

《原著》

## 광산배수 부유물질 저감을 위한 다양한 여과 매질의 특성 및 적용성 평가 - H 석탄광산 배수

이상훈<sup>1\*</sup> · 권혁현<sup>1</sup> · 오민아<sup>2</sup> · 이재영<sup>2</sup> · 김덕민<sup>3</sup>

<sup>1</sup>가톨릭대학교 환경공학전공

<sup>2</sup>서울시립대학교 환경공학부

<sup>3</sup>한국광해관리공단 기술연구소

## Feasibility Tests for Treating Fine Suspended Solids from Mining Drainage, using Various Media by Column Methods - A Case from H Coal Mine

Sanghoon Lee<sup>1\*</sup> · HyukHyun Kwon<sup>1</sup> · Minah Oh<sup>2</sup> · Jai-Young Lee<sup>2</sup> · DukMin Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental engineering, The Catholic University of Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental engineering, The University of Seoul

<sup>3</sup>Mine Reclamation and Technology Center, Mine Reclamation Corporation

### ABSTRACT

Fine suspended solids from mine drainage draw attentions due to their potential adverse influences on the water quality, such as increasing turbidity and degrading aesthetic landscape. Currently, sand filter beds are adapted in some mine drainage treating systems. However, more efficient system is in demand, as the existing sand beds reveal some problems, such as frequent maintenance intervals. Various filtering mediums including fly ash, mine tailing aggregates and the sand were tested for improving the current system, using column experimental set-up. Mine drainage samples were collected from the current treating systems in the abandoned H coal mine. The experiment was run for 7 days. Suspended solids recorded as 100.9 mg/L and the value exceeds the current standard, 30 mg/L. Sand was proved to still be the optimum medium for the fine suspended solids, compared to fly ash and fly ash + sand. Mine tailing aggregates were placed at the exit of the columns, substituting gravels. The tailing aggregates is made by mine tailings and clay. Sand bed filters can also be improved by mixing granular activated carbon, which was found to be economical and efficient in the batch experiment, conducted at the same time.

**Key words :** Mine drainage, Suspended solids, Sand bed, Filtration

### 1. 서 론

광해로 인한 다양한 피해는 이미 오래전부터 인지되어 광해방지 및 복원 전문기관의 설립과 함께 복원작업이 지속적으로 이루어지고 있다. 기행 광산이나 폐광산 모두 유용한 광물을 채취한 후 남은 광물찌꺼기와 광산 배수 그리고 광물찌꺼기와 광폐석 등에서 발생하는 침출수가 주요 오염원이다. 이중 광산배수는 인공소택지와 같은 자연정화나 전기분해와 같은 능동적 처리 등을 거쳐 수질 기준 이하로 처리하는 방법이 채택되고 있으며 광산배수나 침

출수의 주 오염물질인 중금속을 주로 처리하고 있다 (Johnson and Kevin, 2005; Sheoran *et al.*, 2005; Gaikwad and Gupta, 2008; Lesley *et al.*, 2008; Caraballo *et al.*, 2011). 중금속 외에 부유물질 역시 철, 알루미늄 등의 침전물에 주로 기인하는 부유물질 역시 하천 바닥의 침전과 탁도를 증가시켜 하천의 태양광의 투과성 감소로 인한 생태계 훼손과 심미적 경관 손상 및 악영향 등을 야기하여 용수로서의 가치를 떨어뜨린다 (Packman *et al.*, 1999; Mulligan *et al.*, 2009).

이에 대한 개선 대책으로 일부 광산 배수 처리 시설에

\*Corresponding author : slee@catholic.ac.kr

원고접수일 : 2012. 11. 29 심사일 : 2012. 12. 10 게재승인일 : 2012. 12. 11

질의 및 토의 : 2013. 2. 28 까지

사여과 장치를 보강하여 미세부유 물질을 제어하고 있으나, 예상보다 잦은 청소 및 시설교체로 인해 사후 관리 비용이 증가하는 문제가 발생하고 있다. 부유물질의 하천 수 유입은 오염물질을 수계 바닥에 퇴적시킬 뿐 아니라 식물성 플랑크톤과 박테리아의 부착, 그리고 높은 비표면적으로 인한 중금속 흡착을 야기하기도 한다(Yong *et al.*, 2006). 광산배수의 부유물질은 응집이나 침전(Gozan *et al.*, 2006; Jang *et al.*, 2008) 방법 또는 리그나이트와 같은 흡착제(Mohan and Chander, 2006; Cavangh *et al.*, 2010) 등이 적용되었다. 그러나 일반적으로 모래를 이용한 부유물질 제거는 이미 오랜 시간동안 적용되어 어느 정도 성능에 대한 검증이 이루어진 매질로 다양한 기원의 폐수에 적용되고 있다(Sullivan *et al.*, 2001; Healy *et al.*, 2007). 국내에서 부유물질 처리에 적용되는 일반적인 공정들은 스크리닝, 침전, 여과, 막공법 등이다. 스크리닝의 경우 스크린의 크기 분류에 따라 미세부유입자를 선별, 제거할 수 있으며 미세 부유물질을 제어할 수 있는 대표적인 방법으로는 드럼식 미세 스크리닝과 원심력 미세 스크리닝이 있다. 침전의 경우 물리적인 침강속도만을 고려하여 침전지에 침전시키는 방법과 화학 약품 등을 사용하여 응집 후 침전시키는 방법으로 나누어지며, 침전지의 설계에 따라 미세부유물질까지 제거가 가능하다(Cavangh, 2010).

본 연구는 기존 사여과 장치 수명 및 교체시기를 연장할 수 있는 최적 물질의 선정과 함께 기존 공정의 개선 방안을 찾고자 한다. 특히 이 논문에서는 부유물질 및 광산 배수의 특성을 규명하며 기존의 규사와 대체 후보 물질간의 비교를 통해 향후 적용 가능한 매질을 확정한다. 광산배수 중 부유물질은 기존에 주 오염물질로 분류되지 않아 처리과정에서 그대로 방류되는 곳이 대부분이다. 특히 석탄광산에서 발생하는 부유물질들은 입자크기가 다른 광산들에 비하여 더 작은 특성을 나타낸다(Jang *et al.*, 2008). 따라서 본 연구에서는 철, 망간 또는 수산화알루미늄 등 무기성 물질들로 주로 구성되며 유기물 함량이 상대적으로 낮은 광산배수에 함유된 미세부유물질의 제거기작을 규명하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 시료 채취 및 분석

연구에 사용된 광산배수는 강원도 태백시의 H광산에서 채취하였다. 유출된 광산배수는 화학적 처리과정을 거친 후 침전조를 지나 사여과 장치로 유입되어 처리되는 체계로 칼럼시험에 사용한 시료는 사여과로 유입되는 공정에

서 채취하였다. 현장에서 pH, Eh, 전기전도도 등을 측정하였으며 실험실에서 제타전위를 포함한 원소 함량을 분석하였다. 채취된 물시료는 칼럼시험을 위해 실험실로 이송되었으며 시험 시작 전까지 냉장 보관하였다.

물시료와 함께 광산배수 처리장 침전지 바닥에 퇴적된 슬러지와 여과지를 이용하여 제거된 미세부유물질의 고형물 분석도 같이 실시하였으며 이때 국내 토양오염공정시험법을 적용하였다. 즉, 왕수(HCl:HNO<sub>3</sub>=3:1)에 넣은 후 Microwave(115°C, 50min)로 용해하였다. 물과 고형물 모두의 화학조성은 ICP-OES(Spectro Genesis)를 이용하여 분석하였으며 제타전위는 제타포텐셜 측정기(Zetasizer nano ZS)를 이용하였다. 광산배수 내 미세부유물질의 입도분포를 알아보기 위하여 레이저 산란 및 회절을 이용한 습식입도 분석(LMS-30, Seishin)을 실시하였다.

광산배수를 포함한 부유물질과 슬러지 외에 칼럼의 충전물이 된 다양한 매질에 대한 분석도 실시하였으며 충전 매질의 경우 함유된 원소들의 용출가능성이 중요하므로 국내 폐기물 공정시험방법(KSLT)을 적용하였다.

전자주사현미경을 통한 슬러지 및 모래의 흡착 전후 차이를 관찰하기 위하여 전자주사현미경 관찰을 실시하였다(Hitachi, S-4800 FE-SEM).

### 2.2. 칼럼 시험

투명 아크릴을 이용한 칼럼 시험은 광산배수 내 입자성 부유물질 제거 및 화학적 안정화를 확인하기 위한 시험으로서 제원과 운전조건은 Table 1과 같다. 현재 현장에서 가용중인 규사와 더불어 화학적 안정화를 위한 fly ash, 광미골재 등을 조합하여 효율성을 비교 검토하였다(Table 2). fly ash는 다양한 처리 매질 또는 처리 보조재 등으로 활용되며 적절한 가공을 거치거나 원상태 등 다양한 형태로 응용된다(Rios *et al.*, 2008; Ahmanruzzaman, 2010; Maurer *et al.*, 2012). 원통형 아크릴로 제작된 반응조는 7일간 가동하였으며 중금속 함량을 포함한 pH, ORP, EC,

Table 1. Specifications for column tests

	H	비고
Dimension (cylindricality)	5 × 10 cm	Diameter × Height
Volume	196.3 mL	
Mass of filled medium	272 g	Bulk density 1.37
Porosity (Average)	42%	
1 pore volume	82.4 mL	
Flow rate	10.3 mL/hr	3 pore volume / day
Sampling intervals	Daily	
Operation period	7 days	

**Table 2.** Chemical composition of mediums for filtered beds (\* Tailing aggregates)

Elements	Classifications			Standards/Unit	
	Silica Sand	TA*	Fly Ash		
pH	6.97	7.21	8.42	-	
ORP	133.26	71.4	66.3	- mV	
EC	210	61.0	585	- μS/cm	
Heavy metals	As	N. D.	N. D.	1.5 mg/L	
	Cd	N. D.	N. D.	0.3 mg/L	
	Cu	N. D.	N. D.	1 mg/L	
	Pb	0.28	0.213	N. D.	3 mg/L
	Al	3.68	N. D.	N. D.	- mg/L
	Fe	3.70	9.351	61.98	- mg/L
Mn	3.35	N. D.	N. D.	- mg/L	

**Table 3.** Chemical composition of Mine drainage

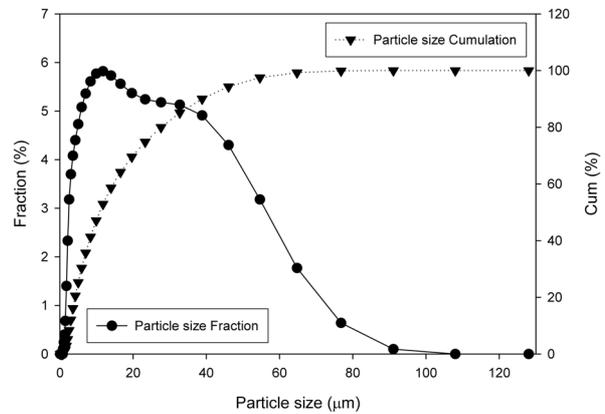
Elements	Composition	Standard/Unit	
pH	6.96	5.8 ~ 8.6	
ORP	137.5	mV	
EC	560.23	μS/cm	
SS	100.9	30 mg/L	
Turbidity	249	FTU	
Zeta potential	-0.701	mV	
Heavy metals	As	N. D.	0.05 mg/L
	Cd	N. D.	0.02 mg/L
	Cu	N. D.	1 mg/L
	Pb	N. D.	0.1 mg/L
	Zn	N. D.	1 mg/L
	Fe	7.12	2 mg/L
Mn	9.42	2 mg/L	

부유물질 농도 및 탁도 등을 측정하였다. 현장에서는 하향류 방식이나 본 시험에서는 편류현상을 최소화하기 위하여 상향류 방식을 취하였다. 유입되는 광산배수는 침전을 방지하고 일정한 부유물질 농도를 유지하기 위하여 교반기가 부착된 모터를 이용하여 24시간 교반하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 광산배수의 물리화학적 특성

광산배수의 물리화학적 특성을 Table 3에 정리하였다. 석탄광에서 발생하는 특성으로 중성의 pH값을 기록한다. 부유물질 농도는 100.9 mg/L로 기준치인 30 mg/L를 훨씬 상회한다. 입자들의 응집정도를 나타내는 제타전위 측정 결과 -0.7 mV로, 응집이 매우 빨리 일어날 수 있는 범위인 0 ± 5 mV 사이의 범주에 포함된다(Greenwood and



**Fig. 1.** Size distribution of suspended particles in mine drainage.

Kendall, 1999). 비소나 카드뮴 등의 중금속은 검출되지 않았으나 Fe와 Mn이 검출되며 두 원소 모두 청정지역 수질오염물질의 배출허용기준을 초과한다. 광산배수의 부유물질 입도분포는 평균이 10.836 μm이었으며 9~14 μm에서 입자가 가장 많이 분포한다(Fig. 1).

#### 3.2. 여과매질의 특성

여과매질의 특성을 Table 2에 표시하였다. 규사는 지금 현장에서 사용하는 것과 가장 유사한 주문진사를 사용하였으며 석탄회는 서해안의 한 화력 발전소에서 발생한 비산재를 사용하였다. Table에서 TA로 표기한 Tailing aggregates는 광물찌꺼기와 점토를 혼합하여 성형 가공한 유리화 골재이며 다공질 물질로 골재를 대신하여 적용 가능할 것으로 판단하여 본 시험에 적용하였다(Lee et al., 2007). 특히 흡착능을 이용한 오염물질 추가 제어 효과와 함께 지정폐기물로 반출, 처리되어야 하는 광물찌꺼기의 재활용 가능성을 고려하였다.

**Table 4.** Chemical composition of suspended solids and sludge

	Zn	Cu	As	Pb	Mn	Fe	Ni	Cd
SS	10.44	N.D.	16.86	N.D.	73.0	546.08	2.04	N.D.
Sludge	47.9	16.26	72.38	39.44	1441.34	30.8	75.78	25.64

석탄회의 경우 부유물질이 많이 발생하여 전기전도도가 가장 높았으며 산화환원전위가 낮았다. 세 매질 중 규사의 경우 pH 6.97로 중성값을 나타낸다. 석탄회는 표면에 주로 흡착되어있는 Ca, S 등의 영향으로 pH 8.42 정도의 약한 알칼리 값을 보인다(Choi *et al.*, 2002; Ahmaruzzaman, 2010).

**3.3. 슬러지 및 부유물질 특성**

**3.3.1. 화학조성**

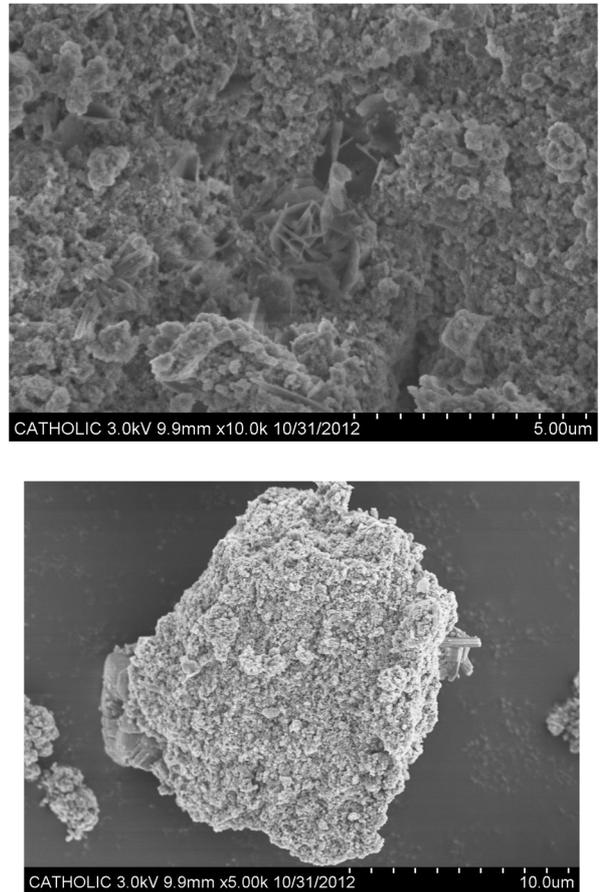
광산배수와 함께 광산현장 침전지에서 채취한 슬러지와 여과지를 통해 걸러낸 부유물질 고형분 화학조성을 분석하였다(Table 4). Fe를 제외한 대부분의 원소들은 부유물질보다 슬러지에서 더 많이 함유되어있다. 분석한 원소들 중 오직 Fe 농도만이 부유물질에서 546.08 mg/kg으로 슬러지의 30.8 mg/kg 보다 훨씬 높은 농도를 보인다. 슬러지는 사여과조 투입 직전 광산배수 침전지 바닥에서 채취된 시료로 사여과를 통해 중금속이 대부분 제거됨을 알 수 있다. 그러나 미세 부유물질 역시 상당량 중금속이 포함되어 있는바 미세 부유물질의 효율적 제거가 필수적임을 시사한다.

**3.3.2. 전자주사현미경 관찰**

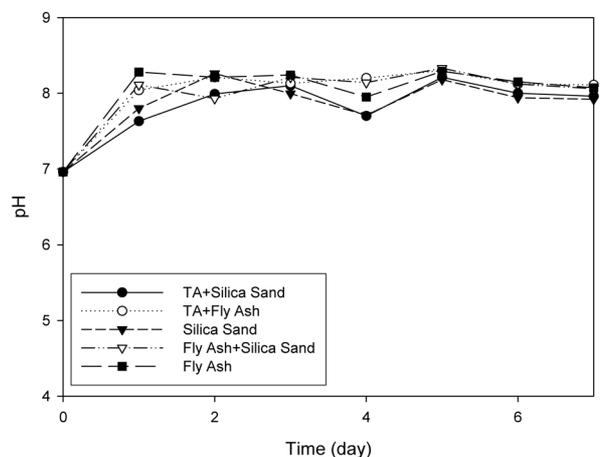
전자주사현미경으로 관찰한 슬러지는 Fig. 2와 같다. 일부 시료는 석고로 추정되는 결정 형태를 보이며 반정량 분석 결과 올라스토나이트, 철산화물 및 소량의 SiO<sub>2</sub> 등으로 구성된다. 미량원소 중 Zr이 발견되며 Mg도 소량 나타난다.

**3.4. 매질에 따른 부유물질 여과 효율**

다양한 매질로 채운 칼럼을 통과한 배출수의 화학조성을 Fig. 3~8에 나타내었다. 부유물질의 농도는 최초 100.9 mg/L에서 모든 매질에서 1 mg/L 이하로 감소하였으며 특히 규사를 매질로 한 칼럼의 경우 7회 시료 채취 후 0.052 mg/L까지 감소하였다. pH는 초기 8 내외에서 시작하여 모든 매질에서 약한 알칼리 값으로 비교적 안정된 값을 유지하였다. 반면 산화환원 전위는 140 mV 정도의 산화경향을 나타내나 시간이 경과하면서 점차 감소하며 75 - 85 mV 범위를 유지하였다.



**Fig. 2.** SEM images of sludge in the sedimentation ponds.



**Fig. 3.** Changes in pH of the effluents with time during the column tests.

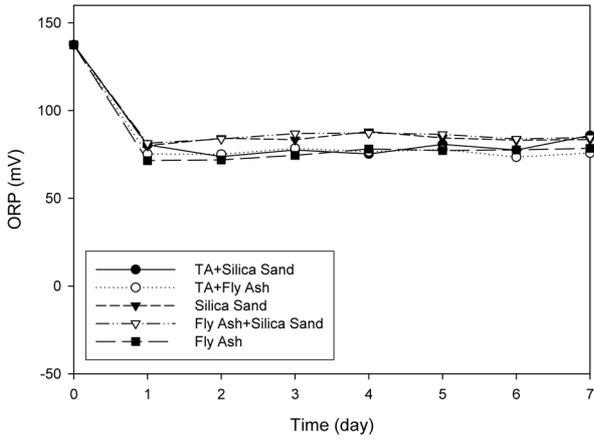


Fig. 4. Changes in ORP of the effluents with time during the column tests.

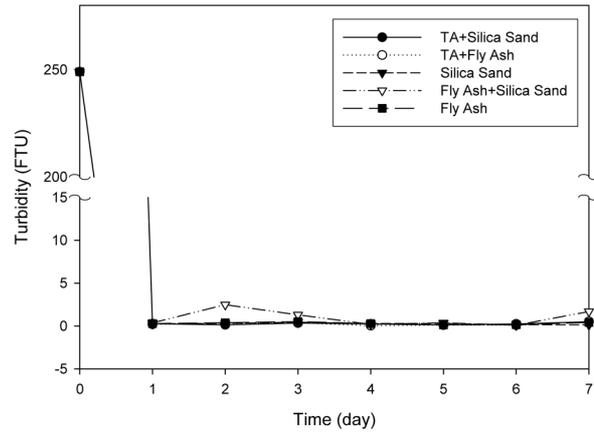


Fig. 7. Changes in turbidity of the effluents with time during the column tests.

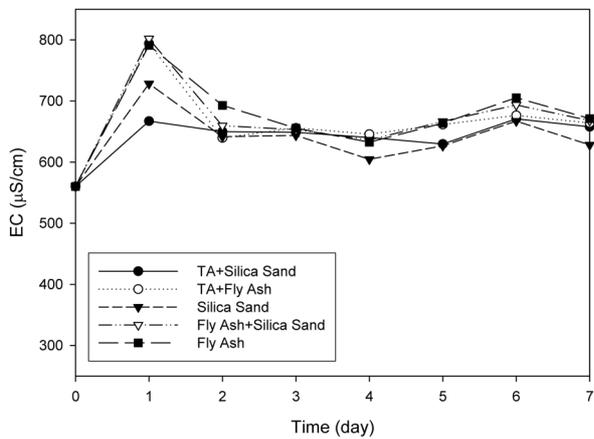


Fig. 5. Changes in Electric conductance of the effluents with time during the column tests.

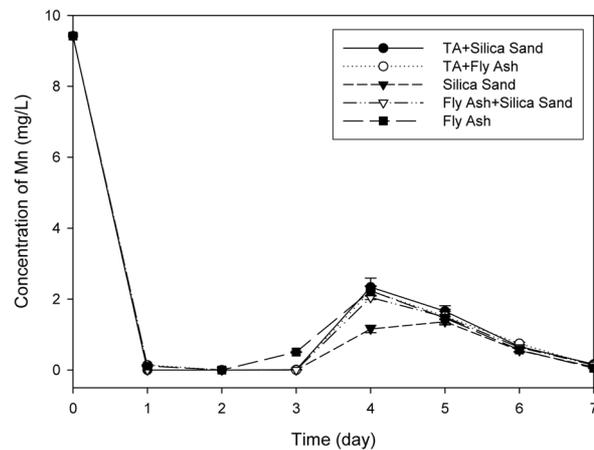


Fig. 8. Changes in Mn concentrations of the effluents with time during the column tests.

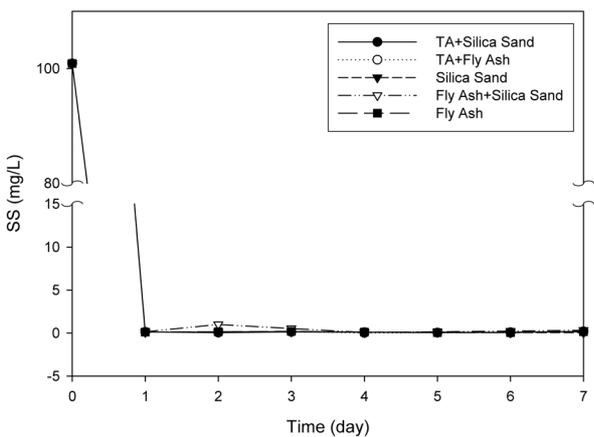


Fig. 6. Changes in suspended solids of the effluents with time during the column tests.

부유물질의 제거효능은 대부분의 매체에서 좋은 효율을 나타낸다. 전기전도도는 부유물질뿐 아니라 다양한 이온

들로 구성된 용존물질의 함량과 관계있는 변수이다. 석탄회, 규사 및 혼합매체 중 규사가 가장 낮은 값을 보여 용존물질 함량이 가장 낮았다. 초기 값이 상승하는 것은 규사에 함유된 흡착물질들이 일시적으로 배출된 결과로 생각된다. 시여과를 통한 부유물질의 제거는 흡착, 확산 및 걸림 등 다양한 과정이 있으며, 모래리는 매질의 특성상 특히 표면흡착이나 확산보다는 직접적인 입자의 충돌에 의한 제거가 더 중요한 작용일 것으로 판단된다(Healy *et al.*, 2007; Mulligan *et al.*, 2009; Cavangh *et al.*, 2010). 반면 입자크기가 상대적으로 작은 석탄회의 경우 흡착과 확산이 상대적으로 중요한 작용으로 판단된다. 본 시험의 결과는 석탄회의 경우 내부에 함유된 미세입자들이 오히려 칼럼 인출부분으로 이동하여 전기전도도와 탁도 등에서 더 높은 값을 기록한다. 부유물질 제거 효능은 적용된 다섯 가지 칼럼 모두 유사한 성능을 보인다. 그러나 구입

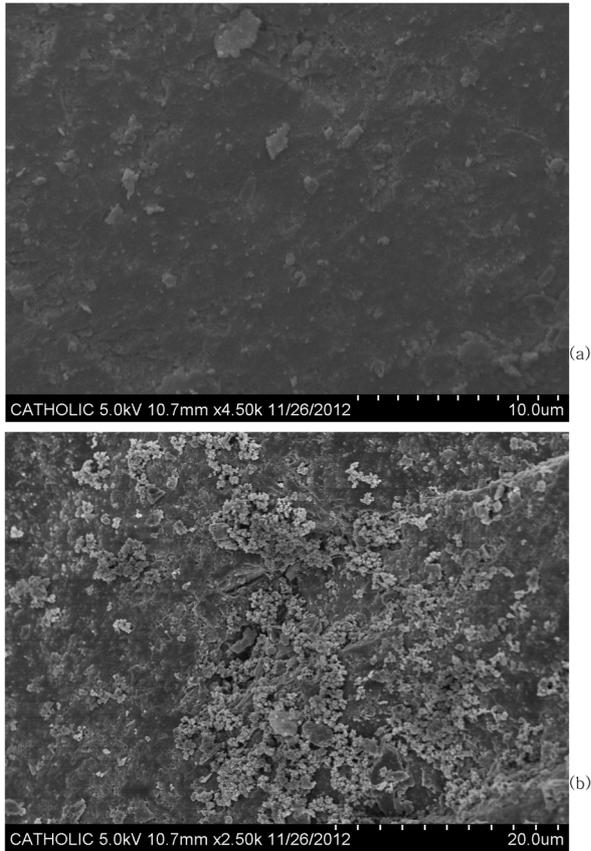


Fig. 9. SEM images for the filter sand before (a) and after filtration (b).

용이성, 가격 및 설치비용 등을 감안할 때 석탄회가 특별히 유리한 점을 발견하지 못하였으며 규사가 경제성과 효율에 적합한 물질로 판단된다.

모래에 걸러진 부유물질은 매우 미립의 크기로 모래 표면에 침전되어 있음을 관찰 할 수 있다(Fig. 9).

현재 H광산의 사여과 운용 과정을 보면 모래 자체의 막힘 현상보다는 사여과 하부 다공질 판에 발생하는 침전에 의한 막힘 현상에 의해 수리 수요가 발생한다. 따라서 매질의 개선 또는 공정개선과 함께 침전물 발생 특성의 규명과 침전물 생성 방지 기작과 제거에 관한 연구 역시 필요하다. 즉, 침전물의 생성을 제어하는 지구화학 조정인자와 기작을 바탕으로 물리화학 또는 미생물학적 제어과정이 고려되고 있다.

#### 4. 결 론

규사를 이용한 부유물질 제거방법은 다른 어느 물질과 비교할 때에 경제성, 효율 및 활용성 등에서 비교 우위를 가진다. 따라서 현재로서는 기존의 규사를 그대로 활용하

는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 여기에 입상활성탄을 혼합하여 기존 성능을 개선할 수 있는 것으로 판단된다. 결론적으로 규사를 유지하되 입상활성탄을 혼합함으로써 개선된 매질효과를 기존할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 최적 매질 선정과 함께 기존 공정의 개선도 동시에 추진, 전반적으로 시스템 성능을 증진하고자 하는 것이었다. 다양한 물질을 이용한 부유물질 제거 시험을 통한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 모래, 석탄회, 모래+석탄회 등 다양한 매질을 시험한 결과 모래가 가장 적합한 물질로 선택되었다. 이는 본 연구와 병행된 다른 시험 결과와도 일치한다.
2. 석탄회의 경우 미세물질의 유출로 인한 중금속 및 용존 또는 부유물질의 증가 위험성이 오히려 우려되었으며 경제성을 고려할 때 사여과 대체물질로 적합하지 않다. 특히 모래와 석탄회의 혼합 역시 혼합 공정의 어려움과 효율의 저하로 기존 규사나 입상활성탄의 혼합이 더 바람직한 것으로 판단된다.

3. 규사와 입상활성탄으로 구성된 매질로도 제거 효율 개선을 기대할 수 있으나 본 연구는 향후 공정의 개선을 통한 새로운 성능 개선 방법도 추가적으로 진행하고자 한다. 즉, 향후 최적 물질로 선정된 사여과 체계를 유지하되; 1) 경사관침전지를 전처리 수단으로 한 개선 처리 체계, 2) 개선된 처리체계를 중금속 함량이 금속광산에 비해 상대적으로 낮은 석탄광산의 광산 원배수에 적용하여 부유물질과 함께 중금속 등을 동시에 처리하는 방법 그리고 3) 기존 사여과 하부 다공판의 막힘 현상을 방지하기 위한 개선 방안 등을 중심으로 한 추가 연구가 필요하다. 아울러 본 연구에서 적용된 석탄광산 배수 외에 금속광산 배수에 적용하여 좀 더 다양한 경우에서 발생하는 광산 배수에 범용적으로 적용할 수 있는 사여과 처리체계의 개선이 필요하다.

#### 사 사

본 연구는 2012년 한국광해관리공단으로부터 기술개발 사업비를 지원받아 수행된 사업임. 또한 저자 중 1인(이상훈)은 “2011년도 가톨릭대학교 교비연구비 지원으로 이루어졌음”에 감사드린다.

#### 참 고 문 헌

Ahmaruzzaman, M., 2010, A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**, 327-363.

- Caraballo, M.A., Macias, F., Rotting, T.S., Nieto, and M.J., Ayora, C., 2011, Long term remediation of highly polluted acid mine drainage: A sustainable approach to restore the environmental quality of the Odiel river basin, *Environmental Pollution*, 159, 3613-3619.
- Cavanagh, J.E., Pope, J., Harding, J.S., Trumm, D., Craw, D., Rait, R., Greig, H., Niyogi, D., Buxtion, R., Champeau, O., and Clemens, A., 2010, A framework for predicting and managing water quality impacts of mining on streams: a user's guide, *Landcare Research New Zealand*, 139-234.
- Choi, S.K., Lee, S., Song, Y., and Moon, H.S., 2002, Leaching characteristics of selected Korean fly ashes and its implications for the groundwater composition near the ash disposal mound, *Fuel*, 81, 1083-1090.
- Gaikwad, R.W. and Gupta, D.V., 2008, Review on removal of heavy metals from acid mine drainage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 6(3), 81-98.
- Greenwood, R. and Kendall, K., 1999, Selection of Suitable Dispersants for Aqueous Suspensions of Zirconia and Titania Powders using Acoustophoresis, *Journal of the European Ceramic Society*, 19, 479-488.
- Healy, M.G., Rodgers, M., and Mulqueen, J., 2007, Performance of a stratified sand filter in removal of chemical oxygen demand, total suspended solids and ammonia nitrogen from high-strength wastewaters, *Environmental Management*, 83, 409-415.
- Jang, M., Lee, H.J., and Shim, Y.S., 2008, Coagulation and flocculation of fine suspended solids in mine drainage, *2008 Mine Reclamation Symposium*, 45-49.
- Johnson, D.B. and Kevin, H.B., 2005, Acid mine drainage remediation options: a review, *Science of the Total Environment*, 338, 3-14.
- Lee, S.W., Chun, S.H., Lee, K.K., and Lee S., 2007, Environmental Assessment of Vitrified Mine Tailing Aggregate Using Various Leaching Methods, *Environmental Impact Assessment*, 16, 35-43.
- Lesley, B., Daniel, H., and Paul Y., 2008, Iron and manganese removal in wetland treatment systems: Rates, processes and implications for management, *Science of the total Environment*, 394, 1-8.
- Maurer, B.W., Gustafson, A.C., Bhatia, S.K., and Palomino, A.M., 2012, Geotextile dewatering of flocculated, fiber reinforced fly-ash slurry, *Fuel*, 97, 411-417.
- Mohan, D. and Chander, S., 2006, Removal and recovery of metal ions from acid mine drainage using lignite - a low cost sorbent, *Journal of Hazardous Materials*, 137, 1545-53.
- Mulligan, C.N., Neginmalak, D., Masaharu, F., and Tomohiro, I., 2009, Filtration of contaminated suspended solids for the treatment of surface water, *Chemosphere*, 74, 779-786.
- Packman, J.J., Comings, K.J., and Booth, D.B., 1999, Using turbidity to determine total suspended solids in urbanizing streams in the Puget Lowlands, Canadian Water Resources Association annual meeting, Vancouver, BC, 27-29, 158-165.
- Rios, C.A., Williams, C.D., and Roberts, C.L., 2008, Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites, *Journal of Hazardous Materials*. 23-35.
- Sheoran, A.S. and Sheoran, V., 2006, Heavy metal removal mechanism of acid mine drainage in wetlands: A critical review, *Minerals Engineering*, 19, 105-116.
- Sullivan, A.B. and Drever, J.I., 2001, Geochemistry of suspended particles in a mine-affected mountain stream, *Applied Geochemistry*, 16, 1663-1676.
- Yong, R.N., Mulligan, C.N., and Fukue, M., 2006, Geoenvironmental sustainability, *CRC Press/Taylor and Francis*, Boca Raton. FL.