ORIGINAL PAPER 원저

용융고화슬래그를 이용한 흡음재료 활용가능성 검토

김성중, 이동호, 박현서*

인천대학교 안전공학과, 삼성중공업(주) 중앙연구소*

(2000년 7월 26일 접수, 2000년 8월 9일 채택)

Investigation on the Utilization Possibility of Vitrified Slag for Sound Absorbing Material

Seong-Jung Kim, Dong-Ho Rie, Hyun-Seo Park*

Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon
Department of Safety Engineering, University of Inchon, Samsung Heavy Industry Co. Research Center*

ABSTRACT

This study was performed to prove that vitrified slag can be utilized as sound absorbing materials by investigating on heavy metal elution and the properties of sound absorbing rate according to the thickness. The heavy metal elution experiment indicated that heavy metal was not eluted since it was fixed stable in the slag. Vitrified slag generally exhibited a maximum sound absorbing rate around at 600Hz-1kHz and 3kHz in the low and high frequency range, respectively. On the other hand, the absorbing rate increased beyond the range of 7kHz again. The sound absorbing rate varied a little according to the thickness of the material. However, Vitrified slag is likely to the effective as a sound absorbing wall material since it has a sound absorbing rate of over 80% in the low and high frequency region when used as a wall.

The results obtained in this study showed that vitrified slag has the recyclable material properties and therefore, highly applicable to sound absorbing materials.

Key Words : Ash, Sound absorbing material, Vitrified slag

초 록

본 연구는 용융고화 슬래그에 대한 중금속 용출실험 및 두께별 흡음율 특성에 따른 흡음재료로서의 활용가능성을 제시하기 위하여 수행되었다. 용융고화 슬래그를 대상으로 한 중금속 용출실험 결과, 중금속이 슬래그내로 안정화되어 용출되지 않았다. 용융고화 슬래그의 저주파 영역에서의 흡음특성은 공통적으로 600 Hz~1 kHz 부근에서 최대 흡음을 나타냈고, 고주파 영역에서는 3 kHz 부근에서 최대 흡음을 나타냈다. 고주파 영역에서는 7 kHz 주파수 영역을 넘는 범위에서는 흡음율이 다시 증대하는 특징을 나타냈다. 용융고화 슬래그를 방음벽의 재료로 사용할 경우 저주파 및 고주파 영역내의 흡음율이 80% 이상의 흡음효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났는데, 이는 흡음율 시험에 사용되는 시편의 두께에 의한 흡음특성을 고려한다면 다소 차이가 있을 수 있으나, 흡음재료로의 재활용에 가능한 물성값을 보유한 것으로 본 연구결과 흡음자재로 활용가능성이 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 소각재, 흡음재료, 용융슬래그

1. 서 론

폐기물 소각시 발생되는 각종 유해가스는 후처리 설비에 의해 배출허용기준치 이하로 처리된 후 대기 중으로 방출되도록 환경 규제되고 있다. 그러나 포집된 비산재(fly ash) 및 바닥재(bottom ash) 내에는 미연소된 상태로 배출된 유해성 유기물질(다이옥신, 퓨란류 등)과 중금속 성분이 함유되어 있어 이들 소각재를 안정화나 무해화 처리 없이 단순 매립할 경우 강우에 의해 소각재 내의 유해성분이 침출됨에 따라 토양이나 지하수 등에 2차 환경 오염을 일으키게 된다[1-3]. 따라서 폐기물의 소각공정에서 발생하는 소각재에 의한 환경 및 인체상의 악영향을 최소화하고 앞으로 보다 엄격해지는 환경규제에 적절하게 대처하기 위해서는 소각재의 안정적인 처분에 관한 연구가 반드시 선행되어져야 한다.

소각재의 안정화 방법에는 일반적으로 고형화법 및 약품처리에 의한 안정화법으로 크게 구분할 수 있으나 이중 고형화법이 유해성분의 안정화 측면에서 유리하다고 보고되고 있다[4]. 고형화법은 고형 온도에 따라 저온 고형화법과 고온 고형화법으로 구분되는데 이중 저온 고형화법에는 시멘트 고형화법, 아스팔트 고형화법, 석회포졸란 고형화법, 압축법 등이 있으며, 고온 고형화법에는 방사성 폐기물과 같은 유독성 폐기물을 소각 처리할 때 발생되는 소각재를 고화물질과 결합시켜 용융시키는 소결 고형화법과 연료 또는 전기를 이용하여 소각재를 용융 슬래그화하는 고온용융 고형화법이 있다[5]. 저온 고형화법으로 소각재를 처리할 경우 저온으로 조업함에 따라 에너지 비용이 적게 들어 경제적이긴 하지만 점토 등과 같은 고형화물질을 다량 첨가함에 따른 최종산물의 부피가 증가되고 소각잔류물 내의 중금속 및 유해성 유기물질이 완전히 분해되지 않는 문제점을 지니고 있다. 반면 고온 고형화법(Plasma Melting)은 1,000℃ 이상의 고온에서 소각잔류물을 고형화하기 때문에 경제적인 측면에서 운전비가 다소 높지만 최종산물의 부피가 감소한다는 측면에서는 가장 효과적인 기술로 알려져 있으며 특히 고온 용융고형화법의 경우 소각잔류물 내에 함유되어 있는 소량의 유기물질을 완전히 분해시킴과 동시에 중금속 성분 및 유해성 무기물질은 용융시켜 유리화(vitrification)할 수 있어 소각잔류물의 최종 처분시 2차 환경오염문제가 거의 발생하지 않는 효과적인 처리 방법이라 판단됨에 따라 이에 대한 응용연구가 많이 이뤄지고 있다[6-8].

이와 같은 고형화방식 중 플라즈마를 이용한 용융고화 슬래그방식은 중금속과 유기성 오염 물질의 용출로 인한 제 2의 환경 오염을 방지할 수 있으며, 취급이 용이하고 감용율을 1/2~1/3 정도로 증대시키는 효과를 기대할 수 있다. 이들에 대한 재활용 연구는 거의 없으나, 다만 ash를 재활용 재료로 콘크리트에 사용하기 위한 연구는 1914년 Engineering News Record에 "An Investigation of the Pozzolanic Nature in Coal Ash"의 제목으로 발표된 후 꾸준히 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 ash를 콘크리트용 혼화재료로써 사용하면 workability의 증가, 수화열의 감소, 장기 강도의 증진, 내구성의 향상 등 콘크리트의 품질 향상에 도움이 되는 것으로 알려져 있다[9]. 이러한 효과로 인해 1948년~1953년 사이에 미국 개척국에서 건설한 중력식 댐인 Hungry Horse Dam의 건설 등에 실제로 이용하기도 하였으며[10], 국내에서는 1980년대 들어와 충주 다목적 댐 및 잠실 수중보 등의 건설에의 사용을 시발로 하여 현재는 일부 레미콘 회사가 원가 절감을 목적으로 양질의 ash를 선별하여 사용하고 있는 실정이다[11]. 국내에서도 ash의 이용에 관해서는 몇몇 연구자들에 의해 콘크리트의 혼화재로의 활용이 검토되고 있으나 그 품질이나 성능에 대한 규명은 미흡한 실정이며, 용융고화 슬래그의 활용에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 용융 고화슬래그를 이용하여 흡음재로의 재활용 방법을 제안하고 또한, 이에 대한 가능성 여부를 타진하여 응용 가치를 검토하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 대상으로 채택한 플라즈마 용융고화 슬래그는 생활폐기물 소각시설인 I소각장에서 발생되는 소각재를 S사가 운영하고 있는 플라즈마에 의한 유해폐기물 고형화 설비에서 고온 용융고화시켜 생성된 수쇄 슬래그로써 밀도가 1.4g/cm^{3}를 나타냈다. 그러나, 밀도가 2.5g/cm^3 이상의 조건으로 한정되어 있는 토목골재용으로 사용이 어려워, 압축하중이 작용하지 않는 건축자재로의 이용방법에 대하여 조사하여 본 결과

〔Table 1〕 Leaching Concentration of Heavy Metals in Slag or Ash

Sample \ Item		Cd	Cr6+	Cu	Pb	As	Hg
Leaching concentration (ppm)	Ash	0.03	0.20	9.00	3.80	0.24	0.06
	slag	N.D	N.D	0.1	0.1	N.D	N.D
Environmental Limitation(ppm)		≤0.3	≤1.5	≤3	≤3	≤1.5	≤0.005

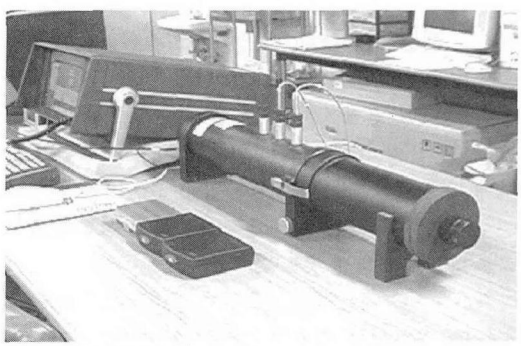
방음, 난연 · 불연 자재로의 활용성이 제시되었다. 따라서, 건축 자재용의 방음, 차음, 방화벽의 이용 방안을 목표로 음향 건축 자재의 기본 조건인 흡음율을 측정하여 재활용 가능성에 대한 자료를 얻기 위한 기초실험을 다음과 같이 실시하였다.

2.1 실험 재료

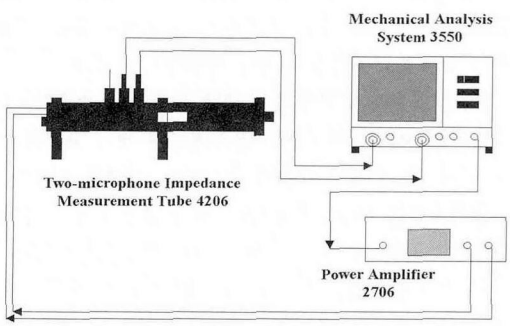
중금속 용출실험 및 흡음율 측정을 위한 시료는 생활폐기물 소각시설인 I소각장에서 발생되는 소각재와 이 소각재를 플라즈마 용융로에서 고온용융시켜 발생된 용융고화 슬래그 원형을 특별한 후처리 과정을 거치지 않고 공기중에서 건조시킨 후 샘플링하여 측정하였다. 소각 ash 처리전용 500kW급 플라즈마 설비는 용융로와 주변 배가스 설비로 구성되어 있으며, 용융로는 용융실과 2차 연소실로 나뉘어져 있고 용융실은 토치가 장착되어 있다. 용융실의 내화물은 MgO-Cr_2O_3과 chamotte 내화물로 구성되어 있고, 토치는 보호가스로 N_2를 사용하는 air토치이다. 주변설비로는 소각재 투입장치, power supply, 슬래그 배출장치, 공기 및 냉각수 공급장치와 후처리설비로 구성되어 있다. 수쇄된 용융고화 슬래그의 원형표본은 High frequency bandwidth 영역에서의 흡음율 측정(Small-tube measurement)을 위하여 직경 20 mm의 cylinder type의 틀에 각각 30 mm, 55 mm, 95 mm의 두께로 슬래그를 채운 후 슬래그가 빠져나오지 않을 정도의 메시를 갖는 얇은 망사로 양쪽을 봉하였다. Low frequency band width 영역에서의 측정 또한 직경 100 mm의 cylinder type의 틀에 고주파 영역에서의 측정 샘플과 같이 각각 두께 30 mm, 55 mm, 95 mm의 직경으로 제작하여 측정 조건을 동일하게 맞추었다.

2.2 실험 방법

흡음율 측정실험에 사용된 용융고화 슬래그에 대한 중금속 용출시험은 차음재로서 사용시 중금속에 용출 가능성을 확인하기 위하여 사용되었다. 이를 위하여 소각재 상태에서의 중금속 용출실험과 플라즈마 용융고화 후 용융고화 슬래그의 중금속 용출실험을 폐기물 공정시험법[12]에 준하여 분석하였다. 그 내용은 〔Table 1〕과 같다. 현재 해외에서 도입하고 이는 흡음율 관련 기술동향을 살펴보면 음향인텐시티(acoustic intensity)를 이용한 음향특성의 파악 기술, 마이크로폰 어레이(microphone array)를 이용한 기수, 음향홀로그래피(acoustic holography)를 이용한 음장(音場) 가시화법, 방위각 추정 방법론 등의 기술이 활용되고 있다. 본 연구에서는 Two-microphone Impedance Measurement Tube 방법을 이용하였



〔Fig. 1〕 Set-up of all large tube measurement departments



〔Fig. 2〕 Large tube measurement set-up using the Type 3550 as controller

고, [Fig. 1]는 실험에 사용된 two-microphone impedance tube 모델 Type 4206의 모습을 나타내며, [Fig. 2]은 흡음율 측정에 활용한 large measurement tube set-up에 관련된 시스템 전반에 걸친 그림을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용융고화 슬래그 용출실험

I소각장에서 발생된 바닥재와 플라즈마에 의한 용융고화 후 발생된 슬래그를 대상으로 한 용출실험 결과는 [Table 1]과 같다. [Table 1]에서 보듯이 I소각장에서 발생된 소각재에서는 대부분의 중금속이 기준치 이상 용출되는 것으로 나타났다. 따라서, 소각재 처리시에는 중금속을 안정화시킬 수 있는 처리과정을 거친 후 매립하여야 하나, 플라즈마에 의한 용융고화 후에 발생된 슬래그의 경우에는 중금속 7개 성분이 슬래그내로 안정화되어 용출되지 않아 흡음재료 등으로 재활용 또는 매립가능을 동시에 만족시키는 것으로 나타났다.

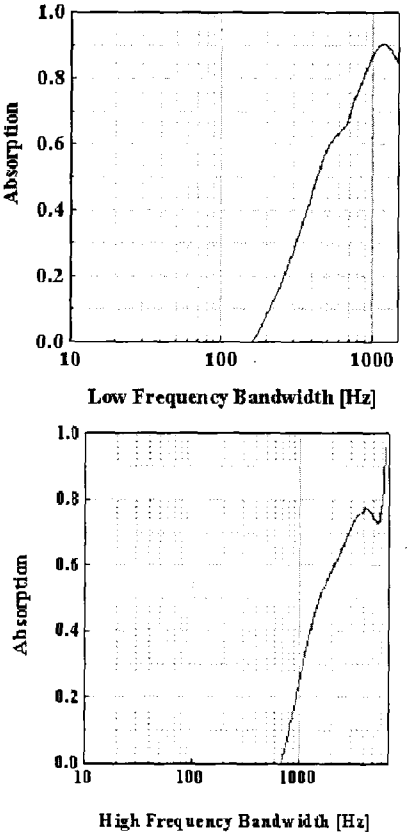
3.2. 용융고화 슬래그를 이용한 흡음율 실험

저주파 영역과 고주파 영역에서의 용융고화 슬래그 시편에 대한 흡음율의 측정 결과는 각각 [Fig. 3], [Fig. 4], [Fig. 5]에 나타나 있으며 이는 각 시편의 두께에 따른 흡음율을 의미한다. [Fig. 6], [Fig. 7]에서는 저주파 영역과 고주파 영역에서의 각 시편의 흡음율을 동시에 나타낸 것이다.

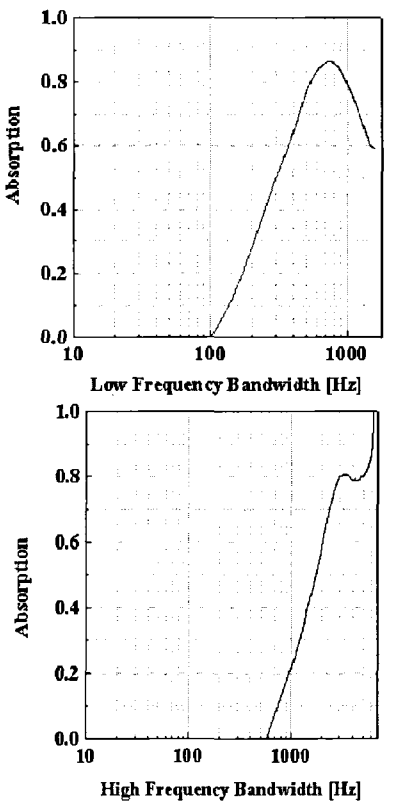
저주파 영역에서의 흡음특성은 공통적으로 600Hz ~1kHz 부근에서 최대 흡음율 80% 이상을 나타내었으며, 두께가 두꺼울수록 흡음율은 증가하는 경향을 보였다. 또한 두께가 두꺼울수록 최대 흡음율을 나타내는 주파수 대역은 낮아지는 특성을 나타냈다.

한편, 고주파 영역에서 두께별 흡음율을 측정한 결과는 저주파 영역에서와 마찬가지로 두께가 두꺼워짐에 따라 그 고유 흡음율이 증가하는 경향을 보였다. 공통적으로는 3kHz 부근에서 최대 흡음효과를 나타냈으며, 7kHz 주파수 영역을 넘는 범위에서는 흡음율이 다시 증대하는 특징을 나타냈다. 또한, 저주파영역에서의 주파수 대역과는 달리 두께가 두꺼울수록 최대 흡음율을 나타내는 주파수 대역은 높아지는 특성을 나타냈다.

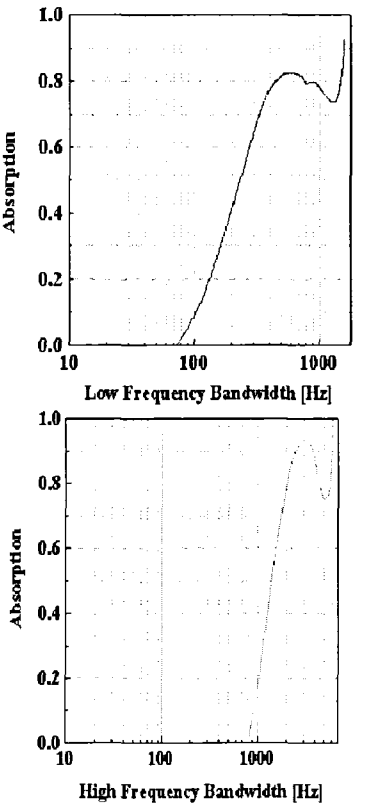
일반적으로 방음 시설의 음향 성능 및 재질 기준의 특성을 판별하기 위하여 흡음 재료로 사용되는 유리면(glass wool)의 경우 잔향실법(KS F 2805)에 의한 평균 흡음율(주파수 밴드별 평균)은 50.75%인 반면 용융고화 슬래그는 수쇄시 입자상으로 slag가 얻어지는 특성에 따라 흡음 재료로 대체한 결과 저주파 영역에서 최대 80% 이상에 해당하는 흡음율을 보여 주었다. 이는 흡음율 시험에 사용되는 시편의 두께에 의한 흡음 특성을 고려한다면 다소 차이가 있을 수 있으나 흡음 재료로의 재활용에 가능한 물성 값을 보유한 것으로 미루어 판단할 수 있다. 흡음율 측정에 활용할 시편을 제작할 경우 다소 어려움이 존재하는데 이는 슬래그 자체가 점성이 소실된 상태여서 응집성이 결여되어 원통형의 시편 제작에 어려움이 발생하였다. 이러한 문제점을 해결하고 시편의 특성을 살려 고밀도 충진된 시편 제작이 이뤄진다면 보다 우수한 성능의 흡음재료로써의 이용가능성이 높다.



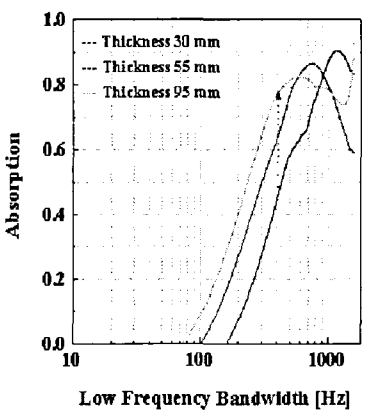
[Fig. 3] Sound absorption of vitrified slag (thickness : 30 mm)



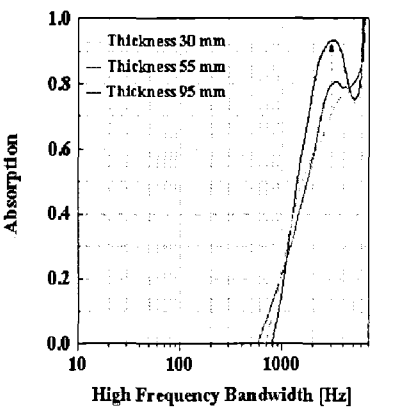
[Fig. 4] Sound absorption of vitrified slag (thickness : 55 mm)



[Fig. 5] Sound absorption of vitrified slag (thickness : 95 mm)



[Fig. 6] Changes of sound absorption with various thickness



[Fig. 7] Changes of sound absorption with various thickness

4. 결 론

생활폐기물 소각장에서 발생된 소각재와 용융고화 슬래그에 대한 중금속 용출실험 결과 및 두께별 흡음율 특성에 따른 흡음재료로서의 가능성 검토 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

1. I소각장에서 발생된 소각재와 용융고화 슬래그를 대상으로 한 중금속 용출실험 결과, 소각재에서 중금속이 기준치 이상 용출되었으며, 용융고화 슬래그에서는 중금속이 슬래그내로 안정화되어 용출되지 않았으므로 흡음재료 등으로 재활용가능성이 존재하는 것으로 나타났다.

2. 용융고화 슬래그를 방음벽의 재료로 사용할 경우 저주파 및 고주파 영역내의 흡음율이 80% 이상의 흡음효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

3. 저주파 영역에서의 흡음특성은 공통적으로 600Hz ~ 1kHz 부근에서 최대 흡음을 나타냈으며, 고주파 영역에서는 3kHz 부근에서 최대 흡음을 나타냈으며, 7kHz 주파수 영역을 넘는 범위에서는 흡음율이 다시 증대하는 특징을 나타냈다. 또한, 저주파영역에서는 시편의 두께가 두꺼울수록 최대 흡음율을 나타내는 주파 수 대역은 낮아지는 특성을 나타내는 반면 고주파 영역에서는 두께가 두꺼울수록 최대 흡음율을 나타내는 주파수 대역은 높아지는 특성을 나타냈다

4. 슬래그 점성소실에 따른 고밀도 충전 문제, 공기층 영역 확보 등 본 실험수행에서 제시되는 문제점을 해결한다면 보다 높은 흡음율을 나태내는 흡음재료로 사용될 수 있을 것으로 추정된다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 98년 환경공학기술연구개발사업에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Fraser, J. L. and K. R. Lum : "Availability of Elements of Environmental Importance in Incinerated Sludge Ash", Environ. Sci. Technol., 17, pp. 52~54(1983).
2. Chang, A. C., A. L. Page and F. T. Bingham : "Reutilization of Municipal Wastewater Sludges-Metals and Nitrate", J. WPCF, 53, PP. 237~245(1981).
3. Buchnioz, B. A. : "Trace Metal Analysis of Size-Fractioned Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash and Its Leachate", Journal Environ. Sci. Health, 28A(2). pp. 423~441(1993).
4. 小島 昭, 柳泥 琳江 : 一般廢棄物燒却フライアッシユの 燒成磁性化再利用,資源環境 對策 Vol. 30 No. 8(1994).
5. 서용칠 :"Ash 처분" ; 슬러지 및 폐기물소각기술 pp. 17-1~17-22(1995).
6. G. Schleger : Proc. of the Conf. on Incineration-The Great Debate, IBM Technical Services Limited, Manchester (1992).
7. H. Hagenmair, K. H. Tichaczek, M. Kraft, R. Haag and H. Brunner : European Patent No. 0252521(1987).
8. H. Hagenmair, K. H. Tichaczek, H. Brunner, and G. Mittelbach : "Catalytic Oxidation a Technology for the Reduction of PCDD/PCDF Emission from Waste Incineration Facilities to below 0.1 ng TEQ/m3", Dioxin 1990, Bayreuth. 10/14.09(1990).
9. G. Woolgar and D. B. Oates. "Fly Ash and Ready-Mixed Concrete Producer", Concrete International, Nov., pp. 34-40(1979).
10. 서정우. "플라이애쉬를 混和材로 사용한 콘크리트의 實用化를 위한 硏究". 한양대학교 박사학위논문(1988).
11. "精製 Fly Ash 技術세미나". 중앙대학교 부설산업 기술연구소, pp. 63-81(1994).
12. 환경부, "폐기물 공정시험방법", 동화기술, pp.582~600(1993)
13. R.J. Collins and S.K. Ciesielski. Recycling and Use of Waste Materials and Byproducts in Highway Construction, Volumes 1 & 2, 1993.
14. Imtiaz Ahmed. Use of Waste Materials in Highway Construction, Report No. FHWA/IN/JHRP-91/3, 1991.
15. Cheryl Solomon. Slag-Iron and Steel, Annual Report, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C., 1992.
16. K. Sakai, et al. "Properties of Granulated Blast-Furnace Slag Cement Concrete, "Proceedings of the Fourth International

Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey, May 1992

17. S. Nagataki, et al. "Properties of Concrete Using Newly Developed Low-Heat Cements and Experiments with Mass Concrete Model," Proceedings of the Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, Turkey, May 1992.
18. 박현서외 4인 "소각재처리 Plasma 용융시스템의 개발" 산업폐기물소재화연구센터 개원3주년 기념 심포지움 1998, pp45-63