

기술보고

석회석 노천광산의 공학적 설계에 의한 사전 타당성 평가

이동길^{1*} · 이재호¹ · 김지환²¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부, ²한국지질자원연구원 정책기획본부

Pre-feasibility Assessment Based on Engineering Design of a Limestone Open Pit Mine

Dong-Kil Lee^{1*}, Jae-Ho Lee¹ and Ji-Whan Kim²¹Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon, Korea²Policy & Planning Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon, Korea

*Corresponding Author. Dong-Kil Lee, ldk@kigam.re.kr, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 124, Gwahak-ro Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

Received

12 March 2024

Final version Received

1 April 2024

Accepted

1 April 2024

Abstract

In this study, a pre-feasibility assessment was performed on a mine that intended to develop a new ore body adjacent to an existing mining area under development. For this purpose, a final pit was designed using a grade block model of the ore body, and a production schedule for 11 million tons per year was established. In this study, mining costs were evaluated using an engineering-based production evaluation rather than a constant unit cost multiplied by production. When the unit operating cost evaluated in 2020 was compared to the cost investigated after the evaluation point, the error between the two costs was observed to be low, particularly given the entity that actually mines ore. The mining a new mining area was deemed economically viable, with the ore price being the most significant factor.

Key words : surface mine, limestone, preliminary feasibility study, operating cost

요약

본 연구에서는 개발중인 기존 채광지역에 인접한 광구내 신규 광체를 개발하려는 광산을 대상으로 사전 타당성 평가를 수행했다. 이를 위해 대상광체의 품위분포에 대한 블럭모델을 기반으로 최종 피트(pit)를 설계하였으며, 연산 11백만 톤에 대한 생산계획을 수립하였다. 본 연구에서 채광비용은 일정한 단위 생산비용을 생산량과 곱하여 평가하는 방식이 아니라 생산량에 대한 공학적 설계 기반의 평가방식을 적용하였다. 2020년에 평가된 비용을 평가시점이 지나 조사된 비용과 비교한 결과, 두 비용간 오차는 실제 개발주체를 고려하면 낮은 것으로 나타났다. 신규 채광지역의 개발은 경제성이 양호한 것으로 평가되었으며, 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 광석의 가격으로 나타났다.

주요어 : 노천광산, 석회석, 타당성 평가, 생산비용

서 론

광산 타당성 평가는 광산개발에 관한 기술적, 환경적, 상업적 기반을 제공하며, 광산 프로젝트의 투자여부에 관한 의사결정에 핵심적인 내용을 제공해 준다(Rupprecht, 2004). 광산의 타당성 평가는 확보된 정보에 기반해 수행된 평가의 수준에 따라 개념 타당성 평가(scoping study), 사전 타당성 평가(pre-feasibility study), 타당성 평가(feasibility study)로 구분된다(Lowrie, 2002). 일반적으로 타당성 평가의 수준이 증가할수록 평가의 정확도가 향상된다.

국내에서 보고된 광물자원 타당성 평가 연구사례는 광산에 대한 옵션가격 결정모델에 대한 연구(Lee and Kim, 2015), 지하광산에 관한 광산설계 및 타당성 평가연구(Lee and Jo, 2016; Lee, 2016a), 광산의 불확실성에 대한 의사결정 연구(Lee, 2016b), 북한 광산에 대한 개념적 경제성 평가에 대한 연구(Yoon and Song, 2019)로서, 보고된 사례가 적을 뿐만 아니라 노천광산에 대한 사전 타당성 평가 이상의 수준에 대해 보고된 국내 연구사례는 아직 부재하다. 노천광산은 지하광산에 비해 채광방식이 단순하고 환경과 안전 측면에서 유리하므로 국내 일부 전문기관에서 기존보다 높은 평가수준으로 국내·외 노천광산에 대한 타당성 평가를 이미 수행했을 수도 있지만 정보보안 및 주식시장 교란 등의 사유로 보고되지 못했을 수도 있다.

지금까지 공개된 자료를 기반으로 국내 노천광산의 비용 산정방식을 살펴보면, 채굴 인·허가를 위해 작성된 국내 채굴계획서나 기존 노천광산의 경제성 평가 보고서(Lee *et al.*, 2000) 등에서 채광비용은 광석 생산량에 일정한 단위 생산비용을 곱하여 평가하는 개념 타당성 평가 수준의 평가방식이 수행되어 왔다. 이러한 평가방식은 매우 제한된 정보와 추측 기반의 결과이므로 정확도가 $\pm 30\sim 50\%$ 로 낮아 프로젝트의 가능성만을 제시하기 때문에 일반적으로 프로젝트의 매우 이른 단계에 수행된다(Al-Bakri *et al.*, 2023). 그러나 프로젝트가 중요한 의사결정을 요구하는 단계에 이르게 되면 이보다 높은 수준의 타당성 평가가 요구되는데, McCarthy(2024)는 사전 타당성 평가 보고서가 기업의 의사결정자가 보게 되는 첫 번째 확실한 정보일 수 있다고 언급했다. 이처럼 광산개발 프로젝트의 실행여부를 판단하기 위해서는 최소한 사전 타당성 이상의 평가가 요구된다.

본 연구에서는 개발중인 채광지역의 가채매장량 감소와 품위 저하로 인해 생산량 확보의 어려움이 예측됨에 따라 기확보한 인접한 광구내 신규광체 개발을 계획하는 광산을 대상으로 사전 타당성 평가를 수행하였다. 광산 단위공정별 채광설계를 통해 구역별 생산량에 따른 작업량을 평가하고 이에 소요되는 장비, 인원, 자재 등의 제원과 비용을 산출해 평가하는 방식을 채택함으로써 보다 정확하고 다양한 변수의 고려할 수 있는 경제성 평가를 시도하였다.

본 론

광산 개발 및 평가의 범위

대상광산의 개발 범위

기존 노천채굴지역에서 생산이 장기화됨에 따라 잔여광체의 가채매장량이 감소하고 광체의 품위가 낮아져 추가적인 매장량 확보가 요구됨에 따라 대상광산은 인근에 기확보한 광구에서 신규광체의 개발이 타당한지 여부를 판단하기 위해 평가를 수행하였다. 기존 채굴지역에 광석처리시설이 이미 구축되어 있기 때문에 신규 채광지역에서 추가적인 광석처리시설을 구축하는 대신에 컨베이어를 이용해 신규 채광지역에서 기존 채굴지역으로 광석을 운반하는 방안이 선정되었다. 이에 따라 본 평가에서는 신규 채굴지역에서는 광석을 채광하고 컨베이어로 기존 채굴지의 광석적치장(ore stockpile, OSP)까지 광석을 운반하는 공정까지를 광산개발 범위로 선정하였다.

대상광산의 경제성 평가 범위

프로젝트에 대한 타당성 평가의 범위는 프로젝트를 주관하는 대상이 민간이나 정부이나에 따라 다르다. 민간영역에서는 프로젝트의 경제적 및 기술적 가치와 비전에 대한 평가를 주된 요소로 수행하지만, 공공영역에서는 공공의 편익증진이 목적이기 때문에 민간영역에서 수행하는 경제적 및 기술적 분석뿐만 아니라 정책적 분석, 환경적 분석, 지역균형발전 분석 등의 다양한 공적요소를 포함한다. 본 프로젝트는 민간이 아닌 정부부처에서 수행하는 예비타당성 평가에 준하여 평가를 수행하였다. 또한 광산개발로 인해 발생하는 산림훼손에 따른 환경비용과 지역경제 기여효과는 고려하지 않았고, 광산개발로 인한 비용과 편익에 대한 평가만 수행하였다.

본 프로젝트의 추진기간은 2021년~2055년이다. 사업기간 이전에 발생한 매몰비용은 고려되지 않았으며, 인플레이션 없이 2020년의 기준연도 불변가격으로 비용과 편익을 산정하였다. 또한 광산개발 생산원가와 판매가는 광업계의 민감한 사업비밀에 해당하는 사안으로 본 연구에서는 관련된 금액을 제시하는 대신에 평균금액을 100으로 일반화(normalization)하여 표기하였다.

대상광산의 채광설계와 생산계획

대상광산의 채광방법과 pit 설계

대상광산에서 사용하고 있는 채광방법은 일반적으로 노천 광산에서 많이 사용하는 노천채굴법(open pit mining method)을 채택하고 있다. 노천채굴법은 노천 채광장에서 하나 이상의 수평벤치를 개설하여 지표 근처에 부존하는 광상을 채광하는 방법이다(Hartman and Mutmanský, 2002).

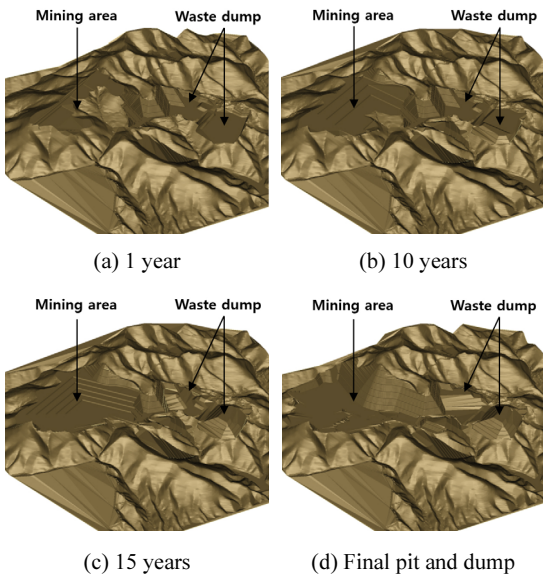


Fig. 1. Pit and dump shapes over time in the new mining area.

본 광산에서 피트(pit) 설계는 광체의 CaO 품위에 대한 블록모델을 바탕으로 각 블록당 개발비용을 산출해 광산의 가치가 최대가 되는 최종 피트형상을 도출하였으며, 이를 바탕으로 단계별 채광계획을 설계하였다. Fig. 1은 신규 채광지에 대한 생산단계별 피트와 폐석장의 형상변화를 나타낸다. 기존 채광지역과 신규 채광지역의 암반의 역학적 특성과 등급이 유사하므로 기존 채광지역에서 적용된 설계인자를 신규 채광지역에도 동일하게 적용하였다. 본 광산에서 피트를 구성하는 벤치의 높이는 10 m, 벤치 경사는 75°이며, 소단(berm)과 운반로의 폭은 각각 5 m, 10 m로 설정하였다. 또한 피트의 총 경사는 49°이다. 그림에서 좌측에 위치하는 채광지역은 시간이 지남에 따라 벤치의 증가로 인해 고도가 점차 낮아지는 반면에, 우측에 위치하는 폐석장에는 폐석이 적치됨에 따라 상부방향으로 벤치가 증가하여 고도가 점차 높아지는 것을 확인할 수 있다.

대상광산은 채광장 지하에 파쇄장을 개설하고 채광장과 파쇄장을 수광(glory hole)으로 연결할 계획이다. 이는 트럭으로 운반된 광석을 중력에 의해 비용없이 파쇄설비에 직접 이동시킬 수 있고 트럭에 의한 운반거리를 줄일 수 있어 운반비용이 절감된다.

대상광산의 생산계획

신규 채광지역의 석회석 생산계획은 연간 생산 목표량 11백만 톤을 기준으로 설계되었다. 최종 피트(final pit)에 대해 푸쉬백 스케줄링(pushback scheduling)을 설계하여

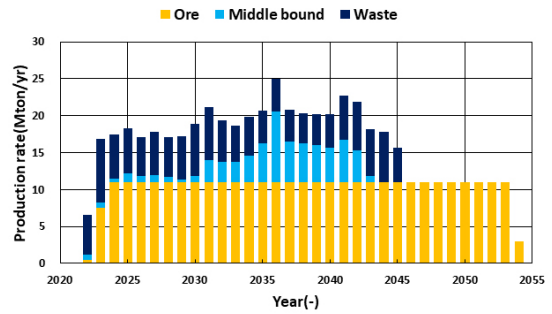


Fig. 2. Annual ore and waste production over time in the new mining area.

연간 생산량을 도출한 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 신규 채광지역에서 개발 초기에는 개발시설 구축으로 인해 연산 2022년 50만 톤, 2023년 7.5백만 톤으로 광석(ore) 생산량이 비교적 적지만, 본격적으로 생산되는 2024년부터 2053년까지는 연산 11백만 톤, 2054년 3백만 톤을 생산할 계획이다. Fig. 2에서 계획된 광석을 생산하는데 발생하는 폐석량도 함께 도시하였는데, 폐석은 광물학적 조성 및 밀도에 따른 관리목적으로 1차 폐석(waste)과 2차 폐석(middle bound)으로 구분하였다. 1차 폐석과 2차 폐석은 2045년까지 생산되다가 그 이후부터는 생산되지 않는다.

대상광산의 석회석 개발공정

본 광산은 석회석 개발공정에 4팀을 하루 3교대(8 hr/shift)로 운영하며, 연간 휴일없이 광산개발을 진행할 계획이다. 모든 단위작업이 하루 3교대로 적용되는 것은 아니지만, 소요되는 작업량에 준해 유연하게 교대수를 운영하고 있다.

천공 및 장약 공정

Fig. 3은 대상광산에서 사용하고 있는 천공장비(drill rig)와 발파장면을 나타낸다. 대상광산은 3대의 천공장비를 운영하며, 천공직경은 89 mm와 115 mm이다. 발파 저항선과 발파공의 간격은 동일한 규격으로 적용하고 있다. 본 광산은 MS 전기뇌관을 사용해 기폭을 수행하며, 공저장약은 (주)고려노벨화학의 뉴에몰라이트(new emulite), 주장약으로 초유폭약(ammonium nitrate fuel oil, ANFO)를 주로 사용되 우기시에는 벌크형 에멀전 폭약을 사용한다. 주어진 조건에 대해 Olofsson(1997)의 관계식을 적용하면, 천공직경은 89 mm와 115 mm에 대한 비천공량(specific drilling)은 각각 0.09 m/m³, 0.06 m/m³이며, 비장약량은 각각 0.32 kg/m³, 0.30 kg/m³으로 나타났다. 이를 기반으로 천공 공정 및 장약공정에 소요되는 작업량과 비용을 산정하였다.



(a) Drilling operation



(b) Charging and blasting operation

Fig. 3. Drilling and blasting process.



(a) Loading operation



(b) Hauling operation

Fig. 4. Loading and hauling process.

적재 및 트럭 운반 공정

적재작업에 사용되는 장비는 휠 로더(wheel loader)로서 버킷용량은 약 11 m³이고, 3대를 운영한다. 운반작업에 사용되는 장비는 광산용 운반트럭으로서, 적재용량이 91 ston(82.6 ton)이고 6대를 운영하고 있다(Fig. 4). 적재 및 운반 대상은 광석, 1차 폐석, 2차 폐석으로서, 각각의 밀도는 2.7 ton/m³, 2.7 ton/m³, 2.0 ton/m³이다. 적재물별 버킷회수, 트럭의 이동속도, 운반거리 등은 개발방법이 유사한 구 채광지역에서 측정한 결과와 설계안을 참고해 산정하였다.

파쇄 및 벨트컨베이어 운반 공정

신규 채광지역에서 채광된 광석의 처리공정과 운반경로를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서와 같이 신규 채광지역에서 채광된 광석은 광산용 운반트럭에 의해 2곳에 위치하는 파쇄장으로 이동된다. 하나는 수갱과 연결된 파쇄장이고 다른 하나는 이동식 해머 파쇄기(hammer crusher)이다. 두 파쇄장의 처리용량은 모두 1,500 ton/hr으로 동일하다. 수갱과 연결된 파쇄장으로 광석이 유입되면, 수갱내 광사(ore bin)와 연결된 그리즐리(grizzly)에서 -800 mm의 크기로 대괴를 파쇄한 후에 자이라토리 파쇄기(gyratory crusher)로 급광되어 -150 mm의 입도로 파쇄된다. 파쇄된 광석은 벨트 컨베이어에 의해 548 m 운반되고 콘 파쇄기(cone crusher)에 의해 -50 mm의 크기로 2차 파쇄된다. 콘 파쇄기의 처리용량은 800 ton/hr이며, 2기가 설치되었다. 반면에 이동식 해머 파쇄기로 유입된 광석은 -50 mm의 크기로 파쇄된 후에 벨트컨베이어로 약 525 m 이동된다.

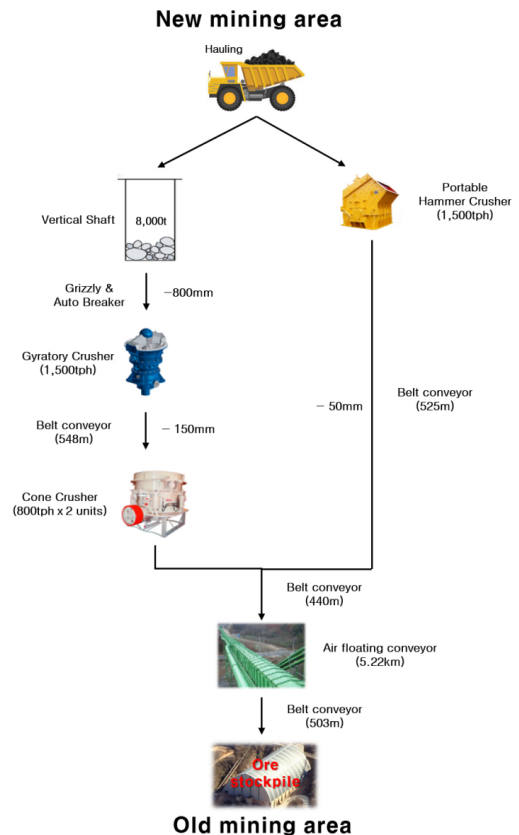


Fig. 5. Operational process and movement route of mined ore.

두 이동경로를 통해 이동된 광석은 함께 벨트 컨베이어와 공기 부양식 컨베이어(air floating conveyor)에 의해 운반되어 구 채광지역에 위치하는 광석적치장(OSP)으로 이동한다. 이때 파쇄된 광석의 총 운반거리는 6.16 km이다. 마지막 벨트 컨베이어는 스택커(stacker)와 연결되어 광석적치장에 광석을 적치한다. 본 평가에서는 각 구간별 컨베이어의 가동시간과 각 구성장치의 운전시간을 고려하여 운영비용을 산정하였으며, 광산현장의 소요내역을 확보해 비교함으로써 평가된 비용을 검증하였다.

보조 작업 공정

채광작업을 보조하기 위해 사용되는 장비는 Table 1과 같으며, 향후 피트내 지하수 및 지표수에 대한 배수시설을 추가로 고려하였다. 장비의 작업량은 광 폐석 생산량과 작업자의 작업시간을 고려하여 평가하였다.

작업자의 구성

신규 채광지역의 개발시 인건비의 산정은 Fig. 6의 작업

인원을 기본 인건비로 설정하고, 생산량의 증감에 따라 필요한 작업자를 증원 또는 감원하는 방식으로 인건비를 산정하였다. 신규 채광지역의 작업자는 총 151명이며, 기본 임금과 더불어 4대 보험과 퇴직금을 가산해 인건비를 산정하였다.

대상광산의 경제성 평가

경제성 평가방법

신규 채광지역에 대한 경제성 평가방법은 일반적으로 많이 사용하는 현금흐름 할인 분석법(discount cash flow method)을 적용하였다. 현금흐름 할인 분석법은 일정 기간 동안 예상되는 현금의 유입과 유출을 현재가치로 할인하여 투자여부를 판단하는 타당성 분석기법이다. 현금흐름 할인 분석법의 평가기준은 일반적으로 총 현재가치(net present value, NPV)와 내부수익율(internal rate of return, IRR)을 많이 사용한다(Harrison *et al.*, 2002; Topal, 2008).

총 현재가치는 미래에 발행하는 현금흐름을 할인율로 할인함으로써 현재시점의 금액으로 환산한 총액을 의미하며,

Table 1. Equipment and workload required for auxiliary operations

Equipment	number	shift (shift/day)	Usage
Crawler dozer	1	1	Cleaning blasted rock and management of waste dump
Wheel dozer	1	3	
Excavator	2	3	Topsoil removal and auxiliary operations
Water tanker	1	1	Dust reduction by watering
Oil tanker	1	2	Refueling
Cargo truck	3	3	Auxiliary operations
Fork lift	2	3	Equipment maintenance and crushing assistance

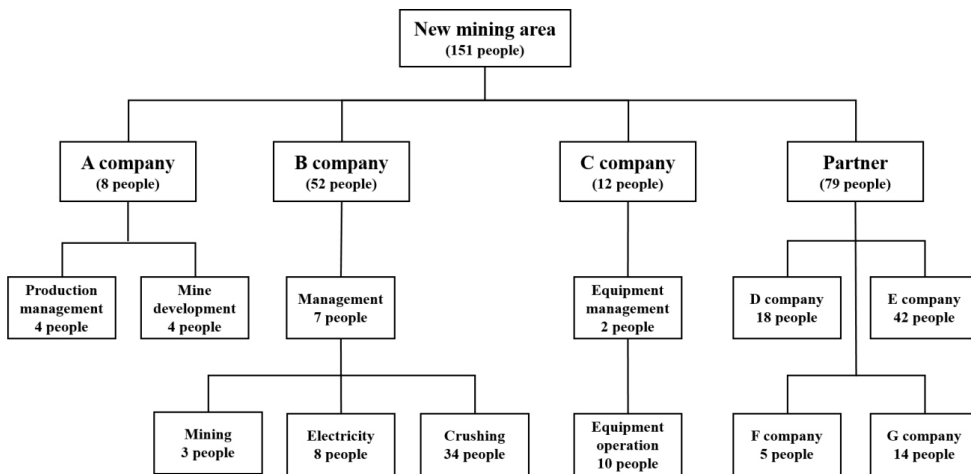


Fig. 6. Placement of workers for each task in the new mining area.

식 1과 같이 계산된다. 일반적으로 총 현재가치가 0보다 크면 투자가치가 존재하는 것으로 평가된다. 총 현재가치는 투자대상으로 인한 수익의 크기를 파악하는데 유용하다.

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{FV_i}{(1+r)^i} \quad (1)$$

여기에서, FV_i : i 년도의 미래가치 = i 년도의 현금유입 - i 년도의 현금유출
 r : 할인율
 n : 평가년 수

내부수익율은 식 2와 같이 비용과 편익의 흐름이 있을 때 해당 투자계획의 총 현재가치를 0으로 만들어주는 할인율을 의미한다. 일반적으로 내부수익율이 할인율보다 높은 경우 투자가치가 있는 것으로 평가된다. 내부수익율은 투자대상의 가치를 수익률로 평가하므로 목표로 하는 수익률 이상을 달성하는지를 나타낸다.

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{FV_i}{(1+IRR)^i} = 0 \quad (2)$$

주요 평가인자의 선정

① 기준년도와 평가기간

본 평가에서는 2020년을 현재시점(0차년도)으로 설정하고 이를 기준으로 가치평가를 수행하였다. 채광종료시점은 2054년이지만 산림복구기간을 감안하여 투자종료시점은 2055년으로 설정하였다. 따라서 평가기간은 2020년부터 2055년까지이다.

② 할인율 및 인플레이션을

본 평가에 적용할 할인율은 정부부처에서 수행하는 예비타당성 평가에서 적용하는 할인율 4.5%(KDI, 2012)을 적용하였다. 본 평가에서는 인플레이션율은 적용하지 않았다.

③ 감가상각

감가상각은 대상광산에서 제시한 20년간 정액분할하여 상각을 수행하였다.

④ 투자비용

2021년부터 사업종료시점까지 투자비는 산림복구, 운영설비의 교체, 광산 철거에 소요되는 비용으로서, 연차별 광산 운영 및 복구 계획에 준하여 적용하였다.

철거비용중에서 해체비용은 비율단가 적용방식(MLIT1,

Table 2. Key factors in calculating costs and profits in the new mining area

Factor	Value	Source
Exchange rate	1239.7 won/US\$	Forecast based on Bank of Korea data from 2013 to 2020 (Bank of Korea, 2020)
Electric charges	93.7 kwon/kWh	Annual average price for industrial power-Eul II in 2020 (KEPCO, 2020)
Diesel price	866.7 won/liter	Forecast based on Opinet data (Opinet, 2020) and the mining company
General management rate	10%	Provided by the mining company
Discount rate	4.5%	KDI, 2012
Reserve rate	10%	KDI, 2012
Corporate tax	10% for less than 200 million won 20% for over 200 million won to under 20 billion won	Tax base for 2020 (NTS, 2020)
Local income tax	10% of corporate tax	Tax base for 2020 (NTS, 2020)
Local resources facility tax	0.75% of sales	Provided by the mining company
Four major insurance rate	15.13%	Total rate of industrial accident insurance, national pension, health insurance, and employment insurance in 2020 (SIIS, 2020)

2020)을 적용하되, 기존 평가방식이 적용대상에 따라 상이한 차이를 보이는 것(Sung and Kim, 2004)을 감안하여 철거대상물 가치의 30%, 잔존가치비율은 10%(MLIT2, 2020), 철거감리비율의 합으로 추정하였으며, 채광이 종료되는 2054년에 철거가 완료되는 일정으로 설정하였다. 반면에 복구비용은 2020년도 기준 복구비 산정기준에 준해 채광기간을 5단계로 구분하고 단계적으로 복구계획을 수립해 지출하도록 계획하였다.

⑤ 주요 비용 및 수익 산정기준

인건비, 운영비, 자재비 등의 주요 비용 및 수익의 산정기준은 Table 2에 제시하였다. 신규 채광지역 광석을 생산하여 광석적치장까지 운반하는데 까지의 광석 판매가격은 해당업체에서 제시한 금액으로 설정하였다. 환율과 디젤가격은 표에서 제시한 근거자료를 기반으로 시계열 분석을 수행해 예측된 결과이다.

단위 운영비용의 평가

연간 생산되는 광석량과 폐석량이 년도마다 다르기 때문에 폐석량을 고려한 광석의 단위 운영비용은 년도마다 다르다. 또한 운영비용에는 작업량에 상관없이 시간이 지남에 따라 지출되는 비용이 있고, 작업량에 비례해 지출되는 비용이 함께 존재하므로 본 연구에서는 이를 단위 기간별로 구분하여 평가한 후에 합산하는 방식을 채택하였다.

Fig. 7은 신규 채광지역에서 연차별 석회석의 단위 운영비용의 추이를 나타낸다. 그림에서 석회석의 단위 운영비

용은 2023년~2054년 기간의 생산비용을 평균한 값을 100으로 설정해 도시하였다. Fig. 2와 Fig. 7을 함께 살펴보면, 폐석의 생산량이 없고 광석 생산량이 높은 2046년~2054년의 경우 운영비용이 낮은 반면에 폐석이 발생하는 2023년~2045년까지는 상대적으로 운영비용이 조금 높다. 반면에 2021년과 2055년은 생산량이 없기 때문에 단위 운영비용이 없는 것이고, 2022년에는 생산되는 광석의 양은 적고 처리해야하는 폐석의 양이 많기 때문에 단위 운영비용이 높게 평가된 것이다. 이처럼 석회석의 단위 운영비용은 일정하지 않고 생산되는 생산물의 종류와 양에 따라 변화한다.

평가된 비용의 적정성을 판단하기 위해서 국내 석회석 노천광산의 톤당 생산비용과 비교하였다. Table 3은 일간 3만 톤의 석회석을 생산하는 경우에 본 연구에서 평가한 석

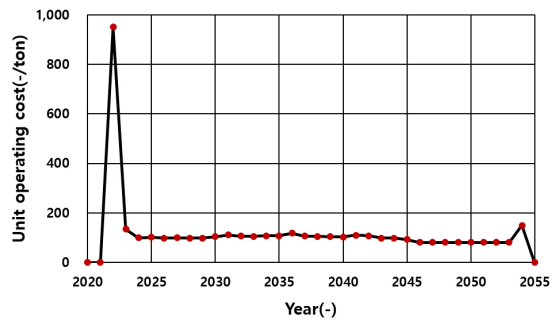


Fig. 7. Operating cost per tonnage of ore over time in the new mining area.

Table 3. Comparison of unit operating costs in the new mining area (based on 30,000 tons of ore/day)

Operations	Cost details	This study	Survey results of Korea's limestone open pit mines ¹⁾	
		Norm. value (-/ton)	Error compared to the same mine	Error compared to average value
Mining	Personnel	13.0		
	Drilling	4.3		
	Blasting	5.6		
	Loading/hauling	18.9		
	Auxiliary operation	4.3		
	General maintenance	11.6	-8.8%	-1.9%
	Subtotal	57.7		
crushing and conveying	Personnel	8.4		
	Crushing/conveying	33.9		
	Subtotal	42.3		
Total sum		100.0		

¹⁾Operating cost per ton of limestone ore as of 2020 surveyed in 9 open-pit limestone mines in Korea.

회석 톤당 운영비용을 100으로 가정했을 때 국내 석회석 노천광산의 석회석 톤당 운영비용을 비교한 것이다. 표에서 제시된 대상광산의 단위 운영비용과 국내 석회석 노천광산의 평균 단위 운영비용은 본 연구의 평가시점인 2020년 이전 이후에 2020년도를 기준으로 운영비용을 조사한 결과이다. 표에서와 같이 2020년에 수행한 본 연구의 단위 운영비용은 국내 평균과 -1.9%의 오차를 보이고, 대상 광산과 -8.8%의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 일반적으로 광산 타당성 평가시 비용평가의 정확도는 개념 타당성 평가가 30~50%, 사전 타당성 평가가 15~30%, feasibility study가 10~15%의 범위인 것(Rupprecht, 2004)을 감안하면, 본 연구에서 산정된 비용은 사전 타당성 평가임에도 불구하고 비교적 높은 정확도를 갖는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서는 제시된 작업인원이 직접고용의 형태로 채광작업에 투입한 것으로 평가를 했지만, 실제 대상광산은 작업별로 외부업체에게 외주(outsourcing)를 주어 관련 작업을 수행하는 방식으로 진행했기 때문에 대상광산의 경우 본 연구결과보다 다소 높은 비용이 소요된 것으로 판단된다. 이는 본 연구결과와 조사결과간의 오차를 유발시키는 주요 원인으로 판단된다.

신규 채광지역에서 석회석의 톤당 생산비용 중에 채광비용은 전체 운영비용의 57.7%를 차지하고 파쇄 및 운반비용은 42.3%로 나타나 채광비용이 파쇄 및 운반비용보다 높은 것을 알 수 있다. 채광비용중에서 적재 및 운반공정이 가장 높은 비율을 차지하였다.

경제성 평가 결과

신규 채광지역을 대상으로 수행한 경제성 평가결과를 Fig. 8과 Table 4에 제시하였다. Fig. 8은 시간에 따른 현재가치(present value, PV)와 누적 현재가치(cumulative PV)의 추이를 나타낸 것이다. Fig. 8에서와 같이 개발 초기에는 광석의 생산량보다 폐석의 생산량이 더 많기 때문에 현재가치 현금흐름은 음의 값을 나타내지만 점차 광석 생산량이 증가함에 따라 현재가치 현금흐름은 양의 값이 된다. 2054년과 2055년에는 광산시설 철거와 산림복구로 인해

비용이 추가됨에 따라 현재가치 현금흐름은 음의 값을 갖는다. 누적 현재가치는 이로 인해 초기 음의 값에서 양의 값으로 변화한다. 최종년도에서 누적 현재가치는 광산개발 전체 기간을 통해 발생되는 현재가치 현금흐름을 합산한 NPV를 의미하며, 이는 광산개발 투자로 인해 얻게 되는 현재가치 현금흐름의 크기를 나타낸다. Table 4에서 할인율이 4.5%일 경우 NPV는 1,742억 원으로 평가되었으며, IRR은 59.2%으로 나타났다. 현재가치를 기준으로 B/C ratio를 평가한 결과, 할인율이 4.5%일 때 B/C ratio는 1.30로 나타났다. B/C ratio가 1보다 높으므로 본 사업은 경제성이 있음을 알 수 있다.

할인율이 달라지면 광산의 총 현재가치도 변화하게 된다. 이와 같이 할인율의 변화에 따른 광산의 총 현재가치의 변화를 파악하기 위해 Fig. 9에 할인율 0%에서 30%구간에서 NPV의 평가결과를 제시하였다. 그림에서와 같이 할인율이 증가할수록 총 현재가치는 감소하며, 총 현재가치가 0이 되는 할인율은 IRR인 59.2%가 된다.

민감도 분석결과

본 연구에서 적용된 다양한 평가지표들은 시간에 따라

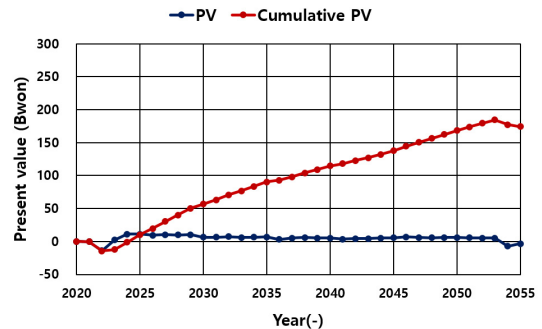


Fig. 8. Present value and cumulative present value over time.

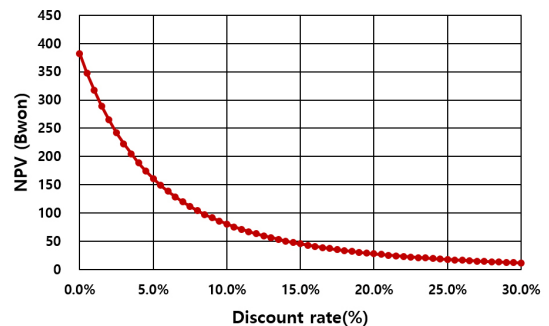


Fig. 9. NPV according to the discount rate.

Table 4. Economic evaluation results in the new mining area

Discount rate	Evaluation index	value
	NPV (Billion won)	174.2
	IRR(%)	59.2
4.5%	Present value of benefit (Billion won)	903
	Present value of cost (Billion won)	696
	B/C ratio of present value (-)	1.30

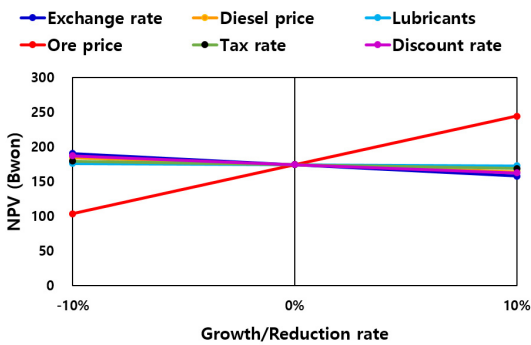


Fig. 10. Sensitivity analysis results.

달라지며 이는 경제성 평가결과를 변화시킨다. 따라서 경제성 평가에 사용된 주요 지표의 변동성이 광산의 경제성 평가결과에 미치는 영향을 파악하는 것은 중요하다. 민감도 분석(sensitivity analysis)은 광산 경제성 평가에 사용된 주요지표들을 일정비율로 증가 및 감소시켜 이에 따른 NPV의 변화를 파악함으로써 평가지표가 경제성에 미치는 영향을 분석하는 방법이다.

본 연구에서는 광산 경제성에 영향을 미치는 주요인자로 환율, 디젤가격, 유류가격, 광석가격, 할인율, 세율을 설정하고, 이들을 10% 증감하였을 때 NPV의 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서와 같이 선정된 주요 지표중에서 광석의 가격이 경제성에 미치는 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 그다음으로 환율, 할인율, 세율, 디젤가격 및 유류가격의 순서로 영향을 미치는 정도가 점차 낮아진다. 따라서 본 광산에서 높은 경제성을 유지하기 위해서는 높은 민감도를 보이는 지표에 대한 리스크 관리가 요구된다.

결론

본 연구에서는 대상광산이 기확보한 인접한 광구내 신규 광체에서 광석을 채광하고 컨베이어로 기존 채굴지역의 광석적치장까지 광석을 운반하는 공정을 대상으로 사전 타당성 평가를 수행하였다. 이를 위해 본 연구에서는 대상광체의 품위에 대한 블럭모델을 기반으로 최종 피트설계를 수행하였으며, 연산 11백만 톤을 생산목표로 설정하여 생산계획을 수립하였다.

본 연구에서 석회석 단위 생산비용은 채광설계와 생산 스케줄링을 통해 도출된 생산량을 기반으로 채광 단위작업별 작업량을 평가하고 이에 소요되는 장비, 인원, 자재 등의 제원과 비용을 산출해 평가하였다. 평가된 시점을 지나서 조사된 국내 석회석 노천광산의 운영비용과 2020년에 평가된 운영비용을 비교한 결과, 2022년에 평가된 단위 운영

비용은 국내 평균 운영비용과 -1.9%의 오차를 보이고, 해당 광산의 운영비용과 -8.8%의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 평가된 비용과 실제 비용간의 오차는 크지 않지만 대상광산의 경우 채광주체가 평가시점과 달라진 점을 고려하면 이러한 차이는 더 작아질 수 있다. 이는 본 연구에서 적용한 채광 단위작업별 공학적 설계에 기반한 광산설계와 경제성 평가결과가 실제와 잘 일치함을 보여준다.

신규 채광지역의 개발은 할인율이 4.5%일 때 NPV는 1,742억 원, IRR은 59.2%, 현재가치 기준의 B/C ratio는 1.30로서 경제성이 양호한 것으로 나타났다. 경제성에 미치는 주요인자를 환율, 디젤가격, 유류가격, 광석가격, 할인율, 세율로 설정하여 민감도 분석을 수행한 결과, 광석의 가격이 경제성에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업(24-3412)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Al-Bakri, A.Y., Ahmed, H.A.M., Ahmed, H.M., and Hefni, M.A., 2023. Evaluation studies of the new mining projects, *Open geoscience*, 15(1), 20220466p.

Bank of Korea, 2020.07.01., Economic statistics system, <https://ecos.bok.or.kr/>

Harrison, S., Herbohn, J., Mangaoang, E., and Vanclay, J., 2002. Socio-economic research methods in forestry: a training manual, *Proceedings of an International Training Workshop*, Rainforest CRC, Baybay, p.109-118.

Hartman, H.L. and Mutmansky, J.M., 2002. *Introductory Mining Engineering (2nd Ed.)*, John Wiley & Sons, Inc.

Korea Development Institute (KDI), 2012. *Modification and supplementary research on general guidelines for feasibility study*, KDI Public Investment Management Center, 460p.

Korea Electric Power Corporation (KEPCO), 2020.07.01., <https://home.kepco.co.kr/kepco/main.do>

Lee, D.K. and Jo, Y.D., 2016. A study on the mine design and economic feasibility analysis using a mine design software, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 53(2), p.175-186.

Lee, D.K., 2016a. Evaluation of the economic risk of a mine using monte-carlo simulation, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 53(4), p.321-330.

Lee, D.K., 2016b. Study on decision making for mine development project with uncertainty, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 53(2), p.149-157.

- Lee, K.H., Jung, S.G., Kim, I.H., Kim, D.H., Choi, G., Jo, Y.D., and You, O.J., 2000. *Cost and benefit analysis of mine development*, KIGAM Report, KR-B-660-2000, p.189.
- Lee, K.P. and Kim, J.D., 2015. Development of an evaluation module for determining mine closure on domestic limestone mine, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 52(2), p.193-207.
- Lowrie, L.L., 2002. *SME Mining Reference Handbook*, Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc.(SME), 1p.
- McCarthy, P.L., 2024. *Objectives of feasibility studies*, Internal paper for Australian Mining Consultants, 202402.15.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT1), 2020. *Construction Standard Estimating System: Common, civil engineering, construction, mechanical equipment*, JinhanNB, 1124p.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT2), 2020. *Civil Engineering Standard Estimating System*, Construction Research Institute, 864p.
- National Tax Service (NTS), 2020.07.01., <https://www.nts.go.kr/nts/main.do>
- Olofsson, S.O., 1997. *Applied Explosives Technology for Construction and Mining (2nd Ed.)*, Nora Boktryckeri AB, Sweden.
- Opinet, 2020.07.01., Korea National Oil Corporation's oil price information, <http://www.opinet.co.kr/>.
- Rupperecht, S., 2004. Establishing the feasibility of your proposed mining venture, *Proceedings of International Platinum Conference on Platinum Adding Value*, The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, p.243-247.
- Social Insurance Information System (SIIS), 2020.07.01., <https://www.4insure.or.kr/pbiz/main/main.do>
- Sung, N.W. and Kim, Y.S., 2004. An Investigation on the Propriety of Ratio-Unit Price Method for Estimating Demolition Cost, *Proceedings of the 5th Korean Institute Of Construction Engineering and Management*, p.579-583.
- Topal, E., 2008. Evaluation of a mining project using discounted cash flow analysis, decision tree analysis, Monte Carlo simulations and real options using an example, *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 1(1), p.62-76.
- Yoon, D.H. and Song, J.J., 2019. Conceptual economic evaluation of a copper mine in north korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 56(2), p.183-196.

이 동 길

2006년 한양대학교 대학원 지구환경시스템공학과 공학박사



현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 자원환경연구센터 책임연구원
(E-mail; ldk@kigam.re.kr)

이 재 호

1993년 고려대학교 대학원 지질학과 이학박사



현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; jhlee@kigam.re.kr)

김 지 환

2018년 고려대학교 일반대학원 경제학박사



현재 한국지질자원연구원 미래전략연구센터 선임연구원
(E-mail; kjiwhan@kigam.re.kr)