

## 3차원 지질 모델링을 활용한 석회석 광산의 정보화 생산 및 관리 시스템 운영 사례

이 준 택<sup>1)</sup> · 이 호 진<sup>2)</sup> · 안 남 수<sup>2)</sup>  
임 병 렬<sup>1)</sup> · 김 춘 식<sup>1)</sup> · 윤 운 상<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(주)넥스지오 · <sup>2)</sup>한일시멘트(주)

3차원 지질 모델링(3D Geo-Modelling) 기법은 광체(Ore bodies)와 같은 가치 있는 지질 정보를 대상으로 지질학적 또는 지구통계학적 해석 과정을 거쳐 3차원 지질 모델을 구성하고, 요구되는 정보에 대한 전산 해석을 실시함으로써, 광산의 가치 평가 뿐만 아니라, 개발 및 생산 과정에서도 효율적인 관리 및 평가를 수행할 수 있는 정보화 기법이다(배기훈 외, 2002; 이준택 외, 2004).

그림 1은 3차원 지질 모델링을 이용해 광체를 파악하고, 채광 설계를 실시한 하나의 예이다.

그림 1의 사례에서 3차원 지질 모델링은 다음과 같은 목적으로 사용되었다.

- 1) 지표지질조사 및 시추조사 결과와 채취시료 분석 자료의 전산화
- 2) 3차원 지질 모델 구성을 통한 광체의 매장량 산출
- 3) 3차원 품위도의 전산화를 통한 품위별 매장량 산출
- 4) 광산 개발시 장기적 혹은 단기적인 생산의 관리와 계획을 통한 품위 관리의 효율성 극대화

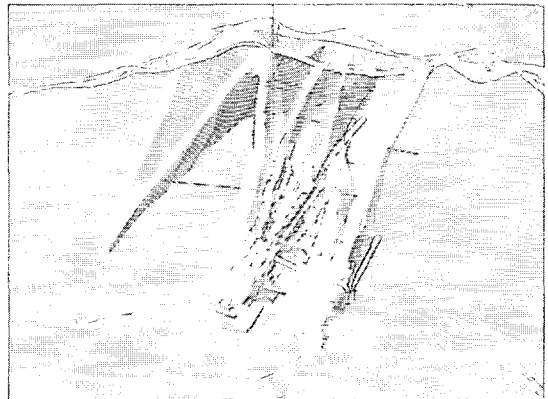
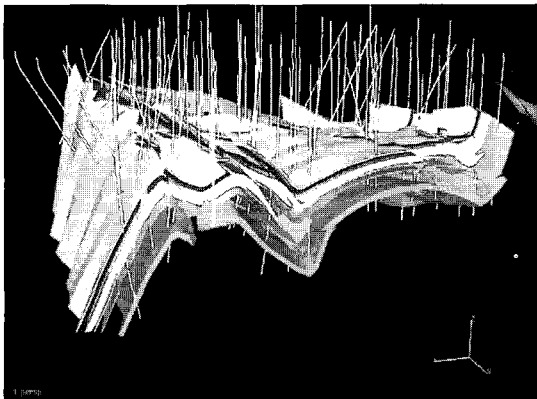


그림 1. 3차원 지질 모델링을 이용한 광체 분석 및 채광 설계 사례.

본 고에서는 3차원 지질 모델링을 통해, i) 석회석광산을 대상으로 얻어진 각종 조사 결과와 채취 시료의 분석 결과를 이용해 광체의 매장량 및 산출량을 계산하고, ii) 실제 개발 중인 광산에서 효율적으로 중·장기 생산계획을 수립하고 광체의 품위를 관리한 사례를 소개하고자 한다.

### 3차원 지질 모델링 적용 개요

모델링 적용 지역은 충청북도 단양의 한일 매포 광산으로서, 98, 99, 108, 109 네 개 광구로 구성되어 있으며, 조선 누층군의 삼태산층과 영흥층이 분포한다.

현재 매포 광산에서는 삼태산층을 대상으로 시멘트용 석회석을 채광하고 있다. 본 광산 지역을 대상으로 아의 조사 및 시추 조사 결과와 채취 시료의 분석결과치를 이용하고, 'LYNX 프로그램'을 사용하여 3차원 지층 모델 및 품위도를 작성하였다. 이 과정에서 총 3,292개의 자료가 사용되었다(그림 2). 3차원 모델링의 분석과정과

활용 내용은 다음과 같다.

- 1) 광체의 조사: 지표 지질 및 시추 조사를 통한 지질도 작성과 지하 광체 분포 상태 확인
- 2) 3차원 지형 및 지질 모델링: 지형, 지질, 관련 구조물의 3차원 모델링 및 가시화
- 3) 지질 모델링 결과의 활용: 광체의 매장량 계산, 채광장의 변화 상태 예측 / 임의의 단면도 작성 및 갱도, 시추공의 설계
- 4) 3차원 'Kriging': 조사된 광체 품위를 이용하여 품위별 분포 예측 및 가시화
- 5) 3차원 'Kriging' 결과의 활용: 광산의 효율적 채광 계획 수립 및 관리

### 연구 지역의 3차원 지질 모델 구성

연구 지역의 수치지형도와 정밀 지표 지질조사 및 시추조사 결과를 이용하여 대상 광산의 3차원 지형과 3차원 지질 모델을 구성하였다. 그림 3은 3차원 지형과 시추 및 시료 채취 위치, 이를

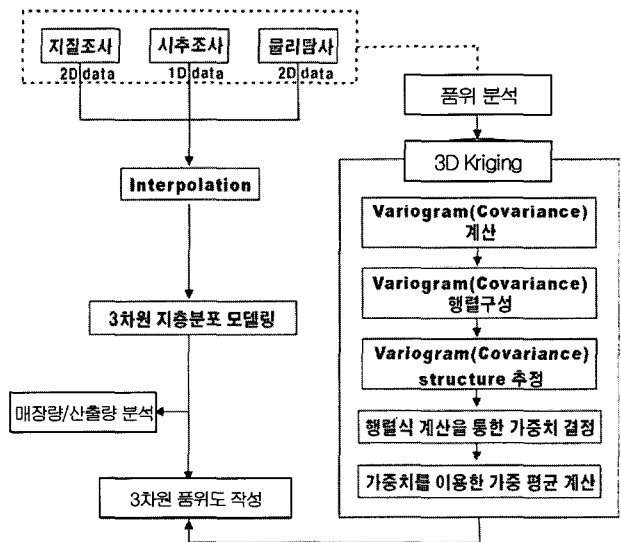
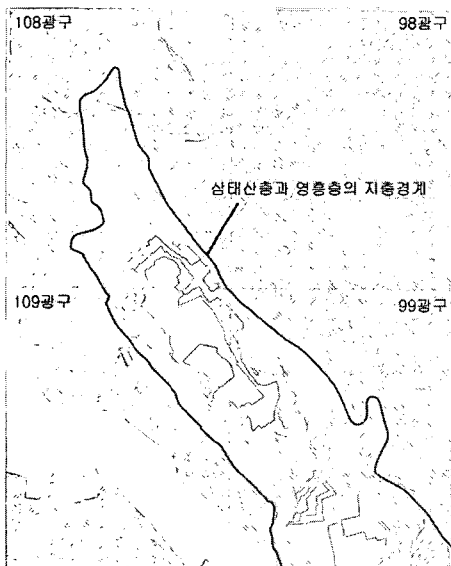


그림 2. 연구 지역 및 3차원 지질 모델링 과정.

이용한 3차원 지질모델, 그리고 각 광구의 매장량 추정 결과이다.

대상 지역의 3차원 지질 모델에 의하면, 구간 내의 200ML까지의 전체 광량은 1,170,506,292톤(433,520,849m³)로 계산 되었으며, 과업 구간 내의 200ML까지의 98광구의 광량은 3,555,052톤(1,316,686m³)로 계산 되었다. 지표상에서는 98광구 내에 광체가 분포하는 양상이 관찰되지 않지만 동쪽으로 경사하는 층의 경계로 지하에서

는 98광구 내에 분포하는 광체가 확인된다. 이밖에 200ML까지의 99광구의 광량은 491,913,183톤(182,190,068m³), 108광구의 광량은 398,745,663톤(147,683,579m³), 109광구의 광량은 276,292,393톤(102,330,516m³)로 계산 되었다. 그림 4는 3차원 지질 모델링을 이용하여 채광 진행에 따른 각 단계별 채광장의 변화를 예측한 것이다.

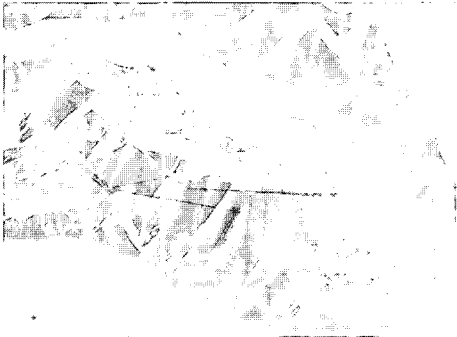
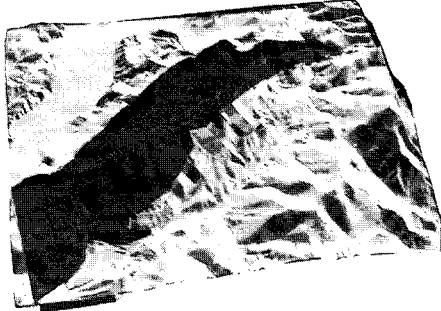
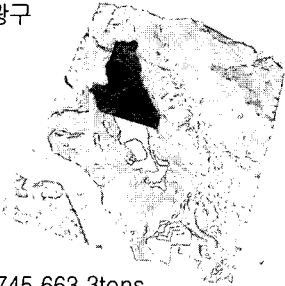
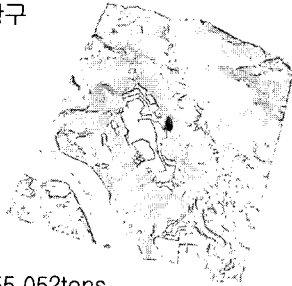
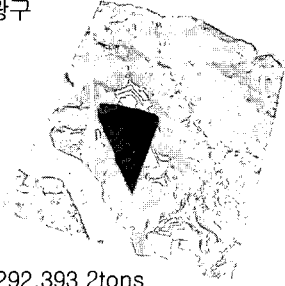
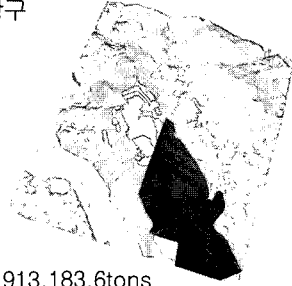
시추 및 시료채취 위치	3차원 지질모델
	
<p>108광구</p>  <p>398,745,663.3tons</p>	<p>98광구</p>  <p>3,555,052tons</p>
<p>109광구</p>  <p>276,292,393.2tons</p>	<p>99광구</p>  <p>491,913,183.6tons</p>

그림 3. 3차원 지질 모델 및 광구별 매장량 추정.

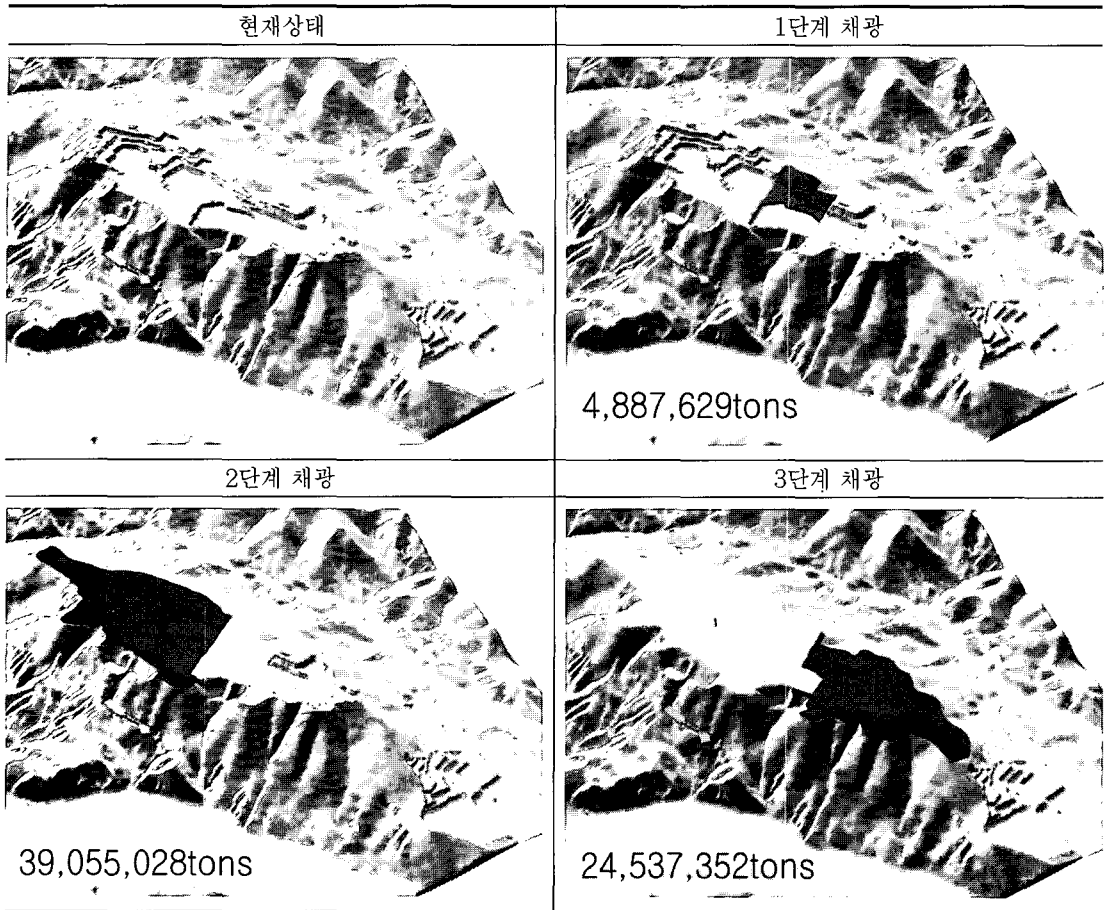


그림 4. 각 단계별 채광량과 채광장의 변화.

### 3D 'Kriging' 기법을 통한 품위도 작성

대상 지역에서 채취한 시료에 대해 주요 성분의 함량을 분석하여 이의 함량 분포를 크리깅 기법을 이용하여 3차원 품위도로 재구성하였으며, 여기서는 CaCO<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>를 대상으로 기술한다.

#### 광물 성분의 지구통계적 특성

베리오그램(베리오그램)은 공간상에 분포하고 있는 변수에 대해, 공간 이동의 변화량 제곱값에 대한 평균을 의미한다. 이는 공간상의 이동에 따

른 해당 변수의 변화량에 대한 절대값을 그 기댓값으로 표현한 것이다. 이 때,  $2\gamma(h)$ 를 베리오그램으로 정의한다. 하지만 일반적인 사용상에서는 베리오그램보다는 semi-베리오그램( $\gamma(h)$ )를 주로 사용한다(Journel, 1986; Journel, & Huijbregts, 1978; Kitanidis, 1985).

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \{V(x) - V(x+h)\}^2$$

그림 5는 매폏광산에서 채취한 석회석 시료의 CaCO<sub>3</sub> 함량(3,149개 시료: 평균 82.4%, 표준 편차 6.59)과 SiO<sub>2</sub> 함량(3,279개 시료, 평

3차원 지질 모델링을 활용한 석회석 광산의 정보화 생산 및 관리 시스템 운영 사례

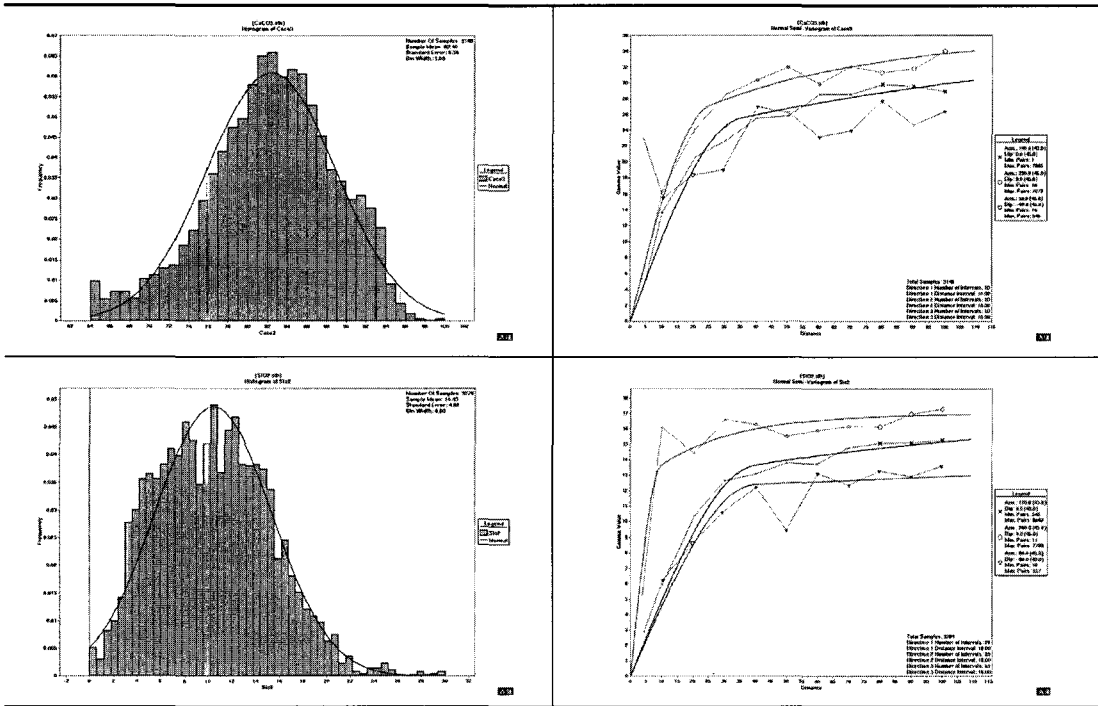


그림 5. 각 성분의 지구통계적 분석 결과. 위: CaCO<sub>3</sub>, 아래: SiO<sub>2</sub>

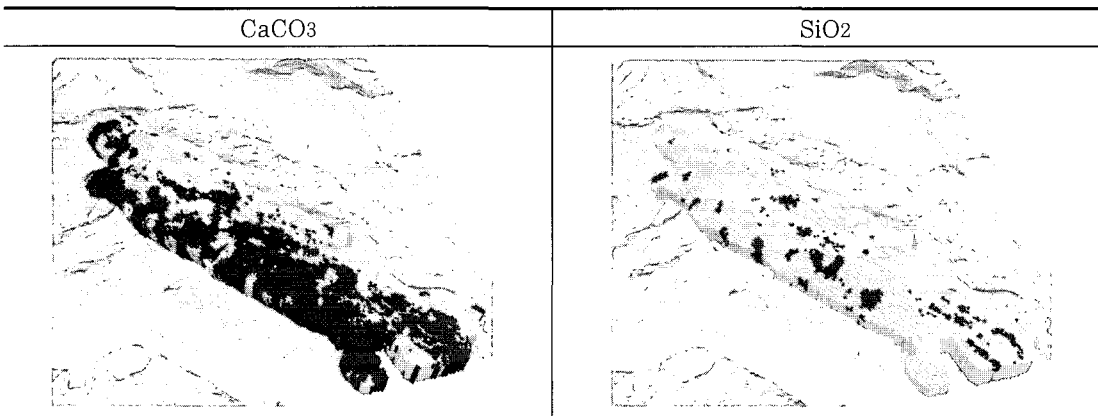


그림 6. 3차원 광체 품위도.

균 10.43%, 표준 편차 4.92)의 통계적, 지구통계학적 분석 결과이다.

**3차원 품위도 및 단계별 채광량 예측**

지구통계학적 분석 결과를 바탕으로 각 성분

대한 3차원 품위도를 작성하였으며, 그림 6은 그 결과이다. CaCO<sub>3</sub>의 품위별 채광량은 0~70% = 1,198,111톤(443,745m<sup>3</sup>), 70~76% = 59,381,137톤(21,993,014m<sup>3</sup>), 76~80% = 188,751,081톤(69,907,808m<sup>3</sup>), 80~84% = 308,135,340톤(114,124,200m<sup>3</sup>), 84~100%

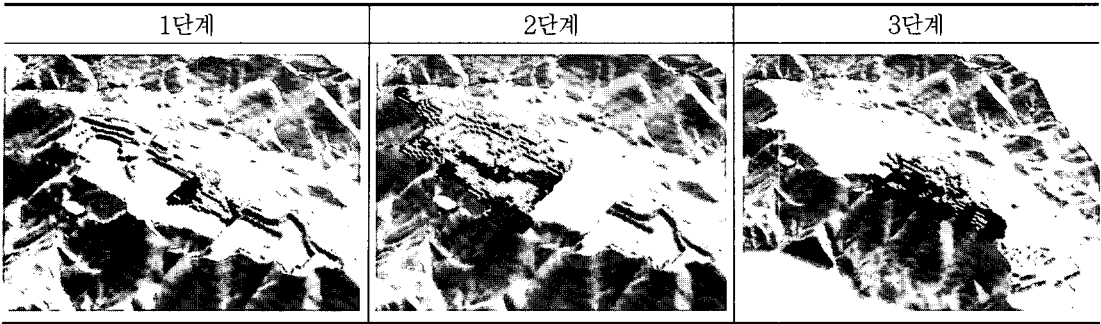


그림 7. 각 단계별 세부 품위도.

표 1. 채광장 변화에 따른 품위별 분석.

광량의 변화		CaCO <sub>3</sub>		MgO		SiO <sub>2</sub>	
1단계 채광	4,887,629tons 1,810,233m <sup>3</sup>	0~70%	50,485tons	0~2%	3,696,328tons	0~5%	144,305tons
		70~76%	351,326tons	2~4%	861,998tons	5~10%	761,210tons
		76~80%	778,610tons			10~15%	3,390,587tons
		80~84%	2,592,880tons	4%~	73,262tons	15~20%	285,002tons
		84~100%	858,290tons			20%~	50,485tons
2단계 채광	39,055,028tons 14,464,825m <sup>3</sup>	0~70%	13,219tons	0~2%	39,626,167tons	0~5%	424,797tons
		70~76%	8,855,532tons	2~4%	1,655,147tons	5~10%	4,367,136tons
		76~80%	16,803,280tons			10~15%	24,008,945tons
		80~84%	11,338,508tons	4%~	373,035tons	15~20%	12,833,185tons
		84~100%	4,643,864tons			20%~	20,356tons
3단계 채광	24,537,352tons 9,087,908m <sup>3</sup>	0~70%	0tons	0~2%	25,263,500tons	0~5%	890,578tons
		70~76%	317,823tons	2~4%	1,383,231tons	5~10%	11,506,074tons
		76~80%	2,594,445tons			10~15%	13,924,954tons
		80~84%	13,737,479tons	4%~	390,920tons	15~20%	716,050tons
		84~100%	10,387,907tons			20%~	0tons

= 353,216,008톤(130,820,744m<sup>3</sup>)이다. 또한 SiO<sub>2</sub>의 품위별 채광량은 0~5% = 37,878,216톤(14,028,969m<sup>3</sup>), 5~10% = 374,387,486톤(138,662,032m<sup>3</sup>), 10~15% = 402,451,934톤(149,056,272m<sup>3</sup>), 15~20% = 95,420,160톤(35,340,800m<sup>3</sup>), 20%~ = 535,202톤(198,223m<sup>3</sup>)이다. 그림 7은 현재상태의 3차원 품위도에 기초하여 향후 1, 2, 3단계 채광장의 변화에 따라 채광되는 부분의 세부 품

위도를 작성한 것이며, 표 1은 각 단계별 광량과 품위를 분석한 결과이다.

### 실제 연도별 채굴 실적 관리

분기별, 반기별로 채광장의 변화 양상을 모델링하고 이를 통해 전체 채굴 실적 및 품위대별 생산 실적을 예상하며 실제의 생산량과 비교한다. 또한, 향후 개발 공정 계획을 수립하여 보다

효과적인 광산의 운영을 가능하게 한다. 그림 8은 2004년 4/4분기의 채광장의 형태와 2005년 2/4분기의 채광장의 형태를 모델링한 그림으로

변화 양상을 확인할 수 있고, 그림 9는 채굴에 따른 2005년 각 성분별 품위대별 생산 실적 모델링 결과를 나타낸 결과이다.

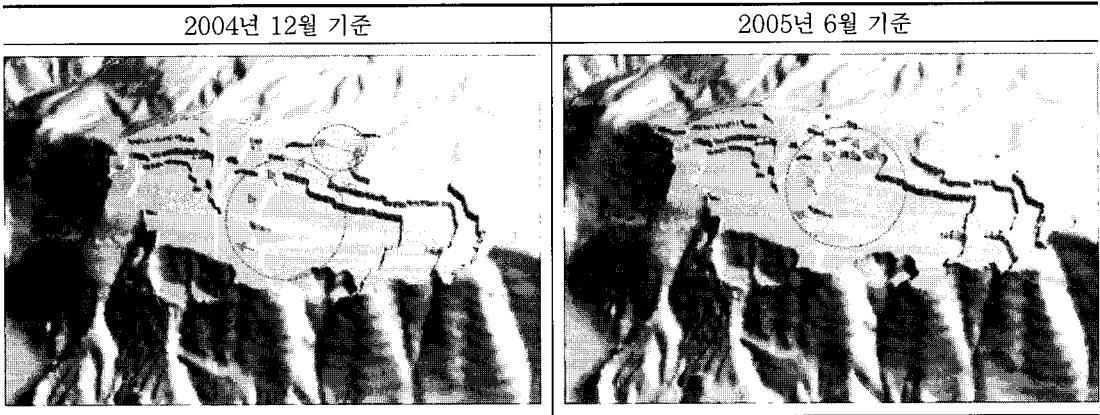


그림 8. 2004년 4/4분기와 2005년 2/4분기의 채광장 변화 양상 모델링 결과.

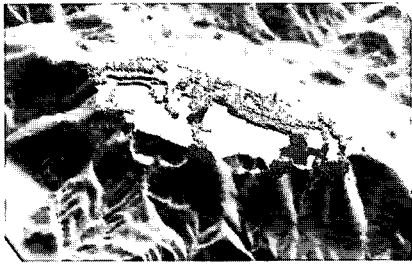





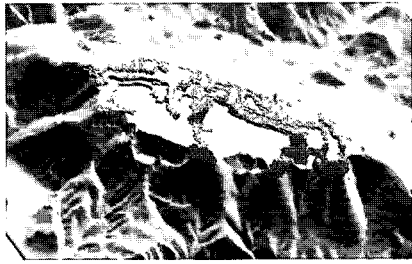





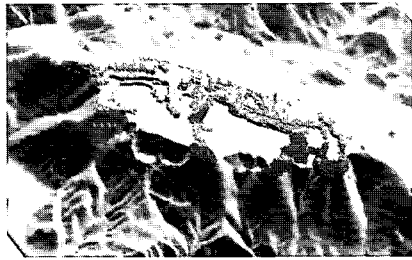



CaCO <sub>3</sub> 기준			품위	생산량(ton)
			0~70%	122,819
			70~76%	675,508
			76~80%	921,146
			80~84%	2,476,392
			84%~	1,965,114
SiO <sub>2</sub> 기준			품위	생산량(ton)
			0~5%	307,049
			5~10%	2,149,343
			10~15%	2,783,441
			15~20%	859,737
			20%~	61,409
MgO 기준			품위	생산량(ton)
			0~2%	5,362,651
			2~5%	614,099
			5%~	184,229

그림 9. 2005년도 각 성분별 품위대별 생산 실적 모델링 결과.

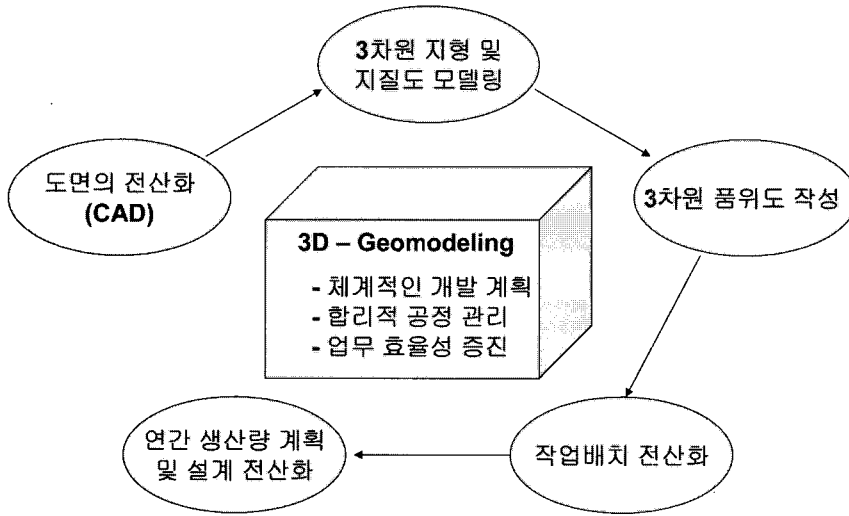


그림 10. 3차원 지질 모델링을 이용한 광산의 정보화 생산 및 관리 체계.

## 맺는 말

본 고에서는 지표 지질 조사와 시추 조사 결과 및 채취 시료 분석 결과를 바탕으로 가행 광산의 3차원 지질 모델링을 수행하고, 3차원 크리깅 기법을 이용하여 품위도 분석을 전산화한 사례를 보여주었다. 전산화된 3차원 지질도 및 품위도는 현재 채광 가능량을 합리적으로 도출할 뿐 아니라, 향후 채광 계획에 따른 품위 관리에 효과적으로 활용될 수 있고, 지속적인 자료의 축적에 따라 보다 정확한 예측과 관리가 가능한 장점을 가지고 있다.

따라서 그림 10과 같이 3차원 지질 모델링을 석회석 광산을 비롯한 각종 가행광산에 적용한다면, 보다 합리적인 광량 및 품위 예측으로 채굴 설계, 작업 배치 및 연간 생산량 계획 등 광산개발 및 생산과 관리를 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- 배기훈, 윤운상, 추석연, 이상태, 2002, "암반 터널설계를 위한 지질분포의 3차원 모델링과 3D kriging 기법을 이용한 암반등급분포의 지구통계학적 처리방안 연구", 지반공학회 논문집
- 이준택, 정두진, 전근식, 한종원, 임병렬, 정의진, 윤운상, 2004, "3차원 kriging을 이용한 석회광산의 품위도 작성 및 활용", 대한자원환경지질학회 2004년도 춘계학술발표회
- Kitanidis, P. K., 1985, "Minimum-variance unbiased quadratic estimation of covariances of regionalized variables", Math. Geol., 17, pp.195~208.
- Journel, A.G, 1986, "Geostatistics: Model and tools for the earth sciences", Math. Geol., 18(1), 3. pp.119~141.
- Journel, A., and C. Huijbregts, 1978, "Mining Geostatistics", Academic Press, NY.