

《原著》

H 광산배수 내 미세부유물질 및 용해성 중금속의 제거를 위한 침전 및 여과 공법에 관한 연구

오민아¹ · 김원기¹ · 김덕민² · 이상훈³ · 이재영^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학부

²한국광해관리공단 광해기술연구소

³가톨릭대학교 환경공학전공

Settling and Filtering Process for the Treatment of Fine Suspended Solids and Soluble Heavy Metals in H Mine Drainage

Minah Oh¹ · WonKi Kim¹ · DukMin Kim² · SangHoon Lee³ · Jai-Young Lee^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

²Mine Reclamation and Technology Center, Mine Reclamation Corporation

³Department of Environmental Engineering, The Catholic University of Korea

ABSTRACT

Fine suspended solids generated effluence from treatment process of mine drainage could destroy environment as the aesthetic landscapes, and depreciate water quality. Therefore, the purpose of this research is focused on process development applied the actual field for controlling fine suspended solids and heavy metals, and so lab-scale test was performed for inducement of basic data. The mine drainage used in this research was sampled in H mine located Jeongseon-gun, Gangwon-do. Concentration of suspended solid, arsenic, iron and manganese was exceeded the standard of contaminant limitation for the clean water, and particle size of suspended solid was less than 10 μm as fine particle. Although hydraulic retention time of mine drainage for effective settling was required more than 6 hours, hydraulic retention time would be increased in winter season when the settling efficiency could be reduced because of viscosity decreasing. Moreover, installed inclination plate helped to increase settling efficiency of suspended solid about 48 %. Filtering media that was the most effective removal of suspended solids and heavy metal was decided granular activated carbon of 1~2 mm was the optimal size.

Key words : Mine drainage, Filtering, Settling, Fine suspended solid

서 론

우리나라를 비롯하여 전 세계적으로 많은 수의 광산들이 개발됨과 동시에 광물자원을 얻는 과정에서 자연경관을 훼손함은 물론 광업활동 중 발생하는 광해로 인한 토양, 수질 등의 환경오염을 발생시키게 되었다(Jang and Kwon, 2011). 선진국의 경우 1970년대부터 광해 문제의 발생을 심각하게 받아들이고 광해 복구를 위한 국가 주도의 계획 수립 및 법률의 제정 등 다양한 제도적 장치들을 마련, 시행해 오고 있다(Skousen and Ziemkiewicz,

1997). 최근 우리나라에서도 광해 문제를 효율적으로 관리 시행할 수 있는 기틀을 마련하고자 광해관리 전담 법규 및 이를 근거로 한 관리부를 발족하는 등 광해 문제의 근본적인 해결을 위해 노력해 오고 있으며, 광산지역의 광해 조사 및 대책 연구, 휴·폐광산의 오염상태에 관한 조사가 전국적으로 수행되고 있다(Kim et al., 2011a).

우리나라에는 전국에 걸쳐 4,800여개의 휴·폐광산이 분포하고 있으며, 이들 대부분은 오염방지시설이 제대로 갖추어지지 않은 채 방치되어 있어 광미나 폐석 적치장으

*Corresponding author : leejy@uos.ac.kr

원고접수일 : 2012. 11. 20 심사일 : 2012. 12. 4 게재승인일 : 2012. 12. 5
질의 및 토의 : 2013. 2. 28 까지

로부터 주변 농경지뿐만 아니라 하천, 지하수에까지 중금속을 포함한 각종 오염물질의 확산이 증폭되고 있는 실정이다(An et al., 2010). 또한, 휴·폐광산에서는 과거 채광이나 선광 및 제련과정 등의 활동으로 배출된 광산 폐기물들과 광산배수가 광산주변에 그대로 방치되어 있어 집중강우 등에 의한 광산 하부와 농경지, 수계의 환경오염을 일으키고 있음이 정밀조사를 통해 드러났다(Kim et al., 2011a). 이에 광산지역 오염 토양 및 수질에 대한 이해를 높이고, 오염물질 제어 공법을 적용하는 등 문제점 해결을 위한 노력을 하고 있으나, 광미나 광산슬러지의 처리, 산성광산배수의 중화 및 고농도 중금속의 처리 등으로 편중되어 연구의 범위가 한정된 경우가 대부분이다(Ji et al., 2007; Kim et al., 2011b).

그러나 최근 광산배수를 처리하여 방류하는 과정에서 산성광산배수나 중금속 등과는 다른 경로로 발생하는 미세부유물질로 인해 방류 하천 내 일부구간의 심미적 경관을 손상시키고, 용수로서의 가치를 떨어뜨린다는 우려가 발생하고 있다(Oh et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 그 동안 광산지역의 주 오염물질로 분류되지 않아 정화에서 도외시되던 미세부유물질을 제거하는 효율적인 방법을 연구하는 동시에 일반적으로 광산배수 내에서 용해되어 존재하다 유속이 느려지는 수계하류의 산화환경에서 침전되어 엘로우보이 등(Lee et al., 2008a)의 현상을 유발하는 용해성 철, 망간을 비롯한 중금속의 정화에 대한 연구를 진행하였다.

2. 실험방법

2.1. 광산배수의 채취 및 물리·화학적 특성분석

본 연구의 대상지역은 문헌조사를 통하여 기존의 휴·폐광산 지역 중 미세부유물질로 인해 민원 등의 문제가 발생한 것으로 알려진 강원도 정선군에 소재한 H 석탄광산으로(Jang and Kwon, 2011), 2012년 5월 16일과 5월 30일, 2회에 걸쳐 광산배수시료를 채취하였다. 채취된 광산배수는 중금속 함량을 비롯하여 pH, 산화환원전위, 전기전도도, 부유물질 농도 및 탁도 등 물리·화학적 특성 분석을 수질오염공정시험기준에 준하여 수행하였으며, 광산배수 내 부유물질 중 미세부유물질의 분포 정도를 알아보기 위하여 레이저 산란 및 회절을 이용한 습식입도분석(LMS-30, Seishin, Japan)을 실시하였다. 중금속 함량에 대한 분석은 Microwave(Multiwave3000, Anton Paar, Austria)로 전처리 후, ICP-OES(GENESIS, SPECTRO, USA)를 이용하여 수행하였다.

2.2. 미세부유물질의 침전효율 평가

침전효율 평가를 위하여 사용된 실내실험 규모의 침전조는 가로 × 세로 × 높이가 600 mm × 150 mm × 150 mm 인 1:4 장방형 아크릴 침전조이다.

2.2.1. 시간에 따른 침전효율

광산배수 내 미세부유물질이 효과적으로 침전하는데 필요한 최적의 시간을 도출하기 위한 실험을 수행하였다. 광산배수의 침전조 내 체류시간은 초기 0시간부터 1, 3, 6, 10, 24, 48시간으로 조정하였으며, 각각의 체류시간 동안 정지한 후 침전조 방류수의 부유물질 농도 및 탁도를 측정하였다.

2.2.2. 온도에 따른 침전효율

일반적으로 온도가 감소하면 물의 점성력이 높아져 입자가 느리게 침강하고, 따라서 침전효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Eckenfelder, 1989). 따라서 광산배수의 수온과 미세부유물질의 침전효율에 대한 상관성을 알아보기 위한 실험을 진행하여 기온이 급격히 떨어지는 겨울철의 침전효율 저하를 기능해 보고자 하였다. 광산배수의 온도는 대기 중의 온도와 평형을 이루는 것으로 가정하고, 대기 중의 기온을 4, 6, 12, 18, 24, 28°C로 조정 후 앞서 수행된 실험으로 도출된 최적 체류시간이 경과한 후 침전조 방류수의 부유물질 농도 및 탁도(HI-93703, Hanna, USA)를 측정하였다.

2.2.3. 유입구와 방류구의 개수 및 경사판의 유·무 등 물리적 변화에 따른 침전효율

선행된 침전효율 실험에서 사용된 장방형 아크릴 침전조의 유입구 개수를 1, 2개, 방류구의 개수를 1, 2, 3개로 조정하고 최적 체류시간 후 방류되는 광산배수의 부유물질 농도 및 탁도를 측정하였다. 또한 미세플록의 침전효율을 높이는 것으로 알려진 경사판을(Eckenfelder, 1989) 1~10개까지 순차적으로 설치하여 경사판 유무 및 개수에 따른 침전효율을 평가하고자 하였다.

2.3. 미세부유물질의 여과효율 평가

문헌고찰을 통하여 일반적으로 부유물질과 중금속의 여과 및 흡착에 널리 사용되는 규사(Eckenfelder, 1989), 입상 활성탄(Eckenfelder, 1989), 제올라이트(Lee et al., 2010), 폐영가철(Lee et al., 2008b; Lee et al., 2009), 페타이어박편(Lee et al., 2009) 등 매질 5종을 선정하여 실험을 진행하였다

2.3.1. 여과매질의 물리·화학적 특성분석

여과매질의 물리·화학적 특성분석을 통하여 매질의 효율성을 기증하는 동시에 매질 자체의 오염물질을 분석하여 장·단기적으로 매질을 통하여 오염물질이 용출될 수 있는 가능성을 배제하고자 하였다. 이 때 여과매질의 중금속 용출 가능성은 국내 폐기물 관리법에 준한 중금속용출시험방법(KSLT)을 이용하여 판단하였다.

2.3.2. 최적의 여과매질 선정

1) 여과매질의 효율성 평가

여과매질의 효율성 평가를 위하여 제작된 반응조는 내경 100 mm, 높이 200 mm의 원통형 아크릴 컬럼으로 7 일의 운행기간 동안 1 mL/min의 유량으로 운행하였으며, 1일 1회의 주기로 중금속 함량을 비롯하여 pH, ORP, EC, 부유물질 농도 및 탁도 등의 항목에 대하여 모니터링을 수행하였다. 이 때 항목에 대한 분석은 수질오염공정시험기준에 준하여 수행하였다. 컬럼 운영을 위해 사용된 펌프는 Gilson사의 미량펌프(MINIPLUS3, France)이며, 컬럼과 펌프는 반응성이 적은 실리콘 튜브(Tygon, USA)로 연결하고 벽면영향 및 채널링 현상의 최소화를 위하여 물의 흐름방향은 상향류로 하였다(Eckenfelder, 1989). 컬럼으로 유입되는 광산배수는 테플론 교반기가 부착된 모터를 이용하여 24시간 교반해 주었다.

2) 여과매질의 입경 선정

매질의 효율성 평가 실험을 통하여 선정된 여과매질에 대하여 침전물 부착이나 매질의 쓸림현상이 적고, 유지·관리가 용이한 최적의 입경을 선정하기 위하여 앞서 수행된 여과매질의 효율성 평가 실험과 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 여재의 입경은 체가름을 통하여 3가지로 분류한 후 각각에 대한 컬럼을 운행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 광산배수의 물리·화학적 특성분석

채취한 광산배수의 물리·화학적 특성을 분석한 결과, 일반적인 석탄광산배수와 같이 pH가 6.4로 중성에 가까운 약산성을 띠었으며 산화환원전위 측정으로 높은 산화상태임을 확인하였고 높은 전기전도도 값을 나타내어 광산배수 내 중금속을 비롯한 기타 이온성 물질이 다량 함유되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 부유물질 농도와 비소, 철 그리고 망간의 항목에서 청정지역 수질오염물질의 배출허용 기준을 초과하는 것으로 나타났다(Table 1).

Table 1. The physico-chemical characteristics of H mine drainage

Classification	Measurement	Standard (Unit)	
pH	6.4	5.8 ~ 8.6	
ORP	224.72	- mV	
EC	281.37	- μS/cm	
SS	34.17	30 mg/L	
Turbidity	255	- NTU	
Concentration of heavy metals	As	0.47	0.05 mg/L
	Cd	N. D.	0.02 mg/L
	Cu	N. D.	1 mg/L
	Pb	N. D.	0.1 mg/L
	Zn	N. D.	1 mg/L
	Fe	8.29	2 mg/L
	Mn	12.15	2 mg/L

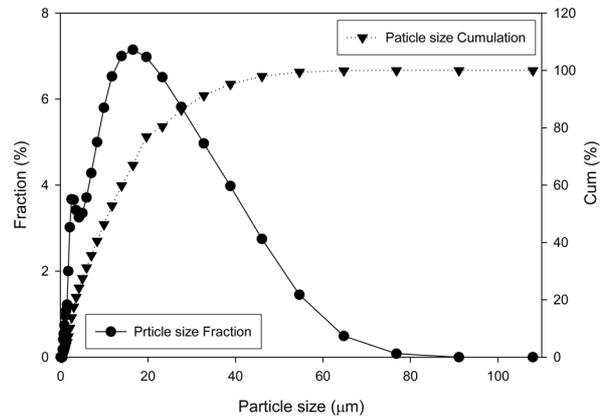


Fig. 1. The particle size distribution of SS in H mine drainage.

광산배수 내 존재하는 부유물질의 입도분포 분석을 수행한 결과 부유물질의 평균입경은 10.56 μm이고, 13.00~17.00 μm의 입자가 가장 많이 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 1).

3.2. 미세부유물질의 침전효율 평가

3.2.1. 시간에 따른 침전효율

광산배수의 침전조 내 체류시간을 달리하여 침전효율 실험을 수행한 결과, Fig. 2와 같이 침전조 체류 6시간 이후부터 방류수의 부유물질 농도 및 탁도가 급격히 낮아지는 경향을 보였다. 광산배수가 침전조 내에 정지된지 1시간 이후에도 부유물질 농도의 청정지역 수질오염물질 배출기준인 30 mg/L를 만족하는 결과를 나타내었으나, 2013년 1월 이후 10 mg/L로 강화되는 부유물질 농도 기준을 고려할 때 광산배수의 침전조 체류시간은 6시간 이상이 적합할 것으로 사료된다.

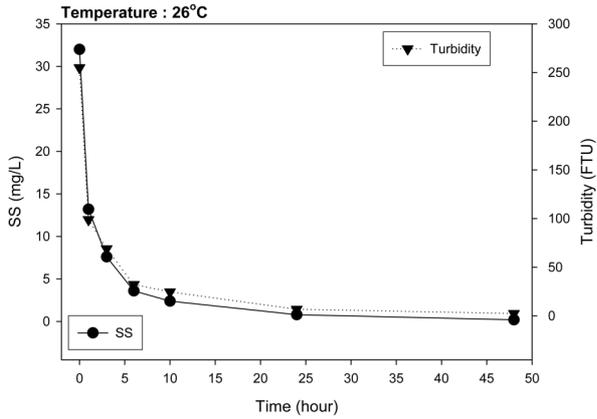


Fig. 2. The changes of SS and turbidity according to retention time.

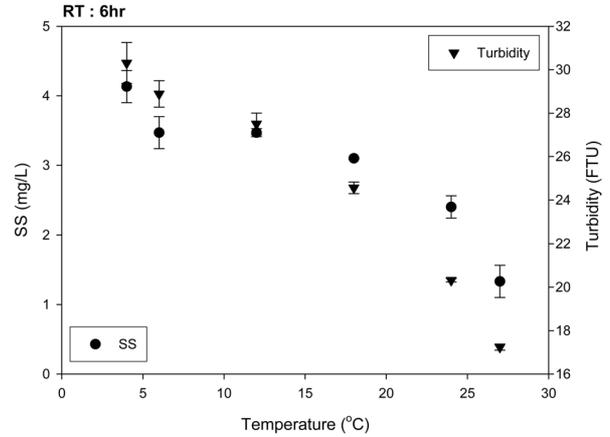


Fig. 4. The changes of SS and turbidity related to temperature variation.

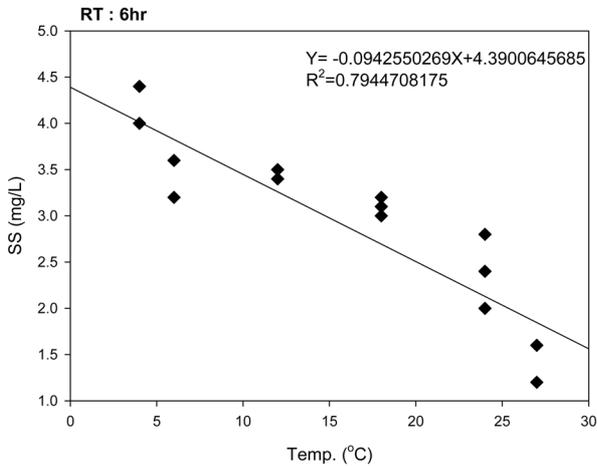


Fig. 3. The relativity between SS and temperature of mine drainage.

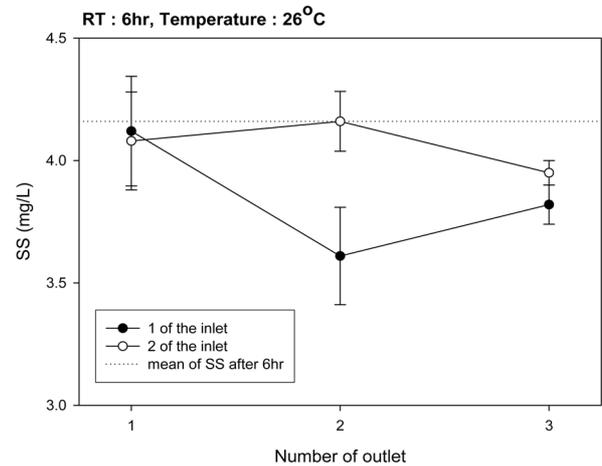


Fig. 5. The SS variation related to the number of inlet and outlet.

3.2.2. 온도에 따른 침전효율

선행된 실험에서 도출된 광산배수의 최적 침전조 체류 시간인 6시간 동안 온도변화에 따른 부유물질의 침전효율 실험을 수행한 결과, Fig. 3과 같이 방류수의 온도가 높을수록 물의 점성력이 낮아지고 침전이 활발히 일어나 부유물질의 농도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 또한 여름철 수면의 온도가 30°C이고 겨울철 수면의 온도가 0°C에 근접한다고 가정하여 Fig. 3에서 도출된 식에 대입할 경우 여름철에 비해 겨울철의 방류수에 약 3배에 가까운 부유물질 농도가 증가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 침전조 설계 시 온도에 따른 침전효율 저하에 대비한 안전율이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 온도변화에 따른 침전조 내 탁도 값 역시 온도가 증가함에 따라 낮아져 부유물질의 농도와 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 4).

3.2.3. 유입구와 방류구의 개수 및 경사판의 유·무 등 물리적 변화에 따른 침전효율

침전조의 유입구와 방류구 개수를 달리 조정하여 각각의 침전효율에 대한 실험을 진행하였으나 6시간의 체류 시간 후 방류되는 광산배수 내 부유물질 농도 및 탁도에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 5). 그러나 방류구의 개수가 늘어날수록 부유물질 농도 및 탁도값의 표준편차가 줄어드는 것으로 볼 때, 방류구 개수가 늘어날수록 침전조 방류구 주변 유체의 흐름이 분산되고, 방류되는 광산배수의 유속 및 유량이 안정화되었을 것으로 사료된다 (Rollings and Rollings, 1995). 또한, 침전조 내 경사판을 설치하여 부유물질의 침전효율 실험을 진행한 결과, 경사판의 개수가 증가함에 따라 침전효율 역시 증가하는 경향을 보였으나, 본 실험에서 사용된 13.5 L 용적의 침전조에는 6개 이상의 경사판을 설치하는 것은 비효율적인

Table 2. The physico-chemical characteristics of filtering media

Classification	Measurement					Standard (Unit)	
	Silica Sand	GAC ¹⁾	Zeolite	W-ZVI ²⁾	WTS ³⁾		
pH	6.97	8.46	9.35	7.06	7.31	-	
ORP	133.26	208.06	143.68	211.08	84.38	- mV	
EC	210	147	1417	126	315	- μ S/cm	
Concentration of heavy metals	As	N. D.	N. D.	0.26	N. D.	N. D.	1.5 mg/L
	Cd	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	0.3 mg/L
	Cu	N. D.	N. D.	0.23	0.82	N. D.	1 mg/L
	Pb	0.28	0.26	2.36	2.37	1.31	3 mg/L
	Al	3.68	0.87	4.28	1.08	4.49	- mg/L
	Fe	3.70	1.24	5.55	6.28	3.29	- mg/L
	Mn	3.35	0.66	4.27	3.72	2.05	- mg/L

1) Granular Activated Carbon (GAC)

2) Zero Valent Iron (ZVI)

3) Waste Tire Scrap (WTS)

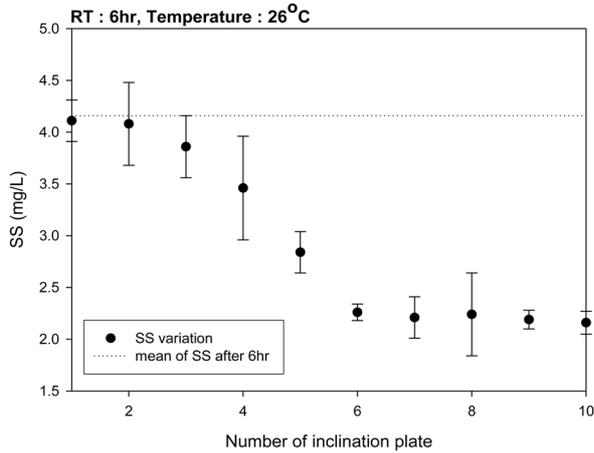


Fig. 6. The correlation with the number of inclination plate and SS.

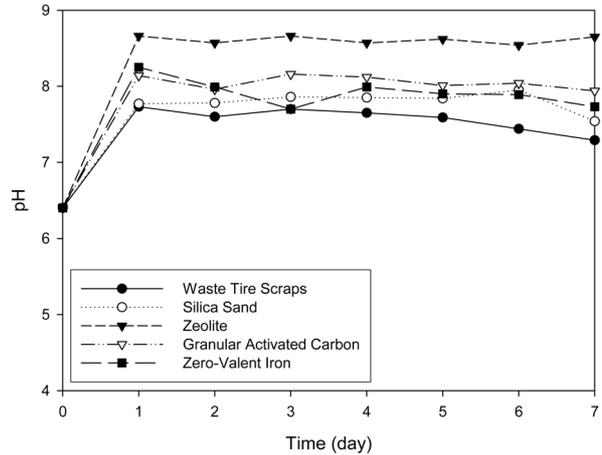


Fig. 7. The pH variation during operating columns of filtering media.

것으로 나타났다(Fig. 6). 경사판 설치 후, 설치 전에 비해 부유물질의 침전효율이 최대 48 %까지 증가하는 것을 확인하였다.

3.3. 미세부유물질의 여과효율 평가

3.3.1. 여과매질의 물리·화학적 특성분석

여과매질 자체의 물리·화학적 특성을 분석한 결과, 제올라이트와 입상 활성탄은 염기성을, 기타 규사와 폐영가철, 페타이어박편은 중성을 띠는 것으로 나타내었으며 페타이어박편을 제외한 여과매질의 산화환원전위가 100 mV를 초과하는 것으로 측정되어 여과매질 자체가 산화상태인 것으로 확인되었다. 또한 매질의 오염물질 용출 가능성을 시험한 결과, 모든 매질이 국내 중금속 용출 기준을

초과하지 않는 것으로 나타나 여과매질의 사용이 가능한 것으로 판단하였다(Table 2).

3.3.2. 최적의 여과매질 선정

1) 여과매질의 효율성 평가

광산배수의 초기 pH 값에 비하여 각각의 여과매질을 충전한 컬럼을 운행한 후, 유출수의 pH 값이 상승하는 것을 확인할 수 있었는데(Fig. 7) 이는 여과매질 자체가 가진 pH의 영향으로 판단하였다. 특히, 여과매질의 물리·화학적 특성분석 결과 9.4로 가장 높은 pH 값을 보인 제올라이트로 충전한 컬럼이 유출수의 pH 값이 8.8로 가장 높게 나타났으며, 그 외 유사한 pH 값을 보인 기타 여과매질 컬럼의 유출수는 비슷한 폭으로 상승함을 확인하였

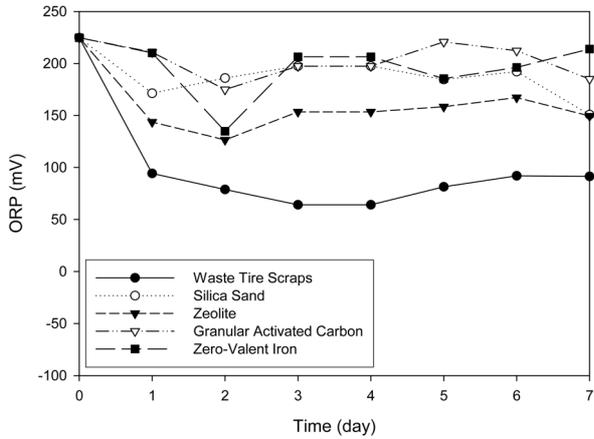


Fig. 8. The ORP variation during operating columns of filtering media.

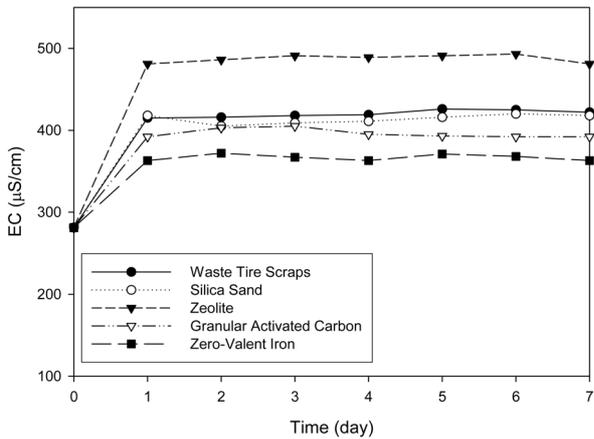


Fig. 9. The EC variation during operating columns of filtering media.

다. 제올라이트를 충전한 컬럼의 유출수는 청정지역 수질 오염물질의 배출기준인 pH 8.6을 초과하여 일반적으로 pH가 낮지 않은 석탄광산배수의 여과매질로서의 사용은 어려울 것으로 판단된다. pH의 상승은 컬럼 운행 첫째 날부터 시작되어 운행이 종료되는 시점까지 크게 변화하지 않았다.

여과매질 자체의 특성에 따라 컬럼 유출수의 특성에 영향을 미치는 경향은 pH 뿐 아니라 산화환원전위와 전기전도도 값에서도 유사하게 나타났다(Fig. 8-Fig. 9). 산화환원전위의 경우 높은 산화상태였던 광산배수가 컬럼 내에서 혐기성 상태의 매질을 통과하면서(유입수의 용존산소량 : 5.16, 유출수의 용존산소량 : 규사 - 4.58, 폐영가철 - 4.73, 입상 활성탄 - 4.11, 제올라이트 - 3.29, 페타이어박편 - 2.10) 그 값이 소폭 감소하는 결과를 나타내었고, 전기전도도의 경우 여과매질의 고유한 전기전도도의 영향으

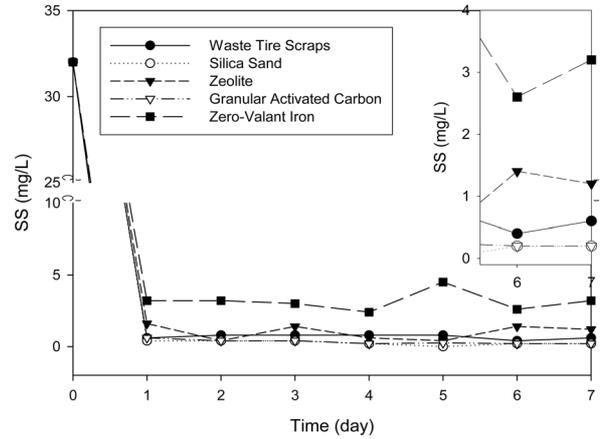


Fig. 10. The SS variation during operating columns of filtering media.

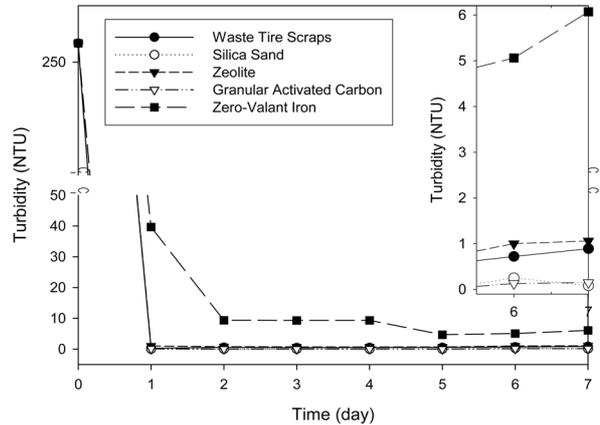


Fig. 11. The turbidity variation during operating columns of filtering media.

로(대조 실험으로 사용된 증류수의 전기전도도 값은 0.5~1.2 µS/cm를 나타내었으며, 매질을 증류수와 교반시킨 후 측정한 전기전도도 값은 Table 2와 같음) 운행초기 유출수의 전기전도도 값이 상승하였으나 그 후 지속적인 증가는 없었다(Bae et al., 1998).

컬럼을 운행하기 전 부유물질 농도 배출기준인 30 mg/L를 초과하였던 광산배수는 컬럼 운행 첫째 날부터 큰 폭으로 떨어져 폐영가철을 충전한 컬럼을 제외하고는 98% 이상의 제거효율을 나타내었으며 컬럼 운행기간 동안 그 효과를 유지하였다(Fig. 10). 이러한 경향은 탁도 측정값에서도 유사하게 나타났으며, 폐영가철을 제외한 모든 여과매질의 탁도 제거효율이 매우 뛰어난 것으로 확인되었다(Fig. 11).

컬럼을 운행하기 전 초기 광산배수 내 중금속 농도가 배출기준을 초과하였던 철, 망간 그리고 비소 항목에 대

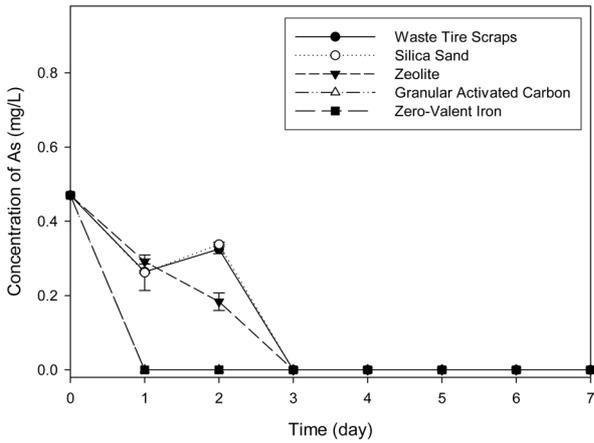


Fig. 12. The concentration of As during operation columns of filtering media.

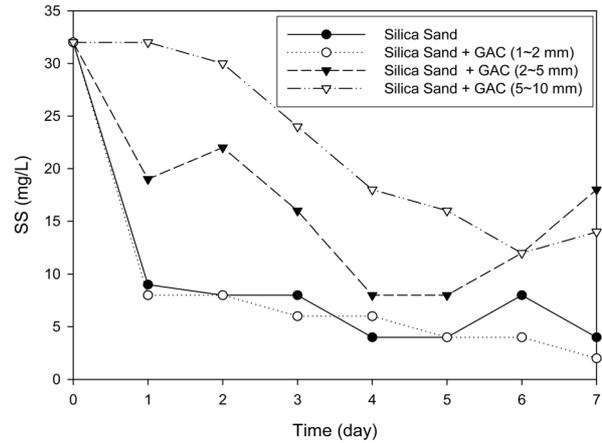


Fig. 15. The SS variation during operating column by size of GAC.

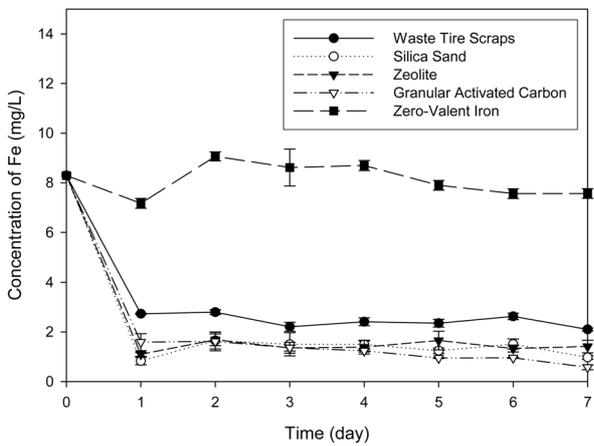


Fig. 13. The concentration of Fe during operation columns of filtering media.

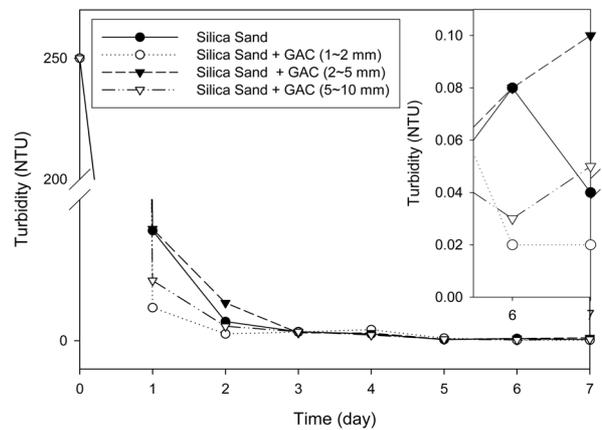


Fig. 16. The turbidity variation during operating column by size of GAC.

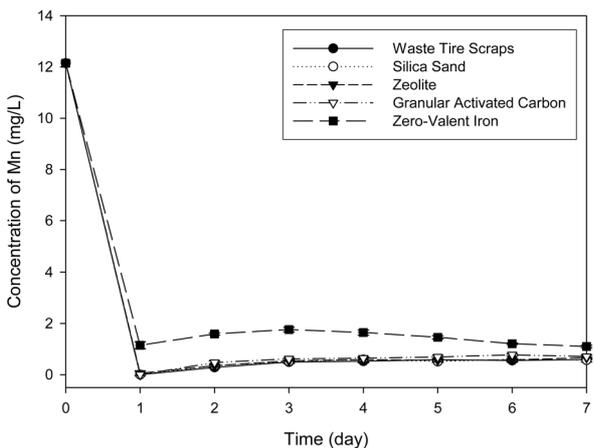


Fig. 14. The concentration of Mn during operation columns of filtering media.

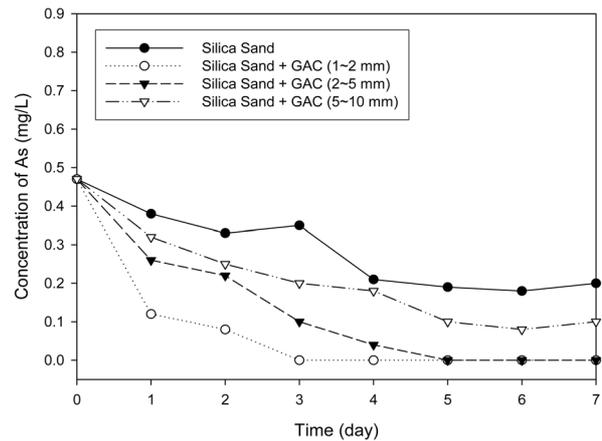


Fig. 17. The concentration of As during operating column by size of GAC.

하여 컬럼 운영에 따른 농도변화를 모니터링 한 결과는 Fig. 12~Fig. 14와 같다. 광산배수 중 침전물이나 색도를

유발하여 심미적 경관을 해치는 것으로 알려진 철의 경우 (Choi et al., 2002; Liang and Thomson, 2009) 운영

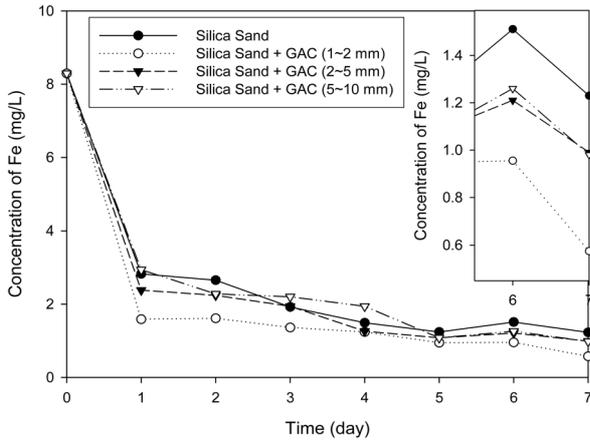


Fig. 18. The concentration of Fe during operating column by size of GAC.

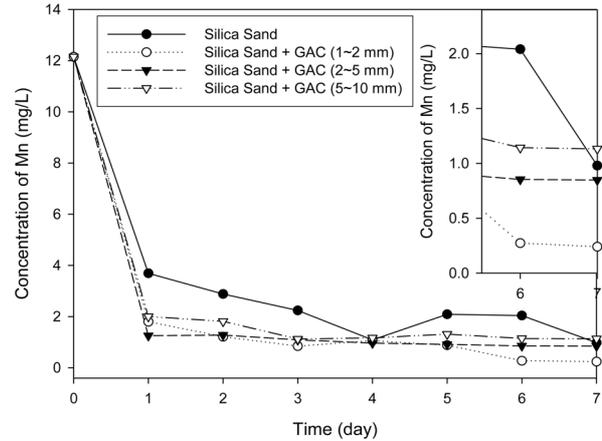


Fig. 19. The concentration of Mn during operating column by size of GAC.

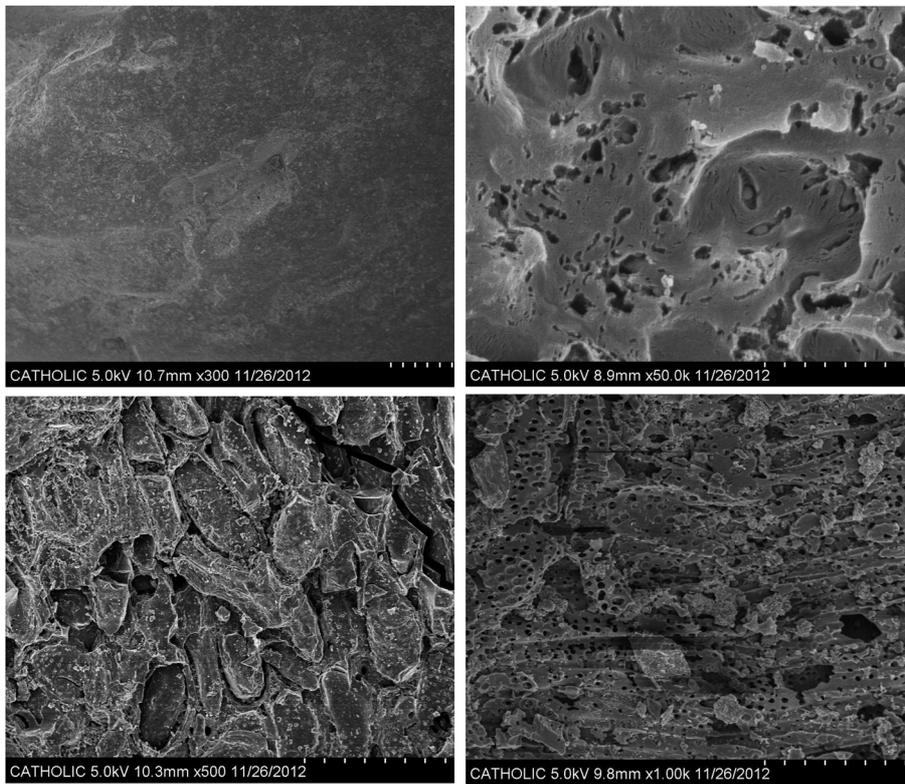


Fig. 20. Surface of granular activated carbon as particle size (a) silica sand, (b) 5~10 mm, (c) 2~5 mm, (d) 1~2 mm.

첫날부터 폐영가철과 페타이어박편을 제외한 매질을 충전하여 운행한 컬럼의 유출수에서 기준치 이하의 농도로 배출되었으며, 일반적으로 독성이 크게 부각되지 않지만 침전율이 높아 막힘현상을 발생시키고 음용수에 존재할 경우 불쾌감을 유발하는 망간의 경우(Eckenfelder, 1989; Liang and Thomson, 2009) 운행 첫날부터 큰 폭으로

감소하여 모든 컬럼 유출수에서 배출기준 이하의 농도로 배출되었다. 또한, 독성물질로 분류되어 음용할 경우 부작용 및 질병을 발생시키는 것으로 알려진 비소는(Kim et al., 2011a) 운행초기 폐영가철을 충전한 컬럼에서 가장 큰 폭으로 제거되는 경향을 보였으나, 컬럼 운행 3일 후에는 규사와 페타이어박편을 제외한 모든 컬럼의 유출수

에서 비소 농도가 기준치 이하로 검출되었다.

상기 결과를 종합하여 판단할 때, 5가지의 여과매질 중 규사와 입상 활성탄이 부유물질 제거에 가장 우수한 것으로 나타났으며, 철, 망간, 비소 등 중금속 제거효율이 가장 높은 매질은 입상 활성탄인 것으로 확인되었다.

2) 여과매질의 입경 선정

선행된 실험을 통하여 선정된 입상 활성탄을 입경에 따라 1~2 mm, 2~5 mm, 5~10 mm로 각각 분류한 후 규사와 1:1의 비율로 혼합하고 컬럼에 충전하여 운행한 결과, 1~2 mm 입경의 입상 활성탄 컬럼에서 부유물질의 농도, 탁도, 그리고 중금속 농도가 가장 효과적으로 제거되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 15~Fig. 19). 입상 활성탄의 입경이 큰 경우 충전한 매질 사이의 공극도 커지고 따라서 부유물질 농도 및 탁도 제거효율이 감소된 것으로 판단한다(Fig. 20). 또한 중금속의 저감의 경우 입경 별 입상 활성탄의 영전하점(Point of Zero Charge : PZC) 차이로 설명할 수 있다. 일반적으로 매질 표면의 pH가 영전하점 보다 작으면 표면은 양전하를 가지고, 반대의 경우 표면은 음전하를 띠게 된다(Kim et al., 2011b). 입경 별 입상 활성탄의 영전하점은 전위차적정법(Kraepiel et al., 1998)을 이용하여 측정하였으며, 1~2 mm, 2~5 mm, 5~10 mm의 입상 활성탄의 영전하점은 각각 8.5, 8.5, 8.8, pH는 8.9, 8.7, 8.7로 분석되었다. 영전하점 측정 결과를 통하여 광산배수 내 존재하는 철, 망간 등과 같은 양이온 중금속이 표면이 강한 음전하를 띠는 1~2 mm 입경의 입상 활성탄에서의 흡착이 더욱 활발히 일어났을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 그 동안 광산배수 처리에서 도외시 되었던 광산배수 내 미세부유물질의 제거를 위한 침전 및 여과공정에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 미세부유물질의 침전효율 실험을 통하여 침전조 내 광산배수의 체류시간은 6시간 이상이 필요하며, 기온이 급감하는 겨울철에는 수온 변화에 따른 점성력의 상승으로 부유물질의 침전효율이 저하되므로 체류시간에 대한 안전율이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

2. 침전조의 부지면적을 줄이는 동시에 침전효율을 증가시킬 수 있는 경사판의 설치를 통하여 미세부유물질의 침전효율이 48%까지 증가하는 것을 확인하였으며, 침전

조에서 방류되는 광산배수의 흐름을 분산시키고 안정화하기 위해 침전조 내 방류구의 개수를 증가시키는 방안이 추천된다. 그러나 경사판의 재질이나 각도 등을 달리하거나 침전조 용적 증가에 따른 경사판의 설치개수를 결정하는 식을 도출하기 위한 추가실험을 통하여 최적의 경사판 설치 설계가 필요할 것으로 사료된다.

3. 5가지 여과매질 컬럼의 광산배수 유출수를 모니터링하여 최적의 여과매질을 선정한 결과, 부유물질의 제거에서는 규사와 입상 활성탄이, 중금속 제거에서는 입상 활성탄이 가장 뛰어난 효율을 나타낸 것으로 확인되었다.

4. 또한, 선행된 실험에서 선정된 입상 활성탄을 3가지 입경으로 나누어 규사와 혼합한 여과매질 컬럼을 운행한 결과, 1~2 mm 입경의 입상 활성탄을 충전한 컬럼의 유출수가 부유물질의 농도, 탁도, 그리고 중금속의 제거에서 가장 높은 효율을 나타내었다. 이 중, 부유물질 및 탁도의 경우 충전한 입상 활성탄의 입경이 크면 매질 사이의 공극도 커지고 따라서 여과재로서의 역할을 충분히 하지 못해 제거효율이 낮아진 것으로 판단하며, 중금속의 경우 영전하점과 pH의 차이가 가장 컸던 1~2 mm의 입상 활성탄에서 형성된 음전하에 의해 활발히 흡착되었기 때문으로 사료된다.

추후 본 연구에서는 상기 결과를 바탕으로 필요한 추가 실험을 실시하고, 침전과 여과 두 가지 공정이 결합된 형태의 반응조를 제작, 장기적으로 운행함으로써 발생할 수 있는 제반의 문제를 해결하여 실제 광산배수 내 미세부유물질의 제거를 위한 현장적용기술에 대한 연구를 진행할 계획이다.

사 사

이 연구는 2012년 한국광해관리공단으로부터 기술개발 사업비를 지원받아 수행된 사업으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- An, J.M., Lee, H.J., Park, I.S., Kim, K.H., and Choi, S.I., 2010, A Study of Fe Removal Efficiency of Acid mine Drainage by Physico-chemical Treatment, *J. of Korean Society of Geosystem Engineering*, **47**(4), 530-538.
- Bae, M.S., Park, S.Y., and Cho, G.M., 1998, Leachate Treatment by Anaerobic Fluidized Activated Carbon Bed, *J. of Korea Solid Waste Engineering Society*, **15**(5), 425-430.
- Choi, S.K., Lee, S., Song, Y.K., and Moon, H.S., 2002, Leaching Characteristics of Selected Korean Fly Ashes and its Impli-

cations for the Groundwater Composition near the Ash Disposal Mound, *Fuel*, **81**, 1083-1090.

Eckenfelder, W.W., 1989, Industrial Water pollution Control, 2nd Edition, *McGraw-Hill Inc.*, New York, NY, 131-163.

Jang, M. and Kwon, H., 2011, Pilot-Scale Tests to Optimize the Treatment of Net-Alkaline Mine Drainage, *Environmental Geochemistry and Health*, **33**, 91-101.

Ji, S., Cheong, Y., Yim, G., and Yoo, K., 2007, Analysis of Patents on Mine Drainage Treatment Technologies, *J. of Korean Society of Geosystem Engineering*, **44**(3), 262-268.

Kim, A.Y., Ko, M.S., Kim, J.Y., Kim, K.W., Bang, S., K., Sim, Y., and Park, H.S., 2011, Removal Technology for Arsenic in Mine Drainage with the Consideration of Its Geochemical Characteristics, *J. of Korean Society of Geosystem Engineering*, **48**(2), 145-154.

Kim, H.J., Chon, H.T., Lee, J.U., and Roh, Y., 2011, Adsorptive Removal of Aqueous Arsenic Using Nanoparticles of Iron Hydroxides, *J. of Korean Society of Geosystem Engineering*, **48**(4), 438-447.

Kraepiel, A.M., Keller, K., and Morel, F., 1998, On the Acid-Base Chemistry of Permanently Charged Minerals, *Environmental Science and Technology*, **32**(19), 2829-2839.

Lee, G., Faure, G., Bigham, J.M., and Williams, D.J., 2008, Metal Release from Bottom Sediments of Ocoee Lake No.3, a Primary Catchment Area for the Ducktown Mining District, *Journal of Environmental Quality*, **37**, 344-352.

Lee, J.Y., Lee, G.J., Youm, S.Y., Lee, M.R., Kamala-Kannan, S., and Oh, B.T., 2010, Stability of Multi-Permeable Reactive Barriers for Long Term Removal of Mixed Contaminants, *Bull*

Environ Contam Toxicol, **84**, 250-254.

Lee, J.Y., Moon, S.Y., Choi, S.I., and Oh, B.T., 2009, Chemical Oxidative Degradation of MTBE in Groundwater by Waste Steel Scrap, *Proceedings of 2009 INEF (International Networks of Environmental Forensics) Annual Conference*, pp. 83-90.

Lee, J.Y., Lee, G.J., Youm, S.Y., Lee, M.R., Kamala-Kannan, S., and Oh, B.T., 2010, Stability of Multi-Permeable Reactive Barriers for Long Term Removal of Mixed Contaminants, *Bull Environ Contam Toxicol*, **84**, 250-254.

Lee, J.Y., Moom, S.Y., Choi, S.I., and Oh, B.T., 2009, Chemical Oxidative Degradation of MTBE in Groundwater by Waste Steel Scrap, *Proceedings of 2009 INEF (International Networks of Environmental Forensics) Annual Conference*, pp. 83-90.

Lee, J.Y., Youm, S.Y., Choi, S.I., and Oh, B.T., 2009, Removal of mixed contaminants by Fe-based biobarrier in flow-through columns using recycled waste materials, *J Mater Cycles Waste Manag*, **11**, 214-221.

Liang, H.C. and Thomson, B.M., 2009, Minerals and Mine Drainage, *Water Environment Research*, **81**(10), 1615-1663.

Oh, S.H., Lee, S.H., and Kim, S., 2009, A Study of the Treatment System of Mine Water of the Ventilation Adit in the Yeonhwa Mine using Heterogeneous Oxidation, *J. of Korean Society of Geosystem Engineering*, **46**(5), 602-613.

Rollings, M. P. and Rollings, R. S., 1995, Geotechnical Materials in Construction, *McGraw-Hill Inc.*, New York, NY, 86-99.

Skousen, J.G. and Ziemkiewicz, P.F., 1996, Acid Mine Drainage Control and Treatment, *West Virginia University and the National Mine Land Reclamation center*, Morgantown, WV, 64-81.