

<기술논문>

3D 프린팅을 통한 거푸집 제조 및 건축 상품 구현 - 제조인자예측과 실험을 통한 적용가능성 검증 -

박진수¹ · 김경택^{2*}

¹한국생산기술연구원 연구원 · ²한국생산기술연구원 수석연구원

Architectural Product and Formwork Manufacture using 3D Printing - Applicability Verification Through Manufacturing Factor Prediction and Experimentation -

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 is digitalized technology, making it easy to predict and manage quality and also, have design freedom ability. With these advantages, AM technology is applied to various industries. In particular, a method of manufacturing buildings and infrastructure with AM technology is being proposed to the construction industry. However, the application of AM technology is restricted due to problems such as insufficient history and quality of technology, lack of construction management methods, and certification of manufacturing products. Therefore, the manufacture of architectural products is implemented with indirect AM technology. In particular, it manufactures formwork using AM and injecting building materials to implement the architectural product. In this study, hybrid type material extrusion AM is used to manufacture large-sized formwork and implement building products. Moreover, we identify factors that can predict productivity and economic feasibility in the additive manufacturing process. As a result, design optimization results are proposed to reduce the production cost and time of architecture buildings.

Keywords : Additive Manufacturing Technology, 3D Printing, Atypical Formwork, Porous Architecture

1. 서론

1.1 연구배경

쾌속가공기술(Rapid Tooling; RT)과 적층제조(Additive Manufacturing, AM, 3D printing)기술은 비정형의 다품종 제품제조를 위한 산업(Ghaffar et al., 2018)에 적극적으로 활용되는 기술이다. 특히 AM기술의 비정형 디자인 구현, 비용 효율성, 빠른 조달시간과 같은 가치가(Buswell et al., 2018; Tay et al., 2017) 정제된 기존기술로부터 연속적인 혁신(Lee & Lee, 2020; Kim et al., 2013)을 일으키고 있다. 하지만, 짧은 역사로 인해 누적된 정보가 부족한 AM기술은 품질 불확

실성, 검증방법과 규제의 미비함으로(Choi & Park, 2020; Wi et al., 2020) 인해, 직접적인 산업진입에는 제약이 발생하고 있다. 이에 최근에는 대형 크기의 AM기술(Roschli et al., 2019)에서 불확실한 품질을 해소하고, 치수의 정합도 향상, 제조시간 축소 등의 이유로 기존의 RT기술이 혼합된 하이브리드 AM기술이 제안되고 있다. 간접적인 산업진입을 위해 현재 공급 가능한 AM기술 건축 상품 제작(Jeong et al., 2021)은 품질검증, 시공, 작업지침 등이 잘 정립된 콘크리트 캐스팅 기술을 병행하여 구현된다. 본 연구에서는 중대형 크기의 건축 상품을 적층제조하기 위해 필요한 인자를 분석하고 생산 효율증가를 위한 AM 적층 형상물의 최적 설계과정을 확인한다.

1.2 연구범위 및 방법

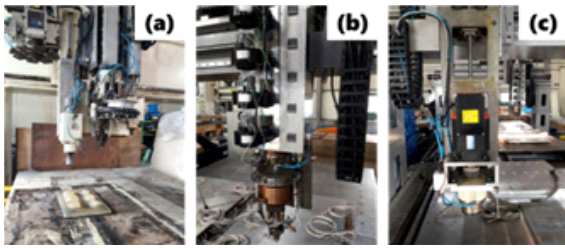
대형화된 폴리머 압출장치는 소형의 압출장치보다 압출 소재에 가열된 열의 양이 많다. 따라서 상온에 압출된 소재

* **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** -

accepted January 10, 2022

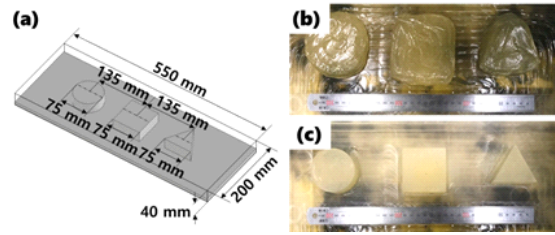


(a) 3 axis gantry system, (b) Polymer extrusion module, (c) Machining module

Fig. 1. Thermoplastic PLA based RT-AM hybrid machine

의 유동성으로 인한 변형이 나타나기도 한다. 가열된 열의 양을 냉각시키며 제조할 경우, 변형은 감소되지만, 제조시간이 증가한다. 따라서 제조시간을 단축하기 위해 낮은 치수정밀도를 갖는 제품을 제작한 뒤에 높은 치수정밀도를 갖는 CNC가공 시스템이 구성된 하이브리드 압출식(Material Extrusion; MEX) 적층제조방법이 제안되었다(Park et al., 2019). PLA (Polylactic Acid) 폴리머와 PLA-석회석 복합소재가 적용소재로 사용된다. PLA 폴리머는 열가소성 수지로, 녹은 상태의 원소재가 상온에서 고형으로 변화된다. <Fig. 1>은 구성된 하이브리드 AM 장비로 폴리머 압출 모듈과 CNC가공 모듈(RT)로 구성되어 있다. 펠렛 형태의 PLA 폴리머 원소재는 가압 펌프를 이용하여 보관영역에서 압출기로 공급되고 압출을 위해 예열 영역, 용융 영역, 노즐을 거친다. 압출 온도는 복수의 밴드히터를 이용하여, 압출유량에 알맞게 조정된다. 압출된 PLA 폴리머는 적층 제조공정과 CNC가공을 통해 최종 적층 형상물로 고정된 작업표면에 재생성되며, 가용 가능한 작업표면의 공간은 최대 $2.5 \times 1.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ 이다. PLA 폴리머 제품은 자체로도 상품이 될 수 있지만, 본 연구에서는 건축소재가 적용된 제품의 캐스팅과 생산성 인자를 확인하기 위해 실리콘 몰드(거푸집) 제작과정에 사용된다. 하이브리드 MEX-AM 시스템의 PLA 폴리머 압출 노즐 직경은 10mm, 적층 속도는 20mm/s로 설정되었으며, 8mm 절삭공구를 사용하여 최종 가공된다. 하이브리드 MEX-AM의 기하학적 성능을 검증하기 위해 <Fig. 2>와 같이 테스트 모델을 적층 형성했다. CNC가공(RT)을 빠르게 적용할 경우, 평균 표면 거칠기는 1.12~1.50mm이며, 높은 정밀도의 매끄러운 표면을 구현할 경우 표면 거칠기는 0.08~0.14mm로 확인할 수 있었다.

확인된 하이브리드 타입의 압출적층제조장비와 성능검증을 기반으로, MEX-AM 기술은 보로노이(Voronoi) 구조를 갖는 다공성 벽체 구조물과 기능이 부여된 조립체를 제조하는 범위로 활용성을 제한하여 사용한다. 제조된 벽체는 실리콘을 사용하여 캐스팅(Casting)을 위한 거푸집으로 활용된다. 생성된 거푸집에는 건축 소재를 투입하여 최종 건축물을 구현한다. 제조시간의 예측을 위해 설계된 건축 상품은 CAM



(a) CAD model, (b) AM part, (c) Machined part

Fig. 2. Test sample for hybrid MEX-AM machine

소프트웨어를 활용하여 제조경로를 추출한다. 제조경로는 통상 G-code로 표현할 수 있으며, 압출시스템이 움직이는 경로와 가공공구가 움직이는 경로를 확인할 수 있다. 이때 전체경로는 실제로 장비가 이송하는 물리량을 갖는 거리로, 제조과정에 입력변수로 활용된다. 더욱이 장비의 이송속도와 적층 두께와 같은 입력 파라미터는 생산속도에 영향을 미치는 인자로 적층상품의 품질과 함께 최적화가 필요한 변수이다. 다만, 상세한 관계식이 형성되지 않았을 경우, 적층상품의 체적을 기반으로 원소재 투입량과 제조 시스템 운영시간을 예측할 수 있다. 특히, 제조과정에서 최적화가 미비한 경우, 품질을 예측하기 어렵기 때문에, 부피기반의 시간 예측이 주요하게 작용한다. 본고에서는 건축 상품을 부피기반으로 인자를 계산하여 생성하고, 건축물의 적층제조과정에서 품질을 유지하면서, 건축 상품의 형상을 기준으로 디자인을 최적화하기 위해, 구현된 건축 상품을 적층경로의 길이를 분석하여 제조시간 감소방법을 제안한다.

2. 결과 및 고찰

2.1 하이브리드 MEX-AM을 적용한 건축 상품제조

2.1.1 생산성 인자분석

제조과정의 속도(적층 속도)는 생산성에 영향을 미치는 주요변수이다. 목표하는 디자인의 건축물과 AM 장비의 운영과정에 직접적으로 관여하여 최종완성 제품의 공급시간과 비용을 결정한다. 생산시간을 예측하기 위해, <Table 1>과 같이 파트의 볼륨기반 또는 적층 경로의 길이 기반으로 제조시간(t_{volume} or t_{length})을 예측할 수 있다. 최적화되지 못한 공정으로 인해 실험에서 적용된 주요인자는 부피를 기반으로 건축 상품의 전체부피와 부피압출속도를 통해 약 7시간의 적층제조와 0.7시간의 가공을 예측할 수 있다. 적층경로와 관련한 인자 또한 구성은 되어있으나, 적층 품질의 기준 없이는 활용이 어려운 인자이다. 품질과 관련하여 층간 적층시간(t_{interval})을 이송속도로 제어하고, 형상물의 품질 기준을 형성하여 길이기반의 생산시간 예측이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 적층제조상품의 표면품질은

GD&T (Geometrical Dimensioning and Tolerancing)에서 Waviness와 관련되어 있다. 제안된 <Table 1>으로 적층표면에 대해 MEX-AM의 1개 레이어의 폭(w_f)과 두께(h_f)를 직사각형으로 계산할 경우, 적층두께(h_f)가 클수록 제조시간(t_{volume} or t_{length})은 감소하나 적층두께로 인한 표면 품질은 감소하는 것을 예측할 수 있다.

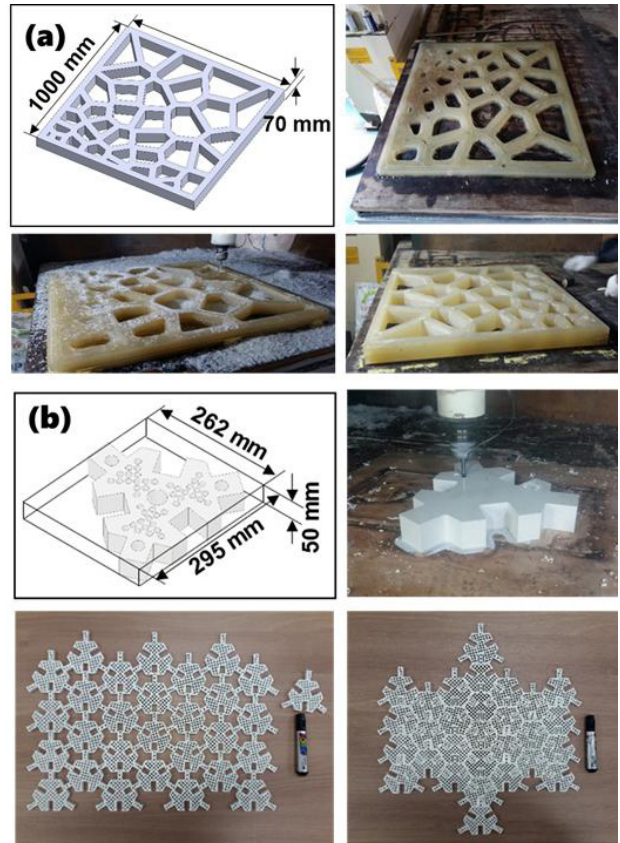
Table 1. The production factor of additive manufacturing

	Factor	Symbol	Unit	Calculation
Volume-based estimation	Part total volume	V_{part}	mm ³	From CAD
	Volume extrusion speed	V_{ex}	mm ³ /sec	$V_{part}/w_f/w_h$
	Building time	t_{volume}	sec	V_{part}/V_{ex}
Length-based estimation	Part total length	L_{part}	mm	From Gcode
	Traveling speed	v_{travel}	mm/s	$L_{part}/t_{interval}$
	Building time	t_{length}	sec	L_{part}/v_{travel}
constraints	Maximum traveling speed of gantry	v_{gantry}	mm/s	Range
	Layer interval time	$t_{interval}$	sec	Feature formability
	Stacked feature formability	-	-	Feature width Feature height
	Feature width	w_f	mm	Variable
	Feature height	h_f	mm	Variable

2.2 하이브리드 MEX-AM을 이용한 건축 상품제작

몰드형성을 위한 제품은 <Fig. 3> (a)와 같이 보로노이 (Voronoi) 패턴을 갖는 다공성 벽체가 설계되었으며, PLA폴리머를 단일소재로 사용하여 제작되었다. <Fig. 3> (a)는 하이브리드 MEX-AM을 활용한 압출 적층 제조와 CNC가공을 보여준다. 이때, AM기술을 활용한 건축 상품의 생산비용을 계산하기 위해 앞서 제안된 <Table 1>에서 부피기준의 생산시간예측을 통해 원자재의 투입무게(부피) 및 시스템 가동시간을 산출할 수 있다. 투입되는 원소재와 관련하여, 비정형의 상품을 적층 제조하는 하이브리드 MEX-AM는 자재 소모량감소와 적층 제조물품 불량회복을 통해 원소재활용의 효율을 향상할 수 있다. 극단적인 예로, CNC가공(Rapid Tooling)에서는 블록(Block)단위의 원소재를 가공하여 비정형 상품을 구현하기 때문에, 하이브리드 타입의 MEX-AM으로 구현 가능한 절삭 불량 감소는 투입소재의 감소와 가공에 의한 생산시간 절감에 영향을 미친다. 결과적으로 하이브리드 MEX-AM이 적용된 건축 상품 제조과정은 비정형의 건축 상품을 AM으로 구현하고 RT기술이 적용되기 때문에 절삭부피가 감소하기 때문에 단순 RT기술보다 생산능력이 증가하고, 운영비용이 절감된다.

<Fig. 3> (b)의 경우, 건축 상품의 소형의 프로토타입



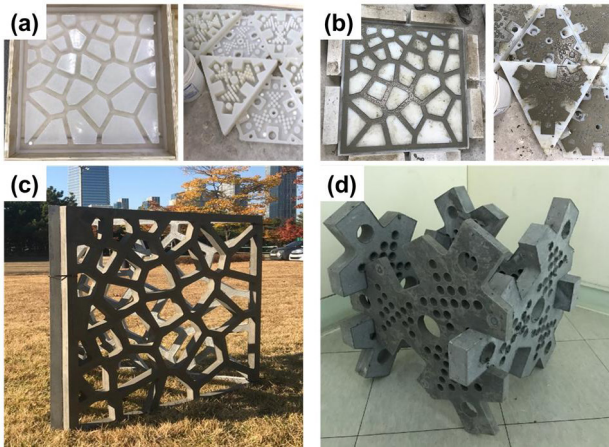
(a) Voronoi wall, (b) Expandable block pattern

Fig. 3. Manufactured parts

(Prototype) 제품으로 기능을 검증하기 위해 석고 분말을 활용한 바인더 젯팅 적층 제조(Binder jetting AM; BJT-AM)을 통해 조립 가능한 형태의 블록 모델을 설계하고 제조하여 유효성을 검증한 결과이다. 설계검증을 통해 하이브리드 MEX-AM에 PLA폴리머와 석회석이 혼합된 소재를 적용하여 건축 상품을 제작했다. <Fig. 3> (a)와 같이 PLA만 투입된 다공성 제품보다 생산비용을 절감하기 위해 적용된 결과이며(PLA 1kg 단가는 석회석의 50배)PLA폴리머-석회석 원료의 혼합 비율은 제조과정에서 압출성과 제조물품의 기계적 특성을 평가하여 경험적으로 조절(PLA폴리머/석회석 55%)되었다. 투입 원소재와 관련하여 생산비용을 감소하는 방법은 두 개 이상의 소재혼합비율과 선형적인 관계를 갖는다.

2.3 실리콘 거푸집과 건축 상품 구현

하이브리드 MEX-AM으로 제작된 각각의 제품을 콘크리트 캐스팅을 적용하여, 대량생산을 가정한 거푸집이 제작되었다. <Fig. 4>와 같이 제작파트를 사용하여, 실리콘 거푸집을 제작한 뒤, 시멘트기반의 건축소재를 캐스팅하였다. 시멘트 소재가 적용된 최종 제품을 생산하기 위해, 거푸집을 제작하기 위한 추가적인 공정과 자재 및 인력이 투입되어, 생

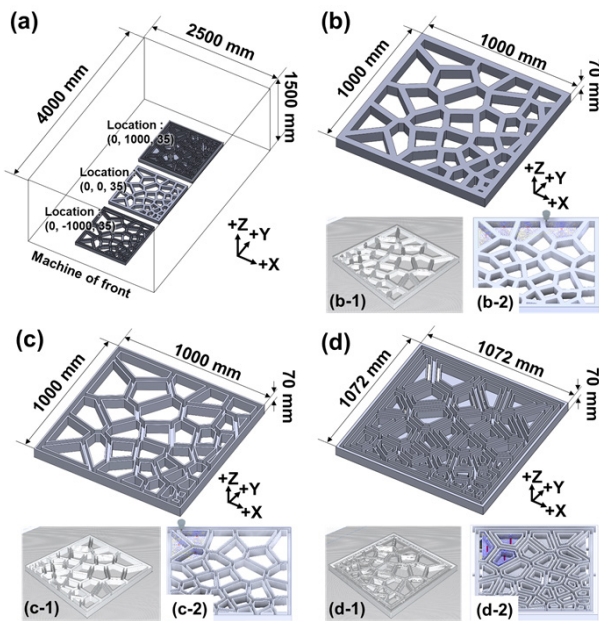


(a) flexible mold, (b) Mortar casting, (c) Voronoi wall (d) Assembled porous block
Fig. 4. Mortar part construction using silicon mold

산시간이 증가하고, 실리콘 거푸집의 과량의 투입이 확인되었다.

2.4 생산효율 증가를 위한 하이브리드 MEX-AM 적층제품 형상 최적화

〈Fig. 5〉는 하이브리드 MEX-AM 과정에서 투입원소재의 부피를 축소하고, 거푸집을 제조하는 과정을 단축하여 생산효율을 증가시키는 방법을 제안한 것이다. 〈Fig. 5〉 (a)는 구현하고자 하는 건축 상품들의 최적 모델들의 예시를 보여준다. 〈Fig. 5〉 (c)는 원본모델 〈Fig. 5〉 (b)의 형상은 유지하고, 25mm 두께의 꺾이기 형태로 구현한 것으로, 거푸집을 형



(a) build model (b) Normal voronoi wall (c) Weight reduction voronoi wall (d) Dead volume reduction voronoi wall

Fig. 5. Modified part models

성하는 과정에서 앞서 구현된 벽체와 동일한 기능을 구현할 수 있도록 설계된 것이다. 제안된 모델은 〈Table 2〉와 같이 제조과정에 투입되는 PLA폴리머의 부피가 55.5% 감소하고, AM 적층시간 30% 감소, 가공시간은 30% 증가하는 것을 예측할 수 있다. 〈Fig. 5〉 (d)는 투입 PLA폴리머의 부피가 감소된 제품을 기반으로 거푸집 제조과정을 단축하고 실리콘의 투입량을 감소하는 최적 제품을 설계한 것이다. 거푸집을 생성하기 위한 테두리 자재와 패턴 내부의 불필요한 면적을 채우는 실리콘의 낭비를 방지하도록 설계되었다. 또한, 실리콘으로 생성된 거푸집이 투입된 콘크리트의 하중을 지지할 수 있도록, 약 50mm의 몰드 두께를 형성한 결과 PLA폴리머의 부피는 20.3% 감소하고, AM 적층시간 26% 감소, 가공시간은 37% 증가하는 것을 예측할 수 있다. 또한, 거푸집을 생성하는 실리콘의 소비량이 32% 감소되었다.

Table 2. Production

Part	Location (X, Y, Z)	Volume (m ³)	Time (hour)		Si mold volume (m ³)
			AM	RT	
(b)	(0, 0, 35)	32.87	7	0.7	36.93
(c)	(0, -1000, 35)	14.60	4	1	36.93
(d)	(0, 1000, 35)	26.55	4.5	1.1	24.99

3. 결론

하이브리드 MEX-AM는 AM공정에서 PLA폴리머를 사용하여 고속으로 낮은 품질의 형상물을 구현하고, CNC가공으로 정밀한 형상물로 재구현한다. 단순 절삭가공보다 투입소재의 양이 감소하고, 적용소재의 변경을 통해 소모되는 원소재의 비용을 추가로 절감할 수 있다. 특히, 하이브리드 MEX-AM은 기존의 압출 적층제조보다 대형의 크기에서 제품치수정밀도가 높고 빠르게 제작하여, 생산성과 품질의 이점을 갖고 있다. 본 연구에서는 이러한 특징을 갖는 하이브리드 MEX-AM을 활용하여 중대형의 비정형 건축 상품을 구현하며, 제조시간 단축과 품질구현 가능성을 확인했다. 특히 압출적층제조과정의 관련 인자를 분석하여, 제품의 총 볼륨 및 적층길이를 파라미터로 생산시간을 예측하였다. 또한, 투입 자원의 비용을 절약하기 위한 복합소재의 투입으로 적용가능성을 확인했다. 거푸집 제조과정에서는 정성적으로 확인한 문제를 해소하기 위해, 단계적으로 적층모델 형상을 변형하여 적층제조과정과 거푸집제조과정을 단축할 수 있는 최적모델 설계 방법을 제안했다. 또한, 제안된 모델에 대하여 생산과 관련된 인자를 분석하여, 3D 프린팅 기술을 활용한 건축 상품의 생산비용을 낮은 수준으로 예측하였다. 결과적으로 AM기술을 적용한 비정형 제품생산기술은 새로운

기능을 갖는 기술의 구현과 생산과정의 상세한 분석을 통한 비용과 시간의 예측이 병행되어야 실현 가능할 것으로 판단된다.

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

- Ghaffar, S.H., Corker, J., and Fan, M. (2018). "Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution." *Automation in Construction* 93(March), pp. 1-11.
- 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.
- 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*, 12(3), pp. 261-276.
- Lee, Y.S., and Lee, T.S. (2020). "Exploring Business Opportunities for Building Social Overhad Infrastructure by Achieving Sustainable Development Goals." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 21(4), pp. 72-81.
- Kim J., Phi, S.W., and Seo, J.W. (2013). "Machine Vision based Quality Management System for Tele-operated Concrete Surface Grinding Machine." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* 33(4), pp. 1683-1691.
- Choi, H., and Park, J. (2020). "Technology Trend of Additive Manufacturing Standardization." *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute* 27(5), pp. 420-428.
- Wi, K., Suresh, V., Wang, K., Li, B., and Qin, H. (2020). "Quantifying quality of 3D printed clay objects using a 3D structured light scanning system." *Additive Manufacturing* 32(December 2019), p. 100987.
- Roschli, A., Gaul, K.T., Boulger, A.M., Post, B.K., Chesser, P.C., Love, L.J., Blue, F., and Borish, M. (2019). "Designing for Big Area Additive Manufacturing." *Additive Manufacturing*, 25, pp. 275-285.
- Jeong, J.H., Hyun, J.H., Jeong, H.S., Go, H.J., Lee, J.H., and Ahn, J.S. (2021). "Permanent Formwork of PLA Filament utilizing 3D Printing Technology." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 22(1), pp. 81-89.
- Park, J., Kim, K., and Choi, H. (2019). "Echnology Trend of Construction Additive Manufacturing." *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, 26(6), pp. 528-538.

요약 : 적층제조(AM, 일명 3D프린팅)기술은 디자인 자유도가 높고 디지털화된 기술의 특성으로 품질데이터의 예측·관리가 용이한 형태로 존재한다. 이러한 이점으로 AM기술은 다양한 산업에 적용되고 있다. 특히 건축물과 기반시설을 AM기술로 제조하는 방법이 건설 산업에 제안되고 있다. 다만, 다소 부족한 기술의 역사와 품질 및 시공 관리방법의 미비, 제조상품의 인증과 같은 문제로 인해 기술사용이 제한되고 있다. 따라서 간접적인 형태로 AM기술을 활용하여 건축 상품제조를 구현하고 있다. 특히, 거푸집을 적층 제조하고 건축 소재를 투입하여 상품으로 구현하는 방법이 확인되고 있다. 본 연구에서는 대형크기의 거푸집을 적층제조하고 건축 상품을 구현하기 위해 하이브리드 압출적층제조를 활용한다. 또한, 적층제조과정에서 생산성과 경제성을 예측할 수 있는 인자를 확인한다. 결과적으로, 건축물의 구현결과와 생산 비용과 시간을 줄이기 위한 형상설계 최적화 방법을 제안한다.

키워드 : 적층제조기술, 3D 프린팅, 비정형 거푸집, 다공성 건축물