

Global Report

불확실한 자재공급 상황에서 광산에서 항구로의 광물 운송 최적화방안

1. 개요
2. 방법론
3. 사례연구
4. 결론

1. 개요

광산산업단지 및 광물의 가치사슬은 광산, 비축물, 폐기물 덩크, 운송시스템 및 처리시설과 같은 다양한 구성요소로 구성된다. 광산의 장기 전략계획 및 스케줄링을 위해 SSO(Simultaneous Stochastic Optimization : 동시 확률론적 최적화) 접근방식이 이용된다. SSO 접근법은 2015년 Montiel/2016년 Goodfellow/2017년 Dimitrakopoulos/2018년 Dimitrakopoulos/2019년 Del Castillo와 Dimitrakopoulos가 제시한 다양한 광물의 침적 시뮬레이션(mineral deposit simulations) 기법을 이용하여 기술적 위험 관리와 아울러 최적의 생산일정을 맞추기 위한 구성요소를 통해 시너지효과를 나타내고 있다.

SSO 접근방식은 과거의 SIP(Stochastic Integer Programming : 확률론적 정수 프로그래밍) 접근방식을 확장한 것으로 물질(광물)의 불확실한 자재공급 상황에서 광산의 기능을 최적화할 수 있다. 그러나 SSO 접근방식에는 광산에서 특정 물질(광물)을 채굴하여 광산으로(또는 항구로) 운송하는 매우 중요한 기능은 포함하지 않고 있다. 특히 철광석을 채굴하는 광산단지에서는 복잡한 철도시스템으로 연결된 여러 광산, 비축물 및 항구 등이 포함될 수 있으며, 기술적 및 지질학적 위험요인을 안고 있는 자재공급 불확실성을 고려할 때 채굴한 철광석이 해당 고객에게 안전하게 운송될 수 있도록 하는 것이 핵심요소이다 [1][2]. 이처럼 광산-항만 간 운송시스템 상호작용은 기술적 위험을 관리하면서 운영의 가치를 극대화할 수 있는 최적화 프로세스가 요구된다[3]. 광산 간 운송 스케줄링 최적화기법의 개발은 광산의 채굴 일정을 미리 최적화하여 자재 공급 불확실성의 원인을 고려한 단기 운영 생산계획으로 제한되었다. 2011년 Liu와 Kozan은 job-shop problem representation을 이용하여 두 광산을 항구로 연결하는 단일 트랙 철도에서 열차예약 모델을 제안한바 있다. 2014년 Singh 등은 대형 철광석 광산단지에 대해 중장기적인 광산-항만 운송일정을 최적화하는 모델을 제시한바 있다. 이 두 모델은 광산에서 채굴일정을 미리 결정해야하기 때문에 광산-항만 운송시스템의 고정된 톤수 및 고정된 광물(철광석)의 품질이 요구된다.

광산-항만 운송시스템의 일정변화는 운송할 광물의 양과 품질에 영향을 미치며, 이는 주어진 시간 내에 채굴해야하는 재료에도 영향을 미친다. 또한 채굴된 광물질의 양이나 품질에 대한 불확실성을 고려하지 않은 두 연구는 최적화 예측의 신뢰성에 제한요인이 있다. 이에 2011년 Bodon 등은 채굴시퀀스, 광산 간 운송 스케줄링 및 항만 작업을 동시에 최적화하기 위한 최적화-이산 이벤트 시뮬레이션(discrete event simulation) 방법의 조합을 제시하였다. 이 접근방식은 다양한 예산지출 및 운영모드를 분석하여 납품된 광물질의 수량과 품질에 미치는 영향을 평가하기 위한 사례연구에 적용된다. 아울러 광산의 생산능력과 광산 간 운송일정을 단일 모델로 성공적으로 결합한다.

2020년 Kalinowski 등은 광산에서 항구로 자재를 운송하는 네트워크의 영향을 최소화하면서 광산-항만 운송 네트워크의 유지보수를 예약할 수 있는 결정적인 모델을 제시하였다. 이 모델은 광산-항만 운송용량에 대한 유지보수의 영향을 고려한 것이며, 용량감소가 광산의 채굴일정에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 이를 통해 2020년 Vahdani/Shams/Buakam/Wisittipanich가 제시한 광산-항만 운송최적화에 잠재적으로 적용됨으로써 단기적인 공급망 최적화에 대한 발전이 이루어졌다. 2020년 Belov 등은 장기적인 교통인프라 역량 계획을 안내하기 위해 열차 및 선박의 단기 운행일정과 항만의 자재비축 관리방법을 개발하였다. 이 방법을 사용하면 모델이 보다 더 긴 운행일정 동안 단기적인 최적화 수준을 유지할 수 있다. 이 접근방식에는 광산에서 채굴 스케줄링이 포함되지 않으며, 불확실성의 원인을 직접 통합하지도 않는다. 2015년 Montiel과 Dimitrakopoulos는 확률론적 최적화 프레임워크 내에서 장기적인 광물 생산 스케줄링을 위한 가공시설의 자재 운송을 위한 대안을 제시하였다. 이를 통해 다양한 방법으로 운송되는 재료 유형별 비율을 미리 결정하여 운송 장비를 관리하는 데 유연성을 제공하였다.

2020년 Gomes Leite 등은 여러 시간동안 광산-클라이언트 공급망에 대한 마르코프 결정 프로세스 모델(Markov decision process model)을 제시하였다. 이 접근방식은 광산-항만 간 운송시스템에 대한 모델링을 제외한 광산 공급망의 여러 구성요소를 고려하여 해결방안을 제시한 것이다.

2. 방법론

2.1. 최적화 모델의 기능

제안된 모델은 2단계 SIP(Stochastic Integer Programming : 확률론적 정수 프로그래밍) 접근방식의 객관적인 기능에서 채굴 및 항만 간 운송비용을 줄이고 항만에서 제품의 수요에 대한 미충족 위험을 줄이는 것을 목표로 하는 최소화 기능이다. 목표함수에는 다음과 같이 4개의 주요섹션이 있다.

- 제1섹션은 광산의 전체 생산스케줄링 비용을 최소화하는 것이다. 파트 I 에는 광산에서 블록의 채굴비용이 포함되며, 파트II에는 광산 목적지에 대한 운송비용이 포함되고, 파트III에는 비축을 위한 매립비용이 포함된다.
- 제2섹션은 광산-항만 간 운송비용이 포함된다. 파트IV에는 장비의 고정비용이 포함되며, 파트V에는 장비의 경로에 종속된 운송비용이 포함되며, 파트VI에는 서로 다른 위치에서 장비의 적재 및 하역비용이 포함된다. 파트VII에는 장비활용이 부족한 비용이 포함된다.
- 제3섹션은 항만에서 제품이 수요 대상에서 이탈될 위험과 관련이 있다. 파트VIII에는 광석의 톤수, 제품의 수요대상 편차에 따른 페널티 비용이 포함되며, 파트IX에는 광석제품의 품질목표 편차에 따른 페널티 비용이 포함된다.
- 제4섹션은 광산에서 최소한의 생산일정을 생성하는 것을 목표로 한다. 이 모델은 smoothing window 내의 블록과 동일한 기간에 블록b를 채굴하는 것을 목표로 한다. 페널티는 채굴되지 않은 smoothing window 내 블록에 적용된다. 파트VII에는 X까지의 GDR(Geological Discount Rate : 지라학적 할인율 D)가 포함된다.

시간이 지남에 따라 비용의 가치를 줄이는 경제적 할인율(d)과 GDR은 이탈하는 비용을 줄이는 것을 목표로 한다. GDR이 포함되는 이유는 최종 운송기간보다 초기 운송기간에 더 많은 비용이 들기 때문에 항만에서 생산목표 미 충족에 따른 위험요인을 감소시킬 수 있다[4].

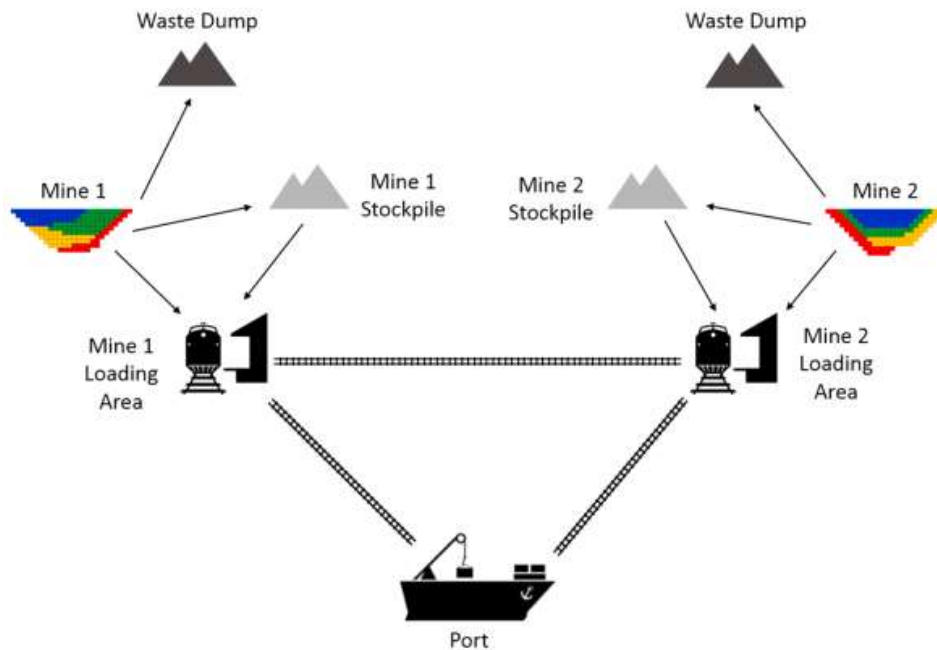
2.2. 코멘트

이 연구에서 제시한 모델의 목적은 광산의 자재공급 불확실성을 고려하여 광산-항만 간 운송의 최적화 및 철도연결 광산단지의 장기적 생산일정의 최적화에 기여하는 것이다. 이를 위해 해당 항만에서 다양한 제품(광물질)에 대한 연간 요구수량과 품질을 충족할 수 있어야 한다. 최적화의 목적은 항만을 이용하는 다양한 제품에 대한 연간 수요를 수량과 품질 측면에서 충족하는 것이다. 제안된 모델은 2단계 SIP(Stochastic Integer Programming : 확률론적 정수 프로그래밍) 접근방식으로 공식화된다. 제안된 모델의 목표함수는 광산-광산 간 운송비용의 절감, 자재공급 불확실성하에서 항만에서 제품목표를 충족하지 못할 위험의 관리 및 감소 등으로 요약할 수 있다. 따라서 이 모델은 일정 시간동안 채굴속도와 채굴된 광물 침전물 블록 간 연결을 포함한 채굴계약조건에 따라 적용될 수 있다.

3. 사례연구

3.1. 개요

전술한 방법론에 대해 2개의 광산과 단일 항만이 연결된 [그림 1]과 같은 철광석 광산단지를 대상으로 한 사례연구를 결과를 제시한다.



* 자료 : M'elanie LaRoche-Boisvert et al, "Simultaneous production scheduling and transportation optimization from mines to port under uncertain material supply", Resources Policy 73 (2021) 102150, p.5.

[그림 1] 광산단지의 구성요소 및 레이아웃

각 광산에는 폐기물 덩프, 적재 공간 및 비품이 있다. 그림에서 화살표는 채굴된 광물질의 흐름을 나타내고, 철도트랙은 항만에 광산을 연결하는 기존의 철도시스템을 나타낸다. 광산에서는 25m마다 약 2,000개의 광산블록과, 12m마다 22,500톤의 광물질을 운송한다. 자재공급 불확실성은 2009년과 2012년 Boucher와 Dimitrakopoulos가 제시한 15개의 지리학적 시나리오를 이용하였다. 이를 통해 5가지 요소(철/산화규소/산화알루미늄/인/LOI(Loss-On-Ignition : 무기광물 분석 및 토양의 화학적 구성을 조사하기 위한 시험방법))에 대한 불확실성과 가변성을 정량화하였다. 항만에서는 2가지 중요한 수요를 고려하였다. 각 광물질들은 <표 1>과 같이 고정된 연간 광물질 톤양과 고려된 요소에 대한 품질 제약조건이 있다.

<표 1> 각 광물질에 대한 등급 목표

	연도	광물질 톤양	Fe[%] (철)	SiO ₂ [%] (산화규소)	Al ₂ O ₃ [%] (산화알루미늄)	P[%] (인)	LOI[%]
광물질생산(1)	1	5,000,000	57.9-59.4	4.6-5.2	1-1.05	0.033-0.04	8.8-11
	2	5,000,000					
	3	4,000,000					
	4	4,000,000					
	5	4,000,000					
광물질생산(2)	1	4,000,000	57.1-58.5	4.9-5.5	0.9-1.05	0.031-0.038	9.5-13
	2	4,000,000					
	3	4,000,000					
	4	3,000,000					
	5	2,000,000					

* 자료 : M'elanie LaRoche-Boisvert et al, "Simultaneous production scheduling and transportation optimization from mines to port under uncertain material supply", Resources Policy 73

(2021) 102150, p.5.

광산단지의 운송시스템에는 <표 2>와 같이 연간 6,300시간 동안 이용할 수 있는 2대의 열차가 포함되어 있다. 아울러 광물질을 운송하는 열차에는 <표 3>과 같이 3개의 경로가 있다.

<표 2> 광물질의 특성

유형	수	운송용량(톤)
-	가용량	-
I	1	23,000
II	1	32,000

* 자료 : M'elanie LaRoche-Boisvert et al, "Simultaneous production scheduling and transportation optimization from mines to port under uncertain material supply", Resources Policy 73 (2021) 102150, p.6.

<표 3> 열차의 경로에 대한 정의

경로	정의	운송비용[\$]
I	항만-광산1-항만	800
II I	항만-광산2-항만	640
III	항만-광산1-광산2-항만 또는 항만-광산2-광산1-항만	960

* 자료 : M'elanie LaRoche-Boisvert et al, "Simultaneous production scheduling and transportation optimization from mines to port under uncertain material supply", Resources Policy 73 (2021) 102150, p.7.

광산 간 운송비용은 각 경로위치 사이의 이동거리에 따라 다르며, 최적화 모델에 사용된 경제적 파라미터는 <표 4>와 같다.

<표 4> 경제적 파라미터

파라미터	가치
채굴 비용(\$/t)	3
광산 내 운송 비용(\$/t)	2
매립 비용(\$/t)	0.1
경제적 할인율(%)	10
지질학적 위험 할인율(%)	12

* 자료 : M'elanie LaRoche-Boisvert et al, "Simultaneous production scheduling and transportation optimization from mines to port under uncertain material supply", Resources Policy 73 (2021) 102150, p.7.

이 사례연구를 위해 광산 내 운송비용은 광산 측면에서 적재지역, 비축 또는 폐기물 덩크에 이르기까지 모든 목적지와 광산에 모두 동일하게 적용하였다.

3.2. 결과검토

사례연구의 모델은 Visual Studio 15(C++) 환경에서 CPLEX v.12.6.1.0을 이용하여 구현된 분기 및 절단 알고리즘을 이용하여 해결하였다. 모델의 바이너리 및 정수변수들의 수(약, 70,000개)와 제약조건의 수(약 175,000개)가 합리적인 기간에 대한 결과도출을 위해서는 너무 크기 때문에 롤링시간 지평선 접

근방식을 적용하였다.(2008년 Dimitrakopoulos와 Ramazan, 2013년 Ramazan and Dimitrakopoulos) 선택기간은 2년이며, 1년은 중복된다. 각 지평선은 최적치와 1% 미만의 간격을 나타내는 정확도로 해석된다. 최적화 프로세스는 매년 각 열차의 예상 운용시간을 나타내는 광산-항만 운송함대의 일정을 제공한다. 경로III의 경우, 각 열차의 완료경로에 따른 운송횟수는 3년 동안 2회 사용된 것으로 나타났다. 또한 운송기간이 가장 긴 열차(표 2 참조)는 처음 3년 동안, 4-5기에는 열차1보다 더 큰 정도까지 사용된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이 기간 동안 더 작은 열차를 다른 작업에 할당하거나 향후 프로젝트에서 최대 4년간의 운송기간을 적용해야 한다는 것을 입증하고 있다. 아울러 광산 간 운송일정을 광산단지의 최적화에 통합할 필요성이 있음을 강조하고 있다.

4. 결론

이 연구에서는 불확실한 자재공급 상황에서 광산단지의 장기적 생산일정과 광산 간 광물운송을 동시에 최적화하기 위해 새로운 확률론적 복합 정수 프로그램(stochastic mixed integer program)을 공식화하였다. 이는 광산단지의 장기적인 전략적 최적화에 따른 광산-항만 간 운송일정을 통합하는 현재까지 기술문헌의 첫 번째 공식화이다. 여기에는 다양한 수의 광산, 비축물, 폐기물 덩크, 적재지역, 기차 및 철도 레이아웃 등이 포함되었으며 항만은 한 개만 이용하였다. 광산단지는 항만의 제품목표를 충족하기 위해 불확실한 자재공급의 용량, 운송 및 지구화학적 혼합과 관련된 여러 작동제약조건을 적용하였다. 제안된 모델을 두 개의 광산으로 구성된 철광석 단지(각 광산에는 비축/적재 공간/폐기물 덩크/단일 항만이 있음)에 적용하여 사례연구를 진행하였다. 결과는 모델을 통해 제품수요와 품질을 충족하는 동시에 목표를 충족하지 못할 위험을 최소화할 수 있음을 입증하였다. 광산단지의 장기적인 최적화에 광산-항만 운송스케줄링을 포함하면 시간이 지남에 따라 운송함대가 어떻게 사용되는지 분석할 수 있다.

향후 연구는 대규모 인스턴스의 최적화를 용이하게 할 수 있는 적합한 메타 휴리스틱 접근방식(meta-heuristic approaches)을 개발할 필요가 있다. 이를 통해 크기와 복잡성 측면에서 제시된 모델의 한계를 해결할 수 있을 것이다. 본 연구에서 제안된 접근방식은 동시에 고려되는 구성요소 특히 광산 간 운송 시너지효과를 활용하여 채굴작업의 가치를 높일 수 있는 잠재력을 가지고 있음을 확인하였다. 또한 제시된 공식화 개념은 여러 개의 이용 가능한 항만이 존재하는 광산단지로 확장할 수 있다. 아울러 각기 다른 비축량을 가진 항만-클라이언트 운송시스템 통합을 위한 전략계획에 대한 의사결정을 지원할 수 있을 것이다.

광산 산업단지에서는 SSO(Simultaneous Stochastic Optimization) 방법을 이용하여 채굴된 광물질 가치사슬을 형성하는 구성요소 간에 시너지효과를 도출하면서 생산목표를 충족시키고, 관련 위험을 관리한다. 이 연구에서는 SSO 접근방식을 도입하여 불확실한 자재공급 상황에서 광산단지의 생산일정과 광물의 운송을 동시에 최적화할 수 있는 방안을 제시하고 있다. 이 연구결과는 국내 지하자원이나 광물을 항만으로의 최적화 운송 관련 정책에 벤치마킹 자료로 활용할 수 있을 것이다.

[참고문헌]

- [1] Baker, C., Giacomo, S., 1998. Resources and Reserves: Their Uses and Abuses by the Equity Markets. Ore Reserves and Finance: A Joint Seminar Between the Australasian Institute of Mining and Metallurgy and ASX, Sydney, pp. 667-676.
- [2] Vallée, M., 2000. Mineral resource + engineering, economic and legal feasibility = ore reserve. Cim. Bull. 93, 53-61.
- [3] Gomes Leite, J., Arruda, E., Bahiense, L., Marujo, L., 2019. Modeling the integrated mines to-client supply chain: a survey. Int. J. Min. Reclam. Environ. <<https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1579693>>
- [4] Dimitrakopoulos, R., Ramazan, S., 2004. Uncertainty-based production scheduling in open pit

mining. SME Transactions 316, 106–112.

<원문제목> Simultaneous production scheduling and transportation optimization from mines to port under uncertain material supply

<원문출처> Resources Policy 73 (2021) 102150