

## 산업부산물을 이용한 친환경 연소재벽돌의 제조특성

김한석 · 정병길<sup>†</sup> · 김대용 · 강동효\* · 장성호\*\*

동아대학교 환경공학과, \*부산광역시 환경시설공단 환경연구센터, \*\*부산대학교 지역환경시스템공학과  
(2009. 5. 13. 접수/2009. 5. 30. 수정/2009. 6. 15. 채택)

## Manufacturing Characteristics of Environmental-friendly Waste Ash Brick with Industrial By-Products

Han-Seok Kim · Byung-Gil Jung<sup>†</sup> · Dae-Yong Kim · Dong-Hyo Kang\* · Seong-Ho Jang\*\*

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

\*Environmental Research Center, Busan Environmental Corporation, Busan, Korea

\*\*Department of Regional Environmental System Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

(Received May 13, 2009/Revised May 30, 2009/Accepted June 15, 2009)

### ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the effects on shape and size, compressive strength, water absorption and heavy metals leaching with various weight mixing ratios in waste ash brick products using waste recycling MSWI(Municipal Solid Waste Incinerator) bottom ash, steel slag and waste building material. The manufacturing processes for the waste ash brick consist of screening, mixing, conveyor transmission, compaction-forming, and curing steps of raw materials. The weight mixing ratios of steel slag around bottom ash were adjusted within the ranges of 10% to 30%. The reported results show that the width and thickness of the manufactured waste ash brick could be satisfied with  $90 \pm 2$  mm and  $57 \pm 2$  mm, respectively which are K.S. standards of products qualities. And in case of length, only 20-Ba50Ss30, 20-Ba60Wb20 and 20-Ba50Wb30 for the mixing ratios could be satisfied with  $190 \pm 2$  mm that is K.S. standards of products quality. The compressive strength and water absorption for 20-Ba50Ss30 and 20-Ba70Wb10 were over  $8 \text{ N/mm}^2$  and below 15% respectively that are K.S. standards of manufactured waste ash brick. The results of tests for the heavy metals leaching in the all manufactured waste ash bricks are also passed to the wastes management regulations. The cost analysis of 20-Ba50Ss30 is evaluated. The manufacturing cost is evaluated 34.3 won/brick with 8 hours and 20tons of raw material per day. Incinerators with problems in bottom ash disposal can therefore derive significant benefits from the application of waste ash brick production.

**Keywords:** waste ash brick, bottom ash, steel slag, waste building material, compressive strength, water absorption, heavy metals leaching

### I. 서 론

우리나라는 좁은 국토면적과 부존자원의 제약으로 인해 발생하는 폐기물을 매립·소각하는 등의 단순처리 방법을 지양하고 폐기물의 재이용 및 재활용을 통한 순환이용이 적극적으로 이루어져야 한다. 특히, 2006년 OECD가 발표한 「한국 환경성과평가 보고서」는 한국이 1997년 이후 폐기물관리에서 상당한 진전을 거두

었지만, 원자재 수입에 의존하고 있는 한국경제가 “순환형 경제”로 가기 위해서는 폐기물관리에 있어 경제적 효율성이 향상될 필요가 있고 폐기물의 감량, 재사용, 재활용(3R)을 위한 추가적 노력이 필요하다고 지적하고 있다.<sup>1)</sup>

이에 따라 정부는 “폐기물 재활용 촉진” 시책을 규정하는 등 그 대책을 강구해 왔으며, 특히 폐기물 중에서 생활폐기물은 종전의 매립보다 소각 및 재활용하는 방향으로 정책을 추진하여 왔다. 환경부에 따르면, 2008년 현재 가동 중인 대형 생활폐기물 소각시설은 총 44개소로 연간 555,973톤의 소각재가 발생하고 있으며, 소각재의 처리비는 150억원에 이르고 있다. 특히 소각

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Dong-A University  
Tel: 82-51-200-5575, Fax: 82-51-200-7683  
E-mail: j6907@hanmail.net

재 가운데 84%를 차지하고 있는 바닥재는 중금속 용출량 등 유해성이 낮아 재활용 가능한데도 불구하고 산업장 일반폐기물로 분류돼 약 90%가 매립되고 있는 실정이다. 단순 매립처분되고 있는 소각재를 자원화하려는 정부정책과 국외의 폐기물 처리정책 추세를 볼 때 국내에서도 소각재를 자원으로 재활용하는 방안에 대한 타당성을 검토할 필요가 있다.

바닥재의 재활용 비율은 국가별로 크게 차이가 나타나고 있으며, 이 중 덴마크가 재활용율이 98% 정도로 가장 높고, 다음으로 체코 89%, 프랑스 72%, 네덜란드 67%, 독일 65%, 노르웨이 52%, 이탈리아 17%, 한국 12.7%, 스웨덴 10% 정도이다. 국외의 생활폐기물 소각시설 바닥재를 활용한 재활용 제품형태는 건설재료(construction material), 매립지 건설재료(landfill construction), 시멘트 산업원료, 제방독원료(embankments) 등으로 사용되고 있다.<sup>2)</sup> 이러한 국내·외의 연구동향 및 산업화 현황을 바탕으로 한 도시폐기물 소각장에서 발생하는 소각재의 재활용기술에 관한 연구동향을 검토해 보면 일반적으로 소각재 재활용기술은 다음의 네 단계로 구분할 수 있다. 먼저 첫 번째 단계는 소각재의 안전처리 관점에서 소각재 내 중금속, 유기화학물질 등 유해물질이 환경중으로 용출되지 않도록 안정화하는 단순한 고형화 처리수준이다. 두 번째 단계는 단순한 소각재의 고형화 처리로서 최종처분과 함께 소각재를 자원으로 재활용이라는 관점에서 소각재의 안전성이 증명된 경우 매립지 복토재, 도로포장재 및 시멘트 등의 점토, 모래 등 일차 원료로서 재활용하는 방안이다. 세 번째 단계는 보다 적극적인 재활용방안으로서 토목, 건축, 조경 등의 분야의 골재 또는 자재로서 재활용하는 방안이다. 그리고 마지막으로 보다 부가가치가 높은 재활용 방안으로서 소각재의 1, 2차 가공을 통한 인조석 및 대리석, 세라믹 제품, 경량골재, 단열재나 흡음재 등 건축자재로 재활용하는 것이다.<sup>3)</sup>

이 등<sup>4)</sup>은 하수슬러지 소각재를 이용한 매립장 차수재, 복토재 및 점토벽돌 등 건설재료로서의 재활용 가능성을 확인한 바 있으며, 송<sup>5)</sup>은 다양한 유해폐기물(바닥재, 비산재, 석탄회, 합금철분진)을 혼합하여 제작된 재생벽돌의 압축강도, 흡수율, 중금속 용출시험결과 기준치를 모두 만족한다고 보고하였다. 박과 이<sup>6)</sup> 및 정 등<sup>7)</sup>은 소각장 바닥재 및 비산재의 중금속 용출저감을 위해 시멘트를 이용한 고형화/안정화 연구결과를 보고한 바 있다.

Krammart와 Tangtermsirikul<sup>8)</sup>은 생활폐기물 바닥재를 소성시킨 후 체가름한 10%까지 시멘트 대체재로서의

가능성을 확인하였으며, 또한 Shih 등<sup>9)</sup>도 생활폐기물 소각재를 소성 및 체가름 처리과정을 거쳐 시멘트 대체재로서 활용가능성을 제시하였다. Polettni 등<sup>10)</sup>은 포졸란 혼화재로서 바닥재 중 Ca 성분이 압축강도에 개선효과를 보여준다고 보고하였으며, 또한 Bertolini 등<sup>11)</sup>은 건조 및 습윤분말 처리한 바닥재가 물과 알루미늄 금속의 반응으로 수소가스를 제거시킴으로써 콘크리트의 팽창을 억제시킬 수 있다고 보고하였다.

지정부산물(지정폐기물 또는 산업부산물)인 철강슬래그는 발생량의 대부분을 현재 재활용하고 있으며, 철강슬래그 중 고로슬래그는 포스코(포항, 광양)에서만 발생되며, 2010년 이후부터는 현대제철에서도 발생이 예상되고 있다. 철강부산물은 비교적 유용한 물질을 많이 함유하고 있어 우수한 품질의 자원으로써 활용도가 크기 때문에 환경, 자원보전의 관점에서 기술개발 방향을 명확히 설정하여 구체적인 리사이클링 기술 확립이 필요하다.<sup>6)</sup> 철강슬래그는 주로 시멘트원료(36.8%), 도로용골재(25.3%), 성토용골재(18.3%)로 재활용용도가 단순하며, 철강슬래그의 발생량을 원천적으로 줄이거나 재활용을 촉진하기 위한 공정개선, 재활용기술의 개발 등의 적극적인 노력이 필요하다.<sup>1)</sup> 건설현장에서 발생하는 건설폐기물(2001~2005년)의 경우 매일 14만 8천톤 정도가 발생되고 있으며, 이를 분리선별하여 순환골재 등 재활용(89.1%)하고, 이후 기타 잔재물 및 부산물은 매립(9.2%), 소각(1.7%) 및 기타 수요업체(0.02%)로 보내져 처리되고 있다.<sup>7)</sup> 건설폐기물의 재활용 기술은 현재 콘크리트나 아스팔트 콘크리트 등 다량의 폐기물이 발생하는 분야에 국한되어 있으며, 건설폐기물 가운데 종이류, 나무류, 폐합성수지류, 금속류, 유리류 등은 현재 적절한 재활용 방안이 수립되어 있지 않은 실정으로 자원순환형 사회의 구현을 위해서는 이러한 폐기물에 대한 재활용 기술의 개발과 함께, 현재 부분적으로 재활용되고 있는 폐콘크리트, 페아스팔트 콘크리트 등에 있어서도 보다 실질적인 재활용을 위한 기술의 개발이 절실하다.<sup>8)</sup>

연소재벽돌은 연소재(연탄재, 석탄재 등)와 각종의 재활용 폐자재를 주요로 하고 경화제를 혼합하여 진동·압축 성형하고 상온 양생 또는 수증기 양생으로 제조한 재활용 벽돌로서 건축용 내장 벽돌에 사용하는 것에 대하여 규정하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 도시생활쓰레기 소각장 바닥재, 철강슬래그 및 폐건축자재를 이용하여 제조된 연소재벽돌의 모양, 치수 및 허용오차, 압축강도, 흡수율, 중금속 용출특성 및 경제성을 평가하여 폐기물의 친환경적인 재활용 방안을 모색하는데 그 목적이 있다.

## II. 연구방법

### 1. 실험재료

본 실험에 사용된 바닥재(Bottom ash; Ba)는 B시 소재 D소각장에서 발생하는 바닥재를 사용하였으며, 채취된 시료는 105~110°C에서 24시간 건조시킨 후 8 mm 체를 통과한 바닥재를 연소재벽돌 제조에 사용하였다. 입자크기를 8 mm 이하로 하는 이유는 소각잔재물의 입자크기가 각기 다르므로 그것을 재활용 자재로 사용하면 미세입자는 '전하의 법칙'에 의해 혼합시 덩어리(영킴현상)가 발생하거나, 또한 입경 8 mm 이상의 크기는 생산된 벽돌제품의 표면의 균일성을 저하시키기 때문이다. 따라서, 소각잔재물에는 완전연소된 미세 입자상태의 무기물을 포함하여 고철, 미소각물(미연 유기물), 수분, 각종 무기물 등이 포함되어 있으므로, 특히 이중에서 고철과 미소각물은 철저한 다단 선별공정을 통하여 제거하였다. 원료생산과정에서 바닥재를 공

기에 노출시키면 수화작용과 탄산염화작용에 의해서 수산화물과 탄산염을 생성시키고 여기에서 탄산염화반응으로 인하여 알칼리도가 감소하게 되며, 그 결과 중금속류의 용해도가 낮아지게 된다.<sup>9)</sup> 산업부산물 중 바닥재의 화학조성 및 원소성분을 각각 XRD(X-ray Diffractometer; model Xport-MRD, KITS Co., Korea)와 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer; model XRF-1700, Shimadzu Co., Japan)로 분석하여 Table 1에 제시하였다. 바닥재의 화학조성 분석결과 CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cl, SiO<sub>2</sub>가 대부분을 차지하는 것을 알 수 있었다.

철강슬래그(Steel slag; Ss)는 U시 소재 L사에서 사용로 공법 중 발생된 슬래그(입경 8 mm 이하)를 사용하였으며, 제련과정에서 발생하는 슬래그는 알갱이 형태로 발생되는데, 이는 99.99%의 Cu를 제조하기 위한 과정에서 발생하는 부산물로서 주된 성분은 Fe이다. 폐건축자재의 경우 B시 소재 J사의 벽돌제조에 사용되는 입경 8 mm 이하의 것을 사용하였다. 시멘트의 경우 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement; OPC)를 경화제로 사용하였다.

실험재료별 중금속 성분을 폐기물용출시험방법<sup>16)</sup>에 의하여 분석한 후 Table 2에 나타내었다.

### 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 생활쓰레기 소각장에서 다량 발생되고 있는 바닥재를 중심으로 철강슬래그 및 폐건축자재를 0~30%의 범위 내에서 단계별로 적용하여 연소재벽돌을 제조하였으며, 구체적인 원료의 배합비율을 Table 3에 나타내었다. 연소재벽돌 제조시 가해 주어야 할 물은 시멘트가 경화에 필요한 최소 수분량 외에도 균일한 혼합과 성형작업을 위한 흐름성을 고려하여 수분을 첨가하였으며, 이에 본 연구에서는 W/C(물-시멘트비)를 20%로 하였다. 고상폐기물인 바닥재와 철강슬래그의 합리적인 배합비율을 도출하기 위하여 기존 Galeota,<sup>17)</sup> Ranganath<sup>18)</sup> 및 이 등<sup>19)</sup>의 연구결과를 중심으로 연소재벽돌 기준인 KS L 8520<sup>20)</sup>에 준하여 결정하였다.

바닥재, 철강슬래그 및 폐건축자재를 이용한 연소재벽돌의 제작은 B시 소재 J사의 벽돌생산공정 (바닥재

Table 1. Characteristics of bottom ash

Chemical composition (%)		Elements (%)	
CaO	58.56	Ca	65.18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.01	Al	11.57
Cl	5.28	Cl	7.40
SiO <sub>2</sub>	4.76	Si	2.98
Na <sub>2</sub> O	2.94	Na	2.69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.47	P	1.47
MgO	1.91	Mg	1.46
SO <sub>3</sub>	1.76	S	0.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.71	Fe	2.21
TiO <sub>2</sub>	1.12	Ti	1.18
K <sub>2</sub> O	0.80	K	0.98
ZnO	0.67	Zn	0.96
MnO	0.21	Mn	0.29
CuO	0.17	Cu	0.25
PbO	0.12	Pb	0.20
SrO	0.12	Sr	0.18
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	Cr	0.12
Total	100.00	Total	100.00

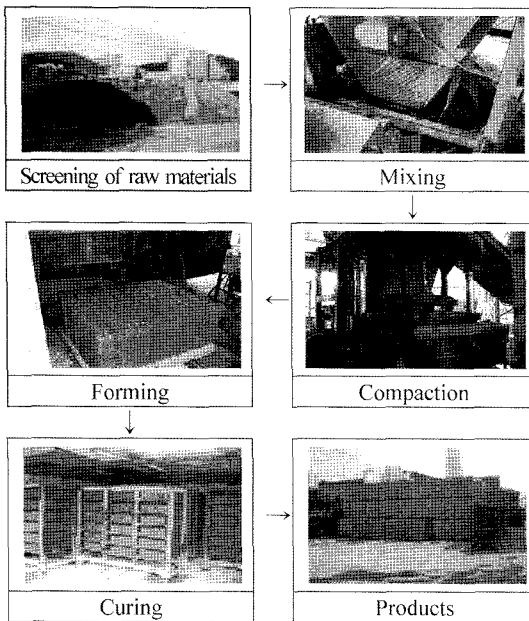
Table 2. Heavy metals concentration of raw materials

Heavy metals	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr <sup>6+</sup> (mg/l)	As (mg/l)	Hg (mg/l)
Bottom ash	0.018	2.056	0.263	0.291	0.011	0.0026
Steel slag	0.013	0.763	0.111	0.006	0.077	0.0010
Waste building material	0.031	2.607	0.184	0.419	0.023	0.0028
Leaching standards	Below 0.3	Below 3.0	Below 3.0	Below 1.5	Below 1.5	Below 0.005

**Table 3.** Weight mixing ratio of raw materials for waste ash brick production

Classifications	Weight mixing ratio (%)			W/C ratio (%)
	Bottom ash	Steel slag	Waste building material	
20-Ba80	80	0	0	20
20-Ba70Ss10	70	10	-	20
20-Ba60Ss20	60	20	-	20
20-Ba50Ss30	50	30	-	20
20-Ba70Wb10	70	-	10	20
20-Ba60Wb20	60	-	20	20
20-Ba50Wb30	50	-	30	20

Note) Ba : Bottom ash, Ss : Steel slag, Wb : Waste building material.



**Fig. 1.** Manufacturing procedure of waste ash brick.

의 수선별 및 체분리(입경 8 mm 이하) → 원료(바닥재, 철강슬래그, 폐건축자재, 보통 포틀랜드 시멘트 및 물)의 혼합 → 컨베이어 이송 → 압축 → 성형 → 양생 → 제품완성)을 통해 제조하였으며, 이를 Fig. 1에 제시하였다. 압축·성형공정에서 압축강도는 80 kg/cm<sup>2</sup>로 하였으며, 양생공정에서 양생온도는 60°C 이상, 양생시간은 1시간 정도(여름철 기준)로 하였으며, 양생 후 8시간 정도 양생실에 보관 후 적재하는 곳으로 옮겨 2일 정도 보관하여 연소재벽돌을 완성하였다. 제조된 연소재벽돌의 모양, 치수 및 허용차의 경우 정밀측정이 가능한 자료 벽돌의 크기를 측정하였다. 또한 압축강도

의 경우 UTM(Universal Testing Machine; model LIT2100A, Labtron Co., Korea)을 이용하여 흡수율과 함께 연소재벽돌 기준(KS L 8520)<sup>20)</sup>에 준하여 측정하였다. 중금속의 경우 연소재벽돌을 분쇄한 후 폐기물공정시험방법<sup>16)</sup>에 준하여 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰





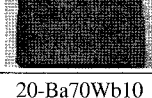

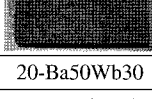
#### 1. 모양, 치수 및 허용오차

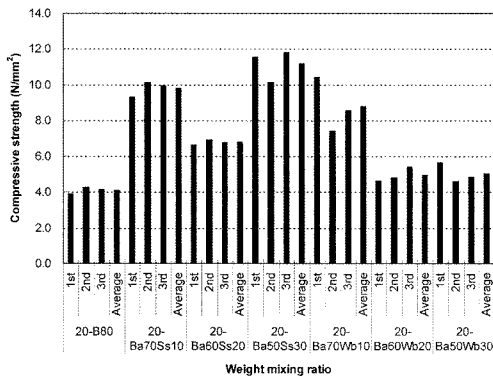
제조된 연소재벽돌의 기초특성 평가를 위해 모양, 치수 및 기건비중을 분석하여 Table 4에 나타내었다. 모양 및 치수의 경우 너비와 두께는 모두 연소재벽돌 품질기준인 90±2 mm, 57±2 mm를 각각 만족하였으며, 길이의 경우 배합비율 20-Ba50Ss30, 20-Ba60Wb20, 20-Ba50Wb30에서만 기준치인 190±2 mm를 만족하였다. 또한 기건비중 분석결과 배합비율 20-Ba50Ss30과 20-Ba50Wb10에서 각각 1.894 g/m<sup>3</sup>와 1.906 g/m<sup>3</sup>로 철강슬래그의 비율이 높아질수록, 폐건축자재의 비율이 낮아질수록 높은 값을 나타내었다. 또한 색상의 경우에도 바닥재에 철강슬래그와 폐건축자재의 배합비율이 증가할수록 검은색과 진회색을 많이 띄고 있는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 배합비율 20-Ba70Ss10의 경우 제조된 연소재벽돌에서 일부 진노란색을 띄는 현상을 나타내었는데, 이는 철강슬래그 내 함유된 철분이 제조과정에서 외부로 노출되어 발생한 것으로 판단된다.

#### 2. 압축강도 및 흡수율

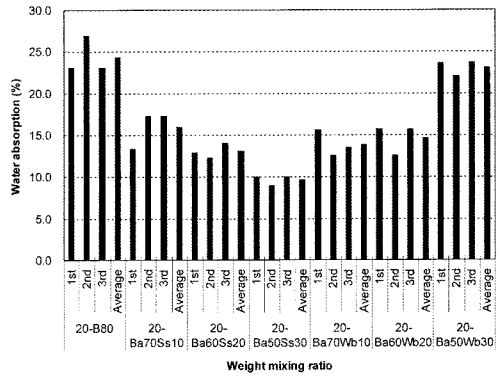
Fig. 2에 바닥재, 철강슬래그 및 폐건축자재를 이용하여 제조된 연소재벽돌의 압축강도와 흡수율의 분석결과를 나타내었다. 압축강도와 흡수율 분석결과 압축강도의 경우 배합비율 20-Ba70Ss10, 20-Ba50Ss30, 20-Ba70Wb10에서 각각 9.806 N/mm<sup>2</sup>, 11.181 N/mm<sup>2</sup>, 8.811 N/mm<sup>2</sup>로 연소재벽돌(KS L 8520) 기준<sup>12)</sup>인 8 N/mm<sup>2</sup> 이상을 만족하였으며, 또한 흡수율의 경우 배합비율 20-Ba60Ss20, 20-Ba50Ss30, 20-Ba70Wb10, 20-Ba60Wb20에서 각각 13.10%, 9.68%, 13.89%, 14.67%로 연소재벽돌(KS L 8520) 기준<sup>12)</sup>인 15% 이하를 만족하는 것으로 나타났다. 대체적으로 산업부산물 중 바닥재를 중심으로 철강슬래그의 함량이 높아질수록 폐건축자재의 함량이 낮아질수록 압축강도는 증가하고, 흡수율은 낮아지는 효과를 나타내었다. 이런 결과들을 통하여 특정 폐기물을 단독으로 사용하는 경우에 비해 여러 가지 폐기물을 복합적으로 사용함으로써 폐기물 조성에 따른 한계를 극복하고 우수한 물성과 미려한 색

**Table 4.** Summary of shape, size and dried-specific gravity of manufactured waste ash brick

Weight mixing ratio		Weight (kg)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Volume (ml)	Dried density (g/ml)
	1st	1.45	180	90	54	875	1.754
	2nd	1.50	180	90	55	891	1.843
	3rd	1.45	170	90	54	826	1.899
	Average	1.47	177	90	54	864	1.832
	1st	1.70	180	90	55	891	1.910
	2nd	1.60	180	90	54	875	1.830
	3rd	1.60	180	90	57	923	1.730
	Average	1.63	180	90	55	896	1.823
	1st	1.55	183	89	55	896	1.730
	2nd	1.48	177	89	55	866	1.708
	3rd	1.50	179	90	55	881	1.702
	Average	1.51	180	89	55	881	1.713
	1st	1.71	187	90	56	934	1.831
	2nd	1.79	190	89	55	930	1.925
	3rd	1.80	190	90	55	935	1.925
	Average	1.77	189	90	55	933	1.894
	1st	1.75	186	89	55	902	1.940
	2nd	1.74	185	89	55	906	1.921
	3rd	1.70	186	90	55	916	1.857
	Average	1.73	186	89	55	908	1.906
	1st	1.59	190	90	55	935	1.700
	2nd	1.60	189	89	55	925	1.729
	3rd	1.59	189	89	55	925	1.719
	Average	1.59	189	89	55	929	1.716
	1st	1.51	190	89	55	930	1.624
	2nd	1.54	190	89	55	930	1.656
	3rd	1.48	191	90	55	932	1.589
	Average	1.51	190	89	55	931	1.623
Standards		-	190±2	90±2	57±2	-	-



(a) Compressive strength



(b) Water absorption

**Fig. 2.** Variations of compressive strength and water absorption of manufactured waste ash brick.

**Table 5.** Leaching characteristics of heavy metals in manufactured waste ash brick

Weight mixing ratio	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr <sup>6+</sup> (mg/l)	As (mg/l)	Hg (mg/l)	CN (mg/l)
20-Ba80	N.D	0.360	0.020	N.D	N.D	0.0012	N.D
20-Ba70Ss10	N.D	0.420	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
20-Ba60Ss20	N.D	0.104	0.020	0.016	0.003	0.0223	N.D
20-Ba50Ss30	N.D	0.295	0.011	0.097	N.D	N.D	N.D
20-Ba70Wb10	N.D	0.087	0.050	0.034	0.020	N.D	N.D
20-Ba60Wb20	0.057	0.150	0.014	0.017	N.D	0.0092	N.D
20-Ba50Wb30	N.D	0.179	0.043	0.055	0.005	0.0087	N.D
Leaching standards	Below 0.3	Below 3.0	Below 3.0	Below 1.5	Below 1.5	Below 0.005	Below 1.0

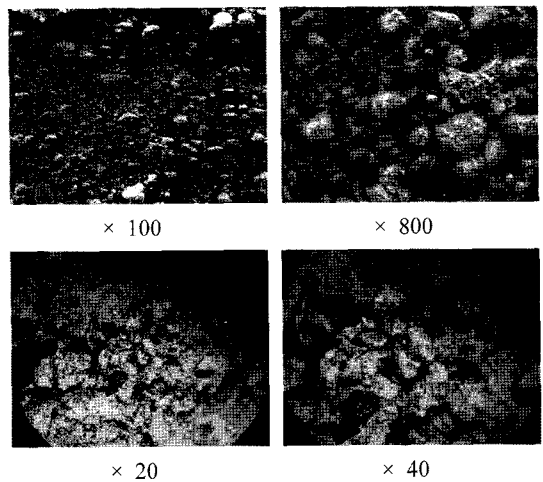
Note) N.D : Not detected.

상을 갖는 벽돌의 제조가 가능함을 알 수 있었으며, 박<sup>21)</sup>의 연구결과에서도 복합처리기술의 가장 큰 장점으로 기존에 단독처리에 따른 재활용의 한계를 극복할 수 있다고 보고하였다. Bhatt<sup>22)</sup>와 Reid<sup>22)</sup> 및 Tay와 Yip<sup>23)</sup>은 고화처리된 시료의 압축강도가 폐기물의 물리화학적 성질과 고화재의 혼합비율 및 양생일수 등에 따라 변화되며, 일반적으로 고화재 첨가량이 많을수록, 양생일수가 길수록 압축강도는 증가하며, 폐기물 첨가량이 많을수록 압축강도는 감소한다고 보고하였다. Michael<sup>24)</sup>과 William<sup>25)</sup>는 고형화에 따른 압축강도의 증가는 처리된 시료의 압축성 및 투수성을 감소시키며, 오염물의 용해도를 감소시킨다고 보고하였다. 또한, 김<sup>26)</sup>은 압축강도의 변화가 시료의 물리화학적 성질, 고화재 첨가량, 수분함량 등에 따른 변화인자와 공시체 제작시의 다짐정도에 따른 밀도변화 때문이라고 보고하였다.

**3. 중금속 용출특성**

제조된 연소재벽돌의 환경위해성을 평가하기 위하여 폐기물공정시험방법<sup>16)</sup>에 명시되어 있는 용출 실험을 통해 용출 후 중금속 농도를 분석한 결과를 Table 5에

나타내었다. 연소재벽돌의 용출시험 결과 유해물질이 기준치 이상 함유되어 있으면, 유해폐기물로 취급되어 재활용이 불가능하게 된다. 제조된 연소재벽돌의 중금속 분석결과 전 항목에서 극미량의 중금속 성분이 검



**Fig. 3.** SEM photographs of manufactured waste ash brick (20-Ba50Ss30).

**Table 5.** Leaching characteristics of heavy metals in manufactured waste ash brick

Weight mixing ratio	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cr <sup>6+</sup> (mg/l)	As (mg/l)	Hg (mg/l)	CN (mg/l)
20-Ba80	N.D	0.360	0.020	N.D	N.D	0.0012	N.D
20-Ba70Ss10	N.D	0.420	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
20-Ba60Ss20	N.D	0.104	0.020	0.016	0.003	0.0223	N.D
20-Ba50Ss30	N.D	0.295	0.011	0.097	N.D	N.D	N.D
20-Ba70Wb10	N.D	0.087	0.050	0.034	0.020	N.D	N.D
20-Ba60Wb20	0.057	0.150	0.014	0.017	N.D	0.0092	N.D
20-Ba50Wb30	N.D	0.179	0.043	0.055	0.005	0.0087	N.D
Leaching standards	Below 0.3	Below 3.0	Below 3.0	Below 1.5	Below 1.5	Below 0.005	Below 1.0

Note) N.D : Not detected.

출되었으나, 모두 폐기물 범규 허용기준치 이하로 나타나 중금속으로 인한 환경위해성은 미미할 것으로 판단된다.

#### 4. 연소재벽돌의 표면구조

Fig. 3에 제조된 연소재벽돌 중 기준치를 모두 만족하는 배합비율 20-Ba50Ss30의 SEM 사진을 촬영한 결과를 나타내었다. 제조된 연소재벽돌의 형상은 대부분 구형입자로 크기는 100  $\mu\text{m}$  미만의 범위 내에 있었으며, 색상은 밝은 회색과 노란 갈색으로 이루어진 매우 단단한 구조를 가지고 있었다.

#### 5. 경제성 평가

제조된 연소재벽돌 중 폐기물관리법 환경기준치를 모두 만족하는 배합비율 20Ba50Ss30에 대하여 「방치폐기물처리이행보증금 산출을 위한 폐기물의 종류별 처리 단가」<sup>27)</sup>와 「예정가격 작성기준」<sup>28)</sup>에 준하여 경제성(작업자 1인 1일 8시간 근무, 원료 가공률 20ton/일 기준)을 평가한 결과를 Table 6에 나타내었으며, 산정 결과 연소재벽돌의 개당 제조원가는 34.3원으로 나타났다. 이는 국토해양부의 「시·군·구별 기본형건축비

산정을 위한 주요자재별 기준단가」<sup>29)</sup>에 제시된 연소재벽돌의 개당 가격인 42원과 부산지역의 건축용 일반 시멘트벽돌<sup>30)</sup>의 개당 가격 48원에 비해 낮은 생산단가로 소각재와 철강슬래그 등 폐기물을 이용한 연소재벽돌의 현장 제조시 경제성이 충분히 있을 것으로 판단되며, 향후 색상, 형태 및 표면 가공 등의 품질향상과 기능성을 추가하여 제품의 품질을 고급화시킨다면 더욱 넓은 분야에서 사용될 수 있으리라 판단된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 폐기물의 친환경적인 재활용 방안으로 도시생활쓰레기 소각장 바닥재, 철강슬래그 및 폐건축자재를 이용하여 제조된 연소재벽돌의 모양, 치수 및 허용오차, 압축강도, 흡수율, 중금속 용출특성 및 경제성 등을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 산업부산물을 이용하여 제조된 연소재벽돌의 너비와 두께는 모두 연소재벽돌 품질기준인 90 $\pm$ 2 mm, 57 $\pm$ 2 mm를 각각 만족하였으며, 길이의 경우 배합비율 20-Ba50Ss30, 20-Ba60Wb20, 20-Ba50Wb30에서만 기

**Table 6.** Economic evaluation of manufactured waste ash brick (20-Ba50Ss30)

Items		Costs (Won)	Estimating production costs (Won)	Notes
Material cost (1)	Direct material costs (2)	316,800 (except ② and ③)	① Cement : 20 ton $\times$ 0.144 = 2.88 ton : 2.88 ton $\times$ 110,000 Won/ton = 316,800 Won	Industrial production cost  Ministry of Environment (Official No. 2008-15) <sup>27)</sup>
			② Bottom ash : 20 ton $\times$ 0.5 = 10 ton (Treatment cost : 50,000 Won/ton) : 10 ton $\times$ (-)50,000 Won/ton = (-)500,000 Won	
			③ Steel slag : 20 ton $\times$ 0.3 = 6 ton (Treatment cost : 10,000 Won/ton) : 6 ton $\times$ (-)10,000 Won/ton = (-)60,000 Won	
	Indirect material costs (3)	94,000	Raw material, tool life, equipment, packing costs and so on : 4,700 Won $\times$ 20 ton = 94,000 Won	Operating costs
Labor cost (4)	Direct labor costs (5)	66,600	Base wages : 66,600 Won/day	Operating costs
	Indirect labor costs (6)	19,980	30% of (5)	
Other costs (7)	Electric power cost, and so on	198,952	40% of (1)+(4)	Ministry of Strategy and Finance (Official No. 160-4) <sup>28)</sup>
	Overhead (8)	83,560	12% of (1)+(4)+(7)	
	Profit (9)	92,273	25% of (4)+(7)+(8)	
Total cost (10)		312,165	(1)+(4)+(7)+(8)+(9) - ((②)+(③))	
Total cost/kg raw material		15.6	312,165 Won $\div$ 20,000 kg = 15.6 Won	
Production cost		34.3	Production number of waste ash brick : 20,000 kg $\div$ 2.2 kg/brick = 9,090 bricks Production cost per unit brick : 312,165 Won $\div$ 9,090 bricks = 34.3 Won/brick	Waste ash brick (190 $\times$ 90 $\times$ 57)

준치인 190±2 mm를 만족하였다.

2. 압축강도와 흡수율의 경우 배합비율 20-Ba50Ss30 및 20-Ba70Wb10에서 연소재벽돌 기준치인 8 N/mm<sup>2</sup> 이상과 15% 이하를 각각 만족하는 것으로 나타났다.

3. 제조된 연소재벽돌의 중금속 용출시험결과 모든 연소재벽돌에서 폐기물 법규 환경기준치 이하로 나타나 중금속에 대한 환경위해성은 미미할 것으로 판단된다.

4. 연소재벽돌 기준치를 모두 만족하는 배합비율 20-Ba50Ss30에 대한 경제성(작업자 1인 1일 8시간 근무, 원료 가공률 20 ton/일 기준)을 평가한 결과 제조원가는 34.3원/개로 평가되어 생활쓰레기 바닥재와 철강슬래그의 재활용 가능성이 충분히 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 부산광역시 환경시설공단 2008년도 연구개발(R&D)사업 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Ministry of Environment : The 4th Basic Plans for Resource Recycling, 2008. 4.
2. Lim, J. W., Um, K. O., Dong, J. I. : A study on institutional and technical standards for recycling of waste incineration ash. *Proceedings of 2007 Annual Korean Solid Wastes Engineering Society Autumn*, Ewha Womans University, 224-227, 2007.
3. Yun, J. M. : Recycling of MSWI ash as construction materials. Incheon Regional Environmental Technology Development Center, 6, 2004.
4. Lee, C. K., Ahn, K. K., Heo, Y. : Use of sewage sludge ash for construction material. *Geoenvironmental Engineering*, 4(4), 25-34, 2003.
5. Song, K. S. : A study on solidification of hazardous wastes using reagent containing lignin sulfonate and it's utilization. Suwon University, Master's Degree Thesis, 52, 2003.
6. Park, H. S., Lee, B. J. : Characteristics and stabilization of municipal solid waste incineration plant ash. *Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society*, 18(1), 722-730, 2001.
7. Jung, H. T., Kim, K. H., Yoo, J. I., Choi, Y. C., Yoon, K. S., Seo, Y. C. : Physico-chemical and leaching characteristics of heavy metals by different test methods for ashes from several municipal solid waste incinerators. *Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society*, 19(4), 407-417, 2002.
8. Krammart, P., Tangtermsirikul, S. : Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste. *Construction and Building Materials*,

- 18(8), 579-853, 2004.
9. Shih, P. H., Chang, J. E., Chiang, L. C. : Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1831-1836, 2003.
10. Poletini, A., Pomi, R., Carcani, G. : The effect of Na and Ca salts on MSWI bottom activation for reuse as a pozzolanic admixture. *Resources, Conservation and Recycling*, 43, 403-418, 2004.
11. Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A. Q., Collepardi, M. : MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1899-1906, 2004.
12. Jung, C. H., Jung, J. H., Lee, J. Y., Park, K. J. : A basic study on recycling of steel slag as final cover material. *Proceedings of 2008 Annual Korean Solid Wastes Engineering Society Spring*, Suncheon University, 381-384, 2008.
13. Choi, D. S., Moon, S. H., Cho, K. H. : Study on analysis of Korea's construction wastes recycle condition through on-site research. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 24(4), 133-140, 2008.
14. Jun, M. H. : The generation and recycling of construction waste. *Geoenvironmental Engineering*, 7(3), 42-48, 2006.
15. Kim, T. Y. : Reality and vision for waste recycling industry. Resource Recycling Publisher, 2002.
16. Ministry of Environment : Waste Examination Methods, Official No. 2008-96, 2008.
17. Galeota, D., Giammatteo, M. M., Marine, R. : Structural concrete incorporation high volume of fly ash. *Proceedings Fifth International Conference Milwaukee*, Wisconsin, USA, 25-42, 1995.
18. Ranganath, R. V., Sharma, R. C., Krishnamoorthy, S. : Influence of fineness and soluble silica content of fly ashes on their strength development with respect to age. *Proceedings Fifth International Conference Milwaukee*, Wisconsin, USA, 354-366, 1995.
19. Lee, W. K., Son, S. G., Hon, S. Y., Lee, J. H., Park, E. Z., Kim, Y. D. : Evaluation of inorganic binder property by mixing ratio of MSWI bottom ash and slag. *Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society*, 25(6), 554-559, 2008.
20. Korean Standards Association : Waste Ash Brick (KS L 8520), 2007.
21. Park, M. S. : Stabilization and manufacturing method of construction material for recycling of solid wastes. Kyonggi University, Doctoral Degree Thesis, 2001.
22. Bhatt, J. I., Reid, J. K. : Compressive strength of municipal sludge ash mortars. *ACI, Materials Journal*, 86, 394-400, 1989.
23. Tay, J. H., Yip, W. K. : Sludge ash as lightweight concrete material. *Journal of Environmental Engineering*, 115(1), 56-64, 1989.
24. Michael, D. L., Phillip, L. B., Jeffrey, C. E. : Hazardous waste management. McGrawHill Inc, 641-646, 1994.
25. William, C. A. : Innovative site remediation technol-



- ogy. Vol. 4, Stabilization/Solidification, Springer, 1994.
26. Kim, I. B., Lee, H. J., An, J. S. : The effect of density variation on the recycling of construction wastes as cement brick. *Journal of Ansung National University*, **29**(2), 171-175, 1997.
  27. Ministry of Environment : Official unit-prices in the system for the proper treatment of abandoned wastes. Official No. 2008-15, 2008.
  28. Ministry of Strategy and Finance : A criterion for estimating cost. Official No. 160-4, 2007.
  29. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs : Standards of basic construction cost calculation for City-Gun-Gu areas. Official No. 2009-96, 2009.
  30. Korea Price Research Center Association Inc., The Information on Commodity Prices, 2008. 11.