적층공법 적용 모르타르의 경화 전 · 후 특성에 대한 기초 실험 평가

Basic Experimental Evaluation of Fresh and Hardened Properties of Mortar Using Additive Manufacturing

우성진* · 박인범** · 이동민*** · 양준모****

Woo, Seong-Jin*, Park, In-Beom**, Lee, Dong-Min***, and Yang, Jun-Mo****

Abstract

Recently, the three-dimensional concrete printing (3DCP) method has been garnering considerable interest owing to its ability to significantly reduce the construction time. In this study, 3D printing or additive manufacturing was applied to mortar using a small gantry type equipment and the performance of the method was evaluated. The mixture proportioning for good mortar printing and deposition was derived. The parameters of printability, buildability, compressive strength, flexural tensile strength, and anti-washout were considered for the performance evaluation. The results showed good printability with a constant width and no surface defects. In the buildability test, the rate of yield stress development increased, and the rate of change in the layer height decreased as the interlayer time interval increased during underwater printing. The flexural tensile strength of the specimen cast into the mold was lower than that of the specimen extracted from the additive parts owing to the longitudinal confinement during printing. The compressive strength in the lateral direction was slightly higher than that in the perpendicular direction, whereas the compressive strength of the specimen extracted from the part printed underwater was higher than that of the specimen cast into the mold.

Key words : Additive Manufacturing, 3DCP, Printability, Buildability, Compressive Strength

요 지

최근 거푸집 공사 및 후속 다짐 과정이 생략되어 공기 단축을 유도할 수 있는 3D 콘크리트 프린팅 공법이 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 소형 갠트리형 장비를 이용하여 모르타르에 대한 적층 공법을 적용하고 3DCP 공법에 대한 기초 성능평가를 수행하였다. 양호한 모르타르 출력 및 적층을 위한 배합비를 도출하였고, 출력성능, 적층성능, 압축강도, 휨인장강도 및 수중불분리성을 평가하였다. 출력물의 직선구간에서 폭이 일정하고, 표면의 결점 및 끊어짐이 없는 양호한 출력성능을 나타내었다. 적층성능 평가를 통해 수중 출력 시 항복응력 발현 속도가 빨라져 적층 시간간격 증가에 따라 층 높이 변화율이 감소됨을 확인하였다. 출력 시 길이방향 구속으로 인해 적층물로부터 추출한 공시체 보다 몰드에 타설한 공시체의 휨인장강도가 더 낮게 나타났다. 수평방향의 압축강도가 수직방향의 압축강도보다 다소 높게 평가되었으며, 수중 출력 시 적층물로부터 추출한 공시체의 압축강도가 몰드에 타설한 공시체보다 높은 압축강도를 나타내었다.

핵심용어 : 적층공법, 3D 콘크리트 프린팅, 출력성능, 적층성능, 압축강도

*정회원, 계명대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: woo.sj@kmu.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Keimyung University

**계명대학교 토목공학전공 학사과정

Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Keimyung University

***계명대학교 토목공학전공 학사과정

Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Keimyung University

****교신저자, 정회원, 계명대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-53-580-5297, Fax: +82-53-580-5297, E-mail: jm.yang@kmu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University

1. 서 론

3D 프린팅 기술의 발전은 제3차 산업혁명이라 불릴 만큼 산업 전반에 걸쳐 제조 기술에 큰 기여를 하고 있다. Contour Crafting 연구진은 1990년대 후반 다양한 재료의 물성에 적합한 3D 프린팅 장비를 개발하여 적용하였으며, 21세기 초반 건설용 3D 콘크리트 프린팅 기법(3D Concrete Printing, 3DCP)을 고안하였다(Khoshnevis and Dutton, 1998; Khoshnevis, 2004). 현재까지 개발된 건설용 3DCP는 압출방식에 의한 적층공법(Additive Manufacturing, AM)을 주로 적용하였다(Perrot et al., 2016; Nerella et al., 2019). 또 다른 3DCP 방식으로는 바인더 젯팅(Binder jetting)을 통해 선택적인 바인더를 수행하는 파우더 베드 기반 방식(Powder-bed-based method)이 있다(Asadi-Eydivand et al., 2016; Nething et al., 2020).

3DCP는 전통적인 시공 방식과 달리 거푸집 공사 및 후속 다짐 과정이 생략되어 공기 단축을 유도할 수 있으며 폐기물 및 노동력을 최소화할 수 있다. 또한 형상 자유도가 높아 비정형 구조물을 장소의 제한을 받지 않고 현장에서 거푸집 없이 손쉽게 시공이 가능할 것으로 전망되고 있다(Wu et al., 2016; Duballet et al., 2017; Hamidi and Aslani, 2019). 그러나, 이러한 장점을 십분 발휘하여 3DCP공법을 적용하기에는 아직까지 많은 과제를 안고 있다. 그 중 하나는 적용하고자 하는 구조물에 적합하며 또한 프린팅 장비에 호환이 가능한 적층재료를 설계해야 하는 것이다. 양호한 3DCP 품질을 확보하기 위해서는 굳지 않은 콘크리트 상태에서의 압송성능(Pumpability), 출력성능(Printability), 적층성능(Buildability), 형상안정성(Shape Stability) 등을 만족하여야 하지만 이러한 요구조건은 서로 상충되는 재료적 특성이기 때문에 이를 만족시키기에는 많은 어려움이 따르고 있다(Zareiyan and Khoshnevis, 2017). 또한, 3DCP 재료는 압축강도, 층간 부착강도 등의 역학적 특성과 경화된 상태에서의 내구성을 만족해야 한다. 그러나 이러한 경화콘크리트의 성능은 시험체의 제작방법, 시험방법 및 조건, 시험체의 크기 등에 따라 달라진다(Meurer and Classen, 2021). 뿐만 아니라, 이러한 3DCP 재료의 요구 성능 및 특성을 평가하고 판단할 수 있는 표준이 전 세계적으로 현재까지 마련되어 있지 않다.

본 연구에서는 소형 갠트리형 장비를 사용하여 적층 공법을 적용하고, 경화 전·후의 모르타르 특성에 대한 기초 성능 평가를 수행하였다. 일정한 품질 유지를 위해 콘크리트 비빔시간에 따른 슬럼프 플로워의 변화를 통해 본 연구에서 사용된 배합의 최적 혼화제량 및 믹싱타임을 정량적으로 평가하였으며(Roussel et al., 2005), 5층의 적층 출력 실험을 통해 높이 변화율을 측정하여 적층성능을 평가하였다. 또한, 적층 시간 간격의 변수를 설정하여 2층의 적층실험을 통해 높이 변화율을 측정하였다. 나아가 동일한 출력조건에서 수중에서의 적층실험을 수행하여 결정된 배합의 수중불분리성과 이를 적용한 3DCP의 수중 적용 가능성을 살펴보았다.

2. 실험재료, 장비 및 실험방법

2.1 실험재료

2.1.1 시멘트

시멘트는 KS L 5201 (2016)에 따라 분석하였으며, 비중 3.15 g/cm^3 , 비표면적 $3,770 \text{ cm}^2/\text{g}$, 초결 210분, 종결 290분의 응결시간을 지닌 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 일정한 품질의 고강도 콘크리트 배합을 도출하기 위하여 동일사에서 제작한 시멘트를 고정적으로 사용하였다.

2.1.2 실리카흙

실리카흙은 ASTM C1240 (2020)에 의한 분석 결과, SiO_2 가 91.6% 함유되었으며, 강열감량 23%, 45 μm 잔분량 3.9%, 비표면적 $204,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 을 나타내었다. 실리카흙의 경우, 분말도 0.1 μm 이상의 초미립자(시멘트 입자의 약 1/25)로 시멘트 입자간 공극 충진을 통해 고강도 특성뿐만 아니라 이를 통한 양호한 적층성의 확보가 가능하다.

2.1.3 잔골재

잔골재는 SiO_2 함유량 95.5%를 지닌 동일사에서 제조된 규사를 고정적으로 사용하였다. 분리된 입도 분포를 통한 출력물의 적층성 확보를 위하여 7호사(0.17~0.25 mm), 5호사(0.7~1.2 mm), 3호사(1.2~2.4 mm)를 3:4:3의 비율로 적용하였고, KS F 2502 (2019)의 체가름 시험 결과 조립률은 2.77로 나타났다(Paul et al., 2018).

2.1.4 혼화제

압출성능 확보를 위해 고성능 감수제를 사용하였고, 적층성능 확보를 위해 증점제를 사용하였다. 고형분 $30.1 \pm 2.0\%$ 를 지닌 밀도 $1.07 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 의 연갈색 액상형의 폴리카르본산계 고성능 감수제와 고형분 $97.0 \pm 2.0\%$ 를 지닌 밀도 $0.75 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 의 백색 분말형의 셀룰로오스계 증점제를 사용하였다.

2.2 배합설계

3DCP 장비의 특성을 고려하여 굵은골재가 포함되지 않는 모르타르 배합을 적용하였다. 설계기준강도를 80 MPa로 설정하고, 물-결합재 비(W/B)는 28.0%로 결정하였다. 출력시 매트릭스의 점성을 높여 적층성능을 향상시키기 위해 증점제를 수량 대비 0.5% 사용하였다. 여러차례 출력시험을 통해 결정된 목표 슬럼프 플로워 값 $130 \pm 5 \text{ mm}$ 를 맞추기 위해 고성능 감수제 혼입량을 결합재 대비 0.5~1.0%에서 조절하였고, 이를 통해 일정한 반죽질기 및 일정한 출력품질을 유지하도록 하였다. 배합설계 상세는 Table 1과 같다.

Table 1. Mixture Proportioning

W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)				Admixture (%)	
	Water	Cement	Silica fume	Fine aggregate	VMA	HRWRA
28.0	230	738	82	1,217	0.5	0.5~1.0

[Note] VMA: viscosity modifying agent, HRWRA: high range water reducing agent

Table 2. Type and Details of Printing Test

Test	Size of one layer (mm)	Printing height of one layer (mm)	Number of layer	Printing environment	HRWRA content (%)	Slump-flow (mm, at 15 min. mixing)
AM-1	600 × 600	30	1	in air	1.0	-
AM-2			5	in air	0.5	133.3
AM-3	700 × 200	25	2	in air	0.5	127.1
AM-4			2	underwater	0.5	126.5

Fig. 1. 3DCP Equipment

2.3 3D 프린팅 장비

AM 공법 적용은 Fig. 1(a)의 소형 갠트리형 출력장비를 사용하였다. 갠트리형 장비는 x, y, z축 최대 1 m × 1 m × 1 m까지 형상출력이 가능하며, 축방향으로 최대 75 mm/sec로 정속 이동할 수 있는 서보모터를 장착한 장비를 사용하였다.

모르타르 이송설비는 배합한 모르타르를 Fig. 1(b) 펌프에 타설한 후 직경 31.75 mm의 원형 호스를 통해 출력장비로 압송하여 출력하는 방식을 채택하였다. 펌프는 로터/스테이터(Rotor/stator)를 사용한 워름펌프(Worm pump) 방식을 사용하였다. 노즐은 호스와 동일한 직경의 원형 노즐을 사용하였다.

2.4 출력실험 방법

모르타르 배합은 트윈믹서를 통하여 수행되었으며, 증점제를 혼입한 결합제 및 잔골재를 3분간 40 RPM으로 건비빔한 후, 동일한 속도에서 배합수를 투입하여 배합을 완성하였다. 기존 배합의 반죽질기 측정을 위한 슬럼프 플로우 실험은 ASTM C1437 (2020)에 의해 실시하였으며, 고성능 감수제와 결합제간 최적 반응 시간을 결정하기 위해 5분 간격으로 슬럼프 플로우를 측정하여 플로우 값 변화를 분석하였다(Roussel et al., 2005; Nerella and Mechtcherine, 2019).

모든 출력물은 갠트리 이동 선속 4,500 mm/min을 적용하여 적층하였고, 총 두 종류 형상의 적층물을 제작하였다. 한 종류 적층물은 한 층이 600 × 600 mm 정사각형으로 구성되어 있고, 30 mm의 일정한 높이로 5층을 적층하여 제작하였다(AM-1, AM-2). 최초 층 출력 후, 상층 출력 시 하층의 층간 침하량 측정을 통하여 적층성능을 평가하였으며, 직선구간에서의 형상을 관측 및 측정하여 출력 품질을 평가하였다.

다른 한 종류 적층물은 한 층이 700 × 200 mm의 직사각형으로 구성되어 있고, 25 mm의 높이로 2층을 적층하여 제작하였다(AM-3, AM-4). 1, 5, 10분 간격의 층간 적층시간 간격을 변수로 하여 실험하였다. 출력물의 적층 후의 높이 감소량 관측을 통해 적층시간 간격에 따른 적층성능의 차이를 비교 평가하였다. 또한, 기중(AM-3) 및 수중(AM-4)에서 동일한 방법으로 실험을 진행하였다. 적용 배합의 수중 적층 가능성을 평가하기 위해 기중 적층물과 출력성능, 적층성능을 비교하였고, 산란광 측정법에 탁도측정장비를 이용하여 수중 탁도를 평가하였다.

각 출력실험의 종류 및 상세를 Table 2에 제시하였다.

2.5 역학적특성 평가 방법

적층공법 적용 콘크리트의 역학적특성을 평가하는 표준

화된 시험방법은 현재 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 KS L ISO 679 (2006) 방법에 따라 시험체를 제작하고 경화 후의 압축강도 및 휨인장강도를 평가하였다. 3DCP는 노즐의 이동방향에 대한 수평, 수직, 높이방향의 압축강도, 휨인장강도 등의 역학적 특성이 다르게 나타나는 비등방성의 특성을 가지고 있다(Le et al., 2012; Panda et al., 2017; Nerella et al., 2019; Mechtcherine et al., 2019; Joh et al., 2020). 본 연구에서는 이와 같은 방향성 중 출력방향을 기준

으로 수직(Perpendicular; Perp.), 수평(Lateral; Lat.)의 2방향에 대한 영향을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 방향성을 고려하여 적층물을 40 mm × 40 mm × 160 mm 크기로 절단하여 시험체를 제작하였다. 시험체의 충격, 균열 등의 손상 방지를 위해 다이아몬드 원형톱을 이용하여 신속하게 절단을 수행하였다. 제작된 시험체를 이용하여 KS L ISO 679 (2006)의 규정과 같이 실험하였다. 방향성을 고려하여 Fig. 3과 같이 지간거리 100 mm로 시험체를 셋팅한 후 3점 재하 휨인장강

(a) Extraction direction of specimen

(b) Test direction of specimen

(c) Making process of test specimen extracted from part

Fig. 2. Method and Making Process of Test Specimen Extracted from Part

(a) Test method considering anisotropy

(b) Flexural tensile test

(c) Compressive test

Fig. 3. Details of Flexural Tensile Strength and Compressive Strength Test

도 시험을 진행하고, 휨인장강도 시험 종료 후의 양쪽 두 파편을 이용하여 압축강도 시험을 수행하였다.

적층 전 모르타르의 본래 압축강도를 평가하기 위해 배합된 모르타르를 직접 몰드에 타설하여 공시체를 제작하고 압축강도를 평가하였다. KS L ISO 679 (2006) 규격에 따라 40 mm × 40 mm × 160 mm 각주형 공시체를 직접 타설 방법으로 제작하여 압축강도 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 기준배합 실험 결과

Table 1 배합비에 따라 3DCP 장비 적용 및 적층에 적합한 목표 슬럼프 플로우 값 130 ± 5 mm을 만족하기 위해 고성능 감수제 혼입량을 조정하였다. 배합수 투입 후 배합시간 5분을 기준으로 고성능 감수제 1% 혼입량 배합에서 슬럼프 플로우 값은 129.0 mm로 나타나 목표값을 만족하였고, 이 배합을 토대로 출력실험을 진행하였다. 출력실험(AM-1) 결과, 한 층의 높이를 30 mm로 설정한 것과 달리 출력 후 큰 변형이 발생하여 높이의 큰 감소 및 폭의 큰 증가를 나타내었다(Fig. 4). 이는 배합시간이 충분치 않아 펌프-갠트리 압송과정 도중 추가적인 고성능 감수제의 반응이 일어났고, 펌프 압출 과정에서 발생되는 온도 증가로 인해 고성능 감수제의 반응이 더욱 활성화되었기 때문인 것으로 판단된다. 출력후 적층물의 과도한 변형은 목표 형상을 만족하기 어렵고, 적층물의 붕괴를 유발할 수 있다. 이에 해당 배합을 폐기 후, 감수제 혼입량을 조정하여 배합실험을 다시 수행하였다.

20분의 충분한 배합시간을 가지면서 0.3%의 혼입량을 시작으로 0.1%씩 고성능 감수제 혼입량을 늘려가며 배합실험을 하였고, 각각의 배합에 대한 슬럼프 플로우를 측정하였

다. 그 결과 목표 슬럼프 플로우를 만족하는 적정 혼입량은 0.5%로 결정되었다. 또한 고성능 감수제 혼입량 0.5%에 대한 적정 배합시간을 결정하기 위해 배합수 투입 후 5분 간격으로 슬럼프 플로우 값을 측정하였다. Fig. 5와 같이 배합시간에 따라 슬럼프 플로우가 점차 증가하다가 15분 이후부터 그 변화가 없는 것으로 나타났으며, 이를 토대로 고성능 감수제 혼입량 0.5%에 대한 배합시간을 15분으로 결정하였다.

3.2 출력성능 평가 결과

출력물의 출력성능을 평가하기 위해 첫 층 직선구간의 폭을 측정하여 일정한 폭을 유지하는지 확인하였으며, 표면의 결점 및 끊어짐 여부를 육안 관찰을 통해 확인하였다 (Kazemian et al., 2019). AM-1 출력을 제외한 나머지 3종 출력물의 출력품질이 Fig. 6과 같이 양호하게 나타났다. AM-2, AM-3, AM-4의 층 폭은 직선구간에서 일정하게 나타났고, 각각 57, 47, 38 mm로 서로 다른 폭을 나타내었다. 이 폭의 차이는 출력시 배합의 슬럼프 플로우 특성(Table 2)과 연관된 결과로서, 낮은 유동성의 배합일수록 출력 및

Fig. 5. Mixing Time - Slump Flow Relationship of Mortar with 0.5% HRWRA

Fig. 4. Printing Test Result of AM-1

Fig. 6. Evaluation of Printing Quality

(a) AM-2

(b) AM-3

(c) AM-4

Fig. 7. Evaluation of Buildability

적층 시 변형이 작게 발생하기 때문이다. AM4의 경우 AM3와 슬럼프플로우 값이 유사함에도 층 폭의 큰 차이를 보였는데, 이는 수중에서 자중의 영향이 감소되어 출력물의 변형이 작게 나타난 결과로 판단된다.

수중에서 출력한 AM4의 적층물 모습은 Fig. 7(c)에 나타내었다. 층간 적층시간 간격 1분, 5분 적층물의 경우, 2층 출력 시 표면의 흠 및 불연속 구간이 다소 나타났다. AM3과 AM4의 출력조건을 동일하게 하였음에도 이러한 결과가 나타난 것은 수중 출력에서는 양호한 출력품질을 만족하기 위한 토출량이 부족한 것을 의미하고, 그 원인 분석을 위해서는 다양한 연구가 필요하다고 판단된다. 층간 적층시간 간격 10분 적층물의 경우, 1층 적층부터 출력 품질이 불량으로 나타났다. 이는 출력 도중 펌프 내 모르타르량이 부족했기 때문으로 이후 성능평가에서는 제외하였다.

3.3 적층성능 평가 결과

AM-2, 3, 4 출력 적층물에 대한 적층 시의 높이 변화를 측정하여 적층성능을 평가하였다(Figs. 8~10). 높이 변화는 1 mm 단위 자를 이용하여 육안 측정하였고, 추후 사진분석을 통해 검증하였다.

Fig. 8. Layer Height Variation of AM-2

AM-2의 경우, 최초 층 출력과 이후 타설되는 층의 높이는 27~32 mm로 나타났으며, 타설 직후 하부 층의 층 높이는 18~27 mm로 나타났(Fig. 8). 1개 층이 적층된 후와 2개 층이 적층된 후를 비교하였을 때, 1, 2, 3, 4층의 층 높이 변화는 5~11 mm로 나타났으며, 위로 한 층이 적층된 후 두 층이 적층된 이후에는 높이 변화가 거의 나타나지 않으며,

Fig. 9. Layer Height Variation of AM-3

층 높이가 안정화되는 현상을 나타냈다. 이는 적층 후 시간 경과에 따라 그 층의 전단 탄성계수가 증가하여 상부 층의 자중이 일정하게 증가함에도 변형량의 증가량은 점차 감소하기 때문이다(Roussel, 2018). 층 높이 감소율은 12.9~37.9%로 크게 나타났다. 이는 층간 적층시간 간격이 25초로 짧게 설정되어 이전 층의 항복강도가 발현되기 전 다음 층의 자중과 출력 압력의 영향을 크게 받았기 때문인 것으로 판단된다. 실 구조물 출력 및 적층 시 이러한 변형량을 최소화하기 위해서는 층간 적층시간 간격을 고려하여 출력 재료의 항복응력 및 조직화 속도를 조절하여야 하겠다.

층간 적층시간 간격에 대한 영향성을 분석하기 위해, 층간 적층시간 간격을 1, 5, 10분으로 설정하여 AM-3 출력실험을 진행하였다. AM-2 대비 층 높이를 25 mm로 줄이고, 층 수는 2층으로 적층하였으며 출력 후의 층 높이 변화를 Fig. 9를 통해 도시하였다. 층 높이의 감소는 1, 5, 10분 적층시간 간격 모두 동일하게 4 mm로 약 15%의 높이 감소율을 나타냈다. 이를 통해 본 연구에 적용된 배합은 10분까지 층 높이 변화에 저항할 수 있는 항복응력의 증가가 나타나지 않는 것으로 보인다. 매트릭스는 휴면기를 지나 수화물의 결정핵생성이 시작되면 항복응력이 증가하기 시작하는데(Roussel, 2018), 10분의 적층시간 간격은 아직 그 시점에 도달하기에 부족한 것으로 판단된다.

AM-3와 동일한 출력조건을 이용하여 수중에서 AM-4 적층실험을 진행하였고, 그 결과 나타난 층간 높이 변화는 Fig. 10과 같다. 적층시간 간격이 1분인 출력물의 경우, 2층의 적층으로 1층의 높이가 2.5 mm 감소하였으며, 약 10.4%의 감소율을 나타내었다. 적층시간 간격이 5분인 출력물은 2층의 적층으로 1층의 높이가 0.5 mm 감소하였으며, 약 1.6%의 감소율을 보였다. 기중에서 출력, 적층한 AM-3 대비 높이 감소율이 감소하였는데, 이는 수중에서 2층의 자중이 감소된 영향때문인 것으로 판단된다. 또한, AM-3 실험결과와

Fig. 10. Layer Height Variation of AM-4

달리 적층시간 간격이 1분에서 5분으로 증가하였을 때, 약 8.8%의 층 높이 감소율 차이를 보였다. 이는 수중 환경에서는 매트릭스의 휴면기가 짧아지고 수화물의 결정핵생성 및 조직화 시점이 앞당겨지면서 항복응력 발현 속도가 빨라지기 때문인 것으로 추측된다. 그러나, 이러한 결과에 대한 확실한 원인 규명을 위해서는 다양한 추가 연구가 필요하다.

3.4 역학적특성 평가 결과

AM-2의 압축강도 및 휨강도는 재령 7일, 28일에 각각 3개의 공시체를 실험하여 평가하였다. 모든 시험체의 휨 파괴시 주균열은 중앙 가력부에서 발생되었다. 주 균열은 AM-2의 휨강도 실험 결과를 Fig. 11에 도시하였다. 재령의 증가에 따라 휨인장강도는 증가하였고, 그 편차는 감소하였다. 초기 재령의 경우 시험체별 강도 발현 속도가 다르기 때문에 휨강의 편차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 특히 적층물에서 추출한 공시체의 7일재령 휨인장강도의 편차가 매우 크게 나타났는데, 이는 3D 프린팅을 통해 몰탈이 출력되고 적층되면서 각 위치별 수화하고 조직화되는 속도도 각각 다르기 때문인 것으로 판단된다. 하중 재하방향 변수에 따른 휨인장강도는 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 적층물로부터 추출한 공시체 보다 몰드에 타설한 공시체의 휨인장강도가 약 7% 낮게 나타났다. Woo et al. (2021)의 연구에서도 유사한 실험 결과가 나타났는데, 이는 적층물 추출 공시체의 경우 노즐 진행방향이 휨인장강도 실험의 주인장응력방향이기 때문에 몰탈이 출력되고 수평, 길이방향으로 변위가 발생하면서 길이방향 구속력이 작용하기 때문이다.

AM-2의 압축강도 실험 결과는 Fig. 12와 같다. 몰드에 타설한 공시체의 28일 재령 압축강도만 설계기준 압축강도 80 MPa을 초과하였고, 적층물로부터 추출한 공시체의 경우 설계기준 압축강도에 못 미치는 결과를 나타내었다. 적층물의 경우 거꾸집 없이 타설되어 거꾸집 혹은 몰드의 구속이

Fig. 11. Flexural Tensile Strength Test Result of AM-2

Fig. 12. Compressive Strength Test Result of AM-2

없고, 내부 다짐이 이루어지지 않기 때문에 이러한 결과가 도출된 것으로 판단된다. 수직, 수평의 방향성에 따른 압축강도는 7일 재령에서는 유사하였고, 28일 재령에서는 수직방향 보다 수평방향의 압축강도가 약 8% 정도 높게 나타났다. 기존 연구에서는 이 방향성에 대한 의견이 분분한데, Panda et al. (2017)과 Sanjayan et al. (2018)의 연구에서는 수직방향의 압축강도가 더 높게 나타났고, 그 이유로 적층 시 수평방향의 구속력이 전혀 없기 때문이라고 하였다. 반면 Nerella et al. (2019)의 연구에서는 수직방향 공시체의 경우 구속 압축영역 밖에 취약한 중간 경계부가 넓게 위치하고 있기 때문에 수평방향 공시체 보다 더 낮은 압축강도를 나타내었다고 보고하였다. 이러한 서로 다른 결과는 출력장비 조건, 출력 환경, 압축강도 공시체 제작 방법 및 실험 방법 등에 따라 달라지는 것으로 일반화된 결과를 도출하기 위해서는 심층적인 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

AM-3, AM-4의 휨인장강도 실험결과를 Fig. 13에 도시하였다. AM-2의 결과와 마찬가지로 적층물로부터 추출한 공

Fig. 13. Flexural Tensile Strength Test Result of AM-3 & 4 at 28 Days

Fig. 14. Compressive Strength Test Result of AM-3 & 4 at 28 Days

시체 보다 몰드에 타설한 공시체의 휨인장강도가 더 높게 나타났고, 적층시간 간격 차이에 따른 영향은 나타나지 않았다. AM-3 보다 AM-4의 휨인장강도가 다소 더 크게 평가되었는데, AM-3의 경우 2일간의 기중양생 후 수중양생을 시작하한 반면, AM-4의 경우 타설 시점부터 계속 수중에서 양생하였기 때문에 휨인장강도의 증가가 나타난 것으로 판단된다.

AM-3, AM-4의 압축강도 실험결과를 Fig. 14에 도시된 바와 같다. 먼저, AM-3 보다 크게 증가된 AM-4의 압축강도 결과를 볼 수 있는데, 이는 휨인장강도 실험 결과와 마찬가지로 기중/수중 양생조건이 차이가 영향을 끼친 것으로 보인다. 또한, 수중에서 적층한 AM-4의 경우 AM-2, AM-3의 경우와 달리 몰드에 타설한 공시체 보다 적층물로부터 추출한 공시체의 휨인장강도가 더 높게 나타났다. 이는 수중 환경에서 작용하는 수압이 압축강도 발현에 도움을 주었을 것으로 판단된다. 휨인장시험 결과와 마찬가지로 적층시간 간격 차이에 따른 압축강도의 변화 경향은 나타나지 않았다.

Table 3. Turbidity Measurement Result of AM-4

Specimen			NTU	Ave. NTU	Ave. mg/L
Interlayer time gap	1 min.	1st	18.6	20.9	31.3
		2nd	23.1		
	5 min.	1st	99.9	96.3	144.4
		2nd	92.6		

3.5 AM-4 탁도 평가 결과

AM-4의 수중 탁도는 동일한 출력시작 지점에서 동일한 높이에서 2층 적층 후 채취한 물을 탁도측정기에 투입하여 측정하였다. 적층시간 간격 변수 1분, 5분 각각에 대해 2회 반복 탁도를 측정하였고, 그 결과는 Table 3에 제시하였다. 탁도측정기를 통해 나타난 NTU 단위 탁도 값은 mg/L 단위로 변환된 현탁물질량 값으로도 나타내었다.

적층시간 간격 1분, 5분에서의 현탁물질량은 각각 31.3, 144.4 mg/L로 평가되었다. KCS 14 20 43 (2021)에서는 수중 불분리성 콘크리트의 현탁물질량을 50 mg/L 이하로 제한하고 있다. 따라서 적층시간 간격 1분에서의 수중분리도는 수중 불분리성 콘크리트 기준을 만족하였고, 적층시간 간격 5분에서는 그 기준을 만족하지 못했다. 이러한 차이는 1층 적층 이후 5분 동안의 적층시간 간격 동안 적층된 콘크리트 내부에서 현탁물질이 용출되어 나왔기 때문인 것으로 판단된다. 3D 프린팅 공법으로 수중에서 적층구조물을 건설하기 위해서는 충분한 시간 경과 후에서 현탁물질량이 기준 값이 이하가 될 수 있도록 재료 및 장비를 개선하는 것이 선결되어야 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 갠트리형 장비를 이용하여 모르타르에 대한 적층 공법을 적용하고 기초 성능평가를 수행하였다. 모르타르의 출력성능, 적층성능 등 경화 전의 특성과 압축강도, 휨강도 등의 경화 후의 특성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 출력물의 직선구간에서 폭이 일정하고, 표면의 결점 및 끊어짐이 없이 출력되어 세 번의 출력시험 모두 양호한 출력성능을 나타내었다. 출력시험 간 나타난 폭의 차이는 배합의 슬럼프 플로우 특성과 연관되어 나타났다.
- 2) 적층성능 평가 결과, 적층 후 시간 경과에 따라 그 층의 전단 탄성계수가 증가하면서 층 높이 변화가 점차 감소하면서 안정화되었다. 기중 적층실험에서는 항복 응력의 발현 속도가 늦어 적층 시간간격에 따른 층 높이 변화 차이가 나타나지 않았고, 수중 적층실험에서는 항복응력 발현 속도가 빨라져 적층 시간간격 증가에

따라 층 높이 변화율이 감소하였다.

- 3) 휨인장강도 실험 결과, 출력 시 길이방향 구속으로 인해 적층물로부터 추출한 공시체 보다 몰드에 타설한 공시체의 휨인장강도가 다소 낮게 측정되었다. 하중 재하방향 및 적층 시간간격 변수에 따른 차이는 나타나지 않았다. 또한, 기중 출력 공시체 보다 수중 출력 공시체의 휨인장강도가 더 높게 평가되었다.
- 4) 압축강도 실험 결과, 수평방향의 압축강도가 수직방향의 압축강도보다 다소 높게 평가되었다. 기중 출력의 경우 거푸집의 구속이 없는 적층물의 압축강도가 몰드에 타설한 공시체와 유사하거나 낮은 압축강도를 나타낸 반면, 수중 출력의 경우 적층물로부터 추출한 공시체의 압축강도가 몰드에 타설한 공시체보다 높은 압축강도를 나타내었다.
- 5) 수중 출력시 탁도측정기를 통해 현탁물질량을 평가한 결과, 적층 후 시간 경과에 따라 현탁물질량이 기준값 이상으로 증가하였다. 수중 출력 시 기준값 이하의 탁도를 고려한 재료 및 장비의 개선이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제명: 수중 적층 타설용 콘크리트 복합재료 개발).

References

- Asadi-Eydivand, M., Solati-Hashjin, M., Farzad, A., and Osman, N.A.A. (2016). Effect of technical parameters on porous structure and strength of 3D printed calcium sulfate prototypes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 37, pp. 57-67.
- ASTM C1240. (2020). *Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM C1437. (2020). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Duballet, R., Baverel, O., and Dirrenberger, J. (2017). Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*, Vol. 83, pp. 247-258.
- Hamidi, F., and Aslani, F. (2019). Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. *Construction and Building Materials*, Vol. 218, pp. 582-609.
- Joh, C., Lee, J., Park, J., and Yang, I.H. (2020). Buildability

- and mechanical properties of 3D printed concrete. *Materials*, Vol. 13, 4919.
- Kazemian, A., Yuan, X., Meier, R., and Khoshnevis, B. (2019). Performance-based testing of Portland cement concrete for construction-scale 3D printing. In *3D Concrete Printing Technology*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 13-35.
- Khoshnevis, B., and Dutton, R. (1998). Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 53-56.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, Vol. 13, No. 1, pp. 5-19.
- KCS 14 20 43. (2021). *Underwater concrete*. Korean Construction Standard, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), Korea.
- KS F 2502. (2019). *Standard test method for sieve analysis of aggregates*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- KS L 5201. (2016). *Portland cement*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- KS L ISO 679. (2006). *Methods of testing cements - Determination of strength*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Law, R., Gibb, A.G., and Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 558-566.
- Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Will, F., Näther, M., Otto, J., and Krause, M. (2019). Large-scale digital concrete construction-CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in construction*, Vol. 107, 102933.
- Meurer, M., and Classen, M. (2021). Mechanical properties of hardened 3D printed concretes and mortars-development of a consistent experimental characterization strategy. *Materials*, Vol. 14, 752.
- Nerella, V.N., Hempel, S., and Mechtcherine, V. (2019). Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*, Vol. 205, pp. 586-601.
- Nerella, V.N., and Mechtcherine, V. (2019). Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D). In *3D Concrete Printing Technology*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 241-264.
- Nething, C., Smirnova, M., Groning, J.A.D., Haase, W., Stolz, A., and Sobek, W. (2020). A method for 3D printing bio-cemented spatial structures using sand and urease active calcium carbonate powder. *Materials & Design*, Vol. 195, 109032.
- Panda, B., Paul, S.C., and Tan, M.J. (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, Vol. 209, pp. 146-149.
- Paul, S.C., Tay, Y.W.D., Panda, B., and Tan, M.J. (2018). Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18, pp. 311-319.
- Perrot, A., Rangeard, D., and Pierre, A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, Vol. 49, No. 4, pp. 1213-1220.
- Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp. 76-85.
- Roussel, N., Stéfani, C., and Leroy, R. (2005). From mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 817-822.
- Sanjayan, J.G., Nematollahi, B., Xia, M., and Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 172, pp. 468-475.
- Woo, S.J., Yang, J.M., Lee, H., and Kwon, H.K. (2021). Comparison of properties of 3D-printed mortar in air vs. underwater. *Materials*, Vol. 14, No. 19, 5888.
- Wu, P., Wang, J., and Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, Vol. 68, pp. 21-31.
- Zareian, B., and Khoshnevis, B. (2017). Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting-Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness. *Automation in Construction*, Vol. 81, pp. 112-121.

Received	October 26, 2021
Revised	October 26, 2021
Accepted	November 3, 2021