

# 산업폐기물 소각장 비산재의 시멘트 및 폐석분 고형화시 압축강도 및 용출특성

정호영 · 김영주 · 김지훈<sup>†</sup>

경북대학교 환경공학과

(2008년 3월 27일 접수, 2008년 5월 13일 채택)

## A Study on Characteristics of Leachability and Compressive Strength of Incinerator Fly Ash, Cement and Waste Stone Powder by Solidification

Ho Young Jung · Young Ju Kim · Ji Hoon Kim<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Graduate School, Kyungpook National University

**ABSTRACT :** In this paper, the solidification behaviour and compressive strength of fly ash, cement, and waste stone powder were studied each separately and with addition of each in different proportions. And also, we assessed stabilizing ability of waste stone powder in cement which was added in fly ash. The particle size of waste stone powder was found smaller than the fly ash and cement particle sizes. Moreover, when mixing all(fly ash, cement, and waste stone powder) showed distinctive crystal structure, and improved stiffness. In case of mixing fly ash, cement and waste stone powder in different proportions, the compressive strength was exceeded to the predicted compressive strength of 10 kgf/cm<sup>2</sup>. The XRD analysis showed high contents of CaO in fly ash and SiO<sub>2</sub> in case of waste stone powder sample. Heavy metal emission experiment showed the 3mg/L of Pb after 14 days of mixing 150 kg/m<sup>3</sup> of cement with the 80~100 kg/m<sup>3</sup> of waste stone powder, which is fulfilling the National Waste Management Policy.

**Key Words :** Solidification, Compressive strength, Fly Ash, Cement, Waste Stone Powder

**요약 :** 본 연구에서는 산업폐기물 소각장 비산재의 고형화시 시멘트와 폐석분을 일정 비율로 첨가하여 하나의 공시체로 만든 후, 압축강도와 중금속의 용출특성을 비교 분석하여 비산재의 고형화시 고화제로 사용되는 시멘트의 일부를 대체할 수 있는지를 평가하였다. 각 시료의 입도와 SEM 분석 결과, 폐석분의 입도가 작게 나타났으며, 비산재가 시멘트나 폐석분의 혼합시 조밀성이 향상되고 뚜렷한 결정구조를 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 각 시료의 XRD 분석 결과, 비산재의 경우 CaO성분이 다량 함유되어 있었으며, 폐석분에 경우 SiO<sub>2</sub>성분이 다량 포함되어 있어 고화제로 사용되는 시멘트와 혼합시 수화반응 및 Pozzolan반응에 기여할 것으로 판단된다. 공시체의 압축강도의 경우, 비산재에 시멘트와 폐석분 혼합 첨가시에 각 첨가비율에 따른 모든 압축강도가 10 kgf/cm<sup>2</sup>을 초과하고 있었으며, 시멘트 단독으로 첨가할 때 보다 시멘트와 폐석분을 혼합하여 첨가할 때 더욱 높은 압축강도를 나타냈다. 중금속 용출시험 결과, 폐석분을 혼합 14일 양생 시, 시멘트 150 kg/m<sup>3</sup>에 폐석분 80~100 kg/m<sup>3</sup>을 주입하는 것으로 국내의 폐기물 관리기준 Pb 3 mg/L를 만족하는 것으로 나타났다.

**주제어 :** 비산재, 시멘트, 폐석분, 압축강도, 중금속 용출특성

### 1. 서론

우리나라의 생활쓰레기 및 건설폐기물 등의 처리는 대부분이 소각 또는 매립에 의한 처리를 시행하고 있으며 고농도의 중금속을 함유한 소각재의 경우 위탁처리 또는 전량 매립에 의한 처리를 수행하고 있다.<sup>1~3)</sup> 매립의 경우 제한된 매립장 부지의 확보 곤란으로 소각처리로의 비율이 확대되고 있으며, 환경부 고시 지정폐기물발생량 중 2001년 소각에 따른 소각재의 발생량이 48,930.9 ton/yr인 것이 2005년에는 88,909.3 ton/yr으로 발생되어 2001년에 비하여 약 82%가 증가한 것으로 나타났다.<sup>4)</sup> 소각재는 소각과정에서 발생하는 불연성 무기물질류의 잔류물로 정의할 수 있

으며 폐기물의 연소 후 소각로의 본체 바닥에 잔류하는 바닥재와 대기오염방지시설에 잔류되는 비산재로 구분된다.<sup>5,6)</sup> 바닥재의 경우에는 대부분 고농도의 중금속을 함유하고 있지 않아 처리 후 매립 및 재활용으로 관리가 이루어지고 있지만, 다량의 중금속을 함유한 비산재는 지정폐기물로 별도 관리되어 대부분 매립에 의존하고 있다.<sup>7,8)</sup> 또한, 대부분의 비산재의 경우 폐기물관리법에서 규정하고 있는 중금속농도 기준보다 높은 농도를 나타내어 지정폐기물매립장에 매립되기 전에 적정 처리가 선행되어야만 한다.

현재, 비산재의 처리 및 관리를 위해 고형화, 열융융, 약재처리, 산처리 등 많은 연구가 수행되고 있지만 그중 저렴하고 관리가 편리한 시멘트 고형화방법이 가장 많이 사용되고 있다.<sup>9~13)</sup> 비산재에 비하여 폐석분의 경우, 중금속을 함유하지 않은 무기물질로 매립장의 복토재 또는 건설현장의 성토재, 도로 보조 기층제 등으로 재활용이 가능

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: kimjihoon@knu.ac.kr

Tel: 053-950-7896

Fax: 053-950-7897

해 일부 재활용되고 있지만 그 재활용률은 일본 등의 선진국과 비교해 낮은 활용률을 나타내고 있다. 또한, 적정 처리의 지연으로 사업장내에 장기 보관되고 있는 경우가 많아 2차 환경오염 유발원으로서의 잠재성을 내포해 있기도 하다.<sup>14-16)</sup>

본 연구에서는 산업폐기물 소각장에서 발생한 비산재를 고흡화하는 단계에서 시멘트에 폐석분을 첨가해 공시체의 일축압축강도를 측정하고 XRD(X-ray Diffraction), SEM(Scanning Electron Microscope)분석 등을 통하여 성분의 성상을 분석하였으며, 비산재에 포함되어 있는 고농도의 중금속 용출특성을 총 중금속농도측정 및 KLT(Korea Leaching test)로 비교 평가함으로써 고농도의 중금속이 함유된 비산재의 고흡화시 시멘트와 주입 폐석분이 미치는 영향 및 고흡제으로써 폐석분의 사용 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

비산재는 산업폐기물 소각시 발생한 비산재를 Cyclone(원심력 집진시설)에서 밀봉 용기에 채취하였으며, 운반 후 Standard Testing Sieve 30 mesh(체의 눈 : 600 μm)를 이용하여 Sieving한 시료를 사용하였다. 각 시료의 성분이 혼합되었을 때 조밀도가 압축강도에 영향을 미칠 것으로 판단되어 각 시료의 입도를 Laser particle size analyzer(LS 1320, Beckman Coulter, USA)로 측정하였으며, 고흡제는 공업용 포틀랜드 시멘트(35F)를 사용하였고, SiO<sub>2</sub> 함량이 약 21.91%이며 분말도는 약 3.31 cm<sup>2</sup>/kg였다. 고흡화 대체용 첨가제로 사용한 폐석분은 천연석재 원석(주원료 화강암)을 사용하여 재단 및 연마하는 공정에서 발생하는 폐석분을 채취하여 분쇄기를 사용하여 Powder 성상으로 만든 후 Standard Testing Sieve 30 mesh(체의 눈 : 600 μm)를 이용하여 Sieving한 시료를 사용하였다. 시료의 결정구조 및 성분을 분석하기 위해 시멘트와 폐석분, 비산재를 10 μm 이하로 분쇄하여 Multi-Purpose X-ray Diffraction(Netherland, PANalytical)을 통하여 시료의 결정구조를 분석하였으며, 고흡화 수행 후 압축강도와 중금속 용출시험을 수행하였다. 압축강도 실험은 비산재 및 시멘트, 폐석분의 주입 비율을 선실험을 통하여 정하였으며, 본 실험에서는 비산재를 1,000 kg/m<sup>3</sup>으로 기준하고 시멘트를 폐기물관리법에 명시되어 있는 첨가량 150 kg/m<sup>3</sup>을 기준으로 ±50 kg/m<sup>3</sup>을 첨가하여 100, 150, 200 kg/m<sup>3</sup>으로 하였다. 폐석분의 첨가량은 단독첨가시 시멘트와 같은 양으로 첨가하였고 시멘트와 혼합첨가 시에는 20~100 kg/m<sup>3</sup>의 변화를 주어 영향성을 평가하였다. 고흡화를 위한 물의 첨가량은 각각의 시료에 대한 결과의 비교를 위해 전체 시료의 40%로 정하였다.

중금속용출시험은 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry(ICP-OES, Optima 2100 DV, Perkin Elmer Co. LTD.)를 이용하여 Pb, Cd, Cu, As, Cr을 분석하였으며 파쇄한 고흡화물을 대상으로 분석하였다. KLT test는 폐기물관리법에 명시되어 있는 폐기물공정시험법에 따라 시행하였으며 압축강도 측정이 마무리된 공시체를 입경

5 mm 이하가 되도록 분쇄하여 전처리를 수행한 후 ICP-OES, Optima 2100 DV(Perkin Elmer Co)를 사용하여 Pb, Cu, Cd, As, Cr의 농도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 각각의 시료에 대한 pH를 측정한 결과, 시멘트가 가장 높은 12.90을 나타냈으며, 다음으로 비산재가 pH 11.24, 폐석분이 pH 9.30으로 나타났다. 실험에 사용된 비산재의 pH가 높게 나타난 이유는 산업폐기물을 소각 연소시키는 과정에서 발생한 연소유해가스(특히, HCl)를 제거하기 위해 투입되는 소석회로 인해 강알칼리성을 나타낸 것으로 판단된다. Fig. 1에는 비산재 및 시멘트, 폐석분의 입도 분석 결과를 나타내었다. 평균입도는 시멘트가 가장 높은 22.58 μm로 나타났으며, 비산재가 22.54 μm, 폐석분이 가장 낮은 9.124 μm로 나타났다. 본 연구에서 사용한 주 고흡제인 시멘트보다 모두 낮게 나타나 3가지 시료의 혼합으로 만들어진 고흡화물의 경우 시멘트의 수화구조 내의 수밀성 충전효과를 나타낼 것으로 판단된다.

XRD분석은 각 시료에 대한 정성분석을 하는 동시에 시멘트의 일부분을 폐석분이 대체할 수 있는지에 대한 가능성을 판단하기 위해 분석하였다. 각 시료에 대한 XRD분석 결과를 Fig. 2~4에 나타내었다. 포틀랜드 시멘트의 XRD 분석결과, CaO성분이 주종을 이루는 것으로 나타났으며, 그 외의 결합성분으로는 Hatrurite, syn(Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>)와 Larnite, syn(Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), Clinochrysolite(Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>) 순으로 분석되었다. Fig. 3에 나타내었듯이 폐석분의 XRD분석 결과, NaAlSiO<sub>3</sub> 성분이 많은 것으로 보아 조장석(Albite)인 것으로 판단된다. 주요 성분은 Quartz low(SiO<sub>2</sub>)가 가장 높은 Peak를 나타내었으며 Albite low(Na(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)), Orthoclase (K(AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)), Kaolinite(Al<sub>2</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>) 순으로 함유되어 있는 것으로 나타났다. CaO는 검출되지 않았지만, 다량의 SiO 성분 함유되어 있는 것으로 나타났으며, 조장석은 화성암과 변성암의 조암광물로 오염원료로 사용되고 있어 시멘트 대체물질으로써 본 폐석분이 첨가물로 가능성이 있다고 판단된다.

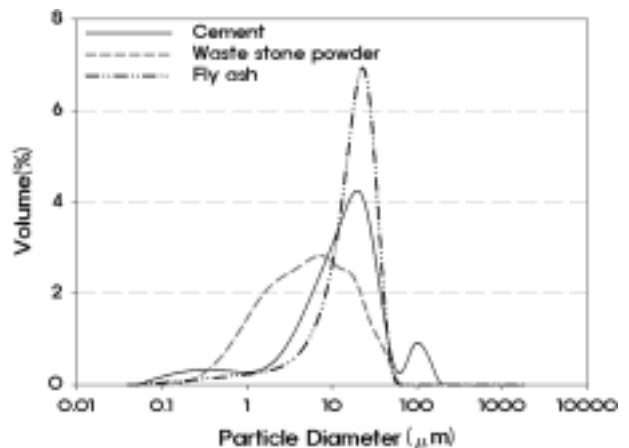


Fig. 1. Variations in particle size.

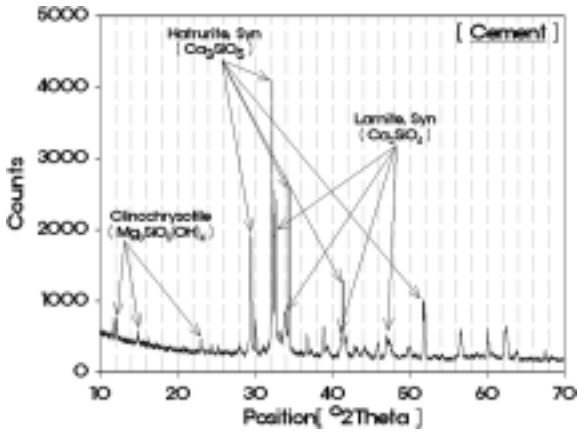


Fig. 2. XRD patterns of portland cement.

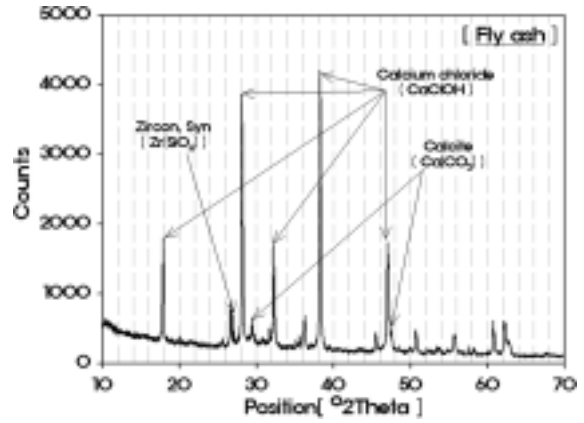


Fig. 4. XRD patterns of fly ash.

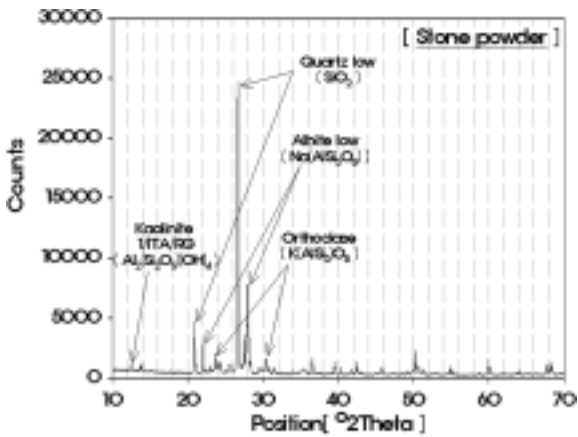
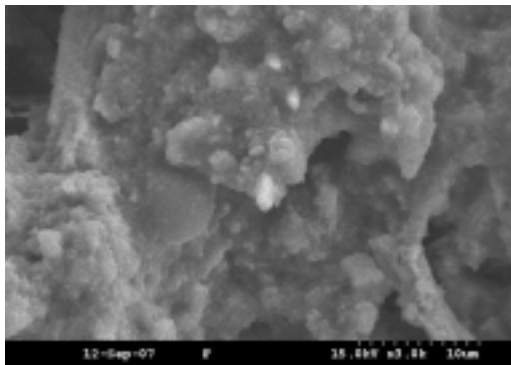


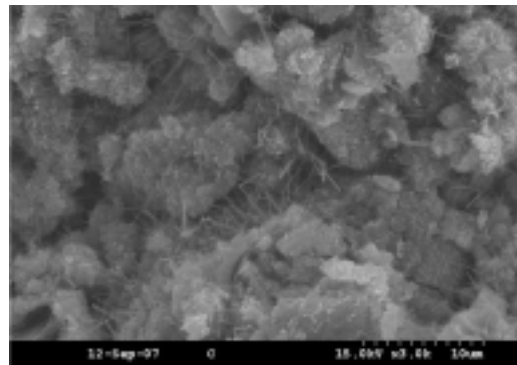
Fig. 3. XRD patterns of waste stone powder.

Fig. 4에는 고형화에 대한 효율을 알아보기 위한 시료로 소각장의 Cyclone에서 채취한 비산재의 XRD의 분석결과를 나타내었다. 실험에 사용된 비산재는 산업폐기물을 소각할 때 발생된 것으로, 분석 결과 Calcium Chloride Hydroxide( $CaClOH$ ) 화합물이 89%로 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

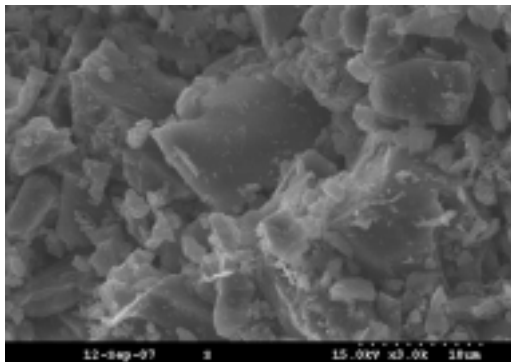
고형화에 사용되는 시멘트의 일부를 폐석분으로 대체하여 비산재에 포함된 중금속의 용출을 억제할 수 있는지를 판단하기 위해, 공시체의 일부를 SEM분석을 통해 고형화물의 결정형태를 비교 분석하였다(Fig. 5). 항목은 우리나라에서 규정하고 있는 시멘트 첨가량  $150\text{ kg/m}^3$ 을 고려하여 지정하였다. 결정형태 분석을 위한 공시체 제작은 본 연구의 실험 방법과 동일하게 수분함량 45%로 하고



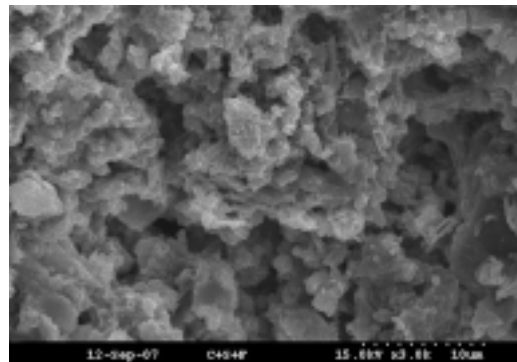
(a) Fly ash



(b) Cement



(c) Waste Stone powder



(d) F1000 : C150 : S150

Fig. 5. SEM image of fly ash, cement, waste stone powder.

약 3일간 30°C Incubator에서 고화시킨 후 SEM을 통해 3,000배율(×3 k)로 관찰하였으며 이를 통해 촬영한 시료의 결정 형태 사진은 Fig. 5에 나타나있다. Fig. 5(a)의 사진은 고품화시킨 비산재를 촬영한 것이며 고온에서 소각된 후 Cyclone을 통해 포집된 비산재이므로 특별한 결정이 없는 것으로 나타났으며, Fig. 5(b)사진은 고품화시킨 시멘트 일부분을 촬영한 것으로 수화입자간의 공극사이에 에트링가이트(Ettringite)로 보이는 침상의 결합물질들이 생성되어있는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(c)사진은 고품화시킨 폐석분을 촬영한 것으로 전체적으로 크고 결정이 확실한 모양을 나타낼 수 있다. Fig. 5(d)사진은 비산재, 시멘트, 폐석분을 1,000 : 150 : 150로 Mixing후 고품화 시킨 일부분을 촬영한 것으로, 각 시료들이 결합하여 확실한 결정 형태로 존재하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 시멘트 단독 첨가에 따른 압축강도변화의 변화를 나타낸 것으로 비산재 1,000 kg/m<sup>3</sup>에 시멘트 100, 150, 200 kg/m<sup>3</sup>을 주입한 결과, 시멘트 100 kg/m<sup>3</sup>을 첨가시 14.9, 18.1, 23.4 kgf/cm<sup>2</sup>으로 양생이 3일에서 14일로 길어질수록 수화반응이 촉진되어 압축강도는 점차적으로 증가되는 것으로 나타났다. 시멘트 150, 200 kg/m<sup>3</sup>을 주입했을 때도 이와 같은 결과를 나타냈으며, 일본의 압축강

도기준(10 kgf/cm<sup>2</sup>)과 비교하여 봤을 때 100 kg/m<sup>3</sup>만 주입 하더라도 모든 공시체가 기준값을 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 폐석분 단독 첨가에 따른 압축강도변화를 나타낸 것으로 비산재 1,000 kg/m<sup>3</sup>에 폐석분만을 100, 150, 200 kg/m<sup>3</sup>으로 주입한 결과, 시멘트 단독으로 주입했을 때 보다 압축강도가 현저하게 낮아진 것을 알 수 있었다. 3~14일로 양생일이 길어지더라도 압축강도의 수치는 큰 증가를 나타내지 않았으며, 폐석분 200 kg/m<sup>3</sup>를 주입하였을 때 가장 높은 5.4~8.1 kgf/cm<sup>2</sup>을 나타내, 모든 값들이 일본의 압축강도 기준에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이상의 결과로 비산재를 고품화시, 폐석분만을 단독으로 첨가하는 것은 무리가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 8~10에 비산재 1,000 kg/m<sup>3</sup>에 시멘트의 주입량을 100, 150, 200 kg/m<sup>3</sup>로 하여 폐석분 첨가량을 20 kg/m<sup>3</sup>에서 100 kg/m<sup>3</sup>로 4단계로 각각 주입량을 달리 하였을 경우의 압축강도 변화를 나타내었다. 시멘트를 100 kg/m<sup>3</sup>첨가 후 폐석분을 20~100 kg/m<sup>3</sup>을 첨가시 압축강도의 모든 값들이 일본의 압축강도 기준을 만족하였으며, 또한, 시멘트 150, 200 kg/m<sup>3</sup>에 폐석분을 단계적으로 증가시켜 첨가시, 시멘트 단독으로 주입했을 경우와 비교해 압축강도가 비

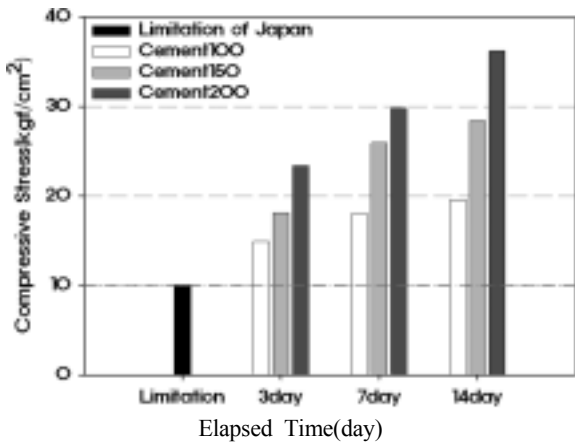


Fig. 6. Compressive strength on different compositions.

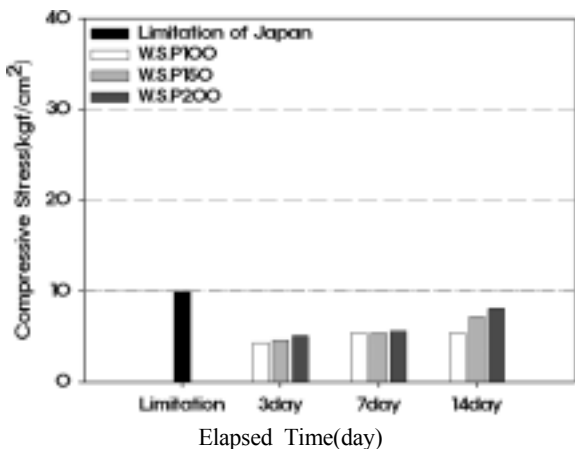


Fig. 7. Compressive strength on different compositions of waste stone powder.

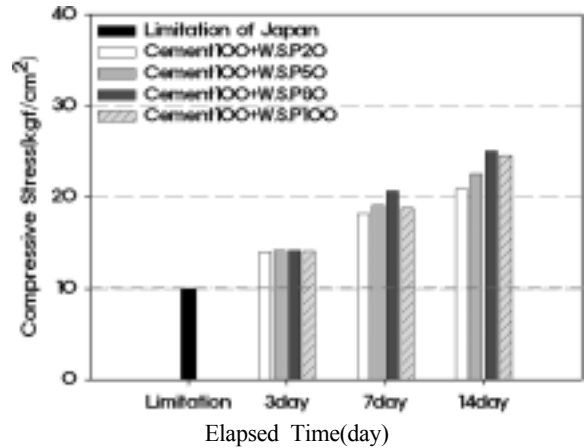


Fig. 8. Effect of waste stone powder on compressive strength at 100 kg/m<sup>3</sup> cement dose.

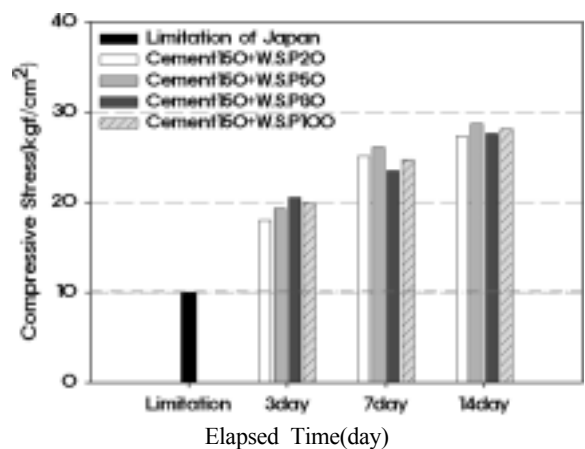


Fig. 9. Effect of waste stone powder on compressive strength at 150 kg/m<sup>3</sup> cement dose.

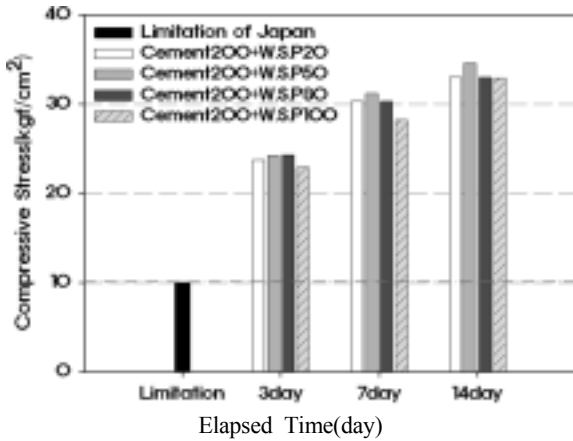


Fig. 10. Effect of waste stone powder on compressive strength at 200 kg/m<sup>3</sup> cement dose.

숫하거나 높은 강도를 나타내고 있는 것으로 나타났다. 이는 단기간의 양생시간과 폐석분 첨가량의 증가로 인한 시멘트 물성이 조금씩 변화하더라도 시멘트보다 입도 분포가 낮은 폐석분이 공시체 내부 구조의 조밀함을 가지고 온 것이라 생각되며, 또한 XRD분석에서 나타난 폐석분에 다량 포함되어 있는 SiO<sub>2</sub>에 의한 Pozzolan반응의 촉진에 의한 상호작용으로 판단된다. 재령일이 길어질수록 압축 강도는 수화 반응에 의해 조금씩 상승하겠지만 3일 압축 강도에서 일본 폐기물관리법에 명시되어 있는 10 kgf/cm<sup>2</sup>을 능가하는 것을 알 수 있었다.

Table 1에 본 실험에 사용된 Cyclone에서 채취한 비산재 내의 총 중금속함량과 각 실험 방법에 따른 시료의 중금속 함량을 나타내었다. 총 중금속함량은 Aqua regia 방법으로 측정하였으며, 그 결과, Pb의 농도가 226.30 mg/L로 가장 높게 나타났고 Cu가 18.2 mg/L, As가 5.5 mg/L, Cr이 3.4 mg/L로 각각 나타났다. 총 중금속 함량 중 가장 높게 나타난 Pb의 농도는 여러 문헌에서도 큰 문제점으로 다루어지고 있으며<sup>17-19)</sup> 본 연구에서도 Pb의 용출억제에 중점을 두고 실험하였다. 시료를 KLT방법으로 분석해 본 결과 Aqua regia방법보다 훨씬 낮은 60.92 mg/L의 Pb가 검출되었고 Cr이 0.093 mg/L로 나타났으며 그 외의 중금속은 검출되지 않았다. KLT방법으로 분석한 결과치보다 Aqua regia방법에서 훨씬 높은 농도가 나타난 것은 시료의 총 중금속함량 알아보는 실험으로 높은 산도에서 용출이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 비산재 1,000 kg/m<sup>3</sup>에 폐석분의 첨가량을 100~200 kg/m<sup>3</sup>으로 변화를 주어 첨가한 공시체의 실험방

Table 1. Concentraion of heavy metal

Item	Pb	Cu	Cd	As	Cr
Aqua regia	226.30	18.20	N.D	5.5	3.4
KLT	60.92	N.D	N.D	N.D	0.093
Standard	3.0	3.0	0.3	1.5	1.5

(N.D. : Not Detected)

법에 따라 용출특성을 평가한 결과를 나타내었다. 고형화 후 Pb를 제외한 Cu, Cd, As, Cr의 경우에는 불검출로 나타났다. Pb의 용출농도는 폐석분 150 kg/m<sup>3</sup>을 주입하여 14일간의 재령일이 지난 후에 가장 낮은 12.88 mg/L로 비산재의 시료자체 Pb 농도에 비하여 약 78.9%가 저감된 것으로 나타났다. 폐기물 관리기준 3 mg/L에는 미치지 못하는 값이지만 어느 정도의 중금속 용출억제 효과를 나타내는 것으로 생각된다. 또한 재령일 및 첨가량을 달리한 다른 값들도 67.8~78.2%의 저감효과가 나타나는 것으로 판단되며, 대체적으로 재령일이 길어질수록 또한, 폐석분의 첨가량이 많아질수록 Pb의 용출이 억제되는 것은 비산재에 포함되어 있는 CaO 성분과 폐석분에 다량 포함되어 있는 SiO<sub>2</sub>성분에 의한 미미한 Pozzolan반응의 활성화에 의한 것으로 판단된다.

비산재 1,000 kg/m<sup>3</sup>에 시멘트 100 kg/m<sup>3</sup>을 첨가한 후 폐석분을 0~100 kg/m<sup>3</sup>까지 변화를 주어 첨가한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 대체적으로 폐석분의 첨가량이 많을수록 재령일이 길어질수록 중금속용출이 억제되는 것을 볼 수 있었으며, Pb의 용출농도는 14일 재령이후 100 kg/m<sup>3</sup>의 폐석분을 첨가했을 때 3.92 mg/L로 약 93.6%의 가장 높은 감소율을 나타냈다. 시멘트 100 kg/m<sup>3</sup>을 주입하였을 경우 국내 기준 3 mg/L를 만족하는 값들이 나타나지는 않았지만, 시멘트 단독으로 100 kg/m<sup>3</sup>을 주입했을 때 보다 대체적으로 낮은 값들을 나타냄으로써 폐석분의 혼합 시 중금속의 용출억제를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 비산재 1,000 kg/m<sup>3</sup>에 시멘트 150 kg/m<sup>3</sup>을 첨가한 후 폐석분을 0~100 kg/m<sup>3</sup>까지 변화를 주어 첨가한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 대체적으로 폐석분의 첨가량이 많을수록 재령일이 길어질수록 중금속용출이 억제되는 것을 볼 수 있었지만 시멘트 100 kg/m<sup>3</sup>을 첨가했을 때와 같은 큰 폭의 감소는 나타나지 않았다. Pb의 용출농도는 14일 재령 이후, 100 kg/m<sup>3</sup>의 폐석분을 첨가했을 때 2.87 mg/L로 약 95.3%의 가장 높은 감소율을 나타냈으며, 80~100 kg/m<sup>3</sup>의 폐석분을 첨가하였을 때 국내 폐기물 관리기준 3 mg/L 만족하는 것으로 나타났다.

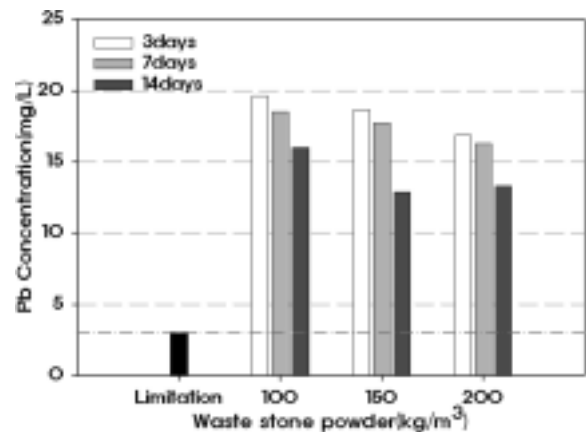


Fig. 11. Effect of waste stone powder on Pb leaching.

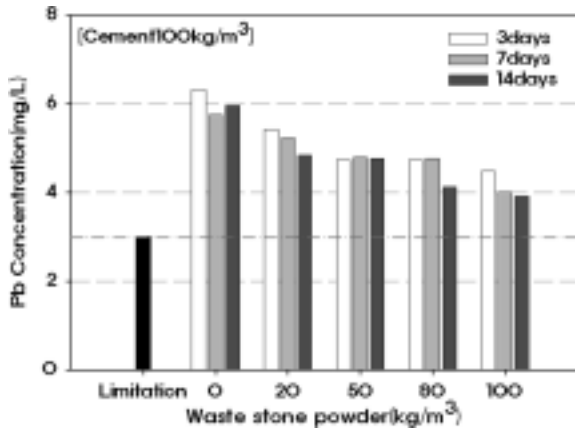


Fig. 12. Effect of waste stone powder on Pb leaching at 100 kg/m³ cement dose.

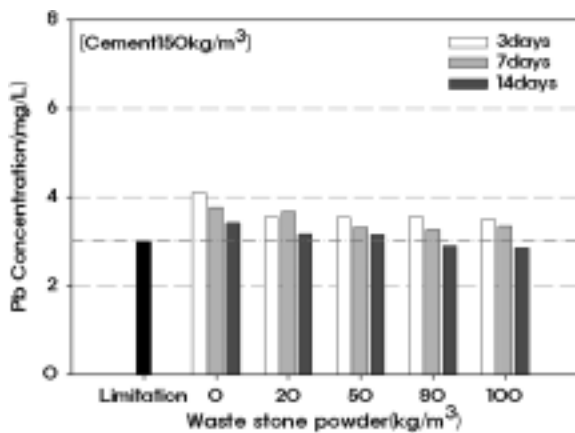


Fig. 13. Effect of waste stone powder on Pb leaching at 150 kg/m³ cement dose.

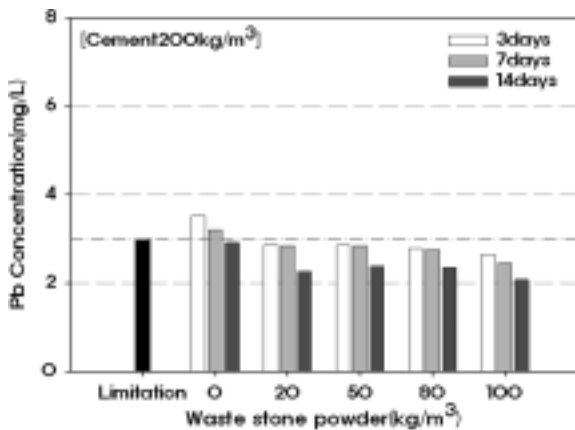


Fig. 14. Effect of waste stone powder on Pb leaching at 200 kg/m³ cement dose.

Fig. 14에 비산재 1,000 kg/m³에 시멘트 200 kg/m³을 첨가한 후 폐석분을 0~100 kg/m³까지 변화를 주어 첨가한 결과를 나타내었다. 시멘트를 단독으로 주입하였을 경우 국내 기준 3 mg/L를 만족하지 않았지만, 폐석분을 20~100 kg/m³까지 주입한 결과 모든 값들이 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 대체적으로 시멘트를 각각 100 kg/m³, 150

kg/m³을 첨가했을 때와 비슷한 양상의 Data를 얻을 수 있었으며, 증금속용출이 억제될수록 Pb의 용출의 감소율은 크게 나타나지 않았다. 이는 공시체를 파쇄하여 실험방법에 맞게 용출시험을 하는 단계에서 시멘트를 다량 주입하여 높은 물성과 조밀한 구조를 가짐에도 불구하고 입자의 표면에 붙어있는 증금속이 탈리되어 감소율이 낮아지는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 비산재의 고형화시 시멘트와 폐석분을 일정한 비율로 조절하여 첨가하고 충분한 Mixing을 통해 하나의 공시체로 만들어 압축강도와 증금속의 용출특성을 평가한 연구이다. 이 연구를 통해 폐석분이 비산재의 고형화시 고화제로 사용되는 시멘트의 일부를 대체할 수 있는 지를 평가하였다. 이에 따른 연구 결과는 아래와 같다.

1) 본 연구에 사용된 산업폐기물 소각장에서 발생된 비산재의 pH의 경우 약 11.2 정도로 높은 pH를 나타냈으며, 고화제 및 첨가제로 사용된 시멘트 및 폐석분 역시 각각 약 12.9, 9.3으로 높은 pH를 나타내는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 높은 pH의 시료 및 고화제 및 첨가제로 인해 용출시험시 시료들의 상호작용으로 대체적으로 pH 약 12 정도를 유지하면서 미미하게 증가하거나 감소하는 것으로 나타났다.

2) 각 시료의 입도가 공시체의 압축강도에 영향을 미칠 것이라 판단하여 실험에 사용된 각 시료의 입도 분석을 시행한 결과 시멘트가 가장 큰 평균 22.58 μm를 나타냈으며, 비산재가 22.54 μm, 폐석분이 9.12 μm로 가장 작게 나타났다. 이는 본 실험에 사용된 폐석분이 비산재 및 시멘트와 혼합시 구조의 조밀성 및 충전효과를 가져올 것으로 판단된다.

3) 일부 공시체에 대한 내부구조 관찰을 위해 SEM분석을 수행한 결과, 특별한 결정이 이루어지지 않은 원형구조의 비산재가 시멘트나 폐석분의 혼합시 조밀성이 향상되고 뚜렷한 결정구조를 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 각 시료의 화학성분 및 결합물을 알아보기 위하여 XRD분석을 한 결과 비산재의 경우 CaO성분이 다량 함유되어 있었으며, 폐석분에 경우 SiO₂성분이 다량 포함되어 있어 고화제로 사용되는 시멘트와 혼합시 수화반응 및 Pozzolan반응에 기여할 것으로 판단된다.

4) 시료의 혼합에 의해 만들어진 공시체의 압축강도의 경우 비산재에 폐석분 만을 첨가 시에는 3~14일간 양생을 하더라도 일본의 폐기물 관리기준 10 kgf/cm²을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 하지만 시멘트와 폐석분 혼합 첨가시에는 본 연구의 첨가비율에 따른 모든 압축강도 Data가 10 kgf/cm²을 초과하는 것으로 나타났다. 또한 시멘트만을 단독으로 첨가할 때 보다 시멘트와 폐석분을 혼합하여 첨가할 때 더욱 높은 압축강도를 발현하는 것으로

로 나타났다. 이는 폐석분의 입도분포가 낮아 수화구조 내 수밀성과 충전효과에 따른 이유 및 비산재에 다량 포함된 CaO 성분과 폐석분에 다량 함유된 SiO<sub>2</sub>성분에 의한 Pozzolan반응의 촉진으로 판단되며, 본 연구에서 압축강도에 대한 시멘트의 첨가량에 따른 폐석분의 최적주입량은 50~80 kg/m<sup>3</sup>인 것으로 나타났다.

5) 국내의 KLT 시험에 따른 용출시험 결과, 산업폐기물 소각장에서 발생한 비산재에 포함되어 있는 Pb 약 60 mg/L의 용출을 억제하기 위해서는 시멘트 200 kg/m<sup>3</sup> 보다 많은 첨가가 필요할 것으로 판단된다. 하지만 폐석분을 혼합 14일 양생시에는 시멘트 150 kg/m<sup>3</sup>에 폐석분 80~100 kg/m<sup>3</sup>을 주입하더라도 국내의 폐기물 관리기준 Pb 3 mg/L를 만족하는 것으로 나타났다. 이로 보아 폐석분의 첨가는 중금속 용출억제에 일부 기여하는 것으로 판단되며, 시멘트의 일부 대체제로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 논문은 2007년도 환경부의 환경기술인력양성지원사업으로 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 이우근, 김진범, 김은미, “비산재중에 함유된 중금속의 용출특성에 관한 연구(2),” 한국폐기물학회지, **14**(3), 257~260(1997).
- 김창은, 이승규, “시멘트를 이용한 폐기물의 고형화처리기술,” 요업재료의 과학과 기술, **9**(5), 517~528(1994).
- 신항식, 윤석표, “유해폐기물의 안정화 및 고형화 기법,” 공해대책, **20**(6), 82~88(1989).
- 환경부, “지속가능한 자원순환형 사회 확립을 위한 제2차 국가폐기물관리종합계획(2002~2011),” 1~20(2001).
- 이상호, “쓰레기 소각로에서 배출되는 비산재처리의 기술동향,” 신기술, **11**(12), 24~36(1997).
- 송오용, 정준오, “오일응집법에 의한 생활폐기물 소각 비산재 중의 탄소성분 회수,” 2004년도 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, p. 925(2004).
- 심재근, “폐기물관리법 개정안에 관한 법적 검토 ; 폐기물관리법 개정방향,” 환경법연구, **20**, 7~15(1998).
- “환경관계법규-폐기물편,” 홍문관, 13~239(2006).
- 배성우, “생활폐기물 소각장 Fly Ash의 시멘트 고형화 특성,” 한국폐기물학회지, **16**(1), 67~72(1999).
- 안남규, “산성광산배수 처리슬러지의 시멘트 고형화 특성,” 한국폐기물학회지, **21**(4), 311~318(2004).
- 이범재, “유해폐기물 시멘트 고형화 처리 특성,” 한국폐기물학회지, **18**(6), 22~30(2001).
- 정진욱, “도금슬러지 시멘트 고형화에서의 압축강도와 용출농도의 상관관계,” 한국폐기물학회지, **19**(4), 426~435(2002).
- Tashiro, H., “Hardening Properties of Cement Mortar Adding Heavy Metal Compound and Solubility of Heavy Metal from Hardened Mortar,” *Cement and Concrete Research*, **7**, 361~370(1977).
- Seaman, J. C., Arey, J. S., and Bertsch, P. M., “Immobilization of nickel and other metals in contaminated sediments by hydroxyapatite addition,” *J. Environ. Qual.*, **30**, 460~469(2001).
- Buchholz, B. A. and Landsberger, S., “Leaching dynamics studies of municipal solid waste incinerator ash,” *J. the AIR & WASTE Management Asso.*, **45**, 579~590(1995).
- Kim, C. E. and Lee S. K., “The effects of the Heavy Metal Ions on the Hydration and Microstructure of the Cement Paste,” *J. Korean Ceramic Society*, **30**(11), 967~973(1993).
- 김태영, “납슬러지의 시멘트 고화시 정제된 비산회와 물의 배합비에 따른 압축강도 및 용출 특성,” 환경관리학회지, **8**, 315~322(1999).
- 연익준, “납슬러지 고형화 및 용출 특성,” 대한위생학회지, **14**(3), 22~30(1999).
- 김영재, 서정인, 박노삼, 허해준, “매립처분장에서 소각잔사로부터 유래된 납의 용출특성과 납의 흡착제로서 복토층의 역할,” **21**(2), 225~233(1999).