

## 유류로 오염된 부지의 원인자 판단을 위한 현장조사 평가

# Field Investigation for Identification of Contamination Sources in Petroleum-Contaminated Site

박정준<sup>a,1\*</sup>, 김성환<sup>b,2</sup>

Jeong Jun Park<sup>a,1\*</sup>, Sung Hwan Kim<sup>b,2</sup>

<sup>a</sup> Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

<sup>b</sup> Exploratory and Creative Educational Program for Future City Design, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

### ABSTRACT

**Purpose :** The subject site selected in this study was a place that was prepared through the reclamation of foreshore completed in 1973. Since then, the site has been occupied by the industry of ship repair for over 30 years.

**Method :** The results of a precise soil examination conducted in 2013 showed that the site was seriously contaminated with TPH over an area of 10,000m<sup>2</sup> and GL(-)3.0m in depth, with an expanding coverage of contamination.

**Results :** The soil contamination by refined petroleum products often results in adverse effects to human health and ecological systems, thus the contamination should be purified as soon as possible.

**Conclusion :** Hydrogeological investigation can be employed to assess the groundwater movement and propagation of contamination to determine the potential agents or contaminants in the soil contaminated with high concentration TPH.

### KEYWORDS

Field Investigation,  
Contamination Source,  
Refined Petroleum,  
Contaminated Site,  
Groundwater Movement

**연구목적 :** 본 연구 대상부지는 1973년에 해안매립이 완료되어 30여 년 동안 선박 수선업 등의 사업활동이 진행되어 왔다.

**연구방법 :** 2013년에 실시한 토양정밀조사결과, 대상부지의 오염면적은 10,000m<sup>2</sup>, 오염심도는 GL(-) 3.0 m 의 고농도 TPH로 유류오염이 확인되었고, 시간경과에 따라 오염범위가 확산되고 있었다.

**연구결과 :** 정제된 석유제품에 의한 토양오염은 종종 생태계와 인간의 건강에 해로운 영향을 미치기 때문에 신속한 정화가 이루어져야 한다.

**결론 :** 따라서 고농도의 TPH로 오염된 대상 부지에 대하여 수리지질학적 조사를 통해 지하수유동과 오염의 확산방향을 평가함으로써 잠재적인 오염원인자를 추정할 수 있다.

현장조사,  
오염원인자,  
정제된 석유제품,  
오염부지,  
지하수 유동

© 2018 Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-32-835-4751. Fax. 82-32-835-0775.  
Email. smearjun@hanmail.net

1 Tel. 82-32-835-4751. Email. smearjun@hanmail.net

2 Tel. 82-32-835-8806. Email. kim791217@inu.ac.kr

### ARTICLE HISTORY

**Received** Apr. 30, 2018

**Revised** May. 04, 2018

**Accepted** Jun. 22, 2018

## 1. 서론

국가 환경관리에서 토양오염은 물, 대기, 폐기물 등의 다른 환경오염에 비해 오염의 피해가 덜 직접적이고 완만하게 발생하는 요소를 지니고 있어 그동안 시급한 환경 문제로 제기되지 않았다. 이와 같은 토양환경 보전의 중요성과 특성을 고려하지 않은 택지개발과 도시화, 산업단지조성, 토양오염물질의 배출 등은 많은 토양오염 문제를 발생시킨다. 실제 토양오염문제는 가시적으로 나타나지 않는 특성 때문에 소극적이고 단편적인 사후관리 대책이 이루어지고 있으며, 주로 아직 드러나지 않은 오염문제의 발견과 그 처리에 초점이 맞추어지고 있다. 따라서, 토양오염의 사전관리 뿐 만 아니라 기후변화대응과 녹색성장이라는 패러다임을 가지고 자원으로써 토양환경의 적극적인 보전과 관리, 이용 정책방향을 강구하는 것이 필요한 시점이다 (Shin and Park, 2009; Kang et al., 2017).

한편, 인천은 급속한 경제·문화 발전으로 보다 쾌적하고 편리한 생활환경 조성을 위해 새로운 도시환경을 조성하는 도시 재생사업이 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 토양 환경에 대한 이해와 평가가 중요시 되고 있다. 특히 기존의 재활용처리 부지와 공장부지, 그리고 군부대 주둔지 등이 이전하면서 기존 부지에 누적되었던 토양 오염과 이에 대한 처리 사항들이 중요하게 부각되고 있다. 그러나, 현재까지 국내 지자체별 토양오염을 관리하는 관련법은 아직 그 기준이 미흡하여 일부 토양 오염을 간과할 우려가 있다(Moon, 2011).

특히, 최근 국내에서 이슈가 되었던 유류에 의한 토양 및 지하수 오염은 에너지원의 운반 및 저장과정에서 발생되었으며, 일반적으로 오염 면적이 광범위하고 지속적으로 확산된다. 방치된 유류오염물질은 토양 지표 및 지중으로 확산되거나, 지하수와 접촉하여 주변지역으로 확산되어 토양, 하천수, 지하수, 하상퇴적물 등으로 피해범위가 넓어지고 복구에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 유류에 의한 환경오염을 방지하기 위해 유류오염에 대한 종합적이고 체계적인 환경평가와 유류오염 지역의 특성을 고려한 유류오염 방지 및 복구기술의 적용이 필요하다(U.S. EPA, 2000).

연구 대상부지는 1973년 매립 준공에 따른 신규토지로 등록되어 해운항만청(1978년) → 해양수산부(1996년) → 인천항만공사(2005년)로 이관되어 오면서 매립지 조성 후 현재까지 임대 부동산으로 활용되어 왔다. ○○살베지(주)가 1978년부터 1994년까지, ○○살베지(주)가 1995년부터 2013년경까지 해당부지에서 사업 활동을 영위하였으며 2013년 2월 토양 오염도 검사결과 토양오염 우려기준을 초과하여 2013년 3월 관할 지자체로부터 토양정밀조사 행정명령을 받은 바 있다. 이에 2013년 7월에 실시한 토양오염 정밀조사결과 부지 내 전체적인 오염이 확인되었으며, 2015년 10월 추가 정밀조사를 실시한 결과 시간이 경과함에 따라 오염범위가 확산되고 있는 것으로 확인되었다. 2017년 현재 대상부지의 상부 건축물 및 기초바닥, 야적된 폐기물 등을 모두 처리하여, 과거 시료채취가 불가능했던 일부 지점의 시료채취 및 분석이 가능한 상태이다. 이에 현 시점의 정확한 토양오염농도 및 범위를 확인하고, 토양 및 지하수 조사 등의 현황을 분석하여 오염원인자 규명을 위한 현장조사를 실시하였다.

## 2. 오염부지의 일반현황 조사

관할지자체에서 제공하는 위성사진을 활용하여 약 30년간 (1986년 ~ 2015년)의 연구대상 부지 및 주변 지역의 변화를 검토하였다. ○○살베지(주) 영업 시기인 1986년부터 1994년 상반기까지의 위성사진을 검토한 결과, 부지 내에는 각종 폐기물이 상부에 야적되어 있으며, 규모가 작은 선박이 일부 확인된다(Fig. 1). 부지 주변 갯골유수지에는 크고 작은 선박이 정박되어 있으며, 좌측은 무연탄 적치장 및 화물 야적장으로 활용되고 있다. 또한 크고 작은 각종 산업시설물이 부지를 중심으로 위치하고 있다.



(a) 1986



(b) 1989



(c) 1991



(d) 1994

Fig. 1. A past satellite photo (1986 to 1994)

○○○살베지(주) 허가 시기인 1995년부터 2013년까지의 위성사진을 검토한 결과, Fig. 2와 같이 부지 영업 초기인 1995년부터 1998년경까지는 북측통로와 함께 남측통로부터 사업부지 내로 선박을 이동시킨 경로(정박위치 및 임시통로 등)를 확인할 수 있다. 1997년에는 소각로를 매입하여 부지 내 매립폐기물을 소각·처리했으며 2005년경 북측부지는 지속적으로 살베지 영업을 하면서 남측부지는 수조(활어보관) 임대용으로 활용하기 시작하였다. 부지 주변의 무연탄 적치장은 사라지고, 점차 물류창고로 활용되는 시설물들이 신축되고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) 1995



(b) 2005



(c) 2010



(d) 2013

Fig. 2. A past satellite photo (1995 to 2013)

○○○살베지(주) 영업이 종료하고, 정밀조사 및 추가조사가 이루어진 2014년부터 2015년의 위성사진을 검토한 결과, Fig. 3(a)와 같이 북측부지는 사무실로 사용된 노후 건축물 2동과 지표면 상부에 일부 폐기물이 야적되어 있으며, 남측부지는 영업이 종료된 수조시설이 방치되어 있다. 2016년 사전답사 결과 부지 내 잔존하던 수조시설은 철거가 완료된 상태였으며, 2017년 현재는 Fig. 3(b)와 같이 부지정지를 완료하여 상부 건축물 및 기초바닥, 야적된 폐기물 등을 모두 처리한 상태이다.



(a) 2015



(b) 2017

Fig. 3. Pictures after the ship repair business closes

### 3. 수리지질학적 특성 조사

#### 3.1 지반 특성

부지 내 시추조사 지점은 Fig. 4와 같이 대표성을 확보하기 위하여 중앙을 기점으로 사방위지점을 굴착하고 지반의 수직적 특성을 확인하였다. 중앙지점은 최대 33.0 m에 기반암(연암)층이 확인될 때까지 굴착하였으며, 그 외 지점은 퇴적층인 약 9~12 m까지 굴착하여 지층구조를 확인하였다. 과업대상 부지 내 북 ↔ 남방향과 동 ↔ 서방향의 지층구조는 Table 1과 같다.



Fig. 4. Location of drilling survey

Table 1. Soil profile

Item	Layer thickness(m)	Configuration	N value, TCR/RQD (number/cm, %)	Note
Landfill layer	0.0~2.5	Silty sand containing gravel	9/30~50/17	-
Sediment layer	8.5~18.1	Sandy silt, Silty sand, Silty clay, Clayey silt	1/30~19/30	-
Granite soil layer	20.6~28.9	Silty sand	14/30~50/12	-
Granite rock layer	28.9~30.7	When drilling, Silty sand to decomposition	50/4~50/3	BH-1
Bedrock layer	30.7~33.0	Granite rock	TCR 100% RQD 65%	BH-1

#### 3.2 지하수 조사 결과

##### (1) 공내지하수위 관측

안정된 지하수위를 확인하기 위하여 시추작업이 완료된 시점으로부터 약 12시간 및 72시간이 경과한 시점에 2차례에 걸쳐 공내 지하수위를 측정하였다. 측정결과 Table 2와 같이 투수성이 높은 부지 특성상 시간 경과에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, BH-1, 3번 공내 지하수위가 약 4.0 m 전후로 낮은 특성을 나타내었다.



Table 2. Measurement results of groundwater level in drill site

Item	After 12 hours(GL,-m)	After 72 hours(GL,-m)
BH-1	4.6	4.7
BH-2	1.2	1.1
BH-3	3.8	3.9
BH-4	1.1	1.4
BH-5	1.3	1.4

**(2) 현장투수시험 및 유향·유속시험**

시추공 굴착 시 매립층(심도 1.0m~3.0m)을 대상으로 현장투수시험을 수행한 결과, BH-1, 2, 3번 지점에서 투수계수가  $1.02E-03 \sim 1.39E-03$  cm/sec로 BH-4, 5번 지점에서의 투수계수인  $7.75E-04 \sim 9.85E-04$  cm/sec보다 높은 특성을 보였다.

BH-2, 4번 지점에서 유향·유속을 측정한 결과, Fig. 5와 같이 BH-2 지점의 유향은  $231.9^\circ \sim 262.5^\circ$  로 SW ~ SWW 방향으로 흐르며, 유속은 30.24 ~ 67.68 cm/day로 확인되었다. BH-4 지점의 유향은  $188.4^\circ \sim 233.4^\circ$  로 S ~ SW 방향으로 흐르며, 유속은 24.48 ~ 40.32 cm/day로 확인되었다.

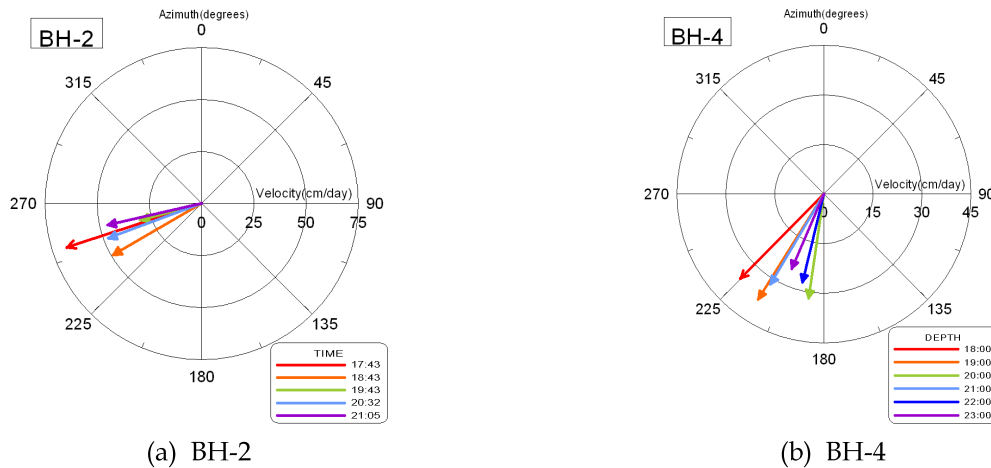


Fig. 5. Flow and flow rater results

**(3) 양수시험 및 순간수위변화 시험**

BH-1, 5번 지점에서 양수시험을 수행하고 결과치를 분석한 결과, Table 3 및 Fig. 6과 같이 BH-1 지점의 투수계수(K)는  $3.780 \times 10^{-4} \sim 4.239 \times 10^{-4}$  cm/sec(평균  $3.965 \times 10^{-4}$  cm/sec)의 범위였으며, 저류계수(S)는  $4.998 \times 10^{-3} \sim 8.512 \times 10^{-3}$  cm/sec로 확인되었다. BH-2 지점의 투수계수는  $1.723 \times 10^{-2} \sim 1.066 \times 10^{-1}$  cm/sec(평균  $5.779 \times 10^{-2}$  cm/sec)의 범위였으며, 저류계수는  $2.784 \times 10^{-3} \sim 3.357 \times 10^{-3}$  cm/sec로 확인되었다. 두 지점의 전체 기하평균 투수량계수는 8.74 cm<sup>2</sup>/sec, 저류계수  $4.465 \times 10^{-3}$ , 투수계수  $4.787 \times 10^{-3}$  cm/sec로 산출되었다.

순간수위변화시험 결과, Table 4와 같이 투수계수(K)의 범위는  $1.53 \times 10^{-4} \sim 1.33 \times 10^{-2}$  cm/sec이고, 평균  $4.87 \times 10^{-3}$  cm/sec로 확인되었다. 투수량계수(T)의 범위는 0.12 ~ 10.12 cm<sup>2</sup>/sec이고 평균 5.88 cm<sup>2</sup>/sec이다.

Table 3. Pumping test results

Drilling No.	Diameter (mm)	Depth (m)	Groundwater level(m)	Distance (m)	Aquifer thickness(m)	Quantity (m <sup>3</sup> /day)	Hydraulic parameter			
							Analysis method	T(cm <sup>2</sup> /sec)	S	K(cm/sec)
BH-1	75	33	4.7	-	28.3	30	Theis	1.20	4.998×10-3	4.239×10-4
							Cooper & Jacob	1.101	8.512×10-3	3.889×10-4
							Recovery	1.07	-	3.780×10-4
BH-1 Geometric mean								1.12	6.522×10-3	3.965×10-4
BH-5	75	9	3.1	1.4	7.6	34	Theis	79.86	2.784×10-3	1.051×10-1
							Cooper & Jacob	81.02	3.357×10-3	1.066×10-1
							Recovery	48.77	-	1.723×10-2
BH-2 Geometric mean								68.08	3.057×10-3	5.779×10-2
Total geometric mean								8.74	4.465×10-3	4.787×10-3

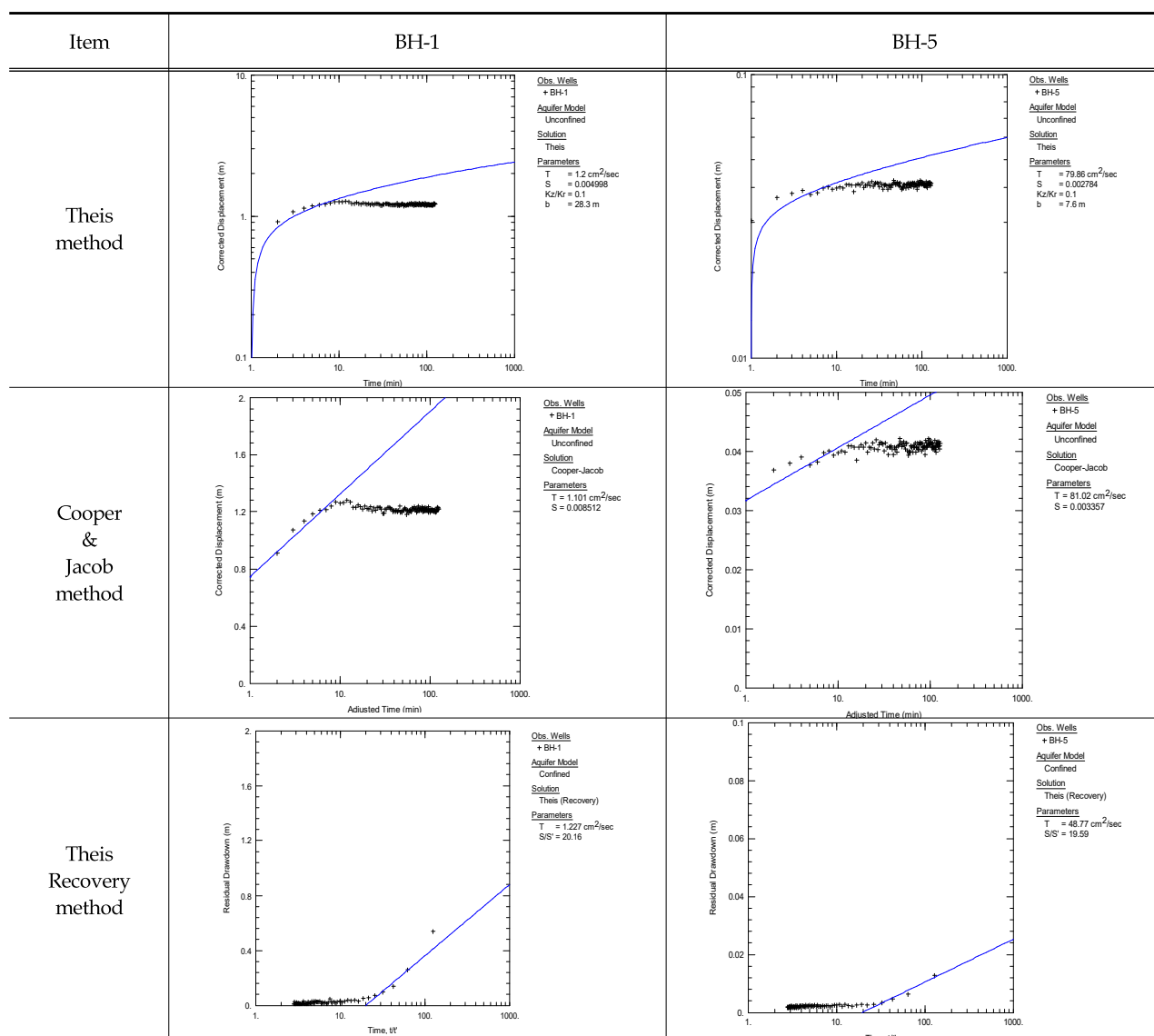


Fig. 6. Pumping test results

Table 4. Pneumatic slug test result

Item	Depth (m)	Initial water level (m)	Aquifer thickness (m)	Hydraulic parameter		
				Analysil method	K(cm/sec)	T(cm <sup>2</sup> /sec)
BH-1	33.0	4.7	28.3	Bouwer-Rice	2.82×10-3	7.97
				Hvorslev	3.50×10-3	9.90
BH-2	12.0	3.9	8.1	Bouwer-Rice	1.53×10-4	0.12
				Hvorslev	2.21×10-4	0.18
BH-3	9.0	1.4	7.6	Bouwer-Rice	9.19×10-3	6.99
				Hvorslev	1.33×10-2	10.12
Mean				-	4.87×10-3	5.88

**(4) 추적자 시험**

분산은 미시적 관점에서 침투 유속의 차이에 의해 발생하는 오염물질의 농도변화로써 역학적 분산(mechanical dispersion)이라 하며, 유로장 길이방향으로 발생하는 종분산과 수직방향으로 발생하는 횡분산이 있다. 간극의 크기, 유로장의 길이, 간극마찰에 따라 발생한다(Freeze et al., 1979). 현장 수리특성 결과로 분산계수를 구하기 위하여 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$\alpha_L = \frac{3U_I^{1/2} [\Delta(U_P/U_I)]^2}{32\pi^{3/2} (bn_e)^{1/2}} \quad (1)$$

여기서  $U_I$  : 전체 주입량(m<sup>3</sup>)

$U_P$  : 시간에 따른 양수량(m<sup>3</sup>)

$b$  : 대수층의 두께(m)

$n_e$  : 유효공극율

$\Delta(U_P/U_I)$  : 0.5  $C_0$  에서의 접선과  $C/C_0$  가 0과 1인 선과의 교차점 사이의 무차원 양수량 증가분

BH-1지점(단일공)에서 수행한 추적자시험결과 Table 5와 같이 주요인자 값을 확인하였으며, 이를 활용하여 종분산지수(m)를 계산한 결과 아래와 같이 0.723 m로 산출되었다. 여기서,  $U_I = 0.9 \text{ m}^3$ ,  $\Delta(U_P/U_I) = 4.873$  (Fig. 7),  $b = 27.60 \text{ m}$ ,  $n_e = 0.01$ 을 적용하였다.

Table 5. Factors used in the tracer test

Test well	Tracer material	Injection concentration (mS/cm)	Injection quantity(L)	Observation time (min)	Pumping rate (m <sup>3</sup> /day)	Effective porosity	note
BH-1	NaCl	67.178	900	88	19.6	0.01	$n_e$ (literary value)



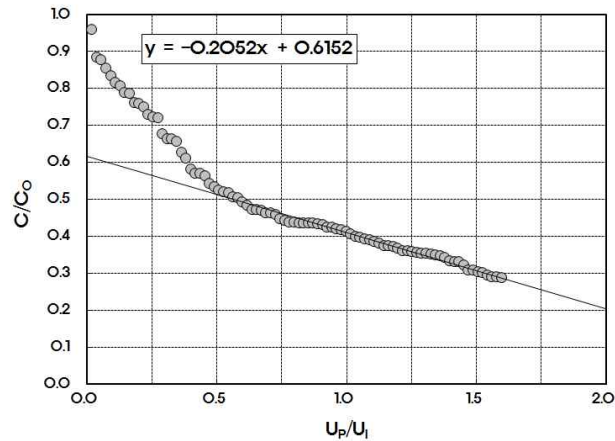


Fig. 7. Curve of concentration history

#### 4. 지하수 유동 모델링

지하수 유동모델링은 대수층에 적합한 모델을 만들어서 실제 대수층의 거동 현상을 재현하는 것을 말한다. 즉, 지질특성 및 지하수 등의 조사를 수행하여 주요 인자 값을 도출하고, 해당지역에 대한 지하수계를 모사하여 장래 발생 가능한 또는 역으로 발생하였던 지하수계의 변화들을 예측 및 추정하는 것이다(Shin et al., 2011).

본 연구에서 사용한 모델링 프로그램(MODFLOW)는 3차원 유한차분 지하수 프로그램으로 다양한 수리지질학적 구조를 보다 쉽게 적용하고 해석할 수 있도록 개발되었다. 국외에서는 일반 지하수 전문 연구기관 및 미국 지질조사국(United States Geological Survey, USGS)에서 가장 활용도 높은 프로그램이며, 국내의 경우 법률적인 문제가 관여되는 경우 사용되는 신뢰성 높은 모델링 프로그램으로 알려져 있다(Brahana and Mesko, 1988; De Weiest, 1966; Johnson, 1967).

일반적인 MODFLOW의 수행절차는 1) 개념모델 설정단계(해석지역의 지형특성 분석, 모델영역 및 유역설정, 대수층 설정 및 수리상수 결정, 조사지역 현황 등), 2) 모델 연산 및 검증단계(정류해석, MT3D해석 등), 3) 실제 결과와 비교·검토의 단계(오염원 확산, 지하수 수계 변화 판단 등)로 실시하였다(Zheng, 1990; Freeze and Cherry, 1979).

##### 4.1 해석 모델링

모델링에 사용된 지하수 함양량은 국토교통부(2012년) 자료인 “지하수 관리기본계획”의 한강서해유역의 함양률인 11.35 %와 20년 평균 강수량인 1261.1 mm/year를 산술한 143.1 mm/year를 적용하였다. 연구대상지역의 지형도 및 수치지도를 활용하여 수계현황을 파악하고 부지의 경계조건을 설정하였으며, 모델영역은 Fig. 8에 도시하였다. 본 연구의 “3장 수리지질특성 조사” 결과 값을 바탕으로 지층특성 및 분포에 따라 Layer를 분리 후 Fig. 9와 같이 수리전도도에 따라 층서를 구분하였다.

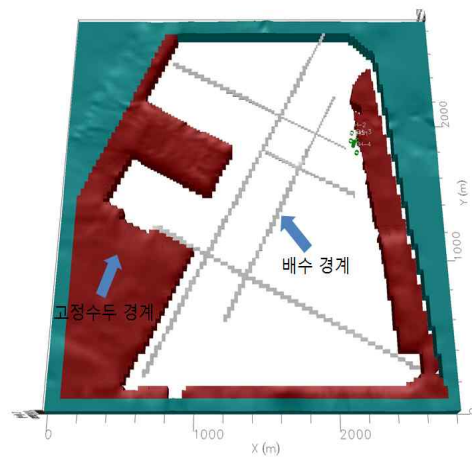


Fig. 8. Setting of model area

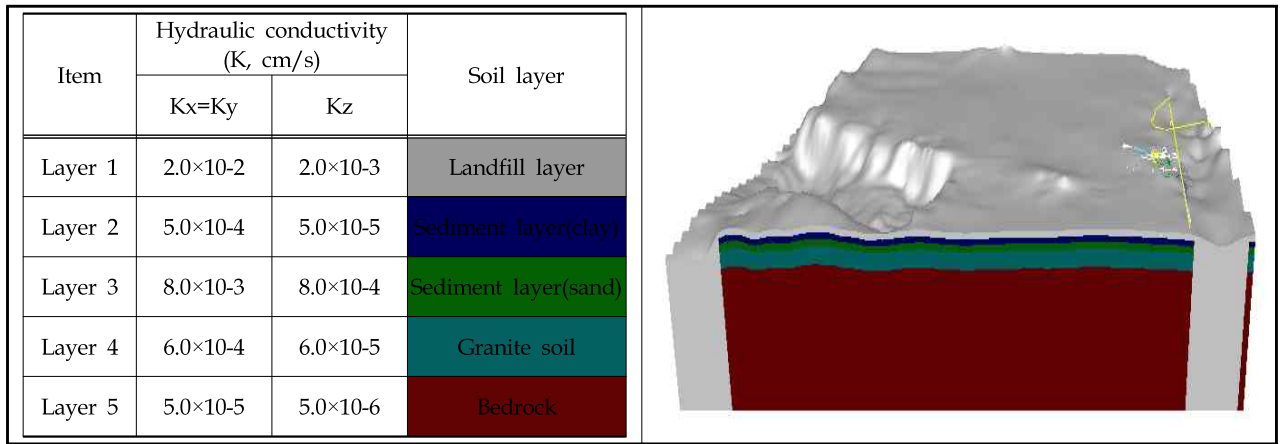


Fig. 9. Layer classification with hydraulic conductivity

정류보정은 제곱평균제곱근(Root Mean Square, RMS) 오차율 5 ~ 10%를 만족해야 한다. Fig. 10과 같이 계산된 RMS 오차율은 62.586 %였으나, 추정 표준오차는 0.684 (m)로 타당한 모델로 평가되었다. 정류수위분포에 따른 해당 층서(layer)별 지하수 흐름방향은 Fig. 11과 같다.

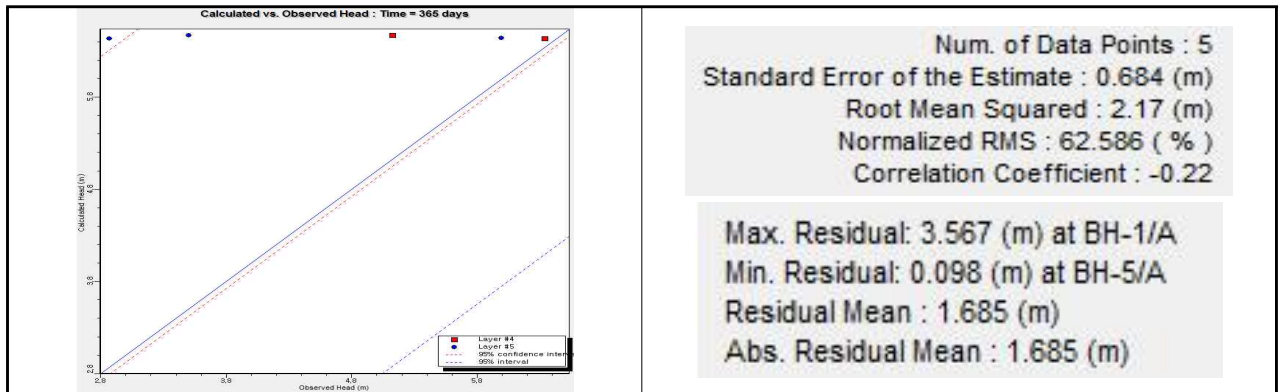


Fig. 10. Result of correction

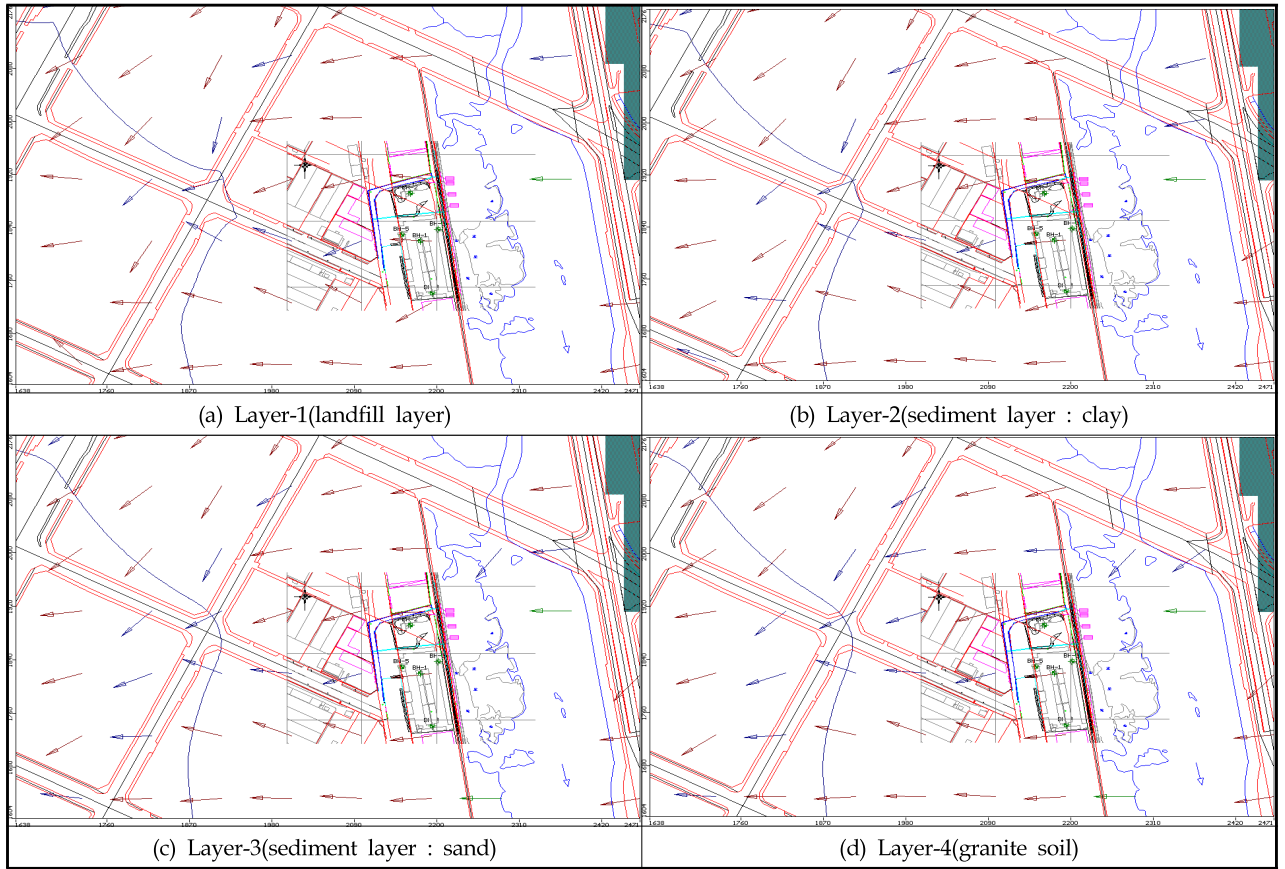


Fig. 11. Direction of groundwater flow

#### 4.2 MT3D를 활용한 오염원 입력과 결과

MT3D(Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model)을 이용하여 과업대상 부지 내에 격자를 구성하고(Fig. 12), 오염부지 내 3구역(A, B, C)에 대하여 해당 셀(cell)안에 부지 내 지하수 농도를 고려한 값(5 mg/L)를 입력 후 어느 지점에서 오염원의 확산 및 이류가 시작되었는지를 확인하였다.



Fig. 12. Area settings of MT3D

Fig. 13은 설정된 A sector, B sector, C sector에서 각각 365일과 1835일 경과시 오염원 확산을 예측한 것이다. A sector는 연구대상 부지의 중앙으로써 지하수의 흐름은 동(E)에서 서(W)쪽 방향으로 흐르며, 임의의 오염원이 1년(365일) 또는 5년(1825일)의 시간이 경과함에 따라 서측으로 확산되는 것을 확인할 수 있다. 단, 부지 내 국한하여 미세하게 확산이 이루어지기 때문에 부지경계 외부로의 확산이 이루어지지 않는 것으로 추정되었다. B sector는 연구대상 부지 남측으로써

지하수의 흐름은 동(E)에서 서(W)쪽 방향으로 흐르며, 임의의 오염원이 1년(365일) 또는 5년(1825일)의 시간이 경과함에 따라 서측으로 확산되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 지층 및 지하수의 특성 등의 영향으로 일부구간에서 부지 경계 외부로 다소 확산이 이루어지는 것으로 추정되었다. C sector는 과업대상 부지 북측으로써 지하수의 흐름은 동(E)에서 서(W)쪽 방향으로 흐르며, 임의의 오염원이 1년(365일) 또는 5년(1825일)의 시간이 경과함에 따라 서측으로 확산되는 것을 확인할 수 있다. 단, 부지 내 국한하여 미세하게 확산이 이루어지고 있으며, 부지 경계 외부에서의 확산은 오염농도가 매우 낮거나 없는 수준에서 이루어지고 있는 것으로 추정되었다.

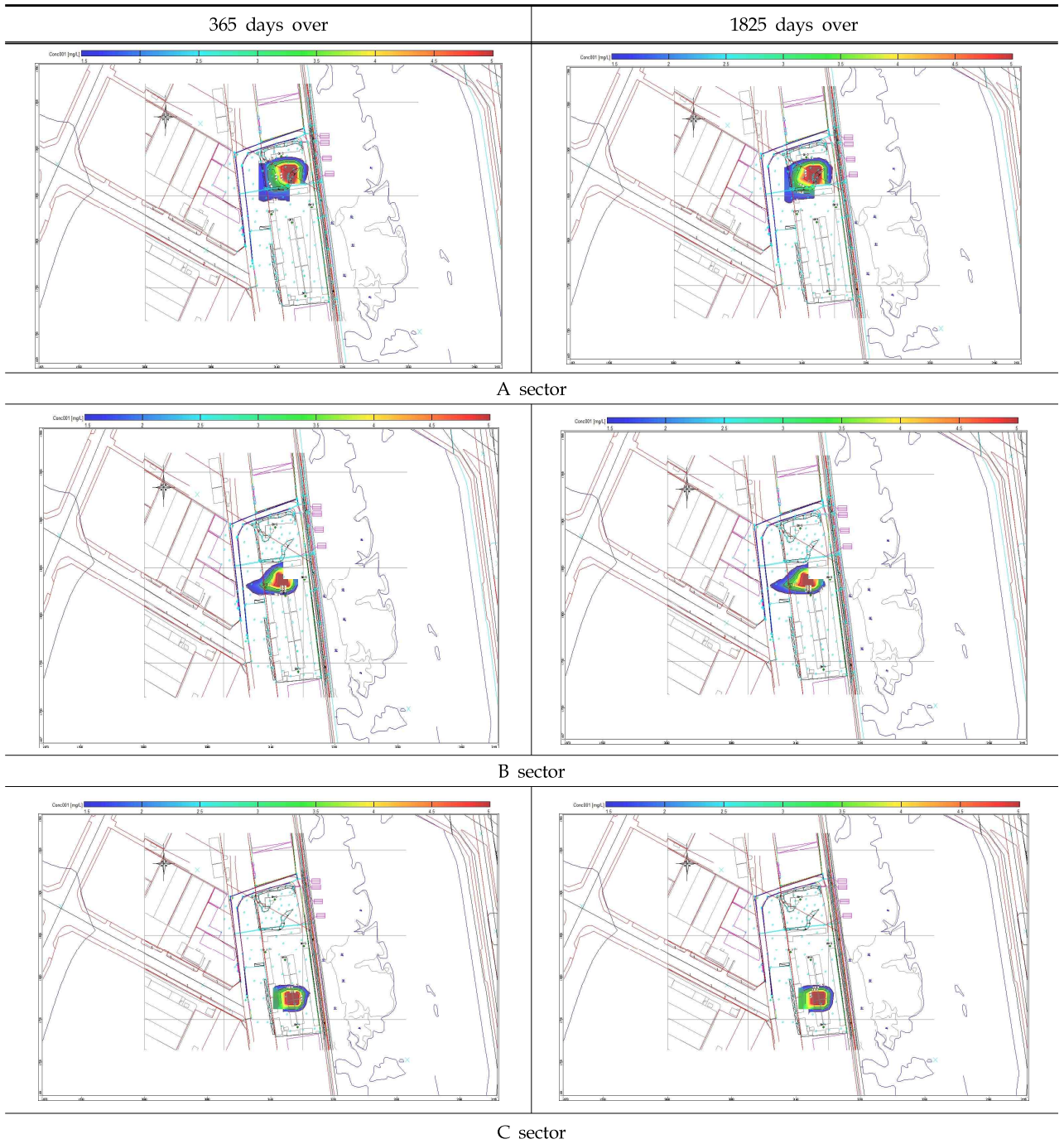


Fig. 13. Prediction of the diffusion of contaminants

## 5. 결론

연구대상 부지의 지반조사, 토양 및 수질오염현황조사 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1973년 매립 준공 이후 ○○살베지(주)가 1978년부터 1994년까지, ○○○살베지(주)가 1995년부터 2013년까지 부지 사용하였으며 부지 내 취급하였던 특정토양오염관리대상시설은 없는 것으로 확인되었다. 다양한 지하수시험을 종합적으로 검토한 결과, 투수량계수(T)의 범위는  $0.12 \sim 81.02 \text{ cm}^2/\text{sec}$  (avg.  $20.69 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ), 저류계수(S)는  $2.784 \times 10^{-3} \sim 8.512 \times 10^{-3}$  (avg.  $4.913 \times 10^{-3}$ ), 투수계수는  $1.530 \times 10^{-4} \sim 1.066 \times 10^{-1} \text{ cm}/\text{sec}$  (avg.  $2.161 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{sec}$ )의 값으로 확인되었다. 또한 주 유향은 SW ~ SWW 또는 S ~ SW 방향으로 흐르는 유동특성을 보이며, 부지 내 지하수위는 1.1 ~ 4.7 m 에 분포하고 있는 것으로 확인되었다.

부지 내 오염이력사항에 대하여 확인할 수 있는 위성사진 및 문서 자료 등을 종합적으로 검토한 결과, 해당부지는 1973년 매립 준공 후 ○○살베지(주) 및 ○○○살베지(주) 등 2개의 업체가 1978년부터 선박과 관련한 영업을 2013년경까지 지속적으로 영위하여 왔다. 이후 토양 및 지하수 오염조사 결과, 해당 기준치를 초과하는 유류오염이 확인되었으며, 상층부 오염의 농도 및 분포가 넓게 나타나는 것으로 보아 상층부로부터 오염이 하부로 확산된 것으로 판단된다. 상기 결과로 유추해볼 때 선박해체·제거 작업을 위하여 선박을 육상으로 이송하거나 선박 분리 작업 시 발생한 유류의 영향으로 추정된다.

## References

- [1] Brahana, J.V., Mesko, T.O. (1988). Hydrogeology and preliminary assessment of regional flow in the Upper Cretaceous and adjacent aquifers, northern mississippi embayment: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 87-4000, p.65.
- [2] De Weiest, R. J. M. (1966). On the storage coefficient and the equation of groundwater flow in nonuniform homogeneous media. *Water Resources Research*, 71-4.
- [3] Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*, Hemel Hempstead, Prentice Hall
- [4] Johnson, A. I. (1967). Specific yield-compilation of specific yields for various materials. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D, 74.
- [5] Kang, H.H., Kim, J.H., Chung, Y.S. and Park, J.J. (2017). "Characteristics of Soil Stress using Expansion Liquid Sheet." *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 13, No. 1, pp.43-50.
- [6] Moon, Y. S. (2011). Analysis of Soil Contamination and Its Future Prediction in Incheon Area. Master's thesis, Incheon University, Korea.
- [7] Shin, E. C. and Park, J. J. (2009). *Geoenvironmental Engineering*. CIR, p.400.
- [8] Shin, E. C., Lee, S. C and Park, J. J. (2011). "The comparison of Remediation Efficiency for Contaminated Soils under Vertical Drain System by Numerical Analysis Method." *Journal of Korean Geosynthetics society*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-8.
- [9] U.S. Environmental Protection Agency(2000), *Integrated Risk Information System(IRIS)*, National Center for Environmental Assessment, Online Database at <http://www.epa.gov/iris/index.html>.
- [10] Zheng, C. (1990). A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground water systems. S.S. Papadopulos & Associates, Inc.