

가스화기 발생 슬래크를 활용한 벽돌제조 특성

김 나랑¹⁾, 정 석우²⁾, 윤 용승³⁾

Characteristics of Brick with Slag Produced from Coal Gasifier

Narang Kim, Seokwoo Chung, Yongseung Yun

Key words : Gasifier(가스화기), Slag(슬래크), Brick(벽돌), Coal(석탄), leaching test(용출시험), Ash(회분),

Abstract : 본 연구는 3톤/일급 이하 가스화 용융로에서 1,400~1,500°C, 7.5~8.0 kg/cm²의 안정적인 운전조건일 때, 시료로 Kideco 탄을 사용하고 이때 발생한 슬래크의 특성 및 슬래크의 재활용을 위한 벽돌제조 특성을 고찰하였다. 발생된 슬래크는 Fe₂SiO₄와 SiO₂가 결정상태로 일부 존재하거나, 중금속들이 결합되어 엇킨 구조인 비결정상태의 치밀한 형태로 이루어져 있었으며, 잔존탄소 함량이 0.06%로 미량 존재하였다. 또한 슬래크에는 중금속 농도가 Kideco탄보다 고농도로 존재하지만, 용출되는 중금속의 농도는 매우 낮아 환경적으로 안정한 물질로서 재활용이 가능한 특성을 지니고 있다. 슬래크 첨가 점토벽돌의 적합성을 평가하기 위해 슬래크를 0%, 10%, 30% 첨가하여 벽돌을 제조하고 KS 산업규격에 따라 시험을 실시하였다. 분석결과 슬래크를 첨가할수록 제조한 벽돌의 흡수율이 낮아져 기존 제품에 비하여 우수한 것으로 측정되었다. 또한 압축강도와 휨강도는 기존 제품의 80~86% 정도인 것으로 측정되었지만 KS 산업규격의 기준치보다 높은 수치를 나타내었고, 내산성, 내알칼리성, 열충격강도 또한 양호한 것으로 나타나, 슬래크를 이용하여 벽돌로 재활용하여 충분히 사용 가능한 것으로 확인되었다.

subscrip

KS : Korea standards
N.D. : not detected

1. 서론

가스화용융 기술은 석탄과 같은 저급 연료, 정유공장에서 배출되는 잔사유와 같은 찌꺼기, 폐기물, 바이오매스에 이르는 다양한 시료를 대상으로 적용하여 환경오염문제를 해결하고, 동시에 이들 저급 시료를 청정한 에너지원으로 활용할 수 있도록 한다. 가스화 반응 공정을 통해 시료 내의 가연성분 중 대부분을 차지하는 탄소 및 수소 성분을 CO(일산화탄소)와 H₂(수소)가 주성분을 이루는 합성가스로 전환시키며, 이렇게 얻어진 합성가스는 정제공정을 거치고 난 후, 청정한 가스연료로 활용하여 전기 발전에 이용하거나 연료전지의 원료 가스 및 각종 화학제품 생산을 위한 원료로의 전환이 가능하므로, 최근에는 합성가스의 적용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 또한 시료 내에 포함된 불연물은 고온에서 용융시켜 슬래크 형태로 배출하는 용융과정을 거치게 되므로 저급의 다양한 시료를 환경적으로 무해하

게 처리하게 한다. 이러한 슬래크는 환경적으로 안정하고 강도가 높아 매립재, 골재, 벽돌, 타일 또는 노반재 등으로 재활용이 가능한 것으로 알려지고 있으며, 미국, 일본등의 선진국에서는 그 연구가 활발하나 아직까지 국내에서는 그 적용성에 대한 연구가 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고등기술연구원에서 개발한 3톤/일급 이하 석탄 가스화기 시스템의 운전 중 배출되는 부산물인 슬래크의 재활용을 위해 벽돌 제조에 대한 특성 평가를 진행하였다. 이를 위해 석탄 가스화기 운전 중 발생한 슬래크를 분석하여 그 특성에 대해 고찰하고 위해성 여부를 분석하여, 보도 및 차도 블록으로서의 재활용 가능성을 알아보기 위하여 점토벽돌 제조용 원료에 분쇄 슬래크를 일정량 첨가한 후 벽돌을 제조하

- 1) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : narang@iae.re.kr
Tel : (031)219-2669 Fax : (031)216-9125
- 2) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : swchung@iae.re.kr
Tel : (031)219-1946 Fax : (031)219-2306
- 3) 고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
E-mail : ysyun@iae.re.kr
Tel : (031)219-2677 Fax : (031)216-9125

여 KS 시험법에 따라 흡수율, 압축강도, 휨강도 등에 대한 시험을 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

고등기술연구원의 3톤/일급 이하 석탄 가스화기 시스템은 석탄 분쇄/건조장치, 분쇄된 미분탄을 고압의 공압수송 방식으로 공급하는 미분탄 공급장치, 고온/고압 조건에서 미분탄과 산소의 가스화반응에 의해 합성가스를 생산하는 석탄 가스화기, 고온의 합성가스를 냉각시키는 합성가스 냉각장치, 합성가스에 포함된 분진과 H₂S 가스 제거를 위한 합성가스 정제장치 등으로 구성되는데, Fig. 1에 이러한 3톤/일급 이하 석탄 가스화기 시스템의 공정 구성도를 나타내었다.

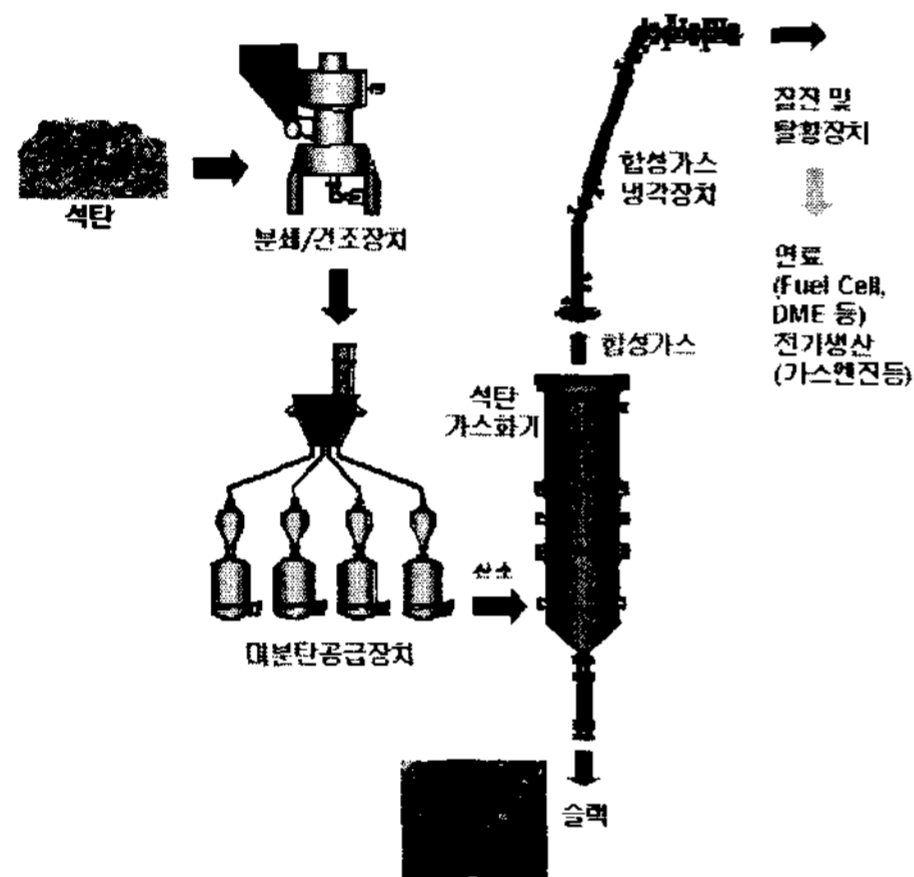


Fig. 1 Process flow diagram of 3 ton/day scale coal gasification system

가스화기는 1,400~1,500°C, 7.5~8.0 kg/cm²의 조건에서 안정적으로 운전이 진행되었으며, 대상탄으로는 아역청탄 계열의 인도네시아 Kideco탄을 이용하였다. Kideco탄은 분체이송에 문제가 없도록 5%이하로 건조시킨 미분탄을 이용하였다. Kideco탄의 주요 성분 분석결과를 Table 1.에 나타내었으며, 슬래크로 배출되는 무기물 성분인 회분이 5.22% 정도 함유된 것을 알 수 있다.

Table 1. Proximate analysis results of kideco coal

Classification	Moisture	Volatile Matter	Ash	Fixed Carbon
Contents (wt.%)	3.40	43.07	5.22	48.31

2.2 점토 벽돌 제조

석탄 가스화기에서 발생한 슬래크를 점토벽돌 제조시 첨가하기 위하여 편밀 분쇄기를 이용하여

200 mesh 80% 통과하는 크기의 조건으로 분쇄하였으며, 이렇게 분쇄된 슬래크를 백토와 흑점토를 7:3 비율로 혼합한 점토에 첨가하여 벽돌을 제조하였다. 벽돌 제조시 분쇄 슬래크는 슬래크의 첨가량에 따른 특성을 비교하기 위해 무게비로 0%, 10%, 30%를 첨가하여 혼합하였으며, 성형 후 상온에서 24시간동안 건조하였고, 1,150°C 조건에서 8시간의 소성과정을 진행하였다. Fig. 2는 이러한 점토벽돌 제조공정의 간략한 흐름도를 나타내었다.

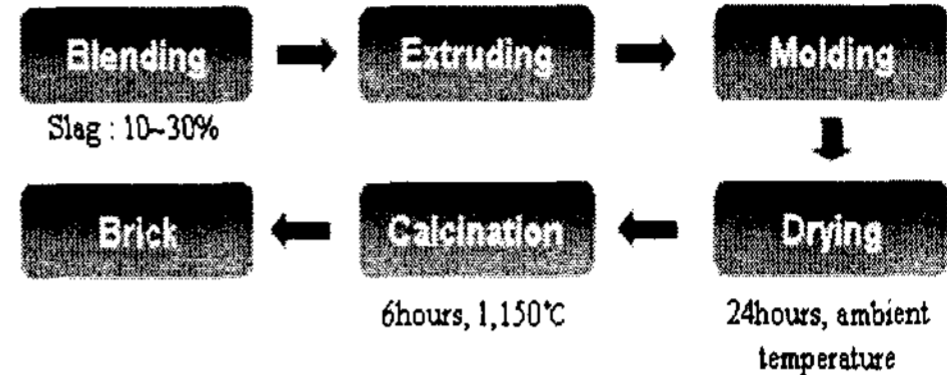


Fig. 2 Schematic diagram of general brick manufacturing process

이렇게 슬래크의 재활용을 위해서 제조된 슬래크 혼합 점토벽돌의 특성 및 적합성을 평가하기 위하여 KS 산업규격에 따라 흡수율, 압축강도, 휨강도, 내산성, 내알칼리성, 열충격강도 등에 대한 시험을 실시하였다. Fig. 3에는 석탄 가스화기 발생 슬래크 및 분쇄 슬래크, 분쇄 슬래크를 첨가하여 제조한 점토벽돌의 모습을 나타내었다.



Fig. 3 Shapes of slag, pulverized slag and slag added brick

3. 결과 및 고찰

가스화 용융 실험에 사용된 Kideco탄의 회재와 운전 후 발생한 슬래크의 화학적 성분의 분석결과를 Table 2.에 나타내었다. 이를 보면 슬래크 및 Kideco탄은 산성산화물인 SiO₂, Al₂O₃, TiO₂와 Fe₂O₃, CaO가 주성분이며, 반응에 의해 Kideco탄에 포함되었던 일부 물질은 슬래크에 존재하지 않는 것을 알 수 있었다.

Table 2. XRF results of slag and coal (unit : wt.%)

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	
Coal	49.5	19.3	1.15	12.0	8.56	
Slag	46.80	20.32	1.08	8.70	6.37	
	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃
	2.31	1.15	1.38	0.06	0.11	3.97
	1.81	0.28	1.15	N.D.	0.07	N.D.

슬래크 내의 잔존 미연탄소 함량을 알아보기 위한 분석결과를 Table 3.에 나타내었는데, 슬래크내

의 탄소의 함량이 0.06%이하로 나타나 석탄내의 탄소성분이 가스화 반응에 의해 대부분이 가스로 전환되었음을 알 수 있었다. 또한 슬래크의 재활용 측면에서 산업계에서 요구되는 잔존 미연탄소 함량 3% 이내의 수준을 충분히 만족시키는 값임을 알 수 있다.

Table 3. Ultimate analysis results of slag

Element	C	H	N	S
Contents (wt. %)	<0.06	<0.03	<0.11	N.D.

슬래크의 재활용을 통한 제품 제조 과정이나 제조 후 용출수 발생으로 인한 유해성 여부를 평가하기 위해 중금속 함량 및 중금속 용출농도를 폐기물공정시험법에 따라 분석하였으며 그 결과를 Table 4.에 나타내었다. 슬래크에는 Kideco탄에 존재하는 중금속 성분이 농축되어 다량으로 존재하고 있다. 그러나 용출액의 경우에는 중금속이 분석 한계치 이하로 측정되어 배출허용기준 이하의 농도로 존재하므로, 슬래크 내에 매우 안정한 형태로 존재하고 있어 환경적으로 무해한 것을 알 수 있다.

Table 4. Heavy Metal Contents in Kideco Coal, slag and Leaching water of slag

Element	Coal (mg/kg)	Slag (mg/kg)	Leaching Water (mg/L)	Leaching Regulation (mg/L)
Cr	19.95	12764	N.D.	1.5
Zn	10.66	6.41	N.D.	-
Cd	0.02	0.24	N.D.	0.3
Pb	2.94	2.47	N.D.	3
Mn	51.08	793.6	N.D.	-
As	0.00	0.00	N.D.	1.5
Cu	3.82	20.03	N.D.	3
Hg	0.22	0.00	N.D.	0.005
V	11.22	128.68	N.D.	-

가스화 용융 공정에서 발생된 슬래크는 단단하고 납작한 구형, 깨진모양, 길쭉한 모양등 다양한 형태로 나타나며, 이러한 슬래크의 단면을 좀더 자세히 관찰하고자 1,000배 확대한 SEM 분석 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 이를 보면 슬래크는 다양한 형태에 관계없이 매끄럽고 치밀한 모습을 관찰할 수 있다.



Fig. 4 SEM analysis results of slag (X1000)

또한 결정구조를 관찰하기 위해 슬래크의 XRD 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 슬래크는 Fe_2SiO_4

와 SiO_2 가 결정상태로 일부 존재하거나, 중금속들이 결합되어 엉킨 구조인 비결정상태로 존재하는 것을 알 수 있다.

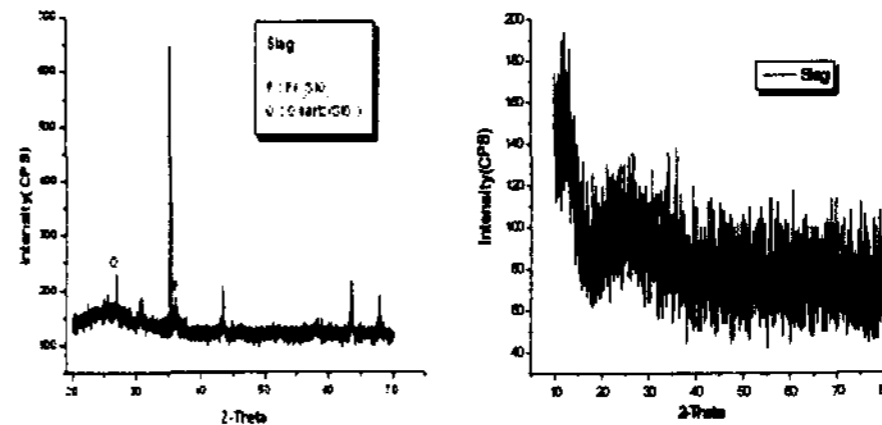


Fig. 5 XRD analysis results of slag

슬래크 첨가 점토벽돌의 적합성을 평가하기 위하여 분쇄 슬래크를 0%, 10%, 30% 첨가하여 제조한 점토벽돌에 대해 KS 산업규격에 따라 시험을 실시하고 그 분석결과를 Table 5.에 나타내었다. 흡수율의 경우 슬래크를 첨가하지 않은 일반 점토벽돌은 11.02%로 나타났으며, 슬래크를 10%, 30%로 혼합하여 제조한 벽돌은 각각 11.96%, 10.40%로 나타나 슬래크를 첨가할수록 흡수율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 벽돌의 흡수율은 낮을수록 내구성이 증가되어 장기적인 사용을 가능하게 하므로, 슬래크를 다량 첨가한 것이 흡수율 측면에서는 유리한 것으로 나타났다. 압축강도는 슬래크를 첨가한 벽돌에서 39.2 N/mm^2 으로, 슬래크가 첨가되지 않은 일반 점토벽돌 45.6 N/mm^2 의 약 86% 정도로 낮게 나타났지만, 1종 벽돌의 기준치인 20 N/mm^2 를 상회하는 것으로 확인되었다. 또한, 보차도용 블록으로서의 적용성을 평가하기 위하여 제품의 휨강도를 측정하였는데, 슬래크를 10%, 30%로 혼합한 벽돌에서 각각 6.18, 6.48 N/mm^2 으로 나타나 슬래크를 첨가할수록 휨강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 역시 일반 점토벽돌보다는 낮은 값을 나타내었으나 KS 산업규격의 기준을 만족시키는 것으로 평가되었다. 또한 슬래크를 첨가한 벽돌은 내산성, 내알칼리성, 열충격강도에 대한 시험에서도 양호한 것으로 평가되었다.

Table 5. KS test results of slag added brick for slag recycling

Test Item	Brick (0%)	Brick (10%)	Brick (30%)	1st Class Regulation
Absorption (%)	11.02	11.96	10.40	< 10
Compressive Strength (N/mm^2)	45.6	39.2	39.2	> 20
Flexural Strength (N/mm^2)	8.08	6.18	6.48	5
Acid Resistance	OK	OK	OK	-
Alkali Resistance	OK	OK	OK	-
Thermal Shock, Fracture Strength	OK	OK	OK	-

4. 결 론

석탄 가스화기에서 발생하는 슬래크의 벽돌로서의 재활용성을 평가하기 위하여, 7.5~8.0 kg/cm², 1400~1500℃의 조업조건의 3톤/일급 석탄 가스화기 시스템의 슬래크를 이용하여 기존 점토벽돌에 분쇄 슬래크를 0%, 10%, 30% 첨가하여 벽돌을 제조하고 시험/분석을 진행하였다.

석탄가스화기에서 발생한 슬래크는 치밀한 구조로 미연탄소가 미량 존재하며, 중금속은 고농도로 존재하나 용출되는 농도는 거의 없어 환경적으로 안정하여 재활용이 가능한 것으로 판단되었다. 슬래크를 첨가하여 제조된 점토벽돌을 분석한 결과 슬래크를 첨가할수록 흡수율이 낮아져 기존 제품에 비하여 우수한 것으로 측정되었다. 또한 압축강도와 휨강도는 기존 제품의 80~86% 정도인 것으로 측정되었지만 KS 산업규격의 기준치보다 높은 수치를 나타내었고, 내산성, 내알칼리성, 열충격강도 또한 양호한 것으로 나타나, 슬래크를 이용하여 벽돌로 재활용하여 충분히 사용 가능한 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단 신·재생에너지센터와 석탄 IGCC 사업단에서 지원하는 “3톤/일급 가스화시스템 구축 운전 및 국내 고유 가스화기 모델 개발” 과제의 일환으로 수행하였습니다. 지원에 감사드립니다.

References

- [1] 산업자원부, 2002, “가스화 복합시스템 연계 실증 및 모사기술 개발”
- [2] A. Acosta et al, 2002, "Utilization of IGCC slag and clay steriles in soft mud bricks (by pressing) for use in building bricks manufacturing", Waste Management.
- [3] 환경부, 2007, “유해폐기물 가스화 용융을 통한 연료가스제조 및 고도 정제 기술개발”