

채굴적 주변 대형 지하광장의 3차원 안정성해석

송원경¹⁾ · 한공창²⁾

Three-dimensional Stability Analysis of A Large Underground Hall in Mined Area

Won-Kyong Song and Kong-Chang Han

ABSTRACT Numerical analysis using FLAC3D has been conducted to estimate the stability of a large underground hall that is to be excavated in a mined area and constructed as an unit of a resort park. Numerical modelling is divided into two stages. The first stage is related to the analysis of the mechanical stability of the hall itself and the second to that of the influence of an adjacent mined cavity upon the hall. In the first stage, the stability of the hall is judged from the interpretation of numerical results in three respects: convergence of the unbalanced force of the model, occurrence of plastic zones and distribution of the displacement. In the second stage, variation of the stress state around the underground hall due to the existence of the cavity is compared to that in the case of the absence of the cavity. Through these analyses, it could be known that the large underground hall is not exposed to any mechanical problems and also not affected by the adjacent cavity.

Key words : 3D numerical analysis, large underground cavern, stability analysis

초 록 폐갱도를 이용하여 관광공원을 조성할 목적으로 지하에 건설될 예정인 대형 지하광장의 안정성을 분석하기 위하여 FLAC3D를 이용한 3차원 수치해석을 수행하였다. 모델링은 두 단계로 나누어 실시되었다. 첫 단계는 지하광장 자체의 안정성 분석이며, 두 번째 단계는 인근의 채굴적이 미치는 영향분석이다. 첫 번째 단계에서는 모델의 불평형력 수렴 여부, 광장 주변의 소성 또는 인장파괴 영역의 발생상황 그리고 변위 양상으로써 광장의 안정성을 판단하였다. 두 번째 단계에서는 채굴적의 존재 유무에 따른 광장 주변의 응력상태 변화를 분석하였다. 해석결과 대형 지하광장은 역학적으로 아무런 문제가 없으며 채굴적으로 인한 영향도 받지 않는 것으로 나타났다.

핵심어 : 3차원 수치해석, 대형지하공간, 안정성 해석

1. 서 론

국내 지하자원 개발 수요의 격감과 함께 폐광산이 늘어남에 따라 이들 지역의 경제 침체뿐만 아니라 폐갱도의 방치로 인한 자연환경의 오염 등 심각한 문제가 발생하고 있다. 이에 따라 최근 각 지방 자치단체에서는 폐갱도라는 지하공간을 개발하여 관광지화 함으로써 지역 경제를 활성화하고 환경을 보전하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 그 대표적인 예로서 강원도 태백시의 석탄 박물관을 들 수 있으며, 울산시의 자수정 동굴나라도 채광 갱도를 이용한 관광시설의 한 예이다.

경기도의 한 지방자치단체에서도 금속광산이었던 K광산 주위의 폐광지역을 중심으로 그 일대를 개발함으로써 관광과 체험학습을 도모할 수 있는 종합적인 테마파크를

조성하려는 사업을 구상중이다. 이 사업에는 채광작업의 재현과 체험을 할 수 있도록 하기 위하여 폐갱도를 이용한 대형 지하광장의 건설을 포함하고 있다.

지하광장은 기존 갱도를 확장하여 폭과 길이 16m, 높이 4m 정도로 건설할 예정이다. 이 지역의 지층은 주로 석회규산염과 편마암으로 구성되어 있어 역학적 측면에서 대형 지하공동의 건설에 매우 유리한 조건을 갖추고 있다(최성웅 외, 1997). 그러나 주변에 산재해 있는 채굴 공동들은 지하광장의 안전을 해칠 수 있는 위험요소로 작용하고 있다.

1)정회원, 한국자원연구소 탐사개발연구부 선임연구원

2)정회원, 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원

원고 접수일 : 2000년 7월 27일

원고 심사 완료일 : 2000년 8월 21일

이에 따라 본 연구에서는 대형으로 건설되는 지하광장 자체의 역학적 안정성뿐만 아니라, 주변에 위치한 채굴공동이 지하광장의 안정성에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 수치해석적 방법으로 분석하였다. 수치해석은 지하광장과 채굴공동 형태의 불규칙성을 감안하여 3차원 모델을 제작하여 수행되었으며 여기에 사용된 프로그램은 FLAC3D이다.

2. 지하광장 주변 갱도조건

2.1 지질 구조

선캠브리아기의 결정편암계인 연천계로 이루어져 있으며 연천계 지층은 하부로부터 탄평리 편암층, 도덕산 석회규산염암층 및 안양규암층으로 3분되어 있다. 편암층은 하부로부터 흑연질편암, 주입편마암, 흑운모편마암, 견운모편마암으로 구성되어 있다. 석회규산염암층은 주로 담회색으로 하부에 열수변질대와 광염대가 발달하고 있다. 안양규암층은 주로 회색 내지 담회색 규암, 국부적으로 석영-백운모 편암으로 구성되어 있다. 석회규산염암층과 편암층과의 경계부분은 상호 중첩에 의한 불연속 협층 발달하고 있다. 각 암층간 경계면의 주향은 대체로 NS방향이다. 주향과 직교 내지 사교하는 EW방향의 계단단층이 발달하고 있으며 여기에 소규모 습곡이 국부적으로 발달하고 있다(최성웅 외, 1997).

2.2 갱도 구조

Fig. 1은 K광산의 갱도구조를 보여주는 평면도와 단면도이다. 갱도는 주수평갱도와 사갱으로 구성되어 있으며 사갱은 32°의 경사를 갖고 있다. 사갱은 모두 6개의 연층을 두고 있는데 수평갱도에 0레벨(101.6 ML), 사갱에 1레벨(75.3 ML), 2레벨(50.3 ML), 3레벨(20.8 ML), 4레벨(7.2 ML), 5레벨(-35.2 ML)이 있다.

지하광장 건설 예정지역은 그림에 표시된 바와 같이 0레벨의 수평갱도에서 사갱 및 좌우 갱도로 연결되는 분기점에 위치한다. 이곳으로부터 남쪽으로 약 50m 떨어져 있는 곳에 대규모 채굴적이 존재하고 있는데, 이것이 지하광장에 영향을 주어 안정성에 해를 줄 것으로 우려된다.

따라서 본 연구에서는 지하광장 자체의 역학적 안정성뿐만 아니라, 주변에 위치한 채굴공동이 지하광장의 안정성에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 분석하기 위하여 수치해석을 실시하였다.

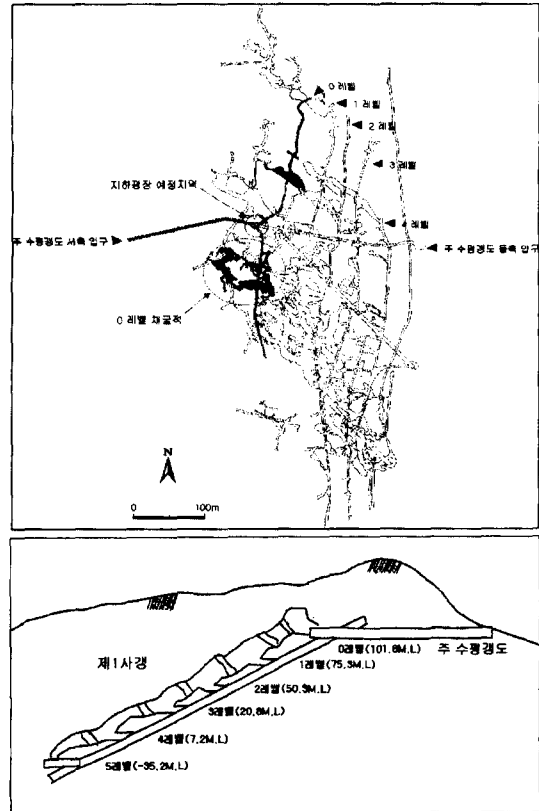


Fig. 1. Plan(top) and section(bottom) view of the mine.

3. 모델링

3.1 모델 구조

대상 광산은 대부분의 폐광산의 경우와 마찬가지로 Fig. 1의 갱내도 이외에는 갱도와 채굴적의 규모를 정확하게 파악할 수 있는 상세한 자료가 존재하지 않기 때문에 3차원 모델을 실제대로 구현하기란 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 갱내도와 현지답사를 근거로 지하광장의 안정성 측면에서 가장 불리한 조건을 갖도록 갱도와 채굴적의 형상을 설정하였다. 또한 3차원 요소망을 구성할 때 서로 다른 형상의 구조를 자유자재로 표현하는 데에는 많은 제약이 따르기 때문에 본 해석모델은 확폭된 지하광장과 기존 채굴적에 초점을 맞추어 갱도 구조를 단순화시켰다.

Fig. 2는 이러한 두 가지 사항을 기준으로 완성한 해석 모델의 구조를 보여주고 있다. 해석모델은 두 개의 주요 부분으로 구성된다. 오른쪽에 보이는 것이 0레벨에

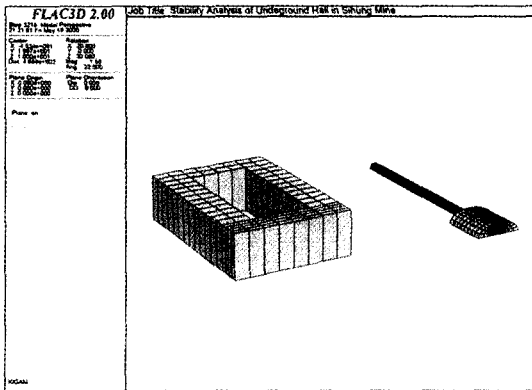


Fig. 2. Perspective view of the numerical model.

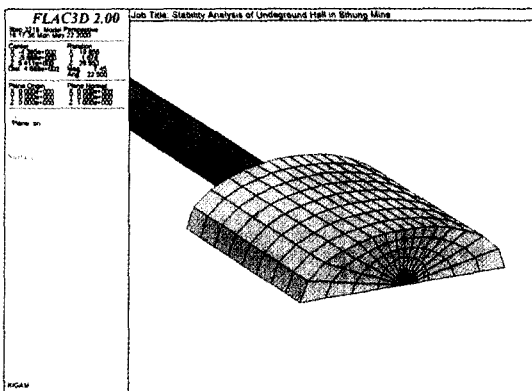


Fig. 3. Zoom-in view of the underground hall.

들어서게 될 광장지역이며 왼쪽은 채굴지역이다. Fig. 3은 지하광장 지역을 확대한 모습으로서 그 크기는 폭과 길이가 각각 16m이고 높이가 4m이다.

실제 갱도들은 해석모델의 갱도 형태와는 달리 여러 단에 걸쳐 복잡하게 형성되어 있으나 광장 수준 이하의 갱도들은 모델에 반영시키지 않았다. 그것은 지하광장이 확장된다 하더라도 광장 하부에 존재하는 기존 갱도나 채굴공동과의 거리에는 변화가 없으므로 이들 구조가 지하광장에는 역학적으로 아무런 영향을 미치지 않을 것이기 때문이다.

반면에 지하광장 예정지역의 남쪽에 위치한 채굴공동은 광장에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 모델에 반영하였으며 광장과는 50m로 결정하였다. 이는 갱내도상에서 채굴적이 광장으로부터 50-60m의 거리를 두고 있기 때문이다(Fig. 1 참조). 채굴적의 높이는 자료가 없어 정확히 알 수 없었으므로 현지답사와 갱내도를 통하여 추정하였다. 즉, Fig. 1의 단면도에서 0레벨에서 3레벨까지

Table 1. Input parameter for the numerical model

γ (kg/m ³)	E (MPa)	ν	C (MPa)	ϕ (°)	T* (MPa)
2,700	10,000	0.22	3.0	30	1.75

*T : tensile strength

상부 3개 레벨간 높이가 25-30m인 점으로 미루어볼 때 채굴적이 상위 레벨까지 연장되지는 않았을 것이므로 채굴적의 높이는 20m를 넘지 않을 것으로 보고 예상할 수 있는 최대 높이인 20m로 결정하였다. 다만 채굴공동의 형태가 Fig. 2에서 보듯이 직각일 수는 없으나 모델 제작의 편의상 이 형태를 취하였다. 그것은 안정성 측면에서 사각 형태의 공동이 원형보다 불리하다는 점을 고려해 볼 때 수치해석 목적에 위배되지 않기 때문이다.

지표 지형 역시 모델의 복잡성을 피하기 위하여 수평면으로 가정하였으며 지표로부터 광장바닥까지의 심도는 Fig. 1의 단면도를 참고하여 60m로 설정하였다.

3.2 지반 물성

지층은 지표부근의 토층과 천부의 풍화암, 연암 및 경암으로 구성되어 있으며 채굴적과 지하광장은 경암층에 위치한다. 그런데 이들 지층들을 3차원 모델상에서 실제와 같이 구현하는 것은 불가능하며, 본 해석의 목적이 지하에 건설될 구조물의 안정성 분석에 있으므로, 수치모델의 지반은 지하광장이 속해 있는 경암층만으로 구성되어 있는 것으로 간주하였다.

경암에 대한 입력물성은 기존 보고서(한공창, 2000)에 나와 있는 자료를 이용하였으며 이를 Table 1에 수록하였다. 이들 물성들은 현지 암반의 RMR값 50과 경험식을 이용하여 환산된 값들이다. 물성계산에 사용된 경험식은 아래와 같다. 한편 초기지압은 지층의 자중에 의해 형성되는 것으로 간주하여 수치해석적으로 구하였다.

$$E = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (\text{GPa}) \quad (1)$$

$$C = 250 e^{0.05RMR} \quad (\text{kPa}) \quad (2)$$

$$\phi = 0.5RMR + 5 \quad (^\circ) \quad (3)$$

4. 해석 결과

4.1 지하광장의 안정성

지하광장의 안정성은 모델에 채굴적을 두지 않은 상태

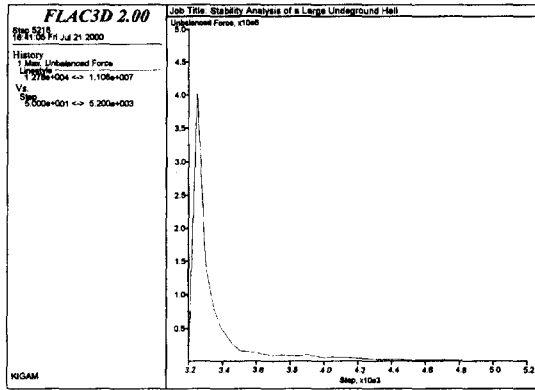


Fig. 4. Variation of the unbalanced force versus calculation step.

에서 모델의 불평형력 수렴 여부, 광장 주변의 소성 또는 인장파괴 영역의 발생상황 그리고 변위 양상 등을 종합하여 판단하였다.

불평형력이란 모델의 어떤 요소들에 작용하는 힘이 평형을 이루지 못할 때 발생한다. 이러한 불평형력 곡선의 수렴여부는 모델의 일부에서 파괴가 일어나고 있는지 아닌지를 판단할 수 있는 기준중의 하나이다. Fig. 4는 계산 진행에 따라 모델의 불평형력 변화를 도시한 그림이다. 그림에서 불평형력은 0에 가까운 매우 작은 값에 수렴하고 있으므로 모델은 힘의 평형을 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 모델의 어느 곳에서도 파괴가 일어나지 않고 안정한 상태를 유지할 가능성을 보여준다.

Fig. 5는 광장 주변에 발생하는 파괴영역을 도시한 그림이다. 그림은 광장 주변의 어느 곳에서도 소성 또는 인장 파괴영역이 발생하지 않음을 보여준다. 따라서 광장

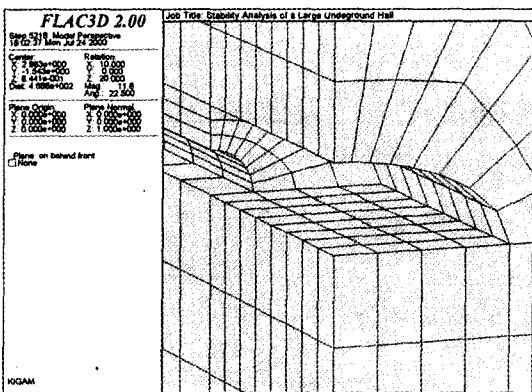


Fig. 5. Plastic state around the underground hall.

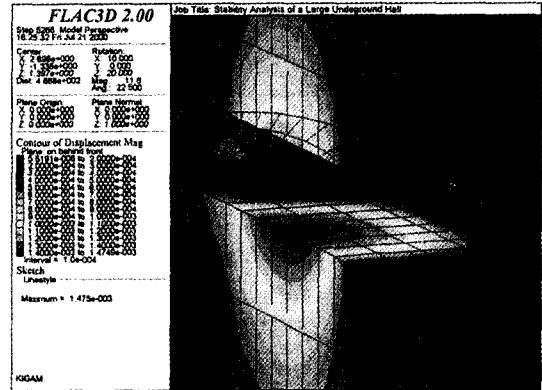


Fig. 6. Displacement contour and vectors around the underground hall.

주위에는 어떠한 영역도 파괴상태에 이르지 않고 탄성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 곧 광장을 원하는 크기로 확장하더라도 안정성에는 아무런 문제가 없음을 의미한다.

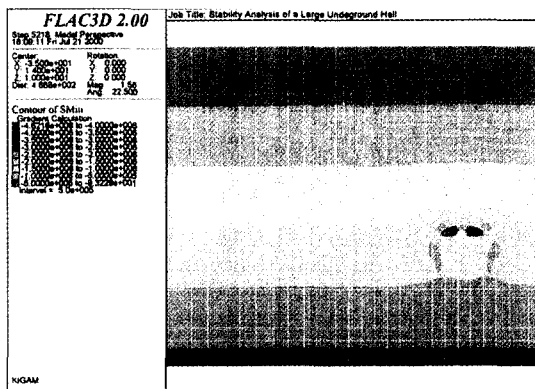
광장 주변의 변위에 대한 해석 결과는 Fig. 6과 같다. 이 그림은 변위 등고선과 변위벡터를 보여주고 있다. 변위는 광장의 천장과 바닥의 중앙부에서 가장 많이 발생하는데 천장에서보다는 바닥에서 더 많은 변위를 일으키고 있는 것으로 나타났다. 그러나 그 절대량은 최대 1.5 mm에 불과하므로 우려할 정도는 아니다. 따라서 지하광장은 변위에 대한 불안정성도 나타나지 않을 것으로 예측된다.

이상과 같이 불평형력 곡선과 파괴영역 그리고 변위에 대한 해석결과로부터 대규모 지하광장은 역학적으로 안전하다는 사실을 알 수 있다.

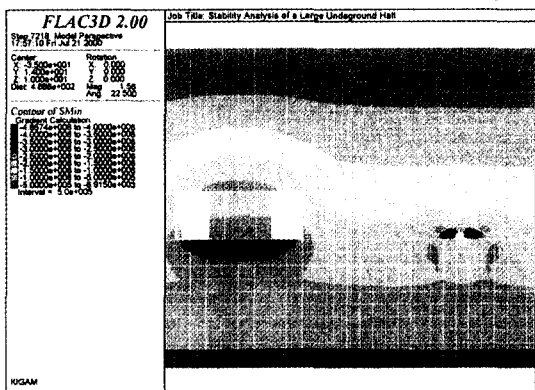
4.2 채굴적 영향

채굴적 영향을 분석하기 위하여 채굴적이 있을 경우와 없을 경우의 해석결과를 비교하였다. 해석순서는 먼저 지하광장만을 두고 계산한 다음 채굴적을 제거한 후 다시 계산을 수행하였다. 실제로는 채굴적이 존재하는 상태에서 지하광장이 건설되나 본 해석에서는 그 역으로 계산을 진행하였다. 이는 만일 채굴적과 지하광장을 굴착순서대로 해석할 경우 지하광장 주변에 발생하는 응력의 변화가 광장굴착 자체에 기인한 것인지 아니면 기존 채굴적의 영향에 기인한 것인지를 구별할 수 없기 때문이다.

Fig. 7은 두 경우에 대한 최대주응력 분포를 수직단면



(a) the case of the absence of the mined cavity



(b) the case of the presence of the mined cavity

Fig. 7. Comparison of the maximum principal stress distributions around the underground hall with respect to the mined cavity.

상에서 비교한 그림이다. Fig. 7a는 채굴적이 없을 경우이고 b는 채굴적이 존재할 경우이다. Fig. 7a와 b를 비교해 보았을 때 지하광장 주위의 최대주응력 분포는 채굴적의 유무와는 관계없이 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 기존의 채굴적이 지하광장 굴착에 따른 응력변화에 아무런 영향을 미치지 않는다는 사실을 말해준다.

이를 보다 구체적으로 알아보기 위하여 두 경우에 대하여 광장 벽면으로부터 채굴적 방향으로 거리에 따른 수직응력의 변화를 비교하였다. Fig. 8이 그 결과를 보여주는 그림으로서 광장 벽면으로부터 4m 간격으로 수직응력의 크기 변화를 도시한 곡선이다. 두 경우 모두 벽면에서의 수직응력은 공동 주변의 응력집중으로 인하여 광장에서 충분히 먼 곳보다 약 두 배 크며, 벽면에서 멀어질수록 그 크기가 급격히 감소하여 18m인 광장 직경의 한 배정도 떨어져 있는 곳에서는 이미 그 영향력이

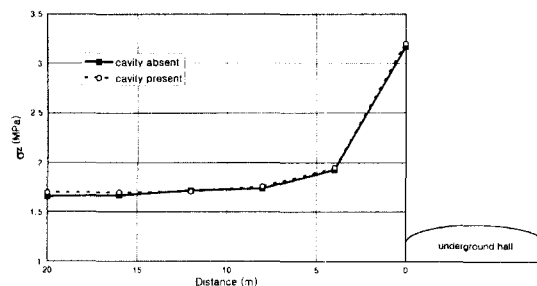


Fig. 8. Comparison of the vertical stresses according to the distance from the hall between in the case of the absence and the presence of the mined cavity.

거의 사라지고 있음을 볼 수 있다. 이는 지하광장 주변의 응력분포는 기존 채굴적의 영향을 받지 않음을 말해준다.

이와 같이 채굴적의 유무와 상관없이 최대주응력 또는 응력의 차가 거의 없는 것은 지하광장이 채굴공동으로 인한 응력집중의 영향권 밖에 위치하고 있기 때문으로 해석된다. 이러한 해석결과로부터 기존의 채굴적은 지하광장의 안정성에 아무런 영향을 끼치지 않는다는 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 폐갱도를 활용한 관광지 개발 목적으로 폭과 길이 16m, 높이 4m 규모로 지하에 건설되는 대형광장의 안정성을 분석하기 위하여 FLAC3D를 이용한 3차원 전산해석을 실시하였다. 전체 갱내도외에는 갱도와 채굴적을 모델링하는데 필요한 상세 도면이 없기 때문에 역학적으로 가장 불리한 규모와 형상으로 모델을 제작한 후 지하광장 자체의 역학적 안정성과 함께 주변 채굴공동이 지하광장의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

지하광장 자체의 안정성을 분석하기 위하여 불평형력 곡선, 소성영역 발생상태, 변위분포 등을 살펴본 결과 불평형력은 0에 가까운 매우 작은 값으로 수렴하며, 지하광장 주변에 압축 또는 인장파괴로 인한 소성영역이 전혀 발생되지 않았다. 또한 변위도 광장의 천정과 바닥에서 최대 1.5 mm 정도밖에 발생하지 않으므로 지하광장의 안정성에는 아무런 문제가 없을 것으로 해석되었다. 다만 본 해석모델에서는 불연속면을 고려하지 않았으므로 실제 시공시에는 암반질리 상태를 파악하여 국부적인

붕락의 가능성에 대비하여 항상 주의를 기울여야 할 것이다.

한편 채굴적의 존재 유무에 따른 광장 주변의 응력변화를 비교해 본 결과, 최대주응력 분포에 아무런 변화가 발생하지 않았으며, 광장 벽면으로부터 거리에 따른 수직 응력의 크기도 거의 차이가 없는 것으로 드러났다. 따라서 기존의 채굴적은 지하광장의 안정성에 전혀 영향을 미치지 않는다는 사실을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 최성웅, 권광수, 김임호, 조원재, 신희순, 이종림, 송원경, 신중호, 박찬, 1997, 지반침하 우려지역의 안정성 평가기법 및 대책 연구, 한국자원연구소, 연구보고서, KR-97(C)-33, 102p.
2. 한공창, 정소길, 신희순, 송원경, 신중호, 최성웅, 박찬, 2000, 가학폐광산 생태환경 조성계획연구, 광명시, 한국자원연구소, 112p.

송 원 경



1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1996년 프랑스 에콜데민느 지질공학과, 공학박사

Tel : 042-868-3247

E-mail : songwk@kigam.re.kr

현 재 한국자원연구소 탐사개발연구부 선임연구원

한 공 창



1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1989년 Ecole des Mines de Paris, 공학석사
 1993년 Ecole des Mines de Paris, 공학박사

Tel : 042-868-3241

E-mail : hankc@kigam.re.kr

현 재 한국자원연구소 탐사개발연구부, 책임연구원