

## 환경오염 저감을 위한 석회석 광산개발방안에 대한 연구

임한옥<sup>1)</sup> · 김재동<sup>1)</sup> · 백환조<sup>1)</sup>

### A Study on the Mining Method for Limestone Mines with Less Environmental Hazards

Han-Uk Lim, Jae-Dong Kim and Hwan-jo Baek

**ABSTRACT** Open cut mining of limestone is generally considered to be more advantageous than underground mining in recovery, grade control, economics, and safety, but it causes substantial environmental pollutants such as ground vibration, noise, dust. It also changes ground surface and may destroy vegetation. The Halla limestone mine which lies adjacent to Baikdu mountains range is selected for a model study. To reduce environmental hazards, and to conserve original surface and woods, both open cut and underground mining methods must be adopted. In case of sub-level stoping, a unit block of 80m high, 70m wide, and 100~120m long is suggested with an estimated overall recovery of 42%. Some suggestions to reduce the environmental hazards are also included. The followings must be considered in determining the degree of fragmentation ; the discontinuity conditions in the rock mass and the charge concentration both at the bottom and column of the hole. In addition to adopting a barrier wall for reducing environmental hazards, the probable production from underground mining is also discussed.

**Key words** : Less environmental hazards, Sub-level stoping, Degree of fragmentation, Barrier wall.

**초 록** 석회석의 노천 채굴법은 갱내 채굴법에 비하여 채수율, 품위조질, 원가, 안전면에서 유리한 것으로 인식되고 있으나 발파로 인한 지반진동, 소음, 분진 등 환경 오염원을 유발시키며 특히 지형과 산림을 훼손한다. 본고에서는 백두대간에 인접한 한라 석회석 광산을 모델로 설정하고 연구하였다. 환경 오염원을 저감시키고, 원 지형 및 산림의 보존을 위하여 노천 채굴과 함께 갱내 채굴을 동시에 채택할 것을 제의한다. 갱내 채굴의 경우 중단 채굴법을 추천하며 이때 한 광획의 크기는 80(높이)×70(너비)×(100~120m)(연장)이며, 채수율은 약 42%로 예상된다. 환경오염 저감을 위한 대책도 제시하였다. 파쇄입도의 조절을 위하여 암반내 불연속면의 발달 상태를 고려하고, 장약공 밑부분과 중간부분의 장약밀도를 변경해야 한다. 환경오염 저감의 한 방안으로 차폐벽의 채택과 갱내 채굴시 출광 가능량 등을 검토하였다.

**핵심어** : 환경오염저감, 중단채굴법, 파쇄입도, 차폐벽.

## 1. 서 론

석회석은 일명 탄산칼슘이라고도 하며 시멘트는 물론이고, 제철, 제강 및 각종 화학제품의 생산 원료로서 그 용도가 매우 다양하여, 국가기간 산업의 확충과 현대 산업 발전에 있어 필수 불가결한 기초 소재 자원이다.

1980년대 후반이후 광산 경영 수지의 악화로 우리나라 대부분의 금속 및 석탄광산이 휴·폐업된 상태에서 현재 유일하게 가행되고 있는 몇몇 자원중 국가경제에 가장 큰 영향을 미치고 있는 자원이 석회석이다.

이들 석회석 자원의 가채 매장량은 약 137억 톤으로

이중 87% 이상이 강원도에 부존 되어있는 것으로 알려져 있다. 현재 가행중인 광산으로 연간 100만톤 이상을 채굴하는 광산은 11개로서 이중 7개 광산이 강원도에 위치하고 있다. 따라서 석회석 자원의 개발은 강원지역의 경제발전은 물론 지역주민과 밀접한 관계를 갖고 있다.

석회석을 채굴하기 위하여 채택 될 수 있는 개발방식은 크게 노천채굴과 갱내채굴로 구분할 수 있다. 대규모

1)정회원, 강원대학교 지구시스템공학과 교수

원고 접수일 : 1999년 8월 2일

원고 심사완료일 : 1999년 11월 18일

광상은 현재 노천 채굴 방식을 채택하고 있으며, 제철, 제강 및 화학제품의 원료로 이용되는 비교적 고품위 소규모 석회석만이 갱내 채굴 방식에 의해 개발되고 있다.

노천 채굴 방식에 의한 개발은 지형, 지질의 변화는 물론이고, 토사의 유출, 발파로 인한 진동 및 소음의 발생, 탁·오수로 인한 수질오염 등의 문제점은 물론이고, 산림복구에 따른 여러 가지 어려움이 따른다.

최근 개발과 보전이라는 상대적 논리의 다름이외에도 환경 보전에 대한 인식의 고조와 강화로 시멘트용 석회석의 개발 즉 노천 채굴은 더욱 더 어려워지고 있는 현실이다. 특히 최근에 논의되고 있는 백두대간의 자연림 보존문제로 앞으로 석회석의 노천 채굴은 더욱 어려워질 것으로 예상된다.

국내에서는 지금까지 여러 사람들에 의해<sup>14)</sup>, 위에 제시된 문제점들을 효과적으로 해결하고, 그 대응방안을 마련하기 위하여 부분적인 과제에 대한 연구는 수행되고 있으나, 종합적인 연구는 수행되지 못한 실정이다. 예를 들면 석회석의 개발을 종래 노천 채굴 방식에서 갱내 방식으로 전환을 위한 몇몇 보고서와<sup>15)</sup> 채석장의 환경 영향 평가기준<sup>16)</sup>, 석회석 광산 개발상의 문제점 및 대책<sup>17)</sup>, 관계전문가 워크샵<sup>18)</sup> 등이 발표 또는 개최된바 있다.

따라서 본 연구에서는 광황에 따라 갱내 채굴법을 선정하던가 또는 불가피하게 노천 채굴법을 채택하더라도 환경오염을 저감시킬 수 있는 대책을 제시하는데 목적이 있다. 그리고 현행 노천 채굴에서 발파상 문제점, 갱내 또는 노천 채굴의 개발 기준 설정시 검토사항 등에 대해서도 검토하였다.

연구대상 광상으로는 광상의 부존조건, 현행 개발 현황 등을 고려하여 한라시멘트(주) 옥계현장을 설정하였으며, 본 과제와 관련되어 부분적으로 이미 보고된 내용까지도 포함하여 종합적인 결론을 도출하였다.

## 2. 환경오염 저감을 위한 석회석의 갱내 채굴법

노천 채굴 또는 갱내 채굴 방식의 선정은 광상의 부존조건에 따라 지하자원을 최대한 회수 가능한 방법을 채택하여야 한다. 그러나 한라광산은 광구의 일부가 백두대간(白頭大幹)과 접하고 있고, 부존구역이 비교적 광활하며, 또한 비교적 험준한 산악지에 위치하고 있어 전체구역을 노천 채굴로 개발하기보다는 노천 채굴과 갱내 채굴을 병행하는 것이 환경보전상 합리적일 것으로 판단하

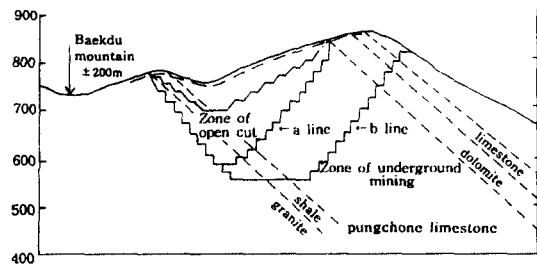


Fig. 1. Section view of D block in Halla mine

였기 때문이다.

또한 광상의 부존이 D 채구를 기준할 때 Fig. 1과 같이 존재하고 있어 지표·지형 변화를 최소화하면서, 최대의 채굴량을 확보할 수 있기 때문이다.

### 2.1. 광상의 부존 조건과 채굴법 선정

#### 2.1.1 광상의 부존 조건

한라광산(옥계)의 지질은 캄브리아기 양덕층군의 묘봉층과 조선 누층군의 대석회암층군에 속하는 묘봉층, 원평층 및 이들 지층을 후기에 관입한 화강암과 기타 암맥류로 구성된다.

위 지층들은 북동쪽에서 남서쪽으로 서로 평행하게 대상(帶狀)으로 분포하고, 남동쪽에서 묘봉층, 풍촌층, 원평층 순서로 북쪽으로 경사져 있으며, 전체 지층의 주향은 N40°~50°E, 경사는 대체로 30~40°NW이다.

묘봉층은 Fig. 1과 같이 본 지역의 최하부 지층으로 주로 점판암(slate)으로 구성되어 있고, 풍촌층은 상부 고품위 석회암대, 백운석대 및 중·하부 석회암대 등 3개의 암상으로 구성되며, 원평층은 주로 점판암, 니질 석회암 및 규암으로 구성된다.

채굴대상은 상부 고품위대와 중·하부 석회암대 전체이다. 고품위대의 두께는 약 20~30m 내외이고 백운석대 및 중·하부 석회암대의 두께는 대체로 40~50m 및 300m 내외이다.

고품위대는 조립질의 석회암으로 유백색 내지 백색을 띤다. 석빙산 17호 광구 내 채광장에서 석빙산 49호에 이르기까지 그 연장이 약 7.5 km로서 CaO가 52.4~54.5%인 고품위대이다. 그러나 현재 가행중인 구간의 총연장은 약 3.5 km 정도이다.

백운석대의 연장 역시 상부 고품위대와 같으며 품위는 대체로 MgO가 20.1~20.2%이다.

한편 중·하부 석회암대는 풍촌층의 최하위로서 암색이

Table 1. Physical properties of rock at Halla Mine

Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	P-wave velocity (m/sec)	Uni. comp. strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Young's modulus ( $\times 10^3$ kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio	Triaxial Test		Remark
							C(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (degree)	
2.71	0.19	4,350	930	90	4.91	0.26	195	44	Pungchon f.limestone
2.72	0.16	5,120	1320	130	6.31	0.23	239	54	Myobong f.shale

담홍색, 담회색, 백색, 유백색등으로 입도는 중립질이 우세하다. 채광장에서는 화강암의 관입으로 석류석, 규회석 등의 스퀴른 광물 및 규화나 변질대가 부분적으로 관찰되어 선택채굴이 실시되고 이로 인해 가채율이 낮아지게 된다. 품위는 대체로 CaO가 46.7~52.9%, MgO는 3% 미만, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 1.52% 이하, SiO<sub>2</sub>는 0.90~7.60%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1% 미만이다.

한편 채굴대상 암반의 등급을 분류하기 위하여 채굴지역 5개소에서 총 20개의 시료를 채취하고 이들에 대한 기초 물성 실험을 실시한 결과를 요약하면 Table 1과 같다.

풍촌 석회암 및 묘봉 셰일의 일축압축강도는 930~1320 kgf/cm<sup>2</sup> (9점), 절리면의 간격은 0.5~1.8m (14점), 절리면의 상태는 다소 거칠고 약간 풍화되었으며 이격은 1 mm 이하 (23점), 지하수 상태는 약간 습한 것으로 추정 (10점), RQD는 대체로 60~85%로 추정 (13점), 그리고 불연속면의 방향과 터널의 방향을 고려한 보정 점수 (-10) 등을 고려할 때 R.M.R 평가값은 59점으로 암반등급 III에 속하는 비교적 양호한 암반이다.

### 2.1.2 채굴 대상 구역의 선정

이 광산은 강원도 옥계면 산계리 산 429-2번지와 남양리 산 287번지 일대에 위치하고 있으며 채굴 구역은 각각 A, B, C, D 및 E 구역으로 구분할 수 있다.

본 구역의 지형은 표고가 최고 872m, 최저 400m로서 표고차가 472m로 국내 다른 석회석 광산에 비하여 표고차 및 경사도가 크다. 즉 표고 400m 이상이 전체의 95%를 상회하며, 경사도 역시 20~30° 이상이 전체 면적의 90%를 초과한다. 최상부 표토에서 하향(下向)으로 노천 채굴을 진행할 경우 사면의 안정성을 고려하면 깔때기(원추형) 모양으로 채굴단면이 좁아지게 된다.

따라서 하부에 부존된 석회석 자원을 남김없이 채굴하기 위해서는 표토에서 부터 보다 넓은 지역에 걸쳐 채굴을 개시하여야 된다.

본 연구에서는 편의상 D구역을 대상으로 Fig. 1과 같

이 단면상 노천 채굴 구역과 갱내 채굴 구역으로 구분하고 후자에 국한하여 연구하였다.

일반적으로 갱내 채굴은 노천 채굴에 비하여 다량의 광주(pillar)를 남겨야 함으로 채광 실수율이 낮아지고, 안전사고의 발생률이 높으며, 품위 조절을 위한 선택 채굴(selective mining)이 어려울 뿐만 아니라, 생산성 저하 및 생산량에 제한을 받은 것으로 알려지고 있다. 반면에 환경보전 특히 원 지형과 산림을 보전 할 수 있는 점에 큰 장점이 있다.

### 2.1.3 광상 부존 조건에 따른 갱내 채광법 선정 기준

채굴작업은 광산 경영의 주된 작업으로 이의 선정은 광산 경영의 성패를 좌우하는 중요한 요소 중 하나이다.

갱내 채굴법은 여러 가지 요인에 의해 결정되지만 크게 나누어보면 다음과 같이 4가지로 구분할 수 있다. 즉, 첫째 자연적 요인에 의한 채굴법의 선정으로 광석 및 모암의 물리적·역학적 성질, 광상의 형태·크기·경사 및 품위, 상반의 성질, 지표로부터의 깊이 등이다. 둘째 경제적 요인에 의한 채굴법 선정으로 광석품위, 판매가격, 실수율 등을 고려하여 결정한다. 일반적으로 저품위 광상은 실수율이 다소 낮더라도 채굴비가 저렴한 방법을 채택한다. 셋째 환경적 요인에 의한 채굴법 선정으로 예를 들면 지표 침하나 광석의 산화작용, 암반돌파(rock burst)나 갱내온도 상승에 따른 재해의 위험성 여부를 고려하여 선정한다. 이외에도 사용장비와 생산성을 고려한다.<sup>7)</sup>

이상 여러 가지 조건을 고려할 때 본 연구 대상지역에서 적용 가능한 방법은 중단채굴법 및 잔주식 채굴법을 들 수 있다. 그러나 본 연구에서는 경제적 요인과 생산성을 중요시하여 중단 채굴법(sub-level stoping)을 선정하였다.

일반적으로 중단 채굴법은 잔주식 채굴법에 비하여 천공 및 적재작업을 중단에서 실시함으로 안전하며, 채굴작업을 대규모 그리고 집약적으로 실시할 수 있어 능률이 향상되고, 채굴 실수율이 높은 장점을 갖고 있다.

그러나 대규모 공동이 형성된 후 방치되므로 때때로

지표 침하를 야기할 수 있으며, 채굴 종료 후 공동의 활용이 불가능하고, 선택채굴이 불가능하여 품위조정이 어려운 단점이 있다.

2.2 중단 채굴법에 의한 갱내 채굴

2.2.1 적정 광획의 설정

중단 채굴법에서 적정 광획을 결정하기 위해서는 먼저 광주(pillar)가 설계되어야 한다.

채굴공동을 증진하지 않은 채굴법에서 광주의 주요한 역할은 첫째 암반의 변위를 억제하면서 채굴적의 측벽 노출을 감소시키고, 둘째 채굴 공동을 몇 개의 작업장으로 분할함으로써 채굴구역의 안정성을 확보하는 일이다.

광주는 시기와 위치에 따라 각각 영구광주와 일시광주, 수직광주(vertical or rib pillar)와 수평광주(horizontal or crown pillar)로 구분한다. 여기서는 재채굴을 고려하지 않으므로 위치에 따른 광주를 설계하기로 한다.

이들 광주 설계에 영향을 미치는 요인 중에서도 암석의 일축압축강도, 광주의 하중, 광주의 형태와 측면 구속(confinement), 지질구조 등이 대단히 중요한 요소들이라 할 수 있다.

주방식 채굴법에서 광주 설계에 관한 경험식으로는 Hustrulid, Hoek-Brown의 제안식이 많이 이용되며, 이외에도 식(1)로 표시된 Hedley의 경험식이 있는데<sup>3)</sup> 이 식은 중단 채굴법의 광주 설계에도 이용된다.

$$S.F = \frac{Q_u}{\sigma_p} = \frac{0.7USC_2 \times W^m}{\sigma_p \cdot h^b} \quad (1)$$

여기서, S.F : 안전율을 의미하며 1.5 이상이면 안전, 1.0 내외이면 파괴

- $Q_u$  : 광주의 강도
- $\sigma_p$  : 광주의 평균응력
- $USC_2$  : 2인치 시편의 단축압축강도

- W, h : 각각 광주의 너비와 높이
- a, b : 각각 상수로 0.5 및 0.75

또한,

$$\sigma_p = \sigma_3 + (m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

- $\sigma_c$  : 실험실 단축압축강도
- m · s : 암반분류에 의한 경험상수
- $\sigma_3$  : 최소 주응력

한라광산에서 초기 응력의 크기를 계측하지 않았으나, 대성 석회석 광산에서 수압파쇄법에 의해 계측한 사례<sup>3)</sup>를 이용하여

K = 0.58~0.88, 암반은 석회암으로 RMR점수 59이므로 Hoek과 Brown의 제안식에서 m = 0.14, s = 0.0001 그리고 광주의 높이 60m, 단축압축강도 등 주요 물성은 Table 1의 값 등을 각각 (1) 및 (2) 식에 대입하여 구하면 수직 광주의 너비는 26.3m 이므로 실제 30m로 설정한다.

한편 광획(block) 및 공동(stope)의 크기는 여러가지 조건에서 광주내 응력분포를 계산하고 그로부터 최적조건을 선택한 결과는 다음과 같다. 즉 광획의 크기는 높이 × 너비 × 연장이 80 × 70 × (100~120)m 이고, 공동의 크기는 60 × 40 × (100~120)m이다. 이때 수직 및 수평광주의 두께는 각각 30, 20m가 된다.

채운 갱도 굴착 및 슬롯 레이즈(slot raise)의 설치 등 구체적인 채굴 순서는 생략하였다. 이때 개략적인 채굴도면은 Fig. 2와 같다.

위와 같은 조건에서 채광 실수율은 다음과 같이 구해진다.

즉 단위 광획의 체적은 560,000m<sup>3</sup> (80 × 70 × 100)

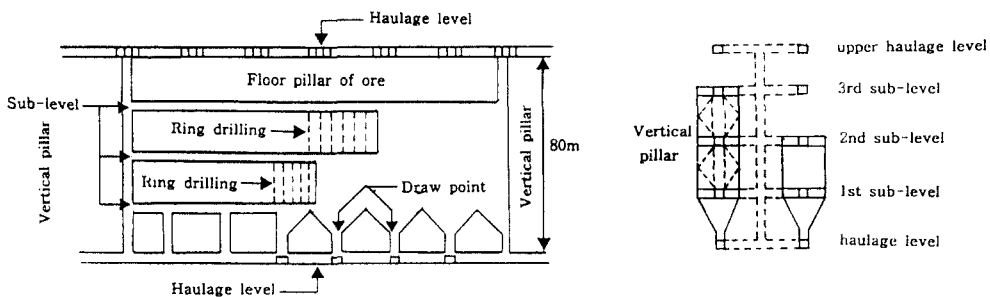


Fig. 2. Schematic diagram of sub-level stopping with longitudinal stopes

이고, 채굴량은 240,000m<sup>3</sup> (60×40×100)로써 대체로 42%이다. 이 값은 후퇴하면서 드로우 포인트(draw point) 갱도의 석회석을 채굴하는 것으로 계산한 것이므로 실제로는 40% 내외로 예상된다. 이렇게 채수율이 낮은 이유는 암반의 강도 관계로 수평 및 수직 광주를 급속광산에 비하여 많이 남기기 때문이다.

2.2.2 광주내 응력분포

광주내 응력 분포 상태를 파악하여 안정성 해석을 위한 수단으로 간단한 2차원 해석을 실시하였다. 그 이유는 토목용 터널이나 지하공간과는 달리 채굴막장이므로 유지기간이 비교적 짧기 때문이다.

한편 수치해석 방법은 유한 차분법을 이용한 2차원 상용 구조 해석 프로그램인 FLAC을 이용하였다.

가. 모델링

(1) 입력자료

Mohr-Coulomb 모델을 이용하여 해석하였으며 이를 위해 입력자료는 암반의 밀도, 탄성계수와 포아송비, 인장강도, 점착력 및 내부마찰각, 그리고 초기 응력조건 등이다.

암반의 역학적 상수는 현지 암반의 특성을 고려하여야 한다. 일반적으로 실험실에서 구한 값(in-tact)은 현지반 (in-situ)에서 구한 값과는 많은 차이를 보이기 때문에 본 연구에서는 암반평가방법 중의 하나인 RMR법 (Rock Mass Rating System)을 적용하여 현지반의 역학적 상수를 결정하였다.<sup>39)</sup> 그 결과 암반의 탄성계수는 16.0 GPa, 포아송비 0.26, 인장강도 2.0 MPa, 점착력 4.0 MPa, 내부마찰각은 39.0°를 적용하였다.

(2) 경계조건 및 초기조건

전체 채굴 작업장을 전산해석하는 것은 무리가 따르기 때문에 채굴대상 구역중 중간심도 즉 872m와 400m의 중간인 630m 부분에 위치한 4개의 광획을 대상으로 광획사이의 수평 및 수직광주의 역학적 거동에 대하여 검토하였다.

이때 한 광획의 크기는 2.2.1절에 표시한 바와 같이 80×70×110m이고 공동의 크기는 60×40×110m이다. 4개의 광획이란 Fig. 3과 같이 상,하 및 좌,우로 인접한 광획으로 이 경우 수평 및 수직거리는 각각 140m 및 160m가 된다. 요소망의 크기는 위 값의 4배 크기로 설정하였다. 따라서 좌측 경계부에서 우측경계부까지는 560m, 상부경계부에서 하부경계부까지는 640m가 된다.

해석 요소망의 좌,우 경계에서는 수평방향의 변위를

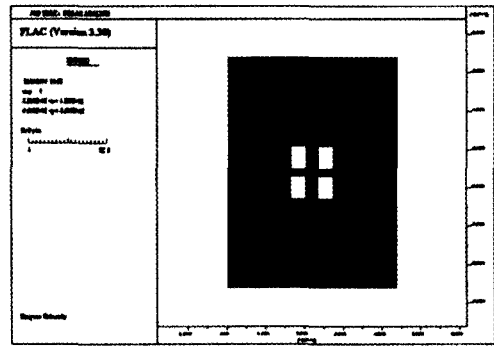


Fig. 3. FDM mesh for stress analysis in pillar

구속하였고, 요소망의 상,하부 경계는 수직방향의 변위를 구속하였다.

연직방향의 초기응력 크기는 암반의 자중을 고려하였으며, 수평응력의 크기는 국내 비금속 광산의 K(수평응력/연직응력 = (0.58~0.88) 값의 평균치(0.73)<sup>39)</sup>를 적용하였다.

요소망의 크기는 채굴 공동의 크기를 고려하여 수평방향으로 120개, 수직방향으로 150개로 구성하였다. 굴착 후 광주와 모서리 부분에 높은 응력집중이 예상되어 4개 공동에 해당하는 지역의 격자망을 좁게 구성하였는데 그 요소망은 Fig. 3과 같다.

나. 해석 결과

해석 결과는 변위, 최대 및 최소 주응력, 주응력의 차이 등 4가지로 구분하여 검토하였다.

(1) 변위

굴착에 의해 발생된 변위를 나타내면 Fig. 4와 같으며 그림의 단위는 m이다. 최대 변위는 상부 채굴 공동의 천장과 하부 채굴 공동의 바닥에서 중앙의 수직 광주 방향

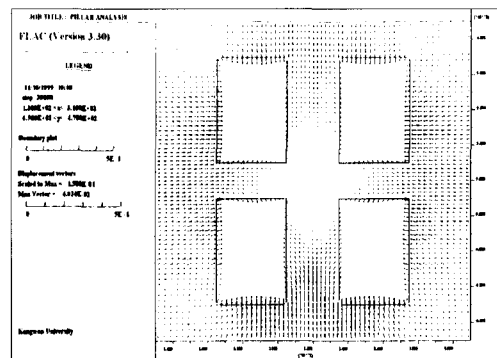


Fig. 4. Displacement vectors in pillar

으로 발생하며 그 크기는 상부 공동의 경우 3.598 cm, 하부 공동의 경우 4.834 cm 정도이다. 또한 좌측 상부 공동의 좌측벽과 우측 상부 공동의 우측벽의 변위는 공히 3.013 cm이고 하부 공동의 좌측벽과 우측벽의 변위는 공히 3.313 cm 정도이다. 이것은 두 공동 사이의 높이가 160m, 좌우 공동 사이의 폭은 140m이며, 공동 단면이 직사각형 형태를 취하고 있어 광주의 측벽 부분에 비해 채굴 공동의 천장 및 바닥에서 많은 변위가 발생된 것으로 보인다.

(2) 최대 주응력의 분포

광주 주위에 분포하는 최대 주응력 선도는 Fig. 5와 같으며 그림의 단위는 Pa이다. 해석 모델의 대칭성으로 인해 광주의 모서리에서 동일한 응력집중 현상을 보인다. 상부 채굴 공동의 바깥쪽 모서리 부분의 최대 주응력은 위쪽 40 MPa, 아래쪽 27.5 MPa 정도이고, 하부 공동의 바깥쪽 모서리 부분은 위쪽 32.5 MPa, 아래쪽 50 MPa 정도의 압축응력이다. 또한 상부 채굴 공동의 안쪽 모서리 부분의 최대 주응력은 위쪽 27.5 MPa, 아래쪽 30 MPa 정도이고, 하부 공동의 안쪽 모서리 부분은 위쪽 32.5 MPa, 아래쪽 35 MPa 정도로서 바깥쪽 모서리 부분의 응력에 비해 값의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

따라서 25 MPa 이상의 응력이 집중되는 영역은 모서리 근처의 일부분임을 보여주고 있다. 이와 같은 응력 분포는 좌, 우측 공동사이의 수직 및 수평 광주가 지보재로서의 역할을 하기 때문인 것으로 생각된다.

한편 상, 하부 수직 광주의 중앙부는 각각 20 MPa, 23 MPa 정도의 압축응력집중이 발생됨을 보여주며, 이 영역에서 주응력의 방향은 대체로 수직방향이다. 따라서 모서리 부분의 주응력에 비해 응력의 교란이 심하지 않

음을 알 수 있다.

(3) 최소 주응력

최소 주응력의 분포 특성은 최대 주응력 선도와 같이 대칭성을 보여주고 있다. 최대 주응력 선도와는 달리 인장응력이 발생하고 있음을 관찰할 수 있는데, 그 지역은 상부 공동 사이의 수직 광주 중앙부와 하부 공동 사이의 수직 광주 중앙부 표면이며 상, 하부 공동 사이의 수평 광주 중심부에 간헐적으로 보인다. 수직 광주 중앙부의 최소 주응력 방향은 대체로 수평방향으로 나타나며 그 크기가 0에 가깝기 때문에 광주 중앙부분은 단축압축상태에 놓여 있음을 알 수 있다.

(4) 주응력 차이

주응력 차이가 가장 크게 나타나는 부분은 하부 공동의 좌, 우측 모서리 부분이며, 다음 상부 공동의 좌, 우측 모서리 부분과 하부 공동 사이에 있는 수직 광주 중앙부에서 크게 나타난다. 따라서 광주가 파괴된다면 이 부분부터 파괴가 시작될 것으로 예상되므로 면밀한 관찰이 요구된다.

3. 환경 오염 저감을 위한 석회석의 노천채굴

석회석의 노천채굴은 대규모 발파에 의해 실시되므로 자연 지형 및 산림의 훼손은 물론이고, 발파로 인한 지반의 진동, 폭음, 암편의 비산, 분진발생 그리고 탁수로 인한 하천의 오염 등이 환경을 저해하는 요인으로 지적되고 있다.

이들 요인 중 자연지형 및 산림 훼손에 대한 대책 등은 필자들이 이미 발표한 내용<sup>(10)</sup>을 참조 바라며, 본고에서는 적정 파쇄암을 얻기 위한 발파작업의 타당성과 발파로 인한 오염 저감대책에 관하여 연구하였다.

3.1. 적정 입도 및 발파재해 저감을 위한 효율적인 발파 작업

석회석의 노천채굴에서 효율적인 발파란 낮은 천공비(穿孔比)와 낮은 장약비(裝藥比)로 일시에 균일한 입도를 갖는 파쇄량을 다량 얻는데 그 목적이 있다.

발파작업이 효율적으로 이루어지지 못할 경우 큰 암괴의 발생으로 파쇄도가 불량하며, 파쇄되지 않은 토우(toe)의 발생, 불안정한 절취 사면의 형성뿐만 아니라, 과대한 지반진동 및 소음의 발생, 암편의 비산 등을 초래하여 경제적인 손실은 물론이고, 때때로 사회적인 문제를 야기하기도 한다.

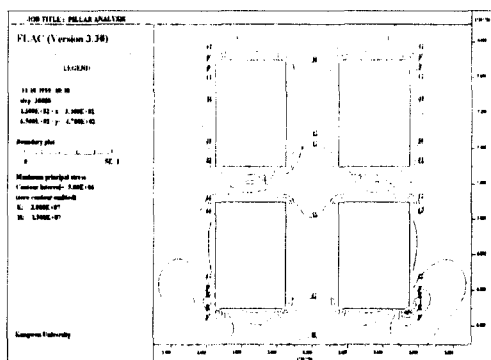


Fig. 5. Max. principal stress contours in pillar

Table 2. Some design of drilling and charge patterns

Explosive : ANFO  
Hole inclination ; 3 : 1

Items	A mine		B mine	
	practical date	Langefors <sup>(1)</sup>	practical date	Langefors <sup>(1)</sup>
Bench height K(m)	15.0	15.0	20.0	20.0
Hole diameter d(mm)	115	102	89	89
Hole depth H(m)	17.0	16.8	24.0	22.0
Practical burden B(m)	3.6	2.85	3.0	2.3
Practical spacing S(m)	4.3	3.60	3.5	2.85
Stemming h <sub>0</sub> (m)	4.0	2.85	3.5	2.30
Primer (kg)	gelatine dynamite	emulite 150	booster	emulite 150
	0.125	2.70	0.227	2.20
Charge ANFO	.	.	.	.
Concentration I <sub>b</sub> (kg/m)	9.6	6.5	5.3	5.0
Height of charge h(m)	13.0	13.45	20.5	19.2
Weight Q(kg)	125	88.0	108	96.0
Total charge Q <sub>tot</sub> (kg)	125.125	90.70	108.227	98.20
Specific drilling b(m/cum)	0.073	0.109	0.114	0.168
Specific charge q(kg/cum)	0.539	0.59	0.515	0.75

\*Langefors의 경험식은 다년간 외국의 많은 사례를 수집, 분석하여 구해진 식으로 위 표에서 A광산은 실제로는 공경 115 mm인데 Langefors는 공경 102 mm를 기준 하였기에 단순비교에는 약간의 차이가 있을 수 있다.

따라서 적정 입도를 갖는 다량의 파쇄암과 환경 오염 원을 저감시킬 수 있는 효율적인 발파작업이 계획, 실시 되어야한다. 일반적으로 발파 결과에 영향을 미치는 요인은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 즉 화약의 성질, 발파 방법의 설계 그리고 발파대상이 되는 암반의 자연적인 부존 조건이다.

사용 화약의 성질은 국내에서 생산되는 화약류만을 사용함으로써 암반조건에 알맞은 화약류를 선정하면 된다. 따라서 여기서는 후자의 2 경우만을 연구대상으로 하였다.

### 3.1.1 발파 설계의 변수

현재 국내 석회석 광산에서 널리 쓰이는 발파 패턴은 Wide Space 방법으로 이를 부분적으로 수정, 보완하여 사용하고 있다. 이 경우 설계 변수로는 천공 직경, 최소 저항선의 길이, 장약공의 간격, 장약량 및 장약방법, 전색, 기폭순서 등을 들 수 있다.

이들 변수들이 현장 여건에 잘 부합되지 않을 경우 적정 파쇄입도를 구할 수 없을 뿐만 아니라, 화약의 에너지를 효과적으로 암의 파쇄에 이용할 수 없기 때문에 지반의 진동 및 폭음이 상대적으로 크게 발생됨은 물론이다.

그러나 발파 설계 변수들은 현장의 자연적조건과 조업 여건에 따라 결정되기 때문에 일률적으로 결정하기는 어

렵다. 또한 이들에 관한 많은 경험식이 소개되고 있으나 여기서는 A, B 두 회사의 발파현황을 Langefors의 기준식과 대비해 보기로 한다.

A광산은 1회 약 30공을, B광산은 금번 연구대상 광산으로 공경 89 mm와 102 mm 두 경우가 있는데, 대체로 공경 89 mm인 경우 20공 내외를 기폭시키고 있다. 이와 같은 주된 이유는 작업장(계단)의 확보 여부에 기인한다.

A, B광산 모두 Langefors식과 비교할 때 단위체적당 천공비 및 단위체적당 장약량이 적어 전반적으로 양호한 편이나 비교적 장약밀도 및 전색장이 크고, 저항선 및 천공간격이 길어서 실제로는 대피의 발생율이 높다.

### 3.1.2 암반내 불연속면의 영향

오랜 세월 지질변동을 받는 암반내에는 균열, 절리, 파쇄대 등 공학적인 불연속면(discontinuity)이 존재한다. 이와 같은 불연속면의 발달 상태는 진동, 비산, 소음의 크기 및 방향은 물론이고 파쇄입도 등에 큰 영향을 미치며 특히 약장약으로 실시되는 선행이완 발파에서는 발파의 성패를 좌우하는 중요한 요인이 된다.

특히 불연속면의 특성은 에너지의 전달, 가스의 누출 등과 관련이 되므로 발파의 설계 및 시공과정에서 천공 간격, 천공방향, 장약량 등을 산정할 때는 불연속면의 상태를 면밀히 관찰하고, 반영하여야 한다.

Table 3. Results of measuring blast-induced ground vibration

Site	Total weight of charge (kg)	Max. delay charge (kg)	Distance(m)	Measured vibration (cm/sec)	Allow able value (cm/sec)	Remarks
Workingplace	3725	27.3	250	0.10	0.2	good
	1231.5	147.5	370	0.12		
	3277.2	127.5	1900	0.032		
Gundaevillage	1186	118.6	2300	0.0015		verygood
	4986	320.0	1800	0.0042		

\* 규제기준치를 0.2cm/sec로 엄격히 설정하더라도 폭원과의 거리가 멀어 안전한 값을 보인다.

Table 4. Results of measured air-blast

Total weight of explosives per day (kg/day)		Detonator (ea)		Distance from source (m)		Measured air-blast (dB)		Remarks
max.	average	max.	average	max.	average	max.	average	
4986	2372	119	52	2300	1850	72	60	good

이지역 주 절리면의 주향은 대체로 N40~50°E 인데 비하여 지형 및 산림훼손 허가구역의 제한 등으로 계단은 이들과 60°정도의 차이를 갖고 형성되어 있다.

또한 현장 조업관제로 실제 적용실험을 실시하지 못한 아쉬움이 있다.

### 3.2 발파 진동 및 소음의 감소대책

한라 광산에서도 석회석 채굴시 야기되는 발파 진동 및 소음의 크기를 제어하기 위하여 수시로 계측하고 있다. 특히 본 연구기간 동안 광산현장과 가장 인접한 군대 마을에서 발파진동 및 소음의 계측 결과는 각각 Table 3 및 Table 4와 같다.

국내에서 적용되고 있는 발파로 인한 소음의 기준치에 의하면 주간의 실제 공사장 소음기준은 70 dB이며 여기에 소음 발생 시간이 1일 2시간 미만일 경우에는 +10 dB의 보정값이 적용되어 80 dB를 기준으로 적용할 수 있다. 한라광산의 경우 작업장의 발파로 인해 측정된 소음은 최대 72 dB이며, 순간적으로 발생한 후 소멸되는 발파 소음이므로 소음에 의한 영향은 극히 작은 것으로 판단된다.

이외에도 채광장 부근 군대마을의 경우 사업지구 후(后)사면으로부터 1200m 떨어져 있고 채광장 표고 보다 250m 하부에 위치하고 있어 계단식 노천 채굴의 특성상 지형적인 장애물이 있는 상태(채광장보다 100-200m가 높은 산이 중간에 위치하고 있음)에서는 소음의 영향이 극히 미미할 것으로 사료된다.

## 4. 노천채굴법 또는 갱내채굴법의 설정시 검토사항

유가(有價)광물인 지하자원의 채굴법 선정을 위해서는 여러 가지 조건들이 검토되어야 한다. 먼저 지하에 묻힌 자원을 효율적으로 개발하기 위해서는 안전(safety)과, 능률(efficiency) 및 경제성(economy) 등을 만족시킬 수 있는 채굴법이 선정되어야 한다. 이외에도 광상을 완전채굴(complete mining) 할 것인지, 또는 부분채굴(selective mining)로 할 것인지를 결정하여야 하는데 이는 투입 자본의 규모에 따라 결정된다.

이와 같은 조건들이 검토된 다음에 광산 기업의 경영 수지를 확인해야 하는데 이를 위해서는 생산비와 판매비, 그리고 앞으로의 가격 변동 요인을 충분히 예측하여 적정 이윤을 남길 수 있는지 확인하고 이를 위한 기술의 향상과 경영의 합리화를 도모하여야 함은 물론이다.

여기서는 대표적인 노천채굴법인 계단식(bench)채굴법과, 갱내채굴법 중 가장 효과적인 방법으로 선정된 중단채굴법(sub-level stoping)등 두 가지 채굴법을 대상으로 서로의 조건 및 특성을 비교하였다.

### 가. 광상의 부존조건

한라광상의 부존 조건은 2.1.1.절의 내용과 같다. 즉 석회석 광체가 표토에서부터 허부로 연속적으로 발달되었으며, 두께는 300m 내외, 연장은 최고 7.5 km이나 현재 가행중인 구간의 총 연장은 약 3.5 km정도이다.

따라서 괴상(塊狀)광체, 또는 산체(山体)광체의 형태이



다. 여기서 산채광상이란 산악의 전체 또는 일부를 구성하는 형태를 의미한다. 이와 같은 광체를 개발하는 방법은 노천채굴법이 효과적이다.

일반적으로 갱내채굴은 맥상(脈狀) 또는 판상(板狀) 광체로 광체가 지하심부에 부존되어 있거나 표토층의 제거가 불가능할 때 적용되는 방법이기 때문이다.

#### 나. 채수율

채수율이란 채굴(광) 실수율을 의미하는데, 2.2절에서 검토한 바와 같이 한라광상에 갱내채굴법을 적용시 광상 및 모양이 모두 석회석으로 금속광상에 비하여 강도가 낮고, 각종 불연속면의 발달이 심하여 다량의 광주(pillar)를 남겨두어야 한다.

따라서 안전 조업을 위하여 수평광주와 수직광주를 남겨야 함으로 한라광상의 경우 채수율은 약 42%로 추정된다. 이와 같은 값은 국내의 다른 연구 결과<sup>13)</sup>와 유사하다. 더욱이 지표의 침하를 방지하기 위하여 보안(保安)광주를 남겨야 하는데 이를 고려할 경우 채수율은 더욱 낮아지게 된다. 참고로 국내에서 현재 중단채굴법으로 철광을 개발하고 있는 S광상의 경우를 예로 들면 다음과 같다. 즉 1광획(bloc)의 크기는 높이×너비×연장이 각각 100, 40, 100m로서 4개의 중단을 설치하고, 수평광주 25m, 수직광주 30m를 남길 때 그 채수율은 약 53%이다.

그리고 외국의 주요 금속광산의 예 즉 중단채굴법을 적용하여 대규모로 출광하던 캐나다의 Kidd Creek, Fox, 인도의 Khetri, 오스트레일리아의 Mount Isa, 아일랜드의 Tynagh, 잠비아의 Baluba 그리고 남아프리카의 Loraine Gold Mine 광산 등은 모두 고가(高價)의 금·은·동·연·아연 등 금속광물을 채굴하던 광산이다.

그러나 채굴 종료후 공동을 충전하고 2차로 광주를 회수할 경우에도 채수율은 대체로 70~75%인 것으로 보고되고 있다.<sup>12)</sup> 그러나 노천 채굴 방식을 채택할 경우 채수율은 거의 100%이다. 따라서 유한(有限)한 자원을 완전 채굴한다는 면에서 갱내채굴법은 노천채굴에 비하여 비효율적임을 알 수 있다.

#### 다. 채굴량 및 작업능력

노천 채굴이 갱내 채굴에 비하여 많은 장점을 갖고 있으나 그 대표적인 것은 채굴비가 저렴하며, 작업이 안전하고 용이하다. 그리고 발파의 효과를 충분히 발휘할 수 있어 대량 생산이 가능한 점이다. 반대로 나쁜점은 노천에서 작업을 하므로 일기의 영향을 받으며, 표토 및 폐석처리 문제, 심도의 제한, 주변 환경에 미치는 영향 등이다.

노천 채굴시 국내의 경우 현재 약 1500만톤/년까지 생산하는 사례가 있지만 갱내의 경우 그렇지 못하다. 즉 갱내의 경우 작업장의 확보와 대형 장비의 사용 여부에 따라 차이를 보이지만 지금까지의 실적은 100만톤 미만이다. 현재 가행중인 S철광산의 경우 약 50만톤/년을 출광하고 있으며, 석회석의 갱내 채굴을 하고 있는 일본 Sanpo광산은 18만톤/년에 불과하다.<sup>12)</sup>

반면에 고가 광물인 금·은·동 등 금속광산은 외국의 사례에서 보면 최대 900만톤/년까지 실적이 있으나 대체로 200~300만톤/년 임을 알 수 있다.<sup>12)</sup>

이와 같이 갱내 채굴량이 석회석과 금속광산에 따라 현격한 차이를 보이는 것은 기술상의 문제점이기보다는 채굴원가에 기인한다. 즉 원가를 고려하지 않는다면 그 최대 채굴량은 기술상 제한이 없다고 볼 수 있으나 경영수지를 고려할 경우 저가 광물인 석회석은 갱내 채굴에 제한이 따른다. 국내의 몇몇 연구 결과에 따르면 대형 장비를 사용할 때 최대 1,000,000톤/년까지는 가능한 것으로 보고되고 있다.<sup>2,3)</sup>

한편 작업능률면에서 노천의 경우 1회 발파에 최대 18,000톤/회까지 채굴 실적을 보이고 있는데 비하여, 갱내 채굴의 경우 중단채굴은 능률적이지만 다량의 채준갱도 굴진이 따르고, 또 광주 회수시에는 안전을 고려해야 함으로 S광산의 예를 들면 O.M.S가 50톤 정도이다.

#### 라. 안전성

모든 작업의 최우선 목표는 안전성 확보이다. 중단채굴의 경우 천공 및 발파가 중단에서 이루어짐으로 다른 갱내 채굴법에 비해선 비교적 안전하다고 알 수 있으나 채굴광석의 반출 등 모든 작업이 갱내에서 이루어짐으로 노천 채굴에 비하여 위험율이 높다.

#### 마. 투자비 및 품질관리

갱내 채굴의 경우 운반갱도 및 설비, 갱도보강, 통기 및 배수설비 등이 요구됨으로 노천 채굴에 비하여 투자비가 훨씬 증가된다.

한편 노천 채굴의 경우 부분적인 폐석의 제거 등 품질관리가 용이하나 중단채굴법의 경우 저품위 또는 맥석의 혼입이 불가피하고 이들을 제거할 수 없어서 품질관리상 대단한 어려움이 따른다.

#### 바. 생산원가

광상의 부존조건 및 개발조건이 서로 다르므로 비교하기는 어렵다. 또한 국내의 경우 본격적으로 석회석을 갱내 채굴하는 광산도 없기 때문에 생산원가의 비교는 더욱 어렵다.

다만 철광석을 중단채굴법으로 채굴하고 있는 S광산의 사례를 분석할 때 갱내 채굴에 따른 직접비는 노천 채굴의 직접비보다 약 150% 상승할 것으로 예상된다.

사. 환경영향

앞부분에서 기술한 바와 같이 노천 채굴은 자연 경관의 훼손 및 지형의 형질 변경이 불가피하다. 또한 발파로 인한 진동, 소음 및 분진의 영향을 저감할 수 있으나 원천적으로 제거할 수는 없다. 반면에 갱내 채굴의 경우에는 때때로 지반의 침하, 갱내수 유출 문제로 인한 오염원 야기 등 환경 영향을 들 수 있다.

5. 채굴법의 제안 및 고찰

대규모 석회석의 노천 채굴은 광상의 부존조건, 채수율등을 고려할 때 타당한 것으로 생각된다. 그러나 이 방법은 각종 환경오염원인을 제공하고, 특히 원 지형 및 산림의 훼손이 불가피하다. 따라서 백두대간과 인접하고 있는 한라광산을 대상으로 노천 채굴과 갱내 채굴을 동시에 채택할 것을 제의하였다. 즉 Fig. 1과 같이 포토에서 일정깊이까지는 노천 채굴을 하고 그 하부는 갱내 채굴 즉 중단 채굴법을 채택하길 제안한다.

5.1 석회석의 갱내 채굴

중단 채굴법은 다른 채굴방법보다 생산성이 높아 능률적이기 때문에 저가(低價)광물인 석회석의 개발에 합당한 것으로 판단된다.

광주 설계에 관한 몇 가지 경험식과 수치해석에 의한 광주 내 응력 분포를 검토한 결과 1광획의 크기는 높이 × 너비 × 연장이 80 × 70 × (100~120)m 이고 채굴공동(stope)의 크기는 60 × 40 × (100~120)m 이다. 이 때 공동 유지를 위한 수직 및 수평 광주의 두께는 각각 30, 20m이며 채수율은 드로우 포인트 부분을 회수할 때 약 42%로 예상된다.

수치해석 결과 광주 내 응력 분포는 비교적 안전한 값을 보이고 있으나 모서리 부분에서 파괴가 일어날 가능성이 있다. 이 부분은 채굴시 필요한 경우 보강이 요구된다. 석회석의 갱내 채굴시 채수율이 낮은 주된 요인은 광주의 유지 때문이며, 석회석은 다른 금속광상과는 달리 암석의 강도는 물론 각종 불연속면이 다수 함유되어 비교적 취약하기 때문이다. 채수율을 향상시키기 위해선 광주의 두께를 낮추거나 채굴공동을 충전하는 방법이 있다. 전자의 경우 광주내에 과다한 응력이 집중되어 소성영역

이 확대되므로 록 볼트 등으로 보강한다면 어느 정도 가능하다. 따라서 채수율의 향상을 위해서는 록 볼트 타설 또는 공동의 충전에 따른 소요비용을 산출하고 그 경제성을 분석해야 한다.

국내의 예를 보면 철광을 개발하고 있는 S광상의 채수율이 약 53%인 점을 고려한다면 석회석의 채수율 42%는 타당한 것으로 평가된다.

5.2 적정 입도 조절을 위한 발파 작업

우리 나라에서 대량으로 석회석을 생산하는 A광산과 한라광산의 발파 설계 변수들을 조사하고 제안된 외국의 경험식 즉 Langefors의 식과 비교, 분석하였다.

두 광산 모두 천공비와 비장약량이 Langefors의 경험식으로 산출한 값보다 적은 값을 보이고 있어 경제적인을 알 수 있다.

그러나 저항선 및 천공간격이 길고, 장약 밀도가 공저와 중간부분이 동일하게 적용되는 점등은 앞으로 개선되어야 할 것이다. 각 작업장에서 부분적으로 관찰되는 파쇄도의 불량 및 옥석 발생의 주원인은 암반내에 발달한 불연속면의 분포특성과 관계가 있는 것으로 판단된다. 즉 절리의 발달 상태는 발파 결과에 영향을 미치나, 현장에서는 이들의 영향을 고려하지 않고 동일한 발파패턴을 적용하고 있다. 따라서 절리의 영향을 감소시키기 위해서는 구역별 절리 발달 상태에 따라 발파 패턴을 조정할 필요가 있다.

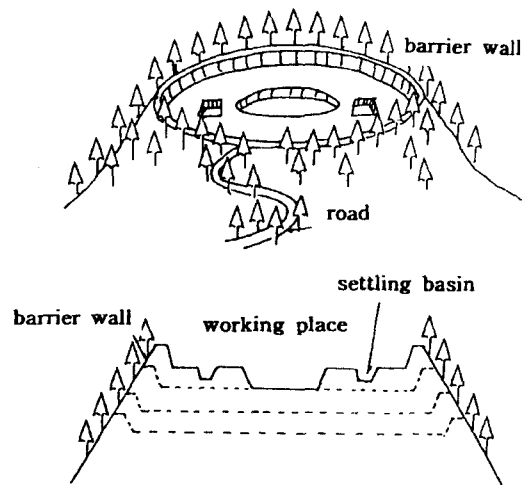


Fig. 6. Schematic diagram of barrier wall for less environmental hazards

### 5.3 발파 진동 및 소음 저감 대책

석회석의 노천 채굴시 발생하는 발파 진동 및 소음 저감을 위한 대책을 제시하였다. 그러나 여기서는 추가로 다음과 같은 차폐벽의 활용을 제의한다.

계단식 노천 채굴시 산꼭대기에서부터 차례로 깎아 내리는 과정에서 채굴 지역 경계부에 항상 Fig. 6과 같이 차폐벽을 남겨 놓은 방법으로 현지 지형 및 작업 조건에 따라 적절히 조정한다. 채굴 지역의 노출을 줄이게 되어 경관 보존상 효과가 있으며, 진동 및 소음, 분진의 저감 효과와 우수(雨水) 및 토사의 산사면 유출을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 결 론

한라광산은 광주의 일부가 백두대간과 인접하고 있고 부존 구역이 비교적 광활하며, 험준한 산악지에 위치하고 있어 개발에 따른 자연 훼손 문제로 많은 어려움을 겪고 있다.

따라서 본 연구는 한라광산을 대상으로 환경오염을 저감시킬 수 있는 개발 방안을 연구하였는데 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 한라광산의 석회석은 표토 약 872m에서 최저 400m 까지에 걸쳐, 두께 300m내외로 발달되어 있다. 이를 전부 노천 채굴시에는 지표면의 경관 훼손 지역이 넓어지므로 노천채굴과 갱내채굴로 구분하여 Fig. 1과 같이 개발할 것을 제의한다. 이때 그 기준이 되는 a, b 곡선은 산림훼손 허가와 관련하여 결정한다.

2. 갱내 채굴은 생산성이 높은 중단 채굴법의 채택을 추천하며, 이 때 1광획의 크기는 높이 × 너비 × 연장이  $80 \times 70 \times (100 \sim 120)$ m이고, 채굴 공동의 크기는  $60 \times 40 \times (100 \sim 120)$ m이다. 공동 유지를 위한 수직 및 수평 광주의 두께는 각각 30m, 20m이며, 채수율은 약 42%로 예상된다.

3. 위 조건에서 광주의 안정성을 평가하기 위하여 2차원 수치해석을 실시하였다.

그 결과 최대변위는 상부 채굴공동의 천장과 하부 채굴공동의 바닥에서 중앙의 수직광주 방향으로 발생되며 그 크기는 상부공동의 경우 3.598 cm, 하부공동의 경우 4.834 cm 이다.

최대주응력은 광주의 모서리에서 발생하는데 그 값은

위쪽 모서리에서 초기연직응력의 약 3배, 아래쪽 모서리에서 약 1.85배 크기이다.

주응력의 차이가 가장 크게 나타나는 부분은 하부공동의 좌, 우측 모서리부분과 수직 광주 중앙부로서 만일 광주가 파괴된다면 이 부분에서 시작될 것으로 예상되므로 면밀한 관찰이 요구된다.

4. 한라광산 및 또 다른 석회석 광산의 발파작업은 wide space 공법을 변형하여 채택하고 있다. 그 동안 꾸준한 연구와 노력의 결과 좋은 실적을 얻고 있다. 그러나 장약밀도의 조정 즉 공 밀부분과 중간부분의 장약밀도 조정 방안과, 암반내에 발달된 불연속면의 영향을 반영한 발파작업의 개선이 요구된다.

5. 한라광산의 현 작업조건에서 발파로 인한 지반진동 및 소음의 크기는 실측 결과 허용 기준치를 0.5cm/sec 이하에 미달되어 양호함을 확인하였다. 소음과 분진 그리고 토사 유출을 저감시킬 수 있는 차폐벽의 활용을 제의한다.

6. 노천 채굴에 비하여 갱내 채굴법은 채수율이 약 42% 내외이며, 채굴부분 생산원가가 약 150% 인상되고, 품질관리 및 안정성면에서 불리하다. 또한 작업장 개설에 제한을 받기 때문에 최대 1,000천톤/년 이상은 비능률적인 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 1997년 및 1998년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소 과제 연구비(강원대학교 부설 자원개발연구소)에 의하여 연구되었으며 지원에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김임호, 정소길 외 8인, 1994, 울진 석회석광산 개발설계 연구, 평해광업개발주식회사, 227p.
2. 김영중, 배병주 외 3인, 1998, 한라광산 갱내 채광 설계용역보고서, 한라시멘트(주), 225p.
3. 신희순, 정소길, 한공창 외 5인, 1999, 석회석 광산의 적정 갱도 규격 및 지보 대책 수립 연구, 대성산업주식회사, 270p.
4. 김선익, 류창하, 선우준 외 4인, 채석장의 분진, 소음 및 발파진동의 발생 특성과 제어대책 및 평가기준개발 연구, 쌍용자원개발주식회사, 83p.
5. 한국양회공업협회, 1997, 시멘트용 석회석 광산 개발상 문제점 및 대책.
6. 원주지방환경청, 한국양회공업협회, 1996, 석회석 광산의 환경관리 및 복구방안에 관한 관계전문가 Work-

- shop. 85p.
7. Holland, C.T., 1973, Mine Pillar Design, SME Handbook, 96-118.
  8. 기경철, 임한옥, 1999, 암반내 지압계측과 이를 응용한 광주의 설계, 한국자원공학회지, 36.4, 249-259.
  9. E. Hoek & E.T. Brown., 1980. Under-ground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527p.
  10. 임한옥, 백환조, 1999, 석회석 자원의 노천채굴에 따른 환경 오염원의 저감 및 관련제도의 개선방향, 터널과 지하공간, 9.3, 230-237.
  11. Stig, O. Olofsson, 1990, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Nitro Nobel, 62-121.
  12. 日本鉦業會, 1983, 大規模鉦床の採掘計劃と現況.



**임한옥**

1966년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1980년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1985년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사  
 1996-1998년 강원대 공과대학원장 겸 산업대학원장

Tel : 0361-250-6253

E-mail : hulim@cc.kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수



**김재동**

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1983년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 0361-250-6256

E-mail : jdkim@cc.kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수



**백환조**

1984년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1994년 University of Texas at Austin, 토목공학과, 공학박사

Tel : 0361-250-6257

E-mail : hwanjo@cc.kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수