자원환경지질, 제35권, 제6호, 581-588, 2002
Econ. Environ. Geol., 35(6), 581-588, 2002

용존공기가압부상장치가 포함된 화학적 처리공정에 의한 오염 지하수 정화

손주형[1] · 이상화[1] · 강현민[2] · 이민희[2]* · 정상용[2]
[1]부산시 남구 농업기반공사 문현지구환경복원사업소, [2]부경대학교 환경지질과학과

Remediation System Using the Chemical Treatment Process Including DAF (Dissolved air Flotation) for a Contaminated Groundwater

Joohyeong Son[1], Sanghwa Lee[1], Hyunmin Kang[2], Minhee Lee[2]* and SangYong Chung[2]
[1]Munhyun District Environmental Remediation Site, Korea Agricultural & Rural Infrasturcture Corporation, Pusan, 608-040, Republic of Korea
[2]Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, 599-1 Daeyondong, Namgu, Pusan, 608-737, Republic of Korea

1. 서 론

화학적 처리 공정은 수처리 분야, 특히 폐수 처리 분야에서 널리 사용되고 있는 수처리 공정으로, 주로 화학적 응집/침전법에 의한 중금속 처리 및 BOD제거, 수질의 pH를 조절하는 중화처리법, 시안(CN^-), 6가 크롬(Cr^{+6}), 철, 망간처리를 위한 산화/환원법 등을 포함한다(환경부, 1995; 양상현, 1998). 이러한 화학적 처리 공정은 국외에서는 이미 1980년대 말부터 폐수처리분야를 넘어 침출수 처리 및 지하수 처리에 사용되고 있다(Domenico and Schwartz, 1990). 화학적 처리공정과는 달리, 용존공기가압부상법(DAF : Dissolved air flotation)은 주로 기름으로 오염된 수질의 정화를 위해 사용하는 물리적 처리 방법으로, 비중이 큰 물과 비중이 작은 기름(유분)이 고압상태에서 물에 과포화된 공기를 대기압에 노출시켜 미세한 공기방울을 형성시키는 시스템을 통과하면서, 비중이 낮은 오염물이 수표면으로 상승하는 원리를 이용하여 물과 기름을 분리시켜 정화하는 방법이다(그린엔택, 2001; 이규성 등, 2000). 용존공기가압부상법은 주로 석유 정제 공장 폐수, 윤활류/기름을 사용하는 공장 폐수, 엔진 공장 폐수 처리에 이용되어왔다.

국내에서 지하수와 관련된 물리/화학적 처리 공정의 적용은 대부분 실험실에서 이루어진 배치 및 칼럼 실험 단계로서, 중금속의 흡착/탈착 처리, 광산 폐수나 광산 주변 침출수 처리를 위한 중화 및 응집/침전 처리에 대한 정화 효율에 관한 연구가 대부분이며(오근창 등, 2001; 정예진 등, 2001; 이찬희 등, 1999), 실제 오염 지역에서 오염 지하수를 정화하는 처리 공정의 설계 및 적용은 토양 오염 처리 공정의 현장 적용 사례에 비하여 매우 부족하다. 실제적인 지하수 처리 공정의 현장 적용 사례가 거의 없는 국내 형편에서, 유류와 중금속(특히 납)으로 오염된 오염 지역의 오염 지하수를 용존공기가압부상 장치를 첨가한 화학적 처리 공정 시스템에 의해 정화함으로서, 오염 지하수 정화를 위한 처리 공정의 향후 연구에 중요하게 사용될 현장 정화 자료 및 기술적 정보를 제공하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

2. 오염 부지의 지하수 특성

지하수 정화를 위해 선정된 오염 부지는 부산시에 위치하며, 부지 정밀 조사 결과, 주 오염원은 오염 지역에 불규칙적으로 존재하는 유류(특히 디젤과 윤활유)와 납(Pb)으로 오염된 토양이며, 토양 구성 상태는 최상부로부터 매립층, 모래층과 실트층이 교호되어 나타나는 복합 토양층(주 오염 토양층), 하상 점토층, 안산암질 풍화 기반암으로 이루어져있다(국방부, 1999). 오염 지역의 지하수 성분과 분포를 조사하기 위하여 총 18개의 관측공을 설치하였다. 3개의 관측공에서 유류의

Table 1. Concentration of TPH and Pb in groundwater at the contaminated site.

Monitoring Well	TPH concentration (mg/L)	Pb concentration (mg/L)
W1	7.2	4.3
W2	8.0	4.0
W3	9.0	4.0

자유상(free phase)이 검출되었으며, 나머지 일부 관측공에서도 납과 유류성분인 TPH(Total petroleum hydrocarbon)가 폐수처리배출 기준을 초과함으로서, 오염 토양 주변 지하수가 오염되어 있음을 알 수 있었다. Table 1은 오염 지역 지하수의 성분 분석 결과이다.

3. 지하수 처리 공정

수처리에 사용되는 대부분의 물리/화학적처리는 단독처리 공정보다는 오염물 특성이나 수질 특성에 따라 처리 공정을 병용해서 사용하는 하나의 복합 처리 공정 시스템으로 운영된다. 본 연구 지역의 오염물 특성과 주변 환경을 고려하여, 오염 지하수를 폐수처리배출허용기준 이하로 처리하고자 하였으며, 용존공기가압부상조, 반응조, 응집조, pH조정조를 결합한 하나의 처리 공정 시스템을 운영하여, 주 오염물질인 지하수내 자유상 및 용해된 유류오염물과 중금속(특히 납)을 제거하였다. Fig. 1은 본 연구에 적용된 지하수 처리 공정 시스템의 사진이며, 각 단위 공정의 특성은 다음과 같다.

3.1. 집수조

집수조는 수처리 장치를 가동하기위한 원수(지하수)를 모으는 곳으로, 20 m×50 m×5 m의 크기의 콘크리트 구조물로 설치되어 있으며 집수용량은 약 50 ton 이다. 상부 및 하부에 칸막이가 설치되어 있으며, 하부 칸막이는 현장에서 지하수와 함께 유입되는 토사 및 비중이 큰 물질들을 1차적으로 침전시키는 역할을 하며 상부 칸막이는 부유물질 및 유류의 이동을 제어하는 역할을 한다. 본 오염 지역의 지하수는 지하수 주 흐름 방향인 서쪽의 하천 경계부를 중심으로 폭 2 m, 깊이 4 m, 길이 50 m 규모의 지하수 채수용 트렌치를 설치하여 차집한 후, 양수 펌프를 이용하여 시간당 10 m^3의 지하수를 집수조에 유입시켰다. 집수조에 모인 지하수는 집수조 수면위에 설치된 Floating Oil Skimmer를 사용하여 처리된 후, 상부층의 물이 반응조로 이동되어졌다.

3.2. 반응조

응집 과정은 응집(coagulation)과 응결(flocculation)의 두 단계로 구분되는데, 응집은 단일 전해질 혹은 염(salt)에 의한 입자들의 불안정화과정(destabilization)으로서 불안정화 된 입자들이 최초로 서로 부착하게 되는 조작이며, 응결은 염기성의 다핵 금속염에 의해 불안정화된 입자들을 서로 엉키게 하기 위해 서서히 뒤섞거나 저어주어 빨리 침전하는 플럭(floc)을 형성하는 조작

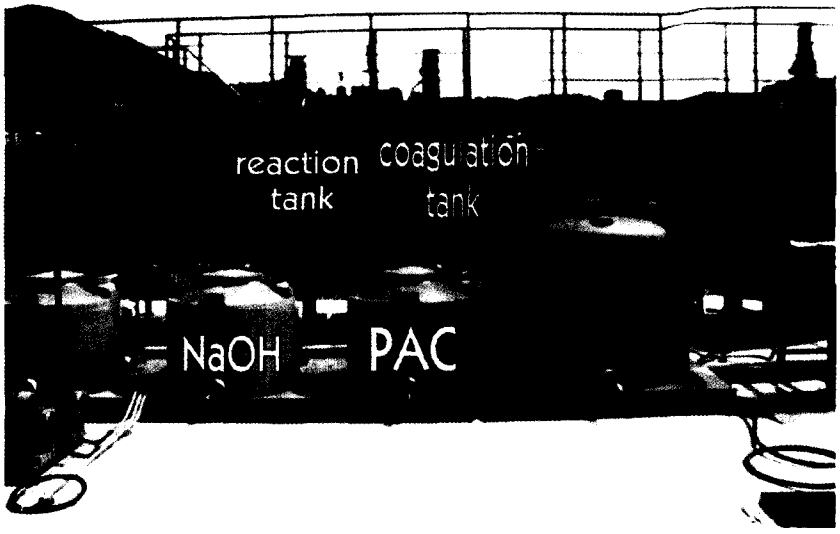

Fig. 1. A unit treatment system to remediate contaminated groundwater at the site.

이다. 본 처리 공정의 반응조는 오염 지하수 중에 함유되어 있는 콜로이드 상태의 불순물을 NaOH를 첨가하여 pH를 염기 상태로 조정한 다음, 응집제인 PAC (polycholoro aluminum : 폴리염화알루미늄)를 첨가하여 입자를 크게 뭉치게 함으로서 침전을 용이하게 하였다. 일정한 시간 간격으로 유입되는 지하수의 부유물질 (SS : suspended solid)의 농도와 양, pH를 분석하여, 변화하는 지하수 수질 조건에서 Jar Test를 실시하여 적절한 반응조 운영 방법을 선택함으로서, 응집 효율을 극대화 할 수 있도록 하였다.

3.3. 응집조

응집조는 응집보조제를 첨가하여 응집조에서 형성된 입자끼리 결합하여 크고 무거운 플록으로 성장시켜 침강 시간을 단축하기 위한 장치로서, 생성된 플록이 깨어지지 않도록 하기 위하여 교반기의 회전속도를 저속으로 하여 운전하며, 지하수 유입 중에 약품 정량 주입장치에 의해 일정량의 응집보조제가 계속적으로 주입되도록 하였다. 응집보조제는 응집제의 응집효율을 증가시키기 위하여 사용하는 것으로 본 연구에서는 폴리머(Polymer)를 사용하였는데, 폴리머는 전하에 따라 음성, 양성 그리고 양쪽성(Polya- mphoteric)으로 구분되며 분자량이 큰 유기성 합성체로서 물에 용해하면 고도로 이온화되고, 따라서 콜로이드 전하는 폴리머 전하에 의해 중화되어 고분자인 폴리머가 콜로이드간에 가교작용을 해서 콜로이드 응결을 촉진시키게 한다. 혼합시 pH와 응집제의 양을 최적화하기 위하여 Jar test를 실시하여 운전 최적 조건을 선택하여 정화 장치에 적용하였다. 실제 오염 부지에서 채취한 오염 지하수 원수 중에서 최고 농도에 해당되는 원수를 Jar test 시험 원수로 사용하였다. 500 m*l* 비이커에 원수 시료 500 m*l*를 채운 후, PAC 주입 후 150 rpm으로 1분간 급속 교반하였으며, 고분자 응집제(polymer) 투입 후 150 rpm으로 1분간 교반한 후 다시 50rpm으로 3분간 교반하였다. 시료를 정치시킨 후 응집성 및 오염물 제거 효율을 측정하였다. Table 2는 시험 원수의 성상을 나타내며, Table 3는 반응조에 투입된 PAC 의 최적 투입량 산정을 위한 Jar test 실험 결과이고, Table 4는 응집조에 투입된 고분자 응집제의 종류를 선택하기 위한 실험 결과를 나타낸다. 위와 같은 Jar test 실험의 반복을 통하여 응집제인 PAC과 Polymer의 투입량을 선정하였으며, 이러한 결과에 기초하여 운영된 반응조와 응집조의 최적 프로그램과 처리 효율을 Table 5에 나타내었다. 실제로 현장에서는 이들 Jar test 양을 기준으로 하여 환경에 따라 조금씩 조정하면서 연속적인 정화 처리를 실시하였다.

Table 2. Properties of contaminated groundwater used in Jar test.

	pH	Conductivity (μs/cm)	Turbidity (Degree)	COD (ppm)
Tested groundwter	7.75	1,780	1,660	266

Table 3. Results for PAC injection amount decision in Jar test.

Test item	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Injected concentration of PAC (ppm)	60	80	100	120
Injected concentration of polymer (ppm) (model: A-101)	1	1	1	1
Reaction rate order	3	2	1	1
Floc size (D)	D_4	D_5	D_5	$D_{5\text{-}6}$
Turbidity of treated water	5.5	4.2	3.8	3.6
COD (ppm) of treated water	15.6	14.2	14.2	10.2

Table 4. Results for the best polymer type decision in Jar test.

Test item	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
PAC (ppm)	100	100	100	100
Polymer type	PA-333A	PA-300	PA-600	A-101
Polymer injection concentration (ppm)	1	1	1	1
Floc creation order	3	2	1	2
Floc size (D)	$D_{4\text{-}5}$	$D_{4\text{-}5}$	D_5	D_5
Turbidity of treated water	2.5	3.2	1.0	3.8
COD (ppm) of treated water	12.4	12.4	10.2	14.2

Table 5. Results for the best operation program and removal efficiency.

Selected program	Injection concentration (ppm)	Floc size (D_{mm})	Removal efficiency of turbidity	Removal efficiency of COD (ppm)
PAC	80~100	D_5	99.9% (1,660→1.0)	96.2% (2261→0.2)
polymer (PA-600)	1~2			

3.4. 용존공기가압부상조

용존공기가압부상은 공기에 압력을 가하게 되면 공기가 물에 과포화 되며, 이들이 대기압으로 환원 시 열역학 법칙에 따라 자유에너지의 변화를 최소화 하기 위해 미세한 공기방울을 형성하는 원리를 이용한 것으로, 수처리의 경우 폐수 내 오염물질인 유분에 부착될 수 있는 미세한 기포를 형성시킨다. 본 처리 공정에서는 STOKE'S 법칙에 의하여 유입 지하수 내 미세한 기포를 발생시켜, 오염물질(주로 유류성분)에 기포가 부착되게 하고, 결과적으로 부상되는 기포의 유효 비중이 감소되어 상승속도를 증가시키므로 오염물인 유분이 수표면으로 떠올라 분리되는 과정을 이용하였다. 유입된 오염 지하수를 반응조와 응집조를 통과시키면서 플럭을 형성한 후, 부상조 하부의 압력탱크에서 과포화시킨 공기를 개방 부상조로 보내어 대기압에 노출시킴으로서 고형물과 액체 입자 주변에 미세한 기포가 형성되도록 하여 고형물을 수표면으로 부상시키며 이를 SKIMMER로 제거하였다. 오염 지하수의 슬러지 침전을 원활하게 하고, 지하수의 상층면에 형성된 스컴(SCUM)의 제거 효율을 향상시킬 수 있도록 하기위하여, 부상조의 상층면에 형성되는 스컴을 보다 큰힘으로 밀어내도록 스컴 스키머의 설치 각도를 회전축의 법선 방향과 소정 각도로 틀어지게 함으로서 스컴의 배출효율을 보다 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 가압수가 거품통에 공급될 때 폐수와는 별도로 유입됨과 아울러 노즐의 충돌판에 충돌하면서 공기 방울을 발생시키게 함으로서 공기 방울의 형성 효율을 향상시키도록 제작되었다.

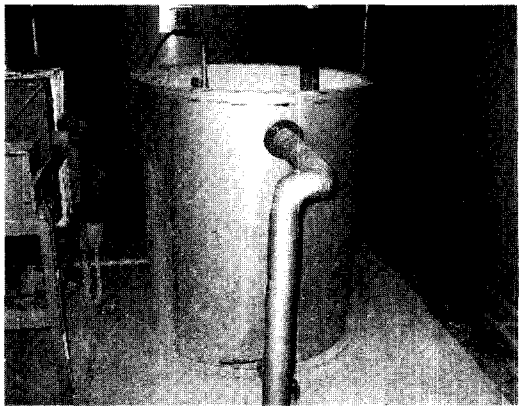

Fig 2. Sludge concentration tank (right) and dewatering filter press (left).

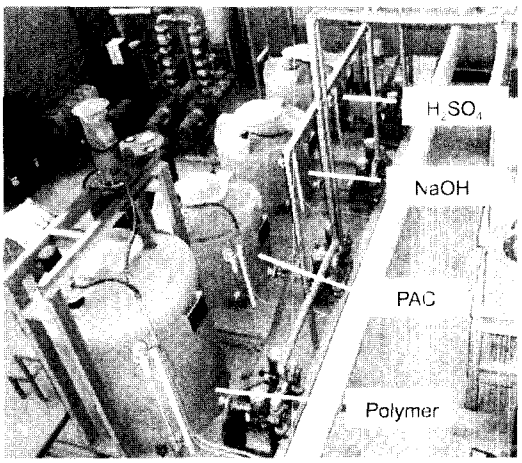

Fig. 3. Injection tanks containing each treatment material.

3.5. 농축조 및 탈수기

농축조는 가압부상조에서 걷어내어진 스컴 및 하부에서 인발한 슬러지를 저장하는 장치로서 스컴은 탈수기를 이용해 탈수 케이크로 만들어서 폐기하였다. Fig. 2는 슬러지 농축조와 탈수 장치를 보여준다.

3.6. pH 조정조

pH조정조는 알칼리성의 폐수를 pH 7정도의 중성으로 조정하는 탱크로서, 반응조와 응집조를 거치면서 증가된 처리수의 pH가 중성으로 처리되어 배출된다. 본 연구에 설치된 pH조정조는 알칼리성인 원수를 중화시키기 위하여 부식방지 펌프로부터 황산이 공급될 수 있는 관이 설치되어 있으며, 황산이 충분히 혼합될 수 있도록 탱크상부에는 교반기가 설치되어 있다. 유입된 오염 지하수는 중금속 처리효율을 높이기 위해 pH 9로 조정하여 반응조, 응집조, 가압부상조를 거쳐 나오기 때문에 처리수의 pH를 다시 중성으로 만들어 주는 역할이 반드시 필요하다. Fig. 3은 각 처리 탱크에 주입되는 약품 탱크의 모습을 보여준다.

3.7. 처리 공정별 정량적 조건과 운전 사양

현장에서 오염 지하수를 처리하기 위해 사용된 용존공기가압부상 장치를 첨가한 화학적 처리 공정 시스템의 운전 사양을 정량적으로 서술하면 다음과 같다. 이러한 운전 조건을 기본 사양으로 하여 실제로 현장에서는 오염 특성에 따라 약간의 공정상의 부분적인 변형을 실시하여, 오염 부지의 지하수를 연속적으로 처리하였다. 보다 자세한 공정 시스템의 운전 사

양은 그린엔텍(2001)에서 얻을 수 있다.

(1) 공정 시스템의 처리 용량

반응조, 응집조, pH 조정조의 용량은 모두 1.5 m × 1.5 m × 1.5 m(3.4 m^3)으로 유효 용적은 2.9 m^3이며, 부상조는 7.2 m^3 이고, 유효 용적은 5.7 m^3 이다. 유입 수량은 5-10 m^3/hr 이며, 반송수량(가압수량)은 유입수량의 약 20-40%를 유지하였다.

(2) 체류 시간

각 공정 시스템의 체류 시간은 반응조, 응집조, pH 조정조의 경우 보통 17.4-34.8 min(일반적으로 15-30 min 유지)이였으며, 부상조의 경우 24.2-56.2 min(일반적으로 15-40 min)을 유지하였다. 부상조의 수면적 부하량은 46-107 $m^3/m^2 \cdot$ day 이였다.

(3) 약품 투여량과 교반 조건

PAC의 주입량은 보통 50-200 ppm(평균100 ppm)이였으며, polymer는 0.5-1.5 ppm(평균1.0 ppm)을 주입하였다. 가성소다(NaOH)와 황산(H_2SO_4)은 pH에 따라 자동적으로 투입되므로 투입량은 원수에 따라 가변적이였으며, 반응조에서는 가성소다 및 PAC 주입하면서 180 rpm의 급속교반이 이루어졌으며, 응집조에서는 polymer가 주입되면서 60 rpm의 완속교반이 이루어졌다.

Table 6. Wastewater discharge concentration limit (WWDL) (Water Quality Preservation Regulation, 2001).

Item	pH	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	n-hexane extraction concentration (mg/L)	Pb (mg/L)
Limit range or concentration	5.8-8.5	120	120	130	5	1

Table 7. Concentration of pollutants in groundwater before and after the treatment system (IW: original goundwater, TW: treated groundwater).

Item Date (Y/M/D)	pH		SS (mg/L)		BOD (mg/L)		COD (mg/L)		n-hexane extraction (mg/L)		Pb (mg/L)	
	IW	TW	IW	TW	IW	TW	IW	TW	IW	TW	IW	TW
(01/9/20)	7.09	6.69	299.5	31.9	6.6	1.6	12.6	7.2	4.2	0.4	0.99	0.17
(01/9/22)	6.94	6.89	364.2	32.3	7.4	2.6	14.4	10.1	6.9	0.8	1.26	0.14
(01/9/24)	6.84	6.62	521.4	39.2	4.2	1.4	10.6	6.8	5.1	0.7	1.22	0.24
(01/9/26)	6.91	6.53	344.2	41.4	5.1	1.1	8.8	5.1	3.5	0.6	0.87	0.26
(01/9/28)	6.82	6.56	326.4	44.5	5.8	1.6	16.3	8.4	4.7	1.0	0.98	0.19
(01/10/4)	6.77	6.62	333.4	39.2	6.9	1.2	16.4	7.8	5.8	1.0	1.23	0.12
(01/10/6)	6.88	6.89	402.1	35.1	5.4	0.9	11.1	6.6	3.6	0.8	1.54	0.25
(01/10/9)	6.74	6.74	266.9	29.4	4.1	1.3	11.9	7.0	3.7	0.9	0.45	0.09
(01/10/11)	6.67	7.01	308.4	36.4	7.3	1.3	14.5	7.9	4.9	0.8	0.69	0.18
(01/10/13)	6.86	7.12	388.4	39.1	5.4	1.8	12.6	9.1	5.8	0.8	0.96	0.22
(01/10/22)	7.01	6.78	413.2	41.2	6.4	1.6	13.9	8.4	6.4	0.9	0.87	0.21
(01/10/27)	6.93	6.81	302.6	22.5	7.2	1.7	16.9	9.6	3.9	0.4	1.65	0.28
(01/10/29)	6.84	6.98	266.4	30.4	6.9	0.9	15.2	5.4	4.1	0.3	0.98	0.21
(01/10/31)	7.09	6.95	520.3	84.0	7.1	1.4	14.8	8.4	0.7	0.5	1.77	0.24
(01/11/2)	6.88	6.74	483.7	37.8	5.7	2.2	12.4	10.1	5.1	0.5	0.87	0.14
(01/11/5)	6.98	7.11	325.7	41.3	6.4	0.9	13.5	5.6	3.6	0.4	1.23	0.17
(01/11/7)	7.13	6.62	421.6	40.5	7.3	2.1	13.9	7.7	0.7	0.3	1.33	0.11
(01/11/9)	6.88	7.10	355.8	33.3	4.4	2.0	8.8	4.9	1.2	0.6	1.45	0.26
(01/11/12)	6.24	6.19	205.4	31.2	3.4	1.5	7.2	5.0	2.3	0.5	0.69	0.14
(01/11/14)	6.72	6.23	619.3	32.9	4.1	1.3	7.8	6.1	6.2	0.9	0.85	0.07
(01/11/16)	6.74	6.64	378.4	42.9	6.2	1.7	13.9	8.4	6.6	0.7	1.77	0.23
(01/11/19)	6.87	6.33	320.8	43.7	6.9	2.2	13.4	6.9	5.1	0.9	2.11	0.13
(01/11/21)	6.91	6.54	344.5	35.4	6.7	1.6	13.5	7.8	4.8	0.7	1.31	0.24
(01/11/23)	6.76	6.55	266.8	36.2	4.6	1.1	10.1	5.6	3.9	0.5	1.05	0.08
(01/11/26)	6.88	7.00	288.4	33.6	4.7	1.6	9.2	6.1	4.1	0.4	0.87	0.15
(01/11/28)	6.86	6.77	315.8	33.7	6.9	2.3	14.5	8.9	5.2	0.3	1.52	0.17
(01/11/30)	6.88	6.74	344.7	34.8	5.9	1.4	13.2	7.6	5.3	0.4	1.24	0.21
(01/12/3)	6.98	6.88	304.7	26.8	4.8	1.8	10.6	6.1	6.4	1.2	1.45	0.32
(01/12/5)	6.89	6.76	369.7	29.8	6.4	2.2	14.7	7.9	8.8	2.1	2.31	0.24
(01/12/7)	7.01	6.84	321.6	29.6	6.1	1.9	12.3	7.6	6.3	1.1	2.14	0.44

Table 7. Continued.

Item Date (Y/M/D)	pH		SS (mg/L)		BOD (mg/L)		COD (mg/L)		n-hexane extraction (mg/L)		Pb (mg/L)	
	IW	TW	IW	TW	IW	TW	IW	TW	IW	TW	IW	TW
(01/12/10)	7.06	7.23	383.5	23.6	6.1	5.4	7.8	7.2	3.7	3.3	2.19	0.32
(01/12/12)	7.04	7.12	269.4	21.4	6.1	5.2	8.2	6.9	3.7	2.1	2.22	0.21
(01/12/14)	7.01	7.24	344.2	18.8	6.2	5.2	8.0	5.2	4.1	2.2	2.24	0.41
(01/12/17)	7.02	6.98	326.7	20.1	6.4	5.3	7.8	4.8	4.3	2.9	2.36	0.31
(01/12/19)	6.99	7.21	256.3	19.2	5.9	4.9	8.3	6.0	4.0	2.4	2.44	0.39
(01/12/21)	6.98	7.01	368.9	23.6	6.2	4.8	8.4	5.8	3.9	3.0	2.31	0.24
(01/12/24)	6.97	7.11	344.5	16.2	6.1	5.6	8.9	6.1	3.9	2.0	2.26	0.21
(01/12/26)	7.06	7.05	289.4	18.4	5.8	4.4	7.8	6.2	3.8	2.4	2.14	0.29
(01/12/28)	6.99	7.03	280.3	21.3	6.2	5.1	8.1	5.6	3.7	1.9	2.18	0.16
(02/1/2)	6.94	6.88	364.8	20.6	6.6	5.9	3.9	2.2	8.4	2.5	2.37	0.21
(02/1/4)	6.98	7.11	344.9	18.4	6.3	5.2	8.2	5.6	4.2	2.4	2.44	0.28
(02/1/7)	7.04	6.98	312.6	22.9	6.4	5.0	8.8	5.4	4.1	2.1	2.42	0.19
(02/1/10)	6.92	6.99	266.4	18.5	6.2	4.6	8.6	5.3	4.3	2.2	2.39	0.21
(02/1/14)	6.88	7.12	344.2	22.4	6.3	4.8	8.8	5.6	5.5	2.6	2.54	0.19
(02/1/17)	7.05	7.74	253.6	33.7	1.9	1.4	20.6	15.6	1.2	1.0	0.74	0.08
(02/1/21)	7.33	6.86	141.2	22.6	1.3	0.9	10.3	7.2	0.3	0.2	0.88	0.10
(02/1/24)	7.25	7.05	334.1	40.5	2.4	2.1	25.4	9.8	1.6	0.6	1.05	0.33
(02/1/28)	7.19	7.14	300.2	38.8	2.3	1.8	24.1	8.1	1.4	0.4	0.84	0.12
(02/1/31)	7.15	7.32	349.8	42.5	2.8	2.2	29.3	10.3	1.8	0.7	0.69	0.09
(02/2/4)	7.09	7.35	702.3	79.9	4.6	3.8	48.2	23.5	5.2	1.4	0.77	0.10
(02/2/7)	7.13	7.76	409.2	50.2	3.3	2.8	34.6	16.4	2.1	1.1	0.66	0.08
(02/2/14)	7.27	6.99	402.4	47.8	3.5	2.9	35.4	17.6	2.3	1.2	0.84	0.12
(02/2/18)	7.33	7.04	356.4	43.4	2.6	2.3	27.6	15.4	1.8	1.0	1.18	0.21
(02/2/21)	7.15	7.22	334.8	41.9	2.4	2.1	25.7	11.2	1.6	0.8	0.64	0.09
(02/2/25)	7.20	7.34	405.1	48.5	3.0	2.7	33.4	13.4	1.9	1.0	0.88	0.12
(02/2/28)	7.20	7.05	692.8	78.2	4.8	3.7	52.4	21.5	5.4	1.2	0.74	0.08
(02/3/11)	7.18	7.01	339.6	42.1	2.9	2.4	29.4	18.4	1.8	1.2	0.86	0.13
(02/3/14)	7.26	7.55	189.7	26.7	1.5	0.9	18.4	11.9	1.2	0.8	0.81	0.13
(02/3/18)	7.47	7.50	304.0	38.8	2.2	1.8	24.8	13.8	1.2	0.9	0.61	0.05
(02/3/4)	7.21	7.22	351.4	41.5	2.9	2.4	30.5	17.0	1.9	1.1	0.68	0.09
(02/3/7)	7.25	7.15	326.9	39.9	2.7	2.5	28.6	10.4	1.4	0.7	0.75	0.06
(02/3/21)	7.19	7.37	321.4	39.1	2.3	1.7	25.6	11.5	1.1	0.8	1.13	0.39
(02/3/25)	7.15	7.00	284.6	35.9	2.0	1.5	22.4	10.4	1.0	0.7	0.87	0.11
(02/3/28)	7.32	7.46	398.4	45.9	2.6	2.1	31.2	16.5	1.8	1.2	0.68	0.09
(02/4/3)	7.74	7.23	55.8	23.7	-	-	13.4	8.1	0.6	0.4	0.08	0.07
(02/4/6)	7.96	7.09	124.6	36.6	-	-	10.2	8.2	0.8	0.5	0.10	0.09
(02/4/9)	8.24	7.23	43.2	22.3	-	-	16.7	9.2	0.7	0.5	0.08	0.08
(02/4/12)	6.96	7.38	32.9	26.4	-	-	11.5	7.6	0.4	0.2	0.07	0.04
(02/4/17)	5.44	7.13	103.6	17.8	-	-	10.8	8.6	0.2	0.1	0.00	0.00
(02/4/20)	7.65	7.35	28.6	18.4	-	-	12.6	7.4	0.5	0.3	0.12	0.10
(02/4/24)	7.75	7.11	94.3	31.7	-	-	14.2	8.3	0.8	0.4	0.10	0.09
(02/4/27)	7.84	7.26	24.2	18.8	-	-	16.2	8.2	0.6	0.3	0.11	0.10
(02/5/03)	7.72	7.24	650.4	39.1	-	-	16.8	5.4	0.5	0.3	0.18	0.03
(02/5/7)	7.26	7.83	92.8	3.7	-	-	12.8	7.6	0.4	0.6	0.02	0.03
(02/5/10)	8.78	7.35	50.1	22.4	-	-	12.4	9.0	0.7	0.6	0.07	0.09
(02/5/13)	7.62	6.80	45.8	19.8	-	-	12.4	8.6	0.3	0.3	0.07	0.06
(02/5/20)	7.72	7.58	34.3	10.2	-	-	14.0	8.6	0.7	0.2	0.07	0.06
(02/5/24)	9.07	7.37	54.7	31.1	-	-	16.0	8.6	0.4	0.3	0.08	0.07
(02/5/30)	9.15	7.85	80.5	26.6	-	-	14.6	8.2	0.4	0.4	0.08	0.09
(02/6/4)	8.62	6.82	24.9	22.3	-	-	10.4	8.4	1.2	0.4	0.08	0.09
(02/6/12)	7.21	7.22	32.5	29.1	-	-	32.8	30.0	0.6	0.7	0.08	0.10
(02/6/25)	6.73	6.63	38.8	24.5	-	-	1480	86.2	76.4	3.9	0.04	0.06
(02/6/28)	7.61	6.97	42.4	25.6	-	-	844	78.8	54.5	3.2	0.08	0.06

4. 결과 및 토의

본 오염 지역의 지하수는 오염 지역 동쪽에 위치한 하천으로 흐르고 있는데, 지하수 주 이동 방향에 존재하는 하천의 수질이 심하게 오염되어 폐수배출허용기준을 초과하므로, 오염지역의 지하수를 본 정화 장치를 이용하여 폐수배출허용기준 이하로 처리한 후 동쪽의 하천으로 배출하였다. Table 6은 정밀 조사 결과 연구 지역 지하수 내 고농도로 존재할 가능성이 높은 오염물질의 폐수처리배출 허용치를 나타내며, 현장 지하수 분석 결과 이러한 항목 중에서 부유물질(SS : Suspended solid), *n*-헥산 추출물질, 납이 배출 허용 기준치를 초과하는 것으로 나타났다.

DAF를 포함하는 화학적 정화 처리 공정 시스템으로 오염 지역 지하수를 처리하였으며, 처리 효율은 오염 현장의 트렌치에서 집수조로 유입되는 지하수 원수와 처리 공정 시스템을 거쳐 처리된 처리수를 주 2회 분석하여 2001년 9월부터 2002년 6월까지 수처리 모니터링을 실시하였다. 모니터링 기간 동안 분석되어진 원수와 처리 지하수의 항목별 농도는 Table 7에 나타나있다.

본 오염 지역 지하수의 pH는 대부분 배출허용 기준(5.8-8.5) 이하로 나타났으며, 정화 장치 처리 후 처리수의 pH는 6.0과 8.0사이를 나타냄으로서 적정한 pH를 유지 시킬 수 있는 것으로 나타났다. 오염 지하수의 부유물질 농도는 폐수배출허용기준치를 최고 5배 이상 초과하였으나, 정화 처리 후 약 50 ppm 이하의 낮은 농도를 유지함으로서 효과적으로 처리되었음을 확인 할 수 있었다(Fig. 4). 본 오염지역과 같이 대규모의 균등조 설치가 불가능한 곳에서는 유입되는 원수의 부유물질의 양적 변동이 클 수 있으므로, 시스템운영자가 수처리 현황을 지속적으로 감시하여 SS의 처리 효율 변동에 적극적으로 대처할 수 있도록 하였다. 지하수의 BOD와 COD는 배출 허용 기준(120 ppm과 130 ppm) 보다 훨씬 낮은 10-50 ppm 범위를 나타내었고, 처리 후 농도는 최고 20 ppm 이하(대부분 10 ppm 이하)로 배출허용기준에 비해 매우 낮은 농도를 유지할 수 있었다. BOD와 COD는 모두 유기물을 나타내는 지표로서 원수의 성질에 따라 변동이 있을 수 있으나, 본 오염 지하수의 경우 기준치 보다 매우 낮은 값에서 변동이 일어나고 있음 알 수 있었다. 오염 지하수의 *n*-헥산 추출 물질은 폐수 배출 허용 기준치인 5 ppm을 약간 넘는 것으로 나타나 처리가 필요한 것으로 나타났다. 정화 장치를 거쳐 처리된 처리수는 대부분의 경우 2 ppm 이하를 나타내었다(Fig. 5). 따라서 오염 지하수 내 용해된 유류성분을 제거하는 제거 효율은, 유입되는 원수의 초기 *n*-헥산 물질 농도 자체가 낮아서 처리 효율면에서 큰 효과를 보이지 못하고 있는 것으로 나타났으나, 처리수 모두 배출허용기준치 이하 농도로 낮출 수 있었다. 본 오염지역과 같이 오염 지하수의 유류 오

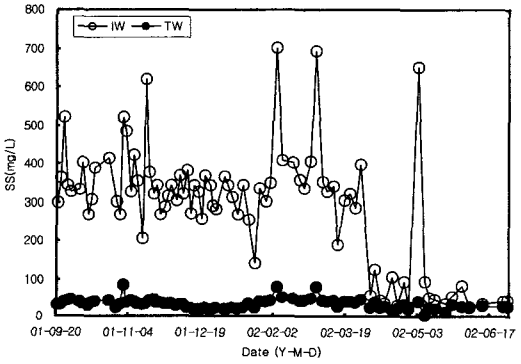

Fig. 4. Comparison of SS (Suspended solid) concentration of treated water (TW) and original groundwater (IW).

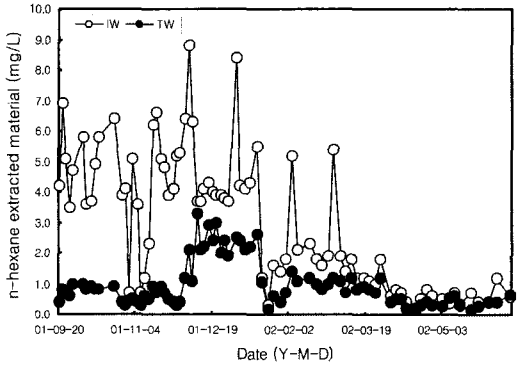

Fig. 5. Comparison of n-hexane extracted material concentration of treated water (TW) and original groundwater (IW).

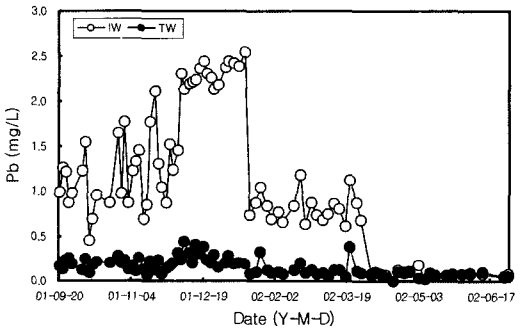

Fig. 6. Comparison of Pb concentration of treated water (TW) and original groundwater (IW).

염 농도가 높지 않은 곳에서는 *n*-헥산 추출물질의 농도를 낮추기 위한 후처리 장치가 필요하지 않으나, 향후 고농도의 *n*-헥산 추출물질을 포함하는 지하수의 유입시에는 활성탄 장치 및 모래 여과 시설 등의 후처리 장치를 설치하는, 처리 공정 시스템의 변형이 필요할 것으로 판단된다. 오염 지하수의 납 농도는 최고치가 폐수배출기준 허용치의 약 2.5배 정도를 보여주며, 전반적으로 허용치를 넘었으나, 정화 장치 처리 후 농도를 0.3 ppm 이하로 유지시킬 수 있어서 중금속, 특히 납에 대한 수처리 효율은 매우 높은 것으로 나타났다(Fig. 6). 납을 제외한 기타 주요 중금속에 대한 원수와 처리수 농도 비교 결과, 처리 효율은 납에서와 같이 매우 효과적인 것으로 나타났다.

5. 결 론

DAF장치를 포함한 화학적 처리 공정을 이용하여 유류와 납으로 오염된 현장 오염 지하수를 폐수처리배출허용 기준으로 이하로 적합하게 처리할 수 있음을 검증하였다. 본 연구는 각각의 수처리 단위 공정을 효율적으로 결합하여, 실제로 다량의 오염 지하수를 처리하는 하나의 복합적인 수처리 공정을 운영하여, 오염 지하수를 현장에서 효과적으로 처리하였다는데 큰 의미가 있으며, 앞으로 오염 지하수 처리 공정의 설계와 운영에 실질적인 자료를 제공할 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2001-041-D00261)에 의하여 연구되었음. 유수분리기장치를 지원한 농업기반공사 문현지구환경복원사업소와 익명의 심사자들에게 감사드린다.

참고문헌

국방부 (1999) 군 오염토양 효율적 복원을 위한 최적방안 연구. 한국토양환경학회, p. 417.

그린엔택 (2001) 수처리 시스템 준공도서 및 운전요령서. p. 1-17.

수질환경보전법 (2001) 수질환경보전법시행규칙 제8조 제1항 별표 5. 환경부.

양상현 (1998) 수질공학개론, 동화기술, 499p.

오근창, 윤정한, 김경웅, 박천영, 김정빈, 양동윤, 김주용, 이광례 (2001) 광주광역시 운정동위생매립장주변 지하수와 하천수의 환경지구화학적 오염특성. 자원환경지질, 34권, 573p.

이규성, 권영두, 김성수, 이성홍, 이한섭, 임영묵, 전종남, 조응현, 홍종순 (2000) 수질오염방지기술. 신광문화사, 573p.

이찬희, 이현구, 조애란 (1999) 공주제일광산 수계에 분포하는 지하수, 지표수, 토양 및 퇴적물의 환경지구화학적 특성과 중금속 오염. 자원환경지질, 32권, p. 611-631.

정예진, 이상훈 (2001) 폐광산복구지역 잔류광미로 인한 주변 지하수/토양 오염 가능성-시흥광산사례. 자원환경지질, 34권, p. 461-470.

환경부 (1995) 오염토양 정화기술 개발, 선도기술개발사업 "유해폐기물 처리기술 사업" 1차년도보고서, 삼성건설 기술연구소, p. 558.

Allen, H.E., Huang, C.P., Bailey, G.W., Bowers, A.R. (1995) Metal speciation and contamination of soil. Lewis Publishers, 375p.

Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990) Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc., 824p.

2002년 11월 8일 원고접수, 2002년 12월 19일 게재승인.