

폐광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속오염 확산특성

강미아^{1*} · 박지민¹ · 김광태²

¹안동대학교 환경공학과, ²전북대학교 환경공학과

Diffusion Characteristics of Heavy Metal Pollution depend on Distance from Abandoned Mines

Meea Kang^{1*}, Ji-Min Park¹, and Kwang-Tae Kim²

¹Department of Environmental Engineering, Andong National University

²Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

인근 토양의 Cu, Pb, Hg 및 As의 주요오염원인 폐광산을 대상으로 폐광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속 오염원의 확산특성을 조사하였다. 광산A는 Cu와 Pb의 오염원으로, 광산B는 Hg의 오염원으로, 광산C는 Pb의 오염원으로, 광산D는 Cu, Pb 및 As의 오염원으로 인근토양에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. As를 제외한 다른 중금속류는 폐광산으로부터의 이격거리가 100 m 이내인 지점에서 고농도로 검출되지만 그 이상의 이격거리에 소재하는 토양에서의 검출은 극히 낮은 농도로 분석되었으므로 이들 중금속류에 의한 토양오염은 우려할 수준이 아님을 알 수 있다. 고농도로 검출되는 비소의 경우에는 이격거리에 따라 일정한 감소경향을 나타내지 않으므로 비소에 의한 오염수준을 예측하기 어렵다. 4개의 광산을 대상으로 한 이격거리에 따른 Cu와 Pb의 오염확산 예측을 위한 방정식을 구한 결과, 상관계수는 각각 0.71과 0.68로 양호한 관계를 나타내었다. 특히 Cu와 Pb의 상관성을 상관계수로 살펴보면 0.84로 매우 유효하므로 이들의 토양내 화학적 거동이 유사함을 알 수 있어 이들을 처리하는 기술을 응용하는데 있어서도 본 연구결과가 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

주요어 : 폐광산, 중금속, 토양오염, 확산, 이격거리

In the study it was investigated the diffusion characteristics of heavy metal pollutions such as Cu, Pb, Hg and As which was the main pollution sources of soils from abandoned mines. The pollution of Cu and Pb was caused by Mine A, that of Hg was caused by Mine B, that of Pb was caused by Mine C and that of Cu, Pb, As was caused by Mine D. Though the high concentration was detected within 100 m from abandoned mines, the low concentration was detected over than 100 m from abandoned mines in all heavy metals investigated except As. It means that it was very difficult to estimate the pollution level of As caused abandoned mines. The results were discussed in the concentrations of Cu, Pb and distances showed a good relationship with 0.71 and 0.68 as the coefficient of correlation, respectively. In particular the relativity of Cu to Pb was very strong with 0.84 as the coefficient of correlation. It was consistent with the chemical behavior in soils in the case of Cu and Pb. Therefore it will be a promising approach to remove Cu and Pb with estimated values in the study.

Key words : abandoned mine, heavy metal, soil pollution, diffusion, distance

서 론

폐광산에서 기인하는 중금속은 인근의 토양을 오염시켜 이로 인한 지하수 오염과 함께 농작물의 성장에도

부정적인 영향을 미치게 된다. 즉 적절한 광해대책 없이 폐광산 주변에 방치되어 있는 광산폐기물 뿐 만 아니라 인근의 지하수를 마시거나 이를 이용하는 주민들의 건강상의 문제를 야기할 가능성도 매우 높은 실정이다. 오

*Corresponding author: wdream@andong.ac.kr

염된 토양과 지하수를 이용하여 경작되는 농작물은 다양한 경로를 통해 이를 섭취하는 사람에게도 유해하다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 국내에서는 인체에 미치는 환경오염원의 주요 인자로서 폐광산을 관리하는 행정 연구기관들이 많으며, 이를 조사 및 연구결과를 근거로 폐광산에 대한 적극적인 조치를 취하고 있다. 그러나 국외의 경우와 비교하면 환경오염과 복구기법 등에 대한 연구들이 아직까지는 소극적으로 이루어지는 경향이 있다. 국외의 경우에는 폐광산 광미장 및 주변지역 중금속 거동과 분포 등에 대한 연구 및 중금속 함유상의 광물학적 지구화학적 연구 등이 활발하다(Macklin *et al.*,¹ 2003; McGregor *et al.*, 2002; Hudson-Edwards *et al.*, 2003; Catalan *et al.*, 2002). 최근 국내연구 중에는 폐광산에서 발생하는 중금속 오염의 거동특성(강미아, 2007; 강미아 등, 2007; 이은기 등, 2007; 김광태, 2005), 광미적지장의 지구화학적 특성(임길재 등, 2006) 등이 있다. 한편, 토양을 오염시키는 주요원인으로서의 폐광산은 호우시 유출 되는 경향을 무시할 수 없으며, 이로 인해 2차적으로 발생되는 물환경과 토양환경의 오염은 피할 수 없는 실정이며, 그 오염정도는 폐광산으로부터의 이격거리와 관계가 밀접할 것으로 판단된다. 폐광산에서 기인하는 중금속 오염은 토양내에서의 중금속의 결합형태, 풍화 등의 외부조건 변화로 생성된 2차 생성물의 형태, 용해도, pH, 점토함량, 수분함량 및 투수성 등 토양의 물리화학적 특성에 영향을 받으며(Palo Alto, 1984), 이격거리가 멀어질수록 오염수준이 낮아 질 것으로 기대되나 실질적으로 중금속 오염수준예측에 대한 연구는 시도된 바가 국내에는 없는 실정이다. 본 연구에서는 전라남도지역에서 Cu, Pb, As 등의 중금속 오염이 심각한 폐광산 4개소를 대상으로 광산으로부터의 이격거리와 토양 중의 중금속 오염원과의 상관성을 고찰하고, 이들 중금속 간의 오염상관도를 이용하여 중금속의 거동을 해석하는 것을 목적으로 한다. 본 연구 결과를 바탕으로 이들 폐광산 이격거리에 따른 중금속 오염물질에 대한 확산특성을 파악하여 인근 지역의 토양환경에 미치는 폐광산의 위해정도를 예측할 수 있다.

시료수집 및 실험방법

시료수집

전라남도에 소재하고 있는 광산 중에서 중금속 오염이 심각한 수준인 4개의 광산을 대상으로 하였으며, 각각 석동광산(Mine A), 명봉광산(Mine B), 아독광산(Mine C)

Table 1. Sampling sites and distance from abandoned mines.

Mines	Address	Sampling Sites : Distance (m)
A Seokdong	Kwangyang, Jeonnam	10, 400, 900, 1500
B Myongbong	Boseong, Jeonnam	100, 150, 800, 1300
C Adok	SunCheon, Jeonnam	10, 800, 1400
D Unjeok	YoungAmkun, Jeonam	20, 450, 950, 1800

및 은적광산(Mine D)이다. 이들 4개 광산의 소재지는 Table 1과 같으며, 시료수집 위치는 광산으로부터의 이격거리에 따라 수집하였다. 광산A에서는 광산으로부터의 이격거리가 10 m, 400 m, 900 m 및 1,500 m인 4개 지점에서, 광산B에서는 광산으로부터의 이격거리가 100 m, 150 m, 800 m 및 1,300 m인 4개 지점에서, 광산C에서는 광산으로부터의 이격거리가 10 m, 800 m 및 1,400 m인 3개 지점에서, 광산D에서는 광산으로부터의 이격거리가 20 m, 450 m, 950 m 및 1,800 m인 4개 지점에서 토양시료를 채취하였다.

실험방법

수집한 각 지점의 시료는 실험실로 옮겨 풍건한 후 2 mm 체를 통과시킨 다음 1,000 g을 달아 비이커에 넣고 증류수 1,000 mL을 주입하여 혼합한 후 pH(HI 991003, U.S.A.)를 측정하였다. 토양 내 함유 중금속류는 Cu, Pb, Ni, Cd, Hg, As 및 CN 등의 7개 항목에 대해 토양오염공정시험방법에 따라 분석하였다.

결과 및 고찰

광산주변 토양의 오염수준

Table 2에 나타난 광산A, B, C 및 D 주변토양의 중금속 오염수준으로 광산에 의한 오염도수준을 평가할 수 있다. 대상으로 한 4개의 폐광산 인근 토양의 pH는 광산A(5.1~6.7), 광산B(5.8~6.6), 광산C(5.6~6.3) 및 광산D(4.7~6.1)의 범위로 모두 산성으로 측정되었다. 토양의 중금속 오염 수준은 각각의 광산의 영향을 받아 광산A인근 토양에서는 Cu, Pb, Hg의 오염이 심각하며, 광산B인근 토양에서는 Hg의 오염이 심각하며, 광산C인근 토양에서는 Pb의 오염이 심각함을 알 수 있다. 특히 광산D에 의한 Cu, Pb, Hg 및 As 등의 중금속오염이 인근토양에 미치는 영향은 매우 심각한 수준임을 알 수 있다. Cu는 0.445~80.72 mg/kg (ave. 13.09 mg/kg),

Table 2. Chemical properties of heavy metals contaminated soil on mine A-D.

Mines	Distance (m)	pH	Concentration (mg/kg)						
			Cu	Pb	Ni	Cd	Hg	As	CN
A	10	5.1	67.15	99.65	4.610	0.344	13.81	0.244	N.D.
	400	6.7	8.813	5.010	15.65	0.071	7.720	N.D.	N.D.
	900	6.5	0.882	4.108	10.28	0.027	N.D.	0.592	N.D.
	1500	5.8	11.74	5.689	11.00	0.137	N.D.	2.741	N.D.
B	100	6.3	0.958	2.420	11.22	N.D.	15.82	N.D.	N.D.
	150	6.2	0.559	5.445	21.55	0.063	0.183	4.418	N.D.
	800	6.6	0.445	2.849	26.11	0.057	0.092	1.969	N.D.
	1300	5.8	1.029	4.211	12.48	0.028	0.067	0.888	N.D.
C	10	5.9	13.63	365.8	11.72	N.D.	2.590	N.D.	N.D.
	800	5.3	0.737	3.963	7.488	0.057	N.D.	0.763	N.D.
	1400	5.6	0.836	4.378	5.835	0.017	0.024	0.408	N.D.
D	20	4.7	80.72	42.32	0.010	N.D.	52.97	122.3	N.D.
	450	5.6	2.100	16.76	4.691	0.086	0.044	396.6	0.220
	950	6.0	2.405	13.34	2.877	0.085	0.031	228.2	N.D.
	1800	6.1	4.279	5.876	4.571	0.198	0.879	43.62	N.D.

N.D.: not detected

Pb은 2.420~365.8 mg/kg (ave. 38.79 mg/kg), Ni은 0.0105~26.11 mg/kg (ave. 10.01 mg/kg), Cd은 N.D. -0.344 mg/kg (ave. 0.080 mg/kg), Hg은 N.D. -52.97 mg/kg (ave. 6.280 mg/kg), As는 N.D. -396.6 mg/kg (ave. 53.52 mg/kg), CN은 광산D의 이격거리 450 m에서만 0.220 mg/kg의 수준으로 검출되었다. 개별 중금속 검출농도의 최고값, 평균값 및 최소값을 Fig. 1에 나타내었다. Cu에 의한 오염은 광산D에서, Pb에 의한 오염은 광산C에서, Ni에 의한 오염은 광산B에서, Hg에 의한 오염은 광산D에서 가장 심각하였다. 특히 As에 의한 오염은 Cu와 Hg에 의한 오염이 심각한 수준을 나타낸 광산D의 인근토양에서 다른 중금속류와는 다른 확산경향을 보

이며, 이격거리가 상당히 떨어진 지점의 토양에서도 고농도로 검출되었다.

이격거리에 따른 중금속 오염확산

광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속의 오염확산 수준을 중금속류에 따라 Cu, Pb, Hg 및 As로 구분하여 Fig. 2(a)-(d)에 나타내었다. As를 제외한 다른 중금속 Cu, Pb, Hg 등의 확산은 폐광산의 가장 가까운 지역의 토양을 심각히 오염시키고 이후에는 이격거리에 관계없이 저농도로 검출되는 특성을 보였다. Fig. 2(a)의 Cu는 광산D에서 이격거리 20 m지점에서 80.72 mg/kg, 광산A에서 이격거리 10 m지점에서 67.15 mg/kg으로 조사되는 등 중금속 오염확산은 이격거리보다 광산특성에 의해 더 많은 영향을 받음을 알 수 있다. Pb과 Hg도 Cu와 유사한 경향으로 조사되었다. 한편 As의 경우에는 광산D에 의한 오염이 매우 심각하며, 이격거리에 따라 반비례적 관계를 나타낸다고 할 수 없는 특성을 보였다. 특히 광산D로부터 950 m의 이격거리를 두는 지점의 토양에서도 228 mg/kg 이상의 고농도로 As가 검출되어 광산D에 의한 다른 중금속의 오염특성(Cu, Pb 등)과는 다른 경향을 나타내었다. As는 암을 유발하는 위해성 중금속으로써 지하수를 오염시키는 경우 처리에 있어서도 경제적 부담이 발생한다. 오늘날, 지하수와 토양에 의한 비소화합물의 유해성이 날로 심각해져 지구적 규모의 연

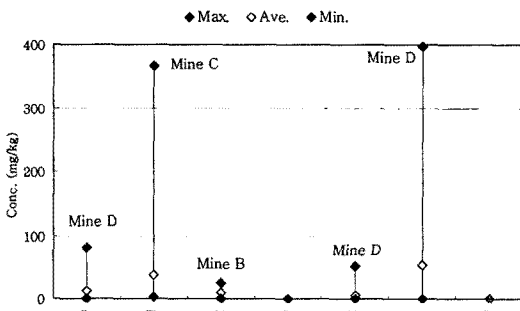


Fig. 1. Pollution level of heavy metals on mine A, B, C and D.

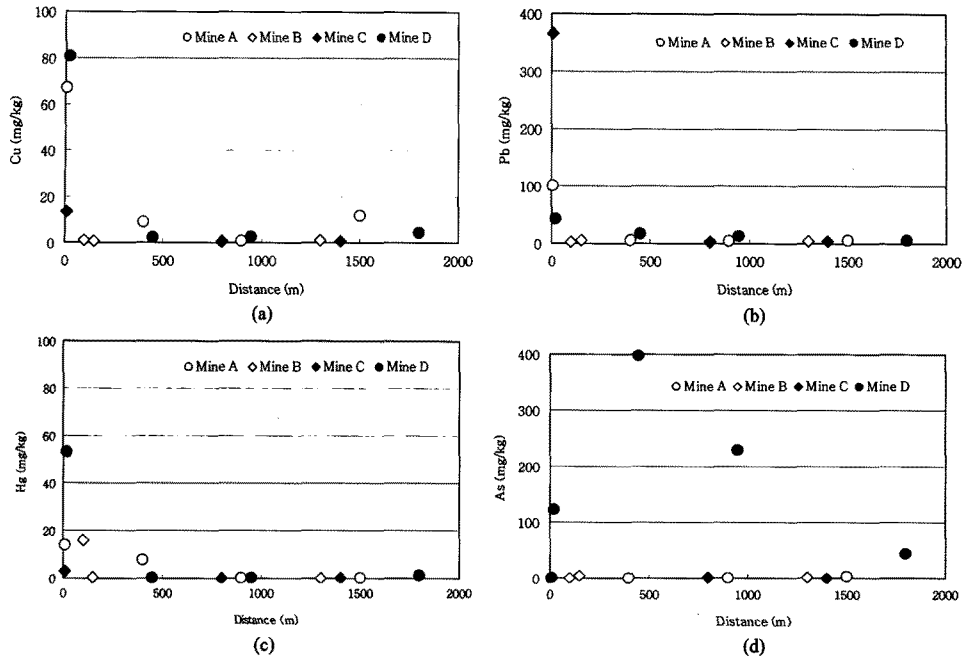


Fig. 2. (a) Diffusion characteristics of Cu depend on distances, (b) Diffusion characteristics of Pb depend on distances, (c) Diffusion characteristics of Hg depend on distances. (d) Diffusion characteristics of As depend on distances.

구가 세계 각지에서 활발히 진행되고 있으며, 처리기술 개발연구도 속속 그 성과를 나타내고 있으므로 국내 자료 축적이 매우 중요한 시점에 있다(Franco Frau *et al.*, 2003; Bednar A.J. *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2000; Yuko Sato *et al.*, 2002).

중금속 오염확산 예측가능성

광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속 오염수준을 예측가능성에 대해 각각의 상관식을 구한 후에 상관계수가 유효할 것으로 판단되는 중금속, Cu, Pb, Hg의 오염자료를 모아 Table 3에 나타내었다. 광산B에서의 중

Table 3. Equation of Cu, Pb and Hg between pollution level and distance on mine A-D.

Heavy Metals	Mines	using Individual Data		using Total Data	
		Equation	r	Equation	r
Cu	A	$y = -12.79 \ln(x) + 93.79$	0.95	$y = -9.69 \ln(x) + 68.4$	0.71
	B	$y = 0.003 \ln(x) + 0.729$	0.01		
	C	$y = -2.724 \ln(x) + 9.80$	0.99		
	D	$y = -18.57 \ln(x) + 131.3$	0.95		
Pb	A	$y = -20.27 \ln(x) + 142.1$	0.97	$y = -34.7 \ln(x) + 237$	0.68
	B	$y = 0.019 \ln(x) + 3.618$	0.02		
	C	$y = -76.74 \ln(x) + 539.9$	0.99		
	D	$y = -7.916 \ln(x) + 65.99$	1.00		
Hg	A	$y = -2.763 \ln(x) + 20.86$	0.94	$y = -4.508 \ln(x) + 32.00$	0.59
	B	$y = -4.255 \ln(x) + 29.01$	0.68		
	C	$y = -0.547 \ln(x) + 3.829$	0.99		
	D	$y = -12.61 \ln(x) + 87.42$	0.96		

Where, x : distance (m)
 y : concentration (mg/kg)
 r : coefficient of correlation

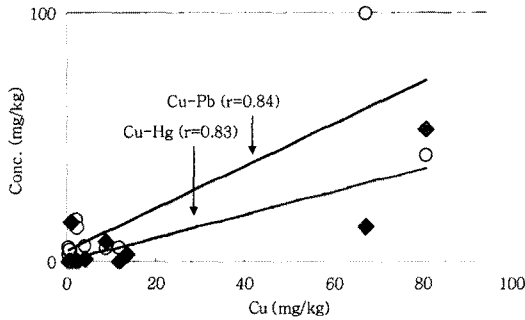


Fig. 3. Correlation among Cu, Pb and Hg.

금속 오염도는 다른 광산의 중금속 오염수준과 비교 할 때 심각한 수준으로 판단하기 어려운데, 이것은 광산B 인근의 토양층의 중금속 오염수준과 이격거리와의 상관성을 관찰하기 어렵게 한다. 그러나 광산B의 특성이 전체적인 이격거리와 Cu와 Pb의 검출농도와의 상관성에 영향을 미치기는 하지만, Cu와 Pb 오염된 광산에서는 이격거리에 따라 오염확산이 반비례적인 관계를 나타내고 이들은 유효한 상관성으로 조사되었으므로 이들 자료의 축적으로 오염확산을 예측 할 수 있을 것으로 보인다. 광산B는 Hg에 의한 오염이 발생하는 곳이므로 이격거리와 Hg의 오염농도와의 상관계수는 Cu와 Pb과 비교할 때 상당히 높은 0.68로 계산되어졌다.

주요 오염중금속 (Cu, Pb 및 Hg) 간의 상관성

주요 오염중금속인 Cu, Pb 및 Hg의 검출농도를 이격 거리에 따른 구분없이 검출농도만을 이용하여 이들 중금속간의 상관성을 고찰하기 위해 상관계수를 구하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 Cu와 Pb, Cu와 Hg의 상관도는 상관계수가 각각 0.84, 0.83으로 매우 유의한 수준을 나타낸다. 여기서 Cu-Pb 간의 상관도는 Table 1에 나타난 광산C의 이격거리 10m 지점에서의 자료를 제외한 경우이다. 왜냐하면 이 지점에서 Pb의 검출농도는 365.8 mg/kg 으로 다른 광산 및 지점에서의 분석값들에 비해 매우 높은 수준으로 검출되는 특성이 있어 이를 제외하였다.

결 론

폐광산에서 기인하는 환경오염물질 중에서 주요오염 물질인 중금속을 대상으로 이격거리에 따른 거동을 명확히 하고, 사람과 주변환경에 미치는 폐광산 유래의 중금속영향을 최소화하기 위해 사용되어지는 기술들을 응

용할 수 있도록 오염도를 예측 가능한지에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 대상으로 한 폐광산A, B, C 및 D는 Cu, Pb, Hg 및 As의 주요 오염원으로 주변 토양에서 이들 중금속은 유해한 수준으로 검출되었다.

2) Cu, Pb, Hg의 경우는 폐광산 주변에서 고농도로 검출되었으나, 그 이후의 지점에서는 저농도로 검출되므로 이들 중금속의 관리는 폐광산 인근에서 이루어져야 한다. 그러나 As로 극 오염된 경우에는 다른 중금속류와는 달리 1,000m 가까운 이격거리의 토양에서도 고농도로 검출되므로 이에 대한 관리는 다른 중금속류와는 달리 해야 한다.

3) 대상으로 한 4개 폐광산 인근의 토양에서 검출되는 Cu, Pb 및 Hg의 이격거리에 따른 오염수준 예측 가능성을 상관계수로 보면, 광산A에서는 각각 0.95, 0.97, 0.94로 조사되었고, 광산C에서는 각각 0.99, 0.99, 0.99로 조사되었고, 광산D에서는 각각 0.95, 1.00, 0.96으로 조사되었다. 한편, 중금속의 오염도가 낮은 광산B에서는 이들 상관계수가 유의하지 않았다. 따라서 폐광산으로 인해 발생하는 인근 토양의 중금속 오염은 중금속 오염수준을 먼저 파악한 후, 이격거리에 따른 감소정도를 예측할 수 있고, 검출되는 중금속들간의 상관성을 파악하여 저감기술을 적절히 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

강미아, 2007, 산성광산배수로 인한 환경오염도 조사, 대한지질공학회지, 17(1), pp. 143-150.
 강미아, 김광태, 2007, 토양 및 광미의 용출실험을 이용한 폐광산오염수준의 모니터링, 대한지질공학회지, 17(3), pp. 419-424.
 김정대, 2005, 강원도 폐금속광산지역의 광미와 주변토양의 중금속 오염현황 및 오염도 평가, 대한환경공학회지, 27(6), pp. 626-634.
 이은기, 최상일, 2007, 인산염을 이용한 휴 폐광산 주변 중금속 오염토양의 안정화처리에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회지, 12(6), pp. 100-106.
 임길재, 지상우, 정영욱, 안주성, 민정식, 최용석, 이용주, 홍지혜, 윤성문, 2006, 전주일광산 광미적치장의 지구화학적 특성, 한국지구시스템공학회지, 43(5), pp. 458-468.
 Bednar, A.J., Garbarino, J.R., Ranville, J.F., Wildeman, T.R., 2005, Effect of iron on arsenic speciation and redox chemistry in acid mine water, Journal of Geochemical Exploration, 85, pp. 55-62.
 Catalan, L.J.J., Kathleen C. Buset and Guohong Yin, 2002, Reactivity of Oxidized Sulfidic Mine Tailings during Lime Treatment, Environ. Sci. Technol., 36(12), pp. 2766-2771.

- Franco Frau and Carla Arda, 2003, Geochemical controls on arsenic distribution in the Baccu Locci stream catchment (Sardinia, Italy) affected by past mining, *Applied Geochemistry*, 18, pp. 1373-1386.
- Hudson-Edwards, K.A., Macklin, M.G., Jamieson, H.E., Brewer, P.A., Coulthard, T.J., Howard, A.J. and Turner, J.N., 2003, The impact of tailings dam spills and clean up operations on sediment and water quality in river systems, *Applied Geochemistry*, 18(2), pp. 221-239.
- Kang, Meea, Kawasaki, Mutsuo, Tamada Synya, Kamei Tasuku, and Magara Yasumoto, 2000, Desalination, 131(1-3), pp. 293-298.
- Macklin, M.G., Brewer, P.A., Balteanu, D., Coulthard, T.J., Driga, B., Howard, A.J. and Jaharia, S., 2003, The long term fate and environmental significance of contaminant metals releases by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramures County, upper Tisa Basin, Romania, *Applied Geochemistry*, 18(2), pp. 241-257.
- McGregor, R.G. and Blowes, D.W., 2002, The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings, *Journal of Geochemical Exploration*, 76(3), pp. 195-207.
- Palo, Alto, 1984, Chemical fractionation of trace metals in contaminated soils, *J. Environ. Qual.*, 26, pp. 259-264.
- Yuko Sato, Meea Kang, Tasuku Kamei, Yasumoto Magara, 2002, Performance of nanofiltration for arsenic removal, *Water Research* 36, pp. 3371-3377.

강미아

안동대학교 환경공학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL: 054-820-6267
 FAX: 054-820-6267
 e-mail: wdream@andong.ac.kr

박지민

안동대학교 환경공학과
 경북 안동시 송천동 388
 TEL: 054-820-6267
 FAX: 054-820-6267
 e-mail: ll1105ll@dreamwiz.com

김광태

전북대학교 환경공학과
 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14번지
 TEL: 062-949-0710
 FAX: 062-949-0702
 e-mail: kshine@emc.or.kr