

## 시멘트고화에 의한 카드뮴슬러지의 안정성 및 용출실험방법 비교 검토

주소영 · 김광렬\*

### A Study on The Comparison of Leaching Methods and Stability of Cement Mortar Solidified Cadmium sludge

So-Young Ju · Kwang-Yul Kim\*

*Korea Atomic Energy Research Center*

*\*Dept. of Environmental Engineering, Chungbuk National Univ.*

#### Abstract

This study was performed to evaluate the effective solidification of Cd sludge using cement and power plant fly ash as cement admixture, to identify the leaching characteristics of the heavy metal Cd sludge solidified, and to develop proper KLT(Korean Leaching Test) of hazardous waste. KLT was compared with EPT(Extraction Procedure Toxicity) and TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure).

Fly ash contents ranged from 0% to 30% of cement weight. The experimental results showed that the optimum amount of fly ash replaced was 10% to 15% and KLT was less appropriate than EPA and TCLP.

Also the purpose of the study was to suggest the modification factors on the leaching test currently used, based on the above mentioned aspects. The effects of pH, leaching time, leaching for agitating intensity, and leaching solvent were investigated.

As the result of test, the leaching potential was relatively high when the pH and agitation intensity of leaching solution were 5 and 150rpm, respectively. Leaching time of six hours was found to be sufficient and the use of acetic acid as a leaching solvent is more useful in landfill site particularly.

Key words : Cd sludge, leaching test, cement, fly ash

#### I. 서 론

유해폐기물을 처리하는 방법중에서 시멘트법은 경제성 및 처리의 용이성 등으로 가장 널리 이용되고 있으나, 고형화 과정에서 고화체의 부피가 폐

기물 양의 최고 두배 이상까지 증가하기 때문에 고화체의 부피를 최소화하고 중금속 폐기물을 고형화하기 위해서는 적은 양의 고화체로 많은 양의 중금속 폐기물을 안전하게 고정시킬 수 있어야 한다. 또한 고형화시킨 폐기물 고화체의 용출특성이

나 기계적 강도 등이 다른 고형화 방법에 의해 생성된 폐기물 고화체와 같거나 향상되어야 한다.

또한, 폐기물의 양에 따라 시멘트 고화체의 강도가 시멘트 모르타르의 강도에 비해 크게 감소하는데 이러한 강도 저하를 방지하기 위해 각종 첨가제 등을 사용하고 있으며, 이러한 첨가제중 시멘트에 석탄화나 제철슬래그 등을 일정비율만큼 첨가하는 방법들이 연구되어 왔다. 석탄 비산회의 처리 기술 및 활용방안에 대한 연구는 여러 가지 형태로 제안된 바 있으며 비산회의 효율적인 재활용방법으로써 시멘트 고화시 첨가제로서 비산회를 이용하는 연구가 진행되고 있고 특히 중금속의 고형화 및 고화체의 용출 특성에 대한 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>1,2)</sup>

한편, 폐기물내 유해성분의 평가는 용출실험을 통하여 그 폐기물의 유해정도를 판단할 수 있는데, 이러한 판정의 여부는 유해폐기물의 중간처리 방법 및 최종처리 방법을 결정하거나 폐기물이 매립되었을 경우 침출수로 배출될 수 있는 오염물질의 양을 예측하는 것이라 할 수 있다. 현재 이러한 용출실험은 전 세계적으로 시행되고 있으나, 용출방법과 용출액 판정기준이 상이하여 결과의 객관적인 비교가 어렵다는 문제점을 가지고 있다.<sup>3,4)</sup>

따라서 본 연구에서는 각종 제련공정과 도금, 안료, 납땜 등의 사용시 발생하고 있는 중금속인 카드뮴슬러지를 시멘트 고형화시 시멘트 혼화제로 비산회를 사용하여 포졸란 반응에 의한 시멘트의 기계적 강도 증진과 수화특성의 개선등을 도모하였으며, 고화체의 안정성을 규명하기 위하여 우리나라 폐기물 공정시험법과 미국의 EPT법 그리고 TCLP법에 의해 고화체에 대한 용출실험을 각각 실시하여 비교 분석함으로써 효율적인 용출실험 방법 등을 제시하고자 하였다.

## II. 이론적 고찰

폐기물의 고형화 반응은 시멘트 혼합물의 pH에 따라 대부분의 다가 양이온이 불용성의 수산화물이나 탄산염으로 변화되기 때문에 특히 독성이 큰 고농도의 중금속 폐기물 처리에 효과적이다. 각종 공정중에 발생하는 유해한 중금속슬러지에는 다양

한 종류의 무기이온들 외에도 유기물질들이 존재하므로 시멘트의 수화반응에 악영향을 나타내지만 일반적으로  $F^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $OH^-$  등에 의해 침전 가능한 이온들을 제외한 대부분의 무기이온들은 수화반응을 촉진시킨다.<sup>2)</sup>

수화반응을 저해하는 요인에는 2가지가 있는데, 첫째 시멘트입자 표면에 침전물을 형성하여 물과 시멘트의 접촉을 억제하는 경우로 석고를 예로 들 수 있다. 또한 중금속의 수산화 침전물과 그 밖의 무기성 침전물도 시멘트 입자 표면에 부착될 경우 저해현상을 유발하는 것으로 보고되고 있다. 둘째 유기물에 의한 경우로 유기물들이 시멘트 표면에 흡착되면 수화반응을 지연시키는 것으로 알려져 있다. 또한 비산회를 포함한 시멘트모르타르는 초기 양생에서 기계적 강도가 낮게 나타나는데 이는 비산회의 낮은 칼슘 함량으로 인하여 비산회 중의 다른 성분들이 칼슘 대신 치환반응을 하기 때문이다. 그 결과 CSH(calcium silicate hydrate)나 다른 수화물 생성에 방해로 가져온다.<sup>5)</sup>

Tashiro<sup>6)</sup> 의하면 Zn, Pb, Cu 등은 시멘트의 칼슘이온과 반응하여 수산화물로 침전하거나  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 복염을 형성함으로써 시멘트 수화에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 시멘트의 초기 강도 저하를 가져온다고 하였다. 그러나, Frank<sup>7)</sup> 의하면 Cd의 경우 반응 초기에  $Cd(OH)_2$ 를 생성하여 CSH와  $Ca(OH)_2$ 의 침전핵으로 작용함으로써 강도 증진에 기여하는 것으로 알려져 있으며, Bishop<sup>8)</sup> 등은 수화반응 초기에 생성되는 수화물인 ettringite의 자유도가 크기 때문에 이온 치환 등에 의해 중금속이온을 효율적으로 고정화시키는 것으로 발표한 바 있지만, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

중금속이 고화체 내에 갇히게 되는 것은 수화반응에 의해 일어나는 작용이므로 효율적인 중금속 처리, 유해폐기물의 안정화를 위해서는 시멘트 수화반응에 대한 고찰이 필요하며, 시멘트 고화체에 있어서 수화반응에 영향을 주는 인자들이 직접 중금속 용출과도 밀접한 관련이 있다.

중금속 용출에 영향을 미치는 물리적 성질로는 물과 시멘트의 비율, 슬러지와 시멘트의 비율, 양생기간, 공극의 크기, 투수계수, 압축강도, 기타 고

화체에 대한 첨가물질의 종류 및 양 등을 들 수 있다. 이들은 서로가 복합적으로 작용하므로 각각의 영향을 규명하기는 매우 어려우며, 1차적인 영향인자들로써 물과 시멘트의 비율, 슬러지와 시멘트의 비율, 양생기간, 고화체에 대한 첨가물질을 들 수 있고, 2차적인 영향으로 물리적 성질과 관계되는 공극의 크기, 투수계수, 압축강도 등의 성질을 거론할 수 있다. 시멘트가 수화반응을 일으키면 체적이 증가해서 수화생성물이 입자사이의 공극을 채우게 되며, 이 때 수화정도와 물과 시멘트의 비율에 따라서 공극율이 달라지게 되는데, 물과 시멘트의 비율이 증가하면 공극율도 커지게 되고, 공극율이 커지면 용매의 침투율이 또한 증가하여 용출량이 증가하게 된다. 또한, 슬러지와 시멘트의 비의 경우는 이 값이 증가하면 시멘트양에 대한 중금속 양이 상대적으로 증가하게 되고, 증가한 슬러지 양만큼 시멘트의 양이 줄어들어서 수화를 일으킬 수 있는 물질이 줄어들기 때문에 강도가 저하되어, 중금속 용출량이 높아지게 된다.<sup>3,4,9 11)</sup>

### III. 실험 및 방법

#### 1. 실험재료

고형화 재료로 시멘트는 국내에서 많이 생산되고 있고 또한 건설 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트(TYPE I, S시멘트 공업)를 사용하였고 첨가제로 사용한 비산회는 한국 비산회 시멘트공업 주식회사에서 시판하고 있는 유연탄 비산회를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 시멘트와 비산회의 화학분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 시멘트와 비산회는 103℃에서 항량이 되도록 각각 건조한 다음 데시케이터에 보관하면서 실험에 사용하였다. 시멘트 모르타르용 모래는 시판용 주문진 표준사를 역시 건조

기에서 같은 온도로 2d 건조한 후 사용하였다.

또한, 폐기물인 중금속 카드뮴슬러지는 카드뮴을 수산화물로 하여 인공적으로 만들어 실험하였다. CdCl<sub>2</sub> 1급 시약(Junsei co.)으로 농도가 10,000mg/L인 용액을 만든 후 응집교반기에서 CdCl<sub>2</sub> 용액은 6N-NaOH를 사용하여 pH를 10으로 조절하여 침전시켜 상등액을 제거하고 침전물만을 수욕상에서 건조하여 카드뮴슬러지를 제조하였다. 카드뮴슬러지를 고형화 전후의 중금속함량을 측정하기 위하여 질산분해(nitric digestion)법<sup>12)</sup>으로 전처리를 하였으며, ICP(Thermo Jarrell Ash ICAP 61E Trace Analyzer, USA)를 이용하여 분석하였다.

#### 2. 고화체 제작

비산회를 혼화재로 시멘트법에 의한 중금속 폐기물인 카드뮴슬러지의 고형화 및 용출실험 과정은 다음과 같다. 우선 시멘트에 대한 비산회의 치환 정도가 고화체의 용출에 미치는 영향을 실험하기 위하여 시멘트 : 모래 : 물의 배합비를 1 : 2.45 : 0.55로 고정시켜 모르타르를 만들고 여기에 카드뮴슬러지를 혼합하였다. 이때 사용된 모래는 시멘트 강도 시험용 표준사<sup>19)</sup>를 사용하였다. 카드뮴슬러지의 혼합비 역시 시멘트 1kg당 5.26g으로 고정하였다. 시멘트에 대한 비산회의 치환량을 0~30%로 고정시켜 고화체를 제작하였다.

카드뮴슬러지, 표준사, 비산회, 그리고 시멘트 등을 혼합한 다음 물과 시멘트의 비가 0.55가 되도록 물을 가하여 이와 같이 배합된 모르타르를 KS F 2403<sup>13)</sup>과 KS F 4004<sup>14)</sup>에 규정된 방법에 의해 고화체를 제작하였다. 이후 습윤상태를 유지하도록 하였으며 24hr 동안 경화가 되도록 한 후 탈형하여 23~25℃ 온도의 흐르는 물속에서 양생하였다. 동일시편에 대한 양생기간은 3, 7, 14 day로 각각 다르게 하였으며 양생기간별로 용출실험을 하였다.

Table 1. Chemical compositions of cement and fly ash

Sample	Chemical composition(wt. %)									Specific gravity
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	others	
Cement	63.28	24.75	5.80	2.53	2.04	1.50	-	-	0.1	3.12
Fly ash	3.22	54.80	25.30	0.24	4.29	0.50	0.68	0.79	10.18	2.15

### 3. 용출실험

용출실험은 양생기간에 따라 각각의 고화체 시편을 회수하여 파쇄한 후 입도가 0.8~5mm가 되도록 체분석을 하여 용출용 시료로 하였으며 국내 폐기물공정시험법에 규정된 용출실험법(Korean Leaching Test)<sup>15)</sup>과, EPT법(Extraction Procedure Toxicity Test Method)<sup>16)</sup>, 그리고 TCLP법(Toxicity Characteristic Leaching Procedure)<sup>17)</sup>에 따라 수행하였다. 이들 실험방법의 주된 차이점은 Table 2에 나타내었으며, 특히 용출용매, 용출시간, 용출교반속도 등에서 큰 차이점을 보이고 있다.

또한, KLT, EPT, TCLP법에 의한 각각의 용출실험방법의 차이와 결과로부터 KLT법의 문제점을 개선하기 위해 파쇄한 고화체 시료 50g씩을 염산과 아세트산으로 각각 pH를 4, 5, 6이 되도록 조정 한 증류수에 1:10(W/V)의 비율로 넣고 용출실험을 하였다. 이때 용출시간은 3, 6, 12, 18, 24hr로 달리 하였으며 교반속도 역시 50, 100, 150, 200rpm으로 달리하였다. 또한 용출과정 동안 pH의 변화를 보정하기 위해 2hr의 간격으로 pH를 조절하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 용출실험결과의 비교

Table 2. Comparison of leaching methods

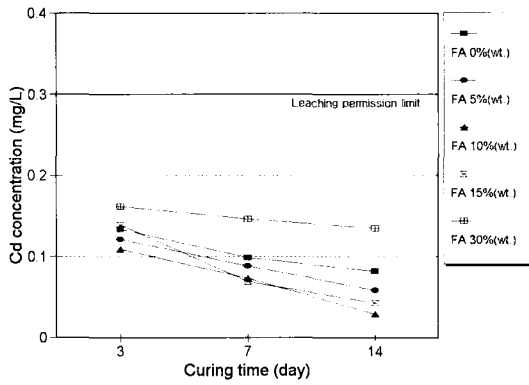
Leaching factors	Korean Method	American Methods	
	KLT	EPT	TCLP
Solid weight	50g	100g	100g
Maximum particle size	5mm	9.5mm	9.5mm
Leaching medium	HCl solution	0.5N Acetic acid solution	Acetate buffered solution
pH of leaching solution	5.8~6.3	5.0±0.2	Fluid #1:4.93±0.05 Fluid #2:2.28±0.05
Solid waste/ leaching solution ratio(kg/L)	1:10(W:V)	1:20	1:20
Leaching temperature	Room temperature	20~40℃	22±3℃
Leaching time	6 hours	24 hours	18 hours
Leaching apparatus & condition	Reciprocal shaker speed : 200rpm stroke : 4~5cm	Agitator 30±2rpm	End-over-end flashing (30±0.2rpm)

비산회를 치환제로 시멘트법에 의한 중금속슬러지의 고형화처리시 고화체의 안정성을 평가하기 위해 우선 비산회의 치환량을 0~30%로 달리하여 카드뮴 슬러지 고화체를 제작하고 각각 다른 양생일에 따라 양생시킨 후 파쇄하여 국내 용출실험방법인 KLT법과 미국의 EPT법, TCLP법에 따라 중금속에 대한 용출실험을 한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

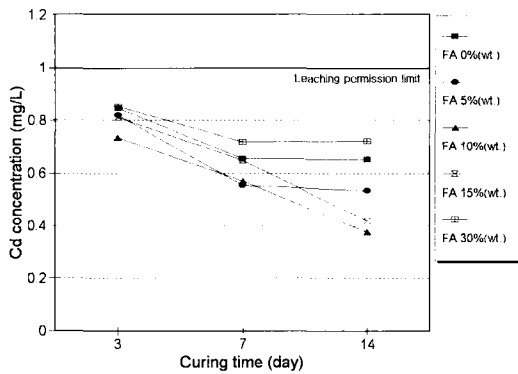
Fig.에서 보는 바와 같이 카드뮴슬러지를 함유한 고화체의 용출실험에서 용출방법에 따라 용출양이 커다란 차이를 나타내고 있으나 대체적으로 비산회 함량이 10~15%일 때 용출농도가 낮음을 알 수 있으며, 양생일이 길어짐에 따라 또한 용출농도가 낮아짐을 알 수 있다.

초기 양생에서 용출 농도가 높게 나타나는 이유는 시멘트 수화반응에 의해 발생하는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 칼슘이온과 비산회에서 용출되는 실리카와 알루미늄이 반응하여 CSH, Ca(OH)<sub>2</sub>의 핵생성을 지연시키기 때문에 고정되지 못한 카드뮴이 쉽게 용출되기 때문이며, 이 후 양생시간이 경과됨에 따라 CSH나 CAH의 생성율이 증가하고 이들 결정내에 카드뮴이 고정됨으로써 안정화되어 용출율이 낮아짐을 알 수 있다<sup>18)</sup>.

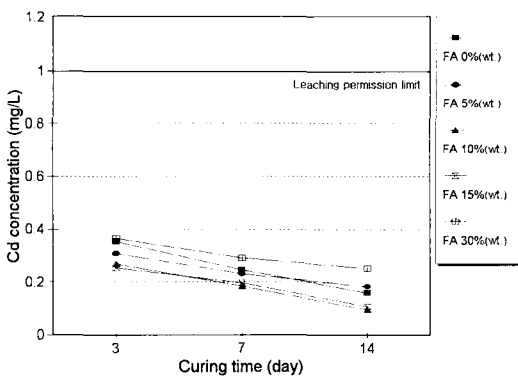
그러나 비산회 치환량이 30%일 경우에는 용출



(1)



(2)



(3)

Fig. 1 Leaching characteristics of solidified Cd-sludge depend on substituted fly ash to cement ratio ; (a) KLT, (b) EPT, (c) TCLP.

농도가 다른 고화체에 비해 높게 나타내는데 이는 상대적으로 시멘트 양이 적어  $\text{Ca(OH)}_2$ 의 생성이

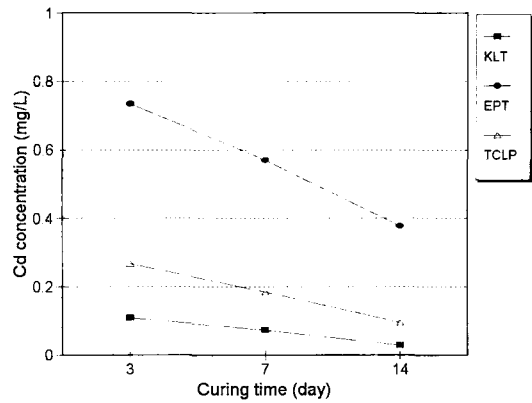


Fig. 2 Leachate concentration of solidified Cd-sludge depend on leaching methods.

적기 때문에 비산화에 다량 포함되어 있는 실리카 및 알루미늄 등이 충분히 반응하지 못한 결과로 생각된다.

한편 같은 고화체에 대해서도 용출실험방법에 따라 용출농도의 차이가 크게 나타남을 알 수 있는데 용출허용기준을 5 ppm으로 설정한 EPT와 TCLP의 경우 기준치가 같음에도 불구하고 실제 용출결과는 차이가 남으로 실험방법의 적용에 따라 고화체의 안정성 평가가 달라질 수 있다.

고화체의 용출실험방법에 따라 용출 농도 편차가 나타남으로 이러한 영향을 살펴보기 위해 비산화의 치환량을 10%로 하여 카드뮴슬러지를 고형화 시킨 고화체를 대상으로 앞에서와 같이 KLT, EPT, TCLP 방법으로 용출실험을 하였다. 그 결과는 Fig. 2와 같으며 Fig. 2에서 보는 바와 같이 용출 실험방법에 따라 용출율이 크게 차이가 남을 알 수 있으며 용출 후의 pH를 측정된 결과 카드뮴고화체의 경우 모두 KLT방법으로 용출 하였을 때 pH가 약 11~12정도인 반면, EPT법의 pH가 4.8~5.2, TCLP법에 의한 용출액의 pH가 8~9로 큰 차이를 보였다.

이러한 용출액의 pH 차이는 KLT의 경우 HCl을 사용하여 시험체의 특성에 관계없이 용출용매의 pH를 5.8~6.3으로 조정하여 용출시키고 있으며, EPT법은 용출실험 과정 중 주기적으로 pH를 보정함으로써 용출용매의 pH가 약산성 상태를 유지하게 된다. 따라서 고화체로부터의 용출율도 타 방법에 비해 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한,

TCLP법의 경우 시험체의 특성을 고려하여 용출시 pH의 급격한 변화를 방지하기 위해 아세트산 완충 용액을 사용하고 또한 시험체로 인하여 생성되는 초기 pH에 따라 용출용매의 pH를 다르게 선택하여 적용하므로 KLT법에 비하여 낮은 pH를 나타내고 있다. 특히 고화체는 시멘트 고화재의 특성상 알칼리성을 띠므로 용출용매의 pH 조절이 용출농도에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

용출액의 중금속 농도는 카드뮴고화체의 양생기간이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며 각각의 용출허용 농도 이하로 안정함을 알 수 있고, KLT, TCLP, EPT 방법순으로 용출농도가 커짐을 알 수 있다.

고화체의 용출실험 방법에 따른 고화체의 부식 정도를 조사하기 위하여 주사전자 현미경(SEM : Scanning Electron Microscope, S-2500C, HITACHI)으로 용출실험 전후의 고화체 표면을 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

이때 SEM 관찰 시편은 비산회 치환량을 10%로 하여 카드뮴슬러지를 각각 고형화하고 14일 동안 양생시킨 고화체로 하였으며, 용출실험 전과 3가지 용출실험법에 의해 용출한 후의 시편 표면을 관찰하였다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 용출후의 시편 표면들은 용출전의 시편 표면에 비하여 모두 정도의 차이는 있으나 부식이 일어났음을 확인할 수 있고 특히 용출율이 높았던 EPT법으로 용출시

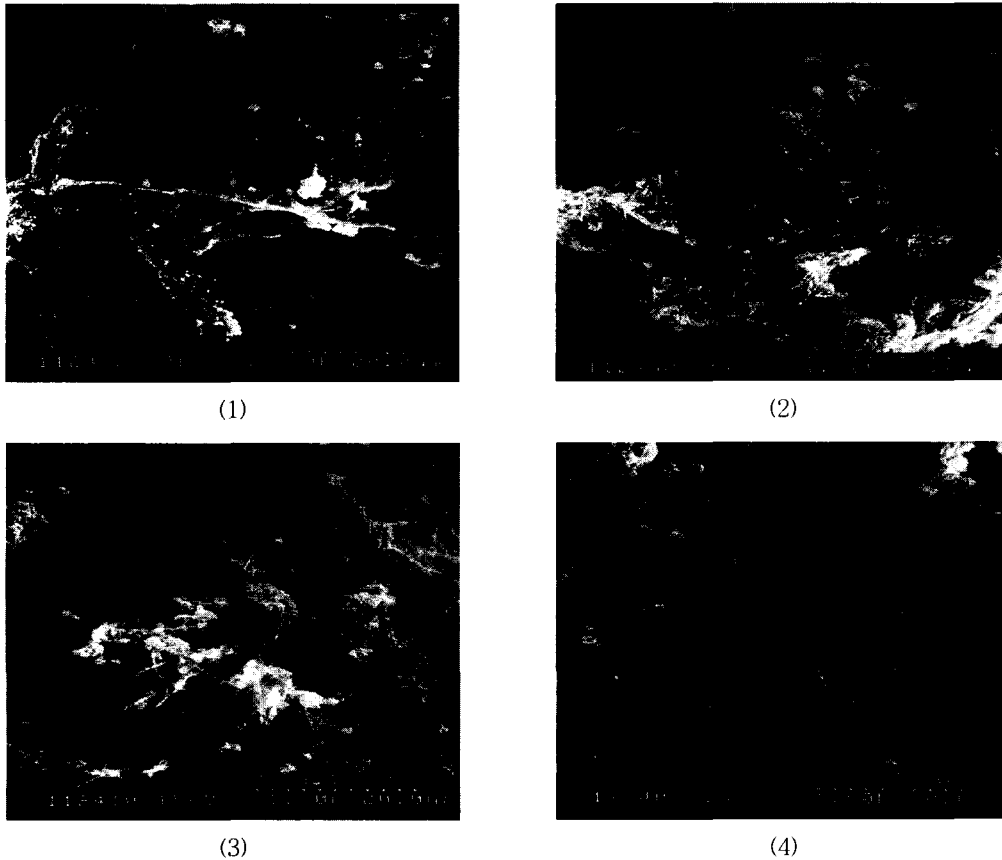


Fig. 3 SEM photographs of solidified Cd-sludge.  
 (1) before leaching,  
 (2) after leaching by KLT method,  
 (3) after leaching by EPT method,  
 (4) after leaching by TCLP method.

킨 후의 고화체가 가장 부식이 크게 일어났음을 알 수 있다.

### 2. KLT법의 개선안

현행 우리나라 용출실험방법(KLT)이 외국의 다른 실험방법에 비하여 중성에 가까운 pH 5.8~6.3의 용출용매로 고화체의 안정도 평가를 위해 용출실험을 하도록 규정되어 있어 빈번히 내리는 산성비가 pH 4~5범위인 점과 실제 매립지에서 산생성기(acid phase)의 pH가 5정도임을 고려할 경우 용출실험방법의 개선이 시급하다고 할 수 있다. 따라서 용출실험방법을 개선하기 위한 여러 가지 변수들 중에서 용출농도에 가장 영향을 미치는 pH와 용출시간, 용출교반속도, 용출용매를 변화시키며 실험한 결과는 다음과 같다.

시멘트에 대한 비산회의 치환량을 각각 10, 15%(무게비)로 하여 카드뮴슬러지를 각각 고형화하고 7일 동안 양생시킨 후 파쇄하고, 용출용매로는 증류수를 염산으로 pH가 각각 4, 5, 6이 되도록 하여 용출실험을 하였으며, 이때 용출교반속도는 150rpm으로 하였다. 용출시간을 6hr로 하고 매 2hr마다 용출에 따른 pH 변화를 보정하기 위해 pH를 조절하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 pH 4인 경우에 0.5ppm의 용출농도를 나타내고 있으며, pH가 높아질수록 용출농도가 감소함을 알 수 있다. 비산회의

치환량에 따라서 용출농도는 큰 차이가 나지 않았지만 비산회 치환량이 15%일 때 용출농도가 낮게 나타남을 알 수 있다.

위의 실험결과를 통해 용출용매의 pH는 낮은 산성비의 pH와 실제 매립지에 매립되었을 때의 산생성기에서의 pH를 감안한다면 pH는 4~5정도가 적합할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 같은 고화체에 대하여 pH 5로 조절한 용출용매인 HCl로 용출시간을 3, 6, 12, 18, 24hr으로 조절하고 용출교반속도를 150rpm으로 고정시켜 실험한 결과이다.

용출시간 6hr까지는 EPT법에서 초기에 pH를 계속 보정하는 것과 같이 pH를 2hr 간격으로 조절하였으며 이후 6hr마다 조절하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 비산회의 치환량과 용출량은 무관하며 용출시간 6hr 이후로는 용출농도의 변화가 없어 용출실험 시간은 6hr가 적절한 것으로 평가된다.

용출결과에 영향을 미치는 인자중에 용출 교반속도의 영향을 알아보려고 용출용매의 pH를 5로 조절하여 2hr마다 pH를 조절하면서 교반속도를 50, 100, 150, 200 rpm으로 하여 6hr 동안 용출실험을 한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

이 결과에 의하면 용출농도가 100rpm에서 150rpm사이에서 급격한 증가를 보이고 있으나 그 이후에는 완만한 증가를 나타내었다. 따라서 현행 공정시험법상에 명시되어 있는 200rpm에서의 농도

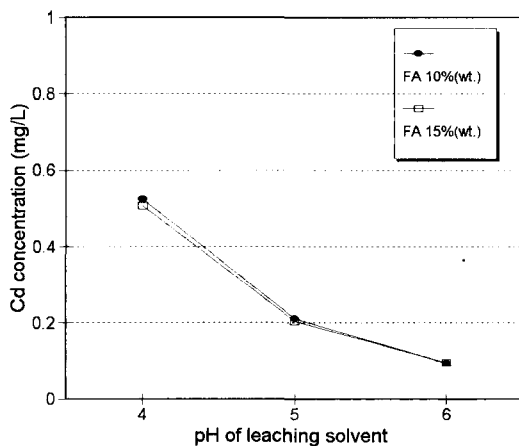


Fig. 4 Heavy metal concentration of leachate for different pH in leaching solvent.

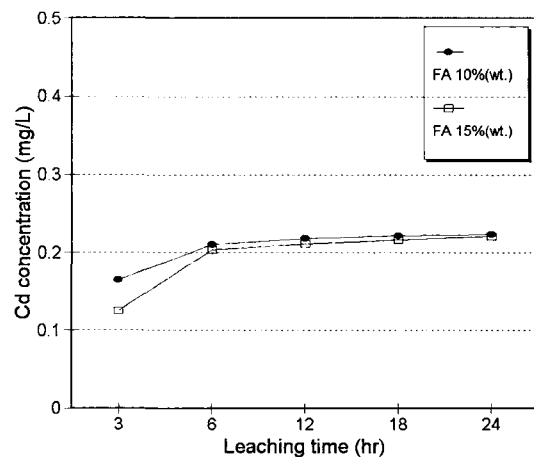


Fig. 5 Heavy metal concentration of leachate according to leaching time.

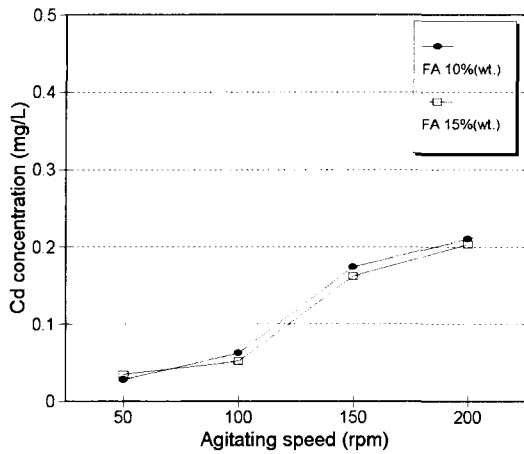


Fig. 6 The effect of agitation speed on heavy metal concentration in leachate.

와 비교를 하면 비산회 치환량이 10, 15%일 때 경우 150rpm과의 용출농도의 차이가 각각 0.036, 0.041 ppm으로 근소한 차가 남을 알 수 있다.

용출 교반속도가 증가함에 따라 앞의 Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이 짧은 시간 내에서는 용출 시료와 접촉하는 용매로 이동하는 중금속의 양이 평형에 이르기까지는 급격히 증가하나 그 이후에는 큰 차이를 보이지 않게 되므로 용출시간이 6hr 정도임을 감안한다면 용출 교반속도 150rpm 정도이면 충분할 것으로 생각된다.

Fig. 7은 용출용매에 따른 용출농도를 비교하기 위하여 국내 폐기물공정시험법상의 용출용매인 염산으로 pH를 5.8~6.2로 조절한 증류수, 아세트산으로 pH를 5가 되도록 만든 증류수, 그리고 염산으로 pH 5가 되도록 조절한 증류수 등으로 각각 용출실험한 결과이다. 용출과정동안 우리나라 시험법상의 경우를 제외한 나머지 용출용매는 2hr 간격으로 pH를 동일 산으로 조절하였으며 용출시간은 6hr로 조절하였으며 용출교반속도는 150 rpm으로 고정하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 염산과 아세트산으로 pH를 조절하며 용출실험한 경우 유사한 용출농도를 나타내고 있으나 pH의 조절이 없었던 KLT법의 경우 용출농도가 약 1/2 정도 이상 적음을 알 수 있다.

공정시험법에 용출 용매는 염산을 사용하게 되

어 있으나 앞선 TCLP법과 EPT법을 비롯하여 대부분이 아세트산을 용출용매로 사용하고 있으며 실제로 매립지내에서 매립초기에 생성되는 유기산을 고려한다면 매립지 침출수의 평가 등을 위해 염산보다는 아세트산을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

## V. 결론

비산회를 시멘트 혼화제로 사용하여 시멘트법으로 중금속인 카드뮴슬러지를 고형화하고, 고화체의 안정성을 평가하기 위하여 용출실험을 하였다. 그 결과 비산회의 적정 대체량과 고화체의 안정화에 미치는 영향 등을 규명하였으며 용출실험방법의 비교를 통한 개선점 등을 제시하고자 하였다.

1. KLT법, TCLP법 그리고 EPT법의 용출 특성을 비교한 결과 용매, 교반속도, pH, 용출시간 등의 차이에 의해 KLT법의 용출 농도가 다른 두 시험법에 비해 수배~수십배의 차이를 보이므로 공정시험법의 개선이 필요한 것으로 사료되었다.
2. 비산회의 첨가비율에 따른 용출 실험 결과 카드뮴슬러지의 고형화는 비산회의 치환량이 무게비로 10~15%일 때 가장 안정적이었으며 고화체

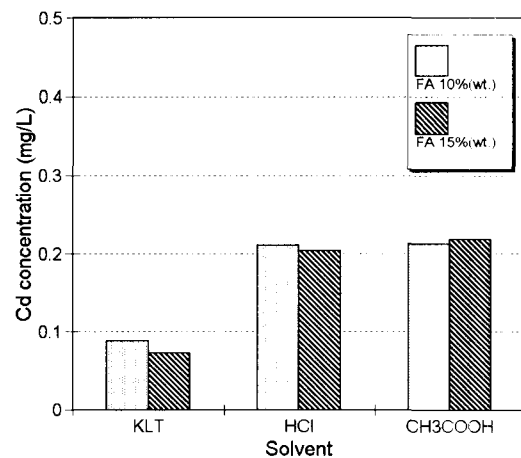


Fig. 7 Leached concentration for solidified heavy metal contained sludge depend on three different leaching solutions.



는 양생일이 길수록 CSH나 CAH가 생성되어 용출량이 낮아짐을 알 수 있었고, 고화체에 대한 SEM 관찰 결과 용출율이 높을수록 표면부식이 큰 것으로 확인되었다.

3. KLT, TCLP, EPT법의 실험과정을 통해 얻어진 결과와 국내 용출실험방법을 개선하기 위하여 pH, 교반속도, 용출시간, 용출액의 변화를 주어 실험한 결과 매립지 및 고화체의 용출 특성과 용출에 의한 영향평가 및 예측을 위해 용출용매의 pH는 5, 교반속도는 150 rpm, 용출시간은 6 hr로 하는 것이 바람직하며 용출용매의 pH 보정은 염산보다 아세트산을 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.
4. 시멘트법에 의한 고화체의 용출실험 과정에서 시멘트로부터 알칼리가 함께 용출되어 용출용액의 pH를 변화시키므로 고화체의 종류에 따른 용출용매의 급격한 pH 변화를 방지하고 용출특성을 정확히 평가하기 위해서는 2hr 정도의 주기로 pH의 보정이 필요하다.

### References

1. 정재춘 외 9인 : 폐기물처리, 동화기술, pp. 583-591, 1998.
2. 환경관리공단 : 유해폐기물처리기술, 환경관리공단 자료집 9, pp. 344-377, 1995.
3. Soon-Haing Cho et. al : 'Comparison of Waste Leaching Methods', J of KSEE, 17, 10, pp. 983-992, 1995.
4. Young-Soo Choi : 'Suggestion on the Modification of Korean Leaching Procedure for Determining Special Waste', J of KSEE, 18, 2, pp. 211-221, 1996.
5. C.H. Weng, C.P. Huang : 'Treatment of Metal Industrial Wastewater by Fly Ash and Cement Fixation', J. of Envir. Eng., 120, 6, 1994.
6. C. Tashiro, H. Ztakahashi, N. Kanaya : 'Hardening Property of Cement Mortar adding Heavy Metal Compounds and Solubility of Heavy Metal from Hardened Mortar', Cem & Concr. Res., 7, pp. 283-290, 1977.
7. K.C. Frank, G.B. Lesile, C. Devi etc. : 'Immobilization Mechanisms in Solidification/Stabilization of Cd and Pb Salts Using Portland Cement Fixing Agents', Environ. Sci. Technol., 24, pp. 867-873, 1990.
8. P.L. Bishop., S.B. Ransom, D.L. Gress. : 'Fixation Mechanisms in Solidification /Stabilization of Inorganic Hazardous Waste', Purdue Ind. Waste Conf. Proc., 221, pp. 395-401, 1983.
9. Jung-Kwon Kim, et. al : 'A Study on the Comparison of EP(EPA), Availability and KOEP Method', J of KSEE, 19, 7, pp. 855-862, 1997.
10. Dong-Jun Jeong, et. al : 'Leaching Characteristics of Heavy Metals by Landfill of Solidified Sludge', J of Korea Solid Wastes Engineering Society, 15, 1, pp. 32-39, 1998.
11. Jun-Oh Jung, et. al : 'The Comparative Evaluation of Korean Leaching Test with TCLP', J. of Korean Solid Wastes Engineering Society, 15, 7, pp. 721-728, 1998.
12. P.L. Cote, D. Lsabel : 'Application of a Dynamic Leaching Test to Solidified Hazardous Wastes', Hazardous and Industrial Waste Management and Testing, 3rd sym., ASTM, pp. 48-60, 1984.
13. KS F 2403, 콘크리트의 강도시험용 공시체를 제작 방법, 1990.
14. KS F 4004, 콘크리트벽돌, 1997.
15. 환경부고시 2000-4호, 폐기물공정시험법, 2000.
16. EPA : 'Regulations for Identifying Hazardous Waste, Par 261 - Identification and Listing for Hazardous Waste', 1983
17. Standard Method for the Examination fo Water and Wastewater, 18th Edition,

- American Public Health Association, Washington, D.C., 1992.
18. So-Young Ju, et. al : 'The Characteristics of Compressive Strength and Leachability on Solidification of Chromium Tannery Sludge adding to Coal Fly Ash', The Korean Journal of Sanitation, 16, 1, pp. 53-60, 2001.