
Global Report

건축물 3D 프린팅의 해결과제

1. 개요
2. 소개
3. 차기 산업혁명
4. 적층식 제조
5. 건축물의 물성
6. 결론

1. 개요

건축 프로젝트와 관련된 여러 이해 당사자들 사이에서 더 좋은 정보 관리 및 의사소통을 가능하게 하는 방법인 BIM에 대한 인식과 사용이 증가하면서 수년 동안 많은 고도의 생산적인 산업에 적용되어온 디지털 제작 도구에 대한 건설 부문의 문이 활짝 열리게 되었다. 3D 프린팅은 지난 수십 년간 발전의 기미를 보이지 않았던 기존의 건설 공정과 달리 이미 AEC(건축, 엔지니어링 및 건설) 분야에 흥미로운 기술로 입증되어 공사 기간 단축, 폐기물 감소, 대량 맞춤화(mass customization) 및 복잡한 건축형태를 가능하게 하는 등 경제적, 환경적 및 시공성 측면에서 중요한 장점을 제공 가능하게 한다. 결과적으로 전 세계 기업과 더불어 대학들은 3D 프린팅을 발전시키고 있고 건축물 건설에 3D 프린팅을 적용하고 있다. 그러나 AEC 분야에서 새로운 기술의 채택이 증가함에 따라 건축물의 올바른 성능을 보장하기 위해 극복해야만 하는 새로운 해결과제들이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 적층식 시공 방식 건축물에 대한 건축물의 물성(building physics) 및 편의성에 관한 새로운 발전을 강조하기 위해 수행된 문헌 검토 결과를 제시코자 한다. 연구결과 지금까지의 초점은 프린팅 적합성, 구조적 건전성, 안전성 및 내구성에 맞추어 온 것으로 드러났다. 이는 내화성과 적절한 열 및 음향적 거동을 포함하여 충족되어야 할 핵심 요건들이 여전히 존재한다는 것을 의미한다.

2. 소개

지난 10년 동안 AEC 부문의 경제적 상황은 크게 위축되어왔다. 2008년 경제위기는 중소기업이 압도적으로 지배하는 산업이라는 것뿐만 아니라 다양한 이해관계자, 프로젝트, 재료 및 기술 등 건설 부문의 크나 큰 단편화와 이질성 측면에서 건설 부문의 취약성이 드러나게 되었다. 정보 시스템의 표준화 부족으로 인해 프로세스와 하위 프로세스 사이에서 상당한 양의 작업 흐름의 손실이 발생한다. 그런데 이것은 건설 부문이 지난 20년 동안 세계 평균 노동 생산성에서 제조업이 3.6% 성장한 것에 비해 1%에 지나지 않을 정도로 생산성이 가장 낮은 부문 중 하나이기 때문이다. 또한 인구 변화로 인해 건설분야의 참여하고자 하는 젊은 사람들에 비해 은퇴하는 사람이 더 많아져서 노동력은 감소하는 추세이다. 이러한 경향은 AEC 부문의 고용과 관련된 현재의 부정적인 인식에 영향받는 것으로 다른 이유 중에서도 산업의 위기, 전반적으로 노동 시장에 대한 열악한 이미지와 매력적이지 않은 입문 여건으로 인해 다른 엔지니어링 분야보다 매력이 떨어지는 것으로 판단된다. 최근 수년 동안 경험한 국제 경제 현실은 투자 감소 또는 기업가 집단의 재정 상황으로 인해 건설 부문의 기업 활동에 대한 강력한 제한이 두드러지게 나타났다. EU GDP(국내총생산)의 9%와 유럽 근로자의 약 5%가 건설 부문에 직접 고용되어 건설 산업은 위기와 경제적 순환의 변동성에 크게 노출되어 있다. 따라서 최근 수년간의 경제위기 둔화추세와 맞물려, 유럽 지역에서만 보면 2013년은 투자, 생산량, 신뢰 지수 및 고용 측면에서 꾸준한 성장을 나타내면서 건설 산업의 전환기로 볼 수 있다.

3. 차기 산업혁명

3.1 인더스트리 4.0

유럽 시민들은 평균 90% 이상의 시간을 실내에서 보내고 있으며, 유럽 에너지 소비의 40%는 건물에서 발생하고 있고 건물에서만 EU 온실가스 배출량의 36%를 생성하여 사람들의 웰빙과 토건분야 건축물의 시공, 유지관리 및 리모델링에 사용되는 재료 및 방법이 직접적인 연계 관계가 있다는 것은 명백해지게 된다. 따라서 프로세스를 자동화하고 폐기물을 최소화하며 생산성을 향상시킬 수 있는 혁신적인 방법을 채택하는 것이 AEC 부문이 필요로 하는 변혁이다.

인더스트리 4.0이라고 하는 차기 산업혁명을 향한 진전은 고유한 환경적 장점을 제공할 뿐 만 아니라 품질에 긍정적인 영향을 미치고 건설 과정에서 프로젝트 지연을 줄이고 안전을 확보하게 한다. 제1차 산업혁명은 기계화, 수력 및 증기력과 관련이 있고 제2차 산업혁명은 전력사용과 조립라인의 도입과 더불어 대량생산 시작을 특징으로 하며 제3차 산업혁명의 특징은 컴퓨터 기술도입과 공정의 자동화인 반면에 제4차 산업혁명은 사이버 물리 시스템인 CPS(Cyber-Physical Systems)를 기반으로 하는 것이다. CPS는 인터넷과 결합된 컴퓨터 기반의 알고리즘으로 물리적 세계에서 작업이 제어, 조정 및 모니터링되는 시스템이다. 따라서 실제 현장 데이터는 센서를 통해 수집할 수 있고 가상 모델과 자동으로 연결되어 있어 가치 사슬을 통해 할당되는 당사자들의 협업이 가능하게 된다. 본문 참고문서[12]에서 Niemelä는 AM이 인더스트리 4.0으로의 패러다임 전환에 있어서 핵심 첨단 기술 중 하나로 평가하고 있다.

3.2 건설 산업의 신기술

건설업계의 관행 변화에 대한 저항에도 불구하고 최근의 건축 시장 침체는 현재의 건설업계를 보다 밝은 미래로 나아가게 할 수 있는 새로운 관점에서 볼 수 있는 기회를 제공하였다.

따라서 건설업체들은 지금까지 획득한 노하우를 유지하면서 AEC부문에 BIM도입으로 최근에 등장한 기술적 변화를 따라 잡아야만 한다. BIM은 본질적으로 다양한 건축 요소와 그 연계 관계를 나타내는 매개변수로 설계된 3D 디지털 모델(일정을 고려할 때 4D, 비용을 포함시 5D)을 기반으로 한 세트의 정보교환 프로세스이다.

따라서 BIM은 건설 수명주기 전반에 걸쳐 모든 이해 당사자들 간의 협력을 촉진함으로써 기존 프로세스에 비해 큰 장점을 제공한다. 또한 설계 초기 및 엔지니어링 단계에서 현실에 가까운 설정을 시뮬레이션 할 수 있는 가상 현실(VR)과 같은 다른 기술들과 함께 사용하면 충돌을 감지하여 비용이 많이 드는 실수를 막는데 도움이 된다.

BIM의 도입은 디지털화 촉진에 핵심적인 역할을 했으며 결과적으로 최근 수년 동안 인더스트리 4.0 기술은 AEC부문에서 점점 더 반영되게 되었다.

애플리케이션 전망이 좋은 새로운 트렌드의 사례는 사물인터넷이다. 이 개념은 무선 주파수 인식시스템(RFID), 적외선 센서 및 장비, 재료와 작업자의 글로벌 위치장치(global positioning devices)와 같은 감지 장비의 통합을 기반으로 한다. 그 목적은 인터넷에 연결하고 실시간 정보교환을 가능하게 하여 건설 현장의 안전을 직접적으로 보장하기 위함이다. 본문 참고문헌 [17]에서 Garyaev의 보고서에 따르면 사물인터넷이 물류 및 운송에서 농업, 에너지 및 스마트 빌딩에 이르기까지 수많은 산업에 성공적으로 적용되었다고 한다.

건설 부문에 적용되는 또 다른 디지털 도구에는 인공지능(AI)이 있다. 이것은 마치 인공지능이 학습, 계획, 자기수정 및 추론과 같은 인간의 지적 능력이 있는 것처럼 과업을 수행하는 기계의 능력을 말한다.

다른 기술 중에서도 AI와 IoT가 새로운 형태와 데이터 소스를 통해 정보 복잡성을 고무시키는 것처럼 디지털 현대화의 또 다른 트렌드는 빅데이터 분석(BDA)이다. 빅데이터는 빠른 속도(데이터 처리 속도), 볼륨(데이터 양) 또는 다양성(데이터 범위)을 감안할 때 현재의 기술 도구가 저장, 제어 및 처리할 수 없는 정보를 특성화하는 반면에 BDA는 패턴과 새로운 기회를 인식할 목적으로 빅데이터가 고려되는 정보를 분석하기 위해 생겨난 스트럭처이다.

3.3 AEC 기업들에 의한 신기술 채택

ECTP(European Construction Technology Platform)운영위원회의 포르투갈 협회 회원인 PTPC(Portuguese Construction Technology Platform)는 포르투갈 북부 지역 건설업체들의 기술 성숙도와

디지털화로의 전환에 대한 한 설문 조사를 실시하였다. 이 설문 조사에 따르면 신기술 채택을 위한 객관적인 전략의 정의 및 수립에 대한 건설회사들의 명확한 지침이 아직까지는 없는 것이 명확하다는 것이다.

일반적으로 AEC부문 중소기업의 기술 성숙도는 낮은 수준이며 이 업계 대부분의 기업들은 핵심 엔지니어링 및 건설 활동에 특화된 소프트웨어 보다는 관리 소프트웨어를 사용하는 경향이 있다.

연구결과 대부분의 기업들이 R&D 투자를 고려하지 않고 있으며 거의 절반 정도는 BIM을 사용하지 않으며 약 1/3 정도는 이러한 기술을 모른다고 주장하는 것으로 나타나기도 하였다. 전반적으로 이 기업들은 예산 문제가 해당 부문에서 현대적인 기술을 채택함에 있어서 주요 장애물로 인식되었다.

가장 생산적인 산업이 디지털화 수준이 높은 산업이고 변화는 일반적으로 이해 당사자들과 함께 시작되기 때문에 디지털 혁신은 기업이 사고방식을 전환하고 디지털 혁신 기반 개발에 투자를 시작할 때만이 가능할 것이다.

그러나 건설 부문에서 디지털 기술의 채택은 시장 구조뿐만 아니라 기업의 규모에도 영향을 받는다. 이러한 이유로 디지털 구현은 종종 혁신을 지원할 더 많은 인적 및 경제적 자원뿐만 아니라 더 많은 역량을 가진 대기업에 의해 주도되는 경향이 있다.

반면에 디지털 프로세스에 대한 인식이 증가함에 따라 이러한 발전은 프로젝트 소유주에게도 요구될 수 있다. 실제 영국 정부는 2016년 4월부터 모든 공공 자금 지원 프로젝트에 BIM 사용을 의무화함으로써 BIM 프로세스 사용의 핵심 견인자 임을 정부 스스로 보여주었다.

이에 따라 영국 건설 산업 전반에 걸쳐 대대적인 BIM 인식 및 채택이 2011년 약 10% 정도에서 2019년 70% 정도로 증가하였다.

현재 BIM은 건설 산업의 혁신 선두주자이며, 디지털화로의 진전은 국가별로 다양하지만 유럽에서는 기존 건설 회사의 29%가 이를 사용 중이다.

전반적으로 건설업계는 대체로 기술 도구의 채택이 느림에도 불구하고 일관되고 건설적인 진전이 이루어지고 있으며 보스턴 컨설팅 그룹에 따르면 2025년까지 전 세계적으로 엔지니어링 및 건설 부문의 디지털 전환으로 설계 및 시공단계에서 13~21% 비용 절감과 운영단계에서 10~17% 추가적인 비용 절감을 이루어낼 수 있는 잠재력이 있다고 한다.

4. 적층식 제조(AM)

4.1 개념

적층식 제조는 원래 급속 프로토타이핑이라고 하며 일반적으로 3D 프린팅으로 알려져 있으며, 초기에는 3차원 디지털 시스템을 사용하여 연속적인 재료 레이어를 쌓아 올리면서 대상물을 형성해 나가는 프로세스이다.

ISO/ASTM 52900-15에 따르면 7가지의 다양한 AM 방식이 있는데 즉, 바인더 분사 방식(binder jetting), 직접 에너지 적층 방식(directed energy deposition), 재료 압출 방식(material extrusion), 재료 분사 방식(material jetting), 분말 적층용융 방식(powder bed fusion), 시트적층 방식(sheet lamination) 그리고 광수지화 방식(vat photopolymerization)이 그것이다. 이러한 다양한 적층 방식은 특정 작동원리를 가지고 있음에 따라 프린팅되는 구성요소의 품질 및 구조적 특성뿐만 아니라 프린팅되는 프로세스의 생산성과 최종 건축 부분의 비용에도 영향을 미치는 독특한 수준의 복잡성을 지니고 있다.

시각적 표현을 위해 본문 그림 5는 7개의 AM 분야 중 하나인 3DP와 관련된 재료 압출 공정에 관한 작업 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저 모델링 컴퓨터 프로그램을 사용하여 어떤 대상 물체를 3차원적으로 모델링 한 다음 3D 디지털 디자인을 분석하고 일련의 단면 레이어로 분할하여 인쇄 경로로 변환하고 아래에서 위로 쌓아올려 시공한다.

4.2 일반적인 용도

지난 20년 동안 AM기술은 상당히 발전하여 많은 시장에서 전통적인 생산 방식을 급속히 변화시켰다. 3DP를 사용하여 여러 부문의 생산패턴 측면에서 새로운 가능성을 열어주는 대량맞춤화(mass customisation)를 가능하게 하는 것 외에도 대상물을 공간 제약 없이 구축할 수 있는데 이것이 현재 AM이 수십억 달러 가치의 산업인 이유인 것이다.

이 혁신적인 기술은 화성이나 달나라와 같은 외계에서 인간의 개척기지 건설용으로 고려되며 경량이고 내구성이 있는 부재를 용이하게 생산할 수 있기 때문에 항공우주 분야에서 인기가 있다.

또한 AM은 복잡한 형상의 액세서리 생산에서부터 보정되는 보호장비의 제작에 이르기까지 스포츠 산업에서 많은 잠재력을 보여주었다. 마찬가지로 자동차 산업에서도 제품을 시장에 출시하는 더 빠른 방법으로 혜택을 누리게 됨에 따라 전반적인 차량 개발 비용을 절감하고 의학 분야에서는 인공 보철물과 같은 정밀한 애플을 활용하여 정형외과에서 성형 수술에 이르기까지 AM을 크게 활용하였다.

결국 3DP의 무제한적인 역량은 수많은 분야에서 그 용도를 가능하게 하고 있다. 따라서 전통적인 건설 공정을 사용하여 복잡한 건축 형상을 구축하는데 따른 고비용문제와 전 세계적인 주택 수요 증가문제뿐만 아니라 AEC부문의 생산성 문제를 염두에 두고 건설 산업에 AM을 적용하는 것이 건설 부문의 필요성에 부응하는 해결책이 될 수 있을 것이다.

4.3 건설 산업

무한한 잠재력을 가지고 매일 새로운 3DP 앱이 등장한다. 그러나 다양한 AM 공정이 광범위한 산업에 긍정적으로 적용되어 왔지만 건설 산업에 도입하는 것은 아직 시작 단계에 있다.

건설부문에서 AM 적용으로 인한 장점은 공기 단축 및 폐기물 감소와 복잡한 모양의 생산에 이 제조 공정으로 인한 보다 큰 유연성이 큰 비용 절감으로 이어지는 등을 들 수 있다. 더욱이 건축공정의 자동화는 인력을 감소시키고 건설 현장을 더 잘 관리할 수 있게 하므로 안전성을 증가시킨다.

본문 참고문서[49]에서 Labonnote는 AM 기술이 선보이는 독보적인 설계 기회를 강조하고 있고 본문 참고문서[47]에서 García de Soto는 건설부문을 디지털 시대로 나아가게 하는 AM 잠재력을 더욱 강조하고 있다.

많은 연구자와 기업들은 3D 프린팅이 실제로 건설 산업을 긍정적인 방식으로 변화시킬 수 있다고 믿고 있으며 본문 그림 6의 예에서 볼 수 있듯이 일부 대규모 건축물은 이미 완성되어져 왔다.

사실상 이 주제에 대한 연구와 프로젝트의 증가로 인해 최근 이러한 발전하는 기술에 관한 다양한 AEC 이해관계자들로부터 큰 베팅이 있어 왔다는 결론을 내릴 수 있다.

5. 건축물의 물성

앞서 언급한 바와 같이 요즘에는 기업과 대학의 많은 프로젝트들이 건축시공 부문에 AM을 구현하여 실시되고 있다. 예를 들면, 남부 캘리포니아 대학의 컨투어 크래프팅(Contour Crafting), 영국의 건설회사인 모노라이트(Monolite)의 디-쉐이프 기술(D-Shape technology), 러프버러 대학(Loughborough University)의 콘크리트 프린팅(Concrete Printing), 에인트호번 공과대학의 콘크리트 프린팅(Concrete Printing)과 MIT 미디어 랩(Massachusetts Institute of Technology's Media Lab)의 디지털 컨스트럭션 플랫폼(Digital Construction Platform)등이 그것이다.

3D 프린팅에 사용되는 재료는 3D 프린터와 호환되어야 하므로 연구팀들은 건축 부재의 프로토타입을 제작할 수 있는 대규모 3D 프린터를 개발하기 시작하였다. 한편, 주로 시멘트 기반의 혼합물들이 개발되었으며, 대부분의 프로젝트는 프린터의 특성에 맞게 특정 혼합물이 조성되도록 설계되었다.

압출이 필요한 3차원 프린팅용 시멘트 계 혼합물의 디자인은 작업성과 가용시간과 관련된 기본요건들을 충족해야 한다. 따라서 주로 골재, 시멘트 및 물로 이루어지는 이 구성에는 성능 가정사항의 요건에 따른 혼합물의 경화 전 또는 경화 후의 특성을 개선하기 위한 첨가제 및 혼화재 등이 있다. 또한 지구 환경 상황을 감안할 때 원료 선택시 지속 가능한 개발 개념을 지향해야 할 필요성이 고려되어야 하는데 이것은 재생 가능한 자원 사용에 우선권을 부여하여 순환경제로 이어져야 한다는 것을 의미한다.

앞서 언급한 바와 같이 지금까지 연구 프로젝트의 초점은 3D 프린터, 재료의 구성 및 구조적 특성 그리고 보강근의 배치와 관련된 질문에 답을 하는 것에 맞추어져 있었다. 그러나 본문 그림7의 표현에서 알 수 있듯이 여전히 많은 개선사항과 해결되어야 할 사항들이 존재한다.

건축물의 물성은 건물 성능과 관련된 여러 분야로 구성되며, 건축물에 편안한 실내 환경을 제공하도록 조성되어야 한다.

건물을 적층식으로 제조하는데 대규모 3D 프린터의 사용이 늘어남에 따라 본문 참고문서 [56]에서 Liu가 지적한 바와 같이 점점 더 많은 문제점들이 불가피하게 발생할 것이다. 따라서 주거용 건물에 지진 및 내진 안전성 또는 내화규정과 같은 현재의 관련 법규로는 버티어 낼 수 없다.

마찬가지로 기밀성, 환기, 습기의 제어(표면 및 내부 결로), 열전달 성능(전도, 대류 및 복사와 같은 열전달 메커니즘, 선형 열 손실, 열교 및 태양열 이용)과 방음(흡음 및 잔향 시간)과 같은 건축물의 물성 부문은 향후 연구 프로젝트의 초점이 될 것이다.

또한 향후 수년 동안에 걸쳐 기후 여건(바람, 비, 눈 또는 태양 복사의 외적 및 내적 힘)과 같은 프린팅 현장의 여건과 관련된 질문들은 그것이 혼합물의 특성에 영향을 미치므로 실험적으로 테스트 되어야만 한다.

그 밖에 지금까지는 대부분의 대규모 AM 방법이 현장에서 이전에 프린트 된 다음에 똑 같이 조립되었다. 이러한 조립 작업은 향후 고층건물 또는 초고층 건물의 경우에도 계속해서 발생할 수 있을 것이다. 이 경우 서로 다른 건축 요소간의 맞춤 유형도 건축물의 물성에도 영향을 미치므로 추가적으로 고려되어야만 한다.

6. 결론

다른 산업들과는 반대로 토건 건설 분야의 모든 프로젝트에는 그 건축물의 수명주기에 걸쳐 독특한 시방, 형상과 행위자들이 있다. 혁신의 부족과 더불어 건설 부문에서 보여지는 단편화는 건설 부문의 현재의 낮은 생산성으로 이어지는 것으로 판단된다. 건설 산업에 적층 제조 방식을 도입하면 공정 자동화가 가능해지므로 큰 기술적 도약을 가능하게 할 수 있다. 건설부문에 적용되는 수많은 신기술이 있다고 본문헌 검토에서 언급하고 있지만 어떤 혁신이 그들과 관련이 있는지를 확인하고 추가적인 개발에 투자하는 것은 기업들의 몫이다. 앞으로 3D 프린팅은 자동으로 철근을 넣어가면서 다양한 압출 노즐을 통해 여러 재료를 동시에 프린팅할 수 있는 기회를 제공한다. 전반적으로 현재 AM의 채택은 아직 광범위하게 발전되지 않은 기술로 인해 느린 상태이지만 실험 및 개발 단계에 대한 연구가 주로 인쇄성, 구조적 건전성, 안전성 및 내구성 보장에 초점을 맞추고 있다. 건설업계에 긍정적인 변화를 가져올 잠재력이 있다고 말할 수 있다.

결론적으로 AEC 부문에서 AM 채택에 관한 새로운 연구들이 늘어남에 따라 건축물의 물성 분야의 발전은 건물의 최적 성능을 위해 필수적이며 따라서 건설 시장에 이 기술을 도입하는 꼭 필요하다.

<원문제목> The 3D printing challenge in buildings

<원문출처> University of Porto