휴리스틱 외판원 문제 알고리즘을 이용한 노천광산 보조 작업 차량의 최적 이동경로 분석

박보영, 최요순*, 박한수

Optimal Routes Analysis of Vehicles for Auxiliary Operations in Open-pit Mines using a Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem

Boyoung Park, Yosoon Choi*, Han-Su Park

Abstract This study analyzed the optimal routes of auxiliary vehicles in an open-pit mine that need to traverse the entire mine through many working points. Unlike previous studies which usually used the Dijkstra's algorithm, this study utilized a heuristic algorithm for the Traveling Salesman Problem(TSP). Thus, the optimal routes of auxiliary vehicles could be determined by considering the visiting order of multiple working points. A case study at the Pasir open-pit coal mine, Indonesia was conducted to analyze the travel route of an auxiliary vehicle that monitors the working condition by traversing the entire mine without stopping. As a result, we could know that the heuristic TSP algorithm is more efficient than intuitive judgment in determining the optimal travel route; 20 minutes can be shortened when the auxiliary vehicle traverses the entire mine through 25 working points according to the route determined by the heuristic TSP algorithm. It is expected that the results of this study can be utilized as a basis to set the direction of future research for the system optimization of auxiliary vehicles in open-pit mines.

Key words Open-pit mine, Auxiliary vehicle, Optimal route, Heuristic TSP algorithm

초 록 본 연구에서는 노천광산에서 다수의 작업 지점들을 경유하며 광산 전역을 순회해야하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석하였다. Dijkstra's 알고리즘을 사용했던 기존의 연구들과 달리 휴리스틱 외판원 문제 알고리즘을 이용한 결과 다수의 작업지점들의 방문 순서까지 고려하여 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석할 수 있다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로프 채광장을 대상으로 광산 전역을 정차 없이 순회하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석하였다. 그 결과 분석자의 직관에 따라 작업지점들의 방문 순서를 결정하는 것보다 휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용해 분석하는 것이 25개 지점 경우 20분 정도의 이동시간을 단축할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 제시한 결과가 노천광산 보조 작업 차량들의 시스템 최적화와 관련된 향후 연구들의 방향설정 위해 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

핵심어 노천광산, 보조 작업 차량, 최적 이동경로, 휴리스틱 외판원 문제 알고리즘

Received: Jan. 7, 2014

Revised: Jan.. 15, 2014

Accepted: Jan. 15, 2014

*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

생산단계의 노천광산에서 채광 작업의 공정은 크게 천공, 발파, 적재, 운반과 같은 4개의 단위작업(unit operation)으로 구분된다(Hartman and Mutmanský, 2002). 이 중 운반 작업에 투입되는 비용은 일반적으로 전체 채광 비용의 50% 이상을 차지한다(Hays, 1990, Bonates, 1996,

Temeng, 1997, Alarie and Gamache, 2002, Niemann-Delius and Fedurek, 2004, Ercelebi and Bascetin, 2009). 노천채광 방식의 특성상 많은 양의 폐석과 광석을 채광장 내부에서 외부의 폐석장이나 선광장으로 운반해야하기 때문이다. 따라서 채광 비용의 큰 비중을 차지하는 운반 작업을 보다 효율적으로 수행하여 생산단가 절감에 기여할 수 있는 기술의 개발이 요구된다.

최근 들어 대규모 노천광산에서 쇼벨과 트럭의 장비 조합으로 운영되는 적재-운반 시스템의 효율성을 개선하기 위한 하나의 방안으로서 운반 작업을 수행하는 광산용 대형 트럭의 최적 이동경로 분석과 관련한 연구가 활발히 수행되고 있다. Choi 등(2007)은 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 이용하여 Suboleski(1975)가 제안한 트럭 사이클 타임(truck cycle time)의 구성 요소 중 폐석을 적재한 트럭이 채광장 하단의 적재지점으로부터 폐석장의 투하지점까지 이동하는 시간(travel time of a loaded truck)을 단축할 수 있는 최적 운반경로 분석을 수행하였다. Choi 등(2009)은 대규모 노천광산에서 지형 경사, 저수지 및 노출 광체의 공간적 분포, 작업 안전성, 이동 제약조건 등을 복합적으로 고려하여 폐석 운반 트럭의 최적 이동경로를 분석할 수 있는 GIS 기반의 분석모델을 개발하였다. 또한, Choi와 Nieto(2011)는 광산용 트럭의 운반시간 단축뿐만 아니라 연료 소비량 절감까지 고려하여 최적 이동경로를 분석할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. Park 등(2013)은 래스터 기반의 GIS 자료를 사용하지 않고도 채광장의 지형경사에 따른 트럭의 이동속도 변화를 최적 이동경로 분석 과정에서 고려할 수 있도록 하는 벡터(vector) 기반의 GIS 자료 구축 방법을 개발하였고, 광산용 트럭의 이동경로 분석시 벡터 네트워크 기반의 최적 경로분석 알고리즘들을 사용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

최근까지 수행되었던 연구들은 대부분 노천광산에서 주 운반 작업을 수행하는 대형 트럭의 최적 이동경로 분석에 목적을 두었다. 그러나 실제 노천광산 현장에서는 트럭뿐만 아니라 트럭이 이동하는 운반 도로의 분진 제어나 채광장 보수 작업을 위한 보조 작업 차량들(살수차 등)이 함께 운영된다. 더욱이 노천채광 장비의 대형화 추세에 따라 운반도로 유지관리를 위한 보조 작업 차량의 필요성이 지속적으로 커지고 있다(Tannant and Regensburg, 2001, Thompson and Visser, 2003). 일반적으로 보조 작업 차량들은 채광장 구역별로 쇼벨, 트럭과 함께 조합을 이루어 현장에 투입되지만, 광산의 경제적 여건에 따라 그 수가 충분하지 못할 경우가 많다(Hartman and Mutmanský, 2002). 이러한 경우에는

소수의 차량들이 정해진 일정에 따라 광산 전역을 순회하면서 채광장 유지관리 작업을 수행해야 한다. 따라서 보조 작업 차량들의 최적 이동경로를 분석하는 것도 운반 시스템의 효율성 개선 측면에서 매우 중요하다. 보조 작업 차량들의 운영 방법에 따라 대형 트럭들의 주 운반 작업 효율이 달라질 수도 있기 때문이다(Hartman and Mutmanský, 2002, Choi et al., 2009).

폐석이나 광석의 운반 작업을 수행하는 대형 트럭의 경우에는 적재지점으로부터 투하지점까지 혹은 그 반대의 경우에 대하여 최적 이동경로를 분석하게 된다. 즉, 하나의 출발지점과 하나의 도착지점 사이의 최적 이동경로를 분석하는 것을 목표로 한다. 그러나 보조 작업 차량들의 최적 이동경로 분석은 대형 트럭과는 차이가 있다. 소수의 보조 작업 차량들이 채광장 내 다수의 작업 지점들을 경유하면서 광산 전역을 순회해야 하기 때문이다. 즉, 하나의 출발지점과 하나의 도착지점 이외에도 다수의 경유 지점들이 존재하며, 이들 경유 지점들을 어떤 순서로 방문할 것인가에 따라 보조 작업 차량의 총 이동시간이나 연료소비량이 크게 달라질 수 있다.

대형 트럭의 이동경로 분석을 목적으로 하였던 기존의 연구들은 대부분 Dijkstra's 알고리즘(Dijkstra, 1959), A* 알고리즘(Hart et al., 1968) 등과 같이 두 지점간의 이동경로를 최적화할 수 있는 방법들을 사용하였다. 그러나 이와 같은 방법들로는 다수의 경유 지점들의 방문 순서까지 최적화해야 하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로 분석 문제를 해결하기 어렵다. 따라서 노천광산 보조 작업 차량의 최적 이동경로 분석을 위해서는 기존의 연구들과는 다른 접근 방법이 필요하다.

본 연구의 목적은 노천채광장에서 다수의 작업 지점들을 경유하며 광산 전역을 순회해야하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석하는 것이다. 이를 위해, 기존의 연구들과는 달리 출발지점과 도착지점 이외에도 다수의 경유 지점들의 방문순서를 고려하여 최적 이동경로를 분석할 수 있는 휴리스틱(heuristic) 외판원 문제(Travelling Salesman Problem, TSP) 알고리즘을 이용하고자 한다.

2. 연구지역

본 연구에서는 인도네시아 동 칼리만탄(East Kalimantan)의 남부에 위치하고 있는 파시르(Pasir) 석탄 노천광산의 로토(ROTO) 채광장을 연구지역으로 선정하였다(Fig. 1). 파시르 노천광산의 전체 면적은 약 504 km²으로 서울시 면적의 약 83%에 해당한다. (주)삼탄에서 탄광개

Fig. 1. Map of the Pasir open pit coal mine, Indonesia

발을 시작해 1993년 첫 상업생산이 시작된 이래 현재 연 3,700만 톤의 유연탄을 생산하고 2013년 상반기에 누적 생산량 3억 톤을 돌파하였다(http://www.samtan.co.kr). 로토 채광장은 크게 북부, 중부, 남부로 구분된다. 북부와 중부의 채광장은 원형에 가까운 형태이며, 남부 채광장은 광체의 주향 방향을 따라 직선형으로 개발되고 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 광산의 규모가 크게 때문에 광산 전역에 복잡한 운반도로 네트워크가 형성되어 있으며, 보조 작업 차량들도 이 운반도로 네트워크를 따라 이동한다. 연구지역에 관한 자세한 설명은 Choi 등(2006), Sunwoo 등(2007), Choi 등(2008)에 제시되었다.

3. 연구방법

3.1 휴리스틱 TSP 알고리즘

TSP는 한 외판원이 어떠한 도시를 출발한 후 n 개의 도시를 한 번씩만 방문하여 모두 순회하고 다시 출발한 도시로 돌아오고자 할 때 비용을 최소화할 수 있는 방문순서 및 이동경로를 결정하는 문제이다. 이산적 변수로 표현되는 비용함수의 최적해를 찾는 대표적인 조합적 최적화(combinatorial optimization) 문제로써 전산학, 교통공학, 경영과학 등 여러 분야에 걸쳐 관심의 대상이 되고 있다(Kim, 1997). TSP는 다수의 경우 지점들을 포함하는 이동 가능한 경로들의 조합을 모두 분석해야 한다는 측면에서 Dijkstra's 알고리즘(Dijkstra, 1959) 등이 적용되는 최적 이동경로 분석 문제와 차이

Fig. 2. Comparison of (a) the optimal route in the travelling salesman problem and (b) that in the shortest path problem

가 있다(Fig. 2).

TSP를 해결하기 위한 다양한 알고리즘들이 Christofides (1976), Bonomi와 Lutton(1984), Golden과 Skiscim (1986), Malek 등(1989), Fiechter(1994) 등 많은 논문들을 통해 발표되었으며, 현재에도 보다 효율적인 알고리즘을 개발하기 위한 노력이 지속되고 있다(http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/index.html). 현재까지 개발된 TSP 알고리즘들은 크게 최적해(exact solution)를 찾는 알고리즘과 근사해(approximate solution)를 찾는 알고리즘으로 구분된다(http://en.wikipedia.org/wiki/Travelling_salesman_problem). 이 중 근사해를 찾는 TSP 알고리즘들이 현실 세계의 문제 해결을 위해 주로 활용되고 있다. 최적해를 찾는 알고리즘들은 경우 도시(지점)의 수(n)가 증가함에 따라 지나치게 많은 계산을 필요로

하기 때문이다(Woeginger, 2003). 예를 들어, 12개의 지점을 경유하는 TSP를 해결하기 위하여 최적해를 찾는 알고리즘의 경우는 총 $12!(479,001,600)$ 개의 이동 가능한 경로들을 모두 분석해야 한다.

근사해를 찾는 TSP 알고리즘들은 가장 이상적인 해답을 구하는 것이 아니라 현실적으로 만족할 만한 수준의 해답을 찾는 휴리스틱 접근법을 사용한다. 따라서 근사해를 찾는 TSP 알고리즘들을 휴리스틱 TSP 알고리즘이라고도 부른다. 휴리스틱 TSP 알고리즘은 최적의 해를 보장하지는 않지만 합리적인 시간 내에 만족할 만한 해를 도출할 수 있다(Fiechter, 1994). 가장 단순한 형태의 휴리스틱 TSP 알고리즘 중에는 Nearest Neighbor (NN) 알고리즘이 있다(Rosenkrantz et al., 1977). NN 알고리즘은 현재의 위치에서 이동 가능한 경로 중 비용을 최소화할 수 있는 경로를 선택하며, 선택된 경로로 이동한 뒤 새로운 위치를 다시 현재의 위치로 설정하고 최소 비용의 경로를 선택하는 작업을 반복한다. 즉, 전체적인 관점에서 이동 가능한 경로들을 모두 분석하여 최적해를 찾는 것이 아니라 각 지점에서 이동 가능한 경로들만을 고려하여 단계별로 최적해를 구해나간다. 각 단계에서 최적해를 구하는 작업의 연속으로 도출한 해는 국부적 최적해(local optimum)일 가능성이 있다. 따라서 NN 알고리즘과 같은 휴리스틱 TSP 알고리즘의 분석 결과는 항상 전체적 최적해(global optimum)를 보장하지는 않는다(Rosenkrantz et al., 1977).

휴리스틱 TSP 알고리즘의 분석 결과가 국부적 최적해일 가능성이 있는 경우 이를 개선하기 위한 방법으로 반복적 개선법(iterative improvement) 또는 임의의 개선법(random improvement) 등이 사용된다. 즉, NN 알고리즘 등으로 TSP의 초기해를 계산한 후, 초기해의 이웃한 노드의 구조를 바꾸거나 일부에 한하여 비용이 증가했을 경우에도 이동을 허용하여 새로운 해를 생성한 후, 값을 비교하여 더 작은 값을 가지는 해를 선택하는 과정을 반복적으로 시행한다. 이러한 과정을 통해 국부적 최적해를 전체적 최적해에 가깝게 개선할 수 있다(Malek et al., 1989). 휴리스틱 TSP 알고리즘의 반복적 개선을 위한 방법으로 담금질 모사법(simulated annealing), 유전 알고리즘(genetic algorithm), 타부 탐색 알고리즘(tabu search algorithm) 등이 주로 사용된다.

본 연구에서는 노천광산 전역을 순회해야하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석하기 위하여 NN 알고리즘을 이용하여 초기해를 생성하고, 타부 탐색 알고리즘(tabu search algorithm)을 이용하여 국부적 최적해를 전체적 최적해에 가깝게 개선하는 휴리스틱 접근법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 타부 탐색 기반의

휴리스틱 TSP 알고리즘에 관한 자세한 설명은 Malek 등(1989)과 Fiechter(1994)를 참고하길 바란다. 현재 이 방법은 ArcGIS 소프트웨어의 Network Analyst 분석 도구(<http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/networkanalyst>)에 채택되어 활용되고 있다.

3.2 도로망 벡터 네트워크 자료의 구축

휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용하기 위한 도로망 네트워크 자료의 구조는 Dijkstra's 알고리즘을 적용할 때 사용되는 것과 동일하다. 따라서 본 연구에서는 Dijkstra's 알고리즘을 이용하여 노천광산 덤프트럭의 최적 이동 경로를 분석하기 위해 Park 등(2013)이 제안한 지형경사를 고려할 수 있는 벡터 네트워크 자료의 생성 방법을 사용하였다. 연구지역 광산 전역의 수치지도를 바탕으로 지형 등고선 자료를 이용하여 10 m 해상도의 수치지형모델(Digital Elevation Model, DEM)을 작성하였으며, 보조 작업 차량이 이동할 수 있는 도로들을 디지털화(digitizing)하여 선(polyline)형태의 도로망 자료를 구축하였다. 자료의 구축시 정밀도를 일정하게 유지하기 위해 도로망을 구성하는 선의 점들(vertices)간의 거리는 최대 100 m로 설정하여 디지털이징을 수행하였다.

디지털이징 된 도로망 벡터 네트워크 자료의 간선별 지형 경사도를 계산하기 위하여 네트워크를 구성하는 점들의 고도값을 수치지형모델을 이용하여 추출하였다. 각 간선들을 방향에 따라 하나의 시작점과 하나의 끝점을 가지므로 이 두 개의 점들의 고도값의 차이(m)를 점들 사이의 거리(m)로 나눈 후 백분율로 환산하여 간선별 지형 경사도(%)를 계산하였다. Park 등(2013)이 고려한 대형 덤프트럭은 도로의 지형 경사도에 따라 이동 속도가 크게 달라지는 특징이 있다. 그러나 보조 작업 차량들의 경우 연구지역 현장에서 관찰한 결과 작업 지점간의 이동시 도로의 지형 경사도에 관계없이 광산내 차량의 최대 허용 속도인 40 km/h로 이동하고 있다. 따라서 도로망 네트워크의 간선별 이동시간은 상향이동과 하향이동 모두 동일하게 40 km/h의 이동속도를 적용하여 산술적으로 산정하였다. 따라서 본 연구에서 구축한 자료는 Park 등(2013)이 사용한 자료와 비교할 때 네트워크 간선별로 부여된 이동시간이 다르다. 마지막으로 간선을 구성하는 정점들의 고도값을 기준으로 위상관계에 대한 정보를 추가하였다. 즉, 수평면 상의 같은 위치에 존재하는 서로 다른 정점들의 고도값이 같은 경우에는 교차로로 정의하였고, 고도값이 다를 경우에는 고가도로로 정의하였다.

Fig. 3. Different numbers of the visiting points for auxiliary vehicles in the study area. (a) 5 points. (b) 15 points. (c) 25 points. The dot represents the visiting point, and the polyline illustrates the road

4. 알고리즘 적용 및 결과

4.1 적용 조건

구축된 연구지역의 도로망 벡터 네트워크 자료에 휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용하여 차고(garage)에서 출발하는 보조 작업 차량이 할당된 작업지점들을 모두 방문한 뒤 다시 차고로 돌아오는데 소요되는 총 이동시간을 최소화할 수 있는 이동경로를 분석하였다. 동일한 적용 조건에 대하여 작업지점들의 방문순서를 휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용하여 분석한 결과와 분석자가 직관적으로 결정한 결과를 비교하여 알고리즘 적용의 효과를 알아보려고 하였다. 휴리스틱 TSP 알고리즘은 객관적이고 과학적인 분석 방법인 반면, 분석자가 직관적으로 작업지점들의 방문순서를 결정하는 것은 객관적이지 못하며 방문지점들의 수가 많아지면 일관성 있는 선택을 하는 것이 어렵기 때문이다. 본 연구에서는 보조 작업 차량이 방문해야 하는 지역이 점차 넓어지는 경우를 가정하여 작업지점의 수를 5개, 15개, 25개로 변화시키면서 분석을 수행하였다(Fig. 3).

본 연구에서는 보조 작업 차량의 최적 이동경로 분석에 목적을 두었기 때문에, 알고리즘 적용을 통한 최적 이동경로 분석의 효과가 잘 나타날 수 있도록 문제를 단순화하여 각 작업지점에서 실제 수행되는 보조 작업의 소요시간은 무시하고 차량의 이동시간만을 고려하였다. 광산 전역을 정차 없이 순회하는 보조 작업 차량의 경우 이러한 단순화된 적용 조건에 부합한다. 그러나 각 작업지점에 정차하여 상당한 시간의 작업을 수행한 후 다음 작업지점으로 이동해야 하는 보조 작업 차량의 경우에는 보조 작업의 소요시간을 고려할 수 있는 스케줄링(scheduling) 방법이 함께 적용되어야 하며, 이는 본 연구에 범위에 해당하지 않는다.

4.2 결과 및 해석

보조 작업 차량이 방문해야 하는 작업지점의 수가 5개일 때(Fig. 3(a)), 차량의 최적 이동경로를 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. 분석자의 직관에 따라 작업지점들의 방문순서를 'A→D→E→C→B→A' 순으로 결정하여 최적 이동경로를 분석한 경우에는 보조 작업 차량의 총

(a)

(b)

Fig. 4. Travel routes of auxiliary vehicles determined by (a) intuitive judgment and (b) a heuristic TSP algorithm when considers 5 visiting points including the garage (No. 1). The number illustrates the visiting order

이동거리가 18.6 km, 총 이동시간은 28분으로 나타났다(Fig. 4(a)). 그러나 휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용하여 최적 이동경로를 분석한 결과에서는 작업지점들의 방문순서가 ‘A→C→E→B→D→A’ 순으로 결정되었고, 보조 작업 차량의 총 이동거리와 이동시간은 각각 15.7 km, 24분으로 나타났다(Fig. 4(b)). 도면상에서 볼 때에는 분석자가 직관적으로 결정한 것(Fig. 4(a))이 휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용해 분석한 것보다 보조 작업 차량의 총 이동거리가 더 짧은 것처럼 보인다. 그러나 분석자의 직관에 의한 결과에서는 차량들이 대부분의 경로를 왕복하여 지나가야 하는 것에 비해 휴리스틱 TSP 알고리즘의 결과에서는 차량들이 대부분의 경로들을 한 번만 지나가게 된다. 따라서 총 이동거리와 이동

(a)

(b)

Fig. 5. Travel routes of auxiliary vehicles determined by (a) intuitive judgment and (b) a heuristic TSP algorithm when considers 15 visiting points including the garage (No. 1). The number illustrates the visiting order

시간이 단축된 것으로 판단된다. 본 연구에서는 고려하지 않았으나 차량의 유턴(U-turn)등에 소요되는 시간까지 생각한다면 두 가지 방법으로 분석한 결과에서 총 이동시간의 차이는 더 커질 것이라 예상된다.

방문해야 하는 작업지점의 수를 15개와 25개로 증가시켜서 동일한 분석을 수행한 결과를 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다. 작업지점의 수가 15개일 때 보조 작업 차량의 총 이동거리는 휴리스틱 TSP 알고리즘을 적용해 분석한 결과가 분석자가 직관적으로 결정한 결과보다 약 8.7 km 더 짧게 나타났다. 작업지점의 수가

(a)

(b)

Fig. 6. Travel routes of auxiliary vehicles determined by (a) intuitive judgment and (b) a heuristic TSP algorithm when considers 25 visiting points including the garage (No. 1). The number illustrates the visiting order

Fig. 7. Difference of travel times along the routes determined by intuitive judgment and those determined by a heuristic TSP algorithm

25개로 증가하였을 때에는 두 가지 방법으로 분석한 보조 작업 차량의 총 이동거리 차이가 약 13.3 km로 더 증가하였다.

두 가지 방법으로 분석한 결과들을 종합하여 경유하는 작업지점의 수에 따라 변화하는 보조 작업 차량의 총 이동시간을 Fig. 7에 도시하였다. 처음 5개의 지점을 순회하는 경우에는 휴리스틱 TSP 알고리즘의 적용 결과와 분석자 직관에 의한 분석 결과가 4분 정도의 차이를 보였으나, 작업지점의 수가 증가할수록 그 차이는 더 커져서 작업지점의 수가 25개가 되었을 때에는 20분이라는 큰 차이를 보였다. 이러한 결과를 볼 때 보조 작업 차량들이 방문해야 하는 지점의 수가 증가할수록 휴리스틱 TSP 알고리즘의 적용 효과가 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 광산 전역을 순회해야하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로 분석에 있어 휴리스틱 TSP 알고리즘을 사용하는 것이 분석자의 직관에 의존하는 것보다 합리적이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 휴리스틱 TSP 알고리즘을 이용하여 노천채광장에서 다수의 작업 지점들을 경유하며 광산 전역을 순회해야하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석하였다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 로프 채광장을 연구지역으로 설정하고 광산 전역을 청차 없이 순회하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석한 결과 분석자의 직관에 따라 경유(작업)지점들의 방문 순서를 결정하는 것보다 휴리스틱 TSP 알고리즘을

적용해 분석하는 것이 차량의 총 이동거리와 이동시간 측면에서 보다 효율적인 것으로 나타났다. 또한, 휴리스틱 TSP 알고리즘의 적용 효과는 보조 작업 차량이 방문해야 하는 작업지점들의 수가 증가할수록 더 커지는 것으로 확인되었다.

Dijkstra's 알고리즘이나 A* 알고리즘을 사용한 기존의 연구들은 하나의 출발지점과 하나의 도착지점 사이의 최적 이동경로만을 분석할 수 있었기 때문에 다수의 작업 지점들을 경유하면서 광산 전역을 순회해야하는 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석할 수 없었다. 본 연구에서는 기존의 연구들과 달리 휴리스틱 TSP 알고리즘을 사용함으로써 다수의 작업지점들의 방문 순서까지 고려하여 보조 작업 차량의 최적 이동경로를 분석할 수 있다. 따라서 본 연구는 노천채광장의 운반 시스템 분석과 관련한 문제에서 그동안 사용되지 않았던 휴리스틱 TSP 알고리즘을 최초로 적용했다는 측면에서 큰 의미를 가진다.

본 연구에서 적용한 휴리스틱 TSP 알고리즘이 생산 단계의 노천광산 현장에서 작업 계획 수립을 위해 실제 활용되기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 첫째, 보조 작업 차량들은 채광장 구역별로 쇼벨, 트럭과 함께 조합을 이루어 작업을 수행하는 경우가 많으므로 다른 장비들과의 상호작용을 고려하여 최적 이동경로를 분석할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 둘째, 보조 작업 차량들의 총 이동거리나 이동시간 뿐만 아니라 각 작업지점에서 실제 소요되는 작업시간까지 모두 고려하여 보조 작업 차량들을 이동경로 결정과 배차간격 스케줄링을 함께 수행할 수 있는 기술의 개발이 요구된다. 셋째, 시간의 흐름에 따라 달라지는 현장 조건을 반영하여 필요한 경우 보조 작업 차량들의 이동경로와 작업지점 방문순서를 유사 실시간으로 재탐색할 수 있는 기술에 대한 개발이 요구된다. 넷째, 현장의 상황에 따라 휴리스틱 TSP 알고리즘이 고려하지 못하는 제약조건들이 존재할 수 있다. 예를 들어 한 대의 살수 차량이 광산 전체를 순회하지 않고 여러 대의 살수 차량들이 구역을 나누어 작업을 수행할 수 있으며, 차량이 채광장 내부의 임시도로 보다는 주 운반도로를 위주로 이동할 수도 있다. 따라서 광산의 실제적인 제약조건들을 고려하여 보조 작업 차량들의 전체 이동경로 중 일부구간은 분석자가 현장 제약조건을 고려하여 직접 결정하고 나머지 구간은 휴리스틱 TSP 알고리즘이 분석할 수 있도록 하는 복합형 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한, 광산의 실제적인 제약조건을 고려하여 분석한 결과와 그렇지 않은 결과를 비교/분석하는 것도 필요할 것이다.

광산 장비의 대형화 추세에 따라 노천광산에서 보조 작업 차량들의 효율적인 운영이 보다 중요시되고 있다. 본 연구에서 제시한 결과는 향후 노천광산 보조 작업 차량들의 시스템 최적화와 관련된 연구들의 방향설정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 지속적인 연구를 통해 실제 현장의 복잡한 조건들을 충분히 고려할 수 있는 기술로써 발전할 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 대성엠디아이(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. Bonomi, E. and Lutton, J. L., 1984, The N-City traveling salesman problem: statistical mechanics and the metropolis algorithm, *SIAM Rev.*, Vol. 26, No. 4, pp. 551-568.
4. Choi, Y., Park, H. D. and Sunwoo, C., 2006, Control of open-pit mine drainage for mine reclamation using Geographic Information Systems, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 43, No. 5, pp. 429-438.
5. 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.
6. Choi, Y., Suh, J. W., Park, H. D. and Sunwoo, C., 2008, Application of GIS-based viewshed analysis for selecting optimal viewpoints and for evaluating the sight distance on a haul road in open-pit mines, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 45, No. 3, pp. 265-275.
7. 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.
8. 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.
9. Christofides, N., 1976, Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem, Report 388, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, USA, p. 5.
 10. Dijkstra, E. W., 1959, A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269-271.
 11. Ercelebi, S. G. and Bascetin, A., 2009, Optimization of shovel-truck system for surface mining, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 109, pp. 433-439.
 12. Fiechter, C. N., 1994, A parallel tabu search algorithm for large traveling salesman problems, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 51, No. 3, pp. 243-267.
 13. Golden, B. L. and Skiscim, C. C., 1986, Using simulated annealing to solve routing and location problems, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 33, No. 2, pp. 261-279.
 14. Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B., 1968, A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp. 100-107.
 15. Hartman, H. L. and Mutmansky, J. M., 2002, *Introductory Mining Engineering*, John Wiley & Sons, New York, USA, 108 p.
 16. Hays, R. M., 1990, Truck, In: Kennedy, B. A. (eds), *Surface mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, USA, pp. 672-691.
 17. Kim, Y., 1997, *Meta Heuristic*, Youngji Publishers, Seoul, Korea, 452 p.
 18. Malek, M., Guruswamy, M. and Pandya, M., 1989, Serial and parallel simulated annealing and tabu search algorithms for the travelling salesman problem, *Annals of Operations Research*, Vol. 21, pp. 59-84.
 19. 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.
 20. Park, B., Choi, Y. and Park, H. S., 2013, Creation of vector network data with considering terrain gradient for analyzing optimal haulage routes of dump trucks in open pit mines, *Journal of the Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 23, No. 5, pp. 353-361.
 21. Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E. and Lewis, P. M., 1977, An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem, *SIAM Journal on Computing*, Vol. 6, No. 5, pp. 563-581.
 22. Suboleski, S. C., 1975, *Mine Systems Engineering Lecture Notes*, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA.
 23. 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.
 24. Tannant, D. D. and Regensburg, B., 2001, *Guidelines for mine haul road design*, University of Alberta Press, Edmonton, Alberta, Canada, pp. 52-53.
 25. Temeng, V. A., 1997, *A computerized model for truck dispatching in open pit mines*, PhD dissertation, Michigan Technological University, Michigan, USA, pp. 1-12.
 26. Thompson R. J. and Visser A. T., 2003, Mine haul road maintenance management systems, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 103, No. 5, pp. 303-312.
 27. Woeginger, G. J., 2003, Exact algorithms for NP-hard problems: a survey, In: Jünger, M., Reinelt, G. and Rinaldi, G. (eds), *Combinatorial Optimization — Eureka, You Shrink!*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2570, Springer, Germany, pp. 185-207.

박 보 영

2012년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학사

Tel: 051-629-6550

E-mail: charmby@gmail.com

현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 석사과정

최 요 순

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

박 한 수

Tel: 02-765-3003

E-mail: parkhs@dsmd.co.kr

현재 대성엠디아이(주) 신소재기술연구소 부장