폐유리로 제조된 인공경량골재를 이용한 모르타르의 물리적 성능에 대한 평가

김성수¹⁾ · 이정배¹⁾ · 남바름¹⁾ · 박광필^{1)*}

¹⁾대진대학교 토목공학과

Performance Evaluation of Artificial Lightweight Aggregate Mortar Manufactured with Waste Glass

Seong-Soo Kim,¹⁾ Jeong-Bae Lee,¹⁾ Ba-Reum Nam,¹⁾ and Kwang-Pil Park^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon 487-711, Korea

ABSTRACT The compressive strength test, bulk density and mortar absorption ratio were carried out to utilize the data as the basic sources for the lightweight mortar and the lightweight concrete, through the study on the physical characteristics of the artificial lightweight aggregate (ALA) made of waste glasses, which was developed for the first time in the country. On the basis of these experiments, the density and the unit volume weight of the ALA showed the value less than 50% of the common aggregate due to the independent pore structure, and the mortar that contains ALA had no big difference from the Control mortar in the test of the absorption ratio. It is judged that this happens based on the internal independent pore structure of the ALA. In case of the mortar containing ALA, there was a tendency of declination in the compressive strength and the bending strength as the mixing rate is increasing, but all mortar showed more than 70% of the Control mortar compressive strength except for the La50 mortar. Hereafter, it is judged that according to the control of the mixing ratio of mineral admixing agent, water and cement, it will realize the equal strength to the control mortar, and the long term edurance is needed to be considered together.

Keywords : compressive strength, unit volume weight, artificial lightweight aggregate, waste glasses, pore structure

1. 서 론

최근 경제발달에 따른 고도의 산업화에 의해 산업 및 생활폐기물의 발생량이 증가하여 매립부지의 부족과 환경오염 등의 문제가 발생하고 있다. 그 중 재활용이 가능한 유리 및 플라스틱의 경우 더욱 심각한 문제를 일으키고 있는 실정이다. 국내의 경우 연간 유리 총생산량은 약 420만 톤이며 이중 약 36%는 판유리, 6%는 유리섬유 제품, 58%가 병 등의 용기로 사용되고, 이에 따른 폐유리 발생량의 점차적 증가는 심각한 환경오염을 유발하고 있는 실정이다.¹⁾ 2004년 폐유리의 발생량은 76만 톤으로 이 중 54만 톤이 재활용되고 있으며, 약 22만 톤이 재활용되지 못하고 버려지고 있다.²⁾

유리는 자연에서 분해되는데 약 1,000만년의 시간이 걸리는 것으로 알려져 있으며 1,000만년에 걸쳐 축적되는 폐유리의 양은 실로 엄청나기 때문에 사회적, 환경적인 문제가 되고 있다. 따라서 폐유리의 처리 및 재활용 문

제가 새로운 관심사로 대두되고 있으며 이와 관련하여 선진국을 중심으로 각종 폐기물 및 폐유리를 재활용하여 자원으로 사용하려는 연구가 진행되고 있다.³⁾

국내건설기술의 비약적인 발달로 인하여 콘크리트구조물은 점점 대형화, 고층화됨에 따라 새로운 콘크리트 제조 방법과 콘크리트 자체의 성능을 향상시키기 위한 연구가 중요하게 다루어지고 있다. 그러나 콘크리트구조물의 대형화, 고층화에 따른 여러 가지 문제점이 발생하고 있다. 콘크리트는 강도 및 내구성이 우수한 재료이지만, 자중이 커서 구조물의 고정하중을 증대시키는 결점을 가지고 있다. 이러한 결점을 해결하기 위한 대안으로 구조물을 경량화 시키는 방법이 제시되고 있으며 이를 위해서는 콘크리트 용적의 60% 이상을 차지하고 있는 골재의 경량화를 위하여 경량골재의 사용이 필수적이라고 하겠다.

경량골재는 다공질의 구형입자로서 콘크리트구조물의 경량화와 단열 및 흡음에 사용되는 자재로 알려져 있다. 하지만 경량골재는 경량화에 필요한 다공성을 지닌 동시에 콘크리트 강도 유지에 필요한 압축강도와 모르타르와의 부착력이 우수한 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 실험을 통해 폐유리로 제조된 인공경량

*Corresponding author E-mail : pkp78@daejin.ac.kr

Received May 9, 2008, Revised August 7, 2008

Accepted March 2, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

골재의 물리적 특성을 파악하였으며 이를 사용하여 제조한 모르타르의 물리적 실험을 실시하였다. 이러한 시험 결과를 바탕으로 인공경량골재를 활용한 경량콘크리트 개발의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

2.1.1 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트는 KS F 5201에 규정된 규격을 만족하는 비중 3.15, 비표면적 328 m²/kg의 보통포틀랜드시멘트 (이하 OPC로 약함)를 사용하였으며, 화학 성분은 Table 1과 같다.

2.1.2 잔골재

본 연구에서 사용한 잔골재는 비중 2.61, 흡수율 0.91%인 규사 6호사를 사용하였다.

2.1.3 폐유리로 제조된 인공경량골재

본 연구에 사용된 인공경량골재 (이하 ALA로 약함)는 입도를 달리한 3종류를 사용하였으며 0.5 mm 이하의 것을 La, 0.5~1.0 mm의 입도를 가진 것을 Lb, La와 Lb를 용적비 1:1로 혼합한 것을 Lc라 하였다.

백색, 갈색, 녹색등의 3종류 유리병의 적절한 혼합에 따라 만들어진 골재는 각 유리병의 색에는 차이가 있을 수 있으나, 그 성능에는 그 차이가 없다. 분쇄 과정은 총 3단계를 거쳐 유리병의 혼합물은 밀가루와 같은 미립분이 된다. 분쇄 과정을 거친 후 원료에 소량의 발포제를 혼입하는데 이 때 발포제의 혼입률에 따라서 생산되는 인공경량골재의 비중이 결정될 수 있다. 발포제를 혼입하여 원료를 가열하면 먼저 수분이 증발하여 건조상태가 되고 700~900°C 정도에서 소성된다. 이때 발포제의 영향으로 인하여 서로 유기체화 된 원료의 내부에 공극이 생기며 표면이 연화되면서 용융성의 유리질 상의 표면을 형성한다. 소성이 끝난 후 냉각 과정을 거치며 만들어진 인공경량골재를 분급 과정에 의하여 여러 입도를 가진 인공경량골재로 생산이 가능하다. Fig. 1은 ALA의 제조 과정을 나타낸 것이다.

2.2 실험 배합

인공경량골재를 이용하여 제조된 모르타르의 배합은 W/C = 50%이며, 인공경량골재를 부피비로 치환하였다. 배합변수는 경량골재의 혼입량으로 모르타르의 제조는

Table 1 Chemical composition of OPC

Chemical composition (%)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss
21.7	5.7	3.2	63.1	2.8	2.2	1.3

Fig. 1 Process for recycling of ALA

Table 2 Mixture proportions of cement mortar

Types	W (g)	C (g)	Aggregates (g)			SP*(g)
			S	La	Lb	
Control	143.0	285.7	714.3	-	-	2.86
La 10	143.0	285.7	642.3	21.9	-	2.86
La 20	143.0	285.7	571.4	43.8	-	2.86
La 30	143.0	285.7	500.0	65.7	-	2.86
La 40	143.0	285.7	428.6	87.6	-	2.86
La 50	143.0	285.7	357.1	109.5	-	2.86
Lb 10	143.0	285.7	642.3	-	24.9	2.86
Lb 20	143.0	285.7	571.4	-	49.8	2.86
Lb 30	143.0	285.7	500.0	-	74.7	2.86
Lb 40	143.0	285.7	428.6	-	99.6	2.86
Lb 50	143.0	285.7	357.1	-	124.5	2.86
Lc 10	143.0	285.7	642.3	10.9	12.5	2.86
Lc 20	143.0	285.7	571.4	21.9	24.9	2.86
Lc 30	143.0	285.7	500.0	32.8	37.4	2.86
Lc 40	143.0	285.7	428.6	43.8	49.8	2.86
Lc 50	143.0	285.7	357.1	54.7	62.3	2.86

*SP : superplasticizer

KS L5105에 따라 실시하였으며 배합은 Table 2와 같다.

2.3 실험 방법

2.3.1 ALA의 물성평가

1) 밀도 및 흡수율

ALA의 밀도 및 흡수율을 측정하기 위하여 KS F 2529 ‘구조용 경량 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험방법’을 사용하였으며 다음 식 (1)과 (2)에 의해 밀도 및 흡수율을 구하였다.

$$\text{표면건조상태의 시료밀도} = \frac{m_s}{m_1 + m_s - m_2} \quad (1)$$

$$\text{흡수율} = \frac{m_s - m_D}{m_D} \quad (2)$$

여기서, m_s = 표면건조포화상태의 무게
 m_1 = 물로 채운 비중병의 무게
 m_2 = 시료와 물로 채운 비중병의 무게
 m_D = 건조 후의 시료의 총무게

2) 골재의 단위용적질량

ALA의 단위용적질량을 측정하기 위하여 KS F 2505 ‘골재의 단위용적질량 및 실적률 시험방법’을 사용하였으며 다음 식 (3)과 같이 구하였다.

$$\text{골재의 단위용적질량} = \frac{m}{V} \quad (3)$$

여기서, m = 건조된 시료의 중량
 V = 시험용기의 부피

3) SEM 및 EDC 분석

ALA의 형상을 관찰하기 위하여 주사현미경 (scanning electron microscope : SEM)을 사용하였으며, 동시에 원소 분석을 하는 장치인 에너지 분산형 분석장치 EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy)형 전자현미경분석기 (electronic probe micro analyzer : EPMA)를 사용하여 구성 원소에 대해 분석하였다.

2.3.2 ALA를 사용한 모르타르의 물리적 시험

1) 압축강도

압축강도시험은 KS L 5105 ‘수경성 모르타르의 압축강도 시험방법’에 준하여 50 × 50 × 50 mm의 입방체 몰드를 사용하여 재령 3일, 7일, 14일, 28일에서 측정하였다.

2) 건조단위중량

재령 28일의 50 × 50 × 50 mm 입방체 공시체를 사용하여 100 ± 5°C에서 48시간 건조 후 무게 (A)를 측정하였다. 동일 공시체를 24시간 건조 후 무게 (B)를 측정하여 A와 B의 무게 차이가 0.5% 미만일 때까지 B를 반복 측정하여 오차가 0.5% 미만의 값을 채택하였다.

3) 모르타르의 흡수율

모르타르의 흡수율 시험은 ASTM C 642 ‘Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete’에 준하여 50 × 50 × 50 mm 입방체 몰드를 사용하여 공시체를 제작하여 재령 28일 후 모르타르 하단부의 10 mm를 침지한 후 24시간 후의 무게를 측정하였다. 동일한 방법으로 매 24시간 마다 무게를 측정하여 0.5% 미만의 무게비 차이를 나타낼 때까지 시험을 수행하여 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$\text{모르타르의 흡수율} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (4)$$

여기서, A = 침지 전 시료의 무게
B = 최종 침지 후 시료의 무게

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 ALA의 물성 평가

3.1.1 ALA의 물리적 성질

Table 3에 ALA의 물리적 성질을 나타내었다. ALA의 표면건조 포화상태의 비중은 0.8~0.91의 범위로 나타났으며 이는 보통 잔골재의 표면건조 포화상태의 비중이 2.5~2.65로 보통잔골재의 약 30% 정도임을 알 수 있다. 흡수율의 경우 3.6~4.3%로 일반 잔골재의 흡수율인 1.5%보다 약간 큰 것을 알 수 있다.⁴⁾ ALA의 단위용적질량은 390~480 kg/m³으로 KS F 2534에서 규정한 구조용 경량골재의 기준인 1,120 kg/m³의 약 40% 정도로 나타나 구조체의 자중감소에 효과적이라고 판단된다.

3.1.2 공극 구조 및 성분 분석

ALA의 SEM 및 EDS 분석 결과를 나타낸 것이 Figs. 2와 3이다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 ALA는 외형이 대부분 구형에 가까운 것을 확인할 수 있으며, 내부에는 많은 독립 기공으로 이루어진 구조를 알 수 있다. 이는 일반적인 인공경량골재의 내부가 연속공극구조로 이루어져 보통골재보다 흡수율이 큰 것에 비해 ALA의 경우 내부공극은 상당히 많은 편이나 대부분 독립기공구조로 이루어져 흡수율이 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.⁵⁻⁷⁾ 또한 La의

Table 3 Physical properties of ALA

	La	Lb	Lc
Size (mm)	≤ 0.5	0.5~1	≤ 1
Specific gravity	0.8	0.91	0.86
Unit volume weight (kg/m ³)	390	480	435
Absorption (%)	4.3	3.6	4.0

Fig. 2 SEM image of ALA

Fig. 3 EDS pattern of ALA

경우 입도 0.5 mm 미만의 골재를 사용했기 때문에 Lb보다 치밀한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 ALA의 EDS 분석 결과로서 Si와 O 및 Na, Ca의 피크가 나타나는 것을 알 수 있고 그 밖에도 Al 및 Mg 등의 원소들이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 ALA의 주원료가 폐유리 병이기 때문에 유리병의 화학 성분 중 70% 이상을 차지하고 있는 SiO₂ 성분에 의한 영향으로 판단된다.⁸⁾

3.2 ALA 모르타르의 물리적 특성

3.2.1 ALA 모르타르의 압축강도

ALA를 사용하여 입도와 혼입률을 달리하여 제조한 모르타르의 압축강도를 나타낸 것이 Figs. 4에서 6이며 ALA의 혼입률이 증가함에 따라 ALA를 혼합하지 않은 Control 모르타르와 비교하여 모든 재령에서 압축강도가 저하하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 La 모르타르의 경우 혼입률 50%의 재령 28일 압축강도는 Control 모르타르와 비교

Fig. 4 Compressive strength of cement mortar replaced with La

하여 약 37%의 강도 저하현상이 나타났다. 그러나 혼입률이 적은 10%, 20%의 경우 Control 모르타르와 비교하여 20% 이하의 강도저하 현상을 나타내고 있다.

Fig. 5에서 나타낸 Lb 모르타르의 경우 혼입률 50%의 재령 28일 압축강도는 Control 모르타르와 비교하여 약 27%의 강도 저하현상이 나타났다. 그러나 혼입률이 적은 10~30%의 경우 Control 모르타르와 비교하여 13% 이하의 강도저하 현상을 나타내고 있다.

Fig. 6은 Lc 모르타르의 압축강도를 나타낸 것으로서 Lc의 초기의 경우는 상대적으로 조립률은 좋으나 시멘트 수화에 따라 강도 발현이 적은 것으로 판단되어 지면 수화의 진행됨에 따라 조적이 치밀해짐으로 좋은 조립률과 같이 상승 작용으로 28일 이후 강도가 좋게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 혼입률이 50%인 경우 재령 28일 압축강도는 Control 모르타르와 비교하여 약 25%의 강도 저하현상이 나타났다. 이러한 이유는 Lb의 초기강도 저하 원인에 따른 결과로 보여진다. 그러나 혼

Fig. 5 Compressive strength of cement mortar replaced with Lb

Fig. 6 Compressive strength of cement mortar replaced with Lc

입률이 적은 10~30%의 경우 Control 모르타르의 90% 이상의 강도를 나타냈다. 이상의 결과를 통해 La와 Lb를 혼합하여 사용한 Lc 모르타르의 압축강도가 가장 높게 측정되었으며 이는 입도가 다른 골재를 혼합하여 사용함에 따라 입도분포가 양호해진 결과로 판단된다.⁹⁾ 또한 최대 혼입률 30% 정도까지 사용이 가능할 것으로 판단된다.

3.2.2 ALA 모르타르의 단위질량 및 흡수율

ALA를 사용한 모르타르의 단위용적중량을 Fig. 7에 나타내었으며 ALA의 혼입률이 증가 할수록 단위용적량은 감소하는 경향을 나타내었다.

특히 La 골재를 사용한 경우 혼입률의 증가에 따른 단위질량의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다. La50 모르타르의 경우 약 25%, Lb50 모르타르의 경우 약 21%의 단위용적중량이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 보인 이유는 390 kg/m³의 단위질량을 갖는 La 골재와 480 kg/m³의 단위질량을 갖는 Lb 골재의 차이에 의한 것으로 판단된다. 또한 La 골재와 Lb 골재를 1:1로 혼합하여 사용한 Lc 모르타르의 경우 La 모르타르와 Lb 모르타르의 중간정도의 단위질량을 나타내었다.

ALA를 사용한 모르타르의 흡수율을 나타낸 것이 Fig. 8이며, ALA의 혼입률이 증가할수록 흡수율이 상승하는 경향을 보였다.

La 모르타르의 경우 흡수율은 9.6~12.1%, Lb 모르타르의 경우 9.4~12.5%, Lc 모르타르의 경우는 9.6~11.7%의 흡수율을 보여 혼입률의 증가에 따라 흡수율이 증가하는 경향을 보였다. 또한 Control 모르타르의 흡수율과 ALA를 가장 많이 혼입한 50% 혼입의 경우 흡수율의 차이는 2.7~3.5%로 나타나 흡수율의 차이가 크지 않은 결과를 나타내었다. 이는 ALA가 독립기공구조를 형성하고 있어 기존의 경량골재에 비해 흡수율이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.⁵⁾

Fig. 7 Unit weight ratio of cement mortar replaced with ALA

Fig. 8 Absorption ratio of cement mortar replaced with ALA

3.2.3 압축강도와 단위질량의 관계

입도가 다른 3종류의 ALA로 제조된 모르타르의 채령 28일 압축강도비와 단위질량비의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 ALA의 혼입률이 증가 할수록 압축강도와 단위용적중량은 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 시험 결과를 통해 La50을 제외한 모르타르에서 Control 모르타르 대비 70% 이상의 압축강도와 20% 이하의 단위용적중량 감소를 나타내었다. 향후 광물질 혼화재의 사용, 물-시멘트비의 조절 등을 통하여 압축강도를 보다 상승시킬 경우 구조물의 경량화를 만족하는 구조용 경량골재로서의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 폐유리를 사용하여 제조된 인공경량골재를 사용한 모르타르의 물리적 특성을 평가한 연구로서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) SEM과 EDS 분석 결과 ALA의 입형은 구형이고 Si, O 등의 원소를 함유한 것으로 나타났다. 또한 ALA

Fig. 9 Relationship between compressive strength ratio and unit weight ratio of cement mortar replaced with ALA

표면은 유리질상이며 내부는 독립기공구조를 가지고 있는 것을 확인하였다.

- 2) ALA의 종류와 혼입률을 달리하여 제조한 모르타르의 압축강도를 측정한 결과 혼입률이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었으나, Lc 모르타르의 경우 골재의 입도분포가 개선되어 20% 이하 혼입률에서는 압축강도가 증가하였다.
- 3) 흡수율 시험 결과 Control 모르타르 보다 최대 3.5% 높게 나타나 ALA의 혼입률에 따른 영향이 적은 것으로 나타났다. 이는 ALA가 일반골재에 비해 흡수율이 높지 않고 ALA의 다공질과 생산 원재료의 특성 때문으로 판단된다.
- 4) ALA의 혼입률에 따른 압축강도와 단위질량에 따른 관계를 고찰한 결과 La50을 제외한 모든 배합에서 Control 모르타르의 압축강도 70% 이상을 나타냈으며, 단위질량의 경우 10~20% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 특히 Lc 모르타르의 경우 압축강도가 크게 나타났는데 이는 La의 잔 입자와 Lb의 큰 입자가 혼합되어 이에 따른 조립률의 상승에 의한 영향으로 판단된다.
- 5) 이상의 결과를 통해 ALA를 사용한 모르타르는 혼입률에 따른 물리적 특성이 상이하게 나타남을 확인하였으며 향후 광물질혼화재의 사용, 물시멘트비

의 조절 등을 통해 압축강도를 보다 상승시킬 수 있을 것으로 판단되며 장기내구성에 대한 검토도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부, 2000, <http://www.me.go.kr>.
2. 한국유리재활용협회, 2004, <http://kgra.org>.
3. 심봉섭, 폐유리를 이용한 건축재료의 제조와 물리학적 특성, 석사학위논문, 전남대학교, 2005, 73 pp.
4. 김성수, 토목재료학, 구미서관, 1997, pp. 63~64.
5. Gjorv, O. D. and Zhang, M. H., "Permeability of High-Strength Lightweight Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 5, 1991, pp. 463~469.
6. Rochholz, Miller, "Investigation of the Absorption of Water by Light Aggregate from Cement Paste," *Journal of Lightweight Concrete*, Vol. 1, No. 1, 1979, pp. 39~41.
7. Swamy, R. N. and Lambert, G. H., "Microstructure of Lytag Aggregate," *Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete*, Vol. 3, No. 4, pp. 273~282.
8. 배수호, 정영수, 석윤호, "재생 유리를 혼입한 모르타르의 특성에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 10권, 2호, 1998, pp. 36~41.
9. 정용욱, 윤용호, 이승한, "잔골재 및 굵은골재 입형이 초유동 콘크리트의 특성에 미치는 영향," 콘크리트학회 논문집, 17권, 5호, 2005, pp. 102~105.

요 약 본 연구는 국내에서 최초로 개발된 폐유리로 제조된 인공경량골재 (artificial lightweight aggregate: ALA)의 물리적 특성에 관한 연구를 통해 경량 모르타르 및 경량 콘크리트의 개발에 기초자료로 활용하기 위해 인공경량골재의 입도에 따른 3종류 (La, Lb, Lc)의 모르타르에 대하여 압축강도 실험, 단위질량 및 모르타르의 흡수율 실험을 실시하였다. 이상의 실험 결과, ALA의 밀도 및 단위질량은 내부의 독립기공구조로 인하여 보통골재의 50% 이하의 값을 나타냈으며, ALA를 사용한 모르타르의 흡수율시험 결과 Control 모르타르와 큰 차이가 없었다. 이는 ALA의 내부의 독립기공구조에 의한 것으로 판단된다. ALA를 사용한 모르타르의 경우 혼입률이 증가 할수록 압축강도와 휨강도는 감소하는 경향이 나타났으나, La50 모르타르를 제외한 모든 모르타르는 Control 모르타르 압축강도의 70% 이상을 나타내었다. 향후 광물질 혼화재, 물-시멘트비 의 조절에 따라 Control 모르타르와 동등한 강도가 발현 될 것이라 판단되며, 장기 내구성에 대한 검토도 함께 이루어져야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 압축강도, 단위용적중량, 인공경량골재, 폐유리, 기공구조