

# 대규모 절성토 지역의 제척지를 고려한 최적화된 토량이동 경로 알고리즘 개발에 관한 연구

## The Study on the Optimized Earthwork Transfer Path Algorithm Considering the Precluded Area of Massive Cutting and Banking

강 태 욱 Kang, Tae-Wook | 정회원 · 중앙대 사회기반시스템 공학부 공학박사 · 한길아이티 BIM사업부 본부장  
(E-mail : laputa99999@gmail.com)  
조 윤 호 Cho, Yoon-ho | 정회원 · 중앙대 사회기반시스템 공학부 정교수 · 공학박사 (E-mail : yhcho@cau.ac.kr)

### ABSTRACT

The purpose of this study is to suggest the optimized transfer algorithm of earthwork considering the precluded area such as the lake, bogs. The earthwork transfer plan in massive cutting and banking should be established because of affecting the construction cost highly. Until now, there was the study about the optimized earthwork transfer model considering the OR(Operating Research), but isn't the study about the model considering the precluded area such as the lake, bogs. In most cases, the engineer adjusts the earthwork transfer path considering the precluded area, manually. The presented model suggests to calculate various visibility paths with A\*algorithm after converting the precluded area to polygon topology. By using this paths, the minimum cost path to optimize the earthwork transfer can be obtained. In this study, the validity of the model was proved as implementing the system for the optimized earthwork transfer considering the precluded area.

### KEYWORDS

operation research, massive volume, earthwork, transfer path, precluded area

### 요지

도로 공사나 토지 공사에서 대규모 절성토 개발 시 설계되는 토량이동계획에서 호수나 습지와 같이 이동불가능한 제척지를 고려해 최적 토량이동 경로 계산 알고리즘을 제안한다. 대규모 절성토 내 토량의 이동계획 수립은 운반단가에 많은 영향을 미치므로 사전에 토량이동계획을 수립해야한다. 선형계획법을 이용한 토량이동 최적화에 대한 연구는 있었으나 이동불가능한 제척지에 대한 영역을 고려한 토량이동 최적화에 대한 연구와 시스템 구현은 없었다. 대부분의 경우는 설계자가 제척지를 고려해 수작업으로 토량이동경로를 조정하고 있다. 본 논문에서 제시한 모델은 먼저 제척지 영역을 평면다각형 위상정보로 변환한 후 A\*알고리즘을 이용하여 여러 가지점 경로를 계산한다. 이 경로에 선형계획법을 이용하여 토량이동 최적화를 위한 최소비용 경로를 얻는다. 본 논문에서는 최적 토량이동 설계시스템을 실현함으로써 제시한 모델의 타당성을 입증한다.

### 핵심용어

선형계획법, 대규모 절성토, 토량이동계획, 제척지

## 1. 서론

토량이동은 토목 공사 시 발생된 특정 지점의 절토를 특정 지점의 성토로 공사 장비를 이용해 옮기는 공정이다. 설계 대상이 선형인 도로나 철도인 경우에는 1차원

유토곡선을 이용해 토량이동을 하나, 대규모 절성토 지역에서는 2차원 상에서 토량이동을 한다. 예를 들어 운동장지구를 토목 설계할 때 지구의 각 지점별로 계획고를 정하고 불도저나 포크레인 같은 절토장비를 이용해

땅을 깎는다. 실제 토량 이동 계획 시 편의를 위해 지구를 그리드란 40미터 작은 사각형 단위로 분할해 놓고 절토가 있는 그리드에서 성토가 있는 그리드로 토량을 이동하게 된다.

대규모 절성토 평면도상에서 토량이동계획을 하는 순서는 그림 1과 같다. 토량이동이 발생할 부지에 그리드를 구성하고 절성토량을 기입한다. 절토나 성토 그리드 사이에 절성토 경계선을 설정한 후 표시된 공사 시행지역 안에서 사업시행에서 제외된 토지인 제척지를 가로지르지 않도록 각 그리드별로 무대, 도자, 덤프 순으로 토량이동을 한다. 대규모 절성토 영역일 경우 이런 작업을 수작업으로 처리하면 많은 시간이 소요된다. 이를 자동화하기위해 선형계획법을 이용한 토량이동 최적화에 대한 연구가 진행되었다. 본 연구는 토량이동 최적화 시 토량이동이 불가능한 호수, 늪지, 문화제보존지역과 같은 제척지를 고려해 토량이동비용 최적해를 구하는 모델을 제안하려 한다.

## 2. 관련 문헌 고찰

관련 연구로 단지 개발 시 발생하는 대규모 절성토 토량이동을 처리하기 위해 선형계획법을 이용한 최적 토량

이동 모델이 연구되었다(정영준, 1999). 이 연구는 여러 개의 제한조건 하에서 목적함수의 값을 극대화 또는 극소화하는 자원의 배분문제를 풀기 위한 OR(Operations Research)기법을 사용한다.

선형계획법의 응용사례인 수송문제는 일정한 공급량을 가지고 있는 몇 개의 공급처로부터 일정한 수요량을 필요로 하는 몇 개의 수요처로 각각의 수요량을 공급하는 경우 총 수송비를 극소로 하는 수송방안을 결정하는 문제이다. 토량이동계획은 수송문제와 모델이 같으므로 수송문제에 대한 해결방법을 적용하면 최적화된 토량이동계획을 얻을 수 있다. 정영준은 토량이동문제를 수송문제로 표현하기 위해 Houthakker법, MODI법(modified distribution)을 사용하여 토량이동비용 최적화 모델을 제안하였다. 그러나 제척지를 2차원적으로 고려하지 못하였다.

최적 비용을 고려한 토량이동계획 자동화에 관한 연구는 부족한 상태로 제척지가 고려된 토량이동 최적화에 대한 연구는 없었다. 본 연구에는 토량이동이 불가능한 호수, 늪지, 문화제보존지역과 같은 제척지를 고려해 토량 이동비용 최적해를 구하는 모델을 제안한다.

이 문제를 해결하기 위해 먼저 설계시스템을 구현하여 단지 평면도상에서 제척지를 평면다각형(polygon)형태

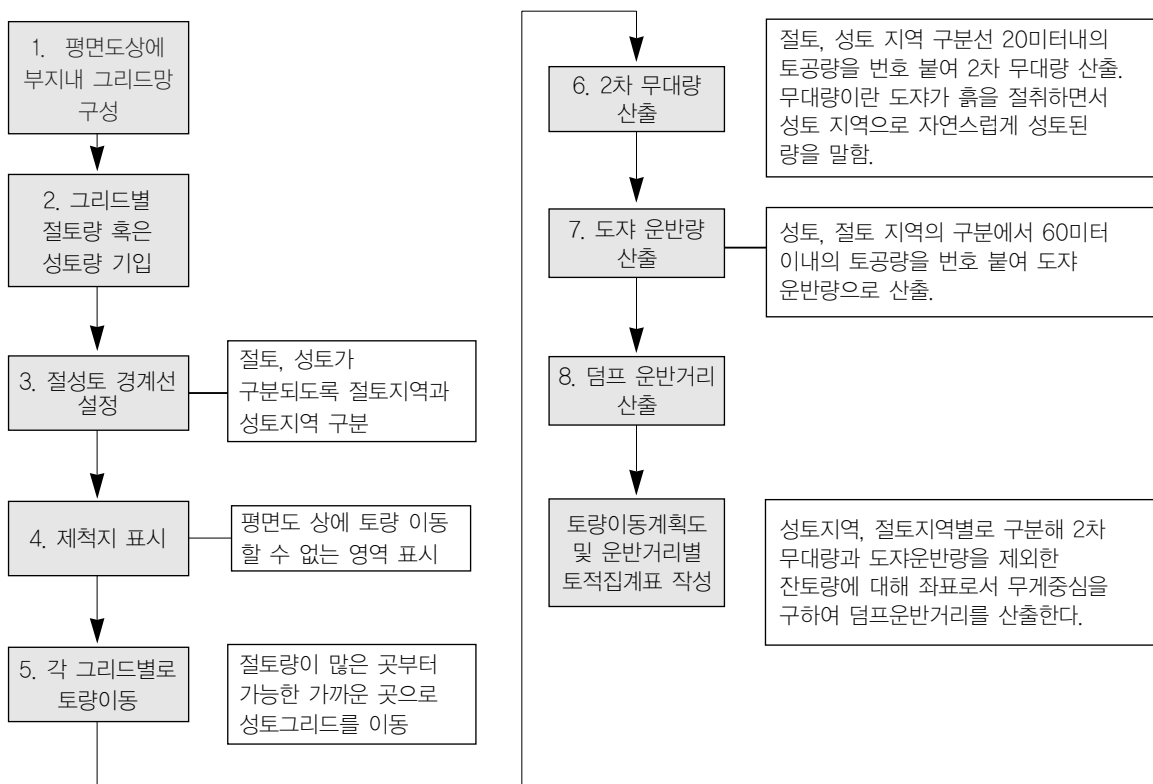


그림 1. 토량이동계획 순서

로 표시하고, 제척지를 돌아서 토량이 이동하도록 거리 비용모델을 개선해 토량이동을 최적화한다. 토량이동시 계산되는 거리비용모델은 그리드 시점에서 중점까지 제척지를 고려해, 가시점(visibility) 경로 최적화 알고리즘을 적용한 후(Thomas, 2001), A\*경로 알고리즘<sup>1)</sup>을 이용해 얻은 경로의 거리를 비용으로 한다(Bryan, 2002).

### 3. 제척지를 고려한 토량이동 최적화 비용 모델

#### 3.1. 제척지를 고려한 최적 토량이동 처리 순서

최적 토량이동경로를 계산하기위해 먼저 선형계획법을 적용한다. 적용된 결과는 전체적으로 최소 이동비용으로 최적화된 각 절토그리드에서 성토그리드까지의 토량이동경로이다. 그 순서는 그림 2와 같다. 이미 절토나 성토물량을 가지고 있는 그리드 망이 구성되어 있다고 가정한다.

그림 2의 각 단계별 설명은 다음과 같다.

첫 단계는 제척지 평면다각형 위상구조 생성이다. 제척지는 평면다각형으로 표현된다. 평면다각형은 제척지 경계를 이루는 좌표 리스트로 구성되어 있으며, 최적경로 탐색 시 사용된다. 선형계획법의 토량이동 비용테이블을 만들 때 비용은 제척지를 고려한 최적경로의 거리

로 한다.

두 번째는 토공량 공급량과 수요량을 일치하는 것이다. 이를 위해 토공량 공급량과 수요량이 다르면 가수요나 가공급을 추가한다.

세 번째는 제척지를 고려해 이동경로 비용테이블을 생성한다. 이를 위해 평면다각형으로 표현된 제척지를 고려해 절토 그리드집합과 성토 그리드집합을 이용해 선형계획법에서 사용하기 위한 이동경로 비용테이블을 만든다.

네 번째는 토량이동 기본해를 계산한다. 이를 위해 해수렴 속도 개선 및 지역해에 빠지지 않도록 정영준(1999)이 사용했던 방법인 Houthakker법을 이용해 다음 단계에서 최적해 탐색 시 문제가 없도록 기본해를 계산하고, MODI법으로 기본해를 개선해 최적해를 얻도록 한다. 이때 두 개 이상의 제약조건이 한 교점에서 만나 어느 기저변수 값이 0이 되는 경우를 퇴화현상이라 하는데 이런 경우 기본변수의 수가 제약조건 수보다 작아 모델을 해석할 수가 없으므로, 이런 경우를 처리해 준다. 계산 시 경로비용모델은 가시점 최적경로를 탐색한 거리를 비용으로 한다.

다섯 번째는 MODI 법을 이용한 토량이동 최적해를 계산하는 것이다. 심플렉스 승수  $U_i, V_j$  를 구하고 비용테이블의 전체 칸이  $C_{ij} - (u_i + v_j) \geq 0$  인지 판단한다. 만약

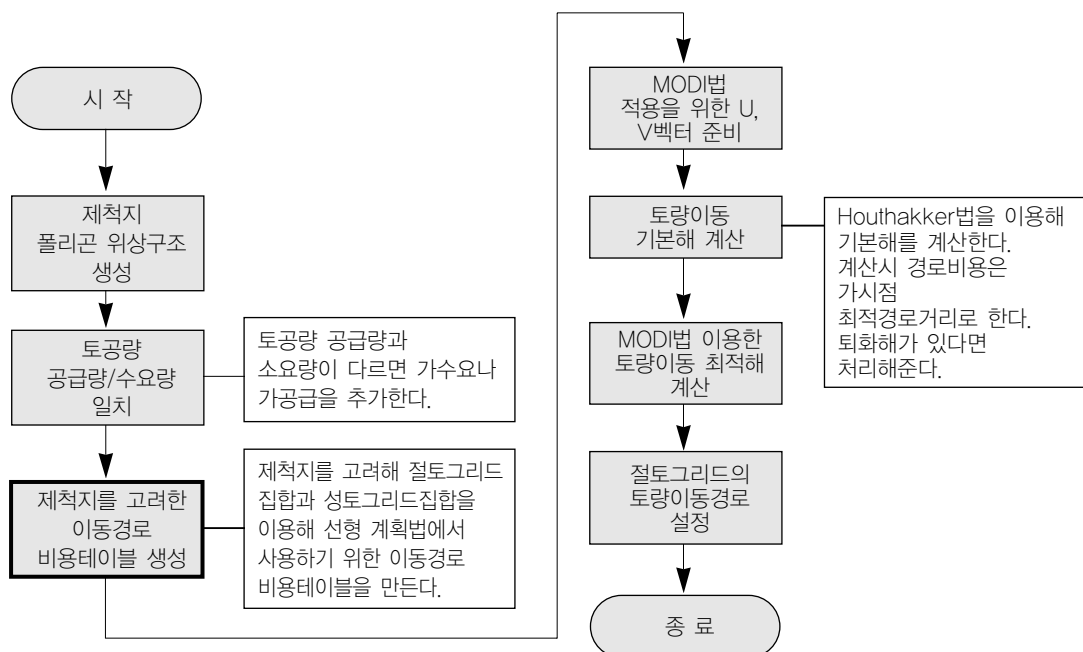


그림 2. 제척지를 고려한 최적 토량이동경로 계산 모델

1) 상태 공간내의 인접한 상태를 탐색해 나가면서 시작 상태에서 목표 상태까지 가장 싼 비용 경로를 얻는 알고리즘

$C_{ij} - (u_i + v_j) \geq 0$  이 아니면 이미 할당된 칸의 할당량을 옮겨서 다른 칸에 할당하는 식으로 할당량을 수정해 전체 칸이  $C_{ij} - (u_i + v_j) \geq 0$  조건에 맞을 때까지 반복한다.

마지막 단계는 절토그리드의 토량이동경로를 설정한다. 이를 위해 계산된 최적 해를 이용해 절토그리드에서 성토그리드로의 토량이동경로를 생성한다.

제척지 영역은 평면다각형자료로 입력되고, 최적해 계산을 위한 반복횟수 등의 변수는 토공이동계산변수 자료에 보관하도록 한다.

본 연구는 그림 2에서 굵은 선으로 표시된 부분인 비용 테이블 생성에서 제척지를 고려한 이동경로 비용 모델을 개발해 적용한다.

### 3.2. 제척지를 고려한 이동경로 비용테이블 생성 시 고려사항

그림 3에서 보는 것처럼 토량이동이 불가능한 제척지 영역이 있을 경우 이를 고려해 토량이동을 해야 한다. 이 영역을 평면다각형으로 표현하면 토량이동경로는 본질적으로 다각형으로 이루어진 장애물들을 돌아가는 최단 경로를 말하는 것이다. 이 방법을 가시점 길 찾기 방법(Visibility Path-finding)이라 한다.

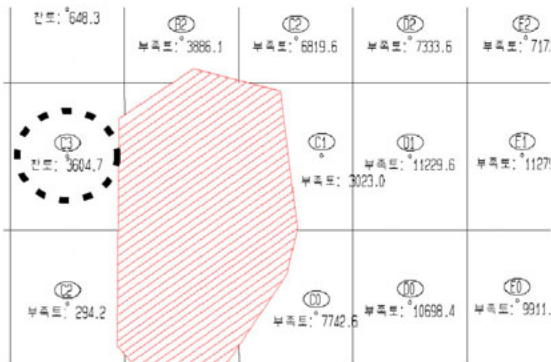


그림 3. 제척지가 표현된 평면다각형 표시(빛금친 부분)

예를 들어 그림 3에서 점선으로 표시된 잔토 C3지점에서 부족토 C1지점까지 토량이동을 하기 위해서는 그

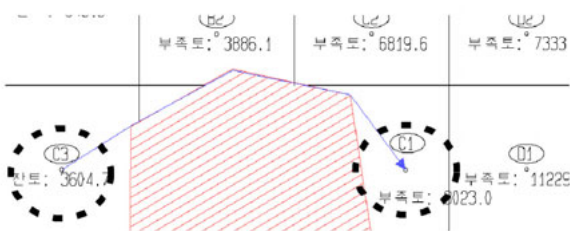


그림 4. C3에서 C1으로 연결되는 최적 가시점 경로

림 4와 같이 C3에서 보여 지는 평면다각형의 정점을 돌아 C1 으로 가는 경로가 구성되어야한다. 이를 가시점 경로라고 하며 그 경로는 여러 개가 될 수 있다.

각각의 경로는 평면다각형의 꼭지점을 선분으로 잇는 식으로 만들어진다.

경로를 추적하는 시작점에서 보았을 때 도면상에서 제척지를 표시하는 평면다각형의 각점은 그림 5와 같이 윤곽점과 비윤곽점으로 구분될 수 있다. 그림에서 아래에 있는 원은 경로를 추적하는 시작점이다. 이 점에서 평면다각형의 각 꼭지점을 바라보았을 때, 시작점에서 보일 수 있는 꼭지점 중 가장 바깥쪽에 있는 꼭지점을 윤곽점이라 정의하고 나머지는 비윤곽점이라 정의한다.

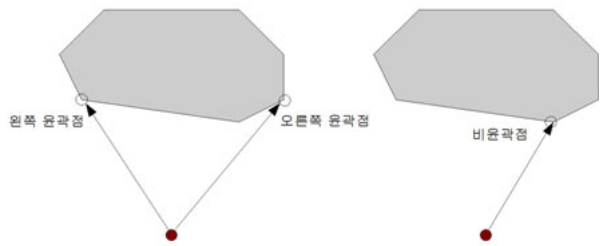


그림 5. 윤곽점과 비윤곽점

최단 경로 추적 시 비윤곽점은 고려할 필요가 없다. 그림 6에서 보는 바와 같이 추적이 시작될 지점부터 마지막 '목표지점' (Target point)까지 최단 경로 고려를 할 때 윤곽점만 고려된다. 경로는 각 윤곽점을 잇는 최단 직선으로 구성되고 벡터로 표현된다. 최단 직선을 추적할 때, 추적이 시작되는 점을 '현재 추적지점' (Current point), '현재 추적지점'에서 뺄어나가는 경로가 될 수 있을 만 한 점을 '다음 추적지점' (Next point), '현재 추적지점' 기준으로 바로 전에 경로 추적했던 지점을 '이

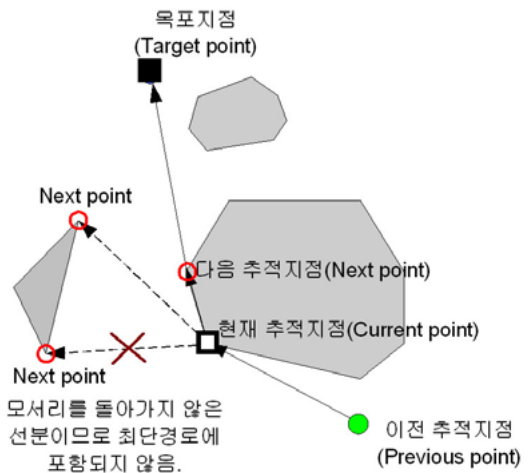


그림 6. 가시점 최단경로 추적 다이어그램

전 추적지점 (Previous point)이라 하자. 그림 6에서 모서리를 돌아가는 최단경로는 실선 화살표, 현재추적지점은 채워지지 않은 사각형으로 표시된 부분, 다음추적지점은 안이 채워진 사각형으로 표시하였다.

최단거리 경로 탐색이므로 '현재 추적지점'에서 보이는 점들 중 윤곽점이 아닌 점들은 '다음 추적지점'으로 고려할 필요가 없다. A\* 최단경로검색 알고리즘을 적용하면 비윤곽점들은 최단 경로에서 제외되어 버리며 윤곽점을 직접 잇는 선분이 최단경로로 선택된다.

그림 7과 같이 최단경로는 '이전 추적지점'으로부터 '목표지점'에 직접 연결할 수 있거나, 다른 윤곽점으로 연결하는 경로에만 존재하며, 모서리로부터 벗어나는 쪽의 선분은 최단경로가 아니다. 모서리를 따라 돌아가는 경로를 구하기위해서 이전 추적지점(Previous point)으로부터 현재 추적지점(Current point)을 잇는 벡터와 현재 추적지점으로부터 다음 추적지점을 잇는 벡터를 고려해야 한다.

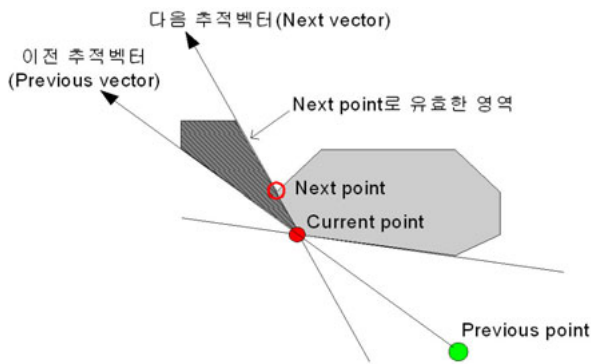


그림 7. 최단경로로 유효한 영역(빗금)

그림 7과 같이 현재 추적지점에서 다음 추적지점까지의 벡터를 다음 추적벡터(Next vector)라 정의하고, 현재 추적지점과 이전 추적지점까지의 벡터를 이전 추적벡터(Previous vector)라 정의하면, 왼쪽 윤곽점일 경우, 다음 추적벡터는 반듯이 이전 추적벡터의 오른쪽을 향해야 한다. 오른쪽 윤곽점일 경우, 다음 추적벡터는 반듯이 이전 추적벡터의 왼쪽을 향해야 한다. 최단경로 탐색을 위해서는 다음 추적지점은 이전 선분을 확장한 선에 의해 만들어지는 유효한 영역 안에 있어야 한다. 그 외의 다음 추적지점은 최단경로에 포함되지 않는다. 그림 8은 가시점 길찾기가 구현된 결과이다. 번호는 시작점과 끝점, 그리고 평면다각형의 정점 번호이며 경로가 표시되어 있다. 검색된 경로는 최단 직선으로 연결된 그래프 형식으로 저장되며 그래프의 노드는 정점번호와 이 노드의 하위경로를 이루는 선분의 끝 노드 번호를 가진다.

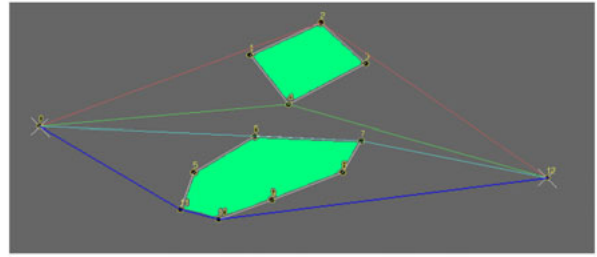


그림 8. 가시점 길찾기 결과(제척지 2개 지역을 고려하였음)

가시점 길찾기 순서는 그림 9와 같이 요약될 수 있으며, 가시점 경로생성함수의 의사코드는 그림 10과 같다.

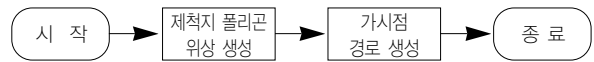


그림 9. 가시점 경로 생성

각 가시점마다 최적화1, 최적화2를 고려한 하위경로가 생성된다. 가시점 경로를 생성하는 함수는 현재 경로를 추적중인 점인 현재 추적지점에서 다음 추적지점까지의 처리가 다음 추적지점이 목표점을 만날 때까지 처리가 계속 반복되므로 재귀호출로 처리한다.

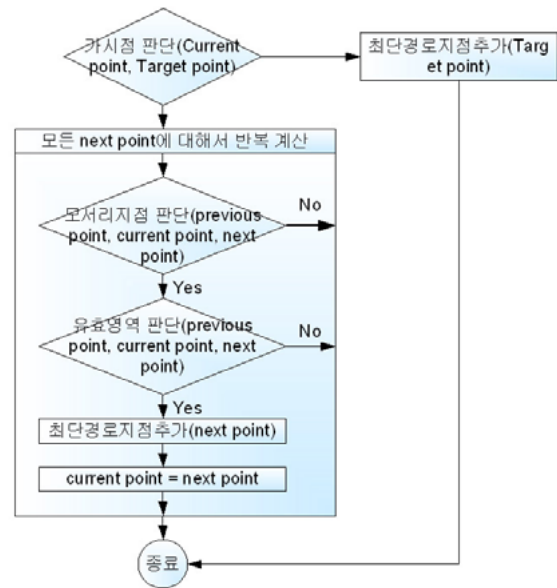


그림 10. 가시점 경로생성 순서도

### 3.3. 최단경로검색 알고리즘을 적용한 최적 경로 계산

A\*최단경로검색 알고리즘은 상태 공간 안의 특정 상태에 이웃한, 즉 인접한 상태들을 조사해 나가면서 시작 상태로부터 목표 상태에 이르는 가장 싼 비용의 경로를 찾는 알고리즘이다.

그림 11은 가시점 길 찾기 알고리즘을 통해 얻은 경로

이다. 3.2절에서의 결과 얻은 가시점 경로 그래프의 경로들 중 가장 싼 비용의 경로, 즉 짧은 거리를 갖는 경로를 A\*알고리즘을 통해 얻는다.

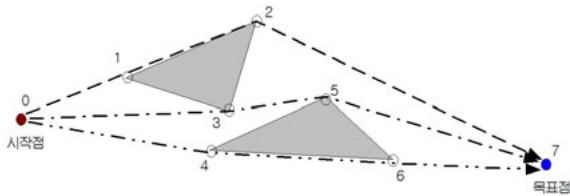


그림 11. 가시점 경로들

A\*알고리즘은 두 종류의 상태 목록을 관리한다. 하나는 아직 조사하지 않은 상태들을 담은 Open List이고, 또 하나는 이미 조사한 상태들을 담은 Closed List이다. Open List와 Closed List 모두 Stack 자료구조이며, Stack 구조는 Push, Pop 연산으로 값을 넣거나 빼서 사용한다. 알고리즘의 시작에서 Closed List는 비어있으며, Open List는 오직 시작 노드(Node)만 가지고 있다. 그림 12는 이 논문에서 적용된 A\*알고리즘의 순서도이다.

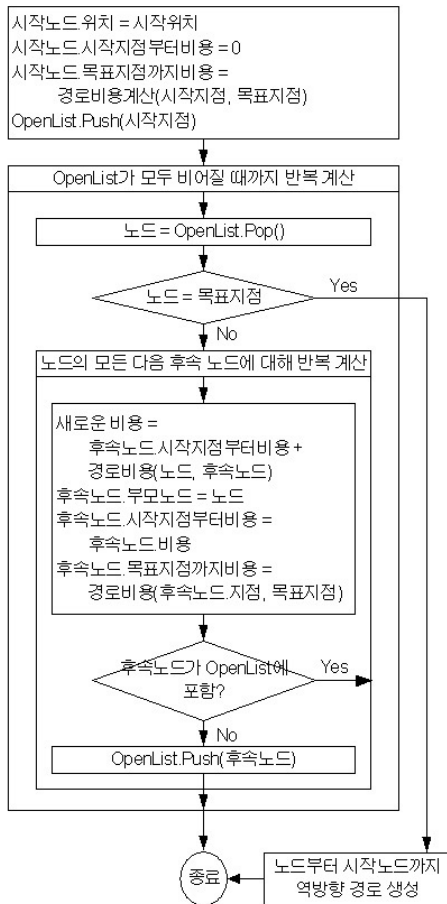


그림 12. A\* 최단경로검색 알고리즘

그림 12의 알고리즘은 Open list의 노드 중 가장 최단 경로로 유망한 노드를 가지고 온 후에 Open list에서 제거한다. 그 상태가 목표점이 아니라면 Open list 내의 노드를 비용을 기준으로 정렬한다.

노드가 새로운 것이면 Open list에 넣고, 이미 Open list에 있는 것이고 이 노드에 대한 경로가 이전 경로보다 비용이 싸면 그 위치와 비용 값을 갱신한다. 반대로 이미 닫힌 목록에 있는 것이면 이미 조사를 마친 것이므로 무시한다. A\* 알고리즘은 현재 Node에 인접한 Node들 중 전체 거리비용이 가장 낮은 노드를 찾아서 그 노드로 이동하는 과정을 반복함으로써 가장 싼 비용의 최종경로를 찾는다.

경로들은 아래 그림과 같이 유향 그래프구조로 표현된다. 원은 그래프의 노드를 나타내고 선분은 경로를 나타낸다. 원안의 숫자는 정점의 번호이며, 선분위의 숫자는 선분 시작 노드에서 끝 노드로 가기위해 소요되는 비용이다.

그림 13은 그림 11을 그래프로 표현한 그림이다.

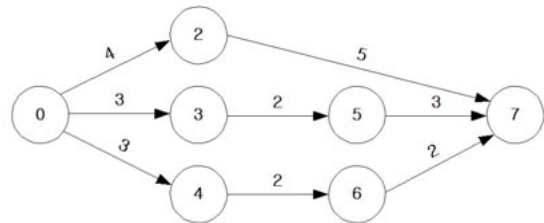


그림 13. 가시점 경로 그래프

그림 13의 가시점 경로 그래프에 A\* 최단경로검색 알고리즘을 적용하면 그림 14에 굵은 실선으로 표시된 최단경로를 얻는다.

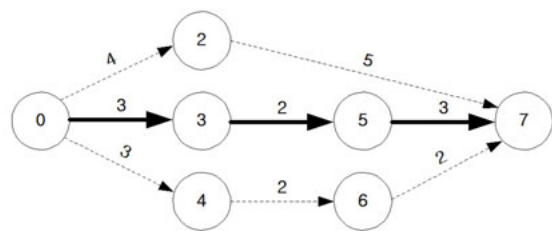


그림 14. 가시점 최단경로 그래프

#### 4. 평가 및 실험

본 장에서는 가시점 길 찾기 알고리즘을 이용해 제척지를 고려한 최적 토량이동계획 시스템을 실현한 결과를 보여준다.

제척지를 고려하지 않은 기존 토량이동경로 계산 방식과 제척지를 고려한 방식을 실제 구현된 시스템에서 수행해 보았으며, 결과를 보면 다음 그림과 같이 제척지를 고려한 토량이동방식이 현실적임을 알 수 있다. 그림 15는 토량이동 계획전의 모습을 나타내고 있고, 이 상태에서 제척지를 고려하지 않을 때는 그림 16의 점선 원이 표시된 토량이동경로가 제척지로 표시된 빗금친 평면다각형 영역을 지나가면서 토량이동을 하고 있다. 그러나, 본 연구 결과에 의해 개발된 프로그램을 이용하여 제척지를 고려해 토량이동 하였을 경우에는 그림 17과 같이 토량이동 경로가 제척지를 지나가지 않고 우회하여 토량이동 처리하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 빗금친 영역은 제척지를 나타낸다.

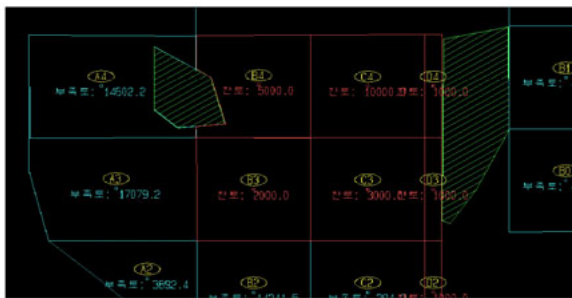


그림 15. 토량이동 계획전 모습

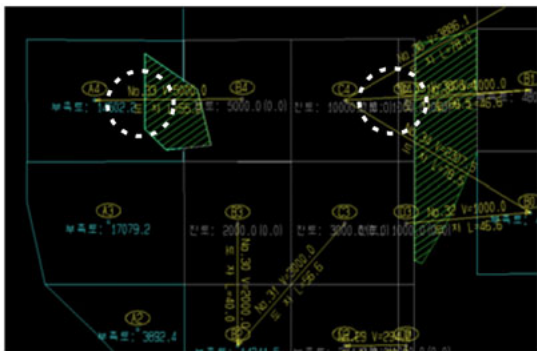


그림 16. 제척지를 고려하지 않은 토량이동계획 (점선 원 표시는 제척지가 고려 안되고 바로 토량 이동되고 있는 모습을 보여줌)



그림 17. 제척지를 고려한 방법에 의한 토량이동계획 처리 방식 (점선 원 표시는 제척지를 고려해 우회하여 돌아가는 토량 이동경로를 표시한 부분)

본 연구에서 제안하는 방법과 제척지를 고려하지 않는 방법 사이의 토공량 이동 비용 차이점을 확인해 보기 위해 그림 15 예에서 A4에서 B4로 이동하는 경우와, D3에서 B0로 이동하는 경우를 이동 비용과 직접적인 관련이 있는 이동 거리를 이용해 다음과 같이 비교해 보았다. 여기서 제척지를 고려하지 않고 OR기법을 이용해 토공량을 이동한 경우는 방법1, 본 연구에서 제시한 A\*알고리즘을 이용해 토공량을 이동한 경우는 방법2로 구분하였다.

표 1. 토량이동처리 방법에 따른 이동 거리 차이 분석

제척지 고려 유무	토공량 이동 시작 그리드	토공량 이동 종료 그리드	거리(m)
방법1	A4	B4	55.2
방법2	A4	B4	63.4
방법1	D3	B0	46.6
방법2	D3	B0	59.3

표 1과 같이 본 연구에서 제안하는 방법은 토공량 이동시 제척지 영역을 고려함으로써 방법1로 얻은 직선형의 이동 경로보다 제척지 주변을 돌아서 최적 이동경로를 얻는 방법2가 좀 더 현실적으로 토공량 이동 비용을 산정할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

대규모 절성토 지역 내에서의 토량이동은 공사비 중 가장 많은 비용을 차지하며, 특히 운반단계에 많은 영향을 미치므로 최적 토량이동계획을 수립하는 것이 중요하다. 이를 위해 선형계획법을 이용한 토량이동 최적화에 대한 연구가 있었으나, 이동불가능한 제척지 영역을 고려한 토량이동 최적화에 대한 연구와 실현된 시스템이 없어 실무에서 설계자가 제척지에 대해 캐드시스템을 이용해 수작업으로 토량이동경로를 조정하고 있다.

이 연구는 토량이동비용을 최소화하도록 설계도면상에서 표현된 제척지 영역을 고려하여 토량이동을 최적화하여 자동 계산하는 모델과 시스템을 제시한다. 이를 위해 먼저 제척지 영역을 평면다각형 위상정보로 변환한 후의 가시점 경로를 계산한 다음 A\*알고리즘을 이용해 만들어진 여러 가시점 경로 중 최소 비용 경로를 얻는다. 이 경로를 선형계획법을 이용한 토량이동 최적화시 토량이동 비용으로 사용한다.

이 시스템을 이용해 도로나 단지의 대규모 절성토 영

역의 토량이동시 제척지를 고려한 최적화된 토량이동경로를 구할 수 있다. 앞으로 연구과제는 다음과 같다.

1. 아직은 토량이동 최적화에서 기하학적 연산이 많이 필요한 가시점 경로 계산비용이 상당히 큰 편이어서 공간 인덱싱 기법 등을 적용해 수행속도를 높일 수 있는 계산 방법과 최적화된 가시점 경로 계산 방법이 더욱 연구되어야 한다.
2. 실제 토공 차량이 제척지등 장애물을 피하며 작업할 경우, 그 이동경로는 곡선이 되어야 함이 맞으나 아직 자료표현 및 비용모델의 한계로 이를 지원하지 못한다. 이에 대한 연구가 필요하다.
3. BIM(Building Information Modeling)이나 CM(시공관리) 도구등과 접목되어, 4차원 관점에서 결과를 표현해 주는 사용자 친화적으로 정보를 사용자에게 가시화해 주는 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 참고 문헌

- 이상용(1992), *OR/MS 원론*, 형설출판사
- 정영준(1999), *토량이동 최적화에 관한 연구*, 토지개발기술, Vol.11 No.3.
- Bryan stout(2002), The Basics of A\* for Path Planning, *Game programming gems 2*
- Thomas young(2001), Expanded Geometry for Points-of-Visibility Path-finding, *Game programming gems*

접 수 일 : 2011. 3. 22

심 사 일 : 2011. 3. 26

심사완료일 : 2011. 10. 24