

작업자의 휴리스틱을 적용한 토랑배분 및 장비운영 모델 개발

임소영* · 김성근** · 안서현***

Lim, So-Young*, Kim, Sung-Keun**, Ahn, Seo-Hyun***

Development of a Soil Distribution Method and Equipment Operation Models Using Worker's Heuristics

ABSTRACT

Earthworks are the fundamental steps in a construction job, and are mainly comprised of smaller tasks performed by construction machinery. The productivity of the construction job can be improved by optimizing excavation, filling, and other such operations. Earthworks involve a lot of mechanical work performed by the collaboration between various kinds of construction equipment, which in turn leads to higher fuel consumption. Actual earthworks depend mostly on the intuition and experience of the driver of the machines, thus leading to inefficiency and environmental problems caused by unnecessary emission of carbon. Recently automated and information-oriented technologies are consistently being researched towards the improvement of efficiency of earthworks in the construction industry. The present research involves the introduction and understanding of the decision-making elements of heuristics which can be applied to the earthwork planning. A method is also suggested for creating an effective work path for construction machine to perform task packages (TP) for cutting and filling processes. A simulation test is performed to verify the effectiveness of suggested methods in terms of space interference and total moving distance of construction equipment.

Key words : Earthwork, Path Planning, Heuristics, Optimum moving path, Construction equipment

초 록

토공작업은 건설공사에 기본이 되는 공종으로 건설장비에 의한 작업이 주를 이루고 있다. 최적 토랑배분 및 장비운영은 건설공사 생산성에 많은 영향을 미치는 요소이다. 토공작업은 다수의 건설장비들의 협업에 의하여 진행되어지는 기계화 작업이며 건설장비로 인하여 많은 연료가 소비되는 작업이다. 현장에서 실질적으로 이루어지는 토공작업은 건설장비 운전자의 경험과 직관에만 의존하여 작업이 수행되고 있어서 비효율적인 측면이 있으며, 토공 작업 시에 많은 연료사용으로 인한 탄소배출은 환경적인 문제점을 발생시키고 있다. 근래에는 토공작업의 효율성을 향상시키기 위한 건설사업의 자동화 및 정보화 기술을 적용한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 토공작업을 위한 휴리스틱스(Heuristics)는 시간이나 정보가 불충분하여 합리적인 판단을 할 수 없는 상황에서 신속하게 사용하는 전문가의 노하우이다. 이를 의사결정 요소로 고려하여 토랑배분 계획에 적용하였으며, 토랑배분 계획에 의하여 형성된 작업패키지를 형성하고 해당 작업을 위하여 건설장비의 효율적인 작업경로를 생성하도록 하였다. 시뮬레이션을 수행을 통하여 제시된 방법론이 건설장비의 공간간섭 및 전체 이동거리 측면에서의 효율을 검증하였다. 본 연구의 시스템을 적용하여 검증한 결과 건설장비의 공간 간섭률이 최소화되고 이동거리가 단축되어 생산성이 좋아지는 효율을 보였다.

검색어 : 토공, 경로계획, 휴리스틱스, 최적이동경로, 건설장비

* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과, 박사과정 (Seoul National University of Science & Technology · isy1120@naver.com)

** 종신회원 · 교신저자 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 정교수, 공학박사

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

*** 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과, 석사과정 (Seoul National University of Science & Technology · tomy8155@gmail.com)

Received March 17, 2016/ revised April 1, 2016/ accepted April 11, 2016

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설공사 기본공종 중 토공작업은 다른 공종과 비교하여 건설장비에 의한 작업성이 높으며, 각 공종간에 장비협업이 무엇보다 중요하다. 대단위 단지 토공의 경우에는 시공계획 단계에서부터 최적의 작업계획을 수립하여 공사가 진행되어야 하지만, 작업자의 직관에 의한 작업 의존도가 높기 때문에 작업의 효율성과 생산성에 제약을 많이 받는다. 근래에는 토공작업의 효율성 향상을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 국내외를 막론하고 건설 산업의 자동화 및 정보화 기술의 적용을 통하여 토공의 생산성을 높이기 위한 연구도 끊임없이 시도되고 있다.

지능형 굴삭시스템 개발(Lee et al., 2008)은 굴삭기라는 단일장비에만 초점이 맞추어져 있어서, 다종의 장비협업에 의해 작업이 이루어지는 실제 현장에서의 적용성이 낮다는 평가를 받는다. 기존에 수행되었던 연구결과의 현장적용사례에 따르면 건설 분야에서는 무인화 된 자동화 및 정보화 시스템보다는 작업자를 지원하는 형태의 시스템이 현장 적용성 측면에서 유리한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 작업자의 휴리스틱에 기반 한 합리적인 토랑배분 방법과 건설장비의 효과적인 운영을 위한 정보제공 시스템을 개발하고 건설장비의 공간간섭물과 이동거리를 최소화하여 최적의 작업경로를 통한 생산성이 좋아지는 효과를 제시하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 단지토공작업을 대상으로 하고 있다. 토공관련 전문가 및 숙련된 작업자들의 휴리스틱의사결정 요소를 반영하여 최적의 토랑배분 방법을 제시하고 건설장비별로 효과적인 작업경로를 제시하는 것을 연구의 범위로 한다. 연구 방법은 다음과 같이 네 단계로 진행하였다.

첫째, 기존의 토랑배분계획 방법을 연구하고 조사된 휴리스틱스를 반영하여 개선된 토랑배분 방법을 제시한다.

둘째, 토랑배분에 따라서 최적으로 절성토 구역이 매칭된 작업패키지(Task Package: TP)를 제시한다.

셋째, 토공 현장 방문조사 및 전문가 면담을 통하여 조사된 건설장비 운영을 위한 노하우를 반영하여 작업패키지 수행시 건설장비의 작업경로를 제시한다.

넷째, Simulator를 활용한 사례연구를 실시한다. 사례연구를 통하여 제시된 토랑배분계획 및 각 건설장비의 경로계획이 운전자들에게 유용한 정보가 되어 토공작업의 생산성 향상 및 저에너지 시공에 효과가 있는지를 검증한다.

2. 관련 기술동향 분석

2.1 토공 계획 관련 기술

기존 연구에서는 토공작업 중 굴삭작업에 국한하여 운전자의 작업형태와 작업시 고려되는 의사결정 요소가 파악되었다(Lee et al., 2008; Kim et al., 2010). 최근 대규모 단지 조성공사에서 토공 운반거리를 최소화할 수 있는 토랑구획 모델을 제시하였다. 구획 알고리즘과 Simulated Annealing 알고리즘을 기반으로 하고 있으며, 이러한 알고리즘은 국부해에 빠질 수 있는 현행 토공구획 방법을 개선하였다. 실제 단지공사 토랑이동도를 적용하여 시뮬레이션한 결과 14%의 개선효과를 확인하였으나, 이는 토질에 대한 고려가 없으므로 이에 대한 후행연구가 필요하다(Baek et al., 2015).

토공 작업에서 투입된 운송장비의 에너지 효율 극대화를 위한 “저탄소 토공경로 시스템 개발”은 경로계획을 위한 현장 공간 및 경로표현법을 정의하였다. 경로의 적절성을 판단하는 기준인 운송시간 및 에너지 소비량 산출법을 제시하였으나, 장비의 정보가 제약적인 관계로 장비의 DB (Database)구축이 필요하다(Gwak et al., 2015).

건설장비에 대해 이루어진 선행연구들은 에너지 절감을 위한 토공 장비군의 최적화 시스템 구축에 관한 연구와 장비 정보의 인터페이스를 위한 정보 모델링을 통하여 건설장비 운영시 협업 프로세스를 최적화하는 연구이다. 이는 향후 건설장비간 스마트 기능과 연계되어 발전되어질 것으로 사료된다(Moon et al., 2015; Yi et al., 2015).

굴삭시스템의 TPS (Task Planning System) 개발을 위한 휴리스틱스를 반영한 사례를 보면 각 작업 단계마다 반영 된 휴리스틱스는 TPS의 구성 체계를 갖추는데 가장 큰 영향을 주었으며, 이는 TPS에 의한 작업 계획 수립의 결과로서 반영되었다(Lee et al., 2008).

2.2 작업경로 생성 관련기술

최적이동경로는 최근 다른 분야보다 군사 분야에서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 다수의 무인지상차량(Unmanned Ground Vehicle: UGV)의 최적이동경로 제시를 위하여 기존의 경로 할당 문제를 해결하고자 하였다. 감시 최적 이동경로 계획은 할당된 지역을 거쳐 정해진 경로를 이동하며, 감시를 실시하여야 한다. 이동경로 계획 시 총 이동거리, 시간, 배터리 량 등 UGV에 요구조건을 모두 충족해야 한다. 제시된 감시노드 개수에 따른 이동계획 결과에 실시간으로 요구조건을 고려하며, 스케줄링 된 이동경로는 각 UGV에 할당되었다. 이는 수치 실험을 통하여 제시하였고 시간과 정밀도의 향상을 가져왔다(Huang et al., 2015; Kim et al.,

2015) 덤프의 최적이동경로를 도출하기 위하여 UGV 경로 모델의 적용이 필요하다.

토공작업 시 작업경로 알고리즘은 정보의 통합으로 이루어지며, 경로 제시를 위한 이동비용 모델을 적용하고 있다. 이는 최적 경로 생성을 위한 작업구역에 장비 이동시 장애물을 포함한 네트워크를 구성하였으며, 이를 비용 모델에 반영하는 방법이다(Kim et al., 2012).

시뮬레이션을 이용한 경로 찾기는 전처리 과정에 대한 효율성을 보장하지 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 고해상도 그리드 맵에서의 경로 찾기를 위해 가시성 정보를 이용한 휴리스틱스 의사결정을 반영한 방법을 제안하였다. 이를 토공에서의 경로계획에 적용한다면 탐색 공간과 탐색 시간을 효율적으로 감소시킬 것으로 사료된다(Kim et al., 2015).

최적 작업경로 탐색을 위한 유전자알고리즘 GA (Genetic Algorithm)는 지점 간 이동시 가중치를 할당하고 공간내에 모든 경로를 평가하여 최단경로를 찾는 알고리즘이다. 그러나 탐색에 소요되는 많은 시간의 문제를 해결하기 위한 A* (Astar Algorithm)은 그래프 기반 탐색 알고리즘 중에서 그래프의 각 꼭지점에 휴리스틱스 의사결정의 추정값을 할당하여 경로를 탐색하는 최단경로 탐색 알고리즘이다. 다익스트라 알고리즘DA (Dijkstra Algorithm)과 A*을 개선하기 위한 경로 탐색에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(Li et al., 2010).

본 연구에서는 최적 토량배분 계획과 각 장비별 최적경로를 운전자에게 제공하기 위하여, 추가된 휴리스틱스 의사결정 요소를 조사하고 작업경로에 적용하였다.

3. 토공계획 수립요소 및 작업패키지 생성

3.1 휴리스틱스의 의사결정 요소

토공작업시 의사결정을 위한 기존의 요소를 바탕으로 추가적인 고려 요소들을 파악하기 위하여 4회에 걸쳐 숙련된 작업자를 대상으로 설문조사를 실시하였으며 현장방문을 통하여 건설장비운용 현황을 파악하였다. 대규모 토공작업이 이루어지는 지역별·규모별로 선정된 현장의 현장관리책임자 78명과 건설장비 운전자 64명을 대상으로 설문과 전문가 면담을 실시하였다.

토공작업 시 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. 또한 기존 연구에서 제시된 요소에서 지반의 종류와 공간간섭은 의사결정 요소에서 제외될 수 있다는 전문가의 의견이 제시되었다(Kim et al., 2005).

Table 1. Decision-Making Elements of Heuristics

Classification	Decision-making Elements of Heuristics
Plan for Earthworks	Selection of location High ground - Low ground
	Natural drainage of effluent ground water and surface water
	Gradient : Movement possible under 30°
	If possible, remove obstruction to secure movement route Preserve obstruction : detour
Equipment Operation	Excavation depth : 2~3m for prevention of sliding
	Transfer Distance : Selected by shortest lineal distance
	Transfer Road : Utilization of existing road, selected by confirming the road's width and equipment specifications.
	Location of each machine : In case the equipment is at a higher level than the excavator, the rotational angle of boom is within 90°
	Obstacle : Pause work when moving equipment approaches the operating radius, and resume after it leaves the operating radius

토공작업 시 건설장비 운전자의 휴리스틱스 의사결정 요소가 건설장비 경로계획 설정시에 활용되어 효율성을 높일 수 있었다. Table 1은 전문가의 면담과 설문을 실시한 결과를 토대로 토공계획과 장비 운용시에 적용 가능한 휴리스틱스 의사결정 요소를 제시하였다.

3.2 토공계획방법

기존 연구(Kim et al., 2005)에서 보여 준 수송모형에 의한 토량배분은 균형수송모형(Balanced Transportation Model)으로 초기 가능해 선정방법과 최적 배분과정을 나타내고 있다. 3차원 토공계획을 수립하기 위하여 제시된 마이크로소프트 엑셀을 이용하여 개발된 시뮬레이터는 건설장비의 스펙, 사이클타임, 속도 등의 정보를 입력한다. 토공현장의 파라메트릭 솔리드 모델 정보를 근거로 하여 절토량과 성토량을 입력하여 수송모델 알고리즘을 적용하여 최적화된 3차원 토량이동계획을 수립한다. 그러나 거리만을 인자로 결정되어진 이동계획 문제를 해결하기 위하여 운반로의 상태(지반상태, 경사도) 장애물 등의 비용인자를 적용하여 토량이동계획을 수립한다.

본 연구에서 토량배분 계획 시 적용되는 비용인자는 전문가의 설문을 반영한 운반거리(이동거리), 운반로의 상태(도로상태)에서 경사도와 지반상태에 따라 미치는 영향과 소음·민원이다. 운반거리는 절토구역과 성토구역의 가장 먼 구간거리를 지칭하며 이를 구간별로 나눈 비용인자는 Table 2와 같다.

Table 2. Cost Factor with Respect to Distance

Transfer Distance	Cost
Farthest distance between the cutting and filling ones inside the construction area	1.0

$$\text{Transfer Distance Cost} = \frac{D_{js} \text{ Certain Cutting} i \sim \text{Certain Filling} j \text{ Street}}{\text{Mas Dis Cutting} i \sim \text{Filling} j \text{ longest distance}}$$

Table 3. Cost Factor with Respect to Road Condition

Road Condition	Average Loaded Speed	Cost
Poor (borrow pit, spoil bank)	7km/hr	1.0
Difficult for intersection	10km/hr	0.75
Unpaved, but intersection possible	15km/hr	0.5
Urban paved road with two lanes	20km/hr	0.25
Construcion of road with more	30km/hr	0.0

Table 4. Cost Factor with Respect to Gradient

Site Gradient	Cost
Up · Down 10°~20°	1.0
Up · Down 5°~10°	0.5
None	0.0

운반로의 지반상태는 장비의 선정과 장비주행성에 큰 연관을 가지고 있으며 지반의 함수비가 높은 경우 덤프의 이동이 어려운 문제가 발생한다. 지반상태에 따른 덤프의 왕복시간은 Eq. (1)과 같으며, 2015년 건설공사 표준품셈에 근거하여 산출하였다.

$$\text{왕복시간(분)} = \frac{\text{운반거리}}{\text{적재시 평균주행속도}} + \frac{\text{운반거리}}{\text{공차시 평균주행속도}} \quad (1)$$

운반로의 상태에 따른 비용인자는 Table 3과 같다.

현장에서 장비의 운행 시 경사도에 따라 덤프트럭의 진입이 어렵거나 시공의 난이도가 높아진다. 경사도가 6° 이상의 경사도에서는 24ton 덤프트럭이 흙을 부리는 작업에서 장비의 전도를 고려해야 한다. 지반 경사도에 따른 비용인자는 Table 4와 같다.

비용인자에 적용되는 경사도는 상향경사와 하향경사로 나누어지며, 이는 두 점의 좌표값을 이용하여 경사도를 계산하게 된다.

이전까지의 공사와는 다르게 인접구조물에 접하여 시공되어지는 공사현장이 증가하면서 크게 대두되어지는 문제가 소음 민원이다. 단지토공 공사 시 발생되어지는 민원의 대다수는 소음과 비산먼지 발생에 대한 부분이다. 민원발생을 최소화하기 위한 이격거리는 Eq. (2)와 같이 소음규제기준과 거리에 따른 감쇠식으로 추산할 수 있다(Korea Environment Institute, 2002).

Table 5. Cost Factor with Respect to Civil Complaints

Noise Distance	Cost
Within 50m	1.0
50m ~ 150m	0.5
Over 150m	0.0

$$SPL = SPL_0 - 20 \log(r/r_0) \quad (2)$$

여기서 SPL : 예측지점에서의 장비소음도

SPL_0 : 소음원으로부터 기준거리만큼 떨어진 지점에서의 장비 소음도

r : 소음원에서 예측지점까지 거리(m)

r_0 : 소음원에서 기준 측정지점까지의 거리(m)

소음에 대한 저항값은 Eq. (2)의 감쇠식으로 추산해보면 이격거리가 50m 이내 일 때 높은 불쾌감을 나타내는 소음도인 55dB을 나타내므로 이에 대한 근거를 바탕으로 Table 5와 같은 비용값을 제시하였다.

3.3 비용요소별 가중치 할당

본 논문에서는 전문가의 설문과 인터뷰를 결과로 하여 전문가 7인의 설문 결과값의 평균값을 비용요소별 가중치로 할당하였다. AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 적용하여 토공 운반시 고려하여야 할 요소들에 대한 상대적 중요도를 Table 6와 같이 도출하였다.

쌍대비교는 1[비슷함]-5[극히 중요함]의 수치를 사용하였으며, 조사된 값의 평균값을 입력값으로 사용하였다. 쌍대비교 결과에 따른 비용요소의 가중치는 운반거리(X_1) 51%, 운반로 상태(X_2) 25%, 경사도(X_3) 15%, 소음민원(X_4) 9%의 순으로 나타났으며, 일관성 지수 CI는 3%로 설문응답에 모순이 없는 것으로 나타났다. 토량배분 비용을 산정하기 위한 Eq. (3)은 아래와 같다.

$$Y = 0.51X_1 + 0.25X_2 + 0.15X_3 + 0.09X_4 \quad (3)$$

Table 6. Relative Comparison between Cost Factors

Classification	Transfer Distance	Road Condition	Gradient	Noise Complaint
Transfer Distance	1.0	3	3	4
Road Condition	1/3	1.0	2	3
Gradient	1/3	1/2	1.0	2
Noise Complaint	1/4	1/3	1/2	1.0

Table 7. Weighted Value of Cost Factor with Respect to Other Parameters

Cost Factor	Weighted Value
Transfer Distance	0.51
Road Condition	0.25
Gradient	0.15
Noise Complaint	0.09

3.4 토공 작업 패키지 스케줄링

토공 절·성토 작업구역(TP)는 최적화 기법에 의한 절·성토량의 배분계획과 경제적 운반거리를 고려하여 구성된다. 토공의 전체적인 스케줄링을 위한 토공작업 TP는 절토노드에서 완료된 절토량의 합과 성토 노드에서 완료된 성토량의 합을 실시간으로 계산하여 토공현장에서 얻어진 전체 절·성토량과 비교하여 진도율을 산출할 수 있다(Kim, 2013).

$$Cutting\ Progress = \frac{\sum_{i=1}^m CV_{S_i}}{Total\ Cutting\ Volume} \quad (4)$$

$$Filling\ Progress = \frac{\sum_{j=1}^n FV_{T_j}}{Total\ Filling\ Volume} \quad (5)$$

$$Total\ Progress = \frac{Cutting\ Progress + Filling\ Progress}{2} \quad (6)$$

Eq. (4)부터 Eq. (6)까지 나타내는 토공량은 $CV_{S_i} = i$ 번 절토노드에서 완료된 절토량 Completed Cutting Volume이고, $FV_{T_j} = j$ 번 성토노드에서 완료된 성토량 Completed Filling Volume이다.

절토작업을 수행하는 작업구역과 성토작업을 수행하는 작업구역을 서로 매칭시키는 TP를 구성하고 작업수행의 우선 순위를 결정하기 위한 방법은 Table 8의 서브룰(Sub-Rule)로 구성된다.

Rule 1은 현재 진행 중인 작업 패키지와 동일공간상에서 절토 및 성토 작업을 할 가능성을 확인하여 작업을 수행할 가능성이 없는 패키지를 먼저 수행하는 것이다. Rule 2는 동일한 우선순위를

Table 8. Task Package Scheduling Rule

Task Package Scheduling Rule (TPSR)		
Rule 1	No-Space Interference First	NSIF
Rule 2	Shortest Travel Distance First	STDF
Rule 3	Min Civil Complaint First	MCCF
Rule 4	Random	RAND

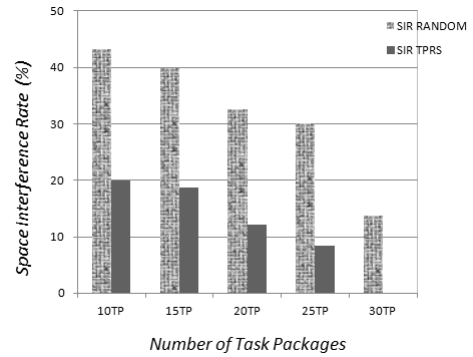


Fig. 1. Space Interference Rate

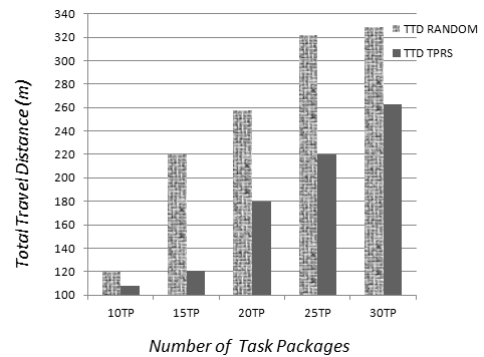


Fig. 2. Total Travel Distance

갖는 작업 패키지가 존재할 경우에 이동거리가 짧은 작업패키지를 수행하는 것이다. Rule 3은 동일한 우선순위를 갖는 작업 패키지가 존재할 경우에 민원발생이 없는 작업패키지를 수행하는 것이다. Rule 4는 Rule 3을 적용한 후에도 동일한 우선순위가 존재한다면 Random한 선택에 의한 작업 수행이 이루어지는 경우를 말한다. 본 논문에서는 작업 패키지의 우선순위를 결정하는 방법으로 TPSR 방법과 Random방식을 시뮬레이션을 통하여 비교 하였다. 이때 작업패키지의 우선순위를 결정하는 방법(TPSR)은 Figs. 1 and 2에서 보여지는 것과 같이 공간간섭율의 저하와 이동거리 단축으로 인한 장비운용에 대한 높은 생산성을 나타내었다.

절토구역과 성토구역 사이의 거리는 원칙적으로 두 구역사이의 중앙좌표간의 거리로 계산 되었다.

Rule 4의 민가가 존재할 경우의 Cost 비용 증가로 인해 선택 대상에서 무조건 제외 될 수 있으므로 계획을 수립 시에 그 값을 명확히 해야 한다.

4. 건설장비 작업경로 생성 방법

4.1 작업경로 생성 알고리즘

최적 작업경로를 산출하기 위한 알고리즘은 GIS 환경에서 지형

분석 기능을 기반으로 하고 있다. 작업경로에 영향을 미치는 다양한 요소들을 래스터 데이터 모델로 변환하는 단계와 최적 작업경로 탐색단계를 통한 시뮬레이터를 통한 검증단계로 구분되어진다. 작업경로 비용요소는 현장 전문가의 휴리스틱스 의사결정 요소를 반영하여 작업구역 형식의 데이터로 모델링하였으며, 각 레이어에 가중치가 적용되어 최적 작업경로 검증에 사용될 최종 레이어가 생성되었다.

4.2 굴삭기 작업경로

굴삭기의 초기 작업위치 선정 방법에는 장비의 안정성이 선행되어야 한다. 이를 위한 방법으로는 배수 방향이 작업에 큰 영향을 미치는 경우와 배수 방향이 작업에 영향을 주지 않는 경우로 나뉜다. 아래는 굴삭기의 단계별 작업경로를 나타낸다.

Step 1. 초기 굴삭위치(노드) 선정 및 굴삭기 셋팅

초기 작업위치를 선정하는 단계로 굴삭기가 90° 이내로 회전하면서 덤프트럭에 상차할 수 있는 굴삭 위치로 선정하여 굴삭기의 플랫폼을 안착한다.

Step 2. 해당 굴삭작업 구역(노드)에서 굴삭작업을 실시하며 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 플랫폼을 이동하며, 작업이 완료되지 않은 굴삭작업 구역 중에서 후속으로 작업을 수행할 구역은 Eq. (7)의 값이 최대인 구역으로 선정 후 플랫폼을 이동하고 Step2를 수행한다.

Step 5. 작업종료

덤프트럭이 상차 위치에 이동하면 용량에 따라 상차작업을 실시한다. 굴삭기 버킷용량은 1m³, 2m³ 두 가지이고 덤프트럭은 적재함의 용량에 따른 15ton, 20ton, 24ton으로 고려하며 현장상황에 맞게 투입대수는 조정된다. 굴삭기 작업경로의 작업프로세스에 고려되는 요소는 덤프트럭 상차위치(X₁)와 Eq. (8)의 배수방향(X₂), 굴삭의 연속성(X₃), 지장물 여부(X₄), Eq. (9)의 이동거리(X₅)이다. 요소별 가중치는 Tables 9~11이며, 이들 요소를 고려한 작업경로 산정을 위한 Eq. (7)은 다음과 같다.

$$Y = 0.47X_1 + 0.26X_2 + 0.15X_3 + 0.08X_4 + 0.05X_5 \quad (7)$$

$$X_2(\text{배수방향}) = \frac{\text{대상 굴삭구역의 표고}}{\text{대상 Cuttinglayer에서의 최고표고}} \quad (8)$$

Table 9. X₁ (Dumper Loading Position)

Dumper Loading Position	Element
Within 90°rotational radius of excavator	1
Within 180°rotational radius of excavator	0.5
Over 180°rotational radius of excavator	0

Table 10. X₃ (Continuity of Excavation)

Continuity of Excavation	Element
Zone closest to present work zone	1
Others	0

Table 11. X₄ (Obstrucion)

Obstrucion	Element
None	1
Existence	0

$$X_5(\text{이동거리}) = \frac{\text{작업구역간 최소 중심거리}}{\text{현재 작업구역과 대상 작업구역간의 중심거리}} \quad (9)$$

4.2.1 배수방향이 작업에 큰 영향을 미치는 경우

굴삭기 작업방향을 배수방향의 반대방향으로 진행하여 작업을 실시한다. 이때의 고려사항은 굴삭기 시간당 작업량으로 이는 굴삭기 버킷용량에 따라 작업량이 상이하기 때문에 고려되어야 한다. 또한 전체 굴착토량을 토대로 하여 굴삭기 작업량과의 적정한 위치 선정이 필요하다.

다수의 굴삭기로 작업이 이루어질 경우에는 전체 굴착토량에서 각각의 굴삭기 버킷 용량에 따른 시간당 작업량을 고려하여 플랫폼

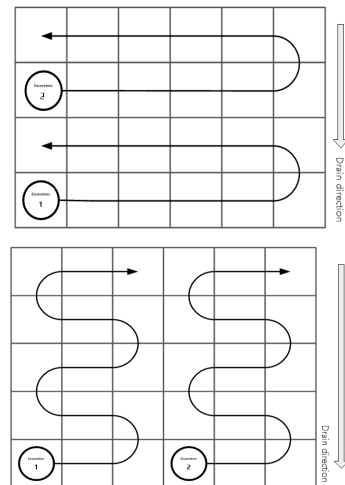


Fig. 3. Work Path for Excavator (Consider Drainage Directions)

의 위치를 결정한다. Fig. 3은 각각의 굴삭기 사이에 발생할 수 있는 공간간섭을 최대한 배제한 경로선정을 나타내며 각 굴삭기의 시간당 작업량을 고려하여 플랫폼의 위치를 결정하여야 한다.

4.2.2 배수방향이 작업에 영향을 주지 않는 경우

기본적으로 1대의 굴삭기가 이동할 수 있는 최적의 작업 경로를 도출한 이후에 전체 굴착 대상 토량과 투입되는 각 굴삭기의 시간당 작업량을 고려하여 초기 작업 위치를 Fig. 4와 같이 작업 경로 상에 순차적으로 배치한다.

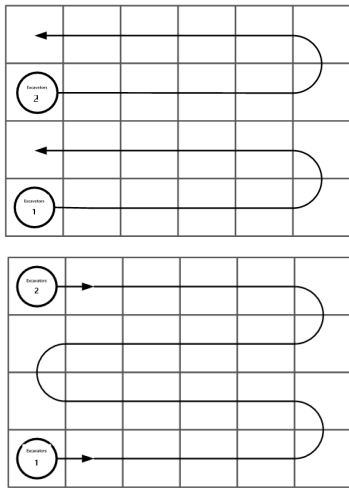


Fig. 4. Work Path for Excavator

초기 작업 위치를 선정할 때 전체 굴착 토량과 각 굴삭기의 시간당 작업량을 산정하여 플랫폼의 위치를 결정한다.

각 굴삭기의 초기작업 위치를 가능한 멀리 떨어뜨려 작업을 수행할 수 있으나 작업 종료가 다가올수록 각 굴삭기가 서로 근접한 거리에서 작업을 수행하게 되어 토사 상차를 위한 덤프트럭들이 동일 공간을 사용하게 될 가능성이 커지므로 작업이 진행될수록 공간간섭을 통한 문제점이 발생할 가능성이 있다.

토공작업계획을 위한 시뮬레이션 모델링은 실제 공사현장에서 작업 중인 굴삭기의 흙막기 작업에서부터 상차시간 적용 덤프트럭의 시간대별 운행속도와 운행조건과 진입여건 등을 고려하여 모델링되었다. 최적 장비조합을 통하여 장비별 작업을 수행하고 시뮬레이션의 결과로 공기단축과 원가절감의 정보를 얻게 되며 실제 현장 상황에서 변화에 대한 대처를 실시간 적용할 수 있다.

4.3 덤프트럭 작업경로

덤프트럭은 굴삭기 플랫폼에서 흙을 적재하고 사토장으로 이동하여 흙을 내린 뒤에 플랫폼으로 돌아오는 반복 작업을 수행한다.

왕복되는 동안의 운행속도는 도로의 조건과 상황에 따라 큰 차이를 보이게 된다. 덤프트럭이 적재 상태일 경우와 공차일 경우 운반로의 상황을 적용하여 토량 운반 모드를 나타내게 된다.

Step 1. 초기 굴착위치(플랫폼)에서 덤프트럭 대기 굴삭기의 작업 위치 선정과 상차 위치를 선정한다.

Step 2. 상차작업 실시

굴삭기 작업량에 따라 상차 작업을 실시하며 상차 위치는 굴삭기가 90° 이내에서 회전하며 상차한다. 작업량에 따른 대기 차량의 배차를 실시한다.

Step 3. 성토구역 이동

작업구역 내에서 이동하는 로컬패스 구간은 최단 이동거리를 선정하여 성토구역으로 이동한다.

작업구역을 벗어난 글로벌패스 구간은 토질의 종류와 반출규정에 맞는 사토 혹은 성토를 성토구역으로 이동한다.

Step 4. 플랫폼별 작업물량과 덤프트럭 대기시간에 따른 작업 배분을 실시하고, 덤프의 경로계획에 따른 덤프트럭 작업을 배분한다. 작업량이 계획물량과 같지 않으면 Step 5로 이동하고 그렇지 않으면 최적의 작업 배분에 따른 플랫폼으로 이동하여 Step 2를 수행한다.

Step 5. 작업종료

굴삭기가 덤프트럭에 흙을 상차하고 적재작업을 종료 후에 덤프트럭이 사토장 입구까지 이동하는 경로를 덤프트럭의 작업경로라고 한다. 덤프트럭은 작업량, 장비대수 등의 요인을 적용한 적재함 용량에 따라 현장에 투입되어진다. 1시간당 작업량을 산정하는 Eq. (10)과 덤프트럭 1회 적재량은 Eq. (11)을 통하여 산정한다.

$$Q = \frac{60 \times q \times f \times E}{cmt} \tag{10}$$

Q : 1시간당 작업량(m^3/hr)

q : 흐트러진 상태의 덤프트럭 1회 적재량(m^3)

f : 체적환산계수

E : 작업효율

$$q = \frac{T}{r_t} \times L \tag{11}$$

T : 덤프트럭의 적재용량(ton)

r_t : 자연상태에서의 흙의 단위중량(습윤밀도)(ton/m^3)

L : 체적환산계수에서의 체적변화율

$$L = \frac{\text{흐트러진 상태의 체적}(m^3)}{\text{자연상태의 체적}(m^3)} \tag{12}$$

$$cmt = \frac{cms \times n}{60 \times Es} + (T_1 + T_2 + T_3) \quad (13)$$

cmt : 덤프트럭의 1회 사이클 타임(분)
 cms : 굴삭기의 1회 사이클 타임(초)
 Es : 굴삭기의 작업효율
 n : 덤프트럭 1대의 토량을 적재하는데 소요되는 굴삭기의 사이클 횟수
 T_1 (운반로 상태) = Table 3의 비용인자를 따름

$$T_2(\text{운반거리}) Z = \sum_{k=1}^{m_i} (Q \times C + A_i) \quad (14)$$

Q : 절토구역에서 성토구역으로 운반해야 할 토공량(m^3)
 C : 토사운반의 단위비용($\text{₩}/m^3$)
 A_i : 0 또는 1인 이진수 값
 가설로 설치 시 0, 가설로 미설치 시 1
 T_3 (경사도) = Table 4의 비용인자를 따름

$$n = \frac{Qt}{q \times k} \quad (15)$$

Qt : 덤프트럭 1대의 적재토량(m^3)
 q : 굴삭기의 버킷용량(m^3)
 k : 버킷계수

덤프트럭의 작업경로를 산정하는 식은 T_2 (운반거리)로 산정되어지며, Q 는 절토구역에서 성토구역으로 운반해야 할 토공량(m^3)이고, m_i 는 i 번째 중간지점 k 의 선택 가능한 지점 수이다. C 는 토사운반의 단위비용($\text{₩}/m^3$)이며, A_i 는 가설로의 설치 유무에 따라 0 또는 1인 이진수의 값이다. 덤프트럭의 작업경로에 대한 작업프로세스 적용 요소는 운반로 상태와 운반거리 그리고 경사도에 의해 산출되며, Fig. 5는 덤프의 최적이동경로를 나타낸다.

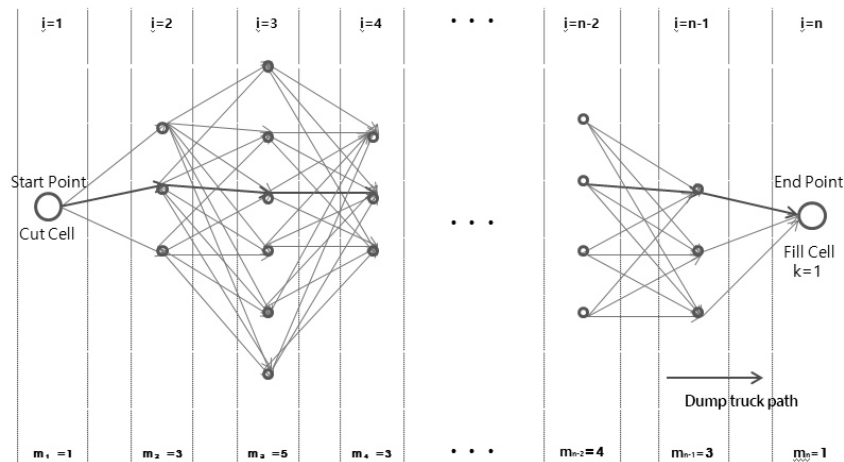


Fig. 5. Optimized Work Path for Dumper

덤프트럭은 굴삭기와 연동하여 작업을 진행하므로 1회 사이클 타임을 결정하는데 굴삭기의 요소값이 반영된다. 토사의 습윤밀도는 건조하거나 습기가 있는 형상에서의 평균값으로 적용한다. 덤프트럭의 시간당 작업량 결정요소의 조건에 따른 값은 2015 건설공사 표준품셈을 따른다.

4.4 다짐기 작업 경로

덤프트럭의 성토 후에 그 구간의 시험다짐을 통하여 다짐횟수를 결정하게 된다. 다짐구간은 직선으로 길게 작업하고 방향전환을 최소화하는 경로로 실시되며, 작업구간에 경사가 있을 경우에는 토사의 밀림현상을 최소화하기 위해 경사가 낮은 방향에서 높은 방향으로 작업을 실시한다.

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(덤프트럭에 의한 성토 및 그레이더에 의한 정지작업)이 완료된 구역을 대상으로 하며, 가능하면 다짐구간이 직선으로 길게 형성되면서 방향전환이 최소화되는 패스로 작업을 실시한다.

작업구간에 경사가 있는 경우에는 토사의 밀림현상을 최소화하기 위하여 경사가 낮은 쪽에서 높은 쪽으로 작업을 실시한다. 시험시공에 의하여 결정된 다짐회수의 작업여부를 확인하고 적정 다짐도가 얻어졌는지를 확인한다.

Step 3. 다짐구역 이동

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

Step 4. 일일 작업물량 확인

일일 누적작업량이 일일 계획물량과 같아지면 Step 5를 수행하고 그렇지 않으면 Step 2를 재실시 한다.

Step 5. 작업종료

시뮬레이션 모델의 적용성을 검토하기 위해 각 장비별 조합과 일일 토공작업량을 분석하였다. 일일 토공작업량은 현장에서 실측 작성된 작업시간과 현장에서 작성된 작업일보의 분석을 통해 나타난다. 토공 현장의 지형 모델을 분석·구성하고, 시공기면의 위치와 다짐기의 장비제원을 고려하여 작업이 수행되어야 한다. 이를 근거로 하여 성토구역에 작업량을 분석하고 각 작업구역의 다짐계획을 수립한다. 다짐기 작업경로의 작업프로세스에 고려되는 요소는 포설횟수, 다짐횟수, 함수비이다. 다짐도 품질규정에 준수하는 작업경로의 생성이 필요하다.

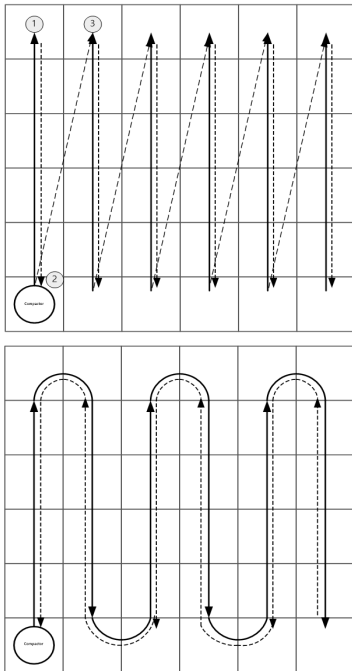


Fig. 6. Work Path for Compactor

다짐기 1대가 작업할 경우에는 성토량에서 다짐기의 시간당 작업량을 계산하고 다짐도 품질규정에 맞춰 Fig. 6과 같이 작업경로를 결정한다.

성토 레이어에서 작업을 수행하는 다짐기의 작업구간 정보를 입력하고 각 장비의 작업경로를 결정한다. 다짐기의 작업 시 작업경로가 심플한 패턴을 따르게 되는데 이는 작업구간의 일정한 다짐도를 얻고자 하기 때문이다. 적정 다짐도를 얻기 위하여 다수의 다짐기가 작업 시에는 각 장비간의 공간간섭을 고려해야 한다. 다짐구역 안에서 여러개의 작업경로가 발생한다면, 이동비용을 계산하여

가장 경제적인 이동경로를 선택하면 된다. 이를 위한 이동비용 (Moving value : MV) 산정식은 Eq. (16) (Kim et al., 2013)에서 제시하고 있다.

$$MV = \frac{\text{현재 노드와 대상 노드의 중심간 거리}}{\sum \text{타 다짐기의 현재노드와 대상 노드의 중심간 거리}} \quad (16)$$

5. 토공작업 관제 시뮬레이터

5.1 시뮬레이터 알고리즘

시뮬레이션의 기본 원리는 통계적 분석을 기초로 하여 건설장비의 작업경로를 통계적 분포로 나타낼 수 있다. 0에서 1까지의 확률적 등분포 난수를 발생시켜 확률누적 함수로 대응하면 건설장비 운행에 대한 통계적인 분포를 재현할 수 있다. 시뮬레이션은 최적의 해를 구하는 방법이 아닌 현장 상황의 구체적인 조사와 분석, 효율적인 자료의 수집을 통한 적정 모델을 구축할 수 있는 프로그래밍 기술이다.

Fig 7에서 도식된 최적 작업경로 도출 시뮬레이터는 GIS 환경에서의 지형분석 기능을 기반으로 하였다. 운반효율에 영향을 미치는 다양한 요소들을 래스터 데이터 모델로 변환하는 단계와 Spatial Analyst를 이용한 최단거리 탐색단계를 거쳐 작업경로의 생산성 분석을 통한 검증단계로 구분된다. 지형요소 추출은 현장 전문가의 휴리스틱 의사결정 요소를 근거로 하였으며, 작업구역 형식의 데이터로 모델링하였다. 모델링된 각 레이어에 가중치가 적용되어 작업 경로 분석에 사용될 최종 레이어가 생성되었다.

5.2 작업경로 효율성 측정 방법

토공운반의 시뮬레이션 모델링의 결과를 통해 공기단축과 원가 절감의 정보 획득이 가능하고 확장성 있는 모델 구현으로 현장 상황변화에 유연한 대처가 가능하다. 각 장비별 영향 요인간의 관계성을 정립한 시뮬레이션은 CO₂ 저감 관리를 통하여 생산성을 증대시키며 더 나아가 최적의 장비 선정 및 조합을 가능하게 하였다.

5.3 시뮬레이터를 통한 건설장비 작업경로 분석

본 연구에서는 휴리스틱스 의사결정 요소를 반영한 토량배분 방법과 건설장비별 최적경로 제시를 위하여 개발된 시스템을 이용하여 작업경로 분석 연구를 진행하였다. 개발된 시뮬레이터 모듈은 수송모델을 통한 토량배분 방법과 건설장비의 최적 작업경로를 확인해보았다. 적용 현장의 분석을 위한 사이클타임 산출시 제시한 값은 현장 실측 자료를 토대로 하였다. 하루 작업시간은 8시간으로 설정되었고 각 장비의 시간당 단가는 2015년 표준품셈 기계화시공의 정보를 통해 제시되었다. 적용 장비는 실제 현장에서 많이 사용되

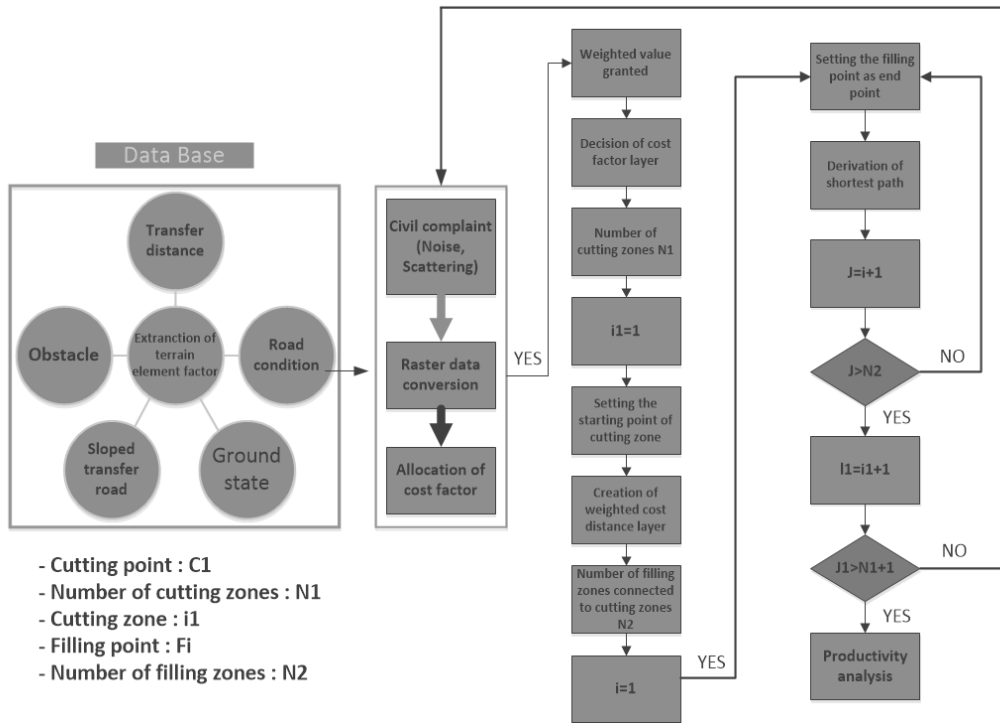


Fig. 7. Simulator used to Derive the Work Path of Earthworks

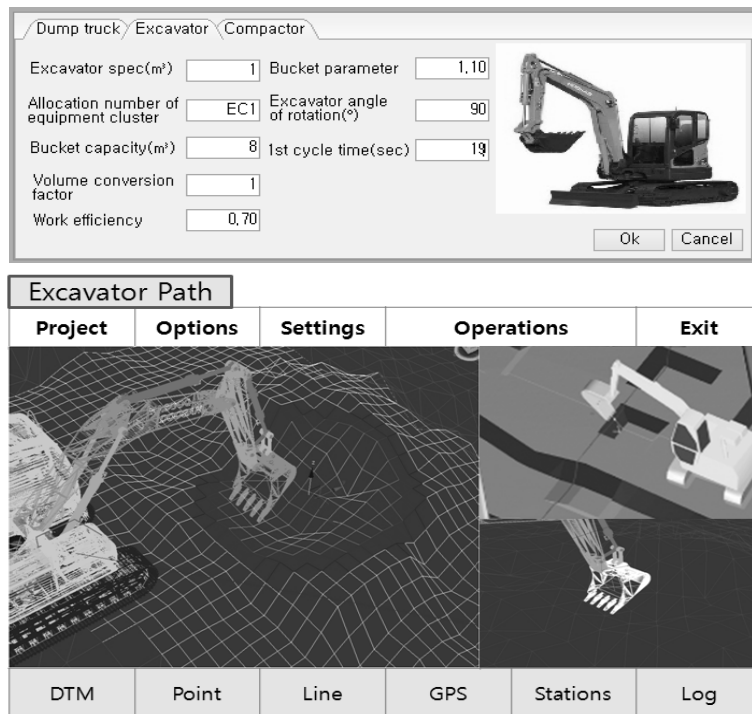


Fig. 8. Simulation Process and Output Screen of Excavator

는 15ton 덤프트럭과 굴삭기 버킷용량 1.0m³을 대상으로 하여 Caterpillar performance 차트를 이용하여 작업경로별 사이클 타임

을 분석하였다. 성토구역과 절토구역의 물량자료는 실제 현장의 설계 데이터를 근거로 하였다.

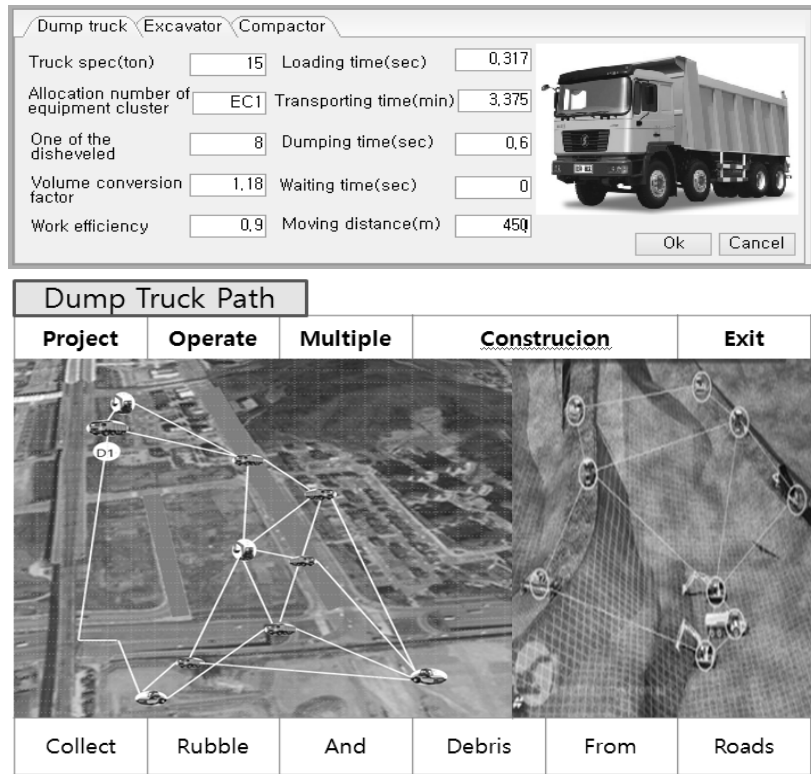


Fig. 9. Simulation Process and Output Screen of Dumper

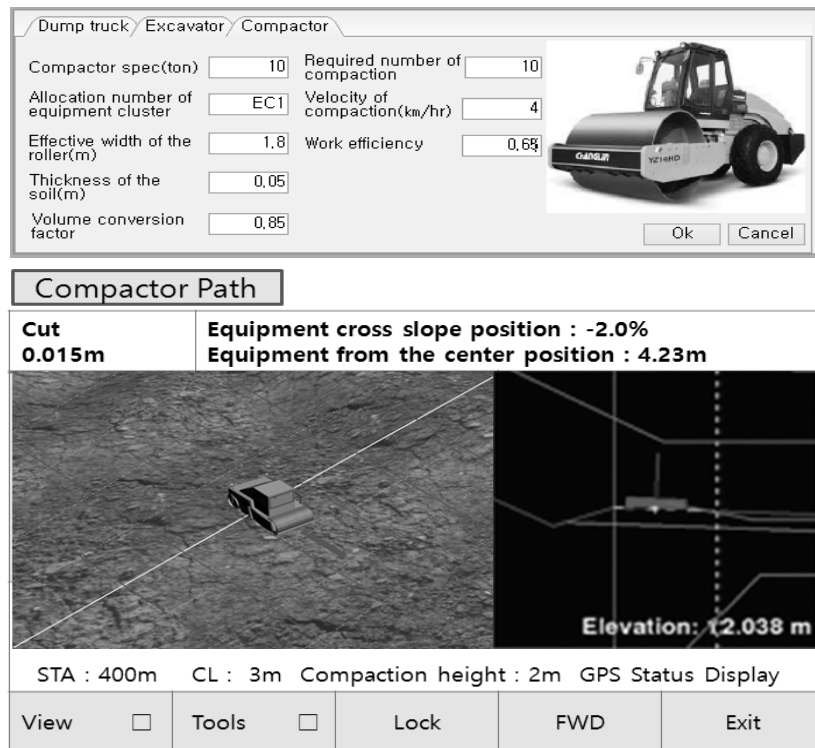


Fig. 10. Simulation Process and Output Screen of Compactor

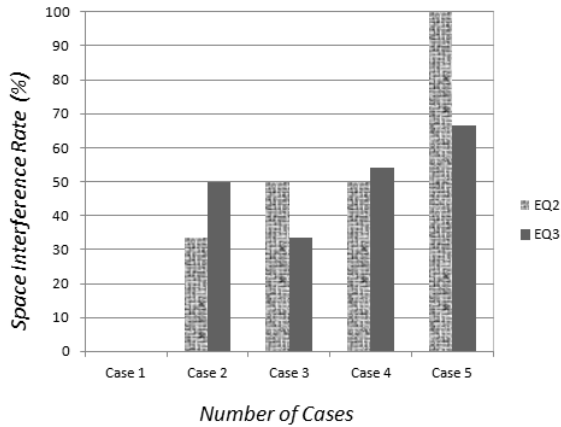


Fig. 13. Case Scenario Analysis Result

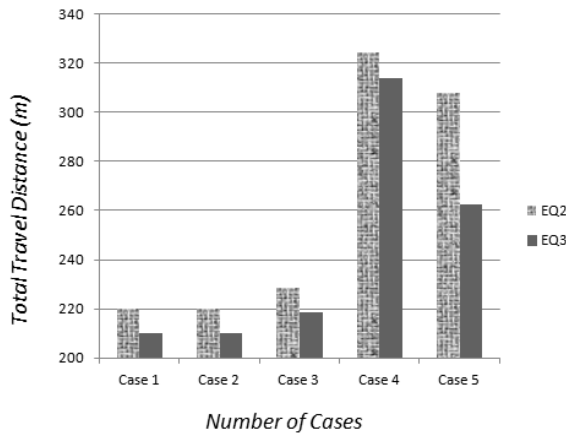


Fig. 14. Case Scenario Analysis Result

7. 결론

대단지 토공현장의 경우 장비의 최적 작업경로는 전체 생산량에 직접적인 영향을 미치게 되며, 실시간 변화하는 작업구간에 대응하기 위한 의사결정이 요구된다. 본 연구에서는 건설장비의 최적 작업경로 시스템 개발을 위하여 토공현장의 비용요소를 결정하였고 이를 전문가의 휴리스틱 의사결정 요소와 연관지어 설명하였다. 시스템 사례 연구를 통하여 공간간섭을 저하와 이동거리가 단축되는 결과를 보였으며, 이는 현장 여건이 충분히 반영된 작업경로 정보를 현장관리자에게 제공함으로써 최적의 현장운용을 가능하게 하였다. 장비간의 최적 작업경로를 통하여 향후 장비간의 협업시스템 구축을 통한 정보를 현장에서 실시간 제공함으로써 현장의 생산성을 높이는데 기여할 것이다. 그러나 현장마다 특성 있는 비용요소가 적용되기 위한 요소의 선정과 적용이 필요하다. 이를 위한 정량적인 비용요소를 파악하기 위한 추가적인 연구가 수행되어야 한다. 본 연구는 3차년에 걸쳐서 진행되는 것으로 2차년도

연구로 수행되었으며, 후속적으로 제시된 플릿관리 방법론을 적용한 시뮬레이터 및 건설장비 관계 시스템을 완성하고 건설장비 및 현장에 직접 설치를 통해 그 효과를 검증하는 연구를 계획하고 있다.

감사의 글

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

References

- 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*, Vol. 35, No. 3, pp. 715-723 (in Korean).
- Gwak, H. S., Seo, J. W. and Lee, D. E. (2015). "Earthmoving haul-route searching method for energy saving based on evolutionary algorithm." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 31, No. 3, pp. 81-88 (in Korean).
- Hanqiao, H., Huan, Z. and Yawei, C. (2015). "Study on multi-path planning and tracking control of the UCAV based on evolutionary algorithm." *International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS*, pp. 1762-1766 (in Korean).
- Kang, S. H., Baek, K. G., Baek, H. G. and Seo, J. W. (2010). "A GIS-Based planning methodology to determine the haul route layout in complex construction projects." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 30, No. 6, pp. 631-639 (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. K., Fukuda, K. and Lee, J. H. (2015). "Optimal route planning in real time Multi-UGA systems by multi-objective evolutionary algorithms." *Industrial Engineering & Management Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 2829-2832 (in Korean).
- Kim, J. H., Jung, Y. W. and Yu, K. A. (2015). "Design of heuristics using vertex information in a grid-based map." *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 20, No. 1, pp. 86-92 (in Korean).
- Kim, S. K. (2013). "3D-based earthwork planning and CO emission estimation for automated earthworks." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 0, pp. 1191-1202 (in Korean).
- Kim, S. K. (2014). "A multi-agent based cooperation system for an intelligent earthwork." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 1609-1623 (in Korean).
- Kim, S. K., Kim, G. Y. and Park, J. H. (2015). "An approach for soil modeling and equipment fleet management towards low-carbon

- earthwork.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 501-514 (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).
- 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. 349-357 (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, J. H., Kang, S. H. and Seo, J. W. (2008). “Development of task planning system for intelligent excavating system applying heuristics.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 28, No. 6, pp. 859-869 (in Korean).
- Li, S., Ding, M., Cai, C. and Jiang, L. (2010). “Efficient path planning method based on Genetic Algorithm combining path network.” 2010 Fourth International Conference.
- Moon, S. W. and Cho, K. S. (2015). “Information modeling for construction equipment interface in earthwork.” *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 35, No. 3, pp. 699-706 (in Korean).
- Construction Association of Korea (CAK) (2015). *Standard of Construction Estimate* (in Korean).
- Yi, C. Y., Lee, H. C., Seo, J. W. and Lee, D. E. (2015). “Construction equipment fleet optimization for energy saving in earthmoving operation.” *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 31, No. 4, pp. 137-144 (in Korean).