

# 지능형 굴삭을 위한 토공작업계획 시스템의 구조 설계

## A Study on the Design of Task Planning System for Intelligent Excavating System (IES)

이 원 식, 송 순 호, 이 승 수, 서 종 원, 김 성 근  
Lee, Won-Sik, Song, Soon-Ho, Lee, Seung-Soo, Seo, Jong-Won, Kim, Sung-Keun

### 요 약

토목, 건축과 관련된 노동현장은 여느 3D 업종들과 마찬가지로 숙련된 기능공의 부재 및 산업재해 발생으로 인해 어려움을 겪고 있으며 이를 극복하기 위한 노력을 계속하고 있다. 대표적인 토목공사인 토공 작업 역시 위험 혹은 유해한 작업환경으로 인해 토공장비의 안전사고 및 생산성과 품질저하가 발생하며 이를 방지하기 위한 장비의 지능화가 절실하게 요구되고 있다. 이를 위해 최근 지능형 굴삭 시스템 개발을 위한 연구가 진행되고 있으며, 토공작업은 일반적으로 광범위한 작업영역을 가지기 때문에 지능형 굴삭시스템의 개발을 위해서는 효율적인 작업을 수행할 수 있도록 하는 작업계획의 수립이 매우 중요하다. 본 연구에서는 작업계획의 대상을 굴삭로봇과 토사로 구분하였으며, 글로벌 영역에서 단위작업 영역, 로컬 영역으로의 분할을 통해 전체 작업 진행에 대해 효율적으로 작업계획을 수립할 수 있도록 구성하여 계획단계에서부터의 토공작업 자동화 및 효율화에 기여하고자 한다. 토공작업계획 시스템은 토공 작업자 및 감독자의 작업 특성 및 노하우를 컴퓨터, 즉 두뇌에 부여함으로써 숙련된 장비조종자의 작업 방법 및 특성을 반영하여 토공 작업 프로세스 모델링을 구축하고 실제 작업환경상의 센서에 의해 측정된 데이터를 실제 작업환경과 동일하게 모델링된 컴퓨터내의 가상환경을 바탕으로 영역분할, 최적 플랫폼 위치선정 및 작업 순차생성을 통해 최적의 토공작업계획을 수립할 수 있도록 한다.

키워드: 지능형 굴삭, 토공작업계획, 작업 플랫폼, 토사 영역분할, 작업 순차생성

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

토목, 건축과 관련된 노동현장은 여느 3D 업종들과 마찬가지로 숙련된 기능공의 부재로 인한 어려움을 겪고 있다. 이로 인해 능숙한 장비운전자의 부재로 발생할 수 있는 안전사고, 생산성과 품질저하 및 장비조작의 실수로 인한 재시공을 방지하기 위해 조종이 간편하며, 장비조종을 위한 조종자의 각종 의사결정에 대한 지원기능을 가진 건설 자동화 시스템의 개발이 시급한 실정이다. 특히 매립지에서의

다짐 및 복토공사, 지뢰 및 폭탄 등에 의한 폭발의 위험이 있는 장소와 같이 위험 또는 유해한 환경에서의 토공 및 복구작업은 장비조종자를 위험에 노출시키므로 지능화된 장비의 개발이 절실히 요구된다. 특히 재래식 작업 특성을 지닌 토공작업의 경우는 작업의 안전성 확보뿐만 아니라 토공의 생산성과 품질의 향상을 위해서도 지능화된 자동화 장비를 이용하여 효율적으로 토공작업을 수행해야 할 필요가 있다. 이러한 당면과제의 해결을 위한 기술적 접근방안으로 최근 급속도로 발전하고 있는 컴퓨터 기술, GPS 및 레이저를 활용한 측량기술, 센서, 원격조정 및 지능제어 기술, 인터넷 및 무선 정보통신기술 등의 원천 기술 확보를 통해 건설생산기술의 혁신적 변화를 가져올 첨단 융합 건설 자동화 시스템 개발이 필요하다. 현재 진행 중인 지능형 굴삭시스템 개발 연구는 다음 그림 1과 같이 지능형 Task Planning System 개발, 지능형 제어기술 개발, 지능형 굴삭시스템 개발 및 통합으로 구분하여 체계적인 연구가 수행 중이다.

본 연구는 지능형 굴삭을 위한 지능형 Task Planning System 개발의 일환으로 설계정보와 원지반에 대한 형상 정보 처리 및 토공량 산출, 효과적인 장비 운용계획을 위한 최적의 작업순서 선정 및 작업 경로 생성을 포함하는 토공 작업계획 시스템을 개발함으로써 계획단계에서부터의 토공

- \* 학생회원, 한양대학교 토목공학과, 박사과정  
beaukor@gmail.com
- \* 학생회원, 한양대학교 토목공학과, 석사과정  
snowkin@hotmail.com
- \* 학생회원, 한양대학교 토목공학과, 석사과정  
rokhonor99@gmail.com
- \* 일반회원, 한국대학교 토목공학과 조교수, 공학박사  
jseo@hanyang.ac.kr
- \* 일반회원, 서울산업대학교 토목공학과 조교수, 공학박사  
cem@snut.ac.kr

본 연구는 건설교통부 첨단융합건설기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 06첨단융합C01)에 의해 수행되었습니다.

작업 자동화 및 효율화에 기여하고자한다.

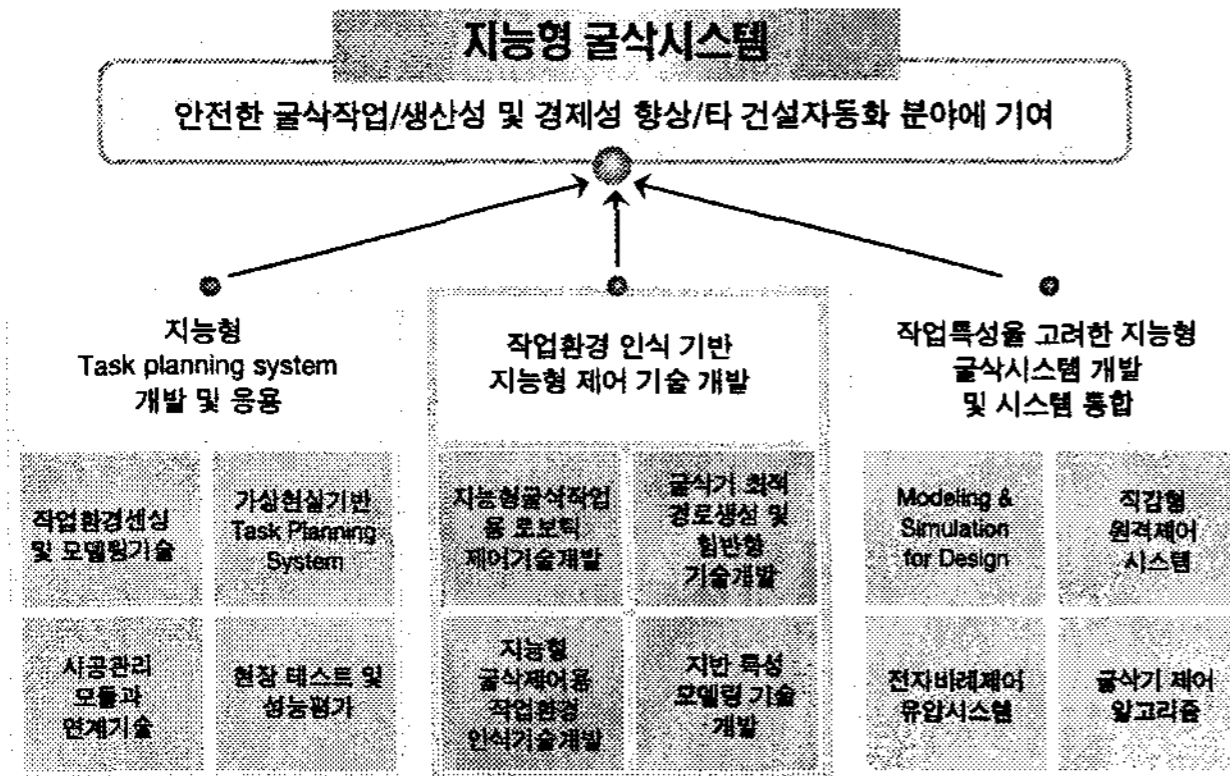


그림 1. 지능형 굴삭시스템 개발 개념도

## 1.2 연구의 범위

본 연구개발의 최종 목표는 작업 영역에서의 시공 상황에 따라 지속적으로 변화되는 비정형(amorphous)의 지반형상의 데이터를 기반으로 산출되는 작업 정보를 바탕으로 전체 작업 영역분할 및 순차 생성 시스템 개발이며 연구개발의 범위는 다음과 같다.

o 작업 영역에 있어 시공 상황에 따라 지속적으로 변화되는 비정형 지반형상을 주기적으로 맵핑하고, 이를 통해 얻어지는 데이터와 설계 데이터를 비교하여 작업영역을 산출하는 알고리즘을 구축한다.

o 토공 작업자나 감독자의 작업 특성 및 노하우를 Task Planning System에 반영하여 작업 영향 요인에 따른 최적 토공작업 프로세스 모델링을 구축하고, 작업영역 분할 및 최적 플랫폼 위치선정, 작업순차 및 이동 계획 생성 기술을 개발한다.

o 작업영역 내에서 센싱된 데이터를 기반으로 실제 작업 환경과 동일하게 가상환경을 모델링하고 굴삭 로봇의 작업 단위에 맞춘 작업영역 분할 및 토사 이동계획을 수립하여 최적의 토공작업계획을 작성할 수 있는 가상현실 기반 지능형 Task Planning System을 개발한다.

## 2. 가상현실 기반 작업계획 시스템(Task Planning System)의 구성

### 2.1 작업계획 개요

토공 작업계획 시스템의 개발을 위해서는 계획의 대상 및 계획 환경을 명확히 구분할 필요가 있다. 이는 지능형 Task Planning System. 개발에 있어서 작업환경을 효율적으로 분석하고, 계획의 대상인 토사 이동과 로봇 운용의 연계성을 확보하기 위해서이다.

계획 환경은 크게 글로벌 영역과 로컬 영역으로 구분할 수 있다. 글로벌 영역은 실제 작업이 수행되는 토공사 전반

에 걸친 현장 단위의 작업영역을 의미하며, 레이저스캐너를 이용하여 3차원 정보를 생성하고, 설계 도면과의 비교를 통해 작업영역과 작업영역의 작업량 정보를 생성한다. 로컬 영역은 굴삭로봇이 한 지역에 플랫폼을 구축한 후 작업을 수행할 수 있는 로봇의 작업범위로 굴삭로봇의 이동에 따라 로컬영역 센싱이 수행된다. 센싱된 로컬영역의 데이터는 글로벌 영역 가상환경으로 업데이트되어 3차원 가상환경 월드 모델을 수립한다.

작업계획의 대상으로는 작업을 수행하는 굴삭 로봇과 작업 대상물인 토사로 구분할 수 있으며 본 지능형 Task Planning System에서는 토사의 이동계획을 중심으로 영역 분할 및 순차를 생성하며, 글로벌 영역 내 이동 경로를 제공한다.

계획 환경과 계획 대상으로 구분하여 각 영역별 작업계획 시스템의 개발 모듈을 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 작업계획 대상 및 환경에 따른 개발 모듈

구분	토사 대상	굴삭로봇 대상
글로벌 영역	-작업환경 구성모듈 -토공량산정 및 작업성질 결정 모듈 -로컬영역 선정 모듈 -로컬영역간 작업순차생성 모듈	-최적플랫폼 선정모듈 -플랫폼 이동계획수립모듈
로컬 영역	-영역 내 작업영역분할 모듈 -토사이동 순차계획 모듈	-굴삭로봇 제어모듈 (작업계획 시스템에서 포함하지 않음)

### 2.2 플랫폼 생성

글로벌 영역에서 작업 단위의 로컬 영역을 분할하는 기준을 제공하는 것은 작업 시 굴삭로봇의 고정된 위치인 플랫폼이다. 플랫폼은 굴삭로봇의 위치 및 공간에 대한 정보뿐만 아니라 굴삭로봇의 효율적인 3차원 작업 범위와 작업 진행 방향, 덤프 진입로 생성 등에 대한 정보를 포함한다. 플랫폼의 생성은 지형정보를 바탕으로 굴삭, 절토와 같은 작업 성질에 따라 결정되며, 작업 진행에 따른 지형 변화에 따라 생성 또는 소멸되는 가변성을 지닌다.

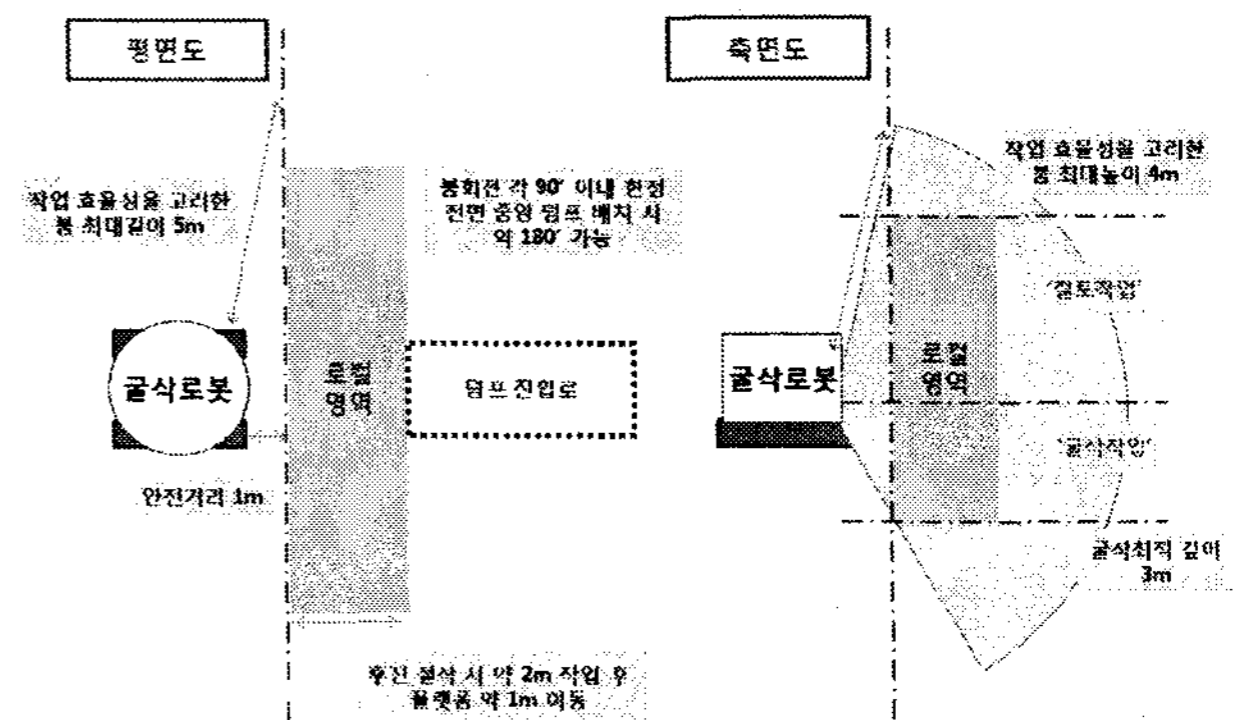


그림 2. 플랫폼의 특성

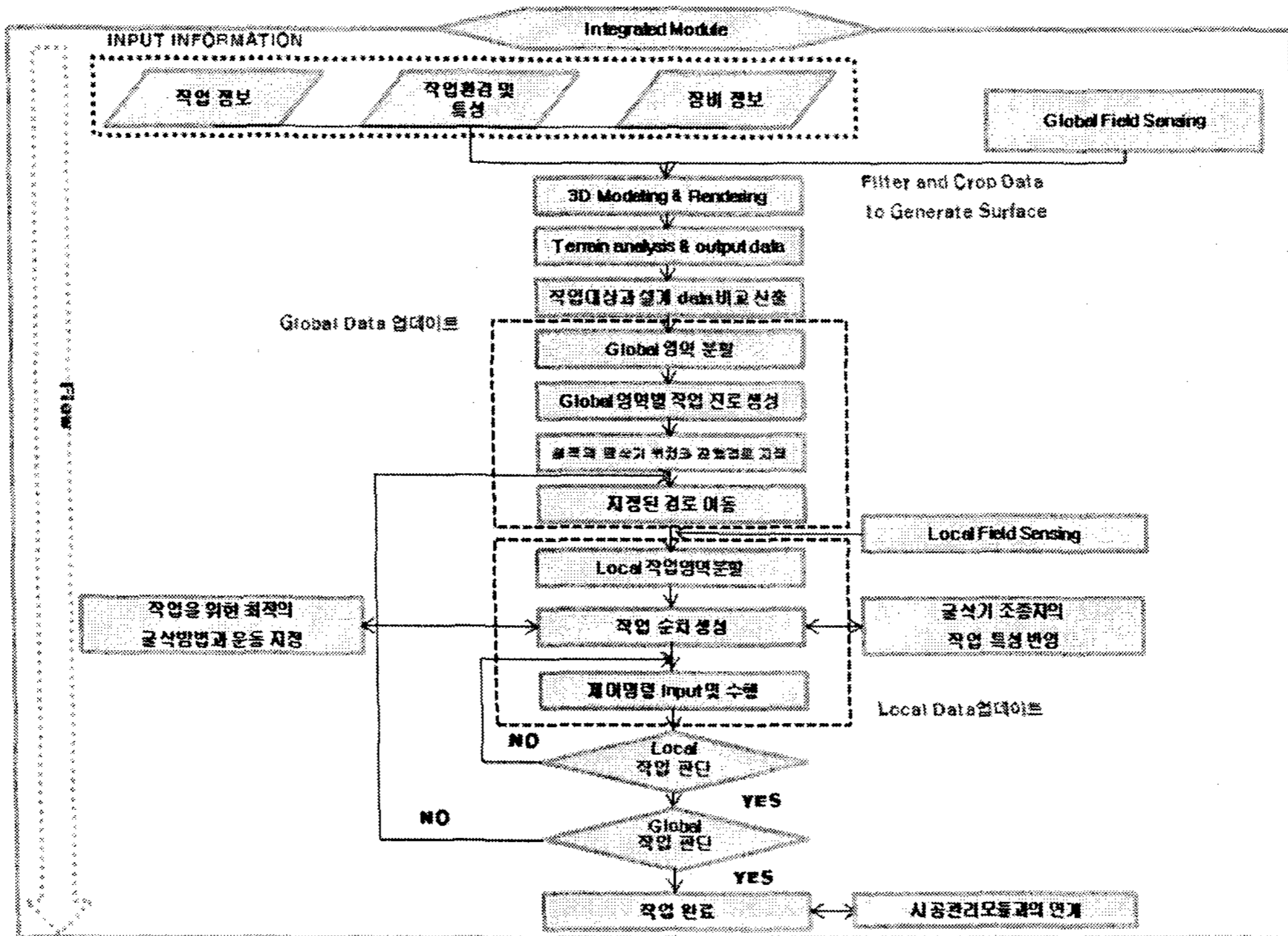


그림 3. 작업 계획 시스템 알고리즘

### 2.3 작업계획 시스템 운용 시나리오

개발 모듈의 통합을 통해서 가상현실 기반 작업계획 시스템이 완성되며 운용 시나리오는 다음 그림 3과 같다. 작업계획 수립을 위해 작업 정보 및 장비 특성을 구체화하여 작업 환경을 구축하고, 센싱 데이터를 바탕으로 3차원 월드 모델을 완성함으로써 사전 준비를 완료한다. 다음으로 글로벌 영역에서의 계획 수립을 통하여 최적 플랫폼에 따른 로컬 영역을 분할하고 이동계획을 수립한 후, 로컬 영역에서 굴삭로봇이 실제 작업을 수행할 수 있는 토사 단위의 작업 순차 계획을 수립하여 로봇 제어 명령 생성을 위한 정보를 제공한다.

## 3. 시스템 구조 및 모듈 별 설계

### 3.1 글로벌영역 작업계획

글로벌 영역에서의 작업계획은 크게 플랫폼 선정에 의한 로컬영역 분할과 작업 순차 생성을 통한 플랫폼 간 이동 계획 수립으로 구분할 수 있다. 플랫폼의 위치와 플랫폼에서의 효과적인 작업범위인 로컬영역 생성 과정에서 고려할 요소로는 크게 영역 결정 범위, 덤프진입로, 경사 및 구배 등이 있다. 우선, 위치에 따른 작업 성질 규명과 장비 사양에 따른 작업 수직, 수평 범위를 산정하여 작업 대상범위를 규정해야한다. 특히 덤프진입로, 성토위치 등을 고려하여 붐의 수평회전각은 좌우 90°이하로 제한하며 일반적인 작업 깊이는 3m로 구분한다. 다음으로 작업 진행 방향과 덤프진입로 생성과의 연계가 필요하므로 작업완료 구간을 통해 덤프가 진입할 수 있도록 작업의 방향성을 함께 고려해

줄 필요가 있다. 마지막으로 안전성 확보를 위해 굴삭로봇 플랫폼이 위치하는 지반의 경사는 작업 시에는 전후경사 5%, 좌우경사 3% 이하로 유지해야 하며, 이동시 굴삭기의 최대 등판능력은 35%로 설정한다. 또한 토사 성질에 따라 절토 비탈면의 안전 및 배수를 고려한 절취구배 결정도 고려해야 한다. 토사의 형태에 따라 인접 영역의 작업은 유사한 형태를 보이거나 연속적인 특성을 가질 수 있다. 또한 굴삭 작업이 진행됨에 따라 작업환경의 변화가 발생함으로써 새로운 영역이 생성되고, 이에 따라 새로운 플랫폼을 선정해 주는 경우도 발생한다. 이를 고려하여 글로벌영역을 로컬영역으로 분할할 시에 작업성질(굴삭, 절토 등)을 고려하고 토공량을 비교하여 유사 작업이 이루어지는 로컬영역을 그룹화하여 단위작업 영역을 설정하였다. 이는 실제 굴삭로봇이 이동하는 순차 및 경로 생성의 효율화를 위하여 매우 중요한 단계이다. 글로벌 영역과 로컬 영역 사이에 작업의 유사성을 고려하여 단위작업 영역을 설정해 줌으로써 단위작업의 우선순위를 결정하고, 단위작업 영역 내에서 로컬 영역을 생성하여 굴삭로봇의 진로계획을 생성할 수 있다

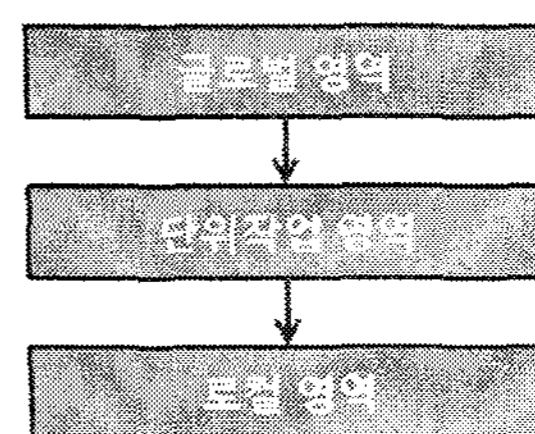


그림 4. 토사의 영역 분할 계획

다음 그림 5와 같이 1, 2 지점과의 거리차를 고려하여 수직분할 후에 덤프 진입방향을 토대로 우선순위를 결정하였으며, 동일한 작업형태로 연속적인 굴삭작업이 가능한 깊이의 토사는 4, 5, 6 영역과 같이 수평 분할하였다. 이와 같이 단위작업 영역구분을 플랫폼 결정 및 작업순차 생성보다 선행할 경우 최초의 작업 계획 시 그림5와 같이 실제 존재하지 않는 지형상에 위치하는 4, 5, 6번 영역의 플랫폼을 생성하기 위해 지형의 순차적인 변화를 모두 예측해야 하는 어려움이 있으며 실제 작업 환경에서는 이처럼 숨은 플랫폼을 생성하더라도 실제 작업 진행 결과에 따라서 플랫폼의 신뢰도를 확보하기에 어려움이 있을 것으로 판단된다.

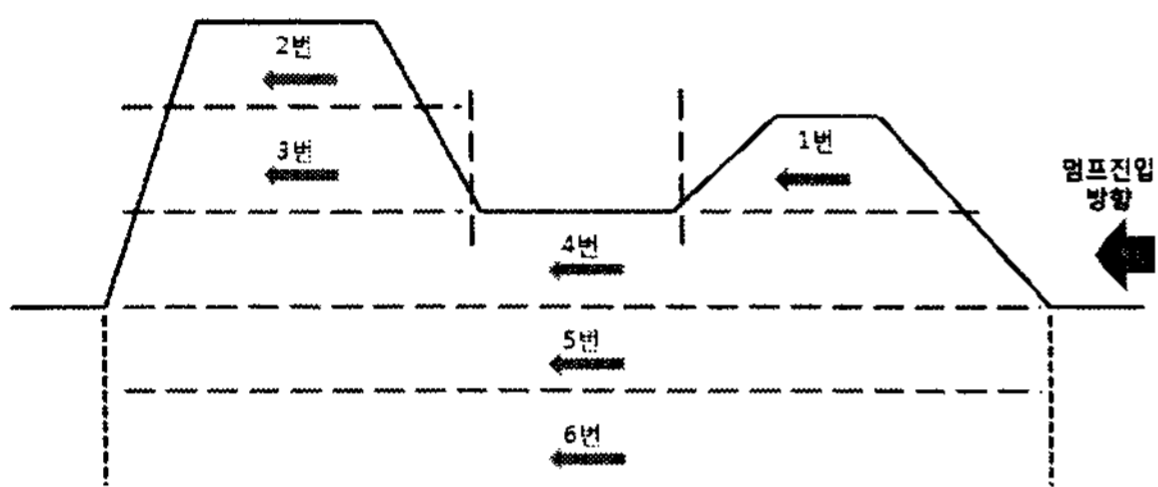


그림 5. 단위작업 영역 분할의 예

### 3.2 로컬영역 작업계획

로컬 영역에서의 작업계획은 숙련된 굴삭기 운전자의 작업노하우를 바탕으로 버킷 단위의 토사형태로 분할하여 굴삭 로봇의 실제적인 작업을 위한 제어 명령을 수행할 수 있도록 하였다. 이를 위해 버킷의 이동경로에 근거하여 시점부의 로컬영역에서는 계획고를 확보하기 위하여 하부방향으로 수평 굴삭을 기준으로 영역을 분할하고, 진행부의 로컬영역에서는 굴삭 작업 완료된 영역부터 장비 진입로를 확보하며 진행방향으로 굴삭을 순차적으로 실시하도록 수직 굴삭을 기준으로 분할한다. 또한 평면 분할의 경우, 상차시 붐의 회전을 최소화하여 작업 효율성을 확보할 수 있도록 덤프진입로 확보에 유리한 구간의 작업을 우선 수행하며, 작업 완료 영역을 덤프진입로로 활용하여 작업을 순차적으로 진행한다.

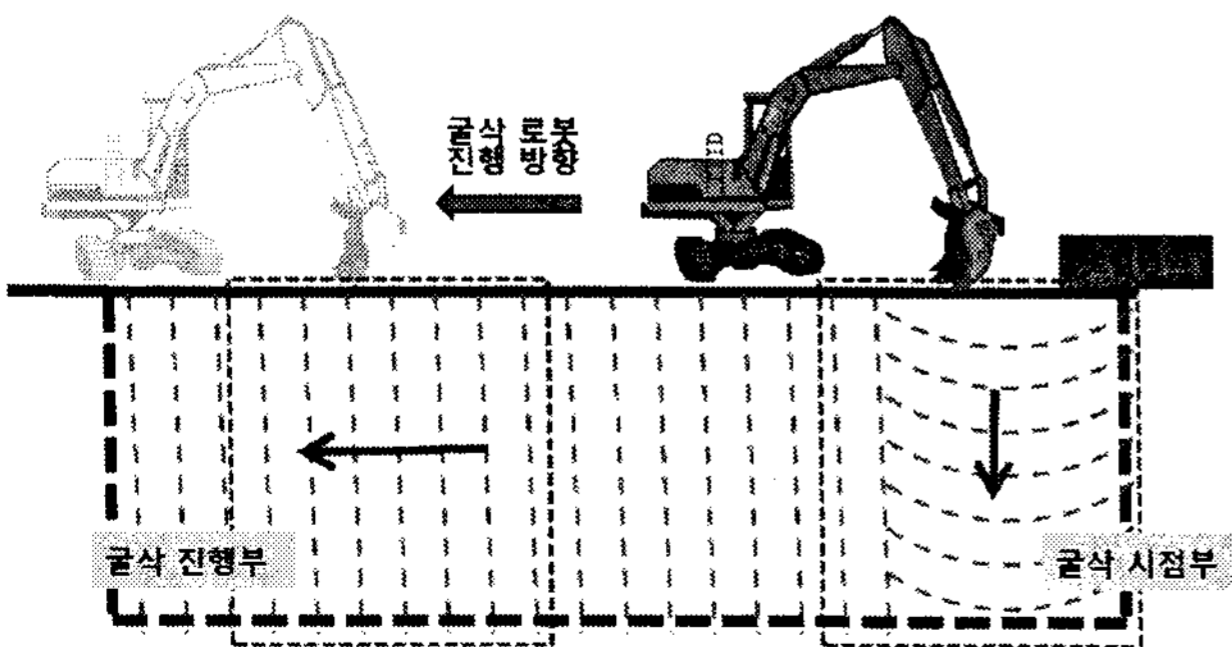


그림 6. 로컬영역 분할 및 순차생성

## 5. 결론

토공작업은 일반적으로 광범위한 작업영역을 가지기 때문에 지능형 굴삭시스템의 개발을 위해서는 효율적인 작업을 수행할 수 있도록 하는 작업계획의 수립이 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 작업계획의 대상을 굴삭로봇과 토사로 구분하였으며, 글로벌 영역에서 단위작업 영역, 로컬 영역으로의 분할을 통해 전체 작업 진행에 대해 효율적으로 작업계획을 수립할 수 있도록 구성하였다.

이처럼 토공작업을 효율적으로 자동화 할 수 있는 획기적 방안으로서 3차원 가상현실 환경에 근거한 작업계획시스템을 개발하여 숙련공 부족에 따른 문제점 해결, 지속적으로 하락하는 건설 생산성의 효율적 증가 및 안전사고 저감을 위한 지능형 굴삭 시스템의 성공적 개발에 기여할 것으로 사료된다. 또한 토공뿐만 아니라 건설산업 전반에 걸쳐서 작업장 환경을 3차원 가상환경으로 구성하여 원격 조종 또는 자율 작업을 수행케하는 요소 기술의 적용을 통해 건설장비 작업 효율 및 품질 향상, 운전 기능인력 부족 대응, 유해한 환경에서의 안전시공 등을 가능케 하여 건설자동화 초석을 마련하고 건설업 경쟁력 제고에 기여하여 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Jun Gu(2004). "Proportional-Integral-Plus(PI) gain scheduling control of an intelligent excavator" IAARC, Robotics for challenging situations and environments; Robotics 2000, 2004, pp.280-285
2. Sanjiv Singsh(1994). "Developing Plans for Robotic Excavators" ASCE, Robotics for challenging environments, 1994, pp. 88-96
3. Sarata(2001). "Model-based Task Planning for Loading Operation in Mining" IEEE, Intelligent Robots and Systems, 2001 v.1, pp.439-445
4. Shigeru Sauata(). "Research and Development on unmanned Loading Operation by Wheel Loader" Verlag Gluckauf, Rapid mine development, 2002, pp.249-258
5. Stone, W. C.(2000). "Automated Earthmoving Status Determination" ASCE, 2000, pp.111-119
6. Tomi Makkonen(2004). "Automation of an excavator based on 3D CAD model and GPS measurement" IAARC, Automation and robotics in construction; ISARC 2004, 2004, pp.268-273