

대규모 노천광산의 운반 효율성 향상을 위한 덤프트럭의 최적 운반경로 분석

최요순¹⁾ · 선우춘²⁾ · 박형동^{1)*}

Analysis of Optimal Haulage Routes for Dump Trucks in Large Open Pit Mines

Yosoon Choi, Choon Sunwoo and Hyeong-Dong Park*

Abstract : This study presents a novel methodology to determine the optimal haulage routes of dump trucks in large-scale open pit mines. The proposed methodology for optimal haulage routing considers multiple criteria which can significantly influence the planning of truck haulage routes. The discrete friction cost which represents adverse affects of truck movement can be assigned using a fuzzy membership function and the weight of each criterion can be determined through the Saaty's pairwise comparisons. The application at the Roto South in the Pasir open-pit coal mine, Indonesia showed that the proposed methodology could make optimal solutions to determine the haulage routes of waste dump trucks between loading locations and waste dumps and could approximately estimate the truck travel time along the optimal haulage route.

Key words : Open pit mine, Mine haulage, GIS, Least-cost path analysis, Pairwise comparisons

요약 : 본 연구에서는 대규모 노천광산의 운반 효율성 개선을 위해 활용할 수 있는 덤프트럭의 최적 운반경로 분석 모델을 개발하였다. 개발된 분석 모델은 운반거리, 지형경사, 수계 및 광체와의 접근성, 운반로 유지관리 작업의 용이성 등 노천광산 현장의 다양한 영향요인들을 복합적으로 고려할 수 있다. 또한, 퍼지 멤버십 함수의 정의와 쌍대비교 기법의 적용을 통해 영향요인들의 저항비용과 가중치를 합리적으로 산정할 수 있다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광의 로토 강남지역에 대하여 개발된 분석 모델을 적용한 결과 현장의 작업계획을 반영한 폐석운반 덤프트럭의 최적 이동경로를 분석할 수 있었으며, 운반작업에 소요되는 덤프트럭의 이동시간도 근사적으로 예측할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 분석 모델은 작업계획에 따라 덤프트럭의 최적 운반경로를 신속하게 제시할 수 있으므로, 대규모 노천광산의 운반 시스템 효율성 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 노천광산, 운반작업, 지리정보시스템, 최적경로분석, 쌍대비교

서론

대규모 노천광산에서는 많은 양의 폐석과 광석들이 상대적으로 길고 가파른 경로를 통해 채굴적 외부로 운반되어야 하며, 운반작업에 투입되는 비용은 일반적으로 전체 채광비용(operation cost)의 50% 이상을 차지한다 (Hays, 1990; Bonates, 1996; Temeng, 1997; Alarie and Gamache, 2002; Niemann-Delius and Fedurek, 2004).

실례로서, 우리나라 해외에너지광물자원 개발의 성공사례로 평가받는 인도네시아 파시르(Pasir) 노천광산의 경우에도 전체 채광비용의 50% 이상이(연간 1000억원 정도) 운반작업에 투입되고 있다(Table 1). 운반비용은 노천광산 개발의 경제성에 크게 영향을 미칠 수 있으므로, 광산내 운반시스템의 효율성 개선을 통해 운반비용을 절감할 수 있는 기술의 개발은 매우 중요하다.

노천광산에서는 덤프트럭, 철도, 컨베이어 벨트, 트롤리 등을 운반작업에 활용할 수 있으며, 이중 덤프트럭은 가장 대표적인 운송수단으로서 대부분의 노천광산에서 활용되고 있다(Bonates, 1996; Temeng, 1997; Cardu, et al., 2004). 덤프트럭을 활용한 운반작업의 효율성은 트럭이 적재지점과 덤프지점 사이를 왕복하는데 소요되는 시간 즉, 트럭 싸이클 타임(truck cycle time)을 측정하여

2007년 8월 24일 접수, 2007년 12월 4일 채택

1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

2) 한국지질자원연구원 지반안전연구부

*Corresponding Author(박형동)

E-mail: hpark@snu.ac.kr

Address: Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

Table 1. Operation costs at the Pasir open pit coal mine, Indonesia in 2006

Operation Units	Cost		
	Roth North Pit	Roto Middle Pit	Roto South Pit
Drilling	\$ 0.61 / ton	\$ 0.39 / ton	\$ 0.52 / ton
	3 %	4 %	5 %
Blasting	\$ 0.84 / ton	\$ 0.39 / ton	\$ 0.84 / ton
	4 %	7 %	5 %
Loading	\$ 4.51 / ton	\$ 1.74 / ton	\$ 2.65 / ton
	23 %	22 %	23 %
Haulage	\$ 10.27 / ton	\$ 3.97 / ton	\$ 6.05 / ton
	53 %	51 %	51 %
Maintenance	\$ 3.24 / ton	\$ 1.25 / ton	\$ 1.91 / ton
	17 %	16 %	16 %
Total	\$ 19.48 / ton	\$ 7.74 / ton	\$ 11.97 / ton
	100 %	100 %	100 %

평가할 수 있다(Ramani, 1990). 예를 들어, 100톤 덤프 트럭의 사이클 타임이 10분일 경우, 2400톤의 폐석을 운반하기 위해서는 4대의 트럭으로 60분간 작업을 수행해야 한다. 그러나 트럭 사이클 타임이 5분으로 단축될 경우에는, 100톤 트럭 2대만으로도 같은 시간동안 동일한 양의 폐석을 운반할 수 있다. 따라서 트럭 사이클 타임이 단축되면 장비 운영비용의 절감 효과를 기대할 수 있으며, 운반작업의 효율성이 향상된 것으로 평가할 수 있다. 일반적으로 트럭 사이클 타임은 Suboleski(1975)가 제안한 다음의 계산식을 이용하여 산정한다.

$$TCT = STL + LT + TL + STD + DT + TE + AD \quad (1)$$

여기서 TCT 는 트럭 사이클 타임, STL 은 적재방향으로 트럭의 회전 및 접근시간(Spot Time at Loading area), LT 는 적재장비의 작업시간>Loading Time), TL 은 적재지점에서 덤핑지점까지 실차의 이동시간(Travel time of a Loaded truck), STD 는 덤핑방향으로 트럭 회전 및 접근시간(Spot Time at Dumping area), DT 는 적재물의 덤핑시간(Dumping Time), TE 는 덤핑지점에서 적재지점까지 공차의 이동시간(Travel time of an Empty truck), AD 는 작업 지연시간(Average Delay time)을 의미한다. 트럭 사이클 타임의 구성요소 가운데 STL , STD , DT 는 트럭 운전자의 작업태도 및 숙련도에 따라 달라질 수 있으며, LT 는 엑스캐베이터(excavator)와 같은 적재장비 효율성에 따라 영향을 받는다. 그러나 이들 4가지 구성요소들은 일반적으로 시간에 따른 변동폭이 크지 않기 때문에 트럭 사이클 타임의 최적화 문제에서 상수(constant

value)로 가정되는 경우가 많다(Niemann-Delius and Fedurek, 2004). 반면, TL , TE , AD 의 3가지 구성요소들은 운반작업 계획에 따라 크게 달라질 수 있는 부분이다. 예를 들어, TL 과 TE 는 적재지점에서 가장 효율적으로 운반작업을 수행할 수 있는 폐석장(waste dump) 또는 광석 비축지점(stockpile)을 선택하고, 적재지점과 덤핑지점 사이의 최적 운반경로를 결정함으로써 크게 단축될 수 있다. 또한, AD 는 적절한 수의 덤프트럭을 적재지점에 할당하고, 트럭의 배차간격을 조정하여 최적화될 수 있다(Meyer, 1979).

트럭 사이클 타임의 단축을 위하여 식 (1)을 구성하는 가변적 요소들(TL , TE , AD)의 최적화 문제에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔으며, 특히 복잡한 최적화 과정을 신속하게 처리할 수 있는 소프트웨어들이 최근까지 다수 개발되었다(Hauck, 1979; Bonates, 1996; Temeng, 1997; Blackwell, 1999; Aksoy and Yalcin, 2000; Alarie and Gamache, 2002; Niemann-Delius and Fedurek, 2004; Oraee and Asi, 2004). 그러나 기존의 연구들은 AD 의 단축을 위하여 TL 과 TE 는 상수로 가정하고 트럭할당 및 배차간격을 최적화하는 문제에 주로 관심을 두었기 때문에, 트럭의 최적 운반경로 결정 문제에 대해서는 합리적인 솔루션을 제공하지 못하는 한계가 있었다. Fig. 1(a)와 같이 원형 채굴적 형태로 개발되는 소규모 노천광산의 경우, 채굴적 내부의 램프웨이 개수가 적고 운반경로의 선택이 매우 제한적이기 때문에 TL 과 TE 를 상수로 가정하고 AD 의 최적화 문제에 접근할 수 있으나(Ramani, 1990; Blackwell, 1999), Fig. 1(b)와 같이 직선형으로 개발되는 대규모 노천광산에서는 다수의 램프웨이들이

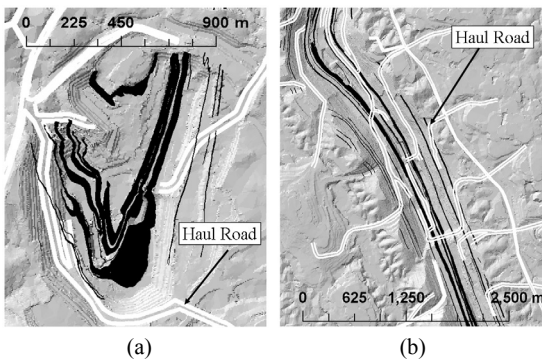


Fig. 1. Comparison between (a) simple haul road networks and (b) complex haul road networks in open pit mines

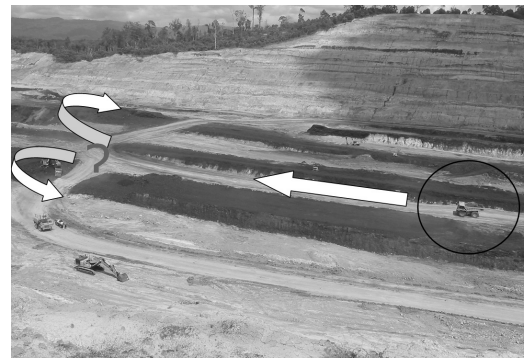


Fig. 2. Example of a complex situation for determining the haulage route of dump truck in open pit mines

복잡한 네트워크를 형성하고 있어 운반경로의 선택에 따라 TL 과 TE 가 크게 달라질 수 있다. 따라서 대규모 노천광산에서 트럭을 이용한 운반작업의 효율성을 극대화하기 위해서는 AD 의 최적화에 앞서 TL 과 TE 를 단축할 수 있는 최적 운반경로 결정이 선행되어야 할 것으로 판단된다(Fig. 2).

본 연구의 목적은 운반로 네트워크가 복잡하게 형성되어 있는 대규모 노천광산에서 덤프트럭의 최적 운반경로를 결정할 수 있는 새로운 분석 모델을 개발하는 것이다. 퍼지 멤버십 함수(fuzzy membership function)와 쌍대비교(pairwise comparisons) 기법을 활용한 다중인자 평가(multi-criteria evaluation)를 통해 운반거리뿐만 아니라 지형경사에 따른 이동속도, 수계분포, 광체분포, 운반로 유지관리 상태 등 운반경로 선택에 영향을 줄 수 있는 다양한 요인들을 복합적으로 고려하며, GIS(Geographic Information Systems) 기반의 최적경로 분석 기법(least-cost path analysis, LCPA)을 적용하여 트럭의 최적 운반경로를 결정하고자 한다. 본 논문에서는 개발된 분석 모델의 원리와 적용방법을 소개한 후, 인도네시아 파시르 노천광 로또 강남(Roth South) 지역을 대상으로 현장 적용을 수행한 결과를 제시한다.

최적 운반경로 분석 모델의 개발

노천광산에서 덤프트럭의 최적 운반경로를 결정하기 위해서는 운반거리 뿐만 아니라 지형조건, 광산 안전규정, 수계와의 접근성 등 다양한 영향요인들을 복합적으로 고려해야 한다. 예를 들어, 운반거리가 가장 짧은 경로를 선택하더라도, 해당 경로에 급경사 구간이 다수 존재하여 트럭이 정상속도로 이동할 수 없다면 운반작업 소요시간은 오히려 길어질 수 있기 때문이다. 본 연구에

서는 다음과 같은 영향요인들을 복합적으로 고려하여 최적 운반경로 분석 모델을 개발하였다.

- 운반거리
- 구간별 운반로의 지형경사와 마찰저항에 따른 이동속도
- 내리막 경로 선택시 광산 안전규정에 따른 최대 허용경사
- 집수지 등 지표수계의 분포와 접근성
- 지표면에 노출된 광체의 분포와 접근성
- 운반로 유지관리 작업의 용이성
- 채굴적 주변 덤프장의 분포와 작업계획에 따른 적재지점의 위치

Fig. 3은 본 연구에서 개발된 덤프트럭의 최적 운반경로 분석 모델을 보여준다. 분석 절차의 첫 번째 단계에서는 관심지역을 균일한 크기의 격자들로 분할한 후, 개별 격자마다 저항비용(friction cost)을 할당한다. 저항비용은 덤프트럭의 이동에 방해되는 저항요소들에 대하여 지불하는 비용으로서, 해당 격자 영역에 다수의 저항요소들이 분포하는 경우 상대적으로 높은 저항비용이 할당된다(Yu, et al., 2003). 노천광산의 경우 운반로의 경사가 급한 구간에서는 오르막 이동시 덤프트럭의 이동속도가 느려지므로, 이러한 구간에서는 상대적으로 높은 수준의 저항비용을 할당할 수 있다. 반면, 수평 운반로에서는 덤프트럭이 보다 빠르게 주행할 수 있으므로, 상대적으로 낮은 수준의 저항비용을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 운반경로 결정시 고려해야할 각 요인별로 퍼지 멤버십 함수를 정의하여 저항비용을 산정하였고, 관심지역에 대한 저항비용 레이어(layer)를 생성하여 분석 모델에 입력할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 저항비용 레이어를 DFC(Discrete Friction Cost) 레이어로 명명한다. DFC 레이어 생성시 퍼지 멤버십 함수를 정의하는 방법에 대한

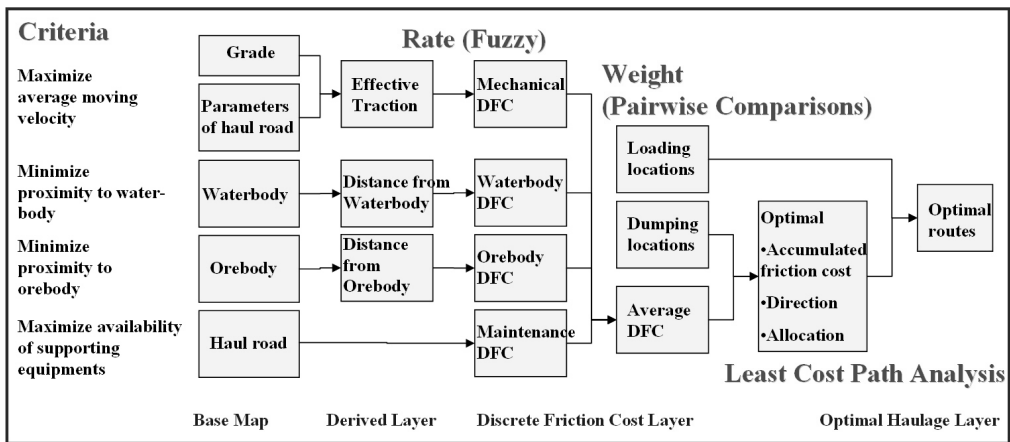


Fig. 3. Procedures of optimal haulage routing in the developed analysis model

자세한 설명은 Atkinson, et al.(2005)을 참고할 수 있다. 분석절차의 두 번째 단계에서는 개별 영향요인들로부터 생성된 DFC 레이어들을 하나로 통합하여 ADFC (Average Discrete Friction Cost) 레이어를 생성한다. ADFC 레이어는 각 영향요인들에 대한 DFC 레이어들을 단순히 산술평균하여 생성할 수도 있으나, 이 경우 개별 영향요인들의 상대적인 중요도가 ADFC 레이어에 반영되기 어렵다. 본 연구에서는 Saaty(1980)가 제안한 AHP (Analytic Hierarchy Process) 이론의 세부절차인 쌍대비교 기법을 적용하여 각 영향요인들의 가중치를 산정하고, DFC 레이어들을 가중평균하는 방법으로 대상지역의 ADFC 레이어를 생성하였다. 마지막 단계에서는 최적경로 분석을 통해 채굴적 내부의 적재지점으로부터 채굴적 외곽의 덤핑지점까지 운반작업을 수행하는데 필요한 최소한의 누적저항비용(accumulated least friction cost)을 계산하고, 덤핑지점까지의 최적 운반경로를 분석한다. 최적경로 분석 결과를 이용하면 적재지점의 위치에 따라 가장 유리한 덤핑지점을 신속하게 판단할 수 있으며, 오르막 이동과 내리막 이동을 구분하여 덤프트럭의 최적 운반경로를 결정할 수 있다.

DFC 레이어의 생성

역학적 저항비용(mechanical friction cost)의 산정

덤프트럭의 이동속도는 노천광산에서 운반경로 결정시 필수적으로 고려해야 할 요소이며, 가급적 빠른 속도로 이동할 수 있는 운반경로를 선택하는 것이 유리하다. 이론적으로 덤프트럭의 이동속도는 도로표면에서 발생하는 추진력(traction)과 마찰저항(resistance)의 크기에 따라 결정되는데, 추진력이 크고 마찰저항이 작을수록 보다 빠른 속도로 이동할 수 있다(Walker, 1988; Hays,

1990). 채굴적 하단에서 채굴적 상단으로 오르막 이동하는 실차의 경우, 다음의 계산식을 이용하여 운반로 구간별 덤프트럭의 유효 추진력(effective traction)을 계산한다(Hays, 1990).

$$ET = Tr - Re = \left[\mu \times \omega \times \frac{100}{\sqrt{\theta^2 + 100^2}} - (GRF \times \theta + RRF) \right] \times GVW \quad (2)$$

여기서 *ET*는 유효 추진력(kN), *Tr*은 추진력(kN), *Re*는 마찰저항(kN), μ 는 도로표면의 점착력 계수(coefficient of adhesion), ω 는 트럭의 하중분산계수(coefficient of weight distribution), θ 는 운반로의 경사도(%), *GRF* (Grade Resistance Factor)는 경사저항계수, *RRF*(Rolling Resistance Factor)는 회전저항계수, *GVW*(Gross Vehicle Weight)는 실차의 총 중량(kN)을 의미한다. 운반로 표면의 상태에 따른 μ , *GRF*, *RRF* 값은 Walker(1988), Hays (1990) 등에 의해 제시되었으며, 트럭의 *GVW*와 ω 값은 트럭 제조사에서 제공하는 장비 명세서를 조사하면 알 수 있다.

유효 추진력이 크게 발생하는 구간에서는 덤프트럭이 빠른 속도로 이동할 수 있으므로 역학적 저항비용은 상대적으로 낮게 평가할 수 있다. 반면, 유효 추진력이 음(-)의 값을 갖는 구간에서는 덤프트럭의 오르막 이동이 불가능하기 때문에, 역학적 저항비용이 매우 높게 산정 되도록 퍼지 멤버십 함수를 정의해야 한다. 트럭의 내리막 이동시에는 *GRF*의 부호가 반대로 바뀌어 오르막 이동에 비해 음(-)의 값의 유효 추진력을 갖는 구간은 줄어든다. 그러나 일부 급경사 구간에서는 덤프트럭이 내리

오는 속도가 지나치게 가속되어 차량의 브레이크 시스템이 쉽게 파손될 수 있으므로(Walker, 1988), 내리막 이동시에도 급경사 구간에서는 광산의 안정규정에 따라 역학적 저항비용이 높게 산정될 수 있도록 퍼지 멤버십 함수를 정의할 필요가 있다.

수계분포 저항비용(waterbody friction cost)의 산정

운반경로가 집수지 등과 같은 수계와 지나치게 근접할 경우에는 운전자의 주행 안전성을 충분히 확보하기 어렵다. 본 연구에서는 수계분포와의 접근성을 고려하기 위하여 충분한 안전거리를 확보할 수 있는 지점에 대해서는 저항비용을 낮게 할당하고, 수계와의 거리가 가까워질수록 저항비용이 점차 높게 할당될 수 있도록 하였다.

광체 저항비용(orebody friction cost)의 산정

노천광산의 경우 덤프트럭과 지표에 노출되어 있는 광체의 접촉 횟수를 최소화할 수 있는 운반경로가 보다 선호된다. 폐석처리용 덤프트럭이 광체 위를 지나가는 경우 덤프트럭에서 흘러나온 폐석이 광체와 혼합되어 광물 적재 및 처리작업의 효율성을 저하시킬 수 있기 때문이다. 또한, 석탄 노천광산의 경우에는 덤프트럭이 지나간 탄층 위로 다량의 석탄 분진(dust)이 발생하여 채광 작업자의 건강과 인근 지역의 대기환경에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 지표에 노출된 광체와의 거리가 가까울수록 저항비용이 높게 할당되도록 퍼지 멤버십 함수를 정의하였다.

유지관리 저항비용(maintenance friction cost)의 산정

운반로 표면을 정리하는 모터 그레이더, 분진제어를 위한 살수차(water truck) 등 운반로 유지관리를 위한 지원장비들의 운영비용 또한 노천광산의 전체 채광비용에서 큰 비중을 차지한다. 따라서 운반작업에 투입된 덤프트럭들이 최소 개수의 램프웨이만을 통해 이동한다면,

유지관리 작업이 필요한 운반로 구간이 줄어들고 동시에 지원장비 운영비용도 크게 절감할 수 있다. 물론 지나치게 적은 수의 램프웨이만을 이용할 경우 일부 구간에서 심각한 정체가 발생하여 운반시스템의 효율성을 저하시킬 수 있으므로 주의가 필요하다. 본 연구에서는 현장의 유지관리 작업여건에 따라 유지관리가 용이한 운반로 구간에는 저항비용을 낮게 할당하고, 유지관리가 어려운 구간에는 저항비용을 높게 할당함으로써 최적경로 분석과정에 운반로 유지관리 측면이 반영될 수 있도록 하였다.

ADFC 레이어의 생성

Saaty(1980)가 제안한 쌍대비교는 복잡한 문제를 단순화하여 영향요인들의 가중치를 효과적으로 결정할 수 있는 기법이다. n개의 영향요인에 대한 가중치 결정을 위해서는 식 (3)과 같은 n×n 크기의 2차원 비교행렬(comparisons matrix)을 생성해야 한다. 비교행렬에서 (i, j)에 위치한 원소는 j번째 영향요인에 대한 i번째 영향요인의 상대적인 중요도 값(relative intensity)을 의미하며, Table 2에 제시된 기준에 따라 그 값을 결정할 수 있다. 예를 들어, 첫 번째 영향요인과 두 번째 영향요인을 비교할 때 첫 번째 영향요인이 약간 더 중요하다고(relatively favors) 판단되는 경우 비교행렬의 (1, 2)에 위치한 원소 c₁₂의 값에는 3을 할당할 수 있다.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

비교행렬을 구성하는 모든 원소들의 값이 할당되면, 식 (4)과 같은 우선순위 행렬(priority matrix, P)을 생성한다. 우선순위 행렬에서 i번째 행의 원소는 i번째 영향요인에 대한 가중치 값을 의미하며, 모든 원소의 합은 1

Table 2. Scale for pairwise comparisons(Bascetin, 2007)

Relative Intensity	Definition	Explanation
1	Of equal value	Two requirements are of equal value
3	Slightly more value	Experience slightly favors one requirement over another
5	Essential or strong value	Experience strongly favors one requirement over another
7	Very strong value	A requirement is strongly favored and its dominance is demonstrated in practice
9	Extreme value	The evidence favoring one over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between two adjacent judgments	When compromise is needed

을 만족한다.

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \left(\frac{c_{1j}}{c_{0j}} \right) \\ \sum_{j=1}^n \left(\frac{c_{2j}}{c_{0j}} \right) \\ \dots \\ \sum_{j=1}^n \left(\frac{c_{nj}}{c_{0j}} \right) \end{bmatrix} \quad \text{where } c_{0j} = \sum_{i=1}^n c_{ij} \quad (4)$$

마지막 단계에서는 쌍대비교 과정이 일관성 있게 진행되었는지 평가한다. 비교행렬을 생성하는 과정에서 분석자의 판단에 일관성이 결여된다면, 산출된 가중치 값들도 신뢰하기 어렵기 때문이다(Saaty, 1980). 쌍대비교 과정에 대한 일관성 정도는 다음의 식들을 이용하여 평가할 수 있다.

$$K = C \times P = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{where } \lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{k_i}{P_i} \right)}{n} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

여기서 CI(Consistence Index)는 앞서 생성된 비교행렬과 우선순위 행렬의 값을 이용하여 계산하며, RI(Random Index)는 Table 3에서 영향인자의 개수(n)에 대응하는 값을 찾아 대입한다. 일반적으로 CR(Consistence Ratio) 값이 0.10보다 작거나 같게 계산되는 경우에는 전체 영향인자들에 대한 쌍대비교가 일관성 있게 진행된 것으로 평가할 수 있다(Saaty, 1980).

최적경로 분석

최적경로 분석 기법은 GIS에서 주로 활용되는 공간분석 기법의 하나로서, 지도학, 인공지능, 토목공학, 컴퓨터 공학 등 다양한 학문분야에서 많은 관심을 받아왔다(Yu, et al., 2003). 최적경로 분석 기법은 입력되는 자료의 형식에 따라 크게 벡터 기반의 경로분석과 래스터 기반의 경로분석으로 구분된다. 벡터 기반의 경로분석은

이미 구축되어 있는 네트워크에서 가장 빠른 이동경로를 찾는 것을 주요 목적으로 하며, 교통, 물류, 관광산업 등의 응용분야에서 활용되고 있다(Berg and Kreveld, 1997). 한편, 래스터 기반의 경로분석은 주로 도로설계, 파이프라인 배치, 군사작전 계획 등 다양한 영향요인들을 복합적으로 고려해야 하는 응용분야에서 최적경로 설정을 위해 활용되고 있다(Yu, et al., 2003). 본 연구에서는 덤프 트럭의 운반경로 결정시 운반거리를 포함한 다양한 영향요인들을 복합적으로 고려하기 위하여, 래스터 기반의 최적경로 분석 기법을 적용하였다.

래스터 기반의 최적경로 분석 절차는 크게 두 단계로 구분할 수 있다. 먼저, 모든 격자에 대한 도착지점까지의 최소한의 누적저항비용을 Dijkstra's(1959) shortest path algorithm을 이용하여 계산하며, 두 번째 단계에서는 Xu and Lathrop's(1995) back-link mechanism을 이용하여 출발지점과 도착지점 사이의 최적 이동경로를 결정한다. Fig. 4는 래스터 기반 최적경로 분석의 예를 보여준다. Fig. 4(a)는 관심지역에 대한 ADFC 레이아웃이며, 격자 (1, 1)은 최종 도착지점을 의미한다. 서로 인접해 있는 격자사이를 이동할 때 지불해야 하는 저항비용은 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Friction Cost} \\ & = \begin{cases} \frac{C_{(i,j)} + C_{(i',j')}}{2} & \text{if } i = i' \text{ OR } j = j' \quad (\text{case 1}) \\ \frac{(C_{(i,j)} + C_{(i',j')}) \times \sqrt{2}}{2} & \text{if } i \neq i' \text{ AND } j \neq j' \quad (\text{case 2}) \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

식 (8)에서 case 1은 인접한 두 개의 격자가 하나의 변을 공유하는 경우에 해당하며, case 2는 두 개의 격자가 대각선 방향으로 인접하여 하나의 꼭짓점을 공유하는 경우이다. Table 4는 Fig. 4(a)의 모든 격자에 대하여 인접 격자로의 이동시 지불해야 하는 저항비용을 계산한 결과이다. 서로 인접하지 않은 격자 사이는 이동이 불가능한 것으로 가정하여 저항비용을 무한대(∞)로 높게 할당하였다. 모든 격자들에 대하여 최소한의 누적저항비용을 계산하기 위해 먼저 최종 도착지점인 격자 (1, 1)의 누적저항비용을 0으로 확정한다(Fig. 4(b)). 이어서 (1, 1)에 인접한 3개의 격자 (1, 2), (2, 1), (2, 2)의 누적저항비용을 다음의 식을 이용하여 계산한다.

Table 3. Random Index (RI) values versus “n” (Bascetin, 2007)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

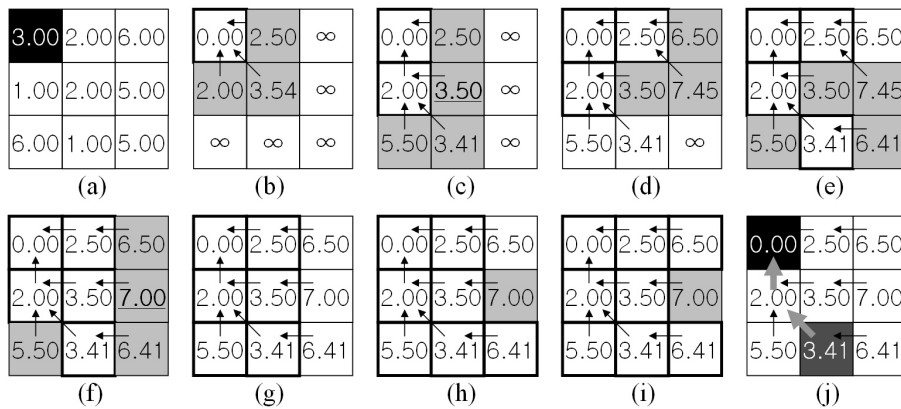


Fig. 4. An example of the least-cost path analysis (LCPA). (a) Average discrete friction cost. (b) Stage 1 for calculating accumulated friction cost. (c) Stage 2. Accumulated friction cost of grid (2, 2) is updated. (d) Stage 3. (e) Stage 4. (f) Stage 5. Accumulated friction cost of grid (2, 3) is updated. (g) Stage 6. (h) Stage 7. (i) Stage 8. (j) Optimal route from grid (3, 2) to grid (1, 1)

Table 4. Adjacency matrix which represents the friction cost of potential routes at each grid in Fig. 4(a)

(row, col)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)
(1, 1)	0	2.50	∞	2.00	3.54	∞	∞	∞	∞
(1, 2)	2.50	0	4.00	2.12	2.00	4.95	∞	∞	∞
(1, 3)	∞	4.00	0	∞	5.66	5.50	∞	∞	∞
(2, 1)	2.00	2.12	∞	0	1.50	∞	3.50	1.41	∞
(2, 2)	3.54	2.00	5.66	1.50	0	3.50	5.66	1.50	4.95
(2, 3)	∞	4.95	5.50	∞	3.50	0	∞	4.24	5.00
(3, 1)	∞	∞	∞	3.50	5.66	∞	0	3.50	∞
(3, 2)	∞	∞	∞	1.41	1.50	4.24	3.50	0	3.00
(3, 3)	∞	∞	∞	∞	4.95	5.00	∞	3.00	0

$$AFC_{(i',j')} = \begin{cases} AFC_{(i,j)} + FC_{(i,j)-(i',j')} & (\text{if } AFC_{(i,j)} + FC_{(i,j)-(i',j')} < AFC_{(i',j')}) \\ AFC_{(i',j')} & (\text{if } AFC_{(i,j)} + FC_{(i,j)-(i',j')} \geq AFC_{(i',j')}) \end{cases} \quad (9)$$

여기서 격자 $AFC(i,j)$ 는 값이 확정된 지점의 누적저항비용을 의미하며, $FC(i,j)-(i',j')$ 는 인접격자(i',j')로의 이동을 위해 필요한 저항비용이다. $AFC(i',j')$ 는 인접격자(i',j')까지 이동하는데 필요한 최소한의 누적저항비용을 의미한다. 격자 (1, 1)에서 격자 (1, 2)로의 이동을 위해서는 저항비용으로 2.50을 지불해야하며(Table 4), 식 (9)에 의해 격자 (1, 2)의 누적저항비용은 2.50으로 계산된다. Fig. 4(b)는 3개의 인접격자에 대한 누적저항비용 계산 결과를 보여주며, 모두 누적저항비용이 확정된 지점인 (1, 1)의 방향으로 화살표가 할당되었음을 알 수 있다. 다음 계산에서는 3개의 인접격자 중 누적저항비용이 가장 작게 계산되었던 격자 (2, 1)의 값을 확정하고, 격

자 (2, 1)에 인접한 4개의 격자 (1, 2), (2, 2), (3, 1), (3, 2)에 대한 누적저항비용을 계산한다(Fig. 4(c)). 격자 (1, 2)의 경우 새로 계산된 누적저항비용이 4.12로서 기존의 2.50보다 크기 때문에 식 (9)에 의해 기존의 누적저항비용 값을 그대로 유지하게 되지만, 격자 (2, 2)의 경우 새로 계산된 누적저항비용이 기존의 누적저항비용보다 더 작기 때문에 누적저항비용의 갱신이 이루어지며, 화살표의 방향도 현재 단계의 확정 격자인 (1, 2) 방향으로 변경된다. 이러한 계산과정은 n개의 격자 가운데 누적저항비용이 확정된 격자의 개수가 n-1개가 될 때까지 반복 수행되며, Fig. 4(i)는 최종적으로 도출된 누적저항비용과 격자별 이동방향을 보여준다. Fig. 4(j)는 임의로 선택된 격자 (3, 2)에서 최종 도착지점인 (1, 1)까지의 최적 이동경로를 보여준다. 누적저항비용 계산과정에서 결정된 화살표 방향을 따라 최종 도착지점까지 거슬러 올라가는 방법으로 최적 이동경로를 결정할 수 있다. 최적 경

로를 따라 이동시 지불하게 되는 총 누적저항비용은 3.41로서 격자 (3, 2)에서 계산된 누적저항비용 값과 동일하다.

현장적용 및 결과

개발된 최적 운반경로 분석 모델의 실용성을 검토하기 위해, 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로토 강남지역을 대상으로 현장 적용을 수행하였다. 파시르 노천광산의 일반현황에 대한 자세한 설명은 최요순 등(2006)을 참고할 수 있다. Fig. 5(a)는 대상지역의 지형적 특성과 탄층, 수계, 운반로 등의 분포현황을 보여준다. 또한, 2007년 6월 6일 폐석운반 작업을 수행하기 위해 계획된 적재지점과 덤프가능 지점의 위치가 표시되어 있다. 총 5개의 적재지점에 대하여 폐석처리용 100톤 덤프트럭이 각각 5대씩 할당되었으며, 덤프 가능한 폐석장은 탄층 주향방향을 기준으로 서측에 3개, 동측에 4개 지점이 분포하고 있다. 지상 정밀 지형측량 자료로부터 10m 해상도(resolution)의 DEM(Digital Elevation Model)을 생성하였고, DEM을 이용하여 대상지역의 지형 경사도(%)를

계산하였다(Fig. 5(b)). 대상지역에서 덤프트럭의 유효 추진력 산정에 필요한 인자 값들은 Table 5와 같다.

퍼지 멤버십 함수의 정의 및 DFC 레이어의 생성 결과

Fig. 6(a)는 대상지역에서 덤프트럭의 오르막 이동시 발생하는 유효 추진력을 보여준다. 램프웨이 및 수평 운반로 구간에서는 유효 추진력이 대부분 높게 산정되었으며, 최대 유효 추진력은 743(kN)으로 나타났다. Fig. 6(b)는 대상지역의 역학적 저항비용을 계산하기 위해 정의한 퍼지 멤버십 함수이다. 유효 추진력이 증가함에 따라 역학적 저항비용은 점차 낮아지며, 최대 유효추진력 743(kN)에 도달하면 역학적 저항비용은 0이 되도록 설정하였다. 유효 추진력이 음(-)의 값을 갖는 구간은 덤프트럭의 오르막 주행이 불가능하므로, 역학적 저항비용을 100,000으로 높게 산정하여 최적 운반경로 결정시 배제될 수 있도록 하였다. Fig. 6(c)는 덤프트럭의 오르막 이동에 대한 역학적 저항비용을 산정한 결과이다. 1 이상의 역학적 저항비용을 갖는 지점들은 대부분 급경사 구간으로 벤치사면의 분포와 거의 일치하는 것을 볼 수 있

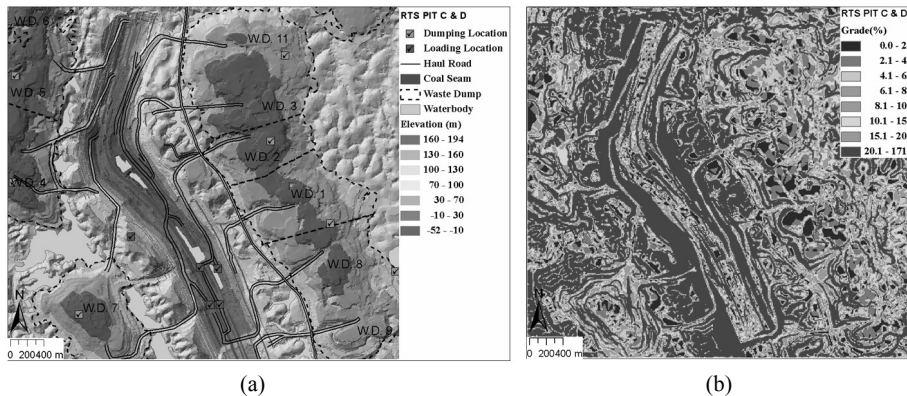


Fig. 5. Study area. (a) Thematic map of Roto South in Pasir open pit coal mine, Indonesia. (b) Grade (%) of terrain surface

Table 5. Parameters for calculating the effective traction on the study area

Parameter		Value
μ (coefficient of adhesion)	loading / dumping area	0.450
	rampway	0.600
	main haul road (horizontal)	0.700
ω (coefficient of weight distribution)		0.667
GRF (Grade Resistance Factor)		0.010
RRF (Rolling Resistance Factor)	loading / dumping area	0.010
	rampway	0.003
	main haul road (horizontal)	0.002
GVW (Gross Vehicle Weight, ton)		163.0

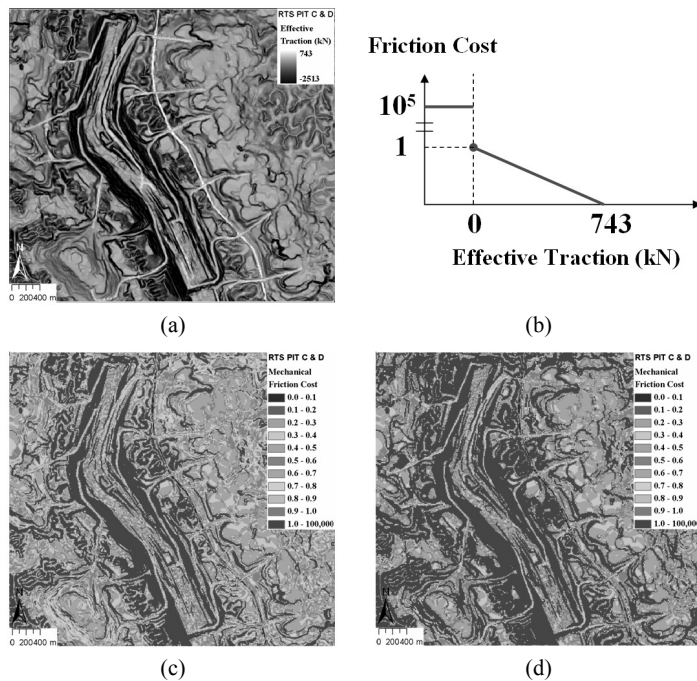


Fig. 6. Mechanical friction cost. (a) Effective traction. (b) Fuzzy membership function for rating the mechanical friction cost. (c) Mechanical DFC layer (full haul moving to uphill). (d) Mechanical DFC layer (empty haul moving to downhill)

다. 내리막 이동에 대한 역학적 저항비용 산정에는 유효 추진력 개념과 더불어 대상지역 램프웨이 경사도의 최대 허용기준(17%)을 추가로 반영하였다. 즉, 17% 미만의 경사구간에 대해서는 유효 추진력 산정결과를 그대로 반영하여 퍼지 멤버십 함수를 통해 역학적 저항비용을 산정하였으며, 17% 경사도 이상의 구간에서는 계산된 유효 추진력과 관계없이 역학적 저항비용을 100,000으로 높게 할당하였다(Fig. 6(d)).

수계 및 탄층과의 접근성에 대한 저항비용을 산정하기 위해, 현장 광산 기술자들의 의견을 반영하여 20 m 이격 거리를 기준으로 퍼지 멤버십 함수를 정의하였다(Figs. 7(a) & (b)). 정의된 퍼지 멤버십 함수는 수계 및 탄층으로부터 20 m 이상 떨어진 지점에는 저항비용을 0으로 낮게 할당하며, 20 m 미만에서는 접근성이 높아짐에 따라 저항비용을 점차 높게 할당한다. 단, 수계영역 내부로는 덤프트럭의 운반경로 설정이 불가능하기 때문에 저항비용을 100,000으로 높게 산정하였다(Fig. 7(a)). Figs. 7(c) & (d)는 수계 및 탄층과의 접근성에 대한 대상지역의 DFC 레이어를 생성한 결과이다.

유지관리 저항비용에 대한 DFC 레이어는 다음과 같은 현장 작업여건을 반영하여 생성하였다. 대상지역에서 운반로 유지관리 작업에 투입 가능한 지원장비들은 총

5개 조합으로서, 5개 적재지점에 대해 각각 1개 조합을 배치할 수 있다. 따라서 2007년 6월 6일 폐석운반 작업의 경우, 5개 적재지점에서 출발하는 트럭들이 어떤 램프웨이를 통해 이동하더라도 운반로 유지관리 작업이 용이한 상황이다. 그러나 채굴적 상단에 위치한 남북방향 수평 운반로의 경우 원탄운반 트럭의 전용도로로 설계되어 있어 폐석운반 트럭은 진입할 수 없다. 본 연구에서는 현장여건을 반영하여 채굴적 상단 수평 운반로에 대해서는 유지관리 저항비용을 100,000으로 높게 할당하였고, 유지관리 작업이 용이한 나머지 운반로들에 대해서는 유지관리 저항비용을 0으로 낮게 할당하였다.

영향요인들의 DFC 레이어 생성을 위해 필요한 퍼지 멤버십 함수는 현장의 여건에 따라 다르게 정의될 수 있다. 특히, 수계 및 탄층과의 접근성에 대한 이격거리 기준은 광산 기술자의 주관적 판단이 크게 개입될 수 있다. 따라서 보다 객관적인 기준으로 DFC 레이어를 생성하기 위해서는 현장의 광산 안전규정에 등에 근거하여 퍼지 멤버십 함수를 정의할 필요가 있다.

ADFC 레이어의 생성 결과

폐석운반 덤프트럭의 오르막 이동과 내리막 이동시 경로선택에 영향을 미치는 요인들의 상대적 중요도를 평가

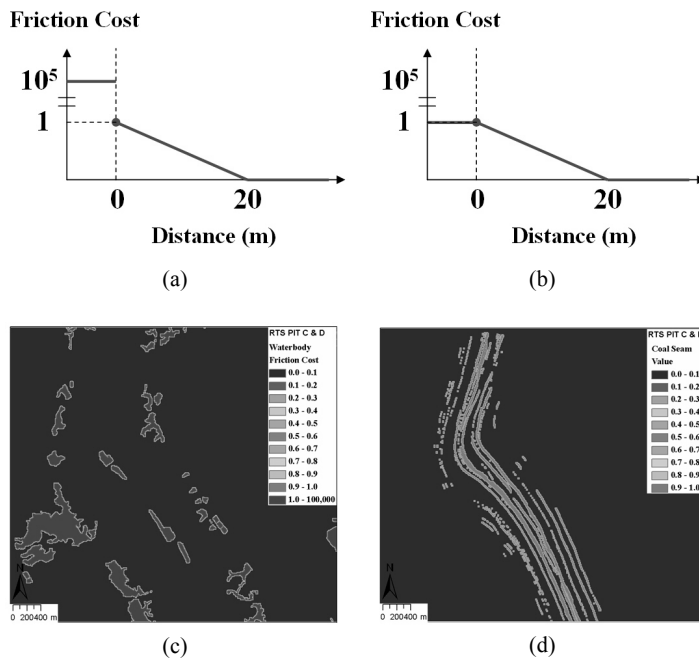


Fig. 7. (a) Fuzzy membership function for rating the waterbody friction cost. (b) Fuzzy membership function for rating the coal seam friction cost. (c) Waterbody DFC layer. (d) Coal seam DFC layer

Table 6. Pairwise comparisons about 4 criteria considering for the optimal haulage routes in the study area

Haulage type	Criterion for evaluation	Comparative criterion	Mining engineer			Geometric mean	Modified intensity
			(1)	(2)	(3)		
full haul (to uphill)	ME	WA	7.00	7.00	3.00	5.28	5.00
	ME	CO	9.00	9.00	7.00	8.28	8.00
	ME	MA	5.00	5.00	0.33	2.03	2.00
	WA	CO	5.00	0.11	3.00	1.19	1.00
	WA	MA	0.20	1.00	3.00	0.84	1.00
	CO	MA	0.14	7.00	0.20	0.58	0.50
empty haul (to downhill)	ME	WA	5.00	7.00	3.00	4.72	5.00
	ME	CO	9.00	9.00	7.00	8.28	8.00
	ME	MA	5.00	5.00	3.00	4.22	4.00
	WA	CO	3.00	0.11	3.00	1.00	1.00
	WA	MA	0.20	1.00	0.20	0.34	0.33
	CO	MA	0.14	7.00	0.11	0.48	0.50

하기 위해, 5년 이상의 현장 경험이 있는 광산 기술자 3명을 대상으로 설문조사를 실시하였다. Table 6은 설문조사 결과에 따라 영향요인들의 비교항목에 대한 상대적 중요도 값을 산정한 결과이다. 광산 기술자 3명의 견해가 일치하지 않는 경우에는 Saaty(1980)가 제안한 방법에 따라 3명의 조사결과를 기하평균한 후, 소수점 이하

를 보정하는 방법으로 상대적 중요도를 결정하였다. 상대적 중요도 값들에 대하여 쌍대비교 기법을 적용한 결과 역학적 저항비용, 수계분포 저항비용, 탄층 저항비용, 유지관리 저항비용에 대한 가중치를 Table 7과 같이 결정할 수 있었다. 덤프트럭의 이동속도와 관계되는 역학적 저항비용의 가중치가 가장 높게 결정되었으며, 유지관

Table 7. Priority weights for 4 criteria and consistence ratio

Haulage type	Weights				CR
	ME	WA	CO	MA	
full haul (to uphill)	0.57	0.13	0.10	0.20	0.05
empty haul (to downhill)	0.62	0.09	0.09	0.20	0.03

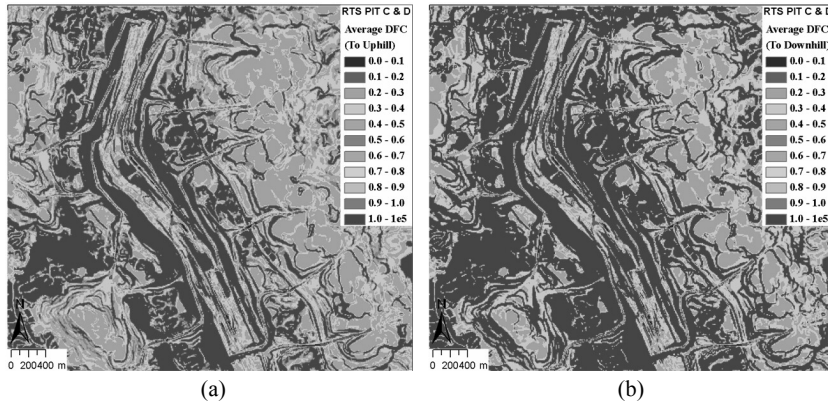


Fig. 8. Average Discrete Friction Cost (ADFC) layer. (a) Full haul moving to uphill. (b) Empty haul moving to downhill

리 작업의 용이성이 두 번째로 높은 가중치를 나타내었다. CR 값은 오르막 이동과 내리막 이동에서 모두 0.10보다 작게 산정되었다. 따라서 설문조사를 통한 쌍대비교 과정은 비교적 일관성 있게 진행된 것으로 판단된다.

ADFC 레이어를 생성하기 위하여, 다음의 식을 이용하여 DFC 레이어들의 중첩연산을 수행하였다.

$$ADFC = \begin{cases} 0.57 \times MED + 0.13 \times WAD + 0.10 \times COD + 0.20 \times MAD & (uphill) \\ 0.67 \times MED + 0.09 \times WAD + 0.09 \times COD + 0.20 \times MAD & (downhill) \end{cases} \quad (10)$$

여기서 *MED*는 역학적 DFC 레이어, *WAD*는 수계분포 DFC 레이어, *COD*는 탄층 DFC 레이어, *MAD*는 유지관리 DFC 레이어를 의미한다. 각각의 DFC 레이어들을 가중 평균하여 대상지역의 ADFC 레이어를 생성한 결과는 Fig. 8과 같다.

최적 운반경로 분석 결과

대상지역에서는 운반작업에 투입된 덤프트럭들이 일정 시간 동일 적재지점과 덤프지점 사이를 왕복하는 fixed assignment 배차 방식을 사용하고 있다. 본 연구에서는 fixed assignment 배차 방식이 최적경로 분석에 반영될 수 있도록, 덤프를 마치고 내려오는 공차의 목적지는 항상 출발했던 적재지점으로 설정되도록 제약조건을 추가

하였다. Fig. 9는 오르막 이동시의 ADFC 레이어와 덤프 가능한 폐석장의 위치정보를 이용하여 최적 운반경로 분석을 수행한 결과이다. Fig. 9(a)는 대상지역의 각 지점에서 가장 유리한 덤프지점까지 도달하는데 필요한 최소한의 누적저항비용을 표시한 것이며, Fig. 9(b)는 각 지점에서의 최적 이동방향을 보여준다. 대상지역에는 복수개의 덤프지점이 존재하기 때문에 적재지점에 따라 누적저항비용을 최소화하여 운반작업을 수행할 수 있는 덤프지점이 달라질 수 있다. Fig. 9(c)에서 채굴적을 분할하는 영역들은 각각 하나의 덤프지점을 포함하고 있는데, 영역내의 어느 위치에서 적재작업을 수행하더라도 같은 영역에 포함된 덤프지점을 목적으로 선택한다면 폐석 운반시 필요한 누적저항비용을 최소화할 수 있다. 대부분의 노천광산에서 적재지점에 비해 덤프지점의 위치가 변경되는 빈도수는 상대적으로 적기 때문에, Fig. 9(c)의 결과는 적재지점의 변경에 따라 덤프지점을 다시 선택해야 하는 경우 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다. Fig. 10은 각 적재지점으로부터 오르막 이동하는 경우와 덤프지점으로부터 내리막 이동하는 경우에 대하여 최적 운반경로를 분석한 결과이다. Fig. 10(a)의 적재지점 L3의 경우 거리상으로는 덤프지점 D3에 근접해 있으나, 다양한 영향요소들을 복합적으로 고려했을 때 덤프지점 D2로 폐석을 운반하는 것이 보다 유리한 것으로 분석되었다. 일부 구간에서는 오르막 이동시의 운반경로

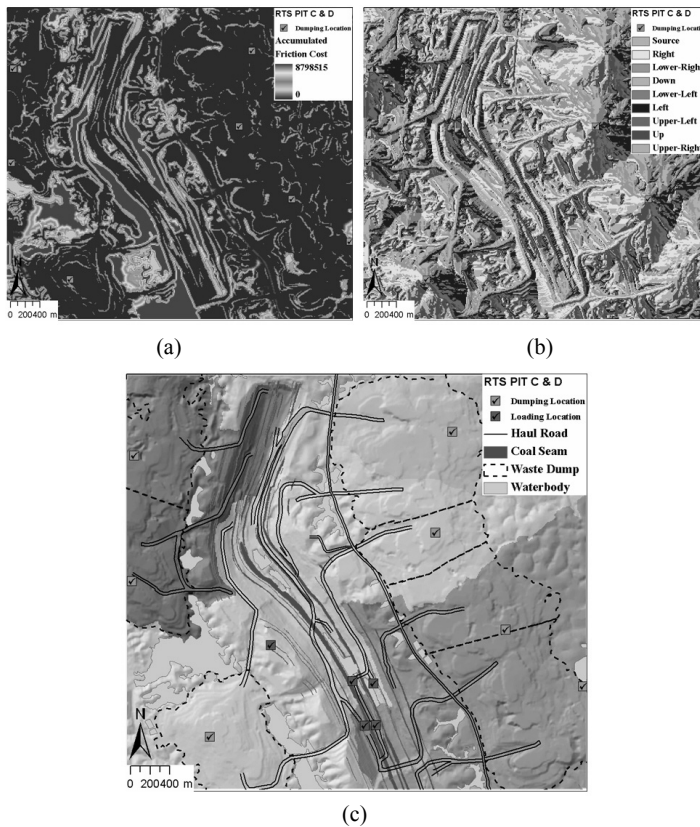


Fig. 9. Results from least cost path analysis. (a) Accumulated friction cost. (b) Optimal moving direction at each grid. (c) Division of the pit for determining the waste dump which has the least cost route

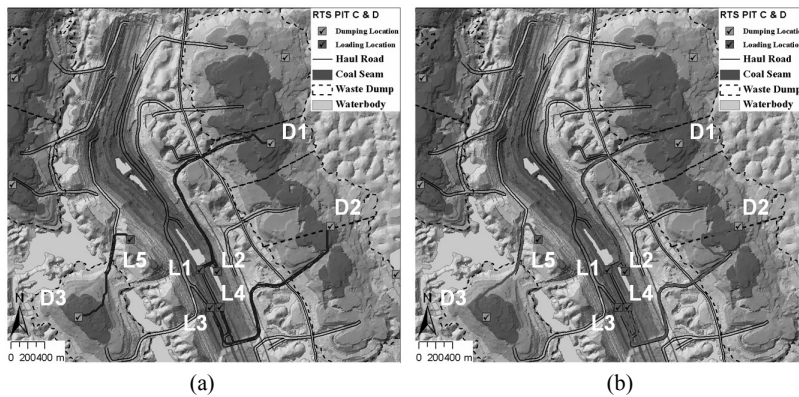


Fig. 10. Optimal haulage routes of dump trucks. (a) Full haul moving to uphill. (b) Empty haul moving to downhill

와 내리막 이동시의 운반경로가 상이하게 결정되었으며, 이는 영향요인들의 가중치와 역학적 저항비용의 산정기준이 오르막 이동시와 내리막 이동시에 다소 차이가 있었기 때문이다. 제시된 경로를 따라 폐석 운반작업을 수

행할 경우 3개의 램프웨이만을 사용하게 되므로, Fig. 10은 유지관리 비용측면에서도 합리적인 분석 결과라고 판단된다.

Table 8. Approximate velocity of dump truck (100 ton) at different grades in the study area

Haul type	Grade (%)	Approximate velocity (km/h)
Full haul moving to uphill	0-4	25
	4-8	20
	8-12	15
	over 12	10
Empty haul moving to downhill	0-4	25
	over 4	40

Table 9. Comparisons between estimated travel time and measured travel time of dump truck (100 ton) through the suggested haulage routes

Route in Fig. 10		Haul type	Distance (km)	Ratio of grade (%) through the route				Average velocity (km/h)	Estimated travel time (min)	Measured travel time (min)
departure	arrival			0-4	4-8	8-12	over 12			
L1	D1	Full	2.85	0.14	0.23	0.41	0.21	16.5	10.4	10.1
D1	L1	Empty							4.5	4.7
L2	D1	Full	2.81	0.14	0.26	0.42	0.19	16.8	10.1	8.9
D1	L2	Empty							4.4	4.4
L5	D3	Full	1.46	0.32	0.23	0.19	0.26	18.1	4.8	4.3
D3	L5	Empty	1.74	0.24	0.30	0.25	0.22	36.5	2.9	2.8
L4	D2	Full	2.81	0.18	0.31	0.40	0.11	17.8	9.5	-
D2	L4	Empty	3.24	0.27	0.30	0.36	0.07	36.0	5.4	-
L3	D2	Full	2.92	0.22	0.31	0.35	0.11	18.2	9.6	-
D2	L3	Empty	3.37	0.30	0.31	0.31	0.09	35.5	5.7	-

운반시간 예측 및 검증

분석된 최적 운반경로에 대한 이동시간을 예측하고, 검증하기 위하여 대상지역의 덤프트럭 이동속도와 관련한 시간연구(time study)를 수행하였다. 채굴적 내부 운반로를 한눈에 내려다 볼 수 있는 전망대에서 구간별로 폐석운반 덤프트럭의 이동시간을 측정하였고, 채굴적 내부 운반로의 일부구간과 외부 운반로에 대해서는 차량을 이용하여 덤프트럭과 함께 움직이면서 이동시간을 측정하였다. 시간연구 결과로부터 운반로 경사도에 따른 100톤 덤프트럭의 이동속도를 Table 8과 같이 근사적으로 추정할 수 있었다. 제시된 최적 운반경로에 대하여 10m 단위로 경사도를 분석한 결과, 운반로를 구성하는 경사도의 비율을 산정할 수 있었으며, Table 8에 제시된 이동속도를 운반로의 경사도 구성비율로 가중평균하여 각각의 운반경로에 대한 평균 이동속도를 계산할 수 있었다(Table 9). Fig. 10에 제시된 5개의 운반경로를 대상으로 평균 이동속도와 실제 이동거리를 이용하여 경로별 TL과 TE를 예측하였으며, 시간연구를 통해 현장에서 직접 측정한 3개 경로의 TL, TE를 비교하는 방법으로 예

측결과와의 검증을 수행하였다(Table 9). TE의 경우 예측된 값과 실제 측정된 값의 차이가 10초 이하로 높은 예측 정확도를 보였으나, TL은 실제보다 30-60초 정도 과대 예측되는 경향을 확인할 수 있었다. 특히 적재지점 L2에서 출발하는 덤프트럭의 TL이 가장 큰 예측 오차를 보였는데, 해당 경로를 통해 운반작업을 수행했던 덤프트럭의 평균 이동속도가 가중평균하여 추정한 16.8 km/h보다 다소 빨랐기 때문인 것으로 판단된다. 이동시간의 예측 정확도를 높이기 위해서는 지속적인 시간연구를 통해 보다 정확한 평균 이동속도를 추정할 필요가 있으며, 트럭 운전자의 작업 숙련도나 태도에 대한 측면도 고려되어야 할 것이다.

결론

본 연구에서는 다중 영향요인들의 가중치 결정을 위한 쌍대비교 기법과 래스터 GIS 기반의 최적경로 분석 기법을 함께 접목하여, 대규모 노천광산에서 덤프트럭의 최적 운반경로를 결정할 수 있는 분석 모델을 개발하였

다. 분석 모델은 이동거리, 지형조건, 광산 안전규정, 수계 및 광채와의 접근성, 유지관리 작업의 용이성 등 다양한 요인들을 복합적으로 고려할 수 있으며, 각 영향요인들에 대한 퍼지 멤버십 함수를 정의하여 덤프트럭의 움직임에 대한 저항비용을 합리적으로 산정할 수 있다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광의 로포 강남지역에 대한 적용을 통해 현장 지형조건과 운반작업 여건을 반영한 DFC 레이어들을 생성할 수 있었으며, 현장 기술자들에게 대한 설문조사 결과에 근거하여 운반경로 결정에 고려할 영향요인들의 가중치를 산정할 수 있었다. 대상지역의 2007년 6월 6일 작업계획을 반영하여 최적 운반경로 분석을 수행한 결과, 5개 폐석 적재지점에서 출발하는 덤프트럭들이 3개의 램프웨이를 이용하여 동측 2개의 덤핑지점과 서측 1개의 덤핑지점으로 운반작업을 수행하는 것이 가장 유리한 것으로 나타났다. 또한 대부분의 운반경로에 대하여 오르막 이동시 1분 이내, 내리막 이동시 10초 이내의 오차범위에서 운반시간을 근사적으로 예측할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 분석 모델은 덤프트럭의 최적 운반경로를 합리적이고 신속하게 결정할 수 있으므로 대규모 노천광산의 운반 효율성 개선을 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 개발된 모델은 적용현장에 따라 저항비용 산정, 가중치 결정, 제약조건 설정 등의 분석 조건의 변경이 용이하기 때문에, 소프트웨어로 개발하여 노천광산 현장에 공급할 경우 범용적인 운반 최적화 분석툴로서 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연연구사업(대규모 석탄 노천광의 연역사면 안정성 및 생산성 향상 연구)과 2007년도 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 수행되었으며, 또한 논문 작성은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

- 최요순, 선우춘, 박형동, 2006, “광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화”, *한국지구시스템공학회지*, Vol. 43, No. 5, pp. 429-438.
- Aksoy, M. and Yalcin, E., 2000, “A computer program for open pit mine equipment selection: TruckMac,” In: Panagiotou, G. N. and Michalakopoulos, T. N. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 2000*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 499-503.
- 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. 59-76.
- Atkinson, D. M., Deadman, P., Dudycha, D. and Traynor, S., 2005, “Multi-criteria evaluation and least cost path analysis for an arctic all-weather road,” *Applied Geography*, Vol. 25, No. 4, pp. 287-307.
- Bascetin, A., 2007, “A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine,” *Environmental Geology*, Vol. 52, No. 4, pp. 663-672.
- Berg, M. D. and Kreveld, M. V., 1997, “Trekking in the Alps without freezing or getting tired,” *Algorithmica*, Vol. 18, pp. 306-323.
- Blackwell, G. H., 1999, “Estimation of large open pit haulage truck requirements,” *CIM Bulletin*, Vol. 92, No. 1028, pp. 143-149.
- 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.
- Cardu, M., Sacerdote, I., Magro, 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.
- Dijkstra, E. W., 1959, “A note on two problems in connection with graphs,” *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269-271.
- Hauck, R. F., 1979, “Computer-controlled truck dispatching in open-pit mines,” In: Weiss, A. (eds), *Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry*, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, USA, pp. 735-742.
- Hays, R. M., 1990, “Truck,” In: Kennedy, B. A. (eds), *Surface mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, USA, pp. 672-691.
- Meyer, H. I., 1979, “Truck allocation to shovels in an open-pit mine: a case study on the initial attempt,” In: Weiss, A. (eds), *Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry*, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, USA, pp. 637-641.
- Niemann-Delius, C. and Fedurek, B., 2004, “Computer-aided 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.
- Oraee, K. and Asi, B., 2004, "Fuzzy model for truck allocation in surface mines," In: Hardygora, M., Paszkowska, G. and Sikora, M. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 2004*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 585-591.
- Ramani, R. V., 1990, "Haulage Systems Simulation Analysis," In: Kennedy, B. A. (eds), *Surface mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, USA, pp. 724-742.
- Saaty, T. L., 1980, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Suboleski, S. C., 1975, *Mine Systems Engineering Lecture Notes*, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA.
- Temeng, V. A., 1997, A computerized model for truck dispatching in open pit mines. PhD dissertation, Michigan Technological University, Michigan, USA, pp. 1-12.
- Walker, S. C., 1988, *Mine winding and transport*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 460-479.
- Xu, J. and Lathrop, R. G., 1995, "Improving simulation accuracy of spread phenomena in a raster-based geographic information system," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 153-168.
- Yu, C., Lee, J. and Munro-Stasiuk, M. J., 2003, "Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 17, No. 4, pp. 361-376.

최요순

현재 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 박사과정
(本學會誌 第43卷 第5号 参照)



박형동

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1994년 영국 런던대학교 임페리얼 칼리지 지질학과, 이학박사

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 부교수
(E-mail; hpark@snu.ac.kr)

선우준

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원
(本學會誌 第43卷 第1号 参照)