

## 대단위 소각장 소각재 자원화에 관한 연구(Ⅱ)

한상민\* · 빈재훈

산업환경과

### Study on Reuse of Ashes Generated from Large Incineration Plants(Ⅱ)

Sang-Min Han<sup>†</sup> and Jea-Hun Bin

Industry Environmental Division

#### Abstract

In Korea, MSWI(Municipal Solid Waste Incinerator) has been continuously constructed since 1984. The 15 - 18% of total amount of wastes generated in 2004 were treated through the incineration plants. The total capacity of large incinerators including medium size was 14,000 tons per day until 2005. The estimated quantity of ashes generated from incinerators is approximately 1,900 tons per day in Korea. The 37,738 tons of ashes was generated at 3 large incineration plants located in Busan(Dadae, Myoungji, Haewoondae) during 2004. We need to find a treatment method for stabilizing heavy metals contained in ashes and recycling ashes. This study was conducted to develop a new solid stabilizer that can prevent to elute heavy metals from ashes and to reuse solidified ashes as construction materials.

Because most polyvalent cations transfer to insoluble hydroxide or carbonate with pH of cement mixture in solidification process, the solidification is effective treatment method for hazardous heavy metals in waste. Hazardous heavy metals sludge generated from incineration process contains various inorganic ions as well as organic substances, so it possibly occur negative effect on the hydration of cement. Most of the inorganic ions generally are help to speedup hydration reaction.

In elution test, bottom ashes mixed with new solid stabilizer were effective in reducing heavy metals. The removal rates of Pb and Cu in bottom ashes with solid stabilizer were 95% and 87%, respectively, while those of Pb and Cu without solid stabilizer were 55% and 77%, respectively. The compressive strength of solidified ashes with 2% of solid stabilizer(S type) increased to 450 kg/cm<sup>2</sup>. The compressive strength of S type was 10 ~ 20 kg/cm<sup>2</sup> higher than that of M and H type.

The stabilizer helped to distribute homogeneously particles of cement and to promote hydration reaction by adding accelerators (Na and K ions).

Key words : Incineration plant, stabilizing heavy metals, compressive strength, solid stabilizer, hydration.

#### 서 론<sup>1),2),3)</sup>

산업화는 유해물질이나 고분자재료의 사용 확대에 따른 폐기물의 질적인 악성화를 가져왔다. 폐기물문제의 원인을 산업화, 도시화로 특징되는 현대사회의 대량생산, 대량소비문화에서 찾는다면 이를 해소하기 위한 대안도 소모적인 생산·소비문제를 폐기물 발생을 최소화하는 「자원순환형 사회경제체제」로 전환하는 데에서 출발하여야 할 것이다.

폐기물이 환경오염의 가장 큰 문제로 인식되기 시작한지 불과 10~20년 밖에 지나지 않았으나 실제로 발생하는 환경오염 사례 혹은 잠재적인 환경피해의 심각성 때문에 유해폐기물의 관리 및 처리기술 개발이 절실히 요구되고 있으며, 또한 폐기물의 재활용을 활성화하기 위해 정부는 자원 재활용을 촉진하기 위하여 정부 발주 공사의 경우 일정비율 이상의 재생 골재 사

용을 의무화 하는 법안이 추진 중에 있다.

정부에서는 생활폐기물의 감량화 및 자원화 시책의 적극적인 추진을 통하여 2011년까지 추정발생량의 12%를 감량하고 재활용기반시설의 확충과 재활용기술개발 및 재활용산업을 육성하여 재활용율을 53%로 제고시켜 나가는 한편 국토여건 및 매립부지난 등을 고려하여 소각처리 목표를 30%(2005년도 23%)로 설정하고 재활용이 어려운 폐기물과 불연성폐기물 소각잔재물에 한정하여 매립처리율을 17%(2005년도 30%)수준까지 낮춤으로써 현재 사용중인 매립시설의 사용기간을 연장해 나갈 계획이다.

폐기물의 통합관리시스템(integrated solid waste management)에서 소각로는 가연성 폐기물의 중간 처리기술으로써 현재까지 범용적으로 사용되고 있는 기술이다. 국내에서는 1984년 이후 지속적인 폐기물 소각로의 보급으로 2004년

<sup>†</sup> Corresponding author. E-Mail: hsm\_21@busan.go.kr  
Phone: 051-757-6937, Fax: 051-757-2879

도에는 15~18% 정도가 소각 처리되고 있다. 2005년까지 건설예정인 중대형 소각로의 총규모는 14,000 톤/일이다. 따라서 국내에서 가동되거나 건설계획인 소각로에서 발생하는 소각재의 양은 대략 1,900 톤/일 이상일 것으로 추측되고 있으며, 우리시 3개(다대, 해운대, 명지) 대형 소각장에서 약 37,738 톤/년(바닥재, 비산재 포함 : 2004년) 발생되고 있다. 이웃나라 일본도 일반폐기물의 약 78%를 소각 처리하고 있으며, 소각로에서 발생하는 소각재의 양은 약 17,000 톤/일(연간 600만톤 : 2003년도) 발생하고 있으나 극히 일부분만 재활용하고 있으며 거의다 매립에 의존하고 있는 실정이며, 환경보전에 대한 국민의 의식 향상과 폐기물 매립장 건설에 따른 지하수 등의 주변 환경오염에 대한 불안 등으로 폐기물 매립부지의 확보가 점점 곤란해지고 있다<sup>4)</sup>. 그로 인하여 이웃나라 일본도 소각재를 다양한 자원으로 이용하기 위하여 해양자재로서 리사이클링 하는 등 다양한 방법을 연구하고 있는 것이 현실이다. 이러한 소각 시설에서 배출되고 있는 소각재는 일반폐기물로 분류하여 도시쓰레기와 같이 매립 처리할 수 있으나, 일부 비산재 등의 소각재에서 중금속이 용출될 수 있는 위험성이 존재하기 때문에 물리화학적 처리를 한 후에 매립을 하고 있다. 또한 생활쓰레기 매립장에서는 소각재의 반입을 반대하는 입장으로 소각시설의 운영 시 소각재의 처리문제가 발생하고 있다. 소각재의 처리기술은 시멘트나 아스팔트를 이용한 첨가제 고형화 기술과 저온에서 소결시키는 소결기술, 고온에서 용융 고화시키는 용융기술 등이 있다. 최근에 와서는 중금속 용출현상이 거의 발생되지 않고 부산물을 재활용할 수 있는 용융기술의 개발에 많은 연구가 진행되고 있으나 고비용 및 운전의 어려운 점 등 많은 단점이 있다. 소각재 등과 같은 폐기물의 재활용을 위해서는 먼저 선행되어야 하는 부분이 환경에 대한 안전성의 확보이다. 우리나라의 경우 1995년 폐기물 관리법이 개정되기 이전에는 시멘트를 사용한 소각비회의 고형화에 있어서 고화물 1m<sup>3</sup> 당 150 kg 이상의 시멘트를 혼합하도록 규정하였으며 고화체의 압축강도도 10 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 규정하였다. 특히 소각재의 경우에는 중금속에 의한 위해성의 우려가 높으므로 처리 및 재활용을 위한 대책 마련 시 이를 필히 고려하여야 한다.

우리나라도 '자원의절약과재활용촉진에관한법률'을 통해 '자원의 효율적 이용과 폐기물의 발생억제', '자원의 절약 및 재활용촉진'을 도모하는 한편, 폐기물관리계획(2002.3)에서 '자원순환형경제사회기반 구축'을 정책목표로 제시하고 폐기물의 '최소화'와 '자원화' 및 '안전관리'를 실천목표로 설정하는 등 자원순환형 폐기물관리를 적극 추진하고 있다. 또한 환경부는 건교부와 공동으로 순환골재의 용도별 품질기준 및 설계·시공 지침을 마련(건교부, 2005.8.24)하여 시행중에 있다. 나아가 순환골재의 재활용 과정에서 국가가 품질을 인증함으로써 수요자의 신뢰성을 한층 더 높이도록 하기 위하여 순환골재의 품질검사 및 인증제도도 2006 상반기에 실시할 예정이다. 그러므로 본 연구에서 중금속 등의 오염물질을 안정화시키면서 소각재를 재활용할 수 있는 처리방안의 필요성이 대두되

고 있는 실정이다. 따라서 중금속 용출을 억제 할 수도 있으며, 골재의 강도도 증가 시킬 수 있는 새로운 고화안정제를 개발하여 콘크리트 2차 제품(인터로킹블록 등)을 만들어 건설원자재로써 활용하고자 한다.

## 연구배경 및 이론적 고찰

### 연구배경

본 연구는 소각재 등의 폐기물을 시멘트, 골재, 물과 혼합 고형화 할 때에 첨가하는 액상의 고화안정처리제(HSM제)의 효과로써, 본 약제는 염화나트륨(NaCl), 탄산나트륨(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 알루미늄산화물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 염화제이철(FeCl<sub>3</sub>) 등의 Na, Ca 및 K이온화합물과 리그닌 설포산소다 및 펠라민수지 설포산소다 등을 함유하고 있다. 이 고화안정처리제는 1) 시멘트 수화반응을 강력히 촉진하는 것과, 2) 동시에 수화반응의 지속효과도 있어 CaO, C-S-H(Tobermorite) 등의 생성중대로 고품질의 강도를 현격히 증가시키게 하며, 3) 장기간출시 시멘트 수화 생성물의 유리수로 인한 공극 등을, 증대생성된 팽창재 CaO 등이 충전시킴으로써 장기강도 및 장기저항성이 우수해지는 시멘트고형체를 만듦으로 소각재 등의 폐기물을 안정처리하여 재활용 제품화 할 수 있는 기술이다.

유해폐기물을 처리하는 방법 중에서 시멘트법은 경제성 및 처리의 용이성 등으로 가장 널리 이용되고 있으나, 고형화 과정에서 고화체의 부피가 폐기물 양의 최고 두배 이상까지 증가하기 때문에 고화체의 부피를 최소화하고 중금속 폐기물을 고형화 하기 위해서는 적은양의 고화체로 많은 양의 중금속 폐기물을 안전하게 고정시킬 수 있어야 한다. 또한 고형화 시킨 폐기물 고화체의 용출특성이나 기계적 강도 등이 다른 고형화 방법에 의해 생성된 폐기물 고화체와 같거나 향상되어야 한다고 보고되어져 있다<sup>5)</sup>.

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 석탄회나 제철슬래그 등을 일정비율만큼 첨가하는 방법들이 연구되어왔다. 한편, 폐기물내 유해성분의 평가는 용출실험을 통하여 그 폐기물의 유해정도를 판단할 수 있는데 이러한 판정의 여부는 유해폐기물의 중간처리방법 및 최종처리 방법을 결정하거나 폐기물이 매립되었을 경우 침출수로 배출될 수 있는 오염물질의 양을 예측하는 것이라 할 수 있다. 이러한 용출실험은 전 세계적으로 시행되고 있으나, 용출방법과 용출액 판정기준이 상이하여 결과의 객관적인 비교가 어렵다는 문제점을 가지고 있다.

### 소각재(Bottom ash)의 시멘트콘크리트용 잔골재로서의 활용성 검토

모르타르(모르터) 또는 콘크리트를 만들기 위해 시멘트 및 물과 혼합하는 모래, 장자갈, 세석, 기타 이들과 유사한 입상의

재료를 골재라한다.

건설분야에 있어서 골재는 도로용, 콘크리트 2차 제품용 등으로 사용되고 있으며, 그 중에서도 콘크리트용으로 가장 많이 사용되고 있다. 콘크리트는 압축강도 등의 물성이 우수하고 구성 재료의 입수가 용이하며 미관이 뛰어난 구조물을 만들 수 있는 등의 장점이 있으므로, 현재 수많은 건설 재료중의 가장 대표적인 재료이다. 콘크리트 굵은 골재, 잔골재 시멘트, 물, 혼화재료로 구성되며, 골재의 품질이 콘크리트의 품질에 미치는 영향은 지대하다. 콘크리트는 시멘트페이스트를 매트릭스(Matrix)로 하여 골재를 결합 고정시킨 것으로서 골재의 표면조직에 따라 시멘트 페이스트의 부착력이 좌우되어지므로 시멘트페이스트와 부착력이 큰 표면조직을 가진 골재를 선정하여야 한다. 이 골재의 표면조직은 암석형태, 조직구조, 조성광물에 관계가 있고 마모여부에 따라 변환된다. 건설공사의 지속적인 확대로 국내의 잔골재 부족현상은 이미 심각한 상황에 직면해 있으며, 향후의 장기적인 전망도 매우 불투명한 상태이다. 또한 2004년 초에는 바다골재 채취금지 등으로 인한 골재파동으로 인하여 천연골재의 수급이 원활하지 못한 사회적 여건변화와 천연골재의 대체자원으로 사용할 수 있는 순환골재의 품질향상으로 소각재의 순환골재 재활용 필요성이 더욱 대두되고 있다. 이러한 상황에서 도시쓰레기 소각재의 콘크리트 잔골재화는 외국의 경우 대체골재 개발과 쓸모없는 폐기물의 자원화 차원에서 활발하게 연구가 진행되고 있으며, 아울러 규격화도 검토되고 있다. 도시쓰레기 소각재를 시멘트콘크리트용 잔골재로서의 적용 가능성을 평가하기위하여 1차 적으로 시멘트 모르타를 제작하여 전체골재 사용량 중의 소각재 치환에 따른 강도발현 등의 기초물성을 측정하여 잔골재로서의 타당성을 검증하여 시멘트콘크리트용 잔골재로서의 활용 가능성을 검토하였다.

입형

골재는 콘크리트 체적의 약 70% 이상을 차지하고 있기 때문에 그 종류와 품질은 콘크리트의 성질에 커다란 영향을 미친다. 골재의 산지가 일정하더라도 현재 대부분 사용하는 골재가 쇄석이기 때문에 골재 산지의 파쇄기 상태에 따라 구분되지만, 특히 경도, 골재의 광물크기, 공극의 특성에 따라 차이가 나며, 골재에 미친 힘의 정도에 따라 차이가 난다.

입도

입도라는 것은 골재의 크기에 따른 입자분율은 골재의 최대 크기 및 최소 크기사이의 입자 크기별 분율을 일컫는 것으로 체에 남는 입자의 무게분율을 의미한다. 작은 입자가 많은 입도의 골재에서는 굵은 입자가 많은 골재보다 콘크리트에서 일정한 작업성을 유지하기 위해서물을 많이 요구하며, 굵은 입자 사이에 작은 입자크기의 골재가 시멘트페이스트와 함께 채워지기 때문에 보다 우수한 품질의 콘크리트를 얻을 수 있는 것이다. 따라서 사용되는 골재가 일정 부피에서 공극이 작아질수록, 콘크리트 작업시 빈공간의 공극이 없기 때문에 최적의 콘크리트를 얻을 수 있다. Table 1,은 소각재를 KS F 2502(골재의 체가름시험방법) 방법에 준하여 체가름 시험한 결과이다.

Table.1 에서 일반적으로 골재의 입도로부터 골재가 미세한지 혹은 굵은지를 평가하는 지수로서 조립율(분말 계수: Fineness modulus, FM)를 정의하고 있다. 조립율은 골재의 체가름시 각각의 체에 남는 골재의 잔분율의 합을 100으로 나눈값으로 다음과 같이 정의되며, 조립율은 골재의 입경이 큰 것일수록 커진다. 문헌에 따르면 일반적으로 잔골재 조립율이 2.6~3.1, 굵은 골재는 6~8 이 되면 입도가 좋은 편으로 보고되어져 있다.

$$\text{조립율(FM값)} = \frac{\sum(\text{잔분율 } \%)}{100}$$

$$\text{소각재의 조립(FM)} = \frac{1+1+1+18+49+70+100}{100} = 2.4$$

강도

콘크리트의 강도는 물 시멘트비(W/C), 골재의 강도 등에 의하여 좌우 되어지는데, 특히 골재의 강도에 미치는 영향으로 골재의 기계적 성질 뿐만 아니라 흡수성이나 부착특성과도 그 관계가 있다. 일반적으로 골재의 강도와 탄성 계수는 그 암석의 재질, 표면성상, 조직 구조에 의해 결정되어지며, 골재의 강도는 첫째, 콘크리트의 마모저항성, 둘째, 동결융해저항성, 화학적 안정성과도 밀접한 관계를 갖는다. 그러나 강도가 강하다고 해서 콘크리트의 성질이 좋다고 판단하기는 어렵다. 골재의 강도가 강하고 단단한 골재는 주위의 시멘트 페이스트에 균열을 발생할 소지가 있기 때문에 적정 범위의 강도를 지닌 골

Table 1. A sieve separate of municipal solid wastes

|         | 각 체에 남은 양의 누계 |     | 각 체에 남은 양 |     |
|---------|---------------|-----|-----------|-----|
|         | g             | %   | g         | %   |
| 20      | 0             | 0   | 0         | 0   |
| 13      | 11            | 1   | 11        | 1   |
| 10      | 16            | 1   | 5         | 1   |
| 5       | 225           | 18  | 209       | 17  |
| 2.5     | 611           | 49  | 386       | 31  |
| 1.25    | 875           | 70  | 264       | 21  |
| pan(접시) | 1250          | 100 | 375       | 30  |
| 계       | 1250          | 100 | 1250      | 100 |
| 최대치수    | 13mm          | -   | -         | -   |

재를 선정하는 것이 이상적이며, 일반적으로 콘크리트에서는 골재의 강도가 시멘트 모르타르 강도 보다 커야 하는 것이 기본적인 것이다.

**불순물**

골재는 단단하고 내구적인 것으로서 적당한 입도를 유지하여야 하며, 골재에 먼지, 진흙, 유기불순물, 염분 등의 유해물이 포함되지 않아야 한다. 특히, 유기물질이 포함되어 있으면 응결 및 경화를 매우 지연시키며, 집토성분은 시멘트 페이스트(paste)와 골재의 부착력을 약화시킴으로서 요구되는 강도를 얻을 수 없으며 내구성 감소, 동결융해 저항성 감소 등을 야기한다.

**부착성**

골재와 시멘트 페이스트와의 부착은 콘크리트의 강도 특히 휨강도에 큰 영향을 미친다. 부착은 골재표면의 거칠기에 의한, 골재와 시멘트 페이스트와 맞물림에 의한 것이다. 파쇄한 돌과 같이 표면이 거치른 것은 부착성이 좋고 골재 내부에 침투를 허용하지 않는 표면 조직을 갖는 것은 부착을 나쁘게 한다. 또한 부착은 골재의 광물학적, 화학적 성질 등에도 영향을 받는다.

**비중, 흡수율 및 마모량**

자연골재의 비중과 흡수율은 모양에 따라 다르지만 비중과 흡수율과 사이에는 반비례 관계가 있고, 모양의 풍화가 진행되면 내부에 미세한 균열이 생겨 비중의 저하와 흡수율의 증대를 초래한다. 이와 같은 골재를 사용한 콘크리트는 일반적으로 탄성계수가 저하하고, 건조수축이 증대하고 중성화와 동결 융해에 대해 내구성이 저하되는 등의 경향을 보인다. 문헌에 따르면 보통 평균적으로 도시쓰레기 조각재 잔골재의 비중은 2.31~2.50, 흡수율은 9.26%~11%, 마모율은 35.8%~40% 정도로 알려져 있다<sup>(11)</sup>.

**폐기물 처리방식의 종류와 특성**

**이론적 고찰<sup>9)</sup>**

**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 공정 중에 발생하는 유해한 중금속 슬러지에는 다양한 종류의 무기이온들 외에도 유기물질들이 존재하므로 시멘트의 수화 반응에 악영향을 나타내지만 일반적으로 F<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, OH<sup>-</sup>등에 의해 침전 가능한 이온들을 제외한 대부분의 무기 이온들은 수화 반응을 촉진시킨다.

수화반응을 저해하는 요인에는 2가지가 있는데, 첫째 시멘트 입자 표면에 침전물을 형성하여 물과 시멘트의 접촉을 억제하는 경우로 석고를 예로 들 수 있다. 또한 중금속 수산화 침전물과 그 밖의 무기성 침전물도 시멘트 입자 표면에 흡착되면 수화반응을 지연시키는 것으로 알려져 있다.

Tashiro<sup>9,27)</sup>에 의하면 Zn, Pb, Cu 등은 시멘트의 칼슘이온과 반응하여 수산화물로 침전하거나 Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응하여 복염을 형성함으로써 시멘트 수화에 악영향을 미칠 뿐만 아니라 시멘트의 초기 강도 저하를 가져온다고 하였다. 그러나, Frank<sup>9,28)</sup> 등에 의하면 Cd의 경우 반응 초기에 Cd(OH)<sub>2</sub>를 생성하여 CSH(calcium silicate hydrate)와 Ca(OH)<sub>2</sub>의 침전핵으로 작용함으로써 강도 증진에 기여하는 것으로 알려져 있으며, Bishop등은 수화반응 초기에 생성되는 수화물인 ettringite의 자유도가 크기 때문에 이온 치환 등에 의해 중금속이온을 효율적으로 고정화시키는 것으로 발표 한 바 있지만, 이에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 중금속이 고화체 내에 갇히게 되는 것은 수화 반응에 의해 일어나는 작용이므로 효율적인 중금속처리, 유해폐기물의 안정화를 위해서는 시멘트 수화 반응에 대한 고찰이 필요하여 다음 장에 시멘트 수화 반응에 대하여 이론적 근거를 상세히 기술 하였으며, 시멘트 고화체에 있어서 수화 반응에 영향을 주는 인자들이 직접 중금속 용출과도 밀접한 관련이 있다.

중금속 용출에 영향을 미치는 물리적 성질로는 물과 시멘트의 비율, 슬러지와 시멘트 비율, 양생기간, 공극의 크기, 투수

Table 2. Variety and Specific of waste treatment method

| 처리방식                 | 적용 및 성능  | 작업성 및 장·단점  |
|----------------------|--|---|
| 시멘트+고화안정처리제(HSM제)고형화 | <ul style="list-style-type: none"> <li>○금속이온 결합을 강력히 촉진</li> <li>○시멘트수화 화합물의 증가로 고형물의 현격한 강도 증가</li> <li>○중금속 용출 억제</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○상온처리, 처리비 저렴</li> <li>○액상이 약제이므로 균질</li> <li>○화학적안정</li> <li>○GR규격을 만족시킴으로 재활용 가능</li> </ul>  |
| 시멘트 고형화              | <ul style="list-style-type: none"> <li>○금속이온을 흡착</li> <li>○유해 폐기물 성상에 따라 고화조제를 사용</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○상온처리, 처리비 저렴</li> <li>○용출억제력 한계성 및 강도발현 부족</li> <li>○Pb과 같은 물질은 양쪽성 물질(Amphoteretic metal) 고형화된 시료의 pH에 따라 용해도가 달라 pH가 낮을 경우와 높을 경우 다같이 용출 농도가 높게 나타 난다.</li> </ul> |
| 아스팔트 고형화             | <ul style="list-style-type: none"> <li>○접착력, 결합력, 내수성, 내식성이 좋음</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>○가열이 필요하므로 처리비 높음</li> </ul>   |
| 플라스틱 고형화             | <ul style="list-style-type: none"> <li>○내수성, 내약품성 등이 우수함</li> <li>○폐플라스틱을 이용가능</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>○가열이 필요하므로 처리비 높음</li> </ul>   |
| 소결 고형화               | <ul style="list-style-type: none"> <li>○물리적, 화학적 안정성 좋음</li> <li>○감량화가 좋음</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○최적 온도 변화 좋음</li> <li>○처리비용 높음, 저비점 중금속 휘산</li> </ul>  |
| 융융 고형화               | <ul style="list-style-type: none"> <li>○대단히 치밀하고 안정된 고화체</li> <li>○감량화 효율이 가장 큼</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>○에너지 소비가 커서 처리비용 고가</li> <li>○저비점 중금속 휘산문제 발생</li> </ul>   |

계수, 압축강도, 기타 고화체에 대한 첨가물질의 종류 및 양 등을 들 수 있다. 이들은 서로가 복합적으로 작용하므로 각각의 영향을 규명하기는 매우 어려우며, 1차적인 영향인자들로는 물과 시멘트의 비율, 슬러지와 시멘트의 비율, 양생기간, 고화체에 대한 첨가물질을 들 수 있고, 2차적인 영향으로 물리적 성질과 관계되는 공극의 크기, 투수계수, 압축강도 등의 성질을 거론 할 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 경우는 이 값이 증가하면 시멘트양에 대한 증금속 양이 상대적으로 증가하게 되고, 증가한 슬러지 양만큼 시멘트의 양이 줄어들어서 수화를 일으킬 수 있는 물질이 줄어들기 때문에 강도가 저하되어 증금속 용출량이 높아지게 된다.

**시멘트의 수화반응**

시멘트의 수화반응<sup>7,8,19)</sup>

시멘트 화합물의 상온에서의 수화반응을 요약하여 화학양론적인 식으로 나타낸 것으로 특히 Table 3. 식(1.5), (1.6), (1.8)는 석고 공존 하에서의 화학반응식이다.

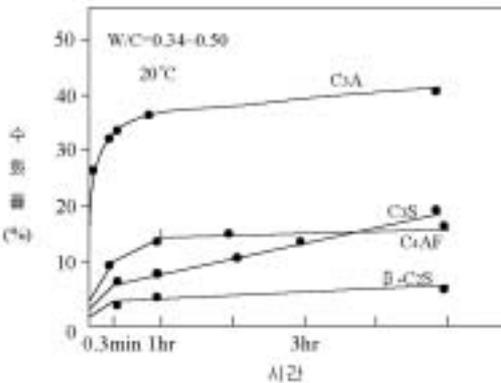


Fig. 1. Hydration velocity of cement compound (1).

시멘트 화합물인 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF는 반응성이 높은 무수화물로서 물과 반응하여 용해도가 낮은 안정한 수화물을 생성한다.

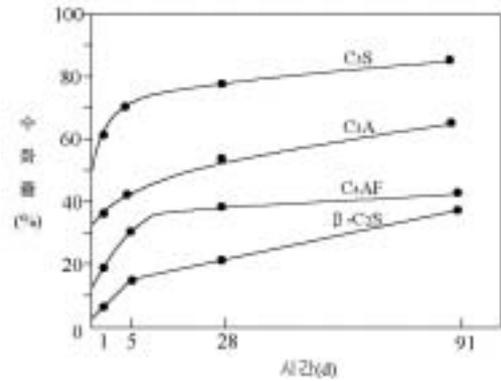


Fig. 2. Hydration velocity of cement compound (2).

다음 Fig. 1.과 Fig. 2.에서와 같이 각 화합물의 수화속도는 91일간의 장기재령으로 보면 C<sub>3</sub>S가 가장 빠르지만, 수화개시 후 5시간 이내의 수화는 C<sub>3</sub>A의 수화속도가 가장 빠른 것을 볼 수 있다. 이와 같이 수화속도에 따른 응결 → 경화로의 진행이 클링커 광물의 강도발현에 영향을 미치며 Fig. 3.와 같이 C<sub>3</sub>S와 β-C<sub>2</sub>S가 장기적으로 높은 강도 발현을 보이고 있다.

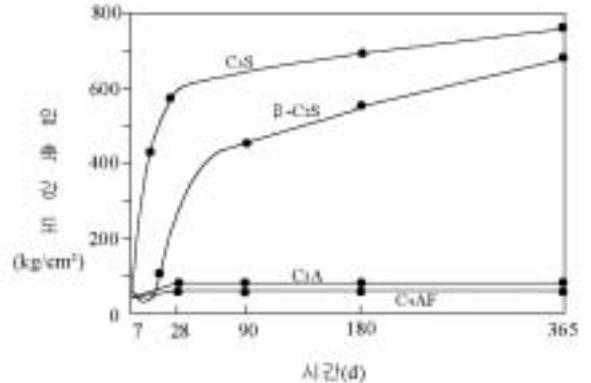


Fig. 3. Compressive strength of hydration cement compound.

Table 3. Hydration of cement

|   |       |
|---|-------|
| $2C_3 + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$  | (1.1) |
| $2C_2 + 4H_2O \rightarrow C_2S_2H_3 + Ca(OH)_2$   | (1.2) |
| $2C_3A + 27H_2O \rightarrow C_4AH_{19} + C_2AH_8$   | (1.3) |
| $C_4AH_{19} + C_2AH_8 \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2$   | (1.4) |
| $C_3A + 3CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$                           | (1.5) |
| $2C_3A + C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + 4H_2O \rightarrow 3[C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O]$ | (1.6) |
| $C_4HF + (8+n)H_2O \rightarrow C_2AH_8 + C_2FH_n$   | (1.7) |
| $C_4AF + 3CaSO_4 + 32H_2O \rightarrow C_4AF \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + Ca(OH)_2$              | (1.8) |

Table 4. hydration heat of cement

(cal/g)

| 시멘트 종류       | 재령(일) | 7       | 28       | 91       |
|--------------|-------|---------|----------|----------|
| 보통포틀랜드시멘트    |       | 70 ~ 80 | 80 ~ 90  | 90 ~ 100 |
| 조강포틀랜드시멘트    |       | 75 ~ 85 | 90 ~ 100 | 95 ~ 105 |
| 중용열포틀랜드시멘트   |       | 55 ~ 65 | 70 ~ 80  | 75 ~ 85  |
| 고로시멘트(B종)    |       | 55 ~ 70 | 75 ~ 85  | 80 ~ 90  |
| 플라이애쉬시멘트(B종) |       | 55 ~ 65 | 70 ~ 80  | 75 ~ 85  |

시멘트의 수화열<sup>10)</sup>

시멘트를 물로 비비면 수화하여 열이 발생하는데 이 수화에 의하여 발생하는 열을 수화열(heat of hydration)이라 한다. 수화열은 시멘트가 응결(setting), 경화(hardening)하는 과정에서 발열하며, 이 발열량은 시멘트의 종류, 화학조성, 분말도, 물/시멘트비 등에 의하여 달라진다. 시멘트가 물과 완전히 반응하면 125 cal/g 정도의 열을 발생한다. 이 수화열은 콘크리트의 내부온도를 상승시키므로 한중(寒中)콘크리트 공사에는 유효하지만 담과 같이 단면이 큰 콘크리트에서는 온도가 크게 상승하여 초기 경화가 끝나 냉각하게 되면 내외의 온도차에 의하여 균열발생의 원인이 된다. 각종 시멘트의 수화열을 Table 4 에 나타내었으며 시멘트의 조성 화합물의 발열량을 Table 4 에 나타내었다.

이러한 시멘트는 주로 아리트(C<sub>3</sub>S), 베리트(C<sub>2</sub>S), 세리트(C<sub>3</sub>A), 페라이트(C<sub>4</sub>AF)와 같은 이질적인 화합물로 이루어져 있으며, 이들은 전체의 약 90%를 점하고 있다. 따라서 시멘트가 물과 접한 후 수화반응이 일어날 때, 이들 개개의 화합물은 C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF의 경우 초기에 급속한 수화반응이 진행되며 이에 반해 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S 등은 장기적으로 서서히 수화반응이 진행된다.

이때 이들 화합물은 수화반응시 각각 다른 발열량을 지니며 수화열(heat of hydration)이라는 다량의 열을 방출하게 된다. Table 5.와 같이 C<sub>3</sub>S, C<sub>3</sub>A등의 화합물을 다량 함유하는 시멘트는 수화열이 크다는 특징을 지니고 있음을 알 수 있다. 이러한 시멘트의 수화열은 근사치로써 개개의 화합물의 수화열을 가중 평균한 값과 같다는 것이 경험적으로 나타나 있으며 이를 식(1.9)으로부터 계산할 수 있다.

Table 5. A purity compound hydration heat including cement

| 화합물               | 수화열 (cal/g) |
|-------------------|-------------|
| C <sub>3</sub> S  | 120         |
| C <sub>2</sub> S  | 62          |
| C <sub>3</sub> A  | 207         |
| C <sub>4</sub> AF | 100         |

$$QH = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF) \dots\dots\dots (1.9)$$

여기서 QH는 시멘트의 수화열, a, b …등은 각 화합물의 수화열, 또 (C<sub>3</sub>S), (C<sub>2</sub>S) … 등은 각각의 성분이 시멘트 중에서 차지하는 비율이다. 한편 각각의 클링커가 시멘트의 일부로서 수화했을 때 각 성분의 수화열을 Table 5.에 나타내었다. C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S의 수화시 방출되는 열량에 있어서는 실험결과가 어느 정

도 일치하고 있으나 C<sub>3</sub>A와 C<sub>4</sub>AF에 있어서는 상당한 차이를 보인다. 즉, 시멘트 중에 C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF 등의 경우 서로 모순되는 결과를 보여 순수화합물의 수화열과 상당히 다르다는 것을 알 수 있다. 보통 시멘트의 수화열을 100 ~ 120 cal/g이며 수화열의 계산치는 실측치와 9.6 cal/g이상의 차이가 발생하기도 한다.

시멘트의 수화발열속도<sup>11),12)</sup>

수화반응의 응결의 시발과 종결은 Fig. 4.와 같다. 이것은 어느 시기에 활발한 반응이 행하여져 있는지의 전체적인 반응

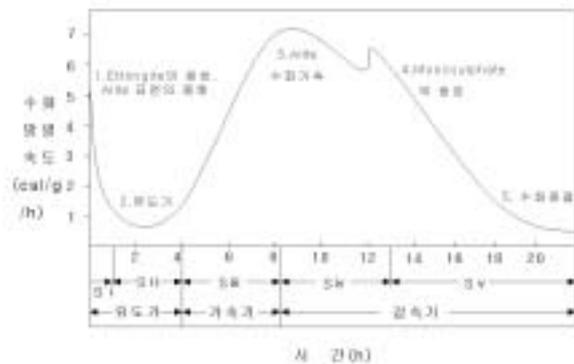


Fig. 4. Hydration and calorific curve of cement.

- Si. 수화직후의 예리한 발열피크는 수중에 용해한 석고가 시멘트 클링커 광물중에서 가장 활성이 큰 알루미늄이트(C<sub>3</sub>A)와 반응하여 생성하는 에트링가이트(ettringite)의 생성열 및 alite표면의 용해열에 의한 것이다.
- Sii. 알루미늄이트 입자 주위는 불용성의 에트링가이트막에 의해 덮여있고 alite입자의 주위에도 불용성의 규산칼슘수화물(C-S-H)막에 의해 피복되어 각각의 수화반응을 억제하고 있는 시기이다.
- Siii. 덮여있는 C-S-H막이 내부로부터의 침투압 때문에 팽창하여 파괴되고 alite의 수화가 재차 활발하게 되는 시기이다.
- Siv. 알루미늄이트 입자 주위의 에트링가이트 막이 결정의 팽창압으로 파괴되고 다시 내부의 C<sub>3</sub>A가 수화를 시작하고 석고의 부족에 의해 육각판상의 모노설페이트(mono-sulfate)로 변화하는 경우의 발열이다.
- Sv. 제 2피크 이후는 확실한 발열피크가 나타나지 않지만 alite와 belite는 다량을 생성된 C-S-H상에 의해 채워져 이온의 이동이 어렵게 되고 수화속도는 점차 느려지게 되며 수화물끼리의 접촉에 의해 응결이 시작된다.

Table 6. Chemical composition of bottom ash and fly ash

| 구분  | SiO <sub>2</sub> | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | FeO <sub>3</sub> | ZnO  | 단위(%) |
|-----|------------------|-------|--------------------------------|------|-------------------|------------------|------------------|------|-------|
| 바닥재 | 26.93            | 17.86 | 11.30                          | 8.79 | 3.67              | 2.92             | 1.72             | 1.57 | 비고    |
| 비산재 | 34.40            | 14.46 | 8.03                           | 2.60 | 4.80              | 1.45             | 3.95             | 0.92 |       |

속도곡선을 표시한 것이다. 횡축은 시간을 종축에는 수화를 나타내며 반응이 활발하면 할수록 반응속도는 커진다. 이 곡선에서 보면 S<sub>i</sub>에서 S<sub>v</sub>까지의 5개의 반응시간에 특징을 붙일 수 있다. 때로는 S<sub>i</sub>와 S<sub>ii</sub>를 합하여 유도가 S<sub>iii</sub>을 가속기 S<sub>v</sub>와 S<sub>v</sub>를 감속기로 줄여 3기간으로 나눌 수도 있다.

도시 쓰레기의 특성

화학적 특성<sup>13),14),15),16),17)</sup>

도시 쓰레기를 소각하면 바닥재, 보일러더스트, 비산재 등 3가지 폐기물이 발생된다. 바닥재는 수분 함유기준 소각되는 쓰레기량의 10~15%가 발생하고 보일러 더스트 및 비산재는 수분 함유 기준 쓰레기량의 1~1.5%가 발생한다. 소각재의 물리적 조성에 있어 순수한 소각재가 64%, 유리, 금속 등 불연물의 비율이 35%를 차지하고 있다.

바닥재의 구조특성을 분석하면 유리상형태(Vitreous Type), 공극형태(Porous), 미세결정상(Microcrystalline Type) 등 3가지 형태로 발생이 되었다. 유리상 형태는 매우 밝은 금속표면과 매우 단단한 구조로 된 검은 암석과 같은 형태이고, 공극형태구조는 소각처리 시 낮은 온도에서 발생하고, 미세 결정상 형태는 바닥재의 가장 빈번한 형태로서 매우 단단한 구조를 갖고 있다.

Table 6 에서 바닥재에 대한 Microscopic특성 결과를 보면, 유리상(Glass newly formed), magnetite(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Quartz(SiO<sub>2</sub>), Melilites(황장석)를 주요 성분으로 하여 60여가지의 암석 성분으로 구성되어 있다. 이들 성분들은 소각장 순간 소각온도와 시간, 반입되는 쓰레기 성상에 따라서 다른 형태로 석출되는데 거의 1000 이상에서는 glass상, 600~1000에서는 magnetite상, 700~800에서는 Melilites가 형성되어 온도 조건에 따라 생성되는 소각재의 성상이 크게 달라지고

있음을 보여주고 있다. 바닥재의 함유된 중금속은 Zn, Cu, Pb, Cr, Ni 정도가 함유되어 있으나, 이 중금속 성분들은 Table 6. 에서 구조 분석한 암석들 내에서 매우 견고한 형태로 고정화·안정화되어 있는 형태로서 낮은 용출농도를 나타내게 된다.

Table 7. Composition rate of bottom ash each particle size

| 체번호              | 체에 남은 무게(%) |
|------------------|-------------|
| 20mm이상           | 2           |
| 20mm미만~13mm이상    | 24          |
| 13mm미만~10mm이상    | 30          |
| 10mm미만~5mm이상     | 7           |
| 5mm미만~2.5mm이상    | 17          |
| 2.5mm미만~1.25mm이상 | 9           |
| 1.25mm미만         | 11          |

물리적 특성<sup>18),19),20),21),22)</sup>

건설골재는 제품의 품질에 직접적인 영향을 주는 것이기 때문에 관리가 매우 중요하며, 표면상태는 골재의 표면이 매끈함과 거칠기 정도에 따라 구분되지만, 특히 경도, 골재의 광물 크기, 공극의 특성에 따라 차이가 나고, 골재에 미친 힘의 정도에 따라 차이가 난다. 특히 골재의 표면은 입형과 같이 시멘트 혼합물의 강도 및 작업성에 큰 영향을 미치며, 때로는 표면의 거칠기가 입형보다 더 중요한 요소로 여겨진다. 부드럽고 매끄러운 표면과는 달리 거친표면은 혼합물의 강도를 증가시키는 하지만 작업성의 향상을 위해서는 더 많은 양의 시멘트를 요구하게 된다. 도시쓰레기 소각재의 입도 분석을 위하여 KS규격에 따라 입도를 분석한 결과는 Table 6 과 같다

Table 7 을 보면 도시쓰레기소각재의 입도는 대체적으로 10mm이상의 크기가 많이 함유되어 있다. 또한 소각재 중에는

Table 8. Heavymetal concentration of bottom and fly ash each particlesize

| 구분           | 입 경       | 항 목  |     |      |       |      |       |       |       |
|--------------|-----------|------|-----|------|-------|------|-------|-------|-------|
|              |           | Pb   | Cr  | Mn   | Fe    | Cu   | Cd    | Mg    | Zn    |
| 바닥재          | 5.66~4.67 | 896  | 130 | 492  | 5636  | 621  | 1.59  | 3710  | 2015  |
|              | 4.00~3.36 | 3763 | 226 | 392  | 13110 | 263  | 5.25  | 6215  | 1679  |
|              | 2.38~1.00 | 1925 | 236 | 391  | 13119 | 1256 | 3.92  | 782   | 4926  |
|              | 0.125mm   | 1011 | 311 | 1978 | 6754  | 1934 | 10.25 | 11871 | 3964  |
| 비산재          | 1.00~0.56 | 6925 | 163 | 496  | 5125  | 1531 | 193.2 | 13925 | 21253 |
|              | 0.56~0.29 | 6915 | 215 | 724  | 5325  | 1624 | 215.2 | 13256 | 20263 |
|              | 0.29~0.18 | 6946 | 196 | 711  | 4966  | 1725 | 711.8 | 17254 | 21397 |
|              | 0.18mm    | 6325 | 217 | 673  | 5912  | 1625 | 314.2 | 17925 | 24263 |
|              | 혼합시료      | 6940 | 209 | 725  | 5004  | 1392 | 335.0 | 18014 | 21037 |
| Clark number |           | 15   | 200 | 900  | 47000 | 100  | 05    | -     | 40    |

금속류(철, 비철금속)등을 함유하고 있어, 이부분을 제거한 후 잔골재로서 사용해야 할 것으로 판단된다. 골재의 입형과 입도 분포는 콘크리트의 배합과 유동성에 커다란 영향을 끼치며 일반적으로 입형과 입도가 좋은 골재는 실적율이 크고 동일 슬럼프를 얻기 위한 단위 수량이 적다. 또한 콘크리트의 작업성(Workability)과 타설도(Pumpability)를 좋게하기 위해서는 미세한 입자분이 필요하지만 그렇다고 해서 지나치게 미세한 입자가 많으면 단위 수량이 커진다.

Table 8 은 바닥재와 비산재의 입경별 중금속 함유량을 나타낸 것이다. 소각재 및 비산재의 입경에 따른 중금속 함유량은 소각재에는 Pb, Fe, Mg, Zn이 많은 것을 알 수 있다. 비산재의 혼합시료를 Clark number(지구표층부 각 원소의 평균 함유량의 추정치)와 비교하여 보면 Pb, Cd, Zn이 400~600 배로 높고 반대로 Mn은 0.5배, Fe은 0.2배로 Clark number 보다 낮게 나타났다. Cu는 약 17배이지만, Cr은 Clark number 와 비슷하다. 따라서 폐기물 중의 Cd, Pb, Zn은 폐기물 연소시 비산재에 농축되어 농도가 높게 된다고 생각된다. 비산재를 처리시 중금속 용출에 더욱더 주의를 기울여야 될 것으로 사료된다.

실험재료 및 방법

실험재료

본 연구에서는 우리시 3개 대형소각장(다대, 명지, 해운대)에서 소각후 배출되는 바닥재를 대상시료로 사용하였으며, 고품화 재료로 시멘트는 국내에서 많이 생산되고 있고 또한 건설 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 포틀랜드 시멘트(TYPE

I, S시멘트 공업)를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 바닥재와 시멘트의 화학분석 결과를 XRF(IRX2000, RIGAKU, JAPAN)로 분석하여 그 결과를 Table 9. 에 나타내었다. 바닥재와 시멘트는 103℃에서 항량이 되도록 각각 건조한 다음 데시케이터에 보관하면서 실험에 사용하였다.

실험방법

시료의 용출실험은 드라이오븐(103℃)에 건조한 후 입도가 0.125~5.66mm가 되도록 체분석을 하여 용출용 시료로 하였으며 국내 폐기물공정 시험법에 규정된 표준용출실험법 KSLT(Korea Stand Leaching Test)에 따라 KSLT법의 용출조건은 pH 5.8~6.2, 1:10의 고액비, 200rpm의 속도로 6 시간 진탕하고 여액을 여지로 여과후 ICP를(Inductively coupled plasma emission spectroscopy : ARL3500, SWISS)사용하여 분석하였으며, 압축강도시험은 지름 150m, 높이300mm의 원주형 공시체를 제작하여 LABTRON2100 (압축강도기)를 이용하여 KS가 규정하고는 방법에 따라 재령 28일 압축강도를 측정하였다.

결과 및 고찰

용출실험 결과의 비교

Table 8 은 용출분석결과로서, 다대, 해운대, 명지소각장 소각재('04년 6월 채취)의 경우 모두 폐기물관리법 유해물질 함유기준 이내로 조사되었다

Table 11 은 서울시 5개 소각장 바닥재 용출 결과는 1999년 서울특별시에서 “소각재 적정처리 대책”(발표자 : 서용찬) 마

Table 9. Chemical composition of cement and bottom ash

| Sample | chemical composition(wt.%) |       |       |      |      |      |      |      |        | specific gravity |
|--------|----------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|------------------|
|        | CaO                        | SiO2  | Al2O3 | SO3  | FeO3 | MgO  | Na2O | K2O  | others |                  |
| cement | 63.28                      | 24.75 | 5.80  | 2.53 | 2.04 | 1.50 | -    | -    | 0.1    | 3.12             |
| ash    | 3.22                       | 54.80 | 25.30 | 0.24 | 4.29 | 0.50 | 0.68 | 0.79 | 10.18  | 2.15             |

Table 10. Leachate element concentration from Municipal solid waste incineration in Busan

(단위: mg/l)

|     | Pb   | Cu    | As  | Cd    | Cr  | Hg     | CN  | TCE | PCE | Org-P |
|-----|------|-------|-----|-------|-----|--------|-----|-----|-----|-------|
| 다대  | 2.05 | 1.215 | N.D | 0.004 | N.D | 0.0003 | N.D | N.D | N.D | N.D   |
| 해운대 | 1.87 | 1.350 | N.D | 0.003 | N.D | 0.0003 | N.D | N.D | N.D | N.D   |
| 명지  | 1.63 | 1.138 | N.D | 0.005 | N.D | 0.0005 | N.D | N.D | N.D | N.D   |

Table 11. Leachate element concentration from Municipal solid waste incineration in Seoul

(단위: mg/l)

|    | Pb    | Cu    | As    | Cd    | Cr    | Hg  | CN  | TCE | PCE | Org-P |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-------|
| 일산 | 0.035 | 1.162 | 0.011 | N.D   | 0.035 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D   |
| 상계 | 0.007 | 0.617 | 0.006 | N.D   | 0.025 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D   |
| 목동 | 2.111 | 1.290 | 0.009 | N.D   | 0.024 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D   |
| 광명 | 2.916 | 0.020 | 0.017 | 0.001 | 0.018 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D   |
| 중동 | 2.137 | 0.736 | N.D   | N.D   | 0.023 | N.D | N.D | N.D | N.D | N.D   |

Table 12. Heavymetal concentration of bottom and fly ash each particlesize

(ug/g)

| 구분           | 입경        | 항목   |     |      |       |      |       |       |       |
|--------------|-----------|------|-----|------|-------|------|-------|-------|-------|
|              |           | Pb   | Cr  | Mn   | Fe    | Cu   | Cd    | Mg    | Zn    |
| 바닥재          | 5.66~4.67 | 896  | 130 | 492  | 5636  | 621  | 1.59  | 3710  | 2015  |
|              | 4.00~3.36 | 3763 | 226 | 392  | 13110 | 263  | 5.25  | 6215  | 1679  |
|              | 2.38~1.00 | 1925 | 236 | 391  | 13119 | 1256 | 3.92  | 7825  | 4926  |
|              | 0.125mm   | 1011 | 311 | 1978 | 6754  | 1934 | 10.25 | 11871 | 3964  |
| 비산재          | 1.00~0.56 | 6925 | 163 | 496  | 5125  | 1531 | 193.2 | 13925 | 21253 |
|              | 0.56~0.29 | 6915 | 215 | 724  | 5325  | 1624 | 215.2 | 13256 | 20263 |
|              | 0.29~0.18 | 6946 | 196 | 711  | 4966  | 1725 | 711.8 | 17254 | 21397 |
|              | 0.18mm    | 6325 | 217 | 673  | 5912  | 1625 | 314.2 | 17925 | 24263 |
|              | 혼합시료      | 6940 | 209 | 725  | 5004  | 1392 | 335.0 | 18014 | 21037 |
| Clark number |           | 15   | 200 | 900  | 47000 | 100  | 05    | -     | 40    |

련을 위한 공청회에서 발표한 자료로 우리시 3개 소각장의 결과와 비교하여 큰 차이는 없는 것으로 조사되었다.

Table 12 는 바닥재 와 비산재의 입경별 중금속 함유량을 나타낸것이다 .소각재 및 비산재의 입경에 따른 중금속 함유량은 소각재에는 Pb, Fe, Mg, Zn이 많은 것을 알 수 있다. 비산재의 혼합시료를 Clark number(지구표층부 각 원소의 평균 함유량의 추정치)와 비교하여 보면 Pb, Cd, Zn이 400~600 배로 높고 반대로 Mn은 0.5배, Fe은 0.2배로 Clark number 보다 낮게 나타났다. Cu는 약 17배이지만, Cr은 Clark number 와 비슷하다. 따라서 폐기물 중의 Cd, Pb, Zn 은 폐기물 연소시 비산재에 농축되어 농도가 높게 된다고 생각 된다. 비산재를 처리시 중금속 및 유해물질 용출에 많은 주의 를 기울여야 될 것으로 사료된다.

고화 안정처리제 개발의 필요성

기존의 시멘트 고화법으로 ①환경적 측면에서 중금속 용출 방지 문제와, ②자원재활용적 관전 및 폐기물 재활용성 측면에서 적절 한 처리 방법이 될 수없으며, ③더욱이 소각재속에 함유된 중금속은 일반 시멘트 고화처리 시 그 수화 반응을 방해하는 것으로 알려져, 더욱 소각재의 안정처리 및 재활용을 어렵게 하므로 새로운 고화 안정처리제의 개발이 이들 문제점 들을 해결할 수 있는 해결책이 될 수 있다.

중금속 이온을 함유한 산업폐기물을 시멘트를 이용하여 고 화시키는 경우에 시멘트의 수화 및 경화과정에 지대한 영향을 준다. Leiber는 ZnO와 PbO에 의한 시멘트의 수화지연에 관 한 연구에서 이러한 중금속들은 단지 C<sub>3</sub>S상 수화에만 영향을 주며 수화지연 정도는 중금속이온의 첨가량이 증가함에 따라, 그리고 비표면적과 C<sub>3</sub>S의 양에 따라 좌우된다고 보고하였으 며, Zn의 경우에는 결정질의 calcium zincate를 형성하지만, Pb의 경우는 비정량적인 결정질의 납화합물을 형성한다고 보 고 하였다. Cu 및 Pb는 알카리와의 반응에 의하여 중금속이 가용성의 수화물을 형성한 후 서서히 반응이 진행됨에 따라 불

용성의 metal 수산화물을 형성하여 시멘트 입자 주위에 impermeable membrane(불침투성 수지) 이 피복되어 물과 의 반응이 차단되는 것으로 사료 되어진다. 향후 소각재의 중 금속 용출 기준치 강화(일본의 경우 2002년도부터 Pb의 경우 3 ppm → 0.3 ppm으로 강화)등과 직 매립에 따른 환경오염 논란은 계속될 것으로 보여 근본적인 대책이 절실히 필요한 것 이 현실이다.

고화안정처리제의 역할

일반적 시멘트 고화법으로 폐기물을 처리하기에는, ①시멘 트 자체의 경화력만으로 중금속의 안정적 용출억제가 힘들며, ②폐기물에 함유된 중금속들이 시멘트 수화반응을 지연시킴으 로써 더욱 소기의 목적을 달성키 어렵고, ③재활용의 경우 GR 규격 등의 제품기준치 및 제품강도 등을 발현키 어려운 기술적 인 문제가 있어 새롭게 개발한 고화안정처리제(HSM)는 Na, Ca, 및 K이온이 많아지면 수화가 촉진됨에 주목하여 초기강 도를 높일수 있음에 주목하여, 급결에 따른 사후문제인 크랙 등을 방지함과 응결·경화를 지연시켜 더많은 수화생성물을 얻을 목적으로, W/C비를 줄여 사용할 수 있는 고성능 AE감수 제를 첨가, 시멘트중의 주된 성분인 CaO와 SiO<sub>2</sub>등이 더욱 많 은 시멘트 수화화합물을 생성할 수 있도록 하는데 주목 하였 고, 특히 시멘트의 특성인 그 원료물질들이 소성반응에서 생성 되어야 반응이 이뤄진과, 도시 쓰레기 소각재의 조성물질이 시 멘트 조성물질과 유사함과 역시 열에너지를 흡수하는 소성 유 사과정을 거침에도 주목하였다. 그러나 상기의 효과를 기대키 위한 첨가물들이 선택적인 반응을 보여 그 선택은 대단히 까다 로운 과정이다.

Na와 K이온 등의 accelerator의 역할에 대하여 설명하여 보면, 유도기중 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>의 농도가 높아지면 제2피크의 출현은 촉진되며, 유도기는 짧아지는 경향이있다. 여기서 석회질 골재 와 시멘트 페이스트간의 부착강도의 개선은, 탄산염이 시멘트 페이스트중의 알카리용액에 침식되어 Ca(OH)<sub>2</sub>층이 형성되는 것에 기인한다고 언급하고 있다. 그러나 그 알카리 농도가 높

Table 13. Chemical composition of HSM material

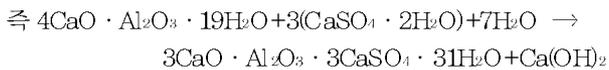
| 성분                                      | 함량(g)   | 비고          |
|---|---------|-------------|
| 염화나트륨(NaCl)                             | 100~200 |             |
| 염화칼륨(KCl)                               | 100~150 |             |
| 질산나트륨(NaNO <sub>3</sub> )               | 50~100  |             |
| 탄산나트륨(Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) | 500~800 |             |
| 알루미늄산나트륨(NaAlO <sub>2</sub> )           | 50~150  |             |
| 염화제일철(Fe <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> ) | 20~50   | ※물 10 L에 용해 |
| 황화나트륨(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | 30~100  |             |
| 염화칼슘(CaCl <sub>2</sub> )                | 50~150  |             |
| 염화칼륨(KCl)                               | 100~150 |             |
| 질산나트륨(NaNO <sub>3</sub> )               | 50~100  |             |

위 10개 조성성분 외 2종의 화학약품 추가하여 제조

으면 재료중의 SiO<sub>2</sub>가 물의 존재에 있어서 장기간에 걸쳐 반응하고 규산소다(혹은 규산칼륨)를 만드는 알카리·실리카 반응이 일어나며, 그때의 팽창압에 의해 콘크리트의 균열이 발생하게 된다. 이는 본 첨가제의 적정배합비 결정에 유효한 결과를 제시하였음. Na와 K는 시멘트 조성물질의 이황산과 물과 반응에서 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 같은 황산알카리금속으로 수산화칼슘과 다음과 반응하여 석고를 생성한다.



그리하여 이 결과 생긴 석고가 알루미늄산칼슘수화물 반응하여 ettringite 로 알려진 불용성의 칼슘설퍼알루미네이트를 생성한다.



이상의 반응은 수산화나트륨과 수산화칼슘의 각각의 포화수용액의 pH값이 14.0과 12.4인 것으로, 수화직후의 알루미늄이트(C<sub>3</sub>A) 입자주위에 불용성의 ettringite막에 의해 덮여있고, 아리트(C<sub>2</sub>S)입자 주위에 피복된 C-S-H막을 용해시켜 수화를 지속적으로 촉진시키며 또 ettringite의 생성을 유도하는 것으로 추정되어진다.

**고화안정처리제의 개발 및 조성성분**

바닥재의 중금속 용출을 억제하기 위하여 Na, Ca, 및 K이온이 많아지면 수화가 촉진되는 점에 주목하여 이들 물질들을 함유한 화학약품을 혼합하여 새로운 고화 안정제(HSM제)를 개발하여 사용하였다

Table 13. 은 새로 개발한 고화안정처리제(HSM제)의 조성성분을 나타낸 것으로, 고화안정처리제(HSM제)제는 액상으로서 성분적으로는 유기물이나 유해성분이 포함되어 있지 않으므로 사용시 특별히 주의 사항이 필요 하지 않으며, 시멘트 첨가량의 2%양으로 물 투입량과 합산하여 투입하여 사용한다.

**새로운 고화안정처리제(HSM제)의 기술적인 특성**

이 고화안정처리제의 특성은 소각재+시멘트+물의 반응시,

고화안정처리제에 포함된 Na, Ca 및 K이온 화합물이 수화생성물Ca(OH)<sub>2</sub>와 반응함에 따라 시멘트 수화반응의 아리트(C<sub>3</sub>S), 베리트(C<sub>2</sub>S), 셀리트(C<sub>3</sub>A), 페라이트(C<sub>4</sub>AF)등에 작용하여 수화작용을 더욱 촉진시켜 유해 중금속을 콘크리트 제품 안에 안정 고정시킴으로써 용출을 억제 시키는 기술이며, 또 시멘트 수화반응을 지속 반응케 하여 시멘트고형물의 강도를 증가시키고 장기저항력에 우수한 효과도 거둘 수 있을 것으로 예상되어, 기존 도시쓰레기 소각재를 재활용시의 문제점인 ①소각재의 중금속 용출의 억제효과와 ②시멘트 고품체의 강도증대에 효과가 있어 소각재를 재활용할 수 있는 안정적 처리기술이라고 할 수 있다. 또한, 소각재 함유율을 골재 사용량의 50 중량% 이상 사용할 수 있어 환경부의 재활용 기준을 충족시킬 수 있는 기술의 특성을 가지고 있다.

**용출시험 및 압축강도 시험**

본 용출시험은 도시쓰레기 소각재에 고화안정처리제(HSM제)를 투입하여 블록을 성형하였을 경우 중금속 용출억제력 정도를 알기위해서 공시체를 28일간 양생한 후 폐기물공정시험법에 규정된 표준용출시험법KSLT(Korea Stand Leaching Test)에 따라 KSLT법의 용출조건은 pH 5.8~6.2, 1:10의 고액비, 200rpm의 속도로 6시간 진탕하고 여액을 여지로 여과 후 ICP를(Inductively coupled plasma emission spectroscopy : ARL3500, SWISS)사용하여 분석하였다.

**용출 시험**

Fig.5.는 Pb의 용출시험결과를 보면 바닥재 Pb의 중금속 용출농도가 1.850 mg/L, 바닥재+시멘트의 중금속 용출농도는 0.825 mg/L로 55%저감 되었으며, 바닥재+시멘트+HSM제의 중금속 용출농도는 0.093 mg/L로 95%저감 되어 용출 시험결과 HSM제가 중금속 용출 안정제로서의 탁월한 효능을 나타내었다. Fig.6.은 Cu의 용출시험결과도 바닥재 Cu의 중금속 용출농도가 1.256 mg/L, 바닥재+시멘트의 중금속 용출농도는 0.285 mg/L로 77%저감 되었으며, 바닥재+시멘트

Table 14. Leachate experiment result on soild stablizer

| 시료           | Cu    | Cd    | Pb    | Cr <sup>6+</sup> | CN  | As  | Hg  | 비고              |
|--------------|-------|-------|-------|------------------|-----|-----|-----|-----------------|
| 바닥재          | 1.256 | 0.005 | 1.850 | N.D              | ND  | N.D | N,D | 혼합(명지, 다대, 해운대) |
| 바닥재+시멘트      | 0.285 | N.D   | 0.825 | N.D              | N.D | N.D | N.D | 소각재 50% 사용      |
| 바닥재+시멘트+HSM제 | 0.165 | N.D   | 0.093 | N.D              | N.D | N.D | N.D | HSM제 2% 투여      |

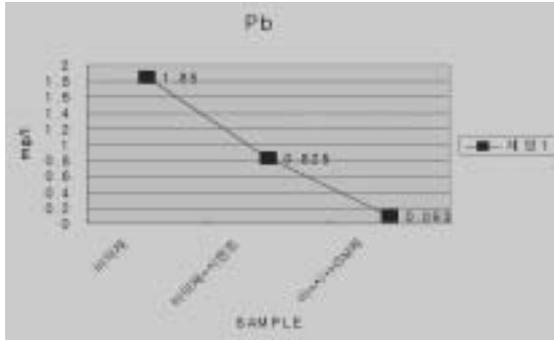


Fig. 5. Leachate concentration of Pb by KSLT.

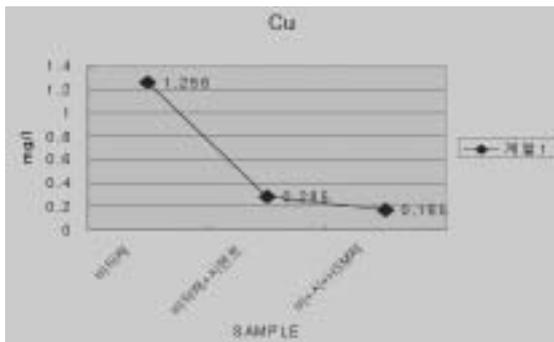


Fig. 6. Leachate concentration of Cu by KSLT.

+HSM의 중금속 용출농도는 0.165 mg/l로 87%저감 되어 용출시험결과 HSM제가 Pb과 마찬가지로 중금속 용출 안정제로서의 효능을 나타내었다. 따라서 본 HSM제는 시멘트입자의 고른 분산 및 Accelerator(Na, K이온)를 이용한 수화촉진 효과로 초기강도발현 증가와 수화작용이 지속적으로 일어나도록 하여 더 많은 시멘트 수화물을 생성케 함으로써 중금속류의 용출억제와 고형체의 강도증가를 가능케 함과, Pb, Cu 등의 중금속이 시멘트 수화지연으로 인한 용출과 강도저하의 문제를 해결하여 안정적으로 소각재의 재활용 가능성을 더한 층 높일 수 있을 것으로 사료된다.

Table 15. Compressive strength of samples after 28 days

|         | 압축강도(kg/cm <sup>2</sup> ) | 비고      |
|---------|---------------------------|---------|
| S-1(H형) | 430                       | 28일(1%) |
| S-2(S형) | 450                       | 28일(2%) |
| S-3(M형) | 440                       | 28일(3%) |

Table 16. Ratio of Degree strength after 28 days

| 재령  | 7일   | 14일  | 28일  | 3개월  | 6개월  | 1년   | 2년   | 5년   |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 강도비 | 0.67 | 0.86 | 1.00 | 1.17 | 1.23 | 1.27 | 1.31 | 1.35 |

압축강도시험

본 연구에서는 압축강도시험을 위하여 콘크리트의 압축강도를 결정하는데 사용될 수 있는 공시체로는 현재 우리나라의 KS가 규정하고 있고, 미국, 일본에서도 사용하고 있는 지름 150 mm, 높이 300 mm의 원주형 공시체(cylindrical specimen)를 제작하여 LABTRON2100(압축강도기)을 사용하여 KS가 규정하고 있는 방법에 따라 고화제 투입량의 변화

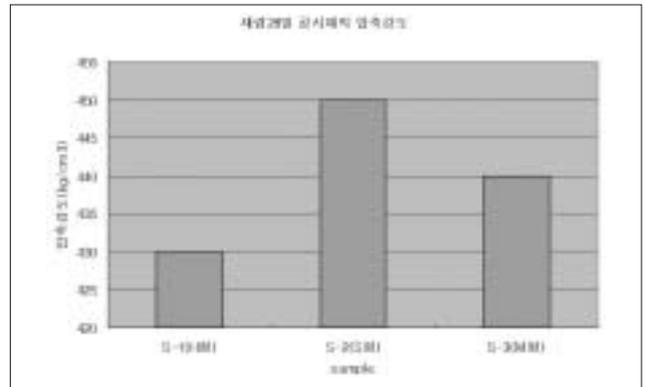


Fig. 7. Compressive strength of samples after 28 days.

에 따라 Sample-1(H형: 1%), Sample-2(S형: 2%), Sample-3(M형: 3%)의 3가지의 공시체를 제작하여 재령 28일 압축강도를 측정하였다.

Table 15. 및 Fig.7.은 공시체 시료들의 압축강도가 430~450 kg/cm<sup>2</sup>의 분포로 나타내었으며, KS8520의 연소재 벽돌 압축강도 기준 82 kg/cm<sup>2</sup> 이상이었으며, 폐기물관리법의 지정 폐기물 고형화 처리기준 cement함유량 150 kg/cm<sup>3</sup>이상의 규격도 만족하였다. 특히, 새로 개발한 고형안정제의 함유량이 2%일때(S형) 압축강도의 강도가 10(M형)~20(H형) kg/cm<sup>2</sup> 증가된 450 kg/cm<sup>2</sup> 으로 고형안정제(HSM제) 적정 배합비율도 확인 할 수 있었다.

재령별 강도변화에 관한 국내의 실험결과가 충분치 않기 때

문에, 외국의 문헌을 참고(일본건축학회)하면 28일 강도에 대한 보통시멘트콘크리트의 재령별 상대 강도를 Table 16, 에 나타내었다

## 결 론

우리시 대단위 생활폐기물 소각장에서 발생되어진 바닥재를 시멘트와 새로운 고화안정처리제(HSM제)를 혼합하여 바닥재를 고형화 하고, 안정성을 평가하기 위하여 용출실험 및 압축강도 실험을 하여 건설원자재(인테리어블록)로의 활용하기 위해 2차년도 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 공시체 S-1형, S-2형, S-3형의 압축강도 측정결과 압축강도가 430~450 kg/cm<sup>2</sup>의 분포로 나타내었으며, KS 8520의 연소재 벽돌 압축강도 기준 82 kg/cm<sup>2</sup> 이상이었으며, 폐기물관리법의 지정 폐기물 고형화 처리 기준 cement 함유량 150 kg/cm<sup>2</sup>이상의 규격도 만족하였다. 특히, 새로 개발한 고형안정제의 함유량이 2%일때(S형) 압축강도의 강도가 10(M형)~20(H형) kg/cm<sup>2</sup> 증가된 450 kg/cm<sup>2</sup> 으로 고형안정제 (HSM제) 적정 배합비율도 확인 할 수 있었다.

2. HSM제를 혼합한 고형체의 중금속 용출결과, Pb은 95%(55% : 시멘트만 사용 고형화시), Cu는 87%(77% : 시멘트만 사용 고형화시)의 저감 효과를 가지는 결과를 얻었는데 이는 새로운 고형안정제 (HSM제)는 시멘트입자의 고른 분산 및 Accelerator(Na, K이온)를 이용한 수화촉진 효과로 초기강도 발현 증가와 수화작용이 지속적으로 일어난 결과로 사료된다.

3. 본 연구는 기존의 시멘트 고화법의 문제점을 경제적인 첨가제를 이용하여 해결을 가능케 하여, 고화만이 아닌 폐기물 재이용을 가능케 하며, 또 기존의 비싼 킬레이트제를 이용한 해외기술과 비교해볼때, 저렴한 약제비로 안정적 효과를 낸으로서 경제성면에서도 뛰어날 것으로 사료 된다.

4. 일반적 시멘트 고화법으로 폐기물을 처리하기에는 시멘트 자체의 경화력만으로 중금속 용출억제가 힘들뿐더러 폐기물에 함유된 중금속들이 시멘트 수화반응을 지연 시키는 것으로 사료된다.

5. 소각재에 함유된 중금속류는 시멘트 고형화시 수화반응을 억제하나 새로운 고화안정처리제(HSM제)를 첨가함으로써 수화를 촉진하며 수화합물 생성을 증대하는 것으로 사료.

6. 소각재의 입도 선별과정만 거친후 별도의 골재 전처리 과정 없이, 액상의 고화안정처리제(HSM제)를 시멘트와 혼합하여 사용하므로 이용이 간편한 장점이 있다.

7. 기존의 시멘트 고화법으로 환경적 측면에서 중금속 용출방지의 문제와, 자원재활용적 입장에서의 폐기물의 재활용성 측면에서도 적절한 처리방법이 될 수 없었으며, 더욱이 소각재 속에 함유된 중금속은 일반 시멘트 고화처리시 수화반응을 방해하는 것으로 알려져, 더욱 소각재의 안정처리 및 재활용을 어렵게 하였으나, 본 연구에서 새로 제조한 고화안정처리제

(HSM제)가 상기 문제들의 해결 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

8. 앞으로의 연구에서는 경제성 분석도 이루어져야 하나 소각재를 이용하는 폐기물 재활용 연구는 보다 거시적 관점에서 폐기물을 환경 안정적으로 처리함과, 최근의 납비현상 등으로 적정매립지 확보난 등을 고려한 매립지 사용년수 증대 효과, 또 자원빈국인 국가적 입장에서 개발된 재활용 기술을 적극 활용 하여 recycling 함은 우리가 당연히 지향해야할 방향이 틀림없다고 사료되며 우리나라 폐기물관리의 정책 목표인 “자원순환형 폐기물관리” 지속가능발전의 관점에서 지속적인 연구가 필요하다고 생각 된다.

## 참 고 문 헌

1. 부산광역시, 환경백서, 2002-2003
2. 환경부, 폐기물 발생현황 및 처리현황, 1999-2004
3. 환경부, 국가폐기물처리계획, 1998
4. 資源環境對策, 일본 도시쓰레기소각재의 처리·리사이클링의 최전선, Vol.39 NO.2, 2003
5. 주소영, 시멘트고화에 의한 카드뮴슬러지의 안정성 및 용출 실험방법 비교 검토, 대한위생학회지, 제17권 제3호, 2002
6. 임남웅, 아스팔트 콘크리트 필러재료의 소각재 재활용방안 연구, 대한환경 공학회지, Vol 20, NO. 11, 1998
7. 한상민, 폐석고와 국내산 저품질 질석을 이용한 내화 내장제 개발에 관한 연구, 동아대학교, 박사학위 논문, 2002
8. 오희찬, 포틀랜드 시멘트 클링커의 소성성에 미치는 가열속도의 영향, 인하대학교, 1985
9. 김병기, 고성능 콘크리트에서 시멘트와 고성능 감수제의 사용성에 관한 연구, university de shervrooke, 2001
10. 김희찬, 시멘트 클링커와 염기성 내화벽돌의 상호반응에 관한 연구, 한양대학교, 1986
11. 최신 콘크리트공학, 한국콘크리트학회, 2001
12. 이종근, 무기재료원료공학, 반도출판사, 1988
13. 배해룡, 소각재를 이용한 소각비산회의 안정화 공정에 따른 문제점과 해결방안, 대한위생학회지, 16권 제2호, 2001
14. 김석완, 도시폐기물 소각로에서 발생된 바닥재와 비산재의 용출특성, 대한환경공학회지, Vol 24, NO.5, 2002
15. 허해준, 매립처분장에서 소각잔사로부터 유래된 납의 용출특성과 납의 흡착제로서 복토층의 역할, 대한환경공학회지, Vol 21, NO. 2, 1999
16. 조경미, 페타이어 소각잔재물의 자원화 평가를 위한 용출방법 비교에 관한 연구, 대한환경공학회지, Vol 23, NO.4, 2001
17. 진호섭, 석탄바닥재 및 폐석회를 이용한 고형화/안정화물의 용출 특성, Vol 24, NO. 3, 2002
18. 김종범, 콘크리트 재생골재를 이용한 산성광산배수 중화처리, Vol 24, NO. 1, 2002

19. 성낙창, 폐콘크리트의 중화 및 중금속 제거를 위한 재활용에 관한 연구(I), 한국환경과학회지 제6권 제5호, 1997
20. 한영수, 소각재 용융슬래그의 중금속 용출특성에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회지, Vol6. NO. 1, 2001
21. 손희정, 매립지 환경조건을 고려한 소각재와 도금 슬러지의 중금속 용출 특성, 대한위생학회지 제3권 제2호, 1998
22. 유종익, 산업폐기물 소각시설의 입자상 물질 및 중금속 배출 특성, 한국 대기환경학회지 제18권 제3호, 2002
23. 신항식, 시멘트고형화에 의한 유해폐기물의 처분, 한국과학기술원, 1994
24. 한소영, 사업장 폐기물 소각재의 고형화에 따른 압축강도와 용출특성, 한국폐기물학회, 1998
25. 한국환경정책평가연구원, 폐기물 자원화 기술의 고급화 방안(유해폐기물), 1999
26. 한국환경정책평가연구원, 유해폐기물 재활용산업의 활성화 방안(고형폐기물), 1998
27. 일본건축학회, 건축공사 표준시방서.동해설.JASS.5, 철근콘크리트공사, 기문당, 1979
28. 건설부, "콘크리트 표준시방서", 건설부, 1988
29. 신총식, 자원순환형 사회 형성 촉진을 위한 폐기물관리 정책방향, 첨단환경기술, p29~p37, 2005
30. 부산광역시청, 소각재 및 비산재 처리현황, 2004-2005
31. C. Tashiro, Hardening property of Cement Motar adding heavy Metal Compounds and Solubility of Heavy Metal from Hardened Motar, Cem & Concr. Res No. 7, 1987
32. K.C. Frank, Immobilization Mechani in Solidification/stabilization of Cd and Pb Salts Using portland Cement Fixing Agents, Environ Sci. Technd No. 24, 1990
33. Grudemo, A., "Development of Strength of Hydrating Cement Paste and their relation to Structural Features", Proc. Symp. on some Recent Research On Cement Hydration, Denmark, 1985