

연구논문

## 고농도 중금속 함유 광미를 이용한 유리화 처리 골재의 장기 용출특성에 따른 환경안전성 평가

이상우\* · 천사호\* · 이기강\*\* · 이상훈\*

가톨릭대학교 생명공학부 환경공학전공\*, 경기대학교 신소재공학부\*\*

(2006년 11월 10일 접수, 2007년 1월 29일 승인)

## Environmental Assessment of Vitrified Mine Tailing Aggregate Using Various Leaching Methods

Lee, Sang-Woo\* · Chun, Sa-Ho\* · Lee, Ki-kang\*\* · Lee Sanghoon\*

Environmental Engineering Section, Division of Biotechnology, Catholic University\*

Department of Material Science and Engineering, Kyonggi University\*\*

(Manuscript received 10 November 2006; accepted 29 January 2007)

### Abstract

Vitrified aggregates obtained by using mine tailings were evaluated using various leaching methods to assess their environmental safety. The leaching tests in this study include continuous batch leaching, Dutch availability leaching, pH-stat and tank diffusion test as well as TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), which is commonly adopted. Vitrification technique has successfully been applied treating some solid wastes containing high level of heavy metals, such as EAF (Electric Arc Furnace) dust and mine tailings. The potentially most leachable element among trace metals was As and theoretically about 7% of total concentrations in the aggregate can be released under extreme condition. Zinc was leached about 4% and the other trace metals including Cd, Cr and Pb were hardly released from the vitrified mine tailing aggregate.

Key words : mine, tailing, vitrification, heavy metal, leaching

## 1. 서론

광해방지사업단의 정밀조사에 의하면, 가행광산은 730여개소이며 휴·폐광산은 1,276개소로 전국적으로 약 2,000여개소의 광산이 존재하는 것으로 알려져 있다(광해방지사업단, 2006). 이들 휴·폐광 주변은 광산 주변에 산재되어 있는 폐공동으로 인한 지반침하 가능성과 광미와 폐석을 포함한 광산 폐기물에 함유된 중금속이 강우 혹은 붕괴로 인해 유실되거나 중금속이 용출되어 주변의 토양이나 지하수를 오염시킨다(임재명 등, 1995; Jang *et al.*, 2000; 이상훈 등, 2006). 경기도 광명시에 위치한 시흥광산의 경우 광산 폐쇄 후 남겨진 광미와 폐석에서 카드뮴, 구리, 납, 아연 등이 기준치 이상으로 용출되어 주변토양 및 하천, 지하수를 오염시켰으며(황호승과 전효택, 1995; 정예진과 이상훈, 2001), 동일, 옥동, 송천 및 동정광산의 위해성 평가 조사 결과 각종 독성 중금속에 의한 문제가 보고되었다(이진수 등, 2003). 또한 광미 용출로 인해 중금속으로 오염된 토양에서 경작된 농작물의 경우 오염되지 않은 지역에 비해 중금속 함량이 높아 인간 및 생태계에 실질적인 위해요소로 작용하고 있다(박정숙과 이미경, 2001; 김미혜 등, 2002). 따라서 휴 폐광산에 잠재오염원인 방치된 광미와 폐석은 안전하게 제거되거나 중금속이 용출되지 않도록 안전하게 처리되어 환경위해성이 최소화 되어야 한다.

매립광미의 경우, 공기 노출 표면은 풍화작용에 의해 중금속 용출이 많이 일어나 상대적으로 풍화과정을 덜 거친 심부의 광미에 비하여 안정된 상태이다(정예진과 이상훈, 2000). 따라서 폐광산 매립광미의 처리기술을 적용할 경우 처리과정 중 신선한 광미 단면이 공기에 노출되어 다시 중금속 방출이 활발해질 가능성이 없어야 하며 처리가 완료된 이후에는 중금속 재용출이 일어나지 않아야 한다. 중금속으로 오염된 토양처리 방법으로는 굴착(excavation), 토양 세척/세정(soil washing / flushing), 토양 증기 추출법(soil vapour extraction), 동전기를 이용한 오염토양 처리(electrokinetic soil remediation), 고형화 / 안정화(solidification / stabilization)등

이 있으나(Chamber *et al.*, 1991) 이들 방법이 아직 국내 현장에 성공적으로 적용된 예는 없다. 기존 국내 폐광산 복원은 주로 매립과 차단이 적용되었으며, 시간이 경과하면서 침출수의 유출 및 광미 유실 등의 위험을 안고 있어 근원적인 처리 방법이 되지 못한다. 또한 세척, 세정기술의 경우 중금속 함량이 높거나 중금속의 분포 형태에 따라 효과가 떨어지며 동전기 방법 역시 비슷한 문제를 가지고 있다.

고형화/안정화 기술은 별도의 첨가제나 물을 이용하는 방법과 용융점 이상으로 가열 후 냉각, 유리화 하는 두 가지 방법이 있다. 특히, 후자의 경우 중금속을 포함한 토양이나 폐기물의 원자 배열을 바꾸어 중금속이 용출되지 않는 형태로 전환하는 것으로 안정성이 매우 뛰어나고 장기적으로 용출이 억제되는 특성을 가지므로 중금속 함량이 매우 높은 토양 또는 폐기물 처리에 적합한 방법이다(이기강과 김정환, 2003). 이때 만들어진 유리화 물질은 골재나 벽돌 등으로 제조, 재활용할 수 있는 장점을 가진다(Evanko *et al.*, 1997). 다만 이 방법은 처리 비용이 비교적 높아 광미와 같이 중금속 오염물질이 독립된 광물이나 고형물 형태로 존재하는 경우 세척이나 동전기법을 통한 정화기술 적용이 제한 될 경우에 효과적으로 이용될 수 있을 것이다. 첨가제를 이용하는 고형화의 경우 시멘트를 이용하여 슬래그 및 비산재 등을 중금속을 함유한 폐기물을 고형화한 결과 중금속의 용출량이 환경기준 이내로 검출되어 고형화에 의한 원소들의 농도저감을 뚜렷하게 확인할 수 있었다(Singh and Pant, 2006). 그러나, 이 방법의 경우 일부 원소들의 경우 최적 용출 pH 범위에 따라 특정 원소가 용출되는 경우가 있어 이 기술 적용의 제한이 될 수 있다. 따라서 폐광산 주변의 환경영향을 최소화하기 위해서는 오염형태에 따라 다양한 방법을 복합적으로 적용해야 하며 고형화 방법 중에서도 유리화 기술은 중금속이 흡착이나 이온상태가 아닌 독립 고형물 상태로 존재하는 광미의 처리에 적합한 처리방법으로 생각된다.

본 연구는 중금속을 다량 함유한 광미를 고형화/안정화 기술중 특히 유리화 기술의 적용 가능성을

판단하기 위한 목적으로 수행되었다. 즉, 중금속과 오염토양을 재료로 유리화 기술을 적용, 인공골재를 제조하며, 제조된 인공골재의 용출특성을 바탕으로 유리화 기술의 환경안전성을 판단하고자 한다. 중금속 함유 광미를 골재로 재활용하거나 또는 재매립할 경우 다양한 자연환경에 노출된다. 특히, 빗물이나 지하수에 접촉하면서 내부에 함유된 중금속은 잠재적으로 용출이 가능한 상태가 되며 이때의 용출특성에 따라 기술 적용 여부와 환경안전성을 판단할 수 있을 것이다. 현재 널리 이용되고 있는 용출시험법은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)가 있으나 본 연구는 좀 더 다양한 환경과 시간을 반영할 수 있는 다양한 시험방법을 이용하여 단기 뿐 아니라 장기간에 걸친 용출특성과 환경영향을 평가하고자 한다. 본 연구에 채택된 방법은 TCLP외에 연속 회분식 용출시험 (Serial batch leaching test - modified after DIN 38414-S4), 가용 용출시험(Dutch availability leaching test - NEN 7341), pH 유지 용출시험 (pH-stat leaching test - CEN/TC 292/WG6, EU standard method of pH dependence test), 탱크 확산 시험(Tank diffusion test - NEN7345, Dutch diffusion leaching test) 등이다(Fallman, 1997; R., Kylefors *et. al.*, 2003; Hage and Mulder, 2003; Tiruta-barna *et. al.*, 2004).

## II. 시험재료 및 방법

### 1. 광미시료

인공골재에 사용된 광미는 강원도 강릉시의 송천광산에서 채취하였다. 국내에서 유일하게 국립공원 내 위치한 송천광산은 금, 은을 개발대상으로 하는 광산으로 1962년도부터 1977년 까지 채광을 하였으며 이후 채광이 중단되고 1995년 광업권이 소멸된 상태이다. 이 곳에는 약 8,000톤의 광미가 광산 인근의 계곡 바로 옆에 매립, 방치된 상태로 우천시 광미 용출과 주변 수계 오염 가능성이 매우 크다. 특히 송천광산 광미의 경우 비소 3,450 mg/kg, 크롬 22.8 mg/kg, 카드뮴 4.2 mg/kg, 납 50.5 mg/kg, 아연 437.8 mg/kg으로 오염되지 않은 토양에 비하여 수십배에서 수백배까지 중금속이 농축된 것으로 나타나고 있다.

### 2. 유리화/안정화기법을 이용한 골재 제조 및 보관

골재 제조과정은 광미와 점토를 약 7:3으로 혼합한 후 Fig. 1과 같은 공정을 통하여 제조하였다. 본 연구에 적용한 나노융합공정을 이용한 유리화/안정화법은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 광미내의 중금속 성분을 안정화하기 위해서는 광미와 점토계 원료의 습식공정에 의하여 균일하게 혼합한다. 이 과정에서 광미내에 포함된 수용성의 중금속 성분이 용출되며 이는 양이온 교환작용에 의해 점토에 흡착된다. 이와 같이 습식혼합 공정을 통하여 중금속 성분의 일

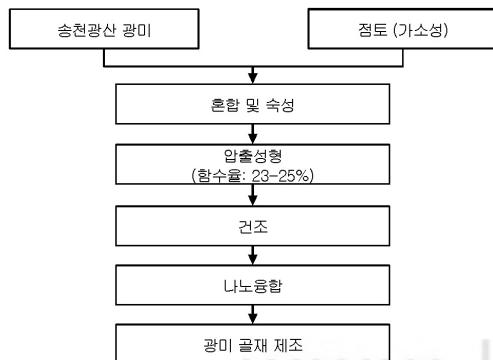


Fig. 1. Manufacturing process of aggregates using vitrification / stabilization and manufactured aggregate.

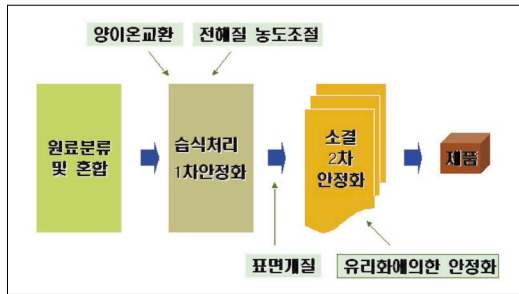


Fig. 2. Vitrification / stabilization using nano-fusion process.

부가 용출되거나 혼합공정에 의해 일차적으로 안정화된다. 혼합공정 후 2차 안정화 과정인 소결 안정화 과정에서는 중금속 성분이 점토 성분과 반응하여 실리케이트 화합물을 형성하거나, 실리케이트와의 공유반응에 의해 액상을 형성하며 액상에 중금속 성분이 용해되며, 냉각과정을 거치고 난 후 유리화가 되어 광미내 중금속이 안정화된다(이상훈 등, 2006).

### 3. 중금속 함량 분석

송천광산 광미시료를 그늘에서 완전히 건조된 후 체질을 통해 -10 mesh(2 mm 이하) 통과분을 대상으로 약 80 mesh 내외로 분쇄하였으며 광미 1 g에 왕수(질산 : 염산 = 1 : 3) 4 mL을 넣어 70 에서 1시간 교반, 가열하였다. 광미 골재 역시 쇄질기로 1차 분쇄한 후 광미와 같은 방법으로 분쇄하여 같은 방법으로 시료를 처리하였다. 왕수로 녹인 시료에 증류수 16 mL로 희석하여 0.45  $\mu$ m 필터로 여과하였으며, 유도결합 플라즈마 흡광/발광기(ICP-OES, Spectro Genesis)를 이용하여 중금속의 농도를 측정하였다.

### 4. 용출 특성 평가 방법

#### 1) 연속 회분식 용출시험(Serial batch leaching test - modified after DIN 38414-S4)

연속 회분식 용출시험은 대상 시료를 교환하지 않고 용액만을 교환하여 연속적으로 원소를 용출하는 시험으로 일반 회분식 시험의 반응식을 확장할 수 있고, 입자 표면에 존재하는 중금속의 용출되는 양을 알아볼 수 있다는 장점이 있다. 연속 회분식 용

출시험은 유리화 / 안정화된 광미골재 50 g과 증류수 500 ml(pH 7.0)를 24시간 동안 30 rpm으로 회전식 교반기(Rolling mixer)를 이용하여 교반하였다. 최초 24시간의 교반이 끝나면 용액만을 제거하여 0.45  $\mu$ m 필터를 이용하여 여과하였고 다시 증류수 500 ml를 넣어 같은 방법으로 총 4회 반복하였다.

#### 2) 가용 용출시험(Dutch availability leaching test - NEN 7341)

고형폐기물에서 발생할 수 있는 잠재적인 중금속 용출량을 평가를 위하여 -80 mesh 이하로 분쇄한 유리화 / 안정화 처리된 광미골재 5 g을 증류수 500 mL와 혼합하여(교액비 1 : 100) 최초 4시간 동안은 pH 7로 조정, controller와 정량펌프를 이용하여 pH를 유지시키면서 교반시켰다. 교반이 끝난 뒤 펌프를 이용하여 용액만을 추출 한 후 별도 보관하고 고체시료가 남아있는 삼각플라스틱에 다시 500 ml 증류수를 혼합한 다음 같은 방법으로 pH 4로 조정하며 18시간 동안 교반하였다. 그 후 pH 4에서 pH 7으로 얻은 시료를 섞은 후 0.45  $\mu$ m 필터를 이용하여 여과 후 분석하였다. pH 조정은 0.1 M 질산과 0.1 M 수산화나트륨을 이용하였다.

#### 3) pH 유지 용출시험(pH-stat leaching test - CEN/TC 292/WG6, EU standard method of pH dependence test)

중금속의 용출은 pH에 많은 영향을 받기 때문에 산성에서 알칼리성에 이르는 다양한 환경에서 용출 특성의 확인을 위하여 pH 유지 용출시험을 실시하였다. -80 mesh 이하로 분쇄한 유리화 / 안정화된 광미 10 g과 증류수 100 mL를 혼합하여(교액비 1 : 10) pH 조건을 4, 5, 5.5, 7, 8, 9, 10, 11, 12의 총 9 단계로 각각 조절하여 마그네틱 교반기로 24시간동안 교반하였다. pH 조정은 0.1 M 질산과 0.1 M 수산화나트륨을 이용하였으며 정량펌프와 controller를 이용하여 일정하게 pH가 유지되도록 하였다.

#### 4) 탱크 확산시험 (Tank diffusion test - NEN7345, Dutch diffusion leaching test)

탱크 확산 시험은 면적에 따른 확산 용출특성을 알아보기 위한 시험방법으로 표면적의 함수에 따른

중금속 용출관계를 나타낸다. 그러나 본 시험에 사용된 유리화 / 안정화된 광미는 입도 분포가 다양하여 표면적 산출에 어려움이 있었기 때문에, 정량하여 반응조에 넣은 후 중량에 따른 중금속 용출 결과로 나타내었다. 광미 1,000 g을 반응조에 넣은 후 질산을 이용하여 pH 4로 조절한 증류수 5,000 ml와 혼합(고액비 1 : 5)하였다. 반응을 시작하여 8시간 후 시료를 채취한 후 다시 같은 양의 증류수를 채웠다. 시료 채취는 각각 24시간, 48시간, 56시간 4일, 9일, 16일, 36일 그리고 64일째까지 총 누적 시험기간 64일만에 걸쳐 8회 채취하였다.

채취한 모든 시료는 0.45 μm 필터를 이용하여 여과한 후 0.2 % 질산을 첨가하여 pH 2 이하로 조절한 후 4에서 냉장보관 하였다. 원소분석은 유도결합 플라즈마 흡광/발광기(ICP-OES, Spectro genesis)를 이용하여 As, Cr, Cd, Pb, Zn을 분석하였다.

### III. 결과 및 토의

#### 1. 송천광미골재 화학조성

송천광산에서 채취하여 광미시료와 나노융합공정을 통하여 제조한 광미골재의 총량분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 송천광산 광미의 경우 As의 함량이 약 3,450 mg/kg으로 매우 높게 나타났으며, Zn, Pb, Cr, Cd이 각각 437.8, 50.5, 22.8, 4.2 mg/kg의 순서로 농도가 높게 나타났다. 자연 토양내 존재하는 중금속 함량과 송천광미의 중금속 함량을 비교하면 As의 평균함량에 비하여 약 575배, Cr의 경우 약 228배, Cd, Pb, Zn의 경우 각각 12배, 1.4배, 4.9배가 높은 함량으로 광미내 중금속의 오

Table 1. Chemical composition of Songchen tailings and aggregate (unit : mg/kg)

	As	Cd	Cr	Pb	Zn
Songchen tailings	3450.5	4.2	22.8	50.5	437.8
Natural soil <sup>1)</sup>	6	0.35	0.1	35	90
Aggregate	1298.6	8.0	10.0	22.9	249.2

<sup>1)</sup> Bowen(1979)

염이 심각한 것으로 판단되며 우수에 의한 중금속 용출로 인한 주변환경의 오염을 유발할 가능성이 있음을 시사한다. 제조된 광미골재의 경우 역시 As의 함량이 약 1298.6 mg/kg으로 높게 나타났으며, Zn, Pb, Cr, Cd이 249.2, 22.9, 10.0, 8.0 mg/kg의 순서로 농도가 높게 나타났다. 따라서 광미골재의 환경위해성 측면에서 용출특성 평가가 반드시 필요하다.

#### 2. 광미골재 용출시험

##### 1) 연속 회분식 용출시험(Serial batch leaching test - modified after DIN 38414-S4)

연속 회분식 용출시험결과(Table 2) 증류수를 이용한 광미골재 연속용출 시험의 경우 Cr, Cd 및 Pb는 전혀 용출되지 않으며 Zn, As만이 용출된다. 특히 As의 경우 최초 24시간 용출시 상대적으로 높은 농도로 용출되었으나 TCLP의 기준치 이하의 값을 나타내었으며, 2, 3, 4회차로 갈수록 점차 감소, 안정된 농도를 보인다. Zn의 경우 용출 횟수와 농도간의 상관관계가 나타나지 않는다. As가 초기에 많이 용출되는 것은 광미골재 제조과정 중 고온의 나노융합과정에서 비소의 낮은 녹는점 (32.4℃)과 끓는점 (65.3℃)에 의하여 비소가 다른 원소에 비해 휘발, 증착되어 주로 입자 표면에 분포하며 표면에 부화된 비소가 물과 접촉시 좀 더 쉽게 용출되기 때문인 것으로 판단된다. 반면 Zn의 경우 휘발성이 낮아 표면보다는 격자내에 주로 분포하여 골재가 용출되면서 일정한 속도로 용출되기 때문인 것으로 판단된다. 회분식 시험 횟수가 증가하면서 용액의 pH는 약간

Table 2. Leachate chemistry collected from continuous batch leaching test (unit : mg/kg)

Number of leaching	As	Cd	Cr	Pb	Zn	pH (initial pH 7)
1	3.09	ND	ND	ND	0.06	6.69
2	0.96	ND	ND	ND	0.07	6.71
3	0.57	ND	ND	ND	0.06	6.30
4	0.48	ND	ND	ND	0.05	6.37
Allowable level*	100	20	100	100	-	-

\* Allowable level: TCLP의 허용기준치

Table 3. Chemical composition of leachate from availability test

(unit : mg/kg)

	As(용출율* %)	Cd(용출율 %)	Cr(용출율 %)	Pb (용출율 %)	Zn (용출율 %)
Songcheon tailings	73.4(5.65%)	0.1(2.38%)	ND( - %)	ND( - %)	11.1(4.45%)
Allowable level**	100	20	100	100	-

\* 용출률(%) = (가용용출시험)/(광미중 총함량) × 100

\*\* Allowable level: TCLP의 허용기준치

씩 감소하며 이는 용출 증가에 따른 표면에 흡착된 알칼리성 양이온이 제거되기 때문으로 생각된다.

2) 가용용출시험(Dutch availability leaching test - NEN 7341)

가용용출 시험은 금속원소들이 용해될 수 있는 최적조건인 산성과 As나 Cr과 같이 oxyanion 형태로 존재하는 원소가 녹아나오기 좋은 조건인 중성 pH에서 각각 용출시험을 하여 최대로 녹아나올 수 있는 원소농도를 파악하기 위한 시험방법으로, 가용용출 시험을 통한 용출특성 규명과 사전 안전성 평가를 위하여 EPA(1986)의 TCLP(Toxicity characteristic leaching procedure)의 허용기준치와 비교하여 보았다. 가용용출시험은 TCLP보다 가혹한 조건(낮은 pH)에서 행해졌음에도 불구하고, Cr과 Pb는 검출되지 않았으며 검출된 Cd의 경우도 TCLP의 기준치 이하의 농도로 나타났다. As의 경우는 다른 중금속에 비하여 상대적으로 높은 용출량을 나타내었으나 TCLP의 기준치를 초과하지는 않은 것으로 나타났다. 또한 광미골재의 중금속 총농도에 대한 가용용출량의 비를 계산한 결과, 총함량에 비해 극히 미량의 중금속만 용출되는 것으로 나타났다. 즉, As의 경우 총농도의 5.65 %, Zn의 경우 4.45 %, 그리고 Cd의 경우 2.38 %만이 용출되어졌으며 Cr, Pb의

경우에는 전혀 용출이 되지 않는 것으로 나타나 자연상태에서 희석 효과 등을 감안하면 거의 무시할만한 수준인 것으로 판단되어진다. As의 경우 골재 제조를 위한 나노융합공정시 낮은 녹는점과 끓는점을 가진 As의 물리적 특성에 따라 대부분 표면에 존재하는 As의 저감을 위하여 유리화 / 안정화법을 건설토목현장에 적용할 때 세척과 같은 전처리를 행한다면 As의 용출을 통한 환경 위해성은 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3) pH 유지 용출시험(pH-stat leaching test - CEN/TC 292/WG6, EU standard method of pH dependence test)

pH는 중금속의 용출정도에 영향을 미치는 가장 중요한 인자중 하나이다. 기존 TCLP와 같은 시험의 경우 일정 pH로 고정되어있어 다양한 자연환경을 반영하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 실험에서는 pH를 4에서 12 범위에서 변화시켜가며 다양한 pH 범위에서 시료의 용출특성 변화를 관찰하였다(Fig. 3). 대체적으로 Cd, Pb, Zn 등과 같은 2가 금속들은 산성에서 용출이 증가하는 반면, As, Cr과 같은 oxyanion 형태로 존재하는 원소들의 경우 알칼리 환경에서 더 용출이 잘 되는 것으로 보고된다(Karamalidis *et. al.*, 2006). pH 유지시

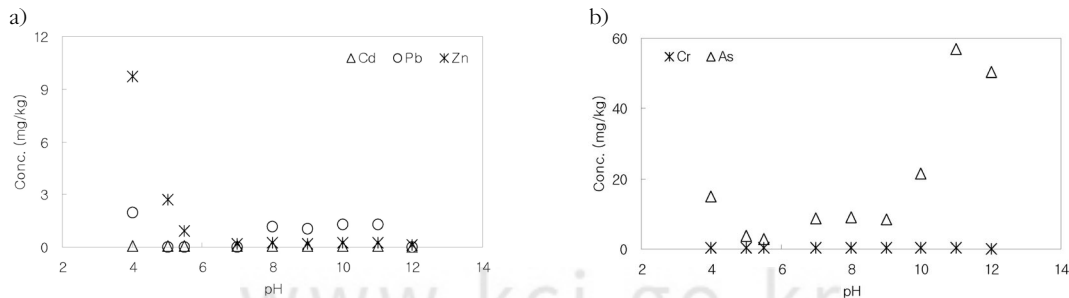


Fig. 3. Leaching of heavy metals from mine tailing aggregate depending on pH a) Cations (Cd, Pb and Zn), b) Oxyanions (Cr, As)

용출시험 결과, Cd, Pb, Zn의 경우 pH 6 이하에서 용출농도가 급격히 증가하며 반면 As의 경우 pH 6-8 사이의 중성조건에서 거의 용출되지 않고 pH 6 이하 또는 10 이상에서 주로 용출되며 특히 10이상의 알칼리 환경에서는 가용용출량이 급격히 증가한다. 그러나, 이 때 최대 용출량을 보면 약 57 mg/kg으로 TLCP에서 제시된 허용기준치 이하의 값을 나타냈으며, 전체함량의 4.38 %에 불과하여 가장 가혹한 pH 조건에서도 As는 매우 안정된 형태로 존재하고 있음이 확인되었다. 또한 pH 4에서 관찰된 Zn의 최대 용출량 역시 TLCP에서 제시된 허용기준치 이하의 값을 나타냈으며, 전체 함량의 3.91 %에 불과하여 유리화 공정을 통해 만들어진 광미 골재내의 원소들을 매우 안정된 상태로 존재하고 있는 것으로 판단된다.

#### 4) 탱크 확산 실험

총 64일간 반응조에서 반응시킨 탱크 확산 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Chandler *et al.*(1997)에 의하면 탱크 확산 실험에 의한 패턴은 크게 1)diffusion controlled release, 2)depletion

of leachable species, 3)delayed release, 4)surface wash-off, 5)wash-out of mobile species, 그리고 6)change in chemical condition 등으로 나누어진다. As의 경우(Fig. 4a) 반응 초기 급격히 용출된 후 일정 시간이 지나면 매우 소량만 녹아나와 대부분의 As는 입자 표면에 쉽게 용출될 수 있는 화학형태로 존재하는 것으로 판단된다. 이는 As가 다른 원소들에 비하여 휘발성이 높기 때문인 것으로 생각된다. 이는 연속회분식 용출시험에서도 비슷한 용출 특성을 보이는 것으로 확인된다. Zn, Cd 및 Pb의 경우 일정기간이 지나면서 용출농도가 증가하는데 이는 이 원소들이 As와 달리 입자 표면이 아닌 내부 결정격자에 더 많이 분포하며 초기에는 입자 표면에 있던 원소들이 용출하다가 입자 표면이 용해되면서 내부에 존재하던 부분들이 용출되어 나오기 때문이다. 또 다른 가능성은 원소들의 화학특성 변화에 따른 용해도 변화이다. 그러나 Cd과 Pb의 용출특성은 용해도 보다 확산에 의해 용출이 조정됨을 시사한다. 즉, 골재와 접촉하는 물의 양에 따라 용출량은 변화할 수 있을 것이다.

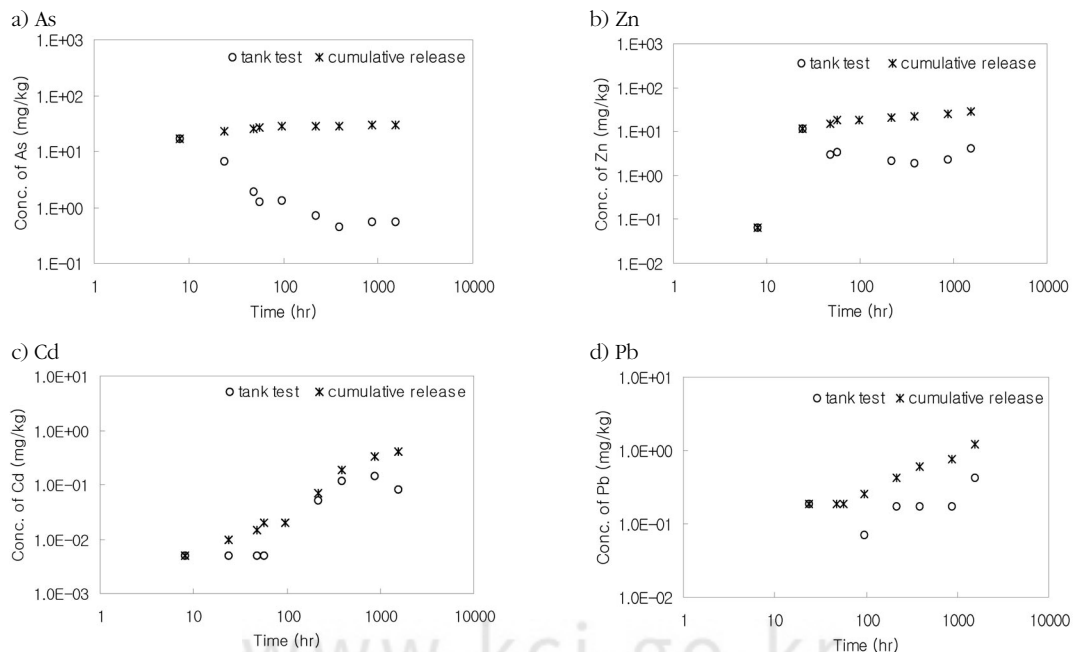


Fig. 4. Diffused ion chemistry from Tank test a) As, b) Zn, c) Cr, and d) Pb

#### IV. 결론

본 연구를 통하여 유리화 방법으로 제조된 광미 골재를 이용하여 중금속 함량이 매우 높은 광미의 처리와 재활용이라는 두 가지 목적을 동시에 만족시킬 수 있는 가능성을 알아보았다. 특히 이미 다양한 중금속 함유 폐기물을 재료로 제조된 바 있는 유리화 방법을 광미에 적용이 가능한지를 환경위해성을 바탕으로 판단하고자 하였다. 따라서 단기 용출 특성이 아닌 장기 용출특성을 중심으로 용출특성을 파악하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연속 회분식 시험, 가용 용출시험, pH 유지 용출시험, 탱크 확산 시험 등 다양한 자연환경을 모두 반영하는 시험 방법을 통한 미량원소들의 용출량은 As의 경우 최대 5% 내외였으며 Zn가 그 다음으로 4% 가량 용출되었다. 그러나 Cd, Cr 및 Pb의 경우 거의 용출되지 않아 유리화 광미 골재는 매우 안정된 형태로 중금속들을 가두고 있다고 판단된다.

2. 각종 용출시험들은 일반적으로 행해지는 TCLP에 비해 훨씬 가혹한 조건에서 이루어졌다. 본 연구에 채택된 용출시험들은 별도로 설정된 기준이 없으나 TCLP 기준과 간접 비교한 결과 TCLP 기준에 비하여 훨씬 낮은 농도로 용출되었으므로 환경위해성이 매우 적다고 판단되며 이는 중금속 함량이 매우 높은 광미 처리에 적용이 가능함을 보여준다.

3. 유리화 골재는 건축재료로 활용이 가능하며 현장에서 제조할 경우 폐공동 채움재료로 활용이 가능하여 친환경적으로 폐광산을 복원할 수 있는 매우 효과적 방법으로 판단된다. 또한 현재 광미 전체가 아니라 입도분리, 자력선별 및 비중선별 등의 방법을 이용하여 특히 광미 중에서도 중금속 함량이 높은 부분을 분리 선별, 적용하는 연구가 진행되고 있으며 이 경우 더욱 효율적이고 경제적으로 광미를 처리할 수 있을 것으로 판단된다.

물리, 화학적 성상이 다양한 광미처리는 특성에 따라 다양한 기술이 복합적으로 적용되어야 한다. 본 유리화 방법은 에너지를 많이 소모하는 방법으로 다른 처리기술에 비하여 상대적으로 높은 비용이 요구되어지나 복합 공정중 최종 처리 방법, 즉, 중금속

함량이 매우 높아 다른 기술적용이 어려운 경우나 분리, 선별된 광미에 효과적으로 적용할 수 있으며 이렇게 제조된 유리화 광미 골재는 환경적으로 안전한 것으로 판단된다.

#### Acknowledge

본 논문은 2006년도 가톨릭대학교 교비연구비에 지원에 의해 연구되었습니다.

#### Reference

- 강성호, 이상훈, 광기석, 이주형, 정문경, 2005, 용출특성규명을 통한 재생골재 환경성 평가, 대한환경공학회지, 27, 293-301.
- 김미혜, 소유섭, 김은정, 정소영, 홍무기, 2002, 폐광산지역 농산물, 토양 및 농경수의 중금속 오염에 관한 연구, 한국식품위생안전성학회지, 17(4), 178-182.
- 광해방지사업단, 2006, [http://www.kmrc.or.kr/pr/k\\_sub2.asp](http://www.kmrc.or.kr/pr/k_sub2.asp)
- 박정숙, 이미경, 2002, 전라남도 광산 주변에서 수확한 농산물 중의 중금속 및 미량금속 함량 조사 '영암, 보성, 곡성, 여천군을 중심으로', 식품영양학회지, 15(1), 64-69.
- 이기강, 김정환, 2003, 무기계 폐분진을 이용한 전자재 제조기술 II : 인공경량골재, 세라미스트, 6(3), 35-41.
- 이상훈, 김선미, 이기강, 2006, 휴, 폐금속광산의 환경영향 저감을 위한 광미 고형화 연구, 영향평가학회, 2006학년도 춘계 학술발표대회 초록집.
- 이진수, 전효택, 김경웅, 김주용, 2003, 폐금속광산 지역에서의 독성중금속에 대한 위해성 평가, 지구시스템공학회지, 40(4), 264-273.
- 임재명, 조용진, 한동준, 1995, 금속광산 광재의 물성 및 침출특성, 한국폐기물학회, 12(5), 534-543.



- 정예진, 이상훈, 2000, 시흥 폐광산 잔류광미로 인한 잠재적 환경오염 영향, 자연과학논문집, 21, 165-180.
- 정예진, 이상훈, 2001, 폐광산 복구지역 잔류광미로 인한 주변 지하수 · 토양 오염가능성-시흥 광산 사례, 자원환경지질학회지, 34(5), 461-470.
- 황호송, 전효택, 1995, 시흥 Cu-Pb-Zn 광산 주변에서의 중금속원소들의 분산 및 존재형태와 흡착처리, 자원환경지질학회지, 28(5), 455-467.
- Bowen, H. J. M., 1979, Environmental Chemistry of Elements, Academic Press, London.
- Chambers, D. C., Willis, J., Giti-Pour, S., Zieleniewski, J. L., Rickabaugh, J. F., Mecca, M. I., Pasin, B., Sims, R. C., Sorensen, D. L., McLean, J. E., Mahmood, R., Dupont, R. R., and Wangner, K, 1991, In Situ Treatment of hazardous Waste Contaminated Soils (2nd ed.). ndc, New Jersey, pp. 98.
- Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Hartlen, J., Hjelmar, O., Kosson, D. S., Sawell, S. E., Sloop, H. A. V. D., and Vehlow, J., 1997, Municipal solid waste incinerator residues, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- EPA, 1986, Toxicity characteristic leaching procedure (TCLP), Fed. Reg., 54(216), 40643-40653.
- Evanko, C. R. and Dzombak, D. A., 1997, Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater, Technology evaluation report (TE-97-01), GWRITAC, 15.
- Fallman, A. M., Performance and design of the availability test for measurement of potentially leachable amounts from waste material, Environ, Sci. Technol., 31, 735-744.
- Hage, J. L. T. and Mulder. E., 2004, Preliminary assessment of three new European leaching tests, Waste management, 24, 165-172.
- Jang, A. and Kim, I. S., 2000, Technical note solidification and stabilization of Pb, Cd, and Cu, in tailing wastes using cement and fly ash, Minerals Engineering, 13(14-15), 1659-1662.
- Karamalidis, A. K. and Voudrias, E. A., 2006, Release of Zn, Ni, Cu,  $SO_4^{2-}$  and  $CrO_4^{2-}$  as a function of pH from cement-based stabilized/solidified refinery oily sludge and ash from incineration of oily sludge, J. Hazardous Materials (In Press).
- Kylefors, K., Andreas, L., and Llargerkvist, A., A comparison of small-scale, pilot scale and large scale tests for prediction leaching behaviour of landfill wastes, Waste management, 23, 45-59.
- Singh, T. S. and Pant, K. K., 2006, Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using portland cement, fly ash and polymeric materials, Journal of Hazardous Materials, 29-36.
- Todorovic, J. and Ecke, H., 2004 Leaching tests for Assessment of Mobility of Inorganic Contaminants from Solidified Incineration Residues - Literature review, Report No. 2004:01, Division of Waste Science and Technology, Lulea University of Technology, Sweden.
- Tiruta-barna, L., Imyim, A., and Barna, R., 2004, Long-term prediction of the leaching behaviour of pollutants from solidified wastes, Adv. Environ. Res., 8, 697-711.