연구논문

백운석 광산 분진세척수의 탁도 개선과 산성광산배수 중화에 대한 적용성 평가

강중석¹⁾ · 임길재²⁾ · 서의영³⁾ · 정영욱²⁾ · 강상수¹⁾ · 김경만¹⁾ · 오참뚝²⁾ · 지상우^{2)*}

The Improvement of Turbidity and the AMD Neutralization Applicability Assessment of the Dolomite Mine Dust Screen Water

Jung-Seock Kang, Gil-Jae Yim, Eui-Young Seo, Young-Wook Cheong, Sang-Soo Kang,
Gyoung-Man Kim, Chamteut Oh and Sang-Woo Ji*

(Received 7 March 2014; Final version Received 15 May 2014; Accepted 19 June 2014)

Abstract : The improvement of turbidity in a dolomite mine dust screen water by coagulation and precipitation and the feasibility of neutralizing acid mine drainage (AMD) using the dust were investigated. The simulated dust screen water was prepared using S dolomite mine dust for experiments. The water shows 1,558 NTU of turbidity and pH 8.51. The median diameter (D50) of dust was 16.4 μm and the particle size distributes from 10 μm to 30 μm . Regardless of the coagulants, 90% of turbidity was improved at pH 3 and 5. The inorganic coagulant, PAC, and the organic coagulant, Nalco 9601, show good improvement efficiencies of turbidity at pH 7 and 11, respectively. In the experiment to neutralize acid mine drainage, dolomite dust increased the AMD pH from 2.89 to 6.7 for 10 min, and removed 100% of the dissolved Fe and Al.

Key words : Dolomite mine, Dust, Turbidity removal, Acid mine drainage, Neutralization

요 약 : 백운석 광산에서 발생하는 분진세척수에 대하여 응집침전에 의한 탁도제거 특성과 분진을 활용한 산성광산배수 중화처리 가능성을 평가하였다. 실험을 위해 S 백운석 광산의 분진을 이용해서 인공 분진 세척수를 제조하였다. 초기 탁도는 1,558 NTU 였으며, pH는 8.51이었다. 분진의 중수위 입도(D50)는 16.4 μm 였으며, 대부분이 10~30 μm 의 입자크기를 갖고 있었다. 응집제와 관계없이 pH 3과 5에서는 90%이상의 탁도가 제거되었다. 무기 응집제인 PAC의 경우 pH 7에서, 유기응집제인 Nalco 9601의 경우 pH 11에서 탁도제거 효율이 좋았다. 산성광산배수에 대한 중화능력 실험 결과 백운석 분진은 10분경과 후 pH 2.89인 산성광산배수의 pH를 6.7 이상으로 상승시켰고, 용존되어 있던 Fe와 Al을 100% 제거하였다.

주요어 : 백운석 광산, 분진, 탁도제거, 산성광산배수, 중화

서 론

광산개발은 필연적으로 다양한 형태의 광해를 유발한다. 가령광산에서의 대표적인 광해는 소음/진동, 분진, 탁수를 포함하는 수질오염 등이 있다. 분진 문제에 있어서는 지표에서 석산 혹은 석회석 광산 등을 개발할 경우

암석의 파분쇄, 선별 혹은 가공 처리하는 과정에서 많은 양의 폐석과 비산성 미립 석분이 발생할 수 있다. 석산의 경우 원석의 30% 가량이 채굴 및 석재 가공과정에서 석분으로 발생하는 것으로 보고된 바 있다(Park *et al.*, 2010). 국내 광산지역에서 발생하는 민원의 22%가 광산 채굴 및 운송과정에서 발생하는 분진에 관한 내용이었다(Ji *et al.*, 2012). 최근에는 친환경 개발유도에 따라 광산 시설의 갱내화 추진으로 인해 작업장에서의 분진관리 또한 매우 중요해지고 있다.

석회석 또는 백운석 광산에서는 광석의 파분쇄 및 운반 과정에서 시설 주변을 밀폐하여 분진 포집장치를 가동하거나 살수 및 침전조를 설치하여 석분비산에 의한 주

1) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부
2) 한국지질자원연구원 지구환경연구본부
3) 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과

*Corresponding Author(지상우)

E-mail; swji@kigam.re.kr

Address; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon, Korea

변 환경의 영향을 최소화 하고 있다(Vardaka *et al.*, 1995). 암석의 파쇄 및 운반과정에서 세척수를 사용하거나 살수를 통해 분진을 제거할 경우 세척수의 처리 및 재활용을 위해서는 탁도제거와 슬러지 관리를 위해 침전조 설치가 필수적이다. 침전조에서 미세한 석분은 고액 분리가 신속하게 진행되지 않아서 탁수가 인근 하천으로 방류 될 수 있다. 또한 침전조의 석분 슬러지는 폐기물로 간주되므로 침전조에서 미세 석분의 빠른 침강을 위한 방안과 석분슬러지의 적절한 관리 및 활용방안이 요구되고 있다(Lee *et al.*, 2010). 침전조에서 탁도를 낮추기 위해서는 넓은 면적의 침전조를 설치하여야 하나 작업장 부지와 용수 재활용 측면에서는 빠른 시간내에 탁도를 제거하기위해 응집제를 투입하는 방안을 고려할 수 있다. 응집제는 수중에 분산되어 있는 고체 입자를 플록을 형성하여 침전과 여과 등 고액 분리를 용이하게 하기 위해 첨가하는 약품이다. 응집제를 투입함으로써 전기화학적 안정한 미세 입자의 안정성을 파괴시키고 물리적인 급속 교반에 의해서 입자를 서로 접촉시켜 작은 플록을 형성시키고 완속 교반에 의해 플록을 성장시켜서 중력 침전을 통해 수중의 미세 입자를 제거할 수 있다. 따라서 응집제 사용을 통해서 침전조의 소요부지 면적을 줄일 수 있고 환경 문제를 최소화 할 수 있다(Park *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011). 응집제는 무기계 응집제와 유기계 고분자 응집제로 크게 구분되고 일반적으로 두 응집제를 병행하여 사용하고 있으나, 최근에는 유기계 고분자 응집제를 더 많이 사용하는 추세다.

국내에서 사용하는 무기계 응집제의 종류에는 소석회(수산화칼슘), 백반, 염화알루미늄, 산화철(III) 및 황산철(II) 등이 있고 유기계 고분자 응집제로는 녹말류, 폴

리아크릴아미드와 그 유도체 등이 있다. 대부분의 응집제는 유해 위험성이 적고 상온 상압 하에서 화학적으로 안정한 것으로 보고되고 있다. 한편 독성에 대한 동물실험 결과, 현재까지는 생체 축적이 없는 등 독성이 없는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2010). 국외에서는 석분의 제거에 응집제를 적용하기 위한 연구가 다양하게 진행된 바 있으나(Ersoy, 2005; Kurama and Karaguzel, 2012; Tasdemir and Kurama, 2013), 국내에는 관련된 연구가 매우 적은 실정이다(Lee *et al.*, 2011; Kang *et al.*, 2013). 석분 슬러지의 경우에는 재활용하기 위한 연구가 진행되어 인조 대리석 개발(Sohn *et al.*, 1995), 벽돌제조(Bilgin *et al.*, 2012), 골재, 토양 개량제 및 도로 재료로의 활용 연구(Jeong *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011), 도자기 원료로의 활용 연구(Lee *et al.*, 1997), 중금속을 제거하기 위한 흡착제로서의 활용 연구(Chin and Min, 2000), 응집제 제조 연구(Lee *et al.*, 2001) 등이 연구된 바 있다. 석분 슬러지는 일반 하수 슬러지 보다 유기물질의 성분이 낮고 함수율이 낮은 일반적 특성을 갖고 있고 원암의 구성광물에 의해서 화학적 특성이 지배된다.

백운석을 채광하는 S 광산의 경우 발생하는 분진은 일반 석분 슬러지에 비해서 탄산염 광물의 조성이 우세하므로 알칼리 특성을 활용할 수 있는 개연성이 크다. S 광산은 현재 갱내에서 채광된 백운석을 파쇄하여 이송하고, 여과집진시설을 통해 분진을 억제하고 있다(Fig. 1). 향후 갱내에서 파쇄선별 작업이 지하에서 수행된다고 가정했을 때 안전한 작업환경을 확보하기 위해서 갱내 환경에 최적화된 집진방식, 사양 선정 및 농도 분진 대응 집진 설비 제작이 요구된다.

Fig. 1. The crushed ore moving system (left) and dust catch system (right) of the S mine.

본 연구에서는 S 백운석 광산의 갱내 파쇄시 발생하는 분진을 살수장치를 통해 세척했을 경우를 가정하여 세척수를 재활용하기 위해 세척수의 특성을 파악하고, 응집제의 종류에 따른 탁도제거 효율을 평가하였다. 또한 분진의 주성분인 백운석 석분의 산성광산배수 중화처리 활용 가능성을 제시하였다.

실험방법

S 광산 현황

S 광산은 충청북도 단양군 매포읍에 위치한 백운석 광산으로서, 광구 전반에 걸쳐 조선계의 홍월리층 및 삼태산층이 분포한다. 홍월리층 및 삼태산층은 습곡으로 인하여 반복되어 나타나는데, 광구의 서측에서는 배사구조를 동측에서는 향사구조를 보여준다. 홍월리층에는 담회색내지 회색의 백운석이 주로 분포하며, 삼태산층에는 암회색의 결정질 석회암 및 암회색 내지 흑색의 셰일이 분포한다. S 광산의 주 가행대상은 홍월리층의 백운석이다(KORES, 1981). 이 지역 백운석의 기원이 석회암이 백운석화작용을 받아 형성된 방해석질 백운석으로 이루어져 있다(Lee, 1983).

분진 세척수의 제조와 탁도, 입도 및 수질 분석

채집된 S 광산 분진을 Kang 등 (2013)에서 수행된 실험의 세척수 수질을 기준으로 하여 증류수에 S 광산 여과 집진시설 포집 분진을 500 mg/L로 넣어 약 1,500 NTU의 탁도를 제조하였다. 이 분진 세척수를 1L 매스 실린더 및 임호프콘(Imhoff cone)에 투입하여 1시간 동안 고액분리를 관찰하고 침강성 슬러지 발생량을 측정

하였다(Fig. 2). 분진 세척수의 탁도는 휴대형 탁도계(Hach 2100P Portable Turbidimeter, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한 미리 건조하여 무게를 측정해 둔 0.45 μm 여과지(Nitrocellulose Membrane Filter)를 이용하여 분진 세척수를 여과 한 후 고체 무게를 측정하여 부유물질(Suspended Solid, SS)을 구하였다. 분진 세척수 부유물질에 대하여 입도분석기(Malvern Instruments Ltd. Mastersizer 2000, UK)를 이용하여 입도를 측정하였다. 수질 분석을 위하여 0.45 μm 여과지(Nitrocellulose Membrane Filter)로 분진 세척수를 여과한 후 50 mL씩 분취하여 미리 세척해 둔 튜브 2개에 나누어 담고, 양이온 분석용은 침전 및 벽면흡착 등에 의한 영향을 방지하고자 농질산 다섯 방울을 첨가하여 pH를 2 미만으로 낮추어 준 후 실험실에서 ICP-AES (HORIBA Jobin Yvon, JPN)에 의해 성분 분석을 실시하였다. 또한, 실험에 사용된 분진의 광물조성을 파악하기 위해 XRD (X-ray diffraction, Phillips X'pert MPD, NLD)를 이용하여 구성광물을 감정하였다.

응집 실험

응집에는 무기고분자 응집제인 PAC과 음이온 유기고분자 응집제인 Nalco사의 9601을 사용하여 응집실험을 수행하였다. 응집실험은 1L 비이커에 인공 분진 세척수 500 mL를 투입하고 각각의 비이커에 응집제를 각 농도별(1 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L) 3 mL 씩 투입하여 급속교반 200 rpm 20초, 완속교반 50 rpm 40초 후 정치상태에서 분단위로 상등수의 탁도(turbidity)를 휴대형 탁도계(Hach 2100P Portable Turbidimeter, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한 1M HCl, 1M NaOH를 사용하여 pH를 3, 5, 7, 9, 11로 변화를 주어 pH별 효과를 관찰하였다.

Fig. 2. View of SS in the mass cylinder and the Imhoff cone over time.

분진에 의한 산성광산배수 중화특성

S 광산의 분진 입도는 모두 1 mm 미만의 미세입자였다. 채취된 분진을 건조로(105℃)에서 24시간 건조시킨 후 산성광산배수 500 mL에 각각 10 g, 50 g, 100 g 첨가하였다. 정해진 시간(0, 10, 30, 60, 120분)에 따라서 상등수에 대하여 pH를 측정 하였다(HACH HQ40d, USA). 또한 시료의 일부(10 mL)를 주사기로 채취하고 0.45 µm 여과지를 이용하여 여과한 후 농질산을 첨가한 후 실 내에서 ICP-AES (HORIBA Jobin Yvon, JPN)에 의해 성분 분석을 실시하였다. 분석항목은 Fe, Al 및 Mn 이었다. 실험에 사용된 산성광산배수는 강원도 강릉에 위치한 와룡탄광(7갱)의 갱내수였다.

결과 및 고찰

분진 입도분포

S 광산 분진의 측정결과 중수위 입도(D50)는 16.4 µm로 측정되었고 입자분포 형태가 중간 입도 영역에 대부분 분포하였다(Table 1; Fig. 3). 즉, S 광산의 분진은 대부분의 입자가 10~30 µm의 크기로 매우 미립의 분진이다. 이는 세척수의 탁도 제거에 긴 시간이 소요될 가능성이 클 것으로 예상된다.

Table 1. Chemical properties of S mine synthetic dust screen water

pH	8.51
Eh(mV)	151.7
EC(µS/cm)	97.6
TDS(mg/L)	45.8
Turbidity(NTU)	1,558
SS(mg/L)	745.5
Alkalinity(mg/L CaCO ₃)	345
Al(mg/L)	0.03
Fe(mg/L)	0.00
Ca(mg/L)	11.82
Mg(mg/L)	5.36
Na(mg/L)	0.32
K(mg/L)	0.00
Si(mg/L)	0.11
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	2.24
D10	1.7
Particle size (µm) D50	16.4
D90	57.9

분진 세척수의 수질 특성

제조된 S 광산 분진 세척수는 pH 8.51의 알칼리성 수질을 갖는다(Table 1). Fig. 4에서 보여주듯이 S 광산 분진은 대부분 백운석으로 구성되어있고, 일부 방해석이 포함되어 있다. 따라서 S 광산 분진에 포함된 백운석과 방해석이 용해되면서 알칼리도를 발생시키고 있다. 또한, 용존 이온의 경우에도 백운석과 방해석이 용해되면서 발생된 Ca와 Mg의 농도가 주된 이온으로 존재한다(Table 1). 분진 세척수의 알칼리도는 345 mg/L as CaCO₃ 이다. 이러한 높은 알칼리도를 갖는 수질 특성은 인근에 분포하는 석탄광에서 발생하는 산성광산배수의 중화에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

분진 세척수의 응집침전 및 탁도제거 특성

분진 세척수의 초기 SS와 탁도는 각각 745.5 mg/L와 1,558 NTU였다. Fig. 2에서 보여주듯이 분진입자와 물 사이에 뚜렷한 고-액 경계가 생기지 않고 일부 입자만 침강하는 특징을 보였다. 임호프 콘 바닥에 침전한 분진 입자는 50분경과 후 그 부피가 1 mL로 유지되어 그 부피 증가가 없었다. 따라서 유입되는 탁수로부터 1 L에 1 mL 부피의 석분이 침전되고 있고 자연적으로 침전 가능한 석분의 양은 유입수의 0.1%(부피비)에 해당된다(Table 2).

분진 세척수를 매스실린더에서 넣고 상등수에 대하여 탁도 및 SS를 측정한 결과 탁도 및 SS가 시간이 경과하면서 서서히 감소하였고 60분 경과시 각각 142.5 NTU 및 55.2 mg/L로 측정되었다(Table 3; Fig. 5). 이때 탁도 및 SS가 유사한 침강특성을 보여주고 있으므로 SS 응집 시험시 자료 수집이 쉬운 탁도 측정을 통하여 응집 특성을 평가하였다. 이때 일정하지는 않지만 탁도와 SS의 비율을 확인하고 그 비의 변화를 기준으로 판단하였다.

500 mL의 S 광산 분진 세척수에 PAC과 Nalco 9601을 각각 1, 5, 10 mg/L의 농도로 3 mL 씩 투입하고 10 분간 응집/침전시켰을 때, 두 응집제 모두 농도가 증가하면서 탁도제거 효율이 증가하였다(Table 4). 혼합속도와

Fig. 3. Change in particle size distribution of the S mine dust.

Fig. 4. The XRD patterns of the S mine dust(Dol.: Dolomite, Cal.: Calcite).

Table 2. The volume of sludge in the Imhoff cone over time

Time (min.)	0	5	10	20	30	40	50	60
Vol. of sludge (ml)	-	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1	1

Table 3. Change in turbidity and SS over time

Time (min)	0	5	20	40	60
Turbidity (NTU)	1,558	663.5	236.5	199.5	142.5
SS (mg/L)	745.5	356.4	149.2	85.2	55.2

Table 4. The effect of concentration of the coagulant on the removal of turbidity

	Raw water	Coagulant dosage (mg/L)		
		1	5	10
PAC	686	323	290	267
Nalco 9601	686	382	342	310

Table 5. The effect of mixing type and time on the removal of turbidity

	Rapid mixing at 200 rpm (time, sec)								
	20			40			60		
	Slow mixing at 50 rpm (time, sec)								
	40	80	120	40	80	120	40	80	120
PAC	407	388	371	358	366	339	351	341	325
Nalco 9601	430	411	407	441	402	375	430	409	400

Table 6. The effect of pH adjustment on the turbidity

		pH					
		8.51	3	5	7	9	11
		1)					
Turbidity	0 min.	1,558	161	449	1,340	1,490	1,440
(NTU)	10 min.	850	91.3	269	835	1,040	915

1) pH of raw water

Fig. 5. Change in turbidity and SS over time.

시간에 의한 영향을 파악하기 위해 1 mg/L의 응집제를 각각 넣고 교반시간을 다르게 하여(급속 200 rpm, 20초, 40초, 60초, 완속 50 rpm 40초, 80초, 120초) Jar test를 수행하였다(Table 5). 10분후의 탁도제거 효율은 큰 차이가 없었는데, Nalco 9601이 54.89%의 제거율을 보이고 PAC이 61.1%의 제거율을 보여 PAC이 6% 가량 좋은 효율을 보였다.

분진 세척수의 pH를 3~11 까지 변화 시킨 결과 pH 3과 5에서 90%이상의 탁도제거율을 보였다(Table 6). 이때, 탁도제거 효과는 응집제의 투여량과 관계없이 유사하게 나타났다. 이는 응집제에 의한 효과보다는 pH를 조절하면서 분진 중 크기가 작은 입자가 용해되면서 부유 미세입자의 양이 줄어들었기 때문에 탁도가 감소했을 것으로 판단된다. Fig. 6에서 보면, 두 응집제 모두 낮은

Fig. 6. The Variation of the turbidity over time by each dosage of PAC and Nalco 9601 at pH 3, 5, 7, 9, and 11.

Fig. 6. Continued.

pH에서는 응집제의 농도에 의한 탁도제거의 차이가 나타나지 않고 있다. pH 7에서부터는 농도에 따라 차이가 나타나는데 두 응집제 모두 응집제의 농도가 높을수록 탁도제거 효율이 좋아지고 있다. pH 7에서는 PAC의 탁도제거 효율(90% 이상)이 Nalco 9601(최대 80%)보다 우수한 것으로 나타났다. pH 9와 11에서는 PAC의 경우 농도에 따른 탁도제거 효율의 차이가 거의 없었는데, pH 9에서는 응집제 농도가 높을 때 오히려 탁도제거 효율이 나빠졌다. Nalco 9601의 경우에는 pH 7에서보다 pH 9와 11에서 탁도제거 효율도 좋아지고 응집제의 농도가 10 mg/L 일 때 85% 이상의 제거 효율을 보였다. PAC과 Nalco 9601이 pH에 따라서 다른 응집효과를 갖는 점에 대한 이해를 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

분진에 의한 산성광산배수 중화특성

산성광산배수는 지하 암석내에 존재하는 황화광물들이 광산활동에 의해 공기 및 물에 노출되어 산화반응을 일으키게 되면서 황산기와 산도가 발생되어 만들어진(Stumm and Morgan, 1996). 대표적인 황화광물인 황철석은 거의 모든 암석내에 존재하여 광산활동에 의해 발생하는 산성광산배수의 주된 요인이 된다. 황철석 산화의 결과로 인해 산성광산배수는 낮은 pH와 높은 용존 금속 이온을 함유하는 특성을 갖게 된다(Younger *et al.*, 2002).

중화실험에 사용된 산성광산배수는 강원도 강릉시 소재 폐탄광인 와룡광산(7갱)의 광산배수로 Table 7에 나타난 바와 같이 pH 2.89, Fe 23.50 mg/L 및 Al 20.92 mg/L 등의 특성을 갖는 강산성의 산성광산배수이다.

백운석이 이산화탄소 및 물과 반응하면 식 (1)과 같이 알칼리도를 생성 하게 된다. 또한 식 (2)와 같이 산성배수의 산(H^+)과 반응하여 알칼리도(HCO_3^-)를 생성할 수도 있다. 이러한 특성을 이용한다면, 일반적으로 사용되는 석회석에 비하여 반응효율이 낮을 수는 있으나 백운석에 의해 발생하는 알칼리도에 의해 산성광산배수의 중화가 가능할 것이다. 또한 알칼리도에 의한 중화를 통해 산성광산배수에 포함된 금속의 침전/제거가 가능할 것이다.

S 광산 분진은 백운석이 주 구성광물 이었다(Fig. 4). 분진의 입도가 모두 1 mm 미만으로 첨가량이 많을수록 산성광산배수의 pH를 높게 상승 시켰다(Fig. 7(a)). pH의 경우 10분 이내에 6.7 이상으로 빠르게 상승하였다(Fig. 7(a)). 10 g의 분진을 투입한 경우에는 1시간까지는 6.7 가량으로 수렴되었고, 100 g의 분진을 투입한 경우 8이상의 pH를 보였다. 이는 산성배수와 반응했을 때 백운석의 용해로 인해 발생된 중탄산 이온(HCO_3^-)에 의한 영향이다. 작은 입도의 분진은 입도가 큰 경우보다 반응속도가 빠르므로 빠른 시간에 중화효과를 보여줄 수 있다. 입도에 의한 영향은 석회석을 사용한 연구사례에서도 연구된바 있는데, 대부분의 연구에서 1 mm이상의 입도에서도 중화효과가 좋게 나타났으나 1 mm이상의 입도에서는 중화효과를 얻는데 걸리는 시간이 더 길게 나타났다(Lyu *et al.*, 1996; Kang *et al.*, 2013). 이러한 입도에 의한 영향은 비표면적과 관련이 있다. 즉, 입도가 작을수록 비표면적이 커져서 산성광산배수와 백운석 입자간의 반응이 더 잘 일어날 수 있게 된다(Lyu *et al.*, 1996). 금속농도의 경우 Fe와 Al은 10분 만에 100%의 제거율을 보였다(Fig. 7(b)와 (c)).

산성광산배수의 중화처리를 위해서 석회석을 사용하는 것은 매우 일반적이며, 상당수의 연구가 진행되어왔다(Lyu *et al.*, 1996; Cravotta and Trahan, 1999; Younger *et al.*, 2002; Santomartino and Webb, 2007). 최근에는 자연정화시설과 물리화화시설의 중간 형태인 Semi-active 시설이 다양한 형태로 개발되어 적용되고 있다(Younger *et al.*, 2002; Hedin Environmental, 2008). 이러한 Semi-active 시설에 석회석 또는 백운석 광산에서 발생하는 분진세척수를 공급하여 세척수에 포함된 알칼리도를 이용한 산성광산배수의 중화와 금속의 제거가 가능할 것으로 생각된다. 또한 자연정화시설의 효율 향상을 위해 기질층에 석회석분말 또는 석회석 조각을 혼합하는 것이 제안된바 있다(Neculita *et al.*, 2011). 이러한 경우 석회석 또는 백운석 광산의 분진의 혼합을 통한 비용절감과 중화효과를 얻는 것이 가능할 것으로 생각된다. 또한, 분진세척수의 응집침전에서 pH가 낮을 때 미립 분진의

Table 7. The chemical properties of the Waryong coal mine (7th adit)

pH	EC ($\mu S/cm$)	Fe	Al
		(mg/L)	
2.89	1,118	23.50	20.92

용해에 의해 탁도제거 효율이 우수했던 바, 인근 광산의 산성광산배수와 백운석광산의 분진 세척수의 혼합에 의한 처리는 두 종류의 광산배수 처리를 함께 진행할 수 있는 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 7. The Variation of (a) pH, (b) Fe concentration, and (c) Al concentration over time by each dosing weight of the S mine dust.

결론

본 연구에서는 백운석 광산에서 발생하는 분진의 제거를 위한 세척수에 대하여 응집제를 이용한 탁도제거 특성을 파악하고 분진을 구성하는 탄산염광물에 의한 알칼리 특성을 이용한 산성광산배수의 중화처리 가능성을 평가하였다.

S 백운석 광산 분진의 중수위 입도(D50)는 $16.4 \mu\text{m}$ 이며, 대부분의 입자가 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 의 크기로 매우 미립의 분진이다. 분진의 주 구성광물은 백운석과 일부 방해석으로 구성되었다. 실험을 위해 제조된 분진 세척수는 pH 8.51, 초기 SS와 탁도는 각각 745.5 mg/L 와 $1,558 \text{ NTU}$ 였다.

응집 시험 결과 pH 3과 5의 낮은 pH 조건에서 응집제의 투입과 관계없이 90%이상의 탁도제거율을 보였다. 무기 응집제인 PAC의 경우 pH 7에서 90%이상의 탁도제거율을 보였고, 유기성 응집제인 Nalco 9601의 경우에는 pH 11에서 85% 이상의 제거 효율을 보였다.

분진을 이용한 산성광산배수의 중화효과는 pH 2.89였던 와룡탄광(7갱)의 광산배수를 10분 경과 후 pH를 6.7 이상으로 상승 시켰고 용존 Fe 및 Al을 100% 제거하였다.

S 광산은 폐탄광이 다수 분포하는 영월지역과 인접해 있다. S 광산의 분진에 함유된 미립의 백운석 입자는 주변의 폐석탄광에서 발생하는 산성광산배수의 중화를 위해 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(2011201030040)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

- Bilgin, N., Yeprem, H.A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. and Marşoglu, M., 2012, "Use of waste marble powder in brick industry," *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 449-457.
- Chin, H.I. and Min, K.W., 2000, "The Possibility of Utilizing Stone Power Sludges as Adsorbents for Heavy Metals," *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 33, No. 6, pp. 519-524.
- Cravotta, C.A. and Trahan, M., 1999, "Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage," *Applied Geochemistry*, Vol. 14, pp. 581-606.
- Ersoy, B., 2005, "Effect of pH and polymer charge density on settling rate and turbidity of natural stone suspensions,"

- Int. J. Miner. Process*, Vol. 75, pp. 207-216.
- Hedin Environmental, 2008, "Optimizing the design and operation of self-flushing limestone systems for mine drainage treatment," www.hedinenv.com/pdf/flushing_final_report.pdf, p. 80.
- Jeong, J.S., Song, G.Y., Ahn, J.H. and Kim, T.H., 2007, "Utilization of Stone Sludges Produced by Stone Manufacturing Process as Asphalt Concrete Filler," *J. of The Korea Society for Civil Engineers*, Vol. 27, No. 4D, pp. 457-464.
- Ji, S.W., Cheong, Y.W., Yim, G.J., Lee, H.B. and Oh, C., 2012, "The study on the Policy Direction of the Eco-friendly Mining Activity for the Improvement of the Image of the Mining," KIGAM report, IP2012-016-2012 (1), p. 146.
- Kang, J.S., Chung, S.K., Cheong, Y.W., Seo, E.Y., Yim, G.J. and Ji, S.W., 2013, "Coagulation of Suspended Solids and Neutralization Capacity of Sludge in a Settling Pond of O Limestone Mine," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 50, No. 2, pp. 204-211.
- KORES, 1981, "Economic Mineral Deposits of Korea, Vol. 9, None-Metals," KORES, p. 484.
- Kurama, H. and Karaguzel, C., 2012, "The effect of Zeta Potential on the Sedimentation Behavior of Natural Stone Processing Effluent," *Physicochem. Probl. Miner. Process*, Vol. 49, No. 2, pp. 575-586.
- Lee, J.H., Yang, S.H., Choi, C.S. and Bang, K.W., 2011, "Analysis of Coagulation-Flocculation Conditions for the Removal of Tunnel Excavation Wastewater," *J. of Korean Society of Urban Environment*, Vol. 11, No. 1, pp. 89-95.
- Lee, P., Youm, S. and Kang, M., 2010, "Environmental Contamination and Best Management of Stone-dust from Quarry Mine," *Econ. Environ. Geol.*, Vol. 43, No. 4, pp. 315-332.
- Lee, S.H., Park, C.W., Choi, S.C. and Lee, E.S., 1997, "Separation of the Quartz - Feldspar Component from Waste Stone Powder Sludge and Product Evaluation Test for the Raw Material of white Chinaware," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 463-470.
- Lee, S.H., Park, J.L. and Kim, B.Y., 2001, "Development of flocculant from stone powder," *J. The Korean Society of Environmental Administration*, Vol. 7, No. 3, pp. 337-343.
- Lee, W.K., 1983, "Sedimentary Petrological Study on the Heungwolri Formation," *J. of the Geological society of Korea*, Vol. 19, No. 3, pp. 190-202.
- Lyu, K.K., Lee, S.H., Ann, J.M. and Park, J.K., 1996, "The Study on Neutralization Treatment for Acid Mine Drainage by using Limestone," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 33, No. 2, pp. 226-232.
- Neculita, C.M., Yim, G.J., Lee, G., Ji, S.W., Jung, J.W., Park, H.S. and Song, H., 2011, "Comparative effectiveness of mixed organic substrates to mushroom compost for treatment of mine drainage in passive bioreactors," *Chemosphere*, Vol. 83, pp. 76-82.
- Park, J.K., Hong, K.N. and Han, S.H., 2010, "The Development of Structural Aggregate using Waste Stone Powder Sludge," *Korea Concrete Institute 2010 fall meeting*, pp. 225-226.
- Santomartino, S. and Webb, J.A., 2007, "Estimating the longevity of limestone drains in treating acid mine drainage containing high concentrations of iron," *Applied Geochemistry*, Vol. 22, pp. 2344-2361.
- Sohn, J.S., Kim, B.G. and Kim, C.K., 1995, "Manufacture of Artificial stone using Waste Stone and Stone Powder," *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, Vol. 4, No. 1, pp. 4-11.
- Stumm, W. and Morgan, J.J., 1996, "Aquatic Chemistry," 3rd., Wiley, p. 1022.
- Tasdemir, T. and Kurama, H., 2013, "Fine Particle Removal from Natural Stone Processing Effluent by Flocculation," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 32, No. 2, pp. 317-324.
- Vardaka, E., Cook, C.M., Lanaras, T., Sgardelis, S.P. and Pantis, J.D., 1995, "Effect of dust from a limestone quarry on the photosynthesis of quercus coccifera, an Evergreen Schlerophyllous Shrub," *Environmental contamination and toxicology*, Vol. 54, pp. 414-419.
- Younger, P.L., Banwart, S.A. and Hedin, R.S., 2002, "Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation," Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 464.

강 중 석

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(本學會誌 第50卷 第2号 參照)

서 의 영

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 박사과정
(本學會誌 第51卷 第2号 參照)

강 상 수

1980년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1987년 인하대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1999년 동아대학교 대학원 자원공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; kss@kigam.re.kr)

오 참 뜻

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 연구원
(本學會誌 第50卷 第2号 參照)

임 길 재

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원
(本學會誌 第51卷 第2号 參照)

정 영 욱

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원
(本學會誌 第51卷 第2号 參照)

김 경 만

2006년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2008년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 박사과정
(E-mail; yaong011@kangwon.ac.kr)

지 상 우

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원
(本學會誌 第51卷 第2号 參照)