

## 김포지역 대규모 지반 굴착에 따른 지하수 수위 및 수질 변화

김규범<sup>1,\*</sup> · 신경희<sup>1</sup> · 차은지<sup>1</sup> · 정수정<sup>2</sup> · 황진연<sup>3</sup>

<sup>1</sup>K-water연구원

<sup>2</sup>한국농어촌공사

<sup>3</sup>부산대학교

### 요 약

경인아라천 김포터미널의 대규모 지반 굴착은 주변 지역 지하수의 수위 및 수질에 변화를 야기할 수 있다. 수치모델을 이용하여 지하수위 변화를 예측한 결과, 터미널 지반 굴착 및 부지내 지표수의 완전 배수는 주변 지역 지하수의 수위, 유속 및 흐름 방향 등에 변화를 초래하였으며, 이와 같은 수문학적 변화는 산화 환원 환경 등 변화를 야기하여 수질에 변화를 가져왔다. 또한, 김포터미널 준공 후 담수시의 지하수위 회복에는 약 1개월 정도 소요되는데 모델에 의한 예측결과와 실제 관측값에 의한 변화가 매우 유사하게 나타났다. 지반 굴착 이후 나타난 기존 관정에서의 고 탁도 발생은 매질내 미립질 입자의 다량 함유 및 유속 증가로 인한 배출 등이 원인으로 추정되었다. 대규모의 지반 굴착은 주변 지역 지하수의 수문 및 수질 환경에 변화를 야기할 수 있으므로 사전에 충분한 조사와 예측을 통하여 대책을 강구할 필요가 있다.

**주요어:** 김포터미널, 지하수 수위, 탁도, 수치모델

**Gyoo-Bum Kim, Kyung-Hee Shin, Eun-Ji Cha, Soo-Jeong Jeong and Jin-Yeon Hwang, 2013, Changes in groundwater levels and quality due to a large-scale land excavation at Gimpo area. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 5, p. 565-577**

**ABSTRACT:** A large-scale land excavation at the Gimpo terminal of the Ara waterway could cause the changes in groundwater level and quality at the surrounding area. The result of the groundwater level's forecasting using a numerical model indicates that land excavation and entire draining brought the changes in groundwater level, flow velocity, and its direction and consequently these hydrologic changes produced the variations in groundwater quality controlled by an oxidation-reduction environment. When water-filling at the terminal after a construction completion, groundwater level at the monitoring well becomes recovered in one month, which is similar to the result of a numerical model. High turbidity at some existing wells is estimated to be originated from both a lot of fine minerals in the sediments and the increase in groundwater velocity after an excavation. Diverse investigation and analysis is required before a large-scale excavation to prevent the changes in groundwater hydrology and quality.

**Key words:** Gimpo terminal, Groundwater level, Turbidity, Numerical model

(Gyoo-Bum Kim, Kyung-Hee Shin and Eun-Ji Cha, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Republic of Korea; Soo-Jeong Jeong, Korea Rural Community Corporation, Uiwang 437-703, Republic of Korea; Jin-Yeon Hwang, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Republic of Korea)

### 1. 서 언

한강과 서해를 잇는 경인아라뱃길(경인아라천) 건설사업은 계양산을 중심으로 한강측의 김포터미널과 서해안측의 인천터미널을 연결하는 수로 굴착

사업으로서 배의 운행을 위하여 물을 채워 인공 하천을 형성하는 사업이다. 배의 운행에 필요한 풍부한 수량을 확보하기 위하여 한강수 및 해수의 유입을 통하여 유지용수를 확보하는데, 뱃길내 수위 및 수질 변화 등으로 인한 주변 지역의 지하수 변화도

\* Corresponding author: +82-42-870-7640, E-mail: gbkim@kwater.or.kr

함께 이해되고 예측될 필요가 있다.

수로 굴착에 따른 지하수 변화 사례 연구로는 미국 플로리다주의 Everglades 지역 수문 환경의 정비를 위하여 운하, 제방, 지하수 양수 등 다양한 수자원 관리 및 활용 시스템을 구축하면서 지표수와 지하수의 상호작용 및 해수침투에 대한 연구가 있다 (Price *et al.*, 2003; Renken *et al.*, 2005; Lohmann *et al.*, 2012). 운하 등 지반 굴착에 따른 주변 지하수와 의 상호작용에 대한 최근 연구로는 미국 북중 네브라스카주에서 지표수-지하수 상호작용도를 평가함에 있어 매질의 공간적 이방성, 암상 특성 및 겉보기 저항값 등을 토대로 연구한 사례가 있으며(Teeple *et al.*, 2009), 투수성 지반으로 구성된 수로의 누수가 주변 지하수 함양에 기여하는 정도를 수위 분석, 지구화학적 해석 및 동위원소 분석 등을 통하여 연구한 바 있다(Harvey and Sibray, 2001). 또한, Arumi *et al.* (2009)는 칠레의 Cachapoal 강 유역에서의 지하수 함양원은 수로에서의 누수가 약 52%, 관개수의 침투가 약 22% 정도 차지함을 밝히면서 두 수문 인자간의 상호 작용을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 경인 아라천의 동쪽 갑문 인근의 김포터미널 부지의 굴착 및 담수 과정에 나타난 주변 지역에서의 지하수 수위 수질 변화 및 탁도의 원인을 평가하고 준공 이후 담수시의 지하수 변화를 예측하고자 하였다.

## 2. 연구 지역

경인아라천 사업은 한강과 서해를 연결하는 연장 18 km, 폭 80 m의 수로를 건설하는 것으로서, 현재

건설 완료되어 국가하천으로 지정된 후 경인아라천으로 명명되어 관리되고 있다(그림 1). 경인아라천은 동측이 한강과 접하고 김포평야를 가로질러 굴착되었으며, 서측은 서해안과 접하여 계양산 서측의 매립지역을 관통하고 있다. 경인아라천은 바닥 표고가 약 -3.6 El.m로 굴착되어 있으며 평상시 유지수위는 2.7 El.m로서 수심 6.3 m를 유지하고 있다.

경인아라천 주변의 지질은 선캠브리아기 변성암류, 쥐라기 퇴적암류와 화성암류, 백악기 화산암류를 제4기 충적층과 매립지로 대분되며, 선캠브리아기의 변성암류는 흑운모편마암, 안구상 편마암, 운모편암, 석영편암, 화강편마암 등이 분포하고 쥐라기 화강암류인 흑운모화강암과 홍색장석화강암이 경인아라천 남쪽에 넓게 분포한다. 또한, 백악기의 화산암류인 용결응회암이 계양산을 중심으로 분포하며, 이를 유문암이 관입하고 있다. 그 외에 응회암, 유문암, 화산쇄설성 퇴적암, 안산암 및 섬록암과 화강반암이 부분적으로 분포하고 있으며, 최상부에는 제4기 충적층이 부정합으로 발달한다(Kim *et al.*, 1995).

연구지역은 경인아라천 동측에 위치한 김포터미널 인근 지역으로서 김포시 고천읍 전호리 일대를 포함한다. 전호리 주변 지형은 평균 고도 5 El.m 내외의 저지대 논과 밭으로 이루어져 있으며, 논과 밭 주위의 산악 지역도 고도 6~80 El.m의 얇은 구릉으로 되어 있다. 이 지역의 지질은 선캠브리아기의 흑운모 편마암을 쥐라기 화강암인 흑운모 화강암이 관입하며, 이를 제4기 충적층이 부정합으로 분포하는 지역이다(그림 2). 본 지역 충적층의 심도는 약 20~30 m로서, 상부에 실트층, 하부 약 5~10 m 구간에 모래층이 분포하고 있다.



Fig. 1. Location of the Ara Waterway and the Gimpo Terminal.

### 3. 현장 조사

연구지역에는 생활용 및 농업용으로 사용되는 관정이 개발 이용되고 있다. 김포터미널 굴착 작업이 진행 중인 2011년 5월 18개소 관정에 대한 현황 조사 결과에 의하면 일부 수량 부족 및 탁도 등의 문제가 발생한 바 있다. 김포터미널 굴착은 2009년 6월부터 시작하여 2011년 9월에 완료되었으며, 이후 담수는 2011년 9월말부터 시작되었다. 김포터미널의 굴착 심도는 약 10.9 m이며, 준공 후 담수시의 수면은 2.6~2.7 El.m로서 지표하 약 4.7 m에 위치한다(표 1).

연구지역내 지하수 관정은 지상 펌프에 의하여 양수되어 양정고가 깊지 않은 것으로 파악되었으며 굴착 심도가 40 m 이내인 얇은 우물에 해당한다. 지하수 관정에서의 수위 및 수질을 파악하고자 현장 수위 조사 및 시료 채취 등을 실시하였는데, 우물 상

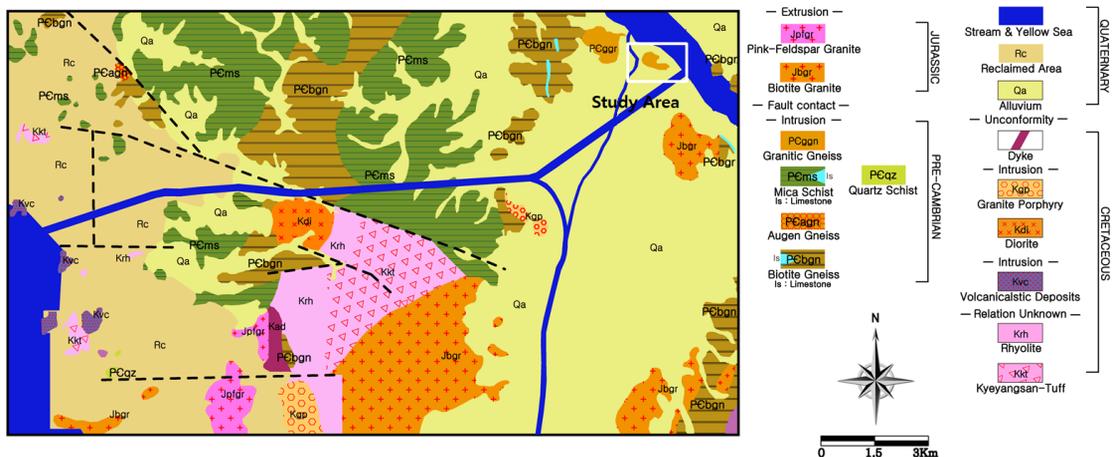
부가 밀폐되어 수위 측정이 불가하여 전호리와 김포터미널 사이에 흐르는 농업용수로 등에서 지표수 수위 및 JH1(지하수 자동 관측정)에서의 지하수위를 측정하여 모델에 활용하였다. JH1 지하수 관측정은 지표 표고 7.45 El.m, 심도 29.5 m 및 구경 200 mm 로 굴착되어 있다.

지하수 및 지표수 수질 조사는 전호리 마을내 3개 관정(JH2: 지표 표고 약 9.0 El.m, JH3: 지표 표고 약 9.1 El.m, JH4: 지표 표고 약 8.7 El.m), 지하수 관측정(JH1), 농업용수로내 지표수 1개소 등에서 수행되었는데, 김포터미널 굴착 중 및 담수 이후 총 5회(2011년 5월, 7월, 9월, 2012년 7월 및 2013년 6월)에 걸쳐 이루어졌다. 아울러, 2차 조사시에는 비교군을 확보하기 위하여 전호리 외 지역의 5개 우물(GC1, GC2, GC3, GC4, GC5)에서 지하수 시료 채취가 추가되었다(그림 3).

**Table 1.** Condition of excavation and water filling at the Gimpo terminal.

Investigation date	Gimpo terminal				Remarks
	Land surface (El.m)	Depth to bottom (m)	Bottom elevation (El.m)	Surface water level (El.m)	
2011. 5. 16	7.3	10.9	-3.6	( $\approx -3.0$ ) <sup>1)</sup>	Water filling in a terminal from 20 September 2011
2011. 7. 05	7.3	10.9	-3.6	( $\approx -3.0$ ) <sup>1)</sup>	
2011. 9. 07	7.3	10.9	-3.6	-3.0	
2012. 7. 26	7.3	10.9	-3.6	2.7	
2013. 6. 24	7.3	10.9	-3.6	2.6	

<sup>1)</sup> No water in the Gimpo terminal after excavation



**Fig. 2.** Regional geologic map of the Ara Waterway (box: study area).

현장 지하수 수질 측정은 수온(T), 수소이온농도 (pH) 및 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 산화환원 전위(Eh)에 대하여 Horiba pH meter (D-25, D-54)를 이용하여 수행되었으며, 알칼리도는 산중화적정법으로 현장에서 측정되었다. 양이온 및 음이온 분석을 위하여 셀룰로스 질산염 막필터를 이용하여 0.45  $\mu\text{m}$  이하로 여과하여 부유물을 제거하였으며, 이 중 양이온 분석 시료는 유기작용과 금속 이온들의 침전이나 용기 내 흡착을 막기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 채취된 시료는 4°C로 수온을 유지하여 실험실로 운반하여 IC (이온 크로마토그래피)와 ICP-AES (유도결합 플라즈마 원자흡광 분석기)로 음이온과 양이온을 분석하였다.  $\text{Fe}^{2+}$  및  $\text{Mn}^{2+}$ 은 현장에서 Spectrophotometer (HACH DR-2800)를 이용하여 분석하였다. 또한, JH1 및 JH2에 대해서는 지하수내 침전물에 대한 해석을 위하여 수시료 채취 시 셀룰로스 질산염 막필터(0.45 $\mu\text{m}$ )에 걸러진 부유/침전물을 수거하여 부산대학교에 의뢰하여 XRD 분석을 실시하였다.

#### 4. 굴착 전후의 지하수위 변동 예측

##### 4.1 모델 설정

김포터미널의 굴착 중 및 담수 중에는 주변 지역의 지하수 수문 환경에 변화를 가져올 수 있다. 지하수 관측정의 지하수위, 김포터미널 굴착 바닥 및 농업용수로, 굴포천 수위 등을 입력 인자로 고려하여 연구지역 지하수위 변화에 대한 수치모델을 Modflow를 사용하여 수행하였다. 모델 영역은 전호리, 김포터미널 굴착 구간 및 터미널 부지 등을 포함하여 2.0 km  $\times$  3.7 km의 범위이며, 모델의 격자는 20 m  $\times$  20 m로 조밀하게 구성하였고 특히 전호리 지역은 10 m  $\times$  10 m로 구성하여 총 67,500개의 격자를 형성하였다 (그림 4).

김포터미널 설계시 굴착된 시추자료를 토대로 2개의 지층으로 모델을 구성하였다. 각 지층(충적층 및 암반층)의 수리전도도는 Log normal 분포를 보이는 현장 투수시험 자료로부터 지수함수( $K = \exp(y + 0.5S_y^2)$ )에 의한 대표값을 구하여 적용하였다(Helsel and Hirsch,

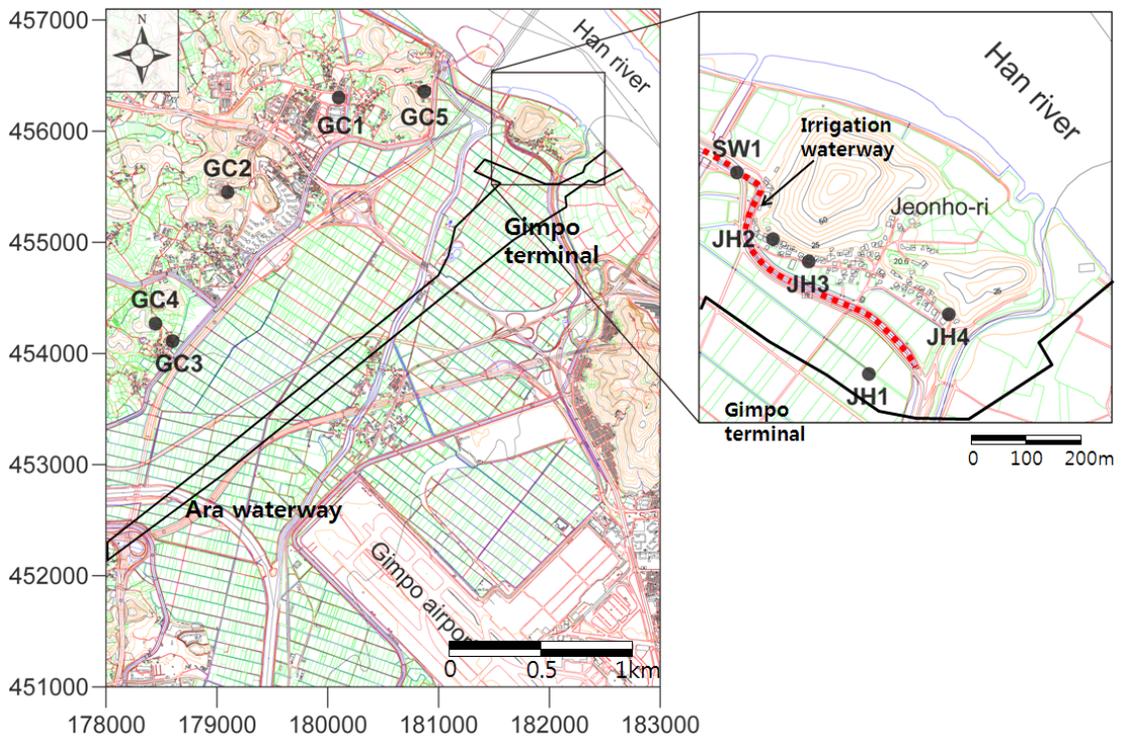


Fig. 3. Location of water sampling in the study area.

2002). 여기에서  $K$ 는 수리전도도,  $y$ 는 표본의 평균,  $s_y$ 는 로그단위의 표본의 분산을 의미한다. 이로부터 추정된 수리전도도는 층적층은  $8.25 \times 10^{-3}$  cm/s, 암반층은  $7.34 \times 10^{-5}$  cm/s이며, 수직수리전도도는 1/10 배를 적용하였다. 김포터미널 굴착 이후에는 구조물 설치 공사를 위하여 완전 배수를 시키게 되며, 완공 이후에는 선박의 정박 등을 위하여 담수를 하게 된다. 따라서, 김포터미널은 개항 이전에는 배수경계(Drain), 개항 이후에는 일정수두경계로 설정하였고, 한강 및 연구지역 좌측을 남북으로 흐르는 굴포천 등은 하천(River)으로 설정하였다.

농업용수도가 잘 발달된 지역의 특성상 농업용수로의 수위 조건이 주변 지하수위에 영향을 미칠 수 있고, 김포터미널의 굴착에 따른 배수 및 담수 조건이 지하수위에 영향을 미칠 수 있으므로 표 2와 같이

다양한 조건을 조합한 모델링을 수행하여 김포터미널의 공사 중 및 공사 이후의 변화를 예측하였다. A 조건은 김포터미널 굴착 이후 배수를 시킨 상태에서 농업용수로에 물이 차 있는 경우, B 조건은 김포터미널 굴착 이후 배수를 시킨 상태에서 농업용수로에 물이 없는 경우, C 조건은 김포터미널 굴착 이후 담수를 시킨 상태이며 농업용수로에 물이 차 있는 경우, D 조건은 김포터미널 굴착 이후 담수를 시킨 상태에서 농업용수로에 물이 없는 경우 등에 해당한다.

4.2 분석 결과

그림 5는 상기 조건의 A 및 B에 대한 예측 결과로서, 김포터미널의 굴착이 진행됨에 따라 주변 지하수의 변화를 모사한 것이며 전호리 마을 앞 농업용수로내에 물이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우

Table 2. Four conditions of groundwater modeling in this study.

Cases	Gimpo terminal	Irrigation channel	Descriptions
A	No water	Water filling	When land excavated
B	No water	No water	When land excavated
C	Water filling	Water filling	After terminal opening
D	Water filling	No water	After terminal opening

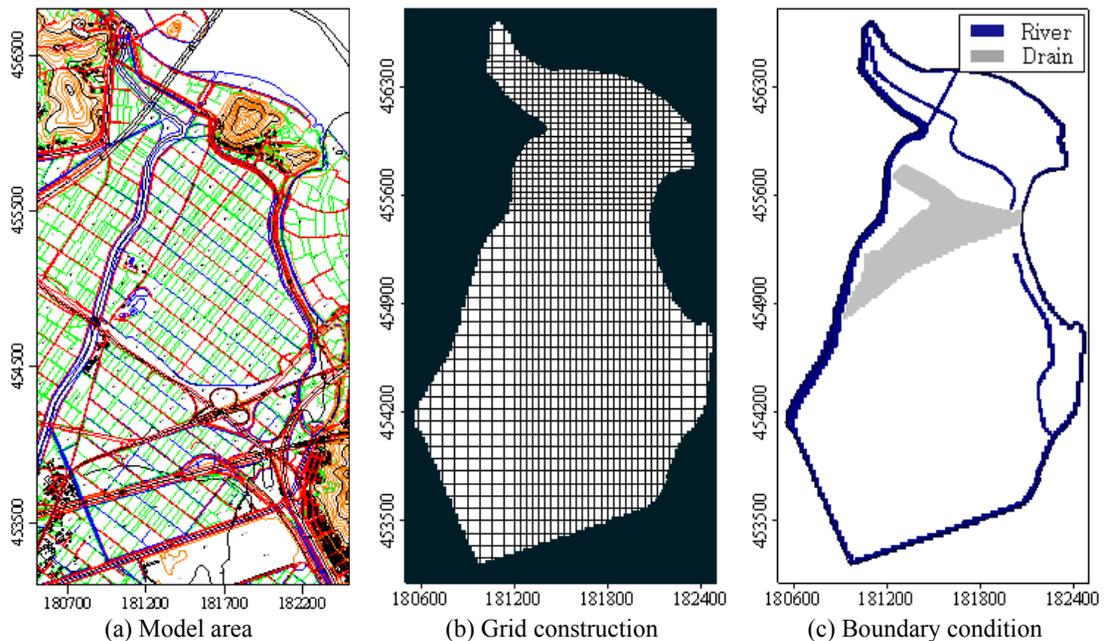


Fig. 4. Grid construction and boundary condition in the model area.

로 구분하여 분석하였다. 농업용 수로내의 수위가 김포터미널 굴착 표고보다 높기 때문에 농업용 수로내의 조건에 따라 주변 지하수 흐름에 변화가 발생한다. 김포터미널 굴착 이후 시간이 경과함에 따라 지하수의 동수구배가 급격히 증가하여 유속이 증가하였으나, 농업용 수로내의 물의 존재 여부에 따른 전호리 지역 지하수의 흐름 방향에는 큰 차이가 나타나지 않고 있다. 이는 10 m 깊이의 김포터미널 굴착에 따른 지하수 동수구배의 급격한 증가가 농업용 수로내 물의 유무 조건보다 지하수 흐름에 미치는 영향이 크기 때문이다.

시간에 따른 수위 강하 그래프에서 보듯이, 농업용수로에 물이 차 있는 경우에는 전호리 지역내의 3개 관정(JH2, JH3, JH4)에서는 약 1 m 이내의 수위 강하가 발생하고 김포터미널 인근의 관측정 JH1은 5 m 이상의 수위 강하가 발생함을 알 수 있다(그림 5(a)). 농업용수로에 물이 없는 경우에는 물이 있는 경우보다 수위 강하량이 큰 것을 알 수 있다(그림 5(b)). 이와 같은 결과는 농업용수로내 물의 존재 유무는 주변 지역 지하수 흐름과 수위에 일부 영향을 미치고 있음을 보여준다. 반면에 김포터미널에 인접한 JH1은 농업용수로내 물의 존재와 상관없이 터미널

굴착의 영향으로 거의 동일한 수위 강하가 나타난다.

김포터미널의 운영 수위 및 수로내 수위 등의 조건으로 터미널 공사 이후 담수 완료에 대한 정류해석을 수행하였다(그림 6). 그림 6(a)는 농업용수로에 물이 차 있는 경우로서 수로 수위(3.1 ~ 3.2 El.m)가 높은 관계로 지하수의 흐름은 김포터미널쪽으로 형성되어 있으나, 그림 6(b)와 같이 농업용수로에 물이 거의 없는 경우는 김포터미널의 운영 수위(2.7 El.m)보다 수로내 수위(서측 하류는 0.8 El.m, 동측 상류는 1.5 El.m)가 낮기 때문에 수로 방향으로의 지하수 유동이 발생하게 된다.

JH1 지점의 실제 관측자료와 부정류 모델의 결과를 비교해 보면, 그림 6(c)에서 보는 바와 같이 상관계수 0.964로서 매우 유사함을 알 수 있다. 담수 이후 약 1개월이 경과하면서 수위 안정이 이루어지기 시작하는데, 약 2.5 El.m까지 수위 상승이 예측되었다. 실제 계측값이 예측 값보다 다소 낮은 것은 김포터미널 담수 직후에는 일정기간 동안 변동 수위로 운영한 것이 영향을 미친 것으로 보인다.

5. 지하수 수질 변화

현장 측정 자료를 보면, JH1 지점의 수질이 타 지

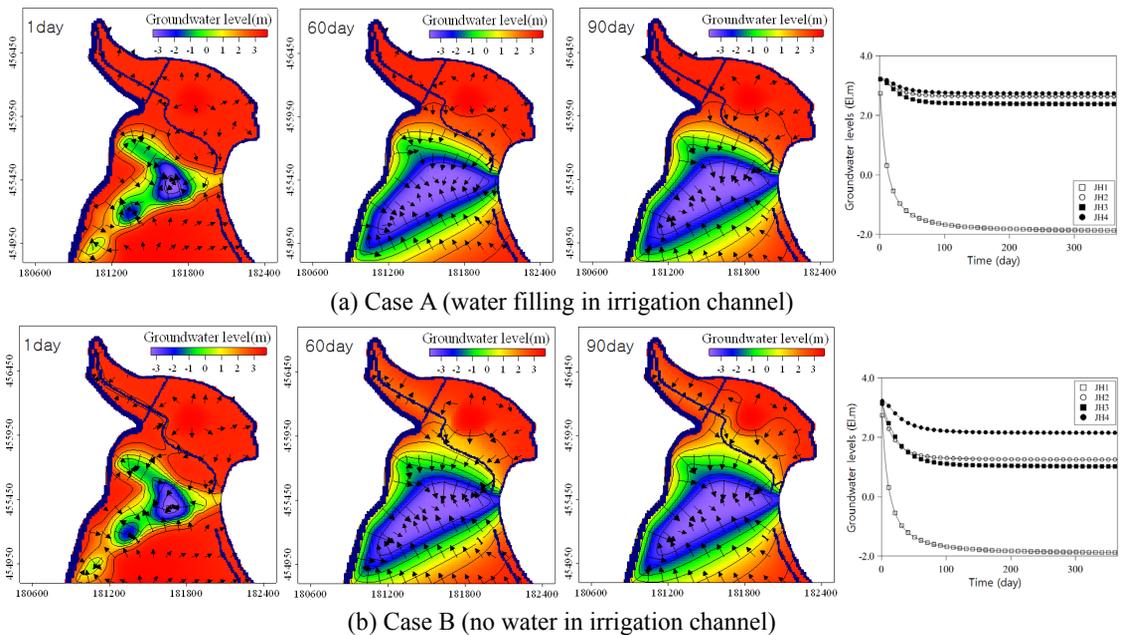


Fig. 5. Changes in groundwater flow and levels estimated by a numerical model after an excavation of the Gimpo Terminal.

**Table 3.** Result of hydrogeochemical analysis at each well.

Sample No.	Date (yyyy-mm)	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	DO (mg/L)	Turbidity (NTU)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Type
JH1-1	2011-05	17.6	6.25	-45	851	0.89	24	24.1	31.9	40.4	7.6	34.03	3.89	81.6	82.3	38.8	1.0	204.3	0.06	0.21	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
JH1-2	2011-07	13.8	6.25	-27	693	1.18	17	26.3	27.9	77.5	6.0	18.81	3.02	73.8	100.4	43.4	1.0	203.6	0.23	0.39	N.D.	Ca-Cl
JH1-3	2011-09	15.2	6.33	-63	674	2.07	32	21.8	28.5	47.5	6.9	31.66	3.34	77.2	73.0	31.2	0.2	207.5	0.00	0.38	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
JH1-4	2012-07	16.0	5.74	-1	817	2.43	-	41.1	32.7	69.7	5.5	-	-	-	9.8	12.8	15.2	379.5	0.05	N.D.	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
JH1-5	2013-06	16.3	5.99	-51	620	3.11	-	22.7	31.8	55.6	9.1	-	-	-	71.1	27.7	0.0	231.9	0.09	0.18	0.17	Ca-HCO <sub>3</sub>
Avg.		15.8	6.11	-37	731	1.94	24	27.2	30.5	58.1	7.0	28.17	3.42	77.5	67.3	30.8	3.5	245.4	0.09	0.29	0.17	
JH2-1	2011-05	17.1	6.79	85	533	3.71	16	26.7	13.5	28.2	7.2	0.05	0.02	28.9	30.5	39.6	69.0	71.3	0.06	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
JH2-2	2011-07	23.2	6.41	53	405	3.73	21	24.1	12.2	26.1	8.4	0.01	0.02	31.4	26.9	34.7	68.5	57.6	0.05	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
JH2-3	2011-09	21.6	6.42	226	320	3.49	11	18.3	9.6	21.5	6.8	0.03	0.01	31.4	16.7	30.8	51.0	56.9	0.00	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
JH2-4	2012-07	32.7	6.58	256	339	4.62	-	19.2	9.7	21.5	6.4	-	-	-	20.9	28.5	48.4	67.5	0.04	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
Avg.		23.7	6.55	155	399	3.89	16	22.1	11.2	24.3	7.2	0.03	0.01	30.6	23.7	33.4	59.2	63.3	0.04	N.D.	N.D.	
JH3-1	2011-05	17.7	6.43	198	438	3.21	2	22.4	14.0	29.2	3.2	0.01	0.00	29.6	29.3	34.8	84.9	50.6	0.07	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
JH3-2	2011-07	23.0	6.31	176	283	2.49	3	16.2	3.2	6.7	2.0	0.13	0.04	8.7	16.7	15.0	11.9	29.1	0.09	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
JH3-3	2011-09	23.1	6.74	312	167	5.95	2	17.4	3.9	8.3	2.1	0.02	0.00	9.3	12.4	13.7	9.5	49.7	0.01	N.D.	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
Avg.		21.3	6.49	229	296	3.88	2	21.3	9.9	21.1	2.7	0.13	0.01	26.3	20.2	26.0	19.8	90.7	0.00	N.D.	N.D.	
JH4-1	2011-05	21.1	6.54	77	446	1.99	2	21.6	9.9	21.1	2.7	0.37	0.01	25.7	20.6	26.5	21.2	92.2	0.00	N.D.	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
JH4-2	2011-07	23.0	6.38	57	428	4.84	3	20.5	9.8	20.9	2.8	0.02	0.01	26.5	19.6	24.1	18.7	89.7	0.00	N.D.	2.24	Ca-HCO <sub>3</sub>
JH4-3	2011-09	21.8	6.37	223	312	3.71	1	21.8	10.1	21.2	2.7	0.01	0.00	26.8	20.2	27.4	19.6	90.1	0.00	N.D.	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
Avg.		22.1	6.50	180	330	4.07	2	20.2	8.7	18.4	2.6	0.10	0.01	21.8	19.9	23.9	26.5	70.3	0.02	N.D.	2.24	
SW1-1	2011-05	17.4	7.02	195	521	6.92	-	14.1	2.9	9.6	3.3	0.22	0.06	9.1	13.4	12.7	21.3	36.7	0.05	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
SW1-2	2011-07	27.6	7.03	187	596	3.32	5	17.3	2.9	6.9	3.5	0.04	0.27	11.0	8.3	7.5	5.6	63.2	0.17	N.D.	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
SW1-3	2011-09	25.3	7.17	178	264	4.69	4	21.3	4.0	17.7	4.8	0.03	0.04	8.3	23.1	18.3	12.7	55.5	0.03	N.D.	0.92	Ca-Cl
Avg.		23.4	7.07	187	460	4.98	5	17.6	3.3	11.4	3.9	0.10	0.12	9.5	14.9	12.8	13.2	51.8	0.08	N.D.	0.92	
GC1-2	2011-07	23.2	6.70	220	760	2.20	-	84.7	20.3	32.2	2.2	N.D.	N.D.	31.9	115.5	63.0	32.9	166.6	0.00	0.20	N.D.	Ca-Cl
GC2-2	2011-07	19.3	6.83	201	348	4.10	-	53.7	4.6	10.0	0.7	N.D.	N.D.	31.0	11.6	15.0	17.6	159.0	0.20	0.20	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
GC2-4	2012-07	18.2	6.20	353	276	4.19	-	52.2	4.8	9.9	0.8	-	-	-	71.6	29.9	0.3	202.4	0.05	0.77	N.D.	Ca-HCO <sub>3</sub>
GC3-2	2011-07	19.9	6.85	233	281	4.94	-	22.0	6.6	11.2	0.8	N.D.	N.D.	27.2	21.3	2.3	61.8	41.9	0.00	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
GC4-2	2011-07	21.1	5.90	242	246	4.43	-	15.8	4.7	18.7	2.7	N.D.	N.D.	15.8	23.5	3.0	76.7	21.5	0.00	N.D.	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
GC5-2	2011-07	22.1	6.17	226	355	4.49	-	32.1	8.3	15.7	2.3	N.D.	N.D.	31.2	35.2	15.5	55.1	71.5	0.10	0.10	N.D.	Ca-(Cl+NO <sub>3</sub> )
Avg.		20.6	6.44	246	378	4.06	-	43.4	8.2	16.3	1.6	N.D.	N.D.	27.4	46.5	21.5	40.7	110.5	0.06	0.32	N.D.	

점에 비하여 큰 차이를 보이고 있다. 온도의 경우 2 0°C 이하로 상대적으로 낮고, pH, 용존산소(DO) 및 산화환원전위(Eh)의 경우에도 타 지점에 비하여 낮 으며 전기전도도(EC)는 높은 값을 보이고 있다(표 3). 이와 같은 현상은 JH1 지점은 타 지점과 달리 양 수가 없고 시료 채취 심도가 상대적으로 깊은(지표 하 약 10m 이상) 관측정으로서 환원환경하에 있었 던 것으로 보인다. 한편, 김포터미널 담수 이후에는 (JH1-4 및 JH1-5) 용존 산소의 함량이 증가되었고 pH가 상대적으로 낮아졌는데 이는 JH1 지점에서 담수로 인한 지하수위 상승이 발생하여(그림 6(c) 참 조), 베일러에 의한 시료 채취 지점의 표고가 상대적 으로 높아진 것이 일부 원인으로 보인다. JH1의 높 은 용존 이온 함량은 화강암 모암의 풍화작용 과정 에 탄산염이 암석을 용해하면서 발생하는 것으로서 주변의 편암 지역에 비하여 높은 값을 보이며, 전기 전도도 역시 높은 값을 나타낸다.

김포터미널 굴착 구간에 인접한 JH1 지점의 지하 수위는 굴착 이후 깊어졌는데(2011년 5월: 11.40 El.m, 2011년 7월: 10.03 El.m), 터미널 굴착 이후 공 사를 위한 지표수의 완전 배수가 인접한 JH1 지점의 지하수위 강하에 영향을 미치게 되었다. 또한, 약 200m 떨어진 전호리 지역내 관정에서도 굴착의 영 향으로 지하수위 강하가 발생하여 취수량이 감소하 는 것으로 조사되었다. 김포터미널 굴착이 완료되고 담수 이전 기간인 1, 2 및 3차 조사의 전호리 지역 4 개 조사공에서의 지하수 수질 변화를 보면, 시간이 경과함에 따라 EC는 감소하고 Eh 및 DO는 증가하 는 경향을 보이고 있어 산화환경에 노출되고 있는데 이는 고정된 펌프 흡입구 심도를 고려할 때 지하수 수두가 지하수위 강하에 의하여 낮아진 것이 영향을 미치는 것으로 보인다.

각 지점별 수질 유형을 보면, JH1, JH4 지점은 주 변의 인위적인 영향은 거의 없는 천부지하수의 수질

특성인 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형을 보이는 반면에, JH2 및 JH3 지점은 Ca-(Cl+NO<sub>3</sub>) 유형을 보이고 있어 관정의 심도가 얇고 농업용수로와 가까운 이들 지점 특성상 하천수의 유입이 영향을 미친 것으로 보인다(그림 7). 즉, 연구지역에는 농경지 면적도 매우 적고 축사 등 오염원이 거의 존재하지 않기 때문에 타 지역(한강, 굴포천 등)에서 양수되어 농업용수로로 유입된 물이 주변 지하수로 확산되는 것으로 보인다.

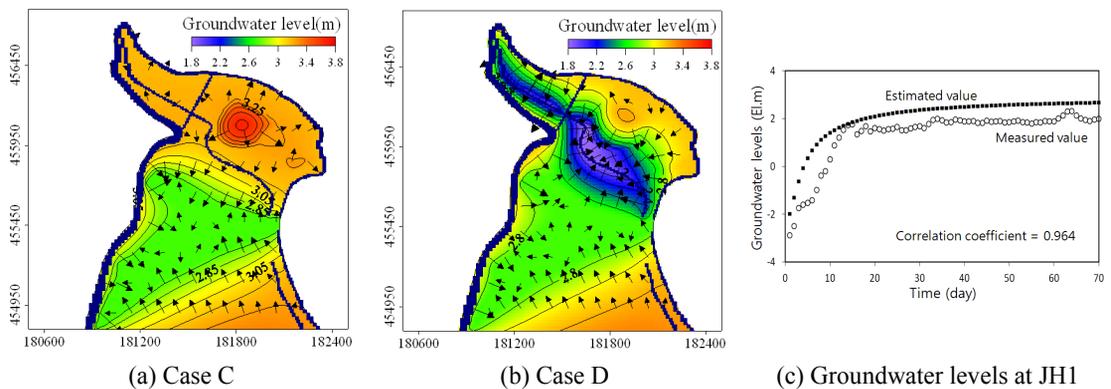
김포터미널의 굴착 이후와 담수 이후의 지하수 수질에 변화가 나타났다(그림 7). 김포터미널 굴착 후 지하수위가 낮아져 있는 시기에는 JH1 및 JH4를 제외하고는 지하수와 지표수가 유사한 수질 유형을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 시료 채취 관정의 심도가 대부분 얇고 굴착 및 담수 전후로 수위 변화가 상대적으로 크지 않으며 농업용수로의 수질에 영향을 받기 때문에 이들 지점들은 지하수 수질이 유사한 특성을 보이고 있다. 반면에, 농업용수로에서 상대적으로 이격된 JH1 및 JH4 지점은 비슷한 수질 유

형을 보이는데, 이들은 용수로에서 상대적으로 멀리 떨어져 있을 뿐 아니라 김포터미널 굴착으로 인한 수위 강하 영향이 용수로 수위 영향보다 훨씬 큰 지점으로서 지하수위의 급격한 강하가 수질 변화에 영향을 준 것으로 파악된다. 또한, 김포터미널 담수 이후인 JH1 지점의 2012년 7월 및 2013년 6월의 지하수 수질은 담수 이전과 현저한 차이를 보이고 있다.

일반적으로 천부지하수에서의 Cl<sup>-</sup>은 수십 mg/L 이하의 낮은 값을 갖고 있으나(Hem, 1992), JH1, GC1 및 GC2의 경우에는 일부 70 mg/L 이상의 높은 값을 보여준다. 또한, 타 지점과 달리 Br<sup>-</sup>가 존재하는데 Br<sup>-</sup> 농도는 자동차 배기가스, 비료, 살충제, 공업용 용해제 및 해수 침투에 의하여 나타나는 것으로 알려져 있다(Andreasen and Fleck, 1997). 물속의 Cl<sup>-</sup>과 Br<sup>-</sup>은 안정한 비반응성 성분으로서 침전, 흡착 등이 나타나지 않기 때문에 지하수내의 염 성분을 추정하는데 사용되며, 일반적으로 해수 침투의 영향을 받는 경우에는 Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>의 함량비는 해수의 함

**Table 4.** Mineral composition of suspended particles in groundwater at each well.

Date	Sample	Quartz	Feldspar	Mica/Illite	Kaolin mineral	Smectite	Remarks
	JH1(5m depth)	++	+	-	?	-	
	JH1(16m depth)	+++	++	++	?	-	Bulk analysis for random-oriented sample
July 2011	JH1(23m depth)	++++	+	++	?	-	
	JH2	+++	++	+	?	-	
	JH3	+	-	+	?	-	
	JH1(5m depth)	++	+	++	-	-	Clay mineral analysis for oriented sample
July 2012	JH2	++	+	+	+	++	



**Fig. 6.** Groundwater flow and levels estimated by a numerical model after water-filling at the Gimpo Terminal.

량비(0.00347)와 유사한 것으로 알려져 있다(Richter and Kreitler, 1993; Morris and Riley, 1966). Br<sup>-</sup> 성분이 존재하는 JH1, GC1, GC2의 시료를 비교한 결과, JH1은 0.0025~0.0052의 범위로서 평균 0.0035로 해수 성분과 매우 유사한 반면에 GC1 및 GC2는 0.0017~0.017의 범위로서 평균 0.0099를 나타내고 있어 상대적으로 크게 나타났다. GC1 및 GC2가 JH1 보다는 크게 나타난 것은 토양층에서 유기물의 분해에 의하여 Br<sup>-</sup>가 부화되었을 가능성 및 공업지역의 산업 활동에 의한 영향일 가능성이 있다(Gerritse and George, 1988). 이와 같이 JH1 지점에서만 지하수에서 염수 침입의 흔적이 나타나는 것은 타 지역에 비하여 상대적으로 깊은 심도에서 시료

채취가 이루어진 점을 고려할 때, 본 지역의 하부 층적층이 과거에 해수가 유입되었던 지층임을 추정케 한다. 이와 같은 결과는 김포터미널 담수에 의하여 JH1의 지하수위가 높게 형성되어 시료 채취 심도가 상대적으로 얇게 분포하였던 4차 시험 기간(2012년 7월)에는 Br<sup>-</sup>가 검출되지 않았고 5차 시험 시에도 상대적으로 함량이 줄어든 결과로부터 유추할 수 있다.

6. 탁도 원인에 대한 고찰

연구지역내 관정에서 탁도는 지하수 이용에 장애 요인으로 나타났는데, 대부분 먹는물 수질기준(1 NTU)보다 높은 값을 보였다. 탁도는 일반적으로 부

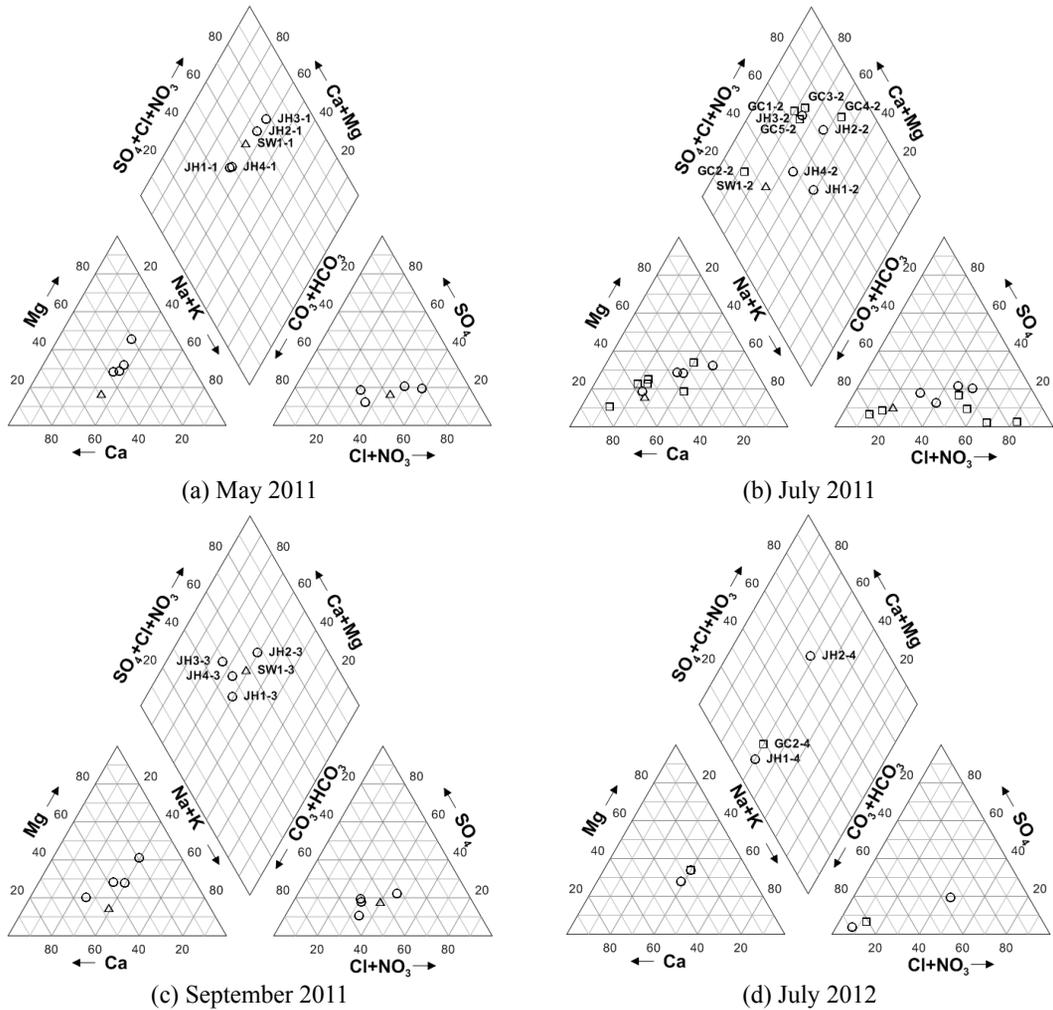


Fig. 7. Piper diagrams for water samples.

유물질, 불순물(점토, 실트, 세립질 유기물, 유기물 합성체 및 플랑크톤 등) 및 높은 철 함량(특히 지하수의 경우) 등의 경우에 발생하게 된다(U.S. EPA, 1999; N'diaye *et al.*, 2013). 탁도 민원이 제기되었던 JH2 및 관측정 JH1에서는 지반굴착 이후 세 번의 분석에서 10 NTU 이상의 높은 값을 나타내었다. 또한, 나머지 관정에서도 1 NTU 이상의 탁도를 보이나, JH1 및 JH2에 비해서는 현저하게 낮은 값을 나타낸다. 이와 같이 JH1 및 JH2 지점에서 높은 탁도를 보

이는 것은 몇 가지 원인으로 추정해 볼 수 있다. 첫째, 이들 두 지점이 용존이온 함량이 JH3 및 JH4 지점과 비교하여 높고 JH1의 용존철 함량이 높으면서 미립질의 입자가 포함된 경우에 탁도의 원인이 될 수 있다. 둘째, 김포 터미널 굴착 이후 수두 경사가 전호리에서 터미널 방향으로 급격히 형성됨으로써 지하수 유속에 변화가 발생하여 지층내에 있던 세립자가 쉽게 씻겨나와 배출될 수 있다.

XRD 분석은 2011년 7월 및 2012년 7월에 각각 수

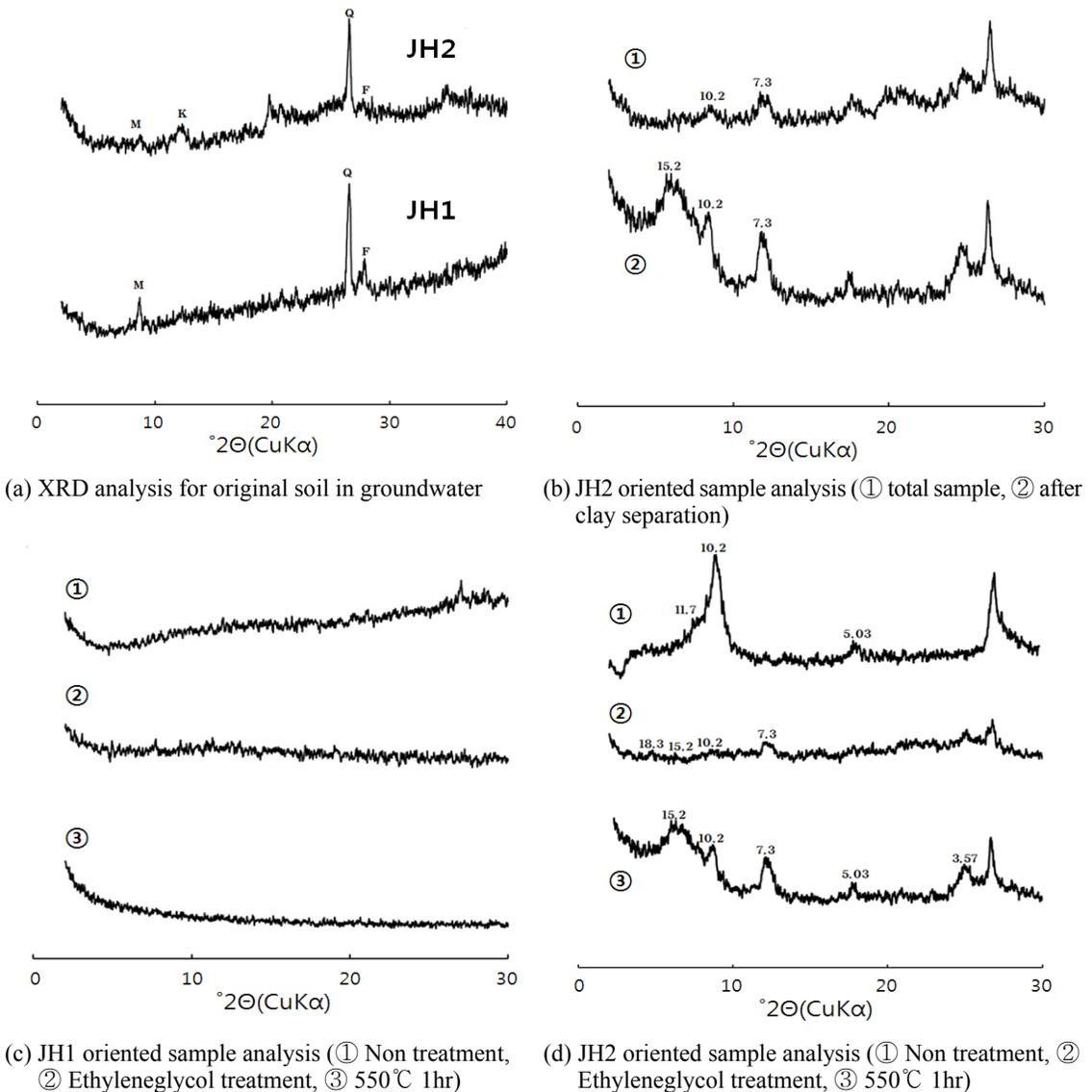


Fig. 8. XRD patterns for the sample of suspended particles at two wells.

행되었으나, 2011년 7월 분석에서는 비정방위 시편에 대한 분석만 수행되어 점토 광물의 존재에 대한 정확한 분석은 수행되지 못하였으나, 2012년 7월 분석에서는 점토물질을 분리한 정방위법에 의한 분석이 다시 실시되었다(그림 4). 2011년 분석에서 JH1, JH2 및 JH3 시료는 공히 석영, 장석 및 운모류 순으로 함유하는 것으로 파악되었으나 스멕타이트(Smectite)와 같은 미립질 성분의 파악은 불가하였다. 또한, 2011년 7월의 비정방위 시편에 대한 분석 결과에서 JH1(심부 시료)이 JH2와 JH3에 비하여 상대적으로 높은 운모류 및 일라이트 함량을 갖는 것으로 평가되었다.

JH1(5m)과 JH2의 두 시료에 대한 2012년 7월의 XRD 분석은 전압 30 KV, 15 mA 및 스캔 속도 2°2θ /min, 시정수 1 sec의 조건에서 이루어졌으며, 점토 성분의 분석을 위해서는 원심분리에 의한 침강법으로 점토분을 분리시킨 후 정방위시편으로 제작하여 XRD 분석을 실시하였고, 점토 광물에 대해서는 에칠렌글리콜 처리 및 가열 등을 통하여 식별하였다.

그림 8(a)의 비정방위 시료로 분석한 결과를 보면, JH1 시료에서는 석영과 장석의 회절선이 JH2에 비하여 약간 크게 나타나고, JH2의 시료에서는 카올린 광물의 회절선이 상대적으로 크게 나타나는 특징을 보인다. 이는 두 시료의 광물 종류가 유사할 것으로 추정되나 JH2에서 점토 광물의 함량이 다소 높을 것으로 파악된다. 점토 성분에 대한 구체적인 분석을 위하여 정방위시편에 대한 XRD 분석 결과, JH1에서는 특징의 회절선이 거의 나타나지 않아 비정질 또는 저정질의 물질로 구성된 것으로 파악되었으며, JH2의 경우에는 그림 8(b)와 같은 특정 회절선이 나타나고 있다. 즉, JH2의 결과를 보면, 15.2 Å 부근의 폭넓은 회절선이 나타나고, 10.2 Å 과 7.3 Å의 회절선도 이전 보다 약간 증가함을 알 수 있다. 또한, 두

시료의 광물 종류를 파악하고자 에칠렌글리콜 처리와 가열 처리를 거친 후 XRD 분석을 실시하였다(그림 8(c) 및 그림 8(d)). JH1의 시료에서는 뚜렷한 회절선이 나타나지 않아 비정질 내지는 저정질의 물질로 구성된 것으로 추정된다. JH2 시료의 경우에는, 무처리시의 15.2 Å의 회절선은 에칠렌글리콜 처리 이후 급격히 규칙성이 상실되고 일부 18.3 Å으로 팽윤된 층성분이 함유되며, 가열 처리에서는 10 Å으로 수축하는 것으로 나타났다. 이는 입자가 극히 미립이고 불규칙성이 많은 저결정질의 스멕타이트(Smectite)에 해당되는 광물로 파악된다. 이외에도 에칠렌글리콜 처리와 가열 처리에서 10.2 Å의 회절선을 나타내는 일라이트도 존재하는 것으로 나타났으며, 무처리시 7.3 Å의 회절선이 550°C 가열 처리 후 소멸되는 것으로 보아 카올린광물인 것으로 판단된다. 따라서, JH2 시료에서는 결정도가 낮은 스멕타이트와 함께 일라이트와 카올린광물 등의 점토광물이 주로 함유하는 것으로 해석된다. 이상 결과를 종합하면, JH1 지점의 경우는 점토광물이 뚜렷하지 않으나 세립질 매질이 포함되어 있고, JH2의 경우에는 탁도를 유발할 수 있는 미립질의 스멕타이트 광물이 포함되어 있음을 알 수 있다.

한편, 수치 모델에서 농업용수로에 물이 있다고 가정하고 시간에 따른 지하수의 유속을 예측한 경우, 김포터미널 굴착 후 시간이 경과함에 따라 터미널 방향으로 형성된 지하수 수두 경사의 증가에 의하여 유속이 점차 빨라지는 것으로 나타났다(그림 9). 김포터미널 굴착 지점으로 가까워지면서 지하수 유속이 증가하는데 특히 JH2 및 JH4 지점 인근에서 유속 변화가 크게 나타났다.

이상 토양의 XRD 분석 결과 및 모델에 의한 유속 변화 등을 종합해 보면, 김포터미널에 인접한 JH1

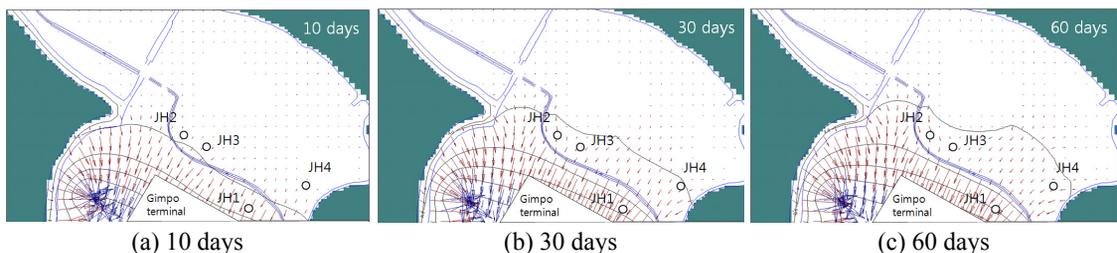


Fig. 9. Estimation of groundwater flow direction and velocity for the case of water-filling in an irrigation channel after an excavation of the Gimpo Terminal (box: location of existing wells).

지점의 경우에는 세립질 입자가 다수 포함되었을 뿐 아니라 터미널 굴착 이후 급격한 수두 변화에 따른 유속 증가 및 유로 변경 등이 탁도 유발의 원인으로 판단된다. 또한, JH2 지점의 경우는 미립질이 스펙타이트 광물이 포함되어 있으면서 지하수 유속 변화의 영향 범위내에 위치하고 있어 탁도 발생이 용이하였던 것으로 보인다. 한편, JH4 지점은 지하수 유속의 증가는 예상되었으나 침전물 시료 채취가 불가할 정도의 소량으로서 XRD 분석이 수행되지 못하였는데 이는 미립질 입자의 침전이 거의 발생되지 않아 탁도가 상대적으로 낮았음을 설명한다.

## 7. 결 언

본 연구는 경인아라천의 김포 터미널 부지의 굴착으로 대규모 지표수 환경의 변화가 발생할 경우 주변지역 지하수에서의 수위 및 수질 변화 특성을 조사 평가하였으며, 지반 굴착 이후 발생한 기존 우물에서의 탁도 증가에 대한 원인을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 지반 굴착으로 인한 지하수 동수 구배의 변화가 지하수위 강하를 초래하였는데, 굴착 지점과 가까운 곳의 지하수위 강하는 5 m 이상으로 상대적으로 크게 나타났으며, 약 200 m 떨어진 마을의 우물에서도 1 m 정도의 수위 강하가 초래되었다. 반면에, 김포터미널 완공 이후 담수시에는 수치모델에 의한 지하수위 회복과 실제 지하수 관측정에서 측정된 수위가 거의 유사한 경향을 보였으며 약 1 개월이 경과하면서 수위 안정이 이루어지는 것으로 나타났다.

둘째, 지반 굴착 및 담수 이후 지하수위가 상승 하 강하게 되는데, 우물내 지하수 취수구가 동일 심도에서 유지됨으로 인한 산화 환원 환경의 변화 및 수위 차이로 인한 지표수와 지하수의 연결성의 변화가 발생하여 지하수 수질에도 변화가 나타났다.

셋째, 연구지역에서 발생한 지하수내의 고 탁도의 원인은 탁도를 유발하는 미립질 입자가 대수층내 다수 포함되어 있으면서 수위 강하로 인한 지하수 유속 변화 등이 탁도를 촉발시키는 작용을 한 것으로 평가되었다.

이와 같이 대규모의 지반 굴착은 기존의 지하수 시스템에 영향을 주어 수위 및 수질에 급격한 변화를 야기할 수 있다. 사전에 충분한 조사와 예측을 통

하여 지하수 시스템에 미치는 영향을 평가하고 적절한 사전 대책을 강구하는 것이 요구되며, 아울러 사업이 종료된 이후에도 기존 지하수 사용자를 위하여 지하수 시스템의 회복을 위한 다양한 방안이 시행될 필요가 있겠다.

## 사 사

본 연구는 K-water 연구원의 자체연구과제(경인아라천 주변지역 지하수 변동평가 연구) 및 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 물관리연구사업에 의한 “수변지하수활용고도화” 연구단의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Andreasen, D.C. and Fleck, W.B., 1997, Use of Br: Cl ratios to differentiate potential sources of chloride in a shallow, unconfined aquifer affected by brackish-water intrusion. *Hydrogeology Journal*, 5(2), 17-26.
- Arumi, J.L., Rivera, D., Holzapfel, E., Boochs, P., Billib, M. and Fernald, A., 2009, Effect of the irrigation canal network on surface and groundwater interactions in the lower valley of the Cachapoal River, Chile. *Chile Journal of Agricultural Research*, 69(1), 12-20.
- Gerritse, R.G. and George, R., 1988, The role of soil organic matter in the geochemical cycling of chloride and bromide. *Journal of Hydrology*, 101, 83-95.
- Harvey, F.E. and Sibray, S.S., 2001, Delineating groundwater recharge from leaking irrigation canals using water chemistry and isotopes. *Ground Water*, 39(3), 408-421.
- Helsel, D.R. and Hirsch, R.M., 2002, *Statistical Methods in Water Resources*. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 4, Chapter A3, U.S. Geological Survey, Reston, 510 p.
- Hem, J.D., 1992, *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water* (3d ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 263 p.
- Kim, K.B., Yun, W., Jin, M.S. and Choi, W.C., 1995, *Geological Report of the Kimpo-Incheon Sheet*, Daejeon, 34 p.
- Lohmann, M.A., Swain, E.D., Wang, J.D. and Dixon, J., 2012, Evaluation of Effects of Changes in Canal Management and Precipitation Patterns on Salinity in Biscayne Bay, Florida, Using an Integrated Surface-water/Groundwater Model. USGS Scientific Investigations

- Report: 2012-5099, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 108 p.
- Morris, A.W. and Riley, J.P., 1966, The bromide/chlorinity and sulphate/chlorinity ratio in seawater. *Deep Sea Research*, 13, 669-705.
- N'diaye, A.D., Namr, K.I. and Kankou, M.O.S.A.O., 2013, Assessment of the turbidity from the effluent of WWTP in the vegetable farming area of Sebkha (Nouakchott, Mauritania). *Basic Research Journal of Soil and Environmental Science*, 1(1), 8-11.
- Price, R.M., Top, Z., Happell, J.D. and Swart, P.K., 2003, Use of tritium and helium to define groundwater flow conditions in Everglades National Park. *Water Resources Research*, 39(9), SBH 13-1~13-12.
- Renken, R.A., Dixon, J., Koehmstedt, J., Ishman, S., Lietz, A.C., Marella, R.L., Telis, P., Rogers, J. and Memberg, S., 2005, Impact of Anthropogenic Development on Coastal Ground-water Hydrology in Southeastern Florida, 1900-2000. Circular 1275, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 77 p.
- Richter, B.C. and Kreitler, C.W., 1993, *Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-water Salinization*. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 258 p.
- Teeple, A.P., Vrabel, J., Kress, W.H. and Cannia, J.C., 2009, Apparent Resistivity and Estimated Interaction Potential of Surface Water and Groundwater along Selected Canals and Streams in the Elkhorn-Loup Model Study Area, North-Central Nebraska, 2006-07. USGS Scientific Investigations Report: 2009-5171, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 67 p.
- U.S. EPA, 1999, Guidance Manual for Compliance with the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule: Turbidity Provisions. EPA 815-R-99-010, 216 p.

---

투 고 일 : 2013년 9월 9일

심 사 일 : 2013년 9월 12일

심사완료일 : 2013년 10월 31일