디지털 워크플로우와 로보틱스가 여는 스마트건설:

콘크리트 3D 프린팅의 공학적 도전과 실천적 미래

글 | 김동현 세종대학교 건축학과 교수

I. 서론: 스마트건설의 핵심 동력, 콘크리트 3D 프린팅

오늘날 글로벌 건설 산업은 탄소중립 실현, 디지털 정밀 시공, 그리고 인구 구조 변화에 따른 현장 인력 감소라는 거대한 패러다임 변화를 맞이하고 있다. 이러한 환경적·사회적 요구 속에서 기후변화 대응과 생산성 혁신을 동시에 달성할 수 있는 '스마트건설기술'로의 전환은 이제 선택이 아닌 생존을 위한 필수가 되었다. 특히 정부가 발표한 스마트 빌딩 활성화 로드맵과 궤를 같이하며 '모듈러 건축 및 신공법·신소재' 테마의 중심축으로 부상한 '콘크리트 3D 프린팅(3D Concrete Printing, 이하 3DCP)' 기술은 현재 가장 가시적인 성과를 보여주는 분야이다. 최근 2020년부터 2026년에 이르는 기간 동안 3DCP 기술의 핵심 초점은 과거 초기 단계의 디지털 한계를 극복하는 수준을 넘어, 현장에서 마주하는 실질적인 물리적·구조적 과제와 시스템적 장벽을 해결하는 방향으로 급격하게 고도화되고 있다. 본 원고에서는 비정형 디자인을 온전히 실현하기 위해 축적된 학술적·공학적 도전 과제들을 짚어보고, 이를 극복하기 위한 디지털 워크플로우, 로보틱스, 재료 과학의 최신 동향과 성과를 집중 조명하고자 한다.

II. 디지털 워크플로우: 기하학적 제약 극복과 툴패스(Toolpath) 혁신

역사적으로 컴퓨터 3D 모델링의 복잡한 비정형 기하학을 실제 건축물의 스케일로 출력·재현하는 변환 과정은 수많은 공학적·미학적 과제를 수반해 왔다. 노즐에서 토출된 재료가 완전히 경화하기 전 중력에 의해 처지거나, 특정 구간에서 과압출(Over-extrusion)이 발생하는 현상, 그리고 적층 계면 간의 불량한 층간 결합(Layer bonding)으로 인한 구조적 취약성은 비정형 디자인 실현을 가로막는 대표적인 걸림돌이었다. 기존의 단순한 2.5D 방식 슬라이싱은 필연적으로 강도 저하와 곡면 표면의 '계단 현상'을 유발했다.

최근의 컴퓨테이셔널 툴패스 생성 알고리즘은 실시간 예측 시뮬레이션 및 모니터링 기술과 결합하여 이러한 한계를 정밀하게 제어하여 극복하고 있다. 학술연구분야에서 구체적으로 개발하고 있는 해결 방안으로서는 첫째, 3D 공간 곡선을 따라 재료를 정밀하게 적층해 나가는 '비평면(Non-planar) 3D 프린팅' 기술로서 곡면강도 저하와 계단 현상이 획기적으로 개선될 수 있음을 증명한 바 있다. 둘째, 출력 궤적과 구조적 주응력선을 정렬시킬 수 있는 '응력 인지 경로 생성' 알고리즘이 개발되어, 노즐 정지 및 재시작 시의 취약점을 보완하고 별도의 보강재 없이도 하중 분산 한계를 구조적으로 극복하는 최적 경로를 산출할 수 있게 되었다. 셋째, 프린팅 중 양생 전 초기 재령 단계에서 발생하는 붕괴 취약성을 방지하기 위해, 사전에 유한요소해석(FEA) 기반의 시뮬레이션을 수행하고 오버행(Overhang) 각도를 동적으로 조정하는 '무경사 제약 최적화' 기술이 성공적으로 적용되고 있다.

현재 이 분야의 실용화 단계는 실험적 성과와 상업적 현장 도입 간의 뚜렷한 격차를 좁혀가는 과정에 있다. 우선 실

'스마트건설기술'로의 전환은
이제 선택이 아닌 생존을
위한 필수가 되었다.

험적 성과로는 오일러 경로(Eulerian paths)를 활용한 무중단 연속 프린팅, 실시간 동적 툴패스 조정, 심도 카메라 기반의 지형 적응형 프린팅 등 고도화된 제어 기술이 성공적으로 입증되고 있다. 반면 상업적 도입 측면에서는 자연어 기반 프린팅 스크립트 변환 기능을 갖춘 COBOD의 Slice 소프트웨어 및 AI를 활용한 결함 탐지·품질 보증(QA) 등이 산업에 적용되기 시작했다. 다만 이러한 상업적 기술들은 아직 통제된 환경과 특정 파일럿 프로젝트에 국한되어 있어, 광범위한 실제 현장 도입은 여전히 제한적이라는 과제를 안고 있다.

III. 하드웨어 및 로보틱스: 건설 현장 스케일링과 현장시공(live construction)

실험실 내의 통제된 프로토타입 규모를 벗어나 소규모 주택, 공공 건축물, 그리고 인프라 시설과 같은 거대 구조물을 실제 건설 현장에서 live로 출력하기 위해서는 하드웨어 체계의 대대적인 스케일링(Scaling)과 물리적 안정성 확보가 필수적이다. 거대한 갠트리 시스템의 물리적 크기 제약과 외부 시공 시 바람, 온도, 습도 등 기후 조건의 변동성은 상용화를 가로막는 심각한 병목현상이었다. 이를 타개하기 위해 최신 로봇 기반 하드웨어 혁신은 자동화, 안정화, 고도화된 유량 제어 시스템을 탑재하며 진화하고 있다.

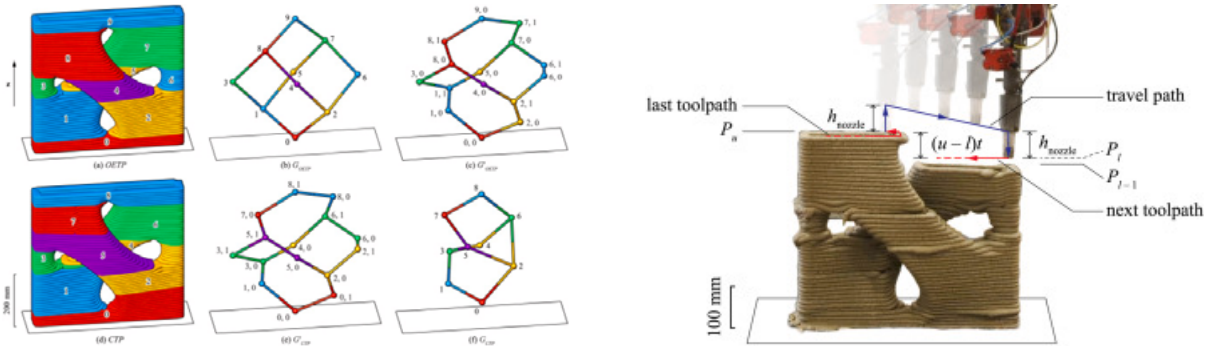
대표적인 혁신 성과로 ETH 취리히(ETH Zurich)에서 진행한 'Tor-Alva' 프로젝트는 듀얼 로봇 시스템을 활용하여 콘크리트를 압출함과 동시에 금속 메쉬를 내부로 삽입하는 공법을 선보이며 그동안 자동화가 불가능에 가깝다고 여겨졌던 철근 배근 문제를 영리하게 해결했다. 또한, ICON사가 선보인 'Phoenix' 시스템은 크레인 형태의 로봇 메커니즘에 자이로스코프(Gyroscopically)로 작동하는 안정화 노즐을 결합하여 고층에서 가해지는 강력한 풍하중과 흔들림을 능동적으로 상쇄하며 대규모 적층 시의 안정성을 극대화했다. COBOD사의 BOD 2.5 장비는 비정형 곡면의 마감 품질을 높이기 위해 회전식 헤드에 표면 평활용 플랩(Smoothing flaps)을 장착함으로써 3D 프린팅 특유의 거친 압출 흔적을 매끄럽게 다듬는 표면 품질 제어를 이뤄냈다. 이에 더해 Vertico사의 프린트 헤드는 압력, 온도, 습도를 실시간 모니터링하는 인터페이스를 갖추고, 내부 믹싱 챔버에 특수 코팅(CODUR)을 처리하여 장시간 연속 출력 시 자재가 엉기거나 정체되어 흐름이 끊기는 현상을 완벽히 방지하는 등 견고화(Ruggedization)된 현장 제어 시스템을 구축해 나가고 있다.

IV. 재료 과학과 시스템적 장벽: 상용화를 위한 최종 과제

3DCP 기술이 실험실 규모의 시범 적용을 넘어 완벽한 표준 공법으로 거듭나기 위해서는 재료 과학적 안정성과 제도적 기반이 병행되어야 한다. 재료 측면에서는 공급 라인이 막히는 것을 방지하면서도 노즐에서 압출된 직후에는 초기 붕괴를 방지하고 빠르게 자립할 수 있는 재료 물성 확보를 위한 기술 개발이 요구된다 .

이를 위해 학계에서는 배합 내 섬유(In-mix fibers) 및 외부 케이블을 통한 인장 강도 확보, 그리고 환경 오염을 줄이는 무폐기물 멤브레인 거푸집 기술 등을 해결책으로 제시하며 구조적 무결성과 친환경성을 동시에 검증해 나가고 있다. 또한 상업 부문에서는 자재 배합의 경제성과 하드웨어 제어 능력을 극대화하는 방향으로 진화하고 있다. 양생 전 초기 재

[그림 1] 노즐 높이 제약 하에서의 오버행 안정성, 연속 출력 및 치수 정확도 제어를 위한 툴패스 최적화의 예시



령 단계의 붕괴 리스크를 제어하기 위해 압출 직전 노즐 내부에서 경화 촉진제를 직접 주입하는 '인시츄 도징(In-Situ Dosing)' 기술을 상용 프린트 헤드에 탑재하는 방법이 개발되었고 고가의 프리믹스 특수 몰탈(Pre-bagged proprietary mortars)을 전량 구매하여 사용하는 대신, 단 1%의 스마트 혼화제(D.fab) 배합 기술만으로 99%의 현지 모래와 골재 등 원자재를 그대로 활용할 수 있게 됨으로써 소규모 주택과 인프라 시공의 경제적 타당성을 대폭 제고했다.

그러나 이러한 기술적 성취에도 불구하고, 실제 광범위한 산업 확산을 위해서는 반드시 넘어야 할 시스템적 장벽들이 존재한다. 우선, 3DCP 기술의 안정적인 현장 구현을 위해서는 자재 물류 최적화를 위한 공급망 전반의 BIM 연동화가 필요하지만 BIM의 보급은 아직도 더딘 상황이며, 한국의 혹한 혹서기의 극단적인 기후를 고려할 때 기후의 영향을 최소화하기 위한 오프사이트(Off-site) 모듈식 프리패브(Prefabrication) 도입이 필수적이지만 관련 산업은 아직 시작단계에 불과하다. 또한, 건축법 제48조 및 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에 따라, 일정 규모 이상(층수가 2층 이상이거나 연면적 200제곱미터 이상 등)의 건축물은 설계 시 반드시 건축구조기술사의 구조안전 확인(구조계산서)을 받아야 하지만 현재 국내 건축구조기준(KDS)에는 콘크리트 3D 프린팅(3DCP) 공법에 대한 명확한 표준 설계 및 시공 기준이 없어 구조기술사 입장에서는 참고할 만한 법적 '선례'나 '표준 시방서'가 없음을 이유로 구조안전성을 보증(날인)하는 것을 꺼리는 실정이다. 따라서, 향후 3D프린팅 건축물에 대한 원활한 심의나 허가행위를 위해서는 관련 제도나 기술표준이 시급히 마련되어야 하는 상황이다.

국제적으로 볼 때 가장 큰 장벽은 바로 '의무적 규제 표준 및 표준 건축 설계 기준의 부재'이다. 현재 ISO/ASTM 52939:2023 등의 초기 표준 제안들이 성립되어 있으나, 이는 여전히 강제성이 없고 구체적인 자재 기준이나 표준 안전 작업 절차(SOP)가 확립되지 않은 자발적 프레임워크에 가까워서 규제와 법적 테두리가 명확하지 않다 보니 광범위한 실제 현장 도입과 민간 확산은 제한적으로 묶여 있는 실정이다. 따라서 물류·기후 리스크 대응책 마련과 함께, 각국 실정에 맞는 실질적이고 의무적인 포괄적 건축 규제 프레임워크의 정립이 무엇보다 시급하게 요구된다 하겠다.

V. 결론: 지속 가능한 미래 건축을 향하여

지난 2020년부터 2026년까지의 짧은 기간 동안, 콘크리트 3D 프린팅 건축 기술이 이루어낸 성과는 실로 눈부시다. 인시츄 도징, 듀얼 로봇 철근 배근, 스마트 혼화제 등 하드웨어와 자재의 융합 혁신은 구조적 취약성의 상당 부분을 해결했으며, 응력 인지형 비평면 툴패스 제어를 통해 비정형 디자인의 기하학적 자유도를 성공적으로 확보하고 있다. 물론 아직은 통제된 환경이나 특정 파일럿 프로젝트 위주로 상업적 도입이 국한되어 있고 기후 리스크 제어라는 숙제도 남아 있지만, 이는 디지털화된 스마트건설이 성숙해가는 필연적인 과정이라고 할 수 있다. 인공지능과 로보틱스가 결합된 3DCP 기술이 예측 불가능한 실제 건설 현장에 맞춰 더욱 견고하게 고도화되고, 의무적인 법적 표준이 안착된다면, 에너지 소비와 탄소 배출을 최소화하는 지속 가능 미래 도시의 핵심 기술로 굳건히 자리매김하여 그린 인프라의 확장에 기여하게 될 것이다. **KICT**

[그림 2] 3DP 로보틱스 및 하드웨어의 혁신

Tor-Alva 프로젝트에 활용된 듀얼 로봇

ICON의 Pheonix 프린터

Vertico MAI의 CONDUR 코팅 믹싱 챔버