

## 저탄소 토공을 위한 솔리드 모델링 및 건설장비 플릿관리 방법론

김성근\* · 김규연\*\* · 박주현\*\*\*

Kim, Sung-Keun\* · Kim, Gyu-Yeon\*\* · Park, Ju-Hyun\*\*\*

### An Approach for Solid Modeling and Equipment Fleet Management Towards Low-Carbon Earthwork

#### ABSTRACT

Earthwork is a basic operation for all forms of civil works and affects construction time, cost and productivity. It is a mechanized operation that needs various construction equipment as a group and uses a lot of fuel for construction equipment. But, the problem is that earthwork operation is usually performed by equipment operator's heuristic and intuition, which can cause low productivity, high fuel consumption, and high carbon dioxide emission. As one of solutions for this problem, the fleet management system for construction equipment is suggested for effective earthwork planning, optimal equipment allocation, efficient machine operation, fast information exchange, and so forth. The purpose of this research is to suggest core methods for developing the equipment fleet management system. The methods include 3D solid parametric model generation, soil distribution using Ctree data structure, equipment fleet construction and equipment fleet operation. A simulation test is performed to verify the effectiveness of the equipment fleet management system in terms of equipment operating ratio, fuel usage, and CO<sub>2</sub> emission.

**Key words** : Earthwork, Fleet management, Solid model, construction equipment, CO<sub>2</sub>

#### 초 록

토공작업은 모든 종류의 토목공사에 기본이 되는 공종으로 공기, 공사비와 생산성에 영향을 미치는 요소이다. 토공은 그룹으로 형성된 다수의 건설장비들이 필요한 기계화 작업이며 건설장비로 인하여 많은 연료를 소비하는 작업이다. 그러나 일반적으로 토공작업은 건설장비 운전자의 경험과 직관에 의하여 수행되기 때문에 낮은 생산성, 높은 연료사용량 및 탄소를 많이 배출시킬 수 있는 문제점을 갖고 있다. 최근 연구에 의하면 이러한 문제점의 해결책의 하나로 건설장비 플릿관리 시스템이 제안되고 있다. 건설장비 플릿관리 시스템은 효과적인 토공계획, 최적의 건설장비 할당, 효율적인 건설장비 운영, 빠른 정보교환 등과 같은 기능을 수행한다. 본 연구에서는 건설장비 플릿관리 시스템 구축시 필요한 주요 방법론을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 토공작업을 위한 3D 솔리드 파라메트릭 모델 형성, 옥트리를 이용한 토량배분, 건설장비 플릿구성 및 운영 방법론을 제시하였다. 건설장비 플릿관리 시스템의 효용성을 건설장비 가동률, 연료사용량, 이산화탄소 배출량 측면에서 검증해 보기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다.

**검색어** : 토공, 플릿관리, 솔리드 모델, 건설장비, 이산화탄소

\* 정희원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수, 공학박사

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

\*\* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Seoul National University of Science & Technology · bichna119@naver.com)

\*\*\* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (Seoul National University of Science & Technology · maxjuhyun@naver.com)

Received February 16, 2015/ revised February 23, 2015/ accepted February 23, 2015

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

토공은 대부분의 건축 및 토목공사의 기본 공종으로 다중 및 다수의 건설장비가 투입되는 공종으로 에너지 투입량도 많고 탄소 발생량도 많은 특징을 갖고 있다. 토공계획을 시공전에 수립하여 작업을 진행하지만 주로 건설장비 운전자의 경험과 직관에 의하여 수행되는 경향이 있기 때문에 작업의 효율성과 생산성 향상에 제약을 받고 있다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구들이 수행되고 있다. 특히 건설자동화 및 정보화 기술을 적용한 토량계획 방법론이 제시되고 있으며 인공지능을 부여한 굴삭시스템이 개발되었다. 하지만 현재까지 개발된 기술 및 시스템은 프로토타입 형태로 현장 적용단계에 이르지는 못하고 있으며 주로 단일 건설장비에 국한되는 한계를 지니고 있다. 실제 현장에 적용되는 시스템이 되기 위해서는 다수 및 다종의 건설장비를 위한 계획기능 및 작업수행 기능이 있어야 하며 전자동의 형태보다는 운전자나 작업자를 지원하여 협업을 가능하게 하는 시스템이 되어야 한다.

건설장비 플릿관리 시스템은 최적 3D 토량배분 계획, 실시간 작업현황, 건설장비군(Equipment cluster)의 형성 및 운영방법, 장비별 효율적인 움직임, 중복작업 방지 등에 관한 정보를 제공함으로써 토공작업의 효율을 개선하고 낭비되는 에너지를 최소화함으로써 생산성 향상 및 탄소저감이 가능한 시공을 지원하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 건설장비 플릿관리 시스템 개발을 위한 요소기술을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

건설장비 플릿관리 시스템 개발을 위한 요소기술로는 토공계획 수립을 위한 3차원 건설정보 모델 형성방법과 건설장비 플릿구성을 위한 방법론을 제시하는 것을 연구의 범위로 하고 있다.

연구의 방법은 다음과 같다.

#### 1.2.1 토공현장 방문조사 및 전문가 면담

현장에서의 장비운영 현황을 파악하고 건설장비 운전자를 대상으로 설문 실시하여 토공작업시 의사결정을 위한 주요 요소를 파악한다.

#### 1.2.2 제조업 분야의 3차원 객체모델 형성방법 조사

건설업 분야에 비하여 오랜 기간동안 3차원 솔리드 모델을 이용하여 설계 및 제조를 하고 있는 제조업의 현황을 파악하고 본 연구에 도입가능한 기술을 파악한다.

#### 1.2.3 3차원 솔리드 파라메트릭 객체모델 형성방법 제시

지형과 같은 비정형 객체를 효과적으로 표현하기 위한 3차원

솔리드 객체를 형성하는 방법을 제시하고 정보저장을 위한 자료구조를 제시하며 토량배분 계획에 적용한다.

#### 1.2.4 건설장비 플릿 구성법 및 운영방법 제시

건설장비 플릿 구성을 위한 개념을 제시하고 전문가 면담을 통하여 파악된 토공작업을 주요 의사결정 요소를 반영한 굴삭기 및 다짐기의 작업프로세스를 제시한다. 그리고 플릿구성을 위한 시뮬레이터 모듈을 개발하여 효과적인 플릿구성이 건설장비 유휴 사용량과 환경부하량의 변화를 살펴보고 최적 플릿구성의 영향을 살펴본다.

## 2. 관련 기술동향

토량배분 관련 연구로는 1차원적인 선형토공에서의 배분에 관한 연구가 대부분이었으며, 단지토공과 같은 2차원적인 토량배분 연구(Lee et al., 2003; Lee et al., 2010; Kang et al., 2011)는 매우 제한적으로 찾아볼 수 있다. Kim (2013)은 2가지 시공방법에 따라서 3차원적으로 토량을 배분하기 위한 개념을 제시하고 토공작업시 발생하는 탄소배출량을 추정하였다. 토량배분 연구와 더불어 계획된 토공물량을 인식하고 자동적으로 작업을 수행할 수 있는 지능형 굴삭기 개발에 관한 연구(Lee et al., 2007; Kim et al., 2011; Kim et al., 2012)가 수행되었다. 토공작업 현장을 3차원으로 모델링하고 가상환경에서 작업영역을 분할한 이후에 굴삭기가 자동적으로 작업할 위치를 선정하고 작업순차를 결정할 수 있는 기술을 제시한 것이다. 또한 주어진 토공작업을 수행하기 위하여 건설장비의 그룹의 구성을 실시간으로 변경하여 시스템 전체의 효율성을 증대시키는 방안이 제시되었는데 Contract Net을 이용하여 작업정보를 교환하고 최적으로 건설장비를 할당하는 방법을 사용하였다(Kim et al., 2005). 하지만 기존 선행연구들은 굴삭기 1대에 국한되어 적용되는 한계가 있었으며 토공작업 중 굴삭작업에 한정된 제약사항이 있었다.

건설장비와 관련된 연구로는 토공장비 선정 및 조합을 위한 영향요인들에 관해 관계성을 정립하는 연구가 있으며, 영향요인으로는 토공량, 굴삭기의 버킷용량, 덤프트럭의 적재용량, 그리고 CO<sub>2</sub> 배출량 등이 제시되었다. 시뮬레이션을 통하여 공기단축, 원가절감, 및 CO<sub>2</sub> 저감을 동시에 만족시킬 수 있는 최적의 장비선장 및 조합이 가능한 방안을 제시하였다(Choi et al., 2010). 또한 장비의 규격별로 LCA분석을 통해 환경 부하량이 최소가 되는 장비조합을 제시하여 친환경 공사가 수행할 수 있도록 한 연구(Kang et al., 2013)가 수행되었으며, 장비조합에 따른 연료사용량과 탄소배출계수를 통해 구한 CO<sub>2</sub> 배출량과 작업의 조건, 장비의 작업 부하량과 대기시간인 공사시간을 비교한 뒤 EZStrobe 시뮬레이션을 이용하여 토공장비의 최적화하는 연구(Kim, 2011)

가 수행되었다.

건설분야에서 LCA와 관련된 연구는 도로 및 철도시설, 하수처리수 재이용시설, 천연가스 플랜트, 공항포장, 각종 교량 등 SOC구조물을 대상으로 수행되었다. LCA 관련 연구들은 건설 자재 생산단계, 건설단계, 유지 및 보수 단계, 철거단계 등으로 구분하여 지구온난화, 오존층영향, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물의 영향범주로 나누어 환경부하를 분석하였다. 대부분의 연구들이 단일 시설물에 대한 환경부하를 분석하고 환경부하를 줄이기 위하여 사용되는 재료를 바꾸는 방안을 제시하고 있다. 새로운 공사 프로세스나 작업계획의 변경, 건설장비의 효과적인 운영 및 시공방법의 변경을 통한 환경부하 저감방안에 대한 연구는 미흡한 편이다(Kim, 2013).

### 3. 저탄소 토공 관련 요소

#### 3.1 토공작업 효율성 및 탄소배출

토공작업의 효율성은 공기, 공사비 및 품질 등과 같은 관점에서 측정이 될 수 있으며, 특히 공기는 작업의 효율성을 나타내는 대표적인 지표로 많이 사용되고 있다. 토공작업의 공기에 영향을 미치는 요소로는 공사의 특성(종류, 규모), 현장조건(날씨, 지반종류 및 상태, 지장물, 지표수 및 지하수, 공사용 도로상태), 장비특성(규모, 효율, 고장률, 사이클타임, 주행성, 장비조합), 및 작업조건(작업계획, 공간제약, 운전자 숙련도) 등에 영향을 받는 것으로 조사되고 있다(Kim et al., 2005).

도로공사의 경우에 탄소배출에 미치는 영향정도는 투입되는 재료가 가장 크며 그 다음으로 토공작업이 영향을 많이 미치는 것으로 조사되었다(Egis Bceom International, 2010). 도로공사 이외의 경우에도 토공이 기본 공종으로 편성되어 있으며 건설장비가 많이 투입되기 때문에 탄소를 많이 배출시키는 요인으로 나타나고 있다. Kaboli et al. (2012)은 건설현장에서 최적의 건설장비 플릿을 구성하여 유류사용량을 줄인다면 탄소발생량이 줄어든다는 사실을 검증하였다.

토공작업에서의 탄소배출량을 추가적으로 줄이기 위해서는 건설장비 최적 플릿구성과 더불어 건설장비의 가동률을 높여야 할 것이며, 나아가서는 각 건설장비의 비효율적인 움직임과 이동을 최소화해야 할 것이다. 건설장비 운전자의 숙련도도 작업의 효율에 영향을 미치는 중요 요소 중의 하나이다. 가능하면 주장비(Main equipment)의 운전자는 경험이 많은 사람으로 배치하는 것이 바람직하며 숙련된 운전자들에게도 시간과 노력이 많이 요구되는 작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 지원해 주는 시스템이 필요하다.

#### 3.2 토공작업시 운전자의 의사결정 요소

기존의 연구에서는 토공작업 중 굴삭작업에 한정하여 운전자의 작업행태와 작업시 고려되는 의사결정 요소를 파악하였다(Lee et al., 2008; Kim et al., 2010). 선행연구들은 주로 단일 굴삭기의 플랫폼을 최적으로 이동하기 위하여 필요한 의사결정 요소들을 파악한 것으로 굴삭기가 다른 건설장비와 플릿을 구성하여 작업을

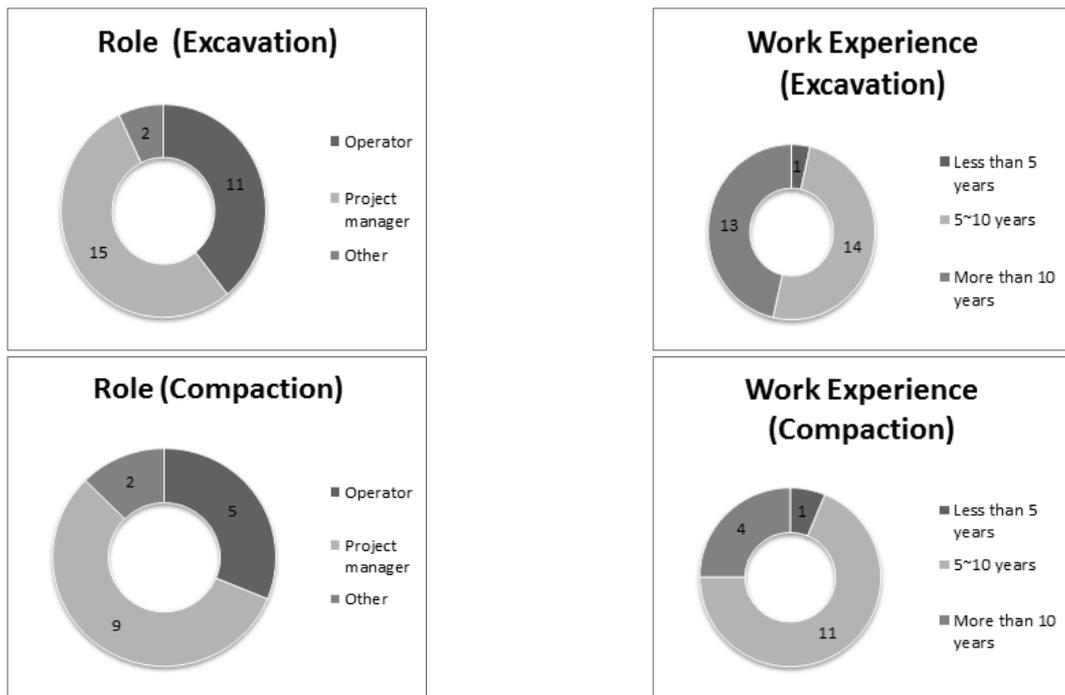


Fig. 1. Information on People Surveyed

Table 1. Result of the Pairwise Comparison Among Excavation Factors

Criteria	Continuity of Excavation	Drainage direction	Moving distance	Underground obstacle	Loading position for a truck	Weight
Continuity of Excavation	1	1/2	5	3	1/5	15.3
Drainage direction	2	1	6	4	1/2	25.5
Moving distance	1/5	1/6	1	1/4	1/7	3.8
Underground obstacle	1/3	1/4	4	1	1/6	8.1
Loading position for a truck	5	2	7	6	1	47.3

Table 2. Result of the Pairwise Comparison Among Compaction Factors

Criteria	Soil condition (Water content)	Preceding activity (by grader)	Slope	Working direction	Weight
Soil condition (Water content)	1	6	8	8	68.5
Preceding activity (by grader)	1/6	1	2	3	14.7
Slope	1/8	3/5	1	3	11.2
Working direction	0	0	0	1	5.6

하는 경우에는 고려요소들이 달라 질수 있다. 즉, 플릿형 작업시 새로운 의사결정 요소의 파악이 필요하며, 기존에 고려되는 요소들 중에서 제외될 수 있는 요소의 결정이 필요하다.

본 연구에서는 플릿형 작업시 추가적인 고려요소와 기존의 요소들 중에서 제외될 수 있는 요소들의 파악을 위하여 건설장비 운전자 16명(굴삭기 11명, 다짐기 5명), 현장 관리자 28명(굴삭기 17명, 다짐기 11명)을 대상으로 설문을 실시하였다. 추가된 새로운 요소는 트럭 상차위치이며 기존의 요소들 중에서 제외된 것은 지반의 종류와 공간간섭이다. 지반의 종류는 연암 및 경암은 미리 굴삭기로 작업을 할 수 없는 대상으로 분류되어 의사결정 요소에서 제외할 수 있다고 의견을 제시하였으며, 일반적으로 현장에서 다수의 굴삭기가 투입되는 경우에도 공간간섭이 발생하지 않는 작업구역에서 독립적으로 굴삭작업이 수행되기 때문에 공간간섭 항목도 제외될 수 있다는 의견을 제시하였다. Fig. 1은 설문대상자들에 관한 정보를 나타내고 있다.

Table 1은 플릿으로 굴삭작업을 수행하는 경우에 고려되는 요소들로 굴삭연속성, 배수방향, 이동거리, 지장물유무, 트럭상차위치에 대하여 쌍대비교를 실시한 결과를 보여주고 있다. 쌍대비교는 1(비슷함)~9(극히 중요함)의 수치를 사용하였으며 조사된 값의 평균값을 입력값으로 사용하였다. 쌍대비교 결과에 따르면 트럭상차위치 47.3%, 배수방향 25.5%, 굴삭 연속성 15.3%, 지장물유무 8.1%, 이동거리 3.8% 순으로 나타났고, 일관성 지수는 6%로 설문

응답에는 모순이 없는 것으로 나타났다.

Table 2는 플릿으로 다짐작업을 수행하는 경우에 고려되는 요소들로 지반상태(함수비), 선행작업(그레이더 징지작업), 지반의 경사도, 작업방향에 관하여 쌍대비교를 실시한 결과를 보여주고 있다. 쌍대비교는 1(비슷함)~9(극히 중요함)의 수치를 사용하였으며 결과에 따르면 지반상태(함수비) 68.5%, 선행작업 14.7%, 지반의 경사도 11.2%, 작업방향 5.6% 순으로 나타났고, 일관성 지수는 5.4%로 설문응답에는 모순이 없는 것으로 나타났다.

#### 4. 토공 건설정보모델 및 작업계획

##### 4.1 건설정보모델 일반

건설정보모델(BIM: Building Information Model)은 구조물의 기획, 설계, 시공, 유지관리, 해체단계에 이르는 전생애주기 동안에 필요한 정보를 통합적으로 생성하여 활용하고, 각 생애주기 단계별로 발생하는 정보를 지속적으로 갱신함으로써 재활용성을 높이기 위한 목적으로 도입되었다. ISO 및 빌딩스마트협회 등에서 BIM 데이터의 운영과 호환을 위하여 표준을 제시함으로써 개방형 BIM을 도입하기 위한 노력을 기울이고 있다.

전 세계적으로 BIM 도입은 주로 건축분야를 중심으로 확산되고 있으며, 국내에서도 정부의 시범사업을 통하여 도입하였고 조달청에서도 BIM적용 및 확대계획을 수립하고 있는 실정이다. 하지만

아직까지는 BIM 도입을 위한 전문조직, 전문인력, 관련 시스템 등이 준비되지 않아서 민간에서는 파일럿 프로젝트를 대상으로 도입하고 있는 실정이며, 기능도 수량산출, 간섭검토 및 도면생성 등과 같은 제한적인 업무에 BIM을 적용하고 있다. 특히 사회기반시설물을 위한 BIM 도입은 매우 제한적으로 시도되고 있는데, 이러한 현상은 BIM 도입을 위한 여러 가지 제약들이 언급되고 있지만 건축물에 비하여 다양한 비정형 구조물과 현장지반을 위한 표준정보모델이 제시되어 있지 않고 설계를 위한 3D 객체도 매우 부족하기 때문이다. MOLIT (2015)는 2020년까지 사회기반시설 공사의 20%까지 BIM을 적용하기 위한 추진계획을 수립하고 시범사업을 수행할 예정이다.

토공작업과 관련한 건설정보모델 연구는 매우 제한적으로 이루어져 왔다. 최근 토공의 데이터모델의 포맷에 관한 연구로 Kim et al. (2013)은 IFC 구조확장을 위한 연구로 도로토공을 성토부, 절토부 및 편철편성부로 구분하여 형상요소 및 설계 파라미터를 제시하였고, Kim et al. (2014)은 IFC 확장개념으로 원지형 및 계획지형 객체, 성토된 객체, 절토된 빈 공간객체, 토공작업 수행되지 않은 원지형 객체, 구조물과 접속된 부분 객체를 나타내기 위한 토공객체 스키마를 제안하고 있다.

토공 BIM은 다른 구조물공과는 달리 다양한 형태의 3D 모델은 필요하지 않으나 지반의 가변적인 형상을 효과적으로 나타낼 수 있는 3D 모델이 필요하며 토질의 종류에 따른 작업량 산정과 적정 투입장비에 대한 정보를 제공할 수 있는 모델이 필요하다.

## 4.2 토공작업을 위한 건설정보모델링

현재 사용되는 BIM 시스템에서는 토공을 위한 객체를 제공하지 않기 때문에 토공을 위한 객체를 정의할 필요가 있다. 제조업 분야에서는 3D 스캐닝을 통하여 취득된 실물 데이터를 기반으로 3D 파라메트릭 솔리드 모델을 생성시키는 기술을 많이 적용하고 있는데 주로 기존에 사용하던 3D 모델이 없는 경우에 사용하고 있으며 파라메트릭 솔리드 모델을 빠르게 생성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서도 3D 스캐닝을 통하여 취득된 건설현장의 Point cloud를 기반으로 하여 토공현장의 파라메트릭 3D 객체로 변환하는 기술을 적용하고자 한다. Fig. 2는 토공현장 파라메트릭 모델을 생성하는 프로세스를 나타내는 개념도를 보여주고 있다.

### 4.2.1 3D 토공현장 스캐닝 및 Surface 모델 생성

최근에는 초당 수만 포인트를 스캔할 수 있는 3D 스캐너들이 상용화되어 있다. 스캐닝 과정을 통하여 Point cloud를 얻을 수 있는데 이것을 NURUB (Non-Uniform Rational B-spline) 서피스(Surface) 모델로 변환할 수 있다. 하지만 상용화된 3D 스캐너의 스캐닝 범위는 토공현장과 같은 넓은 지역을 커버하기에는 무리가

있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Chae et al. (2009)은 토공현장에 여러 개의 구형타겟을 설치하고 스캐너를 여러 곳으로 옮겨 다니면서 지형데이터를 취득한 이후에 구형타겟을 Reference point로 삼아서 취득된 데이터를 하나의 좌표계로 통합하는 알고리즘을 제시하고 있다.

통합된 Point cloud가 취득된 이후에 삼각망을 구성한다. 여러 연구자들이 삼각망을 구성하기 위한 알고리즘을 제시하고 있는데 본 연구에서는 Delaunay triangulation 방법을 적용하여 랜더링 속도도 향상 시키고 상대적으로 매끈한 폴리곤 메쉬를 생성 시키고자 한다. 폴리곤 메쉬가 형성된 이후에 텍스처링 과정을 거치면 색을 가진 서피스 모델이 완성된다.

### 4.2.2 설계정보 및 건설장비 정보 입력

서피스 모델이 완성된 이후에 토공작업이 수행되어야 하는 토공현장의 경계에 관한 정보, 계획 등고선 정보, 시공기면의 위치, 토질조사(보링) 데이터, 건설장비 사양정보 등을 입력한다. 입력된 정보에 근거하여 토량이동 계획을 수립하게 되며, 절토작업의 경우에는 무대량, 도저에 의한 토공물량, 굴삭기 및 트럭조합에 의한 토공물량 등으로 분기된다. 그리고 굴삭기에 의한 토공시 유효 작업반경과 작업깊이를 결정하는데 사용된다. 토공시 지반을 일반토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암 등으로 분류하게 되며 일반토~풍화토까지를 굴삭기에 의한 작업대상 토질로 본다. 토질조사 데이터에 근거하여 각 토질별로 지하에서의 분포를 추정하게 되며, 추정된 분포는 파라메트릭 모델의 지반물성 정보를 제공하는 기초 자료가 된다.

### 4.2.3 자료구조 및 토공을 위한 기본 객체

스캐닝을 통하여 취득된 서피스 모델을 파라메트릭 모델로 변환하기 위하여 필요한 각종 정보를 옥트리(Octree) 자료구조를 이용하여 저장한다. 옥트리는 토공작업 대상구역을 모두 포함하는 큐브를 이용하여 재귀적으로 세부 작업영역으로 분할하면서 해당 작업 영역의 상세한 정보를 담는 자료구조로 사용된다(Fig. 4(4)). 옥트리의 루트노드(Root node)는 큐브의 중심에 해당하며 루트노드의 3차원 좌표값(x,y,z) 중에서 표고에 해당하는 z축 값은 시공기면에 위치하도록 설정한다. Fig. 3에서 보는 바와같이 시공기면 보다 높은 영역은 절토노드로 분류되며 시공기면 보다 낮은 영역은 성토노드로 구분된다. 그리고 루트노드에서 하위레벨의 노드로 분할하는 정도는 굴삭장비의 유효작업 반경 및 작업깊이 등을 고려하여 결정되는데 a는 안전을 고려한 굴삭기의 작업깊이를 고려한 것으로 1m<sup>3</sup> 규격의 굴삭기를 기준으로 2~3m를 기준으로 보고 있으며, b는 7~12m를 기준으로 설정하고 있다. 이러한 기준에 근거하여 옥트리를 루트노드에서 하위노드로 분할하는 경우에 말

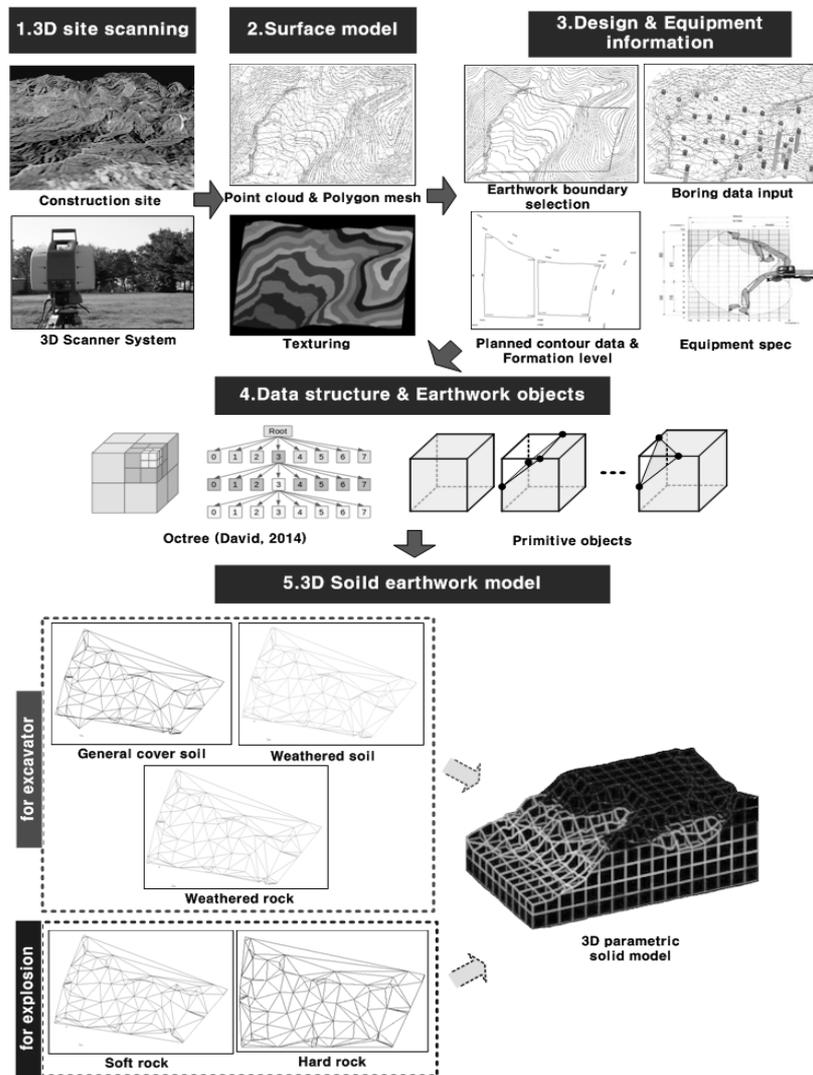


Fig. 2. 3D parametric Solid Modeling Process for Earthwork

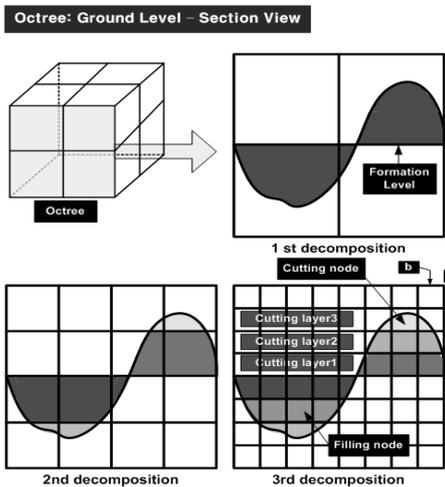


Fig. 3. Octree Decomposition-Section View

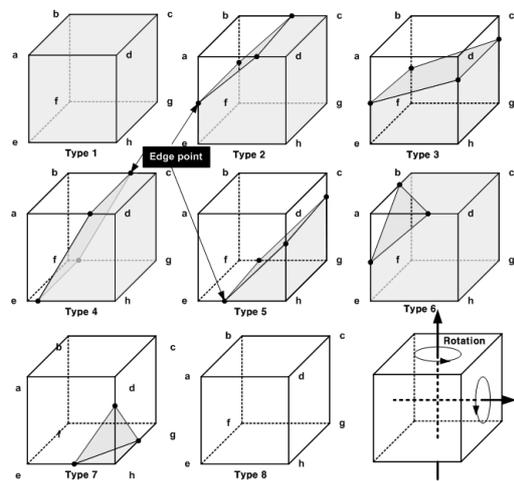


Fig. 4. Primitive Objects for an Earthwork Solid Model

단노드의 물리적인 크기가 (7m×7m×2m)~(12m×12m×23m)에 이르는 영역으로 구분되는 레벨까지 분할을 한다. 만약 최하위 말단노드가 여러 가지 토질로 구성된 경우에 각 토질별 작업물량을 산출하기 위하여 추가적으로 분할을 수행할 수 있다.

옥트리를 이용하여 정보를 저장하기 위한 토대를 마련하고 옥트리의 각 노드가 나타내는 세부 작업영역의 형상을 3차원으로 빠르고 쉽게 구현하고 작업물량을 효과적으로 계산하기 위하여 Fig. 4에서 제시된 바와같이 기본 객체를 제공한다. 일반적으로 객체 중에서 절토구역을 나타내기 위한 기본 객체는 Type1이며 성토구역을 나타내는 기본 객체는 Type8이다. 하지만 일반적으로 스케닝과정을 통하여 얻어진 지형의 표면은 평면인 경우가 없기 때문에 옥트리

구조에서 물리적으로 가장 상위에 위치한 노드에 속한 세부영역의 지형표현 및 작업물량 계산을 위해서는 Type1의 기본 객체를 적용할 수 없으므로 Type2~Type7의 객체 중에서 지형에 가장 근접한 형태의 객체가 선택하여 모델링한다. 그리고 모델링을 효과적으로 진행하기 위하여 각 객체를 회전시켜서 얻어진 객체를 적용할 수 있다.

**4.2.4 3D 파라메트릭 솔리드 모델 생성**

파라메트릭 모델은 3차원 형상정보와 더불어 작업을 효과적으로 수행하기 위한 추가적인 정보를 포함하고 있으며, 해당 노드에서의 정보가 변경되면 정보와 연계된 다른 정보도 연계되어 변경되도록

**Table 3. Octree Node Information**

Category	Level 1 Shape	Level 2 Attribute
Cutting node	Primitive object Type1 ~ Type7	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Node info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Parent node, Sibling node, Children node</li> <li>- Node #, Node center position (of the current cubic), Node size(L×W×H)</li> <li>- Target nodes</li> </ul> </li> <li>■ Shape info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Edge point coordinates</li> <li>- Edge point coordinates of children nodes (for multiple soil types)</li> </ul> </li> <li>■ Material info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soil: types, Swell factor, Shrinkage factor, Consolidation factor</li> </ul> </li> <li>■ Work info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Work type: Excavation, Explosion</li> <li>- Total cutting volume (cutting volume by soil types)</li> <li>- Filling volume by target nodes</li> </ul> </li> <li>■ Equipment                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipment: Dozer, Excavator+Truck</li> <li>- Equipment cycle time</li> </ul> </li> </ul>
Filling node	Primitive object Type2 ~ Type8	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Node info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Parent node, Sibling node, Children node</li> <li>- Node #, Node center position (of the current cubic), Node size(L×W×H)</li> <li>- Source nodes</li> </ul> </li> <li>■ Shape info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Edge point coordinates</li> <li>- Edge point coordinates of children nodes (for multiple soil types)</li> </ul> </li> <li>■ Material info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transported soil: types, Swell factor, Shrinkage factor, Consolidation factor</li> </ul> </li> <li>■ Work info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Total filling volume</li> <li>- Cutting volume by source nodes</li> </ul> </li> <li>■ Equipment                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grader &amp; Compactor</li> <li>- Equipment cycle time</li> </ul> </li> </ul>
Completed or Void node	Primitive object Type1 & Type8	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Node info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Parent node, Sibling node, Children node</li> <li>- Node #, Node center position (of the current cubic), Node size(L×W×H)</li> <li>- Final elevation level</li> </ul> </li> <li>■ Material info                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Soil: types, Consolidation factor, Compacted density</li> </ul> </li> </ul>

하는 특징을 갖고 있다. 옥트리 분할이 완료되면 노드의 정보를 저장하게 되는데 다음 Table 3과 같이 형상정보와 속성정보로 나누어 저장을 한다. 노드는 기본적으로 절토노드, 성토노드, 작업이 완료되거나 작업대상이 아닌 노드로 구분된다. 형상정보는 기본 객체 및 응용 객체를 기반으로 하며 속성정보로는 자신의 노드에 관한 정보와 기본 객체 Type 1 및 Type 8을 제외한 나머지 타입은 육면체 Edge와 접하는 점들에 대한 정보를 제공하며, 해당 노드에 속하는 토질에 관한 정보, 작업량에 관한 정보와 해당 작업을 위한 건설장비에 관한 정보를 포함한다. 특히 작업물량의 산출을 위하여 보링데이터를 이용하여 작성된 토질 구성도에 근거하여 해당 노드에 속하는 토질의 종류를 파악한다. Fig. 5에서 보는 바와같이 보링시추 데이터를 바탕으로 각 노드에 포함되는 토질의 종류를

유추(예를들면, Node 376의 경우에는 Silty sand, Weather soil, Weather rock으로 구성되며, Node 363의 경우에는 Sand stone과 Silty sand로 구성됨)할 수 있으며 토질종류의 경계를 나타내는 연결선에 근거하여 토질별로 물량을 산출할 수 있다. 필요한 경우에 정확한 물량산출을 위하여 Node 377에서와 같이 해당 노드를 추가적인 세부노드로 분할할 수 있다.

### 4.3 파라메트릭 솔리드 모델을 이용한 토공작업 계획

상기절에서 언급된 바와같이 서피스 모델에서 파라메트릭 솔리드 모델로 전환이 되고 관련 정보는 옥트리 자료구조에 저장된다. Fig. 6에서와 보는 바와같이 옥트리 자료구조는 루트노드를 중심으로 큐브를 8개의 세부영역으로 분할하고 노드번호를 부여하게

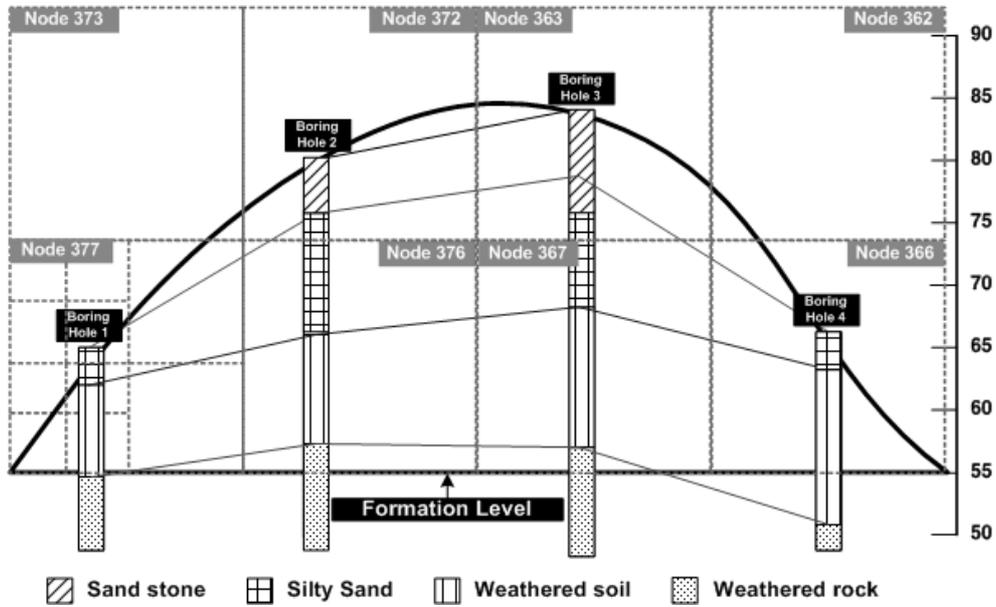


Fig. 5. Work Information Generation for a Octree Node Based on Soil Boring Tests

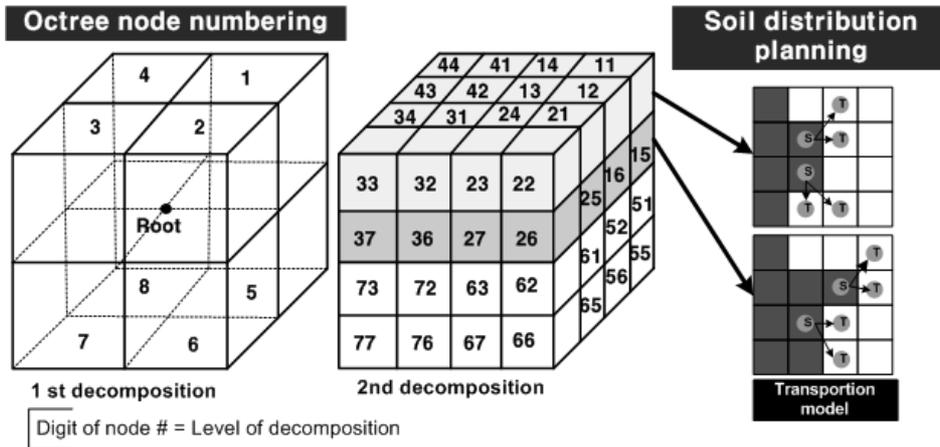


Fig. 6. Soil Distribution Method using Octree Parametric Model

된다. 우선 상위 레이어에서 우상(Upper-right) 구역에서 시작하여 시계방향으로 1~4의 번호를 부여하고 하위 레이어도 마찬가지로 시계방향으로 5~8의 번호를 부여하게 된다. 만약 각 세부구역을 추가적인 영역으로 다시 분할하게 되면 노드번호의 자리수는 분할 차수에 대응하여 두 자리 수가 된다. 첫 번째 자리는 처음 분할에서 할당된 번호를 사용하고 두 번째 자리수는 이미 분할된 세부구역을 다시 8개의 세부구역으로 나누고 상위레이어는 1~4의 번호를 추가적으로 부여하며, 하위레이어는 5~8의 번호를 추가적으로 부여한다. 이러한 옥트리의 번호 부여방식은 노드번호만으로 토공현장에서 어느 구역에 위치하는지 쉽고 빠르게 찾을 수 있는 방법을 제시하게 된다.

기본적으로 굴착 대상구역은 지반고 상위에 위치하는 부분으로 노드번호가 1~4로 시작되는 영역에 포함되고, 성토 대상구역은 노드번호 5~8의 번호로 시작하는 영역에 포함된다. 토량배분 및 토공작업 계획수립을 위하여 건설장비의 유효작업 반경 및 작업깊

이를 고려하여 추가적인 분할을 실시할 수 있다. 추가적인 분할은 노드번호의 자리수 증가를 가져오게 되고 옥트리 노드번호 부여방식에 따라서 1~8의 번호를 추가하게 된다. 추가적인 분할에 따라서 노드번호의 마지막 자리가 1~4의 번호를 갖는 레이어와 5~8의 번호를 갖는 레이어로 구분된다. 노드번호만 확인하면 물리적으로 동일한 작업 레이어에 속하는지의 여부를 쉽게 구분할 수 있으며, 토공작업 계획은 각 레이어별로 최적화 기법 중 수송모델(Transportation model)을 적용(Lee et al., 2003)하여 수립하게 된다.

토량배분을 위한 물량계산은 현장 보링데이터를 기반으로 구성된 옥트리 노드의 파라메트릭 솔리드 모델을 이용하면 Fig. 2(5)에서와 같이 토질종류별로 구분된 3차원 솔리드 모델을 구성할 수 있다. 전체 토공구역의 작업량과 특정 노드(구역)에서의 작업량을 산정할 수 있으며, 수송모델을 적용하면 굴착구역과 성토구역이 매칭된 토공작업 계획을 수립할 수 있다.

3차원 토공계획 수립을 위하여 Fig. 7과 같이 마이크로소프트

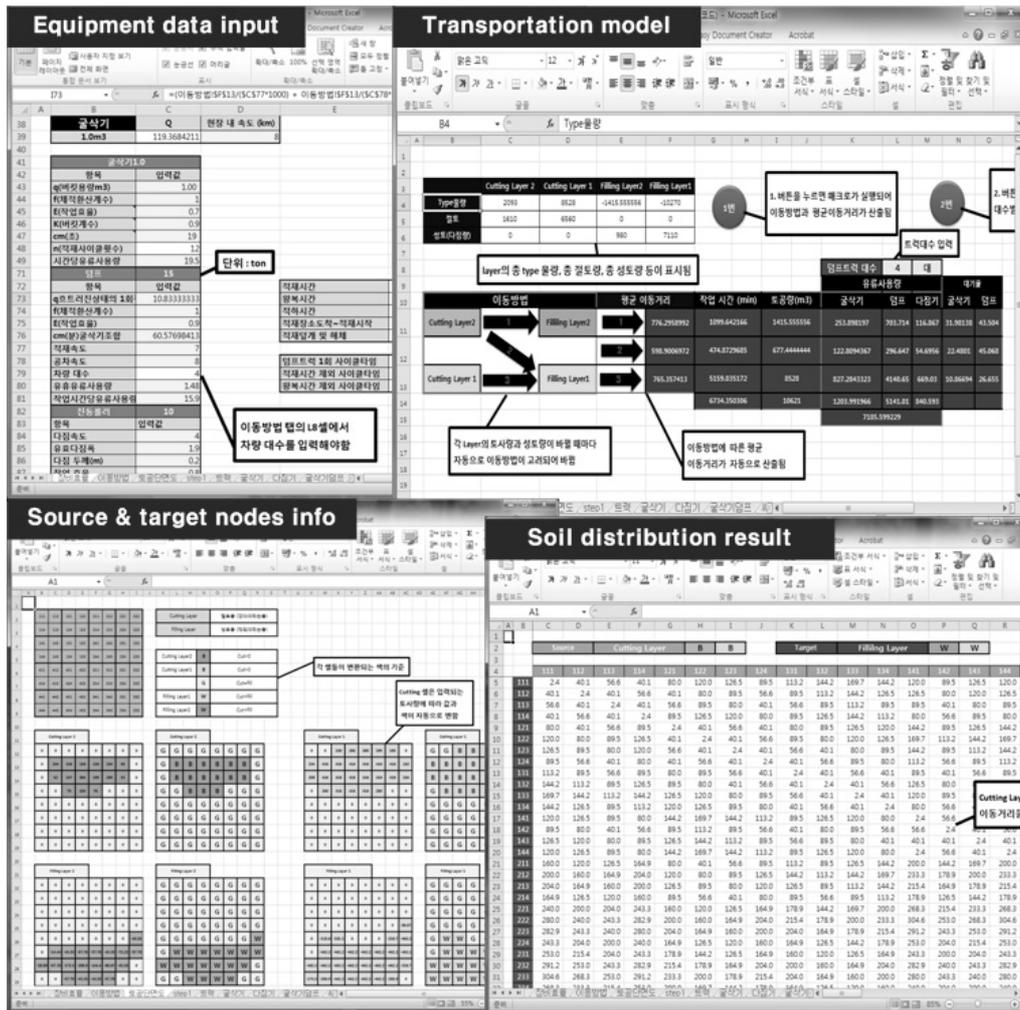


Fig. 7. Excel Based Simulation for an Earthwork Planning

엑셀을 이용하여 시뮬레이터를 개발하였다. 건설장비의 스펙, 사이클타임, 속도 등의 정보를 입력하고 토공현장의 파라메트릭 솔리드 모델 정보에 근거한 각 옥트리 노드에서의 절토량 및 성토량에 관한 정보를 입력하여 수송모델 알고리즘을 적용하면 최적화된 3차원 토량이동계획이 수립된다.

## 5. 건설장비 플릿 구성법 및 운영

### 5.1 건설장비 플릿 구성

기존에 개발된 토공시스템들은 단일 굴삭기가 주어진 정보에 따라서 자동적으로 작업계획을 수립할 수 있도록 하는 기능을 제시하고 있다. 하지만 이러한 시스템들을 건설현장에 적용할 경우 기대되는 효과는 매우 제한적이다. 실제 현장에서 효과를 보기 위해서는 다중 및 다수의 건설장비가 투입되는 환경을 고려해야 한다. 주어진 작업에 알맞게 건설장비 플릿이 구성되고 각 건설장비들이 고효율로 작업을 수행할 수 있도록 지원하는 방법이 필요하다.

Fig. 8은 건설장비 플릿관리 시스템의 개념도를 나낸 것이다. 플릿관리 시스템은 3차원 솔리드 모델을 이용한 토공계획을 수립하고 최적 배분방법으로 절성토 구역에 매칭 시키고, 매칭된 절성토 구역의 작업량에 따라서 실시간으로 건설장비의 구성을 조정하는 기능을 제공한다. 또한 현장에서 다수의 건설장비 군이 운영되는 경우에 전체 시스템의 효율을 높이기 위해서 건설장비 군들 사이에 자원(건설장비)을 재배분하는 기능을 포함되며, 건설장비 군들이 작업을 진행하는 도중에는 움직임을 좀 더 효율화하여 연료사용량

을 줄이기 위한 기능도 포함된다. 시스템 사용자는 플릿관리 시스템을 통하여 토공현장에서 전체 건설장비의 위치와 작업현황을 파악할 수 있으며 작업의 비효율을 초래하는 요소를 파악할 수 있다. 또한 건설장비 운전자들은 플릿관리 시스템으로부터 최적의 작업에 필요한 정보를 실시간으로 전송받을 수 있다. 궁극적으로 플릿관리 시스템은 고효율 작업 및 저에너지 시공으로 탄소저감이 가능하도록 하는 기능을 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

### 5.2 건설장비 플릿 운영

다중 및 다수의 건설장비가 투입되면 옥트리 자료구조와 3차원 파라메트릭 솔리드 모델을 이용하여 최적의 절성토 구역매칭 및 작업물량을 산출하고, 투입되는 건설장비가 최대 효율로 작업을 할 수 있도록 건설장비를 배분하게 된다. 만약 건설장비군이 여러 개가 형성되는 현장이라면 건설장비군에 속하는 건설장비의 수는 고정되어 있는 것이 아니라 플릿관리 시스템에서 전체 시스템의 효율을 고려하여 건설장비의 가동율을 높이기 위한 방법으로 건설장비를 실시간으로 재할당하여 건설장비군의 건설장비 수를 변화시킨다. 구체적으로 어떤 장비가 어떤 건설장비군에 속하게 할지에 관한 정보는 플릿관리 시스템에 의하여 해당 건설장비로 통보되고 시스템에서는 전체적인 건설장비군의 현황을 파악할 수 있다.

건설장비 플릿 운영은 건설장비군의 최적운영과 각 건설장비의 작업 프로세스 및 이동경로 관리 등으로 구성되어 있다. 굴삭기 및 다짐기 작업 프로세스는 다음과 같다.

#### 5.2.1 굴삭기 작업 프로세스

##### Step 1. 초기 굴삭위치(노드) 선정 및 굴삭기 셋팅

토량작업 계획에 의하여 설정된 굴삭대상 구역 중에서 초기 작업 위치를 선정하는 단계로 굴삭기가 90도 이내로 회전하면서 트럭에 상차할 수 있는 지역으로 강우나 용수발생시 물을 흘려보낼 수 있는 위치에 최초 굴삭위치로 선정하고 굴삭기의 플랫폼을 안착한다.

##### Step 2. 해당 굴삭작업 구역(노드)에서 굴삭작업 실시

굴삭이 가능한 지반을 대상으로 계획된 작업량을 달성할 때까지 굴삭작업을 실시한다.

##### Step 3. 일일 작업물량 확인

일일 누적작업량이 일일 계획물량과 같아지면 Step 5를 수행하고 그렇지 않으면 Step 4을 수행한다.

##### Step 4. 후속 굴삭작업 구역(노드) 선정 및 플랫폼 이동

아직 작업이 완료되지 않은 굴삭작업 구역 중에서 후속으로 작업을 수행할 구역은 다음 식의 값이 최대인 구역으로 선정한다. 그리고 플랫폼을 이동하고 Step 2를 수행한다.

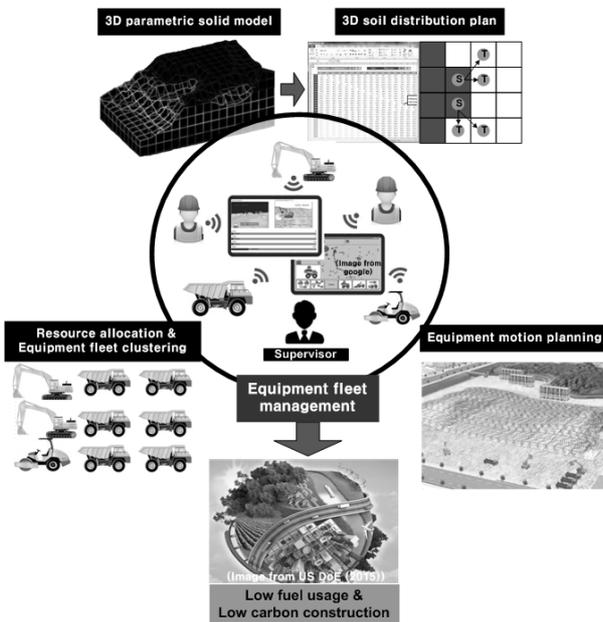


Fig. 8. Concept of an Equipment Fleet Management System

$$Y = 0.47X_1 + 0.26X_2 + 0.15X_3 + 0.08X_4 + 0.04X_5$$

$X_1$ (트럭 상차위치): 굴삭기 회전반경 90도 이내 = 1,  
 굴삭기 회전반경 180도 이내 = 0.5,  
 굴삭기 회전반경 180도 이상 = 0

$X_2$ (배수 방향): (대상 굴삭구역의 표고) ÷ (대상 Cutting layer에  
 서의 최고 표고)

$X_3$ (굴삭의 연속성): 현 작업구역과 바로 인접구역 = 1,  
 기타 = 0

$X_4$ (지장물 여부): 지장물 없음 = 1, 지장물 있음 = 0

$X_5$ (이동거리): (작업구역간 최소 중심거리) ÷ (현재 작업구역과  
 대상 작업구역간의 중심거리)

**Step 5. 작업종료**

**5.2.2 다짐기 작업 프로세스**

**Step 1. 초기 다짐위치 선정 및 다짐기 셋팅**

동일한 지반이라도 함수비와 현장조건에 따라서 시험다짐에  
 의하여 다짐회수를 결정하고 최초 다짐위치로 장비를 이동한다.

**Step 2. 다짐작업 실시 및 다짐도 확인**

선행작업(트럭에 의한 성토 및 그레이더에 의한 정지작업)이  
 완료된 구역을 대상으로 하며, 가능하면 다짐구간이 직선으로 길게

형성되면서 방향전환이 최소화되는 패스로 작업을 실시한다. 작업  
 구간에 경사가 있는 경우에는 토사의 밀림현상을 최소화하기 위하  
 여 경사가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 작업을 실시한다. 시험시공에  
 의하여 결정된 다짐회수의 작업여부를 확인하고 적정 다짐도가  
 얻어졌는지 확인한다.

**Step 3. 다짐구역 이동**

현행 다짐작업 구간의 작업이 완료되고 선행작업이 완료된 성토  
 구간이 있다면 다짐기를 해당 구역을 이동한다.

**Step 4. 일일 작업물량 확인**

일일 누적작업량이 일일 계획물량과 같아지면 Step 5를 수행하  
 고 그렇지 않으면 Step 2를 다시 실시한다.

**Step 5. 작업종료**

**6. 건설장비 플릿관리 사례연구**

본 연구에서는 건설장비 플릿관리 방법론의 제시와 플릿관리용  
 시뮬레이터의 일부 모듈만을 개발하였다. 하지만 플릿관리 시스템  
 의 적용성을 알아보기 위하여 개발된 모듈을 이용하여 시나리오  
 케이스 연구를 진행하였다. 개발된 시뮬레이터 모듈의 3차원 토랑

Table 4. Case Study Result

Category	Average Moving Distance	Truck# (Capacity)	Fuel Usage Excavator	Fuel Usage Truck	Fuel Usage Compactor	Total Fuel Usage	CO <sub>2</sub> Emission
Case 1	165m	1 (15ton)	1234.59 L	2461.78 L	675.74 L	4372.11 L	278.7 kg
Case 2		2 (15ton)	1168.22 L	2527.06 L	596.03 L	4291.31 L	248.7 kg
Case 3		3 (15ton)	1168.22 L	2674.28 L	596.02 L	4438.52 L	257.3 kg
Case 4		1 (24ton)	1180.71 L	2994.19 L	640.25 L	4815.15 L	279.1 kg
Case 5		2 (24ton)	1141.18 L	3088.58 L	592.43 L	4822.19 L	279.5 kg
Case 6		3 (24ton)	1141.18 L	3232.11 L	592.43 L	4965.72 L	287.8 kg
Case 7	462m	1 (15ton)	1342.29 L	3689.02 L	786.91 L	5818.22 L	337.3 kg
Case 8		2 (15ton)	1188.95 L	3658.32 L	604.89 L	5452.16 L	316.0 kg
Case 9		3 (15ton)	1188.95 L	3814.65 L	604.11 L	5607.71 L	325.1 kg
Case 10		1 (24ton)	1243.93 L	4113.16 L	710.32 L	6067.41 L	351.7 kg
Case 11		2 (24ton)	1153.32 L	4153.41 L	601.13 L	5907.86 L	342.5 kg
Case 12		3 (24ton)	1153.32 L	4305.87 L	601.13 L	6060.32 L	347.9 kg
Case 13	762m	1 (15ton)	1429.67 L	4954.78 L	901.52 L	7285.97 L	422.3 kg
Case 14		2 (15ton)	1204.71 L	4860.99 L	631.52 L	6697.22 L	388.2 kg
Case 15		3 (15ton)	1191.17 L	4992.83 L	614.71 L	6798.71 L	394.1 kg
Case 16		1 (24ton)	1297.99 L	5245.51 L	781.21 L	7324.71 L	424.6 kg
Case 17		2 (24ton)	1157.11 L	5231.37 L	610.13 L	6998.61 L	405.7 kg
Case 18		3 (24ton)	1157.11 L	5393.07 L	610.11 L	7160.29 L	415.0 kg

배분 기능의 확인과 건설장비 플릿 운영시 건설장비군의 최적 구성기능과 건설장비의 유류사용량에 따른 환경부하량 산출기능을 확인해 보았다.

시나리오 연구는 전체 굴착량이 10,621m<sup>3</sup>으로 절토 레이어 2개 층과 성토 레이어 2개 층으로 구성되고, 절토 레이어에 속한 절토구역(노드) 수는 41개 성토 레이어에 속한 성토구역(노드) 수는 45개인 현장을 대상으로 하였다. 토량배분 결과에 따라서 절성토 구역을 매칭 시켰으며, 절토구역에서 성토구역까지 평균 운반거리를 계산하였다. 현장내에서 평균운반거리가 165m, 462m,

762m인 경우가 발생하였으며, 3개의 건설장비군이 운영되는 것으로 가정하였고 하나의 건설장비군은 굴삭기 1대(1m<sup>3</sup>), 트럭 1~3대 (15~24ton), 다짐기 1대(10ton)로 구성되는 것으로 시뮬레이션을 하였다.

개발된 시뮬레이터 모듈은 각 건설장비군의 구성에 따라서 장비 가동률과 유류사용량, 그리고 탄소 발생량의 변화를 제시하고, 전체 시스템의 효율을 올리기 위한 의사결정 정보를 제시한다. Table 4와 Fig. 9는 상기에 언급된 시나리오 조건에 따른 결과를 보여주고 있다.

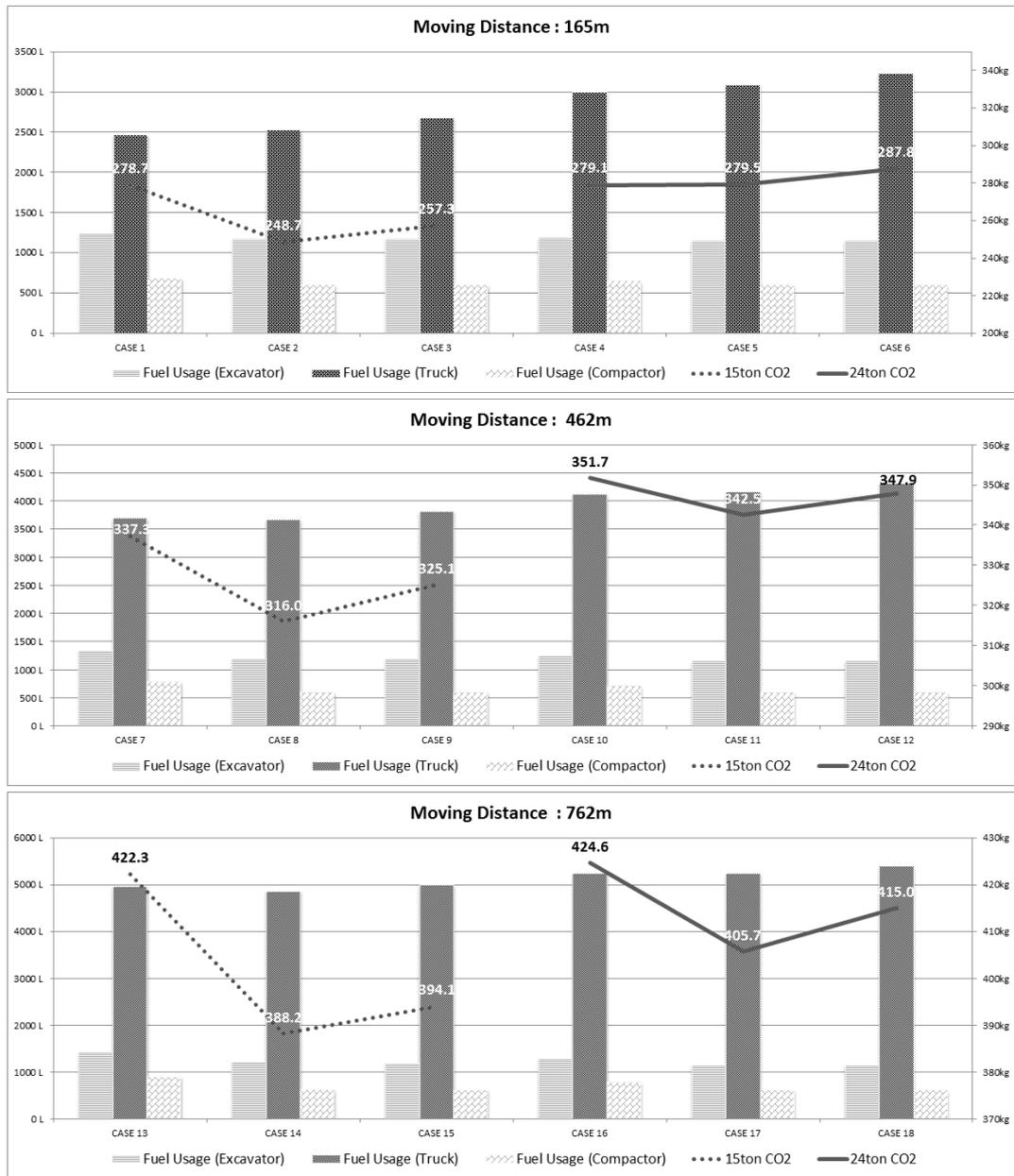


Fig. 9. Result Comparison of the Case Study

Table 5. Operating Ratio by Construction Equipment

Criteria	2011	2012	2013	2014	Simulated result
Excavation	57.24%	46.84%	48.90%	47.22%	85.80%
Truck	60.80%	49.67%	49.42%	48.57%	81.17%
Compaction	42.62%	36.30%	33.02%	30.42%	51.17%

결과에 따르면 주어진 조건의 현장에서는 15ton의 트럭이 투입 되는 경우 각 건설장비군 별로 2대의 트럭을 투입하는 것이 전체 시스템의 효율이 높아지고 유류사용량도 줄어서 탄소가 저감되는 것으로 나타났다. 24ton의 트럭을 투입하는 경우에도 2대씩을 투입 하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났다. 그리고 건설기계협회에서 매년 조사한 건설장비 가동률 데이터와 비교해 보면 플릿관리를 통하여 가동률이 상당히 향상되는 것을 볼 수 있다(Table 5). 물론 가상의 환경에서 시뮬레이션을 할 결과이긴 하지만 전문가들의 의견에 의하면 시뮬레이션 결과값의 80% 정도가 현장에서 달성할 수 있는 가능치라는 것을 고려할 때도 국내현장의 건설장비 가동률 보다 높음을 알 수 있다.

기본적으로 현장조건, 평균운반거리 및 투입되는 건설장비 조건에 따라서 플릿관리를 위한 건설장비군의 형성방법이 다양하게 제시될 수 있으며, 의사결정지는 플릿관리를 위한 최적 건설장비 배분과 건설장비의 숙련된 운전자의 경험에 기반한 작업 프로세스에 관한 정보를 제공 받을 수 있다.

## 7. 결론

건설장비는 토공작업에서 작업 생산성에 영향을 미치는 주요소이기 때문에 건설장비 운영의 효율성을 높이는 것이 토공작업에서 매우 중요하다. 건설현장에서 건설장비의 운영의 효율을 높이는 것은 전적으로 장비운전자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 하지만 건설장비 운전자들이 전체 토공작업의 작업현황과 다른 건설장비들과의 협업관계 등을 종합적으로 고려하여 작업효율을 높이는 것에는 한계가 있다. 또한 최근 건설현장에서 숙련된 운전자의 수가 줄어들고 있는 추세여서 건설장비의 운용 효율이 매년 저하되고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 토공작업에 필요한 각종 정보들을 실시간으로 운전자 및 작업자들에게 제공함으로써 건설장비의 작업효율을 최대화하고 에너지 사용량을 줄임으로써 저탄소 시공이 가능하도록 플릿관리 시스템을 구축을 위한 기술을 제안하고 있다.

최근 BIM을 토목공사에 도입하려는 연구가 진행되고 있다. 하지만 아직까지 토목공사를 위한 3차원 객체데이터가 많이 부족한 실정이다. 제조업에서는 역설계 기법을 통하여 기존에 없던 3차원

솔리드 모델을 효과적으로 생성하여 설계에 적용하고 있다. 본 연구에서도 역설계 기법을 적용하여 토공작업을 위한 3차원 파라메트릭 솔리드 모델을 구성하기 위한 방법론을 제시하였다. 형성된 솔리드 모델을 기반으로 최적 토량배분 계획을 수립하는 시뮬레이터를 개발하였으며, 수립된 계획을 효과적으로 수행하기 위한 건설장비 플릿의 구성과 운영에 관한 방법론을 제시하였다. 또한 굴삭작업과 다짐작업의 효율 향상을 위하여 경험이 많은 운전자들과 전문가들과의 상담을 통하여 주요 의사결정 요소들을 파악하였고 이러한 요소들을 건설장비 플릿 운영시 고려하도록 제안하였다.

제시된 방법론을 적용한 플릿관리 시스템을 도입하는 경우의 효과를 예측해 보기 위하여 사례연구를 실시하였으며, 결과는 현장에서 조사된 건설장비 가동률을 높일 수 있는 것으로 나타났으며 아울러 건설장비 플릿의 효과적인 운영을 통하여 유류사용량을 감축 시켜 궁극적으로 건설현장에서 탄소를 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구는 3차년에 걸쳐서 진행되는 것으로 초기 기초연구로 수행되었으며 후속적으로 제시된 플릿관리 방법론을 적용한 시뮬레이터 및 관련 모듈을 통합한 시스템을 완성하고 건설장비 및 현장에 직접 설치하여 효과를 검증하는 연구를 계획하고 있다.

## 감사의글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B079344-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

Chae, M. J., Lee, K. W., Kim, J. R., Park, J. W., Ryu, H. S. and Cho, M. Y. (2009). "Development of the 3D imaging system and automatic registration algorithm for the intelligent excavation system (IES)." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 10, No. 1, pp. 136-145 (in Korean).

Choi, J. H., Lee, D. H., Kim, S. H. and Kim, S. K. (2010). "Factors affecting selection & combination of earthwork equipments." *Journal of the Korea Institute of building construction*, Vol. 10, No. 1, pp. 201-205 (in Korean).

David's Blog (2014). "Advanced Octree3: Non Static Octrees." *Computer graphics, data structures, and algorithms*, Available at: <https://geidav.wordpress.com/author/geidav/> (in Korean).

Egis Bceom International (2010). *Introduction to greenhouse gas emissions in road construction and rehabilitation*, Project Report, The World Bank.

Kang, M. H. and Park, H. K. (2013). "A study of the combination method for earthwork equipments using the environmental loads and costs." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 33, No. 3, pp. 1215-1224 (in Korean).

- Kang, T. W. and Cho, Y. H. (2011). "The study on the optimized earthwork transfer path algorithm considering the precluded area of massive cutting and banking." *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-8 (in Korean).
- Kim, B. S. (2011). "Correlation analysis on the duration and CO<sub>2</sub> emission following the earth-work equipment combination." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 4D, pp. 603-611 (in Korean).
- Kim, C. Y., Moon, H. S., Won, J. S. and Ju, K. B. (2014). "Extention of IFC core schema for earth work object." *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*, pp. 727-730.
- Kim, H. S., Lee, G. I., Moon, H. S., Ju, K. B. and Kang, L. S. (2013). "Classification of earthwork shape for extension IFC in Civil Engineering." *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, Civil EXPO 2013*, KSCE, pp. 248-251 (in Korean).
- Kim, S. K. (2013). "3D-based earthwork planning and CO<sub>2</sub> emission estimation for automated earthworks." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 33, No. 3, pp. 1191-1202 (in Korean).
- Kim, S. K. and Koo, B. S. (2010). "A path generation method considering the work behavior of operators for an intelligent excavator." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 4D, pp. 433-442 (in Korean).
- Kim, S. K. and Min, S. K. (2012). "Development of a work information model and a work path simulator for an intelligent excavation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 3D, pp. 259-267.
- Kim, S. K., Lee, D. K. and Kim, H. C. (2005) "A model for allocating automated earthwork equipment using contract net." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 25, No. 5D, pp. 721-727 (in Korean).
- Kim, S. K., Min, S. K. and Kim, S. S. (2011). "Path planning simulator for an intelligent excavator." *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, Civil EXPO 2011*, KSCE, pp. 2117-2120.
- Koboli, A. S. and Carmichael, D. G. (2012). "Emission and cost configurations in earthmoving operations." *Organization, Technology & Management in Construction*, Vol. 4, No. 1, pp. 393-402.
- Lee, C. K., Kim, S. K. and Sung, Y. J. (2003). "A study on 2D-based earthwork planning methods." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 23, No. 3, pp. 34-357 (in Korean).
- Lee, J. N., Pyeon, M. W., Koo, J. H. and Park, J. S. (2010). "Earthwork plan using the precise 3D topographic data." *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 18, No. 1, pp. 63-72 (in Korean).
- Lee, S. S., Kim, K. N. and Seo, J. W. (2008). "Analyzing effect factor in earthwork and skillful excavator operator's behavior." *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, Civil EXPO 2008*, KSCE, pp. 1867-1870 (in Korean).
- Lee, W. S., Song, S. H., Lee, S. S. and Seo, J. W. (2007). "A study on the design of task planning system for intelligent excavating system (IES)." *Proceedings of the Korea Institute of Construction Engineering and Management, KICEM*, pp. 921-924 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MOLIT) (2015). *Technology policy division: Press Release 20015-1-22* (in Korean).
- US Department of Energy (2015). "Berkeley lab promotes low-carbon cities in china." *Energy Analysis & Environmental Impacts Division News*, Available at: <http://eaei.lbl.gov/>.