

자동화 토공을 위한 작업환경 모델링 및 굴삭기 이동계획

Work Environment Modeling and Excavator Moving Plan for Automated Earthworks

김성근*[○] 조예원** 김하열*** 옥종호****
Kim, Sung-Keun Cho, Ye-Won Kim, Ha-Yearl Ock, Jong-Ho

요약

최근 제조업의 자동화 및 로봇기술의 발전은 건설업에서 고도의 자동화 기술이 매우 유용할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 첨단기술의 일부만이 건설업에 적용되고 있는데 이것은 작업의 위치가 수시로 변경되고 재료, 장비 및 작업자가 항상 움직이는 건설현장의 특성 때문이다. 단지개발과 같은 토공작업은 매우 반복적이고 지루한 작업이며 많은 건설장비가 필요한 작업이기 때문에 자동화 기술을 적용하기에 좋은 후보분야이다. 본 논문에서는 자동화 토공을 위하여 옥트리 모델을 이용하여 작업환경을 모델링하고 효과적인 굴삭기 플랫폼 이동계획을 생성하는 방법을 제시하고 있다. 굴삭기 플랫폼의 이동경로를 생성하기 위하여 숙련된 작업자와 공사관리자의 노하우를 제안된 토공작업계획 모델에 반영하였다.

키워드: 건설자동화, 토공, 굴삭기, 작업계획

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

현재 국내 건설산업은 숙련공 부족 현상, 고령화 문제, 안전상의 문제로 인한 노무 생산성 저하, 임금상승으로 인한 채산성 악화, 품질의 균일성 및 안전성 확보의 어려움 및 시공기술 경쟁력의 약화와 같은 문제점과 대면하고 있다. 이러한 상황에서 건설자동화 시스템 및 로봇의 개발은 당면한 문제점을 해결하기 위한 최선의 기술적 접근방법으로 인식되고 있다.

건설공종 중에서 토공은 도로, 공항, 단지조성등과 같이 대부분의 토목 및 건축 공사에 필요한 가장 기본적인 작업으로 건설자동화 및 로봇화의 우선적 대상작업으로 고려되고 있는 분야이다 (김성근, 2004). 현재까지 시공의 계획 및 토량의 최적배분 및 장비의 진로계획, CAD와 실시간 토공장비 위치정보의 연계, 원격조종, 작업 후 시공공정 및 작업물량 업데이트 등을 위한 실적관리 소프트웨어를 포함하는 완성도 있는 토공자동화 시스템에 대한 사례는 찾아볼 수 없다. 이들 각각에 대한 연구가 시도되고 있으나, 아직은 토공 전체의 생산성, 품질, 및 안전도를 높이기 위한 통합적인 자동화 토공시스템 형태의 개발은 이루어지지 않고 있다.

본 연구는 종합적인 자동화 토공시스템 개발을 위하여 필요한 요소기술로써 작업공간 및 환경을 모델링하여 효과적인 굴삭작업을 위한 영역인식과 분할 방법을 제시하고, 숙련된 굴삭기 운전자가

제시하는 효과적인 굴삭작업을 위한 요소들을 파악하여 굴삭기 이동경로를 제시하는 것을 목표로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 수행한 연구의 범위 및 방법은 다음과 같다.

(1) Octree 자료구조를 이용하여 작업공간에 대한 모델을 형성하고 적절한 작업구역(Cell)의 크기를 결정한다.

(2) 토공계획을 수립하는 공사관리자의 설문 및 인터뷰를 통하여 효율적인 굴삭작업을 위하여 고려해야 하는 요소를 파악하고 요소들의 우선순위를 결정한 후, 이것을 바탕으로 굴삭기 이동모델을 제시한다.

2 자동화 토공시스템 개요

2.1 자동화 토공시스템 기능

자동화 토공시스템은 작업진행 상황에 따라 지속적으로 변화되는 비정형 지반형상을 주기적으로 맵핑하여 3차원으로 모델링하고 계획도면과 비교·검토함으로써 자동으로 토공량을 산출한다. 로컬 작업 영역에서 센서에 의해 측정된 데이터를 실제 작업환경과 동일하게 모델링된 컴퓨터내의 가상환경에서 실시간으로 업데이트하고 이러한 가상환경을 바탕으로 영역분할, 최적 플랫폼 위치선정 및 작업 순차생성을 하는 모듈 및 굴삭 후 상차할 트럭과 굴삭기 주변 장애물을 센싱하여 안전성을 확보하기 위한 모듈로 구성되어 있다. 그리고 자동화 토공시스템은 굴삭기의 원격제어 및 자율작업제어를 통한 토공작업 실적을 시공관리 DB에 저장하여 실적을 관리하고 주기적으로 작업실적을 측정하여 계획과 비교 분석하는 한편 성과측정 결과를 바탕으로 작업현황을 관리할 수 있는 시공관리 모듈로 구성되어 있다.

Task Planning System은 3차원 지반맵핑 정보에 근거하여 굴삭

* 종신회원, 서울산업대학교 건설공학부 조교수, 공학박사, cem@snut.ac.kr

** 학생회원, 서울산업대학교 대학원, yw0208@lycos.co.kr

*** 학생회원, 서울산업대학교 대학원, psyche1024@snut.ac.kr

**** 종신회원, 서울산업대학교 건축학부 조교수, 공학박사, ockjh@snut.ac.kr

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(06첨단융합C01)에 의해 수행되었습니다.

기의 제원 및 작업특성을 고려하여 작업영역을 자동적으로 분할하고 최적으로 작업이 수행될 수 있도록 작업순차를 생성하게 된다. 중요한 것은 굴삭기 운전자 및 공사관리자의 작업 특성 및 노하우를 Task Planning System에 부여하여 지능형 굴삭시스템이 숙련된 장비조종자의 작업 방법 및 특성을 반영할 수 있도록 하였다.



그림1. 자동화 토공시스템 개요도 (두산인프라코어 외, 2006)

2.2 자동화 토공 작업절차

레이저 스캐너를 이용하여 토공현장을 스캔하면 Point cloud를 얻게 되고, 이것을 Octree 데이터 구조에 저장한다. 그림2에서와 같이 Octree 구조에서 Root를 포함하는 시공기면을 설정하고 굴삭기의 제원과 굴삭작업의 특성을 고려하여 작업구역(Cell)의 크기를 결정한 후, 시공기면 위의 가장 상위 작업레벨에서 처음으로 작업을 시작하기 위한 위치를 선정 후 굴삭기 플랫폼을 위치시킨다.

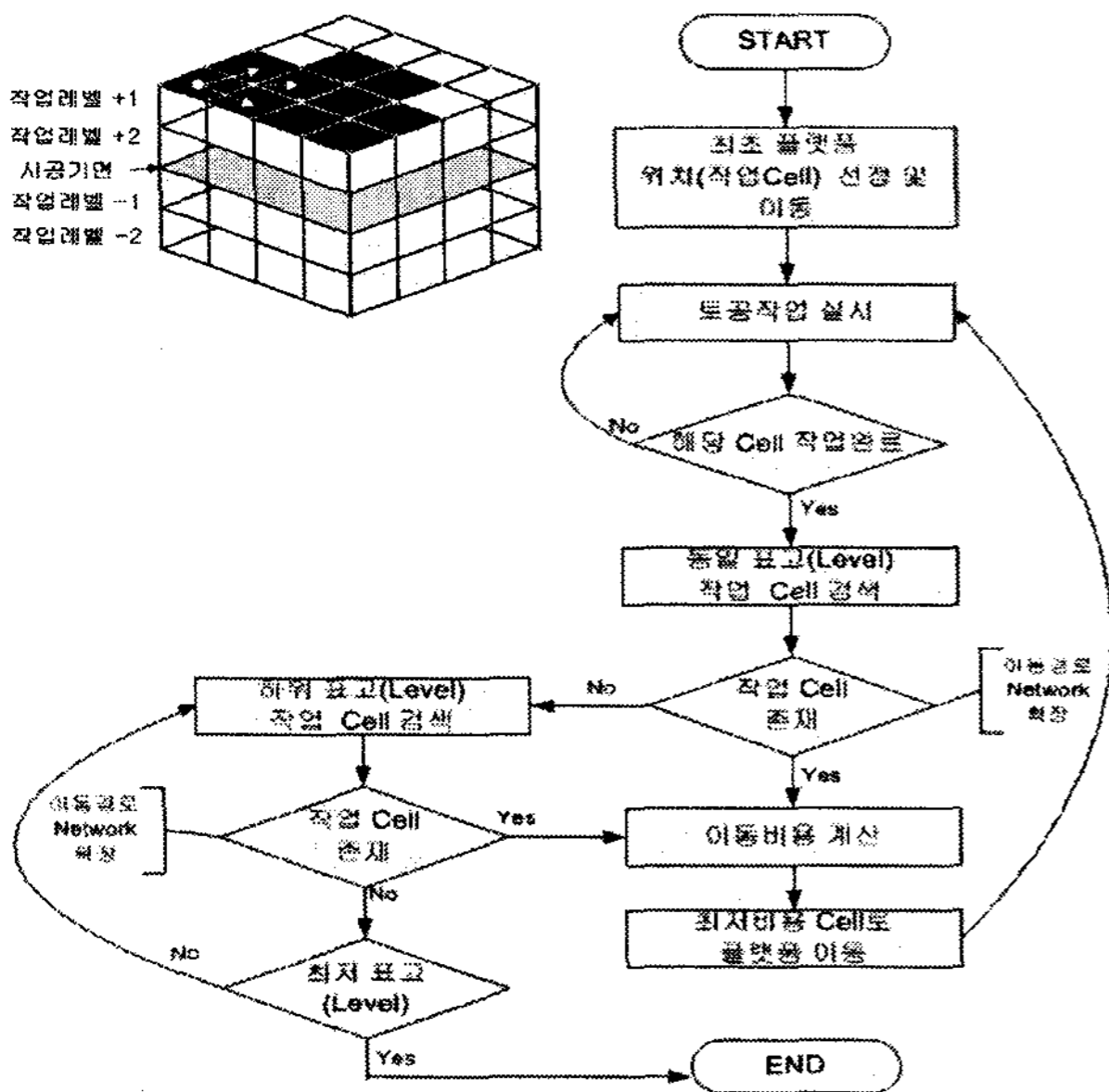


그림2. 자동화 토공 작업절차

해당 작업구역에서 작업이 완료된 후, 동일한 작업레벨에 작업 대상구역이 존재하면 플랫폼을 옮겨 연속적으로 토공작업을 수행하게 된다. 만약 여러 개의 작업 대상구역이 존재한다면 가장 효율적으로 토공작업이 수행되도록 작업구역을 선정해야 하는데, 이것을 위하여 현장의 숙련된 굴삭기 운전자나 공사관리자의 의사결정

고려요소 및 기준의 파악이 필요하다. 작업구역간 굴삭기 플랫폼의 이동경로는 네트워크 형태로 구성될 수 있는데, 네트워크에서 최소의 이동비용이 소비되는 작업경로를 파악하여 플랫폼 이동경로 계획하게 된다. 특정 작업레벨이 완료되면 바로 하위 작업레벨로 움직여 동일한 방법으로 플랫폼을 옮기면서 시공기면이 완성될 때까지 토공작업을 수행하게 되는 것이다.

3. 작업환경 모델링

3.1 Octree 모델

Octree는 8개의 노드를 가진 Tree구조를 의미하는 것으로 공간 분할 용도로 사용되는 자료구조다. 그림3에서 보는 바와 같이 해당 토공현장 객체(Object) 전체를 포함하는 3차원 바운딩 박스를 설정하여 놓고 박스의 중심을 Root(R)로 한다. Root를 중심으로 바운딩 박스를 8개의 노드(공간)로 분할하고 (Level 1), 필요에 따라서 Quadtree에서와 마찬가지로 방법으로 특정 종료조건을 만족할 때까지 재귀적으로 특정 공간을 8개의 서브 노드로 나누는 작업을 계속하게 된다 (김성근, 2004).

Octree구조에서 시공기면은 점 A, B, C, D와 R을 포함하는 평면으로 정의하며, 각 노드는 검정색, 회색 및 흰색 중에서 한 가지 색에 관한 정보를 갖게 되는데, 검정색은 해당 구역의 전체가 토사 또는 암으로 채워진 것을 의미하고, 회색은 해당 구역의 일부만이 토사 또는 암으로 채워진 것을 의미한다. 그리고 흰색은 해당 구역이 토사 또는 암이 없이 비어있는 부분을 의미한다.

Level 1에서 노드의 번호가 1~4이고 노드의 색이 검정색이면 시공기면의 상부에 위치하는 절토구역이 되며, 노드의 번호가 5~8이고 노드의 색이 흰색이면 시공기면 아래에 위치하는 성토구역을 의미한다. 만약 Level 1에서 노드의 색이 회색이면 재귀적으로 Level 2의 8개 서브노드를 구성하며 노드가 시공기면 위에 위치하면서 검정색이면 절토구역이며, 시공기면 아래에 위치하면서 흰색이면 성토구역으로 설정되게 된다. 전체 토공사는 시공기면 위의 노드가 모두 흰색이 되고, 시공기면 아래의 노드가 모두 검정색이 되면 종료된다.

최하위 노드(그림3에서는 Level3)에서는 해당 구역의 좌표, 지반의 종류, 각종 토질계수(압밀계수, 압축지수, 투수계수 등), 토량(계획 절토량, 계획 성토량, 현재 절토량, 현재 성토량), 지장물의 위치 및 종류에 관한 정보를 저장하게 된다.

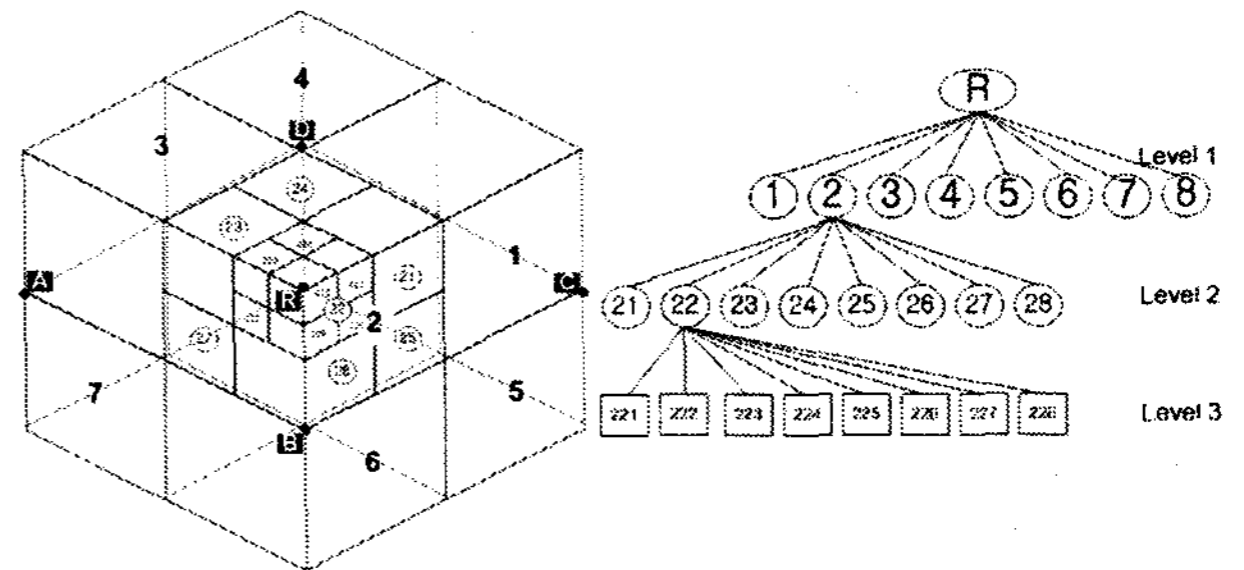


그림3. 작업환경 Octree 모델링 예

3.2 작업구역(Cell) 크기의 결정

효율적인 토공계획 및 굴삭기 플랫폼 이동계획을 위하여 Octree의 최하위레벨의 노드를 나타내는 셀(Cell)의 물리적인 크기를 정하는 것이 중요하다. 셀의 가로 및 세로의 크기는 토공작업시 사용되

는 굴삭기의 제원에 따라서 결정될 수 있다. 현장에서 가장 많이 사용되는 굴삭기의 모델을 조사한 결과 최대굴삭반경은 굴삭기의 붐 길이와 암길이에 영향을 받는데 그 범위가 7~12m인 것으로 조사되었으며, 굴삭기 운전자와의 면담을 통하여 유효굴삭반경은 8~10m 정도로 보는 것이 타당하다는 결론을 얻었다. 이와 같은 정보에 근거하여 셀의 크기를 결정할 수 있지만 굴삭작업을 하는 방식에 따라서 셀의 크기가 달라 질 수도 있을 것이다.

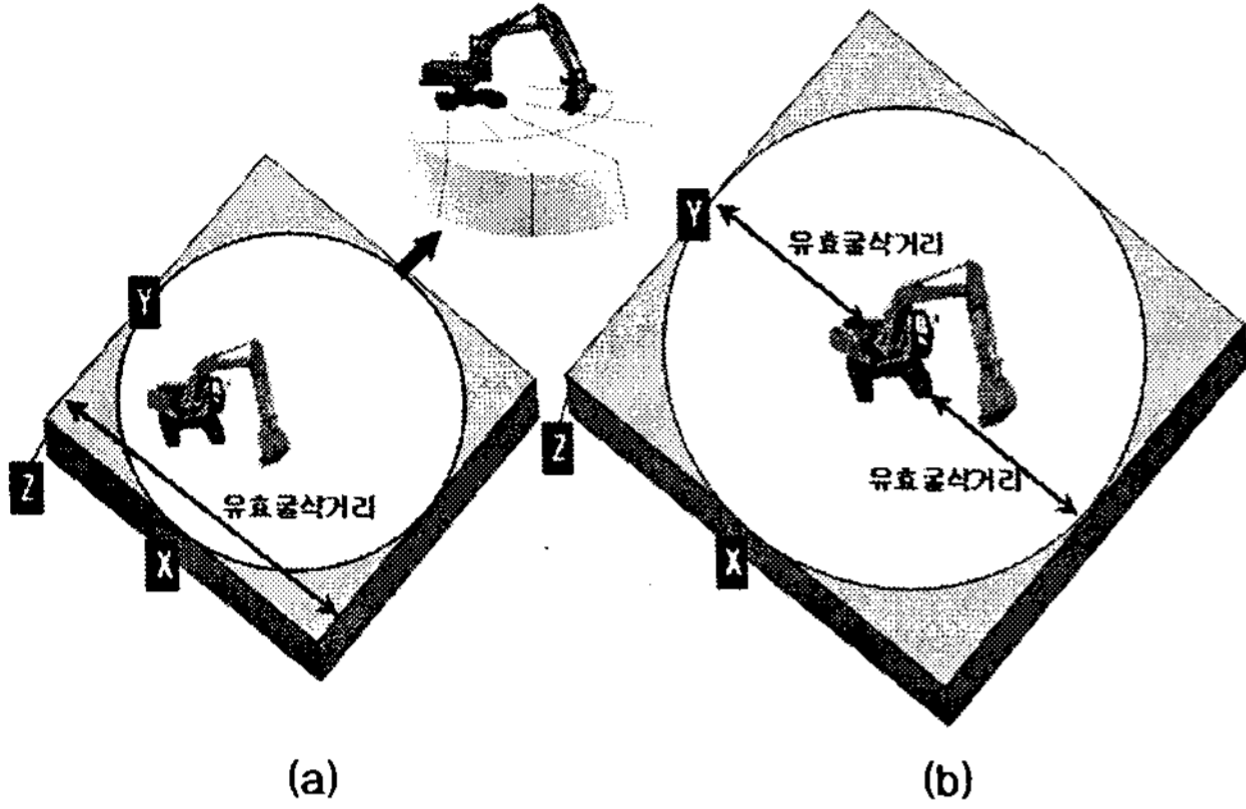


그림4. 유효굴삭거리에 근거한 Cell 크기 결정

그림4(a)에서와 같이 굴삭기 플랫폼을 셀의 한쪽 코너에 위치시키고 작업을 수행하는 경우에 최대 유효굴삭반경이 10m 정도이고, 플랫폼 위치에서 대각선 코너 부분의 굴삭범위가 12m 이내에 위치해야만 하는 상황을 고려해야 하므로 X 및 Y 값은 8m 미만으로 설정하는 것이 적정하다. 그림4(b)에서와 같이 굴삭기 플랫폼을 셀 중앙에 위치시키고 작업을 전후좌우 4방향으로 굴삭작업을 실시한다면 최대 유효굴삭반경과 중앙에서 셀의 각 코너에 이르는 거리를 고려하여 X 및 Y의 값을 16m 미만으로 설정하는 것이 적정하다. 셀의 높이인 Z값은 보편적으로 많이 사용되는 굴삭기들이 제원상 11m 깊이까지 굴착이 가능하지만 지반의 붕괴가 발생할 염려가 있어서 실제 작업을 수행하는 경우에 경사파기로 3m 정도의 깊이로 굴착을 실시하는 것으로 조사가 되었다. 따라서 Z의 값을 3m 미만으로 설정하는 것이 적정할 것으로 사료된다.

4. 굴삭기 이동계획

4.1 이동계획 요소

현재 토공 현장에서는 굴삭기 운전자 또는 공사관리자 각각의 노하우에 따라서 작업이 진행되고 있다. 동일한 현장의 작업일지라도 작업하는 사람에 따라 작업방식이 차이를 보이고 있는 실정이다. 작업자들이 자신의 경험에 의한 방식에 의존하고 있기 때문에 이를 파악하여 공통된 부분과 특수한 부분을 파악하여 지능형 굴삭기 작업계획의 기본 자료로 활용할 필요가 있다. 작업계획 요소를 조사하기 위하여 굴삭기 운전자 18명과 공사관리자 24명을 대상으로 설문 및 인터뷰를 통하여 다음과 같은 사항을 파악할 수 있었다.

최초 작업의 시작위치는 진입로 주변의 가장 높은 작업레벨에서 실시하며, 전체적으로 3~4m 터파기가 완료되면 해당 작업레벨에서 3~4m 터파기를 전체적으로 반복적으로 실시한다. 특정 작업구역에서 작업을 완료하고 다른 작업구역으로 움직이는 경우에 작업구역 내에 지장물의 존재 여부, 지반의 종류, 다른 객체에 의하여 작업구역에서의 공간간섭 영향, 그리고 최단 거리로 이동이 가능여

부를 주요한 굴삭기 플랫폼 이동요소로 제시하였다. 기타 요소로는 운반로의 폭과 배수처리 여부도 제시되었다.

굴삭기 이동 모델을 제시하기 위해서는 요소들간의 상대적인 중요도를 결정하는 것이 필요하다. 요소들간의 상대적인 중요도 파악을 위하여 굴삭기 운전자와 공사관리자 면담 및 설문을 실시하였으며, 항목별로 조사된 값을 평균하여 사사오입한 값을 사용하였으며(표1), 요소들간 쌍대비교를 실시한 결과 우선순위는 지장물 유무(45.1%), 지반의 종류(26.1%), 이동거리(16.9%), 그리고 공간간섭(11.9%)순의 중요도로 나타났다.

표1. 요소별 쌍대비교 값

고려요소	이동거리	지반의 종류	공간간섭	지장물 유무
이동거리	1	1/2	2	1/3
지반의 종류	2	1	2	1/2
공간간섭	1/2	1/2	1	1/3
지장물 유무	3	2	3	1

4.2 이동비용 모델

Octree 구조에서 시공기면과 평행하게 위치한 특정 작업레벨(그림3)에서 하나의 Cell에서 작업을 완료하고 굴삭기를 이동하는 경우에 동일한 작업레벨상에서 대상이 되는 작업구역에 대하여 다음과 같은 식을 이용하여 이동비용을 계산한 후 이동비용이 가장 작은 작업구역을 선정하여 굴삭기를 이동하게 된다.

$$Moving\ Cost = 0.261S + 0.169D + 0.119I + 0.451O$$

(여기서, S:지반계수, D:이동거리 계수, I:공간간섭 계수, O:지장물 계수)

굴삭기 이동비용 모델에 사용되는 계수는 다음과 같다.

- 지반계수(S) - 굴삭대상 지반의 토질에 따른 작업의 난이도를 반영하는 계수이다.

$$S = 0.3 \text{ (일반토사, 풍화토)}, 0.6 \text{ (풍화암)}, 1 \text{ (연암, 보통암, 경암)}$$

- 이동거리계수(D) - 임의의 2개 작업구역의 중심간 거리 중에서 가장 큰 값(D_{max})과 현재 플랫폼이 위치한 작업구역에서 다음 작업 대상이 되는 구역의 중심간 거리(D_i)의 비를 의미한다.

$$D = D_i / D_{max}$$

- 공간간섭계수(I) - 굴삭기가 작업을 수행할 때 작업공간 주위에 트럭 및 각종 객체의 출입으로 인한 공간간섭이 생산성의 저하를 초래하는 정도를 나타내는 계수이다.

$$I = 1 - \frac{D_{Ent\ Cell}}{D_{Ent\ Max}} \quad (\text{굴삭기 1대인 경우}),$$

$$\frac{(1 - \frac{D_{Ent\ Cell}}{D_{Ent\ Max}}) + (1 - \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{D_{Eq\ Cell\ i}}{D_{Eq\ Max\ i}}}{n-1})}{2} \quad (\text{굴삭기 2대 이상})$$

여기서, $D_{Ent\ Cell}$: 출입구에서 특정 셀의 중심까지의 거리

$D_{Ent\ Max}$: 출입구에서 가장 원거리에 위치한 셀의 중심까지의 거리

$D_{Eq\ Cell}$: 장비가 위치한 셀의 중심에서 특정 셀의 중심까지의 거리

$D_{Eq\ Max}$: 장비가 위치한 셀의 중심에서 가장 원거리에 위치한 셀의 중심까지의 거리

n: 토공현장에 투입된 굴삭기 대수

- 지장물 계수(O) - 굴삭기 이동을 위하여 이동후보지로 고려되는 작업구역 내에 지장물(지하매설물 또는 지상구조물)의 존재여부를

나타내는 계수이다.

$O = 1$ (Cell내에 지장물이 존재하는 경우),
 0 (Cell내에 지장물이 없는 경우)

4.3 굴삭기 이동계획 사례

제안된 모델로 제시되는 굴삭기 이동계획을 알아보기 위하여 서울 S대학교에서 스마트하우스를 시공하고 있는 부지를 대상으로 사례를 적용하여 보았다. 부지의 크기는 60×60m이며 작업레벨 (Layer)은 총 4개로 이루어졌으며, 각 레이어의 높이는 3m이다. 하나의 작업레벨은 총 16개의 그리드로 이루어져 있고, 각각의 그리드 크기는 15×15m이다.

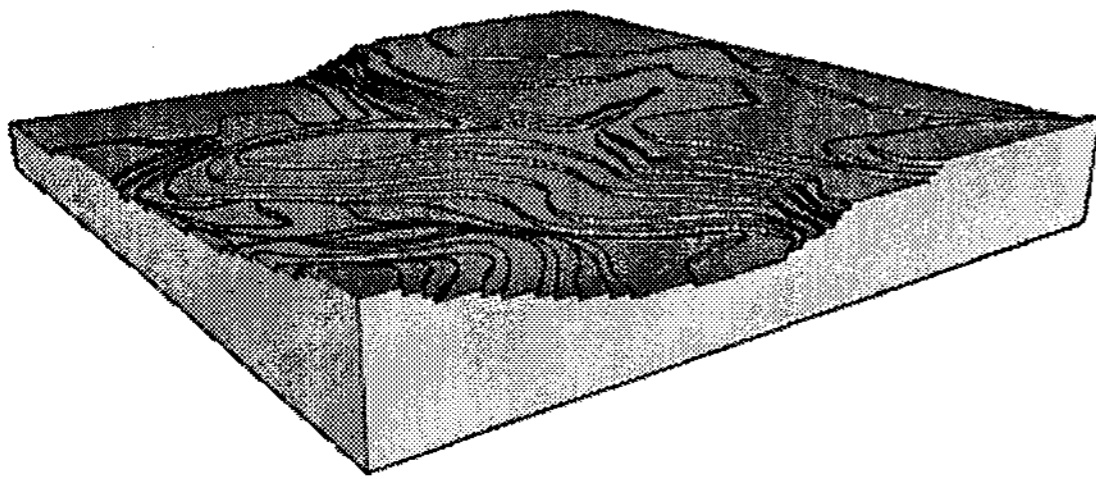


그림5. 토공현장 지형모델

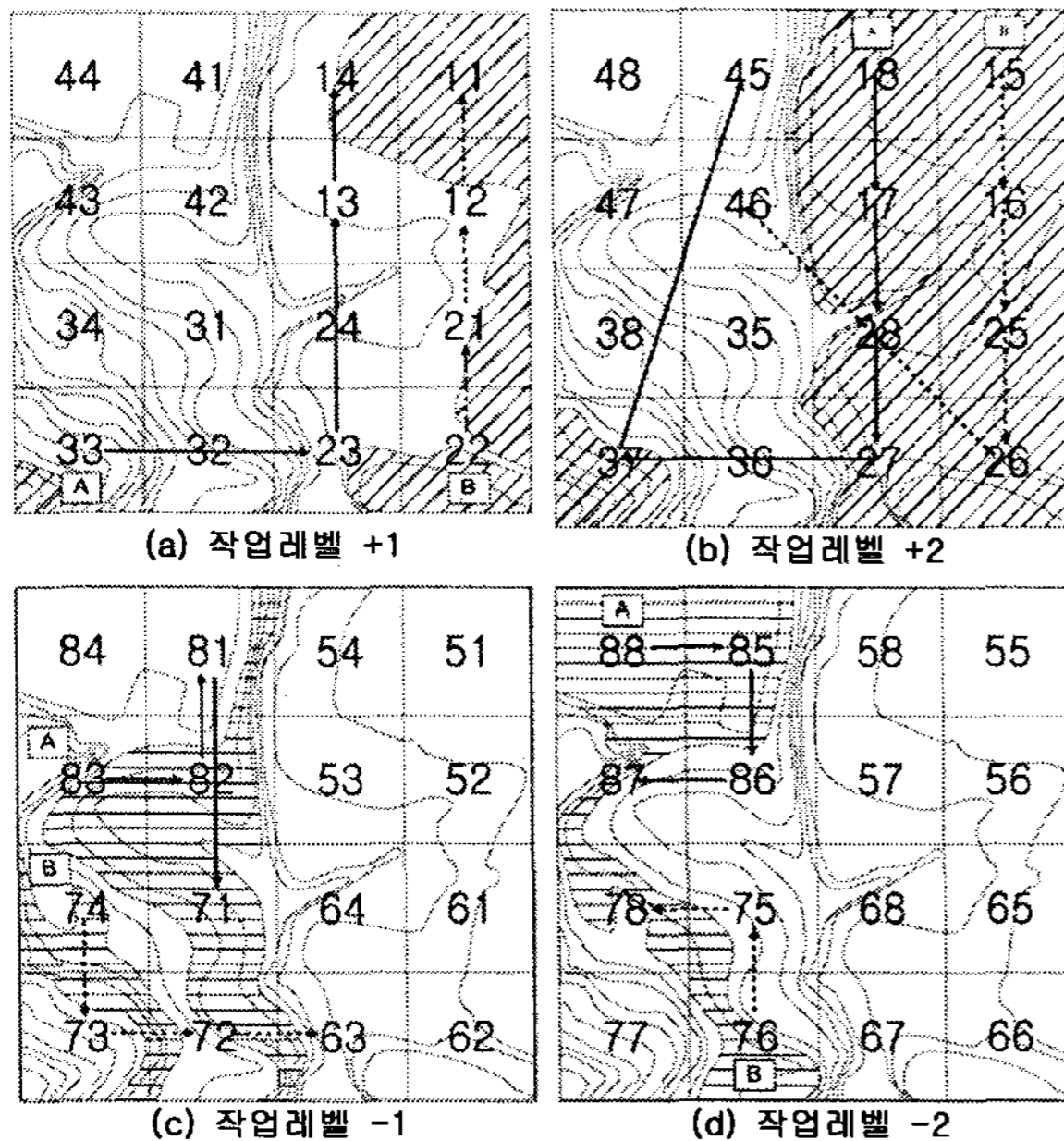


그림6. 작업레벨별 굴삭기 이동경로

현장의 지장물을 조사한 결과 11, 12, 및 23번 작업구역(Cell)에서 지중 2~3m 지점에 배선 Box가 존재하는 것으로 조사가 되었다. 그리고 작업이 발생하는 토질만 조사한 결과 15, 17 및 18번 작업구역은 풍화암으로 조사가 되었고, 토질조사가 실시되지 않은 구역과 성토구역은 일반토사로 가정을 하였다. 출입구는 좌측 상단 작업구역의 상부면 중심에 위치한다고 가정하고, 굴삭기 2대가 작업하는 것으로 가정하였다. 굴삭기의 작업 출발위치는 절토부의 경우 표고가 가장 높은 작업구역과 출입구에서 거리가 가장 먼 작업구역 두 곳으로 정하였다. 언급한 조건하에서 굴삭기의 이동경로를 조사한 결과 그림6과 같은 이동 형태를 보였다.

5. 결론

현재 굴삭기의 지능화 및 자동화는 토공작업에 있어서 작업의 효율성 및 안전성을 위하여 개발 필요성이 높은 분야로 고려되고 있다. 토공작업의 생산성과 품질은 작업계획의 합리성에 의해 크게 좌우되는데, 굴삭작업을 하는 경우에는 굴삭기 플랫폼의 이동경로와 절성토 작업을 하기 위한 붐, 암 그리고 버킷의 이동경로가 생산성에 많은 영향을 미친다.

본 연구에서는 통합적인 토공시스템을 개발하기 위한 요소기술로 작업환경 모델링 방법과 굴삭기 플랫폼 이동경로 알고리즘을 제시하고 있다. 굴삭기 이동경로 알고리즘 개발을 위하여 숙련된 작업자 및 공사관리자의 의견 및 노하우를 반영하였다. 현실적인 토공 자동화시스템이 되기 위해서는 인간의 간섭을 배제한 완전자동화 형태보다는 인간과 자동화 시스템이 통합형태의 모습이 바람직하다고 판단된다. 이를 위하여 작업자의 능력을 확장시켜 주고 효과적인 작업을 지원할 수 있는 각종 지원툴 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 김성근, "원격조정 토공시스템을 위한 GPS 기반의 장비진로계획법" 대한토목학회 논문집, Vol. 24(1D), 2004, pp. 59-66.
2. 두산인프라코어 외, "지능형 굴삭기 개발", 첨단융합건설 기술개발사업 연구계획서, 건설교통부, 2006.

Abstract

Recent advances in automation and robotic technologies in the manufacturing industry suggest that the greater level of automation may be extremely beneficial for the construction industry. However, only some of the high-technology advances may be applied to the construction industry due to the fast-changing construction environment in which work locations are constantly changing and material, equipment, and workers are always moving. The earthwork operation for site development is a good candidate for applying automation technology, because it is a very repetitive and tedious task and needs lots of construction equipment. This paper presents the model of a construction environment and a moving plan for an automated earthwork system, which can produce an effective moving path of an excavator platform with an Octree model. To generate the moving path, the know-how of skilled operators and construction managers is added in the proposed model.

Keywords : construction automation, earthwork, excavator, task planning