

# 스마트 건설장비 기술 트렌드

## Technology Trend of Smart Construction Equipment

김동목  
Dongmok Kim

### 1. 서 론

오늘날 건설현장은 고령화로 인하여 숙련된 작업자의 부족 현상이 갈수록 심화되고 있다. 또한, 극한 환경에서의 토공 작업도 많이 있어서, 작업 현장의 안전 확보도 중요해지고 있다. 그래서 건설 장비가 필요한 건설 및 토목 현장에도 무인화/자동화 기술이 많이 적용되고 있다. 필요한 자동화 요소 기술은 자동차 및 로봇틱스와 같은 인접 산업의 요소 기술 발전과 함께 최근 큰 진전을 보이고 있다.

이런 흐름은 각 장비 제조업체(OEM : Original Equipment Manufacturer) 및 전문 측량 업체들이 운전자의 조작 지원 시스템을 MG(Machine Guidance) 및 MC(Machine Control)와 같은 기능 및 솔루션들이 단계적으로 상용화되어 건설 현장에서의 사용이 늘어나고 있다. 이러한 작업 지원 혹은 운전자 보조 기능들은, 목표 도면 정보를 장비의 보조 기능 시스템에 입력한 뒤 작업자가 작업을 수행하는 것을 전제로 구현되어 있어서 아직 제한적인 반자동 기능 수준에 국한되어 있지만, 기존의 건설 현장에서 관행적으로 진행되던 작업 방식에 비해 현장의 정확도와 효율성을 높이고 있다.

현재까지 건설 시장에 출시된 건설장비의 제한적인 반자동 및 모니터링 수준의 스마트 기능 이외에도, 장비 제조업체들 내부적으로는 더 높은 자율 제어 수준의 무인화/자동화 건설장비 기술과 제품이 개발되고 있다. 스마트 건설장비 기술의 현재와 미래를 함께 소개하겠다. 일반 건설 현장보다 외부 환경으로부터의 통제가 쉬운 대규모 광산 현장을 중심으로, 약 10여년전부터 무인 장비가 현장에 많이 적용되고 있다.

### 2. 스마트 건설장비 기술의 현재

#### 2.1 도저와 모터 그레이더

굴착기보다 작업이 단순하고 반복적인 도저와 모

터 그레이더에는, 자동화된 기능이 좀 더 빨리 적용되었다. 이 장비들은 땅을 고르는 것이 가장 중요한 목적이기 때문에, 자동/반자동 기능은 땅의 지형과 상태에 따라 변하는 도저 블레이드의 삼날 높이를 최대한 빠르게 제어하여 평탄화 작업이 자동으로 이루어지도록 한다. 그래서 초보자나 비숙련자들도 숙련자 수준의 정밀도와 작업 생산성(속도)이 가능하게 해준다. 굴착기에 사용된 센서와 같은 종류의 위치/각도 센서를 장착하여 자동 작업 기능을 지원하기 때문에, 장비 1대의 자동화 기능뿐만 아니라 전체 작업 지역에서 여러 대의 장비가 작업한 완료 지역과 아직 작업이 남은 지역을 쉽게 파악할 수 있도록 정보를 수집할 수 있다.

요즘 대형 도저에는 자동제어 기능뿐만 아니라 원격 제어 기능까지 함께 탑재된 경우가 있으며, 원격 및 자동제어 기능이 결합된 솔루션으로 고객에게 제공된다. 대형 도저는 장비가 커서 작업자가 캐빈 내부에서의 도저 블레이드와 지면 사이 평탄화 작업 현황을 정량적으로 정확히 알기 어렵고, 주로 험지를 작업하느라 전복 위험성도 크기 때문에, 장비 외부에서 조종할 수 있도록 원격제어 기술이 서로 통합되었다. 조작자가 장비에서 멀리 떨어져서 원격제어만으로 정밀한 평탄화 작업이 어렵기 때문에, 원격제어가 자동제어와 함께 적용되어 해당 문제점도 해결해주고 있다.

모터 그레이더에도 비슷한 기술이 적용되는데, 역시 도저와 마찬가지로 비숙련자도 평탄화 작업의 정확도와 작업 생산성을 숙련자 수준으로 향상시킬 수 있도록 보조하는 것이 가장 중요한 목적이다. 기본 기능은 도저와 같지만 평탄화 각도 조절이 훨씬 큰 폭으로 가능하다는 점에서 조금 다르고, 이를 위한 추가 센서가 탑재되어 있다. 예를 들어, Mainfall Sensor, Rotation Sensor, Blade Slope Sensor 등과 같이 장착되는 각도 센서와 장착 위치가 조금씩 다르고, 블레이드를 움직일 수 있는 각도 범위가 도저보다 더 크다는 정도의 차이가 있다.

## 2.2 굴착기 2D/3D MG(Machine Guidance)

굴착기가 필요한 작업 중에도 고정밀 작업이 필요한 경우가 있는데, 도로 공사와 주택 공사 등에서의 기초 작업 마무리 과정에서의 정밀 작업이 있다. 수 cm 정확도의 평면 및 비탈면 고르기나 수도관 및 파이프 등을 매설하기 위한 트렌칭 및 도랑파기 작업에서 고정밀의 작업 완성도와 이를 위한 작업자의 숙련도를 필요로 한다.

도저나 그레이더와 유사하게, 굴착기 버킷 끝의 정확한 위치를 계산하기 위해 굴착기 작업부에 자세 측정을 위한 각도 센서와, 굴착기 몸체 위치와 방위각을 정밀하고 정확하게 측정할 수 있는 고정밀 GNSS(Global Navigation Satellite System) 시스템을 장착해서 굴착기 위치와 자세를 실시간으로 측정하고 계산한다. 계산한 결과는 캐빈(작업자 탑승 공간) 안에서 디스플레이 장치를 통해 작업자가 직접 정량적인 값을, 시각적으로 확인하면서 정밀 작업을 빠르게 할 수 있게 해준다.

굴착기의 MG 시스템은 도저 및 모터 그레이더와 달리 2D와 3D로 상품이 다시 나뉘는데, 이는 도저와 모터 그레이더의 주행 기반 작업과 달리, 굴착기는 대부분의 작업이 주행 후 한 곳에 정지해서 선회와 작업기(프런트부)의 붐, 암, 버킷 동작을 이용하여 진행되기 때문이다. 주행 위주로 작업하는 장비는 정확한 위치를 실시간으로 측정하는 것이 가장 먼저 필요하고, 이를 위해 고가의 고정밀(RTK : Real Time Kinematic) GNSS 시스템을 기본적으로 장착하는 3D MG 시스템이 필수적이다. 하지만 세부 토공 작업과 주행 이동 작업이 대체로 분리되는 굴착기의 경우, 고가의 고정밀 GNSS 시스템만 제외하고 비교적 저가인 IMU(Inertial Measurement Unit) 센서만으로 구성된 2D MG 시스템이 상품으로 이미 사용되고 있다. 비싼 GNSS 없이 저가의 IMU 센서 장착만으로도 기존의 작업 방식보다 현장에서의 작업 정확도 및 생산성 증대 효과를 기대할 수 있기 때문이다.

다만, 고가의 GNSS 시스템이 없는 2D 시스템은 각 영역별 작업이 끝난 뒤 주행을 하면, 장비의 상대 위치를 추정할 수 있도록 기준점(영점)과 공통점 지정을 통한 주행 좌표계 이동이 가능한 기능이 추가되어 있고, 해당 기능을 추가로 수행해야 하는 번거로움이 있다.



Fig. 1 현대두산인프라코어 2D Machine Guidance<sup>1)</sup>

## 2.3 반자동 (Assist)

앞서 설명한 MG 시스템도 작업부의 현재 위치와 정확도를 보여줄 뿐, 초보자의 평탄화 작업 생산성이나 숙련도를 직접적으로 향상시켜 주는 것은 아니다. 그래서 굴착기 작업부와 버킷 끝단의 현재 위치를 실시간으로 작업자에게 표시해주는 MG 시스템 이후, 초보자도 굴착기 평탄화 작업을 쉽게 할 수 있는 반자동 기능이 출시되기 시작했다. 기존의 굴착기 평탄화 작업은 2개의 조이스틱으로 붐-암-버킷의 3자유도 움직임을 적절히 조합해서 능숙하게 제어할 수 있는 숙련도가 필수적인데, 반자동 굴착기는 1개의 조이스틱으로 1가지 방향의 조작만으로 작업부의 암 유압실린더를 직접 수동 제어하면 나머지는 자동제어가 가능하게 해준다. 즉 목표면에 맞춰 붐이나 버킷 실린더가 자동으로 제어되는 기능이며, 이때의 평탄화 목표면의 위치와 기울기는 굴착기 작업자가 미리 세팅할 수 있다. 혹은 굴착기가 더 깊게 파면 안 되는 지형의 목표면을 지정된 뒤 과도한 굴착을 막아주는 보조 기능이 추가되기도 한다. 반자동 굴착기는 여러 센서와 전자제어 장치가 필요하지만, 현장에서의 빈번한 측량 작업이 줄고 작업이 빠르게 진행되어 공사 기간이 짧아지는 효과와 측량사의 작업 비용(인건비)이 줄어드는 경제적 효과가 있다.

## 3. 스마트 건설장비 기술의 미래: Concept-X와 무인 장비

앞에서 설명한 스마트 건설장비 기술의 현재 기능들이 운전자의 모니터링이나 반자동 제어만 가능하도록 해주는 것이었다면, 현대두산인프라코어의 Concept-X 프로젝트를 통해 준비하고자 하는 미래는 무인 장비와 이를 통제하는 관제 센터 중심의 무인 건설/광산 현장이었다. 장비의 자동화/무인화 수

준이 올라가면 스마트 건설 시스템 전체의 정확도와 생산성이 추가 향상될 것이라고 추정할 수 있다. 스마트 건설장비 기술의 미래를 추정하기 위해 Concept-X 프로젝트의 무인 굴착기 기술을 살펴보자.

### 3.1 무인 굴착기 시스템 구성

무인 굴착기의 시스템 아키텍처는 크게 인지(Perception), 판단(Planning), 제어(Control)로 나뉘며 세부적으로는 아주 많은 모듈들이 상호작용하며 동작한다. 이런 복잡한 알고리즘이 실시간성과 신뢰성을 만족하며 각 주기에 맞춰 구동될 수 있도록 ROS(Robot Operating System)라는 미들웨어를 사용하여 각 하드웨어 컴포넌트의 계산 자원을 관리하고 통신할 수 있도록 하였다.

우선, 무인 굴착기의 인지 시스템 중 자기 위치/자세 인지 시스템은 RTK GNSS, 선회 센서, IMU 등으로 이루어져 있다. RTK GNSS는 일반 자동차용 GNSS 대비해서 건설 현장에서 필요한 센티미터 단위의 고정밀도를 보장해주는 시스템이다. 또한, 건설장비는 현장에서의 작업 방향을 알아야 작업 목표와 연결할 수 있으므로 GNSS 안테나를 2개 장착하여 방위각을 실시간 계산한다. 상부체가 회전하여도 하부체 트랙 방향 정보도 알 수 있도록 선회 센서를 선회부에 장착하여 상부체와 하부체의 상대 각도를 실시간 확인할 수 있도록 했다. IMU는 붐, 암, 버킷 및 굴착기 몸체(Body)에 장착하여 작업기 관절의 각도와 굴착기 몸체의 경사각(Roll, Pitch)을 실시간 감지할 수 있도록 하였다.

굴착기가 무인 작업을 하기 위해서는, 주변 환경을 인지해서 데이터로 만들어야 하므로 주변 환경 인지를 추가했고, SVC(Stereo Vision Camera), LiDAR, RADAR, USS(Ultra Sonic Sensor), AVM(Around View Monitoring) 등이 적용되었다. SVC는 사람이 두 눈을 통해 3차원 공간을 시각적으로 인지할 수 있는 것처럼 2개의 렌즈가 서로 떨어진 위치에서 동시에 촬영하여 깊이, 색, 질감과 같은 3D 정보를 얻을 수 있게 해준다. SVC는 굴착기에 총 2개가 장착되었는데, 캐빈(운전실)에 장착한 SVC는 굴착기 전방의 사물을 인지하며, 굴착기 암에 장착한 SVC는 굴착기의 목표 작업 지형(땅)을 스캔한다. 굴착기 붐에는 LiDAR도 장착되어, 목표물에 레이저를 쏘아 반사될 때까지의 시간을 측정하여 인지 대상물까지의 거리를 계산하여 무인 제어 시스템에 정보를 제공한다. RADAR와 USS는 전방 이외 측방 및 후방의 주변

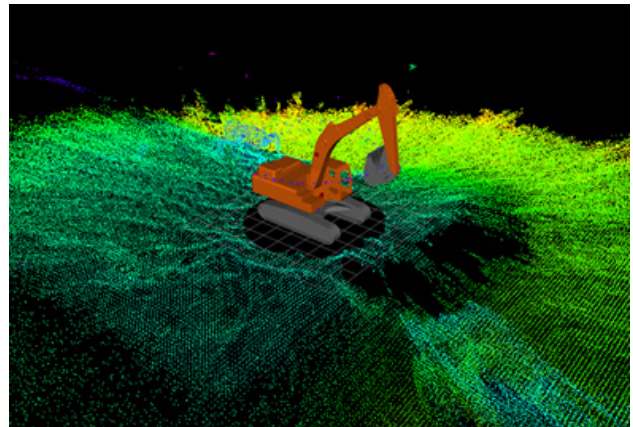


Fig. 2 360 Area Scan<sup>2)</sup>

사물을 감지하는 용도로 사용된다. AVM은 4개의 광각 카메라를 상부체 전후방과 양 측면에 배치하여 사각지대에 존재하는 장애물을 구분하기 위하여 사용하고, 4개의 광각 카메라 영상 정보를 실시간으로 붙여서 수행하여 하나의 입체 영상 정보를 생성하고 전달한다.

판단 시스템의 판단(Planning)이란 인지(Perception)로부터 얻은 정보를 기반으로 주변 환경을 파악하고 다음 동작 및 작업을 결정한다. 판단 시스템은 크게 Local Task Planning, Decision Making, Motion Planning으로 나뉜다. Local Task Planning에서는 작업 영역 안에서 효율적으로 이동할 수 있도록 경로 생성하는 Path Planning과 작업을 위한 트랙의 정지 위치를 선정하고 굴착 위치를 세분화하는 Sequence Planning이 있다. Decision Making은 관제센터(X-center)로부터 내려온 작업 순서대로 움직이도록 Mission을 관리하는 Mission Management System과 작업 도중 갑자기 발생하는 Event에 대한 우선순위를 판단하고 개별의 단위 작업을 결정하는 Decision Makings System이 있다. Motion Planning에는 작업을 위한 작업 장치의 궤적과 주행을 위한 주행 궤적을 생성하는 Trajectory/Path Planning이 있다.

제어 시스템은 굴착기의 복잡한 동작 특성을 잘 제어할 수 있도록 개발되었다. 굴착기는 유압 시스템으로 구성되어 있는데, 굴착기의 유압회로는 구조가 복잡하고 유압회로 자체의 비선형성이 시스템의 제어 모델링 구현과 정확도 성능 확보를 어렵게 만드는 주요 요인이다. 따라서 이를 고려해서 성능을 확보할 수 있는 제어기 설계가 중요하다.

굴착기의 작업기 제어는 로봇 매니플레이터 제어와 유사하여, 추종해야 할 궤적 명령 신호는 조인트의 각도 정보로 구성한다. Motion Planning에서는 전



문가의 동작을 학습한 머신 러닝 기반의 목표 궤적을 생성하며, 직교 좌표계에서 표현되는 버킷의 궤적을 역기구학을 통해 조인트 좌표계의 값으로 변환하여 제어 시스템에 전달한다. 제어 시스템에서는 IMU 및 선회 센서 등을 사용하여 실시간 측정하는 굴착기의 실제 조인트 각도 정보와, Motion Planning 으로부터 전달받은 각도 명령의 오차를 최소화하는 역할을 수행한다. 이를 위한 제어 로직은 크게 피드백 제어부와 피드포워드 제어부로 나뉘며, 피드백 제어부는 실제 산업 전반에 널리 쓰이고 있는, PID(Proportional-Integral-Differential) 제어 기법을 사용했다.

무인 굴착기의 주행제어는 자기 위치 인지에서 추정된 굴착기의 Localization 정보와 Reference Way point의 차이를 비교하여 선속도와 각속도(Yaw rate) 제어명령 값을 생성한다. 하지만 페루프 제어를 수행 중 비상 정지 혹은 원격제어 입력이 감지되면 주행을 멈추고 원격제어 명령을 따르도록 설계하였다. 주행 제어기에서 출력되는 Reference Velocity와 Reference Yaw rate는 굴착기의 제원을 고려하여 트랙의 속도 명령 값으로 변환되며, 굴착기 트랙의 속도 값은 굴착기의 속도에 따른 조이스틱 명령 값의 관계 모델을 통하여 변환되고 제어된다.

### 3.2 무인 굴착기 시연

Concept-X 프로젝트에서 수행한 무인 굴착기 작업은 크게 4가지다. 울퉁불퉁한 지형을 평탄하게 고르는 Grading, 관로 공사나 상하수도 매설 등을 위해 길고 반듯하게 땅을 파는 Trenching, 흙을 굴착하는 Digging, 작업을 위해 작업 영역까지 주행 작업



Fig. 3 Concept-X 시연 모습<sup>2)</sup>

이다. Grading과 Trenching은 작업의 연속성을 위하여 주행 작업과 필수적으로 연동하여 작업해야 하며, 실제 시연에서는 주행 작업과 연동한 Grading 작업, Trenching 작업 및 Digging 작업을 실시간 연속으로 수행하였다. Digging의 경우 흙을 파는 것뿐만 아니라 덤프트럭에 정확하게 Loading하는 것까지 수행하였고, 38톤 Concept-X 무인 굴착기로 시연 및 시험을 진행하였다.

## 4. 결론

스마트 건설 현장에 적용되고 있는 건설장비의 무인화/자동화 기술 트렌드와 세부 요소 기술에 대해 소개하였다. 자율 주행 자동차처럼, Industry 4.0 관점에서의 건설장비 분야도 전자제어 기반의 지능화 기술이 활발히 적용되고 있고 상업적인 성과도 조금씩 나오고 있다. 자동차와 달리 장비 종류 별 작업 종류와 기능이 다르기 때문에 필요한 자동화 기술 수준과 기능의 모습이 다르고, 이에 대한 몇 가지 사례도 살펴보았다. 도저와 모터 그레이더는 건설 현장의 평탄화 작업이 가장 중요한 목적이므로 평탄화 작업을 더 정확하고 빠르게 수행하여 현장의 작업 생산성을 높여주는 반자동 기능이 먼저 개발되어 적용되었다.

굴착기는 도저 및 모터 그레이더와 달리, 더 다양한 작업을 하는 범용 장비이기 때문에 MG 시스템이 늦게 적용되었으며, 주행과 작업이 대체로 분리되어 진행되기에 고가의 고정밀(RTK) GNSS 시스템이 없는 저가의 2D MG 시스템도 3D MG 대비 입문용으로 시장에 먼저 적용되고 있다. 근래에 들어서는 굴착기에도 평탄화 작업을 위한 반자동 제어 기능이 개발되어 현장에 적용되기 시작했다.

다음으로, 스마트 건설과 스마트 장비의 미래를 알아보기 위해 Concept-X 프로젝트 중 무인 굴착기의 세부 요소 기술을 살펴보았다. 무인 굴착기는 스스로 판단하고 움직일 수 있도록 인지(Perception), 판단(Planning), 제어(Control)로 나뉘며 각각의 기능이 주기에 맞게 작동하고 상호작용할 수 있도록 ROS를 적용하여 통합하였다. 무인 장비를 구성하는 3개의 시스템(인지, 판단, 제어)은 각각 필요한 센서 및 알고리즘과 SW로 구성되어 있고, 세부 요소 기술에 대해 본문에서 자세히 알아보았다. 본문에서 알아본 요소 기술이 무인 장비 기반의 스마트 건설 현장의 미래에 필요한 요소 기술의 전부는 아니다. 자율주

행 자동차와 달리, 건설장비는 다른 장비들과 협업하거나 현장의 작업 순서 앞뒤로 연계된 다른 작업들이 서로 밀접하게 연결되어있어 현장에서의 협업이 중요하고, 이에 따른 협업 및 Fleet 관리 요소 기술 개발도 추가로 필요하다.

무인 건설장비 기술을 개발하면, 현재의 스마트 건설 기술/제품 대비 앞으로 발전할 현장의 스마트 건설 미래를 더 구체적으로 예측할 수 있다. 장비 무인화를 위해 추가된 인지 시스템의 데이터는 드론 측량보다 더 자주, 더 빠르게 관계 센터에 현장의 작업 현황 정보를 업데이트할 수 있을 것이고, Trenching이나 Grading과 같은 단순 반복 작업은 간단하게 무인화해서 현장에 투입하는 것이 효율적인 것이다. 무인 제어를 위해 개발한 Motion planning 알고리즘 연구는, 더 효율적인 굴착기 움직임 연구로 자연스레 이어지고 유인 장비의 Assist 기술 개발에도 도움을 주고 있다. 기술 개발 측면에서의 장비/현장 무인화를 목표로 추가 개발되는 세부 요소 기술들이, 이제 본격적으로 시작하는 스마트 건설 현장의 추가 이익 창출 기회로 이어지고 시너지를 낼 수 있음을 확인할 수 있고, 스마트 건설 현장의 다음 미래를 구체적으로 더 그릴 수 있었다.

## 참고 문헌

- 1) Youtube, 두산인프라코어 굴착기 2D 머신가이던스 시스템, <https://www.youtube.com/watch?v=qjST9jaIXIE>
- 2) Hyundai Doosan Infracore [Online], Concept-X, Introduction, <https://asia.doosanequipment.com/kr/smart-solution/conceptx/overview>, (Accessed: 23 Sep 2021).
- 3) 박민철, 정우용, 양승만, 홍희승, 홍성훈, 이희진, 김창목, 문지현, 강민성, 김영준, 유근수, 김동목, 무인 굴착기 자율 제어 시스템 개발, 2020 한국자동차공학회 춘계학술대회, Vol.60, No.167, 2020.

## [저자 소개]

김동목



E-mail : dongmok.kim@hyundai-di.com  
 2011년 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 졸업. 2011년~현재 현대두산인프라코어 소속으로, 현재 기술원 스마트장비 기술개발팀 팀장. 건설장비의 스마트 기술 및 무인화/자동화 기술 개발에 종사.  
 한국 건설자동화 로봇스학회의 회원, 공학박사