

## 지하공간건설 시 해안인근 담수-해수 혼합대의 지화학적 진화

김지연 · 김병우\* · 권장순 · 고용권

한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부

## Geochemical Evolution of Mixing Zone with Freshwater and Seawater near the Coast Area during Underground Space Construction

Jiyeon Kim · Byung-Woo Kim\* · Jang-Soon Kwon · Yong-Kwon Koh

Radioactive Waste Disposal Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

### ABSTRACT

To understand the hydrogeochemical variation of bedrock aquifer during underground space construction, various graphical methods including multiple-component plots and chemical trends were used to estimate the mixing rate between seawater and freshwater and to investigate the evolution of water quality. The water chemistry and mixing rate between fresh and sea waters, which are generally localized in the construction area (MW-7, in land), shows typical characteristics of freshwater that doesn't affect its validity as seawater intrusion. Especially, the water chemistry of a MW-4 (coastline) was classified as Na-Cl type, Na-HCO<sub>3</sub> type, and Ca-Cl type due to the influence of the seawater intrusion. And hydrogeochemical and isotopic data show that local freshwater is subjected to geochemical processes, such as reverse ion-exchange. Throughout the Chadha's diagrams, four different case histories with the temporal and spatial variation of groundwaters in the study area were proposed, which is recommended to interpret the hydrogeochemical reactions effectively.

**Key words :** Underground space construction, Seawater intrusion, Mixing zone, Reverse ion-exchange, Chadha's diagram

### 1. 서 론

지속적인 인구 증가와 고도 산업화, 지하공간개발, 지하수 고갈 및 사막화, 지구 온난화로 인한 가뭄현상, 급격한 빙권의 감소는 인간이 활용할 수 있는 수자원의 고갈을 야기하고 있다. 특히 세계적으로 빙하가 녹는 속도는 매우 빠르게 증가하고 있어, 2100년에는 2012년 해수면을 기준으로 0.9~1.6 m까지 상승할 것으로 예측하고 있다 (Symmon, 2012; Kim et al., 2014). 따라서, 기후변화에 의한 해수면 상승, 해안 내륙지역에서의 지하공간 개발, 지하수 취수정 증가, 그리고 토지 이용변화에 따른 해안 지하수 관리 등이 최근 주요 관심사로 떠오르고 있다. 실증부지에서 해수침투에 대한 연구는 1950~1960년대에 시작하여 1990년대 이후까지 지속적으로 활발히 진행되고 있으며 (Bear et al., 1999; Custodio, 2010), 미국과 유럽

에서는 실내실험 및 이론적 연구뿐만 아니라 수십 년에 걸쳐 실제 해안 대수층(coastal aquifer)의 해수침투(seawater intrusion)에 관한 대규모 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 해수의 염분은 담수(fresh water)와 비교할 때 약 2.4% 정도의 높은 밀도를 가지게 되며, 이 밀도는 높은 압력수두를 가진다. 이러한 담수와 해수의 압력수두는 서로 다른 밀도와 흐름(양방향)을 보이면서 해수의 수두가 높은 등가수두(equivalent head)는 담수의 등가수두가 낮은 대륙방향으로 이동하게 된다. 이때, 해안대수층 중간에서 경계면의 형태는 렌즈상의 곡선 형태를 보이며, 해수로 둘러싸인 대수층의 담수는 렌즈 형태를 갖고, 대수층 깊은 곳에서는 해수가 내륙 방향 안쪽에 위치한다. 특히, 해안 내륙에 건설된 지하공간부지는 해수침투 유동로가 되는 주 단열대에 지하수의 고염분화를 야기시키는 지구화학적 기작으로 나타난다 (Lim et al., 2013). 현재까

\*Corresponding author : bwkim@kaeri.re.kr

Received : 2015. 9. 7 Reviewed : 2015. 11. 9 Accepted : 2015. 12. 21

Discussion until : 2016. 2. 29

지 대부분의 해안지역 해수침투 특성평가는 장기관측공으로부터 해수침투의 시간변화에 따른 수질분석 또는 조석 변동 분석에 의한 연구적 접근이 우세하다. 그러나 해안 내륙의 지하공간건설에 따른 해수침투에 관한 연구는 미미하며, 건설완료 이후에 대한 해수침투(Lim et al., 2013) 및 건설 과정의 시공간적(spatio-temporal) 흐름에 따른 지구화학적 진화과정에 관한 연구는 매우 드문 실정이다.

본 연구의 연구지역 내 해안으로부터 각각 250, 850 m의 거리에 위치한 장기 수질관측공은 지하건설 활동 이전에는 대수층의 전 구간에 걸쳐 순수 담수로 구성되어 있었다. 본 연구는 해안인근에 설치된 장기 수질관측공에서 지하공간건설로 인한 담수계의 해수 염수화 정도를 평가할 수 있는 해석기법 연구로, 해안인근에 위치한 300 m 장심도 장기관측 MW-4호공과 내륙 내에 위치한 MW-7호공으로부터 혼합대의 해수침투 유동로가 되는 단열대 각 6개와 5개 구간을 선정하였다. 특히 지하공동건설 시 담수-해수화 과정을 평가하기 위하여 MW-4호공으로부터 해수와 관련된 전기전도도, 주 용존 이온성분, 수소 및 산소 동위원소 자료들을 이용하여 해수의 영향을 분석하였으며, 여러 주요 용존이온 구성비를 활용한 Chadha 다이아그램을 이용하여 건설에 따른 심부 지하수의 지하학적 염수화 진화과정을 제시하는데 연구의 목적을 두었다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구지역

본 연구의 지하공간건설 지역은 해안에 인접하고 있으며, 해발 고도가 높은 서쪽에서 해안가인 동부로 갈수록 완만하게 경사가 감소하는 지형을 이루고 있다(Fig. 1). 연구지역의 지질은 크게 백악기 퇴적암류와 후기에 관입한 화강암류로 이루어져 있으며, 조사지역의 중심부에 분포하는 화강암류는 중립질의 흑운모화강암과 화강섬록암 내지 섬록암으로 산출된다(Choi et al., 2008). 전반적인 단열 광물은 몬모릴로나이트, 제올라이트 광물, 녹니석, 일라이트 순으로 나타나고 있으며, 황철석은 적은 함유량이지만 광범위하게 분포하고 있다. 본 연구에서는 해안가에서 약 250 m 지점에 위치한 장심도 MW-4호공과 해안가에서 내륙 쪽으로 약 850 m 지점에 위치한 MW-7호공으로부터 지하공간건설에 따른 모니터링 결과를 사용하였다(Fig. 1).

지하공간건설 이전의 부지특성 평가시 MW-4와 MW-7호공의 수질은 상부부터 하부까지 담수로 구성되어 있었다. 해안인근에 위치한 MW-4호공은 지하건설 활동에 따

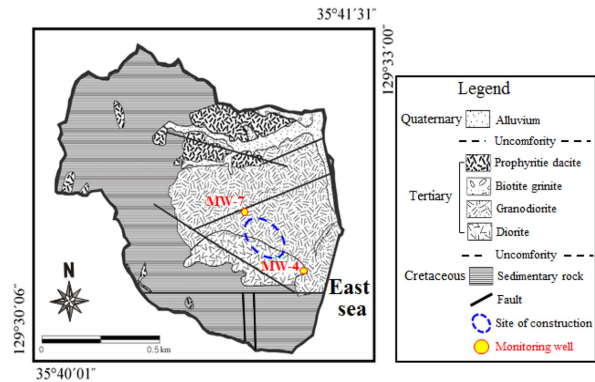


Fig. 1. Geological map with well location in the study area.

른 담수-해수 혼합작용에서 발생하는 일련의 지구화학적 진화과정을 관찰하기 위한 장기 수질관측공으로 본 연구에 사용되었다.

지하공간건설 부지내 지하수위는 전반적으로 지하수 함양특성(강우)에 따른 지하수위변동 및 해안유출의 특성이었으나, 2010년 09월 이후부터는 지하공동건설에 따른 지하수 강하와 해수침투의 흐름을 보였다. 그러나 2014년 12월 조사를 끝으로 해안인근과 지하공동건설 부지 내의 지하수 강하와 해수침투 흐름은 점차적으로 회복되거나 해안유출의 특성을 보이는 것으로 나타났다.

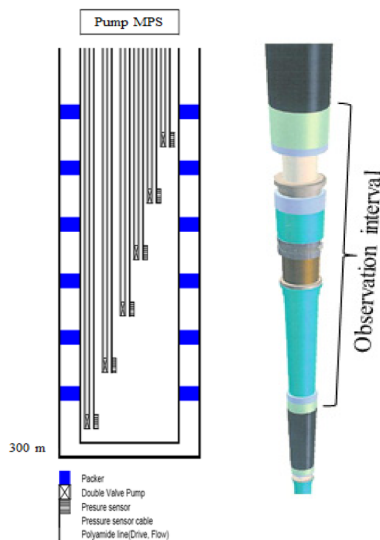
### 2.2. 시료 채취

해안인근의 지하건설 활동에 따른 지하수 내 해수침투 및 지구화학적 변화과정을 규명하기 위하여 해안인근에 위치한 MW-4 및 MW-7 호공을 선정하였다. 그리고 각 조사 시추공은 시추 중·후에 걸쳐 이중 패커를 이용하여 심도별 수리시험 및 지하수 화학분석을 실시하였다. 수리시험을 통하여 해수침투 기능성이 있는 투수성 단열 구간에 대해 스위스 SOLEXPRESS사의 다중패커시스템을 이용하여 이후 장기 수두압 관측 및 지하수 시료 채취를 실시하였다(Fig. 2). 해안인근에 위치한 MW-4호공은 Fig. 2와 Table 1에 정리된 6개의 구간을 선정하여 주 이온 및 동위원소, 그리고 해수혼합율을 확인하였다. 그리고 지하공간건설장 주변에 위치한 MW-7호공은 Fig. 2와 Table 1에서 보는 바와 같이 5개 구간을 선정하였다. 그러나 건설 시 해수침투에 따른 화학적 변동은 매우 미미하여 해수혼합율만을 제시하였다.

MW-4 및 MW-7 호공으로부터의 지하수 시료 채취 및 분석은 분기당 1회(4회/년)를 기준으로 실시되었다. 지하공간건설 굴착에 따른 수질시료는 2010년 9월부터 2011년 9월에 걸쳐 채취하였으나, MW-7호공은 건설 시 수질

**Table 1.** Installation of multi packer system for hydrochemical monitoring

MW-4		MW-7	
Sample No.	Depth; GL.(-)m (EL.(-)m)	Sample No.	Depth; GL.(-)m (EL.(-)m)
MW-4-1	81~100 (56~85)	MW-7-1	104~150 (28~74)
MW-4-2	111~151 (86~126)	MW-7-2	167~194 (91~11)
MW-4-3	152~208 (127~183)	MW-7-3	195~226 (119~150)
MW-4-4	209~251 (184~226)	MW-7-4	227~268 (151~192)
MW-4-5	252~281 (227~256)	MW-7-5	269~301 (193~276)
MW-4-6	282~300 (257~275)		

**Fig. 2.** Design view for sampling intervals and straddle packers.

변화가 거의 없어 해당 시기의 수질분석은 제외하였다. 건설완료 이후는 2011년 12월부터 2014년 12월에 걸쳐 구간별 시료를 채취하였다. 현장에서 pH, EC, DO, Eh, 그리고 수온은 5-Star Potable meter(Orion#1219001)을 이용하여 측정하였으며, 알칼리도(alkalinity)는 산중화 적정법(0.05N HCl)을 이용하여 측정하였다. 실내 분석용 수질 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  셀룰로오스 질산염 필터를 이용하여 부유물을 제거하였으며, 양이온은 금속이온의 침전 및 무균병 내 흡착방지를 위하여 농질산으로 산처리 하여 냉장 보관하였다. 주요 양이온(Na, Mg, K, Ca) 분석은 한국기초과학지원연구원의 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, Shimadzu ICPS-11000 III)를 이용하였으며, 주 음이온( $\text{SO}_4$ , Cl,  $\text{NO}_3$ , F, Br)은 한국원자력연구원의 이온크로마토그래피(IC, Dionex ICS-1100)를 사용하여 분석하였다. 그리고 수소산소 동위원소는 한국원자력연구원 내 레이저 동위원소 분석기(Liquid-water Isotope Analyzer, LGR IWA-35-EP)를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1. 조사 지하수의 물리화학적 특성

##### 3.1.1. 물리화학적 특성

해안인근에 위치한 MW-4호공의 지하공간건설 이전과 이후에 따른 연도별 화학 및 안정동위원소 평균 조성은 Table 2와 같다. 장기관측 기간 동안의 공내 수온은 11.8~22.5°C, pH는 6.4~8.8, Eh는 -56.5~341.7 mV, DO는 0.0~2.8 mg/L의 범위로 나타났으며 관측 기간경과에 따른 뚜렷한 증감은 나타나지 않았다. EC는 224~16,560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 관측기간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 지하공간건설에 따른 심도별 EC 변화 및 수질변동 파악을 위한 시료채취는 심도에 따라 MW-4-1(GL.-81 ~ -100 m), MW-4-2(GL.-111 ~ -151 m), MW-4-3(GL.-152 ~ -208 m), MW-4-4(GL.-209 ~ -251 m), MW-4-5(GL.-252 ~ -281 m), 그리고 MW-4-6(GL.-282 ~ -300 m)의 6개 구간으로 구분하였으며, 이에 따른 심도별 EC 변화양상을 Fig. 3으로 도시하였다. 본 건설부지의 지하공간은 EL.-80에서 EL.-130 m에 위치하며, 해수침투 모니터링 MW-4-1(EL.-56 ~ -85 m)와 MW-4-2(EL.-86 ~ -126 m) 구간은 지하건설공간과 같은 수평선상에 위치하기 때문에 직접적인 단열의 연결로 인하여 해수침투가 큰 것으로 판단된다. 따라서 심도가 증가 할수록 지하공간과의 단열연결성이 감소하기 때문에 EC 또한 감소하는 경향을 보인다.

MW-4-1 구간은 2013년 6월에 16,560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 최대값을 보였으며, 그 이후 감소하기 시작하여 2014년 12월에는 5,570  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지 감소되었다. MW-4-2 구간은 2013년 6월에 14,800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 최대값을 보였으며, 2014년 12월에는 9,890  $\mu\text{S}/\text{cm}$  값으로 감소되었다. MW-4-3, -4-4, -4-5 구간들은 2012년 3월부터 2014년 12월에 걸쳐 지속적으로 소폭의 증가를 보이며, MW-4-3 구간은 2011년 12월에서 2014년 9월에 걸쳐 1,489~11,630  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 급

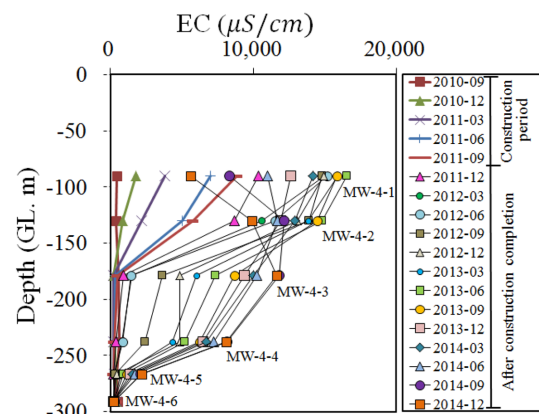
**Table 2.** Annual mean values for chemical data of groundwater in the study area (MW-4)

Sample No.	Depth GL(-)m	Year	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC ( $\mu$ S/cm)	DO (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Br <sup>-</sup> (mg/L)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta\text{D}$ (‰)
MW-4-1	81~100	2010	16.4	6.9	229.3	1,122	0.1	56.9	8.5	34.2	84.6	40.0	297.7	73.8	45.8	0.0	7.1		
		2011	17.0	6.8	123.6	7,495	0.7	580.6	52.2	230.0	579.3	34.2	2,331	423.6	59.8	0.0	10.1	-6.5	-47.4
		2012	16.7	7.0	179.9	14,960	0.2	1561	56.7	428.7	905.1	30.7	4,825	785.5	54.9	0.0	18.3	-6.2	-43.1
		2013	16.8	6.9	123.2	15,220	0.2	1813	53.6	438.1	898.2	30.5	4,833	743.8	66.4	0.0	22.0	-5.5	-36.4
		2014	17.4	7.0	117.0	9,772	0.8	1222	50.8	261.9	524.5	33.8	3,216	542.8	89.2	0.0	12.9	-6.0	-38.7
MW-4-2	111~151	2010	17.2	7.4	259.5	635.0	0.4	31.6	6.5	18.3	52.0	34.0	155.4	35.2	74.8	0.0	3.0		
		2011	17.4	6.6	127.5	5,417	0.5	268.3	28.1	185.0	534.5	34.5	1,680	303.7	64.0	0.0	6.4	-7.0	-48.6
		2012	16.3	6.7	180.6	12,250	0.4	904.6	33.7	387.5	976.4	29.1	4,076	623.2	55.7	0.0	14.9	-6.5	-45.9
		2013	16.8	6.7	117.7	13,745	0.1	1,185	35.1	401.1	1,010	31.2	4,249	651.7	60.2	0.3	16.5	-5.8	-38.8
		2014	17.2	6.6	130.9	11,650	0.2	1,128	40.6	349.7	911.4	29.6	3,707	576.4	77.8	0.0	12.5	-5.8	-37.7
MW-4-3	152~208	2010	17.3	8.2	252.3	387.0	0.5	27.8	4.4	10.7	31.3	34.2	82.1	27.1	80.8	0.4	0.0		
		2011	16.9	8.0	137.3	491.1	0.3	31.6	3.9	6.4	25.3	33.8	52.2	21.6	75.8	0.8	0.2	-7.8	-53.7
		2012	16.5	7.7	206.8	2,860	0.2	110.9	12.0	55.7	212.7	31.1	648.5	77.0	58.0	3.3	2.5	-8.0	-54.2
		2013	16.9	7.5	121.1	7,850	0.1	264.9	22.9	245.3	884.5	31.6	2,320	244.5	58.7	0.1	7.0	-7.1	-46.6
		2014	17.3	7.4	117.1	10,907	0.1	437.3	32.2	353.6	1,325	30.5	3,745	401.1	60.3	0.0	12.3	-6.8	-43.3
MW-4-4	209~251	2010	17.1	8.0	294.5	459.0	1.6	28.9	5.4	13.4	37.6	35.5	113.1	32.2	68.6	0.0	0.0		
		2011	16.7	7.9	52.3	284.6	0.4	25.2	3.2	4.7	18.9	35.2	32.8	20.2	74.8	0.0	0.1	-7.8	-54.2
		2012	16.3	7.2	107.4	2,217	0.1	57.9	7.4	26.4	104.1	33.3	304.9	41.8	55.7	0.8	1.2	-8.0	-53.0
		2013	17.0	7.5	86.3	5,545	0.1	161.3	15.2	135.7	534.8	32.2	1,404	147.8	52.6	0.0	4.3	-7.4	-47.3
		2014	17.6	7.6	114.5	7,548	0.1	261.5	22.3	230.7	917.2	31.2	2,316	244.9	53.4	0.0	8.6	-7.1	-44.7
MW-4-5	252~281	2010	18.0	7.6	297.3	422.0	0.3	26.8	4.8	12.5	33.3	38.5	78.4	34.2	91.5	0.0	0.0		
		2011	16.4	7.8	40.9	229.1	0.2	24.8	2.7	4.3	16.6	37.7	23.3	21.3	74.0	0.0	0.0	-7.9	-54.2
		2012	16.1	7.4	36.7	343.6	0.1	48.3	2.2	2.9	13.0	27.5	57.3	26.0	68.6	1.3	0.2	-8.1	-53.9
		2013	17.1	8.0	60.9	1,032	0.2	118.7	3.5	6.8	43.3	25.6	224.2	36.8	61.8	0.1	0.6	-7.8	-49.3
		2014	17.4	8.1	155.7	1,888	0.1	213.4	6.0	16.1	119.0	21.0	502.6	64.4	50.3	0.0	1.6	-7.6	-48.1
MW-4-6	282~300	2010	18.0	7.7	270.2	439.0	0.2	29.0	4.9	12.8	37.2	36.3	86.4	32.0	90.0	0.0	0.0		
		2011	17.2	7.8	116.1	387.5	0.2	32.7	4.2	8.2	31.1	33.7	48.8	28.5	103.0	0.0	0.1	-7.7	-54.3
		2012	16.8	7.4	40.6	243.0	0.1	29.6	3.2	6.6	22.3	27.0	41.9	25.9	74.7	0.7	0.1	-7.9	-53.1
		2013	17.1	7.4	39.0	227.2	0.3	26.4	2.5	3.2	14.0	23.8	25.3	19.3	66.5	0.0	0.1	-7.8	-48.8
		2014	17.5	7.9	49.6	230.0	0.1	29.6	2.4	2.8	13.8	25.3	31.6	19.1	61.8	0.0	0.1	-7.7	-48.3

격히 증가하는 경향을 보였다. MW-4-4 구간에서는 766~8,100  $\mu\text{S/cm}$ 의 범위를, MW-4-5 구간은 289~2,181  $\mu\text{S/cm}$ 의 범위를, 그리고 MW-4-6 구간은 203~266  $\mu\text{S/cm}$ 의 범위로 해수침투에 의한 EC 값의 변동양상을 관찰할 수 있었다. 계절별 해수의 EC 값은 전 기간에 걸쳐 44,100~53,600  $\mu\text{S/cm}$ 의 범위를 보였다.

### 3.1.2. 수질유형

지하공간건설 및 완료이후에 채취된 지하수의 주요 양이온(Na, K, Ca 그리고 Mg)과 음이온(Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>)의 함량비를 대상으로 각 구간별 수질유형을 파악하기 위해 Fig. 4에 piper 다이어그램을 도시하였다. 해수는 Cl 이온이 지배적이며, 일반적인 지하수는 중탄산염(HCO<sub>3</sub>)과 황산염(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)이 지배적이다(Richter and Keitler, 1993). MW-4호공의 경우 Mg와 SO<sub>4</sub> 이온의 구성비는

**Fig. 3.** Changes of EC values with the sampling depth.

모니터링 시기동안 변화가 가장 작게 나타나며, 심도별 지하수는 크게 3가지 수질유형(Na-Cl, Ca-Cl, Na-HCO<sub>3</sub>)으



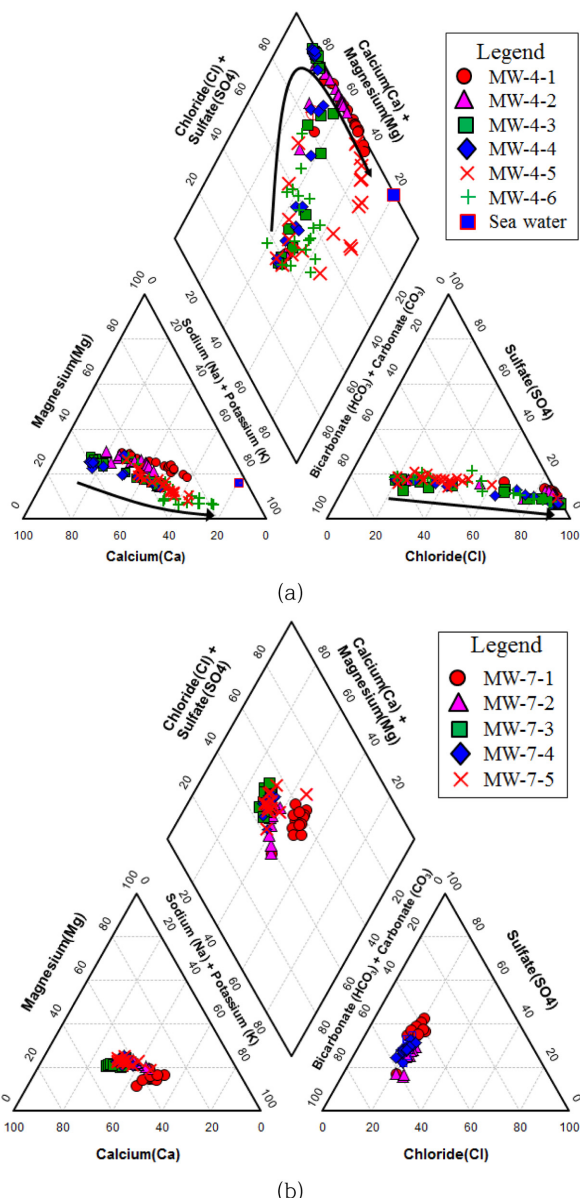


Fig. 4. Piper's diagram of groundwaters sampled during underground space construction in the study area ((a) MW-4 and (b) MW-7).

로 분류된다. MW-4-1과 MW-4-2 구간은 Ca-Cl과 Na-Cl 수질유형, MW-4-3과 MW-4-4 구간은 Ca-Cl 수질유형, MW-4-5 구간은 Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl 수질유형, 그리고 MW-4-6 구간은 Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl 및 Ca-Cl 수질유형으로 혼합되어 있다. 특히, 양이온의 경우 Mg 이온농도 변화량이 적기때문에, 주로 Ca 이온과 Na+K 이온 함량변화에 의해 수질유형이 결정된다. 음이온의 경우, 해수가 침투된 구간에서는 Cl 이온의 함량비가 지배적으로 높게 나타나고, 일반 담수에서는 중탄산염(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 영역이 지

배적으로 분포한다.

MW-7호공은 장기수질관측 동안 대부분 Ca-HCO<sub>3</sub> 수질유형으로 나타나지만, 간혹 상부의 MW-7-1 구간은 Na-HCO<sub>3</sub> 수질유형과 Na-SO<sub>4</sub> 수질유형으로 혼합되어 나타났다(Fig. 4 (b)). 이는 건설에 따른 지표수의 일시적인 영향으로 판단된다.

### 3.2. 지하건설 활동에 따른 해수의 영향

#### 3.2.1. 동위원소 및 할로겐 원소

자연수에서  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$ 의 질량변화는 지하수유입지의 차이, 거동현상, 지하수의 기원, 충전특성, 순환과정의 추적자로서 널리 이용되고 있다(Shin et al., 2002; Na et al., 2002). 따라서 2010년 9월부터 2014년 12월까지 MW-4호공에서 채취된 시료의  $\delta^{18}\text{O}$  및  $\delta\text{D}$ 의 측정 결과를 GMWL(Global Meteoric Water Line)과 함께 Fig. 5에 도시하였다. 일반적인 표준 평균해수(SMOW)의  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$  값은 0‰이며, 조사지역 해수의 평균  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$  값은 표준 평균해수와 유사한 값을 가진다. 건설 시작부터 관측 종료일까지 측정된  $\delta^{18}\text{O}$  및  $\delta\text{D}$  값을 요약하면, MW-4-1 구간은  $\delta^{18}\text{O} = 6.5 \sim -5.2\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -35.1 \sim -47.4\text{‰}$ 이며, MW-4-2 구간은  $\delta^{18}\text{O} = 7.5 \sim -5.6\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -36.9 \sim -48.6\text{‰}$ 이고, MW-4-3 구간은  $\delta^{18}\text{O} = -6.7 \sim -8.0\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -43.0 \sim -54.9\text{‰}$ , MW-4-4 구간은  $\delta^{18}\text{O} = -6.9 \sim -8.0\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -42.8 \sim -54.2\text{‰}$ 이며, MW-4-5 구간은  $\delta^{18}\text{O} = -7.3 \sim -8.0\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -46.8 \sim -55.1\text{‰}$ , 그리고 MW-4-6 구간은  $\delta^{18}\text{O} = -7.5 \sim -8.0\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -46.4 \sim -54.3\text{‰}$ 의 범위를 보였다. 특히, 해수침투에 영향을 받은  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$  값들은 담수 시료에 비해 무거운 값들을 가지는데, 여러 구간 중 MW-4-1 구간의 2013년도 평균  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$  값은 각각  $-5.5\text{‰}$ 와  $-36.4\text{‰}$ 로 해수의 평균 값에 가장 근접하게 나타났다(Table 2). 그러나, MW-4-6구간의 경우 해수침투의 영향은 거의 나타나지 않았다. 일반적인 지하수 시료들은 GMWL 선상에 도시되는데, 본 연구지역의 MW-4호공 수질시료는  $\delta\text{D} = 6.3771\delta^{18}\text{O} - 1.9205$ 의 관계식과 같이 혼합 선상에 도시되므로, MW-4호공의 수질은 담수-해수 혼합대인 것으로 분석된다.

비반응성 할로겐 원소 계열의 Br과 Cl은 환원환경 유기물에 흡착과 비용해성 침전물을 형성하지 않으며, 여러 다른 이온들과 반응하지 않는 특징을 가지고 있다(Fetter, 1993). 일반적인 담수에서의 Cl 이온 함량은 낮은 값을 가지며, Cl 이온 함량이 높아질수록 외부 요인으로부터의 점오염 및 잠재오염에 의한 영향으로 나타난다. 화학적으로 Br 이온은 Cl이온과 유사한 성질을 가지며(Hem,

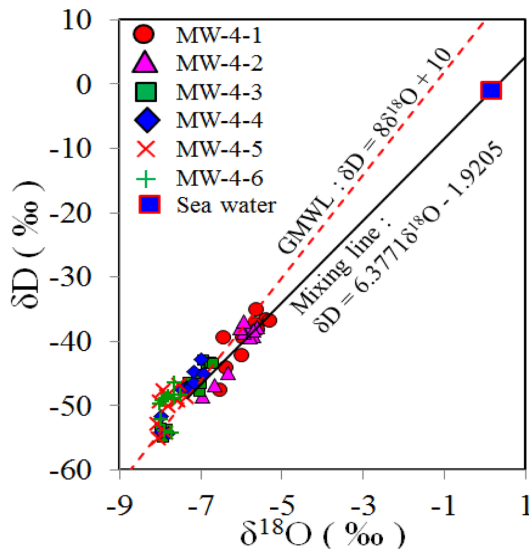


Fig. 5. Plots of  $\delta D$  versus  $\delta^{18}O$  in MW-4 groundwater.

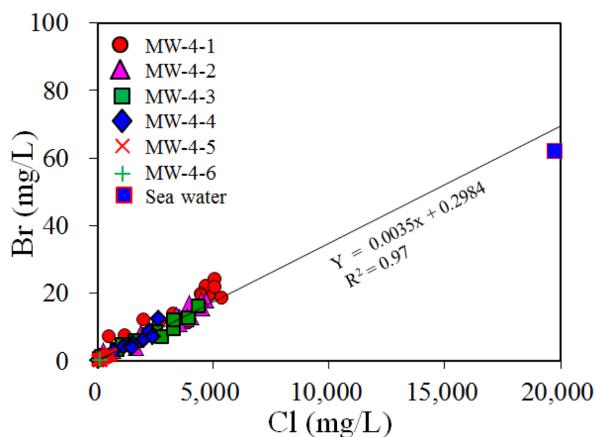
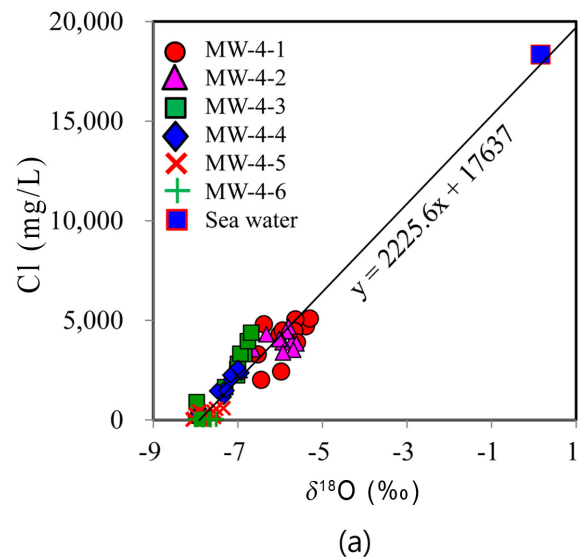


Fig. 6. Plot of Br versus Cl in MW-4.

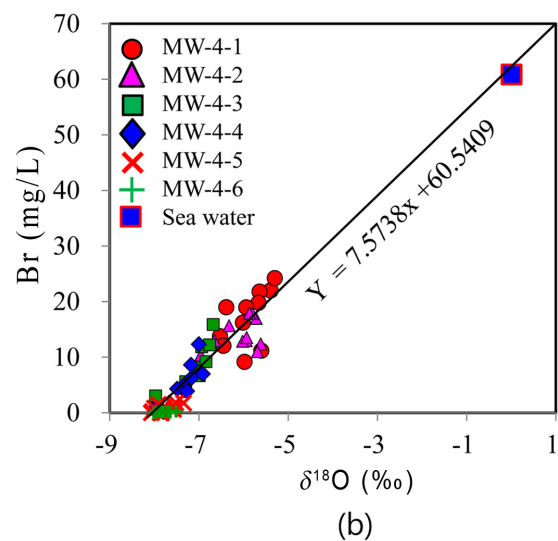
1992), 일반적으로 해수침투의 영향을 받은 담수와 해수의 Br/Cl 함량비는 서로 유사하기 때문에(Richter and Kreitler, 1993), 담수 중의 염분 기원을 추적하여 담수와 해수의 혼합 여부를 파악하는데 널리 이용되고 있다. MW-4호공은 Fig. 6에서 보는바와 같이 Cl에 대한 Br 이온 그래프에서 담수의 Cl 함량이 증가할수록 Br의 함량도 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 해수 침투의 영향이 지배적인 구간 일수록 지역 해수의 Cl과 Br 함량비와 가까워지는 해수화 경향을 잘 보여주고 있으며 상관관계수( $R^2$ )는 0.97으로 높게 나타났다.

$\delta D$ - $\delta^{18}O$ 과 Br-Cl의 관계는 Fig. 5 및 Fig 6과 같이 담수와 해수의 혼합이 잘 나타나며, 또한,  $\delta^{18}O$ 에 대한 Cl 및 Br 이온도 Fig. 7에서 보는바와 같이 상관관계가 높게 나타난다. MW-4-1, -4-2, -4-3, -4-4 구간의 경우

$\delta^{18}O$ 에 대한 Cl 및 Br 이온농도와와의 직선 관계에서는 Fig. 7에서 보는바와 같이 Cl 및 Br 이온농도가 증가할수록  $\delta^{18}O$ 값도 무거워지는 특징을 보이며, 이는 무거운  $\delta^{18}O$  값을 갖는 해수와의 혼합작용을 지시하고 있다. 즉, 해수혼합율이 높을수록 음의  $\delta^{18}O$  값에서 지역 해수의  $\delta^{18}O$  값인 0‰에 근접하게 된다. 그러나, 해수의 영향이 크게 미치지 않는 MW-4-5, 4-6 구간에서는  $\delta^{18}O$ 에 대한 Cl 및 Br 이온의 관계가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이 두 구간의 Cl과 Br 이온의 함량 값은 낮으며,  $\delta^{18}O$  값은 일반 담수의  $\delta^{18}O$  값(-7.3~-8.0‰)과 유사하였다. 전반적으로 해수침투에 의한 시료들의 화학적 분산은 직선을 따라 혼합 선상에 도시되어 있으므로, 이는 해수침투의 영향으로



(a)



(b)

Fig. 7. Plots of (a) Cl versus  $\delta^{18}O$  and (b) Br versus  $\delta^{18}O$  in MW-4 groundwater.

인한 직접적인 담수-해수 혼합작용을 보여주는 증거이다.

### 3.2.2. 해수 혼합율

일반적인 담수와 해수의 혼합율에 대한 평가는 담수와 해수의 염분을 이용하여 담수 관측공으로부터 해수의 부피 혼합을 값으로 산정할 수 있다. 담수와 해수의 혼합율은 각 구간별 건설 이전의 초기 담수 및 해수의  $Cl$  값과 각 시료 채취시기별  $Cl$  값을 이용하여 해수침투로 인한 부피 혼합율을 계산할 수 있다(Zakhem and Hafez, 2007).

$$M_r = \frac{[Cl_{mix}] - [Cl_{gw}]}{[Cl_{sea}] - [Cl_{gw}]} \quad (1)$$

여기서,  $Cl_{mix}$ 는 혼합 지하수의  $Cl$  이온농도 값,  $Cl_{gw}$ 는 초기 지하수의  $Cl$  이온농도 값,  $Cl_{sea}$ 는 해수의  $Cl$  이온농도 값이다. 식 (1)으로부터 건설 MW-4호공 6개 구간에 대하여 해수의 혼합율 변동 그래프를 Fig. 8에 도시하였다.

MW-4호공 내 MW-4-1과 MW-4-2 구간은 2010년 9

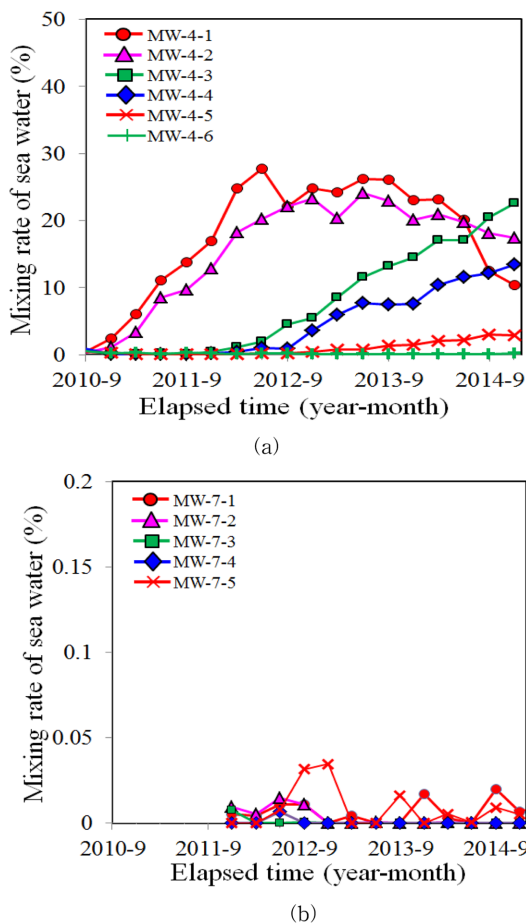


Fig. 8. Changes in mixing rate of seawater to the groundwater ((a) MW-4, (b) MW-7).

월부터 해수침투의 영향으로 해수의 혼합율이 증가하였으며, 2013년 6월을 기점(MW-4-1: 26.3%, MW-4-2: 24.1%)으로 2014년 9월에는 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 8(a)). MW-4-3과 MW-4-4 구간은 2011년 12월부터 2014년 9월까지 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 MW-4-5와 MW-4-6 구간은 지하건설 기간동안 각각 0~3.0%, 0~0.5%의 혼합율을 보였으나, 해수침투로 인한 영향은 거의 없었다.

MW-7호공으로부터의 해수혼합율은 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 대부분 0~0.04% 이하의 낮은 값을 나타내며, 이는 지하건설 주변 관측공은 해수침투가 없거나 매우 약함을 뜻한다.

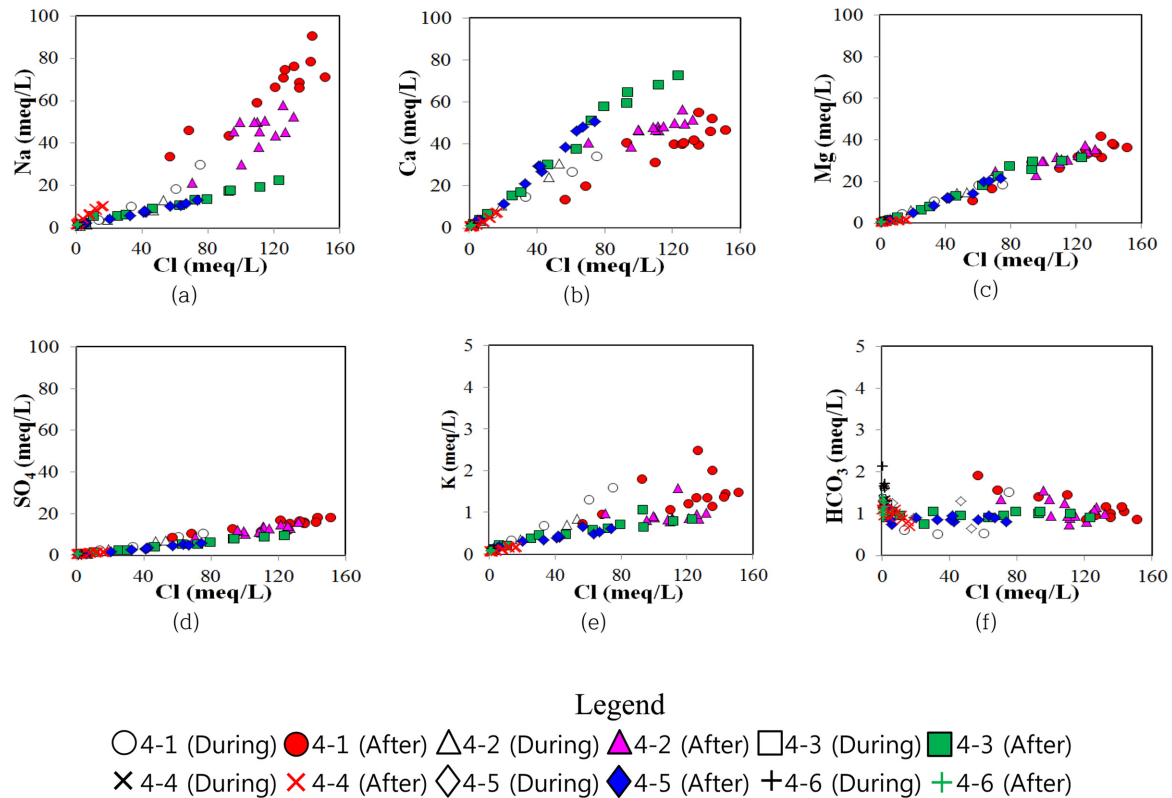
### 3.3. 혼합대의 진화과정

#### 3.3.1. 주성분의 분포

지하공간건설 시 해수침투는 내륙의 여러 가지 환경적 문제들을 발생시킬 수 있으므로, 해수침투에 관한 메커니즘을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히, 담수의  $Cl$  이온 함량이 높아질수록 해수에 의한 영향으로 나타나며,  $Cl$  이온은 담수와 해수와의 혼합 지시자로 이용된다. 담수-해수화 과정에서  $Cl$  이온 농도변화에 대한 주요 이온( $Na$ ,  $Ca$ ,  $Mg$ ,  $SO_4$ ,  $K$  그리고  $HCO_3$ )과의 관계들로부터 해수 침투에 관한 분석이 가능하다.  $Cl$  농도에 대한 주 양음이온의 농도변화는 Fig. 9(a, b, c)에서 보는바와 같이  $HCO_3$ 를 제외한  $Na$ ,  $Ca$ ,  $Mg$  이온들은 지하공간건설 시 급격히 증가하는 양상을 보였으며,  $SO_4$  이온은 Fig. 9(d)에서 보는바와 같이 완만히 증가하는 양상을 보였다. 그러나  $K$  이온은 Fig. 9(e)에서 보는바와 같이 완만하게 증가하는 양상을,  $Na$  이온농도는 심부로 내려갈수록 급격히 증가하는 반면에  $Ca$  이온농도는 MW-4-3, -4-4, -4-2, -4-1, -4-5, 그리고 -4-6 구간 순으로 급격히 증가하는 현상을 보였다. 특히,  $Na$  이온은 상부층에서 급격히 증가하지만,  $Ca$  이온은 하부 심도에서 급격히 증가하였다.  $Cl$  이온 증가에 따른  $Mg$ ,  $SO_4$  이온들은 6개 구간이 서로 같은 비율기로 증가하였으며,  $HCO_3$  이온은 Fig. 9(f)에서 보는바와 같이 지하공간건설 진행 및 완료이후의 전 구간에 걸쳐  $HCO_3$  농도에 미치는  $Cl$  농도의 영향은 다소 적게 나타났다.

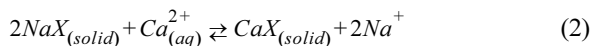
#### 3.3.2. 역이온교환 반응

MW-4호공은 EC에 대한  $Na$ 와  $Ca$  이온농도 변화 양상은 Fig. 4에서 보는바와 같이  $Cl$  이온에 대한 주요 이온과의 관계와 유사함을 알 수 있다. 지하공간건설 시 담수



**Fig. 9.** Plot of major constituents (Na, Ca, Mg,  $\text{SO}_4$ , and  $\text{HCO}_3$ ) versus Cl; ((a) MW-4-1, (b) MW-4-2, (c) MW-4-3, (d) MW-4-4, (e) MW-4-5, and (f) MW-4-6).

수질의 MW-4호공은 최초 Na- $\text{HCO}_3$  유형이었으나 지하공간 건설에 따른 해수침투로 인하여 Na-Cl 수질유형 및 Ca-Cl 수질유형으로 바뀌게 된다. 이는 담수대수층 내에서 Ca와 Na 이온 사이에서 일어나는 역이온 교환반응에 의한 것으로, 다음과 같은 식 (2)로 표현될 수 있다.



여기서 X는 대수층 기질이며, EC에 따른 Ca와 Na 이온 농도 변화는 해수침투로 인한 담수-해수 혼합과정에 따른 Na와 Ca 이온 사이의 상대적 역이온 교환(Reverse Ion-exchange)을 지시한다. 해수침투를 받은 담수층은 해수의 Na 이온으로 포화되기 전까지 역이온 교환반응이 발생하게 된다. 이때, Na 이온으로 포화된 이후의 Ca 이온은 해리되지 않고 계속 Na 이온의 함량만 증가하게 되는 혼합(mixing) 상태에 이른다(Ritcher and kreitler, 1993). Na+K-Cl에 대한 Ca+Mg- $\text{SO}_4$ - $\text{HCO}_3$  이온농도 변화 그래프는 역이온 교환 반응(hypothesized reverse ion exchange reaction) 과정을 지원한다(Rajmohan and Elango, 2004). 이러한 역이온 교환 반응이 해수-담수 혼합대에 내재하는

지배적 과정이 되면, 그래프 상에서 -1의 선형 기울기로 나타난다(Rajmohan and Elango, 2004; Cirelli and Miretzky, 2004). Cirelli & Miretzky(2004)와 Rajmohan & Elango(2004)의 연구는 해수침투로 인한 혼합대에서의 역이온 교환반응에 대한 그래프상의 선형 기울기를 각각 -0.99, -0.85로 제시하였다. MW-4호공의 경우, Na+K-Cl에 대한 Ca+Mg- $\text{SO}_4$ - $\text{HCO}_3$  이온농도는 Fig. 10과 같이 대부분 높은 상관성을 보였다. 상부 MW-4-1 구간에서 하부 MW-4-6구간에 이르는 그래프의 기울기는 각각 -1.01, -0.95, -1.02, -1.10, -1.07, 그리고 -0.79 값을 보이며, MW-4-6구간( $p = -0.79$ )를 제외한 모든 구간은 -1에 근접한다. 이처럼 MW-4-6구간을 제외한 모든 구간은 해수침투로 인한 역이온 교환반응이 발생하였음을 의미한다.

### 3.3.3. 진화과정 해석

EC에 따른 Na/Cl 비율 사이의 관계는 담수에 있는 염류의 원인을 평가하는데 매우 중요하다. 해수침투 평가에 있어서, 본 연구지역은 해수침투에 의해 담수층 내 고농도 Na 이온분포를 띄고 있으며, 심도별로 서로 다른 Na/



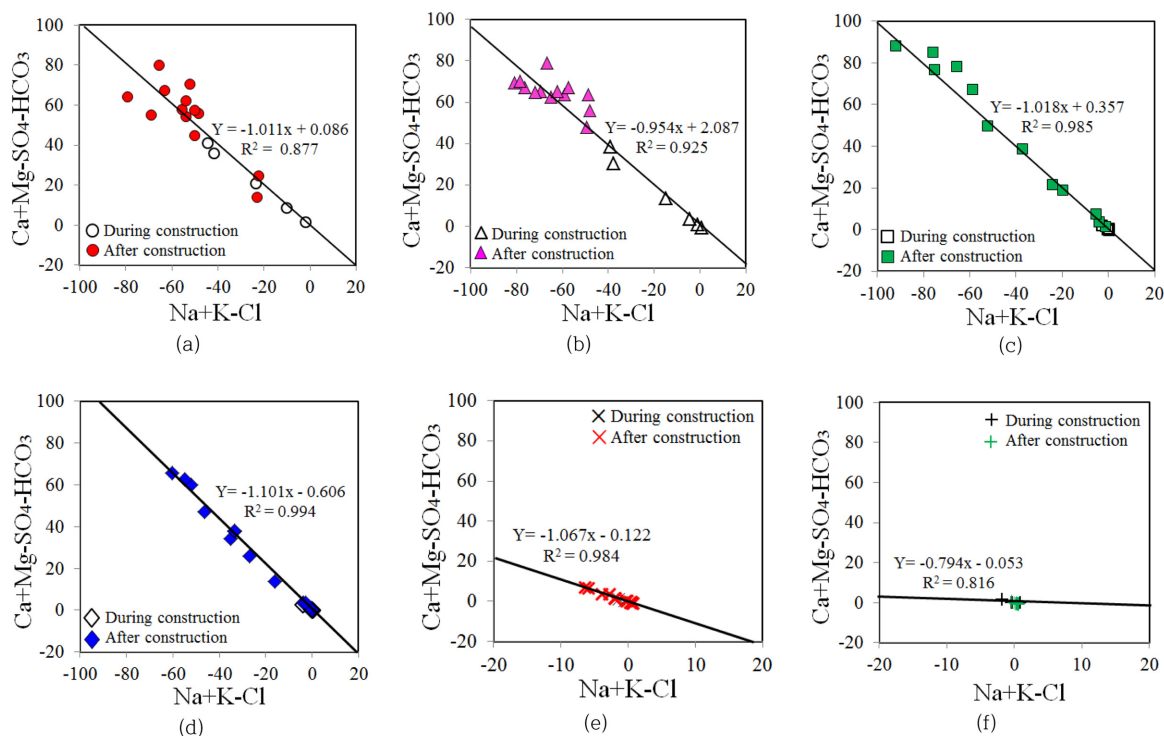


Fig. 10. Plot of  $(Ca+Mg-SO_4-HCO_3)$  versus  $(Na+K-Cl)$  showing the reverse ion-exchange; ((a) MW-4-1, (b) MW-4-2, (c) MW-4-3, (d) MW-4-4, (e) MW-4-5, and (f) MW-4-6).

Cl 이온의 변화 양상을 나타내고 있다. 지하공간건설 시 해수침투에 따른 EC 변화에 대한 Na/Cl 당량 비율의 변화양상은 Fig. 11에 도시하였다. EC 또는 해수의 혼합율이 높아질수록 Na/Cl 비율은 감소하게 되는데, 이때 해수의 Na/Cl 비율값은 0.47에 근접하게 된다. Cl 이온농도와 비교할 때 Na 이온농도의 감소는 Ca와 Na 이온 사이의 역이온 교환반응으로 인한 Na 이온 농도의 감소를 지시한다. MW-4-1과 MW-4-2 구간의 경우, 관측 초반에서 중반에 걸쳐 Na/Cl 비율은 역이온 교환반응으로 인해 해수의 Na/Cl 비율보다 낮게 나타난다(Fig. 11(a, b)). EC 증가와 함께 Na/Cl 비율이 증가하여 인근해수의 Na/Cl 비율 선상인 0.47에 근접하였고, 다시 EC가 감소하는 과정에서 해수의 Na/Cl 비율 선상에 근접하였다. MW-4-3과 MW-4-4 구간은 건설 기간동안 EC 증가와 함께 Na/Cl 비율이 감소하다가 인근 해수의 Na/Cl 기준 선상에 일시적으로 수렴하였다(Fig. 11(c, d)). 그러나 건설 완료시점 이후, Na/Cl 비율은 시간이 지나면서 역이온교환 반응으로 인하여 인근 해수의 Na/Cl 비율 0.47 값보다 상대적으로 낮은 비율을 보였다. MW-4-5구간은 Fig. 11(e)에서 보는바와 같이 EC의 증가와 함께 높은 Na/Cl 비율에서 낮은 비율로 감소하면서 해수의 Na/Cl 기준 선

상에 근접해지는 형태를 보였다. 그리고 MW-4-6 구간은 지하공간건설로 인한 EC의 변화와 Na/Cl 비율의 변화양상은 뚜렷하게 나타나지 않고 있다(Fig. 11(f)).

본 연구에서는 Chadha 다이어그램을 이용하여 지하공간건설 시 해수침투에 의한 담수-해수 혼합대의 지화학적 진화과정을 규명하였다. Chadha(1999)는 Fig. 12(a)에서 보는바와 같이 자연수의 수질유형 분류와 수리화학적 과정을 정의하기 위해 수리화학적 다이어그램을 고안하였다. Chadha 다이어그램은 기존의 piper 및 Durov 다이어그램과 달리 알칼리토금속(alkaline earth metals; Ca, Mg)과 알칼리금속(alkali metals; Na, K)의 당량 퍼센트 차이(difference)를 x 축에 도시하며, 약산성이온(weak acidic ion;  $CO_3$ ,  $HCO_3$ )과 강산성이온(strong acidic ion; Cl,  $SO_4$ )의 당량퍼센트(meq/L) 차이를 y 축으로 나타내어 사각형 다이어그램 상에서 도시된 위치에 따라 물의 특성을 정의하였다. 즉, x 축은  $[(Ca+Mg)-(Na+K)]$ 이며, y 축은  $[(CO_3+HCO_3)-(Cl-SO_4)]$ 이다. 이와 같은 다이어그램은 piper 다이어그램의 마름모형(diamond-shaped field)의 장점을 모두 가지고 있고, 이온교환, 시멘트 오염물(cement pollution), 자연수의 혼합, 황산염 환원(sulphate reduction), 염수(최종 산물), 그리고 여러 가지 관련된 수리화학적 문

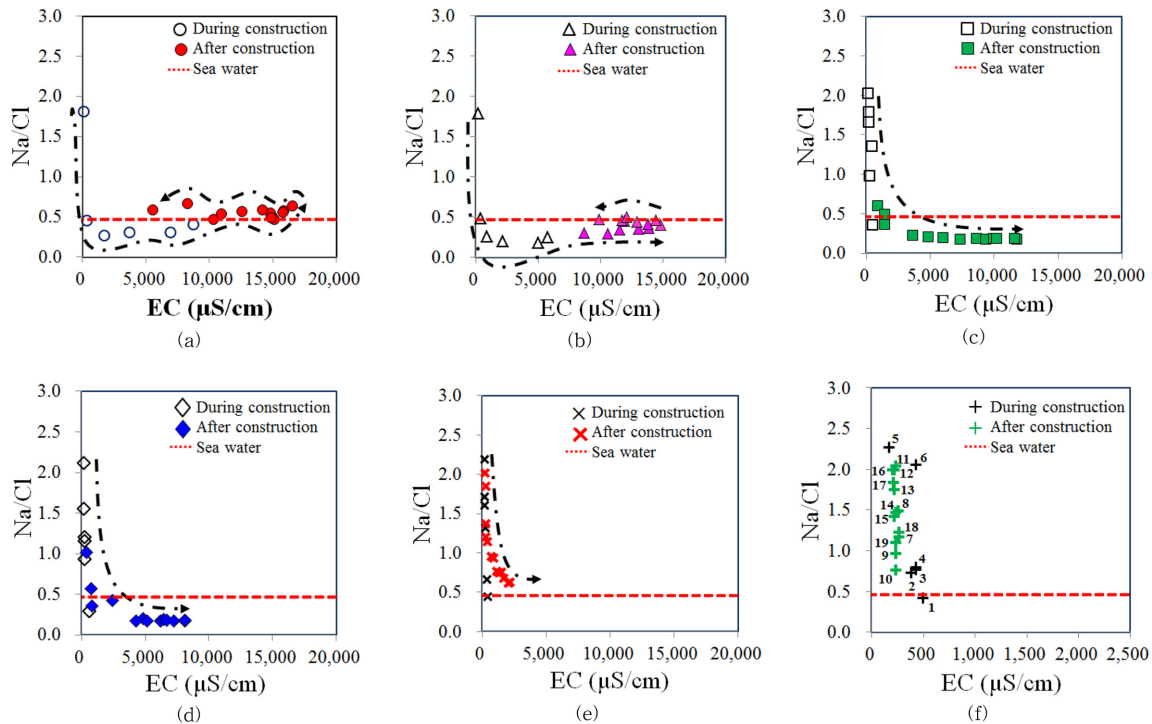


Fig. 11. Plot of Na/Cl ratios versus EC; ((a) MW-4-1, (b) MW-4-2, (c) MW-4-3, (d) MW-4-4, (e) MW-4-5, and (f) MW-4-6).

제와 같은 다양한 수리화학과정을 연구하는데 사용될 수 있다(Chadha, 1999). 이와 같이 Chadha(1999)는 물의 주요 특성을 나타내기 위하여 Chadha의 직사각형 다이어그램을 8가지 세부 수질유형(sub-field): ①  $Ca^{2+}-Cl^{-}$  또는  $(Ca^{2+}-Mg^{2+}-Cl^{-}(Ca^{2+}-Mg^{2+}-Cl^{-}$ -type,  $Ca^{2+}-Mg^{2+}$ -dominant  $Cl^{-}$ -type, 또는  $Cl^{-}$ -dominant  $Ca^{2+}-Mg^{2+}$ -type) ②  $Ca^{2+}-Na-Cl^{-}$ , ③  $Na^{+}-Cl^{-}(Na_2SO_4$ -type,  $Na^{+}$ -dominant  $Cl^{-}$ -type, 또는  $Cl^{-}$ -dominant  $Na^{+}$ -type), ④  $Na-HCO_3^{-}-Cl^{-}$ , ⑤  $Na^{+}-HCO_3^{-}(Na^{+}$ -dominant  $HCO_3^{-}$ -type, 또는  $HCO_3^{-}$ -dominant  $Na^{+}$ -type), ⑥  $Ca-Na^{2+}-HCO_3^{-}$ , ⑦  $Ca-HCO_3^{-}(Ca^{2+}-Mg^{2+}-HCO_3^{-}$ ,  $Ca^{2+}-Mg^{2+}$ -dominant  $HCO_3^{-}$ -type, 또는  $HCO_3^{-}$ -dominant  $Ca^{2+}-Mg^{2+}$  type), ⑧  $Ca^{2+}-HCO_3^{-}-Cl^{-}$ 으로 분류하였다. 본 연구에서는 Fig. 12(a)에서 보는바와 같이 8 가지 세부 수질유형의 중심영역에 위치한 수질유형을 쉽게 명명하기 위하여 ⑨  $Ca^{2+}Na-HCO_3^{-}-Cl^{-}$ 으로 나타내었다. 우리는 Chadha 다이어그램으로부터 담수-해수 혼합대의 지화학적 진화 경로를 크게 4가지 유형의 진화과정으로 나타내었다. 첫 번째, MW-4-1과 MW-4-2 구간은 해수의 영향을 직접적으로 받는 구간으로, reverse angle shape(∖)의 진화 양상이다(Fig. 12(a, b)). 해수침투가 증가할수록 Ca와 Na 이온 사이의 역이온 교환으로 인한 Ca-Cl 수질유형으로 진

화하였다가 해수침투가 감소하면서 Ca 이온이 더 이상 해리되지 않고 Na 이온농도의 증가가 우세해져 Na-Cl 수질유형으로 진화된 것이다. 두 번째, MW-4-3과 MW-4-4 구간은 해수 침투에 따른 Ca와 Na 이온 사이의 역이온 교환으로 인한 Ca-Cl의 수질유형으로 나타나며, 수질변화는 45° 수직으로 기울어진 우측방향(↘)의 진화 양상을 보였다(Fig. 12(c, d)). 장기 수질관측 종료 시점에 MW-4-3 구간의 경우, Ca와 Na 이온 사이의 역이온 교환으로 Ca의 농도가 증가하다 감소하고 있는 상태를 보였고, MW-4-4 구간은 Ca의 농도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 세 번째, MW-4-5 구간은 Ca-Cl에서 Na-HCO<sub>3</sub> 및 Na-Cl 수질유형에 걸쳐 진화되었다. 해수의 혼합을 증가에 따라 Ca와 Na 이온 사이의 역이온 교환반응 형태는 Fig. 12(e)과 같이 좌측 볼록한 형태(∩)의 진화 양상을 보였다. 네 번째, 0.5% 이하의 낮은 해수혼합율을 보이는 MW-4-6구간은 지하공간건설 기간에 걸쳐 Ca-Cl과 Ca-HCO<sub>3</sub> 수질유형을, 지하공간건설 완료시점부터는 Na-HCO<sub>3</sub> 수질유형을 보였다. 그리고 수질관측 종료 시점에는 Na-Cl의 수질유형으로, 오르내림(fluctuation)을 반복하는 복잡한 진화 형태를 보였다(Fig. 12(f)). 또한, MW-4호공의 Na-Ca 간 역이온교환 반응이 일어난 담수-해수 혼합대로부터 x축의  $[(Ca+Mg)-(Na+K)]$ 는 24~100

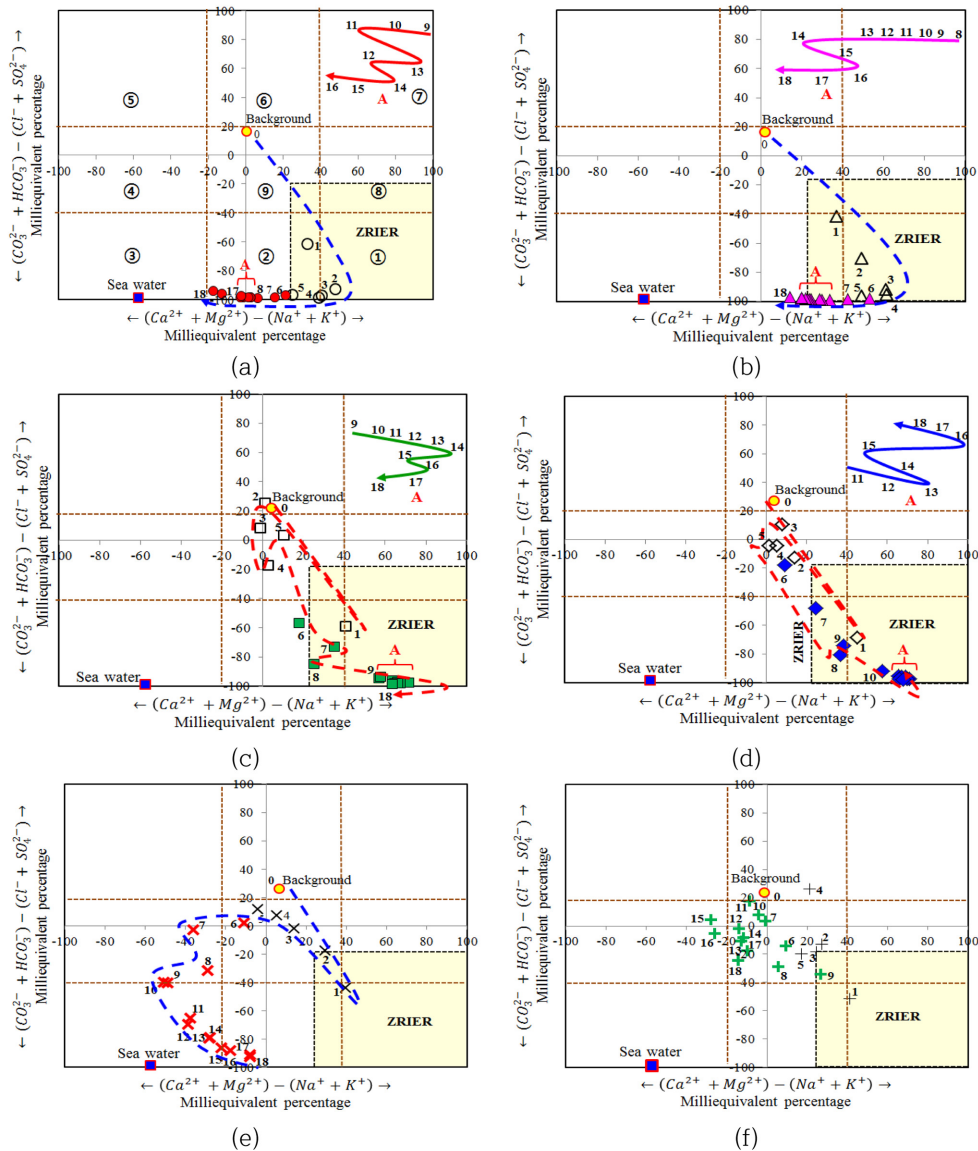


Fig. 12. Mixing processes with fresh and sea waters using Chadha's diagram; ((a) MW-4-1, (b) MW-4-2, (c) MW-4-3, (d) MW-4-4, (e) MW-4-5, and (f) MW-4-6).

당량퍼센트 범위를, y축의  $[(CO_3 + HCO_3) - (Cl - SO_4)]$ 는 -17 ~ -100 당량퍼센트의 범위를 갖는 역이온 교환반응 영역 (zone of reverse ion exchange reaction: ZRIER)을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 해안 인근에 위치한 지하공간건설에 따른 해수침투와 그에 따른 심부환경의 수리화학적 진화과정을 알아보기 위하여 해안 인근 및 내륙에 위치한 장기 수질 관측공으로부터 심도별 장기수질관측이 수행되었다. 담수

해수의 혼합을, Cl에 대한 Br 이온농도의 변화, 산소 및 수소 안정동위원소, 산소 안정동위원소값에 대한 Cl과 Br 이온농도 변화, Cl에 대한 주 이온 Na, Ca, Mg,  $SO_4$ , K,  $HCO_3$  이온농도 변화, EC에 대한 Na/Cl 이온비율 변화, 그리고 Ca+Mg- $SO_4$ - $HCO_3$ 에 대한 Na+K+Cl 이온농도 변화를 통해 해안인근 내륙에 위치한 담수 장기관측공인 MW-4호공으로부터 담수-해수화의 영향을 쉽게 분석할 수 있었다. 또한, 해수침투에 따른 담수-해수 혼합대의 진화과정은 Chadha 다이어그램으로부터 수질유형과 용존이온의 지화학적 분석을 통하여 4가지 시공간적인 경로를 규명하였다.

해안인근에 위치한 MW-4호공을 중심으로 분석결과, MW-4-1과 MW-4-2 구간은 지하공간 건설에 따른 지속적인 해수침투로 인하여 Ca-Cl 수질유형에서 Na-Cl 수질유형으로의 변화를 보였다. 2013년 6월에는 각각 26.3%, 24.1%의 해수 혼합율을 정점으로, 지속적으로 감소하는 추세를 보였으며, Chadha 다이어그램 분석에서는 해수침투에 따라 역이온 교환영역을 포함한 reverse angle shape(∟)의 진화양상을 확인할 수 있었다. MW-4-3과 MW-4-4 구간에서는 건설완료이후 시점부터 해수침투가 발생하기 시작하였으며, EC 증가와 함께 Ca와 Na 이온 사이의 역이온교환에 의한 Ca 이온농도가 급격히 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 수질은 해수침투가 증가할수록 Ca-Cl 수질유형으로 나타나며, 수질변화는 시공간적으로 45° 기울어진 우측방향(↘)의 진화양상을 보였다. MW-4-5 구간은 지하공간건설 완료이후부터 1년의 시간이 경과된 이후에도 해수의 혼합율은 서서히 증가하였다. 그러나 건설 시의 수질은 Ca-Cl 수질유형에서 Na-HCO<sub>3</sub> 수질유형으로 변화하였으나, 해수침투가 차츰 증가되면서 수질은 다시 Na-Cl 수질유형으로 바뀌는 좌측 볼록한 형태(□)의 진화양상을 보였다. MW-4-6 구간은 EC의 변동양상은 크지 않은 미미하게 나타났다. 또한, 수질은 Ca-Cl, Ca-HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub> 그리고, Na-Cl 수질유형이 오르내림(fluctuation)을 반복하는 복잡한 진화 형태를 보여, 지하공간건설 시 해수침투에 의한 영향이 미미한 것으로 나타났다.

본 연구는 담수대수층으로부터 해수침투에 따른 여러가지 변화 양상을 확인할 수 있었으며, 주요 지구화학적 과정은 역이온 교환반응이 우세함을 확인할 수 있었다. 그리고 Chadha 다이어그램의 [(Ca+Mg)-(Na+K)]에 대한 [(CO<sub>3</sub>+HCO<sub>3</sub>)-(Cl-SO<sub>4</sub>)]의 이온 그래프는 연구지역에서 역이온 교환과정과 담수-해수 혼합대의 시공간적 진화과정을 규명하는 분석도구로 유용하게 이용할 수 있었다.

결국, MW-4호공의 MW-4-1, MW-4-2 구간은 관측 종료시점에 해수침투가 감소하고 있는 추세를 보이고 있으나 MW-4-3, MW-4-4 구간은 해수침투가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 상부의 MW-4-1, MW-4-2 구간과 MW-4-3, MW-4-4 구간의 Chadha 다이어그램을 통하여 진화양상을 비교하였을 때, MW-4-3, MW-4-4 구간은 MW-4-1, MW-4-2 구간의 진화 양상과 매우 흡사하였다. 또한, MW-4-3과 MW-4-4 구간의 지하공간건설에 따른 반응속도는 상부와 비교하였을 때 지연된 반응효과로 나타났다는데, 이는 지하공간과 하부 구간에 유로가 되는 단열 연결성 및 지질구조 등의 여러 가지 요인으로 판단된

다. 이와 같이 MW-4-3과 MW-4-4 구간은 시간이 지남에 따라 해수침투가 서서히 감소될 것으로 예측되며, 향후에도 지속적인 수질장기관측을 통하여 담수-해수의 안정적인 관계를 비교분석해야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(핵연료주기사업, NRF-2012M2A8A5007440)에 의해 수행되었으며, 연구지원 기관 및 세심한 의견을 주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

## References

- Bear, J., Cheng, A.H.-D., Sorek, S., Quazar, D., and Herrera, I., 1999, Seawater intrusion in coastal aquifers; concepts, methods and practices, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 625p.
- Chadha, D.K., 1999, A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data, *Hydrogeology Journal*, **7**, 431-439.
- Choi, B.-Y., Kim, G.-Y., Koh, Y.-K., Shin, S.-H., Ryu, S.-W., and Kim, D.-H., 2008, Geochemical characteristics of a LILW repository. Groundwater, *The Journal of the Korean Radioactive Waste Society*, **6**(4), 297-306.
- Cirelli, F.A. and Miretzky, P., 2004, Ionic relations: A tool for studying hydrogeochemical processes in Pampean shallow lakes (Buenos Aires, Argentina), *Quaternary International*, **114**, 113-121.
- Custodio, E., 2010, Coastal aquifers of Europe: an overview, *Hydrogeology Journal*, **18**(1), 269-280.
- Fetter, C.W., 1993, Contaminant hydrogeology, New York, Macmillan Publishing Co., 458p.
- Hem, J.D., 1992, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, 3rd(ed), U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263p.
- Kim, B.-W., Koh, Y.-K., Choi, D.H., Kim, D.G., and Kim, G.-B., 2014, Current State of ; the Global Water Market and Considerations for the Groundwater Industry in South Korea, *The Journal of Engineering Geology*, **24**(3), 431-440.
- Lim, J.-W., Lee, E., Moon, H.S., and Lee, K.-K., 2013, Integrated investigation of seawater intrusion around oil storage caverns in a coastal fractured aquifer using hydrogeochemical and isotopic data, *Journal of Hydrology*, **486**, 202-120.
- Na, C.-K., Lee, M.-S., Lee, I.-S., Park, H.-Y., and Kim, O.-B., 2002, Hydrochemical and isotopic properties of the Thermal



Spring Water from Chonju Jukrim District, Korea, *Economic and Environmental Geology*, **30**(1), 25-33.

Rajmohan, N. and Elango, L., 2004, Identification and evolution of hydrogeochemical processes of groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India, *Journal of Environmental Geology*, **46**, 47-61.

Richter, B.C. and Keither, C.W., 1993, Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization, C.K. Smoley, 258p.

Shin, I.-H., Park, C.-Y., Ahan, K.-S., and Jeong, Y.-J. 2002, Hydrogeochemistry of Groundwaters at the Gogum island area in Jeonnam, Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, **23**(6), 474-485.

Symon, C., 2012, Climate change in the arctic- a hot topic, AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) secretariat, 17p.

Zakhem, B.A. and Hafez, R., 2007, Environmental isotope study of seawater intrusion in the coastal aquifer (Syria), *Environmental Geology*, **51**(8), 1329-1339.