



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주도 동부지역 염지하수 관정의
수리지질학적 특성

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

吳承泰

2011年 7月

碩士學位論文

제주도 동부지역 염지하수 관정의
수리지질학적 특성

指導教授 甘 相 奎

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

吳 承 泰

2011年 7月

제주도 동부지역 염지하수 관정의
수리지질학적 특성

指導教授 甘 相 奎

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2011年 7月

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科 環境工學專攻

吳 承 泰

吳承泰의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2011年 7月

委員長 李 起 浩 印

委 員 趙 恩 一 印

委 員 甘 相 奎 印

목 차

I. 서론	1
II. 이론적 고찰	4
1. 해안지역에서의 염지하수 부존원리	4
2. 제주도의 수문지질단위 분류	6
3. 지하수 대수층의 분류	8
4. 수리지질특성 인자	10
5. 지하수유동	12
6. 조석반응 분석법 이론	17
III. 연구방법	19
1. 염지하수 관정의 공간분포 분석	19
2. 지하지질 및 전기전도도의 수직검층 분석	21
3. 조석반응 분석법(Tidal response technique)	23
IV. 결과 및 고찰	24
1. 제주도 동부지역 염지하수 관정의 개발·이용 특성 및 공간 분포특성	24
2. 제주도 동부지역 염지하수 관정의 지표 및 지하지질 특성	28
3. 제주도 동부지역 염지하수 관정의 전기전도도 수직분포 및 지하수 부존특성	36
1) 전기전도도 수직분포 특성	36
2) 수역별 지하수 부존특성	43
4. 제주도 동부지역 염지하수관정의 수리인자 특성	46
V. 결론	54
VI. 참고문헌	55

List of Figures

Fig. 1. Principle of the Ghyben-Herzberg theory	4
Fig. 2. Surface geology of Jeju Island(Jeju-do, 2003)	7
Fig. 3. Representative element volume(REV)	12
Fig. 4. Basal groundwater under study area	19
Fig. 5. Grid setting for the analysis of spatial distribution characteristics of saline groundwater wells in eastern area of Jeju Island	20
Fig. 6. Locations of saline groundwater wells for the survey and analysis under study area	22
Fig. 7. Location of tidal stations in Jeju Island	23
Fig. 8. Present condition of distribution and utilization of saline groundwater wells in eastern area of Jeju Island	24
Fig. 9. Distribution map of the number of exploited saline groundwater wells per unit grid(0.5km×0.5km) with basin in the eastern area of Jeju Island	26
Fig. 10. Distribution of surface geology in the basal groundwater part of eastern area of Jeju Island	28
Fig. 11. Location map of saline groundwater wells for the study of underground geology	31
Fig. 12. Cross section of underground geology in Namweon basin	31
Fig. 13. Cross section of underground geology in Pyoseon basin	32
Fig. 14. Cross section of underground geology in Seongsan basin	32
Fig. 15. Cross section of underground geology in Gujwa basin	33
Fig. 16. Cross section of underground geology Jocheon basin	33
Fig. 17. The hyaloclastite breccia(dotted circle) observed in saline groundwater wells of the eastern area of Jeju Island	35
Fig. 18. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Namweon basin	38

Fig. 19. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Pyoseon basin	39
Fig. 20. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Seongsan basin	40
Fig. 21. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Gujwa basin	41
Fig. 22. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Jocheon basin	42
Fig. 23. Characteristics of groundwater reserve in Namweon basin	43
Fig. 24. Characteristics of groundwater reserve in Pyoseon basin	44
Fig. 25. Characteristics of groundwater reserve in Seongsan basin	44
Fig. 26. Characteristics of groundwater reserve in Gujwa basin	45
Fig. 27. Characteristics of groundwater reserve in Jocheon basin	45
Fig. 28. Variations of long-time tidal level Seogwipo-Seongsanpo tidal stations	47
Fig. 29. Variations of tidal level during 24hr at Seogwipo-Seongsanpo tidal stations	47
Fig. 30. Variations of groundwater level at TR-1(—) and tidal level at Seogwipo tidal station(···)	49
Fig. 31. Variations of groundwater level at TR-2(—) and tidal level at Seongsanpo tidal station(···)	49
Fig. 32. Variations of groundwater level at TR-3(—) and tidal level at Seongsanpo tidal station(···)	49
Fig. 33. Results of cross correlation function of tidal level(···) versus groundwater level(—) at TR-1(a), TR-2(b) and TR-3(c) monitoring wells. The time lag found was 18min, 36min and 30min for TR-1, TR-2 and TR-3 respectively	50

List of Tables

Table 1. Thickness of the freshwater lens and G-H Ratio of eastern area of Jeju Island(Jeju-Do, 2002)	5
Table 2. Speciation of the saline groundwater wells under study area	21
Table 3. Present condition of exploitation and utilization of saline groundwater wells in eastern area of Jeju Island	25
Table 4. Number of saline groundwater wells per unit grid(0.5km×0.5km) with basin in the eastern area of Jeju Island	27
Table 5. Present condition of surface geology of saline groundwater wells in the eastern area of Jeju Island(unit: km ²)	29
Table 6. Distribution characteristics of underground geology of saline groundwater wells with the basin in the eastern of Jeju Island	30
Table 7. Criteria of TDS and electrical conductivity(EC) applied to the classification of groundwater(Jeju-Do, 2002)	36
Table 8. The hydraulic diffusivity(T/S) and transmissivity(T) of survey wells ·	48
Table 9. Hydraulic parameters of monitoring wells in Jeju Island (Jeju-Do, 2003)	51
Table 10. Hydraulic parameters of wells in the eastern area Jeju island	52

Hydrogeological Characteristics of Saline
Groundwater Wells in the Eastern Area of Jeju
Island

Seung-Tae Oh

Department of Construction and Environmental Engineering

Graduate School of Industry

Jeju National University

Supervised by Professor Sang-Kyu Kam

Summary

For the saline groundwater wells of Namweon, Pyoseon, Seongsan, Gujwa and Jocheon basins in the eastern coastal area of Jeju Island, their hydrogeological characteristics were investigated, using the characteristics of groundwater reserve by the data of vertical logging of electrical conductivity and by those of underground geology, together with the results of hydraulic parameters calculated by the tidal response technique.

The wells in this study area showed that low saline groundwater by mixing of the fresh groundwater inflowed from inland with seawater was

distributed in the upper part and saline groundwater without mixing of fresh groundwater and seawater was distributed in the lower part. The saline groundwater can be reserved in the clinker layer and crushing joint derived from the compact Aa lava, the pillow lava layer and the hyaloclastite breccia layer founded in the bottom of wells.

The hydraulic diffusivity (T/S) values calculated by applying the groundwater level data for these wells and tidal level data in the eastern area of Jeju Island, were in the range of $2.33 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{d}^{-1} \sim 4.56 \times 10^7 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$. The transmissivity (T) values were in the range of $232,558 \sim 13,667,426 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ and $233 \sim 45,600 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$ with regard to unconfined one and an confined one, respectively, and the latter values are similar to those ($731 \sim 44,100 \text{ m}^2 \text{d}^{-1}$) reported in this area earlier.

In addition, it was considered that the aquifer type in this study area was similar to a leaky aquifer (showing a severe leaky phenomenon) or a semi-confined one rather than a complete confined one, based on the geological characteristics such as vertical joint and crushing plane.

I. 서론

제주도 동부지역의 지하수부존특성은 Ghyben-Herzberg 원리가 적용되는 이른바 기저지하수(basal groundwater) 지역으로 알려져 있으며 특히, 해안지역에는 다량의 염분이 함유되어 있는 염지하수(saline groundwater)가 부존하고 있다.

염지하수는 '80년대 중반부터 육상수조식 양식장이나 횃집 수족관, 해수 사우나 등에서 지하해수(최근에는 용암해수라고도 함)라는 용어로 이용되어 오다가, 고 등(2003a, 2005)에 의해 동부지역 지하수의 수직적인 전기전도도의 변화를 토대로 17,350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상의 측정값을 갖거나 평균해수면 아래 화산암의 클린커층, 균열, 절리, 용암류 경계면 등의 공극에 부존하는 총고형물질 함량이 10,000 mg/L 이상인 지하수를 염지하수 또는 고염분지하수로 정의하였다.

염지하수 주요특성은 수온, pH, 염분 등의 항목에서 연중 변동이 거의 없는 안정한 상태이며, 화산암반에 의해 자연·여과되어 청정하고, 마그네슘, 칼슘, 바나듐 등 유용 미네랄 성분이 함유되어 있으며, 수온, 카드뮴 등 유해 중금속이 검출되지 않는다. 따라서 생수뿐만 아니라 고농도 미네랄 용액으로도 개발할 수 있으며, 기능성 소금, 두부, 화장품 등 다양한 용도로 활용할 수 있다.

도내 육상 양식장에서는 여름철 고수온기 및 겨울철 저수온기에 염지하수와 자연 해수를 일정비율로 혼합하여 양식 어류의 적정수온을 유지하고 있다. 또한, 양식수조 내 어병 발생 시 어병확산 방지를 위해 염지하수를 공급하여 환수율을 높이고 있으며, 급변하게 변하는 해상의 기상악화에 따른 자연해수 공급이 중단될 시기에도 염지하수는 비상시 대체수원으로 이용이 가능하다. 이처럼 육상수조식 양식에 중요한 역할을 하고 있으며, 해산어 양식 경쟁력 확보차원에서도 매우 중요시 되고 있는 수자원이다.

이와 같이 염지하수를 효과적으로 사용할 때 그 이용범위는 매우 넓고, 경제성도 충분함에도 불구하고, 염지하수는 일반적으로 지하수의 과잉양수에 의한 해수 침입 현상(seawater intrusion)에 대한 원인 인자로 초점이 맞추어져 있어 이에 대한 인식 전환이 필요한 실정이다.

동부지역의 염지하수 부존에 대한 원인을 규명하기 위한 조사·연구가 여러 연구 기관 및 학자들에 의해 이루어져 왔으며, 그 원인에 대한 해석도 다양하게 제시되고 있다.

최(1988) 및 농어촌진흥공사(1989)는 이 지역에서의 염지하수 부존원인을 지하수 과잉채수에 의한 해수침투 현상으로, 윤(1986)은 토양 및 사구층 내의 염분이 빗물에 의해 용해·침투되어 일어나는 현상으로, 또한 고(1991, 1997) 및 한국수자원공사(1993)는 지질구조에 의한 자연적 현상으로, 제주도(2001)는 이 지역의 수리지질학적 특성에 의한 해수의 단순혼합에 의하여 염지하수가 부존하는 것으로 해석하였다.

최근에는 제주도에서 해수침투 감시관측망 구축사업의 일환으로 2001년부터 담·염수 경계면을 완전 관통시킨 심부 관측정 착정 및 조사사업 등 체계적인 조사 시추공 확보로 동부지역 담·염수체의 경계면을 포함한 수직·수평의 공간적인 분포확인파 지하수 유동과 관련된 지질구조에 대한 정보 확보가 가능하게 되었다. 그 결과 시추 조사과정에서 파쇄된 베개용암(pillow lava) 각력과 유리쇄설성 각력(hyaloclastite breccia)이 관찰되고 있는 것으로 나타났고 이러한 투수성이 좋은 용암류가 누층을 이루며 평균 해수면 하 깊숙이 분포함으로 인하여 지하수가 저류하거나 해수의 압력에 의해 바닷물이 내륙쪽으로 유입하여 염지하수 부존에 상당한 영향을 미치는 것으로 해석하였다(고 등, 2005).

이외에 부 등(2000)은 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입에 관한 사례연구를, 박 등(2003)은 제주도 동부지역 지하수의 담·염수 경계면 분포와 변화에 대한 연구를, 윤 등(2003)은 제주도 동부 한동리지역 염지하수에 대한 수리지질학적 연구를 수행하였다.

대수층의 수리인자 산정과 관련해서는 박 등(1995, 1997)은 제주도 중심부 수리지질변수의 불확실성이 해안지역 지하수 흐름에 미치는 영향에 대한 분석 및 제주도 중-동 수역에서의 해수침투에 대한 수치실험 연구를 실시하였고, 김 등(2005)은 제주도 동부지역 해안대수층의 조석에 의한 수리경사 변화 연구 수행, 이 등(2006)은 제주 동부지역의 수리확산계수와 지하수 도관 유동 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같이 동부지역 지하수 부존특성에 대해 많은 연구 성과가 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 연구·성과가 수문지질의 연관성과 담·염수의 수직적인 공간분포, 염수 상부에 존재하는 담수 지하수체에 대한 연구에만 치우쳐 있어, 실제 염지하수관정

에 관한 대수층 수리적 특성에 대한 연구는 미미한 실정이다.

대수층의 수리인자를 산정하는 전통적인 방법으로는 양수시험, 순간충격시험 등의 수리시험이 있으며, 현장에서의 수리시험은 대수층의 시험범위에 대한 평균 수리인자를 제공한다. 그러나 제주도와 같이 투수성이 큰 대수층이 발달된 지역에서 양수시험을 통해 수리인자를 산정하기 위해서는 충분히 수위강하를 시켜야 한다. 이를 위해 대용량의 펌프를 사용해야 하는 어려움이 있으며, 양수한 물을 처리해야 하는 점, 양수시험 비용 등 고려해야 할 사항이 많다. 특히, 해안 대수층에서는 수리인자 산정을 위한 양수시험이 추천되고 있지 않다(Millham 과 Howes, 1995). 그러나 이러한 해안 대수층에서는 지하수위가 조석의 영향을 받는 특성을 이용하여 조석반응 분석법(tidal response technique)을 통해 대수층의 수리인자를 산정할 수 있으며(Jha 등, 2003), 이 방법을 이용하면 대수층의 넓은 면적에 대한 수평수리전도도를 구할 수 있다(김 등, 2005).

본 연구에서는 제주도 동부 해안지역에 분포하고 있는 남원, 표선, 성산, 구좌, 조천수역의 염지하수관정의 전기전도도 수직검층 및 지하 지질자료를 토대로 제주도 동부 해안지역의 지하수 부존특성을 검토하였고, 또한 조석반응법을 통한 수리인자를 산정한 결과를 결부시켜 염지하수 관정의 수리지질학적인 특성을 분석하였다.

II. 이론적 고찰

1. 해안지역에서의 염지하수 부존원리

해안지역에서 염수와 담수의 비중 차에 의해서 담수가 염수 상부에 렌즈형태로 부존하는 즉, Ghyben-Herzberg 원리(이하 “G-H 원리”라 한다)는 식 (1)과 같다.

$$Z = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} \times h_f \quad (1)$$

여기서, Z : 해수면 하단 담수지하수체의 두께, h_f : 해수면 상단 지하수위의 높이
 ρ_s : 해수의 밀도, ρ_f : 담수의 밀도

일반적으로 담수의 밀도는 1.000 g/cm^3 이고, 해수의 밀도는 1.025 g/cm^3 이므로 상기 식에 의하면, 해수면 아래 담수 지하수체의 두께는 해수면 상부 지하수위 높이의 40 배, 즉 $Z = 40 \cdot h_f$ (G-H Ratio)가 되어 담수지하수체는 해수면 상부 지하수위 높이의 40배에 해당하는 깊이까지 부존하는 것을 의미한다(Fig. 1).

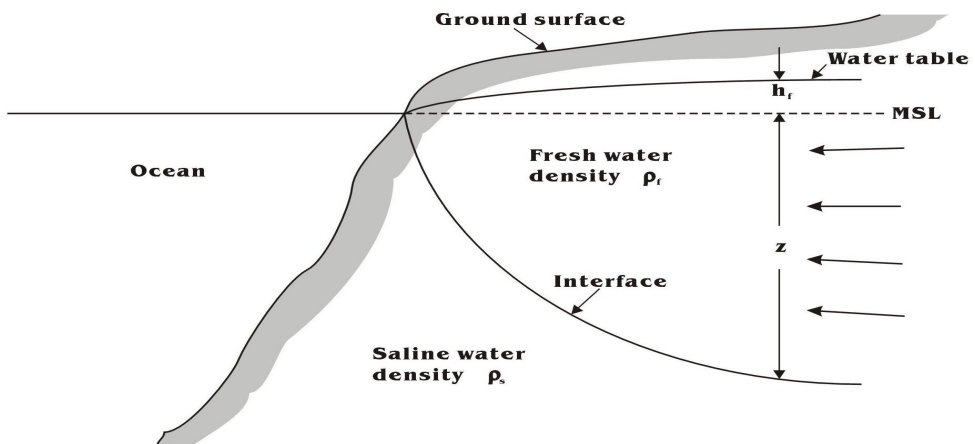


Fig. 1. Principle of the Ghyben-Herzberg theory.

G-H원리가 적용되는 지하수가 부존하기 위해서는 해안변 지역 지층의 투수성은 좋아야 한다. 다시 말해서, 투수성이 양호한 해안변 지층의 틈을 통해 내륙 쪽으로 들어온 해수는 고지대에서 바다 쪽으로 흘러내려오는 담수지하수와 만나 혼합이 되고, 담수와 해수의 중간정도의 조성을 갖는 저염지하수로 부존하게 되는데, 저염지하수가 부존하는 층을 “점이대” 또는 “혼합대”라고 하고, 혼합대 상부에 존재하는 담수지하수를 “담수렌즈”, “G-H렌즈” “기벤-헤르쯔버그 렌즈”라 부른다. 담수렌즈는 모든 지역에 항상 일정한 두께로 존재하는 것이 아니라, 지하수 함양량·조석·지하수 채수량 등의 요인에 따라 확장파 수축 또는 형성과 소멸하는 현상을 반복한다.

제주도 동부지역 해수침투 감시관측망에서 수직적인 전기전도도 측정을 통한 담·염수 경계면 조사 결과에 의하면, Table 1과 같이 G-H Ratio가 평균 1 : 20으로 나타나 담수렌즈가 이론적인 비율보다 훨씬 얇게 형성되어 있는 것으로 조사되었다 (Jeju-Do, 2002).

Table 1. Thickness of the freshwater lens and G-H Ratio of eastern area of Jeju Island(Jeju-Do, 2002)

Well name	Elevation (m)	Groundwater level (E.L, m)	Thickness of the freshwater lens(m)		G-H Ratio
			Theoretical	Observed	
Handong-1	14.79	1.80	72	33.18	1:18
Handong-2	42.22	2.00	80	35.15	1:18
Handong-3	112.25	2.43	97.2	67.69	1:28
Susan-1	33.33	0.90	36	27.56	1:31
Susan-1	70.47	2.30	92	29.21	1:13
Susan-1	115.06	2.40	96	48.33	1:20

2. 제주도의 수문지질단위 분류

제주도(2003)에서는 1:50,000 축적의 제주도 지질도를 토대로 도 전역에 대한 수문지질단위를 Fig. 2와 같이 아아(Aa) 용암류, 파호이호이(Pahoehoe) 용암류, 퇴적암류, 분석구 등 4가지 수문지질단위로 분류하였다.

파호이호이 용암류의 분포면적은 466 km²로 제주도 전체면적의 25.5%를 차지하고 있다. 이 용암류는 점성이 작아 유동성이 크고, 용암류의 표면이 편평하고 매끄러우며, 새끼줄 구조(ropy structure) 등이 발달하는 것이 특징이다(Mcdonald, 1953; Scarth, 1994). 특히, 이 용암류는 점성이 낮기 때문에 50 km 이상까지 유동할 뿐만 아니라 크고 작은 용암관과 용암터널의 발달을 수반한다. 송(2000)은 제주도에 있어서 파호이호이 용암류는 지형경사가 완만한 동·서부지역의 해발 300 m 이하지역에 주로 분포하고 있는데 용암류 단위의 평균두께는 2~3 m 정도이고, 만장굴·협재굴 등의 크고 작은 용암터널들이 발달한다. 제주도 동부지역의 시추코어에서는 용암류 단위가 대체로 1~3 m 두께이고 10~20매의 유동단위를 관찰할 수 있다. 하부에는 클린커층이 아주 얇거나 없으며 용암류의 상·하부가 산화된 상태로 산출되는 경우도 있다.

아아(Aa)용암류는 제주도 전체면적의 66%인 1,206 km²로 가장 넓은 면적을 차지하고 있다. 아아 용암류는 점성이 커서 표면이 거칠고 상부와 하부에는 1~2 m 두께의 클린커층을 형성하며 중앙부는 비교적 치밀한 용암상태를 이루는 것이 특징이다(Mcdonald, 1953; Mcdonald et al., 1983). 송(2000)에 의하면, 제주도의 아아 용암류는 주로 지형경사가 급한 남·북사면을 중심으로 분포하고 있다. 용암류의 단위 두께는 평균 5~10 m이고 상부와 하부에 클린커층이 발달하고 있으며, 기공은 크기가 크고 길쭉하게 신장된 형태를 이룬다. 남·북사면이 지형경사가 급한 이유 중의 하나는 장석현무암, 휘석현무암, 장석휘석현무암, 조면암 등의 아아 용암류가 분포하기 때문이며, 이 지역에서 계곡은 협곡을 이루는 것이 특징이다. 이들 용암류가 지하에 존재하는 경우에는 클린커층이 좋은 대수층이 되고 있다.

제주도에 분포하고 있는 분석구(cinder cone)는 거의 대부분이 스킨리아로 이루어져 있으며, 물의 흡수 및 통수능력이 뛰어나고 해안저지대와 중산간지역 등 도 전역에 고르게 분포하고 있다.

퇴적층(sedimentary layer)은 수성활동에 의해 형성된 응회퇴적암, 용암류 사이에 협재된 역암층 등으로 이루어져 있으며 주로 해안 저지대에 분포하여 지하수 함양에 큰 영향을 주지 않는다.

대체적으로 파호이호이 용암류를 비롯하여 아아 용암류와 분석구 모두 투수성이 매우 양호한 조건임을 감안하면 제주도의 거의 대부분 지역이 강우의 침투가 잘 이루어지는 지질로 구성되어 있다고 할 수 있다.

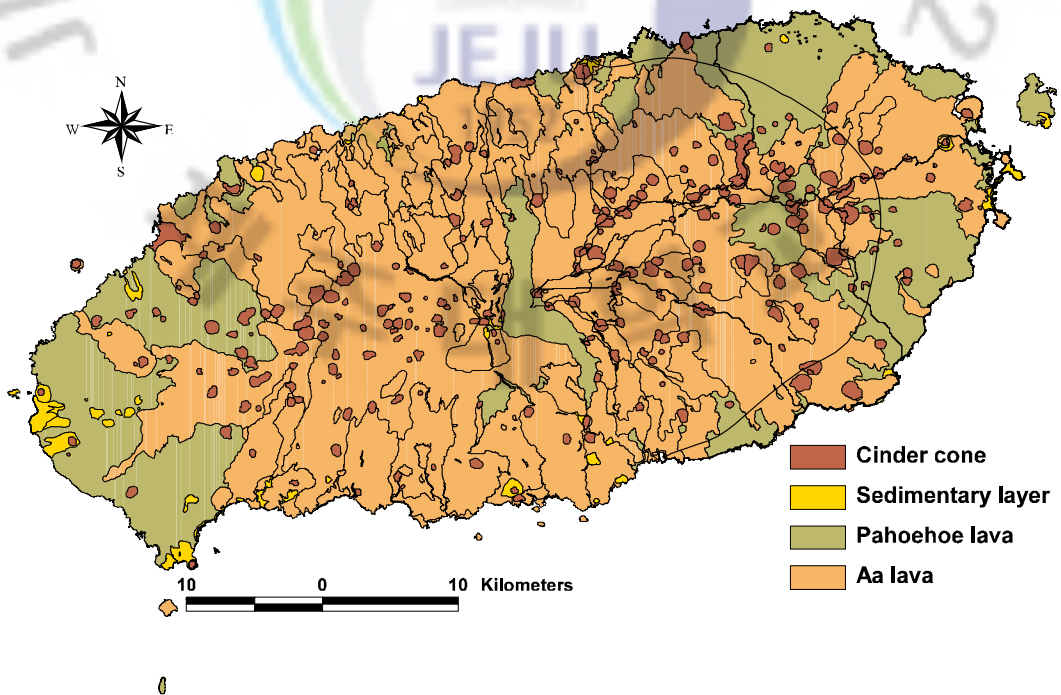


Fig. 2. Surface geology of Jeju Island(Jeju-Do, 2003).

3. 지하수 대수층의 분류(Classification of aquifer)

지하수 대수층은 포화대의 최상단면에서 작용하는 압력이나 자유수면(free water table)의 존재 여부에 따라 자유면 대수층과 피압대수층으로 구분한다.

지하수면에서의 압력이 대기압과 동일한 상태 하에 있는 대수층을 자유면 대수층이라 하고 자유면 대수층 내에 부존되어 있는 지하수를 자유면 지하수라 하며 이러한 상태를 자유면 상태(water table condition, unconfined condition)라 한다.

지하수면의 변화는 바로 대수층 내에 저유된 지하수량의 변화를 의미한다. 특히 대수층에 설치한 우물의 지하수위를 해발표고로 표시한 지하수위 등고선도를 작성해 놓으면 대수층 내에서 지하수의 이동방향, 분포, 그 운동 및 개발가능량을 알아낼 수 있다.

지하수면은 고정된 것이 아니라 강수의 지하함양이나 자연적인 지하수의 배출로 인해 주기적으로 변동한다. 즉 우기에는 다량의 강수가 지하로 스며들어 지하저수지 내로 함양되기 때문에 지하수위는 상승한다. 이에 비해 갈수기에는 지하저수지 내에 부존되어 있던 지하수가 하천이나 기타 용천으로 배출되므로 지하수위는 하강한다. 뿐만 아니라 인위적으로 공업, 생활 및 타 용수원으로 지하수를 지하저수지로부터 채수해 내면 지하저수지 내에 부존되어 있던 지하수량이 감소하여 지하수위는 점차 하강한다. 따라서 자유면 대수층에서 지하수위의 변화는 바로 자유면 대수층 포화대의 두께 변화를 의미하며 이는 다시 지하수위 저장량의 변화를 의미한다.

만일 자유면지하수의 수평범위가 국부적으로만 분포되어 있을 때 이를 부유대수층(perched aquifer)이라 하며 이는 비포화대 내에 국부적으로 분포되어 있는 특수한 경우의 자유면 대수층이다.

자유면 대수층과는 달리 포화대의 상·하부가 저투수성 또는 불투수성층으로 피복되어 있을 때는 대수층(포화대)이 심한 압력을 받는 구속 상태 하에 있게 된다. 그러므로 대수층 최상단부에서의 압력은 대기압보다 높은 압력을 받게 된다. 이와 같이 저투수성 지층은 이보다 투수성이 큰 대수층을 대기압과 직접 접촉하지 못하도록 막고 있기 때문에 피압대수층 내에 부존된 지하수의 상·하위 운동을 저지한다. 이러한 구속 대수층을 피압대수층(confined aquifer, artesian aquifer 및 pressure aquifer)이라

하며, 피압대수층 내에 부존된 지하수를 피압지하수라 한다.

과거에는 피압대수층의 지하수면을 Piezometric surface라고 했으며 자유면 대수층에서는 water table surface라고 불렀다. Piezometric surface는 엄격한 의미에서 피압대수층에서만 적용할 수 있다(Meinzer, 1927). 그러나 1968년부터 미국지질조사소와 1990년 이후에 발간되는 지하수 관련교재에서는 지하수면이란 술어를 자유면 뿐만 아니라 피압대수층에도 동시에 사용하고 있다. 그러나 피압대수층의 지하수면은 자유면 대수층처럼 피압대수층의 최상위의 물리적인 경계면이 아님을 명심해야 한다. 즉 피압대수층의 지하수면은 일종의 가상면(imaginary surface)으로서 우물이 피압대수층을 관통했을 때 지하수가 해당 수두압력에 상응하는 높이까지 상승하는 물리적인 중요성을 가진 가상면이다.

따라서 피압대수층을 관통한 우물에서 형성된 수위는 우물설치지점에서 지하수면의 높이로 정의한다. 피압대수층에서 최상위의 물리적인 경계는 지하수면이 아니고 상위 압층의 저면이다. 즉 상위 압층의 저면은 피압대수층의 최상단면이다. 따라서 피압대수층의 지하수면은 상위 압층의 바닥 위에 있을 수도 있고 지표면보다 높은 곳에 있을 수도 있다.

또한 지하수면의 모양은 그 지역의 지질이나 함양 형태(즉 노두 분포지에서 함양, 상위 대수층으로부터 수직 누수, 또는 상위 대수층으로 누수)나 주입·채수정의 위치와 채수율에 따라서 달라질 수도 있다.

압층을 통해 누수현상은 일어나지만 그 양이 소규모일 때는 이를 피압대수층으로 다르지만 누수현상이 상당히 크게 발생하는 경우에는 누수 정도에 따라 준피압이나 누수피압층으로 취급해야 한다.

4. 수리지질특성 인자

지하수의 수리지질학적인 특성은 지하수 유동특성과 저유특성으로 대별할 수 있다. 유동특성 및 저유특성으로 가장 중요한 인자는 투수량계수(transmissivity)와 저유계수(storativity, storage coefficient)는 동점성계수를 갖는 지하수가 단위 동수구배 하에서 대수층의 전 두께(단위 폭×전 두께)와 단위 폭으로 이루어진 면을 통하여 1일 동안 유동하는 지하수량을 말하며, 이는 부존된 지하수가 투수될 수 있는 능력(transmissible)보다 투수되는 대수층의 성격(transmissive)의 의미를 강하게 지니고 있다. 따라서 과거에는 투수량계수를 coefficient of transmissibility로 불렀으나 현재는 transmissivity란 슬어를 사용한다. 투수량계수는 식 (2)와 같이 수리전도도(hydraulic conductivity, K)에 대수층의 두께(b)를 곱한 값이다. 투수량계수 T 의 디멘션은 (L^2T^{-1})이다.

$$T = K \times b \quad (2)$$

투수량계수는 포화두께와 수리전도도와 밀접한 관계를 가진 수리특성인자로서 2차원의 수리적인 접근법을 적용할 수 있는 경우에 사용하는 인자이다. 특히 포화두께가 시간과 위치(시공간)에 따라 변하는 자유면 대수층에서는 투수량계수가 비선형적인 수리수두에 따라 변한다.

수리수두(지하수위)가 변함에 따라 대수층으로 유입되거나 배출되는 지하수량(체적)은 대수층의 저유계수를 이용하여 정량화시킬 수 있다.

자유면 대수층의 저유계수는 비산출율과 같다. 피압대수층에서 수두가 3차원적으로 변할 때에는 비저유계수를 이용한다.

저유계수(storativity)란 식 (3)과 같이 대수층 내에 저유되어 있던 물이 단위수두 변화에 따라 단위면적을 통해 유입·유출될 수 있는 양을 무차원 상수로 표시한 것으로 이는 식 (4)과 같이 2개항으로 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{\text{배출된 지하수량(체적)}}{(\text{면적})(\text{수두변화})} \quad (3)$$

$$S = S_y + S_s \times b \quad (4)$$

여기서, S는 저유계수이며, S_y 는 단위체적의 대수층 내에 저유되어 있던 물이 단위체적으로부터 중력 배수될 수 있는 지하수의 양과의 체적비로서 비산출률이며, S_s : 단위체적의 대수층 내에 저유되어 있던 물이 지하수위의 강하로 인해 지하수의 팽창과 대수층의 압축현상에 의해 단위 체적으로부터 배출되는 지하수량과의 체적비로서 비저유계수이다. 단 두 경우 모두 단위수두강하가 발생하고 동수구배는 1:1이며, 수온은 15.6℃일 때이다.

자유면 대수층인 경우 S_s 는 S_y (자유면 대수층에서 지하수채수로 인해 지하수위가 하강하면 포화대의 두께가 변화하므로 S_y 는 0이 아니다)에 비해 매우 적은 값이므로 S_s 를 무시하면 $S=S_y$ 이고, 피압대수층에서는 장기간 지하수를 채수하더라도 수위강하가 피압대수층의 포화두께에 영향을 미치지 않기 때문에 $S_y=0$ 이므로 $S=S_s \cdot b$ 로 표현할 수 있다.

저류계수(S)는 대수층에서 수직방향의 수리수두변화가 없는 경우나(동수위선이 직각인 경우로써 지하수 흐름이 수평인 경우) 2차원의 수리적인 접근법을 적용할 수 있는 수평대수층에서 사용하는 인자이다. 피압대수층의 S_s 는 비록 절대치는 적지만 저류계수(S)와 직접적인 관련이 있다,

5. 지하수유동

1) 연속방정식

질량 보존의 법칙을 표현한 연속 방정식은 지하수 유동을 지배하는 기본 법칙으로 유체의 질량보존을 시간당 질량단위로 표현하면,

$$\text{질량유입속도} - \text{질량유출속도} = \text{시간당 질량저장의 변화}$$

이것을 Fig. 3과 같이 직교 좌표계 내의 한 점을 중심으로 $\Delta x \Delta y \Delta z = 1$ 인 단위 체적의 정육면체 다공성 물질에 적용해보면,

$$ABCD \text{ 면을 통한 질량 유입속도} = \rho_w v_x \Delta y \Delta z \quad (5)$$

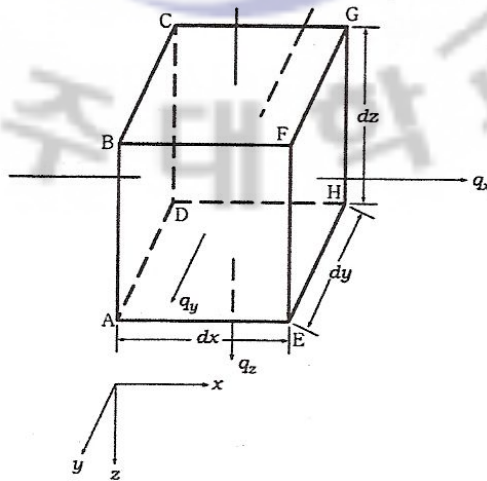


Fig. 3 Representative element volume(REV).

$$EFGH \text{ 면을 통한 질량 유출속도} = \left[\rho_w v_x + \frac{\partial (\rho_w v_x) \Delta x}{\partial x} \right] \Delta y \Delta z \quad (6)$$

순유출속도는 유입과 유출사이에 차이로 식 (6)에서 식 (5)을 뺀 것으로 식 (7)과 같으며, 모든 면을 통한 순 유출속도는 식 (8)과 같다.

$$EFGH \text{ 면을 통한 순 유출속도} = -\frac{\partial(\rho_w v_y)\Delta x\Delta y\Delta z}{\partial x} \quad (7)$$

$$\text{모든 면을 통한 순 유출속도} = -\left[\frac{\partial(\rho_w v_x)}{\partial x}\right] + \frac{\partial(\rho_w v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_z)}{\partial z}\Delta x\Delta y\Delta z \quad (8)$$

식 (8)을 $\Delta x\Delta y\Delta z$ 로 나누어주면 단위체적에 대한 함수로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$-\left[\frac{\partial(\rho_w v_x)}{\partial x}\right] + \frac{\partial(\rho_w v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_z)}{\partial z} = \text{단위체적당 순유출속도} \quad (9)$$

식 (9)의 단위체적당 순유출속도는 시간에 대한 질량 저장의 변화이고 이는 시간에 대한 단위총체적당 질량의 변화로 $\rho_w \cdot n = \frac{m}{V_w} \cdot \frac{V_w}{Vt} = \frac{m}{Vt}$ 는 단위 총 체적적당 질량이고 시간으로 편미분하면 식 (10)과 같이 질량보존방정식 또는 연속방정식이 된다.

$$-\left[\frac{\partial(\rho_w v_x)}{\partial x}\right] + \frac{\partial(\rho_w v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_z)}{\partial z} = \frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} \quad (10)$$

유체의 밀도가 공간에 대하여 변화하지 않는다는 가정을 하면(비압축성 유체) 식 (10)의 좌변 밀도 항을 상수로서 빼낼 수 있다.

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w n)}{\partial t} \quad (11)$$

식 (11)의 좌변 v_x 는 단위면적당, 단위시간당 유체의 유량(Q_x/A)이므로 좌변은 단위체적당 순유체의 유출속도를 의미한다. 단위체적당 유체의 순유출속도는 단위체적 내부에서 유체체적의 시간변화율이 동일하다는 의미이다.

2) 정상상태 유동

한 점에서 유동속도의 크기와 방향이 시간에 대해 일정하다는 의미이고 이를 식 (11)에 적용하면 우변이 0이 되므로 식 (12)와 같이 연속방정식을 쓸 수 있다.

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x}\right] + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

만약 유체가 비압축성이면 밀도가 일정하므로 ρ 를 소거할 수 있고 비록 유체가 압축성이고 밀도가 일정하지 않더라도 연쇄법칙(連鎖法則, chain rule)을 이용하면 $\rho \partial v_x / \partial x$ 항이 $v_x \partial \rho / \partial x$ 항보다 훨씬 더 크기 때문에 식 (13)과 같이 단순화된다.

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

v_x v_y v_z 대신 Darcy 법칙을 대입하면 식 (14)와 같이 비등방 포화 다공성 매체를 통한 정상상태 유동 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (14)$$

등방 매체일 경우 $K_x = K_y = K_z$ 이고 만약 이 매체가 균질하다면 $K(x, y, z) =$ 일정하므로 식 (15)의 균질 등방성 매체를 통한 정상상태 유동에 대한 방정식으로 변형된다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (15)$$

식 (15)는 수학자들에 의해 잘 알려진 가장 기본적인 편미분방정식 중의 하나로 라플라스 방정식(Laplace equation)이라고 부른다. 이는 3차원 유동장 내 어떤 지점에서의 수두 h 를 표현한 함수 $h(x, y, z)$ 이다.

3) 비정상상태 유동

비정상상태 유동(unsteady-state flow, nonsteady-state flow) 또는 천이 유동은 유동장 내 한 점에서 유동속도의 크기와 방향이 시간에 대하여 변할 때 발생하며 이 경우 연속 방정식은 식 (16)이 된다.

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (16)$$

식 (16)의 우변 첫째 항 $n \frac{\partial \rho}{\partial t}$ 는 밀도 ρ 의 변화로 인한 물의 팽창에 의해서 발생된 물의 질량속도이다. 이 항을 전개하면 $n \frac{\rho}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \frac{dp}{dh} \frac{\partial h}{\partial t}$ 이 된다. 여기에 $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} = \beta$, $\frac{dp}{dh} = \rho g$ 인 관계식을 대입하면 $n \rho \beta \rho g \frac{\partial h}{\partial t}$ 이 된다.

둘째 항은 공극 n 의 변화로 반영된 다공성 매체의 압축에 의해 생성된 물의 질량속도로서 전개하면 $\rho \frac{dn}{dp} \frac{dp}{dh} \frac{\partial h}{\partial t}$ 이 된다. 여기에서 $\frac{dn}{dp}$ 는 $\frac{n}{n} \frac{dn}{dp} = n\alpha \approx \alpha$ 또는

$\frac{dn}{dp} = \frac{d(\frac{V_v}{V_T})}{dp} = \frac{1}{V_T} \frac{dV_v}{dp} \approx \frac{1}{V_T} \frac{dV_T}{dp} = \alpha$ 의 관계를 갖고 있다. 따라서 둘째 항은 $\rho \alpha \rho g \frac{\partial h}{\partial t}$ 로 변형시킬 수 있다.

n 와 n 의 변화는 모두 수두 n 의 변화에 의해 형성되며, 수두가 단위 강하되었을 때 두 메커니즘에 의해서 생산된 물의 체적은 S_s 이다. 여기에서 S_s 는 $S_s = \rho g (\alpha + n\beta)$ 로 주어지는 비저유계수이다. 따라서 생산된(유체저장의 시간변화율) 물의 질량속도는 $\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t}$ 이고 다음의 식 (17)과 같이 변한다.

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (17)$$

좌변의 항들을 연쇄법칙을 이용하여 전개한 후 $\rho \frac{\partial v_x}{\partial x}$ 형태의 항이 $v_x \frac{\partial \rho}{\partial x}$ 항보다 훨씬 더 크다는 것을 적용하면 식의 양변에서 ρ 를 제거할수 있다. 여기에 Darcy법칙을 대입하면 식 (18)을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (18)$$

식 (18)은 포화된 비등방 다공성 매체를 통한 천이유동에 대한 방정식이다. 만약 매체가 균질하고 등방이면 식 (19)이고, S_s 를 전개하면 식 (20)이 된다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\rho g (\alpha + n\beta)}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (20)$$

위 식은 확산방정식(확산방정식, diffusion equation)으로 알려져 있으며 해 $h(x, y, z, t)$ 는 유동장 내 어떤 시간과 지점에서 수두의 값을 나타낸다. 해를 얻기 위해서는 세가지 기본적인 수문학적 인자인 K , α , n 과 유체 인자인 ρ , β 를 알아야 한다.

두께 b 인 수평 대수층의 경우, $S=S_s b$, $T=Kb$ 이므로 식 (20)의 이차원 형태는 식 (21)과 같다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (21)$$

해 $h(x, y, t)$ 는 어떤 시간에서 수평 대수층을 통하여 수평면 상의 어떤 지점에서의 수두장을 나타낸다. 해를 얻기 위해서 대수층 변수인 S 와 T 를 알아야 한다.

6. 조석반응 분석법(tidal response technique) 이론

해안대수층의 지하수는 조석의 영향으로 상승과 하강을 반복하게 되는데, 이러한 지하수위 변동은 조석변화에 의한 압력파(pressure wave)의 전달에 의해 생성된다. 자유면대수층인 경우 압력파는 대수층 공급 내에 물이 채워지거나 빠지는 현상에 의한 저유량의 변화에 의해 생성되는 반면, 피압 대수층의 경우는 유체압(fluid pressure)의 변화에 의해 생성된다. 이러한 압력파의 속도, 진폭, 파장, 및 감쇠는 조석의 주기, 진폭, 대수층의 투수량계수, 저류계수, 그리고 해안으로부터의 거리 등에 의한 영향을 받는다(Ferris, 1951).

압력파가 내륙으로 전달됨에 따라 지하수위가 변동하는 이러한 해안지역에서는 일시적인 지하수위 측정으로는 지하수 유동을 정확히 분석할 수 없으며, 지하수위의 연속적인 측정을 통한 분석이 필수적이다(김 등, 2005).

조석변화에 의한 지하수위변화 분석을 위해 이와 유사한 고체에서의 열전달 모델이 이용되며 이는 식 (22)와 같다(Jacob, 1950; Ferris, 1951; Werner와 Noren, 1951).

$$h(x, t) = h_{msl} + A \cdot \exp\left[-\sqrt{\frac{wS}{2T}} x\right] \cdot \sin\left[wt - \sqrt{\frac{wS}{2T}} x + c\right] \quad (22)$$

위 식에서 $h(x, t)$ 는 지하수위, h_{msl} 은 평균 해수위 [L], A 는 조석의 진폭(amplitude) [L], x 는 해안으로부터의 거리 [L], T 는 대수층의 투수량계수 [L^2T^{-1}], S 는 저류계수 [무차원], w 는 조석의 속도(tidal speed)로서 $2\pi/t_0$ 와 같으며 t_0 는 조석의 주기(tidal period)이다. t 는 시간 [T], c 는 상변화(phase shift)이다.

조석의 진폭을 H_0 , 지하수위의 진폭을 H_x 로 표현하면, 식 (22)는 식 (23)과 같은 관계가 성립한다.

$$H_x = H_0 \exp(-px), \quad p = \sqrt{\frac{2T}{wS}} \quad (23)$$

또한, 조석의 영향에 의한 지하수위 변동의 지연시간은 식 (24)과 같다.

$$t_T = \frac{\alpha S}{2\beta T} \quad (24)$$

지연시간을 측정하기 위해서는 교차상관분석을 이용할 수 있으며, 일반적으로 교차상관관계분석(cross-correlation analysis)은 입력자료 x_t 와 출력자료 y_t 와의 상관성을 분석할 때 이용된다. 교차상관함수는 비대칭 [$r_{xy}(k) \neq r_{yx}(k)$]이며, $k > 0$ 일 때 $r_{xy}(k) > 0$ 이면 입력 자료가 출력자료에 영향을 미치며, $k < 0$ 일 때 $r_{xy}(k) > 0$ 이면 출력 자료가 입력 자료에 영향을 미친다. 지연(delay)은 $k = 0$ 와 최대 $r_{xy}(k)$ 값 사이의 시차로 정의된다. 일반적으로 지연이 짧을수록 전달이 빠르다고 해석할 수 있다.

$k > 0$ 일 때 $r_{xy}(k)$ 는 식 (25)와 같으며 여기서 $C_{xy}(k)$ 는 교차상관도표(cross-correlogram)이며, σ_x, σ_y 는 시계열자료의 표준편차이다.

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (25)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad (26)$$

Ⅲ. 연구방법

1. 염지하수관정의 공간분포 분석

연구지역 내 수리학적인 특성 연구를 위한 염지하수관정의 공간분포 분석방법은 우선, 제주도 16개 수역과 지하수부존형태별 지역분포의 경계의 공간속성정보를 dBASE(*.dbf)화하여 Arc-view 3.3 GIS프로그램에서 불러온 후 연구지역을 Fig. 4과 같이 추출하였다.

추출된 연구지역 내에 염지하수관정에 대한 위치, 양수능력, 관정 제원정보 등 속성정보(수자원본부 자료 참조)를 GIS 프로그램에 입력한 후 분석에 필요한 각각의 Layer를 중첩하였고, 이를 Fig. 5와 같이 0.5 km × 0.5 km의 일정크기로 격자망을 설정하여 분석하였다.

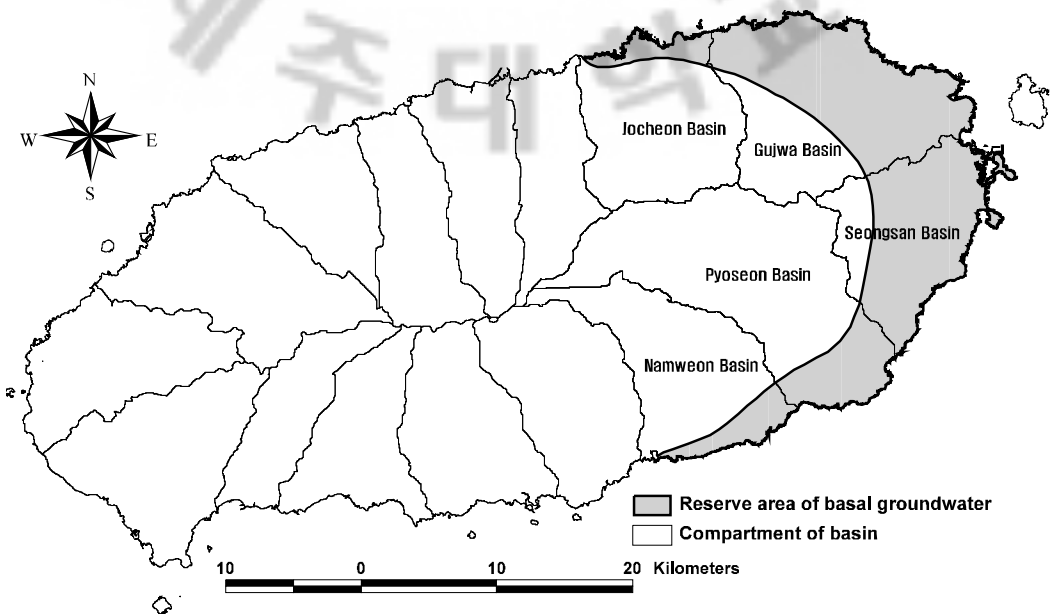


Fig 4. Basal groundwater under study area.

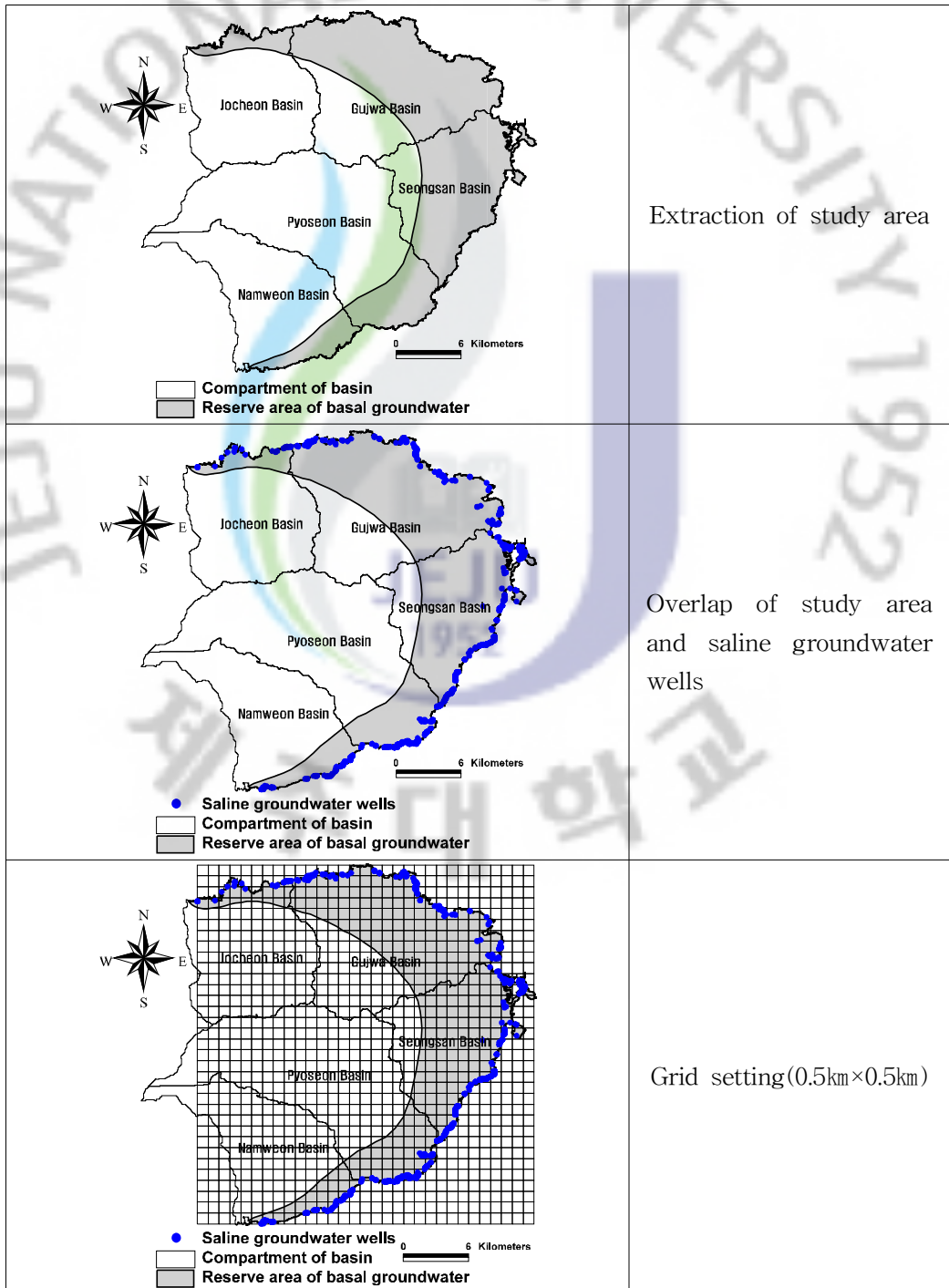


Fig. 5. Grid setting for the analysis of spatial distribution characteristics of saline groundwater wells in eastern area of Jeju Isjand.

2. 지하지질 및 전기전도도의 수직검층 분석

지하지질 분포 상태를 분석하기 위하여 Fig. 5에서 추출된 염지하수관정 중 자료 획득이 가능한 개발당시 지질주상도 자료((주)남천개발 지하수개발 감리보고서, 2001~2010)를 바탕으로 주상도에 기재된 다양한 암석명을 수문지질특성에 따라 단순화하여 파호이호이(Pahoehoe) 용암류, 아아(Aa) 용암류, 사력층 내지는 자갈층으로 재분류하고 각 수역별로 수문지질특성을 분석하였다.

전기전도도 수직검층분석은 나공 상태의 염지하수관정에서 CTD-DIVER를 이용하여 심도별로 측정된 전기전도도의 수직적인 측정값을 분석하여 연구지역 지하수의 수직적인 분포특성 분석을 실시하였다. Fig. 6은 지하지질 분포 및 전기전도도의 조사·분석용 염지하수관정의 위치이며, Table 2는 해당 염지하수관정의 제원현황을 나타낸 것이다.

Table 2. Speciation of the saline groundwater wells under study area

Basin	Well ID	E.L(m)	Drilling depth(m)	Water level(m)	Remarks
Namweon Basin	NW-1	7.0	50.0	7.0	
	NW-2(TR-1)	4.0	60.0	3.5	Observation of water level
	NW-3	5.0	60.0	4.5	
	NW-4	3.0	61.0	4.4	
Pyoseon Basin	PS-1	5.0	48.0	5.0	
	PS-2	7.0	63.0	6.1	
	PS-3	3.0	60.0	3.0	
	PS-4	4.0	69.0	2.5	
Seongsan Basin	SS-1	6.0	70.0	5.1	
	SS-2	8.0	60.0	6.2	
	SS-3	7.0	61.0	4.0	
	SS-4	2.0	50.0	2.0	
	TR-1	6.0	65.0	5.0	Observation of water level
	TR-2	3.0	47.0	2.5	
Gujwa Basin	GJ-1	2.0	55.0	2.0	
	GJ-2	6.0	59.0	5.5	
	GJ-3	4.0	45.0	2.0	
	GJ-4	5.0	53.0	5.0	
Jocheon Basin	JC-1	2.5	48.0	2.3	
	JC-2	4.0	68.0	4.0	
	JC-3	7.0	35.9	7.0	

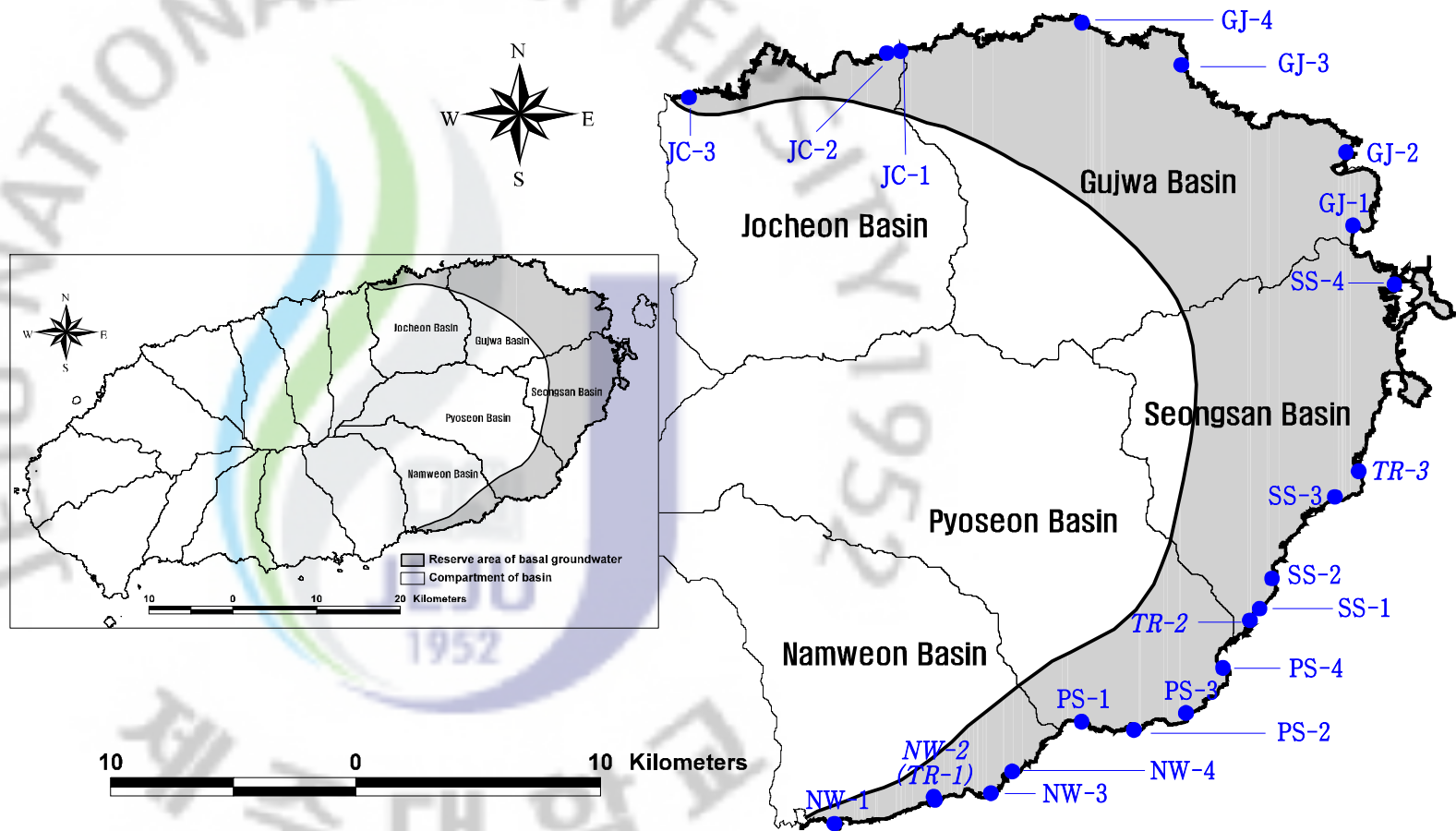


Fig. 6. Locations of saline groundwater wells for the survey and analysis under study area.

3. 조석반응 분석법(tidal response technique)

조석반응 분석법을 통한 수리인자 산정을 위해서는 오랜 기간 동안 관측된 지하수의 수위변동 자료가 필요하며, 이를 위해서는 연구지역에 분포하고 있는 염지하수관정 내에 자동수위측정기를 설치하여야 하나 현실적으로 기 개발되어 상시 이용하고 있는 관정에 대해서 장기간에 걸쳐 수위관측자료를 얻기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구 당시에 염지하수를 개발·이용하기 전 상태의 TR-1, TR-2, TR-3 등 3개소 염지하수관정에서 수위관측 자료를 이용하여 분석하였다.

또한, 조석반응 분석법을 위해서는 지하수위 자료 이외에 조수위자료가 필요하다. 현재 제주도에 설치되어 있는 검조소(tidal station)는 Fig. 7과 같이 제주, 서귀포, 성산포, 모슬포 네 지점이다. 이 중 연구지역의 수리특성을 분석하기 위해서는 서귀포, 성산포의 조수위자료가 필수적이다. 따라서 국립해양조사원에서 조석자료 제공 시스템을 통해 제공하고 있는 서귀포 및 성산포 조수위자료의 변화를 조사하였다.

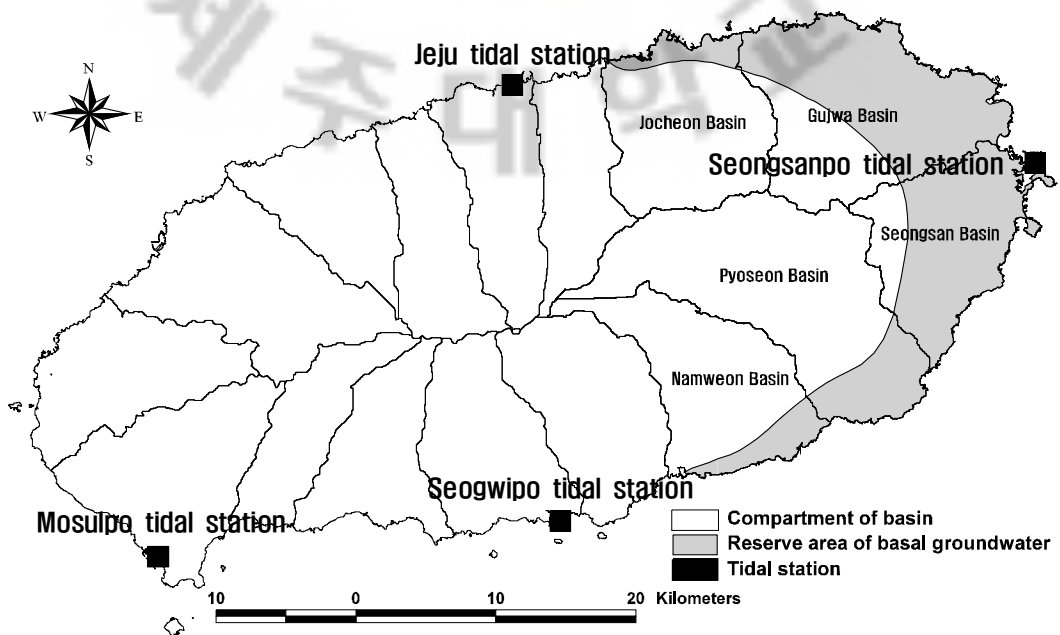


Fig. 7. Location of tidal stations in Jeju Island.

IV. 결과 및 고찰

1. 제주도 동부지역 염지하수관정의 개발·이용 특성 및 공간 분포특성

2010년까지 기 개발된 연구지역의 염지하수관정은 Fig. 8 및 Table 3과 같이 총 971공이 개발 운영되고 있다. 용도별로는 대부분 육상양식장에서 이용되는 수산업이 전체 개발 공수에 92.8%인 901공이며, 다음으로 식당, 횃집 등 어패류 보관용으로 이용되는 식품접객용 66공(6.8%), 기타 4공(0.4%)순으로 분포하고 있다. 관정 개발량면에서도 조사지역 전체 개발량의 99.7%을 차지하는 수산업용이 7,151천m³/일, 식품접객 14.9천m³/일, 기타 4천m³/일 순으로 개발되어 있음을 알 수 있다.

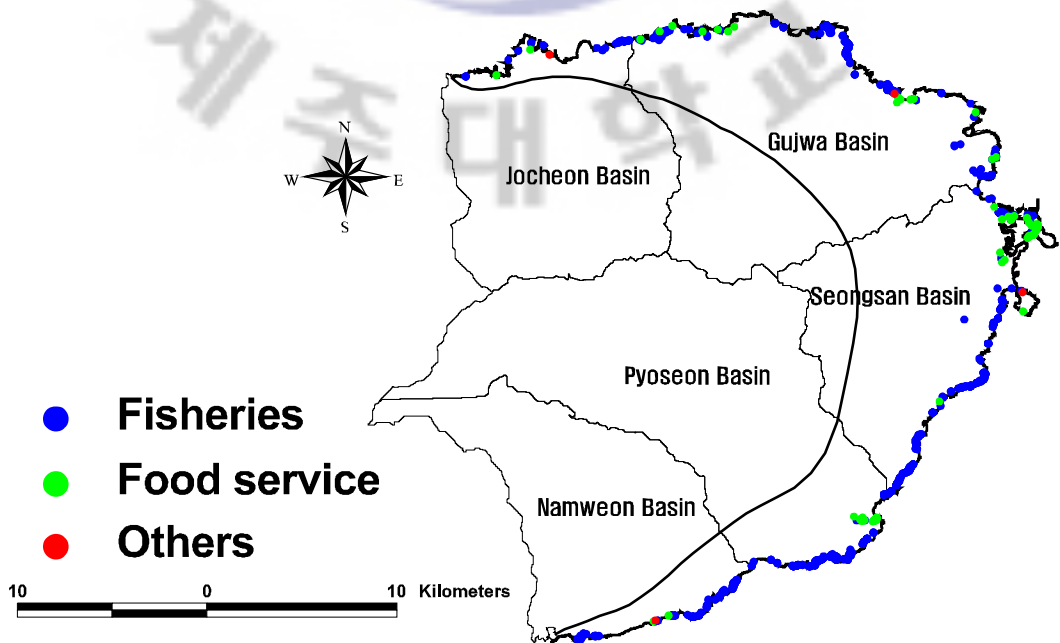


Fig 8. Present condition of distribution and utilization of saline groundwater wells in eastern area of Jeju Island.

Table 3은 제주도 동부지역에 분포하고 있는 염지하수 관정을 수역별로 구분하여 나타낸 것으로 성산수역(333공, 2,282.1 천m³/일) > 표선수역(235공, 1,803.4 천m³/일) > 구좌수역(219공, 1,636.5 천m³/일) > 남원수역(146공, 1,166.5 천m³/일) > 조천수역(38공, 281.4 천m³/일) 순으로 개발·이용되고 있는 것으로 나타났다.

Table 3을 통해 본 제주도 동부지역 염지하수관정의 개발·이용 특성은 염지하수 전체 개발공수 및 개발량은 각 971공, 7,169.9 천m³/일이고 이를 공당 개발량으로 환산하면, 7,384 m³/일으로 대체적으로 대용량으로 개발되어 있음을 알 수 있다. 제주도 수자원본부에 의하면 2010년 12말 까지 도내에 개발된 담지하수는 4,839공, 1,440 천m³/일으로 이는 본 연구지역 개발공수의 5배 수준이나, 개발량은 약 1/5배 정도로 나타나고 있어 동부지역에 분포하고 있는 염지하수의 공당 지하수 개발량이 월등히 높은 편임을 알 수 있다.

Table 3. Present condition of exploitation and utilization of saline groundwater wells in eastern area of Jeju Island

	Basin	Fisheries	Food service	Others	Total	Remarks
Namweon basin	No. of wells	143	2	1	146	Amount of attainable water per well ($\times 10^3$ m ³ /d): 8.0
	Permitted amount($\times 10^3$ m ³ /d)	1,163	0.5	3	1,166.5	
Pyoseon basin	No. of wells	218	17	-	235	Amount of attainable water per well ($\times 10^3$ m ³ /d): 7.7
	Permitted amount($\times 10^3$ m ³ /d)	1,800	3.4	-	1,803.4	
Seongsan basin	No. of wells	302	30	1	333	Amount of attainable water per well ($\times 10^3$ m ³ /d): 6.9
	Permitted amount($\times 10^3$ m ³ /d)	2,275	6.4	0.7	2,282.1	
Gujwa basin	No. of wells	203	15	1	219	Amount of attainable water per well ($\times 10^3$ m ³ /d): 7.5
	Permitted amount($\times 10^3$ m ³ /d)	1,632	4.3	0.2	1,636.5	
Jocheon basin	No. of wells	35	2	1	38	Amount of attainable water per well ($\times 10^3$ m ³ /d): 7.4
	Permitted amount($\times 10^3$ m ³ /d)	281	0.3	0.1	281.4	
Total	No. of wells	901 (92.8%)	66 (6.8%)	4 (0.4%)	971 (100%)	Amount of attainable water per well ($\times 10^3$ m ³ /d): 7.4
	Permitted amount($\times 10^3$ m ³ /d)	7,151 (99.7%)	14.9 (0.2%)	4 (0.1%)	7,169.9 (100%)	

Fig. 9은 제주도 동부지역 수역별 염지하수관정의 공간 분포특성을 살펴보기 위하여 설정 격자망(0.5 km × 0.5 km) 당 개발공수(밀도)를 나타낸 것이고 이를 정리하여 Table 4에 나타내었다. Fig. 9에서 보는바와 같이 공간분포특성은 해안선을 따라 띠를 이루고 있으며, 성산수역과 표선수역에서는 관정간 거리가 매우 짧은 특성을 보이고 있다. 특히 관정밀도가 설정 격자망(0.5km×0.5km) 내 21공 이상 밀집되어 있는 지역은 35개소이며 이 중 41~50공 이상의 고밀도 지역도 표선수역에서 2개 지역에 나타나고 있음을 알 수 있다(Table 4).

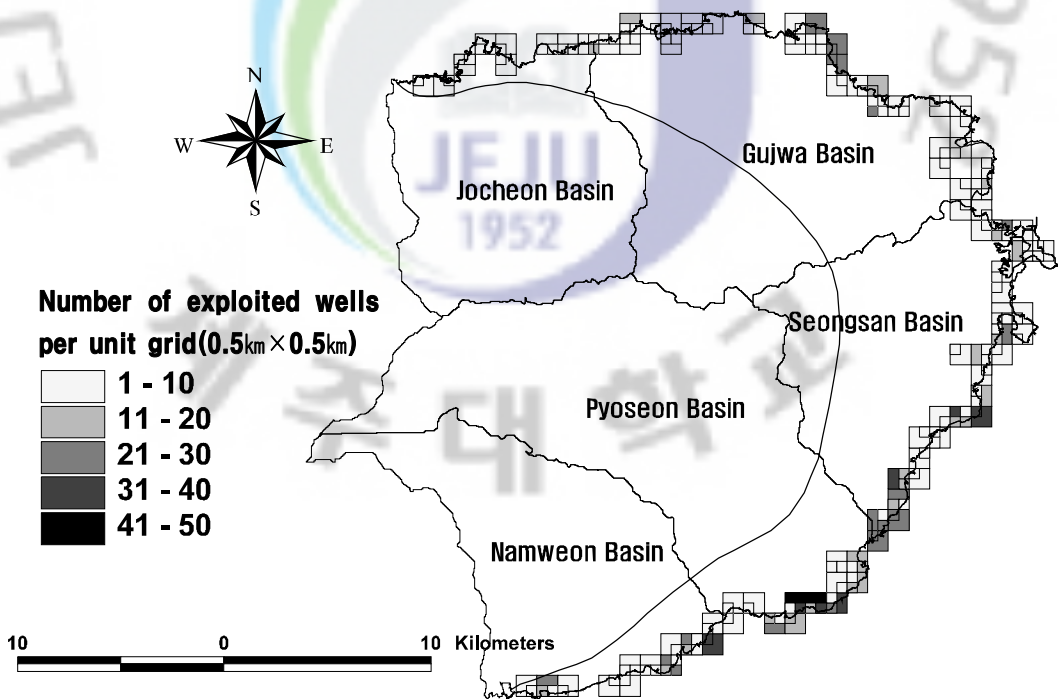


Fig. 9. Distribution map of the number of exploited saline groundwater wells per unit grid(0.5km×0.5km) with basin in the eastern area of Jeju Island.

Table 4. Number of saline groundwater wells per unit grid(0.5km×0.5km) with basin in the eastern area of Jeju Island

No. of exploited wells per unit grid(0.5km×0.5km)	Namweon Basin	Pyoseon Basin	Seongsan Basin	Gujwa Basin	Jocheon Basin
1 ~ 10	24	17	51	66	21
11 ~ 20	3	8	10	6	1
21 ~ 30	3	5	9	7	-
31 ~ 40	2	3	4	-	-
41 ~ 50	-	2	-	-	-
Total	32	35	74	79	22

제주도 동부지역에 분포하고 있는 염지하수관정은 단위격자망(0.5 km × 0.5km) 당 개발공수(밀도)가 높고 공당 취수량이 많은 특성에도 불구하고 지속적으로 염지하수를 개발·이용하고 있다. 이는 염지하수가 수리학적으로 매우 양호한 대수층 수리특성을 갖고 있음을 지시하는 것이다. 고(1997)는 동부지역 해수면 하부에 잠겨 있는 용암류의 두께가 두껍기 때문에 해수와 접촉하는 단면적이 넓어 해수압(조력)이 내륙 깊숙이까지 전파될 수 있는 여건을 지니고 있고 아울러 용암류 단위 두께가 얇고 균열 및 절리 등의 투수성 구조들이 발달해 있어서 해수가 용암류의 투수성 구간을 통해 내륙의 지층내로 유입되어 고염분의 염지하수가 부존하고 있는 것으로 해석하였다. 지하수의 산출특성은 지하수를 포함하고 있는 지하의 지질 상태와 그 구조에 의해서 결정되어지기 때문에 본 연구지역과 같이 공당 채수량이 대용량이고 관정밀도가 매우 높음에도 불구하고 지속적으로 해수유입이 용이한 수문지질 특성을 갖고 있으며, 대수층 수리특성이 좋기 때문에 지하수 채수에 따른 영향권(Zone of influence)이 작은 범위의 지역에만 국한됨을 의미하는 것이라 할 수 있다.

2. 제주도 동부지역 염지하수관정의 지표 및 지하지질 특성

동부지역 염지하수관정이 분포하고 있는 수역별 지표지질 분포는 Fig. 10 및 Table 5에 나타내었다. 전체적으로 파호이호이 용암류 144.3 km² > 아아 용암류 119.0 km² > 분석구 11.0 km² > 퇴적층 4.5 km²의 면적 순으로 파호이호이 용암류 및 아아 용암류가 주로 분포하고 있음을 알 수 있다. 수역별로는 표선, 남원수역은 아아 용암류가 우세하며, 성산~조천수역 등은 북쪽으로 갈수록 파호이호이 용암류가 발달하고 있다. 그 외 분석구와 퇴적층은 남원수역을 제외한 수역에서 나타나고 있으나, 본 연구지역 수역면적 대비 분석구와 퇴적층이 차지하는 비율은 미미한 것으로 나타났다.

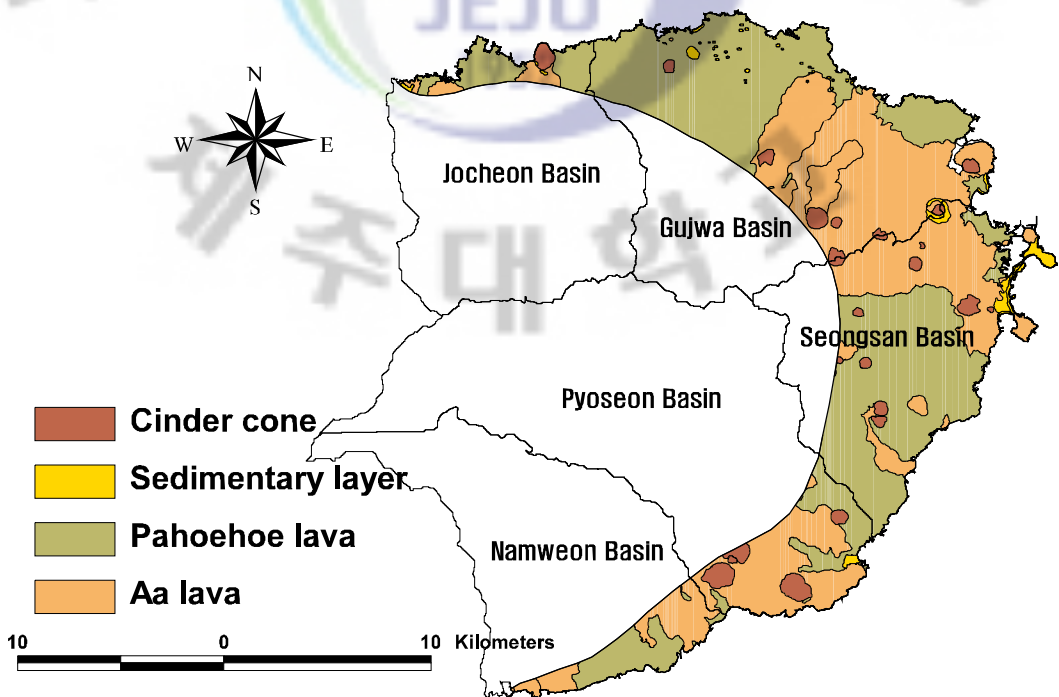


Fig. 10. Distribution of surface geology in the basal groundwater part of eastern area of Jeju Island.

Table 5. Present condition of surface geology of saline groundwater wells in the eastern area of Jeju Island(unit: km²)

Basin	Pahoehoe lava	Aa lava	Cinder cone	Sedimentary layer
Namweon basin	8.9	9.3	-	-
pyoseon basin	8.8	21.5	4.2	0.3
seongsan basin	57.0	31.4	2.9	2.7
Gujwa basin	60.3	54.2	3.0	1.3
Jocheon basin	9.3	2.6	0.9	0.2
Total	144.3	119	11	4.5

본 연구지역의 지하지질 분포특성을 살펴보기 위하여 Fig. 11과 같이 수역별로 3~4개소의 관정을 선정하였고, 각 관정에 대한 종 단면도를 작성하여 Fig. 12~16에 도시하였다. 또한, 주 대수층구간으로 여겨지는 스크린 설치구간을 별도 구분하여 해당구간의 지하지질특성을 파악하여 Table 6에 나타내었다.

Fig. 12~16 및 Table 6에서 보는 바와 같이 본 연구지역의 지하지질은 아아 용암류가 대부분을 차지하며, 해수면에 인접하거나 지하수 공 중간부에는 일부 파호이호 이 용암류가 분포하고 있음을 알 수 있었다. 주 대수층 구간의 지질특성은 대체적으로 용암류에서 파생된 사력층~자갈층으로 구성되어있고 일부, 시기를 달리하는 용암류의 경계면과 냉각절리 및 파쇄구간도 포함되어있다.

Table 6. Distribution characteristics of underground geology of saline groundwater wells with the basin in the eastern of Jeju Island.

Basin	Well ID	Main underground geology	Main aquifer(Screen interval)	
			interval(E.L. m)	Geology
Namweon basin	NW-1	Pahoehoe-Aa lava	(-)26~(-)34	boundary face of lava, Sandy gravel layer~gravel layer
	NW-2	Aa lava	(-)38~(-)44	Sandy gravel layer~gravel layer
	NW-3	Aa lava	(-)35~(-)55	Sandy gravel layer~gravel layer
	NW-4	Aa lava	(-)47~(-)57	Sandy gravel layer~gravel layer
Pyoseon basin	PS-1	Aa lava	(-)41~(-)43	Sandy gravel layer~gravel layer
	PS-2	Aa lava	(-)50~(-)56	boundary face of lava, Sandy gravel layer~gravel layer
	PS-3	Aa lava	(-)51~(-)57	boundary face of lava, Sandy gravel layer~gravel layer
	PS-4	Aa lava	(-)61~(-)64	Sandy gravel layer~gravel layer
seongsan basin	SS-1	Aa lava	(-)56~(-)59	Sandy gravel layer~gravel layer
	SS-2	Aa lava	(-)27~(-)52	boundary face of lava, Sandy gravel layer~gravel layer
	SS-4	Aa lava	(-)45~(-)48	cooling joint and crushing of Aa laval
Gujwa basin	GJ-1	Aa lava	(-)50~(-)53	Sandy gravel layer~gravel layer
	GJ-2	Aa lava	(-)47~(-)53	cooling joint and crushing of Aa laval
	GJ-3	Aa lava	(-)35~(-)41	Sandy gravel layer~gravel layer
	GJ-4	Aa lava	(-)39~(-)48	boundary face of lava, Sandy gravel layer~gravel layer
Jocheon basin	JC-1	Aa lava	(-)40~(-)46	Sandy gravel layer~gravel layer
	JC-2	Aa lava	(-)50~(-)56	Sandy gravel layer~gravel layer
	JC-3	Aa lava	(-)23~(-)29	Sandy gravel layer~gravel layer

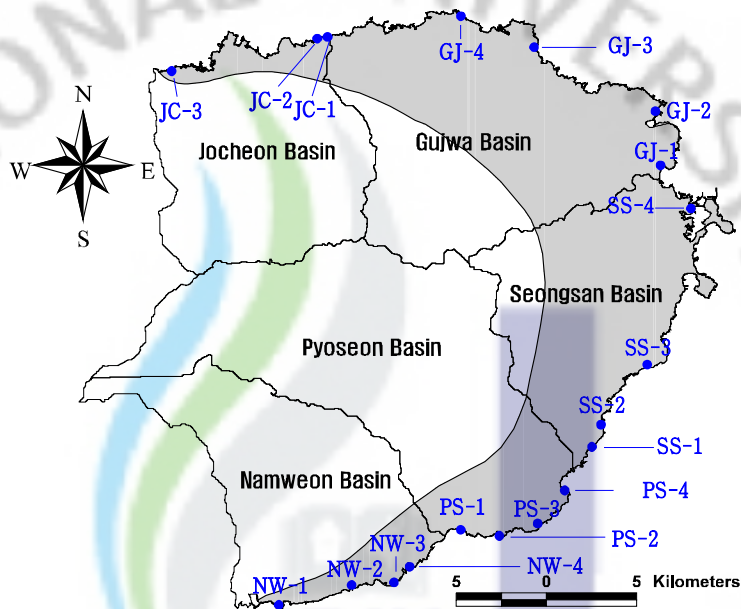


Fig. 11. Location map of saline groundwater wells for the study of underground geology.

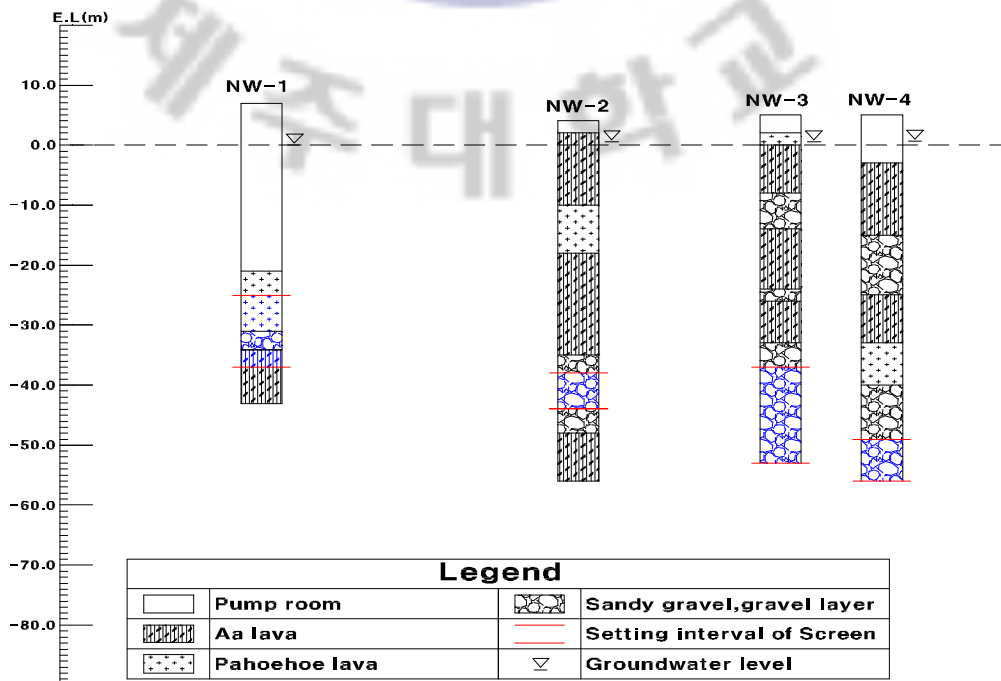


Fig. 12. Cross section of underground geology in Namweon basin.

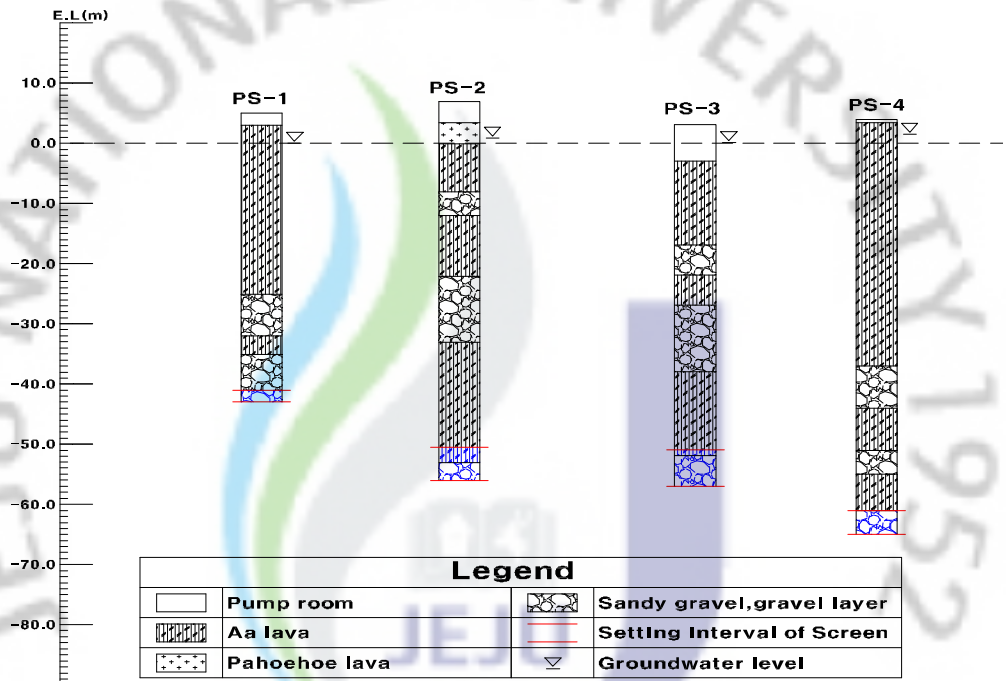


Fig. 13. Cross section of underground geology in Pyoseon basin.

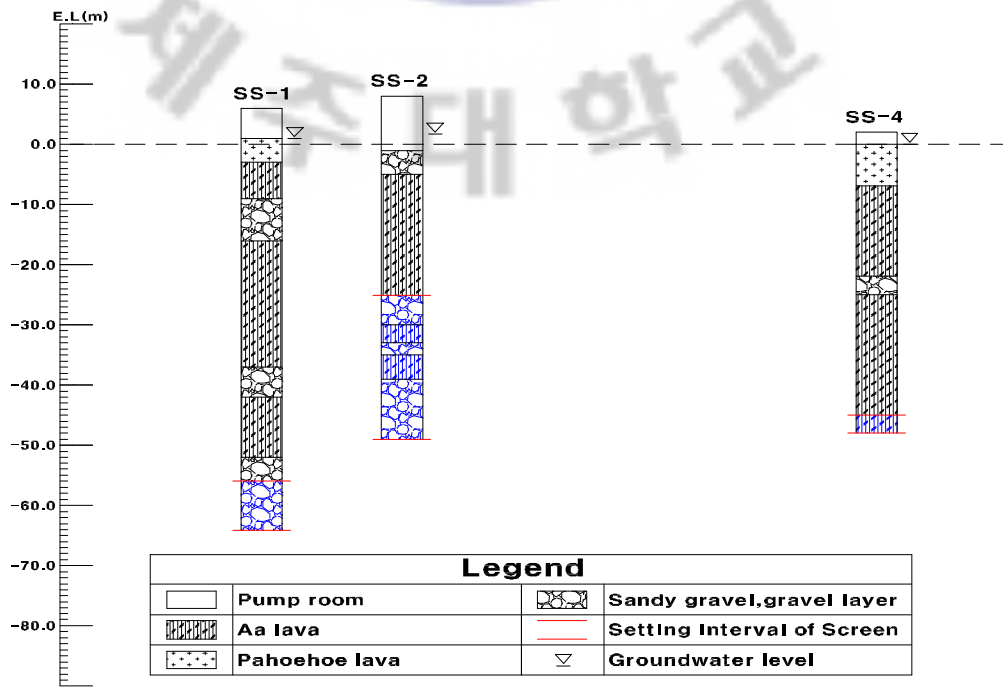


Fig. 14. Cross section of underground geology in Seongsan basin..

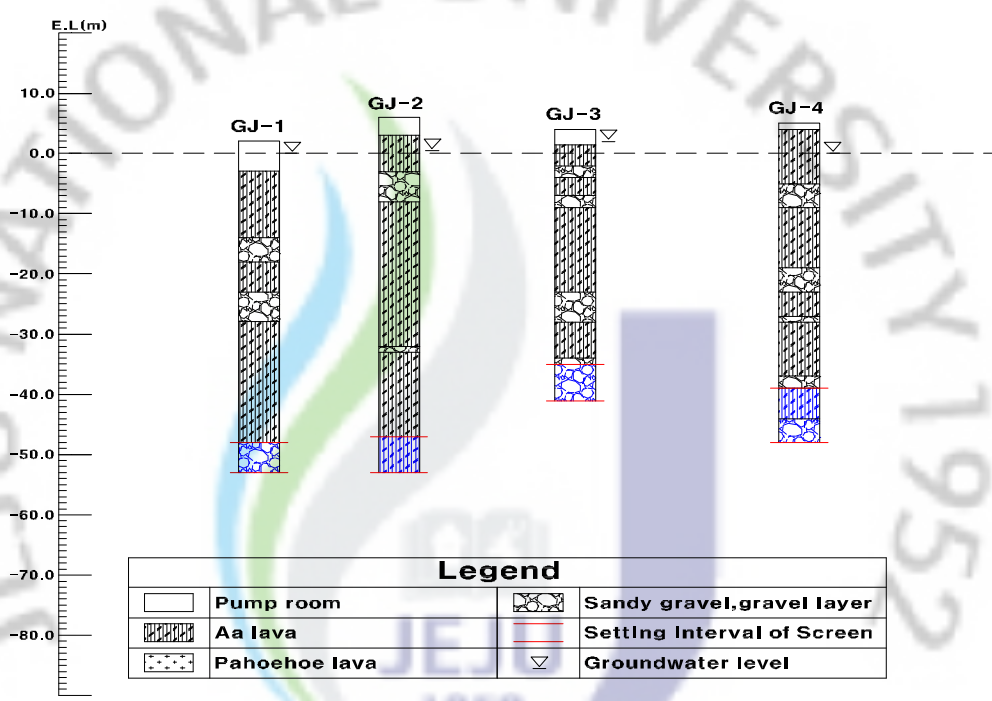


Fig. 15. Cross section of underground geology in Gujwa basin..

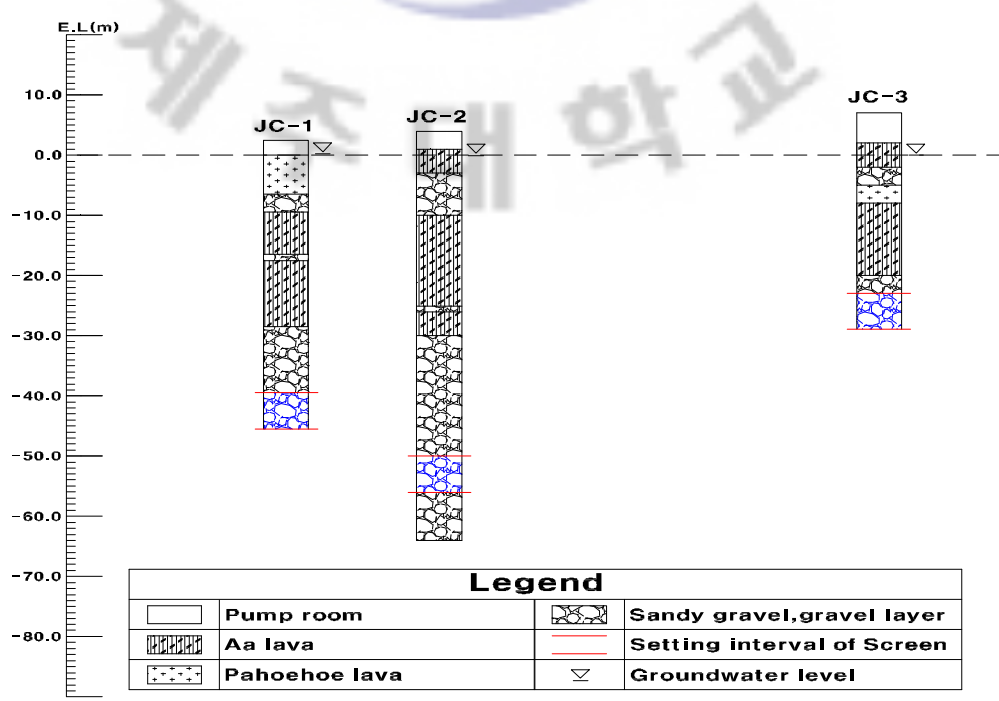


Fig. 16. Cross section of underground geology Jocheon basin.

본 염지하수관정의 지하지질에 분포하고 있는 주요 투수성 지층 중 염지하수 부존을 용이하게 하고 투수성이 양호한 유리쇄설성 각력(hyaloclastite breccia)은 Fig. 17와 같이 전 구역에서 관찰되고 있다. 출현심도는 남원구역의 NW-3에서는 E.L(-)37.0~(-)53.0m, NW-4에서는 E.L(-)49.0~(-)53.0m, 표선구역의 PS-1에서는 E.L(-)41.0~(-)43.0m, 성산구역의 SS-2에서는 E.L(-)43.0~(-)47.0m, 구좌구역의 GJ-3에서는 E.L(-)34.0~(-)41.0m, 조천구역의 JC-2에서는 E.L(-)39.0~(-)54.0m에서 분포하며, 크기는 남원구역~성산구역까지는 자갈 크기이며, 구좌~조천구역까지는 암괴상으로 회수되었다. 본 각력의 표면에는 황색을 띠는 팔라고나이트가 코팅되어 있다.

본 연구지역의 지하지질분석을 통해 본 수문지질학적인 의미는 지하수를 저류시킬 수 있는 공극이나 틈이 차지하는 비율이 높고, 유리쇄설성 각력암과 용암류의 경계 및 절리대는 고염분 지하수의 부존을 용이하게 해주는 투수성 지층의 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

고 등(2005)은 파쇄된 베개용암 각력과 유리쇄설성 각력(hyaloclastite breccia)은 동부지역의 관측망 시추 과정 중에 관찰할 수 있는데, 파쇄된 암괴의 표면에는 급냉에 의해 생겨난 두께 1 cm 이하의 유리질이 발달하고 있으며, 크기는 대체로 10~15 cm 정도이다. 유리질 표면에는 황색을 띠는데, 이는 검은색을 띠는 유리질이 수분을 흡수하여 부피가 커지면서 만들어진 팔라고나이트이다. 일반적으로 용암이 급격한 온도 변화에 의해 냉각되는 경우에는 용암 속에 녹아있는 혼합물들이 광물로서 배열될 시간을 얻지 못하기 때문에 어둡고 불투명한 유리질이 형성되게 된다. 용암이 바닷물에 닿으면 급냉현상이 일어나 새까만 유리질 파편(glassy fragments)이 형성된다. 박 등(2002)은 이 베개용암(Pillow Lava)층을 통해 고염분지하수가 내륙쪽으로 확산되는 것으로 해석하였다.

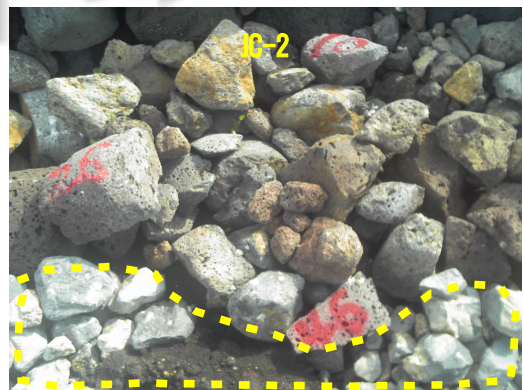
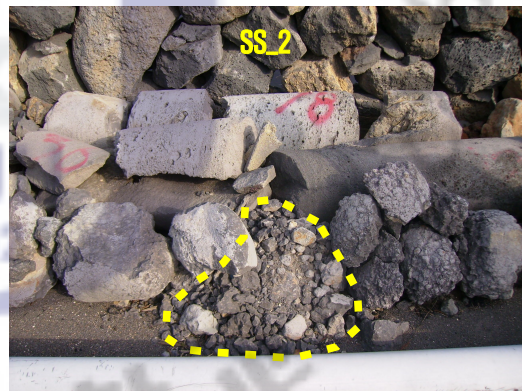
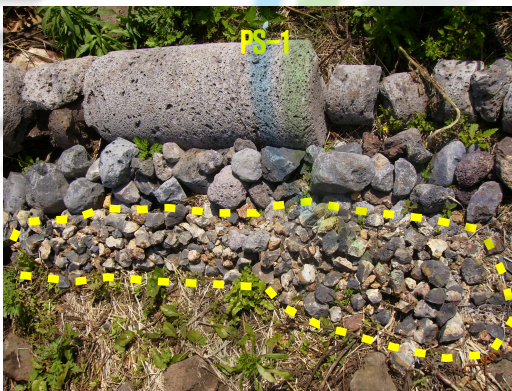


Fig. 17. The hyaloclastite breccia(dotted circle) observed in saline groundwater wells of the eastern area of Jeju Island.

3. 제주도 동부지역 염지하수관정의 전기전도도 수직분포 및 지하수 부존특성

1) 전기전도도 수직분포 특성

지하수 내에서의 전기전도도 값은 용해되어있는 고형물의 성분 및 함량에 따라 그 값이 달라진다. 그러므로 화학적으로 순수한 물은 전기전도도가 매우 낮은 물이며 많은 고형물의 혼합으로 이온이 많이 존재하면 그 값은 높아진다. 빗물의 전기전도도 값은 매우 낮으며, 오염된 지하수나 해수가 침투된 지하수의 전기전도도 값은 대단히 높다.

제주도(2002)에서는 동부지역 영구 관측정을 대상으로 2001년 11월부터 2002년 10월까지 총 12회에 걸친 수직적인 전기전도도의 변화를 조사한 결과, 동부지역 지하수체를 크게 Table 7과 같이 담수지하수체, 저염지하수체, 염수지하수체의 3가지 유형의 지하수로 수직적인 구분을 하였다.

Table. 7. Criteria of TDS and electrical conductivity(EC) applied to the classification of groundwater(Jeju-Do, 2002)

Classification of groundwater	TDS(mg/L)	Electrical Conductivity(EC, $\mu\text{S}/\text{cm}$)
Fresh groundwater	0~1,000	below 1,700
Low saline groundwater	1,000~10,000	1,700~17,350
Saline groundwater	above 10,000	above 17,350

본 연구지역에 분포하고 있는 염지하수관정의 심도별 전기전도도(EC) 검층결과를 Fig. 18~22에 나타내었고, 이를 제주도(2002)의 전기전도도(EC)의 분류기준에 따라 검토하였다.

Fig. 18~22에서 알 수 있는 바와 같이 남원수역을 제외한, 표선수역~조천수역에 이루는 지역의 전기전도도 수직분포 특성은 지하수위 형성부에서 1차 변곡점까지는 층후를 달리할 뿐 저염지하수 형태를 띠다가 1차 변곡점 이후에는 짧은 심도에서 2차 변곡점까지 급하게 EC값이 상승하며 염수지하수에 이루며 그 이하부에서 공저까

지는 17,350~50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 고염분의 염지하수가 분포하고 있음을 알 수 있다. 이들 수역에서는 1,700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하의 담수 지하수체는 확인되지 않고 있고, 저염지하수체와 염수지하수체만이 부존되어 있다. 윤 등(2003)은 동부지역 전기전도도의 변곡점이 여러 군데에서 나타나고 있는 것은 여러 대수층에서 유입된 각기 다른 지하수체에 의해 형성된 것으로 지하수의 유입은 주로 특정 대수층에서 이루어지며, 이들 대수층은 각기 다른 성분의 지하수체를 포장하고 있는 것으로 해석하였다.

표선수역~조천수역에 분포하고 있는 저염지하수는 담수지하수와 염수지하수의 혼합에 의해 형성되는 “점이대” 또는 “혼합대”로서 계절적으로 보면 지하수 함양량이 많은 여름철 동안은 다소 두터운 반면, 강우량이 적은 겨울철동안에는 얇아지는 특성을 보인다. 또한 해수압의 전달 정도와 해안으로의 담수지하수 유출량에 따라서도 혼합대의 두께는 차이를 나타낼 수 있다(고 등, 2003). 본 연구지역의 저염지하수 층후가 관측 관정별로 차이를 보이는 것은 수직검층시기가 동일한 시기에 검층이 이루어지지 않아 앞서 전술한 바와 같이 계절적인 특성을 반영하는 것으로 사료된다. 염수지하수체는 총용존고용물(TDS)이 10,000 mg/L 이상 함유한 지하수체를 말하며(Robinove 등, 1958), 이를 전기전도도로 나타내면 17,350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상인 지하수체를 말한다(Jeju-Do, 2002). 이 염수지하수체는 본 연구에서 청하는 염지하수와 동일하며, 해수와 거의 같은 염분함량을 나타내는 지하수로서, 본 연구지역의 분포깊이는 2차 변곡점 이후부터 공저까지 분포하고 있다.

남원수역 중 NW-1관정은 층후를 달리할 뿐 다른 수역과 동일형태의 수직분포특성을 보이고 있다. 다만, NW-2, NW-3, NW-4는 다른 수역과 달리 NW-2는 지표 하 52.2~60.0m의 공저에, NW-3, NW-4는 각각 지표하 26.0~48.0m, 25.0~45.0m 구간의 지하수 공 중간부에서 전기전도도가 감소하는 현상이 나타났으며, 전기전도도 측정값으로 보면 담수지하수체와 염수지하수체의 혼합대 구간의 특성을 보이는 저염지하수체에 해당된다. 이는 해당지역 지하수 공 중간부와 하단부에는 상부 담수대수층과 다른 제 2의 담수흐름이 매우 크게 작용하고 있는 것으로 판단된다. 황 등(2006)은 제주 동부지역 일부 시추공에서 취득한 전기전도도 검층 자료 중에서 고염분 지하수체 하부에서 전기전도도가 감소하는 현상을 보고한 바 있는데, 이는 고염분 지하수체 하부에 또 다른 대수층이 존재함을 의미하고 있으며, 이들 대수층이 상당히 넓은 지역에 하부 대수층이 존재하는 것으로 판단하였다.

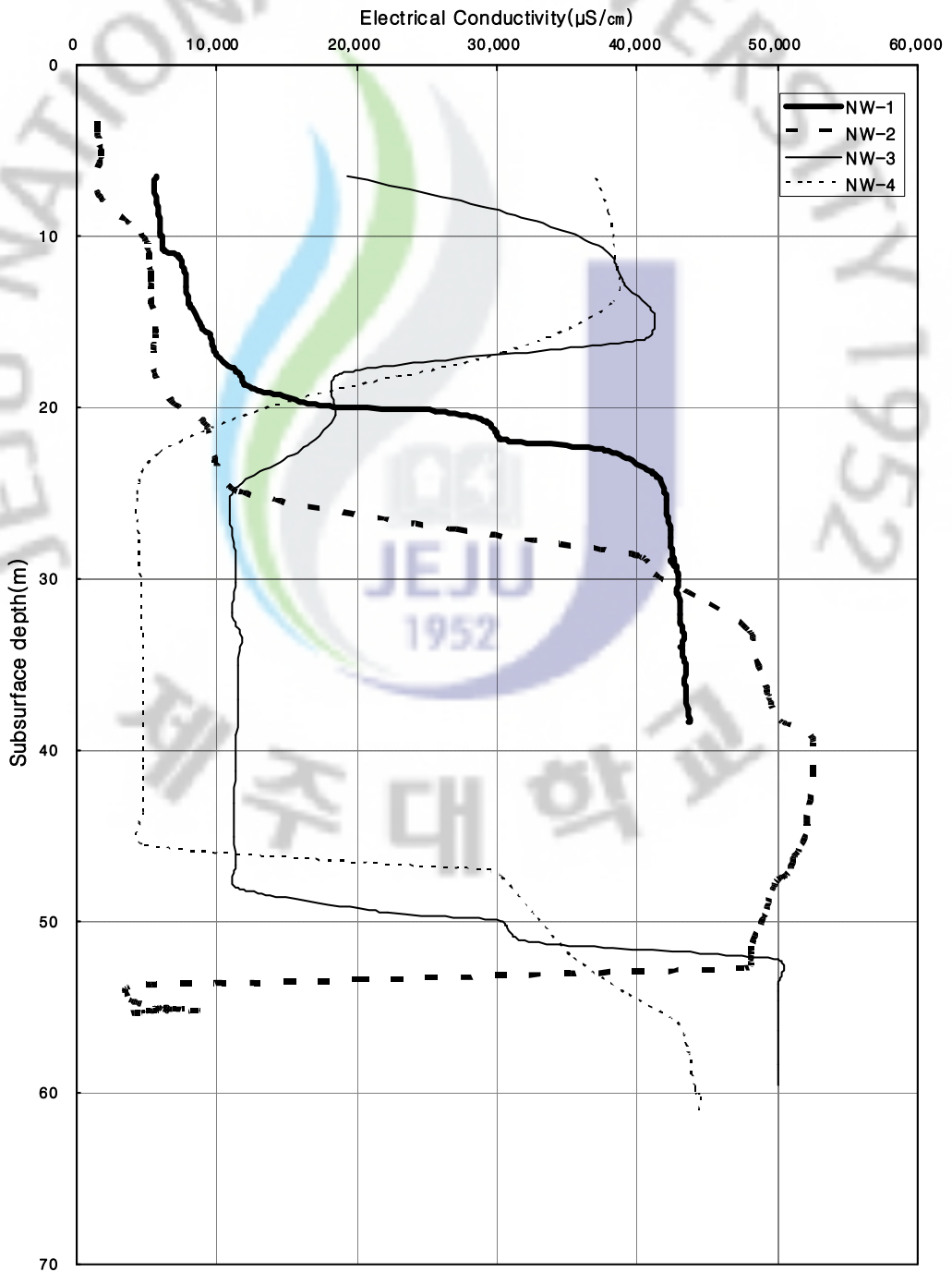


Fig. 18. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Namweon basin.

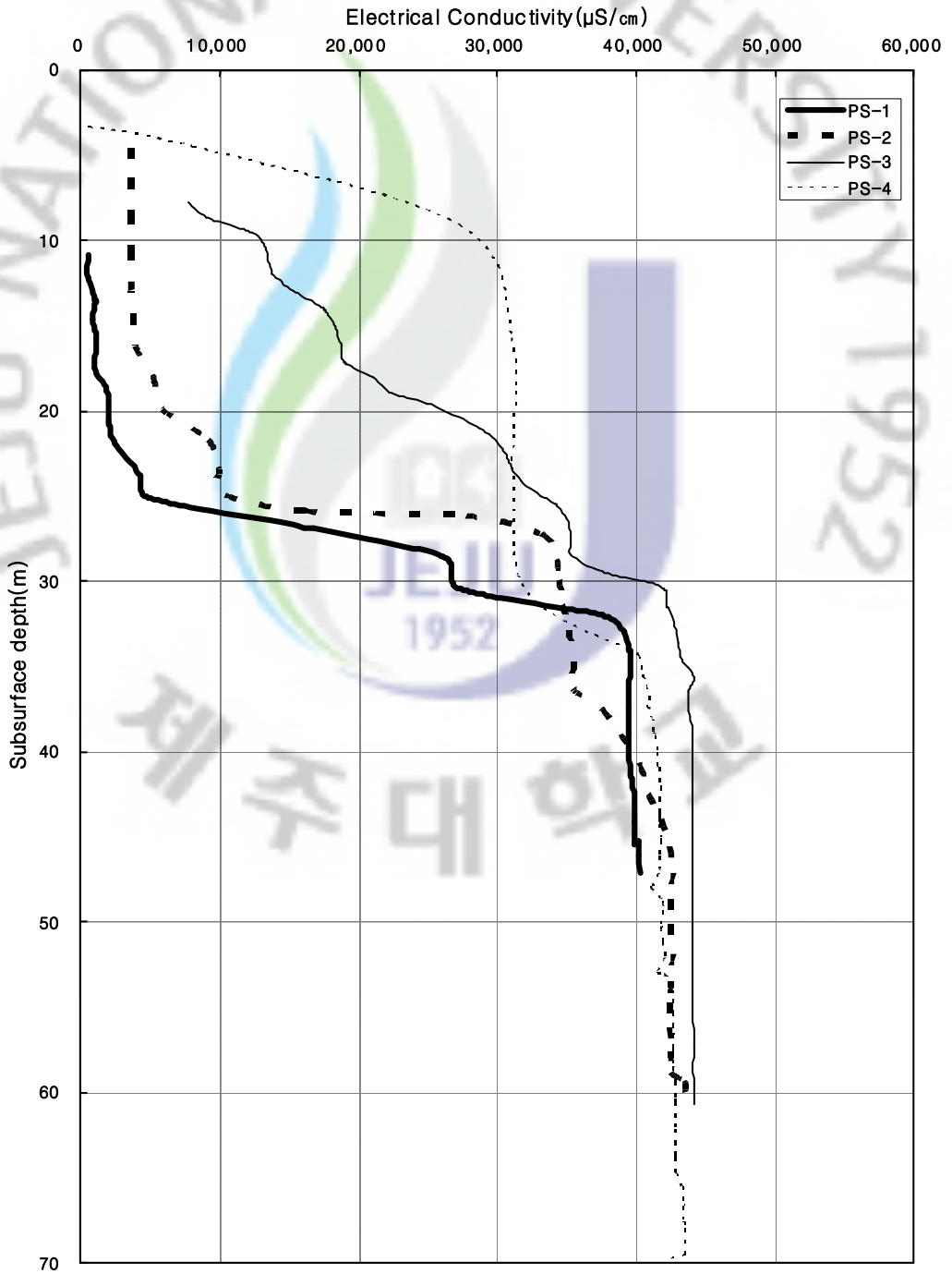


Fig. 19. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Pyoseon basin.

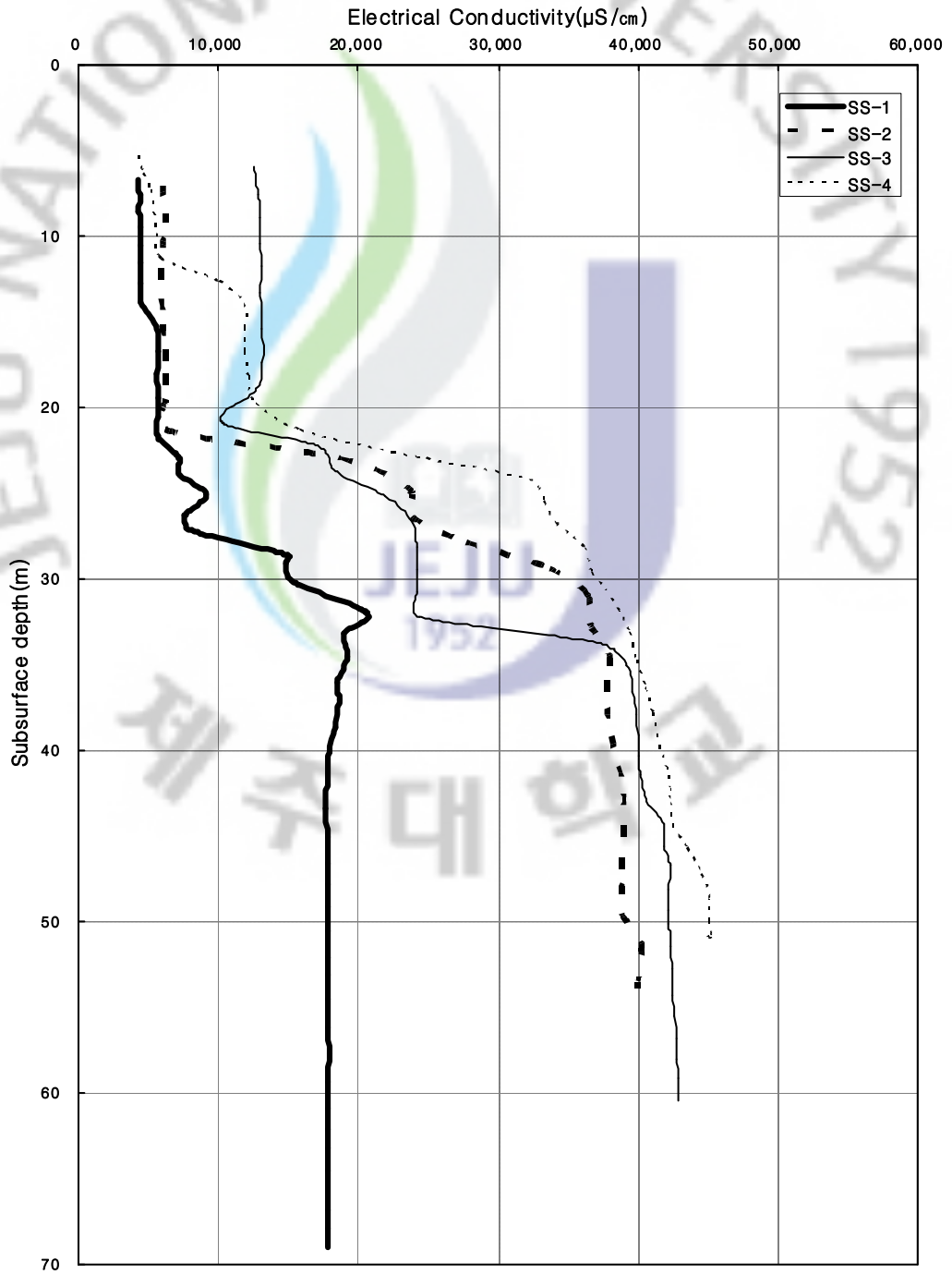


Fig. 20. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Seongsan basin.

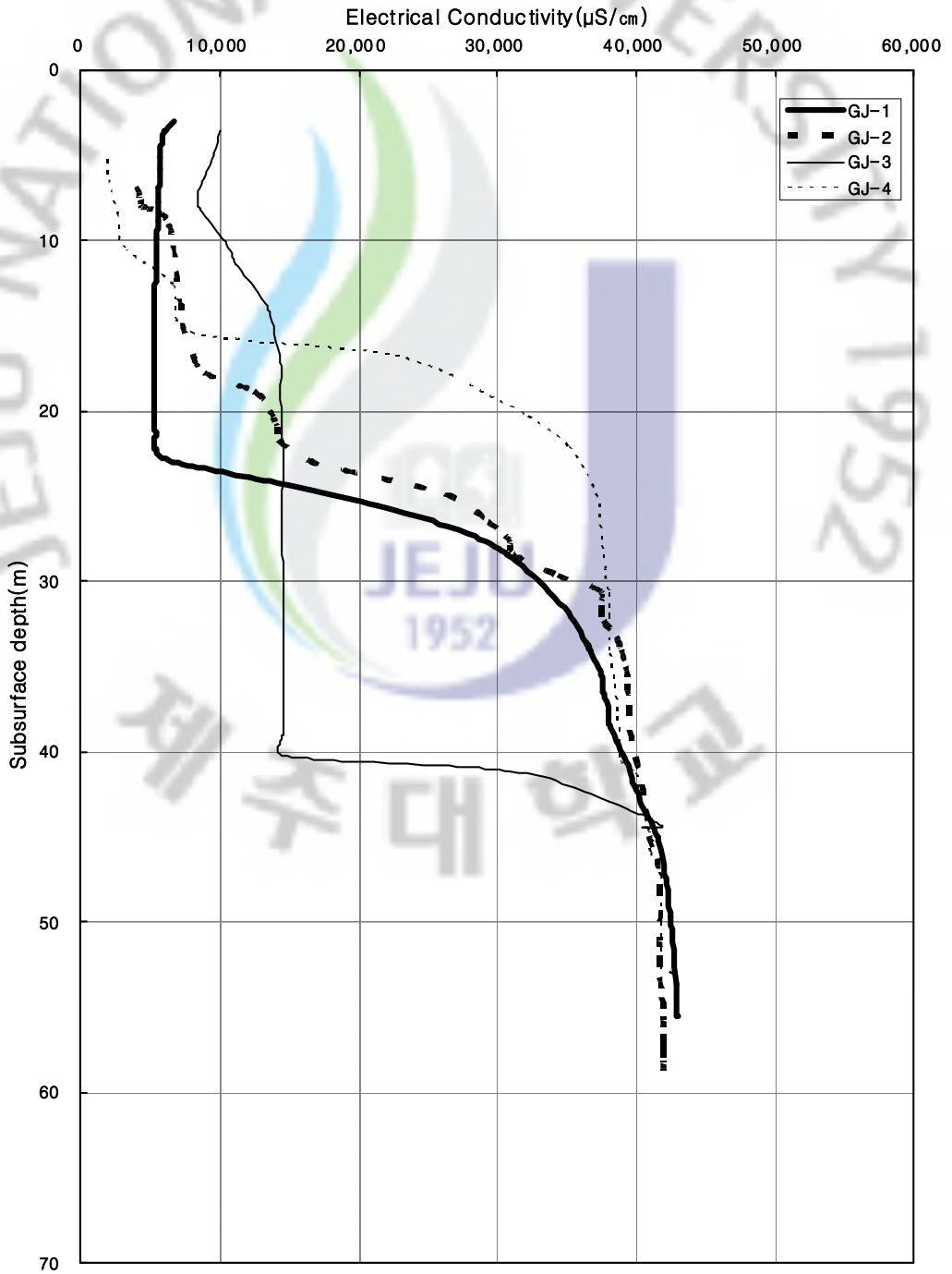


Fig. 21. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Gujwa basin.

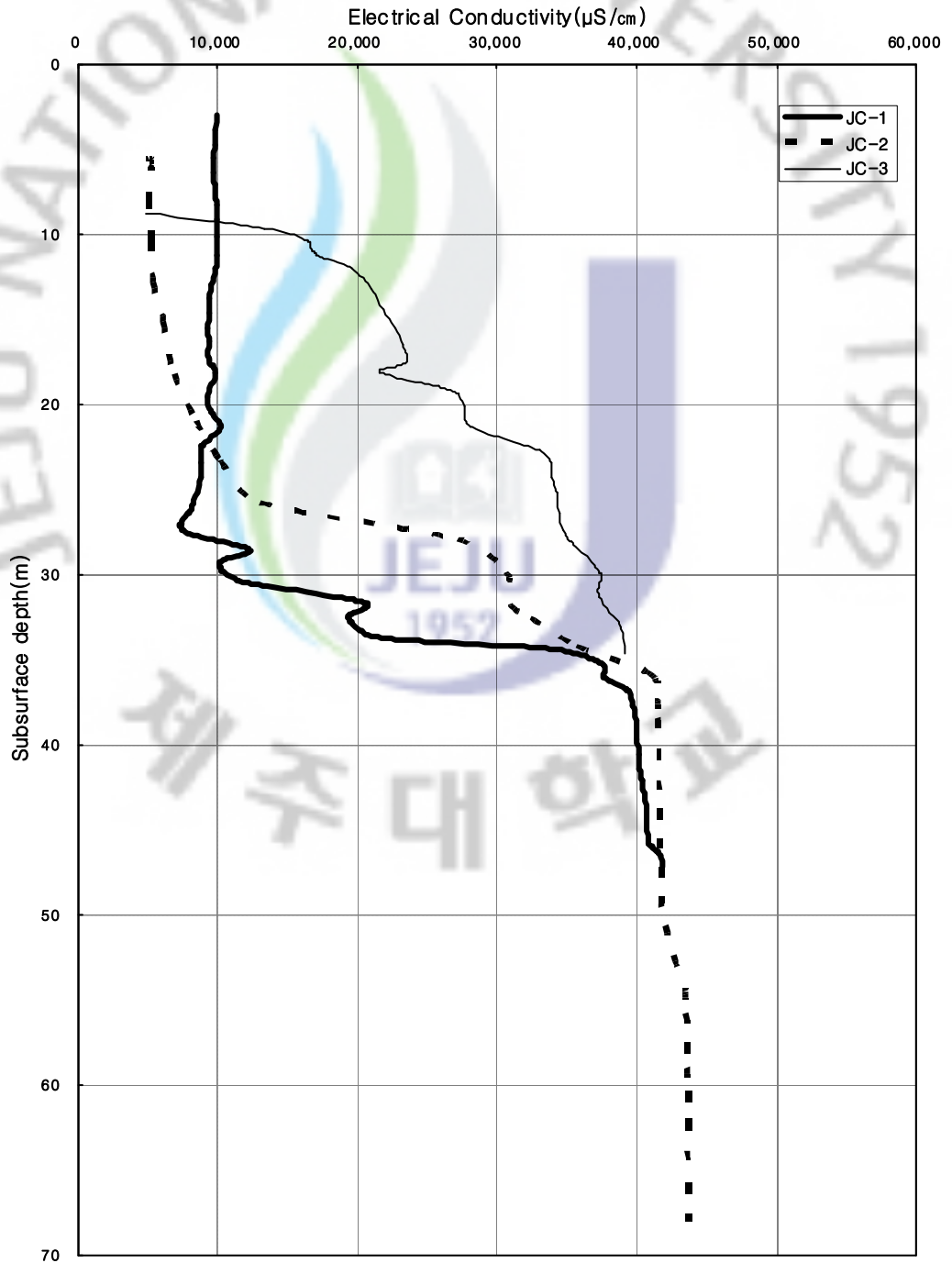


Fig. 22. Variations of electrical conductivity with the subsurface depth in saline groundwater wells of Jocheon basin.

2) 수역별 지하수 부존특성

지하지질과 전기전도도 수직분포를 종합한 수역별 지하수 부존특성을 Fig. 23~27에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 남원수역은 대체적으로 저염지하수-염수지하수로 구분되며, 동쪽으로 갈수록 저염분지하수가 확대되어가고 있다. 특이한 점은 NW-2에서는 공저구간에 담수유입에 따른 저염분지하수가 부존되어있고, NW-3, NW-4는 상부구간에 염수지하수체가 부존되어 있는 점이다. 이는 해수압이 내륙으로 들어올 수 있는 지하지질 공간이 NW-2의 공저 구간은 미약하고 NW-3, NW-4의 상부구간은 자갈과 용암류경계면으로 구성되어 있어 해수유입이 비교적 용이한 지층으로 구성되어 있는 점과 담수 유입이 계절별로 다른 점에 기인하는 것으로 여겨진다.

그 외 수역 중 표선수역의 지하수 부존특성은 동쪽으로 갈수록 염수지하수가 확대되고 있고, 성산수역은 북쪽으로 갈수록 저염지하수가 미약하게나마 확장되며, 구좌수역은 파형형태의 저염지하수-염수지하수형태를 보이며, 조천수역은 서쪽으로 갈수록 염수지하수체가 확장됨을 알 수 있다. 수역별 부존특성은 대체적으로 층후를 달리 할 뿐 저염지하수-염수지하수 순으로 부존되어 있다.

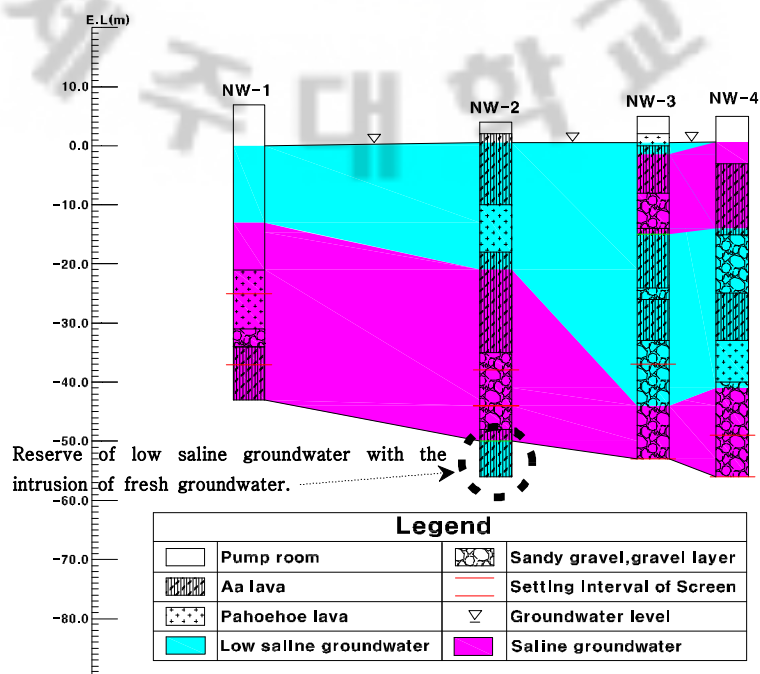


Fig. 23. Characteristics of groundwater reserve in Namweon basin.

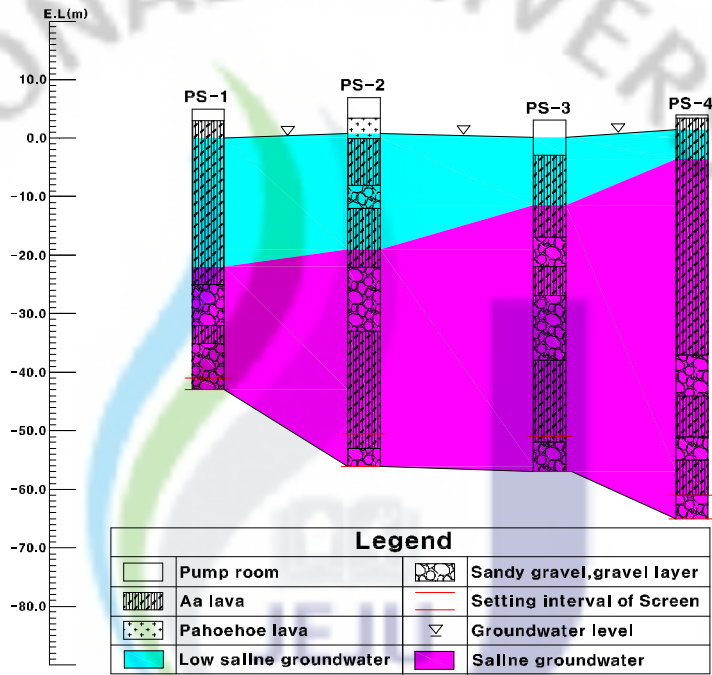


Fig. 24. Characteristics of groundwater reserve in Pyoseon basin.

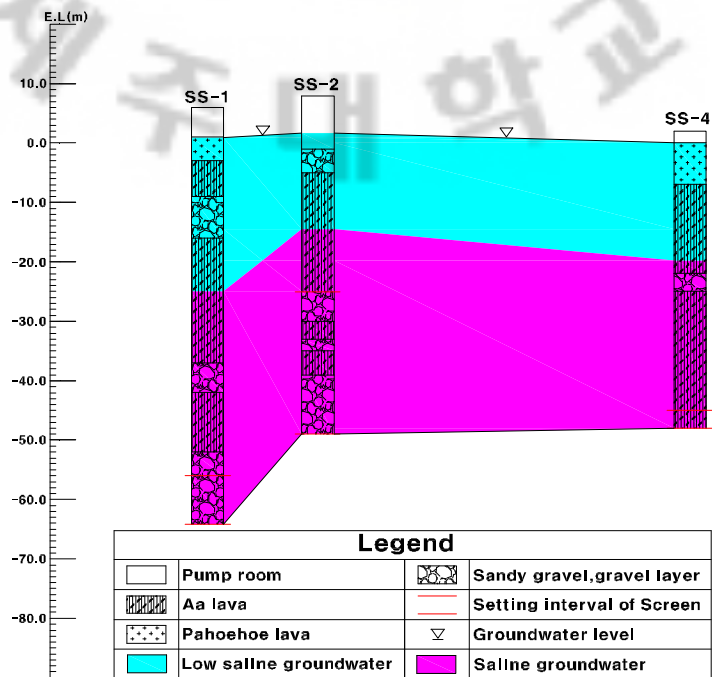


Fig. 25. Characteristics of groundwater reserve in Seongsan basin.

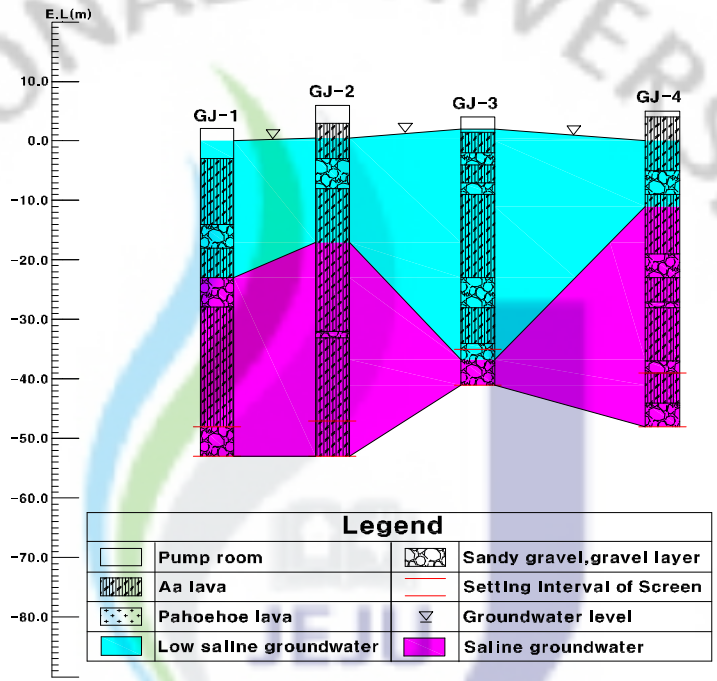


Fig. 26. Characteristics of groundwater reserve in Gujwa basin.

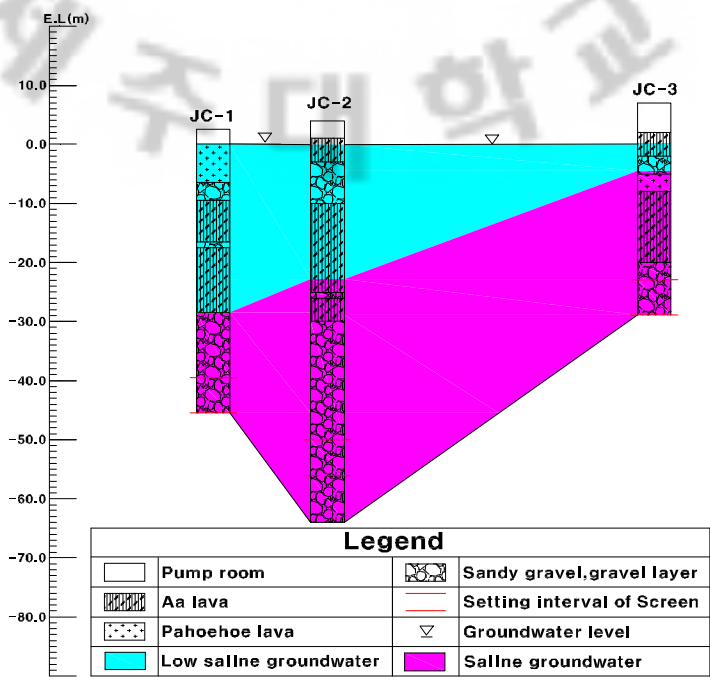


Fig. 27. Characteristics of groundwater reserve in Jocheon basin.

4. 제주도 동부지역 염지하수관정의 수리인자 특성

지하수자원의 개발 및 관리를 위해서는 함양과 배출 시스템을 고려한 복잡한 문제를 해결해야 하며, 모델링은 지하수 시스템을 관리하는데 매우 중요한 역할을 한다. 대수층의 수리적 특성을 결정하는 투수률계수, 저류계수, 수리전도도, 비산출량, 누수계수 등의 수리인자는 지하수 모델링시 필수적이다. 이러한 대수층의 수리인자를 산정하는 전통적인 방법으로는 양수시험, 순간충격시험 등의 수리시험이 있다. 현장에서의 양수시험은 대수층의 시험범위에 대한 평균 수리인자를 산정하기 위해서는 충분한 수위강하를 위해 대용량의 펌프를 사용해야 하는데 어려움이 있으며, 양수한 물을 처리해야 하는 점, 양수시험 비용 등 고려해야 할 사항이 많다. 특히, 해안 대수층에서는 수리인자 산정을 위한 양수시험이 추천되고 있지 않다(Millham과 Howes, 1995). 또한, 염지하수가 분포하고 있는 동부 해안지역의 광범위한 지역에서는 해양조석의 영향까지 받고 있어 양수시험은 물론 비양수량자료를 이용한 대수층의 수리특성 평가조차도 어려운 실정이다.

해안 대수층에서는 지하수위가 조석의 영향을 받는 특성을 이용하여 조석반응 분석법(tidal response technique)을 통해 대수층의 수리인자를 산정할 수 있고(Jha 등, 2003), 이 방법을 이용하면 대수층의 넓은 면적에 대한 수평수리전도도를 구할 수 있다(김 등, 2005).

조석반응법은 해양조석과 지하수위 조석변동 특성을 이용하여 대수층의 수리확산계수(hydraulic diffusivity)를 추정하는 방법으로 원래 1차원 부정류의 유동을 보이는 피압대수층에 적용되었으나(Ferris, 1951), Moss(1990)와 Erskine(1991)은 조석 변동 폭에 비해 대수층의 두께가 매우 큰 자유면 대수층에도 적용할 수 있음을 지적한 바 있다.

조석반응 분석법을 위해서는 관정의 지하수위 자료 이외에 조위 자료가 필요하다. 현재 제주도에 설치되어 있는 검조소 중 본 연구에 필요한 서귀포와 성산포의 조위 자료를 비교 검토한 결과, Fig. 28~29에서 보여 지는 바와 같이 서귀포 지역이 성산포 지역에 비해 조차가 크게 나타나고 있으나, 두 지점간의 지연시간을 계산한 결과 조석 지연시간은 거의 없음을 알 수 있다.

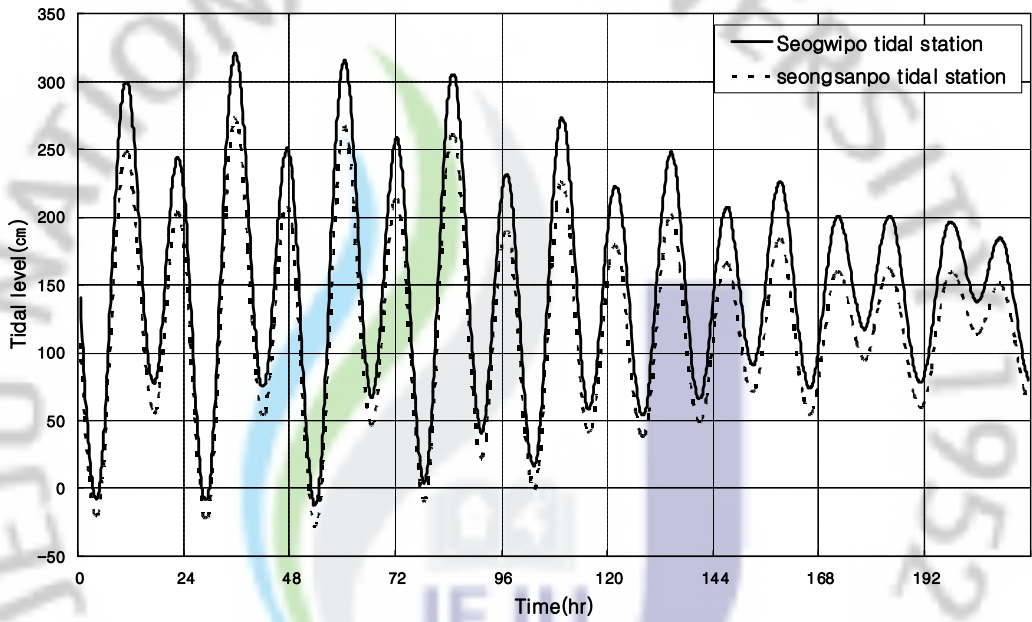


Fig. 28. Variations of long-time tidal level Seogwipo-Seongsanpo tidal stations.

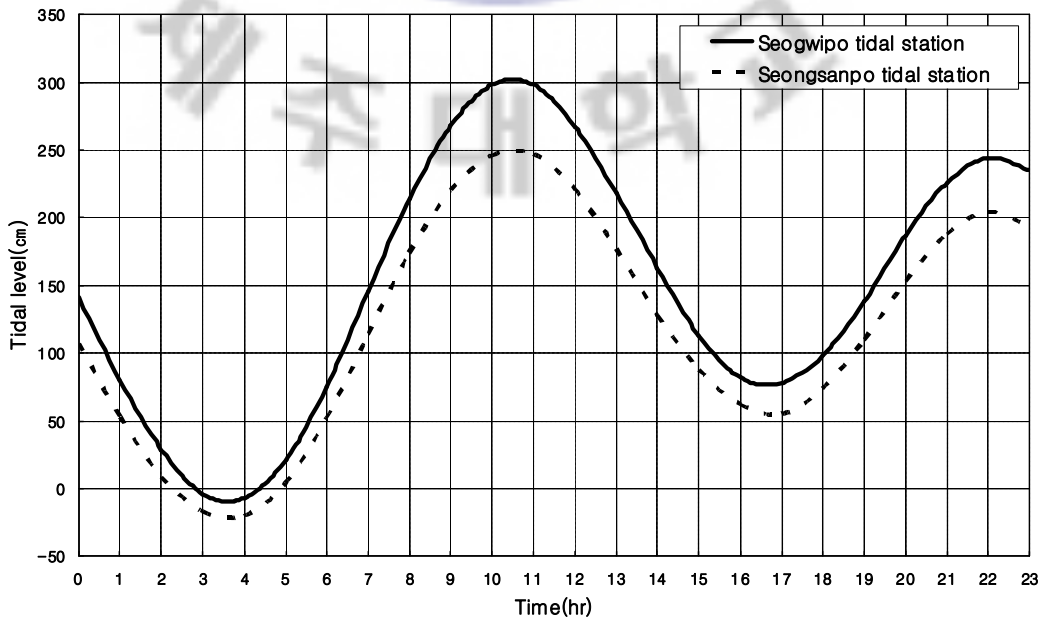


Fig. 29. Variations of tidal level during 24hr at Seogwipo-Seongsanpo tidal stations.

본 연구에서는 앞서의 조위검조소와 제주도 동부지역 염지하수관정 중 TR-1, TR-2, TR-3의 지하수위 변동 측정 자료를 이용하여 수리인자를 산정해 보았다.

본 연구 염지하수관정인 TR-1, TR-2, TR-3의 지하수위 변동자료와 검조소의 조석자료는 Fig. 30~32에 나타내었고, 이를 교차상관분석을 실시한 결과 Fig. 33에서와 같이 TR-1, TR-2, TR-3의 지연시간은 각각 18분, 36분, 30분으로 나타났다.

TR-1, TR-2, TR-3의 지연시간과 해안과의 거리 등을 식(23), 식(24)를 이용하여 수리확산계수(T/S)를 계산하면, 수리확산계수(T/S)는 $2.33 \times 10^7 \sim 4.56 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 의 범위를 보임을 알 수 있고(Table 8) 이는 이 등(2006)이 보고한 동부지역의 수리확산계수(T/S)인 $2.5 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1} \sim 7.5 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 와 유사함을 알 수 있다.

조석반응 분석법을 이용한 수리확산계수인 T/S로부터 주요한 수리인자인 투수량계수(T)를 구하기 위해서는 일반적으로 양수시험을 통해 저류계수(S)를 구해야하나 앞서 언급한 바와 같이 현실적인 어려움과 많은 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 직접적인 양수시험 대신 기존에 연구된 대수층 유형별 저류계수 값을 인용하여 투수량계수(T)를 산정하였다. 일반적으로 자유면대수층의 저류계수는 0.01~0.3(Freeze and Cherry, 1979) 내외의 값을, 피압대수층인 경우 저류계수 값은 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ (Driscoll, 1986)을 가지는데 이들 값을 적용하면 Table 8과 같이 자유면 대수층인 경우 투수량계수(T)는 232,558~13,667,426 m^2d^{-1} 의 범위를 보이며, 피압대수층인 경우 233 ~ 45,600 m^2d^{-1} 의 범위를 보임을 알 수 있었다.

Table 8. The hydraulic diffusivity(T/S) and transmissivity(T) calculated by the distance from coast and time lag for each of survey wells

Well ID	Distance from coast (m)	Time lag (min)	T/S (m^2d^{-1})	T(m^2d^{-1})	
				Unconfine (S=0.01~0.3)	Confine (S= $10^{-3} \sim 10^{-5}$)
TR-1	28	18	2.33×10^7	232,558~6,976,744	233~23,300
TR-2	70	36	4.56×10^7	455,581~13,667,426	456~45,600
TR-3	53	30	4.00×10^7	400,000~12,000,000	400~40,000

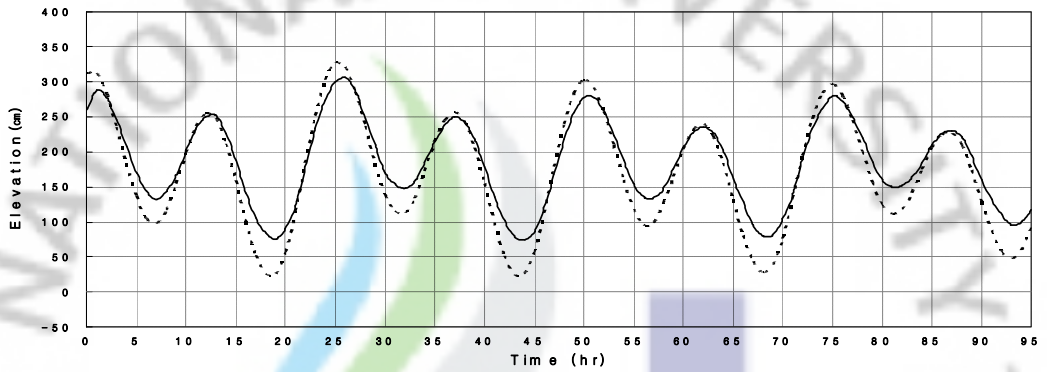


Fig. 30. Variations of groundwater level at TR-1(—) and tidal level at Seogwipo tidal station(···).

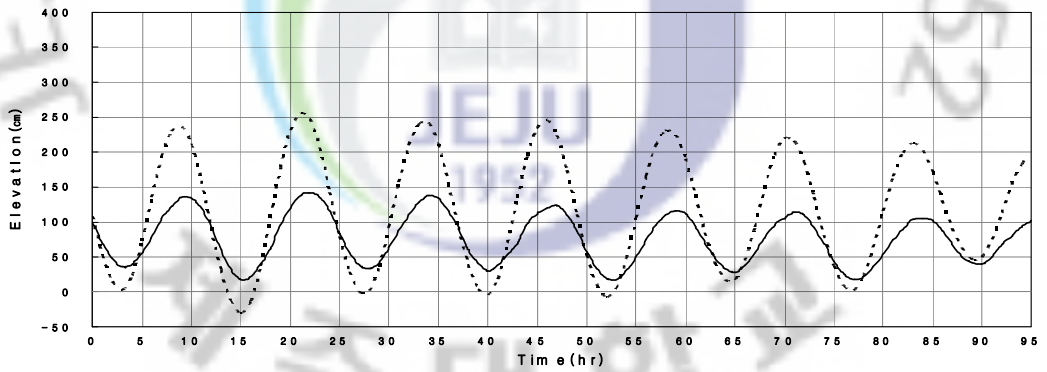


Fig. 31. Variations of groundwater level at TR-2(—) and tidal level at Seongsanpo tidal station(···).

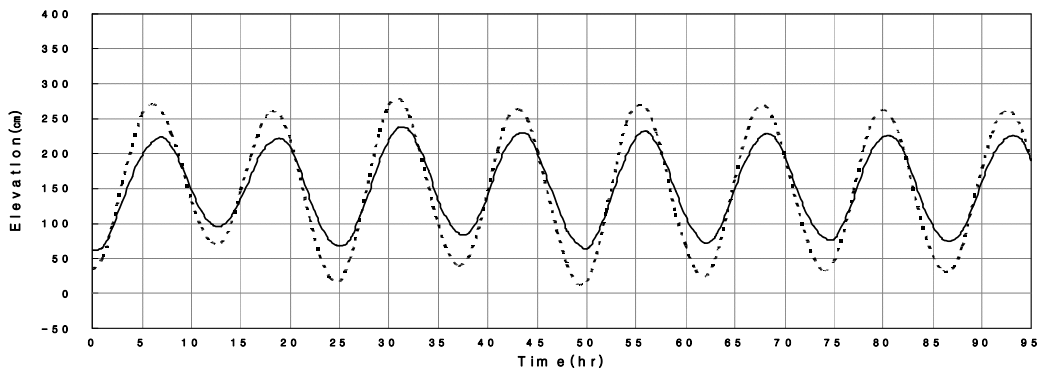


Fig. 32. Variations of groundwater level at TR-3(—) and tidal level at Seongsanpo tidal station(···).

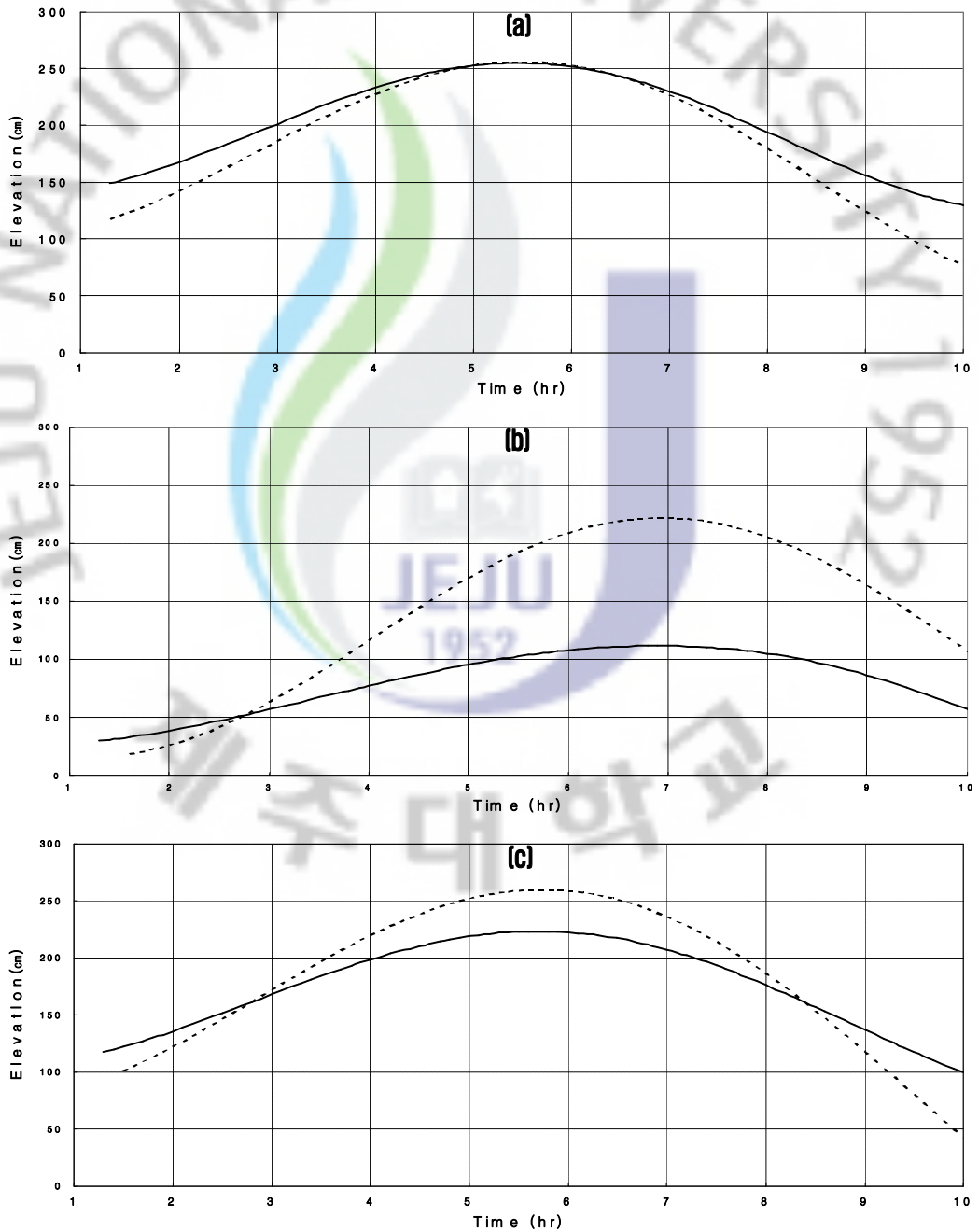


Fig. 33. Results of cross correlation function of tidal level(···) versus groundwater level(—) at TR-1(a), TR-2(b) and TR-3(c) monitoring wells. The time lag found was 18min, 36min and 30min for TR-1, TR-2 and TR-3 respectively.

피압대수층으로 적용하여 구한 투수량계수(T) 값은 Jeju-Do(2003)가 광역상수도 및 해수침투 감시 관측망 88공의 자료를 토대로 기본 통계분석을 실시한 수리상수 특성 결과 자료 중 동부지역의 투수량계수(T) 731~44,100 m²d⁻¹의 값과 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다(Table 9).

Table 9. Hydraulic parameters of monitoring wells in Jeju Island(Jeju-Do, 2003)

Area	Statistical analysis	Pumping capacity (m ³ /d)	Specific capacity (m ³ /d)	Transmissivity (m ² /d)	Hydraulic conductivity (m/d)
Total (88 wells)	Mean	2,312.0	10,861.2	17,573.0	552.2
	Minimum	900.0	151.0	434.2	8.7
	Maximum	3,325.0	55,900.0	74,940.0	2,400.0
	Range	2,425.0	55,749.0	74,505.8	2,391.3
Southern (21 wells)	Mean	2,388.8	9,070.9	19,146.9	637.5
	Minimum	1,442.0	151.0	434.2	8.7
	Maximum	3,056.7	25,194.0	74,940.0	2,400.0
	Range	1,614.7	25,043.0	74,505.8	2,391.3
Northern (36 wells)	Mean	2,505.4	11,280.8	17,033.0	358.4
	Minimum	1,500.0	201.8	832.6	14.7
	Maximum	3,325.0	55,900.0	59,097.6	1,650.1
	Range	1,825.0	55,698.2	58,265.0	1,635.4
Eastern (27 wells)	Mean	2,110.9	11,446.1	17,725.5	839.0
	Minimum	1,000.0	351.4	731.0	173.1
	Maximum	2,871.0	48,579.2	44,100.0	2,266.2
	Range	1,871.0	48,227.8	43,369.0	2,093.1
Western (4 wells)	Mean	1,525.0	12,536.3	13,141.0	199.2
	Minimum	900.0	2,923.0	4,270.5	61.6
	Maximum	2,000.0	25,000.0	26,020.0	385.0
	Range	1,100.0	22,077.0	21,749.5	323.4

또한, Table 10에서 보는 바와 같이 Han 등(1994)이 동부지역인 조천, 구좌, 성산, 표선 및 남원 등 5개 수역에 설치된 109개 관정에 대한 투수량계수인 $20\sim 76,600\text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 의 값과 Kim 등(2005)이 제시한 $294\sim 43,600\text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 의 값과 유사한 값을 보이고 있다.

Table 10. Hydraulic parameters of wells in the eastern area Jeju island

Wells	Hydraulic Diffusivity(T/S, m^2d^{-1})	Transmissivity(m^2d^{-1})	References
109 wells	-	42,200	Han et al.(1994)
Handong-2(HD-2) well	4.36×10^7	436~43,600	Kim et al. (2005)
Jongdal(JD-1) well	2.94×10^7	436~43,600	
Susan(SS-1) well	4.20×10^7	436~43,600	

결과적으로, 연구지역의 대수층이 피압대수층일 경우에는 추정 투수량계수와 기존 연구결과의 투수량계수가 어느 정도 부합되는 양상을 보이거나 자유면 대수층을 가정하면, 기존의 연구결과와 부합되지 않는다. 김 등(2005)은 조석영향이 해안에서 3~5 km에 이르는 점을 고려하여 동부지역 해안 대수층이 피압대수층일 가능성을 지적하였으며, 피압대수층을 가정하고 저류계수를 적용하면 조석반응법에 의한 추정치는 기존의 투수량계수와 부합된다고 보고한 바 있다. 반면 이 등(2006)은 조석반응법에 의한 제주 동부지역의 수리확산계수와 기 연구된 투수량계수를 통해 저류계수를 산출한 수리상수 특성은 피압대수층의 일반적인 저류계수를 보인다고 보고하였는데 연구지역의 수리지질학적 요소들의 존재는 동부지역 지하수의 도관 유동의 가능성을 제시하고 있다.

본 연구에서도 지하지질특성이 비교적 치밀한 Aa 용암류가 주를 이루고 있고 이 용암류에서 수반되는 자갈층인 클린커층과 파쇄절리가 유효한 대수층인 점, 그리고 시추 공저에 나타나는 베게용암과 유리쇄설성 각력암 등 해수가 지하대수층으로 빠르게 대량 유동을 가능케 하는 높은 투수성의 다공질 매체가 존재하고 있는 점 등은

도관 유동의 가능성을 지시하고 있으며, 이는 담수지하수 뿐만 아니라 염지하수의 부존을 용이하게 하고 염지하수 산출특성을 매우 양호하게 하는 수리적인 배경이라 할 수 있다.

그리고, 연구지역 해수면 하부에 주로 분포하는 Aa 용암류가 해수와 접촉하는 단면적이 넓어 해수압(조력)이 내륙 깊숙이까지 전파될 수 있는 여건보다는 본 용암류에서 파생되는 클린커, 베게용암 등의 투수성 구간을 통해 해수가 내륙적으로 빠르게 확산되고 있음을 수리확산계수(T/S)를 통해 확인이 가능하며, 또한 수직절리, 파쇄대 등의 지질적인 배경은 본 연구지역의 대수층형태는 완전한 피압대수층(confined) 보다는 누수현상이 상당히 크게 발생하는 누수피압층(leaky aquifer)이거나 준피압(semi-confined)에 보다 근접한 것으로 판단된다. 다만, 본 염지하수 공간적인 분포특성에서 나타나는 바와 같이, 염지하수관정 간에 이격거리가 짧을 뿐만 아니라 고밀도이며 공당 채수량이 대용량임에도 불구하고 지하수 채수에 따른 영향권이 작은 범위의 지역에만 국한되는 것으로 나타나는 점은 자유면 대수층의 특성을 나타내는 바향후 이에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다고 사료된다.

V. 결론

제주도 동부 해안지역에 분포하고 있는 남원, 표선, 성산, 구좌, 조천수역의 염지하수관정의 전기전도도 수직검층 및 지하 지질자료를 토대로 제주도 동부 해안지역의 지하수 부존특성을 검토하였고, 또한 조석반응법을 통한 수리인자를 산정한 결과를 결부시켜 염지하수 관정의 수리지질학적인 특성을 검토하였다.

연구지역의 지하수 부존특성은 내륙의 담수유입과 해수의 혼합에 의한 저염지하수가 상부구간을 형성하고 있으며, 그 이하부에는 담수대수층과는 혼합이 되지 않은 고염분의 염지하수가 분포하고 있다. 염지하수 부존을 용이하게 하는 지하지질로는 치밀한 Aa 용암류에서 수반되는 클린커층과 파쇄절리, 시추 공저에 나타나는 베게용암과 유리쇄설성 각력이다.

조석반응 분석법을 이용하여 수리인자를 산정한 결과, 수리확산계수(T/S)는 $2.33 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1} \sim 4.56 \times 10^7 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 이고, 투수량계수(T)는 대수층 유형을 자유면대수층 또는 피압대수층으로 가정한 경우 각각 $232,558 \sim 13,667,426 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 와 $233 \sim 45,600 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$ 의 범위를 보이는데 기존 본 연구지역에 대해 발표된 T값($731 \sim 44,100 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$)과 비교하면 피압대수층으로 가정했을 경우의 T값과 유사한 값을 보임을 알 수 있었다.

또한 수직절리, 파쇄대 등의 지질적인 배경은 본 연구지역의 대수층형태는 완전한 피압대수층(confined) 보다는 누수현상이 상당히 크게 발생하는 누수피압층(leaky aquifer)이거나 준피압(semi-confined)대수층에 가깝다고 보인다.

VI. 참고문헌

- 건설교통부·한국수자원공사, 2005, 현장기술자를 위한 지하수 핸드북, pp. 27~66.
- 고기원, 1991, 제주도 서귀포층의 지하분포상태와 지하수와의 관계, 지질학회지, 27(5).
- 고기원, 2005, 제주도 지하수의 부존 및 산출특성, 제주문화 제11호, pp. 95~115.
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 대학원 박사학위논문, 325pp.
- 고기원, 강봉래, 문덕철, 2006, 제주도 수문지질과 지하수 관리제도, 2006제주·하와이 물 포럼, '화산섬의 지하수, 최적관리기법은?', pp. 134~165.
- 고기원, 박윤석, 강봉래, 김봉석, 2005, 제주도 동부지역의 지하지질과 화산활동, 제13회 세계물의 날 기념 학술세미나, '제주의 물·세계의 물 도민의 자산', pp. 5~44.
- 고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철, 2003a, 제주도 동부지역의 수문지질과 지하수 부존특성(1), 제11회 세계물의 날 기념 학술세미나, '제주의 물·세계의 물 도민의 자산', pp. 7~88.
- 고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철, 2003b, 제주도 동부지역의 수문지질에 관한 연구(II), 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, pp. 67~72
- 김경호, 신지연, 고은희, 고기원, 이강근, 2009, 지구온난화에 따른 제주도 근해의 해수면 상승과 제주도 동부지역 지하수의 염수대 변화, 한국지하수토양환경학회지, 14(3), 68~79.
- 김남신, 2009, GIS 실습, 한올아카데미, pp. 370~388.
- 김대권, 손팔원, 1995, 제주연안 염지하수에 관한 연구, 남해수산연구소 사업보고서, pp. 69~76.
- 김성수, 김대권, 손팔원, 이창훈, 하동수, 2003, 제주도 염지하수 수질의 시공간적 변화, 한국양식학회지, 16(1), 15~23.
- 김지영, 오윤근, 류성필, 2001, 제주도 동부지역 지하수의 염수화에 관한 연구, 한국환경과학학회지, 10(1), 47~58.

농어촌진흥공사, 1989. 지하수장기개발계획보고서.

박남식, 이용두, 1995, 제주도 중심부 수리지질변수의 불확실성이 해안지역 지하수 흐름에 대한 수치실험결과에 미치는 영향에 대한 연구, 대한지하수환경학회 1995년도 정기총회 및 춘계학술발표회, pp. 35

박남식, 이용두, 1997, 중-동 제주수역의 지하수 개발로 인한 해수침투, 지하수환경, 4, 5~13.

박원배, 박윤석, 고기원, 문덕철, 2003, 제주도 동부지역 지하수의 담·염수경계면 분포와 변화, 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, pp. 55~58.

박윤석, 고기원, 강봉래, 박원배, 2002, 2001년 제주도 해수침투 감시관측망 구축사업 성과 -북제주군 구좌읍 한동리~송당리지역-, 제10회 세계물의 날 기념 학술세미나, '제주의 물·세계의 물 도민의 자산', pp. 73~113.

박윤석, 고기원, 강봉래, 함세영, 2002, 제주도 동부지역 수문지질에 관한 연구(I), 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, pp.81~84.

박원배, 박윤석, 고기원, 문덕철, 2003, 제주도 동부지역 지하수의 담·염수 경계면 분포와 변화, 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회, pp. 55~58.

박종철, 2003, GIS 데이터베이스를 활용한 지하수수치모델링 통합에 관한 연구, 공주대학교 대학원 석사학위논문, 77pp.

부성안, 정교철, 2000, 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입, 지질공학 10, 107~110.

성현정, 김용제, 이철우, 김구영, 우남철, 2005, 균열암반에서의 양수시험자료 해석과 일반 방사상 유동모델의 적용성 연구, 대한자원환경지질학회지, 38(2), 177~185.

송성호, 이기철, 배광욱, 정형재, 2002, 수치모델을 이용한 지하수 영향범위 산정, 한국수자원학회지, 37(3), 74~85.

송시대, 2000, 제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 부산대학교 대학원 박사학위논문, pp.15~18.

심병완, 정상용, 2004, 단열암반 대수층에서 조석분석법을 이용한 수리상수 추정, 한국지하수토양환경학회지, 9(3), 27~32.

- 심병완, 정상용, 성익환, 이병대, 조병욱, 2003, 동남해안지역의 피압단열 대수층에서 조석분석법을 이용한 수리상수 추정, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, pp. 497~499.
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구, 제3집.
- 윤정수, 김기표, 정차연, 2003, 제주도 동부 한동리지역 고염분 지하수에 대한 수리지질학적 연구, 지질학회지, 39(1), 115~131.
- 이봉주, 구민호, 박윤석, 고기원, 박기화, 2006, 제주 동부지역의 수리확산계수와 지하수 도관 유동 가능성, 지질학회지, 42(3), 439~454.
- 정상용, 김병우, 김규범, 권해우, 2009, 단계양수시험 해석시 우물상수 산정방법이 우물효율에 미치는 영향, 대한지질공학회지, 19(1), 71~79.
- 최병수, 1998, 단공양수시험에 의한 대수층조사방법, 농어촌진흥공사농공기술지, 60, 101~110.
- 최병수, 2007, 단공시험 해석에서 저류계수의 보정방법, 한국지하수토양환경학회지, 12(3), 36~43.
- 최병수, 2008, 유효우물반경 산정 경험공식의 일반화에 대하여, 한국지하수토양환경학회지, 13(3), 15~20.
- 최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수특성, 제주도연구, 5집.
- 한국수자원공사, 1993, 제주도수자원종합개발계획수립보고서.
- 한규언, 이상선, 정차연, 2000, 해수침투 방지를 위한 물리검층과 GIS활용방안, 한국지구물리탐사학회 2000년도 특별심포지엄, pp.54~68.
- 한정상, 2000, 지하수환경과 오염, 박영사, pp.75~107.
- 황세호, 신제현, 박인화, 박기화, 2006, 물리검층 자료를 이용한 제주도 동부지역의 해수침투 특성 고찰, 제6회 지하수 학술세미나, '제주의 물·세계의 물 도민의 자산', pp.5~33.
- Bursoy, Y. K. and W, K. Summer, 1980, Determination of aquifer parameters from step test and intermittent pumping data, Groundwater, 18(3), 137-146.
- Butler, J. J. and J. M. Healy, 1998, Relationship between pumping-test and slug-test parameter: Scale effect of artcraft, Groundwater, 36(2), 305-313

- Chun, J. C. and S. Rho, 1991, Salinity tolerance of eggs and juveniles of flounder, *Paralichthys olivaceus*(Temminck et Schlegel). J. Aquaculture, 4, 73~84
- Erskine, A. D., 1991, The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the U.K., Groundwater, 29, 556~562.
- Ferris, J.G, 1951, Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, International Association of Science Hydrology Publication, 33, 148-155.
- Freeze, R. A. and J. A. Cherry, 1979, Groundwater, Prentice Hall, 604pp.
- Hamm, S., J. Cheong, S. Jang, C. Jung and B. Kim, 2005, Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifer of Jeju Island, Korea, J. Hydrol., 3(10), 111~121.
- Han, J. S., G. S. Han, N. J. Kim and C. Han, 1994, Sustainable yield of groundwater resources of the Jeju Island, J. Korean Soc. Groundwater Environ., 1(1) 33~50.
- Jacob, C. E., 1950, Flow of groundwater. In: Engineering Hydraulics, Rouse, H.(ed.), John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 321~386.
- Jeju-Do, 2001, Comprehensive Survey of Hydrogeology and Groundwater Resources in Jeju Island(I), 378pp.
- Jeju-Do, 2002, Comprehensive Survey of Hydrogeology and Groundwater Resources in Jeju Island(II), 343pp.
- Jeju-Do, 2003, Comprehensive Survey of Hydrogeology and Groundwater Resources in Jeju Island(III), 425pp.
- Jha, M. K., Kammi, Y., and Chikamori, K., 2003, On the estimation of phreatic aquifer parameters by the tidal response technique. Water Resources Management, 17, 69~88.
- Kim, K., B. Shim, K. Park, T. Kim, H. Seong, H. Park, K. Koh and N. Woo, 2005, Analysis of Hydraulic Gradient at coastal aquifers in eastern part of Jeju

- Island, *Econ. Environ. Geol.*, 38(1), 79~89.
- Mcdonald, G. A., 1953, Pahoehoe, aa, and block lava. *Am. J. Sci.*, 251, 169~191.
- Mcdonald, G. A., A. T. Abbott, and F. L. Peterson, 1983, *Volcanoes in the Sea. The Geology of Hawaii*(2nd ed.). University of Hawaii Press, Honolulu, 517pp.
- Meinzer, O. E., 1927, *Outline of Groundwater Hydrology with Definitions*, USGS Water Supply Paper 1544-H, pp. 1~96.
- Millham, N. P and B. L. Howes, 1995, A comparison of methods to determine K in a shallow coastal aquifer. *Groundwater*, 33, 49~57.
- Moss, R., 1990, *Handbook of Groundwater Development*. John Wiley & Sons, New York, pp. 276~312.
- Robinove, D. J., R. H. Langford and J. W. Brookhart, 1958, *Saline-Water Resources of North Dakota*. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 1428, p. 72.
- Scarth, A., 1994, *Volcanoes*, University College London Press, 273 pp.
- U.S. EPA Office of Ground-Water Protection, 1987. *Guidelines for Delineation using a coupled GIS and groundwater model*, *J. Environ. Manag.*, 54, 205-214.
- Werner, P. W. and D. Noren, 1951, Progressive waves in nonartesian aquifer, *Trans. Amer. Geophysical Union*. 32, 238~244.
- White, J. K. and T. O. L. Roberts, 1994, The significance of groundwater tidal fluctuations, in groundwater problems in urban areas, *Proceedings of the International Conference organized by the Institution of Civil Engineers*, London, 2-3 June 1993, pp. 31~42.
- Williams, T. A. and A. K. Williams, 1989, Estimating water-table altitudes for regional groundwater flow modelling, U.S. gulf coast, *Groundwater*, 27, 333~340.

감사의 글

대학원 생활을 시작하고 이 논문이 완성되기까지 참으로 멀고 오랜 길이었지만 많은 분들의 관심과 아낌없는 도움으로 이렇게 소중한 결실을 맺을 수 있지 않았나 생각해봅니다. 먼저 부족함이 많은 저에게 관심과 애정으로 꼬박 밤을 지새우며 지도해주신 감상규 교수님께 존경과 사랑의 마음으로 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 가운데도 검토와 지도로 많은 조언을 해주신 이기호 교수님, 조은일 교수님에게도 감사드립니다. 대학원 생활 열정적인 가르침과 관심을 가져주신 허목 교수님, 허철구 교수님, 이용두 교수님 그리고 김진근 교수님께도 진심으로 감사드립니다.

논문을 완성할 수 있도록 배려해주신 (주)남천개발 고병주 사장님, (주)남원건설 고재욱 사장님을 비롯한 이번에 같이 결실을 맺는 김언주 연구원님과 항상 관심으로 염려해 주신 양성기 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 논문 쓰다며 업무에 소홀했지만 옆에서 격려해주신 정태윤 부장님, 노신옥 과장님, 성병건 과장, 김창환 과장, 성도혁 대리님, 승미씨, 광진이에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 늦은 밤 같이 공부해가며 2년 반 동안 힘이 되어주었던 동기생(현운석, 오순미, 고수용, 지창규)과 항상 용기를 주셨던 5기 선배님(강동호, 김상현, 김은영, 오명철)들과 7기 후배님(김진, 현훈철)들 정말로 감사합니다.

끊임없는 사랑과 격려로 지켜봐주시고 뒷바라지 해주신 부모님과 막내 사위에게 많은 사랑을 주신 장인·장모님께 정말 감사드립니다. 멀리 떨어져 있지만 항상 용기를 북돋아 준 형님과 누님, 처형 모두모두 고맙습니다. 마지막으로 그 동안 공부한다고 소홀했던 가정을 인내와 사랑으로 굳건하게 지켜준 내 사랑하는 아내 허 유아님과 같이 많은 시간을 보내지 못해도 아빠를 이해해 주고 힘을 준 우리 집 희망의 두 기둥인 제현, 재원에게 작은 결실을 드립니다.

여기서 멈추지 않고 앞으로 더 나은 발걸음을 내딛도록 발전하는 모습을 보이도록 노력하겠습니다. 다시 한번 관심을 가져주신 모든 분들께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

2011년 7월