

## 전력생산을 위한 암반내 압축공기저장공동의 안정성분석

### Stability Analysis of Compressed Air Storage Caverns in Rockmass

신희순<sup>1)</sup>, Hee-Soon Shin, 신중호<sup>1)</sup>, Joong-Ho Synn, 최성웅<sup>2)</sup>, Sung-Oong Choi,  
한일영<sup>3)</sup>, Il-Yeong Han, 김정엽<sup>4)</sup>, Jung-Youp Kim

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources(KIGAM)

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources(KIGAM)

<sup>3)</sup> SK건설(주) 수석연구원, Principal Research Engineer, SK Engineering & Construction

<sup>4)</sup> SK건설(주) 과장, Senior Engineer, Information Technology Planning Team, SK Engineering & Construction

**SYNOPSIS** : CAES which is called as a compressed air energy storage was firstly developed at Huntorf, German in 1978. The capacity of that system was 290MW, and it can be treated as a first commercial power plant. CAES has a lot of merits, such as saving the unit price of power generation, averaging the peak demand, improvement of maintenance, enlarging the benefit of dynamic use. According to the literature survey, the unlined rock cavern should be proposed to be a reasonable storing style as a method of compressed air storage in Korea. We decided the hill of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources as CAES site. If we construct the underground spaces in this site, the demand for electricity nearby Taejon should be considered. So we could determine the capacity of the power plant as a 350MW. This capacity needs a underground space of 200,000m<sup>3</sup>, and we can conclude 4 parallel tunnels 550m deep from the surface through the numerical studies. Design parameters were achieved from 300m depth boring job and image processing job.

**Key words** : compressed air energy storage, CAES, caverns, rockmass

## 1. 서 론

양수발전소가 심야잉여전력을 이용하여 물의 위치에너지를 증가시켜 주간에 발전시키는 순수한 전력 저장시설인 반면, 압축공기저장(CAES: Compressed-Air Energy Storage)에 의한 발전방식은 심야에 공기를 40~80 기압의 고압으로 압축시켜 지하 저장공동에 저장하였다가, 주간에 이를 turbine에 뿜어 LNG를 연료로 하여 전력을 생산하는 방식으로서 전력저장과 화력발전의 성격을 복합적으로 지닌 발전 시설이다. 현재 많이 사용되고 있는 양수발전방식은 건설비가 많이 들고 환경문제를 야기할 가능성이 있으며, 입지선정이 어려운 단점이 있다. 지하에 건설되는 CAES발전소는 이러한 단점을 극복할 수 있을 뿐만 아니라 도시 근교에서 대규모 시설을 건설할 수 있는 장점이 있다. 세계 각국에서 양수발전 이후의 전력저장시설로서 연구중인 중규모 이상의 전력저장시설은 크게 SMES, CAES와 해수양수발전이 있다. 이중 현재 전세계적으로 상용화된 유일한 전력저장시설은 CAES이다. CAES는 압축공기저장 발전시스템으로 불리는 전력저장시설로서 1978년 독일의 Huntorf에서 290MW급의 발전소가 세계 최초로

가동을 시작한 이후, 1991년 미국에서 110MW급의 McIntosh 발전소가 가동을 시작한, 세계적으로 상용화 초기단계에 있는 전력저장시설이다. 본 논문에서는 이러한 CAES전력시스템의 국내적용을 위하여 대전대덕연구단지내 한국지질자원연구원부지내에 CAES지하저장 공동을 설계(350MW급)하였으며 이러한 공동의 안정성평가를 실시하였다. 저장공동의 심도는 550m 이며 공동의 폭은 14m, 높이는 22m, 길이는 180m로 이러한 공동 4개가 병렬로 배열되었다. 부지특성 조사를 위하여 지형 및 지질조사, 3개공 시추, 수압시험, BIPS조사, 전기비저항탐사, GPR탐사, 초기지압측정 등이 실시되었다.

## 2. 압축공기저장방법

압축공기를 지하에 저장하는 방식에는 정압식과 변압식이 있다. 정압식은 수직갱을 이용하여 지하공동과 상부저수지를 연결시켜, 저장된 압축공기를 사용함에 따라 감소되는 저장공기의 압력을 수위에 의하여 보상하는 방식으로 상부저수지의 건설비와 수직갱의 굴착비가 더 필요하지만 저장된 공기를 100% 활용할 수 있다는 것이 장점이다. 반면 변압식은 저장공기를 사용함에 따라 감소된 압력을 보상하지 못하므로, 일정압력에 도달하면 더 이상 전력을 생산할 수 없어 저장된 공기를 모두 활용할 수 없으며, 저장심도가 정압식에 비하여 상대적으로 깊다는 것이 단점이다(그림 1 참조).

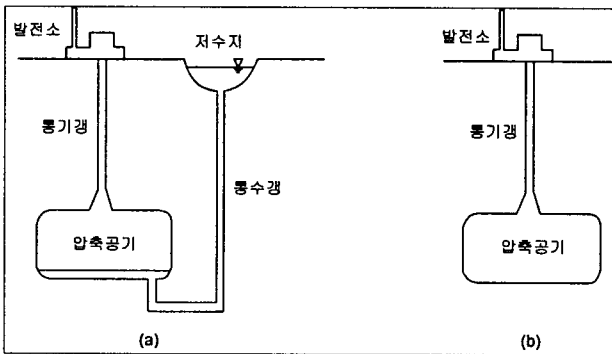
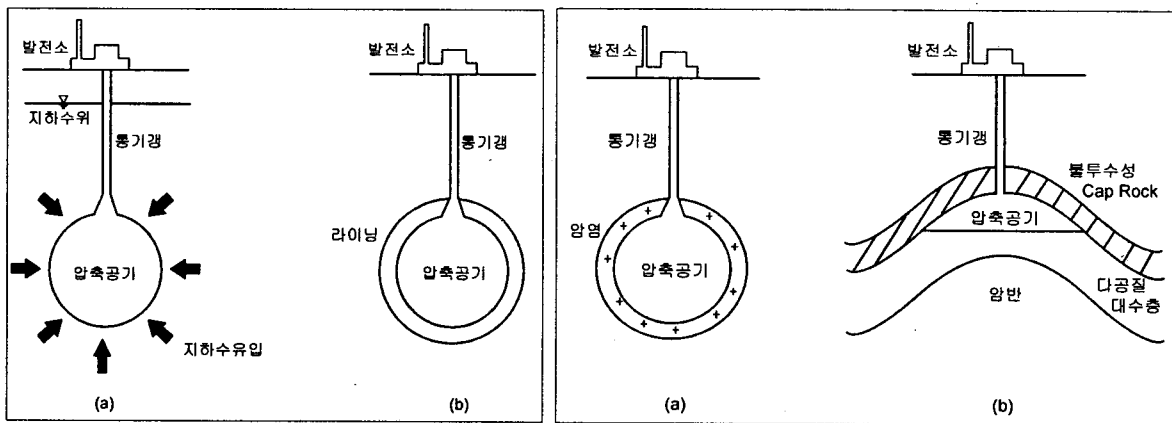


그림 1. 압축공기의 저장방식:(a)정압식,(b)변압식

수백미터 이상의 낙차를 필요로 하는 양수발전소의 입지는 지형적 조건에 크게 영향을 받는 반면 CAES는 거의 대부분의 지질조건에서 건설이 가능하기 때문에 양수발전에 비한다면 입지 제약조건이 거의 없다고 할 수 있다. 국내에서 가장 적용 가능성이 높은 방식은 지하수압에 의하여 고압의 기체를 저장하는 무복공식 대심도 암반 공동형이다(그림 2 참조).



(a)무복공식암반공동형(b)라이닝식암반공동형

그림 2. 압축공기의 저장공동

(a) 암염공동형

(b) 대수층형

그림 3. 압축공기의 저장장소

이 방식은 이미 국내에서 실용화된 LPG 지하저장 방식과 동일하며, 차이점은 기존의 LPG 저장공동이 지하 120m 정도에서 8기압의 프로판가스를 저장하는 반면, CAES는 지하 500m, 안팎에서 40기압 정도의 공기를 저장한다는 점이다. 세계최초의 CAES 발전소인 독일의 훈돌프 발전소나 미국의 매킨토시 발전소의 압축공기 저장방식은 암염공동형이다(그림 3 참조). 암염공동은 암염 덩이 존재하는 곳에서

용해 굴착법(solution mining)에 의하여 쉽게 굴착할 수 있어 건설비가 매우 저렴하며, 기밀성이 뛰어나지만, 세계적으로 암염 돔이 분포하는 지역은 국한되어 있으며, 또한 국내에도 암염 돔은 존재하지 않기 때문에 국내 적용가능성은 없다. 이밖에 미국, 이탈리아, 이스라엘 등지에서 추진중인 대수층 저장방식이 있다. 돔 구조를 갖는 대수층 내에 압축공기를 저장하는 방식으로서 암염공동형과 마찬가지로 건설비는 매우 저렴하지만 입지가 매우 제한적이며, 국내 여건에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 우리나라의 경우 여러 가지 면에서 압축공기 지하저장 시설의 건설은 유리한 점을 가지고 있으며, 압축공기의 저장방식으로는 무복공식의 암반공동형이 추천될 수 있을 것이다.

### 3. 지하저장시설에 대한 안정성 분석

#### 3.1 공동의 크기와 형상

이상적인 공동형태는 원형 혹은 그것에 가까운 형이 유리하기 때문에 지하발전소와 같은 대단면에는 달걀형의 단면형태가 이용된다. 그러나 시공성, 경제성, 안정성 등을 고려한다면 말발굽형 단면이 적당하다. 서울 화력발전소 부지내 지하 압축공기 저장시설 설계(한일영 외, 1998)에 적용된 공동 단면을 기준으로 그림 4와 같은 규모의 예비공동을 설계하였다. 공동의 폭은 14m, 높이는 22m이며 3단계로 나누어 굴착된다. top heading은 변형된 계란형의 아치형 천반을 갖으며 높이는 7m이다. 이렇게 설계된 공동의 단면적은 290m<sup>2</sup>이다. 저장공동의 용량을 20만m<sup>3</sup>로 가정할 때 공동의 총연장은 약 700m이므로 길이가 180m인 공동 네 개를 병렬로 배열한다. 그림 5는 이와 같이 설정된 저장공동을 한국지질자원 연구원 부지내에 설치한 도면이다.

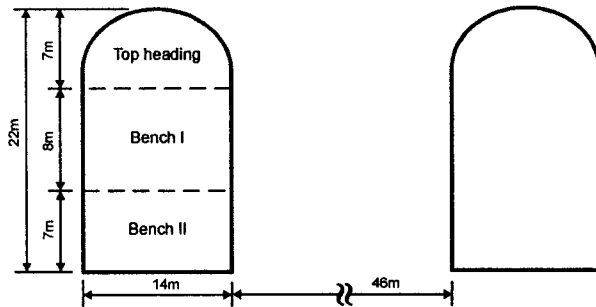


그림 4. 저장공동 단면

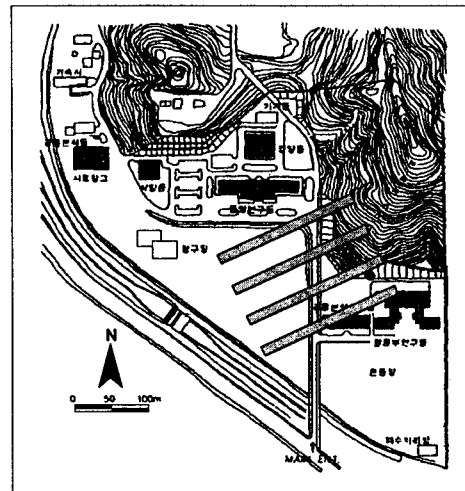


그림 5. 지하 저장공동 배치도

#### 3.2 공동간격결정을 위한 2차원 해석

저장 시설은 네 개의 공동이 병렬로 구성될 예정이므로 공동간 간격은 공동의 안전에 큰 영향을 미치게 된다. 자연 수봉 방식에 있어서 공동 사이의 암반에 간극수압이 충분히 얻어지지 않을 가능성이 있기 때문에 기밀성의 관점에서 검토가 필요하다. 안정성에 영향을 미치는 공동이간거리는 다음과 같은 조건에 따라 좌우된다. ① 암반의 역학적 성질, ② 초기지압의 크기와 방향, ③ 불연속면(단층, 파쇄대, 판리, 층리 등)의 규모·방향, ④ 단면의 형태 및 크기.

따라서 앞에서 결정된 공동의 규격에 대하여 적정 공동간격을 구하기 위해 다음과 같이 FLAC-2D에 의한 2차원 해석을 실시하였다.

### 3.2.1 단일공동에 대한 해석

#### (1) 모델의 구성

공동의 안정성을 분석하기 위하여 우선 단일 공동에 대한 수치해석을 실시하였다. 수치해석에는 FLAC을 이용하였으며 지하공동이 좌우 대칭구조를 갖고 있으므로 모델의 구조는 그림 6과 같이 공동의 오른쪽 부분만으로 제작되었다. 공동이 500m 이하의 심부에 위치하여 막대한 지반압을 받고 있으므로 공동 굴착에 따른 영향범위는 넓지 않고 공동 주위에 국한된다. 따라서 모델의 경계면을 공동 주변의 일정 거리로 제한하였으며 모든 경계면의 변위를 구속하는 조건을 사용하였다. 초기응력은 심도에 따른 상부하중과 축압계수 K에 따라 산정하여 모델의 각 요소에 할당하였다. 초기지압은 해당 심도에 대한 추정값인 1.5를 적용하였으나, 비교를 위하여 K=0.5, 1.0, 2.0일 경우에 대해서도 해석을 실시하였다. 설계정수를 실험실에서 시험 결과와 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 실험실에서 구한 물성값과 현지암반 물성 산정결과와의 비교

Density (g/cm <sup>3</sup> )	v	Em(GPa) Lab/H	Tm(MPa) Lab/HB	θm Lab/T	cm(MPa) Lab/HB
0.27	0.22	50/28.2	12/0.62	53.9/39°	25/2.95

\* H : Hoek et al.(1998), HB : Hoek and Brown(1980), T : Trueman(Mohammad et al., 1997)

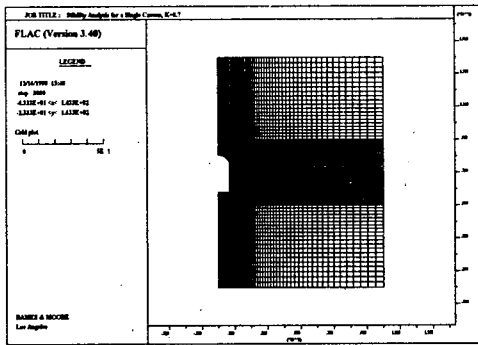
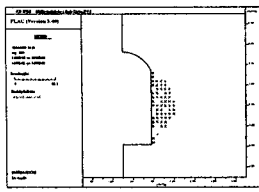


그림 6. 수치해석 모델의 요소망

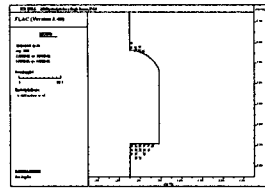
공동의 보강대책 수립을 위하여 모델은 보강이 없는 자연 암반 굴착 상태로 수치해석을 수행하였으며 공동은 전단면 굴착을 한 것으로 가정하였다. 모델에 적용된 물성은 표 1에 표시된 현지 암반의 물성값을 사용하였다. 지하수면은 지표에서 형성되고 있으므로 지표로부터 공동까지 완전포화 상태에 있다고 가정하고 모델 각 요소에 심도에 해당하는 간극수압을 할당하였다.

#### (2) 해석결과

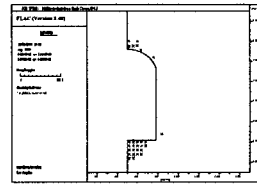
K값에 따라 공동 주변에 발생하는 소성영역의 분포와 응력분포의 변화를 그림 7에 도시하였다. 수직 응력이 수평응력보다 크면 소성영역이 측벽에서 발생하는 반면, 수평응력이 수직응력보다 큰 경우에는 공동의 상하반에 소성영역이 발생되고 있음을 알 수 있다. 그리고 K값이 커짐에 따라 소성영역의 범위가 확대되는 경향을 보이고 있으며 상반에서보다 하반 쪽에 더욱 발달되고 있다. 이는 K=1.5일 때 공동 주변의 응력분포를 도시한 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 공동의 측벽보다는 상하반에 응력 집중이 더 심하기 때문이다. 수직응력보다 수평응력이 크므로 측벽에서 가장 많은 변위가 발생하며 그 크기는 3cm 정도이다(그림 9). 천정과 바닥에서는 1cm 내외의 변위가 발생하는 것으로 나타났다. K=1.5일 때 소성영역은 상반에서 3m, 하반에서 5m 정도까지 발달되므로 상반과 하반에 록볼트를 각각 5m와 7m 깊이까지 시공하여 공동을 보강할 필요가 있다. 만일 K=2라면 측벽부에 인장파괴가 일어나므로 측벽의 보강도 요구된다.



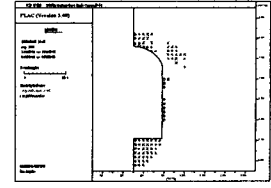
(a) K=0.5



(b) K=1.0

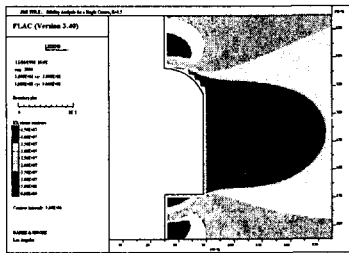


(c) K=1.5

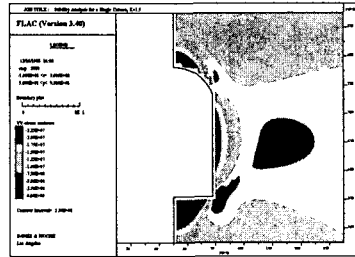


(d) K=2.0

그림 7. K값에 따른 소성영역의 변화



(a) 수평응력분포



(b) 수직응력분포

그림 8. 공동주변의 응력분포 (K=1.5)

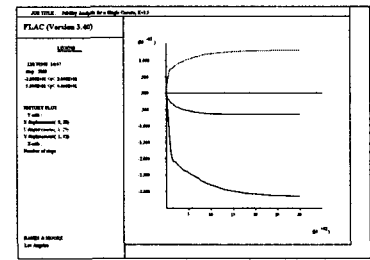
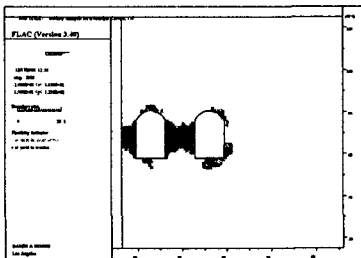


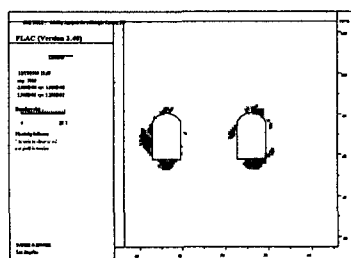
그림 9. 공동 벽면의 변위량 (K=1.5)

### 3.2.2 복합공동 해석에 의한 공동간격 결정

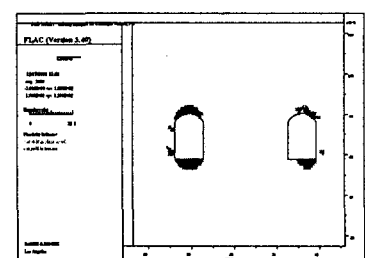
역학적으로 공동 상호간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 두 개의 공동으로 구성된 대칭모델을 제작하여 수치해석을 실시하였다. 초기응력 조건과 해석과정은 단일공동의 경우와 같으며 공동간격이 공동폭의 1배, 2배 3배인 경우를 분석하였다. 그림 10은 해석 결과로서 공동 주위에 발생하는 소성영역의 변화를 보여준다. 그림 10(a)에서 저장공동들이 공동 폭만큼 밖에 떨어져 있지 않으면 공동 사이의 소성영역이 연결되어 파괴가 일어나게 된다는 사실을 알 수 있다. 공동이 폭의 두 배만큼 떨어져 있으면 파괴가 일어날 정도로 소성대가 발전되지는 않으나 가운데 위치한 공동의 측벽에서 단일 공동의 경우에는 발생되지 않던 소성영역이 비교적 넓게 발생되므로 이 부분의 안정성에 문제의 여지가 있다(그림 10(b) 참조). 그림 10(c)에서 볼 수 있듯이 공동간격이 폭의 3배일 때 발생하는 소성영역은 단일공동의 경우와 유사하게 나타났다. 또한 그림 11에서 보는 바와 같이 응력집중이 중첩되는 구간이 공동 사이에 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 해석 결과는 이 거리에서는 공동간에 서로 영향을 미치지 않는다는 사실을 말해주므로 공동은 최소한 폭의 3배 이상 떨어져야 안전상 문제가 발생되지 않을 것이다.



(a) 공동간격=공동폭

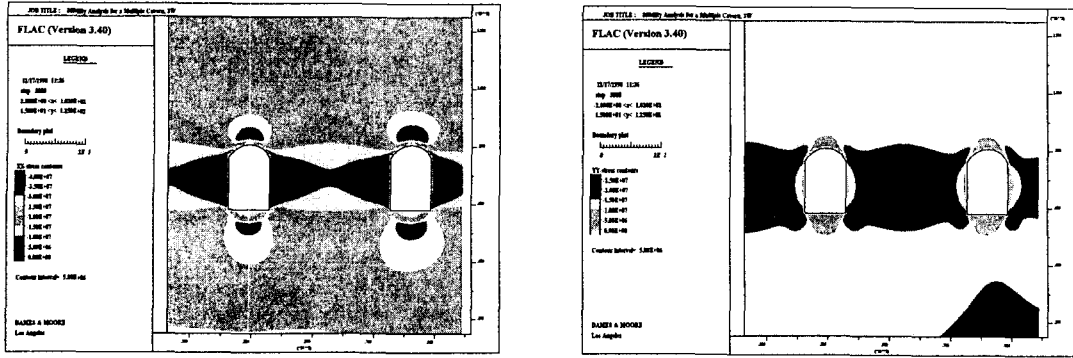


(b) 공동간격=2×공동폭



(c) 공동간격=3×공동폭

그림 10. 공동간격에 따른 소성영역의 변화



(a) 수평응력분포 (b) 수직응력분포  
 그림 11. 공동간격이 공동 폭의 3배일 때 공동주변의 응력분포

### 3.3 수직갱 주위 안정성 분석을 위한 3차원 해석

#### 3.3.1 3차원 해석모델 구성

공동의 배치 형태는 2차원 수치해석을 통하여 이미 검토된 바가 있다. 즉, 50bar의 저장압력을 유지해야 하는 공동의 특성상 지하공동의 적정 심도는 550m로 결정되었으며, 공동의 폭을 14m, 높이를 22m로 할 때 공동의 단면적은 290m<sup>2</sup>이 되므로 저장공동의 용량을 20만m<sup>3</sup>으로 하기 위해서는 길이가 180m인 공동 4개를 병렬로 배열하는 형태로 전체적인 layout을 설계하였다. 또한 공동의 양쪽 끝에는 공동의 굴착 및 운영을 위한 2개의 수직갱이 위치하게 될 것이다. 지하공동의 layout 선정 과정은 다음의 표 2와 같이 정리될 수 있다.

표 2. 지하공동의 layout 선정 과정

검토항목	필요 사항	기본 개념	설계기준	비고
지하공동의 심도	공동 내 저장압력 ( $\geq 50\text{bar}$ )	지하수위로서 압력을 보상	적정 심도(=550m)	지하수면은 지표면과 동일함
지하공동의 단면 형태	시공성, 경제성, 안정성이 보장되는 최대의 유효단면적 요구	Horse Shoe 형태의 단면	폭=14m, 높이=22m 단면적=290m <sup>2</sup>	그림 4 참조
지하공동의 배열	저장공동의 용량 ( $\approx 20\text{만m}^3$ )	단면적 290m <sup>2</sup> 의 공동으로 총연장 700m가 필요	길이 180m의 공동 4개를 병렬로 배열	그림 12 참조
지하공동간의거리	응력집중현상 등 공동상호간의 영향 최소화 필요	공동간의 이격거리 > 공동 폭의 3배	공동간의 이격거리=46m (>3×14m)	그림 4 참조

따라서 표 2의 설계기준을 토대로 지하저장공동의 3차원적 layout을 개념적으로 표현하면 그림 12와 같다. 즉, 공동 간격은 공동 폭의 3배 이상을 적용하여 46m로 하였으며, 4개의 공동은 각각 터널로 연결되고 4개 공동의 대각선 방향으로 양쪽 끝에 수직갱이 각각 굴착되는 것으로 하였다. 그림 12 지하저장공동의 3차원적 layout따라서 그림 12 및 그림 5를 참조로 3차원 해석모델을 그림 13과 같이 작성할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 지표하부 550m에 존재하게 될 지하저장고의 요소망 작성을 위해 overburden 전체를 해석모델에 반영하는 대신, 공동 주위 부분만 모델에 반영하고 상부에는 그에 맞는 overburden pressure를 하중조건으로 줌으로써 해석모델을 단순화시켰다. 수치해석은 FLAC-3D(ver.2.0)를 이용하였으며, 해석을 위한 입력변수는 2차원 해석에서의 동일하게 적용하였고, 압축공기 저장용 공

동은 무복공으로 건설한다는 본 과업의 특성에 맞게 어떠한 지보재도 적용하지 않았다.

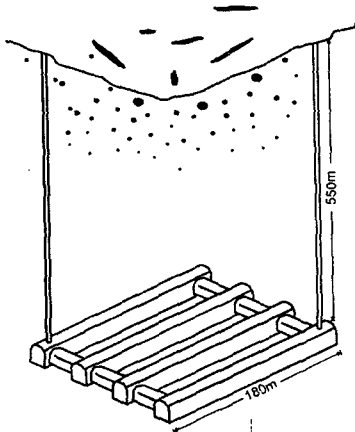


그림 12. 지하공동의 3차원적 배열 형태

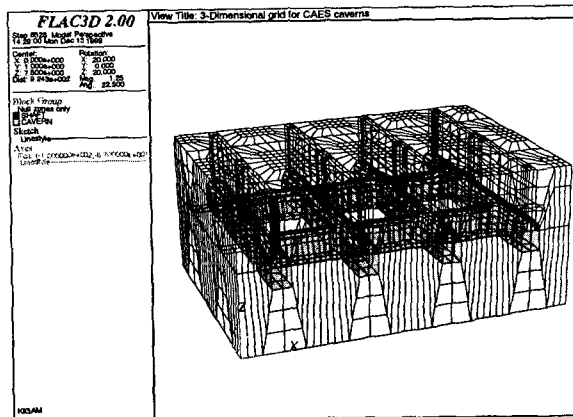


그림 13. 3차원 수치해석 모델의 작성

### 3.3.2 해석결과

지하저장공동 및 수직갱의 안정성 검토를 위하여 전단면 굴착을 가정한 수치해석이 실시되었다. 중력만이 고려된 상태에서 저장공동 및 수직갱이 굴착되었을 때 공동 주위의 최대주응력 분포양상은 그림 14와 같으며, 최소주응력 분포양상은 그림 15와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 터널의 하부 측벽쪽에서 최대주응력이 밀집되고 있으며, 최소주응력은 터널의 크라운부에 밀집되고 있음을 알 수 있다

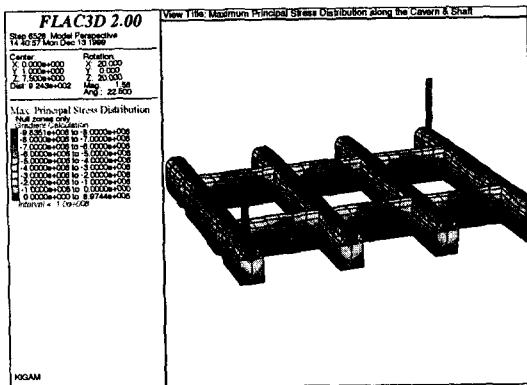


그림 14. 지하공동 주위의 최대주응력 분포도

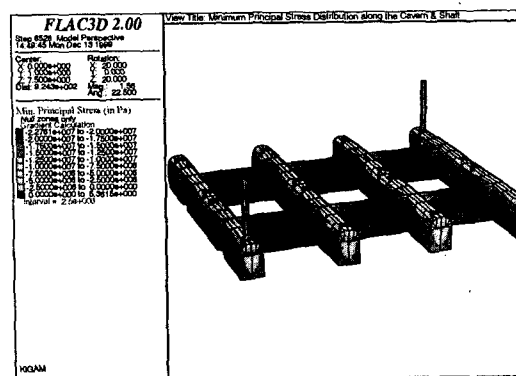


그림 15. 지하공동 주위의 최소주응력 분포도

한편, 지하공동과 수직갱이 연결되는 부분에 대한 정확한 검토를 위해서 그림 16과 그림 17에서 보는 바와 같이 수직갱과 지하공동이 연결되는 부분을 확대하여 최대주응력과 최소주응력 분포양상을 살펴보았다. 그림에서 보는 바와 같이, 주응력의 이상대는 없는 것으로 판단된다. 그림 18에서는 전단변형률 (shear strain rate) 분포양상을 표시하였는데, 수직갱의 존재로 인하여 수직갱 쪽으로의 전단변형률이 상당히 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이는 그림에서 판단되듯이 수직갱의 위치가 지하저장고의 한 쪽 끝에 위치하면서 경계효과에 의해 과장되게 표현되고 있음을 알 수 있다. 따라서 해석모델을 충분히 크게 한다면 이러한 전단변형률 발생양상은 줄어들 것으로 판단된다. 그림 19와 그림 20은 소성영역 분포 및 변위발생양상을 보여주고 있는데, 대부분의 변위는 수직갱을 따라 발생하고 있으며, 수직갱의 원인으로 인해 터널 상부에서도 소성영역이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 향후 해석모델과 같은 형태의 지하저장시설이 구축될 경우, 공동 자체의 안정성은 확보될 수 있는 것으로 판단되나, 수직갱에 대해서는 적절한 지보 패턴을 적용하여 수직갱의 안정성을 확보해야 할 것으로 사료된다.

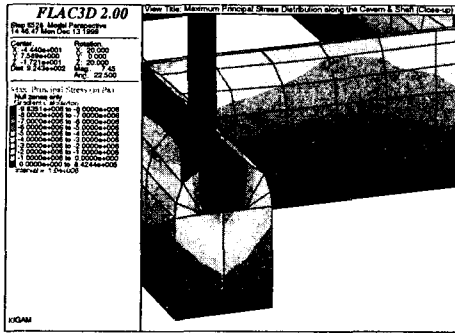


그림 16. 수직갱 부분의 최대주응력 분포도

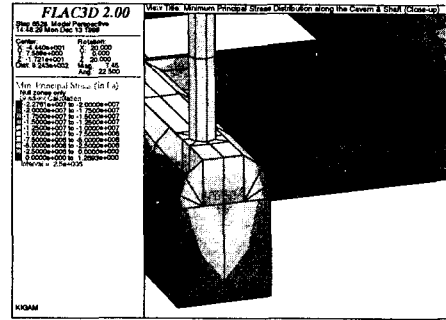


그림 17. 수직갱 부분의 최소주응력 분포도

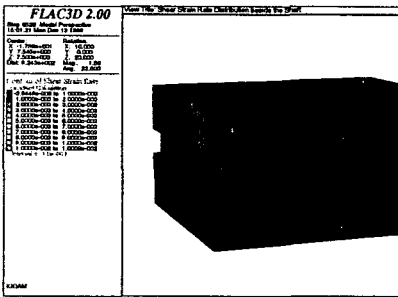


그림 18. 수직갱 주위의 전단 변형집중대

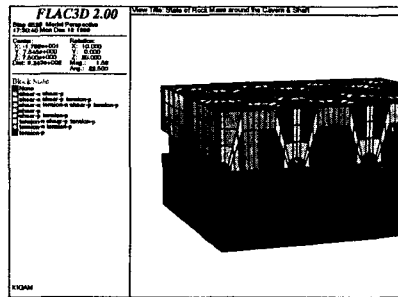


그림 19. 지하공동 상부에 집중되는 소성영역

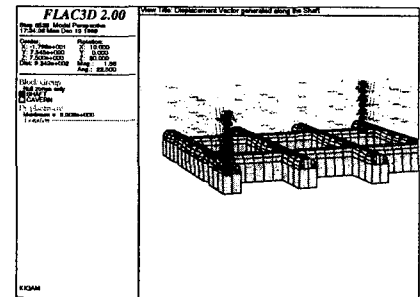


그림 20. 수직갱 및 공동 주위에서의 변위 발생

#### 4. 결 론

우리 나라의 경우 전력 소비지 근처 심부 암반은 대체적으로 경암층으로 구성되어 있기 때문에 경암층을 대상으로 한 무복공 암반공동형 지하저장시설을 한국자원연구소 내에 건설하는 것으로 가정하여 인근 지역의 전력사용량, 전력요구량, 향후 전력생산 요구량 등에 대한 분석과 지하양수 발전시스템에 대한 CAES의 경제성 분석 등을 거쳐 최종적으로 지하저장시설의 규모, 저장공동의 심도, 공동의 폭, 높이, 길이 등을 결정하였다. 본 설계안은 수직갱에 대한 부분적인 보강외에는 안정성이 확보되는 것으로 확인되었다.

#### 참고문헌

1. 신희순외(1999), 지하에너지 저장시설 구축 및 유지기술연구, KR-99(B)-2, 과학기술부 연구과제보고서.
2. Hoek, E.(1990), "Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 27, No. 3, pp. 227~229.
3. Hoek, E. and Brown, E. T.(1980), *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 137~197.
4. Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F.(1998), *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, Balkema, pp. 215.
5. Mohammad, N., Reddish, D.J. & Stace, L.R.(1997), "The relation between in-situ and laboratory rock properties used in numerical modelling", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34, NO. 2, pp. 289~297.