

폐유리를 분쇄 및 발포하여 제조한 인공경량골재의 경량모르타르 적용 기초물성 평가

Evaluation on Material Properties of Lightweight Cement Mortar with Crushed and Expanded Waste Glass Aggregates



박정훈 Jung-Hoon Park
☎케미콘 기술연구소 과장
E-mail : jhpark@chemicon.co.kr

1. 서론

최근 전 세계적으로 환경을 보존하고 기후변화협약을 대응하기 위해 에너지 및 자원을 효율적으로 사용하며 발생하는 폐기물을 재활용하는 등 온실가스배출량의 발생을 최소화하기 위한 노력이 활발하다. 건설산업은 시멘트의 제조과정에서 온실가스배출량의 발생이 높고 천연골재는 점차 고갈되고 있어 앞으로 수급이 어려워질 것이 예상되며 건설폐기물의 발생량이 점차 증대됨에 따라 환경문제에 대해 적극적으로 대비해야 한다. 국내에서는 발전소 및 산업공장에서 발생하는 다양한 산업폐기물을 시멘트에 혼입하여 콘크리트의 물리·화학적인 특성을 개선시키고 에너지 및 자원을 절감하는 기술이 연구 및 개발되어 활용되고 있으며, 최근에는 다양한 산업폐기물을 재활용하여 인공경량골재를 생산하고 이를 산업에 적용하기 위한 연구가 활발하다¹⁻²⁾.

최근 폐유리를 파쇄 및 고온에서 발포시켜 인공경량골재를 제조하고 이를 다양한 산업분야에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히, 건설산업의 경우 콘크리트용 골재로 사용하는데 있어서 재료의 경제적 비용의 문제와 불규칙적인 물성으로 인해 콘크리트 품질의 안정성을 확보하는데 어려움이 있어 일부 건설현장의 시범적용에 그치는 수준으로 실제 적용 실적은 미비한 수준이다³⁻⁵⁾. 폐유리는 다양한 산업에서 판유리, 유리섬유, 유리병 등의 형태로 발생되고 있으며 유리제품의 활용이 증대됨에 따라 폐유리의 발생량도 증대하고 있다. 국내 폐기물관리법에서는 폐유리를 파쇄·분쇄하여 유리제품이나 건축·토목자재의 원료로 가공하는 것을 규정하고 있다. 선진국에서는 폐유리를 유리병원료로의 재활용 수준을 넘어 다양한 분야에 재사용하기 위한 기술이 개발되어 활발하게 적용되고 있으나 국내에서는 아직까지 유리병의 원료로 재사용하는 기술이 대부분이다. 또한 환경부에서는 자원의 회수 및 재활용이 촉진될 수 있도록 장기 재활용목표율을 고시하고 있으며 2017년 기준으로 폐유리의 재활용의무율은 79.3%이며 이는 2005년 67.2%에서 시작하여 매년 상승하는 추세이다⁶⁾. 즉, 앞으로 재활용의무율이 증가할 것을 대비하여 폐유리를 건축·토목자재의 원료로 가공하여 실제 공사에 적용하기 위한 공법 개발이 필요하다. 이와 같은 기술은 버려지는 자원을 재

활용함으로써 산업폐기물을 처리하는데 소요되는 비용과 에너지를 절약하고 매립문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 인공경량골재를 사용하여 콘크리트의 특성을 개선시키고 국제적인 친환경기술정책과 규제에 부합하여 경제적·사회적인 이슈에 대응이 가능할 것으로 기대된다⁷⁻⁸⁾.

폐유리를 활용하여 제조한 인공경량골재는 천연골재에 비하여 내부에 공극이 많아 밀도, 열전도율, 강도가 낮은 특성이 있다. 이와 같은 인공경량골재의 특성을 잘 활용하여 고층 건축구조물 또는 교량, 대공간 구조물 등에 경량콘크리트로 적용할 경우 구조물 전체의 자중을 감소시켜 구조부재의 단면 축소 및 다양한 스펙과 구조에 적용할 수 있어 구조적인 측면에서 효용성이 높으며 단열성과 방음효과 등으로 건축구조물 전체의 효용성도 증대시키기 때문에 해외에서는 건축 토목분야에 다양한 활용이 진행되고 있다. 반면 국내에서는 아직까지 경량콘크리트에 대한 인식이 부족하고 인공경량골재의 원료가 되는 팽창점토와 팽창혈암 등의 부존자원이 거의 없는 여건과 대량생산 및 적용사례에 대한 품질과 안전규정이 충분히 검토되지 못하였고 인공경량골재 시장의 기반조차 형성

되어 있지 않은 실정이다³⁻⁵⁾.

이에 따라 본 연구에서는 폐유리를 활용하여 제조된 인공경량골재를 모르타르에 적용함으로써 조성물에 관한 기초적인 특성을 분석하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 폐유리를 활용한 인공경량골재를 사용한 경량콘크리트 개발의 기초적인 자료를 마련하고자 한다.

2. 실험 계획

2.1 사용재료

인공경량골재를 모르타르 및 콘크리트에 적용하는데 있어서 골재자체의 강도가 낮고 흡수율이 높은 특성으로 인해 기준강도를 만족하기 어려운 것으로 나타났다. 인공경량골재는 사용된 재료와 제조공법에 따라 다양한 형태로 제조되고 있으며 펄라이트, 질석, 팽창점토, 팽창유리 경량골재의 특성과 외관을 [표 1], <그림 1>에 나타내었다. 비중이 작을수록 압축

[표 1] 경량골재 종류별 특성

Characteristic	Pelite	Vermiculite	Expanded clay	Expanded glass granulate
Thermal conductivity[W/mK]	0.06	0.05-0.07	0.1-0.22	0.07
Combustible	incombustible			
Bulk density[kg/m ³]	39-95	60-160	280-650	140-530
Grain shape	square-edged, very irregular	square-edged, very irregular	round, crushed	round
Compressive strength	very low	low	high	high
Water absorption[Volume %]	50-70	50-70	5-15	5-7
Recycling product	no	no	no	yes



Pelite
(magnified 15x)



Vermiculite
(magnified 24x)



Expanded clay
(magnified 9.45x)



Expanded glass granulate
(magnified 30x)

그림 1. 인공경량골재 비교

강도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 팽창유리의 경우 경량골재 중 유일하게 폐자원을 재활용하여 제조되었고 흡수율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

2.2 실험 배합

본 연구에서는 시멘트와 일반골재의 중량비를 1:3으로 설정한 모르타르 배합에서 일반골재를 폐유리경량골재로 20~25 wt%만큼 치환하여 제조한 경량모르타르의 물성 실험을 진행하였다. 폐유리경량골재를 입도 사이즈에 따라 0.5~1.0 mm, 1.0~2.0 mm, 2.0~4.0 mm의 세 종류로 구분하

였고 이를 각각 20 wt%만큼 치환하여 입도에 따른 물성을 평가하였다. 또한 3종류의 입도를 혼합하여 25 wt%만큼 치환하여 입도조합의 차이에 따른 물성을 평가하였다. 폐유리경량골재는 앞서 기술한바와 같이 경량골재 중 흡수율이 가장 낮고 강도가 보통수준보다 우수한 독일 P사의 폐유리로 만든 팽창형 유리골재(이하, 폐유리경량골재)를 선정하였다. 폐유리경량골재는 고품질의 재생유리를 분쇄하여 약 900℃ 온도의 특수한 가마(kiln)에서 소성 및 발포시킨 골재로서 안정성이 우수하며 입도별 물리적 성질은 [표 2]와 같다. 폐유리경량골재의 입도 사이즈에 따른 100g의 부피를 비교한 모습은 <그림 2>에 나타내었다.

[표 2] 폐유리경량골재의 물리적 특성

Aggregate	Standard sand	Expanded glass granulate		
Grain size(mm)	0.08 - 1.6	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 4.0
Grain density(kg/m ³)	2.53	0.43	0.34	0.32
Water absorption by mass(wt%)	0.6	27	22	22

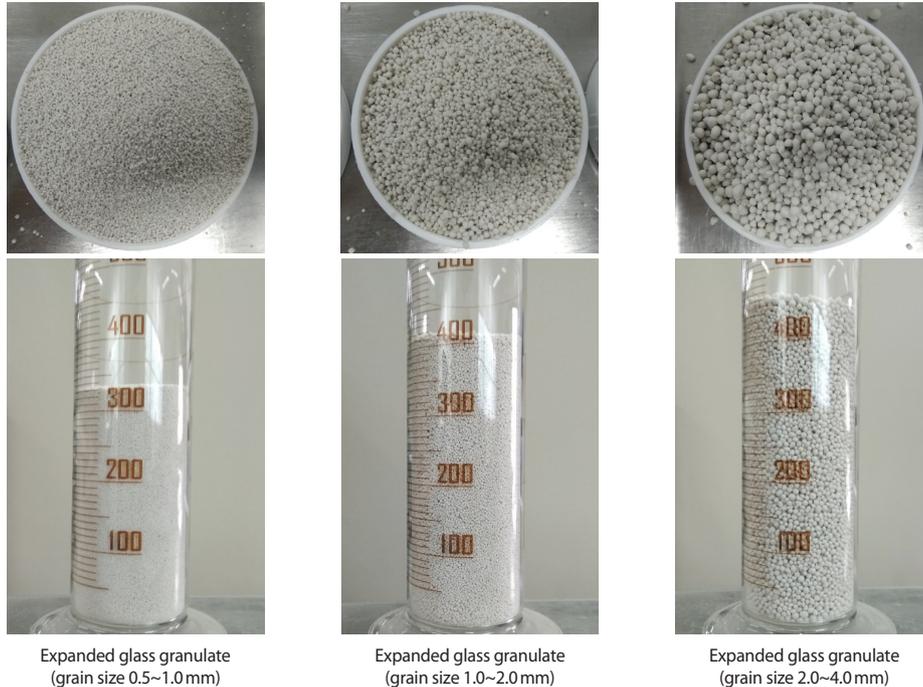


그림 2. 폐유리경량골재 입도별 부피 비교

시멘트는 국내 A사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였고 실리카 폼은 국내 B사의 SiO₂ 함량이 95%인 제품을 사용하였다. W/B = 55%이며 폐유리경량골재의 사용에 따른 작업성과 부피변화를 고려하여 배합수와 혼화제를 조절하였다. 혼화제는 PC계 유동화제와 VAE계 분말수지 및 셀룰로오스 섬유를 사용하였다. 모르타르 배합비율과 사용된 재료의 물리·화학적 특성을 [표 3, 4, 5]에 나타내었으며 모르타르의 제조는 KS L 5105에 따라 실시하였다.

3. 실험 결과

3.1 플로우

폐유리경량골재 입도별 치환에 따른 모르타르 배합 직후와 20분 경과에 대한 플로우를 <그림 3>에 나타내었다. 전반적으로 모르타르에 치환된 폐유리경량골재의 입도가 작을수록 초기 플로우가 감소하였고 입도가 큰 경우에는 초기 플로우

[표 3] 폐유리경량골재 적용 모르타르 배합비율(g)

Specimen	Binder		Water (w/b = 0.55)	Aggregate				Chemical admixture		Mortar properties		
	Cement	Silica fume		Standard silica sand	Expanded glass granulate				SP*	AS**	Fresh density	Flow diameter (mm)
					0.5 - 2.0 (mm)	0.5 - 1.0 (mm)	1.0 - 2.0 (mm)	2.0 - 4.0 (mm)				
Reference	405	45	247.5	1350.0				4.50	0	2209	174	
Single u-1	405	45	256.5	1080.0	270.0			6.75	1.35	1743	168	
Single u-2	405	45	254.3	1080.0		270.0		6.75	1.35	1667	170	
Single u-4	405	45	252.0	1080.0			270.0	6.75	1.35	1557	173	
Complex h-1	405	45	261.0	1012.5	168.8	94.5	74.3	9.00	1.69	1534	172	
Complex h-2	405	45	258.8	1012.5	94.5	168.8	74.3	9.00	1.69	1511	172	
Complex h-4	405	45	256.5	1012.5	94.5	74.3	168.8	9.00	1.69	1481	173	

* SP : Superplasticizer

** AS : Anti-segregation agent

[표 4] 시멘트 및 실리카 폼, 폐유리경량골재의 물리·화학적 특성(wt%)

Binder	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Specific density
Cement	61.7	21.86	4.95	3.66	2.75	0.1	0.1	2.16	3.15
Silica fume	0.11	95.36	0.13	0.09	0.08	0.27	0.49	0.08	2.2
Expanded glass granulate	8.5	71.5	2.21	-	1.8	12.5	1.8	-	0.11 ~ 0.65

[표 5] 혼화제 특성

Chemical admixture	Product type	Appearance
Superplasticizer	Polycarboxylic acid	Light brownish liquid (SC* = 20%)
Anti-segregation agent	VAE** polymer, cellulose fiber powder	White powder

* SC : Solid concentration

** VAE : Vinyl acetate ethylene



Flow [mm]	Reference	Single u-1	Single u-2	Single u-4	Complex h-1	Complex h-2	Complex h-4
0 min	174	168	170	173	172	172	173
20 min	168	160	162	166	165	166	165

그림 3. 폐유리경량골재 적용 모르타르 플로우

우 수치가 일반 모르타르와 유사하였다. 이는 입도가 작을수록 경량골재의 비표면적이 증가하여 흡수량이 증가하여 작업성이 감소한 것으로 예상된다. 폐유리경량골재의 입도를 조합하여 사용할 경우 전체적으로 일반 모르타르와 유사한 초기 플로우 수치를 나타내었다. 모르타르 제조 20분 경과 후 플로우는 일반 모르타르가 6mm만큼 감소하였고 폐유리경량골재가 사용된 배합의 경우 일반모르타르와 유사하게 6 ± 2 mm만큼 감소하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 시간 경과에 폐유리경량골재의 흡수량이 크지 않은 것으로 판단된다. 이는 폐유리경량골재가 유리질의 표면이 매끄러운 구(sphere)형태로 구성되어 있어 시간경과에 따른 흡수량이 크지 않으며 부피의 증가 및 불베어링효과로 인해 작업성을 유지하는 특성에 기인한 것으로 사료된다.

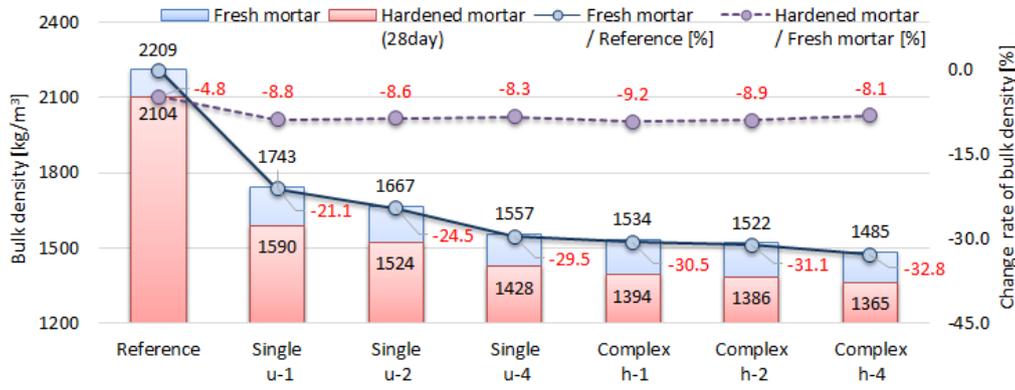
3.2 단위용적질량

폐유리경량골재 입도별 치환에 따른 모르타르 배합 직후와 28일 경과에 대한 단위용적질량을 <그림 4>에 나타내었다. 모르타르에 치환된 폐유리경량골재의 입도가 클수록 단위용적질량이 크게 감소하였으며 단일 입도의 폐유리경량골재를 사용한 모르타르에서 입도 사이즈 0.5~1.0mm의 경우에는 21.1%까지 감소하였고 2.0~4.0mm의 경우에는 29.5%까지

단위용적질량이 감소하였다. 입도 사이즈를 혼합하여 사용할 경우 단위용적질량이 30.5~32.8%만큼 감소하였으며 이는 입도 사이즈가 혼합될 경우 다소 조립율의 차이가 있더라도 단위용적질량의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 모르타르 28일 재령 후 단위용적질량을 균지않은 모르타르의 단위용적질량과 비교한 결과 일반 모르타르에서 4.8%만큼 감소하였고 폐유리경량골재가 사용된 배합의 경우에는 8.1~9.2%만큼 감소하였다. 이는 폐유리경량골재가 흡수한 배합수가 시간경과에 따라 시멘트 수화반응에 참여하지 못하여 건조된 수량으로서 폐유리경량골재의 입도 사이즈 및 조립율의 차이가 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단되며 실험 전반적으로 폐유리경량골재는 양생기간동안 약 3~4%만큼 수분을 더 흡수하였다가 점차 배출되어 추가적인 시멘트 수화반응에 사용되거나 건조된 것으로 판단된다.

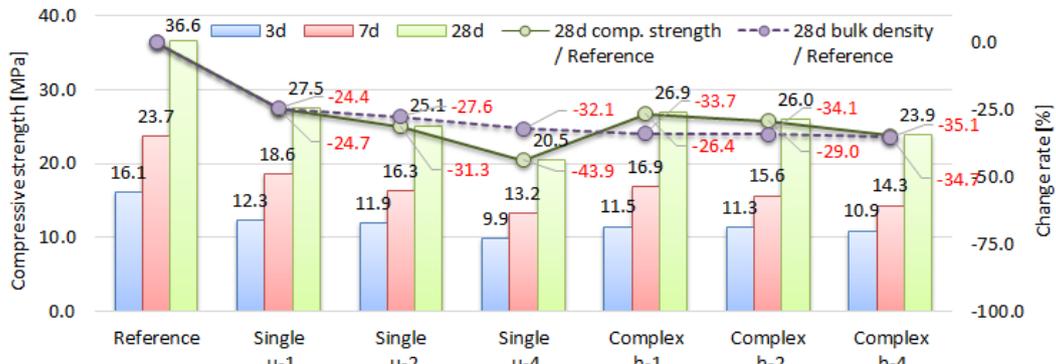
3.3 압축강도

폐유리경량골재 입도별 치환에 따른 모르타르의 3일, 7일, 28일 재령 압축강도와 28일 일반 모르타르 압축강도 대비 폐유리경량골재가 사용된 모르타르의 강도변화율을 <그림 5>에 나타내었다. 모르타르에 치환된 폐유리경량골재의 입도가 커질수록 일반골재를 사용한 모르타르 대비 압축강도가 크게



Bulk density [kg/m³]		Reference	Single u-1	Single u-2	Single u-4	Complex h-1	Complex h-2	Complex h-4
Fresh mortar		2209	1743	1667	1557	1534	1522	1485
Hardened mortar (28day)		2104	1590	1524	1428	1394	1386	1365
Change rate [%]	Fresh mortar / Reference	-	-21.1	-24.5	-29.5	-30.5	-31.1	-32.8
	Hardened mortar / Fresh mortar	-4.8	-8.8	-8.6	-8.3	-9.2	-8.9	-8.1

그림 4. 페유리경량골재 적용 모르타르 단위용적질량



Compressive strength [MPa]		Reference	Single u-1	Single u-2	Single u-4	Complex h-1	Complex h-2	Complex h-4
3d		16.1	12.3	11.9	9.9	11.5	11.3	10.9
7d		23.7	18.6	16.3	13.2	16.9	15.6	14.3
28d		36.6	27.5	25.1	20.5	26.9	26.0	23.9
Change rate [%]	28d comp. strength / Reference	-	-24.7	-31.3	-43.9	-26.4	-29.0	-34.7
	28d bulk density / Reference	-	-24.4	-27.6	-32.1	-33.7	-34.1	-35.1

그림 5. 페유리경량골재 적용 모르타르 압축강도

감소하였으며 단일 입도의 폐유리경량골재를 사용한 모르타르에서 입도 사이즈 0.5~1.0mm의 경우에는 24.7%까지 감소하였고 2.0~4.0mm의 경우에는 43.9%까지 압축강도가 감소하였다. 입도 사이즈를 혼합하여 사용할 경우 압축강도가 26.4~34.7%만큼 감소하였다. 특히, 일반 모르타르에 대한 폐유리경량골재를 사용한 모르타르의 단위용적질량의 저하율과 압축강도의 저하율의 변화특성을 비교한 결과, 단일 입도 사이즈를 사용한 실험체는 단위용적질량대비 압축강도의 저하율이 크게 나타났으며 복합 입도 사이즈를 사용한 실험체는 압축강도의 저하율이 완만하게 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서, 다양한 입도 사이즈의 폐유리경량골재를 복합적으로 사용할 경우 모르타르의 압축강도저하가 완만하게 조절될 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 폐유리를 파쇄 및 발포하여 제조된 인공경량골재의 입도 사이즈별 흡수율, 단위용적질량, 압축강도 및 조립율에 의한 모르타르의 적용특성을 파악하고자 하였다. 폐유리경량골재는 인공경량골재 중 상대적으로 흡수율이 적고 골재강도가 양호하며 비교적 품질이 안정적인 재료를 선정하였다. 실험방법은 폐유리경량골재를 입도 사이즈에 따라 0.5~1.0mm, 1.0~2.0mm, 2.0~4.0mm로 구분하여 단일 입도별로 모르타르에 적용하여 물성을 평가하였고, 입도

별로 구분된 폐유리경량골재를 조합하여 모르타르에 적용하여 복합 입도에 대한 물성을 평가하였다. 평가항목은 일반 골재만을 사용한 모르타르 대비 일반골재를 폐유리경량골재로 20~25%만큼 치환할 경우 나타나는 모르타르의 플로우(0분, 20분), 단위용적질량(균지않은 모르타르, 경화된 모르타르), 압축강도(3일, 7일, 28일) 특성의 수치를 평가하고 비교·분석하였다. 실험 결과, 일반골재를 사용한 모르타르 대비 폐유리경량골재를 사용한 경량모르타르에서 플로우가 실험 전반적으로 약 6mm만큼 감소하였고 단위용적질량은 21~30%만큼 감소하였으며 압축강도는 25~44%만큼 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 폐유리경량골재의 입도가 작을 경우 모르타르의 단위용적질량과 압축강도의 저하율이 낮았고 입도가 클수록 단위용적질량과 압축강도의 저하율이 증가하였다. 또한 폐유리경량골재를 조합하여 모르타르에 적용할 경우 단위용적질량의 저하율과 대비하여 압축강도의 저하율이 완만하게 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 폐유리경량골재를 사용하여 모르타르의 부피를 증가시키고 경량화하기 위해서는 입도 사이즈가 큰 폐유리경량골재를 사용하여 단위용적질량을 감소시키는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한, 다양한 입도사이즈의 폐유리경량골재를 복합적으로 사용할 경우 모르타르의 압축강도저하의 폭을 감소시키고 모르타르의 부피증가 및 무게절감으로 인해 시공비의 절감을 통한 경제성 확보가 가능할 것으로 기대된다.

담당 편집위원 : 노승준(금오공과대학교)

참고문헌

1. Jamshidi, A., Kurumisawa K., Nawa T., Igarashi T. (2016). "Performance of pavements incorporating waste glass: The current state of the art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v64, pp. 211-236
2. 김상현, 김세환, 박형신, 전현규, 서치호 (2015). "유리질 중공 미소 구체를 사용한 경량골재콘크리트의 특성에 관한실험적 연구", *한국건축시공학회*, v.15 n.2
3. 심봉섭 (2005). "폐유리를 이용한 건축재료의 제조와 물리학적 특성", 전남대학교.
4. 김성철, 박기찬, 최형욱 (2011). "인공경량골재의 입도에 따른 고강도 경량콘크리트의 강도변화에 대한 실험적 연구", *한국구조물진단학회*, v.15 n.5
5. 하상욱, 유정호, 박현일, 황재남 (2012). "재생 경량골재를 활용한 세라믹 바닥재의 기초물성 연구", *한국건설순환자원학회*, v.12 n.1
6. 한국폐기물협회 (2018). <http://www.kwaste.or.kr>
7. 박대오, 사순현, 지석원, 최수경, 유택동, 서치호 (2007). "경량골재 종류 변화에 따른 경량콘크리트의 특성 연구", *한국건축시공학회*, v.7 n.1(12호)
8. 서치호, 최기봉, 송현수 (2006). "경량골재콘크리트의 특성 및 활용", *한국콘크리트학회*, 전문위원회 연구발표집, 3, pp. 201-213