

碩士學位論文

제주도 서부 해안지역의 수문지질과
지하수 부존특성



濟州大學校 大學院

海洋學科

李 垂 炯

2008年 2月

제주도 서부 해안지역의 수문지질과 지하수 부존특성

指導教授 尹正守

李垂炯

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

李垂炯의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 윤석훈 (印)

委 員 최영찬 (印)

委 員 윤정수 (印)

濟州大學校 大學院

2008年 2月

Characteristics of Hydrogeological and Groundwater Occurrence
in the Western Coastal Areas of Jeju Island, Korea

Soo-Hyoung Lee

(Supervised by professor Jeung-Su Youn)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the Degree of Master of Science

Department of Oceanography

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Feb. 2008

목 차

LIST OF FIGURE	iv
LIST OF TABLE	v
LIST OF PHOTO	vi
Summary	vii
I. 서론	1
II. 연구지역의 개요	3
2-1. 지형	3
2-2. 수문지질	5
2-3. 강수량	6
2-4. 물수지	10
2-5. 지하수 개발·이용현황	11
III. 연구방법	13
3-1. 연구대상 시추공 선정	13
3-2. 물리검층	13
3-3. 대수성시험 및 수질조사	14
IV. 결과 및 고찰	16
4-1. 연구지역의 지하지질	16
4-1-1. 시추공의 구성지질	16
4-1-2. 지하지질 분포특성	22
4-2. 물리검층	30
4-2-1. 물리검층 개요	30

4-2-2. 물리검층 자료해석	31
4-3. 대수층의 수리성 및 수질특성	42
4-3-1. 관측정별 대수성 시험	43
4-3-2. 대수층의 수리성	53
4-3-3. 대수층의 분포	56
4-3-4. 대수층의 수질특성	59
4-4. 지하수 부존특성 해석	63
V. 결론	71
참고문헌	74
부 록	78
감사의 글	95



LIST OF FIGURE

Fig. 1. Study area and location of monitoring wells, and groundwater occurrence types, western Jeju Island.	4
Fig. 2. Geological Map of the Study Area(KIGAM, 2000).	7
Fig. 3. The Distributions of groundwater wells in study area.	12
Fig. 4. Map showing deep dilling sites and cross-section lines in study area.	24
Fig. 5. Geologic cross-section of A-A' line in the study area.	25
Fig. 6. Geologic cross-section of B-B', C-C', D-D', and E-E' line in the study area.	26
Fig. 7. Geologic and geophysical well logs in the Kosan monitoring well.	33
Fig. 8. Geologic and geophysical well logs in the Shindo monitoring well.	35
Fig. 9. Geologic and geophysical well logs in Ilgwa monitoring well.	37
Fig. 10. Geologic and geophysical well logs in Panpo monitoring well.	39
Fig. 11. Geologic and geophysical well logs in Hamo monitoring well.	41
Fig. 12. The procedures for aquifer test with depth in the study area.	42
Fig. 13. The drawdown graphy which is happened under aquifer test in the MR2.	49
Fig. 14. The specific yield of each monitoring wells.	58
Fig. 15. Electric conductivity logs with time in the Kosan and Ilgwa monitoring wells, study area.	64
Fig. 16. Electric conductivity logs with time in the Shindo and Hallim 1 monitoring wells, study area.	66
Fig. 17. Diagrammatic representation of groundwater occurrence and layered aquifer in the HL1 - HL 2 and HM - SM 2 sections, western Jeju.	68
Fig. 18. Diagrammatic representation of groundwater occurrence in the Susan area, eastern Jeju(After Koh et al., 2006)	69

LIST OF TABLE

Table 1. Monthly and annually precipitation data of kosan area, western part of Jeju Island.	9
Table 2. Water Budget Data of Western Watershed and Jeju Island.	10
Table 3. The present state of groundwater development in the study area. ..	11
Table 4. Classification of groundwater wells in the study area.	12
Table 5. Inventory of monitoring wells in the study area.	14
Table 6. Geophysical logging methods, required borehole conditions and objectives.	30
Table 7. The results of aquifer test of the each monitoring wells in the study area.	44
Table 8. Hydraulic coefficients of monitoring wells.	54
Table 9. The groundwater compositions of the each aquifer in the monitoring wells, study area.	60
Table 10. The Compared of water quality with study area, background water quality of entire island and saline groundwater in the eastern area.	62

LIST OF PHOTO

- Photo 1. Drilled core showing volcanic rocks and sedimentary deposits from
Kosan monitoring well. 22
- Photo 2. Drilled core showing massive volcanic rocks from Sangmo 1
Monitoring Well. 28
- Photo 3. Hyaloclastite breccias from Murung 1 in 16~32m. 28



Summary

Subsurface Geology and Groundwater Occurrence in the Western Coastal Areas of Jeju Island, Korea

The purpose of this study is to grasp the geohydrological features of western coast aquifer surveyed through analysis of geological logging, geophysical logging, aquifer test and chemical water quality by aquifer with the object of 13 seawater intrusion monitoring wells at the western parts set by Jeju special governed Island.

The geological features at the study area are divided into 5 units of underground geological like lava sequence that ranges throughout the top of Seoguipo Formation with various thickness, Seoguipo Formation, U Formation, sedimentary layer that contained between lava sequence, and lava flows that contained between Seoguipo Formation.

As a result of analysis of aquifer test, it is concluded that most range of aquifer in study area develops at volcanic rocks of jointed and/or hyaloclastite breccias, the aquifer are found as fallow in Seoguipo Formation and gravel layer between lava sequence, and gravel layer in Seoguipo Formation or unconsolidated sand layer.

According to the result of classification of chemical water quality and groundwater occurrence type, one is basal groundwater regions(HL1, SD, HM),and the good water quality of parabasal groundwater regions(SM1, IG) the other one is the poor quality of water regions(the rest of other monitoring wells). there is high content of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the upper part of the poor quality of water regions

As a result of geophysical logging, it is set against drilled core collected in the process of well dilling underground. As a analysis of natural gamma, there represent high value in sedimentary layer of lava sequence and section which has lots of clay in Seoguipo Formation. Conductivity of Shindo and Hamo has increased with as conductivity getting deeper and it's reached to approximately 30,000~40,000, which makes sure that there is salinewater below freshwater.

I. 서론

1-1. 연구배경 및 목적

해안지역에서의 집중적인 지하수 개발·이용은 해수가 대수층 내로 침입하는 ‘해수침입(Sea water encroachment)’을 일으키거나, 담수지하수체 하부의 해수 또는 염수가 수직상승(Sea water intrusion or saltwater upcoming) 현상을 일으킬 수 있기 때문에 세계적으로 해안대수층에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 예를 들면, 미국의 경우, 1854년 Long Island에서 처음으로 해수침투현상이 보고(Back and Freeze, 1983)된 이래, Florida Miami 부근의 Biscayne 대수층의 염수침입 연구(Kohout, 1964), 미국지질조사소의 대서양 연안지역에서의 담수-염수 관계에 대한 연구(Barlow, 2003) 등 수 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들은 궁극적으로 해안대수층을 해수침투로부터 보호하면서 지하수를 효율적으로 이용하기 위한 최적의 방법과 기술개발을 목적으로 하고 있다.

제주도의 경우, 연평균 강수량이 약 2,000mm에 달하는 다우지역임에도 불구하고(제주도·한국수자원공사, 2003), 투수성이 높은 수문지질학적 특성으로 인하여 생활용수는 물론 농업용수까지 모든 용수를 지하수에 의존하고 있다. 2006년 말 현재 제주도내에 개발된 지하수 관정은 총 4,965공에 이르고 있으며, 지하수 개발량은 지하수 적정개발량(1,768천 m^3 /day)의 92%인 1,627천 m^3 /day에 달하고 있다(제주특별자치도 수자원본부 업무보고 자료, 2007. 2). 특히, 지하수 관정의 대부분은 해안 저지대에 집중적으로 개발되어 있어 갈수기 때 지하수 과다 사용에 따른 해안대수층으로의 염수침입이 우려가 제기되고 있다(제주도, 2004).

따라서, 제주특별자치도에서는 2001년 제주도 동부지역을 시작으로 ‘해수침투 감시 관측망 설치사업’을 연차사업으로 추진하여 2007년까지 41개소에 관측망을 설치해 운영하고 있으며, 이 사업으로부터 많은 연구 성과가 발표되었다(윤정수, 1986; 박윤석 외, 2002; 고기원 외, 2003a, b, c; 고기원 외, 2004; 이봉주 외, 2004; 이봉주 외, 2006; 고기원 외, 2005; 황세호 외, 2005a, b; 황세호 외, 2006). 그러나, 이들 연구의 대부분은 제주도 동부지역에 설치된 해수침투 감시 관측정

을 대상으로 수행되었으며, 서부지역의 해안대수층을 대상으로 한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

한림-한경-대정을 포함하는 제주도 서부지역은 연평균 강수량이 1,000~1,200 mm 범위로서 제주도 전체 평균보다 약 700~800mm 정도 적을 뿐만 아니라, 상습적인 가뭄피해가 발생하고 있어 농업용 지하수 이용량이 도내에서 가장 많은 지역으로 알려져 있다. 특히, 이 지역에서는 마늘 파종 및 발아기인 8월말에서 11월 사이 기간 동안에 농업용 지하수 관정을 집중적으로 가동함으로써 지하수위가 약 4~10m 정도 하강하는 현상이 발생하고 있다(고기원 외, 2006). 이처럼, 서부지역은 해안저지대의 지하수가 개발 밀도가 높고, 특정 시기에 지하수를 집중적으로 취수하는 현상이 반복되고 있어 장기간의 가뭄이 지속될 경우에는 지하수 함양량 부족으로 지하수위 하강 및 해수침투가 발생할 우려가 높은 취약성을 지니고 있다.

따라서, 본 연구는 제주특별자치도에서 서부지역에 설치한 해수침투 감시 관측정 및 지하수위 관측정 13개소를 대상으로 시추코아 지질주상도 해석, 지구물리검층 자료의 해석, 대수층별 대수성 시험 및 수질분석 자료해석 등을 통하여 서부지역 해안대수층의 수문지질학적 특성을 파악하는데 목적이 있다. 특히, 해수침투 감시 관측정을 대상으로 실시한 전기전도도, 온도, 자연감마선, 시추공경 등의 지구물리검층 자료와 시추코아 지질주상도와와의 대비를 통하여 이 지역 해안대수층의 발달위치 및 구성지질, 담-염수 경계면의 형성위치 등을 파악함은 물론, 수문지질층서 설정의 가능성을 고찰하는데 중점을 두고 있다.

II. 연구지역의 개요

2-1. 지형

연구지역은 행정구역상 제주시 한림읍에서 서귀포시 대정읍에 이르는 제주도 서부해안지역으로서 제주도의 유역 구분(제주도·한국수자원공사, 2003)에 의하면, 한림-한경-대정유역에 속하는 지역이다(Fig. 1).

지형적으로 보면, 연구지역은 제주도의 장축방향에서 서쪽 끝에 위치하는 지역으로서 지형경사가 완만한 특징을 나타낸다. 연구지역내에는 모슬봉을 비롯하여 당산봉, 수월봉, 송악산, 농남봉 등 다수의 분석구들이 위치해 있으며, 이들 분석구를 제외하면 해안에서 해발 50m 등고선까지의 거리는 3~4km 범위로 매우 완만한 편이다. 한림읍 옹포천을 제외하면 중산간지역 이상에서 발원하여 해안까지 이르는 하천은 발달하지 않는다(문덕철, 2004). 그렇지만, 국지성 집중호우 또는 장마철 폭우에 의한 침수 및 범람 피해를 방지하기 위해서 설치한 인공배수로(정차연, 2002)가 몇 군데 분포하고 있으며, 대표적인 배수로는 월림지구, 고산지구, 신도지구가 있다

해안선의 대부분은 용암류가 바닷가까지 확장함으로써 발달한 암석해안을 이루고 있으며, 급격한 단애를 이루는 곳은 거의 찾아 볼 수 없다. 해안 사구층은 한림읍 협재리 부근, 안덕면 화순해수욕장 부근, 그리고 대정읍 하모리지역에 분포하고 있다. 이 중 협재리 사구층은 협재해수욕장에서 정월오름 사이에 2km의 폭으로 약 3km의 연장을 갖고 분포한다(한국자원연구소, 2000). 이 사구층은 대부분이 미고결의 조개껍질편으로 구성되어 있고, 두께는 약 4m 정도이나 변화가 심한편이다. 화순해수욕장에서 산이수동에 이르는 구간에 분포하는 사구층은 해안을 따라 길게 분포하는데, 이 사구층의 두께는 약 5m에 이르며 해안을 따라 언덕지형을 이루고 있다. 이 지역의 사구층은 조개파편과 응회질 및 잔자갈 크기의 현무암편으로 구성되어 있으며, 미고결의 사구층에는 미약한 층리가 형성되어 있다(한국자원연구소, 2000).

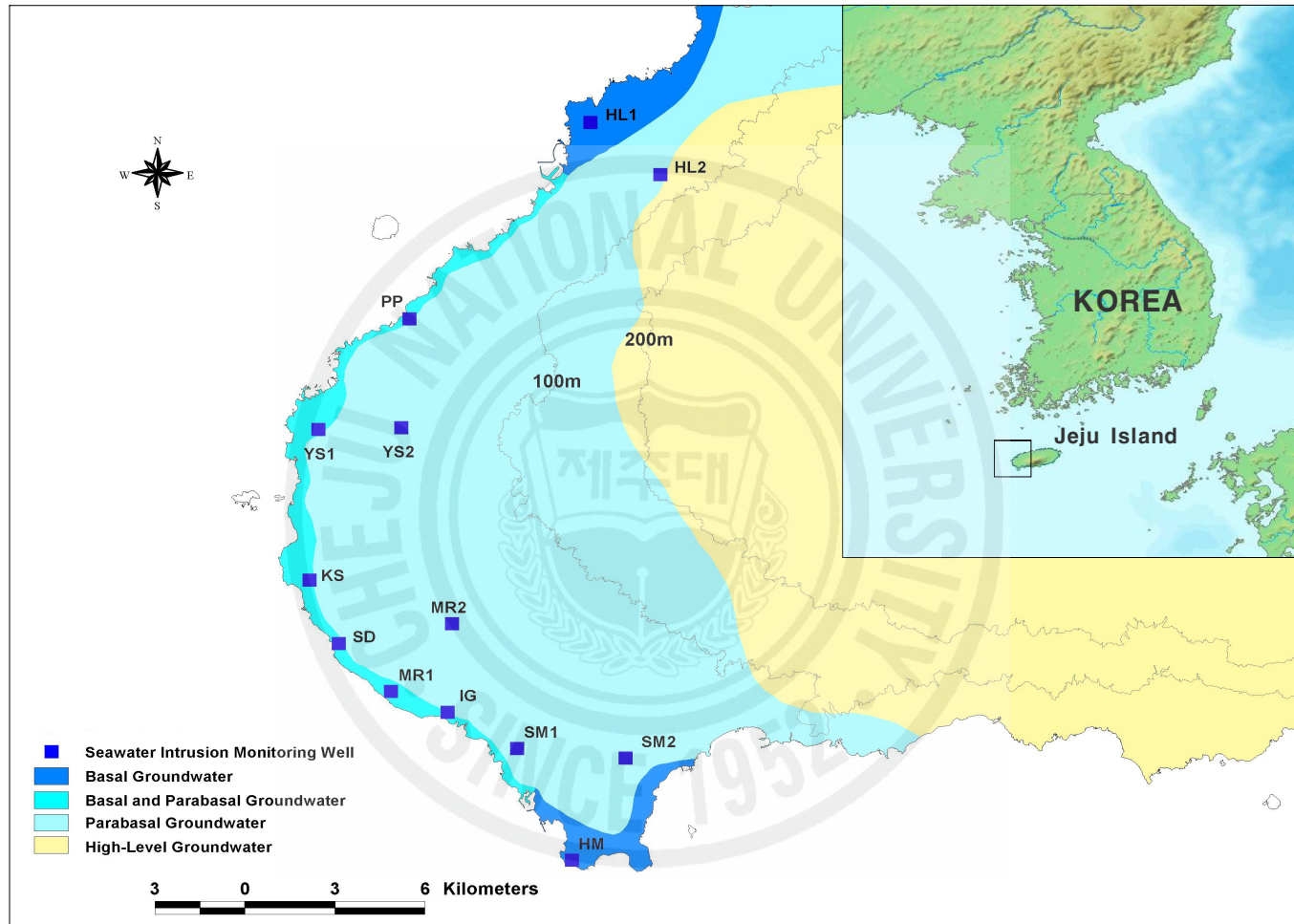


Fig. 1. Study area and location of monitoring wells, and groundwater occurrence types, western Jeju Island.

2-2. 수문지질

본 연구지역의 지질은 퇴적층, 화산암류, 화산쇄설암이 분포하고 있다(한국자원연구소, 2000). 퇴적층은 용암과 용암 사이에 협재한 황적색 혹은 회색의 소규모 스크리아성 니질퇴적암, 역암, 각력상 역암으로 구성되어 있다. 화산암류는 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암 및 조면암으로 분류되며, 이 중 조면암류는 관입상을 보여 높은 지형을 이루기도 한다. 화산쇄설암은 수성화산분출과 스트롬볼리분출에 의해 형성된 것으로 구분되는데, 수성화산 분출에 의해 형성된 응회암은 균산, 단산, 송악산, 당산봉, 수월봉을 이루고 있으며, 스트롬볼리 분출과 관련된 화산쇄설암은 분석구를 이루고 있다(Fig. 2; 한국자원연구소, 2000).

가. 용암류

본 연구지역의 용암류는 다른 암석이나 지층에 비하여 투수성이 높은 특징을 나타내고 있다. 용암류에 있어서 투수성을 높게 해주는 주요 요인으로는 아아 용암류에 수반되는 클링커층, 용암류와 용암류 사이의 접촉면을 발달하는 공간, 냉각절리, 고결되지 않은 분석, 용암터널의 붕괴로부터 생겨난 공동 등이다(고기원, 2001).

연구지역에 분포하는 용암류는 광해악현무암, 왕이매조면현무암, 병악현무암질조면안산암 등이 분포하고 있는데(한국자원연구소, 2000), 이들 용암류의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

광해악현무암은 연구지역에 가장 광범위하게 분포하고 있는 화산암으로서 회색 내지 암회색을 띠며, 1~10mm크기의 기공이 20% 정도 함유하고 있으나 노두에 따라 변화가 크며, 부분적으로 기공이 2cm 크기로 신장된 것도 관찰된다.

왕이매조면현무암은 월림-신평 꽃자왈용암류로 기재한 암석으로서 한림읍 이시돌 목장 남측 돌오름에서 시작되어 한경면 청수리와 한림읍 월림리, 그리고 대정읍 신평리에 이르는 지역에 분포하고 있다(송시대, 2000). 왕이매조면현무암은 회색 내지 암회색을 띠며, 대체로 치밀 견고하고, 부분적으로 길게 신장된 기공이 함유되어 있다(Fig. 2).

병악현무암질조면안산암은 애월읍의 금성리와 조수리, 서귀포시의 화순리와

감산리 일대에 분포하고 있으며, 분석구 형성 후에 용암이 분석구로부터 흘러 나와 형성된 암석으로 다량의 각력을 함유한 것이 특징이다. 각력으로 구성된 이 암석에는 용암피가 불규칙하게 분포하며, 지표면에서는 흔히 흑갈색 내지 흑적색의 암석을 띄는 클링커 및 스코리아만 관찰되기도 한다(송시태, 2000).

송악산을 구성하는 조면현무암은 비교적 치밀한 조직을 보이며, 곳에 따라 주상절리가 관찰되기도 한다. 이 암석에는 5mm 크기의 휘석, 장석, 감람석이 소량 산점하며, 부분적으로 2cm 크기의 초염기성 암편이 포획되어 소량 나타나며 길게 신장된 2cm 크기의 기공이 드물게 나타난다(한국자원연구소, 2000).

나. 퇴적암류

당산봉응회암은 한경면 고산리 자구내포구에 분포하고 있으며, 현무암질 유리 질응회암으로 황갈색 내지 담갈색을 띄고, 화산사와 잔자갈 크기의 화산력, 소량의 화산회와 화산괴로 구성되어 있다. 이 응회암은 잘 고결되어 있으며, 층리 발달이 양호하다. 화산괴와 조립의 화산력은 주로 미립질 현무암으로 5mm 크기의 휘석이 소량 함유되어 있다.

송악산응회암은 송악산 기저부를 이루는 암석으로서 주로 모래 크기의 현무암질 화산회 입자와 자갈 크기의 현무암질 및 이질 암편들로 구성되어 있으며, 해안 절벽 노두를 따라 평행층리, 파동형 층리, 거대연흔, 탄낭, U-자형 하도구 등의 퇴적구조들이 발달되어 있다(한국자원연구소, 2000).

2-3. 강수량

제주도는 우리나라에서 비가 가장 많이 내리는 다우지역 중의 한 곳이다. 해안 저지대에 위치한 제주지방 기상청과 3개 기상대(제주, 서귀포, 고산, 성산포)에서 측정된 30년 평균 강수량은 1,567mm이지만, 중산간지역을 포함한 제주도 전역의 1993~2002년의 강수량은 1,975mm로서 전국평균 1,283mm보다 무려 692mm가 더 많다(건설교통부, 한국수자원공사, 2001). 또한, 해발 100m 증가함에 따라 연

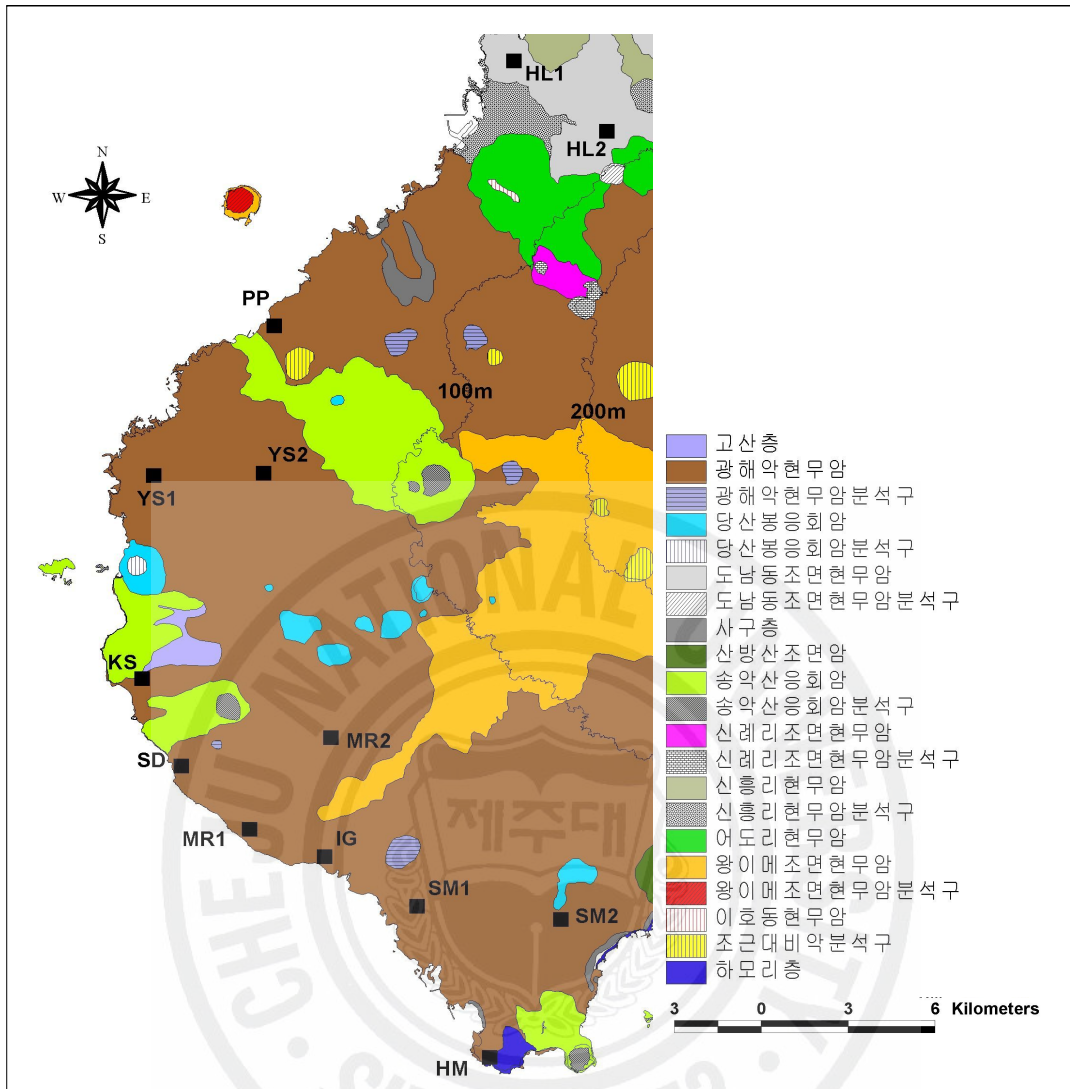


Fig. 2. Geological Map of the Study Area(KIGAM, 2000).

강수량은 약 273mm씩 증가하는 현상을 나타내고 있으며, 해발 200m 이하 지역은 연간 1,651mm, 해발 200~600m의 중간간 지역은 2,184mm, 해발 600m 이상 지역은 2,784mm이다(제주도·한국수자원공사, 2003).

표 1은 고산지역의 1973년~2006년까지 월별 강수량을 나타낸 것이다(고산기상대의 관측자료: 1987~2007, 대정관측소: 1973~1987). 분석기간 동안 고산지역의 연평균 강수량은 1,179.7mm로서 제주도 해안지역 평균 1,567mm보다도 약 380mm가 적은 편이다. 연평균 강수량의 46.5%인 549.6mm가 여름철에 집중되고 있고, 분석기간 중 최대 연강수량은 1999년 1,874.5mm이며, 최저 연강수량은 1984년

703.2mm로서 강수량 변동 폭은 1,173.1mm에 이르고 있다. 이처럼, 고산을 포함하는 서부해안지역 강수량이 제주도내에서 가장 적음으로서 강수량부족에 의한 가뭄 현상도 자주 발생하고 있다. 특히, 2005년의 경우 마늘과종기인 9월 강수량이 10.5mm에 불과하여 농업용 지하수 관정을 지속적으로 가동한 결과, 일부 지하수 위 관측정의 수위가 일시적으로 해수면 하까지 하강하는 현상이 발생하기도 하였다(고기원, 2006).



Table 1. Monthly and annually precipitation data of kosan area, western part of Jeju Island.

Year	Jan	Feb	Mar	Apri	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Total
1973	82.0	98.0	37.8	173.3	238.0	49.4	95.0	94.1	153.4	112.7	25.1	24.0	1182.8
1974	48.8	59.3	63.2	107.0	176.0	135.8	351.4	167.5	10.5	17.0	23.1	39.0	1198.6
1975	34.9	42.2	70.4	175.5	111.5	237.5	103.0	85.5	116.5	118.0	61.0	70.9	1226.9
1976	13.4	159.0	73.2	119.0	198.0	301.5	63.5	124.0	109.5	91.0	30.3	45.5	1327.9
1977	19.3	17.4	96.9	205.5	180.0	224.5	107.5	118.5	111.0	8.5	46.0	31.9	1167.0
1978	51.7	30.6	52.7	52.5	17.0	219.5	66.5	128.5	143.5	45.5	54.0	37.7	899.7
1979	39.0	127.3	82.4	133.0	68.0	324.5	401.0	316.0	69.0	11.0	64.7	82.8	1718.7
1980	69.1	53.1	88.0	110.0	228.0	102.0	229.5	171.0	48.5	73.0	123.0	47.5	1342.7
1981	28.4	56.8	57.0	89.5	68.5	312.3	79.0	366.4	141.9	133.3	70.7	14.3	1418.1
1982	27.3	29.7	81.7	98.1	59.3	28.4	195.6	153.0	50.6	15.0	135.9	26.2	900.8
1983	34.2	42.4	92.0	93.7	112.9	57.8	165.4	95.9	232.2	37.2	22.5	17.2	1003.4
1984	9.6	28.8	38.8	73.0	49.0	166.6	93.4	71.4	99.9	6.0	21.6	45.1	703.2
1985	16.7	59.0	118.1	78.3	106.8	453.0	294.4	197.1	101.7	180.4	53.8	41.3	1700.6
1986	31.8	7.0	44.7	121.4	88.7	218.2	359.1	108.5	119.0	58.5	22.3	91.7	1270.9
1987	49.5	40.9	124.4	89.6	85.3	171.8	595.9	279.5	41.5	8.0	30.1	11.3	1527.8
1988	14.6	18.6	95.4	80.5	86.4	101.5	67.1	207.4	36.9	4.0	8.6	14.5	735.5
1989	88.8	91.9	43.6	29.5	67.5	104.6	168.1	108.1	273.2	20.2	75.9	10.1	1081.5
1990	51.2	113.7	55.2	102.8	97.8	205.8	98.4	118.9	170.9	40.7	90.9	16.0	1162.3
1991	33.6	47.3	116.8	33.3	368.2	269.9	334.9	38.6	194.3	9.2	31.4	26.5	1504.0
1992	52.8	15.9	134.4	115.4	96.5	76.1	61.8	326.6	133.6	4.0	56.6	33.9	1107.6
1993	32.8	66.6	90.7	23.6	132.3	160.7	86.9	354.8	40.8	27.0	94.2	41.0	1151.4
1994	37.5	20.1	53.2	152.6	85.1	123.2	20.2	208.2	50.2	48.7	11.8	23.5	834.3
1995	36.3	61.2	40.8	82.7	136.2	79.7	341.4	86.0	49.3	60.0	20.6	8.8	1003.0
1996	26.1	16.4	91.6	48.2	63.3	216.9	56.5	175.5	14.6	36.3	44.5	47.5	837.4
1997	13.5	14.9	55.2	138.8	60.0	41.5	119.7	161.8	12.6	5.0	197.0	55.1	875.1
1998	81.6	38.0	96.6	164.8	85.2	210.9	54.6	42.4	218.0	37.4	12.7	8.2	1050.4
1999	96.6	34.5	110.8	65.3	117.1	120.3	575.5	501.3	171.7	36.6	21.8	23.0	1874.5
2000	57.7	7.4	37.2	28.5	67.7	121.5	94.4	229.2	198.2	71.3	90.0	10.5	1013.6
2001	82.2	59.7	9.8	47.3	44.7	237.1	163.3	196.7	18.7	97.8	57.4	99.0	1113.7
2002	28.8	49.4	61.1	70.6	96.1	52.1	273.7	308.7	111.0	76.6	30.3	67.4	1225.8
2003	37.3	42.0	73.2	133.1	249.1	253.3	265.8	244.2	79.6	32.5	80.6	12.3	1503.0
2004	16.4	70.2	72.9	118.3	169.4	85.3	48.1	363.7	239.5	24.5	26.6	35.0	1269.9
2005	33.2	52.7	96.8	53.7	81.5	35.6	165.0	130.3	10.5	45.0	93.1	30.6	828.0
2006	49.3	41.3	40.1	117.7	144.7	203.5	407.5	100.9	102.6	44.8	70.1	27.8	1350.3
Mean	41.9	50.4	73.4	97.8	118.7	167.7	194.2	187.7	108.1	48.1	55.8	35.8	1179.7
Max	96.6	159.0	134.4	205.5	368.2	453.0	595.9	501.3	273.2	180.4	197.0	99.0	1874.5
Min	9.6	7.0	9.8	23.6	17.0	28.4	20.2	38.6	10.5	4.0	8.6	8.2	703.2
Rang	87.0	152.0	124.6	181.9	351.2	424.6	575.7	462.7	262.7	176.4	188.4	90.8	1171.3

※ 1973~1987 data : Daejeong area observational data

2-4. 물수지

표 2는 제주도 전체 및 서부지역 3개 유역의 유효 지하수 함양량의 물수지를 나타낸 것이다(제주도·한국수자원공사, 2003). 연구지역의 물수지를 유역별로 구분하여 살펴보면, 평균 강수량의 경우 한경유역이 1,175mm로 가장 적은 반면, 한림과 대정유역은 각각 1,375mm와 1,314mm로 비슷한 편이다. 수문총량은 유역면적이 넓은 한림유역이 186백만m³/yr으로 가장 많은 반면, 유역면적과 강수량이 가장 적은 한경유역은 111백만m³/yr을 나타내고 있다. 또한, 증발산량은 대정과 한림유역이 각각 75백만m³/yr과 83백만m³/yr으로 비슷하지만, 한경유역의 경우 59백만m³/yr으로 가장 적다. 직접유출량은 한림유역이 22백만m³/yr으로서 수문총량의 11.8%이고, 대정유역은 11백만m³/yr(6.7%), 한경유역 8백만m³/yr(7.2%)이다. 지하수 함양량은 대정유역과 한림유역이 각각 수문총량의 45.6%(72백만m³/yr)와 43.5%(81백만m³/yr)인 반면, 한경유역은 39.6%(44백만m³/yr)으로서 지하수 함양율이 가장 적다(제주도·한국수자원공사, 2003).

결론적으로 연구지역 3개 유역의 수문총량은 제주도 전체의 13.3%(455백만m³/yr), 지하수 함양량은 12.5%(197백만m³/yr)를 차지하고 있다. 3개 유역의 면적은 도 전체 유역면적의 20.3%를 차지하지만 강수량이 제주도 동부지역의 수문총량 28.1%(964백만m³/yr)과 지하수 함양량 33.5%(529백만m³/yr)보다 적기 때문에 수문총량과 지하수 함양량이 차지하는 비율은 낮게 나타나고 있다.

Table 2. Water Budget Data of Western Watershed and Jeju Island.

Districts	Area (km ²)	Annual Mean Rainfall(mm)	Total Rainfall (10 ⁶ m ³ /yr)	ET (10 ⁶ m ³ /yr)	Runoff (10 ⁶ m ³ /yr)	Groundwater Recharge	
						10 ⁶ m ³ /yr	10 ³ m ³ /day
Whole Island	1,719	1,975	3,427	1,138	708	1,581	4,329
Deajeong	120	1,314	158	75	11	72	197
Hankyung	94	1,175	111	59	8	44	120
Hallim	134	1,375	186	83	22	81	222

〈출처: 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ), 제주도·한국수자원공사, 2003〉

2-5. 지하수 개발 · 이용현황

표 3은 2006년 말 현재 연구지역 3개 구역의 지하수 개발현황을 나타낸 것이다. 전체적으로 1,251개의 지하수 관정이 개발되어 있으며, 양수능력은 436,938m³/day에 이르고 있다(Fig. 3). 연구지역에 개발된 지하수 관정 수는 제주도 전체 개발된 관정(4,965공)의 25%에 이르는 것이며, 양수능력은 27%에 해당하는 것으로서 지하수가 과다하게 개발된 지역임을 알 수 있다(제주특별자치도 수자원본부 내부자료).

구역별 지하수 관정 개발현황을 살펴보면, 대정구역이 782공 · 210,324m³/day으로서 3개 구역 중 가장 많으며, 특히 해발 50m 이하의 해안 저지대에 지하수가 집중적으로 개발되어 있음을 알 수 있다. 또한, 한경구역과 한림구역의 경우도 해안저지대 지역에 관정이 집중 개발되어 있다.

Table 3. The present state of groundwater development in the study area.

(Unit : Number of wells, m³/day)

Areas	Total		> El. 50m		El. 50~100m		El. 100~200m		< El. 200m	
	Well	Yield	Well	Yield	Well	Yield	Well	Yield	Well	Yield
Total	1,251	436,938	761	232,737	263	94,388	170	76,707	57	33,106
Hallim	203	97,463	80	31,285	32	17,456	54	27,343	37	21,379
Han-kyung	266	129,151	132	65,603	68	30,253	54	27,015	12	6,280
Dae-jeong	782	210,324	549	135,849	163	46,679	62	22,349	8	5,447

<자료 : 제주특별자치도 수자원본부 내부자료>

연구지역에 개발된 지하수 관정의 용도를 살펴보면(Table 4), 농업용 관정이 전체의 85%인 1,069공이며, 양수능력 역시 농업용이 전체의 87%를 차지하고 있어 연구지역에 개발된 지하수 관정 대부분은 농업용임을 알 수 있다. 생활용 관정은 132개소에 불과하고, 공업용도 33개소에 지나지 않는다.

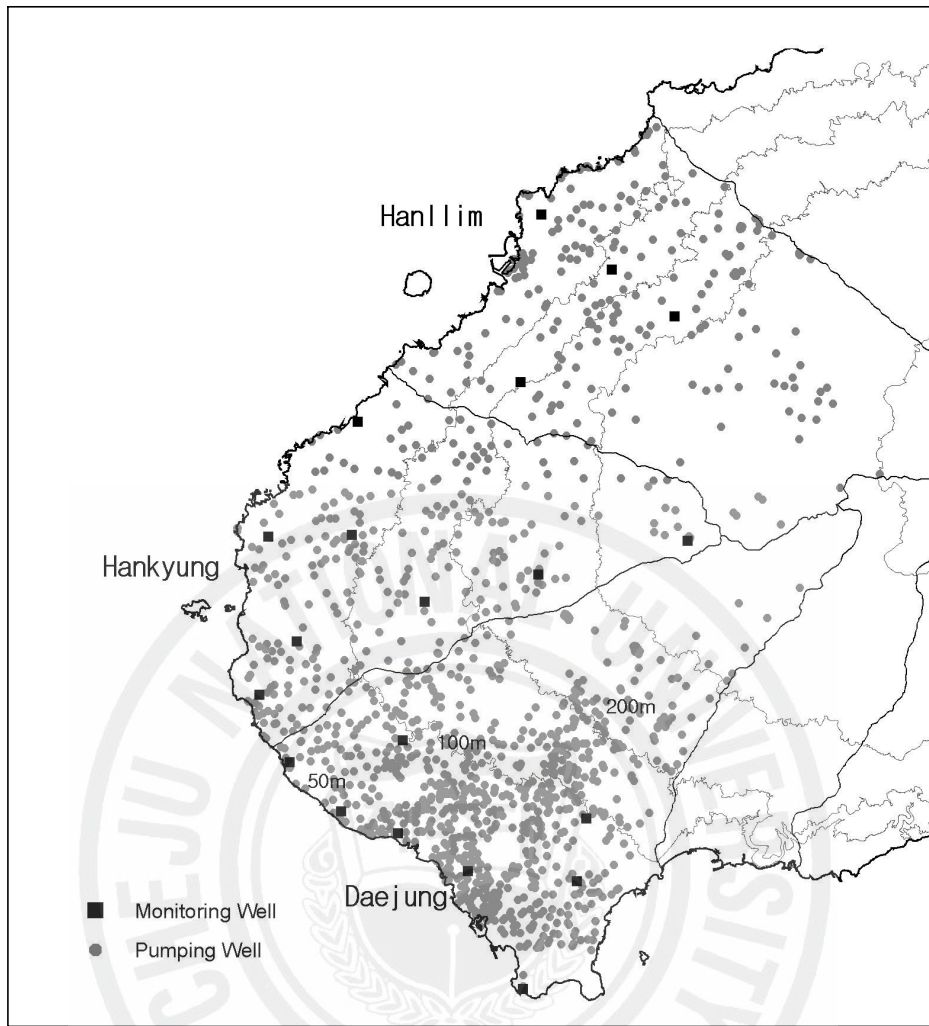


Fig. 3. The Distributions of groundwater wells in study area.

Table 4. Classification of groundwater wells in the study area.

(Unit : Number of wells, m³/day)

Areas	Total		Domestic		Agriculture		Industry		Others	
	Total	Yield	Well	Yield	Well	Yield	Well	Yield	Well	Yield
Total	1,251	436,938	132	47,309	1,069	381,198	33	8,431	17	-
Hallim	203	97,463	61	21,550	123	72,529	14	3,384	5	-
Han-kyung	266	129,151	17	9,937	239	117,270	4	1,944	6	-
Dae-jeong	782	210,324	54	15,822	707	191,399	15	3,103	6	-

Ⅲ. 연구방법

3-1. 연구대상 시추공 선정

본 연구는 제주특별자치도 수자원본부에서 「제주도 해수침투 감시관측망 설치사업」의 일환으로 서부지역에 설치한 13개 관측정과 3개 지하수위 관측정을 대상으로 실시하였다. 해수침투 감시 관측정 13공 중 8공(용수1·2, 무릉1·2, 한림1·2, 상모1·2)은 2004년~2005년도에 설치되었고, 나머지 5공(판포, 신도, 고산, 일과, 하모)은 2007년도에 설치되었다.

표 5는 본 연구대상 관측정의 표고, 착정심도, 해안으로부터의 거리, 물리검층 심도 등 일반적인 현황을 나타낸 것이다(Fig. 1). 해수침투 감시 관측정은 해안과 내륙 쪽에 설치되었으며, 시추심도는 상모2호공(해수면 하 302m)을 제외하면, 해수면 하 105m~178m 범위에 이른다. 해수면 하 100m 이하까지 시추조가 이루어진 것은 담-염수 경계면의 존재 여부를 확인함과 아울러, 담-염수 경계면이 형성된 경우에는 계절적인 변화를 모니터링하기 위한 것이다. 또한, 심부시추를 통하여 지하지질분포와 지하수 부존 및 산출특성에 관한 기초적인 정보를 축적하기 위해서이다.

3-2. 물리검층

연구대상 관측정 13공 중 2007년에 착정된 5개 공에 대해서는 온도검층, 전기전도도검층, 자연감마선, 공경검층, 전기검층을 실시하였고, 제주특별자치도 수자원본부에서 각 관측정에 대해 보유하고 있는 온도 및 전기전도도자료를 이용하였는데, 전기전도도가 잘 대비되는 고산, 일과, 신도, 한림 관측정의 자료를 활용하였다.

온도 및 전기전도도검층, 자연감마선검층, 자연전위검층, 단극저항검층, 공경검층에 사용된 장비는 미국의 Mount Sopris Ltd.사의 MGXII 지상제어 본체와 윈치 그리고 Sonde는 2PCA, 2PGA, 2IDA를 사용하였다. 온도검층과 전기전도

도검층은 공내수의 교란에 따른 영향을 최소화하기 위해 물리검층 중 가장 먼저 실시하며, 온도 및 전기전도도는 하향식 검층법을 실시하였고, 자연감마선, 공경, 전기비저항은 상향식 검층방법으로 실시하였다.

본 연구의 검층에 온도 및 전기전도도에 사용된 Sonde 2IDA의 측정범위는 $-1\sim 50^{\circ}\text{C}$, $0\sim 64\text{ms/cm}$ 이고, 공경검층에 사용된 Sonde 2PCA의 측정범위는 $57\text{mm}\sim 736\text{mm}$ 이다. 자연전위와 단극저항, 자연감마선에 사용된 Sonde 2PGA의 측정범위 중 자연감마선은 $0\sim 100,000\text{cps}$, 자연전위는 $\pm 1,500\text{mV}$, 단극저항은 $1\sim 5,000\text{ohms}$ 의 범위이다.

Table 5. Inventory of monitoring wells in the study area.

Well Name	Elevation (m)	X	Y	Drilled Depth(m)	EL. Depth(m)	Logging Depth(m)	Distance From Coast(m)	Remarks
YS-1	10.94	123,080	32,154	155	-144.1	77.4	838	Seawater intrusion monitoring well
YS-2	37.44	125,839	32,219	185	-147.9	141.0	2,650	
HL-1	14.16	132,128	42,825	121	-106.8	106.3	599	
HL-2	59.12	134,461	41,014	185	-125.9	182.0	3,112	
MR-1	11.12	125,414	23,048	160	-149.8	126.6	279	
MR-2	45.83	127,524	25,405	172	-126.2	141.5	3,220	
SM-1	17.86	129,693	21,071	171	-153.1	141.1	684	
SM-2	22.90	133,304	20,734	325	-302.4	309.1	1,413	
HM	7.08	131,518	17,182	150	-142.9	100	119	
PP	14.44	126,104	35,998	140	-125.6	94	190	
SD	10.30	123,760	24,714	190	-179.7	179	228	
KS	8.45	122,786	26,924	146	-139.6	86	445	
IG	15.00	127,378	22,332	146	-131.0	120	202	

3-3. 대수성시험 및 수질조사

연구대상의 13개 관측정의 대수층별 수리상수 파악과 수질조성 및 특성을 파악하기 위하여 제주특별자치도 수자원본부에서 실시한 대수층별 양수시험 자료와 수질분석 자료를 활용하였다.

양수시험은 관측정별로 최소 2회이상 실시되었는데, 대수층의 지하수 산출능

력을 파악하기 위해 제1차 시험은 제1대수층 하부까지 착정한 후 실시하였고, 제2차 및 3차시험은 팩커를 이용해 상·하부 대수층을 차단시키 다음 실시하였으며, 최종적으로 일정양수율 시험을 실시하였다. 또한 투수량계수(m^2/day)와 수리전도도(m/day)는 HydroSOLVE Inc사에서 개발한 AQTESOLV 윈도우용 버전 2.5 전산 프로그램을 이용하여 Unconfined와 Confined 조건에서 Cooper-Jacob(1946)의 공식을 적용하여 산출하였다.

수질분석은 각 관측정에 대한 대수층시험 진행과정에서 채수된 물시료를 제주특별자치도 보건환경연구원에 의뢰해 분석하였다. 수질분석항목도 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})과 음이온(Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- -N)의 8가지 성분에 대해 분석하였다.



IV. 결과 및 고찰

4-1. 연구지역의 지하지질

4-1-1. 시추공의 구성지질

본 연구에서는 제주특별자치도 수자원본부에서 작성한 연구 대상 13개 시추공의 지질주상도 자료를 이용하여 시추공별 지하지질 분포상태를 파악함과 아울러, 지질단면도 작성을 통해 연구지역의 개괄적인 지하지질 분포상태를 파악하였다. 13개 시추공의 공별 지하지질 분포상태를 서술하면 다음과 같다(부록 시추공별 지질주상도).

가. 한림지구

한림1호공

한림1(HL1) 시추공은 제주시 한림읍 수원리 표고 14.16m 지점에 위치하며, 해안선으로부터 약 599m 떨어져 있고 지표 하 121m(EL. -106m)까지 굴착되었다.

이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 104m까지는 33m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 104m부터 4.0m 두께로 산출되며 서귀포층 직 하부 지표 하 121m부터 U층(Unconsolidated Deposits; 고기원, 1997)이 분포한다.

화산암류는 육안 상으로 볼 때 OB(Olivine Basalt; 감람석현무암)와 AFOB(Acicular Feldspar Olivine Basalt; 침상장석감람석현무암)로 이루어져 있으며, 매수는 9매이다. 지표 하 13.5~15m에서 스킨리아질 사암층이 1.5m의 두께로 분포하고 있고 특히, 지표 하 94.5~104m에서 유리쇄설성 각력암층(Hyaloclastite breccias)이 분포하고 있는데, 이 유리쇄설성 각력암층은 뜨거운 용암이 물과 만나서 급속히 냉각될 때 파쇄된 파편이나 또는 각력으로 이루어져 있다(cas and wright, 1987). 유리쇄설성 각력암층은 클링커층과 같이 공극율이 높기 때문에 지하수가 유동할 수 있는 좋은 투수층이 되고 있다.

한림2호공

한림2(HL2) 시추공은 제주시 한림읍 상대리 표고 58.0m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 3,112m 떨어져 있으며, 지표 하 190m(-130.8m)까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 125m까지는 다양한 4.5~27.5m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 125m부터 56.5m 두께로 산출되며, 서귀포층 직 하부 지표 하 181m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 육안상으로 볼 때 OB, AFOB, AOB(Augite Olivine Basalt; 감람석현무암), PEB(Porphyrific Feldspar Basalt; 반상장석현무암)로 이루어져 있다. 또한, 지표 하 46~54m 구간에 토양층과 사암층이 형성되어 있으며, 지표 하 104~125m 구간은 유리쇄설성 각력암층도 분포한다.

나. 무릉지구

무릉1호공

무릉1(MR1) 시추공은 서귀포시 대정읍 영락리 표고 10.82m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 279m 떨어져 있으며 지표 하 160m(EL. -149.8m)까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 61m까지는 3.5~18m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 66~129m의 63m두께로 산출되며 서귀포층 직 하부 지표 하 129m부터 U층이 분포한다.

서귀포층 직상위에는 5m 두께로 원마도가 좋은 자갈층이 분포하고 있으며, 지표 하 16~32m 구간에는 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있다. 이 시추공의 지하지질에서 가장 특이한 점은 지표 하 72~87m까지 15m 두께로 조면질안산암(Trachyandesite; TA)이 분포하고 있다는 것이다. 연구대상 13개 시추공 중에서 서귀포층 상부에 조면질 화산암류가 분포하고 있는 것은 이 시추공 밖에 없으며, 나머지 시추공에서는 서귀포층 상부에 현무암질 화산암류가 분포하고 있다.

무릉2호공

무릉2(MR2) 시추공은 서귀포시 대정읍 무릉리 표고 45.53m 지점에 위치하고,

해안선으로부터 약 3,220m 떨어져 있으며 지표 하 195m까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 92m까지는 1.5~24m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 98~145m까지 47m의 두께로 산출되며 서귀포층 하부 지표 하 166m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 AFOB로 이루어져 있으며, 화산암류 사이에는 토양층이 분포하고 있는데, 지표 하 32~32.5m, 46~46.5m, 56.5~57m, 75~77m, 그리고 서귀포층 직 상위인 92~98m에 분포하고 있다. 이들 토양층은 황토색, 오렌지색 화산회층으로 이루어져 있다.

다. 상모지구

상모1호공

상모1(SM1) 시추공은 서귀포시 대정읍 동일리 표고 17.56m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 684m 떨어져 있으며 지표 하 170m(EL. -153.1m)까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 109m까지는 5~37m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 113~152m구간에 39m의 두께로 산출되며 서귀포층 하부 지표 하 152m부터 U층이 분포한다. 화산암류는 AFOB, OB, APB(Aphanitic Feldspar Basalt)로 이루어져 있고, 이들 현무암류 사이에는 지표 하 9~9.5m에 토양층이 분포하며, 지표 하 50~72m에 구간에는 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있다.

상모2호공

상모2(SM2) 시추공은 서귀포시 대정읍 상모리 표고 22.59m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 1,413m 떨어져 있으며 지표 하 325m(EL. -302.m)까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 54m까지는 5~10m 두께의 용암류 단위로 이루어진 용암류가 분포하고, 서귀포층은 지표 하 60~325m 구간에 분포하고 있다.

화산암류는 육안상으로 볼 때 AFOB와 AOB(Augite Olivine Basalt)로 분류되며, 총 8매로 이루어져 있다. 지표 하 54~60m에는 20cm 크기의 화강암역을 포

함한 Black sand가 분포하고 있다. 서귀포층은 265m의 두께로 이루어져 있고, 지표 하 259~262m 구간에는 3m 두께의 치밀질 화산암이 분포하고 있다. 이 시추공에서는 평균 해수면 하 302m 까지 시추가 이루어졌으나 U층을 포착하지는 못했다.

라. 용수지구

용수1호공

용수1(YS1) 시추공은 제주시 한경면 용수리 표고 10.64m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 838m 떨어져 있으며 지표 하 150m(EL. -144.1m)까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 76m까지는 1~12.5m 두께의 용암류 단위로 이루어진 용암류가 분포하고, 서귀포층은 지표 하 76~120m 구간에 44m의 두께로 산출되며 서귀포층 하부 지표 하 120m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 총 12매의 용암류 단위로 이루어져 있는데 모두 AFOB로 이루어져 있으며, 지표 하 19~20m에 황토색의 토양층이 분포하고 있다. 그리고 지표 하 42~49m와 63.5~76m 구간에는 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있다.

용수2호공

용수2(YS2) 시추공은 제주시 한경면 두모리 표고 37.13m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 2,650m 떨어져 있으며 지표 하 185m(EL. -147m)까지 굴착되었다. 이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 77m까지는 1~15m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 78~163m 구간에 85m의 두께로 산출되며, 서귀포층 하부 지표 하 163m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 13매의 용암류 단위로 이루어져 있는데 육안 관찰에 의하며, 모두 AFOB로 이루어져 있다. 지표 하 27~29m에 풍화된 현무암역을 포함하는 화산회층이 분포하고 있다. 그리고 지표 하 77~78m에는 3~5cm 크기의 원마도가 좋은 자갈층이 분포하고 있다.

마. 판포(PP)

이 시추공은 제주시 한경면 판포리 표고 12.0m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 170m 떨어져 있으며 지표 하 140m(EL. -125.6m)까지 굴착되었다.

이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 92m까지는 3.9~16m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 92~122m구간에 30m의 두께로 산출되며, 서귀포층 하부 지표 하 122m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 11매의 용암류 단위로 이루어져 있는데 육안관찰에 의하며 모두 AFOB로 분류된다. 화산암류 사이에는 지표 하 4.5~6.0m에 토양층이 분포하고 있고, 서귀포층은 미고결 패사와 이암으로 이루어져 있으며 두께는 30m이다. 지표 하 57~73m 구간에는 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있다.

바. 하모(HM)

이 시추공은 서귀포시 대정읍 하모리 표고 8.0m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 119m 떨어져 있으며 지표 하 150m(EL. -142.9m)까지 굴착되었다.

이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 66m까지는 1~11m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 69~142m구간에 73m의 두께로 산출되며, 서귀포층 하부 지표 하 142m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 11매의 용암류 단위로 이루어져 있으며, 지표 하 55~58m, 66~69m에 토양층이 분포하고 있다. 그리고 지표 하 19~27m에는 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있으며 서귀포층내인 지표 하 92~95.5m에는 절리가 발달한 치밀질의 TA가 3.5m 두께로 분포하고 있다.

사. 일과(IG)

이 시추공은 서귀포시 대정읍 일과리 표고 12.0m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 202m 떨어져 있으며 지표 하 146m(EL. -131.0m)까지 굴착되었다.

이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 100m까지는 3~27m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 100~140m구간에 40m의 두께로 산출되며, 서귀포층 하부 지표 하 140m부터 U층이 분포한다.

화산암류는 8매의 용암류 단위로 이루어져 있는데 육안관찰에 의하며 AFOB

와 OB로 분류된다. 49~52m와 67.5~68m에 토양층이 분포하고 있다. 그리고 지표 하 21~42m, 53~67.5m, 98~100m에 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있다. 이 시추공에서 특이할 만 한 점은 용암류의 단위 두께가 27m에 이르는 구간이 2회(지표 하 15~42m 및 68~95m)에 걸쳐 분포하고 있고, 유리쇄설성 각력암층도 3매가 분포하고 있다는 것이다.

아. 고산(KS)

이 시추공은 제주시 한경면 고산리 표고 8.0m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 445m 떨어져 있으며 지표 하 146m(EL. -148.6m)까지 굴착되었다.

이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 72m까지는 2.3~31m 두께로 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 72~145m구간에 73m의 두께로 산출되며, 서귀포층 하부 지표 하 145m부터 U층이 분포한다(Photo. 1).

화산암류는 총 9매의 용암류 단위로 이루어져 있으며, 지표 하 48~72m 구간에는 유리쇄설성 각력암층이 분포하고 있고, 서귀포층의 층후는 56m이다.

자. 신도(SD)

이 시추공은 서귀포시 대정읍 신도리 표고 10.0m 지점에 위치하고, 해안선으로부터 약 228m 떨어져 있고, 지표 하 190m(EL. -179.9m)까지 굴착되었다.

이 시추공의 지하지질 분포를 보면, 지표에서부터 80m까지는 2.5~31m 두께의 용암류 단위로 이루어진 화산암이 분포하고, 서귀포층은 지표 하 81~185m구간에 104m의 두께로 산출되며, 서귀포층 하부 지표 하 185m부터 U층이 분포한다.

화산암류 모두 AFOB로 이루어져 있는데, 매수는 9매이다. 지표 하 5~5.5m와 80~81m에는 각각 토양층과 스코리아 퇴적층이 분포한다. 특히, 이 시추공에서 유리쇄설성 각력암층은 지표 하 21~38m(두께 17m)와 52~72m(두께22m)에 분포하고 있고, 서귀포층 중간인 지표 하 134~140m에는 6m 두께의 치밀한 TA가 분포하고 있다.



Photo 1. Drilled core showing volcanic rocks and sedimentary deposits from Kosan monitoring well.

4-1-2. 지하지질 분포특성

연구지역의 지하지질 분포와 변화, 구성지질의 종류와 분포양상, 그리고 지하지질의 공간적 분포특성 등을 파악하기 위하여 연구대상 13개 시추공의 지질주상도 자료를 활용하여 Fig. 4와 같이 5개의 지질단면도를 작성하였다. 즉, 지질단면도는 한림에서 하모에 이르는 해안근처에 위치한 시추공을 연결한 A-A' 단면과 해안에서 내륙을 연결한 B-B' 단면 등 5개 단면도를 작성하였다(Fig. 5~6 참조).

연구지역의 지하를 구성하고 있는 구성지질은 크게 서귀포층 상부에 다양한 용암류 단위로 이루어진 화산암류, 서귀포층, U층, 화산암류 사이에 분포하는 퇴적층, 서귀포층내에 협재된 화산암류 등 5가지 종류로 구분할 수 있으며, 이들의 분포특성에 대해 개괄적으로 서술하면 다음과 같다.

가. 서귀포층 상부 화산암류

서귀포층 상부에는 화학적 조성은 물론 물리적 특성을 달리하는 용암류가 분포하고 있는데, 그 분포심도는 평균해수면 하 31.4m(SM-2)에서 91.1m(SM-1)범

위를 나타내고 있다. 다시 말해서, 본 연구지역에는 지표로부터 평균해수면 하 최소 31m에서부터 최대 91m까지 투수성이 좋은 용암류가 분포하고 있는데, 이는 제주도 동부지역의 용암류 분포심도(고기원, 1997; 고기원의 2인, 2005)와 비교할 때 60m~80m가 얕은 것으로서 동·서부지역 간에 지하지질구조가 차이가 있음을 보여주는 것이다.

용암류의 매수는 6~13매의 범위이며(평균10매), 용암류 단위의 두께는 5m~12m범위(평균9.0m)이다. 이는 평균 5~12m 두께의 용암류가 6~13회 흘렀다는 것을 의미하는 것으로서 서귀포층이 퇴적된 이후 연구지역에는 크게 6~13회 정도의 용암류가 쌓이면서 오늘날과 같은 지형이 형성되는 과정을 밝힌 것으로 해석된다. 용암류 단위의 최대 두께는 시추공별로 차이를 나타내어 10~37m 범위를 나타내는데, 서귀포층의 포착심도가 깊은 한림1호공, 일과, 상모1호공에서 최대두께를 보이고 있다. 이처럼 단위 두께가 30m에 이르는 두꺼운 용암류의 가운데 부분은 사진2에 제시된 바와 같이 매우 치밀 견고한 상태를 이룸으로써 지하수의 유동을 방해하는 저투수성 지층의 역할을 한다.

한편, 서귀포층 상부에 분포하는 용암류 중 특이한 것은 용암류가 바다로 유입되면서 생겨난 유리쇄설성 각력암층이다. 사진3은 무릉1호공의 지표 하 16m~32m 사이 구간에 16m 두께로 분포하고 있는 유리쇄설성 각력암층을 보여주는 것으로서, 이 층은 파쇄된 크고 작은 각력으로 이루어져 있기 때문에 전반적으로 투수성이 매우 높다. 이와 같은 유리질 쇄설성 각력암층은 한림1호공, 판포, 용수1호공, 고산, 신도, 무릉1호공, 일과, 상모1호공, 하모, 한림2호공 등에서 1매 내지 3매가 분포하고 있는데, 분포심도는 어떤 규칙성은 없으나 신도, 무릉1호공, 일과, 하모시추공에서는 대체로 해수면 하 10m~20m 범위에서 포착되고 있다. 유리쇄설성 각력암층의 분포심도는 이것이 형성될 당시의 고해안선의 위치는 물론 수심을 지시해준다는 점에서 화산층 서학적으로 큰 의미를 지닌다고 할 수 있다(제주도, 2002). 아울러, 수문지질학적 측면에서는 담수지하수 또는 염지하수가 이동할 수 있는 투수층 역할을 한다는 점에서 중요한 지층이라 할 수 있다.

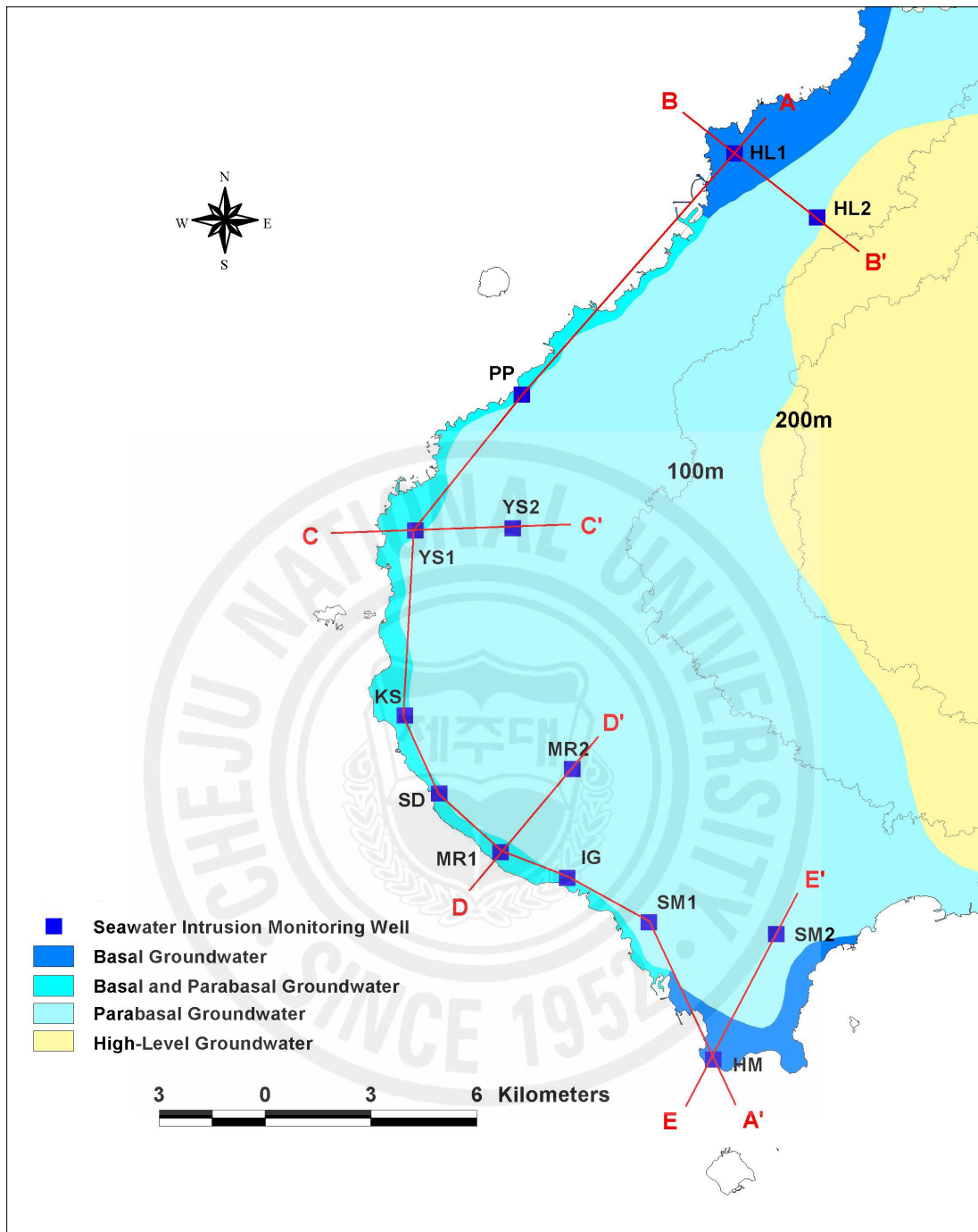


Fig. 4. Map showing deep dilling sites and cross-section lines in study area.

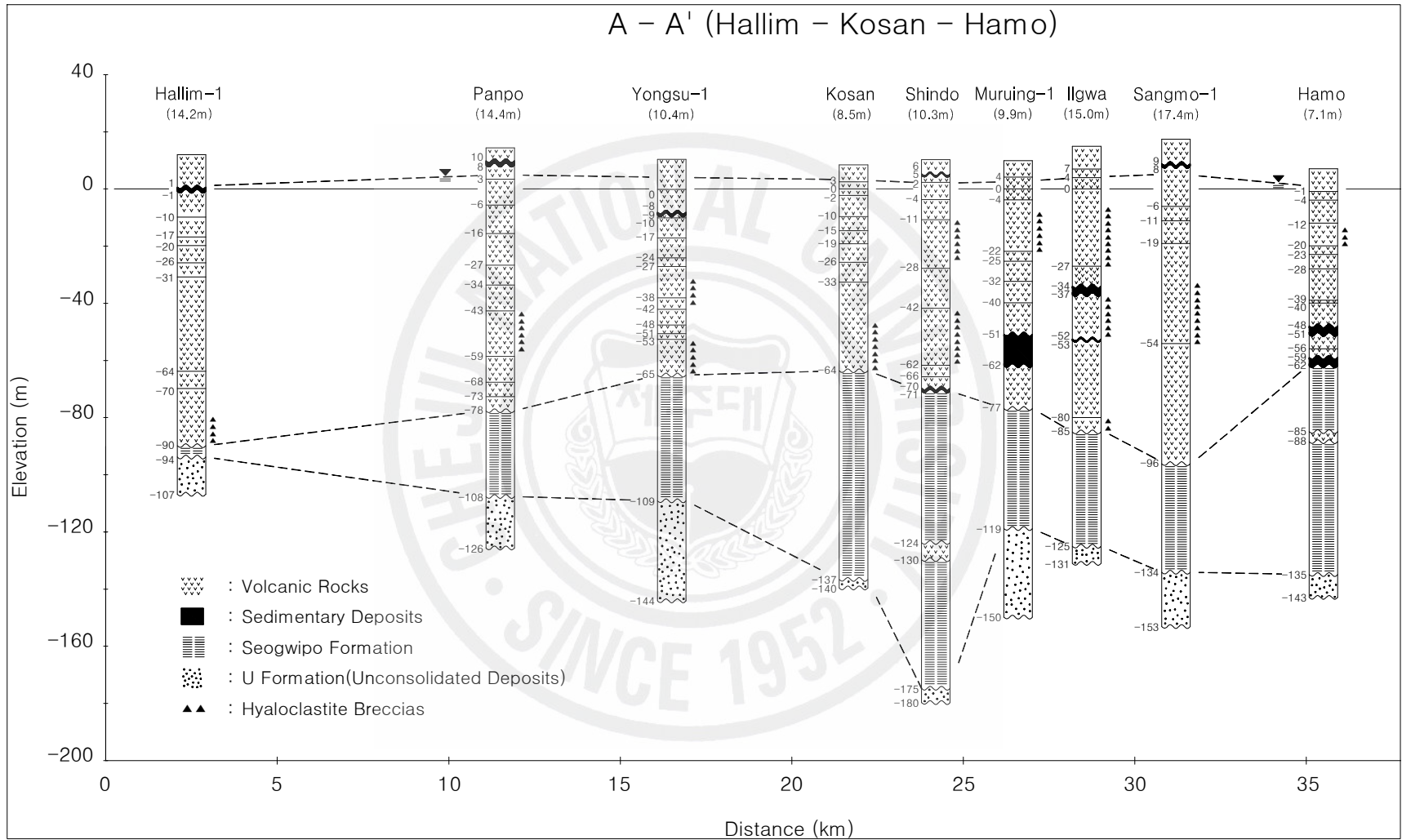


Fig. 5. Geologic cross-section of A-A' line in the study area.

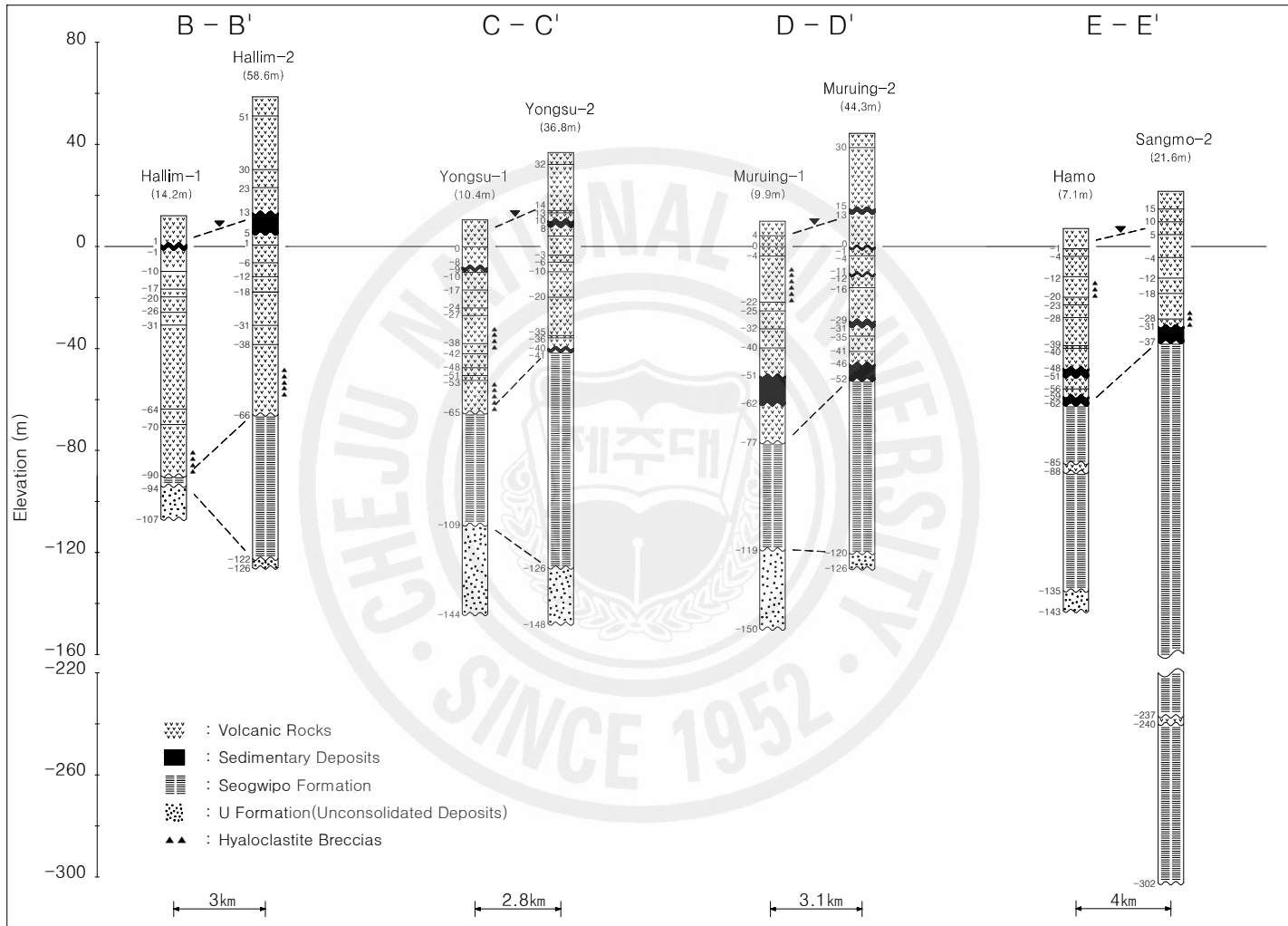


Fig. 6. Geologic cross-section of B-B', C-C', D-D', and E-E' line in the study area.

나. 용암류사이의 퇴적층

서귀포층 상부의 용암류 사이에는 심도를 달리하여 고토양층, 화산회층, 역암층, 사암층, 미고결 패사층 등의 퇴적층이 협재되어 있다. 이들 퇴적층의 두께는 대체로 1m 내외의 것에서부터 11m까지 다양한 편이며, 고결도에 있어서도 잘 고결된 것에서부터 고결되지 않은 상태로 존재하는 것까지 다양한 편이다. 이 같은 퇴적층은 화산활동 휴지기 동안 유수나 바람의 작용에 의한 운반·퇴적되었거나, 화산회층 같은 경우에는 인근의 분화구로부터 떨어져 퇴적된 것으로 사료된다. 무릉2호공의 지표 하 75~77m 사이에는 오렌지색의 화산회층이 존재하고, 일과시추공의 지표 하 67.5~68m 구간에는 미고결 패사층도 분포하고 있다.

수문지질학적 측면에서 용암류 사이에 협재된 퇴적층 중 고결내지 준고결의 퇴적층, 특히 점토성분을 많이 함유한 퇴적층은 지하수의 유동을 방해하거나 어렵게 하는 저투수성 지층의 역할을 한다. 더욱이, 이 같은 퇴적층이 대수층 상부에 위치하는 경우에는 이들 퇴적층은 하부의 서귀포층과 함께 가압층(Confined bed)의 역할을 하므로 대수층은 일종의 피압 지하수면을 형성하게 되는데(한정상, 2000), 연구지역을 포함한 서부지역의 지하수위가 동부지역에 비해 전반적으로 높은 위치에 형성되고 있는 것은 이 같은 지하지질학적인 차이에 의한 것으로 해석된다.

다. 서귀포층

본 연구지역에서 서귀포층은 평균해수면 하 37m에서부터 91m 범위에서 포착되고 있으며, 층후는 매우 가변적이다. 전반적으로 해안선 근처의 시추공에서 내륙으로 향하면서 이 층의 포착심도는 상승하는 경향을 나타내고 있다. 공간적으로 볼 때에는 한림1호공에서 판포, 용수, 고산시추공 쪽으로 오면서 점진적으로 포착심도가 상승하다가 고산시추공을 기점으로 신도·무릉1호공·일과·상모1호공 쪽을 향해 다시 포착심도가 점차 낮아지는 경향을 보이고 있다. 다시 말해서, 연구지역에서 서귀포층의 분포상태는 고산 해안가를 중심으로 동-서 방향으로 낮아지는 분포형태를 보여주고 있다(Fig. 5).

본 연구대상 13개 시추공 중에서 신도·하모·상모2호공에서 서귀포층 내에 치밀질의 화산암류가 분포하고 있음이 확인되었다. 시추공별로 보면, 신도의 경우



Photo 2. Drilled core showing massive volcanic rocks from Sangmo 1 Monitoring Well.



Photo 3. Hyaloclastite breccias from Murung 1 in 16~32m.

평균해수면 하 124~130m 사이에 6m의 두께로 분포하고 있고, 하모시추공에서는 평균해수면 하 85~88m(두께 3m)에, 상모2호공에서는 평균해수면 하 237~240m(두께 3m)에 분포하고 있다. 사진2는 하모시추공의 지표 하 92~95m에서 회수된 시추코아를 나타낸 것으로서 사진에서 보는 바와 같이, 이들 화산암류는 두께가 3~6m 범위로 얇을 뿐만 아니라, 치밀질이고 강도가 매우 강하며, 절리가 발달되어 암괴형태로 산출된다.

한경면 저지시추공의 서귀포층 내에 분포하고 있는 화산암에 대해 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대측정을 실시한 결과에 의하면 고기원(1997)과 고기원외 2인(2004), 서귀포층 직상부 용암류의 절대연령과 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 알려지고 있다. 따라서, 연구지역 시추공에서 확인되고 있는 서귀포층 내의 화산암은 관입암이라기 보다는 서귀포층이 퇴적될 당시에 형성된 용암류일 것으로 사료된다.

마. U층

U층은 주로 미고결내지 준고결의 상태이며 서귀포층 하부에 분포한다(고기원, 1997). 구성물질은 세립질 모래와 점토질로 이루어져 있으며, 제주도를 형성케 한 초기 화산활동이 일어나기 이전에 형성된 층으로 알려져 있다.

연구대상 관측정들 중 상모2호공을 제외한 12개 시추공에서 U층의 존재가 확인되었으며, U층의 포착심도는 EL.-106.8~EL.-179.7m의 분포심도를 나타내고 있으며, 지구별로 U층의 포착심도를 보면 한림지구 EL.-106.8~-125.9m, 용수지구 EL.-144.1-147.9m, 상모1 EL.-153.1m, 무릉지구 EL.-149.8~-126.2m, 그리고 관포 EL.-125.6m, 고산 EL.-139.6m, 신도 EL.-179.7m, 일과 EL.-131.0m, 하모 EL.-142.9m로 파악되며, 신도 시추공에서 U층이 다소 깊이 분포하고 있다. 전반적으로 제주도 서부지역에서 U층의 평균 포착심도는 EL.-139.4m이다.

4-2. 물리검층

4-2-1. 물리검층 개요

물리검층(Geophysical logging)은 주로 석유탐사 분야에서 이용되어 왔으나 최근에 들어와서는 지반조사, 지하자원 및 지열자원 평가, 지하수조사 분야 등 광범위한 영역에서 다양하게 이용되고 있다(제주도·한국지질자원연구원, 2004). 물리검층 자료는 암석의 지질학적, 수문지질학적, 지반공학적 특성에 관한 정보를 제공해 줄 뿐만 아니라 구성암석, 암석의 파쇄정도, 지하수 유동과 물리·화학적 성질에 대한 해석을 하는데도 유용하다. 특히, 지하수 연구에 있어서 물리검층 자료는 수직적인 지하수의 물리·화학적 특성은 물론 지층의 물리적 특성에 관한 보다 상세한 해석을 가능케 할 뿐만 아니라 시추코아와 물리검층자료의 대비를 통하여 지층의 물리적 특성을 정량화 하는데도 도움이 된다(Table 6).

Table 6. Geophysical logging methods, required borehole conditions and objectives.

Log type	Specific log	Borehole Conditions	Information
Nuclear	Gamma-ray Spectral gamma-ray Gamma-gamma(density) Neutron-neutron(porosity)	Open and cased holes with or without fluid Open holes with fluid	Lithology, density, porosity, calibration of surface geophysics
Electrical	Self-potential Resistivity Focused Resistivity	Open or screened holes with fluid	Lithology, calibration of surface geophysics, location of pvc screen
Electromagnetical	Induction Susceptibility	Open and pvc cased hloes with or without fluid	Lithology, saline waters
Acoustical	Sonic	Open holes with fluids	Lithology(porosity)
Physical	Caliper	Open and cased holes with or without fluid	Borehole diameter
Optical	Borehole camera Optical borehole televiewer	Open and cased holes with clear water	Casing or borehole condition, caving, slope and aspect of fractures and layers
Flow	Impeller flowmeter Heat pulse flowmeter	Open and cased holes with fluid	Vertical water movement in the borehole
Fluid	Water quality	Open and cased holes with fluid	EC, temperature, pH, O2, no3, Eh, total gas pressure

(Thomas Wonik & Klaus Hinsby, 2006)

본 연구에서는 제주특별자치도 수자원본부에서 2007년 서부지역에 설치한 5개 해수침투 감시 관측정을 대상으로 자연감마선, 공경검층, 단극저항검층, 자연전위검층, 공내수의 온도 및 전기전도도검층을 실시하였다.

4-2-2. 물리검층 자료해석

가. 고산(KS)

Fig. 15는 해안에서 445m 떨어진 고산 관측정에서 실시한 물리검층자료를 지질주상도와 함께 나타낸 것이다. 이 관측정은 지표 하 148m까지 측정되었으나 하부 퇴적층 구간이 매몰되어 물리검층은 지표 하 90m까지 실시되었으며, 이 구간에는 화산암류, 모래층, 유리쇄설성 각력암층(Hyaloclastite breccias)이 분포하고 있다.

자연감마선(Natural Gamma) 검층결과, 자연감마선 값은 크게 3개의 그룹으로 구분되고 있는데, 지표 하 24m까지 약 20CPS 이하의 낮은 값을 나타내다가 25m 지점을 경계로 지표 하 71m까지 약 40CPS 내외로 비교적 높은 값을 유지하며, 지표 하 72m 하부 구간 즉 “A”로 표시된 구간에서는 40~60CPS 범위의 값을 보이고 있다. 일반적으로 자연감마선 값은 칼륨·우라늄·토륨을 많이 포함한 지층에서 높은 피크를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 현무암류는 칼륨·우라늄·토륨 함량이 매우 낮기 때문에 5~50 API 범위의 자연감마선 값을 나타내는 것으로 보고된 바 있다(Helm-Clark et al., 2004). 이 관측정의 자연감마선 변화를 보면, 지표 하 25m 지점에서의 피크는 용암류 경계면에 얇게 협재된 토양층에 의해 유발되는 것으로 해석되며, 지표 하 72m 하부의 피크 변화는 서귀포층 중에 포함된 점토질 성분에 의해서 다른 구간보다 높은 값을 보이는 것으로 사료된다.

공경 값의 변화를 보면, 지표 하 18~26m 구간에서 400mm 이상의 공경을 나타내며, 그 하부에서는 일부 구간에서 피크를 보이는 것을 제외하면 대체로 일정한 값을 유지하고 있다. 이처럼, 지표 하 18~26m 구간에서 착경구경(300mm)보다 훨씬 넓은 공경 값을 나타내는 것은 이 구간이 절리가 발달한 용암류가 분포하고 있기 때문이며, 그 하부 일부 구간에서의 피크는 용암류 단위의 변화와 서

귀포층 내의 매질 및 고결도의 변화에 의해서 비롯되는 것으로 해석된다.

SPR(단극저항검층) 검층은 화산암류에서 100~400ohm-m의 범위를 보이고 있으나 지표 하 25~42m 사이에서 증가했다가 그 하부로 내려가면서 감소하는 경향을 보여주고 있다. 일반적으로 전기비저항 값은 투수성이 불량한 층(치밀질 암층이나 고결된 점토층 등)에서 비교적 높은 값을 나타내고, 절리나 파쇄가 발달한 투수성이 좋은 지층 또는 용존물질 함량이 많은 지하수에서는 상대적으로 낮은 값을 나타내 것으로 알려져 있다(한정상, 2000; 황세호 외5인, 2005). 이와 같은 일반적 현상에 비추어 볼 때, 비교적 치밀질 용암류로 이루어진 지표 하 25~42m 구간에서 단극저항 값이 증가하는 반면, 절리 및 파쇄가 발달한 화산암류와 투수성이 좋은 유리쇄설성 각력암층 분포하는 구간에서는 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있는 것으로 해석된다.

SP(자연전위검층) 검층자료를 보면, 지표 하 17~30m 사이 구간에서는 약간의 변화를 보이다가, 그 하부부터 점진적으로 증가하는 모습을 보여주고 있을 뿐, 특이할만한 피크나 변화는 나타나지 않고 있다.

온도검층 결과를 보면, 지표 하 22m까지 구간에서 뚜렷한 변화를 보여주고 있으며, 그 하부부터 77.5m까지 구간에서는 큰 변화 없이 유지되다가 77.5m부터 증가를 나타내고 있다. 이를 보다 구체적으로 살펴보면, 제시된 그림에서 "B" 구간에서는 온도가 19℃에서 16.8℃로 감소하다가 "C"로 표시된 지점(지표 하 17.5m)을 지나면서 "D"(지표 하 22.5m) 지점까지 다시 증가한 후 지표 하 77.5m까지 일정한 온도를 유지하고 있다. 이 같은 온도의 변화를 놓고 볼 때, 지표 하 17.5m까지는 대기의 영향을 받는 구간으로 해석되며, 지표 하 17.5~22.5m 사이 구간에는 지하수의 유출(제1대수층)에 의한 온도변화로 해석된다. 또한, 지표 하 77.5m 즉, "F"지점에서의 온도변화는 서귀포층 내의 매질의 변화에 의한 현상으로 해석된다. "D" 지점에서의 온도변화는 이 관측정을 대상으로 실시한 심도별 대수성 시험에서 산출능력이 양호한 대수층의 발달하고 있는 것과 잘 일치하는 결과이다.

전기전도도 검층결과도 온도검층 결과와 유사한 패턴을 나타내고 있는데, 전기전도도 값은 자연수위에서부터 22.5m까지 즉, "D"지점까지 점진적으로 감소한 후, 검층 종료심도까지 100 μ s/cm 이하의 값을 유지하고 있다. 이와 같은 전기전

도도 값의 변화는 전술한 온도검층 결과뿐만 아니라, 이 관측정의 심도별 수질조성 자료와도 잘 일치하는 것이다.

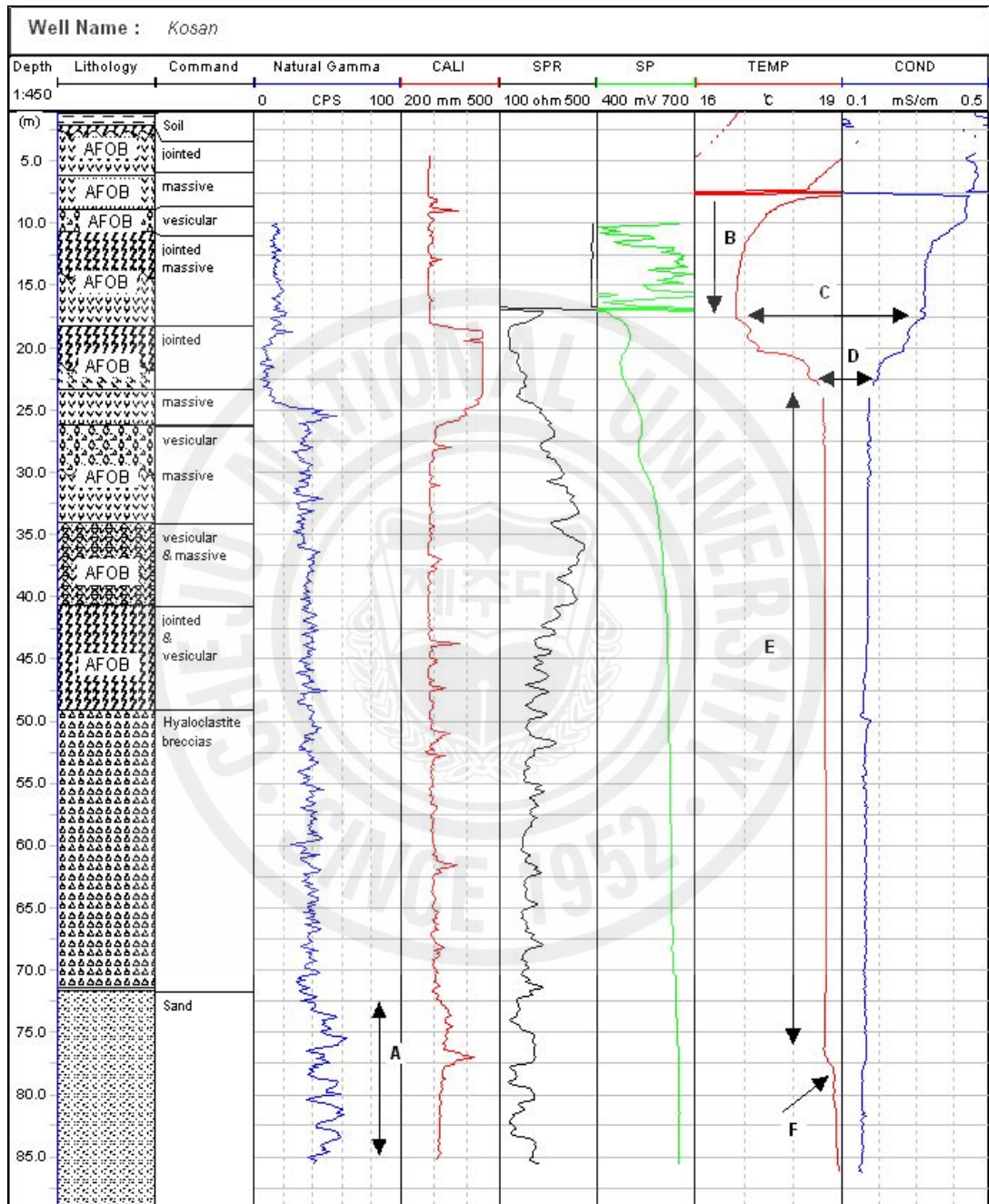


Fig. 7. Geologic and geophysical well logs in the Kosan monitoring well.

나. 신도(SD)

Fig. 16은 해안에서 228m 떨어진 신도 관측정에서 실시한 물리검층 자료를 지질주상도와 함께 나타낸 것이다. 이 관측정은 지표 하 190m까지 측정되었으나, 하부 퇴적층 구간의 매물로 지표 하 192m까지만 검층이 이루어졌으며, 검층구간까지의 구성지질은 2매의 유리쇄설성 각력암층과 1매의 토양층을 포함하고 있는 화산암층과 서귀포층으로 이루어져 있다.

자연감마선 값은 전반적으로 심도가 깊어질수록 증가하고 있으며, 크게 3개의 구간으로 구분할 수 있다. 즉, 약 20CPS 내외의 값을 보이는 구간(지표 하 10~35m), 30CPS 내외의 값을 보이는 구간(지표 하 35~82m), 그리고 60CPS 내외의 값을 보이는 구간(지표 하 82m 이하)으로 나눌 수 있다. 또한, 화산암층과 서귀포층 분포 구간도 비교적 잘 구분되고 있는데, 화산암층 분포 구간에서는 20CPS 이하의 값을 나타내는 반면, 서귀포층(A 구간)에서는 60CPS 내외의 값을 보이고 있으며, 점토함량이 많은 구간에서는 80CPS에 가까운 높은 값을 나타내고 있다. 전반적으로 이 관측정의 자연감마선 값의 변화는 지질주상도와 비교적 잘 일치하고 있다.

공경검층자료에서 알 수 있듯이, 이 시추공의 공경 변화는 비교적 심한 편이다. 유리쇄설성 각력암층이 분포하는 지표 하 20~30m와 50~70m 구간, 그리고 서귀포층 내 고결도가 낮은 구간(예 : 105m 및 175m 지점)에서 측정 구경보다 훨씬 큰 공경 값을 나타내고 있다.

SPR 검층 값은 지표 하 20m에서 피크를 보인 후 감소하기 시작하여 검층 종료심도까지 큰 변화 없이 유지되고 있으며, SP 검층 값은 지표 하 20~30m 구간에서 가파르게 상승하다가 그 하부부터 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 공경 · SPR · SP 검층 값 간에는 상관관계를 나타내고 있는데, 다시 말해서 공경 값이 증가하는 구간에서 SPR 및 SP 값이 증가하는 현상을 보이고 있다.

온도는 지표 하 10~20m(B 구간)에서 감소하다가 20~28m 사이에서는 상승세를 나타낸 후 160m 지점까지 일정하게 유지하다가, 160m(E 구간)를 기점으로 급격하게 증가하는 모습을 보이고 있다. 지표 하 28m 지점에서의 온도 피크는 지하수의 유입(제1대수층)에 의한 것으로 해석되며, 지표 하 160m부터의 급격한 증가는 매질의 변화에 의한 온도증가로 판단된다.

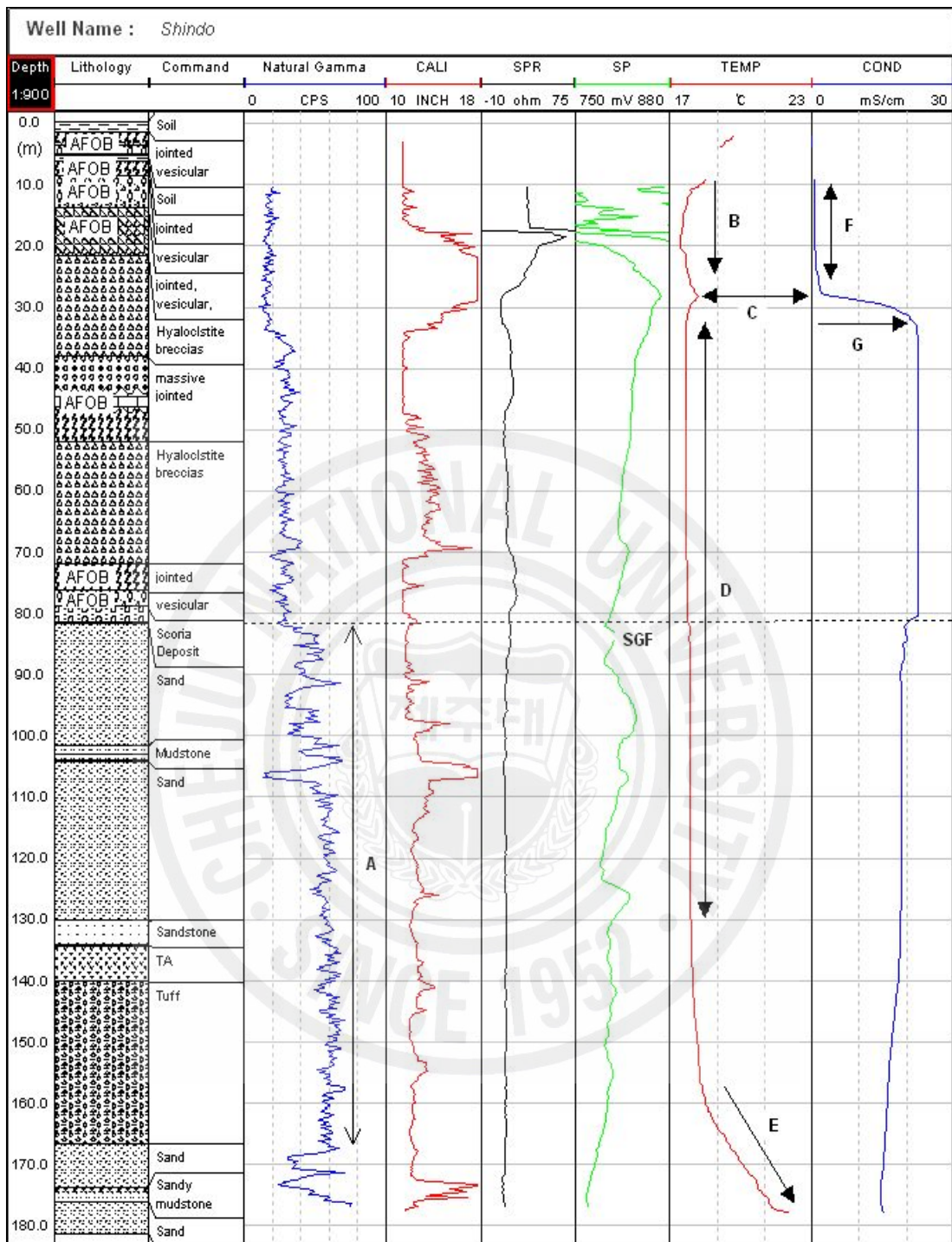


Fig. 8. Geologic and geophysical well logs in the Shindo monitoring well.

전기전도도는 지표 하 28m(F 구간)까지는 담수에 해당하는 낮은 값을 보이다가 이 심도를 경계로 20,000 μ S/cm까지 급격하게 증가한 후 80m 부근까지 이어지

다가 서서히 감소하는 모습을 보이고 있다. 이처럼, 지표 하 28m(G 구간) 지점에서의 급격한 전기전도도의 변화는 해수와의 혼합에 의한 증가로 판단된다. 즉, 이 관측정의 담수 렌즈는 지표 하 28m까지 분포하고, 그 하부에는 염수지하수체가 존재하는 기저지하수 부존형태를 이루고 있는 것으로 해석된다. 특히, 지표 하 28m와 80m 지점에서의 온도와 전기전도도 변화 피크는 이 관측정에서 실시한 심도별 대수층 시험결과에서 얻어진 대수층의 분포와도 일치하고 있다. 즉, 지표 하 28m 지점과 80m 지점에 대수층이 발달하고 있음이 대수성 시험 자료와 온도 및 전기전도도 자료로부터 해석이 가능하다.

다. 일과(IG)

Fig. 17은 해안에서 120m 떨어진 일과 관측정에서 실시한 물리검층 자료를 나타낸 것이다. 이 관측정에서는 지표 하 120m까지 검층이 이루어졌으며, 검층 구간의 구성지질은 2매의 유리쇄설성 각력암층과 고토양층 및 패사층을 협재하고 있는 화산암류, 그리고 서귀포층으로 이루어져 있다.

이 관측정의 자연감마선 값은 전술한 고산 및 신도 관측정의 경우에서처럼, 점토질 성분을 함유한 지층에서 피크를 보이고 있으며, 공경 값 역시 파쇄대 및 절리발달 구간, 그리고 미고결 모래층 분포 구간에서 측정 구경보다 큰 값을 보이고 있다. 또한, 단극저항검층 값도 공경이 비교적 일정하게 유지되는 구간에서 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 특히 지표 하 47~50m 사이에서 비교적 낮은 값을 보이고 있다. 온도는 지표 하 10m에서 55m까지 구간에서는 점진적으로 낮아지다가 지표 하 85m를 기점으로 점차 상승하는 경향을 보이고 있다. 전기전도도는 지표 하 10m에서 35m까지 비교적 급격하게 감소하며, 45~55m 사이 구간에서 약간의 상승추세를 나타낸 후 검층 종료심도까지 일적선의 형태로 유지되고 있다.

이상의 공내검층 결과를 종합해 보면, 지표 하 45~50m 사이 구간은 낮은 단극저항 값과 전기전도도 값의 증가, 그리고 온도의 미약한 변화로 특징지을 수 있으며, 이 관측정에서 실시한 2차 대수성 시험 결과, 비양수량이 $24\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ 를 나타냈는데, 이는 이 구간에 대수층이 발달하고 있음을 의미하는 것이다.

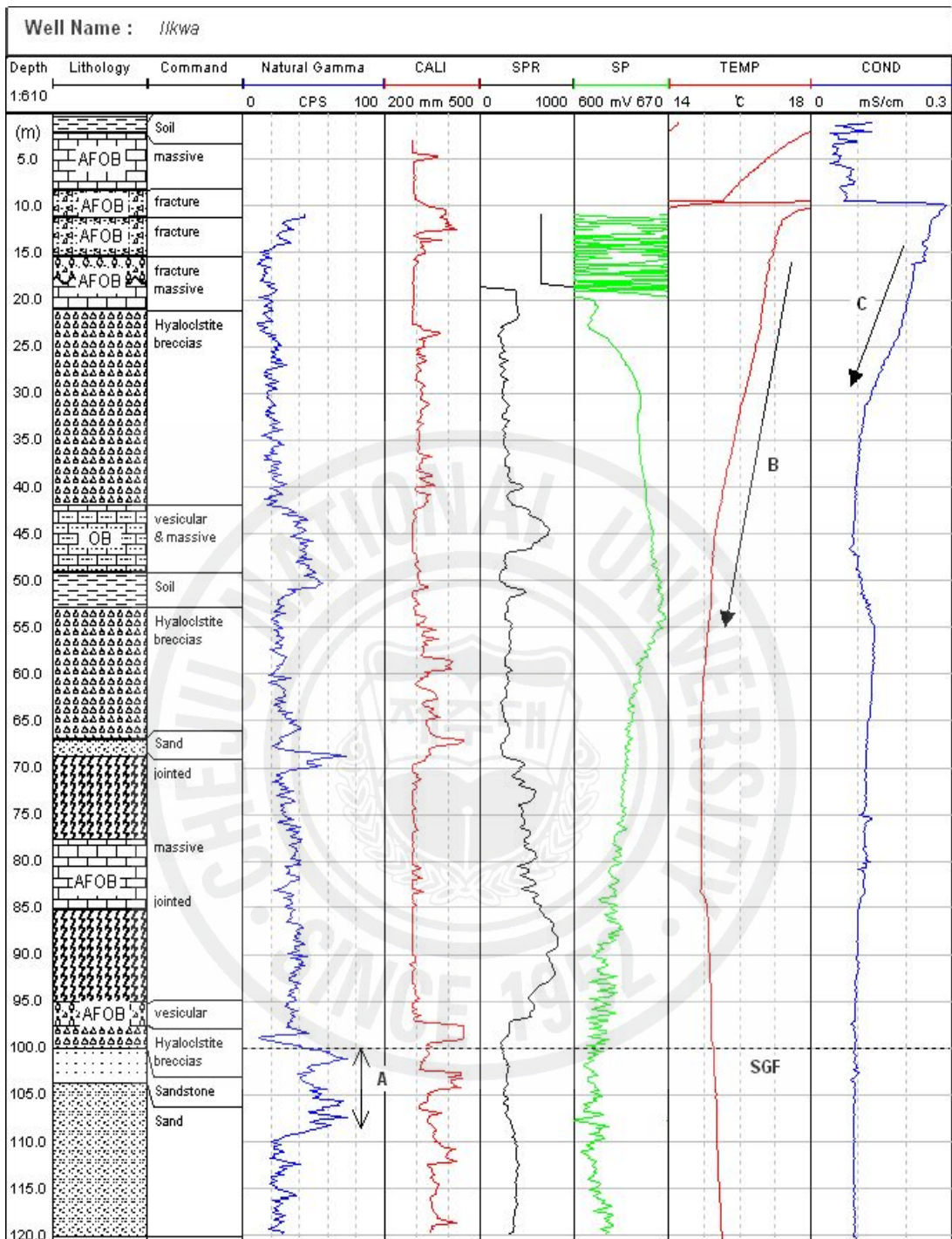


Fig. 9. Geologic and geophysical well logs in Ilgwa monitoring well.

라. 판포(PP)

Fig. 18은 해안에서 190m 떨어진 판포 관측정에서 실시한 물리검층 결과와

지질주상도를 함께 나타낸 것이다. 이 관측정은 지표 하 140m까지 측정되었으나 고결도가 낮은 모래층이 92m부터 분포하고 있어 물리검층은 95m까지 밖에 실시하지 못하였다. 물리검층이 이루어진 구간까지의 구성지질은 보면, 92m 상부에는 유리쇄설성 각력암층과 고토양층을 포함하는 화산암류가 분포하고, 92m 하부에는 서귀포층으로 이루어져 있다.

이 관측정의 자연감마선 검층결과는 전술한 다른 관측정과는 다소 상이한 양상을 보이고 있다. 즉, 지표 하 10~43m까지 즉 "A" 구간이 "B"(지표 하 45~80m) 구간보다 높은 값을 보이며, 지표 하 43m 지점의 고토양층에서 피크를 나타낸다. 특히, 43m 지점을 경계로 상부와 하부의 자연감마선 값이 차이를 나타내고 있으며, 비교적 일정한 범위의 값을 보이는 것으로 미루어 볼 때, 화산암류의 칼륨 함량이 큰 차이가 없음을 의미한다(Helm-Clark et al., 2004).

공경 값은 "C"로 표시된 구간에서 비교적 큰 변화를 보이고 있는데, 지표 하 20~30m 사이의 변화는 절리가 발달한 구간이고, 지표 하 55~72m 사이는 유리쇄설성 각력암층이 분포하는 구간이다.

단극비저항(SPR) 값은 일과 관측정의 경우에서처럼 공경이 비교적 일정하게 유지되는 구간에서는 높은 값을 보이는 반면, 공경의 변화가 심한 구간에서는 낮은 값을 보이고 있다. 이 같은 SPR 값의 변화로 볼 때, 치밀질 화산암층에서는 SPR 값이 상대적으로 높은 값을 나타내고, 절리 또는 파쇄가 발달하거나 공극율이 높은 유리쇄설성 각력암층 등 투수성이 양호한 지층에서는 낮은 값을 보이는 것으로 해석할 수 있다.

온도와 전기전도도 값은 "E"로 표시된 지표 하 60m까지 구간에서 변화를 보이며, 그 하부에서는 비교적 균일한 값을 유지하고 있다. 온도의 경우, "D" 구간에서는 점진적인 감소를 보이다가 지표 하 50m부터 60m(E)까지 증가하고 있으며, 전기전도도는 지표 하 45m까지 점차 감소하다가 이 지점을 지나면서부터 비교적 급격하게 감소(F)하는 모습을 보이고 있다. 따라서, 지표 하 55~60m 사이에서 지하수의 유입이 있는 것으로 해석된다.

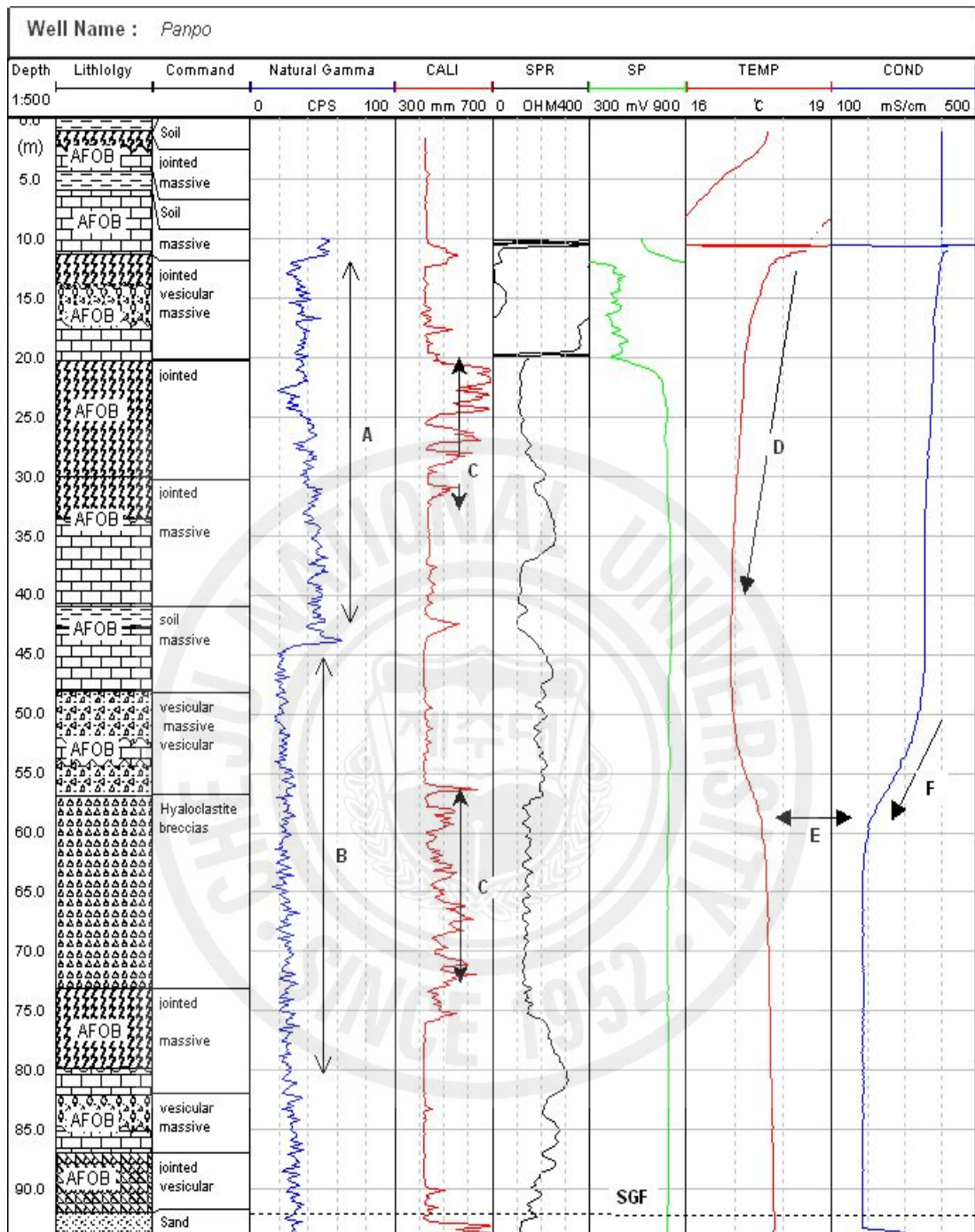


Fig. 10. Geologic and geophysical well logs in Panpo monitoring well.

마. 하모(HM)

Fig. 19는 해안에서 119m 떨어진 하모 관측정에서 실시한 물리검층 자료와 지질주상도를 함께 나타낸 것이다. 이 관측정은 지표 하 150m까지 굴착되었으나

100m 하부 구간이 매몰되어 100m까지만 검층이 이루어졌다. 검층이 실시된 구간의 구성지질은 화산암층과 서귀포층으로 양분할 수 있으며, 화산암류에는 유리쇄설성 각력암층과 고토양층이 협재되어 있고, 서귀포층은 응회암 및 사암층 등으로 이루어져 있다.

자연감마선 값의 변화를 보면, 지표 하 60m까지 구간에서는 약간의 변화를 보이면서 점진적으로 증가하는 경향을 나타내다가, 60~70m 사이(A 구간)의 화산암층에서 낮은 값을 보이고, 서귀포층(B 구간)에서는 비교적 일정한 값을 유지하고 있다. 공경의 경우, 화산암층에서 비교적 변화가 심한 편인데, 이는 용암류 단위의 변화, 절리 및 파쇄대의 발달, 유리쇄설성 각력암층의 분포 등으로 인해 나타나는 현상이다. 단극전기비저항과 SP 값은 지표 하 15~25m에서의 변화를 제외하면, 특이한 변화를 나타내지 않고 있다. 온도 및 전기전도도 검층결과를 보면, 이 고관측정에서도 신도 관측정의 경우처럼 담수지하수(지표 하 20m까지 "C" 구간), 담-염수 혼합대(20~43m까지 "D" 구간), 그리고 염지하수(지표 하 43m 이하 "E" 구간)로 구분할 수 있다. 즉, 이 관측정은 제주도 동부 기저지하수 부존지역 같은 지하수 부존형태를 이루고 있다.

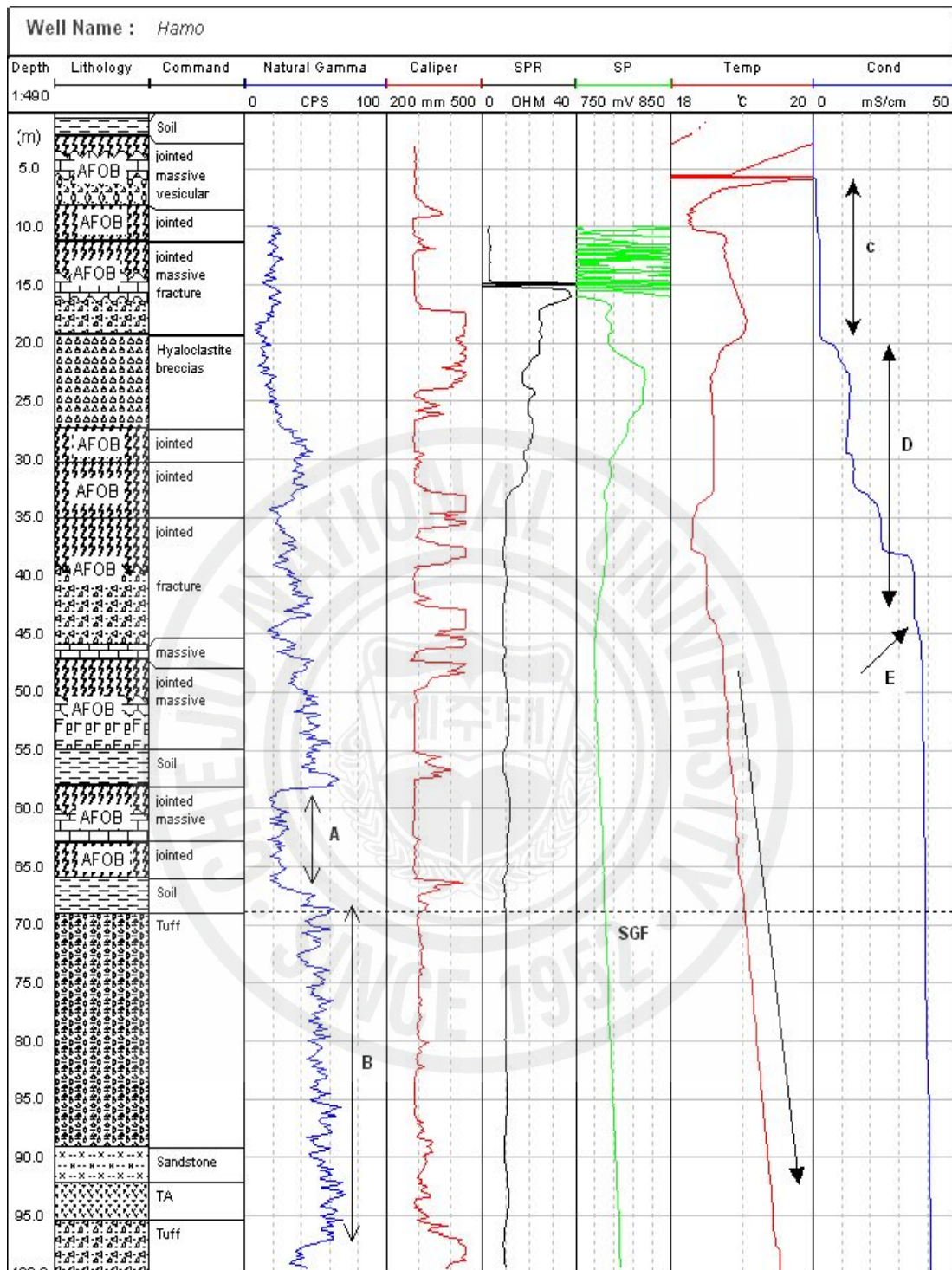


Fig. 11. Geologic and geophysical well logs in Hamo monitoring well.

4-3. 대수층의 수리성 및 수질특성

연구지역의 지하는 다공질 용암누층으로 이루어져 있을 뿐만 아니라, 용암누층 사이에는 두께를 달리하는 퇴적층이 분포하고 있으며, 화산암류 직 하부에는 저투수성 지층인 서귀포층이 두껍게 분포하는 지질구조를 이루고 있다. 특히, 주 대수층이 발달하는 용암누층은 측방으로의 연속성이 불량할 뿐 아니라, 용암류 단위의 두께와 투수성이 대단히 복잡한 상태를 이루고 있기 때문에 대수층의 발달상태 또한 복잡할 것으로 예상되고 있다. 즉, 관측정별 대수층의 위치는 물론 대수층의 산출능력과 수질특성에서 차이를 나타낼 것으로 예상되고 있기 때문에 대수층별 대수성 시험을 통하여 이와 같은 차이를 밝혀내는 것이 필요하나 지금까지 이와 같은 연구는 거의 수행되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 제주특별자치도 수자원본부에서 해수침투 감시 관측공 설치과정에서 실시한 대수층별 대수성 시험자료와 음·양이온 분석자료를 이용하여 연구대상 관측정의 대수층 발달상태와 수질특성에 대한 해석을 실시하였다.

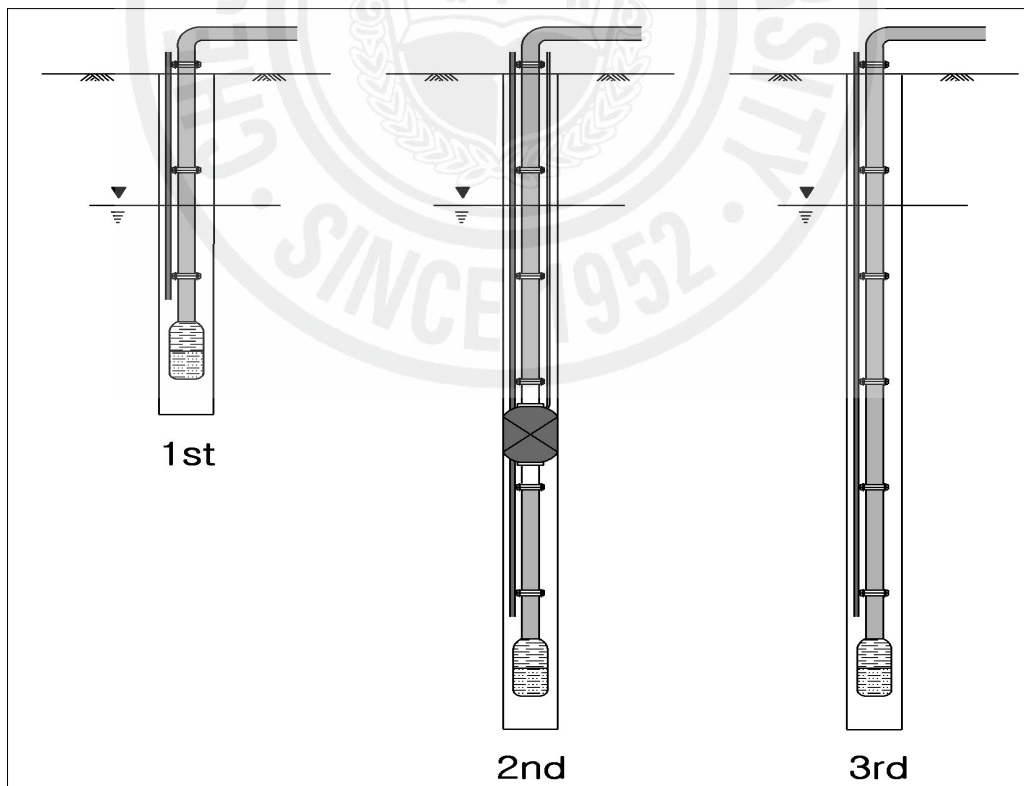


Fig. 12. The procedures for aquifer test with depth in the study area.

대수층별 대수성 시험은 관측정 별로 최소 2차례 이상씩 실시되었으며, 시험시간은 최소 8시간 이상 이루어졌다. 특히, 상부 대수층으로부터의 지하수 누출을 막기 위해 팽창형 고무 팩커(Packer)를 사용하였으며, Fig. 12는 대수층별 대수성 시험과정을 나타낸 모식도이다. 또한, Table 7은 연구대상 관측정에서 이루어진 대수층별 대수성 시험 및 그 결과를 요약한 것이며, 관측정별 시험결과를 서술하면 다음과 같다.

4-3-1. 관측정별 대수성 시험

가. 한림지구

한림1호공

한림1 관측정에서는 모두 4회에 걸쳐 대수성 시험이 실시되었다. 제1차 시험은 지표 하 22m까지 굴착한 다음 1,900m³/day 양수율로 시험을 실시하였는데, 양수량 부족으로 2분 만에 시험이 중단되었다. 제2차 시험은 지표 하 50m까지 굴착한 후 1,900m³/day 양수율로 8시간 동안 실시하였는데, 이 때 수위 강하량은 0.28m에 불과하였다. 제3차 시험은 지표 하 80m까지 굴착한 다음 50m에 팩커를 설치하고 상부 대수층을 차단시킨 상태에서 1,500m³/day 양수율로 8시간 동안 시험을 실시한 결과, 0.48m 수위강하를 기록하였다. 제4차 시험은 지표 하 120m까지 굴착한 후 일정 양수율(1,000m³/day)로 24시간 동안 시험을 실시하였는데, 0.74m의 수위 강하를 나타내었다. 이상의 대수성 시험결과를 놓고 볼 때, 한림1 관측정은 해수면 하 10~38m 구간과 해수면 하 40~68m 사이 구간에 산출능력이 양호한 대수층이 발달하고 있는 것으로 해석되는데, 지질주상도에 의하면 이들 구간에는 두께가 얇고 절리가 발달한 AFOB 용암류로 이루어져 있어 이 관측정의 대수층은 용암류 사이에 발달하는 절리대인 것으로 사료된다.

한림2호공

한림2 관측정에서는 총 4회에 걸쳐 대수성 시험이 실시되었다. 제1, 2, 3차 시험은 각 대수층별로 실시되었고, 제4차 시험은 일정 양수율로 실시되었다. 제1차

Table 7. The results of aquifer test of the each monitoring wells in the study area.

Classification	PP				KS			SD			IG				HM			
	1st	2nd	3rd	4th*	1st	2nd	3rd*	1st	2nd	3rd*	1st	2nd	3rd	4th*	1st	2nd	3rd	4th*
Drilled Depth (m)	35	74	100	140	36	95	140	50	101	190	37	77	104	140	32	32	75	140
Pumping Time	2min	3min	1hr	7hr	24hr	40min	24hr	24hr	24hr	24hr	1min	24hr	2min	19hr	24hr	24hr	24hr	24hr
GWL(m)	4.30	11.30	11.30	12.00	8.40	8.40	8.40	10.50	10.00	10.50	8.50	12.20	12.20	11.50	8.00	7.50	7.1	6.5
Static GWL (m)	-	-	-	27.68	8.918	-	8.81	10.73	21.18	10.93	-	52.29	-	23.21	9.717	8.844	9.552	8.107
Draw Down (m)	-	-	-	15.680	0.518	-	0.410	0.230	11.180	0.430	-	40.090	-	11.710	1.717	1.344	2.452	1.607
Pumping Rate(m ³ /d)	-	-	-	1,300	2,600	-	1,900	2,300	1,300	2,600	-	1,300	-	2,300	1,300	2,900	2,050	2,200
Pump Depth (m)	24	66	95	97	31	~	34	29		43	28	59		99	27	27		53
Packing Depth (m)						50			44				75				32	
Pump Depth** (m)						72			72				101				59	

* : Constant-rate pumping test

** : Pump depth is after installation of packer

- : Pumping test was stopped

Table 7. Continued.

Classification	HL1				HL2				YS1					YS2			
	1st	2nd	3rd	4th*	1st	2nd	3rd	4th*	1st	2nd	3rd	4th	5th	1st	2nd	3rd	4th
Drilled Depth (m)	22	50	80	120	7	100	128	190	26	38	54	77	150	90	185	185	185
Pumping Time	2min	8hr	8hr	24hr	8hr	8hr	8hr	24hr	4min	5min	6min	12hr	8hr	6hr	12hr	12hr	15hr
GWL(m)	13.00	13.00	13.00	13.00	50.20	50.00	51.00	51.80	9.0	9.0	9.0	8.5	8.0	21.0	21.0	21.0	21.0
Static GWL (m)	-	13.27	13.48	13.74	50.24	50.00	51.00	51.94	-	-	-	10.8	11.3	26.0		31.0	33.9
Drawdown (m)	-	0.28	0.48	0.74	0.04	0.004	0.004	0.14	-	-	-	2.3	3.3	5.0		10.0	12.9
Pumping Rate(m ³ /d)	1,900	1,900	1,500	1,000	1,900	1,500	1,500	1,000	1,500	1,330	1,000	1,310	1,711	1,200	1,800	1,750	1,580
Pump Depth (m)									19.1	32.2	37.0	73.3		50.3	26.2	38.2	
Packing Depth (m)			55				98						60.9		30.0	42.6	42.6
Pump Depth** (m)													67.6				48.6

* : Constant-rate pumping test

** : Pump depth is after installation of packer

- : Pumping test was stopped

Table 7. Continued.

Classification	MR1					MR2				SM1			SM2	
	1st	2nd	3rd	tide effect	4th*	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	1st	2nd*
Drilled Depth (m)	32	72	160	160	160	78	92	111	170	30	73	170	58	325
Pumping Time	10hr	20min	12hr	44hr	12hr	1hr	20min	12hr	8hr	12hr	9hr	12hr	11hr	12hr
GWL(m)	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	32.0	32.0	33.5	34.0	14.0	14.0	14.0	17.0	17.0
Static GWL (m)	10.6	-	20.0	-	26.0	-	-	61.0	49.4	14.1	14.1	14.3	34.0	20.3
Drawdown (m)	0.9	-	10.3	-	16.3	-	-	27.5	15.4	0.1	0.1	0.3	17.0	3.3
Pumping Rate(m ³ /d)	1,850	900	1,220		1,200	300	500	900	1,738	1,000	1,000	1,739	1,000	1,000
Pump Depth (m)	25.2				32.1	73.5	73.5	79.5		25.2	37.2		49.3	49.3
Packing Depth (m)		49.3	34.7						91.1			97.6		
Pump Depth** (m)		56.0	55.8						97.8			103.8		

* : Constant-rate pumping test

** : Pump depth is after installation of packer

- : Pumping test was stopped

시험은 지표 하 67m까지 굴착한 후 1,900m³/day의 양수율로 8시간 동안 실시되었으며, 수위 강하량은 0.04m를 기록하였다. 제2차 및 3차(98m에 팩커설치) 대수성 시험은 지표 하 100m와 128m까지 굴착한 후 1,500m³/day의 양수율로 8시간씩 실시되었는데, 이 때 수위 강하량은 0.004m로 동일하였다. 제4차 시험은 185m까지 굴착한 후 1,000m³/day 양수율로 24시간 동안 실시되었는데, 이 때 지하수위는 0.14m 하강하였다.

한림2 관측정의 경우에는 해수면 근처(El. -3m)에 분포하고 있는 2.5m 두께의 클린커층이 제1대수층인 것으로 해석되며, 해수면 하 48~67m 사이에 분포하는 유리쇄설성 각력암층이 제2 대수층인 것으로 해석된다.

나. 용수지구

용수1호공

용수1 관측정에서는 5회에 걸쳐 시험이 이루어졌으나, 1~3차까지의 시험은 대수층 산출능력 부족으로 정상적인 시험이 이루어지지 못하였고, 4차 및 5차 시험은 각각 12시간과 8시간 동안 시험이 진행되었다. 제4차 시험은 지표 하 77m까지 즉, 서귀포층이 직 상부까지 굴착한 후 제1대수층을 대상으로 시험을 실시하였는데, 50마력 모터를 지표 하 73.3m에 설치하고 12시간 동안 양수를 실시한 결과, 양수율은 1,300m³/day 이었고 총 수위 강하량은 2.3m를 기록하였다. 또한, 제5차 시험은 지표 하 150m 까지 착정한 후 60.9m에 팩커를 설치하여 제1대수층을 차단한 다음, 75마력 모터로 8시간 동안 양수시험을 실시한 결과, 양수율은 1,710m³/day이었으며, 이 때 수위 강하량은 3.3m를 기록하였다. 이 관측정의 지질 주상도에 의하면, 서귀포층 직 상부인 지표 하 63.5~76m 구간에는 투수성이 양호한 유리쇄설성 각력암층으로 이루어져 있는데, 이 층이 주대수층인 것으로 판단된다.

용수2호공

용수2 관측정에서는 모두 4회에 걸친 대수성 시험이 실시되었다. 지표 하 90m까지 굴착한 후 제1차 시험이 실시되었는데, 이 때 양수율은 1,200m³/day 이

었고, 수위 강하량은 5.0m을 나타내었다. 또한, 지표 하 185m까지 굴착을 완료한 후 30m에 펌퍼를 설치하고, 그 상부구간을 대상으로 1,800m³/day 양수율로 시험을 실시하였으나 수량 부족으로 시험이 중지되었다. 따라서, 펌퍼를 42.6m(모터 펌프 38.2m 설치)에 설치하여 1,750m³/day 양수율로 펌퍼설치 구간 상부층을 대상으로 12시간 시험을 실시한 결과, 10.0m의 수위강하를 나타내었다. 제4차 시험은 펌퍼를 42.6m에 설치한 후 그 하부에 모터펌프를 설치하고, 1,580m³/day 양수율로 15시간 동안 시험을 실시한 결과, 12.9m의 수위강하를 나타내었다. 따라서 이 관측정의 제1대수층은 지표 하 29~40.5m 사이에 분포하는 AFOB(침상장석 감람석현무암) 절리대이고, 제2대수층은 지표 하 52~55m 사이의 절리발달 구간인 것으로 판단된다.

다. 무릉지구

무릉1호공

무릉1 관측정에서는 모두 3회에 걸쳐 대수성 시험이 이루어졌다. 제1차 시험은 지표 하 32m까지 굴착한 후, 25.2m에 75마력 모터펌프를 설치하고 1,750m³/day 양수율로 10시간 동안 시험을 실시한 결과, 수위는 10.0m 강하하였다. 따라서, 지표 하 16~32m 사이에 분포하는 유리쇄설성 각력암층이 제1대수층 구간으로 판단된다. 또한, 제2차 시험은 지표 하 72m까지 굴착한 다음 49.3m에 펌퍼를 설치하고, 그 하부 구간을 대상으로 900m³/day 양수율로 시험을 실시한 결과, 20분이 경과한 후 수량부족으로 시험이 중단되었다. 이는 지표 하 61~72m까지 약 11m 두께로 자갈층 및 이암층이 분포하고 있어 지표 하 50~72m 사이에 구간에는 유의할만한 대수층은 발달하고 있지 않은 것으로 판단된다. 제3차 시험은 지표 하 160m까지 굴착한 후, 34.7m에 펌퍼를 설치한 다음 그 하부 구간을 대상으로 1,220m³/day 양수율로 12시간 동안 시험을 실시한 결과, 10.3m의 수위 강하를 나타내었다. 따라서, 지표 하 72~87m 사이에 분포하는 조면질안산암층의 절리발달 구간이 제2대수층 역할을 하는 것으로 판단된다.

무릉2호공

무릉2 관측정에서는 모두 4회에 걸쳐 대수성 시험이 실시되었다. 지표 하 78m와 92m를 굴착한 후 실시한 제1차 및 제2차 시험은 대수층의 산출능력 불량으로 시험이 중단되었다. 따라서 지표 하 92m 즉, 서귀포층 직 상부를 이루고 있는 용암누층에는 유의할만한 대수층은 발달하지 않고 있는 것으로 판단된다. 이는 서귀포층 상부의 용암누층에는 0.5~2.0m 두께의 퇴적층이 5매가 분포하고 있고, 지표 하 11~31m 구간에는 매우 치밀한 용암류가 분포하는 등 전반적으로 투수성이 불량한데서 비롯되는 것으로 해석된다. 제3차 시험은 지표 하 111m까지 굴착한 다음 900m³/day 양수율로 12시간 동안 시험을 실시한 결과, 27.5m의 수위강하를 나타내었다. 제4차 시험은 지표 하 170m까지 굴착한 후, 91.1m에 펌커를 설치하여 상부 대수층으로부터의 지하수 유입을 차단시킨 다음 서귀포층을 대상으로 1,738m³/day의 양수율로 8시간 동안 시험을 실시한 결과, 지하수위는 15.4m 하강하였다. 이상과 같이 4차에 걸친 대수성 시험결과를 놓고 볼 때, 서귀포층 상부 용암누층에는 대수층이 발달하지 않고 있는 것으로 판단되며, 서귀포층 구간 내의 대수층은 수리성이 불량하여 양수시험 시 15.4m와 27.5m의 큰 수위 강하를 일으킨 것으로 해석된다.

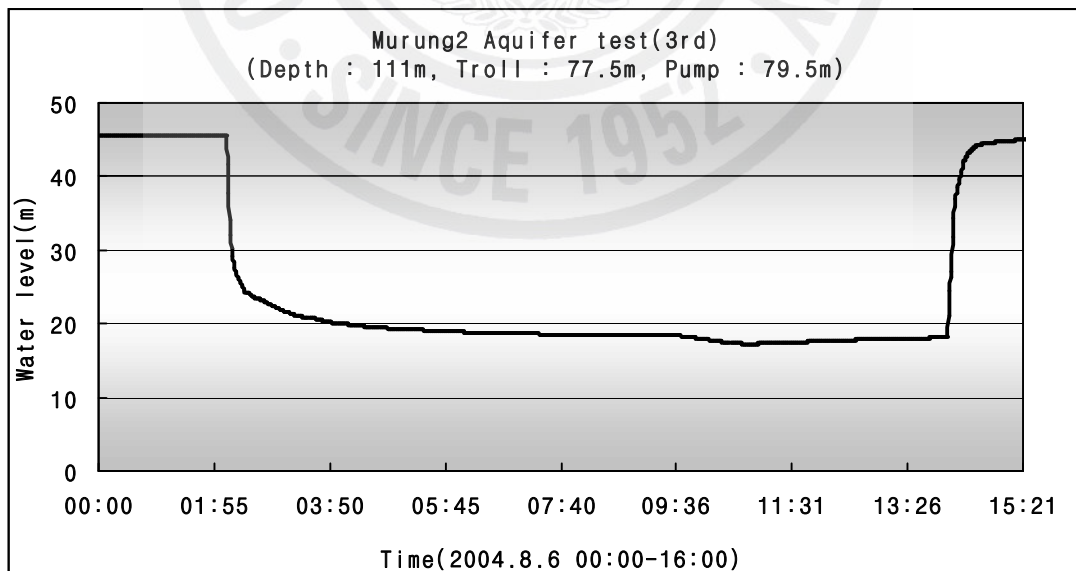


Fig. 13. The drawdown graphy which is happened under aquifer test in the MR2.

라. 상모지구

상모1관측정

상모1 관측정에서는 모두 5회 걸쳐 대수성 시험이 진행되었다. 제1차 시험은 지표 하 30m까지 굴착한 후 모터펌프를 30m에 설치하고 1,000m³/day 양수율로 12시간 동안 시험을 실시하였는데, 이 때 수위 강하량은 0.1m를 기록했다. 즉, 지표 하 23~26m 구간에 발달한 OB(감람석 현무암) 절리대가 제1대수층인 것으로 해석된다.

제2차 시험은 지표 하 73m까지 굴착 한 다음 37.3m 지점에 모터펌프를 설치하고 1,000m³/day 양수율로 9시간 동안 시험을 실시한 결과, 지하수위는 0.1m 밖에 하강하지 않았다. 지질주상도에 의하면, 제2대수층은 지표 하 50~72m 구간에 분포하는 유리쇄설성 각력암층인 것으로 해석된다.

제3차 시험은 지표 하 170m까지 굴착한 후 97.6m 지점에 펌프를 설치하여 상부 제1 및 2대수층을 차단시킨 다음, 그 하부구간을 대상으로 1,739m³/day 양수율로 12시간 동안 양수를 실시하였는데, 이 때 수위 강하량은 0.3m를 기록했다. 지질주상도에 의하면, 서귀포층과 화산암류 사이(지표 하 109~113m)에 원마도가 좋은 3~5cm 크기의 자갈층이 분포하고 있는데, 이 구간이 제3대수층인 것으로 판단된다.

상모2관측정

상모2 관측정에서는 2차례에 걸쳐 대수성 시험이 실시되었다. 제1차 시험은 지표 하 58m까지 굴착한 후 49.3m 지점에 모터펌프를 설치하고 1,000m³/day 양수율로 11시간 동안 시험을 실시하였는데, 이때 수위 강하량은 17m에 달하였다.

제2차 시험은 지표 하 325m까지 굴착한 다음 49.3m에 모터펌프를 설치하여 1,000m³/day 양수율로 12시간 동안 시험을 실시하였는데, 지하수위는 3.3m 하강하였다. 1차 및 2차 시험결과를 놓고 볼 때, 동일한 심도에 모터펌프를 설치하여 동일한 양수율로 지하수를 채수할 때 발생하는 수위 강하량은 굴착심도가 깊을수록 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 굴착심도가 깊을수록 포화대의 두께가 두꺼워져 지하수의 유입량이 많아지기 때문인 것으로 해석된다.

마. 판포(PP)

이 관측정에서 대수성 시험은 모두 4회가 실시되었다. 그러나, 1, 2, 3차 시험에서는 양수량 부족으로 시험이 중단되었다. 즉, 지표 하 35m, 74m, 100m까지 굴착한 후 실시한 3차례의 시험 모두가 대수층의 산출능력 불량으로 시험이 중단되었다. 지표 하 140m까지 굴착한 실시된 일정양수율 시험에서는 1,300m³/day 양수율로 7시간동안 실시하였는데, 지하수위는 15.68m 하강하였다.

이상의 대수성 시험결과를 놓고 볼 때, 이 관측정에서는 서귀포층 상부의 용암누층 구간에는 산출량이 많은 대수층은 발달하지 않고 있으며, 지표 하 92~97m, 98~113m, 118~120m에 분포하는 서귀포층 내의 미고결 모래층 구간이 대수층인 것으로 판단된다. 그러나, 지하수가 미고결 모래층으로부터 배출되기 때문에 양수 시에는 세립사가 지하수와 함께 토출되고 있을 뿐만 아니라, 대수층의 산출능력이 좋지 않기 때문에 수위 강하량도 16m에 달할 정도로 크게 발생하고 있는 것으로 해석된다.

바. 고산(KS)

이 관측정에서는 3회의 걸친 대수성 시험이 진행되었다. 제1차 시험은 지표 하 36m까지 굴착 한 다음 2,600m³/day 양수율로 24시간 동안 시험을 실시하였는데, 이 때 지하수위는 0.518m 하강하였다. 제2차 시험은 지표 하 95m까지 굴착한 다음 50m에 펌퍼를 설치하여 상부 대수층을 차단시킨 후 시험을 실시하였으나 양수량 부족으로 시험이 중지되었다. 지표 하 130m까지 굴착한 후 1,900m³/day 양수율로 24시간 동안 실시한 일정양수율 시험에서는 수위가 0.41m 하강하였다. 이와 같은 대수성 시험 결과를 놓고 볼 때, 이 관측정에서는 지표 하 36m 상부 구간에 산출량이 많은 대수층이 발달하고 있는 것으로 해석된다. 즉, 주대수층은 지표 하 18~23m 사이에 분포하는 절리발달 구간인 것으로 해석되며, 지표 하 48~72m 사이에 분포하는 유리쇄설성 각력암층은 지하수 산출능력이 불량한 것으로 해석된다.

사. 신도(SD)

이 관측정에서도 3회에 걸쳐 대수성 시험이 실시되었는데, 제1차 시험은 지표

하 50m까지 굴착한 다음 2,300m³/day 양수율로 24시간 동안 시험을 실시한 결과, 수위는 0.23m 하강하였다. 또한, 제2차 시험은 지표 하 101m까지 굴착한 후 44m 지점에 펌퍼를 설치하고 1,300m³/day 양수율로 24시간 동안 시험을 실시한 결과 11.18m의 수위강하를 기록하였다. 제3차 시험은 일정 양수율 시험으로서 지표 하 190m까지 굴착한 다음 2,600m³/day 양수율로 24시간 시험을 실시하였으며, 이 때 수위 강하는 0.43m를 기록하였다. 따라서, 이 관측정의 제1대수층과 제2대수층은 지표 하 21~38m와 52~72m 사이에 분포하는 유리쇄설성 각력암층인 것으로 해석되며, 제1대수층이 지하수 산출능력이 훨씬 양호한 것으로 판단된다.

아. 일과(IG)

이 관측정에서는 4회에 걸쳐 시험이 실시되었다. 제1차와 제3차 시험은 양수량 부족으로 단수가 되어 시험이 중단되었다. 제2차 시험은 지표 하 77m까지 굴착한 후 1,300m³/day 양수율로 24시간 동안 시험을 실시하였는데, 이 때 수위 강하량은 40.09m를 기록하여 본 연구 대상 관측정 중에서 수위 강하량이 가장 크게 발생하였다. 제4차 시험은 2,300m³/day 양수율로 19시간 진행된 일정양수율 시험으로서 지하수위는 11.71m가 하강하였다. 따라서, 이 관측정의 주대수층은 지표 하 53~67.5m 구간에 분포하는 유리쇄설성 각력암층인 것으로 판단되지만, 수위강하가 크게 발생하는 것으로 미루어 볼 때 지하수 산출능력은 불량한 것으로 판단된다.

자. 하모(HM)

이 관측정에서는 총 4회에 걸쳐 시험이 실시되었다. 제1, 2, 3차 시험은 각 대수층별로 실시되었고, 제4차 시험은 일정 양수율로 실시되었다. 제1차 시험은 지표 하 32m까지 굴착한 후 1,300m³/day의 양수율로 24시간 동안 시험을 실시하였는데, 1.717m의 수위 강하량을 나타내었고, 2차 시험은 2,900m³/day의 양수율로 24시간 동안 실시하였는데, 수위 강하량은 1.344m를 나타내었다. 제3차 시험은 지표 하 75m까지 굴착한 후 지표 하 32m에 펌퍼를 설치하고 2,050m³/일의 양수율로 24시간 동안 실시하였는데, 이 때 수위 강하량은 2.452m를 기록하였다. 제4차는 시험은 지표 하 140m까지 굴착한 후 24시간동안 2,200m³/day의 일정 양수

율로 실시한 결과, 1.607m의 수위강하를 나타내었다.

이 관측정에서는 대수성 시험이 진행되는 동안에도 조석의 영향에 의해 지하수위가 주기적인 등락을 반복하고 있기 때문에 양수에 의한 수위 강하량을 정확하게 산출하는 것이 불가하며, 또한 지표 하 20m부터 염분농도가 높은 염수가 부존하고 있기 때문에 타 관측정과 동일한 기준에 의해 대수층의 능력을 평가하는 것은 의미가 없는 것으로 판단된다.

4-3-2. 대수층의 수리성

Table 8은 연구대상 13개 관측정 중 조석의 영향을 심하게 받는 4개 관측정(한림1, 하모, 고산, 상모1)을 제외한 9개 관측정에서 정상적으로 진행된 대수성 시험자료를 근거로 산출한 대수층 상수를 나타낸 것이다. 투수량계수(m^2/day)와 수리전도도(m/day)는 HydroSOLVE Inc사에서 개발한 AQTESOLV 윈도우용 버전 2.5 전산프로그램을 이용하여 Unconfined와 Confined 조건에서 Cooper-Jacob(1946)의 공식을 적용하여 산출하였다.

수리전도도(Hydraulic conductivity) 혹은 투수계수(Coefficient of permeability)는 단위 시간 동안 단위 동수구배 하에서 단위 면적을 통하여 유출되는 지하수의 유출률로 정의되는 대수층 상수로서 지질매체의 투수성이 클수록 수리전도도의 값은 크다. 또한, 투수량계수(Transmissivity)는 동점성계수를 갖는 지하수가 단위 동수구배 하에서 대수층의 전 두께와 단위 폭으로 이루어진 면을 통해 1일 동안 유동하는 지하수량으로 정의된다. 따라서 투수량계수는 부존된 지하수가 투수될 수 있는 능력보다는 대수층의 성격을 평가하는 척도로 이용되고 있다(한정상, 1998) 비양수량은 지하수위를 1m 하강시켰을 때 관정을 통해 1일 동안 양수할 수 있는 지하수량을 의미한다. 따라서, 상기와 같은 3가지 대수층의 수리상수 값을 이용하면, 연구지역 대수층의 산출능력을 평가할 수 있다.

제시된 표에서 보는 바와 같이, 연구대상 9개 관측정에서 실시된 13회의 대수성 시험으로부터 얻어진 평균 양수율은 $1,371m^3/day$ 이나 그 범위는 $2,300\sim 900m^3/day$ 으로 비교적 넓은 편이다. 관정으로부터 지하수를 배출할 때 발생하는 수위 강하량은 평균 12.9m, 최소 0.1m, 최대 40.1m를 나타내어 관측정에 따른 차이가 매우 큰 편이다.

Table 8. Hydraulic coefficients of monitoring wells.

Well name	Test	Depth (m)	Pumping rate(m ³ /day)	Draw down (m)	Packing depth (m)	Transmissivity (m ² /day)		Hydraulic conductivity(m/day)		Specific yield (m ³ /day/m)
						Confined	Unconfined	Confined	Unconfined	
MR1	3rd	160	1,220	10.3	125.3	180.7	142.9	1.44	1.14	118.4
MR2	3rd	111	900	27.5	-	54.7	56.2	0.71	0.72	32.7
	4th	170	1,738	15.4	91.1	214.3	41.7	2.72	0.53	112.9
YS2	1st	58	1,000	17.0	-	116.6	144.7	2.84	3.53	58.8
	2nd	325	1,000	3.3	-	549.8	428.7	1.79	1.39	303.0
YS1	4th	77	1,310	2.3	-	962.8	956.7	14.06	13.97	569.6
	5th	150	1,711	3.3	60.9	1,052	1,279	11.81	14.36	518.5
YS2	3rd	185	1,750	10.0	42.6	357.1	343.6	2.51	2.41	175.0
HL2	4th	190	1,000	0.1	-	15,090	15,420	109.2	111.6	7,143
PP	4th	140	1,300	15.7	-	160.1	176.8	1.25	1.38	82.9
SD	2nd	101	1,300	11.2	44.0	172.8	226.4	3.03	3.97	116.3
IG	2nd	77	1,300	40.1	-	65.7	25.4	1.01	0.39	32.4
	4th	140	2,300	11.7	-	384.5	201.9	2.99	1.57	196.4
Mean			1,371	12.9		1,489 (336) [*]	1,496 (335)	11.95 (3.85)	12.7 (3.78)	727 (193)

* AQTESOLV for Window Version 2.5 Solution Model : Cooper-Jacob, 1946)

투수량계수의 값은 Confined와 Unconfined 조건 간에 큰 차이를 나타내지 않고 있으며, Unconfined를 기준으로 할 때 최대 15,090m³/day(한림2호공), 최소 25.4m³/day(일과 관측공 2차 시험)로 산출되어 관측정에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 최대값을 나타낸 한림2호공을 제외할 경우, 연구대상 8개 관측정의 평균 투수량계수는 335m³/day이다. 수리전도도 값 또한 Confined와 Unconfined 조건 간에 큰 차이를 나타내지 않고 있으며, Unconfined를 기준으로 할 때 최대 111.6m/day, 최소 0.39m/day, 평균 12.7m/day로서 변화가 큰 편이다. 최대값을 나타낸 한림2호공을 제외할 경우 평균 수리전도도는 3.78m/day이다. 비양수량의 경우, 한림2호공에서 최대치(7,143m³/day/m)를 나타내었고 무릉1호공 3차 시험과 일과 관측공 2차 시험에서 각각 32m³/day/m로 최소치를 나타내었으며, 평균값은 727m³/day/m이나 한림2호공을 제외하면 193m³/day/m이다.

이상과 같은 연구대상 관측정의 대수층 상수 값들을 이전의 연구결과와 비교해 보면, 다음과 같다. 즉, 연구대상 관측정의 평균 투수량계수는 제주도와 한국수자원공사(2003)가 광역상수도 및 해수침투 감시 관측정 88공을 대상으로 산출한 평균값(17,573m³/day)보다 훨씬 작으며, 한국농촌공사에서 개발한 309개의 공공 농업용 관정의 양수시험 자료를 이용하여 산출한 평균 투수량계수(1,953.9m³/day)보다 훨씬 작은 편이다. 또한 평균 수리전도도 역시 광역상수도 및 해수침투 감시 관측정보다 매우 작으며(10,861.2m³/day/m), 공공 농업용 관정의 평균 비양수량(283.8m³/day/m)보다도 작은 편이다. 그러나, 농업기반공사(현 한국농촌공사)가 2000년 제주도 지하수 보전관리계획 보고서에서 제시한 서부지역 101개 관정의 평균 투수량계수(115.5 m³/day)보다는 다소 많은 편이며, 평균 비양수량 역시 184.2m³/day/m으로 비슷한 편이다.

이와 같이, 연구대상 8개 관측정(한림2호공 제외)의 평균 투수량계수, 평균 수리전도도, 평균 비양수량 값이 제주도와 한국수자원공사(2003)에서 분석한 평균 값과 큰 차이를 나타내는 것은 분석대상 관정이 수리성이 양호한 지역에 설치된 광역상수도 관정과 해수침투 감시 관측정의 자료를 활용한데서 비롯되는 것으로 판단된다. 다시 말해서, 광역상수도 관정은 1일 평균 2,312m³에 달하는 많은 양의 지하수를 채수하여도 수위강하가 많이 발생하지 않는 지역에 설치되었기 때문에 대수층의 수리성이 양호한 것으로 분석되었다. 이와는 반면, 농업기반공사(2000)

에서 제시한 수리상수는 연구지역에 이미 개발된 공공 농업용 및 생활용 관정의 양수시험 자료를 근거로 분석되었기 때문에 본 연구의 결과와 비슷한 범위의 값을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

이상의 결과를 놓고 볼 때, 연구지역 중에서도 한림2 관측정의 대수층 산출능력은 광역상수도 관정 못지않게 아주 양호한 편이며, 상모2·용수1·용수2 관측정의 경우는 서부지역에 개발된 공공용 관정과 비슷한 대수층 산출능력을 보이는 것으로 판단된다. 그러나, 무릉1 및 2관측정을 비롯하여 판포·신도·일과 관측정은 대수층의 수리성이 전반적으로 불량한 것으로 평가된다.

4-3-3. 대수층의 분포

Fig. 14는 연구대상 관측정의 심도별 대수성 시험자료를 이용하여 산출한 대수층 수리상수와 그리고 지질주상도를 종합적으로 고려하여 작성한 A—'A 지질 단면선 상에 위치한 9개 관측정의 대수층 발달상태를 표시한 것이다.

제시된 그림에서 보는 바와 같이, 연구지역의 대수층은 크게 다음과 같이 3가지 유형으로 분류할 수 있다. 즉,

첫째, 평균 해수면 하 10~30m 사이의 화산암류의 절리대나 유리쇄설성 각력암층에 발달하는 대수층

둘째, 평균 해수면 하 40~60m 사이의 화산암류의 절리대나 유리쇄설성 각력암층에 발달하는 대수층

셋째, 서귀포층 직상위의 화산암류 절리대나 서귀포층과 용암류 사이의 사력층에 발달하는 대수층

넷째, 서귀포층 내의 사력층이나 미고결 모래층에 발달하는 대수층

이와 같은 유형에 따라 연구대상 관측정의 대수층 분포상태를 살펴보면, 상모1 관측정의 경우 상기와 같은 3가지 유형의 대수층이 모두 발달하고 있으며, 신도관측정은 첫 번째와 두 번째 유형의 대수층이, 무릉 관측정에는 첫 번째와 세 번째 유형의 대수층이 발달하고 있다. 또한, 하모·고산·한림1 관측정에는 첫 번째 유형의 대수층이 분포하고 있고, 일과 관측정은 두 번째 유형이, 판포 관측정은 네 번째 유형의 대수층이 발달하고 있는 것으로 해석된다.

한편, 제시된 그림에서는 비양수량 값을 $100\sim 300\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$, $500\sim 1,000\text{m}^3$

/day/m, 1,000~20,000m³/day/m으로 각각 표시하여 대수층의 산출능력을 상대 평가하였다. 대수층의 비양수량 분포를 보면, 한림1·고산·신도·상모1 관측정은 첫 번째 유형의 대수층에서 높은 비양수량 값을 보이고 있고, 상모1관측정에서는 두 번째와 세 번째 대수층에서도 비양수량 값이 크게 나타나고 있다. 이와는 반면, 판포·일과·무릉1 관측정은 비양수량이 100~300m³/day/m 사이의 값을 나타내 산출능력이 매우 불량한 것으로 판단되며, 용수1 및 하모 관측정은 비교적 양호한 비양수량 값을 나타내었다.

또한, 연구대상 관측정 중 한림1·상모1·하모 관측정을 제외하면, 전반적으로 심도가 깊어질수록 수위 강하량이 크게 발생하고 있음을 알 수 있는데(Table 8), 이는 심도가 깊어질수록 대수층의 수리성이 불량하다는 것을 의미하는 것이다. 이와 같은 현상이 발생하는 주된 원인으로서는 심도가 깊어질수록 서귀포층에 가까워지고 있을 뿐만 아니라, 고토양층 등의 퇴적층도 용암류 사이에 협재되어 있어 화산암층의 수리성이 전반적으로 불량한데서 비롯되는 것으로 해석된다. 이 같은 해석은 고동찬(2005)이 서부지역 관정 지하수를 대상으로 실시한 CFC-12 걸보기 연령 값 연구결과에서도 잘 나타나고 있는데, 서부지역 지하수의 CFC-12 걸보기 연령은 평균 30년, 최대 62년으로서 지하수의 순환속도가 매우 느리다는 것을 보여주고 있다. 다시 말해서, 서부지역의 전반적인 지하지질은 투수성이 불량하기 때문에 지하수의 순환속도가 느리며, 지하수를 채수할 때 발생하는 수위 강하도 크게 발생하고 있는 것이다.

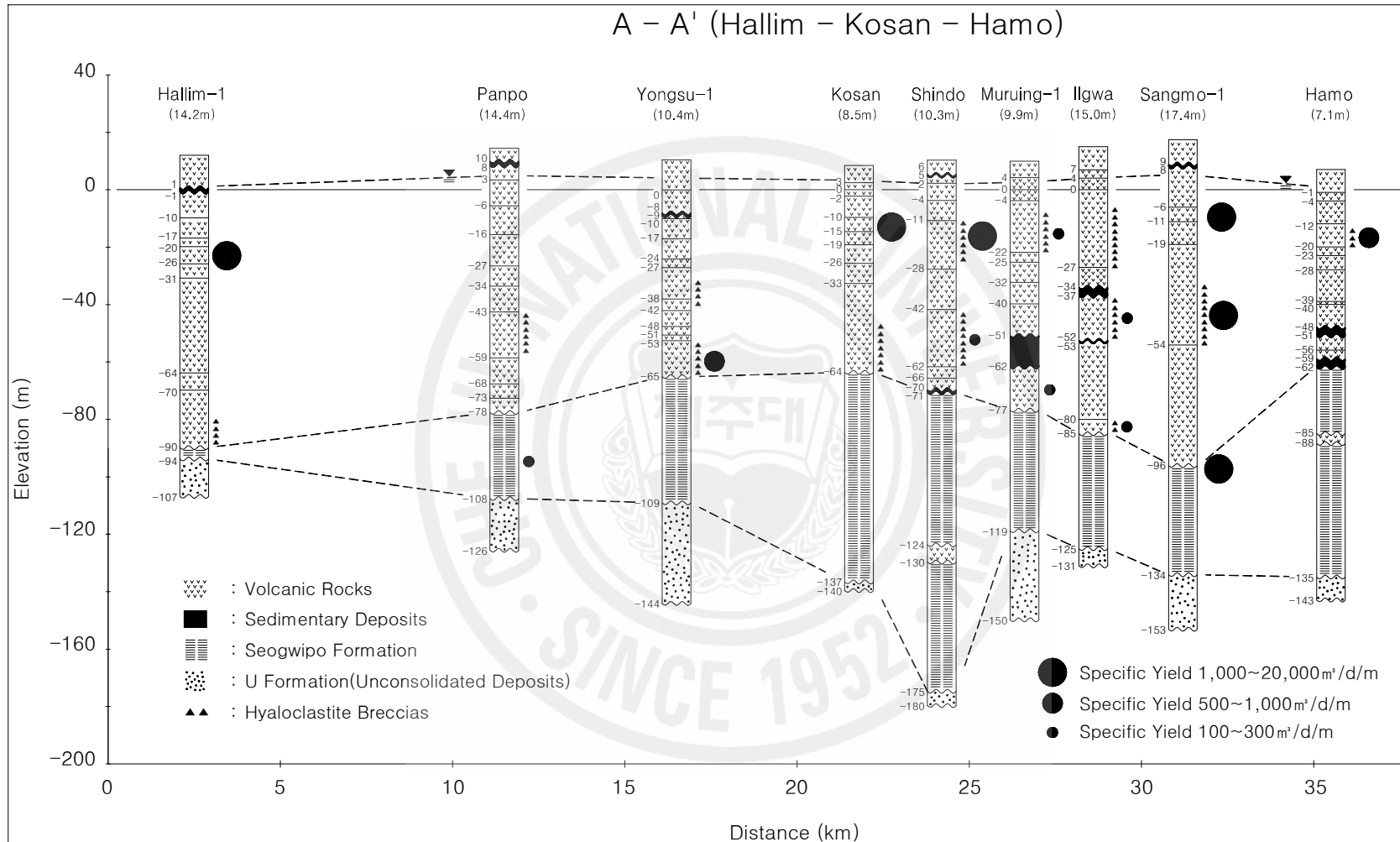


Fig. 14. The specific yield of each monitoring wells.

4-3-4. 대수층의 수질특성

일반적으로 지하로 침투된 빗물은 지하수체까지 이동하는 동안에 비포화대를 거치면서 물-암석반응을 일으키게 되며, 지하수의 유동계를 따라 하류지역으로 이동하는 과정에서 토양과 암석성분이 많이 용해된다. 특히, 제주도는 투수성이 좋은 화산암으로 이루어져 오염취약성이 높기 때문에 지상에 분포하는 각종 점 및 비점오염원으로부터 배출된 여러 가지 오염물질에 의한 영향을 받기 쉬운 지역이라 할 수 있다.

본 연구지역은 해안가를 따라 취락지가 형성되어 있을 뿐만 아니라, 농경지가 넓게 분포하고 있으며, 크고 작은 축산시설들도 분산되어 있어 이들 오염원으로부터 발생하는 생활하수, 축산폐수, 농경지에 살포되는 비료 및 농약 등 다양한 오염물질이 지하침투에 의해 고유한 지하수의 수질특성이 변질될 가능성이 높을 것으로 예상되고 있다. 또한, 해안에 인접해 있기 때문에 해수의 영향을 받을 가능성도 배제할 수 없기 때문에 지하수의 수질이 심도에 따라 어떠한 변화를 보이고 있으며, 지역별로는 어떠한 차이를 나타내고 있는지를 파악하는 것은 지하수의 이용 및 수질보호 측면에서 중요한 정보로 이용될 수 있다. 그러나, 지금까지 제주도 지하수와 관련한 연구에서는 대수층별 음·양이온 성분의 변화에 대해 체계적으로 연구가 수행된 바 없다. 따라서, 본 연구에서는 제주특별자치도 수자원본부에서 연구대상 관측정에 대하여 실시한 음·양이온 성분 분석결과를 이용하여 연구지역의 심도별 수질특성을 해석하였다.

Table 9는 연구대상 13개 관측정을 대상으로 실시한 심도별(또는 대수층별) 및 관통정 양수시험 과정에서 채수한 지하수 시료의 음·양이온 성분 분석 값을 나타낸 것이다.

우선, 연구대상 관측정들의 전반적인 음·양이온 성분 값의 분포를 살펴보면, 상모1·2 및 일과 관측정을 제외한 10개 관측정의 음·양이온 성분들은 전반적으로 높은 값을 보이고 있다. 한림1·신도·하모 관측정의 경우, 질산성질소를 제외한 7가지 성분 값은 심도가 깊어질수록 현저하게 증가하는 현상을 나타내었는데, 이는 담수지하수체 하부에 염분을 많이 함유한 염지하수(saline groundwater)가 부존하고 있기 때문인 것으로 해석된다.

Table 9. The groundwater compositions of the each aquifer in the monitoring wells, study area.

Well Name	Aquifer test		Packing Depth (m)	Cl ⁻ (mg/ℓ)	NO ³⁻ -N (mg/ℓ)	SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)	HCO ₃ ⁻ (mg/ℓ)	K ⁺ (mg/ℓ)	Ca ²⁺ (mg/ℓ)	Na ⁺ (mg/ℓ)	Mg ²⁺ (mg/ℓ)
	Test	Dep.(m)									
HL1	1st	22	-	32.0	18.4	16.0	100.40	7.45	32.66	23.69	16.55
	2nd	50	-	1,309.0	6.2	75.0	61.00	29.73	45.49	779.95	113.90
	3rd	80	55	9,738.0	3.3	1,450.0	108.58	192.20	229.40	5,124.20	668.80
	4th	120	-	8,537.0	4.3	1,132.0	90.28	173.69	503.18	3,789.92	183.70
HL2	1st	67	-	19.0	8.5	3.0	63.44	3.80	11.25	10.43	9.40
	2nd	100	-	8.0	3.4	2.0	31.72	1.78	5.70	6.06	3.66
	3rd	128	98	14.0	5.8	6.0	61.00	4.06	11.52	11.27	7.28
	4th	190	-	15.0	6.3	5.0	51.24	4.39	10.62	11.98	7.85
YS1	2nd	38	-	65.0	37.6	25.0	48.80	7.33	35.64	25.48	29.95
	3rd	54	-	35.0	19.7	15.0	148.40	46.37	97.96	25.99	2.81
	4th	73	-	19.0	1.0	5.0	31.72	6.24	13.27	15.80	3.21
YS2	1st	90	-	28.0	17.4	18.0	46.36	5.13	19.31	14.31	13.96
	3rd	185	42.6	35.0	19.0	20.0	34.48	5.34	19.94	13.78	16.52
	4th	185	42.6	33.0	18.2	19.0	47.46	5.86	27.47	13.84	17.69
MR1	1st	32	-	22.0	13.9	16.0	43.92	4.40	15.46	11.23	11.65
	3rd	160	34.7	51.0	2.1	13.0	50.02	6.03	47.55	23.93	8.96
	4th	160	-	15.0	0.5	5.0	65.88	4.36	11.02	13.09	3.37
MR2	3rd	111	-	14.0	2.6	6.0	65.88	4.83	14.23	11.98	7.63
	4th	170	91.1	23.0	13.6	19.0	61.00	6.47	19.10	13.50	11.83
SM1	1st	30	-	10.0	3.1	4.0	41.48	3.76	5.97	7.29	4.75
	2nd	73	-	10.0	2.7	4.0	40.26	3.58	7.22	7.63	4.52
	3rd	170	97.6	12.0	5.6	7.0	42.70	4.23	8.73	8.78	5.88
SM2	1st	58	-	10.0	0.3	4.0	57.34	5.99	4.89	17.80	2.23
	2nd	325	-	12.0	1.3	8.0	102.48	8.30	12.53	25.20	2.59
P P	3rd	100	-	69.0	10.5	24.0	65.88	11.24	32.07	66.96	20.12
	4th	140	-	41.0	5.1	17.0	114.68	21.95	52.30	94.25	25.20
KS	1st	36	-	37.0	15.8	16.0	43.92	4.46	17.72	21.26	19.39
	2nd	95	50	33.0	1.0	10.0	68.32	3.51	14.65	18.17	15.49
	3rd	140	-	37.0	13.4	15.0	58.56	4.32	16.96	20.45	16.00
SD	1st	50	-	1,227.0	25.0	694.0	78.08	112.58	329.10	4,182.30	634.48
	2nd	101	44	1,135.0	0.7	218.0	97.60	44.07	69.18	2,603.28	142.33
	3rd	190	-	1,861.0	4.6	256.0	82.96	68.55	148.00	2,046.20	307.00
IG	2nd	77	-	10.0	0.4	4.0	75.64	3.66	15.19	15.77	5.48
	4th	140	-	13.0	0.7	7.0	73.20	3.83	11.15	12.80	4.94
HM	1st	30	-	3,873.0	38.7	893.0	93.94	57.50	104.50	1,645.00	212.25
	2nd	30	-	8,264.0	23.1	1,494.0	112.24	268.90	369.45	7,799.00	1,150.50
	3rd	75	32	8,572.0	24.9	1,640.0	117.12	266.25	355.95	8,589.50	1,180.40
	4th	140	-	9,177.0	18.8	2,319.0	122.00	494.05	759.20	8,484.40	1,245.00

※ 1st 및 4th 등은 대수성시험 차수를 의미하는 것임

즉, 이들 관측정이 위치한 지역에는 담-염수 경계면을 갖는 기저지하수가 부존하고 있기 때문에 심도가 깊어질수록 염지하수의 영향에 의해 음·양이온 성분 값들이 높아지고 있는 것으로 판단된다. 이와는 반면, 심도가 깊어질수록 질산성질소의 농도는 현저하게 낮아지는 현상을 나타내고 있는데, 이는 지표에 가까운 대수층은 지상의 오염원으로부터 배출되는 오염물질의 영향을 받고 있는 반면, 심부로 갈수록 그 영향의 정도는 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 이 같은 해석은 윤정수와 박상운(1998)의 연구결과와도 일치하고 있는데, 그들은 저지대지역 용천수의 질산성질소 농도가 강수량과의 비례적인 관계를 나타내는 현상은 상류구배 구간의 오염원으로부터 만들어진 암모니아성질소가 강수와 함께 지하로 침투하여 시간이 지남에 따라 질산성질소로 되어 하류지역의 용천수에서 높게 나타나는 것으로 해석하였다. 지하수 중의 질산성질소 오염원에 대해 오윤근과 현익현(1997), 송영철외 2인(1999), 강봉래외 2인(2002), 송성준외 3인(2003) 등이 연구한 바에 의하면, 대부분이 질소질 화학비료로부터 유래되고 있으며 일부는 축산폐수·생활하수·토양 유기물 분해로부터 비롯되고 있는 것으로 밝혀져 질산성질소 오염이 인위적인 활동으로부터 기인하고 있다.

연구대상 관측정은 음·양이온 성분 값과 지하수 부존형태를 고려하면, 다음과 같이 3가지로 유형으로 구분할 수 있다. 즉,
첫째, 기저지하수 부존지역에 위치한 관측정(한림1·신도·하모)

이들 관측정의 수질은 동부지역의 기저지하수 부존지역에서처럼 염소이온과 나트륨 이온 등 해수에 기원을 둔 성분 함량이 높다.

둘째, 준기저지하수 부존지역에 위치한 수질이 양호한 관측정(상모1·상모2·일과)

이들 관측정의 수질은 비교적 양호하여 먹는물 수질기준을 충족시키고 있다.

셋째, 준기저지하수 부존지역에 위치한 수질이 불량한 관측정(한림2 등 7개 관측정)

이들 관측정은 전반적으로 음·양이온 성분 값이 높으며, 특히 지표에 가까운 심도(대수층)에서 질산성질소 함량이 높다.

Table 9는 연구지역에 설치된 관측정의 지하수 수질상태를 다른 지역과 상대평가를 하기 위하여 상기와 같이 3가지 유형으로 분류한 후, 각각의 음·양이온 성분 값의 평균과 중앙값을 구한 다음, 제주도의 배경수질(제주도, 2000)과 동부지역의 염지하수 수질자료(제주특별자치도 수자원본부 자료)와 비교한 것이다.

제시된 표에서 보는 바와 같이, 첫 번째 유형에 해당하는 기저지하수 부존지역에 위치한 한림1·신도·하모 관측정의 음·양이온 평균값과 중앙값은 동부지역의 염지하수와 비슷한 조성을 나타내고 있는 것으로 파악되었다. 다만, 질산성 질소는 동부지역 염지하수에서가 훨씬 낮은 값을 보였다. 두 번째 유형(PBG I)의 경우는 제주도의 배경수질과 큰 차이를 나타내지 않고 있음을 알 수 있으며, 세 번째 유형(PBG II)의 경우는 음·양이온 성분 값들이 배경수질보다는 높은 반면, 동부지역의 염지하수보다는 훨씬 낮은 것으로 파악되어 인위적인 오염물질에 의한 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

Table 10. The Compared of water quality with study area, background water quality of entire island and saline groundwater in the eastern area.

Classification		Cl ⁻ (mg/ℓ)	NO ₃ ⁻ -N (mg/ℓ)	SO ₄ ²⁻ (mg/ℓ)	HCO ₃ ⁻ (mg/ℓ)	K ⁺ (mg/ℓ)	Ca ²⁺ (mg/ℓ)	Na ⁺ (mg/ℓ)	Mg ²⁺ (mg/ℓ)	
Background waterquality	Mean	8.8	1.4	1.9	45	2.6	4.2	10.3	3.3	
	median	5.8	0.9	1.9	29.9	2.1	3.9	6.1	3	
SG (Eastern Area)	Mean	7,729	6.0	1,147	78.0	144.0	257.0	3,949	527	
	median	3,549	1.4	775.5	69.2	69.6	111.1	1,659	1,659	
Study Area	BG	Mean	4,509.9	15.3	823.6	88.8	136.6	222.7	3,299.6	438.4
		median	3,873.0	15.8	893.0	93.9	57.5	104.5	1,645.0	183.7
	PBG(I)	Mean	11.1	2.5	5.6	59.8	4.7	9.3	13.0	4.6
		median	11.0	2.0	5.5	51.2	4.0	8.6	10.8	4.8
	PBG(II)	Mean	30.7	10.78	13.0	60.1	8.1	24.7	22.2	12.6
		median	30.5	9.5	15.0	54.9	5.0	17.3	14.1	11.7

※ SG : Saline Groundwater, BG : Basal Groundwater, PBG : Parabasal Groundwater

4-4. 지하수 부존특성 해석

제주도 지하수의 부존형태에 대해서는 1960년대부터 논의되기 시작하였다. 남기영(1966)은 제주도에는 상층부 지하수(High-Level Groundwater)와 기저지하수(Basal Groundwater)의 두 종류의 지하수가 발달하는 것으로 제시하였다. 즉, 상층부 지하수는 기저지하수 상부에 존재하는 지하수로서 불투수층압이나 반투수층압에 의하여 기저지하수와 분리되는 지하수이고, 기저지하수는 상층부 지하수와 구별되어 더 깊은 곳에 발달하는 일명 「Ghyben-Herzberg 렌스」라 하였다. 김옥준(1969)은 제주도의 지하수를 상부유동 지하수(High Level Groundwater)와 기저지하수(Basal Groundwater)로 구분한 바 있다. 또한, 산업기지개발공사(1981, 현 한국수자원공사)는 제주도의 지하수 부존형태를 상위지하수(High Level Groundwater), 기저지하수(Basal Groundwater) 및 준기저지하수(Parabasal Groundwater)의 3가지 형태로 구분하여 ‘준기저지하수’라는 개념을 새롭게 도입하였으며, 상위지하수는 고지대 및 남제주 전역에 넓게 분포하고, 해수상부에 Lens 상으로 부존하는 기저지하수는 동부지역에, 그리고 준기저지하수는 북부 및 서부 일부지역에 부존하는 것으로 제시하였다. 고기원의 6인(1993), 고기원(1997)은 지하지질구조와 지하수의 산출상태에 따라 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수(상부준기저, 하부준기저), 기반암지하수의 5가지 형태로 구분하고 그 각각의 특성에 대하여 설명하였으며, 제주도·한국수자원공사(2003)은 기저지하수, 준기저지하수(상부준기저, 하부준기저), 상위지하수, 기저 및 준기저 혼합지역으로 구분하였다.

이상과 같이, 그동안 수행된 연구에서는 제주도 전역의 지하수 부존형태를 기저지하수, 준기저지하수, 상위지하수, 기반암지하수의 4가지 형태로 분류되고 있다. 이처럼, 광역적인 지하수 부존형태에 대해서는 비교적 잘 정리되어 있는 편이지만, 지역적 및 국지적인 지하수 부존형태에 대해서는 매우 미흡하여 동부지역을 대상으로 고기원의 3인(2003)의 연구를 제외하면 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 연구지역의 지하지질 분포상태, 공내 물리검층 결과, 심도별 대수성 시험 및 수질분석 자료, 전기전도도 검층자료 등을 종합하여 서부 해안지역의 지하수 부존형태에 대하여 해석함과 아울러, 지하수 부존 모식도를 제시하였다.

우선 연구지역 지하수의 수직적인 수질변화를 파악하기 위하여 4개(고산, 신

도, 일과, 한림1) 관측정을 대상으로 주기적으로 실시된 전기전도도 검층자료를 해석하였다. Fig15는 고산과 일과 관측정을 대상으로 2007년 10~12월 사이에 2시간 간격으로 실시된 전기전도도 검층 자료를 나타낸 것이다. 이들 관측정의 전기전도도 값은 $120\sim 530\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 좁은 범위에서 변화를 보이고 있으며, 상부구간에서 비교적 높은 값을 보이지만 심도가 깊어짐에 따라 전기전도도 값은 감소한 후 대체로 해수면 하 40~50부터 일정한 값을 유지하고 있다. 이처럼, 상부층에서 전기전도도 값이 높은 것은 지표로부터의 오염물질의 영향을 받기 때문에 생겨나는 현상으로 해석되며, 하부층에서 전기전도도 값이 일정하게 유지되고 있는 것은 해수와의 혼합이 이루어지지 않고 있음을 보여주는 것이다.

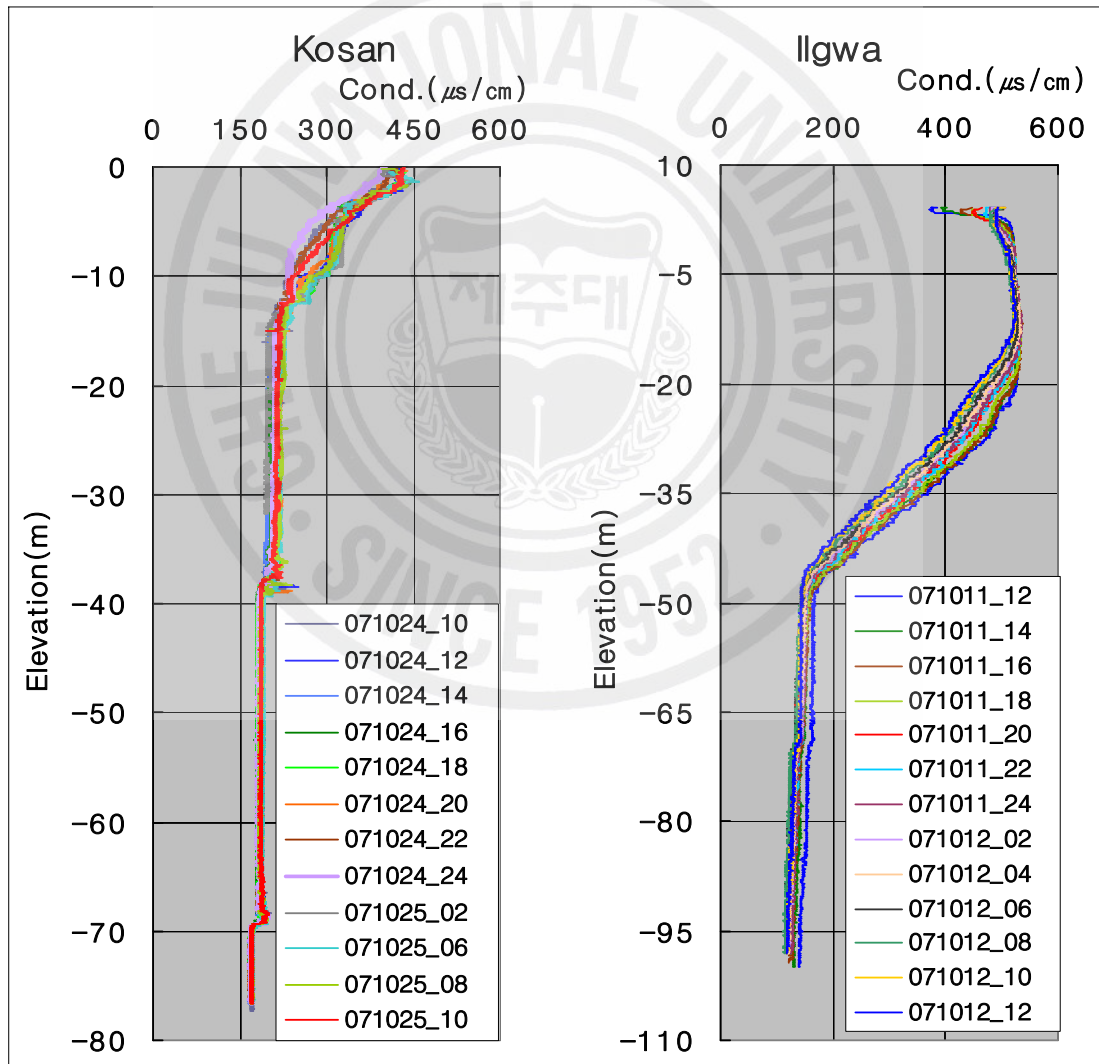


Fig. 15. Electric conductivity logs with time in the Kosan and Ilgwa monitoring wells, study area.

다시 말해서, 이들 관측정은 해안으로부터 200m(일과)~445m(고산) 밖에 떨어져 있지 않은 거리에 위치하고 있음에도 불구하고, 해수면 하부에서 해수와 혼합이 발생하지 않고 있는 것은 서귀포층의 지하분포 상태와 밀접한 관련성이 있는 것으로 보인다. 즉, 고산 관측정에서 서귀포층은 평균 해수면 하 64m부터 분포하고 있고, 일과 관측정의 경우는 평균 해수면 하 85m이다. 또한, 이들 관측정의 평균 지하수위는 각각 El. +2.98m(고산)와 El. +4.10m(일과)에 형성되고 있는데, 만일 이들 관측정에서 Ghyben-Herzberg 원리(G-H원리)에 의한 담-염수 경계면의 형성된다고 가정할 때, 이론적인 담-염수 경계면의 심도는 고산 관측정에서 해수면 하 120m이고, 일과 관측정은 이 보다 더 깊은 해수면 하 164m가 된다. 그러나, 전술한 바와 같이, 투수성이 불량한 서귀포층은 이론적인 담-염수 경계면 분포심도의 1/2 수준인 평균 해수면 하 64m와 85m에서부터 분포하고 있기 때문에 담수와 해수의 비중 차이에 의한 담-염수 혼합대는 형성되기 어려운 지하지질구조를 이루고 있다고 할 수 있다.

Fig. 16은 한림1과 신도 관측정에서 2007년 4~7월 사이에 측정된 전기전도도 검층결과를 나타낸 것이다. 제시된 그림에서 보는 바와 같이, 이들 관측정의 전기전도도 값은 전술한 고산과 일과 관측정과 달리 담수에서부터 염수 범위에 이르는 값을 나타내고 있다. 또한, 전기전도도 값이 매우 큰 범위에서 변화하고 있는데, 신도 관측정의 경우, 상부로부터 담수지하수-저염지하수(slightly saline water 또는 brackish water)-담수지하수-염지하수(saline water)의 다층구조를 이루고 있으며, 한림1 관측정도 담수지하수-저염지하수-염지하수-저염지하수의 복잡한 구조를 나타내고 있다.

이와 같은 두 관측정의 수직적인 전기전도도 변화는 층상 대수층(layered aquifer 또는 multi-aquifer)이 발달하고 있음을 의미하는 것으로서 Fetter(1998)는 불균질한 지질로 이루어진 해안지역에서는 수질조성이 다른 층상의 대수층이 발달할 수 있음을 제시하였다. 또한, 미국 로스엔젤레스로부터 북서쪽으로 60 마일 떨어진 곳에 위치하고 있는 Oxnard Plain의 대수층은 지질상태에 따라 상부에서 하부로 주수 대수층(perched aquifer), Oxnard aquifer, Mugu aquifer 순의 3개의 대수층으로 이루어져 있는데, 주수 대수층은 염소이온이 23,000mg/ℓ로 지극히 높은 반면, 중간에 위치해 있는 Oxnard aquifer는 염소이온 농도가 180~

1,900mg/l이며, 가장 하부에 위치한 Mugu aquifer의 경우는 76mg/l로 매우 낮은 값을 보인다(Izbicki, 1996). 제주도에서도 이와 같은 사례 연구가 수행된 바 있는데, 고기원의 2인(1998)은 한림읍 귀덕리 해안지역에서 층상의 대수층이 발달하고 있음을 보고한 바 있다. Luszczynski and Swarzenski(1960, 1962, 1966)는 뉴욕의 롱아일랜드를 대상으로 실시한 연구에서 지그제그형 담-염수 경계면은 층상대수층(multi-aquifer)의 지하수 시스템 때문인 것으로 해석하였다. 그들은 또한, 층상대수층의 지하수 시스템에서 층상염수췌기(multiple saltwater wedge)는 지하수 시스템의 투수성 변화에 의한 현상인 것으로 해석하였다.

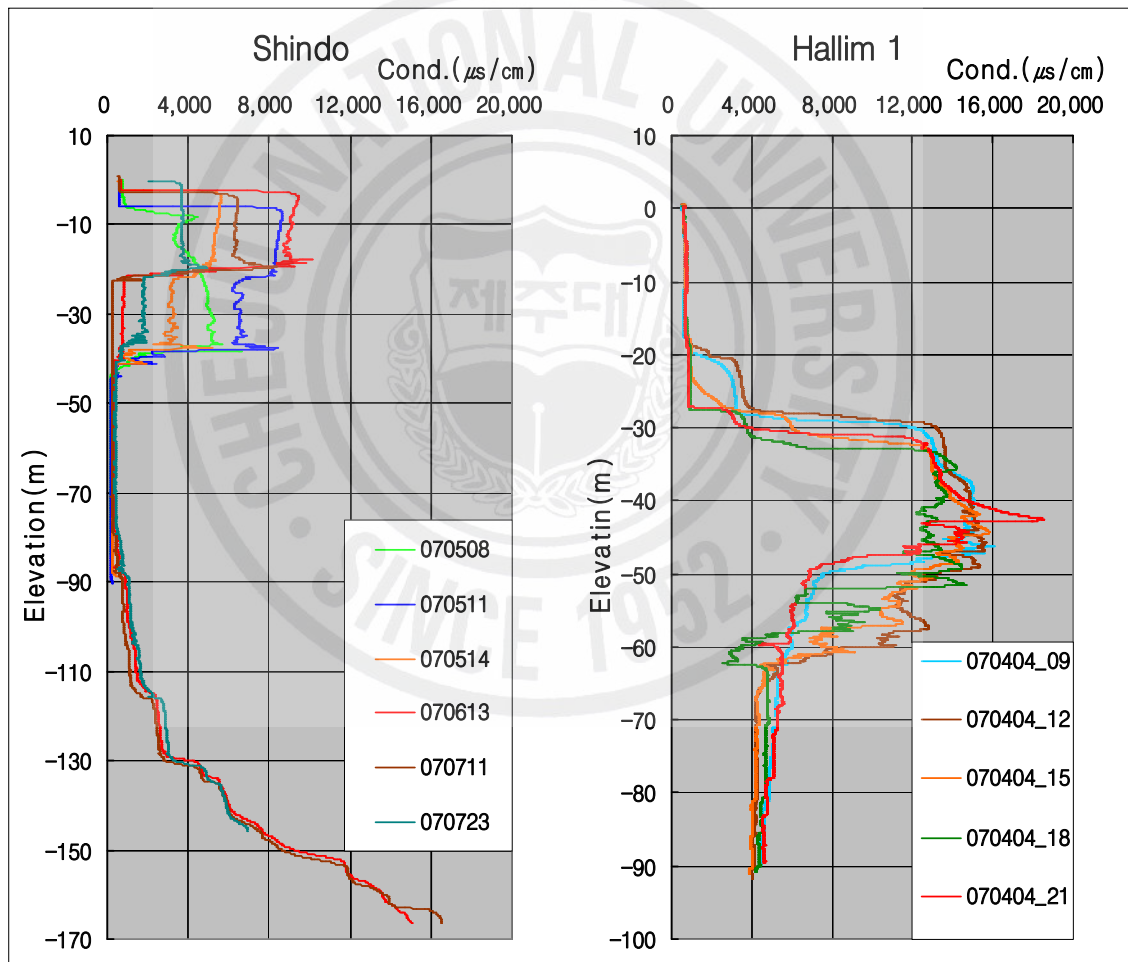


Fig. 16. Electric conductivity logs with time in the Shindo and Hallim 1 monitoring wells, study area.

이들 관측정에서 서귀포층의 분포심도는 신도 관측정이 El. -71m이고, 한림1

관측정은 El. -90m이다. 또한, 이들 관측정의 평균 지하수위는 각각 El. +0.99m와 El. +0.46m인데, G-H원리에 의해 담-염수 경계면이 형성될 수 있는 심도는 각각 평균 해수면 하 40m와 18m이다. 이와 같은 점으로 미루어 볼 때, 신도와 한림1 관측정에서 서귀포층은 이론적인 담-염수 경계면이 형성될 수 있는 심도보다 훨씬 하부에 분포하고 있는 것이다. 결론적으로 이 두 관측정이 분포한 지역에서 서귀포층은 너무 깊은 곳에 분포하고 있기 때문에 해수의 유입을 차단시켜 주는 수문지질학적 방벽(hydrogeological barrier)의 역할을 하지 못하는 것으로 해석된다.

Fig. 17은 한림1호공과 하모 관측정으로부터 얻어진 조사자료를 근거로 한림1호공에서 2호공을 연결한 단면, 그리고 하모관측정과 상모2 관측정을 연결한 단면상의 지하수 부존 모식도를 나타낸 것이며, Fig. 18은 연구지역과의 비교를 위해 제주도 동부 수산지역의 모식도(고기원의 2인, 2006)를 나타낸 것이다.

Fig. 17에 제시된 바와 같이, 서부 해안지역은 동부지역과는 상이한 지하수 부존특성을 나타내고 있다. 우선, 한림1호공과 2호공을 연결한 단면상의 지하수 부존 모식도를 보면, 한림1호공 주변의 해안지역에는 수질조성을 달리하는 층상 대수층 구조를 이루고 있으나 이 관측정에서 약 1.5km 떨어진 내륙 쪽부터는 담수지하수체가 부존하고 있다. 한라산 고지대 및 중산간 지역에서 함양된 지하수는 동수구배를 따라 해안지역으로 유동하여 절리 또는 파쇄대, 혹은 유리쇄설성 각력과 같은 화산암층의 투수성 지질구조를 따라 유입된 해수와 만나 혼합대를 형성하고 있는데, 혼합대에서의 염분농도는 대수층의 담수 유출량 정도에 따라 좌우되기 때문에 담수 유출량이 많은 대수층에서는 염분농도가 낮은 저염지하수(brackish water 또는 slightly saline water)가 부존하고, 담수 유출량이 적은 대수층에서는 고염분지하수(saline water)가 부존하는 층상구조를 이루고 있는 것으로 해석된다. 이 같은 해석은 하와이 오아후섬의 층상 대수층 시스템에서 수문지질학적 제어에 대한 수치해석 연구를 실시한 Oki et al(1998)의 연구결과와도 맥락을 같이하는 것이다. 즉, 그들은 오아후섬 진주만 지역의 상부 석회암층 내의 지하수위와 염분도 분포는 지하수 유출량, 상부 석회암층 내의 층서적 변화, 진흙층의 연속성과 수리전도도에 의해 조절된다고 제시하였다.

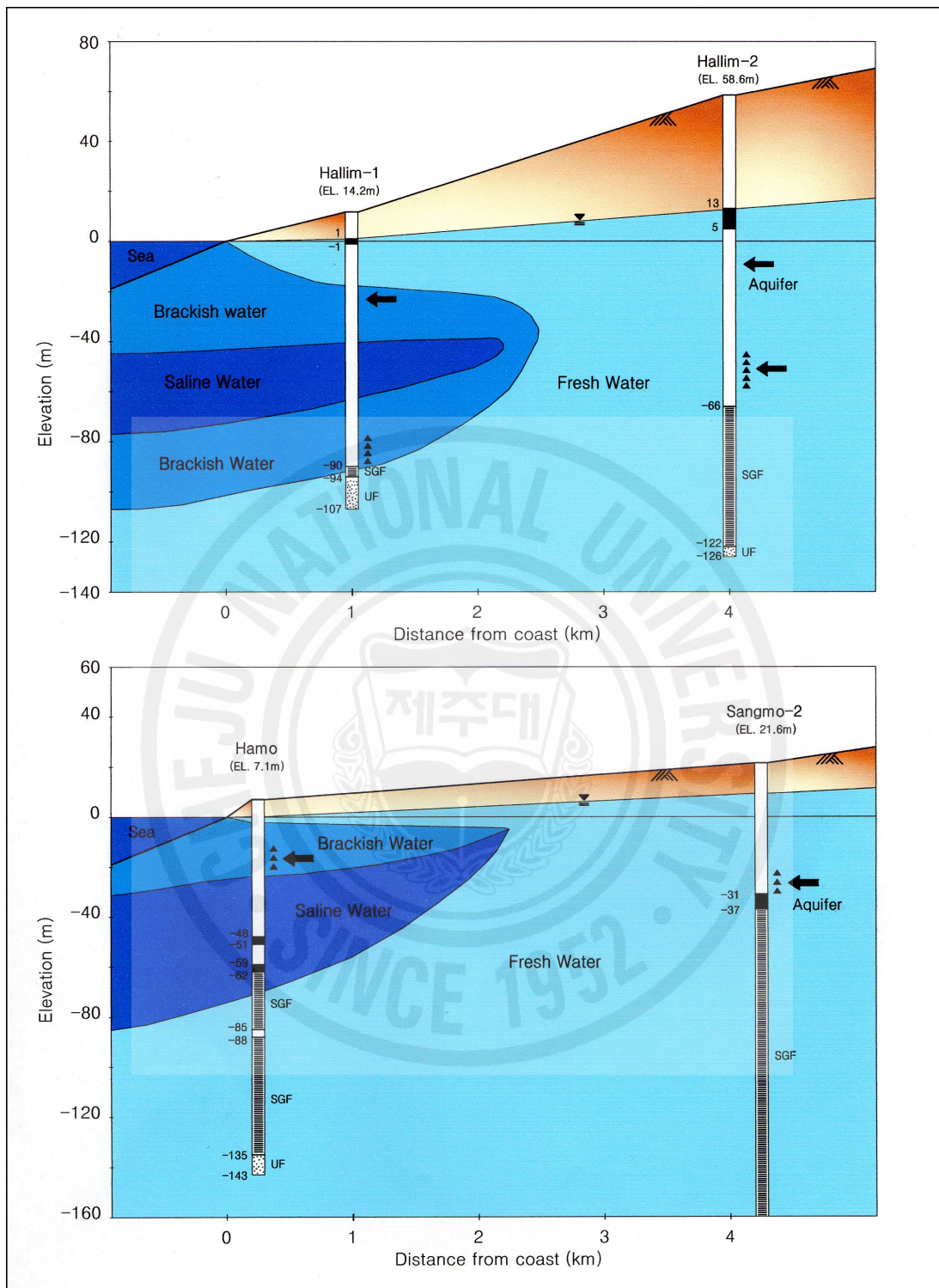


Fig. 17. Diagrammatic representation of groundwater occurrence and layered aquifer in the HL1 - HL 2 and HM - SM 2 sections, western Jeju.

이와 같은 지하수 부존형태로 인하여 한림1호공이 위치한 한림읍 수원리 해안가의 용천수들은 염소이온이 비교적 높은 값을 나타내고 있는데, 쥐물(남당코 지물) 용천수의 경우 염소이온이 1,810mg/ℓ 이고, 역물 용천수는 1,151mg/ℓ 로 조사되었다(제주도, 1999). 그러나, 내륙 먼 곳에서부터 심부를 따라 유동하는 심층 지하수 흐름(deep flow path)은 저염지하수 하부의 지층에서 확산 및 혼합작용을 통해 해안으로 배출되고 있다(Fetter, 1998).

한편, 하모에서 상모2 관측정을 연결한 단면상의 지하수 부존형태는 전술한 한림지역과는 다소 상이한 모습을 보이고 있다. 즉, 해안지역에서 담수 지하수체의 두께가 매우 얇을 뿐만 아니라, 담수지하수 - 저염지하수 - 염지하수 - 담수 지하수의 층상구조를 나타내고 있고, 저염지하수와 염지하수 켜기는 하모 관측공으로부터 내륙 약 2km 거리까지 분포하고 있다.

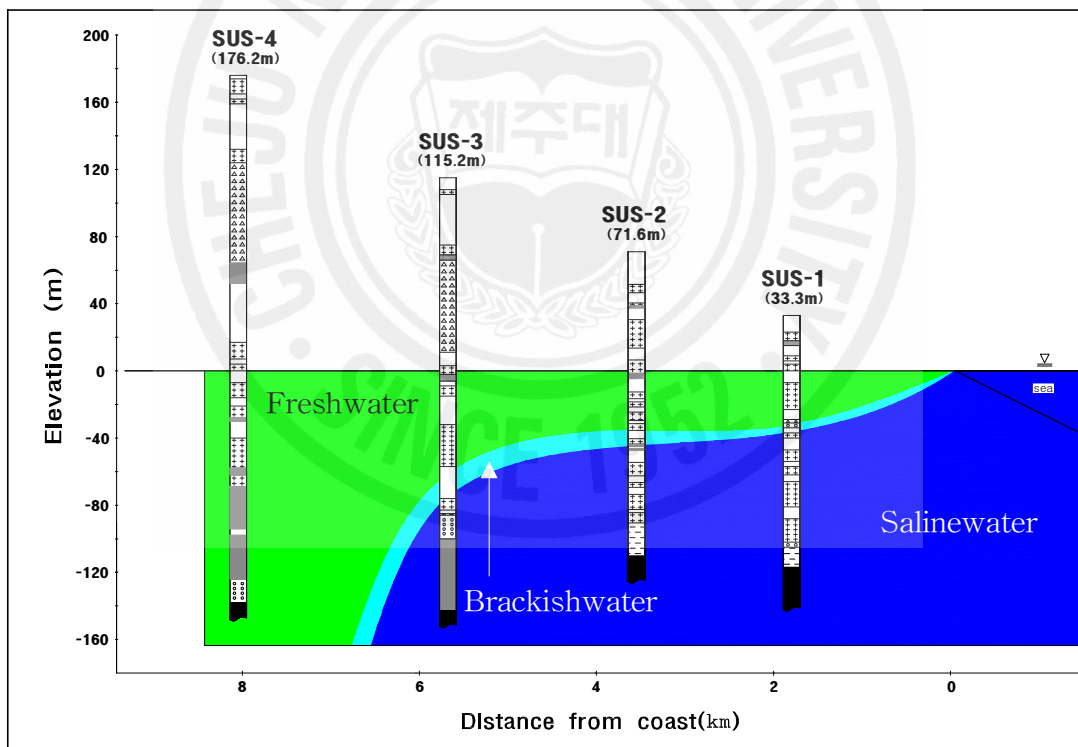


Fig. 18. Diagrammatic representation of groundwater occurrence in the Susan area, eastern Jeju(After Koh et al., 2006)

한림과 하모지역의 지하수 부존형태를 제주도 동부의 수산지역(Fig. 18)과 비교해 보면, 다음과 같은 차이점이 있음을 알 수 있다. 즉,

첫째, 수산지역이 한림 및 하모지역보다 염지하수체 분포범위가 훨씬 넓다.

둘째, 염지하수체의 두께도 수산지역이 훨씬 더 두텁다.

셋째, 담-염수 혼합대(저염지하수)는 수산지역이 훨씬 얇다.

넷째, 수산지역에는 층상대수층 구조를 이루고 있지 않다.

다섯째, 수산지역이 담수지하수체의 두께 좀더 두텁다.

이와 같은 차이를 나타내는 주된 수문지질학적 요인은 (1) 지하지질구조의 상이성, (2) 지하수 함양량의 차이, (3) 대수층의 수리성 및 담수 지하수 유출량의 차이, (4) 지하수위 분포 및 동수구배에서의 차이 등을 고려할 수 있다. 정역학적 상태에서 수직적인 담수렌즈의 두께는 G-H 원리에 의해 추정할 수 있으나 실제의 담수렌즈의 두께는 다음과 같은 요인에 의해 영향을 받는다. 즉 (1) 대수층으로 보충되는 지하수 함양량의 변화, (2) 지하수 채수량, (3) 연안지역에 피압층의 존재 유무, (4) 대수층의 수리적 특성이다. 실제에 있어서 담수와 염수의 경계면은 예리하지 않고 담수와 염수가 혼합된 전이대(transition zone) 하부에 염수가 존재하는데, 이 같은 현상은 주로 주기적인 조석운동과 함양량의 변화로부터 비롯되는 것이다. 모든 다른 요인은 일정하다고 가정했을 때, 담수렌즈의 두께는 지하수 함양량이 증가할수록 두꺼워 지는 반면, 채수량이 많으면 많을수록 얇아지게 된다. 대수층의 수리전도도 또한 담수렌즈의 두께에 영향을 미치는데, 다른 요인은 일정하다고 가정했을 때, 담수렌즈의 두께는 수리전도도가 낮은 대수층에서가 두껍게 형성된다(James et al., 1999).

V. 결론

제주도 서부 해안지역에 설치된 해수침투 감시 관측정 13개소를 대상으로 시추코아 지질주상도 해석, 지구물리검층 자료의 해석, 대수성시험 및 수질분석 자료해석 등을 통하여 서부 해안지역의 지하지질과 지하수 부존특성에 관해서 연구를 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 한림-한경-대정을 포함하는 제주도 서부지역은 연평균 강수량(1973~2006)이 1,180mm로서 제주도 전역의 연평균 강수량보다 약 800mm가 작은 지역으로서 지하수 함양량은 제주도 전체의 12.5%에 해당하는 연간 197백만 m^3 이고, 해발 50m 이하 해안저지대에 761개의 지하수 관정이 개발되어 1일 233천 m^3 을 채수할 수 있는 양수능력을 갖추고 있다.

2. 연구지역에 설치된 해수침투 감시 관측공 13개소의 지질주상도를 분석한 결과, 연구지역의 지하를 이루고 있는 구성지질은 크게 서귀포층 상부에 다양한 두께로 분포하는 용암누층, 서귀포층, U층, 용암누층 사이에 협재된 퇴적층, 서귀포층 사이에 협재된 용암류 등 5가지 수문지질 단위로 구분할 수 있었다.

○ 서귀포층 상부 용암류는 평균 해수면 하 31.4~91.1m 범위까지 분포하고 있는데, 이 용암누층은 평균 10회 정도 흐른 용암류로 이루어져 있고, 평균 용암류 두께는 5~12m로 파악되었다.

○ 서귀포층 상부의 용암누층에는 용암류가 바다로 유입될 때 생겨난 유리쇄설성 각력암층이 1매 내지 3매 분포하고 있는데, 이 층은 자갈크기의 각력으로 이루어져 있어 투수층의 역할을 하고 있는 것으로 해석되었다.

○ 용암누층 사이에는 화산활동 휴지기 동안 유수나 바람에 의해 운반·퇴적된 고토양층, 화산회층, 역암층, 사암층, 미고결 패사층 등의 퇴적층이 분포하고 있는데, 그 두께는 1~11m의 범위를 나타내며, 지하수의 유동을 방해하거나 어렵게 하는 저투수층의 역할을 하는 것으로 해석되었다.

○ 서귀포층은 평균 해수면 하 37~91m 범위에서 포착되고 있으며, 그 두께

는 지역에 따라 가변적이고, 한경면 고산리를 중심으로 동·서쪽으로 가면서 점차적으로 깊어지는 경향을 보이고 있다.

- 연구대상 관측정 중 신도, 하모, 상모2호공에서는 서귀포층 내에 3~6m 두께의 용암류가 분포하고 있는 것이 확인되었는데, 산출상태 및 이전의 연구결과로 미루어 볼 때 서귀포층이 퇴적될 당시에 형성된 용암류로 보인다.
- 서귀포층 하부의 U층은 13개 관측공 중 상모2호공을 제외한 12개소에서 확인되었는데, 세립질 모래와 점토질로 이루어져 있으며, 그 포착심도는 해수면 하 90~175m 범위로 비교적 편차가 큰 편이다.

3. 해수침투 감시 관측공 13개소에서 실시된 대수층별 대수성 시험자료를 분석한 결과, 대체로 연구지역의 대수층 구간은 화산암류의 절리대나 유리쇄설성 각력암층, 서귀포층과 용암류 사이의 사력층에 발달하는 대수층, 그리고 서귀포층 내의 사력층이나 미고결 모래층에서 주로 발달하는 것으로 판단되고, 각 관측정의 수리성을 분석한 결과, 서부지역은 전반적으로 투수성이 불량하여 지하수의 순환속도가 느리고, 양수로 인한 수위강하도 크게 발생하는 것으로 사료된다.

4. 연구대상 관측정의 음·양이온 성분 값과 지하수 부존형태로 구분을 한 결과, 기저지하수 부존지역(한림1, 신도, 하모), 준기저지하수 부존지역의 수질이 양호한 관측정(상모1, 상모2, 일과)과 수질이 불량한 관측정(나머지 8개 관측정)으로 나누어지며, 수질이 불량한 관측정의 상부에서는 질산성질소의 함량이 높게 나타났다.

5. 2007년도에 설치된 판포, 고산, 신도, 일과, 하모관측정을 대상으로 자연감마선을 비롯하여 공경, 단극저항, 자연전위, 온도, 전기전도도 등의 물리검층을 실시한 결과, 지하수 착정과정에서 회수된 시추코아와 잘 대비되었다.

- 절리 및 균열이 발달한 용암류 단위의 상·하부, 유리쇄설성 각력암층, 자갈층, 미고결 패사층 등 연약지층 구간에서 공경의 변화를 보이고 있고, SPR(단극저항검층)검층에서는 치밀질암과 고결된 점토층에서 높은값을 나

타내는 반면 질리 및 과쇄가 발달한 구간과 투수성이 좋은 유리쇄설성 각력암층에서 비교적 낮은 값을 나타내었다.

- 자연감마선 검층결과, 점토질을 많이 함유한 용암누층 사이의 퇴적층과 서귀포층 중 이질성분이 많은 구간에서 높은 값을 나타내었다.
- 전기전도도 검층결과, 신도와 하모관측정에서 심도가 깊어짐에 따라 전기전도도가 증가하여 약 $30,000 \sim 40,000 \mu\text{s}/\text{cm}$ 의 값을 나타내어 담수지하수와 해수에 염지하수가 부존하고 있음이 확인되었다.

위의 연구결과, 제주도 서부 해안지역의 지하지질을 구성하는 물질은 비슷하지만, 수문지질학적인 특성에 의해서 국지적으로 기저지하수와 준기저지하수의 부존형태를 나타내며 과잉양수로 인한 해수침투가 우려되는 지역으로 해석되었다.

하지만, 관측정간의 위치 및 거리로 인해 전반적인 서부지역의 지하수 부존형태를 나타내기는 다소 무리가 있는 것으로 판단되었으며, 서부지역의 효율적인 지하수 이용을 위해서는 지하지질과 지하수에 대한 꾸준한 연구와 체계적인 지하수개발이 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, 1992, 제주도의 지하지질구조와 지하수위 변동과의 관계(I)-강우에 의한 지하수위 변동-, 지질학회지, 제 28권 5호, p.540.
- 고기원, 윤선, 윤정수, 박원배, 한정상, 김남중, 정구원, 1993, 제주도의 지하수 산출특성, 지질학회지, 제29권 제1호, pp. 48.
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문, p. 325.
- 고기원, 박윤석, 김태운, 1998, 제주도 서북부 귀덕리 해안지역에 발달한 심부 담수 대수층에 관한 연구, 제주발전연구, p. 223~233.
- 고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철, 2003, 제주도 동부지역의 수문지질에 관한 연구(II)한국지하수토양환경학회 2003년도 총회 및 춘계학술발표회, p. 67~72.
- 고기원, 박윤석, 박원배, 2004, 제주도 동부지역의 지하 지질분포와 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대, 대한지질학회 춘계학술답사, p.29~50.
- 고기원, 박윤석, 강봉래, 김봉석, 2005, 제주도 동부지역의 지하지질과 화산활동, 제13회 세계 물의 날 기념 학술세미나 pp. 3~44.
- 고기원, 박윤석, 김기표, 2006, 제주도 지하수의 수위변동 요인과 수위변화 특성, 제주·하와이 물 포럼, p.174~204.
- 고동찬, 2005, 환경 추적자를 이용한 제주도 지하수의 수리지구화학 및 유동 특성화, 서울대학교 박사학위 논문, pp. 120.
- 김기표, 2002, 제주도 동부해안 한동리 지역의 수문지질학적 연구, 제주대학교 석사학위논문, p. 64.
- 김창욱, 고기원, 박윤석, 윤정수, 2004, 제주도 서부지역의 대수층별 지하수 산출능력 연구, 한국지하수토양환경학회 2004년도 임시총회 및 춘계학술발표회, p. 83~88.
- 남기영, 1966, 제주도의 지질과 지하수, 국립지질조사소 지하수원조사 보고서, 제 3호, pp. 109~137.
- 농업기반공사 제주도본부, 2004, 해수침투 감시관측망 구축사업 결과보고서.

- 농업기반공사 제주도본부, 2005, 해수침투 감시관측망 구축사업 결과보고서.
- 문덕철, 2004, 제주도 주요하천의 기저유출량 산정에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, pp. 1~75.
- 박원배, 1993, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, p. 49.
- 박윤석, 고기원, 강봉래, 함세영, 2002, 제주도 동부지역 수문지질에 관한 연구(I), 한국지하수토양환경학회 2002년도 총회 및 춘계학술발표회, p. 81~84.
- 산업기지개발공사, 1981, 제주도수자원종합조사보고서.
- 송성준, 강태우, 박원배, 강봉래, 2003, 제주도 서부지역의 지하수 수질실태와 오염예방을 위한 농업적 실천 방향, 제주도·제주지역환경기술개발센터 공동주최 제11회 세계물의 날 기념 학술세미나, pp. 89~131.
- 송시태, 2000, 제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 부산대학교 박사학위 논문, pp. 118.
- 송영철, 고용구, 유장걸 1999, $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수 중의 질산염 오염원 조사, 지하수환경, Vol. 6, No.3, pp. 107~110.
- 오윤근, 현익현, 1997, $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수 중의 질산성질소 오염원추정에 관한연구, 지하수환경, Vol. 4, No.1, pp. 1~4.
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구, 제3권, p. 309~326.
- 윤정수, 박상운, 2000, 한라산지역 용천수의 수리지화학적 특성, 한국지구과학회지, 제21권, 제1회, pp. 81~92.
- 이봉주, 고기원, 문상호, 박윤석, 임무택, 2004, 지하수위 조석 변동특성에 근거한 해수 유입 진단, 지질학회지, 제 40권 제1호, p. 53~64.
- 이봉주, 구민호, 박윤석, 고기원, 박인화, 2006, 제주 동부지역의 수리확산계수와 지하수 도관 유동 가능성, 지질학회지, 제42권 제3호, pp. 439~454.
- 정차연, 2002, 제주도 서부해안지역의 지질과 지하수, 부산대학교 박사학위논문, pp. 167.
- 제주도, 1999, 제주의 물, 용천수, p. 392.
- 제주도·농업기반공사, 2000, 지하수 보전·관리계획 보고서.
- 제주도, 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III), p.

65~119.

제주도, 2004, 제주도 지하수 관리계획, pp.1~106.

제주도·한국지질자원연구원, 2004, 미래 제주도 청정지하수 안정적 공급 시스템 구축 사업, pp. 100~133.

한국자원연구소, 2000, 모슬포·한림 도폭 지질보고서, p. 56.

한정상, 2000, 지하수오염과 환경, 박영사, p. 458~481.

황세호, 신제현, 박인화, 최선영, 박기화, 고기원, 2005, 제주 현무암 지역의 용암 분출에 따른 물리검층 반응의 특성 고찰, 한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지엄, p. 55~71.

Back,, William, and Freeze, R.A.,eds., 1983, Chemical hydrogeology: Benchmark Papers in Geology, 73, Hutchinson Ross Publication Company, Stroudsburg, Pa., 416 p.

Barlow, P.M., 2003, Ground water in freshwatersaltwater environments of the Atlantic coast: U.S. Geological Survey Circular 1262.

Delwyn S. Oki, William R. Souza, Edward L. Bolke, and Glenn R. Bauer, 1998, Numerical analysis of the hydrogeologic controls in a layered coastal aquifer system, Oahu, Hawaii, UAS, Hydrogeology Journal Vol. 6, p. 243~263.

Fetter C. W., 1998, Applied Hydrogeology, third edition, Macmillan College Publishing Company, New York.

Helm-Clark, C. M., Rodgers, D. W., and Smith, R. P., 2004, Borehole geophysical techniques to define stratigraphy, alteration and aquifers in basalt, Journal of Applied Geophysics, vol. 55, p. 3-38.

Izbicki J. A., 1996, Seawater Intrusion in a Costal California Aquifer, U.S. Geological Survey Fact Sheet 125~96.

Kohout, FA., 1964, The flow of fresh water and salt water in the Biscayne aquifer of the Miami area, Florida: U.S.Geological Survey Water-Supply Paper 1613-C, p. 12-32.

Luszczynki, N.J., and Swarzenski, W.V., 1960, Position of the salt-water body in the Magothy Formation in the Cedarhurst-Woodmere area if southwestern Nassau County, Long Island, N.y.: Economic Geology, v.

55, no. 8, p. 1739-1750.

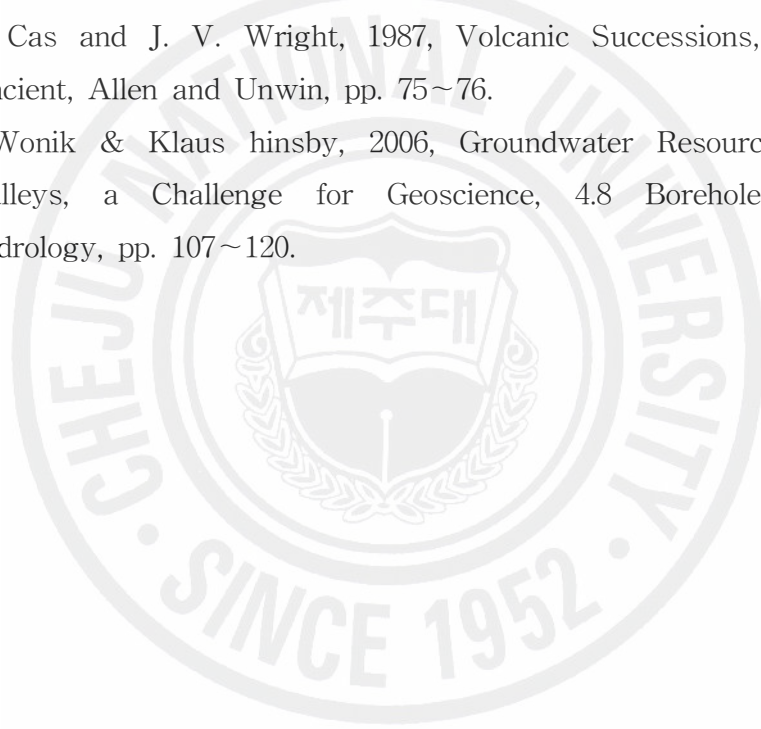
Luszczynki, N.J., and Swarzenski, W.V., 1966, Salt-water encroachment in southern Nassau and southeastern Queens Counties, Long Island, New York: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1613-F, 76 p.

Miller, James A.; Whitehead, R. L.; Oki, Delwyn S.; Gingerich, Stephen B.; Olcott, Perry G., 1999, Ground water atlas of the United States. Segment 13, Alaska, Hawaii, Puerto Rico, and the U.S. Virgin Islands, U.S. Geological Survey HA 730-N, p. 36.

Paul M. Barlow, 2003, Ground water in freshwater-saltwater environments of Atlantic coast, USGS Circular 1262, p. 113.

R. A. F. Cas and J. V. Wright, 1987, Volcanic Successions, Modern and Ancient, Allen and Unwin, pp. 75~76.

Thomas Wonik & Klaus hinsby, 2006, Groundwater Resources in Buried Valleys, a Challenge for Geoscience, 4.8 Borehole logging in hydrology, pp. 107~120.



부 록

1. 연구지역 시추공의 지질주상도
2. 대수층별 수질조성



Geologic Log

Well Name	Kosan	El.	8.45m	Location	X 122,786 / Y 26,924
Depth	148m	Logging Date		2007. 08. 16 (Koh, Giwon)	
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name		Description	
0.5	0.5	soil		surface soil	
6.0	5.5	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, 1~2m: jointed, 2~6m: massive	
8.3	2.3	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt 6~7m: massive, 7~8m: vesicular	
10.6	2.3	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, jointed	
18.0	7.4	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt 10.6~14m vesicular, jointed 14~18m: massive	
23.0	5.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt block, 23m slime	
27.6	4.6	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular,	
34.0	6.4	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, massive	
41.0	7.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, jointed	
72.0	31.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, jointed 48~72m: Hyaloclastite breccias	
89.0	17.0	SGF		sand: medium size sand deposit	
100.0	11.0			Sandymudstone	
105.0	5.0			sand: shell sand, unconsolidated	
130.0	25.0			Sandymudstone	
145.0	15.0			sand: shell sand, unconsolidated	
148.0	3.0	UF		U formation	

Geologic Log

Well Name	Shindo	El.	10.30m	Location	X 123,76 / Y 24,714		
Depth	190m	Logging Date		2007. 08. 16(Koh, Giwon)			
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name		Description			
1.0	1.0	Soil		Surface soil			
5.0	4.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt 1~4m: jointed, block, 4~5m: vesicular			
5.5	0.5	Soil		Paleo soil layer			
8.0	2.5	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt 5.5~7m: 40cm soil, 7~8m: vesicular			
14.0	6.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, 10~14m: reddish color 8~10m, 10~12m, 12~14m: sub-unit			
21.0	7.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular, massive, block			
38.0	17.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt hyaloclastite breccias			
52.0	14.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt 38~49m, 40~47.5m, 47.5~52m: sub-unit 43~47m: massive, 47.5~52m: block			
72.0	20.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt hyaloclastite breccias			
76.0	4.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt massive, 74~76m: jointed			
80.0	4.0	AFOB		Acicular Feldspar Olivine Basalt vesicular			
81.0	1.0	SGF		Scoria: Air-fall deposits, bedding			
102.0	21.0			Sand: unconsolidated, tuffaceous			
104.0	2.0			Mudstone			
130.0	26.0			Sand: tuffaceous sand			
134.0	4.0			Sandstone			
140.0	6.0			TA: Trachyandesite, massive			
167.0	27.0			Tuff			
174.0	7.0			Sand: unconsolidated, containing shell fossils			
177.0	3.0			Sandymudstone			
180.0	3.0			Sand: black sand, unconsolidated			
185.0	5.0			Sandymudstone			
190.0	5.0			UF		U Formation	

Geologic Log

Well Name	Ilgwa	El.	14.99m	Location	X 127378 / Y 22332
Depth	140m	Logging Date	2007. 08. 16(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
0.5	0.5	soil	Surface soil		
8.0	7.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 0.5~1.5m: jointed, 1.5~8m: vesicular and massive		
11.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed, fractured		
15.0	4.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed, fractured		
42.0	27.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 15~17m: vesicular, 17~21m: massive 21~42m : hyaloclastite breccias		
49.0	7.0	OB	Olivine basalt vesicular, massive 48~49m: jointed		
52.0	3.0	Soil	49~51m : soil 51~52m : rounded pebbles, 5~7cm size		
67.5	15.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 52~53m: vesicular 53~67.5m : hyaloclastite breccias		
68.0	0.5	Sand	unconsolidated fossils		
95.0	27.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 68~78m: vesicular, jointed 78~85m: massive, 85~95m: jointed		
100.0	5.0	AFOB	Vesicular, 98~100m : hyaloclastite breccias		
104.0	4.0	SGF	Sandstone: consolidate, bedding		
122.0	18.0		Sand: unconsolidated, containing shell fossils 104~110m : medium size, 116m: coarse grain size		
129.0	7.0		Sandymudstone: containing shell fossils		
140.0	11.0		Sandstone: tuffaceous, containing shell fossils		
146.0	6		UF	U Formation	

Geologic Log

Well Name	Panpo	El.	14.44m	Location	X 126,104 / Y 35,998
Depth	140m	Logging Date		2007. 08. 16(Koh, Giwon)	
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name		Description	
0.6	0.6	Soil		Surface soil	
4.5	3.9	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 1~2m: jointed, 2~4.5m: massive	
6.0	1.5	Soil		soil	
11.0	5.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt: massive	
20.0	9.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 11~12m: jointed, 12~13: vesicular 13~20m: massive	
30.0	10.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt jointed and massive	
41.0	11.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 30~33m: block, 30~37m: massive	
48.0	7.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 42m: soil and clinker, 42~48m: massive	
57.0	9.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 48~53m, 55~57m: uncollected core	
73.0	16.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt hyaloclastite breccias	
82.0	9.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 73~80m: vesicular, jointed, 80~82m: massive	
87.0	5.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 82~85m: vesicular, 85~87m: massive	
92.0	5.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed, block	
97.0	5.0	SGF		Sand: shell sand, unconsolidated	
98.0	1.0			sandstone	
113.0	15.0			Sand: shell sand, unconsolidated	
118.0	5.0			mudstone	
120.0	2.0			Sand: shell sand, unconsolidated	
122.0	2.0			mudstone	
140.0	18.0	UF		U Formation	

Geologic Log

Well Name	Hamo	El.	7.07m	Location	X 131,518 / Y 17,182
Depth	150.0m	Logging Date		2007. 08. 16(Koh, Giwon)	
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
1.0	1.0	Soil	Surface soil		
8.0	7.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt: 3~4m: jointed, fractured, 4~7m: massive, 4m: vertical jointed, 7~8m: vesicular		
11.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt reddish in color		
19.0	8.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 11~13m: vesicular, jointed, reddish color 16~17m: vesicular, 17~19m: jointed		
27.0	8.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt Hyaloclastite breccias		
30.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 29~30m: jointed		
35.0	5.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 33~35m: jointed, fracture		
46.0	11.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 35~40m: vesicular, jointed, 45~46m: jointed		
47.0	1.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt: massive		
55.0	8.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 47~49m: vesicular, jointed 49~55m: massive		
58.0	3.0	Soil	paleo soil		
63.0	5.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 58~60m: jointed, 60~63m: massive		
66.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, 63~64m, 65~66m: jointed		
69.0	3.0	Soil	paleo soil, mixed with gravels		
89.0	20.0	SGF	Tuff:69m Zenolith, 82~83m: containing shell fossils		
92.0	3.0		Sandstone: containing shell fossils		
95.5	3.5		TA: Trachyandesite ,massive, jointed		
116.0	20.5		Tuff: containing shell fossils		
129.0	13.0		Mudstone: yellow & gray color		
142.0	13.0		Tuff: containing shell fossils		
150.0	8.0	UF	U Formation		

Geologic Log

Well Name	Murung 1	El.	10.2m	Location	X 125,693 / Y 23,048
Depth	160.0 m	Logging Date		2004. 07. 10(Koh, Giwon)	
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name		Description	
0.3	0.3	Soil		Surface soil	
6.0	5.7	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt vesicular, massive	
10.0	4.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt vesicular, 6~7m: jointed	
14.0	4.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 10~12m: jointed, 12~14m: porosity	
32.0	18.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 16~32m : Hayaloclastite breccias	
35.5	3.5	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 32m: vesicular, 32~35m: massive	
42.5	7.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 35.5~40m: jointed, vesicular 40~42.5m: massive	
50.0	7.5	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 42.5~48m: vesicular, 48~50m: massive	
61.0	11.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 50~52.5m: vesicular, jointed 52.5~61m: massive	
66.0	5.0	Gravel Layer		10~15cm size	
72.0	6.0	SGF		Mudstone: with sandstone, containing shell fossils	
87.0	15.0			TA: massive, 72~77m: jointed	
117.0	30.0			Sandstone: tuffaceous, containing shell fossils	
127.0	10.0			Mudstone	
129.0	2.0			Sandstone	
160.0	31.0	UF		U Formation: Muddy sand materials Semi-consolidate	

Geologic Log

Well Name	Murung 2	El.	45.83m	Location	X 127,524 / Y 25,048
Depth	172m	Logging Date		2004. 10. 11(Koh, Giwon)	
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name		Description	
1.5	1.5	soil		Surface soil	
3.0	1.5	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt massive, vesicular	
7.0	4.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 3~4m : reddish color, jointed 4~6m : densely, small vesicles 6~7m : horizontal jointed	
31.0	24.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 7~11m: vesicular, jointed 11~14m: vesicular and jointed 14~31m: massive	
32.5	1.5	Soil		ochre Color	
46.0	13.5	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 32.5~36m: vesicular, jointed 36~46m: massive	
46.5	0.5	Soil		Ash layer, orange color	
49.5	3.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt reddish brown, 46.5~47.5m: jointed 47.5~49.5m: vesicular and massive	
56.5	7.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 49.5~53m, 53~56.5m: jointed	
57.0	0.5	Soil		Ash layer, orange color air-fall deposit	
62.0	5.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt in general vesicular, jointed	
75.0	13.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 62~64m: vesicular, jointed 64~67m: vesicular, 67~75m: massive	
77.0	2.0	Soil		Ash layer, orange color air-fall deposit	
81.0	4.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt in general massive	
87.0	6.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 81~86m: vesicular, jointed, 86~87m: massive	
92.0	5.0	AFOB		Acicular feldspar olivine basalt 87~89: jointed, 89~92m: massive	
98.0	6.0	soil		paleo soil, yellowish brown	
145.0	47.0	SGF		Tuff: containing shell fossils, bedding	
166.0	21.0			Tuff : sandymudstone, containing shell fossils	
172.0	6.0	UF		U Formation	

Geologic Log

Well Name	Sangmo 1	El.	17.86m	Location	X 129,693 / Y 21,071
Depth	171.0m	Logging Date	2004. 10. 11(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
0.5	0.5	soil	Surface soil		
9.0	8.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 1~3m: vesicular, jointed 4~9m: massive		
9.5	0.5	Soil	reddish color		
24.0	14.5	APB	Aphanitic feldspar basalt 13~24m: jointed, block		
29.0	5.0	OB	Olivine basalt 24~26m: jointed, 26~29m: massive		
37.0	8.0	OB	Olivine basalt vesicular, in general jointed		
72.0	35.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt jointed(37~39m, 47~50m) 39~47m: massive 50~72m : pillow lava(56~62m slime)		
109.0	37.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 72~77m: vesicular, 77~80m: massive 80~109m: massive		
113.0	4.0	Gravel	Beach Grave, 3~5cm sizer well sorted		
118.0	5.0	SGF	Tuff: containing shell fossils, consolidate		
135.0	17.0		Tuff: fractured, slime		
140.0	5.0		Tuff: containing shell fossils		
146.0	6.0		Sand layer: unconsolidated		
152.0	6.0		Mudstone		
171.0	19.0	UF	U Formation		

Geologic Log

Well Name	Sangmo 2	El.	22.59m	Location	X 133,304/ Y 20,734
Depth	325m	Logging Date	2004. 07. 10(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
1.0	1.0	Soil	Surface soil		
8.0	7.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, vertical jointed		
13.0	5.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, 8~11m: jointed, reddish brown		
18.0	5.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, 13~18m: jointed, reddish brown		
27.0	9.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt in general vesicular		
35.0	8.0	AOB	Augite olivine basalt 27~29m: jointed, 32~35m: massive		
41.0	6.0	AOB	Augite olivine basalt 36~38m: vesicular, 38~41m: massive		
51.0	10.0	AOB	Augite olivine basalt 41~45m: jointed, reddish brown 45~51m: massive		
54.0	3.0	AOB	Augite olivine basalt Hyaloclastite breccias		
60.0	6.0	Sand	Sand: black sand 20cm size granite		
74.0	14.0	SGF	Tuff: black, tuffaceous		
74.5	0.5		Soil: Paleo soil ochre color		
75.0	0.5		Tuff: coarse grained		
76.0	1.0		Conglomerate: well sorted, containing shell fossils		
78.0	2.0		Sand: tuffaceous		
79.0	1.0		Mudstone containing shell fossils		
325.0	246.0		Tuff: coarse and fine grained		

Geologic Log

Well Name	Yongsoo 1	El.	10.94m	Location	X 123,08 / Y 32,125
Depth	155m	Logging Date	2004. 10. 11(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
0.5	0.5	soil	Surface soil		
11.0	10.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 0.5~3m: vesicular, jointed 3~11m: massive		
19.0	8.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 11~12.5m: jointed, block 12.5~16m: massive, 16~19m: jointed		
20.0	1.0	Soil	ocher color		
21.0	1.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular and massive		
28.0	7.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt jointed(21~24m, 27~28m) 24~27m: massive		
35.0	7.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt in general jointed		
38.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt in general jointed		
49.0	11.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 38~42: vesicular, jointed 42~49m : hyaloclastite breccias		
53.0	4.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 49~50m: vesicular, jointed 50~52m: massive, 52~53m: jointed		
58.0	5.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 53~56: jointed, 56~58m: massive		
61.5	3.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular and massive		
63.5	2.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular and massive		
76.0	12.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt pillow basalt breccias		
97.0	21.0	SGF	Sand: unconsolidated layer		
98.0	1.0		Tuff: sandstone		
120.0	22.0		Tuff		
155.0	35.0	UF	U Formation		

Geologic Log

Well Name	Yongsoo 2	El.	37.13m	Location	X 125,839 / Y 32,219
Depth	185.0	Logging Date	2004. 06. 04(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
0.3	0.3	soil	Surface soil		
0.5	0.2	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed		
5.0	4.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed 4.5~5m: glassy		
23.0	18.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 5~9m: vesicular, 9~22m: massive		
24.0	1.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed		
27.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed		
29.0	2.0	Ash	Ash layer		
33.0	4.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt ~30.5m: jointed, with Ash, vesicular		
40.5	7.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular		
43.3	2.8	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular		
47.0	3.7	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, with small-grained olivine		
57.0	10.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, jointed		
72.0	15.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt vesicular, 62~68m: massive 68~72m: jointed		
73.0	1.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt massive		
77.0	4.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 73~76m: vesicular, jointed 68~72m: massive		
78.0	1.0	Gravel Layer	Gravel Layer: 3~5cm size, well sorted		

Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description
84.0	6.0	Tuff	Tuff: 78~82 coarse-grained sand
88.0	4.0	Tuff	Tuff: fine-grained, containing shell fossils
92.0	4.0	Tuff	Tuff: coarse-grained containing shell fossils
93.0	1.0	Tuff	Tuff: fine-grained
96.0	3.0	Tuff	Tuff: coarse and fine-grained bedding, slump
108.0	12.0	Tuff	Tuff: coarse and fine-grained
139.0	31.0	Tuff	Tuff: coarse and fine-grained 139m: slump and glassy
141.0	2.0	Sand	Sand: beach sand, containing shell fossils
145.0	4.0		Mudstone
148.0	3.0	SGF	Sand: Very Fine Sand
152.0	4.0		Sand: beach sand, containing shell fossils
157.0	5.0		Sand: Very Fine Sand
163.0	6.0		Sand: beach sand, containing shell fossils
185.0	22.0	UF	U Formation: Muddy sand materials Semi-consolidate

Geologic Log

Well Name	Hallim 1	El.	14.16m	Location	X 132,128/ Y 42,825
Depth	121.0m	Logging Date	2005. 09. 06(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
2.5	2.5	Soil	Surface soil		
13.5	11.0	OB	Olivine basalt 2.5~4m: clinker, 4~13.5m: massive		
15.0	1.5	Conglomerate	scoria sand layer, well sorted		
24.0	9.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 17~19m: fracture, jointed		
31.0	7.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 24~28m, 28~31m interflow ,vesicular 24~25m: jointed		
34.0	3.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 31~32m: jointed, reddish color		
40.0	6.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt reddish color, 34~36m: jointed		
45.0	5.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt reddish color, jointed		
78.0	33.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 45~49m,49~52m,52~54.5m,54.5~59m, 59~64m,64~67m,67~74m,74~78m interflow(8)		
83.5	5.5	OB	Olivine basalt: massive		
104.0	20.5	OB	Olivine basalt 83.5~94.5m: clinker 86~94.5m: massive 94.5~104m: hyaloclastite breccias		
108.0	4.0	SGF	Sand: shell sand		
121.0	13.0	UF	U Formation		

Geologic Log

Well Name	Hallim 2	El.	59.12m	Location	X 134,461 / Y 41,014
Depth	185.0m	Logging Date	2003. 09. 06(Koh, Giwon)		
Depth (m)	Thick. (m)	Field Name	Description		
0.5	0.5	Soil	Surface soil		
8.0	7.5	PFB	Porphyritic feldspar basalt, block		
29.0	21.0	AOB	Augite olivine basalt 8~13m: clinker, reddish color		
36.0	7.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 29~31m: weathered 31~36m: vesicular and massive		
46.0	10.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 36~40m: clinker, 40~46m: massive		
54.0	8.0	Soil/ Sandstone	46~48m: ocher color 48~54m: sandstone layer		
58.5	4.5	OB	Olivine basalt		
65.5	7.0	OB	Olivine basalt 58.5~61m: clinker, 64m interflow		
71.0	5.5	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 65.5~68m: vesicular 68~71m: massive		
77.0	6.0	AFOB	Acicular feldspar olivine basalt 71~74m: vesicular, 74~77m: massive		
90.0	13.0	OB	Olivine basalt 77~85.5m: vesicular, block 85.5~90m: massive		
97.5	7.5	OB	Olivine basalt 90~92.5m: vesicular, block 92.5~97.5m: massive		
125.0	27.5	OB	Olivine basalt 97.5~99m: vesicular 99~104m: massive 104~125m: hyaloclastite breccias		
135.0	10.0	SGF	Sandstone		
181.5	46.5		Tuff: vesicular, peperite		
185.0	3.5	UF	U Formation		

부록 2. 수질자료를 meq/l로 환산

(단위: meq/l)

Well Name	Classification		Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Anions Sum	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Cations Sum
	Test	Dep.(m)										
HL1	1st	22	0.90	1.31	0.33	1.65	4.20	0.19	1.63	1.03	1.36	4.21
	2nd	50	36.93	0.44	1.56	1.00	39.93	0.76	2.27	33.93	9.37	46.33
	3rd	80	274.71	0.24	30.19	1.78	306.91	4.91	11.45	222.90	55.02	294.28
	4th	120	240.83	0.31	23.57	1.48	266.18	4.44	25.11	164.86	15.11	209.52
HL2	1st	67	0.54	0.61	0.06	1.04	2.25	0.10	0.56	0.45	0.77	1.89
	2nd	100	0.23	0.24	0.04	0.52	1.03	0.05	0.28	0.26	0.30	0.89
	3rd	128	0.39	0.41	0.12	1.00	1.93	0.10	0.57	0.49	0.60	1.77
	4th	190	0.42	0.45	0.10	0.84	1.82	0.11	0.53	0.52	0.65	1.81
YS1	2nd	38	1.83	2.68	0.52	0.80	5.84	0.19	1.78	1.11	2.46	5.54
	3rd	54	0.99	1.41	0.31	2.43	5.14	1.19	4.89	1.13	0.23	7.44
	4th	73	0.54	0.07	0.10	0.52	1.23	0.16	0.66	0.69	0.26	1.77
YS2	1st	90	0.79	1.24	0.37	0.76	3.17	0.13	0.96	0.62	1.15	2.87
	3rd	185	0.99	1.36	0.42	0.57	3.33	0.14	1.00	0.60	1.36	3.09
	4th	185	0.93	1.30	0.40	0.78	3.40	0.15	1.37	0.60	1.46	3.58
	1st	32	0.62	0.99	0.33	0.72	2.67	0.11	0.77	0.49	0.96	2.33
MR1	3rd	160	1.44	0.15	0.27	0.82	2.68	0.15	2.37	1.04	0.74	4.30
	4th	160	0.42	0.04	0.10	1.08	1.64	0.11	0.55	0.57	0.28	1.51
MR2	3rd	111	0.39	0.19	0.12	1.08	1.79	0.12	0.71	0.52	0.63	1.98
	4th	170	0.65	0.97	0.40	1.00	3.02	0.17	0.95	0.59	0.97	2.68
SM1	1st	30	0.28	0.22	0.08	0.68	1.27	0.10	0.30	0.32	0.39	1.10
	2nd	73	0.28	0.19	0.08	0.66	1.22	0.09	0.36	0.33	0.37	1.16
	3rd	170	0.34	0.40	0.15	0.70	1.58	0.11	0.44	0.38	0.48	1.41
	4th	170	0.34	0.41	0.15	0.74	1.64	0.11	0.42	0.36	0.50	1.38
SM2	1st	58	0.28	0.02	0.08	0.94	1.33	0.15	0.24	0.77	0.18	1.35
	2nd	325	0.34	0.09	0.17	1.68	2.28	0.21	0.63	1.10	0.21	2.15
PP	3rd	100	1.95	0.75	0.50	1.08	4.28	0.29	1.60	2.91	1.65	6.45
	4th	140	1.16	0.36	0.35	1.88	3.75	0.56	2.61	4.10	2.07	9.34
KS	1st	36	1.04	1.13	0.33	0.72	3.22	0.11	0.88	0.92	1.60	3.52
	2nd	95	0.93	0.07	0.21	1.12	2.33	0.09	0.73	0.79	1.27	2.89
	3rd	140	1.04	0.96	0.31	0.96	3.27	0.11	0.85	0.89	1.32	3.16
SD	1st	50	34.61	1.78	14.45	1.28	52.13	2.88	16.42	181.93	52.19	253.42
	2nd	101	32.02	0.05	4.54	1.60	38.21	1.13	3.45	113.24	11.71	129.53
	3rd	190	52.50	0.33	5.33	1.36	59.52	1.75	7.39	89.01	25.25	123.40
IG	2nd	77	0.28	0.03	0.08	1.24	1.63	0.09	0.76	0.69	0.45	1.99
	4th	140	0.37	0.05	0.15	1.20	1.76	0.10	0.56	0.56	0.41	1.62
HM	1st	30	109.26	2.76	18.59	1.54	132.15	1.47	5.21	71.56	17.46	95.70
	2nd	30	233.13	1.65	31.11	1.84	267.72	6.88	18.44	339.26	94.64	459.21
	3rd	75	241.82	1.78	34.14	1.92	279.66	6.81	17.76	373.64	97.10	495.31
	4th	140	258.88	1.34	48.28	2.00	310.51	12.63	37.88	369.07	102.41	522.00

※1st 및 4th 등은 대수성시험 차수를 의미하는 것임

부록 2. 수질자료를 meq(%)로 환산

(단위: meq%)

Well Name	Classification		K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Cations sum	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Anions Sum
	Test	Dep.(m)										
HL1	1st	22	4.52	38.69	24.47	32.32	100.00	21.52	31.31	7.94	39.23	100.00
	2nd	50	1.64	4.90	73.24	20.22	100.00	92.48	1.11	3.91	2.50	100.00
	3rd	80	1.67	3.89	75.75	18.69	100.00	89.51	0.08	9.84	0.58	100.00
	4th	120	2.12	11.98	78.68	7.21	100.00	90.47	0.12	8.85	0.56	100.00
HL2	1st	67	5.15	29.77	24.07	41.02	100.00	23.87	27.03	2.78	46.31	100.00
	2nd	100	5.09	31.77	29.45	33.69	100.00	21.91	23.57	4.04	50.48	100.00
	3rd	128	5.87	32.53	27.73	33.87	100.00	20.42	21.41	6.46	51.70	100.00
	4th	190	6.20	29.29	28.80	35.71	100.00	23.29	24.76	5.73	46.22	100.00
YS1	2nd	38	3.38	32.11	20.01	44.49	100.00	31.41	45.98	8.92	13.70	100.00
	3rd	54	15.95	65.74	15.20	3.11	100.00	19.22	27.37	6.08	47.34	100.00
	4th	73	9.00	37.35	38.76	14.89	100.00	43.53	5.80	8.45	42.22	100.00
YS2	1st	90	4.58	33.63	21.72	40.07	100.00	24.94	39.23	11.83	23.99	100.00
	3rd	185	4.42	32.20	19.40	43.98	100.00	29.69	40.79	12.52	16.99	100.00
	4th	185	4.19	38.31	16.83	40.67	100.00	27.35	38.17	11.62	22.85	100.00
MR1	1st	32	4.83	33.10	20.96	41.12	100.00	23.28	37.22	12.50	27.00	100.00
	3rd	160	3.58	55.12	24.18	17.12	100.00	53.70	5.60	10.10	30.60	100.00
	4th	160	7.39	36.47	37.76	18.38	100.00	25.76	2.17	6.34	65.73	100.00
MR2	3rd	111	6.23	35.82	26.29	31.66	100.00	22.12	10.40	7.00	60.48	100.00
	4th	170	6.18	35.58	21.92	36.33	100.00	21.52	32.20	13.12	33.16	100.00
SM1	1st	30	8.73	27.04	28.78	35.46	100.00	22.27	17.47	6.58	53.68	100.00
	2nd	73	7.92	31.18	28.72	32.18	100.00	23.16	15.83	6.84	54.18	100.00
	3rd	170	7.67	30.91	27.10	34.32	100.00	21.37	25.24	9.20	44.18	100.00
	4th	170	7.66	30.23	26.35	35.76	100.00	20.66	25.28	8.90	45.16	100.00
SM2	1st	58	11.30	18.01	57.15	13.54	100.00	21.26	1.61	6.28	70.84	100.00
	2nd	325	9.89	29.13	51.06	9.92	100.00	14.86	4.08	7.31	73.75	100.00
PP	3rd	100	4.45	24.79	45.12	25.63	100.00	45.53	17.53	11.69	25.25	100.00
	4th	140	6.01	27.93	43.88	22.19	100.00	30.81	9.70	9.43	50.07	100.00
KS	1st	36	3.24	25.13	26.28	45.34	100.00	32.37	34.98	10.33	22.32	100.00
	2nd	95	3.11	25.34	27.40	44.15	100.00	39.95	3.06	8.93	48.05	100.00
	3rd	140	3.49	26.76	28.13	41.62	100.00	31.89	29.23	9.54	29.33	100.00
SD	1st	50	1.14	6.48	71.79	20.59	100.00	66.40	3.42	27.72	2.46	100.00
	2nd	101	0.87	2.67	87.43	9.04	100.00	83.80	0.13	11.88	4.19	100.00
	3rd	190	1.42	5.98	72.13	20.46	100.00	88.21	0.55	8.96	2.28	100.00
IG	2nd	77	4.71	38.12	34.50	22.68	100.00	17.27	1.75	5.10	75.89	100.00
	4th	140	6.05	34.40	34.43	25.12	100.00	20.81	2.84	8.27	68.08	100.00
HM	1st	30	1.54	5.45	74.77	18.24	100.00	82.68	2.09	14.07	1.17	100.00
	2nd	30	1.50	4.01	73.88	20.61	100.00	87.08	0.62	11.62	0.69	100.00
	3rd	75	1.37	3.59	75.44	19.60	100.00	86.47	0.64	12.21	0.69	100.00
	4th	140	2.42	7.26	70.70	19.62	100.00	83.37	0.43	15.55	0.64	100.00

※1st 및 4th 등은 대수성시험 차수를 의미하는 것임

감사의 글

논문이 완성되기까지 부족했던 저에게 직·간접적으로 도움을 주신 모든 분들에게 먼저 감사의 마음을 전합니다.

석사과정동안 부족한 점이 많은 저에게 많은 지도와 관심을 가져주신 지도교수님이신 윤정수 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 바쁘신 와중에도 시간을 쪼개어 논문을 심사하여 주시고 조언을 해주신 최영찬 교수님, 윤석훈 교수님께 감사드리며, 항상 따뜻하게 격려하여 주신 고유봉 교수님, 이준백 교수님, 방익찬 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

대학원진학을 비롯해서 지질학과 지하수의 길을 열어주시고 항상 데리고 다니시며 많은 것을 경험하게 해주시고 가르쳐주신 수자원본부의 고기원 박사님에게 깊은 감사의 마음을 전합니다. 그리고 부족한 저를 가르쳐주시고 힘든 작업을 해주신 수자원 연구실의(박윤석 연구원, 강봉래 연구원, 김기표 연구원 김봉석 연구원, 문덕철 연구원) 연구원들에게 감사의 마음을 전합니다.

같이 실험도 하고 많은 것을 가르쳐주시고 조언을 해주신 한국지질자원연구원의 황세호 박사님과 김용철 박사님 그리고 항상 웃음 준 병각이에게도 감사의 마음을 전합니다.

서로 논문을 쓰면서 힘들었을 때마다 힘을 준 같은 실험실의 태정이 형과 물리실험실의 성준이 형 그리고, 각 연구실의 후배들에게도 고마운 마음을 전합니다. 또한, 논문을 쓰면서 힘들었던 순간에 멀리서 항상 격려와 힘을 준 영주, 한표, 하성 영학 등과 고향친구들(재호, 상덕, 천희, 규섭, 민정, 정화, 봉화, 유경)에게 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로, 항상 걱정만 끼치고 속만 태웠던 막내아들을 언제나 한결같은 마음으로 믿어주신 아버지, 어머니와, 언제나 부족한 동생에게 힘을 실어준 누나들과 형, 그리고 든든한 지원군이 되어주신 우리 매형들에게 감사의 마음을 전하며 이 글을 바칩니다.