

## 유류오염 지하수 정화를 위한 양수처리법 적용시 지하수위 변화 및 수처리장치의 효율평가

조장환<sup>1\*</sup> · 김준호<sup>1</sup> · 박민규<sup>1</sup> · 김태형<sup>2</sup> · 최연수<sup>2</sup> · 최상일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국환경공단 토양지하수처

<sup>2</sup>광운대학교 환경공학과

## Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plant and Groundwater Level by Pump and Treat Technology Applied for Petroleum Contaminated Site

Chang-hwan Cho<sup>1\*</sup> · Joon-ho Kim<sup>1</sup> · Min-kyu Park<sup>1</sup> · Tae-Hyung Kim<sup>2</sup>  
Yoen-Soo Choi<sup>2</sup> · Sang-il Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Soil and Groundwater, Korea Environ. Corp.

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

### ABSTRACT

This study was performed to evaluate the applicability of pump and treat technology as well as to identify the changes of groundwater level by continuous pumping at the petroleum contaminated site. A total of 9 monitoring wells were installed at the site and the contaminant concentrations, TPH, benzene, toluene, ethylbenzene and xylene, of groundwater were measured. With the results of the groundwater monitoring, a total of 9 wells were set up for pumping contaminated groundwater in 3 locations. The waste water treatment facility with a capacity of 10 m<sup>3</sup>/hr was installed in the site and operated for about 1 year. The concentrations of the contaminated groundwater from the 3 pumping wells were exceeded groundwater regulation for benzene and TPH. However, the effluent concentration of benzene and TPH was under the regulation showing the maximum level of 0.011 mg/L and 1.2 mg/L during the operation periods. Groundwater levels were decreased by continuous pumping and those were not recovered during the operation period. Groundwater levels of PW-1,2, PW-3,4,5,6 and PW-7,8,9 were decreased about 5 m, 0.7 m, 2 m, respectively. The hydraulic conductivity (K) of the region of PW-1,2, PW-3,4,5,6 and PW-7,8,9 was estimated to be 6.143 × 10<sup>-5</sup> cm/sec, 2.675 × 10<sup>-5</sup> cm/sec, 1.198 × 10<sup>-4</sup> cm/sec. Groundwater level was seemed to be affected not by hydraulic conductivity but by morphological effect. These results show that the pump and treat technology has high applicability for the restoration of petroleum contaminated groundwater but needs continuous monitoring to prevent rapid groundwater drawdown.

**Key words :** Pump and treat, Groundwater level, Petroleum contaminated site, Waste water treatment facility, Pumping well

### 1. 서 론

토양에 유출된 유류오염물질은 주변 지하수의 오염을 야기하고, 오염된 지하수는 이동방향과 수위 변화에 따라 오염구간을 확대시킨다. 오염지하수는 음용수원의 오염을 야기하며, 인간과 생태계에 독성을 야기하므로 심각성이 증가하고 있다(Lim et al., 2012).

주 음용수원으로 지하수를 이용하는 국가에서는 지하수 오염에 대한 인식이 높아 지난 수 십 년간 다양한 오염 지하수 정화공법이 개발되어 왔다. 오염지하수 처리공법은 메커니즘에 따라 물리적, 화학적, 생물학적 처리법으로 나눌 수 있으며, 정화위치에 따라 지중처리(*in-situ*) 기술과 지상처리(*ex-situ*) 기술로 구분할 수 있다. 지중처리 기술에는 대수층 공기주입법(As : air sparging), ORC(oxygen

\*Corresponding author : cho6272@keco.or.kr

Received : 2014. 2. 12 Reviewed : 2014. 5. 16 Accepted : 2014. 5. 21

Discussion until : 2014. 8. 31

releasing compound), 반응벽체법(PRB : permeable reactive barriers), 자연저감법(natural attenuation), air stripping 등이 있으며, 지상처리 기술에는 양수처리법(pump and treat) 및 생물반응기법(bioreactor) 등이 있다(Han, 2000; Brusseau et al., 2011).

우리나라에서도 오염지하수를 단기간에 최소의 비용으로 정화하기 위해 선진 외국의 기술을 들여와 우리 실정에 맞도록 보완 발전시키거나 새로운 기술을 개발하는 노력이 계속되고 있다(Lee et al., 2010). 지중처리 기술은 정화를 완료하였다고 하더라도 오염물질의 “tailing” 및 “rebounding” 현상에 의해 정화결과에 대한 예측이 용이하지 않으므로 정화과정의 평가가 용이하고 정화결과에 예측이 가능한 대표적인 지상처리기술인 양수처리법이 선호되고 있다.

양수처리법은 오염지하수를 지상으로 양수하여 기존의 수처리 장치에서 처리하는 방법으로서(EPA, 2001), 미생물분해, 활성탄 흡착, 탈기법, 침전과 같은 메커니즘을 이용하여 정화한다(Langwaldt and Puhakka, 2000; EPA, 2009; Voudrias, 2001). 또한 오염지하수의 이동성을 수리동력학적으로 제어함으로써 오염지역의 지속적인 확산을 방지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 지속적으로 다량의 지하수를 양수함으로써 주변지역의 지하수위가 낮아질 수 있으며, 이로 인해 지반침하 및 건축물의 붕괴를 야기할 수 있다(Shi et al., 2012; Jesús et al., 2013; Yang et al., 2014). 양수처리공법은 오염지하수를 지속적으로 양수한다는 측면에서 대상부지의 지하수위 감소 및 지반침하 현상이 충분히 예상되지만, 아직까지 양수처리공법이 지하수위 변화에 미치는 영향과 관련된 자료는 거의 알려지지 않고 있다.

본 연구에서는 오랜 기간 유류누출에 의해 오염된 지역의 지하수 처리를 위해 실제 정화현장에 적용한 양수처리법의 정화효율을 평가하고, 장기간 양수처리공법에 따른 지하수 양수가 대상부지의 지하수위 변화에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 부지현황

대상 부지는 강원도 00지역에 위치하고 있으며, 지난 수십 년간 유류저장탱크, 송유관, 유류 수·불 시설이 사용되어 왔다. 시설의 노후화에 따른 누유사고가 발생하였으며, 부지 내·외부에 오염정황이 발견되었다. 대상 부지는 북쪽이 낮고 남쪽으로 치중 고도가 높아지는 지형이며, 지하수 흐름방향 또한 지형적 특성에 따라 남쪽에서

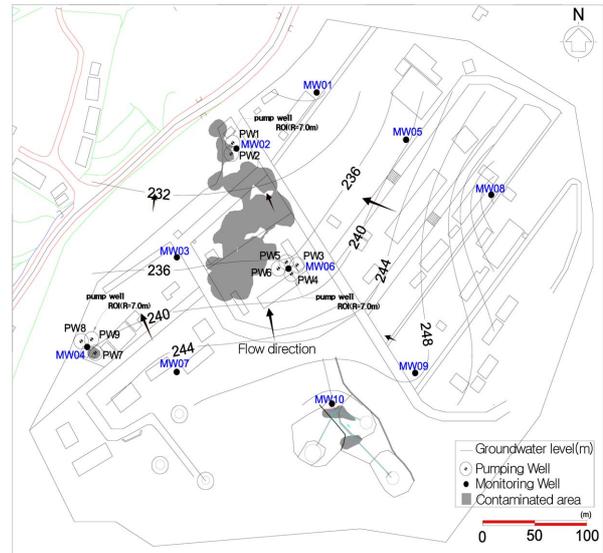


Fig. 1. Contaminant status and the location of monitoring wells and pumping wells.

북쪽으로 흐르고 있다.

대상 부지의 토양오염 조사결과 유류에 의해 지하 8 m 까지 오염이 발견되었으며, 오염된 토양의 면적 및 양은 약 7,000 m<sup>2</sup> 및 12,000 m<sup>3</sup>으로 조사되었다. 지하수위는 0.76 m에서 4.82 m까지 분포하고 있어 지하수에 의한 토양오염의 확산이 의심되는 지역이다. 토양오염현황 및 관측정과 양수정의 설치 위치를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2. 수리지질 특성

#### 2.2.1. 수리전도도 측정

대상지역에 총 10개의 지하수 관측정을 설치하였다. 추정되는 지하수 흐름방향을 고려하여 조사지역에 균일하게 분포시키는 것을 원칙으로 하였으며, 오염이 우려되는 지역에는 밀도를 높여 관측정을 배치하였다.

길이 6.0 m~9.0 m 직경 10 cm의 PVC 파이프를 이용하였으며, 하부 3.0 m~6.0 m까지는 2 mm의 슬롯을 만들어 유체의 이동이 자유롭도록 하였고, 상부는 무공관으로 지표의 가스나 유체의 유입을 방지하였다.

각 관측정에서 부피를 알고 있는 베일러(bailer)를 이용하여 일정 수량을 추출하여 순간적으로 지하수위를 낮춘 후 자동수위측정계(levellogger, Eijkelkamp Inc.)를 지하수면 아래에 설치하여 지하수위의 회복 양상을 실시간으로 관측하였다. 시험결과는 수리시험 해석 상용 프로그램인 AQTESOLV(v.3.01, HydroSOLVE, Inc.)를 이용하여 분석하였으며, 결과해석은 자유면 대수층에 주로 적용되는 Bouwer-Rice 모델을 이용하였다.

2.2.2. 지하수 수질측정

지하수를 채취하여 TPH, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠 및 크실렌을 분석하였다. 퍼징과 시료채취에 사용되는 장비들은 일회용 장비를 사용하였고, 재사용하는 장비에 대해서는 사용 전 세척을 실시하여 교차오염을 방지하였다. 분석방법은 수질오염공정시험법을 준용하였다.

2.3. 수처리 시스템

2.3.1. 양수정 설치

관측정이 설치된 10곳의 지하수 중 지하수 수질분석 결과 지하수오염이 상대적으로 높은 3곳(MW 2, MW 4, MW 6)에 양수정을 설치하여 오염지하수를 양수처리 하였다. 관측정 MW 2 지역에는 2개의 양수정(PW-1,2), MW 4 지역에는 3개의 양수정(PW-7,8,9), MW 6 지역에는 4개의 양수정(PW-3,4,5,6)을 설치하여 오염지하수를 양수하였다. 시간의 경과에 따라 양수정에서 채취한 지하수 및 지하수처리 장치에서 처리된 방류수의 지하수 오염물질 농도를 분석하였다.

2.3.2. 수처리장 설치 및 운전

오염지하수는 수처리장치의 침사지(settling tank, 3 mW × 4 mL × 3.5 mH)로 유입되어 유량조정조(flowmeter control tank, 4 mW × 10 mL × 3.5 mH), 응집조(coagulation tank, 1.5 mW × 1.8 mL × 2.4 mH)와 반응조(flocculation, 1.5 mW × 1.8 mL × 2.4 mH), 가압부상조(pressure rise tank, 10 m<sup>3</sup>/hr), 처리조(treatment tank, 2 mW × 2 mL × 3.5 mH), 모래여과조(sand filter, Φ1.1 m × 1.83H) 및 활성탄 여과조(active carbon filter, Φ1.1 m × 1.83H)를 거쳐 방류된다(Seo et al., 2009). 응집반응에 쓰이는 약품은 NaOH, Al<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, Polymer이고 응집조 및 반응조에 투입된다. 침사지와 가압부상조의 슬러지는 농축조(sludge thickener tank, 1.5 mW × 3 mL × 2.4 mH)에 보내져 농축시킨 후, 탈수처리장치(filter press)를 거쳐 고형 슬러지로 배출된다.

수처리장치의 유입량은 10 m<sup>3</sup>/hr이며, 활성탄 여과조의 활성탄 교체 주기는 약 1개월 이다. Fig. 2에 수처리장치의 지하수 흐름도를 나타내었다.

2.3.3. 모니터링

약 1년 동안 운전하면서 각 양수정에서 양수한 지하수 및 수처리 장치를 통과한 방류수의 TPH, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌을 1회/월의 주기로 분석하였다. 분석방법은 수질오염공정시험법을 준용하였다. 또한 장기간 지하수 양수에 의한 대상부지 지하수위 변화를 파악하기 위

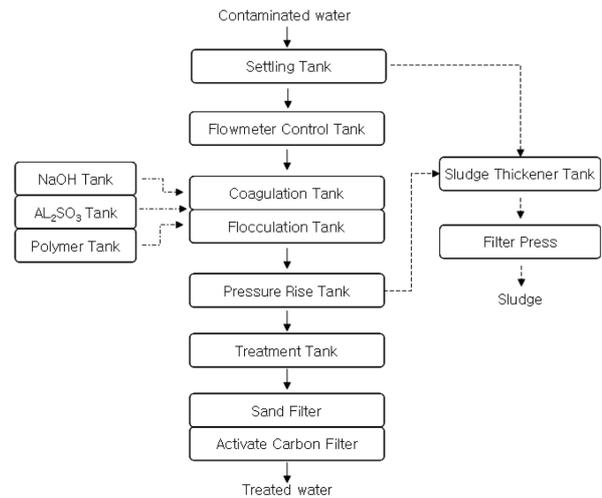


Fig. 2. Flow diagram of groundwater treatment facility.

해 양수정의 지하수위를 측정하였다. Solinst사의 수위계(model 101)를 이용하여 지하수면까지 깊이를 측정한 후, 측정지점의 고도를 수준측량을 통하여 해발고도로 환산하여 지하수의 공간적인 분포를 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 수질특성

지하수 관측정 MW 2에서 벤젠이 0.388 mg/L로 조사되었다. 관측정은 대상부지의 하부지역으로 상부 지역의 오염지하수가 모이는 지역이며, 토양오염 지역과 인접하고 있다. MW 4는 TPH 및 벤젠이 각각 43.5 mg/L, 0.099 mg/L로 조사되었다. 지하수 TPH 농도는 과도하게 높게 조사되었는데, 이는 분석과정에서 지하수 상부의 유분이 완전히 분리되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 관측정은 소규모 주유대에 접하고 있으며 토양오염지역 내에 위치하고 있다. MW 6은 TPH, 벤젠, 톨루엔, 크실렌이 각각 2.6 mg/L, 0.394 mg/L, 2.143 mg/L, 2.164 mg/L으로 각각 검출되었다. 양수처리공법을 적용하기 전 대상부지의 지하수오염물질 분석결과를 Table 1에 나타내었다.

3.2. 수처리장 효율평가

국내 지하수의 수질기준은 ‘지하수의 수질보전 등에 관한 규칙’에서 정하고 있다. 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌의 지하수 생활용수 기준은 각각 0.015 mg/L, 1 mg/L, 0.45 mg/L, 0.75 mg/L이며, 석유계총탄화수소의 지하수 정화기준은 1.5 mg/L이다.

양수정 9개의 지하수를 분석한 결과, PW 1 양수정에서

**Table 1.** The results of analysis for TPH, Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene of shallow groundwater (unit : mg/L)

Monitoring Well	TPH (1.5)	Benzene (0.01)	Toluene (0.7)	Ethyl benzene(0.3)	Xylene (0.5)
MW 1	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
MW 2	0.6	0.388	N.D.	0.003	0.007
MW 3	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
MW 4	43.5	0.099	N.D.	0.056	0.135
MW 5	0.5	N.D.	N.D.	N.D.	0.002
MW 6	2.6	0.394	2.143	0.230	2.164
MW 7	0.4	0.002	0.004	0.002	0.009
MW 8	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	0.007
MW 9	0.3	N.D.	N.D.	N.D.	0.006
MW 10	0.4	N.D.	N.D.	N.D.	0.002

N.D. : Not Detected

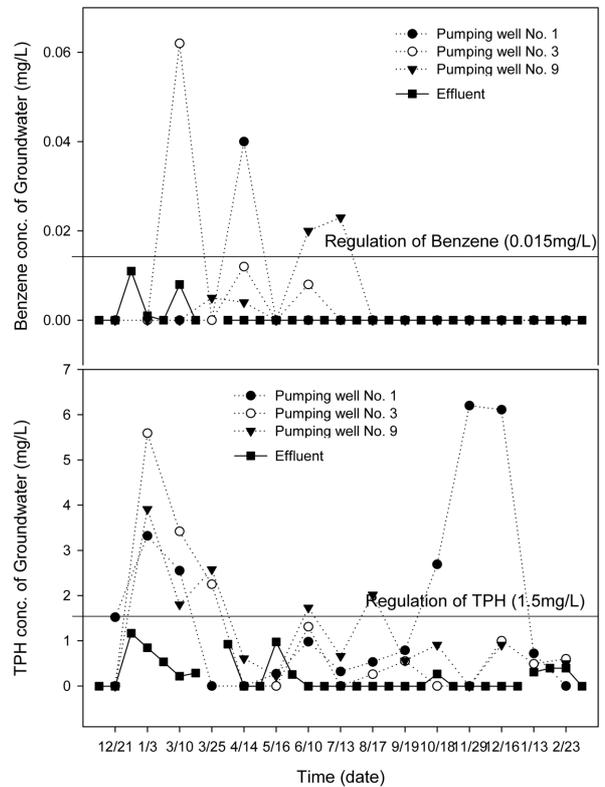
( ) : the regulation of groundwater

는 벤젠이 최고 0.040 mg/L, TPH가 최고 6.2 mg/L로 조사되었다. PW 3 양수정의 경우 벤젠이 최고 0.062 mg/L, TPH가 최고 5.6 mg/L로 조사되었다. PW 9 양수정은 벤젠이 최고 0.023 mg/L, TPH가 최고 3.9 mg/L로 조사되었다. 양수정 PW1, 3, 9의 지하수는 벤젠과 TPH 항목이 지하수 생활용수 기준을 각각 초과하였으며, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌의 경우는 농도가 상대적으로 높지 않거나 불검출 되었다.

수처리장치를 거친 방류수를 분석한 결과 벤젠은 최고 0.011 mg/L, TPH는 최고 1.2 mg/L로 지하수 수질기준에 적합한 것으로 나타났다. 양수정(PW 1, PW 3, PW 9)과 방류수의 수질분석 결과 중 TPH 및 벤젠의 농도 변화특성을 Fig. 3에 나타내었다.

**3.3. 지하수위 변화**

오염지하수의 양수처리 과정에서 지속적인 지하수 양수에 의해 양수정의 지하수위는 낮아졌으며, 양수처리 기간 동안 회복되지 않았다. 초기 지하수위는 하부지역인 PW-1,2가 약 0.5~0.7 m, 상부지역인 PW-3,4,5,6은 3.3~3.7 m, PW-7,8,9는 4.2~5.5 m로 나타났으나, 양수정에서 오염지하수의 양수에 의해 PW-1,2 양수정의 지하수위는 약 5 m, PW-3,4,5,6 양수정은 약 0.7 m, PW-7,8,9 양수정은 약 2 m 낮아져 각각 5.5~5.6 m, 3.8~4.5 m, 6.3~7.1 m를 유지하는 것으로 나타났다. 하부지역인 PW-1,2 지역의 변화량이 상부지역인 PW-3,4,5,6 및 PW-7,8,9지역보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. PW-1,2 양수정과 PW-7,8,9 양수정의 지하수위는 약 3월 후 급격한 변화를 나타내었으며, 그 이후에는 일정 수준을 유지하는 경향을 나타내었다. 이는 대상부지의 지형적 특성에 따라 상부에서 유입

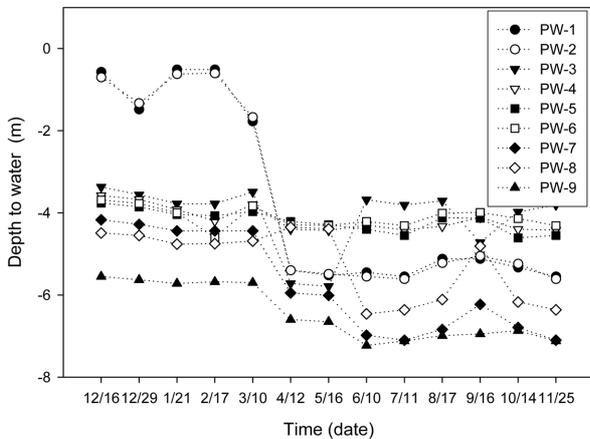


**Fig. 3.** Benzene and TPH analysis results of groundwater from pumping well 1,3,9 and effluent.

된 지하수가 하부에서 속도가 느려짐에 따라 상대적으로 많은 양의 지하수가 모여 있었기 때문인 것으로 판단된다. 세 지역 모두 낮아진 지하수위의 회복 양상은 관찰되지 않았으며, PW-1,2지역의 수리전도도는  $6.143 \times 10^{-5}$  cm/sec, PW-3,4,5,6지역은  $2.675 \times 10^{-5}$  cm/sec, PW-7,8,9지역은  $1.198 \times 10^{-4}$  cm/sec로서 지하수위 회복과 수리전도도와의 연관성은 없는 것으로 나타났다. Table 2에 대상부

**Table 2.** The results of analysis of slug test

Monitoring Well	Depth to water (m)	Well Depth (m)	Initial displacement (m)	Hydraulic conductivity (K, cm/sec)
MW-1	2.75	7.00	0.360	$1.364 \times 10^{-5}$
MW-2	0.76	8.00	0.068	$6.143 \times 10^{-5}$
MW-3	4.82	9.00	0.306	$1.375 \times 10^{-5}$
MW-4	2.23	6.00	0.083	$2.675 \times 10^{-5}$
MW-5	0.66	9.00	0.435	$1.465 \times 10^{-5}$
MW-6	3.39	6.00	0.048	$2.370 \times 10^{-5}$
MW-7	0.94	6.00	0.448	$7.609 \times 10^{-5}$
MW-8	1.86	9.00	0.132	$1.198 \times 10^{-4}$
MW-9	1.62	6.00	0.202	$2.484 \times 10^{-5}$
MW-10	1.27	6.00	0.472	$5.184 \times 10^{-5}$



**Fig. 4.** The changes of groundwater level of each pumping well.

지의 수리전도도 분석결과를 정리하였으며, Fig. 4에 지속적인 오염지하수 양수에 의한 각 양수정의 지하수위 변화를 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 오랜 기간 유류누출에 의해 오염된 지역의 지하수 수질특성을 파악하고, 오염지하수 정화를 위해 약 1년간 적용한 양수처리공법의 적용성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

대상지역의 지하수 조사결과 총 10개의 관측정 중 3개의 관측정에서 벤젠과 TPH가 상대적으로 높게 나타났다. 모두 유류오염지역 내부 및 인접한 지역으로써 토양오염과 지하수오염지역이 유사함을 나타내고 있다.

지하수 오염이 발견된 3개의 관측정 주변에 총 9개의 양수정을 설치하여 오염지하수를 양수처리 하면서 지하수 오염농도 및 지하수위 변화특성을 분석하였다. 총 9개 중

3개의 양수정으로 부터 양수한 지하수에서 벤젠과 TPH 농도가 상대적으로 높게 나타났으나, 수처리장치를 거친 방류수의 벤젠은 최고 0.011 mg/L, TPH는 최고 1.2 mg/L로 검출되어 수처리장치가 효과적인 것으로 조사되었다.

양수처리과정에서 지속적인 지하수 양수에 의해 낮아진 지하수위는 양수처리 과정동안 회복이 되지 않았다. 지하수위 변화는 수리전도도의 영향 보다 지형의 고저차에 의한 지하수의 흐름방향과 지하수 함양의 차이에 의한 것으로 판단된다.

유류오염 지하수 정화를 위한 양수처리법의 현장 적용성은 우수한 것으로 조사되었다. 그러나 양수처리장치 운전 중 지속적인 지하수위 변화를 모니터링하고 급격한 지하수의 변화를 방지하기 위한 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구의 일부분은 2013년도 광운대학교 학술연구비의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

#### References

Brusseu, M.L., Hatton, J., and DiGuseppi, W., 2011, Assessing the impact of source-zone remediation efforts at the contaminant-plume scale through analysis of contaminant mass discharge, *J. Contamin. Hydrol.* **126**(3-4), 130-139.

EPA, 2001, A Citizen's Guide to Pump and Treat, EPA/542-F-01-025.

EPA, 2009, Green Remediation Best Management Practices: Pump and Treat technologies: EPA/542-F-09-005.

Han, J.S., 2000, Groundwater Environment and Contamination, *J. Soil Groundw. Environ.* Vol. 19(3), p. 33~38, 2014

Parkyoungsa publisher, p. 525-527.

Jesús, P., Martín, H., Thomas, J.B., Norma, G., José, Á., Mario, E., and Alfredo, S., 2013, Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México, *Engineering Geology*, **164**(17), 172-186.

Langwaldt, J.H. and Puhakka, J.A., 2000, On-site biological remediation of contaminated groundwater: a review, *Environ. Pollut.*, **107**(2000) 187-197.

Lee, J.M., Lee, B.S., and Woo, N.C., 2010, Effects of Site-scale Anisotropy of an Aquifer on Groundwater Remediation, *J. Soil Groundw. Environ.*, **15**(6), 17-28.

Lim, H.G., Lee, J.Y., Park, Y.Y., and Park, Y.C., 2012, A Study on Hydrochemistry Characteristics of Groundwater and Surface water near a Petroleum Contaminated area, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(5), 10-19.

Seo, Y.S., Choi, S.I., Kim, J.M., Kim, B.K., Kim, S.G., Park, S.H., and Ju, W.H., 2009, Full-scale soil washing and non-discharged washing water treatment process of soil contaminated with petroleum hydrocarbon, *J. Soil Groundw. Environ.*, **14**(1), 61-67.

Shi, X., Fang, R., Wu, J., Xu, H., Sun, Y., and Yu, J., 2012, Sustainable development and utilization of groundwater resources considering land subsidence in Suzhou, China, *Engineering Geology*, **124**(4), 77-89.

Voudrias, E.A., 2001, Pump-and-Treat Remediation of Groundwater Contaminated by Hazardous Waste: Can It Really be Achieved?, *Global Nest : the Int. J.* **3**(1) 1-10.

Yang, C., Zhang, Q., Zhao, C., Wang, Q., and Ji, L., 2014, Monitoring land subsidence and fault deformation using the small baseline subset InSAR technique: A case study in the Datong Basin, China, *J. Geodyn.*, **75**, 34-40.