

3D 프린팅을 위한 굵은 골재가 포함된 콘크리트의 압출성 확보를 위한 배합설계 프로세스

이윤정¹, 한선진², 이상훈¹, 윤수민³, 김강수^{4*}

Mix Design Process for Securing Extrudability of Concrete Containing Coarse Aggregates for 3D Printing

Yoon Jung Lee¹, Sun-Jin Han², Sang-Hoon Lee¹, SuMin Yoon³, Kang Su Kim^{4*}

Abstract: Mortar has been applied in most previous studies on 3D concrete printing. In such cases, however, the economic efficient cannot help decreasing due to higher binder contents and larger amount of fine aggregates. In order to enhance the applicability of 3D printing technology to construction industry, therefore, 3D concrete printing technology utilizing coarse aggregates needs to be developed further. This study aims at proposing the mix design process of concrete containing coarse aggregates for 3D printing. Based on extensive literature review and experimental studies, the mix proportion suitable for 3D printing has been derived, and the extrudability of concrete with coarse aggregates has been verified through 3D printing tests. The primary variable of the extrudability tests was the contents of viscosity modifying agent (VMA), and the extrudability was quantitatively evaluated by measuring dimensions, distribution of aggregates, and surface quality of 3D-printed filaments. The test results showed that the dimensional suitability and surface quality were improved as the VMA contents were larger, and the coarse aggregates were evenly distributed in the section of filament regardless of the VMA contents. Based on the test results, the mix design process for concrete containing coarse aggregates for 3D printing has been proposed.

Keywords: 3D concrete printing, Coarse aggregate, Extrudability, Dimensional suitability, Distribution of aggregates, Surface quality

1. 서론

건설산업은 타 제조산업에 비하여 노동집약적인 특징을 갖고 있다. 또한, 최근 사회 전반적으로 저출산 및 고령화 문제에 직면하고 있으며, 건설현장에서도 노동력 부족, 청년인력 유입 저하, 국내 숙련공 부족 등으로 인한 문제가 심화되고 있다(Wang et al., 2017). 따라서, 국가적 차원의 건설 경쟁력 및 생산성을 확보하기 위해서는 현장작업 축소 및 공사기간 단축 등을 위한 혁신적인 변화가 필요한 상황이다.

3D 콘크리트 프린팅(3D concrete printing, 이하 3DCP)은 굳지 않은 콘크리트를 출력하여 거푸집 없이 콘크리트 부재를 제작하는 기술로써, 별도의 가설공정을 필요로 하지 않기 때

문에 노동력 및 공사기간 단축에 매우 유리하다(Le et al., 2012(a)). 따라서, 세계적으로 3DCP 기술에 많은 관심이 집중되고 있으며, 대략 10년 전부터 3DCP 관련 연구가 활발하게 진행되었다(Tay et al., 2017). 대부분의 기존 연구는 3DCP에 대한 성능지표로 압출성, 출력품질, 형상유지성, 작업성, 오픈타임, 적층성, 경화 거동, 역학적 특성(압축강도, 휨강도) 등을 제시하고 실험을 통해 제시한 성능지표를 검증하는 형태로 이루어졌다(Le et al., 2012(b); Panda and Tan 2018; Ma et al., 2018; Ali et al., 2017). 또한, 기존 연구에서는 3D 프린팅 재료로써 굵은 골재가 포함되지 않은 모르타르를 주로 사용하였다. 다만, 굵은 골재가 포함된 콘크리트를 사용할 경우에 비해 모르타르를 사용하는 경우에는 결합재(binder)의 함량 및 잔골재량이 높기 때문에 경제·환경적 측면에서 불리하다. Shat et al.(2022)는 굵은 골재를 첨가했을 때 단위부피(1 m³) 소요되는 비용을 77% 감소시킬 수 있다고 보고하였다. 3DCP로 제작된 출력물은 출력과 동시에 외기에 노출되기 때문에 건조수축이 빠르게 진행되며 균열이 발생하는 특성을 보이거나(Lee et al., 2020, Seo et al., 2022), 굵은 골재를 사용하면 수축 현상을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한, 굵은 골재를 사용한 콘크

¹서울시립대학교 건축공학과 스마트시티융합전공 박사과정

²서울시립대학교, 건축학부 연구교수

³서울시립대학교 건축공학과 스마트시티융합전공 석사과정

⁴서울시립대학교, 건축공학과 스마트시티융합전공 교수, 교신저자

*Corresponding author: kangkim@uos.ac.kr

Department of Architectural Engineering and the Smart City Interdisciplinary Major Program, University of Seoul, Seoul 02054, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

리트가 (보통강도의 경우) 모르타르보다 탄성계수가 크기 때문에 구조적으로 더 유리하며(Rahul et al., 2022), 무엇보다 경제성을 크게 높일 수 있다는 장점이 있다. 그럼에도 불구하고 모르타르의 프린팅 연구가 지속되는 이유는 굵은 골재가 크고 무거워서 프린팅의 출력성능을 확보하기가 어렵기 때문이다. 또한, 굵은 골재가 포함된 콘크리트를 압출하기 위해서는 비교적 고성능의 장비 및 기계공학적 지식이 요구되므로 굵은 골재가 포함된 콘크리트를 출력할 수 있는 프린팅 시스템을 구축하는 것이 현실적으로 더 어려운 측면이 있다(Xiao et al., 2021). 따라서, 굵은 골재가 포함된 콘크리트의 3D 프린팅에 관한 연구는 매우 기초단계이며, 이론적 접근이나 정립된 실험방법이 거의 전무한 상태이다. 본 연구에서는 문헌연구를 통해 굵은 골재가 포함된 3DCP에 적합한 콘크리트 배합을 선정하고, 배합·출력실험을 통해 압출성(Extrudability)을 검증하고자 하였다. 압출성 검증을 위하여 치수 적합성, 표면 품질, 골재 분포도를 평가지표로 설정하였다. 또한, 실험결과를 기반으로 굵은 골재가 포함된 콘크리트 배합의 압출성능을 확보할 수 있는 배합설계 프로세스를 제안하고자 하였다.

2. 문헌연구

2.1 3D 콘크리트 프린팅의 주요 특성

3DCP과 관련된 주요 인자는 압출성, 적층성(buildability), 오픈타임(opentime) 등이 있다(Le et al., 2012(b)). 압출성은 굳지 않은 콘크리트가 프린트 노즐을 통해 막힘 없이 출력되어 연속적으로 필라멘트를 형성하는 성능이다. 일반적으로는 콘크리트를 막힘없이 출력하기 위해서는 콘크리트의 유동성(flowability)이 높아야 한다. 다만, Lee et al.(2020)은 콘크리트의 유동성이 높으면 점도가 낮을 수 있으며, 점도가 매우 낮은 콘크리트로 출력한 필라멘트는 형태를 유지하기 어렵다고 보고하였다. 따라서, 3D 프린팅용 콘크리트는 작업성을 확보할 수 있는 적절한 유동성과 출력물의 균일한 품질을 확보할 수 있도록 다소 높은 점성이 요구된다.

Rahul et al.(2019)은 3D 프린팅용 배합을 설계하고, 유동화제의 함량을 변수로 하여 압출성 실험을 수행하였다. 필라멘트의 치수와 표면결합의 분석을 통하여 압출성을 평가하였다. 필라멘트의 단면 치수를 측정하여 단면의 치수가 노즐의 치수와 0.5 mm 오차 이내로 유사하고, 동시에 필라멘트의 표면에 공극 및 불연속성 같은 결함이 없는 경우를 압출성능이 확보된 것으로 판단하였다. 실험 결과, 유동화제 혼입율이 0.09% 미만인 실험에서는 유동성이 부족하여 압출이 불가하였다. 유동화제 0.09%인 배합은 필라멘트의 폭 및 두께가 프린트 노즐의 단면치수와 다소 차이가 있었으며, 출력된 필라멘트의 치수도 일관적이지 못하였다. 이와는 달리 유동화제의 혼입률을

0.10%로 설정한 변수에서는 필라멘트의 폭 및 두께가 프린트 노즐의 단면치수와 유사하였으며, 출력된 필라멘트의 치수도 일정하게 형성되어 압출성능을 만족한 것으로 평가하였다.

적층성은 출력된 필라멘트의 과도한 변형이나 붕괴 없이 굳지 않은 콘크리트를 적층하는 성능으로 정의한다. 선행연구(Jeong et al., 2019)에서는 상부에 적층된 필라멘트들과 하부층의 자중에 의하여 압축응력이 굳지 않은 콘크리트의 항복응력을 초과하는 경우 붕괴로 이어질 수 있다고 보고하였다. 따라서, 3D 프린팅용 콘크리트는 필라멘트 자중과 상부에 적층된 필라멘트들의 무게로 인한 변형에 저항할 수 있는 충분한 항복응력을 가져야 한다. 또한, 오픈타임을 배합 이후 굳지 않은 콘크리트가 출력 가능한 상태로 유지되는 시간이며, 3D 프린팅 시 콘크리트가 펌프나 호스 내부에서 굳는 사고를 방지하기 위해서도 사전실험을 통해 오픈타임을 파악하는 것이 필요하다(Ye et al., 2021).

2.2 굵은 골재가 포함된 콘크리트의 3D 프린팅

본 연구에서는 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅 용 콘크리트의 배합설계를 위하여 문헌연구를 수행하였다. Rahul and Santhanam(2020)은 굵은 골재의 함량이 3DCP 주요 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 굵은 골재와 잔골재의 총 함량 대비 굵은 골재 비율을 변수로 실험을 수행하였다. 출력실험 결과, 총 골재량 대비 굵은 골재 비율이 0%~30%인 배합은 압출성을 확보하였으며, 굵은 골재 비율이 45%인 배합은 압출성 확보에 실패하였다. 이는 굵은 골재의 양이 많아질수록 탈수로 인하여 재료가 분리되며 콘크리트의 유동성이 부족해지기 때문이다.

Vespalec et al.(2020)은 배합 직후부터 10~65분 동안 5분 간격으로 필라멘트를 출력하여 프린팅 품질을 관찰하였다. 초기 10분 동안은 콘크리트의 유동성이 과도하여 필라멘트 형상을 안정적으로 유지할 수 없었으며, 40분 이후에 출력된 필라멘트에서는 불연속적인 형상 및 균열이 관찰되었다. 따라서, Vespalec et al.은 콘크리트 배합의 적절한 오픈타임을 20-40분으로 제시하였다.

이외에도 총 10개의 문헌(Chen et al., 2021; Ji et al., 2019; Ji, et al., 2022; Liu et al., 2022; Mechtcherine et al., 2019; Rahul and Santhanam 2020; Vespalec et al., 2020; Wang et al., 2022; Xiao et al., 2022; Zhang et al., 2022)을 통해 27개의 굵은 골재가 포함된 3D프린팅용 콘크리트 배합비를 수집하였으며, 이를 Fig. 1에 나타내었다. 그래프에서 x축은 배합시 사용된 굵은 골재의 최대 치수를 나타내었고, Fig. 1(a)의 y축은 시멘트 대비 골재의 양, Fig. 1(b)의 y축은 시멘트 대비 굵은 골재의 양을 의미한다. 또한, ● 표식은 압출성을 확보한 배합, ▲ 표식은 압출성이 미흡한 배합을 의미하고, 이 연구에서 설

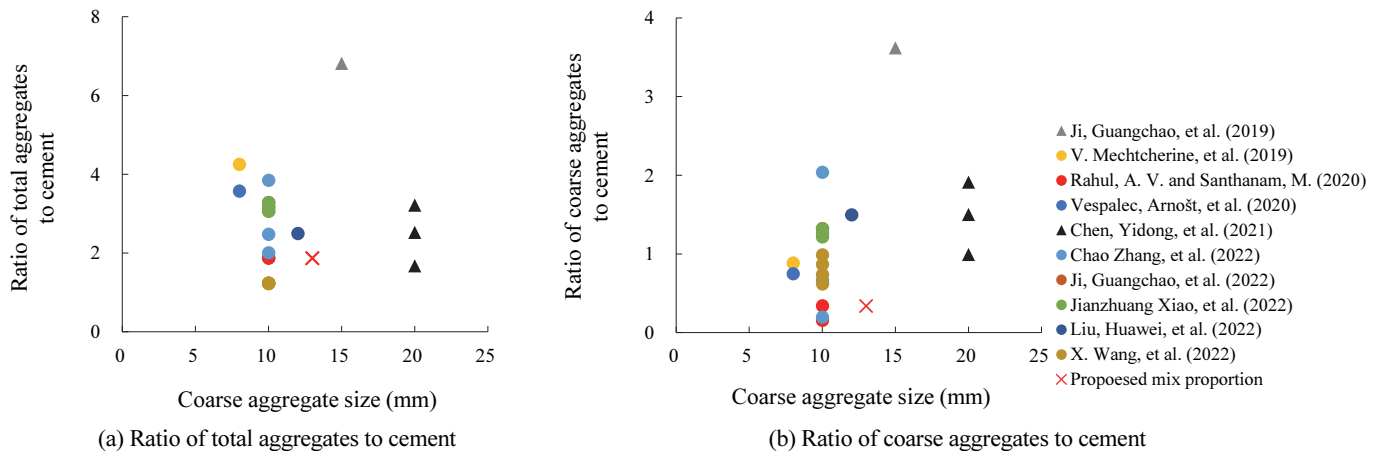


Fig. 1 Collected mix proportions containing coarse aggregate

정한 배합은 × 표식으로 나타내었다.

일반적으로 최대 치수 10 mm인 골재를 사용하는 경우가 많았으며, 15 mm와 20 mm인 골재를 사용한 실험에서는 우수한 압축성이 확보되지 않은 것으로 미루어 보아 골재의 최대 치수가 클수록 압축성을 확보하기 어렵다는 것을 알 수 있다. Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이, 기존 연구에서 시멘트 대비 골재의 함량은 약 100% ~ 400% 범위 내에 분포하였다. 또한, Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이, 대부분의 배합에서 시멘트 대비 굵은 골재의 비율은 1.3 이하인 것으로 나타났다. 일반적인 콘크리트의 배합에서 굵은 골재의 함량이 시멘트 대비 2.82 배 ~ 4.09 배 수준인 것을 고려하면(IS:10262-2009), 3DCP 배합의 굵은 골재 함량은 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다. 또한, Rahul and Santhanam(2020)이 수행한 실험에서는 동일한 총 골재량에서 굵은골재의 비율이 증가할수록 탈수성(desorptivity)이 증가하고, 충전밀도(packing density)가 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 골재의 비율이 가장 높은 배합이 압축성 실험을 통과하지 못하였다. 본 연구에서는 앞서 조사한 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅용 콘크리트 문헌을 통하여 압축이 가능한 굵은 골재 함량의 범위를 참조하였다. 특히, Rahul and Santhanam(2020)의 배합 출력물의 품질이 가장 우수한 것으로 판단되어 본 연구에서는 이들의 연구 결과를 기반으로 실험을 계획하였다.

3. 배합실험

3.1 실험계획

Table 1에는 3D 프린팅을 위한 콘크리트 배합비를 정리하여 나타내었다. 배합재료는 시멘트(Cement), 플라이애시(Fly ash), 굵은 골재(Coarse aggregate), 잔골재(Fine aggregate), 물(Water), 유동화제(Super-plasticizer, SP), 증점제(Viscosity

modifying agent, VMA)를 사용하였다. 결합제로써 시멘트는 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였으며, 빠른 초기 수화반응이 특징인 순환유동층 플라이애시(Circulating Fluidized Bed Combustion Fly ash)를 사용하였다. 굵은 골재는 최대 치수가 13 mm인 것을 사용하였으며, 물-시멘트비(Water-cement ratio, W/C)는 0.4로 설정하였다. 혼화제로써 굳지 않은 콘크리트의 유동성을 지속시키기 위하여 고품분 30%가 포함된 폴리카본산계 유동화제를 활용하였다. 또한, 점도가 높은 배합이 압축성을 확보하기에 용이하기 때문에(Lee et al., 2020) 증점제를 통해 점도를 증진시켰다.

Neville(1997)에 의하면 유동화제는 W/C에 따라 함량이 달라질 수 있으며, 사용하는 시멘트와의 호환성을 고려해야 하는 등의 여러 변수가 존재한다. 따라서, 제조사에서 권장하는 함량을 그대로 적용하기 보다는 배합실험을 통해 사용하는 시멘트와 환경에 적합한 유동화제의 함량을 찾는 것이 매우 중요하다. 또한, 증점제 역시 압축성에 큰 영향을 미치기 때문에 적용하는 배합에 적합한 증점제의 보다 정확한 함량을 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 적절한 유동화제 및 증점제 함량을 결정하기 위한 배합실험을 수행하였다.

Table 1 Mixing test variables

Specimen	Cement	Fly ash	Coarse agg.	Fine agg.	Water	SP (SP to binder ratio)	VMA (VMA to water ratio)
S0.6-V1.5						0.6 %	
S1-V1.5						1.0 %	
S2-V1.5	1.00	0.25	0.34	1.53	0.40	2.0 %	1.5 %
S3-V1.5						3.0 %	
S4-V1.5						4.0 %	
S3-V3						3.0 %	3.0 %

Table 1에 나타난 바와 같이 유동화제와 VMA 함량을 실험 변수로 설정하였다. 유동화제는 제조사에서 권장하는 결합제 대비 유동화제 비율인 0.6 %부터 추가적으로 1.0 %, 2.0 %, 3.0%, 4.0%로 설정하였다. VMA는 제조사 권장하는 물 대비 VMA 비율인 1.5 %와 그 두 배인 3.0%로 설정하였다. 실험은 KS F 2402에 따라 슬럼프와 슬럼프플로우를 측정하여 압출이 가능한 유동성이 확보되는지 확인하고, 배합시 물 투입 후 약 90분 동안 시간 경과에 따른 슬럼프를 측정하여 오픈타임도 파악하고자 하였다. 시간에 따른 슬럼프가 초기슬럼프에서 KS F 4009의 슬럼프 허용오차인 ± 25 mm 내로 유지되는 시간을 오픈타임으로 설정하였다. 본 연구에는 출력물을 제작하는 시간을 고려하여 오픈타임은 최소 50분을 확보하는 것을 목표로 하였다.

3.2 실험결과

유동화제 함량이 0.6 % ~ 2.0 %인 배합은 배합이 원활하게 이루어지지 않아 슬럼프 및 슬럼프플로우를 측정할 수 없었으며, 나머지 변수에 대한 배합실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이때 측정시간은 배합수를 투입한 시점부터 경과한 시간이다. S3-V1.5 실험체와 S4-V1.5인 실험체의 평균 슬럼프는 각각 216.3 mm, 237.5 mm로써 두 배합 모두 압출이 가능할 것으로 판단되었다. 또한, 두 경우 모두 배합수 투입 후 약 60분 이상 일정한 유동성을 보였으며, 이에 따라 목표한 오픈타임

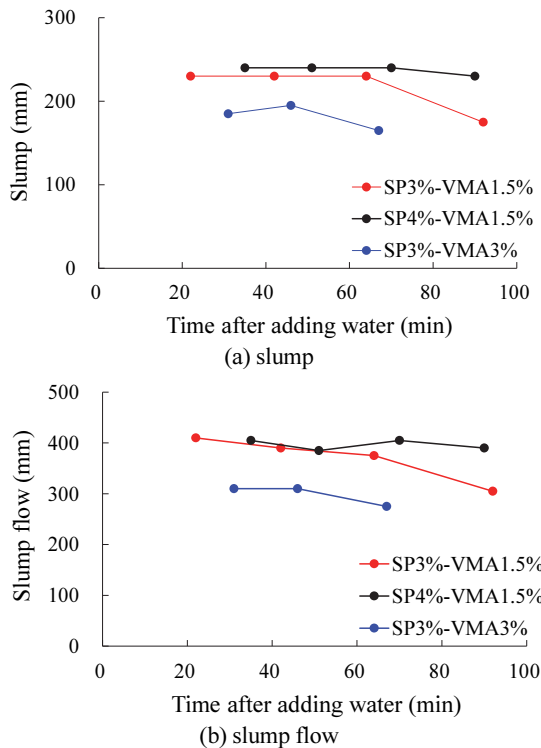


Fig. 2 Measured slump and slump flow

을 확보한 것으로 판단하였다. 유동화제 함량 3.0 %와 4.0 %의 배합실험 결과가 유사하였으므로 경제성을 고려해 출력실험 시 유동화제의 함량 3.0 %를 적용하였다. 증점제 3.0 %인 S3-V3 실험체의 평균 슬럼프와 슬럼프플로우는 181.7 mm, 298.3 mm로써 증점제 1.5 %인 실험체보다 다소 낮게 나타났으며, 일정한 유동성이 확보되는 시간은 약 50분으로 확인되었다.

4. 출력실험

4.1 실험계획

Table 1에 나타난 바와 같이 증점제 함량이 각각 1.5 %와 3.0 %인 S3-V1.5 및 S3-V3 배합의 압출성을 검증하기 위해서 3D 프린팅 실험을 수행하였다. 실험은 굳지 않은 콘크리트를 길이 1,000 mm까지 연속적으로 출력하는 것으로 계획하였다. 이때 사용된 출력장비는 NETZSCH 사의 Progressive Cavity Pump NM 063 모델이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 시멘트와 혼합하여 원활하게 출력이 가능한 최대 골재 사이즈는 최대 12.5 mm이고, 펌프 내부를 통과할 수 있는 고체의 최대 크기는 50 mm이다. 또한, 3DCP에 사용되는 펌프는 일반적인 펌프와 다르게 최소 토출량 및 토출량 제어가 중요하기 때문에 출력 가능한 최소 유량을 20 L/h로 제작하였으며, 토출량의

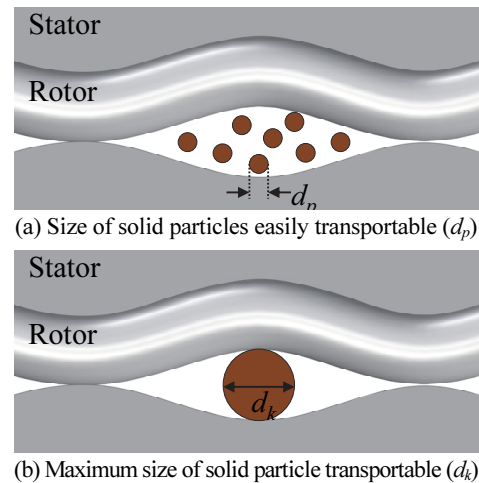


Fig. 3 Particle size of transportable in pump

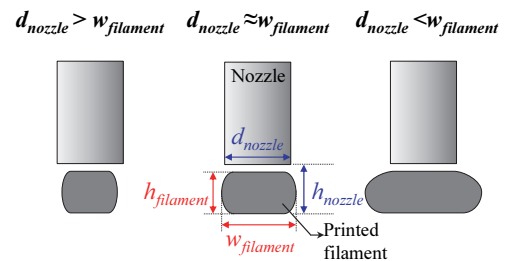


Fig. 4 Filament section

미세 제어가 가능하도록 인버터를 부착하였다.

3D 프린팅 시 기본적으로 노즐에서의 막힘이나 필라멘트의 끊어짐이 없어야 하며, 본 연구에서는 필라멘트의 치수 적합성, 표면 품질, 골재 분포도를 압출성 검증에 대한 지표로 설정하고 관측하였다. 또한, 치수적합성, 표면품질, 골재분포도는 해당 변수로 출력된 하나의 필라멘트에서 모두 평가하였으며, 출력 후 28일이 경과된 시점에서 그라인더를 사용하여 필라멘트를 절단해서 시편을 추출하였다.

Rahul et al.(2019)에 의하면 출력물은 필라멘트의 단면적($A_{filament}$)과 노즐의 단면적(A_{nozzle})이 동일할 때 형상안정성을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 $A_{filament}$ 와 A_{nozzle} 이 동일할 때 치수 적합성이 가장 우수한 것으로 간주하였다. 또한, Fig. 4에 나타난 바와 같이 필라멘트의 폭($w_{filament}$)이 노즐의 직경(d_{nozzle})과 유사할수록 안정적으로 적층할 수 있는 것으로 판단하였다. 이 실험에서는 d_{nozzle} 이 50 mm인 원형 노즐을 사용하였으므로 이상적인 $w_{filament}$ 는 50 mm이며, 필라멘트의 단면을 직사각형으로 가정하면 $h_{filament}$ 가 약 40 mm ($h_{filament} = A_{nozzle}/w_{filament} \approx 40$ mm)로 형성되었을 때 압출성이 우수한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 h_{nozzle} 은 40 mm로 설정하였다.

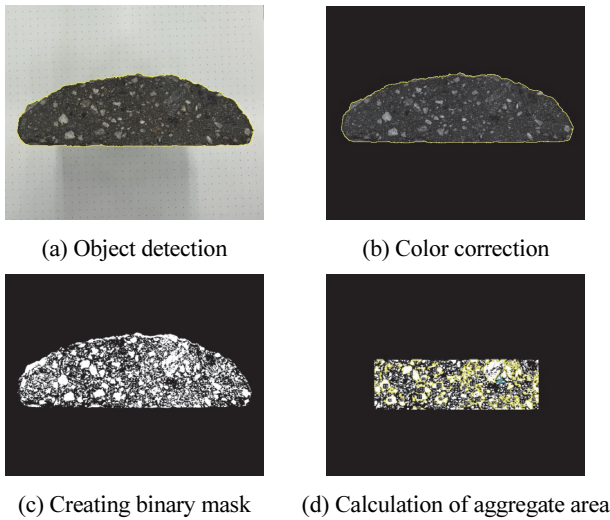


Fig. 5 Evaluation of aggregate distribution

두 번째 평가지표인 필라멘트 표면의 품질을 관찰하기 위하여 3D 스캐너(Artec Eva)를 사용하여 출력물의 표면을 스캔한 후, ISO 4287/1에 제시된 최대 높이 거칠기 측정방법을 적용하였다. 이 방법은 3D 스캔을 통해 측정된 모델에서 단면을 추출하여 설정한 기준길이를 구간을 나누고, 각 구간 내에서 가장 높은 봉우리(R_{peak})와 가장 낮은 골짜기 사이(R_{valley})의 수직거리(R_{max})를 측정하는 것이다. 즉,

$$R_{max} = |R_{peak}| + |R_{valley}| \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 식 (1)에 따르면, R_{max} 가 클수록 표면이 거칠어 표면 품질이 낮다는 것을 의미하고, R_{max} 가 작을수록 표면 품질이 우수한 것으로 간주할 수 있다.

세 번째 평가지표인 골재 분포도를 확인하기 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 이미지후처리 프로그램(Image J)을 활용하여 필라멘트 단면 내 골재 분포를 관찰하였다. 먼저, 필라멘트 단면을 지정하고, 골재를 명확하게 구분하기 위해 사진의 색감을 조정하였다. 이후 골재를 마스킹(masking)하고, 마스킹된 면적을 계산하여 필라멘트 전체면적 대비 골재 면적의 비율을 도출하였다.

$$\text{골재 면적의 비율} = \frac{\text{마스킹된 골재 면적}}{\text{필라멘트 전체면적}} \quad (2)$$

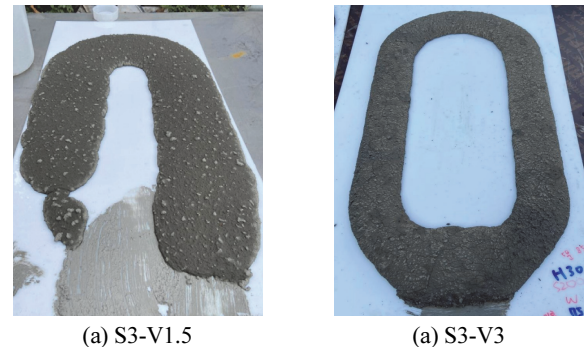


Fig. 6 3D-printed specimen according to content of viscosity modifying agent

Table 2 Dimensions of 3D-printed specimens

Specimen	Width of filament (mm)	Average (mm)	Standard deviation	Height of filament (mm)	Average (mm)	Standard deviation	Area of section (mm ²)
S3-V1.5	182.00	184.67	3.09	20.92	22.47	0.56	4,149.53
	183.00			24.93			
	189.00			21.56			
S3-V3	88.24	88.68	0.76	25.38	25.05	0.84	2,221.43
	89.75			26.10			
	88.06			23.68			

Table 3 Results of R_{max} for printed specimen

Specimen	R_{max}	Average R_{max}
S3-V1.5	2.50	2.30
	1.94	
	1.54	
	3.22	
	1.41	
	3.17	
S3-V3	0.85	1.05
	1.46	
	0.85	

4.2 실험결과

Fig. 6에는 3D 프린팅된 실험체 사진을 나타내었으며, 증점제 함량이 1.5 % 및 3.0 %인 배합에서 모두 노즐에서의 막힘 없이 연속적으로 압출되었다. Table 2에는 필라멘트의 치수 측정 결과를 나타내었으며, 이를 기반으로 압출성 평가지표 중 첫 번째인 치수 적합성에 대해서 평가하였다. 증점제 함량이 1.5 %인 경우에 비해 증점제 함량이 3.0 %인 배합의 필라멘트의 단면적이 노즐의 단면적(=1962.5 mm²)에 근접하게 형성되었다. 증점제 함량이 3.0 %인 배합의 $w_{filament}$ 도 d_{nozzle} (=50 mm)에 더 근접하게 나타났으며, $w_{filament}$ 의 표준편차도 매우 낮게 나타났다. 또한, $h_{filament}$ 와 h_{nozzle} 을 비교하였을 때에도 증점제 함량이 3.0 %인 배합으로 출력한 필라멘트의 $h_{filament}$ 가 d_{nozzle} 인 40 mm에 더 가깝게 형성된 것을 확인할 수 있다. 따라서, 치수 적합성은 증점제 3.0 %가 혼입된 배합이 더 우수하다고 평가할 수 있다.

ISO 4287/1에서 제시하는 최대 높이 거칠기 측정방법을 활용하여 각 실험체 단면의 표면 품질을 평가한 결과를 Fig. 7 및 Table 3에 나타내었다. 증점제 함량 1.5 %인 실험체의 R_{max} 평

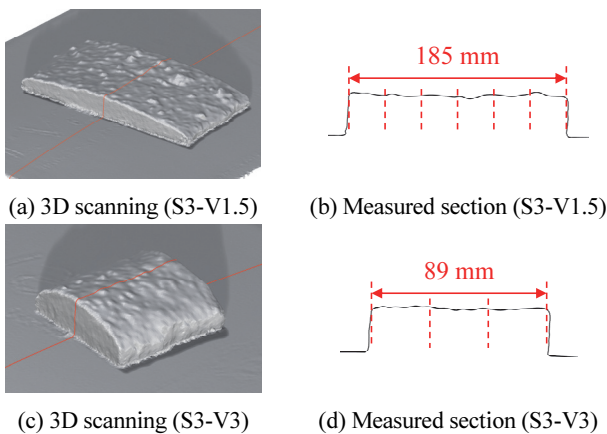


Fig. 7 Evaluation of filament surface quality

Table 4 Results of aggregate distribution

Specimen	Aggregate area/ Total filament area	Average	Standard deviation
S3-V1.5	0.17	0.24	0.05
	0.21		
	0.27		
	0.30		
	0.19		
S3-V3	0.27	0.23	0.03
	0.23		
	0.24		
	0.24		

균은 2.30이며, 증점제 함량 3.0 %인 실험체의 R_{max} 평균은 1.05로 나타났다. 이는 증점제 3.0 %가 혼입된 배합이 증점제 1.5%가 혼입된 배합에 비해 표면 품질이 더 뛰어난 것을 의미한다.

Table 4에는 이미지후처리 프로그램을 기반으로 필라멘트 단면의 골재 분포도를 측정된 결과를 나타내었다. 출력된 필라멘트에서 임의로 4지점을 절단하여 단면을 추출하였으며, 각 단면의 면적과 골재의 면적을 산출하여 비율로 나타내었다. 골재 분포도의 경우, 증점제의 혼입량에 관계 없이 유사한 수준으로 나타났다. 또한, 두 배합의 골재 분포도의 표준편차는 0.05 이하로써 3D 프린팅을 하더라도 필라멘트 길이에 걸쳐 골재가 균일하게 분포된 것으로 확인되었다.

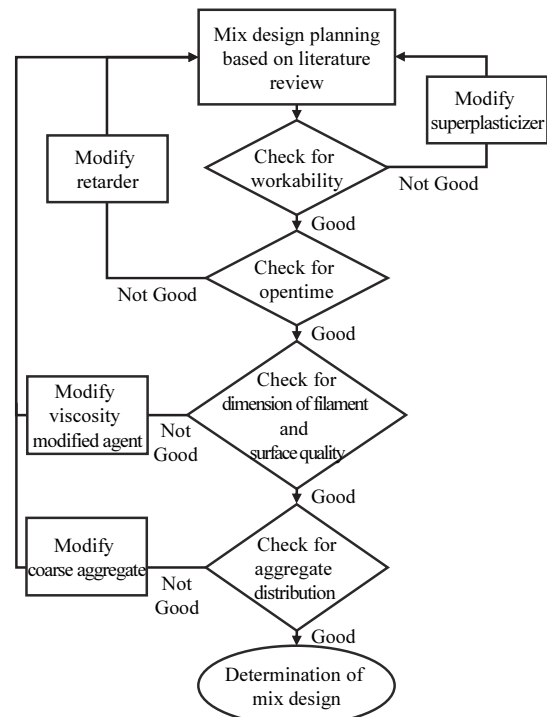


Fig. 8 Proposed process of mix design for 3DCP with coarse aggregate

5. 배합설계 프로세스 제안

앞서 배합실험 및 3D 프린팅 출력실험 결과를 기반으로 이 연구에서는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅용 콘크리트의 압출성 확보를 위한 배합설계 프로세스를 도출하였으며, 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저, 문헌연구를 바탕으로 굵은 골재가 포함된 3DCP 배합을 수집하여 데이터베이스를 구축하고, 이를 통해 가장 적합할 것으로 판단되는 배합을 선택한다. 이후 배합실험을 통해 작업성을 확보할 수 있는 유동화제 함량을 산출하고, 이때 시간에 따른 슬럼프를 측정하여 오픈타임을 산정할 수 있다. 오픈타임은 시간에 따른 슬럼프가 초기슬럼프에서 KS F 4009의 슬럼프 허용 오차인 ± 25 mm 내로 유지되는 시간으로 정의하였다. 본 연구에서는 모든 배합에서 목표한 오픈타임을 모두 확보하였지만, 오픈타임이 목표한 시간에 도달하지 못한 경우에는 선행 연구를 참조하여 응결 지연제를 혼입할 수 있다. 마지막으로 3D 프린팅 출력실험을 수행하여 치수 적합성, 표면 품질, 골재 분포도를 평가하여 압출성을 검증한다. 필라멘트의 치수 또는 면 품질이 목표한 지표에 도달하지 못한 경우는 본 논문의 실험변수와 같이 증점제를 조절하여 압출성을 확보할 수 있다. 만약, 골재 분포도를 평가하여 목표한 지표에 도달하지 못하는 경우에는 굵은 골재의 최대 치수 또는 함량을 변화시키는 방법이 필요할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅 용 콘크리트 배합을 도출하였으며, 출력 실험을 통해 압출성능을 대표할 수 있는 지표를 제시하였다. 또한, 실험결과를 기반으로 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅 용 콘크리트의 배합설계 프로세스를 제안하였다. 본 연구로부터 도출한 결과를 다음에 정리하였다.

- 1) 문헌연구를 수행하여 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅용 콘크리트 배합 27개를 수집하였으며, 이를 바탕으로 가장 적합할 것으로 판단되는 배합비를 선정하였다. 선정 배합비에 대한 재료실험 결과, 유동화제를 2.0% 이하로 투입하는 경우 적절한 슬럼프를 확보할 수 없었으며, 증점제를 3.0% 이상 혼입하였을 때 출력 가능한 적정 슬럼프와 60분 이상의 오픈타임을 확보할 수 있었다.
- 2) 압출성을 평가할 수 있는 지표로써 치수 적합성, 표면 품질, 골재 분포도를 제시하였다. 치수 적합성은 출력된 필라멘트의 폭과 높이가 노즐의 직경과 출력 높이와 유사할수록 적합한 것으로 판단하였다. 표면 품질은 최대 높이 거칠기 측정방법을 통해 R_{max} 를 산정하여 출력된 필라멘트 표면의 품질을 비교하였다. 마지막으로 골재 분포도는 출력된 필라멘트에서 임의로 여러 개의 단면을

추출한 후 이미지분석을 통해 골재면적/필라멘트의 단면적 비를 산출하여 평가하였다.

- 3) 출력실험 결과, 증점제 함량이 3.0%인 콘크리트가 증점제 함량이 1.5%인 콘크리트보다 치수 적합성, 표면 품질, 골재 분포도 측면에서 모두 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 압출성이 미흡한 배합의 경우 증점제 함량을 조절함으로써 압출성을 높일 수 있다. 다만, 골재 분포도의 경우에는 증점제 함량에 따른 차이가 크지는 않았기 때문에 골재 분포도가 확보되지 않았을 때에는 증점제의 혼입량을 조절하기 보다는 굵은 골재의 최대 치수 또는 함량을 변화시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.
- 4) 이 연구에서는 실험결과를 기반으로 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅용 콘크리트의 압출성 확보를 위한 배합설계 프로세스를 제안하였다. 다만, 3D 프린팅 콘크리트의 실질적인 적용을 위해서는 압출성 뿐만 아니라 적층성이 확보되어야만 한다. 따라서, 추후 굵은 골재가 포함된 균지 않은 콘크리트의 적층성 실험이 추가적으로 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: NRF-2019R1A2C2086388).

References

1. Wang, C., Ikuma, L., Hondzinski, J., and de Queiroz, M. (2017), Application of assistive wearable robotics to alleviate construction workforce shortage: Challenges and opportunities, *Journal of Computing in Civil Engineering* 2017, ASCE, 358-365.
2. Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F., and Thorpe, T. (2012(a)), Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, 42(3), 558-566.
3. Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., and Leong, K. F. (2017), 3D printing trends in building and construction industry: a review, *Virtual and Physical Prototyping*, TAYLOR & FRANCIS LTD, 12(3), 261-276.
4. Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., and Thorpe, T. (2012(b)), Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, SPRINGER, 45(8), 1221-1232.
5. Panda, B., and Tan, M. J. (2018), Experimental Study on Mix Proportion and Fresh Properties of Fly Ash Based Geopolymer for 3D Concrete Printing, *Ceramics International*, ELSEVIER SCI LTD, 44(9), 10258-10265.
6. Ma, G., Li, Z., and Wang, L. (2018), Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing, *Construction and Building Materials*, ELSEVIER SCI LTD, 162, 613-627.

7. Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., and Khoshnevis, B. (2017), Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, *Construction and Building Materials*, ELSEVIER SCI LTD, 145, 639-647.
8. Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., and Ghani, Z. (2019), 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, ELSEVIER SCI LTD, 97, 13-23.
9. Shah, H. A., Yuan, Q., and Photwichai, N. (2022), Use of Materials to Lower the Cost of Ultra-High-Performance Concrete - A Review, *Construction and Building Materials*, ELSEVIER SCI LTD, 327, 127045.
10. Lee, H., Kim, W. W., Seo, E. A., and Moon, J. H. (2020), Effect of Shrinkage Characteristics of Cement-Based Composites by Extrusion and Lamination Process of Construction 3D Printing, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(6), 113-118 (in Korean).
11. Seo, E. A., Yang, K. H., and Lee, H. J. (2022), Experimental Study for Evaluating Early Age Shrinkage of Mortar for 3D Printing, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 26(2), 76-83 (in Korean).
12. Rahul, A. V., Mohan, M. K., De Schutter, G., and Tittelboom, K. (2022), 3D Printable Concrete with Natural and Recycled Coarse Aggregates: Rheological, Mechanical and Shrinkage Behaviour, *Cement and Concrete Composites*, ELSEVIER SCI LTD, 125, 104311.
13. Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Wang, L., Ding, T., Duan, Z., and Du, S. (2021), Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities, *Cement and Concrete Composites*, ELSEVIER SCI LTD, 122, 104115.
14. Lee, Y. J., Han, S. J., Jeong, H., Kim, J. H., and Kim, K. S. (2020), Material Characteristics of Rapid Prototyping Concrete and Member Behavior, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 32(1), 85-93 (in Korean).
15. Jeong, H., Han, S. J., Choi, S. H., Lee, Y. J., Yi, S. T., and K. S. Kim. (2019), Rheological Property Criteria for Buildable 3D Printing Concrete, *Materials*, MDPI, 12(4), 657.
16. Ye, J., Cui, C., Yu, J., Yu, K., and Xiao, J. (2021), Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber, *Composites Part B: Engineering*, ELSEVIER SCI LTD, 211, 108639.
17. Chen, Y., Zhang, Y., Pang, B., Liu, Z., and Liu, G. (2021), Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance., *Construction and building materials*, ELSEVIER SCI LTD, 296, 123624.
18. Ji, G., Ding, T., Xiao, J., Du, S., Li, J., and Duan, Z. (2019), A 3D printed ready-mixed concrete power distribution substation: Materials and construction technology. *Materials*, MDPI, 12(9), 1540.
19. Ji, G., Xiao, J., Zhi, P., Wu, Y. C., and Han, N. (2022), Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates, *Construction and Building Materials*, ELSEVIER SCI LTD, 325, 126740.
20. Liu, H., Liu, C., Bai, G., Wu, Y., He, C., Zhang, R., and Wang, Y. (2022), Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate, *Additive Manufacturing*, ELSEVIER, 55, 102843.
21. Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., and Näther, M. (2019), Large-Scale Digital Concrete construction-CONPrint3D Concept for on-Site, Monolithic 3D-Printing, *Automation in Construction*, ELSEVIER, 107, 102933.
22. Rahul, A. V., and Santhanam, M. (2020) Evaluating the Printability of Concretes Containing Lightweight Coarse Aggregates, *Cement and Concrete Composites*, ELSEVIER SCI LTD, 109, 103570.
23. Vespalec, A., Novák, J., Kohoutková, A., Vosynek, P., Podroužek, J., Škaroupka, D., Zikmund, T., Kaiser, J., and Paloušek, D. (2020), Interface behavior and interface tensile strength of a hardened concrete mixture with a coarse aggregate for additive manufacturing, *Materials*, MDPI, 13(22), 5147.
24. Wang, X., Jia, L., Jia, Z., Zhang, C., Chen, Y., Ma, L., Wang, Z., Deng, Z., Banthia, N., and Zhang, Y. (2022), Optimization of 3D printing concrete with coarse aggregate via proper mix design and printing process, *Journal of Building Engineering*, ELSEVIER, 56, 104745.
25. Xiao, J., Lv, Z., Duan, Z., and Hou, S. (2022). Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations, *Journal of Building Engineering*, ELSEVIER, 51, 104282.
26. Zhang, C., Jia, Z., Wang, X., Jia, L., Deng, Z., Wang, Z., Zhang, Y. and Mechtcherine, V. (2022), A two-phase design strategy based on the composite of mortar and coarse aggregate for 3D printable concrete with coarse aggregate, *Journal of Building Engineering*, ELSEVIER, 54, 104672.
27. A. M. Neville. (1997), *Properties of Concrete* (4th edition), WILEY, London: Longman, 62-262.

Received : 11/30/2023
 Revised : 01/02/2024
 Accepted : 01/02/2024

요 지 : 기존 대부분의 3D 콘크리트 프린팅 연구는 모르타르를 재료로 활용하고 있다. 다만, 굵은 골재를 포함한 콘크리트에 비해 모르타르를 사용할 경우에는 높은 바인더 함량과 잔골재량으로 인하여 경제성이 저하될 수 밖에 없다. 따라서, 3D 프린팅 기술의 건설산업 적용 확대를 위해서는 굵은 골재를 사용한 콘크리트 3D 프린팅에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 굵은 골재가 포함된 3D 프린팅 용 콘크리트의 배합 설계 프로세스를 제안하고자 하였다. 다양한 문헌연구 및 배합실험을 참고하여 3D 프린팅에 적합한 배합을 도출하였으며, 출력실험을 통하여 압출성을 검증하였다. 콘크리트 배합의 증점제(Viscosity modifying agent, VMA) 함량을 출력실험의 변수로 설정하였으며, 출력된 필라멘트의 치수 적합성, 골재분포도, 표면 품질을 평가하여 압출성을 검증하였다. 실험결과, VMA의 함량이 높은 배합이 더 우수한 치수 적합성과 표면 품질을 보였으며, VMA 함량이 다름에도 불구하고 모든 배합에서 골재분포가 균등하게 나타났다. 실험결과를 바탕으로 굵은 골재가 포함된 콘크리트의 압출성을 향상 시킬 수 있는 배합설계 프로세스를 도출하였다.

핵심용어 : 3D 콘크리트 프린팅, 굵은 골재, 압출 성능, 치수 적합성, 골재 분포도, 표면 품질