

유리연마슬러지를 사용한 경량골재 제조 및 골재의 내부기공이 물성에 미치는 영향에 관한 연구

추용식[†] · 이종규 · 심광보*

요업(세라믹)기술원 세라믹·건재본부

*한양대학교 세라믹공학과

(2004년 11월 17일 접수; 2004년 12월 28일 승인)

Preparation of Lightweight Aggregate Using Glass Abrasive Sludge and Effects of Pores on the Aggregate Properties

Yong Sik Chu,[†] Jong Kyu Lee, and Kwang Bo Shim*

Ceramic and Building Materials Division, KICET, Seoul 153-023, Korea

*Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received November 17, 2004; Accepted December 28, 2004)

초 록

유리연마슬러지와 graphite를 발포제로 사용하여 경량골재를 제조하였으며, 경량골재 내부기공과 물성과의 상관성을 도출 하였다. 이때 graphite 함량을 각각 달리하여 성구를 제조하였으며, 700°C 및 800°C에서 20분 동안 소성하였다. 소성 전후 골재의 부피 변화를 검토한 결과, 발포제의 첨가량보다는 소성 온도가 좀 더 큰 영향을 미침을 확인하였다. 기공의 크기 및 면적은 발포제 첨가량과 소성 온도 상승에 따라 증가하는 특징을 나타내었으나, 발포제 첨가량 1% 이상에서는 큰 폭의 증가를 동반하지 않았다. 흡수율/열전도율과 기공과의 상관성은 매우 높아, 각각의 상관관계계수는 ±0.8 이상을 나타내었다.

ABSTRACT

Lightweight aggregate was made using glass abrasive sludge and graphite in this study. This study tried to draw the correlation between lightweight aggregate's properties and internal pore. The precursor was made by added different graphite contents and was burned for 20 min. at 700°C and 800°C. The volume change of aggregate was checked at before and after burning, and confirmed that the burning temperature effected more than expanding agent on volume change. The size and area of pore in aggregate increased according to the amount of expanding agent and burning temperature but it didn't bring about big effect above 1% of expanding agent. The absorbtion ratio, thermal conductivity and porosity have a high correlation, so each coefficient of correlation showed above ±0.8.

Key words : Glass abrasive sludge, Lightweight aggregate, Graphite, Pore

1. 서 론

환경오염 문제가 점차 심화되고 있는 오늘날, 폐기물의 유효적절한 재활용은 환경오염방지 및 매립지의 감소와 천연원료 사용량 저감에도 큰 기여를 할 수 있다. 이러한 폐기물 중 발생량도 많고 재활용이 용이한 것으로 유리 관련 폐기물을 들 수 있다.^{1,2)}

우리나라는 1970년대 이후 경제 수준의 향상과 산업 발달로 유리 제품의 소비는 매년 증가하는 추세이며, 이에 따라 유리 관련 폐기물 또한 증가하는 추세이다. 유리 폐

기물은 크게 병유리와 판유리에서 발생하는 연마슬러지 등을 들 수 있다. 병유리는 수거가 용이하여 재활용률이 높으나 유리연마슬러지는 재활용에 어려움이 있다.³⁾ 이는 유리연마슬러지가 발생되는 공장에서의 분리·처분이 체계적으로 진행되지 않으며, 판유리를 제조하는 원료물질 자체가 저가이어서 재활용시 부가가치가 높지 않기 때문이다. 그러므로 유리연마슬러지의 재활용률을 높이기 위해서는 고부가가치 제품 개발과 더불어 범용으로 사용이 가능하여야 할 것이다. 이러한 용도들 중 주목할 만한 것은 유리연마슬러지를 사용하여 단열특성을 갖는 경량골재를 개발·활용하는 것이다.

국내에서는 다수의 경량골재 제조에 관한 연구가 진행되고 있으나, 현장 사용에는 아직까지 많은 문제점을 내포하고 있다.^{4,5)} 그중 하나는 경량골재가 제조 방법 및 사

[†]Corresponding author : Yong Sik Chu
E-mail : yschu@kicet.re.kr
Tel : +82-2-3282-2423 Fax : +82-2-3282-2430

용원료에 따라 10~30%의 높은 흡수율을 나타내어 2차 제품으로 활용하기에 어려움이 있다는 것이다.^{6,7)} 또한 유기질 단열재보다 좋지 못한 단열특성도 상용화를 위해 해결되어야 하는 문제점이다. 이러한 경량골재의 기계적, 열적 특성은 경량골재의 조성, 소성 조건 등에 따라서도 변화하지만 특히 경량골재 내부에 존재하는 기공과 밀접한 상관성이 있는 것으로 알려져 있다.⁸⁾

그러므로 본 연구에서는 유리연마슬러지와 graphite를 발포제로 사용하여 경량골재를 제조하고, 경량골재의 내부에 존재하는 기공 특성과 물성과의 상관성을 도출하여 향후 경량골재 제조 및 물성예측을 위한 기본 자료로 확보하였다.

2. 실험 방법

유리연마슬러지와 graphite를 사용한 경량골재 제조 방법 및 골재 내부에 존재하는 기공과 물성과의 상관성을 도출하기 위한 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 제조 공정으로 실험을 진행하였다.

출발원료인 유리연마슬러지를 충분히 건조시킨 후 발포제로 graphite를 0.1%, 0.3%, 0.6%, 1.0%, 1.5%, 2.0%

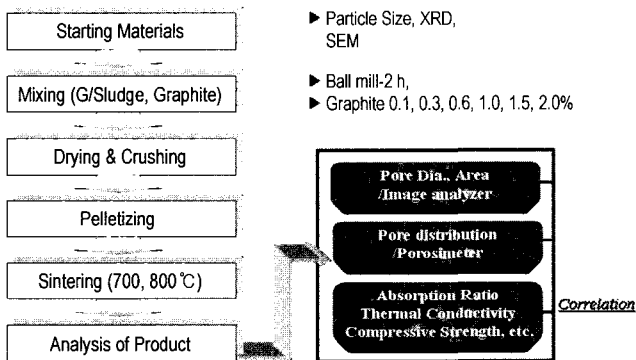
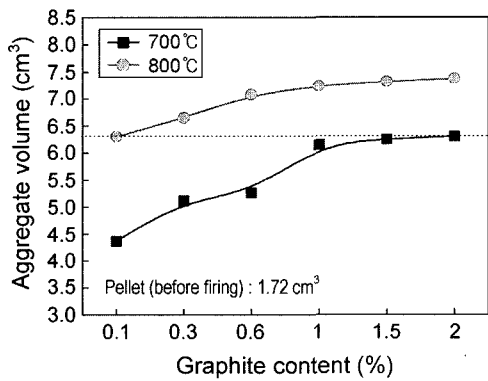


Fig. 1. Flow diagram of the lightweight aggregate fabrication.



(a) aggregate volume (after sintering)

를 첨가하였다. 발포제가 첨가된 유리연마슬러지를 ball mill에서 건식으로 24시간 동안 혼합하였다. 혼합이 끝난 후 준비된 원료는 pelletizer를 사용하여 성구를 제조하였으며, 제조된 성구는 항량이 될 때까지 건조하여 자유 수분을 제거하였다. 건조 성구는 상온에서부터 분당 5°C의 승온 속도로 가열하여 최고 소성온도는 700°C, 800°C-20분 조건으로 소성하였다.

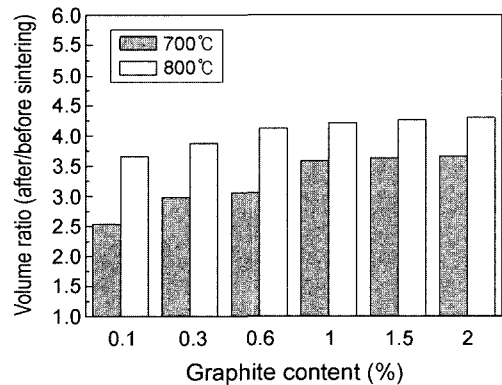
제조된 경량골재의 기초물성을 검토하기 위해 KS F 2504 “잔골재의 흡수율 및 비중 측정방법”에 따라 흡수율과 비중을 측정하였다. 또한 만능재료시험기로 경량골재가 파괴되는 최대하중 값을 측정하여 압축하중 및 열전도율을 측정하였다. 열전도율은 경량골재와 시멘트를 혼합·경화시킨 후 측정하였다. 경량골재 내부에 존재하는 기공의 양 및 크기를 측정하기 위해 이미지 분석기(Media Cybernetics社, Image-Pro Plus)를 사용하였으며, 결과값으로 얻어진 기공과 물리적 특성과의 상관관계 계수 및 관계식을 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소성 전후 골재비교

경량골재 제조 후 부피 변화를 확인하기 위해 700°C 및 800°C에서 소성 한 후 경량골재의 지름을 3회 측정하고, Fig. 2와 같이 부피 및 부피비를 도출하였다. 소성 전 성형체의 부피는 1.72 cm³이었으며, 700°C-graphite 0.1%에서의 부피는 4.4 cm³, 0.3% -5.2 cm³, 0.6%-5.3 cm³, 1.0%-6.2 cm³, 1.5%-6.3 cm³, 2.0%-6.3 cm³이었다.

700°C 소성 조건에서는 graphite의 첨가량이 증가할수록 부피가 증가하였으나, graphite 1.0% 이상에서는 더 이상의 부피변화가 발생하지 않아 graphite 함량 1.0% 조건이 경량골재 크기 변화의 critical point로 추측되어졌다. 경량골재와 성형체와의 부피비는 graphite 0.1%에서 2.5, 1.0%에서 3.6, 2.0%에서 3.7로 계산되어, 경량골재 부피는 성



(b) volume ratio (before/after sintering)

Fig. 2. Volume change of lightweight aggregate according to graphite contents.

형체 대비 최소 2.5배, 최대 3.7배로 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 800°C 조건에서도 graphite 첨가량이 증가할수록 부피가 증가하였으나, graphite 1.0% 이상에서는 더 이상의 큰 부피 변화가 발생하지 않아 700°C 소성조건과 동일한 임계점으로 추측되어졌다. 특히 700°C 소성 조건에서의 경량골재 최대 부피는 800°C 소성 조건의 최소 부피와 유사한 값을 나타내어, 경량골재의 부피변화에 좀 더 큰 영향을 미치는 것은 발포제의 함량보다 소성 온도를 확인할 수 있었다.

3.2. 흡수율 및 비중

일반적으로 인공 경량골재는 다공성 구조로서 보통 골재보다 높고 빠른 흡수력을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 원료의 변화 및 새로운 process 도입 혹은 골재의 피복 처리에 의해 흡수율 저하가 가능하다고 알려져 있다.⁹⁾ 따라서 본 연구에서도 일반적인 출발원료로 사용되는 플라이애쉬 혹은 점토질 대신 유리연마슬러지를 사용하여 골재표면에 저흡수성의 유리질 층을 형성하고자 하였으며, open pore 보다는 벌집모양의 closed pore를 형성하여 수분 침투 저항성을 증대시키고자 하였다.

Fig. 3은 발포제 함량 및 수중 유지시간에 따른 흡수율 변화를 나타낸 것이다. 발포제의 함량 및 수중 유지시간의 증가에 따라 흡수율이 증가하는 경향을 나타내었으며, 소성 온도가 높아짐에 따라서도 흡수율이 증가하였다.

700°C 소성 조건에서는 graphite 함량이 증가함에 따라 흡수율도 증가하였으나, 800°C 소성 조건에서는 graphite 함량 1.0% 이상에서는 큰 폭의 증가세를 관찰할 수 없었다. 700°C 소성 조건에서 제조된 경량골재의 흡수율은 1% 이내에 모두 존재하였으며, 최저값은 1시간-graphite 0.1% 조건에서 0.17%이었다. 800°C 소성 조건에서 제조된 경량골재의 흡수율은 2% 이내에 모두 존재하였으며, 최대값은 3시간-graphite 2.0% 조건에서 1.7%이었다.

비중값은 700°C 소성 조건에서 0.6~0.8 수준이었으며, 800°C 소성 조건에서는 0.3~0.5 수준으로, 소성온도의 증가에 따라 비중은 감소하였다. 또한 발포제인 graphite 함량이 증가함에 따라서도 비중이 낮아지는 경향을 나타내었다.

3.3. 미세구조 및 기공의 변화

경량골재는 다량의 기공을 함유할수록 비중 및 열전도

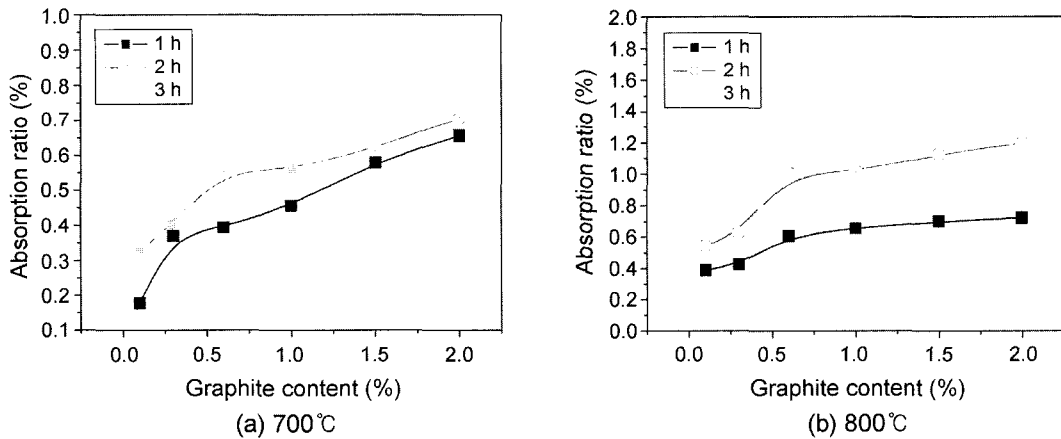


Fig. 3. Absorption ratio of lightweight aggregate according to graphite contents.

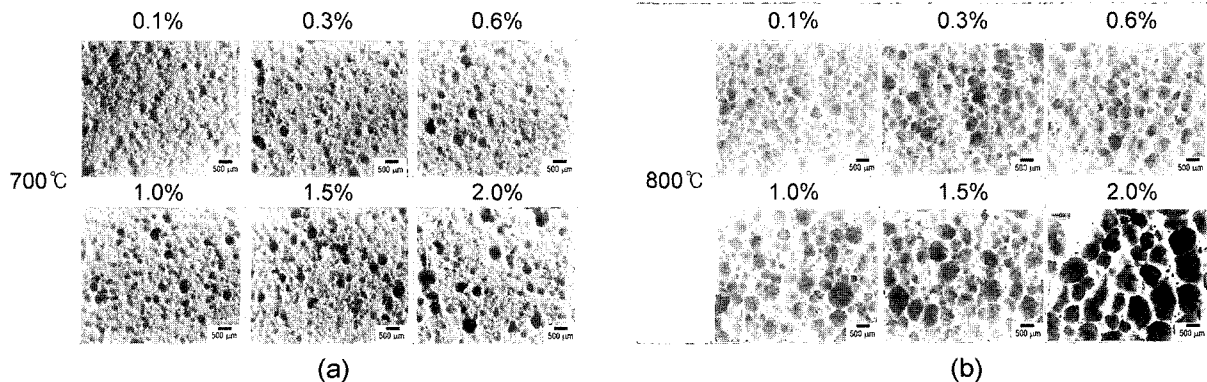


Fig. 4. Micro structure in lightweight aggregate (x500 light microscope).

율이 낮아지고, 기계적 강도가 저하하는 특성을 나타낸다. 또한 흡수율은 기공의 함량에 따라 증가하며, open pore 인 경우 더욱 증가한다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 각각의 소성온도(700 및 800°C)에서 제조된 경량골재의 단면을 관찰하기 위해 골재의 중심부를 절단하고 500배 현미경사진을 촬영하였으며, 관찰결과로부터 얻어진 기공의 특성과 골재 자체의 물리적 특성을 연관시켜 고찰하였다.

Fig. 4는 소성온도별-graphite 함량별 제조 경량골재의 내부 구조를 관찰한 것이며, Fig. 5는 Fig. 4를 기본으로 한 (소성온도별-graphite 함량별 제조 경량골재에 생성된 기공의 분포를 분석하기 위한) 이미지 분석용 스캔(scan) 사진이다. Figs. 4 및 5에서와 같이 graphite 함량 및 소성 온도 증가에 따라 기공의 크기는 좀 더 커지고, 단위 면적당 존재하는 기공의 면적도 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 graphite 함량 1% 이상에서는 큰 폭의 변화를 관찰할 수 없었다.

이미지 분석기로 분석한 기공의 면적 및 지름을 Table 1에 나타내었다. 700°C 소성 조건에서는 graphite-0.1% 경량골재의 기공 지름이 0.28 mm, 기공 면적은 0.066 mm² 이었다. 0.6%에서는 0.364 mm, 0.104 mm²로 큰 폭의 증가를 나타내었으나, 1.0% 이후에는 약간의 증가를 나타내었다. 800°C 소성 조건에서는 graphite-0.1% 경량골재의 기공 지름 0.338 mm, 기공 면적은 0.089 mm²이었으며, 이

는 700°C 소성 조건과 비교시 graphite-0.6% 및 1.0% 수준과 유사하였다. 800°C-0.6%에서는 0.476 mm, 0.177 mm², 1.0%에서는 0.518 mm, 0.211 mm², 1.5%에서는 0.712 mm, 0.398 mm²로 증가하였다.

3.4. 열전도율 및 압축강도

제조된 경량골재의 열전도율을 측정하기 위해 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 경량골재를 혼합하여 경화체(4×8.5×16cm)를 제조하였다. 일반적으로 시멘트 경화체는 W/C

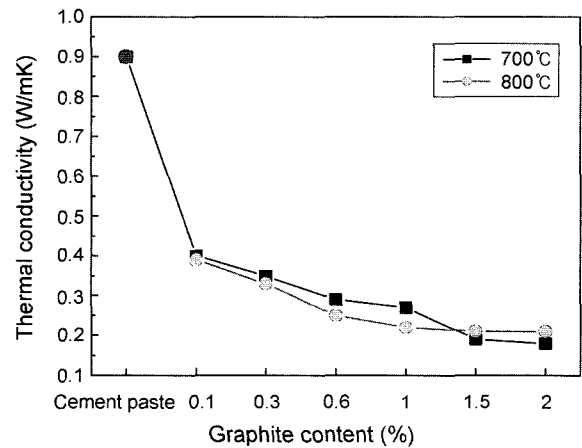


Fig. 6. Thermal conductivity of lightweight aggregate.

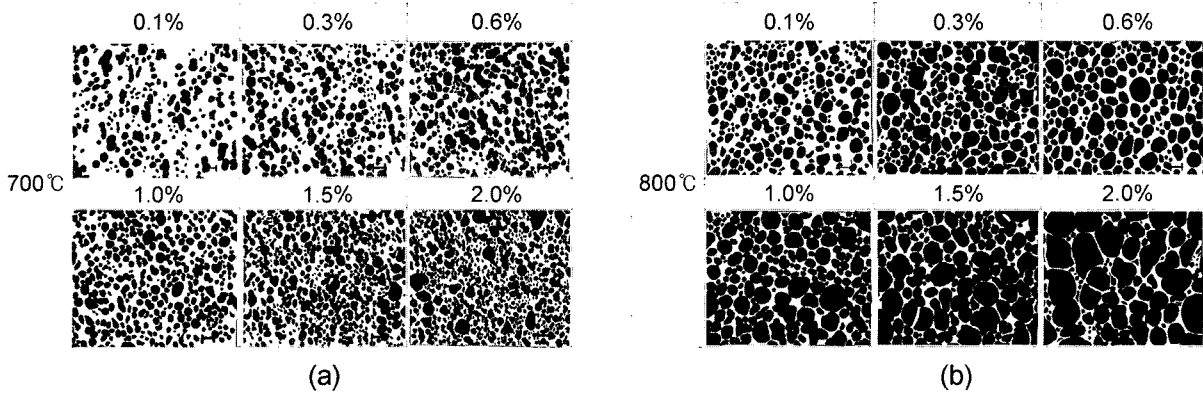


Fig. 5. Pore distribution in lightweight aggregate (for analysis using image analyzer).

Table 1. The Result of Analysis on Pore Area and Diameter Used Image Analyzer

700°C	0.1%	0.3%	0.6%	1.0%	1.5%	2.0%
Pore area (mm ²)	0.066	0.078	0.104	0.090	0.109	0.099
Pore dia. (mm)	0.280	0.318	0.364	0.338	0.374	0.355
800°C	0.1%	0.3%	0.6%	1.0%	1.5%	2.0%
Pore area (mm ²)	0.089	0.159	0.177	0.211	0.398	0.380
Pore dia. (mm)	0.338	0.450	0.476	0.518	0.712	0.695

비, 골재의 함량 등 제조 조건에 따라 다르나 1.0 W/m·K 전후, sand stone 및 marble 등은 3.0 W/m·K 수준, 금속류인 steel은 120 W/m·K로 세라믹 수준을 크게 상회한다고 알려져 있다.¹⁰⁾

본 연구에서 제조된 경량골재 경화체는 Fig. 6에서와 같이 0.2 W/m·K 수준으로 일반 시멘트 경화체보다 매우 낮은 값이며, 동일 조건으로 제조된 시멘트 경화체는 0.9 W/m·K로 경량골재를 사용한 경화체보다 약 4배에서 5배에 이르는 수준이었다. 700°C에서 800°C로 소성 온도가 증가함에 따라 약간의 열전도율 감소는 관찰되었으나, 그 폭은 크지 않은 수준이었다. 800°C 소성 조건에서는 1.0% 부터, 700°C 소성 조건에서는 1.5%부터 열전도율이 크게 감소하지 않았다.

Fig. 7은 소성 조건 및 graphite 함량별 압괴하중 특성을 나타낸 것이다. 경량골재의 압괴하중을 측정하기 위해 상부 지그를 이동시켰으며, 이때 경량골재가 견딜 수 있는 최대 하중값을 기록하였다. 압괴하중은 graphite 첨가량이 증가함에 따라 약간의 증진 효과가 관찰되었으나, 1.0% 이후에는 오히려 하중값이 낮아지는 결과를 나타내었다.

소성 온도가 낮은 700°C 조건에서 좀 더 높은 하중값을 나타내었으며, 최대 하중값은 700°C-0.6% 조건에서 175 kgf 이었다.

3.5. 기공과 물리적 특성과의 상관성

열전도율과 기공 면적의 상관성을 도출하여 Fig. 8에 나타내었으며, 사각형은 실측 data를, 원형은 상관관계 방정식에 의한 계산 data이다.

700°C 소성 조건에서의 열전도율과 기공 면적과의 상관관계 계수 r 값은 -0.81이었으며, 800°C에서도 -0.81을 나타내었다. 이는 열전도율과 기공 면적의 상관성이 매우 높은 역상관성을 나타내는 것을 의미하고, 이에 따라 상관관계 방정식에 의해 계산된 열전도율 값이 실측값과 매우 근접해 있음을 확인할 수 있었다. 700°C에서의 상관관계 방정식은 “열전도율=0.14-0.16×기공 면적”이었으며, 800°C에서의 상관관계 방정식은 “열전도율=0.60-1.36×기공 면적”이었다.

Fig. 9는 흡수율과 기공 면적과의 상관성을 구한 그래프이다. 700°C에서의 흡수율과 기공 면적과의 상관관계

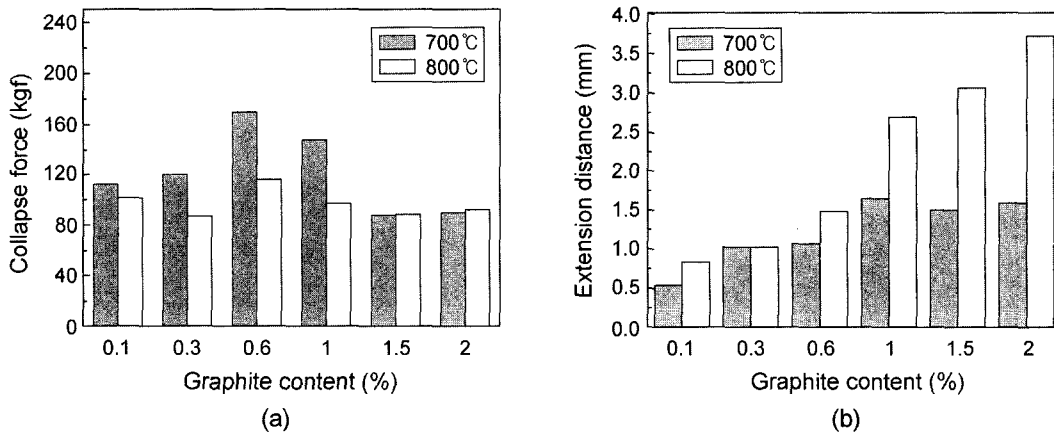


Fig. 7. Collapse force and extension distance on lightweight aggregate.

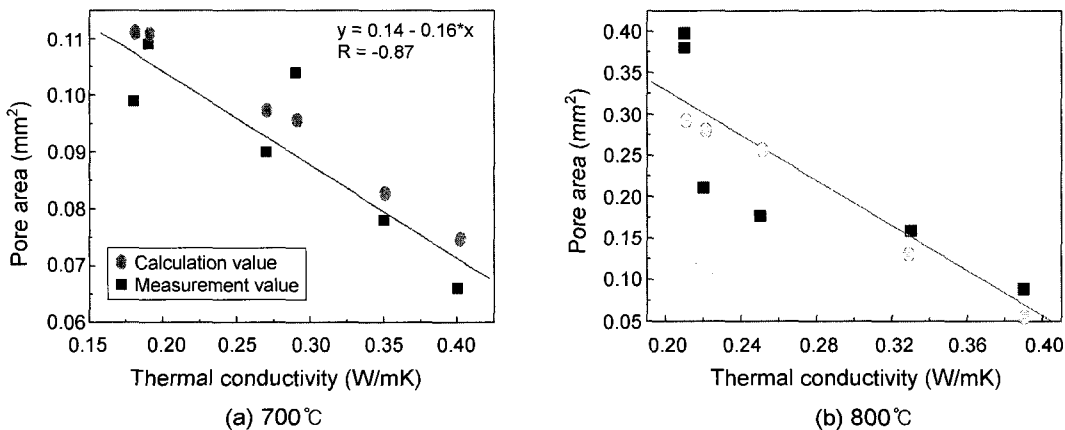


Fig. 8. Correlation between thermal conductivity and pore area of lightweight aggregate.

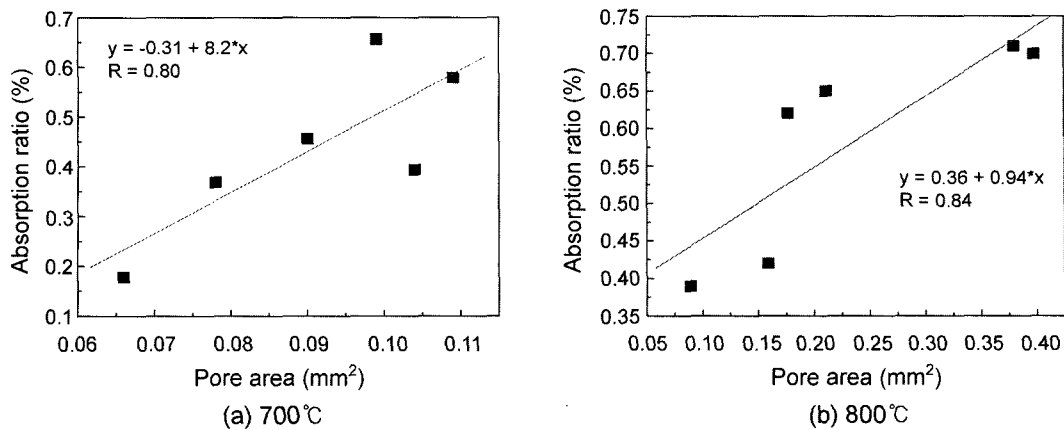


Fig. 9. Correlation between absorption ratio and pore area of lightweight aggregate.

계수 r 값은 +0.80이었으며, 800°C에서는 +0.84이었다. 이 때 소성 온도에 따른 상관관계 방정식은 700°C에서 “흡수율 = $-0.31 + 8.20 \times$ 기공 면적”이었으며, 800°C에서의 상관관계 방정식은 “흡수율 = $+0.36 + 0.94 \times$ 기공 면적”이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유리연마슬러지로 제조된 경량골재의 물성을 검토해 보았으며, 측정된 물성과 내부 기공과의 상관성을 계산하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 소성 전후 골재는 graphite 함량과 소성 온도가 증가함에 따라 부피가 증가하나, 경량골재의 부피변화에 좀 더 큰 영향을 미치는 것은 발포제의 함량보다 소성 온도임을 확인할 수 있었다.

2. 발포제의 함량, 수중 유지시간 및 소성 온도가 증가함에 따라 흡수율이 증가하였으며, 소성온도의 증가와 graphite의 함량이 증가함에 따라서 비중은 낮아지는 경향을 나타내었다.

3. Graphite 함량 증가 및 소성 온도 증가에 따라 기공의 크기는 증가하고 단위 면적당 존재하는 기공의 면적도 증가하였다. 그러나 graphite 1% 이상에서는 큰 폭의 증가가 관찰되지 않아, 기공 크기에 영향을 주는 임계점으로 예측되었다.

4. 본 연구에서 제조된 경량골재를 사용한 시멘트 경화체는 $0.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 수준으로 일반 시멘트 경화체보다 매우 낮은 수준이었다. 열전도율은 소성온도가 증가함에 따라 약간 감소하였으나 그 폭이 크지 않은 수준이었고 graphite 1.5% 정도부터 열전도율이 크게 감소하지 않았다.

5. 열전도율과 기공 면적은 매우 높은 역상관성을 나타내었으며, 흡수율과 기공 면적 또한 높은 상관성은 나타내어, 향후 기공 면적을 측정하여 경량골재의 물리적 특성을 충분히 예측할 수 있으리라 판단되었다.

REFERENCES

1. T. Y. Lim, “The Wastes Generation in Glass Furnace and the Evaluation of Potentiality for Recycle,” *Paper of the KICET* (2000).
2. S. W. Bae, S. Y. Han, and Y. B. Kwon, “Characteristics of Cement Based Solidification Process for Municipal Solid Waste Incineration Plant Fly Ash,” *J. Kor. Solid Waste Eng. Soc.*, **16** [1] 67-72 (1999).
3. H. G. Lee, “Preparation of Cellular Glass from the Waste Glass by the Hydrolysis (in Kor.),” pp. 1-3 in Ph. D Thesis, Dankok University, Chunan, 1997.
4. C. H. Seo, “Development and Characteristics of Artificial Lightweight Aggregate,” *Magazine of the Kor. Con. Ins.*, **3** [2] 17-21 (1991).
5. V. Ducman, A. Mladenovic, and J. S. Suput, “Lightweight Aggregate Based on Waste Glass and Its Alkali-Silica Reactivity,” *Cem. and Con. Res.*, **32** [2] 223-26 (2002).
6. D. K. Kim, S. J. Yoon, K. J. Mun, and Y. S. Soh, “The Applications of Artificial Aggregate Using the Municipal Waste Incineration Fly-Ash to Interlocking Block,” *Proceedings of the Kor. Con. Ins.* **15** [1] 327-32 (2003).
7. J. H. Park, “Effects of Admixture on the Preparation of Sintered Artificial Lightweight Aggregate (ALA) Using Bituminous Coal Ash and Its Sintering Characteristics,” pp. 112-22 in Ph. D Thesis, Chungnam National University, Deajun 2001.
8. C. Y. Jun, J. W. Kim, and W. J. Kim, “A Study for Development of Artificial Ligh-Weight Aggregate Concrete Using EAF Dust, Clay,” *Proceedings of the Kor. Con. Ins.*, **15** [1] 31-4 (2003).
9. Y. S. Chu, “A Study on the Preparation of Lightweight Aggregate Using Glass Abrasive Sludge,” *J. Kor. Soc. of Waste Mana.*, **20** [8] 765-72 (2003).
10. S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, “Concrete,” Pearson Education, Inc. 459-73 (2003).