

<기술논문>

압출식 적층제조 기술을 적용한 건축 3D 프린팅 운영절차의 설계 및 검증

박진수¹ · 김경택^{2*}

¹한국생산기술연구원 연구원 · ²한국생산기술연구원 수석연구원

Construction 3D printing SoP Design and Verification Using Material Extrusion Additive Manufacturing Technology

Park, Jinsu¹, Kim, kyung taek^{2*}

¹Researcher, Korean institute of industrial technology

²Primary Researcher, Korean institute of industrial technology

Abstract : Additive manufacturing (AM, also known as 3D printing) technology gets attention for various effects in the construction industry. It reveals abilities of process automation, high traceability of resource management, construction period precision improvement, and worker safety. However, unlike the existing construction technology, the development of AM construction process causes trial errors and unpredictable accidents. In the present study, the construction AM process is designed for on-site construction, and it performs with empirical tests. Also, we analyzed the causes of qualitative experimental results.

Keywords : Additive Manufacturing, 3D printing, Process Design, Construction 3D printing

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물을 위한 시공과정은 다양한 유형의 자원투입과 장기간의 절차를 갖는 프로젝트 기반의 생산체계를 갖고 있다.(Kim et al., 2019; Go et al., 2019) 이러한 체계는 시공전 주기에 폭넓은 관리 및 추적이 요구되며, 시공과정의 연속성과 예측도 향상을 위한 데이터분석(Kim & Kwon, 2019; Heeyeon et al., 2020), 시공기술, 현장/시공관리시스템(Kim et al., 2020) 등의 기술개발 필요성이 강조된다. 연구개발결과는 설계된 건축물과 시공 결과물사이의 정보 연결성을 향상시킨다. 3D 프린팅(Additive manufacturing; AM) 기술은 가상의 설계정보를 기반으로 원자재를 투입하여 실물의 상품으로 재구성하는 기술적 맥락을 갖고 있다. 특히, 소비자가 요구하는 상품을 제조(시공)하기 위해 다양한 공정을 요구되던 기존의 생산(시공)체계를 단일의 공정으로 구현 가

능한 기술이다. AM기술은 3차원의 상품을 2차원 또는 1차원의 적층 경로로 분할하여 층간 결합을 통해 3차원으로 재구성하는 과정을 갖고 있어, 상품의 디자인 자유도가 높고, 제조(시공)과정의 추적이 용이하다. AM기술의 특성과 시공 기술개발의 요구가 부합하여(Sakin & Kiroglu, 2017) 연구/개발자들에 의해 건설 산업에 AM기술을 적용하고 기존의 시공방법을 대체하는 건축물 시공기술 개발을 진행하고 있다(Buswell et al., 2018; Duballet et al., 2017). 특히 자동화 가능한 시공과정으로 인해 작업자 의존도를 축소하고 시공 과정의 데이터 추적, 작업자 안전향상 등의 가치를 실현 가능할 것으로 기대하고 있다. 다만 AM 기술의 건설 산업진입은 아직 품질과 기준이(Choi & Park, 2020) 미비한 상황으로 제한적으로 실현되고 있으며, 반복적인 실험을 통한 기술의 표준화와 검증연구가 진행중에 있다. 본 연구에서는 압출식 적층제조(Material Extrusion Additive Manufacturing; MEX-AM)기술의 건설 산업적용을 위해 현장에서 건축물을 직접 시공하는 범위에서 시공운영절차를 설계하고 실증실험을 통해 확인된 문제점과 해결을 통해 현재구현기술을 점검한다.

* **Corresponding author:** Kim, kyung taek Korea institute of industrial technology, 156, Geatbeol-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

E-mail: kkt@kitech.re.kr

Received November 22, 2021: **revised** December 22, 2021

accepted January 3, 2022

2. 이론적 배경

2.1 압출식적층제조기술

ISO/ASTM52900 표준분류에 의해 적층제조기술은 7가지 특징을 갖는 기술로 구분 가능하다. 다양한 적용소재와 3차원 구현능력에 따라 분류되는 각 기술에서도 압출식적층제조기술은 유동성을 갖는 소재를 활용하여 3차원의 적층경로를 따라 제품을 재구성하는 흐름을 갖고 있다. <Fig. 1>은 이러한 압출식 적층제조기술의 특징을 보여주는 도식화 하여 나타낸 모습이다.

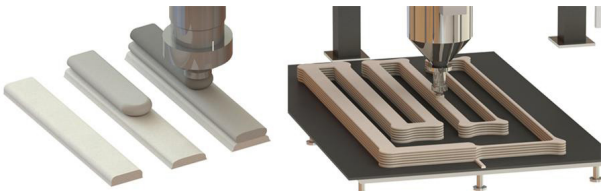


Fig. 1. Material extrusion additive manufacturing

2.2 건축적층제조기술동향

Park et al. (2019)에 의하면 현재 적층제조기술을 활용한 건축 상품을 제조방법은 직접 건축물을 형성하거나, 거푸집을 제조하여 건축소재로 캐스팅한 제품을 실제제품으로 활용하는 방법이 제안되고 있다. 다만, 상품의 크기에 의해 구현기술의 한계가 존재하여, 작은 규모의 건축 상품을 제조하기 위해 정밀도가 높은 1회성 혹은 다회성의 거푸집을 형성하고 시멘트기반의 소재를 투입하여 상품을 생산하는 기술을 적용할 수 있다. 다만 어느 정도 규모가 있는 건축부재 또는 시설물 등의 제조는 직접 건축소재를 투입하여 제품을 제작하는 방법이 거푸집생산보다 공정, 비용, 시간적으로 유리한 것을 확인할 수 있다. 직접 건축물을 적층제조하기 위해서 요구되는 시스템은 크게 건축소재를 적층 공간에 압송하기 위한 압출시스템과 ISO 8373과 같이 공급된 재료를 3차원의 공간에 좌표로 이송하는 로봇 시스템이 존재한다. 다만 도입단계의 건축적층제조기술은 반복적인 실험을 통해 최적화가 이뤄지고 있으며 앞서 기술한 장점을 구현하기 위해 디지털공간과 물리적 공간을 통합하여 관리하는 요소기술이 적용 및 검증되고 있다.

3. 압출식 적층제조기술 시공운영절차 설계

3.1 IDEFO 기반 적층시공운영 설계

3.1.1 건축 적층제조기술 운영절차

ISO/ASTM 52900 표준에 의해 분류된 AM공정의 절차 <Fig. 2>는 Pre-AM(A01), AM(A02), Post-AM(A03)으로 정의되며, 제품의 Inspection(A04)을 추가하여 구성된다. 각 단

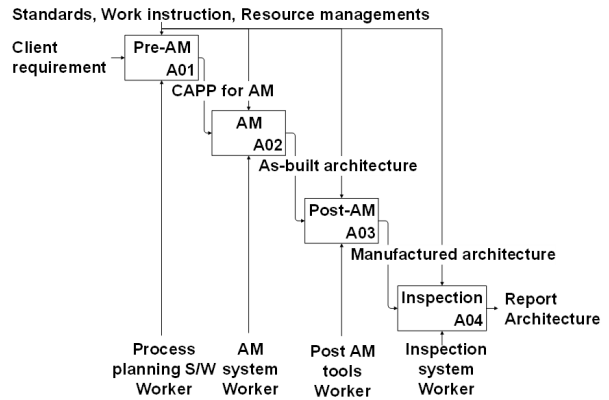


Fig. 2. Designed MEX-AM process

계는 상품을 실물로 구현하는 과정에서 물리적 상태를 기준으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 건축물을 적층 시공하기 위해 <Fig. 2>에서 제안된 절차를 따라 각종 투입장비, 자원, 인력 및 작업데이터를 형성 및 관리한다. 특히, Pre-AM 단계에서는 소비자 요구에 맞추어 건축물을 설계하고, 전체 시공과정의 작업지침(SoP)과 시공비용 분석 및 공정이 계획된다. AM 단계에서는 설계된 작업지침에 따라 건축물을 구현하고 Post-AM단계와 Inspection단계에서 요구 강도를 만족하도록 경화된 건축물의 치수측정을 통해 품질을 검증한다.

3.1.2 건축 적층제조를 위한 Pre-AM 단계

Pre-AM 단계의 세부적인 과정은 <Fig. 3>으로 구성된다. 고객 요구에 따른 건축물의 기초디자인이 시공 및 건축물의 성능, 규제, 품질 등을 만족하기 위해 최적설계(A011) 된다. 최적 설계된 건축물은 시공과정의 작업지침설계의 기준으로 활용된다. 특히, 시공기간, 건축물의 투입소재, 장비, 작업자 등의 비용을 분석하고 전략에 따라, 건축물의 품질을 조정하여 현장 환경변수를 고려한 시공 작업 모델을(A012) 형

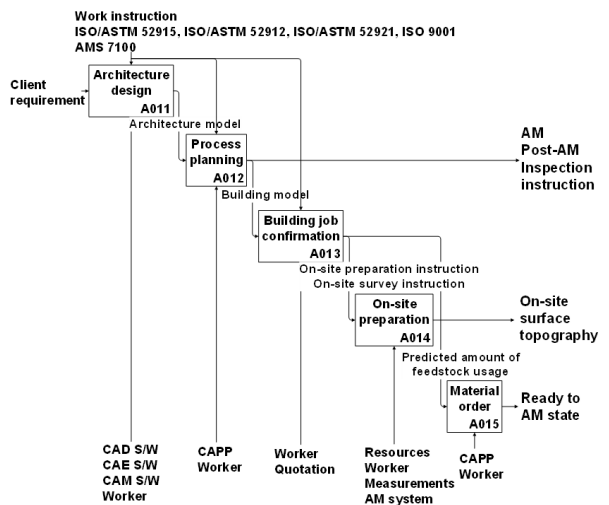


Fig. 3. Designed Pre-AM process

성한다. 설계된 모델은 소비자의 (A013)결정에 의해 투입비용 및 시공기간 조정 및 최종 선정되며 적층 시공을 위한 갠트리 장비의 투입과 건축소재 압출 시스템의 투입 시점을 (A014)결정한다. 갠트리 장비의 설치 이후, 시공환경의 정보를 획득하여 앞서 설계된 작업 모델에 최종 반영하게 되며, 추가 자원투입 및 건축물의 최적설계 변화와 소비자의 재확인인이 이뤄진다. 투입 시스템들의 설치와 작업 모델의 최종확정 이후, 건축 소재의 신선도를 위해 원소재가 (A015)준비되며, AM시공의 진행이 가능하다. 일반적인 AM제조를 위한 Pre-AM 단계에서는 투입장비의 최적모델링, 소재선정, 비용, 납기 등의 예측이 이뤄진다. 하지만 건설 산업에 적용된 건축물 적층 시공 Pre-AM 단계는 시공현장의 정보를 확보하여, 적층 제조(시공) 작업 모델을 더욱 강건하게 설계하는 과정이 필요하다.

3.1.3 건축 적층제조를 위한 AM 단계

(Fig. 4)는 AM 단계를 나타낸 것으로 압출시스템에 투입된 건축소재의 수화반응 등에 의해 적층 시공과정에 건축물의 품질과 건전성의 제어가 적극적으로 개입되어야 한다. 특히 압출 형성된 건축소재가 층을 형성하고 다음 층과의 충분한 접착력을 구현하기 위한 최대 허용시간이 발생한다 (Sanjayan et al., 2018). 반대로, 수화 반응에 의해 적층형상을 유지하기 위한 충분한 강도가 형성되는 시간을 관리하여 연속적인 적층 시공을 위해서는 적절한 시간제어가 필요하다(Roussel, 2018). 이러한 건축소재의 유변학 특징은 건식 건축소재와 물이 혼합된 이후(A021) 적극적인 시간제어가 요구된다. 본 연구에서는 Lee et al. (2019)에 의해 설계된 습식 혼합된 건축소재를 적용하였다. 배합된 건축소재는 압출 볼륨을 확인하여 AM 공정에 투입된다.

갠트리 시스템은 앞서 설계된 건축물의 작업 모델을 적용

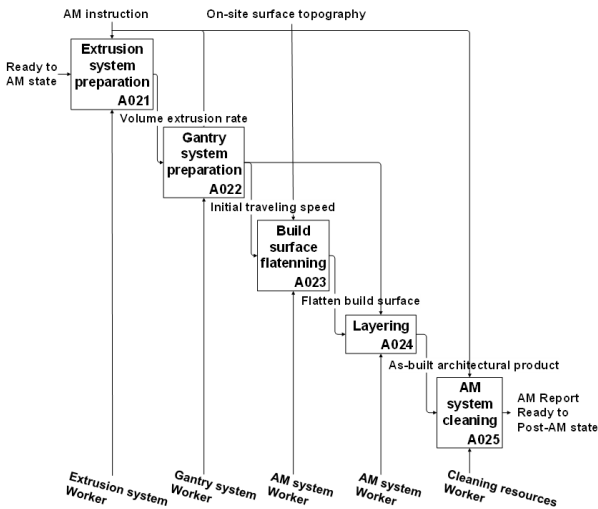


Fig. 4. Detail process of designed AM stage

하여 적층 시공 이전에 설계된 건축물과 물리공간좌표를 일치시키고, 적층경로(tool-path) 예비테스트(A022)를 통해 작업 모델의 오류를 점검한다. 압출되는 소재의 단위시간당 볼륨(체적유량)과 갠트리 시스템의 검증 이후, 실제 적층 형상의 폭과 두께 적합성을 평가한다. 평가에는 테스트 모델을 적용하여 파라미터를 선택하고 압출시스템의 소재공급속도와 갠트리 시스템의 이송속도를 조정한다. 다만, 초기 레이어의 적층 과정(A023)은 현장시공의 범위에서 갠트리 시스템과 다른 시공현장표면 평탄도 확인이 필요하다. 낮은 평탄도로 인해 높은 두께편차가 발생하는 영역은 갠트리 시스템의 속도조절을 통해 극복가능하다. 평탄 적층 표면에 연속 적층(A024)을 통해 건축물을 최종 완성하고 투입된 장비 및 자원의 유지보수(A025)를 통해 AM단계가 마무리 된다.

3.1.4 건축 적층제조를 위한 Post-AM 단계

적층 시공된 건축물의 강도는 수화반응이 발생하며 시간 경과(A031)에 따라 증가한다. Post-AM 단계에서는 7일의 양생(A031)이후 건축물 내부에 추가 구조물을 구성하여 강화하고(A032) 추가 양생을 진행한다. 추가 양생기간 동안 건축물의 균열, 치수 등을 확인하고 적층 상품의 품질을 확인하여 AM적층시공을 완료(A033)한다.

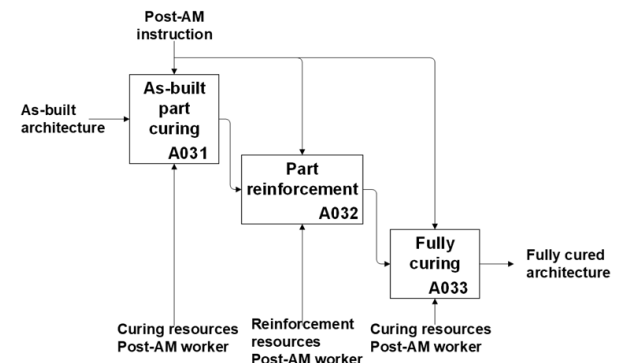


Fig. 5. Detail process of designed Post-AM stage

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Pre-AM

적층제조를 위한 건축 상품은 ISO/ASTM 52921 표준규정에 따라, 가상의 데이터가 식별 가능한 형태로 형성 및 관리된다. (Fig. 6)과 (Table 1)은 설계된 건축 상품을 기반으로 제안된 시공 작업 모델을 나타낸다. 표준규정에 의해 건축물을 현장공간에 배치하고 제조이력 및 실질적인 위치를 추적 관리하기 위한 지점을 발생할 수 있다. 특히, Pre-AM 단계에서 제조과정의 결함을 방지하기 위해 모델을 최적화하여 분할된 건축 제품을 구성하도록 설계되었다. 건축소재의 건조과정에서 발생하는 수축으로 인한 균열을 방지하기 위해

분할위치가 조정되어 <Fig. 6> b), c), d)가 제안되었다. 다만, 시공현장 표면의 낮은 평탄도로 인한 적층 두께 높이가 편차는 <Fig. 6> a)을 적용하여, 적층 시공 초반에 평탄표면을 형성한다. 이러한 디지털 기반 제조 이력(데이터)을 통해 AM 공정의 결과로 제조된 각 건물에 대한 데이터 추적이 가능하다.

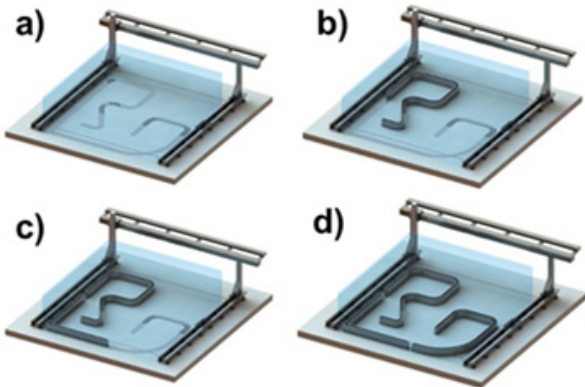


Fig. 6. a) Flattening layer, b) Architecture 1, c) Architecture 2, d) Architecture 3

Table 1. Description of Fig. 6 (ISO/ASTM 52921 based)

Architecture model locations, orientations				
Name	Location (X, Y, Z) m	Reorientation (A, B, C) deg	Initial direction	Volume (m ³)
a)	0, 0, 0	0, 0, 0	Z	-
b)	-2.6, 1.2, 0.5	0, 0, 0	Z	20
c)	-2, -2.3, 0.5	0, 0, 0	Z	25.5
d)	2.8, -1.8, 0.5	0, 0, 0	Z	11

건축시공을 위해 개발된 적층 제조 시스템은 시멘트 기반의 소재를 혼합·압출하는 압출시스템과 압출된 건축소재를 적층 경로를 따라 이송해 입체 공간을 이동하는 갠트리 시스템 두개로 분류되었다. 압출소재의 흐름은 <Fig. 7>와 같으며, 원재료가 압출소재(모르타르)로 혼합되어 적층 시공에 투입되었다. 적용된 압출소재는 Lee et al. (2019)에 의해 제안된 것으로, 몰드를 이용하여 소재를 경화시킨 결과 약 66MPa의 압축강도가 확인되었으며, 적층제조에 적용할 경우, 약 30%의 압축강도를 기대할 수 있다. 압출소재는 모터에 의해 회전하는 오거-스크루 압출펌프에 투입되어 공급 호스를 통해 25mm 노즐을 관통하여 적층 시공현장에 투입된다. 이때 압출 시스템을 관통하는 모르타르의 고점도 유동은 관련계통에 마찰 및 회전 부하, 수화반응으로 인한 열을 발생한다. 발생한 열은 건축소재의 수화반응을 가속화한다. 다만, 열에 의한 온도상승은 정상 상태에 도달하여 일정하게 유지된다. 본 실험에서는 <Fig. 7> b), c) 계통을 순환하는 온도 안정화가 적용되었다. 온도가 안정화된 압출소재의 체적

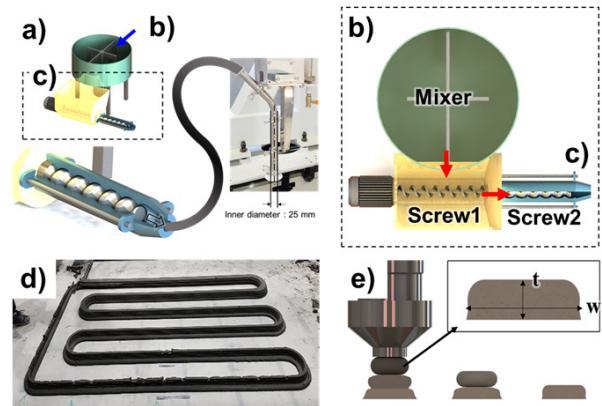


Fig. 7. a) Extrusion system, b) Feedstock mixer, c) Motor screw & Auger screw, d) Test architecture, e) Extrusion model

유량을 기준으로 모터의 RPM을 조정한다. 또한, 정상상태가 확보된 소재를 기준으로 적층두께 및 압출소재의 적층 성능을 확인하기 위해서 <Fig. 7> d)와 같이 실험체를 사전 적층 시공하여 적합한 적층 레이어의 폭(w)과 두께(t)를 확인한다. 실험체의 부적합 형상과 관련하여 Park et al. (2020)에 의하면 표면형상과 치수를 정성적으로 판단하여 적층건전성을 예측할 수 있다.

갠트리 시스템은 직교 좌표계를 활용하여 적층경로를 구현하기 위해 <Fig. 8>와 같이 설계 및 제작(Gudel, Korea)되었으며 적층제조 가능한 부피 10 × 10 × 3m³를 갖고 있다. 또한, 고하중의 부하조건과(250kgf, 400mm/s, 1000mm/s²) 높은 반복위치 정밀도 구현(0.08mm)을 위해 랙-피니언 구동부품을 갖고 2개의 Y축, 단일 X축, Z축 이송으로 구성되었다. 실험실 수준의 적층장비는 가설공사를 통해 보호되며, Pre-AM 단계에서 시공비용/주기 예측을 위해 설치시간 및

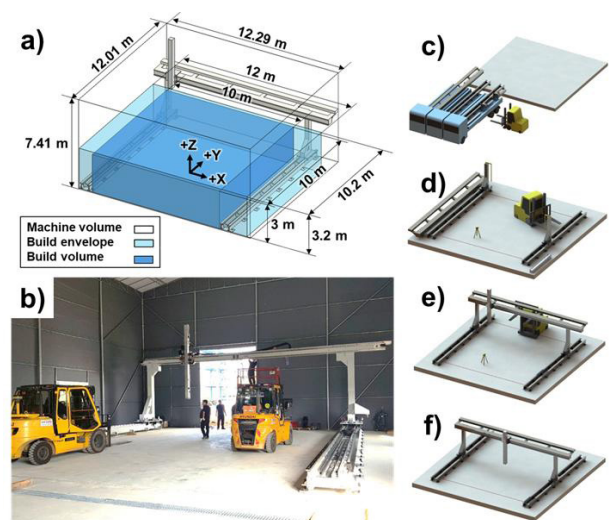


Fig. 8. a) Designed gantry machine, b) Installation on-site, c) Machine unloading, d) Y-axis placement, e) X/Z-axis installation, f) Electronic system installation

투입자원의 분석이 필요하다. 본 연구에 활용된 갠트리 장비는 <Fig. 8> c) 와 같이 단위 모듈로 분해된 각 축이 시공현장으로 이송되어 하차되고, 설치지침에 따라 <Fig. 8> d) 와 같이 Y축 평행도를 조정하고 <Fig. 8> e) 와 같이 X/Z 축 설치과정에 요구 정밀도를 만족할 수 있도록 한다. 설치과정은 오전 상차기준 시공현장의 거리에 따라 다르게 확인되나, 통상 2일의 시간으로 예측할 수 있으며, 제어설비를 위한 배선 작업 등에 의해 총 3일의 설치기간이 소요된다.

4.2 AM

<Fig. 9>는 <Fig. 6> a)을 구현하기 위해 시공표면과 갠트리 장비의 높이편차를 측정된 결과이다. 확인된 편차 데이터는 <Fig. 3> A022에 의해, 적층경로를 추적하여 1m 간격으로 측정했으며 <Fig. 9> a)와 같이 취득 데이터를 주수로 관리하여 실제위치를 추적할 수 있다. 측정값에 의해 식별된 최대 높이 편차는 시공표면의 가장 높은 지점을 기준으로 약 54mm인 것으로 확인되었다. 이러한 높이 편차는 <Fig. 7> d) 에서 최적화된 적층두께 10mm의 5.4배의 차이로, 편차 발생구간에서 압출 부피를 고정하고, 갠트리 장비의 이송속도를 두께배율 편차에 따라 조정하여 평탄적층을 적용했다.

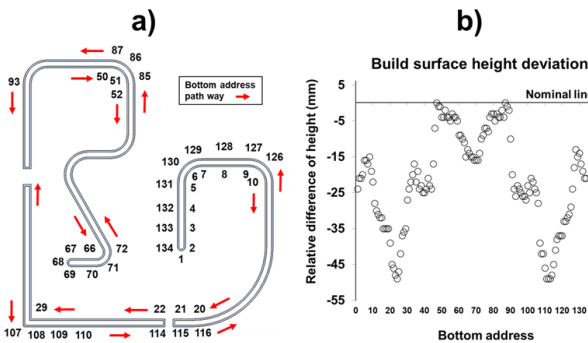


Fig. 9. (a) Architecture model tool-path (initial layer)
(b) Build surface height deviation distribution

앞서 제안된 적층제조시스템과 작업 모델을 기반으로 AM 시공의 결과, <Fig. 10> a)와 같이 평탄 적층이 완료되었다. 다만, 형성된 적층 레이어 에서 불균일한 형상을 확인할 수 있었다. <Fig. 10> c)와 같이 적층 형성된 압출소재가 낮은 강도와 중력에 의한 형상의 변형이 발생한 것으로, 높이 편차가 큰 영역에서 현상이 도드라지게 나타난다. 특히 적층 표면에 둥근 모양의 불안정한 형상은 <Fig. 10> d) 와 같이 이후 적층 레이어의 낮은 치수 정밀도를 형성하여 적층 제조된 건축물의 품질을 저해한다. 다만, 설계(7분)보다 긴 시간(30분)의 압출소재 경화시간을 갖고, 부적합 적층형상의 강도를 증가하여, 3개 층의 연속적층으로 평탄도 확보가 가

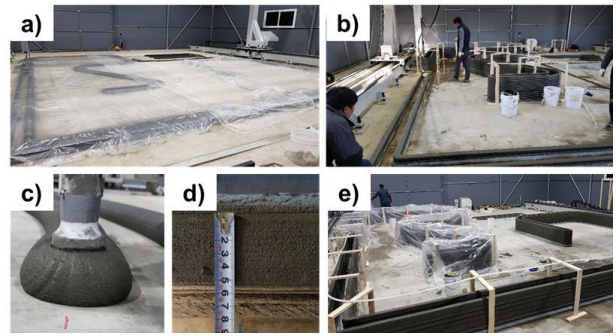


Fig. 10. a) Flattening layer, b) Architecture 1, c) Unstable layer, d) Dimensional error of unstable layers, e) Architecture 2 & 3

능했다. 높은 높이편차가 극복된 적층 표면에 빌드 모델의 적층 경로를 적용하여 <Fig. 10> b), e) 와 같이 연속적층 시공되었다. 실험당시 영하의 온도에 근접하는 환경에서 반복적층을 위한 강도를 확보하기 위해 <Fig. 10> e)와 같이 간이로 가습환경을 형성하여 7일간 양생되었다.

4.3 Post-AM

적층 형성된 건축물 일부의 표면 높이분포를 계측한 결과, <Fig. 11> a)와 같은 편차 그래프를 확인하였다. 평탄면의 적층을 통해 적층표면의 높이편차가 감소되었으며, 건축물 높이편차는 최대 2mm로 확인되었다. 낮은 시공현장의 표면 평탄에 대응하기 위해, 적층 이송속도를 조절하고, 연속적층을 통해 높이편차를 감소시킨 효과가 확인된다. 육안검사를 통해 연속적층과정에서 <Fig. 11> c)와 같이 건축물의 표면에서 일정주기의 패턴을 확인했다. 이는 펌프로 소재를 직접 압출하는 시스템에서 공급경로길이 증가에 따라 나타나는 현상이다. 공급되는 소재가 시간경과에 따라 수화반응이 발생하고, 시멘트 입자 간의 결합으로 인한 유동성능 변화가 나타난다. 특히 거친 입자가 공급호스 내부 마찰을 증가시키고 관내 온도향상 및 유속을 감소시켜 노즐에서의 압출 부피변화가 나타난 것으로 예측할 수 있다. 이러한 현상은 새롭게 배합된 압출소재가 투입되어 압출성능을 회복하는 과정으로 인해 주기성을 갖고 나타난다. 앞서 적층 표면의 높이편차를 저감하기 위해 평탄면을 형성하고 연속적층을 진행했다. 이러한 과정에서 형상의 변형을 최소화하기 위해 24시간의 경화가 이뤄졌으며, 모사실험을 통해 단락된 적층면의 성능을 예측하기 위한 테스트 모델이 <Fig. 11> d) 와 같이 형성되었다. 평탄면을 적층하고, 경화된 적층표면 위로 형성된 형상물은 약한 외력(사람의 체중으로 밀어내는 수준)에도 파괴되는 낮은 접합강도가 구현됐다. 이러한 현상은 정성적인분석으로 실험과정에서 약 9시간에서 12시간 사이의 적층에서는 문제가 되지 않았으나, 향후 적층제조과정의 안전과 관련하여 정량적인 분석이 필요하다.

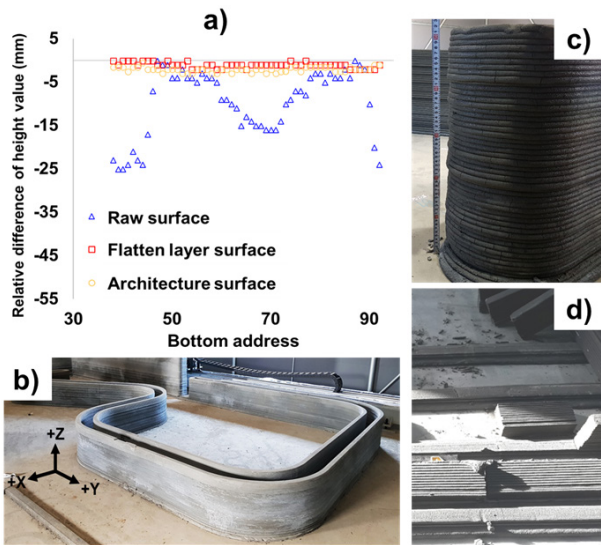


Fig. 11. a) Height deviation distribution, b) Architecture 1, c) Surface wave, d) Crack of long-term layer

4.4 건축 3D프린팅 운영

제안된 3D프린팅 운영절차를 실제 적층제조과정에 적용하여 문제점을 정성적으로 확인한 결과, 높이편차와 각종 설비는 시공운영 절차를 강화하고 제조시스템의 자동화 수준을 향상하여 극복할 수 있을 것으로 기대한다. 다만, 물리적인 한계로 대형화된 3D 프린팅에서 소재공급을 위한 경로길이 증가는 소재물성 예측의 변수를 유발하고, 제어된 실험환경이 아닌 실제 현장으로 장비가 투입될 경우, 온도와 습도 같은 제어하기 어려운 변수가 공격적으로 발생할 것이다. 따라서 시공환경에 유연하고 능동적인 적층제조를 위한 신중한 소재공급과 환경제어를 위한 연구가 필요하다.

5. 결론

건축 3D프린팅 기술로 건축물을 구현하기 위해 적층작업 모델을 설계 및 적용하여 실험실 환경에서 건축물의 적층 시공과정을 실증했다. 시공표면의 높이편차는 건축물의 치수부정합과 소재활용 시간예측을 저해하고 적층제조과정의 불확실성을 야기한다. 본 논문에서는 확인된 이슈를 해결하기 위해 시공표면에 주소를 부여하고, 갠트리장비 이송속도를 제어하여 평탄도 문제를 완화했다. 다만, 예측하지 못한 강도증가 시간이 요구되었으며 불연속적인 적층이 발생했다. 결과적으로 경험적인 실험과정을 통해 이슈를 해소했으나, 건축물의 품질을 향상시키고, 안전과 관련한 규제를 극복하기 위해서는 제안된 시공 작업 모델에서 다양한 정량 데이터를 기준으로 작업지침이 발생할 수 있도록 보완이 필요하다. 특히 적층 형상물을 가상공간에서 3차원으로 재구

성하여 설계된 작업 모델과 실시간 비교를 통해 제조과정의 건전성을 판단하고 누적하여, 적층 시공기술의 예측정밀도를 향상해야한다. 이러한 맥락에서 향후 연구에서는 적층 형상물의 실시간 모니터링 또는 3차원 스캐닝과 같은 데이터 획득기술을 통해 시공운영절차를 강화할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 도시건축사업(21AUDP-B121595-06) ‘소형 건축물 및 비정형 부재 대상 3D 프린팅 설계, 재료 및 장비 개발 과제’ 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Kim, Y.J., Yeom, D.J., and Kim, Y.S. (2019). “Development of construction duration prediction model for project planning phase of mixed-use buildings.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 18(6), pp. 586-598.
- Go, T.Y., Lim, T.K., and Lee, D.E. (2019). “Construction Process Modelling Method Improving the Traceability of ICT Applications.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 20(1), pp. 114-123.
- Kim, S.G., and Kwon, S.W. (2019). “Case Analysis on Application of Project Delay Analysis Method in Domestic Construction Project.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 20(6), pp. 98-106.
- Kim, K.Y., Kim, J.H., Seo, J.W., and Shim, H. (2020). “The Improvement of Point Cloud Data Processing Program For Efficient Earthwork BIM Design.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 21(5), pp 55-63.
- Kim, Y.P., Jeong, Y.H., and Lee, M.J. (2020). “Construction Lean Process Development and Application for Field Productivity Improvement.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 21(2), pp. 88-97.
- Sakin M., and Kiroglu Y.C. (2017). “3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM.” *Energy Procedia*, 134, pp. 702-711.
- Buswell, R.A., Leal, de Silva W.R., Jones S.Z., and Dirrenberger, J. (2018). “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research.” *Cement and Concrete Research*, 112, pp. 37-49.

- Duballet, R., Baverel, O., and Dirrenberger, J. (2017). "Classification of building systems for concrete 3D printing." *Automation in Construction*, 83, (August), pp. 247-258.
- Choi, H., and Park, J. (2020). "Technology Trend of Additive Manufacturing Standardization." *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute* 27(5), pp. 420-428.
- 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* 172, pp. 468-475.
- Roussel, N. (2018). "Rheological requirements for printable concretes." *Cement and Concrete Research*, 112, pp. 76-85.
- Lee, H., Kim, H.J., Moon, J.H., Kim, W.W., and Seo, E.A. (2019). "Evaluation of the mechanical properties of a 3D-printed mortar." *Materials (Basel)*, 12(24), pp. 1-13.
- Park, J., Lee, H., and Choi, H. (2020). "Buildability of mortar feedstock in material extrusion additive manufacturing." *Archives of Metallurgy and Materials*, 65(3), pp. 1069-1072.

요약 : 적층제조(AM, 3D프린팅) 기술은 건설업계에서 다양한 효과로 주목받고 있다. 특히 시공자동화, 자원관리, 시공기간 정밀도 향상, 작업자 안전 등의 문제점을 해소하는 능력을 기대하고 있다. 하지만, 적층 시공 과정은 축적된 데이터가 많은 기존 시공기술과 달리 성숙하지 못한 절차 및 시공방법으로 인해 시행착오와 예측이 어려운 사고를 유발한다. 본 연구에서는 현장 시공형 건설 AM 프로세스를 설계하고 실증을 위한 실험이 진행된다. 또한, 정성적인 실험결과와 원인 분석이 진행되었다.

키워드 : 적층제조, 3D 프린팅, 시공설계, 건축 3D 프린팅
