

3D 프린팅 격자구조 인공골재를 치환한 경량콘크리트의 압축강도 특성

박광민^{1*}, 민경성¹, 노영숙²

¹(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터, ²서울과학기술대학교 건축학부 건축공학전공

Compressive Strength of Lightweight Concrete Using 3D Printed Lattice Lightweight Aggregate

Kwang-Min Park^{1*}, Kyung-Sung Min¹, Young-Sook Roh²

¹Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories

²Department of Architectural Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 경량골재를 혼입한 경량골재 콘크리트는 건축구조물 경량화가 가능하다는 장점으로 지속적으로 수요가 증가하고 있다. 이를 위해 경량골재의 안정적인 공급과 품질 확보 방안이 필요하다. 본 연구는 3D 프린팅으로 경량 고강도의 격자 구조체를 출력하여 경량골재로서의 활용성을 검토하는 것을 목표로 했다. 골재 종류에 따른 콘크리트 밀도 및 압축강도를 평가하기 위하여 일반 부순골재, 바텀애시 및 준설토 기반 인공경량골재, 바텀애시 부산 경량골재 및 3D 프린팅 격자 구조 경량골재를 사용하여 4가지의 배합설계를 진행했다. 실험 결과, 일반골재 콘크리트가 밀도 2.2 t/m³, 압축강도 45.9 MPa인 것과 비교하여, 3D 프린팅 격자구조 경량골재를 사용한 콘크리트는 밀도 1.7 t/m³, 압축강도 46.7 MPa이 발현됐다. 결과적으로 동급의 압축강도에서 밀도가 21.7 % 감소하는 효과를 확인했다. 따라서 3D 프린팅 격자구조 경량골재를 경량콘크리트에 사용할 수 있는 것을 시사한다. 향후 3D 프린팅 기반 굵은골재 대량 생산 및 경제성 검토를 실증적 차원에서 분석할 계획이다.

Abstract The demand for lightweight aggregate concrete is continuously increasing due to its advantage of reducing the building's weight. Therefore, stable supply and standard quality of lightweight aggregate are necessary. This study examined the applicability of a lightweight aggregate in concrete making by manufacturing a lightweight and high-strength lattice structure out of it by 3D printing. Later, the density and compressive strength of the concretes made of natural crushed, artificial lightweight, bottom ash lightweight, and 3D printed lattice structure lightweight aggregates were measured. This measurement showed that the 3D printed lattice structure lightweight aggregate concrete exhibited a density of 1.7 t/m³ and compressive strength of 46.7 MPa. On the other hand, the natural crushed aggregate concrete had a density of 2.2 t/m³ and compressive strength of 45.9 MPa. Likewise, the density of the concrete decreased by 21.7 % for the same compressive strength while using a 3D printed lattice structure lightweight aggregate instead of the natural crushed aggregate. Therefore, the 3D printed lattice structure lightweight aggregate can be used to make lightweight concrete. The mass production and economic feasibility of the 3D printed lattice structure lightweight aggregate will be studied in the future.

Keywords : 3D Printing, Lattice Structure, Coarse Aggregate, Lightweight Concrete, Compressive Strength

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 “3D 프린터를 이용한 밀도제어형 인공경량골재 제조기술 개발(21CTAP-C157265-02)”으로 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Kwang-Min Park(Korea Conformity Laboratories)

email: kmpark@kcl.re.kr

Received January 3, 2022

Revised March 3, 2022

Accepted April 1, 2022

Published April 30, 2022

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.1.1 경량골재를 사용한 콘크리트

골재는 콘크리트 구성 재료로 모래, 자갈 및 쇄석 등의 입상재료를 의미하며, 콘크리트 체적의 약 70 %를 차지하는 중요 자재이다. 따라서 물리적 특성에 따라 콘크리트의 역학적 성능에 영향을 미친다[1].

콘크리트의 질량을 낮추기 위하여 경량골재를 사용하여 제조하는 경량골재 콘크리트(Lightweight concrete, LWC)는 경량화가 가능하다는 이점으로, 앞으로도 경량 콘크리트 수요는 지속적으로 증가할 것으로 전망된다[2].

인공경량골재는 여러 가지 원료를 혼합하여 만들기 때문에 사용하는 원료에 따라 골재의 품질이 달라질 수가 있어 동일 배합일지라도 경량골재 콘크리트의 특성이 다르게 나타나므로, 골재의 품질 관리가 매우 중요하다[3]. 따라서 콘크리트의 품질에 큰 영향을 미치는 중요 자재인 골재의 안정적인 공급과 품질 확보 방안이 필요하다. 이에 본 연구에서는 3D 프린팅으로 출력한 격자구조 인공경량골재의 활용 가능성을 검토하고자 한다.

1.1.2 격자구조체

격자구조체는 일반적으로 단위셀(Unit Cell)을 설계 공간 안에서 반복적으로 배열하여 생성한 구조체를 말한다[4]. 격자구조체는 강도 및 강성, 초경량 및 에너지 흡수 능력 등의 우수성을 가지고 있어서 전방위 산업에서 주목을 받고 있다[5,6]. 그러나 격자구조체의 다양한 장점에도 불구하고 복잡한 형상에 따른 제조 공정의 어려움으로, 현재까지 광범위한 상용화 및 사용은 제한되고 있다. 이 본 연구에서는 인공경량골재 형상을 격자구조체로 적용함으로써 가능성을 검토하고자 한다.

1.1.3 3D 프린팅

3D 프린팅(3D Printing, 이하 3DP) 기술은 전통적인 제조 방법으로는 불가능한 복잡한 기하학적 형상 제조가 가능한 기술로써, 격자구조체 제조를 위한 최적 기술로 주목을 받고 있다. 3차원 캐드 모델을 한층 한층 쌓아 올림으로써 기존 기술로는 제작이 불가능한 복잡한 형상을 제조할 수 있다. 3D 프린팅 기술 발달로 경량 고강도 격자구조체 제조에 대한 연구가 시도되고 있다[7,8].

1.2 연구의 범위 및 한계

본 연구는 굵은골재에 한정하여 격자구조체 최적 설계, 3D 프린팅 기반 굵은골재 출력, 배합설계, 밀도 및 압축강도 시험을 통한 기술적 검토를 진행했다.

KS F 2527 콘크리트용 골재에서 정의하는 인공경량골재는 ‘고로 슬래그, 점토, 규조토암, 석탄회, 점판암과 같은 것을 팽창, 소성, 소피하여 생산되는 골재’로 정의하고 있다. 본 연구의 3D프린팅 인공경량골재의 요구성능표는 KS F 2527 천연 굵은골재 및 KS F 2541 굵은골재 파쇄값을 고려하여 일반 천연골재 요구성능인 흡수율 3 % 미만 및 파쇄값 30 % 이하로 설정했고, 경량화를 목표로 절대건조밀도 1 g/m³ 수준으로 설정했다. 단, 3D 프린팅 기반 굵은골재 대량 생산 및 경제성 검토는 향후 실증적 차원에서 분석할 계획이다.

2. 연구 개요 및 방법

2.1 시험체 제조

2.1.1 경량콘크리트 배합 재료

본 연구의 콘크리트 배합사항은 Table 1과 같다. 먼저 물결합재비(W/B) 40 %, 단위수량 180 kg/m³으로

Table 1. Mixing design to produce concrete specimens

Specimen items.	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)					S.P (Binder×%)
		Water	Binder		Fine aggregate	Coarse aggregate	
			Cement	Fly ash			
Con_NCA	40	180	360	90	725	886	1.2
LWC_ALA						563	
LWC_BA						545	
LWC_3DLLA						344	

Con:Concrete, LWC:Lightweight concrete, NCA:Natural crushed aggregate, ALA:Artificial lightweight aggregates, BA:Bottom ash aggregate, 3DLLA:3D printed lattice lightweight aggregate

설정했다. 콘크리트 결합재로 KS L 5201의 1종 보통포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement) 및 KS F 5405의 2종 플라이애시(Fly ash)를 사용했다. 시멘트 밀도 및 비표면적은 각각 3,150 kg/m³ 및 3,300 cm²/g이다. 플라이애시 밀도 및 비표면적은 각각 2,350 kg/m³ 및 3,550 cm²/g이다. 잔골재는 밀도 2.600 g/cm³ 강사를 사용했다.

굵은골재를 실험요인으로 설정하고, 일반 부순골재(Natural crushed aggregate, NCA), 바텀애시 및 준설토 기반 인공경량골재(Artificial lightweight aggregates, ALA)[9], 남동발전에서 생산된 바텀애시 부산 경량골재(Bottom ash aggregate, BA) 및 3D 프린팅 격자구조 경량골재(3D printed lattice lightweight aggregate, 3DLLA)를 사용했다.

Table 2. Physical properties of aggregate used

Aggregate type	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Water absorption (%)
NCA	2.65	6.78	0.9
ALA	1.65	7.11	9.1
BA	1.60	7.23	10.1
3DLLA	1.01	6.95	0.1

NCA:Natural crushed aggregate, ALA:Artificial lightweight aggregates, BA:Bottom ash aggregate, 3DLLA:3D printed lattice lightweight aggregate



Fig. 1. Type of coarse aggregate
(a) Natural crushed aggregate (b) Artificial lightweight aggregates (c) Bottom ash aggregate (d) 3D printed lattice lightweight aggregate

Table 2와 같이 NCA, ALA, BA 및 3DLLA의 밀도는 각각 2.65 g/cm³, 1.65 g/cm³, 1.60 g/cm³ 및 1.18 g/cm³로서, 3DLLA가 기타 경량골재에 비해 경량성이 우수하다. 또한, NCA, ALA, BA 및 3DLLA의 흡수율은 각각 0.9 %, 9.1 %, 10.1 % 및 0.1 %로서, 3DLLA가 기타 경량골재에 비해 흡수성에서 유리하다.

각 굵은골재의 물리적 특성 및 외관은 Table 2 및 Fig. 1과 같다. NCA를 혼입한 일반콘크리트는 Con_NCA로 표기하고, 경량골재를 혼입한 경량콘크리트는 LWC_경량골재기호로 표기했다.

2.1.2 3D 프린팅 격자구조 경량굵은골재 제조

굵은골재 형상은 Rhinoceros(Rhino 7, Robert McNeel & Associates, Seattle, WA, USA)를 사용하여 설계했다. 선행 연구[10]를 통해 Simple cubic 외 10종 단위셀을 20 mm × 20 mm × 20 mm 구조체에 3열 반복 배열하고, 이 가운데 Simple cubic 및 Octahedron 단위셀이 축방향성에 가장 우수함을 확인했다(Fig. 2). 본 연구에서는 모르타르 부착성을 고려하여 표면거칠기를 가진 Octahedron 형상을 적용하여 인공경량골재 설계에 반영했다(Fig. 3). 본 연구에서는 형상설계 한계를 고려하여 정육면체 형상을 적용했다.

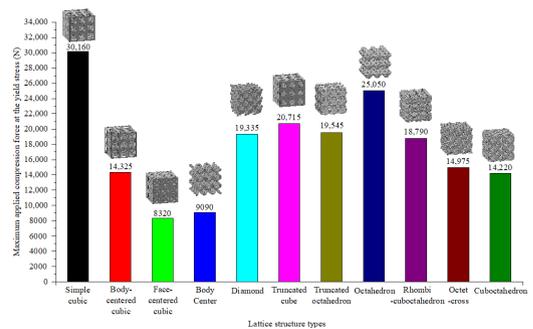


Fig. 2. Yield force of different lattice structure types with a relative density of 0.3 and 3 × 3 × 3 pattern [10].

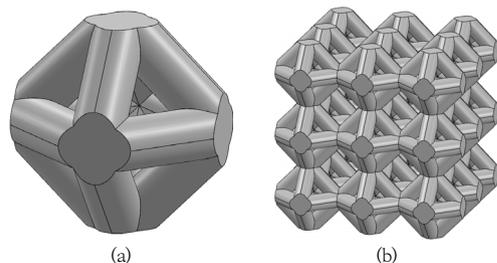


Fig. 3. Shape of 3D printed lattice lightweight aggregate
(a) Unit cell (b) Lattice structure

여기서 해당 단위셀은 상대체적 30 %로써, 70 %의 공극을 가지도록 설계했다. 3DLLA는 10 mm × 10 mm × 10 mm 및 20 mm × 20 mm × 20 mm의 2가지 크기로 출력했다. 배합과정에서는 10 mm × 10 mm × 10 mm 및 20 mm × 20 mm × 20 mm는 개수비율로 3:7의 비율로 사용했다. 결과적으로 $\phi 100$ mm × 200 mm 시험용 원주형 공시체 제작에 10 mm × 10 mm × 10 mm 및 20 mm × 20 mm × 20 mm 출력물이 각각 49개 및 115개가 혼입된다. 여기서, 공시체 1개에 필요한 3DLLA 생산시간은 약 55분이 소요됐다.

3D 프린팅 제조는 폴리아미드 12(Polyamide 12, PA12)소재를 적용하여 HP사 Jet Fusion 4200를 사용했다. 여기서 PA12는 가장 높은 빈도로 사용되는 3D프린팅용 엔지니어링 플라스틱 소재로 인장강도 48 MPa의 기계적 특성을 보유하고 있다. 격자구조체는 복잡하고 정교한 형태임을 고려하여 멀티젯퓨전방식(Multi Jet Fusion, MJF)을 채택했다. 3DLLA 출력조건은 적층두께 0.08 mm, 해상도 1200 dpi로 진행했다.

PA12 밀도는 1.01 g/cm³이며, 실제 3D 프링팅 출력한 10 mm × 10 mm × 10 mm 및 20 mm × 20 mm 크기의 3DLLA는 각각 0.303 g 및 2.424 g이다. 출력물의 질량 오차 범위가 1 %임을 확인하고 사용했다.

2.2 시험 항목

2.2.1 굵은골재 파쇄 시험

KS F 2541 굵은골재의 파쇄값 측정을 위한 시험방법에 준하여 측정했다. 굵은골재 파쇄값(Aggregate crushing value, ACV)을 측정하기 위해 표면 건조 포화 상태의 굵은골재를 시험장치에 넣고 (10 ± 5) 분 동안 최대하중 400 kN에 이를 때까지 일정 속도로 재하했다. 하중을 제거한 다음, 2.36 mm 체로 체가름한 다음 체를 통과한 파쇄된 골재의 질량을 측정한다. ACV는 시험 전 시료 질량에 대한 2.36 mm 체를 통과한 파쇄된 골재의 질량비를 백분율로 계산했다.

2.2.2 굳지않은 콘크리트 슬럼프

굳지않은 콘크리트의 유동성 및 성형성, 재료분리 여부를 확인하기 위해 KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험방법에 준하여 측정했다.



Fig. 4. Situation after aggregate crushing test
(a) Test method process (b) Natural crushed aggregate (c) Artificial lightweight aggregates (d) Bottom ash aggregate (e) 3D printed lattice lightweight aggregate

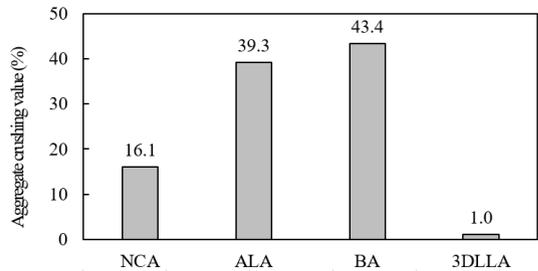


Fig. 5. Aggregate crushing values

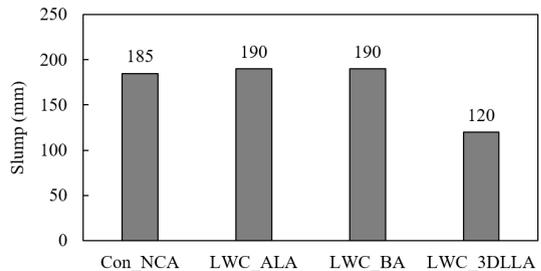


Fig. 6. Slump values

2.2.3 경량골재 콘크리트 밀도

경량골재 콘크리트의 밀도를 측정하기 위해 KS F 2409 군지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험방법에 준하여 경량골재 콘크리트의 단위용적 질량을 측정했다.

2.2.4 경량골재 콘크리트 압축강도

KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법을 준용하여 $\phi 100$ mm \times 200 mm 시험용 원주형 공시체를 제작하고 재령 7일 및 28일 압축강도를 측정했다. 재령별 공시체 3개 압축강도를 측정했으며 압축강도 측정은 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM maximum 100 kN)를 사용했다.

3. 연구 결과 및 분석

3.1 굵은골재 파쇄 시험

굵은골재 파쇄 시험 후의 상황 및 굵은골재 파쇄값은 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. Fig. 4와 같이 400 kN 하중을 재하한 후의 굵은골재를 보면 NCA, ALA 및 BA는 압착 파쇄된 것을 알 수 있다. 반면 3DLLA는 하중재하 전후의 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 5와 같이 굵은골재 파쇄값 측정 결과 NCA, ALA, BA 및 3DLLA에서 각각 16.1 %, 39.3 %, 43.1 % 및 1.0 %로 측정되었다. 결론적으로 3D 프린팅 격자 구조 경량골재가 강도가 우수한 것을 확인했다.

3.2 군지않은 콘크리트 슬럼프

Fig. 6에 군지않은 콘크리트 슬럼프 결과를 나타냈다. Con_NCA, LWC_ALA 및 LWC_BA는 185 mm, 190 mm 및 190 mm로 동일 수준이었으나, LWC_3DLLA는 120 mm로 슬럼프 저하가 나타났다. 이는 조립률 및 형상에 기인된 저하로 분석되며, 향후 유동성 저하를 방지하기 위하여 고성능 감수제 조정 및 조립률 개선 등이 필요하다.

3.3 경량골재 콘크리트 밀도

Table 3에 재령 28일의 콘크리트 밀도 결과를 나타냈다. 일반 콘크리트는 2.2 t/m^3 이나, 기존 경량골재를 사용한 LWC_ALA 및 LWC_BA는 1.8 t/m^3 로 낮아지는 결과가 나타났다. 또한 3D 프린팅 골재를 사용한

LWC_3DLLA는 밀도 1.7 t/m^3 로 측정됐다. 3DLLA의 밀도는 1.01 g/cm^3 으로 ALA 및 BA보다 낮은 밀도를 갖지만 배합과정에서 3DLLA 공극에 모르타르가 침투하여 충전됐기 때문에 LWC_3DLLA 밀도는 1.7 t/m^3 로 LWC_ALA 및 LWC_BA와 비슷한 수준으로 관찰된 것으로 분석된다.

3.4 경량골재 콘크리트 압축강도

Table 3 및 Fig. 7에 재령별 측정된 콘크리트 압축강도를 나타냈다. 재령 7일 및 28일에서 Con_NCA는 34.6 MPa 및 45.9 MPa가 측정됐다. 경량골재를 사용한 LWC_ALA는 33.9 MPa 및 40.0 MPa, LWC_BA는 31.5 MPa 및 36.0 MPa가 나타났다. 재령 28일 Con_NCA를 기준으로 LWC_ALA 및 LWC_BA는 12.9 % 및 21.5 %의 압축강도 저하가 나타났다. 따라서, 경량골재를 사용함에 따라 압축강도가 감소하는 경향이었다. 반면, 재령 7일 및 28일에서 LWC_3DLLA는 35.8 MPa 및 46.7 MPa로 Con_NCA와 강도 차이가 없었다. 결과적으로 3D 프린팅 격자구조 경량골재를 사용한 경량콘크리트는 압축강도 45 MPa급 배합설계 조건에서 강도 저하없이 밀도 1.7 t/m^3 로 설계 가능한 것을 확인했다.

Table 3. Physical properties of concrete

Type	Density (t/m ³)	Compressive strength (MPa)	
		7 days	28 days
Con_NCA	2.2	34.6	45.9
LWC_ALA	1.8	33.9	40.0
LWC_BA	1.8	31.5	36.0
LWC_3DLLA	1.7	35.8	46.7

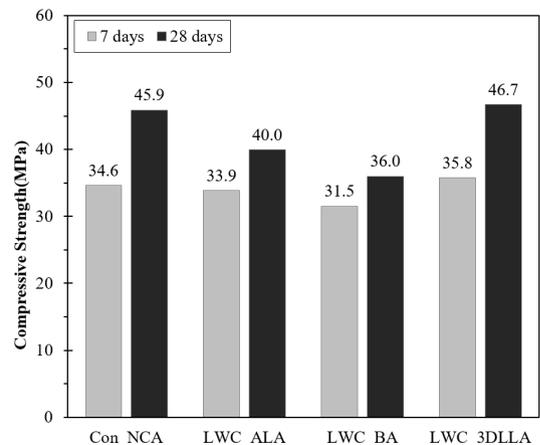


Fig. 7. Compressive strength of concrete

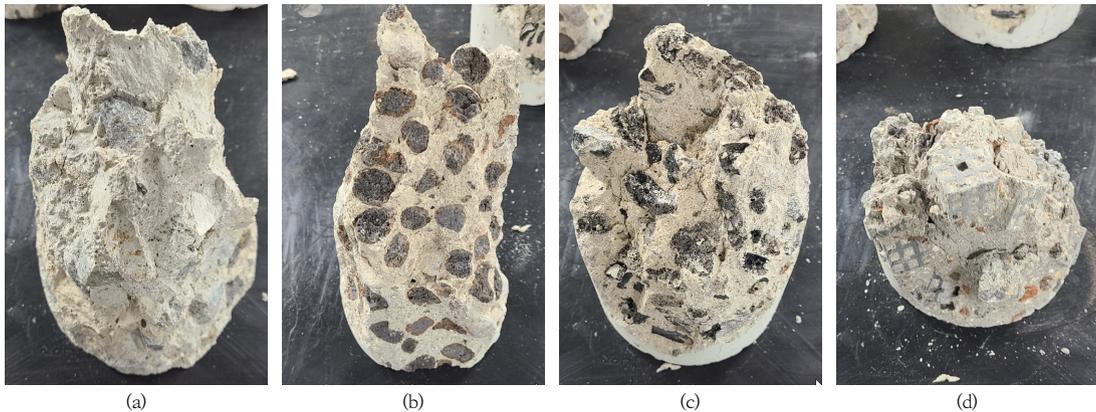


Fig. 8. Fracture of concrete

- (a) Using natural crushed aggregate (b) Using artificial lightweight aggregates
(c) Using bottom ash aggregate (d) Using 3D printed lattice lightweight aggregate

Fig. 8에 압축강도 측정 후 파괴된 콘크리트 형상을 나타냈다. 일반적으로 경량골재를 사용한 경량콘크리트 파괴 시 균열이 골재를 관통하여 발생하게 되며, 강도 저하를 발생한다[11]. Con_NCA는 골재와 모르타르 계면을 따라 파괴면이 발생한 것을 알 수 있다. 그러나, LWC_ALA 및 LWC_BA는 경량골재를 관통하는 균열이 발생하여 파단된 것을 알 수 있다. 경량골재가 파괴됨에 따라 압축강도가 저하한 것으로 볼 수 있다. LWC_3DLLA는 일반콘크리트와 동일하게 골재와 모르타르 계면이 파단하는 형상으로 골재파괴는 보이지 않았다.

본 연구는 연구실 단위로 공시체를 제조했으며, 생산 단가는 Con_NCA, LWC_ALA, LWC_BA 및 LWC_3DLLA가 100 원, 175 원, 155 원 및 48,000 원이 소요됐다. 따라서, 단, 안정적 수급을 위한 대량 생산 및 경제성 검토가 반드시 필요하다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 기계적 특성이 우수한 격자구조체를 설계하고 활용 분야를 개척하기 위한 연구로서, 인공경량·고강도골재 및 이를 활용한 경량 고강도 콘크리트의 적용 가능성을 검토했다.

3D 프린터로 격자구조 경량골재를 출력하고 이를 경량콘크리트에 적용했다. 그 결과, 압축강도 45 MPa급 배합에서 강도저하없이 밀도를 1.7 t/m³로 저감할 수 있었다. 이는 3D 프린팅 격자구조 경량골재가 경량 콘크리트용 골재로 사용할 수 있는 가능성을 시사한다.

또한, 격자구조체의 적용성을 검토하기 위하여, 대체 재료가 요구하는 성능을 만족하는지에 대한 검토가 필요하다. 경량골재로 적용하기 위해서는 절대건조밀도, 흡수율, 파쇄값 및 입도 등의 요구조건에 대한 검토가 필수적이다. 본 연구에서는 제한적인 요구조건에 대해서 검토했다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 3D 프린팅 격자구조 경량골재는 절대건조밀도 1.01 g/cm³, 흡수율 0.1 % 및 파쇄값 1.0 % 수준으로 기계적 특성이 우수함을 확인했다.
- (2) 3D 프린팅 격자구조 경량골재를 사용한 콘크리트 압축강도 시험 결과, 45 MPa급 설계에서 경량골재 파괴는 보이지 않았고, 골재와 모르타르 계면에서 파단하는 형상이 나타났다. 최종적으로 45 MPa급 배합설계 조건에서 강도저하없이 밀도 1.7 t/m³로 설계 가능한 것을 확인했다.

References

- [1] Neville, A. M. Properties of concrete. Edition 5, p.xxx, New York, N.Y: Pearson, 2011, pp.846
- [2] KIM, Yoo-Taek; JANG, Chang-Sub. Production technology, property and application of artificial lightweight aggregates. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol 23, No.4 pp.14-17, 2011
DOI: <https://doi.org/10.22636/MKCI.2011.23.5.14>
- [3] Kim, Yong-Hyok. "Manufacture of Lightweight Aggregates Using Bottom Ash." *Magazine of RCR* Vol 11 No.2, 2016

DOI: <https://doi.org/10.14190/MRCR.2016.11.2.030>

- [4] X.Z. Zhang, M. Leary, H.P. Tang, T. Song, M. Qian, "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol.22, No.3, pp.75-99, June 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0086-1>
- [5] M. Mazur, M. Leary, M. McMillan, S.Sun, D. Shidid, M. Brandt. "Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM), *Laser Additive Manufacturing*", Woodhead Publishing, 2017, pp.119-161.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00005-1>
- [6] X. Cao, S. Duan, J. Liang, W. Wen, D. Fang, "Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.145, pp.53-63, Sep 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.006>
- [7] L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.23, No.4, pp.660-677, June 2017.
- [8] O. Al-Ketan, R. Rowshan, R.K. Al-Rub, "Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials", *Additive Manufacturing*, Vol.19, pp.167-183, Jan 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.006>
- [9] Lee, Kyung-Ho, Keun-Hyeok Yang. "Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete Using Expanded Bottom Ash and Dredged Soil Granules." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol 37, No.2, pp.189-196, 2021
- [10] Park, K.-M.; Min, K.-S.; Roh, Y.-S. "Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements", *Materials*, 15, 97, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010097>
- [11] Sim, J., Yang, K., "Influence of specimen geometries on the compressive strength of lightweight aggregate concrete", *Journal of the Concrete Institute*, Vol.24, No.3, pp.333-340, 2012
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.3.333>

박 광 민(Kwang-Min Park)

[정회원]



- 2006년 3월 : 일본 미에대학교 건축공학 (공학사)
- 2006년 3월 : 일본 미에대학교 건축공학 (공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건축공학 (박사수료)
- 2008년 9월 ~ 2013년 1월 : (주)동양구조안전기술
- 2013년 1월 ~ 현재 : (재)한국건설생활환경시험연구원 책임연구원

<관심분야>

건축재료, 건축구조, 디지털패브리케이션

민 경 성(Kyung-Sung Min)

[정회원]



- 2017년 3월 : 세명대학교 토목공학 (공학사)
- 2020년 8월 : 성균관대학교 건설환경시스템공학 (공학석사)
- 2020년 8월 ~ 현재 : (재)한국건설생활환경시험연구원 연구원

<관심분야>

토목재료, 친환경 콘크리트, 건설 3D 프린팅

노 영 숙(Young-Sook Roh)

[정회원]



- 1993년 2월 : 단국대학교 건축공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 미국 콜로라도 대학교 건축공학 (공학석사)
- 2000년 2월 : 미국 콜로라도 대학교 건축공학 (공학박사)
- 2002년 9월 ~ 2005년 4월 : 단국대학교 초빙교수
- 2005년 5월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건축학부 건축공학전공 부교수

<관심분야>

건축구조