

스마트 토공시스템을 위한 요소기술 개발 방향에 관한 연구

김성근*

Kim, Sung-Keun*

A Study on the Direction of Core Technology Development for a Smart Earthwork System

ABSTRACT

The problems of lack of skilled worker and poor productivity at the construction site continue to be raised, and the introduction of construction automation as one of the solutions to this has been considered. The development of various types of equipment and systems has been carried out, especially for earthwork operations with multiple construction equipment. However, the level of commercialization of developed equipment or systems is very limited. Although the single-product type of earthwork equipment has been applied to the site, the integrated type of earthwork system is still in the field testing stage. Considering these constraints, the limited budget and research period, a strategy is needed to identify which technology areas and core technologies should be developed first. In this study, the technology areas and detailed core technologies that are essential for the development of earthwork systems at the level of commercialization are set and the priority of development is determined. In addition, the earthwork system that has been developed so far is analyzed and the detailed development direction is presented based on it. The findings can be used for a decision making to set the priority for core technologies that should be developed first in the limited budget and period.

Key words : Construction automation, Earthwork system, Core technology, Priority, AHP

초 록

건설현장에 숙련공 부족문제와 생산성 저하 문제가 지속적으로 제기되고 있으며, 이것에 대한 해결책의 하나로 건설자동화 기술도입이 검토되어 왔다. 이러한 배경에서 다양한 형태의 장비 및 시스템 개발이 이루어져 왔고, 특히 다수 및 다종의 건설장비가 투입되는 토공작업을 위한 개발이 많이 수행되었다. 하지만 개발된 장비나 시스템이 상용화 수준에 도달한 것은 매우 제한적이다. 그나마 단품 형태로 개발된 토공장비의 경우에는 현장에서 적용되고 있는 사례를 볼 수 있으나, 시스템 형태로 개발된 것은 각종 기능이 유기적으로 통합된 것이 아니라서 현장 테스트 단계에 머무르고 있다. 이러한 제약사항을 극복하고 제한된 예산과 연구기간을 고려할 때 어떤 기술분야의 어떤 요소기술들을 우선적으로 개발을 해야 하는지 전략이 필요하다. 본 연구에서는 상용화 수준의 토공시스템 개발을 위하여 필수적인 요소기술 분야와 세부 요소기술들을 설정하고 개발 우선순위를 결정하였다. 아울러 현재까지 개발이 완료된 토공시스템을 분석하고 이것에 근거하여 세부적인 개발방향을 제시하였다. 연구결과는 제한된 예산과 기간동안에 우선적으로 개발해야 할 기술을 설정하는데 사용될 수 있을 것이다.

검색어 : 건설자동화, 토공시스템, 요소기술, 우선순위, 쌍대비교

* 중신회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 정교수, 공학박사
(Corresponding Author · Seoul National University of Science and Technology · cem@seoultech.ac.kr)

Received October 23, 2018/ revised October 26, 2018/ accepted November 12, 2018

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

저출산 문제는 우리나라 전체 산업에 신규 인력의 유입이 감소되는 심각한 문제로 받아들여지고 있다. 특히 건설업은 3D 업종이라는 인식으로 인하여 타산업에 비하여 유입 인구가 더욱 줄어들고 있는 상황이며 기존의 인력의 고령화와 더불어 건설생산성이 악화되고 있는 실정이다. 통계청 자료에 따르면 2014년 기준으로 필요한 건설기능인력 보다 13% 이상 부족한 상황이며, 그나마도 작업에 숙련되지 않은 외국인 인력으로 현장을 운영하는 경우가 많다. 우리나라의 건설생산성은 2015년 기준으로 벨기에, 영국, 네덜란드, 스페인의 생산성의 절반에도 미치지 못하는 시간당 13.6달러 수준으로 발표되었다.

지금은 4차 산업혁명 시대를 맞이하여 다양한 스마트 및 디지털 기술을 적용하여 각 분야에서 생산성을 향상 시키려는 노력을 기울이고 있다. 이미 해외에서는 4차 산업혁명기술을 적용하여 건설생산성을 올리기 위한 정책을 추진하고 있는 상황이다. 영국에서는 Construction 2025 (Son, 2016)를 통하여공기단축 50%를 목표로 하고 있고, 일본에서는 1-Construction (Cho, 2017)을 통하여 2025년까지 건설생산성을 20% 향상 시키는 목표를 설정하고 있다. 또한 싱가포르의 경우에도 Construction Productivity Roadmap (NAS, 2017)를 통하여 첨단기술을 도입하여 매년 2~3% 건설생산성 향상 계획을 수립하고 있

으며, 우리나라에서도 제6차 건설기술진흥기본계획(국토교통부)을 통하여 2022년까지 건설생산성을 40% 향상 시키는 것을 목표로 제시하고 있다

상기에 언급된 낮은 건설생산성 및 노동력 부족에 대한 해결책으로써 4차 산업혁명기술을 기반으로 하는 토공작업 관련 시스템 개발이 이루어지고 있으나 상용화 단계에 이르기까지는 많은 제약 사항이 있는 것이 현실이다. 본 연구에서는 제한된 예산과 연구기간을 고려할 때 실현장에 적용 가능한 수준의 토공시스템 개발을 위하여 필수적인 요소기술 분야와 세부 요소기술들을 설정하고 개발 우선순위를 결정하고자 한다. 아울러 현재까지 개발이 완료된 토공시스템을 분석하고 이것에 근거하여 세부적인 개발방향을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

연구에서는 토공시스템 관련 기술동향 분석, 토공시스템 개발요인 분석, 상용화 단계에 이르기 위한 개발대상 요소기술 분야와 세부 요소기술 선정 및 개발 우선순위 결정, 토공관련 시스템의 기술성숙도 파악을 포함하며, 기존 토공시스템의 분석을 통하여 개발방향을 제시하는 것을 범위로 한다. 자세한 내용은 다음과 같다.

(1) 토공시스템 관련 기술 조사

4차 산업혁명과 관련하여 여러가지 디지털 기술들이 대두되고 있다. 본 연구에서는 토공시스템 개발에 적용될 수 있는 디지털 기술 동향을 살펴보고, 지금까지 개발되어온 스마트 토공 관련 기술을 각종 논문, 특허 및 기술자료 검토를 통하여 분석하고자 한다.

(2) 토공시스템 개발요인 및 세부 토공작업별 자동화 니즈 분석

토공작업에서 낮은 건설생산성 및 노동력 부족문제를 해결하기 위한 방안으로서 자동화 시스템 도입에 대한 수요자의 필요성을 분석하기 위하여 설문 및 AHP분석을 통하여 개발요인을 파악하고, 세부 토공작업별로 안전성, 생산성, 품질, 경제성, 및 인력대체성 측면에서 자동화 시스템의 필요성에 대한 우선순위를 파악해 본다.

(3) 상용화 수준의 토공시스템 개발을 위한 요소기술 분야 및 세부 요소기술 파악

다양한 4차 산업혁명기술 관련 기술들이 제시되고 있는데 토공시스템 개발에 필요한 기술들을 몇 개의 그룹으로 분류하고 기술 분야의 개발 우선순위를 기술의 중요도, 기술의 성숙도, 건설현장 적용성 등의 관점에서 전문가들의 설문을 바탕으로 결정한다. 또한 기술 분야별로 세부 요소기술을 정의하고 요소기술들의 개발 우선 순위도 결정한다.

(4) 개발된 토공시스템 분석 및 개발방향 제시

기존에 정부지원 연구과제로 수행되어 개발된 토공시스템을 분석하고 상용화 단계의 수준에 이르기까지 추가적으로 개발을 해야 하는 부분에 대하여 검토하고 의견을 제시한다.

2. 관련 기술동향 분석

2.1 디지털 기술 관련 동향

디지털 기술이란 4차 산업혁명과 관련된 첨단 기술을 대별하여 사용되는 것으로 3차 산업혁명의 정보화 및 지식화 기술과는 차별을 두고 있다. 빅데이터, 클라우드, 인공지능, 로봇, 모바일, 사물인터넷, 가상현실, 증강현실, 블록체인, 드론, 3D 프린터 등과 같은 기술들이 융합 및 연결되어 혁신적인 변화를 일으키는 개념의 기술이라고 할 수 있으며(Lee et al., 2017), 이러한 기술을 통하여 생산성의 혁신을 가져오는 것이 4차 산업혁명의 특성이라고 할 수 있다. 건설업에서도 디지털 기술을 도입하여 스마트한 건설을 수행하기 위한 다양한 연구개발이 진행되고 있다.

BIM은 디지털 건설의 기초를 이루는 기술로 구조물의 전체 생애주기 동안 발생하는 정보를 효과적으로 생성, 통합 및 관리하고

재활용하기 위하여 제시된 것으로, 2차원 도면이 갖는 한계를 극복하고 건설 참여자가 건설의 각 단계별에서 유기적이며 지속적으로 정보를 공유할 수 있도록 하는 기술이다. BIM 데이터의 상호운영 및 호환을 위하여 표준규격을 제정하고 다양한 주체들이 서로 공유 및 교환을 통하여 BIM 도입의 목적을 달성하기 위한 노력을 기울이고 있다(Park et al., 2018). 현재 BIM은 디지털 건설의 기본 요소로 고려되고 있으며 주로 3차원 시각화, 설계오류 검토, 시공성 검토, 물량산출 등에 적용되고 있다. 하지만 아직까지 여러 가지 제약으로 인하여 생성된 BIM모델을 구조물의 생애주기에 걸쳐 재활용되고 있지는 못한 실정이다.

건설로봇 기술은 작업자 안전문제, 숙련공 부족문제, 생산성 저하문제, 경제성 확보 등의 이유로 건설업에 도입되었다(Kim et al., 2004). 초기 건설로봇은 특정 공종에 투입되어 단순 작업을 수행하는 형태가 주를 이루었으나, 최근에는 다기능의 협업이 가능한 형태의 건설로봇이 개발되고 있다. 하지만 실제 건설현장에서 사용되고 있는 로봇을 많이 접할 수 없는 이유는 제조업의 정형화된 작업환경과 달리 현장의 여건이 외부환경에 많은 영향을 받으며 가변성이 심하기 때문에 안전하고 확실하게 적용하는데 어려움이 있기 때문이다. 현재 국내외에서 단일 건설로봇 개발의 형태에서 협업이 가능한 다수 및 다종의 건설로봇이나 장비들로 구성된 시스템 형태를 개발하고 있다. 또한 BIM 데이터와 연계되어 시공 단계에서 건설로봇이 사용될 수 있는 시스템이 개발되고 있다. 현재 국토교통부에서도 8대 혁신성장동력으로 건설자동화가 추진되고 있어서 다양한 형태의 건설로봇이 개발될 수 있을 것으로 사료된다.

인공지능 기술은 인간의 사고능력과 의사결정 능력을 대신할 수 있는 기술이다. 이것은 과거부터 지속적인 발전을 이루어 왔고 최근 빅데이터 기술과 하드웨어 기술의 발전과 함께 큰 진보를 보이고 있으며 4차 산업혁명의 핵심기술로 대두되고 있다. 그동안 인공지능 기술을 건설업에 도입하는 다양한 연구개발이 진행되어 왔다. 인공지능을 설계 소프트웨어에 적용하여 최적의 설계지원, 설계오류 실시간 확인, 구조계산, 물량산출, 각종 시뮬레이션, 리스크 분석, 프로젝트 관리 등과 같은 기능을 자동으로 수행할 수 있도록 하고 있으며, 건설장비와 같은 하드웨어에 접목하여 실시간 시공계획 생성, 최적의 장비운영 지원, 무인 자동화 작업, 장비간 협업지원, 저에너지 시공 등과 같은 기능을 수행할 수 있는 기반을 제공하고 있다. 이러한 기능들은 전통적으로 인력에만 의존하여 작업을 수행하는 경우보다 생산성, 안전성, 효율성 측면에서 개선되는 효과를 보여주고 있다.

드론은 자율이동체로 단순 교통수단을 넘어 각종 정보의 수집, 가공, 배포 및 활용 등 광범위한 부분에서 역할을 수행할 수 있는 기술로 고려되고 있다(KARI, 2017). 최근 건설업에서도 현장의

3차원 모델취득과 실시간으로 작업현황을 파악하고, 구조물의 유지관리 단계에서 구조물의 상태를 파악하기 위한 목적으로 드론이 사용되고 있다. 특히 토공현장에서는 시간과 인력이 많이 필요한 측량작업을 대신하여 드론을 사용하여 효과적으로 지형모델 취득과 작업 현황 파악이 가능하며, 유지관리 단계에서는 짧은 시간에 구조물의 상태를 파악하고 인력으로 접근하기 어려운 곳도 용이하게 접근하여 상태를 확인할 수 있다. 최근에는 건설업에 사용될 수 있는 다양한 형태의 드론 개발이 이루어지고 있으며 드론에 장착할 수 있는 특수목적의 각종 센서와 카메라도 개발되고 있다.

3D 프린팅 기술은 3차원으로 입력된 디지털 설계파일을 기반으로 적층방식으로 금속, 폴리머, 콘크리트 등과 같은 재료를 사용하여 3차원으로 입체물을 출력하는 기술이다(Oh et al., 2014). 이러한 방식의 기술은 맞춤형 설계로 건설비용 감소, 사용되는 자원의 감소, 대량생산 용이성, 정밀성 확보, 비정형 구조물의 구축이 가능한 장점을 갖고 있다. 그러나 아직 구조물의 규모, 사용되는 재료의 강도문제, 철근 및 철골시공 등과 같은 문제가 해결되지 않아서 건설현장에 적용된 사례는 많지 않다. 그동안 영국, 미국, 네덜란드, 중국에서 시험적으로 저층 주택이나 간단한 구조물을 시공한 사례가 존재하며 관련 특허도 계속 출원되고 있는 상황이다. 한국은 아직 기술개발 수준이 다른 나라에 비하여 질적으로 부족한 상황에서 R&D 투자가 필요한 상황이다.

2.2 스마트 토공 관련 기술

대부분의 공사에서 기본 공종으로 고려되는 토공은 다수 및 다종의 건설기계가 투입되어 운영되는 특성을 갖고 있다. 기존의 재래적인 토공작업에서는 반복적인 측량작업과 작업자 및 건설장비간 필요한 정보의 적시제공 기능의 미비로 인하여 생산성 향상에 어려움이 있었으며, 건설장비 운전자의 숙련도에 따라 생산성이 많이 달라지는 경향을 보였다. 이러한 점을 개선하기 위하여 다양한 주체들에 의하여 연구개발들이 이루어져 왔다. 대표적인 토공작업 관련 상용 시스템을 살펴보면 Sokkia에서는 3차원 정보, GPS, 각종 센서 및 통신기술을 접목하여 기존 작업에 비하여 검측단계를 줄이고 정밀도가 높은 작업이 가능한 시스템을 제시하고 있으며(Sokkia Korea, 2013), Trimble에서는 GPS, 그래픽 기술, 통신기술, MMI (Man-Machine Interface)를 기반으로 하는 머신가이던스 기술을 적용하여 측량말뚝 설치 없이 정확하게 토공작업을 할 수 있는 기능을 제공하고 있으며 건설장비 전체의 Fleet를 관리할 수 있는 기능도 제공하고 있다(Trimble, 2018). 특히 일본의 경우에는 Fujita와 Maeda 건설의 경우에는 작업자의 안전을 위하여 원격 또는 무인으로 토공작업을 할 수 있는 시스템을 구축하여 운영을 하고 있으며, 미국의 경우에도 Caterpillar사에서 무인으로

토공작업을 수행할 수 있는 상용화 시스템을 개발하였다. 국내에서는 두산인프라코어와 몇 개의 대학들이 협업을 하여 지능형 굴삭기 (Kim et al., 2012)를 개발하여 현장실험을 실시(Fig. 1)하여 무인토공의 가능성을 보여 주었으며, Fig. 2에서와 같이 최근에 토공작업 수행시 다수 및 다종의 건설장비들이 실시간으로 필요한 정보를 공유하면서 최적의 토공계획을 수립하고 건설장비의 운영을 지원할 수 있는 플랫폼리 시스템(Kim et al., 2017; Smart Construction Tech Research Group, 2018)이 개발되었다.

연구개발 추세를 살펴보면 토공작업에 사용될 수 있는 단일 장비나 시스템 개발이 선행되었고, 그 이후에는 다수의 건설장비들이 협업을 할 수 있는 환경을 제공하는 시스템 개발이 이루어졌다. 단일 장비의 경우에는 기존에 필수적으로 수행되던 측량작업을 하지 않아도 되며 숙련된 운전자의 생산성을 확보하며 요구되는 품질을 만족할 수 있도록 지원하는 기능을 제공하였다면, 시스템의 경우에는 전체 작업의 측면에서 소요되는 시간을 최소화하면서 생산성을 높일 수 있도록 하는 작업계획 수립과 장비움직임 및 운영을 지원하는 기능을 제공하고 있다. 최근에는 가상현실 및 증강현실 기술을 접목하여 3차원 이미지의 동적정보를 제공하거나 기존의 2차원 도면에서 제공되던 정보를 실제 현장의 환경에 투영하여 정보를 제공함으로써 작업의 현실성과 몰입성을 개선하고 이것을 기반으로 효율적인 의사결정과 시공이 가능하도록 지원하는



Fig. 1. Unmanned Intelligent Excavator



Fig. 2. Fleet Management System for Earthworks (Smart Construction Tech Research Group, 2018)

노력이 시도되고 있다. 아직은 프로토타입의 형태이지만 가상현실이나 증강현실을 적용한 건설기계도 출시가 되고 있으며, 관련 기술들은 매년 ISMAR (International Symposium on Mixed and Augmented Reality)에서 소개가 되고 있다.

3. 세부공종별 개발우선 순위 및 시스템 구축기술 분석

3.1 스마트 토공시스템 개발요인 파악

현장에 적용할 수 있는 시스템 개발에 있어서 중요한 것은 우선적으로 사용자의 필요성이 있어야 하며, 어떤 개발요인을 우선적으로 고려할지 결정해야 하고 시스템을 구현할 수 있는 요소기술이 수반되어야 한다. 본 연구에서는 시스템 개발요인의 우선순위와 시스템 개발을 위한 범위 및 수준에 대하여 전문가들의 면담과 설문을 바탕으로 결과를 도출하였다. 면담 및 설문조사는 Fig. 3에서와 보는 바와같이 토공작업에 경험이 있는 26명의 현장관리자와 건설기계 운전자를 대상으로 실시하였다. 설문 응답자의 73%가 10년 이상의 경험을 갖고 있어서 의미있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

스마트 토공시스템 구축시 중요하게 고려되는 개발요인으로는 안전성, 생산성, 품질, 경제성, 그리고 인력대체성이 선정되었으며 개발요인들간의 상대적인 중요도를 AHP기법을 사용하여 결정하였다. 설문조사시 5점 척도를 사용하였고 회수된 설문중에서 일관성 지수가 10% 이상인 경우에는 제외를 시키고 19개 설문만 최종결

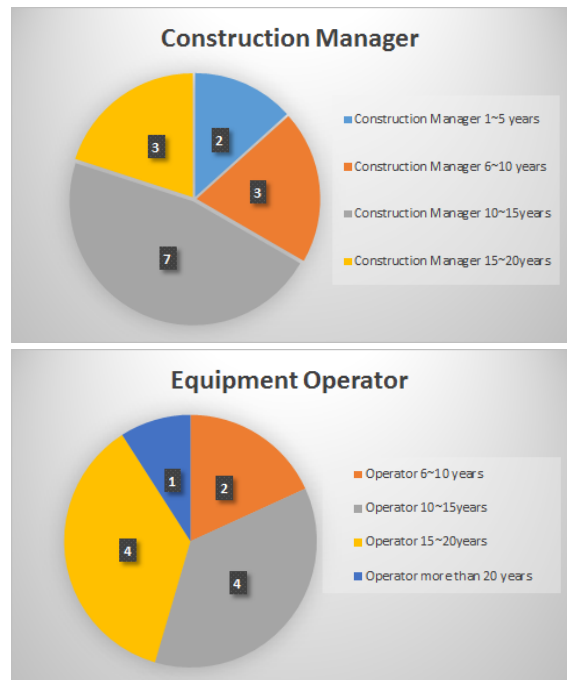


Fig. 3. Experts for the Questionnaire Survey

Table 1. AHP Analysis for the Needs of a Smart Earthwork System

	Safety	Productivity	Quality	Economic Value	Labor Displacing	Weight	Priority
Safety	1	1/3	2	2	4	0.24	2
Productivity	3	1	2	2	4	0.38	1
Quality	1/2	1/2	1	2	3	0.18	3
Economic Value	1/2	1/2	1/2	1	3	0.14	4
Labor Displacing	1/4	1/4	1/3	1/3	1	0.06	5

* $\alpha = 0.1$, CR= 0.01

Table 2. Automation Needs for the Subtasks of Earthwork

Task	Subtask	Safety (0.24)	Productivity (0.38)	Quality (0.18)	Economic Value (0.14)	Labor Displacing (0.06)	Score	Priority
Earthwork	Clearing & Grubbing	6	10	7	4	3	7.24	4
	Cutting/Digging	11	15	1	1	2	8.78	1
	Filling/Backfilling	6	9	13	0	2	7.32	3
	Hauling	2	16	0	11	1	8.16	2
	Slope Protection	16	3	11	0	0	6.96	5

과에 반영하였다(Table 1). 설문결과에 따르면 스마트 토공시스템 구축시 생산성 향상이 가장 중요한 개발요인으로 고려되고 있는 것으로 나타났으며, 다음으로 안전성, 품질, 경제성, 그리고 인력대체성 순으로 중요도를 갖는 것으로 조사되었다.

3.2 토공작업 세부공종별 기능개발 우선순위

토공작업은 표토제거 및 부지정지 작업, 절토 및 터파기, 토사처리 및 운반, 성토 및 되메우기, 사면 보호공 등의 세부공종으로 구성되어 있다. 개발시 모든 세부공종을 커버할 수 있는 시스템 개발이 현실적으로 어려운 관계로 순차적인 개발을 위하여 Table 2에서와 같이 작업특성을 고려하여 세부공종별로 우선순위를 결정하였다. 우선순위 결정을 위하여 설문자들에게 세부공종별로 상기에서 언급된 6가지 개발요인 중에서 가장 중요한 개발요인 1가지를 선택하도록 요청 하였으며, 필요한 경우에 개발요인을 2개까지 선택이 가능하도록 하였다. 세부공정의 점수는 각 개발요인별로 선택된 수에 AHP 분석에 의하여 결정된 개발요인의 가중치를 곱한 점수를 모두 합하여 산정하였다. Table 2에서 보는바와 같이 절토 및 터파기가 가장 높은 점수가 나왔으며, 토사처리 및 운반, 성토 및 되메우기, 표토제거 및 부지정지 작업, 그리고 사면보호공 작업 순으로 점수가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 토공시스템 개발시 점수가 높게 나온 세부작업을 대상으로 하는 기능을 우선적으로 반영해야 함을 나타내는 것으로 사용자가 해당 작업에 우선적으로 자동화를 도입하고자 하는 의사를 나타낸 것으로 해석할 수 있을 것이다.

3.3 스마트 토공시스템을 위한 요소기술 개발 우선순위

Table 3은 Kim et al.(2004)의 연구에서 제시한 건설자동화 기술영역과 관련 요소기술들을 보완하여 제시한 것이다. 스마트 토공시스템 개발에 소요되는 한정된 예산과 시간을 고려하여 효과적으로 개발을 수행하기 위해서는 Table 3에 분류된 요소기술들의 개발 우선순위를 정하는 것이 필요하다.

토공의 세부작업들의 특성을 고려하여 요소기술들의 개발 우선순위를 결정하기 위하여 평가항목으로 기술 중요도, 기술 성숙도, 건설현장 적용성을 고려하도록 하였다. 관련 전문가 10명을 대상으로 설문을 실시하였고 AHP 기법을 적용하여 평가항목의 가중치를 도출하였다. 우선순위 결정시 평가항목의 가중치는 스마트 토공시스템 구축시 요소기술로서의 중요도(기술 중요도): 34%, 국내에서 해당 요소기술의 성숙도(기술 성숙도): 25%, 해당 요소기술의 건설현장 적용 가능성(건설현장 적용가능성): 41%로 나타났다. 또한 설문자들에게 각각의 요소기술에 대하여 기술 중요도, 기술 성숙도, 건설현장 적용가능성에 대한 점수를 High(3점), Mid(2점), Low(1점)를 부여하도록 하였다. 각 요소기술의 우선순위는 다음과 같이 계산을 실시하였고, 그 결과는 Table 3에서 우선순위(Priority) 칼럼에 제시되어 있다.

$$\text{요소기술 우선순위 점수} = \{(\text{기술 중요도 평균값} \times 0.34) + (\text{기술 성숙도 평균값} \times 0.25) + (\text{건설현장 적용가능성 평균값} \times 0.41)\}$$

결과에 따르면 스마트 토공시스템을 위하여 GIS & GPS 기술, 유무선 통신기술, 유비쿼터스 및 모바일 기술, BIM 기술, 인터넷

Table 3. Priority of the Core Technologies for Earthwork Systems (Core Technologies are Modified from Kim et al., 2004)

No	Technology Area	Core Technology	Score	Priority
1	Information & Communication (TA1)	• Wire & Wireless Technology (CT1)	2.857	2
		• Internet & Cloud Technology (CT2)	2.655	5
		• IoT (Internet of Things) Technology (CT3)	2.407	11
		• Information Standardization (CT4)	2.366	13
		• Communication Protocol Technology (CT5)	2.368	12
		• GIS & GPS Technology (CT6)	2.941	1
		• Ubiquitous & Mobile Technology (CT7)	2.841	3
		• Multi-media Technology (CT8)	2.571	6
		• RFID(Radio-Frequency Identification) Technology (CT9)	2.280	15
		• API(Application Programming Interface) Technology (CT10)	1.998	24
		• Database & Big Data Technology (CT11)	2.282	14
2	Sensing & Control (TA2)	• Sensors & MEMS(Micro Electro Mechanical System) Technology (CT12)	2.493	10
		• Vision & Sound Technology (CT13)	2.232	17
		• Planning Algorithms & Softwares (CT14)	2.518	8
		• Remote & Haptic Control Technology (CT15)	1.948	26
		• Intelligent Control Technology (CT16)	1.977	25
		• Intuitive OCU (Operator Control Unit) Technology (CT17)	1.941	27
		• Man-Machine/Man-Robot Interface Technology (CT18)	2.541	7
3	Artificial Intelligent (TA3)	• Work Knowledge & Skill Database Technology (CT19)	2.209	18
		• Soft Computing Technology (CT20)	2.518	9
		• Machine Learning & Deep Learning (CT21)	2.159	20
		• Image, Video & Voice Analysis Technology (CT22)	2.191	19
		• Robotic Process Automation Technology (CT23)	1.752	28
		• Decision Management Technology (CT24)	2.057	22
		• Virtual Agent Technology (CT25)	1.391	32
4	Simulation (TA4)	• BIM(Building Information Model) Technology (CT26)	2.684	4
		• Intelligent CAD(Computer Aided Design) & CAC (Computere Aided Construction) Technology (CT27)	2.052	23
		• VR(Virtual Reality) & AR(Augmented Reality) Technology (CT28)	1.514	30
		• Real-Time Simulation Technology (CT29)	2.157	21
		• Cyber-Physical System Technology (CT30)	1.382	33
5	Teaching System (TA5)	• Online & Offline Teaching Technology (CT31)	2.266	16
		• Intelligent Teaching Technology (CT32)	1.618	29
		• Automated Error Correction Teaching Technology (CT33)	1.504	31

및 클라우드 기술, 멀티미디어 기술, 인간-기계 인터페이스 기술, 계획용 알고리즘 및 소프트웨어 기술, 소프트 컴퓨팅 기술, 센서 및 미세전자기계시스템 기술 등등의 우선순위로 개발이 이루어져야 함을 나타내고 있다.

3.4 기존의 관련 시스템들의 기술성숙도 파악 및 목표 설정

TRL (Technology Readiness Level)은 NASA에서 기술투자

위험관리를 위하여 도입한 것으로 핵심요소 기술의 성숙도를 나타내는 지표로 사용하고 있다. 본 연구에서도 기존에 개발된 토공관련 시스템들의 기술성숙도를 파악하고 이것에 근거하여 목표로 하는 기술성숙도를 설정하고자 한다.

우선 기술성숙도는 Table 4에서와 같이 9단계로 구분된다. 기초이론 정립단계(1단계), 개념정립 단계(2단계), 수요검증 단계(3단계), 시험용 규모의 시작품 단계(4단계), 파일럿 규모의 시작품

Table 4. Classification of the Technologies for Earthwork Operations by TRL

Type \ TRL	Idea			Prototype		Validation		Production	
	1: Basic Research	2: Concept Formulation	3: Needs Validation	4: Lab Scale Prototype	5: Pilot Scale Prototype	6: Field Test System	7: Demonstration System	8: Initial Commercial System	9: Final Commercial System
Stand alone system	<ul style="list-style-type: none"> Stanford Univ.: Construction automation technologies (Paulson, 1985) KICT: Semi-automatic dozer (KICT, 1998) Inha Univ.: Automation technology roadmap (Kim et al., 2001) 	<ul style="list-style-type: none"> Univ. of Nottingham: automated earthwork planning (Mawdesley et al., 2002) KICT: Framework of an intelligent earthwork system (Kim & Russell, 2003) SeoulTech: Equipment path planning (Kim et al., 2003) 	<ul style="list-style-type: none"> Napier Univ.: Needs of construction automation (Taylor et al., 2003) Univ. of Central Florida: Tele-operation, positioning, collision detection tech (Oloufa et al., 2003) Lancaster Univ.: Feasibility analysis for robot technology (Seward & Zied, 2003) 	<ul style="list-style-type: none"> Cinvestav: Haptic excavator (Torress-Rodriguez et al., 2005) 	<ul style="list-style-type: none"> Industrial Robot: Remotely operated backhoe (Yoshihiro, 2003) 	<ul style="list-style-type: none"> Doosan: Intelligent excavator (Cho, 2015) Iowa DOT: Intelligent compaction system (Iowa DOT, 2010) 	<ul style="list-style-type: none"> Bickhardt Bau Aktiengesellschaft: Mobile 3D mapping for earthwork (Siebert & Teizer, 2014) 	<ul style="list-style-type: none"> Fly-Site: Drone survey earthwork Trimble: AR-based SiteVision prototype 	<ul style="list-style-type: none"> Trimble: Earthwork grade control platform Leica: Geosystem Sokkia: 3D MC excavator Caterpillar: Acugrade
Integrated system				<ul style="list-style-type: none"> SeoulTech: Intelligent navigation system (Kim et al., 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> KICT: 3D surface modeling system (Chae et al., 2011) 	<ul style="list-style-type: none"> Hanyang Univ.: ICT based fleet management system for earthwork (Seo, 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> GS Construction: Soil compaction management system 	<ul style="list-style-type: none"> Maeda: Tele-earthwork system Obayashi: Compact system Fujita: Unmanned construction system 	<ul style="list-style-type: none"> Kuhn: Construction site 4.0

* TRL: Technology Readiness Level

단계(5단계), 적용 환경과 유사한 현장 테스트 단계(6단계), 실제 환경에서의 성능검증 단계(7단계), 표준화 및 시제품 단계(8단계), 그리고 최종 사업화 단계(9단계)로 구분된다. 기존의 대표적인 토공과 관련된 연구 및 기술개발을 독립형 시스템과 통합형 시스템으로 구분하고 TRL의 어떤 단계에 있는지를 살펴보았다. 많은 경우에 연구기관들이 단계 7에 이르는 기술을 개발하면 이것을 바탕으로 건설장비 및 소프트웨어 제작사들이 상용화를 하는 패턴을 보이고 있다. 기존에는 8단계 및 9단계에 이르는 시스템이 소수에 불과했으나, 최근에는 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 적용할 수 있는 요소기술들이 개발됨으로써 9단계에 이르는 시스템들이 점차 늘어나고 있는 추세이다. 건설업이 제조업과는 다른 작업환경으로 인하여 적용될 수 있는 요소기술에 제약이 많았으나 이러한 어려움이 점차 해소되고 있는 추세여서 가까운 미래에 토공현장에서 다양한 자동화 시스템을 볼 수 있을 것으로 판단된다.

기존의 8단계 및 9단계에 이르는 토공관련 시스템의 경우에는 단일 장비나 제한된 범위의 기능들을 통합한 시스템 형태가 주를 이루고 있다. 측량, 계획, 시공 및 관리, 검측기능이 일괄적으로 통합한 형태의 스마트 토공시스템의 개발에는 3.3절에 파악된 각종 요소기술들이 적용되어야 할 것이며, 5년 정도의 중기적인 관점에

서 완전자동화 형태의 시스템과 반자동화 형태의 시스템에 따라서 6-8단계의 성숙도를 달성하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

4. 국내 스마트 토공시스템 개발 현황 및 Key Challenges 분석

4.1 스마트 토공시스템 기능 개요

스마트 토공시스템의 기능은 Fig. 4와 같이 지역적 기능과 전역적 기능으로 구분된다. 신도시 개발을 위한 단지토공을 대상으로 하며 단일 주체에 의하여 공사를 진행하는 경우에 적용되는 시스템을 기준으로 기능을 설명하면 다음과 같다.

4.1.1 지역적 기능

지역적 기능은 개발구역내에 위치한 세부 작업구역 내에서 수행되는 기능이다. 세부 작업구역의 지반의 3D BIM을 형성하는 기능, BIM과 설계정보에 근거하여 작업구역 내에서의 토량이동 계획을 수립하는 기능, 토량이동 계획에 따른 최적의 장비투입 기능, 절토작업 시 건설장비의 최적상차를 위한 기능, 구역 내 최적 건설장비 이동계획 기능, 구역 내 건설장비 및 작업자간 충돌회피 기능,

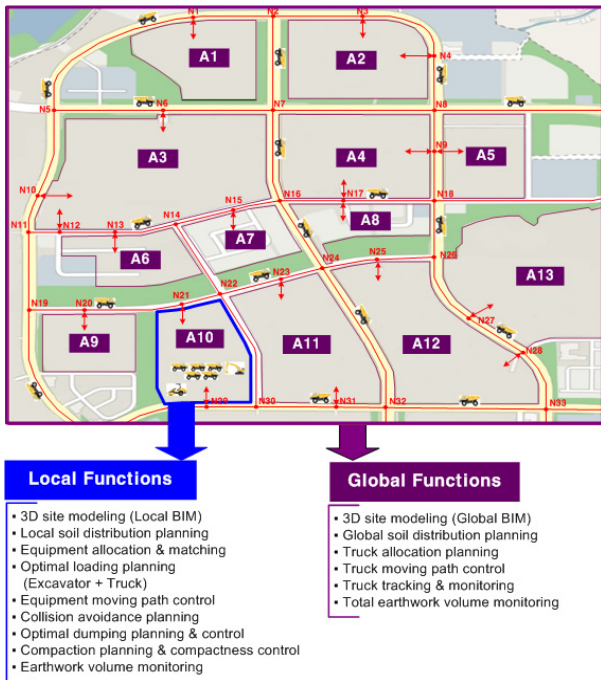


Fig. 4. Global and Local Functions of the Smart Earthwork System

구역 내 성토계획 및 다짐도 관리기능, 구역 내 토공작업량 모니터링 기능 등이 포함된다.

4.1.2 전역적 기능

전역적 기능은 전체 개발대상 단지를 범위로 하여 수행되는 기능이다. 전체 단지의 3D BIM을 형성하는 기능, 각 세부 작업구역의 절성토량을 고려한 전체 단지레벨에서의 토량이동 계획, 세부 작업구역간 토량 이동시 트럭할당 기능, 교통상황을 고려한 트럭의 최적 이동계획 기능, 실시간 트럭의 경로추적 기능, 전체 단지레벨의 토공작업량 모니터링 기능 등이 포함된다.

4.2 스마트 토공시스템 개발 현황

국토교통부 연구과제로 진행된 ICT를 활용한 건설장비 관제 및 스마트 시공 기술 개발의 결과로 Fig. 5에서 보는 바와 같은 시스템이 개발되었다. 상기에 언급된 개발관련 이슈는 최근까지 개발된 시스템의 상태에서 프로덕션(Production) 단계의 상용화 시스템으로 완성되기 위해서 필요한 것을 제시한 것이다.

개발된 시스템은 드론과 스캐너를 이용하여 비정형 토공현장의 3D 빔모델을 구축하는 e-BIM Modeler, 현장사무실과 건설장비간 통신을 위한 스마트 커넥터, 토공계획을 수립하고 이것에 근거한 효율적인 장비운영을 위한 플릿 매니저, 건설장비 레벨에서의 효율성 증대를 위한 머신콘트롤, 그리고 증강현실과 서라운드뷰를 활용한 안전관리 기능인 세이프티 가이드스 등을 포함한다. 개발된

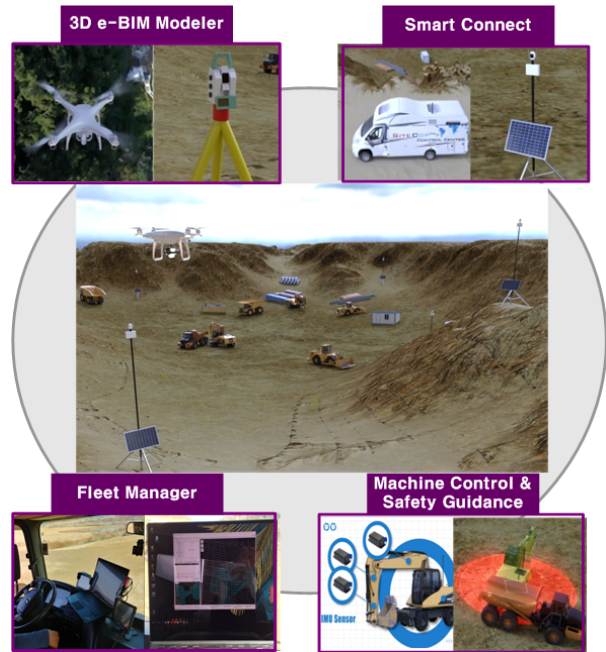


Fig. 5. Smart Earthwork System (Modified from Smart Construction Tech Research Group, 2018)

시스템의 모듈은 아직까지 완전히 통합된 형태는 아니며 개별적으로 존재하는 모듈이다. 시스템은 특정 모듈에서 산출된 결과가 다른 모듈의 입력 값으로 사용되는 형태로 운영되고 있다. 실제로 현장에 투입될 수 있는 상용화 수준에 이르기 위해서는 다음 장에 언급될 지역적 기능 및 전역적 기능 개발 관련 이슈에 대하여 추가적인 연구개발이 필요한 상황이다.

4.3 지역적 기능 개발 관련 이슈 분석

스마트 토공시스템은 단위 로컬 영역에서의 설계정보와 시공정보가 유기적으로 연계하는 기능을 제공해야만 한다. 지금까지 개발된 시스템을 기준으로 다음과 같은 부분에서 개선을 해야 할 것이다.

4.3.1 3차원 로컬 영역 지형모델 생성

현재 로컬 영역의 3차원 지형모델을 구축하기 위하여 이동형 3D 스캐너와 드론을 이용하고 있다. 스캐너와 드론은 3차원 지형모델을 구축하는 경우에 각기 장단점이 있어서 이것을 동시에 사용하는 하이브리드 모델이 도입되고 있다. 단일 방식에 비하여 하이브리드 모델의 정확성이 높은 것으로 알려져 있다. 하지만 아직 두 가지 방식에서 각기 생성된 정보를 통합 및 정합하는 과정에서 처리시간이 다소 걸리고 있으며, 정밀한 정합을 위하여 레퍼런스 포인트를 설정하는 것이 필요하다. 또한 기존의 시스템은 다수의 소프트웨어를 사용하여 지형데이터 처리, 통합 및 정합, 3차원 지형모델 생성작업을 수행하고 있어서, 수작업 처리를 병행해야

하는 계약을 갖고 있다. 스마트 토공시스템에서는 3차원 지형모델 생성시 단일 소프트웨어를 이용하여 스캐너와 드론에서 취득된 정보를 바탕으로 현재보다는 빠른 속도로 통합할 수 있도록 개선이 필요하다.

4.3.2 로컬 영역의 토량배분 계획 및 최적 이동경로 생성

도로 및 철도와 같은 선형적인 토량배분은 유토곡선 및 블록 이론적 접근방법을 이용하여 계획을 수립하고 있으며, 단지토공과 같이 면토공의 경우에는 LP (Linear Programing) 모델, 수송모델, 정수모델, 유전자 알고리즘 이용 모델, 퍼지 모델 등 다양한 방법론을 이용한 토량배분 방법이 제시되고 있다. 대부분의 방법론은 연구결과로 제시된 모델이며 실제 현장에 사용되는 시스템에 수송 모델이 적용된 사례가 있다. 하지만 현장에서 토량배분 시 고려해야만 하는 이동거리, 고저차, 장애물, 통과불능지역 위치, 배수방향, 공사기도 위치, 유용토 물량 등의 실제적인 사항을 고려한 토량배분은 아니기 때문에 이러한 제약사항을 고려한 토량배분 계획수립 기능개발이 필요하다.

토량배분 계획이 수립된 이후에 이동경로에 대한 계획을 수립하게 되는데 대부분의 기존 연구들은 로컬 영역을 세부구획으로 나누고 절토구역과 성토구역을 매칭한 이후에 해당 구역을 직선으로 움직이는 경로를 제공하고 있다. 하지만 실제 현장에서는 이동불가 구역, 건설장비의 통과 가능 여부, 지반의 경사도, 지반상태, 구역 내 가설도로 및 구조물 위치, 관련 공정상황 등을 고려하여 이동경로를 생성해야 하므로 추후 시스템에서는 현실 조건을 반영한 경로가 생성되도록 개선이 필요하다.

4.3.3 건설장비 이동경로 추적 및 충돌방지

스캐너와 드론에 의하여 취득된 정보를 바탕으로 구성된 3차원 수치지도를 이용하여 토량배분 계획을 수립하는데, 이 지도는 Bessel1841 타원체를 기반으로 하는 한국측지계인 TM좌표로 되어 있다. 반면에 건설장비의 이동경로를 추적하기 위하여 사용되는 GPS는 WGS84 타원체를 기반으로 하는 경위도 좌표값을 사용한다. 이러한 차이로 인하여 3차원 수치지도 정보와 건설장비의 실시간 위치정보를 동일한 맵에 동시에 표현하기 위해서는 좌표값 변환이 필요하다. 스마트 토공시스템에서는 별도의 변환 소프트웨어를 사용하지 않고 TM좌표와 경위도 좌표를 자동으로 변환하는 기능이 필수적이며, 좌표변환시 오차를 최소화할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

건설현장에서 종종 건설장비와의 충돌로 인한 사고가 발생하곤 한다. 건설장비에서 일정 범위 내에 근접한 인력이나 다른 건설장비를 실시간으로 인지할 수 있는 기능이 필요하다. 기존의 연구에서는 비전(전후방 카메라, 서라운드뷰) 및 센서를 이용하는 방법 및

능동형 RFID를 이용하는 방법이 제시되고 있으나 비전을 이용하는 경우에는 빠르게 움직이는 건설장비의 이동속도 이미지 처리속도가 느린 문제가 있으며, 능동형 RFID를 이용하는 경우에는 각종 전파간섭이 발생할 때 오류가 생기는 문제를 갖고 있다. 이러한 제약사항을 극복할 수 있는 방법론 제시가 필요하다.

4.3.4 최적 상차위치 결정

로컬 영역에서 토공작업의 효율성에 개선하기 위해서는 굴삭기와 트럭이 조합 작업시 토량 적재시간을 줄여야만 한다. 적재시간을 단축하기 위해서는 최적 상차위치를 선정해야만 한다. 상차위치에 따라서 굴삭기 버킷의 움직임이 달라지고 트럭의 진출입 경로도 달라진다. 기존의 시스템에서는 굴삭기의 최적 이동경로 생성기능은 제공하고 있지만 최적상차를 위한 트럭 위치 결정기능은 없다. 상차위치는 실시간으로 변화되는 굴삭기의 위치 및 방향, 트럭들의 진출입 효율성 등을 고려하여 결정되어야 하며 스마트 토공시스템에서는 이러한 기능을 제공해야 할 것이다.

4.4 전역적 기능 개발 관련 이슈 분석

4.4.1 3차원 글로벌 영역의 토량배분

각 로컬 영역에서 토량배분 계획이 수립되면 영역별로 잉여토량 및 부족토량이 산정되며, 전체 단지의 차원에서 로컬 영역간 토량배분 계획을 수립하게 된다. 스마트 토공시스템은 계획수립 기능만 수행하는 것이 아니라 시공지원 및 자원배분 기능도 수행을 해야 한다. 이러한 관점에서 문제는 잉여토가 발생하는 것으로 계획된 로컬 영역이라고 하더라도 작업일정에 따라 실제 잉여토량이 발생하지 않아서 토량이 부족한 로컬 영역으로 공급을 못 할 수도 있다. 글로벌 영역에서의 토량배분 계획은 각 로컬 영역의 작업상황이 고려되어 토량배분 계획이 수립되어야 하므로 실시간으로 각 영역별 작업상황을 파악할 수 있는 기능이 지원되어야 한다.

4.4.2 글로벌 영역에서의 트럭배치 및 이동경로 추적

토공작업은 굴삭기 및 트럭의 조합작업에 의하여 실시가 되고 있으며, 각 건설장비의 아이들 타임을 최소화하는 것이 토공의 생산성을 올릴 수 있는 방법이다. 각 로컬 영역에서의 작업상황과 건설장비의 운영상황, 그리고 로컬 영역간 이동거리 및 교통상황을 고려하여 전체 건설장비의 가동률을 최대화할 수 있도록 건설장비를 할당 및 조합을 해야 한다. 스마트 토공시스템은 이러한 기능을 제공할 수 있도록 글로벌 영역에서 각 건설장비의 이동경로를 추적할 수 있어야 하며, 각 건설장비에 작업 및 건설장비 할당에 관한 정보를 제공할 수 있어야 한다. 즉, 전체의 관점에서 건설장비 운영의 효율성을 극대화하기 위하여 통합 관계기능을 제공해야 한다.

4.4.3 토공 작업량 모니터링

스마트 토공시스템에서는 로컬 영역에서의 작업량은 스캐너와 드론을 이용하여 검측을 하게 된다. 대우건설의 경우에는 드론을 활용하여 1시간에 9km² 면적의 정보를 취득할 수 있는 것으로 발표를 하였는데, 이러한 기준이라면 일반적인 크기의 로컬 영역에서 토공작업량 모니터링은 몇 분단위에서 검측이 가능할 것이다. 글로벌 영역에서의 토공량 모니터링은 각 로컬 영역에서 검측된 데이터에 근거하여 산출을 하면 되지만, 시공지원 기능 및 실시간 건설장비 할당 기능을 수행하기 위해서는 각 로컬 영역에서 모니터링 시점과 주기에 관한 기준설정이 필요하다.

5. 결론

현재까지 개발된 장비나 시스템이 상용화 수준에 도달한 것은 매우 제한적이다. 그나마 단품 형태로 개발된 토공장비의 경우에는 현장에서 적용되고 있는 사례를 볼 수 있으나, 시스템 형태로 개발된 것은 각종 기능이 유기적으로 통합된 것이 아니라서 현장 테스트 단계에 머무르고 있다. 이러한 제약사항을 극복하고 제한된 예산과 연구기간을 고려할 때 어떤 기술분야의 어떤 요소기술들을 우선적으로 개발을 해야 하는지 전략이 필요하다. 이러한 관점에서 방향을 제시하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

전문가 설문과 AHP 기법을 적용한 결과에 따르면 토공작업에 적용될 스마트 토공시스템은 생산성 향상, 안전성 확보, 품질 확보, 경제성 확보, 인력대체의 요인순으로 필요성이 있으며, 절토 및 터파기, 토사처리 및 운반, 성토 및 되메우기, 표토제거 및 부지정지 작업, 사면보호공의 세부공종 순으로 토공시스템이 적용될 수 있도록 개발이 되어야 하는 것으로 나타났다. 4차 산업혁명기술들을 5개의 기술분야로 나누었으며 기술분야별로 세부 요소기술들을 정의하였다. 세부 요소기술들은 설문을 통하여 조사된 데이터를 바탕으로 요소기술 우선순위 집수를 산출하여 토공시스템 개발시 우선적으로 개발을 해야 하는 순서를 1위에서 33위까지 설정하였다.

지금까지 토공작업을 위하여 개발된 단품형태의 장비와 시스템들이 기술성숙도 관점에서 어떤 단계에 도달을 했는지 분석을 하였다. 또한 5년 정도의 중기적인 관점에서 본 연구에서 언급된 로컬 영역 및 글로벌 영역에서의 기능을 수행할 수 있는 반자동화 및 전자동화 스마트 토공시스템이 제시한 요소기술들의 개발로 어느 레벨에 도달할 수 있을지도 유추해 보았다. 현재 상용화 레벨의 통합된 토공관련 시스템이라고 할지라도 로컬 영역 및 글로벌 영역에서 수행해야 하는 기능을 고루 갖춘 것은 없으며 일부 기능만은 갖고 있는 경우가 대부분이다. 실제 토공현장에 적용 가능한 형태의 토공시스템은 각종 기능이 통합된 반자동화 형태가 될 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시된 로컬 영역 및 글로벌 영역에서

의 기능을 모두 수행할 수 있는 정도의 반자동화 시스템은 향후 5년 정도의 기간이면 상용화 전단계인 7단계는 이를 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비(#2018-0512)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Cha, M. J., Lee, G. W., Kim, J. Y., Park, J. W. and Cho, M. Y. (2011). "A 3D surface modeling system for intelligent excavation system." *Automation in Construction*, Vol. 20, pp. 808-817.
- Cho, J. Y. (2017). *Strategies and Implication of Japanese Construction Industry in the 4th Industrial Revolution*, Construction Policy Review Report 2017-03, Korea Research Institute for Construction Policy (in Korean).
- Cho, Y. L. (2015). "Introduction to the intelligent excavating system." *Journal of Drive and Control*, Vol. 12, No. 3, pp. 61-65 (in Korean).
- Fujita Research (2017). *Unmanned Construction (Tech. Brochure)*, Fujita Research, Encino, CA, USA, Available at: <http://www.fujitaresearch.com/fujita-unmanned.pdf> (Accessed: December 30, 2017).
- Korea Aerospace Research Institute (KARI) (2017). "The 4th Industrial Revolution and Drones." *Korea Air Research Institute Aviation Issue*, No. 13 (in Korean).
- Kim, S. K. and Lim, S. Y. (2017). "A study on the improvement of a fleet management system for construction equipment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 6, pp. 1063-1076 (in Korean).
- Kim, S. K. and Min, S. G. (2012). "Development of a work information model and a work path simulator for an intelligent excavation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3D, pp. 259-267 (in Korean).
- Kim, S. K. and Russell, J. S. (2003). "Framework for an intelligent earthwork system: Part I. System architecture." *Automation in Construction*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-13.
- Kim, S. K., Lee, J. B. and Kim, Y. S. (2004). "A study on core technologies and technological innovation strategies for construction automation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 5D, pp. 795-803 (in Korean).
- Kim, S. K., Russell, J. S. and Koo, K. J. (2003). "Construction robot path-planning for earthwork operations." *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 97-104.
- Kim, S. K., Seo, J. W. and Russell, J. S. (2012). "Intelligent navigation strategies for an automated earthwork system." *Automation in Construction*, Vol. 21, pp. 132-147.
- Kim, Y. S., Kim, H. C., Seo, J. H. and Oh, S. W. (2001). "A study for the introduction of construction automation and robotics technologies in domestic construction industry." *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 111-120 (in Korean).

- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (1998). *A study on the development of semi-automatic equipment of construction machinery (VII)*, KICT Research Report (98-084) (in Korean).
- Lee, H. S. and Yang, H. M. (2017). "Innovative methods for construction technology at the Era of 4th industrial revolution." *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 17, No. 2, pp. 12-17 (in Korean).
- Mawdesley, M. J., A-Jibouri, S. H., Askew, W. H. and Patterson, D. E. (2002). "A model for the automated generation of earthwork planning activities." *Construction Innovation*, Vol. 2, No. 4, pp. 249-268.
- National Archives of Singapore (2017). *2nd Construction Productivity Roadmap*, Media Factsheet, Available at: <http://www.nas.gov.sg/archivesonline/data/pdfdoc/20170307002/>.
- Oh, J., Oh, J. S. and Jung, H. Y. (2014). "Applicability to the construction of 3D printing technology." *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 62, No. 9, pp. 38-44 (in Korean).
- Oloufa, A. A., Ikeda, M. and Oda, H. (2003). "Situational awareness of construction equipment using GPS, wireless and web technologies." *Automation in Construction*, Vol. 12, pp. 737-748.
- Park, T. S. and Park, H. S. (2018). "The current status and facilitation strategy of BIM for civil infrastructure projects." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 133-140 (in Korean).
- Paulson, B. C. (1985). "Automation and robotics for construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 111, No. 3, pp. 190-207.
- Seo, J. W. (2017). R&D Report: Fleet management for construction equipment and Smart construction technology using ICT, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (in Korean).
- Seward, D. and Zied, K. (2003). "Towards a comprehensive feasibility analysis for the use of robots in the construction industry." *Proceedings of the 20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Eindhoven, Holland, pp. 399-405.
- Siebert, S. and Teizer, J. (2014). "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system." *Automation in Construction*, Vol. 41, pp. 1-14.
- Smart Construction Tech Research Group (2018). *Integrated Fleet Management and Smart Construction Technology in the 4th Industrial Revolution*, YouTube KR Movie Clip, Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=frPgTe59YVc> (Accessed: August 10, 2018).
- Sokkia Korea (2013). *Positioning Instruments Catalog 2013*, Available at: <https://www.sokkia.co.kr/default/1004web/dd/d08.php> (in Korean).
- Son, T. H. (2016) "From constructing the team to construction 2025." *The CERIK Quarterly Report-Summer*, CERIK, pp. 49-52 (in Korean).
- Taylor, M., Wamuziri, S. and Smith, I. (2003). "Automated construction in Japan." *Proc. of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, Vol. 156, No. 1, pp. 34-41.
- Torres-Rodriguez, H. I., Parra-Vega, V. and Ruiz-Sanchez, F. J. (2005). "A haptic excavator system with active masses sliding mode PD force-force position control." 16th Triennial World Congress, IFAC Publications, Prague, Czech Republic, pp. 517-522.
- Trimble (2018). Earthworks Grade Control Platform, Available at: <https://construction.trimble.com/earthworks> (in Korean).
- White, D. J., Vennapusa, P. and Gieselman, H. (2010). "Iowa's intelligent compaction research and implementation." Research, Iowa Department of Transportation, pp. 1-11.
- Yoshihiro, K. (2003). "A remotely controlled robot operates construction machines." *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 30, No. 5, pp. 422-425.