한국지반환경공학회 논문집
제11권 제7호 2010년 7월 pp. 25~31

플라즈마 용융방식으로 배출된 슬래그의 냉각방식에 따른 재료적 특성 및 재활용

Recycling and Characteristics of Plasma Melting Slag Materials Produced by Different Cooling Methods

정 주 영[1)] · 배 우 근[2)] · 김 문 일[3)] · 박 세 용[†]
Chung, Juyoung · Bae, Wookeun · Kim, Moonil · Park, Seyong

ABSTRACT : In this study, it was intended to suggest new cooling method that enables to improve the applicability and added value higher than existing slag by applying new cooling method(powder cooling slag) at the time discharging slag, which is produced from the ash melting system that the plasma torch is used for the first time in Korea. It is suggested the applicative direction in the development of future recycling process by discovering its nature of material and applicative possibility as earthwork material. The ashes produced after the sewage sludge discharged from Y city was incinerated by the fluidized bed method and was used as test materials. As result of XRF(X-Ray Flourescence Spectrometry) analysis, main ingredient of sewage sludge ashes was SiO_2(32%) besides CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3, and so on. In addition, as result of XRD analysis, traditional diffuse pattern of glass could be found from granulated air-cooled slags, while a minor crystal phase could be observed from powder cooling slag, because the powder on the surface exists in the state not melted. From EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) analysis, it is deemed that powder ingredient has no change before and after it is used as cooling medium, and accordingly it is thought that the powder can be produced as the material where the function is added if used in different shape.

Keywords : Cooling method, Granulated air-cooled slags, Slag, Plasma torch

요 지 : 본 연구에서는 국내 최초로 플라즈마 토치를 사용한 재(ash) 용융설비에서 발생한 슬래그를 대상으로 기존에 제시되지 않은 새로운 냉각방식(분체냉각방식)을 적용하여 현재 적용되고 있는 슬래그 냉각방법보다 적용성 및 부가가치를 높일 수 있는 냉각방식을 제시했다. 재료적 특성분석 및 토공재료로의 재활용 가능성을 검토하여 향후 공정 개발에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 소각재(ash)는 Y시의 fluidized bed method에서 배출되는 하수슬러지를 소각하여 실험재료로 사용하였다. 하수슬러지 소각 잔재의 XRF 분석결과는 SiO_2가 전체 32%로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3 등이 주성분 원소로 구성되어 있다. XRD 분석결과에서는 냉각슬래그 입자로부터 전형적인 유리화 진행을 찾을 수 있었으며 냉각슬래그 분말로부터 크리스탈상이 관찰되었는데 그 이유는 분말이 녹지 않은 상태로 표면에 존재하기 때문이라 판단된다. EDX 분석으로부터 냉각매체로 사용된 전후에 분체의 성분이 바뀌지 않았으며 만약 다른 형태를 사용한다면 활용성이 더해진 분말을 생산할 수 있을 거라 판단된다.

주요어 : 냉각 방식, 냉각슬래그 분말, 슬래그, 플라즈마 토치

1. 서 론

하수슬러지는 하수처리과정에서 필연적으로 발생하는 부산물로써, 대부분 매립 또는 해양투기되고 있다. 해양투기에 의한 하수슬러지의 최종 처분은 육상처리에 비해 처리비용이 저렴하다는 이유로 국내 대부분의 지자체에서 가장 선호하는 방법이나, 폐기물의 해양투기에 관한 국제 협약인 런던협약이 1996년도에 개정되면서, 폐기물의 해양투기에 대한 규제가 강화되고 있고, 해양환경 개선의 중요성이 점차 대두되고 있다.

해양부는 해양오염방지법 시행규칙 개정을 통해 해양투기 폐기물허용 기준을 강화하고 배출방법을 제한한다고 발표하면서 중금속 등 해양오염 가능성이 높은 하수슬러지 및 축산폐수의 해양투기를 2012년부터는 원칙적으로 금지하기로 했다(환경부, 2006). 하수슬러지와 축산폐수에 대한 이같은 조치는 납, 카드뮴 등 유해 중금속이 포함되어, 수산물의 안정성 등에 미치는 영향이 크고 육상처리도 가능하다는 그동안의 연구결과에 따른 것이다(Wang 등, 2001). 실제로 미국과 유럽 등 선진국에서는 이미 90년대 초반부터 하수슬러지와 축산폐수에 대한 해양투기를 금지해 소각 또는 매립

1) 비회원, 코오롱 건설주식회사 환경사업본부 부장
2) 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수
3) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수
† 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail : seyong0828@naver.com)

하거나 벽돌시멘트 원료, 퇴비 등으로 재활용 처리하고 있다(Frugier 등, 2002). 또한 국제사회에서 하수슬러지의 해양투기는 유해 중금속에 의한 수산물의 안정성등의 위험성 때문에 해양투기하는 나라들을 지목하고 있는 상황으로 우리나라와 일본, 필리핀이 그에 포함된다.

이와 같이 하수슬러지의 최종처리가 비교적 간단하고 비용이 저렴한 매립과 해양투기가 어렵게 되자, 에너지를 소모하면서 슬러지를 감량화시키는 소각 및 용융에 의한 처리방법을 각 지자체에서 점차 적용 및 확충하려고 하는 실정이다.

용융은 현재까지 개발된 안정화 및 재활용 방법 중에서 가장 안정한 방법일 뿐만 아니라 발생원의 플랜트에서 원천적으로 오염물질의 유출을 봉쇄할 수 있는 기술이다(구재희, 2008). 소각과정에서 발생할 수 있는 다이옥신 등 휘발성 유해물질을 고온에서 무해한 물질로 전환시킬 수 있는 기술로 2차 오염을 방지할 수 있다. 또한 최종부산물인 용융슬래그는 용암이 식어서 암석이 되는 것과 같은 유사한 특성을 갖고 있으므로 다양한 용도로 재활용이 가능하다(Pioro 등, 2001; Scarinici 등, 2000).

외국에서는 최근 다이옥신 파동과 더불어 용융시설이 많이 도입되고 있으며, 용융슬래그의 재활용을 위한 연구도 활발히 진행되고 있다(손지환 등, 2007). 한편 우리나라는 현재 용융시설의 건설이 시작단계에 있으며 보급이 점차 활발해 질것으로 예상된다. 용융시설의 건설은 많게는 수백억원이 소요되며, 용융슬래그의 재활용이 용융시설의 경제성 평가에 대한 성패를 좌우할 수도 있는 주요 과제임에도 불구하고 현재까지 연구사례가 거의 없기 때문에 본격적인 연구추진이 필요한 실정이다.

냉각방식은 크게 3가지로 분류될 수 있는데 용융로에서 나온 용융슬래그를 물에 의해 냉각하는 수쇄슬래그, 공기로 냉각하는 공냉슬래그, 냉각온도를 천천히 내리거나 급냉된 슬래그를 다시 재 결정화하는 서냉슬래그 등으로 분류 할 수 있다. 본 연구에서 제시하는 새로운 냉각방식인 분체 냉각방식은 공기중에서 분체를 사용하여 냉각한 방법이다. 용융슬래그는 냉각방법에 따라 형태와 강도를 달리하므로 사용할 용도에 따라 적합한 냉각방식을 채택하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 국내 최초로 플라즈마토치를 사용한 재(ash) 용융설비에서 발생한 슬래그를 대상으로 기존에 제시되지 않은 새로운 냉각방식(분체 냉각)을 적용하여 현재 적용되고 있는 슬래그 냉각방법보다 적용성 및 부가가치를 높일 수 있는 냉각방식을 제시하고, 재료적 특성분석 및 토공재료로의 재활용 가능성을 검토하여 향후 공정 개발에 적용할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 재료

그림 1은 본 연구에 적용한 용융설비 Pilot 규모 공정을 나타낸 것이다. 혼합기에서 소각재와 생석회를 정량공급기를 통해 소각재 용융로로 투입하는 투입설비, 플라즈마 토치를 사용 1500℃ 이상의 온도에서 소각재를 용융하는 재(ash) 용융설비, 가스냉각설비, 연소가스 처리설비 및 통풍설비 등으로 구성되어 있다.

하수슬러지 소각설비(유동상 소각로)의 소각재를 플라즈마 용융처리 후 배출되는 슬래그의 활용방안을 실험하고자 Y시에서 배출되는 하수슬러지를 채취하여 900℃에서 1시간 이상 소각한 후 발생된 소각재를 플라즈마 용융설비를 이용하여 용융하였으며, 용융물은 수냉법(수쇄 슬래그), 공냉법(공냉 슬래그)과 분체 냉각법(분체 냉각슬래그)을 사용하여 냉각한 후 재료로 사용하였다.

2.2 분석조건 및 장비

시료의 용융온도 및 강열감량을 조사하기 위하여 건조시료

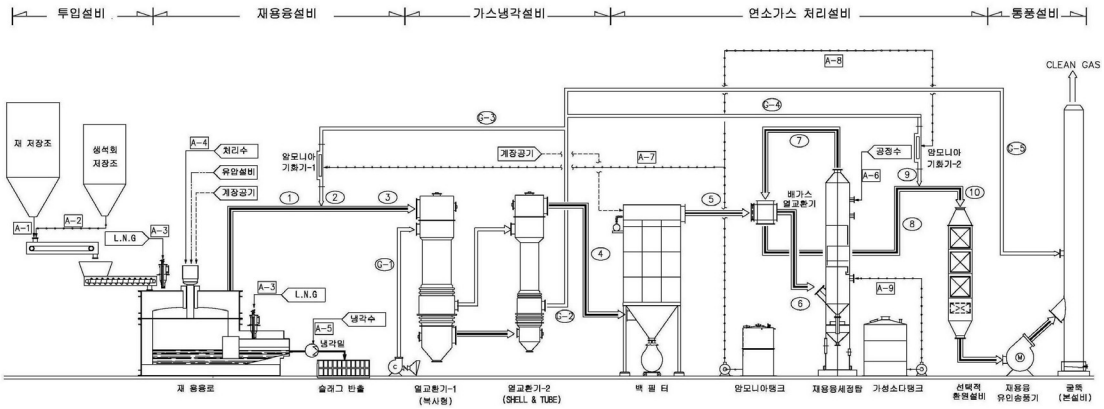


그림 1. 용융설비

를 미분화한 분말(약 20mg)의 열분석(TG/DTA, TA Instrument SDT 2960)을 행하였다. 또한, 용융 시 새로운 상의 생성 여부와 용융 후 유리화 진행정도를 알아보기 위해 XRD 분석(PW-3020, Phillips LTD.)을 하였다. 소각재 및 용융슬래그의 표면구조는 SEM(Hitachi; X-4200)으로 조사하였다. 이때 시편은 대전(charging)현상을 방지하기 위하여 IB-2 ion coater(Giko Engineering사)에서 이온전류를 8mV로 하고 30초간 유지하여 백금(Pt)으로 코팅한 후 사용하였다. 중금속 용출시험은 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 법을 사용하여 분석하였다(송춘하, 2000; Rha 등, 2000).

2.3 잔골재(수쇄, 분체 냉각슬래그) 재활용성 평가

본 실험의 목적은 수쇄, 분체 냉각 슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위한 적용성을 평가하기 위함이다. 재활용성 평가 실험을 위해 모르타르 제조는 배합계획에 따라 각 재료의 양을 1/10g의 정밀도를 가진 저울을 이용하여 계량하고, 잔골재(모래, 수쇄 슬래그), 시멘트, 물의 순으로 투입하여 기계비빔으로 제조하였다. 휨강도용 시험체는 KS F 2407(단순보의 중앙점 하중법에 의한 휨강도 시험방법)에 의거하여 40×40×160mm 철제 몰드를 사용하여 각 배합별로 3개를 제작하였다. 시험체 제작 후, 24시간 양생 실에서 양생 후, 탈형과 동시에 항온수조에서 23±2℃의 수중에서 28일간 양생을 실시하였다. 압축강도 시험은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르터의 압축강도 시험방법)에 준하였으며, 모르타르 시험체 단면적을 2방향으로 1/100mm의 정확도를 가진 버니어 캘리퍼스를 이용하여 길이를 3번 측정 후 단면적을 계산하였다. 휨강도 시험은 KS F 2407(단순보의 중앙점 하중법에 의한 휨강도 시험방법)에 의거하여 40×40×160mm의 시험체를 제작하여 실험하였다.

표 1. 하수슬러지 소각 잔재의 XRF 분석결과

산화물	중량, kg/hr	구성, %
SiO_2	**182.777**	**31.898**
CaO	**143.448**	**25.035**
MgO	10.571	1.845
Al_2O_3	**74.225**	**12.954**
Na_2O	5.456	0.952
K_2O	17.732	3.095
Fe_2O_3	**57.743**	**10.077**
TiO_2	5.911	1.032
P_2O_5	39.556	6.903
Cl	0.455	0.079
Sulphur	25.371	4.426
Carbon	1.000	0.176
ZnO	1.819	0.317
PbO	0.045	0.003
NiO	0.068	0.012
MnO	0.682	0.119
CuO	1.046	0.163
Cr_2O_3	1.046	0.163
CdO	0.003	0.001
Hg	0.00009	0.00002
CoO	0.864	0.151
etc	3.183	0.555
Total	573	100

3. 결과 및 고찰

3.1 기초 물성 분석 결과

하수슬러지 소각 잔재의 XRF 분석결과는 표 1과 같다. SiO_2가 전체 32%로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, CaO, Al_2O_3 및 Fe_2O_3 등이 주성분 원소로 구성되어 있다. 용융온도 및 점도를 낮추어 작업성을 좋게 하는 척도인 염기도(Basicity = $\frac{CaO}{SiO_2}$)는 약 0.8 정도로 생석회등의 염기도 조절제등의 첨가제(생석회)량은 미비할 것으로 판단된다. 그림 2의 XRD 분석결과 calcite와 clacium-silicate계 화합물, α-SiO_2상이 주성분인 것으로 나타났다(그림 2).

그림 3은 하수슬러지 소각재의 TG/DTA 분석결과이다.

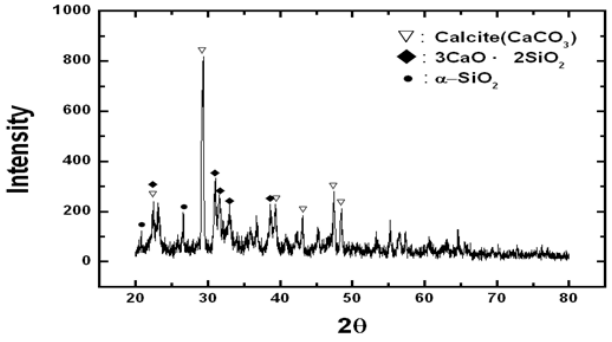


그림 2. XRD 분석결과

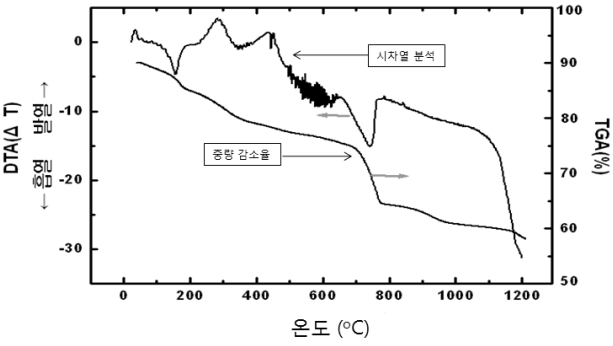


그림 3. 하수슬러지 소각재의 TG/DTA 분석결과

좌측은 시차열분석, 우측은 중량감소율(%)를 나타내고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 500℃ 이하에서 흡착수 및 유기물 등의 지속적인 열분해를 관찰할 수 있으며, 700℃ 부근 이상에서 미연탄소의 산화, 결정수의 탈수, calcite의 탈 탄산 반응, 저융점 화합물·비금속 등의 휘발 등에 의한 흡열반응과 급격한 중량감소가 관찰되었다. 대부분의 중량 감소는 800℃ 이하에서 거의 종료되며 용융은 1100℃ 부근에서 시작됨을 알 수 있다.

3.2 용융 슬래그 냉각법에 따른 표면상태 비교

그림 4는 냉각방법을 달리한 각각의 시편 주사현미경(SEM : ×1000)으로 표면 촬영한 결과를 나타낸 것이다. 수쇄슬래그의 표면은 유리질로 매끈한 반면, 공냉슬래그 표면은 약간 거칠어진 부분이 확인되었고, 분체 냉각슬래그의 표면은 분체와 표면만 용융된 상태로 결합되어 육안으로도 거친 면이 많이 보이고 있다. 이는 냉각 매체로 사용한 분체가 부분 용융된 것으로 사료된다. 새로운 냉각법으로 제조된 슬래그 중 분체 냉각슬래그의 경우 자체 강도 향상과 함께 시멘트의 부착력도 향상시킬 수 있으며, 골재로도 재활용 가능성이 높을 것으로 판단된다.

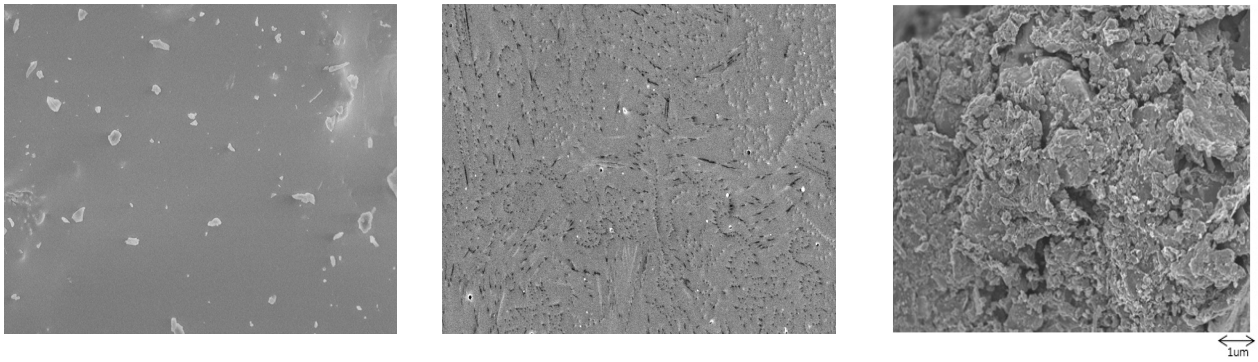
그림 5는 표면에 녹아 부착되어 있는 분체에 대해 EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 실시한 결과이다. 좌측은 분체, 우측은 슬래그 표면에 녹아 부착되어 있는 분체의 경우이다. 분석결과에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 주성분인 Si, Al, Ca의 Peak가 동일한 것으로 보아, 분체의 성분 변화는 거의 없는 것으로 판단된다.

3.3 슬래그의 골재로의 재활용성 평가

3.3.1 수쇄 슬래그의 골재로의 재활용성 평가

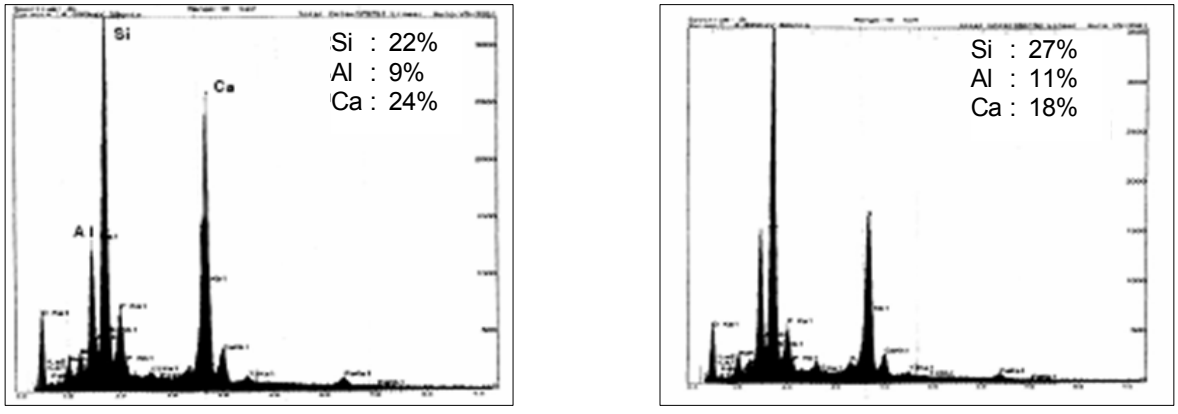
슬래그를 콘크리트용 골재로 사용하기 위한 적용성을 평가하기 위하여, 시멘트와 잔골재의 배합비(C:A)를 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4, 1 : 5까지 4가지로 하였다. C:A의 서로 다른 혼합비 조건에서 재활용 수쇄 슬래그의 혼입율을 잔골재의 용적기준으로 0%에서 단계적으로 25%씩 혼입율을 증가시켜 100%까지 배합하였다.

슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용하기 위하여 배합계획에 따라 강도 실험을 한 결과를 그림 6에 나타내었다. 수쇄슬래그의 치환율에 따른 압축강도의 변화는 시멘트의 양



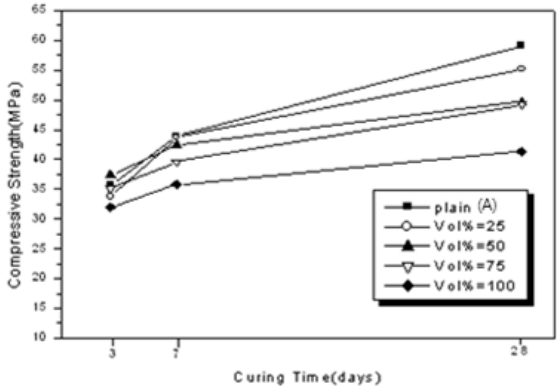
(a) 수쇄슬래그 (b) 공냉슬래그 (c) 분체 냉각슬래그

그림 4. 냉각방법을 달리한 각각의 시편 주사현미경(SEM : ×1000)으로 표면 촬영한 결과

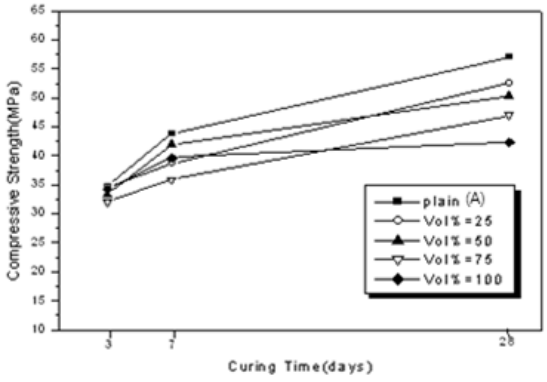


(a) 분체 (b) 슬래그 표면에 녹아있는 분체

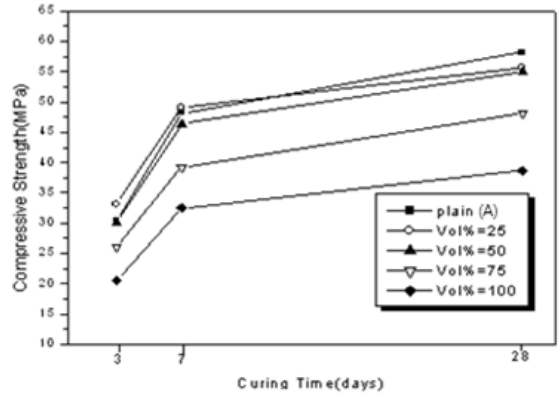
그림 5. 열처리 전후 물성 변화



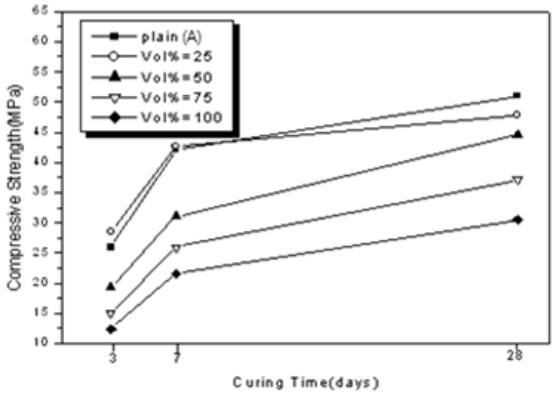
(a) C : A = 1 : 2



(b) C : A = 1 : 3



(c) C : A = 1 : 4



(d) C : A = 1 : 5

그림 6. 수쇄 슬래그를 혼입한 모르타르의 압축강도(G.S = Granulated Slag 수쇄슬래그, C = Cement, A = Aggregate 골재)

이 적은 빈배합 방향으로 갈수록, 골재의 치환율이 증가할수록 압축강도 감소폭은 증가하였다. 재령(材齡) 3일인 경우 C:A 비가 1:2일 때는 무치환 모르타르에 비해 100% 치환 모르타르의 압축강도가 10.9% 감소하였는데 비해, C:A 비가 1:5일 때는 52.2% 가 감소하였다. 이러한 압축강도의 감소폭은 재령이 증가함에 따라 그 차이가 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 시멘트의 양이 많은 부배합인 경우 골재의 치환율 25%, 50%인 경우의 초기 재령 강도는 무치환 모르타르의 강도와 비슷하거나 높게 나타나는 경우도 발생하였다. 재령이 증가하고 치환율이 증가할수록 강도 발현율이 저하되는 것은 시멘트페이스트의 강도에 비해 약한 강도를 지닌 수쇄슬래그가 강도 측정시 시멘트페이스트 보다 먼저 파괴되고 유리질로 되어 있는 표면 특성상 부착력이 적은 특성 때문인 것으로 사료된다.

그림 7은 수쇄슬래그 혼입율에 따른 재령 28일의 휨강도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 수쇄슬래그의 혼입율에 따라 휨강도가 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내고 있고, 시멘트 골재비에 따른 휨강도 감소폭은 빈배합으로 갈수록 그 감소폭이 더욱 큰 경향을 보이고 있다. 이러한 감소폭은 압축강도의 감소폭에 비하여 큰 것으로 나타났다.

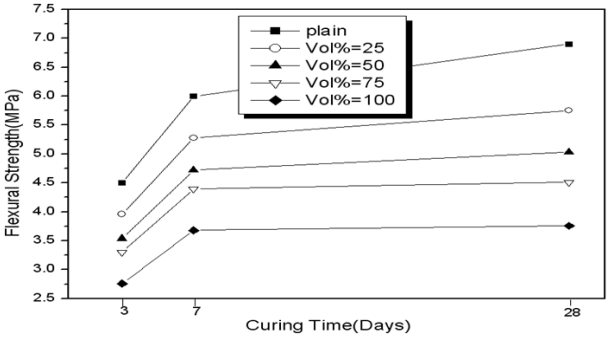


그림 7. 수쇄 슬래그를 혼입한 모르타르의 휨강도 (G.S = Granulated Slag, 수쇄슬래그)

이와 같이 수쇄슬래그의 치환율이 증가할수록, 골재비가 증가할수록 뚜렷하게 휨강도가 저하하는 이유는 수쇄슬래그 자체 강도가 낮고, 표면이 매우 미끄러운 슬래그 골재 특성 때문인 것으로 사료된다.

3.3.2 분체 냉각 슬래그의 골재로의 재활용성 평가

수쇄슬래그의 골재활용성 평가의 시험방법을 적용하였으며, 시멘트와 잔골재의 배합비(C:A)는 수쇄슬래그의 실험결과 강도 발현율이 가장 낮은 1 : 5의 배합비로 하였다. 냉

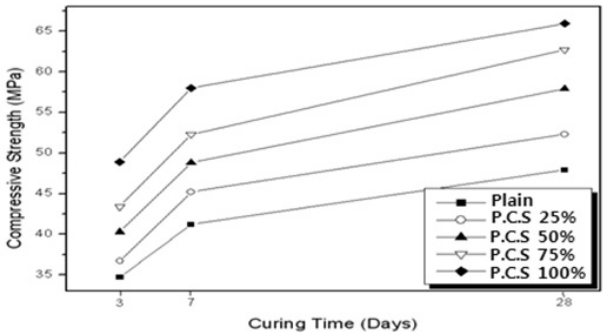


그림 8. 공냉 슬래그를 혼입한 콘크리트의 압축강도
(P.C.S = Powder Cooling Slag, 분체 냉각슬래그)

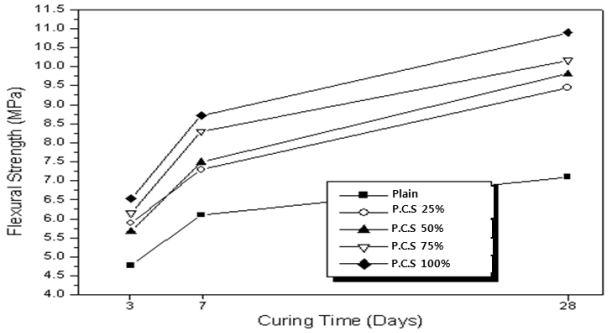


그림 9. 공냉 슬래그를 혼입한 콘크리트의 휨강도
(P.C.S = Powder Cooling Slag, 분체 냉각슬래그)

각매체로 사용한 분체는 SiO_2와 Al_2O_3를 중량비로 2:1로 배합한 시료를 사용하였으며, 각 시료의 용융점은 슬래그의 배출온도보다 높기 때문에 그림 8과 같이 슬래그와 결합할 것으로 사료되며, 토공재료 이외의 적용분야에 사용 시 분체의 용융온도와 투입 시점 등을 고려하여 냉각매체로 사용한다면 다양한 분야로 적용 가능할 것으로 판단된다.

그림 8은 분체 냉각 슬래그를 혼입한 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. 수쇄, 공냉 슬래그의 실험결과와는 반대로 재령이 증가하고 치환율이 증가할수록 강도 발현율이 높아지는데, 이는 분체 냉각슬래그 골재 자체의 경도가 기존의 모래보다 높고, 슬래그 표면이 수경성으로 변화되기 때문인 것으로 사료된다.

그림 9는 분체 냉각슬래그를 혼입한 콘크리트의 휨강도를 나타낸다. 압축강도와 마찬가지로 휨강도도 약 30% 정도 증가하며, 치환율이 높을수록 압축강도 및 휨강도가 증가하는 경향을 볼 수 있다.

화학적으로 안정되어 있는 유리질(수쇄, 공냉)슬래그는 시멘트나 물과 접촉하여도 화학반응이 일어나지 않으며, 매끈한 표면특성으로 시멘트와의 접착력도 낮다. 반면 분체 냉각슬래그는 강도에 가장 큰 영향을 미치는 표면특성과 자체강도 부분에서 보완이 되었기 때문에 유리질(수쇄, 공냉) 슬래그의 단점을 보완하고 일반 골재의 대체제로써 활용가능성이 높을 것으로 판단된다.

표 2. 중금속 용출 시험 결과

중금속 / 냉각방식	Pb(mg/L)	Cu(mg/L)	Cd(mg/L)	Cr(mg/L)
수쇄슬래그	0.10	0.08	0	0.12
공냉슬래스	0.74	0.11	0.01	0
분체 냉각슬래그	0.89	**0.44**	0.01	0.12
시멘트 고화체	**1.16**	0	0	0
기준(환경부, 2004)	3	-	0.3	1.5
기기 검출한계(ug/L)	0.65	-	0.08	0.40

3.4 환경 안정성평가

시멘트 고화체에 대하여 중금속 용출시험을 실시하여, 수쇄(수냉), 공냉, 분체 냉각슬래그의 용출 결과를 표 2에 나타내었다. 실험 결과, 시멘트 고화체의 중금속 용출농도는 Pb를 제외하고는 불검출로 나타났으며 Pb의 용출농도도 기준치 이하였다(Wang 등, 2001). Cu, Cd, Cr은 시멘트 고화체가 가장 낮은 농도를 보였는데, 이는 용출액의 pH에 따른 것으로 판단된다. 수쇄, 공냉, 분채냉각 슬래그의 pH가 7.0～7.5로 중성영역인 반면 시멘트 고화체는 11.6으로 높은 pH를 보였다. 일반적으로 Cu, Cd, Cr가 산성영역에서 용출이 용이한 반면, 양쪽성 금속인 Pb는 산성 영역뿐 아니라 알칼리성 영역에서 용출 되기 쉬운 것으로 알려져 있다(홍현미, 2005). 따라서 용출액의 pH가 높은 시멘트 고화체에서 Pb 용출농도가 높아진 것으로 추정된다. 그러나 시멘트 고화체의 용출농도는 Pb의 허용기준치에 미치지 못하는 수준이어서, 환경적인 문제는 나타나지 않는 것으로 판단된다.

4. 결　론

소각재 용융슬래그는 충분히 재활용이 가능한 상태이나 천연골재 등과 비교할 때 아직은 강도가 조금 약하고 물성면에서도 뒤떨어지는 것이 사실이다. 그렇기 때문에 토공재료 등으로의 효과적인 재활용을 위해서는 품질 향상이 필요하다. 본 실험에서는 새로운 냉각방법을 적용하여 표면처리를 함으로 향상된 품질의 슬래그를 제조하고 물성평가를 수행하였으며, 토공재료로의 재활용 가능성 평가실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 슬래그의 배출방법에 따른 특성을 조사한 결과, 수쇄·공냉·분체냉각 방법 모두 양호한 용융 상태를 보였으며, 수쇄·공냉 슬래그는 유리질로 표면이 매끄러운 형

상을 보였으나, 분체 냉각슬래그는 표면에 분체가 용융되어 융착된 모습으로 불규칙한 면을 보이고 있다. 이는 표면조도의 향상으로 골재 대체재로 사용 시 시멘트와의 부착력이 증가하여 전체 강도 발현율에 기여할 것으로 판단된다.

(2) 냉각 방식에 따라 다른 형태로 배출되는 용융슬래그에 대한 골재로의 활용 가능성을 검토한 결과 수쇄(수냉) 슬래그는 시멘트 골재비가 증가할수록, 슬래그의 치환율이 증가할수록 작업성은 저하되었지만, 재료분리 현상은 나타나지 않았다. 분체 냉각슬래그의 콘크리트 적용결과 Plain(무치환) 콘크리트에 비해 100% 치환 콘크리트의 압축강도는 49.9～65.9MPa로 32% 정도 증가하였고, 휨강도도 7.1～10.9MPa로 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 분체 냉각슬래그 골재 자체의 경도가 기존의 모래보다 높고, 슬래그 표면이 수경성으로 변화된 때문인 것으로 사료된다.

(3) 슬래그는 Si 망목구조로 중금속을 안정적으로 감싸는 구조로 되어 있어 중금속 용출을 억제하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 본 실험결과, 공냉 슬래그 경우에 비하여 용출정도가 낮게 나타났으며, 분체 냉각슬래그의 경우 유리질 슬래그 보다 용출 농도가 높게 나타났으나 그 차이는 미비하며 모든 중금속 검사 항목에서 기준치 이하로 검출되었다.

참 고 문 헌

1. 구재희(2008), *수평 압축식 고정층 폐기물 가스화 용융로의 최적 운전조건 도출*, 박사학위논문, 아주대학교, pp. 1～2.
2. 손지환, 김기헌, 강영렬, 박선구(2007), 생활폐기물 열분해-가스화-용융공정시설에서 다이옥신의 분포특성, *Analytical Science & Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 10～16.
3. 송춘하(2000), *소각재 용융슬래그의 물성 및 용출특성에 관한 연구*, 석사학위논문, 서울시립대학교, pp. 2530.
4. 홍현미(2005), *폐기물 유형에 따른 소각재의 중금속 용출특성 연구*, 석사학위논문, 대전대학교, pp. 16.
5. 환경부(2004), *토양환경보전법*, 제 4 조, 2규정.
6. 환경부 자원순환국 생활폐기물과(2006), *유기성 오니 처리 종합 대책*, 한국개발연구원 경제정보센터, pp. 9.
7. Scarinici, G., Brusatin, G., L Barbieri, A., Corradi, I., Lancellotti, P., Colombo, S., Hreglich, R., DallIgna(2000), Vitrification of Industrial and Natural Wastes with Production of Glass Fibers, *Journal of the Europen Ceramic Society*, Vol. 20, Issues 14-15, pp. 2485～2490.
8. Wang, Kuen-Sheng, Chiang, Kung-Yuh, Lin, Kae-Long and Sun, Chang-Jung(2001), Effects of a Water-Extraction Process on Heavy Metal Behavior in Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash, *Hydrometallurgy*, Vol. 62, Issue 2, pp. 73～81.
9. Pioro, L. S., Sadovskiy, B. F. and Pioro, I. L.(2001), Research and Development of a High-Efficiency One-Stage Melting Converter-Burial-Bunker Method for Vitrification of High-Level Radioactive Wastes, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 205, Issues 1-2, pp. 133～144.
10. Frugier, P., Godon, N., Vernaz, E. and Larche, F.(2002), Influence of Composition Variations on the Initial Alteration Rate of Vitrified Domestic Waste Incineration Fly-Ash, *Waste Management*, Vol. 22, Issue 2, pp. 137～142.
11. Rha, C. Y., Kang, S. K. and Kim, C. E.(2000), Investigation of the Stability of Hardened Slag Paste for the Stabilization/ Solidification of Wastes Containing Heavy Metal Ion, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B73, Issue 3, pp 255～267.

(접수일: 2010. 1. 27 심사일: 2010. 2. 1 심사완료일: 2010. 5. 14)