

CSIRO HI Cell을 이용한 초기응력의 측정 및 해석

Measurement and Analysis of In-Situ Stress by CSIRO HI Cell

이정인¹⁾, Jung-In Lee, 최해문²⁾, Hae-Moon Choi, 김정원³⁾, Jung-Won Kim, 엄진석⁴⁾, Jin-Suk Uhm, 안형준⁵⁾, Hyoung-Jun An.

- ¹⁾ 서울대학교 자원공학과 교수, Professor, Dept. of Mineal & Petroleum Eng., SEOUL Nat'l Univ.
- ²⁾ 대본엔지니어링 대리, Daebon Eng.
- ³⁾ 서울대학교 자원공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Min. & Petr. Eng., SEOUL Nat'l Univ.
- ⁴⁾ 코오롱건설(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Institute of Construction Technology, Kolon Eng & Const. Co., Ltd.
- ⁵⁾ 코오롱건설(주) 기술연구소 전임연구원, Researcher, Institute of Construction Technology, Kolon Eng & Const. Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this study, CSIRO HI Cell, developed on the basis of Leeman method by CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) in Australia, was used to measure in-situ stress 6 times and to decide 3D stress components and three principal stresses on the site of Jookryung tunnel, the 9th working location of Joongang highway in Poonggee region, Kyungsangbook-Do. CSIRO HI Cell is the in-situ stress measurement instrument to obtain perfect stress components in one borehole and to measure continuously during overcoring work. The result of this study represents the advantage and disadvantage of CSIRO HI Cell. By adding the result of measuring in-situ stresses by CSIRO HI Cell in this study to the in-situ stress data measured in Korea and by improving the result of studies until now, the equations, calculating the value of vertical stress and horizontal stress and deciding the region of the ratio of horizontal stress to vertical stress(K) according to depth, were suggested newly.

keywords : In-situ stress, stress relief method, Leeman method, CSIRO HI Cell, in-situ stress ratio (K)

1. 서론

최근 원유, 액화가스 등의 지하 저장 시설과 대단면 암반 터널의 굴착 공사가 증가하고 있다. 이와 같은 대단면 암반 터널의 합리적인 설계 및 시공을 위해서는 응력 해석에 의한 역학적 안정성의 정확한 평가가 필요하며 암반의 초기 응력 측정은 이를 위한 가장 중요한 입력 자료가 된다. 본 연구에서는 호주 CSIRO(연방산업과학연구기관)에서 공벽변형법을 바탕으로 개발한 CSIRO HI Cell을 이용하여 경상북도 풍기지역 중앙고속도로 제9공구 죽령터널 현장에서 6회에 걸쳐 초기 응력을 측정하였다. 또한 CSIRO HI Cell을 이용하여 초기 응력을 측정한 결과를 현재까지 국내에서 측정된 초기 응력 자료에 추가하여 현재까지의 연구 결과를 보완함으로써 우리나라에서의 지하 심도에 따른 수직 응력과 수평 응력의 크기를 구하는 경험식과 심도에 따른 수직 응력에 대한 수평 응력의 비(K값)의 범위를 결정하는 상, 하한 경험식을 새로이 제시하였다.

2. CSIRO HI Cell에 의한 응력 측정 방법

2.1. 측정 장비

본 연구에서는 현지 응력 측정을 위해 공벽 변형법에 바탕을 둔 CSIRO HI Cell (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Hollow Inclusion Cell) 을 사용했다. 본 연구에서 사용된 thin-wall 타일의 셀은 프로브(probe) 직경이 35mm(반경 17.5mm)이고 프로브의 플라스틱 두께가 매우 얇아서 게이지 역시 반경 17.5mm 위치에 있다. 셀은 직경이 38mm인 파일럿 홀(pilot hole)에 설치되어 직경 150mm로 오버코어링한다. 그림 1은 셀 내부의 게이지 위치를 나타내며, 각 게이지의 정확한 위치는 표 1와 같다. 그림 2은 게이지의 내부구조를 나타낸다.

몇 개의 게이지가 작동하지 않더라도 최소한 6개의 게이지가 작동하면 각 응력 성분의 측정이 가능하다. 또한 등방성 암반뿐만 아니라 이방성 또는 orthotropic 암반에서도 측정이 가능하며, 게이지가 차지하는 표면적의 증가로 인하여 부분적인 암반의 불균질성에 따른 변형률의 오차를 줄일 수 있다. 오버코어링 전후만이 아니라 오버코어링 중에도 계속적인 측정이 가능하므로 시험의 신뢰도와 온도에 의한 영향 등을 판단하는데 필요한 정보를 얻을 수 있다.

그 외에 변형률 측정기, 에폭시 접착제, 천공 장비, 셀 설치 장비 및 Hoek-Franklin 이축 압축 챔버를 사용한 이축 압축 시험 장비가 필요하다.

2.2. 설치 및 측정

파일럿 홀 굴착에서 회수된 코어를 조사하여 절리가 없는 부위에 게이지의 부착 위치를 선정한다. 이렇게 설정된 지점에 게이지가 위치하도록 피스톤 로드 길이를 조절하여 셀의 앞부분에 그림 2-1와 같이 설치한다. 셀 내부에 접착제를 주입한 후 피스톤을 밀면 그림 2-3의 홀을 통하여 접착제가 방출되어 셀과 암반을 접착시킨다. 접착제의 탄성 계수, 포아송비 등의 역학적 성질은 그림 2-7의 셀의 몸체를 이루는 플라스틱 수지의 역학적 성질과 같도록 제작되었다. 실험 결과에 의하면 셀 몸체의 탄성 계수는 2.6~2.7GPa 이고 포아송비는 0.4이다. 피스톤이 그림 2-9의 트립 와이어(trip wire)를 절단하게 되면 접착제가 완전히 방출되었음을 알 수 있다. 또한 트립 와이어가 끊어짐으로써 그림 2-10의 온도 측정 센서가 작동하기 시작한다. 온도 측정 센서로부터 저항치로 표시되는 암반내 온도를 측정할 수 있다. 변형률 게이지와 연결된 그림 2-12의 케이블을 측정 장비에 연결함으로써 변형률을 측정한다.

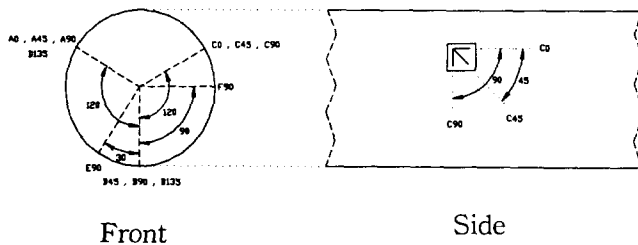
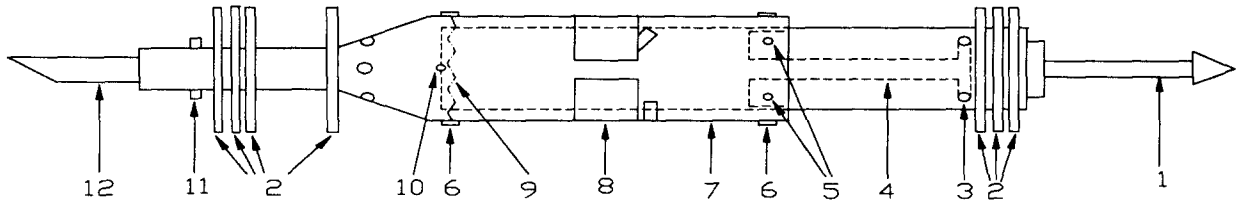


그림 1. 셀 내의 게이지 위치

표 1. 셀 내의 게이지 위치

| Gauge | α (°) | β (°) |
|-------|--------------|-------------|
| A0 | 323.0 | 0 |
| A90 | 300.0 | 90 |
| A45 | 300.0 | 45 |
| B45 | 163.5 | 45 |
| B135 | 163.5 | 135 |
| B90 | 180.0 | 90 |
| C0 | 83.0 | 0 |
| BC90 | 60.0 | 90 |
| C45 | 60.0 | 45 |
| D135 | 300.0 | 135 |
| E90 | 210.0 | 90 |
| F90 | 90.0 | 90 |



- 1 - Piston rod, 2 - Rubber seal, 3 - Glue exit holes, 4 - Piston, 5 - Shear pin (4 off),
 6 - Centering lug, 7 - Main body, 8 - Three strain gauge rosette, 9 - Trip wire,
 10 - Thermistor, 11 - Orienting screw (2 off), 12 - Core cable

그림 2. CSIRO HI Cell의 구조

3. 응력 측정 이론

CSIRO HI Cell은 공벽변형법에 기초를 두고 있는 응력 측정 도구이다. 따라서 기존의 Leeman 법에서 발전된 형태의 이론이 적용되며 에폭시 접착제를 이용해 공벽과 간접적인 접촉을 이루기 때문에 이에 대한 식의 변형과 보정 계수(K_i , $i = 1$ to 4)가 사용된다. 다음 식들은 초기응력과 측정된 변형률과의 관계식이다.

$$E_r \epsilon_\theta = (\sigma_x^0 + \sigma_y^0)K_1 - 2(1 - \nu_r^2)[(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \cos 2\theta + 2\tau_{xy}^0 \sin 2\theta]K_2 - \nu_r K_4 \sigma_z^0 \quad (1)$$

$$E_r \epsilon_z = \sigma_z^0 - \nu_r(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \quad (2)$$

$$E_r \gamma_{\theta z} = 4(1 + \nu_r)(\tau_{yz}^0 \cos \theta - \tau_{zx}^0 \sin \theta)K_3 \quad (3)$$

$$\epsilon_{\pm 45^\circ} = 0.5(\epsilon_z + \epsilon_\theta \pm \gamma_{\theta z}) \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{(mn + 1 - 2\nu_p)(1 - \nu_p \nu_r)}{e(1 - n) + n + 1 - 2\nu_p} + \nu_p \nu_r \quad (5)$$

$$K_2 = D^{-1}[(1 - e)d_2 + (\chi_p + e)d_3] \quad (6)$$

$$K_3 = \frac{1 + nm}{1 + n + e(1 - n)} \quad (7)$$

$$K_4 = 1 - (K_1 - 1) \frac{\nu_p - \nu_r}{\nu_r(1 - \nu_p \nu_r)} \quad (8)$$

$$e = \frac{G_p}{G_r}, m = \frac{R_p^2}{R_{sg}^2}, n = \frac{R_1^2}{R_p^2} \quad (9)$$

$$D = (1 + \chi_r e)[\chi_p + e + (1 - e)n(3 - 6n + 4n^2)] + (\chi_p - e\chi_r)n[(1 - e)n^3 + \chi_p + e] \quad (10)$$

$$d_2 = 12 \frac{n}{m}(1 - n)(1 - \nu_p) + n^2[n^2 m(3m - 4\nu_p) + 4n - 3] \quad (11)$$

$$d_3 = 1 - 4\nu_p m n + 3m^2 n^2 \quad (12)$$

$$\chi_p = 3 - 4\nu_p, \chi_r = 3 - 4\nu_r \quad (13)$$

위첨자 o는 현지상태를, 아래첨자 r은 암반, p는 플라스틱을 나타낸다. R_p 는 파일럿홀의 반경, R_{sg} 는 변형률 게이지까지의 반경, R_1 은 셀 프루브 내경이다. 셀 축방향을 z축으로 설정한다.

이축시험에 의한 탄성계수와 포아송비는 다음 식에서 정해진다.

$$E_2 = K_1 \frac{2P_0 M}{e_{\theta-sg}(M-1)} \quad (14)$$

$$\nu_2 = -K_1 \frac{e_{z-sg}}{e_{\theta-sg}} \quad (15)$$

$$M = \frac{R_c^2}{R_p^2} \quad (16)$$

여기서 R_c 와 R_p 는 각각 오버코어의 외부 반경과 내부 반경(파일럿 홀의 반경)을 나타낸다.

4. 현지응력 측정 및 해석

CSIRO HI Cell을 이용한 초기 응력 측정은 경상북도 풍기지역 중앙고속도로 제9공구 죽령터널의 시점부 우측터널(대구방향)에서 1997년 8월 27일부터 9월 5일까지 2개의 보어홀에서 각 3측점씩 총 6개의 시험이 수행되었다. 터널 바닥의 고도는 394m, 측점부의 고도는 396m였다. 터널 입구에서 약 92m 지점의 막장에서 보어홀을 굴착하여 시험을 수행하였다. 측정 지점의 평균 심도는 55m 였으나 2번 보어홀 방향(터널 진행 방향)으로는 앞부분에 계곡이 위치하여 특히 수직 응력에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 이 방향은 암반이 심하게 파쇄되어 있고 측정된 변형률이 안정화되지 않아서 충분히 응력이 개방되었다고 생각되는 지점을 선택하여 그 지점에서의 변형률을 적용하여 초기 응력을 계산하였다. 측정 대상 지역의 기반암은 화강편마암으로 실험실 시험에서 표 2와 같은 역학적 성질을 나타내었다. 터널에 대한 지형은 그림 3와 같다. 본 연구에서는 모두 자북을 기준으로 표시하였다. 진북은 자북에 대해 시계방향으로 6° 방향(N6° E)이다.

측정을 실시한 2개의 보어홀 중 1번 보어홀은 막장의 우측 벽면에(방위각 20°, 경사 -6°), 2번 보어홀은 막장면에(방위각 291°, 경사 -5°) 굴착하였다. 여기서 방위각은 북쪽을 기준으로 동쪽을, 경사는 수평면을 기준으로 아래 방향을 양(+)으로 설정했다. 각 보어홀이 상향 천공되었음을 나타내기 위해 경

사를 음(-)으로 표시하였다. 1번 보어홀에서 1~3번 시험을, 2번 보어홀에서 5~7번 시험을 각각 실시하였다. 각 보어홀은 좌측의 상행선 터널(춘천 방향)의 영향을 벗어나기 위해 터널 반경(5.8m) 이상을 굴착한 후 시험을 수행하였다.

응력 계산을 위해 Stress 91이라는 프로그램을 사용하였다. 이는 MINDATA Ltd.에서 개발한 CSIRO HI Cell 전용 응력 계산 프로그램으로, 응력을 구하기 위한 복잡한 계산을 수행하며 계산 과정에서 F 통계량을 적용한 통계적인 처리를 실시하여 결과에 대한 신뢰도를 증가시킨다. F 통계량은 각 집단간에 근본적인 차이가 존재하는지를 판별하는 통계적 방법이다.

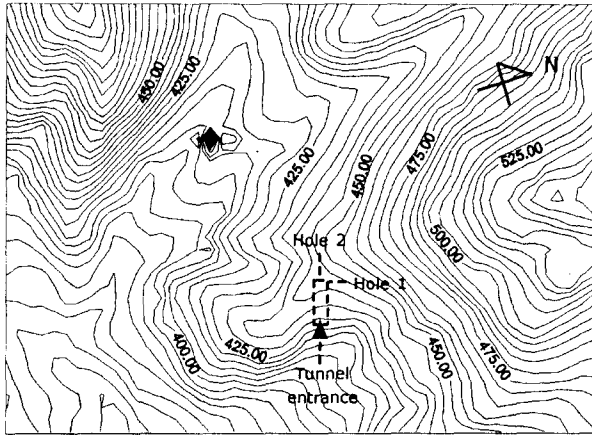


그림 3. 지형도

표 2. 실험실 시험 결과

| | |
|--|------|
| Specific gravity | 2.48 |
| Porosity | 0.46 |
| P-wave velocity (m/sec) | 5080 |
| S-wave velocity (m/sec) | 2650 |
| Compressive strength (kg/cm ²) | 1500 |
| Young's modulus (10 ⁵ kg/cm ²) | 4.91 |
| Poisson's ratio | 0.22 |
| Internal friction angle (°) | 51 |
| Cohesion (kg/cm ²) | 280 |

오버코어링 작업동안 측정된 온도 변화를 이용하여 1°C당 축방향(0°) 게이지에는 +16.5를, 45° 게이지에는 +8을, 원주방향(90°) 게이지에는 +0을 보정값으로 적용하였다. 오버코어링 작업 초기의 비트의 흔들림에 의한 오차를 제거하기 위해 처음 1주기(0-60mm)의 측정치를 제외시켰다. 또한 굴착 장비의 성능 제한으로 500mm까지의 결과만을 적용했다. 따라서 대부분의 경우 60-500mm 범위의 결과를 이용하여 해석을 수행하였다.

전체적인 결과는 표 3~6에 나타내었다. x축은 동서 방향을, y축은 남북 방향을 나타내며 z축은 수직 방향을 나타낸다. 3번 및 6번 시험을 제외한 나머지 4개 시험의 주응력 분포를 평사투영법으로 나타낸 것이 그림 4이다. 최대 주응력은 1번 시험의 결과가 약간 다르지만 전체적으로 일정한 방향성을 보임을 알 수 있었다. 반면에 중간 주응력과 최소 주응력의 경우 측정된 두 응력의 크기가 상당히 작을 뿐만 아니라 서로 큰 차이를 보이지 않아 방향성이 나타나지 않았다. 터널 축의 방위각이 110° 인 점을 고려하면 최대 주응력의 방위각이 86.5° 이고 경사가 11.8° 라는 결과로부터 최대 주응력은 터널 축에 거의 평행하게 작용함을 알 수 있다.

암반 자중을 2.7t/m³ 로 두고 55m 심도에서 오버버든(overburden)에 의한 수직 응력을 구해보면 1.49 MPa 이 된다. 보어홀 1은 진행 방향에 따라 지표의 고도가 높아지는 지형이므로 1번 및 2번 시험의 결과를 인정할 수 있다. 하지만 보어홀 2의 경우 진행 방향에 따라 지표의 고도가 갑자기 낮아지며 전방에 계곡을 사이에 두고 봉우리가 존재한다. 따라서 이런 지형이 수직 응력을 감소시키는 방향으로 작용한 것으로 생각된다.

국내 초기응력 측정자료를 이용하여 구한 수직응력, 수평응력, 수직응력대 수평응력비(K값)는 각각 다음 식과 같다. 그림 5~7은 다른 식들과 비교한 그래프이다.

$$\sigma_v \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 2.13 + 0.264 Z \text{ (m)} \quad (R = 0.82, SD = 41.89) \quad (17)$$

$$\sigma_v \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 11.29 + 0.248 Z \text{ (m)} \quad (R = 0.74, SD = 50.87) \quad (18)$$

$$0.4 + \frac{15}{Z(m)} < K(Z) < 1.1 + \frac{330}{Z(m)} \quad (19)$$

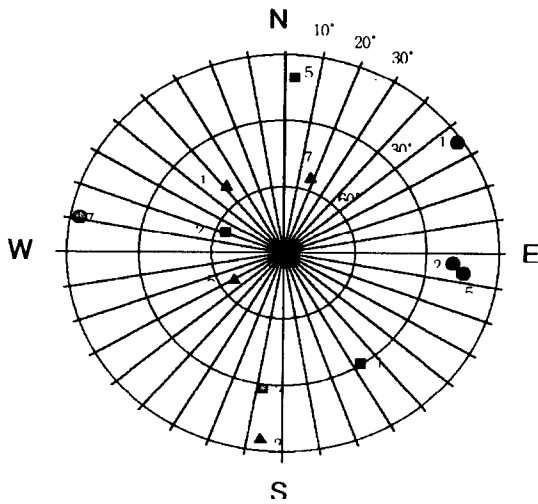
5. 결론

본 연구에서는 CSIRO HI Cell을 사용하여 중앙고속도로 제9공구 죽령터널 시점부에서 초기 응력을 측정하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 추후 300m 이상의 대심도에서 CSIRO HI Cell을 이용한 초기 응력 측정을 실시하여 본 연구의 결과와 비교 분석할 필요가 있다.

1. 중앙고속도로 제9공구 죽령 터널 상행선에서의 초기 응력 측정 결과 홀 1에서 최대 주응력이 5.63 MPa(Bearing = 74° , Dip = 13°), 최소 주응력이 0.98 MPa(Bearing = 24° , Dip = 31°)이었고, 홀 2에서 최대 주응력이 2.35 MPa(Bearing = 99° , Dip = 11°), 최소 주응력이 0.42 MPa(Bearing = 38° , Dip = 63°)이었다. 전체적으로는 최대 주응력이 3.99 MPa(Bearing = 87° , Dip = 12°), 최소 주응력이 0.70 MPa(Bearing = 31° , Dip = 47°)이었다.
2. 측정된 초기 응력 중 수직 응력의 크기는 오버버튼의 자중에 의한 값에 대해 홀 1에서 99.3 ~ 155.7% 로, 홀 2에서 8.1 ~ 71.8% 로 나타났다. 이는 지표 부근에서 측정이 실시되어 지형의 영향이 크게 작용한 것으로 생각된다.
3. 심도 Z(m)에 따른 측정된 수직 응력의 크기 σ_z (kg/cm²)는 $\sigma_z = 0.264 Z + 2.13$ 으로 표시할 수 있다.
4. 심도 Z(m)에 따른 측정된 평균 수평 응력의 크기 σ_{h-avg} (kg/cm²)는 $\sigma_{h-avg} = 0.248 Z + 11.29$ 로 표시할 수 있다.
5. 수직 응력에 대한 평균 수평 응력의 비(K)는 0.5 ~ 4 의 범위에 있으며, 심도 Z(m)에 따른 범위는 상한식 $K_1 = \frac{330}{Z} + 1.1$ 과 하한식 $K_2 = \frac{15}{Z} + 0.4$ 로 표시된다.

6. 참고문헌

1. 송원경(1985), "공벽변형법에 의한 암반응력 측정 연구", 석사학위논문, 서울대학교.
2. 임한욱, 이정인(1991), "심도에 따른 암반내 초기응력의 변화와 그 경향성", 터널과 지하공간, Vol.1, pp.91-101.
4. Duncan Fama, M. E., Pender, M. J.(1980), "Analysis of the hollow inclusion technique for measuring in situ rock stress", Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, pp.131-146.
5. Walton, R. J., Worotnicki, G.(1986), "A comparison of three borehole instruments for monitoring the change of rock stress with time", Proceedings of the International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, pp.479-488.
6. Worotnicki, G.(1993), "CSIRO triaxial stress measurement cell, Comprehensive Rock Engineering", Vol.3-I, pp.329-394.



- : Maximum principal stress
- : Intermediate principal stress
- ▲ : Minimum principal stress

그림 4. 주응력 방향

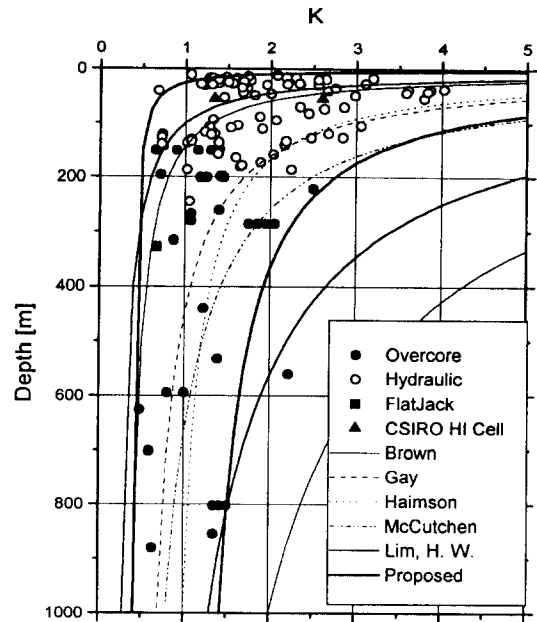


그림 5. 국내에서의 K값

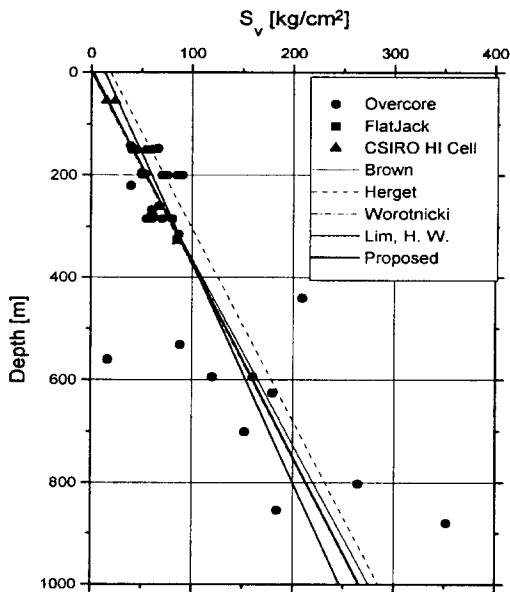


그림 6. 국내에서의 수직응력

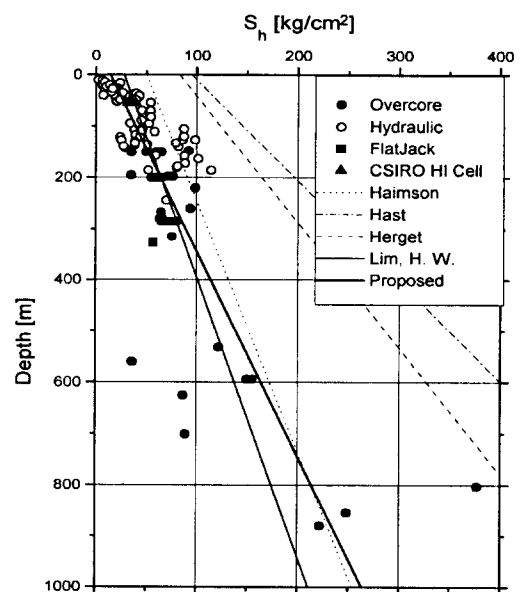


그림 7. 국내에서의 수평응력

표 3. 이축시험 결과

| No. of Test | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Young's modulus (10^9 kg/cm ²) | 3.837 | 4.060 | 4.021 | 4.877 | 3.910 | 3.476 |
| Poisson's ratio | 0.24 | 0.19 | 0.39 | 0.20 | 0.29 | 0.20 |
| K1 | 1.110 | 1.112 | 1.102 | 1.113 | 1.107 | 1.111 |
| K2 | 1.216 | 1.217 | 1.218 | 1.221 | 1.217 | 1.214 |
| K3 | 1.069 | 1.070 | 1.069 | 1.070 | 1.069 | 1.069 |
| K4 | 0.917 | 0.871 | 0.997 | 0.877 | 0.954 | 0.875 |

표 4. 응력 성분

| No. of Test | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ_x (MPa) | 4.39 | 5.10 | 4.07 | 2.78 | 2.33 | 1.64 |
| σ_y (MPa) | 3.30 | 1.12 | 1.05 | 1.49 | 3.07 | 0.36 |
| σ_z (MPa) | 1.48 | 2.32 | -1.25 | 1.07 | -0.13 | 0.12 |
| τ_{xy} (MPa) | 1.62 | -0.28 | -0.61 | -0.20 | -2.35 | -0.27 |
| τ_{yz} (MPa) | -0.61 | -0.01 | -0.50 | 0.06 | -0.78 | -0.17 |
| τ_{zx} (MPa) | 0.66 | 1.41 | 0.49 | 0.61 | 1.16 | -0.16 |

표 5. 주응력

| No. of Test | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ_1 (MPa) | 5.56 | 5.70 | 4.25 | 2.99 | 5.41 | 1.70 |
| B (°) | 55.0 | 93.5 | 101.1 | 96.7 | 138.5 | 280.7 |
| D (°) | 2.7 | 22.5 | 6.1 | 17.3 | 13.7 | 4.5 |
| σ_2 (MPa) | 2.74 | 1.75 | -1.38 | 1.50 | -0.60 | 0.43 |
| B (°) | 146.9 | 291.0 | 339.6 | 2.7 | 259.8 | 187.8 |
| D (°) | 34.7 | 66.5 | 78.7 | 12.4 | 64.8 | 31.8 |
| σ_3 (MPa) | 0.87 | 1.09 | 1.00 | 0.85 | 0.46 | -0.01 |
| B (°) | 321.1 | 186.2 | 192.8 | 238.7 | 43.2 | 17.9 |
| D (°) | 55.2 | 6.4 | 9.5 | 68.5 | 20.7 | 57.8 |

표 6. 수평응력, 수직응력 및 K값

| No. of Test | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| σ_{h-max} (MPa) | 5.554 | 5.120 | 4.189 | 2.810 | 5.079 | 1.695 |
| Bearing (°) | 54.3 | 86.0 | 79.0 | 81.4 | 40.5 | 78.6 |
| σ_{h-min} (MPa) | 2.136 | 1.100 | 0.931 | 1.460 | 0.3211 | 0.3054 |
| I_a | 2.600 | 4.655 | 4.499 | 1.925 | 15.82 | 5.550 |
| σ_{h-avg} (MPa) | 3.845 | 3.11 | 2.56 | 2.135 | 2.700 | 1.000 |
| σ_{h-tm} (MPa) | 0.47 | 0.54 | 0.80 | 0.27 | 0.05 | 0.03 |
| σ_{h-tb} (MPa) | 0.47 | 0.35 | 0.95 | 0.37 | 0.61 | 0.37 |
| σ_v (MPa) | 1.48 | 2.32 | -1.25 | 1.07 | -0.13 | 0.12 |
| K | 2.598 | 1.341 | 2.048 | 1.995 | 20.77 | 8.333 |

여기서 $I_a = \frac{\sigma_{h-max}}{\sigma_{h-min}}$, $\sigma_{h-avg} = \frac{\sigma_{h-max} + \sigma_{h-min}}{2}$, $K = \frac{\sigma_{h-avg}}{\sigma_v}$, $\sigma_{h-tm} = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{v(measured)}$,
 $\sigma_{h-tb} = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma Z$ 이다.