

## 조석에 따른 제주도 동부지역 염지하수의 수질특성

오 윤 근

제주대학교 환경공학과

### Water Quality Characteristics of Groundwater Salinization in the Eastern Area of Jeju Island with Tidal Levels

Youn-Keun Oh

*Department of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea*

The salinization of groundwater is widely known as one type of water contamination in all over the coastal area. To investigate this salinization of groundwater, the various approaches are needed because its characteristics is widely changed from area to area and from time to time, depending on the aquifer conditions.

The purpose of this study is to investigate the physical and chemical characteristics of salinization of groundwater at the east area of Jeju island. For this purpose, the major ions of groundwater, are analyzed according to the well depth and tidal levels. The results obtained from this study are summarized as follows:

At D-28 well, the deeper the well depth, the greater the degree of water quality fluctuation with tidal levels. However, this phenomenon is appeared inversely at D-124 well. This difference is due to the existence of the specific permeation structure such as cracks and joints at the same level with mean sea level at their location. It is found that time lag between tidal level and the fluctuation of water quality is 2~2.5 hours at D-28 well, and 3~3.5 hours at D-124 well. As the depth of well is deeper, the concentrations of major ions are increased, excepting the case of  $\text{NO}_3^-$  originated from the land sources.

**Key words** : groundwater, salinization, tidal levels

### 서 론

제주도 지하수는 제주도민의 생활과 산업을 뒷받침하는 유일한 수자원이다. 제주도에서는 지난 20여년간 원예농가의 증가와 대형화, 가축사육두수의 증가, 골프장 및 휴양시설의 증가에 따른 지속적인 지하수 개발로 지하수 오염이 확대되어 문제가 되고 있다. 제주도의 지하수는 다른 지역에서보다 비교적 산

업 폐기물에 의한 오염이 덜된 것으로 보고되고 있으나 바다와 직접 접해 있기 때문에 해수침입이 예견되어 왔으며 제주도 동부지역의 경우 지하수의 염수화는 심각한 문제로 대두되고 있다. 1940년대 Oahu도 진주만 지역의 지하수 관정에서 염도 증가로 폐공이 발생된 것과 같이 이러한 염수화는 해안변에서 수리구배가 대단히 완만한 지역에서 주로 나타나고 있다 (최, 1994; 권 등, 1997).

제주도의 지하수체는 강수 등이 중력에 의해 지하

로 침투하여 흐름장을 형성하는데 불투수면을 중심으로 상위지하수 (high level groundwater)와 기저지하수 (basal ground water)체를 형성하고 이동과 배출의 수문학적 순환과정을 거치면서 물 균형 (water balance)을 이루고 있다. 담수와 해수가 접하는 곳에는 동적평형상태를 유지하고 있으며, 어떤 폭을 갖는 혼합부분인 점이대를 형성한다. 이러한 점이대는 간만의 차, 담수의 유입 및 기타 양수에 의하여 지하수위 변화에 따라 확산된다 (최, 1988).

일반적인 지하수 염수화의 잠재 요인으로서는 1) 자연적인 염지하수 (natural saline groundwater), 2) 암염의 용해 (halite solution), 3) 해수침입 (sea-water intrusion), 4) 가스나 유정에 의한 고염화 (oil-and gas- field brine), 5) 농지에서 유출 (agricultural effluents), 6) 염화확산 (saline seep), 7) 용설제에 의한 염화 (road salt) 등이 있다 (Richter et al., 1993).

제주도 동부지역의 지하수 염수화 원인에 대해 현재까지 수행된 연구결과에 의하면 제주도 형성 당시부터 염지하수가 부존할 수 있는 지질구조로 인한 자

연적인 현상 (고 등, 1997), 과잉양수에 의한 해수침투 (최 등, 1991), 토양 및 사구층내의 염분의 용해·침투에 의한 현상 (윤, 1986)이라고 보고되고 있다.

지하수의 염수화는 해안을 접하고 있는 대부분의 지하수에서 잠재되어 있는 현상으로 대수층의 조건에 따라 시·공간적으로 변동하고 매우 복잡하기 때문에 광범위하게 논의되어야 하며 다양한 접근이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 제주도 동부지역 지하수를 대상으로 조석에 따른 시간별, 심도별 수질변화를 비교 분석하여 그에 따른 특성을 고찰하였다.

## 연구내용 및 방법

### 연구내용

제주도 동부지역 지하수 염수화의 조석에 따른 수질변화를 관측하기 위하여 Fig. 1의 두 곳의 관정

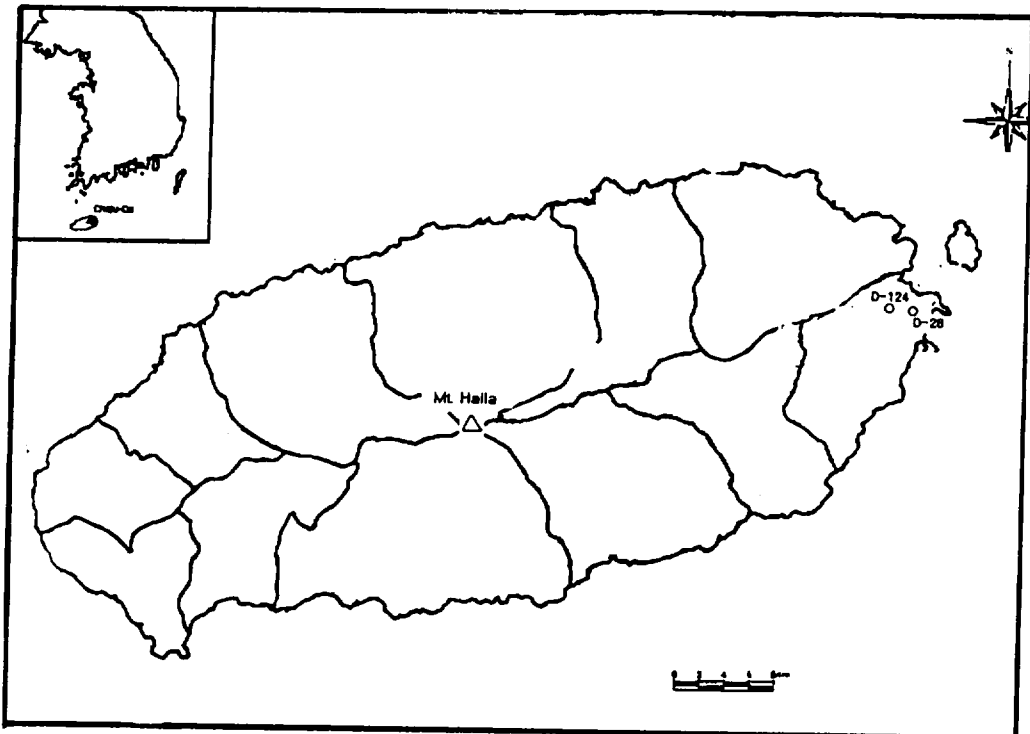


Fig. 1. Sampling sites for groundwater in Jeju.

조석에 따른 제주도 동부지역 염지하수의 수질특성

Table 1. The present condition of well used in this study (unit: m)

Well No.	Location	Elevation	Depth	Natural water level	Dynamic water level	Distance from coast
D-124	Susan	28.65	51.0	27.40	33.00	2.750
D-28	Kosung	28.24	41.0	27.20	27.30	2.000

\* 자료 : 제주도수자원종합개발계획수립 보고서 (1993)

(D-124, D-28)에서 조석간만의 차가 크게 나타나는 1998년 8월에 2회에 걸쳐 24시간 동안 2시간마다 심도에 따라 연속 채수하여 분석하였다. 각 조사지역 지하수 관정 현황은 Table 1과 같다.

분석방법

분석항목중 수온, pH, 전기전도도는 현장에서 측정하였으며, pH는 pH meter (Orion model 250A)로

Well No.		D-28	D-124
Location		Sungsan Kosung	Sungsan Susan
Elevation (m)		28.24	28.65
Depth (m)		41.00	51.00
Natural W.L. (m)	before '93	27.20	27.30
	'93	27.20	27.40
Dynamic W.L (m)		27.30	33.00
Capacity (m <sup>3</sup> /d)		1901	1650
Hydro-geologic properties	SPC (m <sup>3</sup> /d)	1.9E+04	
	T (m <sup>3</sup> /d)	1.87E+2	
	s	3.6E-02	4.0E-1
	K (m/d)	1.36	
TDS (mg/L)	before '89	220.00	32.00
	after '89	960.00	640.00
Temp. (°C)		17.0	
Geological formation	major aquifer	FOB	FOB
	unconformity	2	4
well structure (m)	dia.	0.25	0.25
	pipe	26.00	31.00
	strainer	15.00	20.00
Pump	built year	'73	'80
	type	A	75-E
	suction pipe (m)	35.00	45.00
usage		domestics, agriculture	domestics, agriculture
Drill. year		'72	'79

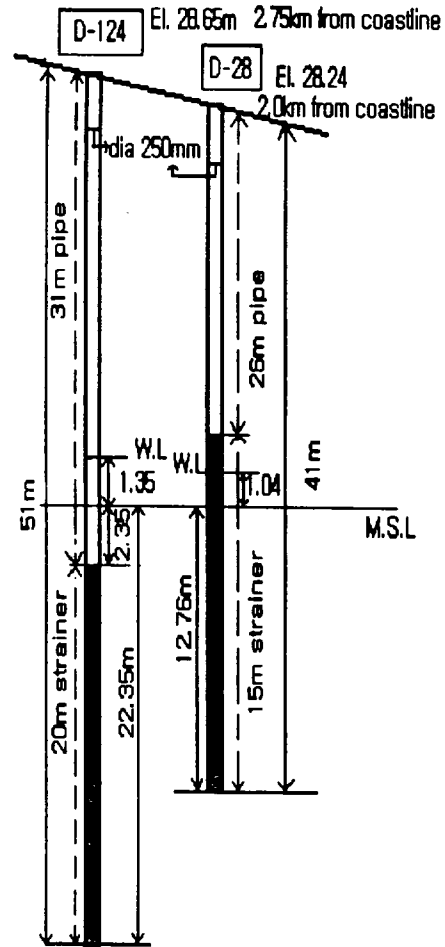


Fig. 2. Schematic diagram showing well structure of D-124, D-28.

측정하고, 전기전도도는 전기전도도계 (ATI Orion model 128)로 측정하였다. 음이온 성분중  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ 은 Ion chromatography (Dionex-500, USA)을 이용하였고,  $\text{HCO}_3^-$ 은 bromocresol green을 사용하여 0.02N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 적정하여 정량하였다. 양이온인  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ 은 원자흡광광도계 (GBC 904AA)를 이용하여 분석하였다.

## 결과 및 고찰

### 조석에 따른 시간별 수질특성

#### D-28, D-124 관정 현황 및 모식도

D-28과 D-124 관정에서 조석에 따른 수질변화를 고찰하기 위하여 관정의 현황과 모식도를 Fig. 2에 나타냈다.

D-28관정은 성산읍 고성리 해발 28.24 m에 위치하고 해안으로부터 2.0 km 떨어져 있으며, 1972년에 생활용수 및 농업용수로 개발되었다가 염분도가 높아져 폐공되어 지금은 제주도에서 장기관측망 장비를 설치하여 monitoring하고 있는 관정이다. 착정심도는 지표에서 41.00 m, 자연수위는 27.20 m로 평균해수면 상부 담수 두께가 1.04 m이고 착정후의 동수위도 거의 변하지 않아 27.3 m였다. 우물구조는 250 mm의 casing으로 pipe길이 26 m, strainer 15 m로 구성되어 있다.

D-124 관정은 성산읍 수산리 해발 28.65 m에 위치하고 해안으로부터 2.75 km 떨어져 있으며, 1979년에 생활용수 및 농업용수로 개발되었다가 역시 염분이 높아져 폐공되어 장기관측망장비를 설치하여 monitoring하고 있는 관정이다. 착정심도는 지표에서 51m, 자연수위는 27.3 m로 평균해수면 상부 담수 두께는 1.35 m이고 착정후 동수위는 33.0 m이고, 우물구조는 250 mm의 casing으로 pipe 길이 31 m, strainer 20 m로 구성되었다. 두 관정 모두 주대수층의 지질구조는 FOB (Feldspar Olivine Basalt, 장석과 감람석류를 포함한 현무암)으로 되어있고, D-28, D-124 관정의 미고결투수층이 각각 2개층, 4개층이 존재한다 (제주도수자원종합개발계획수립 보고서, 1993).

#### D-28 관정의 수질변화

Fig. 3은 D-28 관정에서 조석에 따른 수질변화를 나타낸 것이다. D-28은 해안에서 2.0 km 떨어진 거리에 위치하고 있으며, 조석효율은 13.57%로 비교적 조석의 영향을 많이 받고 있어 투수성이 좋은 지역에 위치하고 있다.

조석에 따른 수질변화의 주요한 특성은 심도 30.00 m (평균해수면하 1.76 m)에서는 변화가 미미하지만 심도가 내려갈수록 변화 폭이 증대되고 있다. 이는 지하로 유입된 지하수와 해수의 비증차 (1:1.025)로 담수체가 해수위에 렌즈형태로 떠있어 점이대가 형성되어 있고, 이 점이대가 조석의 영향으로 변하는 것이라 사료된다.

D-28 관정에서는 해수면이 상승하는 고조시와 하강하는 저조시에 의해 수질변화에 미치는 지연시간 (time lag)은 2~2.5 시간으로 나타났다. 이는 조석이 지하수위에 미치는 지연시간 2시간보다 약간 늦게 수질변화가 일어나고 있다. 그리고 조석의 변화에 따라서  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Na}^+$  등 주요한 이온은 비례적으로 변하고 있는 반면,  $\text{NO}_3^-$ 은  $\text{Cl}^-$  등 주요 이온의 농도와는 역의 상관성을 나타내고 있다.

#### D-124의 수질변화

Fig. 4는 D-124 관정에서 조석에 따른 수질변화를 나타낸 것이다. D-124 관정은 해안에서 2.75 km 떨어진 거리에 위치하고 있으며, 조석효율이 10.32%로 D-28과 같이 비교적 조석의 영향을 많이 받는 투수성이 좋은 지역에 위치하고 있다고 사료된다.

조석에 따른 수질변화의 주요한 특성은 D-28과는 역으로 심도 30 m (평균해수면하 1.76 m)에서는 변화 폭이 크지만 심도가 내려갈수록 변화가 미미하게 나타나고 있다. 동부지역의 지질은 투수성이 좋은 용암류가 해수면하 115 km까지 분포하고 있으며 용암류의 단위 두께가 얇고 균열 및 절리 등의 투수성 구조들이 발달해 있다는 보고 (고, 1997)와 같이 D-124 관정 하부에도 이런 투수성 구조가 존재하고 있다고 추정되며, 평균해수면상에 위치한 균열 및 절리를 통하여 조석의 영향에 따라 해수가 유입되고 유출되는 현상으로 사료된다. 이는 지표하 50 m (해수면하 21.35 m)에서  $\text{HCO}_3^-$ 이  $\text{Cl}^-$  등의 이온과 비례적인 상관관계를 갖

조석에 따른 제주도 동부지역 염지하수의 수질특성

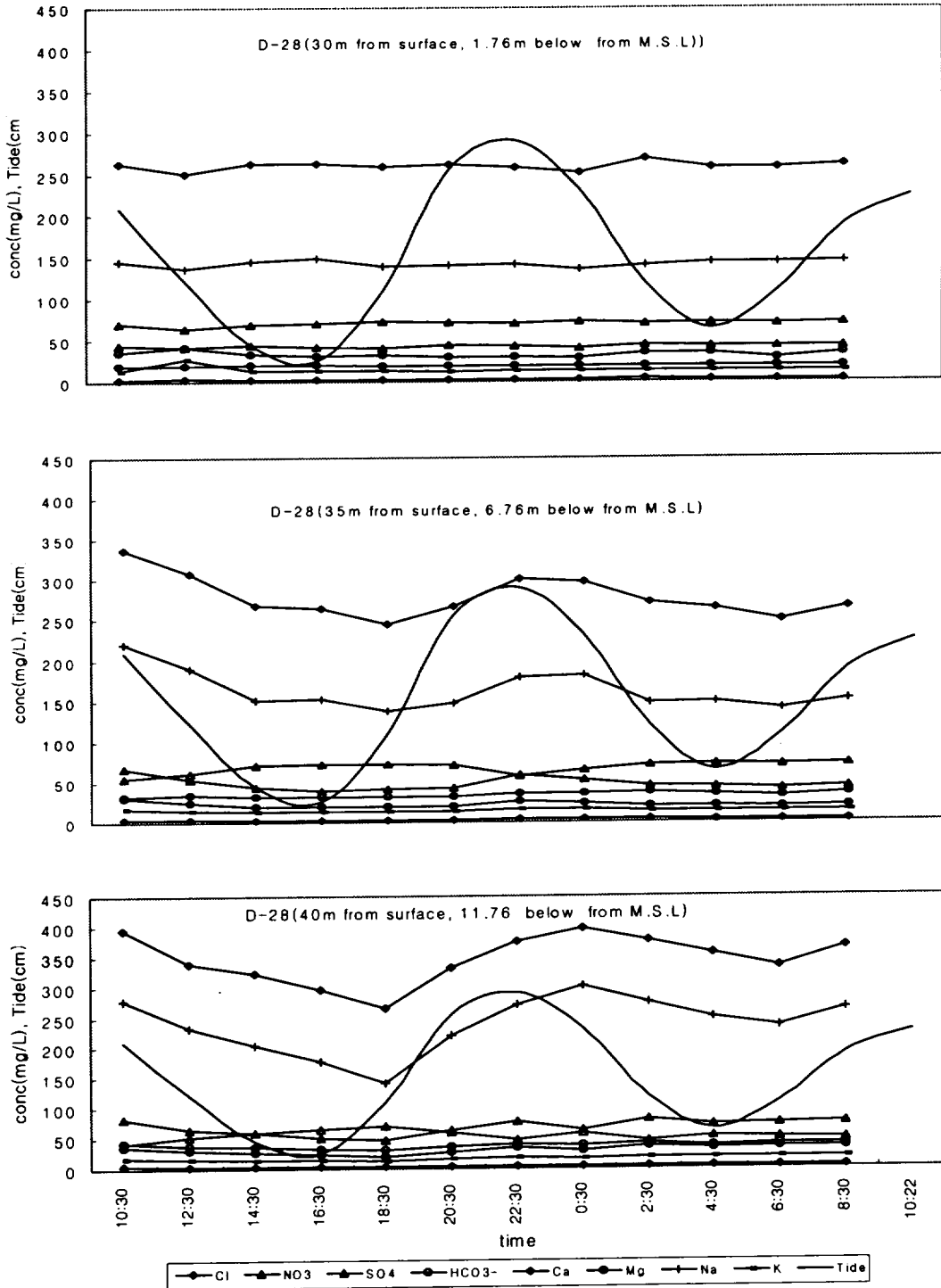


Fig. 3. Variation of major ions in accordance with tidal levels in D-28 well.

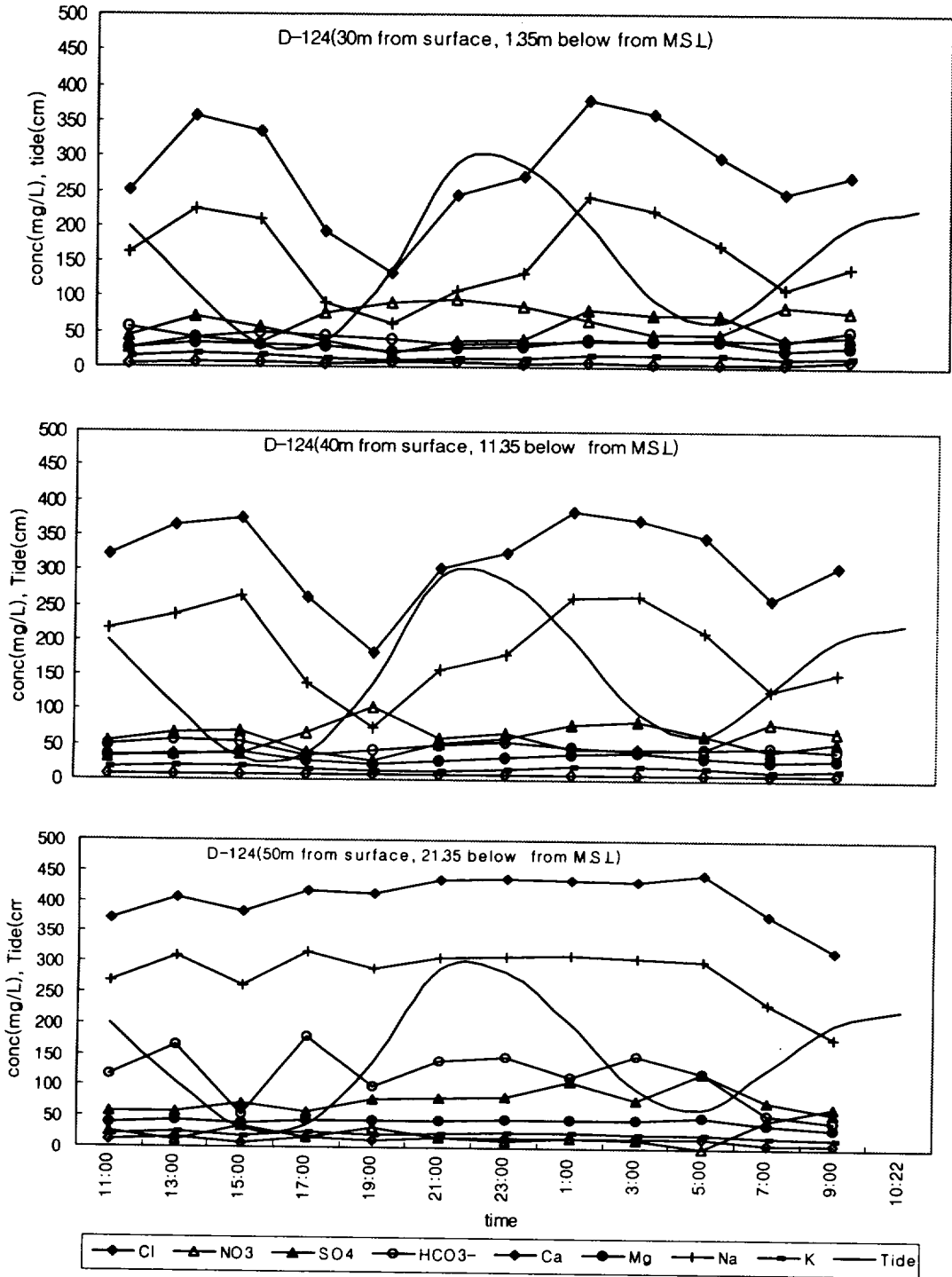


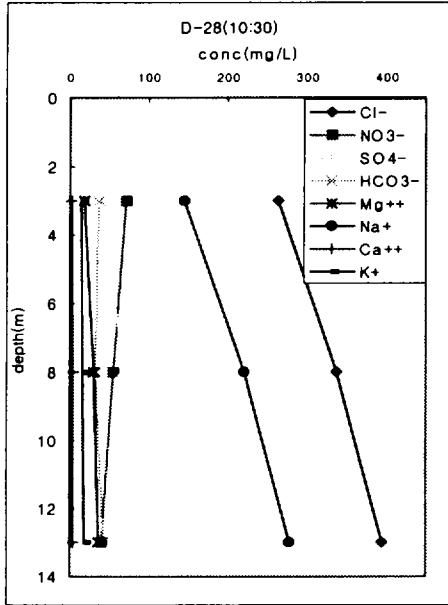
Fig. 4. Variation of major ions in accordance with tidal levels in D-124 well.

조석에 따른 제주도 동부지역 염지하수의 수질특성

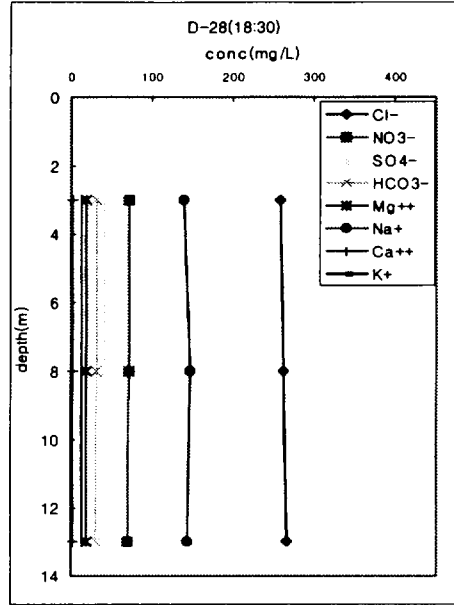
고 있으나, 다른 지역은  $Cl^-$  등과 이러한 상관관계를 나타내고 있지 않다는 점에 비추어 추정할 수 있다.

D-24 관정에서 해수면이 상승하는 고조시와 하강

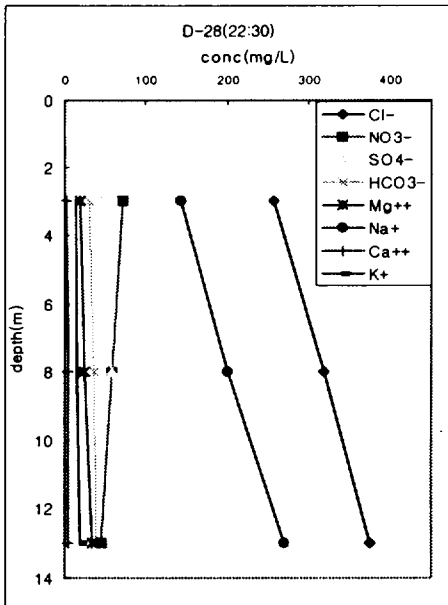
하는 저조시에 의해 수질변화에 미치는 지연시간 (time lag)은 3~3.5 시간으로 조석이 지하수위에 미치는 지연시간 3.5시간과 비슷하게 나타났다. 그리고



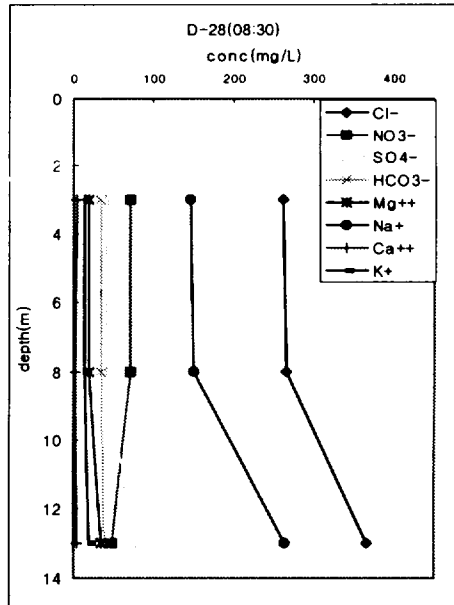
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5. Variation of major ions in accordance with depth in D-28 well.

D-124 관정에서도 D-28 관정과 마찬가지로 조석의 변화에 따라서  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Na}^+$  등 주요한 이온은 비례적으로 변하고 있는 반면,  $\text{NO}_3^-$ 은  $\text{Cl}^-$  등 주요 이온의

농도와는 역의 상관성을 나타내고 있다.

조석에 따른 심도별 수질특성

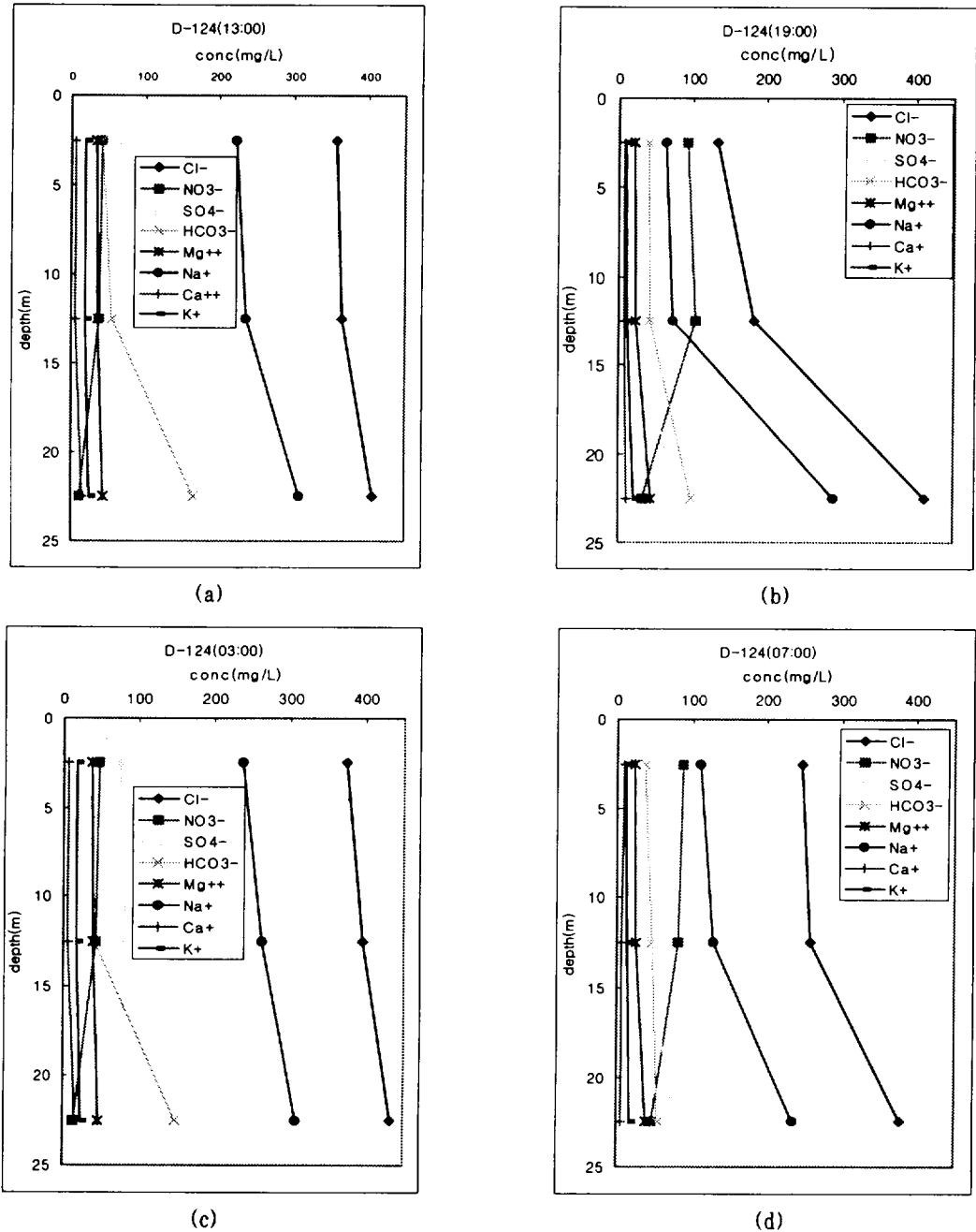


Fig. 6. Variation of major ions in accordance with depth in D-124 well.



Fig. 5, 6는 각각 D-28과 D-124 관정에서 조석에 따른 심도별 수질 변화를 24시간 측정한 결과 중에서, 고조시와 저조시의 시간지연 (time lag)을 고려하여 수질의 정점과 저점에서 주요 이온에 대한 변화를 나타낸 것이다. D-28 관정은 지표 하 41 m (해수면 하 12.76 m)까지 측정되었고, D-124 관정은 지표 하 51 m (해수면 하 22.35 m)까지 측정되었다.

Fig. 3에서 D-28 관정의 상부지점인 지표하 30 m (해수면 하 1.76 m) 부근에서  $Cl^-$  농도는 250~260 mg/l에서 거의 변화를 나타내지 않으나, 하부지점으로 갈수록 해수면의 상승과 하강에 따라서  $Cl^-$  농도의 변화가 많이 나타난다. 지표하 40 m (해수면 하 12.76)에서  $Cl^-$  농도는 260~400 mg/l까지 변화가 나타나고 있다. 이와 같이 상부지점은 변화가 없고 저조 (Lower low water)시에 하부지점의  $Cl^-$  농도가 상부지점과 거의 같을 때까지 감소하게 되어 Fig. 5, 6에서 보여지는 것처럼 심도에 따라 농도변화가 미미하게 나타난다고 사료된다. 이와는 반대로 Fig. 4를 보면 D-124 관정에서는 하부지점인 지표하 50 m (해수면하 21.35 m)의  $Cl^-$  농도는 320~440 mg/l으로 상대적으로 농도 변화폭이 적은 반면, 상부지점으로 갈수록  $Cl^-$  농도는 130~380 mg/l까지 농도변화가 심하게 나타난다.

이런 원인 등에 의하여 D-28 관정에서의 주요 이온은 심도에 따라 저조시에 비해 고조시가 상대적으로 변화폭이 크며, D-124 관정에서는 역으로 저조시가 변화폭이 크게 나타나고 있다.

심도에 따라 대부분 이온의 농도가 증가하는데  $NO_3^-$  농도는 역으로 심도가 증가함에 따라 농도가 감소하는 경향이 나타나고 있다. 이는  $NO_3^-$ 는 육상기원의 물질로서 지하수 심도 깊이까지 침투하지 못함을 나타내는 것이며, 조석에 따라 다른 주요 이온의 변화하는 경향과 역으로 나타나고 있다.

## 결 론

제주도 동부지역 지하수의 조석에 따른 시간별, 심도별 수질변화를 비교 분석하여 그에 따른 특성을 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 조석에 따른 시간별 수질 변화가 D-28, D-124관정에서 확연하게 나타나도 있으며, D-28 관정에서는 심도가 얇을수록 변화가 미미하고 심도가 깊어질수록 변화폭이 증대되고 있는 반면, D-124 관정에서는 역으로 나타나고 있어 평균해수면과 같은 위치에 균열 및 절리 등의 투수성 구조가 있다고 사료된다. 조석에 의해 수질변화에 미치는 지연시간은 D-28에서는 2~2.5 시간이고 D-124에서는 3~3.5 시간으로 나타났다.

2. 조석에 따른 심도별 수질 변화는 심도가 깊어짐에 따라 주요 이온의 농도는 증가하며,  $NO_3^-$  농도는 역으로 심도가 깊어짐에 따라 농도가 감소하는 경향을 나타나고 있다. 이는  $NO_3^-$ 는 육상기원의 물질로서 지하수 심도 깊이까지 침투하지 못함을 나타내는 것이라 사료된다.

## 참고문헌

- 최순학. 1988. 제주도의 형성과 지하수 특성. 제주도 연구, 5. pp. 59-77.
- 최순학. 1991. 제주도와 OAHU도의 지질구조 및 수자원의 특성. 제주도 연구, 8. pp. 7-39.
- 최순학. 1994. 지하수의 보존과 이용방안. 제주지역 개발과 환경보전(제주도문제 학술 심포지엄). 한라일보사. pp. 67-92.
- 고기원. 1997. 제주도 지하수의 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성. 부산대학교 대학원 지질학과, 박사학위논문. 325 pp.
- 권병두·이희순. 1997. 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구 : 제주도와 하와이제도. 한국지구과학회지, 18: 217-237.
- 농림수산부. 제주도, 농어촌진흥공사. 1991~1997. 제주도 각 연도별 장기관측망 설치 및 조사실적보고서
- Richter, Bernd C. and Charles W. Kretler. 1993. Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-water Salinization. 258 pp.
- 윤정수. 1986. 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구. 제주도연구, 3: 43-53.