

煉炭滓의 未燃炭素 含量에 따른 燒成 에코벽돌 特性†

朴泓奎* · 柳承佑* · †鄭文泳**

*世明大學校 一般大學院 資源循環處理專攻, **世明大學校 바이오環境工學科

Properties of the Sintered Eco-brick according to the Unburned Carbon Content of the Coal Briquette Ash†

Hong-Kyu Park*, Seung-Woo Yoo* and †Moon-Young Jung**

*Major in Resources Processing and Recycling, Graduate school, Semyung University

**Department of Biological & Environmental Engineering, Semyung University

요 약

최근 고유가 시대로 접어들면서 연탄의 사용량이 급격하게 증가하고 있어 이때 발생하는 연탄재의 친환경적인 순화자원화 기술개발이 필요하게 되었다. 연탄재에는 가연성분인 미연탄소와 고온열적특성이 우수한 몰라이트 성분이 다량 함유되어 있어 소성 에코벽돌의 원료로 적합하다고 판단된다. 이 연구의 목적은 연탄재에 함유되어 있는 미연탄소가 소성 에코벽돌의 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하는데 있었다. 미연탄소 함량 10.5 wt%인 연탄재 50 wt%와 폐유리 50 wt%의 배합비율로 제조한 에코벽돌을 950°C로 소성한 시험체의 압축강도는 소성 점토벽돌 국내규격(KS L 4201)의 1종 규격에 해당하였다. 특히, 미연탄소 함량이 1.0 wt%인 연탄재의 배합비율을 70 wt%까지 증가시켜 제조한 소성 에코벽돌 시험체의 압축강도는 소성 점토벽돌 1종 규격에 해당하였다.

주제어 : 연탄재, 순환자원화, 소성에코벽돌, 미연탄소

Abstract

Coal briquette use has dramatically increased because of high oil prices. Hence, it is necessary to develop an environment-friendly recycling technique of the coal briquette ash. The coal briquette ash contains a large amount of an unburned carbon content and a mullite with high thermal property, so it is considered to be used as raw materials of sintered eco-brick. This study aimed to investigate on how the unburned carbon affects properties of the sintered eco-brick. The eco-brick was mixed with the ratio of 50 wt% coal briquette ash having the unburned carbon 10.5 wt% and 50 wt% cullet, then being sintered at 950°C, which of the compressive strength was in line with the first class of the sintered clay brick standard(KS L 4201). In particular, the compressive strength of the sintered eco-brick was equal to the first class of the KS L 4201 despite the increase of mixing ratio for coal briquette ash with 1.0 wt% unburned carbon to 70 wt%.

Key words : Coal briquette ash, Resource recycling, Sintered eco-brick, Unburned carbon

1. 서 론

최근 고유가 시대로 접어들면서 1980년대 이후로 지속적으로 감소되었던 연탄(coal briquettes)의 소비량이 2000년대 들어와서 급격히 증가하여 2008년도에는 약

230만톤에 이르고 있다.¹⁾ 연탄 사용량에 비례하여 연탄재(coal briquette ash) 발생량 또한 급증하고 있는 실정이다. 연탄재는 쓰레기 종량제 대상품목에서 제외되어 쓰레기 수거차량에 섞여져서 폐기되므로 생활폐기물 매립지의 수명단축을 유발시키고 있다. 이러한 연탄재를 순환자원화한다면 생활폐기물 매립지의 수명 연장은 물론이고 광물자원의 수명도 연장시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 연탄은 가연성분인 고정탄소(fixed

† 2010년 1월 14일 접수, 2010년 2월 24일 1차수정

2010년 4월 20일 2차수정, 2010년 4월 30일 수리

* E-mail: myjung@semyung.ac.kr

carbon)와 점결제인 무기성 점토광물로 구성되어 있으며, 연탄 내의 고정탄소는 대부분 연소되나 일부 불완전하게 연소되어 연탄의 연소산물인 연탄재에 미연탄소분이 존재하게 된다. 즉 연탄재는 광물질(mineral matters)과 소량의 미연탄소(unburned carbon)로 구성되어 있다.²⁾ 한편, 건축용 소성벽돌의 주원료는 점토광물이나 최근 부존자원의 고갈과 환경보호로 인해 광물자원의 개발에 어려움을 겪고 있어 선탄 폐석과 화력발전소의 부산물인 석탄회(coal fly ash)를 재활용하여 소성 점토벽돌을 개발한 사례³⁻⁶⁾가 있다. 연탄재는 선탄 폐석 및 석탄회와 유사한 화학적, 광물학적 특성을 가지고 있어 소성벽돌의 원료로 적합할 수 있다고 판단된다. 그러나 연탄재를 적정처리하지 않고 그 자체를 요업원료 및 토건용 재료로 사용할 경우에는 연탄재 내에 함유되어 있는 미연탄소가 최종 제품에 여러 문제점을 발생시킬 수 있다. 석탄의 연소 부산물인 석탄회를 콘크리트 또는 모르타르에 혼화 재료로 사용할 경우 한국산업규격(KS L 5405)에서는 미연탄소함량을 5 wt%이하로 규정하고 있다. 이러한 미연탄소분과 광물질을 선별하는 방법으로는 마찰정전선별법, 구상응집법, 부유선별법 등이 적용되고 있다. 이중에서도 부유선별법이 가장 효과적이라고 알려져 있다.⁷⁾ 따라서 본 연구진은 연탄재내 미연탄소분과 광물질을 선별하는 연구를 수행한 바 있다.⁸⁻⁹⁾

그리고 본 연구에서는 환경친화성을 고려하면서 연탄재를 대량 처리할 수 있는 순환자원화 기술 개발의 일환으로 연탄재의 미연탄소 함량이 소성 에코벽돌 특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시료

본 실험에서는 충북 제천시 도로변에서 수거한 연탄재와 한국유리공업협동조합에서 구입한 폐유리(cullet)를 Rod mill로 일정시간 분쇄한 후, 60mesh 이하의 체질 산물을 소성 에코벽돌 제조용 시료로 사용하였다. Fig. 1은 시료에 대한 Mastersizer-S(영국 Malvern사)의 입도 분석 결과를 나타낸 것이다. Table 1은 X선형광(XRF) 분석법에 의한 시료의 화학성분을 나타낸 것이다. Fig. 2는 연탄재의 X선회절(XRD)분석 결과를 나타낸 것이다. 그리고 Table 2는 Rietvelt method를 적용한 TOPAS program을 이용하여 XRD분석 자료로부터 구한 연탄재의 구성광물 함유율을 나타낸 것이다.

2.2. 실험방법

Table 3은 에코벽돌 시험체 제조를 위한 시료(연탄재와 폐유리)의 배합비율 및 소성조건을 나타낸 것이다. 그

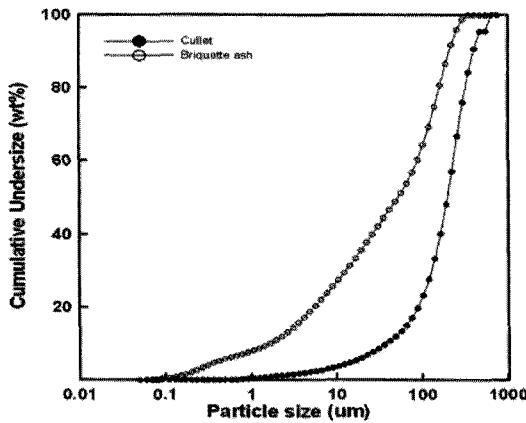


Fig. 1. Particle size distribution of raw materials for sintered eco-brick.

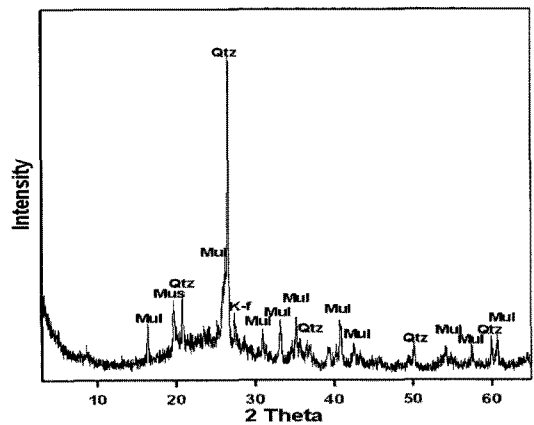


Fig. 2. XRD pattern of coal briquette ash(Mul : mulite, Qtz : quartz).

Table 1. Chemical compositions of the coal briquette ash and cullet

Chemical composition (wt%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	lg-loss
Briquette ash	52.50	30.30	4.35	1.10	0.80	0.12	3.98	6.85
Cullet	71.31	2.08	0.60	8.39	1.15	11.73	2.07	-

Table 2. Mineral quantity of the coal briquette ash

Minerals	Mullite	Quartz	Plasioclase	K-feldspar	Phlogopite	Hornblede	Hematite	Laumontite
wt%	65.7	18.4	1.6	3.0	4.8	3.1	2.6	0.9

Table 3. Production conditions of sintered eco-brick specimens

Mixing ratio(wt%)		Sintering conditions	
Briquette ash	Cullet	Sintering temp.(°C)	Holding time(min)
50	50	800 -1,000	30
60	40		
70	30		
80	20		
90	10		

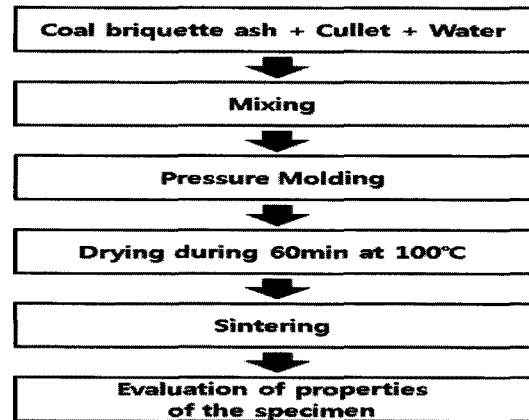


Fig. 3. Flowchart about production process of sintered eco-brick specimen.

리고 Fig. 3은 소성 에코벽돌의 시험체 제조 공정도를 나타낸 것이다. 시료의 배합비율에 따라 물을 가해 30분 동안 믹서를 사용하여 충분히 혼합한 후, 38×38×38 mm 인 몰드를 이용하여 유압식 압축기로 시험체를 성형하였다. 이때 성형압력은 2,100 kg/cm²으로 고정하였다. 한편 시험체의 건조는 100°C에서 1시간, 소성온도는 4수준(800, 900, 950 및 1000°C)으로 실시하였다. 이때 소성 승온속도는 3°C/min이었고 최고온도에서 30분간 유지하였다. 또한 연탄재 내의 미연탄소(이하, UC라 약함) 함량에 따른 소성 에코벽돌의 특성을 알아보기 위하여 연탄재 내의 UC함량을 5수준(1.0, 3.5, 5.5, 10.5 및 15.5 wt%)으로 시험체를 제조하였다. 이때 연탄재 내의 UC 함량을 조절하기 위해 기존의 연탄재 부유선별 연구⁹⁾에서 확보한 부선산물을 이용하였다. 이렇게 여러 조건에

서 제조한 소성 에코벽돌 시험체의 압축강도를 측정하였다. 또한 시험체의 부피와 건조 무게 및 포화된 습윤 무게를 측정하고 다음 식에 의거하여 흡수율(absorptance, %)과 열린 기공률(open porosity, %)도 계산하여 한국산업규격인 점토벽돌(KS L 4201)의 물성 값(흡수율과 압축강도)과 비교하였다. 그리고 DZ2 Zoom Microscope System(Union사)를 이용하여 시험체의 표면특성도 분석하였다.

$$\text{흡수율}(\%) = \left(\frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{열린 기공률}(\%) = \left(\frac{W_s - W_d}{V_b} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, W_d : 소성 에코벽돌 시험체의 건조무게 [g]
 W_s : 소성 에코벽돌 시험체의 포화 습윤무게 [g]
 V_d : 소성 에코벽돌 시험체의 부피 [cm³]

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시료 특성

점토벽돌과 같은 세라믹 소결체의 원료는 SiO₂/Al₂O₃ 비가 2.0~4.0 정도인 점토광물이 주로 이용되고 있다.⁴⁾ 연탄재의 SiO₂/Al₂O₃ 비가 약 1.7정도이므로 SiO₂가 주 성분인 페유리를 20%만 혼합하여도 SiO₂/Al₂O₃ 비가 약 2.2정도가 되므로 세라믹 소결체 원료로 활용이 가능할 것으로 판단된다(Table 1 참고). 저급점토를 이용한 다공질 세라믹스 제조¹⁰⁾ 연구에서 제시된 식 (3)을 이용하여 연탄재의 화학성분(Table 1 참고)으로부터 구한 연탄재의 내화도는 1,547°C이었다. 따라서 연탄재만으로 에코벽돌을 제조할 경우, 고온의 소성온도가 요구될 것이다.

$$\begin{aligned} \text{내화도}(\text{°C}) &= 898 + 7.11 \text{ SiO}_2 + 16.8 \text{ Al}_2\text{O}_3 \\ &\quad - 39.45(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \quad (3) \end{aligned}$$

페유리의 화학성분(Table 1)을 볼 때, 소다석회 유리(soda-lime-silica glass)에 해당한다. 일반적으로 소다석회 유리의 연화점(softening point)은 720°C 내외로 알려져 있다.¹¹⁾ 그러므로 연탄재에 페유리를 혼합하여 소성 에코벽돌을 제조하였을 경우, 소성온도를 낮출 수 있을 것이다. 연탄재의 XRD분석 결과인 Fig. 2와 Table

Table 4. Concentrations of heavy metals leached from the coal briquette ash

Heavy metals	Pb	Cu	Cd
Guideline(mg/l)	3.0	3.0	0.3
Conc. of heavy metal in leachate(mg/l)	0.20	0.01	0.07

2를 통해 연탄재의 주요 구성광물은 몰라이트(mullite) 66 wt%와 석영 18 wt%이며, 부 구성광물로는 사장석, 정장석, 금은모, 각섬석, 적철석, 로몬타이트 등이 소량 함유되어 있음을 확인하였다. 몰라이트는 고온·저압의 생성조건 때문에 천연적으로 산출되는 예는 매우 드물지만 자연 상태에서 풍부하게 존재하는 Al-Si계 점토광물을 1,250°C 이상의 고온에서 소성하면 형성되는 $Al_6Si_2O_{13}$ 인 알루미늄규산염광물이다.¹²⁻¹³⁾ 이러한 몰라이트는 고온에서도 높은 강도, 화학적 안정성 등 여러 우수한 물성을 보이기 때문에 전통 세라믹스뿐만 아니라 첨단 세라믹에서도 중요한 재료로 쓰이고 있다.¹⁴⁾ 따라서 연탄재는 고온열적특성이 우수한 가능성이 매우 높은 재료임을 시사해 주고 있다. Table 4는 연탄재의 위해성을 파악하기 위해 폐기물공정시험법에서 규정하고 있는 KSLT에 따른 중금속 용출시험 결과, Pb 0.20 mg/l, Cu 0.01 mg/l, Cd 0.07 mg/l로 폐기물용출 기준 값 이하로 나타났다. 따라서 연탄재 자체를 물질전환법에 의해 재활용하는 데는 문제가 없다고 판단되었다.

3.2. 소성 에코벽돌의 압축강도

Fig. 4는 UC함량 1.0 wt%인 연탄재와 페유리의 배합

비율을 달리하여 제조한 에코벽돌의 소성온도별 압축강도 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 소성온도가 높아질수록 시험체의 압축강도도 높아졌다. 소성온도 950°C에서는 연탄재의 배합비율이 70 wt%이하까지 그리고 소성온도 1,000°C에서는 모든 시험체의 압축강도가 소성 점토벽돌(KS L 4201)의 1종 규격인 압축강도 22.54MPa 이상이였다. 그러나 소성온도 900°C 이하에서는 모든 시험체의 압축강도가 소성 점토벽돌의 1종 규격을 만족하지 못하였다. 일반적으로 시중에 판매되는 점토벽돌의 소성온도는 1,100°C이상이고, 선탄 폐석이나 석탄회를 재활용하여 제조한 소성 점토벽돌³⁻⁶⁾의 소성온도도 1,100°C이상 이었다. 시료의 특성에서 언급하였듯이 연탄재의 화학성분을 이용하여 구한 연탄재의 내화도는 1,547°C이었다. 그리고 소다석회 유리의 용융점은 1,200~1,300°C정도로 알려져 있다.¹¹⁾ 소성온도는 소결체의 수축을 최소화하기위해 용융점의 약 75%가 정당하다고 알려져 있다.¹⁵⁾ 그러므로 본 연구에 사용된 페유리의 소결온도는 900~975°C정도로 예측할 수 있다. 따라서 연탄재 내의 주 광물질인 몰라이트와 석영보다 용융점이 매우 낮은 페유리가 먼저 용융, 소결되기 때문에 950°C 이상에서 소성된 시험체의 압축강도는 소성 점토벽돌(KS L 4201)의 1종 규격인 압축강도 22.54MPa 이상을 충족하는 것이다. 한편 연탄재의 배합비율이 증가할수록 소성 에코벽돌의 압축강도는 감소하였다. 그리고 연탄재의 50 wt% 배합비율에서 소성온도 900°C 시험체는 소성 점토벽돌 3종규격인 10.78MPa 이상의 값을 확보 할 수 있었다. Fig. 5는 연

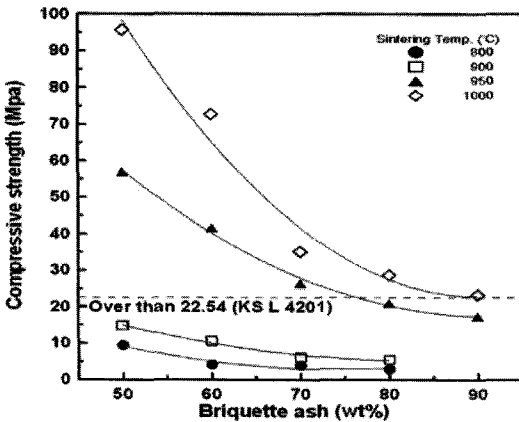


Fig. 4. Compressive strength of eco-brick according to sintering temperature and content of briquette ash with 1.0 wt% UC.

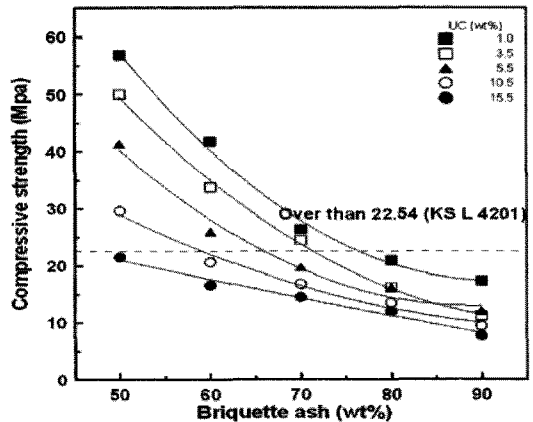


Fig. 5. Compressive strength of eco-brick sintered at 950°C according to content of briquette ash with different UC.

탄재 내의 UC함량 그리고 연탄재의 배합비율에 따른 950°C 소성 에코벽돌의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 연탄재 내의 UC함량이 증가할수록 또한 연탄재의 배합비율이 높아질수록 소성 에코벽돌의 압축강도는 감소하였다. 일반적으로 석탄내의 고정탄소는 950°C 부근에서 완전 연소된다. 따라서 이러한 현상은 연탄재 내에 존재한 미연탄소가 완전 연소되어 소성 에코벽돌 내에 많은 기공이 형성됨으로서 압축강도가 낮아진다고 사료된다. 반면에 연탄재의 배합비율이 낮아질수록 즉, 폐유리의 배합비율이 증가할수록 시험체의 압축강도는 증가하였다. 이는 앞서서도 언급하였듯이 폐유리가 먼저 용융, 소결되기 때문이다. 이처럼 폐유리는 에코벽돌의 소성온도를 낮출 수 있을 뿐만 아니라 에코벽돌의 압축강도 증대도 기대할 수 있을 것이다. 연탄재의 50 wt% 이하의 배합비율에서는 UC함량 10.5 wt%에서도 1종 규격 이상의 압축강도 값을 확보 할 수 있었다. 연탄재의 70 wt% 이하의 배합비율에서는 UC함량 3.5 wt% 이하에서 2종 규격 20.59MPa 이상의 압축강도 값, 연탄재의 90 wt% 이하의 배합비율에서는 UC함량 5.5 wt% 이하에서 3종 규격 이상의 압축강도 값을 확보 할 수 있었다.

3.3. 소성 에코벽돌의 흡수율

Fig. 6은 연탄재(UC 1.0 wt%)와 폐유리의 배합비율에 따른 에코벽돌 시험체의 소성온도별 흡수율을 측정 한 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 소성온도가 높아질수록 그리고 연탄재의 배합비율이 감

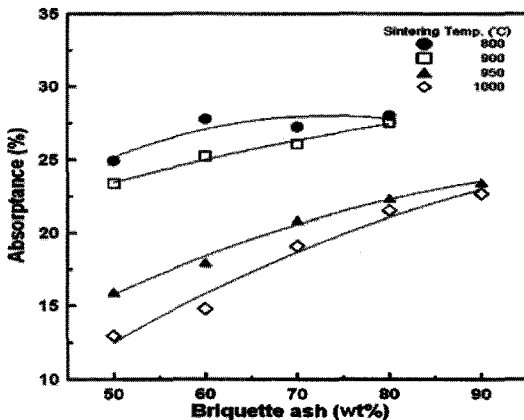


Fig. 6. Absorbance of eco-brick according to sintering temperatures and contents of briquette ash with 1.0 wt% UC.

소할수록 흡수율은 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 이는 기존의 연구¹⁶⁻¹⁷⁾에서 규명한 바와 같이 소성온도가 증가함에 따라 생성된 유리용융상이 시험체 내의 기공을 메워 기공률이 감소하기 때문에 흡수율이 감소하는 것이다. 한편, 소성온도 1,000°C 및 연탄재 60 wt% 이하의 배합비율에서는 소성 점토벽돌의 3종 규격인 흡수율 15%이하의 값은 확보 되어졌다. 그러나 현 실험조건에서 제조된 시험체는 소성 점토벽돌(KS L 4201)의 1종 규격인 흡수율 10%이하의 값을 확보할 수 없었다. Fig. 7은 UC함량이 다양한 연탄재의 배합비율에 따른 950°C 소성 에코벽돌의 흡수율을 측정 한 결과를 나타낸 그래프이다. 출발원료인 연탄재 내의 UC 함량이 증가할수록 그리고 연탄재의 배합비율이 증가할수록 시험체의 흡수율도 증가하였다. 이러한 현상은 출발원료 내에 UC함량이 증가하고, 약 950°C에서 UC는 연소되므로 소성 에코벽돌 내 열린 기공의 수가 증가하여 흡수율이 높아졌다고 사료된다.

3.4. 흡수율과 열린 기공률의 관계

Fig. 8은 연탄재(UC 5.5 wt%)와 폐유리의 배합비율을 변화시키면서 950에서 소성한 에코벽돌의 흡수율과 열린 기공률을 나타낸 그래프이다. 연탄재의 배합비율이 증가할수록 시험체의 흡수율과 열린 기공률도 증가하였는데 그 증가율이 매우 유사하였다. 따라서 연탄재의 배합비율이 60 wt%이고 소성온도가 950°C인 조건에서 제조한 UC함량에 따른 시험체의 흡수율과 열린 기공률의 관계를 살펴본 결과, 연탄재 내의 UC함량이 증가할수록 역시 시험체의 흡수율과 열린 기공률도 증가

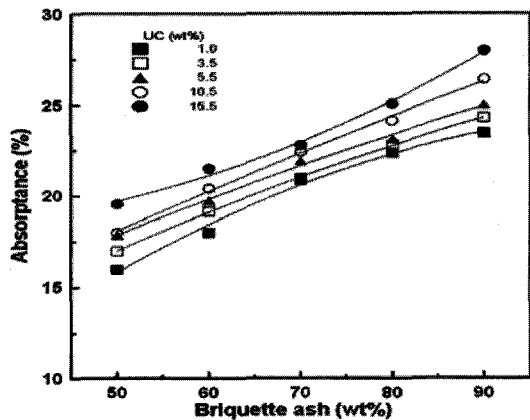


Fig. 7. Absorbance of eco-brick sintered at 950°C according to contents of briquette ash with different UC.

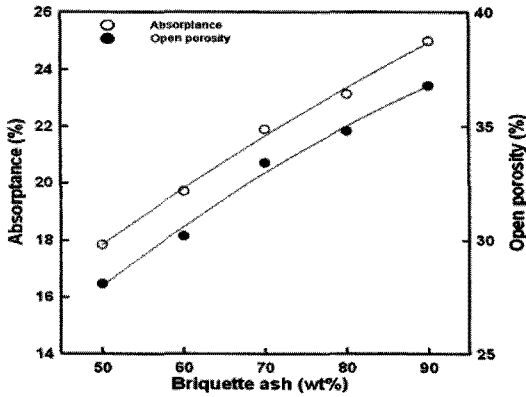


Fig. 8. Absorbance and open porosity of eco-brick sintered at 950°C according to mixing ratio of coal briquette ash with 5.5 wt% UC.

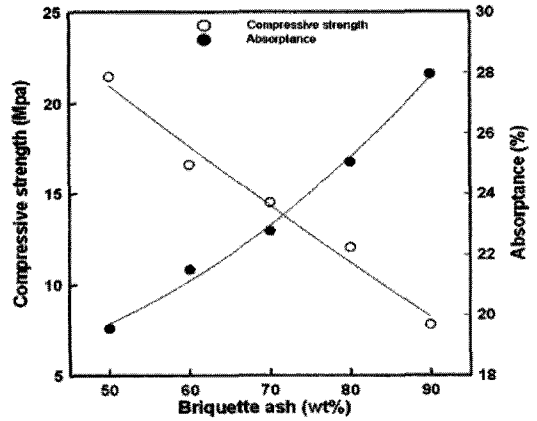


Fig. 10. Compressive strength and absorbance of eco-brick sintered at 950°C according to mixing ratio of coal briquette ash with 15.5 wt% UC.

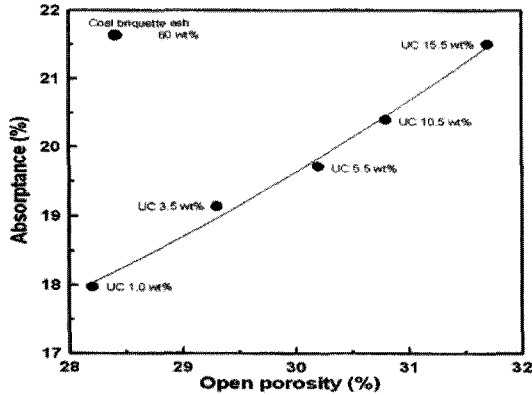


Fig. 9. Relationship between absorbance and open porosity of eco-brick sintered at 950°C with different contents of UC. Mixing ratio of coal briquette ash was 60 wt%.

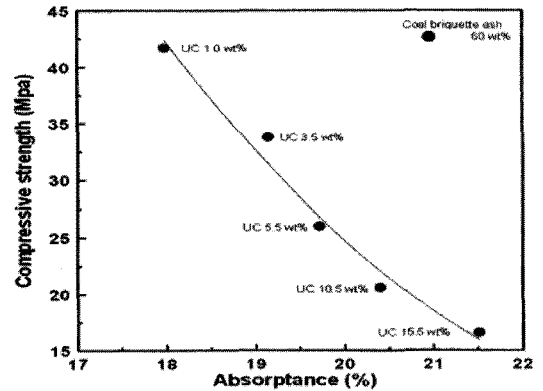


Fig. 11. Relationship between compressive strength and absorbance of eco-brick sintered at 950°C with different contents of UC. Mixing ratio of coal briquette ash was 60 wt%.

하였다. 즉, 소성 에코벽돌의 흡수율과 열린 기공률은 정비례 관계(Fig. 9)가 있음을 알 수 있었다.

3.5. 압축강도와 흡수율의 관계

Fig. 10은 UC함량이 15.5 wt%인 연탄재와 폐유리의 배합비율을 변화시키면서 950°C에서 소성한 시험체의 압축강도와 흡수율을 나타낸 그래프이다. Fig. 11은 배합비율이 60 wt%인 연탄재 내의 UC함량을 변화시키면서 950°C에서 소성한 시험체의 압축강도와 흡수율의 관계를 나타낸 그래프이다. 두 그림에 나타나 있듯이 연탄재 내의 UC함량이 감소할수록 압축강도는 증가하고 흡수율은 감소하였다. 즉, 소성 에코벽돌의 압축강도와 흡수율은 반비례관계임을 알 수 있었다.

3.6. 시험체의 표면 특성

Fig. 13은 연탄재(UC 3.5 wt%)와 폐유리의 배합비율을 변화시키면서 950°C에서 소성한 시험체의 표면을 75배로 확대하여 촬영한 사진이다. 석탄화-점토계의 세라믹스 벽돌제조 연구⁴에서도 언급되어 있듯이 시료 내의 알칼리 성분과 SiO₂ 및 Al₂O₃와의 반응에 의해 생성된 유리용융액에 의해 시험체의 표면은 약간의 광택을 띠고 있고 UC의 연소에 의해 형성된 기공이 관찰되었다. Fig. 14는 UC함량 변화에 따른 에코벽돌의 표면 색상을 나타낸 것이다. 이때 연탄재의 배합비율은 90 wt%이고 소성온도는 950°C이었다. 사진에서 알 수 있듯이 UC 함량이 증가할수록 소성 에코벽돌 표면의 색

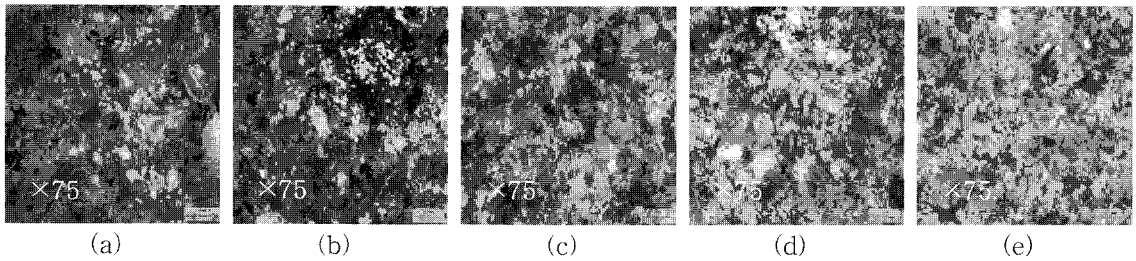


Fig. 13. Surface image of the eco-brick sintered at 950°C according to different mixing ratio of coal briquette ash with 3.5 wt% UC. Mixing ratio of coal briquette ash : (a) 50 wt%(b) 60 wt% (c) 70 wt% (d) 80 wt% (e) 90 wt%

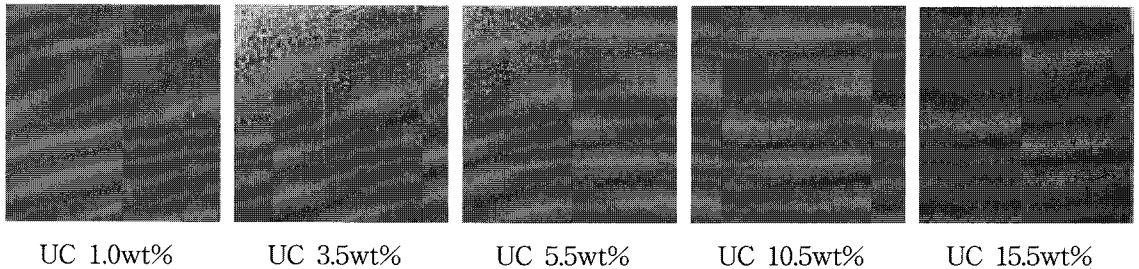


Fig. 14. Variety of color of the sintered eco-brick according to different content of UC.(Mixing ratio of coal briquette ash 90 wt%, Sintering temp. 950°C).

상은 짙어지는 경향을 보여주고 있다. 따라서 출발원료인 연탄재 내의 UC함량을 변화시키면 다양한 표면 색상을 가진 에코벽돌의 제조도 가능하다고 판단되어진다.

4. 결 론

생활계 폐기물인 연탄재의 특성과 미연탄소가 함유되어 있는 연탄재로 제조한 소성 에코벽돌의 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연탄재의 물성시험과 중금속 용출시험 결과, 연탄재를 물질전환법에 의해 순환자원화하는 데는 문제가 없다고 판단되었다. 특히 연탄재에는 가연성분인 미연탄소와 고온열적특성이 우수한 물라이트 성분이 다량 함유되어 있어 소성에코벽돌의 원료로 적합하다고 판단되었다.

2) 연탄재를 이용한 소성 에코벽돌은 미연탄소 함량이 감소할수록 열린 공극률이 감소하여 압축강도는 높아지고, 흡수율은 낮아졌다.

3) 연탄재(UC 10.5 wt%) 50 wt%, 폐유리 50 wt%의 배합비율로 950로 소성한 에코벽돌 시험체의 압축강도는 소성 점토벽돌 국내규격(KS L 4201)의 1종 규격에 해당하였다. 특히, 미연탄소 함량을 1.0 wt%까지 줄여 연탄재의 배합비율을 70 wt%까지 증가시켜도 소성 점

토벽돌 1종 규격에 해당하였다. 그러나 시험체의 흡수율은 어떠한 배합조건에서도 소성 점토벽돌 KS 1종 규격을 만족시키지 못하였다. 따라서 향후에는 이에 대한 보완 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지자원기술평가원에서 주관하는 2006년도 에너지자원인력양성사업에 관한 일련의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국광해관리공단, 2009. 8. 1, www.mireco.or.kr
2. Park S.J. et al., 2007, Removal of unburned carbon from coal briquette ash by flotation, *Proceeding of the 9th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, October 29 ~ November 2, 2007, Sendai, Japan, pp. 288-291
3. 현종영, 정수복, 채영배, 2005: 점토벽돌 원료로서 선탄폐석의 활용, *한국자원리사이클링학회지*, **14**(4), pp. 3-9.
4. 김경남, 권재혁, 신대용, 2001: 석탄회(FA)-점토계의 세라믹스 벽돌제조, *한국폐기물학회지*, **18**(5), pp. 459-467.
5. 김병규, 최영윤, 길대섭, 2004: 무연탄 석탄회 고품량 벽

돌의 상용화를 위한 요소기술 개발, 산업자원부, 연구보고서.

6. Xu Lingling, Guo Wei, Wang TaO, Yang Nanru, 2005: Study on fired bricks with replacing clay by fly ash in high volume ratio, *Construction and Building materials*, **19**, pp. 243-247.
7. Gray M.L. et al., 2002: Physical cleaning of high carbon fly ash, *Fuel Processing Technology*, Vol. 76, pp.11-21.
8. 이윤중, 권성원, 정문영, 2007: 연탄재의 순환자원화를 위한 부선허성 연구, 한국폐기물학회 2007년도 하계 젊은 과학자 학술발표회논문집, pp. 108-114.
9. 유승우, 박홍규, 정문영, 2009: 연탄재 부유선별에서 고정탄소의 산화가 유상포수제 첨가량에 미치는 영향, 한국지구시스템공학회지, **46(5)**, pp. 582-588.
10. 한상목, 신대용, 1998: 저급점토를 이용한 다공질 세라믹스 제조, 한국세라믹학회지, **35(6)**, pp. 575-582.
11. 이선영, 2005: 소다석회 유리 재용용시 알카리 휘발에 관한 연구, 배재대학교 대학원 박사학위논문, pp. 129.
12. 강종봉, 조범래, 1999: 반응소결을 통한 다공성 물라이트의 제조, *한국재료학회*, Vol. 9, No. 6, pp. 630-634.
13. 장용선, 1997: 석탄회의 이화학적 변이성과 광물학적 특성, *광물과 산업*, 제 10권, 제 2호, pp. 8-13.
14. Schneider H., Schreuer J., Hildmann B., 2008: Structure and properties of mullite-A review, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, pp.329-344.
15. 도자기 기술교육 교재(4), 2006: 소성기술, 요업(세라믹)기술원 도자기기술교육센터, pp. 463-510.
16. 이기강, 김동원, 1993: 석탄회-점토계 벽돌소지의 곡강도와 미세구조, 한국결정성장학회지, **3(1)**, pp. 45-58.
17. Ven-Gen Lee and Ting-Hao Yeh., 2008: Sintering effects on the development of mechanical properties of fired clay ceramics, *Materials science & Engineering, A* **485**, pp. 5-13.

朴 泓 奎

- 2008년 세명대학교 자원환경공학과 공학사
- 2010년 세명대학교 대학원 공학석사(자원순환처리 전공)
- 현재 (주)KCC 중앙연구소

柳 承 佑

- 2008년 세명대학교 자원환경공학과 공학사
- 2010년 세명대학교 대학원 공학석사(자원순환처리 전공)
- 현재 한국광물자원공사 기술연구소

鄭 文 泳

- 1982년 한양대학교 자원공학과 공학사
- 1984년 한양대학교 자원공학과 공학석사
- 1989년 한양대학교 자원공학과 공학박사
- 현재 세명대학교 바이오환경공학과 교수