

## 자동화 굴삭로봇의 운용단위 작업계획수립을 위한 로컬영역설계모듈 개발

이승수\* · 장준현\*\* · 윤차웅\*\*\* · 서종원\*\*\*\*

Lee, Seung-Soo\*, Jang, Jun-Hyun\*\*, Yoon, Cha-Woong\*\*\*, Seo, Jong-Won\*\*\*\*

### Development of the Local Area Design Module for Planning Automated Excavator Work at Operation Level

**ABSTRACT :** Today, a shortage of the skilled operator has been intensified gradually and the necessity of an earthwork in extreme environment operators are difficult to access is increasing for the purpose of resource development and new living space creation. For this reason, an effort to develop an unmanned excavation robot for fully automated earthwork system is continuing globally. In Korea, a research consortium called 'Intelligent Excavation System' has been formed since 2006 as a part of Construction Technology Innovation Program of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korea. Among detailed technologies of the Task Planning System is one of the core technologies of IES, this paper explains research and development process of the Local Area Design Module, which provides informatization unit to create automated excavators' work command information at operation level such as location, range, target, and sequence for excavation work. Designing of Local Area should be considered various influential factors such as excavator's specification, working mechanism, heuristics, and structural stability to create work plan guaranteed safety and effectiveness. For this research, conceptual and detail design of the Local Area is performed for analyzing design element and variable, and quantization method of design specification corresponding with heuristics and structural safety is generated. Finally, module is developed through constructed algorithm and developed module is verified.

**Key words :** earthwork, intelligent excavation system, task planning system, local area

**초록 :** 오늘날 숙련된 굴삭기 운전자의 부족현상은 갈수록 심화되고 있으며, 자원개발 및 새로운 생활공간 창출 등을 목적으로 운전자가 접근하기 어려운 극한환경에서 토공작업의 필요성이 증가함에 따라 전 세계적으로 토공완전자동화를 위한 무인화 굴삭로봇 개발의 노력이 경주되고 있다. 국내에서도 지난 2006년 말부터 국토해양부 건설기술혁신사업의 일환으로 '지능형 굴삭시스템' 연구단을 구성하여 연구를 지속하고 있다. 본 논문에서는 지능형 굴삭시스템의 작업계획생성시스템이 갖추어야 할 세부요소기술 중, 굴착작업의 위치, 범위, 목표, 순차 등 굴삭로봇의 운용단위 작업명령정보를 생성하기 위한 정보화단위를 제공하는 로컬영역설계모듈의 연구개발내용에 대하여 설명한다. 로컬영역의 설계는 굴삭로봇의 체원, 작업메카니즘, 휴리스틱 및 구조적안전성 등 여러 영향요소가 고려되어야 안전하고 효율적인 굴착작업을 보장하는 작업계획을 생성할 수 있다. 따라서 로컬영역의 설계요소를 분석하기 위하여 현장조사를 통한 개념적 설계를 수행하고, 상세설계를 통해 설계변수를 도출하였으며, 휴리스틱 및 구조적 해석요건을 만족하도록 설계내용을 정량화하였다. 마지막으로 로컬영역설계모듈을 개발하기 위한 알고리즘을 구축하고, 개발된 모듈을 검증하였다.

**검색어 :** 토공사, 지능형굴삭시스템, 작업계획생성시스템, 로컬영역

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 전임연구원 공학석사 (sslee@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (silverzzun@naver.com)

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (ansaene@hanmail.net)

\*\*\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 부교수, 공학박사, PE (Corresponding Author · Hanyang University associate professor · jseo@hanyang.ac.kr)

Received October 25 2012, Revised November 15 2012, Accepted December 17 2012

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

토공사는 자연지형에 시설물을 시공하기 위한 기초지반 형성 작업으로서 굴착, 상차, 운반, 쌓기, 다지기 등 흙을 대상으로 하는 모든 작업을 의미하며, 시설물 전체 공사비의 약 20%정도를 차지할 정도로 비중이 크기 때문에 토공사의 생산성 및 품질이 전체 건설공사에 미치는 영향은 지대하다 할 수 있다(박현용 등, 2007). 토공사의 가장 두드러진 특징 중 하나는 건설기계장비에 작업 의존도가 매우 높은 공종으로 투입되는 건설기계장비의 활용방안 및 운용능력에 따라 생산성, 품질 및 안전 등 작업의 성과가 크게 달라진다. 토공사에 활용되는 수많은 건설기계장비 중, 굴삭기는 전 세계적으로 가장 널리 활용되고 있는 토공장비로서 2010년 국내 토공장비 등록현황을 살펴보면, 굴삭기 117,306대, 볼도저 4,262대, 로더 16,686대, 스크레이퍼 19대, 덤프트럭 54,981대로 국내와 같이 국토의 면적이 협소하고 도심지 공사가 많은 경우 더욱 활용도가 높다할 수 있다(국토해양부, 2011).

따라서 전 세계에서는 토공작업의 생산성과 품질을 향상시키기 위하여 굴삭기의 기계적 성능을 향상시키는 데 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 그러나 굴삭기를 실제 운용하는 운전자는 열악한 환경을 대상으로 작업을 수행하고, 전도·낙하·비레·추락 등 재래식 사고가 빈번하게 발생하기 때문에 3D(Difficult, Dirty, Dangerous)업종으로 인식하여 갈수록 인력부족 현상은 심화되고 있으며, 나이가 숙련공의 부족이라는 악순환의 우려가 현실화되고 있다. 또한, 기존에 개발이 진행되지 않았던 극지, 극서 지역을 비롯하여 해저, 지하공간 및 우주 등 극한적인 환경(extreme environment)을 대상으로 자원의 개발과 인류의 새로운 생활공간 창출에 대한 필요성이 더욱 절실해 지고 있어 현재와 같이 인력이 기계장비를 직접 제어하는 형태의 토공기술로서는 접근조차 불가능하기 때문에 이를 해결하기 위한 기술의 확보가 반드시 필요하다(이태식, 2011).

이러한 문제점을 인식하고 해결하기 위해서 국내를 포함한 주요 선진국에서는 굴삭기와 같은 토공기계장비의 무인화를 통한 완전자동화(full automation)시스템의 구축을 위한 노력을 경주하고 있다. 국내의 경우, 지난 2006년 말부터 국토해양부 건설기술혁신사업의 일환으로 두산인프라코어(주)의 주관아래 지능형 굴삭 시스템(Intelligent Excavation System)이라는 연구단을 구성하여 굴삭로봇을 기반으로 토공사의 첨단 자동화 생산시스템 구축을 위한 연구를 지속하고 있다(J. Seo et al., 2011). 이와 같은 토공완전자동화를 위한 자동화 굴삭로봇의 연구개발을 위해서는 크게, 작업 대상지형을 인식하여 굴삭로봇

의 이동경로 및 세부굴삭계획을 지능적으로 수립하여 작업을 명령 및 통제할 수 있는 ‘지능형 작업계획시스템(Intelligent Task Planning System)’과 생성된 명령에 대하여 자율적으로 정밀하게 추종하여 작업을 수행할 수 있는 ‘굴삭로봇(Excavation Robot)’이 필요하다.

굴삭로봇기술은 로보틱스(robotics) 및 스마트센서(smart sensor)와 같은 첨단 IT기술을 기반으로 한 하드웨어 기술의 눈부신 발전으로, 일본의 경우 Robo-Q Excavator라는 원격조종 무인화굴삭로봇을 상용화하여 실제 현장에 적용 중에 있으며, 유럽에서는 현재의 4DOF(Degree Of Freedom)에서 더욱 유연한 자유도의 매니플레이터를 장착하고 있는 원격조종 굴삭로봇을 개발하는 등, 주로 원격조종(wireless control)을 기반으로 한 반자동화(semi-automation)기술로서 상용화되고 있다. 이와 함께 토공완전자동화기술을 이룩하기 위하여 확보되어야 할 다른 필수요소기술인 지능형 작업계획시스템에 관한 연구는 상대적으로 상용화를 위하기보다 원천기술의 확보를 위한 노력이 진행되고 있다. 토공작업계획시스템 개발을 위한 연구사례를 살펴보면, Sanjiv & Howard(1998)는 굴삭로봇에 부착된 센서를 통해 획득된 지형모형을 ‘Coarse Planner’와 ‘Refined Planner’로 구성된 ‘Multi-Resolution Planning’ 시스템을 구축하여 휴리스틱(heuristic)을 고려한 굴삭작업 순서 및 경로계획을 수립하고, 굴삭로봇에 부착된 스캐너를 통해 트럭을 인식하여 상차하는 기술을 확보하였다. Kim 등(2003)은 굴삭로봇의 이동경로를 산출할 경우 장애물과의 충돌을 고려하여 이를 회피하기 위한 ‘SensBug’알고리즘을 제시하여 장애물을 회피한 굴삭로봇의 최단경로 산출을 위한 연구를 수행하였으며, Sarata 등(2005)은 상단의 흙을 굴착하기 위한 굴삭장비인 휠로더(wheel loader)의 이동경로를 산출하기 위하여 작업경로의 반복적인 패턴을 분석하여 일정한 직선과 곡선운동으로 정형화 된 이동경로를 산정하였다. 또한, Sakaida 등(2006)은 계획된 작업에 최적의 버킷경로를 찾기 위하여 숙련된 굴삭기 운전자의 조종습관을 관측하여 정형화된 계획생성모듈을 개발하였으며, 이승수 등(2008)은 자동화 굴삭계획시스템을 설계하기 위하여 현장 실무자 및 굴삭기 운전자의 휴리스틱을 정립하여 이를 기반으로 지능형 작업계획시스템의 설계방향을 제시하였다. Seo 등(2011)은 레이저 스캐너를 통해 획득된 글로벌 지형을 대상으로 굴삭로봇의 작업계획을 효율적으로 수립하기 위하여 영역을 세분화하고, 세분화 된 지형에 휴리스틱을 고려한 굴삭로봇의 이동경로 및 로컬영역을 생성하는 등 작업계획생성시스템의 프로토타입(prototype)을 완성하여 시스템을 구축하였다. 상기에서 언급한 작업계획생성시스템의 원천기술 확보를 위한 대부분의 연구내용은 주로 숙련된 작업자의 휴리스틱

및 정형화된 패턴을 고려한 글로벌영역<sup>1)</sup>의 세분화, 굴삭로봇의 이동경로 산출, 로컬영역<sup>2)</sup> 설계, 센서를 활용한 상차 및 장애물의 회피, 그리고 로컬영역 내에서의 개략적 작업순차를 생성하는 기술이라 할 수 있다.

그러나 휴리스틱을 기반으로 작업계획생성시스템을 설계하는 것은 짧은 시간에 효율적인 성과에 접근할 수 있으나, 굴삭로봇의 안전성과 밀접한 설계내용은 실질적인 구조적 해석내용이 뒷받침되도록 하여 휴리스틱스의 불확실성에 대한 타당성이 검증되어야 할 것이다. 또한, 작업계획생성시스템의 경우 프로젝트에 활용되는 굴삭로봇뿐만 아니라 시스템의 확장성과 호환성이 고려되도록 굴삭로봇의 제원과 로봇의 작업메커니즘을 반영하여 상황에 따라 최적화된 정량적 설계내용을 보장할 수 있도록 해야 할 것이다. 특히, 로컬영역은 굴삭로봇의 구체적 운용단위(Operation Level) 작업계획을 생성하기 위한 정보화 단위이기 때문에 굴삭로봇의 작업메커니즘을 분석하여 설계요소를 구체화하고, 굴삭로봇의 제원, 숙련된 조종사의 휴리스틱스 및 구조적안전성 등 더욱 다양한 요소를 고려하여 타당성이 확보되도록 설계해야 하며, 이를 기반으로 굴삭로봇의 이동경로 계획, 상차계획, 버킷경로계획, 작업순차계획 등의 연구가 진행되어야 할 것이다.

본 논문은 국내에서 연구가 진행 중인 지능형굴삭시스템의 연구내용 중, 지능형 작업계획시스템을 구성하는 세부모듈로서, 자동화 굴삭로봇의 굴삭작업 시 효율성과 안전성을 보장할 수 있는 운용단위 구체적 굴삭작업계획과 명령을 생성하기 위한 정보화단위인 로컬영역을 설계하고 생성하는 ‘로컬영역설계모듈(Local Area Generator)’의 연구개발 내용에 대하여 설명하고자 한다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 지능형굴삭시스템의 소요기술 중, 지능형 작업시스템을 구성하고 있는 세부모듈인 로컬영역설계모듈의 연구개발내용에 대하여 살펴보고, 입력변수를 가정하여 개발된 모듈을 통해 로컬영역을 생성해 봄으로써 연구내용을 검증하는 것으로 연구의 범위를 한정하였다. 다음 Figure 1은 로컬영역설계모듈을 개발하기 위한 본 연구의 연구수행목표에 대한 내용이다.

먼저, 로컬영역의 설계를 위한 구성요소를 분석하고 각 구성요소별 기능을 정의하기 위하여 현장조사(field survey)를 실시하여 로컬영역에 대한 개념적 설계를 수행하였으며, 현장조사와 함께 설문조사 및 자문을 통한 로컬영역에서의 굴삭작업에

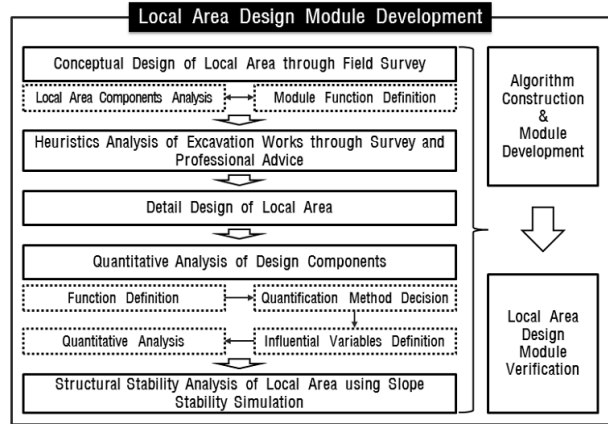


Fig. 1. Research Objectives

대한 휴리스틱을 정립하였다. 그리고 설계구성요소와 작업휴리스틱의 내용을 바탕으로 상세설계를 실시하여 설계내용의 정량화를 위한 설계변수를 도출하였으며, 설계변수 간 상관관계를 정량적으로 해석하여 입력변수에 따른 최적화된 설계내용을 결정하기 위한 수식을 도출하였다. 또한, 굴삭로봇의 전도위험과 관련된 설계요소의 경우 휴리스틱기반 정량적 해석내용의 타당성을 검증하기 위하여 사면안정해석프로그램을 활용한 구조적 안전성을 분석하였다. 이와 같은 연구내용을 바탕으로 모듈개발을 위한 알고리즘을 Visual Basic을 통해 개발하고, 개발된 모듈의 기능을 검증하기 위하여 입력변수를 설정하여 로컬영역의 설계 및 생성내용을 확인하였다.

## 2 지능형 굴삭시스템(Intelligent Excavation System: 이하 IES)

지능형굴삭시스템 개발은 토공작업에서 가장 큰 수요를 보이고 있는 굴삭기가 기반이 되는 로봇개발로서, 작업환경 전반을 센서를 통해 실시간으로 감지하여 이를 기반으로 최적의 작업계획 수립 및 상황변화에 실시간으로 능동적인 대처를 하여 토공작업을 수행할 수 있도록 메커니즘의 제어가 지능적으로 이루어지며, 이러한 지능을 바탕으로 굴삭로봇은 정해진 토공작업을 자율적으로 수행하거나, 작업 및 환경 특성에 따라 로봇감시자의 최소입력 및 모니터링 혹은 원격조종으로 토공작업 수행을 가능케 하는 기술로 정의 할 수 있다(이승수 등, 2008).

지능형굴삭시스템 개발을 위해서는 크게, 세 가지 세부핵심요소기술을 필요로 하며 Figure 2는 지능형굴삭시스템 개발내용을 세부핵심요소기술을 중심으로 구분한 연구개발 수행추진체계이다.

첫 번째 핵심기술인 ‘지능형 작업계획 시스템(Task Planning

1) 글로벌영역(Global Area): 굴삭기가 작업을 실시하여야 할 전체영역(이승수 등, 2008)  
 2) 로컬영역(Local Area): 굴삭기가 플랫폼에 위치하여 작업 할 일정 규격의 영역(이승수 등, 2008)

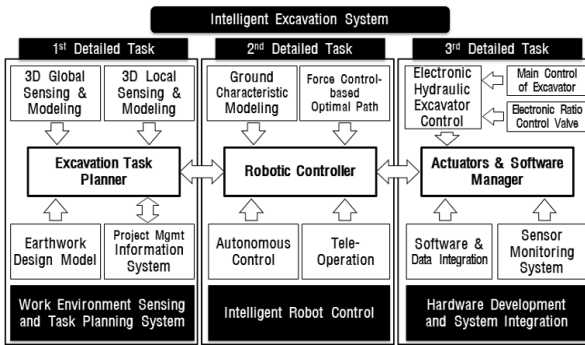


Fig. 2. Research Strategies for the IES(J. Seo et al., 2007)

System; 이하 TPS) 개발 및 응용’은 3D Laser Scanner를 활용하여 작업환경을 센싱(sensing)하고 모델링(modeling)하여 지형정보를 생성하고, 생성된 지형정보를 TPS를 구성하고 있는 각 모듈을 통하여 영역분할, 최적 플랫폼 생성, 작업순차 생성, 굴삭로봇 이동경로 계획, 굴삭경로생성 및 작업내용의 품질제어 등 작업의 계획을 지능적으로 수립하는 과제와 실시간 변화하는 작업환경에 대한 분석, 판단 및 명령에 대한 과제를 수행하여 안전하고 효율적인 작업이 진행 되도록 통제하는 지능형 작업계획시스템이다(서종원 등, 2007). 두 번째 핵심기술인 ‘작업환경 인식기반 지능형 제어기술 개발’은 굴삭로봇이 TPS에서 생성한 계획 및 명령을 바탕으로 작업환경에 따른 매니플레이터의 효율적 경로생성, 굴삭로봇의 이동 및 조종자의 간섭 시 필요한 원격제어스테이션(Wireless Control Station)개발 등, 자율제어에 관련된 기술개발로서 작업계획시스템에서 전송된 굴삭계획 명령에 대하여 굴삭로봇이 효율적으로 작업하도록 최적의 메커니즘을 생성하는 기술이며, 마지막 세 번째 핵심기술인 ‘작업특성을 고려한 지능형 굴삭시스템 개발 및 시스템 통합’은 생성된 계획에 따른 제어명령에 대하여 굴삭로봇이 정확하게 추종제어할 수 있도록 제어 알고리즘 및 하드웨어를 개발하고 개발된 모든 시스템을 통합 및 관리하는 기술이다(서종원 등, 2007). 특히, 전자비례제어 유압시스템은 굴삭기를 로봇화 하기 위한 전단(front-end)기술로서, 유압시스템을 일종의 서보(servo)시스템으로 만드는 기술이며, 기존의 유압시스템은 사용자의 레버 조작을 기계적인 신호로써 전달하여 압력을 생성하고, 이것이 유압 제어 밸브를 구동하여 실린더에 들어가는 유량을 조절하게 되는데, 이러한 기계적 제어신호 전달 메커니즘을 전기신호에 의한 솔레노이드(solenoid) 구동 방식으로 전환하여 시스템의 특성을 확보하는 기술이다.

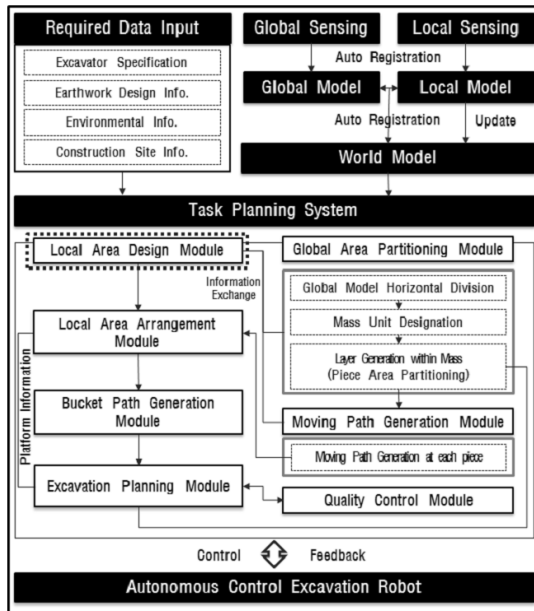
첫 번째 기술은 토공원전자동화를 위해 필요한 지능형 작업계획시스템이고, 두 번째와 세 번째 기술은 자율제어 굴삭로봇을 개발하기 위한 기술이라 할 수 있으며, 이러한 세 가지 세부핵심

요소기술의 개발은 각 요소기술 간 호환성을 고려하여 개발되고 있으며, 개발된 각 요소기술은 서로 유기적으로 결합하여 완전한 지능형 굴삭시스템이 완성될 것이다.

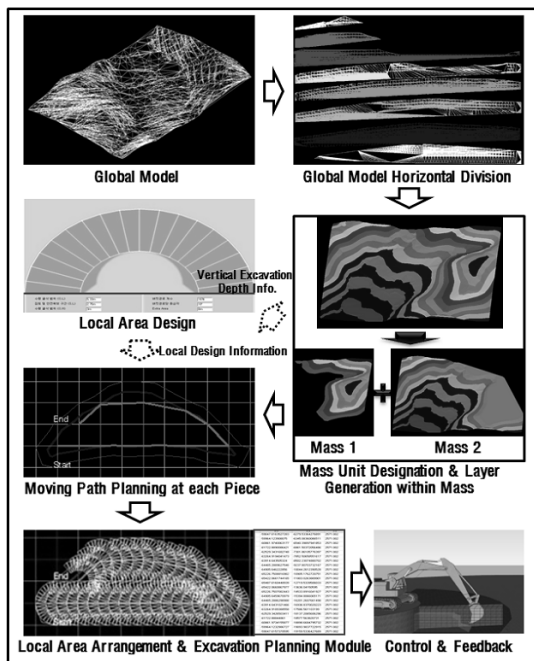
### 3. 로컬영역설계모듈(Local Area Design Module) 개발

로컬영역설계모듈은 지능형굴삭시스템의 핵심기술인 TPS를 구성하고 있는 모듈로서, 굴착작업과정에서 안전성과 효율성을 보장함과 동시에 토공작업 휴리스틱과 직선의 굴삭경로와 회전을 기반으로 하는 굴삭메커니즘이 고려된 굴삭작업계획을 생성하기위한 정보화단위인 로컬영역을 최적화하여 설계하는 모듈이다. 다음 Figure 3은 TPS를 구성하고 있는 세부모듈의 체계로서 로컬영역설계모듈과 기타 구성모듈과의 연관성을 파악할 수 있다.

TPS는 가장 먼저, 글로벌센싱(global sensing)을 통해 생성된 비정형적인 글로벌영역모델을 대상으로 원활한 배수, 흙막이 가시성공과의 병행되는 작업프로세스(work process), 상차의 용이성 및 굴삭기의 전도방지 등을 위한 토공사의 단계적인 굴착특성이 고려된 레이어 단위의 영역별 작업순차를 결정하기 위하여 영역을 분할한다. 또한, 매스단위 영역분할과정은 글로벌 지형이 다수의 돌출된 봉우리 형상의 지형을 포함할 경우, 작업의 순차가 지형의 상부에 위치한 레이어 단위 영역부터 작업하도록 계획되어 굴삭로봇이 비경제적으로 다수의 봉우리를 왕복하면서 작업하게 되는데, 이를 사전에 방지하기 위하여 봉우리 별 매스단위영역을 지정하고 매스단위영역별로 레이어 단위 작업순차를 부여하기 위한 과정이다(이승수 등, 2008). 그리고 세분화된 각각의 레이어 단위 피스영역(piece area)을 대상으로 굴삭로봇의 이동경로를 결정하고, 이동경로를 기반으로 굴삭로봇의 고정된 작업위치인 플랫폼의 위치를 지정해야 하며, 각 플랫폼을 기준으로 굴삭로봇의 상대적인 작업 목표를 생성하고 정보화해야 한다. 이를 위하여 로컬영역설계모듈에서 플랫폼을 기준으로 굴삭로봇의 운용단위 구체적 굴삭작업계획 및 명령생성을 위한 정보화단위인 로컬영역을 설계하며, 생성된 로컬영역은 이동경로 상에 순차적으로 배열되어 각 로컬영역 내 굴삭경로의 시점과 종점을 결정한다. 굴삭경로정보가 결정되면, 작업계획생성모듈을 통해 각 로컬영역 내부에 포함된 지형의 형상, 장애물 등 공간적 요소가 고려된 최종적인 굴삭경로를 생성하고 각 경로 간 작업순차를 부여하며, 이는 굴삭로봇의 작업명령정보로 전송되어 굴삭로봇은 굴삭경로의 범위 내에서 피스영역별 굴삭작업 목표인 사공기면까지 주기적으로 전송되는 로컬센싱정보와 연계되어 작업품질이 만족될 때까지 자율적



(a) The Relationship of Detailed Modules



(b) TPS Procedure & Output (J.Seo et al., 2011)

Fig. 3. Relationship and Procedure of TPS Modules

으로 힘방향 최적 버킷경로를 산출하며 작업을 반복한다. 이와 같이 로컬영역은 TPS가 생성하는 굴삭로봇의 굴삭작업 계획에 대한 상세수준을 결정하는 정보화단위일 뿐만 아니라, 굴삭로봇의 이동경로계획, 로컬영역의 배열, 품질제어 등 기타 모듈의 내용을 결정할 수 있는 핵심요소라 할 수 있다. 따라서

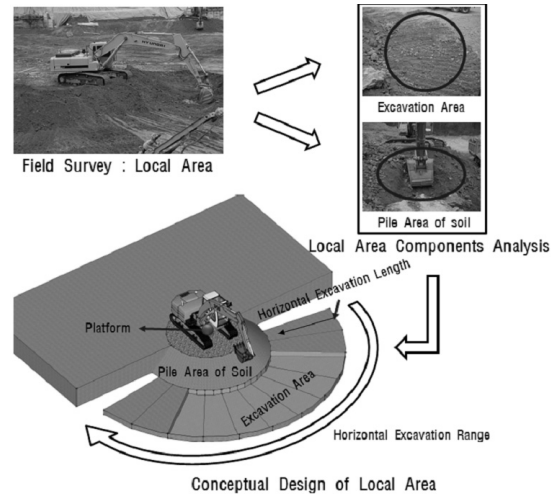


Fig. 4. Conceptual Design of the Local Area through Field Survey

로컬영역설계모듈의 개발은 TPS의 작업계획생성 내용에 대한 전반적 성능에 큰 영향을 미치므로 작업휴리스틱, 굴삭로봇의 작업메커니즘 및 체인 등 내부적 성능에 대한 고려사항은 물론, 타 모듈과의 유기적인 상관관계를 고려하여 굴삭로봇의 안전성과 효율성이 보장된 작업계획이 생성될 수 있도록 충분한 검토를 수행하여 개발되어야 한다.

### 3.1 로컬영역의 구성요소 분석 및 정량적 해석

로컬영역설계모듈을 개발하기 위한 알고리즘을 구축하기 위해서 먼저, 로컬영역을 구성하고 있는 요소들을 분석하기 위하여 현장조사를 실시하였으며, 설문조사 및 전문가 자문을 통해 휴리스틱을 정립하고, 설계구성요소와 휴리스틱내용을 바탕으로 AutoCAD를 활용한 상세설계를 실시하여 영향변수 간 상관관계를 정량적으로 해석함으로써 설계구성요소에 대한 설계내용을 도출할 수 있는 수식을 산출하였다.

#### 3.1.1 로컬영역의 개념적 설계 및 작업휴리스틱분석

로컬영역을 설계하기 위해서는 개략적인 로컬영역의 형태를 분석하여야 한다. 따라서 총 5곳의 토공현장을 방문하여 현장조사를 실시하였으며, 개략적 형태 및 구성요소를 분석하여 Figure 4의 내용과 같이 로컬영역의 개념적 설계를 수행하였다.

현장조사 및 분석결과, 로컬영역은 굴삭기가 작업 시 본체를 고정하기위하여 트랙을 접지하는 접지영역, 버킷으로 굴착해야 하는 작업 목표구간인 굴착영역(excavation area), 흙을 파고 본체방향으로 끌어내면서 토사가 더미(pile)를 이루는 집토영역(pile area of soil), 굴삭경로와 같은 설계요소로 구성되었다. 이와 같은 설계구성요소에 대한 설계목표를 더욱 구체화하기위

Table 1. Heuristic Analysis for Local Area Design (S.Lee et al., 2008)

| No | Heuristics  | Design Considerations                                   |
|----|---|---|
| 1  | <ul style="list-style-type: none"> <li>The optimal horizontal excavation distance differs by the specification of an excavator.</li> <li>When platform is flat, safe excavation is available in maximum horizontal reachable range.</li> </ul>  | Horizontal Excavation Length, Grounding Area (Platform) |
| 2  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Excavation area should not intrude excavator's platform area.</li> <li>Lateral rim of the excavator track must have approximately 2m of buffer space to prevent overturn caused by the weakened or collapsed platform area.</li> </ul>   |   |
| 3  | <ul style="list-style-type: none"> <li>When loading after excavation, the horizontal rotating angle of excavator's manipulator should be applied within 90 degrees so that it can increase work efficiency.</li> <li>When working on the platform, horizontal excavation range degree should be set within 180 degrees for frontal and excavation work should be continued backward.</li> </ul> | Horizontal Excavation Range                             |
| 4  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Soil in excavation area should be excavated and gathered at the bottom of the platform before truck is placed for easy excavating and loading. This can also minimize idling of the excavator.</li> </ul>  | Pile Area of Soil                                       |
| 5  | <ul style="list-style-type: none"> <li>2~3m of excavating depth is appropriate considering the characteristics of phased excavation, despite excavator's specification and type difference. It also helps sufficient drainage flow, overturn prevention and easy loading.</li> </ul>  | Vertical Excavation Depth                               |
| 6  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Excavation accuracy of designed surface at each layer is recommended as -20cm ~ +20cm to maintain efficiency. So, it would not block the entering earthwork equipment.</li> </ul>  | Quality Control (Extra Area)                            |
| 7  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Excavation for the final formation level should be finished as within +2Cm.</li> </ul>   |   |
| 8  | <ul style="list-style-type: none"> <li>The additional excavation area should be considered to attain fine quality because the starting and finishing point of bucket path has low excavation quality.</li> </ul>  |   |

하여 설문조사 및 전문가의 자문을 바탕으로 숙련된 운전자의 작업 휴리스틱을 정립하였다. 설문조사는 경력 10년 이상인 9명의 숙련된 운전자와 21명의 현장관리인을 대상으로 실시하였고, 분석된 내용을 전문가 자문을 통하여 정립하였으며 다음 Table 1의 내용과 같다.

Figure 4의 로컬영역에 대한 개념적 설계내용과 Table 1의 로컬영역의 작업휴리스틱을 참조하여 로컬영역의 설계구성요소(예측된 설계영향변수 포함)를 분석해본 결과, 수평굴삭거리, 수평굴삭범위(굴삭회전각도), 집토영역, 접지영역, 수직굴삭깊이 및 작업품질을 고려하기 위한 여유영역이 도출되었다. 전문가의 자문을 통한 검증과정을 거쳐 구체적인 설계목표를 수립하였으며, 로컬영역의 수평굴삭범위는 180°로 설정함으로써 굴삭로봇이 일방향으로 연속성을 가지고 후진하며 작업한다는 점을 고려하고, 수평굴삭거리는 수직굴삭높이를 감안하여 굴삭로봇의 제원에 따른 최대 작업도달거리로 설정하되, 최종 계획되는 굴삭경로의 범위는 TPS의 굴삭경로정보생성모듈에서 각 로컬영역 범위내의 지형형상 및 작업환경을 고려하여 생성된다는 점을 고려하였다.

또한, 집토영역은 작업의 효율성을 도모함과 함께 접지영역의 역할을 보조하므로 굴삭로봇의 접지영역범위 내에 통합하여 구성하되, 트랙의 종방향 끝단부터 2m의 버퍼영역을 확보하여 접지영역확보에 대한 휴리스틱을 충분히 만족하도록 설계를 계획하였다. 굴착구간 내 버킷경로의 시점구간은 작업의 품질 마감이 용이하지 않고[(Sakaida et al., 2006), (Shao et al.,

2008)], 본 프로젝트의 경우, 굴삭로봇이 작업과 동시에 주기적인 로컬센싱을 통해 작업 목표지점의 품질이 완료될 때까지 작업을 반복한다는 시스템 내부적 특징을 고려하여 굴삭작업의 효율성 측면에서 굴착의 범위에는 속하지만 굴착영역 내 품질평가에서 제외되는 여유영역(extra area)을 설정하였다. 마지막으로, 굴착구간은 작업계획수립을 위한 대상영역으로서 굴삭로봇 매니플레이터의 직선과 회전운동으로 구성된 4DOF 작업메커니즘을 고려하여 일직선의 버킷경로를 수평굴삭범위 내에서 플랫폼을 중심으로 회전시키며 굴착영역에 배열하는 설계목표를 수립하였다.

### 3.1.2 로컬영역 설계내용의 정량적 해석

로컬영역의 각 설계변수 간 상호연계성을 분석하여 설계내용을 정량화하기 위한 해석과정은 모듈개발을 위한 알고리즘의 구축에 있어 반드시 필요한 과정이다. 각 설계변수의 상호연계성을 파악하기 위해서 전 단계에서 수행한 개념적 설계내용과 휴리스틱을 통해 구체화한 설계요소 및 설계목표를 바탕으로 AutoCAD를 활용하여 상세설계를 실시하였으며, 다음 Figure 5의 내용과 같다.

로컬영역 내 각각의 설계구성요소에 대한 설계내용의 정량화는 설계변수로서 굴삭로봇의 제원인 독립변수가 입력되고 이에 따라 작업휴리스틱, 구조적 안전성, 굴삭메커니즘이 고려된 종속변수가 결정되어야 한다. 따라서 Figure 5에서의 설계요소들을 기반으로 로컬영역의 설계를 위한 변수를 결정하고 정량화

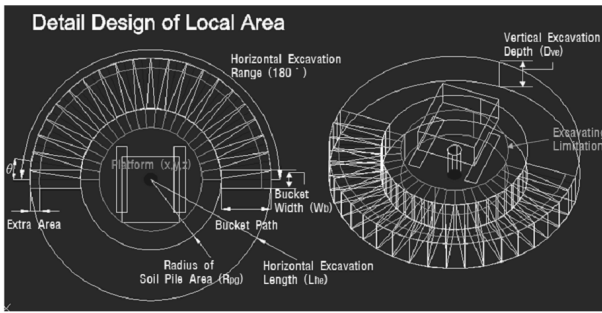


Fig. 5. Detail Design of Local Area (J.Seo et al., 2011)

방안을 도출하기 위해서 다음 Figure 6과 같이 굴삭로봇의 제원을 고려한 종단면도를 작성하여 독립변수를 정의하고 상관관계 분석하였다.

Figure 5와 6의 내용을 바탕으로 로컬영역의 설계를 위한 종속변수로는 수평굴삭거리( $L_{he}$ ), 집토 및 집지영역의 반경( $R_{pg}$ ), 여유영역의 구간( $L_e$ ) 및 굴삭경로의 개수( $N_{ep}$ )가 있으며, 설계상수로는 작업휴리스틱스에서 도출되었던 수평굴삭범위( $180^\circ$ )와 TPS의 영역분할 단계에서 정의되는 수직굴삭깊이( $D_{ve}$ )로 분석되었다. 먼저, 로컬영역의 외곽면을 결정하는 수평굴삭거리는 굴삭로봇의 수평최대도달거리( $L_{hm}$ )를 기준으로 지면에서 굴삭로봇본체(body)와 매니플레이터(manipulator)의 접합부인 센터조인트까지의 높이( $H_{cj}$ )를 고려하였을 때, 버킷의 끝점이 지면에 접하는 지점부터 플랫폼 중심까지의 거리로 결정된다. Figure 6에 도시된 꼭짓점 ABC로 구성된 직각삼각형의 선분CA의 길이를 구하여 수평굴삭거리를 구할 수 있으며, 다음 식 (1)과 같다.

$$L_{he}(\text{수평굴삭거리}) = \sqrt{(L_{hm})^2 - H_{cj}^2} \quad (1)$$

도출된 수평굴삭거리는 수직굴삭깊이 및  $180^\circ$ 의 수평굴삭범위와 함께 로컬영역의 경계(boundary)면을 결정하며, 다음으로 로컬영역을 구성하고 있는 집토 및 집지영역, 굴삭경로 및 여유영역이 설계되어야 한다. 집토 및 집지영역은 굴삭기의 플랫폼을 포함하는 집지영역과 작업의 효율성 및 안전을 위한 집토영역으로 구성된 구간으로서, 트랙 측하부에서의 굴삭작업은 굴삭로봇의 중량과 굴삭과정에서 발생하는 외력이 한쪽면의 트랙에 집중되어 플랫폼의 충분한 지지력이 요구되므로 안전이 충분히 고려되어야 한다. 따라서 현장조사의 측정치와 설문조사내용을 기준으로 한 작업휴리스틱(Table 1참조)의 내용을 참고하여 집토 및 집지영역의 반경을 플랫폼을 중심으로 트랙의 종방향 끝단부분부터 2m(버퍼영역)의 영역이 포함되도록 설계 하였으며, 다음 식 (2)를 산출하였다.

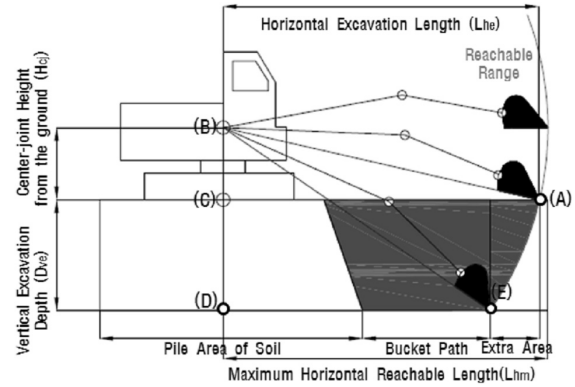


Fig. 6. Longitudinal Section Drawing of Local Area considering Excavator's Specification

$$R_{pg}(\text{집토 및 집지영역 반경}) = \frac{L_{track}}{2} + 2m, \quad (2)$$

( $L_{track}$  : 굴삭기 트랙 종방향 길이)

로컬영역에서 굴삭로봇의 운용단위 굴착계획수립의 기준이 되는 굴삭경로의 설계는 먼저, 굴삭로봇 버킷의 폭과 로컬영역의 외곽경계면으로부터 집토 및 집지영역의 경계면까지 굴착거리를 고려하여 규격을 결정하고, 이를 굴착영역에 배치하기 위하여 굴삭경로의 개수가 결정되어야 한다. 굴착영역 내 굴삭경로의 개수를 결정하기 위하여 플랫폼을 중심으로 수평굴삭거리를 반지름으로 한 로컬영역의 외곽면 호의 길이는 버킷경로호를 기준으로 규칙적으로 배열되었을 때 배열된 버킷경로 폭의 총합이 호의 길이와 동등하다는 점을 활용하여 굴삭경로 개수의 산출식을 다음과 같이 도출하였다.

$$N_{ep}(\text{굴삭경로의 개수}) = \left[ \frac{L_{he} \times \pi}{W_b} + 1 \right] + 1 \quad (3)$$

굴삭경로의 개수를 산정하는 과정에서 로컬영역 호의 길이를 굴삭기의 제원인 버킷의 폭으로 분할하는 데, 결과 값을 정수화 하기위하여 가우스기호를 활용하여 계산된 값을 올림한 어림수를 도출하였다. 소수점자리를 올림 한 이유는 굴삭경로의 개수가 기준보다 많아지게 되면 보다 세분화된 작업계획을 도출할 수 있을 뿐만 아니라 굴삭경로 간 약간의 중첩이 발생되게 배열되어 굴착품질의 제어에 용이하기 때문이다. 굴삭경로의 개수가 도출되고  $180^\circ$ 의 수평굴삭범위를 가지는 굴착영역내부에 균등배열 하기 위해서는 Figure 5에서 표시된 바와 같이 굴삭경로 간의 사잇각이 결정되어야 하며 이는 수평굴삭범위( $180^\circ$ )에서 굴삭경로의 개수에서 1을 뺀 값 즉, 굴삭경로의 사잇각 발생개수로 나누어 주면 된다.

마지막으로 여유영역은 굴착영역에는 포함되나 굴착품질 평가구간에서는 제외되는 영역으로서, 로컬영역의 최외곽 면을 기준으로 하는 굴착 시점구간은 버킷이 닿지 않거나 입사각이 형성되어 설계내용대로 굴착품질을 만족하기가 어렵기 때문에 작업의 효율성을 도모하고자 Figure 6과 같이 여유영역을 설계하였다. 또한, 여유영역은 굴삭로봇의 명령추종과정에서 발생할 수 있는 최소한의 오차를 감안한 비퍼영역으로서의 역할도 한다. 만약, 로컬영역에서 여유영역이 설정되지 않는다면, 굴삭로봇은 버킷이 입사하는 시점부분의 작업품질제어를 위한 비효율적인 굴착과정과 버킷이 닿지 않는 부분의 작업을 위한 불필요한 플랫폼을 부가적으로 생성해야 하기 때문에 자동화 굴삭로봇의 작업생산성이 저하될 것이다. 여유영역 구간의 거리는 수평 굴삭거리(선분 AC)에서 수평최대도달거리를 기준으로 버킷의 끝점이 수직굴삭깊이가 고려된 시공기면에 닿았을 때 생성된 E점에서 플랫폼의 수직선상 시공기면과 접하는 D점까지의 거리를 뺀 값으로 산정하며, 다음 식 (4)와 같다.

$$L_e(\text{여유영역 구간길이}) = L_{hc} - \sqrt{L_{hm}^2 - (H_{cj} + D_{ve})^2} \quad (4)$$

여유영역은 실제 굴착범위에는 포함되나 품질제어의 대상구간에서는 제외되는 특징 때문에 굴삭로봇이 방향성을 가지고 후진하면서 작업한다는 점을 감안하면, 여유영역에서 발생하는 비균질한 품질을 다음 작업순차를 가지는 로컬영역에서 커버할 수 없을 것이다. 따라서 이러한 문제점을 감안하여 로컬영역 배열모듈은 플랫폼 간 배열간격을 설정하고 작업시점에서의 위치를 최적화하여야 할 것이다.

### 3.2 로컬영역 설계내용에 대한 구조적 타당성 검토

로컬영역 설계구성요소 중 집토 및 접지영역은 굴삭로봇의 트랙이 접지하는 영역으로서, 굴삭로봇의 하중 및 굴착과정에서 발생하는 힘이 직접 전달되기 때문에 붕괴가 발생할 경우 전도로 인한 사고가 발생하게 된다. 전도위험의 불확실성에 숙련된 조종사의 직관적인 대처가 가능한 굴삭기와 달리, 무인자동화굴삭로봇은 휴리스틱을 기반으로 설계내용이 결정된 집토 및 접지영역이 붕괴될 경우 바로 큰 사고와 연결될 수 있다. 따라서 설계내용의 구조적 타당성을 검토하기 위하여 굴삭로봇의 자중과 굴착작업으로 발생하는 힘이 트랙을 통하여 집토 및 접지영역에 전달되는 것을 고려하여 GeoStudio V.2004 프로그램에서 제공하는 Slope/W를 활용한 사면안정해석(slope stability analysis)을 실시하였다.

본 연구에 적용한 사면안정해석의 방법으로는 활동면을 따라 파괴가 일어나려고 하는 시점에서 토체의 정역학적인 평형을

고려하여 안전성을 해석하는 한계평형해석(limit equilibrium analysis)방법 중, 가장 널리 적용되고 있는 Bishop의 절편법(slice method)을 적용하였다(Krahn, 2004). 경사면에 대한 파괴면의 형상(failure plan geometry)은 크게 표층파괴, 평면파괴 및 원호파괴로 구분되는데, 파괴면의 정의에 따라 사면안정해석의 방법 및 분석결과에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 표층파괴는 초기 강우침투 및 토석류에 의해 발생하고 평면파괴는 암반과 토사의 경계층에서 주로 발생하며, 분석 대상의 지반물성이 비교적 균질하고 통상적인 원호활동에 의하여 파괴가 발생할 경우 원호파괴면의 형상을 가지게 된다(김현기 & 김수삼, 2011). 따라서 원호파괴를 가정한 사면안정해석방법인 Bishop의 절편법을 선정하였으며, 해석조건에 대한 시나리오를 설정하고 원형 파괴면의 수많은 경우의 수에 대한 시뮬레이션을 수행하여 가장 낮은 안전율을 대상으로 안전성을 판단하였다.

#### 3.2.1 사면안정해석을 위한 조건설정

집토 및 접지영역에 대한 사면안정해석을 위해 조건의 설정이 필요한 영향요소로는 토사의 물성, 영역에 작용하는 하중의 크기 및 로컬영역의 형상으로 구분할 수 있다. 먼저, 토사의 물성은 크게 두 가지의 조건을 설정하였으며, 국내 토공현장에서 흔히 발견되고 기계굴착이 가능한 자연 상태의 밀실한 사질토(SM)와 충분한 배수와 건조가 이루어진 자연 상태의 굳은 점성토(ML, CL)를 대상으로 하여 모든 영역의 토질은 균질하다고 가정하여 적용하였다. 해석과정에서 소요되는 토사의 물성은 단위중량, 내부마찰각 및 점착력이며, 신뢰적인 데이터를 확보하기 위하여 국토해양부(2009)의 비탈면설계기준에 제시된 자연지반의 강도정수를 활용하였다. 그리고 로컬영역의 형상 및 규격은 굴삭로봇의 제원에 따라 설계내용이 산출되므로, 현재 굴삭로봇개발에 활용하고 있는 두산인프라코어(주)의 DX140LC모델의 제원을 적용하여 규격을 결정하였으며, 굴착영역의 작업진도에 따른 안전율의 변화를 고려하기 위하여 0%, 50%, 100%의 작업 진도에 따른 각각의 로컬영역의 형상을 가정하여 분석하였다. 또한, 굴착과정에서 형성될 수 있는 집토영역의 사면형상은 굴삭로봇의 트랙이 접하는 지점부터 집토영역의 외곽경계면까지 경사가 형성되도록 설정하여 안전율확보에 열악한 지형의 형상 조건을 부여하였으며, 접지영역은 평평하다고 가정하여 해석하였다. 마지막으로 집토 및 접지영역에 작용하는 하중의 크기는 굴삭로봇의 자중과 함께 굴착작업시 트랙의 후방이 들리기 시작할 때 버킷에 작용되는 연직 전도하중 즉, 사면의 붕괴에 가장 크게 작용될 수 있는 힘을 가정하여 이때 트랙의 접지면에 작용되는 분포하중을 산출하여 적용하였으며, 굴착진도에 따라 각각의 전도하중이 변한다는



Table 2. Simulation Condition Definition for Slope Stability Analysis

| Contents  | Simulation Condition   |  |                                 |                            |                               |
|---|--|--|---------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
|   | Case   | Soil Type                              | Unit Weigh (KN/m <sup>3</sup> ) | Internal Friction Angle(°) | Cohesion (KN/m <sup>2</sup> ) |
| Soil Properties<br>(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009) | 1  | Compacted Sandy Soil-SM-(Natural Soil) | 19                              | 30                         | 20                            |
|   | 2  | Stiff Cohesive Soil-ML-(Natural Soil)  | 18                              | 25                         | 35                            |
| Local Area Design   | Excavation Robot Specification (m)   | Lhm                                    | Wb                              | Ltrack                     | Hcj                           |
|   |  | 7.24                                   | 1                               | 3.5                        | 1.3                           |
| Local Area Design (m)   | Local Area Design (m)  | Lhe                                    | Rpg                             | Dve                        |                               |
|   |  | 7.12                                   | 3.75                            | 2.5                        |                               |
| Applied Load Definition   | · Tipping Load: Tipping load is vertical load applied at bucket when the back end of the excavator track is begun to lift during excavation work. (Considered the fact that tipping load varies according to excavation progress)<br>· Excavator's Weight at each part and Tipping load are used to generate vertical reaction force at tipping point. |  |                                 |                            |                               |
| Excavation Progress   | Case   | Progress                               | Status                          |                            |                               |
|   | 1  | 0%                                     | Initial Local Area shape        |                            |                               |
|   | 2  | 50%                                    | 50% cutting is progressed       |                            |                               |
|   | 3  | 100%                                   | 100% cutting is progressed      |                            |                               |
| Preconditions   | · Conditions related to water pressure was ignored.  |  |                                 |                            |                               |
|   | · Other influential load(ex: vibration..) was not considered.  |  |                                 |                            |                               |
|   | · Slope stability at each simulation case is evaluated by minimum safety factor among all generated safety factors (7936 safety factor at each case).  |  |                                 |                            |                               |
|   | · Platform inclination = 0°  |  |                                 |                            |                               |
|   | · Soil Properties are homogeneous.   |  |                                 |                            |                               |

점도 고려해 주었다.

이 밖에 기계굴착이 실시되는 토공현장의 경우, 우기에는 작업을 실시하지 않고 굴착작업 전에 배수를 통해 지하수위를 충분히 낮추거나 함수상태가 포화인 경우 배수재를 활용하여 사전에 연약지반개량이 이루어지기 때문에 지하수위 및 침투수로 발생할 수 있는 수압의 작용은 조건에서 배제하였고, 굴삭로봇의 굴착과정에서 발생하는 진동하중을 무시하였으며, 사면의 붕괴에 가장 큰 영향을 주는 외력은 굴삭로봇의 전도하중으로 생성된다고 가정하였다. 다음 Table 2는 이와 같은 로컬영역의 집토 및 접지영역에 대한 사면안정해석의 조건을 요약한 내용이다.

### 3.2.2 굴삭로봇의 전도하중 산출

굴삭로봇의 전도하중은 굴착작업 시 버킷에 작용하는 연직하중으로 인하여 굴삭로봇이 전도되기 시작할 때의 하중 값을 의미하며, 버킷이 지면에 입사하여 퍼서 올릴 경우 전도가 발생할 수 있다. 일반적으로 굴삭기는 전도하중의 크기보다 작은 힘으로 작업을 수행하며, 본 해석에서는 전도하중이 걸릴 때 접지하는 트랙에 작용하는 분포하중이 가장 크다고 가정하였다.

전도하중의 산출과 이때 트랙에 작용되는 분포하중을 계산하기 위해서는 굴삭로봇의 전체 중량을 세분화한 값과 모멘트 평형으로 미지수(전도하중에 따라 트랙이 지면에 전달하는 분포하중)를 도출하기 위한 각각의 위치정보가 필요하기 때문에 본 해석에 적용된 굴삭로봇(DX 140LC)의 형식신고자료(2007)의 내용을 참조하여 다음 Figure 7과 같이 도식화 하였다.

Figure 7에서 전도하중이 발생할 경우, 트랙 후방끝단에 작용되는 연직 반력은 0 ton이라 할 수 있고 지면의 연직반력 W3은 가장 큰 값이 도출되어 집토 및 접지영역의 안정에 가장 불리한 조건을 만들 것이다. 또한, L1의 값이 작아질수록 전도하중이 커지므로 사면안정해석의 조건에 부합하도록 로컬영역 내 굴착진도가 각각 100%, 50%, 0%일 경우, 1번 지점을 기준으로 모멘트 평형에 따른 다음 식 (5)를 참고하여 각각의 W3값을 산출하였다.

$$W_3 = \frac{W_2(L_1 - L_2) + W_4(L_1 + L_4) + W_5(L_1 + L_5) + W_6(L_1 + L_6)}{(L_1 - L_3)} \quad (5)$$

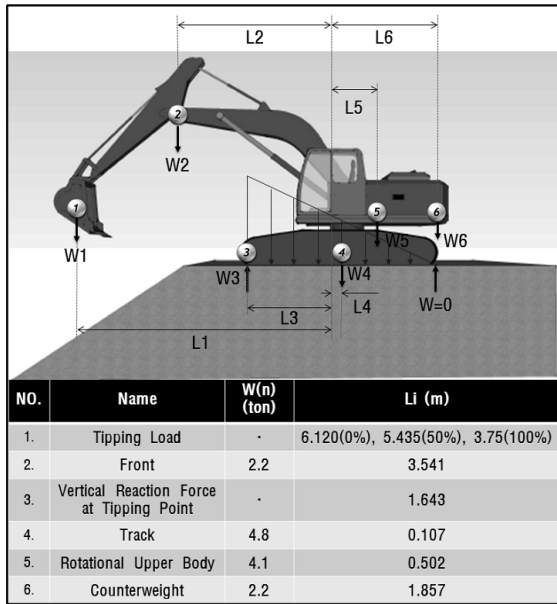


Fig. 7. Excavation Robot Specifications for Tipping loads Generation

W3값을 산출한 결과는 굴착진도가 0%인 경우 17.9 ton, 50%인 경우 18.7 ton, 100%인 경우 23.1 ton이며, 이는 굴삭로봇의 자중과 전도하중이 모두 고려된 값이라 할 수 있다. 사면안정해석은 2차원 단면에서의 해석이므로 트랙의 단면에 작용하는 분포하중으로 적용하기 위하여 높이 1m, 길이 3.5m, 폭 1.2m(트랙 폭의 총합)를 고려한 단위중량으로 환산한 값을 입력하고 삼각형 단면의 정보를 입력하였다.

### 3.2.3 집토 및 접지영역의 사면안정해석

Slope/W를 활용한 사면안정해석은 조건의 경우의 수에 따라 총 6회의 모델링작업을 실시하였다. 사면안정해석에 적용한 Bishop의 절편법은 파괴면의 형상을 원형으로 가정하여 파괴면을 절편으로 세분화하여 각 절편과 절편 사이에 작용하는 저항모멘트와 작용모멘트를 고려하여 해석을 실시하는 방법으로서, 안전율은 원형파괴면형상의 설정에 따라서 각 절편의 전단력의 합과 전단저항력의 합의 비로 산출되게 된다(최인걸 & 박영목, 2007). 따라서 각 모델링 조건에서 산출되는 안전율의 수는 원형파괴면형상이 그려지는 경우의 수의 조건과 같다 할 수 있다. 본 해석에서는 원형파괴면의 형상을 결정짓기 위한 파괴면의 기준점을 분석모델의 상단에 16\*16, 총 256개의 기준점을 생성하였고, 원형파괴면이 분석모델의 전 구간에서 발생될 수 있다는 점을 가정(표면파괴 제외)하여 총 31개의 세분화된 원형파괴면 접선을 설정함으로써, 각 분석모델별 총 7936회의 시뮬레이션 해석을 수행하였다.

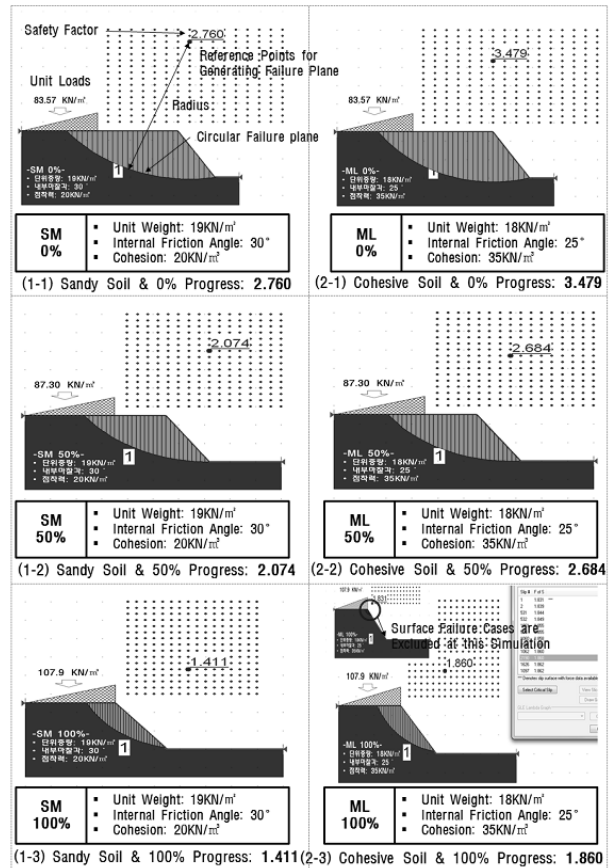


Fig. 8. Slope Stability Simulation Results

각 분석모델의 조건에 따른 토사의 물성, 하중 등의 변수를 입력하였으며, 사면안정해석 시뮬레이션을 수행하여 가장 최소로 도출된 안전율과 파괴형상을 나타낸 결과는 다음 Figure 8과 같다.

상기에서 설정한 조건에 따라 사면안정시뮬레이션을 수행한 결과, 안전율의 최소값이 1.411로 도출되었다. 사질토가 점성토보다 사면의 안정에 취약한 것으로 분석되어 토질의 점착력에 대한 변수가 안정도해석에 가장 영향을 미친다는 것을 예상해 볼 수 있다. 또한, 로컬영역의 굴착 전과 굴착 후의 작업내용에 따라 안전율이 크게 변화되는 이유는 굴착이 진행되면서 집토 및 접지영역을 지지하는 수동토압이 감소할 뿐만 아니라, Figure 7의 L1값이 감소하면서 전도하중이 매우 커지기 때문이다.

분석된 안전율을 활용하여 집토 및 접지영역의 안전성을 평가하기 위하여 국토해양부(2009)의 건설공사비탈면설계기준에 제시된 내용 중, 깎기 비탈면설계기준의 허용기준 안전율을 참고하였다. 안전율의 기준은 크게 1년 미만의 단기안정성과 이상의 장기안정성으로 구분되어 있으며, 본 분석조건의 경우 단기간의 안정성이 요구되기 때문에 제시되어 있는 단기안정성

을 위한 최소허용안전율인 1.0을 기준으로 비교하였으며, 본 해석조건에서의 최소안전율은 1.414이므로 휴리스틱을 기반으로 한 로컬영역의 설계내용은 본 조건에서 충분한 구조적안전성이 확보되었다는 점을 확인 할 수 있다.

그러나 굴삭로봇의 제원이 달라지거나 토질의 특성이 크게 변화된다면, 안전성이 보장되지 못할 경우가 생길 수 있다. 따라서 휴리스틱을 참고하여 도출하였던 집토 및 로컬영역의 설계방안 중 2M의 버퍼영역확보에 대한 값은 상황에 따라 본 절차와 같이 사면안정해석을 실시하여 충분히 안전이 확보될 수 있는 값이 적용되어야 하며, 이를 위하여 로컬영역생성모듈 개발과정에서 고정값이 아닌 입력변수로 적용되도록 하였으며, 기본적 셋팅값(default)은 2m로 지정하였다.

### 3.3 알고리즘 구축 및 개발내용 검증

로컬영역 설계를 위해 수행한 정량적 해석 및 절차에 대한 연구내용을 바탕으로 알고리즘을 구축하여 모듈을 개발하였다. 로컬영역이 설계되기 위해서는 굴삭기의 제원과 휴리스틱 및 구조적안전성이 고려된 설계상수 등의 소요데이터가 입력되어야 하며, 이를 바탕으로 로컬영역의 설계내용이 결정되고 구성된다. 로컬영역을 구성하는 설계구성요소 중, 굴삭작업계획에 활용되는 정보는 플랫폼의 위치와 플랫폼을 기준으로 한 각 굴삭경로의 시점과 종점정보이며, 집토 및 안전확보영역, 여유영역, 수평굴삭범위 등 기타 설계요소에 대한 각각의 설계내용은 굴삭경로의 위치와 범위를 결정하는 주요 변수로서 처리되거나 품질제어의 범위를 결정하는데 소요된다. 따라서 굴삭작업에 대한 계획, 수행, 품질 및 성능평가 등의 내용을 시각적으로 제공하기 위한 TPS의 3차원시각화시뮬레이터(graphical simulator)에서 로컬영역의 시각화가 필요한 경우 로컬영역 내 굴삭경로만을 대상으로 표현되도록 하였으며, 이는 시스템의 데이터 트래픽(data traffic)관리차원에서 더욱 유리하고 또한, 굴삭경로정보만 시각화하더라도 기타 로컬설계구성요소의 형태나 내용을 파악할 수 있기 때문에 여러 면에서 장점이 될 수 있을 것이다. 다음 Figure 9는 로컬영역설계모듈을 개발하기 위한 알고리즘 모형을 구축한 내용이다.

로컬영역의 설계를 위하여 소요되는 데이터를 입력하면, 각 설계구성요소들의 설계내용을 정량화하기 위한 설계 데이터 처리과정(data processing)을 거치게 되는데, 이는 로컬영역의 규격을 결정하는 과정이라 할 수 있다. 그리고 데이터 처리과정에서 발생된 정보만을 가지고도 TPS에서 생성되는 이동경로상의 플랫폼정보가 생성된다면 굴삭경로의 길이와 개수 및 굴삭경로간 사잇각을 통해서 플랫폼을 기준으로 한 시점과 종점의 상대적 위치정보의 생성이 가능하다. 그러나 이러한

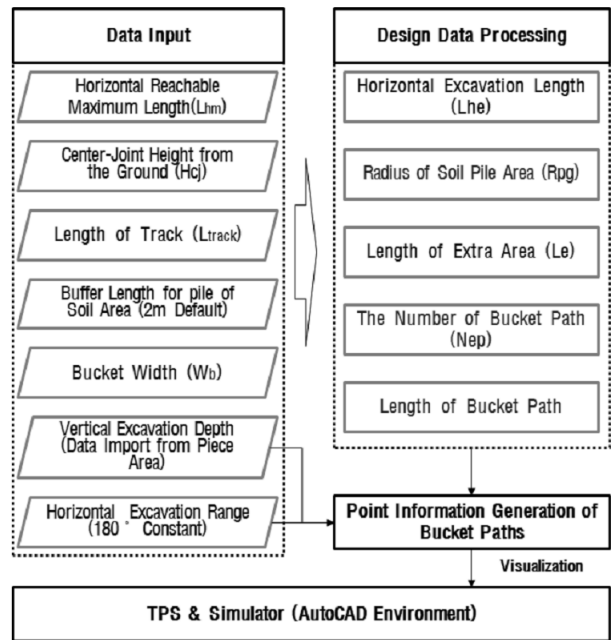


Fig. 9. Algorithm Model for Local Area Design Module

로컬영역의 설계내용이 TPS 시뮬레이터를 통하여 시각화될 수 있도록 데이터 처리과정으로 생성된 설계내용을 바탕으로 로컬영역을 3차원으로 모델링하여 공간정보를 가진 객체를 생성하는 기능을 추가로 부여하였으며, 로컬영역설계모듈을 통해 생성된 로컬영역에 대한 모든 정보 및 객체는 TPS내에 구성되어 있는 기타 모듈과 연관되어 작업을 계획하거나 품질을 평가하는데 활용되고 시뮬레이터를 통한 시각화 정보로서 나타나게 된다.

이러한 로컬영역 구성요소의 설계내용 정량화 및 객체생성을 위한 알고리즘구축 내용을 기반으로 로컬영역설계모듈을 개발하였으며, 굴삭로봇의 제원을 입력하고 설계에 관련된 초기 디폴트값을 별도로 설정할 수 있도록 사용자인터페이스(user interface)를 구축하였다. Visual Basic을 활용하여 알고리즘을 개발하였으며, 소요데이터가 입력되면 알고리즘의 내용을 통해 로컬영역의 설계내용에 대한 포인트 정보가 생성되게 된다. 생성된 포인트정보는 AutoCAD를 기반으로 개발되고 있는 TPS Simulator에 전송되어 플랫폼의 위치정보를 기준으로 로컬영역정보가 시각화된다. 개발된 모듈을 검증하기 위하여 다음 Figure 10(a)와 같이 DX 140LC의 제원을 입력하고, 집토 및 접지영역을 위한 버퍼영역의 크기는 휴리스틱에 기반한 초기 디폴트값을 그대로 적용하여 로컬영역의 설계내용을 산출하고 객체를 생성해 보았다. 또한, Figure 10(b) 및 10(c)와 같이 로컬영역설계모듈을 통한 설계내용 및 객체가 TPS의

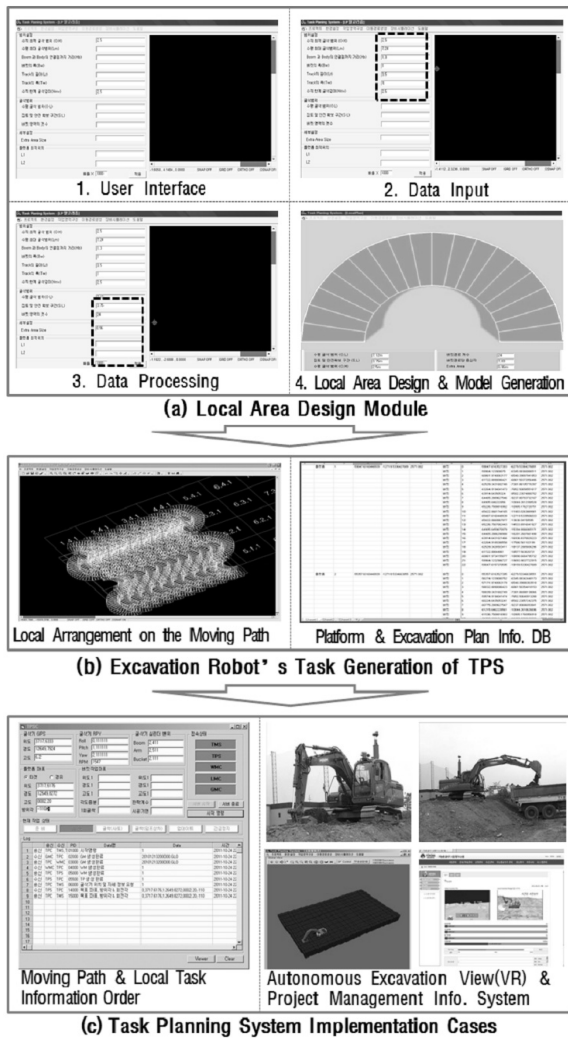


Fig. 10. Implementation Examples of Local Area Design Module

작업계획생성과정에서 이동경로와 연계되어 정보화단위로 활용되는 로컬영역설계모듈의 개발목표를 확인하기 위하여 이동 경로생성모듈과 연계하여 굴삭로봇의 운용단위 작업계획 목표를 지정하는 플랫폼 및 각 굴삭경로의 시점과 종점에 대한 정보를 생성하여 텍스트 파일로 저장하였다. 마지막으로 본 연구를 통하여 개발된 로컬영역설계모듈과 이를 응용하여 개발한 TPS에서 입력된 작업환경에 따른 굴삭작업계획을 생성하였으며, 생성된 작업계획정보를 지능형 굴삭로봇에 명령하여 무인화 굴삭작업을 수행하고 작업 성능을 테스트해 봄으로써 본 연구개발에 대한 내용을 검증하였다.

#### 4. 결론

토공사는 공사현장마다 비정형적인 지형의 형상 및 작업내용

그리고 토질의 물성이 상이하기 때문에 일반적인 제조업이나 기타 건설공사의 공종과 달리 자동화시스템의 구축이 매우 어렵다고 할 수 있다. 그러나 갈수록 숙련공은 물론 노동력의 급감현상이 증가될 것으로 예상되고, 극한적 환경을 대상으로 인류의 자원 및 새로운 생활공간의 창출이 요구되고 있어 토공완전자동화기술은 인류가 반드시 해결해야할 문제이다. 현재, 전 세계적으로 토공자동화기술개발을 위한 노력이 지속되고 있으나 대부분 영역단위 작업계획시스템에 기반을 두거나 이에 정형화된 작업패턴을 통한 시스템이 구축되어 실제 현장에 적용하기가 어려운 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 굴삭로봇의 굴삭경로 즉, 운용단위 작업계획이 수립되기 위한 최적의 정보화 단위를 생성하고, 이를 바탕으로 주변의 환경과 공사여건이 고려된 효율적인 작업을 계획되어야 할 것이다. 또한, 완전자동화시스템의 경우 인간과 같이 위험요소에 대한 직관적인 대처가 어렵기 때문에 휴리스틱을 기반으로 생성되는 작업계획에 대하여 충분한 안전이 확보되도록 상황에 따른 구조적 안정성검도를 수행하여 작업계획내용에 대한 충분한 타당성이 확보되도록 해야 할 것이다.

본 연구는 토공완전자동화시스템 구축을 위한 요소기술 중, 굴삭로봇의 효율적이고 안전한 작업계획이 생성될 수 있는 정보화단위인 로컬영역을 설계하고 생성하는 로컬영역설계모듈의 연구 및 개발내용에 대하여 소개하였다. 현장조사를 통한 로컬영역의 개략적인 설계로 설계요소를 도출하였으며, 작업의 효율성을 도모하고 설계목표를 확인하고자 숙련된 작업자의 휴리스틱을 분석하여 반영하였으며, 상세설계를 통해 설계변수의 도출 및 설계내용을 정량화하기 위한 수식을 산출하였다. 또한, 굴삭로봇의 4DOF 작업메커니즘을 반영하여 로컬영역 내 굴삭경로를 구성하였으며, 안전과 관련된 설계내용에 대해서는 다양한 조건을 반영한 사면안정시물레이션을 실시하여 설계내용의 타당성을 입증하였다. 마지막으로 알고리즘 구축을 통한 시스템 개발내용 및 기능을 검증함으로써 연구내용을 뒷받침하였다.

앞으로 토공자동화를 비롯한 타 공종의 자동화시스템 구축에 있어서, 자동화 로봇의 보다 구체적이고 실효성 있는 작업계획 생성을 위한 정보화단위의 생성 및 응용에 대한 연구가 끊임없이 진행 될 것이고 본 연구는 이러한 연구의 수행에 앞서 프로토타입(prototype)을 제시할 수 있을 것이다. 본 연구개발내용을 바탕으로 굴삭작업뿐만 아니라 성토작업까지 고려된 지능적이고 상황대처능력이 뛰어난 작업계획시스템 개발을 위하여 끊임 없는 노력을 경주한다면, 국내의 우수한 고급 로봇기술과 함께 완전자동화시스템 구축을 위한 국내의 건설자동화 기술력을 한 층 앞당길 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(과제번호: 06첨단 융합01)과 지식경제부 지식경제 기술혁신사업(과제번호: 2012 T100201733)의 지원에 의하여 수행되었습니다

## References

- Doosan Infracore Co., Ltd.(2007), *DX140LC EXCAVATOR Specification Report*.
- Hui Shao, Hiroshi Yamamoto, Yuki Sakaida, Takashi Yamaguchi, Yuji Yanagisawa, Akira Nozue (2008), Automatic Excavation Planning of Hydraulic Excavator, *Intelligent Robotics and Applications*, pp. 1201-1211.
- Hyeon-Yong Park, Yong-Ho Tae, Sung-Kwon Woo (2007), A Study on the Estimating of the Dump Truck's Travel Speed Based on Analysis of Factors Affecting, *Journal of Korea Institute of Construction Engineering and Management*, Vol. 8, No. 3, pp. 97-105.
- Hyun-Ki Kim, Soo-Sam Kim (2011), Slope Stability Analysis Considering Multi Failure Mode, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 1, pp. 24-30.
- In-Gul Choi, Young-Mok Park (2007), *The Geo-technical Engineering for On-site Practice*, Goomiseokwan., Inc.
- John Krahn(2004), *Stability Modeling with SLOPE/W -An Engineering Methodology-First Edition*, GEO-SLOPE/W International Ltd.
- Jong-Won Seo, Chang-Woo Park, Dal-Sik Jang (2007), Development of Intelligent Excavating System -Research Consortium Introduction-, *KICEM Conference 2007*, pp. 197-204.
- Jongwon Seo, Seungsoo Lee, Jeonghwan Kim, Sung Keun Kim (2011), Task Planner design for an automated excavation system, *Automation in Construction*, Vol 20, Issue 7, pp. 954-966.
- Kim S. K., Russell J. S., Koo K. J. (2003), Construction robot path-planning for earthwork operations, *Journal of computing in civil engineering*, vol.17, pp. 97-104.
- Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009), *Slope Design Standard for Construction Projects*.
- Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), *Statistics for Construction Equipment Status*, Report, Machinery and Materials Division of Construction WorkForce.
- Sanjiv Singh and Howard Cannon(1998), Multi-resolution Planning for Earthmoving, *Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation*, Leuven(Belgium), pp. 121-126.
- Seung-Soo Lee, Jeong-Hwan Kim, Sang-Hyeok Kang, Jong-Won Seo(2008), Development of Task Planning System for Intelligent Excavating System Applying Heuristics, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 6D, pp. 859-869.
- Shigeru S., Yossewee W. and Takashi T. (2005), Planning of scooping position and approach path for loading operation by wheel loader, *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, IAARC, Ferrara(Italy), pp. 1-6.
- Tae-Sik Lee(2011), Importance and Future Development Direction of the Construction Extreme Engineering in the 21th Century, Special Contribution Report, *Construction Technology Magazine of Ssangyong Engineering & Construction Co., Ltd*, 2011 SPRING, pp. 12-17.
- Yuki Sakaida, Daisuke Chugo, Kuniaki Kawabata, Hayato Kaetsu, Hajime Asama (2006), The Analysis of Excavator Operation by Skillful Operator, *23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, IAARC, Tokyo (Japan), pp. 543-547.