

다공성 세라믹의 발포에 관한 연구 A Study on Bloating of Porous Ceramic

김귀식* · 김현관** · 정지현***†

Gui-Shik Kim*, Hyeon-Gwan Kim** and Ji-Hyun Jeong***†

(접수일 : 2012년 12월 05일, 수정일 : 2013년 02월 07일, 채택확정 : 2013년 02월 12일)

Abstract: In this study, lightweight aggregate was made from basalt stone powder sludge. Clay and glass powder were respectively added from 0 to 20 wt% and from 0 to 100 wt%. The glass powder helped to form glassy phase which trapped generating gas in the materials. CaCO₃ helping bloating process was added from 0 to 10 wt%. It was possible to produce lightweight aggregate at range from 1150°C to 1200°C. The specimen was heated in furnace at 1100, 1150 and 1200°C for 15 min, respectively, to sinter aggregates. Chemical composition of materials were determined, and characteristics were analyzed, including specific gravity, water absorption. Lightweight aggregate which was heated at 1200°C had specific gravity of 0.53 g/cm³, water absorption of 3.08%, and this value satisfied KS L 8551 standard.

Key Words : Basalt, Stone Sludge, Bloating, Lightweight Aggregate

1. 서 론

제주도에 널리 산재되어 있는 암석은 주로 현무암으로 석재가공 공장에서 원석을 채석하여 판석, 경계석 등으로 절단 및 연마한 후 도로 포장재나 건축재로 주로 이용하고 있다. 현무암은 염기성 화산암에 속하고 암석학적으로 단단한 종류의 암석으로 SiO₂ 함유량이 47~52% 범위이며, 크고 작은 기공을 포함하는 다공질의 특성을 나타낸다. 육안으로 관찰되는 광물의 종류는 감람석, 휘석, 사장석이나 이들 광물의 형태와 함량은 암석의 화학조성에 따라 차이를 나타낸다. 감람석과 보통휘석은 현무암에서 가장 흔한 큰 결정을

갖는 반정광물이며 사장석 반정도 매우 흔하다. 현무암은 마그마가 지표면으로 나와 갑자기 식어 굳어져 된 암석이기 때문에 마그마 속에 녹아있던 기체에 의한 불규칙한 기공이 많으며, 갑자기 응고하여서 결정이 매우 작거나 없으며 주로 회색 및 흑색의 색상을 나타낸다. 천연 현무암은 미관이 수려하고 그 강도와 내구성도 우수하여 토목건축용 자재로서 많이 이용되고 있다. 그러나 대량소비에 의한 자원부족과 현무암 원석을 채취하는 과정에서 자연 환경 훼손이 불가피하게 되며, 원석의 가공 시에도 다량의 폐석과 석분이 발생하여 환경문제를 야기하게 되는 문제가 있다^{1,2)}. 한편, 토목건축용 자재의 수요는 내진대책 등에

***† 정지현(교신저자) : 제주대학교 기계공학전공

E-mail : badaro@jeju.ac.kr, Tel : 064-754-3627

*김귀식 : 제주대학교 기계공학전공

**김현관 : 부산대학교 기계공학전공

***† Ji-Hyun Jeong(corresponding author) : Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

E-mail : badaro@jeju.ac.kr, Tel : 064-754-3627

*Gui-Shik Kim : Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

**Hyeon-Gwan Kim : Major of Mechanical Engineering, Pusan National University.

유래하는 경량화, 건축물의 불연화, 도로망의 확충, 공공시설의 충실 등을 위해 증대하고 있지만 천연의 토목건축용 자재 즉, 하천모래, 자갈 등은 그 채취 자체가 환경파괴를 초래하므로, 채취의 제약을 받아서 수요의 증대에 따른 수량의 확보가 어렵다. 자연계에서 얻어지는 토목건축용 자재의 대체로서 인공적 토목건축용자재의 제공이 요망되고 있다. 인공 경량골재는 1917년 세일을 가열 팽창시켜 경량골재를 제조한 최초의 특허를 시작으로 1930년경부터는 구주 각국에서 팽창성 점토, 세일, 석탄회 및 광재 등을 이용한 제품들이 본격적으로 상품화되기 시작하였다³⁾. 선진국의 경우 주로 점토 또는 부산물 자원화 목적으로 비산재를 원료로 하여 제조되고 있으며, 국내의 경우 1960년경부터 제주도 화산재, 연탄재, 혈암, 점토 등을 대상으로 인공경량골재 제조에 관한 연구가 진행되었다⁴⁾.

본 연구는 현무암 석재 가공과정에서 발생하는 폐석분 슬러지를 소성 발포하여 다공성의 경량골재를 제조하기 위하여 발포기구, 첨가물들의 배합비 및 발포를 위한 소성방법 및 물성 등을 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

주원료는 현무암 석분슬러지, 첨가물은 제주점토와 소다유리분말을 사용하였다. 발포제는 탄산칼슘(CaCO₃)을 선정하였는데, 이는 첨가제로서 사용되고 있는 무기물 중의 하나로서 재료비가 저렴하고 충격강도도 보강해주며, 흐름성을 개선하는 역할을 한다. Table 1에 석분슬러지와 제주점토의 화학성분을 나타내었다. 석분슬러지와 제주점토 모두 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로 나타났으며, 제주점토의 경우 강열감량이 9.33%로 확인되었다. 석분슬러지와 제주점토의 XRD분석결과를 Fig. 1에 나타내었다. 이를 통하여 각 광물의 고유한 회절패턴과 비교하여 해당 물질의 광물성분을 파악할 수 있다. 석분슬러지의 경우 30°근처에서 피크특성을 갖는 투회석과 22°~27°에서 피크특성

Table 1 Chemical component of materials

Materials	Stone Powder Sludge	Jeju Clay
SiO ₂	50.61	62.26
Al ₂ O ₃	14.35	15.55
TiO ₂	2.07	1.21
Fe ₂ O ₃	11.91	6.88
MnO	0.15	0.08
MgO	7.59	0.97
CaO	8.78	0.51
Na ₂ O	2.77	0.91
K ₂ O	0.71	1.87
P ₂ O ₅	0.28	0.08
LOI	0.56	9.33

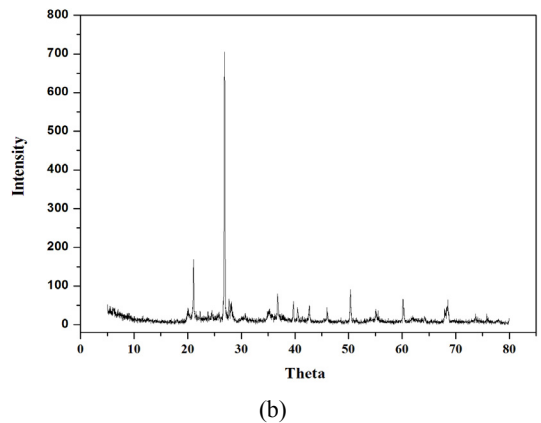
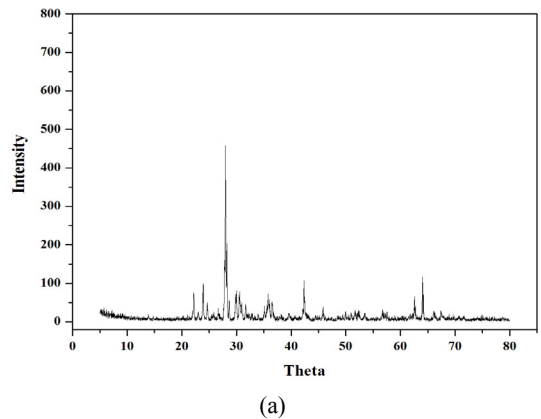


Fig. 1 XRD patterns of (a) stone powder sludge and (b) Jeju clay

을 갖는 회장석의 광물성분이 나타났고, 제주점토는 26°에서 피크특성을 갖는 석영과 22°~28°에서 피크특성을 갖는 조장석, 20°~62°에서 피크특성을 갖는 백운모의 광물성분이 나타났다.

Table 2 Particle-size distribution of Stone powder sludge and Jeju clay

Material	Size	75 μ m below	75~250 μ m	250 μ m above
	Stone Powder Sludge		65.09%	34.15%
Jeju Clay		51.51%	34.68%	13.81%

2.2 발포기구

다공성 발포골체의 제조는 소성발포에 의해 가능한데, 소지 재료를 가열하면 적당한 점성을 가진 용융액이 생성된다. 그리고 공존하는 가스발생 물질로부터 가스가 발생하여 용융액이 가스와 함께 팽창한 결과 다포체가 형성되고 급랭에 의해 고정된다.

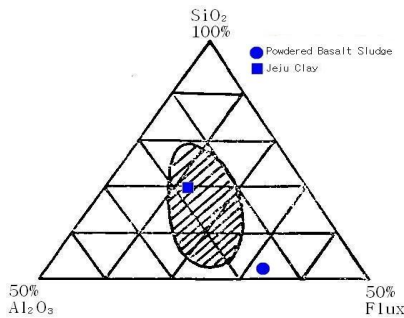


Fig. 2 Bloating range

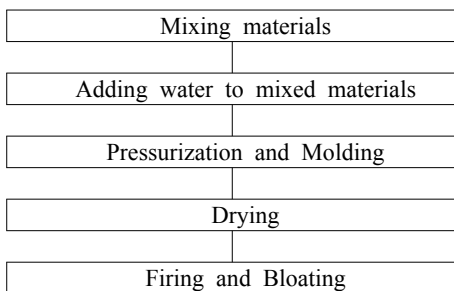


Fig. 3 Flow chart of bloating process

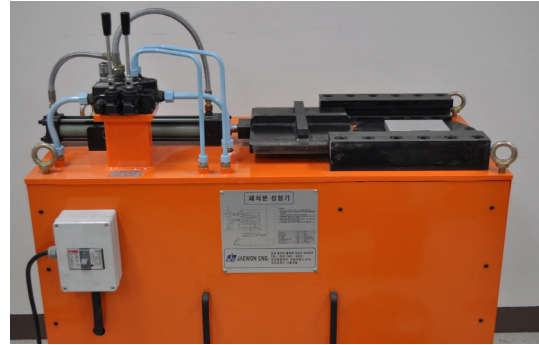


Fig. 4 Molding press for stone powder

Table 2에 나타난 바와 같이 발포인자는 시료의 성질과 소성방법이므로, 먼저 시료의 화학조성이 발포범위에 있는지를 파악해야 한다. 다른 중요한 발포인자는 소성방법이다. 소성방법은 발포온도를 결정, 발포온도까지 도달하는 승온속도 및 온도 유지시간이 중요하다. Imani 등⁵⁾은 소성방법을 급열법 혹은 준급열법과 서열법으로 분류하였다. 급열법은 노내 온도가 소정의 온도(발포온도)에 도달했을 때 시료를 투입하고 그 온도에서 약 10분간 유지한 후 냉각하는 것이고, 준급열법은 승온속도를 10~25 °C/min로 가열하여 소정의 온도에서 약 10분간 유지한 후 냉각하는 것이며, 서열법은 승온속도를 10 °C/min 이하로 하여 소정의 온도에서 약 10분간 유지한 후 냉각하는 것이다. 본 연구에서는 급열법과 서열법의 소성방법을 사용하였다. 발포조건으로 높은 온도에서 충분한 점성을 가지는 유리상이 생성되어야 하며, 유리상을 형성하는 온도에서 탄산염과 같은 물질이 가스를 발생해야 한다⁶⁾. Riley⁷⁾는 경량골체의 소성온도 범위인 1,000~1,300 °C에서 발포하기 쉬운 원료의 화학조성을 Fig. 2와 같이 표시하였으며 SiO₂ 48~70%, Al₂O₃ 8~25%, Fe₂O₃+FeO 3~12%, CaO+MgO 1~12%, Na₂O+K₂O 0.5~7%의 범위에 해당한다. 반면, 화학조성이 Riley의 범위에 들지 않더라도 Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 비율이 높으면 열처리 시 용융액의 양이 증가하여 내부에서 발생하는 가스가 외부로 방출되는 것을 막아 발포가 되게 한다⁸⁾.

Fig. 2에서 현무암석분슬러지와 비교를 위한 제

주 점토(옹기토)의 화학성분을 나타내었다. 현무암 석분슬러지는 발포범위의 밖이고 제주점토는 범위 안에 있다. 따라서 석분슬러지 자체만으로는 Riley의 발포범위에 해당하지 않음을 알 수 있다. 그리고 Al₂O₃에 대한 SiO₂의 상대적인 비율 또한 열처리시 충분한 용융액이 형성될 조건이 아니므로 석분슬러지만으로 다공성세라믹스를 제조하기에는 어려움이 따른다.

2.3 실험방법

Fig. 3에 발포골재를 제조하는 공정의 순서를 나타낸다. 시편 제작은 우선, 각 원료를 볼밀을 이용하여 300 μm이하로 분쇄한 후, 일정 배합비에 따라 볼밀로 혼합하였다. 혼합된 재료에 함수율이 10 wt%가 되도록 조정된 뒤 Fig. 4와 같은 폐석분 성형기를 이용하여 최대 가압력 20 MPa로 성형하였다. 이 때, 함수율 10 wt%이하에서는 재료간의 결합이 잘 되지 않았으며, 15 wt%이상에서는 성형시 문제점이 발생하였다. 성형된 시편은 전기가마를 이용하여 100℃에서 24시간 동안 건조한 다음 전기로에서 급속소성하였다. 1,100℃~1,200℃의 범위에서 50℃간격으로 실험을 진행하였으며, 해당온도에서 15분간 유지하여 로냉하였다. 이 때, 승온속도는 5℃/min이었다.

본 연구에서는 급속가열 과정에서 발포제나 유기물이 분해되어 H₂O 및 CO₂ 등의 가스를 발생시켜 유리질 피막을 팽창, 발포하는 과정을 통해 다공질 세라믹스를 제조하고자 하였다. 비중 및 흡수율의 측정에는 KS L 8551 경량 발포 세라믹 블록의 시험법에 따라 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제주점토의 첨가에 따른 특성조사

제주점토의 첨가에 따른 특성을 조사하기 위하여 Table 3과 같이 석분슬러지와 제주점토를 80~100 wt% : 0~20 wt%로 조정하여 합이 100 wt%가 되도록 하였고, 유리분말과 CaCO₃를 각각 100 wt%, 5 wt%로 고정하여 실험을 진행하였다. 소성온도는 1,150℃였으며, 15분간 급속소성을 한 후 로냉하여 특성을 비교하였다.

Table 3 Mix proportion for materials (wt%)

Specimen	Stone Powder Sludge	Jeju Clay	Glass Powder	CaCO ₃
B100	100	0	100	5
BC91	90	10	50, 100	0, 5, 10
BC82	80	20	100	5

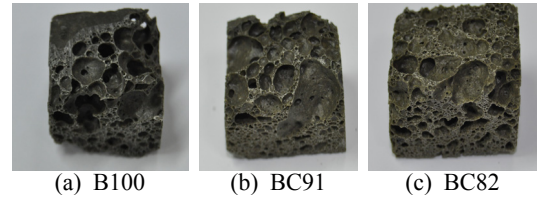


Fig. 5 Specimen for Jeju clay content

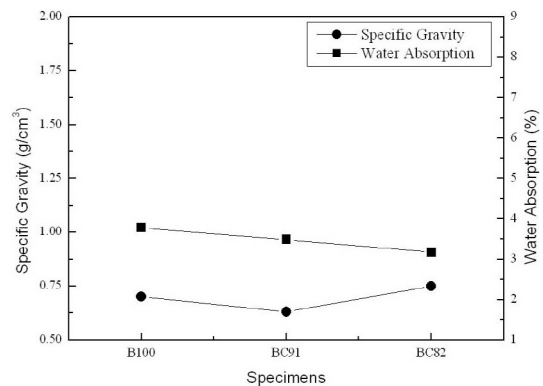


Fig. 6 Characteristics for mix proportion

Fig. 5에 시험편의 단면을, Fig. 6에 각 시험편의 비중 및 흡수율을 각각 나타내었다. 모든 배합비에서 물에 뜨는 경량골재를 제조할 수 있었지만 BC91 시험편의 경우가 가장 우수하였다.

3.2 유리분말 첨가에 따른 특성조사

유리분말의 첨가에 따른 특성을 조사하기 위하여 석분슬러지 90 wt%, 제주점토 10 wt%, CaCO₃ 5 wt%로 고정한 뒤 실험을 진행하였다. 유리분말의 양을 배합물의 50%와 100%로 각각 조정된 후 1,100℃~1,200℃의 범위에서 50℃간격으로 해당온도에서 15분간 유지한 후 로냉하여 특성을 비교하였다. 유리분말의 첨가량에 따른 시험편의

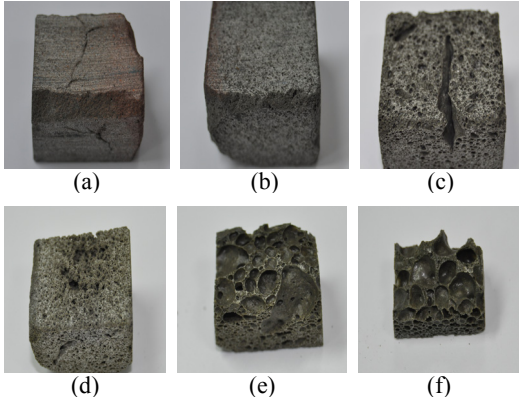


Fig. 7 Specimen for glass powder content (a,b,c : 50 wt%, d,e,f : 100 wt%)

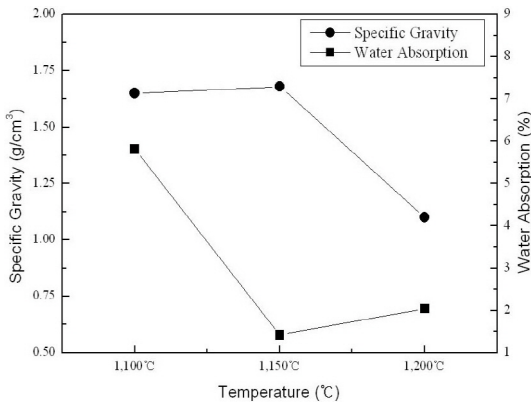


Fig. 8 Characteristics of specimen in glass powder content 50 wt%

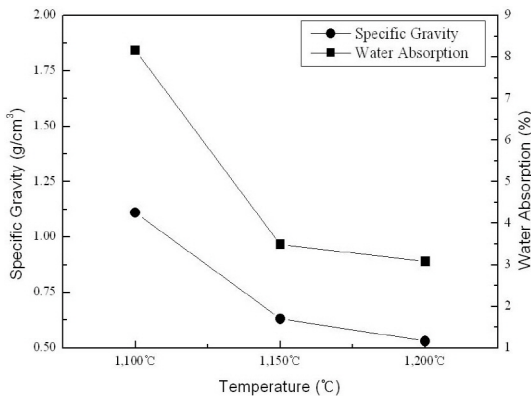


Fig. 9 Characteristics of specimen in glass powder content 100 wt%

단면을 Fig. 7에 나타내었으며, 열처리 온도에 따른 비중 및 흡수율을 조사하여 Fig. 8~9로 나타내었다. KS L 8551 경량 발포 세라믹 블록의 시험법에서는 비중 0.45초과~0.55미만, 흡수율 5.0% 이하로 규정하고 있는데, 본 연구에서는 유리분말 100 wt%를 첨가하여 1,200 °C에서 급속소성 행한 시험편의 경우 이 규정을 만족시킴을 알 수 있었다. 반면, 유리분말을 첨가하지 않은 시험편은 비중 1.53 g/cm³, 흡수율 18.02%로 나타났으며, 내부에 발포가 진행된 흔적을 발견할 수 없었다. Fig. 8~9에 나타난 결과를 통해 알 수 있듯이, 각 온도에 따른 유리분말 첨가량에 대한 비중 및 흡수율의 관계를 파악하여 보면, 비중이 높을수록 낮은 흡수율을 보임을 알 수 있다. 이는 유리분말의 첨가에 따른 시험편 내부의 기공형성에 따른 것으로 여겨진다. 본 연구에서 사용된 유리분말은 시험편의 표면에 유리상을 형성하여 내부에서 발생하는 발포가스가 외부로 배출되는 것을 막아 경량골재 제조에 도움을 준다. 또한 발포제인 CaCO₃는 950 °C에서 CaO와 CO₂로 분해되며, 이는 발포유리의 대표적 발포기구이다.

본 연구에서 진행된 발포는 Riley의 발포범위에 속하지는 않지만, 유리분말의 첨가로 인한 시험편 외부의 유리상 형성으로 내부에서 발생하는 발포가스를 막아 경량골재 제작이 가능하였다고 여겨진다.

3.3 CaCO₃ 첨가에 따른 특성조사

CaCO₃첨가에 따른 특성을 조사하기 위하여 석분슬러지 90 wt%, 제주점토 10 wt%, 유리분말 100 wt%로 고정하고 CaCO₃의 양을 0 wt%~10 wt%로 변화시키며 실험을 수행하였다. 열처리 조건은 5°C/min의 승온속도로 1,150 °C에서 급속소성을 하였으며, 15분간 유지한 후 로냉하였다.

Fig. 10에 시험편의 단면을 나타냈었으며, CaCO₃ 첨가에 따른 비중 및 흡수율을 Fig. 11에 나타내었다. CaCO₃ 함유량이 높아질수록 비중은 증가하고, 흡수율은 감소함을 알 수 있다. 따라서 경량골재 제작시 CaCO₃의 양을 조절함으로써 강도 측면에서 보완을 할 수 있으리라 여겨진다.



(a) 0% (b) 5% (c) 10%

Fig. 10 Specimen for CaCO₃ content

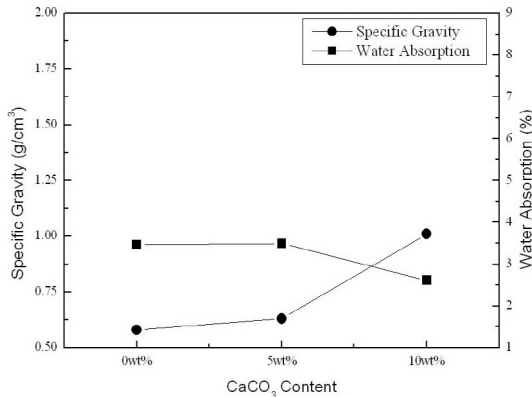


Fig. 11 Characteristics of specimen in CaCO₃ content 50 wt%

4. 결 론

석분슬리지를 활용하여 경량골재를 제조하는데 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 석분슬리지는 Riley의 발포 조성범위에 속하지는 않지만 유리분말의 첨가 등 재료 표면에 유리질의 용융상을 형성할 수 있는 조건을 만들어 발포가 가능하도록 하였다.

2) 경량골재 제조에 있어서 첨가물인 유리분말은 100 wt% 정도의 양이 첨가되어야 하며, 115 0℃에서 급속소성을 통해 기술표준원의 경량발포 세라믹 블록(KS L 8551)조건을 만족하는 경량골재를 제조할 수 있었다.

3) CaCO₃ 10 wt%첨가시 제조한 경량골재의 비중 0.78 g/cm³, 흡수율 1.0%로 특성이 향상됨을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. X. Wang, Y. Jin, Z. Wang, Y. Nie, Q. Huang and Q. Wang, 2009, "Development of Lightweight Aggregate from Dry Dewage Sludge and Coal Ash", Waste Management, Vol. 29, pp. 1330-1335.
2. N. Almeida, F. Branco, J. d. Brito and J. R. Santos, 2007, "High-performance Concrete with recycled Stone Slurry", Cement and Concrete Research Vol. 37, pp. 210-220.
3. C. R. Cheeseman and G. S. Viridi, 2005, "Properties and Microstructure of Lightweight Aggregate produced from sintered Sewage Sludge Ash", Resources Conserve Recycle Vol. 45, pp. 18-30.
4. Y. J. Kwon, Y. T. Kim, K. G. Lee, Y. J. Kim, S. G. Kang, J. H. Kim and M. S. Park, 2001, "Lightweight Aggregate Bloating Mechanism of Clay/Incinerated Ash/Additive System", Journal of the Korean Ceramic Society. Vol. 38, No. 9, pp. 811-816.
5. S. Imani and T. Yamamoto, 1976, "A Study of the Artificial Light-weight Aggregates", Kyushu Institute of Technology Academic Repository, No. 33, pp. 11-20.
6. A. B. Suad and V. T. L. Bogahawatta, 2006, "Development of lightweight aggregates in KUWAIT", The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 31, No. 1C, pp. 231-239.
7. C. M. Riley, 1951, "Relation of chemical properties to the bloating of clays", Journal of American Ceramic Society. Vol. 34, No. 4, pp. 121-128.
8. S. M. Han, D. Y. Shin and S. K. Kang, 1998, "Preparation fo Porous Ceramics Using Low Grade Clay", Journal of Korean Ceramic Society, Vol. 35, No. 6, pp. 575-582.