

비산회를 첨가한 피혁공장 크롬 슬러지의 고화시 압축강도 및 용출 특성

주소영 · 연익준 · 신필식* · 전병진* · 김광렬**

충북대학교 건설기술연구소, *충북보건환경연구원, **충북대학교 환경공학과

The Characteristics of Compressive Strength and Leachability on Solidification of Chromium Tannery Sludge adding to Coal Fly Ash

So Young Ju · Ik Jun Yeon · Pil Sik Shin* · Byoung Jin Jeon* · Kwang Yul Kim**

The Institute of Construction Technology, Chungbuk Nat'l Univ., Cheongju, Korea

**Chungbuk Institute of Health & Environment Research, Cheongju, Korea*

***Dept. of Environmental Eng., Chungbuk Nat'l Univ., Cheongju, Korea*

Abstract

In this study, the heavy metals in tannery sludge were solidified by using cement and power plant fly ash. Solidification characteristics were discussed with the compressive strength and chromium leaching characteristics of solids.

The compressive strength of cement mortar was increased by the amount of fly ash up to 24.3~33.8%, which was considered the results of pozzolanic reaction. When the content of fly ash was 20%, cement mortar showed the highest value $295\text{kg}/\text{cm}^2$ for 28 days curing.

At early curing days, solidified chromium tannery sludge solids were showed lower compressive strength because of the retard on the hydration of cement, but the compressive strength was recovered to be more than $140\text{kg}/\text{cm}^2$ for 28 days curing regardless with the amounts of fly ash.

Also, the results of leaching tests by KSM and TCLP method were showed that the solidified chromium sludge have leached out 0.3~2.2% and 11~17%, respectively.

I. 서 론

산업화에 따라 필연적으로 발생하는 다양한 유해폐기물은 부식성, 반응성, 인화성, 독성물질 등을 함유하고 있으며 생물학적으로 분해가능한 유기화합물질은 자연상태에서 대부분이 독성이 덜한 형

태로 분해되어 안정화될 수 있지만, 생물학적으로 분해 불가능한 중금속 등 무기원소들은 자연 환경에 지속적으로 존속할 것이다. 또한 장래에 이러한 원소들이 자연계에 노출될 때, 과잉량이 존재하면 생명체에 직접적이고 치명적인 영향을 줄 수도 있다. 그러므로 이러한 오염물질이 처분되기 전에 적

절한 처리를 통해서 자연계로의 유출 가능성을 최소화시킨 후 유해폐기물 매립지에 안전하게 처분되어야 할 필요성이 있다¹⁾.

유해폐기물을 처리하는 방법에는 소각, 산화 매립, 고형화/안정화하는 방법 등이 있으며 그 중에서 유해폐기물의 고형화 방법에는 시멘트법, 석회법, 열가소성 플라스틱법, 유기중합체법, 피막형성법, 자가시멘트화법, 유리화법 등이 있으며 그 중에서 시멘트법이 경제성 및 처리의 용이성 등으로 가장 널리 이용되고 있다²⁾.

이 중에서 시멘트법이 경제성 및 처리의 용이성 등으로 인하여 가장 널리 이용되고 있다. 그러나, 시멘트법은 고형화 과정에서 매립할 폐기물의 양이 최고 두배 이상까지 증가하기 때문에 우리나라와 같이 국토가 협소한 실정에서는 고형화 과정에서 발생하는 부피의 증가를 최소화할 수 있는 고형화방법의 개발이 시급하다고 하겠다. 고화체의 부피를 최소화하여 중금속 폐기물을 고형화하기 위해서는 적은 양의 고화체로 많은 양의 중금속 폐기물을 고정시킬 수 있어야 하며 또한 고형화시킨 폐기물 고화체의 용출특성이나 기계적 강도 등이 기존의 고형화 방법에 의해 생성된 폐기물 고화체와 같거나 향상되어야 한다. 따라서 기존의 고화체에 비하여 높은 기계적 강도와 적은 용출특성을 갖고 또한 화학적으로 보다 안정한 고화체의 개발이 요구된다^{2,3)}.

시멘트 고화법에 대한 개선방법으로 앞에서 언급한 고화체의 특성을 개선하기 위하여 시멘트에 석탄회나 제철슬래그 등을 일정비율만큼 첨가하는 방법들이 연구되어 왔는데 그 예로 1932년에 미국에서 여러 전력회사들이 석탄회의 처리와 재활용에 대한 광범위한 연구개발을 바탕으로 콘크리트용 혼화재료로서 석탄회를 활용하기 시작하였으며, 석탄회중 특히 비산회에 대한 연구가 1937년 Davis 등에 의해 발표된 바 있다⁴⁾.

국내에서 발생하는 비산회는 1998년도에 366만 톤이었으며 동력자원부의 장기전력수급계획에 의하면 2000년 이후 500만톤 이상이 발생할 것으로 예상되고 있으며, 이중 주로 전기집진기에서 포집되는 비산회는 시멘트의 품질개선과 시멘트 대체 재료로서 경제적 시공 및 산업폐기물의 재활용이

라는 관점에서 일부 레미콘 회사를 중심으로 이용되고 있으나 그 이용률은 약 10% 정도에 불과하다. 따라서, 나머지는 아직도 전량 매립되고 있으며 그에 따른 분진발생, 매립장 확보, 매립후의 관리문제 등으로 인하여 여러가지 환경문제를 유발하고 있어 보다 비산회의 재활용율을 높일 수 있는 기술개발과 방법의 개선이 시급한 문제이다⁵⁻⁷⁾.

비산회의 효율적인 재활용 방법으로 비산회를 혼합한 시멘트를 이용하여 중금속의 고형화 및 용출 특성, 비산회의 포졸란 반응과 수화반응, 비산회를 콘크리트 혼화제로 사용하여 건축자재로의 활용방안, 비산회를 직접 도로포장재로도 이용가능성에 대한 연구가 발표되고 있다⁸⁻¹¹⁾. 이상과 같이 고형화 처리시 다양한 종류의 중금속과 같은 무기이온과 유기이온, 또는 비산회의 첨가가 고화체의 물성에 미치는 영향이나 용출특성에 대한 규명은 어느정도 활발히 진행되고 있으나, 시멘트나 비산회와 같은 고형화재료를 이용하여 고농도의 중금속을 함유하고 있는 산업폐기물을 직접 처리할 수 있는 실용화에 대한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 비산회를 시멘트에 첨가할 경우 포졸란 반응에 의해 시멘트의 기계적 강도를 증진시키고 수화특성을 개선시키는 성질을 활용하여 중금속 폐기물을 고형화하기 위한 고화체로 사용할 경우 중금속의 안정화를 기대할 수 있을 것으로 생각되어 피혁공장에서 폐기물로 발생하는 크롬슬러지를 대상으로 고형화 특성을 규명하고자 하였다. 즉, 비산회를 혼화제로 시멘트법에 의해 피혁공장 크롬 슬러지를 고형화하기 위한 반응조건들을 검토하였으며 또한 크롬 슬러지 고화체에 대한 안정성을 시험하기 위하여 압축강도와 용출특성과 고화체의 물리적 특성 등에 대하여도 검토하였다.

II. 실험

1. 실험재료

(1) 고형화 재료

고농도의 크롬을 함유한 피혁공장에서 발생하는

Table 1. Chemical compositions of cement and fly ash.

(Unit : wt %)

| Sample | Chemical Compositions | | | | | | | | Specific Gravity |
|---------|-----------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|------------------|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | |
| Cement | 63.02 | 25.07 | 5.94 | 2.45 | 2.01 | 1.49 | | | 3.12 |
| Fly Ash | 3.22 | 52.00 | 23.81 | 0.16 | 4.29 | 0.90 | 0.70 | 0.88 | 2.15 |

슬러지를 고형화하기 위한 고형화재료로서 시멘트와 비산회, 모래를 사용하였다.

시멘트는 국내에서 시판되고 있는 포틀랜드 시멘트(Type I, H시멘트사)를 사용하였으며, 103℃에서 항량이 되도록 건조한 다음 데시케이터에 넣어 보관하면서 사용하였다.

또한 비산회는 충남 보령화력발전소에서 호주산 유연탄의 연소시 전기집진기로 포집하여 이를 한국 플라이애쉬 공업주식회사에서 입도와 미연탄소분을 일정하게 유지시킨 시판용을 사용하였다.

시멘트와 비산회에 대한 성분분석 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 시멘트는 전형적인 type I의 성분조성을 나타내고 있으며, 비산회의 경우에는 포졸란 반응을 일으키는 SiO₂가 52.0%, Al₂O₃가 23.8%를 나타내고 있어 시멘트와 혼합하여 사용할 경우 강도 및 작업성 증진에 크게 기여할 것으로 기대되었다.

시멘트 몰탈용 모래는 KS L 5100¹²⁾ 규격에 명시된 압축강도 시험용인 시판용 주문진 표준사를 건조기에서 103℃로 항량이 되도록 건조한 후 사용하였다.

(2) 슬러지

슬러지는 (주)J피혁 폐수처리장에서 발생하는 크롬 함유 피혁 슬러지로서 1차 탈수처리한 것을 별도의 전처리 없이 직접 사용하였다. 이 슬러지는 함유율이 21.9%이며, 26,500ppm의 크롬을 함유하고 있고, 그외에 일부 중금속이 미량 함유되어 있었다.

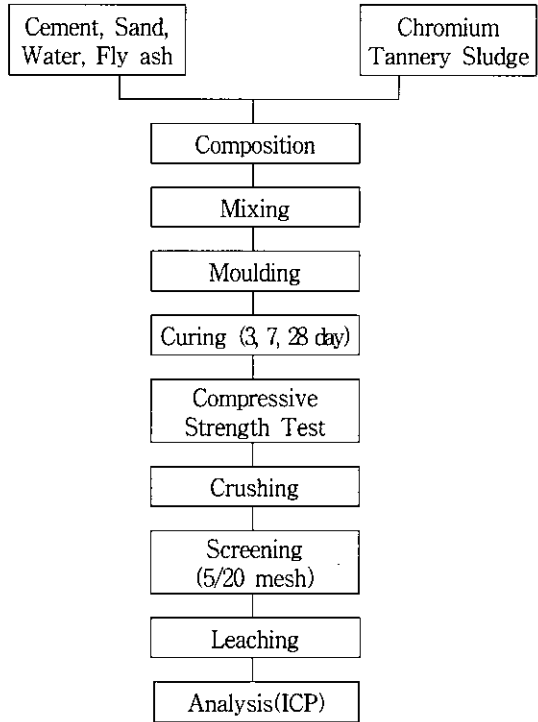


Fig. 1. Flowchart of experimental procedure.

2. 실험방법

비산회를 혼화재로 시멘트에 의한 크롬 함유 피혁 슬러지의 고형화처리 실험에 대한 전과정은 Fig. 1과 같다.

(1) 배합설계

일반적으로 시멘트 몰탈의 공시체를 제작할 때 물의 양은 슬럼프(12±1cm)를 고정시키는 경우와 배합수량을 고정시키는 경우로 나눌 수 있는데다^{13,14)}, 배합수량을 고정시키는 방법으로 비산회의 첨가량에 따른 강도 변화를 알아보고자 Table 2와 같이 시멘트, 비산회, 표준사, 슬러지 등의 무게비를 변화시켜 각각의 경우에 대하여 실험하였다.

먼저 KS L 5100¹²⁾에 준하여 시멘트 : 모래 : 물의 배합비를 1 : 2.45 : 0.49로 하여 몰탈을 만든 후 슬러지를 혼합하여 예비실험을 한 결과, 작업성이 현격히 저하되어 시멘트와 모래, 물의 배합비를 1 : 2.45 : 0.60으로 고정하여 실험하였다. 이 때 시멘트 대체재로서 비산회의 치환량은 5~30%로 하였으며, 슬러지의 첨가량은 시멘트 또는 시멘트와

Table 2. Composition of matrix.

| Sample | unit : weight (g) | | | | |
|----------|-------------------|---------|--------|--------|----------------------|
| | Cement | Fly Ash | Sand | Sludge | Water [w/c ratio] |
| Blank | 225.00 | 0.00 | 551.25 | - | 135.00(0.6) |
| | 202.50 | 22.50 | 551.25 | - | 135.00(0.6) |
| | 180.00 | 44.50 | 551.25 | - | 135.00(0.6) |
| | 157.50 | 67.50 | 551.25 | - | 135.00(0.6) |
| Specimen | 202.50 | 22.50 | 551.25 | 11.25 | 135.00(0.6) |
| | 180.00 | 44.50 | 551.25 | 22.50 | 135.00(0.6) |
| | 157.50 | 67.50 | 551.25 | 33.75 | 135.00(0.6) |

w : water, c : cement(Fly ash + cement)

비산회의 혼합량에 대하여 5~20%로 하여 실험을 수행하였다.

(2) 시편제작과 압축강도의 측정

고형화 실험에 사용된 시편제작을 위하여 50×50×50mm 크기의 주철제로 된 몰드를 사용하였다. 먼저 Table 2의 배합비에 따라 잘 혼합한 시료들을 시멘트와 물의 비, 또는 시멘트에 비산회를 첨가한 혼합물과 물의 비가 0.60이 되도록 증류수를 가하여 몰타르를 만들었다. 이와 같이 배합된 몰타르를 KS F 2403¹³⁾과 KS F 4004¹⁴⁾에 따라 몰드의 1/3이 되게 채

운 후 다짐막대로 30회 다지고 다시 1/3을 넣고 다진 다음 나머지를 채우고 나서 30회씩 다졌다. 다짐이 끝난 몰타르는 젖은 천으로 덮고 천이 마르지 않도록 수시로 물을 분무하여 습윤상태를 유지함으로써 시편표면의 수분증발을 막았다. 이와 같은 상태로 24hr 동안 방치한 후 탈형하여 20℃의 흐르는 물속에서 양생하였다. 이 때 양생시간은 3, 7, 28일로 하였으며, 매 실험마다 3개씩의 시편을 제작하여 압축강도 및 용출실험을 하였다.

몰속에서 양생이 끝난 시편의 압축강도는 유압식 압축강도 시험기(Universal Testing Machine, Instron Model 8500, INSTRON)를 사용하여 KS F 2405¹⁵⁾ 및 KS F 2314¹⁶⁾에 따라 시험하였다.

(3) 용출실험

비산회를 첨가한 시멘트 고화체에 고정된 크롬 슬러지중의 크롬 이온의 안정도를 시험하기 위하여 고화체 시편을 파쇄한 후 체분석을 통하여 0.84~4mm (5/20 mesh)로 입자 크기를 일정하게 한 후 용출실험을 하였다.

중금속의 용출실험은 현재 실행중인 우리나라 폐기물 공정시험법의 용출능에 문제점이 제기되고 있는 바^{17,18)}, 우리나라 용출시험방법(KSM: Korean

Table 3. Comparison of Waste Leaching Factors

| | Korean Method | TCLP | EPT |
|---------------------------------|---|--|-------------------|
| Max. Particle Size(mm) | 5.0 | 9.5 | 9.5 |
| Agitation Apparatus | reciprocal shaking (stroke : 4-5cm, speed : 200rpm) | end-over-end fashion (30±2 rpm) | |
| Leaching Time | 6 hr | 18 hr | 24 hr |
| Leaching Medium | HCl | acetate buffered solution | 0.04M acetic acid |
| pH of Leaching Solution | 5.8~6.3 | Fluid #1 : 4.93±0.05 Fluid #2 : 2.88±0.05 | 5.0±0.05 |
| Liquid : Solid | 10:1 | 20:1 | 16:1 |
| Temperature | room temperature | 22±3℃ | 20~40℃ |
| Filter Size | 1 μm | 0.6~0.8 μm | 0.45 μm |
| Leaching Vessel | 2L, erlenmeyer flask | 2L, Teflon or PE (zero headspace) | |
| Calibration by Moisture Content | Yes | No | No |

Standard Method)과 미국 TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)법에 의하여 실험하였으며, 이에 대한 결과를 비교하였다.

TCLP법에 따라 파쇄한 시편을 5g씩 취하여 아세트산으로 pH를 2.28로 조절한 용출액 100mL에 넣고 22°C로 고정된 항온진탕기에서 30rpm으로 18hr 동안 진탕시켜 중금속에 대한 실험을 하였다. 또한, 우리나라 공정시험법에 따라 HCl을 사용하여 pH를 6.0으로 조절한 증류수 100mL속에 파쇄한 시편 10g을 취하여 넣고 역시 22°C로 고정된 항온진탕기에서 200rpm으로 6hr 동안 진탕시켜 중금속을 용출실험을 하였다.

용출이 끝난 용액은 GF/C(Whatman, 1822 047) 필터로 여과하여 여액중 10mL를 취한 후 질산분해 방법으로 전처리 하여 ICP (Thermo Jarrell Ash ICAP 61E Trace Analyzer, USA)를 이용하여 분석하였으며 바탕실험을 통하여 보정하였다. 또한 이들 폐기물의 용출시험방법과 미국 EPA에서 유해폐기물을 판정하기 위해 1980년대 중반까지 주로 사용되었던 EPT(Extraction Procedure Toxicity Test)방법의 주된 차이점을 Table 3에 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

1. 압축강도

화력발전소 비산회를 혼화제로 사용하여 피혁공장에서 폐기물로 발생되는 크롬 함유 슬러지의 시멘트 고형화시 비산회의 시멘트 대체량과 슬러지, 그리고 양생일에 따른 고형체의 압축강도를 실험한 결과는 다음과 같다.

시멘트 고형체에 비산회를 첨가하여 양생일과 비산회량에 따른 압축강도의 변화를 조사한 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 일반적으로 시멘트 몰탈의 특성인 양생일의 증가에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 비산회를 첨가함에 따라 압축강도가 비산회의 양이 20%가 될 때까지는 현저하게 증가함을 알 수 있고, 이후 강도가 감소하나 시멘트의 강도에 비해서는 역시 강도가 증가됨을 알 수 있다.

양생일 3일의 경우에 비산회를 첨가함에 따라

14.8~28.1% 정도 압축강도가 더 높게 나타나는 것으로 보아 이때에도 포졸란 반응이 어느정도 진행되었음을 알 수 있었다. 특히 비산회의 첨가량이 10~20% 정도일 때 양생일이 경과함에 따라서 약 24.3~33.8%의 높은 압축강도 증진효과를 볼 수 있었으며, 따라서 비산회를 효과적인 강도증진제로 이용할 수 있을 것으로 생각되며, 압축강도로 볼 때 비산회의 첨가량은 10~20% 정도가 가장 적당할 것으로 판단되었다. 또한 전체 시멘트의 양의 30%를 비산회로 대체하였을 경우에는 10~20%를 대체하였을 경우보다 압축강도가 다시 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 상대적으로 시멘트의 양이 적어 생성되는 Ca(OH)₂가 적기 때문에 비산회에 다량 포함되어 있는 SiO₂ 및 Al₂O₃ 등이 충분히 반응하지 못한 결과로 사료된다.

Fig. 3~5에는 고농도의 크롬을 함유한 피혁공장 슬러지를 5, 10, 15% 첨가하여 고형화한 경우 슬러지의 함량 및 비산회의 첨가량과 양생일에 따른 압축강도의 변화에 대한 결과를 나타내었다. Fig. 3에서 크롬 슬러지를 5% 첨가하였을 때에도 양생일이 경과함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 보였으며, 비산회의 첨가량이 10~20%일 경우 가장 높은 압축강도를 나타내었다. 슬러지의 첨가량이 10%인 경우의 Fig. 4과 15%인 Fig. 5의 경우에도 비슷한 경향을 보이고 있으며, 슬러지의 첨가량이 15%일 때에도 28일 양생후에는 기준강도치인 140kg/cm²보다 높은 압축강도를 나타내어 압축강도면에서 볼 때 슬러지의 고형화가 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있었다.

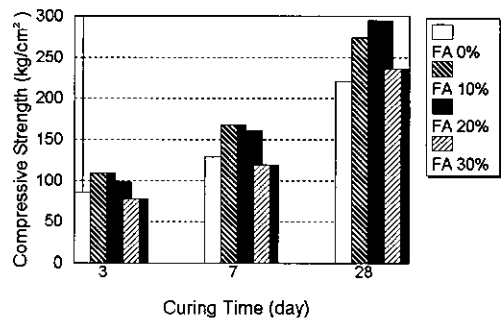


Fig. 2. Compressive strength of cement mortar according to the curing time and fly ash content.

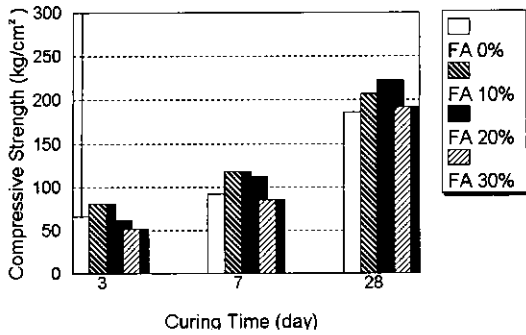


Fig. 3. Compressive strength of cement mortar according to the curing time and fly ash content in case of 5% of sludge contained.

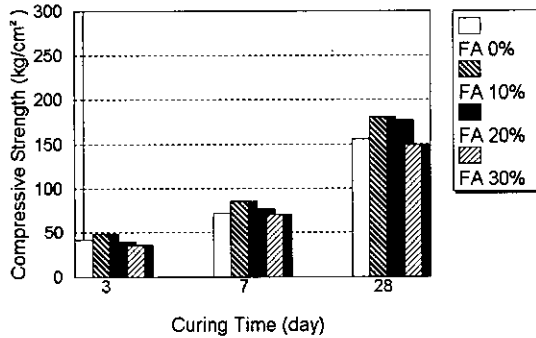


Fig. 4. Compressive strength of cement mortar according to the curing time and fly ash content in case of 10% of sludge contained.

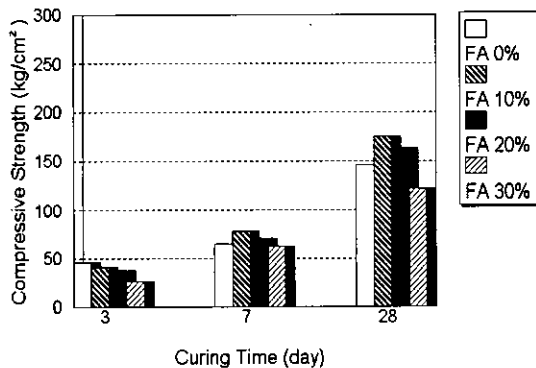


Fig. 5. Compressive strength of cement mortar according to the curing time and fly ash content in case of 15% of sludge contained.

2. 중금속의 용출특성

비산회와 시멘트 고화체에 고농도의 크롬을 함유한 슬러지를 고정화 하였을 때 크롬의 안정성을 평가하기 위하여, 우리나라의 폐기물 공정시험법 (KSM)과 미국의 TCLP방법을 사용하여 중금속 용출실험을 한 결과를 Fig. 6~8에 나타내었다.

Fig. 6~8에서 피혁공장 슬러지를 고형화한 경우 슬러지의 함량과 비산회의 첨가량 및 양생일에 따른 고화체의 중금속 용출특성을 나타내었으며, TCLP 시험방법에 의해 용출실험을 한 결과 대체적으로 양생일이 28일로 경과함에 따라 크롬의 용출율도 적어지고 있어 고농도의 크롬 슬러지가 효과적으로 안정화 되었음을 알 수 있었으며, 앞의 압축강도 시험에서 압축강도의 증가가 크게 나타났던 비산회의 첨가량 10~20%이었을 때 용출율도 적게 나타나는 경향을 보임으로써 압축강도와 용출특성간에 상관성이 있음을 알 수 있었다.

또한 용출시험방법에 따라 용출율이 매우 큰 차이를 나타내고 있음을 볼 수 있었다. 우리나라 폐기물 공정시험법의 용출시험방법에 따른 결과가 미국의 TCLP실험 결과보다 훨씬 적게 나타났는데, 이것은 폐기물공정시험법의 경우 용출액으로 HCl을 사용하며, 시험체의 특성에 관계없이 용출액의 pH를 5.8~6.3으로 규정하고 있는데 반해, TCLP법에서는 acetate 완충용액을 사용하고 시험체의 특성을 고려하여 용출시 시험체로 인하여 생성되는 초기 pH에 따라 두가지의 pH중에서 한가지를 선택적으로 적용하도록 규정되어 있어, 본 실험에서는 시료 자체의 pH가 10.0 이상을 나타내므로 TCLP 시험절차에 따라 아세트산을 희석하여 pH를 2.88 ± 0.05 로 조절한 용매를 사용하였기 때문인 것으로 생각되었다. 그밖에 용출시간과 용출용액의 농도, 교반속도등의 차이도 시험 결과에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 실제로 실험중에 용출액의 pH를 측정해 본 결과 용출시험이 끝난 용출액의 pH가 TCLP법의 경우에는 3.5~3.9범위를 나타내었으나 우리나라 시험법의 경우에는 용출액 자체의 완충능이 적기 때문에 pH가 12이상까지 높아져 알칼리상태를 유지하기 때문에 중금속의 용출이 억제되어 용출 양이 작은 것으로 볼 수 있다.

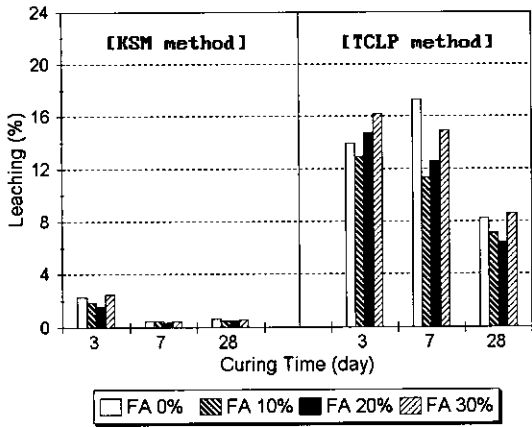


Fig. 6. Leachability of cement mortar according to the curing time and fly ash content in case of 5% of sludge contained.

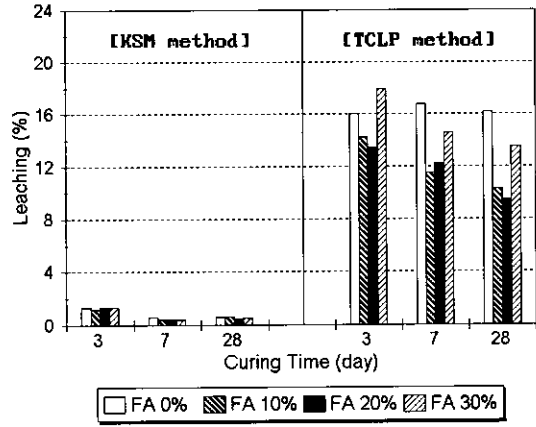


Fig. 8. Leachability of cement mortar according to the curing time and fly ash content in case of 15% of sludge contained.

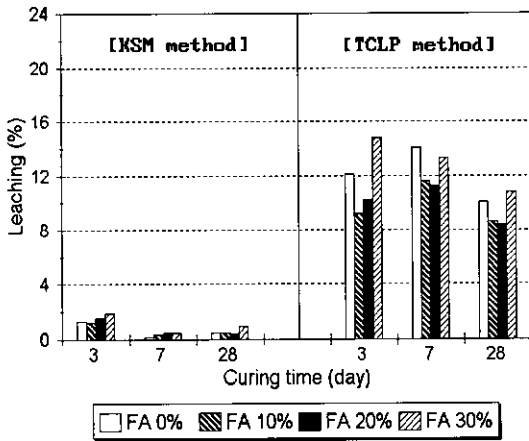


Fig. 7. Leachability of cement mortar according to the curing time and fly ash content in case of 10% of sludge contained.

이는 중금속의 용출이 용매의 종류와 pH, 용출액의 완충능력 등 용매의 특성에 따라 큰 차이를 나타내는 것으로, 우리나라의 용출시험법은 현재 우리나라 강우의 pH가 빈번히 4이하로 나타나고 있는 현실을 고려할 때, 특정폐기물의 유해성 판정시 중금속 용출시험법의 보완이 필요할 것으로 생각된다.

IV. 결 론

화력발전소 폐기물인 비산회를 시멘트 강도증진용 혼화제로 하여 시멘트 고화제로 피혁공장 크롬 슬러지를 고형화시키고 고화체의 안정성 평가를 위해 압축강도 및 용출실험을 하여 고형화 특성에 대한 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 비산회를 첨가한 고화체의 경우 시멘트 몰탈만의 경우에 비하여 양생일이 경과함에 따라 전체적으로 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 10~20% 정도 비산회 첨가시 양생일이 경과함에 따라 약 24.3~33.8%의 높은 압축강도 증진 효과를 나타내어 비산회가 강도증진제로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.
2. 크롬슬러지를 15%까지 증가시키면서 고형화한 경우 슬러지의 양이 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 보였으나, 시멘트의 특성인 양생일의 경과에 따라 강도가 점진적으로 증가함을 나타내었고 28일 양생의 경우 시멘트 고화체의 기준강도인 140kg/cm²보다 높은 값을 나타냄으로써 고화체의 무게비 15%까지는 효율적으로 크롬 슬러지의 고형화가 가능함을 알 수 있다.
3. 크롬슬러지 고화체의 용출실험에서 미국의 TCLP

법과 우리나라의 폐기물 공정시험법을 사용하여 비교한 결과 용출시간, 용출용매비, 교반속도 및 용출액의 pH 등의 차이에 의하여 TCLP법이 수십 배 정도 높은 용출율을 보임으로써 우리나라 폐기물 공정시험법의 재고가 필요한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한국폐기물학회 : 폐기물 처리기술과 재활용, 동화기술, pp.254~279(1995)
2. 정재춘 외 9인 : 폐기물 처리, 동화기술, pp.543~552(2000)
3. 도갑수 : 폐기물처리공학, 신광문화사, pp.258~262(1993)
4. 이남훈 외 7인 : 폐기물처리재활용, 동화기술, pp.277~283(1998)
5. 한국전력공사기술연구원 : 콘크리트 혼화제로서의 석탄재 이용방안 연구, KRC-87H-J01, 4 (1989)
6. 석탄회 이용가치와 재활용 기술 I - 석탄회 발생과 재활용현황, 월간폐기물, 8, 1994
7. 박광희 외 2인 : 포졸란을 이용한 전기로분진 중의 중금속 시멘트화에 관한 연구, 한국 폐기물학회지, Vol. 13, No. 1, 1-18(1996)
8. J. N. Diet, P. Moszkowicz, D. Sorrentino : Behaviour of Ordinary Portland cement during the stabilization/solidification of synthetic heavy metal sludge : macroscopic and microscopic aspects, Waste Management, Vol. 18, 17-24(1998)
9. B. K. Marsh, R. L. Day : Pozzilanitic and Cementitious Reactions of Fly Ash in Blended Cement Pastes, *Cem. & Concr. Res.*, Vol. 18, pp.301~310(1988)
10. L. Wei, T. R. Naik, D. M. Golden : Construction Materials made with Coal Combustion By-Products, *Cem. Concr., & Aggregates*, Vol. 16, No. 1, pp. 36-42(1994)
11. E. Zamorani, I. A. Sheikh, and G. Serrini : Physical Properties Measurements and Leaching Behavior of Chromium compounds Solidified in a Cement Matrix, Nuclear and Chemical Waste Management, Vol. 8, 239-245(1988)
12. KS L 5100 : 시멘트 강도 시험용 표준사
13. KS F 2403 : 콘크리트의 시험용 공사체 제작 방법
14. KS F 4004 : 시멘트 벽돌
15. KS F 2405 : 콘크리트의 압축강도 시험방법
16. KS F 2314 : 흙의 일축 압축 시험 방법
17. 조순행, 유희찬, 최영수 : 폐기물 용출시험 방법의 비교, 대한환경공학회지, Vol. 17, No. 10, pp.983~992(1995)
18. 김영관, 허인량 : 중금속의 용출에 미치는 용매의 영향, 대한환경공학회지, Vol. 19, No. 12, pp.1591~1596(1997)