

## 건설장비 플릿관리 시스템 적용시 생산성 분석

임소영\* · 김성근\*\*

Lim, So-Young\*, Kim, Sung-Keun\*\*

### Productivity analysis using a Fleet Management System for Construction Equipment

#### ABSTRACT

With the advent of the 4<sup>th</sup> industrial revolution and the combination of IoT, there have been diverse domestic and foreign researches for the development of construction industry. Especially, in the large-scale earthwork site where many and various construction equipments are put into, the control system between construction equipments is important for the increase of productivity. Thus, after developing the fleet management system for the optimum operation of construction equipments, the problems were checked and improved for each step in the process of application at site. In order to verify the site application process of the fleet management system for the optimum operation of construction equipments, the analysis on the productivity was performed by inputting the data used for the actual site and the site data using this system and then comparing the data through simulation. The analysis was limited to excavator and dump. In the results of the analysis, the rate of work per hour was increased to the range of 4 % while the cost price was decreased to 4 %. Even though the results of the analysis could be different depending on the site applied, the results showing the increase of workload of equipments and the decrease of cost price in the complex project at earthwork site verify the increase of productivity.

**Key words :** Earth work, Soil distribution, Planning, Fleet management, Path planning, Equipment

#### 초 록

4차 산업혁명 시대의 도래와 IoT 기술의 접목을 통하여 건설산업을 발전 시키기 위한 다양한 연구가 국내외에서 진행되고 있다. 특히 다수다종의 건설장비가 투입되는 대단지 토공현장에서 건설장비의 관제 시스템은 생산성 증대를 위하여 매우 중요하다. 이러한 이유로 건설장비 최적운영 플릿관리 시스템이 개발되었고, 현장에서 적용과정 중에 문제점이 도출되어 단계별로 개선이 필요하게 되었다. 건설장비 최적운영 플릿관리 시스템의 현장 적용과정을 검증하기 위해 실제 현장에 사용되었던 데이터와 본 시스템을 이용하여 생성된 현장자료를 입력하고 시뮬레이션을 통해 데이터를 비교하여 생산성 분석을 진행하였다. 분석은 굴삭기와 덤프에 국한하여 진행하였으며, 분석결과 시간당 작업율이 4%대로 증가, 반면에 원가는 4%로 감소되는 것으로 나타났다. 적용한 현장에 따라서 분석결과는 상이할 수 있지만, 토공현장 단지사업에서 장비의 작업량 증가와 원가 감소를 보여준 것은 생산성 증대를 검증한 것으로 사료된다.

**검색어 :** 토공작업, 토량배분, 계획, 플릿관리, 경로계획, 건설장비

\* 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사수료 (Seoul National University of Science and Technology · isy1120@naver.com)

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사

(Corresponding Author · Seoul National University of Science and Technology · cem@seoultech.ac.kr)

Received December 2, 2019/ revised December 9, 2019/ accepted December 17, 2019

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설업은 제조업과 비교하고 생산성 증가율이 미비하며 타산업에 비하여 산업재해율도 매우 높은 산업으로 인지되고 있다. 또한 현장의 숙련공들의 평균 연령도 매우 높아져 있는 상황이며, 정부의 정책에 따라 실시되고 있는 주 52시간 근무제에 적용에 따라서 건설업의 경쟁력도 점점 낮아지고 있는 상황이다. 이와 같이 건설업이 당면한 문제점을 해결하기 위하여 4차 산업혁명 관련 기술들로 자동화 건설장비, 드론 및 센서 등을 통한 현장정보 수집, 빅데이터 기반 관리, 로보틱스, 모듈화 등이 제시되고 있으며 관련 연구가 진행되고 있는 상황이다(Kim and Kim, 2017). 언급된 첨단 기술들을 건설업에 적용함으로써 재래적인 방식과는 개념을 달리하는 스마트 건설을 추진하여 획기적으로 건설의 생산성 및 효율성을 높일 수 있는 방법론을 강구할 필요가 절실히 요구되고 있다.

최근 국내에서도 4차 산업혁명 관련 기술들을 건설산업에 적용하기 위한 연구와 기술개발이 진행되고 있으며 관련 제도도 정비하고 있는 중이다. 건축분야에서 다양한 건축물의 설계 및 시공에 BIM (Building Information System)을 도입되고 있으며, BIM 적용과 더불어 3D 스캐너, 드론 및 IoT 기술을 활용하여 시공단계와 유지관리 단계에서 생산성과 효율성을 높이는 시도를 하고 있다. 또한 스마트 팩토리화 유사한 개념으로 공장과 같은 환경에서 건축물을 시공함으로써 생산성과 품질을 높이기 위한 노력을 기울이고 있다. 토목분야에서는 건축분야에 비하여 상대적으로 BIM 도입이 더디게 진행되는 경향이 있으나 최근 발주처에서 SOC 프로젝트에도 BIM 도입을 긍정적으로 고려하고 있는 것으로 파악되고 있다. 토목공사의 경우에는 넓은 현장에서 다수 및 다종의 건설장비가 투입되어 작업이 진행되고 있는 관계로 효율적인 건설장비 운영이 전체 생산성에 미치는 영향이 매우 큰 것이 특징이다. 개별 건설장비의 효율은 건설장비의 가동률과 운전자의 숙련도에 많은 영향을 받으며, 조합으로 운영되는 건설장비들의 경우에는 건설장비의 플릿을 어떻게 구성하는가에 따라서 영향을 많이 받는다. 따라서 관련 연구들(Jang, 2011; Kim et al., 2012; Seo et al., 2012; Kim, 2014b; Cho et al., 2016; Seo, 2018)도 GNSS (Global Navigation Satellite System)와 각종 센서에 기반한 MC (Machine Control) 개발에 관한 것과, 입력된 설계 및 작업정보에 근거하여 건설장비의 위치, 자세, 작업범위 등을 운전자에 정확히 전달하여 별도의 측량작업 및 위치확인이 필요없이 작업이 가능하도록 하는 MG (Machine Guidance) 개발에 관한 내용이 많이 지고 있다. 또한 단일 건설장비의 효율만 높인다고 해서 전체 공사의 생산성을 높이는데 한계가 있기 때문에 최근에는 공사현장에 투입되는 건설장비 및 인력을 효율적으로 운영하기 위한 플릿관리 시스템에 관한 개발도 진행되고 있다.

기존에 개발된 건설장비 플릿관리 시스템(Ahn et al., 2016; Kim and Lim, 2017)의 경우에는 실제 현장에 적용시키는 경우에 다음과 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 첫 번째로 플릿관리 시스템의 계획기능과 수행기능이 단일 하드웨어로 구현되어 실제로 현장에 적용하는 경우에 다수의 건설장비에 탑재하는데 제약이 있었으며 작업관련 정보를 실시간으로 운전자 및 관리자에게 제공하는데 문제점이 있다. 두 번째로 토량배분 계획을 수립하기 위하여 사용되는 토공현장 3D맵에 건설장비의 실시간 위치를 표시할 수 없어 작업 수행 시 건설장비의 실시간 이동경로와 작업현황을 파악할 수 없다. 세 번째로 토량배분 계획 수립 시 성토구역을 선정함에 있어 현장에서 실제작업을 수행하기 위한 필요조건을 만족시키지 못하는 한계를 갖고 있었다. 성토구역은 가능한 근접하여 모여 있게 계획을 함으로써 다짐기로 작업 시 연속된 구간 작업이 가능하도록 해야 하는데, 기존 시스템의 경우에는 절·성토량과 이동거리만을 고려하여 성토구역을 선정하다 보니 성토구역이 산발적으로 선정되는 문제가 있다. 네 번째로 토량배분 계획이 수립되면 절·성토 구역을 연결하는 트럭의 이동경로가 생성되는데 실제로 트럭이 이동할 수 없는 구역도 이동경로에 반영되는 문제가 있다.

본 연구는 상기에 제시된 문제점을 보완하여 기존의 플릿관리 시스템을 개선하였으며, 개선된 플릿관리 시스템을 실제 대단위의 단지현장 토공에 적용한 다음 생산성 분석을 실시하여 플릿관리 시스템의 효율성을 검증해 보는 것이다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 대상공종은 단지토공이며 플릿관리 시스템 현장테스트는 단지조성 공사현장에서 실시를 하였다. 그리고 플릿운영을 위하여 투입되는 건설장비는 굴삭기와 트럭만을 대상으로 한정한다. 세부적인 연구범위와 방법은 아래와 같다.

#### 1.2.1 관련 기술동향 분석

본 연구에서는 기존 토량이동과 건설장비의 최적 이동경로 연구 동향과 방법론 및 현재 진행되어진 플릿관리 시스템에 대해서도 파악한다. 건설현장에서 이루어지는 각 작업에 대한 요소와 운반장비의 운행현황 및 경로선정 등에 대한 정보는 실제현장 데이터의 분석과 전문가 면담을 통하여 확보한다. 기존 개발된 방법론의 문제점을 분석하고 이를 바탕으로 토량배분과 장비경로 및 장비협업에 대한 요소기술을 도출한다.

#### 1.2.2 기존 플릿관리 시스템의 개선

기존에 개발된 플릿관리 시스템을 현장에 적용하는 경우에 문제가 되는 점들을 보완하여 시스템을 개선한다. 개선된 플릿관리

시스템은 하드웨어적으로 계획과 관리를 위한 서버모듈과 각 건설 장비에 탑재를 하기 위한 모바일 모듈과 분리를 한다.

### 1.2.3 현장테스트 실시

개선된 플릿관리 시스템의 현장 적용성을 확인하기 위하여 대단위 단지토공 현장에서 현장사무소에 서버모듈을 각 건설장비에 모바일 모듈을 설치하여 생산성 향상 분석을 위한 데이터를 취득한다.

### 1.2.4 플릿관리 시스템 테스트 결과분석

수치지도를 활용하여 기존의 지형과 설계 데이터를 입력하여, 플릿관리 시스템을 통하여 얻은 데이터와 실제 현장의 시공계획을 비교하여 토량배분의 결과를 분석하며, 시스템을 이용한 장비 투입 계획과 실제 투입대수를 비교하고, 굴삭기와 덤프의 최적 투입대수에 대한 비교 분석을 실시한다. 또한 실제 사용된 굴삭기와 덤프의 투입 대수와 플릿관리 시스템을 활용한 굴삭기와 덤프의 시간당 작업량을 비교한 생산성 분석과, 이를 통한 장비 원가분석을 시행한다.

## 2. 관련 기술동향 분석

### 2.1 토공 관련 장비 및 시스템 개발 현황

토공용 건설장비에 적용된 텔레매틱스 프로그램은 대표적으로 EARTHWAVE Technologies사의 “Fleetwatcher”, Catapillar사의 “VisionLink”, Topcon사의 “Sitelink” 등이 있다(Seo, 2018). 현재 건설장비의 위치추적을 핵심기능으로 장비의 유지관리를 목적으로 운영되어지고 있으나, 이보다는 프로젝트 관제를 기반으로 한 건설장비 협업관리 시스템의 구축이 필요하다. GPS를 통하여 24시간 장비를 관리 감독할 수 있으므로 현장간의 거리가 광범위한 미국의 경우, 타 현장의 장비를 보다 효과적으로 관리하기 위한 방안으로 플릿관리가 사용되고 있다. 일본의 Obayashi는 부지조성이나 도로 토공부지조성이나 도로 토공, 락필댐 등의 성토 공사에 있어 고도 종합 정보화 시공을 통해 시공관리를 간소화하는 고정밀도 성토관리 시스템 ‘COMPACT’를 개발하여 건설장비의 협업을 실시하고자 하고 있다. 일본의 Fujita사는 입체영상, 그래픽을 이용하고 GPS 데이터에 근거하여 원격제어가 가능한 시스템을 개발하였으나, 최적의 토량 배분을 고려한 장비의 진로계획과 같은 시공계획 지원 기능(Baek et al., 2015)에 대해서는 개발단계에 있다.

Trimble사의 토공자동화 시스템은 그래픽을 이용한 머신 가이던스의 예로서 이들 시스템은 불도저, 다짐기, 굴삭기 등의 토공장비의 실시간 위치정보를 GPS 시스템을 이용하여 실시간으로 업데이트 하여 장비 내에 설치된 모니터 상에 CAD 설계정보와 오버랩하여 보여줌으로써 장비 운전자에게 절토위치와 성토위치에 대한 정보를 제공하며, HMI (Human-Machine Interface, 장비-조종자 인터페이스)를 이용하면 기존의 토공 작업 시 요구되던 측량말뚝을

설치할 필요 없이 조종자는 어느 부분을 절토 혹은 성토를 해야 할 지를 그래픽정보에 준하여 알 수 있게 되므로 매우 효율적인 토공작업을 수행할 수 있게 되었다. HMI를 위한 디스플레이 장치는 장비 운전자가 버튼을 조작하여 토공 작업을 위한 위치 정보를 확인하고, 터치스크린 조작을 통해서 효율적인 토공작업 수행이 가능하게 지원하고 있다. 또한 Trimble사의 GeoManager (Fleet Solutions) 시스템에서 제공되는 정보 중 “Fleet Productivity”는 실시간 위치정보 및 운송 관리, 운전자와 엔지니어의 직접 통신을 통하여 정보를 제공하며, “Business Intelligence” 기능은 운전자와 기술자의 의사소통 개선 및 정확한 추적으로 초과근무 비용 절감을 가져왔다는 평가를 받고 있다.

### 2.2 플릿관리 시스템 기술

플릿관리 시스템은 현장 사이트 내 장비 이동과 관련된 정보의 실시간 반영을 위하여 각 셀의 이동경로 속성 입력기능 탑재와 현장 작업자 의사결정을 지원하여 화면으로 구현되었다. 시뮬레이터는 크게 계획모듈과 실행모듈로 구분할 수 있으며, 계획모듈에서는 토량분배 및 자원할당, 자원관리가 이루어지고 실행 모듈 부분에서는 현장 토공 작업지(트럭 운전자)의 의사결정을 지원할 수 있는 Path\_Guidance 기능을 지원하게 된다.

플릿관리 시스템의 최대의 장점은 장비운용 및 인력에 의존하고 있던 측량, 신호수, 장비운용 기록자 등이 필요로 하지 않는 것에 있다. 효율적 장비운용은 생산성 증대의 효과뿐만 아니라 CO<sub>2</sub>배출량 감소(Kim, 2014a)와 인력 미배치로 인한 안전사고의 문제점도 해결되는 결과를 가져왔다. 기 개발된 플릿관리 시스템(Kim and Lim, 2017)은 하나의 모듈로 설계되었으나, 이후 연구의 진척에 따라 서버 모듈과 모바일 모듈로 나누어 정보를 제공하게 되었다. 이를 위해 개발된 알고리즘의 제시와 연구 내용은 아래 Fig. 1과 같이 플릿관리 시스템의 개요도를 나타낸다.

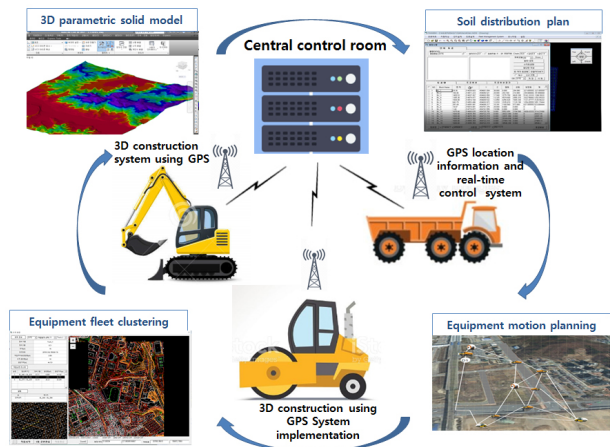


Fig. 1. Overview of a Fleet Management System (FMS)

### 3. 개선된 플릿관리 시스템 개요

#### 3.1 시스템 모듈 구성

다수의 건설장비의 효율적인 플릿관리를 위해서는 전 현장의 작업량을 확실히 파악하고, 그에 맞게 장비를 투입하고 장비나 작업의 지연에 대하여 현장사무소 내에서 즉시 파악하고 그에

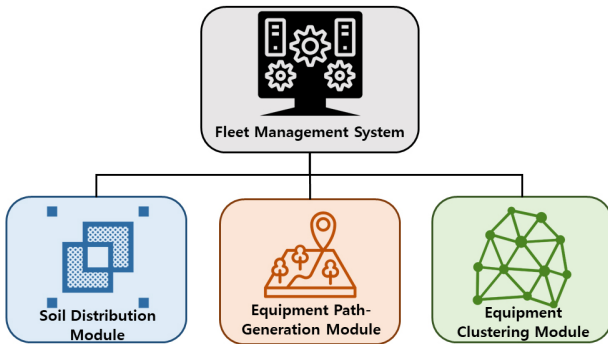


Fig. 2. Three Modules of the Revised Fleet Management System

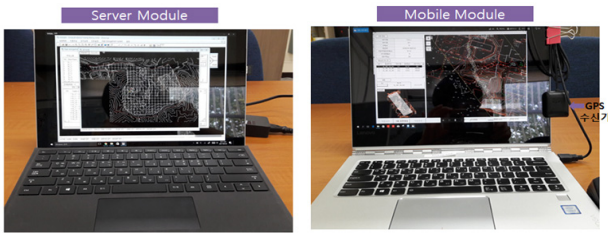


Fig. 3. Multiple Hardwares: Sever Module and Mobile Modules

따라 건설장비의 투입계획을 즉시 변경하여 효율적으로 작업을 진행하게 하도록 하는 것이 주목적으로 시스템의 구성도는 Fig. 2와 같다.

본 시스템은 먼저 원지형과 계획지형을 토대로 토공 작업량을 데이터로 입력하고, 투입 장비의 제원을 입력을 하면 시물레이션을 통하여 최적의 장비대수와 작업군을 형성한다. 최적의 장비군 시물레이션 결과가 형성되면 그 시스템을 토대로 장비를 투입하고 작업을 지시한다. 하지만, 작업장에 문제나 작업의 지연 등의 문제가 발생 시 남은 작업량과 다른 작업장에서 지원 가능 장비를 재계산하여, 최적의 장비군을 다시 도출하는 시스템이다. 기존에 하드웨어적으로 구분되어 있지 않았던 것을 Fig. 3에서 보는 바와 같이 현장사무소 설치용인 서버모듈과 각 건설장비에 탑재하기 위한 모바일 모듈로 구성하였다. 시스템은 3가지 모듈로 구성되며 Fig. 4와 같이 모듈간의 정보와 결과값은 서로 공유하여 사용이 가능하게 구성 하였다.

#### 3.2 플릿관리 시스템의 실시간 건설장비 조합기능

현장내 건설장비 이동과 관련된 정보의 실시간 반영을 위하여 플릿관리 시스템에 각 셀의 이동경로 속성 입력기능을 제공하였다. 현장조건 및 건설장비 대수 변화에 따른 결과를 파악하여 투입장비 제원 및 작업효율을 고려한 최적 건설장비 조합을 제시하게 되는데 이는 1일 토공배분량과 1일 작업시간을 제한조건으로 하는 조합이 제시되는 것이다. 평균 대기시간 산정은 자원할당 알고리즘에 반영된 변수 및 연산식으로 산출되며 이중 건설장비의 대기시간 산정에는 대기행렬의(M/M/1):(FCFS/∞/∞) 모형에서 지수분포를 나타

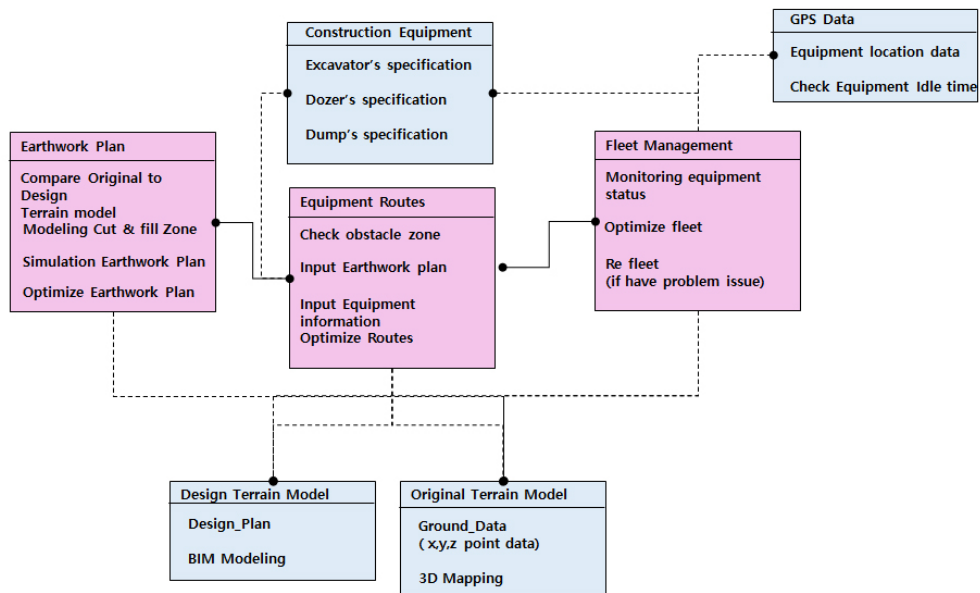


Fig. 4. Information Flow among the Modules

내는 서비스율( $\mu$ )과 포아송 분포를 나타내는 도착률( $\lambda$ )로 연산식을 구성하여 건설장비 조합구성 알고리즘에 반영하였다.

플릿관리 시스템에서 시뮬레이션을 진행하면 각 건설장비에 대한 작업 및 이동경로가 시각적으로 모바일 모듈화면에 제시된다. 무선통신 기술 및 GPS 데이터를 활용하여 실시간으로 건설장비의 위치나 상태를 파악할 수 있으므로 현장의 상황과 작업상태를 고려하여 건설장비 조합을 실시간으로 변경할 수 있다. 플릿관리 시스템에서는 주어진 상황에서 전체 작업의 생산성을 높일 수 있도록 건설장비의 조합을 구성할 수 있도록 기능을 제공한다.

#### 4. 현장 개요 및 테스트 조건

##### 4.1 테스트 현장 개요

단지토공에서 재래적인 방법으로 건설장비를 운영하는 경우와 플릿관리 시스템을 도입하여 건설장비를 운영하는 경우에 건설 생산성이 어떻게 달라지는지를 테스트하기 위하여 2개 현장을 대상으로 테스트를 진행하였다. 현장에 관한 사항은 Table 1과 같다.

플릿관리 시스템은 기본적으로 드론이나 3D 스캐너를 통하여 취득된 지형 데이터를 이용하도록 되어 있는데 본 연구에서는 해당 데이터가 없어서 공공기관에서 제공하는 수치지도 데이터(Fig. 5)를 활용하여 등고, 표고점 등을 이용하였다. 수치지도의 데이터를 이용하여 삼각망을 형성하여 기본 지표면을 형상화 하였고, 기초 설계 데이터를 이용하여 플릿관리 시스템에서 결과를

Table 1. Information on Test Sites

|                  |   |
|------------------|---|
| Project          | Eunam Industrial Complex  |
| Location         | Eunam-ri, Chopyeong-myeon, Chungbuk   |
| Area             | 611,283 m <sup>2</sup>  |
| Earthwork Volume | Total: 187,588 m <sup>3</sup>   |
| Equipment        | Excavator (0.7 m <sup>3</sup> ), Truck (15 ton)<br>Dozer (32 ton), Grader (3.6 m) |

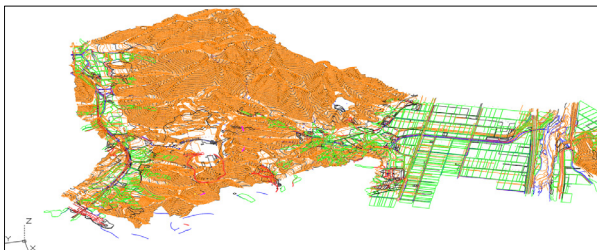


Fig. 5. Digital map of the Test Site

산출하도록 하였다.

지형의 특징은 좌측은 산지로 이루어져 있고 우측은 평야로 평탄한 지형을 가지고 있다. 사업구역은 주로 산지 내에 있고 사업지는 최고표고 260 m, 최저표고 65 m로 표고차는 195 m이고 단순 표고차만 보면 절토로 사업지 부지정지가 이루어질 수 있는 사업으로 볼 수 있지만, 보링결과 토사의 양이 적고 주로 발파암 위주의 토질 상태가 이루어져 있어, 사토장에서 토사를 사와야 하고, 반대로 발파암은 암석 판매가 이루어져 굴삭기와 덤프의 사용의존도가 높은 현장이다.

테스트 현장은 평균 표고 88 m에 부지가 생성되는 과업으로 면적은 611,284 m<sup>2</sup>로 부지정지 시 성토고 2 m ( $\pm 15$  cm)로 발파암 504,283 m<sup>3</sup>, 흙깎기(사토) 381,583 m<sup>3</sup>, 부족토(사토) 186,723 m<sup>3</sup>로 외부 사토장과 현장과의 거리는 직선거리 기준 12.7 km, 계획기준 14.5 km로 계획되어 있다. 현장에서 사용되는 장비는 굴삭기 0.7 m<sup>3</sup>, 덤프 15 ton(자동덮개 포함), 불도저 32 ton, 모터그레이더 3.6 m, 진동롤러(10 ton) 등 다수의 장비들로 계획 및 시공을 하였다. 발파암의 경우 장비 투입계획과 암석 판매로 얻은 수익에 대해서는 데이터의 누락으로 본 연구에서는 발파암에 관한 공정은 분석에서 제외하고 사토에 대해서만 분석을 시행하였다.

##### 4.2 테스트 조건

재래의 방법과 플릿관리 시스템을 이용한 경우에 토량배분의 효율성 및 건설장비의 생산성을 비교하기 위하여 Table 2에서와 같은 조건으로 테스트를 실시하였다. 대상현장은 Fig. 6에서 보는 바와같이 10 m × 10 m의 작업구역으로 분할을 하였으며 설계정보에 제시된 시공기면의 위치에 따라서 절토셀과 성토셀로 구분을 하였다.

Table 2. Field Test Conditions

| Category  | Note   |
|-----------|--|
| Work Cell | - Work cell size: 10 m × 10 m<br>- Total work volume: 187,588 m <sup>3</sup><br>- Average work volume for each cluster: 6,253 m <sup>3</sup><br>- Average distance between work cells: 1,061 m |
| Excavator | - # of excavators: 7<br>- Bucket size: 1 m <sup>3</sup><br>- Average loading time: 0.16 sec  |
| Truck     | - # of trucks: 88<br>- Loading capacity: 15 ton<br>- Average speed: 40 km/hr<br>- Average loading time: 0.5 min  |
| Soil      | - Unit Weight: 1.8 ton/m <sup>3</sup>  |

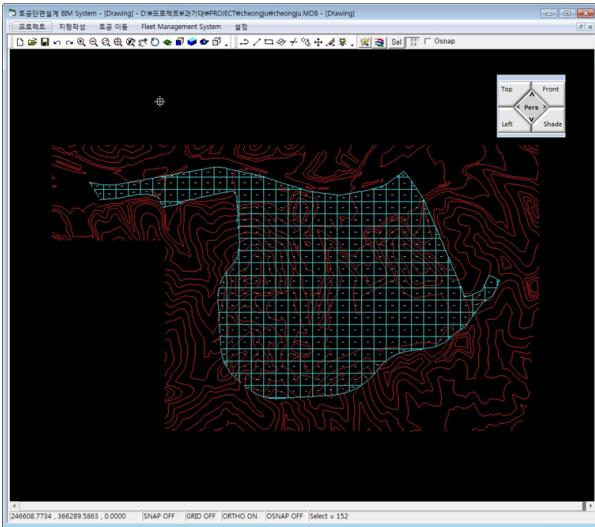


Fig. 6. Cell Decomposition (Work Cells) of the Test Site

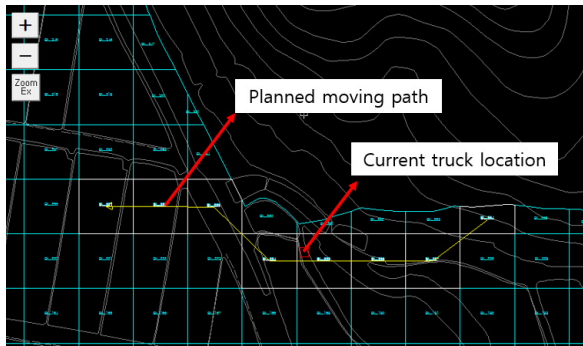


Fig. 7. Planned Path and Truck Location in Real Time

## 5. 플릿관리 시스템 테스트 결과

### 5.1 3D 맵에 실시간 이동경로 분석

기존의 플릿관리 시스템의 경우에는 건설현장의 3D맵상에 건설장비의 실시간 위치가 정확히 표현되지 못하였다. 본 연구에서는 건설장비의 GPS 좌표를 이용하여 실시간 위치가 3D지도상에 표현이 되도록 지도의 타입이 자동으로 변환되는 기능을 부여하였다. 플릿관리 시스템에 의하여 토공계획이 수립되고 이것에 기반하여 건설장비의 이동경로가 제시된다. 운전자는 제시된 이동경로를 따라서 움직이면 건설장비의 위치가 실시간으로 3D 맵상에 표시가 된다. 테스트 결과 이동경로를 따라서 주행하면 허용오차 이내에서 건설장비의 위치가 실시간으로 표시되는 것을 확인하였다(Fig. 7).

### 5.2 토공량 분석

현장 내에서 발생하는 절토량, 성토량 및 부족토량을 기반으로 비교 분석을 하였다. 실시설계 데이터와 DAS를 활용하여 토공량을

Table 3. Earthwork Volume Analysis

| Category      | Detail design Data     | Fleet management system Data | Equipment        |
|---------------|------------------------|------------------------------|------------------|
| Cutting Vol.  | 281,583 m <sup>3</sup> | 287,431 m <sup>3</sup>       | Excavator        |
| Dozer Vol.    | 123,583 m <sup>3</sup> | 145,861 m <sup>3</sup>       | Dozer            |
| Filling Vol.  | 287,721 m <sup>3</sup> | 287,723 m <sup>3</sup>       | Grader, Roller   |
| Shortage Vol. | 186,723 m <sup>3</sup> | 176,681 m <sup>3</sup>       | Excavator, Truck |

산출하였고, 플릿관리 시스템을 이용하여 토공량을 산출하여 비교를 해 보았다. 플릿관리 시스템에서는 현장을 10 m × 10 m 작업셀로 분할하고, 각 셀별로 절토량, 성토량 및 부족토량을 산출하였다. 토공량 분석 결과는 다음 Table 3과 같다.

초기 데이터보다 플릿관리 시스템을 이용한 결과에서는 절토에서 사토량이 약 2 % 증가했고, 1차 운반 중 40 m 이내의 토량이 18 % 증가하였는데, 이것은 계획에서의 20 m이내의 무대토량을 제외한 영향으로 판단된다. 단지토공에서는 지반을 정지하기 위한 흙 쌓기는 무시할 정도로 오차가 거의 없었으며, 상대적으로 현장 내에서의 사토가 증가함에 따라 외부 사토장에서 가져와야 하는 토량은 감소함을 보였다. 이는 Boring Data를 활용하여 지반을 형성하는 데에 있어 기본 방식은 지반 구성층을 직선으로 연결하여 토량을 산출하는데, 본 플릿관리 시스템에서는 각 셀마다 압축층을 Cube형태로 나누어 형성하고 토량을 산출함으로써 토량의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

## 5.3 건설장비별 생산성 및 원가 분석

### 5.3.1 굴삭기

실시설계 데이터와 플릿관리 시스템을 통하여 산출된 토량과 건설장비 투입계획을 토대로 장비별 작업량을 분석하였다. 먼저 설계 데이터와 시스템에서 장비의 작업량 계산은 표준 품셈에 의거하여 계산을 시행하였다. 굴삭기의 작업량은 Eq. (1)과 같다.

$$Q = \frac{3600 \times q \times k \times f \times e}{C_m} \quad (1)$$

위의 식으로 계산할 때 현장과 시스템의 시뮬레이션 시 정확한 작업량 비교를 위하여 동일하게 설정한 요소들의 값은 Table 4와 같으며 시간당 작업량은 Fig. 8과 같다.

사이클 타임은 0.25초가 감소하였고, 시간당 작업율은 4 % 정도 증가함을 볼 수 있다. 절토의 경우에는 굴삭기 단독 운전으로 인한 작업에 영향을 미치는 여러 요소 중 외부적인 요소가 적어 차이가 없을 것으로 판단되었으나, 플릿관리 시스템에 의하여 정확한 작업 위치와 장소로 이동지점 안내 등의 요소가 포함되면서 사이클 타임이 감소하고 시간당 작업량은 증가가 된 것으로 판단된

Table 4. Applied Values for Factors in Eq. (1)

| Factor                     | Value      | Note                           |
|----------------------------|------------|--------------------------------|
| q (Bucket volume)          | 0.8        | from estimating standards      |
| k (Bucket factor)          | 0.9        | from estimating standards      |
| f (Soil conversion factor) | 0.77       | 1/1.3                          |
| E (Work efficiency)        | 0.6, 0.605 | measured data, simulated data  |
| Cm (Cycle time): sec       | 18, 17.89  | measured data, simulation data |

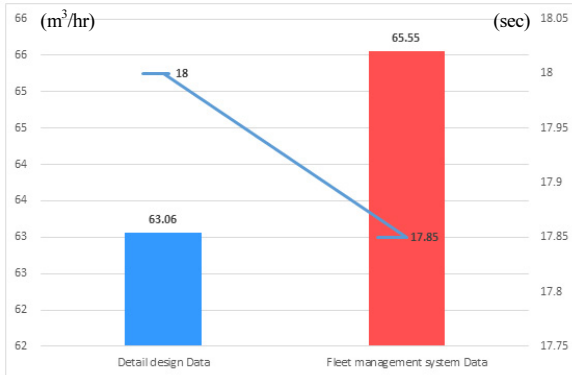


Fig. 8. Work Volume Per Hour and Cycle Time Analysis (Excavator)

Table 5. Input Data from the Estimating Standards for Cost Analysis (won/hr)

| Category      | Excavator (0.7 m <sup>3</sup> ) | Truck (15 ton) |
|---------------|---------------------------------|----------------|
| Material cost | 18,251                          | 28,298         |
| Labor cost    | 37,723                          | 37,723         |
| Overhead cost | 20,902                          | 18,533         |
| Total         | 76,876                          | 84,554         |

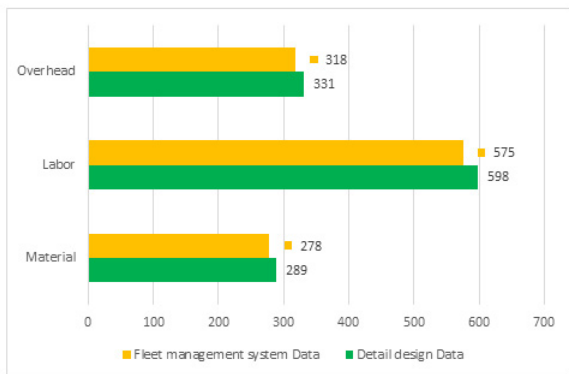


Fig. 9. Cost Analysis (Excavator)

다. 또한 이를 바탕으로 표준 품셈 데이터(Table 5)에 의거한 시간당 굴삭기 원가를 분석하였으며 분석결과는 Fig. 9와 같다.

건설장비 원가는 크게 경비, 노무비, 재료비를 합친 금액으로 세분화하여 원가분석을 시행하였다. 경비는 약 4 % 감소하였고, 노무비는 3.8 %, 재료비는 3.8 % 감소하였다. 굴삭기 1대당 시간당

금액은 47원 감소하였고, 시간당 원가 감소금액은 작은 금액이지만 1일 8시간, 한 달 20일 작업시간 기준에 감소되는 금액은 7,520원이고, 실제 현장에서 사용된 절토작업에서 사용된 금액은 342,968,094원 이었고, 플릿관리 시스템을 적용하는 경우에는 금액은 329,733,693원으로 13,234,401원이 절감할 수 있는 것으로 분석되었다.

### 5.3.2 트럭

트럭은 현장 내에서만 뿐만 아니라 현장 외부로도 많은 이동이 발생하는 건설장비로 관리가 어렵다. 트럭의 이동경로는 운전자의 직관으로 결정되므로 동일한 절성토 구역을 이동하는 경우에도 사이클 타임이 운전자에 따라 상당히 다르게 나타나고 있고 현장 내에서도 굴삭기와의 조합작업을 진행 할 때도 지연시간이 많이 발생한다. 플릿관리 시스템에서는 건설장비의 이동경로를 Fig. 10과 같이 운전자에게 제시하여 최적의 경로를 제시하며 사이클 타임 관리를 원격으로 수행하게 되고, 현장 내에서 실시간으로 트럭의 위치를 추적할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

트럭의 이동경로의 설정은 출발지점과 목표지점을 직선으로 표시하는 것이 아니라, 기존의 지형을 쉘로 세분화하고 쉘 속성을 지정하여 트럭이 이동이 가능한 지역과 불가능한 지역으로 구분한다. 토량배분에 기반한 이동경로 생성은 단순히 절·성토 구간의 직선거리를 고려한 것이 아니라 실제 현장 내에서 트럭이 이동 가능한 경로를 생성하도록 하였다. 트럭 운전자가 주어진 작업구역에서 상·하차 작업이 이루어질 때 서버 모듈에서 Task Planning과 이동거리를 고려한 건설장비 조합과 이동경로를 생성하여 모바일 모듈에 전송하여 운전자에게 관련 정보를 제공한다.

본 시스템을 활용하여 사토장과 현장을 설정하고 트럭의 이동경로를 계산한 결과 기존 설계안에서는 14.5 km로 제시 되었지만, 14.3 km로 200 m 정도가 감소 된 것을 알 수 있다. 또한 덤프의 시간당 작업량을 분석하기 위하여 시간당 작업량은 Eq. (2)와 같다. 그리고 설계 데이터와 생산성분석을 위해 사용된 요소들의 값은

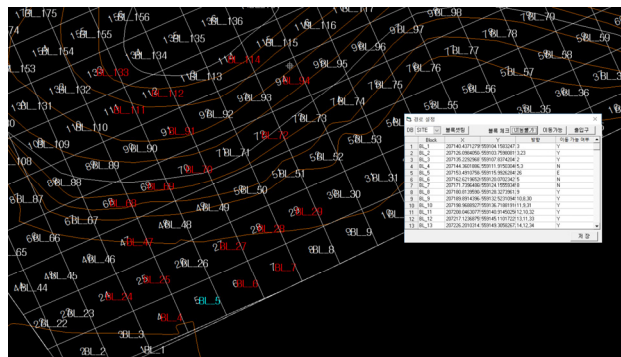


Fig. 10. Moving Path Generation and Location Tracking for a Truck

Table 5 및 Table 6과 같으며, 시간당 작업량의 비교는 아래 Fig. 11과 같다.

$$Q = \frac{60 \times q \times f \times E}{C_m} \quad (2)$$

사토장에서의 토사운반은 굴삭기와 트럭의 협업으로 장비간의 조합과 트럭의 이동시간에 따라 대기시간의 영향이 커진다. 설계상에서의 사이클 타임은 58.3분이었지만, 플릿관리 시스템에서 장비의 사이클 타임은 55.71분으로 2.59분(4.44 %)이 감소된 것을 알 수 있고, 시간당 작업량은 8.68 m<sup>3</sup>/hr에서 9.09 m<sup>3</sup>/hr (4.72 %) 증가한 9.09 m<sup>3</sup>/hr가 되었다. 이는 트럭 뿐만이 아니라 굴삭기의 작업효율도 올라가면서 사이클 타임보다 시간당 작업량의 영향이 더 크게 발생한

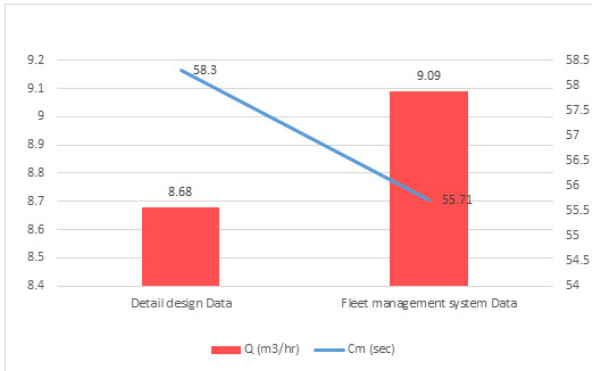


Fig. 11. Work Volume Per Hour and Cycle Time Analysis (Truck)

Table 6. Applied Values for Factors in Eq. (2)

| Factor                             | Value       | Note                          |
|------------------------------------|-------------|-------------------------------|
| q (Truck capacity): m <sup>3</sup> | 11.72       | 15.0/1.6*1.25                 |
| f (Soil conversion factor)         | 0.8         | 1/1.25                        |
| E (Work efficiency)                | 0.9         | from estimating Standards     |
| Cm (Cycle time): min               | 58.3, 55.71 | measured data, simulated data |

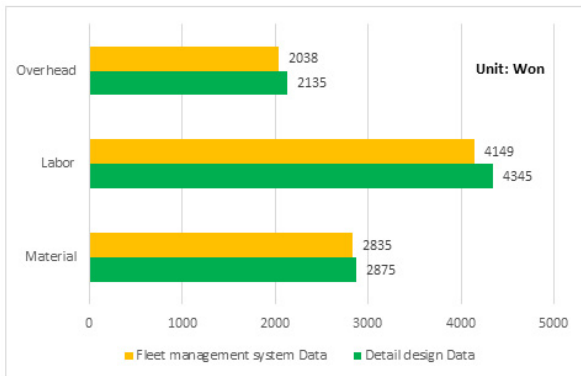


Fig. 12. Cost Analysis (Truck)

것으로 판단된다. 트럭프의 원가분석은 Fig. 12와 같다.

트럭의 경비, 노무비, 재료비 모두 4 % 정도 감소되었고, 시간당 원가는 9,355원에서 9,022원으로 333원이 감소되었다. 실제 사용된 장비에서 사토의 운반공중에서의 금액 차이는 1,755,009,477원에서 1,692,457,272원으로 62,552,205원이 감소되었다. 트럭의 경우 장비대가 다른 장비에 비해 원가가 높아 절토의 사토량 보다도 부족토 운반량이 작음에도 감소하는 금액차이는 월등히 큰 것으로 나타났다.

## 6. 결론

기존의 단지토공분야의 생산성 향상과 관련된 연구들은 효율적인 토량배분 계획수립과 수립된 계획에 따라서 시공을 할 수 있는 방법론을 제시하고 있다. 지금까지 다양한 최적화 알고리즘을 적용하여 배분계획이 수립되도록 하는 방법론들이 제시되었고, 수립된 계획과 동일하게 작업자들이 현장에서 작업을 수행할 수 있도록 지원하는 도구들도 개발되었다. 대규모 단지토공의 경우에는 다수 및 다종의 건설장비들이 투입되어 작업이 수행되는 특징을 갖고 있기 때문에 건설장비의 효율적인 운영이 중요하다. 개별 건설장비의 운영은 운전자의 숙련도에 영향을 받고 있으며, 전체 단지토공의 생산성은 투입되는 건설장비들의 효율적인 조합작업에 영향을 받고 있다. 이러한 점을 고려하여 비숙련자도 숙련된 운전자와 같이 작업수행이 가능하고 투입되는 건설장비들을 효율적으로 운영하기 위한 시스템이 필요하다. 기존에 제시된 플릿관리 시스템은 주어진 조건에 따라서 토량배분 계획을 수립하고 수립된 계획에 따라서 운전자들에게 작업구역, 절성토 및 건설장비 실시간 위치, 건설장비 조합에 관한 정보를 제공하도록 개발이 되었으나 실제 현장에 적용함에 있어서 몇 가지 제약사항이 있었다. 본 연구는 기존에 개발된 플릿관리 시스템의 제약사항을 해결하고 필드 테스트를 통하여 실제로 현장에 적용하는 경우에 생산성이 향상되는지 검증을 하였다.

개선된 플릿관리 시스템은 3차원 디지털맵상에서 토량배분 계획에 따라 생성된 건설장비 이동경로와 건설장비의 실시간 위치가 표현되도록 사용되는 맵의 변환을 자동화 하였고, 현장사무실에 설치되는 서버 모듈과 각 건설장비 탑재되는 모바일 모듈로 하드웨어를 분리 시켰다. 또한 이동경로 생성에 있어서도 현장에서 건설장비가 이동하지 못하는 곳에서는 경로가 생성되지 않도록 하였으며, 현장의 여건과 투입된 건설장비들의 상황에 따라서 조합작업을 위하여 건설장비군이 형성되도록 하였다. 개선된 플릿관리 시스템의 효율성을 확인해 보기 위하여 대단위 단지공사를 대상으로 현장테스트를 진행하였다. 현장테스트 결과분석은 굴삭기와 덤프에 국한되어서 진행하였고, 분석결과 주어진 조건에서 시간당 작업율이 4 %대로 증가하였고, 원가는 4 %로 감소되는 것을 알 수 있었다. 만약 다른 현장이라면 분석결과는 당연히 달라지겠지만,



토공이 주 사업인 대단지 사업에서 건설장비의 효율성 증가와 원가 감소를 보여준 것은 전반적인 생산성은 향상으로 해석될 수 있다.

본 연구에서 시스템 적용시 작업자의 능력이 모두 우수하다는 점, 모든 시간에 현장은 최적의 조건이라는 점을 가정하여 결과를 산출하였기에 실제 현장에서 발생할 수 있는 문제점과 작업자들마다 다른 작업효율은 반영하지 못하였다. 또한 1곳의 현장을 대상으로 테스트를 진행한 관계로 정량화된 결과치를 얻을 수는 없었지만 플릿관리 시스템을 도입하는 경우에 단지토공에서 생산성이 증대될 수 있음을 확인한 것은 의미가 있다고 판단된다. 추후에는 실제 여러 현장에 적용하면서 이에 대한 데이터를 객관화하는 과정을 거친다면 플릿관리 시스템 도입시 구체적으로 어느 정도로 생산성 향상을 기대할 수 있을지 판단이 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

### References

Ahn, S. H., Kim, S. K. and Lee, K. W. (2016). "Development of a fleet management system for cooperation among construction equipment." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 36, No. 3, pp. 573-586 (in Korean).  
 Baek, H. G., Kang, S. H. and Seo, J. W. (2015). "An earthwork districting model for large construction project." *Journal of the*

*Korean Society for Geospatial Information System*, KSGIS, Vol. 35, No. 3, pp. 715-723 (in Korean).  
 Cho, G. Y., Seo, M. G. and Nam, S. H. (2016). *The technical trend of intelligent construction machines and the industry prospect*, Research report, KAIA (in Korean).  
 Jang, J. H. (2011). *The development of intelligent excavation system (Final report)*, Research report# 1615001635, KAIA (in Korean).  
 Kim, B. S. (2014a). *The development of carbon dioxide-reduction earthwork planning models*, Research report#1345201570, NRF (in Korean).  
 Kim, N. I. and Kim, S. (2017). *The direction of construction machinery technical development considering changes in the construction industry*, KEIT PD Issue Report, Vol. 17-12, pp. 50-73 (in Korean).  
 Kim, S. K. (2014b). "A multi-agent based cooperation system for an intelligent earthwork." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 5, pp. 1609-1623 (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*, KSCE, Vol. 37, No. 6, pp. 1063-1076 (in Korean).  
 Kim, S. K., Seo, J. W. and Russell, J. S. (2012). "Intelligent navigation strategies for automated earthwork system." *Automation in Construction*, Vol. 21, No. 1, pp. 132-147 (in Korean).  
 Seo, J. W. (2018). *The control of construction equipments using ICT and the technical development of smart construction*, Research report #17SCIP-B079689-04, KAIA (in Korean).  
 Seo, J. W., Kim, J. H., Jung, T. H., Min, J. H. and Hoe, Y. R. (2012). *The operating smart construction system of carbon-reduction construction equipments*, Research report#615003951, KAIA (in Korean).