

무기고화제를 이용한 중금속 오염 광미의 안정화 처리를 위한 기초연구

A basic study for stabilization of heavy metal contaminated tailings by inorganic binders

민 경 원* 김 태 풍** 이 현 철** 서 의 영***
Min, Kyoung-Won Kim, Tae-Poong Lee, Hyun-Cheol Seo, Eui-Young

Abstract

Stabilization treatment is one of processes for wastes and their components to reduce their toxicity and migration rates to surroundings. Inorganic binders such as calcium hydroxide, blast furnace slag and red mud were tested for their potential applicability to in-situ stabilization of heavy metal contaminated tailings in the abandoned metal mines.

Columns(150mm dia. x 450mm length) filled with mixtures of inorganic binders and tailing from the Geumjang mine with various mixing ratios of binders to tailings, 5%, 7% and 9% were applied artificial rainfall tests for 28 days. Effluents from columns filled with calcium hydroxide and tailing showed high pH's of ~12.5 and a increasing trend of concentration in Pb and Zn with a significant decrease in permeability in terms of elapsed days. Those with burning slag and tailing showed pH's of ~8.5 and significantly low concentrations in heavy metals with a stable permeability. In case of red mud, effluents showed significantly low concentrations in heavy metals but a decreased permeability with pH's of ~10.5. Conclusively, this basic study suggests burning furnace slag be a potential stabilizer for effective treatment of heavy metal contaminated mine tailings.

키워드 : 무기고화제, 오염 광미, 안정화, 인공강우실험

Keywords : *inorganic binders, contaminated tailings, stabilization, artificial rain tests*

1. 서론

국내에는 900여개의 금속광산, 380여개의 석탄광산 및 1,200여개의 비금속 광산을 포함하여 총 2,500여개소의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로써 적절한 환경복원시설이 설치되지 않아 주변 생태

계가 위협 받고 있다. 특히 폐금속광산에서는 과거 채광이나 선광·제련과정 등의 광산활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들(폐석, 광미, 광석광물, 광산폐수 등)이 광산 주변에 그대로 방치되어 있어 집중강우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계의 환경 오염을 계속적으로 일으키고 있다. 이렇게 오염된 토양이나 하천수는 농작물의 성장에도 영향을 미쳐 궁극적으로는 이를 섭취하는 인간의 건강에 심각한 문제를 야기한다[5]. 이러한 오염광미 및 오염토양 정화기술은 선진국에서 다양하게 개발되었으며 특히 미국의 경우

* 강원대학교 지구·환경공학부 교수, 교신저자

** 강원대학교 대학원 지구시스템공학과

*** 강원대학교 지구·환경공학부 지구시스템공학전공

EPA에 의해 주도되는 Superfund program과 SITE(Superfund Innovative Technology Evaluation) program에 의해 토양복원에 대한 많은 기술과 경험이 축적된 바 있다.

정화기술은 처리 위치에 따라 오염된 토양을 이동시키지 않고 현장에서 직접 처리하는 In-situ 방법과 오염토양을 이동·운반하여 처리하는 Ex-situ 방법으로 구분할 수 있다. 또한 오염토양의 특성에 따라 물리·화학적, 생물학적, 열적 처리기술 등을 적용하여 토양 중의 오염물질을 분해 또는 분리·추출 및 고정화하여 정화한다. 오염토양 정화기술은 정화대상 부지의 특성에 따라 적합한 기술을 선택하여야 하며 이를 위해서는 오염물질의 종류, 오염정도, 위해도 등이 평가되고 이를 바탕으로 대상기술 및 효용성, 적용성, 처리비용의 평가 등 각 기술별 세부평가를 통해 적합한 기술이 결정되어야 한다[2].

물리·화학적 처리방법 중 하나인 고정화/안정화 처리법은 시멘트, 석회, 슬래그 등과 같은 첨가제를 혼합하여 오염성분의 이동성을 물리적으로 저하시키거나 화학적으로 용해도를 낮추어 무해한 형태로 변화시키는 기술로 타 공법에 비하여 시공이 간편하며 In-situ, Ex-situ 모두 적용이 가능하며 다양한 오염 물질을 동시에 처리할 수 있는 장점이 있다. 또한 처리된 지역의 투수율이 감소되지만 충분한 양의 복토를 실시하면 재녹화가 가능하다[3]. 현재 중금속을 함유한 액상 폐기물을 처리하는 기술로 국내에 도입되어 부분적으로는 이미 실용화되고 있으나, 중금속으로 오염된 토양에서 중금속을 불용화하는 기술에 대한 국내 연구는 미흡한 편이며 최근에 폐광산 광미의 처리에 고정화/안정화 기법을 적용하는 연구가 더러 진행되고 있다. 대표적인 예로 구봉 Au-Ag 광산(충남 청양), 삼보 Pb-Zn 광산(경기 화성), 달성 Cu-W 광산(대구 달성) 등의 지역 폐광미에 대해 시멘트를 이용한 고정화 실험과 황화나트륨(Na₂S), 황화수소나트륨(NaHS)을 이용하여 금속화합물 침전 실험을 수행한 바 있으며, As의 불용화 실험으로 염화제2철(FeCl₃)과 과산화수소(H₂O₂)를 이용한 금속-비산염 형태로의 전환과 안정성 평가가 이루어진 바 있다[6]. 또한 구봉광산 지역에서 파일럿 장치를 현장에 설치하여 시간당 1~5 톤의 광미를 처리하는 현장적용연구를 수행하였다. 따라서 본 연구를 통해 폐광산 광미에 대해 여러 무기화제를 이용한 고정화/안정화처리가 가능한지 여부를 판단 하고자 하였다.

2. 광미의 화학 조성

대상 시료는 경상북도 울진의 금강광산의 폐광미를 이용하였다. 금강광산은 1962년 5월 9일 등

록, 1989년 9월 30일에 폐광하였으며 주요 광종으로는 금, 은, 동, 연, 아연으로 현재 폐석 적치장의 유실 방지를 위한 옹벽이 120m 시공되어 있으며 미시공 구간이 존재한다. 본 시료는 미시공 구간에서 채취하여 실내에서 풍건한 뒤 체가름 하여 화학조성을 분석하였다.

2.1. 주원소 성분

체가름한 광미를 75 μ m(200mesh) 이하로 파쇄하여 XRF(강원대학교 공동실험실습관, ZSX100e, Japan)를 이용하여 분석한 결과 광미의 주요 성분은 SiO₂ 67.7%, Al₂O₃ 9.2%, Fe₂O₃^T 13.1% 등으로 나타났다(Table 1).

Table 1. Major oxides of Geum-jang tailing by XRF

Oxides	wt %
SiO ₂	67.7
Al ₂ O ₃	9.2
Fe ₂ O ₃ ^T	13.1
SO ₃	3.21
K ₂ O	2.51
MgO	1.59

2.2. 중금속 농도

중금속 농도 분석을 위해 토양오염공정시험법에 따라 2mm의 표준체(10mesh)를 통과한 광미 10g 과 0.1N HCl 50ml를 100ml 플라스크에 넣고 항온수평진탕기(100회 1분, 진폭 10cm)에서 30℃를 유지하며 1시간 동안 진탕한 후 0.45 μ m 여과지로 여과하여 ICP-OES(한국기초과학지원연구원 부산센터, ACTIVA, JY HORIVA)를 이용하여 Cd, Cu, Pb, Zn를 분석한 결과 Pb의 경우 대책기준[7]을 초과하는 428mg/kg, Zn는 52.3mg/kg, Cu는 15.5mg/kg, Cd은 0.25mg/kg으로 나타났다(Table 2).

Table 2. Analytical data of heavy metals by ICP-AES for tailing samples from the Geumjang Mine compared with environmental standards

Element	Geumjang Tailing(mg/kg)	Warning Standard (mg/kg)	Countmeasure Standard (mg/kg)
	KSLP		
Cd	0.25	1.5	4
Cu	15.5	50	125
Pb	428	100	300
Zn	52.3	300	700

3. 무기고화제의 화학조성

무기고화제를 사용하여 중금속으로 오염된 광미의 안정화 가능성을 검토하기 위하여 소석회, 고로슬래그, 레드머드를 실험대상 무기고화제로 선정하였다. 체가름한 무기고화제를 75 μ m(200mesh) 이하로 파쇄하여 XRF(강원대학교 공동실험실습관, ZSX100e, Japan)를 이용하여 분석하였다.

3.1. 소석회

현재 폐기물의 고형화/안정화 처리 및 수질개선제로 사용되고 있는 소석회는 자체의 pH가 상당히 높아 일부 오염토양 및 폐기물에 대하여 중금속 제어를 목적으로 사용되어 왔다. 본 연구에 사용한 소석회의 주성분은 CaO가 약 95.1%이다(Table 3).

Table 3. Major oxides of calcium hydroxide by XRF

Oxides	wt %
CaO	95.1
SiO ₂	1.32
MgO	1.25

3.2. 고로슬래그

용광로에서 철광석으로부터 선철을 만들 때 생기는 고로슬래그는 화학분석 결과 CaO 45.6%, SiO₂ 29.2%, Al₂O₃가 13.8%를 함유하고 있다(Table 4). CaO성분으로 인하여 pH가 높기 때문에 중금속을 제어할 수 있는 무기고화제로 사용될 가능성이 있다고 판단되어 본 연구에 사용 하였으며 산업폐기물이기 때문에 구득이 용이하고 가격이 저렴한 장점이 있다.

Table 4. Major oxides of blast furnace slag by XRF

Oxides	wt %
CaO	45.6
SiO ₂	29.2
Al ₂ O ₃	13.8
MgO	3.31
SO ₃	3.29
Fe ₂ O ₃ ^T	2.00

3.3. Red mud

보오크사이트에서 알루미늄을 제거하고 남은 산업폐기물인 Red mud는 포졸란 반응의 주요 성분인 Al₂O₃ 와 SiO₂ 성분을 각각 약 30%와 10% 정도 함유하고 있기 때문에 포졸란에 의한 안정화 및 고형화 처리에 적용가능성을 검토하기 위하여 본 연구에 사용하였다. 분석 결과 Fe₂O₃ 37%, Al₂O₃ 30%, SiO₂ 10.8%를 함유하고 있다(Table 5).

Table 5. Major oxides of red mud by XRF

Oxides	wt %
Fe ₂ O ₃ ^T	37.0
Al ₂ O ₃	30.0
SiO ₂	10.8
Na ₂ O	9.56
TiO ₂	7.93
CaO	3.35

4. 무기고화제 혼합비 및 컬럼 용출 실험

중금속 함량이 높은 광미를 안정화하여 현장에 매립하였을 경우 눈과 비가 지표에서 하부로한다. 일반적으로 산성비 조건인 pH 5.6의 강우가 내린다면 표토를 지나 산성비와 혼합체가 접촉하게 된다. 혼합체가 산성비와 반응하여 중금속이 용출된다면 다량의 중금속이 지하수를 타고 지하 환경 오염을 유발할 수 있다. 따라서 본 실험은 아크릴 컬럼 내에 무기고화제와 광미를 혼합 한 후 컬럼에 복토한 다음 인공강우를 주입하여 하부로 유출되는 유출수를 분석하고 중금속 제어 효율을 규명하고자 하였다.

4.1. 무기고화제 혼합비

무기고화제의 혼합비는 경제성을 고려하여 광미 7kg에 무기고화제를 광미대비 5%, 7%, 9% 비율로 결정하여 각각 0.35kg, 0.49kg, 0.63kg을 사용하였으며, 무기고화제를 컬럼 내의 상부에 복토하는 방법과 하부에 복토하는 방법, 그리고 혼합 하는 방법 중에서 가장 효율이 높은 혼합 하는 방법을 선정 하였다[1].

4.2. 컬럼 용출 실험

실험에 사용된 컬럼은 크기 15cm×15cm×45cm의 실린더형으로 제작하여(Fig 1) 각각의 혼합비율에 따라 광미와 무기고화제를 아스팔트 혼합기(Tatech, 용량 18ℓ)를 이용하여 혼합 한 후 컬럼 내에 복토하였다(Fig 2).

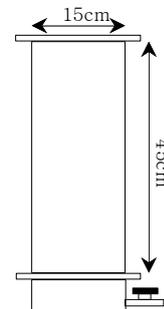


Fig 1. Schematic figure of a column



Fig 2. Columns filled with mixtures of tailings and inorganic binders

컬럼의 상부로 인공강우를 주입, 하부로 유출되는 유출수를 채수하여 pH 및 중금속 농도 분석을 실시하였다. 인공강우 조건은 1차 증류수에 HCl을 이용하여 pH 4로 조절한 용액을 주입하였으며 주입량은 울진 금장광산 지역의 연평균 강수량을 이용하여 월평균 강수량으로 변환하고 다시 일평균 강수량으로 하여 1일당 주입량을 1.2ℓ로 결정하였다[4]. 용출 실험 기간은 총 28일이며 분석용으로 최초 7일간은 1일 1회씩 채수하고, 그 후에는 3일 1회씩 채수하여 총 14개의 용출수 시료를 택하였다.

5. 컬럼 용출 실험 결과 및 고찰

광미만을 채운 컬럼과 함께 무기고화제와 혼합된 광미로 채워진 컬럼들에 대한 인공강우시험으로 용출된 물 시료들을 ICP-OES(한국기초과학지원연구원 부산센터, ACTIVA, JY HORIVA)를 이용하여 중금속 농도를 분석한 후 안정화를 위한 무기고화제의 적용가능성을 검토하였다(Tables 6, 7, 8, and 9).

Table 6. Heavy metal concentrations of effluents from tailing-filled column

Elements Elapsed days	Zn	Cd	Pb	Cu
1	12.80	0.03	18.88	1.07
2	8.05	0.09	22.30	0.63
3	4.69	0.04	19.83	0.45
4	3.19	0.03	16.02	0.36
5	2.56	N.D	11.3	0.31
6	2.17	N.D	9.07	0.32
7	2.01	N.D	5.61	0.29
10	1.25	N.D	4.51	0.14
13	2.04	N.D	2.48	0.34
16	2.66	N.D	1.40	0.25
19	2.37	N.D	0.44	0.22
22	2.10	N.D	0.45	0.14
25	1.85	N.D	0.16	0.15
28	2.15	N.D	0.55	0.20

5.1. 소석회 처리 광미

실험결과 소석회에 의한 중금속 제어율은 높게 나타났으나 광미와 소석회가 반응하여 굳어지는 포졸란 반응이 진행되어 투수율이 낮아져 투수량이 현저하게 감소하였으며 유출수의 pH가 약 12.5 정도로 다소 높게 유지되어 Pb와 Zn의 재용출을 유발하였다(Table 7). 유출수의 높은 pH는 중금속의 재용출을 유발할 뿐만 아니라 주변 수계 및 토양으로 유입되어 2차적인 오염을 유발할 수 있기 때문에 추가적인 처리가 요구된다. 따라서 광미의 중금속 제어를 위한 안정화처리에는 소석회가 적합하지 않을 것으로 보이며 고형화 처리에 사용하는 것이 더 효율적인 것으로 판단된다.

5.2. 고로슬래그 처리 광미

고로슬래그는 소석회와 같이 포졸란 반응이 진행되지 않아 투수율이 낮아지는 현상은 발생하지 않았다. 또한 각각의 혼합비율 5%, 7%, 9%의 모든 비율에서 pH 약 8.5내외로 비교적 안정적인 상태를 유지하였다. 또한 유출수의 중금속 농도 분석 결과에서도 Zn, Cd, Pb는 검출되지 않았으며 Cu의 경우도 약 0.04ppm의 낮은 농도로 거의 검출되지 않았다(Table 8). 고로슬래그는 광미의 안정화처리 시 현장 적용이 가능하며 폐기물을 재활용한다는 측면에서 상당히 효율적인 처리방법이 될 것으로 판단된다.

5.3. Red mud 처리 광미

Red mud의 중금속 용출량은 Cd의 경우 용출되어 나오지 않았으며 Zn, Pb, Cu의 경우에는 0.01ppm에서 0.10ppm 이하로 매우 적은 양이 용출되었다(Table 9). pH는 약 10.5 내외로 소석회보다는 다소 낮은 pH를 유지하였지만 소석회의 경우와 마찬가지로 투수율이 낮아져 투수량이 현저하게 감소하였으며 현장 적용성을 고려해 볼 때 효율적이지 못할 것으로 판단된다.

5.4. 현장 적용성 검토

본 실험을 통하여 얻은 데이터들을 바탕으로 현장 적용성과 용출량을 고려하여 불 때 고로슬래그를 가장 적합한 무기고화제로 선정하였으며, 현장 적용시의 경제성을 고려하여 각각 5%, 7%, 9%를 혼합하여 실험한 결과 혼합 비율이 5%일 경우에도 충분히 안정화 효율을 보이는 것을 확인하였으며 따라서 고로슬래그를 5% 비율로 혼합 하였을 경우가 가장 경제적이며 효율적인 것으로 생각된다. 그러므로 현장적용 시 혼합하는 비율절감까지 고려한다면 고로슬래그를 혼합 비율 5%로 하여 굴착 후 하부에 복토하는 방법이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

Table 7. Heavy metal concentrations of effluents from columns filled with mixtures of tailing and calcium hydroxide

Mixing ratio	5%				7%				9%			
Elements Elapsed days	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu
1	0.05	N.D	4.63	0.20	0.13	N.D	3.96	0.26	0.08	N.D	5.38	0.30
2	0.02	N.D	4.42	0.20	0.23	N.D	3.72	0.31	0.10	N.D	6.01	0.27
3	0.02	N.D	4.36	0.20	0.15	N.D	3.67	0.23	0.10	N.D	6.55	0.25
4	0.02	N.D	4.19	0.18	0.11	N.D	3.56	0.18	0.08	N.D	6.29	0.22
5	0.04	N.D	4.21	0.19	0.15	N.D	3.41	0.22	0.07	N.D	6.64	0.21
6	0.03	N.D	3.83	0.17	0.11	N.D	3.47	0.18	0.12	N.D	6.67	0.22
7	0.07	N.D	4.10	0.19	0.18	N.D	3.46	0.18	0.12	N.D	7.19	0.22
10	0.05	N.D	3.85	0.20	0.10	N.D	3.61	0.15	0.09	N.D	8.08	0.26
13	0.06	N.D	4.31	0.20	0.09	N.D	4.42	0.17	0.09	N.D	9.35	0.30
16	0.05	N.D	4.60	0.18	0.10	N.D	4.40	0.16	0.07	N.D	9.90	0.24
19	0.04	N.D	5.02	0.18	0.16	N.D	4.57	0.17	0.11	N.D	9.77	0.24
22	0.07	N.D	6.08	0.17	0.22	N.D	4.47	0.15	0.07	N.D	11.17	0.23
25	0.07	N.D	7.63	0.18	0.18	N.D	4.72	0.15	0.08	N.D	11.19	0.22
28	0.14	N.D	9.37	0.19	0.14	N.D	4.76	0.14	0.08	N.D	12.90	0.23

Table 8. Heavy metal concentrations of effluents from columns filled with mixtures tailing and blast furnace slag

Mixing ratio	5%				7%				9%			
Elements Elapsed days	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu
1	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.05
2	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.05
3	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05
4	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05
5	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04
6	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04
7	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04
10	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05
13	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04
16	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05
19	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.05
22	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.06
25	N.D	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.06
28	N.D	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	N.D	0.06

Table 9. Heavy metal concentrations of effluents from columns filled with mixtures of tailing and red mud

Mixing ratio	5%				7%				9%			
Elements Elapsed days	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu
1	0.02	N.D	N.D	0.55	0.01	N.D	N.D	0.19	N.D	N.D	N.D	0.17
2	0.03	N.D	0.03	0.45	0.01	N.D	N.D	0.10	N.D	N.D	N.D	0.13
3	0.05	N.D	0.08	0.33	0.01	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	0.10
4	0.15	N.D	0.50	0.22	0.01	N.D	N.D	0.10	N.D	N.D	N.D	0.09
5	0.03	N.D	0.06	0.13	0.02	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.09
6	0.07	N.D	0.02	0.09	0.03	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.08
7	N.D	N.D	0.03	0.13	0.03	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.08
10	0.06	N.D	0.13	0.10	0.03	N.D	N.D	0.04	N.D	N.D	N.D	0.07
13	0.06	N.D	0.10	0.08	0.04	N.D	0.04	0.04	N.D	N.D	0.02	0.07
16	0.03	N.D	0.20	0.05	0.02	N.D	0.01	0.03	N.D	N.D	N.D	0.06
19	0.06	N.D	0.08	0.04	0.04	N.D	0.04	0.04	N.D	N.D	0.03	0.06
22	0.04	N.D	0.03	0.03	0.03	N.D	N.D	0.05	N.D	N.D	N.D	0.06
25	0.03	N.D	0.01	0.03	0.03	N.D	N.D	0.06	N.D	N.D	0.08	0.07
28	0.05	N.D	0.03	0.04	0.04	N.D	N.D	0.08	N.D	N.D	N.D	0.07

6. 결론

휴·폐광산에 산재하는 중금속으로 오염된 광미에 대하여 무기고화제를 이용한 안정화처리의 적용가능성을 검토하기 위하여 소석회, 고로슬래그, red mud 등의 무기고화제와 폐광미를 혼합한 후 칼럼에서 인공강우실험을 실시하였다. 각각의 무기고화제를 광미대비 5%, 7%, 9%의 비율로 광미와 혼합처리하여 실험한 결과로 소석회와 광미혼합체는 점차 고형화되어 투수율이 낮아져 유출량이 현저히 저하되었고 약 12.5의 높은 pH로 Pb, Zn의 경우 점차 유출수에서의 농도가 높아짐을 보였다. 고로슬래그와 광미의 혼합체 칼럼에서의 용출수는 약 8.5의 비교적 낮은 pH와 극소량의 중금속함량을 나타냈고, Red mud의 경우는 용출수에서 중금속의 함량은 극히 낮으나 약 10.5의 비교적 높은 pH값으로 보이며 점차 투수율이 현저하게 낮아짐을 알 수 있었다. 결론적으로 고로슬래그가 중금속의 폐광미의 중금속 용출을 억제하며 적절한 투수율을 유지하므로 효율적으로 폐광미 안정화처리에 적용할 수 있는 가능성을 보이고, 광미대비 5% 정도의 사용으로 효율적인 안정화가 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 권지철, “폐금속광산 주변 오염물질의 안정화 처리연구”, *세명대학교 공학석사 학위논문*, 2006.
- [2] 권현호, *광해방지공학*, 동화기술, 373p, 2007.
- [3] 김경웅 외 9명, *토양오염복원기술*, 신광문화사, 215p, 2006.
- [4] 이예선, 김인수, 이민희, “비소 및 중금속으로 오염된 토양복원을 위한 안정화 공법 칼럼 실험”, *한국지하수토양환경학회 추계학술 발표회 논문집*, pp. 167-170, 2005
- [5] 정명채, “광산개발에 의한 환경오염 현황”, *광해방지 정책 및 기술 심포지움*, 한국지질자원연구원, pp. 37-53, 2002.
- [6] 최용수, 오종기, “폐광산복원기술”, *한국과학기술연구원 환경복원 및 재생기술 연구보고서*, 과학기술부, 517p, 1999.
- [7] 환경부, *폐기물 관리법 시행규칙*, 2007.