

碩士學位論文

제주도 동부 중산간 교래리 및 해안

한동리지역 대수층특성 연구



濟州大學校 大學院

海洋學科

金昌玉

2008年 2月

제주도 동부 중산간 교래리 및 해안
한동리지역 대수층특성 연구

指導教授 尹正守

金昌玉

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

金昌玉의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 尹錫勳 印

委 員 尹正守 印

委 員 金進會 印

濟州大學校 大學院

2008年 2月

Aquifer Characteristics of Gyourae-ri Middle
Mountainous area and Handong-ri Coastal area
in Eastern Jeju Island, Korea

Chang-Ok Kim
(Supervised by Jeong - Soo Yoon)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

February, 2008

목 차

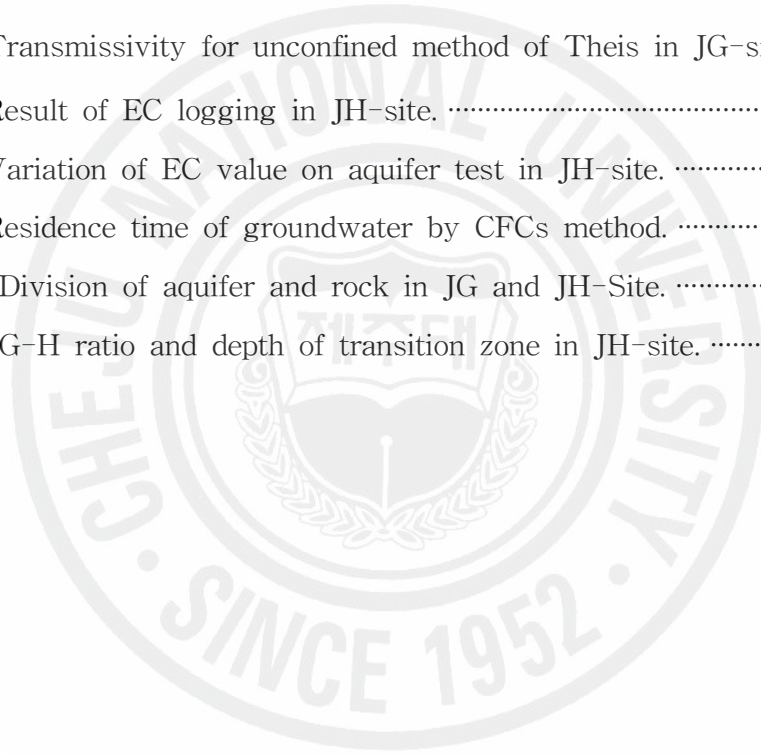
| | |
|-----------------------------|----|
| 목차 | i |
| Summary | iv |
| I. 서론 | 1 |
| II. 재료 및 방법 | 3 |
| 1. 연구지역 | 3 |
| 2. 연구방법 | 6 |
| III. 연구결과 | 8 |
| 1. 지하지질구조 | 8 |
| 1.1 지하지질 | 8 |
| 1.2 시추공경변화 | 10 |
| 2. 시추과정중 지하수위 변화 | 13 |
| 3. 대수층별 수리특성 | 15 |
| 3.1 대수층별 지하수 산출능력 | 15 |
| 3.2 대수층별 수리상수 | 22 |
| 4. 대수층별 전기전도도 변화특성 | 26 |
| 4.1 시추심도에 따른 전기전도도 변화 | 26 |
| 4.2 양수에 의한 전기전도도 변화 | 30 |
| 5. 장기 지하수위변화 | 33 |
| 6. 대수층별 지하수 체류시간 | 34 |
| IV. 고찰 | 36 |
| 1. 지질구조와 대수층의 관계 | 36 |
| 2. 대수층 규모 및 발달형태 | 38 |
| 3. 지하수부존 및 산출특성 | 41 |
| V. 결론 | 43 |
| 참고문헌 | 45 |

List of Figures

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Location map of study area. | 4 |
| Fig. 2. Geological profile in JG and JH-site. | 10 |
| Fig. 3. Calliper logging and geological profile in JG and JH-site. | 11 |
| Fig. 4. Variation of groundwater level during drill in JG-site. | 14 |
| Fig. 5. Profile of aquifer test for each aquifer in JG-site. | 16 |
| Fig. 6. Fluctuation of groundwater levels for perched aquifer test in JG-site. | 17 |
| Fig. 7. Fluctuation of groundwater levels for aquifer test in JG-site. | 18 |
| Fig. 8. Profile of aquifer test for each aquifer in JH-site. | 19 |
| Fig. 9. Fluctuation of groundwater levels for aquifer test in JH-site. | 21 |
| Fig. 10. Transmissivity for aquifer pumping and recovery test in JG-site. | 23 |
| Fig. 11. EC logging data in JG-site. | 26 |
| Fig. 12. Graph of EC logging data in JH-site. | 28 |
| Fig. 13. Variation of EC to time interval and geological profile in JH-site. | 29 |
| Fig. 14. Fluctuation of EC for aquifer test in JH-site. | 32 |
| Fig. 15. Long term fluctuation of groundwater levels in JG and JH-site. | 33 |
| Fig. 16. Schematic Residence time of groundwater by CFCs method. | 35 |
| Fig. 17. Gradient and spread range of lava flow in two site. | 37 |
| Fig. 18. Hydrogeological profile in JG and JH-site. | 40 |
| Fig. 19. Schematic model of groundwater occurrence of eastern area in Jeju. | 42 |

List of Tables

| | |
|--|----|
| Table 1. Description of investigation wells in study area. | 3 |
| Table 2. Subgeological boundary and depth in JG and JH-Site. | 9 |
| Table 3. Classification and ratio of subgeology in JG and JH-Site. | 9 |
| Table 4. Method and result of aquifer test for each aquifer in JG-site. | 16 |
| Table 5. Method and result of aquifer test for each aquifer in JH-site. | 19 |
| Table 6. Transmissivity for unconfined method of Theis in JG-site. | 22 |
| Table 7. Result of EC logging in JH-site. | 27 |
| Table 8. Variation of EC value on aquifer test in JH-site. | 30 |
| Table 9. Residence time of groundwater by CFCs method. | 34 |
| Table 10. Division of aquifer and rock in JG and JH-Site. | 39 |
| Table 11. G-H ratio and depth of transition zone in JH-site. | 42 |



Summary

Hydrogeological structure in Jeju Island is complex and especially difficult to determine from the surface because of the uncertainty of volcanic geology where little of the internal structure is visible. Lush vegetation masks the underlying lava flows of the island. Rainfall is abundant, surface water runoff is meager and dependent upon intense rainfall, facts that indicate that the groundwater resource is large. Details of its occurrence and size are not precisely known and would benefit from further investigation.

The customary coring of tube wells in Jeju Island provides excellent opportunities to study composition and physical character of the volcanic formations. Geophysical logging of the wells provides evaluation of a larger sample of the formation properties outside the borehole for potential water. The high percentage of core recovery is due to the massive character of the lavas. The massive character has other effects such as higher particle velocities of groundwater flow in the permeable zones, narrowed mixed zones in basal groundwater aquifers and higher heads.

The purpose of this study is to understand the characteristics of each aquifer and phenomenon of seawater intrusion in Gyourae-ri middle mountainous area and Handong-ri coastal area in eastern Jeju Island. For this purpose, I made aquifer tests for each aquifer using packer and change characteristics of electric conductivity by pumping tests at aquifer of two monitoring wells in the study area. Seawater intrusion is a common problem in coastal areas and many islands, especially Jeju Island. Seawater intrusion into an aquifer depends on the characteristic of the local geology. Aquifer

tests were performed to determine the hydraulic properties of aquifer systems. These properties may be needed to design municipal water supply well fields, to predict rates and directions of groundwater flow. Aquifer tests may be pumping test mainly. In pumping test, groundwater is pumped from a pumping well and water levels are measured in the pumping well and in one or more observation wells.

The results obtained from this study are summarized as follows :

It is formed by 5th major geological layer in study area, volcanic rock, sedimentary, SGF(Seogwipo formation), hyaloclastites and UF(Unconsolidated formation). Geological structure of aquifer is consisted of joint and fracture, hyaloclastites, fine sand, sand and gravel, scoria. The aquifer in JG-site is made of three aquifer and these aquifer is formed upper sea level. Eespecially, Perched aquifers are formed in this area. Aquifer in JH-site is made of three aquifer and first aquifer is formed -10~-40m below sea level and second aquifer is consisted of sand and gravel middle of lava. Last aquifer is formed in hyaloclastites of 51m layer. During a pumping test, the tidal effect is different in each aquifer and the range is about 1m.

I. 서 론

제주도는 한라산을 정점으로 원추형의 지형구조를 이루며 해안방향으로 완만한 경사를 보이는 순상화산체의 화산지형 특징을 잘 보여준다(농업진흥공사, 1971). 제주도의 전체 지형은 해발고도와 지형경사도에 따라 크게 한라산체, 중산간지대, 해안저지대로 나눌 수 있으며, 동서방향으로는 해안저지대의 면적이 우세하고, 남북방향으로는 한라산체의 면적이 상대적으로 넓다(제주도, 2000).

제주도 중산간지역은 수문지질학적 측면에서 강우량과 강우빈도가 해안지역보다 높아 비교적 양호한 지하수 함양지역에 해당되며 지하수의 흐름은 동수경사를 따라 해안지역으로 하향 흐름이 우세한 지역이다. 지질은 한라산과 분석구로부터 분출된 두께가 다양한 용암류가 호층을 이루며, 화산활동 휴지기에 쌓인 퇴적층은 심도와 두께를 달리하여 불연속적으로 분포하고 있다. 또한 비포화대가 두껍고 지하수위가 지표로부터 깊은 곳에 위치하고 있어 대수층의 수리성을 평가할 수 있을 만큼 충분한 양을 양수하는 것도 쉽지 않으며, 지질구조와 지하수와의 관계를 규명할 수 있는 시추공 또는 조사공의 개발공수가 적어 해안지역보다 상대적으로 연구가 덜 이루어져 있다(제주도, 2006). 반면에 해안지역은 지하수 배출지역으로 지하수위가 해수면 직상부에 형성되며 일부 해안지역의 지하수위 변화는 조석에 의한 영향이 우세하고 고염분 지하수의 부존으로 담·염수 경계면이 뚜렷이 관찰된다(김기표, 2002).

제주도 동부지역은 상위지하수와 기저지하수가 부존하는 특수한 지역으로 해안지역은 고염분 지하수에 의한 해수침입 현상이 발생하는 반면(부성안, 1999), 중산간지역은 해수의 영향이 없는 양질의 지하수를 채수할 수 있는 지질 조건을 갖추고 있어 수리지질학적으로 차별성을 갖고 있다.

제주도 지하수체의 유동, 대수층의 규모나 발달 형태와 관련된 많은 수리지질학적 선행 연구가 있었다. 윤정수(1986)는 제주도 동부지역의 지하수 고염분 현상의 원인에 대하여 연구를 하였으며, 최순학(1986)은 동부지역 지하수의 고염분 현상은 지하수의 과잉 양수에 의한 해수침투로 해석하였고, 고기원(1997)은 제주

도 형성 당시부터 염지하수가 부존할 수 있는 지질구조에 의한 자연적 현상으로 해석하였다. 최병수(1999)는 비양수량 자료로부터 투수량계수를 추정하는 연구를 하였고, 김기표(2002)는 제주도 동부 해안지역에 산출되고 있는 고염분 지하수의 근원을 밝히는 연구를 하였다. 고동찬(2002)은 제주도지역 대수층들의 수직적 분포와 수리적 연결성을 규명하였으며, 김창옥(2004)은 제주도 서부해안지역 대수층별 수리지질특성과 지하수 산출능력을 해석하는 연구를 수행하였다. 그러나 대수층별 대수성 시험을 통한 대수층의 발달 규모, 인근 관정간의 상호 간섭관계 등 수문순환체계 등에 관한 연구는 대구경으로 개발된 심부 시추공의 상하부 대수층을 완벽하게 차수하기가 어렵고 시험과정에서 시추공이 붕괴될 우려가 높고 투수성이 매우 양호하므로 많은 양의 지하수를 강제 배수시키기 위한 대용량 펌프의 설치 등의 현실적인 어려움으로 인하여 매우 미진한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 제주도 동부 중산간과 해안지역에 대한 대수층의 수리지질학적 특성과 지하수의 부존 및 산출특성을 비교 연구하고자 한다. 이를 위하여 중산간지역에 해당되는 제주시 교래리 지역과 해안지역에 해당되는 한동리 지역에 설치된 심부 조사공 2개소를 분석대상으로 선정하고, 이들 지하수공에 대한 공경검층, 시추과정에서 비포화대 구간에서의 시추심도별 지하수위 변화, 대수층별 대수성시험, 시추심도별 전기전도도 수직검층, 대수층별 지하수 체류시간, 지하수위 변동특성, 회수된 시추코어 자료를 이용한 지하지질구조 분석을 통하여 제주도 동부 중산간지역 및 해안지역의 대수층별 수리지질학적 특성과 지하수 부존 및 산출특성을 파악하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구지역

연구지역은 제주도 동부 중산간 및 해안지역으로 지하수 분류에 의한 상위지하수, 준기저지하수, 기저지하수가 부존하는 지역이다(제주도, 1993). 제주도의 지형경사는 지하수의 동수경사를 어느 정도 반영하므로 지하수의 흐름방향을 예측할 수 있으며 동수경사를 계산하여 유속을 계산하는데 도움이 된다(부성안, 1999). 본 연구에서는 해수침투가 해안에서 내륙쪽으로 진행된다는 가정 하에, 지형경사와 해안과의 거리, 지하수 부존형태를 고려하여 상위지하수가 부존할 것으로 추정되는 지역에 위치한 JG-site(제주교래지구)와 기저지하수 부존지역에 위치한 JH-site(제주한동지구) 심부 조사공 2공을 분석대상으로 선정하였다(Fig. 1, Table 1).

JG-site는 제주시 조천읍 교래리 지역으로 해발표고 439m의 중산간 지역에 위치하며, 한라산 백록담 정상으로부터 북동쪽으로 약 15km, 조천읍 함덕리 해안에서 남쪽으로 약 13km 떨어져 위치하고 있다. 제주도 지하수 부존형태 분류(고기원, 1997)에 따르면 상위지하수 부존지역에 해당된다.

Table 1. Description of investigation wells in study area.

| Site | Locality | El.(m) | Distance from coast (km) | TM | Type of occurrence |
|------|-----------------|--------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| JG | Jocheon Gyourae | 439.0 | 13.0 | X : 168797 Y : 41822 | High level groundwater |
| JH | Gujwa Handong | 34.0 | 1.5 | X : 182332 Y : 55123 | Basal groundwater |

※ BGL : Below ground level, El. : Elevation

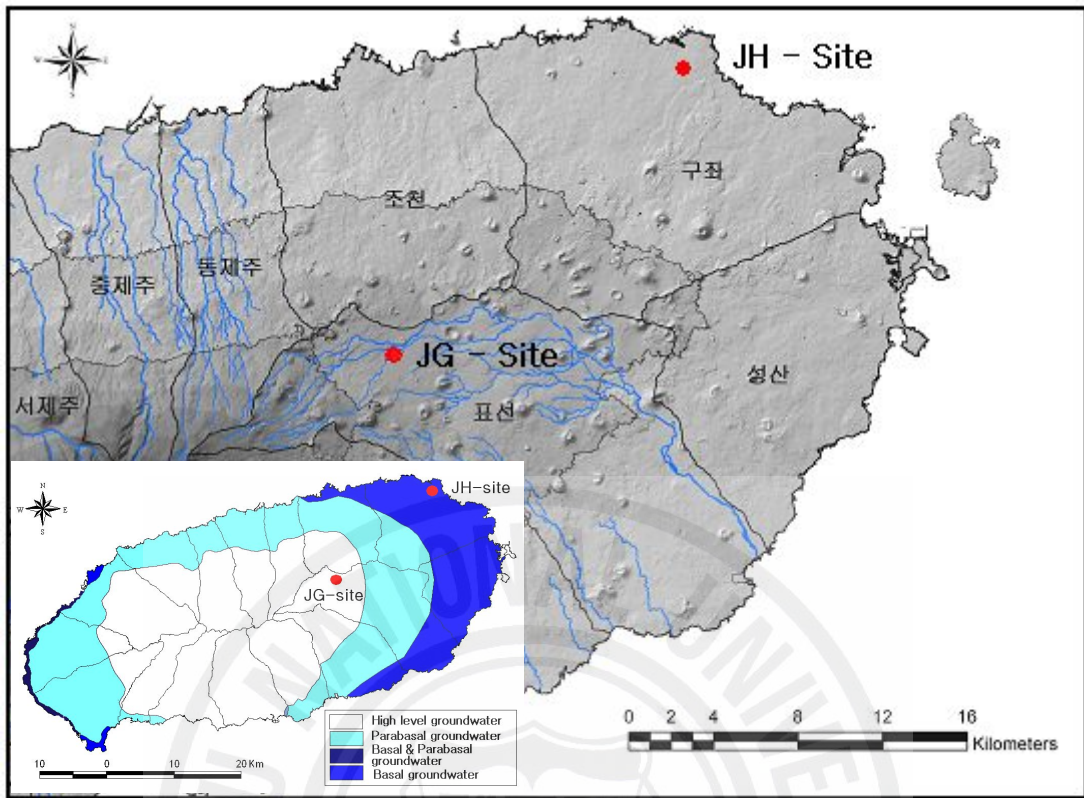


Fig. 1. Location map of study area.

JH-site는 제주시 구좌읍 한동리 지역으로 해발표고는 34m이며, 해안과의 최단거리는 정북방향으로 1.5km이다. 제주도의 북동부 해안저지대에 위치하고 지형경사는 대체로 완만한 평지상의 경사를 보이고 있다. 제주도 지하수 부존형태 분류(고기원, 1997)에 따르면 기저지하수 부존지역에 해당된다.

제주도는 화산활동에 의해 형성된 화산섬으로서 화산분출물과 화산활동 휴지기 동안 진행된 침식 및 퇴적작용으로부터 형성된 퇴적층이 겹겹이 쌓인 순상화산체를 이루고 있다. 화산암류의 화학적 조성은 알카리현무암(Alkali Basalt), 현무암(Basalt), 조면질현무암(Trachy basalt), 조면질안산암(Trachy andesite), 현무암질조면안산암(Basaltic trachyandesite), 현무암질안산암(Basaltic andesite), 조면암(Trachyte) 등이다. 나머지 지역은 퇴적암류로 응회퇴적층, 해양성 퇴적층, 용암류 사이에 협재된 퇴적층, 현생퇴적층, 사구층 등으로 이루어져 있다(고기원 외 2005).

화산암은 용암의 물리적 특성에 의해 파호에호에(Pahoehoe) 용암과 아아(Aa) 용암으로 나눌 수 있는데, 파호에호에 용암류는 주로 제주도의 동부와 서부 해안 저지대 지역에 분포하고, 아아 용암류는 남부와 북부, 그리고 한라산 고지대 지역을 중심으로 분포하고 있다. 해수면 하부에 존재하는 용암류의 분포 깊이는 동부 해안지역이 해수면 하 100~150m 범위이고, 서부 및 북부 해안지역은 해수면 하 50~70m, 남부 해안지역은 해수면 상부 10~80m 범위이다.

용암류 하부에는 서귀포층(Seogwipo formation)이 광범위하게 퇴적되어 있다. 서귀포층은 천해성 퇴적층으로서 암질은 역질사암, 사암, 이암, 셰일 등으로 고결, 미고결 내지 준고결 상태이다(고기원, 1997). 최근 서귀포층 노두에 대한 퇴적학적 분석(윤석훈 외, 2006)에 따르면, 서귀포층은 암상, 퇴적구조, 침식경계면, 생물교란 및 화석 포함 여부 등을 기준으로 할 때, 10개의 화석 포함 층단위와 4개의 화석비 포함 층단위로 구분되며, 이들 층단위들은 육상 화산쇄설물이 재동되어 유입되고 폭풍의 영향이 우세한 연안 환경에서부터 니질 외대륙붕까지 다양한 천해환경에서 형성된 것으로 해석된다.

미고결 퇴적층은 서귀포층 하부에 분포하는 지층으로 지표에서는 나타나지 않고 있으나, 심부 시추조사 결과에 의해 그 존재가 확인되어 해수면 아래 약 100~150m 정도에 분포하는 사니층으로 고기원(1997)은 본 층의 점토광물을 분석하여 미고결의 원인을 규명하였으며, U층(Unconsolidated formation)으로 기재하였다.

2. 연구방법

지하지질구조 및 대수층의 규모와 형태를 육안으로 쉽게 판별하기 위하여 회전식 코어회수 방법으로 U층이 포착된 심도까지 시추하였다. 회수된 코어는 화산암의 경우 구성광물의 종류, 함량, 형태와 암질 등에 근거하여 야외명으로 불렀다. 퇴적암은 구성물질의 종류, 입자의 크기 및 화석의 유무 등을 고려하여 지층명을 붙이고 주상도를 작성하였다.

암석의 파쇄대 및 대수층의 발달 규모를 간접적으로 해석하기 위하여 시추공 공경검층을 실시하였으며, 검층결과는 시추코어로부터 작성된 지질주상도와 비교 해석하였다.

JG-site는 비포화대의 두께가 두텁고 지하수위가 깊게 형성될 것으로 예측되어 시추과정에서 수위측정기(Water level meter)를 이용하여 시추심도 증가에 따른 지하수위 변화를 심도별로 측정하였다.

대수층별 지하수의 수리성과 산출능력을 평가하기 위한 대수층별 대수성시험은 각 조사공에서 4차례(제1, 제2, 제3대수층, 전 구간 관통정)씩 실시하였다. 대수층으로 판단되는 일정한 심도까지 시추한 후 상하부의 대수층을 특수 제작된 차폐용 팽창팩커(G&G 테크놀로지 제작)로 분리시킨 다음, 팩커 하부에 펌프를 설치하여 시험하고, 최종 단계는 대수층을 차단하지 않고 지하수위 하부 전 구간에 대한 관통정 시험을 실시하였다. 이때 자동수위관측기(Troll9000)를 설치하여 지하수위 및 전기전도도 변화를 관측하였다. 특히, JG-site는 비포화대 구간에 분포하는 주수지하수(perched water)를 대상으로 하는 시험을 실시하였다.

담·염수 경계면의 수직적인 분포와 변동특성을 파악하기 위하여 고심도 수질검층기 RG-Prologer(TCDS1531, Robertson Geologging LTD)를 이용하여 시추 종료 후 전기전도도 검층을 실시하고, 기저지하수 부존지역에 위치한 JH-site의 경우 시추 과정에서(심도 68m, 100m, 130m, 160m) 전기전도도 검층을 실시하여 시추심도 변화에 따른 고염분 지하수의 변화 특성과 시추 심도별 해수침투 영향을 해석하였다.

자연 상태에서 지하수위 변동특성을 해석하기 위하여 시추가 종료된 후 자동

수위 관측기(Troll9000, Diver)를 설치하여 지하수위 변화를 관측 분석하였다.

대수층별 지하수의 체류시간은 대수성 시험 과정에서 수질시료를 채수하여 Chlorofluorocarbons(CFCs) 방법으로 분석하였다. CFC 분석에 필요한 시료 채취는 125mL 유리병에 금속 라이너가 설치된 마개를 이용하여 대기와의 접촉이 없는 상태에서 삼중복시료(triplicate)로 채취하였다. CFC의 분석은 한국지질자원연구원에서 자체 제작된 Purge & Trap 전처리 장치로 물속의 CFC를 추출하여 전자포획검출기(Electron Capture Detector)가 설치된 가스크로마토그래피시스템(Gas Chromatorgraphy, GC-14B, Shimadzu)으로 분석하였다. 분석결과는 100pg/kg 이상의 CFC 농도에서 상대표준편차가 5% 이내를 가지는 자료를 이용하였다. 지하수의 CFC 연령측정은 North America Air Curve를 이용하여 결정하였다.



Ⅲ. 연구결과

1. 지하지질구조

1.1 지하지질

연구대상 조사공의 지하지질은 크게 화산암류, 퇴적층, 서귀포층, 유리질쇄설성각력암층, U층 등으로 분류할 수 있다(Table 2).

JG-site는 해발표고 439m로 시추심도 474m(El. -35m)에서 U층이 포착되어 심도 480m(El. -41m)에서 종결하였다. 지표 하 421m(El. 18m)까지는 용암류와 퇴적층이 호층을 이루며, 지표 하 421~474m(El. 18~-35m)까지 서귀포층이 분포하고, 지표 하 474m(El. -35m) 하부에 U층이 분포하고 있다.

화산암류는 구성광물의 종류, 형태와 암질 등에 근거할 때 비현정질현무암, 반상장석현무암, 휘석감람석현무암, 장석휘석감람석현무암, 조면질안산암 등으로 총 35매 정도이며, 두께는 최소 3.1m, 최대 23m, 평균 11m이다. 용암류 단위 횡수가 많다는 것은 수 차례의 화산활동이 반복되었다는 증거로 볼 수 있다. 치밀질 용암류는 두께 74.5m로서, 퇴적층과 더불어 지하수의 수직적 및 수평적 유동을 방해하는 저투수층(aquiclude)의 역할을 할 것으로 보인다.

용암류 사이에 분포하는 퇴적층은 서귀포층이 포착되기 시작하는 지표 하 421m(El. 18m)까지 1~6m의 층후로 8매가 협재되어 있는데, 퇴적층의 전체 두께는 31m이다(Fig. 2). 암상은 점토층, 화산회층, 이질사암층, 이질역암층 등 다양하며 고결도는 높지 않은 편이다. 서귀포층이 지표 하 421m(El. 18m)에서 포착되는 것으로 미루어 볼 때, 대략 해수면 직상부에서 다소 기복을 갖고 분포하는 것으로 예상된다. 진회색의 미고결 실트층인 U층은 심도 474m(El. -35m)인 해수면 하부에서 확인되며 해안쪽으로 갈수록 고도가 낮아질 것으로 판단된다(Fig. 2).

Table 2. Subgeological boundary and depth in JG and JH-site.

| Site | Elevation (m) | Ground-water level (El.m) | Upper boundary(El. m) | | | Depth of well(m) | |
|------|---------------|---------------------------|-----------------------|---------------|--------|------------------|--------|
| | | | SGF | Hyaloclastite | UF | BGL | El. |
| JG | 439.0 | +183.0 | +18.0 | - | -35.0 | 480 | -41.0 |
| JH | 34.0 | +1.5 | - | -70.0 | -121.0 | 160 | -126.0 |

※ BGL : Below ground level, El. : Elevation,

SGF : Seogwipo formation. UF : Unconsolidated formation

JH-site는 해발표고 34m로 지표 하 155m(El. -121m)에서 U층이 포착되어 시추심도 160m(El. -126m)에서 종결하였다. 지질은 사구층(Sanddune), 장식감람석현무암(FOB), 사층(Sand), 유리질쇄설성각력암(Hyaloclastite), U층으로 이루어져 있으며, JG-site와는 달리 용암이 물과 만나 급냉하면서 생성된 유리질쇄설성각력암이 분포한 반면 응회질의 서귀포층은 결층으로 확연히 다르다(Fig. 2).

화산암류는 다공질의 장식감람석현무암(FOB)으로 지표 하 104m(El. -70m)까지 분포하며 총 5매 이상의 용암류 단위로 두께는 최소 1m, 최대 9m, 평균 2.7m이다. 지표 하 34~36m(El. 0~-2m) 구간에는 담황색의 준고결된 점토층이 분포하며, 사층은 지표 하 68.5~78m(El. -34.5~-44m)와 79~83m(El. -45~-49m) 2개 구간에서 관찰된다. 상부 사층은 패류화석이 관찰되지 않는 반면 하부 사층은 패류화석이 확인된다. 유리질쇄설성각력암층은 지표 하 104~155m(El. -70~-121m)로 51m의 층후로 전체 구간 중 약 32%를 차지하고 있다. 진회색의 실트질 U층은 지표 하 155m(El. -121m)부터 포착되기 시작하였다(Table 3).

Table 3. Classification and ratio of subgeology in JG and JH-Site.

| Site | Lava flow | | Sediment | | SGF | | Hyaloclastite | | Depth of well (m) |
|------|-----------|----|-----------|-----|-----------|----|---------------|----|-------------------|
| | layer (m) | % | layer (m) | % | layer (m) | % | layer (m) | % | |
| JG | 390 | 81 | 31 | 7.4 | 53 | 11 | - | - | 480 |
| JH | 83 | 52 | 2 | 1.3 | - | - | 51 | 32 | 160 |

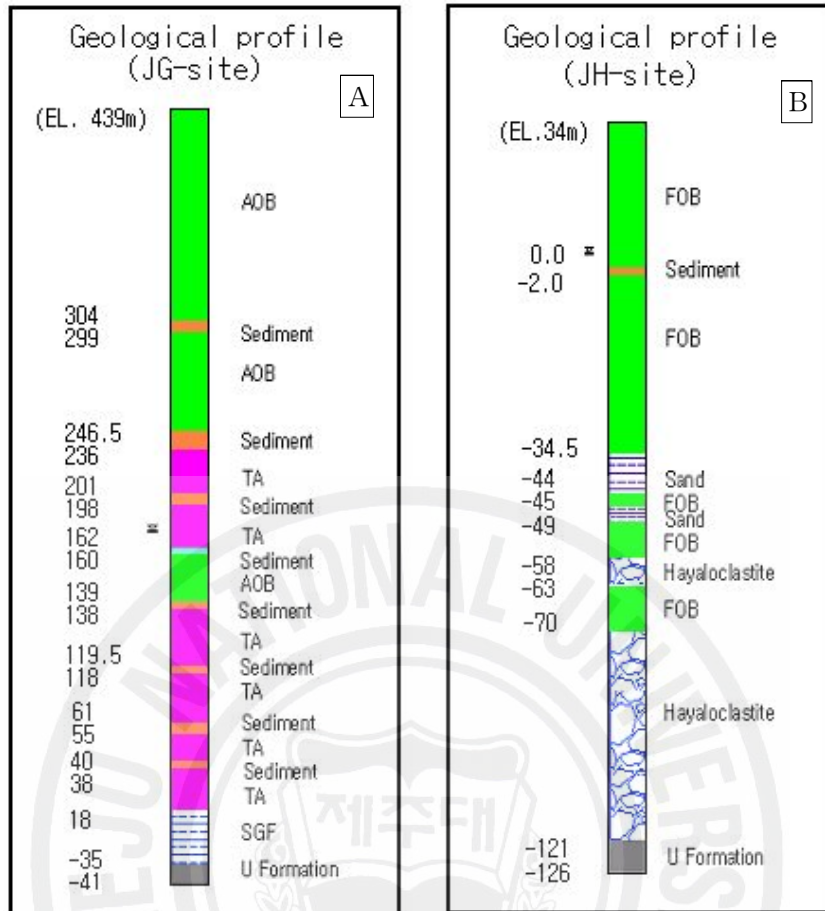


Fig. 2. Geological profile in JG(A) and JH-site(B).

1.2 시추공경변화

JG-Site는 지표에서부터 70m까지 구경 400mm로 시추하였으며, 140m까지 구경 300mm, 최종심도까지는 구경 250mm로 3단계로 시추하였다. 공경검층 결과 암질의 상태에 따라 공경의 변화가 다양하다. 지표 하 450m까지 공경이 500mm 이상 확장된 구간은 지표 하 192~198m, 248~257m, 321~324m 등 3개 구간이며, 지표 하 106m, 233~238m, 278~281m은 타 구간에 비해 공경이 넓게 확장되어 있다(Fig. 3).

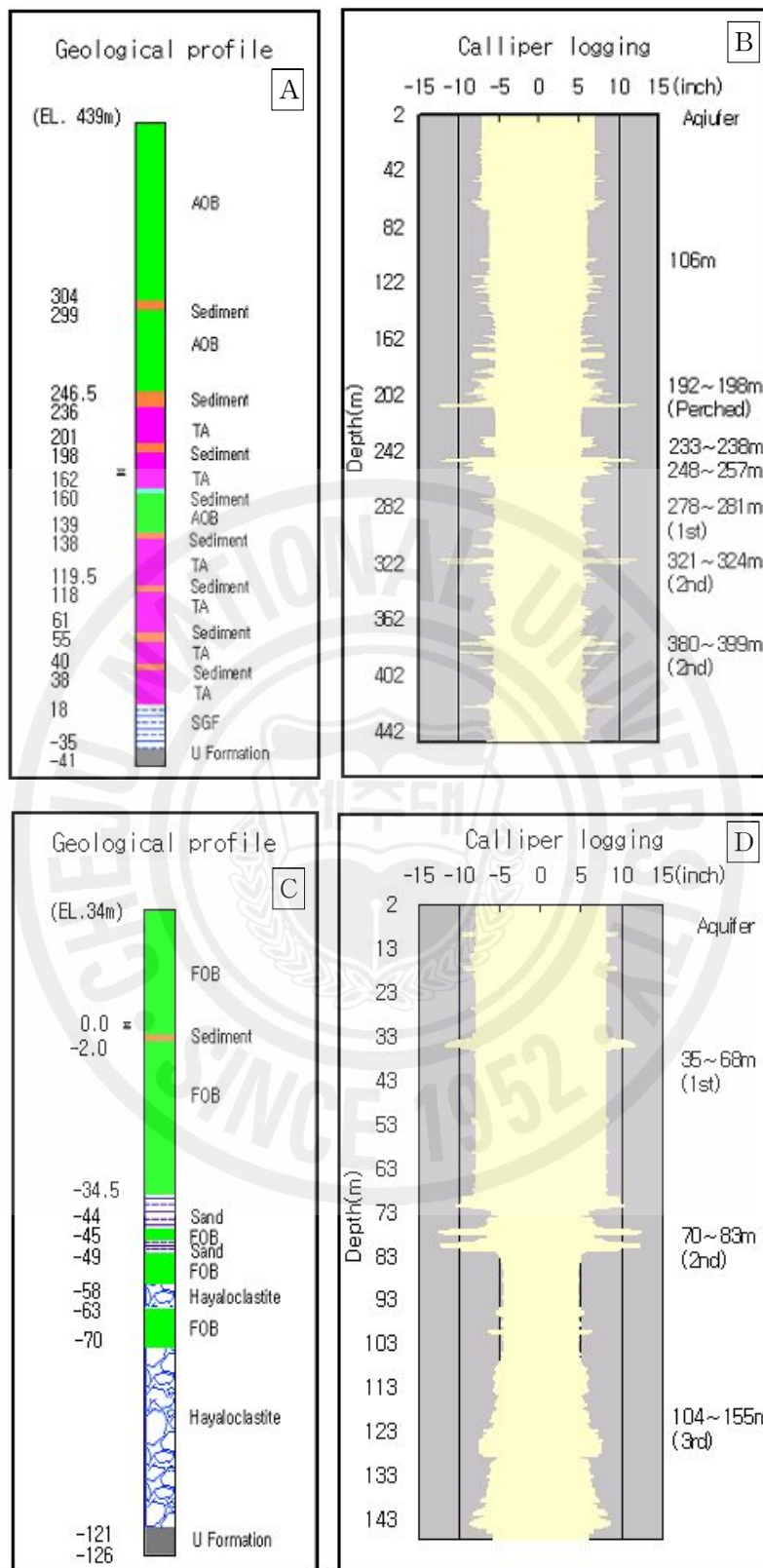


Fig. 3. Calliper logging and geological profile in JG(A,B) and JH-site(C,D).

JH-site는 지표에서부터 70m까지 구경 400mm로 시추하였으며, 지표 하 160m까지 구경 200mm로 2단계로 시추하였다. 심도 70m까지 공경이 비교적 일정하게 형성되나 미고결 사층이 분포하는 지표 하 70~83m에서는 공경의 변화가 심하게 나타난다. 유리질쇄설성각력암층이 포착되는 지표 하 104m부터 공경이 크게 확장되어 있는데 이는 각력암층 시추과정에서 공내 붕괴에 따른 현상으로 각력암층이 고투수성 지질구조에 해당됨을 암시해 준다. 지표 하 160m까지 직경 500mm 이상 확장된 구간은 지표 하 35m, 69m, 78m, 80m로 모두 4개 구간에 해당된다.

JG-site와 JH-site에서 실시한 공경검층 결과는 회수된 시추코어, 대수성시험 분석 결과에 의해 해석된 대수층의 분포 구간과 규모가 매우 정확하게 일치하고 있다. 암질이 치밀하고 절리구조가 발달하지 않은 구간에서는 비교적 일정하게 공벽이 형성되나, 용암류 경계면, 클린커층, 절리구간, 퇴적층 분포구간 등에서는 시추구경보다 2배 이상인 직경 500mm까지 확장되어 있다. 또한 소폭으로 예리하게 확장되는 몇 개의 구간은 주변 대수층과 수평적으로 연결되어 있을 것으로 판단된다.

2. 시추과정 중 지하수위 변화

지하수위가 지표 하 200m 이상되는 고심도 조사공의 시추과정에서 지하수위 측정은 작업공정상 수동측정에 의존해야 하므로 정밀도와 효율성에 대한 한계성 때문에 체계적인 조사가 이루어질 수 없어 학계에 자료로서 보고된 적이 없었다.

시추과정에서 지층 및 시추심도 변화에 따라 수위변화가 발생하는 것은 지하수위 상부의 비포화대 구간에서는 주수대수층(perched aquifer)이 호층으로 존재하고 있음을 의미하며, 포화대 하부에서는 대수층이 호층으로 발달하고 있음을 의미하는 것으로서 제주도와 유사한 지질구조를 보이는 하와이에서도 유사한 현상이 보고되고 있다(Meyer and Presley, 2001).

JG-site가 위치한 지하수 함양지역인 중산간지역은 비포화대 두께가 200m 이상으로 매우 두껍게 발달하고 있어 대수층으로 지하수를 공급해 주는 통로 역할을 하고 있다(제주도, 2006). 비포화대 내에는 지하수의 하방침투를 방해하는 치밀질 화산암층이나 저투수성 퇴적층이 복잡하게 분포할 것으로 추정되므로 시추과정에서 지하수위 변화는 주대수층의 분포위치, 발달 양상, 지층과의 관계 등을 해석하는데 유용한 정보가 되기 때문에 시추과정에서 심도별로 연속적으로 지하수위 변화를 측정하였다.

JG-site는 시추과정에서 지표 하 188m에서부터 422m까지 모두 8회에 걸쳐 지하수위가 하강하는 현상을 나타내었다. 지표 하 188m에서 처음으로 지하수위가 형성되었으나 심도 234m 지점을 관통하였을 때, 지하수위는 2m 하강한 190m, 심도 239m 지점을 관통하였을 때에는 다시 22.5m가 하강한 212.5m에 수위가 형성되었다. 심도 259m 지점을 관통한 후 수위는 18.5m가 하강한 231m, 심도 279m 지점을 관통한 다음에는 238m로 7m 하강하는 등 8회에 걸친 변화를 보이다가 심도 422m 이후에는 더 이상의 수위변화를 나타내지 않았다(Fig. 4).

시추종료 후 지하수위가 258.5m에 형성된 점을 고려할 때, 지하수위 상부의 심도 188m, 234m, 239m 구간에 형성된 수위는 주수대수층에 의한 것이며, 지하수위 하부의 심도 259m, 279m, 307m, 356m, 422m에서의 수위변화는 퇴적층 상부나 클린커층 및 절리구간 관통에 의해 생겨난 것으로 해석된다.

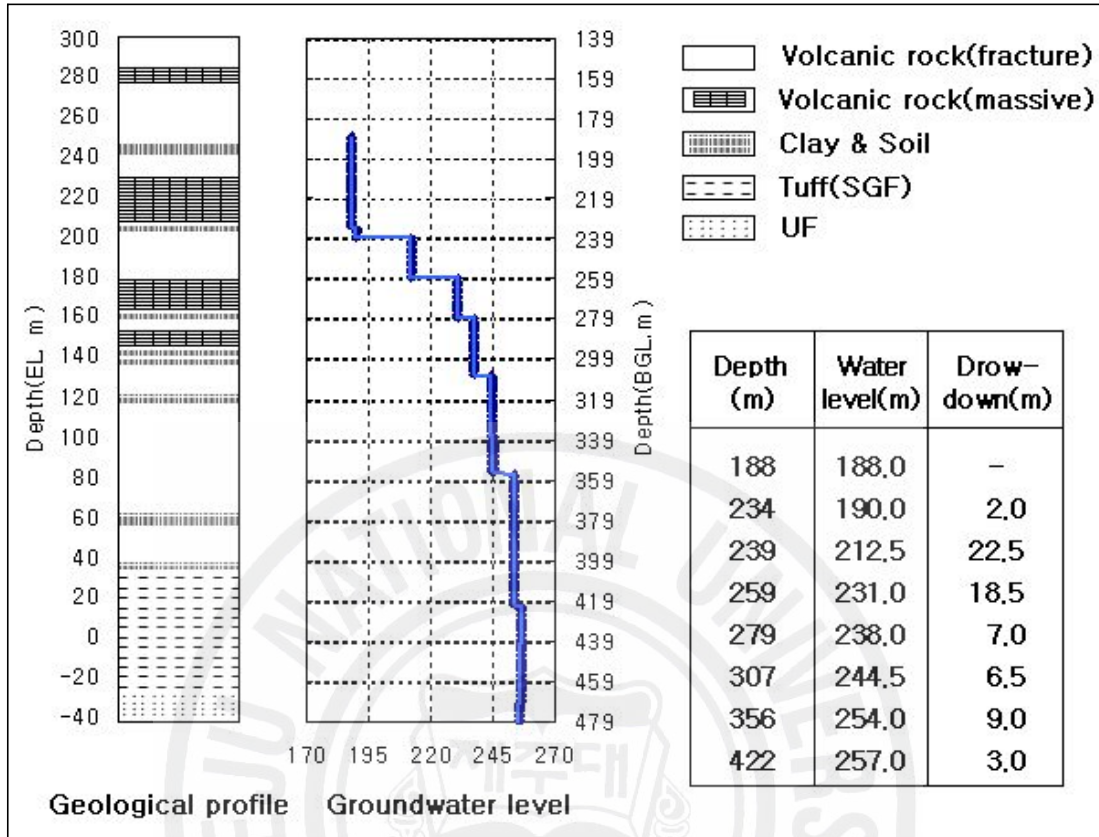


Fig. 4. Variation of groundwater level during drill in JG-site.

지하수위 하부 구간에서 지층이 변화할 때 지하수위가 상승하지 않고 하강하는 현상은 피압상태의 대수층 발달이 미약할 뿐만 아니라, 투수성이 좋은 지층을 통해 지하수가 누수되는 즉, 수두압력이 낮은 해안쪽으로 유동되는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 JG-site가 위치하는 중산간지역은 지하수위 상부에 주수대수층이 불연속적으로 발달하고 있고 지하수위 하부 구간에는 대수층이 호층으로 발달하고 있어 인위적으로 수직 관통시켰을 때 투수층을 통한 지하수의 누수로 인한 수위변화가 발생하는 것으로 해석할 수 있다. 중산간지역에 분포하는 주수대수층을 시추 등과 같이 인위적으로 수직으로 관통시켰을 때 수평으로 유동하던 지하수가 하부 대수층으로 유동경로를 바꾸게 되면서 심부 대수층을 따라 하방 유동하게 되는데, 이러한 결과로 인하여 해안가 용천수의 용출수량 변동현상이 발생될 수 있다.

3. 대수층별 수리특성

3.1 대수층별 지하수 산출능력

JG-site의 대수성시험은 주수대수층을 포함하여 4차례(총 7회)로 150마력의 펌프를 사용하여 동일한 조건으로 시험하였다(Table 4, Fig. 5).

1차 시험은 총 4회로 지표 하 230m까지 시추 후, 192.5~198m의 주수대수층을 대상으로 2,150m³/일~1,400m³/일로 4~25시간 동안 실시하였다. 1-1차 시험은 2,150m³/일로 양수하였을 때, 수위강하가 지속적으로 발생하여 4시간 동안 최대 4.46m가 하강하였다. 1-2차 시험은 평균 2,100m³/일로 25시간 배출시켰을 때 최대 6.3m의 수위강하가 발생하였다. 1-3차 시험은 1,400m³/일로 낮추었을 때 초기 수위강하가 0.98m만 발생하고 시험시간 경과에 따른 수위강하는 발생하지 않았으나 시험종료 후 원래 상태로 회복하는데 긴 시간이 소요되었다. 1-4차 시험은 평균 1,700m³/일로 줄였을 때에도 수위강하가 지속적으로 발생하여 주수대수층의 적정양수량은 일일 1,400m³ 이내가 적당할 것으로 판단된다(Fig. 6).

2차 시험은 지표 하 315m까지 시추 후, 심도 215m에 팩커를 설치하여 주수대수층을 차단시킨 다음, 펌프는 262m에 설치하고 심도 233~238m, 248~257.5m, 278.5~281m에 발달한 제1대수층을 대상으로 1,700~700m³/일로 27시간 동안 시험하였다. 시험초기 양수율은 1,700m³/일이었으나 시간이 경과함에 따라 지속적으로 감소하여 종료 직전에는 700m³/일로 떨어졌으며, 수위도 약 21m나 하강하여 제1대수층은 주수대수층보다 지하수 산출능력이 불량한 것으로 평가되었다.

3차 시험은 지표 하 440m까지 시추 후, 심도 317m에 팩커를 설치하고 펌프를 330m에 설치한 다음 317~440m 구간을 대상으로 1,400m³/일로 25시간 동안 시험하였다. 시험기간 동안 양수율이 일정하게 유지되고 수위강하도 초기에 발생한 3.1m가 계속 유지되어 지하수의 산출능력이 양호한 것으로 평가되었다.

4차 시험은 지하수위 하부 전 구간 관통정 시험으로 심도 480m까지 시추 후, 펌프를 276m에 설치하고 1,500m³/일로 24시간 동안 시험하였다. 양수율은 1,500m³/일로 일정하였으며 수위강하도 초기에 발생한 1.56m가 유지되었다.

양수량 증가로 인한 수위하강은 발생하지 않고 있어 지하수의 산출능력이 양호한 것으로 판단된다(Fig. 7).

Table 4. Method and result of aquifer test for each aquifer in JG-site.

| Division of test | Aquifer | Drill depth (m) | Range of test (m) | Water level (m) | Draw-down (m) | Pumping rate(m ³ /D) | Pump (m) | Packer (m) |
|------------------|---------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------|---------------------------------|----------|------------|
| 1st | Perched | 230 | 188~230 | 188 | 4.46 | 2,150 | 198 | N |
| | | | | | 6.30 | 2,150~2,030 | 204 | N |
| | | | | | 0.98 | 1,500~1,400 | 204 | N |
| | | | | | 1.48 | 1,700 | 204 | N |
| 2nd | 1st | 315 | 244.5~315 | 244 | 20.97 | 1,700~700 | 262 | 215 |
| 3rd | 2nd | 440 | 317~440 | 256 | 3.10 | 1,400 | 330 | 317 |
| 4th | All | 480 | 258~480 | 256 | 1.56 | 1,700~1,400 | 276 | N |

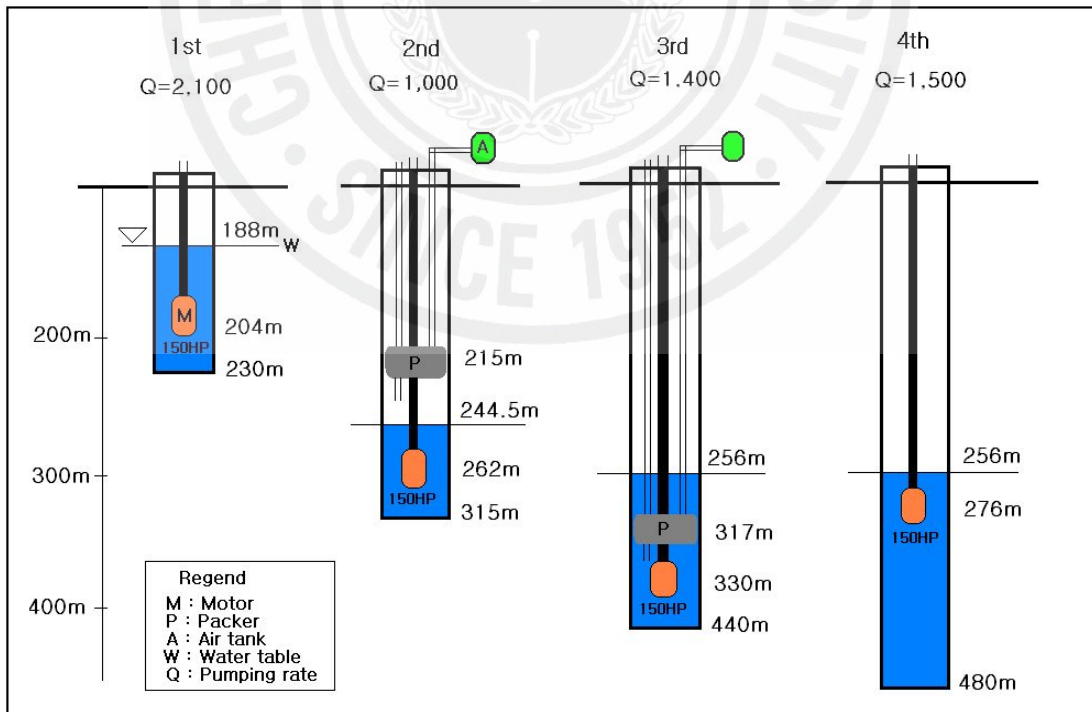


Fig. 5. Profile of aquifer test for each aquifer in JG-site.

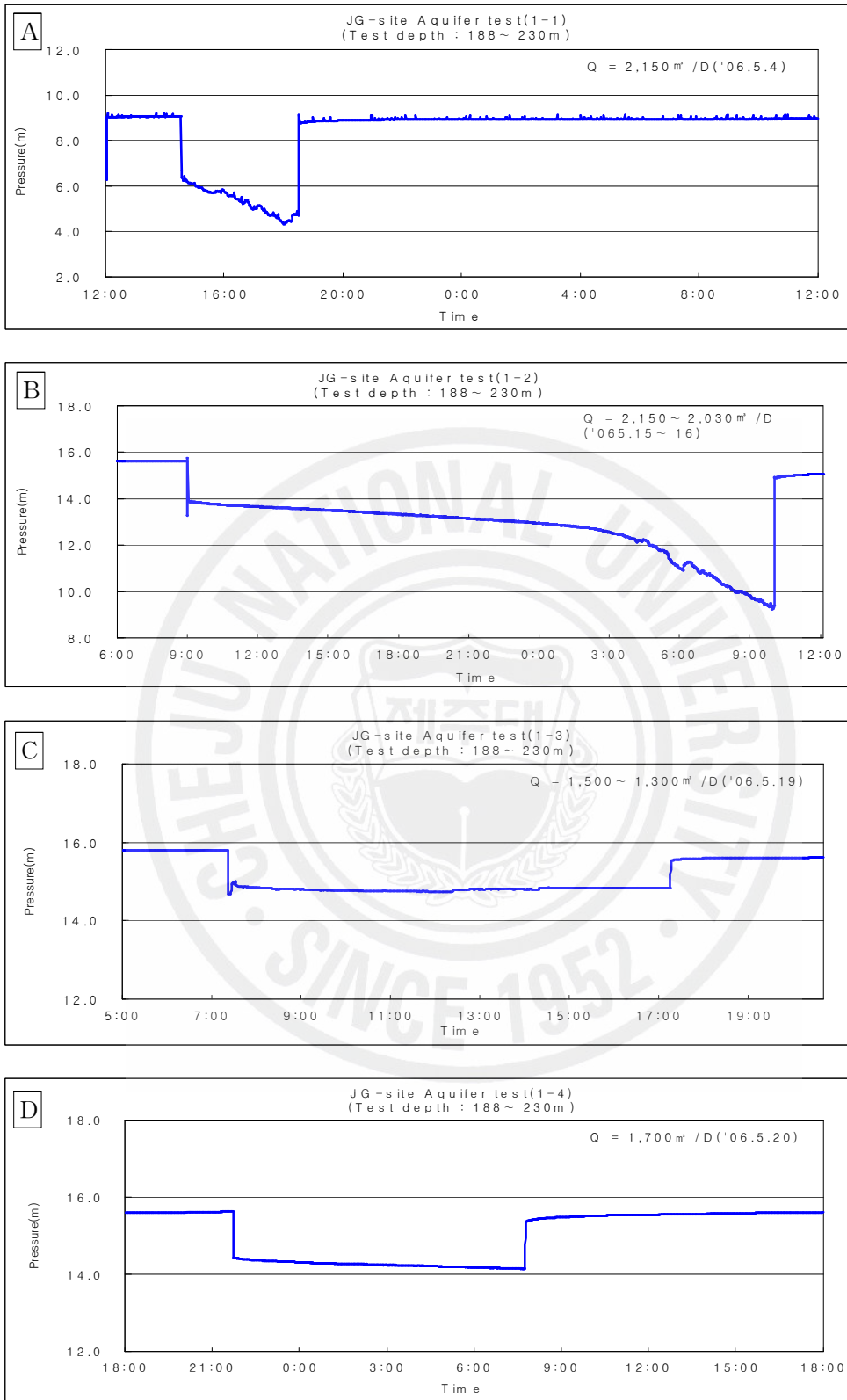


Fig. 6. Fluctuation of groundwater levels for perched aquifer test in JG-site.

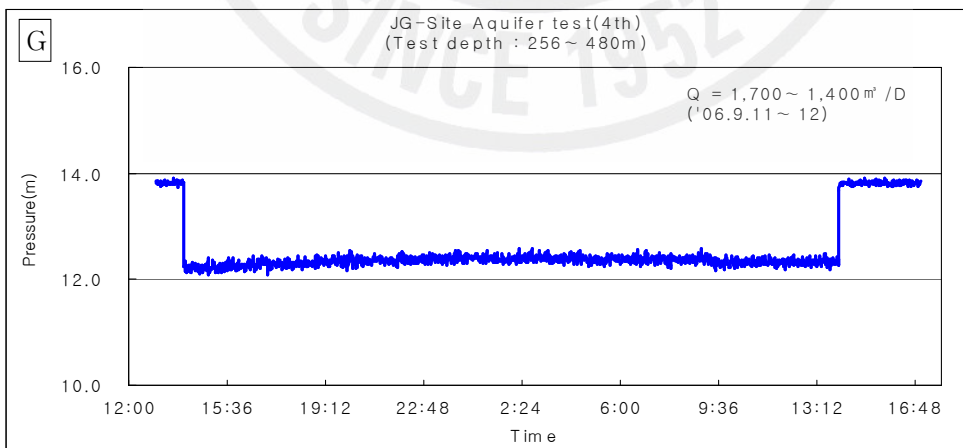
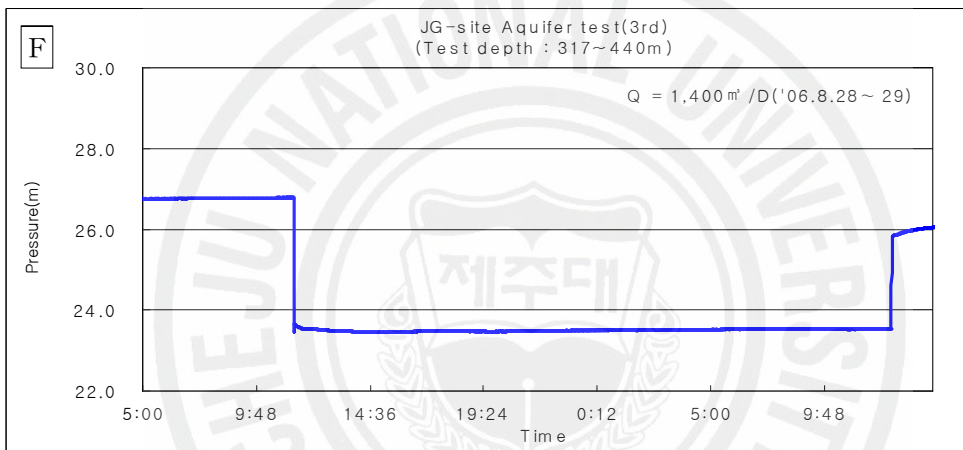
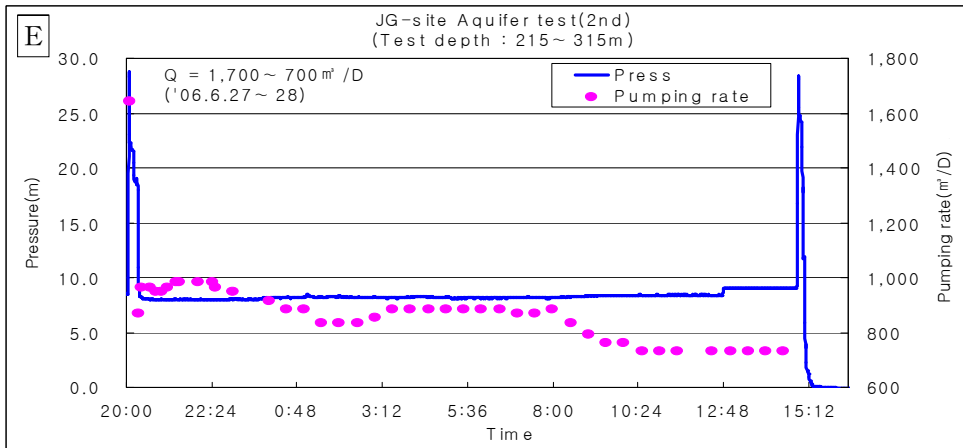


Fig. 7. Fluctuation of groundwater levels for aquifer test in JG-site.

JH-Site에서는 3개 대수층에 대하여 4차례(총 7회)에 걸쳐 대수층별로 심도를 분리하여 40마력의 펌프로 시험하였다(Table 5, Fig. 8).

Table 5. Method and result of aquifer test for each aquifer in JH-site.

| Division of test | Aquifer | Drill depth (m) | Range of test (m) | Draw-down (m) | Pumping rate (m ³ /d) | Pump (m) | Packer (m) | Remarks |
|------------------|---------|-----------------|-------------------|---------------|----------------------------------|----------|------------|---------|
| 1st | 1-1 | 68 | 32.4~68 | 0.02 | 1,440 | 36 | N | |
| | 1-2 | | | 0.03 | 1,440 | 66 | N | |
| 2nd | 2-1 | 100 | 68~100 | 0.09 | 1,330 | 84 | 68 | closed |
| | 2-2 | | 32.4~100 | 0.07 | 1,330 | 84 | N | open |
| 3rd | 3-1 | 130 | 100~130 | 0.03 | 1,300 | 115 | 100 | closed |
| | 3-2 | | 32.4~130 | 0.02 | 1,300 | 115 | N | open |
| 4th | All | 160 | 32.4~160 | 0.03 | 1,230 | 136 | N | |

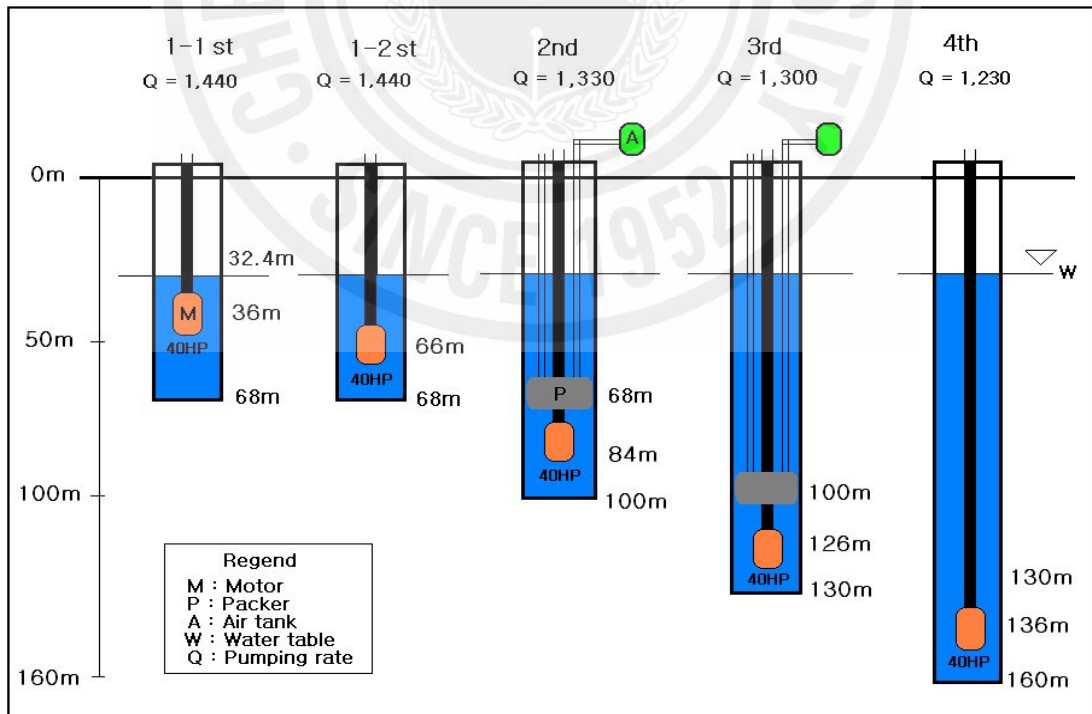


Fig. 8. Profile of aquifer test for each aquifer in JH-site.

1차 시험은 지표 하 68m까지 시추 후, 용암류에 발달된 제1대수층(암반대수층)을 대상으로 1,440m³/일으로 2회 실시하였는데, 이 때 펌프는 심도 36m와 66m에 각각 설치하여 동일 시추심도에서 펌프 심도를 달리하였을 때 양수에 의한 해수침투 여부를 분석하였다. 펌프를 36m에 설치하여 지하수를 배출시켰을 때 수위강하가 0.02m로 매우 미미하였으며, 양수에 의한 수위강하 보다는 조석에 의한 영향으로 판단되며 약 1m 범위 내에서 변동이 이루어진다. 펌프심도 66m에서는 0.03m의 수위강하가 이루어 졌으며 양수 중에도 오히려 상승하는 점으로 미루어 조석영향이 약 1m 이내의 수두변화를 발생시키는 것으로 해석된다.

2차 시험은 지표 하 100m까지 시추 후, 팩커 설치 전과 후 2회 실시하였다. 심도 68m에 팩커를 설치하여 제1대수층을 차단시킨 다음 지표 하 68~100m에 발달한 제2대수층(사층)을 대상으로 실시하였는데, 이때 펌프는 84m, 1,330m³/일으로 양수시 약 0.09m 하강하였다. 팩커를 푼 상태에서 심도 32~100m 구간 전체에 대한 관통정 시험에서는 0.07m의 수위강하를 보였다.

3차 시험은 지표 하 130m까지 시추 후 2회 시험하였다. 먼저 지표 하 100m에 팩커를 설치한 다음 지표 하 100~130m에 발달한 제3대수층(유리질쇄설성각력암층)을 대상으로 펌프는 심도 115m에 설치하고 1,300m³/일으로 6시간 동안 양수시 약 0.03m 하강하였다. 팩커를 푼 상태에서 심도 32~130m에 대한 관통정 시험에서는 0.02m의 수위강하가 나타났다.

4차 시험은 지하수위 하부 전 구간에 해당되는 관통정 시험으로 지표 하 160m까지 시추한 다음 펌프를 심도 136m에 설치하고 1,230m³/일으로 양수시 수위강하가 0.03m로 미미하게 발생하였다(Fig. 9).

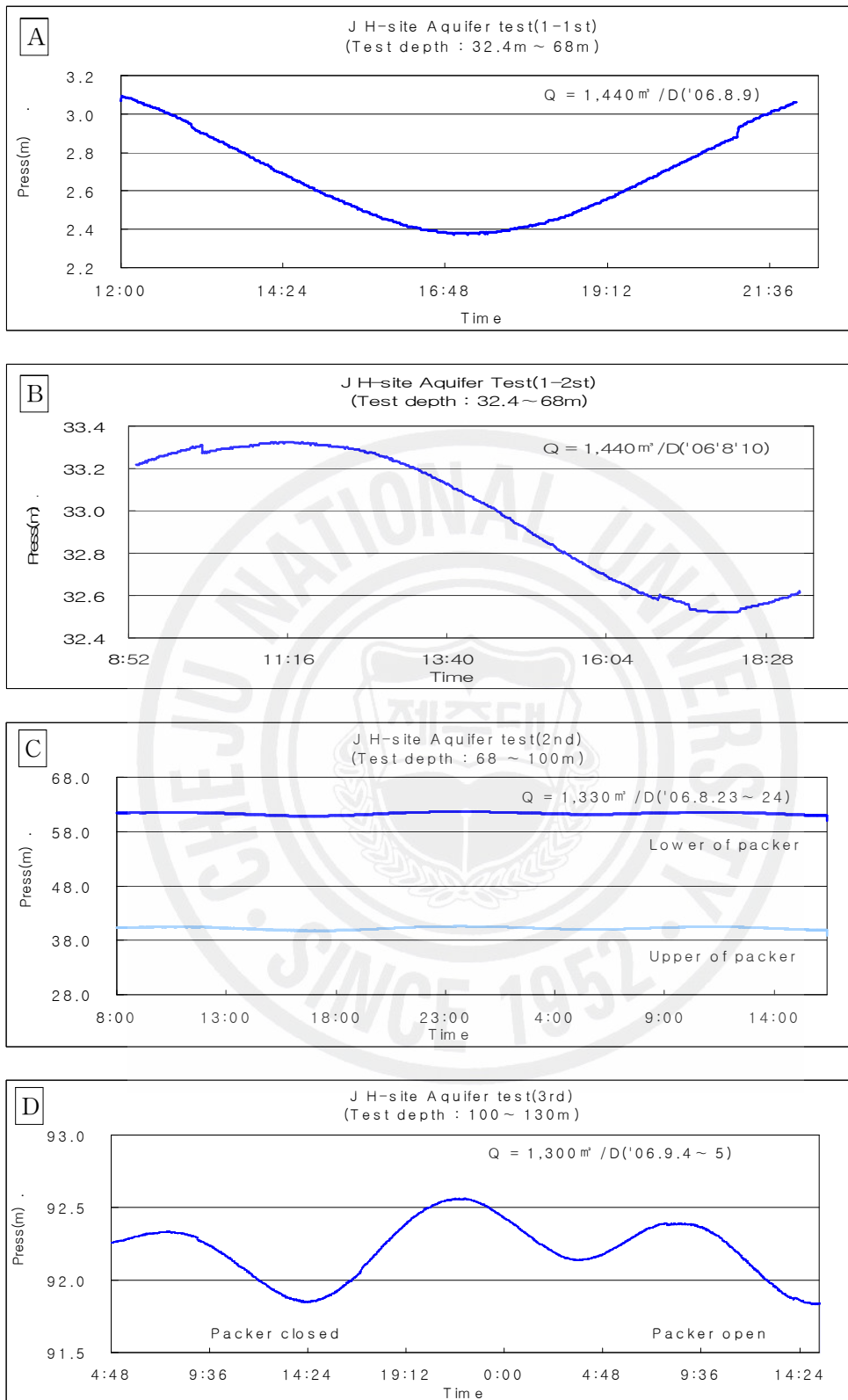


Fig. 9. Fluctuation of groundwater levels for aquifer test in JH-site.

3.2 대수층별 수리상수

JG-site 대수성시험 자료로부터 Theis(1935)와 Cooper-Jacob(1946)의 방법에 따라 양수시 수위와 회복수위 자료를 이용하여 투수량계수를 산정한 결과 (AQTESOLV ver2.5), 주수대수층의 투수량계수는 평균 753~4,233m²/일로 범위가 넓었으나, 1,400m³/일 양수율로 시험한 1-3차 시험자료의 투수량계수(3,301~4,233m²/일)가 주수대수층의 수리성을 대표하는 것으로 판단된다(Fig. 10).

이전까지 발표된 제주도의 투수량계수를 살펴보면 농업기반공사(2000)는 농업 및 생활용수 관정을 대상으로 조사하여 평균 투수량계수는 201.8m²/일로 분석하였다. 제주도는 광역상수도 취수정 및 해수침투 감시관측정의 자료를 토대로 투수량계수를 산출하였는데, 평균 투수량계수는 17,573m²/일, 평균 수리전도도는 하와이주 기저지하수체(457m/일)와 유사한 값을 나타낸다(제주도, 2003).

Table 6. Transmissivity for unconfined method of Theis in JG-site.

| Division of test | Aquifer | Range of test (m) | Draw-down (m) | Pumping rate (m ³ /D) | Transmissivity (m ² /d) | Type of test |
|------------------|---------|-------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------|
| 1st | Perched | 188~230 | 4.46 | 2,150 | 906 | pumping |
| | | | | | 886 | recovery |
| | | | 6.30 | 2,150~2,030 | 753 | pumping |
| | | | | | 2,117 | recovery |
| | | | 0.98 | 1,500~1,300 | 3,301 | pumping |
| | | | | | 4,233 | recovery |
| | | | 1.48 | 1,700 | 2,775 | pumping |
| | | | | | 2,599 | recovery |
| 2nd | 1st | 244.5~315 | 20.97 | 1,700~700 | 75 | pumping |
| | | | | | 212 | recovery |
| 3rd | 2nd | 317~440 | 3.10 | 1,400 | 895 | pumping |
| | | | | | 1,137 | recovery |
| 4th | All | 258~480 | 1.56 | 1,700~1,400 | 2,144 | pumping |
| | | | | | 2,139 | recovery |

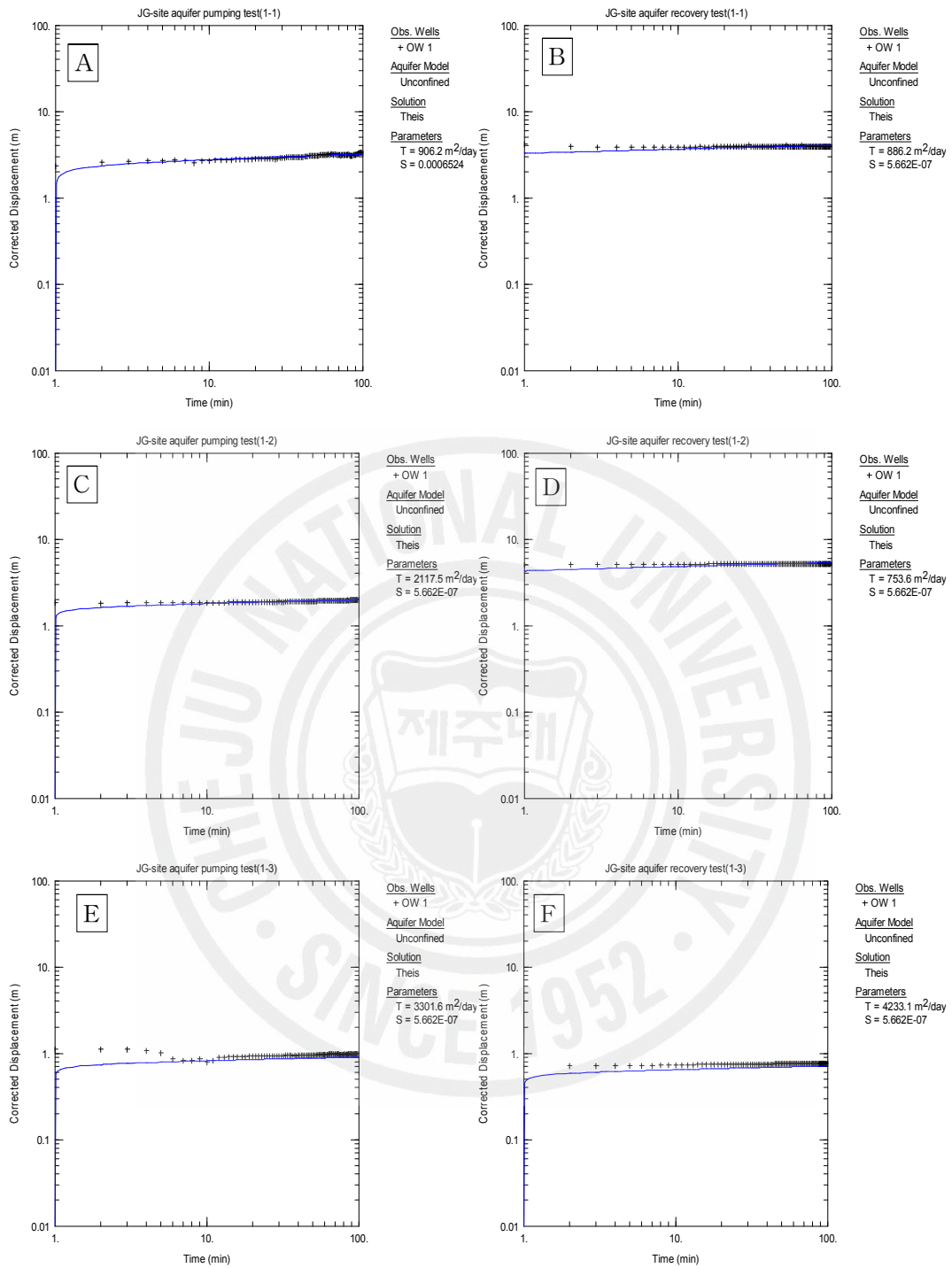


Fig. 10. Transmissivity for aquifer pumping and recovery test in JG-site.

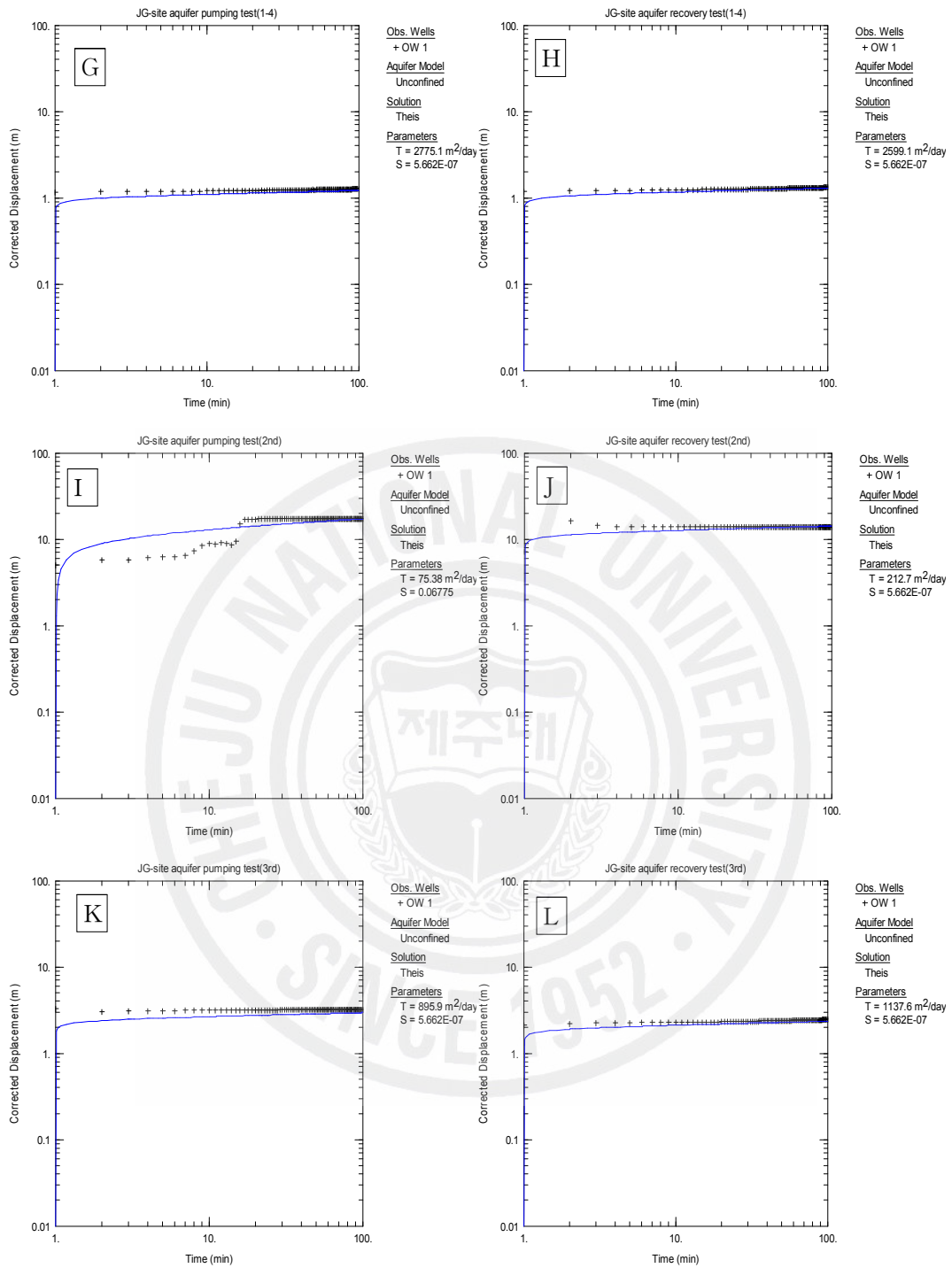


Fig. 10. Continued.

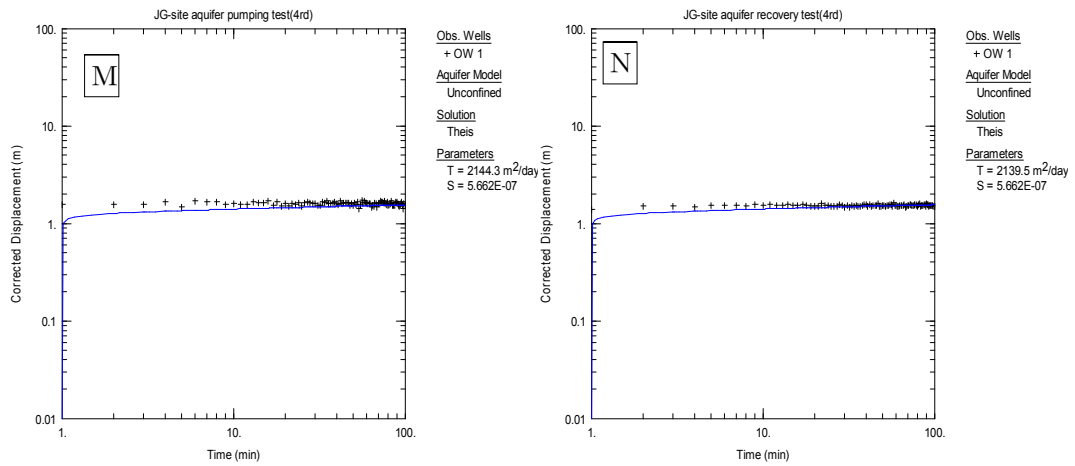


Fig. 10. Continued.

제주도 대수층의 수리성에 관해 여러 기관과 학자들에 의해 연구가 이루어져 왔으나 연구 결과는 매우 큰 차이를 나타내고 있다(최병수, 1999). 그 이유는 대수층의 물을 충분히 강제 배출시켜 지하수위를 최대로 떨어뜨리지 못한 점과 조사대상 관정의 시추공경, 심도, 펌프용량 그리고 조사시기 등 제반 시험조건이 동일하지 못한데도 원인이 있다고 사료된다.

4. 대수층별 전기전도도 변화특성

4.1 시추심도에 따른 전기전도도 변화

JG-site에서 EC검층은 JH-site에서 처럼 수직적인 변화가 크지 않으므로 시추종료 후 2회만 실시하였다. 지하수위 직상부에서부터 EC 값이 반응을 보이기 시작하는데 시추과정에서도 확인되었듯이 주수대수층에서 유출되는 지하수와 검층센서의 반응에 의한 결과로 볼 수 있다. 지하수위 하부에서 480m까지 $100\mu\text{s}/\text{cm}$ 이내로 수직적인 변화가 거의 없이 일정한 값을 보여 주고 있다(Fig. 11).

JH-site는 시추심도 변화에 따른 수직적 수질변화와 염수침입 여부를 규명하기 위하여 시추 심도별로 6회와 시추종료 후 3시간 간격으로 5회 반복 실시하였다(Table. 7).

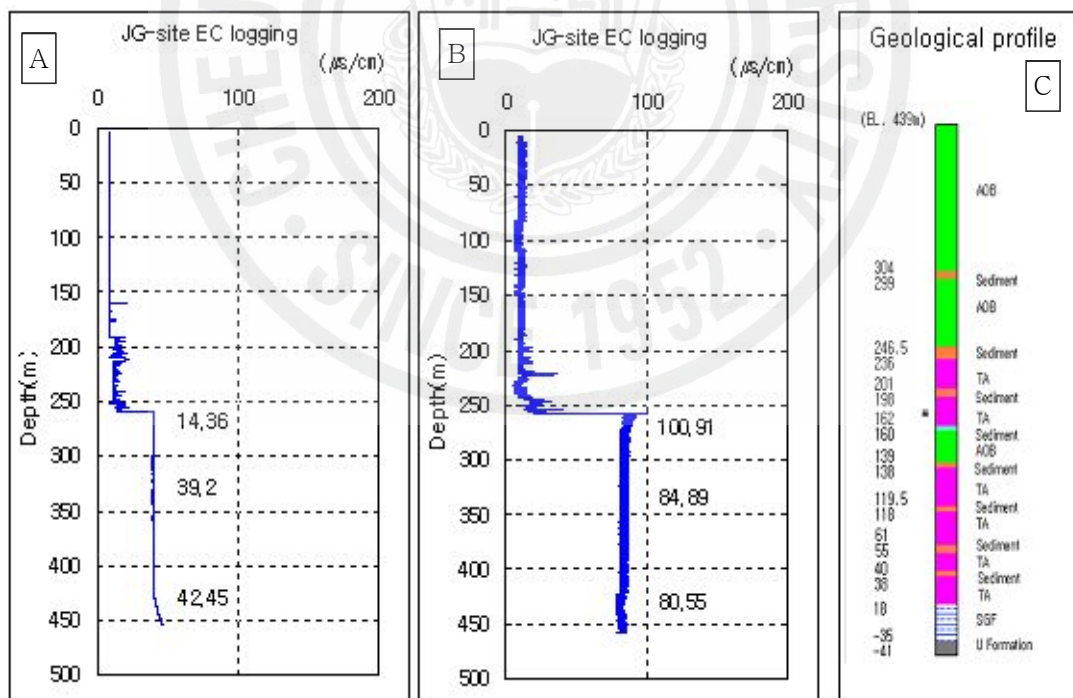


Fig. 11. EC logging data in JG-site.

(A : Open hole, B : Casing hole, C : Geologging profile)

Table 7. Result of EC logging in JH-site.

| Division | Date | Water level (m) | Drill depth (m) | Max. of EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | Aquifer | Result |
|----------|--------|-----------------|-----------------|--|-------------|-------------|
| 1st | 8. 7 | 32.0 | 58 | 657 | 1st Aquifer | Fresh water |
| 2nd | 8. 9 | 32.3 | 68 | 1,256 | | |
| 3rd | 8. 21 | 33.0 | 100 | 42,681 | 2nd Aquifer | Salt water |
| 4th | 9. 6 | 33.1 | 130 | 44,583 | 3rd Aquifer | |
| 5th | 9. 20 | 32.4 | 160 | 40,997 | | |
| 6th | 10. 19 | 32.5 | 160 | 42,667 | | |
| 7th | 11. 7 | 33.0 | 160 | 42,667 | | |

1차 검층(심도 58m)은 지하수위 직하부에서 EC 최대 값이 $657\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 기록하고 심도 38.5m에서 최소 값 $538\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 보였으며, 최종심도까지 미미하게 증가하나 일정한 양상으로 담수지하수가 부존하고 있다.

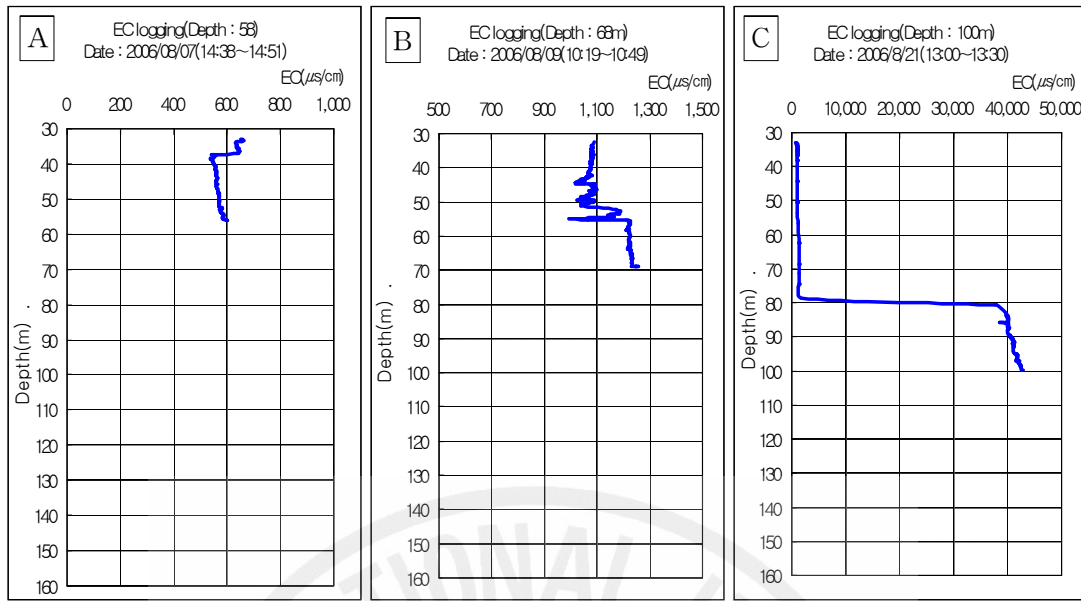
2차 검층(심도 68m)은 검층심도 말단에서 최대 값 $1,256\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 기록하였으며 1차 검층 결과보다 다소 높은 값을 보였다. 수직적으로 볼 때, 점차 하부로 갈수록 EC 값이 높아지는 경향을 보였으며, 심도 55m 지점에서 미약한 증가 추세를 보이고 있으나 담수지하수로 볼 수 있다.

3차 검층(심도 100m)은 심도 68.5~70m에서 염지하수의 부존을 확인할 수 있다. 심도 79~83m에서 $42,681\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 기록하여 염수의 직접적인 영향을 보여주었다. 사층을 경계로 담·염수의 경계면이 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다.

4차 검층(심도 130m)은 지하수위 하부에서 일정한 수치로 약 $1,040\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 보이다가 심도 79m 지점에서 $38,900\mu\text{s}/\text{cm}$ 까지 급격하게 높아진 다음 점차 증가하는 추세를 보였으며 심도 말단부에서 최대 값 $44,583\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 보였다.

5차 검층(심도 160m)은 시추완료 직후 실시하였으며, 4차 검층과 비슷한 양상을 보였다. 심도 79m 지점에서 급격하게 높아지며 이후부터 심도 108m까지 점차 증가하다가 안정화되어 최대 값 $40,997\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 기록하였다.

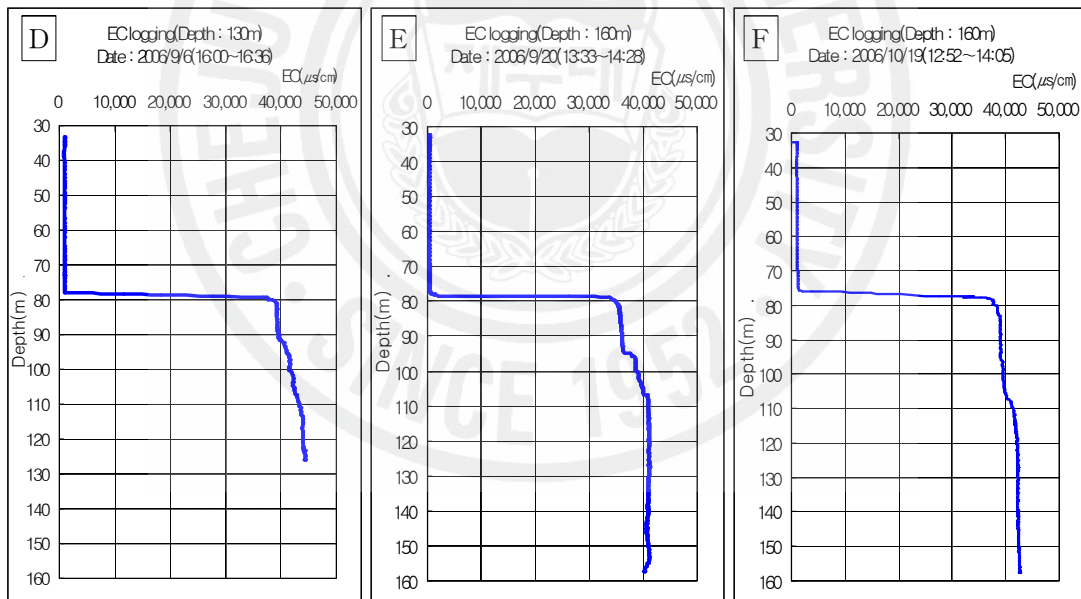
6차 검층(심도 160m)은 시추완료 한 달이 지난 후 실시한 결과이며, 5차 검층에서 보여주었던 추세와 비슷하다. 최대 값은 심도 말단부에서 $42,667\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 기록하였다(Fig. 12).



(A) depth : 58m

(B) depth : 68m

(C) depth : 100m



(D) depth : 130m

(E) depth : 160m

(F) depth : 160m

(after one month)

Fig. 12. Graph of EC logging data in JH-site.

7차 검층(심도 160m)은 조석변화에 따른 수직적 수질변화와 전이대의 변동 특성을 해석하기 위해 3시간(09시, 12시, 15시, 18시, 21시) 간격으로 5회에 걸쳐 실시하였다. 검층결과 G-H비는 1:41로 산정되어 이론적인 값(1:40)과 매우 비슷하다. 수직적으로 두 번 정도 변화를 볼 수 있는데, 지표 하 70~80m 부근에서 급격히 증가하는 점으로 보아 전이대 구간이며, 지표 하 107~110m에서 한 번 더 증가하는데 이 구간은 치밀한 용암류와 유리질쇄설성각력암층의 경계부로서 지층의 변화가 발생하는 구간으로 투수성이 매우 양호한 유리질쇄설성각력암층이 고염분 지하수의 유입을 유도하는 지질구조적 요건을 갖추고 있는 것으로 판단된다(Fig. 13).

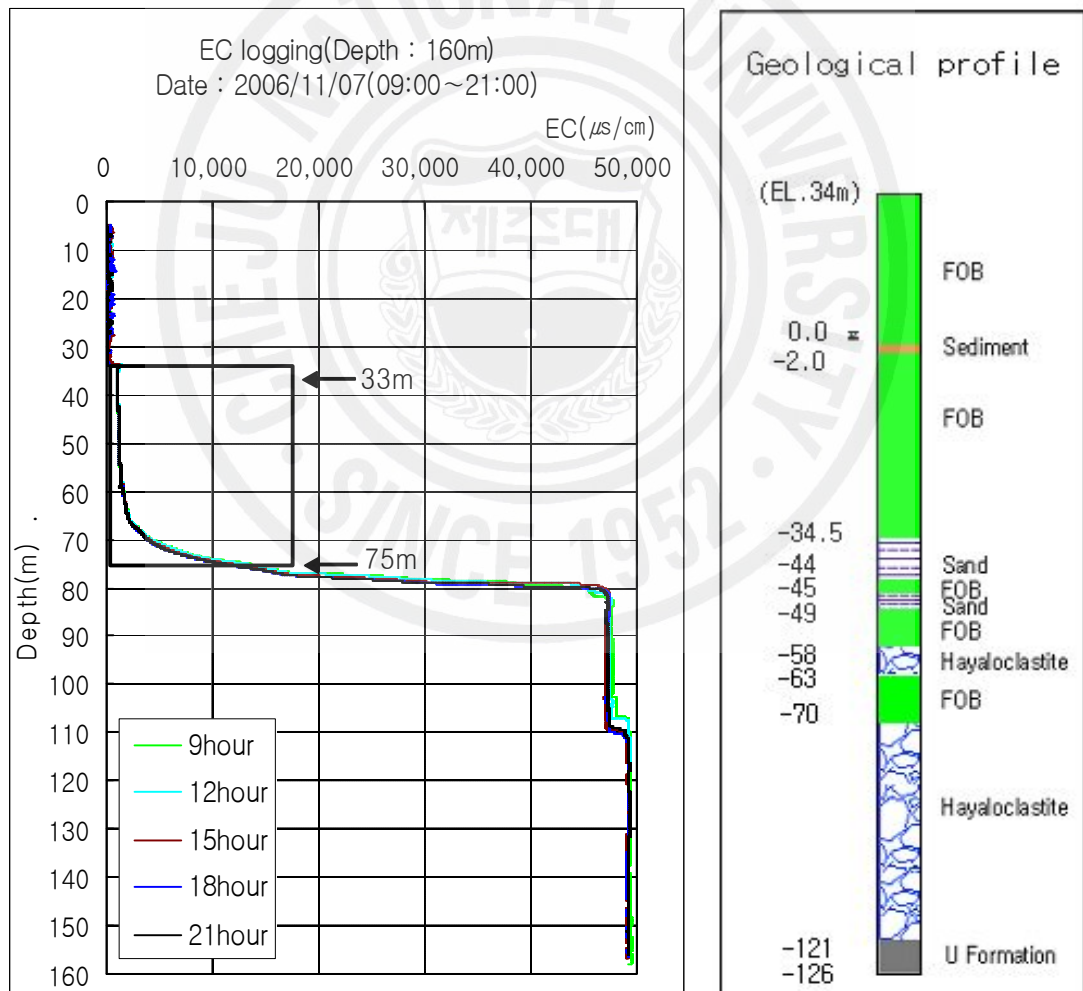


Fig. 13. Variation of EC to time interval and geological profile in JH-site.

4.2 양수에 의한 전기전도도 변화

JH-site의 대수성시험은 4차례(총 7회)에 걸쳐 시추 심도별로 실시하였으며, 1차 시험은 시추심도 68m(El. -34m), 2차 시험은 100m(El. -66m), 3차 시험은 130m(El. -96m), 4차 시험은 160m(El. -126m)에서 실시하였다(Table 8).

1차 시험은 펌프를 심도 36m 지점에 설치한 상태에서 EC 값은 약 1,116 μ s/cm를 보였으며, 펌프 가동 후 4시간 정도 EC 값이 지속적으로 떨어져 약 553 μ s/cm를 기록 후 펌프 중지 후에는 초기 값과 거의 비슷한 수준까지 상승하였다. 펌프를 심도 66m 지점에서 가동 전 자연 상태에서 EC 값이 약 1,127 μ s/cm를 보였으나 가동 후에는 자연 상태와 비슷한 양상을 띠다 약 3시간 경과 후 다시 하강하면서 약 777 μ s/cm까지 떨어지며 이후 잠시 상승하다 다시 떨어지는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 지하수위가 조석에 지배되는 것처럼 양수에 따라서 EC도 상승과 하강이 반복하고 있음을 나타낸다. 심도 66m에서 양수한 경우 EC 값은 최대 값이 1,139 μ s/cm로 심도 36m의 1,007 μ s/cm보다 약 130 μ s/cm 정도 높아 펌프 심도에 따라서 EC 값이 차이가 있다(Fig. 14).

Table 8. Variation of EC value on aquifer test in JH-site.

| Division of test | | Range of test (m) | EC(μ s/cm) | | |
|------------------|-----|-------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | | | Before | pump on | pump off |
| 1st | 1-1 | 32.4~68 | 1,004~1,116 | 553~1,007 | 995~998 |
| | 1-2 | 32.4~68 | 1,123~1,127 | 777~1,139 | 768~860 |
| 2nd | 2-1 | 68~100 | 39,990~40,378 | 17,640~28,717 | 39,462~39,909 |
| | 2-2 | 32.4~100 | 39,462~39,909 | 16,638~28,837 | 39,487~39,740 |
| 3rd | 3-1 | 100~130 | 43,627~43,910 | 41,684~42,000 | 43,330~44,527 |
| | 3-2 | 32.4~130 | 43,330~44,527 | 41,592~41,863 | 44,254~44,536 |
| 4th | | 32.4~160 | 44,382~45,054 | 44,274~44,996 | 44,160~45,290 |

2-1차 시험은 펌프시험, 2-2차 시험은 펌프를 끈 후 전 구간에 대한 시험으로 2-1차 시험에서 가동 전 EC 값은 약 $40,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 보였으며, 가동 후에는 $17,640\sim 28,717\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 유지하다 가동중지와 동시에 다시 자연 상태의 약 $40,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 상승하였다. 2-2차 시험도 2-1차 시험과 비슷한 양상으로 변화가 발생하였다. 양수 시작과 동시에 EC 값이 하강하는 점으로 보아 담수와 염수의 전이대에 해당되는 구간으로 해석되며, 상하부 대수층을 차단하는 펌프의 역할은 EC 값의 변화에는 미미하게 작용하는데 이는 대수층이 호층으로 완전히 분리되지 않고 어느 정도 대수층이 연결되어 염수가 포화된 것으로 보인다.

3-1차 시험은 펌프시험, 3-2차 시험은 펌프를 끈 후 전 구간 시험으로 3-1차 시험은 자연 상태에서 EC 값은 약 $44,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 보였으나, 가동 후 약 $42,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 떨어진 상태로 가동중지 전까지 유지되다가 원래 상태로 회복되었다. 또한 양수 시작과 동시에 하강하나 그 범위는 처음보다 약 $2,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 정도 떨어진다.

따라서 상기한 바와 같이 지하수 양수를 위한 펌프 설치심도에 의해서 EC 값이 변화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 한 가지 주목할 것은 양수가 시작되면서 고염수가 부존하는 심도 70m 하부의 대수층 시험에서 EC 값이 비양수시 보다 가동시 다소 낮게 나타나는 현상이 발생하는데 이는 수중모터펌프를 통한 지하수 유입이 상부 구간의 저염분 지하수의 유입량이 상대적으로 더 우세하기 때문으로 판단된다. 또한 상하부 대수층을 차단하는 펌프의 역할은 고염분 지하수로 포화된 상태에서 EC 값의 변화에는 미미하게 작용하고 있다. 그러나 본 연구는 단시간의 양수시험에 의해 나타난 결과로서 지속적으로 사용되는 지하수 관정에서의 양수시 측정되는 EC 값과는 다를 수 있으므로 장기 양수에 의한 변화를 분석한다면 염수침입 및 전이대의 변동 특성 등 자료 해석에 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다(Fig. 14).

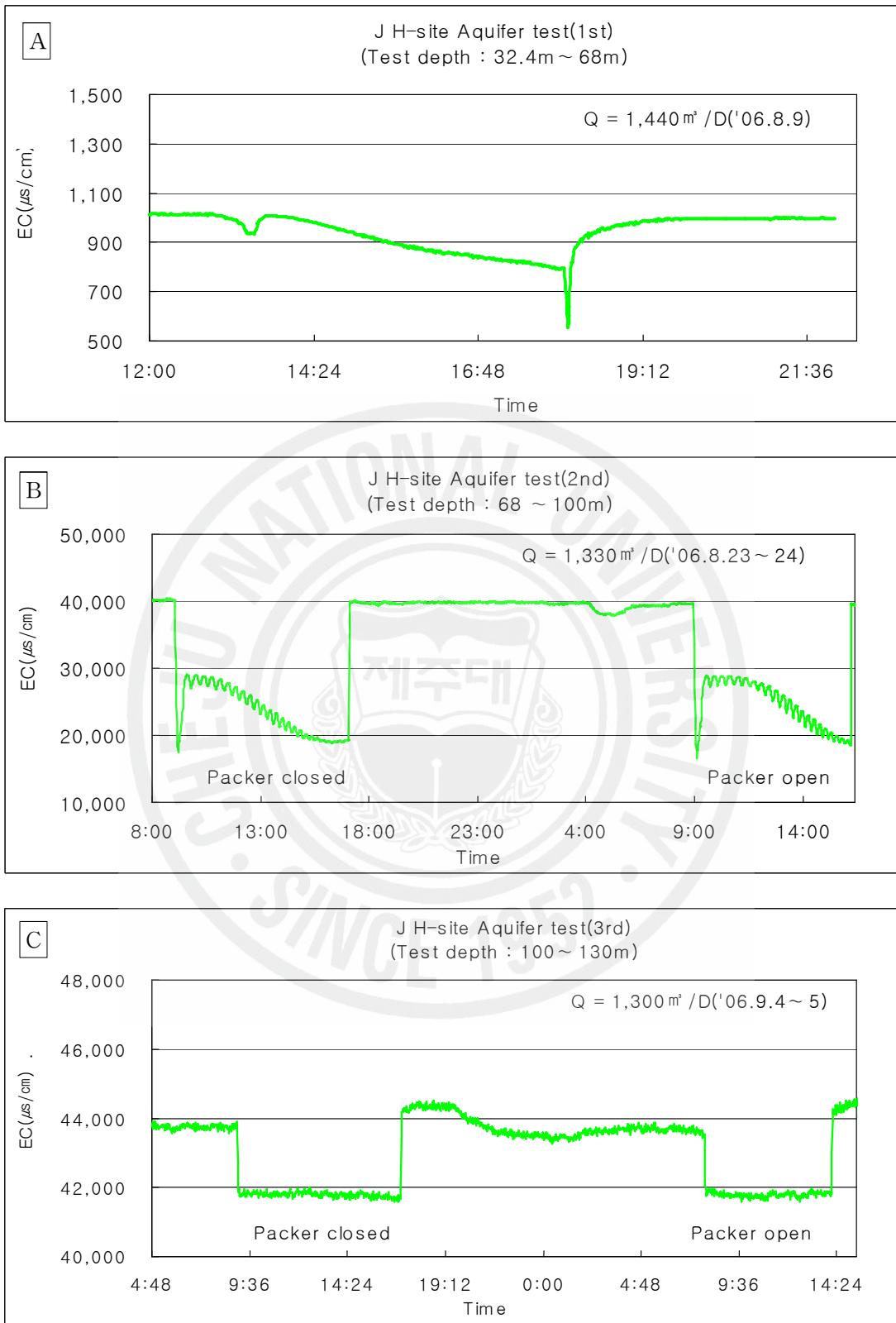


Fig. 14. Fluctuation of EC for aquifer test in JH-site.

5. 장기 지하수위변화

JG-site는 자동수위 관측기 설치시점인 10월 13일 경에는 지하수위가 약간 상승하는 추세를 보이다가 10월 19일부터 점차 하강하여 관측이 종료된 한달 후인 11월 14일까지 계속하여 하강추세를 보여주고 있어 강우에 의한 수위가 변동됨을 알 수 있다. JH-site는 상승이나 하강추세는 나타나지 않고 1m 이내의 변동 폭으로 일주기변화에 따라 수위가 상승과 하강을 반복하는 양상으로 평상시에는 조석의 영향에 의해 수위가 변동하고 있어 수위변동이 중산간 지역과 해안지역이 뚜렷하게 차이가 있음을 알 수 있다(Fig. 15).

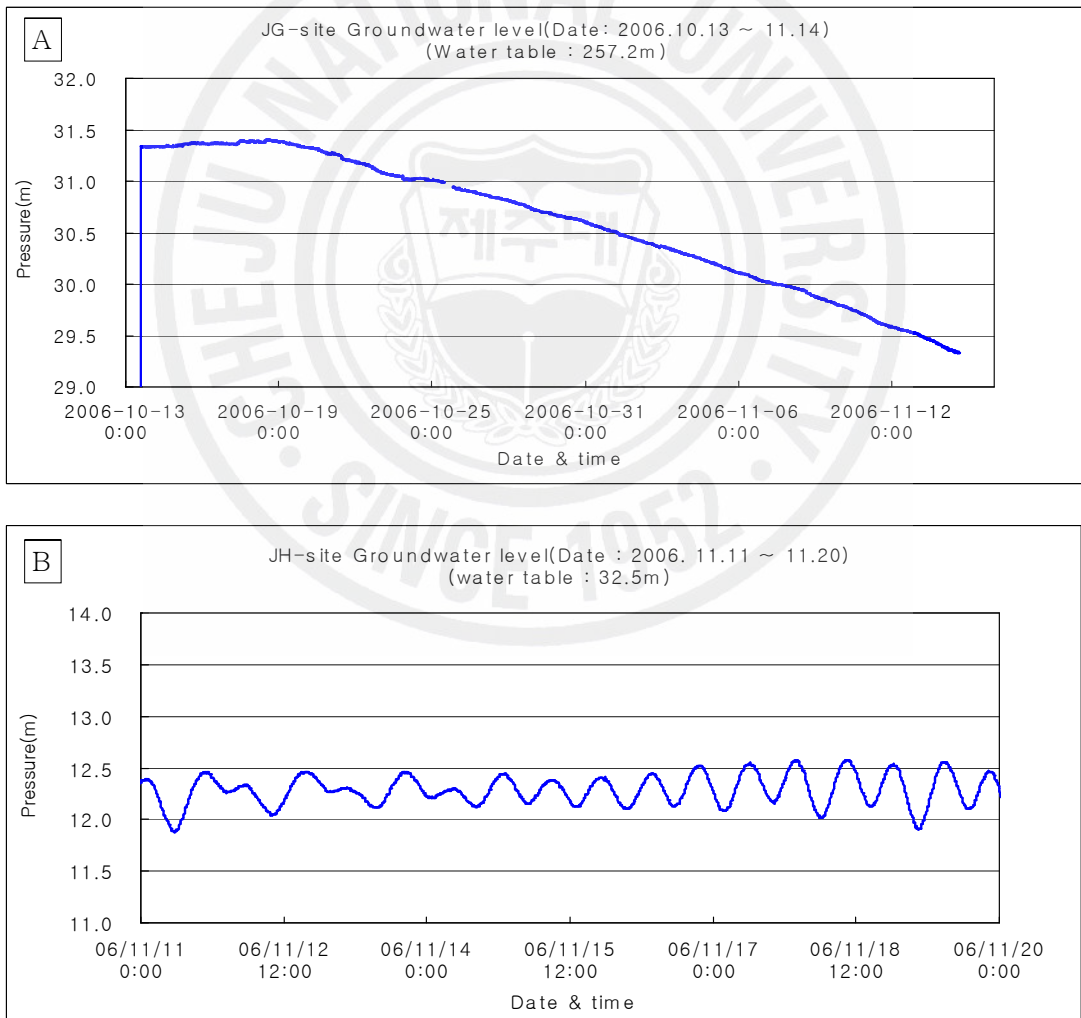


Fig. 15. Long term fluctuation of groundwater levels in JG and JH-site.

6. 대수층별 지하수 체류시간

CFCs를 이용하여 지하수의 연령을 분석할 경우 시료 채취 과정에 주의가 요구된다. 대기중에는 지하수에 비해 매우 높은 농도의 CFC가 존재하므로 지하수 시료가 대기와 접촉하면 안되기 때문이다(고동찬 외, 2002). 시료 채취시 수중에서 반드시 시료병에 물을 가득 채워야 하고 버블 등 빈 공간이 없도록 채수하여야 하며, 뚜껑은 절연테이프 등으로 감아 주어야 한다. 시료는 3개를 채취하며, 배관이 PVC나 엑셀 파이프일 경우 시료를 오염시킬 수 있으므로 배관은 금속재질이나 나일론 재질을 사용하였다. 지하수의 연령 측정을 위해서는 표고, 수온, 전기전도도, 용존산소 자료 등이 동시에 측정하여야 하는데, 이는 용존산소가 매우 낮은 경우에는 CFCs가 분해되기 때문에 확인 차원에서 꼭 필요하다.

JG-site는 대수성시험시 심도 244.5~315m 구간에서 CFCs를 이용한 지하수 연령 측정 결과 약 19년으로 측정되었으며, 심도 317~440m에서는 약 22년으로 상부구간보다 높게 나타났다. 이는 상부 대수층과 하부 대수층의 지하수 체류시간에 차이가 있어 하부로 갈수록 더 길어지는 것으로 사료되며, 보다 정확한 연령 분포를 알기 위해서는 전 구간 시료에 대해 2~3회 정도의 시료 채취를 반복적으로 실시하여 지하수 연령을 검증하는 것이 필요할 것으로 보인다(Table 9).

Table 9. Residence time of groundwater by CFCs method.

| Site | Sample ID | Sampling date | Depth of test (m) | Pump depth (m) | Temperature (°C) | EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | Average (year) |
|------|-----------|---------------|-------------------|----------------|------------------|--------------------------------|----------------|
| JG | JG-1 | 6.27 | 244.5~315 | 262 | 13 | 70 | 19 |
| | JG-2 | 8.29 | 317~440 | 330 | 13 | 75 | 22 |
| | JG-3 | 9.12 | 256~480 | 276 | 13 | 67 | 19 |
| JH | JH-1 | 8.11 | 33~68 | 33 | 15 | 1,305 | 17 |
| | JH-2 | 8.23 | 33~100 | 85 | 16 | 19,086 | 33 |
| | JH-3 | 9. 4 | 100~130 | 115 | 16 | 41,627 | 34 |
| | JH-4 | 9.18 | 33~160 | 136 | 17 | 44,557 | 31 |

JH-site는 심도 33~68m의 담수 구간에서 측정된 지하수 연령은 17년, 하부의 염수 구간에서는 30년 이상의 지하수 연령을 보이는데 이는 상부 담수 분포 구간은 유동이 빠르고 하부 염수 분포 구간은 상대적으로 정체되어 있음을 의미한다(Fig. 16).

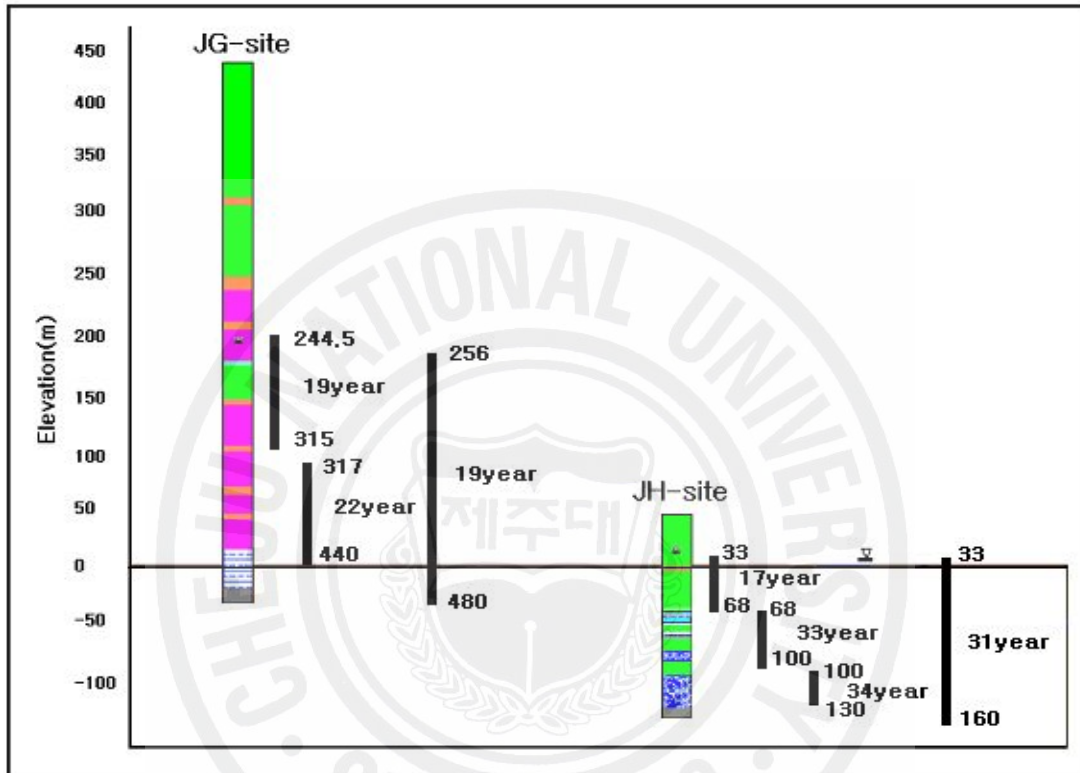


Fig. 16. Schematic residence time of groundwater by CFCs method.

IV 고찰

1. 지질구조와 대수층의 관계

연구대상 2개의 조사공의 지하지질은 화산암류, 퇴적층, 서귀포층, 유리질쇄설성각력암층, U층 등으로 분류할 수 있다. 화산암류의 구성은 JG-site는 조면질 및 안산암질 조성을 갖는 화산암류의 산출빈도가 높고 용암류의 두께가 390m로 두텁다. JH-site는 장석감람석현무암(FOB)이 주를 이루며 용암류 두께는 136m로 중산간 지역보다 상대적으로 해안쪽에서 용암류 층후가 얇다(Fig. 17).

JG-site는 용암류 사이에 협재된 점토층이 지하수위 상·하부에 분포할 뿐만 아니라 분포 수도 많아 지하수의 부존 및 산출특성을 복잡하게 만드는 수문지질 단위가 되고 있으며, JH-site는 해수면 근처 지하수위 직하부에 1매가 분포하여 JG-site와 비교하여 상대적으로 수문지질 단위가 단순하다. 용암이 해수와 만나 급냉된 유리질쇄설성각력암층의 분포는 해안면에 인접한 JH-site에서만 확인되며 고투수성 지질구조로 인하여 고염분 지하수의 부존을 가능하게 하고 있다.

서귀포층은 JH-site에서는 결층이지만 내륙쪽으로 향하면서 고도가 점차 높아지는데 JG-site의 경우 해수면 직상부에서 다소 기복을 갖고 포착되므로 상위 지하수 내지 준기저지하수의 부존을 가능하게 할 것으로 사료된다. U층은 JG-site에서는 심도 474m(El. -35m)에서 포착되며, JH-site는 심도 155m(El. -121m)에서 포착되어 해안쪽으로 갈수록 고도가 낮아진다.

JG-site와 JH-site를 연결할 경우 지형 경사는 0.023, 지하수의 동수경사는 0.01, U층의 경사는 0.005로 지형 경사가 가장 급하며, U층의 경사는 완만한 편이다(Fig. 17).

용암이 지형경사 구배를 따라 단속되지 않고 중력에 의하여 하방으로 유동한다는 조건 하에서 2개의 조사공 대한 용암 층후의 감소폭을 단순 비례식을 이용하여 수평적인 해저 확장범위를 산정하면 해안선으로부터 바다쪽으로 약 4km

이내까지 연장되어 있을 것으로 추정된다. 그러나 실제 자연조건에서는 용암류의 점성, 해수의 영향, 지형구배 등 다양한 요인으로 인하여 이보다는 적게 확장되어 있을 것으로 판단되며 제주도 지체구조의 명확한 규명을 위해서는 해상 시추와 같은 정밀조사도 필요할 것으로 사료된다.

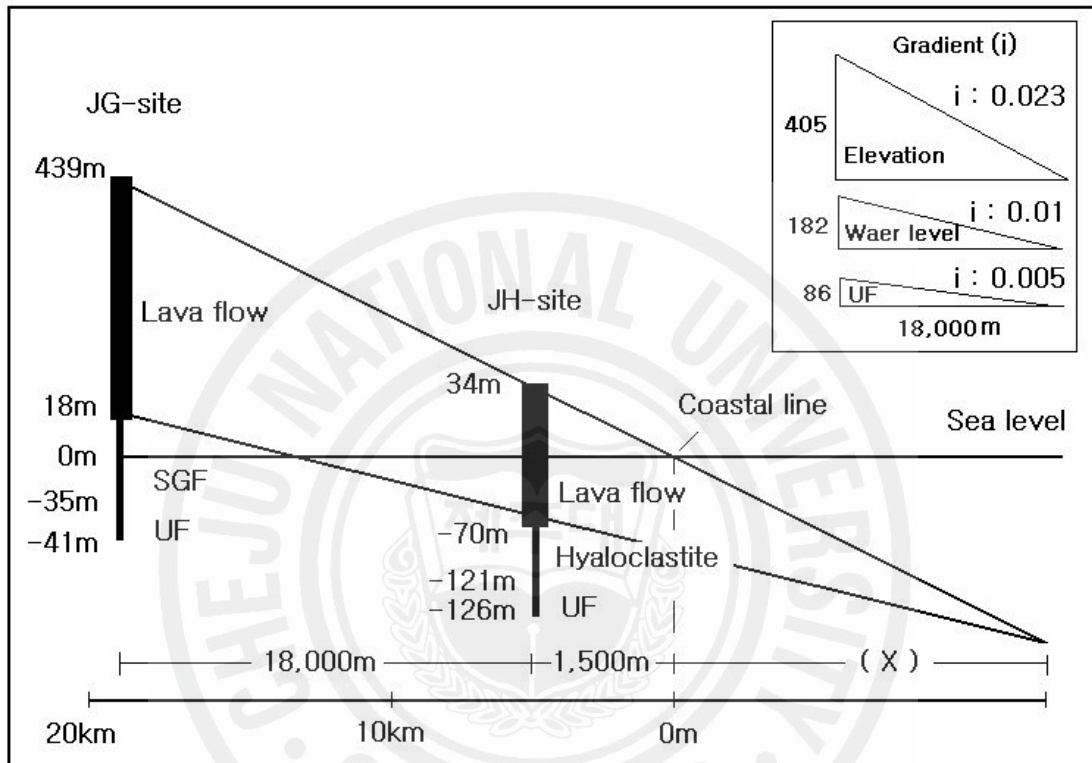


Fig. 17. Gradient and spread range of lava flow in two site.

2. 대수층의 규모 및 발달형태

중산간 지역에 위치한 JG-site의 주수대수층은 지표 하 192.5~198m(El. 246.5~241.0m)에서 두께 5.5m로 분포하며 구성 지층은 스코리아층으로 지하수를 함양시키는 역할을 하고 있는 주수대수층이다. 지표 하 233~281m에 발달된 스코리아층과 사력층으로 구성된 제1대수층은 크게 3개 구간으로 분류되며 10m 이내의 폭으로 용암류 경계면을 이루고 있다. 지표 하 321~399m의 사력층과 파쇄대가 발달한 제2대수층은 시추과정에서 지하수가 배출되는 현상이 확인되었다. 대수층 발달형태는 주수대수층이 뚜렷하며, 서귀포층이 해수면 상부에서 포착되고 호층을 이루는 대수층이 해수면 상부에서 확인된다. 시추과정에서 수위가 심도에 따라 하강하는 점으로 보아 지하수위 하부는 포화된 상태가 아니며, 호층의 상태로 대수층이 발달하고 있다(Table 10).

JH-site의 시추과정에서 지표 하 34m 지점의 점토층 관통 후에 지하수위가 형성되는 점으로 미루어 점토층이 저투수성 역할을 하여 피압현상이 발생한 것으로 판단된다. 제1대수층은 지표 하 43.0~68.0m(El. -9~-34)의 절리와 파쇄대가 잘 발달한 화산암 구간으로 담수지하수가 부존하고 있다. 제2대수층은 지표 하 68.5~97m(El. -34.5~-63m)의 사층으로 담염수의 혼합이 이루어지는 전이대 구간에 해당된다. 제3대수층은 지표 하 104~155m(El. -70~-121m)의 유리질쇄설성각력암으로 층후는 51m로 매우 두텁고 고투수성에 의한 지질특성으로 염지하수가 부존하고 있다. 대수층 발달형태는 용암류 사이에 협재된 점토층의 영향으로 피압대수층 형태를 보여주고 있다. 대수층은 호층의 상태로 발달하고 있으나 유리질쇄설성각력암층은 포화 상태에 가깝다.

따라서, JG-site는 지하수의 함양지역으로 주수대수층이 잘 발달하고 있는 반면, JH-site는 지하수 배출지역으로 주수대수층은 확인되지 않는다. 대수층을 이루는 지질매체는 JG-site는 화산암류 사이의 사력층이나 용암류 내에 발달한 절리와 파쇄대가 주를 이루며, 주로 해수면 상부에 주로 분포한다. JH-site는 용암류 내에 발달한 절리 및 파쇄대, 사층과 유리질쇄설성각력암층이 주대수층 역할을 하며, 주로 해수면 하부에 분포한다.

대수층 분류에 의하면 JG-site는 시추과정에서 지하수위가 하강하는 현상을 볼 수 있는데 이는 자유면 내지 누수대수층으로 해석되며, JH-site는 대수층 상부에 점토층과 같은 저투수성 지층이 분포되어 있고 점토층을 관통한 후에 지하수위가 포착되는 점으로 보아 피압 내지 누수피압대수층 양상을 보인다(Fig. 18).

Table 10. Division of aquifer and rock in JG and JH-Site.

| Site | Division of aquifer | Depth of aquifer | | Thick-ness (m) | Geological characteristic |
|------|---------------------|------------------|-------------|---------------------|--------------------------------|
| | | (BGL.m) | (El.m) | | |
| JG | Perched | 192.5~198.0 | 246.5~241.0 | 5.5 | Scoria and Sedimentary deposit |
| | 1st | 233.0~238.0 | 194.0~189.0 | 5.0 | Sedimentary deposit |
| | | 248.0~257.5 | 191.0~181.5 | 9.5 | Gravel and Fracture |
| | | 278.5~281.0 | 160.5~158.0 | 2.5 | Gravel and Fracture |
| 2nd | 321.0~324.0 | 118.0~115.0 | 3.0 | Gravel and Fracture | |
| | 384.0~399.0 | 55.0~40.0 | 15.0 | Gravel and Fracture | |
| 3rd | 421.0~ | 18.0~ | <53.0 | Tuff(SGF) | |
| JH | 1st | 43.0~68.0 | -9.0~-34.0 | 25.0 | Joint and Fracture |
| | 2nd | 68.5~78.0 | -34.5~-44.0 | 9.5 | Sand and Gravel |
| | | 79.0~83.0 | -45.0~-49.0 | 4.0 | |
| | | 92.0~97.0 | -58.0~-63.0 | 5.0 | |
| 3rd | 104.0~155.0 | -70.0~-121.0 | 51.0 | Hyaloclastite | |

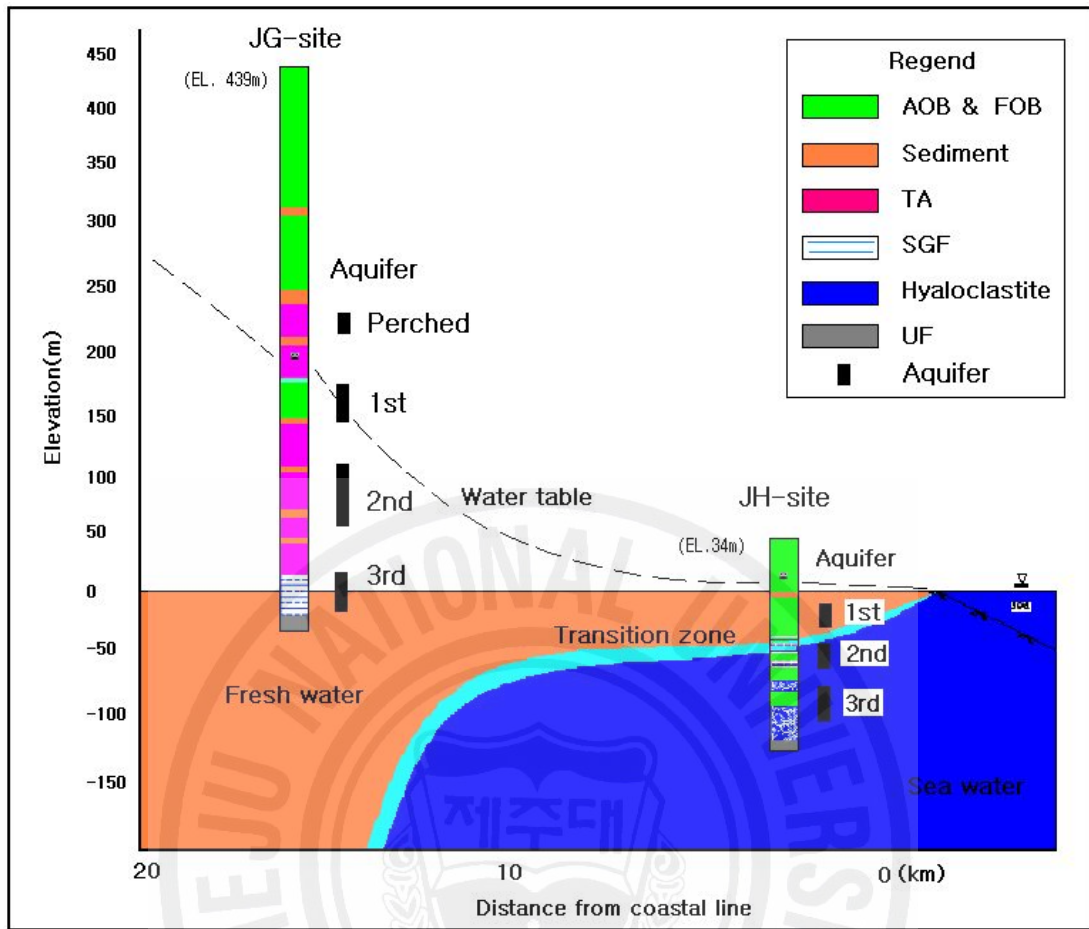


Fig. 18. Hydrogeological profile in JG and JH-site.

3. 지하수부존 및 산출특성

JG-site의 지하수위 상부에 발달한 주수대수층은 1,400m³/일 이내의 지하수를 배출시킬 수 있는 능력을 지니고 있는 것으로 판단되며, 지표 하 233~281m 구간은 지하수의 산출능력이 상부 주수대수층과 하부 대수층에 비해 상대적으로 떨어진다. 지표 하 321~399m 구간의 산출능력은 양호한 것으로 평가되었는데, 심도 375m(El. 64m) 부근에서 다량의 지하수가 빠르게 배출되는 현상과도 일치한다. 이는 지하수위 하부는 완전 포화된 상태가 아니며 대수층이 호층의 상태로 발달하고 있으나 지층의 투수성과 대수층의 수평적 연속성 등에 따라 지하수의 산출능력이 큰 차이를 나타내고 있다. 대수층별 지하수 산출능력은 대수층의 규모나 구성지질 매체에 따라 각기 차이가 있음을 알 수 있다.

JH-site의 해수면 하부에서 대수층은 호층으로 발달하고 있으며 유리질쇄설성각력암층은 포화 상태에 가깝다. 1일 1,000m³ 이상의 지하수를 배출시켜도 수위강하가 미미할 뿐만 아니라 조석영향에 따라 변하며, 지하수 산출능력이 대단히 양호한 것으로 판단된다. 각각의 대수층 시험에서 지하수위가 조석의 영향에 지배되어 변동하고 있어 대수층마다 조석의 영향이 미치는 것으로 볼 수 있다.

고염분 지하수의 부존에 대해 JH-site는 서귀포층이 결층으로 해수의 내륙쪽 유입을 제어할 수 있는 지질구조적 역할을 할 수 없으며, 고투수성의 유리질쇄설성각력암층의 분포로 인하여 고염분 지하수가 부존한다. JG-site에 분포하는 서귀포층은 53m 두께의 응회질 성분으로 해수면 상부에서부터 포착되어 염수침입 가능성은 극히 적은 편이다. 중산간 지역에서는 해수면 하부까지 개발하여도 담수지하수가 부존하고 있고 해안 지역은 담수지하수 하부에 염수지하수가 부존하고 있다. JH-site의 EC 값은 지하수위 하부에서 일정한 수치로 약 1,000 μ s/cm를 보이다가 심도 79m 지점에서 급격하게 38,900 μ s/cm까지 높아진 다음 최종 심도까지 점차 증가하는 추세를 보였으며, 심도 말단부에서 최대 값 44,580 μ s/cm을 보였다. 담수와 염수가 혼합되는 전이대는 약 75m(El. -41m) 하부에서 분포하며 G-H비는 약 1:41로 이론적인 G-H비(1:40)와 매우 유사하다(Table 11).

Table 11. G-H ratio & depth of transition zone in JH-site.

| Site | El. (m) | Water level (BGL.m) | EC($\mu\text{s}/\text{cm}$) | | | Transition zone | | | |
|------|---------|---------------------|-------------------------------|---------------|---------------|----------------------|-----------|--------------|-------------------------|
| | | | (50m) | (75m) | (150m) | Layer of fresh water | Depth (m) | G-H ratio | Distance from coast(km) |
| JH | 34 | 32.5 | >1,000 | 15,000~20,000 | 42,000~45,000 | +1.5 | -41 | $\cong 1:41$ | 1.5 |

지하수 부존양상을 보면 JG-site는 서귀포층이 해수면 상부에 위치하는 점과 지하수위 변동특성으로 볼 때 상위지하수 및 준기저지하수의 부존양상을 보이며, 반면 JH-site는 담수 하부에 염지하수가 부존하며 특히, 이론적인 G-H비와 매우 비슷하여 기저지하수로 명확히 구분할 수 있다(Fig. 19).

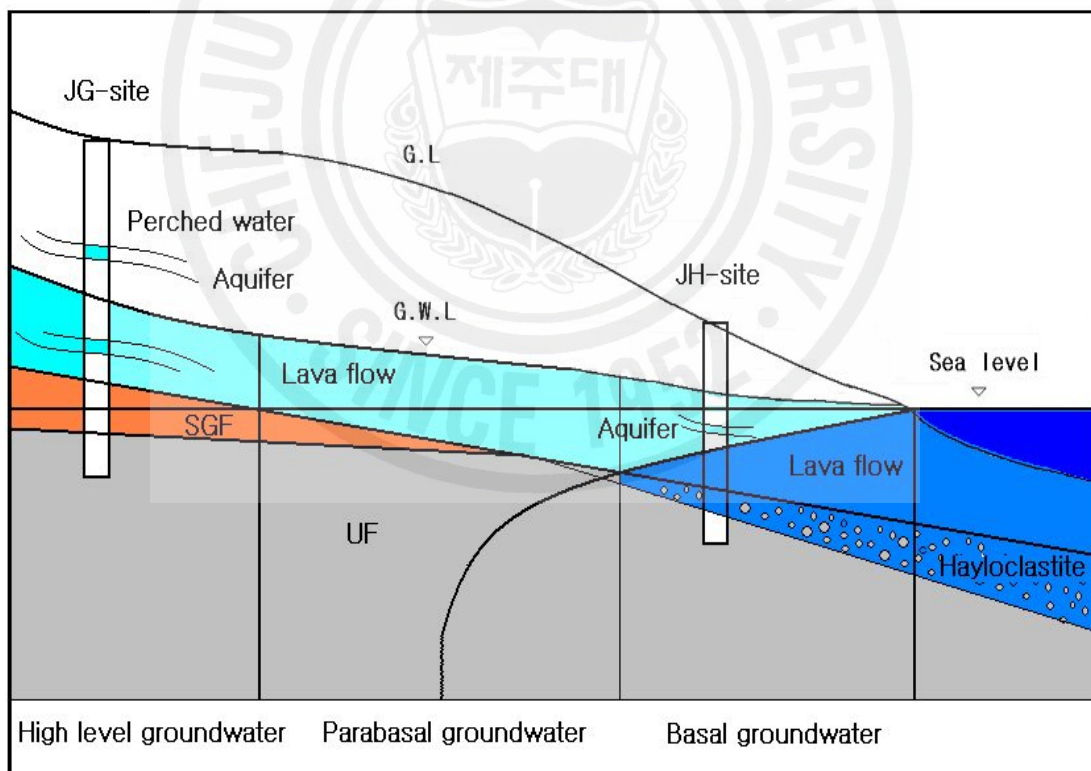


Fig. 19. Schematic model of groundwater occurrence of eastern area in Jeju.

IV. 결 론

제주도 동부 중산간 교래리(JG-site) 및 해안 한동리(JH-site)지역 심부 조사공 2개소에서 지하지질구조와 공경검층, 시추과정에서 심도별 지하수위 변화, 대수층별 양수시험, 시추단계별 전기전도도 수직검층, 지하수위 관측, 대수층별 지하수 체류시간 등을 분석하여 대수층별 특성과 지하수 산출능력에 관한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연구지역 조사공에서 U층 포착심도까지 심부시추 결과, JG-site에서 용암류는 심도 421m(El. 18m)까지 분포하며, 421~474m(El. 18~-35m) 구간은 서귀포층, 474m(El. -35m)부터 U층이 분포하고 있다. JH-site는 심도 155m(El. -121m)에서 U층이 포착되며, 서귀포층은 결층이나 유리질쇄설성각력암층이 분포하여 상대적으로 JG-site와 비교된다.

2. JG-site와 JH-site 공경검층 결과는 시추코어, 대수성시험 결과에 의한 대수층의 분포 구간과 비교적 정확하게 일치한다. 시추공경은 암질이 치밀한 구간에서는 비교적 일정하나, 용암류 경계면, 클린커층, 퇴적층 분포구간 등에서는 시추구경보다 2배 이상인 직경 500mm까지 확장되어 있으며, 소폭으로 급격하게 확장되는 구간은 주변 대수층과 수평적으로 연결되어 있을 것으로 판단된다.

3. JG-site는 시추과정에서 심도가 깊어질수록 지하수위가 하강하는 현상을 볼 수 있는데 이는 자유면 내지 누수대수층으로 해석되며, JH-site는 대수층의 상부에 점토층과 같은 저투수성 지층이 분포되어 있고 점토층을 관통한 후에 지하수위가 포착되는 점으로 보아 피압 내지 누수피압대수층 양상을 보인다.

4. 중산간지역의 JG-site에 분포하는 주수대수층을 시추 등과 같이 인위적으로 수직으로 관통시켰을 때 수평으로 유동하던 지하수가 하부 대수층으로 유동 경로를 바꾸게 되면서 심부 대수층을 따라 하방 유동하게 되는데, 이러한 결과로 인하여 해안가 용천수의 용출수량 변동현상이 발생할 수 있다.

5. JG-site의 대수층은 최소한 3개 이상의 대수층으로 구성되어 있으며, 주수대수층의 지하수 산출능력이 가장 양호하고, 제1 및 제2대수층은 해수면 상부 용

암류 경계면을 따라 호층으로 발달하고 있으나 완전한 포화상태는 아니며, 각각의 대수층은 구성지질 매체에 따라 산출능력이 다르게 산출된다. JH-site는 해수면 하 10~40m 사이에 제1대수층이 분포하고 제2대수층은 용암류 사이의 사층이며, 제3대수층은 고투수성의 유리질쇄설성각력암층이다. 각각의 대수층별 지하수 산출능력은 큰 차이는 없는 것으로 해석된다.

6. JH-site에서 고염수가 부존하는 심도 70m 하부의 대수층 시험에서 EC 값이 비양수시 보다 가동시 다소 낮게 나타나는 현상이 발생되는데 이는 수중모터 펌프를 통한 지하수 유입이 상부 구간의 저염분 지하수의 유입량이 상대적으로 더 우세하기 때문으로 판단된다.

7. 자연상태에서 지하수위 변동은 JG-site는 강우와 연관되어 변동되며, JH-site는 상승이나 하강추세는 나타나지 않고 1m 이내의 변동 폭으로 조석의 영향에 의해 수위가 변동하고 있어 중산간과 해안지역이 뚜렷하게 차이가 있다.

8. JG-site는 서귀포층이 해수면 상부에 위치하는 점과 지하수위 형성지점으로 볼 때 상위지하수 및 준기저지하수의 부존양상을 보이며, JH-site는 담수 하부에 염지하수가 부존하는 기저지하수로 명확히 구분할 수 있다.

9. 대수층별 지하수 체류시간은 JG-site의 심도 244.5~315m 구간은 19년, 심도 317~440m은 22년, 전 구간에 대한 시료는 19년으로 분석되었다. 상부 대수층과 하부 대수층의 지하수 체류시간에 차이가 있으며 하부로 갈수록 체류시간이 길어지고 있다. JH-site는 심도 33~68m 담수 구간은 17년, 하부의 염수에서는 30년 이상으로 상부 담수체는 유동이 빠르고 하부 염수체는 상대적으로 유동속도가 느림을 지시하며 중산간보다 해안지역에서 체류시간이 길게 나타나고 있다.

참 고 문 헌

- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문.
- 고기원, 2001, 제주도광역수자원관리본부, 하와이주의 수문지질과 지하수관리.
- 고기원, 박윤석, 강봉래, 김봉석, 2005, 제주도 동부지역의 지하지질과 화산활동, 제 13회 세계 물의날 기념 학술세미나, pp. 5~44.
- 고동찬, 이대하, 김용제, 이승구, 고경석, 김구영, 2002, 환경추적자의 혼합모델 해석을 이용한 제주도 지하수 평균연령 추정, 한국지질자원연구원 주최 지하수 순환해석기술워크샵 논문집, pp. 100~115.
- 고동찬, 이대하, 박기화, 2002, 제주도지역 대수층들의 수직적 분포와 수리적 연결성, 한국지하수토양환경학회 2002년도 추계학술발표회, pp. 17~20.
- 농업진흥공사(ADC), 1971, 제주도지하수보고서.
- 김규한, 1982, 동위원소의 지하수학에 응용, 지질학회지 제18권 제3호, pp. 167~171.
- 김기표, 2002, 제주도 동부해안 한동리 지역의 수문지질학적 연구, 제주대학교 석사학위논문.
- 김창욱, 윤정수, 정차연, 2003, 제주도 남사면지역의 지하지질구조와 지하수 산출 특성, 한국지하수토양환경학회 2003년도 춘계학술발표회, pp. 255~258.
- 김창욱, 고기원, 박윤석, 윤정수, 2004, 제주도 서부지역의 대수층별 지하수 산출 능력 연구, 한국지하수토양환경학회 2004년도 추계학술발표회, pp. 83~88.
- 박원배, 1993, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문.
- 부성안, 1999, 제주도 지하수 부존특성 및 이용가능량 산출에 대한 연구, 안동대학교 석사학위논문.
- 윤석훈, 조성권, 2006, 제주도 서귀포층의 퇴적상과 퇴적환경, 대한지질학회지, 42,1-17.
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구 제3지, pp. 309~326.
- 윤정수, 박상운, 1994, 제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화, 제주대학교 해양연구소 연구보고, 제18권, pp. 59~84.

- 윤정수, 김기표, 정차연, 2003, 제주도 동부 한동리지역 고염분 지하수에 대한 수리지질학적 연구, 지질학회지, 제39권 제1호, pp. 115~131.
- 정차연, 2002, 제주도 서부해안 지역의 지질과 지하수, 부산대학교 박사학위논문.
- 제주도, 2000, 제주도 지하수 보전·관리 계획 보고서.
- 제주도, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(Ⅲ).
- 제주도, 2006, 제주도 삼다수 취수정 주변지역 지하수조사보고서.
- 최병수, 1999, 제주도 지하수의 우물 비양수량자료를 이용한 대수층상수 결정방법, Journal of Korean Society of Groundwater Environment, Vol. 6, No. 4, pp. 180~187, December, 1999.
- 최순학, 조병욱, 1986, 제주지역 수리지질조사 연구, 한국동력자원연구소 KR-86-2-8, pp. 83~158
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사.
- Badon-Ghyben, W., 1888-1889, Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam, Koninklyk Instituut Ingenieurs Tijdschrift, The Hagye, pp. 8~22.
- Barker, R. D., 1990, Investigation of groundwater salinity by geophysical methods, in Geotechnical and Environmental Geophysics, Wark, S. H. ed., Vol. II, SEG, pp. 201~211.
- Choi, S.H., Kim, Y.K., Lee, D.Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea: J. Korea Inst. Mining Geol.24 (3), pp. 319~368.
- Cooper, H.H., and Jacob, C.E., 1946, A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History, American Geophysical Union, 27, pp. 526-534.
- Cooper, H.H., Jr., Kohout, F.A., Henry, H.R. and Glorer, R.E., 1964, Sea water in coastal aquifers, relation of salt water and fresh water. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 1613c, p. 84.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.K., 1979, Groundwater. Prentice-Hall, Inc. Eaglewood Cliffs, New Jersey, p. 604.

- Fetter, C. W. Jr., 1998, Applied hydrogeology, Merrill Pub. Com., p.592.
- Hubbert, M. K., 1940, The theory of groundwater motion, Jour. Geol., 48, pp.78
5~944.
- Kohout, F.A., 1961, Fluctuation of Groundwater Levels Caused by Dispersion
of Salts, J. Geophysical Research, 66(8), pp. 2429~2434.
- Meyer W. and Presley T.K., 2001, The Response of the Iao Aquifer to
Groundwater Development, Rainfall, and Land-Use Practices Between
1940 and 1988, Island of Maui, Hawaii, U.S. Geological Survey Water
Resources Investigation Report 00-4223, p. 60
- Morin, R. H., Urish, D. W., 1995, Hydrostratigraphic characterization of a
coastal aquifer geophysical log analysis, Cape Cod national seashore,
Massachusetts ; The log Analysis, 35, pp. 27~37.
- Theis, C.V., 1963, The lowering of the piezometer surface and the rate and
discharge of a well using groundwater storage, Transaction, American
Geophysical Union, v. 16, pp. 519~524.
- Theis, C.V., 1963, Estimating the transmissivity of a water table aquifer from
the specific capacity of a well, U.S. Geological Survey Water Supply
Paper 1536- I. pp. 332~336.
- Todd, D.K., 1980, Groundwater Hydrology, New York, John Willey & Sons. p38.