

3D 프린팅으로 제작한 굵은 골재를 사용한 경량콘크리트의 압축강도 실험

안병주
전주대학교 건축공학과

Compressive Strength Experiment of Lightweight Concrete Using Coarse Aggregate Produced by 3D Printing

Byung-Ju Ahn
Department of Architectural Engineering, Jeonju University

요약 콘크리트의 품질에 큰 영향을 미치는 중요 자재인 굵은 골재는 채취장소, 생산방법 등에 따라 다양하게 생산된다. 현재 건설업계는 굵은 골재의 안정적인 공급과 표준적인 품질 확보 방안이 필요한 실정이다. 본 연구는 굵은 골재를 3D 프린팅으로 제작하여 사용하는 것이 이 문제 해결에 도움이 되는지를 검토하는 것이 목적이다. 3D 프린팅을 위한 필라멘트는 검토 결과 ABS 필라멘트가 선정되었다. 굵은 골재의 설계는 CATIA를 사용했으며, 제작은 CUBICON Single Plus를 사용하였다. 공시체는 3개의 AE제를 사용 것과 3개의 그렇지 않은 것 등 총 6개를 제작한 후 28일 동안 수중 양생하였다. 압축강도 시험 결과 AE제를 사용할 경우 콘크리트표준시방서에서 규정한 경량콘크리트 설계기준의 최저 압축강도 이상이 발현됨을 확인했다. 이는 3D 프린터로 제작한 굵은 골재가 경량콘크리트의 굵은 골재로 사용될 가능성이 있음을 시사한다. 특히 대량생산 체계를 갖출 경우 궁극적으로 굵은 골재의 안정적 수급과 표준적인 품질 확보라는 건설업계가 당면하고 있는 문제 해결에도 일조할 수 있을 것이다. 향후에는 3D 프린팅으로 제작한 굵은 골재의 부착력 향상 방안, 경제성 분석 등에 관한 연구를 진행할 예정이다.

Abstract Coarse aggregate is produced in various ways depending on the location and production method. Currently, the construction industry is in need of a stable supply of coarse aggregate and a way to secure standard quality. The purpose of this study is to examine whether the use of coarse aggregate in 3D printing can help solve this problem. ABS filament was selected for use in 3D printing. CATIA was used for the design of the coarse aggregate, and CUBICON Single Plus was used for the production. Six specimens were produced and cured in water for 28 days. Three of them were made with AE agent, and three were made without it. A compressive strength test confirmed that when the AE agent was used, the compressive strength was greater than the lightweight concrete design criterion specified in the concrete standard specification. This suggests that coarse aggregate produced by a 3D printer may be used for lightweight concrete. A mass production system using this method could help to solve the problems facing the construction industry, such as stable supply and demand for coarse aggregate and securing standard quality.

Keywords : 3D Printing, Coarse Aggregate, Lightweight Concrete, Compressive Strength Experiment, ABS Filament

이 논문은 전주대학교 2019년 연구년 지원사업에 의해 수행된 연구결과물임.

*Corresponding Author : Byung-Ju Ahn(Jeonju Univ.)

email: bjahn@jj.ac.kr

Received March 30, 2020

Accepted May 8, 2020

Revised April 21, 2020

Published May 31, 2020

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

골재는 콘크리트나 모르타르의 구성재료인 모래, 자갈, 쇄석 등의 입상재료를 의미한다[1]. 이것은 콘크리트의 품질에 큰 영향을 미치는 중요 자재이다. 이것은 치수에 따라서 잔골재와 굵은 골재, 비중에 따라서 보통골재, 경량골재, 중량골재 등으로 구분한다. 채취장소의 용도지역에 따라서 하천골재, 산림골재, 바다골재, 육상골재 등으로 분류한다. 그리고 생산지에 따라 천연골재, 인공골재(부순 돌, 부순 모래 등), 인공경량골재 등으로 구분한다.

콘크리트의 골재 구성(KS F 2526)은 자갈 44%, 모래 34%, 시멘트 14%, 물 8% 등으로서, 굵은 골재인 자갈이 가장 큰 비중을 차지한다.

1.1.1 굵은 골재의 공급계획과 잔량 분석

Table 1은 국토교통부가 발표한 제5차(2014~2018) 골재수급기본계획(안)에서 밝힌 굵은 골재의 공급계획(안)이다. 이 Table에서 알 수 있듯이 굵은 골재 수요량 중 하천골재는 0.5%를, 산림골재는 61.6%를, 선별·파쇄골재는 36.8%를 차지하고 있다.

Table 1. Plan for supply of coarse aggregate during 2014~2018 (draft)

(unit: thousand m³)								
Item	2014	2015	2016	2017	2018	Total	Ratio	
Demand	114,007	115,152	116,270	116,682	118,078	580,189	-	
Supply	122,728	125,338	126,842	127,357	127,658	629,923	100%	
Per- mis- sion	Total	77,490	79,220	80,111	80,396	397,980	63.2%	
	River Aggre- gate	578	590	596	599	601	2,964	0.5%
	Forest Aggre- gate	75,479	77,158	78,028	78,304	78,821	387,790	61.6%
	Land Aggre- gate	1,433	1,472	1,487	1,493	1,341	7,226	1.1%
Dec- lara- tion	Selected Crushed Aggrega- te	45,228	46,118	46,731	46,961	46,895	231,943	36.8%

※ Source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 5th (2014~2018) Aggregate Supply and Demand Plan (draft), 2013

[2]에서는 골재 자원 조사량과 채취 후 잔량 및 구성비를 제시했다(Table 2 참조). 이 Table에서 알 수 있듯이 대부분 골재의 잔량은 40% 미만이다. 특히 가장 이상적인 골재인 하천골재는 잔량이 1.9%로서 가장 적다.

Table 2. Investigation amount of aggregate resources and residual amount and composition ratio after collection

(unit: thousand m ³)					
Item	Existing area (m ²)	Abundance	Development amount (A)	Permission Collection Performance (1993~2013) (B)	Balance (A-B)
Total	2,867,657	2,6374,475	17,278,346	2,611,179	14,667,167
River Aggregate	280,881	2,088,043	930,902	647,572	283,330
Sea Aggregate	-	7,842,402	4,489,797	564,015	3,925,782
Forest Aggregate	-	8,184,998	6,061,314	1,222,032	4,839,282
Land Aggregate	2,586,776	8,259,033	5,796,332	174,949	5,621,383
				6.7%	38.3%

※ Source: Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 5th (2014~2018) Aggregate Supply and Demand Plan (draft), 2013

1.1.2 굵은 골재의 안정적 공급 방안의 필요성

현업에서 사용되는 굵은 골재인 하천골재, 산림골재, 선별·파쇄골재 등은 다음과 같은 문제점들을 안고 있다.

먼저 하천골재는 Table 2에서도 알 수 있듯이 잔량이 극히 부족하며, 향후 20년 이내에 고갈될 수 있는 상황에 처해있다.

산림골재는 현재 국내에서 상대적으로 확보하기 가장 용이한 골재이다. 그러나 이것은 개발 제한지역 및 행정 규제 등으로 인해 골재 채취장 개발 등이 쉽지 않아 안정적 공급 측면에서 어려움이 있다[3].

그리고 선별·파쇄골재는 건설현장 등에서 발생하는 부수적 골재 등을 원석으로 사용해 제조하는 것이다. 이것은 부수적 골재의 특성상 원석의 품질 변화가 심하고, 제작 업체의 영세성으로 인해서 제대로 된 제조과정을 거치지 않아 저품질 골재 유통 등과 같은 품질 문제가 있다[3][4]. 특히, 부수적 골재 발생 현장에서 배출되는 원석에 대한 건설업체의 관리 감독 소홀, 골재업체의 운영 경비 절감 등에 기인해서 흙, 풍화석 등을 제대로 걸러내지 않고 무분별하게 반입하여 사용하는 등 문제가 끊이지 않고 있다[3][4]. 그리고 골재는 심사기준이 없어 KS 인증을 받기가 쉽지 않은데, 실제 KS 인증을 취득한 업체는 2015년 기준 전체 골재업체 1,500여 개 중 11개 업체(0.8%)에 불과하다[3].

따라서 콘크리트의 품질에 큰 영향을 미치는 중요한 자재인 굵은 골재의 안정적인 공급과 표준적인 품질 확보 방안이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 이러한 현업의 당면 과제를 해결하기 위한 한 가지 방안으로서, 4차 산업혁명의 핵심 기술 중 하나인 3D 프린팅으로 제

작한 굵은 골재의 활용 가능성을 검토하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 한계

연구의 범위는 굵은 골재의 3D 설계, 3D 프린팅을 이용한 굵은 골재 제작, 배합설계, 공시체 제작 및 양생, 압축강도 시험, 결과 분석 등이다.

현재 3D 프린팅용 필라멘트는 PLA 필라멘트, ABS 필라멘트, 폴리카보네이트 필라멘트, 나일론 필라멘트 등이 있다. 본 연구에서 사용한 3D 프린터는 CUBICON Single Plus인데, 이것에서 사용 가능한 필라멘트는 PLA 필라멘트와 ABS 필라멘트뿐이다. 이에 본 연구에서는 PLA 필라멘트와 ABS 필라멘트만을 대상으로 굵은 골재 제작 가능성을 검토했다.

2. 굵은 골재 제작용 필라멘트 선정

2.1 3D 프린터 필라멘트들의 강도 검토

굵은 골재로 사용되는 암석은 현무암, 석회암, 안산암, 경질사암, 화강암 등이 있다. Table 3은 필라멘트 선정을 위해 이 암석들과 필라멘트들의 강도를 비교한 것이다.

Table 3. Comparison of the compressive strength of stones and filaments

Stone Type	Compressive Strength (MPa)	Comparison of PLA Filament	Comparison of ABS Filament
		94MPa	65MPa
Basalt	70	134%	93%
Lime stone	55	171%	118%
Andesite	50~80	188~117%	130~81%
Hard sandstone	10~50	940~188%	650~130%
Granite	80~120	117~78%	81~55%

분석 결과 PLA 필라멘트는 암석들 중 강도가 가장 낮은 경질사암에 비해 평균 564.0%, ABS 필라멘트는 평균 390.0% 높은 강도를 가지고 있다. 또한, 강도가 가장 높은 화강암과 비교하면, PLA 필라멘트는 평균 97.5%, ABS 필라멘트는 평균 68.0%의 강도를 가지고 있다.

2.2 콘크리트의 열변형 특성 검토

콘크리트의 열변형 특성을 정리하면 Table 4와 같다 [5]. 매스콘크리트를 기준으로 수화열 중심부의 최고온도는 85.3℃이다. 따라서 3D 프린터로 제작한 굵은 골재가

내력 구조재의 골재로 사용되기 위해서는 필라멘트의 열변형 온도가 최소 86℃ 이상이 되어야만 한다.

Table 4. Characteristics of heat deformation of concrete

Item	Time to reach maximum temperature (hr)	Central maximum temperature (T)	Surface temperature (t)	Temperature difference (T-t)	Crack index
Program Interpretation	85	74.5	50.8	23.7	0.63
Temperature measurement	32	85.3	55.5	29.8	0.50

2.3 선정 결과

Table 5는 필라멘트 선정 결과를 정리한 것이다. 분석 결과 압축강도는 PLA 필라멘트가 더 우수하지만, 열변형 온도와 용융점 온도는 ABS 필라멘트가 더 높은 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 ABS 필라멘트를 굵은 골재 제작을 위한 필라멘트로 선정했다.

Table 5. Filament selection result

Item	PLA Filament	ABS Filament
Compressive Strength	Compared to hard sandstone 564%	Compared to hard sandstone 390%
Heat deflection temperature	50℃	107℃
Melting point temperature	150~160℃	220~235℃
Selection result	×	○

그러나 ABS 필라멘트는 열변형 온도, 용융점 온도 등이 화재위험 온도인 260℃보다 모두 낮다. 따라서 본 연구에서 3D 프린터로 제작한 굵은 골재는 높은 내화성이 요구되지 않는 비내력 구조용 경량콘크리트에 사용되는 것이 합리적이라고 판단된다. 경량콘크리트 굵은 골재의 절건밀도는 0.0015g/mm³ 미만이며[6], ABS 필라멘트의 밀도는 0.0010g/mm³ 이다[7], 따라서 이를 근거로 ABS 필라멘트는 콘크리트표준시방서에 정의된 경량콘크리트 굵은 골재의 밀도를 만족함을 알 수 있다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

실험내용은 3D 프린터로 굵은 골재를 제작해서 공시체를 만든 후 28일 동안 수중 양생한다. 그리고 이 공시

체들을 대상으로 압축강도 시험을 하는 것이다. Table 6은 표준시방서를 기준으로 경량콘크리트 1m³, 설계 강도 21MPa에 따른 콘크리트 배합설계 내용을 정리한 것이다.

Table 6. Concrete mixing design

Experimental Factor	Experimental Level
F (kg/cm ²)	273
W/C (%)	0.45
C _g (kg/m ³)	400.00
Total aggregate volume (m ³)	0.66
Fine aggregate volume (m ³)	0.32
Fine Aggregate amount (kg)	840.42
Coarse aggregate volume (m ³)	0.34
Coarse aggregate amount (kg)	890.40

공시체의 크기는 Ø100mm×200mm(체적은 0.00157m³)이며, 제작 개수는 AE제의 사용 여부에 따라 각 3개씩 총 6개를 제작한다. Table 7은 공시체 타입별 배합설계 내용이다.

Table 7. Mixing design to produce specimens

Specimen No.	Coarse aggregate maximum dimension (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit: g				AE agent (g)
						Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
A1, A2, A3	25	8	7	45	47	847.8	1,884.0	4,253.4	4,880.4	52
B1, B2, B3	25	8	2.5	45	49	847.8	1,884.0	3,958.5	7,601.7	-

3.2 굵은 골재 제작 및 사용량

굵은 골재의 형상은 CATIA를 사용하여 3D로 설계했으며, 이 설계 파일을 이용하여 굵은 골재들은 CUBICON Single Plus로 제작되었다. 굵은 골재는 프린팅되는 동안에 용융된 필라멘트들이 적층되면서 완성된다. 이때 적층되는 층별 제작 오차가 발생하는데, 이로 인해 굵은 골재는 매끈한 표면이 아닌 울퉁불퉁한 표면을 갖게 된다. CUBICON Single Plus의 경우 이러한 층별 굴곡 차이가 최소 0.2mm에서 최대 0.5mm 정도 발생한다.

본 연구에서 제작한 굵은 골재의 직경은 25mm, 20mm, 15mm, 10mm, 5mm 등 5가지 타입이 있다. 또한, 시멘트와의 부착력을 높이기 위해 각 골재의 6면에 홀을 설계했다. 이중 직경 5mm의 굵은 골재는 치수가 너무 작아 오히려 홀을 뚫으면 강도 저하가 우려되어 홀을 만들지 않았다.

Fig. 1은 굵은 골재 타입별 입형과 단면을 정리한 것이며, Fig. 2는 3D 프린터로 출력된 5종의 굵은 골재들의 사진이다. 사진의 좌측에서 우측으로 갈수록 직경이 작아진다. Table 8은 굵은 골재 타입별 규격을 정리한 것이다.

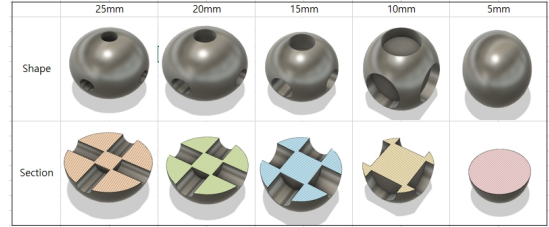


Fig. 1. Shape and section for each type of coarse aggregate



Fig. 2. Coarse aggregates made with 3D printer

Table 8. Specification by type of coarse aggregate

Item	Coarse aggregate maximum dimension				
	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm
Hole diameter (mm)	10.0	5.0	5.0	5.0	0.0
Hole depth (mm)	7.0	7.5	5.0	2.5	0.0
Volume (mm ³)	7,003.1	3,305.2	1,178.1	229.1	523.6
Weight (g)	8.4	4.0	1.4	0.2	0.6

굵은 골재의 입도 분포는 AE제의 사용과 무관하게 25mm는 10%, 20mm는 25%, 15mm는 30%, 10mm는 25%, 5mm는 10%였다. Table 9는 공시체 1개당 굵은 골재의 개수와 중량을 정리한 것이다.

Table 9. Number and weight of coarse aggregate per specimen

Item	Coarse aggregate maximum dimension				
	25mm	20mm	15mm	10mm	5mm
AE Agent	9 ea	47 ea	160 ea	798 ea	74 ea
	63.84g	159.6g	191.5g	159.6g	63.8g
Non AE Agent	8 ea	41 ea	138 ea	686 ea	110 ea
	54.9g	137.2g	164.6g	137.2g	54.7g

3.3 실험 방법

배합설계에 따라 시멘트, 모래, 굵은 골재, 물, AE제 등을 섞어 비빔을 실시한다. 슬럼프 테스트 결과, 슬럼프 값은 AE제 사용과 미사용 경우 모두 8cm로서 KS 규정을 만족했다.

이후 공시체 실린더에 비빔 콘크리트를 부어 총 6개의 공시체를 제작한다. 공시체는 일정한 습기 유지를 위해 비닐로 밀봉한 후 24시간 동안 경화시킨다. 다음으로 실린더를 탈형하고, 28일 동안 공시체를 수중 양생한다. 그리고 만능재료시험기(UTM: Universal Testing Machine, 이하 UTM)를 사용하여 공시체들에 대한 압축강도 시험한다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 실험 결과

Fig. 3은 28일 양생한 공시체를 압축강도 시험하는 광경이며, Fig. 4는 압축강도 시험 후 파괴된 공시체의 형상을 보여주고 있다.

특히 Fig. 4는 굵은 골재의 홀 속으로 시멘트 페이스트가 밀실하게 충전된 상태로 양생 되었음을 보여주고 있다. 또한, 공시체 파괴 시 일부의 굵은 골재가 박리됨을 알 수 있다.



Fig. 3. Compressive strength test sight



Fig. 4. Destroyed specimen shape

Table 10. Compressive strength test result

Item	AE agent			Non AE agent		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Strength (MPa)	16.04	17.66	17.78	14.41	15.97	13.04
Avg. (MPa)	17.16			14.47		

Table 10은 압축강도 시험 결과를 정리한 것이다. AE제를 사용한 공시체 A1, A2, A3의 시험 결과의 평균 값은 17.16MPa, AE제를 사용하지 않은 공시체 B1, B2, B3의 그것은 14.47MPa로 나타났다.

4.2 분석

콘크리트표준시방서(2016)에 따르면 경량골재 콘크리트의 설계기준 압축강도는 15MPa 이상, 24MPa 이하이다[6]. 이를 근거로 최저 설계기준 압축강도인 15MPa와 비교해 보았을 때 AE제를 사용한 결과는 114.4%, AE제를 사용하지 않은 결과는 96.5%이다. 이는 AE제를 사용할 경우 3D 프린터로 제작한 굵은 골재가 경량콘크리트에 사용될 가능성이 있음을 시사하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3D 프린터로 제작한 굵은 골재를 사용한 경량콘크리트 공시체를 대상으로 압축강도 시험을 했다. 시험 결과, AE제를 사용할 경우 콘크리트표준시방서에서 규정하고 있는 경량콘크리트 설계기준의 최저 압축강도 이상이 발현됨을 알 수 있었다. 이는 3D 프린터로 제작한 굵은 골재가 경량콘크리트의 굵은 골재로 사용될 가능성이 있음을 시사한다. 특히, 대량생산 체계를 갖출 경우 궁극적으로 굵은 골재의 안정적 수급과 표준적인 품질 확보라는 건설업계의 당면 과제 해결에도 일조할 수 있을 것이다.

본 연구를 수행하면서 느꼈던 3D 프린팅 기술의 활용과 관련된 한계점들이 있었는데, 이것들을 극복하기 위한 노력이 향후 수행되어야 할 것이다. 이를 정리하면 다음과 같다.

(1) 부착력 향상 문제: 본 연구에서 제작한 굵은 골재는 부착력 향상을 위한 6개의 홀과 프린팅 과정에서 생성되는 깊이 0.2mm ~ 0.5mm의 표면 굴곡을 가지고 있다. 그러나 압축강도의 향상을 위해서는 굵은 골재와 시멘트 페이스트 간의 부착력이 지금보다 더 높아져야만 한다. 향후 연구에서는 다양한 형상 제작이 가능한 3D 프린터의 장점을 살려서 구형보다 부착력을 더 높일 수 있는 다양한 형태의 굵은 골재 개발도 고려하고 있다. 이를 통해 궁극적으로 콘크리트의 압축강도 향상 또한 예상된다.

(2) 경제성 문제: 본 연구에서 공시체 6개 제작을 위한

ABS 필라멘트의 재료비는 60,000원 정도였다. 이것은 자갈 등과 같은 천연골재의 재료비와 비교하면 비싼 비용이다. 여기에 3D 프린터의 초기 투자비, 감가상각비 등을 합산하면 그 차이는 더 커질 것이다. 그러나 건물을 시공하는 과정에서 보통콘크리트 부재를 경량콘크리트 부재로 대체했을 때 공사비는 절감되며, 건물의 규모가 크면 클수록 절감 액수는 더욱더 증가한다. 또한, 3D 프린터를 사용한 대량 생산체계를 갖출 경우, 굵은 골재의 생산비용은 지금보다 더 절감될 수 있다. 따라서 3D 프린터로 제작한 굵은 골재의 경제성은 향후 실증적 차원에서 심도 있는 분석이 필요하다.

(3) 필라멘트의 내화성 문제: 현재 주로 사용되고 있는 3D 프린터는 대부분 FDM(Fused Filament Fabrication) 방식이다(본 연구에서 사용한 CUBICON Single Plus도 이 방식임). 이 방식의 프린터에서 사용되는 필라멘트들의 열변형 온도는 대부분이 화재위험 온도인 260℃ 이하이다(일부 필라멘트들은 열변형 온도가 최고 280℃에 이르기도 함). 이로 인해 3D 프린팅으로 제작한 굵은 골재의 활용 대상은 경량콘크리트로 제한될 수밖에 없다. 향후 열변형 온도가 유의미하게 상승한 필라멘트가 개발된다면 3D 프린팅을 사용하여 구조재 콘크리트용 굵은 골재의 제작과 활용에 관한 연구도 가능할 것이다.

filament-1.75mm, 2020.

<http://3dprinterstore.co.kr/product/%ED%81%90%EB%B9%84%EC%BD%98cubicon-absplatpupetg-%ED%95%84%EB%9D%BC%EB%A9%98%ED%8A%B8-175mm/74/>

안 병 주(Byung-Ju Ahn)

[정회원]



- 1996년 2월 : 한양대학교 건축공학(공학석사)
- 2001년 8월 : 한양대학교 건축공학(공학박사)
- 2001년 9월 ~ 2002년 8월 : 한양대학교 BK21 핵심사업단 Post Doc. 연구원
- 2002년 9월 ~ 현재 : 전주대학교 건축공학과 교수

〈관심분야〉

건설관리, BIM, 3D Printing

References

- [1] Choi, M. K., Construction Materials, Moon Un Dang, 2012, p65.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 5th (2014~ 2018) Aggregate Supply and Demand Plan (draft), 2013. p14, p19.
- [3] Park, M. Y., "Improvement of raw material system for advancing concrete", Korea Construction Newspaper, 2015.
<http://www.conslove.co.kr/news/articleView.html?idxno=40608>
- [4] Kim, S. C., Cho, Y. K., "Investigation on the Quality Enhancement of Recycled Aggregate for Concrete," Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 21, No. 2, pp. 68~69. 2017.
- [5] Korea Concrete Institute, State-of-the-art Concrete Engineering, Ki Moon Dang, 1999.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Concrete Standard Specification, 2016, p96 ~ p97.
<https://www.codil.or.kr/codil.do>
- [7] 3D Printer Store™, Cubicon ABS/PLA/TPU/PETG