

하수슬러지로 제조한 경량 벽돌의 물성평가

Evaluation of the Physical Properties for Lightweight Bricks Made from Sewage Sludge and Wasted Glass

정재아 · 손영금 · 이우근[†]
Jae-Ah Jeong · Yeong-Geum Son · Woo-Keun Lee[†]

강원대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

(2012년 7월 30일 접수, 2013년 11월 4일 채택)

Abstract : Ocean dumping of sewage sludge is banned. Therefore, it is needed to develop alternative treatment method. Sewage sludge and waste glass are used to prepare lightweight brick. Large amount of energy is consumed to prepare building material, because of its high preparation temperature, or above 1,200°C. We study to prepare lightweight brick, using sewage sludge and waste glass as raw materials in this research. Lightweight brick was made at low temperature of below 800°C to reduce CO₂ emission by geopolymer technique. Calcination temperature, mixing ratio of sewage sludge/waste glass and water glass/water were discussed to evaluate their effect on the brick prepared. In this study, the optimal conditions for preparing bricks was 750°C of firing temperature, 1.5 of mixing ratio for water glass/water and 10 : 90 wt% of sewage sludge/waste glass. At this condition, compressive strength and specific gravity of brick prepared were 5.1 MPa and 0.46, respectively. These values satisfy the criteria on a lightweight brick.

Key Words : *Lightweight, Brick, Sewage Sludge, Wasted Glass, Geopolymer*

요약 : 하수슬러지의 해양투기가 금지됨에 따라 하수슬러지의 적정처리에 대한 요구가 커지고 있다. 따라서 본 연구에서는 하수슬러지와 폐유리를 이용하여 경량벽돌을 제조하고자 하였다. 건축자재인 벽돌은 통상 1,200°C 이상의 고온에서 제조되기 때문에 벽돌 제조시 다량의 에너지가 소비된다. 본 연구에서는 하수슬러지와 폐유리를 이용하여 경량벽돌 제조시 CO₂ 배출량을 줄이기 위해 800°C 이하의 낮은 온도에서 지오폴리머 기술을 이용하여 벽돌을 제조하였다. 경량벽돌 제조시 소성온도, 하수슬러지와 폐유리 및 물유리와 물의 혼합비 등이 주요 영향 인자이며, 이들의 변화에 따른 경량벽돌의 특성을 평가하였다. 본 연구결과에 따르면 경량벽돌의 최적 제조조건은 소성온도 750°C, 물유리/물 혼합비 1.5, 하수슬러지/폐유리 비 10 : 90 wt%였다. 이때 제조한 경량벽돌의 압축강도 5.1 MPa, 비중 0.46으로 발포세라믹 경량벽돌 기준을 만족시키는 것으로 나타났다.

주제어 : 경량벽돌, 벽돌, 하수슬러지, 폐유리, 지오폴리머

1. 서론

국내 하수슬러지 발생량은 2004년부터 2011년까지 꾸준 히 증가되어 왔으며, 2011년에는 약 3,095,948 ton의 하수슬 러지가 발생되었다. 이렇게 발생된 하수슬러지의 처리는 해 양투기가 38%로 가장 높았으며, 재활용 29%, 소각 11%, 육 상매립 10%, 연료화 9%, 기타 4%로 처리되고 있다. 그러나 하수슬러지 처리에 가장 많은 부분을 차지하는 해양배출의 경우 2012년 전면금지 됨에 따라 해양투기로 버려지던 하 수슬러지의 처리방안이 시급히 요구되고 있다.¹⁾

또한 지속적인 주택건설과 노후화된 건축물의 재건축이 증가함에 따라 건설폐기물이 증가하고 있다. 이에 따른 안 정적인 처리 및 재활용은 환경보전과 천연자원의 보존, 막대 한 처리비용 절감 차원에서 당면 과제로 부각되고 있다. 버 려지거나 매립되는 건설폐기물 중 폐 판유리의 경우 약 20% 를 차지하고 있으며, 2009년 폐유리의 총 발생량 641,000톤 중 현재 약 73.5% 정도가 재활용되고 나머지는 매립되고 있

는 실정이다.^{2,3)} 폐유리는 유리 블록, 유리타일, 유리비드, 발 포용 경량 골재 등으로 다양하게 활용되지만, 폐유리를 타 용도로 재자원화 하는 업체들이 대부분 영세하고 그 수요가 국한되어 있어 기술개발에 대한 연구와 기술력이 매우 미 흡한 실정이다⁴⁾. 또한, 폐유리 해결방안으로 콘크리트와 섞 어 쓰거나 유리 세라믹(발포 유리 등) 등이 있지만, 이러한 공정들은 1,000°C 이상의 고온을 요구하고 중금속이 휘발 및 탄소를 포함한 발포제로 인한 CO₂ 가스를 방출하는 문 제를 가지고 있다.

건축 마감재의 경우에는 크게 석재류, 세라믹 소재, 목재 류, 섬유상 복합 재료 등을 볼 수 있지만, 대부분이 벽돌 및 타일, 석재 등이 사용되고 있다. 그러나 대부분의 건축 마감 재의 경우 1,200°C 이상의 고온에서 생성되어 고에너지를 소비하며 지구 온난화의 주범인 CO₂를 생성하는 등 많은 문제점이 있다. 또한, 천연, 인공 건축마감재의 경우, 강도 에 비해 단위중량이 높아 부재의 자중을 높이는 단점을 가 지고 있다.

[†] Corresponding author E-mail: woklee@kangwon.ac.kr Tel: 033-250-6355 Fax: 033-257-6350

따라서 본 논문에서는 경량 마감재를 제조하여 에너지 절약 및 탄소 배출량 문제를 해결하고자 하였으며, 이때 지오폐유리 기술과 하수슬러지, 폐유리를 원료로 활용하고자 하였다. 지오폐유리의 경우에는 60°C 정도의 온도에서 충분한 강도가 발현되기 때문에 1,000°C 이상의 고온은 요구되지 않으며 다만, 하수슬러지의 유기물 제거와 폐유리분말의 발포를 위해 700~800°C 소성과정을 진행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서 사용된 폐유리는 발포 역할로 사용하였으며, A사에서 수집한 것으로 판유리를 분쇄 시 집진시설에서 발생하는 유리분말을 325 mesh (45 μm 이하)로 체가름 하여 사용하였다.

하수슬러지는 C시 하수처리장에서 탈수 케이크를 채취하여 사용하였다. 탈수 케이크의 하수슬러지는 함수량이 1% 이하가 될 때 까지 자연건조 후 폐유리분말과 균일하게 혼합하기 위해 40 mesh (400 μm 이하) 이하로 체가름 하여 사용하였다.

물유리는 공업용으로 시판되고 있는 H사 물유리를 사용하였다.

실험에 사용된 재료들은 엑스선 형광분석기(ZSX-100e)를 통해 화학성분을 분석하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 폐유리는 SiO₂ 성분이 약 69.7%로 가장 높은 함량을 보이고 있으며, 하수슬러지는 SiO₂ 9.8%, Al₂O₃ 16.3% 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 물유리는 알칼리금속인 실리카(SiO₂)가 함유된 물질로 물유리 내부의 Si-OH 수화물의 열분해로 인한 팽창으로 기공을 형성하는 특징이 있다.^{8,9)}

2.2. 실험방법 및 실험 조건

2.2.1. 물유리 혼합비에 따른 영향

물유리 혼합비에 따른 압축강도 및 비중의 영향을 검토하기 위해 소성온도를 700°C에서 하수슬러지와 폐유리의 혼합비를 10:90 wt%로 고정하고, 물유리:수용액 비를 0.5~2.0로 변화시켜 벽돌을 제조하였다.

Table 1. Chemical composition of raw materials (unit : wt %)

	Waste glass	Sewage sludge	Water glass
SiO ₂	69.7	29.8	35
Al ₂ O ₃	4.89	16.3	
CaO	10.2	11.0	
Fe ₂ O ₃	1.28	9.56	
P ₂ O ₅	0.02	14.8	
MgO	2.33	1.68	
Na ₂ O	7.64	0.75	14
SO ₃	0.25	10.1	
Others	3.69	6.01	51

Table 2. Experimental condition of water glass and water ratio

Raw materials		Liquid	Calcination temperature (°C)
Sewage sludge	Waste glass	Water glass/water	
		0.5	700
10%	90%	1.0	
		1.5	
		2.0	

Table 3. Experimental condition of mixing ratio and calcination temperature

Sewage sludge (wt%)	Waste glass (wt%)	Calcination temperature (°C)
10	90	700
20	80	750
30	70	800
40	60	

2.2.2. 하수슬러지와 폐유리 혼합비 및 소성온도에 따른 영향

40 mesh 이하의 건조한 하수슬러지와 325 mesh 이하의 폐유리를 Table 3의 혼합비율로 혼합한 후 물유리 용액을 가해서 슬러리 상태로 만든다. 이 슬러리를 몰드(50×50×50 mm)에 넣고 습윤양생장치에서 60°C로 건조한 후 소성하였다. 소성시 폐유리의 부풀음이나 과소성을 막기 위해, 550°C에서 예열한 후 5°C/min의 승온률로 700~800°C까지 상승시켜 2시간 소성하였다.

2.3. 제조한 벽돌의 특성평가

본 연구에서 제조하고자 하는 경량벽돌은 기존의 세라믹 벽돌에 비해 비중이 낮으면서 압축강도는 일정 값 이상으로 유지해야 한다. 따라서 본 연구에서는 제조한 벽돌이 이와 같은 목표를 달성하고 있는 지를 검토하기 위해 벽돌의 압축강도와 비중을 측정하고, 이 값이 경량 발포 세라믹 블록에 대한 국내 기준인 “KS L 8551”을 만족하는지 평가하였다. 또한 사용하는 재료들이 폐자원이라, 환경안전성에 대한 평가가 필요하나 이들 재활용제품에 대한 환경안전성 기준이 없어서 폐기물의 중금속 용출실험(KSLT)방법에 따른 중금속 용출량을 검토하였다.

2.3.1. 압축강도 및 비중분석

발포세라믹 경량벽돌에 대한 국내 기준은 KS L 8551에 따르면 압축강도는 2.94 MPa 이상, 비중은 0.45~0.55 g/cm³이다. 따라서 본 연구에서는 제조한 벽돌이 이 기준을 만족하고 있는 지를 평가하기 위해 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하여 측정하였으며, 비중은 105±5°C에서 건조한 공시체를 질량(m)과 부피(V)를 측정한 후 4°C를 기준으로 구하였다.

2.3.2. 중금속 용출실험

제조한 경량 벽돌에서 향후 중금속이 용출될 수 있는지에

대한 가능성 여부를 판단하기 위해 중급속 용출실험을 하였다. 중급속 용출실험은 한국표준용출실험법(KSLT)으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

하수슬러지와 폐유리를 이용하여 경량벽돌을 제조할 때 하수슬러지나 폐유리가 온도에 따라 발포특성이 변화하게 되어 제조하는 벽돌의 경량성이나 압축강도가 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 물유리 첨가량 및 하수슬러지와 폐유리의 혼합비, 소성온도에 대한 경량벽돌의 특성을 검토하였다.

3.1. 물유리 혼합비에 따른 영향

물유리 혼합비에 따라 제조된 벽돌의 압축강도와 비중변화를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에 따르면 물유리/수용액의 비가 혼합비가 1.5일 때 압축강도는 5.65 MPa로 가장 높게 나타났으며, 비중은 0.51로 가장 낮은 값을 나타내었다. 물유리/수용액의 비가 0.5와 1.0인 경우 압축강도는 이보다 감소하여 각각 2.57 MPa, 3.91 MPa를 나타내었고 비중은 각각

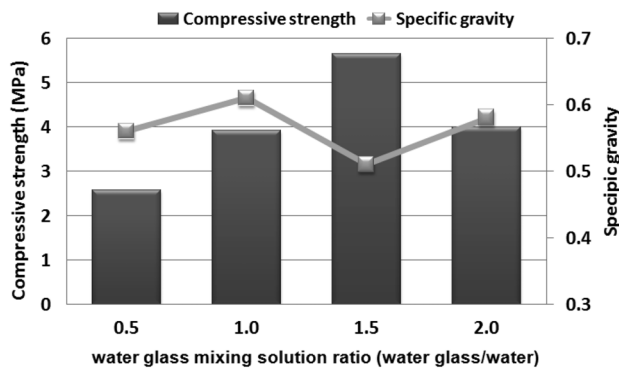


Fig. 1. Compressive strength and apparent specific gravity for brick prepared.

0.56, 0.61을 나타내었다. 이는 발포보다는 치밀화로 인해 압축강도 및 비중이 증가한 것을 알 수 있었다. 또한, 물유리 혼합비가 2.0인 경우에는 물유리의 과다 발포 및 과용용으로 인해 압축강도는 감소하고 비중은 증가한 것을 알 수 있었다.

따라서 본 실험에서는 물유리의 혼합비율을 1.5로 고정하여 실험을 진행하였다.

3.2. 하수슬러지와 폐유리 혼합비 및 소성온도에 따른 영향

물유리의 혼합비를 1.5로 고정하고, 소성온도 및 혼합비에 따른 압축강도 및 비중 측정값을 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에 따르면 하수슬러지와 폐유리의 비가 10:90 wt%에서 40:60 wt%로 갈수록, 즉 폐유리의 함량이 줄어들수록 (하수슬러지의 함량이 증가할수록) 압축강도가 5.7 MPa에서 2.6 MPa로 현저히 낮아지는 것을 알 수 있었다. 하수슬러지 함량이 증가함에 따라 압축강도가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 하수슬러지가 탄화됨에 따라 제조된 블록 내의 결합 구조를 약하게 하여 강도에 부정적인 영향을 끼친 것으로 판단된다.

소성온도에 따른 영향은 소성온도가 증가할수록 압축강도가 약간 증가하기는 하였지만 그에 따라 비중도 0.46에서 0.69로 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 벽돌내부의 치밀화 현상 때문으로 판단된다.

Fig. 3에는 소성온도를 750°C로 하고, 하수슬러지와 폐유리의 혼합비를 변화시켰을 경우의 벽돌의 표면에 대한 표면 사진을 도시하였다.

이 사진에서 나타난 것처럼 하수슬러지와 폐유리의 혼합비가 10:90 wt%인 경우는 폐유리의 발포특성에 따른 기공의 형성으로 압축강도는 크면서 비중은 낮아지는 결과가 얻어졌지만 하수슬러지 양이 증가하면서 기공이 줄어드는 현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 발포로 생긴 macro pore를 첨가된 하수슬러지가 메워 기공이 줄어드는 현상이 발생한 것으로 판단된다.

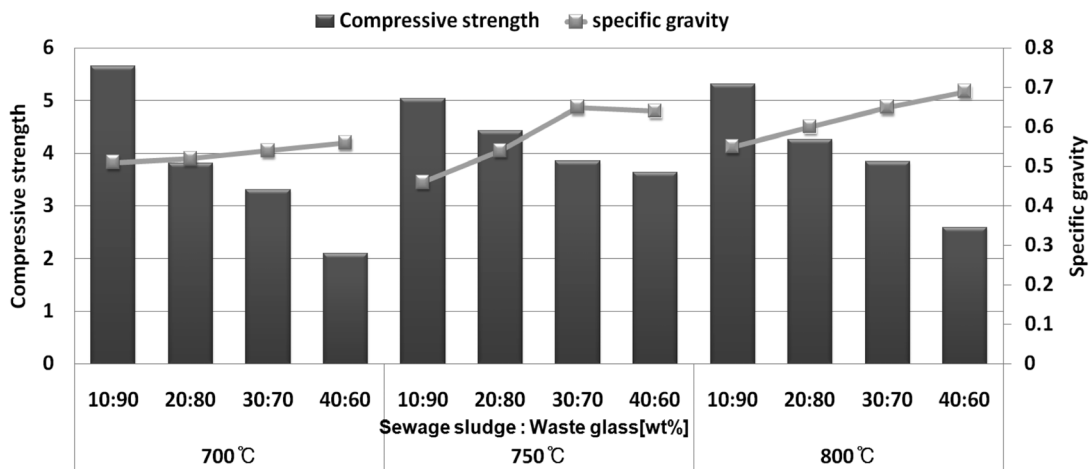


Fig. 2. Compressive strength and apparent specific gravity for calcination temperature.

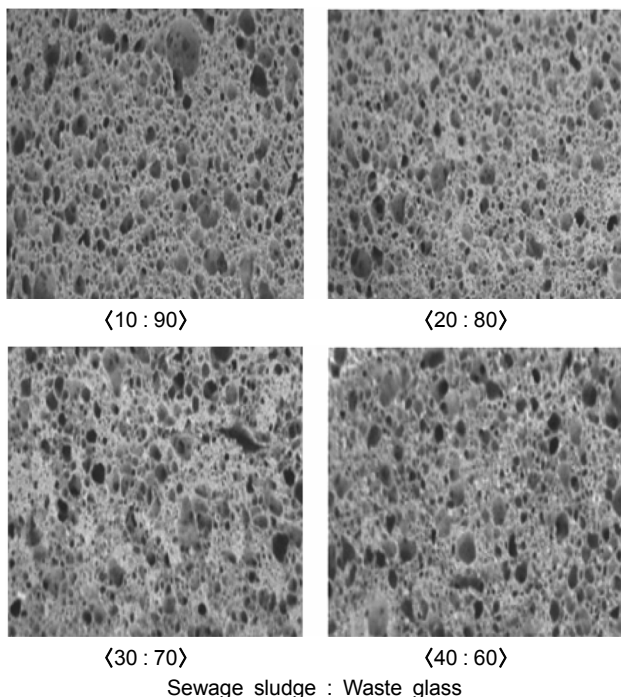


Fig. 3. The surface state on the mixing ratio of calcination temperature (750°C).

그러나 하수슬러지 함량이 계속 증가하면 하수 슬러지 중 유기물의 열분해에 의한 미세 기공들의 발달로 다시 기공이 많아지면서 압축강도가 현저히 저하되는 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

앞서 검토한 내용을 토대로 적절한 압축강도와 비중을 갖는 경량벽돌을 제조하기 위한 실험조건은 물유리의 혼합비 1.5, 소성온도 750°C, 하수슬러지와 폐유리의 비가 10:90 wt% 일 때, 발포세라믹 경량벽돌에 대한 국내 기준 KS L 8551을 만족하는 것으로 검토되었다.

3.3. 중금속 용출실험 결과

본 연구에서는 폐자원을 활용하여 경량 소재를 제조하였으므로, 이로 인해 빗물 등 환경 중에 노출되었을 때, 본 연구에서 제조한 경량벽돌로부터 중금속의 용출가능성을 평가하기 위해 중금속용출실험을 수행하였다.

용출실험은 본 연구에서 목표로 하는 경량벽돌의 특성을 만족시키는 조건에서 제조한 벽돌을 대상으로 하여 용출실험을 수행한 결과이며, 그 결과는 Table 3에 정리하였다. 원료로 사용한 하수슬러지는 약간의 중금속을 함유하고 있으나 중금속 허용기준치를 만족하는 것을 알 수 있었으며, 제

Table 3. Leached concentration of heavy metal from specimen by KSLT method (unit : mg/L)

	Pb	Cd	Cu
Regulation limit	3	0,3	3
Sewage sludge	0,36	0,03	-
Brick	0,002	0,001	-

* Brick ; Average of all bricks

조된 경량 벽돌 또한 중금속 허용기준치를 만족하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

하수슬러지 및 폐유리 혼합비에 따른 경량벽돌 제조 시 혼합비율 및 소성온도에 대한 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) 물유리 혼합비율이 0.5와 1.0인 경우에는 발포보다는 치밀화 현상으로 인해 압축강도 및 비중이 증가한 것을 알 수 있었으며, 물유리 혼합비율이 1.5인 경우 발포가 잘 이루어져 비중이 감소하는 것을 알 수 있었다.

2) 소성온도 및 하수슬러지 함량이 증가함에 따라 하수 슬러지 탄화로 제조된 블록 내의 결합 구조를 약하게 하여 강도에 부정적인 영향을 끼친 것을 알 수 있었다. 또한, 비중의 경우에는 물유리 발포로 인해 형성된 macro pore에 하수슬러지 분말이 기공을 메워 비중이 증가한 것을 알 수 있었다.

3) 제조된 경량 벽돌은 소성온도 750°C에서 폐유리 함량이 90 wt% 이상 첨가되었을 때 KS L 8551규격을 만족하였다. 또한, 환경안정성을 평가하기 위해 중금속 용출실험 결과 허용 기준치를 만족하는 것을 알 수 있었다.

KSEE

참고문헌

1. Ministry of Environment, "2011 Statistics of sewerage," (2012).
2. Ministry of Environment, "Environmental statistics yearbook," (2010).
3. Cho, H. H., Song, D. H. and Go, S. S., "A Study on the Thermal Conduction and physical properties of self-leveling mortar using waste glass," *Arch. Inst. Kor.*, **26**(12), 149~158 (2010).
4. Ministry Of Construction and Transportation, "Construction recycling of harmfulness waste and research trends and application," pp. 94~116(2003).
5. Ministry of Environment, "Official test methods of waste," (2011).
6. KS L 8551(2007).
7. KS F 2405(2010).
8. Kong, Y. P., Seo, S. H., Kim, J. H. and Suhr, D. S., "Characteristics of Porous Ceramics Depending on Water Content of the Water Glass and Heat Treatment Temperature (In Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42**(10), 691~697(2005).
9. Prud'homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Clacens, J.-M. and Rossignol, S., "Role of alkaline cations and water content on geomaterial foams: Monitoring during formation," *J. Non-Crystalline Solids*, **357**, 1270~1278(2011).