D., Eide, S. and Myklebust, R., 2016, The development of volcanic sequences at rifted margins: New insights from the structure and morphology of the Vøring Escarpment, mid Norwegian Margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 5212-5236.
- Ahn, G.S., Lee, H.G. and Im, H.C., 1995, A Study of granite formed in Jeju Island. *Journal of Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 28, 5, 513-518.
- Ahn, H.S., Park, J.Y., Kim, J.M. and Kim, J.C., 2015, Three-dimensional geologic modeling of the Pohang Basin distributed in Haedo-Dong, Nam-Gu, Pohang-Si, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 21-36.
- Ahn, U.S., Choi, J.H. and Yeo, E.Y., 2017, Eruption timing of the Geomun Oreum through the comparison of radiocarbon and quartz OSL ages. *The Geological Society of Korea*, 53, 3, 367-376.
- Alexander, W.D., 1859, Later details from the volcano on Hawaii. *Pacific Commercial Advertiser*, 2.
- Asquith, G.B., Krygowski, D. and Gibson, C.R., 2004, Basic well log analysis (Vol. 16). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.
- Bartetzko, A., Pezard, P., Goldberg, D., Sun, Y.F. and Becker, K., 2001, Volcanic stratigraphy of DSDP/ODP Hole 395A: An interpretation using well-logging data. *Marine Geophysical Researches*, 22, 111-127.
- Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R. and Wolff, H., (Eds.), 2007, Handbook of practical X-ray fluorescence analysis. Springer Science & Business Media.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Nemeth, K., Smith, I.E. and Sohn, Y.K., 2011, The

- influence of magma plumbing complexity on monogenetic eruptions, Jeju Island, Korea. *Terra Nova*, 23, 70–75.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E.M., Sohn, Y.K. and Néeth, K., 2010, Mechanisms driving polymagmatic activity at a monogenetic volcano, Udo, Jeju Island, South Korea. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160, 931–950.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E., Maas, R. and Sohn, Y.K., 2012a, How small-volume basaltic magmatic systems develop: a case study from the Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Journal of Petrology*, 53, 985–1018.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Smith, I.E., Sohn, Y.K. and Maas, R., 2012b, Spatio-temporal evolution of a dispersed magmatic system and its implications for volcano growth, Jeju Island Volcanic Field, Korea. *Lithos*, 148, 337–352.
- Brenna, M., Cronin, S.J., Kereszturi, G., Sohn, Y.K., Smith, I.E., and Wijbrans, J., 2015, Intraplate volcanism influenced by distal subduction tectonics at Jeju Island, Republic of Korea. *Bulletin of volcanology*, 77, 1, 7.
- Buscombe, D. and Masselink, G., 2006, Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79, 1–2, 33–52.
- Cas, R.A.F. and Wright, J.V., 1987, *Volcanic Successions*. Allen and Unwin, London, 528 p.
- Colella, A. and Prior, D.B., 2009, *Coarse-grained deltas*. London: Blackwell Scientific Publications, 3–27.
- Di Traglia, F., Nolesini, T., Solari, L., Ciampalini, A., Frodella, W., Steri, D. and Galardi, E., 2018, Lava delta deformation as a proxy for submarine slope instability. *Earth and Planetary Science Letters*, 488, 46–58.
- Duraiswami, R.A., Gadpallu, P., Shaikh, T.N. and Cardin, N., 2014, Pahoehoe - a ' a transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India-implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. *Journal of Asian Earth Sciences*, 84, 146–166.

- Dutton, C.E., 1884, Hawaiian volcanoes. United States Geological Survey Annual Report, 4, 75-219.
- Ecker A., 1976, Groundwater Behaviour in Tenerife, Volcanic Island(Canary Island, Spain). Journal of Hydrology, 28, 73-86.
- Flegler, S.L. and Flegler, S.L., 1997, Scanning & Transmission Electron Microscopy. Oxford University Press.
- Folk, R.L., 1954, The distribution between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature. Journal of Geology, 62, 334-359.
- Furnes, H. and Fridleifsson, I.B., 1974, Tidal effects on the formation of pillow lava/hyaloclastite deltas. Geology, 2, 381-384.
- Furnes, H. and Sturt, B.A., 1976, Beach/shallow marine hyaloclastite deposits and their geological significance: an example from Gran Canaria. The Journal of Geology, 84, 439-453.
- Goddard, E.N., Trask, P.D., DeFord, R.K., Rove, O.N., Singewald, J.T. and Overbeck, R.M., 1984, Rock color chart: Boulder. Geological Society of America.
- Goff, F., 1996, Vesicle cylinders in vapor-differentiated basalt flows. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 71, 167-185.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W., Scott, J.H.J., and Joy, D.C., 2017, Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer.
- Haraguchi, K., 1930, Jeju Volcanic Island. Professor Ogawa's Sixtieth birthday Memorial Volume, 595-649.
- Haraguchi, K., 1931, Geology of Saishu (Jeju) Island. Bulletin of Geological Survey of Korea, 10, 1-34.
- Harris, A.J. and Rowland, S.K., 2015, Lava flows and rheology. In The encyclopedia of volcanoes, Academic Press, 321-342.
- Hon, K., Kauahikaua, J., Denlinger, R. and Mackay, K., 1994, Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: Observations and measurements of

- active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. Geological Society of America Bulletin, 106, 3, 351-370.
- Hon, K., Gansecki, C. and Kauahikaua, J., 2003, The Transition from 'A'a to Pāhoehoe Crust on Flows. US Geological Survey Professional Paper, 1676, 89.
- Honnorez, J. and Kirst, P., 1975, Submarine basaltic volcanism: Morphometric parameters for discriminating hyaloclastites from hyalotuffs. Bulletin of Volcanology, 39, 441-465.
- Hwang, S.H., Shin, J.H., Park, K.H., Park, I.H. and Koh, G.W., 2006, Geophysical well logs in basaltic volcanic area, Jeju Island. Geophysics and Geophysical Exploration, 9, 3, 231-240.
- Hwang, S.K., 2000, Volcanic Form of the Songaksan Tuff Ring·Cinder Cone Complex, Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 4, 473-486.
- Irvine, T.N.J. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian journal of earth sciences, 8, 5, 523-548.
- Jaques, A. L. and Green, D. H., 1980, Anhydrous melting of peridotite at 0 - 15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. Contributions to mineralogy and petrology, 73, 3, 287-310.
- Jenkins, R., 1999, X-ray fluorescence spectrometry (Vol. 2). New York: Wiley.
- Jeong, G.Y., Han, A., Cho, M., Park, M., Kwak, T. and Ahn, U.S., 2015, Mineralogical and geochemical study on the origin of paleosols in Jeju Island, The Geological Society of Korea, 68-68.
- Jeong, J.O., Yoon, S.H., Koh, G.W., Joe, Y.J., Hong, J.G., and Kim, J.J., 2016, Mineralogical and sedimentological characteristics of the U Formation underlying the volcanic strata in Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 52, 4, 389-403.
- Jeju Special Self-Governing Province, 1997, Orumm of Jeju Island, 483 p.

- Ji, H.S., Woo, K.S., Kim, R., Choi, D.W., Yang, D.Y. and Park, B.K, 2008, The age and origin of carbonate sand dunes in Gimnyeong area, Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*. 44, 5, 615-628.
- Jones, J.G., 1969, Pillow lava and pahoehoe: A reply. *The Journal of Geology*, 77, 732-734.
- Jones, J.G. and Nelson, P.H.H., 1970, The flow of basalt lava from air into water - its structural expression and stratigraphic significance. *Geological Magazine*, 107, 13-19.
- Jourdan, F., Sharp, W.D. and Renne, P.R., 2012, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages for deep (~ 3.3 km) samples from the Hawaii Scientific Drilling Project, Mauna Kea volcano, Hawaii. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13, 5.
- Kang, S., Lim, D. and Kim, S.Y., 2010, Benthic foraminiferal assemblage of Seogwipo Formation in Jeju Island, South Sea of Korea: Implication for late Pliocene to early Pleistocene cold episode in the northwestern Pacific margin. *Quaternary International*, 225, 1, 138-146.
- Katz, M.G. and Cashman, K.V., 2003, Hawaiian lava flows in the third dimension: identification and interpretation of pahoehoe and aa distribution in the KP-1 and SOH-4 cores. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (G3), 4, 24 p.
- Kawachi, Y., Pringle, I.J. and Coombs, D.S., 1983, Pillow lavas of the Eocene Oamaru Volcano. In *North Otago: Pacific Science Congress, Dunedin, New Zealand, Guidebook for Excursion Bh*, 18 p.
- Kim, B.K., 1974, Paleontological Study on the Sand Dune Deposits in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 10, 2, 95-108.
- Khim, B.K., Woo, K.S. and Sohn, Y.K., 2001, Sr isotopes of the Seogwipo Formation (Korea) and their application to geologic age. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19, 6, 701-711.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Hwang, S.G., Howells, M.F. and Reedman, A.J., 1986, Tuff Rings and Tuff Cones of Jeju Island. *Journal of Geological Society*

- of Korea, 22, 1-9.
- Kim, I.S. and Lee, D., 2000, Magnetostratigraphy and AMS of the Seoguipo Formation and Seoguipo Trachyte of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 163-180.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidence of the presence of old continental basement in Cheju volcanic island, South Korea, revealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. Geochemical Journal, 36, 421-441.
- Kim, S.H., 1963, Physiography of Jeju Island, The Korea Geographical Society, 1, 2-4.
- Koh, C.S., Yoon, S.H., Hong, J.G., Jeong, J.O. and Kim, J.J., 2019a, Stratigraphic analysis of the drilling core in Woljong-ri coastal area, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 55, 1-20.
- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, 326 p.
- Koh, G.W., Park, J.B., Hong, S.S., Ko, I.J. and Kim, T.H., 2019b, Multiple volcanic eruption episodes in the highlands of Mt. Halla (Hallasan), Jeju Island, Korea: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of lava flows. Journal of the Geological Society of Korea, 55, 71-86.
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.R., Kim, G.P., and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 49, 209-230.
- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The Study on Geology and Volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Absolute ages of the Subsurface Volcanic Rock Cores from Boreholes in the Eastern Lowland of Jeju Island. Economic and Environmental Geology, 41, 93-113.
- Koh, G.W., Park, J.B. and Moon, D.C., 2017a, Geology and Groundwater of Jeju Volcanic Island. Jeju Province Development Corporation, 262 p.

- Koh, G.W., Park, J.B., Shon, Y.G. and Yoon, S.H., 2017b, Geologic logging guidebook of drilling core of Jeju Island. Jeju province development cooperation, 293 p.
- Koh, J.S., Yun, S.H., Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y.W., 2005, Petrology of the Basalt in the Udo Monogenetic Volcano, Jeju Island. *Journal of Petrological Society of Korea*, 14, 1, 45-60.
- Kokelaar, P., 1986, Magma-water interactions in subaqueous and emergent basaltic. *Bulletin of Volcanology*, 48, 5, 275-289.
- Korea Institute of Energy Research, 2006, Detailed Survey of Marine Geology, Offshore Wind Farm Project of Woljong-ri, Jeju Island.
- Korea Rural Community Corporation, 1971, Report of Jeju-do Groundwater, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 381 p.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Lea, D.W., Martin, P.A., Pak, D.K. and Spero, H.J., 2002, Reconstructing a 350 ky history of sea level using planktonic Mg/Ca and oxygen isotope records from a Cocos Ridge core. *Quaternary Science Reviews*, 21, 1-3, 283-293.
- Lee, D.Y., 1993, Geological Composition of Jondal-ri Drilling Site. Summary of Symposium on Volcanic Geology in Jeju Island, Mt. Halla-Mt. Baekdu Volcanic Comparison Research Society, 51 p.
- Lee, D.Y. and Kim, J.Y., 1991, Review on volcanic history and stratigraphy of Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 5, 538.
- Lee, J.H. and Yun, S.H., 2012, Study on the Distributional Characteristics and Classification of Quaternary Monogenetic Volcanoes in Jeju Island, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 21, 4, 385-396.
- Lee, J.S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic volcanics of South Korea; geodynamics implications on the East-Eurasian

- Margin. Ph. D. Thesis University D'ORLEANS.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and Petrochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci Rep., Tohoku Univ., Ser., 315, 521-541.
- Lee, M.W., 1994, Formation History and geologic structures of Jeju Volcanic Island. Symposium of environmental conservation, development and use of groundwater resources in Jeju Island, Korean Society of Soil and Groundwater Environment, Jeju, 54-74.
- Lee, M.W. and Son, I.S., 1983, How Jeju Island made? - Geology and Rocks of Jeju volcanic island. Chunkwang Publication, Seoul, 135 p.
- Lee, M.W., Won, C.K., Lee, D.Y., Park, G.H. and Kim, M.S., 1994, Stratigraphy and Petrology of Volcanic Rocks in Southern Cheju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 521-541.
- Lee, S.H., Park, J.Y. and Kim, J.M., 2015, Three-dimensional geologic modeling of a metamorphic complex for characterization of a deep underground research laboratory site. Journal of the Geological Society of Korea, 51, 377-387.
- Leeder, M.R., 2012, Sedimentology: process and product. Springer Science & Business Media.
- Li, B., Park, B.K., Kim, D. and Woo, H.J., 1999, The geological age and paleoenvironment of the lower Seogwipo Formation, Cheju Island, Korea. Geosciences Journal, 3, 4, 181.
- Li, S.J., Feng, X.T., Wang, C.Y., and Hudson, J.A., 2013, ISRM suggested method for rock fractures observations using a borehole digital optical televiewer. Rock mechanics and rock engineering, 46, 3, 635-644.
- Liu, W. and Yamazaki, F., 2019, Monitoring of the 2018 Kilauea's eruption in the lower East Rift Zone using multi-temporal PALSAR-2 imagery. In 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), 1-5.
- Long, P.E. and Wood, B.J., 1986, Structures, textures, and cooling histories of

- Columbia River basalt flows. Geological Society of America Bulletin, 97, 1144-1155.
- Lorenz, V., 1986, On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings. Bulletin of volcanology, 48, 5, 265-274.
- Macdonald, G.A., 1953, Pahoehoe, aa, and block lava. American Journal of Science, 251, 3, 169-191.
- MacDonald, J.G., 1967, Variations within a Scottish Lower Carboniferous lava flow. Scottish Journal of Geology, 3, 1, 34-45.
- Mallet, J.L., Jacquemin, P. and Cheimanoff, N., 1989, GOCAD project: Geometric modeling of complex geological surfaces. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 1989, Society of Exploration Geophysicists, 126-128.
- Mallet, J.L., 2002, Geomodeling. Oxford University Press, 599 p.
- Mattox, T.N., 1993, Where lava meets the sea; Kilauea Volcano, Hawaii. Earthquakes & Volcanoes (USGS), 24, 160-177.
- Mattox, T.N. and Mangan, M.T., 1997, Littoral hydrovolcanic explosions: a case study of lava - seawater interaction at Kilauea Volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 75, 1-17.
- McPhie, J., Doyle, M. and Allen, R., 1993, Volcanic Textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. CODES Key Centre, University of Tasmania, Hobart, 198 p.
- Ministry of Construction, Jeju Special Self-Governing Province, Korea Water Resources Corporation, 1993, Geologic report of the Seongsan Sheet (1:50,000).
- Moore, J.G., Phillips, R.L., Grigg, R.W., Peterson, D.W. and Swanson, D.A., 1973, Flow of lava into the sea, 1969-1971, Kilauea Volcano, Hawaii. Geological Society of America Bulletin, 84, 537-546.
- Nehyba, S. and Nývlt, D., 2015, "Bottomsets" of the lavafed delta of James Ross Island Volcanic Group, Ulu Peninsula, James Ross Island, Antarctica.

- Polish Polar Research, 36, 1-24.
- Nichols, G., 2009, Sedimentology and stratigraphy. John Wiley & Sons.
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 3, 181-194.
- Oze, C. and Winter, J. D., 2005, The occurrence, vesiculation, and solidification of dense blue glassy pahoehoe. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 142, 3, 285-301.
- Park, E.J., 2000, REE and Nd-Sr isotopes of the granitic rocks from the Cheju Island. Master Thesis, University of Ewha Womans University. 76 p.
- Park, G.H., An, J.S., Gee, W.S. and Park, W.B., 2006, Geological trip of Jeju Island, Korea (Enlarged edition). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Jeju Development Institute, 183 p.
- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1994, Geochemical evolution of the Cheju volcanic island. Ph.D Thesis of Yonsei University, 305 p.
- Park, J.B. and Kwon, S.T., 1996, Tholeiitic volcanism in Cheju Island, Korea. Journal of the the Petrological Society of Korea, 5, 1, 66-83.
- Park, J.B., Park, K.H., Cho, D.L. and Koh. G.W., 1999, Petrochemical Classification of the Quaternary Volcanic Rocks in Cheju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 4, 253-264.
- Park, J.Y., Kim, J.M. and Yoon, S.H., 2015, Three-dimensional geologic modeling of the Pohang Basin in Korea for geologic storage of carbon dioxide. Journal of the Geological Society of Korea, 51, 3, 289-302.
- Park, K.H., Cho, D.L. and Kim, J.C., 2000a, Geologic report of the Mosulpo-Hanrim Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 56 p.
- Park, K.H., Cho, D.L., Kim, Y.B., Kim, J.C., Cho, B.W., Jang, Y.N., Lee, B.J., Lee, S.R., Son, B.K., Cheon, H.Y., Lee, H.Y. and Kim, Y.U., 2000b,

- Geologic report of the Segwipo-Hahyori Sheet (1:50,000). Jeju Provincial Government, 163 p.
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p.
- Park, K.H., Lee, B.J., Kim, J.C., Cho, D.L., Lee, S.R., Park, D.W., Lee, S.R., Choi, Y.S., Yeum, D.Y., Kim, J.Y., Seo, J.Y. and Shin, H.M., 2000c, Geologic report of the Jeju (including Baekado-Jinnampo) Sheet (1:250,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 59 p.
- Park, S.P., 1985, A Study of Parasitic volcanoes of Jeju Island. Collected Papers of Chonnam National University, 30, 159-166.
- Pichler, H., 1965, Acid hyaloclastites. Bulletin of Volcanology, 28, 293-310.
- Pike, R.J., RJ, P. and GD, C., 1981, Revised classification of terrestrial volcanoes and catalog of topographic dimensions, with new results on edifice volume.
- Pirson, S.J., 1983, Geological well log analysis.
- Porter, S.C., 1979, Quaternary stratigraphy and chronology of Mauna Kea, Hawaii: a 380,000-yr record of mid-Pacific volcanism and ice-cap glaciation. Geological Society of America Bulletin, 90(7_Part_II), 980-1093.
- Pouliot, J., Lachance, B., Brisebois, A., Rabaud, O. and Kirkwood, D., 2003, 3D geological modeling: Are GIS or CAD appropriate. In Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Workshop, WG II/5, II/6, IV/1 and IV/2 Joint Workshop on Spatial, temporal and multi-dimensional data modelling and analysis.
- Rittmann, A., 1962, Volcanoes and their activity. John Wiley and Sons, New York, 1-305.
- Sahagian, D., 1985, Bubble migration and coalescence during the solidification of basaltic lava flows. The Journal of Geology, 93, 2, 205-211.

- Schlumberger, 1989, Log Interpretation Principles/Applications. Schlumberger Educational Services, 13-19.
- Schmincke, H.U., 2004, Volcanism (Vol. 28). Springer Science and Business Media.
- Self, S., Keszthelyi, L. and Thordarson, T., 1998, The importance of pāhoehoe. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 26, 81-110.
- Selley, R.C., 1998, Elements of petroleum geology. Gulf Professional Publishing.
- Serra, O.E., 1983, Fundamentals of well-log interpretation.
- Shim, G.S., Kim, Y.H., Hwang, S.H. and Park, J.B., 2018, Applicability of natural gamma data to analyze the distribution and stratigraphy of volcanic units in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 54, 2, 153-168.
- Silvestri, S.C., 1963, Proposal for a genetic classification of hyaloclastites. Bulletin of volcanology, 25, 315-321.
- Skilling, I.P., 2002, Basaltic pahoehoe lava-fed deltas: large-scale characteristics, clast generation, emplacement processes and environmental discrimination. Geological Society, London, Special Publications, 202, 91-113.
- Sohn, Y.K., 1996, Hydrovolcanic processes forming basaltic tuff rings and cones on Cheju Island, Korea. Geological Society of America Bulletin, 108, 1199-1211.
- Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 1993, The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain flow on a steep volcanic cone slope. Sedimentology, 40, 4, 769-786.
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, K.H., and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and

- subaerial versus submarine hydrovolcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. *Sedimentology*, 55, 4, 899-924.
- Sohn, Y.K. and Yoon, S.H. 2010, Shallow-marine records of pyroclastic surges and fallouts over water in Jeju Island, Korea, and their stratigraphic implications. *Geology*, 38, 763-766.
- Sohn, Y.K., Yoon, W.S., Ahn, U.S., Kim, G.B., Lee, J.H., Ryu, C.K. and Kang, C.H., 2015, Stratigraphy and age of the human footprints-bearing strata in Jeju Island, Korea: Controversies and new findings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 4, 264-275.
- Son, I.S. and Lee, M.W., 1998, The Subsurface Stratigraphy of Cheju Volcanic Island, Korea. *Journal of the Korean earth science society*, 19, 581-581.
- Swanson, D.A., 1973, Pahoehoe flows from the 1969 - 1971 Mauna Ulu eruption, Kilauea volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 2, 615-626.
- Tamanyu, S., 1990, The K-Ar ages and their stratigraphic interpretation of the Cheju Island volcanics, Korea. *Chishitsu Chosajo Geppo*, 41, 527-537.
- Tribble, G.W., 1991, Underwater observations of active lava flows from Kilauea volcano, Hawaii. *Geology*, 19, 633-636.
- Vail, P.R. and Mitchum, R.M., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 1: overview. In: Payton, C. (ed.), *Stratigraphic Interpretation of Seismic Data*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 26, 83-97.
- Vail, P.R., 1987. seismic stratigraphy interpretation procedure. In Bally, A.W. ed., *Atlas of seismic stratigraphy*, AAPG Studies in geology, 1, 1-10.
- Vespermann, D. and Schmincke, H.U., 2000, *Scoria cones and tuff rings*. Academic Press.
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A., 2006, Pahoehoe flows from the central Paraná continental flood basalts. *Bulletin of Volcanology*, 68, 7-8, 599-610.

- Walker, G.P., 1987, Pipe vesicles in Hawaiian basaltic lavas: Their origin and potential as paleoslope indicators. *Geology*, 15, 1, 84-87.
- Wang, G., Zhang, S., Yan, C., Song, Y., Sun, Y., Li, D. and Xu, F., 2011, Mineral potential targeting and resource assessment based on 3D geological modeling in Luanchuan region, China. *Computers and Geosciences*, 37, 1976-1988.
- Wang, G. and Huang, L., 2012, 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers*, 3, 483-491.
- Waters, A.C. and Fisher, R., 1971. Base surges and their deposits: Capelinhos and Taal volcanoes. *Journal of Geophysical Research*, 76, 5596 - 5614.
- Watton, T.J., Jerram, D.A., Thordarson, T. and Davies, R.J., 2013, Three-dimensional lithofacies variations in hyaloclastite deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 250, 19-33.
- Warren, B.E., 1990, X-ray Diffraction. Courier Corporation.
- Wilmoth, R. A. and Walker, G. P., 1993, P-type and S-type pahoehoe: a study of vesicle distribution patterns in Hawaiian lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 55, 129-142.
- Wohletz, K.H. and Sheridan, M.F., 1983, Hydrovolcanic explosions: II, Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones. *American Journal of Science*, 283, 5, 385-413.
- Won, C.K., 1975, Study of Geologic Development and the Volcanic Activity of the Jeju Island. The Research Institute for Basic Science, Konkuk University, 1, 7-56.
- Won, C.K., 1976, Study of Petro-chemistry of Volcanic Rocks in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 207-226.
- Won, C.K., Lee, M.W., Yun, S.H. and Ko, B.K., 1998, Geochemical Characteristics of the volcanic rocks in Pyoseon Area, Southeast Cheju, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 34, 172-191.

- Yamagishi, H., 1979, Classification and features of subaqueous volcanoclastic rocks of Neogene age in southwest Hokkaido. Geological survey of Hokkaido, Report, 51, 1-20.
- Yeo, E.Y., Choi, J.H., Ahn, U.S. and Cheng, C.S., 2019, Quartz OSL dating of palaeosols intercalated with basaltic lava flows and scoria deposits from monogenetic volcanoes in northeastern Jeju Island, Korea. The Geological Society of Korea, 62-62.
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1995, Late Quaternary calcareous nannofossils from the Sinyangri Formation of Cheju (Jeju) Island. Korea. Journal of the Paleontological Society of Korea, 11, 146-158.
- Yoon, S., Jung, C.Y., Hyun, W.H., Song, S.T., 2014, Tectonic history of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 457-474.
- Yoon, S., Koh, G.W. and Kim, I.T., 1995, Development history of Cheju Island. Chejudo (Bull. normal letter font Chejudo Province Government), 98, 148-164.
- Yoon, S.H., Chough, S.K., 2006, Sedimentary facies and depositional environment of the Seoguipo Formation, Jeju Island: Journal of the Geological Society of Korea, 42, 1 - 17.
- Yoon, S.G., Han, D.S. and Lee, D.Y., 1987, Quaternary Geology in the Southern Part of Jeju Island, KR-86-2-(B)-2, 64 p.
- Yoon, S.H., Hong, S.W., Im, S.H. and Kim, S.H., 2014, A Study on Collection of Geological and Volcanic Information of Jeju Island. Tamla Culture Research Institute of Jeju National University, 161 p.
- Yoon, S.H., Lee, B.G. and Sohn, Y.K., 2006, Geomorphic and Geological Characteristics and Eruption Process of the Hanon Volcano, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea. 42, 1, 19-30.
- Yun, S.H., 2004, The volcanic sequences of Jeju volcano: General. The second international symposium of Jeju volcanological institute, Jeju, 17-29.
- Yun, S.H., Lee, M.W. and Jin, M.S., 2009, Training Material Book of National

Geopark of Jeju Island. Jeju Special Self-Governing Province, 112 p.

Yun, S.H., Lee, Y.J., Chung, W.W. and Koh, J.S., 1999, Petrology and Zircon Crystal Morphology of the Granitic Rocks from the Basement , Cheju Volcanic Island , Korea : (2) Pre - Cretaceous Granite. Journal of Korean Earth Science Society, 20, 3, 277-281.

요약

제주도 동북부 월정-행원 지역의 화산층서를 정립하고 화산활동과 연계된 해안지역의 지질학적 진화과정을 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 제주도 동북부에 위치한 월정-행원 지역에 설치된 7개 시추공으로부터 회수된 시추코어에 대한 육안검층을 통한 암상 산출특성 분석, OTV 및 자연감마선 검층, 용암류 시료에 대한 지화학 및 박편 분석, 퇴적층의 입도 및 광물 분석, 3차원 층서 모델링 분석이 이루어졌다.

연구지역에 분포하는 7개 시추공으로부터 회수된 시추코어는 비각력화 용암류, 유리질 각력암이 우세하게 발달된 각력화 용암류, 니질 및 사질의 비화산성 퇴적암, 점토질의 고토양등의 암상으로 구성된다. 비각력화 및 각력화 용암류 시료에 대한 지화학적 분석 결과, 이들은 비알칼리 계열 용암류인 쏘레아이트질 현무암 및 안산암의 조성이 지배적인 것으로 확인되었다. 시추코어의 대부분은 쏘레아이트질 현무암으로 이루어져 있고, 쏘레아이트질 안산암은 월정지역의 상위 비각력화 용암류 구간에서 주로 나타난다. 한편 시추공 지구물리검층 자료 중 자연감마선 검층자료에서는 암상과 용암류 화학조성에 따라 세기를 구분하였는데, 고토양과 퇴적암 일부 구간에서 그 세기가 다소 높게 나타나는 점을 제외하고는 특별한 상관관계가 나타나지 않는다. 이와 같은 특성들을 종합적으로 고려하여 6개의 층단위, 즉 하부로부터 비화산성 퇴적암층 I, 각력화 용암류층 I, 비각력화 용암류층 I, 비화산성 퇴적암층 II, 각력화 용암류층 II, 비각력화 용암류층 II로 구성된 층서체계를 제시하였다. 또한 설정된 층단위들의 암상과 심도정보를 기반으로 연구지역에 대한 3차원 지질 모델링을 수행하였다. 대부분의 층단위들은 연구지역 전반에 걸쳐 발달되어 있지만, 층단위 II는 연구지역의 남부, 층단위 IV는 북동부 및 남서부에서만 나타난다. 월정지역에서는 내륙에서 해안방향으로 갈수록 대체로 층단위들의 두께가 감소하지만, 행원지역은 층단위별로 두께의 증가와 감소가 상이한 양상을 보인다. 층단위 부피는 층단위 I 과 층단위 II가 가장 크고, 나머지는 유사한 부피로 연구지역에 분포되어 있다.

각 층단위를 구성하고 있는 암상에 대한 성인과 기원을 파악하기 위해 세부

암상특성에 대한 분석을 진행한 결과, 비각력화 용암류층은 ① 고다공질 분층, ② 다공질 분층, ③ 치밀질 분층, ④ 유리질 분층으로 세부 암상이 구분된다. 이와 같은 암상은 파호이호이 용암류 유동단위 내에서 수직적으로 구간에 따라 나타나는 특징으로 해석된다. 각력화 용암류층에서는 유리질 조직이 우세한 다양한 크기의 각력으로만 회수가 이루어졌지만, OTV 검층영상에서는 이들을 둘러싸고 있는 기질도 함께 확인된다. 따라서 이들의 발달 및 분포특성을 기준으로 ① 반과쇄 용암류, ② 역지지 각력암, ③ 기질지지 각력암 등 암상이 구분되었다. 이와 같은 암상은 용암류가 물과의 접촉으로 인해 급냉과쇄된 유리쇄설성 각력암에서의 전형적인 특징으로 해석된다. 아울러 비화산성 퇴적암층은 니질 및 사질의 입자들로 이루어진 괴상의 퇴적암으로 이루어져 있으며, 화산기원 물질들이 결핍됨과 더불어 폐각편이 포함되어 있는 점은 퇴적암층이 연안 및 내대륙붕 환경에서 형성되었음을 지시한다. 특히, 시추공 최하부 기저를 이루고 있는 비화산성 퇴적암층은 전반적인 출현 심도로 미루어 볼 때, 제주도 주요 층서단위 중 서귀포층에 해당되는 것으로 해석하였다.

시추코어 암상분석과 이들의 산출특성을 파악한 결과, 용암류의 경우 연구지역에는 아아 용암류는 관찰되지 않고 모두 파호이호이 용암류로 나타나고, 용암류 유형은 P형이 우세하다. 이는 과거 용암류가 정치될 당시의 지형은 경사가 4° 이하의 완만한 저지대를 이루고 있어, 용암류 내부에서는 전단변형의 영향이 크게 나타나지 않아 아아 용암류로의 전이가 발생되지 않았던 것으로 해석된다. 아울러 유리쇄설성 각력암은 형성과 퇴적작용이 지속적으로 발생됨에 따라 용암삼각주를 형성하며 전진하였고, 이는 화산섬의 육지부를 확장시키는 주요한 역할을 하였을 것으로 판단된다. 또한 이들이 발달된 두께의 공간적인 변화를 통해서도 그 당시 해수면에 대한 추정을 가능케 한다.

이와 같은 결과들을 종합해보면 월정리-행원리 해안지역의 지질학적 진화과정은 크게 4단계로 설명된다. ① 연구지역은 전반적으로 서귀포층(층단위 I) 퇴적이 170ka 경에 종료된 후 용암삼각주(층단위 II)가 144ka 사이에 현재 해안선에서 내륙으로 최대 약 2km 지점까지 약 50~60m의 두께로 형성되었다. ② 이후 해수면 하강에 의해 이전에 형성되었던 용암삼각주를 포함한 연구지역 대부분이 육상에 노출되고 화산활동 휴지기 내지 무퇴적 기간이 지속되었고, 서귀포층의

상부는 다소의 토양화 작용이 발생하였다. 그리고 해수면이 상승하던 135~130ka 사이에 일어난 화산활동은 해수면 상승속도보다 빠르게 서귀포층 상부에 넓은 용암대지(층단위Ⅲ)를 20~30m의 두께로 형성시켰다. 이러한 용암대지는 해상 시추조사에서 취득된 시추코어와의 대비를 통해 제1단계에서 형성된 고해안선을 기준으로 약 3~4km 이상 외해쪽까지 발달된 것으로 추정된다. ③ 이후에도 연구지역은 해수면 상승이 계속되었고, 130~128ka 동안 층단위Ⅲ 위에 비화산성 연안 퇴적층(층단위Ⅳ)이 얇게 퇴적되고, 재차 발생한 화산활동으로 용암류의 유입이 일어나서 그 상부에는 다시 용암삼각주에 의한 층단위Ⅴ가 형성되었다. 이 용암삼각주는 128~92ka까지 다소 긴 기간에 걸쳐 두께 약 20~30m의 각력화 용암류층을 집적시켰으며, 용암류 해안은 현재 해안선 기준 약 1.0~1.5km 지역까지 완만한 경사를 이루었다. ④ 층단위Ⅴ가 형성되고 난 뒤, 내륙에서 분출한 용암류가 다량 공급되면서 해안지역에는 용암대지(층단위Ⅵ)가 50~60m 두께로 발달하면서, 현재의 해안지형이 완성되었다.

감사의 글

연구실에서 공부를 한지 어느덧 10년 이상의 시간이 지나갔습니다. 학자로서의 길을 걸기로 마음먹었던 당시를 생각하면 정말 많은 것들이 달라져 있고 또 여러 가지 일들이 있었습니다. 이처럼 수많은 변화 속에서도 무사히 학위과정을 마칠 수 있었던 것은 저 혼자만의 능력이 아닌 제 주변에 많은 도움과 격려를 주신 분들이 계셨기에 가능했습니다.

우선 학부에서부터 대학원까지 긴 시간동안 변함없이 저를 믿고 해아릴 수 없을 만큼 많은 가르침을 주신 윤석훈 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 교수님께서 말씀해주신 것처럼 지금 이 순간이 끝이 아닌 진정한 전문가로 거듭나기 위한 첫 걸음으로 생각하고 늘 겸손한 자세로 노력하겠습니다. 그리고 대학원 생활 동안 응원을 아끼지 않고 해주시고 따끔한 충고와 진심어린 조언을 해주셨던 이준백 교수님, 송상근 교수님, 문재홍 교수님 그리고 황세호 박사님, 박원배 박사님, 박준범 박사님, 전용문 박사님, 안웅산 박사님, 신제현 박사님께도 감사드립니다.

아울러, 연구를 수행할 수 있도록 다양하고 방대한 자료를 선뜻 제공해 준 제주특별자치도 개발공사 담당자 분들께도 감사의 말씀을 드립니다. 특히, 학부부터 지금까지 연구실에서 동고동락하며 꿈을 함께 키워온 늘 고마운 친구이자 든든한 방장 우석이, 든든한 연구실 후배 성현이, 우성이, 민재 그리고 저보다 앞서 낯선 길을 걸어가며 좋은 본보기가 되어주고 조언을 해주는 기범이형 정말 감사드립니다.

학위과정을 마친 저를 누구보다 축하해준 내 오랜 친구 동빈이와 민섭이 그리고 친형과도 같은 재선이형에게도 감사 전합니다. 또한 소프트웨어를 사용하는데 많은 도움을 주신 김준모 교수님과 채용씨, 시료 분석에 있어 물신양면으로 지원 해주신 정종욱 박사님과 더불어 옆에서 아낌없이 도움을 준 지수형, 성우, 선영, 진주에게도 깊은 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 이날까지 공부하는 저를 믿고 지지해주고 힘들게 뒷바라지 해주신 아버지와 어머니, 지칠 때마다 큰 위로가 되어준 누나, 부족한 오빠를 잘 챙겨주는 귀여운 막내 은정이, 그리고 삶의 동기가 되어준 미나에게 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 감사합니다.