

자동화 토공을 위한 3D 토량배분과 탄소발생량 추정

김성근*

Kim, Sung-Keun*

3D-based Earthwork Planning and CO₂ Emission Estimation for Automated Earthworks

ABSTRACT

The former researches on earthwork automation were mainly focused on GPS and sensor application, environment modelling, equipment path planning, work information management, and remote control etc. Recently, reducing CO₂ emission becomes one of main focuses for an automation research. In the case of earthwork operations, many kinds of construction machines or robots are involved, which can cause high level of CO₂ in a construction site. An effective earthwork plan and construction machine operation can both increase productivity and safety and decrease CO₂ emission level. In this research, some automation concepts for green earthworks are suggested such as a 3D construction site model, a 3D earthwork distribution based on two different earthwork methods, and an earthwork package construction method. A excel-based simulator is developed to generate the 3D earthwork distribution and to estimate the level of CO₂ emission for the given earthwork.

Key words : Earthwork, Automation, Low-Carbon, Job Planning, Simulator

초록

기존의 토공 자동화 연구들은 주로 GPS와 센서의 응용, 작업환경 모델링, 장비 진로계획, 작업 정보관리, 원격조정 등과 같은 주제에 관심을 두었다. 최근에는 건설자동화 연구분야에서 CO₂ 감축이 주요 관심사의 하나로 대두되었다. 토공작업의 경우에는 많은 종류의 건설장비나 로봇들이 관여되므로 건설현장에서 많은 양의 CO₂를 배출하는 작업이 되고 있다. 효과적인 토공계획과 건설장비 운영은 생산성 및 안전성을 증가시킬 뿐만 아니라 CO₂ 배출량도 줄일 수 있다. 본 연구에서는 3D 토공현장 모델, 2가지 시공법에 의한 3D 토량배분 방법, 토공작업 패키지 구성방법과 같은 그린 토공을 위한 몇 가지 자동화 개념을 제시하고 있다. 엑셀로 작성된 시뮬레이터를 개발을 통하여 주어진 토공작업에 대하여 3D 토량배분 계획을 수립하였고 CO₂ 배출량을 추정하였다.

검색어 : 토공, 자동화, 저탄소, 작업계획, 시뮬레이터

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

지금 세계는 2005년 교토의정서 발효를 계기로 탄소배출을 최소화하기 위한 노력을 하고 있으며, 2011년 12월에 있었던 “더반의 유엔 기후변화 협의”에서는 중국과 인도가 탄소배출을 제한하는 교토의정서 2기에 동의하면서 재생에너지 산업과 탄소배출권 산업이 매우 중요하게 대두되고 있다. 세계적인 경제침체로 건설시장의 규모가 소폭 감소하는 추세를 보이고 있지만, 전체 건설시장에서 그린건설의

* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Associate Professor, Seoul National University of Science and Technology · cem@seoultech.ac.kr)

Received February 8 2013, Revised February 13 2013, Accepted February 18 2013

규모는 매년 늘어나고 있는 추세이다. 그린건설시장을 주도하는 시장이 기존에는 유럽(EU)였지만 점차 녹색시장에 무관심했던 미국, 캐나다, UAE, 필리핀, 및 인도 등과 같은 개발도상국에 의하여 형성되고 있다. 특히 미국의 경우에는 건설분야에서 탄소저감을 위한 노력으로 친환경 건설기술 개발 및 자재, 시공법 변화에 대한 R&D 투자를 꾸준히 하고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 국내 건설업도 탄소시장에 대비할 방안을 마련하는 것이 필요하다.

기존의 건설자동화 연구는 건설생산성 향상, 부족한 노동력 대체, 시공품질 향상, 및 공기단축 등과 같은 목적으로 결과물들을 산출하였다. 최근 친환경 건설기술개발에 대한 요구가 많아지는 상황에서 건설자동화 연구에 기존에 추구하던 목적의 달성과 더불어 그린건설에 관한 개념을 도입해야 할 필요가 생겼다. 본 연구는 저탄소 자동화 토공시스템을 위한 요소기술을 개발하는데 목적을 두고 있다. 자동화 토공작업시 저탄소, 저에너지 달성을 위한 방법론을 개발하고자 한다. 궁극적으로는 다수 및 다종의 건설장비(멀티 에이전트)가 사용되는 환경에서 전체 시스템 효율을 최대화하고 탄소배출을 최소화하는 자동화 시스템을 개발하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 건설공종 중에서 가장 기본이 되며 다양한 건설장비가 사용되어 다른 공종에 비하여 탄소배출량이 높은 토공작업(단지토공)을 대상으로 하고 있다. 주어진 정보를 이용하여 자동으로 단지토공을 위한 토공작업 계획을 세우고 건설장비의 운영을 효율화하여 생산성 향상 및 탄소배출을 감축할 수 있는 요소기술을 제시하고자 한다. 저탄소 자동화 토공작업을 위한 요소기술 중에서 토공현장

모델링 기술, 토공작업 패키지 개념, 토공시공법에 따른 3D 토량배분 및 토공작업 CO₂량 산출을 연구의 범위로 한다.

우선적으로 토공작업 프로세스를 이해하고 단지개발을 위한 토공작업 정보모델을 구성하고, 이것을 기반으로 최적화 기법을 적용하여 토공시공법별로 효율적인 토량배분 프로세스를 제시한다. 그리고 최적의 토공작업 패키지 구성과 토공시공법의 특성을 반영하여 배출되는 CO₂량을 추정해 보고자 한다. 연구진행 프로세스는 다음 Fig. 1과 같다.

2. 관련 기술동향

최근에 토공작업을 효율적으로 자동화 할 수 있도록 설계정보와 원지반에 대한 형상정보에 기반을 둔 계획, 장비의 실시간 위치 자동인식, 수립된 계획에 따른 굴삭기 자율주행 등과 같이 굴삭기에 계획기능, 원격조정 및 자율제어기능을 부여하는 요소기술을 개발하고 프로토타입을 완성하는 연구(Kim 외, 2012)가 진행되었다. 하지만 토공계획부분에 있어서는 성토작업은 제외하고 절토작업에만 한정되는 한계를 갖고 있다.

토량배분에 관한 연구들을 살펴보면 1차원적인 선형토공의 최적화에 관한 것이 주를 이루고 있으며, 단지토공과 같은 2차원적인 토량배분에 관한 연구(Lee 외, 2003; Lee 외, 2010; Kang 외, 2011)는 제한적으로 수행되었다. 실제 현장적용에는 아직도 설계자의 경험에 의존하여 2차원적인 토량배분을 실시하거나 LH공사에서 개발한 DAS라는 단지설계프로그램을 이용하고 있는 실정이다. 기존의 방식으로는 자동화 토공에 사용하기 위한 토공량 산출의 정확도 및 효과적인 토공계획 측면에서 제약점을 갖고 있다.

LCA와 관련된 연구는 에너지관리공단, 산업자원부, 환경부 등에서 LCA 수행방법, 평가기법 개발, LCI DB구축과 관련한 연구가 추진되었다. 건설분야에서는 건축물을 대상으로 LCA기법의 적용방법, 설비시설의 LCA적용, 전과정에서 발생하는 CO₂ 배출량 산정, 건축자재의 LCA적용에 관한 연구가 수행되어 왔으며, LCA 평가방법을 활용하여 환경비용을 산출하기 위한 연구들이 수행되어 왔다. 사회기반 시설물에 관련하여 상하수도시설, 도로시설, 교량시설, 항만시설, 발전시설 등을 대상으로 전과정 단계별 환경부하 분석, 투입되는 자재 및 장비별 에너지 사용량 도출, 발생하는 배출물질들의 정량화를 통한 환경부하평가, 친환경 설계에 관한 연구가 수행되었다. 2000년도 이후에 비시장제인 환경제에 관하여 환경비용을 환산하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 본 연구와 직접적으로 연관이 되는 최근 연구사례를 살펴보면 다음 Table 1과 같다.

탄소저감에 관한 대부분의 연구들은 특정 시설물의 생애주기 동안 발생하는 탄소배출량을 예측하고 어떤 단계가 환경부하를

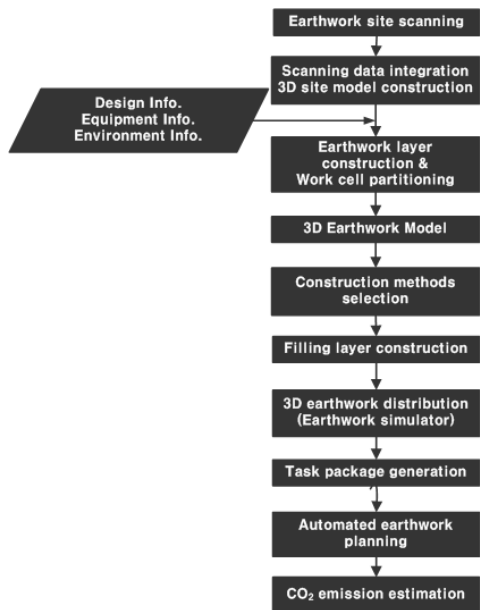


Fig.1. Research Process

Table 1. Related researches on Low carbon

Author (Year)	Contents	Remark
Kim (2011)	· Analyze the correlation of equipment combination, CO ₂ emission and duration.	CO ₂ emission estimation for construction equipment
Kim et al. (2010)	· Suggest WBS for integrated information management for cost, construction document and drawing. · Suggest a system architecture for integrated analysis of VE/LCC and LCA.	LCC and LCA Integration
Moon (2009)	· Perform environment impact assessments for multiple road constructions to ascertain environmental stress at the initial road construction phase. · Provide the process for environment impact assessment and conduct sensitivity analysis for the key materials used for road construction.	LCA for road constructions
Cass et al. (2011)	· Suggest a method that can be used to develop and analyze life-cycle inventories at the construction phase. · Propose a shift to a context-sensitive process-based approach that uses actual observed construction data to calculate greenhouse gas emissions using a hybrid LCA.	LCA for road constructions

많이 발생 시키는지에 관한 분석을 실시한 것과 사용되는 건설재료를 달리하여 탄소배출을 줄이는 방안을 제시하는 것이 대부분이었다. 새로운 공사 프로세스, 효과적인 작업계획 및 시공법을 적용하여 탄소배출을 줄이기 위한 연구는 아직 미흡한 편이다.

3. 토공계획 모델

3.1 토공작업을 위한 고려요소

토공작업에 영향을 주는 요소들로는 공사의 특성(공사의 종류와 규모 등), 건설장비의 특성 (종류, 규격, 효율, 고장률, 사이클타임, 주행성, 장비조합 등), 현장조건 (날씨, 흙의 종류 및 상태, 지장물 유무, 지표수 및 지하수 상태, 공사용 도로상태 등), 그리고 작업조건 (작업계획, 작업공간 제약, 운전자 숙련도 등)으로 구분될 수 있다 (Kim 외, 2005). 본 연구에서는 토공작업시 투입되는 다양한 건설장비의 효율적인 움직임과 운영을 통한 생산성 향상과 CO₂ 저감 목표를 달성하기 위하여 작업조건 세부항목 중에서 자동화 토공에 적용될 수 있는 작업계획(토량배분계획)을 중점 고려요소로 간주하고 있다.

3.2 토공현장 분할

3.2.1 토공현장 3D 지형모델 형성

토공현장 분할 모델을 구성하기 위하여 3D 스캐너를 이용하여 지형을 스캔한 이후에 얻어진 포인트 클라우드 (Point cloud)를 기반으로 3차원 지형모델을 구성하게 된다.

Leica사의 3D 스캐너를 장착한 차량을 이용하여 토공현장 내에 스캔 대상 구역을 설정한 후에 스캐닝 작업을 통하여 현장 지형을 나타내는 원시 스캔데이터(포인트 클라우드)를 생성한다. 이것을 이용하여 삼각망(Mesh)을 구성하여 현장 지형모델을 생성하게 된다. 토공현장의 크기가 큰 경우에는 한번의 스캐닝 작업을 통하여

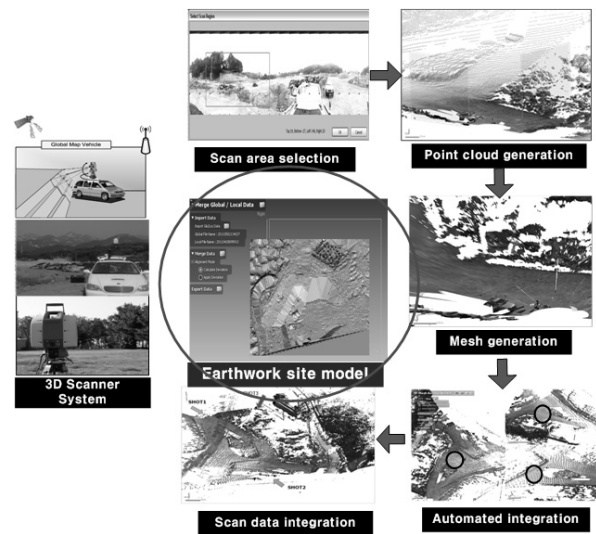
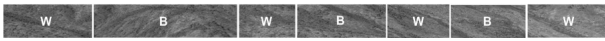


Fig. 2. 3D modeling process for an earthwork site

토공현장 전체의 모델을 얻을 수가 없다. 이러한 경우에는 토공현장 내에 몇 개의 구형타켓을 설치하여 놓고 다양한 위치에서 스캐닝을 하여 하나의 좌표계로 일치화 시키는 과정(정합과정)을 거쳐서 얻어진 스캐닝 데이터를 하나의 데이터 셋(Set)으로 재구성하여 최종적인 토공현장 지형모델을 완성하게 된다. 상기의 절차에 따라서 형성된 토공현장 지형모델은 절성토량 계산과 토공작업계획을 세우는데 사용된다.

3.2.2 선토공시 토공현장 분할

선토공은 도로, 철도, 축제 등과 같은 노선공사에 사용되는 것으로 폭이 좁고 길이가 긴 형태로 구성된 토공현장에서 이루어진다. 기존에는 측량을 통하여 종단면도와 횡단면도를 작성하여 토량계산서를 작성하고 이것에 근거하여 토적곡선을 작성한다. 토적곡선



* Note: B: Cutting area, W: Filling area

Fig. 3. 1D partitioning for an earthwork site

을 이용하여 토량이동을 계획하며 운반거리에 따른 건설장비를 선정한다. 또한 시토장 및 토취장의 위치도 토적곡선의 토량 누계량을 참고하여 위치를 선정한다. 하지만 기존의 방법은 계략적인 토량이동만을 계획할 수 있을 뿐 최적화의 개념에서는 효율적이지 못한 측면을 갖고 있다.

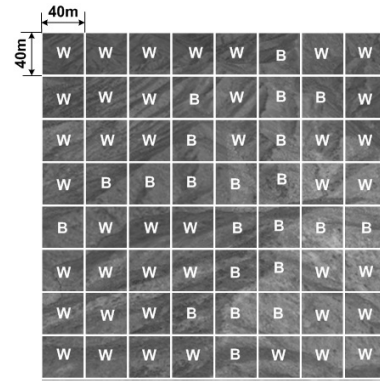
도로 및 철도 현장도 3D 스캐너를 이용하여 토공현장 지형모델링이 가능하며 Fig. 3에서와 같이 1D 토공현장의 모델을 구성할 수 있다. 토공현장의 분할은 기공기면을 기준으로 절성토가 바뀌는 지점을 기준으로 하여 세부구역을 나누게 된다. 각 구역의 길이는 현장의 조건과 절성토량에 따라서 달라지게 된다. 기본적으로 최종적인 시공기면 위치를 결정하면 각 구역별로 절성토량을 계산할 수 있으며 이것을 바탕으로 절성토 구역을 구분하고 절성토구역(B)에서 성토구역(W)로 토량이 이동하는 Graph를 구성하면 최소비용흐름문제(Minimal cost flow problem)로 구성하여 최적해를 찾을 수 있다.

1D 토공현장의 분할 사례는 Ji 외(2010)의 연구에서 찾아볼 수 있는데 장거리의 도로공사 프로젝트를 수행하는 경우 자기 다른 회사에 의하여 시공이 되는 경우에 어떻게 토공현장을 세부단위의 토공현장으로 분할하여 시공을 하는 것이 절성토 균형을 맞추면서 세부단위 토공현장간 토량의 이동이 최소화되는지에 관한 해결책을 제시하고 있다.

3.2.3 면토공사 토공현장 분할 및 작업 레이어

면토공은 단지개발, 대규모 택지조성 및 지역개발 등과 같이 선토공 보다는 길이가 짧지만 폭이 넓게 구성된 토공현장에서 이루어진다. 일반적으로 단지개발을 위한 토량의 배분방법은 선토공과 같이 노선의 횡단면을 기준으로 평균토량을 계산한 토적곡선을 이용하여 배분하는 방식으로는 최적의 토량이동 계획을 세우는 데 부적절하다. 일반적으로 면토공계획은 평면도상에서 Fig. 4와 같이 40m간격의 방안망을 구성한다. 각 방안망의 절성토의 누적토량을 구한 토량계산서를 작성하고, 여기서 산출된 무대량, 잔토량, 부족토량을 기입하여 2차원적인 이동량을 산출하는 절차로 진행된다.

기존의 2차원적인 토공현장 분할과 토량계산 방법으로 계략적인 토량 이동계획을 세울 수 있지만 작업자 레벨 또는 건설장비운영 측면에서 최적화되어 있는 토량 이동계획의 수립은 어려우며 자동화 시공에 적용할 수 없는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 자동화 시공을 고려하여 건설장비의 운영측면에서 효과적이며 최적의 토량이동계획을 통하여 탄소발생량도 저감할 수 있도록 3차원



* Note: B: Cutting area, W: Filling area

Fig. 4. 2D partitioning for an earthwork site

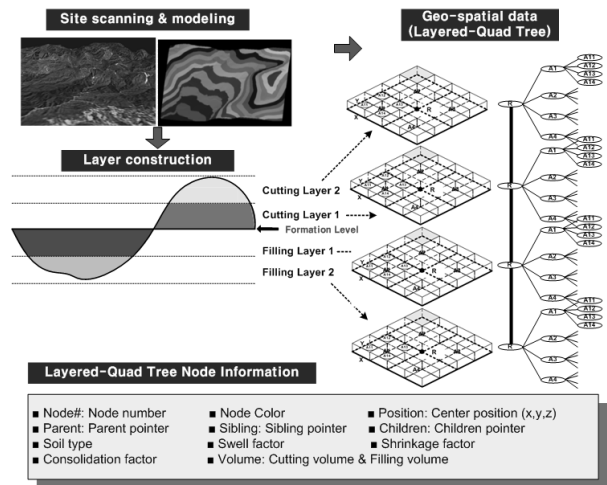


Fig. 5. Data structure for an earthwork site and Information model for a node (Kim et al., 2012b)

적인 토공현장 정보모델을 구성하였다. 토공현장 3D 정보모델은 상기에서 언급된 바와같이 3D 스캐너를 이용하여 지형을 스캔한 이후에 3차원 지형모델을 구성하고 절성토의 균형과 토량이 이동의 최소화를 고려하여 단지의 시공기면을 결정하게 된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 여러 층의 Cutting Layer(절성층)와 Filling Layer(성토층)으로 구분하게 된다.

각 Layer의 높이는 Cutting Layer의 경우에는 건설장비의 제한과 건설장비가 작업시 지반이 붕괴되지 않는 높이를 고려하여 안전을 유지할 수 있는 높이인 4m 미만으로 설정하는 것이 적절한 것으로 판단된다. Filling Layer의 경우에는 흙쌓기법에 따른 1회 성토높이와 작업시 성토사면이 붕괴되지 않는 깊이를 고려하여 결정하게 되는데 전방쌓기법의 경우에는 전문가의 의견에 따르면 5m 미만으로 설정하는 것이 타당한 것으로 나타났으며, 수평층쌓기법 중 하천제방, 도로 및 철도의 축제에 이용되는 후층쌓기는

Layer 높이를 1.2m 미만으로 그리고 흙댐 및 구조물의 뒤채움에 이용되는 박층쌓기는 Layer 높이를 0.6m 미만으로 하는 것이 타당한 것으로 조사되었다. 특히 수평층 쌓기법에 의한 성토인 경우에는 기초지반의 침하를 방지하기 위하여 성토재료는 다짐 후 층당 두께가 0.2m 이하가 되도록 균일하게 포설한 후에 다짐을 하도록 규정하는 경우가 많았다.

Layer를 구성한 이후에 각 Layer 정보를 Layered-Quad Tree (Kim 외, 2012)라는 자료구조를 이용하여 저장하게 된다. 이 자료 구조는 토공작업이 층별로 이루어지는 작업특성을 고려하여 효과적으로 작업진행에 관한 정보를 다루기 위하여 개발된 것이다. 하나의 Layer는 기존의 Quadtree 자료구조의 특성에 따라 여러 개의 Cell(Node)로 분할되게 되며, 하나의 Cell은 단지개발시 사용되는 방안망의 크기(40m×40m)와 동일하게 설정하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 각각의 Cell(Node)은 노드의 위치정보, 자료구조에서의 연결정보, 절성토를 구분하는 정보, 작업대상 토질의 종류와 특성에 관한 정보, 작업토량에 관한 정보 등을 포함하고 있다.

3.3 토공작업 패키지

3.3.1 노드 색 정보

토공현장의 지형정보는 Layered-Quad Tree 자료구조를 이용하여 저장된다. 각 Layer는 다수의 노드로 구성되며 노드가 포함하는 정보 중에서 절성토를 구분하는 정보로 노드 색을 이용하고 있다.

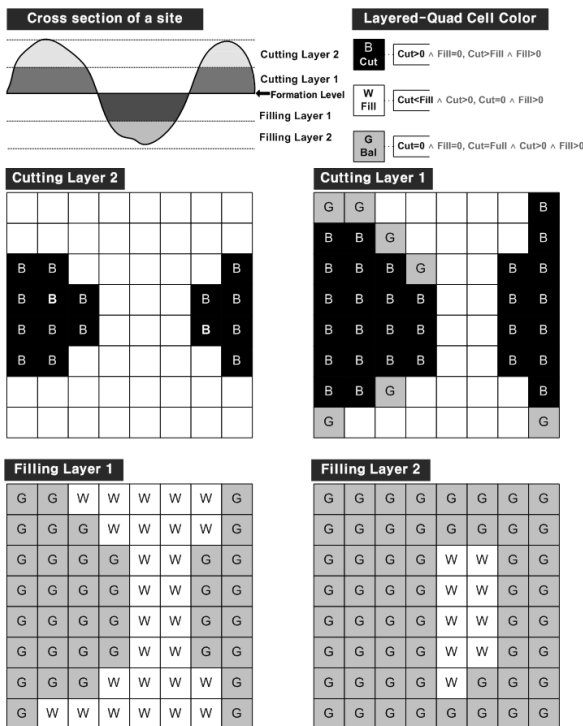


Fig. 6. Layer construction and Node color information

노드의 색이 검정색(B)이 되면 절토구역이 되며, 노드의 색이 흰색(W)이면 성토구역이 된다. 그리고 노드의 색이 회색(G)이면 해당 구역은 절성토의 양이 같거나 시공기면상에 위치하고 있으면서 추가적인 작업이 필요없는 구역을 나타내는 것이다. 노드에 색이 부여되어 있지 않은 경우(무색)에는 해당 구역은 원래 작업대상 토사가 존재하지 않으며 작업대상 구역에 포함되지 않는 것을 의미한다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 주어진 원지반에 따라서 토공현장이 2개의 Cutting Layer와 2개의 Filling Layer로 구성되어 있다면 Cutting Layer에 속한 노드들의 색은 검정색, 회색 및 무색으로 구성되며, Filling Layer에 속한 노드들의 색은 회색과 흰색으로 구성된다. 검정색 노드는 토량을 공급하는 Source 노드가 되고 흰색 노드는 토량을 공급받는 Target 노드가 된다. 효율적인 토공작업을 수행하기 위하여 어떤 Source에서 어떤 Target으로 토량이 이동시켜야할지를 결정해야 한다.

3.3.2 토공작업 패키지 구성

Layered-Quad Tree를 이용하여 토공현장 정보모델이 완성된 이후에 Fig. 7에서 보는 바와 같이 단지조성을 위한 토공작업 패키지(Earthwork Package)를 5가지 형태(Kim 외, 2003)로 구분한다. Cutting Layer에 존재하는 검정색(B)노드에서 Filling Layer에 존재하는 흰색(W) 노드로 배분되는 형태(Type1), B에서 W로 일부 토량을 배분하고 남은 절토량을 사토장으로 배분하는 형태(Type2), B의 절토량 전부를 유용토로 사용하지 못하고 모두 사토

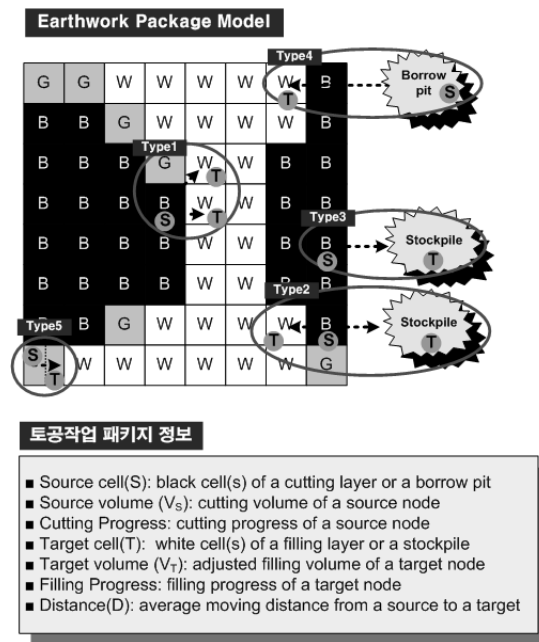


Fig. 7. Earthwork package (Kim et al., 2012b)

장으로 배분하는 형태(Type3), 절토량이 성토량 보다 적어서 토사장에서 W로 배분하는 형태(Type4), 그리고 동일한 Cell 내에서 절성토 작업이 이루어지는 형태(Type5)로 구분된다.

한 현장의 토공작업은 상기에 언급된 5가지 작업유형의 집합이 되며, 5가지 유형을 구성하기 위해서는 최적화 기법을 이용하여 절토 노드(B)와 성토 노드(W)를 매칭 시켜주는 단계를 거쳐야 한다. 여러 가지 최적화 기법 중에서 수송모델을 이용하였으며 이동비용은 Source 노드에서 Target 노드까지의 거리로 산정하였다. 패키지 구성의 최적화가 전체 시스템의 작업시간 단축과 탄소를 저감할 수 있도록 해 준다.

토공 작업모델 패키지는 절토구역(B)과 성토구역(W)의 매칭에 관한 정보, 절성토량 및 3차원 공간상에서 운반거리에 관한 정보를 포함한다.

3.3.3 토공작업 패키지 적용

하나의 토공작업 패키지는 최적화 기법에 의하여 절성토량 균형 및 운반거리 등을 고려하여 구성이 된다. 개별적인 토공작업 패키지는 최적화(로컬 최적화)되어 있지만 전체 토공작업의 관점에서는 최적화가 되지 않은 경우도 있으므로 구성된 모든 토공작업 패키지 사이에 작업의 우선순위를 고려하여 전체의 최적화(글로벌 최적화)를 도모해야 한다. 전체 토공시스템의 생산성 향상을 고려하여 토공작업 패키지들의 작업수행 우선순위를 정하고 1일 투입 가능한 건설장비의 종류와 대수를 고려하여 토공 공정계획을 수립한다.

공정계획을 수립한 이후에는 토공작업 패키지를 이용하여 진도 관리를 실시한다. 전체 토공사를 구성하는 토공작업 패키지들의 절토(B) 노드에서의 완료된 절토량의 합과 성토(W) 노드에서의 완료된 성토량의 합을 실시간으로 계산하여 토공현장 3D 모델에서 얻어진 전체 절성토량과 비교하여 진도율을 측정할 수 있다.

$$CuttingProgress = \frac{\sum_{i=1}^m CV_{Si}}{Total\ Cutting\ Volume}$$

$$FillingProgress = \frac{\sum_{j=1}^n FV_{Tj}}{Total\ Filling\ Volume}$$

$$TotalProgress = \frac{CuttingProgress + FillingProgress}{2}$$

여기서, CV_{Si} = i번 절토노드(Source)에서의 완료된 절토량 (Completed cutting volume), FV_{Tj} = j번 성토노드(Target)에서의 완료된 성토량 (Completed filling volume)

투입되는 건설장비의 작업능률 향상을 위하여 현재 수행이 되어야 하는 토공작업 패키지를 고려하여 건설장비의 조합을 결정하는데 사용한다. 토공사의 효율에 영향을 미치는 여러 가지 요소가 있지만 공사 구역내의 토량배분을 효과적으로 하는 것과 건설장비를 효율적으로 운영하는 것이 매우 중요한 요소가 된다. 투입되는 건설장비의 조합을 Equipment Cluster라고 하며 전체 토공시스템의 효율 개선을 위하여 Equipment Cluster의 크기는 고정되어 있는 것이 아니라 주어진 토공작업 패키지에 따라서 변화한다. 예를 들면, 굴삭기 2대와 트럭 10대가 투입되어 동시에 2개의 토공작업 패키지를 동시에 수행할 수 있는 경우라면, 처음에는 각 Equipment Cluster가 굴삭기 1대와 트럭 5대로 구성되어 작업을 시작했지만 공사가 진행되면서 이후에 수행을 해야만 하는 토공작업 패키지의 특성을 고려하여 굴삭기 1대와 트럭 3대, 그리고 굴삭기 1대와 트럭 7대로 재구성할 수 있다. 즉, 주어진 상황에서 전체 시스템의 효율성을 높일 수 있도록 Equipment Cluster가 재구성되는 것이다.

4. 시공법에 따른 토량배분

4.1 전방 쌓기법을 위한 토량배분 프로세스

전방 쌓기법은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 성토구역을 향하여 전방으로 토사를 투하하는 공법으로 공사비가 저렴하며 안식각이 자연스럽게 이루면서 시공속도를 빠르게 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 다짐이 부족하여 구조물 축조시 침하가 많이 발생하는 단점을 갖고 있다. 주로 매립지 등의 대단위 공사에 사용되며 도로 및 철도 등의 낮은 축제에도 사용된다.

전방 쌓기법을 위한 토량배분은 각 Cutting Layer의 절토구역(Black cells)에서 절토한 토량을 시공기면 이하에 위치한 Filling Layer의 성토구역(White cells)으로 배분하게 된다. 전방 쌓기법은 시공기면 이하의 성토구역에 대하여 Layer의 구분없이 절토구역에서부터 가까운 곳에서부터 순차적으로 성토를 해 나가는 특성이 있다. 이러한 특성을 고려하여 Filling Layer들의 성토정보를 하나로 통합한 Integrated Filling Layer를 형성하여 토량배분을 실시한다. 만약 Fig. 6에서와 같은 현장조건에서 2개의 Cutting layer와 2개의 Filling layer로 구성되는 경우에 전방 쌓기법을 적용한다면 Fig. 9에서와 같이 2개의 Filling layer가 1개의 통합된 레이어로 구성된다. Integrated filling layer에 속한 노드의 성토량은 기존에 여러 개로 분할된 Filling layer에 속한 노드의 중심좌표값 중에서 동일한 (x,y)값을 가지는 노드의 성토량을 총합하여 결정한다. 붉은색 점선으로 표시된 노드들의 성토량은 기존의 2개의 Filling layer에 속한 노드의 성토량을 합하여 결정된다. 토량배분은 다수의 Cutting layer에서 1개의 통합된 Filling layer로 배분되는 형태를 이루게 된다.

하게 된다. Fig. 10에서와 같은 경우에는 Cutting layer4에서부터 Cutting layer1번에 이르기까지 순차적으로 토공작업 패키지를 구성하기 위한 절토구역(Black cells)을 선정하게 되며, Filling layer4에서부터 Filling layer1번에 이르기까지 순차적으로 성토구역(White cells)을 선정하여 절성토 구역을 매칭하게 된다. 다수의 Cutting layer에서 다수의 Filling layer로 토량이 배분되는 형태를 이루게 된다.

5.3D 토량배분

5.1 토량배분 알고리즘

전방 쌓기법 또는 수평 쌓기법의 시공방법에 따라서 절토구역(B)과 성토구역(W) 구성이 완성되면, Fig. 11과 같이 m개의 절토구역(B_i)에서 n개의 성토구역(W_j)으로 절토한 유용토를 최소의 비용으로 운반하고자 하는 경우, 이를 선형계획법으로 나타내면 다음식(Lee 외, 2003)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min.} \quad & [C_{11}X_{11} + C_{12}X_{12} + \dots + C_{1n}X_{1n}] \\
 & + [C_{21}X_{21} + C_{22}X_{22} + \dots + C_{2n}X_{2n}] \\
 & + [C_{m1}X_{m1} + C_{m2}X_{m2} + \dots + C_{mn}X_{mn}] \\
 \text{s.t.} \quad & X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} \leq B_1 \\
 & X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2n} \leq B_2 \\
 & \vdots \\
 & X_{m1} + X_{m2} + \dots + X_{mn} \leq B_m \\
 & X_{11} + X_{21} + \dots + X_{m1} \geq W_1 \\
 & X_{12} + X_{22} + \dots + X_{m2} \leq W_2 \\
 & \vdots \\
 & X_{1n} + X_{2n} + \dots + X_{mn} \geq W_n \\
 & X_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j
 \end{aligned}$$

여기서, C_{ij}는 B_i에서 W_j로 토량을 운반하는데 필요한 비용, X_{ij}는 B_i에서 W_j로 운반되는 토량

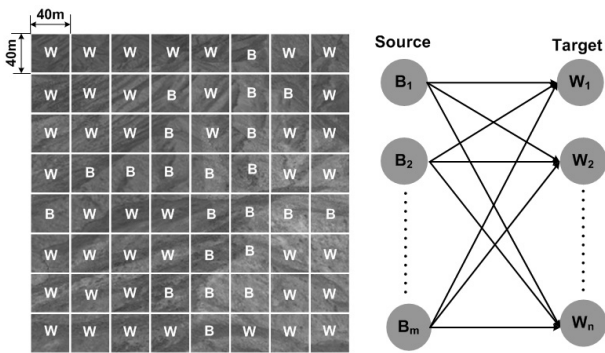


Fig. 11. Network construction for earthwork distribution

5.2 토량배분시 운반비용의 적용

본 연구에서는 절토구역에서 성토구역으로의 이동경로의 길이를 운반비용으로 정의하며, 기본적으로 토량을 운반하는데 필요한 비용은 절토구역의 중심좌표에서 성토구역의 중심좌표에 이르는 직선거리를 의미한다. 이 거리는 절토된 토량을 성토구역으로 운반하기 위하여 건설장비가 움직이는 1회 평균이동거리로 간주될 수 있다. 만약 토공작업 수행되는 현장에서 작업시행에서 제외되어야 하는 제척지가 존재하는 경우에는 건설장비의 이동경로가 제척지를 통과하지 않도록 해야만 한다. 즉, 제척지를 포함하는 경우에는 토량을 운반하는데 필요한 비용 계산시 단순히 절토구역과 성토구역의 중심좌표간의 거리만을 고려해서는 안 되며 제척지를 우회하는 거리를 운반비용으로 적용해야만 한다.

기존 제척지를 고려하여 운반경로를 결정하는 연구를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 12(a)의 경우에는 절토구역과 성토구역 사이에 제척지가 존재하는 경우에는 제척지를 가로지르는 경로를 택하지 않고 제척지 주위의 다른 구역의 중심좌표를 통과하는 경로를 선택하고 있다. 이러한 경로는 다소 긴 운반경로를 생성하게 되어 비용이 커지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 12(b)에서와 같이 가시점 길찾기 방법(Visibility path-finding)을 이용하여 좀 더 짧은 이동경로를 생성할 수 있도록 제안하고 있다. 하지만 실제로 건설장비가 움직이는 이동경로를 고려하는 경우에는 가시점 길찾기 방법에 의해 생성되는 이동경로는 제척지를 표시하는 부분의 경계선을 따라서 생성되므로 건설장비의 이동시 제척지를 침범하는 문제점이 발생한다. 따라서 Fig. 12(c)에서와 같이 제척지를 포함하는 다각형의 외부에 건설장비의 크기를 추가로 고려하여 제척지의 크기를 확장 시키는 형태 공간(Configuration space) 개념을 적용함으로써 건설장비가 제척지를 침범하지 않고 이동할 수 있는 방법을 본 연구에서 제안하고 있다.

Fig. 12(b)와 Fig. 12(c)에서 생성되는 이동경로는 비슷한 모양을 나타내고 있으나 생성방법은 차이가 있다. Fig. 12(b)의 경우에는 제척지 폴리곤의 위상을 생성하고 가시점 경로 그래프를 형성한 후 A* 최단경로검색 알고리즘을 적용하여 경로가 가장 짧은 운반경로를 생성하는 것이다. Fig. 12(c)의 경우에는 토공현장에 존재하는 제척지 및 각종 장애물들에 대하여 C-space 장애물을 설정하고

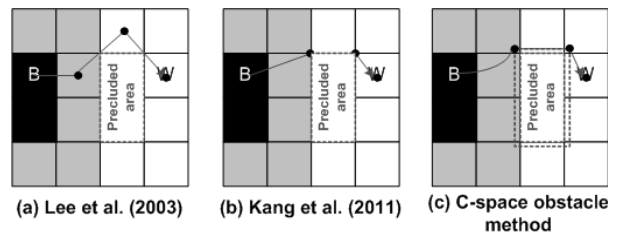


Fig. 12. Moving cost determination considering a precluded area

SensBug (Kim 외, 2003b) 알고리즘을 적용하여 운반경로를 생성한 것이다.

5.3 토량배분 시뮬레이터

기존에 수작업에 의하여 수행되던 단지토량배분을 자동화하기 위하여 Excel기반의 토량배분 시뮬레이터를 개발하였다. 토량배분 알고리즘은 최적화 모델 중의 하나인 수송모델을 기본으로 하였다. 특정 Cutting Layer를 Source로 Filling Layer를 Target을 설정하게 되어 있으며, 전체 이동비용(이동거리)가 최소화되도록 토공작업 패키지를 형성한다. 특정 Black Cell에서 특정 White Cell로 배분되는 토량이 표시되도록 하였다. Source와 Target의 전체 토량이 균형을 이룰 수 있도록 사토장과 토사장을 추가하여 시뮬레이션 할 수 있다.

또한 토공작업에 투입되는 건설장비의 작업량 및 연료소모량 산출을 위한 기본데이터로 사용함으로써 토공작업을 수행하면서 발생한 온실가스 발생량의 산출을 수행할 수 있도록 하였다. 지구온난화 물질의 산출은 LCA(Life Cycle Assessment)분석을 통해 환경부하량을 산출하는 환경성적표지 전용 전과정평가 소프트웨어 TOTAL의 분석결과를 바탕으로 이루어진다. 시뮬레이터는 토공량 산출 테이블, 토량 이동거리 산출 테이블, 지구온난화 물질 산출 테이블로 구성되어 있으며 각각의 테이블은 서로 연계되어 있다 (Fig. 13).

시뮬레이터는 토공현장에 투입된 장비의 효율산출을 위한 Worksheet와 절토구역의 레이어 정보를 담고 있는 Worksheet (C1, C2, ... Cn : n은 절토구역 총 레이어 수), 성토구역의 레이어 정보를 담고 있는 Worksheet(F1, F2, ... Fn : n은 성토구역 총 레이어 수), 그리고 토량배분을 위해 절토 Layer와 성토 Layer의 Layer Match가 이루어지는 Worksheet(Step1, Step2... Step n : n은 총 matching 횟수)로 구성되며 토량배분 Worksheet에는 Layer Match에 의한 토공작업의 최종결과가 종합적으로 나타난다. Fig. 13의 A는 SourceCell134의 절토량 100m³가 TargetCell 244의 성토에 사용되었음을 의미한다. 이때 유용토의 이동거리는 Fig. 13의 B에 나타나게 되며 이동거리는 토량배분이 이루어지는 두 셀(40m×40m×H(절토 및 성토깊이))의 3차원 공간상의 거리를 의미한다. 유용토의 이동거리에 따라 건설장비의 조합이 결정되는데 본 시뮬레이터에서는 토공작업의 일반적인 기준에 따라 40m 이하의 이동거리에서는 굴삭기의 무대토공을 수행하고 40m 초과-60m이하의 거리에서는 불도저의 사용, 60m를 초과하는 이동 거리에 대해서는 굴삭기와 덤프트럭의 장비조합을 선택하였다. 이동 거리에 따라 선택된 장비와 해당 셀에서의 토공작업량에 근거하여 산출된 건설장비의 에너지(유류) 소비량은 지구온난화 물질 산출을 위한 기본 데이터가 된다.

본 연구에서는 LCA 분석을 활용하여 건설장비에 의해 발생하는 환경부하물질을 정량적으로 산출하였다. LCA는 국제표준화 기구의 14040's에서 정의하고 분석 절차를 규정하고 있다. ISO 14040's에 의하면 목적 및 범위정의(Goal and scope definition), 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 전과정 해석(Life Cycle Interpretation)의 단계로 구성되어 있다. 본 연구에서는 토공작업을 수행하는 과정에서 건설장비가 소모하는 경유와 휘발유에 의해 발생하는 6가지 영향범주(자원소모 : ADP, 지구온난화 : GWP, 오존층영향 : ODP, 산성화 : AP, 부영양화 : EP, 광화학적산화물생성 : POCP) 중 지구 온난화 영향범주의 물질을 환경부하의 대상으로 설정하였다.

LCA 분석을 위하여 환경부와 한국환경산업기술원에서 개발한

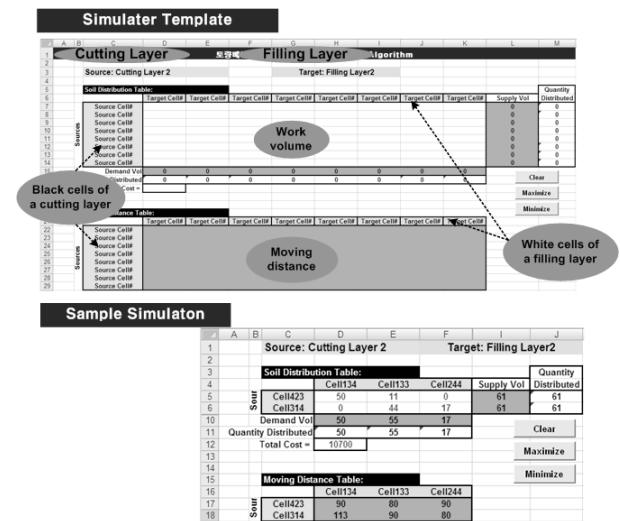


Fig. 13. Earthwork distribution simulator

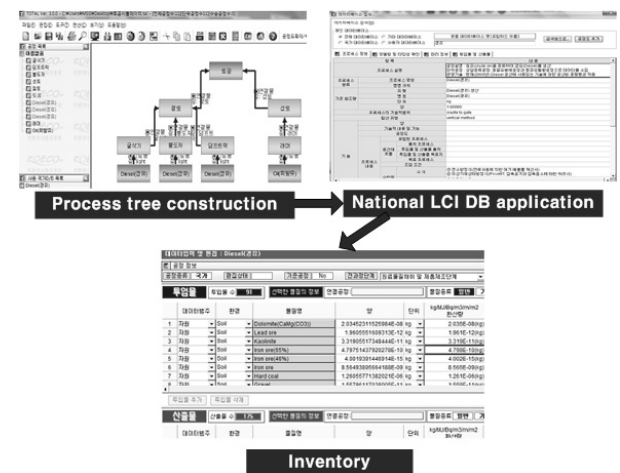


Fig. 14. TOTAL application for Earthwork LCA

환경성적표지 전용 LCA 소프트웨어 TOTAL Ver.4.0.13을 사용하였으며 TOTAL의 구동을 위하여 토공작업에 대한 공정트리를 생성하고 목록을 구성하여 지구온난화 물질에 대한 정량적 산출을 수행하였다(Fig. 14).

TOTAL의 LCA 분석은 LCI DB는 국가데이터베이스(지식경제부, 국토해양부, 환경부의 LCI DB)를 기반으로 그 결과가 산출되며 본 연구에서는 건설장비에 사용되는 경유와 휘발유 LCI DB를 활용하였다. 이와 같은 과정은 Layer Match의 횡수만큼 반복되어 Step n Worksheet에 저장되며 Layer Match가 최종적으로 종료되면 토공분배 Worksheet에 모든 Layer Match의 결과가 종합적으로 산출된다.

6. 시공법에 따른 시뮬레이션 테스트

6.1 전방 쌓기법 적용시

토공현장(320m×320m)을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 토공현장은 전방 쌓기법 적용시에는 1회 절토깊이 2m로 설정하여 Cutting Layer 2개와 Filling Layer 1개로 분할하였다. 수평층 쌓기법 적용시에는 1회 절토 깊이 2m, 성토깊이 0.2m를 설정하여 Cutting Layer 2개, Filling Layer 3개로 분할된 토공현장으로 모델링 되었다. 시뮬레이션을 위한 건설장비의 작업효율 및 연료소모량, 현장조건은 2012년 표준품셈을 적용하였으며 그 내용은 Table 2와 같다.

전방 쌓기법을 적용한 시뮬레이션은 절토구역은 1회 절토깊이 2m를 고려한 2개의 Layer로 분할되지만 공법 특성상 성토구역의 Layer 분할은 전체를 1개의 Layer와 1개의 Cell로 분할하여 토공배

Table 2. Input parameters for simulation tests

Equipment	Dimension	Condition	Remark
Excavator	1.0m ³	<ul style="list-style-type: none"> Under natural condition Normal soil 	
Dozer	32ton	<ul style="list-style-type: none"> Sand/S-soil Rotation angle: 90° 	
Dump Truck	15ton	<ul style="list-style-type: none"> Sand, Gravel, Stream rock, Normal soil Speed: <ul style="list-style-type: none"> - Loaded:7km/hr - Unloaded:8km/hr) 	Excavator used if the moving distance is more than 60m.
Plate Compactor	1.5ton	<ul style="list-style-type: none"> Coverage width: 0.45m Speed: 1.0km/hr Number of compaction : N=3, Compacted thickness: D=0.1m 	Forward filling : Work volume (m ³ /hr) used

분작업을 수행한다. 시뮬레이터는 각 셀의 토공량 산출을 통하여 절·성토 Type을 자동으로 구분하여 Fig. 15와 같이 절토 Type의 셀은 B(Black Cell), 성토 Type의 셀은 W(White Cell), 잘성토의 균형을 이루고 있는 Type의 셀은 G(Gray)로 표현한다.

성토작업 중 다짐작업은 공법 특성상 최종 마무리에 대한 1회의 다짐만 적용하였으며, 시뮬레이션 결과 Layer Match는 2회가 일어났다. 총 절토량은 5,906.25m³, 총 성토량은 5,350m³, 총 이동토량은 5,350m³이 발생했다. 총 성토량과 이동토량의 합계가 같은 것은 대상 현장에서는 발생된 유용토가 모두 성토작업에 사용되었음을 의미하며 총 절토량과 총 성토량의 차이는 사토장으로 처리해야할 토량을 의미한다.

토량의 총 이동거리는 5,764.97m이며 TOTAL 프로그램의 활용하여 절·성토 작업과 토량의 이동작업으로 인해 배출되는 지구온난화 물질의 정량적 산출 결과를 반영하면 대상 현장에서는 1.130E+02 (kg CO₂ eq./)의 지구온난화 물질의 배출이 발생하는 것으로 분석되었다.

6.2 수평층 쌓기법 적용시

수평층 쌓기법을 적용한 시뮬레이션(Fig. 16)에서는 잘·성토량

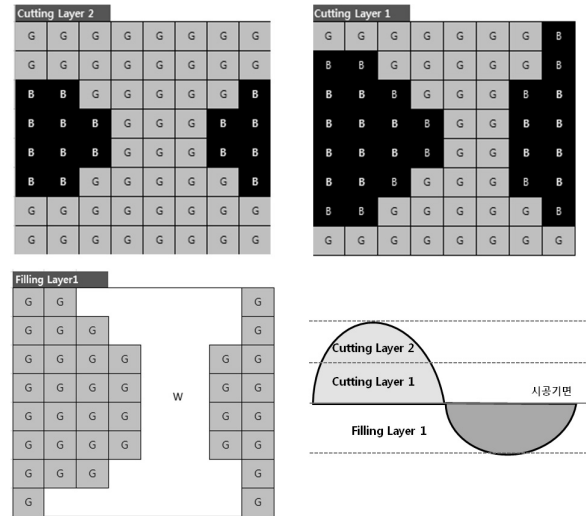


Fig. 15. Layer construction and cutting-filling area information (Forward filling method)

Table 3. Simulation result (Forward filling method)

Match	Cutting volume (m ³)	Filling volume (m ³)	Total volume (m ³)	Total movement (m)	Carbon Emission (kg CO ₂ eq./)
Step1	2100.00	2100.00	2100.00	2028.42	1.872E+01
Step2	3806.25	3250.00	3250.00	3736.55	9.428E+01
Total	5906.25	5350.00	5350.00	5764.97	1.130E+02

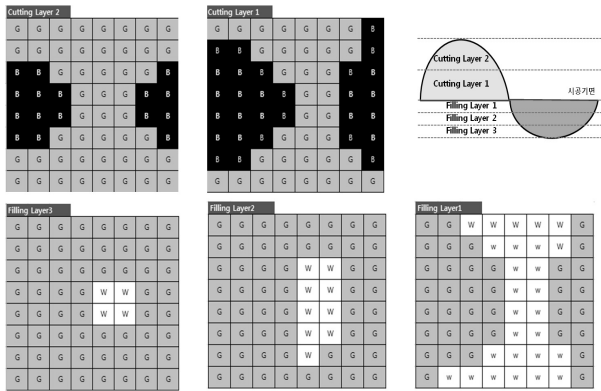


Fig. 16. Layer construction and cutting-filling area information (Level filling method)

Table 4. Simulation result (Level filling method)

Match	Cutting volume (m ³)	Filling volume (m ³)	Total volume (m ³)	Total movement (m)	Carbon Emission (kg CO ₂ eq./)
Step1	2100	400	400	320.30	1.402E+01
Step2	0	1700	1700	2354.18	4.825E+01
Step3	3806.25	550	550	428.34	2.302E+01
Step4	0	2700	2700	10026.33	1.635E+02
Total	5906.25	5350	5350	13129.15	2.561E+02

의 이동이 절토가 이루어진 B에서 가장 가까이에 위치한 W를 우선적으로 탐색하여 Cell간 1:1(B Cell:W Cell) 또는 1:n, n:1 Cell Match를 통해 해당 Cell에서 필요한 토공량을 모두 소진하거나 수급할 때 까지 반복하는 절토Cell 중심의 작업을 수행한다.

시뮬레이션 결과 대상 현장에서 토량배분을 위한 Layer Match는 4회가 일어났다. Table 4에서와 같이 대상 토공현장의 총 절토량은 5,906.25m³, 총 성토량은 5,350m³, 총 이동토량은 5,350m³이 발생했다. Step2과 Step4에서는 절토량이 0인 것을 확인할 수 있는데 이것은 Step1의 절토량과 Step1/Step2의 성토량 간의 Layer Match와 Step3의 절토량과 Step3/Step4의 성토량 간의 Layer Match가 이루어졌음을 의미한다. 전방층 쌓기법 시뮬레이션의 결과와 동일하게 대상 현장에서는 발생된 유훈도는 모두 성토작업에 사용되었으며 총 절토량과 총 성토량의 차이만큼의 사토량이 발생하였다.

이때 토량의 총 이동거리는 13,129.15m이며 TOTAL 프로그램을 활용하여 절·성토 작업과 토량의 이동작업으로 인해 배출되는 지구온난화 물질의 정량적 산출 결과를 반영하면 본 연구의 대상 현장에서는 2.561E+02(kg CO₂ eq./)의 물질이 배출되었음을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서 대상으로 하고 있는 토공작업의 경우에는 많은 종류의 건설장비나 로봇들이 관여되므로 건설현장에서 많은 양의 CO₂를 배출하는 작업이 되고 있다. 즉, 토공작업에서 CO₂ 배출량을 줄일 수 있다면 시공단계에서 탄소저감 효과를 많이 볼 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 효과적인 토공계획과 건설장비 운영을 통하여 생산성 및 안전성을 증가시킬 뿐만 아니라 CO₂ 배출량도 줄일 수 있는 자동화 토공을 위한 요소기술을 본 연구에서 제시하였다.

기존에 개발되었던 토공시스템이 절토작업만 대상으로 한 반면, 본 연구에서는 절성토 작업을 모두 대상으로 하고 있으며, 각 시공법의 특성을 고려하여 3D 토량배분이 될 수 있도록 하였다. 특히 토공작업 패키지 개념은 최적의 토량배분이 될 수 있도록 하며 동시에 건설장비의 효율적인 운영에도 사용되는 개념으로 제시된 것이다. 패키지의 구성과 패키지 스케줄링이 전체 자동화 토공시스템의 생산성에 영향을 미치며 이것은 탄소배출량 감축에도 직접적인 영향을 미친다. 토공작업 패키지 구성시에 적용되는 토량배분 알고리즘은 수송모델을 이용하였고, 이동비용 계산은 실제로 건설장비가 움직이며 작업을 할 수 있는 이동경로를 고려한 C-space 장애물 개념을 사용하여 산출하였다. 기존의 연구에 의하여 제시된 것들은 이동거리가 길어서 비용이 높아지는 문제점이 있거나 이동거리는 짧지만 실제로 건설장비가 움직이는 경로를 고려한 비용을 산출하지는 않았다.

그리고 본 연구에서 제시된 개념들을 확인하기 위하여 Excel 기반 시뮬레이터를 개발하였다. 주어진 현장에 대하여 각 시공법에 따라서 테스트를 실시하여 토공계획수립과 토공작업 패키지 생성을 확인하였다. 또한 각 시공법별로 발생하는 CO₂ 배출량을 산출해 보았다. 특히 탄소배출과 관련된 시뮬레이션 결과는 시공법과 건설장비 운영에 따라서 탄소배출량이 많이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 여러 번의 다짐이 수행되는 수평층 쌓기법이 탄소배출량이 많았으며, 본 논문에서는 결과가 제시되지 않았지만 토공작업 패키지가 최적화 된 경우와 그렇지 않은 경우에 탄소배출량에 있어서 차이가 많이 발생하였다.

추후에는 실제 현장을 대상으로 시뮬레이션을 실시할 예정이며, 금번 연구에서는 건설장비의 운영을 통하여 발생하는 CO₂ 배출량 산출은 품셈에 근거한 연료소모량을 사용하였으나, 현실에 근접한 결과를 산출하기 위하여 현장에서 직접 건설장비에서 측정된 CO₂ 배출량 데이터를 취득하여 적용할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 연구지원프로그램으로 지원받았습니다. (연구과제 No: 2012-002104)

References

- Cass, D., and Mukherjee, A. (2011). "Calculation of greenhouse gas emissions for highway construction operations using a hybrid life cycle assessment approach: A Case Study for Pavement Operations." *Journal of Construction Engineering and Management, ASCE*, Vol. 137, No. 11, pp. 1015-1025.
- Ji, Y., Borrmann, A., Rank, E., Seipp, F., and Ruzika, S. (2010). "Mathematical modeling of earthwork optimization problems." *Proceedings of the International Conference in Computing in Civil and Building Engineering*, Nottingham, UK, Nottingham University Press, Paper 202, pp. 403-409.
- Kang, T. W., 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 CO₂ 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. H., Shin, M. H., Kang, L. S. (2010). "Integrated information system for environmental and economic evaluation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 30, No. 6D, pp. 615-622 (in Korean).
- Kim, S. K., Lee, D. G., 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. G. (2012a). "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 (in Korean).
- Kim, S. K., Min, S. G. (2012b). "Development of core technologies for a low-carbon automated earthwork." *Proceedings of the 13th KICEM Annual Conference, KICEM*, Vol. 12, pp. 507-508. (in Korean)
- Kim, S. K., Russell, J. S. (2003a). "Framework for an intelligent earthwork system. Part II. Task identification/scheduling and resource allocation methodology." *Automation in Construction*, Vol. 12, No. 1, pp. 15-27.
- Kim, S. K., Russell, J. S., Koo, K. J. (2003b). "Construction robot path planning for earthwork operations." *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 17, No. 2, pp. 97-104.
- Kim, S. K., Seo, J. W., Russell, J. S. (2012). "Intelligent navigation strategies for an automated earthwork system." *Automation in Construction*, Vol. 21, No. 1, pp. 132-147.
- Lee, C. K., Kim, S. K., Sung, Y. J. (2003). "A study on 2D-based earthwork planning methods." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 23, No. 3D, pp. 349-358 (in Korean).
- Lee, J. N., Pyeon, M. W., Koo, J. H., 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).
- Moon, J. S. (2009). *LCA analysis and case study of environment factors for highway construct project*, MSc thesis, GyeongSang National University (in Korean).