

반응벽체에 쓰인 주물사의 용출특성에 관한 연구

Leaching Characteristics of Foundry Sands When Used as Reactive Media in Permeable Reactive Barriers

이 태 윤*¹ Lee, Tae-Yoon

Benson, Craig H*²

박 재 우*³ Park, Jae-Woo

Abstract

Waste foundry sands were tested to determine their leaching characteristics when used as reactive media in permeable reactive barriers (PRBs). Water leach tests and column leach tests were performed on twelve foundry sands and three reference materials such as Peerless iron, a local fill material, and torpedo sand. The latter three materials were tested to compare concentrations of heavy metals and anions found in other materials commonly placed below the groundwater table with those from the foundry sands. Results of water leach tests and total elemental analyses showed that all of the foundry sands are Category 2 materials per Section NR 538 of the Wisconsin Administrator Code. However, tests on Peerless iron, torpedo sand, and a typical fill material indicate that these materials, which are commonly placed below the groundwater table, also are Category 2 materials. Thus, using foundry sand as a PRB medium should pose no greater risk than that imposed using conventional construction materials.

요 지

폐주물사가 반응벽체의 매체로 쓰였을 때의 중금속, 음이온과 PAHs의 용출 특성을 12개의 폐주물사와 3개의 기준물질(Peerless iron, local fill soil, and torpedo sand)을 선택하여 batch와 column 실험을 통하여 밝혔다. 3개의 기준물질은 이들로부터 얻어진 용출특성을 폐주물사와 비교하기 위해 사용되었다. Water leach test와 total elemental analyses로부터 얻어진 결과에 따라 모든 폐주물사는 그룹 2에 속하였다. 하지만, 일반적으로 지하수면 아래에 건설재료로 이용되는 3개의 기준물질도 역시 그룹 2로 분류되었다. 따라서, 폐주물사의 반응벽체에의 사용은 일반적인 건설재료를 지하수면 아래에 사용하였을 시와 비교했을 때에 비해 비슷한 농도의 중금속과 음이온이 용출됨을 알 수 있다.

Keywords : Leaching characteristics, PAHs, Peerless iron, Permeable reactive barriers, Waste foundry sands

1. 서 론

반응벽체를 이용한 지하수 처리는 반응벽체 설치 시 얻을 수 있는 여러가지 이점때문에 점점 사용횟수가 늘어나고 있다. 반응벽체는 현장처리이기 때문에 반응벽

체에 유입된 오염물을 매립지나 다른 처리 장소로 옮길 필요가 없고 자연적으로 형성된 동수경사를 이용하기 때문에 설치 후 어떠한 동력(energy)도 필요하지 않다. 벽체에 사용되는 반응매체는 오염물의 종류에 따라 선택되어 진다. 일반적으로 많이 사용되는 영가 철은

*1 정희원, 포항산업과학기술연구소 선임연구원 (Member, Research Institute of Industrial Science and Technology, badger74w@rist.re.kr)

*2 University of Wisconsin-Madison 토목환경공학과 교수 (Dept. of Civil Environmental Engrg., Univ. of Wisconsin-Madison, Prof.)

*3 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., Associate Prof.)

Table 1. Lists of Beneficial Use Methods

		Industrial Byproduct Category				
		5	4	3	2	1
1	Raw Material for Manufacturing a Product	×	×	×	×	×
2	Waste Stabilization/Solidification	×	×	×	×	×
3	Supplemental Fuel Source/Energy Recovery	×	×	×	×	×
4	Landfill Daily Cover/Internal Structure	×	×	×	×	×
5	Confined Geotechnical Fill		×	×	×	×
6	Encapsulated Transportation Facility Embankment		×	×	×	×
7	Capped Transportation Facility Embankment			×	×	×
8	Unconfined Geotechnical Fill			×	×	×
9	Unbonded Surface Course				×	×
10	Bonded Surface Course				×	×
11	Decorative Stone				×	×
12	Cold Weather Road Abrasive				×	×
13	Material Placed Below Groundwater Table					×

염소계 화합물(Blowes et al. 1995, Robert et al. 1996, and Arnold and Roberts 1998), 중금속(Benner et al. 1997, Francis and Dodge 1998, Shokes and Möller 1999, Su and Puls 2001), 그리고 염소계 제초제(Eykholt and Davenport 1998, Koppensteiner 1998) 등의 제거에 사용된다.

반응벽체의 단점으로는 초기설치비용(영가철)이 높다는 것이다. 이는 작은 오염사이트에 대한 벽체의 적용을 어렵게 만드는 가장 큰 요인이 되고 있다. 따라서 초기설치 비용을 줄이기 위해 값싼 반응매체를 찾아낼 필요가 있기 때문에 이 연구를 시작하였다. 본 연구에 쓰인 주물사는 sand, clay, coal과 영가철로 구성이 되어있다(Javed and Lovell 1994). 주물사에 포함된 coal은 흡착제로 영가철은 염소계 화합물에 대한 환원제로 쓰일 수 있다. 주물사가 반응매체로 쓰일 수 있다면 벽체설치 비용 절감뿐만 아니라 현재 모자라는 매립장의 공간절약에도 기여할 수 있다.

2. 이론적 배경

폐기물을 유기물 제거 흡착제로의 사용을 평가한 많은 시도가 있었다. 여기에 쓰인 재료로는 straw, wood chips, peat, coal, shale, paper sludge와 페타이어 등이 있다(Thain 1974, Knocke and Hemphill 1981, Rowley et al. 1984, Rael et al. 1995, Kershaw and Pamukcu 1997, Kim et al. 1997, Moo-Young and Zimmie 1996). 역시 폐기물인 석탄회와 주물사의 건설재료로서의 타당성 실험도 행하여져 오고 있다(Abichiou et al. 2000).

여러가지 물질의 혼합물인 주물사는 미국의 위스콘신주에서만 1년에 800,000 Mg 정도 생산이 되고 처리비

용만 약 \$18 million이다. 이러한 주물사를 건설재료로 사용하기 위해선 NR 538에 따라 주물사를 분류시켜야 하고 이 결과에 따라 주물사의 건설재료로서의 타당성을 평가받을 수 있다. 여기에 사용된 분류방법은 위스콘신주 환경부의 규정에 따른 것이다. 각각의 분류에 따른 적용가능 여부는 x로 Table 1에 나타나 있다.

3. 실험재료 및 방법

3.1 재료

미국의 일리노이, 오하이오와 위스콘신으로부터 생산된 12개의 주물사를 이용하여 실험을 행하였다. 각각의 주물사는 번호 1에서 12로 표기되어있다. Fig. 1에 나타난 입도분포곡선으로부터 각각의 주물사는 가는

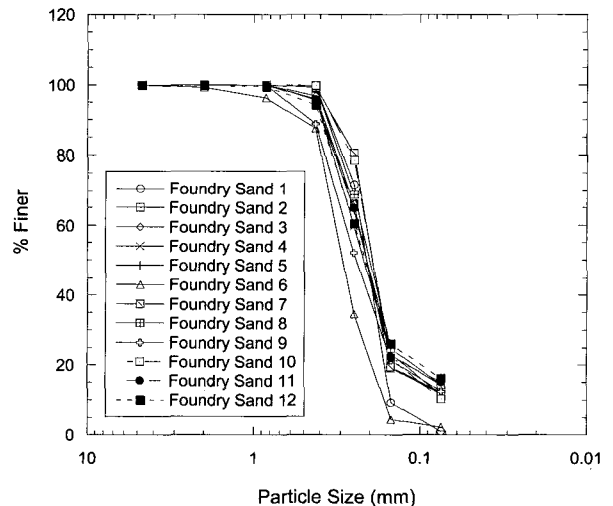


Fig. 1. Particle Size Distribution Curves for Foundry Sands

Table 2. Index Properties of Foundry Sands (from Abichou et al. 2000).

Foundry Sand	Binder Type	Particle Size (%)			Atterberg Limits ^b			USCS Classification	Specific Gravity	TOC
		P ₂₀₀	P _{2μm}	Active Clay ^a	LL	PL	PI	USCS		
Sand 1	Clay	10.7	6.7	5.1	N.P. ^o	N.P.	N.P.	SP-SM	2.62	1.5
Sand 2	Clay	14.3	9.2	7.0	18	17	1	SM	2.53	2.6
Sand 3	Clay	11.3	7.7	7.5	20	18	2	SW-SM	2.52	2.5
Sand 4	Clay	13.2	9.3	10.5	23	19	4	SC-SM	2.63	0.5
Sand 5	Clay	12.4	8.0	8.4	23	18	5	SC-SM	2.54	1.8
Sand 6	Clay	10.2	5.2	6.6	20	17	3	SP-SM	2.61	1.1
Sand 7	Clay	10.9	4.5	6.2	18	14	4	SC-SM	2.72	2.2
Sand 8	Clay	11.1	6.2	7.4	26	20	6	SP	2.68	2.5
Sand 9	Chemical	4.3	2.9	N.A. ^d	N.P.	N.P.	N.P.	SP	2.64	0.8
Sand 10	Clay	10.0	3.5	4.7	N.P.	N.P.	N.P.	SP-SM	2.73	2.5
Sand 11	Clay	16.0	13.2	13	27	20	7	SM-SC	2.51	4.0
Sand 12	Clay	10.0	3.5	4.7	N.P.	N.P.	N.P.	SP	2.73	2.4

^a Active Clay determined by Methylene Blue Titration (ASTM C 837), ^b ASTM D 4318 with one week hydration period, ^c N.A. = Not applicable, ^d N.P. = Non-plastic, ^e N.T. = Not tested.

모래로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이들 주물사의 index property는 Table 2에 요약이 되어있다(Abichou et al. 2000). 액성한계는 non-plastic에서 29, plasticity index (PI)는 non-plastic에서 7, 벤토나이트 함량은 0에서 13%, 그리고 비중은 2.51에서 2.73의 분포를 보이고 있다.

기준물질로 일반적인 fill material, 상업용 철, 그리고 torpedo sand를 선택하였다. 상업용 철은 미시간주 디트로이트에 위치한 Peerless Metal Powders and Abrasives 회사에서 구입하였고 입자의 평균 지름은 0.7 mm이고 표면적은 0.87 m²/g이다. Torpedo sand는 USCS 분류법에 의해 SP로 분류되어지고 균등계수와 곡률계수는 각각 2.6과 0.84였다.

3.2 용출실험

주물사를 Wisconsin Administrative Code Section NR 538에 따라 분류하기 위해 water leach test(ASTM D3987)를 실시하였다. 70g의 주물사를 Mason jar에 1400 mL의 type 1 증류수와 함께 섞은 후 18시간 동안 22°C에서 29 rpm의 속도로 교반시켰다. 18시간 후 5분 동안 침전 시킨 후 0.45 μ m의 유리섬유필터를 통과시켰다. 얻어진 샘플은 보관을 위해 질산을 이용하여 pH 2이하로 한 후 냉장보관 하였다. 샘플에 포함 된 중금속을 측정하기 위해 위스콘신 대학에 위치한 Soil and Plant Laboratory에 보내졌고, 측정은 inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS)을 이용하였다.

3.3 Total elemental analyses

가. 금속이온

USEPA 3051 방법에 따라 각각의 주물사에 대해 acid digestion을 하여 총 금속의 양을 측정하였다. 0.5g의 주물사를 digestion 용기에 질산 10 mL와 같이 넣은 후 microwave를 이용하여 10분 동안 열을 가하였다. 금속의 농도는 Varian[®] SpectrAA 800을 이용하여 측정하였고 USEPA SW 846 7000A 방법을 이용하였다. 용액에 포함된 입자들은 0.45 μ m 유리섬유 필터를 이용하여 제거하였다.

나. Polynuclear Aromatic Hydrocarbon

주물사에 포함된 polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs)의 분석은 위스콘신 주립연구소에 보내져 분석하였다. 분석에 사용된 방법은 USEPA 3540C였다.

3.4 컬럼용출실험

주물사의 용출특성을 좀더 정확하게 파악하기 위해 컬럼실험을 행하였다. 여기에 사용된 실험 조건은 Table 3에 요약되어 있다. 5개의 주물사가 사용되었고 이는 주물사에 포함된 TOC와 점토의 양을 고려하여 선택되었다. 비교를 위해 반응벽체에 쓰이는 영가철과 건설재료로 쓰이는 torpedo sand도 같이 실험하였다.

주물사와 torpedo sand를 통과하는 침투속도는 유효 공극계수가 총 공극계수와 같다고 가정한 후 계산되었

Table 3. Experimental Conditions for Column Leaching Tests

Medium	Clay (%)	Total Iron (%)	TOC (%)	Method	V_s^a (cm/s)	ρ_d^b (Mg/m ³)	n^c	n_e^d
Sand 1	5.1	2.83	1.5	LMR ^f	5.97×10^{-4}	1.43	0.45	0.45
				CB ^g	6.87×10^{-4}	1.49	0.43	0.43
Sand 2	7.0	0.15	2.6	CB	1.89×10^{-3}	1.49	0.40	0.40
Sand 4	10.5	0.29	0.5	CB	1.89×10^{-3}	1.49	0.40	0.40
Sand 10	4.7	0.14	2.5	CB	4.85×10^{-4}	1.32	0.49	0.49
				CB	7.44×10^{-4}	1.31	0.51	0.51
Sand 12	4.7	11.26	2.4	CB	6.94×10^{-4}	1.41	0.48	0.48
				CB	8.71×10^{-4}	1.39	0.49	0.49
Iron	N.A. ^e	100	N.A.	CB	6.74×10^{-4}	2.12	0.72	0.45
				LMR	1.10×10^{-3}	1.94	0.75	0.47
				CB	1.99×10^{-3}	2.09	0.73	0.46
Torpedo Sand	N.A.	N.A.	0.4	LMR	6.95×10^{-4}	1.56	0.41	0.41
				LMR	9.33×10^{-4}	1.48	0.44	0.44
				CB	1.71×10^{-3}	1.47	0.44	0.44

^a Seepage velocity, ^b Dry density, ^c Total porosity, ^d Effective porosity, ^e N.A. = Not applicable. ^f LMR = Mass leaching ratio approach, ^g Concentration-basis approach.

다. 실제로 주물사의 건조 밀도가 1.60 Mg/m³보다 작을 시에는 유효 공극계수와 총 공극계수가 같은 값을 나타 내었다. 하지만 영가철의 경우엔 유효 공극계수가 총 공극계수에 비해 훨씬 적은 값을 보였다(Sosnowski 1996).

이 실험에 사용된 용액은 Madison tap water이고 사용 전 질소 개스를 이용해 용존산소를 제거하였다.

가. 실험장치

사용된 실험장치가 Fig. 2에 나타나 있다. 2가지 종류의 유리컬럼(200 mm length and 25 mm diameter 또는 450 mm length and 25 mm diameter)을 사용하였고 peristaltic 펌프를 사용하여 용액을 아래에서 위로 주입 하였다. 용액 샘플링은 배출구에 설치된 테플론 백을 이용하여 행하였다.

나. 분석

샘플은 질산을 이용하여 pH 2이하로 만든 후 냉장고에 4°C에서 보관하였다. 분석은 Graphite furnace AA를 이용하여 실행하였다(USEPA 7000A).

다. 데이터 해석

컬럼테스트로부터 얻어진 데이터는 Shackelford와 Glade(1997)가 제안한 analytical mass leaching model을 이용하여 해석하였다. 이 모델은 advection-dispersion-reaction-equation(ADRE)을 기반으로 만들어졌다.

Cumulative mass approach인 경우, 배출수는 주어진 시간동안 계속 테플론 백에 담겨져 있고, 여기서 측정된 농도는 주어진 시간동안의 평균농도(C_e)가 된다. 이 기간동안의 질량 증가(Δm)는 평균농도에 그 기간동안 배출된 부피를 곱함으로써 얻어진다. 이 과정을 여러 번 반복하면서 각 기간동안의 질량 증가를 구한 후 이를 초기의 컬럼에 있는 총 질량(M_0)으로 각각 나누어 준다. 이 값들을 연속적으로 합하고(normalized cumulative

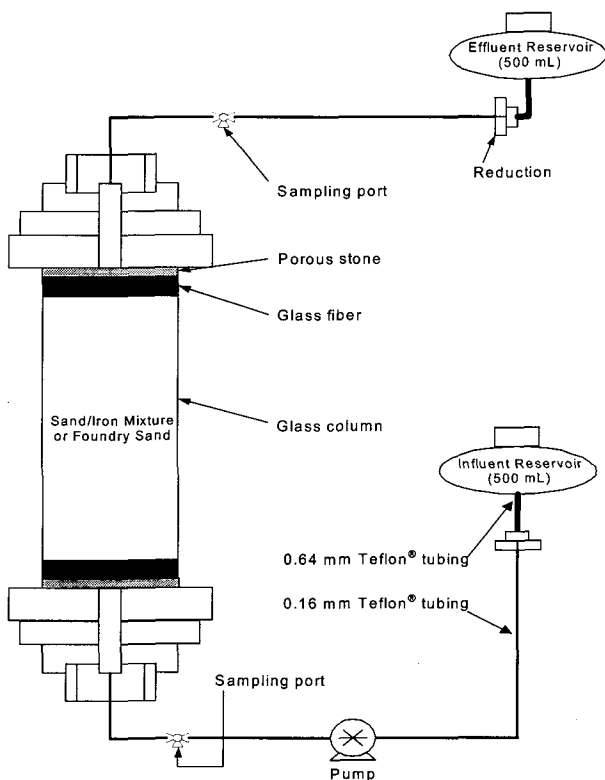


Fig. 2. Schematic of a Column Leach Test

mass leach ratio, LMR) 이를 pore volume에 대해 그래프에 나타낸다. LMR은 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$LMR = \sum \frac{(\Delta m)}{M_0} \quad (1)$$

LMR을 ADRE 형태로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$LMR = \frac{T}{R} - \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{T}{R} - 1 \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{R - T}{2(TR/P_L)^{1/2}} \right) + \left(\frac{T}{R} + 1 \right) \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left(\frac{R + T}{2(TR/P_L)^{1/2}} \right) \right\} \quad (2)$$

여기서 T는 leached pore volume of flow, R은 retardation factor, P_L 은 column peclot number를 의미한다.

농도를 기준으로 한 경우는 아래와 같은 식으로 표시된다.

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{R - T}{2(TR/P_L)^{1/2}} \right) + \exp(P_L) \operatorname{erfc} \left(\frac{R + T}{2(TR/P_L)^{1/2}} \right) \right\} \quad (3)$$

Nonlinear least-squares regression 해석을 이용하여 식 (2)와 (3)을 각각의 데이터에 fitting하여 원하는 변수를 구하였다.

3.4 투수계수 실험

길이 200 mm 직경 25 mm의 유리컬럼을 이용하여 주물사의 투수계수를 측정하였다. 실험은 Fig. 3에서와 같이 정수두 방법을 이용하여 행하였다. 주물사는 3개의 층으로 나누어져서 컬럼에 넣어졌으며 각 층에 15번 또는 20번의 붓을 이용한 다짐을 하여 밀도를 달리 하였다. Madison tap water를 이용하여 동수경사를 가하였고 그 값은 4에서 28까지 주물사에 따라 달리 주었다. 실험은 투수계수 값이 일정해 지고 유입수와 배출수의 양이 같아 질때까지 행하였다.

4. 결 과

4.1 용출실험

가. 금속이온

주물사에 대한 water leach tests의 결과는 Table 4에

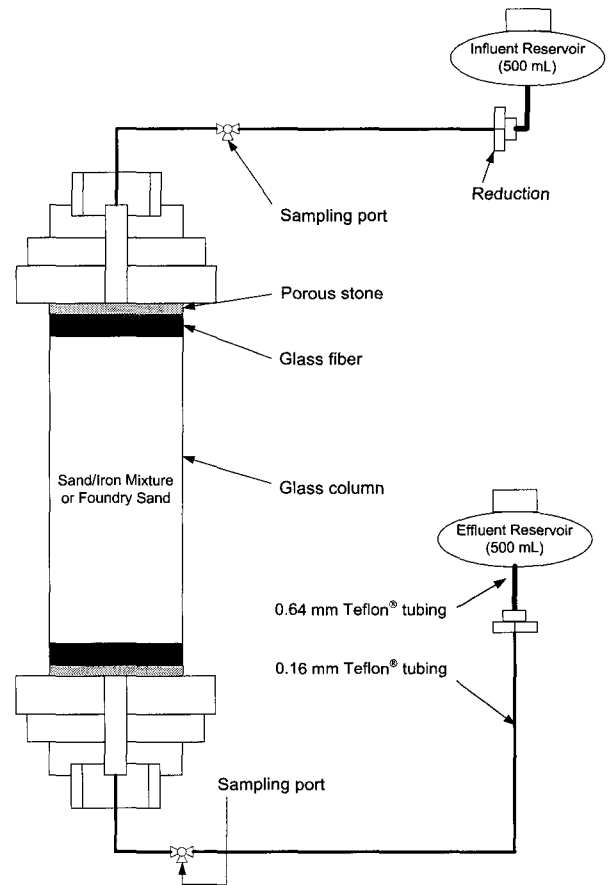


Fig. 3. Schematic of a Constant Head Test

NR 538에서 제안한 Category 1 standard와 같이 나타나 있다. 총 18개의 metal의 농도가 측정되었고 Category 1 standard를 초과하는 경우는 굵은 문자로 나타나 있다.

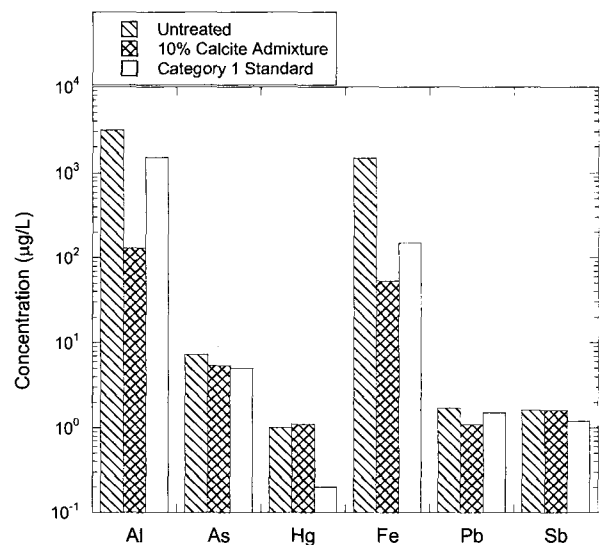


Fig. 4. Concentrations of Al, As, Hg, Fe, Pb, and Sb from Water Leach Tests on Sand 4 with and without 10% Admixture of Calcite

Table 4. Metal Concentrations ($\mu\text{g/L}$) from Water Leach Tests (Metals) on Foundry Sands, Fill, Torpedo Sand, and Peerless Iron. Numbers in Parentheses Next to Atomic Symbol are NR 538 Cat. 1 Standards in $\mu\text{g/L}$. Numbers in Bold Indicate Exceedences of Cat. 1 Standard

Sample	Be (0.4)	Al (1500)	Cr (10)	Mn (25)	Fe (150)	Ni (20)	Cu (130)	Zn (2500)	As (5)
Sand 1	0.1	250.4	1.1	4.4	91.6	1.8	12.4	2.3	3.5
Sand 1 ^a	0.1	252.5	1.1	4.6	95.8	1.6	12.3	2.4	4.1
Sand 2	0.1	1876.0	1.6	8.1	658.6	2.0	13.5	5.7	4.2
Sand 3	0.1	376.0	2.2	2.1	163.8	0.9	8.4	2.3	2.6
Sand 4	0.2	3131.0	2.5	17.4	1483.4	3.1	17.1	8.8	7.3
Sand 5	0.1	1257.6	1.9	8.0	376.2	3.0	15.4	5.9	4.2
Sand 6	<0.1	859.5	1.0	5.7	234.0	2.2	17.9	2.4	1.1
Sand 7	<0.1	183.6	0.5	12.4	515.0	1.9	3.2	1.7	1.7
Sand 8	0.5	2060.6	1.7	7.1	486.8	2.4	15.0	2.9	2.1
Sand 9	0.1	240.5	1.7	66.2	415.5	7.0	11.2	57.0	0.6
Sand 10	<0.1	851.1	1.9	9.6	256.0	2.0	20.6	4.4	4.3
Sand 11	0.1	1217.0	2.3	5.7	342.5	1.6	12.2	5.0	7.5
Sand 12	<0.1	89.4	0.8	2.7	128.2	1.6	13.3	1.1	0.3
Fill	0.2	137.7	1.2	5.7	91.7	2.6	208.4	24.0	<0.2
Sand 4 ^b	0.1	128.6	1.6	12.1	53.0	10.4	34.6	14.2	5.4
Peerless Iron	<0.1	22.0	13.1	136.5	230.5	14.8	9.0	7.1	6.9
Torpedo Sand	<0.1	141.84	1.41	3.2	7.72	1.29	3.58	<0.2	2.07

Sample	Se (10)	Mo (50)	Ag (10)	Cd (0.5)	Sb (1.2)	Ba (400)	Hg (0.2)	Tl (0.4)	Pb (1.5)
Sand 1	3.7	3.0	0.0	0.1	0.6	7.8	1.0	0.0	0.3
Sand 1 ^a	3.6	3.4	<0.02	0.1	0.6	7.9	1.1	<0.02	0.4
Sand 2	5.5	3.0	0.2	<0.03	0.2	12.3	0.8	0.0	0.9
Sand 3	<2.0	2.2	0.1	0.0	0.4	2.7	1.1	0.1	0.2
Sand 4	5.5	5.0	0.1	0.0	1.6	18.6	1.0	0.0	1.7
Sand 5	<2.0	3.3	<0.02	0.1	0.6	14.4	0.7	0.0	0.5
Sand 6	5.9	9.9	0.3	0.3	2.2	9.1	1.3	0.2	5.1
Sand 7	<2.0	1.2	0.4	<0.03	0.3	7.0	0.5	<0.02	1.4
Sand 8	<4	7.9	3.1	0.6	3.4	10.3	0.5	0.3	12.2
Sand 9	<2.0	2.4	0.3	0.4	0.3	11.1	0.5	0.1	5.3
Sand 10	<2.0	2.9	0.1	<0.03	0.5	10.1	0.5	0.0	0.3
Sand 11	<2.0	6.6	0.1	0.1	0.7	6.4	0.6	0.0	0.4
Sand 12	<2.0	6.0	<0.02	<0.03	0.2	4.5	0.4	<0.02	0.2
Fill	<4	0.3	0.2	1.1	1.6	7.1	1.0	0.1	32.1
Sand 4 ^b	<2.0	3.4	0.9	0.4	1.6	5.7	1.1	0.1	1.1
Peerless Iron	<2	6.8	0.1	0.5	19.4	24.8	0.7	0.3	15.0
Torpedo Sand	<2	0.33	<0.02	<0.03	0.18	7.11	1.1	0.04	0.08

^a Duplicate, ^b Admixture with 10% Calcite

초과되는 metal을 농도를 줄일 수 있는 방법중의 하나로 주물사 4를 선택하여 calcite(CaCO₃)를 무게의 10%가 되게 섞은 후 water leach test를 해하였고 결과는 Fig. 4에 나타나 있다. Al과 Fe은 standard 값 이하로 낮아졌고 Pb는 약간 감소하였으나 As, Hg, Sb는 변화를 보이지 않았다.

나. 음이온

5가지의 음이온(chloride, fluoride, nitrite and nitrate, sulfate)에 대해서 분석을 하였고 결과는 Table 5에 나타나 있다. Standard를 초과한 값은 굵은 문자로 표시되어 있다.

Table 5. Anion Concentrations (mg/L) from Water Leach Tests on Foundry Sands, Fill, Torpedo Sand, and Peerless Iron. Numbers in Parentheses Next to Atomic Symbol are NR 538 Cat. 1 Standards in mg/L. Numbers in Bold Indicate Exceedances of Cat. 1 Standard

Material	Anion Concentration (mg/L)				
	Cl (125)	F (0.8)	NO ₂	NO ₃ (2.0)	SO ₄ (125)
Sand 1	3.2	0.2	< 0.05	0.7	9.5
Sand 2	6.0	0.4	< 0.05	0.8	11.7
Sand 3	5.6	0.4	< 0.05	0.7	4.0
Sand 4	6.6	0.5	< 0.05	0.7	10.4
Sand 5	5.7	0.4	< 0.05	0.9	12.3
Sand 6	8.4	0.9	< 0.05	< 0.1	18.1
Sand 7	3.0	0.4	< 0.05	0.03	2.0
Sand 8	7.8	0.9	< 0.05	< 0.1	12.8
Sand 9	2.5	0.6	< 0.05	0.03	2.7
Sand 10	4.5	0.3	< 0.05	0.7	9.6
Sand 11	4.9	0.5	< 0.05	0.7	6.3
Sand 12	6.4	0.7	< 0.05	0.7	7.5
Fill soil	4.0	0.4	< 0.05	< 0.1	1.9
Iron	0.7	1.9	<0.05	<0.1	N.A.
Torpedo sand	3.4	2.6	<0.05	<0.1	0.24

다. Total elemental analyses

(1) 금속이온

5가지의 metal(As, Be, Cr⁶⁺, Sb, Tl)에 대해 분석을 하였고 결과는 Table 6에 나타나 있다. 이외에 산화-환원 반응에 영향을 줄 수 있는 3가지 metal(Cu, Fe, Zn)에 측정을 하였고 이는 Table 7에 요약되어 있다.

(2) Polynuclear Aromatic Hydrocarbons(PAHs)

PAHs에 대한 결과는 Table 8에 요약되어 있다. 주물사가 건조되었을 때와 수분을 함유할 때의 두가지에 대해서 실험을 행하였고 standard를 초과한 경우는 굵은 문자로 표시되어 있다.

Table 6. Metal Concentrations (μ g/kg) from Total Elemental Analyses on Twelve Foundry Sands, Fill, Torpedo, and Peerless Iron. Numbers in Parentheses Next to Atomic Symbol is NR 538 Cat. 1 Standard in μ g/kg. Numbers in Bold Indicate Exceedances of Cat. 1 Standard

Material	As (42)	Be (14)	Cr (14500)	Sb (6300)	Tl (1300)
Sand 1	239	253	2,915	6	29
Sand 2	160	373	6,389	4	38
Sand 3	962	179	2,527	5	41
Sand 4	729	320	6,729	16	82
Sand 5	459	310	5,444	4	36
Sand 6	564	310	4,805	11	53
Sand 7	2,883	149	51,497	41	23
Sand 8	1,050	459	8,997	7	60
Sand 9	2	14	3,219	928	4
Sand 10	512	292	4,420	4	46
Sand 11	555	285	1,501	4	47
Sand 12	585	298	66,374	19	35
Fill soil	794	96	2,832	4	17
Iron	6,490	20	198,770	70	24,290
Torpedo sand	1,560	140	7,600	10	27,700

Table 7. Concentrations of Cu, Fe, and Zn from Total Elemental Analyses on Foundry Sands

Foundry Sand	Copper (mg/kg)	Iron Fraction		Zinc (mg/kg)
		mg/kg	% Iron by Weight	
Sand 1	41.2	28,253	2.83	34.6
Sand 2	11.4	1546	0.15	9.4
Sand 3	4.4	11,928	1.19	35.8
Sand 4	2.0	2851	0.29	0.2
Sand 5	5.8	1370	0.14	20.6
Sand 6	11.6	1627	0.16	15.4
Sand 7	2.6	6491	0.65	10.6
Sand 8	5.4	7820	0.78	1.0
Sand 9	15.0	1167	0.12	0.0
Sand 10	13.2	1378	0.14	18.4
Sand 11	3.6	1849	0.18	29.6
Sand 12	182	112,563	11.26	26.6

Table 8. Summary of PAH Concentrations ($\mu\text{g/kg}$) from Total Elemental Analyses

Compound	Cat.1 standard	Foundry Sand											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Acenaphthene (wet)	900,000	ND	ND	ND	*D<61	ND	ND	*D<30	*D<61	*D<150	*D<150	*I<140	ND
Acenaphthene (dry)		*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Acenaphthylene	8800	*LML ND	*LML ND	*LML ND	*LML*D<84	*LML ND	*LML ND	*LML*D<130	*LML*D<84	*LML*D<210	*LML*D<210	*LML*D<210	*LML ND
Acenaphthylene		*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Anthracene	5,000,000	17	36	ND	*I<70	*I<16	13	120	*I<70	*I<130	87	110	15
Anthracene		17	37	*E	*E	*E	13	120	*E	*E	88	110	15
Benz(a)anthracene	88	39	62	ND	*I<120	*I<35	*I<40	*I<250	*I<230	*I<230	*I<300	*I<300	*I<60
Benz(a)anthracene		39	63	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Benzo(a)pyrene	8.8	30	*I<60	ND	*I<80	*I<15	ND	*I<120	*I<78	*I<140	*D<200	*D<200	*I<24
Benzo(a)pyrene		30	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Benzo(b) fluoranthene	88	65	*I<120	ND	*I<230	*I<50	*I<70	*I<250	*I<180	*I<300	*I<300	*I<260	*I<60
Benzo(b) fluoranthene		66	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Benzo(ghi)perylene	880	58	110	ND	160	39	*I<50	*I<220	*I<180	280	*D<230	*I<310	*I<70
Benzo(ghi)perylene		58	110	*E	170	39	*E	*E	*E	290	*E	*E	*E
Benzo(k)fluoranthene	880	27	26	ND	*D<80	ND	*I<15	*I<60	*I<80	*D<200	*D<200	*D<200	*I<18
Benzo(k)fluoranthene		27	27	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Chrysene	8,800	44	*I<80	ND	*I<150	*I<25	*I<15	*I<160	*I<120	*I<150	*I<160	*I<180	*I<40
Chrysene		44	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Dibenzo(ah)anthracene	8.8	*I<20	*I<20	ND	*I<60	ND	*I<30	*I<48	*I<32	*D<100	*D<80	*D<80	*I<14
Dibenzo(ah)anthracene		*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Fluoranthene	600,000	*I<140	*I<160	ND	*I<330	*I<60	*I<40	*I<300	*I<230	*I<300	*I<300	*I<400	*I<70
Fluoranthene		*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Fluorene	600,000	ND	*I<40	ND	*I<160	ND	ND	*I<190	*I<260	*D<650	*D<650	*I<180	*I<60
Fluorene		*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
Indeno(123-cd)pyrene	88	56	69	ND	*D<170	*I<40	*I<100	*I<220	*I<130	*D<350	*D<320	*D<320	*I<50
Indeno(123-cd)pyrene		57	70	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E
2-methyl naphthalene	8,800	220	820	4.1	1400	490	550	8700	2300	3500	5800	9800	610
2-methyl naphthalene		220	830	4.1	1400	490	560	8800	2300	3600	5900	9900	610
Naphthalene	600,000	530	1200	20	1200	510	900	4100	1900	2300	4000	4600	710
Naphthalene		540	1200	20	1200	510	910	4100	1900	2400	4100	4600	720
Phenanthrene	880	160	450	78	920	160	110	900	740	900	720	880	170
Phenanthrene		160	460	78	920	160	110	910	740	930	730	890	170
Pyrene	500,000	51	50	ND	*I<270	*I<50	*I<30	*I<240	*I<180	*I<200	*I<180	*I<230	*I<60
Pyrene		51	51	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E	*E

Note: ND = Not detected, E = the dry weight concentration for the compound could not be determined, I = due to the interferences, the report limit of the compound interest is elevated to the level that is identified, LML MD = the laboratory matrix spike exceeds the lower quality control limit for the compound (LML) and the compound is not detected (ND), LML D = the laboratory matrix spike exceeds the lower quality control limit for the compound (LML), but the compound is detected.

4.2 NR 538에 따른 주물사의 분류

주물사와 fill soil, torpedo sand, 영가 철에 대한 NR 538에 따른 분류가 Table 9에 나타나 있다. 모든 물질은 Category 2로 분류가 되었다. 앞의 결과에서 보면 주물사에서 용출된 오염물은 3가지의 기준 물질에서의 오염물과 거의 흡사한 농도를 나타내고 있음을 알 수 있고 많은 경우에 더 낮은 농도의 오염물이 나옴을 알 수 있다.

4.3 투수계수

투수계수 실험 결과는 Table 10에 나타나 있다. 투수

계수는 주물사에 포함된 clay의 양과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다(Fig. 5). 점토의 양이 증가함에 따라 투수계수는 감소하고 같은 점토 함량일 경우 건조 밀도가 증가함에 따라 낮은 투수계수 값을 보이고 있다. 대부분의 주물사는 투수계수 값이 10^{-4} cm/s인 대수층에 쓰일 수 있고 이보다 더 투수계수가 높은 대수층인 경우는 굵은 입자를 추가로 넣어 줌으로써 투수계수를 높일 수 있다. 이의 증명을 위해 주물사 10에 대해서 영가 철을 넣었을때의 투수계수 값을 측정하였다(Fig. 6). 철의 양이 증가함에 따라 투수계수도 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Table 9. Categorization in Accordance with NR 538

Materials	Metals		Anions	PAHs	Summary
	Water Leach Test	Total Elemental Analysis			
Sand 1	2	2	1	1	2
Sand 2	2	2	1	1	2
Sand 3	2	2	1	2	2
Sand 4	2	2	1	1	2
Sand 5	2	2	1	1	2
Sand 6	2	2	2	1	2
Sand 7	2	2	1	2	2
Sand 8	2	2	2	2	2
Sand 9	2	1	1	1	2
Sand 10	2	2	1	2	2
Sand 11	2	2	1	1	2
Sand 12	2	2	1	1	2
Fill soil	2	2	1	1	2
Iron	2	2	2	1	2
Torpedo sand	2	2	2	1	2

Table 10. Summary of Hydraulic Conductivity Tests Including Dry Density and Clay Content

Soil	Clay Content (%)	Dry Density (Mg/m ³)		Hydraulic Conductivity (cm/sec)	
		Low	Moderate	Low	Moderate
Sand 1	5.1	1.31	1.48	1.56×10^{-3}	1.00×10^{-4}
Sand 2	7.0	1.34	1.46	2.30×10^{-3}	1.20×10^{-4}
Sand 3	7.5	1.35	1.47	6.00×10^{-4}	6.50×10^{-5}
Sand 4	10.5	1.26	1.49	9.40×10^{-7}	1.40×10^{-7}
Sand 5	8.4	1.34	1.42	2.80×10^{-4}	1.20×10^{-4}
Sand 6	6.6	1.36	1.64	4.00×10^{-4}	7.00×10^{-5}
Sand 7	6.2	1.38	1.5	3.90×10^{-4}	1.40×10^{-5}
Sand 8	7.4	1.38	1.61	3.80×10^{-6}	1.20×10^{-7}
Sand 9	0	1.51	1.65	2.70×10^{-2}	8.60×10^{-3}
Sand 10	4.7	1.34	1.45	5.40×10^{-4}	1.00×10^{-4}
Sand 11	13	1.26	1.41	9.20×10^{-7}	4.40×10^{-7}
Sand 12	4.7	1.32	1.49	1.90×10^{-3}	6.50×10^{-5}

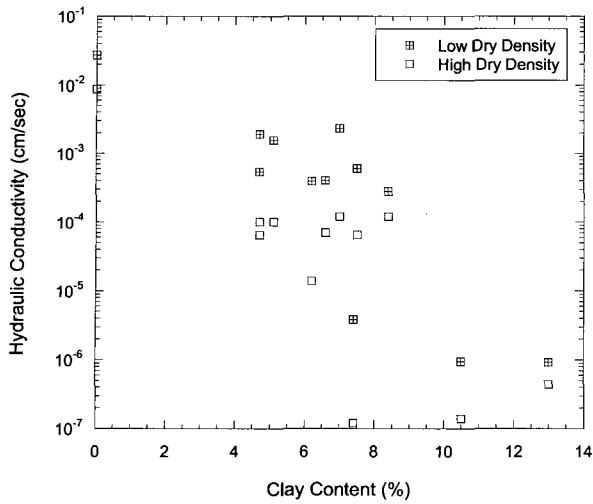


Fig. 5. Hydraulic Conductivities of Foundry Sands as a Function of Clay Content and Dry density

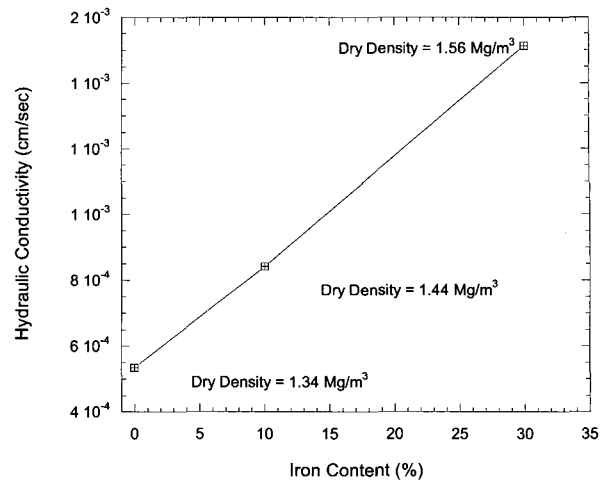


Fig. 6. Increases of Hydraulic Conductivity of Sand 10 when Peerless Iron was Mixed to Increase the Reactivity and Hydraulic Conductivity

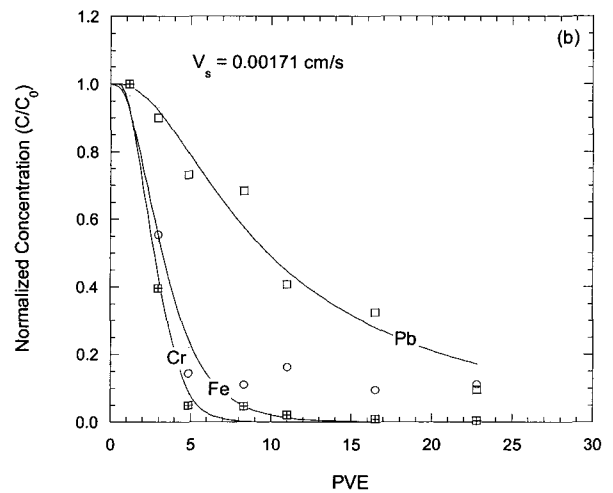
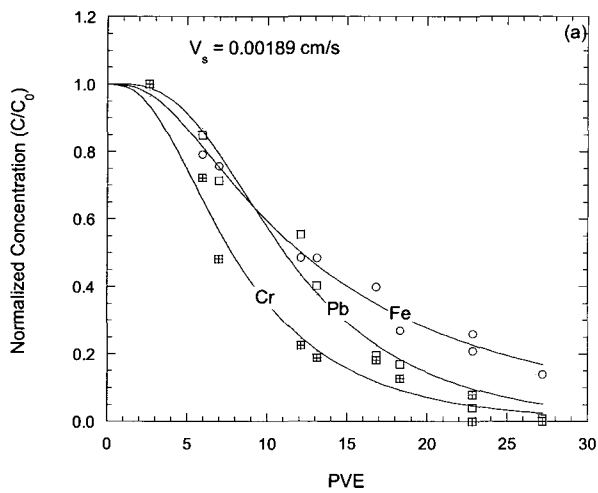


Fig. 7. Elution Curves for Cr, Fe, and Pb for (a) Sand 2 and (b) Torpedo Sand. Curves Corresponds to Eq. 3.27 Fit Using Instantaneous Concentrations

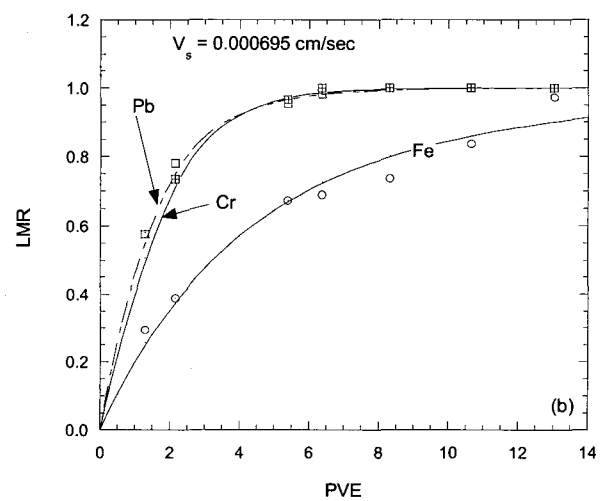
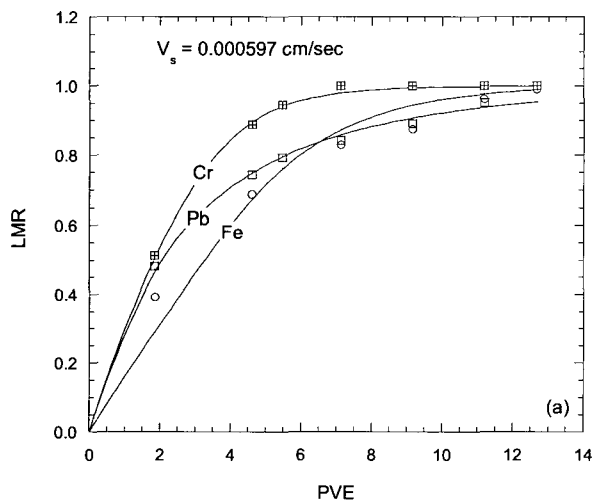


Fig. 8. Elution Curves for Cr, Fe, and Pb for (a) Sand 1 and (b) Torpedo Sand. Model Fit was Conducted Using Cumulative Mass Leaching Ratio

4.4 컬럼용출실험

주물사와 2개의 기준 물질(영가 철과 torpedo sand)에서 나온 배출수로부터 Cr, Fe과 Pb를 측정하였다. 이에 대한 대표적인 용출곡선이 Fig. 7과 8에 나타나 있다. 용출 특성 규명을 위해 앞에서 설명한 두가지 방법을 이용하였다. 농도를 이용한 용출곡선은 Fig. 7에 cumulative mass leaching ratio(LMR)을 이용한 경우는 Fig. 8에 각각 나타나 있다.

농도를 이용한 해석방법의 경우 1 pore volume이 경과한 후에 측정된 농도를 초기 농도로 가정하였다. LMR인 경우는 실험기간 중에 용출된 금속의 양을 모두 합산한 후 이를 총 용출량으로 가정하였다.

모델 fitting으로부터 얻어진 Dispersion coefficient와 partition coefficient는 Table 10에 요약되어 있고 컬럼 실험으로부터 얻어진 최대 최소 농도는 Table 11에 나타나 있다. Table 10으로부터 두가지 해석방법으로부터 얻어진 Dispersion coefficient와 partition coefficient는 흡사한 값을 가짐을 알 수 있다.

가. 분배계수

주물사의 경우 Cr과 Pb에 대한 분배계수는 거의 흡사하였고 철에 대해선 약간 낮은 값을 보이고 있다. 영가 철과 torpedo sand의 경우 Cr, Fe, Pb에 대한 분배계수는 주물사의 값과 비슷하거나 낮은 값을 보이고 있다.

주물사의 특성(clay content, iron content, and TOC)이 분배계수에 미치는 영향을 규명하기 위해 multivariate regression 해석을 실시하였고 이때 얻어진 경험식은 아래에 나타나 있다.

$$K_{p, Fe} = - 11.5 + 1.32 C + 0.87 I + 0.05 TOC \quad (4)$$

여기서 $K_{p, Fe}$ 은 철에 대한 분배계수, C는 점토 함량(%), I는 총 Fe 함량(%), TOC는 total organic carbon content (%)를 나타낸다.

나. Dispersion Coefficient

Dispersion coefficient로부터 계산된 dispersivity와 예측된 값(0.1L)이 Table 12에 나타나 있다. 예측 값은 컬럼길이의 10%와 같다고 가정 후 예측하였고 앞의 계산 값은 dispersion coefficient를 침투속도로 나눔으로써 계산되었고 비교값은 Table 12에 나타나 있다. 모든 경우에 있어 예측과 계산 값이 비슷한 결과를 보이고 있으나 주물사 12의 경우는 예측 값보다 훨씬 큰 결과가 나왔다. 이는 주물사 12가 다른 주물사에 비해 훨씬 많은 양의 철을 포함하고 있기 때문에 용출특성을 desorption만으로는 설명할 수가 없고 dissolution도 같이 고려해야만 함을 알 수 있다. 이 dissolution 현상 때문에 철의 농도가 빨리 줄지 않고 계속해서 용출된다고 예상된다. 이 현상을 설명하기 위해 일반적인 dispersivity와 partition

Table 11. Results of Column Leach Tests: Dispersion Coefficient, Partition Coefficient, Maximum and Minimum Concentrations for Fe, Cr, and Pb

Medium	Method	V_s (cm/s)	Fe				Cr				Pb			
			D^a (cm^2/s)	K_p^b (L/kg)	C_{max}^c ($\mu g/L$)	C_{min}^d ($\mu g/L$)	D (cm^2/s)	K_p (L/kg)	C_{max} ($\mu g/L$)	C_{min} ($\mu g/L$)	D (cm^2/s)	K_p (L/kg)	C_{max} ($\mu g/L$)	C_{min} ($\mu g/L$)
Sand 1	LMR ^f	5.97×10^{-4}	1.12×10^{-3}	1.7	- ^e	-	1.45×10^{-3}	0.8	-	-	8.11×10^{-3}	0.6	-	-
	CB ^g	6.87×10^{-4}	7.26×10^{-3}	1.1	720	48	-	-	-	-	3.73×10^{-4}	0.3	22	0
Sand 2	CB	1.89×10^{-3}	1.20×10^{-2}	4.3	2,309	321	6.75×10^{-3}	2.3	15.8	0	4.91×10^{-3}	3.2	35.8	0.29
Sand 4	CB	1.89×10^{-3}	2.34×10^{-3}	3.9	2,322	139	1.70×10^{-2}	3.6	28.6	1	6.00×10^{-3}	1.3	42.1	0
Sand 10	CB	4.85×10^{-4}	4.61×10^{-4}	0.7	823	11	-	-	-	-	4.45×10^{-4}	0.7	12.1	0.9
	CB	7.44×10^{-4}	3.17×10^{-3}	1.3	1,123	106	-	-	-	-	-	-	-	-
Sand 12	CB	6.94×10^{-4}	3.52×10^{-2}	10.7	415	123	-	-	-	-	3.76×10^{-4}	0.6	11.8	0.1
	CB	8.71×10^{-4}	4.19×10^{-2}	9.1	873	323	-	-	-	-	-	-	-	-
Peerless Iron	CB	6.74×10^{-4}	6.17×10^{-4}	0.5	1,200	56	-	-	-	-	-	-	-	-
	LMR	1.10×10^{-3}	7.76×10^{-4}	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CB	1.99×10^{-3}	1.93×10^{-2}	2.1	635	38	1.08×10^{-3}	0.5	38.9	0	7.88×10^{-3}	1.3	8.2	0.66
Torpedo Sand	LMR	6.95×10^{-4}	8.23×10^{-3}	1.0	-	-	2.31×10^{-3}	0.4	22.4	0	4.19×10^{-3}	0.2	6.2	1.4
	LMR	9.33×10^{-4}	4.78×10^{-3}	0.9	-	-	-	-	-	-	9.21×10^{-4}	0.3	7.7	0
	CB	1.71×10^{-3}	6.03×10^{-3}	1.8	278	27	2.19×10^{-3}	0.7	20.5	0	1.68×10^{-2}	1.1	11.0	1.1

^a Dispersion coefficient, ^b Partition coefficient, ^c Maximum concentration ($\mu g/L$), ^d Minimum concentration ($\mu g/L$), ^e Hyphens indicate that measurements were not made, ^f Mass leaching ratio approach, ^g Concentration-basis approach.

Table 12. Comparisons of Longitudinal Dispersivity Obtained from Estimation and Model Fit

Medium	V_s (cm/sec)	α_L^a (Estimated) (cm)	Method	α_L (Eqs. 3.26–3.27) (cm)		
				Fe	Cr	Pb
Sand 1	5.97×10^{-4}	1.9	LMR ^c	1.9	2.4	13.6
Sand 1	6.87×10^{-4}	1.9	CB ^d	10.5	N.A. ^b	0.6
Sand 2	1.89×10^{-3}	1.5	CB	6.3	3.6	2.6
Sand 4	1.89×10^{-3}	1.5	CB	1.2	9.0	3.2
Sand 10	4.85×10^{-4}	2.9	CB	1.0	N.A.	0.9
Sand 10	7.44×10^{-4}	2.9	CB	4.3	N.A.	N.A.
Sand 12	6.94×10^{-4}	2.0	CB	50.7	N.A.	N.A.
Sand 12	7.26×10^{-4}	1.9	CB	20.9	N.A.	0.5
Sand 12	8.71×10^{-4}	1.9	CB	48.1	N.A.	0.5
Iron	4.19×10^{-4}	1.8	LMR	0.9	N.A.	N.A.
Iron	6.90×10^{-4}	2.0	CB	0.7	N.A.	N.A.
Iron	1.26×10^{-3}	1.9	LMR	9.8	0.5	4.0
Torpedo Sand	6.95×10^{-4}	1.9	LMR	11.8	3.3	6.0
Torpedo Sand	9.33×10^{-4}	2.0	CB	5.1	N.A.	1.0
Torpedo Sand	1.71×10^{-3}	2.0	LMR ^f	3.5	1.3	9.8

^a Longitudinal dispersivity, ^b N.A. = Not applicable, ^c Mass leaching ratio approach, ^d Concentration-basis approach.

coefficient 값을 사용했고 이 결과는 Fig. 9에 나타나있다. 이때 모델식은 실험결과의 앞부분에서는 잘 맞았으나 뒤의 dissolution 현상에 대해서는 맞지 않았다.

다. Required Pore Volumes to Meet MCLs

얼마만큼의 pore volume이 지난 후에 metal의 농도가 MCL이하가 되는 지(PVER)에 대한 값이 Table 13에 정리되어 있다. Cr과 Pb의 경우는 항상 MCL이기 때문에 PVER 값은 0이다. 그와 대조적으로 철의 경우엔 실험 초기엔 농도가 MCL이상이었다.

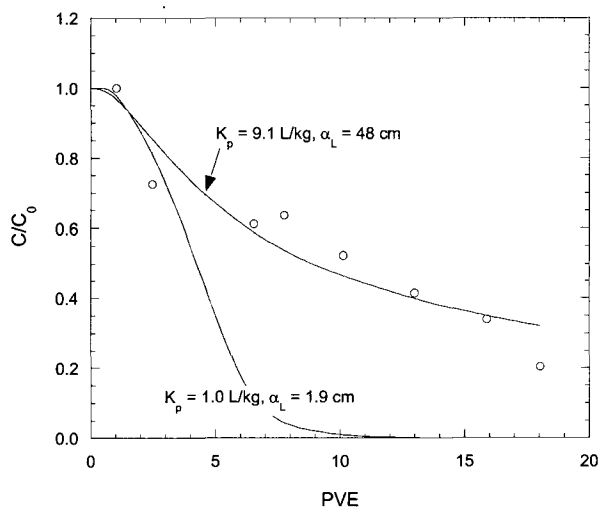


Fig. 9. Elution Data for Fe for Sand 12 and Curves for Eq. 3.27 Using Fitted K_p and L (9.1 L/kg , $\alpha_L = 48 \text{ cm}$) and Typical K_p and α_L (1.0 L/kg , $\alpha_L = 1.9 \text{ cm}$)

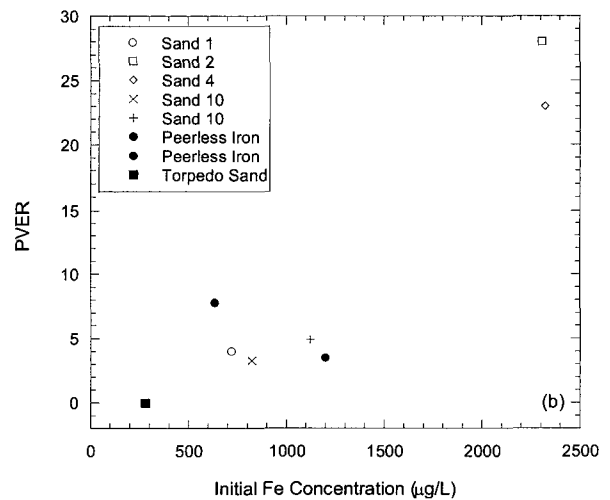
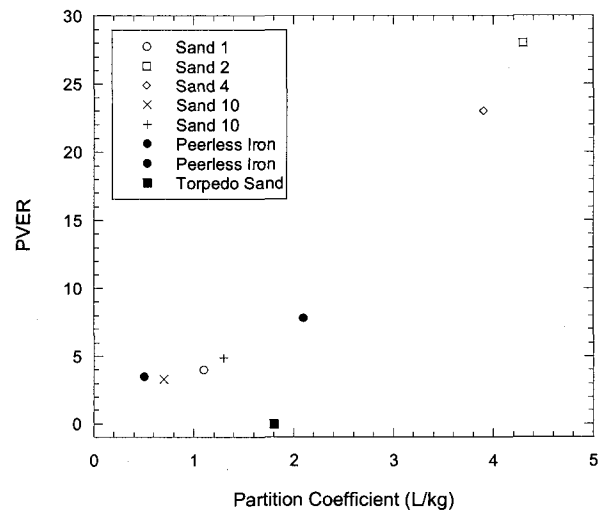


Fig. 10. Relationship Between PVER and (a) Partition Coefficient and (b) Initial Fe Concentration

Table 13. Partition Coefficients, Maximum Concentrations, and Required Pore Volumes of Effluent Required (PVER) to Meet MCLs for Fe, Cr, and Pb for Foundry Sands, Peerless Iron, and Torpedo Sand

Medium	V _s (cm/sec)	Fe (300 μg/L) ^a			Cr (100 μg/L)			Pb (50 μg/L)		
		K _P ^b	C _{max} ^c	PVER ^d	K _P	C _{max}	PVER	K _P	C _{max}	PVER
Sand 1	6.87×10 ⁻⁴	1.1	720	4	0.8	N.A. ^e	0	0.3	22	0
Sand 2	1.89×10 ⁻³	4.3	2,309	28	2.3	15.8	0	3.2	35.8	0
Sand 4	1.89×10 ⁻³	3.9	2,322	23	3.6	28.6	0	1.3	24.7	0
Sand 10	4.85×10 ⁻⁴	0.7	823	3.3	N.A.	N.A.	N.A.	0.7	12.1	0
	7.44×10 ⁻⁴	1.3	1,123	4.9	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Sand 12	7.26×10 ⁻⁴	10.7	415	2.6	N.A.	N.A.	N.A.	0.6	11.8	0
	8.71×10 ⁻⁴	9.1	324	2.5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.93	0
Peerless Iron	4.19×10 ⁻⁴	0.5	1,200	3.5	0.5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1.26×10 ⁻³	2.1	635	7.8	0.4	38.9	0	1.3	8.2	0
Torpedo Sand	1.71×10 ⁻³	1.8	278	0	0.7	20.5	0	1.1	11.0	0

^a MCL, ^b Partition coefficient, ^c Maximum effluent concentration (μg/L), ^d Required pore volume of effluent to meet MCL, ^e N.A. = Not applicable.

철에 대한 PVER 값은 2.5에서 28 사이로 다양하게 나타났고 이는 초기의 철 농도와 분배계수와 밀접한 관계가 있다(Fig. 10). Regression 해석으로부터 이 관계를 설명하는 식 (6)을 얻었다.

$$PVER = -6.53 + 3.81 K_P + 0.00711 C_{IN} \quad (6)$$

여기서 C_{IN}은 초기의 배출수에서의 철의 최고 농도를 의미한다(μg/L).

라. Comparison Between Water Leach Tests and Column Leach Tests

Table 14에 컬럼실험에서 얻은 초기의 Cr, Fe, Pb 농도와 batch 실험에서 얻은 3가지 금속의 농도가 요약되

어져 있다. 컬럼실험에서의 농도는 항상 batch 실험 결과 보다 높았고 이는 단순히 solid-solution ratio만으로는 설명이 되지 않았다. 따라서 두 가지 실험을 연관시키기 위해 regression 해석을 하였고 결과는 식 (7)~(9)에 나타나 있다.

$$C_{Fe, column} = 3.214 C_{Fe, wlt} + 158.6 \quad (7)$$

$$C_{Pb, column} = 12.78 \ln(C_{Pb, wlt}) + 32.9 \quad (8)$$

$$C_{Cr, column} = 9.17 \ln(C_{Cr, wlt}) + 16.11 \quad (9)$$

여기서 C_{Fe, column}은 컬럼실험에서 측정된 초기의 철의 농도(μg/L)이고 C_{Fe, wlt}는 용출실험에서 얻어진 철의 농도(μg/L)이다.

용출실험에서 얻어진 금속의 농도와 주물사의 특성과

Table 14. Concentrations of Fe, Cr, and Pb from Column Tests and Water Leach Tests. Concentrations from Column Tests are the Maximum Concentration at the Onset of the Test

Medium	Fe (μg/L)		Cr (μg/L)		Pb (μg/L)	
	Column Test	Batch Test	Column Test	Batch Test	Column Test	Batch Test
Sand 1	720	96	N.A. ^a	1.1	22	0.4
Sand 2	2,309	659	15.8	1.6	36	0.9
Sand 4	2,322	1,483	28.6	2.5	42	1.7
Sand 10	823	256	N.A.	1.9	12	0.3
	1,123	256	N.A.	1.9	N.A.	0.3
Sand 12	415	128	N.A.	0.8	12	0.2
	324	128	N.A.	0.8	0.9	0.2
Peerless Iron	1,200	231	N.A.	13.1	N.A.	15
	635	231	38.9	13.1	8	15
Torpedo Sand	278	8	20.5	1.4	11	0.08

^a Not applicable

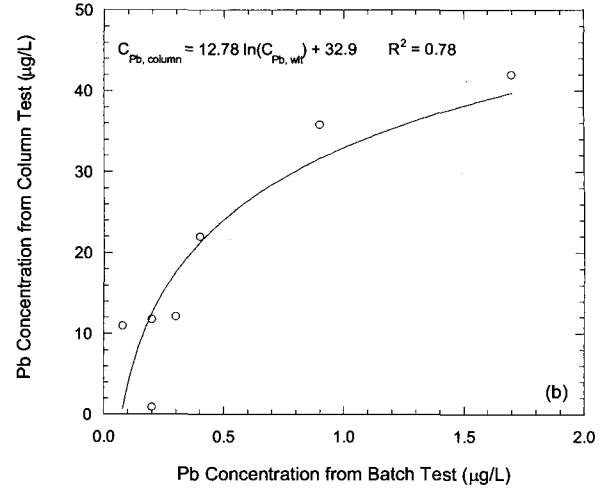
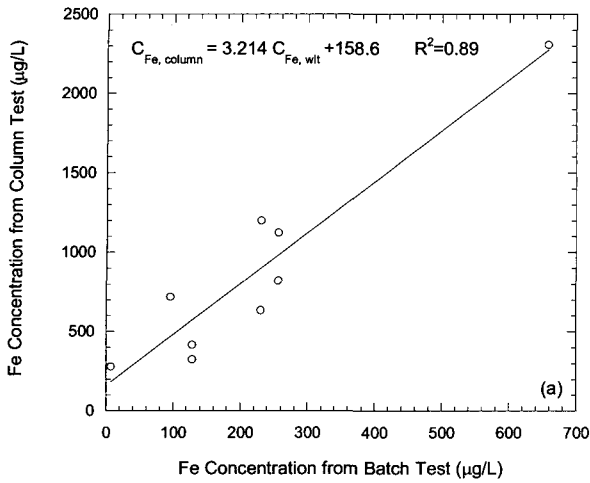


Fig. 11. Relationship Between Column Test and Batch Test: (a) Concentration of Fe (b) Concentration of Pb, and (c) Concentration of Cr

의 관계를 얻기 위해 다시 regression 해석을 하였고 이에 대한 결과가 식 (10)과 (11)에 나타나 있다. Cr의 경우는 충분치 않은 데이터로 인해 경험식을 얻지 못했다.

$$C_{Fe, wt} = -1115 + 120 C + 316 TOC \quad (10)$$

$$C_{Pb, wt} = -0.85 + 0.24 C - 0.01 I \quad (11)$$

4.5 PVER의 예측

PVER을 예측하는 과정이 Fig. 12에 나타나 있다. 주

물사의 특성중 점토, 총 철의 함량, TOC가 측정이 되면 식 (4)와 (5)를 이용해 Fe과 Cr에 대한 분배계수가 예측될 수 있고 용출실험을 행할 시의 Fe과 Cr의 농도는 식 (10)과 (11)로 예측된다. 실제 현장상황에서의 초기 농도(C_0 in 식 (3))는 식 (7)에서 (9)를 이용하여 계산되어진다. 다음으로 식 (3)을 이용하여 PVER을 계산한다. 위와 같이 예측된 주물사에 대한 PVER과 컬럼실험을 통해 측정된 PVER이 Fig. 13과 Table 14에 나타나 있고 이로서 예측된 값이 측정된 값과 아주 근사함을 알 수 있다.

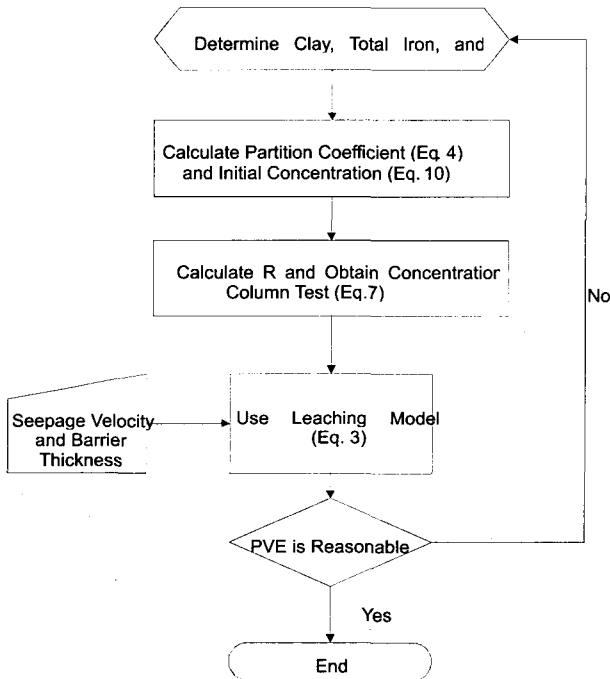


Fig. 12. Flow Chart to Estimate PVER Using Data from Water Leach Test

5. 요약 및 결론

용출실험과 total elemental analyses의 결과로서 실험

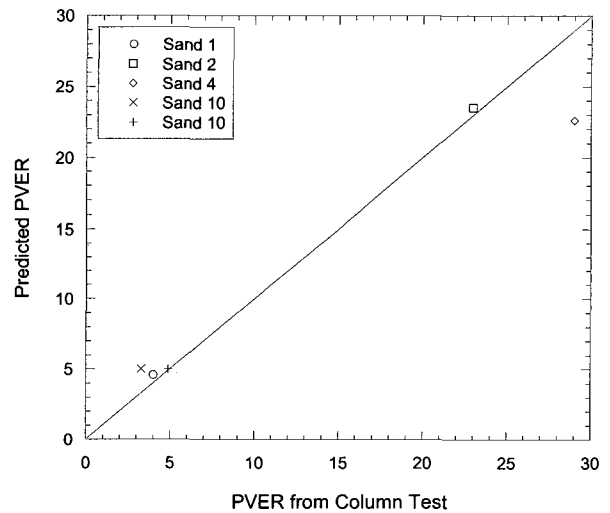


Fig. 13. Comparison of PVER for Fe Predicted Using Method in Sec. 8.5 and PVER from Column Tests (Table 8.5)

에 사용된 모든 주물사는 Category 2에 속했다. 그러나, 실험에 사용된 기준 물질들도 또한 Category 2로 분류가 되었다. 따라서, 주물사의 반응벽체에의 이용은 실제로 건설재료로 쓰이는 재료들과 비교시 더 큰 위험은 주지 않을 것으로 생각된다. 또한, 컬럼실험을 통해 Cr과 Pb는 항상 MCL이하였고 Fe의 경우는 실제 반응벽체에 쓰이는 영가 철과 비교시 실험에 사용된 한가지 주물사를 제외하곤 거의 흡사한 PVER 값을 나타내었다.

또한 PVER은 본 실험에서 구한 경험식을 이용하여 예측이 가능하였고 이 식들은 주물사에 포함된 기본적인 특성을 측정함으로써 예측이 가능하였다.

참 고 문 헌

1. Abichou, T., Benson, C., and Edil, T. (2000), "Foundry Green Sands as Hydraulic Barriers: Laboratory Study", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(12), 1174-1183.
2. Arnold, W. and Roberts, A. (1998), "Pathways of Chlorinated Ethene and Chlorinated Acetylene Reaction with Zn(0)", *Environmental Science and Technology*, 32(19), 3017-3025.
3. Benner, S., Blowes, D., and Ptacek, C. (1997), "A Full-Scale Porous Reactive Wall for Prevention of Acid Mine Drainage", *Ground Water Monitoring and Remediation*, 17(3), 99-107.
4. Blowes, D., Ptacek, C., Cherry, J., Gillham, R., and Robertson, W. (1995), "Passive Remediation of Groundwater Using In Situ Treatment Curtains", *Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics* (2), Daniel, D. and Acar, Y. (Eds.), ASCE, GSP 46, 1588-1607.
5. Eykholt, G. and Davenport, D. (1998), "Dechlorination of the Chloroacetanilide Herbicides Alachlor and Metolachlor by Iron Metal", *Environmental Science and Technology*, 32(10), 1482-1487.
6. Francis, A. and Dodge, C. (1998), "Remediation of Soils and Wastes Contaminated with Uranium and Toxic Metals", *Environmental Science and Technology*, 32(24), 3923-3998.
7. Javed, S. and Lovell, C. (1994), "Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction", Report JHRP/INDOT/FHWA-94/2J Final Report, Purdue School of Engineering.
8. Kershaw, D. and Pamucku, S. (1997), "Ground Rubber: Reactive Permeable Barrier Sorption Media", *In Situ Remediation of the Geoenvironment*, Evans, J. (Ed.), ASCE, GSP 71, 26-40.
9. Kim, J., Park, J., and Edil, T. (1997), "Sorptions of Organic Compounds in the Aqueous Phase onto Tire Rubber", *Journal of Environmental Engineering*, 123(9), 827-834.
10. Knocke, W. and Hemphill, L. (1981), "Mercury(II) Sorption by Waste Rubber", *Water Research*, 15(2), 275-282.
11. Koppensteiner, B. (1998), "The Degradation of the Herbicides Alachlor and Metolachlor by Iron Metal in Water and Soil Systems", *M.S. Thesis*, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison.
12. Moo-Young, H. and Zimmie, T. (1996), "Geotechnical Properties of Paper Mill Sludges for Use in Landfill Covers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 122(9), 768-775.
13. Rael, J., Shelton, S., and Dayaye, R. (1995), "Permeable Barriers to Remove Benzene: Candidate Media Evaluation", *Journal of Environmental Engineering*, 121(5), 411-415.
14. Roberts, A., Totten, L., Arnold, W., Burris, D., and Campbell, T. (1996), "Reductive Elimination of Chlorinated Ethylenes by Zero-Valent Metals", *Environmental Science and Technology*, 30(8), 2654-2659.
15. Rowley, A. and Husband, F., and Cunningham, A. (1984), "Mechanisms of Metal Adsorption from Aqueous Solution by Waste Tire Rubber", *Water Research*, 18(8), 981-984.
16. Shokes, T. and Möller, G. (1999), "Removal of Dissolved Heavy Metals from Acid Rock Drainage Using Iron Metal", *Environmental Science and Technology*, 33(2), 282-287.
17. Sosnowski, C. (1996), "Flow Performance and Chemical Profiles through Granular Iron under Anaerobic and Anoxic Conditions", *MS Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison.
18. Sparks, D. (1995), Redox Chemistry of Soils, Chapter 8, *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, San Diego, CA.
19. Starr, R. and Cherry, J. (1994), "In Situ Remediation of Contaminated Groundwater: The Funnel and Gate System", *Ground Water*, 32(3), 465-476.
20. Su, C. and Puls, R. (2001), "Arsenate and Arsenite Removal by Zerovalent Iron: Kinetics, Redox Transformation, and Implications for in Situ Groundwater Remediation", *Environmental Science and Technology*, 35(7), 1487-1492.
21. Thain, D. (1974), "Tire Rubber Removes Mercury from Process Stream", *Proc. 4th Annual Environmental Engineering and Science Conf.*, Louisville, KY, 369-386.

(접수일자 2002. 6. 28, 심사완료일 2002. 10. 8)