

지질학회지 제 53권 제 6호, p. 805-817, (2017년 12월) J. Geol. Soc. Korea, v. 53, no. 6, p. 805-817, (December 2017) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2017.53.6.805 ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

담수 주입에 따른 담-염수 혼합대에서의 수질 특성 변화

김덕근¹ · 이치형² · 배종섬¹ · 김규범^{3,‡} ¹K-water연구원 ²(주)인텔리지오 ³대전대학교 건설안전방재공학과

요 약

본 연구에서는 GI-Waterway 주변의 대수층에서의 염수의 확산 특성을 파악하고, 주입정을 활용한 담수 주 입시 담-염수 혼합대의 수질 변화를 평가하였다. GI-Waterway는 한강 하류와 서해를 연결하는 국내 최초의 인 공뱃길로써 길이 18 km, 폭 80 m로 2011년 9월말부터 수질관리를 위해 해수와 한강 물을 함께 유입시켜 운영 중에 있다. 수로에 근접한 지하수 관측정(M-19)내 전기전도도는 수로내의 염분 변화 영향을 받고 있으며, 수질 유형은 Ca(Mg)HCO₃에서 Ca(Mg)Cl(SO₄) 유형을 거쳐 Cl_SO₄ 유형으로의 변화가 나타나고 있다. 주입정을 활용한 담수 주입 시험 결과, 주입 후 평균 49.9%의 전기전도도 저감 효과를 얻을 수 있었으며, 각 관측정에서 는 주입 후 수 일 경과 후에도 주입 효과가 지속되는 것으로 나타났고, 주입 효과는 지표하 약 15 m 하부의 모래 층에서 잘 나타났다.

주요어: 염수 확산, 전기전도도, 주입정, 담-염수 혼합대, 관측

Deog-Geun Kim, Chi-hyung Lee, Jong-Soem Bae and Gyoo-Bum Kim, 2017, Changes in water quality in saline-fresh water mixed zone according to a freshwater injection. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 6, p. 805-817

ABSTRACT: In this study, saline water spreading into surrounding aquifer along the GI-Waterway is investigated and the changes of water quality in saline-fresh water mixed zone by a fresh water injection is assessed. GI-Waterway is the first artificial waterway, 18 km long and 80 m wide, which connects the West Sea with the Han River, and seawater and freshwater are introduced in the waterway to control water quality condition since September 2011. The electric conductivity at the monitoring well, M-19, close to the waterway is affected by the surface water salinity in the waterway. Hydrogeochemical type of groundwater changes from Ca(Mg)HCO₃ into Cl_SO₄ type through Ca(Mg)Cl(SO₄) type. The result of injection test by using an injection well shows that the average decreasing effect of 49.9% in electric conductivity is acquired just after the injection and the effect is maintained fairly well for several days at the monitoring wells and especially it is predominant in sand layer below about 15 m in depth.

Key words: saline water spreading, electric conductivity, injection well, saline-fresh water mixed zone, monitoring

(Deog-Geun Kim and Jong-Soem Bae, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 34045, Republic of Korea; Chi-hyung Lee, Intellegeo Co. Ltd., Seoul 08390, Republic of Korea; Gyoo-Bum Kim, Daejon University, Daejeon 34520, Republic of Korea)

1. 서 언

해안지역은 해수와 담수가 공존하는 지역으로서 밀도가 큰 해수층이 담수 대수층 하부로 침투하여 나 타나는 수리적 평형관계를 갖게 된다. 이와 같은 해 수 침투는 두 매질의 밀도 차이에 의하여 자연적으로 나타나거나 지하수 양수나 주입 등 인위적 요인에 의 하여 조절되는 특성을 갖고 있다. 해수와 담수 경계 면은 기본적으로 Ghyben-Herzberg의 이론에 의하 여 나타나게 되는데, 지하수의 과다한 양수 등은 이 경계면을 보다 내륙으로 이동시키게 되어 지하수내 염분을 증가시키게 된다.

^{*} Corresponding author: +82-42-280-4804, E-mail: geowater@dju.kr

전세계적으로 해수침투 및 대책에 대한 연구 및 사업이 다양하게 수행되었는데, 미국 서부 캘리포니 아 지역의 경우, 1951년에 맨하탄 비치 해안의 방치 공을 활용한 주입 시험을 실시한 바 있으며 이를 토 대로 1953년부터 9개의 함양정과 54개의 지하수 관 측정을 활용한 주입을 통하여 해수침투를 방지할 수 있는 해수방벽 프로젝트(Seawater barrier project) 를 시작하였으며, 이후 미국 태평양 해안 및 플로리 다 지역 등에 담수 주입을 통한 해수침투 차단 사업 이 시행되어 왔다(Lipshie and Larson, 1995). 주입 정을 통한 담수의 함양은 해수 침입에 대한 벽체를 형성하는 주요 방법으로서, 피압이나 자유면 또는 층 상의 대수층에서 모두 적용 가능한 방법으로 알려져 있다(Mahesha, 2001). 레바논의 Jieh 및 Damour 지 역에서는 주입정 함양 방식을 활용한 3열의 차단벽 설치 효과를 모델을 통하여 평가하고 해수침투를 차 단하였다(Masciopinto, 2013). 나이지리아의 Lagos 섬 지역에서는 해안지역에서의 지구물리탐사를 통하 여 해수 침투를 방지하기 위한 적정 지하수 개발 심 도를 평가한 바 있으며 아울러 136 m 깊이의 차수벽 설치를 제안한 바 있다(Akinbinu, 2015). 해안지역 뿐 아니라 내륙으로 해수가 유입될 수 있는 경로는 운하, 배수로, 태풍 등이 해당된다. 운하의 경우에는 배의 이동을 위하여 깊이 굴착하게 됨으로써 해수가 유입되는 경우가 있으며, 멕시코의 Sabine 호에서는 호수와 연결된 대규모의 운하로 인하여 호수내로 해 수가 유입되기도 하였다(Barlow, 2008). 아메리카 대 륙의 대표 운하인 파나마 운하의 갑문에는 담수를 해 수가 대체하는 방식으로 물을 이송시켜 배를 이동시 키는 시스템을 가동하고 있으며, 갑문의 운행시 운하 내에는 염수가 유입되게 되는데 이를 방지하기 위하 여 갑문내에 공기 순환 셀 시스템에 의한 염분 분리 기 술을 도입하고 있다(Jones and Dawson, 1973). 최근에 는 해안 대수층에서의 지하수 주입에 의한 해수유입 차단이 대수층의 수질 확보와 해수침투로 인한 농업 활동에 미치는 영향 등을 경제적 관점에서 평가하여 해수침투 대책의 필요성을 강조한 바 있다(Siarkos et al., 2017).

국내의 경우에도 다양한 해수침투 관련 연구가 수 행된 바 있다. Lee (1992)는 제주도내 해수와 담수간 의 유체동력학적 평형에 대한 연구를 수행하였으며, Hwang *et al.* (1999)은 임해지역의 지하 비축기지 주 변에서의 지하수 유동에 해수침투가 미치는 영향을 2차원 수치모델을 활용하여 평가한 바 있다. Lee et al. (2001)은 부산 동래지역 암반 대수층내에 나타나는 해수침투 특성을 지하수의 이화학 특성 자료를 활용 하여 평가하였으며, Park et al. (2002)는 서부 해안 지 역에서 채취된 229개의 시료를 활용하여 해안으로부 터의 거리와 심도에 따른 광역적인 Seawater mixing index (SMI)를 도출한 바 있다. Park et al. (2008)은 해안 대수층내의 단층의 존재가 해수 침투에 어떤 영 향을 미치는지 모델을 통하여 분석하였는데, 단층면 에 평행한 방향이 지하수 및 염분 이동에 통로 역할을 할 수 있음을 밝힌 바 있다. Lee and Moon (2008)은 서천-군산 지역의 해수침투 특성을 수질데이터의 시 계열 및 요인분석을 통하여 평가하였는데, 이들 지역 은 충적/풍화대 대수층에 비하여 암반 대수층을 통 한 해수침투가 활발하게 이루어지고 있음을 규명하 였다. 또한, 해수 침투의 범위를 파악하는 수단으로 서 전기탐사나 전기비저항탐사와 같은 지구물리탐사 방법을 활용하여 담수와 해수의 경계를 결정하였으 며, 이화학 분석자료와 전기비저항탐사를 융합한 연 구를 수행하기도 하였다(Hagemeyer and Stewart, 1990; Hwang et al., 2000; Choudhury and Saha, 2004; Sherif et al., 2006).

이상과 같은 해수침투 특성에 대한 연구뿐 아니라 해수침투 방지를 위한 연구도 수행되었는데, Kim et al. (2003)는 화성시 해안지역에서의 양수정내 염수 가 침투하지 않도록 조석 효율과 Ghyben-Hertzberg 이론을 이용한 적정 양수량을 제시한 바 있으며, Kang et al. (2005)는 연안 대수층에서의 해수침투를 효과 적으로 방지하기 위하여 인공 하수처리수의 대수층 함양수로서의 활용성을 Sand box 모델을 활용하여 평가한 바 있다. Jung et al. (2014)는 지하수를 양수 하여 해수 침투를 방지하는 대책을 시행하는 경우에, 2중 양수정 방식으로서 해안측의 해수정과 내륙측의 담수정을 복합 설치 운영하는 방식을 설치한다면 내 륙측에서 보다 저염소 지하수를 취수함으로써 물 활 용성을 제고할 수 있다는 연구를 수행한 바 있다. Lee and Kim (2015)에서는 부산광역시 수영구 지역의 해 안 대수층내의 해수침투 저감을 위하여 기존의 방치 공을 통한 담수 주입시의 효과를 정량적으로 평가하 기 위하여 다차원 수리동역학적 분산 수치모델링을 수 행한 바 있다.

본 연구에서는 해수가 포함된 수로 주변에서 염수 (이하 수로내의 물이므로 해수 보다는 염수로 기술) 유입을 차단하기 위하여, 우물 방식의 지하수 주입을 실시할 경우에 나타나는 주입 전후의 담-염수 혼합 층에서의 지하수 수질 특성 변화를 분석하는데 목적 을 두었다.

2. 연구지역

본 연구지역은 인천광역시 계양구 상야동 일대로 서, GI-Waterway와 굴포천 연결수로의 합류지점에 해당하며, 서측에 구릉성 산지가 존재하나 대부분 평 야 지대로서 충적층이 잘 발달된 지역이다(그림 1). GI-Waterway는 한강 하류에서 서해로 연결되는 국 내 최초의 인공뱃길로써 주운수로의 길이는 18 km, 폭 80 m, 수심 6.3 m이며, 2011년 9월 말부터 수질관 리를 위해 서해안의 해수와 한강 물을 혼합하여 시범 운영하였으며, 2012년 하반기부터 본격 운영을 개시 하였다.

인근 지역의 토지는 대부분 벼농사 또는 비닐하우 스 재배로 활용되고 있으며, 주 농업용수 공급원은 인 공 수로를 통하여 유입되는 한강 또는 굴포천의 물이 며 일부 지역은 지하수 관정이 사용되고 있다. 본 지 역의 기반암은 선캠브리아기의 호상흑운모편마암이 며 상부에 제4기의 충적층이 잘 발달하고 있다. 본 지 역의 충적층은 현장 시추자료에 의하면 26~33 m의 두께로 분포하며 상부로부터 일반적으로 표토, 점토, 실트, 모래 및 풍화토의 순으로 구성되어 있다(그림 2). 연구지역에는 GI-Waterway 운영시 설치된 M-19 지 하수 관측정이 설치 운영중에 있었으며, 본 연구를 위 하여 3개의 관측정(OB-1, OB-2, OB-3)과 1개의 주 입정(IW)을 추가로 설치하였다.

3. 대수층의 수리 및 수질 특성

GI-Waterway는 평수위 2.7 El.m 및 2.23 ~ 3.07 El.m의 범위 내에서 운영되고 있으며 갑문의 운영 조 건에 따라 7 ~ 8일 주기로 상승 하강을 하고 있다. 연 구지역 인근의 지하수위는 GI-Waterway의 물을 채 우기 이전에는 수로의 수위 및 주변 관정에서의 양수 영향 등으로 -2.14 ~ 2.50 El.m의 범위를 나타냈으나, 이후에는 1.02 ~ 3.74 El.m 정도로 평균 2.65 El.m를 보이고 있다. 본 지역은 평야지대로서 지형 경사에 의 한 지하수 흐름보다는 주로 굴포천과 GI-Waterway 의 수위 및 관정의 양수 영향을 받는 지역에 해당한다.

대수층의 수리특성을 파악하기 위하여, 관측정 3개 소(OB-1, OB-2, OB-3)에 대하여 순간수위변화시험 을 실시하였으며, 평균 수리전도도는 OB-1이 1.44×10^4 cm/sec, OB-2가 1.32×10^4 cm/sec, OB-3이 1.13×10^4 cm/sec로 분석되었다.

시추공내 지하수의 흐름 방향을 파악하기 위하여 주 대수층으로 파악되는 지표하 심도 15.0~16.0 m 구



(a) Location of the study area

(b) Location of injection and observation wells and geophysical survey lines

Fig. 1. Location of the study area and injection/observation wells.

Wells	Target	Flow direction—	Fl	ow rate	Main flow direction
	(GL-m)		(cm/day)	(cm/sec)	
OB-1	15.0	153.9°	40.32	4.67×10 ⁻⁴	SSE
OB-2	15.5	150.8°	59.04	6.83×10 ⁻⁴	SSE
OB-3	16.0	29.9°	1,732.32	2.01×10 ⁻²	NNE
IW	15.5	28.5°	14.4	1.67×10^{-4}	NNE
M-19	15.5	161.6°	11.52	1.33×10 ⁻⁴	SSE

Table 1. Result of flow logging at groundwater wells.



Fig. 2. Vertical distribution of sediments at the injection and observation wells.

간의 모래층을 대상으로 유향유속검층을 실시한 결과, GI-Waterway에 가까운 OB-1와 OB-2 및 굴포천 연 결수로에 가까운 M-19는 유속이 느리면서 SSE 방향 으로 주 흐름이 형성되어 있으며, 상대적으로 양 하천 으로부터 먼곳에 위치한 OB-3은 유속이 빠르면서 NNE 방향의 주흐름이 형성되고 있다(표 1). 이와 같은 결 과는 굴포천 연결수로에 의하여 영향을 받는 NNE 방향의 빠른 흐름이 연구지역을 지배하고 있으나, GI-Waterway와 굴포천 연결수로가 만나는 구간으로서 하천수의 흐름 방향이 충돌하기 때문에 다양한 방향 을 보이는 것으로 파악된다.

지난 6년간의 M-19 관측정의 전기전도도의 변화를 보면, 지표하 11 m (EL. -4 m) 지점은 약 400 µS/cm 정도에서 큰 변화가 없이 유지되고 있으나, 지표하 28 m (EL. -21 m)지점의 경우에는 약 5,000 µS/cm까지 증가하는 특성을 보였으며, 이 기간 동안 GI-Waterway 는 약 25,000 µS/cm까지 증가하였다(표 2; 그림 3). 2012년 이후 지표수의 전기전도도가 높아지기 시작 한 점을 고려할 때, M-19의 깊은 심도에서만 전기전



Fig. 3. Long-term changes in electric conductivity at M-19 and GI-Waterway.

도도가 증가한 점은 대수층 하부로 염수의 유입이 발생하였음을 보여준다.

시간 경과에 따른 연구지역내에 설치된 지하수 관 측정 M-19의 지하수의 이화학 특성을 보면, 지표하 11 m 지점에서 채취된 시료는 대부분 Ca(Mg)HCO₃ 유형의 범주에 해당되나 시간이 경과하면서 Ca(Mg) Cl(SO₄) 유형으로 변해가는 것을 볼 수 있다. 지표하 28 m 지점의 시료는 초기를 제외하고 후반기에는 Cl_SO₄ 유형으로 변화되어 GI-Waterway의 시료와 근접하 고 있음을 알 수 있다(그림 4).

한편, 각 관측정 및 주입정내에서의 전기전도도의 수직적인 분포를 파악하기 위하여 CTD diver를 활 용한 검층을 실시하였는데, M-19 관측정의 2015년 4월에 실시한 결과에서는 15 m 깊이에서부터 전기 전도도 농도가 급격히 증가하기 시작하였음을 보여 주며, 2015년 9월에는 약 5,000 μS/cm를 초과하는 것으로 나타났다(그림 5(a)~(d)). 반면에, OB-1의 경 우에는 2015년 11월에 심도 15~23 m 구간에서 약 17,000 μS/cm의 높은 값을 보이다가 23 m 이상 깊이

	Sample		Т (°С)	рН	EC (µS/cm)	Eh (mV)	DO (mg/L)	Concentrations (mg/L)								
Well o	depth (m)	Date						Ca ²⁺	Mg^{2+}	Na^+	\mathbf{K}^{+}	Cl	SO4 ²⁻	NO ₃ -	HCO ₃ -	Br
	-11	' 11/04/27	14.2	6.47	509	95	2.32	35.6	21.4	40.5	1.3	33.6	61.9	0.1	159.3	0.1
	-28	' 11/04/27	13.5	6.48	551	136	2.18	36.1	21.4	40.8	1.4	35.6	65.0	0.3	158.7	0.1
	-11	` 12/03/14	7.9	8.50	246	165	10.38	26.2	15.1	33.3	1.0	22.6	32.2	0.3	202.6	-
	-28	` 12/03/14	9.1	7.67	389	36	9.02	23.2	13.3	31.3	1.0	19.7	30.0	0.3	152.3	-
	-11	·13/11/19	11.1	5.21	658	109	2.75	35.6	25.6	47.8	0.8	27.4	69.1	-	199.5	-
	-11	` 14/10/14	15.5	6.40	531	71	2.25	34.2	23.7	41.2	1.0	32.3	73.4	-	177.5	0.1
	-11	` 15/04/22	16.5	6.79	460	59	2.08	33.1	21.9	48.2	4.6	32.4	53.3	-	173.2	0.1
	-28	` 15/04/22	15.4	6.29	2,650	-41	2.38	169.5	73.7	326.1	8.4	961.0	145.0	0.3	140.3	3.2
	-11	' 15/09/16	15.9	6.40	549	219	2.31	42.7	28.2	43.5	1.6	37.5	84.6	0.8	184.8	0.5
	-28	' 15/09/16	16.2	6.21	4,910	-33	3.95	302.0	154.0	580.0	5.1	1,520.0	185.0	14.9	130.9	1.3
	-11	' 16/03/29	14.0	6.53	463	109	2.00	40.1	29.0	35.5	1.4	36.9	100.7	-	172.0	0.1
	-28	' 16/03/29	12.8	6.05	4,550	-13	3.07	334.5	176.9	851.4	8.6	2,434.4	249.6	-	48.2	7.1
- Waterway - -	-5	' 11/04/26	15.50	8.53	636	100	9.83	33.6	6.7	53.9	11.9	63.0	49.1	1.0	134.8	0.1
	-5	·12/03/13	7.50	8.55	10,410	108	16.97	198.2	223.7	1,842.6	70.7	3,414.0	557.3	23.5	147.8	24.2
	-5	'13/11/22	10.60	7.52	32,000	47	3.80	235.1	757.2	8,232.0	288.9	12,247.8	1,674.3	5.2	151.3	43.3
	-5	·15/04/20	17.30	7.51	24,900	99	6.17	224.8	636.1	6,845.9	324.4	12,270.3	1,708.3	5.3	123.8	42.4
	-5	·15/09/24	16.60	9.30	28,200	119	4.55	154.0	670.0	6,070.0	233.0	9,540.0	1,370.0	8.4	104.9	33.6
	-5	' 16/03/28	9.8	8.20	19,290	50	7.26	249.1	819.4	6,901.1	299.0	11,745	1,350.8	4.4	129.9	35.1

 Table 2. Result of hydrogeochemical analysis for water samples before an injection test.

608

에서는 다시 줄어드는 특성을 보이고 있다(그림 5(e)). OB-2의 경우에도 OB-1과 유사한 패턴을 보이는데 약 10,000 µS/cm까지 증가된 전기전도도가 약 28 m 하부에서는 7,000 µS/cm 정도로 감소되는 특성 을 보인다(그림 5(f)). OB-3에서는 나머지 2개 관측 정에 비하여 전기전도도의 증가폭이 크지 않은 것으 로 나타났으며, 주입정 IW에서는 OB-1과 유사한 패 턴을 보이는 것으로 나타났다(그림 5(g)). 고 전기전 도도의 출현 심도는 OB-3이 OB-1 보다 약간 깊으며 그 값도 작은데 이는 시추주상도에서 보듯이 OB-3의 모래층의 출현심도 및 두께와 관련이 있는 것으로 추 정되며, 아울러, 수로에서부터의 거리도 OB-3이 상대 적으로 먼 것이 영향을 미쳤을 수 있다. 그러나, 이들 중 어느 것이 주 요인인지에 대해서는 명확하지 않아 보인다.

이상에서 보는 바와 같이, 주입 시험 이전까지 연구 지역의 지하수는 당초에는 전형적인 지하수-지표수 혼 합 수질 특성을 갖고 있었으나 GI-Waterway의 물을 채우면서 염수 유입 영향을 받는 과정이 지난 수년간 지속되어 왔음을 알 수 있다. 이는 본 지역이 GI-Waterway 와 굴포천 연결수로가 만나는 돌출 구간이면서 충적층 으로 이루어진 지역으로서 GI-Waterway의 타 구역보다 지표수의 대수충내 유입이 용이한 지역이라는 점과 대수충의 수직 분포 및 거리 등이 염수 유입 및 분포 에 영향을 미친 것으로 보인다.

4. 주입정의 설계 및 현장 실험

현장 주입 실험은 주입정(IW)을 활용하여 수행되었 으며, 주변 관측정(OB-1, OB-2, OB-3 및 M-19)에서 지하수위 및 수질 변화를 관측하였다. 주입정은 굴착 경 300 nm, 내경 150 nm, 심도 26 m로서, 지표하 14~19 m, 21~24 m 구간에 유공관(슬롯 크기: 2.0 mm)을 설 치하고, 외부는 2.0~5.0 mm의 여재를 부설하였다. 주 입수는 생활용 수질기준을 만족하는 인근의 농업용 수로내의 지표수를 사용하였으며, 중력에 의한 비압 력식 주입을 실시하였다.

주입시험은 예비시험, 단기시험 및 장기시험의 3단 계로 진행되었으며, 장기시험 이후에 전기전도도 검층 및 간이수질 분석을 실시하였다(표 3). 장기 시험시 주 입량은 초기에 약 74.2 m³/d를 보이다가 5일을 경과 하면서 약34 m³/d의 일정한 값으로 유지되었다(그림 6).



Fig. 4. Piper diagrams for water samples at M-19.

5. 주입에 따른 수질 변화 특성

각 관측정에서 주입전(6월 27일), 주입 종료 직후 (7월 9일) 및 주입 종료 후 7일 경과(7월 16일) 시의 전기전도도 검층을 수행하여 주입 효과의 변화를 파 악해 보았다(그림 7). 상부와 하부 구간의 수질 변화 특성이 차이를 보이므로, OB-1의 경우는 15 m, OB-2 는 15 m, OB-3은 17 m를 기준으로 상하 구간의 변 화를 비교해 보았다.

상부 구간의 경우, GI-Waterway에 인접한 OB-1은 5,500 ~ 16,300 μS/cm의 전기전도도를 보이다가 주 입 종료 직후에는 3,800 ~ 7,100 μS/cm까지 감소하였 으며, 주입 종료 후 7일 경과 후에도 2,200 ~ 8,700 μ S/cm 정도로 유지되고 있다. OB-2의 경우에는 800 ~ 9,200 μS/cm의 분포를 보였는데, 주입 종료 직후 에는 600 ~ 800 μS/cm까지 하강하였으며, 주입 종 료 후 7일 경과 시에도 500 ~ 600 μS/cm 정도로 유 지되고 있다. 주입정에 가장 가까이 위치한 OB-3의 경 우에는, 2,000 ~ 5,300 μS/cm의 분포를 보였는데, 주 입 종료 직후에는 600 ~ 1,800 μS/cm까지 하강하였 으며, 주입 종료 후 7일 경과 시에는 800 ~ 1,200 μS/cm 로 전체적으로 재상승되는 현상이 나타났다.

하부 구간의 경우, OB-1에서는 15,000 ~ 17,500 μ S/cm의 전기전도도를 보이다가 주입 종료 직후에는 4,500 ~ 8,900 μS/cm까지 감소하였으며, 주입 종료 후 7일 경과 시에는 재 상승하여 11,000 ~ 15,600 μ



Fig. 5. Result of electric conductivity logging at each well before an injection test.

(u) i ie injection test					
Date	Period	Injection rate (m ³ /d)	Remarks		
2016/06/13	2 hr 30 m	65			
(b) Short-term injection test					
Date	Period	Injection rate (m ³ /d)	Remarks		
2016/06/22	7 hr	90			
(c) Long-term injection test					
Date	Period	Injection rate (m^3/d)	Remarks		
2016/06/27~ 2016/07/09	12 days	33.5 ~74.2 (average 47.3)	Injection rate range: 32.8 ~ 74.2		

Table 3. Details on the injection tests.

(a) Pre-injection test



Fig. 6. Changes of injection rate for a long-term test.

S/cm을 보이고 있다. OB-2의 경우에도 하부에 8,500 ~ 10,300 μS/cm의 분포를 보였는데, 주입 종료 직 후에는 4,300 ~ 5,200 μS/cm까지 하강하였으며, 주 입 종료 후 7일 경과 시에 4,700 ~ 5,700 μS/cm로 약 간상승하는 것으로 나타났다. 주입정에 가장 가까이 위 치한 OB-3의 경우에는, 하부에 6,100 ~ 7,400 μS/cm의 분포를 보였는데, 주입 종료 직후에는 2,800 ~ 4,100 µS/cm까지 하강하였으며, 주입 종료 후 7일 경과 시에도 2,100 ~ 3,900 μS/cm로 비교적 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다.

이와 같이, 주입전에 비하여 주입 종료 직후의 전 기전도도의 수직 분포를 보면, OB-1은 약 15 m 깊이, OB-2는 약 15 m 깊이, OB-3은 약 17 m 깊이에서 계 단상으로 급격한 변화를 보이는 것으로 나타났다. 이 는 주입전에 전기전도도의 수직 분포가 OB-1 및 OB-3 에서 완만하게 변하는 점과 차이가 있다. 이와 같은 주 입 종료 직후의 급격한 전기전도도의 변화가 발생한 것은 시추주상도에서 보듯이 이들 심도에서 주 대수 층인 모래층이 발달하기 때문으로서 모래층을 통한 확 산이 용이했음을 의미한다. 주입 종료 후 7일 경과 시 에는 GI-Waterway에 가장 가깝고 주입정에서 가장 먼 OB-1공에서 염수의 재유입이 빠르게 나타났으며, OB-2 및 OB-3에서는 주입 효과가 상대적으로 지속 되었음을 보여준다. 또한, 동일 모래층이라고 하더라 도 부분적인 투수성의 차이 및 경계부 등에서 주입 수의 확산 및 염수의 재유입 정도에 차이가 나타나 기도 한다.

상부 심도와 하부 심도로 구분하여 구간별 전기전 도도의 평균값을 토대로 주입 전후의 값을 비교하여 주입 효과를 평가해 보았다(표 4). 상부 심도의 경우 에는 OB-3에서 75.0%, OB-2에서 58.8%, OB-1에서 55.8%, M-19에서 16.7%의 순으로 효과가 나타났는 데, 주입정으로부터의 거리에 따라 주입 효과가 반비 례하는 것으로 평가되었다. 반면에, 하부 심도의 경 우에는 OB-1에서 63.7%, OB-3에서 52.9%, OB-2에 서 46.1%, M-19에서 30.3%의 순으로 효과가 나타났 으며, 이는 주입정과의 거리와 무관하게 나타났다. 이 와 같은 특징은 하부 모래층(그림 2의 sand 층)의 지하 수 흐름이 상부보다 이방성이 크기 때문으로 보인다.

담수와 염수의 혼합대의 분포를 파악하기 위하여 쌍극자 배열에 의한 전기비저항탐사를 2측선씩 주입 전(6월 27일), 주입중(7월 2일) 및 주입 종료 후(7월 9일)로 구분하여 수행하였다(그림 1, 8). 측선의 전극 간격은 5 m, 조사 심도는 25 m로 설정하였다.

측선 L-1의 경우, 비저항의 분포범위는 주입전에 13.5 ~ 88.1 Ωm, 주입중에 3.3 ~ 105.0 Ωm, 주입후 는 16.6 ~ 61.9 Ωm로 나타났다. OB-1 주변의 비저 항의 변화 양상을 보면, 주입전에는 심도 5.0 ~ 17.0 m 정도에서 중간 정도의 비저항대가 존재하나, 주입중 에는 측점 No. 10과 No. 11 사이에서 담수 주입 효과 가 잘 나타나는 반면에 OB-1 주변에서는 하부로부터 저 비저항대의 영역이 넓어지면서 저비저항대로 변화되고 있다. 이와 같이 초기 주입 4일 후인 7월 2일의 저비저 항대가 넓어지는 것은 담수 주입시 예상되는 현상과 차이를 보이는데, 이는 주입으로 인한 지하수 흐름 변 화로 하부 구간에서 염수화된 물의 이동이 발생하였거 나 탐사 결과의 공간적 오차로 인한 것으로 추정된다.

측선 L-2의 경우에는, 비저항의 분포범위는 주입 전에 9.39 ~ 120.0 Ω·m, 주입중에 13.3 ~ 83.7 Ω·m, 주입 종료 후는 5.7 ~ 313.0 Ω·m로 나타났다. OB-3 및 IW 인근의 변화 양상을 보면, 주입전에는 심도 7 m 부근에서 중간 내지 높은 비저항대를 보이고 심도 10.0 m 하부에서는 낮은 비저항대가 존재하나, 주입 중에는 OB-3의 10 m 하부에서 약간의 상승이 나타 나고 있어 주입 효과가 반영된 것으로 보인다. 또한, 주입 종료 후에는 높은 비저항이 유지되어 주입 효과 가 지속되고 있음을 알 수 있다.

이상 두 측선에 대한 비저항 분포의 주입 시간에 따 른 변화를 보면, 주입 초기에는 담수의 물리적 이동이 우세하기 보다는 주입으로 인한 기존 염수 성분의 이 동이 발생하는 것으로 보이며, 측선 L-2에서 보듯이 주입 후 지체 시간을 보이면서 담수 효과가 발생하는 것으로 분석된다. 다만, 주입에 따른 수질 변화와 전

Table 4. Effect of freshwater injection according to electric conductivity logging at four monitoring wells.

Content		Distance to	EC (m	- Decreasing ratio (9/)	
		IW (m)	Before injection	After injection	Decreasing Tatlo (76)
OB-1 -	0~15m	15	9.5	4.2	55.8
	>15m	15	16.8	6.1	63.7
OB-2 —	0~15m	10	1.7	0.7	58.8
	>15m	10	8.9	4.8	46.1
OB-3 —	0~17	5	2.8	0.7	75.0
	>17m	5	7.0	3.3	52.9
M-19 –	0~15m	20	0.6	0.5	16.7
	>15m	20	6.6	4.6	30.3



Fig. 7. Vertical distribution of electric conductivity at three monitoring wells.

기비저항탐사 결과가 명확히 일치하지 않는 것은 탐 사의 한계점으로 보인다.

주입 전(6월 21일), 중(7월 1일), 종료 후(7월 9일 및 16일)의 지하수 시료에 대한 이화학 분석 결과를 Piper diagram에 도시해 보았다(그림 9). 상부 구간 시료는 지표하 10 m, 하부 구간 시료는 지표하 22 m 에서 채취하였다. 주입 전(6월 21일)의 수질을 보면, 상부 구간의 경우에는, OB-1과 OB-3에서 염수의 혼합을 보이는 영역에 도시되었는데 이는 그림 7에서도 유사하게 나타나고 있다. 반면에 OB-2와 M-19는 지하수의 영역에 도시되어 있음을 알 수 있다. 하부 구간 의 경우에는 모든 관측정이 염수의 혼합 특성을 보이고 있으며 전기전도도 검층 결과에서도 알 수 있다.

주입 중 및 후의 수질 변화를 보면, 상부 구간의 경 우 대부분의 관측정(OB-1, OB-2, M-19)에서 주입 중 인 7월 1일의 수질 특성이 주입 전보다 다이아그램 의 우측에 위치하여 염수 성분이 확대된 것처럼 보이

며, 주입 종료 후에는 주입의 효과로 인하여 좌측으로 다시 이동하여 주입 효과가 발생함을 알 수 있다. 하 부 구간의 경우에는, OB-1은 주입 중(7월 1일)에는 담 수화 현상이 보이지 않으나 주입 종료 직후인 7월 9 일에는 주입 효과가 잘 나타났으며, 7월 16일에는 다시 염수화 됨을 알 수 있다. 주입수의 Na⁺ 농도는 32.57 mg/L, Cl⁻ 농도는 49.2 mg/L, Ca²⁺는 22.09 mg/L 등으로서 염수화된 지하수의 농도에 비하여 매우 낮 아 주입으로 인한 희석 또는 배수에 의하여 수질 변 화가 발생된 것으로 보인다. OB-2, OB-3 및 M-19의 경우에는 주입에 따른 수질 변화 효과가 잘 나타나지 않는데, 이는 그림 7에서 보듯이 주입에 따른 수질 변화의 폭이 상대적으로 적기 때문으로 보인다. 즉, 상 부 구간이 하부 구간에 비하여 주입에 따른 이화학적 특성 변화 및 효과가 뚜렷한데, 이는 모래층으로 구 성된 하부 구간(그림 2의 sand 층) 특성이 반영된 것 이며 아울러 하부가 상부 구간에 비하여 염수 침입



Fig. 8. Results of electric resistivity survey along L-1 and L-2.

정까지 담수의 확산이 이루어지지 못하나 일정 시간 이 지나면서 주입 효과가 반영되는 것을 알 수 있으 며, 중단 시에도 일정 기간 동안 주입 영향이 지속됨

이 우세하였기 때문으로 보인다.

이상 주입 전, 중 및 후의 전기전도도 검층 및 이 화학 분석 결과에서 보면, 주입 초기에는 인근 관측



(b) Lower range (sampled in G.L.-22 m) **Fig. 9.** Piper diagram for water quality before, during, and after an injection.

을 알 수 있다.

6. 결 언

본 연구는 GI-Waterway와 굴포천 연결수로가 만 나는 지점에서 해수가 혼합된 염수의 주변 대수층으 로의 유입 특성을 파악하고, 관정을 통한 담수의 주 입시 나타나는 지하수 수질 변화 및 염수 차단 효과 를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 본 지역은 GI-Waterway와 굴포천 연결수로 가 만나는 꼭지점 형태의 충적층 지역으로서 지표수 의 영향을 쉽게 받는 지역이며, 해수가 혼합된 지표수 의 영향으로 담수 이후 대수층내 지하수 수질 변화가 지속되었던 지역으로서 지하수의 이화학특성은 지하 수~지표수 성분에서 담-염수 혼합대 지하수 성분으 로 변화하고 있다.

둘째, 담수 주입시 각 관측정에서의 주입 효과는 투 수성이 양호한 하부의 모래층(그림 2의 sand 층)을 통하여 잘 나타나고 있다.

셋째, 담수 주입 전후의 전기비저항탐사를 활용한 염수 분포 범위를 평가한 결과, 비저항값은 전기전 도도와 반비례 관계를 보이므로 추가적인 연구를 통 하여 염수 침입 및 차단 효과에 대한 확인 수단으로 활용 가능할 것이다.

넷째, 지하수 관측정에서의 전기전도도 검층과 이 화학 특성 변화를 보면, 주입 효과는 일정 시간이 경 과한 이후에 나타나기 시작하며 주입 중단 이후에도 주입 효과가 지속되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 특성을 고려할 때, 인공함양 방식의 주입에 의한 염 수 침입 방지의 설계를 위해서는 장기간의 주입 시험 과 주입량 및 간격 등을 고려한 다양한 형태의 현장 시 험을 통하여 주입 주기나 기간을 설정할 필요가 있다.

REFERENCES

- Akinbinu, V.A., 2015, Delineation of saline water intrusion to safe-guide inland groundwater resources. Ocean & Coastal Management, 116, 162-168.
- Barlow, P.M., 2008, Preliminary Investigation: Saltwater Barrier-Lower Sabine River. Sabine River Authority of Texas, Retrieved 2012-12-09.
- Choudhury, K. and Saha, D.K., 2004, Integrated geophysical and chemical study of saline water intrusion.

Ground Water, 42(5), 671-677.

- Hagemeyer, R.T. and Stewart, M., 1990, Resistivity investigation of saltwater intrusion near a major sea-level canal, in S. H. Ward, ed., Geotechnical and Environmental Geophysics, vol. II: SEG, 67-77.
- Hwang, H.S., Lee, S.K., Ko, D.C., Kim, Y.S. and Park, I.J., 2000, Detection of sea-water intrusion caused by tidal action using DC resistivity monitoring. Geophysics and Geophyiscal Exploration, 3(1), 1-6 (in Korean with English abstract).
- Hwang, Y.S., Bae, H.S., Seo, D.I., Kim, K.S. and Kim, C.S., 1999, Groundwater flow characteristics affected by the seawater intrusion near simulated underground storage caverns in the coastal area. Journal of Engineering Geology, 9(1), 17-29 (in Korean with English abstract).
- Jones, M.L. and Dawson, C.E., 1973, Salinity-temperature profiles in the Panama canal locks. Marine Biology, 21, 86-90.
- Jung, E.T., Lee, S.J., Lee, M.J. and Park, N.S., 2014, Effectiveness of double negative barriers for mitigation of seawater intrusion in coastal aquifer: Sharp-interface modeling investigation. Journal of Korea Water Resources Association, 47(11), 1087-1094.
- Kang, J.K., Lee, S.J. and Kim, C.G., 2005, Investigation on hydraulic properties according to artificial recharge and extraction. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 27(9), 995-1005 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.Y., Lee, K.C. and Jung, H.J., 2003, Hydrogeological properties of coastal aquifer in Hwaseong area: implication for tidal effects. Journal of the Geological Society of Korea, 39(3), 385-390 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J., Cho, B.W., Moon, S.H. and Lim, M.T., 2001, Seawater enchroachment into bedrock aquifer in dongnae, Pusan. Journal of the Geological Society of Korea, 37(3), 407-420 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J. and Moon, S.H., 2008, Integrated approach for evaluating the characteristics of seawater intrusion using factor analysis and time series analysis: Seocheon-Gunsan area. Journal of the Geological Society of Korea, 44(2), 219-232 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.M. and Kim, J.M., 2015, Three-dimensional numerical modeling of impacts of fresh water injection on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer due to urbanization of Suyeong-gu, Busan, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 51(2), 203-219 (in Korean with English abstract).
- Lee, K., 1992, On the hydrodynamic balance of fresh and salt waters in the Cheju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 28(6), 649-664 (in Korean with

English abstract).

- Lipshie, S.R. and Larson, R.A., 1995, The west coast basin, Dominguez Gap, and Aalamitos seawater-intrusion barrier system, Los Angeles and Orange counties, California. AEG News, 38(4), 25-2.
- Mahesha, A., 2001, An overview of control of salt water intrusion in coastal aquifers. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 7(1), 58-71.
- Masciopinto, C., 2013, Management of aquifer recharge in Lebanon by removing seawater intrusion from coastal aquifers. Journal of Environmental Management, 130, 306-312.
- Park, J.H., Kihm, J.H., Kim, H.T. and Kim, J.M., 2008, Three-dimensional numerical simulation of impacts of fault existence on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer, Buan, Korea. Journal of Soil and Groundwater Environment, 13(5), 33-46 (in Korean with English abstract).
- Park, S.C., Yun, S.T., Chae, G.T. and Lee, S.K., 2002,

Hydrogeochemistry of shallow groundwaters in western coastal area of Korea: A study on seawater mixing in coastal aquifer. Journal of Soil and Groundwater Environment, 7(1), 63-77.

- Siarkos, I., Latinopoulos, D., Mallios, Z. and Latinopoulos, P., 2017, A methodological framework to assess the environmental and economic effects of injection barriers against seawater intrusion. Journal of Environmental Management, 193, 532-540.
- Sherif, M., Mahmoudi, A.E., Garamoon, H., Kacimov, A., Akram, S., Ebraheem, A. and Shetty, A., 2006, Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating seawater intrusion in the outlet of Wadi Ham, UAE. Environmental Geology, 49(4), 536-551.

Received	:	July	27,	2017
Revised	:	November	29,	2017
Accepted	:	November	30,	2017