

순환잔골재를 활용한 친환경 콘크리트 벽돌의 물성 및 배합설계 연구

최형국¹·양성철²·손재호³·이승현^{4*}

¹홍익대학교 건축공학과 박사과정 · ²홍익대학교 건축공학부 교수 · ³홍익대학교 건축공학부 교수 · ⁴홍익대학교 건축공학부 교수

A Study on the Properties and Mix Design of Eco-friendly Concrete Bricks Using Recycled Fine Aggregates

Choi, Hyungkook¹, Yang, Sungchul², Son, Jaeho³, Lee, Seunghyun^{4*}

¹Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hongik University

²Professor, School of Architectural Engineering, Hongik University

³Professor, School of Architectural Engineering, Hongik University

⁴Professor, School of Architectural Engineering, Hongik University

Abstract : In the construction industry, lack of reliability in the quality of recycled aggregates, harmful substance problems, and negative consumer perceptions limit the expansion of the use of recycled aggregates. In this respect, existing studies mainly focus on the use of recycled coarse aggregates in concrete in consideration of durability. On the other hand, in the case of recycled fine aggregates, not only are there insufficient cases applied to major structures, but the scope of application is very limited due to lack of awareness. Therefore, the main purpose of this study is to present the possibility of their application in bearing and non-bearing wall structures through physical characteristics experiments of concrete bricks for masonry according to various mixing ratios of recycled fine aggregates and cement amounts. To this end, the compressive strength and absorption rate of concrete bricks were measured focusing on the mixing ratio of the recycled fine aggregate and the crushed fine aggregate and the amount of cement. As a result, it is found that it is possible to use 100% of recycled fine aggregate for 200kg/m³ of cement or 25% of crushed fine aggregate mixed with 75% of recycled fine aggregate for the same amount of cement to achieve the compressive strength of 13MPa, which is one of the quality requirements for concrete bricks for bearing walls. In addition, it is found that to meet the strength of 8MPa, one of the quality requirements for non-bearing walls, it is sufficient to use 100% of the recycled fine aggregate for 100kg/m³ of cement. Through the absorption rate tests, it is also confirmed that the absorption rate of the concrete brick is 13% or less by meeting the required performance criteria. This means that even if recycled fine aggregate is used in the manufacture of concrete bricks, the quality standards required by KS F 4004 (concrete bricks) can be sufficiently met.

Keywords : Recycled Fine Aggregate, Concrete Brick, Mix Design, Physical Performance

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

순환골재 활용성 증대를 위하여 콘크리트의 물리적 또는 기계적 성질에 관한 연구와 순환골재를 생산하는 골재 생

산공정에 관한 연구가 많은 진전을 이루고 있으며, 이로 인한 품질향상이 이루어지고 있다(Roh, 2020; Kwak et al., 2013; Kim et al., 2011; Shin, 2016). 그러나 국내에서는 순환골재를 적용한 구조체 적용에 관한 연구는 아직 미진한 상태이다. 그 이유는 순환골재를 포함한 보통 콘크리트의 내구성 또는 물리적 성질 등에서 문제점이 발견되기 때문이다. 순환골재는 일반골재에 비해 흡수율이 높고, 밀도가 낮고, 안전성이 낮고, 이물질 함유량이 높다. 이러한 특성은 순환골재 콘크리트의 강도, 내구성, 가공성 등에 부정적인 영향을 준다(Poon et al., 2009; Yang et al., 2008; Domingo et al., 2010). 그럼에도 불구하고 사회적 요구는 자원보존과

* **Corresponding author:** Lee, Seunghyun, School of Architectural Engineering, Hongik University, 2639, Sejong-ro, Jochiwon-eup, Sejong-si, Republic of Korea

E-mail: slee413@hongik.ac.kr

Received November 2, 2023; **revised** March 11, 2024

accepted May 5, 2024

기후 변화개선을 위해 건설폐기물을 재활용하여 친환경 콘크리트로 재활용하기 위한 연구의 필요성은 증가하고 있다 (Pacheco-Torgal et al., 2013).

건축물 기준 완화를 위한 순환골재 콘크리트 적용 시 품질 특성에 관한 연구(우경섭 외, 2020)에서 신축 건축물에 순환골재 적용이 가능함에도 폐기물 골재라는 부정적인 선입견 때문에 순환골재는 비구조적 단순 용도로만 사용되고 있는 문제점을 확인하였다. 기존 순환골재에 관한 연구는 주로 내구성을 충족하는 순환 굵은골재 사용에 관한 연구에 집중되어 있으며, 순환 잔골재 활용에 관한 연구는 매우 부족한 것이 현실이다. 이는 기술적, 안전성 측면에서 일반인들의 인식 부족 등으로 순환 잔골재의 주요 구조부 적용 사례가 많지 않다는 점이 하나의 원인이라 할 수 있다.

따라서 본 연구의 주요 목적은 KS F 4004(콘크리트벽돌) 기준에 부합하는 순환잔골재를 활용하여 순환잔골재의 치환율과 시멘트량의 변화에 따른 콘크리트 벽돌의 물성 변화를 조적용 콘크리트 벽돌 제작 실험을 통하여 밝히고자 한다. 또한 이를 통하여 순환 잔골재 활용 가능성과 범위를 확대하여 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

KS F 2573 기준에 충족하는 순환잔골재를 활용한 콘크리트 벽돌의 실험항목으로 5, 7, 28일 압축강도 및 흡수율을 측정하였다. 이때 건축폐기물 재활용 촉진에 관한 법률에서 규정하는 “순환골재 재활용 제품 콘크리트 벽돌”이 될 수 있도록 순환잔골재를 25%씩 순차적으로 늘리고, 시멘트 배합량을 300kg/m³부터 50kg/m³씩 순차적으로 줄임으로써 조적용 콘크리트의 내구성 변화를 확인하여 배합에 따른 사용 가능 범위를 확인하였다. 내력벽 및 비내력벽 사용에 대한 기준을 확인 할 때 “한국산업표준(KS) 콘크리트 벽돌 기준 KS F 4004 콘크리트 벽돌”의 품질기준을 참고하였다. 물 시멘트비는 35% 정하고 시멘트 배합량을 조절하여 압축강도를 분석하였다. 천연잔골재 및 순환잔골재의 함수상태는 표건상태로 실험을 진행하였다. 또한, 순수 조적조 콘크리트 벽돌의 순환잔골재의 특성을 알아보기 위하여, 혼화재 또는 혼화제를 사용하지 않고 실험을 진행하였다.

이를 통하여, 콘크리트 벽돌의 내력벽과 비내력벽 사용 가능 경계 범위에 따른 순환잔골재 사용 범위를 평가하였다. 이로써 콘크리트 벽돌 배합설계 시 순환잔골재 사용 범위에 대한 기초연구자료를 제시하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 순환골재의 특성

일반적으로 유럽의 기준에서 순환골재는 양질의 콘크리트 폐기물에서 생산한 순환골재와 콘크리트와 조적조 폐기물 등에서 생산한 순환골재로 분류할 수 있다. 전자는 주로 내력벽 콘크리트 후자는 주로 비내력벽 콘크리트에 사용된다. 외국의 사례의 경우 순환골재의 품질은 각 국가의 표준에 의하여 제시되고, 이러한 순환골재를 사용할 수 있는 최대 강도 등급 및 내구성 요구 조건은 기술 지침 및 시방서에 의해 제한되고 있다. 현재 지름 4~5mm 이하인 순환골재 기술적 요인으로 인하여 사용이 제한적인데 반하여 순환 굵은골재는 천연골재 대비 20~60% 수준으로 치환하여 사용할 수 있으나 최대 치환량은 유럽의 경우 지역에 따라 상이하다 (Korea Concrete Institute, 2019).

순환골재를 사용할 경우 일반적인 기술적 문제는 순환골재 표면에 붙어 있는 기존 모르타르로 인한 높은 흡수율과 낮은 밀도에 기인하며, 강도(압축강도 및 인장강도) 및 탄성계수 등 기계적 성질에 더하여 탄성화 및 동결융해저항 등 내구성능도 부정적인 영향을 받는다. 천연골재 콘크리트에 비해 순환골재 콘크리트의 상대적으로 낮은 탄성계수 및 비교적 높은 수축, 크리프 등을 콘크리트 구조물 설계에 반영하기 위해선 다수의 지침에서 해당 기계적 물성에 대한 수정 계수를 적용할 것을 추진하고 있다(Korea Concrete Institute, 2019).

유럽 콘크리트 표준 ‘EN 206 (2013) 부록 E’는 공칭지름 4 mm 이상 순환굵은골재에 대해 구성성분을 콘크리트계, 조적재, 아스팔트계, 부유성 석질 재료, 유리, 철 및 비철계 금속으로 규정하고, 강도는 30~37MPa로 제한하고 있으며, 최소강도는 8~10MPa인 압축강도를 사용하고 있다(Rilem, 1994). 조적조 사용에 대한 기준은 불명확하나 네덜란드 시방서는 콘크리트 및 조적조 순환골재의 양에 따라 다음과 같이 2종류의 순환골재를 정의하고 있다. 또한 콘크리트 골재 및 조적조 골재는 이물질 제한량을 만족시켜야 한다. 콘크리트 골재는 최소한 95%의 콘크리트 골재 및 최대 5%의 조적조 골재, 조적조 골재는 최소한 65%의 조적조 골재, 25%의 경량콘크리트, 셀룰러 콘크리트, 모르타르로 각각 구성된 골재를 의미한다. 네덜란드 표준에서는 굵은골재와 잔골재를 포함한 순환골재의 치환율이 20% 이하인 경우, 이를 사용하여 생산한 콘크리트를 일반 콘크리트로 간주한다.

본 연구에서는 콘크리트 벽돌 제작에 사용되는 부순잔골재를 순환잔골재로 치환할 경우의 물리적 특성변화를 비교하기 위한 실험을 진행하였다. 구조용 콘크리트 또는 모르타르 제품으로서 순환잔골재의 사용 범위를 확인하기 위한

각각 시멘트 배합량은 시멘트 300, 250, 200, 150, 100kg/m³로 조정하고, 순환잔골재의 치환율은 부순골재에 순환잔골재량을 각각 25%, 50%, 75%로 혼합하여 압축강도를 실험하였다. 천연잔골재, 부순잔골재, 순환잔골재 100%를 사용하였을 때 각각의 압축강도 분석을 통해서 순환잔골재가 기존 잔골재를 대체하여 사용해도 안전성에 문제가 없는지 실험을 통하여 증명하고자 하였다. 콘크리트 벽돌의 기준은 “콘크리트 벽돌(KS F 4004)” 규정에 따라 비내력벽 벽돌은 8MPa 이상, 옥외에 사용하는 내력벽 벽돌은 13MPa 이상 강도 기준을 충족하는지 여부를 판단하였다.

2.2 순환잔골재 선행연구 및 고찰

순환골재에 관한 연구는 폐콘크리트에서 발생 되는 굵은 골재, 잔골재, 시멘트 부산물 등에 대하여 다양하게 이루어지고 있다. 서경호 외(2004)은 “재생콘크리트 벽돌에 대한 연구”에서 재생콘크리트의 압축강도와 흡수율을 측정하였다. 그 결과 재생 시멘트 치환율이 20% 증가할 때마다 압축강도가 평균 16%씩 감소한다는 것을 확인하였다. 하지만 치환율이 40%가 되면 압축강도가 감소하지 않고, 오히려 80%나 증가한다는 것을 실험으로 확인하였다. 반면에 흡수율은 재생 시멘트 치환율과 관계없이 비슷한 수준을 유지하였다(XU et al., 2004).

추용규(2018)는 “순환골재를 활용한 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 평가”를 수행하였으며, 순환골재의 치환율이 증가할수록 역학적 특성은 저하되고, 특히 순환 굵은골재를 100% 치환하거나 순환잔골재와 굵은골재를 모두 혼합한 경우 역학적 성능이 저하되는 것으로 나타났다.

Poon and Chan (2006)은 순환잔골재를 사용하여 포장 블록과 콘크리트를 제조하고 압축강도를 평가한 결과 순환잔골재의 대체율이 높을수록 포장 블록의 압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 순환굵은골재와 순환잔골재의 낮은 품질과 부착 모르타르의 영향으로 해석하였다. 그러나 순환굵은골재와 순환잔골재를 사용하는 포장 블록과 콘크리트는 일반 포장 블록과 콘크리트보다 친환경적이며, 일정 수준 이하의 대체율에서는 구조용으로 사용할 수 있다는 것이 확인되었다.

문경태 외(2014)은 폐콘크리트를 재활용하여 만든 골재인 순환골재를 사용한 콘크리트의 성능을 연구하였다. 순환골재의 비율을 높일수록 콘크리트의 슬럼프와 압축강도가 낮아진다는 것을 확인하였다.

송진만(2019)은 순환잔골재를 활용한 식생블록의 제조 가능성을 연구하였다. 순환잔골재와 시멘트를 400kg/m³의 비율로 섞어서 모르타르를 만들었고, 이 모르타르로 옹벽 블록을 생산하였다. 옹벽 블록은 재생잔골재를 사용하여 만든 벽

돌로, 그 성능을 평가하기 위해 압축강도와 경제성을 분석하였다. 전체 잔골재 중에서 순환잔골재가 차지하는 치환 비율은 30%, 50%, 70%, 100%로 설정하였으며, 실험결과 순환잔골재의 비율이 높아질수록 압축강도가 낮아진다는 것을 확인하였다. 그러나 순환잔골재의 비율이 30%일 때 옹벽 블록 제품의 품질기준인 7일 기준강도에서 19MPa 이상을 충족하였다.

선행연구 고찰을 통해 확인한 결과 연구 동향은 순환골재를 활용한 콘크리트 자체의 역학적 특성 및 내구성에 집중되어 있으며, 콘크리트용 순환굵은골재에 대한 혼화재 또는 혼화재 사용 등 첨가물에 따른 물성 변화를 관찰하는 연구가 주를 이루고 있으나, 조적조 순환잔골재에 관한 연구는 매우 부족한 상황임을 확인하였다. 이는 순환잔골재를 활용한 제품군의 사용량이 적고, 제품에 대한 비중이 작기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 시멘트량의 변화에 따라 대체가능한 순환잔골재의 범위를 파악하고자 순환잔골재와 부순잔골재를 배합 비율을 다양화하여 실험을 진행하였으며, 내력벽, 비내력벽 콘크리트 조적용 벽돌의 사용 기준 및 범위를 확인하였다.

3. 실험체 제작

3.1 배합조건

실험체 제작을 위한 콘크리트 배합은 일반적으로 용적배합법을 적용하나, 콘크리트 벽돌공장에서는 실무적으로 영향인자 수준 관리가 용이한 중량배합을 적용하고 있는 실정이다. 그 이유는 품질관리 측면에서 중량비율로 사용하는 것이 용이하고, 반복적으로 사용하는 재료 계량에서의 오차 범위를 줄일 수 있기 때문이다. 또한 벽돌 제조 시 성형성 향상을 위하여 단위수량이 매우 낮게 요구될 뿐만 아니라, 성형 제작 과정에서 물의 증감에 따른 높은 압력과 진동으로 벽돌을 찍어내기에 중량배합으로 컨트롤하는 것이 합리적이어서 본 실험에서도 실무 제작 과정을 그대로 반영하였다. 또한 용적배합을 적용할 경우 각 골재들의 밀도를 반영하여 부피로 변환할 경우 골재의 공극량의 변화 등이 발생하여 이를 반영할 경우 공극량 변화에 의한 콘크리트의 밀도 변화가 발생하므로 압축강도에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 판단하였다. 이에 본 연구에서는 각 골재량을 중량으로 대체한 것으로 특성을 비교평가 하였다.

콘크리트 벽돌 실험체의 모르타르 제작에 사용한 잔골재는 다음 <Table 1>에서 보는 바와 같이 천연 100%, 부순 100%, 순환 100%, 부순+순환잔골재 25%, 50%, 75% 혼합 3가지 타입 등 총 6가지 타입으로 시편을 제작하여, 각 배합

에 따른 물리적 특징을 비교하였다. 콘크리트 벽돌은 시멘트, 모래, 물 등을 혼합하여 양생한 건축 재료로, 일반적인 직사각형 모양의 콘크리트 벽돌 시편으로 제작하였다.

Table 1. Mortar Mix Ratios (/m³)

Specimen	W/C ratio (%)	Water (kg)	Cement (kg)	Natural Fine Aggregate (kg)*	Crushed Fine Aggregate (kg)**	Recycled Fine Aggregate (kg)***
Natural 100%	35	70	200	1,600		
Crushed 100%					1,600	
Recycled 25%					1,200	400
Recycled 50%					800	800
Recycled 75%					400	1,200
Recycled 100%						1,600

실험체의 원자재는 외부시험을 진행하였고, 시험성적서 기준으로 충족된 결과를 얻은 자재를 사용하였다. 실험실에서는 체가름시험을 진행하여 5mm의 충족 여부를 확인하였다.

각 실험체는 플라스틱 성형틀에 조건별로 5일, 7일, 28일 강도를 측정하기 위해 시편을 5개씩 3조로 15개를 제작하였다. 이 실험체는 다시 천연, 부순, 순환잔골재 100%를 사용하는 3가지 타입과 부순 잔골재에 순환잔골재를 25%, 50%, 75%로 혼합한 3가지 타입으로 총 6가지 타입으로 나누어 시멘트 벽돌을 제작하였다. 시멘트량은 300kg에서 50kg씩 줄여서 100kg까지 5가지 타입의 시멘트량을 사용하여, 각각 90개의 시멘트 벽돌을 만들었다. 따라서 시멘트량, 잔골재 배합량, 재령별 변화에 따른 콘크리트 벽돌의 물성 실험을 위하여 총 450개의 시멘트 벽돌을 제작하였다. 압축강도 측정을 위해서는 Vernier Calipers를 사용하여 시멘트 벽돌의 단면적을 계산하고, 압축강도기를 사용하여 압축강도를 실험하였다. 흡수율 시험은 20°C의 수조에 24시간 동안 침수한 후, 100~110°C의 건조기에서 건조하여 실험을 진행하였다.

3.2 배합재료

3.2.1 시멘트

시멘트는 포틀랜드 시멘트 적당량의 석고 및 분쇄제를 가하여 분말화한 것이다. 포틀랜드 시멘트는 보통, 중용열, 조강, 저열, 내황산염 포틀랜드 시멘트의 5종으로 구분하며, 본 연구에서 사용된 시멘트는 “국가표준 KS F 5021(포틀랜드

시멘트, 2016, 아세아 시멘트)”의 규정에 적합한 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 물리적/화학적 특성은 <Table 2, 3>에 표기된 것과 같다.

Table 2. Physical Properties of Ordinary Portland Cement (OPC)

Cement	Density	Final setting time		Compressive strength (MPa)			Fineness (cm ² /g)
		Initial (min)	Final (hrs)	3Day	7Day	28Day	
OPC	3.15	215	4.45	28.5	42.7	56.5	3.56

Table 3. Chemical Composition of Ordinary Portland Cement (OPC)

	Chemical Composition (%)								
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
OPC	2.52	20.47	4.95	3.27	60.99	2.27	2.25	0.33	1.07

3.2.2 천연잔골재

본 연구에서 사용된 천연잔골재는 “KS F 2527(콘크리트용 골재, 2018)” 및 “KS F 2502(굵은골재 및 잔골재의 체가름시험 방법)” 규정에 적합한 자연에서 채굴한 잔골재로서, <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 입도는 10mm체를 전부 통과하고 5mm체를 통과하며 0.08mm체까지의 누적 통과량을 보여주는 잔골재가 사용되었다.

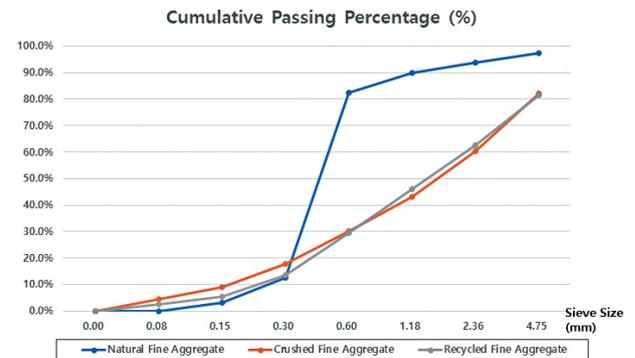


Fig 1. Particle Size Distribution of Natural, Crushed, and Recycled Fine Aggregates

천연잔골재의 내구성은 재료의 강도와 관련이 있다. 잔골재의 절대건조밀도는 2.5g/cm³이상, 흡수율은 3.0% 이하의 값을 표준으로 한다. 잔골재의 내화성, 염소이온, 침투저항성, 동결융해저항성 등도 중요한 내구성 지표이다. 천연잔골재는 천연 세척사를 사용하였다. 세척사 사용으로 체가름 시험을 진행한 결과 강사 모래 입자가 3mm 이하 중점 분포된 것을 확인하였다. 골재의 품질기준은 외부시험의뢰에 의

Table 4. Physical Properties of Natural, Crushed, and Recycled Fine Aggregates (KS F 2527, 2018)

	Natural Fine Aggregate (kg)	Test Result	Crushed Fine Aggregate (kg)	Test Result	Recycled Fine Aggregate (kg)	Test Result
Density in oven-dry condition (g/cm ³)	2.5 ↑	2.56	2.5 ↑	2.56	2.5 ↑	2.3
Absorption rate (%)	3.0 ↓	1.03	3.0 ↓	1.16	5.0 ↓	3.24
0.08mm Sieve Passing Rate (%)	3.0 ↓	2.2	7.0 ↓	2.9	7.0 ↓	3.9
Clay contained (%)	1.0 ↓	0.1	0	0	1.0 ↓	0.4
Chloride content (%)	0.04 ↓	0.005	0	0	0	0
Ingredient Safety (%)	10.0 ↓	3.1	10.0 ↓	4	10.0 ↓	4
Particle shape determination			53 ↑	54	53 ↑	54
Alkali-aggregate reaction					Harmless	Harmless
Impurity contents	Organic foreign material				1.0 ↓ (volume)	0.3
	Inorganic foreign material				1.1 ↓ (mass)	0.2

한 시험성적서를 기준값으로 하였으며, 물리적 특성은 다음 <Table 4>에서 보는 바와 같다.

3.2.3 부순잔골재

부순잔골재는 석산에서 채취한 암석 또는 공사현장에서 발생하는 암석, 모래, 자갈을 파쇄, 입도선별, 세척을 통하여 생산하는 잔골재를 말한다. “KS F 2527(콘크리트용 골재, 2018)”에 부합하는 부순잔골재를 사용한 콘크리트 또는 모르타르의 특성에 대한 선행연구 결과에 따르면 “동일한 물시멘트비가 사용된 콘크리트의 경우 부순잔골재 콘크리트는 천연잔골재 콘크리트에 비해 워커빌리티가 낮게 나타나는 것이 일반적이다(Enforcement Decree of the Act on Promotion of Recycling of Construction Waste by the Ministry of Environment, 2018).” 또한 강도 특성은 자연사와 비슷한 수준이거나 오히려 더 높은 결과를 나타내기도 한다. 부순잔골재는 0.08mm 통과량이 7% 이하로, 천연잔골재 3% 이하 기준보다 높다. 추가로 부순잔골재와의 입도분포가 콘크리트의 워커빌리티와 강도에 미치는 영향을 평가하는 지표로 입자모양관정 실적율과 안전성 평가를 위한 미분 함량, 유기물 함량을 추가한다. 물리적 특성 및 입도분포는 <Table 4> 기준 및 <Fig. 1>에서 보는 바와 같다.

3.2.4 순환잔골재

순환잔골재는 건설폐기물을 물리적 또는 화학적 처리 과정을 거쳐 품질기준에 맞게 재가공해 만든 골재로 “KS F 2573(콘크리트용 순환골재)”에 적합한 제품이어야 한다. 천연잔골재의 기준과 달리 이물질 함유량(유기이물질, 무기이물질), 알칼리골재반응 항목이 추가되어 있으며, 절대건조밀도, 흡수율, 0.08mm체 통과량, 안전성 등 기준을 달리하여 관리되고 있는 것을 알 수 있었다. 물리적 특성은 <Table 4>와 같으며 체가름 시험은 <Fig. 1>에서 보는 바와 같다.

천연잔골재, 부순잔골재, 순환 잔골재의 품질기준을 종합하여 비교하면, 부순잔골재는 0.08mm체 통과량, 입자모양 관정실적을 제외한 시험 항목의 품질기준이 천연골재와 동일

한 반면, 순환골재는 이물질 함유량(유기이물질, 무기이물질), 알칼리골재반응 항목이 추가되어 있으며, 절대건조밀도, 흡수율, 0.08mm체 통과량, 안전성 등에서 낮은 품질기준을 적용하는 것을 알 수 있었다. 이러한 품질상의 차이점이 선행연구 사례에서 확인한 순환잔골재 활용에서 모르타르의 품질 저하에 영향을 주는 것으로 확인되고 있다.

4. 성능검토실험 및 결과 분석

4.1 성능 실험 및 방법

본 연구에서는 건설폐기물 재활용 부산물인 순환잔골재의 활용방안으로 순환잔골재를 부순잔골재 대체재로 사용하였다. 기본 실험에서 순환 잔골재의 사용량은 전체 잔골재 대비 25%, 50%, 75%를 적용했고, 각각 부순잔골재+순환잔골재 배합비로 2.5:7.5, 5:5, 7.5:2.5의 질량비를 사용하였다. 또한, 순환골재는 기존 상용화 되어 활용되는 콘크리트 벽돌 제품과 동일한 물시멘트비를 적용하여 실험을 진행하였다.

‘건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률 시행령(The Construction Recycling Promotion Act by the Ministry of Environment, 2023)에서는 순환골재를 원료로 사용하여 만든 콘크리트제품 제조용 순환골재를 50% 이상 사용한 벽돌, 블록, 도로경계석, 맨홀 등의 제품으로 정의하고 있다(Guidelines for the Handling of Construction Waste Management and Disposal by the Ministry of Environment, 2018).’ 이는 건설폐기물의 신뢰도에 따른 기준으로 파악된다. 순환잔골재의 골재 품질, 치환율, 물시멘트비 등 다양한 변수를 설정하여 기존 연구에서 다루지 않았던 순환잔골재의 실험을 통해 굳지 않은 모르타르와 경화된 모르타르의 성질 및 역학적 특성을 분석하는 기초 자료를 얻을 수 있었다. 압축강도 실험은 KS F 2405를 기준으로 수행하였다.

흡수율 실험은 KS F 4004(콘크리트벽돌)의 기준으로 수

행하였으며 5, 7, 28일 보존한 제품에서 시험체를 취하여 실온 20~25℃ 물속에 24시간 침식시킨 이후 물속에서 꺼내어 철망 위에 놓고 1분간 물기를 뺀 이후 젖은 형겅으로 표면을 닦아내고 시험체의 표건질량을 측정한다. 이후 100~110℃ 공기 건조기 안에서 24시간 건조시켜 시험체의 절대건조질량을 측정한 이후 흡수율을 계산하며, 다음 식에 따라 흡수율을 계산한다.

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_1}$$

M_0 = 시험체의 표건 질량 (g)
 M_1 = 시험체의 절건 질량 (g)

4.2 실험결과 및 고찰

4.2.1 재령 기간별 압축강도

본 연구에서는 순환잔골재의 치환율 및 시멘트 배합에 따른 조적조용 콘크리트 벽돌 모르타르의 강도 특성을 분석하기 위해 콘크리트 벽돌의 5, 7, 28일 각각 압축강도를 측정하였다. 그 결과 순환잔골재의 비율이 높아질수록 압축강도가 낮아졌다는 것을 확인하였다.

다음 <Table 5>은 시멘트 배합량 변화와 부순잔골재 및 순환잔골재를 치환율에 따른 콘크리트 조적용 벽돌 실험체의 재령별 평균 압축강도 실험 결과를 보여준다. 압축강도 실험은 KS F 2405를 기준으로 수행하였으며, 콘크리트 벽돌 시편들의 재령별 압축강도의 평균값을 정리하였다. 그 결과 순환잔골재의 비율이 높아질수록 압축강도가 낮아졌다는 것을 확인하였다.

또한, 시멘트량이 적을수록, 순환잔골재 치환율이 증가할수록 강도 발현이 저조하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 5, 7일 초기강도와 28일 재령 압축강도는 재료배합 유형별로 큰 차이 없이 대체로 5, 7일 강도는 76~79% 수준으로 28일에 강도에 도달하는 경향을 보였다. 이는 시멘트가 수분과 반응하여 수화물질을 생성하고 콘크리트 내부에서 점차 결합하면서 강도를 향상시키기 때문이다.

다음 <Table 6>와 <Fig. 2>은 시멘트량 및 천연, 부순, 순환잔골재의 치환율에 따른 콘크리트 조적용 벽돌의 28일 평균 압축강도가 내력벽(구조용), 비내력벽(비구조용)의 허용 가능 범위를 정리하여 보여준다.

일반적으로 순환잔골재의 표면에는 시멘트페이스트, 유분 등 이물질이 부착되어 있는데, 이러한 성분이 순환잔골재와 시멘트 사이의 밀접한 화학적 결합에 따라 압축강도가 저하되는 것으로 판단된다. 또한 골재표면에 잔존하고 있는 시멘트 페이스트는 다공성으로 흡수율이 크고, 순환잔골재의 이물질과 잔골재와 시멘트의 수화반응이 일어나지 못하는 것도 압축강도 저하의 한 원인으로 판단된다.

Table 5. Compressive Strength by Age (MPa)

Cement (300 kg/m ³)						
Day	Natural 100%	Crushed 100%	Recycled 25%	Recycled 50%	Recycled 75%	Recycled 100%
5	17.27	18.1	21.69	18.18	16.79	14.41
7	17.01	20.39	20.37	19.78	18.92	18.23
28	17.26	22.56	20.77	19.92	19.25	19.08
Cement (250 kg/m ³)						
Day	Natural 100%	Crushed 100%	Recycled 25%	Recycled 50%	Recycled 75%	Recycled 100%
5	13.88	19.15	19	17.42	15.36	12.64
7	14.94	21.22	20.7	19.89	15.36	13.32
28	13.67	22.43	20.45	19.64	18.82	15.05
Cement (200 kg/m ³)						
Day	Natural 100%	Crushed 100%	Recycled 25%	Recycled 50%	Recycled 75%	Recycled 100%
5	9.90	15.17	14.31	9.92	8.01	8.67
7	11.15	16.65	15.97	13.55	11.12	10.83
28	11.09	20.39	19.83	14.02	13.04	11.44
Cement (150 kg/m ³)						
Day	Natural 100%	Crushed 100%	Recycled 25%	Recycled 50%	Recycled 75%	Recycled 100%
5	6.82	11.79	9.08	8.74	8.91	8.4
7	6.95	13.47	11.37	10.15	9.35	8.32
28	9.42	17.49	14.22	12.97	11.36	10.51
Cement (100 kg/m ³)						
Day	Natural 100%	Crushed 100%	Recycled 25%	Recycled 50%	Recycled 75%	Recycled 100%
5	4.81	9.93	9.49	7.77	8.37	7.72
7	5.14	12.31	10.19	8.69	8.95	8.78
28	7.04	16.59	12.35	11.35	10.52	10.36

Table 6. Compressive Strength Test Results (MPa)

	28-Day Compressive strength (MPa)				
	Cement 300 kg/m ³	Cement 250 kg/m ³	Cement 200 kg/m ³	Cement 150 kg/m ³	Cement 100 kg/m ³
Natural 100%	17.26	13.67	11.09	9.42	7.04
Crushed 100%	22.56	22.43	20.39	17.49	16.59
Recycled 25%	20.77	20.45	19.83	14.22	12.35
Recycled 50%	19.92	19.64	14.02	12.97	11.35
Recycled 75%	19.25	18.82	13.04	11.36	10.52
Recycled 100%	19.08	15.05	11.44	10.51	10.36

Black letter: Exceeds the minimum limit of compressive strength for bearing walls (13 MPa)

Blue letter: Exceeds the minimum limit of compressive strength for non-bearing walls (8 MPa)

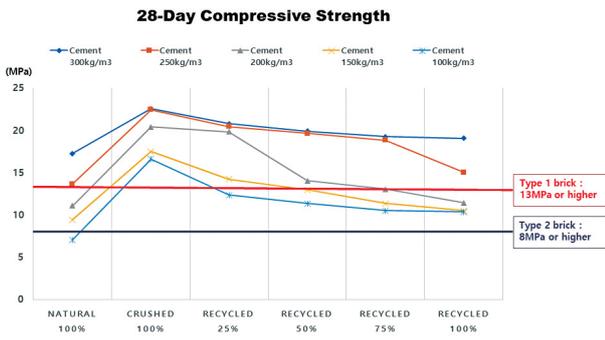


Fig. 2. Compressive Strength (28 Days)

실험 결과를 더욱 구체적으로 살펴보면 시멘트량이 100 kg/m³를 사용하는 경우에는 부순잔골재 대비 압축강도가 부족하였다. 그러나 순환잔골재로 사용하는 경우에는 C종 2급 (비내력벽 구조 및 옥내 사용) 기준에 맞는 벽돌 8N/mm² 이상의 압축강도를 충족하는 것으로 나타났다. 또한, C종 1급(내력구조, 옥외 사용)에 사용하기 위해서는 13N/mm² 이상의 압축강도가 필요하다는 결과를 확인했다. 따라서 시멘트 200 kg/m³ 순환잔골재 75% 혼합하고 부순잔골재를 25%를 혼합한 경우, 13MPa의 압축강도를 충족하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 시멘트 300kg/m³사용의 경우는 19MPa를 충족함으로 보강도 웁벽블록, 콘크리트 호안, 보차도 경계블록 등 다양한 제품에 사용하는 데 필요한 기준을 충족하는 것으로 확인되었다. 기존 연구는 시멘트 400kg/m³ 사용의 경우는 19 MPa를 충족한 결과를 얻은 사례(송진만, 2019)보다는 개선된 결과를 얻을 수 있었던 것은 순환잔골재의 품질연구와 KS규격의 엄격한 품질관리가 품질향상에 영향을 준 것으로 파악된다.

건설폐기물관리법에서는 콘크리트제품은 순환골재를 50% 이상 사용한 벽돌, 블록, 경계석 등을 순환골재 재활용 제품으로 정의하고 있다. 본 실험의 결과에서는 다양한 배합으로 시멘트량에 따른 골재의 강도가 정리됨으로 제품 대상에 따라 순환골재 100% 사용도 가능하다는 결과를 얻었다. 다만 순환잔골재의 품질이 압축강도에 영향을 주는 바 순환골재의 이물질 제거 관련 연구가 필요하며, 법규에 충족하는 제품을 생산하기 위해서는 더 많은 다양한 실험적 연구를 통해 배합시험과 기능성 혼화제 또는 혼화제 활용에 관한 연구도 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4.2.2 흡수율

조적조 벽돌은 기본적으로 압축재로서, 흡수율이 높을 경우 습윤상태에서 강도가 현저히 저하되거나 동결기에 흡수된 수분의 팽창에 의한 파괴 및 백화 현상이 발생 될 수 있다. 또한 조적조 벽돌의 품질에는 모르타르의 접착 강도, 시

공 정밀도에 영향을 받으며 쌓기 방식, 줄눈관리, 인방설치, 방수, 배수, 통풍 시스템도 고려하여야 한다.

조적용 콘크리트 벽돌은 다양한 형태의 공극 때문에 물이 그 공극으로 들어가서 흡수된다. 이때 콘크리트 벽돌의 흡수율이 높을수록 콘크리트의 내구성이 감소하고, 부식 등의 문제가 발생할 수 있다. 시편의 공극이 많은 경우 흡수율이 크게 나타나고, 반대로 공극이 적으면 흡수율은 낮게 나타나는 것이다. 이는 잔골재 표면에 부착된 기존 모르타르가 미세한 균열 등을 가지고 있어 더 많은 공극을 내포하고 있기 때문으로 판단된다.

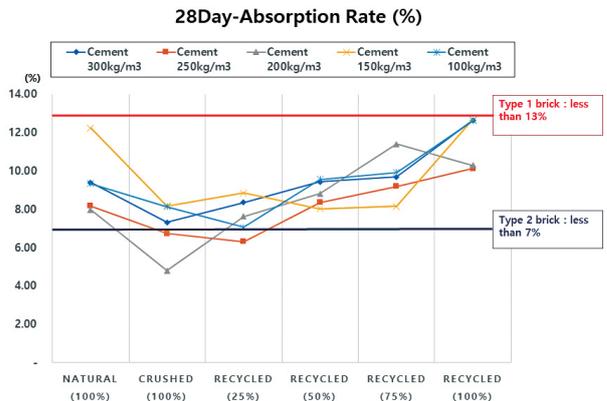


Fig. 3. Absorption Rate (%)

다음 (Fig. 3)는 이번 실험에 사용된 조적용 콘크리트 벽돌의 배합 조건별 평균 흡수율 실험 결과를 보여준다. (Fig. 3)에서 보는 바와 같이 순환골재의 흡수율은 시멘트량이 많고 적음에도 크게 영향을 받지 않고 흡수율이 일정한 것을 보여주고 있다. 대체로 재상 잔골재의 사용 여부나 배합 조건의 변화에도 요구되는 흡수율 성능 기준인 C종 2급 13% 이하에는 충족하는 것으로 확인되었다, 다만 내력구조 옥외 사용에는 공극을 메우기 위한 미장, 도장, 점토, 세라믹 등 다양한 마감을 통해 지속적인 품질개선 방법을 찾아야 할 것이다.

5. 결론

현재 도시가 급속하게 팽창함으로 노후화된 건축물에서 재건축, 재개발로 인해 건설폐기물이 급속하게 증가하고 있다. 그에 따라 처리비용과 지자체 간의 폐기물처리에 대한 갈등이 증가하고 있다. 국제사회에서는 지구온난화 기후변화에 따른 대응으로 탄소배출권을 저감하기 위한 탄소량을 줄이라는 요구가 거세지고 있다. 따라서 건설업계를 향한 기후변화에 대한 환경적인 요구를 충족시킬 필요가 있다. 본 연구는 건설폐기물로부터 재생된 순환잔골재를 활용함으로

써 골재의 비용을 절감하고 시멘트량을 절감하며, 환경보호 및 경제적인 이익을 얻기 위한 노력의 일환으로 수행되었다.

현재 건설업계에서는 부순잔골재와 순환잔골재를 혼합하여 조적조 벽돌을 제조하는데 사용하고 있으며, KS 기준 시험을 통해 요구성능을 충족한다면 순환잔골재를 100% 까지도 사용할 수 있다는 결론을 얻었다. 이로써 순환잔골재를 사용하는 것에 대한 막연한 두려움을 근거 있는 실험 데이터를 통해 해소하고, 안전한 제품으로 생산될 수 있음을 확인하였다. 또한, 압축강도를 높임으로써 다양한 콘크리트 기성 제품군에 사용 가능성을 확장할 수 있음을 확인하였다(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2014; Concrete Brick Mix Ratio Table).

이는 시멘트량과 부순잔골재 및 순환잔골재의 다양한 배합조건에 따라 생산한 콘크리트 조적용 벽돌의 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 먼저 1차 실험에서 시멘트 300kg/m³으로 시험한 결과, 재생골재 100%를 사용하였을 때 19.08MPa의 압축강도를 얻었다. 이를 바탕으로 시멘트량을 300kg/m³부터 50kg/m³까지 순차적으로 줄여가며 실험한 결과, 100kg/m³ 시멘트까지 사용하여도 10.36MPa까지의 압축강도를 얻을 수 있었다. 이 값은 조적조 비내력벽 압축강도 8MPa를 충족하는 값으로 충분하며, 안전성을 고려한 130% 안전율에도 충족된다. 내력벽 기준인 압축강도 13MPa를 충족하기 위해서는 최소 시멘트 200kg/m³를 사용해야 하며, 순환잔골재 75%와 부순잔골재 25% 혼합을 사용하면 13.04MPa의 압축강도를 얻을 수 있었다. 또한, 흡수율 실험에서 벽돌의 공극 차이에 의한 흡수율은 13% 이하로 성능요구 기준을 충족함을 확인할 수 있었다. 이러한 실험 결과를 통해 순환골재의 사용으로 다양한 제품군으로 확대가 가능함을 확인할 수 있었다. 이는 건설폐기물이 대체자원으로 더욱 적극적으로 활용될 수 있는 가능성을 보여준다.

다만 본 실험에서는 콘크리트 벽돌 제조 시 실무 과정을 반영하여 배합에 대한 천연 및 부순 잔골재를 순환골재로 중량 치환하여 재료의 특성치 경향을 비교하였기에, 향후 연구과제로는 용적 배합법을 적용한 물성 실험을 계속하고자 한다. 또한 건설폐기물에 잔골재 및 굵은골재를 함께 포함하거나, 혼화재 또는 혼화제 사용에 관한 연구, 잔골재와 굵은골재의 비율 및 조합에 따른 압축강도 향상을 위한 연구 등 다양한 조건에서의 연구가 수행될 필요가 있다. 이는 건설폐기물의 재활용을 통해 다양한 콘크리트 제품군을 개발하고 활용하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문(전시, 저서)은 2023학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원 되었음.

References

- Chu, Y.K. (2018). "A Study on the High-Performance Concrete Incorporating Recycled Aggregates." Master's Thesis, Graduate School of Gunsan University.
- Concrete Brick Mix Ratio Table (D/B Concrete, D/H Concrete, S/Y Concrete).
- Corinaldesi, V. (2010). "Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates." *Construction Building Materials*, 24(9), pp. 1616-1620.
- Domingo, A., Lazaro, C., Gayarre, F.L., Serrano, M.A., and Lopez-Colina, C. (2010). "Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete." *Materials and Structures*, 43(8), pp. 1147-1160.
- Enforcement Decree of the Act on Promotion of Recycling of Construction Waste by the Ministry of Environment (2018).
- EN 2062 (2013). "Concrete-Specification, performance, production and conformity." CEN, European Committee for Standardization.
- Guidelines for the Handling of Construction Waste Management and Disposal by the Ministry of Environment (2018).
- Kim, J.M., Kim, H.S., Lee, D.G., and Kang, C. (2011). "Properties of Autoclave Curing Lightweight Foamed Concrete Using Waste Concrete Powder." *Journal of Korea Society of Waste Management*, 28(2), pp. 191-199.
- Korea Concrete Institute (2019). Concrete Practical Guidelines, KCI PM2008, pp. 1-19.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2014) Korea Institute Of Construction Technology.
- KS F 2502 (2014). Test Method for Sieve Analysis of Coarse and Fine Aggregates, Korean Standards Association.
- KS F 2527 (2018). Specifications for Natural, Crushed, Recycled, and Fine Aggregates for Concrete, Korean Standards Association.
- KS F 2573 (2024). Recycled Aggregates for Concrete, Korean Standards Association.
- KS F 4004 (2018). Concrete Bricks, Korean Standards Association.
- KS F 5021 (2016). Chemical Composition, Physical

- Performance, Test Methods, Sampling, Marking, and Packaging of Portland Cement, Korean Standards Association.
- KS L 5105 (2016). Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar, Korean Standards Association.
- Kwak, E.G., Kang, H.K., and Kim, J.M. (2013). "Recycling Technology for the Waste Concrete Fine Particles of By-product from Recycling Process for Waste Concrete." *Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8(3), pp. 20-24.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport Ordinance No. 2017-175 (2017). Regulations on the Use Purpose and Mandatory Usage Amount of Recycled Aggregate and Other Recycled Products in Recurring Construction Projects.
- Moon, K.T., Park, S.Y., and Kim, H.J. (2014). "Mechanical Properties of Concrete with Different Replacement Rate of Recycled Fine Aggregate." *Journal of Marine Sciences and Technology*, 38, pp. 39-46.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J., and John, V.M. (2013). *Eco-efficient Concrete*, Woodhead Publishing in Materials.
- Poon, C.S., and Chan, D. (2006). "Paving blocks made with recycled concrete aggregate and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates." *Construction and Building Materials*, 20(8), pp. 569-577.
- Poon, C.S., Kou, S.C., Wan, H.W., and Etxeberria, M. (2009). "Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates." *Waste Management*, 29(8), pp. 2369-2377.
- RILEM (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates, TC 121-DRG, Mater Struct 27, pp. 557-559.
- Roh, S.J. (2020). "Foreign Application Cases of Recycled Aggregate Concrete." *Korean Recycled Construction Resources Institute*, 15(1), pp. 53-55.
- Shin J.H. (2016). "Performance evaluation of concrete using modified recycling aggregate produced by accelerated carbonation method." Graduate School of Dankook University.
- Song, J.M. (2019). "Strength Characteristics and Economic Analysis of Mortar for Retaining Wall Blocks Using Recycled Fine Aggregates." Master's Thesis in Engineering.
- The Construction Recycling Promotion Act by the Ministry of Environment (2023).
- Yang, K.H., Chung, H.S., and Ashour, A.F. (2008). "Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties." *ACI Materials Journal*, 34(105), pp. 289-296.
- Xu, J.H., Park, C.W., Ahn, J.C., and Kang, B.H. (2004). "The Study Concrete Brick Material of Recycle Cement Using." *Journal of the Korea Institute of Construction Engineering and Management*, 4(2), pp. 87-90.
- Woo, G.S., Kim, J.H., Lee, S.H., and Oh, J.K. (2020). "A Study on the Quality Properties When Applying Recycled Aggregate Concrete for the Construction Standard Mitigation." *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(3), pp. 63-69.

요약 : 건설업계에서 순환 골재의 품질에 대한 신뢰성 부족, 유해 물질 문제, 소비자의 부정적 인식 등은 순환 골재의 활용 확대를 제한하고 있다. 이런 측면에서 기존 연구들은 주로 내구성을 고려하여 콘크리트에 굵은 순환 골재를 사용하는 데 중점을 두고 있다. 반면 순환 잔골재의 경우 주요 구조물에 적용된 사례가 부족할 뿐만 아니라, 인식 부족 등으로 활용 범위가 매우 제한적인 상황이다. 이에 본 연구의 주요 목적은 순환 잔골재와 시멘트량의 다양한 배합 비율에 따른 조적용 콘크리트 벽돌의 물리적 특성 실험을 통하여 내력벽과 비내력벽 구조물에서 그들의 활용 가능성을 제시하는 것이다. 이를 위해 순환 잔골재와 부순 잔골재의 혼합비율 및 시멘트량을 중심으로 콘크리트 벽돌의 압축강도와 흡수율을 측정하였다. 그 결과 내력벽용 콘크리트 벽돌의 품질 요구 기준 중 하나인 13MPa의 강도를 달성하기 위해서는 시멘트량 200kg/m³에 순환 잔골재를 100% 사용하거나, 부순 잔골재를 25% 사용하고 순환 잔골재를 75% 혼합하여 사용하는 것이 가능함을 확인하였다. 또한 비내력벽의 품질 요구 기준 중 하나인 8 MPa의 강도를 충족시키기 위해서는 시멘트량 100kg/m³에 순환 잔골재를 100% 사용하는 것만으로 충분하다는 결과가 나왔다. 벽돌의 공극에 의한 흡수율은 13% 이하로 요구 성능 기준을 충족하는 것으로 확인되었다. 이는 콘크리트 벽돌 제조 시 순환 잔골재를 사용해도 KS F 4004(콘크리트 벽돌)에서 요구하는 품질 기준을 충분히 만족시킬 수 있음을 의미한다.

키워드 : 순환 잔골재, 콘크리트 벽돌, 배합설계, 물리적 성능
