Global Report

3D 프린팅 콘크리트의 구조적 잠재력 연구

1. 개요
2. 소개
3. 프린팅의 필요성
4. 콘크리트 프린팅 방법
5. 제작 방법
6. 결론

KAIA 국토교통 과학기술진흥원

작성자 | 김규남

1. 개요

3D 프린팅은 자동화와 인공지능으로 건설 산업을 변화시킬 차세대 산업혁명의 일부분으로 환영받고 있다. 3D 프린팅은 건축 혁신의 첨병으로서 건축물이 시공되는 방법에 획기적인 영향을 미칠 잠재력을 가지고 있다. 건설 산업이 3D 프린팅을 이용한 로봇 제어(robotically controlled) 방식이나 자유형 제조(free-form manufacture) 방식을 최초로 적용한 산업은 아니다. 의료, 자동차 및 항공 산업 분야의 경우는 3D 프린팅이 부품이나 표준 제품으로 또는 구성 부품으로 사용되고 있다. 3D 프린팅은 신속한 생산, 저렴하고 독특한 제품이 요구되는 곳에서 특히 성공적인 것으로 입증되었다. 최근 급격히 증가하는 맞춤형 주문과 관련하여 맞춤형 신발을 제작하기도 하고, 특정 개인에게 맞는 보철이나 인공기관(prosthesis)을 통해 한 개인의 삶을 변화시키는 것도 가능하게 되었다. 이 보고서에서는 2016년 “Pai Lin Li Travel” 상을 수상한 Victoria Richardson이 발표한 구조 엔지니어링 및 건설산업이 3D 프린팅을 통해 누릴 수 있는 장점들을 연구한 내용들을 다루고 있다.

2. 소개

건설산업에서 3D 프린팅이 아주 새로운 것은 아니다. 건축가와 엔지니어들은 건축물의 부재들이 어떻게 함께 작용하는지를 알아내기 위하여 3D 컴퓨터 모델을 이용한 신속한 프로토타이핑(prototyping)을 통해 몇 시간 안에 소규모의 실제 모델로 만드는 것이 가능하게 되었다. 이런 소규모의 실제 모델들은 고객들에게 보여 줄 수 있으며, 디자인을 개발하는 사람들에게도 유용한 도구이다. 디지털 설계 및 제작의 다음 단계는 단지 모델을 프린트 하는 것뿐만 아니라 건축물 그 자체를 프린트 하는 것이다.

이제 콘크리트에 초점을 맞추어 건설 산업에 혁명을 일으킬 3D 프린팅의 잠재력을 살펴보고자 한다. 3D 프린팅이 일상적으로 사용되도록 입력이 요구되는 6가지 영역과 신기술의 응용, 그리고 개발되고 있는 현재의 기술들을 다루고자 한다. 새로운 기술들이 개발됨에 따라 3D 프린팅에 대한 정의도 다양한 재료를 적용한 여러 가지 방법들로 확대되었다.

이 보고서에서 3D 프린팅은 재료를 연속적으로 층을 쌓아가며 만들어지는 3D 목적물을 만들기 위해 디지털 파일을 사용하는 기술을 의미한다. 본 연구에는 콘크리트뿐만 아니라 현재의 다양한 역량을 보여주기 위해 점토, 모래 및 암석에 관한 내용도 포함한다. 이 내용은 미국과 유럽에서 실시된 콘크리트의 3D 프린팅에 관한 최첨단 연구의 개관이다. 의심할 여지없이 많은 제조업체와 개발자들도 이렇게 성장하는 연구 커뮤니티의 일원이다.

3. 프린팅의 필요성

전 세계적 과제인 급속한 도시화, 기후 변화 및 심각한 자원부족 문제와 더불어 재료 투입을 감소시키는 보다 효율적인 건설 방법들이 모색되고 있다. 콘크리트의 3D 프린팅은 폐기물을

감소시키고 건설시간을 단축하며 운반비를 줄여줌으로써 해결책의 일환이 될 수 있을 것이다. 동시에 이 기술은 건축가들에게 그들 설계의 형상과 방식에 자유로움을 제공할 것이다.

3.1 급속한 도시화에 따른 수요

인구 증가에 따른 수요에 부합하기 위해 빠르고 저렴한 시공방법을 찾는 것이 시급하다. 특히 의제에서 가장 강조코자 하는 것은 도심지역에 서민주택의 건설 필요성이다. 영국의 경우 인구 성장에 맞추어 공급이 요구되는 주택건설 증가율은 현재 거의 50% 정도에 이르는 것으로 추정하고 있다. 콘크리트 3D 프린팅은 몇 달이 아닌 단 며칠 만에 주택생산 프로세스와 공급을 혁신할 잠재력을 가지고 있다. 또한 현장에서 가장 비용이 많이 드는 부분을 대체할 가능성이 있으므로 엄청난 원가절감 잠재력도 가지고 있다.

건설비용을 산정해 보면 전체비용 중 15~50%가 인건비인 것으로 나타난다. 완전히 로봇으로 건설한다면 이런 인건비의 상당부분을 절감할 수 있을 것이다. 컴퓨터를 이용한다면 현장의 많은 일들이 보다 안전하고 정확하며 신속하게 이루어질 수 있을 것이다. 로봇의 이용을 확대한다면 현장 일의 일부를 사람 없이 할 수 있을 것이므로 보건 안전에 소비되는 비용도 절감할 수 있을 것이다. 자동화된 건설현장은 보다 불리한 여건 하에서도 원활히 공사가 추진될 수 있을 것이다. 고소작업, 악천후 및 야간작업의 경우도 상당히 수월하게 될 것이다. 완전 자동화된 현장은 광범위한 변화를 필요로 하지만 3D 프린팅은 비용절감의 가능성도 있다. 현장에서 건축 구성품이나 건축물의 맞춤 생산이 원활해진다면 상당한 운송비 절약을 가져다 줄 것이다. 중장비 차량 진출입 필요성을 감소시킨다면 건축현장으로 인한 환경파괴를 보다 최소화할 수 있을 것이며, 배출물을 줄이고, 시공 프로세스도 인프라 문제 등으로 인한 복잡한 일정관리의 제약에서 벗어날 수 있을 것이다. 모든 이해 관계자들에게 미치는 영향이 감소된다는 것은 계획 프로세스를 단순화하고 가속화하게 되는 것이다.

3.2 형태와 효율성

기존 콘크리트 시공 기술은 생 콘크리트를 지탱하면서 모양을 만들어 낼 수 있는 대형 거푸집 또는 형틀이 요구되어 많은 인력을 필요로 한다. 일반적으로 이러한 기술은 맞춤형 형틀이 비싸기 때문에 가능한 단순하고 반복적으로 사용될 수 있는 구조설계가 요구된다. 이러한 관점에서 3D 프린팅은 다음 두 가지 문제점을 극복할 수 있는 대안이다.

첫째, 시공의 용이성을 위해 구조체의 모양을 단순화하는 것은 건축가들의 표현의 자유를 감소시키는 것이다. 원하는 최종 모양으로 3D 프린팅하게 되면 복잡한 형틀작업이 필요하지 않으며 특정 상황에 맞게 곡선과 세부 디테일을 만들어 낼 수 있게 된다. 3D 프린팅은 무한정으로 복잡한 모양을 가진 경량의 아기자기한 구조물을 설계할 수 있는 새로운 기회를 열어준다.

둘째, 콘크리트 구조물에 있어서 시공의 용이성을 위해 구조물을 단순화하는 것은 최적화된 형상을 만들기보다는 더 경제적인 정형화된 형상을 만들게 된다. 형틀작업은 기존 콘크리트 공사비의 약 50%를 차지한다. 형틀작업에 대한 재료 투입과 시공요건을 감소시킴으로서 구조물

을 만드는데 사용되는 자원을 크게 줄일 수 있다. 많은 재료와 형틀작업을 제거함으로서 최종 건축물에 대한 전반적인 내재 탄소량과 건축물에 들어가는 자원을 감소시킨다.

본문의 그림 2는 ETH 취리히 기술대학에서 설계된 최첨단 3D 프린팅 판넬이다. 이 디자인은 형상에 맞추어 최적화된 곡선모양을 볼 수 있다. 프린팅된 판넬은 영구적인 형틀 역할을 하며 나중에 배선 작업용 채널이 포함되어 있다. 이와 같은 솔루션을 사용함으로서 형틀작업은 생략될 수 있고 전반적인 재료의 사용과 시공비가 절감될 수 있다.

3.3 건설의 변화

지난 수십 년 동안 현장 안전이 시공의 변화를 주도해왔지만 오늘날 현장의 시공 공정과 50년 전의 시공 공정 간에 보이는 차이점은 거의 없다. 철근 콘크리트공사에 대한 시공 공정은 기본적으로 여전히 인력을 기반으로 하고 있으며, 철근을 설치하고 콘크리트를 타설하는 작업이 인간의 노동력에 의존하고 있다. 반면에 현대적인 자동차 공장은 옛날과 사뭇 다르다. 50년 전에 거기서 일하던 사람들에게는 기계화공정의 자동차 공장 모습이 몰라보게 달라진 것이다.

만약 3D 프린팅 장비가 고소작업이나 좁은 공간의 작업 등 사람을 필요로 하는 곳에서 사용된다면 일정부분의 리스크는 제거될 수 있을 것이다. 따라서 디지털 선진 기술은 우리의 공사현장을 보다 안전하게 만들 수 있을 것이다. 이것은 다양한 제조공정을 위해 설계를 할 수 있는 구조 엔지니어를 필요로 하며 우리는 다양한 기술이 설계과정에 어떻게 영향을 미치는지를 알아야 한다.

4. 콘크리트 프린팅 방법

콘크리트 3D 프린팅의 주요 기술은 아래와 같다.

* 콘크리트 쌓아 올리기
* 파우더 베드(powder bed) 및 바인더(binder) 기술
* 보강 메쉬

각 방법에 대해 현재 사용 및 사용 가능성이 있는 것 그리고 제한 사항들을 기술코자 한다.

4.1 콘크리트 쌓아올리기(Layering concrete)

콘크리트 쌓아올리기는 압출기반의 공정이다. 로봇 제어 노즐은 콘크리트를 겹겹이 쌓아올리며 자유로운 형태의 모양을 만들어낸다. 생콘크리트 상태로 압출되어 겹겹이 쌓아 올려지는 콘크리트 층은 수미터 높이의 건축 구성품을 신속히 만들어낸다. 일반적으로 두께 30cm, 높이 1m, 길이 1m의 벽체를 만드는데 대략 1시간 정도 걸린다. 노즐은 문형 크레인 장비(gantry) 또는 로봇팔에 장착될 수 있으며 입력된 디자인에 따라 자유로운 형태의 모양을 압출 성형해 낸다.

4.2 파우더 베드 및 바인더 기술(Powder bed and binder techniques)

이 방식의 3D 프린팅에는 고운 가루에서부터 직경 5mm의 과립형 재료에 이르는 모든 적층형 재료(deposition material)가 사용될 수 있다. 적층형 재료 한 층을 뿜어낸 후 얇은 바인더 층이 뿜어져 나와 재료를 함께 접착시키게 된다. 과립형 재료의 얇은 층에 화학 바인더 또는 수지(resin)를 사용하여 바인더층과 과립형 재료층을 번갈아 뿜어내면서 디자인에 따라 만들어진다. 최종 마감작업을 하기 위해 접착되지 않은 재료는 프린팅 후 제거된다.

4.3 보강 메쉬(Reinforcement mesh)

콘크리트를 프린팅하는 아이디어를 뒤집어 생각해 보면 수반되어야 할 대체 기술(alternative technology)은 콘크리트 보강 메쉬를 만든 후 그 안에 콘크리트를 채워 넣는 기술이다. 이 방법에서 보강 메쉬는 콘크리트의 영구적인 형틀재로서 사용되는 것이다. “Branch Technology”회사는 폴리에틸렌 망을 만드는 세계에서 가장 큰 자유형 로봇을 사용하고 있다. 이 보강 메쉬는 라티스 구조재(lattice structure) 또는 구조물의 골격으로 사용되는데 그 안에 콘크리트가 타설되어 콘크리트 보강 제작용으로 쓰인다.

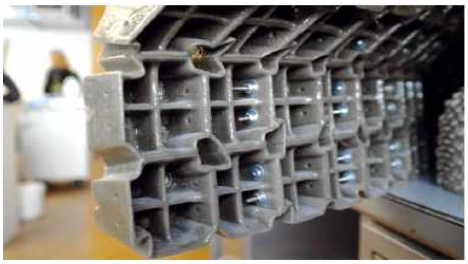
4.4 가능성의 확대(Expanding the possibilities)

4.4.1 3D 프린팅 연결

3D 프린팅 콘크리트의 사용 범위는 프린팅 조각을 스마트한 방법으로 연결함으로서 확대될 수 있다. 지금까지 개별 건축 구성품들이 프린팅 되어왔는데 완벽한 건축물을 이루도록 이러한 개별 건축 구성품들을 연결하는 방법에 대한 의문이 제기된다.

3D 프린팅 개발자들은 기술을 사용하여 세부적인 연결방법을 도모하고자 하였다. Rael San Fratello는 20cm x 20cm 규격의 부재 사이에 너트와 볼트를 사용할 수 있는 시설을 갖추었다. 그림 15의 프린팅된 조각품은 그림 16에 표시된 볼트체결 방법을 사용한 것이다. 프린트하는 과정 중에 구멍들이 체결될 수 있다. 이런 방법으로 건축물 전체를 완성하려면 디자이너가 전체 건축물 내의 각각의 작은 부품을 고려하여야한다.





<그림 15 - 그림 16의 소형 부품을 결합한 것> <그림 16 - 볼트체결로 결합한 소규모 프린팅 부품>

4.4.2 재료

콘크리트 프린팅용 각 방법 및 기계는 특정 조건에서 가장 잘 작동하도록 그리고 특정 결과를 얻을 수 있도록 변화되고 최적화되어왔다. 엄청난 수의 다양한 프린터들이 훨씬 더 많은 각각의 재료들을 가지고 많은 일을 할 수 있다. 업계에서는 재생 가능하고 지속 가능한 재료들의 활용의 잠재력을 검토하고 있다. 예를 들어 플라스틱 메쉬 프린팅의 경우 재활용 재료를 사용할 수 있다. 지금까지 실행된 몇 가지 실험 중 일부는 해양에서 수집된 플라스틱을 가지고 이루어졌다. 기존 콘크리트에 비하여 많은 재료들이 아직 더 비싸고 3배 이상의 비용이 들지만 비용문제는 시간과 인건비의 절감으로 균형을 이루게 될 것이다.

4.4.3 보강재료(Reinforcement)

콘크리트에 전달되는 인장력을 감당하기 위하여 보강 재료가 필요하다. 이것은 앞서 취리히 ETH에서 Mesh Mould 개발관련 언급되었던 것이다. 적층형 콘크리트를 보강할 수 있는 더 큰 잠재력을 가지고 있는 신규개발 사례를 소개코자 한다. 나폴리 대학 건축구조공학부(the University of Naples Federico II Department of Structures for Engineering and Architecture)의 연구진들은 3D 프린팅의 기술적 장점을 활용하여 최적화된 콘크리트 적층 설계에 보강 재료를 삽입할 수 있는 방법을 개발하였다. 나폴리 대학의 연구진은 구조적으로 요구되는 곳에만 콘크리트를 타설할 수 있는 3D 프린팅을 사용함으로서 최적화된 빔 설계 방안을 마련하였다. 그 빔 설계는 최소의 중량으로 최대 처짐을 줄일 수 있도록 최적화되었다. 시공을 위해 그 빔들은 최종 모양을 만들 수 있도록 조립되는 세그먼트별로 분리하였다. 이후 외인장 브레이싱 시스템(external tensile bracing system)을 제공할 수 있도록 보강철근을 이 세그먼트에 고정하였다.

5. 제작 방법

이 보고서는 3D 프린팅의 개발자의 최첨단 기능을 설명하는 것과 더불어 이제 그 선구적인 노력에서부터 건설현장의 대규모 공사에 이르기까지 프로세스를 수행하는데 필요한 핵심사항들을 살펴보고자 한다.

5.1 표준의 재정립(Renewal of standards)

로봇 및 재료의 개발은 빠르게 진행된다. 반면에 건축관련 규정과 표준은 입안하여 승인 후 실행이 될 때 까지 수년이 걸릴 수 있다. 쌓아올려 제조하는 것에 대한 일련의 표준들이 있긴 하지만 콘크리트 프린팅에 딱 들어맞는 것이 아니며 기존의 표준과 현재 개발 중인 기술간에는 차이가 존재한다.

단기적으로 기업들은 그들의 프로젝트에 가장 유사한 기준을 사용하여 규정의 부족문제를 회피하려 한다. 예를 들어, 미국의 Branch Technology는 구조용 단열 패널에 대한 규정을 사용한다. 이를 통해 개발 및 진행이 가능하지만 장기적인 솔루션은 아니다. 3D 프린팅 기술은 사용

되는 재료와 구조 형태에 관한 검증된 표준의 한계를 뛰어 넘기 때문에 명확한 엔지니어링 입력(engineering input) 사항 및 지침이 요구된다.

장기적으로 프린팅 건축 구성품을 지정하기 위해 국제적으로 기술자를 확보하려면 제조 프로세스가 체계화되어야 할 필요가 있다. 콘크리트 프린팅의 경우에서도 재료와 공정의 수를 감안할 때 제조 프로세스가 실행될 수 있는 방법에 대한 신중한 고려가 요구된다. 구조 엔지니어의 의견 및 지침을 통해 이러한 기술적 발전의 한계가 극복될 수 있다.

5.2 협업의 증가(Increased collaboration)

연구기간 동안 본인은 한 연구원으로부터 다른 연구원에게 인사말을 전달해 줄 것을 자주 요청받았다. 3D 프린팅 커뮤니티는 개척자들과 매우 밀접한 네트워크이다. 그들의 정신은 협업과 지식 공유가 관련된 모든 사람에게 더 나은 결과를 도출하는데 도움이 된다는 것이다. 그러나 기술발전에 또 다른 측면이 있다. 혁신가들에게 처음으로 시장을 개척하는데 더 많은 투자가 필요하다는 점과 지적재산권 관련 문제는 큰 숙제이다.

특허는 연구 활동을 보호하여 보다 많은 그리고 더 나은 협업을 위한 전제조건이 되는데 중요한 역할을 한다. 그러나 특허를 얻는 것은 복잡한 일이다. 규제 복잡성과 큰 이권(high stakes)이 걸린 문제로 인해 소규모 연구 프로젝트에게는 접근하기 어려운 이 분야에 전문 법률 서비스 웹이 생겨나게 되었다. 혁신을 보호하기 위해서는 극단적인 개선(marginal improvement)보다 단계적 변화가 필요하다.

예를 들어, 미국에서 Contour Crafting(등고선 제작방식) 특허를 취득하는데 1백만 달러가 소요되며 국제특허를 취득하는 데에는 더 많은 비용이 소요된다. 제품 또는 프로세스가 상업적으로 이용되기 전에 그에 관한 연구는 은폐되어야 한다는 것이 연구계의 일반적인 암묵적 합의사항이다. 특허를 취득하는 것은 나라별로 다양하다. 예를 들어, 미국에서의 경우 동일한 특허 부문에서 어떤 공정이나 신규 재료에 대한 방법 모두에 대한 특허를 신청할 수 없어서 비용이 많이 드는 두 개의 특허를 취득하거나 하나만 선택해야 한다.

그러나 절망적인 것만은 아니다. 2016년 ETH 로봇제작 연구실(Robotic Fabrication Laboratory)은 메쉬 몰드(Mesh Moulds)에 관한 연구가 스위스 기술상(Swiss Technology Award)을 수상하였다. 이 상을 수상함으로서 다른 건축가들과 공동작업자들에게 그들의 연구 성과가 알려지게 되었고 그로 인해 새롭고 지속적인 파트너십을 발전시키는 계기가 되었다.

우리는 지적 재산권의 중요성에 관한 문화적 장벽을 극복해야 하며 또한 더 많은 협업이 가능하도록 물리적인 장벽도 이겨내야 한다. 오늘날의 디지털 세계에서도 허브(hubs)는 서로 가깝게 위치하는 곳에서 발전하고 있다. 정부 연구 보조금 정책과 함께 하는 허브는 공동연구를 촉진하는데 도움이 될 수 있다. 취리히의 ETH는 스위스 당국의 권한을 위임받은 국립 연구소이다. 이 센터는 스위스의 과학, 경제 및 사회의 전략적 중요성을 가진 분야에서 장기적인 연구 네트워크를 촉진한다. 프로젝트에 공동연구를 할 수 있는 자금이 필요한데 아마도 학계와 산업계가 미래에 어떻게 함께 할 수 있는지에 대한 그 대답이 될 것 같다.

5.3 가능성의 증거(Proof that it is possible)

3D 프린팅과 관련한 흥미로운 것들이 많이 있음에도 불구하고 3D 프린팅이 미래의 건설 자동화의 일부란 사실을 입증할 만한 확실한 증거가 필요하다. 그 시장은 전 세계에 위치한 수많은 소규모 조직들이 연관되어 있다. 이 조직(firms)들은 여러 프로젝트에서 수많은 고객들을 위해 일하고 있으며 발표된 간행물(the snippets published)들은 이들은 시장이 이 기술을 수용할 만큼 충분한 집단적 이해(collective understanding)를 제공하지 못한다.

미국에서 증거가 부족한 한 가지 이유는 공공 도메인에서 본격적인 프로젝트를 허용하기를 꺼리는 것이다. 예를 들어 남부 캘리포니아 대학은 대학 캠퍼스에 건설되는 것을 우려하였으며 캘리포니아주는 책임문제로 공공장소에서 3D 시공을 금지하고 있다.

이를 극복하기 위해 기업들은 추가 테스트를 통해 그들의 건축물을 증명해야 한다. 수용여부는 관계당국에 달려있다. 채터누가(Chattanooga)에 있는 “Branch Technology”회사와 그 회사에서 현재 추진 중인 주택건설 프로젝트를 위해 회사에서 두 가지 규정요건을 담당하는 공무원을 만났다. 그 두 요건 중 첫째는 시험에 구조엔지니어를 배치해야 하며 실물 크기의 모형을 제작해야 하는 것이다. 그 모형의 크기는 1.2M x 2.4M로 대형이다.

6. 결론

이 보고서에서는 3D 프린팅 콘크리트가 저렴한 비용으로 구현 가능한 최적화된 설계를 제공함으로서 건설 산업의 변혁을 일으킬 수 있는 잠재력이 있다는 것을 강조하고자 한다. 3D 프린팅 콘크리트를 구조적으로나 상업적으로 건설가능하게 하기 위해 필요한 핵심 사항들도 요약하였다. 구조 엔지니어들이 업계의 3D 프린팅 기술채택을 이끌어 가는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 이것은 우리의 설계 효율성을 향상시키고 미래 인구 및 자원 수요에 부합할 수 있도록 우리의 건설 방식을 변모시킬 것이다.