

<기술논문>

3D 프린팅 기술의 건설 산업 적용가능성 검토

박진수¹ · 김경택^{2*}

¹한국생산기술연구원 연구원 · ²한국생산기술연구원 수석연구원

Reviewing the Applicability of 3D Printing Technology in the Construction Industry

Park, Jinsu¹, Kim, kyungtaek^{2*}

¹Researcher, Korean institute of industrial technology

²Primary Researcher, Korean institute of industrial technology

Abstract : Recently a method of constructing architectural products using additive manufacturing technology has been proposed. The additive manufacturing technology automates the construction process and it can secure the safety of workers. In addition, due to the high implementation efficiency of atypical shapes, the applicability to the manufacturing process of buildings and infrastructure is drawing attention. Additive manufacturing technology has the ability of satisfying computer-based construction automation, resource management and construction period prediction which is required in the modern construction industry. However, the industrial application is still limited by insufficient data, standards, regulations, and operating methods. In this study, in order to analyze the applicability of architectural additive manufacturing technology, we manufacture each architectural product with two additive manufacturing systems. In addition, we apply an application of each building product into an appropriate manufacturing system through the AM production decision model. And identify problems in the manufacturing process through empirical experiments. As a result, we propose an extended additive production decision model to improve the quality of building products.

Keywords : 3D Printing, Additive Manufacturing, Architecture Building, Mortar

1. 서론

건설 산업은 대형의 건축물에서 인테리어 부재까지 다양한 크기와 소재의 상품을 공급하는 시장으로, 소비자 요구를 충족시킬 수 있는 소량 다품종 제조기술의 수요가 높다. 최근 이러한 요구에 대응할 수 있는 적층제조(Additive Manufacturing, AM or 3D printing)기술이 건축 상품생산 과정에 적용되고 있다. AM기술은 가상공간에서 설계한 제품을 적합한 소재로 층층이 적층하여 실물로 구현하는 기술로써 기존의 제조기술보다 제품제조와 투입자원 운용복잡도가 낮다. 더욱이 컴퓨터 기반의 제조기술특징으로 인해 시공비용과 직결되는 자재관리, 공급시간조절, 작업자투입 및 안전관리 등의 데이터관리가 용이하다. AM기술은 사용소

재와 적층방법 등에 의해 7가지 기술로 구분한다(Chung et al., 2020). 특히, 건축소재 적용성이 높은 압출식 적층제조 기술(Material Extrusion Additive Manufacturing; MEX-AM)을 건설 산업에 적용하고 있다. 건축물을 적층 제조하기 위한 MEX-AM기술은 시공현장에서 시멘트 기반의 상온 경화소재를 3차원으로 압출하여 건축물을 제조하는 방법과 (Buswell et al., 2018) 거푸집을 제작하고 콘크리트를 타설하여 구현하는 방법으로 활용한다(Jeong et al., 2021; Park et al., 2020) 또한, 건축상품의 크기에 따라서 이송과 설치가 제한적인 경우 현장에서 직접 건축물을 적층 제조하는 방법을 선택한다. 반대로 건축 상품 이송 및 설치가 용이할 경우 분할된 비정형 건축 상품을 적층 제조하여 현장에서 조립 설치하는 방법을 선택한다. 하지만 현재 건설 산업에서 AM기술은 표준과 규제의 부재로 활용이 제한된다. 다만, AM기술은 시공이력 및 품질관리과정을 정량 데이터로 증빙하여 향후 형성될 표준과 규제에 대응 가능할 것으로 기대하고 있다. 따라서 건설 산업 적용을 위한 AM기술의 연구 개발은 소재선정, 제조, 건축물 설치과정 등을 모사하는 전

* **Corresponding author:** Kim kyungtaek, Korea institute of industrial technology, 156, Geatbeol-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea
E-mail: kkt@kitech.re.kr

Received December 15, 2021; **revised** January 18, 2022

accepted January 26, 2022

체 범위에서 고려되어야 한다. 본 연구에서는 MEX-AM 기술을 적용한 건축 AM시공절차를 제안한다. 또한, 건축 상품의 크기에 따라 구분 가능한 AM운영절차와 2개의 AM시스템을 운용한다. 실험결과로 확인된 건축 상품의 품질저하원인을, 적용소재의 유연특성과 연관 지어 정성적으로 분석한다. 결과적으로 향후 AM기술의 건설 산업 적용을 위해 시공과정에 필요한 AM 시스템 운영방법과 품질향상 및 개선된 추가 운영방법을 제안한다.

2. 실험방법

2.1 적층제조장비

본 연구에서 적층제조 장비는 제조 가능한 건축 상품의 크기에 따라 2가지이다. <Fig. 2 (a)>와 같이 대형의 적층제조장비(A시스템)은 X-Y-Z 축으로 10m×10m×3m 구동거리를 갖는 작업공간(Build Volume)을 갖고 있다. <Fig. 2 (b)>와 같이 소형의 적층제조시스템(B시스템)은 X-Y-Z 축으로 1.5m×2.5m×1m의 구동거리를 갖고 있다. 각 장비에서 주요 축과 부품들은 1000mm/s²의 가속도와 A시스템에서는 400kg, B시스템에서는 250kg의 부하 하중을 견딜 수 있다.

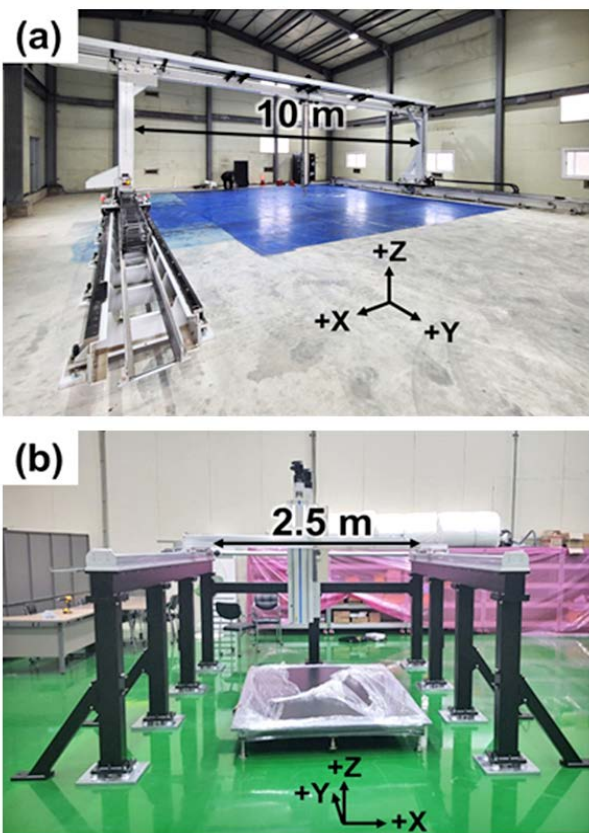


Fig. 1. (a) Large area gantry machine (A system) (b) Small area gantry machine (B system)

부가적인 설계사양으로 A시스템은 압출소재가 연속으로 공급되는 약 30m 길이의 소재공급용 고압호스의 무게를 지지하며 이송한다. B시스템의 경우, 상대적으로 짧은 소재이송거리로 소재공급호스의 무게영향은 미비하다. 하지만, 약 150kg의 압출장치와 100kg의 압출소재 무게를 이송할 수 있다. A시스템의 경우 최대 등속 이송속도 400mm/s B시스템의 경우, 최대 등속 이송속도는 200mm/s이다.

2.2 건축 상품 디자인

건축적층제조장비의 작업공간제약으로 건축 상품을 분할하여 생산하는 방법이 존재하지만, 대개 건축 상품의 크기는 장비의 작업공간으로 제한한다. <Fig. 2>는 A시스템과 B시스템으로 제조하려는 건축 상품들을 ISO/ASTM 52921 표준 규격을 준용한 도식화 결과이다. 해당 표준규격은 적층제조를 위한 건축 상품의 위치를 표현하여 제조이력 추적 및 관리하기 위해 활용된다.

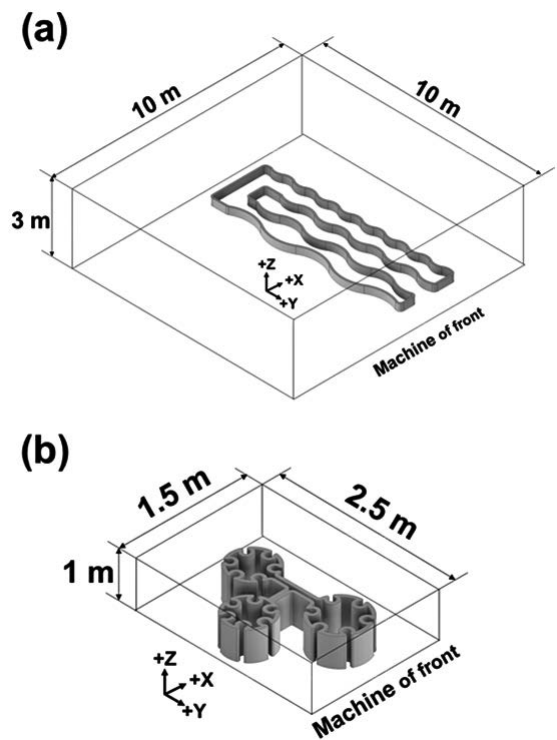


Fig. 2. (a) Wave form vertical wall (b) Freeform architectural product

<Fig. 3 (a)>의 경우, 건축 상품의 크기를 X-Y-Z 축을 기준으로 4m×9m×0.5m로 제한하고 A시스템으로 적층 제조한다. <Fig. 3 (a)> 건축 상품은 건축물 외벽 형상 구현능력 확인을 위해, 물결의 주기가 곡률 반지름을 기준으로 500mm, 665mm, 835mm, 1000mm를 갖도록 설계했다. <Fig. 3 (b)> 건축

상품은 X-Y-Z 축을 기준으로 1.2m×2.2m×0.5m의 크기를 갖고 B시스템으로 적층제조과정을 적용한다. 특히 <Fig. 3 (b)>는 복잡형상의 구현능력을 확인하기 위한 상품 디자인으로, 100mm의 최소반지름을 갖는 복잡형상을 구성했다. 설계된 건축 상품은 각 시스템으로 적층 제조하기 위해서 3차원의 이송경로를 요구한다. 소형의 폴리머 AM 장비는 제품을 적층 제조하기 위해 STL (StereoLithography) 포맷과 같은 3차원 모델링 파일을 연속된 점 형태로 재구성하여 3차원 이송경로로 구현한다. 하지만, 대형건축 상품의 경우, 3차원 모델링 파일의 표면품질에 따라 점간 연결이 도드라지는 다각형 형태의 곡면을 제작하기도 한다. 따라서 본 시스템에서는 CNC (computer numerical control) 가공에 활용되는 원호보간 방법을 적용하여, 기계 정밀도에 의존하는 곡면 형상을 구현한다.

2.3 적층제조운영시간 예측

<Fig. 2>에서 설계된 건축 상품은 물리적 공간에서 3차원으로 이동하는 적층경로(G-code toolpath)로 재구성한다. 적층경로는 길이의 물리량을 갖고 있으며, 이송속도로 나누어 적층제조시간을 예측할 수 있다. 예측된 적층제조시간은 AM시스템의 운용비용, 인력투입, 자원소비량 등으로 계산이 가능하다. 특히 AM기술의 건설 산업적용과정에서 생산성과 경제성 분석의 기반이 된다. 적층제조시간(t_{AM})을 예측하기 위해 보유 장비의 이송속도($u_{traveling}$)와 다수의 입력 파라미터 관계를 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 본 연구에서 적용된 실험모델은 A시스템과 B시스템에서 각각 약 40m와 7m의 1개 층 적층길이($l_{traveling}$)를 갖고 있다. 각 시스템의 최고 속도를 기준으로 구현 가능한 1개 층 적층제조시간은 A시스템 100sec와 B시스템 35sec으로 예측 가능하며, 총 적층 레이어(h_{part})를 적층높이(h_{layer})로 나누어 1개 층 적층제조시간의 배수로 A시스템 파트는 5000sec, B시스템 파트는 1750sec의 적층제조시간(t_{AM})을 예측할 수 있다.

$$t_{AM} = \frac{h_{part} \times l_{traveling}}{h_{layer} \times v_{traveling}} \quad (1)$$

2.4 적층제조 최적결정모델

앞서 제안된 적층제조장비와 건축 상품을 AM기술로 구현하고 산업에 적용하기 위해서는 보다 복잡한 품질, 경제성, 안전과 같은 요소를 상호 분석하여 최적의 제조방법을 제안해야한다. 다만, 아직 전반적인 생산흐름이 모호하고 품질에 대한 기준이 미비한 AM기술의 제조방법 결정을 위해서 <Fig. 3>과 같이 AM 생산시스템 결정모델을 도식화했다. 제

안된 결정모델은 BPMN2.0 표기방법을 모사하여 실제 적층제조과정에 투입되는 요소를 함축하고 도형으로 표현한 것이다. 본 실험에서는 작업공간의 부피, 치수정밀도, 최대이송속도, 작업자 투입 및 운영비용 등의 차이가 존재하는 A와 B시스템 두 개를 기준으로 구성된다. 적층제조 시스템 선정과정을 위해 우선, 상품수요자 요구에 따라 (P1)에서 건축 상품 디자인을 제안한다. 제안된 디자인은 (T1)에서 현재 보유하고 있는 제조 시스템의 성능을 기준으로 투입비용, 품질, 시공기간과 같은 한계 사항을 판단하여, 초안 디자인을 재설계한다. 재설계한 디자인은 제조 시스템의 운영일정과 수요자의 판단으로 평가 및 결정한다. 결정된 상품 디자인을 기반으로, (P2)에는 투입소재, 적층경로 및 파라미터와 같은 정보가 발생한다. 확인된 정보와 건축 상품 제조운영정보는 AM시스템 적용에 적합성을 판단(OR)한 뒤, (P4)또는 (P6)의 AM장비로 적층제조를 진행한다. 이러한 최적결정모델은 적층제조 시스템운영이 간헐적이고, 생산지연이 없는 조건에서는 건축 상품의 제조시간을 기준으로 생산시간과 비용을 예측할 수 있으나, 연속생산과 생산계획이 누적되는 형태로 운영될 경우, 생산우선순위 결정(Kim et al., 2020)을 통해 운용 효율 판단이 필요하다. 다만, 본 연구에서는 각 시스템을 독립적으로 운영하여 건축 상품을 제조한다.

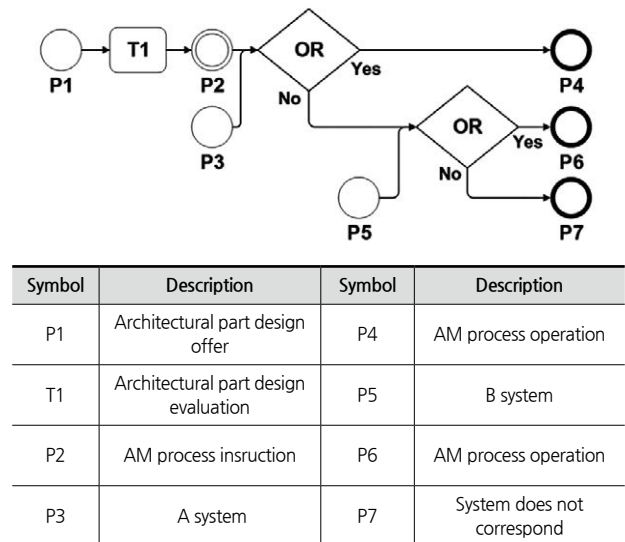


Fig. 3. AM process decision model for proper construction AM system for architectural products

3. 결과 및 고찰

3.1 건축 상품 적층제조결과

<Fig. 4>는 A시스템과 B시스템에 적용된 비정형 건축 상품을 구현한 결과이다. 실험결과 A시스템과 B시스템의 평

균 적층이송속도는 A시스템에서 82mm/s B시스템에서 60mm/s로 최대 이송속도 대비 절반이하로 적용했다. 이러한 이송속도 저하원인은 압출시스템에 적용된 펌프성능의 한계로 확인했다. 고점도 모르타르에 유동성을 부여하기 위해 A시스템의 경우 20마력의 오거스크루 방식 모르타르펌프와 B시스템에서는 5마력의 롤러진공펌프를 사용했다. 하지만, 약 250kg 배치 단위의 모르타르가 압출시스템의 호퍼에서 소모를 대기하는 과정에서 수화반응으로 인해 더 큰 점도를 발현하고 펌프과열을 유발했다. 이 때문에 실험과정에서 압출펌프 연속운전은 저속의 RPM으로 운용했으며, 결과적으로 압출유량저하와 적층이송속도 감소를 나타냈다. 이러한 현상은 설계된 모르타르의 강도구현시간과 압출시스템의 모르타르 소비시간 및 계통내부 모르타르 잔류시간에 대한 상관관계를 갖고 있다. 따라서 고성능 압출시스템의 적용 또는 적층제조과정의 소재물성관리가 필요하다.

$$V_{extrusion} = w_{layer} \times h_{layer} \times v_{traveling} \quad (2)$$

각 AM시스템에 적용된 건축 상품 적층제조과정은 소재를 압출하는 유량과 적층형상물의 치수구현과정에서 식(2)와 같은 기초적인 관계식을 갖는다. 부피압출유량($V_{extrusion}$)은 적층형상의 폭(w_{layer}), 높이(h_{layer}), 그리고 이송속도($v_{traveling}$)의 곱으로 환산할 수 있다. 적층 레이어의 형성과정에서 충분한 가압으로 개면 접합강도를 확보하기 위해, 통상 압출 적층제조에서는 노즐 직경의 40%이하로 적층 두께를 조절하여 제조한다. 본 연구에서는 25mm의 노즐직경을 사용하여 10mm의 적층두께를 AM과정에 적용했다. A시스템과 B시스템의 건축 상품결과는 약 60mm의 적층 형상 폭을 나타냈다. 앞서 확인한 각 시스템의 평균적층이송속도와 식(2)를 토대로 부피압출유량은 A시스템에서 49.2cm³/s, B시스템에서 36cm³/s로 확인했다. 또한, AM과정에 사용한 모르타르의 총 부피는 A시스템 작업시간 27500sec, B시스템 작업시간 5833sec으로 A시스템 약 1.35m³, B시스템 약 0.21m³을 확인했다.

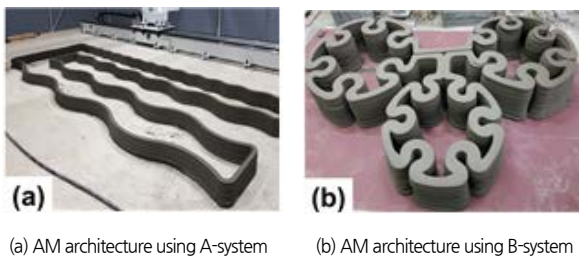


Fig. 4. Results of architectural products

3.2 건축 상품 적층제조 품질

〈Fig. 5〉는 앞서 확인한 압출시스템의 문제로 각 시스템에서 제조한 건축 상품형상의 결과이다. 실험에 적용된 모르타르 소재는(Lee et al., 2019) 적층과정에 충분한 강도 형성을 위해 약 420sec 정도의 경화시간이 필요하다. 〈Fig. 5 (a)〉는 A시스템의 평균 이송속도 82mm/s를 기준으로 1개 층의 적층 시간이 약 740sec이다. 따라서 A시스템은 설계 사양보다 긴 1개 층 적층 시간으로, 연속 적층에 필요한 강도가 구현된다. 하지만 B시스템을 이용한 〈Fig. 5 (b)〉는 적층 제조과정에서 1개 층 적층시간이 116sec으로, 설계사양 대비 약 1/4 수준이다. 따라서 형상유지를 위한 강도구현시간이 부족하고, 적층에 의한 하중으로 균열이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 압출적층제조 of 품질은 적용소재의 수화반응시간의 허용범위에 따라 달라지는 것을 확인할 수 있다.

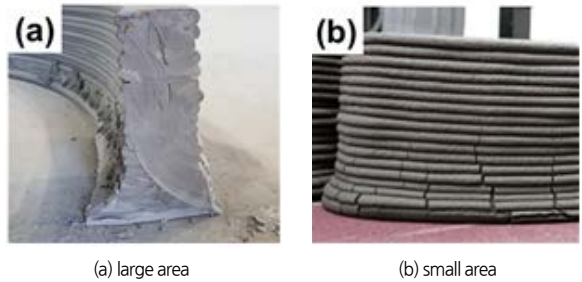


Fig. 5. Defects of architectural AM products

3.3 건축 적층제조 적용검토 및 품질향상방법

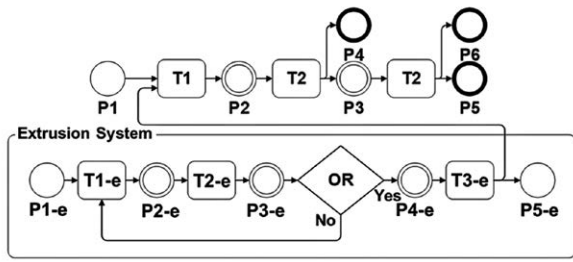
제조된 건축 상품은 ‘소재준비-압출시스템안정화-성능평가-적층제조-적층제조시스템 청소’ 단계로 1일 8시간의 작업시간이 소요될 것으로 예측했다. 하지만, 압출시스템의 안정화 및 성능평가과정에서 불륨압출유량이 예상보다 작아졌다. 이로 인해 A시스템과 B시스템 모두 예상보다 긴 시간의 적층제조가 진행됐다. 따라서 압출 시스템과 적용소재의 운용과정 예측의 부족으로 인해 결정모델의 예측정밀도가 하락했다. 건축 AM을 활용한 건축 상품 생산시스템 결정모델의 신뢰성, 시공운영 및 상품의 품질향상을 위해서는 적용소재와 압출시스템 성능예측이 필요할 것으로 판단된다. 〈Fig. 6〉은 AM운영과정에서 적용소재물성을 실시간으로 확인하는 AM작업결정모델을 제안한 것이다. 건축 상품의 1개 층 적층시간(P2)을 실시간으로 확인하기 위해 소재물성변동(P3-e)에 따라서 적층제조과정의 이송속도 조절한다. 앞서 확인한 결과에 따르면, 소재물성변화에 대응하기 위해서 A시스템의 경우 압출 및 이송속도 증가, B시스템의 경우 압출 및 이송속도 감소를 예상할 수 있다. 결과적으로 시공운영에 리스크로 작용하는 소재물성변화 및 압출유량변화를 측정하여 건축 상품 제조에 소요되는 총 운영시간이 예측된다.

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

- Buswell, R.A., Leal, de Silva W.R., Jones, S.Z., and Dirrenberger, J. (2018). “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research.” *Cem Concr Res*, 112, pp. 37-49.
- Chung, J.H., Lee, G., Kim, J.H., and Choi, J.J. (2020). “A Comparative Analysis of the Classification System for Three-Dimensional Concrete Printers.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 21(2), pp. 3-14.
- 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.
- 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.
- Lee, H.J., Kim, J.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, S.J., Yoo, S.K., Kim, M.H., and Kim, J.J. (2020). “A Study on the Mechanical Properties Experiment for Architectural Application of Polyamide-12 MJF 3D Printing Material - Focusing on the Change in Tensile Properties According to the 3D Printing Orientation -” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 21(6), pp. 95-102.



Symbol	Description	Symbol	Description
P1	M process operation	P4	AM operation result
T1	AM schedule prediction	T2	AM system maintenance
P2	AM schedule	P5	AM system return
P3	AM architectural part	P6	AM process report
Extrusion System			
P1-e	Powder/liquid material input	P3-e	Result of flow table test
T1-e	Powder/liquid material mixing	P4-e	Identified fresh mortar
P2-e	Fresh mortar	T3-e	Extrusion test
T2-e	Flow table test	P5-e	Identified volume extrusion ratio

Fig. 6. Enhanced manufacturing process decision model for AM system operation

또한, 실험결과로 확보된 보고서(P6)는 운영 데이터를 누적하고 분석가능하기 때문에 시공설계 단계에서 변수를 최적화하고, 작업결정모델의 정밀도를 향상시킨다.

4. 결론

AM 기술의 적용성능을 확인하기 위해 두 개의 적층제조 시스템을 이용하여 건축 상품을 구현했다. AM기술은 시공 과정의 관점에서 기존 기술대비 비정형의 상품을 제작하는 방법이 단순하고 소요시간이 적다. 다만 본 연구에서 확인된 모르타르소재의 물성변화와 부피압출유량변화는 시공운영 성능과 건축 상품품질 저하를 나타냈다. 이러한 문제는 건축 AM을 위해 설계한 생산성/경제성/품질 등의 정밀도를 낮추는 인자이다. 이를 위해 제안된 시공운영결정모델은 AM 과정을 실시간 피드백하는 것으로 모사되어 있으며, 적용소재의 물성변화에 따른 압출성능관리가 가능하다. 다만, 해당 결정모델을 지원할 수 있는 하드웨어시스템 개발이 필요할 것이다. 산업적용을 위한 건축 AM기술은 정형화된 시스템결정모델, 하드웨어 구현 및 데이터관리 연구를 통해 실현 가능할 것으로 기대한다.

요약 : 최근 적층제조기술을 활용한 건축 상품 시공방법이 제안되고 있다. 적층제조기술은 건축 상품 시공과정을 자동화하여 작업자 안전을 확보한다. 또한, 비정형 형상의 구현효율성이 높아 건축물과 기반시설제조과정에 적용 가능성을 주목 받고 있다. 적층제조기술은 현대의 건설 산업에서 요구되는 컴퓨터 기반의 시공자동화, 자원관리, 시공기간예측 등을 만족할 수 있는 기술이다. 하지만, 아직 부족한 누적 데이터와 표준, 규제, 운영방법 등에 의해 산업 적용이 제한되고 있다. 본 연구에서는 건축 적층제조기술 적용가능성을 분석하기 위해 2개의 적층제조시스템으로 건축 상품을 제조한다. 또한 각 건축 상품은 적층생산결정모델을 통해 적합한 제조시스템으로 투입하는 방법이 적용되고, 실증 실험을 통해 제조과정의 문제를 확인한다. 결과적으로 건축 상품의 품질 향상을 위한 확장된 적층생산결정모델을 제안한다.

키워드 : 3D 프린팅, 적층제조, 건축 상품, 모르타르
