

3D 프린팅 기술을 활용한 PLA 필라멘트 비탈형 거푸집 연구

정준형¹ · 현지훈² · 정희상³ · 고휘재⁴ · 이주희⁵ · 안요섭^{6*}

¹호서대학교 재난안전시스템학과 석사과정 · ²호서대학교 건축공학과 학사과정 · ³호서대학교 건축공학과 학사과정 ·
⁴호서대학교 재난안전시스템학과 석사과정 · ⁵호서대학교 건축토목공학과 학사과정 · ⁶호서대학교 재난안전시스템학과 조교수

Permanent Formwork of PLA Filament utilizing 3D Printing Technology

Jeong, Junhyeong¹, Hyun, Jihun², Jeong, Heesang³, Go, Huijae⁴, Lee, Juhee⁵, Ahn, Joseph^{6*}

¹Graduate Student, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University

²Student, Department of Architectural Engineering, Hoseo University

³Student, Department of Architectural Engineering, Hoseo University

⁴Graduate Student, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University

⁵Student, Department of Architectural Engineering, Hoseo University

⁶Assistant Professor, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University

Abstract : In recent years, the design of buildings is changing from formal to creative and freeform. Accordingly, the scale of construction technology is changing to architectural design and construction of irregular buildings. Using the FDM method, which is one of the 3D printing technologies, it is possible to manufacture various forms of irregular formwork inexpensively and quickly compared to the existing formwork, and it seems to be able to solve the manpower problem. Using a 3D printer, the PLA filament formwork is produced in the form of a cylinder and a rectangular cuboid, and the usability of the PLA filament formwork is confirmed by examining the compression strength test and the degree of deformation and reusability over 28 days of age. Different sizes of additional specimens are also conducted according to the size. As a result of the experiment, it was confirmed that the filament formwork itself has about 3~4MPa strength. As a result of reviewing data through existing linear studies and experiments, it is appropriate to use more than 60% infill, and it is advantageous in terms of strength. As a result of cutting and dismantling the filament formwork, the surface is very clean and there is no damage, so it can be reused.

Keywords : 3D Printer, Permanent Formwork, PLA Filament, Compressive Strength

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 건축물의 디자인이 자유롭고 창의적인 형태를 갖는 비정형 형태로 변하고 있는 추세이며, 세계적으로도 점차 비정형 건축물의 설계 및 시공 기술 등이 그 나라의 과학, 기술, 문화, 경제를 가늠하는 척도로 자리 잡아가고 있는 실정이다. 기존의 비정형 건축물의 거푸집은 목재와 철재, EPS (Expanded poly styrene form)을 이용하여 시공하였다. 목재 거푸집은 단가가 저렴하고 제작시간이 짧지만, 다양한 형

상의 가공이 어렵고, 재사용의 한계점이 있으며, 철재 거푸집은 컴퓨터 기술을 이용하여 절단하기 때문에 다양한 형상을 보다 정밀하게 가공할 수 있으나, 제작시간이 길고 단가가 높다. 또한 관련 기술자들의 노령화로 인력 문제가 심각한 상태이다. 이러한 문제점들을 해결하고 건설 산업의 발전을 위한 기술로 3D 프린팅 기술이 주목받고 있다. 3D 프린팅 기술은 미래 기술로 각광받는 산업이며, 제조업, 의료, 자동차, 항공, 군사, 건설 등 다양한 산업으로 확산되고 있다 (Fig. 1). 아래 (Fig. 2)는 1997년부터 2016년까지 전 세계에서 3D 프린터에 대한 간행물의 성장 동향이며, 이렇듯 최근 급격하게 3D 프린터에 대한 관심이 늘어나고 있음을 알 수 있다. 하지만 세계적으로 3D 프린터 시장에 대한 관심이 늘고 사업 규모가 확장되고 있지만 안전보건공단 조사 자료에 의하면 국가별 시장 현황을 보면 미국이 36%, 독일 11.2% 한국은 4.1%의 수준에 불과하다(Park, 2018).

* **Corresponding author:** Ahn, Joseph, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University, 20, Hoseo-ro79beon-gil, Asan, 31499, Republic of Korea

E-mail: josephahn@hoseo.edu

Received November 13, 2020: **revised** December 7, 2020

accepted December 14, 2020

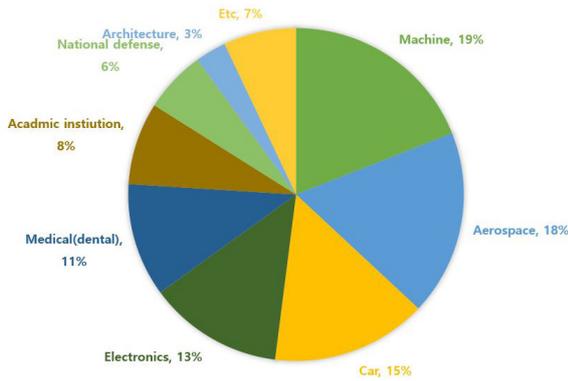


Fig. 1. 3D printer market (Wobblers Associates, 2017)

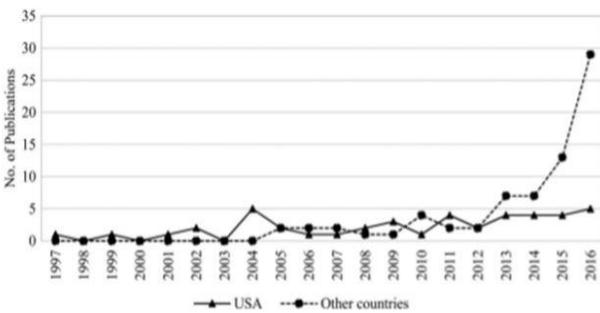


Fig. 2. CoMParison of Growth Trends in U. S. and All National Publications (Park, 2018)

Song (2018)에 의하면 해외 사례를 예시로 구조적 안전성으로 인해 건축물을 3D 프린트하는 경우에는 한 방향의 비정형성만으로 형태를 가지는 한계점이 있으며, 구조적 보강이 현실적으로 필요하다고 설명하고 있다. 또한 비정형 거푸집은 일회성, 비용 등 환경적이나 경제적으로 단점이 있으며, 이를 해결하기 위한 방안으로 3D 프린터를 이용해야 하며, 비탈형 거푸집으로 해체하지 않고 마감재 그대로 활용하는 방식이 필요하다고 제안하고 있다.

본 연구는 선행 연구 고찰과 기술동향분석을 통하여 다양한 형상을 제작할 수 있는 3D 프린터의 FDM (Fused deposition modeling) 기술을 사용하여 실험체를 출력하며, PLA (Polylactic Acid) 재료를 기반으로 친환경적이며, 후 가공이 용이한 비탈형 거푸집을 제작하고 압축강도 실험을 통하여 강도적인 측면을 확인하고 타설 시 거푸집의 변형 정도를 측정하여 재사용성이 가능한지에 대한 여부를 확인하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 3D 프린터 FDM 방식을 이용하여 PLA 재료 기반의 원기동형과 직육면체 형태의 비탈형 거푸집을 제작하고, 압축강도 실험을 통하여 강도적인 측면과 타설 시 거푸집의 변형 정도를 측정하여 PLA 소재의 거푸집의 강도 및

재사용성 가능 여부에 대한 연구를 범위로 하였다.

본 연구는 다음과 같은 순서로 진행하였다.

1. 비탈형 거푸집 제작 및 3D 프린터 기술, 선행연구 자료를 고찰하고 제작에 필요한 3D 프린터와 재료를 선정한다.
2. FDM 방식의 3D 프린팅 기술을 통하여 실험체를 출력한다. 실험은 총 3차에 걸쳐 실험을 진행하며 1차 실험은 필라멘트 거푸집 파괴 실험, 2차 실험은 비탈형 거푸집 파괴 실험, 3차 실험은 필라멘트 실험체 파괴 실험으로 진행한다.
3. 출력 전 예비 출력 실험을 통하여 3D 프린터의 정상 작동 여부를 확인하고 설정값을 조정하여 출력물의 하자가 없도록 한다.
4. 제작한 실물 모형을 실험실로 운반하여, 압축강도와 변형률에 대한 실험을 진행한다.
5. 측정 데이터를 분석하여 필라멘트로 제작한 비탈형 거푸집에 대한 사용성 여부를 확인한다.

2. 3D 프린터 예비적 고찰

2.1 3D 프린터 FDM 기술

건축 분야에 활용되는 3D 프린팅 기술은 FDM (Fused deposition modeling), SLS (Selective laser sintering), LOM (Laminated object manufacturing)의 기술이 있으며, 본 연구에서 사용한 FDM 기술을 분류하면 <Table 1>과 같다.

FDM 방식은 3D 프린터 출력 방식 중 가장 기본적인 방식으로, 고체로 된 재료에 열을 가하여 녹인 후 겹겹이 쌓아

Table 1. 3D Printer FDM technology

Type	Method	Related figure
	Cartesian	
Fused Deposition Modeling (FDM)	Mendelian	
	Delta	

올리는 적층 방식으로, 전문 인력이 필요 없으며 장비와 재료가 저렴하다는 장점이 있으며 FDM 방식은 크게 3가지로 분류된다.

카르테시안 방식은 베드가 X,Y축으로 이동하면서 노즐이 Z축으로 움직여 적층하는 방식이며, 델타방식은 베드가 Z축으로 내려가면서 노즐이 X,Y축으로 이동하면서 적층하는 방식이다.

델타방식은 노즐이 X,Y,Z축 세 방향으로 움직이며 적층하는 방식이다. 카르테시안(XY-Z)방식은 축의 이동성 때문에 다른 방식에 비하여 움직임이 적기 때문에 필라멘트 안착이 잘 되며 출력물의 정교함이 높다. 하지만 진동과 소음 등이 있으며 출력 속도가 다소 느리다는 단점이 있다.

멘델(XZ-Y) 방식은 3D 프린터의 초기 출력 방식이며, Y축으로만 움직이기 때문에 단면을 채우는 과정에서 베드가 많이 움직이기 때문에 출력물이 영향을 쉽게 받아 정교함이 떨어진다. 델타(XYZ)방식은 세 개의 기둥과 노즐이 연결되어 모두 움직이는 출력 방식이다. 빠른 출력과 색의 혼합이 장점이지만, 출력의 정교함이 떨어진다는 단점이 있다. 본 연구에서는 가장 많이 사용되며 출력물의 정교함을 고려하여 카르테시안 방식을 사용하였다.

2.2 3D 프린터 재료 물성표

3D 프린팅 소재 시장은 플라스틱, 금속, 세라믹 및 기타로 분류되고 있다. <Fig. 3>에 의하면 시장 점유율의 40% 이상인 소재는 플라스틱이며, 플라스틱 소재는 3D 프린팅 소재 중 비교적 다른 소재에 비해 단가가 저렴하고 저온에서도 쉽게 녹아 제품을 만드는 것이 가능하다. 이중 PLA (Polylactic Acid)는 가장 널리 사용되는 플라스틱 필라멘트 소재이며, 우수한 밀착성, 감소된 수축률, 고밀도 및 비틀림 저항성이 우수한 것이 특징이다. 또한 재료가 친환경적이며 땅이나 물속에 방치할 경우 자연적으로 썩어 없어지는 점을 이용하여 다양한 산업에서 많이 이용되고 있다(Jeong, 2018). FDM 방식에서 사용할 수 있는 재료들의 물성표를 확인하고 인장 강도(MPa)와 휨 강도(MPa)와 I-zod(J/m) 특성을 구분하여 강도측면과 충격 버팀 정도를 고려하여 재료를 선정하였다<Table 2>.

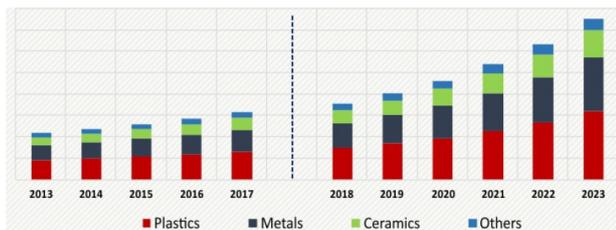


Fig. 3. Global 3D printing market according to material type (Frsot & Sullivan, 2017)

Table 2-1. Material properties of 3D printer

Material properties			
Type	tensile strength (MPa)	I-zod (J/m)	flexural strength (MPa)
PLA	53	16	60
PETG	50	85	71
Nylon	85	106	73
Carbon	56	33.3	89
Conductive ABS	45	85.2	37
ABS	79	20	47

※ PLA : Polylactic acid
 ※ PETG : Polyethylene terephthalate glycol
 ※ ABS : Acrylonitrile butadiene styre

Table 2-2. PLA filament properties

	Typical Value	ASTM Method
Physical Properties		
Specific Gravity	1.24	D792
MFR,g/10min (210℃, 2.16kg)	7	D1238
Melt Density (g/cc)	1.08 at 230℃	
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break, psi (MPa)	7700(53)	D882
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8700(60)	D882
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	500(3.5)	D882
Tensile Elongation, %	6.0	D882
Notched Izod IMPact, ft-lb/in (J/m)	0.3(16)	D256

본 연구에서는 건설폐기물의 절감을 위한 친환경적 소재이며, 수축률과 비틀림 저항성도 강도적인 측면에 이점이 있을 것이라 판단되어, 3D 프린터의 재료 중 PLA 필라멘트를 이용하여 연구를 진행하였다.

2.3 선행연구 고찰

Kim (2017)은 3D 프린팅을 이용한 비정형 비탈형 거푸집을 제작하여 실험을 진행하였으며, 다양한 형태로 제작이 가능하다는 것을 확인하였고, 거푸집의 측압을 검토한 결과 안전성 또한 확인하였다. 재령 28일간 육안으로 관찰 결과 형태변화가 없는 것을 확인하였으며 압축강도 실험에서 평균 22.9MPa의 실험 결과가 나왔다.

Kim (2017)은 해외 사례 조사를 통하여 3D 프린팅 건축 특성을 분석하여 3D 프린팅 기술을 활용한 시공 방식이 경제적 측면에서 이점이 있을 것으로 예상하고 있으며, 형태적 측면에서는 자유롭게 디자인할 수 있을 것으로 보고 있다. Nam (2018)은 FDM 방식의 3D 프린터로 적층 출력된 폼라이너의 적교이방성 물성치를 실험하였으며, ABS와 PLA 폼라이너를 사용하여 실험을 진행하였다. ABS는 Infill 간격 9mm 이하부터, PLA는 Infill 간격 12mm 이하부터 사용성 기준을 만족하는 결과를 보여주었고, Infill 밀도는 30~35% 정도를 권장하고 있다.

Ahn (2020)은 S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술 EPS 거푸집 제작 공법을 개발하고 제작 프로세스를 제시하였으며, S-LOM 방식의 3D 프린팅 기술을 활용할 경우 약 57.4%의 제작시간 단축 효과가 있음을 제시하고 있다.

Lee (2018)은 LOM 방식의 3D프린터를 이용한 비정형 콘크리트 부재 생산 프로세스를 제시하였고, Mock-up test를 통해 타당성을 검증하였으며, 기존 강재 거푸집을 이용한 시공기술 대비 약 47.8% 제작시간 단축 효과와 56.2%의 비용 절감 효과를 제시하였다.

기존 선행연구 고찰 결과 3D 프린터로 제작한 거푸집은 자유로운 형태로 출력할 수 있으며, 제작시간의 단축 및 측압에 대한 안전성을 검증하였다. 하지만 PLA 필라멘트 재료를 이용한 비탈형 거푸집 실험에 대한 연구가 추가적으로 필요함에 따라 본 연구에서는 PLA 필라멘트를 이용한 거푸집 실험을 진행하였다.

3. 3D 프린터 계획

3.1 거푸집 제작 프로세스 및 계획

아래 <Fig. 4>은 거푸집 제작 프로세스이다. 3D 프린터로 출력할 실험체를 모델링 한 후 출력을 진행하고, 출력된 실험체를 확인한다. 이상이 있을 경우 노즐온도, 배드온도, 속도의 설정값을 다르게 적용하고 재 출력한다. 출력 실험체에 안착 및 단층 발생 현상 등의 이상이 없을 경우 실험실로 운반하여 실험을 진행하며, 실험 도중 오류가 발생하면 실험체에 대한 오류 발생 여부를 파악하고 모델링을 수정하고 오류가 발생하지 않으면 실험 데이터를 검증한다.

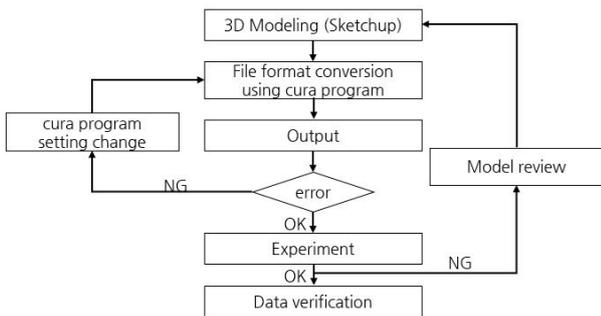


Fig. 4. Formwork experiment process

3.2 3D 프린터 FDM 방식 기술을 활용한 거푸집 제작

본 연구에서는 FDM 출력 방식을 이용한 거푸집 모델링을 진행하였다<Fig. 5>. 3D 프린터는 G-code 파일 형식을 지원하였기에, Sketch-up 프로그램을 STL 형식의 파일로 저장하여 Cura 프로그램을 통하여 G-code 형식 파일로 전환 후 출력을 실행하였다.

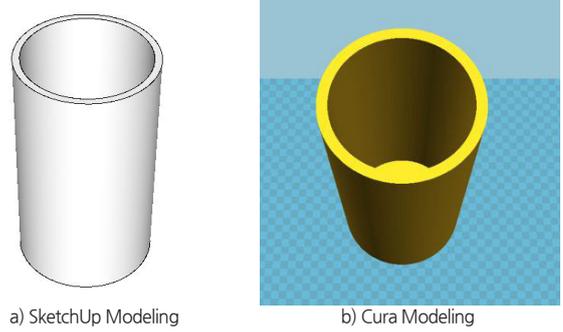


Fig. 5. 3D Printer Modeling

필라멘트 특성을 고려하여 초기 프린터 설정 값을 통하여 출력 실험을 진행하였다<Fig. 6>.

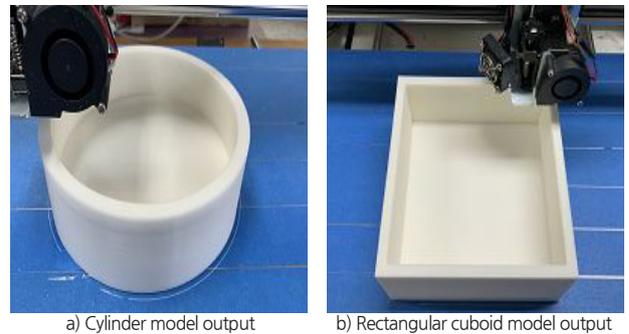


Fig. 6. 3D Printer model output

실험체 출력도중 실험체가 출력 라인에서 이탈하여 형태가 온전하지 않거나, 출력도중 단층 현상이 발생하여 출력물의 형태가 일정치 않고, 모서리 부분이 뜨는 현상이 발생하였다. 이러한 현상이 발생한 이유는 3가지로 확인하였다.

1. 노즐온도: 노즐온도가 너무 높을 경우 필라멘트가 노즐 입구에 달라붙어 출력 라인에 제대로 안착하지 못했다. 이를 해결하기 위하여 적정온도 210℃로 설정하여 출력한 결과 출력 라인에 제대로 안착하는 것을 확인하였다.

2. 배드온도: 배드온도가 낮을 경우 필라멘트가 제대로 안착하지 못하고 출력 라인에서 이탈하거나 노즐입구의 열에 의하여 뜨는 현상이 발생하였다. 배드온도는 60℃로 설정하여 출력하였다.

3. 출력속도: 출력속도가 너무 느리면 기존 출력된 필라멘트가 굳지 못하면서 기존 출력중인 선이 노즐부분에 붙어 이동하였으며, 속도가 빠를 경우 안착 전에 출력 라인에서 이탈하였다. 속도는 55m/s로 설정하여 출력하였다.

적정 출력 값을 조정하여 출력한 결과 출력이 정상적으로 이루어졌으며, 품질 또한 기존 출력물들 보다 향상되었다.

출력 기준은 다음 <Table 3>과 같다.

Table 3. Polylactic acid filament properties

Attribute	Value
Printer	Pinter 544 / C600
Filament	PLA
Nozzle temperature	210°C
Infill	20 / 40 / 60 / 80 / 100 %
Bed temperature	60°C
Speed	55m/s

4. 거푸집 실험

4.1 거푸집 실험 개요

실험은 총 3차 실험으로 Infill 정도와 실험체 크기에 따라 진행되었으며, 1차 실험은 필라멘트 거푸집 자체만을 파괴하여 필라멘트 거푸집이 강도를 갖는지 확인하는 압축강도 실험이며, 2차 실험은 필라멘트 거푸집에 콘크리트를 타설하여 거푸집과 콘크리트의 파괴 지점을 알아보고 강도를 측정하는 압축강도 실험이다, 3차 실험은 필라멘트로만 채워진 공시체의 강도 및 압축된 정도를 확인하는 실험으로 진행되었다. 1차, 2차 실험 진행 중 나온 데이터와 선행 연구의 결과에 의해 일부 실험체는 Infill의 범위를 조정하여 실험을 진행하였다. 아래 <Table 4>는 실험체 제작 계획이다.

Table 4-1. First experiment filament formwork production plan

No.	Size(mm)	Printer	Infill(%)	Form
A-1	150x150x300	P	20	C/R
A-2	150x150x300	P	40	C/R
A-3	150x150x300	P	60	C/R
A-4	150x150x300	C	80	C/R
A-5	150x150x300	C	100	C/R
B-1	180x180x330	P	40	C/R
B-2	180x180x330	P	60	C/R
C-1	200x200x350	C	40	C/R
C-2	200x200x350	P	60	C/R

※ C : Cylinder
 ※ R : Rectangular cuboid

Table 4-2. Second experiment filament formwork production plan

No.	Size(mm)	Printer	Infill(%)	Form
A-1	150x150x300	P	20	C/R
A-2	150x150x300	P	40	C/R
A-3	150x150x300	P	60	C/R
A-4	150x150x300	P	80	C/R
A-5	150x150x300	P	100	C/R
B-1	180x180x330	P	40	C/R
B-2	180x180x330	C	60	C/R
C-1	200x200x350	P	40	C/R
C-2	200x200x350	P	60	C/R

※ C : Cylinder
 ※ R : Rectangular cuboid

Table 4-3. Third experiment filament formwork production plan

No.	Size(mm)	Printer	Infill(%)	Form
A-1	150x150x300	P	40	C/R
A-2	150x150x300	P	60	C/R
B-1	150x150x300	C	40	C/R
B-2	150x150x300	P	60	C/R
C-1	150x150x300	P	40	C/R
C-2	180x180x330	C	60	C/R

※ C : Cylinder
 ※ R : Rectangular cuboid

실험체는 출력실에서 3D 프린터를 이용하여 출력 후 실험실로 운반하여 실험하였으며, 콘크리트 배합 표는 다음 <Table 5>와 같다. 콘크리트 타설 시에 KS F 2403 '콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법'에 따라 제작하였으며, 실험을 통하여 압축 강도를 확인하였다. 공시체는 기건 양생하였으며, 재령 28일에 파괴하였다. 압축강도 시험 방법은 KS F 2405 '콘크리트 압축강도 시험방법'을 따랐으며 공시체는 시험 전 캐핑기를 통하여 표면처리 후 측정하여 사용하였다.

Table 5. Concrete mixing table

fck (MPa)	Slump (mm)	W/B (%)	Water (kg)	Cement (kg)	Fine aggregate (kg)	Coarse aggregate (kg)
20.08	120	50	30	46.5	72.6	112.3

4.2 거푸집 변형률 측정



Fig. 7. Filament formwork curing

<Fig. 7>는 필라멘트 거푸집에 콘크리트를 타설하여 재령 28일 동안 변형이 있는지를 확인하는 과정이며, 7일 간격으로 거푸집의 변형이 있는지 측정하여 평균값을 구하였다. 거푸집의 변형정도는 아래 <Table 6>로 나타내었다.

Table 6. Form deformation rate

infill	Before		After	
	Cylinder (mm)	Retangular cuboid (mm)	Cylinder (mm)	Retangular cuboid (mm)
20	150.65	150.65	150.65	150.65
40	150.66	150.66	150.66	150.66
60	150.65	150.65	150.65	150.65
80	150.66	150.66	150.66	150.66
100	150.56	150.56	150.56	150.56

거푸집의 변형 정도를 측정한 결과 변형이 일어나지 않았으며, 0.5mm~0.6mm의 오차 값은 3D 프린터의 노즐 출력 크기인 0.6mm의 사이즈에 의하여 오차가 발생한 것으로 확인되었다. 하지만 타설 중 Infill 20%와 40%의 경우 물 빠짐 현상이 발생하였으며, 콘크리트 층과 거푸집 층이 일치하지 않았다. Infill 60%부터는 물 빠짐 현상이 일어나지 않았으며, 물 빠짐 현상은 바닥 부분에서 일어났다(Fig. 8).

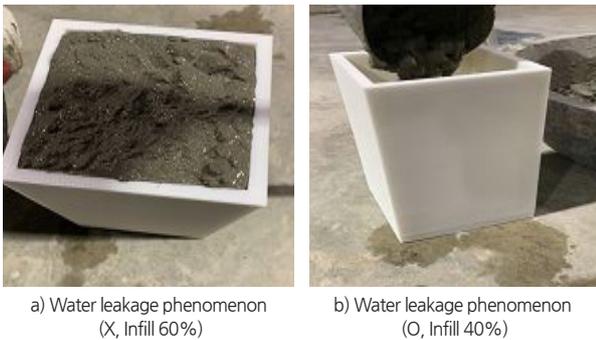


Fig. 8. Water leakage phenomenon of filament formwork

4.2 압축강도 실험

Table 7. Compressive strength experiment of filament form

infill	Cylinder			Rectangular cuboid		
	150	180	200	150	180	200
20	7.13	-	-	7.14	-	-
40	9.37	10.02	10.11	9.62	10.25	10.07
60	12.97	14.26	14.93	13.11	14.92	14.45
80	15.12	-	-	15.02	-	-
100	20.05	-	-	20.32	-	-

〈Table 7〉와 〈Fig. 9〉는 1차 실험인 필라멘트 거푸집 압축강도 실험에 대한 데이터이다. 150mm Infill 20% 실험체 실험결과 7.13MPa/7.14MPa 지점에서 파괴되었으며 Infill 40% 실험체는 8.01MPa/8.09MPa에서 으스러지는 소리가 발생하였으며 9.37MPa/9.62MPa에서 파괴되었다. Infill 60%는 12MPa/12.11MPa 지점에서 압축이 시작되었으며, 12.97MPa/13.11MPa에서 파괴되었다.

Infill 80% 실험체는 13.07MPa/13.15MPa에서 서서히 압축되기 시작하였으며 15.12MPa/15.02MPa에서 파괴되었다. 원기둥형의 경우 일부면이 갈라지면서 파괴되었고 직육면체의 경우 압축되면서 일부면이 터져버렸다. Infill 100% 실험체는 17MPa/17.08MPa 지점에서 갈라지는 소리가 발생하였으며, 18.97MPa/19.01MPa에서 압축이 빠르게 시작되었으며, 20.05MPa/20.32MPa 지점에서는 으스러지는 소리와 함께 일부면이 갈라지면서 변형이 심하게 일어났다. 180mm 크기의 실험체는 Infill 40% 실험체는 10.02MPa/10.25MPa 지점에서 파괴되었으며 Infill 60%는 12.04MPa/12.18MPa 지점에서 압축이 시작되었으며, 14.26MPa/14.92MPa 지점에서 파괴된다. 200mm 크기의 실험체는 10.11MPa/10.07MPa에서 파괴되었으며 Infill 60%의 경우는 12.03MPa/12.06MPa에서 압축이 서서히 압축이 시작되었고, 14.93MPa/14.45MPa에서 파괴되었다. Infill 실험 결과 Infill 60% 미만은 물 빠짐 현상과 콘크리트 층이 일정하지 않았으며 강도 역시 많이 부족한 것으로 나타났으며 Infill 60% 이상은 물빠짐 현상이 없으며, 압축이 일어나면서 일정강도를 버티는 모습을 보였으며, 크기가 크면 변형부분이 좀 더 높은 지점에서 일어났지만 파괴되는 지점은 비슷하였다. 거푸집 제작 시 중요한 요인으로는 Infill의 채움 정도이며, 적정 Infill은 60% 이상을 사용하는 것이 바람직한 것으로 확인되었다.

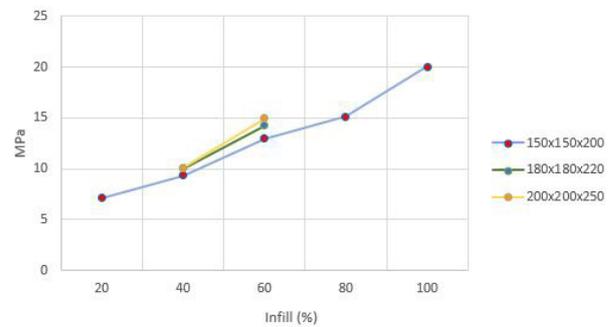


Fig. 9-1. 1st experiment coMParison (cylinder)

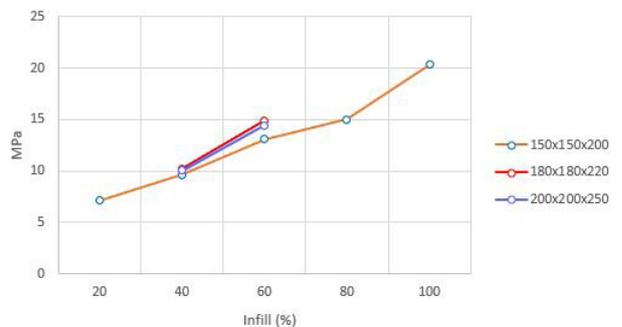


Fig. 9-2. 1st experiment coMParison (rectangular cuboid)

Table 8. Non-stripping form compressive strength experiment

infill	Cylinder			Rectangular cuboid		
	150	180	200	150	180	200
20	20.18	-	-	20.85	-	-
40	20.24	21.08	20.74	21.66	22.25	22.28
60	25.31	26.51	24.11	25.7	26.56	26.13
80	27.55	-	-	28.05	-	-
100	30.56	-	-	29.44	-	-

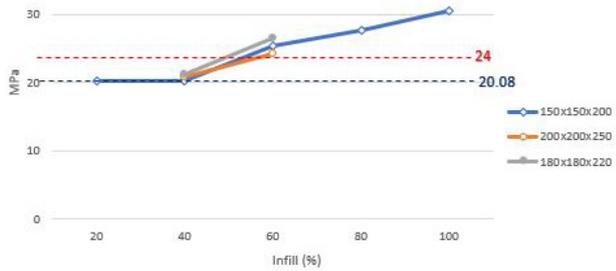


Fig. 10-1. 2nd experiment coMParison (cylinder)

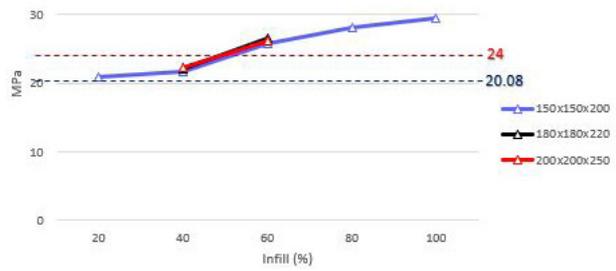


Fig. 10-2. 2nd experiment coMParison (rectangular cuboid)

〈Table 8〉과 〈Fig. 10〉는 2차 실험인 비탈형 거푸집의 압축강도 실험에 대한 데이터이다. 결과 비교는 원기둥형/직육면체로 비교하였다.

150mm Infill 20% 실험체 결과 20.18MPa/20.85MPa에서 파괴되었다. 하지만 17MPa/17.16MPa 지점에서 거푸집이 먼저 파괴되었으며, 이후 콘크리트가 파괴되었다. 기존 거푸집 선행실험과 콘크리트 공시체 파괴데이터를 비교해보면 콘크리트가 하중을 버텨므로써 거푸집이 힘을 더 견딜 수 있던 것으로 판단된다. Infill 40% 실험체는 18.32MPa/18.94MPa에서 거푸집이 파괴되었으며, 20.24MPa/21.66MPa에서 콘크리트가 파괴되었다.

Infill 60% 실험체는 16MPa/16.33MPa 지점에서 거푸집이 압축되기 시작했으며, 21.02MPa/21.33MPa 지점에서 거푸집 일부가 파괴되었으며 23.11MPa/23.42MPa에서는 콘크리트가 파괴되기 시작하였다. 이후 25.31MPa/25.7MPa에서 거푸집과 콘크리트가 파괴되었다.

Infill 80% 실험체는 16.88MPa/16.92MPa 지점에서 거푸

집이 압축되기 시작하였으며, 20.76MPa/20.81MPa 지점에서 급격히 변형되었으며 24.43MPa/24.66MPa에서 속도가 줄어들었다. 이후 27.55MPa/28.05MPa에서 거푸집 일부가 파괴되었으며, 내부에 있던 콘크리트도 완전히 파괴되었다.

Infill 100% 실험체는 16.67MPa/16.92MPa 부분에서 서서히 압축되었으며 22MPa/22.73MPa 부분에서 갈라지는 소리가 들렸으며, 압축이 진행되다 25.56MPa 부분에서 원기둥형 실험체의 바닥부분은 떨어져나갔으며 중앙부분이 볼록하게 부풀기 시작하였고, 30.56MPa/29.44MPa에서는 부분 부분이 갈라지기 시작하였으며, 내부를 확인한 결과 콘크리트에 균열이 발생하였다. 180mm 실험체 Infill 40% 실험 결과 18.28MPa/18.56MPa 지점에서 거푸집이 파괴되기 시작하였으며, 21.08MPa/22.02MPa에서는 거푸집과 콘크리트가 파괴되었다. Infill 60%는 16.76MPa/16.89MPa에서 압축이 시작되었으며 26.51MPa/26.56MPa에서 콘크리트와 거푸집이 파괴되었다. 200mm 실험체 실험 결과 Infill 40%는 18.69MPa/18.88MPa 지점에서 거푸집이 파괴되기 시작하였으며 20.74MPa/22.28MPa에서 거푸집과 콘크리트가 파괴되었다. Infill 60%는 17.32MPa/16.5MPa 지점에서 압축되기 시작하였으며 서서히 압축이 진행되다 22.84MPa/21.14MPa 지점에서 거푸집 일부가 파괴되었으며 24.11MPa/ 26.13MPa 지점에서는 거푸집과 콘크리트가 파괴되었다. 〈Fig. 10〉에 파랑선은 콘크리트 공시체 실험강도이며, 빨간 선은 시공시 콘크리트 타설 강도인 24MPa를 표시하여 비교하였다.

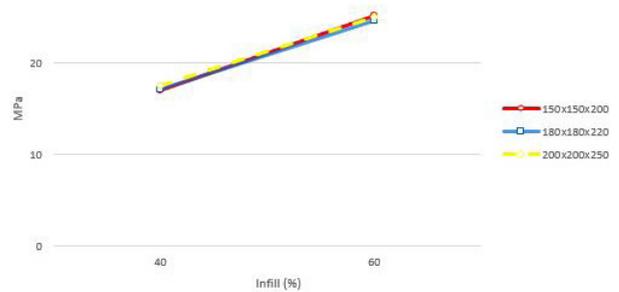


Fig. 11-1. 3rd experiment coMParison (cylinder)

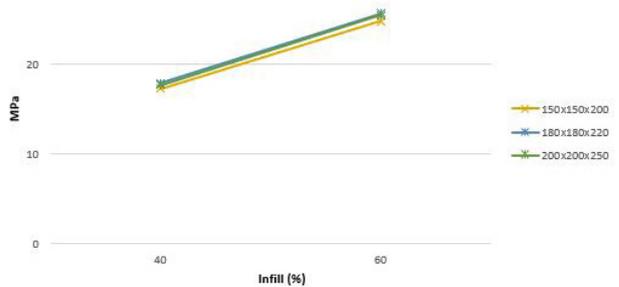


Fig. 11-2. 3rd experiment coMParison (rectangular cuboid)

Table 9. Filament compressive strength experiment

infill	Cylinder			Retangular cuboid		
	150	180	200	150	180	200
20	-	-	-	-	-	-
40	16.97	17.1	17.57	17.24	17.88	17.66
60	25.18	24.68	24.97	24.76	25.61	25.46
80	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-

〈Table 9〉와 〈Fig. 11〉는 3차 실험인 필라멘트로만 이루어진 실험체의 압축강도 실험에 대한 데이터이다. 1차 및 2차 실험과 선행연구 고찰을 통하여 40%와 60%의 실험체만 제작하여 실험을 진행하였으며, 150mm 실험체의 Infill 40%는 16.97MPa/17.24MPa에서 변형이 시작되었다. 이후 압축 약 28MPa까지 진행시킨 결과 약간의 균열이 있었으나 파괴된 곳은 없었다. Infill 60%는 24.76MPa/25.61MPa에서 변형이 시작되었으며, 약34MPa 까지 압축시킨 결과 Infill 40%는 균열이 있었지만 Infill 60%는 균열이 없었으며 파괴된 곳 없이 압축되기만 하였다. 180mm 실험체 실험 결과 Infill 40%는 17.1MPa/17.88MPa에서 변형이 시작되었으며, 균열이 발생하지 않았다. Infill 60%는 24.68MPa/25.61MPa에서 변형이 시작되었다. 200mm 실험체 실험 결과 Infill 40%는 17.57MPa/17.66MPa에서 변형이 시작되었으며 Infill 60%는 24.97MPa/25.46MPa에서 변형이 시작되었다.

4.3 분석 및 고찰

실험분석결과 3D 프린터의 출력조건은 중요한 요소로 작용한다. 노즐온도와 배드온도가 높을 경우 필라멘트가 출력라인에서 제대로 안착하지 못하고 이탈하는 현상이 발생하거나 모서리가 뜨는 현상이 발생하며, 너무 낮을 경우도 동일한 현상이 발생한다. 이에 따라 재료의 특성을 고려하여 적절한 설정이 필요하며, 속도가 너무 빠를 경우 출력물의 품질이 떨어지거나, 안착이 되지 않아 강도에도 영향을 줄 수 있다. FDM 방식의 프린터 2대를 사용하여 출력하였으며 프린터 성능의 차이로 인해 실험결과 값의 미세한 오차 값이 발생하였지만 크게 영향은 없는 수준이었다. Infill 60% 미만의 경우 물빠짐 현상이 발생하였으며, 콘크리트층과 거푸집층이 동일하지 않았으며, Infill 60%이상의 경우 물빠짐 현상이 발생하지 않았다. 선행 실험과 본 연구 실험결과 Infill 정도는 60% 이상이 적합한 것으로 판단된다.

콘크리트를 타설 한 후 거푸집의 변화를 측정된 결과 변화는 없었으며 출력사이즈와 오차가 생긴 0.5~0.6mm는 3D 프린터 노즐 사이즈로 인한 오차 값으로 확인되었다. 1차 실험결과 필라멘트 거푸집도 약 3~4MPa의 강도를 견딜 수 있으며, 크기에 따라 미세하게 차이가 있는 것을 확인할 수

있었다. 2차 실험결과 비탈형 거푸집은 Infill이 높을수록 콘크리트 공시체와 비교하였을 경우 압축강도를 많이 견딜 수 있는 것으로 확인되었으며, Infill 60% 이상의 경우 시공시 사용되는 24MPa의 강도보다 높게 측정되었다. 3차 실험결과 필라멘트로만 이루어진 실험체의 압축강도 데이터에서는 하나의 실험체를 제외하면 균열이나 파괴가 일어나지 않았으며, 실험 종료 후 육안으로 확인한 결과 단순하게 압축된 형태였다. 압축 후 변형정도를 확인해보니 9~11mm 정도 압축되었다. 오류가 발생한 실험체 및 일부 실험체를 절단하고, 파괴된 실험체의 거푸집 표면을 확인한 결과 콘크리트와 잘 분리되었으며, 표면이 매우 깨끗한 점과 별다른 손상이 없던 점을 고려하면 재사용 역시 가능할 것으로 확인하였다.

5. 결론

본 연구는 다양한 형상의 제작의 필요성과 친환경적이고 후가공이 유리한 PLA 필라멘트를 이용하여 비탈형 거푸집을 원기둥과 직육면체 형태로 Infill의 %로 나누어 제작하고 압축강도 실험하였다. 1차 실험은 필라멘트 거푸집 파괴로 Infill 20%, 40%의 경우 60%의 비해 3~4MPa 정도 작게 나왔으며 변형 없이 파괴되었으며, Infill 60% 이상의 경우 압축이 진행되며 갈라지는 현상이 지속적으로 발생한 후 파괴되었다. 이를 통하여 Infill 60% 미만을 사용은 부적합하며, 60% 이상을 사용해야한다.

2차 실험은 거푸집에 콘크리트를 타설하여 비탈형 형태로 압축강도 실험을 진행하였다. Infill 20%와 40%의 거푸집이 먼저 파괴되고 콘크리트가 강도를 버티는 것을 확인하였으며, Infill 60% 이상의 경우 거푸집이 변형이 일어나면서 콘크리트의 파괴가 늦어지는 것을 확인하였다.

콘크리트를 타설 전, 후를 비교하였을 경우 거푸집의 변형이 없었으며, 실험 직후 거푸집 표면과 실험체 탈형 결과 표면이 매우 깨끗하고 굽거나 파손된 흔적이 없는 것으로 보아 재사용 역시 가능할 것으로 보인다. 실험 결과 Infill 60% 미만의 경우 물 빠짐 현상으로 인해 타설 층이 일정하지 않았으며 강도역시 낮게 측정되었다. Infill 60% 이상의 경우 물 빠짐 현상이 없었으며 타설 층이 동일하였고, 60% 미만 보다 높은 강도를 견딜 수 있는 점을 고려하여 Infill 60% 이상을 사용해야 한다. 거푸집을 절단하여 탈형시키거나 파괴된 실험체의 거푸집 표면을 확인한 결과 표면이 매우 깨끗하고 파손정도가 없던 것을 보아 재사용 역시 가능할 것으로 보인다. 연구의 실험을 통하여 3D 프린터로 비정형 형상의 출력물을 비교적 쉽고 고품질의 출력이 가능하다는 것을 확인하였으며, 압축강도 실험결과 비탈형 거푸집으로 사용할 경우 강도가 높게 측정됨에 따라 구조적인 측면

에서도 이점이 있는 것으로 확인하였다. PLA 필라멘트의 특성과 시공 후 합판 거푸집과 비교하였을 경우 파손정도가 매우 적어 시공성과 마감성에도 이점이 있다. 본 연구의 한계점으로는 3D 프린터 출력사이즈 한계로 인한 대형사이즈의 실험을 진행하지 못하였으며, 실험에 사용된 출력물은 각 Infill 별 1개의 실험체를 사용하였으며, 콘크리트를 동시에 타설하지 못했다는 점이다. 추후 연구를 통하여 실험체의 수를 늘려 정확한 평균값을 확인하고, 다양한 형태의 실험체를 제작하여 형태에 따른 강도를 확인해야 하며, 축압실험을 통하여 콘크리트 타설 시 축압 기준을 만족하는지에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 성과는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2019R1F1A1058866).

References

- Ahn, H.J., Lee, D.Y., Ji, W.J., and Cho, H.H. (2020). "Development of Method for Manufacturing Freeform EPS Forms Using Sloped-LOM Type 3D Printer." *Korea Institute of Building Construction a collection of dissertations at and academic conference*, pp. 171-182.
- Jeong E.K., and Kim. S.H. (2019). "Research on the types of materials used in 3D printers and the properties of harmful substances." Occupational Safety and Health Research Institute.
- Jeon, K.H., Park, M.B., Kang, M.K., and Kim, J.H. (2012). "A Study on the Development of System Platform and Construction Materials for Automation Deposition Construction System." *Korea Institute of Construction Engineering and Management a collection of dissertations at an academic conference*, pp. 209-210.
- Kim, J.S., and Yoon, J.E. (2017). "A Study on the Characteristics of 3D Printing Architectur." *Korean Institute of Spatial design, a collection of dissertations at an academic conference*, pp. 110-111.
- Kim, H.R., Ahn, H.J., Cho, H.H., and Kang, K.I. (2020). "A Study on the Inter-module Coupling Method for EPS Concrete Form Produced By Sloped-LOM Type 3D Printing Technology." *Architectural Institute of Korea a collection of dissertations at and academic conference*, pp. 89-99.
- Lee, D.Y., Lee, D.M., Cho, H.H., and Kang, K.I. (2018). "The Production Process and Mock-up Test of Freeform Concrete Segments using LOM type 3D Printer." *Korea Institute of Building Construction a collection of dissertations at and academic conference*, pp. 89-99.
- Nam, H.W., and Hong, K.J. (2018). "Safety and serviceability of form-liners manufactured by a FDM 3D printer." *Korea Society for Advanced Composite Structures a collection of dissertations at and academic conference*, pp. 54-64.
- Park, H.M. (2018). "Development of the Mix Proportions of Concrete for the Extruder of Construction 3D Printers." Kookmin University paper of masters degree.
- Park, H.M., and Choi S.H. (2019). "Development of the Mix Proportions of Concrete for the Extruder of Construction 3D Printers." *Korean Concrete Society, a collection fo dissertations at an academic conference*, pp. 503-504.
- Song, J.Y., and Yoo, H.Y. (2018). "A Case Study of International Architecture Using 3D Printer." *A Collection of papers for the Autumn Conference of the Korean Architectural Associatio*, pp. 601-605.
- Seo, J.S., Lee, B.C., and Kim, Y.Y. (2019). "The Effects of Void Ratio on Extrudability and Buildability of Cement-based Composites Produced by 3D Printers." *Korea institute for Structural Maintenance and Inspection a collection of dissertations at and academic conference*, pp. 104-113.

요약 : 최근 건축물의 디자인이 정형에서 벗어나서 창의적인 형태를 갖는 비정형 건축물로 변하는 추세이며, 이에 따른 건설기술의 척도가 비정형 건축물의 건축 설계, 시공 등으로 바뀌고 있다. 3D 프린팅 기술 중 하나인 FDM 적층방식을 이용하여 다양한 형태의 비정형 거푸집을 기존 거푸집에 비하여 저렴하고 빠르게 제작할 수 있으며, 인력문제 등을 해소할 수 있을 것으로 보인다. 3D 프린터를 이용하여 PLA 필라멘트 비탈형 거푸집을 원기둥형과 직육면체 형태로 제작하여 재령 28일의 기준을 통한 압축파괴 실험과 변형정도, 재사용성 여부 등을 검토하여 PLA 필라멘트 거푸집에 대한 사용성을 검증하였다. 추가적으로 실험체의 크기를 다르게 하여 크기에 따른 실험도 진행하였다. 실험결과 필라멘트 거푸집 자체가 약3~4MPa의 강도를 갖는 것으로 확인되었으며, 기존 선행연구와 실험을 통한 데이터를 검토한 결과 Infill 60% 이상으로 사용해야 적절하며, 강도적인 측면에서도 유리한 것으로 확인되었다. 필라멘트 거푸집의 절단, 탈형 결과 표면이 매우 깨끗하고 손상이 없어 재사용도 가능할 것으로 기대된다.

키워드 : 3D 프린터, 비탈형 거푸집, PLA 필라멘트, 압축강도