

노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석을 위한 지형경사가 고려된 벡터 네트워크 자료의 생성 방법

박보영, 최요순*, 박한수

Creation of Vector Network Data with Considering Terrain Gradient for Analyzing Optimal Haulage Routes of Dump Trucks in Open Pit Mines

Boyoung Park, Yosoon Choi*, Han-Su Park

Abstract Previous studies for analyzing optimal haulage routes of dump trucks in open pit mines mostly used raster data. However, the raster data has several problems in performing optimal route analyses: (1) the jagged appearance of haulage roads according to the cell resolution often causes overestimation of the travel cost; (2) it is difficult to trace the topological relationships among haulage roads. These problems can be eliminated by using vector network data, however a new method is required to reflect the performance characteristics of a dump truck according to terrain gradient changes. This study presents a new method to create vector network data with the consideration of terrain gradient for analyzing optimal haulage routes of dump trucks in open pit mines. It consists of four procedures: (a) creating digital elevation models, (b) digitizing haulage road networks, (c) calculating the terrain gradient of haulage roads, and (d) calculating the average speed and travel time of a dump truck along haulage roads. A simple case study at the Roto South pit in the Pasir open pit coal mine, Indonesia is also presented to provide proof that the proposed method is easily compatible to ArcGIS Network Analyst software and is effective in finding optimal haulage routes of dump trucks with considering terrain gradient in open pit mines.

Key words Open pit mine, Haulage operation, GIS, Dump truck

초 록 최근까지 노천광산을 대상으로 덤프트럭의 최적 운반경로 분석을 수행한 연구들은 주로 래스터 자료를 사용하였다. 그러나 래스터 자료는 격자 해상도에 따라 운반경로가 zigzag 형태로 심하게 왜곡될 수 있으며, 경로의 위상관계를 고려할 수 없는 한계가 있다. 벡터 네트워크 자료를 사용할 경우에는 이러한 문제점들을 해결할 수 있으나, 지형경사에 따른 덤프트럭의 성능 변화 특성이 최적 운반경로 분석시 반영될 수 있도록 할 필요가 있다. 본 연구에서는 노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석을 위해 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동 속도 변화를 반영할 수 있는 벡터 네트워크 자료의 생성 방법을 제시하였다. 수치지형모델 제작, 운반도로로 디지털 타이핑, 지형 경사도 계산, 경사도를 반영한 트럭의 이동속도 및 이동시간 계산 순으로 자료의 생성 작업이 진행된다. 제시한 벡터 네트워크 자료 생성 방법의 적용성과 효과를 알아보기 위하여 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로토 남부 채광장을 대상으로 간단한 사례연구를 수행한 결과, 제시한 방법이 ArcGIS Network Analyst 소프트웨어와 쉽게 호환이 가능하며, 최적 운반경로 분석시 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동속도 변화를 효과적으로 반영할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심어 노천광산, 운반작업, 지리정보시스템, 덤프트럭

Received: Oct. 15, 2013

Revised: Oct. 25, 2013

Accepted: Oct. 27, 2013

***Corresponding Author:** Yosoon Choi

(Tel) +82516296562, (Fax) +82516296553

E-Mail) energy@pknu.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

1. 서 론

일반적으로 생산단계의 노천광산에서 반복적으로 수행되는 작업공정은 크게 천공, 발파, 적재, 운반공정으로 구분된다(Hartman and Mutmanský, 2002). 이중 운반 작업공정에 투입되는 비용은 대부분의 노천광산 현

장에서 전체 채광비용의 50% 이상을 차지한다(Hays, 1990, Bonates, 1996, Temeng, 1997, Alarie and Gamache, 2002, Niemann-Delius and Fedurek, 2004). 따라서 효율적인 운반 작업을 통해 운반 작업공정에 투입되는 비용을 절감하는 것은 광산운영의 경제성 측면에서 매우 중요하다.

노천광산의 운반 작업에는 철도, 덤프트럭, 컨베이어 벨트 등 다양한 장비들이 사용되고 있다. 이 중 덤프트럭은 기동성과 유연성이 우수하여 대부분의 노천광산 현장에서 활용되고 있는 가장 대표적인 운반 장비이다(Bonates, 1996, Temeng, 1997, Cardu, et al., 2004). 최근까지 노천광산에서 덤프트럭을 이용한 운반 작업의 효율성을 높이기 위하여 트럭의 이동시간을 단축하거나 연료소비량을 줄일 수 있는 최적 운반경로 분석 방법들이 연구되었다(Choi et al. 2007, Choi et al., 2009, Choi and Nieto, 2011).

기존의 연구들은 공통적으로 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)에서 사용되는 래스터(raster) 자료를 이용하여 최적 운반경로 분석을 수행하였다. 래스터 자료를 이용한 최적 운반경로 분석 방법은 노천광산 채광장 사면에 형성된 운반도로 뿐만 아니라 채광장 하단의 도로 이외의 작업공간까지도 경로 분석시 고려할 수 있으며, 지형경사에 따른 트럭의 이동속도나 연료소비량의 변화를 분석 과정에 반영할 수 있는 장점이 있다(Choi and Nieto, 2011). 그러나 래스터 자료 구조의 고유한 특징으로 인해 분석에 사용된 자료의 격자 해상도에 따라 운반경로가 zigzag 형태로 심하게 왜곡될 수 있으며, 경로의 위상관계(topology)를 고려할 수 없어 교차로와 고가도로(overpass)를 구분하지 못하는 등의 한계가 있다(Wise, 2002).

이러한 한계는 네트워크 형태의 벡터 자료 구조를 이

용한 최적 운반경로 분석을 통해 극복할 수 있다. 벡터 자료 구조를 이용하면 zigzag 형태의 왜곡 없이 운반경로를 보다 사실적으로 표현할 수 있으며, 경로의 위상 관계를 고려하여 최적 운반경로 분석을 수행할 수 있다(Lee, 2011). 그러나 벡터 자료 구조는 지형의 연속적인 변화를 표현하기 어렵기 때문에 지형의 경사에 따른 덤프트럭의 속도 변화나 연료소비량의 변화를 최적 운반 경로 분석시 반영하지 못하는 문제가 있다. 노천광산에서 운반작업에 사용되는 대부분의 덤프트럭들은 이동 속도나 연료소비량이 수평 운반로와 경사로에서 크게 달라지며, 같은 경사로라 할지라도 상향 이동의 경우와 하향 이동의 경우가 큰 차이를 보인다. 따라서 노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석을 위해 벡터 네트워크 자료를 사용할 경우에는 지형경사에 따른 덤프트럭의 성능 변화 특성이 반영될 수 있도록 할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 노천광산 덤프트럭의 최적 운반 경로 분석을 위해 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동 속도 변화가 고려된 벡터 네트워크 자료의 생성 방법을 제시하는 것이다. 제시된 방법으로 생성한 노천광산의 운반 도로 벡터 네트워크 자료와 ArcGIS Network Analyst (<http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/networkanalyst>) 소프트웨어를 이용하여 노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석에 관한 간단한 사례연구를 수행하고자 한다.

2. Dijkstra's 알고리즘의 원리

Dijkstra's 알고리즘(Dijkstra, 1959)은 벡터 네트워크 자료를 이용한 최적 경로 분석시 널리 사용되고 있으며, ArcGIS Network Analyst 소프트웨어도 이 알고리즘을 기반으로 개발되었다. Dijkstra's 알고리즘의 원리를 간

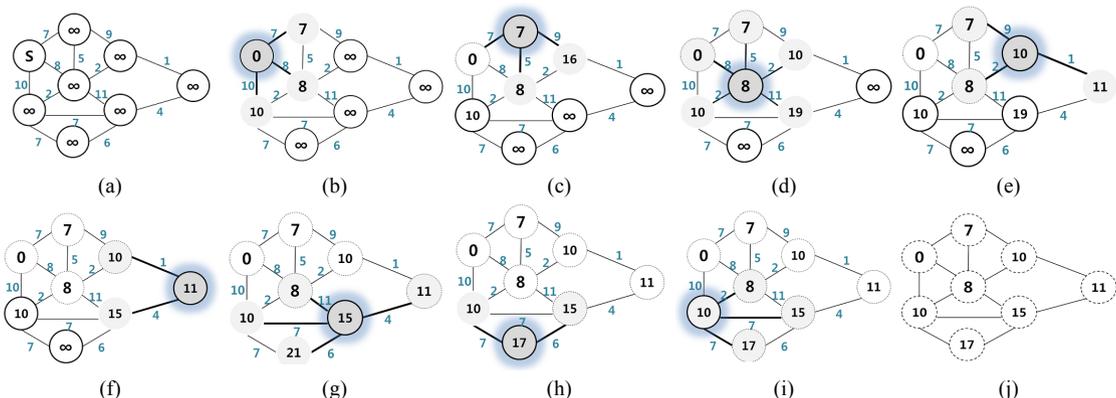


Fig. 1. An example of optimal route analysis using the Dijkstra's algorithm

단히 설명하면 Fig. 1과 같다. 먼저 방향성 그래프 $G=(V, E)$ 에서 하나의 출발점(s)으로부터 다른 모든 정점(v)까지의 최단거리를 구하는 것을 분석의 목표로 설정한다. 각 정점 v에 대하여 $D[v]$ 를 출발점 s로부터 현재까지 선택된 정점 집합 U를 경유하는 거리 또는 비용이라고 정의하고 ∞ 로 초기화한다. 출발점 s에서 간선으로 연결된 각 정점까지의 거리(비용)를 계산하면 $D[v]$ 의 초기 값인 ∞ 는 계산된 거리(비용) 값으로 대체된다. 이때 가장 작은 $D[v]$ 를 가지는 정점이 새로운 출발점이 된다. 새로운 출발점에서 간선으로 연결된 정점들에 대하여 $D[v]$ 를 새로 계산한 후, 새로 계산된 $D[v]$ 값이 기존의 값보다 작으면 값을 갱신하고 그렇지 않으면 값을 그대로 유지한다. 이와 같은 과정을 모든 정점들이 최소의 $D[v]$ 값을 가질 때까지 반복 수행한 후 알고리즘을 종료한다. Fig. 1의 사례의 경우에는 총 9번의 계산이 반복 수행된 후 알고리즘이 종료된다.

Dijkstra's 알고리즘은 방향성 그래프의 간선들에 할당된 가중치 값(거리, 시간, 연료소비량, 위험도 등)에 따라 최적 경로 분석의 결과가 크게 달라질 수 있다. 따라서 간선들에 가중치 값을 합리적으로 할당할 수 있는 방법이 필요하다. 본 연구에서는 지형경사에 따른 덤프트럭의 성능 변화 특성을 방향성 그래프 간선들의 가중치 값에 반영할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

3. 지형경사를 고려한 운반도로 벡터 네트워크 자료의 생성 방법

본 연구에서는 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동 속도 변화를 반영할 수 있는 벡터 네트워크 자료를 생성하기 위하여 Fig. 2와 같은 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 총 4단계의 절차로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 노천광산의 수치지형도를 이용하여 수치지형모델(digital elevation model)을 제작하며, 두 번째 단계에서는 채광장에 조성된 운반도로를 벡터 네트워크 자료로 표현하기 위해 디지털라이징(digitizing)을 수행한다. 세 번째 단계에서는 디지털라이징된 벡터 네트워크 자료의 구간별 경사도를 계산하며, 마지막 단계에서는 경사도에 따른 트럭의 이동 속도와 시간을 계산하여 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블에 입력한다.

3.1 수치지형모델 제작

지형경사를 고려한 운반도로 벡터 네트워크 자료를 생성하기 위해서는 먼저 지형경사 정보를 제공할 수 있는 수치지형모델을 제작해야 한다. 신뢰성 있는 수치지형모델을 제작하기 위해서는 토탈 스테이션(total station), DGPS(differential global positioning system) 등을 이용한 정밀 측량 결과로 작성된 수치지형도가 필요하다. 수치지형도에 포함된 지형 등고선 자료를 ArcGIS 소프트웨어의 'Create TIN' 기능을 이용하여 TIN (triangulated irregular network) 모델로 변환할 수 있으며, 이를 다시 'TIN to Raster' 기능을 이용하여 래스터 자료 구조를 갖는 수치지형모델로 변환할 수 있다.

3.2 운반도로 디지털라이징

노천광산의 고해상도 위성영상이나 광산도면을 기본 지도(base map)로 사용하여 채광장 사면, 하단 작업장, 폐석장 등에 조성된 덤프트럭의 운반도로를 디지털라이징하여 선(polyline) 형식의 벡터 네트워크 자료를 작성한다. 여기서 운반도로는 하나의 선으로 표시되며, 이러한 선들의 조합으로 전체 운반도로 네트워크가 형성된다. 디지털라이징 작업이 정밀하게 이루어질수록 운반도로의 보다 사실적인 표현이 가능하지만, 자료 작성에 더 많은 시간과 노력이 요구된다. 반면, 디지털라이징 작업의 정밀도가 지나치게 낮으면 최적 운반경로 분석 결과에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 네트워크를 구성하는 정점 사이의 간격을 최대 100 m로 설정하여 디지털라이징을 수행하였다. 즉, 정점과 정점을 연결하는 간선의 길이는 100 m를 넘지 않는다.

3.3 지형 경사도 계산

디지털라이징된 벡터 네트워크 자료의 구간별 지형 경사도를 계산하기 위하여 네트워크를 구성하는 각 정점들의 고도 값을 수치지형모델을 이용하여 추출한다. 이를 위해, 본 연구에서는 ArcGIS 소프트웨어의 'Feature Vertices to Point' 기능을 이용하여 네트워크를 구성하는 정점들을 점(point) 형식의 벡터 자료로 저장하였다. 그리고 'Add Surface Information' 기능을 이용하여 정점들이 위치한 좌표의 고도 값을 수치지형모델로부터



Fig. 2. Procedure for creating vector network data which considers terrain gradients

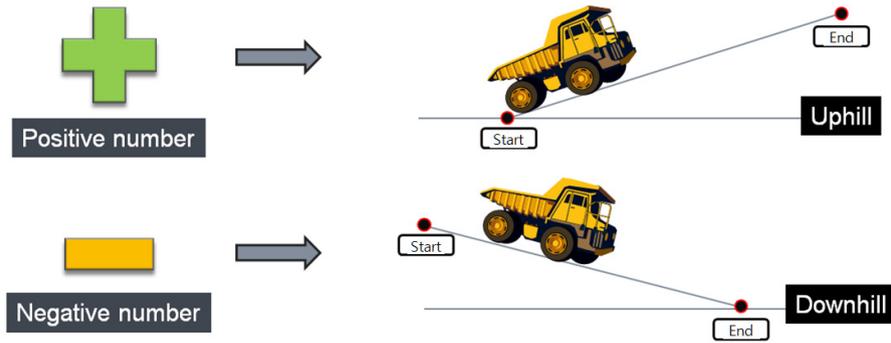


Fig. 3. Schematic diagram representing the meaning of positive and negative terrain gradients

Table 1. An example of attribute table of vector network data which considers the terrain gradients of haulage roads

ID	Start Elevation (m)	End Elevation (m)	Length (m)	GRADE (%)	Uphill Travel Time (min)	Downhill Travel Time (min)	Start → End Travel Time (min)	End → Start Travel Time (min)
1	144	147	100	3	0.24	0.24	0.24	0.24
2	129	138	100	9	0.40	0.15	0.40	0.15
3	124	116	100	-8	0.40	0.15	0.15	0.40
4	128	140	100	13	0.60	0.15	0.60	0.15
5	82	81	100	-1	0.24	0.24	0.24	0.24
6	124	118	100	-6	0.30	0.15	0.15	0.30
7	170	170	100	0	0.24	0.24	0.24	0.24
8	120	117	100	-4	0.30	0.15	0.15	0.30
9	146	152	100	6	0.30	0.15	0.30	0.15
10	42	32	100	10	0.40	0.15	0.15	0.40

추출하여 선 형식의 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블에 입력하였다.

네트워크를 구성하는 간선들을 각각 하나의 시작 정점과 하나의 끝 정점을 가진다. 이 두 개의 정점들의 고도 값의 차이(m)를 계산한 후 100 m로 나누어 백분율로 환산하면 간선별 지형 경사도(%)를 계산할 수 있다. 두 개의 정점간의 고도 차이는 양(+)의 값과 음(-)의 값이 모두 나타날 수 있으며, 이에 따라 간선별 지형 경사도가 양(+)의 경사와 음(-)의 경사로 계산된다. 양(+)의 경사는 시작 정점으로부터 끝 정점까지 상향 이동하는 것을 의미하며, 음(-)의 경사는 하향 이동하는 것을 의미한다(Fig. 3). Table 1은 10개의 간선들로 구성된 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블의 예를 보여준다. 세 번째 단계가 끝나면 테이블의 ‘Start Elevation’, ‘End Elevation’, ‘Length’, ‘GRADE’ 필드(field) 값의 계산 및 입력이 완료된다.

3.4 경사도를 반영한 트럭의 이동속도 및 이동시간 계산

경사도에 따른 덤프트럭의 이동속도와 이동시간을 계산하여 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블에 입력한다. 네트워크를 구성하는 간선들의 길이에 관한 정보는 이미 속성 테이블에 입력되어 있으므로 간선별로 덤프트럭의 이동속도를 결정하면 이동시간은 산술적으로 쉽게 계산이 가능하다. 덤프트럭의 이동속도는 차량의 성능, 적재여부, 운반도로 표면의 상태 등에 따라 크게 달라질 수 있다. Table 2는 Choi 등(2007)이 인도네시아 파시르 석탄 노천광산에서 차량의 이동속도와 관련한 시간연구를 수행하여 채광장 운반도로의 경사도에 따른 100톤 덤프트럭의 이동속도를 근사적으로 계산한 결과를 정리한 것이다. 상향(오르막)이동의 경우에는 폐석을 가득 적재한 차량(실차)의 이동속도를 계산한 것이며 하향(내리막)이동은 폐석을 투하한 공차의 이동

Table 2. Approximate speed of a dump truck (100 ton) at different terrain grades(%) at the Pasir open pit coal mine, Indonesia(Choi et al., 2007)

Type	Grade (%)	Approximate speed (km/hour)
Uphill	0-4	25
	4-8	20
	8-12	15
	over 12	10
Downhill	0-4	25
	over 4	40

속도를 계산한 것이다. 상향이동의 경우에는 운반도로의 경사도가 커질수록 이동속도는 느려지며, 하향이동의 경우에는 경사도가 커질수록 이동속도는 빨라진다. 그러나 최고 속도는 광산안전 규정에 따라 40 km/hour로 제한된다.

Table 2와 유사한 자료를 이용하여 경사도 및 이동방향에 따른 트럭의 이동속도를 결정하면 이를 이용하여 간선별로 상향이동과 하향이동시의 이동시간을 산술적으로 계산할 수 있다(Table 1). 운반도로의 경사도가 양(+)의 값을 가질 경우에는 계산된 상향이동 시간은 시작 정점에서 끝 정점까지의 이동시간을 의미한다. 반대로 경사도가 음(-)의 값을 가지는 경우에는 계산된 상향이동 시간이 끝 정점에서 시작 정점까지의 이동시간이다. 이러한 방법으로 운반도로의 경사도를 반영한 덤프 트럭의 이동시간이 계산되면 그 결과들은 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블에 Table 1과 같이 저장된다.

4. ArcGIS Network Analyst를 이용한 최적 운반경로 분석

제시된 방법으로 생성한 노천광산의 운반도로 벡터 네트워크 자료를 덤프트럭의 최적 운반경로를 분석을 위해 활용하기 위해서는 소프트웨어가 필요하다. 본 연구에서는 ArcGIS Network Analyst를 이용하여 최적 운반경로 분석을 수행하였다. ArcGIS Network Analyst는 최단 경로 분석, 여러 위치를 경유해야 하는 운송 차량의 가장 효율적인 경로 설정, 최근접 시설의 위치 파악, 시설의 최적 위치 결정 등의 최적화 문제에 사용되는 벡터 네트워크 자료 기반의 GIS 공간 분석 도구이다.

ArcGIS Network Analyst를 활용하는 절차는 크게 벡터 네트워크 자료에 위상관계에 대한 정보를 추가하는 네트워크 빌드(build) 과정과 출발지점과 도착지점 간의 최적 경로를 결정하는 네트워크 분석 과정 순으로

진행된다. 본 연구에서 제시된 방법으로 생성한 운반도로 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블에는 간선을 구성하는 정점들의 고도 값이 입력되어 있으므로, 수평면상의 같은 위치에 존재하는 서로 다른 정점이 같은 고도 값을 갖는 경우에는 교차로로 정의하며 다른 고도 값을 갖는 경우에는 고가도로로 정의하여 위상관계에 관한 정보를 추가할 수 있다. 이러한 과정은 ArcGIS Network Analyst의 'New Network Dataset' 마법사 기능을 사용하면 쉽게 처리할 수 있다. 네트워크 분석 과정에서 벡터 네트워크 자료의 속성 테이블(Table 1)의 필드 중 'Start → End Travel Time'과 'End → Start Travel Time'을 이용하여 간선들에 할당하는 가중치 값을 설정해야 한다. 필요에 따라서는 일반통행, 유턴금지 등과 같이 트럭 운행과 관련한 제약조건들을 벡터 네트워크의 간선 별로 설정할 수 있다.

5. 사례연구

본 연구에서 제시한 지형경사를 고려한 운반도로 벡터 네트워크 자료를 생성 방법이 ArcGIS Network Analyst 소프트웨어에서 적용이 가능한지를 확인하고, 노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석시 기존의 벡터 네트워크 자료 생성 방법과 어떠한 결과 차이를 보이는지 알아보기 위하여 간단한 사례연구를 수행하였다.

사례연구 지역은 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로토 남부(Roto South) 채광장으로 설정하였다. 사례연구 지역에 관한 설명은 Choi 등(2007)과 Sunwoo 등(2007)에 자세히 기술되어 있다. 본 사례연구의 목적이 간단한 예제를 통해 제시된 방법의 적용성과 효과를 알아보는 것이었기 때문에, 벡터 네트워크 자료의 생성을 위해 필요한 광산도면, 수치지형모델, 운반도로의 경사에 따른 100톤 트럭의 이동속도 측정자료(Table 2)는 Choi 등(2007)에 제시된 2007년 당시 수집된 자료들을 그대로 사용하였으며 별도의 추가적인 현장방문과 자료조사는 하지 않았다. 따라서 본 사례연구의 결과가 현재의 파시르 노천광산 현장의 상황을 반영하지는 않는다.

Fig. 4는 지형경사를 고려하여 생성한 연구지역의 운반도로 벡터 네트워크 자료를 ArcGIS Network Analyst를 이용하여 분석한 결과이다. 폐석을 실은 100톤 덤프 트럭(실차)이 채광장 내부의 두 곳의 적재 지점으로부터 서쪽과 동쪽에 위치한 폐석장까지 상향 이동하는 최적 운반경로(Fig. 4a)와 폐석을 실지 않은 100톤 덤프 트럭(공차)이 서쪽과 동쪽 두 곳의 폐석장으로부터 내부의 적재지점까지 하향 이동하는 최적 운반경로(Fig. 4b)

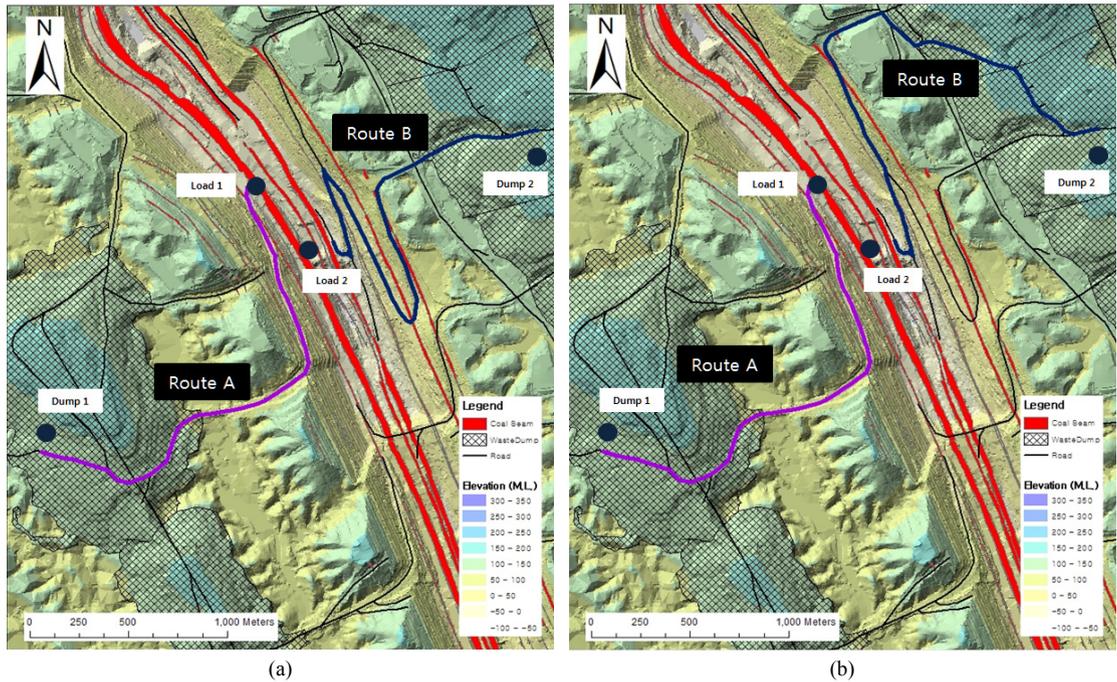


Fig. 4. Optimal haulage routes of dump trucks determined by ArcGIS Network Analyst and vector network data with considering terrain gradient. (a) Uphill movement. (b) Downhill movement

Table 3. Haulage distance, travel time and average speed of dump trucks along optimal routes illustrated in Fig. 4

Type	Route	Haulage distance (km)	Travel time (min)	Average speed (km/hour)
Uphill	A (Fig. 4a)	2.66	8.0	20.0
	B (Fig. 4a)	3.19	10.0	19.1
Downhill	A (Fig. 4b)	2.66	5.0	31.9
	B (Fig. 4b)	3.06	6.0	30.6

가 지도상에 표시되어 있다. 서쪽 폐석장과 연결된 최적 운반경로의 경우에는 실차의 상향 이동경로(Route A in Fig. 4a)와 공차의 하향 이동경로(Route A in Fig. 4b)가 동일하게 분석되었다. 그러나 최적 운반경로를 통해 이동하는 트럭의 운반 소요시간은 상향이동의 경우 8분, 하향 이동의 경우 5분으로 상이하게 분석되었다(Table 3). 이는 운반경로의 지형경사가 고려되어 공차 상태로 하향 이동할 경우 실차 상태로 상향 이동할 때 보다 빠른 속도를 낼 수 있는 덤프트럭의 특성(Table 2)이 반영되었기 때문이다.

동쪽 폐석장과 연결된 최적 운반경로는 실차의 상향 이동경로(Route B in Fig. 4a)와 공차의 하향 이동경로(Route B in Fig. 4b)가 상이하게 나타났다. 실차의 경

우 총 10분이 소요되는 3.19 km 길이의 운반경로가 최적인 것으로 분석되었다. 반면, 공차의 경우에는 북쪽 방향으로 이동 후 다시 남쪽 방향으로 돌아 내려오는 3.06 km 길이의 운반경로가 선택되었고, 소요시간은 6분으로 분석되었다(Table 3). 분석된 최적 운반경로의 출발지점으로부터의 거리에 따른 지형 고도의 변화를 살펴보면 실차의 상향 이동경로(Fig. 5a)가 공차의 하향 이동경로(Fig. 5b)보다 급경사 구간이 적은 것을 확인할 수 있다. 본 사례연구에서 사용한 운반도로의 경사에 따른 100톤 트럭의 이동속도 측정자료(Table 2)를 보면 상향 이동시에는 운반경로의 경사가 급할수록 이동속도가 느려져서 12% 경사 이상에서는 10 km/hour의 속도로 이동하게 되지만, 하향 이동시에는 운반도로의 경

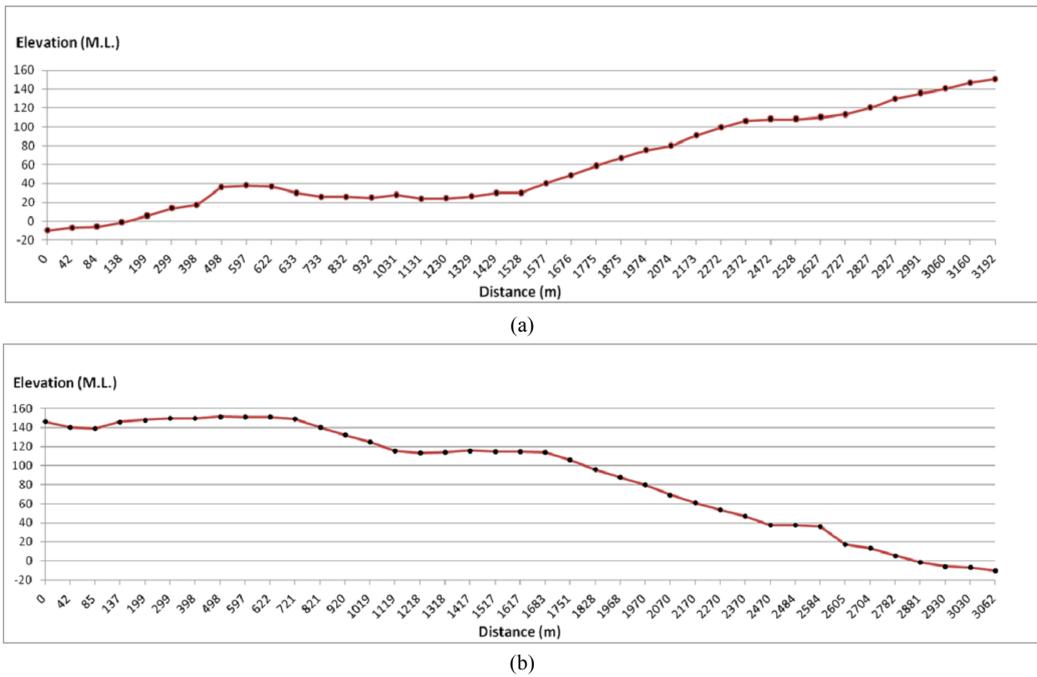


Fig. 5. Topographic profiles along optimal haulage routes. (a) Uphill route B in Fig. 4a. (b) Downhill route B in Fig. 4b

사가 급할수록 이동속도가 빨라져서 4% 경사 이상이 되면 최고 속도인 40 km/hour를 유지하면서 이동하게 된다. 따라서 상대적으로 급경사 구간의 비중이 적은 Fig. 5a의 경로는 상향 이동에 유리하며, 4% 경사 이상의 구간의 비중이 높은 Fig. 5b의 경로는 하향 이동이 유리하게 나타난 것으로 판단된다.

기존의 방법에 따라 지형경사를 고려하지 않고 생성한 연구지역의 운반도로 벡터 네트워크 자료를 이용하여 동일한 작업 조건에 대한 최적 운반경로를 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 지형경사를 고려하지 않는 벡터 네트워크 자료를 사용한 경우에는 실차의 상향 이동시 최적 운반경로와 공차의 하향 이동시 최적 운반경로가 모두 동일하게 나타났다. 이동시간의 경우에도 서쪽 폐석장과 연결된 경로(2.66 km)는 상, 하향 모두 4분, 동쪽 폐석장과 연결된 경로(3.06 km)는 상, 하향 모두 4.6 분이 소요되는 것으로 분석되었다. 운반도로의 지형경사가 고려되지 않아 상, 하향 방향에 관계없이 연구지역에서 허용된 덤프트럭의 최고 이동속도인 40 km/hour를 평균 이동속도로 설정하여 소요시간을 산정했기 때문이다. 따라서 기존의 방법으로는 지형경사에 따라 달라지는 덤프트럭의 속도 변화를 최적 운반경로 분석시 반영할 수 없으며, 이를 위해서는 본 연구에서 제시한 벡터 네트워크 자료의 생성방법이 사용되어야 한

다는 것을 알 수 있다.

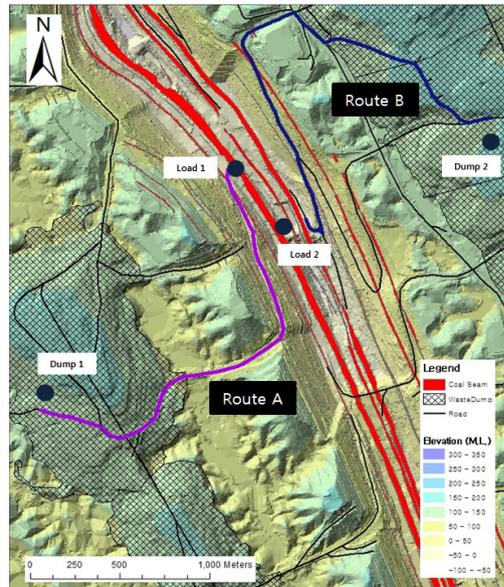


Fig. 6. Optimal haulage routes of dump trucks determined by ArcGIS Network Analyst and vector network data without considering terrain gradient. The routes of uphill and those of downhill movements are identical

6. 결론

본 연구에서는 노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석을 위해 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동속도 변화를 반영할 수 있는 벡터 네트워크 자료의 생성 방법을 제시하였다. 자료의 생성 방법은 수치지형모델 제작, 운반도로 디지털라이징, 지형 경사도 계산 및 입력, 경사도를 반영한 트럭의 이동속도 및 이동시간 계산 순으로 진행되는 4단계의 작업으로 구성된다. 제시된 벡터 네트워크 자료 생성 방법의 적용성과 효과를 알아보기 위하여 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로포 남부 채광장을 대상으로 간단한 사례연구를 수행하였다. 그 결과 제시된 방법으로 생성된 자료는 ArcGIS Network Analyst 소프트웨어와 쉽게 호환이 가능하며, 노천광산 덤프트럭의 최적 운반경로 분석시에도 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동속도 변화를 효과적으로 반영할 수 있음을 확인할 수 있었다. 대조적으로 기존의 방법으로 지형경사를 고려하지 않고 생성한 벡터 네트워크 자료는 덤프트럭의 상향 이동과 하향 이동시 발생하는 속도의 변화를 최적 운반경로 분석시 반영할 수 없었다.

본 연구의 결과가 기존의 벡터 네트워크 자료 기반의 최적 경로분석 방법을 대체할 새로운 알고리즘을 제시한 것은 아니다. 그러나 4단계의 절차로 구성된 자료 생성 방법을 통해 벡터 네트워크 자료가 지형의 변화를 표현할 수 있도록 함으로써 도로의 지형경사에 따른 덤프트럭의 이동속도 변화를 최적 운반경로 분석에 반영할 수 있도록 했다는 측면에서 기존에 일반적으로 사용되는 벡터 기반의 최적 운반경로 분석과 차별성을 가진다. 따라서 자연지형과 비교할 때 지형기복이 심한 노천광산에서는 덤프트럭의 최적 운반경로 분석시 지형경사를 고려할 수 있는 벡터 네트워크 자료의 생성 방법이 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 물론 실제 노천광산 현장에서 활용하기 위해서는 지형경사에 따른 덤프트럭의 속도 변화 이외에도 차량 운영과 관련한 다양한 제약조건들을 추가적으로 검토하고, 최적 운반경로 분석과정에 반영할 필요가 있다. 향후 연구를 통해 현장의 운영 조건을 추가적으로 반영한다면, 본 연구에서 제시한 방법이 노천광산 운반 작업의 효율성을 높이기 위해 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업 “국내 석회석광 적용 자동차 경량화 광물 원료 등 미래 자원화 기술 실증화 연구(과제번호: 2013T100100021)”

를 수행하는 대성엠펜디아(주)의 2013년 기술정보 수집 연구용역비 지원으로 수행되었다.

References

1. Alarie, S. and Gamache, M., 2002, Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Vol. 16, No. 1, pp. 55-76.
2. Bonates, E. J. L., 1996, Interactive truck haulage simulation program, In: Hennies, W. T., Ayres Da Silva, L. A. and Chaves, A. P. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 1996*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 51-57.
3. Cardu, M., Sacerdote, I., Margro, A. and Crosa, M., 2004, Analysis of possible alternatives for the exploration and hauling system in a marl mine (Tavernola BG, Italy), In: Hardygora, M., Paszkowska, G. and Sikora, M. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 2004*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 543-551.
4. Choi, Y., Sunwoo, C. and Park, H. D., 2007, Analysis of optimal haulage routes for dump trucks in large open pit mines, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 44, No. 6, pp. 477-491.
5. Choi, Y., Park, H. D., Sunwoo, C. and Clarke, K. C., 2009, Multi-criteria evaluation and least-cost path analysis for optimal haulage routing of dump trucks in large scale open-pit mines, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 23, No. 12, pp. 1541-1567.
6. Choi, Y. and Nieto, A., 2011, Optimal haulage routing of off-road dump trucks in construction and mining sites using Google Earth and a modified least-cost path algorithm, *Automation in Construction*, Vol. 20, No. 7, pp. 982-997.
7. Dijkstra, E. W., 1959, A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269-271.
8. Hartman, H. L. and Mutmansky, J. M., 2002, *Introductory Mining Engineering*, John Wiley & Sons, New York, USA, 584 p.
9. Hays, R. M., 1990, Truck, In: Kennedy, B. A. (eds), *Surface mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, USA, pp. 672-691.
10. Lee, K. W., 2011, *Bike Route Selection Methods Considering User Characteristics Using GIS*, PhD dissertation, Incheon National University, Incheon, Korea, 123 p.
11. Niemann-Delius, C. and Fedurek, B., 2004, Computeraided simulation of loading and transport in medium and small scale surface mines, In: Hardygora, M., Paszkowska, G. and Sikora, M. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 2004*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 579-584.
12. Sunwoo, C., Choi, Y., Park, H.D. and Jung, Y.B., 2007, Drainage control and prediction of slope stability by GIS-based hydrological modeling at the large scale open

pit mine, Journal of the Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 17, No. 5, pp. 360-371.

13. Temeng, V. A., 1997, A computerized model for truck dispatching in open pit mines. PhD dissertation, Michigan

Technological University, Michigan, USA, pp. 1-12.

14. Wise, S., 2002, GIS Basics, Taylor & Francis Group, London, UK, 240 p.



박보영

2012년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학사

Tel: 051-629-6550
E-mail: charmby@gmail.com
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 석사과정

박한수

Tel: 02-765-3003
E-mail: parkhs@dsmc.co.kr
현재 대성엠디아이(주) 신소재기술연구소 부장



최요순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부, 공학사
2009년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부, 공학박사
2010년 미국 펜실베이니아 주립 대학교 에너지자원공학과, Post-Doc

Tel: 051-629-6562
E-mail: energy@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 조교수