바텀애쉬와 폐유리를 사용하여 제조한 저온소성 경량골재의 열전도율과 기공특성

이한백^{1)*} · 지식원²⁾ · 서치호³⁾

¹⁾선일공업(주) 기술연구소 ²⁾인덕대학 건축과 ³⁾건국대학교 건축공학과

Thermal Conductivity and Pore Characteristics of Low-Temperature Sintered Lightweight Aggregates Made from Waste Glass and Bottom Ash

Han-Baek Lee,^{1)*} Suk-Won Ji,²⁾ and Chee-Ho Seo³⁾

¹⁾R&D Center, Sunil Industrial Company, Seoul 135-270, Korea

²⁾Dept. of Architecture, Induk University, Seoul 139-749, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

ABSTRACT In this study, waste glass and bottom ash were used as basic materials in order to secure a recycling technology of by-products which was mostly discarded and reclaimed. In addition, because softening point of waste glass is less than 700°C and bottom ash includes combustible material, it was possible to manufacture low-temperature sintering lightweight aggregates for energy saving at 800~900°C that it is as much as 20~30% lower than sintering temperature of existing lightweight aggregates. Thermal conductivity of newly-developed lightweight aggregates was 0.056~0.105 W/m·K and its porosity was 40.36~84.89%. A coefficient of correlation between thermal conductivity and porosity was -0.97, it showed very high negative correlationship. With this, we were able to verify that porosity is key factor to affect thermal conductivity. Microstructure of lightweight aggregates by CaCO₃ content and replacement ratio of bottom ash in the variation of temperature were that CaCO₃ content increased along with pore size while replacement ratio of bottom ash increased as pore size decreased. Specially, most pores were open pore instead of closed pore of globular shape when replacement ratio of bottom ash was 30%, and pore size was small about 1/10~1/5 as compared with case in bottom ash 0~20%. In addition, open pore shapes were remarkably more irregular form of open pore in 900°C than 700°C or 800°C when replacement ratio of bottom ash was 30%. We reasoned hereby that these results will influence on absorption increase, strength and thermal conductivity decrease of lightweight aggregates.

Keywords : lightweight aggregate, waste glass, rottom ash, thermal conductivity

1. 서 론

우리나라는 2009년을 기준으로 909억불(2008년 1415억불)의 에너지를 수입하여 소비하였는데, 이는 전체 무역수입액의 25%를 차지하고 있으며 소비에너지 중 해외 의존도가 97%로써 에너지 과소비국으로 분류되고 있다. 이러한 에너지의 대외의존도를 줄이기 위해 여러 방면의 에너지 저감책이 강구되고 있는데, 그 중 건축물에서의 단열특성 향상에 의한 에너지 사용량 저감은 매우 중요한 에너지 저감요소로 간주되고 있다.¹⁻³⁾ 단열이란 열이 흐르는 물체의 전열저항을 크게 하여 열 흐름을 적게 하는 것으로,

이것을 건축물에 적용하면 구조체의 열관류율을 작게 하는 것을 의미한다. 작은 열관류율을 얻기 위해서는 재료의 두께를 증가시키거나 열전도율이 작은 재료를 사용해야 하는데, 재료의 두께를 증가시켜 열관류율을 작게 하는 것은 설계상의 제한 및 가격상승 등의 한계가 있기 때문에 열전도율이 작은 재료를 사용하는 것이 보다 효율적이다. 따라서 열전도율이 작은 단열소재를 사용하여 열의 이동을 가능한 억제하여 건축물에서 열의 손실을 저지하거나 불필요한 열의 유입을 방지하여 에너지 절약을 촉진함과 동시에 실내온도의 불균형을 방지해서 최적의 실내환경을 확보할 수 있다.⁴⁾ 일반적으로 다량의 기공을 함유한 다공성 경량골재는 열전도율과 선팅창률값이 작는데 이는 골재내부에 존재하고 있는 독립기공이 많을수록 대류 및 복사 등에 의한 열이동을 방해하여 열전도율이 낮아지기 때문이다.⁵⁻⁸⁾ 특히 건축구조물 내부의 에너지 손실을 저감시키

*Corresponding author E-mail: si21100@sirmc.co.kr

Received August 13, 2010, Revised September 15, 2010,

Accepted September 26, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

는 방안으로 다양한 단열공법을 이용하여 건물 내외의 열을 차단하는 방법이 적용되고 있으며, 또한 수많은 유·무기계 단열소재들이 개발되고 있으나, 이미 선진국에서는 유기계 단열소재의 시공상 문제 및 화재시 유해성 등으로 인해 거의 사용하지 않는 실정이다.^{9,10)} 이를 대체할 무기계 단열소재로 그 방향을 전환하고 있으며, 최근에는 다량의 기공을 포함하고 있는 재료들의 단열효과가 소개되면서 다공성 수경석회, 다공성 활성탄 등 친환경적 다공성 소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹¹⁻¹⁹⁾

한편 화력발전소에서 부산(副産)되는 폐기물 중 바텀애쉬(bottom ash)는 그 발생량이 많으나 대부분 단순매립(單純埋立)되고 있어 재활용이 절실히 요구되고 있다. 또한 환경부의 통계자료에 의하면 폐유리(waste glass)의 연간 발생량은 2008년도에 약 75만 톤으로 매년 증가하고 있으며, 이 중 일부는 유리제품 제조시 단순 치환용으로 재활용되고 있으나 대부분 폐기되고 있는 실정이다.²⁰⁻²²⁾

이 연구는 단열소재로 사용할 수 있는 저온소성 경량골재를 개발하기 위한 일련의 연구로서 바텀애쉬와 폐유리를 모재(母材)로 활용함으로써 이에 대한 재활용률을 높이고, 고부가가치화를 위해 기존 경량골재의 소성온도인 1,200~1,300°C 보다 20~30%가 낮은 800~900°C에서 제조 가능한 경량골재를 제조하고자 하였다. 아울러 제조한 경량골재의 열전도율 및 기공특성을 검토하여 단열성이 우수한 에너지 절감형 저온소성 경량골재 개발을 위한 연구의 기초적 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 재료

이 연구에서는 국내 K사의 판유리 가공 공장에서 발생하는 폐유리와 국내 B화력발전소에서 발생하는 바텀애쉬를 주원료로 하고 발포제로는 국내 D사의 시약급 CaCO₃를 사용하였다.

폐유리와 바텀애쉬는 100°C 건조기에서 향량이 될 때까지 충분히 건조한 후 화학분석(습식분석)을 실시하였다. 폐유리와 바텀애쉬의 습식화학분석 결과는 Table 1과 같다.

폐유리의 주성분은 SiO₂ 71.9%, CaO 9.38%, Na₂O 9.42% 수준으로 분석되어, 일반 소다석회(soda lime)계 유리에서 발생하는 폐유리임을 확인하였다. 바텀애쉬의 주성분은 SiO₂ 45.5%, Al₂O₃ 23.4%, 강열감량(L.O.I)은 22.3%이었으며, 강열감량의 대부분은 연소성물질인 미연탄소(未燃炭素, unburned fixed carbon)와 휘발분(volatil matter; CO, H₂, CmHn계 탄화수소류)으로 구성된 것으로 나타났다.

Table 1 Chemical composition of raw materials

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Cl	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
W/G	71.90	1.14	0.30	2.05	0.16	9.38	3.82	9.42	0.28	0.66
B/A	45.50	23.40	0.24	0.01	5.15	0.99	0.42	0.43	0.62	22.3

Note) W/G : waste glass, B/A : bottom ash

2.2 경량골재 제조

구형(球型)의 경량골재를 제조하기 위해 Table 2에서와 같이 폐유리와 바텀애쉬를 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30 비율로 각각 혼합하고 발포제는 CaCO₃를 0.3%, 0.6%, 0.9% 첨가하여 볼밀(ball mill)에서 24시간 동안 혼합하였다. 균질하게 혼합된 분말(폐유리분말 + 바텀애쉬 + 발포제), 점결제인 물유리(물유리3호)와 증류수간의 비율을 83 : 4 : 13(분말 : 물유리 : 증류수)으로 모르타르 믹서를 사용해 5분 동안 혼합하였으며, 펠렛타이저를 사용하여 구형의 성형체로 성형하였다. 성형이 완료된 성형체를 건조기에서 100°C로 24시간 동안 건조한 후, 로터리 킬른(rotary kiln)을 사용해 700°C, 800°C, 900°C로 소성·제조하였다.

2.3 특성 평가

경량골재의 열전도율을 측정하기 위해 지름이 10 ± 0.5 mm 인 것을 선별하여 고정틀(150 × 150 × 20 mm)에 경량골재를 채우고 KS L 9016(보온재의 열전도율 측정 방법)에 규정된 평판열류계법에 따라 열전도율 시험기에 장착하여 측정하였다(Fig. 1). 평판열류계법은 시험체를 통과하는 열류량을 열류계로 측정하고, 그때의 시험체 온도차를 측정하여 열전도율을 구하는 방법으로, 이 연구에서는 2매 열류계 방식을 사용하였으며 식 (1)~(3)을 이용하여 열전도율을 계산하였다.

$$\text{열전도율}(W/m \cdot K) = \frac{l}{R_c} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{\theta_1 - \theta_2}{q} \quad (2)$$

$$q = k \times e = \frac{l}{2}(k_1 \times e_1 + k_2 \times e_2) \quad (3)$$

여기서 l 은 시험체의 두께, R_c 는 시험체의 열저항이다. θ_1

Table 2 Manufacturing condition of lightweight aggregate

Factors	Waste glass (%)	Bottom ash (%)	CaCO ₃ (%)	Temp. (°C)
Level	4	4	3	3
	100	0	0.3	700
	90	10	0.6	800
	80	20	0.9	900
	70	30

Fig. 1 Thermal conductivity tester

및 θ_2 는 각각 시험체의 고온면의 온도 및 저온면의 온도이며 q 는 단위면적당 열류량(W/m^2), k , k_1 , k_2 는 열류계의 감도계수($W/m^2 \cdot V$), e , e_1 , e_2 는 열류계의 출력(V)이다.

또한, 경량골재의 기공률은 KS L 3304(내화 단열 벽돌의 비중 및 참기공률 측정 방법)에 따라 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

$$P_t = \left(1 - \frac{D_b}{D_t}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기서 D_b 는 경량골재의 부피비중, D_t 는 경량골재의 참 비중이다.

바텀애쉬 치환사용량에 따른 경량골재의 기공형태 변화와 이러한 변화가 기공률과 열전도율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 $CaCO_3$ 를 0.3%, 0.6%, 0.9% 첨가하고 700°C, 800°C, 900°C로 소성·제조한 경량골재의 중앙부 파단면 미세구조를 SEM으로 관찰·촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열전도율

각 소성온도대에서 $CaCO_3$ 첨가량과 바텀애쉬 치환사용량을 증가시키면서 제조한 경량골재의 열전도율 값을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 소성온도 700°C에서 $CaCO_3$ (0.3%, 0.6%, 0.9%) 첨가량과 바텀애쉬(10%, 20%, 30%) 치환사용량을 달리하여 제조한 경량골재의 열전도율을 값이다. 열전도율 값의 영역은 0.065 W/m·K(B/A; 0%, $CaCO_3$; 0.9%)~0.105 W/m·K(B/A; 30%, $CaCO_3$; 0.3%) 범위에 있음을 확인하였다.

발포제로 $CaCO_3$ 를 0.3%첨가하고 바텀애쉬 치환율을 0~30%로 증가시키면서 제조한 경량골재의 열전도율은 0.087 W/m·K(B/A; 0%)~0.105 W/m·K(B/A; 30%)로 측정되었고 $CaCO_3$ 를 0.6% 첨가하였을 경우에는 0.072 W/m·K(B/A; 0%)~0.082 W/m·K(B/A; 30%), $CaCO_3$ 를 0.9% 첨가하였을 경우에는 0.065 W/m·K(B/A; 0%)~0.073 W/m·K(B/A; 30%)로 측정되어 발포제 함량이 동일할 경우 바텀애쉬의 치환사용량이 증가하게 되면 경량골재의 열전도율은 증가되었다.

Fig. 2 Thermal conductivity of lightweight aggregate according to replacement ratio of bottom ash and $CaCO_3$ contents

Fig. 2(b), (c)는 소성온도 800°C, 900°C에서 $CaCO_3$ (0.3%, 0.6%, 0.9%) 첨가량과 바텀애쉬(10%, 20%, 30%) 치환사용량을 달리하여 제조한 경량골재의 열전도율 측정결과이다. 800°C, 900°C에서 소성·제조한 경량골재도 700°C에서 소성·제조한 경량골재와 마찬가지로 바텀애쉬의 치환·사용량이 증가할수록 열전도율은 증가되었다. 800°C에서 소성·제조한 경량골재의 최저 열전도율은 0.059 W/m·K(B/A; 0%, $CaCO_3$; 0.9%)이고 최대 열전도율은 0.072 W/m·K(B/A; 30%, $CaCO_3$; 0.3%)이었으며, 900°C에서 소성·가공 경량골재의 최저 열전도율은 0.056 W/m·K(B/A; 0%, $CaCO_3$; 0.9%)이고 최대 열전도율은 0.069 W/m·K(B/A; 30%, $CaCO_3$; 0.3%)이었다. 경량골재의 소성온도가 증가함에 따라 열전도율은 감소하는 경향

을 보이고 있으며 발포제 첨가량이 증가할수록 열전도율은 감소하였다. 또한 바텀애쉬의 치환사용량이 증가함에 따라 열전도율도 증가하는 경향을 보였는데 이는 폐유리(melting point, 700~800°C)보다 융점이 높은 바텀애쉬(melting point, 950~1,500°C)의 치환사용량이 증가함으로써 연구에서 적용한 소성온도(700~900°C)에서는 기포를 포집할 수 있는 액상의 생성량이 적어서 경량골재 내부의 기공을 적게 형성함으로써 열전도율이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 700°C와 같은 저온소성에서 상대적으로 융점이 높은 바텀애쉬의 치환사용량을 증가시켜 경량골재를 제조할 경우 골재내부의 기공(량)이 충분히 형성되지 않아 열전도율이 상승하는 것으로 판단되며, 소성온도 900°C, CaCO₃ 0.9%, 바텀애쉬 치환율 10%에서 최소 열전도율 값(0.057 W/m·K)을 나타내었다.

3.2 기공률

경량골재의 열전도율은 원료물질의 성분, 구성상들의 형태, 밀도, 기공률 등 다양한 요소들에 영향을 받는다. 이 연구에서는 그 중 핵심요소라 판단되는 기공률을 측정하여 단열특성과의 상관성을 확인하고자 하였다.

Fig. 3은 각 소성온도에 따른 CaCO₃ 첨가량과 바텀애쉬 치환사용량을 증가시키면서 제조한 경량골재의 기공률을 나타내었다. 700°C에서 소성한 경량골재(Fig. 3(a))의 기공률은 최저 40.36%(B/A; 30%, CaCO₃; 0.3%)이고 최고 71.46%(B/A; 0%, CaCO₃; 0.9%)이었고 800°C에서 소성한 경량골재(Fig. 3(b))의 기공률은 최저 62.21%(B/A; 30%, CaCO₃; 0.3%)이고 최고 83.25%(B/A; 0%, CaCO₃; 0.9%)이었으며, 900°C에서 소성한 경량골재(Fig. 3(c))의 기공률은 최저 67.87%(B/A; 30%, CaCO₃; 0.3%)이고 최고 84.89%(B/A; 0%, CaCO₃; 0.9%)이었다.

CaCO₃ 첨가량과 바텀애쉬 치환율에 따른 경량골재의 기공률 변화는 각 소성온도에서 유사한 경향으로 나타났으며, 소성온도에 따른 경량골재의 기공률은 700°C에서 800°C로 증가할 때에 800°C에서 900°C로 증가할 때에 보다 증가폭이 크게 나타났다. 이는 폐유리의 유리전이온도(glass transition temperature)가 약 700°C이기 때문에 700°C와 800°C 영역에서는 발포제의 영향과 점도의 영향이 크게 반영되어지고 그에 따른 기공률의 변화가 두드러지는 것으로 사료되나, 800°C 이후부터는 유리전이온도를 크게 상회하였기 때문에 경량골재가 충분히 연화되어 700°C에서 소성한 경량골재에 비해 상대적으로 소성온도에 의한 영향(점도변화)이 적은 것으로 판단된다. 800°C에서 소성한 경량골재의 바텀애쉬 치환사용량(0% → 10%, 20% → 30%)에 따른 기공률 변화는 Fig. 3의 (b)에서와 같이 CaCO₃ 첨가량이 0.3%일 때에 66.95% → 66.12% → 64.90% → 62.21%, CaCO₃ 첨가량이 0.6%일 때에 75.90% → 74.43% → 72.57% → 69.41%, CaCO₃의 첨가량이 0.9%일 때에 83.25% → 81.43% → 78.88% → 74.70%로 모든 경량골재가 바텀애쉬 치환사용량이 증

Fig. 3 Porosity of lightweight aggregate according to replacement ratio of bottom ash and CaCO₃ contents

가할수록 기공률이 낮아졌으며, 900°C에서 소성한 경량골재도 유사한 경향을 나타내었다. 즉 바텀애쉬의 치환율이 높아짐에 따라 기공률은 감소하는 경향을 보였는데 이것은 폐유리의 융점 보다 상대적으로 바텀애쉬의 융점이 높기 때문에 바텀애쉬의 치환율이 증가함에 따라 성형체의 융점이 증가되기 때문에 그에 적합한 소성분위기가 조성되어야 하나 그러지 못할 경우 오히려 기공생성의 저해 요인으로 작용하는 것으로 판단되며, 소성온도 900°C, CaCO₃ 0.9%, 바텀애쉬 치환율 10%에서 최대 기공률 값(82.94%)을 나타내었다.

3.3 열전도율과 기공률의 상관관계

Fig. 4에 나타난 열전도율과 기공률의 상관관계수(相關係

Fig. 4 Correlation between porosity and thermal conductivity

數)는 -0.97 로 매우 높은 음(-)의 상관성을 가지고 있으며, 이는 경량골재 내부에 존재하는 기공률(기공량)이 증가함에 따라 열전도율은 감소한다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 골재 내부에 존재하는 다량의 폐기공이 열의 이동(대류현상)을 억제하여 나타난 것으로 판단되며, 경량골재의 기공률이 단열특성을 좌우하는 핵심 요소임을 확인할 수 있었다.

3.4 미세구조

경량골재 내부에 존재하는 기공의 형태와 크기는 열전도율을 좌우하는 중요한 요소이므로 제조한 경량골재의 중앙부를 절단하여 내부 기공구조와 형상을 주사전자 현미경(SEM)을 이용해 관찰하였다.

Fig. 5는 소성온도 700°C 에서 CaCO_3 첨가량과 바텀애쉬 치환율을 증가시켜 제조한 경량골재의 기공형상 사진

이다. 사진에서와 같이 기공크기는 CaCO_3 의 첨가량이 증가함에 따라 증가되고 바텀애쉬의 치환율이 증가할수록 기공은 작아지고 기공 크기가 일정하지 못하였다. 또한 소성온도 700°C 의 경우 내부기공이 제대로 형성되지 못한 형상을 보이는데, 이는 소성온도가 낮음으로 인해 성형체가 다량의 고점성 용융상을 만들지 못하여 발포제(CaCO_3)가 성형체를 팽창시키지 못함에 기인된 것으로 판단된다.

Fig. 6은 소성온도 800°C 에서 각 발포제별 바텀애쉬 치환율을 증가시켜 제조한 경량골재의 기공구조 및 형상 사진이다. 800°C 에서 소성한 경량골재도 700°C 에서 소성한 경량골재와 마찬가지로 CaCO_3 의 첨가량이 증가함에 따라 기공크기는 증가되고 바텀애쉬의 치환율이 증가할수록 기공은 작고 불규칙하였다. 특히 바텀애쉬를 30% 치환하여 제조한 경량골재는 대부분의 기공이 구(球) 형태의 폐기공이 아닌 불규칙한 형태의 개기공으로 존재하고 있었으며 기공의 크기도 바텀애쉬를 30% 치환·사용한 경량골재는 바텀애쉬를 0~20% 치환사용한 경량골재의 약 $1/10 \sim 1/5$ 수준의 크기로 관찰되었다. 이는 융점이 높은 바텀애쉬의 치환사용량이 많아 성형체의 융점이 증가하고 이로 인해 기포를 포집할 수 있는 액상의 생성량이 적어서 경량골재 내부의 기공을 적게 형성했기 때문으로 판단된다.

900°C 에서 소성한 경량골재의 기공구조 및 형상 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 900°C 의 경우도 CaCO_3 의 첨가량과 바텀애쉬의 치환율 변화에 따라 700°C , 800°C 에서 소성한 경량골재와 유사한 경향을 나타내었다. 하지만 소성온도가 증가할수록(800°C , 900°C) CaCO_3 의 활발한 발포력(foaming activity)으로 인해 내부기공(폐기공)이 700°C

Fig. 5 SEM image of lightweight aggregate added with bottom ash and CaCO_3 (700°C)

Fig. 6 SEM image of lightweight aggregate added with bottom ash and CaCO_3 (800°C)

Fig. 7 SEM image of lightweight aggregate added with bottom ash and CaCO_3 (900°C)

보다 많이 형성되었음을 확인할 수 있었다. 특히 소성온도 900°C에서 바텀애쉬를 30% 치환하여 제조한 경량골재는 700°C, 800°C에서 제조한 경량골재 보다 더욱 불규칙한 형태의 개기공이 두드러지게 나타났는데, 이는 경량골재의 흡수율 증가, 강도 저하, 단열특성 저하에 일정부분 기여할 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구는 대부분 폐기·매립되어 버려지는 산업부산

물을 재활용하여 대량으로 산업화할 수 있는 기반기술을 확보하고자, 연화점이 700°C 수준으로 낮은 폐유리와 에너지 연소물질(미연탄소, 휘발분 등)을 포함하고 있는 바텀애쉬를 모재로 저온소성 경량골재를 제조하였으며, 그에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 저온소성 경량골재의 열전도율은 0.056~0.105 W/m·k 수준으로 나타났다. 또한 동일한 제조조건에서 소성온도가 증가할수록 열전도율은 감소하는 경향을 보였으며 발포제 첨가량이 증가할수록 열전도율은 감소하였다.

- 2) 저온소성 경량골재의 기공률은 40.36~84.89% 수준으로 나타났으며, 동일한 제조조건에서 소성온도가 증가할수록 기공률도 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 열전도율과 기공률의 상관계수는 -0.97로 매우 높은 음(-)의 상관성을 가지고 있으며, 이는 저온소성 경량골재 내부에 존재하는 기공률이 증가함에 따라 열전도율은 감소한다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 골재 내부에 존재하는 다량의 폐기공이 열의 이동을 억제하여 나타난 것으로 판단되며, 기공률이 단열특성을 좌우하는 핵심 요소임을 확인할 수 있었다.
- 4) 700°C에서 제조된 저온소성 경량골재의 경우, 내부 기공이 제대로 형성되지 못한 형상을 보이는데, 이는 소성온도가 낮음으로 인해 성형체가 다량의 고점성 용융상을 만들지 못하여 발포제(CaCO_3)가 성형체를 팽창시키지 못함에 기인된 것으로 보이며, 800°C 이상에서는 내부기공(폐기공)이 활발하게 형성됨을 보여주고 있다.
- 5) 바텀애쉬를 30% 치환사용하여 제조한 저온소성 경량골재는 소성온도가 증가함에 따라 기공률도 증가하였으나 바텀애쉬를 0~20% 치환사용한 경우에 비해 내부기공(폐기공)이 제대로 형성되지 못한 형상을 나타내었는데, 융점이 높은 바텀애쉬의 치환사용량이 많아 이로 인해 기포를 포집할 수 있는 액상의 생성량이 적어서 경량골재 내부의 기공을 적게 형성했기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 건설기술혁신 연구개발사업(과제번호: 05건설핵심기술D-11)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 서치호, “경량콘크리트의 성상에 관한 실험적 연구,” 한양대학교, 박사학위논문, 1985, pp. 10~18.
2. 심규섭, “기포제를 사용한 구조용 경량 모르타르의 역학적 특성 및 단열성능 평가에 관한 실험적 연구,” 한양대학교, 석사학위논문, 2009, pp. 23~25.
3. 이성인, “국가에너지절약 및 효율향상 추진체계 개선방안 연구,” 에너지경제연구원 연구보고서, 2009, pp. 7~21.
4. 김성완, “건축물의 대단열과 외단열,” 대한건축학회지, 36권, 6호, 1992, pp. 28~30.
5. 佐取一男, “各種岩質の骨材を用いたコソクリートの熱的性質,” 土木技術資料, Vol. 20, No. 11, 1978, pp. 32~37.

6. Rhee, S. K., “Porosity-Thermal Conductivity Correlations for Ceramic Materials,” *Materials Science and Engineering*, Vol. 20, 1975, pp. 89~93.
7. Levy, F. L., “A Modified Maxwell-Eucken Equation for Calculating the Thermal Conductivity of Two-Component Solutions or Mixtures,” *International Journal of Refrigeration*, Vol. 4, Issue 4, 1981, pp. 223~225.
8. Khalil, K. M. S., Elkabee, L. A., and Murphy, B., “Preparation and Characterization of Thermally Stable Porous Ceria Aggregates Formed via a Sol-Gel Process of Ultrasonically Dispersed Cerium(IV) Isopropoxide,” *Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 78, Issue 1, 2005, pp. 83~89.
9. 김무한, “단열재와 단열구법에 대한 고찰,” 대한건축학회지, 35권, 5호, 1991, pp. 29~34.
10. 김민경, 김성은, “건물유형별 성능개선 요소기술에 관한 연구,” 대한건축학회 논문집(계획계), 26권, 8호, 2010, pp. 127~135.
11. 김정환, 노현승, 서신석, “친환경적 건축재료로서 수경성 석회 모르타르의 소개,” 세라미스트, 9권, 3호, 2006, pp. 36~43.
12. 신민철, “친환경 재료기술,” 세라미스트, 9권, 2호, 2006, pp. 12~17.
13. 전현규, 서치호, 김대희, “팽창펄라이트를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회지, 19권, 5호, 2003, pp. 71~78.
14. 안재철, “폐 EPS 재생골재의 공극구조와 경량골재콘크리트의 단열성능,” 대한건축학회지, 19권, 4호, 2003, pp. 89~96.
15. 김진만, 최훈국, 박선규, “기포제 종류에 따른 경량기포콘크리트의 기포구조 및 열적특성에 관한 실험적 연구,” 한국건축시공학회지, 9권, 4호, 2009, pp. 63~73.
16. Wang, K. S. and Shih, M. H., “The Thermal Conductivity Mechanism of Sewage Sludge Ash Lightweight Material,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 803~809.
17. Cheeseman, C. R., and Viridi, G. S., “Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate Produced from Sintered Sewage Sludge Ash,” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 45, 2005, pp. 18~30.
18. Hemmings, R. T., Cornelius, B. J., Yuran, P., and Wu, M., “Comparative Study of Lightweight Aggregates,” 2009 *World of Coal Ash*, Lexington, Kentucky, USA, 2009, pp. 13~16.
19. Wassermann, R. and Bentur, A., “Effect of Lightweight Aggregate Microstructure on the Strength of Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, 1997, pp. 525~537.
20. 이철태, “발포유리 원료로서 폐유리의 물리 화학적 특성,” 한국공업화학회, 16권, 3호, 2005, pp. 440~448.
21. 이현동, 김성철, 김재관, 장석원, 김미영, 부창진, “순산소 연소 보일러에서 발생한 석탄회 특성 평가,” 한국공업화학회 응용화학, 13권, 1호, 2009, pp. 137~140.
22. 환경부, “환경통계연감” 2008, pp. 34~42.

요 약 이 연구에서는 대부분 폐기·매립되고 있는 산업부산물의 재활용 기술을 확보하고자, 연화점이 700°C 수준으로 낮은 폐유리와 에너지 연소물질을 포함하고 있는 바텀애쉬를 모재로 기존 경량골재의 소성온도보다 20~30%가 낮은 800~900°C에서 제조가능한 에너지 절감형 저온소성 경량골재를 제조하고자 하였다. 경량골재의 열전도율은 0.056~0.105 W/m·K 수준, 기공률은 40.36~84.89% 수준으로 나타났다. 열전도율과 기공률의 상관관계수는 -0.97로 매우 높은 음(-)의 상관성을 보였는데, 기공률이 단열특성을 좌우하는 핵심 요소임을 확인할 수 있었다. 각 소성온도별 CaCO₃ 첨가량과 바텀애쉬 치환율에 따른 경량골재의 미세구조는 소성온도에 상관없이 CaCO₃ 첨가량이 증가할수록 기공크기도 증가하고, 바텀애쉬 치환율이 증가할수록 기공크기는 작아지며 일정하지 못하였다. 특히 바텀애쉬를 30% 치환한 경우 대부분의 기공형태가 구(球)형태의 폐기공이 아닌 불규칙한 형태의 개기공으로 존재했으며 기공크기도 바텀애쉬 0~20% 치환 사용한 경우에 비해 약 1/10~1/5 수준으로 관찰되었다. 또한 바텀애쉬 30% 치환시 소성온도 900°C의 경우가 700°C, 800°C에서 보다 더욱 불규칙한 형태의 개기공이 두드러지게 나타났는데, 이는 경량골재의 흡수율 증가, 강도 저하, 단열특성 저하에 일정부분 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 경량골재, 폐유리, 바텀애쉬, 열전도율