지하원유저장 공동주위 암반의 변형거동 특성에 따른 지하수 유동해석

장 근 무* 이 정 인
(서울대학교 공과대학 자원공학과)

1. 서 론

지하원유비축 기지 저장공동의 원유 유출이나 기화누설을 방지하기 위하여 지하수압을 조절하는 수벽공의 운영이나 공동주위 암반의 그라우팅 공법 설계에 있어서는 공동의 굴착으로 인한 주위 암반의 변형에 따른 투수계수의 변화와 지하수위의 변화에 대한 해석이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 순간증압법을 이용한 삼축압축하의 암석의 투수계수 측정을 통하여 변형율과 투수계수와의 관계함수식을 구하였다. 그리고 유한요소법 탄소성해석으로 공동주위 암반의 응력 및 변형율을 계산하였으며, 실험에서 구한 변형율과 투수계수와의 관계식을 이용하여 암반의 변형거동에 따른 투수계수의 변화에 대한 해석을 하였다. 또한 유한요소법에 의한 지하수 유동해석을 실시하여 공동주위 암반의 투수계수의 변화가 지하수 유동의 변화에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 다양한 조건의 수벽공의 운영압력과 공동 주위 암반의 그라우팅의 효과를 고려한 지하수 유동해석을 실시하여 공동의 굴착으로 인한 지하수위의 변화를 계산하였고 현재 운영중에 있는 수벽시설의 설계기준에 대하여도 검토하였다.

2. 삼축압축하의 투수계수 측정시험

본 연구에서는 투수계수와 변형율과의 관계함수식을 구하기 위해 습윤시편에 대해서 순간증압법(Transient Pulse Method) 에 의한 삼축압축하의 투수계수 측정시험과 건조시편에 대한 삼축압축시험을 병행해서 실시하였다. 투수계수 측정시험과 건조시편에 대한 삼축압축시험에서는 동일한 시추코어로 부터 시편을 성형하여 시험편의 물리적, 역학적 특성의 차이를 배제했다. 투수계수 측정시험은 공극수압 9 MPa,봉압 15 MPa 의 조건에서 정수압 상태로 부터 축하중을 증가시키면서 하중단계별로 투수계수를 측정하였다. 건조시편의 삼축압축실험에서는 시험편에 변형율

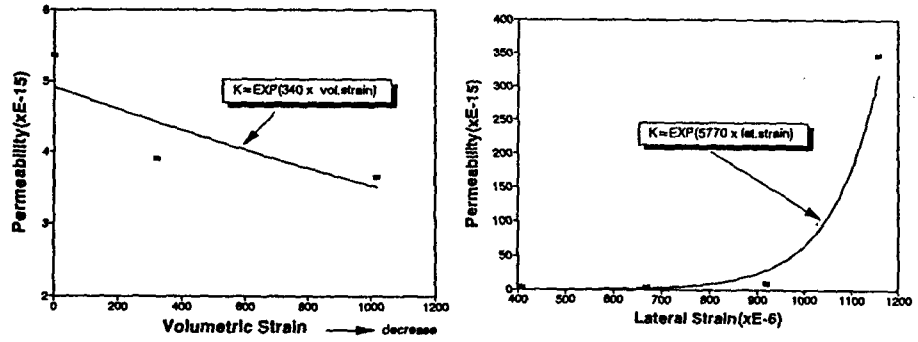
게이지(Strain gage)를 부착하여 정수압 상태로 부터 축하중을 증가시키면서 축방향 변형율과 횡방향 변형율을 측정하였다. 각각의 실험에 대해서 다이알게이지(Dial gage) 를 이용해서 축방향 변위를 측정하여 투수시험에서의 응력-축방향 변형율 곡선과 동일한 변형거동을 보여주는 건조시편 삼축압축 실험결과를 선정하였다. 투수계수 측정시험에서 초기 하중단계에서는 축응력이 증가함에 따라서 투수계수는 감소하는 양상을 나타낸다. 이는 축하중이 증가함에 따라 시험편 내부에 존재하는 미세균열이나 공극이 폐쇄되기 때문이다. 이러한 특성은 체적변형율의 감소와 밀접한 관련이 있으며 순수탄성 압축(pure elastic compression) 단계라고 할 수 있다. 이 후 최대하중의 약 50% 이후 부터는 하중의 증가에 따라 투수계수의 지수함수적인 급속한 증가가 발생한다. 이러한 투수계수의 증가는 횡방향 변형율이 선형적으로 증가하는 구간을 벗어나 비선형적으로 증가하는 양상과도 밀접한 관련성이 있다. 본 연구에서는 초기 하중단계에서 투수계수가 감소하는 영역을 탄성영역이라고 정의하고 이후 균열의 발생으로 투수계수가 증가하는 구간을 소성영역으로 정의해서 각각의 경우에 대해서 투수계수의 변화를 아래의 변형율의 함수식으로 표현하였다. 탄성영역에서는 하중의 증가에 따른 투수계수의 감소를 체적변형율과의 지수함수식으로 구하였으며 이 후 하중의 증가에 따른 소성영역에서의 투수계수의 증가는 횡방향 변형율과의 지수함수식으로 구했다.

$$K_e = K_0 \mathrm{Exp}(\beta^e \times Vol.strain) \tag{2.1}$$

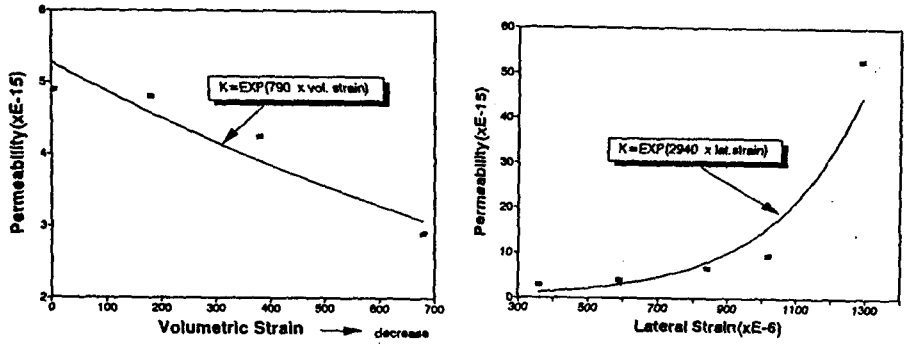
$$K_p = K_0 \mathrm{Exp}(\beta^p \times Lat.strain) \tag{2.2}$$

K_0 는 초기 정수압상태의 투수계수로서 초기투수계수이며, K_e, K_p 는 탄성영역과 소성영역에서의 변화된 투수계수이다. 그리고 β^e 와 β^p 는 변형율에 따른 투수계수 변화의 민감도를 나타내는 실험상수로서 각각 탄성영역과 소성영역에서의 곡선의 기울기를 나타낸다.

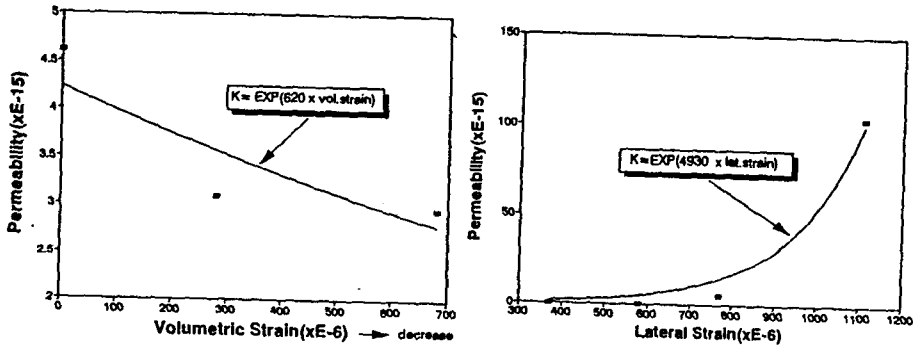
Fig. 2.1 은 투수계수와 체적변형율, 투수계수와 횡방향 변형율과의 관계 그래프를 보여주고 있다. 본 연구에서는 실험상수 β^e 와 β^p 의 값을 평균값에 근사한 값인 600, 4500 으로 설정해서, 암반의 변형거동에 따른 투수계수의 변화를 계산하는 관계식의 상수로 사용하였다.



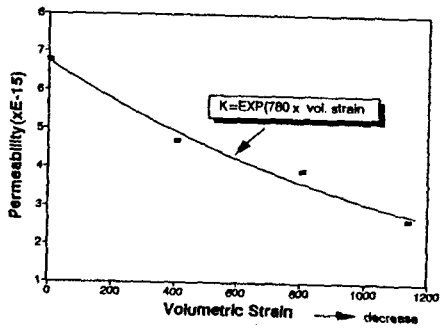
(A) specimen A



(B) specimen B



(C) specimen C



(D) specimen D

Fig. 2.1 Fitting curves between permeability and strain in elastic & plastic region for four specimen

3. 공동주위 암반의 변형거동에 따른 투수계수의 변화

3.1 변형거동에 따른 투수계수 변화의 이론과 방법

공동의 굴착으로 인한 공동주위 암반의 투수계수의 변화는 공동주위 암반의 응력재배치 현상에 큰 영향을 받게 된다. 그러므로 공동주위 암반의 투수계수의 변화를 규명하기 위해서는 변형거동 해석을 통한 소성영역의 규명과 응력 및 변형율에 대한 계산이 선행되어야 한다. 본 해석에서는 탄소성 유한요소해석에 의한 공동주위 암반의 변형거동 해석을 하고 이에 따른 투수계수의 변화를 규명하였다.

공동주위 암반의 투수계수는 공동 주위에 재배치 되는 응력의 크기와 방향에 직접적인 영향을 받게 되므로 공동주위 암반의 투수계수도 이방성의 특성을 가진다고 할 수 있다. 일반적으로 공동주위에 재배치되는 응력의 크기와 방향은 최대주응력과 최소주응력으로 표현할 수 있으며 최대주응력과 최소주응력에 상응하는 변형율은 최대주변형율과 최소주변형율이며 투수계수는 최대주변형율의 수직방향으로 가장 큰 값을 가질 수 있다. 그러므로 최대주변형율의 수직방향의 투수계수를 최대 주투수계수(maximum principal permeability)로 정의할 수 있으며, 최소주변형율의 수직방향이 최소 주투수계수(minimum principal permeability) 로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 공동주위 암반의 투수계수를 최대 주투수계수와 최소 주투수계수의 두 방향으로 구분하여 변형거동에 따른 투수계수의 변화를 규명하였다. 삼축압축하의 투수계수 측정실험을 통해서 암석시편의 소성영역에서는 투수계수와 횡방향 변형율과의 관계함수식을 구하였다. 이에 근거하여 공동주위의 소성영역에서는 최대 주투수계수의 변화는 최대주변형율의 함수로서 구하고 최소 주투수계수의 변화는 최소주변형율의 함수로서 구한다. 이를 식으로 표현하면 식 (3.1) 과 같다.

$$K_1 = K_0 \ \mathrm{EXP}\,(\beta^{p} \cdot \varepsilon_1)$$
$$K_2 = K_0 \ \mathrm{EXP}\,(\beta^{p} \cdot \varepsilon_2) \qquad (3.1)$$

여기서,

K_0 ; 초기 투수계수 (initial permeability)

K_1 ; 최대 주투수계수(max. principal permeability)
K_2 ; 최소 주투수계수(min. principal permeability)
ε_1 ; 최대 주변형율(max. principal strain)
ε_2 ; 최소 주변형율(min. principal strain)
β^p ; 실험상수 (β^p = 4500)

공동의 굴착의 영향권에서 벗어난 탄성영역에서는 초기 투수계수에 비해서 변화된 투수계수의 이방성은 거의 없으므로, 실험으로 구한 투수계수와 체적변형율의 관계함수식을 이용하여 투수계수의 변화를 구해 보았다. 2차원 평면 변형율의 조건의 경우, 투수계수와 체적변형율과의 관계를 식으로 표현하면 식(3.2) 와 같다.

$$K = K_0((\mathrm{EXP}\,\beta^e(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)) \qquad (3.2)$$

여기서, β^e ; 실험상수 (β^e = 600)

3.2 갤러리 굴착에 따른 암반의 투수계수의 변화

본 해석에서는 전체 6개의 저장공동에서 대칭성을 고려하여 3개의 저장공동을 모델화하였다. 현지암반의 탄성계수는 공내수평재하시험의 일종인 Goodman jack test 방법에 의해서 구해진 암반의 탄성계수 값에서 최소값인 3.5×10^4 MPa 를 입력치로 하였다. 그리고 RMR 분류결과와 암석시편에 대한 삼축압축 실험 결과치를 참조하여, 점착력은 삼축압축시험결과치의 10 % 값인 2 MPa 값을 입력치로 하였으며 마찰각은 실험치의 60-70 % 의 범위인 35 ° 를 입력치로 결정하였다. 비중과 포아슨비는 실험결과치를 참조하여 비중은 $2.7g/cm^3$, 포아슨비는 0.26 을 입력치로 하였다. 수압파쇄법에 의한 현지암반의 초기응력을 측정한 결과, 수직응력에 대한 수평응력의 비는 최고 3.6 으로서 수평응력이 매우 큰 지반으로 나타났다. 본 해석에서는 깊이에 따른 수직응력을 계산하고 수직응력에 대한 수평응력의 비에 근거하여 수평응력을 산정해서, 이를 초기응력으로 입력하여 굴착해석을 하였다.

Fig 3.1 는 주응력의 크기와 방향을 보여준다. 측압계수가 크기 때문에 공동주

위에 압축응력이 작용하고 있으나 공동주위 소성영역에서는 응력개방의 영향으로 투수계수의 증가가 예상된다.

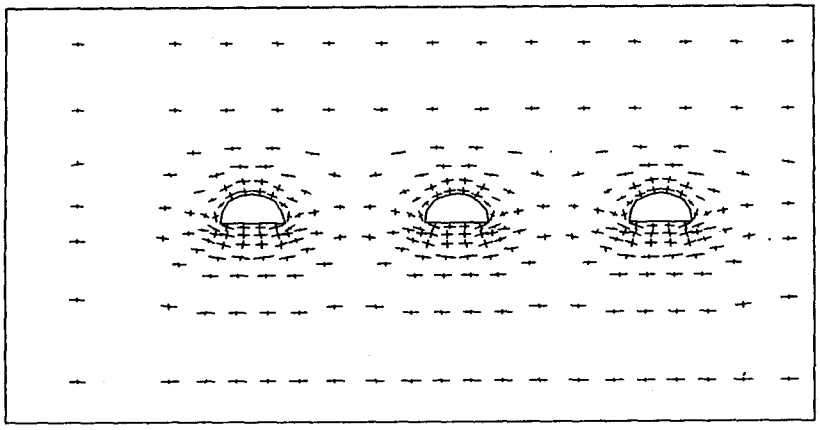
식 (3.1) 과 (3.2) 에 의한 투수계수의 변화는 Fig. 3.2 과 같다. 공동굴착의 영향권에서 벗어난 영역에서의 투수계수의 변화는 거의 없으며 소성영역에서 최대 주투수계수는 공동의 반경방향으로서 공동상부에서 최대 60 배 정도의 급격한 증가를 보여주며 반대로 최소주변형율에 수직방향의 투수계수는 초기투수계수에 비해서 오히려 줄어들고 있다. Fig. 3.3 은 초기투수계수 값 (3.6×10^{-6} cm/sec) 에 대한 공동주위의 암반의 평균투수계수의 변화를 보여준다. 요소의 평균투수계수는 최대 주투수계수와 최소 주투수계수의 평균으로 정의하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공동의 상하부에서 투수계수의 증가폭이 크며, 모서리 부근에서는 응력집중의 영향으로 투수계수의 증가폭이 작은 양상을 보여주고 있다.

3.3 전단면 굴착에 따른 암반의 투수계수의 변화

본 연구에서는 전단면 굴착 후 공동주위 암반의 투수계수의 변화를 계산하기 위해서 전단면 굴착에 따른 변형거동 해석을 실시였다. 해석에 사용된 입력치는 갤러리 단면 해석에서 사용된 입력치와 동일한 값을 사용하였으며 굴착단계와 보강의 영향은 고려하지 않았다.

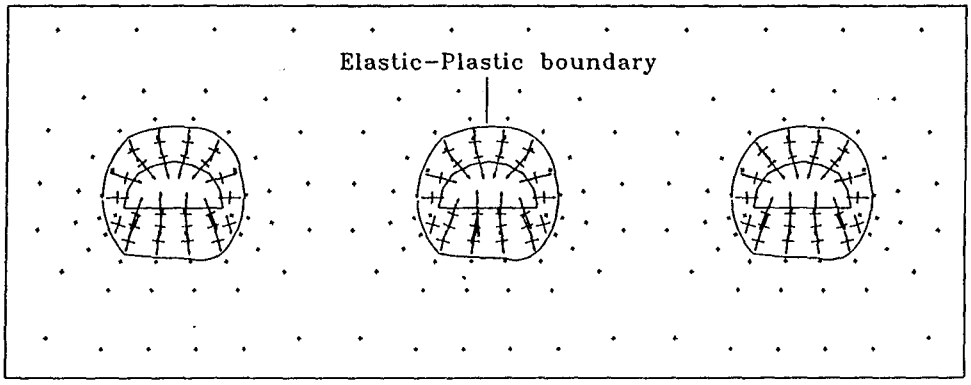
Fig. 3.4 는 주응력의 크기와 방향을 보여준다. 저장 공동의 폭에 비해서 높이가 큰 형상을 가지므로 공동의 상하부에서 보다는 공동의 좌우측 벽면에 응력개방이 크게 발생하고 있다. 공동주위에는 압축응력이 발생하고 있으나 이러한 응력개방의 영향으로 투수계수의 증가가 예상된다.

Fig. 3.5 (a)-(c) 는 각각의 공동주위에서의 초기 투수계수(3.6×10^{-6} cm/sec) 를 기준값으로 해서 평균 투수계수의 변화를 보여준다. 공동벽면에서의 응력 개방이 크게 발생하고 있으므로 전체적으로 공동 벽면에서 투수계수의 증가가 크게 발생하고 있다. 그리고 좌측 공동과 우측공동의 각각의 좌, 우벽면에서의 투수계수의 증가가 크게 발생하고 있다. 이는 변형거동 해석의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 좌측 공동과 우측공동의 각각의 좌, 우벽면에서는 인접공동의 영향을 받지 않음으로 인해서 변위가 다른 영역에 비해서 크게 발생하며 이에따라 투수계수의 증가가



Principal stress — : 6.0 MPa

Fig. 3.1 Magnitude and orientation of principal stresses around gallery



Plastic zone : Max. principal permeability — 2.2E-4 cm/sec
: Min. principal permeability - 3.3E-6 cm/sec

Elastic zone : Principal permeability - 3.6E-6 cm/sec

Fig. 3.1 Magnitude and orientation of principal stresses around gallery

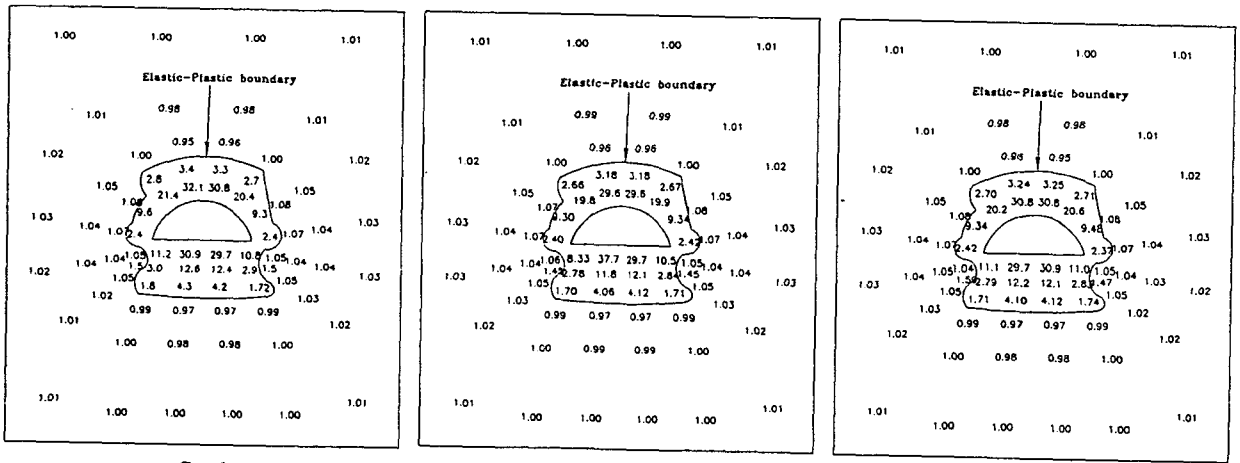


Fig. 3.3 Variation of average permeability around gallery

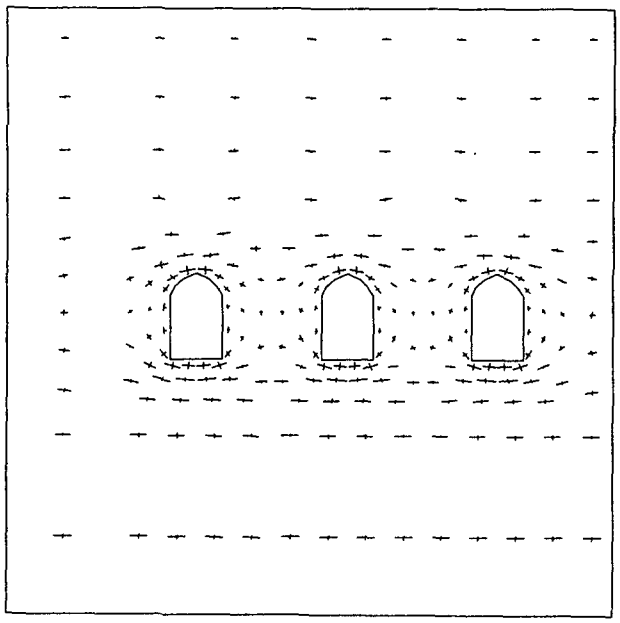


Fig. 3.4 Magnitude and orientation of principal stresses around cavern

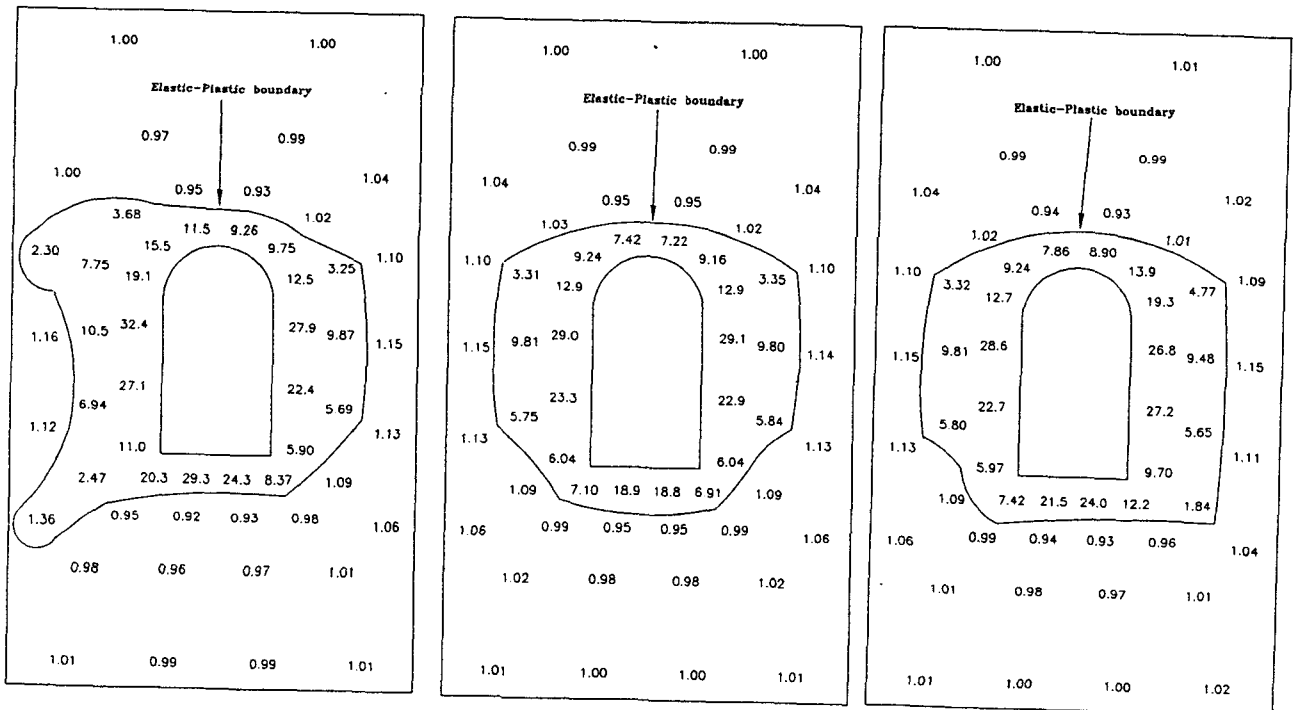


Fig. 3.5 Variation of average permeability around cavern

크게 발생했다고 볼 수 있다. 그리고 공동의 하부 모서리에서는 응력집중의 영향으로 투수계수의 증가가 크지 않았다.

4. 공동의 굴착에 따른 지하수 유동해석

4.1 갤러리 굴착에 따른 지하수 유동해석

본 연구에서는 다양한 조건의 수벽공의 운영압력과 그라우팅의 효과를 고려한 지하수 유동해석을 실시하여 공동의 굴착으로 인한 지하수위의 변화를 해석하여 현재 운영중에 있는 수벽시설의 설계기준과 그라우팅의 차수 효과에 대한 검토를 하였다. 그리고 공동의 굴착으로 인한 공동주위 암반의 변화된 투수계수를 입력치로 하는 유동해석을 실시하여 초기투수계수를 입력치로 하는 유동해석 결과와 비교하고, 공동주위 암반의 투수계수의 변화가 지하수 유동에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 해석대상 모델의 좌우측경계면은 해수면까지 확장해서 해수면을 등수두면으로 하는 경계조건을 설정하였으며, 초기 지하수면은 시추조사공에서의 지하수위 관측치를 근거로 지표면 하부 20 m 에 지하수위가 위치하는 것으로 모델링하였다. 모델의 하부면은 불투수층으로 설정했으며 공동하부 약 450 m 까지 확장하여 경계조건이 미치는 영향을 최소화 하였다. 그리고 공동인접부는 변형거동 해석에서 사용된 유한요소망과 동일한 유한요소망을 구성하여 변형거동 해석에 의한 투수계수의 변화값을 입력자료로 하는 수리해석을 가능할 수 있도록 유한요소망을 구성하였다.

Fig. 4.1 은 저장공동 상부 30 m 에 2 bar 의 운전압력으로 수벽공이 운영되고 있는 조건하에서의 지하수위의 변화와 유속벡터의 크기와 방향을 보여준다. 해석결과, 수벽공 하부의 4개의 저장공동의 상부에서는 수벽공의 영향으로 지하수위는 수벽공 상부 20 m 에 유지되고 있으나 공동상부에 수벽공이 설치되지 않은 2개의 저장공동에서는 지하수위가 공동의 하부까지 하강하고 있다. 지하수위가 Fig. 4.24 에서와 같이 유지된다고 할 때 전체 공동 내부로의 누수량이 약 700 ton/day 로서, 지하비축기지의 설계기준인 340 ton/day 를 초과하고 있다.

Fig. 4.2 는 공동주위의 증가된 투수계수를 입력치로 하는 해석결과로서, 전체

1126 개의 요소중에서 공동 주위의 288개의 요소에 대해서 변화된 투수계수를 입력치로 하였다. 초기 투수계수를 입력자료로 계산한 Fig. 4.1 의 결과와 비교하면 수벽공의 영향으로 지하수위의 변화는 거의 없다고 볼 수 있다. 그러나 공동주위 암반의 투수계수의 증가로 인해 전체 공동 내부로의 누수량은 약 2000 ton/day 로서 약 3배 정도 증가하고 있다. 그러므로 비축기지 암반의 수리적인 평형상태를 잃지 않기 위해서는 공동주위에 그라우팅을 실시해서 공동내부로의 지하수의 유입을 억제해야 할 필요성이 있다.

Fig. 4.3 은 실제현장의 조건과 동일한 2 bar 의 압력으로 수벽공이 운영되고 있으며 공동주위 10 m 반경의 범위에 대해서 그라우팅이 실시된 경우이다. 지하수면은 수벽공 상부 20m 에 유지되고 있으며, 수벽공이 설치되지 않은 2개의 공동의 경우에도 공동 상부 30 m 이상에서 지하수위가 유지되고 있어서 설계기준을 만족시킨다고 할 수 있다. 그리고 전체 저장공동에 대해서 지하수의 흐름방향이 공동 내부로 향하고 있으므로 원유의 유출은 거의 없다고 판단된다. 또한 해석결과, 해수의 유입은 무시할 수 있다고 판단된다.

4.2 전단면 굴착에 따른 지하수 유동해석

본 해석에서는 전단면 굴착 후 원유의 저장을 가정한 운전단계에서의 유동해석을 실시하여 저장공동의 원유 유출이나 기화누설에 대한 해석을 실시하였다.

Fig. 4.4 는 저장공동에 원유를 저장한 경우로서 일반적으로 원유의 저장압력은 0.5 bar 에서 최고 2 bar 의 범위이다. Fig. 4.4 는 공동의 저장압력으로 1bar 가 작용할 경우의 공동주위에서의 동수구배를 보여준다. 해석 결과의 효과적인 표현을 위해서 해석모델의 좌측 공동으로 부터 일련기호(C_1 - C_6) 를 사용하였다. 전체 저장공동에 대해서 동수구배는 1 이상이므로 공동의 기밀성이 유지된다고 할 수 있으며, 상부에 수벽공이 설치되지 않은 C_1, C_2 공동의 동수구배도 1.5 이상의 범위에 있으므로 저장압력이 1 bar 인 경우에는 공동 외부로의 가스의 유출은 없으리라 판단된다.

Fig. 4.5 는 공동의 저장압력이 2 bar 인 경우에 공동주위의 등수두선의 분포를 보여준다. 상부에 수벽공이 설치되어 있는 공동에서의 등수두선의 분포는 수벽공의

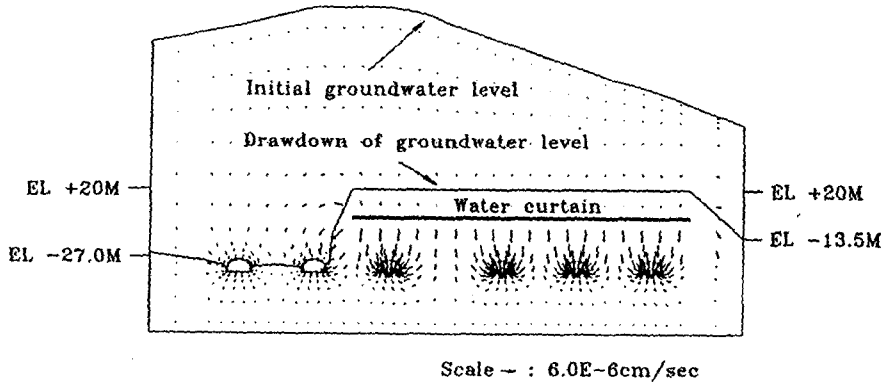


Fig. 4.1 Drawdown of groundwater level and groundwater velocities when water curtain is opereted with 2 bar

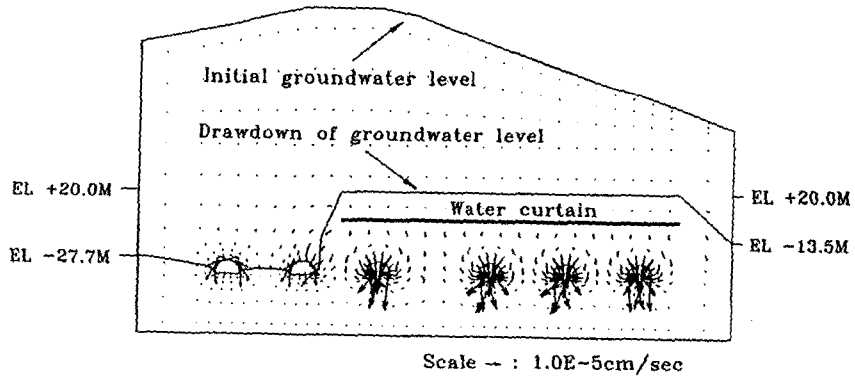


Fig. 4.2 Drawdown of groundwater level and groundwater velocities when increased permeability is considered

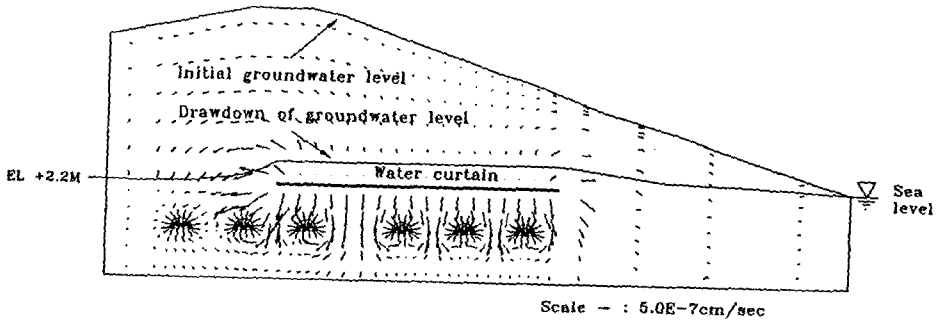


Fig. 4.3 Drawdown of groundwater level and groundwater velocities when grouting is performed and water curtain is operated with 2 bar

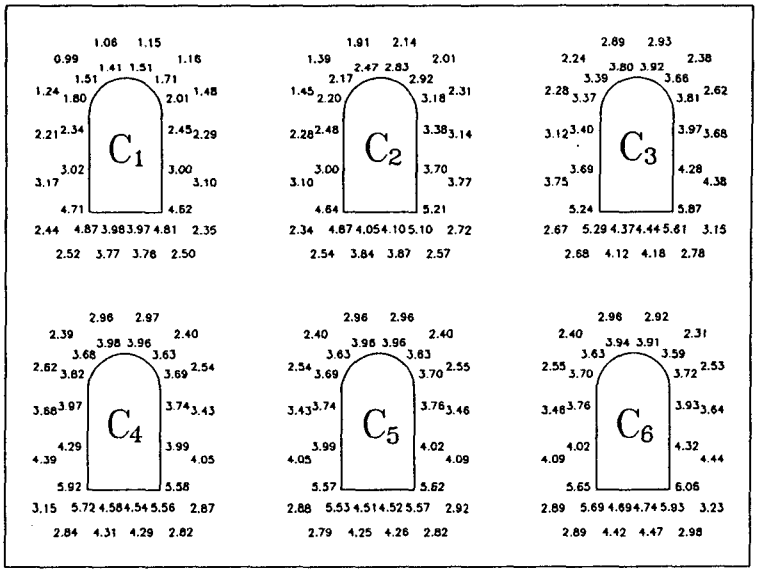


Fig. 4.4 Hydraulic gradient around caverns when internal pressure of cavern is 1 bar

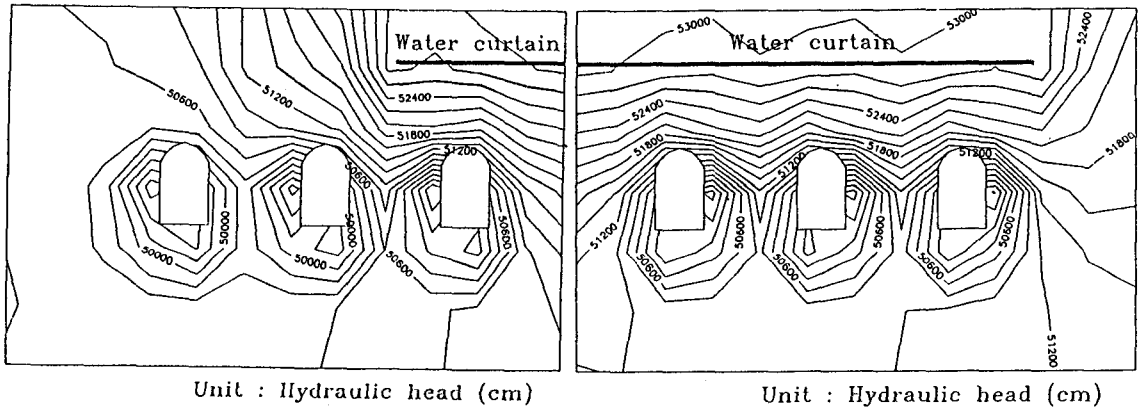


Fig. 4.5 Groundwater head around caverns and water curtain when internal pressure of cavern is 2 bar

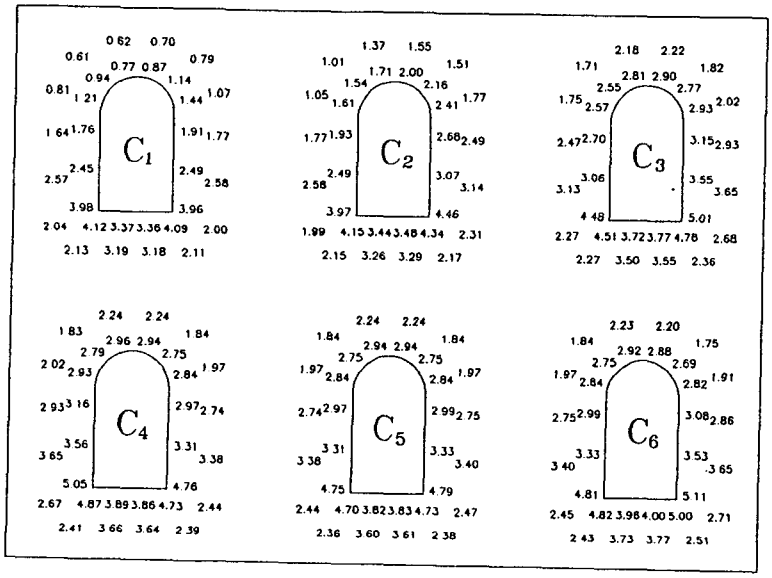


Fig. 4.6 Hydraulic gradient around caverns when internal pressure of cavern is 2 bar

영향으로 수벽공의 방향으로 등수두선이 조밀하게 분포하고 있으며 공동상부에 수벽공이 설치되어 있지 않는 공동 주위의 수두보다 높은 값을 나타내고 있다. 그러므로 수벽공 하부의 공동에서의 기밀성이 보다 유리하다고 할 수 있다. Fig. 4.6 은 공동상부의 동수구배를 보여준다. C_2 - C_6 공동의 경우에는 동수구배가 1 이상의 값을 보여주므로 기밀성이 유지된다고 할 수 있으나 C_1 공동의 동수구배는 1 이하로서 가스의 유출 가능성이 있다고 할 수 있다. 그러므로 C_1 공동이 기밀성을 가지기 위해서는 보다 정밀한 그라우팅의 시공이 필요하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 건설중에 있는 지하원유비축 기지를 해석 대상모델로 하여 공동의 굴착으로 인한 공동주위 암반의 변형에 따른 투수계수의 변화와 이에 따른 지하수 유동해석을 실시하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 대상암반의 주종을 이루고 있는 화강섬록암 시편에 대해서 순간증압법을 이용한 삼축압축하의 투수계수 측정시험을 실시하여 투수계수와 변형율과의 관계식을 구하였다. 탄성영역에서의 투수계수의 변화는 체적변형율의 지수함수식으로 구하였다. 그리고 소성영역에서의 투수계수의 변화는 횡방향 변형율의 지수함수식으로 구하였다.

(2) 갤러리 굴착에 따른 투수계수의 변화에 대한 해석을 실시한 결과 갤러리 반경방향의 투수계수의 증가가 발생하였으며, 평균 투수계수는 공동의 상하부에서 최고 약 30 배 정도의 증가가 발생하였다. 그리고 갤러리의 모서리 부근에는 응력집중으로 투수계수의 증가가 크지 않았다.

(3) 전단면 굴착에 따른 투수계수의 변화에 대한 해석을 실시한 결과 공동의 벽면에서는 응력개방의 영향으로 평균 투수계수는 최고 약 30 배 정도 증가하였다. 그리고 모서리 부근에는 응력집중으로 투수계수의 증가가 크지 않았다.

(4) 갤러리 굴착에 따른 암반의 변화된 투수계수를 입력치로 하는 지하수 유동해석을 실시한 결과 초기 투수계수를 입력치로 하는 해석 결과와 비교하여 수벽공의 영향으로 지하수위의 변화는 거의 없으나 공동내부로의 지하수 유입량은 약 3 배 정도 증가하였다.

(5) 원유의 저장으로 인한 공동의 저장압력이 1 bar 인 경우의 지하수 유동해석 결과, 공동의 기밀성이 유지될 수 있으나 공동의 저장압력을 2 bar 로 가정했을 경우에는 공동 상부에 수벽공이 설치되지 않은 공동에 대해서는 원유의 기화누설이 예상된다. 그러므로 이를 방지하기 위해서는 수벽공이 설치되지 않은 공동에 대해서는 보다 정밀한 그라우팅의 시공이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. P.C.Kelsall, J.B.Case, & C.R.Chabannes, 1984, Evaluation of Excavation - induced Changes in Rock Permeability, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.21, No.3, pp.123-135
2. R.Pusch, 1989, Alteration of the Hydraulic Conductivity of Rock by Tunnel Excavation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.26, No.1, pp.79-83
3. J.A. Hudson, 1987, Rock Mechanics Interaction Matrices ; Part 1-the Concept, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 24
4. L.Wei & J.A.Hudson, 1990, Permeability Variation around Underground Openings in Jointed Rock Masses : A Numerical Study, Proc. of the International Symposium on Rock Joints, pp.565-569
5. C.R. Wilson, et al, 1983, Large- Scale Hydraulic Conductivity Measurements in Fractured Granite, Int., J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol 20, No6, pp.269-276