

## 총설

## 국내 석회석 광산의 부산물 활용 방안

백환조<sup>1\*</sup> · 김동휘<sup>1</sup> · 정용식<sup>2</sup><sup>1</sup>강원대학교 에너지자원공학과, <sup>2</sup>한국광해광업공단 기술개발처 기술개발2팀

## Utilizing Waste Rock from Domestic Limestone Mines

Hwanjo Baek<sup>1\*</sup>, Donghui Kim<sup>1</sup> and Yongsik Jeong<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea<sup>2</sup>Research and Development Team 2, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp, Wonju, Korea

\*Corresponding Author. Hwanjo Baek, [hwanjo@kangwon.ac.kr](mailto:hwanjo@kangwon.ac.kr), Department of Energy and Resources Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

## Received

29 November 2023

## Final version Received

27 December 2023

## Accepted

27 December 2023

## Abstract

This study reviewed the accumulation status of waste rock generated while mining domestic limestone and dolomite mines. Potential utilization plans for the waste rock have been discussed. Data on the annual production and waste rock generation for the past five years were obtained from 47 currently operating mines. In addition, waste rock samples were collected from eight mines in the Gangwon and Chungbuk regions to investigate their chemical and mineralogical characteristics. For underground mining, waste rock generation accounted for approximately 9% of total ore production; in open-pit mines, it was up to 24%. Mine water both inside and outside the pit was analyzed and was found to meet general water quality requirements except for the suspended matter concentration. The mechanical test results showed that the generated waste rock met quality standards and could be used as coarse aggregates for concrete production.

**Key words** : waste rocks, limestone, aggregates, recycling

## 요약

이 연구에서는 국내 석회석 및 백운석 광산의 채굴과정에서 발생하는 부산물의 관리 현황과 활용 방안에 대하여 검토하였다. 현재 가행 중인 47개소 광산을 대상으로 설문조사를 통하여 최근 5년간의 생산량과 부산물 발생량 자료를 취합하였으며, 강원 및 충북 지역의 8개 광산 현장을 방문하여 부산물의 적치현황과 화학적, 광물학적 특성을 조사하였다. 갱내채광 광산의 경우 생산량 대비 9%, 노천채광 광산은 24%의 부산물이 발생하고 있었다. 갱내수와 갱외 유출수의 수질은 부유물의 농도 외에는 일반적인 방류수질 기준을 만족하는 것으로 분석되었다. 또한 역학 시험의 결과에서는 굵은 골재의 품질기준치를 충족하여 콘크리트용 골재로서 활용가능성도 높음을 확인하였다.

**주요어** : 광산 부산물, 석회석, 골재, 재활용

## 서론

자원개발 과정에서는 부산물과 광미, 플라이애쉬, 슬래그 등 다양한 종류와 형태의 부산물들이 발생한다. 광산 부산물은 함유하는 광석의 품위가 너무 낮거나 혹은 전혀 함

유되지 않은 암석 물질을 의미하며, 추가적인 파쇄와 선광 작업을 통해 경제성을 확보하기가 어려워 광산 인근의 부지에 임시로 적치된다. 현재 광산에서 발생하는 부산물은 폐기물로 지정되어 산림자원보호 및 산지관리, 환경오염 예방 등의 관련 법령과 규정에 따라 엄격하게 관리되고 있

다. 이처럼 광산 부산물의 반출과 재활용이 제약을 받는 상황에서 부산물 적치장의 규모는 광산이 가행되는 동안 크게 증가하고 있으며, 적치장 확보를 위한 산지 사용면적 증가로 자연환경 훼손이 심화되고 관리비용 증대로 광산 경영에 어려움이 가중되고 있는 실정이다.

광산 부산물의 재활용을 확대하는 것은 효율적인 자원 활용의 측면뿐만 아니라, 천연자원의 소비를 줄이고 운송에 필요한 에너지 사용을 절감하기 위한 녹색광산(*green mining ideology*)의 취지에도 부합한다. 광산 부산물 재활용의 기대효과는 광물자원의 효율적 이용과 환경문제의 최소화, 그리고 골재 판매를 통한 수입과 부산물 처리 비용 감축으로 개발 이익을 향상시킨다는 점이다(Mitchell *et al.*, 2004). 해외의 경우, 광산개발 허가를 신청할 때 생산량에 따른 부산물 발생량을 추산하고 이에 대한 활용방안을 제시하여 개발허가를 받도록 규정하고 있으며(Heikkinen *et al.*, 2008), 토목분야의 도로 기반재와 복토재, 차량소음 저감을 위한 방음벽체, 터널과 공동 라이닝 후방의 충전제, 건축의 내장재와 외장재, 광산 채굴지에서 발생한 산성광산 배수의 중화재, 폐광 후 산지 복원과 안정화 등 다양한 용도로 활용하고 있다.

국내에서도 광산 부산물의 재활용에 관한 다양한 연구가 수행되었는데, 석회석 광산의 저품위 부산물을 굵은 골재로 활용하여 고강도 콘크리트의 유동성, 공기량 및 압축강도 등의 시공특성을 검토하였다(Han and Kim, 2015). 이외에도, 폐석회석 미분말과 산업부산물인 건식 배연탈황석고 및 부산생석회 등을 원료로 하여 수화, 가공처리 및 배합을 통하여 아스팔트 콘크리트 박리방지제로서의 적용 가능성을 검토한 연구(Park, 2019)와 폐석회석 미분말을 시멘트 대체재료로서의 활용 가능성을 파악하기 위해 석회석 미분말의 분말도 및 치환율 변화에 따른 콘크리트의 특성 분석에 관한 연구도 수행되었다(Ryu and Woo, 2007). 석탄부산물을 대상으로도 콘크리트용 부순 골재, 역청포장 혼합물용 골재 및 보조기층재 등과 같은 건설재료로의 활용 가능성에 관한 연구(Hyun *et al.*, 2005), 발포유리 제조(Lim *et al.*, 2011)와 포틀랜드시멘트의 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 원료 물질로서 활용 가능성을 검토한 연구 결과(Kim *et al.*, 2006) 등이 발표되었다.

이러한 연구 결과들에도 불구하고 여러 법적 규제 등으로 인하여 국내에서 광산 부산물을 활용한 사업화 사례는 드문 반면, 국외의 경우에는 정부와 지자체가 주도하여 광산 부산물을 적극적으로 활용하고 있다. 일례로, 2013~2014년 핀란드 지질조사국(Geological Survey of Finland)은 Savonia 대학과 공동으로 광산 부산물을 지역의 사회적 생산기반, 즉 댐·항만·발전소·통신 시설 등의 산업 기반 및

학교·병원·공원 등의 사회복지·환경 시설 건설에 소요되는 골재로서 활용하는 방안에 대한 프로젝트를 수행하였다(Savonia, 2013). 이 프로젝트는 유럽연합 지역개발자금의 지원을 받아 수행한 것으로, 토목건설 분야의 골재 활용, 부지 조성계획 수립, 골재 판매망 설계 등 지역의 갱내 및 노천 채광장에서 발생하는 부산물들에 대한 종합적인 관리시스템 구축을 주요 내용으로 하였다. 미국은 광업권 허가 전에 폐기물 처리에 대한 계획서를 제출하도록 규정하고 있으며, 주정부와 시민단체가 주도하여 광산폐기물 관리실태에 대한 정기적인 조사를 시행하고 있다. 광산폐기물의 대부분은 건물과 도로의 건설 골재로 사용되고, 광미는 타일이나 유리, 콘크리트 생산 등에 재활용하고 있다(Omar *et al.*, 2012). 캐나다는 광종별로 발생하는 부산물을 대상으로 중량 당 유해물질 함량의 기준치를 설정하여 이를 충족하면 도로 건설용 재료로 사용되거나 건설용 골재로 판매하고 있다(Omar *et al.*, 2012).

최근 정부는 「자원순환법」을 「순환경제사회 전환 촉진법」으로 개정하였으며, 이 법은 생산·소비·유통 등 제품의 전과정에서 자원을 효율적으로 이용하고 폐기물의 발생을 최대한 억제하며 발생된 폐기물의 순환이용을 촉진하여 지속가능한 순환경제사회를 만들기 위함을 목적으로 한다. 또한 관련 법령인 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에서도 폐기물의 발생을 억제하고 재활용을 촉진하는 등 자원을 순환적으로 이용하도록 함으로써 환경의 보전과 국민경제의 건전한 발전에 이바지하는 것을 목적으로 한다고 명시하고 있다(KLIC, 2023). 따라서, 채굴 및 선별과정에서 발생하는 광산 부산물들을 순환자원으로 분류하여 활용하는 것은 지속가능한 자원산업의 발전뿐만 아니라 국가 자원의 합리적이고 효율적인 활용을 위해서도 조속히 해결되어야 한다.

## 석회석 광산의 생산량과 부산물발생 현황

국내 비금속 광물자원으로는 석회석, 규석, 납석, 장석 등이 있으며, 이 중 석회석이 가장 대표적이다. 국내 매장량은 약 115억 톤 정도로 보고되고 있으며, 백운석과 대리석을 포함하면 약 130억 톤에 이른다(Kim *et al.*, 2015). 석회석은 강원도와 충청북도에서 전체 생산량의 95% 이상을 생산하고 있으며(Kim *et al.*, 2015), 한국지질자원연구원에서 운영하는 광물자원통계포털에서는 2012~2021년 기간 중 강원지역 55개소 광산에서 약 130백만 톤, 충북지역 33개소 광산에서 약 47백만 톤의 부산물이 발생한 것으로 추정된다(Table 1).

**Table 1.** Limestone production and waste rock occurrence in Gangwon and Chungbuk (KIGAM, 2023)

Year	Gangwon		Chungbuk	
	Production (MT)	Waste rock (MT)	Production (MT)	Waste rock (MT)
2012	62,012,665	12,402,533	21,170,616	4,234,123
2013	61,750,649	12,350,130	23,133,961	4,626,792
2014	65,664,632	13,132,926	21,737,987	4,347,597
2015	66,052,680	13,210,536	23,697,611	4,739,522
2016	67,659,510	13,531,902	25,475,782	5,095,156
2017	69,785,235	13,957,047	25,334,193	5,066,839
2018	65,502,636	13,100,527	23,785,012	4,757,002
2019	63,329,802	12,665,960	23,468,998	4,693,800
2020	59,750,829	11,950,166	22,135,034	4,427,007
2021	63,235,316	12,647,063	23,266,195	4,653,239
Total	644,743,954	128,948,790	233,205,389	46,641,077

### 광산현장 설문조사

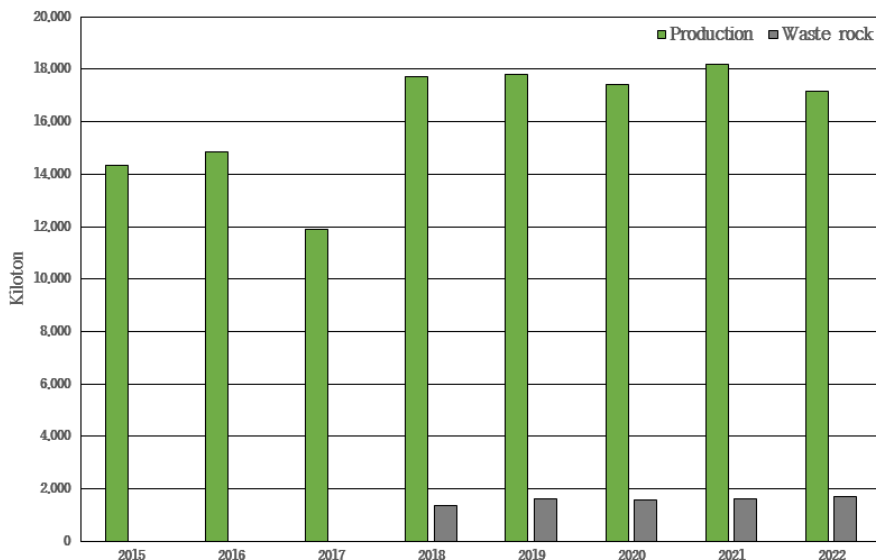
본 연구에서는 한국광업협회와 공동으로 47개의 석회석 및 백운석 광산을 대상으로 최근 5년간의 부산물 발생 및 관리 실태에 관한 설문조사를 수행하였다.

### 갱내채광 광산

Fig. 1은 34개소 갱내채광 광산의 석회석 생산량과 부산물 발생량을 나타낸 것이다. 석회석 생산량은 설문조사의 결과와 2018년에 발간된 광업편람을 참조하여 8년간의 자료를 반영하였고, 부산물 발생량은 설문조사 결과인 5년간의 자료를 반영하였다. 최근 8년간의 평균 생산량은 16,181천 톤이며, 기간별 자료의 출처가 상이하긴 하지만 갱내채광에 의한 생산량이 과거에 비해 약간 증가한 것으로 볼 수 있다. 최근 5년간의 평균 부산물 발생량은 1,571천 톤으로 조사되었으며 생산량 대비 부산물 발생 비율은 약 9%이다. 발생한 부산물의 57%는 갱내 충전용 및 복구용, 29%는 폐석장 적치, 14%는 골재 및 기타 용도로 활용하고 있는 것으로 조사되었다. 또한, 갱내채광 광산에서의 부산물 누적처리량은 약 17,971천 톤이다.

### 노천채광 광산

Fig. 2는 13개소 노천채광 광산에서의 석회석 생산량과 부산물 발생량을 나타낸다. 갱내채광과 마찬가지로 생산량은 8년간의 자료를 반영하였고 부산물 발생량은 5년간의 자료를 반영하였다. 최근 8년간 평균 생산량은 44,820천 톤이며 생산량은 점차 감소하는 추세이다. 이는 최근 환경문제에 의한 노천채광의 개발 제한과 고품위 광석을 채광하기 위해 갱내채광으로 전환되고 있기 때문으로 분석된다. 부산물 발생량은 연간 9,923천 톤으로서 생산량 대비 부산물 발생 비율은 약 24%에 달하며, 현재의 누적처리량은 약 120,520천 톤으로 조사되었다.



**Fig. 1.** Limestone production and waste rock occurrence in underground mines.

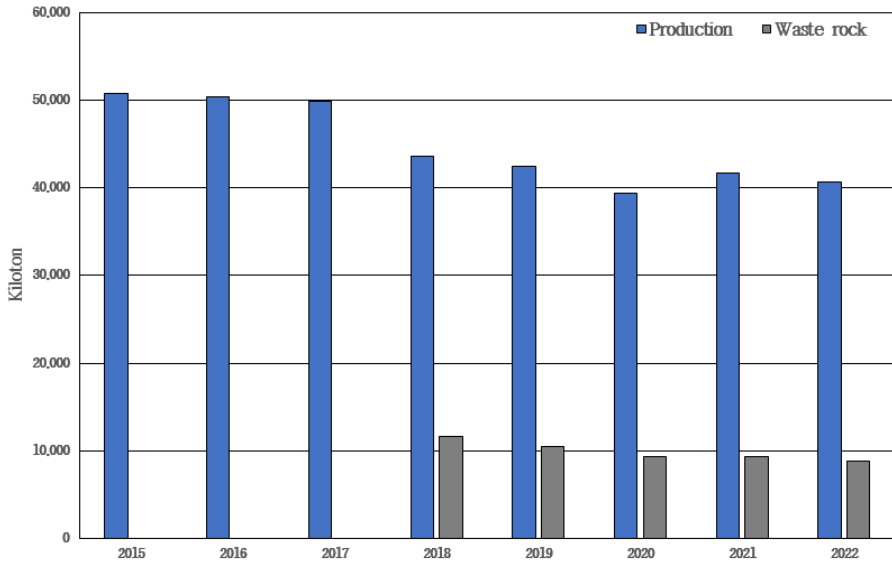


Fig. 2. Limestone production and waste rock occurrence in open-pit mines.

노천채광 광산에서는 발생한 부산물의 60%를 폐석장에 적치하며 27%는 광산 복구용, 그 외 13%가 골재 및 기타 용도로 활용하고 있는 것으로 조사되었다. 부산물의 증가로 인해 적치장의 면적은 확대되고 있으며 추가 적치장 개발 등으로 산림 훼손과 비용이 증대하여 광업경영에 어려움이 가중되고 있는 상황이다.

### 부산물의 관리현황

강원지역 3개소, 충북지역 5개소를 대표광산으로 선정하고 개발현황과 부산물 관리현황 등을 조사하였다. 이들 광산에 대한 현장조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

#### 강원 삼척 D광산 D사업소

광산은 풍춘층 상부 고품위인 백색 석회암대와 암회색 석회암대로 구성되며, 층후는 50~60 m이나 지역적 차이를 보이고 최상부 백색 석회암대는 층리 발달이 양호하다. 세립 내지 중립질 결정질 석회암이 다수이며 극세립-세립질 석회암으로 대체로 층리발달이 미약한 과상 석회암이 우세하다. 현재 갱내채광에 의한 생산량은 원석기준 연간 590천 톤이며, 원석 채취량 대비 8%의 부산물이 발생하고 있다. 부산물은 모두 갱내 적치 및 충전용으로 사용하고 있어 부산물 처리 및 적치에 관한 문제는 없는 상황이다.

#### 강원 강릉 H광산

광산은 선캠브리아누대의 변성퇴적암류인 태백산층, 하



Fig. 3. Waste rock piles at H mine, Kangwon.

부 고생대 조선누층군의 장산층, 묘봉층, 풍춘층과 두위봉형 조선누층군의 화절층, 동점층, 두무동층에 대비되는 원평층, 오르도비스의 막동층과 대비되는 석빙산층과 이를 관입한 여러 종류의 화강암체 석영반암, 암맥으로 구성되어 있다. 갱내 및 노천채광을 병행하며 생산량은 원석기준 연간 8,000천 톤이고 원석 채취량 대비 63%인 5,000천 톤의 부산물이 발생하고 있다. 현재 폐석장의 누적적치량은 약 60,000천 톤 이상이다(Fig. 3). 부산물 일부는 골재로 활용한다.

#### 강원 삼척 S광산

광산은 두위봉형 조선누층군 중 백운산 향사의 북익부에 위치하며 동쪽에 발달하는 오십천 단층을 중심으로 선캠브리아기 태백산변성암복합체를 기저로 고생대 캠브리아기

의 장산층, 요봉층, 화절층 및 오오도비스기의 동점층, 두무동층, 막동층과 이들을 관입한 백악기 석영반암 및 암맥류로 구성된다. 갱내 및 노천채광 광산으로서 연간 4,500천 톤의 생산량 중 2,000천 톤은 시멘트용, 2,500천 톤은 제철용으로 반출하고 있다. 채광량의 약 10%의 부산물이 발생하지만 노천채광장 하부 채굴적에 매립하므로 현재까지는 부산물 처리에 관한 큰 어려움은 없다.

#### 충북 단양 S광산

광산은 홍월리층의 고품위대가 백운석질과 석회석 퇴적광산을 이루고 있다. 석회석 광산은 비결정질 백운석과 소량의 방해석, 점토광물, 탄질물 및 처어트로 구성되며 담회색, 백색 및 암회색대가 호층을 이루고 괴상으로 산출된다. 갱내 및 노천채광을 병행하고 있으며 생산량은 원석기준 연간 800천 톤이다. 원석 채취량 대비 7~8%의 부산물이 발생하며 비료 생산과 골재로 활용하고 있어 부산물 처리에 관한 어려움은 없는 상황이다.

#### 충북 단양 D광산 S사업소

광산은 영흥층 하부 백운암 우세대를 대상으로 하는 고품위 백운석으로서, 습곡에 의하여 반복되어 광산의 전 구역에 걸쳐 넓게 분포한다. 주 구성암석은 암회색 백운암, 담회색 백운암, 녹회색 석회질 슬레이트, 회색 및 암회색 판상 석회암, 담회색 괴상 석회암 등이다. 갱내 및 노천채광을 병행하고 있으며 생산량은 원석기준 연간 400천 톤이다. 원

석 채취량 대비 약 3~5%의 부산물이 발생하는데, CaO 53% 이상이면 제철 및 제강용으로 사용하고 그 이하는 시멘트용으로 판매하고 있다. 현재 약 40천 톤의 부산물이 노천채광장 하부에 매립되어 있으며 야적장에 적치된 부산물은 거의 없다.

#### 충북 제천 D광산 J사업소

광산은 조선누층군의 석회암대를 기반으로 최상부 지층인 영흥층과 이를 부정합으로 덮는 석탄기의 갑산층으로 구성되어 있으며 후기 관입 암맥류도 존재한다. 영흥층의 구성암석은 주로 백운암이고 폭은 10~20 m를 갖는 판상석회암과 박층의 셰일이 협재한다. 현재 갱내채광으로 개발하고 있으며 생산량은 원석기준 연간 590천 톤이다. 원석 채취량 대비 8%의 부산물이 발생하고, 모두 갱내 적치 및 충전용으로 사용한다.

#### 충북 제천 A광산

본 광산의 광산은 고생대 캄브리아기 삼방산층, 마차리층, 홍월리층과 중생대 백악기로 추정되는 석영 반암류와 일부의 산성맥암, 신생대 제4기의 충적층으로 구성된다. 삼방산층은 주로 녹회색셰일, 녹색사암, 사암 등으로 구성된다. 본 광산은 현재 노천채광을 수행하고 있으며 생산량은 원석기준 연간 6,300천 톤, 원석 채취량 대비 22%의 부산물이 발생하고 있다. 부산물 중 일부는 골재로 활용하고 있으며 나머지는 폐석장에 적치하고 있다.

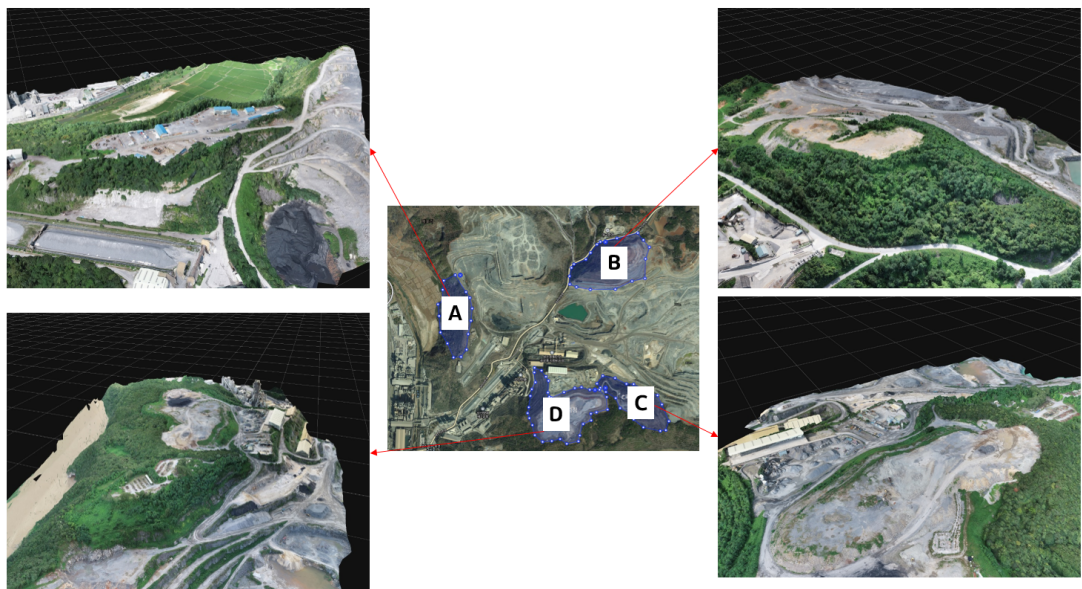


Fig. 4. Waste rock piles at S mine, Chungbuk.

**충북 단양 S광산**

광산은 영월형 조선누층군으로 구분되는 삼태산층(문곡층)과 영흥층, 중생대 하부 대동누층군의 반송층, 이들을 관입한 석영반암 및 암맥류로 구성되며 구조적으로 평창단층 서부에 해당된다. 현재 노천채광으로 개발하고 있으며 생산량은 원석기준 연간 8,400천 톤이다. 원석 채취량 대비 13%인 1,100천 톤의 부산물이 발생하는데, 800천 톤은 골재와 조경석으로 활용하고 나머지 300천 톤은 폐석장에 적치하고 있다. 다이크나 점토 등의 이물질이 부산물에 협재되어 재활용에 어려움이 있다. 현재 A, B, C, D, 4곳의 폐석장에 약 30,000천 톤의 부산물이 적치되어 있다(Fig. 4).

**부산물의 화학적 및 광물학적 특성 분석**

충북 단양에 소재한 S광산과 강원 강릉 H광산의 부산물 시료를 채취하여 화학적 특성과 광물학적 특성을 분석하였다. 석회석 광산에 적치된 부산물들은 CaCO<sub>3</sub>의 함량이 높아서 기능성 골재를 비롯한 건설분야 외에도 농업(토양 개량제; 비료 및 산도 조절), 화학산업(공정에서 발생하는 황산 오염폐수의 중화 등), 수처리(pH 조절, 침전제 등) 등 여러 분야에서 활용될 수 있다. 관련 특허들도 다수 등록되어 있긴 하지만, 사업화에 성공한 사례는 비교적 드문 것으로 확인된다. 또한, 일반 토석류와 혼합된 상태로 발생하는 부산물은 재활용 목적에 따라 사전에 선별·파쇄한 후 적치하는 것이 효과적이다.

**pH 특성**

환경부에서 제시한 토양오염공정시험법에 따라 시료를 2 mm 이하로 체질한 후, 각각 1 g을 취하여 탈이온수(deionized water) 5 mL와 혼합하였다. 25 rpm으로 1시간 동안 교반 후 상등액의 pH를 pH 4, 7, 10 표준용액으로 보정된 pH 측정기를 이용하여 분석하였다. S광산과 H광산 부산물의 pH는 각각 9.5, 9.2로 확인되었다(Table 2). 석회석의 탄산염(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)이 수소이온과 반응하여 중탄산(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)을 형성함에 따라 pH가 높아지며, 산성토양에서 중금속의 지구화학적 이동성을 감소시키기 위한 토양 안정화제로 사용될 수 있는 가능성을 나타낸다. 또한, 산성광산 배수 등의 오염수를 중화하고 중금속 이온의 침전을 유도하기 위해서도 석회석 부산물을 활용할 수 있다.

**주성분 원소 특성**

X선 형광분석기(ZSX Primus II, Rigaku)를 이용해 200 mesh 이하로 분쇄한 시료의 주성분 원소를 분석하였다. XRF 분석 결과, S광산과 H광산 시료는 Ca가 주된 원소이며, CaO 함량은 각각 51.0%, 49.7%로 분석되었다(Table

**Table 2.** Chemical properties of waste rock from S and H mines

Properties (%, except pH)	S mine	H mine
pH	9.5	9.2
CO <sub>2</sub>	19.6	17.3
Na <sub>2</sub> O	0.0	0.6
MgO	2.4	9.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2	4.4
SiO <sub>2</sub>	21.1	16.4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.0	0.0
SO <sub>3</sub>	0.1	0.0
Cl	0.0	0.0
K <sub>2</sub> O	0.9	1.2
CaO	51.0	49.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4	1.0
SrO	0.1	0.0
TiO <sub>2</sub>	0.1	0.0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0	0.0
MnO	0.0	0.1
ZnO	0.0	0.0
Rb <sub>2</sub> O	0.0	0.0
Sum	100	100

2). 한편 MgO의 함량은 부산물에 포함된 CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>의 영향으로 H광산의 시료가 상대적으로 높게 나타난다.

**광물학적 특성**

X선 회절분석(X-ray Diffraction; D2 PHASER, Bruker)에 의해 S광산과 H광산에서 채취한 시료의 주요 광물상을 분석하였다. 현장에서 채취한 시료를 200 mesh 이하로 분쇄한 후, 분석각은 10~160° 구간에서 0.02° 간격으로 측정하였다. 주사시간 1초, Co tube(with 1.54104 Å), 가속전류 10 mA, 가속전압 30 kV의 조건에서 측정을 실시하고 XRD 분석프로그램(HighScore Plus 3.0, PANalytical)을 이용하여 측정된 피크를 동정하였다.

XRD 분석 결과, S광산에서 채취한 부산물은 CaCO<sub>3</sub>(calcite)가 주된 구성광물인 것으로 확인되어 XRF 분석 결과에서 CaO의 함량이 높게 나타난 것과 일치하는 결과를 보여주었다(Fig. 5). H광산의 부산물은 CaCO<sub>3</sub> 뿐만 아니라 CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(dolomite)도 존재하며, 석영(quartz), 흑운모(biotite), 백운모(muscovite) 등의 조암광물 피크가 확인되었다(Fig. 6).

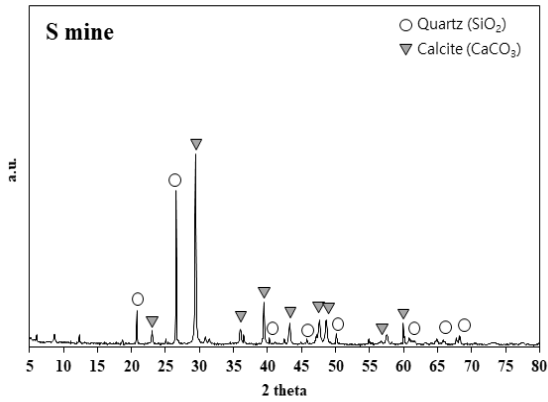


Fig. 5. Result of X-ray diffraction analysis (S mine, Chungbuk).

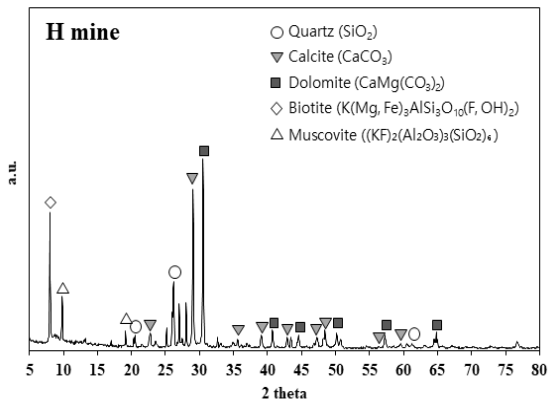


Fig. 6. Result of X-ray diffraction analysis (H mine, Kangwon).

### 유출수의 수질 분석

광산 부산물이 주변의 토양과 수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 충청남도 S광산의 물 시료를 대상으로 중금속 분석을 수행하였고 충청북도 제천시 D광산 J사업소와 강원도 삼척시 S광산의 물 시료를 전문분석기관에 의뢰하여 수질 분석을 수행하였다.

### 중금속 분석

충북 단양군에 소재한 S광산 내 B지구와 C지구에 위치한 집수정에 있는 물을 대상으로 화학적 특성을 확인하였다. 물 시료는 현장에서 0.45 μm 필터로 여과하여 채수하였으며, 집수정의 pH는 현장에서 측정하여 기록하였다. 시료 내 주요 중금속(As, Cd, Cu, Pb, Zn)의 농도가 환경부에서 제시한 배출허용기준에 만족하는지 확인하기 위해 ICP-MS를 이용해 정량분석을 수행하였다.

물 시료의 화학적 특성을 확인한 결과, 두 집수정의 pH는 8.1로 배출허용기준인 5.8~8.6에 만족하는 것으로 나타났다(Table 3). 이는 일반적인 금속광산 갯내수의 pH가 산성인 것과 대비되는 결과이다. 집수정의 pH가 약알칼리성을 띠는 결과는 석회석의 주 광물인 CaCO<sub>3</sub>의 용해로 발생되는 중탄산(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 영향에 의한 것으로 판단된다. 두 집수정의 물 시료 내 중금속의 농도는 배출허용기준 대비 매우 낮은 값을 보여주었다. As는 주로 금속광산에 다량 존재하는 황철석(pyrite; FeS<sub>2</sub>), 황비철석(arsenopyrite; FeAsS) 등에 함유되어 있으며, 특히 중금속은 pH 7 이상에서 대부분 수산화물(hydroxide) 형태로 침전되는 것으로 알려져 있다. 따라서 집수정 내 중금속의 농도가 낮은 원인은 갯내수의 높은 pH의 영향도 있지만, 일반적으로 석회석과 중금속과의 연관성이 낮기 때문인 것으로 판단된다.

### 갯내수 수질분석

충북 제천시 D광산 J사업소와 강원도 삼척시 S광산의 물 시료를 대상으로 수소이온농도(pH), 총유기탄소(TOC), 부유물질(SS), 음이온계면활성제(ABS), 광유류(n-Hexane)에 대한 분석을 진행하였다.

Table 4는 D광산 J사업소의 물 시료 분석 결과이다. 물환경보전법 공공폐수처리시설의 방류수 수질기준에 모두 만족하는 것으로 분석되었다. Table 5에 나타난 S광산의 경우 부유물질을 제외한 항목들은 모두 기준치를 충족하는 것으로 분석되었다. 부유물질이 높게 측정된 이유는 시료 채취일을 기준으로 해당 지역에 내린 집중강우의 영향으로 판단된다.

Table 3. Results of heavy metal content analysis (S mine, Chungbuk)

(μg/L)	As	Cd	Cu	Pb	Zn	pH
B	0.51	0.1	2.15	0.74	1.8	8.1
C	0.48	0.03	0.75	0.41	1.71	8.1
Acceptable standards	100	20	500	200	1000	5.8~8.6

**Table 4.** Results of water quality analysis (D mine, Chungbuk)

	Unit	Reference	Result
pH	-	10 or less	7.8
TOC	mg/L	10 or less	1.0
SS	mg/L	10 or less	6.7
ABS	mg/L	-	below quantifiable limit
n-Hexane	mg/L	-	below quantifiable limit

**Table 5.** Results of water quality analysis (S mine, Kangwon)

	Unit	Reference	Result
pH	-	10 or less	7.5
TOC	mg/L	10 or less	0.8
SS	mg/L	10 or less	19.4
ABS	mg/L	-	below quantifiable limit
n-Hexane	mg/L	-	below quantifiable limit

### 부산물의 골재활용 가능성 평가

국토교통부에서 발표한 2023년 국내 골재 수요는 238,987 천m<sup>3</sup>으로, 모래는 전체의 48%인 114,714 천m<sup>3</sup>, 자갈은 52%인 124,273 천m<sup>3</sup>에 달한다(MOLIT, 2023). 육상이나 하천골재 등의 채취 여건 악화에 따라 산림골재 외에도 부순골재 및 순환골재 등의 대체골재 활용이 확대되고 있다. 골재수급은 지역별 자체 공급을 원칙으로 하되 부족분은 인근 지역의 반·출입 조정으로 권역별 수급계획을 세우며, 지역별 수요는 수도권 41.7%, 경상권 25.7%, 충청권 14.5%, 전라권 11.0%, 강원 4.9%, 그리고 제주 2.2% 순이다. 천연 자원인 산림골재의 공급계획은 105,491 천m<sup>3</sup>로 총 공급량의 41.8%에 달한다. 또한 건설공사 등에서 발생하는 부수적인 토석 등의 선별·파쇄골재, 그리고 폐콘크리트의 순환골재 등이 46.7%를 차지한다.

석회석의 주 구성광물인 방해석의 밀도는 2.71 g/cm<sup>3</sup>이지만 석회석의 밀도는 공극이나 불순물 등의 영향으로 다소 저하된 약 2.6~2.7 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.2~0.8% 정도이며, 다른 골재용 암석과 비교하면 변동 폭이 적다(Han and Kim, 2015). 골재로 사용되는 석회석의 압축강도는 100~200 MPa, 인장강도 8~12 MPa 정도의 값을 나타낸다(Kim, 2016). 현재 일부 석회석 광산에서 레미콘 원료로서 부산물을 파쇄하여 잔골재와 굵은골재를 공급하고 있으나 관련 법규의 제약으로 그 비중은 낮은 편이다. 최근 들어 국내·외 초고층 건물 프로젝트에 석회암 골재를 사용하여 제조한 초고강도 콘크리트를 사용한 사례가 보고된 바 있다. 두바이 버즈그 칼리 파 시공에서 설계기준강도 80 MPa급 고강도 콘크리트 제

**Table 6.** Aggregate test results of mine wastes (D mine, Kangwon)

	Unit	Reference	Result
Dry density	g/cm <sup>3</sup>	2.5 or more	2.67
Absorption	%	3.0 or less	0.57
Under 0.08 mm	%	1.0 or less	0.1
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%	12 or less	1.0
Abrasion	%	40 or less	21.4

**Table 7.** Aggregate test results of mine wastes (H mine, Kangwon)

	Unit	Reference	Result
Dry density	g/cm <sup>3</sup>	2.5 or more	2.76
Absorption	%	3.0 or less	0.51
Under 0.08 mm	%	1.0 or less	0.5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%	12 or less	2.2
Abrasion	%	40 or less	20.9

**Table 8.** Aggregate test results of mine wastes (D mine, Chungbuk)

	Unit	Reference	Result
Dry density	g/cm <sup>3</sup>	2.5 or more	2.58
Absorption	%	3.0 or less	0.7
Under 0.08 mm	%	1.0 or less	0.5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%	12 or less	2.8
Abrasion	%	40 or less	24.7

**Table 9.** Aggregate test results of mine wastes (S mine, Chungbuk)

	Unit	Reference	Result
Dry density	g/cm <sup>3</sup>	2.5 or more	2.64
Absorption	%	3.0 or less	0.69
Under 0.08 mm	%	1.0 or less	0.2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%	12 or less	1.6
Abrasion	%	40 or less	25.1

조에 경질의 석회암 골재가 사용되었으며, 국내 잠실의 초고층 프로젝트 현장에서도 석회암 골재를 사용한 초고강도 콘크리트로 시공한 사례가 있다(KCA, 2023).

미국의 총 골재 생산량에서 석회석 골재가 차지하는 비율은 2000년대 기준으로 약 41%를 차지하고 있으며, 부순



골재 생산량에서 차지하는 비율은 약 71%로 매우 높은 수준으로 나타났다(KCA, 2023). 영국의 부순골재는 연간 약 1억 톤 내외로 생산되고, 2012년 기준으로 콘크리트용 부순골재 중에서 석회석 골재가 차지하는 비율은 약 67% 수준으로 가장 높고, 화성암 26.8%, 사암 6.2%의 순으로 생산되었다(KCA, 2023). 일본은 1990년대에 콘크리트용 골재의 총 수요량이 감소하였음에도 불구하고 석회석 골재가 점유하는 비율은 지속적으로 증가하여 2002년에는 약 8.5%, 2012년에는 약 25%에 이르고 있어 점차 증가하는 추세에 있다(KCA, 2023).

### 골재 활용성 평가시험

강원 지역의 D광산 D사업소와 H광산, 충북 지역의 D광산 J사업소와 S광산의 부산물을 채취한 후, 골재채취법 제 22조의4에 의거하여 실시하였다. 건조 상태의 밀도, 흡수율, 0.08 mm 체 통과량, 안정성( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), 마모율로 총 5개의 항목으로 시험을 진행하였으며, 4개소 모두 기준치를 상회하여 골재로서의 활용이 적합한 것으로 나타났다(Tables 6~9).

## 결론

국내 석회석 및 백운석 광산을 대상으로 광석 생산량 대비 부산물 발생현황을 조사한 결과, 갱내채광 광산의 경우 최근 8년간 평균 광석 생산량은 연 16,181천 톤이며 생산량 대비 약 9%의 부산물이 발생하고, 노천채광 광산의 생산량은 연 44,820천 톤이며 약 24%의 부산물이 발생하고 있다. 환경문제 등에 의한 노천채광의 제한과 고품위 광석을 채광하기 위한 갱내채광 확대에 따라 갱내채광 광산의 생산량이 점차 증가하고 노천채광 광산의 생산량은 감소하고 있음이 확인되었다.

부산물의 pH, XRF, XRD 분석 결과, 대부분 CaO가 약 50% 함유된 석회석 혹은 돌로마이트로서, 상당히 높은 calcite 함량을 유지하고 있음을 확인하였다. 따라서 석회질 비료 및 산도 조절을 위한 토양 개량제나 화학 공정에서 발생하는 오염수의 중화제, 또는 중금속 오염수의 pH 조절과 중금속 침전제 등 환경복원 사업에도 활용이 가능할 것으로 판단된다. 골재 활용성 평가를 위한 품질 검사에서도 굵은 골재의 기준 물성치를 상회하며, 갱내수 수질은 물환경보전법에 따른 공공폐수처리시설의 방류수질 기준을 충족하고 부산물장의 유출수는 강우기간 중 부유물질의 농도가 일시적으로 높게 측정되는 경우도 확인되었다.

갱내채광 광산은 채굴작업에서 발생하는 부산물의 대부분을 채굴적 충전이나 현장 복구용으로 활용하고 있는 반면에 노천채광 광산은 대부분 야외 폐석장에 적치하고 있

어 적치장 확보나 주변의 민원 등으로 인한 어려움이 가중되고 있으므로 지속가능한 광업 경영을 위해서는 기능성 골재나 산업원료 등 다양한 분야에서 활용하기 위한 기술 개발이 시급하다. 또한 현재 적용되고 있는 산지관리법이나 폐기물관리법, 골재채취법 등 관련 법령에 대한 합리적인 개선도 필요하다. 이를 통해 천연의 산림골재 공급비중을 낮추는 대신 광산에서 발생하는 부산물의 활용을 크게 확대하는 것은 자원순환을 통한 순환경제 구축이라는 국가적 정책 방향과도 부합하는 것으로 판단된다.

한편, 채굴현장에서 발생하는 부산물은 현재 폐기물로 분류되어 있으나, 석회석 광산의 부산물은 주변 토양이나 수질에 미치는 환경적 영향의 가능성은 거의 없고 CaO 함량 기준에만 미치지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 채굴과정에서 발생하는 일부 토석류를 제외하면 광산 폐석이라는 용어보다는 저품위 석회석이나 미활용 자원, 혹은 광업 부산물 등의 적절한 용어로 대체하는 것이 필요하다.

## 사사

본 연구는 2023년도 한국광해광업공단 기술연구사업의 연구과제 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드린다.

## References

- Han, C.G. and Kim, K.H., 2015. Construction performance of high strength concrete utilizing waste limestone coarse aggregates, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 15(6), p.545-551.
- Heikkinen, P.M., Noras, P., and Salminen, R. (eds.), 2008. *Mine closure handbook-environmental techniques for the extractive industries*, Geological Survey of Finland (GTK), 169p.
- Hyun, J.Y., Jeong, S.B., and Kim, B.S., 2005. Utilization possibilities of a digging refuse emitted from domestic coal mine as a raw material for construction, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 42(3), p.243-247.
- Kim, H.S., Hyun, J.Y., Jeong, S.B., Ahn, J.W., and Chae, Y.B., 2006. Utilization of coal-preparation refuse as a raw material for ordinary portland cement, *Resources Recycling*, 43(3), p.243-249.
- Kim, J.Y., Kim, H.S., and You, K.S., 2015. Current state of limestone industry in Korea, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 52(2), p.263-269.
- Kim, K.H., 2016. Use of low-grade limestone for cement industry as concrete aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources*, 11(1), p.20-23.

- Korea Cement Association (KCA), 2023.05.31., <https://www.cement.or.kr>
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2023.05.31., <https://www.kigam.re.kr/mici/>
- Korea Law Information Center (KLIC), 2023.05.31., <https://www.moleg.go.kr>
- Lim, T.Y., Ku, H.W., Hwang, J.H., Kim, J.H., and Kim, J.K., 2011. A study on the fabrication of foamed glass by using refused coal ore and its physical properties, *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 21(6), p.266-273.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2023. Annual Plan of the Domestic Aggregate Demand and Supply, 34p.
- Mitchell, C., Harrison, D.J., Robinson, H.L., and Ghazireh, N., 2004. Minerals from waste: recent BGS and Tarmac experience in finding uses for mine and quarry waste, *Minerals Engineering*, 17(2), p.279-284.
- Omar, O.A., Abd Elhameed, G.D., Sherif, M.A., and Mohamadien, H.A., 2012. Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties, *HBRC Journal*, 8(3), p.193-203.
- Park, B.S., 2019. Performance analysis of asphalt anti-stripping agents recycled by wasted limestone and industrial by-products, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 36(8), p.749-759.
- Ryu, H.G. and Woo, J.K., 2007. An analysis on concrete properties with the fineness of waste limestone, *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, 7(1), p.85-90.
- Savonia, 2013.05.31., [https://codez.savonia.fi/cdio3\\_2013\\_gtk/gtk/en/index.html](https://codez.savonia.fi/cdio3_2013_gtk/gtk/en/index.html)



**백 환 조**

1994년 University of Texas at Austin, 토목공학과 박사

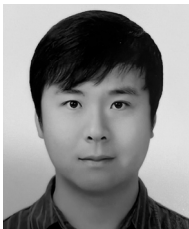
현재 강원대학교 에너지자원공학과 교수  
(E-mail; hwanjo@kangwon.ac.kr)



**김 동 휘**

2021년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학박사

현재 강원대학교 산업기술연구소 박사후연구원  
(E-mail; donghui8714@naver.com)



**정 용 식**

2020년 U. of ARIZONA, Dep. of Mining and Geological engineering

현재 한국광해광업공단 기술연구원 기술개발2팀 차장  
(E-mail; ysjeong@gmail.com)