

Characterization of fine lightweight aggregates sintered at floating state using by vertical furnace

Seunggu Kang[†]

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

(Received November 7, 2008)

(Accepted November 27, 2008)

Abstract The fine aggregates of below 2 mm size was fabricated using by the vertical furnace in which the aggregates could be sintered at floating state and its physical properties were analyzed. The liquid formed at the surface of specimens sintered at 1200~1300°C induced a gas in core to expand so the denser shell and porous core could be produced. The C series specimen fabricated by crushing an extruded body had an irregular shape and sharp edges but those became spheroidized by bloating due to gas expansion inside. The fine aggregates fabricated in this study was as light as floating in the water and had an apparent density of 0.68~1.08. The absorption rate was proportioned to a porosity showing that the pores in core was not closed completely. The properties of fine aggregates fabricated in vertical furnace were similar with those of in an electric muffle furnace but the sticking-together phenomenon by surface fusion was not occurred in the vertical furnace. The aggregates fabricated in this study had a little lower impact resistance than that of natural aggregate but satisfied the unit volume weight standard specified in KS.

Key words Fine lightweight aggregates, Vertical furnace, Floating, Apparent density, Porosity

수직로에서 부유 소성된 경량 세골재의 특성

강승구^{*}

경기대학교 신소재공학과, 수원, 442-760

(2008년 11월 7일 접수)

(2008년 11월 27일 심사완료)

요 약 입자를 부유 상태에서 소성할 수 있는 수직로를 이용하여 2 mm 이하 크기의 경량 세골재를 제조하고 그 물리적 특성을 고찰하였다. 1200~1300°C에서 소성된 대부분 시편은 표면에 다량의 액상이 발달하였고 따라서 내부의 가스가 팽창하여 다공성의 중앙부와 상대적으로 치밀한 표피층이 형성되었다. 특히 압출 성형체를 파쇄시켜 얻은 부정형의 C 계열 시편은 1300°C 이상으로 소결하면 내부에 가스가 팽창하여 시편 전체가 부풀어져서 구형으로 되었다. 본 부유 수직로에서 소성된 시편의 겉보기 비중은 0.68~1.08 범위로 대부분 물에 뜰 정도의 경량이었다. 제조된 경량 세골재의 흡수율은 기공율과 비례하였고, 따라서 내부 기공들이 완전 고립된 폐쇄기공은 아님을 나타내었다. 부유소성로에서 제조된 세골재는 전기 머플로에서 소성된 시편과 비슷한 물성을 나타내었으나, 전기로에서 나타나는 골재 간 융착 현상이 발생하지 않았다. 수직로에서 부유소성된 세골재의 내충격성은 자연골재보다 다소 낮았으나, 단위용적중량은 KS 규격 기준을 만족하였다.

1. 서 론

경량골재는 고층건물, 교량 등의 자중 감소용 콘크리트, 방음 및 방습용 콘크리트, 진동 방지용 도로포장 등의 건축 자재 뿐만 아니라 각종 식물의 성장과정에서 수분의 증발을 제어하는 원예용 토양 대체재료, 세라믹 담체 등의 분야에 폭 넓게 이용되고 있다[1-3].

지금까지는 경량골재 수요의 대부분을 하천, 바다에서 채취한 천연골재로 사용하였으나 최근 많은 지자체들이 바닷모래 채취를 금지하면서 천연골재 만으로는 골재의 수요를 충족하기가 어려워졌다[4, 5]. 또한 산림에서 채취한 쇄사에는 미립분이 다량 혼입되어 있어 이를 콘크리트 등에 그대로 사용할 경우, 부실공사의 위험이 있고 더불어 자연훼손 문제를 야기한다는 단점이 있다[6].

최근 들어 이러한 문제들을 해결하기 위하여 산업 폐기물을 친환경적으로 처리하여 안전한 인공 경량 골재를 생산하는 연구가 진행되고 있으며 만약 이러한 연구결과가 자연골재에 비교하여 경제적인 경쟁력을 갖추게 되면

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-249-9767

Fax: +82-31-244-8241

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

그 긍정적 피급효과는 매우 클 것이다[7, 8].

콘크리트 제조 시 골재들의 충전이 잘되어야 시공된 구조물의 설계 강도를 만족시키는 데 유리하므로 골재 크기의 분포가 넓은 것이 필요하다. 그런데 기존의 로터리 킬른으로는 2 mm 정도 크기의 세골재를 제조할 경우, 골재 간 융착 현상으로 인한 골재 덩어리가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실험실 규모의 수직로를 사용하여 로 하부에서 공기를 불어넣어 줌으로써 세골재를 부유시킨 상태에서 가스로 소성하여 골재 간 융착이 발생되지 않도록 세골재를 제조하였다. 또한 여러 온도 및 성형방법에 의한 세골재의 특성을 비교 분석함으로써 경량 세골재의 최적 제조 조건을 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 원료들의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 점토는 일반 점토벽돌을 제조하는데 사용되는 것이며, 폐백토는 유류 흡착제로 사용된 후 폐기된 것으로 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분이지만 강열 감량이 48.4%으로 대부분이 휘발성분이다. 석분오니(stone ash sludge)는 주성분이 SiO₂와 Al₂O₃로서 그 함량이 점토와 유사하며, 유리 원료 분류상 수식제인 1족 및 2족 금속 산화물을 다량 함유하고 있어 용제역할을 할 것이라고 생각된다. 본 연구에서는 폐백토 : 석분오니 : 점토 = 1 : 3 : 6 (무게비)으로 골재를 제조하였다.

세골재 성형은 두 가지 방법을 사용하였다. 첫째는 원료들을 24시간 습식 ball mill 혼합하여 slab 모양의 압출기로 뽑아내어 건조한 뒤, 이를 파쇄(crushing)하여 미세한 크기 골재를 얻는 방법으로, 이렇게 얻어진 것을 C 계열 시편으로 명명하였다. 또 다른 방법은 원료들을 건식 ball mill로 혼합하여 425 μm 이하의 분말을 얻은 뒤, 이를 pelletizer를 이용하여 구형의 세골재를 얻는 방법으로, 이 경우에는 P 계열 시편으로 명명하였다. 각 방법으로 성형된 시편을 각각 체가름하여 1.7~2.0 mm 크기의 골재를 본 실험에 사용하였다.

고온에서 소성하여 발포시키는 인공경량 세골재의 제조 시 골재간 융착 현상으로 인한 제조 효율이 낮아지는 문제점을 보완하기 위하여 골재를 부유 상태에서 소성할 수 있도록 설계 제작된 수직 소성로를 이용하였다[9].

수직로는 가스를 연료로 사용하였으며 본 연구에서는 세골재를 1200~1300°C 범위 내에서 5분 동안 소성하여 제조하였다. 이때 수직로 하단으로부터 공기를 불어 넣어 골재를 부유시킨 상태로 소결을 하였다.

인공경량 세골재의 겉보기 밀도 및 흡수율, 단위용적중량(unit weight), 실적률(solid content), 그리고 충격값 등의 물성 평가는 KS 기준에 의거하여 실시하였다[10-13]. 단위용적중량은 일정 부피의 용기 내에 시편을 충전시켰을 때 용기 부피당 시편의 무게를 의미하고, 실적률은 시편이 충전된 용기 내에 시편 점유 공간을 백분율로 계산한 것이다.

광학현미경을 이용하여 골재의 표면 및 형태를 관찰하였고, 미세구조를 관찰하기 위해 SEM(JSM-6500F, JEOL)을 이용하였으며, 기공률은 Image analyzer software (Total Imaging Solution i-SOLUTION, iMTechnology)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공경량 세골재의 관찰

2가지 성형법에 따른 성형체와 여러 온도에서 소성된 인공경량 세골재를 광학 현미경으로 관찰하여 Fig. 1에 나타내었다. C 계열 시편은 압출 성형된 원료를 파쇄한 것이고 P 계열 시편은 구형 성형기인 pelletizer로 제조된 것이다. 구형성형기로 제조된 P 계열 시편과 달리 C 계열의 파쇄시편은 aspect ratio가 크고 부정형으로 모서리가 날카로운 특징을 갖는다.

세골재 원료 시편을 수직로에서 부유 상태로 1200~1300°C 범위에서 소성하면 표면에 액상이 형성되어 매끄럽고 치밀한 표피 구조를 나타낸다. C 계열 시편의 경우 소성 온도 증가에 따라 날카로웠던 파쇄면 모서리들이 둥그스름하게 되면서 1300°C에서 소결된 것은 구 형태를 갖는다. 이는 급속한 고온 소결로 인해 시편표면에 점성의 액상이 빨리 형성되고, 이것이 내부에 발생된 가스가 밖으로 빠져나가는 것을 억제하므로 내부에 갇힌 기체가 팽창하여 시편이 등방으로 부풀어 오르기 때문으로 생각된다.

P 계열시편에서도 소성온도가 증가할수록 골재의 표면

Table 1
Composition of the raw materials (wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	ZnO	PbO	SO ₃	I. loss
Clay	64.8	17.7	7.2	0.2	0.7	0.2	1.8	1.0	0.1	-	-	-	-	-	6.3
Waste White Clay	41.9	5.4	1.7	0.3	0.7	0.3	0.6	0.7	0.1	-	-	-	-	-	48.4
Stone Sludge	66.7	14.9	2.3	2.0	1.1	3.8	5.2	0.3	0.1	-	-	-	-	-	3.6

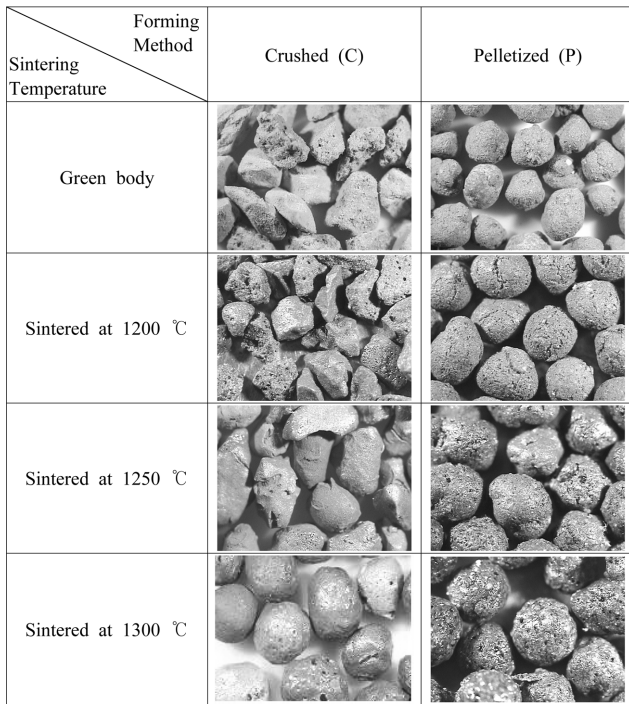


Fig. 1. Apparent image of green and sintered body for fine lightweight aggregates.

에 액상이 생성된 것을 확인 할 수 있다. 인공경량 세골재 P 계열시편의 미세구조를 SEM으로 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. 소성온도가 증가할수록 골재 내부의 기공이 커지는 것을 볼 수 있다. 1200°C에서 소성한 골재에는 약 100 μm 크기의 기공이 존재하며, 표피층에 존재하는 기공은 내부 기공에 비해 크기 작고 따라서 표피층은 상대적으로 치밀한 구조를 갖는다. 이러한 치밀한 표면을 표피층(shell)이라 하며, 내부를 중심부(core)라고 칭하기로 한다.

1250°C에서 소성한 골재에는 중심부에 500 μm 이상의 거대기공이 존재하며, 표피층과 중심부 간의 구분이 확실히 관찰된다. 1300°C에서 소성한 골재는 중심부에 증공(hollow)이 발생하였고, 표피층 구조를 확실히 관찰할 수 있다. 1300°C에서 소성한 골재 단면을 확대한 사진, Fig. 2(d)를 관찰하면 작은 약 200 μm 두께의 표피층이 확인된다. 이처럼 고온 소결의 시편에서 표피층이 잘 발달된 것은 고온에서 소결한 만큼 표면에 액상이 많이 생성되었고 이 액상은 표면의 기공을 채움과 동시에 액상반응을 촉진하여 소결 속도를 증가시켰기 때문으로 생각된다. 표피층과 중심부의 상대 비율은 경량골재의 물리적 특성에 크게 영향을 준다. 즉 중심부에 거대 기

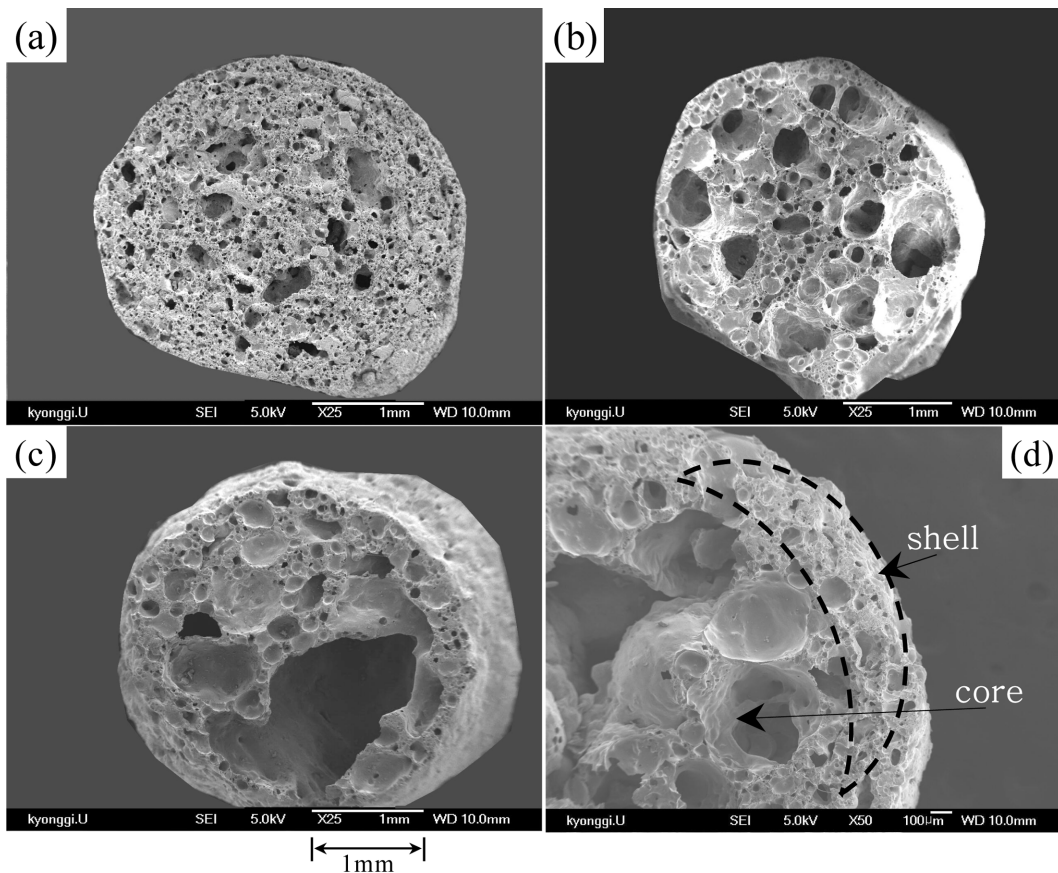


Fig. 2. Microstructure of cut cross section of fine lightweight aggregates formed by pelletizer and sintered in vertical furnace at (a) 1200°C (b) 1250°C and (c) 1300°C. (d) Magnified of (c) showing shell and core.

공이 다량 존재하는 골재는 초경량 특성을 갖게 되고, 표피층이 잘 발달된 골재는 높은 강도 및 낮은 흡수율을 갖게 된다.

3.2. 인공경량 세골재의 물리적 특성

인공경량 세골재의 물리적 특성을 평가하기 위하여 시간 경과에 따른 골재의 흡수율을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 흡수율 측정 1시간 정도의 초기단계에서는 모든 시편의 흡수율이 5% 이내로 측정되었고, 흡수 속도는 골재의 소결온도와 함께 증가되었다. 시간에 따른 흡수율은 성형방법에 따라 거의 차이가 나타나지 않았다.

수직로에서 부유 상태로 소성시킨 세골재의 24시간 흡수율은 성형 방법에 관계없이 소성온도에 따라 점차 증가하였다. 예를 들어, P 계열 시편들의 경우, 1200°C에서 소성한 시편(P-1200)의 24시간 흡수율은 6.1% 인 반면, 1300°C 소성시편은 13.3%로 2배 이상 크게 나타났다. C 계열 시편들의 경우도 P 계열의 경향과 같이 소성온도가 증가함에 따라 흡수율이 증가하여 1200°C 소성시편의 흡수율(7%)에 비해 1300°C 소성시편은 12%로 1.7배 높았다.

소성온도에 따라 흡수율이 증가하는 것은, Fig. 2의 미세구조 그림에서 보듯이 소성온도가 높아지면 기공률

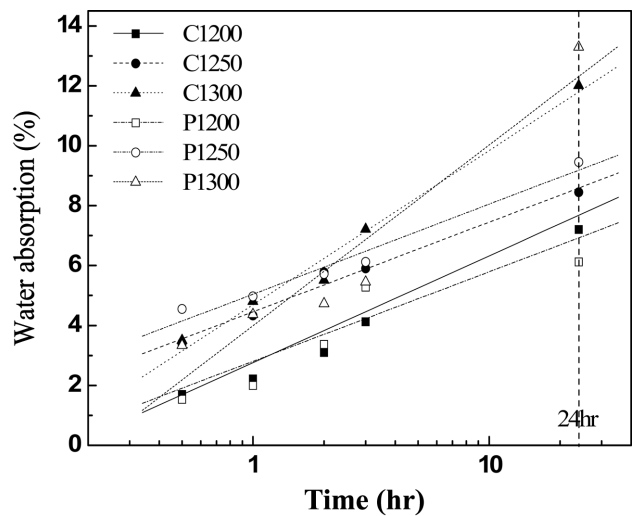


Fig. 3. Water absorption of fine artificial aggregates as a function of time. The capital 'C' and 'P' implies 'crushed' and 'pelletized' respectively and a number means sintering temperature (°C) in a specimen identifications.

이 증가되는 결과와 일치한다. 표면이 완전히 유리화되어 코팅되어 있다면 내부기공이 폐기공(closed pore)이 되어 흡수율이 기공율과 비례하지 않겠지만, 본 연구에서 제조된 시편들은 높은 기공율과 기공 개수로 인하여 기공들이 완전히 폐쇄되지 않았고 따라서 흡수율과 기공

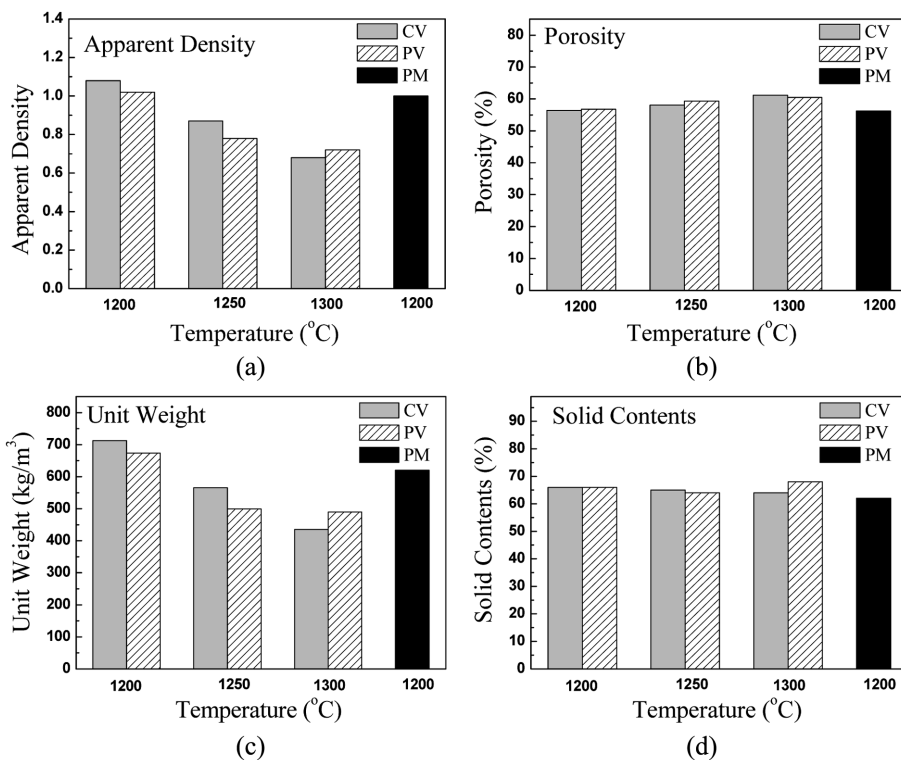


Fig. 4. Physical properties of fine lightweight aggregates. (a) apparent density (b) porosity (c) unit weight and (d) solid contents. CV means crushed and sintered at vertical furnace; PV means pelletized and sintered at vertical furnace; PM means pelletized and sintered at muffle furnace.

물이 비례했다고 생각된다.

인공경량 세골재의 겉보기 밀도, 기공률, 단위용적중량 그리고 실적률을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 골재의 겉보기 밀도는 성형방법에 관계없이 소결온도 증가와 함께 감소하는 경향을 나타내었다. 1300°C에서 소결된 경우 만 제외하고 1200~1250°C 소결범위에서 C 계열 시편의 겉보기 비중이 P 계열보다 높게 나타났다. 수직로에서 소결된 경량골재의 겉보기 밀도는 0.68~1.08 g/cm³의 범위로 대부분 물에 뜨는 정도의 경량성을 나타내었다.

일반 머플 전기로에서 pelletizer로 성형된 시편을 1200°C/5 min 분 직화 소결한 경우(PM), 같은 온도의 수직로에서 소성된 골재의 비중과 비슷하였다. 골재를 부유상태로 소성하는 수직로에서는 골재 끼리 서로 달라 붙어 덩어리를 형성하는 용착 현상이 없었으나, 머플 전기로에서 1200°C 이상에서 소결하게 되면 골재 간 용착 현상이 발생하였다.

수직로에서 부유 소성된 경량 세골재의 기공률은 성형방법에 관계없이 56.4~61.2% 범위로 나타났으며 소성온도가 높아질수록 기공률은 조금씩 증가하였다. 머플 전기로에서 소성된 시편의 기공율도 같은 온도에서 소성된 골재와 유사한 값을 나타내었다.

수직로에서 부유 소성된 골재의 단위용적중량은 435.2~712.8 kg/m³ 범위로 나타났으며 소결온도 증가에 따라 감소하였다. 1300°C를 제외하고 1200~1250°C 소결범위에서 C 계열 시편의 단위용적중량이 P 계열보다 높게 나타났다. 본 연구에서 제조된 골재는 KS에서 규정하는 일반모래 및 구조용 경량골재의 단위용적중량인 1100 kg/m³에 비하여 매우 낮아 우수한 경량 특성을 갖는 것으로 판명되었다[12].

실적률은 일정 부피를 갖는 용기에 골재를 충전시켰을 때 충전된 골재의 부피비율을 의미한다. 본 연구에서 수직로를 이용하여 부유 소성된 골재의 실적률은 성형방법 또는 소성온도에 거의 변화되지 않았고 64~68% 범위로 나타났다. 성형법 종류는 소성된 골재의 미세구조에 영향을 주지 않았으나 소성온도는 큰 영향을 주었다. 소성 온도가 증가할수록 골재의 기공이 거대화 되며 표면에 치밀한 구조를 갖는 표피층과 내부에 다공구조를 갖는 중심부의 구분이 뚜렷해졌다.

본 실험에서 수직로에서 부유 소성된 인공경량 세골재는 소성온도 및 성형방법에 따라 약간의 차이는 있으나 그 충격값이 대부분 25~30% 범위로 나타났으며, 이는 14.8% 값을 갖는 일반 자연골재에 비하여 내충격성이 다소 약한 것으로 측정되었다. 따라서 본 연구에서 제조된 경량 세골재를 골재 충격값이 중요한 선정 인자가 되지 않는 분야 예를 들어, 방음 및 방습, 배수 필터재, 담체 등에 사용될 때는 크게 고려할 필요는 없으나, 구조용 콘크리트에 적용할 경우에는 시공된 구조물이 설계

강도를 만족할 수 있는지 사전에 공시체 시험을 수행해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

세골재 제조 시 입자간 용착 현상을 억제하기 위하여 골재를 부유 상태에서 소성하는 수직로를 이용하였다. 원료 중 첨가된 폐백토 및 석분오니는 소성과정에서 각각 가스발생에 의한 골재 경량화 및 용제 역할에 의한 표면에 액상을 형성시키는데 기여하였다. 대부분 1200~1300°C에서 소성된 시편은 표면에 다량의 액상이 발달하였고 따라서 내부의 가스가 팽창하여 다공성의 중앙부와 상대적으로 치밀한 표피층이 형성되었다. 제조된 골재 크기는 2 mm 이하였다. 압출 성형체를 파쇄시켜 얻은 성형체는 부정형이고 가장자리가 날카로웠으나 1300°C 이상으로 소결하면 내부에 가스가 팽창하여 시편 전체가 부풀어져서 구형으로 되었다. 본 부유수직로에서 소성된 시편의 겉보기 밀도는 0.68~1.08 g/cm³ 범위로 대부분 물에 뜰 정도의 경량이었다. 골재의 물 흡수속도는 소결온도와 함께 증가하였으며 측정 1시간에서의 시편의 흡수율이 모두 5% 이내였으나 24시간 후에는 2배 이상으로 나타났다. 흡수율은 기공율과 비례하였고, 따라서 내부 기공들이 완전 고립된 폐쇄기공은 아님을 나타내었다. 부유소성로에서 제조된 세골재는 일반 전기 머플로에서 소성된 시편과 비슷한 물성을 나타내었으나, 골재 간 용착 현상이 발생하지 않았다. 본 연구에서 제조된 경량 세골재의 단위용적중량은 435~713 kg/m³ 범위로 일반모래 및 구조용 경량골재의 KS 기준보다 우수하게 나타났다. 실적률은 64~68%로 경량콘크리트용 골재로 적당하다고 판단된다. 그러나 내충격성은 자연골재보다 다소 낮았으며 따라서 본 연구에서 제조된 골재를 구조용 콘크리트에 적용할 경우, 시공된 구조물이 설계 강도를 만족할 것인지는 사전에 공시체 시험을 수행해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21C 프론티어 사업, 산업폐기물 재활용 기술 개발 사업단의 연구비(3D-1-1) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Y.B. Chai, "Materials mineral of lightweight aggregates", Mineral and Industry 3[1] (2002) 124.
- [2] T.Y. Lo, H.Z. Cui and Z.G. Li, "Influence of aggregate

- pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete”, *Waste Management* 24[4] (2004) 333.
- [3] T.Y. Lo and H.Z. Cui, “Effect of porous lightweight aggregate of strength of concrete”, *Materials Letters* 58[6] (2004) 916.
- [4] K.H. Kwon, “The sand war at the coast of Busan and Tongyeong” Reported at the Local section of Internet Chosun Ilbo, <http://news.chosun.com>, Oct. 13 (2008).
- [5] J.H. Cha “The development plans of housing complex for the recreation and tour in Gulup-Do” Reported at the Local section of Internet Donga Ilbo, <http://www.donga.com>, July 16 (2008).
- [6] S.J. Choi, S.Y. Lee, B.C. Yeo and M.H. Kim, “An experimental study on the properties of crushed sand in capital region and concrete according to the replacement ratio of crushed sand”, *Journal of the Korean Institute of Construction* 5[1] (2005) 63.
- [7] S.D. Kang, “A study on manufacturing of autoclave lightweight concrete with fine sludge of crushed sand”, *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers* 35[3] (1998) 264.
- [8] J.S. Kim, “Experimental study on application of mortar using a recycled fine aggregates as a natural fine aggregates substitutes” The 32 Cement Symposium 32, Held at Hotel Solak Park, Sokcho-Si, Kangwon-Do, Korea, July 14-15 (2005) 222.
- [9] H.J. Lee and S.G. Kang, “Fabrication and characterization of artificial aggregates using recycled resources” to be published in *J. Kor. Ceram. Soc.* 46(2) (2009).
- [10] KSF 2504 : Testing method for the density and absorption rate of fine aggregates, Korean Standard Association (2003).
- [11] KSF 2505 : Testing method for the unit volume weight and void content of aggregates, Korean Standard Association (2003).
- [12] KS F 2534 : Standard of unit weight for sands and lightweight aggregates, Korean Standard Association (2003).
- [13] KS F 2581 : Testing method for determination of aggregates impacting value - Method of test for production control of aggregates, Korean Standard Association (2003).