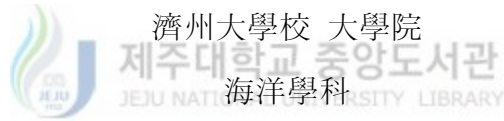


碩士學位論文

제주도 동부해안 한동리 지역의
수문지질학적 연구



金奇標

2002年 7月

제주도 동부해안 한동리 지역의 수문지질학적 연구

指導教授 尹 正 守

金 奇 標

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2002年 7月



金奇標의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 尹 錫 勳 印

委 員 朴 元 培 印

委 員 尹 正 守 印

濟州大學校 大學院

2002年 7月

Hydrogeology Study of Handong-ri area
in the Eastern Coast of Jeju Island, Korea

Gee-Pyo 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
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

July, 2002

목차

목차

Summary

I. 서론

II. 연구방법

III. 연구지역의 개요

1. 지형

2. 지하수 부존 특성

IV. 이론적 배경

1. 해안지역 대수층의 매카니즘

2. Piper diagram 해석 기법

3. 산소안정동위원소 원리

4. Ghyben-Herzberg 원리

V. 결과 및 고찰

1. 지표지질

2. 지하지질

3. 지하수위 변화

4. 수질특성

5. 전기전도도 및 온도 검층

VI. 결론

참고문헌

부록

List of Figures

- Fig. 1. Location map of study area.
- Fig. 2. Location map of the monitoring well and spring in study area.
- Fig. 3. Digital topographic map in study area.
- Fig. 4. Schematic model of groundwater occurrence of the north-eastern area in Jeju Island.
- Fig. 5. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water.
- Fig. 6. Fresh water lens an oceanic island under natural conditions.
- Fig. 7. Geologic map of north-Eastern area in Jeju Island.
- Fig. 8. A-A' line cross section and Geological profiles.
- Fig. 9. Variation water level and EC in each wells and tide at coastal sea.
- Fig. 10. Variation water level of the HL well and precipitation.
- Fig. 11. Piper diagram of chemical composition of the study area.
- Fig. 12. Stiff diagram of chemical composition of the study area.
- Fig. 13. The oxygen and hydrogen isotopic composition in water.
- Fig. 14. The oxygen isotopic composition in ground-water.
- Fig. 15. EC, temperature Logging data and geological profile at HM1 well.
- Fig. 16. EC, temperature Logging data and geological profile at HM2 well.
- Fig. 17. EC, temperature Logging data and geological profile at HM3 well.
- Fig. 18. EC, temperature Logging data-2 from HM3 well.
- Fig. 19. Variation of EC by depth and time from HM1 well.
- Fig. 20. Variation of EC by depth and time from HM2 well.
- Fig. 21. Variation of EC by depth and time from HM3 well.

List of Tables

Table 1. Description of monitoring well in study area.

Table 2. The rate of the oxygen isotopic composition.

Table 3. Variation of water level at each wells by the tide.

Table 4. Chemical composition of groundwater in the monitoring wells.

Table 5. Result of oxygen stable isotopes compositions in each well and coastal sea.

Table 6. Depth of interface zone in study area.



Summary

The purpose of this study is to understand the high saline water phenomenon of Handong-ri area in the eastern coast of Jeju Island, were investigate the tidal effect of groundwater level, variation of electric conductivity and temperature, geological logging on the monitoring wells, chemical water quality, and ratios of oxygen isotope of groundwater and seawater.

According to the results of geological logging on the monitoring wells, Geological structure of below the groundwater table consist of sandy layer, the hyaloclastites in forms of fragments and rubbles. They have stratum of the high porosity and good permeability that can act as aquifer layer. Hyaloclastites thicken more and more from inland to coast, so it expected that saline water flow easily into inland.

The tidal effect of HM1, 2 well are 0.43 and 0.23 respectively. Time lags are 56min and 102min respectively. The groundwater level of HM3 well, 5.1km distanced from coast, is little effected by the tide, but it find that daily variation of EC by tidal effect. Therefore HM3 is received effect by tide

It is monitored the hourly fluctuation of groundwater level from December 2000 to March 2002 at HL well distanced about 2.2km from coast. The maximum amplitude of groundwater level is 0.68m a day and difference of level by precipitation is 0.74m for monitoring period. Therefore variation of water level received effect by precipitation and tide.

Major ion and oxygen isotopic composition in lower layer of HM1, 2 well are similar to saline water and upper layer of HM3 well have little mixing with saline water. And major ion and oxygen isotopic composition at upper layer of HM1, 2 well are similar to the saline water, it represent the groundwater body by simple

mix freshwater with saline water.

Results of EC and temperature geophysical logging represented that all the wells have a interface zone of freshwater and saline water. Depth of the interface zone is less than Ghyben-Herzberg's principle. The thickness of interface zone is only several meters at HM1, 3 well. But, EC increase stepwise at interface zone of HM 2 well, it showed that interface was developed by steps since stratum with good permeability was distributed with multi-steps both above and below interface zone.

Results in investigating variation of interface zone of freshwater and saline water represented that the hyaloclastites formed at below groundwater table is developing toward the coast; this area consisted of stratum of good permeability. Hyaloclastites is presumed the main path of the high salinity water. There are a lot of movement by the tide at upper layer. Salinity of lower layer spreads to upper up step in proportion to tidal energy.

Because of hydrogeological characteristics, Interface zone of freshwater and saline water is made, High salinity of groundwater occur in east coastal area of Jeju Island. Therefore, I think that high saline groundwater phenomenon is natural condition by simple mixing.

I. 서론

제주도는 한라산을 정점으로 원추형의 지형조건을 가지며, 화산암류와 화산회토로 이루어져 있다. 또한 용암동굴, 숲골, 꽃자왈 등 투수성이 양호하여 강수량(연간 1,872mm)의 상당부분이 강우 후 빠르게 지하로 침투되어 지하수계로 함양(함양률 48%, 제주도, 2000)되며, 그 중 일부는 해안변 용출 등으로 기저유출되고 있다. 이러한 지하수는 자연현상 또는 인위적 현상에 의하여 수위변화를 보인다. 자연현상에는 강수, 조석, 증발산, 기압, 지진이나 호우 등 이상조건에 의한 하천수의 변화 등을 들 수 있으며, 인위적 요인으로는 양수, 상하수도의 누수, 관개용수, 지하구조물설치, 댐에서의 방류에 의한 하천수의 증감 등을 들 수 있다(Jacob, 1939; Robinson, 1939; Bredehoeft, 1967).

제주도와 같은 섬지역에서의 담수 lens체의 두께는 조석운동, 대수층의 불균질성, 개발에 따른 지하수의 불규칙한 소모량 등에 따라 복잡한 유동상태를 이루고 있어 해수와 동적 평형을유지하는 것으로 밝혀졌고, 담수체와 해수가 접하는 곳에서는 어떤 폭을 갖는 점이대가 형성되어진다(농업진흥공사, 1973).

이러한 점이대는 조석의 영향, 함양량과 유출량의 변동, 기타 양수량에 의한 지하수위의 변화에 따라 확산되며, 일시에 많은 양의 지하수를 심정공에서 양수할 경우 담수 lens체 하부에는 갑작스런 국부적 변위현상이 일어나 염수는 상향운동을 일으키게 되어 넓은 점이대가 형성되며 기존 대수층내로 염수가 침입될 가능성이 있다.

제주도는 지표수의 개발이 어려워 용수의 거의 대부분을 지하수에 의존하고 있으며, 세계적으로 청정한 수질을 유지하고 있지만, 생활용수나 농업용수로 사용하던 일부 우물에서 질산성 질소나 고염분현상이 발생하여 관측공으로 활용되거나 폐공되고 있는 실정이다. 질산성질소로 오염된 지하수는 주로 서부지역 일원에서 주로 조사되고 있으며(제주도환경백서, 1999, 2001), 지하수내 Cl^- 이온 함량이 $250mg/l$ 이상인 고염분 지하수가 출현하는 지역은 지하수 부존형태중 기저지하수체가 분포하는 북제주군 한림읍 수원리, 남제주군 대정읍 상모리 및 동부지역 해안변에 개발된 지하수 관정에서

나타나고 있다(한규언 등, 2000).

기저지하수가 분포하고 있는 동부지역의 해안변 지역에 위치한 지하수는 해수와 직접 접촉하기 때문에 대수층에서 담수를 염수로 환원하거나 혹은 혼합되는 원인이 된다. 그러므로 해안변을 따라 형성된 지하수체에서 해수의 침입은 가장 일반적인 담수의 오염원이 된다. 따라서 이들 지역에서의 지하수의 염수화 현상을 명백히 밝히고 사전에 예측, 감시할 수 있는 적절한 방비책을 얻는 것은 매우 중요한 일이다.

제주도 동부지역 고염분 지하수의 원인 규명에 대해서는 여러 연구기관 및 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 그 원인에 대해서는 다양하게 제시되고 있다. 고염분 지하수의 산출에 대하여 최순학(1988), 최순학과 김영기(1989), Choi et al(1991)는 지하수의 과잉양수에 의한 해수침입 현상으로 해석하였고, 고기원(1991, 1997), 고기원 등(1992, 1993)은 동부지역은 제주도 형성당시부터 고염분 지하수가 부존할 수 있는 지질구조에 의한 자연현상으로 보고하였다. 윤정수(1986)는 동부지역은 타지역보다 염분을 많이 함유한 사구층이 많고 화산활동기간 동안에 용기, 침강활동이 커 균열대의 양호한 발달로 담수 lens가 얇기 때문으로 해석하였고, 제주도 지하수장기개발계획 조사보고서(농업진흥공사 등, 1989)에서는 동수구배가 완만하여 담수체의 수압이 상대적으로 낮아 해수가 내륙 깊숙이 침투할 수 있고, 해안변에서의 과잉채수는 해수의 침입을 용이하게 할 수 있을 것으로 보고하였다. 또한 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(I)(제주도, 2001)에서는 수리지질 및 수리지구화학적 특성에 의한 해수의 단순혼합으로부터 기인하는 것으로 해석하는 등 동부지역 고염분 지하수의 부존 원인이 명확히 밝혀지지 못한 상태에 있다. 또한 제주도 지하수의 조사, 연구는 대부분 지하수 이용을 목적으로한 기준에 개발된 공에서 연구가 이루어져 공의 심도 및 분포가 한정됨으로서 수문지질학적 환경에 대한 보다 정밀한 해석이 이루어지지 못하였다. 이에 제주도는 2001년 해수침투 감시관측망 구축사업의 일환으로 동부 지역인 한동리 일원에 해안변으로부터 등고선에 수직 방향으로 거의 일직선상에 3개소의 관측 조사공을 해수면하 약 150m까지 개발하였다. 따라서 본 연구는 이들 3개의 관측정을 중심으로 공내에서의 수직 물리검층을 행하여 담·염수 경계면의 위치와 변화를 파악하고 인근 해안에서의 해수면의 변동과 지하수위 변동과의 상관 관계 및 지하수 수질특성 등을 연구함으로써 동부지역의 고염분 지하수에 대한 원인을 밝히고자 한다.

II. 연구방법

본 연구에는 한동관측공 1, 2, 3호공과 구좌2수원(한동) 영구관측정(이하 한동영구관측정)을 활용하였다. 각 관측공이 위치한 표고는 14~114m까지 분포하고 한동1, 2, 3호공의 경우 U층이 포착되는 심도인 해수면하 114~159m까지 굴착되었으며, 한동영구관측정은 해수면하 105.2m까지 굴착되었다. 이들 관측공들은 해안변에서 약 0.8~5.1km떨어진 지점에 위치하며, 한동2관측공과 한동영구관측정은 약 10m의 거리를 두고 인접하여있다(Table 1, Fig. 1).

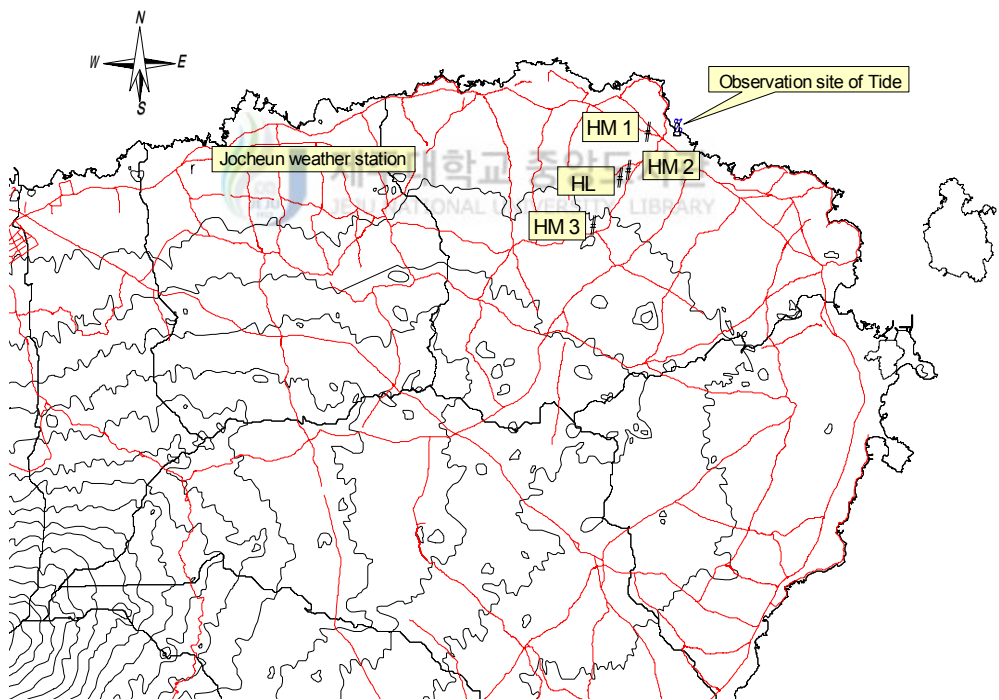


Fig. 1. Location map of study area.

조석 효율을 파악하기 위하여 한동리 해안가 방파제에 자동수위관측기(CTDP300, Greenspan)를 설치하였으며, 관측공별 지하수위 및 전기전도도(Electric conductivity)는 CTD350장비를 사용하여 각각 1분 간격으로 관측하였다. 장주기의 수위변화 관측을 위해 한동영구관측정에서 2000년 12월부터 CTDP300 장비를 이용하여 1시간 간격으로 수위, 수온, 전기전도도 및 pH 등을 관측한 자료를 이용하였으며, 강우자료는 제주도 재난관리본부에서 운영하고 있는 조천읍사무소에 설치된 기상관측자료를 이용하여 비교, 분석하였다. 전기전도도 검층은 대수층 파악 및 해수의 유입현상을 관찰할 수 있는 간단한 측정방법으로 관측공의 심도별로 측정하여 전기전도도의 변화양상을 파악하였고, 전기전도도가 급격히 상승하는 구간은 해수의 유입 가능성을 지시하고 있다고 말 할 수 있다. 전기전도도는 온도가 1℃ 증가하면 약 2%정도 증가한다. 따라서 셀상수를 측정값에 곱하여 25℃에서의 값으로 환산하여 나타내며, 본 연구에서 사용된 장비는 비전도도(specific conductivity)로 환산 측정된다. 각 관측공에서의 담·염수경계면의 변화를 파악하기 위하여, 개발 완료된 한동1, 2, 3호공 관측정에서 2시간 간격으로 연속 24시간 동안 RG-prologer(TCDS1531, Roberson Geologging Ltd.)를 이용하여 수직물리검층을 실시하였다.

주요이온성분 분석 및 산소안정동위원소 분석을 위해 RG-prologer Sampler를 사용하여 심도별로 채수 하였으며, 해수와 성분을 비교하기 위하여 한동리 방파제에서 시료를 채수하였다. 주요이온성분 분석용 시료는 채수 후 냉장 보관하여 제주도 보건환경연구원에 의뢰하여 분석하였으며, 음이온성분(Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- -N)에 대하여는 Ionchromatography (DIONEX 500)를 사용하여 분석하고, 양이온성분(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})에 대하여서는 원자흡광광도계(Varian SpectraAA-800)를 사용하여 분석하였다. 산소안정동위원소 조성비는 한국기초과학지원연구원 동위원소실험실에 의뢰하여 분석하였으며, 가스-질량분석기(Finnigan MAT-252)로 측정하였다.

Table 1. Description of monitoring well in study area.

Well name	Elevation (m)	Depth (m)	Distance from coast (km)	Remarks
HM1	14	175	0.8	Handong 1 monitoring well
HM2	44	202	2.3	Handong 2 monitoring well
HL	44.8	150	2.3	Handong long term monitoring well
HM3	114	262	5.1	Handong 3 monitoring well

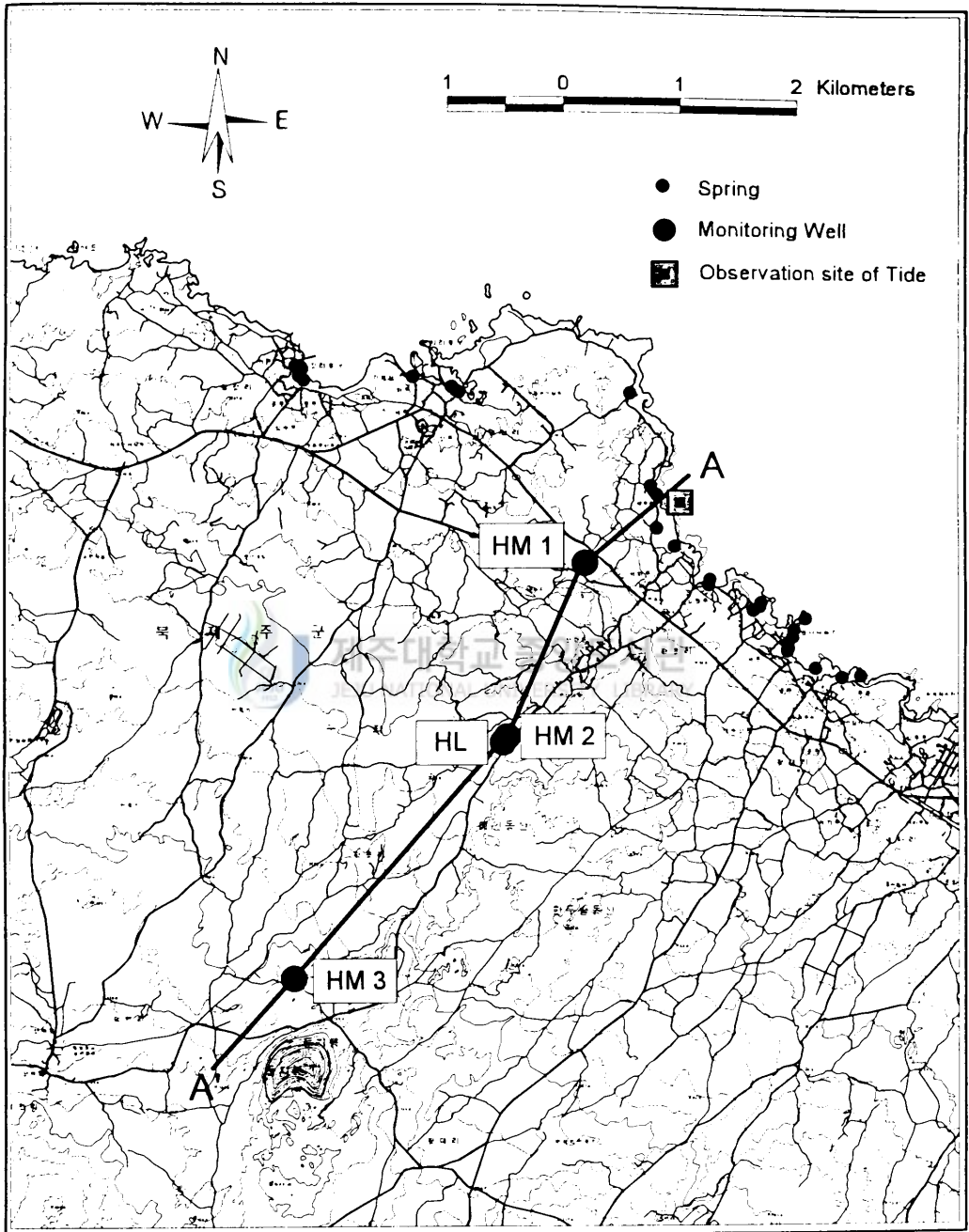


Fig. 2. Location map of the monitoring well and spring in study area.

A-A' : Cross section line.

Ⅲ. 연구지역의 개요

1. 지형

본 연구지역은 행정구역상 북제주군 구좌읍 한동리에 속하며 제주시에서 동쪽으로 약 30km 떨어진 곳으로 지형구배가 하류에서 상부까지 비교적 균일하며 0.022정도로 대체로 완만하다. 3개의 관측정 중 표고가 가장 높은 한동3호공(해안거리 : 5.1km)의 상류에는 둔지봉(표고 : 282.2m)이 자리하고 있으나 그 하류부에는 오름이나 계곡 등 지하수 흐름에 영향을 미칠만한 지형은 지표에서 나타나지 않고 있다. 수계의 발달은 매우 미흡하여 투수성이 양호한 지질특성에 의해 상류로부터 하천을 따라 흘러 내려오는 표면유출은 찾아볼 수 없으며 집중 강우시 일시적으로 지형 경사면을 따라 일시적인 지표유출을 보이기도 한다(Fig. 2, Fig. 3).

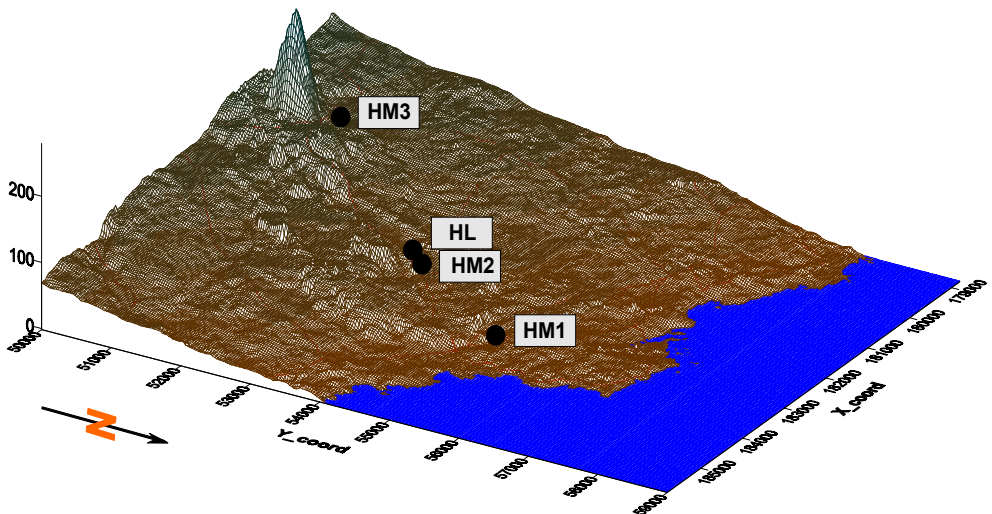


Fig. 3. Digital topographic map in study area.

2. 지하수 부존 특성

남기영(1966)이 제주도 지하수를 상부층지하수(high-level groundwater)와 기저지하수(basal groundwater)로 분류한 이래 김옥준(1969)은 상부유동지하수와 기저지하수로 분류하였으며, 최순학(1988)은 주수(perched water)와 기저지하수로 구분하였고, 농업진흥공사(1989)는 상위지하수와 기저지하수로 분류하였다. 이후 한국수자원공사(1993)는 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수(parabasal groundwater)로 구분하였고, 고기원(1997)은 상위지하수, 기저지하수, 상부준기저지하수, 하부준기저지하수 및 기반암지하수(basement groundwater)의 형태로 분류하였으며, 손주형(1999)은 상위지하수와 기저지하수로 분류하였다.

고기원(1997)은 서귀포층의 지하분포상태, 지하수위 분포 및 변동, 지하수의 수질변화, 지역별 수질특성 등을 근거로 지하수 부존 형태를 해석하였는데, 기저지하수는 북촌에서 남원에 이르는 해안변과 약 7km 내륙까지 분포하고 있다고 하였다.

제주도수자원종합개발계획수립보고서(한국수자원공사 등, 1993)에서는 제주도 전역에 대하여 지하수 부존 형태를 지도상에 도시하였는데, 이에 의하면 연구지역 일원에는 기저지하수체가 분포하고 있다(Fig. 4).

연구지역에 분포하는 기저지하수라는 용어는 하와이주에서부터 유래되었다. 하와이주의 지하수 조사과정에서 Meinzer(1930)에 의해 『기저지하수』에 대한 용어가 정립되었는데 “통상적인 지하수위 혹은 주된 지하수위 하부의 투수성 암석을 완전히 포화하고 있는 지하수체로서 일시적으로 존재하는 부유지하수와 구분되는 지하수체”로 정의하였다. 기저지하수와 같은 동의어로는 담수렌즈(freshwater lens), 기저렌즈(basal lens), G-H렌즈(Ghyben-Herzberg lens) 등이 사용되고 있다(고기원, 2001).

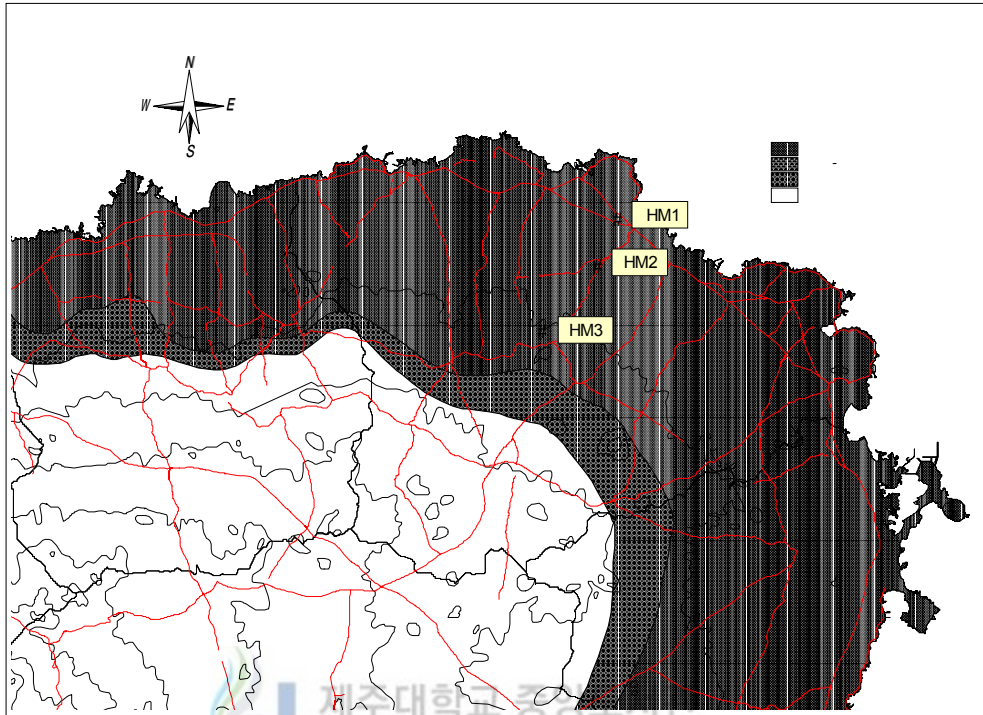


Fig. 4. Schematic model of groundwater occurrence of the north-eastern area in Jeju Island (KWRC, 1993).

IV. 이론적 배경

1. 해안지역 대수층의 특성

일반적으로 자연상태에서 해안가에 있는 자유면 대수층에서의 지하수는 주로 지형에 영향을 받아 바다로 유동되며, 해안가의 대수층으로 부터 염수를 밀어낸다. 염수를 밀어내는 정도는 지하수의 함양량, 수리수두 및 수리전도도와 같은 여러 요인들에 의해 좌우된다. 이러한 현상은 자연적으로 지질구조와 관련되어 일어날 수도 있으며, 특히 지하수 개발에 의해 해수가 담수 대수층으로 이동할 수 있는데 Freeze와 Cherry(1979)는 이러한 현상을 『해수침입』이라고 정의하였다

자연상태에서 자유면 대수층과 천부 피압 대수층에서의 지하수 유동은 해수면의 느린 변화에 대해 비교적 빠르게 반응한다. 즉 담수의 수두가 높으면, 바다로 통해있는 대수층의 모든 염수는 밀려나가고 대신 담수가 대수층에 존재하게 된다. 이와는 반대로 담수의 수두가 염수의 수두보다 낮으면 염수가 담수를 대체하는 현상이 일어난다. 그러나 담수의 수두가 염수를 대체할 정도로 충분히 크지 않을 경우 담수와 염수 사이에 역학적인 평형상태가 일어나 담수체와 해수가 접하는 곳에서는 어떤 폭을 갖는 점이대가 형성된다(Hubbert, 1940). 이러한 점이대의 위치와 모양을 결정하는 주요 메커니즘에는 조력에너지에 의한 염수이동, 담수의 함양 또는 배출의 변화에 따른 담수의 정수압면 변화 등이 있으며, 점이대에서는 유동이 발생하기 때문에 해수는 지속적으로 대수층을 침입하게 된다(Cooper et al., 1964).

대수층 내로의 해수의 유입은 대부분의 해안지역에서 발생하며, 이로 인하여 지하수 관정이 폐공되고 있다. 자연적인 조건하에서 자유면 해안 대수층이나 얇은 해안 대수층의 지하수는 지형적인 원인에 의하여 바다로 흐르고 있다. 해수의 유입이 어느 정도 일어나는가는 여러 가지 요인에 따라 다르지만 그 중에서도 함양량, 수리수두

및 대수층의 투수량 등에 영향을 받는다.

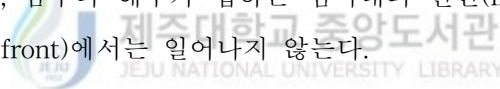
담수와 해수가 접하는 경계면은 지역에 따라 조석의 변동, 담수의 유출량, 수리학적 관계에 따라 다르며 미국 Florida의 Miami에서는 50ft 두께(Kohout, 1960), 북부 Atlantic Plain에서는 400~2,200ft 두께까지 이르고 있다(Meisler, 1989). Miami에서는 이 점이대 내에서 침입된 해수의 20%가 다시 바다로 유출된다(Kohout, 1960). 이와 같은 점이대 내에서의 흐름 때문에 담수의 수위가 낮거나 지형적인 요인에 의하여 내륙쪽으로 해수가 흐를 수 있는 어떤 조건 하에서는 담수와 해수가 혼합된 점이대가 상당한 거리까지 내륙쪽으로 위치하게 된다(Stringfield and LeGend, 1996; Cotecchia and others, 1974).



2. Piper diagram 해석기법

Piper diagram은 주 양이온인 Na^+K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도(epm)와 주 음이온인 Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 의 농도를 백분율로 환산하여 도시하는 방법으로 이외에 특정오염원에 대하여 1~2개의 항목을 추가하여 도시할 수도 있다. 그런 다음 양이온과 음이온이 도시된 점을 상부에 있는 다이아몬드형 그래프에 도시하여 지하수의 유형분석과 진화 및 혼합작용 등을 분석하는데 이용된다.

Fig. 5는 Richter & Kreitler(1993)에 의하여 Piper diagram을 이용하여 혼합과 이온교환을 분석한 것으로 (a1)은 어떤 지역에서 해수침입에 의하여 이온교환 특성이 나타날 때이고, (a2)는 혼합 특성을 나타날 때이며, (b)는 시추공을 따라 침입된 해수와 담수가 단순한 혼합 특성을 나타날 때 나타나는 형태이다. 이온교환은 대수층에서 Ca^{2+} 와 Na^+ 사이의 교환형태가 가장 뚜렷하고 해수가 침입하여 Na^+ 가 대수층에 포화될 때까지 진행하며, 담수와 해수가 접하는 접이대의 전면(initial front)에서만 일어나며, 그 후면(behind front)에서는 일어나지 않는다.



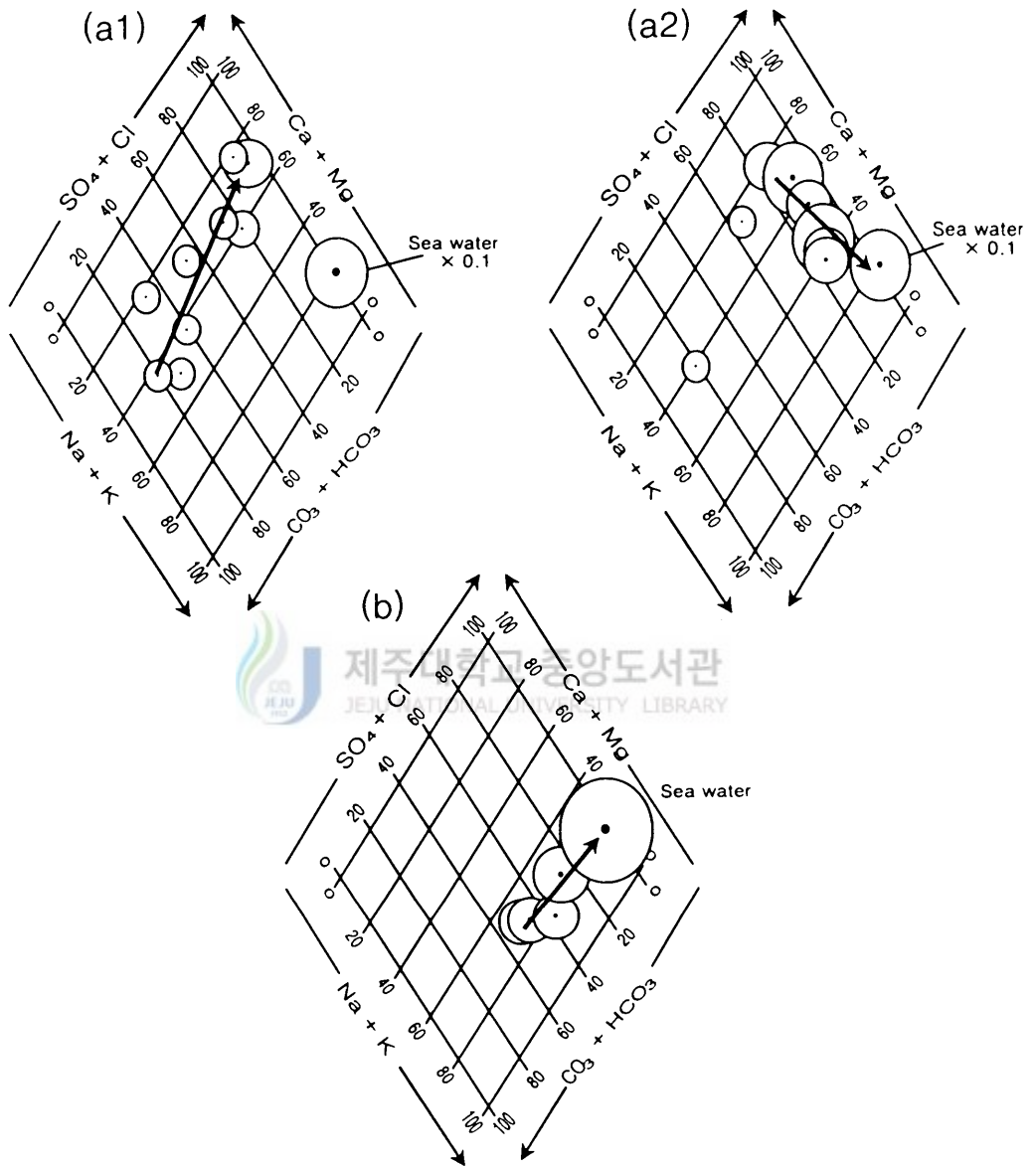


Fig. 5. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water.

Regional sea water intrusion is characterized by ion exchange (a1) and mixing (a2), whereas local mixing of intruded seawater with fresh water along boreholes is characterized by simple mixing (b) (Richter and Kreitler, 1993).

3. 산소안정동위원소 원리

자연계에서 존재하는 산소 안정동위원소의 상대적인 존재량(%)은 Table 2와 같다 (Hoefs, 1980). 산소 중에서 안정동위원소의 존재량이 가장 많은 ^{16}O 와 ^{18}O 를 택하여 그 비($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)를 안정동위원소 연구에 이용하고 있으며, $\delta^{18}\text{O}$ 로 표현한다.

Table 2. The rate of the oxygen isotopic composition(Hoefs, 1980).

Oxygen	Isotopic	^{16}O	^{17}O	^{18}O
	Existent volume(%)		99.763	0.0375

안정동위원소 조성비는 천분율(‰) 단위로 표시하며, 국제표준 시료와 비교하여 정량한 것을 나타내고, 계산공식은 다음과 같다.

$$\delta_{SA}(\text{‰}) = \left[\frac{R_{SA} - R_{ST}}{R_{ST}} \right] * 1000$$

R=안정동위원소 비

ST=국제표준시료(SMOW)

SA=분석시료

안정동위원소는 스스로 핵분열을 하지 않으며, 자연계에서 물질이 처음 생성될 때 구성하는 각 원소는 안정동위원소의 고유한 존재비를 갖는다. 그러나 한번 형성된 물질은 시·공간에 따라 다양한 물리·화학적 작용으로 그 물질의 상(phase)이 변화하며, 이때 안정동위원소의 존재비가 변하게 된다.

지구상의 천수는 지역적으로 δD 및 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화가 매우 크며, 이러한 현상은 위도, 고도, 강우량, 기단의 근원, 계절 등에 좌우되는 것으로 알려지고 있다(Gilfillan,

1934; Epstein and Mayeda, 1953; Fredman, 1953; Dansgaard, 1953; Craig, Boato and White, 1956).

대기중의 수증기는 계속적으로 증발, 응결과정을 거쳐 구름을 형성하고 강수가 되며, 기화되기 쉬운 무거운 분자가 우선적으로 응결하므로 남은 수증기는 점점 ^{18}O 이 적게 된다. 그 결과 당초 같은 기단에서 연속적으로 강수가 일어나면 무거운 동위원소는 점차적으로 감소하게된다. 기단의 응결정도는 온도에 좌우되므로 강수중의 동위원소성분과 강수가 일어날 때의 온도사이에는 밀접한 관계가 있다(김규한, 1982).

대수층내에서는 암석중의 산소와 치환이 일어나지 않는한 물의 동위원소성분은 더 이상 변화되지 않으며, 치환 과정은 대수층내의 상온에서는 미약하여, 지하수내의 동위원소성분은 대수층내에 함양될 시기와 지역의 강수사이에 밀접한 관계가 있다(김규한, 1982).



4. Ghyben-Herzberg 원리

정수력학적 개념(Hydrostatic concept)

W. Badon Ghyben(1888) 과 A. Herzberg(1901)는 비슷한 시기에 임해지역에서 담수지하수가 대수층 내에서 염수지하수위에서 평형상태를 유지하고 있으며, 또한 염수를 치환하고 있음을 발견하였다.

자유면 지하수체가 일반적인 조건하에서 강수는 지하로 침투하여 염수의 상부에서 부존하며 지하수는 계속적으로 해안으로 유출된다. 그리고 담·염수 간의 밀도차에 의해 어느정도의 깊이에서 접이대가 형성되며 이를 경계로 담수와 염수가 나뉘어서 부존하게 된다.

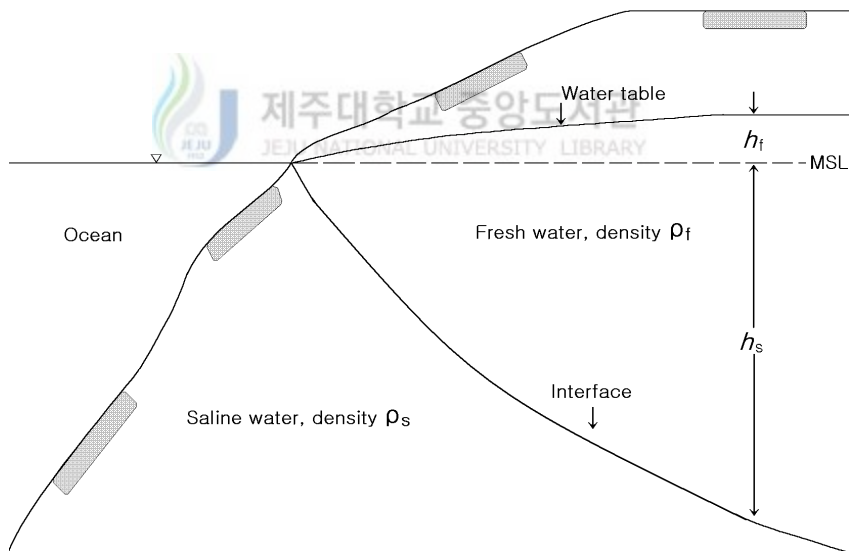


Fig. 6. Fresh water lens an oceanic island under natural conditions(Todd, D.K, 1923).

Ghyben(1888)과 Herzberg(1901)는 임해지역에서 담수와 해수의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$\rho_s g h_s = \rho_f g (h_s + h_f)$$

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

h_s = 평균해수면에서 담수와 해수와의 경계면까지의 높이

h_f = 평균해수면에서 지하수면까지의 높이

ρ_s = 해수의 밀도

ρ_f = 담수의 밀도

$\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$, $\rho_f = 1.000 \text{ g/cm}^3$ 라 하면

$$\therefore h_s = 40 h_f \quad \dots\dots\dots (1)$$

식(1)을 일반적으로 Ghyben-Herzberg 관계식이라 한다.

이 식은 피압지하수에도 자유면지하수와 같은 관계를 구할 수 있으나 이들 모두 “담수-해수체의 평형조건은 지하수면이 해수면보다 위에 있어야 하고, 수리경사는 바다쪽으로 향해야 한다.”는 조건이 필요하다.

초기 연구이래로 이 관계식에 대한 한계가 지적되었다(Hubberr, 1940). 해수침투는 대수층의 규모와 지하수면의 표고에 좌우되며, 해안선 근처에서는 이 관계식은 담수체의 배출을 위한 삼출면(seepage face)을 형성하기 위하여 나누어져야만 한다. 정수 두압 평형이라는 것은 흐름이 없음(no flow)를 의미하지만, 실제에 있어 해안선 근처에서는 지하수의 배출이 끊임없이 일어난다.

Kohout(1960)는 미국 Florida 해안에서 해안선에 직각방향으로 39개의 관측공을 설치하여 담수-해수체 경계면을 조사하였다. 이 결과에서는 서로 다른 밀도를 갖는 담수와 해수가 만나 염소이온농도의 변화를 보이는 전이대(transition zone)가 형성되는

것이 증명되었다. 그렇지만, 실제 담수-해수체 경계면 자체가 밀도차가 미미한 두 유체의 흐름을 경계짓는 흐름이 없는 경계(no flow boundary)인지, 혹은 확산에 의한 전이대가 형성되는 것인지에 대하여는 향후 연구과제로 남겨두었다.

한편, 육지부 기저지하수체의 규모는 충전율, 대수층의 수리전도도 및 피압층의 유무와 관련되며, 담수체의 수축과 조석효과에 따라 경계면에 변화가 일어난다는 견해도 있다(Fetter, 1988). 담수-해수간 경계면 문제는 확산 및 용질이동 이론을 이용하여 수학적으로 연구되기도 하였다(Bredehoeft & Inder, 1973; Segol et al., 1975).



V. 결과 및 고찰

1. 지표지질

농업진흥공사(ADC, 1971)의 지하수개발 타당성 조사를 위한 제주도 지하수 보고서에 수록된 1/10만 제주도 지질도에 의하면, 연구지역은 침상장석감람석현무암(FOB)과 그 상위의 비현정질현무암(APB)이 주로 분포하는 것으로 기재되어 있다(Fig. 7). 또한 해안선에 인접하여 사구층(SD)과 둔지봉을 비롯한 오름을 구성하는 분석층(C)이 소규모로 분포한다. 제주도수자원종합개발계획수립보고서(원종관 외, 1993)에서는 온평리 현무암과 이를 피복하는 둔지봉현무암으로 구분하였는데, 온평리현무암은 침상장석감람석현무암에 대비되고 둔지봉현무암은 비현정질현무암에 대비되는 암석이다.

침상장석감람석현무암은 연구지역을 포함하는 제주도 동부의 해안 저지대를 따라 광범위하게 분포하는 암석으로 파호이호이(pahoehoe) 용암류의 산상을 나타내며, 그 흐름특성에 의해 튜물러스(tumulus)와 같은 작은 구릉이 발달된 넓은 대지상의 지형을 형성하고 있다. 회색 내지 암회색으로 침상의 사장석 미반정과 감람석 반정이 풍부하게 나타나며, 감람석이 집괴되어 나타나기도 한다. 다양한 암상을 나타내지만 대체로 다공질이며, 기공의 모양은 유동방향에 따라 타원형을 이루고 있다. 지표면에 노출된 암체의 표면에 새끼줄구조(ropy structure)가 나타나는 유동성이 높고 점성이 낮은 용암류의 특성을 나타낸다. 본 암이 분포된 지역에는 용암터널이 발달하며, 지표면 상에서 용암터널이 함몰된 솜골 등의 투수성지질구조가 발달하기 때문에 강수의 지하 침투가 매우 쉬운 지질구조적인 특징이 있다.

한동1호공의 상류에서 한동2, 한동3호공 및 둔지봉 방향을 따라 설상(한자)으로 분포된 비현정질현무암은 연구지역에서 침상장석감람석현무암을 부정합으로 피복하며 노출되어 있다. 본 암은 지표에서 그 노출이 쉽게 나타나지 않고 대부분 분석층에 피복되어 나타난다. 본 암을 피복하고 있는 분석층은 높고 낮은 작은 구릉들을 형성하

고 있는데, 이러한 분포양상을 나타내는 분석층은 화산성암설사태(volcanic debris-avalanche)로 형성된 것이다(Yoon et al, 2001). 분지붕에 인접한 지역에 형성된 구릉들이 높고 크며, 분지붕에서 떨어질수록 그 규모가 점차 줄어드는 것으로 보아 화산성암설사태층은 분지붕의 산체붕괴로 형성된 것으로 추정된다. 화산성암설사태층의 하부에 주로 나타나는 비현정질현무암은 반정광물로 사장석이 약 0.3~0.8%, 휘석이 약 0.8~1.5%, 감람석이 약 0.8%로 함유되어 나타난다.

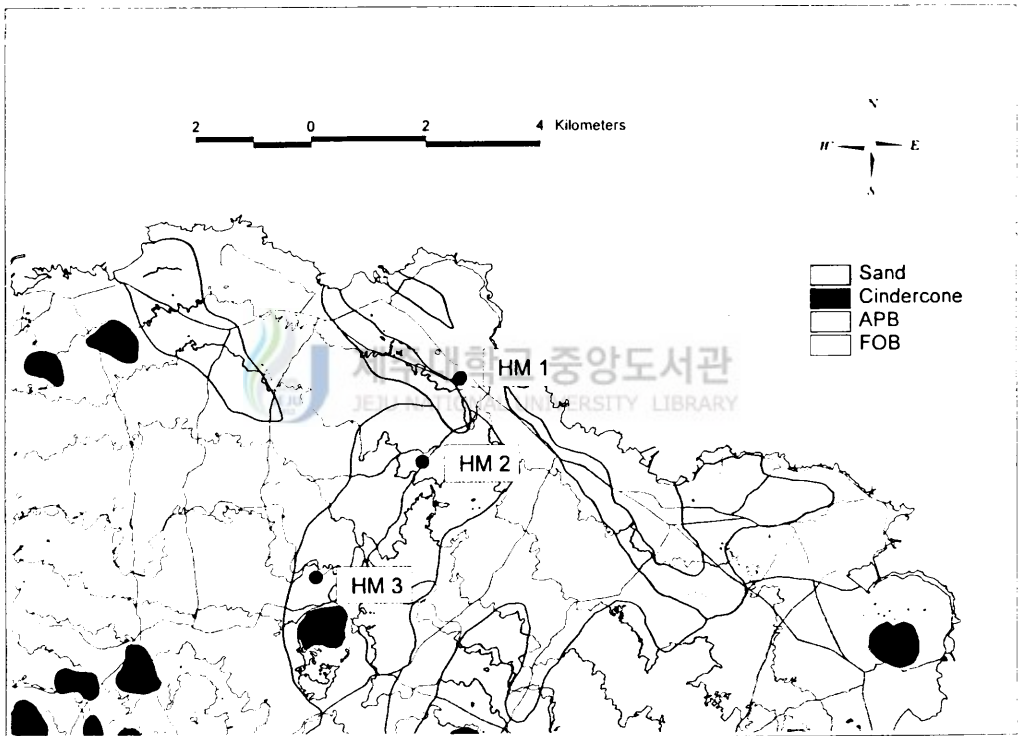


Fig. 7. Geologic map of the north-eastern area in Jeju Island(ADC, 1971).

2. 지하지질

해수침투 감시를 위해 개발된 3개소의 시추공에서 산출된 암석 코아(core)와 시추과정에서 나타난 특징으로부터 지하지질과 대수층 구간을 분석하였으며, 각 시추공의 지하지질을 대비하여 전반적인 지하지질을 추정하였다(Fig. 8). 시추공별 지하지질의 암석기재는 정차연(2002)의 제주도 화산암의 암석명 명명법에 따라 구분하였다.

1) 시추공별 지질

(1) 한동1호공(HM1)

본 시추공은 북제주군 구좌읍 행원리 표고 14.0m 지점에 해수침투 감시를 목적으로 개발되었으며, 가장 가까운 해안선으로부터는 약 0.8km 떨어져있고, 지표하 175m(해수면 기준 -161.0m)까지 굴착되었다.

지표하 82.0m(EL. -68.0m)까지는 지표면에서 나타나기 시작하는 침상장석감람석현무암을 포함하는 감람석현무암(olivine basalt) 계열의 분출단위(eruption unit)로 연속되어 있으며, 각 분출단위의 사이에는 육성 또는 해성기원으로 판단되는 쇄설성 퇴적층이 협재되어 있다. 지표하 82.0m에서 지표하 151.0m(EL. -137.0m)까지는 유리질 쇄설암이 나타나며, 지표하 151.0m에서 굴착 최종심도인 지표하 175.0m(EL. -161.0m)까지는 미고결 내지 준고결 상태의 쇄설성 퇴적층이 분포한다(appendix 1).

(2) 한동2호공(HM2)

본 시추공은 북제주군 구좌읍 한동리 표고 43.0m 지점에 해수침투 감시를 목적으로 개발되었으며, 가장 가까운 해안선으로부터는 약 2.2km 떨어져있고, 지표하 202m(해수면 기준 -159.0m)까지 굴착되었다.

지표하 161.0m(EL. -118.0m)까지는 휘석현무암(augite basalt)과 감람석현무암 계열의 분출단위(eruption unit)로 연속되어 있으며, 각 분출단위의 사이에는 육성 또는 해성기원으로 판단되는 쇄설성 퇴적층이 협재되어 있다. 지표하 161.0m에서 굴착 최종

심도인 지표하 202.0m(EL. -159.0m)까지는 미고결 내지 준고결 상태의 쇄설성 퇴적층이 분포한다(appendix 2).

(3) 한동3호공(HM3)

본 시추공은 북제주군 구좌읍 한동리 표고 114.0m 지점에 해수침투 감시를 목적으로 개발되었으며, 가장 가까운 해안선으로부터는 약 5.1km 떨어져있고, 지표하 262m(해수면 기준 -148.0m)까지 굴착되었다.

지표하 217.5m(EL. -103.5m)까지는 휘석현무암과 감람석현무암 계열의 분출단위(eruption unit)로 연속되어 있으며, 각 분출단위의 사이에는 육성 또는 해성기원으로 판단되는 쇄설성 퇴적층이 협재되어 있다. 지표하 217.5m에서 굴착 최종심도인 지표하 262.0m(EL. -148.0m)까지는 미고결 내지 준고결 상태의 쇄설성 퇴적층이 분포한다(appendix 3).

2) U층

온천탐사를 위한 심부 시추 결과(표고 2.5~214.5m)를 토대로 한 고기원(1997)의 조사에 의하면, 제주도 동부지역은 EL. -82~-145m에서부터 U층(U Formation)이 나타나기 시작하며, 그 층후는 111~180m로 제주도를 형성시킨 초기 화산활동이 일어나기 직전까지 퇴적된 것으로 해석한 바 있다.

본 연구지역에서는 한동1호공의 EL. -152m, 한동2호공의 EL. -137m, 한동3공의 EL. -125m 하부에 U층에 대비되는 지층이 포착되며, 내륙으로 향할수록 점차 보다 높은 위치에서 포착된다. 본 층은 녹회색을 나타내며, 뽀 냄새가 나는 미사질 점토로 미약한 층리를 나타내기도 한다. 원마도가 매우 양호한 현무암질 자갈을 소량 함유하고 있다. 물로 포화되면 약하게 흠어지며, 건조된 상태에서는 준고결된 상태를 보여주는 특징이 있다.

3) 해성퇴적층

U층의 상부에는 미고결의 니질, 미사질, 사질 및 역질로 구성된 해성퇴적층(marine

sediments)이 분포한다. 이들 퇴적층에는 굴껍질을 비롯한 다양한 종류의 패각이 함유되어 있으며, 대부분 층리가 없고 미고결 상태로 산출된다. 한동1호공에서는 EL. -137.0~ -152.0m 구간, 한동2호공에서는 EL. -106.0~ -137m 구간, 한동3호공에서는 EL. -76.0m~ -125.0m 구간에 분포한다. 해성퇴적층 또한 U층과 같이 내륙으로 향할수록 점차 보다 높은 위치에서 포착된다. 한동2호공과 한동3호공에서는 감람석현무암 계열의 용암류가 본 퇴적층에 협재되어 있는데, 이는 본 해성퇴적층의 퇴적환경이 매우 얇은 수저환경이었거나 해안선에 따라 나타나는 해빈환경이었음을 나타내며 또한 시기에 따라 수저환경과 육상환경이 반복되었음을 의미하는 것이다.

본 연구지역을 포함하는 북촌-표선선의 동쪽 지역은 일반적인 제주도의 지하층서에서 화산암과 U층의 중간에 천해성 환경에서 퇴적된 것으로 알려진 서귀포층이 결층되어 나타나지 않는 것으로 연구되어져 왔다(고기원, 1997). 그러나 금 회 시추조사 결과 U층의 상위에 패류화석을 함유한 해성퇴적층이 나타나므로 향후 본 해성퇴적층과 서귀포층과의 관계정립에 관한 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

4) 현무암질 용암류

해성퇴적층의 상위에는 감람석현무암과 휘석현무암 계열에 속한 현무암질 용암류(basaltic lava flow)들의 분출단위(eruption unit)들이 얇은 두께의 육성 또는 해성퇴적층을 협재하면서 지표까지 연속되어 있다. 각 분출단위들은 한 개 내지 수 개의 유동단위(flow unit)로 구성되어 있으며, 각 유동단위는 0.5~33m의 범위로 평균 약 3m의 수직 두께를 보여준다. 대체로 다공질이며, 두꺼운 유동단위에서는 중심부가 기공이 거의 없는 치밀한 조직을 나타내기도 한다. 기공이 밀집된 매우 다공질의 현무암질 화산암들은 파쇄가 심하며, 특히 유리질쇄설암(hyaloclastites)은 유리질 암편과 암괴로 산출되고 있다.

한동1호공의 EL. -35.5~ -43.5m 구간과 EL. -68.0~ -137.0m 구간, 한동2호공의 EL. -28.0~ -37.5m 구간, 한동3호공의 EL. -42.0m~ -48.5m 구간, EL. -64.5m~ -71.0m 구간에는 유리질쇄설암이 분포하고 있다. 본 암은 용암류가 물과 접촉하여 급냉되면서 유리질로 파쇄되어 형성되는 암석으로, 고결도가 낮고 분급이 불량하며, 유리질 피각



(tachylite)을 가진 비현정질의 암괴와 유리질 쇄설암편 및 황회색의 점토가 혼재되어 산출된다. 현무암질 외의 다른 성분의 암편이 나타나지 않고, 황회색의 점토는 매우 세립으로 파쇄된 현무암질 유리가 변질되어 형성된 것으로 판단된다.

5) 대수층

시추공의 암석 코아와 시추과정에서 나타나는 수위변동 등의 특징으로부터 판단해 볼 때, 지하수가 측방 유동할 수 있는 대수층 구간은 각 시추공별로 아래와 같이 추정된다.

한동1호공에서는 EL. -7.0~-9.5m 구간과 EL. -13.0~-14.0m 구간의 미고결 모래층, EL. -26.9~-43.5m 구간의 미고결 모래층과 파쇄가 심한 현무암 및 유리질쇄설암, EL. -53.0~-58.0m 구간의 미고결 사력층과 파쇄가 심한 현무암, EL. -68.0~-152.0m 구간의 유리질쇄설암과 모래 및 자갈층이 대수층으로 추정된다. 본 시추공에서는 특히 EL. -68.0~-137.0m 구간의 두께 69m로 형성된 유리질쇄설암이 매우 양호한 대수층으로 판단되며, 시추공을 통해 미고결 모래층과 파쇄가 심한 현무암 및 유리질쇄설암 등 대부분이 대수층 구간으로 나타난다.

한동2호공에서는 EL. -19.0~-24.5m 구간의 미고결 모래층, EL. -28.0~-37.5m 구간의 유리질쇄설암, EL. -42.5~-49.0m 구간의 파쇄가 심한 현무암, EL. -73.0~-136.0m 구간의 파쇄가 심한 현무암과 모래 및 자갈층이 대수층으로 추정된다. 본 시추공에서는 한동1호공에 비해 EL. -50.0m 위의 구간에서는 대수층의 발달이 약간 미약하나, EL. -50.0m 아래는 한동1호공과 비슷한 대수층의 발달정도를 나타낸다.

한동3호공에서는 EL. -13.0~-17.0m 구간의 미고결 사력층, EL. -42.0~-48.5m 구간과 EL. -64.5~-71.0m 구간의 유리질쇄설암, EL. -76.5~-85.5m 구간의 미고결 모래층이 대수층으로 추정된다. 본 시추공에서는 한동1호공과 한동2호공에 비해 대수층의 발달이 미약하며, 특히 한동1호공과 한동2호공에서 EL. -50.0m 아래에 발달된 유리질쇄설암과 파쇄가 심한 현무암이 한동3호공에서는 두께가 얇게 발달되어 있다.

결론적으로, 3개의 시추공에서 대수층을 형성시킬 수 있는 공극이 많고 투수성이 양호한 지층을 비교해보면, 해안선에 인접한 한동1호공에서는 평균해수면 하부의 거

의 대부분 구간이 대수층을 형성할 수 있는 모래층, 파쇄가 심한 현무암 및 특히 두꺼운 층후를 나타내는 유리질쇄설암으로 구성되어 있으며, 이러한 양상은 한동2호공까지 거의 비슷하게 유지되는 반면, 해안선과 가장 먼 한동3호공에서는 평균해수면 하부의 대수층 구간이 현저히 줄어든 것을 알 수 있다.



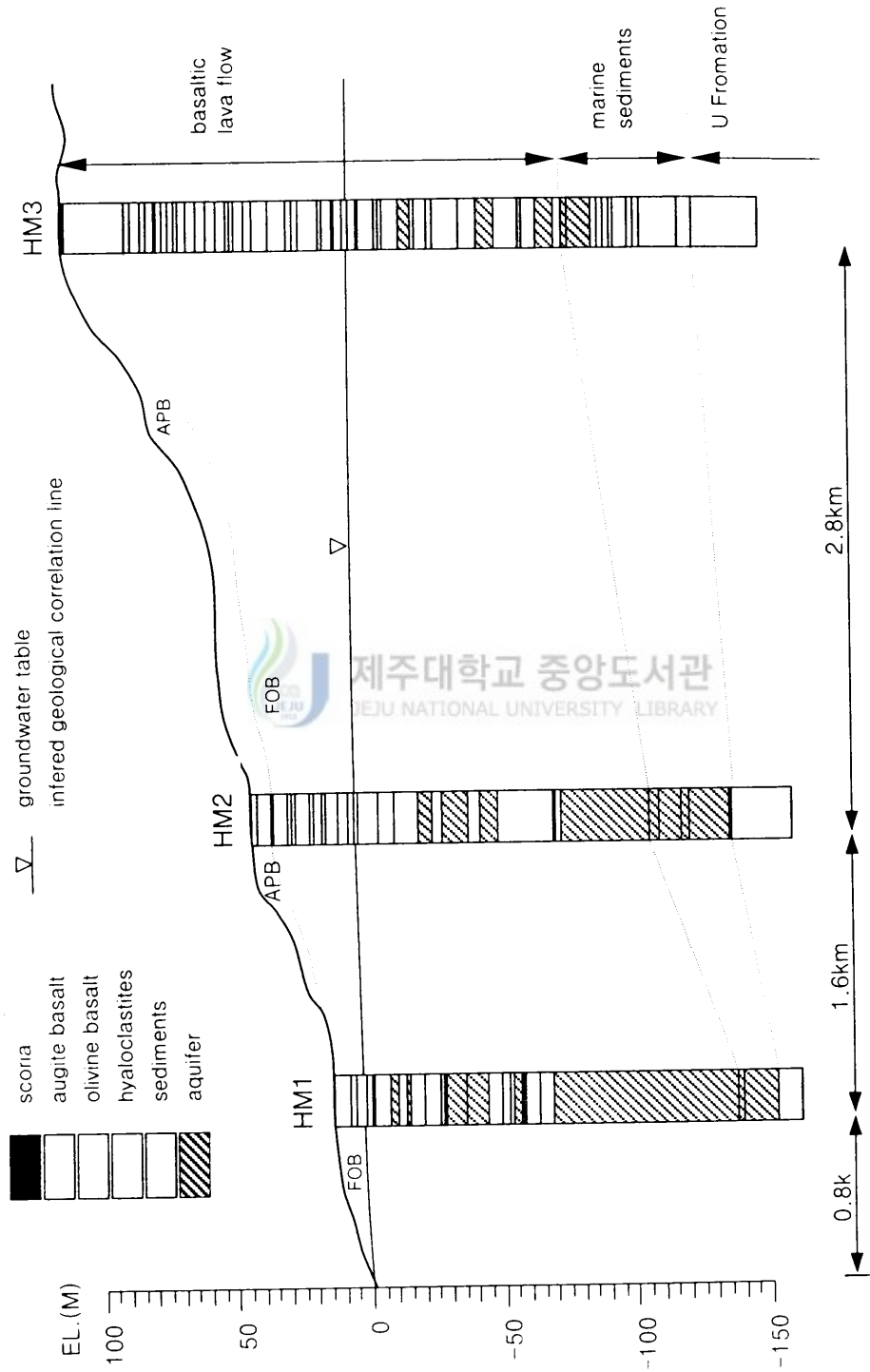


Fig. 8. A-A' line Cross section and Geological profiles.

3. 지하수위 변화

1) 단주기에 의한 지하수위 변화

2001년 8월 29일부터 9월 24일까지 26일간 연구지역 내 한동리 방파제에서 자동수위관측기(CTDP300, Greenspan)를 이용하여 해수면의 변화를 1분 간격으로 측정하였으며, 이와 동시에 각 관측정별로 CTDP300장비를 사용하여 지하수위의 변화 및 전기전도도, 수온, pH 등을 관측하였다. 정확한 해수준면의 기준을 알 수 없어서 관측기간 동안의 평균값을 가상의 평균해수준면(EI. 0m)으로 간주하여 해수면의 변화를 기록하였다.

관측결과 관측기간 동안 해수면의 변화는 9월 17일 16시 03분경에 -1.47m로 저저조를 보였으며, 동일 22시 19분경에 1.36m로 고고조를 기록하여 1일 최대 약 2.83m까지 변화하였다. 한동1호공에서는 동일 17시 01분경에 0.43m로 최저치를 보였으며, 동일 23시 14분경에 1.65m로 최고치를 보여 1일 동안의 지하수위 변동폭이 1.22m로 조사되었다. 이로서 조석효율이 0.43으로 조사되었으며 지연시간(time lag)은 56분을 전후하는 것으로 조사되었다. 한동2호공과 인접한 한동영구관측정에서는 동일 17시 44분경에 4.15m로 최저치를 기록하였으며, 익일 00시 03분에 4.80m로 최고치를 기록하여 1일 최대 0.65m의 변동폭을 보였다. 조석효율은 0.23로 조사되었고, 지연시간(time lag)은 102분을 전후하는 것으로 조사되었다. 해안에서 약 5.1km 떨어진 한동3호공에서는 조석에 의한 지하수위의 일변화는 거의 나타나지 않고 있다(Table 3, Fig. 9).

각 관측정에서의 1일 전기전도도의 변화는 관측기기의 설치심도에 따라 다르게 나타나 그 값을 표현할 수는 없지만 최대치와 최소치를 보이는 시점의 수위 증감 곡선과 일치하지 않음을 알 수 있다. 한편 해수면의 최대변화 시점인 9월 17일의 경우 한동1호공에서의 최대 지하수위를 보이는 시점은 약 23시 14분인데 반하여 전기전도도 값이 최대치를 보이는 시점은 약 22시 39분 전후로 고조 시각은 전기전도도 곡선이 35분정도의 선행하여 나타나고 있다. 그러나, 지하수위가 가장 낮았던 시점은 약 17시 01분인데 반하여 전기전도도 값이 최소를 보인 시점은 17시 30분 전후로 약 29분 차

를 두고 수위의 최저값이 선행하고 있어 전기전도도의 상승 속도와 하강 속도가 다르게 나타났다. 한동영구관측정에서는 전기전도도 곡선이 뚜렷한 일변화를 나타내고 있으나 조석의 변화곡선과는 많은 차이를 보이고 있다. 18일 5시 33분에 지하수위가 고저조를 형성되고 있으나, 전기전도도 값은 4시 11분에 형성되고 있어 88분의 시간차를 두고 선행하는 것으로 조사되었다. 한동3호공에서는 동기간 동안에 관측된 자료가 부족하여 2001년 11월 30일부터 12월 5일까지 10분간격으로 관측한 자료를 이용하였다. 그 결과, 지하수위의 일변화는 매우 미약하거나 거의 거의 보이지 않으나 전기전도도 값의 변화는 뚜렷한 일변화를 보이고 있어 해안에서 5.1km 떨어진 한동3호공에서도 조석의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Variation of water level at each wells by the tide.

	HM1	HL	HM3	Coastal Sea
Distance from coast (km)	0.8	2.3	5.1	-
Wide of level variation (m)	1.22	0.65	-	2.83
Tidal effect	0.43	0.23	-	-
Time lag (minute)	56	102	-	-

그러나, 지하수위 값의 최대, 최소시간과 전기전도도의 최대, 최소시간이 일치 하지 않고 있는 점, 지하수위는 반일주조 형태의 주기를 갖고 있으나 한동3호공에서의 전기전도도 곡선은 일주조 형태의 곡선을 그리고 있는 것, 또한 한동3호공에서 조석에 의한 영향이 지하수위에는 매우 미약하거나 거의 나타나지 않고 있으나 전기전도도 및 온도, pH의 변화 곡선에서는 뚜렷하게 나타나고 있는 것 등에 대해서는 보다 구체적으로 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

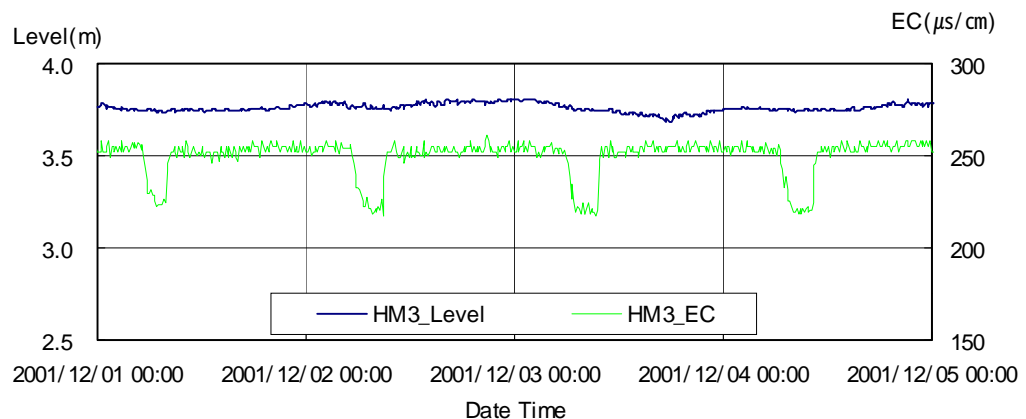
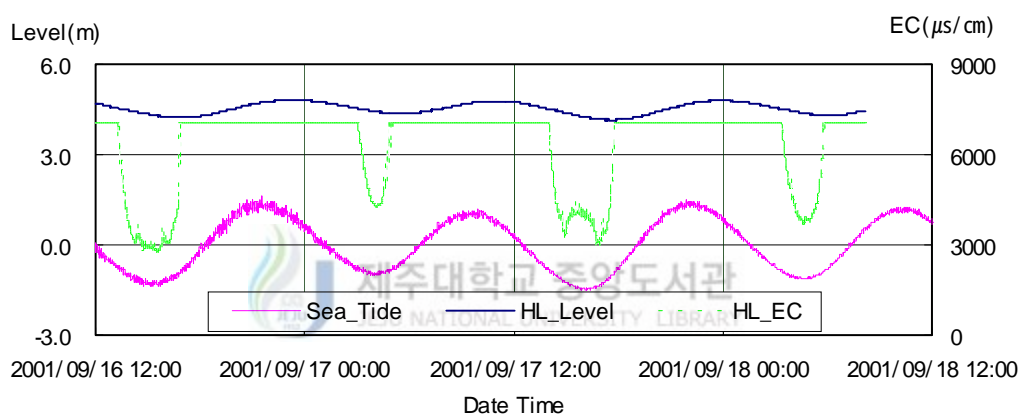
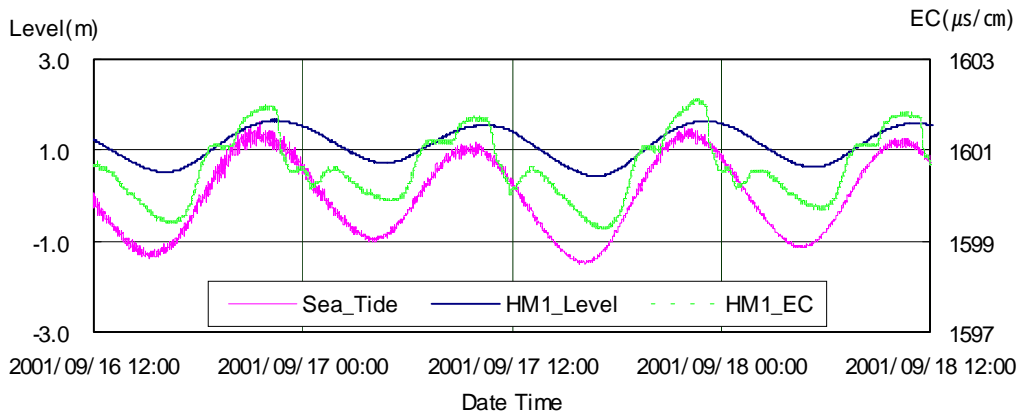


Fig. 9. Variation water level and EC in each well and tide at coastal sea.

2) 장주기에 의한 지하수위변화

제주도는 내륙지방보다 강수량이 600mm이상 많은 다우지역이며, 도서지역으로서 강우와 조석에 의해 지하수위가 주로 변동하고 있는 것으로 알려져 있다(고기원의 3인, 1992; 고기원의 5인, 1992; 고기원의 7인, 1993; 고기원의 2인, 1994; 박원배의 2인, 1994; 고기원의 2인, 1995). 또한 박원배(1993)와 고기원(1997)은 지하수위 변화요인을 강우지배형과 조석지배형 그리고 혼합형으로 구분하고 있으며, 고기원(1997)은 북촌~표선의 동북부, 동부 및 동남부지역을 조석지배형으로 분류한바 있다.

Godin(1966)은 1시간 간격으로 71시간 또는 72시간의 연속관측에 의한 일주조와 반일주조의 태양과 달에 의한 조화를 효과적으로 제거하기 위하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

다음 식은 연속된 수위의 기록을 $O_{(1)}, O_{(2)}, O_{(3)}, \dots, O_{(71)}$ 로 하면 36번째의 평균수위를 구할수 있다.

$$X_i = \sum_{K=0}^{23} \frac{O(K+i)}{24} \quad (i=1, 2, 3, \dots, 48)$$

$$Y_j = \sum_{i=0}^{23} \frac{X(i+j)}{24} \quad (j=1, 2, 3, \dots, 25)$$

36번째 시간의 평균 수위

$$M = \sum_{j=1}^{25} \frac{Y_j}{25}$$

이 방법에 의하여 한동영구관측정의 수위를 재 산정하였다.

Fig. 10은 한동영구관측정에서 1시간 간격으로 2000년 12월부터 계속하여 관측되고 있는 수위자료와 조천읍사무소에서 관측되고 있는 기상자료(강수량)와의 관계를 도시한 것이다. 한동영구관측정에 관측된 수위자료에서 조석에 의한 수위변화는 2001년 1월 11일 2.38~3.06m까지 변화하여 1일 최대 0.68m의 변동폭을 보이고 있다. 한편, 강우에 의한 변화는 2001년 3월의 적은 강우 영향으로 2.62m까지 하강하였던 수위는 6월의 집중강우 영향으로 3.34m까지 수위가 상승하고 있어 약 3개월 동안에 0.72m의 수위상승을 보였다. 다시 7월의 적은 강우 영향으로 수위가 하강하였다가 8월이후 다

시 회복됨을 보이고 있어 평상시에는 조석의 영향에 의해 수위가 변동하고 있으며, 강우시에는 조석과 강우의 혼합된 형태로 수위가 변화하고 있음을 알 수 있다.

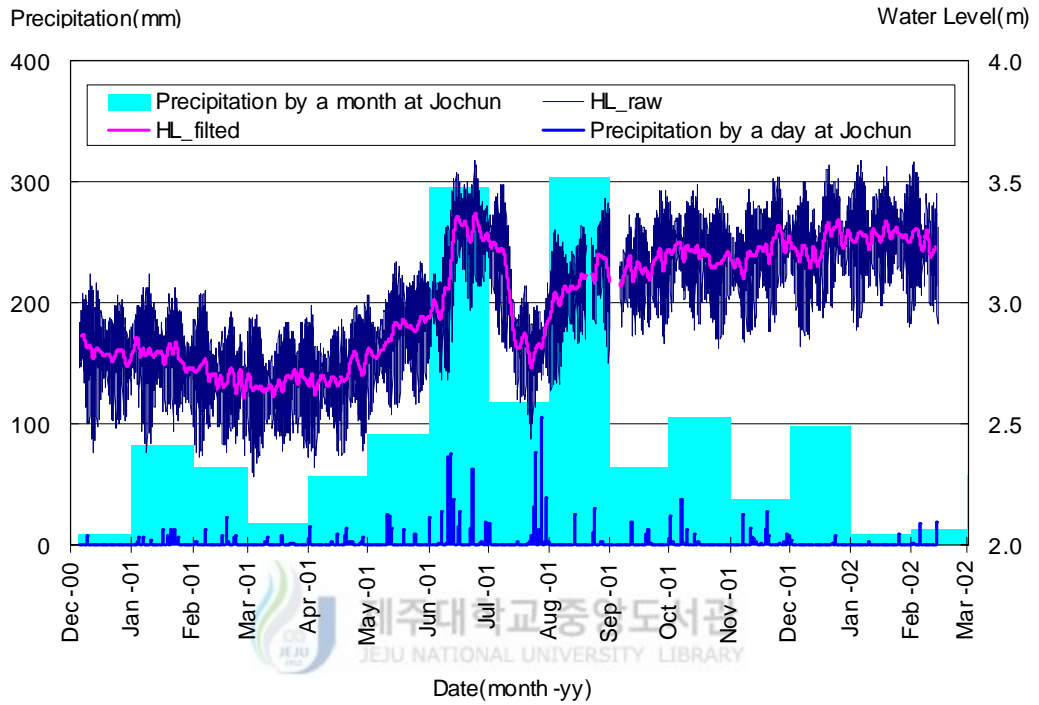


Fig. 10. Variation water level of the HL well and precipitation.

4. 수질특성

한동1, 2, 3호공에서의 시료 채취는 상층부와 하층부로 나누어 시료를 채수하였는데 다음과 같다. 한동1호공은 지표하 30m, 100m에서 채수하였고, 한동2호공에서는 점이 대층이 넓게 나타나 지표하 50m, 90m, 130m에서 채수하였으며, 한동3호공서는 지표하 160m 210m에서 채수하여 주요이온성분 및 산소안정동위원소 조성비를 분석 하였다.

1) 주요이온성분 분석

한동1, 2, 3호공 및 인근 해안에서 채수한 시료를 제주도보건환경연구원에 의뢰하여 주요이온성분에 대하여 분석한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Chemical composition of groundwater in the monitoring wells.

	Depth (m)	NO ³ -N	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ³⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
HM1	30	6.43	348.46	55.19	74.05	10.55	184.79	26.10	18.26
	100	0.90	18,827.70	2,511.30	153.40	314.12	9,272.55	1,145.23	376.80
HM2	50	4.60	98.35	17.48	52.11	3.09	54.55	10.56	8.45
	90	1.80	12,106.81	1,896.54	137.13	208.93	6,491.75	742.31	264.10
	130	1.90	18,962.36	3,049.64	178.27	337.73	9,967.40	1,107.58	384.70
HM3	160	1.03	25.34	4.75	49.37	1.84	15.27	4.37	5.17
	210	1.50	13,690.34	1,942.87	61.71	124.71	6,369.60	952.55	1,287.10
Sea water		1.80	20,730.19	3,161.48	171.41	350.78	9,905.80	1,142.64	386.20

한동2호공 상부층(HM2_50m)의 수질형태는 Na-Mg-Cl-HCO₃형을 이루고 있고, 한동3호공 상부층(HM3_160m)의 수질형태는 Na-Mg-HCO₃-Cl형을 이루고 있다. 특히 한동3호공의 상부층의 경우 해수의 성분과는 달리 Na와 Cl이온의 감소와 Ca와 HCO₃의 현격한 증가를 보이고 있는 것으로 나타나 일반적인 담수지하수 형태를 보임으로써 해수의 영향을 거의 받지 않는 담수지하수로 판단할 수 있다.

한동2, 3호공의 상부층을 제외하면 그 수질형태가 모두 Na-Cl형을 보여 직·간접적으로 해수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이는 한동1호공 상부층(HM1_30m), 한동2호공 상부층(HM2_50m), 한동3호공 하부층(HM3_210m)은 해수내에 함유하고 있는 Na이온이 대수층내의 Ca와 Mg를 포함한 광물들과 치환반응을 일으킨 결과로 사료되며, 또한 상부층에서 계속 공급되는 담수지하수의 영향을 받아 Ca와 Mg이온 및 중탄산이온의 증가로 인하여 담수와 염수의 혼합대의 지하수로 판단된다.

각 관측정의 심도별 지하수를 양·음이온을 분석한 결과를 토대로 지하수의 수질 특성을 파악하고자 piper diagram 및 stiff diagram으로 나타내었다(Fig. 11, 12). piper diagram에서는 한동3호공의 상부층(HM3_160m)을 제외하면 모두 해수 인근에 집중되고 있어 이곳을 제외하면 해수의 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 특히 한동1, 2호공의 저층은 해수와 완전히 일치하고 있다. 해수의 영향을 직접 받고 있는지를 알아보기 위하여 Richter와 Kreitler(1993)가 제시한 모델(Fig. 5)과 비교하면 Fig. 5의 (b)의 형태와 동일한 양상을 보여주고 있어 이는 시추공을 따라 유입된 해수와 단순혼합의 특징이라 할 수 있다(Fig. 11, Table 4).

지하수의 주요이온성분 분석 결과를 stiff diagram에 작도하여 보면 전술한바와 같이 양이온 중에서는 Na⁺, 음이온중에서는 Cl⁻이온이 가장 큰 영향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 각 관측공의 저층에서 stiff diagram의 형태는 해수의 형태와 거의 유사한 경향을 보여주고 있어 이는 해수의 직·간접적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다(Fig. 12).

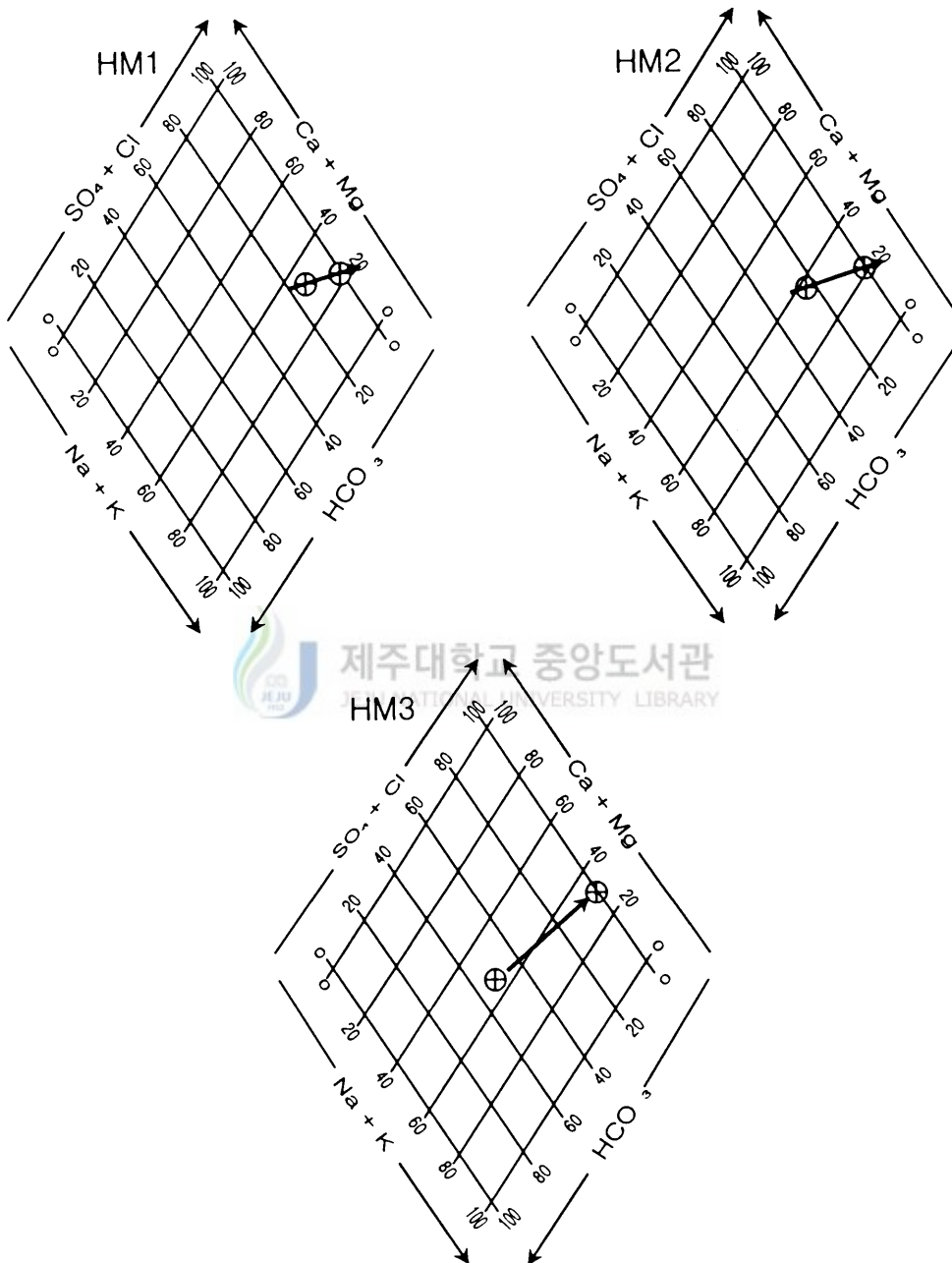


Fig. 11. Piper diagram of chemical composition of the study area.

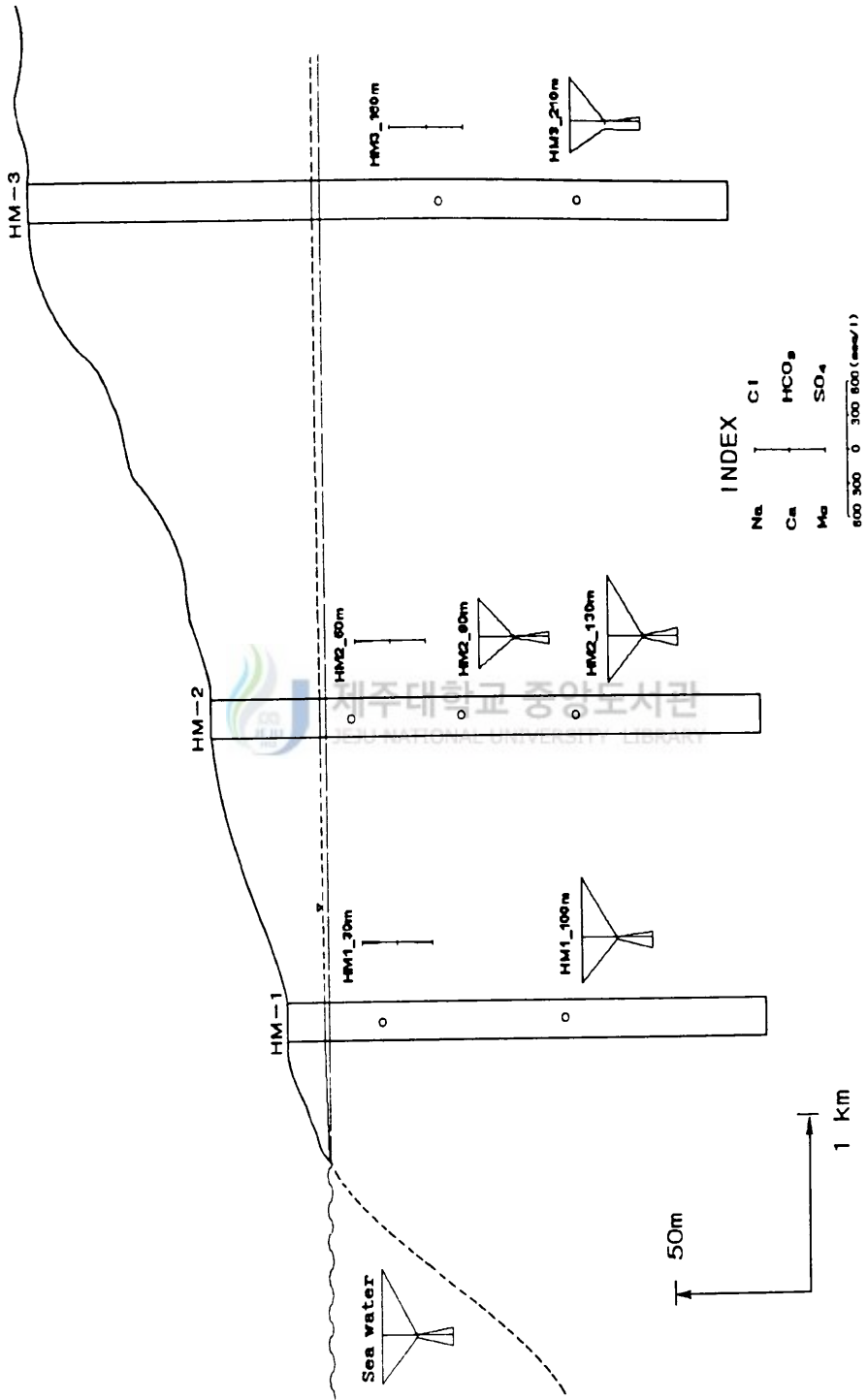


Fig. 12. Stiff diagram of chemical composition of study area.

2) 산소안정동위원소 조성

해수에 의해 영향을 받지 않는 배경 지하수와 해수를 두 성분으로 하여 대상시료가 이들 두 성분에서 어느 정도 영향을 받고 있는가는 다음과 같이 계산할 수 있다 (Clark & Fritz, 1997).

$$f_S = \frac{\delta_G - \delta_F}{\delta_S - \delta_F} \dots\dots\dots (2)$$

f_S = 지하수내의 해수비율

δ_G = 시료의 산소동위원소 조성

δ_F = 배경지하수의 산소동위원소 조성

δ_S = 해수의 산소동위원소 조성

제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(I)(제주도, 2001) 자료에 의하면 제주도 지하수의 산소안정동위원소 조성은 -5.6~-8.0‰의 값을 보이며, 평균 -7.1‰이며, 동부지역의 평균값은 -6.8‰이었다. 이 조사자료에 의하면 제주도의 지하수는 계절별로 기온의 차이에 의한 강수의 산소안정동위원소 조성비가 다르게 나타나며, 용천수의 경우 고도차이가 크므로 조성비가 다양하게 분포함을 볼 수 있다(Fig. 13). 또한, 동부지역의 지하수가 서부지역의 지하수보다 조성비가 높게 나타나는 것은 서부지역보다 낮은 지역에서 함양이 이루어지기 때문이라고 해석하였으나, 동부지역의 지하수가 일부 염수와 혼합된 것임을 간과할 수는 없을 것이다.

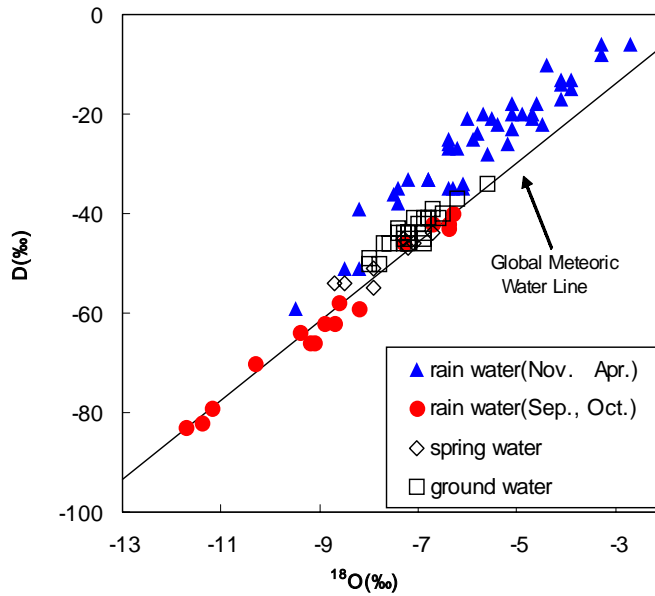


Fig. 13. The oxygen and hydrogen isotopic composition in water(provine Jeju, 2001).

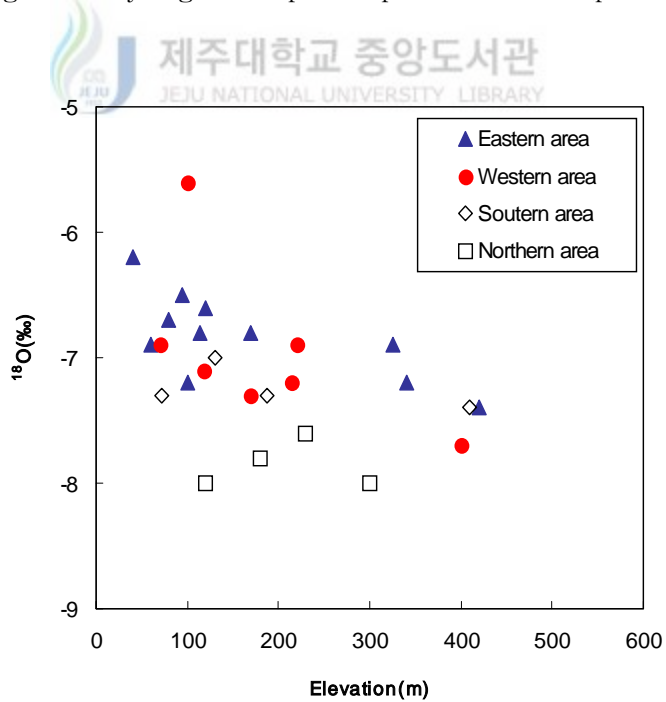


Fig. 14. The oxygen isotopic composition in ground-water(provine Jeju, 2001).

Table 5. Result of oxygen stable isotopes compositions in each well and coastal sea.

	HM1_ 30	HM1_ 100	HM2_ 50	HM2_ 90	HM2_ 130	HM3_ 160	HM3_ 210	Sea water
$\delta^{18}O$ (‰)	-6.66050	0.06375	-6.81125	-2.50625	-0.07500	-7.01275	-1.72725	0.07275
ratio of saline-water for $\delta^{18}O$ (%)	4.97	99.87	2.84	67.84	97.92	0.00	74.17	100.00
ratio of saline-water for EC (%)	1.96	90.64	0.45	53.84	88.974	0.00	67.62	100.00

Table 5는 한동3호공의 상부층의 지하수와 해수를 배경수질로 하여 식(2)에 의해 계산된 결과이다. 한동1, 2호공의 상층부에서는 각각 4.97%와 2.84%의 해수비율을 보이고 있으며, 한동1, 2호공의 저층부는 각각 99.87%와 97.92%로 해수와 거의 흡사함을 알 수 있었다. 한동3호공 저층부에서는 해수비율이 67.62%로 한동1, 2호공에 비하여 상당히 적은 값을 나타내고있어 내륙쪽으로 갈수록 해수비율이 낮아지고 있음을 알 수 있다.

5. 전기전도도 및 온도 검층

온도의 수직검층은 공내 물의 온도를 측정함으로써 지하수와 오염물질의 이동과 근원을 밝히는데 중요한 역할을 한다. 또한 공내의 물의 전기전도도측정에 선행하거나 동시에 측정하여 이를 보정하는데 쓰인다(Keys and MakCary, 1971; Keys, 1990).

온도검층은 물을 공내로 들여보내거나 내보내는 심도구간의 위치를 포함한 공내 물의 흐름에 관한 유익한 정보를 제공해주며, 투수성 분포와 상대적인 수두에 관한 정보를 얻을 수 있다. 또한, 온도 센서는 좁은 범위 안의 공내 물이나 공기의 온도에만 반응하지만 이 때 기록된 온도는 입접한 암석과 암층내 물의 온도를 지시할 수 있다(Keys and MakCary, 1971; Keys, 1990). 일반적인 수온변화는 심부로 갈수록 지하층 온도에 의하여 증가하는 경향을 보여, 지온 경사가 일정하다는 것은 공내에 유체의 흐름이 거의 없으며, 같은 지층으로 구성되어 있음을 지시하고 공내의 물의 흐름이 없는 경우 인접한 암석의 온도를 지시하기도 한다.

전기전도도는 전기장이 가해졌을 때 전류를 흐르게 할 수 있는 물질이 능력을 의미하며, Hounslow(1995)는 전기전도도 값과 양이온 총량과의 관계를 『전기전도도 = 양이온의 총량(meq/l) * 100』으로 표현하였고, 한정상(1998)은 지하수에 의해 희석된 해수(점이대 가까운 구간)의 Cl농도와 EC와의 상관관계를 『 $Cl = 0.2976EC$ 』로 표현하였다.

해수침투 문제에서 물리검층은 공내수의 전기전도도 분포를 파악하고 수리지질학적 단위를 구분할 수 있다(Morin and Urish, 1995). 또한 전기비저항 값을 등가염분농도로 환산하기 위한 변환식 도출에 이용되기도 한다(Barker, 1990).

조사지역에서 전기전도도 및 온도의 수직 검층을 2002년 1월 14일부터 19일까지 각 관측정별로 2시간 간격으로 24시간(13회) 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 한동1호공(HM1)

한동1호공에서의 검층결과 자연수위에서부터 지표면하 50m까지는 전기전도도 값이 1,000~1,500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 범위를 보이며, 지표면하 51.6m~58m 사이에서 급격히 증가하고 있고, 지표면하 63.5m 이하에서는 48,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 내외의 값이 공저까지 동일한 값을 보이고 있다(Fig. 15). 지표면하 51.6m에서 연속관측의 평균값은 1,974 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 상부점이 대의 전기전도도 값을 보이고 있으며, 지표면하 58m에서는 46,129 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 을 보여 불과 6.4m의 범위에서 44,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이상의 큰 변화를 보이고 있다.

온도의 변화 곡선의 평균값은 지하수면에서 17.1 $^{\circ}\text{C}$ 였던 값이 지표면하 14m 구간(수심 약 0.75m)에서 17.27 $^{\circ}\text{C}$ 으로 상승하였다가 지표면하 47m에서부터 15.96 $^{\circ}\text{C}$ 내외로 최소값을 보이고 있다. 지표면하 약 51m부터는 전기전도도 값이 급격히 증가하면서 수온도 전기전도도의 농도 구배를 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 온도 값이 최저치를 보이는 지표면하 약 47m~51m 구간에서 저온의 냉수가 유입되고 있으며, 그 상부에서 높은 값을 보이는 것은 지온에 의한 것으로 해석된다. 또한 지하수면하 약 0.75m 구간에서 수온이 증가하는 것은 지표와 직접적으로 연결된 공내를 따라 들어온 차가운 공기가 지하수면의 표층에 영향을 주는 것으로 사료된다. 지표면하 76m에서부터 전기전도도 값은 거의 일정한 값을 보이는 반면, 수온 값은 지표면하 76m, 116m, 131m, 142m, 150m 등에서 조금씩 증가하는 양상을 보이고 있어 이는 공내로 유입된 지하수는 같은 염분농도를 갖으나 수온이 서로 다른 각각 다른 대수층에서 지하수가 유입됨을 알 수 있어 지질조건이 각기 다른 지층으로 형성되어 있음을 이번 검층에서도 확인 할 수 있었다.

검층기간 동안 지하수위의 변화는 12.88m~13.69m로 0.81m의 수위 변화를 보인 반면 전기전도도 급경사구간의 변곡점(전기전도도 값이 20,000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 초과하는 최저심도)의 변화는 52.67m~53.05m로 0.38m로 나타나 지하수위 변화폭 보다 적은 약 0.5배 정도 변화하였다.

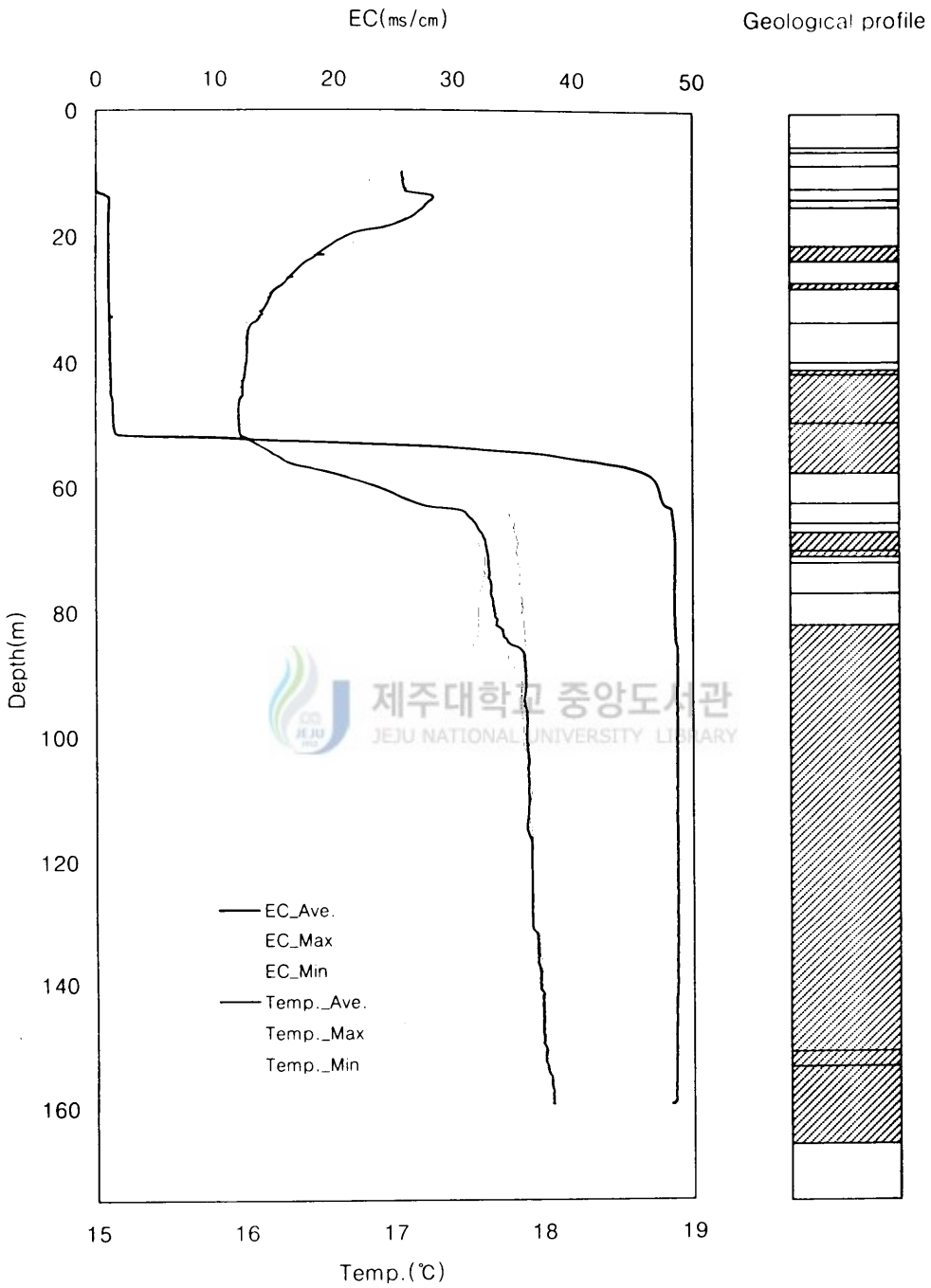


Fig. 15. EC, temperature Logging data and geological profile at HM1 well

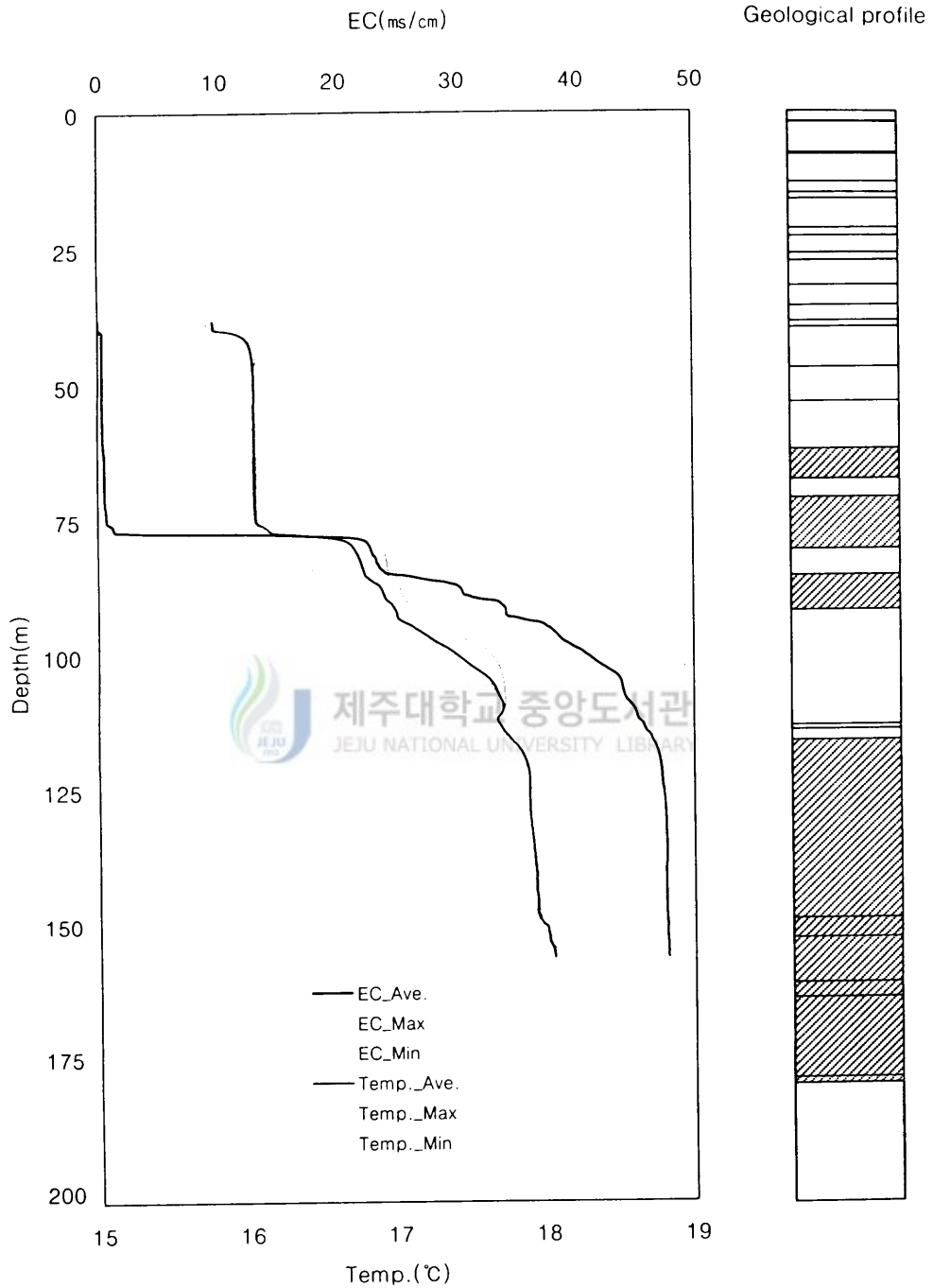


Fig. 16. EC, temperature Logging data and geological profile at HM2 well

2) 한동2호공(HM2)

한동2호공에서는 자연수위 부근에서 전기전도도 값은 약 $350\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 값을 보이며, 지표면하 75m까지 지속적으로 증가하여 약 $1,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 값을 보이고 있다. 이후 지표면하 약 77m부터 지표면하 120m 구간까지는 구간별로 층을 이루며 증가하여 $47,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 이상의 값을 보이고 있고, 그 이상의 심도에서는 동일한 값을 보이고 있다(Fig. 16). 수온의 변화는 지면에서의 온도변화가 지표면하 약 60m(지하수면하 약 20m)까지 영향을 미치며 그 이하에서는 16.05°C 내외로 안정정도로 나타나고있고, 전기전도도 값의 심도에 따른 농도경사구배를 따라 지속적으로 증가하여 공저에서 18.05°C 로 최고값을 보이고있다. 이는 본 공은 점이대 상하부 구간에 다층의 수리지질학적 지질구조를 이루고 있으며 경계면 상하부에서는 투수성이 좋은 파쇄대 구간이 발달되어있어 이 층에서 각기 다른 지하수체가 혼입되는 것으로 해석된다.

검층기간 동안 지하수위의 변화는 40.11m~40.59m로 0.48m의 수위 변화를 보인 반면 전기전도도 급경사구간의 변곡점(전기전도도 값이 $5,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 초과하는 최저심도)의 변화는 77.06m~78.52m로 1.46m로 나타나 지하수위 변화폭 보다 약 3배정도의 폭을 갖고있다.



3) 한동3호공(HM3)

한동3호공에서의 전기전도도 값은 한동1호공에서와 비슷한 형태의 그래프를 나타내고 있으나 그 값은 상이하다. 표층에서의 전기전도도 값은 약 $100\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 값을 나타내고 있고, 지표면하 178m 부근까지는 최대 $240\mu\text{s}/\text{cm}$, 평균 약 $130\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 전형적인 일반 지하수위 전기전도도 값을 보이고 있으나, 전기전도도 값이 $1,300\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 보이는 지표면하 180m를 경계로 급격히 상승하여 지표면하 184m에서 $33,000\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 최대변화 구간을 보이고 있다. 그 이하 심도에서는 유사한 값의 전기전도도를 보이며 공저에서 평균값이 $33,200\mu\text{s}/\text{cm}$ 으로 최대값을 보이고 있다(Fig. 17). 공내를 따라 들어온 대기의 온도 변화는 지표면하 약 150m(지하수면하 약 40m)까지 변화시키고 있으며, 지표면하 184m까지는 전기전도도의 농도구배를 따라 증가하고 있으나 그 이하 심도에서는 전기전도도의 구배보다 급한 구배로 지속적으로 증가하여 공저에서는 약

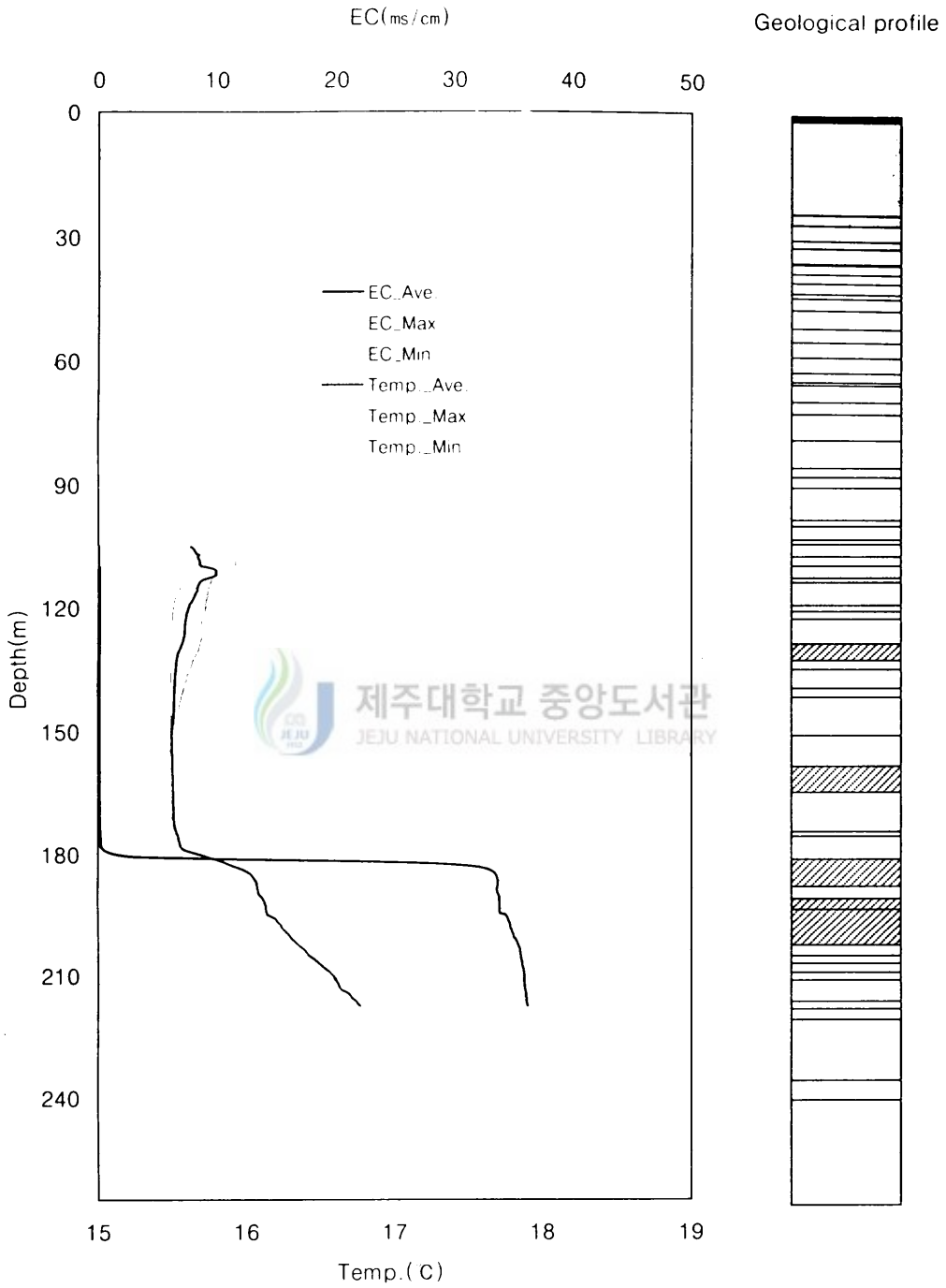


Fig. 17. EC, temperature Logging data and geological profile at HM3 well

16.76°C를 보이고 있다. 본 공에서는 한동1, 2호공에 비하여 전기전도도의 최대값이 낮으며, 수온이 전체적으로 낮게 나타나고 있다. 전기전도도 값이 낮고 수온이 심부에서 지속적으로 증가하며, 관측공 개발이 끝난 7일 후에 검층한 결과(Fig. 18)를 보면 심부에서 전기전도도 값이 낮아지는 경향을 보이고 있어 이는 굴진시 작업수가 정체되어 있는 것으로 예상되어 심부에서는 대수층의 발달이 미약한 것으로 사료된다.

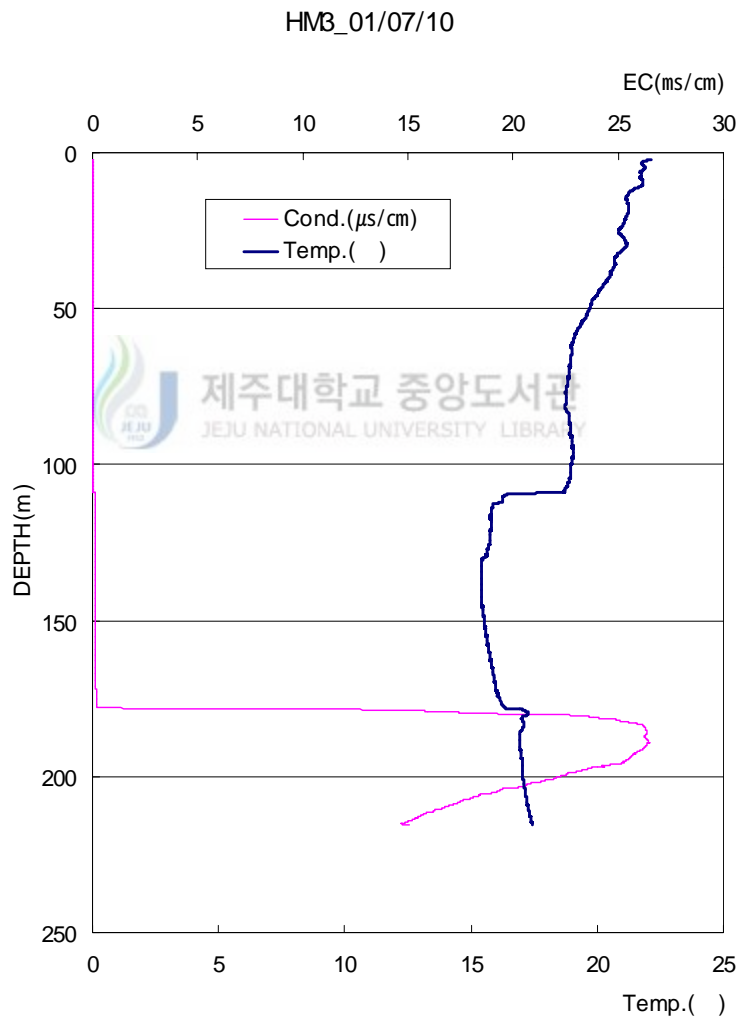


Fig. 18. EC and temperature Logging data-2 from HM3 well.

검층기간 동안 지하수위의 변화는 109.98m~110.07m로 0.09m의 수위 변화를 보인 반면 전기전도도 급경사구간의 변곡점(전기전도도 값이 15,000 μ s/cm를 초과하는 최저 심도)의 변화는 181.44m~181.59m로 변화폭은 0.15m로 나타나 지하수위 변화폭과 비슷한 값을 보였다.

따라서 조사지역의 관측점에서 전기전도도와 수온의 변곡점이 여러군데에서 나타나고 있는 것은 여러 대수층에서 유입된 각기 다른 지하수체에 의해 형성된 것으로 지하수의 유입은 주로 특정 대수층에서 이루어지며, 이들 대수층은 각기 다른 성분의 지하수체를 포장하고있음을 의미한다.

4) 심도별 전기전도도변화

연속 검층결과 자료를 토대로 임의의 심도를 정하여 그 심도에서의 시간대별 전기전도도 변화를 알아보았다.

Fig. 19, 20, 21에서 보는바와 같이 조석 효과에 따른 전기전도도 변화는 대수층마다 각각 다르게 나타나며, 최고농도를 나타내는 시간도 대수층마다 다르게 나타나는 것으로 보인다. 그러나 보다 정밀한 이해를 위해서는 전기전도도 기록계를 다층으로 장시간 설치한 정밀조사가 필요하다.

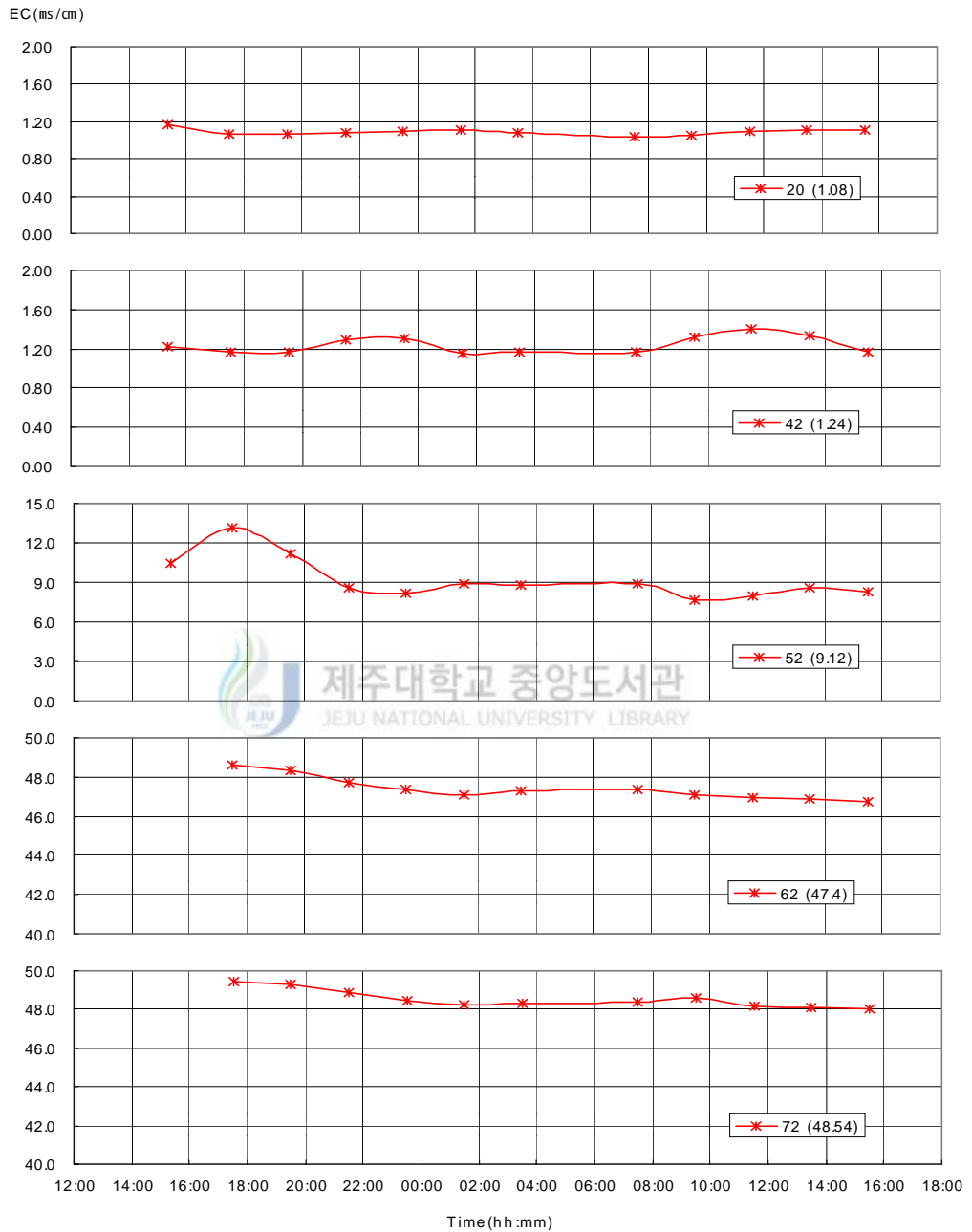


Fig. 19. Variation of EC by depth and time from HM1 well.

Note is depth(B.G.L., m) and parenthesized phrase is average of EC(ms/cm).

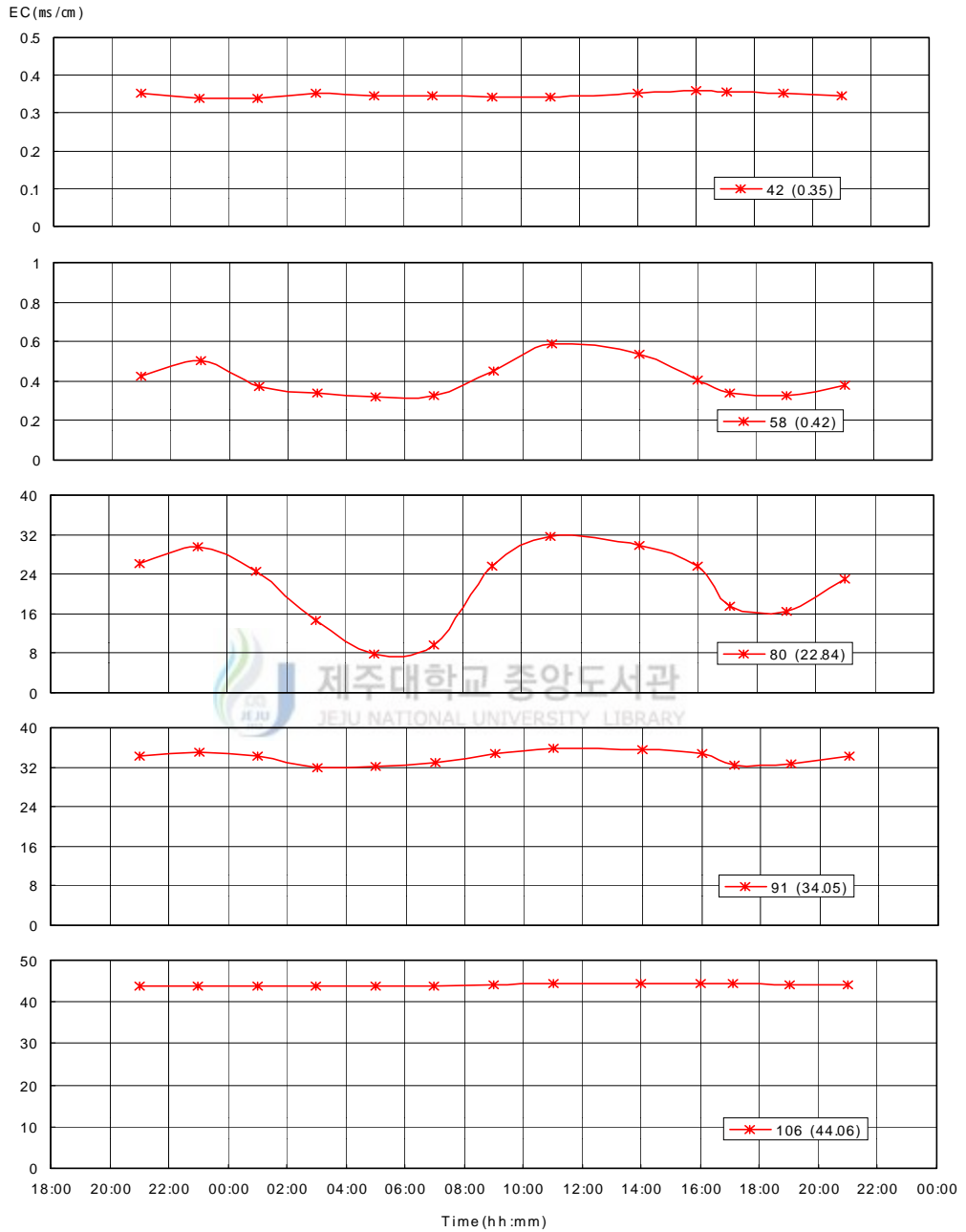


Fig. 20. Variation of EC by depth and time from HM2 well.

Note is depth(B.G.L., m) and parenthesized phrase is average of EC(ms/cm).

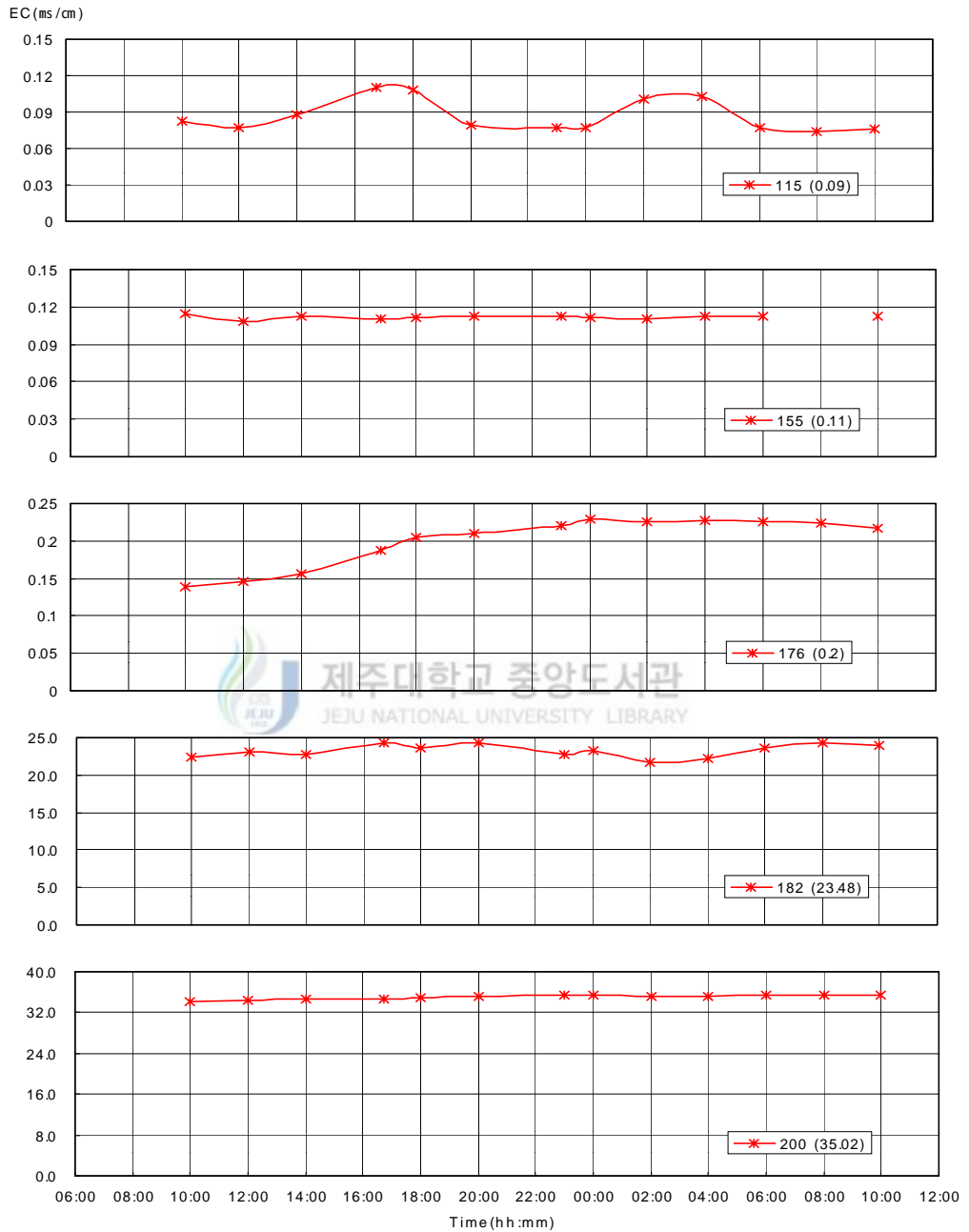


Fig. 21. Variation of EC by depth and time from HM3 well.

Note is depth(B.G.L., m) and parenthesized phrase is average of EC(ms/cm).

5) 담·염수 경계면의 깊이 산정

해양분야에서 주로 활용되고 있는 밀도 계산식으로서 H. W. Harvey(1960)는 밀도와 염분의 상관관계 그래프를 온도는 0~30℃, 염소이온농도는 0~22(g/kg)의 범위에서 작성하고 있어 담수에서도 활용이 가능할 것으로 사료된다.

$$\rho = 1 + \sigma_t/1000$$

$$\sigma_t = A + B * \sigma_0 + C * \sigma_0^2$$

$$\sigma_0 = -0.069 + 1.4708 * Cl - 0.001579 * Cl^2 + 0.0000398 * Cl^3$$

$$A = (4.53168 T - 0.545939 T^2 - 1.98248 * 10^{-3} T^3 - 1.438 * 10^{-7} T^4) / (T + 67.26)$$

$$B = 1 - 4.7868 * 10^{-3} T - 9.8135 * 10^{-5} T^2 - 1.0843 * 10^{-6} T^3$$

$$C = 1.8030 * 10^{-5} T - 8.164 * 10^{-7} T^2 + 1.667 * 10^{-8} T^3$$

ρ : 밀도(g/cm^3)

σ_t : t °C에서의 밀도

σ_0 : 0 °C에서의 밀도

Cl : 염분농도(g/kg)

T : 현장온도(°C)



따라서, 조사지역의 각 관측점에서 층별로 채수한 지하수의 염소이온과 온도를 활용하고 상기 식에서 밀도를 계상하여 G-H이론과 비교하였다.

조사결과 한동1호공에서는 이론적인 담·염수 경계면의 심도와 실제 관측된 심도가 각각 53.6m와 40m로 관측된 경계심도가 다소 낮게 형성됨을 알 수 있었으며, 한동2호공에서는 이론적 경계심도는 147.3m인데 반하여 실제 나타나는 심도는 34m에 불과하였고, 한동3호공에서 이론적 경계심도는 208.8m인데 반하여 실제로는 68m에서 경

계면이 형성되고 있다(Table 6). 이는 한동1호공에서는 담·염수 경계면 하부에서 파쇄대 구간의 발달이 양호하여 G-H이론의 등질 등방의 지질조건에 가까운 지질조건을 가지며 U층의 출현심도가 해안거리에 비하여 상대적으로 깊은 곳에서 형성됨으로서 염수의 유동이 용이하기 때문으로 해석된다.

Table 6. Depth of interface zone in study area.

	Water level (El. m)	Layer	Cl ⁻ Consistency (g/kg)	Temp. (°C)	Density (g/l)	the Depth by Theoretical (m)	the Depth by Observed (m)
HM1	1.3	upper(30m)	0.348	16.17	0.999473	53.6	40
		lower(100m)	18.828	17.89	1.023703		
HM2	3.65	upper(50m)	0.098	16.05	0.999155	147.3	34
		lower(130m)	18.962	17.80	1.023912		
HM3	3.8	upper(160m)	0.025	15.50	0.999145	208.8	68
		lower(210m)	13.690	16.30	1.017333		

VI. 결론

제주도 동부 해안지역에 산출되고 있는 고염분 지하수의 근원을 알아보기 위하여 구좌수역 한동리 인근에 개발된 3개소의 관측공을 중심으로 지하수위 및 전기전도도 변화, 주요이온성분 분석, 산소안정동위원소 조성비, 지하수 물리검층 등을 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 한동1, 2, 3호공의 지하지질 구조를 살펴보면 지하수면 하부에 사질층, 암편과 암괴로 산출되는 유리질쇄설암 등 많은 구간이 대수층을 형성시킬 수 있는 공극이 많고 투수성이 양호한 지층으로 구성되어 있으며, 유리질쇄설암은 내륙에서 해안으로 갈수록 그 층후가 두터워 해수의 유동을 원활히 할 수 있을 것으로 예상할 수 있었다.

2. 한동1, 2호공에서의 조석효율은 각각 0.43, 0.23으로 조사되었으며, 지연시간은 각각 56분, 102분으로 나타났다. 해안에서 5.1km 떨어진 한동3호공에서는 조석에 의한 수위변화는 거의 없거나 매우 미약하였으나, 전기전도도 값은 일변화를 보이고 있어 한동3호공에서도 조석의 영향을 다소 받고 있음을 알 수 있었다.

3. 해안에서 약 2.2km 떨어진 한동영구관측공은 조석에 의한 일변화는 최대 0.68m 까지 변화를 보였고, 강우에 의한 최고수위의 차는 0.74m로 지하수위 변화는 조석과 강우에 의한 혼합 형태를 보이는 것으로 조사되었다.

4. 주요이온성분 및 산소안정동위원소를 사용한 수질분석결과 한동1, 2호공의 저층에서는 해수와 거의 유사한 수질특성을 보였고, 한동3호공의 상부에서는 해수의 영향이 거의 없는 지하수였으며, 한동1, 2호공의 상부에서는 해수의 성분과 유사하나 담수와 해수의 단순혼합에 의한 지하수채임을 알 수 있었다.

5. 전기전도도 및 온도 물리검층결과 각 관측정에서 담·염수경계면이 확인 되었고, 경계면의 심도는 G-H의 이론보다 비교적 얕은 심도에서 형성되고 있음을 알 수 있었다. 한동1, 3호공에서는 점이대구간이 수 m내에 불과하였으나 한동2호공의 경우 각 대수층에서 단계별로 전기전도도 값이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 경계면

상하부에 투수성이 양호한 지층이 다층으로 분포함으로써 경계면이 점이적으로 형성되고있는 것으로 보여진다.

6. 한동리 지역에 개발된 3개의 관측공에 대한 담·염수 경계면의 변화양상을 조사한 결과 이들 관측공 하부에는 투수성이 양호한 유리질쇄설암이 해안으로 갈수록 잘 발달되어있고, 해저까지 연결되어있으며, 이 층은 고염분수의 주 유동 경로로 추정된다. 이의 상부층은 조석에 의한 운동량이 많고 저층의 염분이 상부층로 전이되는 것은 그 운동량에 비례하는 것으로 보인다.

따라서, 제주도 동부해안 한동리지역에서 산출되고있는 고염분 지하수는 이들 지역의 수리지질적인 특성에 의해 담·염수 경계면을 형성하고 있으며, 단순혼합에 의한 자연적인 고염분 지하수가 부존하는 것으로 해석되었다.

그러나, 각 대수층별로의 특성을 알기 위하여는 대수층 상·하부구간을 밀봉한 상태에서 특정 대수층을 대상으로 하는 수위, 수질 측정 및 양수시험을 통해 수리특성을 파악하여야하고 대수층내에서 수평, 수직흐름 속도 등을 알아내는 등 향후 많은 연구가 지속되어야 할 것이다.

참고문헌

- 건설부, 제주도, 한국수자원공사(KWRC), 1993, 제주도수자원종합개발계획수립보고서.
- 고기원, 박원배, 고용구, 김성홍, 오상실, 윤선, 1992, 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구, 제주도보건환경연구원보 제3권 pp. 15~43.
- 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, 1992, 제주도의 지하지질구조와 지하수위 변동과의 관계 (II)-조석에의한 지하수위 변동-(요약)지질학회지 제28권 5호, pp. 540~541.
- 고기원, 고용구, 윤정수, 1994, 제주도 동·서부지역의 지하수 수질특성과 표고별 및 계절별 수질변화 양상에 관한 연구(요약). 대한지질학회 제49차 학술발표집, pp. 40~41.
- 고기원, 문영석, 양성기, 1995, 제주도 동북부지역 지하수의 수위변동과 수질조성에 관한 연구, 제주대학교 환경연구소 환경연구논문집 제3권 1호, pp. 101~126.
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문.
- 고기원, 2001, 제주도광역수자원관리본부, 하와이주의 수문지질과 지하수관리.
- 농림부, 농업기반공사, 2001, 해수침투조사 사업 보고서(2001).
- 농업진흥공사(ADC), 1971, 제주도지하수보고서.
- 농업진흥공사, 제주도, 농림수산부, 1989, 제주도 지하수 장기개발계획 조사 보고서.
- 농업기반공사 제주도지사, 2001, 제주도 화산암의 암석 명명 규약(안).
- 김규한, 1982, 동위원소의 지하수학에 응용, 지질학회지 제 18권 제 3호, pp. 167~171.
- 김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, Journal of Korean Society of Groundwater Environment, Vol. 4, No. 2, pp. 61~72 June, 1997.
- 박윤석, 고기원, 강봉래, 박원배, 2002, 2001년 제주도 해수침투 감시관측망 구축사업 성과; 제주도의 물·세계의 물 도민의 자산, 제10회 세계 물의 날 기념 학술세미나, 제주도, pp. 73~113.

- 박원배, 1993, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문.
- 박원배, 양성기, 고기원, 1994, 제주도 지하수의 수질변동에 관한연구, 한국환경화학회지, 제3권, 제4호, pp. 333~248.
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구: 제주도연구 제3지, pp. 309~326.
- 이상호, 1994, 제주도해안 지하수의 염수침입 개연성: 제주도 지하수자원환경학적보전과 개발이용, pp. 145~165.
- 이원우역, 1984, 해양화학, 대한교과서주식회사.
- 정차연, 2002, 제주도 서부해안 지역의 지질과 지하수, 부산대학교 박사학위 논문.
- 제주도, 2000, 제주도 지하수 보전·관리 계획 보고서.
- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(I).
- 한규언, 신희섭, 2000, 제주도 해안지역 고염분 현상에 관한 고찰: 지질재해 관측 및 방지기술 심포지엄, 2000년도 자연재해방재기술개발사업단·(사)대한지질공학회 공동학술발표회 논문집, pp. 150~171.
- 한규언, 이상선, 정차연, 2000, 해수침투 방지를 위한 물리검층과 GIS활용방안: 농업현장에 필요한 물리탐사 기술, 한국지구물리탐사학회 2000 정기총회 및 특별 심포지움, 한국지구물리탐사학회, pp 54~68.
- 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.
- Bernd C. Richter and Charles W. Kreitler, 1993, Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-water Salinization.
- 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., Jr., Kohout, F.A., Henry, H.R. and Glorer, R.E., 1964, Sea waer in coastal aquifers, relation of salt water and frash water. U.S. Geological Sruvey, Water Supply Paper 1613c, p. 84.
- Craig H., Boato G. and White, D. E., 1956, Isotopic geochemistry of thermal waters. Nat, Acad. Sci. Nucl., Rep. 19, pp. 26~36.
- Dansgaard W., 1953, The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapour, Tellus, 5, pp. 461~469.
- Epstein S. and Mayeda T., 1953, Variation of the ^{18}O content of waters from natural sources. Geochim. Cosmochim. Acta., 4, pp. 213~214.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.K., 1979, Groundwater. Prentice-Hall, Inc. Eaglewood Cliffs, New Jersey, p. 604.
- Friendman I., 1953, Deuterium content of the natural water and ice, Goechim. Cosmochim. Acta., 4, pp. 89~103.
- Friendman I., Machta, and Soller, R., 1962, Water vapour exchange between a water droplet and its environment, J. Geophys, Res, 67, pp. 2761~2766.
- Gilfilan E. S. Jr., 1934, The isotopic composition of the sea water, J. Am. Chem. Soc., 56, pp. 406~408.
- Herzberg, B., 1901, Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder, Jou. Gasbeleuch- tung und Wasserversorgung, Vol. 44. p. 815~819.
- Hoefs, J., 1980, Stable Isotope geochemistry (second edition) Spring-verlag. New York, p. 208.
- Hubbert, M. K., 1940, The theory of groundwater motion, Jour. Geol., 48, pp.785~944.
- Fetter, C. W. Jr., 1998, Applied hydrogeology, Merrill Pub. Com., p.592.
- Kohout, F.A., 1961, Fluctuation of Groundwater Levels Caused by Dispersion of Salts, J. Geophysical Research, 66(8), pp. 2429~2434.
- Morin, R. H., Urish, D. W., 1995, Hydrostratigraphic characterization of a coastal aquifer bt geophysical log analysis, Cape Cod national seashore, Massachusettes ; The log Analysis, 35, pp. 27~37.

Appendix

1. 한동1지구 지질주상도
2. 한동2지구 지질주상도
3. 한동3지구 지질주상도



1. 한동1지구 지질주상도

Locality		33°32' 17.6" / 126°46' 24.1"		
elevation		14.0m	well name	HM1
depth		175.0m	logger	Cha-yeon Jung
depth (m)	thickness (m)	geologic profile	rock name	occurences
5.5	5.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of fiver flow units thickness of flow units : 0.5-5.5m reddish gray to dark gray vesicular acicular plagioclass, olivine phenocrysts
6.0	0.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
8.3	2.3	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
12.0	3.7	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
13.8	1.8	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
15.0	1.2	////////////////////		
21.0	6.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	upper part : very vesicular
23.5	2.5	////////////////////	sediment	unconsolidated, fine to medium sand
27.0	3.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	medium to dark gray olivine(0.5-3mm in diameter) rich
28.0	1.0	////////////////////	sediment	unconsolidated, shell fragment-bearing medium to coarse sand
33.4	5.4	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of three flow units thickness of flow units : 1.3-6.2m vesicular
39.6	6.2	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
40.9	1.3	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
41.6	0.7	////////////////////	sediment	shell fragment-bearing, dark gray fine to medium sand
49.5	7.9	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of several flow units, vesicular, fractured
57.5	8.0	 	hyaloclastites	dark gray, consists of glassy to aphanitic fragments, contains fractured angular rubbles of isolated pillows
62.5	5.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of three flow units vesicular
65.7	3.2	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
67.0	1.3	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		

depth (m)	thickness (m)	geologic profile	rock name	occurrences
70.0	3.0	////////////////////	sediments	unconsolidated upper part : consists of reddish fractured fragments lower part : weathered boulder-bearing mud
	1.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of four flow units upper two flow units : very vesicular and fractured reddish gray to dark gray acicular plagioclase, olivine phenocrysts
	1.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
	5.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
	5.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
82.0	69.0	 	hyaloclastites	dark gray consists of glassy to aphanitic fragments of acF-OB contains fractured angular rubbles of isolated pillows
151.0	2.5	//////////////////// ////////////////////	sediments	unconsolidated consists of well rounded granitic, dacitic and basaltic boulders(3~20cm in diameter)
153.5	12.5	//////////////////// //////////////////// ////////////////////	sediments	unconsolidated, light gray well matured contains shell fragments(oyster) fining-upward upper part : silt lower part : sand
166.0	9.0	//////////////////// //////////////////// ////////////////////	sediments	greenish light gray silt unconsolidated to semiunconsolidated foul smell slightly
175.0				

2. 한동2지구 지질주상도

Locality		33°31 ' 29.6 " / 126°48 ' 59.6 "		
elevation		44.0m	well name	HM2
depth		202.0m	logger	Cha-yeon Jung
depth (m)	thickness (m)	geologic profile	rock name	occurrences
2.0	2.0	////////////////////	sediments	dark gray silt
	5.5	▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	vesicular, fractured
8.0	0.5	////////////////////	sediments	unconsolidated, yellowish gray mud
	5.0	◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of two flow units, vesicular
13.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇		
15.0	1.0	////////////////////	sediments	unconsolidated, reddish mud
21.5	5.5	◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of three flow units, dark gray, vesicular
	23.0	1.5		
26.0	3.0	◇◇◇◇◇◇◇◇		
27.5	1.5	////////////////////	sediments	unconsolidated, yellowish mud weathered boulder-bearing
32.0	4.5	◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of seven flow units thickness of flow units : 1.2-9.0m reddish gray to dark gray vesicular acicular plagioclase
	35.5	3.5		
38.3	2.8	◇◇◇◇◇◇◇◇		
	39.5	1.2		
47.0	7.5	◇◇◇◇◇◇◇◇		
	53.0	6.0		
62.0	9.0	◇◇◇◇◇◇◇◇		
	67.5	5.5	////////////////////	sediments
71.0	3.5	◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	vesicular

depth (m)	thickness (m)	geologic profile	rock name	occurrences
80.5	9.5		hyaloclastites	consists of glassy to aphanitic rubbles of AB
	5.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of two flow units lower unit : reddish vesicular fragments and rubbles
85.5	6.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
92.0	21.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of four flow units lower two three units : very fractured
113.0		◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
114.0		◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
116.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇			
116.0	33.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇ ◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
149.0	3.7	////////////////////	sediments	unconsolidated, greenish light gray mud to sand shell fragment-bearing
152.7	8.3	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	fractured
161.0	3.0	////////////////////	sediments	unconsolidated, greenish light gray mud
164.0	15.0	//////////////////// ////////////////////	sediments	unconsolidated, light gray sand well matured, contains shell fragments
179.0	1.0		reworked hyaloclastites	consolidated
180.0	22.0	//////////////////// //////////////////// //////////////////// ////////////////////	sediments	unconsolidated to semiconsolidated greenish light gray, silty mud contains rounded basaltic pebbles
202.0				

3. 한동3지구 지질주상도

Locality		33°30 ' 19.5 " / 126°47 ' 49.5 "		
elevation		114.0m	Well name	HM3
depth		262.0m	logger	Cha-yeon Jung
depth (m)	thickness (m)	geologic profile	rock name	occurences
1.3	1.3	▣▣▣▣▣▣▣▣▣▣	scoria	reddish
	22.7	▽▽▽▽▽▽▽▽ ▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	vesicular to massive
24.0	2.5	////////////////////	sediments	unconsolidated, reddish mud wethering boulder-bearing
26.5	3.7	▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	light to dark gray
30.2	1.8	////////////////////	sediments	unconsolidated, reddish mud
32.0	3.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of nineteen flow units thickness of flow units : 0.5-9m reddish gray to dark gray acicular to lathlike plagioclase olivine phenocrysts upper part of a flow unit : very vesicular
35.5	0.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
36.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
38.0	2.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
40.5	2.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
43.0	1.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
44.0	3.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
47.0	4.2	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
51.2	3.4	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
54.6	3.8	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
58.4	3.6	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
62.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
64.0	1.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
65.0	4.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
69.0	3.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
72.0				

depth (m)	thickness (m)	geologic profiles	rock name	occurrences
78.0	6.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	
	6.6	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
84.6	2.4	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
87.0	2.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
89.5	7.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
97.0	1.5	////////////////////		
98.5	3.5	▽▽▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	large vesicles
102.0	1.0	////////////////////	sediments	reddish mud
103.0	3.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	vesicular
106.0	2.0	////////////////////	sediments	unconsolidated, vesicular rubbles and mud
108.0	3.0	▽▽▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	large vesicles
111.0	1.0	////////////////////	sediments	reddish to yellowish gray mud
112.0	5.5	▽▽▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	consists of two flow units
117.5	1.5	▽▽▽▽▽▽▽▽▽▽		
119.0	2.0	////////////////////	sediments	unconsolidated, vesicular rubbles and mud
121.0	6.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	large vesicles
127.0	4.0	////////////////////	sediments	consists of reddish fragments
131.0	2.0	////////////////////		reddish mud
133.0	4.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	medium gray
137.5	2.0	////////////////////	sediments	reddish to yellowish gray mud
139.5	9.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	medium gray
149.0	7.0	▽▽▽▽▽▽▽▽▽▽	AB	upper part : vesicular, fractured
156.0	6.5		hyaloclastites	consists of glassy to aphanitic rubbles of AB
162.5	9.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	medium gray
172.0		◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		upper part : vesicular

depth (m)	thickness (m)	geologic profiles	rock name	occurrences
173.0	1.0	////////////////////	sediments	reddish vesicular rubbles and mud
178.5	5.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	medium to dark gray upper part : vesicular
185.0	6.5		hyaloclastites	consists of glassy to aphanitic fragments of OB contains fractured angular rubbles of isolated pillows
188.0	3.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	dark gray, massive
190.5	2.5	////////////////////	sediments	light gray, unconsolidated, contains shell fragments(oyster)
199.5	9.0	////////////////////	sediments	unconsolidated coarse sand to fine pebble shell fragment-bearing
202.0	2.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇	OB	consists of seven flow units thickness of flow units : 2-5m vesicular
204.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
206.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
208.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
213.0	5.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
215.0	2.0	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
217.5	2.5	◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇		
232.0	14.5	//////////////////// //////////////////// ////////////////////		
237.0	5.0		reworked hyaloclastites	yellowish medium gray semiconsolidated to consolidated
262.0	25.0	//////////////////// //////////////////// //////////////////// //////////////////// ////////////////////	sediments	unconsolidated to semiconsolidated greenish light gray silty mud foul smell slightly

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 아낌없는 지도와 격려로 보살펴주신 윤정수교수님께 진심으로 감사 드립니다. 관심과 정성으로 가르침을 주신 고유봉 교수님, 최영찬 교수님, 방익찬 교수님, 이준백 교수님, 윤석훈 교수님의 가르침에 감사를 드리며, 부족한 저에게 조언과 비판 아끼지 않으신 제주발전연구원 박원배 박사님께 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 중에도 논문을 수정해 주시고 방향을 제시해 주신 제주도광역수자원관리본부 고기원 박사님과 박윤석, 문영석, 강봉래 선생님께도 감사를 드리며, 동위원소분석을 해주신 한국기초과학지원연구원 이광식 박사님께도 고마운 마음을 전합니다.



직장에서 학업에 충실 할 수 있도록 배려해주신 농업기반공사 제주도본부 민승식 본부장님과 정대요 지하수부장님, 이용섭 과장님, 이상선 과장님, 신희섭, 원순규, 서정진, 안중기, 우동광, 김창욱 계장님께 감사드리며, 지질 주상도를 작성해 주시고 논문의 지질부분을 수정해주신 정차연 계장님께 감사의 마음을 전합니다. 지질연구실 후배들과 영향조사팀의 후배 동림, 창석, 병훈, 성우, 정선에게도 고마운 마음을 전합니다.

늘 근심과 사랑으로 지켜봐 주신 아버님, 어머님, 동생들, 장인어른, 장모님과 사랑하는 아내 은순, 딸 가람과 조카 선욱과 함께 결실의 기쁨을 나눕니다.