

## 주물사가 포함된 투수반응벽체(PRB)를 이용한 아연으로 오염된 지하수 처리기법 연구

### Remediation of Groundwater Contaminated with Zinc Using Permeable Reactive Barriers Containing Foundry Sands

이 태 윤\*<sup>1</sup> Lee, Tae-Yoon

Benson, Craig H\*<sup>2</sup>

박 재 우\*<sup>3</sup> Park, Jae-Woo

#### Abstract

Partition coefficients for zinc vary on a broad range depending on properties of the foundry sands (TOC, clay content, total iron content) and solution pH. Among these properties, solution pH was found to be the most important factor. Empirical equations were developed from batch tests to predict partition coefficients and rate constants as a function of foundry sand properties and solution pH. Rate constants obtained from batch (kinetic) tests and batch sorption tests were found to be comparable when the solution pHs were comparable.

#### 요 지

아연의 주물사에 대한 분배계수는 주물사에 포함된 TOC, 점토 함량, 총 철 함량 등에 따라 변하고 특히 용액 pH에 큰 영향을 받는 것을 관찰하였다. Batch 실험으로부터 얻어진 경험식으로부터 분배계수와 제거상수를 예측할 수 있었다. Batch kinetic 실험과 batch sorption 실험으로부터 얻어진 분배계수는 용액 pH가 같을 시 거의 같은 값을 보이고 있다.

**Keywords :** Batch kinetic test, Partition coefficient, Permeable reactive barriers, Rate constant

#### 1. 서 론

오염된 지하수처리기술로 각광을 받고 있는 투수반응벽체(permeable reactive barrier, 이하로는 PRB)는 그 간편성과 다양한 오염물질에 대한 적용성으로 인해 현재 광범위하게 연구되고 있다. PRB의 기본적인 원리는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 투수성이 큰 반응매체를 벽체내에 설치함으로써 오염된 지하수를 자연적으로 벽체 안으로 유도하고 필요한 반응을 벽체내에서 일어나

게 한다. 처리후 오염물질농도는 지하수 허용농도 이하로 감소되어야 한다.

PRB는 in-situ 처리이기 때문에 한번 설치 후 다른 처리기법에 비해 유지비용이 훨씬 적게 들어가게 된다. 하지만 많은 작은 오염지역들이 그 오염범위에 비해 처리비용이 많이 들어가기 때문에 PRB 설치를 어렵게 만드는 주된 원인이 되고 있다. 이중 PRB에 일반적으로 쓰이는 비싼 철의 값이 초기비용을 높이는 주요 원인이 되고 있다. 이에 철과 동등한 오염처리능력

\*1 정회원, 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.)

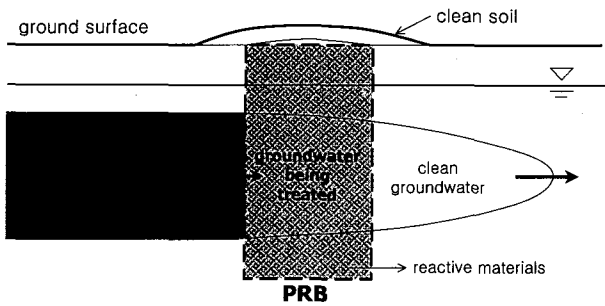
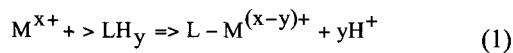


Fig. 1. Schematic of a PRB

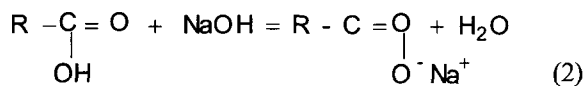
을 가지면서 값싼 PRB 재료로서의 가능성을 보인 주물사가 중금속 중 오염된 토양과 지하수에 많이 발견되는 아연을 효과적으로 처리할 수 있는지를 여부를 batch와 column 실험을 통하여 알아보았다.

## 2. 이론적 배경

금속이온들의 유기성탄소와의 흡착은 H<sup>+</sup>와 metal acidic functional groups, L사이의 이온 교환으로 설명이 된다(McBride 1994):



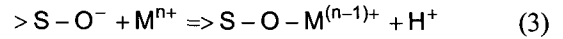
여기서 M<sup>x+</sup>는 금속이온을 L은 metal acidic functional group이다. 다양한 metal acidic functional group으로는 carboxyl(R-COOH), phenol(C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH), alcohol(R-CH<sub>2</sub>OH), enol(R-CH=CH-OH), ketone(R-CO-R), quinone(O=C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>=O), ether(R-CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>-R), and amino(R-NH<sub>2</sub>) 등이 있다(Stevenson 1982). 여기서 R은 alkyl group를 나타낸다. 금속이온의 base가 흡착반응에 고려될 시 유기성탄소와의 흡착은 주로 carboxylate group에서 이루어지고 아래와 같이 나타내어진다(McBride 1994):



NaOH가 위의 시스템에 투여되었을 때 carboxylate group에 있는 H<sup>+</sup>는 떨어져 나오고 대신 Na<sup>+</sup>이 carboxylate group에 흡착이 된다.

금속이온들의 유기성탄소와의 흡착성의 순서와 흡착의 세기는 유기성탄소의 electronegativity와 연관이 되어 있고 McBride(1994)에 의해 자세히 설명이 되어 있다. Surface complexation 반응에 의해 금속이온들은 또

한 metal oxide에 흡착이 된다. Metal oxide는 낮은 pH에서는 protonation에 의해 양전하를 높은 pH에서는 그와 반대로 음전하를 띠게 된다. 따라서 높은 pH에서는 금속이온들이 쉽게 metal oxide에 흡착이 된다. 이 반응은 아래와 같이 나타내어진다.



금속이온들의 metal oxide에의 흡착에 영향을 미치는 요소로는 용액의 pH, 금속이온의 농도, 표면성질, metal oxide의 종류가 있다(Sparks 1995). 실제로 많은 종류의 metal oxide들이 폐수처리공정에 있어서 중금속제거에 쓰여져 오고 있다. 여기서 쓰이는 공정들은 지하수처리공정에 있어서도 어려움 없이 적용이 될 수 있다. 예를 들면 Se(IV)과 Se(VI)는 aluminum oxide로 코팅된 모래로 제거가 되었고(Kuan et al. 1998) arsenic(III)와 arsenic(V)는 iron oxide로 코팅된 모래로 제거가 되었다(Joshi et al. 1996). Iron oxide와 organic carbon으로 Pb, Cu, Zn와 Cd을 효과적으로 제거하였다(Paulson 1999).

## 3. 실험방법 및 분석

### 3.1 실험 재료

위스콘신, 일리노이, 오하이오에서 생산되는 12개의 주물사를 사용하였고 각각의 주물사는 숫자 1부터 12까지 표시되었다. Fig. 2에 나타난 입도분포곡선에서 알 수 있듯이 각각의 주물사는 대부분이 가는 모래로 구성되어

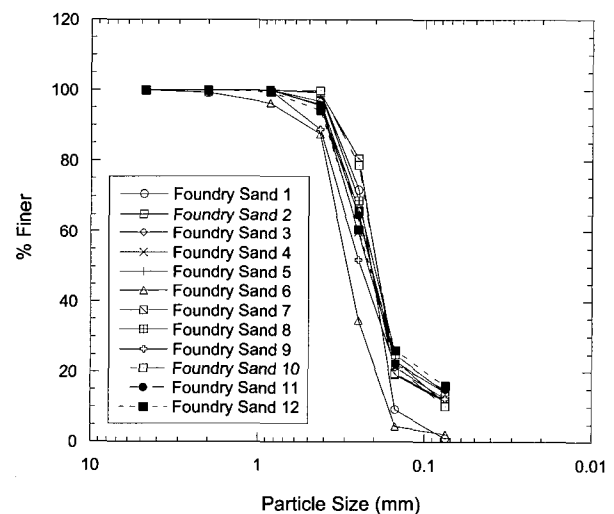


Fig. 2. Particle Size Distribution Curves for Foundry Sands

Table 1. Index Properties of Foundry Sands (from Abichou et al. 2000)

Foundry Sand	Binder Type	Particle Size (%)			Atterberg Limits <sup>b</sup>			USCS Classification	Specific Gravity
		P <sub>200</sub>	P <sub>2μm</sub>	Active Clay <sup>a</sup>	LL	PL	PI	USCS	
Sand 1	Clay	10.7	6.7	5.1	N.P. <sup>e</sup>	N.P.	N.P.	SP-SM	2.62
Sand 2	Clay	14.3	9.2	7	18	17	1	SM	2.53
Sand 3	Clay	11.3	7.7	7.5	20	18	2	SW-SM	2.52
Sand 4	Clay	13.2	9.3	10.5	23	19	4	SC-SM	2.63
Sand 5	Clay	12.4	8	8.4	23	18	5	SC-SM	2.54
Sand 6	Clay	10.2	5.2	6.6	20	17	3	SP-SM	2.61
Sand 7	Clay	10.9	4.5	6.2	18	14	4	SC-SM	2.72
Sand 8	Clay	11.1	6.2	7.4	26	20	6	SP	2.68
Sand 9	Chemical	4.3	2.9	N.A. <sup>d</sup>	N.P.	N.P.	N.P.	SP	2.64
Sand 10	Clay	10	3.5	4.7	N.P.	N.P.	N.P.	SP-SM	2.73
Sand 11	Clay	16	13.2	13	27	20	7	SM-SC	2.51
Sand 12	Clay	10	3.5	4.7	N.P.	N.P.	N.P.	SP	2.73

Table 2. Elemental Analysis of Iron Particles as Reported by Peerless Metal Powders and Abrasive Co. of Detroit, MI

Elements	% by Weight
Iron	92
Carbon	3.5
Manganese	1
Silica	2.5
Copper	1

있다. 사용된 주물사의 index property는 Table 1에 표시되어 있다(Abichou et al. 2000). 벤토나이트 함량은 0%에서 13%, 비중은 2.51에서 2.73까지 다양하게 포함되어 있다. TOC 함량은 0.5%에서 4.0%까지 측정되었다.

실험에 사용된 영가 철(zero-valent iron)은 미시간주 디트로이트에 위치한 Peerless Metal Powders and Abrasives Co.에서 구입되었다. 이 철의 평균 입자크기는 0.7 mm 이고 비표면적은 0.87 m<sup>2</sup>/g이다. 철의 순수도는 약 92%에서 95%이었고 구성성분들은 Table 2에 나타나있다.

Fisher에서 생산된 입상 아연철(97.8% 순도)을 질산으로 녹여서 이를 atomic absorption 기기의 검량선 작성에 사용하였다.

### 3.2 실험방법

#### 가. Batch Kinetic Tests

Batch sorption test에 앞서 필요한 반응 시간과 흡착 현상을 규명하기 위해 Batch kinetic test를 실시하였다.

실험에 사용된 주물사는 벤토나이트(0.8% to 4.0%)와 TOC(0% to 13%) 함량을 고려하여 선택되었다. 철의 함량은 0.1%에서 10%였다. 5g의 주물사와 100 mg/L zinc 용액을 포함한 50 mL 테플론용기를 회전 기계에 장착한 후 30 rpm의 속도로 회전시켰고 계획된 시간에 pH와 아연 농도를 측정하였다. 세가지의 다른 초기 pH 용액을 사용하여 zinc의 sorption kinetic에 미치는 영향과 아연침전의 양상을 연구하였다.

#### 나. Batch Sorption Tests

2g의 주물사와 다양한 농도의 아연 용액을 50 mL의 테플론 용기에 담아 30 rpm의 속도로 24시간동안 교반하였다. 각각의 실험에 있어서 초기 pH를 다르게 하였다. 이와 더불어 아연 용액만을 포함한 기준용액을 이용하여 초기농도를 구하였다(Zytner 1991). 실험 가와 나의 경우에 고체입자를 용액에서 분리시키기 위하여 8,000 rpm의 속도로 4 °C에서 20분 동안 원심 분리시켰다.

### 3.3 분석방법

아연 농도는 varian SpectraAA 800을 이용하여 측정하였다. 여기서 쓰인 방법은 USEPA Method 7950을 따랐다. Standard에 쓰인 stock 용액을 만들기 위해 analytical reagent grade의 1.000g 아연 금속을 10 mL의 농축 질산에 녹인 후 Type 1 증류수로 희석하여 1,000 mg/L의 아연 용액을 만들었다. 필요한 standard는 증류수로 희석하여 만들었으며 이때 농축질산을 넣어 항상 1% 부피

의 질산 농도를 유지하였다. 실험에서 나온 샘플의 경우에도 질산을 넣어 1% 부피의 질산 농도를 유지하였다. 이 실험에서의 아연의 검출한계는 0.01 mg/L였다. 모든 실험에서 pH buffer는 사용되지 않았고 초기 pH는 1.0 M 질산과 1.0 M sodium hydroxide를 이용하여 맞추었다. Batch test에 쓰인 아연 용액은 ZnCl<sub>2</sub>을 Type 1 증류수에 녹여서 사용하였다.

### 3.4 데이터 해석방법

#### 가. Batch Sorption Tests

아연의 주물사에 대한 분배계수는 실험을 통해 얻어진 데이터를 linear와 Freundlich isotherm models에 fitting을 시킴으로써 얻어졌다. 이 두 모델은 아래와 같이 표시된다.

$$C_s = K_p C_e \quad (4)$$

$$C_s = K_f C_e^{1/n} \quad (5)$$

여기서 C<sub>s</sub>는 주물사에 흡착된 아연의 농도(mg/kg), C<sub>e</sub>는 평형아연농도(mg/L), K<sub>p</sub>와 K<sub>f</sub>는 각각 linear와 Freundlich model에서의 분배계수를 나타낸다. 1/n은 zinc의 주물사에 대한 친화도를 나타낸다.

#### 나. Batch Kinetic Tests

아연의 mineral 표면에의 흡착을 고려한 first-order decay model(Koppensteiner 1998)을 이용하여 rate constant와 분배계수를 구하였다(식 (6)).

$$C_{aq}(t) = \frac{C_0}{R} \exp\left(-\frac{k_{obs} t}{R}\right) \quad (6)$$

여기서 C<sub>aq</sub>(t)는 어떤 시간에서의 아연 농도(mg/L), C<sub>0</sub>는 초기 아연 농도(mg/L), k<sub>obs</sub>는 bulk first-order rate constant(1/hr), 그리고 R은 아연의 철표면으로의 순간적 흡착량을 나타낸다. 실험에서 구한 데이터에 위의 모델을 fitting 시켜 R과 k<sub>obs</sub>을 구하였다. 여기에서 k<sub>obs</sub> 값은 흡착과 침전에 의한 아연의 시간에 따른 농도 감소를 의미한다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 Batch Kinetic Test

#### 가. 접촉 시간과 pH가 아연 제거에 미치는 영향

주물사와 상업용 철 모두의 경우에 아연의 농도는 초기 pH에 상관없이 접촉 시간이 증가함에 따라서 감소하였다(Figs. 3-5 참조). 특히 주물사의 경우에 실험 시작 10분 안에 모든 흡착이 일어났으며 접촉 시간이 늘어날수록 농도가 조금 감소되었고(pH 2.6과 3.0), pH 4.8의 경우 감소량은 앞의 낮은 pH의 경우보다는 증가되는 경향을 보이고 있다. 이 중 주물사 12의 경우 아연 제거 양상이 pH 3.0과 4.8의 경우 상업용 철과 비슷한 양상을 보이고 있다.

#### 나. pH의 변화

용액의 pH는 실험이 진행되는 동안 증가하였다가 평형상태에 도달하였다(Figs. 3-5). 초기 pH가 2.6인 경우

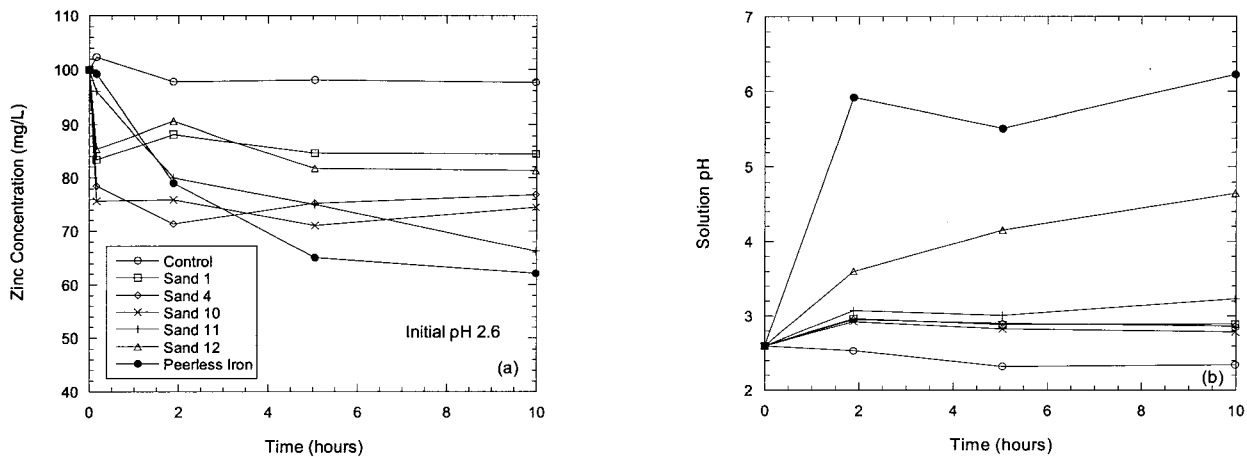


Fig. 3. Results of Batch Kinetic Tests at Initial pH 2.6: (a) Zinc Concentration and (b) Solution pH

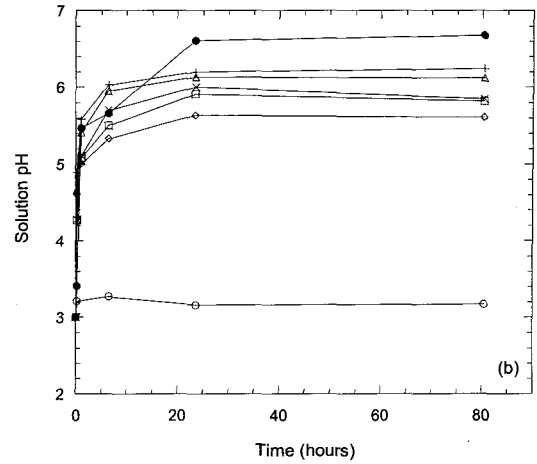
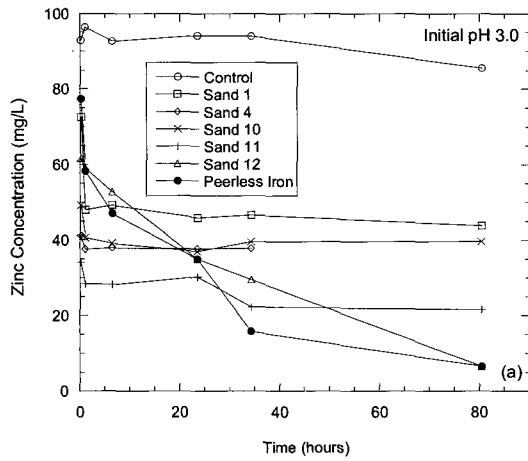


Fig. 4. Results of Batch Kinetic Tests at Initial pH 3.0: (a) Zinc Concentration and (b) Solution pH

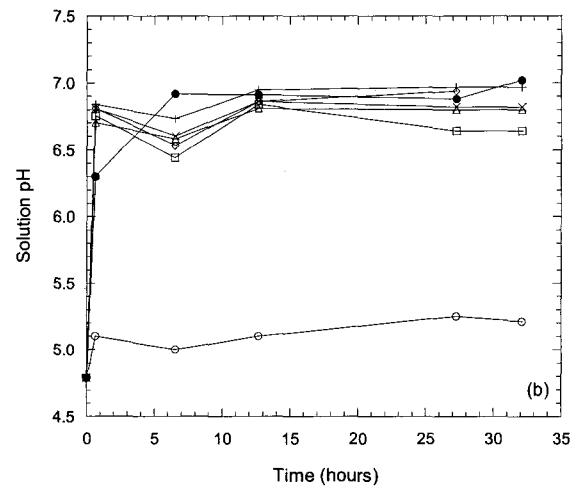
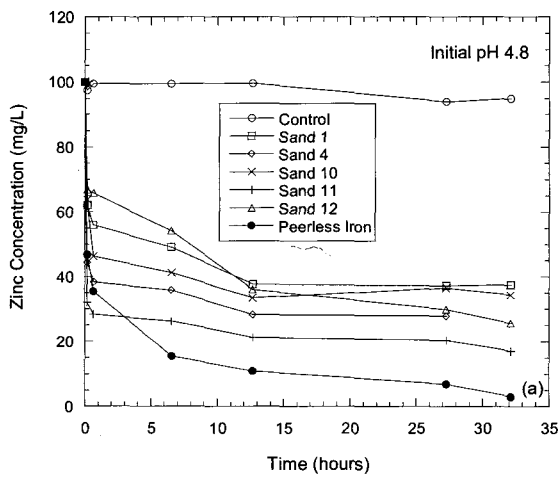
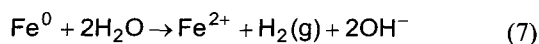


Fig. 5. Results of Batch Kinetic Tests at Initial pH 4.8: (a) Zinc Concentration and (b) Solution pH

대부분의 주물사의 경우 pH 3.0 이하에서 평형에 도달 하였으나 주물사 12의 경우 계속적으로 증가하여 실험 종료시에도 평형에 도달하지 않았다. 상업용 철의 경우에도 평형에 도달하지 않고 계속 증가하였다. 초기 pH가 3.0인 경우 실험 시작 10분만에 pH가 급격히 증가하였고 이후 조금 증가하였다가 20시간이 경과한 후에 평형에 도달하였다. 초기 pH가 4.8인 경우에도 pH가 3.0인 경우와 비슷한 결과를 나타내고 있다.

이러한 pH의 증가는 주물사에 포함되어 있는 carbonate minerals, exchangeable base cations, 및 decomposition of aluminosilicate minerals에 의한 buffering 때문으로 사료된다(McBride 1994). 상업용 철의 경우의 pH 증가는 철의 산화와 물의 환원반응으로 식 (7)로 설명이 된다.



#### 다. 흡착과 침전에 의한 아연의 제거

아연 제거 시 흡착과 침전의 영향을 규명하기 위하여 초기 pH를 달리 한 control test를 실시하였다. 이 실험에서는 아연의 제거가 침전에 의해서만 일어나도록 하기 위해 어떠한 반응체(i.e., 주물사 또는 상업용 철)도 사용되지 않았다. 초기 pH는 1.0 M의 HCl과 1.0 M의 NaOH를 이용하여 범위 3.0에서 10.0이 되도록 조절하였다.

침전에 의한 아연의 제거율이 초기 pH에 대해서 Fig. 6에 나타나 있다. 그림으로부터 아연의 침전이 pH 5와 6 사이에서 시작됨을 알 수 있다. 주물사와 상업용 철에 의한 제거율도 그림과 표에 나타나 있다. 결론적으로 pH가 5.5이하인 경우에 주물사에 의한 아연의 제거는 흡착에 의해 pH가 5.5보다 큰 경우에는 흡착과 침전에 의해 제거가 됨을 알 수 있다.

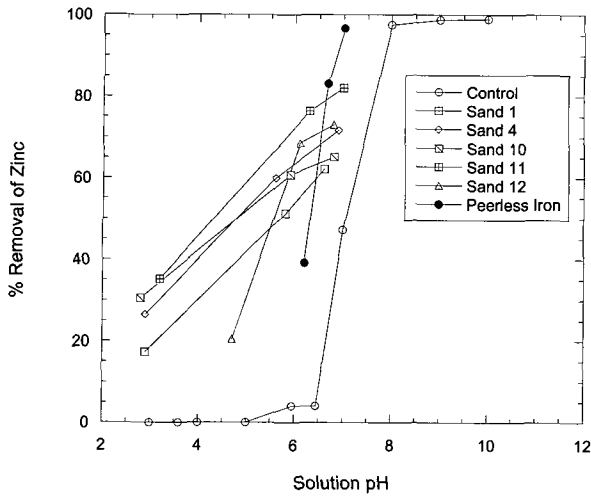


Fig. 6. Zinc Removal During Batch Kinetic Tests for Foundry Sands and Peerless Iron as a Function of Solution pH. Also Shown is Mass Removed During Serial Control Tests

#### 라. 아연의 제거율 상수와 순간 분배계수

아연의 first-order 제거율 상수와 순간 분배계수를 구하기 위해 식 (6)을 batch kinetic test로부터 구해진 데이터에 fitting하였다. 데이터와 model fit이 Fig. 7과 8에 나타나 있고 Table 3에 요약되어있다. 주어진 그림으로부터 아연의 제거율은 first-order임을 알 수 있다.

아연의 first-order 제거율 상수는 주물사의 점토 함량, 최종용액 pH, TOC, 그리고 총 철 함량이 증가함에 따라 같이 증가함을 알 수 있다(Fig. 9). 이 중 TOC와 총 철 함량은 점토와 pH의 영향에 비해 작음을 알 수 있다. 이 중 pH의 영향이 가장 크게 나와 있는데 이는 pH가 증가함에 따라 용액에 있는 아연이 zinc hydroxide 또는

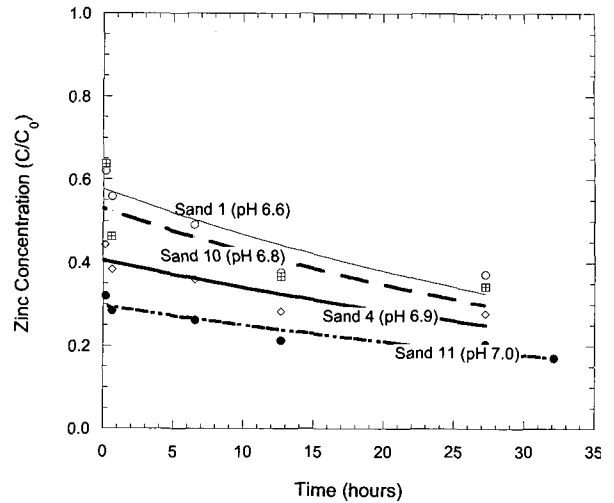


Fig. 7. Zinc Concentrations and Fits of Eq. 3.7 for Sands 1, 4, 10, and 11. The initial pH was 4.8

zinc oxide로 변환되어 용액속에서 제거가 되기 때문이다. 상업용 철에 의한 제거율 상수는 pH가 6.2일 때 주물사와 비슷한 값을 가졌으나 이보다 높은 pH에서는 약 6배가량 높은 값을 가졌다(Table 3).

아연 제거율 상수에 영향을 미치는 위의 4가지 요소를 정량적으로 나타내기 위해 multivariate regression 해석을 하였다. 여기서 쓰인 significance level은 0.05였다. 아래의 식 (8)은 위의 통계해석 결과를 보여주고 있다 ( $R^2=0.99$ ).

$$K_{obs} = -0.0852 + 0.00138 C + 0.00277 TOC + 0.00126 I + 0.0163 pH \quad (8)$$

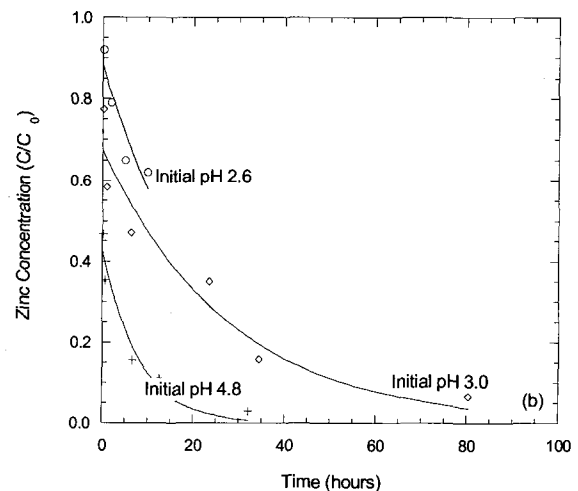
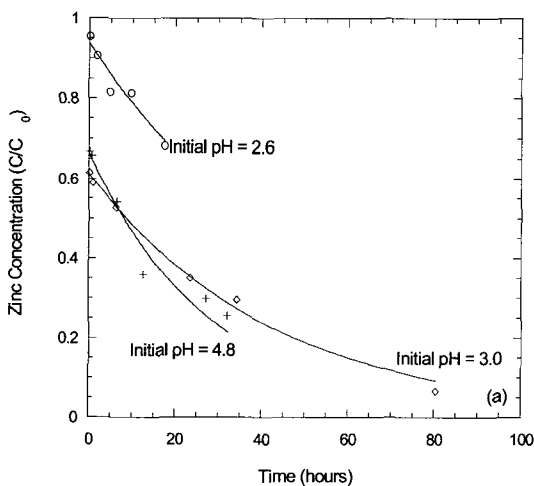


Fig. 8. Zinc Concentrations and Fits of Eq. 7 for (a) Sand 12 and (b) Peerless Iron

Table 3. Partition Coefficients and Rate Constants for Zinc Removal Using Foundry Sands and Peerless Iron

Medium	Clay (%)	TOC (%)	TIC (%)	Iron	K <sub>p</sub> (L/kg)	Rate Constant	Initial pH	Final pH
Sand 1	5.1	1.5	0	2.83	15.7	0.036	4.8	6.6
Sand 4	10.5	0.5	0.1	0.29	31.2	0.044	4.8	6.9
Sand 10	4.7	2.5	0.6	0.14	18.9	0.04	4.8	6.8
Sand 11	13	4	0.7	0.18	50.5	0.058	4.8	7
Sand 12	4.7	2.4	0	11.3	1.4	0.018	2.6	4.7
Sand 12	4.7	2.4	0	11.3	7.5	0.042	3	6.1
Sand 12	4.7	2.4	0	11.3	10.8	0.053	4.8	6.8
Iron	N.A. <sup>a</sup>	N.A.	N.A.	100	2.9	0.048	2.6	6.2
Iron	N.A.	N.A.	N.A.	100	10.2	0.054	3	6.2
Iron	N.A.	N.A.	N.A.	100	28.4	0.295	4.8	6.8

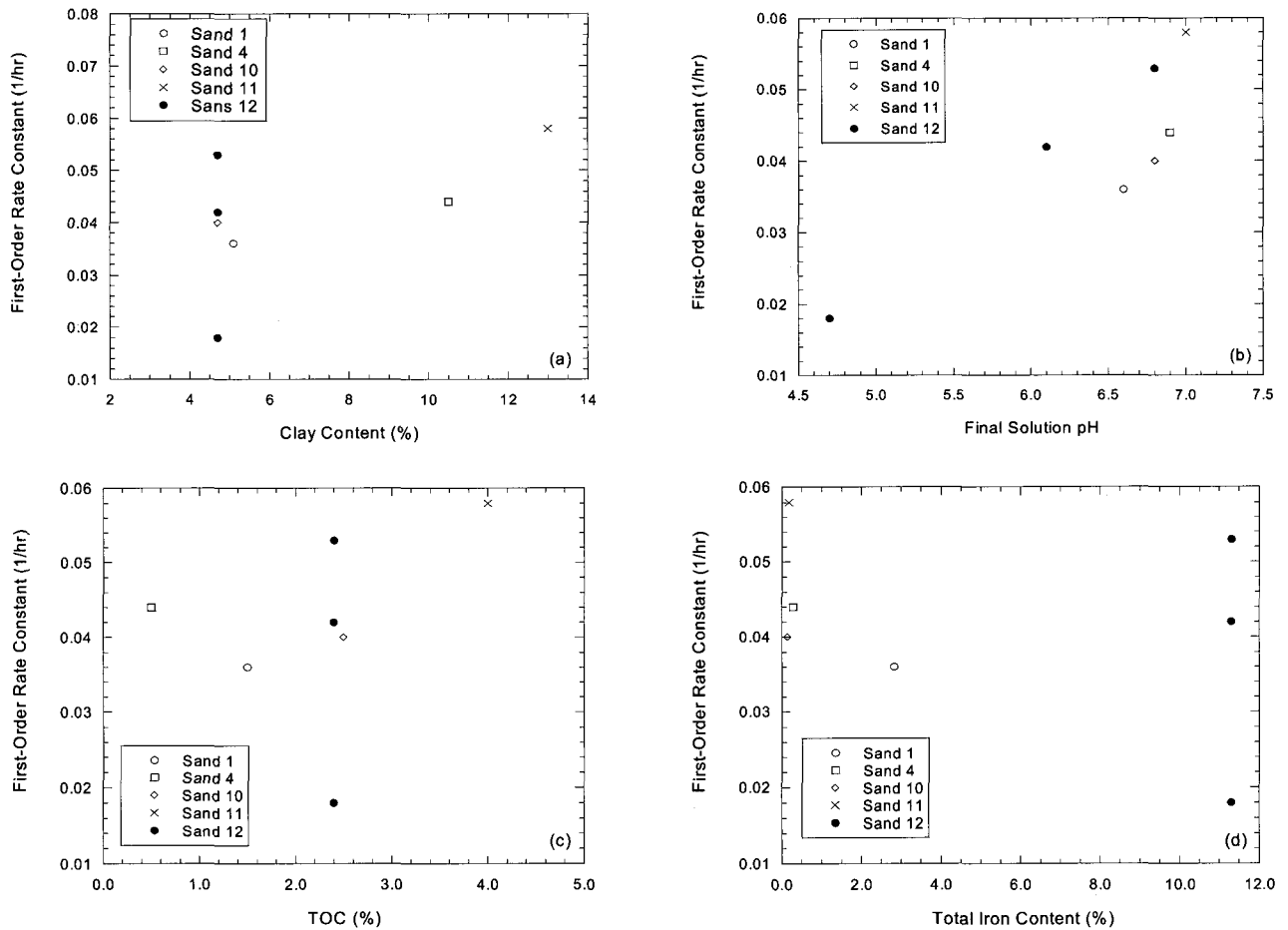


Fig. 9. First-Order Rate Constant as a Function of (a) Clay Content, (b) Final Solution pH, (c) TOC and (d) Total Iron Content (%)

여기서 C는 점토 함량(%), I는 총 철 함량(%)을 나타낸다.

순간 분배계수는 점토 함량과 최종 pH가 증가함에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다(Fig. 10). 이는 점토의 표면전하가 pH가 증가함에 따라 음전하를 가짐으로써 아연의 점토 표면으로의 흡착을 가속시킴을 알 수 있다.

점토와 최종 pH의 순간 분배계수에의 영향을 파악하기 위해 multivariate regression 해석을 실시하였고 식 9에 나타나있다( $R^2=0.97$ ).

$$\log K_p = -2.30 + 0.48 \text{ pH} + 0.048 C \quad (9)$$

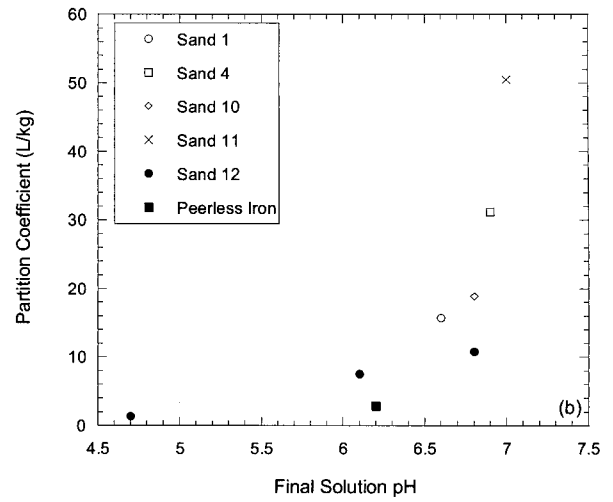
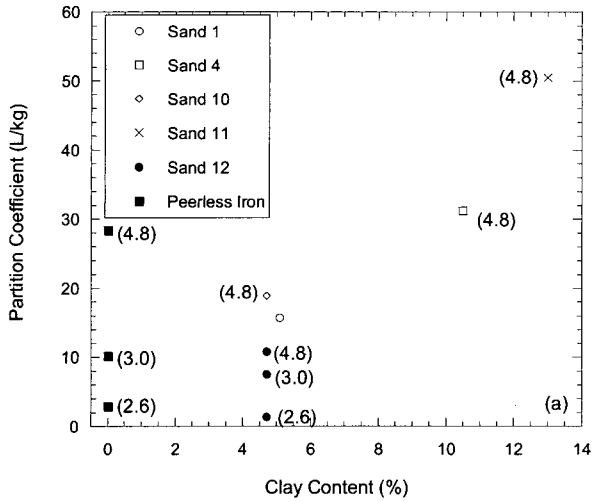


Fig. 10. Effect of (a) Clay Content and (b) Final Solution pH on the Instantaneous Partition Coefficient for Zinc. Numbers in Parentheses in (a) Represent Initial Solution pH

#### 4.2 Batch Sorption Test

Batch sorption test로부터 얻어진 흡착등온선(sorption isotherm)은 Fig. 11에 나타나 있다. Fig. 11에서 보듯이 농도 증가에 따라 흡착량은 비선형의 관계를 보이고 있고, 특히 낮은 농도에서는 비선형성의 양상이 심해짐을 알 수 있다. Linear와 Freundlich 모델을 이용해 구한 분배계수는 Table 4에 요약이 되어있다. 표에 명시된 방법 중 method 1과 2는 linear 모델을 이용하였으나 전자는 non-zero intercept과 후자는 forced zero intercept 방법을 이용하였다.

Batch sorption tests(method 1)로부터 얻어진 분배계

수와 식 (9)를 이용해 구한 분배계수는 거의 비슷한 값을 나타내었다(Fig. 12). 식 (9) 이용시 pH는 batch sorption test에서의 최종 pH를 이용하였다. 위의 결과에서 볼 수 있듯이 pH와 주물사의 점토 함량을 알면 식 (9)를 이용한 분배계수의 예측이 가능하리라 사료된다.

#### 5. 요약 및 결론

아연의 분배계수와 제거율 상수는 주물사에 포함된 TOC, 점토 함량, 총 철의 양과 용액의 pH에 영향을 받음을 알 수 있다. 이중 용액의 pH가 가장 중요한 변수임을 본 실험을 통해서 알 수 있었다. 또한 본 실험을 통해

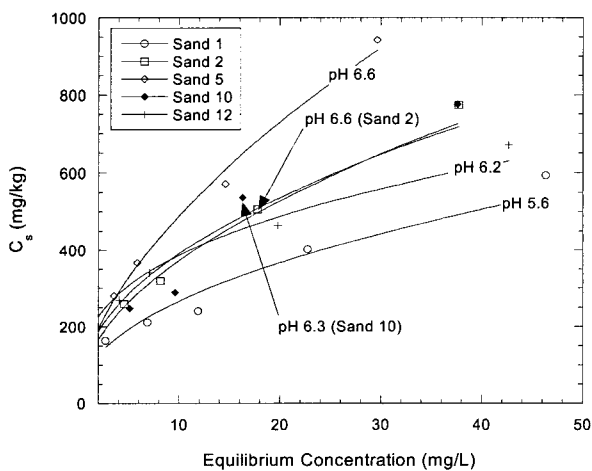


Fig. 11. Zinc Sorption Isotherms at Initial Solution pH 2.6. Numbers Adjacent to Data Correspond to Final pHs

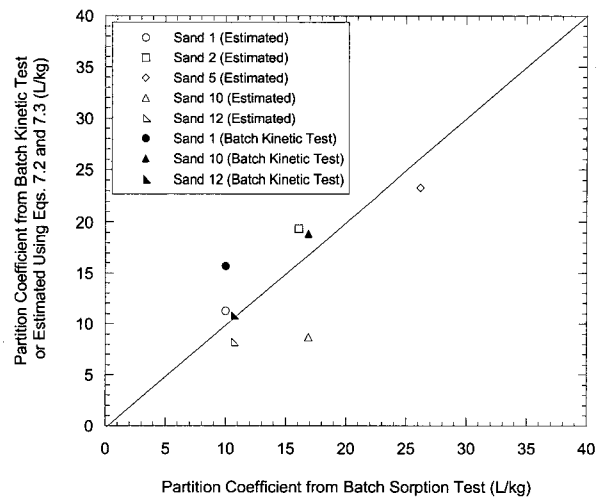


Fig. 12. Comparison of Partition Coefficients Obtained from Batch Sorption Tests and Batch Kinetic Tests



Table 4. Sorption Parameters of Freundlich Model for Zinc Sorption Using Sands 1, 2, 5, 10, and 12

Foundry Sand	Linear Model				Freundlich Model	
	Method 1 <sup>a</sup>		Method 2 <sup>b</sup>		1/n	R <sup>2</sup>
	K <sub>p</sub> (L/kg) <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>	K <sub>p</sub> (L/kg)	R <sup>2</sup>		
Sand 1	10	0.99	14.5	0.65	0.46	0.94
Sand 2	16.1	0.99	23.1	0.64	0.46	0.98
Sand 5	26.2	0.99	34.8	0.79	0.58	0.99
Sand 10	16.9	0.95	23.5	0.7	0.5	0.93
Sand 12	10.7	0.97	18.2	0.01	0.34	0.99

a Method 1 is fit of linear isotherm with non-zero intercept, b Method 2 is fit of linear isotherm with intercept forced to zero

서 얻어진 경험식을 이용하여 분배계수와 제거율 상수를 정확하게 예측할 수 있음을 밝혔다. 예측시 필요한 용액 pH와 주물사에 포함된 TOC, 철, 점토 함량은 비교적 쉽게 측정할 수가 있기 때문에 이들 변수들을 정확하게 알면 실제 현장에서의 아연 제거능을 실험실에서 간단하게 측정할 수 있다는 점에서 큰 의의를 가진다.

또한, 현재 폐기물로 지정된 주물사를 반응벽체 매체로 사용함으로써 아연을 비롯한 중금속 제거뿐만 아니라 현재 모자라는 매립장의 공간 절감에도 기여하리라 예상한다.

### 감사의 글

6년 동안 아낌없는 지도를 해주신 벤슨 교수와 재정적 지원을 해준 위스콘신 환경부에 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

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. Joshi, A. and Chaudhuri, M. (1996), Removal of Arsenic from Ground Water by Iron Oxide-Coated Sand, *Journal of Environmental Engineering*, 122(8), 769-771.
3. Kuan, W., Lo, S., Wang, M., and Lin, C. (1998), Removal of Se(IV) and Se(VI) from Water by Aluminum-Oxide-Coated Sand, *Water Research*, 32(3), 915-923.
4. McBride, M. (1994), *Environmental Chemistry of Soils*, Oxford University Press, New York, NY.
5. Paulson, A. (1999), Modeling Removal of Cd, Cu, Pb, and Zn in Acidic Groundwater during Neutralization by Ambient Surface Waters and Groundwaters, *Environmental Science and Technology*, 33(21), 3850-3856.
6. Sparks, D. (1995), Redox Chemistry of Soils, Chapter 8, *Environmental Soil Chemistry*, Academic Press, San Diego, CA.
7. Stevenson, F. (1994), *Humus Chemistry: Genesis, composition, reactions*. 2nd Ed. John Wiley and Sons, New York, NY.
8. Zytner, R. (1992), Adsorption-Desorption of Trichloroethylene in Granular Media, *Water, Air, and Soil Pollution*, 65: 245-255.

(접수일자 2002. 6. 18, 심사완료일 2002. 10. 8)