

단지공사의 토공구획 계획 모델

백현기* · 강상혁** · 서종원***

Baek, Hyeon Gi*, Kang, Sang Hyeok**, Seo, Jong Won***

An Earthwork Districting Model for Large Construction Projects

ABSTRACT

Earthwork in a large construction project such as a land development generally costs 20-30% of the total cost. The earthmoving process, comprising of four repetitive tasks: loading, hauling, unloading, returning, is quite simple and it does not need delicate or advanced techniques. Therefore, earthmoving earthwork planning can heavily affect the cost and time., and Even a slight deviation from the plan can increase or decrease the cost and time. This study presents a planning model that minimizes average haul distance in a large complex construction project. Based on earthwork planning, practitioners' heuristics, a districting algorithm and Simulated Annealing algorithm were employed to build the model. Districting algorithm plays a role that divides in dividing an earthmoving area into several sections. Simulated annealing provides a function that decides whether a new generated solution is confident. Finally, the proposed model was applied to a real earthmoving project of a large land development. It was found that the model showed approximately 14% improvement in average hauling distance compared to the actual design plan.

Key words : Construction of complex, Haul route, Cut, Fill, Districting area, Simulated Annealing (SA)

초 록

단지 조성을 위한 토공사는 대상 부지의 지형고를 계획고와 맞추기 위한 대규모 토량이동으로 이루어지는 공사로 전체 공사비에 20~30%를 차지하는 중요한 공정이다. 한편 토공사는 주로 적재-운반-하차-복귀의 단순 작업사이클로 구성되어 있어 계획의 품질은 공기와 비용에 매우 큰 영향을 끼친다. 본 연구에서는 대규모 단지 조성 공사에서 토공 운반거리를 최소화할 수 있는 토공구획 모델을 제시하였다. 본 모델은 구획 알고리즘과 simulated Annealing 알고리즘에 기반하고 있으며, 이러한 알고리즘은 국부해에 빠질 수 있는 현행 토공구획 방법을 개선하기 위하여 도입되었다. 제시된 모델의 적용성을 평가하기 위하여 실제 단지공사 토량이동도를 대상으로 시뮬레이션을 실시한 결과 약 14%의 개선효과를 확인하였다.

검색어 : 단지조성, 토공사, 절토, 성토, 구획산출, Simulated Annealing (SA)

1. 서론

토공사는 단지조성 프로젝트에서 단일 공종으로는 가장 큰 비중을 차지하는 공정 중 하나이다. 따라서 토공사 공정 진행의 효율성은 전체 프로젝트의 공정 진행에 매우 큰 영향을 끼친다. 특히 단지조성공사 토공계획은 계획을 지원하는 프로그램이 없기 때문에 전적으로 계획자의 주관적 판단에 의존하고 있다. 그렇기 때문에 무수히 많은 가능 대안에 대한 검토 없이 계획이 이루어지는 경우가 대부분이다. 결국 토공사가 진행되는 도중에 종래의 계획을 변경하기도 하는데, 이는 많은 비용과 시간을 낭비하는 요인이 된다.

* 삼성엔지니어링 토목설계사업부 (Samsung Engineering · klib@naver.com)

** 정희원 · 인천대학교 도시환경공학부 조교수, 공학박사 (Incheon National University · lifesine@inu.ac.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 정교수, 공학박사 (Corresponding Author · Hanyang University · jseo@hanyang.ac.kr)

Received March 2, 2015/ revised March 20, 2015/ accepted March 24, 2015

많은 연구자들이 유토 곡선을 통한 토공량 계산법을 개선하여 왔다(Easa, 1988; Chen and Lin, 1991; Easa, 1992; Easa, 1993; Easa, 1998). Easa는 도로 중심선이 지나는 지반고와 토공 구획의 중심선을 일치 시키는 방법을 개발하였고, Epps and Corey(1990)는 각 구획의 종단을 연결하여 절, 성토량을 보다 정확히 계산하는 방법을 개발하였다. 또한 Smith(1999)는 현장의 상태와 생산성을 고려한 장비군 수를 정하는 연구를 수행하였으며, Lee et al.(2003)은 절, 성토 운반을 2차원 지형도에서 최적화하는 연구를 수행하였다. Zhang(2008)은 토공량 이동을 위한 설비구성을 최적화하기 위한 다목적 시뮬레이션 체제를 개발하였다. Son et al.(2005)는 선형기반의 2D 모델을 이용하여 토공 운반거리를 측정하였다. Kim and Russell(2003a, 2003b)은 화물 전용 에이프런의 시뮬레이션 모델링을 토공현장에 맞게 개발하였다. Ji et al.(2010)은 토공사에 연관된 문제와 별개의 문제를 수치적으로 해결하는 모델을 개발하였다. Moselhi and Alshibani(2009)는 학습 알고리즘과 지리정보시스템을 이용하여 최적 토공이동 모델을 제시하였다.

토공 생산성을 증진시키기 위한 다양한 연구가 진행된 바 있으나, 단지공사에서 토량 이동에 대한 연구는 거의 없는 것으로 조사되었다. 이에 본 논문에서는 대규모 단지 조성을 위한 공사 중 토공사 계획 수립을 대상으로 최적 토공계획 수립을 위해 토공계획자를 대상으로 인터뷰를 실시하여 현행 토공계획 프로세스 및 토공계획자의 휴리스틱스를 정립하였다. 또한 도출된 정보를 기반으로 최적화 기법 중 하나인 Simulated Annealing(SA) 알고리즘을 사용하여 토공계획 모델을 제시하였다. 이후 실제 현장에 적용하여 모델의 적용성을 검토하였다.

2. 단지공사의 토공구획 계획 프로세스

토공구획 계획 모델을 수립하기 위하여 현업에서 토공계획을 담당하고 있는 11명의 실무자들과 인터뷰를 실시하였다(Table 1). 인터뷰를 통해 다음과 같은 사실을 발견할 수 있었다. 첫째,

Table 1. Interviews for Earthwork Planning Investigation

Question	Response	No.
The Objective	- To balance cut and fill volume inside the site	11 / 11
The Criteria for Judgment	- The average hauling distance - Total hauling distance multiplied by quantities - Total hauling cost	6 / 11 3 / 11 2 / 11
Decision Making Methods	- Subjective judgment - References	9 / 11 2 / 11
Use of Tools of Materials	- DAS (LH) - Guidance for site development (KLC)	7 / 11 5 / 11

토공 구획산출의 가장 큰 목적은 공사단지 내 절토량과 성토량의 균형을 맞추는 것이다. 이것은 비용을 절감하기 위한 것으로 만약 절토량과 성토량의 차이가 클 경우 남은 토사를 처분하든가 아니면 부족한 토사를 반입해 와야 하기 때문이다. 즉, 단지 내에서 잉여 또는 부족 토량이 발생하지 않게 하는 것이 비용을 최소로 하는 가장 첫째 조건이라 할 수 있다. 둘째는 토공구획 계획의 효율성을 판단하는 기준으로 절반 이상의 응답자들은 평균운반거리를 토공구획 계획의 효율성을 판단하는 지표로 활용하고 있었다. 셋째, 대부분의 판단은 계획자의 주관적인 경험에 기반하고 있으며, 다양한 대안에 대한 검토가 충분히 이루어지지 않고 있었다. 이것은 아직 토공구획 계획 방법에 대한 연구와 이를 지원하는 소프트웨어가 충분히 발달하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 마지막으로 계획자들은 DAS라는 소프트웨어를 사용하고 있었다. 그러나 이것 역시 초안 수준의 토공구획 계획만을 산출할 수 있는 것으로 나타났다.

전문가 인터뷰를 통해 도출한 토공구획 계획 프로세스는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 근접한 절토 성토 구역을 몇 개의 구획으로 분할한다.
- (2) 운반거리를 저감하기 위해 절토 구획을 근접한 성토 구획으로 연결한다.
- (3) 절토량을 연결된 구획의 성토량에 골고루 할당한다.
- (4) Eq. (1)에 제시된 평균운반거리를 산출하여 대안 계획의 효율성을 판단한다.

$$average\ hauling\ distance = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ij} \times Q_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij}} \quad (1)$$

where, D_{ij} = hauling distance from cut i to fill j
 Q_{ij} = soil quantity from cut i to fill j

현재 현업에서는 DAS라는 소프트웨어가 토공구획 계획을 위해 사용되고 있다. DAS 소프트웨어를 이용한 토공구획 계획 절차를 나열하면 다음과 같다.

- (1) DAS를 통해 40×40m의 격자를 형성한다(Fig. 1)
- (2) DAS가 자동으로 각 격자의 토공량을 산출하고, 절토와 성토의 경계를 결정짓는다.
- (3) 절토와 성토 구역의 경계에서 도저를 이용하여 이동시킬 구역을 산출한다.
- (4) 덤프트럭으로 이동시킬 토사량을 계산한다.
- (5) DAS로부터 산출된 결과를 바탕으로 토공구획 계획자가 임의로 운반경로를 생성하고 토량을 할당한다.

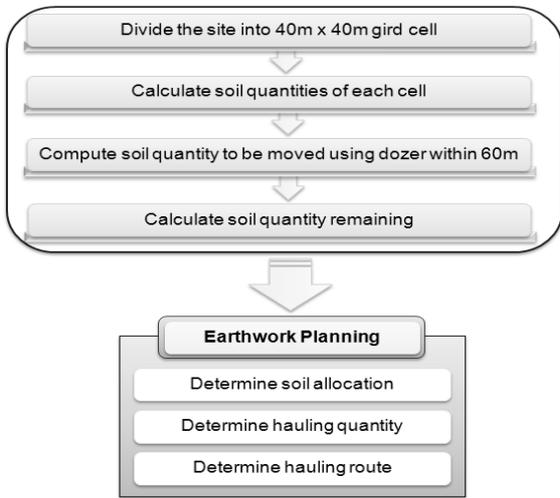
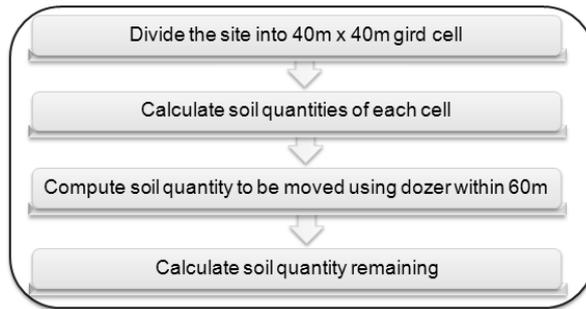


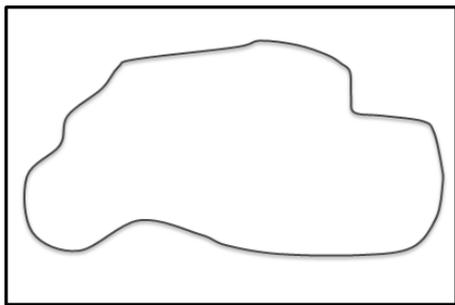
Fig. 1. 2-Step Earthwork Planning Process

그러나 DAS는 도저로 이동시키는 토사의 운반계획만을 지원할 뿐 덤프트럭으로 이동시키는 토공계획을 산출할 수 없다. 또한 DAS 기술은 구획(District)을 어떻게 나눌지에 대한 지원이 불가능하다. 따라서 이 단계 이후부터는 토공계획자가 주관적으로 판단하여 토공구획을 나누기 때문에 정확한 절,성토 구획설정을 하지 못한다.

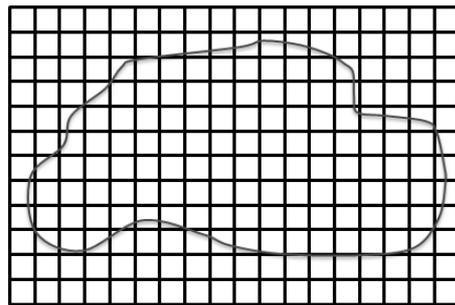
DAS로부터 산출된 결과를 바탕으로 토공구획 계획자는 상세 계획을 수립한다. 이때 대부분은 주관적 경험을 바탕으로 계획이 이루어진다. 토공구획 상세 계획 수립을 지원하는 소프트웨어나 가이드라인은 존재하지 않는 것으로 조사되었다. 조사된 토공구획 상세계획 절차를 도식화하면 Fig. 3과 같다. 우선 계획자는 임의의 절토구역을 선택하여 몇 개의 구획으로 분할하고, 같은 방식으로 근접한 성토구역을 선택하여 몇 개의 구획으로 나눈다(Fig. 3(c)). 그리고 나서 계획자는 하나의 절토구획을 다른 하나의 성토구획과



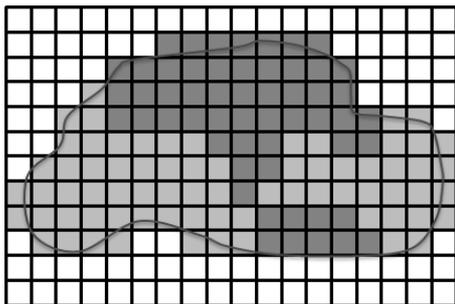
(a) Earthwork Planning Process - DAS



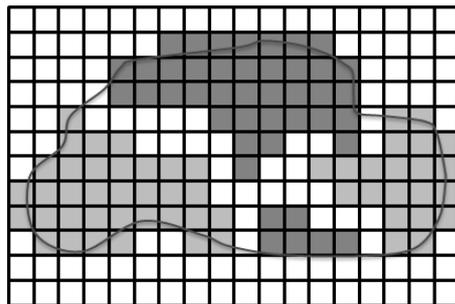
(b) Input Site Boundary



(c) Divide the Site Into 40 x 40m Grid

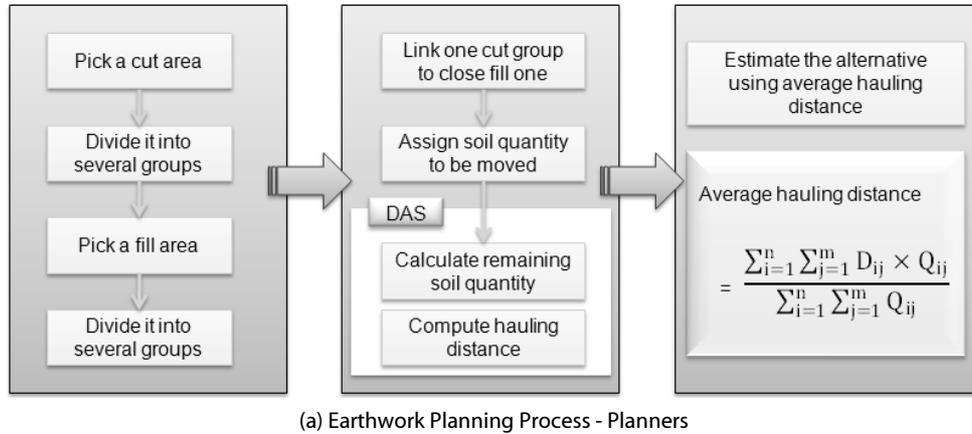


(d) Calculate Soil Quantities of Each Cell

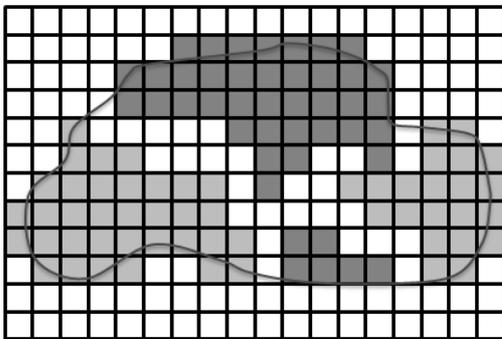


(e) Compute Soil Quantity to be Moved using Dozer Within 60m

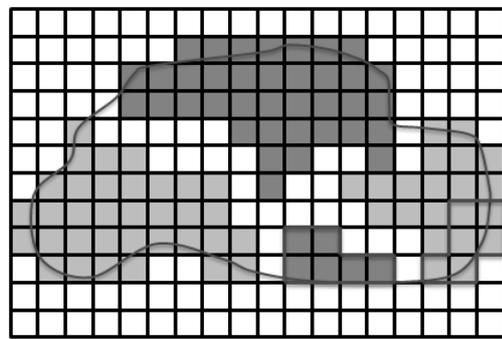
Fig. 2. Earthwork Planning Process - DAS



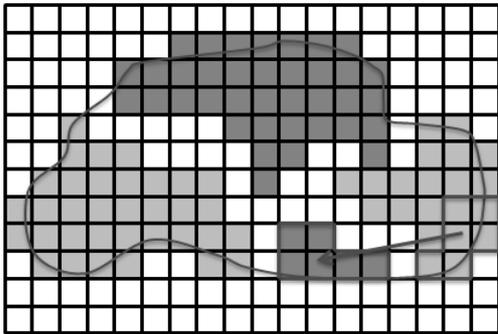
(a) Earthwork Planning Process - Planners



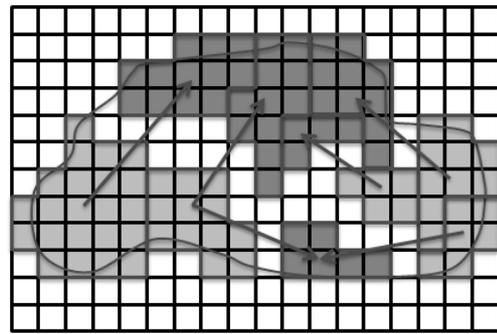
(b) Remaining Soil Quantities



(c) Pick and Divide Cut and Fill Areas



(d) Connect Adjacent Fill Section



(e) Repeat Assigning Tasks

Fig. 3. Earthwork Planning Process - Planners

연결시키고 이동 토량을 할당한다(Fig. 3(d)). 이후 절토구획의 남은 토량을 다른 하나의 성토구획과 연결시키고 이동 토량을 할당한다. 만약 절토구획의 남은 토량이 성토구획의 토량을 만족시키지 못하면 근접한 다른 하나의 절토구획에서 부족 토량을 취한다. 모든 구획에 대해 이런 절차가 반복되면 하나의 토공구획 계획도가 완성된다(Fig. 3(e)). 이어서 계획지는 토공구획 계획도로부터 평균 운반거리를 산출한다. 이후 새로운 토공구획 계획도를 작성하여 평균 운반거리를 산출하여 기존 계획도의 평균 운반거리와 비교하여 평균 운반거리가 보다 작은 계획안을 최종 계획으로 선정한다. 이와 같은 방법으로 산출된 토공구획 계획은 매우 많은 시간을

소요할 뿐만 아니라 선정된 계획안이 최적의 계획이라고 보장할 수 없다. 특히 현업에서는 보통 2-3개의 대안을 비교하여 그 중 평균 운반거리가 가장 작은 계획안을 선정하기 때문에 가능성 있는 대안이 충분히 검토되지 않는다.

3. 단지공사 토공구획 계획 모델

3.1 절토 및 성토 구획 산출 모델

본 연구에서는 위와 같은 방식을 극복하기 위해 Fig. 4와 같이 새로운 방식의 토공구획 모델을 제시하였다. 본 모델은 개발된

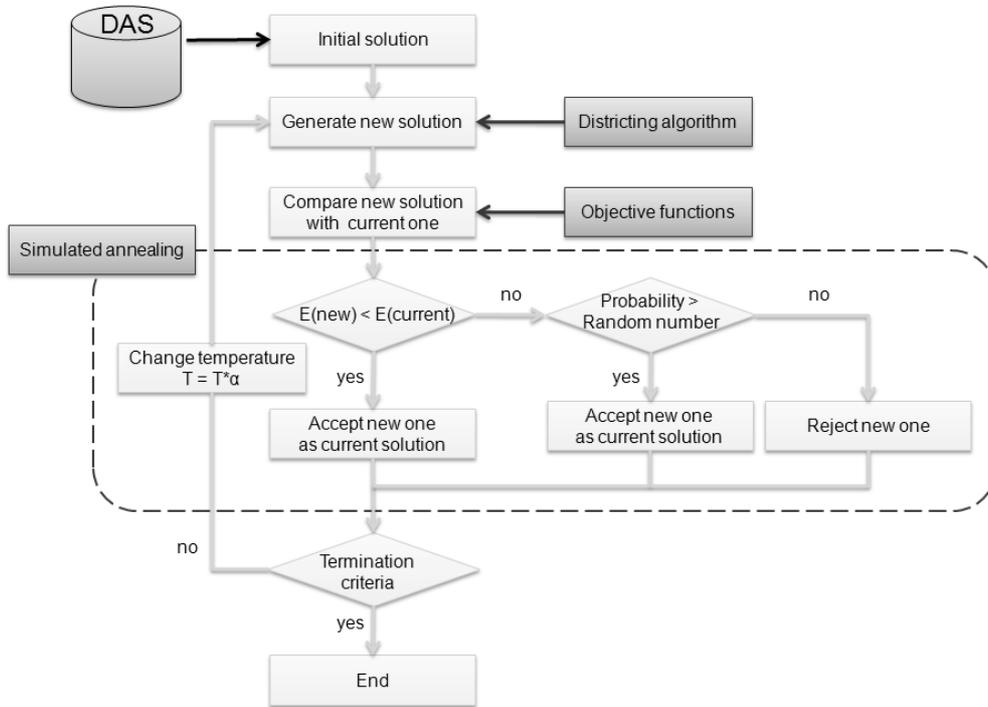


Fig. 4. Model Flow Chart

알고리즘에 따라 구획을 임의로 변경해 가며 해당 토공구획도의 평균운반거리를 산출하여 최소의 평균운반거리가 산출되는 토공구획도를 도출해낸다. 이때 Matlab으로 프로그래밍된 Districting 알고리즘과 Simulated Annealing 알고리즘이 차례로 적용된다.

Fig. 4에 보인 바와 같이, 개발된 모델(Earthwork Planning Model, 이하 EPM)은 DAS의 결과물을 임의의 몇 개의 구획으로 분할한 토공구획도를 최초 데이터로 입력받는다. 이때 EPM은 이 토공구획도를 현재 상태의 최선해(Current Best Solution, 이하 CBS)로 간주한다. 이것을 바탕으로 EPM은 Districting 알고리즘을 이용하여 대안 토공구획도(Alternative Solution, 이하 AS)를 산출한다. AS가 산출된 후 EPM은 CBS와 AS가 목적함수를 충족시키는가를 판단한다. 이때 AS가 국부해인가를 판별하기 위해 SA 알고리즘이 사용된다. 이와 같은 과정이 반복되면 국부해를 피하면서도 평균운반거리를 최소화할 수 있는 토공구획도를 산출한다.

3.2 Districting 알고리즘

Districting 알고리즘은 Table 2와 같은 절차를 거친다. Matlab에서 프로그래밍 된 본 알고리즘을 통하면 절토부와 성토부의 경계에서 무작위로 방향을 바꿔 새로운 구획을 형성하게 된다. 보다 구체적으로 설명하면, 우선(1,1) 격자에서 시작하여 우측으로 한 칸씩 이동하며 EPM은 절토부나 성토부의 경계를 찾아낸 후, 그 지점에서 구획을 확장할지 축소할지를 무작위로 결정한다. 무작

위로 결정하는 이유는 국부해일 가능성을 배제하기 위해서이다. 이렇게 무작위로 결정된 구획에 대해 목적함수를 기반으로 에너지 값이 산출되고 그것은 Simulated Annealing 알고리즘의 입력 값이다.

3.3 목적함수

구획의 응집도와 토공의 효율성을 판단하기 위해 다음과 같이 세 개의 목적함수를 정의하였다. 첫째, 토공구획의 밀집도로 구획의 모양이 밀집해 있을수록 토공생산성이 높아지게 된다는 사실에서 다음과 같이 목적함수를 구성하였다. 본 목적함수의 값은 토공구획의 형상이 밀집해 있는 형상일수록 작게 산출된다. 왜냐하면 구획은 임의로 생성되는데, 만약 좌우로 긴 장방형의 형상으로 구획이 설정된다면 시공성을 오히려 저하시키기 때문이다.

$$f_1(x) = \sum_{j=1}^k Q_j \times \sqrt[3]{(\max x_j - \min x_j)^2 + (\max y_j - \min y_j)^2} \quad (2)$$

where, k = total number of districts
 Q_j = soil quantity of district j
 $\max x_j$ = max x - coordinate of district j
 $\min x_j$ = min x - coordinate of district j
 $\max y_j$ = max y - coordinate of district j
 $\min y_j$ = min y - coordinate of district j

둘째는 절토량과 성토량의 차이를 최소화할 수 있는 목적함수이다. 구획의 절토량과 성토량의 차이가 최소가 될수록 본 목적함수의 값은 작아지게 된다.

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^k |Q_j| \quad (3)$$

where, $Q_j = \sum_{i \in D_j} q_i$, $D_j = \{i | x_i = j\}$
 $q_i = \text{the amount of soil to be cut or filled of cell } i$

셋째는 임의의 구획이 최소한 하나 이상의 절토부와 성토부를 포함하는가를 검토하는 함수이다. 본 목적함수는 임의의 구획이 최소한 하나 이상의 절토부나 성토부를 포함하도록 한다.

$$\sum_{i \in D_j} x_i \geq 1 \quad (4)$$

where, $x_i = 0 \text{ or } 1 (i \in D_j)$

Table 2. Districting Algorithm Process

Steps	Method	Process
Assign soil quantity to each cell in n by m matrix form	- cut cell: (+) / fill cell: (-) - outside the boundary: zero value	<ul style="list-style-type: none"> - positive : cut section - negative : fill section - zero : balanced or outside <p>Assign value in matrix form</p>
Initialize the solution	- n districts - draw cell value from site layout matrix	<p>Initialize solution with n districts</p>
Find cells located at boundary and decide to change or not	- move from (1,1) to the right - stop at boundary - generate random number [0,1]	<ul style="list-style-type: none"> - move from (1,1) to right - stop at boundary - change or not <p>Find the boundary and decide change</p>
Decide the direction to be changed	- generate random number	<ul style="list-style-type: none"> - randomly decide direction to be changed <p>Decide direction</p>
Assign the cell to selected district	- bring value from original plane - assign zero value to the cell in other districts	<ul style="list-style-type: none"> - if there's a cell of other district, assign it to new district <p>Change the cell</p>

3.4 Simulated Annealing (SA) 알고리즘

SA 알고리즘은 현재 도출된 해가 국부해일 가능성을 평가하는 프로세스이다. 특히 토공 구획도는 고려할 수 있는 경우의 수가 무수히 많기 때문에 어느 것이 최적해인가를 판단하기가 매우 어렵다. 이때 SA 알고리즘을 이용하면 AS의 목적 함수값이 CBS의 것보다 크더라도 개선된 해일 수 있다는 오류를 방지할 수 있다.

SA 알고리즘은 이미 다양한 연구에서 전형적인 알고리즘을 제시한 바 있다. 본 논문에서는 그 알고리즘을 그대로 차용하였다. 이 알고리즘은 본 연구에서 제시된 모델에서 절토부와 성토부 사이에 임의로 구획을 나누어 구획을 생성하였을 때 그것이 전역해(global solution)인지 국부해(local solution)인지를 판단한다.

SA 알고리즘은 최솟값을 찾는 알고리즘으로 많이 사용되고 있는데, 다음의 두 가지 이유로 이 알고리즘은 많이 이용되고 있다. 첫째, 실무자들 사이에서 넓은 범위의 공학적 문제들을 성공적으로 해결했다는 점이다. 둘째, SA 알고리즘과 같은 한계점 알고리즘은 점근적 수렴성의 이론적 분석과 같은 확률적 요소를 사용하고, 수학자들 사이에서는 매우 자주 쓰이고 있다.

SA 알고리즘은 금속의 담금질 원리로 만들어졌다. 만약 금속이 천천히 식는다면, 금속 분자가 결정구조로 형성되어 둥그런 모양이

Simulated Annealing [Kirkpatrick et al., 1983; Cemy, 1985]

1. Select an initial feasible solution s
 2. Let $T = T_0$ be the initial temperature
 3. **while** $T \geq \epsilon$, do the following steps
 - 3.1. **for** L times do the following steps
 - select at random a feasible move producing a neighborhood feasible solution s' of the current solution s
 - 3.1.1. **if** $\Delta = \Delta(s') < 0$ (downhill move)
 - the move is performed
 - 3.1.2. **else** $[\Delta = \Delta(s') \geq 0]$ (uphill move)
 - the move is performed with probability $p = \exp(-\Delta/T)$
 - 3.1.3. **end if**
 - update the temperature T
 - 3.2. **end for**
 4. **end while**
5. The final solution is the best local optimum found s^*

Fig. 5. Simulated Annealing Algorithm (Ricca and Simeone, 2008)

될 것이다. 이 결정구조는 최소의 에너지 상태이거나 생겨나는 문제의 최적화된 해결책인 상태임을 알려준다. 만약 금속이 빨리 식는다면, 금속 조각은 거칠거나 돌출부가 생긴다. 이러한 돌출부와 뾰족한 각은 일반적인 극대, 극솟값을 나타낸다. SA 알고리즘을 이용하면 값이 올라 갈수도 있는 경우도 있지만 최적의 확률적 방법으로, 현재 도출된 해가 극소 값일 가능성을 피하고 최솟값을 찾아낸다.

Fig. 5와 같이 금속의 온도는 점차 줄어들고, 모든 프로세스는 온도가 내려가는 동안 계속 반복된다. 온도가 감소하는 것은 값이 변경될 경우의 수가 줄어든다는 것을 의미한다. 온도가 0일 때 이 프로세스는 종료하며, 최적 값을 찾으면 온도가 변해도 알고리즘

의 도출 값은 변하지 않는다.

4. 사례연구

본 논문에서 제시한 모델의 적용성을 검토하기 위하여 실제 현장의 토공도를 입수하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6은

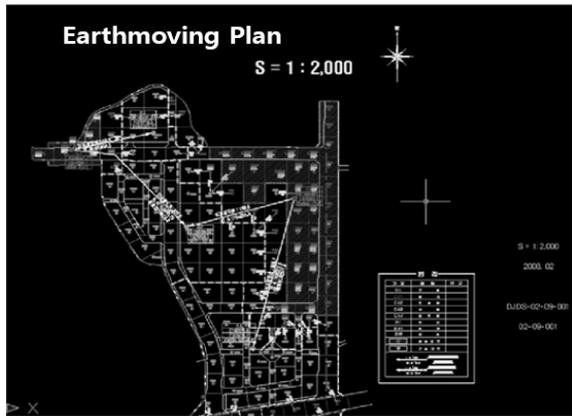


Fig. 6. Actual Design Data

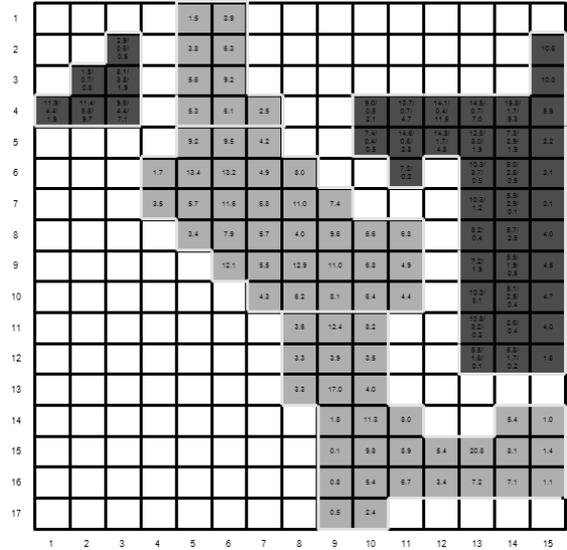


Fig. 7. Transformation of Design Data to Matrix Form

Table 3. Input Data about Volume of Cut, Fill

1				1.5	3.9										
2			-4.0	3.8	6.3										-10.8
3		-2.8	-8.3	5.6	9.2										-10.0
4	-18.2	-26.7	-21.1	5.3	6.1	2.5			-11.9	-19.1	-26.0	-22.2	-26.3	-5.9	
5				9.2	9.5	4.2			-8.3	-17.4	-20.8	-17.5	-12.1	-2.2	
6				1.7	13.4	13.2	4.9	8.0				-14.5	-8.8	-2.1	
7				3.5	5.7	11.6	6.3	11.0	7.4			-11.5	-8.9	-2.1	
8				3.4	7.9	5.7	4.0	9.6	6.6	6.8		-8.6	-8.2	-4.0	
9					12.1	5.5	12.9	11.0	6.8	4.9		-9.1	-7.9	-4.5	
10						4.3	6.2	8.1	6.4	4.4		-13.4	-8.0	-4.7	
11							3.6	12.4	8.2			-13.7	-2.9	-4.0	
12							3.3	3.9	3.5			-7.9	-7.7	-1.5	
13							3.3	17.0	4.0						
14								1.8	11.3	8.0				5.4	1.0
15								0.1	9.3	2.9	5.4	20.8	8.1	1.4	
16								0.3	5.4	6.7	3.4	7.2	7.1	1.1	
17								0.5	2.4						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

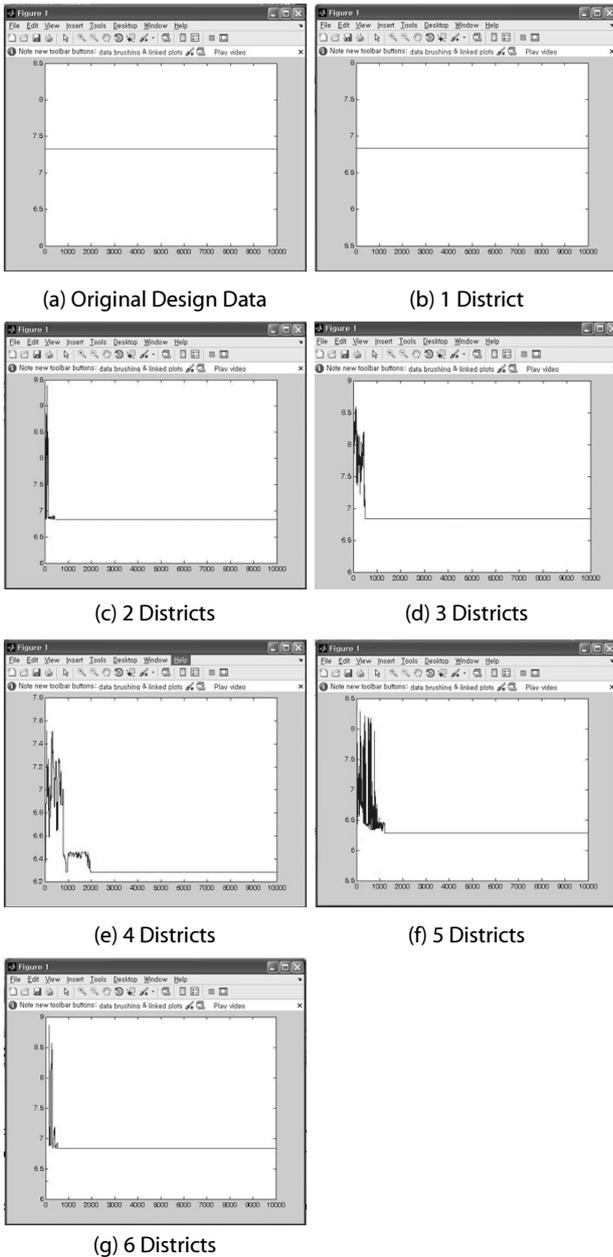


Fig. 8. Average Hauling Distance

CAD 기반의 DAS를 이용한 OO단지의 토량이동도이다. 왼쪽상단과 오른쪽상단에 표시 되어있는 빨간색 셀은 절토 지역이고, 초록색 셀은 성토 지역이다.

Fig. 7은 격자 형식으로 전환된, 각 셀에 절토 및 성토량이 입력된, 도면이다. 격자 형식을 실제 토공도와 동일한 크기로 만들기 위하여 세로와 가로 셀을 17×15 격자로 형성하고, 각 격자에 토공량을 입력하였다. 실제 데이터와 같이 격자 데이터에도 절토구획은 빨간색으로 성토구획은 초록색으로 표시한다. 그리고 절토와 성토

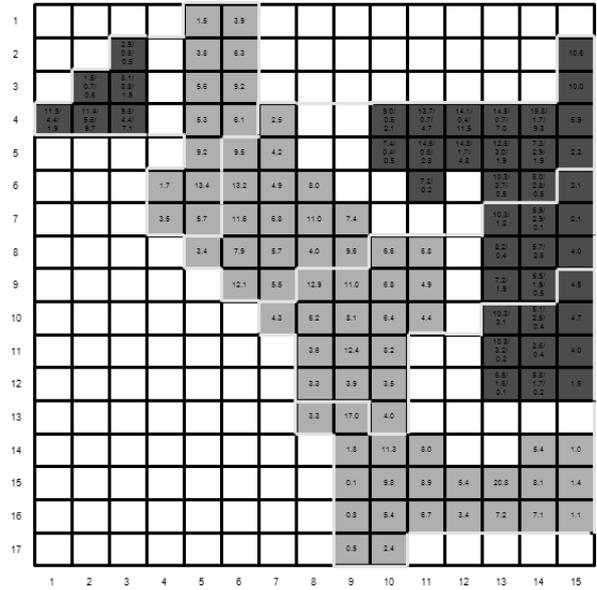


Fig. 9. Earthwork Planning Solution with 4 Districts

의 경계선을 다섯 구획으로 나누어 노란색 선으로 그 경계를 표시하였다. 사례연구를 위하여 나는 구획의 수는 6개를 초과하지 않도록 하였고, 반복 계산 횟수는 10000번으로 설정하였다.

Fig. 8은 구획을 1개부터 6개까지 나누었을 때 산출된 평균운반거리이다. 그림에 보듯 시뮬레이션 횟수가 증가할수록 평균운반거리는 하나의 값으로 수렴하게 된다. 예를 들어 Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 1개의 구획으로 설정한 경우 평균운반거리는 7.36m로 계산되었다. 값의 변동이 없는 이유는 구획이 1개이기 때문이다. 그러나 구획이 2개 이상이 되면 구획이 여러 모양으로 다르게 나눌 수 있어 구획의 모양에 따라 운반거리 또한 다르게 산출된다.

Fig. 9는 평균 토공 이동거리의 값이 가장 작은 토공도를 4구획으로 나누었을 때의 토공 구획도이다. 평균 토공 운반 거리는 6.27m로 종래의 설계 데이터의 평균 토공 이동거리(7.36m)와 비교하였을 때 14.81%가 감소된 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구의 목표는 단지공사에서 토공 평균 운반거리를 최소화할 수 있는 토공 구획도를 산출할 수 있는 모델을 구축하는 것이다. 이를 위해 토공계획자를 대상으로 인터뷰를 실시하여 현행 토공계획 프로세스 및 토공계획자의 휴리스틱스를 정립하였으며, 이를 근거로 구획 모델을 구축하였다.

본 연구에서 제시한 모델은 Districting 알고리즘과 SA 알고리즘에 기반하고 있다. Districting 알고리즘은 토공 이동도를 데이터로

입력받아 임의의 구획으로 분할하는 기능을 하고, SA 알고리즘은 산출된 토공 구획도가 국부해인지를 판단하는 역할을 한다. 실제 현장 토량이동도에 본 모델을 적용해 본 결과 최대 14.81%의 평균운반거리 감소의 효과를 확인하였다.

본 연구의 한계는 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 제시된 3개의 목적함수를 적절히 조합하여 하나의 지표로 산출할 수 있는 과정이 필요할 것이다. 본 연구에서는 세 목적함수를 모두 만족시키는 대안만이 채택될 수 있도록 고안되었다. 그러나 어느 하나의 목적함수를 만족시키지 않는다고 해서 대안이 될 수 없다는 의미는 아니기 때문에 모든 목적함수의 조건을 만족시킬 필요는 없다고 판단된다. 둘째, 본 연구에서 제시한 구획 알고리즘은 단지 내에 토공장비의 통행이 불가능한 제척지가 존재할 경우 제대로 작동하지 않을 수 있다. 왜냐하면 본 연구에서 모든 격자는 토공장비의 통행이 가능하다는 가정을 전제하고 있기 때문이다. 마지막으로 본 연구는 단지 내 토질은 균질하다는 가정을 전제하고 있다. 그러나 토질은 여러 종류일 수 있고, 그에 따른 운반 방법에도 차이가 있을 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 토질에 대한 고려가 포함되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호 : 14SCIP-B079344-01)의 지원에 의하여 수행 되었습니다.

References

- Easa, S. M. (1988). "Improved method for locating centroid of earthwork." *Journal of Surveying Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 13-25.
- Easa, S. M. (1992). "Estimating earthwork volumes of curved roadways: Mathematical Model." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 834-849.
- Easa, S. M. (1993). "Smooth boundary approximation for directly computing irregular area." *Journal of Surveying Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 3, pp. 86-101.
- Easa, S. M. (1998). "Smooth surface approximation for computing pit excavation volume." *Journal of Surveying Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 3, pp. 125-133.
- Epps, J. W. and Corey, M. W. (1990). "Cut and fill calculation by modified average-end-area method." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 5, pp. 683-689.
- Ji, Y., Borrmann, A. and Rank, E. (2010). "Mathematical modeling of earthwork optimization problems." *Proceedings of the fifth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2010 (ICCCBE 2010)*.
- Kim, S. K. and Russell, J. S. (2003a). "Framework for an intelligent earthwork system: Part I. System Architecture." *Automation in Construction*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-13.
- Kim, S. K. and Russell, J. S. (2003b). "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.
- 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*, Vol. 23, No. 3D, pp. 349-357.
- Marzouk, M. and Moselhi, O. (2004). "Fuzzy clustering model for estimating haulers' travel time." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 130 No. 6, pp. 878-886.
- Moselhi, O. and Alshibani, A. (2009). "Optimization of earthmoving operations in heavy civil engineering projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 135, No. 10, pp. 948-954.
- Ricca, F. and Simeone, B. (2008). "Local search algorithm for political districting." *European Journal of Operational Research*, ELSEVIER, Vol. 189, No. 3, pp. 1409-1426.
- Smith, S. (1999). "Earthmoving productivity estimation using linear regression techniques." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 131-141.
- Son, J. H., Mattila, K. G. and Myers, D. S. (2005). "Determination of haul distance and direction in mass excavation." *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 131, No. 3, pp. 302-309.
- Tam, C. M., Tong, T. L. and Wong, B. L. (2007). "An integrated system for earthmoving planning." *Journal of Construction Management and Economics*, ASCE, Vol. 25, pp. 1125-1135.
- U.S. Department of Commerce (2002). *Construction review*, U.S. Department of Commerce.
- Zhang, H. (2008). "Multi-objectives simulation-optimization for earthworkmoving operations." *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 1, pp. 78-86.