

천심도 절리 암반 중에 굴착된 지하 냉장저장 공동의 안정성 해석

김호영¹⁾ · 박연준²⁾ · 한공창³⁾ · 박의섭¹⁾

Stability Analysis of Underground Cold Storage Openings in Shallow Jointed Rocks

Ho-Yoeng Kim, Yeon-Jun Park, Kong-Chang Han and Eui-Seob Park

ABSTRACT A pilot plant of underground cold storage for food has been excavated as a R&D program. For the stability assessment of underground cold storage openings in shallow jointed rocks, three kinds of stability problems were analyzed by numerical methods. For the analysis of unstability by rock block movements, DEM was used considering the statistical distribution of rock joints. Concerning thermally induced cracking, FDM was used with thermomechanical stress analysis. Finally, in order to evaluate the joint failure during the thawing process, BE algorithm was applied. Numerical examples applied for the pilot plant show that the possibility of unstable failure of openings exists but can be avoided with proper rock reinforcements provided.

1. 서 론

식품의 지하 냉장저장고는 에너지 절약과 지상환경의 보전이라는 두가지 장점으로 인하여 국내에서 실용화가 추진되고 있다. 상업용 지하 냉장저장고는 일반적으로 심도 30~50 m 이내에 위치하며, 저장공동의 폭은 12~15 m 이상일 때 경제성을 가진다. 저장공동은 암반 중에 굴착되며, 내부가 -25~-40°C로 냉각됨에 따라 주변 암반도 일정한 범위까지 동결된다. 저장공동의 심도가 깊지 않으므로 열유동은 지상기온의 연중변화에 영향을 받게되며, 공동상부 암반층이 두껍지 않아 암반내 절리면에 작용하는 수직응력이 상대적으로 작아서 절리들에 의해 생성된 암석블록의 이동이 용이하게 된다.

지하 냉장저장고의 구조적 불안정성은 다음과 같은 3가지 요인에 의하여 발생한다.

- (1) 암반절리에 의한 암석블록의 이동
- (2) 냉각에 따른 암반의 열수축에 의한 인장파괴
- (3) 해동에 따른 절리면의 이완

이와 같은 문제의 해석에는 전산해석이 유효한 수단이 되며, 본 연구에서는 개별 문제에 대하여 각각 DEM, FDM 및 BEM 프로그램을 이용하여 저장공동

에 대한 안정성 해석을 실시하였다. 해석은 지하 냉장저장고의 실증시험을 위하여 한국자원연구소 내에 시공된 pilot plant를 대상으로 실시하였다.

2. 지하 냉장저장고 pilot plant

한국자원연구소 부지 내의 산속으로 지하 냉장저장고 pilot plant가 굴착되었다. 이의 layout은 Fig. 1과 같으며, 시설내역은 Table 1과 같다(김호영 외 1996). 본 지역의 암석은 중생대 화강암으로서 지표의 일부 구간만 풍화되어 있고 전반적으로 공학적 분류등급 "GOOD"에 해당하는 양호한 암질을 보인다. 굴착은 천공 및 발파에 의해 수행되었다. 지하공간 내에는 냉각설비류와 기계실 및 실험실의 환기를 위한 환기시설이 설치되었다. 본 시설의 시운전은 96년 4월 중순부터 시작되었으며, 암반 내부 및 지하 저장고 내에 지중온도 및 변위, 응력변화, 지하수압, 실내의 온습도 등을 자동적으로 측정하는 측정장비 및 monitoring 시스템이 설치되었다. 본 시설은 향후 14개월간 운영하면서

- 1) 정회원, 신경건설(주) 지하비축팀
- 2) 정회원, 수원대학교 토목공학과 전임강사
- 3) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부

Table 1. Content of pilot plant for underground cold storage

Facility	W×H (m)	Length (m)	Volume (m ³)	Floor Area (m ²)	Design Criteria
Cold Room	4.5×3	10.0	121.0	45.0	-25~-40°C
Chilled Room	4.5×3	8.0	96.8	36.0	+2~-2°C 60~90% RH
Laboratory	7×4	8.0	286.8	84.0	+19°C
Machine Room	4×3	5.0	56.5	20.0	
Connection Tunnel	3×3	45.0	378.0	135.0	

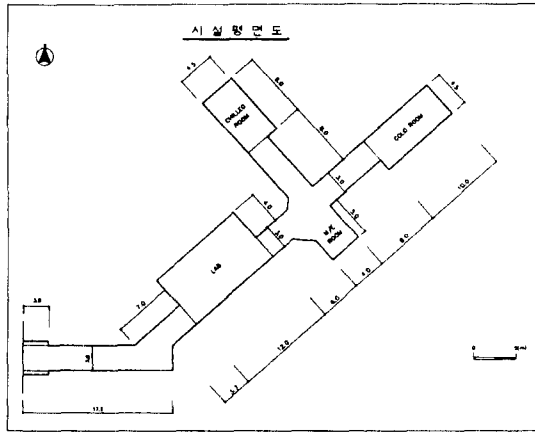


Fig. 1. Layout of the pilot plant

제반 공학적 문제와 지하저장에 따른 식품의 보존조건에 대한 연구가 이루어질 계획이다.

3. 절리 암반 내 저장공동의 안정성 해석

3.1 암반절리의 모델링

암반의 역학적 거동을 분석하기 위해서는 불연속면의 분포상태를 파악하는 것이 중요하다. 여기서 불연속면이란 열극(fracture), 절리(joint), 층리(bedding), 엽리(schistosity), 단층(fault) 등과 같이 암반 중에 존재하는 암반의 연속성을 방해하는 모든 요소를 말하며, 그 중에서 공동 주변암반의 거동을 제어하는 주된 요소는 절리이다. 암반절리의 분포는 통계적으로 처리되어야 하며, 이를 위해 절리의 방향 및 경사, 연장, 간격 및 밀도에 대한 통계적 특성이 정의되어야 한다.

절리의 방향과 경사 절리는 방향과 경사에서 다수의 군으로 나누어지며, 이러한 절리군의 평균치에 대해 개별절리의 방향과 경사는 일정한 편차 내에서 분산되어 있다. Mahtab *et al.*(1972)에 의하면 단위구에서 절리의 법선벡터의 분포는 hemispherical normal 분포를 보이며, 이는 다음과 같은 확률분포함수나 확률밀도함수의 형태로 표시된다.

$$P(\theta) = \frac{1 - \exp [k \cdot (\cos \theta - 1)]}{1 - \exp(-k)} \quad (1)$$

$$p(\theta) = \frac{k \cdot \exp (k \cdot \cos \theta)}{2\pi[\exp (k) - 1]} \quad (2)$$

여기서, P: 임의의 절리가 자신이 속해 있는 절리군의 평균절리와 θ 를 이룰 확률함수

p: 확률의 밀도함수

k: 분산계수

3.1.1 절리의 연장

현장에서 절리의 전구간이 노출되지 않는 경우가 많기 때문에 절리의 연장은 scanline이나 window법에 의해 측정된 값을 연산처리하여야 한다. Pahl(1981)에 의하면 터널 측벽에서 나타나는 절리군에 대해 절리의 평균연장은 다음 식으로 구해진다.

$$\mu = l \cdot h \frac{1 + N_c/N - N_c/N}{(1 \cos \varphi + h \sin \varphi)(1 - N_c/N + N_c/N)} \quad (3)$$

여기서 N은 측정된 절리의 합이며, N_c , N_i 는 각각 측정된 window 내에서 절리가 나타나는 양상에 의해 분류되는 표본수이다. 또한 h는 window의 폭이며, l은 절리중심점 간의 간격을 의미한다. 이로부터 log를 취하여 연장과 표준편차를 최대 근사법에 의해 예측한다.

3.1.2 절리의 간격과 밀도

공간 내에서 절리의 위치는 편의상 절리를 대표하는 한 점, 예를 들면 중심점으로 표시할 수 있기 때문에 공간 내의 절리 분포를 punctual process로 나타낼 수 있다. punctual process로서 Poisson법을 사용한다면, 부피 V인 암반 내에서 절리의 수 N은 단위부피당 절리의 평균수인 체적 밀도 λ_v 에 대한 Poisson 법칙을 따른다.

$$P(N = n) = \exp(-\lambda_v \cdot V) \frac{(\lambda_v \cdot V)^n}{n!} \quad (4)$$

체적밀도는 암반의 단위면적당 절리의 평균 수인 표면 밀도 λ_s 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\lambda_w = \lambda_w / [2 \sin \alpha E(r)] \quad (5)$$

여기서, α : 절리의 법선과 측정면의 법선의 사이각

$E(r)$: 절리의 평균연장

Kulatilake와 Wu(1984)는 측정 window 내에서 절리의 중심이 나타나는 확률을 계산함으로써 표면밀도를 예측하는 방법을 개발하였으며, 이에 따라 절리의 평균밀도가 구해진다.

3.2 절리암반의 구조해석

절리암반 내에 굴착된 공동의 안정성 평가를 위해서는 주변 암반에서 절리에 의해 형성되는 암반블록의 거동을 해석하여야 한다. 개별요소법은 이러한 해석에 적절하게 활용될 수 있는 방법으로서 공동굴착에 따른 절리의 전단변위와 벌어짐, 블록의 붕락 및 슬라이딩 등을 해석하는 수단을 제공한다.

지하 냉장저장고의 pilot plant의 굴착과정에 터널벽면에서 절리에 대한 조사를 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

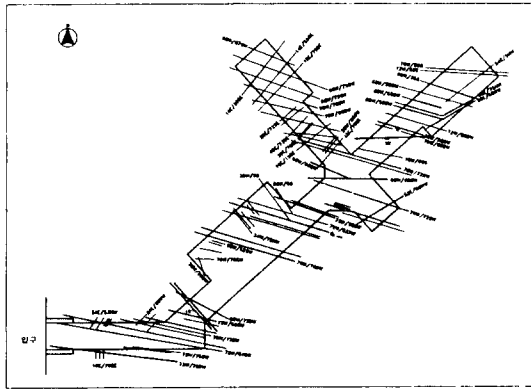


Fig. 2. Joint distribution around the pilot plant

이와 같이 측정된 절리자료를 이용하여 앞에서 기술한 방법에 따라 저장공동에 직교하는 평면에서 절리에 대한 통계자료를 구하면 Table 2와 같다.

절리암반의 구조해석을 위해 사용된 개별요소 프로그램은 UDEC이다. Table 2의 자료를 이용하여 냉동실 주변 암반의 모델링을 실시하여 굴착에 따른 안정성을 분석하였다. 이때 암반 절리에 사용된 입력자료는 육안관찰과 실험실 시험으로부터 구하였으며, 그 내용은 Table 3과 같다.

UDEC 해석에서 각 블록은 강체로 간주하였으며, 하중조건은 블록들의 자중만을 고려하였다. 먼저 해석영역에 대해 블록모델을 구성하여 평형상태를 구하였다. 이후 공동을 굴착하고 힘의 재분배 과정에 의해 새로운 평형에 도달하기까지 200,000 cycle을 반복계산한 결과, 공동 주변에서 절리의 벌어짐과 불안정블록의 속도 벡터를 구하면 Fig. 3과 같다.

그림과 같이 불안정 블록은 공동의 천정부에 발생하고 있으며, 자중에 의한 붕락 가능성을 보인다. 이 경우 key block의 범위는 2 m 이내로서 충분한 길이의 록볼

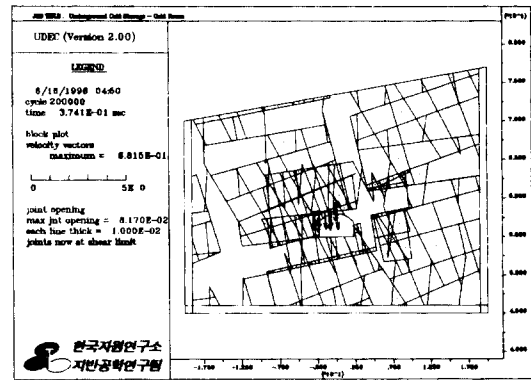


Fig. 3. Results of stability analysis by UDEC

Table 2. Statistics of rock joints around the pilot plant

set No.	Mean Extention (m)	Mean Density (unit/m ²)	Mean Orientation	Mean Dip Angle	S.D of Orientation	S.D of Dip Angle
1	6.54	0.04	122.4	88.1	14.8	23.6
2	15.32	0.05	204.4	66.4	16.7	11.1
3	19.21	0.01	118.2	15.0	45.1	9.4

Table 3. Input parameters for rock joints

Normal stiffness (MPa/m)	Shear Stiffness (MPa/m)	Tensile Strength (MPa)	Cohesive Strength (MPa)	Friction Angle (degree)
1.33×10^{10}	1.33×10^{10}	0	0	36

트에 의해 효과적으로 보강이 가능한 것으로 판단되며, 실제로 굴착시 길이 2.4 m의 Swellex bolt에 의해 보강이 완료되었다.

4. 열응력 해석

암반의 냉각에 따른 열응력에 의한 안정성을 검토하기 위해서는 먼저 저장공동의 냉각에 따른 암반 내 열유동 해석이 필요하며, 이후 각 단계별 온도 분포로부터 열응력의 변화를 구한다. 해석에 사용된 프로그램은 FDM 구조해석 프로그램인 FLAC이다.

대상 지역의 화강암의 공학적 특성은 실험실 시험으로부터 구하였으며, 열적 특성은 제반 자료를 참고하여

입력자료를 Table 4와 같이 정하였다.

Fig. 4는 냉동실을 -25°C로 유지하면서 12개월간 냉각한 결과, 주변 암반의 온도분포로서, 공동의 폭만큼 암반 내부로 동결이 진행되었다. 이에 따라 열응력 해석을 실시한 결과, 공동 주변의 최소 주응력 분포는 Fig. 5와 같으며, 주변 암반의 소성영역의 범위는 Fig. 6과 같이 계산되었다.

암반의 동결영역을 중심으로 소성영역이 광범위하게 발달하고 있으며, 공동의 모서리 지점에서 인장균열이 크게 전파되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 향후 냉각이 시작되면 공동의 불안정성이 발생하며, 천정부의 소성파괴 및 인장균열 전파로 인한 붕락을 암시하고 있다. 그러나 본 해석의 경우, 화강암의 실험실 시험에 의한 선팡창계수를 그대로 적용하였으므로, 절리가 많이 포함되어 있는 현지 암반의 선팡창 특성보다 과도하게 추정된 것으로 판단된다. 따라서 향후 pilot plant를 운영하면서 주변 암반의 온도, 응력 및 변위의 측정결과로부터 현지 암반의 특성을 파악하며, 이를 반영할 수 있는 해석이 필요하다.

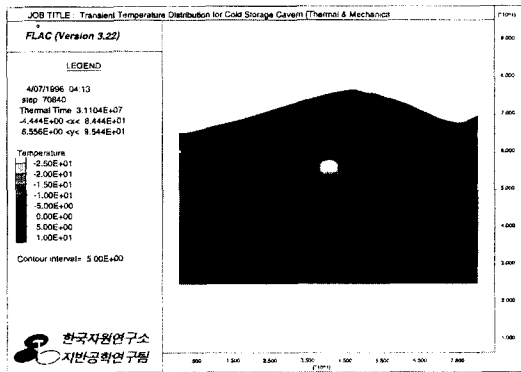


Fig. 4. Temperature distribution

5. 결빙 및 해동에 의한 절리거동 해석

5.1 결빙 및 해동에 따른 암반 절리의 거동

일반적으로 암석이 동결되면 압축강도와 내부 마찰

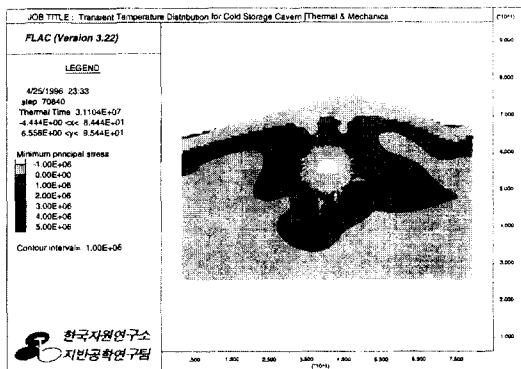


Fig. 5. Distribution of minimum principal stress.

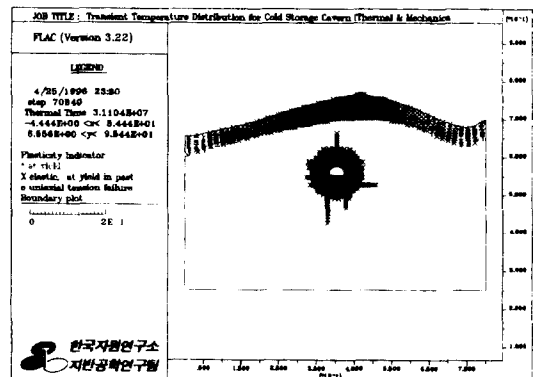


Fig. 6. Plastic zones.

Table 4. Mechanical and thermal properties of granite

Density (kg/m ³)	Young's Modulus (× 10 ⁵ MPa)	Poisson's ratio	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Thermal Conductivity (w/m°C)	Specific Heat (J/kg°C)	Coeff. of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ /°C)
2660	43.2	0.28	116	7.7	3.1	800	15.0

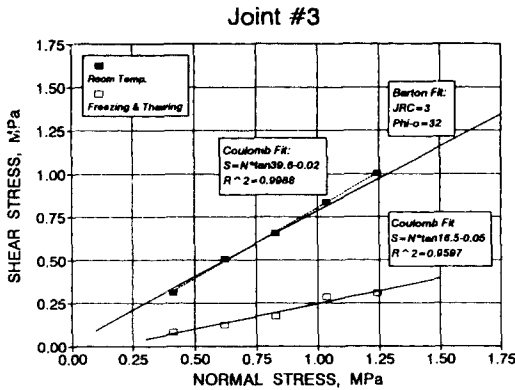


Fig. 7. Results of shear test for rock joint and fit of Coulomb and Barton's equation

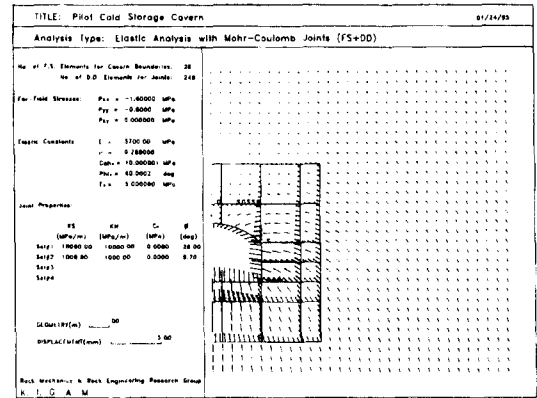
각은 증가한다. 한편, 절리의 경우에는 간극수의 결빙에 따라 얼음의 전단강도만큼 절리의 전단강도는 증가하지만, 해동시에는 얼음과 물의 공존으로 인하여 절리면의 기본 마찰력이 급격히 저하하여 표면 거칠기가 낮은 절리, 즉 전단강도의 주된 요소가 절리면의 기본 마찰력에 의해 발생하는 절리면에서는 절리의 전단강도가 급격히 감소한다(Park, 1992). 대상 지역의 절리에 대해 상온 및 결빙 이후 해동 시의 절리 전단시험을 실시한 결과는 Fig. 7과 같다.

그림과 같이 해동시에 암반절리의 내부마찰각은 상온에 비해 20~30% 수준을 나타내고 있다. 따라서 지하냉장저장고의 가동을 중단하는 경우 주변 암반의 해동에 의한 절리면의 이완과 결과적인 붕락이 예상된다.

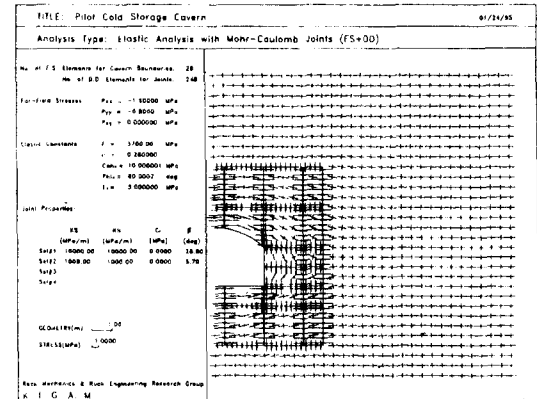
5.2 절리거동을 고려한 안정성 해석

운영 중인 지하 냉장저장고의 운전을 중단하는 경우 암반의 모든 영역이 일시에 해동되는 것은 아니며, 공동 주변의 암반으로부터 서서히 내부로 해동되는 영역이 확산된다. 따라서 해동에 따른 절리 암반의 거동은 저장공동 주변에 국한하여 수행하는 것이 바람직하며, 이때 해동시의 절리거동을 잘 표현할 수 있는 전산해석 방법이 필요하다.

BEM은 공동 주변의 넓은 암반영역을 대상으로 해석이 용이할 뿐만 아니라, 절리요소를 필요한 영역에 적절히 고려할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 Crouch와 Starfield(1983)에 의해 제안된 경계요소해석 알고리즘을 기본으로하여 암반영역은 응력불연속법으로, 절리요소는 변위불연속법으로 해석이 가



(a)



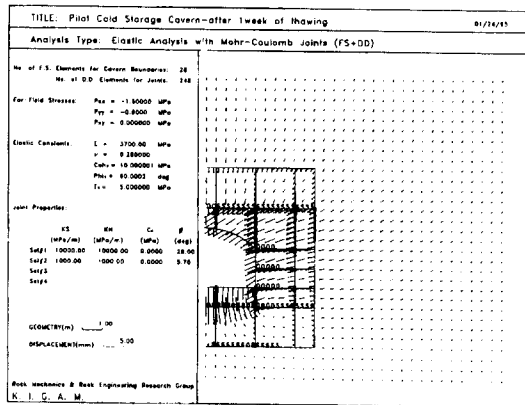
(b)

Fig. 8. Displacement and stress distribution under normal temperature(+12°C)

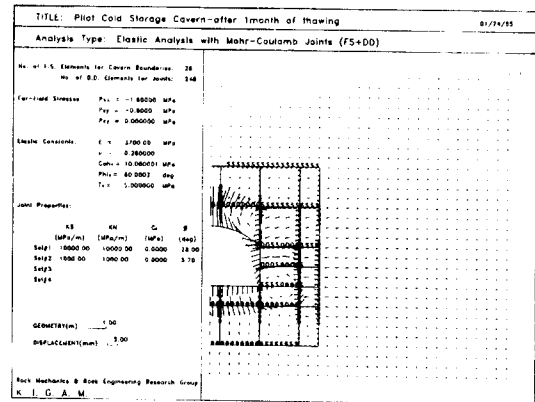
능한 전산해석 프로그램을 개발하였으며(김호영 외, 1995), 이를 사용하여 냉동실 주변 영역의 해동에 따른 안정성을 해석하였다. 특히 개발된 프로그램은 단계적 굴착 및 단계적인 재하를 고려할 수 있어 절리에 대해 응력경로에 따라 해석결과가 달라지는 소성해석이 가능하다.

본 해석은 pilot plant의 건설이 시행되기 이전에 수행된 것으로, 지반조사에서 얻은 지질자료만을 근거로 하였기 때문에, 횡압이 다소 크게 평가되었으며(k0=2), 절리의 방향도 실제와 부합하지는 않는다. 그러나, 얻어진 지질자료를 근거로 가장 불리한 상태를 가정하여 해석을 수행하였다.

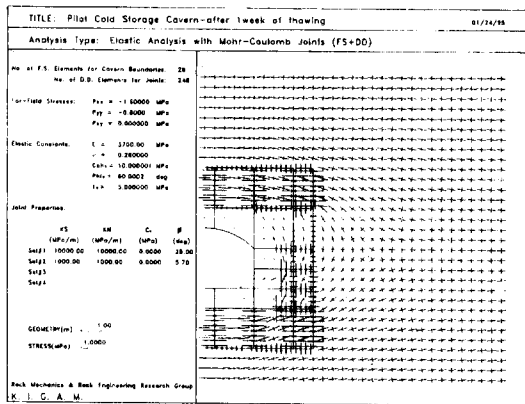
Fig. 8은 절리를 포함한 저장공동 주변의 암반에 대한 상온에서의 변위 및 응력분포를 나타낸 것이다. 그림과 같이 공동 주변에 각각 2개의 절리군이 존재하는 것으로 단순화된 모델링을 실시하였다. 그림에서 S는



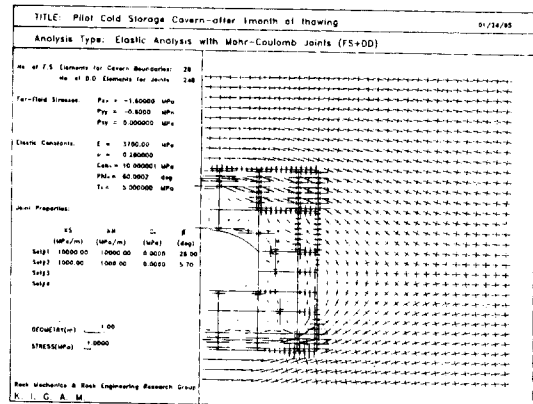
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 9. Displacement and stress distribution after 1 week from thawing

Fig. 10. Displacement and stress distribution after 1 month from thawing

절리의 슬라이딩, O는 벌어짐을 의미한다. 절리면 일부에서 슬라이딩과 벌어짐이 발생하고 있지만 전체적으로 블록은 안정하게 유지된다. 또한 주응력분포도 균질하게 유지되고 있다.

변위가 전체적으로 상향하고 있는 것은, 공동의 천반부가 아치형으로 변위의 억제에 유리한 모양인데 비하여 공동의 측벽부와 공동바닥이 직선으로 변위량이 상대적으로 많고, 시스템 매트릭스 역산시 single precision을 사용한 데서 비롯된 수치적 오차에 기인한 것이다.

Fig. 9는 해동을 시작한지 1주일이 경과하여 0°C 등온선이 공동 경계에서 1 m 정도 후퇴한 경우의 변위 및 응력을 나타낸 것이며, Fig. 10은 해동 후 1개월이 경과하여 0°C 등온선이 2 m 정도 후퇴한 경우를 나타낸 것이다.

1주일 경과 시 공동 천정에서 블록이 이탈되는 양상

을 보이며, 응력이 완전히 이완되고 있다. 또한 1개월 경과 시 절리의 이완은 암반 내부로 전파되며, 응력이 이완되는 영역도 넓어지고 있음을 볼 수 있다.

특이한 사항으로 Fig. 9(a) 및 Fig. 10(a)에서 공동바닥에 놓인 2개 블록의 변위는 하향이며, 그 하부의 2개 블록의 변위는 상향임에도 불구하고, 절리면에서의 변위는 블록의 변위와 반대방향으로 되어있음을 들 수 있는데, 이역시 응력이 이완된 블록에서 나타나는 수치적 오류로서 향후 시스템 매트릭스 계산시 double precision을 사용하면 개선될 것이다. 그러나, Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)에 도시된 응력분포와 비교해 보면 "O"로 표시된 개구절리부에서는 힘의 블록간 힘의 전달이 이루어지지 않고 있어 해동에 따른 절리의 성질변화가 응력의 재분배 과정에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

이와 같이 일단 빙점 이하로 냉각된 암반이 해동됨에

따라 저장공동 주변에서 절리의 이완에 의한 불안정성을 보이고 있으며, 지하 냉장저장고의 보강설계시 이러한 파괴 가능성을 고려하여 rock bolt의 길이 및 수량 산정에 참조하여야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

지하 냉장저장고 굴착 및 운영에 따른 암반의 구조적 안정성을 해석하기 위하여, (1)천심도 절리암반의 거동, (2)냉각에 따른 암반의 열수축, (3)해동에 따른 절리의 이완과 같은 3가지 불안정 메커니즘을 평가하기 위한 전산해석을 실시하였다. 각각의 현상을 적절히 모델링하고 타당한 결과를 얻기 위하여 각 현상별로 DEM, FDM 및 BEM 해석 프로그램이 이용되었다.

해석결과, 암반을 냉각할 경우에는 열응력에 의한 인장파괴의 가능성이 있으며, 냉각된 암반이 해동될 경우에는 절리의 이완에 의한 붕락 가능성이 있음이 전산해석에 의해 묘사되었다. 이에 대해서는 향후 pilot plant의 운영과 계측을 통하여 지속적으로 규명될 것이며, 입력자료 및 전산해석법의 타당성도 재검토될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 통상산업부의 에너지절약 기술개발의 일환으로 수행되었으며, 본 연구를 위해 지원해 주신 통상산업부와 에너지자원기술개발지원센터의 관계자들에게 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 김호영 외, 1995, 에너지 절약형 지하냉장 및 냉동저장 설계기술개발에 관한 중간보고서(I), 통상 산업부
2. 김호영 외, 1996, 에너지 절약형 지하냉장 및 냉동저장 설계기술개발에 관한 중간보고서(II), 통상 산업부
3. Mahtab, M. A. *et al.* (1972), Analysis of fracture orientations for input to structural models of discontinuous rock, Bureau of Mines Report of Investigations, U.S., Department of the Interior.
4. Pahl, P. J. (1981), Estimating the mean length of discontinuity traces, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, pp. 229-234.
5. Park, Y.J. (1992), Influence of below-freezing temperatures on the shear behaviour of wet rock joints, Ph.D. Thesis, University of Minnesota
6. Crouch, S.L. and A.M. Starfield (1983), *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, pp. 45-109, pp. 206-240