

도시폐기물 소각 잔재물의 상온 고형화에 의한 건축재 이용

이상혁* · 김수생**

동아대학교 대학원 환경공학과 박사과정* · 동아대학교 환경공학과 교수**

I. 서 론

소각재에 대한 적절한 처리문제는 폐기물관리의 중요한 현안문제로 대두되고 있음에도 불구하고^{1,2,3)}, 그 동안 도의시되어온 바닥재를 재활용하여 환경 위해성이 없으며, 건설(건축) 자재로서 성능이 우수하고, 제조가 용이할 뿐 아니라 제조 원가도 저렴한 고부가가치의 건축자재를 개발함으로써 폐기되는 소각재를 자원으로 재활용하고자 시도 하였다.

재활용 제품의 강도와 환경 위해성을 동시에 만족시키기 위해서는 소결(소성)과정에서 얻어지는 것과 비슷한 구조인 무정형의 결정을 얻을 수 있도록 용결고형화를 결정고형화 시키는 결합제(binder) 또는 혼합제의 개발과 제조방법이 필요하므로 본 연구는 이러한 제품의 개발을 위하여 기초연구를 통해 사용가능한 결합제를 몇가지 선정하였고, 이들 결합제를 사용하여 1) 결합제의 함량 2) 결합제간의 혼합비 3) 가압 성형시의 압력 등을 변수로 시편(specimen)을 제조하여, 건설재로서의 타당성, 환경위해성 및 Model을 사용하여 침출특성을 평가함으로써 건설재로서의 실용화에 기여하고자 하였다.

II. 실험재료 및 방법

실험에 사용한 바닥재는 P시와 C시에 소재하고 있는 소각장의 바닥재 저장고에서 5회에 걸쳐 폐기물 공정시험법상의 시료의 채취 및 조제 방법에 따라 분취하여 가능한 조성이 일정하도록 하나의 혼합시료로 조제하였다. 준비된 혼합시료는 100mesh로 체가름하여 선별한 후 1차로 외기에서 24시간 자연건조 시킨 후 100℃의 건조기에서 12시간 건조하였으며, 사용된 무기결합제는 hong kong clay, sodium silicate($\text{SiO}_2\text{nNa}_2\text{O}$)와 aluminum sulfate($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) 등을 단독 또는 일정 비로 혼합하였고, 이는 모두 국내에서 저가로 제조되는 공업용으로서 구매와 가격 면에서의 장점을 고려하였다. 고화체는 바닥재와 결합제를 혼합한 총 중량에 대하여 결합제의 양이 10~30% 되도록, 단독 또는 두 종류 이상 혼합하여, 성형 mold의 압력을 100,200,300,400 Kgf/cm^2 으로 변화시켜 제조하였고, 시료간 구별을 용이하게 하기 위하여 바닥재는 B, 황산알루미늄은 A, 황산마그네슘은 M, 규산나트륨은 S 로 표기했으며, 문자 뒤의 숫자는 결합제의 혼합비(중량%)이다.

재료시험으로는 경제적, 시간적, 실용적 측면을 고려하여 구조적 성질인 겉보기 비중, 부피비중, 기공율, 흡수율 등을, 기계적 성질로는 압축강도와 곡강도를, 내구성 조사를 위해 동결융해, 축입말림시험을 그리고 구성성분 및 미세구조 파악을 위해 X-ray, fluorescenc

[연락처] (우)152-056 이 상 혁 서울시 구로구 구로 6동 139-128 신영B/D B동 401호

Tel 02-853-5541, Fax 02-853-1829, E-mail isen@hananet.net

spectrometer (XRF)분석과 Scanning Electron Microscopy (SEM)분석을 하였다.

환경 위해성 검토를 위하여 가압성형된 고형화 시료는 폐기물 공정 시험법상의 용출시험법(KSLT)과 TCLP법⁴⁾을 사용하여 중금속 용출량을 구하고자 하였으며 장기간의 침출특성을 평가하기 위하여 동적 침출실험 (dynamic leach test) 중 침출과정이 상온에서 진행되는 ANS-16.1 방법⁵⁻⁶⁾을 선택하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 건설재로서의 타당성 검토

6개의 각기 다른 결합제 혼합비에 대하여 가압 성형시의 압력을 100, 200, 300, 400 kgf/cm² 으로 변화시켜 압축강도를 측정된 결과, 결합제의 혼합비에 관계없이 압력이 증가할수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig.1 에서 보듯이 성형압력 100 kgf/cm²은 KS F 4002 3급 시멘트 벽돌 기준인 40 kgf/cm²에 못 미치고 있으며, 결합제의 혼합비에 가장 영향 받지 않는 것으로 나타났고, 성형압력 400kgf/cm²은 대부분의 고화체에 있어서 점토벽돌 2급이상의 압축강도를 보이므로서 강도 면에서는 큰 문제가 없음을 보여주었고 400 kgf/cm²을 초과한 고화체에서는 층간균열 (Lamination) 현상이 발생되어 바람직하지 않은 것으로 나타나 도시하지 않았다.

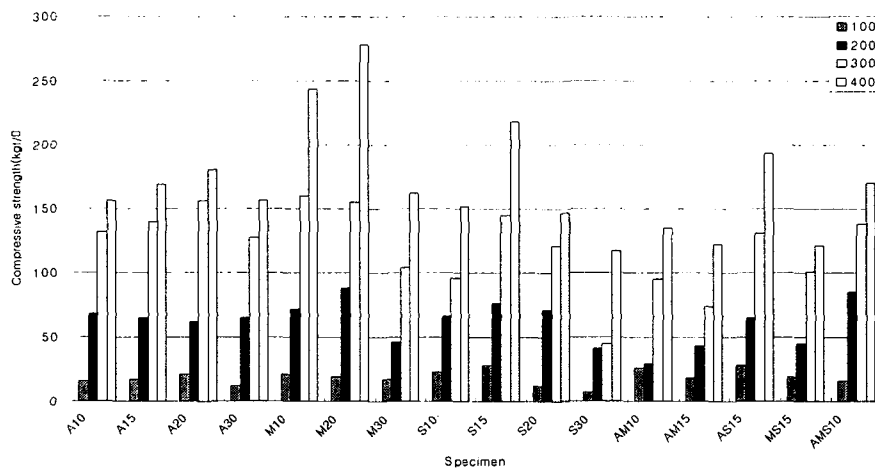


Fig.1 Compressive strength variation according to molding pressure

기공율과 흡수율은 결합제의 종류보다는 혼합비와 더욱 밀접한 상관성이 있으며, 압축강도는 기공율, 흡수율과는 뚜렷한 상관관계를 포착할 수 없었다. 또한 결합제 혼합비 30%에서의 강도는 그 미만 혼합비보다 다소 낮게 나타나는 경향이 있으므로 혼합비가 30%를 초과하면 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

동결 융해시험에서는 고화체 S15만이 기준 반복횟수 12회에서 표면부터 손상되기 시작하였고, 나머지는 모두 이전에 붕괴되거나 표면이 손상되어 기준치에 미달되는 것으로 나타

났다.

2. 환경위해성

바닥재를 대상으로 유해물질 함유기준 내의 중금속 Pb, Cr, Cd, Cu, As 등 5개 항목과 기준외의 일반 중금속 Fe, Ni 등 총 7개 항목에 대하여 분석한 결과, Fig.2 에서 보는 바와 같이 KSLT에 의한 용출시험에서는 모든 항목이 기준치 이내로 나타났으나, TCLP법에 의한 경우는 Pb가 7.470, Cu가 7.148mg/L로서 기준을 초과하였다.

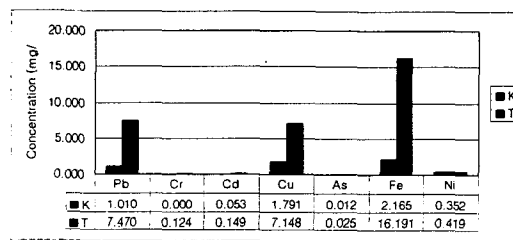
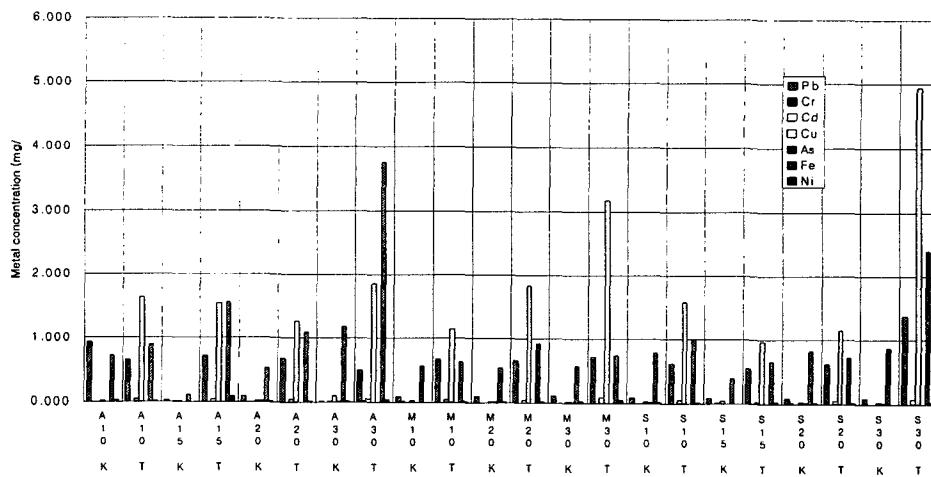
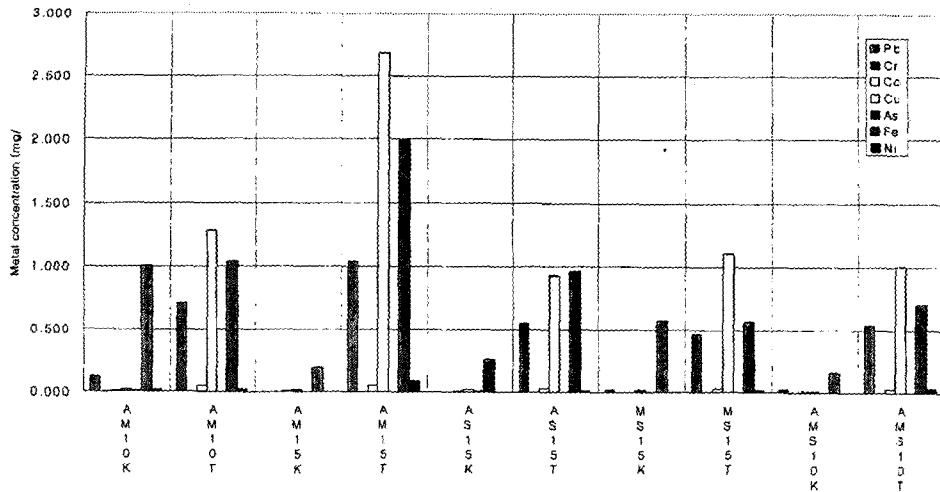


Fig.2 Comparison of extraction method for bottom ash
(K : KSLT, T : TCLP)

고화체에 대한 Fig.3 을보면 Pb의 경우는 Cu, Cd와 함께 비교적 높은 용출율을 나타내었으나, 용출농도는 모두 기준치 이내이며, 혼합비가 30%인 경우는 그 이하에서보다 다소 용출율이 높게 나타났다. 그러나 그 이외의 중금속류는 결합제 혼합비에 의한 영향에 유의할만한 차이를 보이고있지 않았다.



(a)



(b)

Fig. 3 Results of extraction test for the various solidified specimen

한편, 압축강도, 동결융해 내성 등이 양호했던 S15, S20 등은 용출농도가 낮을 뿐만 아니라 용출방법에 따라 큰 차이를 보이고 있지 않으나, AM15, AS15는 K법에서는 용출농도가 매우 낮은 반면 T법에서는 증가하는 특성을 보였다.

제조된 고화체 중 구조적 기계적 성질과 용출특성이 가장 양호한 S10, S15를 대상으로 비교적 용출시험에서 용출농도가 높았던 Pb, Cd, Cu 등의 중금속에 대하여 침출기작 및 장기 용출특성을 평가하고자 ANS-16.1 방법을 사용하여 100일간에 걸쳐 침출시험을 수행한 결과, 누적 침출분율을 침출 기간별로 도시하면 Fig.4 와 같다.

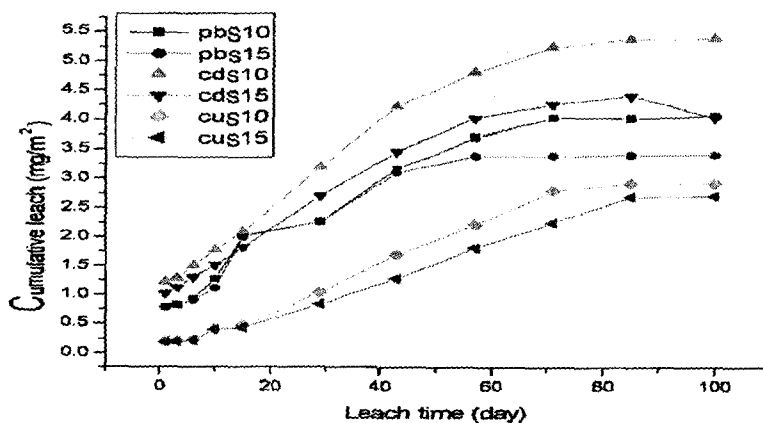


Fig. 4 Experimental results of S10 and S15 leaching test on Pb, Cd and Cu

침출기간에 따른 침출특성으로서, S10 Cd의 경우 시험 초기부터 60일에 이르기까지 누적분율의 증가율이 다른 경우보다 가장 빨랐으며, S15 Cu는 가장 느리게 나타났다. 따라서 Cd는 초기 침출이 강한 것으로 보인다. Cu는 초기침출보다는 침출기간 40일 전·후에서 침출율이 가장 높았으나 80일 이후부터는 증가율이 현저하게 감소함을 보이고 있다. 전반적으로 볼 때 장기적 침출곡선의 유형은 S15 Cu를 제외하고 유사한 형태를 보였으며, 71일 이후의 누적분율 증가율이 현저히 감소함으로써 고화체의 환경에 대한 장기적 안정성이 양호한 것으로 판단된다.

확산에 기초한 Model

$$B_i = \frac{c_i \times V_i}{1000 \times A}$$

B_{ti} : i 기간의 누적침출량, mg/m²

t_i : i 기간까지의 접촉시간, day

t_{i-1} : i-1 기간까지의 접촉시간, day

을 사용하여 용출의 주요기작이 무엇인가를 규명한 결과, S10, S15 고화체의 기율기 값은 Pb, Cd, Cu에 걸쳐 0.8650~1.1983으로서 0.6 이상이 되므로, 주된 침출 기작이 용해에 의해서임을 알 수 있었다.

이같은 결과는 결합제의 성상이 수용성으로서 고형화 이후에도 다소의 용해 현상이 일어난다고 볼 수 있으나, 양적으로 볼 때 TCLP법에 의한 용출량의 4% 내외로서 매우 미량이며, 누적 침출분율 곡선 후기에 증가 속도가 현저히 둔화되고 있으므로 지속적인 장기 침출의 가능성은 매우 희박한 것으로 나타났다.

IV. 결 론

1. 가압성형시의 압력을 100, 200, 300, 400 kgf/cm²으로 변화시킨 결과 400 kgf/cm²에서 가장 우수한 성능의 고화체가 제조되었고, 400kgf/cm²보다 높은 압력에서는 층간 균열(Lamination)현상이 미세하게 생성되어 성능을 저하시켰다.

2. 결합제(Binder) 및 결합제간의 혼합비를 변화시켜 제조한 결과, S15%고화체는 압축강도 319kgf/cm²으로 가장 높았고, 이는 KS L 4201 점토벽돌 1급 기준인 210 kgf/cm²을 상회하는 수준이며, M10%, M20%고화체도 압축강도 244, 278kgf/cm²을 나타냈으나, M20% 고화체는 100℃의 수중에서 부분적으로 용해되어 건설재로서는 부적합하였다.

3. 결합제 혼합비 30%에서의 강도는 그 이하에서 보다 낮은 경향이 있으므로 혼합비 30% 이상의 증가는 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

4. 고화체의 용출시험에서는 S30% TCLP시험의 결과 Cu 용출농도만이 4.944mg/L로 기준치 3mg/L를 초과하였고, 그 외는 모두 기준치보다 매우 낮은 값을 보여, 상온 고형화에 의한 중금속 용출 저감 효과는 매우 우수한 것으로 나타났다.

5. 중금속별 용출율은 As가 KSLT 분석시 40.63%로 가장 높았으나 용출농도는 매우 낮았고, Cd이 TCLP분석시 29.28%로서 두 번째로 높게 나타났다. Pb의 용출 형태는 타 연구와 비교할 때, 용출 용매의 pH에 매우적인 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

6. ANS-16.1 침출시험에 의한 누적침출분율 곡선의 형태는 모든 중금속이 침출초기부터 60일 정도까지에서 빠른 증가율을 보이다가 70일 이후 급격히 낮아지는 형태로서 고화체의

환경에 대한 장기적 안정성은 양호한 것으로 판단된다.

7. 확산 Model에 기초한 식에 의하여 침출기작을 해석한 결과, S10, S15 고화체의 기울기 값은 Pb, Cd, Cu에 걸쳐 0.8650~1.1983으로서, 주된 침출기작은 용해에 의한 것으로 나타났다으나, 누적침출량이 TCLP법에 의한 용출량의 4%내외로서 매우 미량이며, 누적침출분율곡선 후기에 증가속도가 현저히 둔화되고 있으므로 지속적인 장기침출의 가능성은 매우 희박한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 이형식, 국내의 폐기물 자원재생 기술현황과 전망, 환경보전 (1997.5.)
2. 정재춘, 효율적인 폐기물의 관리체계 및 자원화 방향, 환경보전 (1997.5.)
3. 홍준석, 폐기물재활용의 현황과 정책방향, 환경보전 (1997.5.)
4. U.S. EPA, Toxicant Extraction Procedure, Informal Draft, Maech, (1978)
5. Lowenbach, W, Compilation and Evaluation of Leaching Test Methods, EPA-600/2-78-095, U.S EPA, May(1978)
6. Ham, R., Anderson, M.A., Stegmann, E., and Stanforth, R, Background Study on the Development of a standard Leaching Test, EPA-600/2-79-109, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, May(1979)