

유류비축기지 설계를 위한 대심도 경사공에서의 수압파쇄 초기응력 해석

In-Situ Stress Determinations by Hydraulic Fracturing in Deep Inclined Boreholes for the Design of Underground Oil Storages

최 성 웅 ^{*1} Choi, Sung - Oong	신 희 순 ^{*2} Shin, Hee - Soon
박 찬 ^{*1} Park, Chan	신 중 호 ^{*1} Syun, Joong - Ho
배 정 식 ^{*3} Bae, Jeong - Sik	이 형 원 ^{*4} Lee, Hyeong - Won
박 종 인 ^{*5} Park, Jong - In	전 한 석 ^{*6} Jeon, Han - Seok

Abstract

Hydraulic fracturing tests were performed in two inclined boreholes for the design of underground oil storages in Korea. Extensions of their application limits were expected through a precise comparison between the interpretation techniques for the vertical and the inclined boreholes. Especially, it was verified that the magnitude of in-situ stress can be varied even in the same rock mass with a variety of geographic/geotechnical characteristics. It was also demonstrated that its orientation can be changed even in the same borehole with the existence of explicit discontinuities.

요 지

유류비축용 지하저장공동의 설계를 위하여 수압파쇄시험에 의한 현지암반내 초기응력 해석이 수행되었다. 부지 내 2개의 경사 시추공에 대해 수행된 금번 시험은 국내 기술진에 의한 지하비축기지 적용의 첫 사례이다. 또한, 경사공 해석기법을 처음으로 도입하여 수직공 해석기법에 의한 결과와 비교, 해석기법의 타당성을 검증함으로써 향후 수압파쇄시험의 적용범위 확대를 기대할 수 있었다. 특히 인근 지역이라도

*1 정희원, 한국자원연구소 암반공학연구그룹 선임연구원

*2 정희원, 한국자원연구소 암반공학연구그룹 책임연구원

*3 SK건설(주) 토목기술팀 과장

*4 정희원, SK건설(주) 토목기술팀 부장

*5 한국석유공사 건설기술처 대리

*6 정희원, 한국석유공사 건설기술처 부장

지형적 또는 지질학적 특성에 따라 초기응력의 크기는 달라질 수 있음을 보여주었으며, 동일 시추공 내에 서라도 구조선 등과 같은 뚜렷한 불연속면이 있을 경우 초기응력의 방향이 심도에 따라 변화될 수 있음을 보여주었다.

Keywords : Hydraulic fracturing, Underground oil storages, Inclined borehole, In-situ stress, Geographic/geotechnical characteristic, Explicit discontinuity

1. 서 론

암반의 초기응력상태(in situ stress in rock)는 판구조론 및 지진해석에서 뿐만 아니라 지하공간의 공학적 설계에서도 대단히 중요한 변수로 작용하지만, 초기응력 중에서도 특히 수평 성분은 여러 가지 구조지질학적 영향 등에 의해 교란되는 경우가 많으므로 현장에서의 직접적인 측정을 통해서만 정량적인 평가가 가능하다고 알려져 있다(Haimson, 1988).

특히 지하공간을 굴착할 경우, 굴착면에서의 응력집중으로 말미암아 암반이 과응력 상태에 놓이게 되면서 암반이 파괴되거나, 굴착면에서 인장응력대의 발생으로 인한 기존 균열면의 확장으로 새로운 균열이 형성되어 암반 블록의 안정성을 위협하는 문제가 발생하는 경우가 많기 때문에, 현지암반의 초기응력을 미리 알고 이를 설계에 직접 반영하는 것은 대단히 중요하다.

이를 위해 응력보상법(flat jack method), 응력개방법(overcoring method), 그리고 수압파쇄법(hydraulic fracturing method) 등이 응력을 측정하는 방법으로 제안되고 있는데, 이들 중에서 수압파쇄법은 다음과 같은 몇 가지 상대적 장점으로 인해 최근 지반조사 분야에서 널리 이용되고 있다.

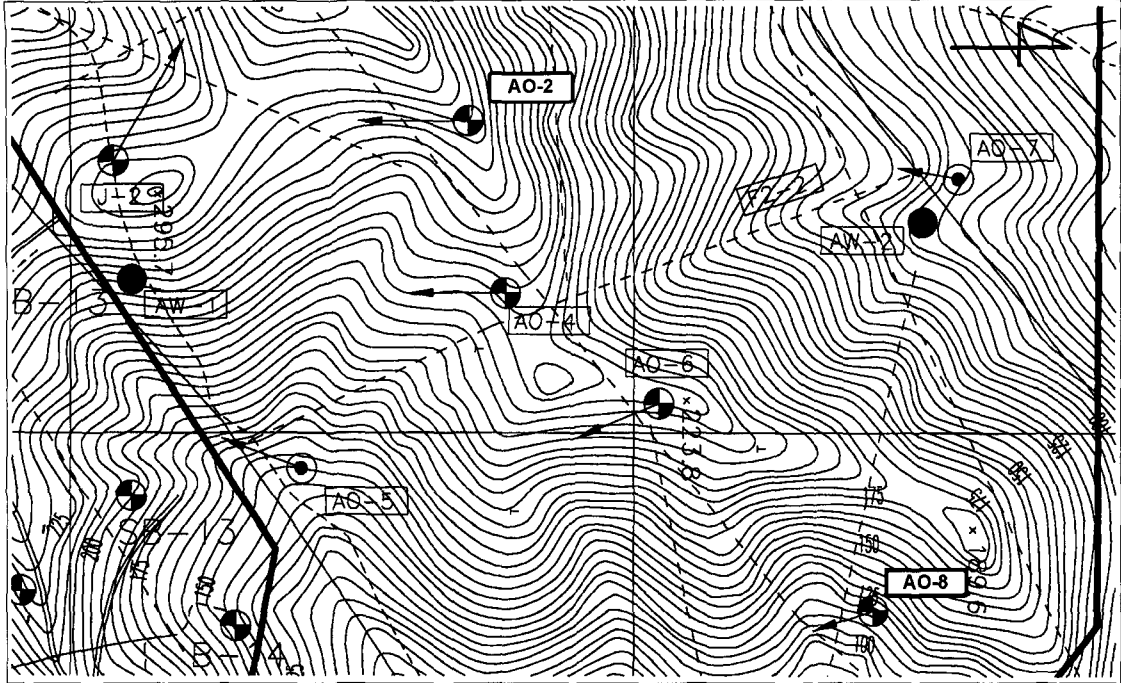
즉, 시추공을 이용하기 때문에 지하구조물의 구축을 위한 기초설계단계에서 적용이 가능하다

는 점과, 시추공을 굴착할 수 있는 한 지하 심부까지 적용이 가능하다는 점, 그리고 응력을 직접 측정하기 때문에 측정오차가 포함될 가능성이 상대적으로 적다는 점 등이다. 또한 기존의 지반조사용 시추공을 그대로 이용하기 때문에 조사비의 절감도 피할 수 있다는 점에서 유용한 응력 측정법으로 인식되고 있다.

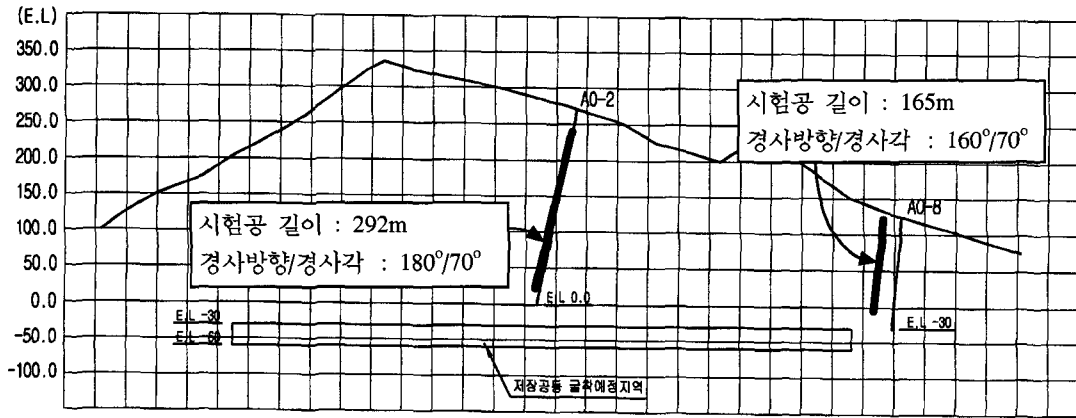
따라서 본 연구에서는 OO추가유류비축기지용 지하저장시설의 설계 정밀도를 높이기 위해, 해당지반 내에 존재하는 암반의 초기응력을 직접 측정하여 측압계수를 제공함으로써 유류비축용 지하저장시설의 규격과 방향, 그리고 지보 패턴의 결정에 대한 기준을 마련코자 수압파쇄시험이 수행되었다.

수압파쇄시험은 AO-2공 및 AO-8공에 대해 수행되었는데, 특히 그림 1에서 보는 바와 같이 AO-2공과 AO-8공은 각각 S 방향 및 S20°E 방향으로 70°씩 경사져 있다. 절리나 단층 등 불연속면이 수직 또는 급경사로 발달되어 있을 경우, 이의 정확한 조사를 위하여 경사 시추를 실시하는 것이 최근의 일반적인 추세인데, 본 시험 대상공 역시 이러한 목적으로 굴착된 경사공이다.

따라서 본 연구에서는 경사공에 대한 수압파쇄 해석을 국내 처음으로 실시하였으며, 또한 수직공에 대한 해석기법을 동시에 적용하여 각각의 결과를 비교함으로써 경사공 해석기법의 적용성을 제안하고자 한다.



(a) 시험공 위치도



(b) 단면 투영도

그림 1. 수압파쇄 시험공의 위치도 및 단면 투영도

수압파쇄 시험대상 구간은 시추공 텔레뷰어 탐사 자료를 이용하여 AO-2공에 대해서는 8개 지점을, AO-8공에 대해서는 7개 지점을 선정하였으며, 각 시험공별 시험구간은 표 1에 정리한 바와 같다.

2. 수압파쇄법의 이론적 고찰

2.1 수직공 해석이론

그림 2는 수압파쇄시험으로부터 얻어질 수 있

표 1. 시험공별 수압파쇄시험 구간

Test No.	AO-2공			AO-8공		
	Inclined Depth (m)	G.L (m)	E.L (m)	Inclined Depth (m)	G.L (m)	E.L (m)
1	193.0	-181.36	93.64	75.0	-70.47	54.53
2	220.0	-206.73	68.27	97.0	-91.15	33.85
3	230.5	-216.59	58.41	103.5	-97.25	27.75
4	243.0	-228.35	46.65	116.5	-109.47	15.53
5	260.0	-244.32	30.68	124.5	-116.99	8.01
6	272.0	-255.59	19.41	145.0	-136.25	-11.25
7	283.5	-266.40	8.60	152.0	-142.83	-17.83
8	287.0	-269.69	5.31			

는 전형적인 (압력-유량)의 시간이력곡선이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 초기파쇄 이후 유체의 가압을 중지하면 일정한 압력인 균열폐쇄 압력(P_s)에 이르게 되며, 이 압력은 균열을 유지시키는데 필요한 압력과 같거나 조금 크기 때문에 대개 균열면에 수직으로 작용하는 최소수평 주응력(S_h)을 나타내게 된다. 즉,

$$S_h = P_s \quad (1)$$

한편, 균열폐쇄이후 다시 가압을 하면 초기파쇄압력(P_b)보다는 낮은 일정 압력에 도달하게 되는데 이 압력을 이차파쇄압력 또는 균열개구압력(P_r)이라 하며, 이로부터 현지압반 인장강도 (in-situ tensile strength, T_{hf})를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{hf} = P_b - P_r \quad (2)$$

균질 등방성이고 불투수성의 탄성체로 가정된 암반 내에 형성된 수직의 시추공에 대해 상부암반 자중에 의한 응력(overburden pressure)을 시추공 축방향의 주응력으로 가정하였을 경우, 이때의 이차원적 수압파쇄 조건식은 다음과 같이 주어진다(Hubbert와 Willis, 1957).

$$\sigma_p = -S_H + 3S_h - P_b = -T_{hf} \quad (3)$$

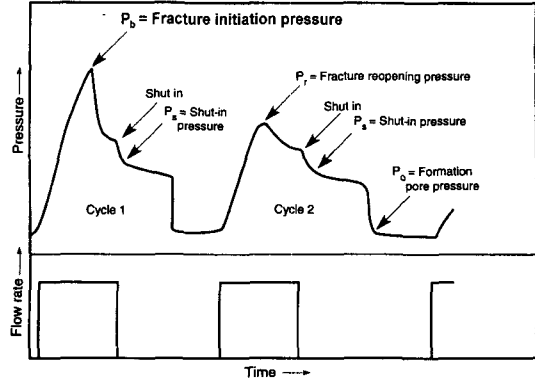


그림 2. 수압파쇄시험에 의한 전형적인 (압력-유량)의 시간이력곡선; 초기파쇄압력 P_b , 균열폐쇄압력 P_s , 균열개구압력 P_r , 공극수압 P_o .

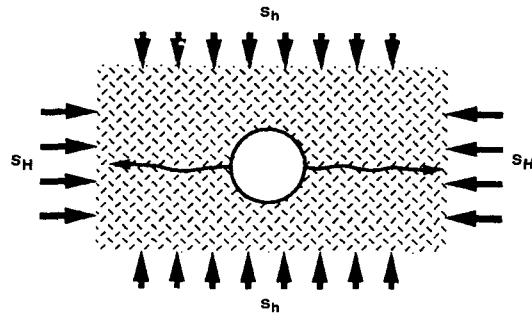


그림 3. 최소수평주응력(S_h) 및 최대수평주응력(S_H)에 의한 수압파쇄 균열 방향의 모식도

$$\sigma_p = \gamma h \quad (4)$$

여기서, σ_p 는 시추공 벽면에 작용하는 최소점선응력이며, σ_v 는 수직방향의 주응력, γ 는 암반의 단위중량, h 는 지표로부터의 심도이다. (2)식과 (3) 식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$-S_H + 3S_h - P_b = -(P_b - P_r)$$

$$S_H = 3S_h - P_r \quad (5)$$

따라서, 식 (1)과 식 (5)로부터 최소수평주응력(S_h)과 최대수평주응력(S_H)을 구할 수 있다(그림

3 참조).

이상에서 보는 바와 같이 최소수평주응력은 전적으로 균열폐쇄압력에 관계되며, 최대수평주응력은 균열폐쇄압력 및 균열개구압력에 관계된다. 따라서 균열폐쇄압력과 균열개구압력의 정확한 산정은 암반의 초기응력해석에 있어서 절대적으로 중요하다. 그러나, 초기파쇄압력은 첫 번째 가압사이클에서 최대 압력으로 비교적 쉽게 결정될 수 있지만 나머지 값들은 그렇지 못하여 여러 가지 기법들이 제안되고 있다. 현재까지 세계적으로 제안되고 있는 방법 중에서 대표적인 것들로는 ① Gronseth와 Kry에 의한 압력 대 시간방법, ② Doe에 의한 압력 대 log(시간)방법, ③ Aamodt와 Kuriyagawa에 의한 ln(압력) 대 시간방법, ④ Zoback과 Haimson에 의한 log(압력) 대 log(시간)방법 등이 있다(Aggsson 과 Kim, 1987).

그러나, 본 해석에서는 국내 암석에 대한 실내 시험으로 그 근접성이 입증된 “이중선형 압력감 쇠퇴속도법(bilinear pressure decay rate method, dP/dT vs. P method)”을 적용하여 균열폐쇄압력을 산정하였으며, 누적주입유량법을 적용하여 균열개구압력을 구하였다(최성웅, 이희근, 1995; 류동우 외, 1996).

2.2 경사공 해석이론

수직공에 대한 해석이론에서는 주응력 중의 하나가 시추공의 축방향과 나란하다고 가정함으로써, 무한 영역 내의 원형공동에 대한 2차원 평면변형률 조건으로 단순화시키고 있다.

그러나 현지압반 주응력 중에서 어느 것도 시추공의 방향과 나란하지 않거나, 시추공의 축방향이 수직이 아닐 경우에 대하여, Ljunggren와 Nordlund (1990)는 그림 4와 같이 축변환에 의한 경사공 수압파쇄 해석식을 수학적으로 제안한

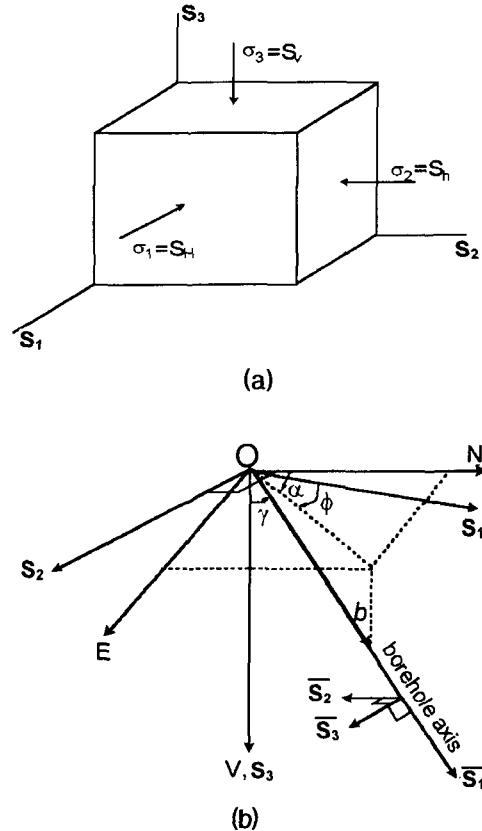


그림 4. 경사공 주위의 응력분포양상을 계산하기 위한 좌표계. (a) 현지압반응력, (b) 각도의 정의 (Ljunggren & Nordlund (1990)에 의함)

바 있다.

즉 그림 4(a)에서 보는 바와 같이, (S_1, S_2, S_3) 좌표계 상에서 (S_H, S_h, S_V)방향과 나란한 방향으로 존재하는 현지압반 주응력 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 와, 그림 4(b)처럼 단위벡터 b 로 정의되는 경사공을 가정하였다. 이때, γ 는 b 와 S_3 가 이루는 각이며, ϕ 는 b 가 S_1, S_2 면에 투영되었을 때 S_1 과 이루는 각이다.

한편, 시추공의 축방향과 나란한 $\overline{S_1}$ 과, S_1, S_2 수평면상에 포함되는 $\overline{S_2}, \overline{S_3}$ 및 이와 직교하는 $\overline{S_3}$ 로 구성되는 ($\overline{S_1}, \overline{S_2}$)의 국부좌표계를 (O, N, E, V) 전체좌표계와 함께 고려할 경우, 수평

각 a 는, b 가 수평면 상에 투영되었을 때 진북방향 (N)과 이루는 각도를 의미한다.

따라서 (O, N, E, V)좌표계와 ($\overline{S}_1, \overline{S}_2, \overline{S}_3$)좌표계 사이의 관계는 다음과 같이 좌표계 변환 행렬 $[B]$ 로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\overline{S}\} &= [B]\{S\} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \sin \gamma & \sin \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \gamma \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \cdot \cos \gamma & -\sin \alpha \cdot \cos \gamma & \sin \gamma \end{bmatrix} \{S\} \end{aligned} \quad (6)$$

만약 식 (6)에서 α 대신 ϕ 을 취하면, Cartesian 좌표변환공식을 사용하여 시추공 좌표계에서의 응력텐서 $[\sigma_b]$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} [\sigma_b] &= \begin{bmatrix} \sigma_{\overline{S}_1} & \tau_{\overline{S}_1\overline{S}_2} & \tau_{\overline{S}_1\overline{S}_3} \\ \tau_{\overline{S}_1\overline{S}_2} & \sigma_{\overline{S}_2} & \tau_{\overline{S}_2\overline{S}_3} \\ \tau_{\overline{S}_1\overline{S}_3} & \tau_{\overline{S}_2\overline{S}_3} & \sigma_{\overline{S}_3} \end{bmatrix} \\ &= [C] \begin{bmatrix} S_H & 0 & 0 \\ 0 & S_h & 0 \\ 0 & 0 & S_V \end{bmatrix} [C]^T \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \sigma_{\overline{S}_1} &= (S_H \cos^2 \phi + S_h \sin^2 \phi) \sin^2 \gamma + S_V \cos^2 \gamma \\ \sigma_{\overline{S}_2} &= S_H \sin^2 \phi + S_h \cos^2 \phi \\ \sigma_{\overline{S}_3} &= (S_H \cos^2 \phi + S_h \sin^2 \phi) \cos^2 \gamma + S_V \sin^2 \gamma \\ \tau_{\overline{S}_1\overline{S}_2} &= \frac{1}{2} (S_h - S_H) \sin 2\phi \sin \gamma \\ \tau_{\overline{S}_1\overline{S}_3} &= \frac{1}{2} (S_V - S_H \cos^2 \phi - S_h \sin^2 \phi) \times \sin 2\gamma \\ \tau_{\overline{S}_2\overline{S}_3} &= \frac{1}{2} (S_H - S_h) \sin 2\phi \cos \gamma \end{aligned} \quad (8)$$

한편, 수압파쇄에 의해서 발생하는 파쇄균열이 경사공축에 평행한 종균열인 경우, 균열면에 대한 좌표계를 (x, y, z)라 하면, x 축은 균열면상에 있고 z 축에 직교하며 y 축은 균열면에 직각이

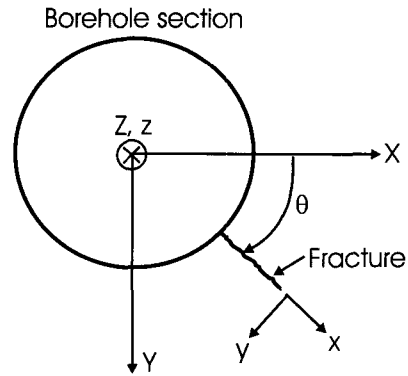


그림 5. 경사시추공 단면상에서의 발생균열과 좌표계의 관계

다(그림 5 참조). 이 경우에 x 축은 X 축과 θ 의 각을 이루므로, xyz 좌표계에서의 응력성분은 다음과 같이 XYZ 좌표계의 응력성분으로 표현된다.

$$\sigma_x = \sigma_X \cdot \cos^2 \theta + \sigma_Y \cdot \sin^2 \theta + \tau_{XY} \cdot \sin 2\theta \quad (9)$$

$$\sigma_y = \sigma_X \cdot \sin^2 \theta + \sigma_Y \cdot \cos^2 \theta - \tau_{XY} \cdot \sin 2\theta \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = -0.5(\sigma_X - \sigma_Y) \sin 2\theta + \tau_{XY} \cdot \cos 2\theta \quad (11)$$

또한 수압파쇄에 의해 균열이 발생하였을 경우 균열발생지점에서의 최대접선응력(σ_θ)은 결국 그 지점의 인장강도와 동일하므로 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.

$$\sigma_\theta = 3\sigma_y - \sigma_x - P_b = -T = -(P_b - P_r) \quad (12)$$

$$\sigma_y = P_s \quad (13)$$

여기서, P_b 는 시험구간에 가해지는 수압(P_w)의 최대치인 초기파쇄압력이며, P_r 은 균열개구압력, P_s 는 균열폐쇄압력이다.

따라서 균열개구압력과 균열폐쇄압력은 다음 식으로부터 구해질 수 있으며, 결국 현지압반 응력장을 구할 수 있다(Ljunggren과 Nordlund, 1990).

$$\begin{aligned} P_r &= \sigma_X (3 \sin^2 \theta - \cos^2 \theta) + \sigma_Y (3 \cos^2 \theta \\ &\quad - \sin^2 \theta) - 4\tau_{XY} \cdot \sin 2\theta \end{aligned} \quad (14)$$

$$P_s = \sigma_x \cdot \sin^2\theta + \sigma_y \cdot \cos^2\theta - \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (15)$$

3. 수압파쇄 현장시험

3.1 시험장비

수압파쇄 현장시험을 크게 2 단계로 구분하면, 수압에 의한 균열이 발생될 때까지 시험대상구간을 가압하는 단계와 발생한 균열을 확인하는 단계로 나눌 수 있다. 균열을 발생시키는 단계에서 사용되는 패커는 스트래들 패커(straddle packer)로서, 팽창성 고무패커 두 개를 연결하여 시추공 내의 일정구간을 완전히 밀폐한 뒤 이 구간을 가압시키기 위해 사용된다. 균열을 확인하는 단계에서 사용되는 패커는 균열압인패커(impression packer)로서, 이는 일종의 나침반(또는 gyroscope)과 같은 방향지시계와 함께 연결되어 사용된다. 균열압인패커 둘레에 고무슬리브(rubber sleeve)를 씌움으로써 균열압인패커가 가압되는 동안 시추공벽상의 균열이 고무슬리브에 찍혀 나오도록 한다. 시험에서 사용된 패커는 프랑스 Petrometallic社의 Bimbar 1(φ58mm)이다.

그림 6은 본 조사에서 사용된 와이어라인형 수압파쇄 시스템의 모식도이다. 와이어라인형 수압파쇄시스템은 depth counter가 부착되어 있는 전동 윈치에 의해 스트래들 패커를 시추공 내로 내리는 방법으로서 패커의 가압과 가압구간의 가압은 별도의 고압 호스에 의해 이루어진다. 이 시스템에서 제일 중요한 것은 가압구간 내의 압력을 반드시 시추공 내에서, 즉 가압구간에 인접한 지점에서 측정해야 한다는 것이다.

즉 그림 6에서 보는 바와 같이 스트래들 패커의 직상부에 압력변환계가 부착되어 있으며, 여기서 읽어들이는 압력은 전기적 신호로 변환되어 지상의 데이터 획득장치와 연결, 실시간으로 notebook PC에 기록되며 동시에 압력 및 유량의 시간이력곡선이 모니터 상에 표현된다.

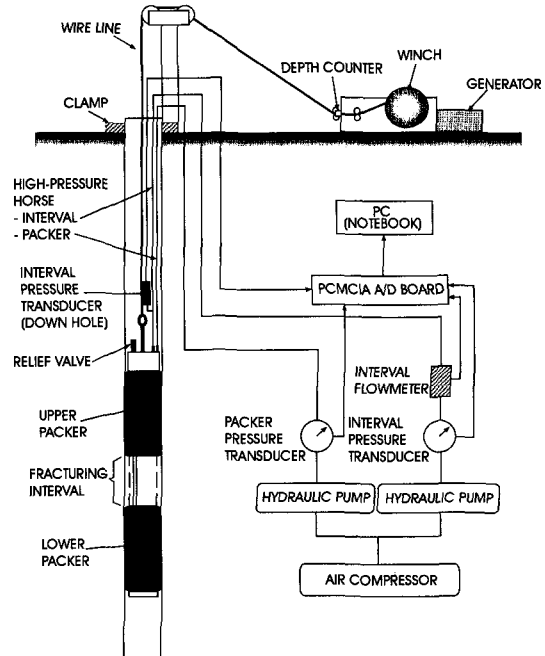


그림 6. 수압파쇄 시스템의 모식도

특히 스트래들 패커의 상부에 부착되어 있는 자동 relief valve는 당 연구팀에 의해 개발된 장비로서, 수압파쇄시험 후 패커의 압력이 완전히 제거되지 않음으로 인해 야기될 수 있는 패커의 jamming을 방지하기 위하여 일정 압력 이하에서 자동으로 열리게 되며 또한 어떠한 형태의 패커에도 부착이 가능하도록 설계되어 있다.

3.2 예비시험

수압파쇄시험을 시작하기 전에 패커 및 각종 연결부의 확인과 제반 시스템의 안정성 여부를 확인하기 위해 casing 내에서 예비 시험이 수행되었다.

그림 7은 예비시험 결과 구해진 패커와 가압 구간 압력 및 유량 곡선을 나타내고 있는데, ①은 패커를 casing 내에 완전히 밀폐시키기 위해 가압을 계속하고 있는 단계를 나타낸다.

②부분은 패커가 casing 내에서 압력을 받아

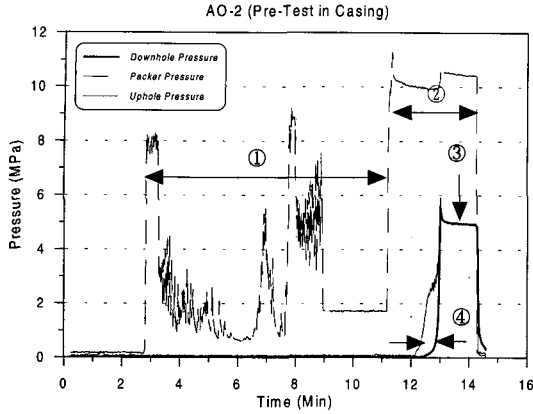


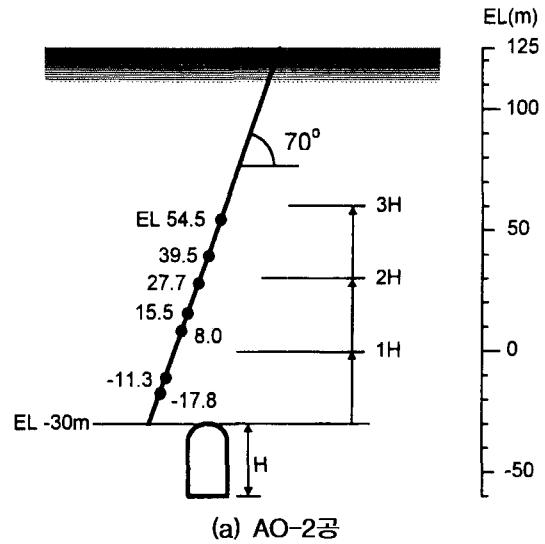
그림 7. 예비 시험에 대한 압력 및 유량의 시간 이력곡선 ; ① 패커의 가압 단계, ② 패커 가압 완료, ③ 패커 및 기타 ④ 시스템의 압력 누설 여부 확인, 시스템과 가압구간 내에서의 압력 측정 시간차

어느 정도 고정되었음을 의미하는 구간으로서 스트래들 패커 사이에서 가압구간이 형성되었음을 의미하는 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 약 10 MPa 가량의 압력으로 패커를 고정했을 때에도 압력의 손실은 나타나지 않고 있으며, 약 0.5 MPa 정도를 더 가압해도 패커는 안정적인 경향을 띠고 있다.

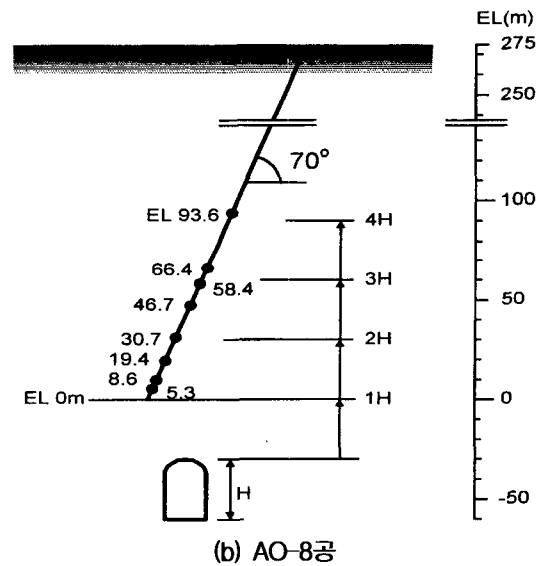
한편, 패커가 고정된 상태에서 가압구간 내로 고압수를 넣는 과정이 ④의 부분인데, 여기서 보는 바와 같이 지상의 시스템에 부착되어 있는 압력변환계로 측정되는 가압구간의 압력과 시추공 내에서 패커 직상부에 부착되어 있는 압력변환계에서 측정되는 압력과는 뚜렷한 시간 차이가 남을 알 수 있다.

이는 시스템의 호스 및 각종 연결 부위에서의 compliance 때문이며, 또한 고압호스 자체의 선저항에 의해 시스템에서 토출되는 압력이 실제 공내에 100% 전달되기에는 다소 시간차가 있음을 의미하는 것이다.

이로부터 수압파쇄에 의한 압력관계를 측정할 때 반드시 공내에 부착된 압력변환계로부터 압



(a) AO-2공



(b) AO-8공

그림 8. 수압파쇄 시험구간의 선정 모식도

력을 읽어들이어야 함을 확인할 수 있다.

또한, 그림에서 ③의 부분은 가압구간 내의 압력을 약 5 MPa 가량으로 가압하여 패커 사이로 압력 누설이 발생하지는 않는지, 또는 고압 호스의 연결부의 확인을 위해 압력을 고정시킨 부분이다. 그림에서 보듯이 압력의 누설은 전혀 없음을 알 수 있으므로 패커의 연결부 및 제반 시스템의 안정성은 확보된 것으로 보여진다.

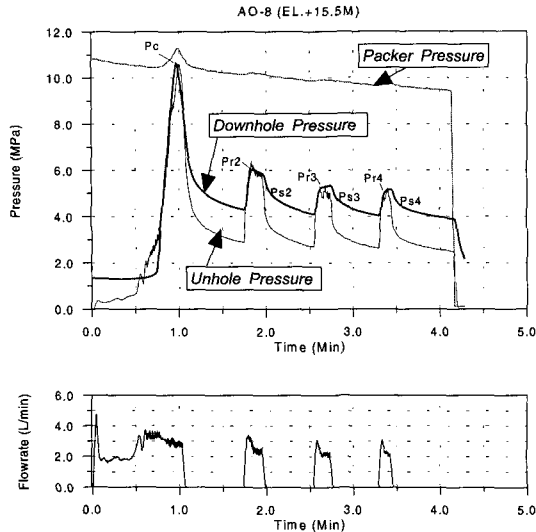


그림 9. AO-8공의 EL.+15.5M 지점에 대한 (압력-유량)의 시간이력곡선

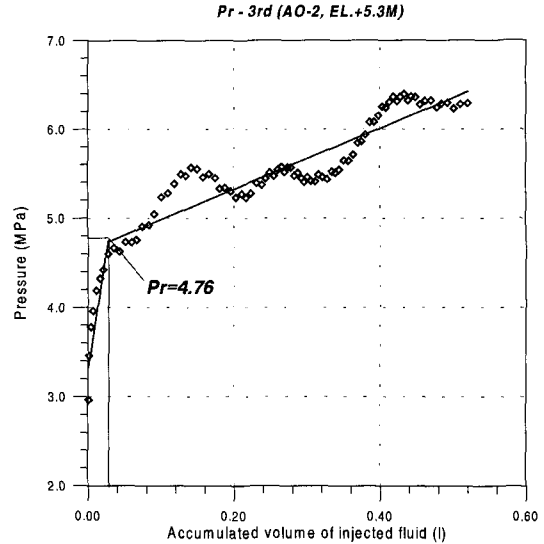


그림 10. AO-2공에 대한 EL.+5.3M 지점의 세 번째 가압사이클에 대한 균열개구압력(P_f)의 결정

3.3 시험대상 구간선정

이상과 같이 예비 시험을 실시한 뒤 그림 8과 같이 심도별로 수압파쇄시험이 실시되었다.

일반적으로 터널의 안정성 해석시 필수 경계 조건으로 주어지는 축압계수는, 해석의 신뢰도 향상 차원에서 최소한 터널 높이의 3배까지 측정되어야 하는 것으로 알려져 있지만, AO-2공의 경우 터널 높이의 1배 지점까지만 시추가 실시되어 있었기 때문에 터널 구간을 포함해서 터널 높이의 4배 지점까지 축압계수 양상을 파악하기 위하여 EL.+5.3m부터 EL.+93.6m까지 측정을 시도하였다.

한편 AO-8공의 경우는 EL.-17.8m 부터 EL.+54.5m까지 측정을 실시하여 터널의 crown부분부터 터널높이의 3배 지점까지에 대하여 시험을 수행하였다.

3.4 수압파쇄시험 측정결과

이상과 같이 설정된 시험 심도에 대하여, 각

심도별 수압파쇄시험으로부터 첫 번째 가압 사이클을 통해 초기파쇄압력, P_b 를 구할 수 있었으며, 두 번째 및 세 번째 가압 사이클을 통해 이차 파쇄압력 또는 균열개구압력, P_f 을 구하였다. 그림 9는 수압파쇄시험으로부터 구해진 (압력-유량)의 시간이력곡선에 대한 한 예를 보여주고 있으며, 이와 같이 구해진 초기파쇄압력과 균열개구압력, 그리고 이들의 차이로 주어지는 현지압반 인장강도 T_M 를 균열폐쇄압력과 함께 표 2에 정리하여 나타내었다.

그림 10은 AO-2공의 EL.+5.3M 지점에 대한 균열개구압력 산정 그래프인데, 압력의 상승 구간에 대한 직선회귀분석식과 압력강하 구간에서의 직선회귀분석식의 교점을 구하여 균열개구압력을 산정하는 누적주입유량법을 적용한 예이다.

만약 균열개구압력곡선의 최고 값을 이용하는 기존의 방법을 적용할 경우, 누적주입유량법에 비해 약 1.5 MPa 정도가 과대 평가될 수 있음을 알 수 있는데, 이 정도의 차이는 전체 응력해석 시 상당한 영향을 미칠 수 있는 크기이다.

표 2. 수압파쇄시험에 의한 응력측정 결과표

Hole No.	Inclined depth (m)	Elevation (m)	Breakdown pressure (P_b) (MPa)	Reopening Pressure (P_r) (MPa)			$T_{hf}^{(1)}$ (MPa)	Shut-in Pressure (P_s) (MPa)		
				2nd Cyc.	3rd Cyc.	Average		2nd Cyc.	3rd Cyc.	Average
AO-2	193.0	93.6	9.25	5.54	5.44	5.49	3.76	4.32	3.71	4.02
	220.0	68.3	10.22	6.35	6.22	6.29	3.94	4.21	4.19	4.20
	230.5	58.4	9.51	6.90	5.88	6.39	3.12	4.15	4.13	4.14
	243.0	46.7	9.45	6.42	5.63	6.03	3.43	4.94	4.41	4.68
	260.0	30.7	9.29	6.42	6.07	6.25	3.05	4.81	4.52	4.67
	272.0 ²⁾	19.4	6.64	4.61	4.65	4.63	2.01	3.46	3.24	3.35
	283.5	8.6	9.94	6.96	6.53	6.75	3.20	4.71	4.86	4.79
287.0	5.3	11.62	5.29	4.76	5.03	6.60	4.64	4.85	4.75	
AO-8	75.0	54.5	6.84	4.05	3.94	3.99	2.85	2.97	3.08	3.02
	97.0	33.8	9.01	5.07	4.52	4.79	4.22	4.43	4.18	4.30
	103.5	27.7	7.91	4.45	4.10	4.27	3.64	3.44	3.11	3.27
	116.5	15.5	10.65	5.71	5.05	5.38	5.27	4.84	4.59	4.71
	124.5	8.0	7.75	4.48	4.54	4.50	3.25	4.02	3.92	3.97
	145.0 ³⁾	-11.3	20.42	10.90	9.85	10.37	10.05	9.58	9.25	9.41
152.0	-17.8	10.37	7.89	7.69	7.79	2.58	8.34	7.64	7.98	

- 1) 현지암반 인장강도는 초기파쇄압력(P_b)과 균열개구압력(P_r)의 차이로 계산됨.
- 2) 기존 균열의 reopening 현상발생.
- 3) 국부적인 암반물성의 이상대가 존재하여 인장강도가 크게 측정됨.

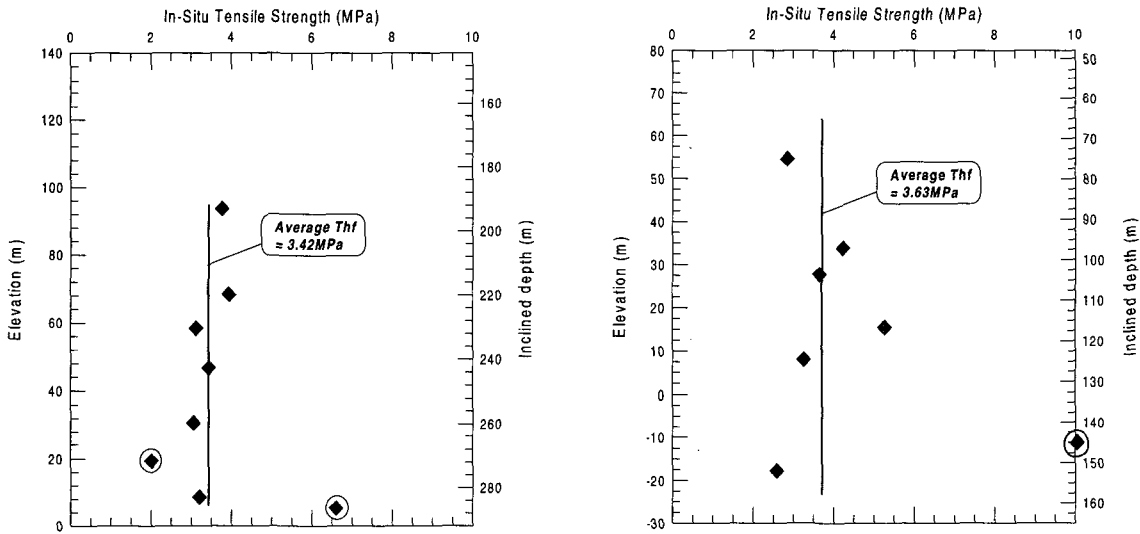


그림 11. 수압파쇄시험에 의한 심도별 현지암반 인장강도(T_{hf})의 산정 (○; 평균에서 제외시킨 값)

한편, 그림 11은 초기파쇄압력과 균열개구압력의 차이로 주어지는 현지암반 인장강도의 경향을 살펴보기 위해 직선회귀분석으로 표현한 것인데, AO-2공의 경우 reopening이 발생했던

EL.+19.4M 지점과 국부적인 영향인 것으로 판단되는 EL.+5.3M 지점을 제외하고 평균값을 구해보면 약 3.42 MPa 정도임을 알 수 있다. 또한 AO-8공의 경우도 마찬가지로 국부적인 영향인

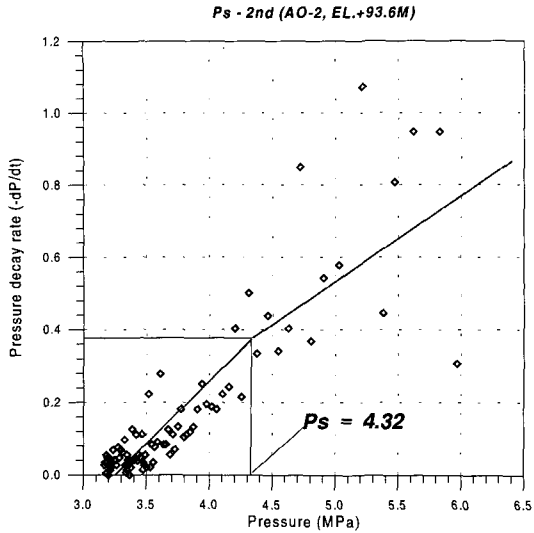


그림 12. AO-2공 EL.+93.6M 지점의 두 번째 가압사이클에 대한 균열폐쇄압력(P_s)의 결정

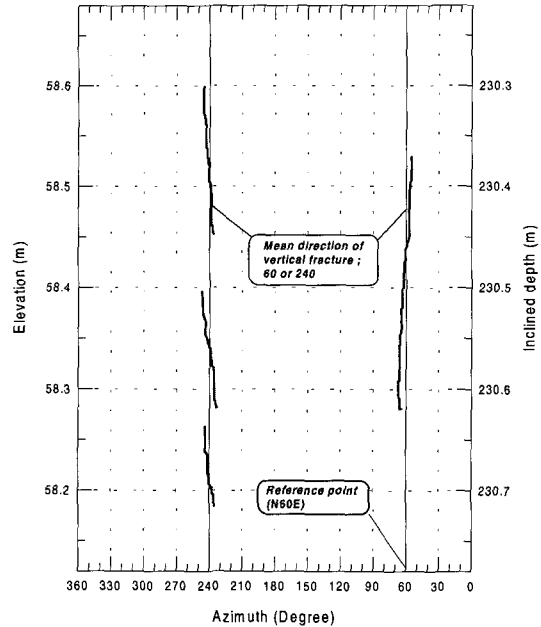
것으로 파악되는 EL.-11.3M 지점을 제외하고 평균을 구했을 때 AO-2공과 거의 유사한 3.63 MPa의 현지암반 인장강도를 구할 수 있다.

한편, 초기파쇄 또는 균열개구 이후 펌핑시스템을 shut-off 시켰을 때 수압파쇄에 의해 발생한 균열이 다시 닫히면서 일정한 수준에 도달하는 압력인 균열폐쇄압력, P_s 는 균열면에 수직으로 작용하는 압력과 거의 동일하다. 따라서 수압파쇄에 의한 균열이 종균열일 경우 균열폐쇄압력은 곧 최소수평주응력을 직접 나타내기 때문에 이를 정확히 산정하는 것은 대단히 중요하다.

따라서 앞서 언급한 바와 같이 최대한 균열폐쇄압력을 객관적이고 과학적으로 산정하기 위해 이중선형 압력감쇠속도법을 적용하였으며, 그림 12는 이러한 방법으로 AO-2공의 EL.+93.6M 지점에 대해 산정된 균열폐쇄압력의 한 예를 보여 주고 있다.

3.5 균열압인시험

균열압인패커와 균열방향측정기를 연결하여



Reference point; S60°W or N60°E

그림 13. AO-2 시추공의 EL.+58.4M 지점에서 수압파쇄균열 및 최적적합직선(N60°E)

각 심도별로 수압파쇄균열에 대한 압인시험이 실시되었다.

균열압인패커에 의해 슬리브 상에 찍혀 나온 수압파쇄 균열의 방향은 균열방향측정기로부터 촬영된 기준선(reference line)의 방위를 기준으로 알 수 있게 되는데, 그림 13에서 보는 바와 같이 AO-2공의 EL.+58.4M 지점에서 균열방향측정기로부터 촬영된 기준선의 실제 방향은 N60°E였고 이에 대하여 수압파쇄균열의 방향을 함께 도시하게 되면, 수압파쇄균열의 방향은 N60°E 또

는 S60°W임을 알 수 있다.

4. 응력해석

4.1 수직공에 대한 해석기법의 적용

수직응력 σ_v 는 해당 심도에 대한 암반의 토피압으로부터 계산될 수 있다. 상부 암반의 평균 밀도는 실내시험으로부터 약 0.027 MPa/m로 간주할 수 있으므로 수직응력은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\sigma_v = 0.027 (\text{MPa/m}) \times \text{depth} (\text{m}) \quad (16)$$

한편, 최소수평주응력 σ_h 는 수압파쇄 시험결과 발생한 균열이 종균열일 경우 균열폐쇄압력

으로부터 직접 구해질 수 있는데, Haimson(1996)은 여러 가지 현장측정사례로부터 70° 이내의 균열은 종균열로 간주할 수 있다는 제안을 한 바 있다.

따라서 식 (1) 및 식 (5)로부터 구해진 최소수평주응력(σ_h) 및 최대수평주응력(σ_H)과 이들에 의한 측압계수의 상한값 및 하한값을 구하여 주응력의 방향과 함께 정리한 것이 표 3에 나타나 있다.

그러나 본래 식 (5)로부터 최대수평주응력을 산정할 때 공극수압 P_0 의 영향을 고려하여 이 값만큼 빼줘야 한다. 대개 천심도에서의 시험에서는 지하수면에 의한 공극수압의 영향이 그다지 크지 않아 무시되곤 하지만 본 조사 시추공과 같이 심도가 100m 이상될 경우 지하수압의 영향은

표 3. 수직공 응력해석에 의한 수압파쇄 응력해석 결과표

Inclined depth (m)	Elevation (m)	Pore Pressure ¹⁾ (P_0) (MPa)	Vertical Stress ²⁾ (σ_v) (MPa)	Min. Horizontal Stress (σ_h) (MPa)	Max. Horizontal Stress (σ_H) (MPa)	K		σ_H direction ³⁾
						K_h (σ_h/σ_v)	K_H (σ_H/σ_v)	
AO-2 borehole								
193.0	93.6	1.34	4.90	4.02	5.21	0.82	1.06	55°±5°
220.0	68.3	1.60	5.58	4.20	4.72	0.75	0.85	80°±5°
230.5	58.4	1.70	5.85	4.14	4.33	0.71	0.74	60°±5°
243.0	46.7	1.81	6.17	4.68	6.19	0.76	1.00	N.A
260.0	30.7	1.97	6.60	4.67	5.78	0.71	0.88	N.A
272.0	19.4	2.09	6.90	3.35	3.33	-. ⁴⁾	-. ⁴⁾	reopening
283.5	8.6	2.19	7.19	4.79	5.42	0.67	0.75	N.A
287.0	5.3	2.23	7.28	4.75	6.98	0.65	0.96	72°±3°
AO-8 borehole								
75.0	54.5	0.47	1.90	3.02	4.60	1.59	2.42	45°±3°
97.0	33.8	0.67	2.46	4.30	7.44	1.75	3.02	45°±5°
103.5	27.7	0.74	2.63	3.27	4.80	1.24	1.83	N.A
116.5	15.5	0.86	2.96	4.71	7.89	1.59	2.67	60°±10°
124.5	8.0	0.93	3.16	3.97	6.48	1.26	2.05	N.A
145.0	-11.3	1.12	3.68	9.41	16.74	2.56 ⁵⁾	4.55 ⁵⁾	60°±8°
152.0	-17.8	1.19	3.86	7.98	14.96	2.07	3.88	N.A

- 1) 지하수위면을 고려한 공극수압
- 2) 암반의 밀도(0.027 MPa/m)로부터 계산된 값
- 3) 진북으로부터 시계방향으로의 각도
- 4) 기존 균열의 reopening 현상발생으로 K 값이 측정되지 않음.
- 5) 국부적인 암반물성 이상대의 존재로 K 값이 크게 측정된 것으로 추정됨.

반드시 고려되어야 한다. 따라서 최대수평주응력은 식 (5)에서 공극수압 P_p 만큼 빼서 구해진 값이다.

한편, 최대수평주응력의 방향은 AO-2공의 경우 평균값이 N67°E 였으며, 약 ±11° 가량의 오차범위를 나타내고 있으며, AO-8공의 경우 평균값이 N52.5°E 였으며 오차범위는 약 ±8°이다. 따라서 AO-2공과 AO-8공에 대한 수압파쇄시험으로부터 최대수평주응력의 방향은 거의 유사한 방향으로 나타남을 알 수 있었다.

그러나 측압계수의 크기는 두 시추공의 경우 비교적 차이가 남을 알 수 있는 바, AO-2공의 경우 측압계수가 0.6~1.0 가량이나, AO-8공의 경우는 1.2~3.0이며 국부적으로 4.0 이상의 값도 나타나고 있다.

이러한 현상은 지형 및 지질적인 영향에 기인하는 것으로 판단되는데, 지형적으로 AO-2공과 AO-8공이 동일한 mass 내에 있다고는 하나, AO-2공의 위치는 지형적으로 비교적 평탄한 곳에 위치하고 있으며 주위 지형의 급격한 변화가 없는 곳에 위치하고 있는 반면, AO-8공의 경우가 파른 지형에 속하고 있으며, 지형적으로도 mass의 경계부분에 속하고 있어 이에 의한 영향이 크게 작용하기 때문이다. 이러한 사실은 가파른 절벽 근처의 산악지형에서 응력측정을 실시한 결과 비교적 측압계수가 크게 나타나는 경향이 있다는 Amadei 와 Stephansson(1997)의 연구 결과와도 부합되고 있으며, 특히 AO-8공의 북동 지역에 발생되어 있는 구조대를 기준으로 퇴적암과 화산암의 암질경계부 인근에 AO-8공이 위치하고 있기 때문이기도 할 것이다.

그림 14는 지난 2년간 한국자원연구소에서 수행하였던 수압파쇄시험에 의한 국내 각 지역에서 심도별 초기응력 측정값과 측압계수의 양상을 표시한 것인데(최성웅, 1997), 여기서 보듯이 본 조사 심도와 유사한 지점인 120m 이상의

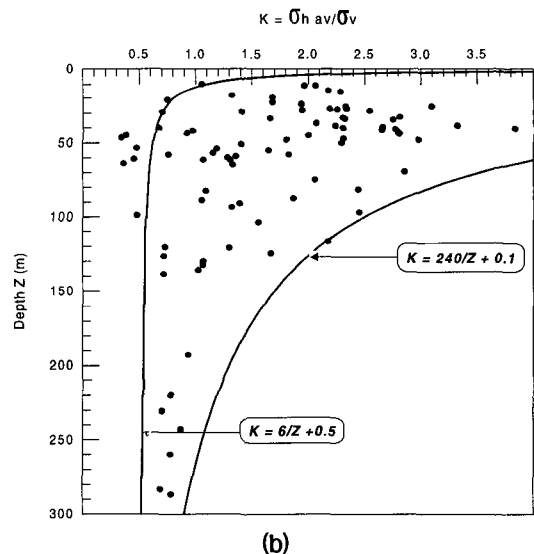
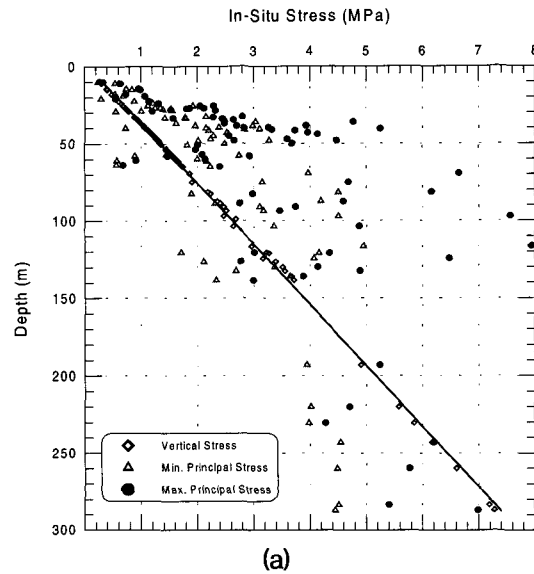


그림 14. 수압파쇄시험에 의해 측정된 국내 각 지역의 심도별 초기응력 양상 (a) 및 측압계수의 범위 (b)

심도에서는 대체적으로 측압계수의 하한값은 0.5~1.0 정도이며, 상한값은 1.0~1.5 정도임을 알 수 있다. 본 조사지역에서의 측정결과를 보면 AO-2공의 경우는 이 범위에 속하고 있지만, AO-8공은 다소 큰 값을 보이고 있다. 따라서

표 4. 경사공 응력해석에 필요한 측정자료

Inclined depth (m)	Elevation (m)	Pressure data			Hole orientation ¹⁾		Fracture orientation ¹⁾	
		P_o (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	α	γ	ϕ	θ
AO-2 borehole								
193.0	93.6	1.34	5.49	4.02	180°	20°	125°	145°
220.0	68.3	1.60	6.29	4.20	180°	20°	100°	170°
230.5	58.4	1.70	6.39	4.14	180°	20°	120°	150°
243.0	46.7	1.81	6.03	4.68	180°	20°	120°(?)	150°(?)
260.0	30.7	1.97	6.25	4.67	180°	20°	120°(?)	150°(?)
272.0	19.4	2.09	4.63	3.35	180°	20°	- ²⁾	- ²⁾
283.5	8.6	2.19	6.75	4.79	180°	20°	108°(?)	162°(?)
287.0	5.3	2.23	5.03	4.75	180°	20°	108°	162°
AO-8 borehole								
75.0	54.5	0.47	3.99	3.03	160°	20°	115°	155°
97.0	33.8	0.67	4.79	4.31	160°	20°	115°	155°
103.5	27.7	0.74	4.27	3.28	160°	20°	115°(?)	155°(?)
116.5	15.5	0.86	5.38	4.72	160°	20°	100°	170°
124.5	8.0	0.93	4.50	3.97	160°	20°	100°(?)	170°(?)
145.0	-11.3	1.13	10.37 ³⁾	9.42 ³⁾	160°	20°	100°	170°
152.0	-17.8	1.19	7.79	7.99	160°	20°	100°(?)	170°(?)

(?) 표시는 직접 측정되지 않아서 인접한 지점의 측정결과를 이용한 것임.

1) α , γ , ϕ , θ 의 정의는 앞의 그림 4 참조.

2) 기존균열의 reopening 으로 수압파쇄에 의한 균열이 발생하지 않음.

3) 국부적인 암반물성 이상대의 존재로 주변 시험위치보다 큰 값이 측정됨.

AO-8공에서의 측정값으로부터 이 지역은 지형 및 지질적인 영향에 의하여 응력의 집중현상이 발생하고 있음을 알 수 있다.

4.2 경사공에 대한 해석기법의 적용

앞에서 언급한 바와 같이 수압파쇄시험이 수행된 두 개의 시험공은 모두 70°의 경사공이었기 때문에 경사공에 대한 해석이론을 적용하여 앞서 구한 수직공 해석법에 의한 응력해석결과와 비교하고자 한다. 경사공 해석이론에 의한 응력해석에 필요한 자료를 정리하면 표 4와 같다.

표 4에 나와 있는 입력자료를 이용하여 경사공 응력해석기법에 의해 계산된 결과는 표 5와 같은데, 여기서 수직응력은 수직공 응력해석에서와 마찬가지로 측정심도에서의 상반하중으로 계

산되며, 2개의 수평주응력 성분은 앞의 식 (14) 및 식 (15)로부터 계산된다. 이 두 개의 식에 나타나 있는 XYZ좌표계에 대한 응력성분들을 다시 식 (8)의 주응력 성분으로 표현하게 되면 그 관계식이 매우 복잡하고 계산 또한 수직공 응력 해석에서와 같이 간단하지 않으므로 컴퓨터 프로그램을 작성하여 응력해석이 이루어진다.

따라서 수직공 해석법에 의한 응력해석결과인 표 3과 경사공 해석법에 의한 응력해석결과인 표 5에 대해 축압계수의 하한값(수직응력에 대한 최소수평응력의 비)과 상한값(수직응력에 대한 최대수평주응력의 비)만 따로 떼어내어 비교를 해 보면 그림 15와 같다.

즉 AO-2공 및 AO-8공 모두 수직공 해석기법과 경사공 해석기법으로부터 구해진 축압계수의 양상은 거의 유사함을 알 수 있다.

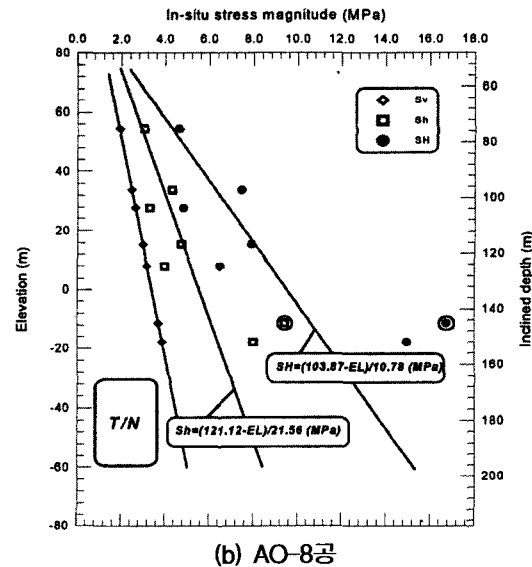
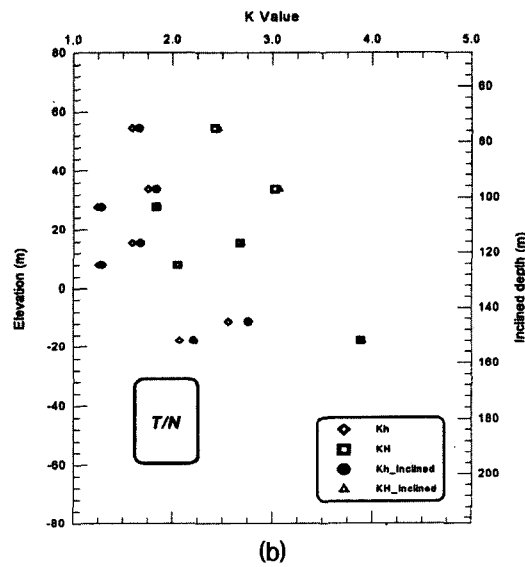
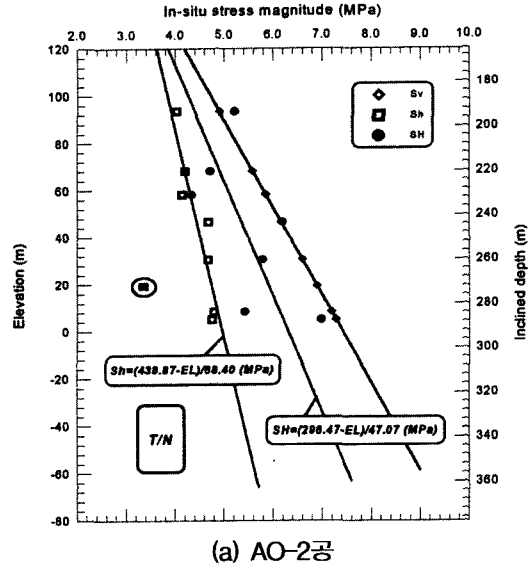
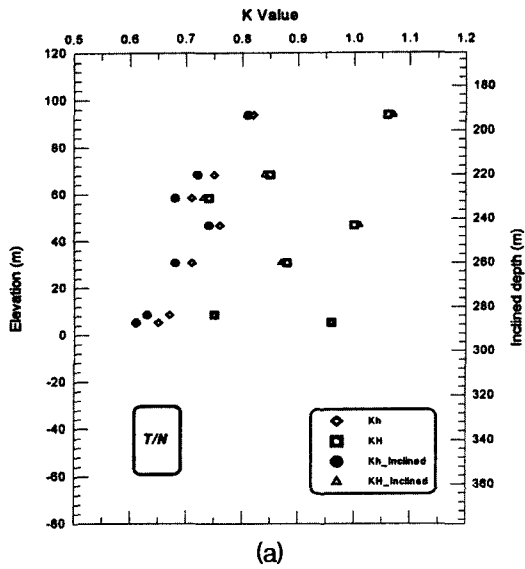


그림 15. 수직공 및 경사공 해석기법의 적용에 따른 축압계수의 변화양상 (Kh 및 K_H 는 수직공 해석기법에 의한 축압계수의 상,하한값, $K_{h_Inclined}$ 및 $K_{H_Inclined}$ 는 경사공 해석기법에 의한 축압계수의 상,하한값)

그림 16. 각 시추공에 대한 주응력의 심도별 변화양상(○표는 회귀분석에서 제외시킨 값)

5. OO추가비축기지 부지의 응력상태

표 5에 정리하여 나타낸 시추공별 심도별 최

대수평주응력, 최소수평주응력 및 수직응력을 그림으로 나타내면 그림 16과 같다.

즉, AO-2공의 경우는 기존 균열의 reopening 현상만이 발생했던 EL.+19.4M 지점에서의 측정치를, AO-8공의 경우는 국부적인 영향으로 큰

표 5. 경사공 응력해석에 의한 수압파쇄 응력해석 결과표

Inclined depth (m)	Elevation (m)	Vertical Stress (σ_v) (MPa)	Min. Horizontal Stress (σ_h) (MPa)	Max. Horizontal Stress (σ_H) (MPa)	K_h (σ_h / σ_v)	K_H (σ_H / σ_v)	σ_H direction
AO-2 borehole							
193.0	93.6	4.90	3.94	5.24	0.81	1.07	55°
220.0	68.3	5.58	4.02	4.71	0.72	0.84	80°
230.5	58.4	5.85	3.98	4.28	0.68	0.73	60°
243.0	46.7	6.17	4.54	6.20	0.74	1.01	60°(?)
260.0	30.7	6.60	4.48	5.77	0.68	0.87	60°(?)
272.0	19.4	6.90	2.93	3.29	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
283.5	8.6	7.19	4.51	5.41	0.63	0.75	72°(?)
287.0	5.3	7.28	4.45	6.99	0.61	0.96	72°
AO-8 borehole							
75.0	54.5	1.90	3.15	4.68	1.66	2.46	45°
97.0	33.8	2.46	4.50	7.56	1.83	3.07	45°
103.5	27.7	2.63	3.35	4.87	1.28	1.85	45°(?)
116.5	15.5	2.96	4.95	7.94	1.67	2.69	60°
124.5	8.0	3.16	4.07	6.48	1.29	2.05	60°(?)
145.0	-11.3	3.68	10.15 ²⁾	16.80 ²⁾	2.76 ²⁾	4.57 ²⁾	60°
152.0	-17.8	3.86	8.52	15.03	2.21	3.90	60°(?)

(?) 표시는 직접 측정되지 않아서 인접한 지점의 측정결과를 이용한 것임.

1) 기존균열의 reopening 으로 K 값이 측정되지 않음.

2) 국부적인 암반물성 이상대의 존재로 K 값이 크게 측정된 것으로 추정됨.

표 6. 직선회귀분석에 의한 터널예정심도에서의 주응력 및 축압계수 양상

위 치	G.L (m)	Verical Stress (σ_v) (MPa)	Min. Horizontal Stress (σ_h) (MPa)	Max. Horizontal Stress (σ_H) (MPa)	K_h	K_H
AO-2공						
공동천정부	-305.0	8.2	5.3	7.0	0.65	0.85
공동중심부	-320.0	8.6	5.5	7.2	0.64	0.84
공동바닥부	-335.0	9.1	5.6	7.5	0.62	0.82
AO-8공						
공동천정부	-155.0	4.2	7.0	12.4	1.67	2.95
공동중심부	-170.0	4.6	7.6	13.8	1.65	3.00
공동바닥부	-185.0	5.0	8.4	15.2	1.68	3.04

응력값이 측정되었던 EL.-11.3M 지점에서의 측정값을 제외하고 직선회귀분석을 실시한 결과, 유티저장공동의 예정 심도에 대한 최대 및 최소 수평주응력을 표 6과 같이 유추할 수 있다.

따라서 AO-2공 및 AO-8공에서의 수압파쇄시 협결과 현지암반의 최소 및 최대수평주응력의

크기는 각각 다음 식과 같이 주어질 수 있다.

AO-2공 ;

$$\sigma_h = (438.87 - EL) / 88.40 \text{ (MPa)} \quad (17)$$

$$\sigma_H = (298.47 - EL) / 47.07 \text{ (MPa)}$$

AO-8공 ;

$$\sigma_h = (121.12 - EL) / 21.56 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_H = (103.87 - EL) / 10.78 \text{ (MPa)}$$
(18)

전체적으로 AO-2공의 경우 최대수평주응력과 최소수평주응력은 모두 수직응력에 비해 낮은 값을 보이고 있으며, 심도의 증가에 따라 그 차이는 점차 커짐을 알 수 있다. 또한 AO-8공의 경

우 최대수평주응력 및 최소수평주응력은 모두 수직응력에 비해 큰 값을 나타내고 있으며, 마찬가지로 심도의 증가에 따라 그 차이가 점차 커짐을 알 수 있다. 그림 17은 각 시추공에 대한 최대수평주응력의 방향을 나타낸 것이다.

그림 16과 그림 17을 종합하여 볼 때 AO-2공이 위치한 지역의 현지암반 응력장은, 터널 예정 심도인 EL.-30m~EL.-60m (사거리로는 324m~356m에 해당함)를 기준으로 볼 때 N67°E 방향으로 약 7.0~7.5 MPa의 최대수평주응력이 존재하고 있으며, 이와 직교하는 N23°W 방향으로 약 5.3~5.6 MPa의 최소수평주응력이 존재하고 있음을 알 수 있다.

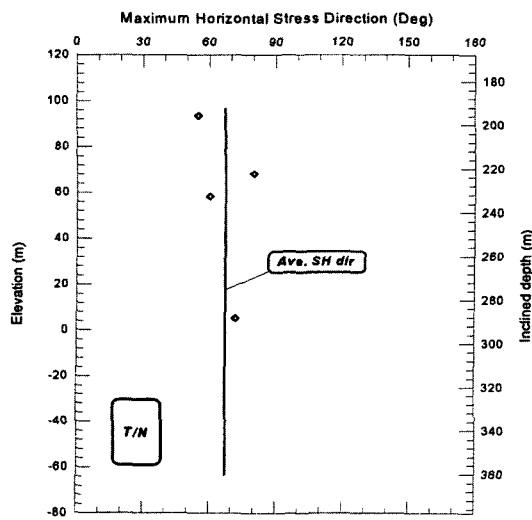
AO-8공도 마찬가지로, 터널 예정심도인 EL.-30m~EL.-60m(사거리로는 165m~197m에 해당함)를 기준으로 볼 때 N53°E 방향으로 약 12.4~15.2 MPa의 최대수평주응력이 존재하고 있으며, 이와 직교하는 N37°W 방향으로 약 7.0~8.4 MPa의 최소수평주응력이 존재하고 있음을 알 수 있다.

특히 AO-8공의 경우 E.L.+20m 부근에서 N60°E의 파쇄대가 통과하고 있음이 확인되었는데 이 파쇄대 통과 심도를 기준으로 상하부의 최대수평주응력의 방향이 각각 N45°E와 N60°E로 측정되었음을 알 수 있다.

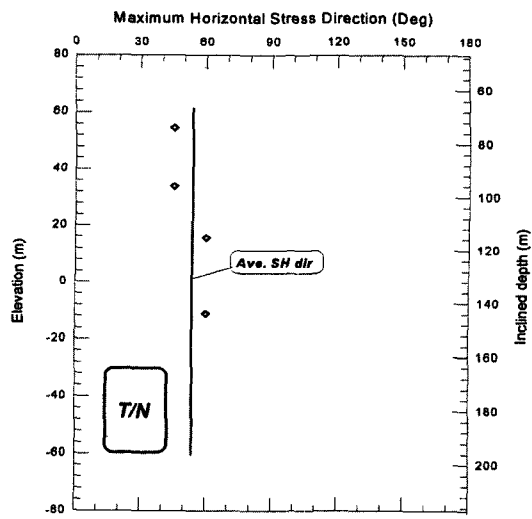
그림 18은 AO-2공과 AO-8공에서 측정된 최대 및 최소수평주응력의 방향을 지형도 상에 함께 나타낸 것이다.

6. OO추가비축기지설계에 대한 해석 결과의 적용

AO-2공과 AO-8공에서 측정된 자료를 근거로 직선회귀분석을 통하여 터널예정심도에서의 축압계수를 추정할 바 있는데(표 6 참조), 여기서 보는 바와 같이 AO-2공과 AO-8공에서 산정된



(a) AO-2공



(b) AO-8공

그림 17. 각 시추공에 대한 최대수평주응력의 방향

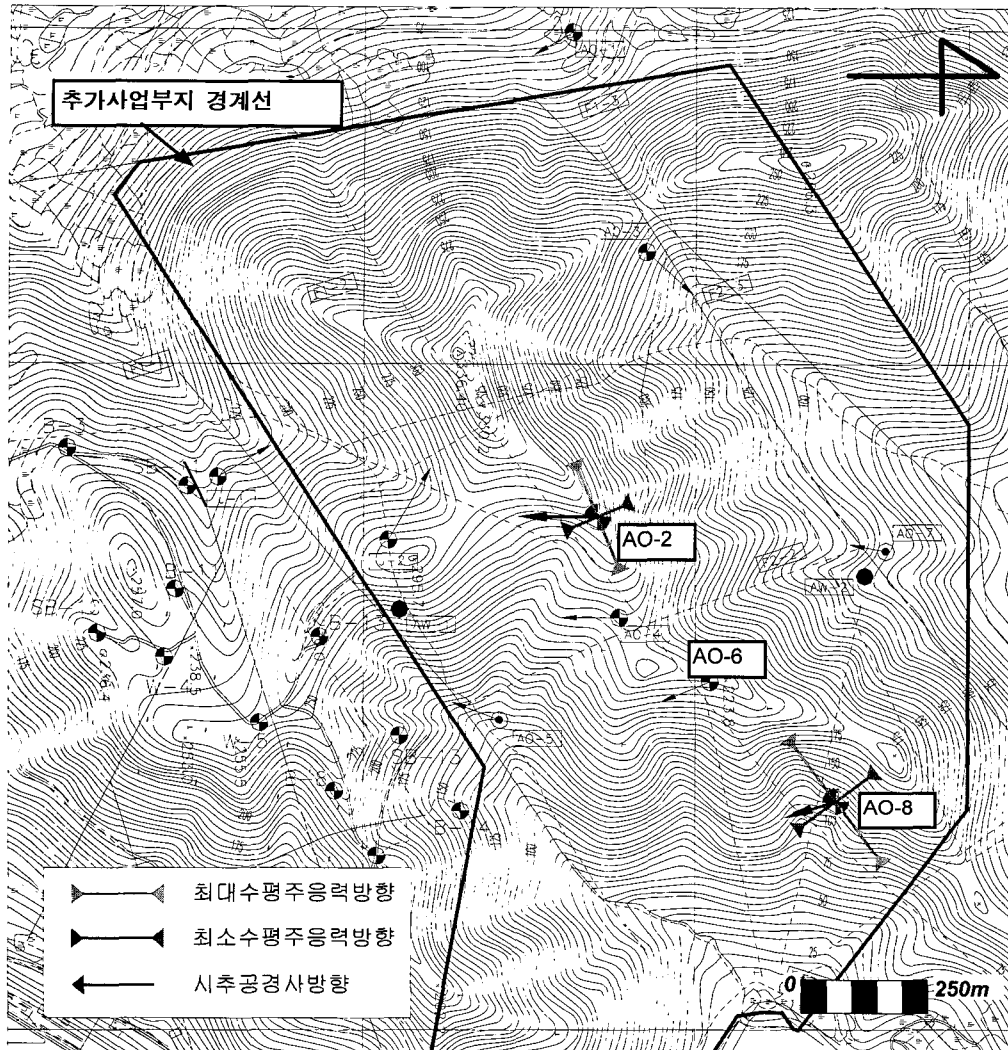


그림 18. AO-2 및 AO-8공에서의 수평주응력의 방향

측압계수값이 크게 차이가 나고 있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 지형 및 지질적인 원인에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 AO-8공에서의 측압계수 측정결과와 AO-2공에서 측정된 측압계수의 결과를 어느 범위까지 적용할 것인가 하는 점이 중요하게 된다. 이와 같이 측압계수의 적용지역을 구분하기 위해서는 지형적인 특성을 고려하고, 지형에 따른 심도별 측압계수의 변화 특성을 고려할 필요가 있다.

즉, AO-8공에서부터 AO-6공까지 가파른 지형적 특성을 보이고 있으며, AO-6공부터 AO-2공까지는 전체적으로 비슷한 고도를 보이고 있기 때문에, AO-8공에서 측정된 결과는 터널의 진행 방향을 따라 AO-6공 지점 근처까지, 지형고도로 볼 때 약 EL.+175M 지점까지 (이후부터는 완만한 지형임) 적용할 수 있을 것으로 사료되며, 나머지 구간에 대해서는 고도상에서 큰 차이가 없기 때문에 AO-2공의 결과를 확대 적용할 수 있

표 7. 기존 기지에 대한 수압파쇄시험공의 제원

공명	위치	표고 (E.L. m)	심도 (m)	공경사	비고
B-1	C1W탁장	60.85	121.2	수직	1공구
B-12	C4E	93.07	135	수직	2공구
YB-2	C1S	155.44	150	수직	2공구

을 것으로 판단된다.

7. 기존 기지에 대한 측정결과와의 비교

본 시험 대상 저장기지는 기존의 유류저장기지의 추가시설로서, 기존 저장기지에 대한 수압파쇄 응력해석이 실시된 바가 있었다(Korea Power Engineering Company, Inc., 1990). 따라서 본 절에서는 기존의 해석결과와 본 시험에서 측정된 수압파쇄 시험결과를 비교코자 한다.

즉, 기존 기지에서 실시된 수압파쇄시험공의

제원은 표 7과 같으며, 이들에 대한 수압파쇄 시험결과를 요약하면 표 8과 같은데, 저장공동의 상부에서의 측압계수양상을 비교하기 위하여 동일한 심도에서의 측압계수 및 최대수평주응력 방향을 비교하면 표 9와 같이 정리될 수 있다.

기존 기지에서 측정된 결과를 보면, 1공구와 2공구의 측정된 결과가 측압계수 및 주응력 방향에서 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 기존 기지 내의 1공구와 2공구 지역은 서로 다른 초기응력 상태에 놓여 있었던 것으로 판단된다.

마찬가지로 기존 기지와 추가 기지에서 측정된 측압계수와 최대수평주응력의 방향을 비교하면, 두 지역이 인접하여 있음에도 불구하고 각각의 부지에 서로 다른 초기응력상태가 형성되어 있음을 알 수 있다.

따라서 유사한 지역 내에서도 위치에 따라 암반 내 초기지압의 양상이 다르게 나타날 수가 있음이 밝혀졌으므로 추가비축기지 설계 시에는

표 8. 기존 기지에서 각 시추공별 수압파쇄시험결과

Hole No.	Depth (m)	E.L. (m)	σ_v (MPa)	σ_h (MPa)	σ_H (MPa)	K_h	K_H	σ_H direction*
B-1	58.8	+2.05	1.6	-	-	-	-	-
	75.8	-14.95	2.0	2.0	3.2	0.0	0.0	50
	86.7	-25.85	2.3	-	-	-	-	-
	91.4	-30.55	2.4	4.1	7.8	잘못된 계산식	3.3	40
	95.3	-34.45	2.6	5.2	12.0	1.7	3.2	0
	106.0	-45.15	2.8	8.2	15.9	2.0	5.7	-3
B-12	75.0	+18.07	2.0	2.8	2.8	1.4	1.4	-
	94.1	-1.03	2.5	5.0	6.1	2.0	2.4	45
	106.7	-13.63	2.9	3.4	4.9	1.2	1.7	76
	110.1	-17.03	3.0	4.7	7.6	1.6	2.5	144
	116.2	-23.13	3.1	-	-	-	-	84
	131.2	-38.13	3.5	-	-	-	-	-
YB-2	103.5	+51.94	2.8	4.3	5.6	1.5	2.0	71
	126.1	+29.34	3.4	7.7	12.7	2.3	3.7	109
	145.7	+9.74	3.9	2.2	4.3	0.6	1.1	-
	164.5	-9.06	4.4	4.0	-	0.9	-	-
	185.9	-30.46	5.0	5.0	6.9	1.0	1.4	69
	210.8	-55.36	5.6	4.5	-	0.8	-	-

* 최대수평주응력의 방향은 진북으로부터 시계방향으로의 각도

본 시험에서 측정된 결과를 활용하여 현장여건에 부합되는 터널 설계를 수행하여야 할 것이다.

표 9. 기존 기지와 추가 기지에서 초기응력 해석결과 비교

구분	기존 기지			추가 기지	
	B-1	B-12	YB-2	AO-2	AO-8
시추공명					
공동상부 측압계수	4.0	2.0	1.7	0.85	2.95
최대수평 주응력방향	N22°E	N87°E	N83°E	N67°E	N53°E

8. 결 론

OO추가비축기지 건설을 위하여 터널의 설계 정수 중 압반의 초기응력을 산정하기 위하여 부지 내 2개 지점에서 70° 경사의 시추공을 대상으로 수압파쇄시험이 실시되었다.

본 연구는 도로 및 철도터널설계 시 필수 입력 자료인 현지암반 초기응력을 제공하기 위하여 수행되던 수압파쇄시험과는 달리, 지하 암반 내 유류저장시설의 설계를 위해 국내 기술진에 의해 단독으로 수행된 국내 첫 사례이며, 특히 100m 이상의 대심도 경사공에 대한 해석이었다는 점에서 의의가 크다. 수행결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) AO-8공은 비축기지 터널의 입구부에 해당되며, AO-2공은 터널의 중심부에 해당된다. 두 시추공 모두 시추심도가 터널 예정심도에 못미치고 있어 터널 심도에 대한 암반의 초기응력을 유추코자 상부 지반에서 각각 7회 및 8회씩의 시험을 실시, 데이터의 충분한 축적을 통하여 회귀분석의 신뢰도를 높이고자 노력하였다.
- 2) 수직공에 대한 해석기법과 경사공에 대한 해석기법을 각각 적용한 결과, 현지암반 응력장의 해석 결과에는 거의 차이가 없는 것으로 밝혀졌으며, 이는 Haimson(1996)이 밝힌 바

와 같이 시추공의 경사가 70° 이내일 때는 수직공에 대한 해석기법을 적용해도 무리가 없다는 연구결과와도 부합되고 있다.

- 3) 경사공 해석기법을 적용하였을 경우 저장공동 예정심도를 기준으로, AO-2공의 경우 N67°E 방향으로 약 7.0~7.5 MPa의 최대수평주응력이 작용하고 있으며, N23°W 방향으로 약 5.3~5.6 MPa의 최소수평주응력이 작용하고 있는 것으로 측정되었다. 또한 AO-8의 경우 N53°E 방향으로 약 12.4~15.2 MPa의 최대수평주응력이, N37°W 방향으로 약 7.0~8.4 MPa의 최소수평주응력이 작용하고 있는 것으로 측정되었다.
- 4) AO-8공의 경우 시추조사와 텔레뷰어 탐사를 통해 E.L +20m 부근에서 N60°E 방향의 파쇄대가 통과하고 있음이 확인되었는데, 이 파쇄대 통과심도를 기준으로 상하부의 최대수평주응력의 방향이 각각 N45°E와 N60°E로 측정됨으로써 동일한 시추공에 대해서라도 뚜렷한 구조지질학적 불연속면이 있을 경우 이에 의한 영향으로 초기응력상태가 변화될 수 있다는 사실을 증명할 수 있었다.
- 5) 터널예정심도에서의 측압계수는 AO-2공의 경우 0.65~0.85, AO-8공의 경우 1.68~3.04로 계산되었다. 이와 같이 두 시추공에서의 측압계수값이 크게 차이나는 것은 지형 및 지질적인 원인에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, AO-2공과 AO-8공이 동일한 mass내에 있다고는 하나, AO-2공의 위치는 지형적으로 비교적 평탄하면서 주위 지형의 급격한 변화가 없는 곳에 위치하고 있다. 반면에 AO-8공의 경우 가파른 지형에 속하고 있으며, 지질학적으로도 암질경계부에 위치하고 있어 이에 의한 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다. 이는 가파른 산악지형에서 응력측정을 실시한 결과 비교적 측압계수가 크게 나타나는

경향이 있다는 Amadei와 Stephansson(1997)의 연구결과와도 부합되고 있다.

- 6) 기존 기지와 추가 비축기지에서 측정된 수압 파쇄시험결과를 비교한 결과, 두 지역은 비록 인근에 위치하고 있지만, 서로 다른 초기응력 상태가 형성되어 있는 것으로 판단된다. 따라서 인근 지역 내에서도 암반 내 초기지압의 양상이 다르게 나타날 수가 있음이 밝혀졌으므로 추가비축기지 설계 시에는 본 시험에서 측정된 결과를 활용하여 현장여건에 부합되는 터널 설계를 수행하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 최성웅, 이희근 (1995), "인공슬롯을 고려한 수압 파쇄 균열의 발전양상에 관한 연구", *한국암반공학회지, 터널과 지하공간*, 제5권, 제3호, pp. 251~265.
2. 류동우, 최성웅, 이희근 (1996), "통계적 접근법에 의한 수압파쇄 자료해석용 전산프로그램개발 및 적용", *한국암반공학회지, 터널과 지하공간*, 제6권, 제3호, pp. 209~222.
3. 최성웅 (1997), "현지암반 초기지압의 분포특성 및 암반터널설계에의 적용", *한국암반공학회지, 터널*

과 지하공간, 제7권, 제4호, pp. 323~333.

4. Korea Power Engineering Company, Inc. (1990), *Hydraulic Fracturing Stress Measurements at --, --, --, Korea*, p. 75.
5. Aggson, J. R. and Kim, K. (1987), "Analysis of Hydraulic Fracturing Pressure Histories : A Comparison of Five Methods used to Identify Shut-in Pressure", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 24, No. 1, pp. 75~80.
6. Amadei, B. and Stephansson, O. (1997), *Rock Stress and Its Measurement*, Chapman & Hall, p. 490.
7. Haimson, B. C. (1988), "Current Hydraulic Fracturing Interpretation, How Correctly does it estimate the Maximum Horizontal Crustal Stress?", *Tran. Am. Geophys.*, Vol. 69, pp. 1454.
8. Haimson, B. C. (1996), "Can Inclined Exploratory Boreholes be used for In Situ Stress Measurements? A Review of Three Case Histories", *Proc. of Eurock '96*, p. 403~409.
9. Hubbert, M. K. and Willis, D. G. (1957), "Mechanics of Hydraulic Fracturing", *Tran. AIME*, Vol. 210, pp. 153~163.
10. Ljunggren, C. and Nordlund, E. (1990), "A Method to Determine the Orientation of the Horizontal In-situ Stresses from Hydrofracturing Measurements in Inclined Boreholes", Ph.D. Thesis, Lulea University.

(접수일자 1998. 3. 31)