

폴리머 물질 첨가를 통한 중금속 오염 광미의 고형화 처리

Addition of Polymeric Materials to Binders for Solidification of Heavy Metal Contaminated Mine Tailings

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

Abstract

Polymeric materials in addition to Portland cement and hydrated limes were used to solidify heavy metal contaminated tailings from five abandoned metal mines in Korea. Mine tailings were mixed separately with Portland cement and hydrated lime at a concentration of 20-30 wt% and 6-9 wt%, respectively and Ethylene Vinyl Acetate(EVA) powder was added to each specimen at a ratio of 2.5 and 5.0 wt% to binders. Polymer-added and polymer-free solidified forms were evaluated for their appropriateness in accordance with the suggested test methods. Regardless of addition of polymeric materials, all solidified forms satisfy the uniaxial compressive strength(UCS) requirements(0.35MPa) for land reclamation and show remarkably reduced leaching concentrations of heavy metals such as As, Cd, Cu, Pb and Zn less than the toxicity criteria of Korean standard leaching test(KSLT). The addition of polymeric materials increased the UCS of solidified forms to improve a long-term stability of solidified mine tailings.

키워드 : 광미, 고형화, 폴리머

Keywords : mine tailing, solidification, polymeric materials

1. 서론

우리나라는 1980년대 후반부터 광업활동이 위축되기 시작하였으며, 경영합리화가 되지 못한 광산들은 휴·폐광하게 되었는데, 금속광산의 경우 전국적으로 900여개, 석탄광산의 경우 330여 개의 광산들이 휴·폐광하게 되어 전성기에 비해 약 97%정도가 활동을 중단하게 되었다. 광산 활동이 중단됨으로써 휴·폐광 당시 철저한 광산보안조치 또는 환경보호조치가 미흡하였으며, 관리자 없이 방치되어

폐갱도, 채굴적, 광미나 폐석 등의 광산폐기물, 채광 및 선광 시설물 등이 잔존하여 광해의 요인으로 작용하게 되었다[1]. 따라서 이러한 광해의 요인들에 대한 원인을 파악, 분석하여 오염방지 및 복원대책을 수립, 토양 및 수질오염 등으로 인한 피해를 감소시킬 필요성이 대두되어 왔다.

중금속 오염으로부터의 토양 또는 지하수 정화 기술은 일반적으로 격리(isolation), 고정화(immobilization), 독성저감(toxicity reduction), 물리적 분리(physical separation) 및 화학적 침출(extraction)등으로 구분하며 통상적으로 부지특성에 따라 각각의 방법을 중복 또는 조합하여 적용함으로써 오염부지에 대한 효과적인 처리가 가능하다. 격리기술은 특정지역내로 오염원을 격리시켜 오염원의 이동을 방해하는 것으로 복토, 차수방벽

* 강원대학교 대학원 지구시스템공학과
** 강원대학교 지구·환경 공학부 교수, 교신저자
*** 강원대학교 지구·환경 공학부 지구시스템공학전공

설치 등이 있으며, 불용화기술은 오염물질의 용탈 특성을 변화시키거나 오염원의 물리적 이동성을 저하시키는 방법으로 고형화/안정화 기술, 유리화 기술 등이 있다. 독성 또는 이동성 저감법은 오염원의 독성과 이동성을 저감시키기 위하여 중금속 원소의 형태를 화학적, 생물학적으로 변화시켜 처리하는 것으로 산화, 환원 등의 화학적 처리기술, 물리화학적, 생물학적 과정을 통하여 오염물을 분해, 변환, 침전, 흡착되도록 투수성 처리 방법을 설치하는 방법, 특정 식물이나 미생물들을 이용하는 자연적인 생물학적 처리기술 등이 있다. 오염물의 물리적 특성을 이용한 선별, 분리, 자력선별, 비중선광, 부유선광등을 통한 물리적 분리기술이 있으며, 화학적 침출 기술은 토양 세척 또는 세정법, 물리화학적 처리, 건식야금, 동전기적 처리 기술 등을 통한 오염원을 추출, 분리해내는 기술이 있다. 이들 방법별 처리비용의 범위는 처리대상 및 오염도양양의 규모, 오염 성분 등에 따라 각각 다르며, 오염부지나 오염물질에 대한 전처리, 부지조성, 허가비용, 폐기물 처리비용 등을 제외할 때 격리 기술이 가장 저렴하며, 토양세정법, 동전기적 방법, 토양세척법 등은 비슷한 비용수준이고, 유리화 기술이 이들 중 고가인 것으로 나타났다[1]. 따라서 본 연구에서는 처리비용이 가장 저렴한 격리 기술 중 고형화/안정화 기술에 대한 연구를 실시하였으며, 일반적으로 고형화/안정화 기술에 사용되는 소석회와 시멘트에 콘크리트 강도 증진용으로 첨가되는 폴리머(EVA powder)를 혼합하여 고형화/안정화 처리 이후 강도 증가와 중금속 침출 저감 효과를 확인하여 장기적인 안정성을 향상시키기 위한 기술개발을 목표로 연구를 실시하였다.

2. 광미의 화학 조성

2.1 pH

각 대상 광산의 광미적치장의 10개소를 지정하여 시료를 채취하였으며 채취한 시료를 사분법에 의하여 혼합하였다. 혼합한 시료는 실내에서 일주일간 풍건하였으며 풍건시에 시료가 고르게 풍건 되도록 위 아래로 섞어주었다. 풍건한 시료를 토양 오염공정시험법에 따라 증류수 50ml에 2mm(10mesh) 이하 크기의 광미시료 10g을 혼합하여 1시간동안 진탕하여, 10분 방치 후 pH(SCHOTT, handylab pH12) 측정기로 pH 를 측정하였다(Table 1).

Table 1. Results of pH.

Samples of tailing	pH
Songchun	2.21
Samkwang	7.38
Geopung	2.71
Geumjang	5.12
Janggun	5.63

2.2 주원소함량

풍건한 광미를 75 μ m(200mesh) 이하의 분말로 파쇄하여 XRF(강원대학교 공동실험실습관, ZSX 100e, Japan)를 이용하여 산화물형태로 주원소함량을 분석하였다(Table 2).

Table 2. Elemental composition of the mine tailing samples analyzed by XRF.

Samples of tailing	Component (unit : wt%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	SO ₃
Songchun	15.9	3.10	32.6	0.10	27.9
Samkwang	80.3	6.50	1.70	2.80	0.10
Geopung	57.5	13.8	16.8	0.10	3.20
Geumjang	73.5	9.40	8.40	0.60	1.00
Janggun	27.7	1.70	21.1	9.10	27.1

2.3 미량원소함량

토양오염공정시험법에 따라 2mm의 표준체(10mesh)를 통과한 광미시료 10g과 0.1N HCl 50 ml를 100ml 플라스크에 넣고 항온수평진탕기(100회 1분, 진폭 10cm)에서 30℃를 유지하면서 1시간 동안 진탕한 후 0.45 μ m여과지로 여과하여 ICP(강원대학교 공동실험실습관)를 이용하여 As, Cd, Cu, Pb, Zn를 분석하였다(Table 3).

Table 3. Heavy elemental concentration in the mine tailing samples according to the Korean standard leaching test of soil (KSLT).

Samples of tailing	Elements concentration (mg/kg, ppm)				
	As	Cd	Cu	Zn	Pb
Songchun	2,545	24.9	163	839	57.4
Samkwang	259	3.50	0.40	50.4	1.10
Geopung	<0.50	0.10	212	10.8	5.20
Geumjang	<0.50	4.30	153	2,230	1,061
Janggun	<0.50	2.30	0.20	500	43.7
Warning level	6	1.5	50	300	100
Countmeasure level	15	4	125	700	300

폐기물공정시험법에 따라 광미의 입경이 0.5~5mm가 되도록 하여 파쇄한 광미시료 100g과 HCl을 이용하여 pH를 5.8~6.3으로 조정된 용액 1,000 ml를 2,000ml 삼각플라스크에 넣고 상온, 상압에서 진탕회수가 매 분당 약 200회, 진폭이 4~5cm의 진탕기를 사용하여 6시간 동안 연속 진탕 후 0.45 μ m여과지로 여과하여 ICP 분석을 하였다(Table 4).

Table 4. Heavy elemental concentration in the mine tailing samples according to the Korean official leaching procedure (KOLP).

Samples of tailing	Elemental concentration (mg/kg, ppm)				
	As	Cd	Cu	Zn	Pb
Songchun	38.7	1.77	18.4	92.7	3.47
Samkwang	2.86	0.12	0.10	0.21	0.15
Geopung	0.12	0.12	24.2	12.8	0.27
Geumjang	0.08	0.49	0.15	25.5	4.41
Janggun	0.38	0.51	N.D.	17.9	N.D.
Toxicity criteria of KOLP	1.5	0.3	3		3

* N.D. : Not Detected, Detection limit < 1 ppb

3. 연구 방법

3.1 고화체 제작

고형화에 사용된 고화체는 소석회와 포틀랜드 시멘트를 이용하였으며, 소석회와 시멘트의 혼합물에 콘크리트 강도 증진용으로 사용되는 K사의 EVA powder 를 첨가하였다. 첨가한 EVA powder의 특성은 다음과 같다(Table 5).

Table 5. Characterization of Ethylene Vinyl Acetate(EVA) Copolymer.

Type	Appearance	Size (μm)	pH	Density (g/ml)
Powder	White	90	7	0.5

Ethylene Vinyl Acetate(EVA) Copolymer DA1420 은 분말상으로 물에 바로 녹아서 안정한 에멀전이 되는 재분산성 분말로서, 시멘트, 석고 및 석회등의 무기질 바인더와 혼합하거나 단독으로 사용하여 건축용 집착제, 벽체 마감제, 콘크리트의 강도 증진용으로 사용되며 권장사용량은 1-6%이다. 따라서 본 연구에서는 폴리머를 혼합하여 고화체의 강도 증진 및 중금속 용출여부를 확인하고자 EVA Powder를 고화체에 대해 각각 2.5wt%와 5wt%로 비율을 달리하여 혼합하였다.

광미를 고형화하는 방법으로 KS F 2329(2002)을 이용하였으며, 몰드의 측면에 그리스를 발라 탈형이 용이하도록 준비된 5cm×10cm 크기의 실린더 몰드에 1/3씩 다져 넣으면서 성형하였다. 성형 후

혼합 및 다짐 과정에서 형성된 공극을 제거하기 위해서 고무망치를 이용하여 몰드의 측면을 가볍게 두드려 공극이 상부로 배출될 수 있도록 고화체를 양생하였고, 몰드에서 24시간 양생 후 탈형하여 항온수조(제이오텍, BS-31)에서 40℃로 7일간 양생하였다(National Lime Association, 2006).

고화체의 양생은 재령 7일, 14일, 28일로 나누어 강도값을 측정하는 것이 일반적이지만 National Lime Association에서는 40℃에서 7일간 급결양생하는 것을 기본으로 하고 있다. 이는 급결양생법이 재령 28일 양생과 동일한 효과를 낼 수 있다고 가정하고 있기 때문이다.

첨가수는 1차 증류수를 사용하였으며 고화체와 광미를 혼합한 전체의 중량 비율 30wt%를 혼합하였다.

3.1.1 소석회와 폴리머

현재까지 고형화처리에 적용된 시험법은 배합비율과 혼합수의 비율을 달리하여 실험결과를 통해 최적조건을 나타내는 배합비율이 최적배합비율로 제시되었다. 그러나 공인된 시험법에 따라 실험을 진행할 경우 신뢰성 확보와 시간적, 경제적 이익을 확보할 수 있다. 따라서 National Lime Association(2006)에서는 오염된 토양의 정화를 위해 석회를 이용한 토양의 고형화/안정화에 대한 기술을 제시하고 있다. 이는 중금속으로 오염된 토양을 대상으로 제시된 시험법이며 실제 현장시료에 대한 적용데이터를 함께 제시하고 있다. 일반토양과 휴폐금속광산의 광미는 많은 물리·화학적 특성의 차이가 존재하지만 광미 자체도 일반적으로 사질토양으로 분류될 수 있기 때문에 광미시료에 National Lime Association의 시험법을 적용하여 실험을 실시하였다. 시험법에서는 ASTM D 6276(2006) 시험법을 최적배합비 시험법으로 제시하고 있으며, 석회와의 혼합물의 pH가 12.4가 되는 조건을 최적배합비로 제시하고 있다. 따라서 풍건된 각 광미 시료를 ASTM D 6276에 따라 40번체에 체가름하여 150 ml 플라스틱 용기에 25g씩 넣고, 각각의 용기에 소석회를 5%~9%까지 혼합한 뒤 각 용기에 증류수를 100ml씩 넣어 1시간 간격으로 30초씩 흔들어주면서 6시간 동안 반복 후 pH를 측정하였다.

ASTM D 6276 시험결과 광미 자체의 pH와 소석회를 혼합한 혼합물에서의 pH 측정 결과(Table 6), 각 광미의 최적배합비는 송천광미는 9wt%, 삼광광미는 8wt%, 거풍광미는 7wt%, 금장광미는 7wt%, 장군광미 6wt%로 결정하였다. 폴리머는 고화체에 대해 중량 비율로 각각 2.5wt%와 5wt%로 비율을 달리하여 혼합하였다.

Table 6. pH of mixtures of mine tailings and hydrated limes with various weight percentage of added hydrated limes.

Samples of tailing	Added hydrated lime (wt%)				
	5	6	7	8	9
Songchun	10.63	11.64	12.22	12.34	12.40
Samkwang	8.50	12.35	12.39	12.41	12.45
Geopung	11.74	12.38	12.44	12.48	12.50
Geumjang	12.37	12.39	12.42	12.45	12.48
Janggun	12.35	12.40	12.44	12.48	12.51

광미의 고회화처리를 위하여 사용된 소석회는 태영EMC의 소석회 TYH-P325A(CaO 85%이상, 325mesh)를 사용하였으며, 성분은 다음과 같다 (Table 7).

Table 7. Elemental composition of the hydrated limes analyzed by XRF..

Component	Result(%)
CaO	95.1
SiO ₂	1.32
MgO	1.25

3.1.2 시멘트와 폴리머

시멘트의 경우는 최적배합비 실험이 아닌 기존의 연구에서 제시되었던 광미 : 시멘트 혼합비율인 7:3(정명채, 2006), 3:1(이민희, 2006)을 고려하여 광미 : 시멘트 혼합비율을 중량 비율로 광미대비 시멘트 혼합량을 30wt%와 20wt%로 결정하였다. 사용된 시멘트의 성분은 다음과 같다(Table 8). 폴리머는 고회체에 대해 Weight%비율로 각각 2.5wt%와 5wt%로 비율을 달리하여 혼합하였다.

Table 8. Elemental composition of the cements analyzed by XRF.

Component	Result(%)
CaO	69.8
SiO ₂	15.3
Al ₂ O ₃	3.47

3.2 고회체 시험

3.2.1 고회체 일축압축강도시험

고회화는 오염물질을 높은 구조적 보전성을 가진 고상 물질로 전환함으로써 오염물질의 결합강도를 증가시키고 반응 표면적을 감소시키기 위한 방법이다. 따라서 일정 강도 이상이 되어야 고회체에 대한 균열을 예방하여 반응 표면적을 감소시킬 수 있으며 장기적으로 안정성을 얻을 수 있다. 또한 고회화 처리한 고회체를 현장매립 또는 해양투기, 건설자재로서의 재활용을 위해서도 일정 강도 이상이 되어야 한다. 폐기물관리법에 따르면 과거에 21kgf/cm²의 강도가 명시되어왔으나 현재 강도

기준은 삭제되었고, 1m³ 당 150kg의 시멘트를 사용하도록 하는 기준만 명시되어 있다(폐기물 관리법 시행규칙, 2007). 따라서 본 연구에서는 고회체의 배합과 양생법을 National Lime Association(2006)에서 제시된 방법에 따라 수행하였기 때문에 일축압축강도 기준을 미국 EPA의 기준인 3.5kgf/cm²으로 하였다. 고회체를 EVA Powder 혼합 비율에 따라 각각 3개씩 제작하여 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 KS F 2405(2005)에 따라 규정된 방법으로 일축압축강도를 측정하였다(Fig. 1).



Fig. 1. Measurement of uniaxial compressive strengths.

강도시험 결과 5개 광미 모두에서 평균 일축압축강도가 미국 EPA의 기준인 3.5kgf/cm² 보다 높은 강도를 나타내었으며, 송천광미, 금장광미, 장군광미는 모든 고회체에서 EVA powder의 혼합량을 증가시킬수록 일축압축강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 삼광광미는 시멘트 20wt%, 거풍광미는 시멘트 30wt%에서만 EVA powder 혼합량을 2.5%에서 5%로 증가시킬수록 일축압축강도가 지속적으로 증가하지는 않았다. 아래에 나타난 강도는 각 고회체 3개의 평균 강도로 나타내었다 (Table 9, Fig 2).

Table 9. Results of uniaxial compressive strengths (Unit: kgf/cm²).

Binders	EVA mixing ratio (wt%)	Average of UCS strengths					
		Song chun	Sam kwang	Geo pung	Geum jang	Jang gun	
Hydrated lime	0	3.80	3.80	3.80	3.50	4.40	
	2.5	3.90	4.80	4.80	4.10	4.60	
	5	4.50	4.30	4.80	4.70	5.40	
Cement	20 wt%	0	99.3	37.8	122	99.8	147
		2.5	114	45.4	131	116	196
		5	117	45.3	132	132	223
	30 wt%	0	112	63.4	206	177	201
		2.5	119	76.5	225	196	216
		5	125	83.8	224	201	235

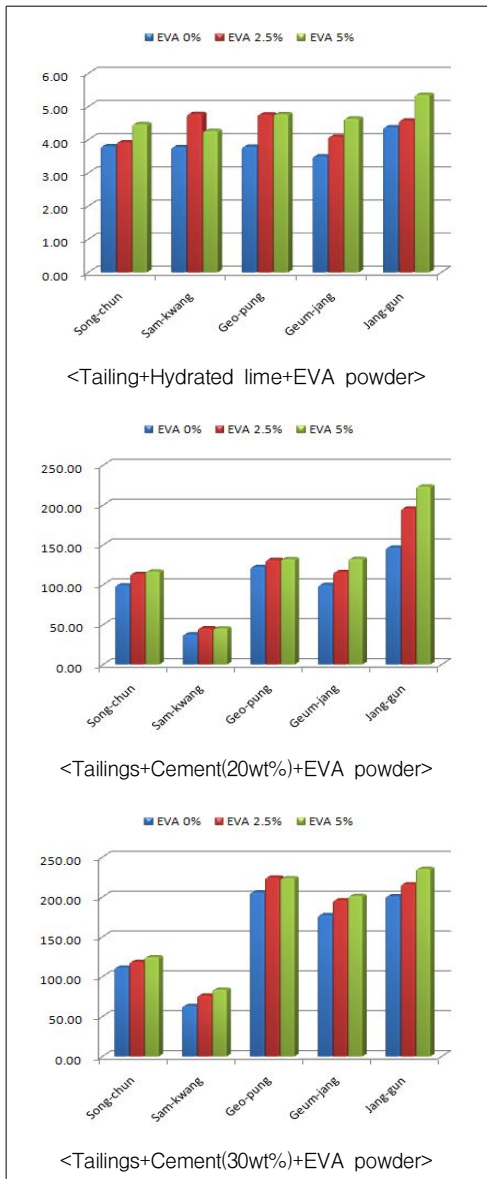


Fig. 2. Results of uniaxial compressive strengths (Unit: kg/cm²).

3.2.2 고형체 중금속용출시험

광미는 광산보안법 시행규칙 제 240조에 의거하여 광업폐기물로 분류되어 있으며, 동법 시행규칙 제 240조 및 241조에서 그에 대한 관리를 규정하고 있다. 그러나 현재 폐기물관리법에서는 폐기물 로써의 광미에 대한 별도의 규정은 없는 실정이다.

폐기물 관리법 시행규칙에 따르면 제 18조의 2

규정에서 안정화 또는 고형화처리물을 지정폐기물로 규정하고 있으며, 그러한 지정폐기물에 대한 유해물질 함유기준을 동법 제 2조의 1항의 별표 1에 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 고형화처리 후의 중금속 용출시험을 폐기물관리법 시행규칙에서 제시하고 있는 지정폐기물 유해물질 기준과 비교하였다.

용출 시험을 실시한 고형체에서 원래의 광미시료에 비하여 현저히 낮은 중금속의 농도를 나타내었으며 모두 지정폐기물 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다. 그러나 분석을 실시한 Zn의 경우는 현재 유해물질기준이 제시되지 않은 상태이며 Zn 역시 낮은 농도로 검출되는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2.2.1 As

처리이전의 송천, 삼광광미에서 As가 지정폐기물 유해물질기준을 초과하여 각각 38.7mg/kg, 2.86mg/kg으로 분석되었으나 고형화 처리이후 유해물질기준 이하 농도로 검출되었다. 거풍, 장군, 금장광미는 처리이전의 광미에서 As가 낮았고 고형화 처리 이후에도 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다(Table 10).

Table 10. Results of Korean official leaching procedure (KOLP) by ICP analysis for tailing samples compared with toxicity criteria of KOLP.

Binders	EVA Powder Mixing ratio (wt%)	Element concentrations (mg/kg, ppm)					
		Song chun	Sam kwang	Geo pung	Geum jang	Jang gun	
Hydrated lime	0	1.387	0.110	N.D.	0.039	0.270	
	2.5	1.395	0.158	0.024	0.027	0.236	
	5	1.025	0.082	0.010	0.013	0.214	
Cement	20 wt%	0	1.059	0.025	0.019	0.024	0.111
		2.5	1.465	0.016	0.014	0.017	0.090
		5	1.409	0.025	0.016	0.011	0.124
	30 wt%	0	0.983	0.022	0.020	0.012	0.056
		2.5	1.267	0.019	0.021	0.016	0.057
		5	0.828	0.006	0.021	0.014	0.050
Toxicity criteria of KOLP		1.5					

* N.D. : Not Detected, Detection limit < 1 ppb

3.2.2.2 Cd

처리이전의 송천, 금장, 장군광미에서 Cd이 지정폐기물 유해물질기준을 초과하여 각각 1.77mg/kg, 0.49mg/kg, 0.51mg/kg으로 분석되었으나 고형화 처리 이후 모두 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다. 삼광, 거풍광미는 처리이전의 광미에서 Cd가 낮게 분석되었으며 고형화 처리 이후에도 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다(Table 11).

Table 11. Results of Korean official leaching procedure (KOLP) by ICP analysis for tailing samples compared with toxicity criteria of KOLP.

Binders	EVA Powder Mixing ratio (wt%)	Element concentrations (mg/kg, ppm)					
		Song chun	Sam kwang	Geo pung	Geum jang	Jang gun	
Hydrated lime	0	0.060	0.004	N.D.	N.D.	0.012	
	2.5	0.061	0.007	N.D.	N.D.	0.010	
	5	0.059	0.002	N.D.	N.D.	0.009	
Cement	20 wt%	0	0.046	0.001	N.D.	N.D.	0.004
		2.5	0.064	N.D.	N.D.	N.D.	0.003
		5	0.061	0.001	N.D.	N.D.	0.005
	30 wt%	0	0.043	N.D.	0.001	N.D.	0.001
		2.5	0.055	N.D.	N.D.	N.D.	0.001
		5	0.036	N.D.	N.D.	N.D.	0.002
Toxicity criteria of KOLP		0.3					

* N.D. : Not Detected, Detection limit < 1 ppb

3.2.2.3 Cu

처리이전의 송천, 거풍광미에서 Cu가 지정폐기물 유해물질기준을 초과하여 각각 18.4mg/kg, 24.2mg/kg으로 분석되었으나 고형화 처리 이후 모두 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다. 삼광, 금장, 장군광미는 처리이전의 광미에서 Cu가 낮게 분석되었으며 고형화 처리 이후에도 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다(Table 12).

Table 12. Results of Korean official leaching procedure (KOLP) by ICP analysis for tailing samples compared with toxicity criteria of KOLP.

Binders	EVA Powder Mixing ratio (wt%)	Element concentrations (mg/kg, ppm)					
		Song chun	Sam kwang	Geo pung	Geum jang	Jang gun	
Hydrated lime	0	0.205	N.D.	0.107	0.103	N.D.	
	2.5	0.298	N.D.	0.149	0.088	N.D.	
	5	0.165	N.D.	0.128	0.086	N.D.	
Cement	20 wt%	0	0.400	N.D.	0.151	0.118	N.D.
		2.5	0.249	N.D.	0.132	0.059	N.D.
		5	0.479	0.004	0.168	0.032	N.D.
	30 wt%	0	0.587	N.D.	0.057	0.027	N.D.
		2.5	0.699	N.D.	0.085	0.013	N.D.
		5	0.613	N.D.	0.113	0.043	N.D.
Toxicity criteria of KOLP		3					

* N.D. : Not Detected, Detection limit < 1 ppb

3.2.2.4 Zn

Zn의 경우는 현재 지정폐기물 유해물질 기준이 제시되어 있지 않은 상태이며 처리 이전의 광미에서 각각 송천광미 92.7mg/kg, 삼광광미 0.21mg/kg,

거풍광미 12.8mg/kg, 금장광미 25.5mg/kg, 장군광미 17.9mg/kg로 분석되었으며 고형화 처리 이후에는 송천광미에서는 검출되지 않았으며, 삼광, 거풍광미는 0.05mg/kg이하, 금장, 장군광미에서는 0.5mg/kg 이하의 농도로 저감되었다(Table 13).

Table 13. Results of Korean official leaching procedure (KOLP) by ICP analysis for tailing samples compared with toxicity criteria of KOLP.

Binders	EVA Powder Mixing ratio (wt%)	Element concentrations (mg/kg, ppm)					
		Song chun	Sam kwang	Geo pung	Geum jang	Jang gun	
Hydrated lime	0	N.D.	0.020	0.007	0.449	0.154	
	2.5	N.D.	0.038	0.013	0.242	0.482	
	5	N.D.	0.024	0.011	0.338	0.324	
Cement	20 wt%	0	N.D.	0.015	0.005	0.026	0.015
		2.5	N.D.	0.009	0.003	0.035	0.021
		5	N.D.	0.004	0.005	0.045	0.008
	30 wt%	0	N.D.	0.007	0.017	0.028	0.029
		2.5	N.D.	0.007	0.040	0.041	0.019
		5	N.D.	0.005	0.018	0.033	0.020
Toxicity criteria of KOLP		* N.D. : Not Detected, Detection limit < 1 ppb					

3.2.2.5 Pb

처리이전의 송천, 금장광미에서 Pb가 지정폐기물 유해물질기준을 초과하여 각각 3.47mg/kg, 4.41mg/kg으로 분석되었으나 고형화 처리 이후 모두 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다. 삼광, 거풍, 장군광미는 처리이전의 광미에서 Pb가 낮게 분석되었으며 고형화 처리 이후에도 유해물질기준 이하의 농도로 검출되었다(Table 14).

Table 14. Results of Korean official leaching procedure (KOLP) by ICP analysis for tailing samples compared with toxicity criteria of KOLP.

Binders	EVA Powder Mixing ratio (wt%)	Element concentrations (mg/kg, ppm)					
		Song chun	Sam kwang	Geo pung	Geum jang	Jang gun	
Hydrated lime	0	0.028	0.042	0.034	0.736	0.636	
	2.5	0.027	0.061	0.023	0.436	0.313	
	5	0.104	0.045	0.035	0.578	0.539	
Cement	20 wt%	0	0.120	0.087	0.030	0.391	0.131
		2.5	0.124	0.063	0.029	0.667	0.114
		5	0.073	0.041	0.030	1.122	0.072
	30 wt%	0	0.337	0.062	0.081	0.820	0.504
		2.5	0.405	0.055	0.053	0.930	0.375
		5	0.428	0.064	0.038	0.855	0.414
Toxicity criteria of KOLP		3					

* N.D. : Not Detected, Detection limit < 1 ppb

4. 결론

전국 5개 광산을 대상으로 중금속 오염광미의 고형화처리법 개발을 위해 소석회와 시멘트를 주 고화제로 사용하고 폴리머를 첨가하여 고형화처리를 실시한 결과 소석회와 시멘트를 이용하여 광미와 소석회, 광미와 시멘트의 배합비를 결정하여 고화체를 각각 3개씩 제작, 양생한 고화체의 압축강도는 미국 EPA 기준인 3.5kgf/cm^2 이상이였다.

동일한 조건을 유지하면서 콘크리트 강도 증진용으로 사용되는 EVA Powder를 각 조건별로 2.5wt%, 5wt%로 하여 동일한 크기와 조건으로 제작 및 양생한 고화체의 압축강도 역시 미국 EPA 기준인 3.5kgf/cm^2 이상이였으며, 폴리머를 혼합하지 않은 고화체 보다 모든 조건에서 더 높은 강도를 보였다. 용출시험에서는 폐기물공정시험법에서 제시한 용출시험방법에 따라 고화체의 As, Cd, Cu, Zn, Pb 의 중금속 용출시험을 실시한 결과 고형화 처리 후 폴리머를 혼합하지 않은 고화체와 폴리머를 혼합한 시료 모두에서 중금속 용출 농도가 지정폐기물 유해물질기준 이하의 농도로 감소함을 확인 하였다.

본 연구를 통해서 소석회와 폴리머, 시멘트와 폴리머를 이용하여 고형화 처리 시 모든 조건에서 환경기준에 적합한 것으로 나타났으며 폴리머를 첨가하였을 경우 고화체의 강도의 증가와 중금속 용출 저감 효과의 증가로 인해 장기적인 안정성을 높여줄 수 있을 것으로 보인다. 또한 향후 인공강우 시험 및 동결 융해 시험을 통한 지속적인 중금속 용출여부 확인과 강도 변화 등이 연구되어야 할 것이며, 고형화처리 이후 포졸란 반응이 형성되었는지 여부를 확인하기 위한 미세구조 관찰 등이 연구되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 환경부, 폐금속광산 토양오염실태 일제조사 (강원, 경기, 전북, 전남권역), 2003.
- [2] 이예선, 김인수, 이민희, “비소 및 중금속으로 오염된 토양복원을 위한 안정화 공법 칼럼 실험”, 한국지하수토양환경학회 2005년도 춘계 학술발표회 논문집, pp.167-170, 2005.
- [3] 전지혜, 김인수, 이민희, 장윤영, “금속 광미 처리를 위한 포틀랜드 시멘트와 MSG시멘트 고형화 실증 실험 연구”, 자원환경지질, 제 39권, 제6호, pp.699-710, 2006.
- [4] 정명채, 최용섭, 황범순, 이진용, “시멘트를 활용한 폐금속광산 광미의 고형화처리 사례 연구”, 대한환경지질학회 2006 춘계 학술발표회 논문집, pp.487-490, 2006.
- [5] 지식경제부, 광산보안법 시행규칙, 2008.
- [6] 환경부, 토양오염공정시험법, 2002.
- [7] 환경부, 폐기물공정시험법, 2005.
- [8] 환경부, 폐기물 관리법 시행규칙, 2009.
- [9] ASTM D 6276-99a, “Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization”, 2006.
- [10] KS F 2329, 시험실에서 흙 시멘트의 압축 및 휨 강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법, 2002.
- [11] National Lime Association, Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil, 2006.