

트럭 고장 및 파쇄기 처리용량을 고려한 노천광산 쇼벨-트럭 운반 시뮬레이션

박세범, 최요순*, 박한수

Simulation of Shovel-Truck Haulage Systems in Open-pit Mines by Considering Breakdown of Trucks and Crusher Capacity

Sebeom Park, Yosoon Choi*, Han-Su Park

Abstract This paper presents a case study that performed simulations on shovel-truck haulage systems in an open-pit mine by considering truck's breakdown and crusher's capacity. The SSangyoung limestone open-pit mine in Korea was selected as a study area and investigated to design the simulation algorithms. The GPSS/H simulation language is used to implement the simulation algorithms as a console application(simulator). The values of input parameters for simulator were measured by field investigation in the study area. The simulation results showed that 7 trucks can maximize the daily profit of haulage operations(i.e., 73,775 USD) when considers the frequency of trucks' breakdown as 1/40 hour⁻¹. In addition, the crusher capacity of 1300 tph is required to improve the efficiency of shovel-truck haulage systems in the study area.

Key words Open-pit mine, Haulage system, Simulation, Shovel, Truck

초 록 본 논문에서 트럭의 고장 발생 가능성과 파쇄기의 처리 용량 변화를 고려하여 노천광산 쇼벨-트럭 운반 시스템의 시뮬레이션을 수행한 사례연구 결과를 제시한다. 강원도 동해시에 위치한 쌍용자원개발 석회석 노천광산을 연구지역으로 선정하고, 시뮬레이션 알고리즘을 설계 하였다. GPSS/H 시뮬레이션 언어를 이용하여 설계된 시뮬레이션 알고리즘들을 콘솔 프로그램 형식의 시뮬레이터로 개발하였다. 또한, 연구지역의 현장조사를 통해 시뮬레이터에 입력되는 인자 값들은 직접 측정하였다. 시뮬레이션 결과 40시간 빈도의 트럭 고장 발생 가능성을 고려할 경우에는 7대의 트럭을 시스템에 투입하는 것이 하루 평균수익을 73,775 USD로 최대화할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한, 파쇄기의 처리 용량은 1,300 thp로 운영하는 것이 연구지역의 쇼벨-트럭 운반 시스템의 효율을 높일 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심어 노천광산, 운반 시스템, 시뮬레이션, 쇼벨, 트럭

1. 서 론

노천광산에서 천공, 발파, 적재, 운반 작업 등으로 구성되는 생산 공정을 효과적으로 계획하고 관리하는 것

은 매우 중요하다(Hartman and Mutmanski, 2002, Choi and Nieto, 2011a). 해외에서는 노천광산의 생산 공정 중 다수의 쇼벨과 트럭으로 구성되는 적재-운반 시스템을 효과적으로 설계하기 위한 다양한 시뮬레이션 프로그램들이 개발되어 활용되고 있다(Bonates, 1996, Temeng, 1997, Blackwell, 1999, Aksoy and Yalcin, 2000, Alarie and Gamache, 2002, Oraee and Asi, 2004, Yan and Lai, 2007, Krause and Musingwini, 2007, Zhang, 2008, Ercelebi and Bascetin, 2009). 그러나 국내의 경우에는 노천광산의 쇼벨-트럭 운반 시뮬레이션과 같은 생산 공정 설계 기술과 관련한 연구가

Received: Nov. 12, 2013

Revised: Dec. 17, 2013

Accepted: Dec. 17, 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

매우 미흡한 실정이다(Choi, 2011, Park *et al.*, 2013). 국내에서도 노천광산의 생산 공정 설계를 위한 외산 상용 프로그램을 구입하여 활용하는 것이 가능하지만, 이들 프로그램들은 대부분 매우 고가이므로 영세한 규모의 국내 광산 현장에서는 활용되기 어렵다. 또한, 외산 상용 프로그램들은 대부분 시뮬레이션 알고리즘이나 소스 코드를 공개하지 않기 때문에 이 분야의 국내 기술 자립화에도 큰 도움이 되지 못한다(Park and Choi, 2013).

최근 들어 국내에서도 노천광산의 쇼벨-트럭 운반 시뮬레이션과 관련한 기초적인 연구들이 일부 수행되었다. Choi(2011)는 단일 쇼벨과 다수의 트럭으로 구성된 노천광산 운반 시스템을 시뮬레이션 할 수 있는 Windows 기반 프로그램을 개발하여 채광장에 투입되어야 할 트럭의 수를 최적화할 수 있도록 하였으며, Choi과 Nieto (2011b)는 GPSS/H 시뮬레이션 언어와 구글어스를 사용하여 운반 시스템에 투입될 트럭의 수와 적재장과 파쇄장 사이의 트럭 운반 경로를 최적화할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 그러나 이들 연구들은 노천광산 운반 시스템에 다수의 쇼벨들을 투입하여 작업을 수행할 경우 발생할 수 있는 트럭 배차 방식에 관한 문제들을 고려하지 못하는 한계가 있었다. Park과 Choi(2013)는 이러한 한계를 극복하기 위해 다수의 쇼벨들과 트럭들이 운영되는 노천광산에서 고정 트럭 배차 방식과 실시간 트럭 배차 방식을 고려하여 운반 시스템을 시뮬레이션 할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 그러나 이 연구에서도 운반 작업 중에 발생할 수 있는 트럭의 고장 가능성이나 파쇄기의 처리 용량 변화 등과 같은 보다 현실적인 조건들을 고려할 수 없는 한계가 있었다.

본 연구의 목적은 노천광산의 쇼벨-트럭 운반 시스템 내에서 발생할 수 있는 트럭의 고장 발생 가능성과 파쇄기 처리 용량 변화를 고려하여 시뮬레이션을 수행하

는 것이다. 이를 위해 국내 석회석광산을 연구지역으로 설정하여 현장에 적합한 시뮬레이션 알고리즘을 설계하고, 현장조사를 통해 시뮬레이션에 필요한 인자 값들을 결정하고자 한다. 또한, 시뮬레이션 전문 언어인 GPSS/H를 사용하여 시뮬레이션 알고리즘을 프로그램으로 구현할 것이다. 본 논문에서는 개발된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 트럭의 고장 발생 가능성과 파쇄기 처리 용량 변화를 고려해 연구지역 쇼벨-트럭 운반 시스템의 시뮬레이션을 수행한 사례연구 결과를 제시한다.

2. 광석(폐석) 적재-운반 시뮬레이션

대부분의 노천광산은 다수의 적재장과 파쇄장으로 구성되어 있고, 광석 혹은 폐석을 운반하는 시스템은 다양한 적재 장비와 운반 장비의 조합으로 운영된다. 많은 노천광산 현장에서 쇼벨과 트럭으로 구성된 쇼벨-트럭 운반 시스템을 사용하고 있으며, 이 시스템을 구성하는 장비들의 단위 작업들은 Suboleski(1975)가 제안한 트럭순환시간 이론을 이용하여 Eq. (1)과 같이 설명할 수 있다(Bonates, 1996, Temeng, 1997, Cardu *et al.*, 2004).

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

여기서 TCT 는 트럭순환시간, STL 은 적재장비로의 트럭 접근시간(spotting time at the loader)을 나타내고, LT 는 적재장비의 작업시간(loading time), TL 은 광석(폐석)을 적재한 트럭(실차)이 파쇄장(폐석장)으로 이동하는 시간(travel time of loaded truck), STD 는 파쇄기(또는 폐석 투하지점)로의 트럭 접근시간(spotting time at the crusher), DT 는 트럭의 투하 작업시간(dumping time), TE 는 공차가 적재장으로 다시 이동하는 시간

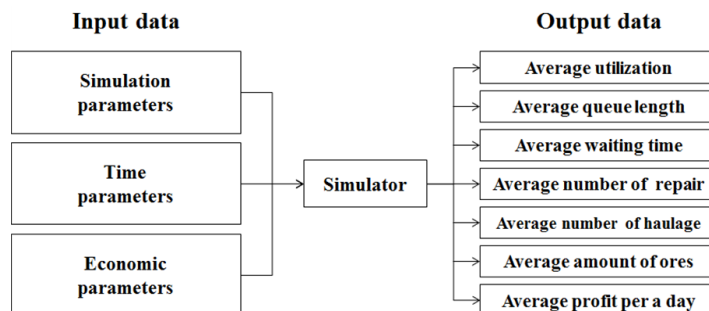


Fig. 1. Typical input and output data for a shovel-truck haulage simulation program

(travel time of empty truck), AD 는 적재장이나 파쇄장(폐쇄장)에서 트럭이 대기행렬에 들어가 기다려야하는 시간(average delay time)을 의미 한다.

시뮬레이션을 위해서는 시뮬레이션 실행을 위한 인자, 이산적인 사건들의 소요시간과 관련한 인자, 경제성 분석을 위한 인자들이 시뮬레이션 프로그램에 입력되어야한다. 출력 자료는 사용자의 목적에 따라 출력되는 값들이 달라지며, 전형적인 시뮬레이션 프로그램에 사용되는 입출력자료는 Fig. 1과 같다. 입출력자료에 대한 자세한 설명은 Park and Choi(2013)에 제시되었다.

시뮬레이션 수행 후 운반 작업의 하루 평균 수익(ADP , USD/day)을 산정하기 위하여 Choi(2011)의 연구에서 제시된 수익 산정 모델을 Eq. (2)와 같이 개선하였다.

$$ADP = \{(NH \times TRC \times P)\} - (TC \times NT) - (SC \times NS) - (CC \times COC) - (FR \times BOC) \quad (2)$$

여기서 NH 는 총 적재-운반 횟수(number of haulage operations), TRC 는 트럭의 적재용량(truck's capacity, ton), P 는 톤당 석회석의 가격(USD), TC 는 트럭 한 대의 하루 운영비용(truck's operation cost, USD/day), NT 는 시뮬레이션에 투입된 트럭의 수(number of trucks, 대), SC 는 쇼벨 한대의 운영비용(shovel's operation cost, USD/day), NS 는 시뮬레이션에 투입된 적재장비의 수(number of shovels, 대), CC 는 파쇄기 처리 용량(crusher's capacity, tph), COC 는 파쇄기 운영비용(crusher's operation cost, USD/day), FR 은 컨베이어 벨트의 석회석 공급 속도(feed rate, tph), BOC 는 벨트 컨베이어의 운영비용(belt conveyor's operation cost,

USD/day)을 의미한다.

3. 연구지역

노천광산에서는 자연 및 지질학적 조건(지질조건, 광체 형태 및 심도 등), 경제적인 조건(광석 품위, 부존량, 운영비, 투자비 등) 그리고 기술적 조건(장비, 운반방법, 채광장 경계 등)을 고려하여 채광장을 계획하고 설계한다. 마찬가지로 노천광산 쇼벨-트럭 운반 시뮬레이션 알고리즘도 현장의 특성을 고려하여 맞춤형으로 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 알고리즘 설계를 위해 (주)쌍용자원개발에서 운영하는 동해 석회석 광산을 연구지역으로 설정하였다. 이 광산은 강원도 동해시 삼화동에 위치하고 있으며 총 세 곳의 작업장을 운영하고 있다(Fig. 2). 연간 석회석 생산량은 약 1,400만 톤 정도이다. 본 연구에서는 세 개의 작업장 중 제 2지구 작업장의 쇼벨-트럭 운반 시스템을 대상으로 시뮬레이션 알고리즘을 설계하였다. 2지구 작업장은 두 지점의 적재장(각 지점 당 쇼벨 1대)과 한 지점의 파쇄장(파쇄기 1기)으로 구성된다. 2지구 작업장의 적재지점 및 파쇄기의 위치와 트럭 운반경로는 Fig. 2와 같다.

시뮬레이션 수행에 필요한 입력 인자들의 값들을 측정하기 위해 현장조사를 수행하였다. 연구지역의 운반 시스템을 구성하는 각 단위 작업의 시간과 관련된 인자 값들은 스톱워치를 이용하여 총 10회씩 반복측정 하였다. 또한, 시뮬레이션 수행을 위한 인자 값과 경제성 분석을 위한 인자 값들은 현장의 협조를 받아 결정하였다. 단, 석회석 판매가와 같은 영업 기밀에 해당하는 인자 값은 MKE와 KIGAM(2011)이 발간한 광산물수급현황

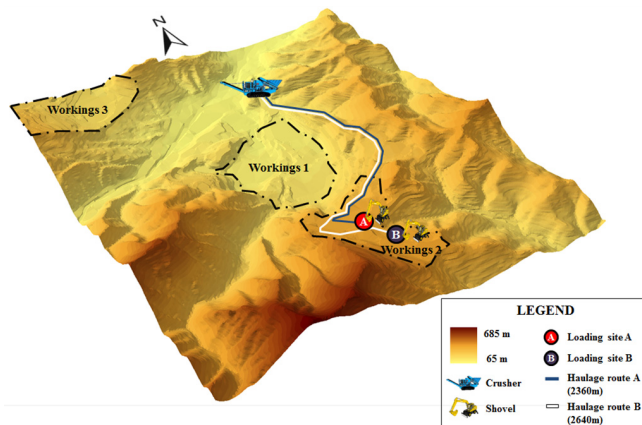


Fig. 2. Digital elevation model of the SSangyoung open-pit limestone mine, Kangwon-do, Korea. The haulage routes of trucks connecting from shovels to the crusher are displayed

Table 1. Parameter setting for shovel-truck haulage simulations in the study area

		Parameters	Value
Simulation parameter		Number of days to simulate	1,000 (days)
		Daily working hours	480 (min/day)
		Capacity of truck	70 (ton)
		Capacity of crusher's hopper	450 (ton)
		Crushing rate of crusher	1,300 (ton/hour)
		Feed rate of conveyor belt	3,600 (ton/hour)
Time parameter	at shovel	Spotting time (wait in the queue)	0.69 ± 0.04 (min)
		Spotting time (no wait in the queue)	0.39 ± 0.06 (min)
		Loading time	3.62 ± 0.36 (min)
	at crusher	Spotting time (wait in the queue)	0.39 ± 0.03 (min)
		Spotting time (no wait in the queue)	0.31 ± 0.01 (min)
		Dumping time	1.89 ± 0.17 (min)
	on road	Travel time of a loaded truck (from area A to crusher)	7.34 ± 0.44 (min)
		Return time of a empty truck (from crusher to area A)	6.14 ± 0.27 (min)
		Travel time of a loaded truck (from area B to crusher)	9.37 ± 0.22 (min)
		Return time of a empty truck (from crusher to area B)	7.92 ± 0.16 (min)
	in repair facility	Mean time of a truck's breakdown	40 (hour)
		Mean time of a truck's repair	4 (hour)
	Economic parameter	truck	Daily cost for each truck's driver
Daily cost for each truck			463.77 (USD/day)
Daily etc. cost for each truck			222.89 (USD/day)
shovel		Daily cost for each shovel's driver	130.87 (USD/day)
		Daily cost for each shovel	1,055.48 (USD/day)
		Daily extra cost for each shovel	406.55 (USD/day)
etc.		Price per ton of ores	11.85 (USD/ton)
		Cost for crusher's operation (1,000 tph)	10,000 (USD/day)
		Cost for conveyor belt's operation (1,000 tph)	5,000 (USD/day)

보고서를 참고하여 산정하였다(Table 1).

파쇄기 운영비용과 벨트 컨베이어의 운영비용은 각 장비에 소비되는 전력과 전기 요금에 따라 달라진다. 연구지역에서는 현장 여건상 파쇄기 처리 용량과 벨트 컨베이어의 처리 용량에 따른 소비 전력의 변화를 산정하는 것이 용이하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Eq. (2)에서 사용되는 파쇄기의 운영비용을 10,000 USD (1,000 tph 기준)로 설정하고 처리 용량이 100 tph 증가할수록 비용도 1,000 USD 증가하는 것으로 가정하였다. 또한, 벨트 컨베이어의 경우에는 운영비용을 5,000 USD(1,000 tph 기준)로 설정하고, 처리 용량이 100 tph 증가할수록 비용은 500 USD 증가하는 것으로 가정하였다. 운전기사의 인건비, 연료비, 수리/유지 관리비, 보

험비 등은 트럭과 쇼벨의 운영비용에 모두 포함된다고 가정하였다.

4. 시뮬레이션 방법 및 결과

연구지역에서 조사한 쇼벨-트럭 운반 시스템에 대하여 전문 시뮬레이션 언어인 GPSS/H를 활용하여 시뮬레이터를 개발하였다. GPSS/H는 물류, 항공, 광업, 방위산업 등의 분야에서 대기행렬 이론의 적용이 가능한 실세계 현상들을 시뮬레이션하기 위해 광범위하게 활용되고 있다. GPSS/H 시뮬레이션 언어의 특징에 관한 자세한 설명은 Choi(2011), Park과 Choi(2013)를 참고하길 바란다.

4.1. 트럭 고장 가능성을 고려한 쇼벨-트럭 운반 시뮬레이션

실제 광산 현장에서는 트럭의 고장과 관련한 사건들이 언제 어디서 일어날지 정확하게 예측을 하는 것이 불가능하다. 또한, 트럭의 수리시간도 부품의 재고 유무, 정비사의 기술적 능력 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 노천광산에서 운반 작업 중 일정 시간이 지나면 확률적으로 트럭의 고장이 발생하게 되고 고장이 발생한 트럭은 수리가 끝날 때까지 운반 작업을 수행할 수 없다고 가정하여 시뮬레이션 알고리즘을 설계하였다(Fig. 3). 새로운 트럭이 운반 시스템에 투입되면 알고리즘은 각 적재지점에서 작업 중인 트럭의 수(각 적재지점으로 이동하고 있는 트럭의 수, 대기행렬에서 대기 중인 트럭의 수, 적재작업을 위해 쇼벨에 접근중인 트럭의 수를 모두 고려함)를 비교하고, 더 적은 수의 트럭이 작업을 수행하고 있는 적재지점으로 새로 투입된 트럭을 배치한다. 각 적재 지점에 트럭이 접근하면 알고리즘은 쇼벨의 사용 가능 여부를 판단하게 된다. 만약 쇼벨의 사용이 가능할 경우에는 트럭은 적재작업을 위해 쇼벨에 접근하게 되고 적재작업을 수행한다. 이때 Eq. (1)의 STL , LT 가 발생한다. 반면, 쇼벨의 사용이 불가능 할 경우에는 트럭은 쇼벨이 사용 가능해질 때까지 대기행렬에서 기다려야 하며 AD 가 발생한다. 광석의 적재가 끝난 트럭은 실차 상태로 파쇄장으로 이동하게 되고 TL 이 발생한다. 파쇄장에 도착한

트럭은 적재지점과 마찬가지로 파쇄기의 사용 가능 여부를 판단하고 파쇄기의 사용이 가능할 경우 트럭은 파쇄기에 접근하여 투하작업을 수행하며 STD 와 TD 가 차례로 발생하게 된다. 만약 파쇄기의 사용이 불가능 할 경우에는 역시 대기행렬에서 기다려야하며 AD 가 발생하게 된다. 투하를 끝낸 트럭은 설정한 시뮬레이션 시간을 확인하고, 시뮬레이션을 종료할 것인지 아니면 시뮬레이션을 계속해서 수행할 것인지 결정하게 된다. 시뮬레이션을 계속 수행할 경우 트럭의 고장 발생 가능성을 확률적으로 판단하며, 트럭의 고장이 발생할 경우에는 해당 트럭은 별도의 수리 시간만큼 시스템에서 제외되고 수리가 완료된 이후에 시스템에 재투입된다. 반대로 트럭의 고장이 발생하지 않을 경우에는 해당 트럭은 다시 적재지점으로 이동하며 이때 TE 가 발생한다. Fig. 4는 시뮬레이션 알고리즘을 따라 운반 시스템에서 트럭들이 이동하는 경로를 개념적으로 도식화한 것이다.

실제 광산 현장에서는 운전자의 숙련도 및 장비의 종류에 따라 고장 발생 빈도와 수리시간이 다르지만 본 연구에서는 시뮬레이션의 단순화를 위해 고장 발생 빈도를 평균 40시간, 수리 시간을 평균 4시간으로 설정하였다. 또한, 고장 발생 빈도와 수리 시간 모두 확률적으로 지수분포의 형태를 따른다고 가정하였다. 그 외의 시뮬레이션 수행에 필요한 인자 값들은 Table 1에 제시된 인자 값들을 시뮬레이터에 입력하여 쇼벨-트럭 운반 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 7대의 트럭을 시스

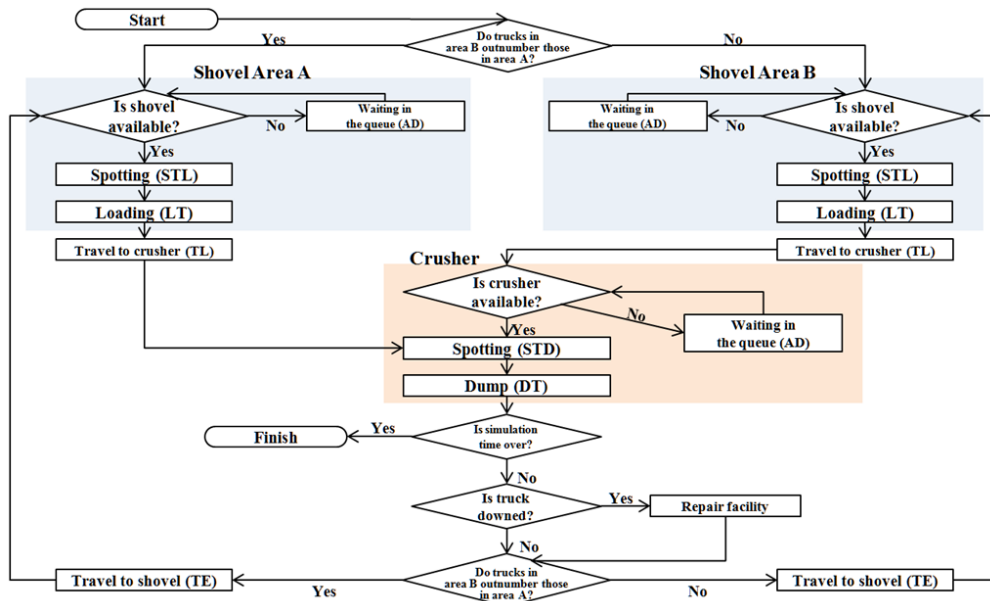


Fig. 3. Algorithm for simulating shovel-truck haulage systems with considering the truck's breakdown

템에 투입하는 것이 장비의 이용률을 70% 이상 넘지 않는 범위 내에서 운반 작업의 하루 평균 수익을 가장

높일 수 있는 것으로 분석되었다(Table 2). 본 연구에서 트럭의 고장 발생 가능성을 고려하여 시

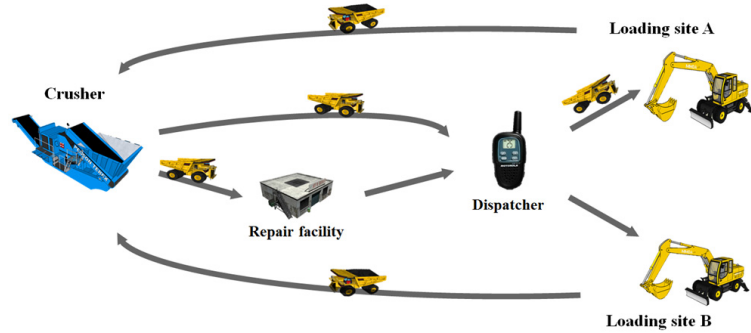


Fig. 4. Conceptual view of shovel-truck haulage systems with considering the truck's breakdown

Table 2. Simulation results for a shovel-truck haulage system with considering the truck's breakdown

Number of trucks	Shovel - area A			Shovel - area B			Crusher			Util. conveyor belt (%)	Avg. truck's repair (units)	Avg. load (ton/day)	Ore supply (ton/day)	Profit (USD/day)
	Util. shovel (%)	Avg. queue (unit)	Avg. waiting time (min)	Util. crusher (%)	Avg. queue (unit)	Avg. waiting time (min)	Util. crusher (%)	Avg. queue (unit)	Avg. waiting time (min)					
2	22.5	0.00	0.00	12.3	0.00	0.00	19.1	0.00	0.00	10.11	0.35	41.6	2913	-1254
3	26.8	0.00	1.67	24.6	0.00	1.05	28.1	0.01	0.98	14.89	0.47	61.3	4287	14241
4	40.0	0.03	1.65	28.2	0.00	1.16	37.3	0.03	0.99	19.65	0.72	80.8	5658	29698
5	47.4	0.08	1.86	35.6	0.02	1.53	45.0	0.05	0.95	23.66	0.85	97.4	6814	42603
6	56.9	0.15	2.25	41.6	0.03	1.24	53.1	0.08	1.14	27.86	1.12	114.6	8025	56152
7	67.2	0.13	1.92	50.0	0.03	1.21	67.3	0.15	1.23	33.26	1.23	136.8	9579	73775
8	65.8	0.10	1.57	51.3	0.04	1.20	90.8	1.06	3.81	33.24	1.37	136.8	9573	71913
9	65.3	0.11	1.68	50.9	0.04	1.23	90.4	1.94	6.95	32.97	1.69	135.7	9496	71211
10	66.5	0.12	1.77	51.7	0.04	1.32	92.3	2.90	10.15	33.56	1.56	138.1	9665	72417

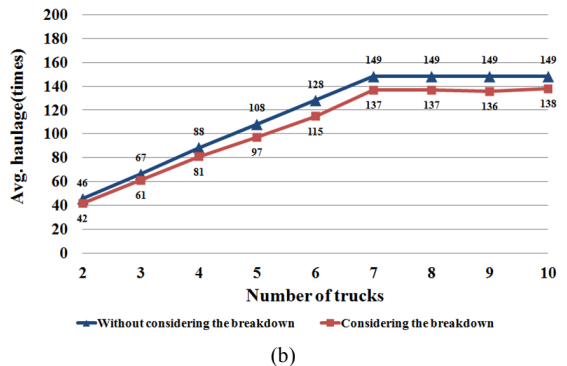
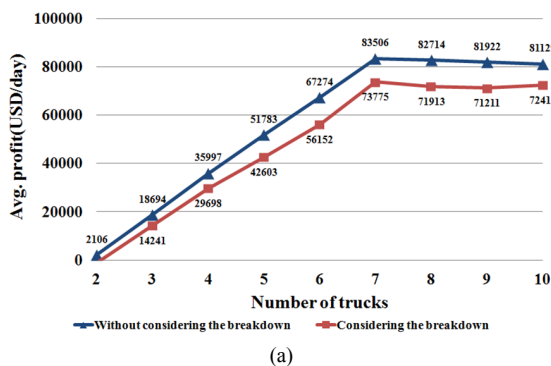


Fig. 5. Comparison of simulation results with and without considering the truck's breakdown. (a) Average daily profit. (b) Average number of haulage

물레이션을 수행한 결과와 Park과 Choi(2013)의 연구에서 트럭의 고장 발생 가능성을 고려하지 않고 시물레이션을 수행한 결과를 비교해 보았다(Fig. 5). 운반 시스템을 최적화하기 위해 투입되어야 하는 최적의 트럭의 수는 동일하게 분석되었다. 그러나 하루 평균 수익, 하루 평균 적재-운반 횟수 등과 같은 세부적인 결과들은 트럭의 고장 발생 가능성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우가 차이가 있음을 확인할 수 있다. 트럭의 고장 발생 가능성을 고려하지 않은 시물레이션 결과는 적재-운반 횟수, 하루 평균 수익 등을 과대평가 할 수 있으므로, 트럭의 고장 발생 가능성을 고려한 본 연구의

시물레이션 결과가 보다 합리적이라고 판단된다.

4.2 파쇄기 처리 용량을 고려한 쇼벨-트럭 운반 시물레이션

노천광산의 운반 시스템을 효과적으로 운영하기 위해서는 시스템에 투입되는 트럭의 수뿐만 아니라 파쇄기의 처리 용량도 최적화할 필요가 있다. 본 연구에서는 단위시간 당 파쇄기 처리 용량을 입력받아 쇼벨-트럭 운반 시스템을 시물레이션 할 수 있는 알고리즘을 Fig. 6과 같이 설계하였다. 사용자는 시물레이터에 파쇄기의 처리 용량을 직접 입력할 수 있으며, 입력한 파쇄기의

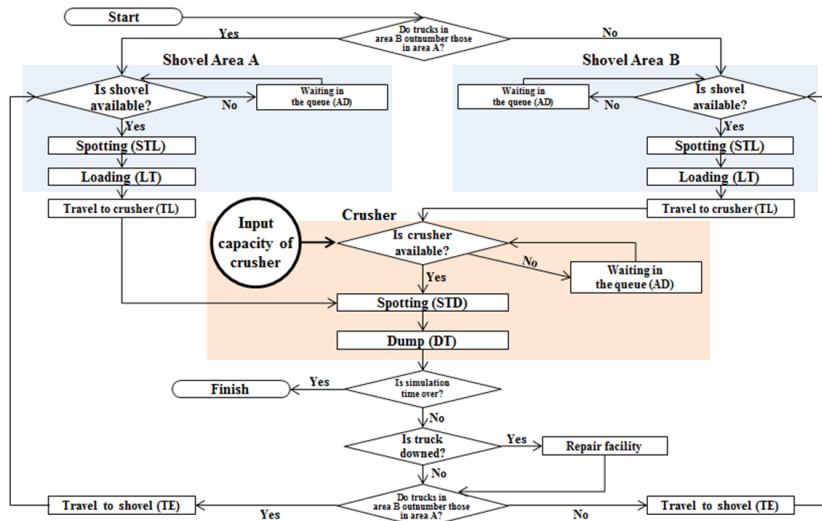


Fig. 6. Algorithm for simulating shovel-truck haulage systems with considering the truck’s breakdown and crusher’s capacity

Table 3. Simulation results for a shovel-truck haulage system with considering the crusher’s capacity

Crushing rate of crusher (tph)	Shovel - area A			Shovel - area B			Crusher			Util. conveyor belt (%)	Avg. truck’s repair (units)	Avg. load	Ore supply (ton/day)	Profit (USD/day)
	Util. shovel (%)	Avg. queue (unit)	Avg. waiting time (min)	Util. crusher (%)	Avg. queue (unit)	Avg. waiting time (min)	Util. crusher (%)	Avg. queue (unit)	Avg. waiting time (min)					
1100	51.4	0.05	1.23	48.2	0.03	0.83	90.9	1.10	4.67	28.31	1.32	116.5	8153	58885
1200	56.8	0.07	1.37	51.0	0.03	0.87	86.1	0.56	2.93	30.64	1.25	126.1	8826	65856
1300	67.2	0.13	1.92	50.0	0.03	1.21	67.3	0.15	1.23	33.26	1.23	136.8	9579	73775
1400	68.0	0.14	1.99	49.7	0.04	1.33	63.8	0.11	0.90	33.34	1.25	137.2	9601	73043
1500	68.0	0.14	1.99	49.7	0.04	1.33	63.8	0.11	0.90	33.34	1.25	137.2	9601	72043
1600	68.0	0.14	1.99	49.7	0.04	1.33	63.8	0.11	0.90	33.34	1.25	137.2	9601	71043
1700	68.0	0.14	1.99	49.7	0.04	1.33	63.8	0.11	0.90	33.34	1.25	137.2	9601	70043
1800	68.0	0.14	1.99	49.7	0.04	1.33	63.8	0.11	0.90	33.34	1.25	137.2	9601	69043
1900	68.0	0.14	1.99	49.7	0.04	1.33	63.8	0.11	0.90	33.34	1.25	137.2	9601	68043

처리 용량을 반영하여 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 파쇄기 처리 용량을 제외한 다른 요소들은 모두 결정되어 있는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 앞선 시뮬레이션 결과에서 연구지역의 운반 시스템에 7대의 트럭을 투입하는 것이 가장 유리한 것으로 분석되었기 때문에, 트럭의 수는 7대로 설정하였으며 나머지 시뮬레이션 인자들을 Table 1과 동일하게 적용하였다.

파쇄기의 처리 용량을 1,100 tph에서 2,000 tph까지 100 tph 단위로 변화시켜가며 시뮬레이션을 수행한 결과는 Table 3과 같다. 그 결과 파쇄기의 처리용량을 1,300 tph로 운영할 경우 장비의 이용률을 70% 이상 넘지 않는 범위 내에서 운반 작업의 하루 평균 수익을 가장 높일 수 있는 것으로 분석되었다. 1,300 tph은 연구지역에서 현재 운영되고 있는 파쇄기의 처리 용량과 동일하다. 따라서 연구지역에 현재 설치되어 있는 파쇄기는 적절한 처리 용량으로 운영되고 있다고 판단된다. 시뮬레이션 결과에서 하루 8시간의 작업을 가정했을 때 평균 광석 생산량은 9,579톤이다. 현장에서는 2교대 작업이 이루어지고 있으므로 하루 16시간의 작업과 연간 298일의 작업일을 가정하면 산술적으로 연간 약 570만 톤의 광석이 생산되는 것으로 분석된다. 따라서 가정된 시뮬레이션 조건에 따라 쇼벨-트럭 운반 시스템을 운영할 경우 광산 전체의 연간 광석 생산량인 1,400만 톤의 약 40%인 570만 톤을 제 2 작업장에서 생산할 수 있을 것이라 판단된다.

만약 연구지역의 운반 시스템에 쇼벨이나 트럭을 추가 투입하여 광석의 생산 속도를 높이거나 할 경우에는 파쇄기의 처리 용량도 1,300 tph보다 증가시키는 것이 유리할 수 있다. 이러한 경우에도 본 연구에서 제시한 시뮬레이션 알고리즘이 파쇄기의 처리 용량을 결정하기 위해 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

5. 결론

본 연구에서는 트럭의 고장 발생 가능성과 파쇄기 처리 용량의 변화를 고려하여 노천광산의 쇼벨-트럭 운반 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. (주)쌍용자원개발의 동해 석회석 노천광산을 연구지역으로 설정하여 시뮬레이션에 필요한 인자들을 측정하였으며, 연구지역에 적합한 시뮬레이션 알고리즘을 설계하였다. 또한, 설계된 알고리즘들을 바탕으로 GPSS/H 시뮬레이션 언어를 트럭의 고장 발생과 파쇄기 처리 용량을 고려할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다.

하루 8시간의 작업 시간과 1,000일 간의 작업 기간을

가정하고 현장에서 측정한 시뮬레이션 인자 값들을 개발된 시뮬레이터에 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 연구지역의 운반 시스템 내에서 트럭의 고장 발생 가능성을 고려할 경우에는 7대의 트럭을 시스템에 투입하는 것이 운반 작업의 하루 평균 수익을 가장 높일 수 있는 것으로 분석되었다(73,775 USD). 반면 트럭의 고장 발생 가능성을 고려하지 않을 경우에는 운반 시스템의 최적화를 위해 투입해야 할 트럭의 수는 동일하게 분석되었지만 운반 작업의 하루 평균 수익이 다소 과대평가될 수 있음을 확인할 수 있었다(83,506 USD). 연구지역에 7대의 트럭을 투입하는 것으로 가정하고 파쇄기 처리 용량을 1,100 tph에서 2,000 tph까지 100 tph 단위로 변화시켜가며 시뮬레이션을 수행한 결과에서는 파쇄기 처리 용량을 1,300 tph로 운영할 경우 시스템의 효율을 가장 높일 수 있는 것으로 분석되었다. 1,300 tph은 연구지역에서 현재 운영되고 있는 파쇄기의 처리 용량과 동일하다.

본 연구의 결과는 국내에서 수행되었던 기존의 연구들에서 고려할 수 없었던 트럭의 고장 발생 가능성과 파쇄기 처리 용량의 변화를 고려할 수 있도록 노천광산의 쇼벨-트럭 운반 시스템 시뮬레이션 알고리즘을 개선했다는 측면에서 의미를 가진다. 그러나 국내의 기술이 국제적인 수준에 도달하기 위해서는 보다 다양한 현장 조건들을 반영할 수 있는 시뮬레이션 알고리즘에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다. 예를 들어, 본 연구에서는 트럭의 고장이 발생할 경우 수리를 받는 동안 트럭이 운반 시스템에서 배제되는 것으로 가정하였으나, 실제 광산 현장에서는 다수의 트럭들이 운영되기 때문에 트럭의 고장이 발생할 경우 대체 트럭이 운반 시스템에 투입될 수 있다. 따라서 개별 트럭보다는 총 트럭의 규모(truck fleet size)를 고려하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 보다 현실적인 방안이 될 수 있다. 또한, 개발된 시뮬레이션 알고리즘을 국내 광산 현장에서 활용하기 위해서는 사용자 편의의 Windows 기반 프로그램으로 시뮬레이터를 개발할 필요가 있으며, 다양한 현장 적용을 통해 시뮬레이션 결과가 현장의 상황과 서로 잘 부합하는지에 관한 실증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업 “국내 석회석광 적용 자동차 경량화 광물 원료 등 미래 자원화 기술 실증화 연구(과제번호: 2013T100100021)”를 수행하는 대성엔디아이(주)의 2013년 기술정보 수집 연구용역비 지원으로 수행되었다.

References

1. 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.
2. 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.
3. Blackwell, G. H., 1999, Estimation of large open pit haulage truck requirements, *CIM Bulletin*, Vol. 92, No. 1028, pp. 143-149.
4. 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.
5. 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.
6. Choi, Y., 2011, New software for simulating truck-shovel operation in open pit mines, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 4, pp. 448-459.
7. Choi, Y. and Nieto, A., 2011a, 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.
8. Choi, Y. and Nieto, A., 2011b, Software for simulating open-pit truck/shovel haulage systems using Google Earth and GPSS/H, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 6, pp. 734-743.
9. 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.
10. Hartman, H. L. and Mutmansky, J. M., 2002 *Introductory mining engineering*, 2nd Ed, John Wiley & Sons, New York, USA, 584p.
11. Krause, A. and Musingwini, C., 2007, Modelling open pit shovel-truck systems using the machine repair model, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 107, pp. 469-476.
12. MKE and KIGAM, 2011, Annual report of mineral supply and demand status in Korea, <http://rik.kigam.re.kr/portal/> (Access at 06 November 2013).
13. Oraee, K. and Asi, B., 2004, Fuzzy model for truck allocation in surface mines, Hardygora, M., Paszkowska, G. and Sikora, M. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 2004*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 585-591.
14. Park, S. and Choi, Y., 2013, Simulation of shovel-truck haulage system by considering truck dispatch methods, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 50, No. 4, pp. 543-556.
15. Park, B., Choi, Y., 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.
16. Suboleski, S. C., 1975, *Mine Systems Engineering Lecture Notes*, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA.
17. Temeng, V. A., 1997, A computerized model for truck dispatching in open pit mines. PhD dissertation, Michigan Technological University, Michigan, USA, pp. 1-12.
18. Yan, S. and Lai, W., 2007, An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with overtime considerations, *Automation in Construction*, Vol. 16, No. 6, pp. 734-744.
19. Zhang, H., 2008, Multi-objective simulation-optimization for earthmoving operation, *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 1, pp. 79-86.



박 세 범

2012년 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 공학사

Tel: 051-629-6550
E-mail: sebumilv@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@dsmc.co.kr
현재 대성엠디아이(주) 신소재기술연구소 부장