

## [II 중점분야] 도로구조물의 스마트 건설 기술



**심상수** 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수, csshim@cau.ac.kr  
**이상윤** 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 수석연구원, sylee@kict.re.kr  
**심성한** 성균관대학교 건설환경공학부 교수, ssim@skku.edu

### 1. 도로구조물의 사업 공급체계의 혁신

국내 건설산업은 국내 시장을 기반으로 하는 성장기를 경험했고 해외 매출이 700억달러를 정점으로 하락하고 있는 상황이기 때문에 국가, 기업, 기술자 모두에게 변화가 절실한 상황에 놓여있다. 공공 인프라를 포함해서 그동안 건설한 인프라 총량은 지속적으로 증가하지만 노후화 속도가 급증하고 있어 인프라가 제공하는 서비스를 지속하기 위한 대책이 사전에 강구되어야 하는 시점이다. 또한, 신규 인프라는 국민들의 인프라에 대한 서비스 요구수준이 높고 건설에 따른 민원, 환경, 경제적 문제 등이 복잡하게 연결되어 있고 고령화와 건설에 필요한 자원 부족이 예상되기 때문에 혁신적

변화가 요구된다. 인력 중심, 현장 중심의 건설산업이 더 이상 유효하지 않고 칸막이 형태의 시스템은 혁신의 핵심적인 장애가 되고 있다.

스마트건설 연구개발 사업에서는 도로구조물에 대해서 프리팹 구조를 위한 DfMA 기술, 원격 자동화 시공 기술, 품질 관리 기술을 중점적으로 개발하고 있다. 세계 시장에서도 경쟁할 수 있는 핵심기술들이 공유되고 콘텐츠가 플랫폼 기반으로 운영될 수 있는 토대를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 사업관리 측면에서 디지털 모델 기반의 협업과 정보의 자산화가 뒷받침되어야 진정한 건설산업 공급체계의 혁신이 가능할 것이다.

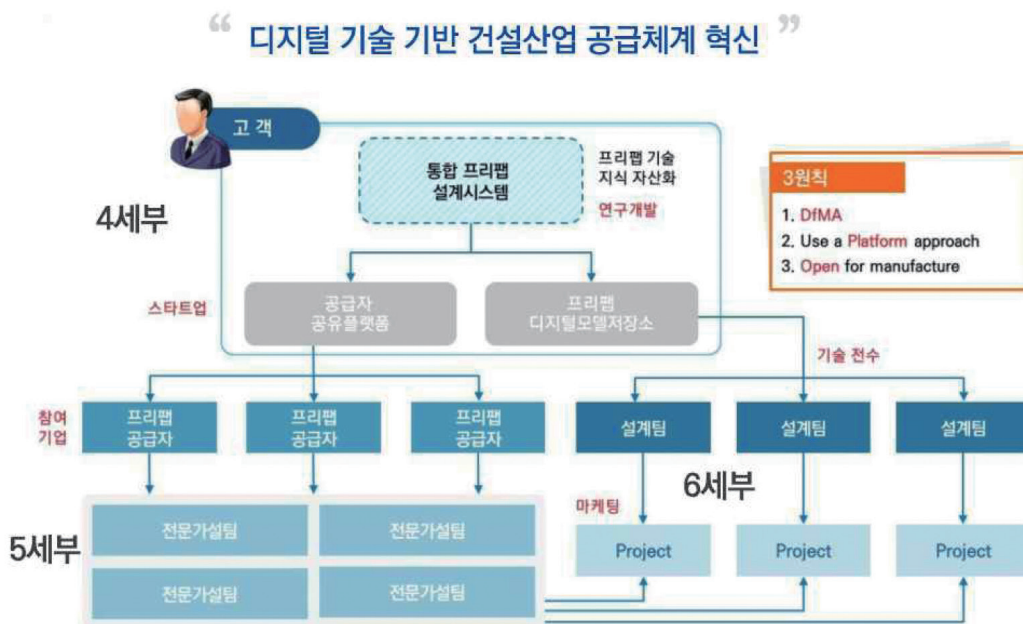


그림 1. 디지털 기술 기반 건설산업 공급체계 혁신

## 2. 도로구조물 스마트 건설을 위한 기술개발

### 2.1 스마트 프리캐스트 기술을 위한 디지털엔지니어링 모델

건설산업의 혁신 기술로 대두되고 있는 대표적인 2가지는 하드웨어 측면에서 프리캐스트 기술과 소프트웨어 측면에서 DfMA (Design for Manufacturing and Assembly)라고 할 수 있다. 건설산업이 목적 시설물의 다양성으로 인해 제조업과 같은 최적화된 생산체계를 갖추기 어렵고 생애주기 동안의 피드백이 하나의 공급체계에서 이루어지기 힘든 구조임은 아직도 명확하다. 그럼에도 불구하고 인구고령화, 자원부족의 심화, 환경 및 폐기물 감소에 대한 요구 증가, 정보통신 및 로봇 기술의 진화는 지금까지의 건설산업의 느린 변화를 지속하기 힘들게 하고 있다. 많은 선진국들이 국가의 공공시설물 발주시장을 근거로 프리캐스트 기술을 유도하고 있고 관련

표준, 제도, 계약 등을 능동적으로 제공하여 원가절감을 통해서 예산 효율성을 높일 뿐 아니라 건설에 필요한 재료, 장비, 인력의 부족에 대비하고 있다. 이에 따라 기업들의 기술 개발도 제조업 기술을 과감하게 도입하고 하드웨어 플랫폼으로 공급 가능한 프리캐스트 기술을 개발하고 실제 사업 적용을 통해서 원가 절감과 고품질화를 이루고 있다.

스마트건설 기술 개발사업의 4세부 과제는 “디지털기반 도로구조물 설계-제작-시공 지원기술 개발”이고 11개의 세부 과제와 2개의 해외위탁연구기관, 10개의 참여기업으로 구성되어 있다. 소프트웨어적인 측면에서 기존의 BIM기술을 타 산업분야와 연계시킬 수준으로 높은 디지털엔지니어링 모델 개발과 실증이 있고 하드웨어적으로 콘크리트 프리캐스트 구조와 강구조 프리캐스트 구조의 설계-제작-품질검사 기술 개발이 있다. 건설산업의 공급 체계를 프리캐스트 공급자, 조립가

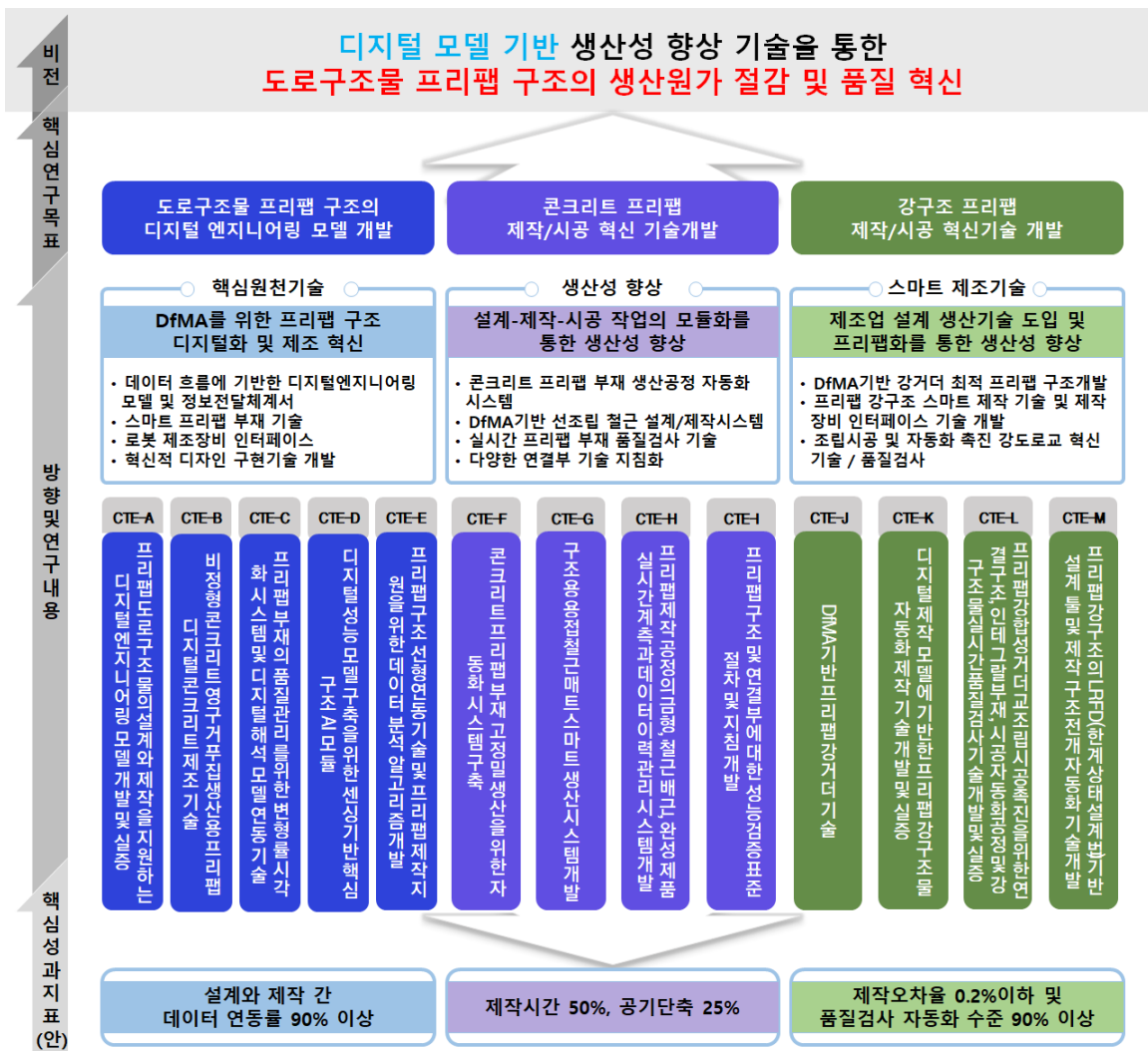


그림 2. 4세부 과제의 기술 구성 개요

설, 설계자로 구성되어 전문화된 플랫폼 기업들이 창출되도록 유도하고 상호간의 연결은 디지털엔지니어링 모델과 여기에 정의된 데이터에 기반하도록 하는 “Data-driven Engineering”이 중요한 연구 개념이다. 이를 통해서 데이터 연동 자동화율을 높이고 시간과 공간의 제약을 극복하는 동시공학적 절차가 이루어지도록 하는 목표를 갖고 있다. 하드웨어적인 측면에서는 현장작업을 최소화하고 생산을 자동화하기 위한 제조기술 개발, 이를 품질검사 자동화 기술, 설계 및 디지털 가조립 등 소요 기술을 개발한다. 또한, 프리랩 기술이 도입되는데 장애가 될 수 있는 설계기준이나 시방을 개선하고 제도적인 개선점을 도출하는 노력을 하고 있다.

스마트건설 기술은 국가간의 경계를 상당부분 무력화시킬 수 있기 때문에 국제적으로 무한 경쟁 기술영역이 될 가능성이 크다. 따라서, 연구개발이 진행되는 과정에 해외 연구 그룹과의 협력 연구가 필수적으로 필요하고 건설산업의 성장 잠재력이 높은 국가에서도 기술 도입의 현지화를 위한 연구를 수행할 예정이다. 영국의 캠브리지 대학은 “스마트 인프라센터”를 국가 지원으로 운영하고 있기 때문에 관련 경험을 공유하기 위해 협력체계를 구축했고 캄보디아의 ITC 대학은 향후 이 지역의 스마트 프리랩 기술 수출과 이를 활용한 국내 기업의 시장 확대 차원에서 기술 현지화를 위한 협력 연구를 수행하려고 한다.

## 2.2 도로구조물 원격 자동화 시공기술 개발

도로구조물 원격·자동화 시공 기술은 MR, 로봇, 머신러닝 등을 활용하여 건설공사에 포함된 위험한 작업, 인력에 의한 의사결정 등의 생산성 저해 요인을 해소하여 건설공기를 단축시킬 수 있는 시공 기술이라고 정의할 수 있다. 이 기술은 크게 교량과 관련된 ‘고소(高所)/고위험 시공 원격화’와 터널과 관련된 ‘TBM 시공 자동화’라는 두 가지 주제로 구성되어 개발된다.

첫 번째 구성기술인 ‘Telerobotics 기반 교량 고소/고위험 시공 원격·자동화 기술’은 인력 기반으로 이루어지는 주요 고소/고위험 공종인 교량용 거더 거치와 교각 현장시공을 로봇, MR 기술 등을 활용하여 원격으로 수행하는 기술이다. 본 기술을 적용하면, 인력에 의해 수행되는 현재의 교량용 거더 거치는 복수의 이동식 크레인이 협업하여 거더를 자동으로 운반하고 원격 조종자가 원격로봇(tele-robot)을 제어하여 최종 위치에 정밀하게 거치하는 방식으로 전환됩니다. 교각 현장시공은 자동 승하강 작업대 위에 배치된 복수의 로봇을 현장감 높은 MR (Mixed Reality) 환경에서 원격 조종자가 제어하여 시공하는 방식으로 전환된다.

두 번째 구성기술인 ‘머신러닝 기반 기계화 터널(TBM) 자동화 기술’은 지반 및 TBM 굴진 데이터와 머신러닝 기술을 활용하여 TBM장비 운전을 자동화하고 전방을 예측하여 TBM 시공 리스크를 감소시키는 기술입니다. 본 기술을 적용하면,

### ○ 교량, 터널 원격·자동화시공기술개발

**연구목표 1** 교량 고소/고위험 시공 원격/무인화

**연구목표 2** TBM 시공 자동화



구성기술 1	Telerobotics 기반 교량 고소 / 고위험 시공 원격 자동화 · 기술	구성기술 2	머신러닝 기반 터널 기계화 시공 (TBM) 자동화 기술
세부기술 1	▶ 교량용 거더 거치 무인화를 위한 협업형 로봇틱 크레인 기술	세부기술 3	▶ 머신러닝 기반 TBM 스마트 운용 기술 개발
세부기술 2	▶ 교각 무인화 시공을 위한 실감형 VR, 로봇 기반 원격시공 기술	세부기술 4	▶ 머신러닝 기반 TBM 리스크 관리기술 개발

그림 3. 세부 과제의 기술 구성 개요

운전자의 숙련도에 의존했던 TBM 시공이 자동화되고 굴진면 전방의 위험지반을 정확하게 예측하여 장비의 가동률이 향상된다.

앞서 설명한 교량 시공 원격·자동화 기술들은 위험한 위치에 투입된 인력에 의해 수행되는 거더 거치와 교각 시공 작업을 대신하게 되고, TBM 시공 자동화 기술은 TBM 장비에 S/W 형태로 적용되어 운전원을 대신하여 TBM 장비를 자동으로 운전하고 굴진면 전방의 위험성을 실시간으로 예측하여 알려주게 됩니다. 이러한 건설 현장의 기술적인 변화는 시공기간의 단축과 건설 생산성을 향상시키는 효과로 나타날 것으로 기대하고 있다. 앞으로 원격 또는 자동화 건설 기술의 활용 범위가 넓어진다면 건설현장의 작업환경이 개선되어 건설업에 대한 이미지의 쇄신은 물론, 청년층의 유입과 숙련 기반 확보에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

건설 현장에서 원격·자동화 기술의 적용이 활성화되기 위해서는 장비 또는 로봇을 이용한 작업에 대한 적절한 대가 산정 기준 즉, 품셈이 마련될 필요가 있다. 이를 통해 기업에게 합리적인 대가가 주어진다면 개발된 기술의 적용이 활성화되는 것은 물론이고 관련 기술에 대한 기업의 적극적인 투자를 촉진하리라 생각된다. 또한, 원격제어를 통해 반자동적으로 이루어지는 원격로봇의 작업 효율과 운용 중 안전성은 운전자의 숙련도에 직접적인 영향을 받기 때문에, 중장비 운전자에 대한 자격과 같이 원격로봇 운전자의 자격을 부여할

수 있는 제도의 마련에 대해서도 준비가 필요하다.

단기적으로는 개발되는 기술을 활용하는 기업의 이윤으로 얻어 질 수 있는 경제적 효과를 입증하는데 집중할 계획이다. 장기적으로는 극한지·극서지 등 인력으로 접근과 작업이 매우 어렵거나 불가능한 환경과 같이 원격 로봇, 원격 제어 기술이 효과적으로 적용될 수 있는 다양한 분야로 기술 적용 범위를 넓히고자 한다.

### 2.3 지능형 도로구조물시공 품질관리 기술개발

스마트건설기술개발 사업단의 6세부에서는 프리랩 기반 도로구조물 시공의 효율성을 향상시키고 품질관리를 위한 기술개발하며 궁극적으로 프리랩 기반 시공의 신뢰성 확보와 저변확대를 목표로 하고 있다. 우리는 LiDAR, 영상정보, 드론을 활용하여 프리랩 부재와 시공 중 구조의 3차원 형상을 계측하고, 계측된 형상을 바탕으로 조립시공 이전에 시공성을 판단하여 문제발생 위치를 추정한다. 이를 통해 시공자가 사전조치를 취할 수 있게 되어 잘못된 시공으로 인한 추가적인 공사비 지출 및 공기지연을 막을 수 있다. 또한 프리랩 시공의 경우 부재를 공장에서 생산하기 때문에 조립까지 운송, 인양, 적재의 과정을 반복하게 되며 이때 충격, 하중분배 불균형 등에 의해 부재의 품질이 저하될 수 있다. IoT센서를 통해 생산부터 조립까지의 부재의 변형을 계측하여 품질을 모니터링하는 기술을 개발합니다. 그리고 개발된 기술을 바

### 프리랩 기반 도로구조물 시공의 효율성 향상 및 품질관리 기술 개발



그림 3. 5세부 과제의 기술 구성 개요

탕으로 프리랩 기반 시공품질 관리를 위한 기준(안)을 제시할 계획이다.

개발하려는 연구의 핵심기술은 고속/정밀 형상계측 및 이를 이용한 시공성 사전판단과 운송 중 부재 모니터링을 위한 IoT센서 기술이다. 일반적인 형상계측은 LiDAR, 카메라 등을 이용하여 수행할 수 있지만, 현장에서의 적용이 가능한 수준의 고속화, 정밀화 및 사용성을 모두 만족해야 한다. IoT센서 기술도 운송 중인 부재의 거동을 정확하게 계측할 수 있어야 할 뿐 아니라 현장적용을 위한 비용, 사용성을 만족할 수 있도록 개발되어야 한다.

이 연구팀은 성균관대학교가 주관을 맡고, ㈜브리콘, ㈜디오티, 중앙대학교, 홍콩이공대학교, 한국도로공사가 공동기관으로 참여하는 총 6개의 기관으로 구성되어 있다. 스마트건설기술개발 사업이 실용화를 목표로 하고 있기 때문에, 기술개발과 현장의 니즈를 모두 충족시킬 수 있도록 대학과 기업이 적절하게 융합된 작지만 강한 팀이다. 성균관대와 홍콩이공대의 참여연구진은 교량 및 부재의 형상계측 분야에서 상당히 오랜 연구를 수행해왔고, ㈜브리콘은 프리캐스트 교각, 바닥판 등 관련 기술과 다양한 시공경험을 보유하고 있다. 또한 중앙대와 ㈜디오티는 교량 모니터링 목적의 IoT센서 개발에서는 국내 최고수준의 기술을 보유하고 있으며, 한국도로공사는 사업단 전체를 이끌고 있을 뿐만 아니라 6세부에서는 시공품질 관리 기준(안)을 통해 크게 기여할 것으로 기대를 하고 있다.

시공품질 관리기술을 통해 프리랩 시공의 신뢰성을 제고하고 이는 시장이 확대되는 결과로 나타날 것이라고 생각한다. 계측을 통해 시공품을 모니터링하는 것은 비용을 직접적으로 줄여주는 효과보다는 조립시공 시 발생할 수 있는 시공실패를 미연에 방지하여 불확실성을 줄여주는 형태의 간접적 효과가 크다고 할 수 있다.

### 3. 결론

스마트건설 연구개발에서 개발되는 요소 기술은 기술 패키징이 되어야 실질적으로 효과를 나타낼 수 있다. 대기업은 주력 상품군 단위에서 시장의 수요를 창출하고 현재 건설까지만 다루는 시장영역을 운영 및 유지관리 분야로 확대하도록 노력해야 한다. 제조업 분야에서 Digital Twin을 기술적 화두로 대두시키고 연구개발을 집중하는 것도 기업의 비즈니스 영역을 공급에서 멈추지 않고 생애주기 전체로 확대해

서 안정적인 수입 창출 구조를 만들기 위한 것이다. 하나의 제품군을 생애주기 동안 관리하면 문제점에 대한 실시간 피드백이 가능하게 되고 새로운 제품개발과 성능 개선이 빨라지게 된다. 건설산업에서는 공급 체계의 단계별 단절로 인해 이러한 생애주기 동안의 피드백이 실질적으로 이루어지지 못하고 있다. 공공 발주자가 이러한 역할을 수행해야 하지만 아직까지 설계 및 시공단계에 집중되어 있고 생애주기 자산가치 차원의 비용 모델 수립과 같은 노력은 미약한 실정이다.

전문기업은 소재, 부재, 생산시설, 장비 및 시공 기술, 유지관리 기술 등의 핵심적인 기술 영역에서 국내 뿐 아니라 세계 시장을 상대할 수 있는 기술력 확보를 할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 국내 시장이 합리적이고 어느 정도 예측 가능한 수준에서 수요 체계를 제공해야 한다. 요구성을 제시하고 이를 만족하거나 상회하는 제품군에 대해서 설계 단계에서 반영하고 이를 사업기간동안 지속할 수 있는 투명한 조달 플랫폼이 요구된다. 기술의 다양성에 어느 정도 제약이 있을 수 있지만 신규 건설시장 축소에 맞춰서 유사 기술의 통합을 통해 국가 자산으로서의 가치 중심으로 기술을 정립하고 이를 국가가 구매하는 체계가 필요하다. 다양한 제품을 개발하고 설계나 기술 지원을 지속하기 힘든 전문업체들이 늘어나고 있다. 또한, 이러한 다양한 제품군을 생산하는 시설도 수요 축소에 따라 줄어들 수 밖에 없고 이는 비용 증가로 이어지게 될 것이다. 하드웨어 측면에서 모듈화는 생산시설, 연결 기술, 조립 및 가설 기술, 장비 등이 공통 영역을 확장하는 것에서 그 장점을 극대화할 수 있다.