

수압파쇄시험에 의한 산악지역에서의 현지 암반 초기응력 측정 및 분포특성 연구

Study on Characteristics of In-situ Rock Stress State in Mountainous Region by Hydraulic Fracturing Method



배성호*
Bae, Seong-ho



전석원*
Jeon, Seok-won



최용근*
Choi, yong-kun



김학수*
Kim, Hak-soo

Abstract

Since early in the 90's, the need for construction of underground rock structures such as long and large section traffic tunnel, energy storage cavern, industrial facility, etc. has been largely increased because the Korean territory is not wide and about 65 % of the land consists of mountainous region. The initial rock stress measurement has been widely conducted to provide the quantitative information on the stress state of engineering site at the design stage of underground rock structures. Among the diverse methods developed for measuring rock stress, hydraulic fracturing test is most popularly used because it is applicable at pre-construction stage and has no limit in testing depth. In this paper, the characteristics of initial rock stress state in mountainous region were studied on the basis of the in-situ hydraulic fracturing stress measurement results from the 60 test boreholes in various parts of Korea.

Keywords: in-situ rock stress, hydraulic fracturing test, horizontal stress ratio(K), in-situ tensile strength

*1 정회원, (주)지오제니 컨설턴트 이사

*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

*3 정회원, (주)지오제니 컨설턴트 이사

*4 (주)지오제니 컨설턴트 대표이사

요 지

국토의 65% 이상이 산악으로 구성된 이유로 90년대 이후 산악지형의 암반을 대상으로 한 대규모 교통터널, 에너지 비축시설 및 산업용 저장소와 같은 대형 토목구조물의 필요성이 크게 증가하고 있다. 암반내 시공되는 토목 구조물의 설계과정에서 현지 암반의 초기응력장에 대한 정량적인 자료가 주요한 핵심요소로 작용하며 이러한 초기응력장에 대한 제반 정보를 획득하기 위한 목적으로 국내에서는 정밀 지반조사 과정에서 수압파쇄법이 대표적으로 사용되고 있다. 본 논문에서는 국내 각지의 산악지형에서 얻어진 수압파쇄 시험 현장 측정 자료들에 대한 해석결과를 바탕으로 국내 산악지형의 암반내 초기응력 분포 특성에 대한 분석을 수행하였다.

주요어: 현지암반 초기응력, 수압파쇄시험, 측압계수, 현지암반 인장강도

1. 서론

암반 내 초기응력을 측정하기 위한 방법으로는 측정원리와 방법에 따라 다양한 현장 및 실내 측정법이 제안되어 사용되고 있으며 이중에서 측정결과의 신뢰성이나 현장 적용성면에서 다른 측정법에 비해 많은 장점을 가진 수압파쇄법과 응력개방법이 널리 사용되고 있다. 특히 수압파쇄법은 기존의 시추공을 이용해 시험이 가능하고 조사 심도에 제한을 받지 않으며 시공 중 뿐만 아니라 설계 단계에서도 적용할 수 있기 때문에 대형 암반 구조물의 설계에서 요구되는 정보를 얻기 위해 가장 폭넓게 응용되고 있는 초기응력 측정법이다.

국내의 경우 1990년대 초반 이전에는 지하자원 개발 분야와 주요 국가 기간시설 중 일부 대형 사업 분야에서 주로 응력개방법에 의해 초기응력 측정이 이루어졌고, 일부는 외국 기술진에 의해 수압파쇄법으로 측정이 수행되었으나 1990년대 이후 터널 및 지하 공간 개발에 따른 대형 토목공사 분야에서 국내 기술 및 인력에 의해 수압파쇄법을 이용하여 초기응력 측정이 수행되고 있다.

본 논문에서는 국내 각지, 특히 산악지역의 60개 지점(측정심도: 15~310 m, Fig. 1)에서 수행된 총 280개 구간의 수압파쇄시험 결과 중 불완전한 자료를 제외한 약 220개 측정구간의 해석결과를 바탕으로 수평응력의 크기와 방향성, 측압계수 등 암반 내 초기응력장의 분포 특성에 대한 분석결과에 대해 논의하고자 한다.

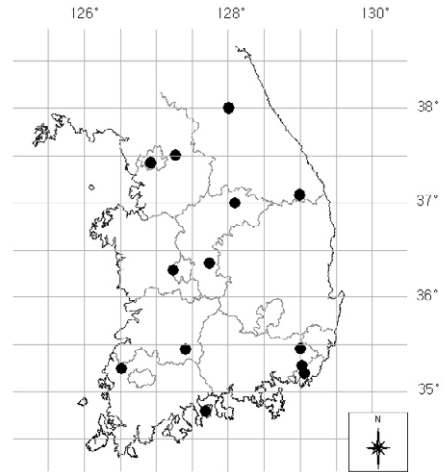


Fig. 1 Location Map of Hydraulic Fracturing Stress Measurements in Korea (Each circle includes 2~9 test sites)

2. 암반내 초기응력

2.1 암반내 초기응력

지표 하부의 암반은 암반자체의 자중과 지질학적 요인들에 영향을 받은 상태에서 응력의 평형상태가 유지되고 있다. 공동이 굴착되기 전 암반 내부 응력의 균형상태가 유지되며 이때의 응력을 초기응력 (initial or virgin stress)이라 하고 굴착이나 외부요인에 의해 발생된 응력의 재배열 과정에서 형성된 응력을 유도응력 (induced

Table 1. Variation of Horizontal Stress Components with Depth in Korea

제안자	초기응력상태 추정식	측정법 및 조사 심도 (m)
임한욱, 이정인 (1995)	$S_{hav} = 1.858 + 0.0183 \cdot z$ ($r = 0.869$)	응력개방법 (0~850 m)
최성웅 (1997)	$6/z + 0.5 < K_{avg} < 240/z + 0.1$	수압파쇄법
배성호, 최용근 (2001)	$27/z + 0.31 < K_{avg} < 175/z + 1.05$ $S_H = 1.401 + 0.036 \cdot z$ ($r = 0.840$) $S_h = 1.346 + 0.025 \cdot z$ ($r = 0.839$)	수압파쇄법 (20~310 m)

주 : K_{avg} : 평균 축압계수, S_{hav} : 평균 수평응력(MPa), $S_H(S_h)$: 최대(최소) 수평응력(MPa), z : 심도(m)

stress)이라고 한다.

이중 초기응력은 발생원인과 형태에 따라 매우 다양하지만 Bielenstein, Barron (1971), Hyett, Dyke, Hudson (1986) 등이 제안한 분류 기준으로 볼 때 크게 상부암반의 밀도특성과 지형적인 영향 (topographic effect), 즉 상부지층에 의한 응력 (gravitational stress) 과 지각운동에 의한 지체응력 (tectonic stress) 그리고 지각을 구성하는 매질 자체의 변형, 변성, 침식작용 등에 의해 형성된 잔류응력 (residual stress) 등으로 구분된다.

지하 하부의 암반이 균질하고 등방성이며 교란받지 않은 탄성 매질이고 상부 지형이 평탄하다도 가정할 경우 암반내 임의의 심도에서의 축압계수 (K , ratio of horizontal stress to vertical stress)는 탄성학적으로 쉽게 추정이 가능하다. 그러나 실제 암반내 응력상태는 과거나 현재의 지각 조산운동, 지질학적 구조와 상부 지형 변화에 의한 영향으로 탄성학적으로 계산된 값과는 상이한 결과를 나타낸다.

1960년대 이후 전 세계적으로 수행된 현지 암반의 초기응력 측정결과 수직응력값들은 측정심도와 매질의 밀도의 곱인 선형적인 관계식에 부합되지만 500 m 미만의 심도에서 수평응력 성분은 지역특성 및 지질조건에 따라 매우 광범위한 범위의 값을 나타낸다. 지난 30년간 세계적으로 5 km 미만 심도에서 시행된 초기응력 현장 측정 자료들중 700 여개의 측정값들을 주요 대륙별로 데이터베이스화시키고 분류한 결과 (Omer Aydan, Toshikazu

Kawamoto, 1997)에 의하면 심도가 500 m 이상으로 증가됨에 따라 수직응력에 대한 수평응력의 비는 1에 수렴하는 양상을 나타내지만 500 m 이내의 심도에서는 수평응력 성분은 매우 넓은 범위에 분포하며 평균 축압계수도 1 이하에서 6 사이에 분포하는 것으로 알려져 있다.

지금까지 국내에서는 임한욱, 이정인 (1995) 등이 응력개방법에 의한 실측값을 바탕으로 추정식을 제안하였고, 최성웅(1997)과 배성호, 최용근 (2001)은 국내 여러 지역에서 수압파쇄법을 이용한 측정값들을 분석하여 초기응력의 분포 특성을 나타내는 추정식들을 제안한 바 있다. (Table 1)

2.2 초기응력 측정결과와 활용

수압파쇄법에 의해 현장 시험에서 실측된 압력, 유량변화 측정값부터 구해지는 정보에는 최대(소) 수평응력의 크기, 방향과 같은 굴착전 응력장의 절대값과 심도에 따른 응력의 변화양상 그리고 축압계수 등이 포함된다. 이러한 현지 암반의 응력상태에 대한 실측 정보는 터널의 굴진방향, 단면의 형상, 배열방법 그리고 단면의 보강방법, 터널의 배열간격 등을 포함한 전반적인 암반구조물 설계의 적정성을 결정하는 단계와 굴착되는 지하 구조물의 안정성 해석에서 정확하고 신뢰성 있는 결과를 얻는데 있어 주요 매개변수로 작용한다. 측정결과와 응용분야를 요약하면 다음과 같다.

- 최적 굴착단면 선정 및 검토

- 암반구조물의 최적 진행/배치 방향 선정
- 최적 지보 패턴 및 발파설계 패턴 설계에 활용
- 암반구조물의 역학적 거동 및 안정성 평가에 활용
- 기존 설계의 타당성 검토
- 데이터베이스를 통한 응력장 분포도 (regional stress field map) 도출
- 지층구조나 대규모 불연속면의 생성원인 규명시 자료로 활용

3. 수압파쇄시험 및 자료해석

3.1 측정시스템 및 현장시험

현장 수압파쇄 시험장비는 크게 자료를 획득하고 시스템을 조절하는 조절부, 시험과정에서 얻어지는 물리량을 측정하고 전송시키는 측정부, 시험구간을 밀폐시키는 패커부 그리고 펌프에 동력을 공급하는 동력부 등으로 구성되는데 공내 투입장치의 이동방식과 유체 이동의 경로(방법)에 따라 드릴 로드 방식 (drill-rod(pipe) type), 드릴 로드-호스 방식 (drill rod(pipe) & hose type), 와이어 라

인 방식 (wireline & hose type), 다중 호스 방식 (multihose type) 구분할 수 있다. 상기한 4 가지 방식은 각각의 특징과 장단점을 가지고 있으며 현재 이중에서 현장측정의 편이성/효율성과 경제적인 측면에서 장점을 가진 와이어 라인 방식이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 측정결과와 정밀도에 가장 영향을 미치는 부분인 유체의 이동과 가압에 사용되는 펌프는 공급되는 동력원의 형태에 따라 공기방식 펌프 (pneumatic powered pump), 전기방식 펌프 (electric-driven pump), 유압방식 펌프 (hydraulically powered pump)로 구분되며 이중 전기방식과 유압방식 펌프는 공기방식에 비해 좀더 안정되고 정확한 압력-유량 값을 얻을 수 있는 장점을 가진다.

본 논문의 분석에 사용된 모든 현장자료는 앞에서 언급한 여러 요소의 장점을 살리고 국내의 지형조건에 적합하도록 설계/제작된 엔진방식의 유압-와이어 라인 시스템 (engine driven hydraulic powered wireline hydrofrac system)에 의해 측정되었다. Fig. 2는 전체 시스템의 개념도를 나타낸다. 현장 측정시스템에는 엔진의 회전속도에 의해 조절되는 6-피스톤 수압펌프가 장착되어 정밀한 유량유지와 P-Q법 적용을 위한 단계적 유량조절 (stepwise flowrate control)이 가능하다. Fig. 3과 Fig. 4는 수압펌프의 가압 특성과 현장에 설치된 수압

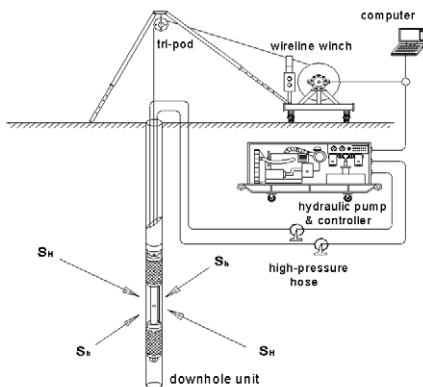


Fig. 2 Schematic Diagram of Field Measuring System

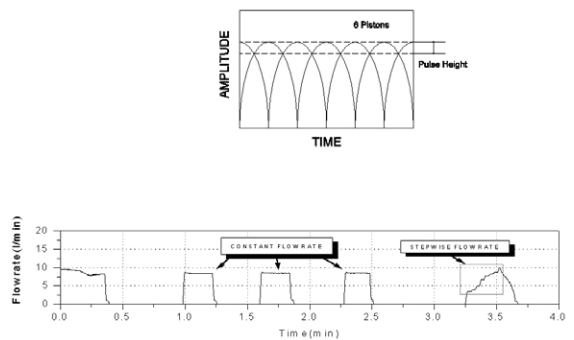


Fig. 3 Characteristics of Pump Output and Control of Flowrate



Fig. 4 A View of Some Parts of Field Measuring System
 A: Control Unit, B: Power Unit,
 C: Data Recording Unit, D: Hydraulic Pump,
 E: Multi-piston Water Pump, F: Water Tank

파쇄 시스템의 일부를 나타낸다.

현장시험은 시험구간의 선정, 스트래들 패커 (straddle packer)에 의한 구간 밀폐 (sealing off), 수압파쇄 균열 형성을 위한 시험구간의 가압, 유도된 균열 형태 및 방향성 측정 등 4 단계로 진행된다. 스트래들 패커에 적용되는 압력은 대상 암반의 강도에 따라 일반적으로 7~14 MPa 범위에서 결정되며 유도된 인장균열의 형태와 방향성 측정에는 임프레이션 패커법 (oriented impression packer method), 초음파 텔리뷰어법 (acoustic televiewer method) 그리고 공내 영상촬영법 (BIPS) 등이 선택적으로 사용된다. 시험과정에서 시험구간과 스트래들 패커에서의 압력변화값과 시스템 내에서의 유량값들이 각각 측정되는데 1개소에 대한 시험에서는 통상 4개 이상의 가압 사이클 자료가 얻어지며 P-Q 법에 사용되는 자료를 획득하기 위해서는 단계적 유량조절 (6 단계 이상)에 의한 부가적인 시험이 수행된다. 현장에서 측정되는 압력-유량대 시간 이력곡선은 암반의 강도특성과 시험구간내 불연속면 (절리, 균열 등)의 존재 유무에 따라 다양한 형태를 가지게 된다. 특히 불연속면의 개방-밀폐에 따라 기록되는 측정 자료는 응력해석의 본 자료로 이용하

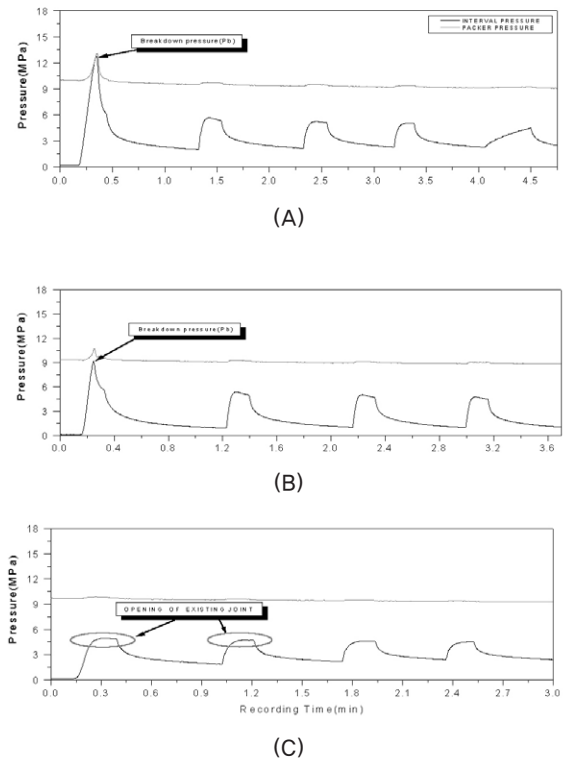


Fig. 5 Examples of Pressure Time Records.

- (A) Record in gneiss with estimated in-situ tensile strength of 8 MPa
- (B) Record in limestone with estimated in-situ tensile strength of 4 MPa
- (C) Record in granite with pre-existing joint

기에는 부적합하며 해석의 보조 자료로만 활용하여야 한다. Fig. 5는 현장에서 측정된 압력-유량대 시간 이력곡선들을 나타낸다. (A)와 (B)는 시험구간내에 새로운 수압파쇄 균열이 형성된 정상적인 자료들로 (A)는 (B)에 비해 상대적으로 암반의 강도가 매우 큰 암반에서 측정된 자료를 나타낸다. 반면에 (C)는 수압파쇄 균열이 유도되지 않고 구간 내에 존재하던 기존 불연속면의 개방-밀폐에 따라 측정된 것으로 (A), (B)와는 달리 뚜렷한 최대 압력값 (균열 발생 압력)이 나타나지 않고 반복되는 가압 사이클의 변화 형태가 1번째 사이클과 차이가 없거나 미미한 것을 알 수 있다.

3.2 수압파쇄 모델 및 매개변수 결정

3.2.1 수압파쇄 모델

일반적인 수직공에 대한 수압파쇄시험 결과의 해석에 적용 가능한 모델은 크게 탄성 모델 (elastic model), 공극탄성 모델 (poroelastic model), 파괴역학 모델 (fracture mechanics model) 그리고 균열가압 모델 (fracture pressurization model)로 구분된다.

Biot의 공극 탄성이론을 바탕으로 Haimson에 의해 제안된 공극탄성 모델은 시험 중 주변 암반내로 유체의 침투를 고려한 이론으로 응력값의 산정에 정밀한 실내 시험으로 구해지는 K (function of Biot poroelastic coefficient), α (poroelastic coefficient of rock), ν (Poisson's ratio of rock)에 대한 정확한 값들이 요구되며 Haimson에 의해 수행된 실내 수압파쇄 실험 결과 응력의 절대값이 25 MPa를 초과하지 않는 조건에서는 탄성모델과 공극탄성 모델과의 차이가 크지 않음이 밝혀졌다.

Sayed et al. (1978)과 Rummel (1987)에 의해 제안된 파괴역학 모델은 암반내 자연적으로 존재하는 균열 (natural crack)의 선단에 응력이 집중되어 발생하는 균열의 불안정한 전파 (unstable crack propagation)에 바탕을 둔 이론으로 응력 (최대 수평응력)값을 산정하기 위해서는 암석의 파괴인성 (fracture toughness)과 공경과 초기 균열 길이에 의해 계산되는 응력집중 상수들 (stress intensity coefficients; k_1, k_2)에 대한 정보가 요구된다. 이 모델은 관련 매개변수를 구하는데 많은 노력이 필요하고 시추공경에 비해 초기균열의 길이가 충분히 길지 않은 조건에서는 큰 오차를 발생시킬 가능성이 크기 때문에 공학적으로 적용시 신중한 검토가 요구되는 이론이다.

탄성모델은 Hubbert & Willis (1957)에 의해 처음 제안된 후 Kehle (1964), Bredhoeft (1976) 등에 의해 보완, 개선된 이론으로 제한적인 요소를 내포하고 있지만 현장

시험에서 측정되는 결과값만으로 초기응력의 크기가 계산되므로 공학적인 면에서 가장 적용성이 큰 모델이다. 이 모델에서는 시추공 주변의 응력상태를 평면 변형을 하에서 탄성이론에 근거한 Kirsch's solution으로부터 유도된 응력상태식과 현지 암반의 인장강도와 공극수압 개념을 결합하여 응력값을 산정하게 된다.

본 논문에 인용된 모든 응력해석 결과는 탄성 모델을 바탕으로 구해졌다. Fig. 6은 수압파쇄의 발생 메커니즘을 개념적으로 나타내기 위해 Kirsch's solution (Jaeger and Cook, 1976)을 바탕으로, 주어진 조건하에서의 시추공벽에서의 접선응력 변화를 도식적으로 나타낸 그래프이다. Fig 6에 도시된 바와 같이 공벽에서 접선응력 (σ_{θ} , θ : P1으로부터 반시계방향으로의 각도)은 $3P_2 - P_1 - p$ ($\theta = 0$ 인 경우)에서부터 $3P_1 - P_2 - p$ ($\theta = \pi/2$ 인 경우) 까지 변화함을 알 수 있다. 이러한 조건하에서 공내에서 공벽에 작용하는 압력 (p), 즉 수압파쇄시 시추공 내부에서 공벽에 가해지는 압력이 점차 증가하여 $3P_2 - P_1$ 을 초과하는 경우 P1 방향으로부터 공벽에는 접선 인장응력 (tangential tensile stress)이 형성된다. 이 때 형성된 유효 접선 인장응력이 현지암반 인장강도의 절대값을 초과하면 P1 방향의 공벽에 인장 균열이 형성되는데 이것으로

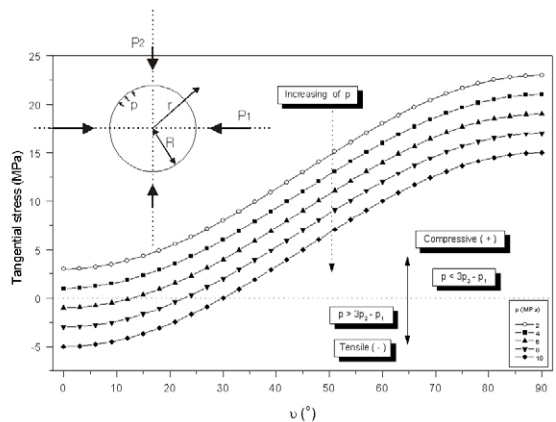


Fig. 6 Variation of Tangential Stress in the Wall Rock for Stepwise Increased Values from 2.0 MPa to 10.0 MPa when S_h is 5.0 MPa and Stress Ratio is 2.0.

수압파쇄 균열의 발생 메커니즘은 간단하게 설명된다.

3.2.2 매개변수 결정

수압파쇄 현장 시험 결과로부터 암반내 초기응력과 기타 정보를 얻기 위해서는 2종류의 매개변수값들이 결정되어야 한다. 하나는 초기응력의 크기에 관련된 압력값 자료이며 다른 하나는 유도된 인공균열의 특성, 즉 초기 응력의 작용방향에 관련된 것이다. 압력 매개변수값에는 균열 발생압력 (P_b), 균열 폐쇄압력 (P_s), 균열 개구압력 (P_r) 등이 포함되며, 수평응력의 방향성과 시험결과의 적정성에 정보를 가진 인장 균열의 특성은 앞에서 언급한

여러 균열 추적장치 (fracture tracing device)에 의해 구해진다.

압력 변수들중 균열 발생압력값은 현장 측정 자료로부터 바로 구해지지만 최소 수평응력에 해당하는 균열 폐쇄 압력 (fracture shut-in pressure, P_s)과 최대 수평응력과 현저 암반 인장강도 계산에 적용되는 균열 개구압력 (fracture reopening pressure)은 압력의 변화가 분명하지 않은 경우 최적값 결정에 도해적 방법 (graphical method)외에 비선형 회귀분석 (NLRA)기법을 이용한 통계적 방법 (statistical method)을 기초로 여러 기법들이 적용된다.

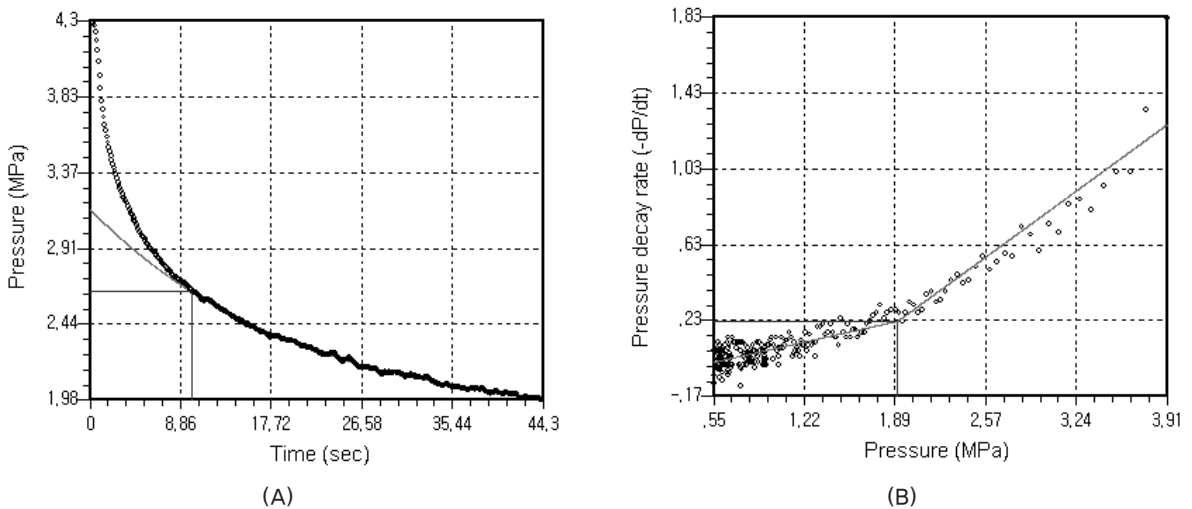


Fig. 7 Examples of P_s Determination
(A): Exponential Pressure-Decay Method, (B) Bilinear Pressure-Decay-rate Method

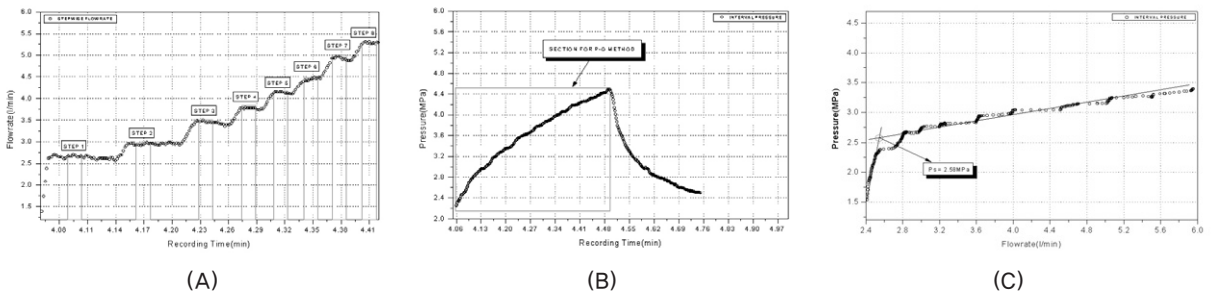


Fig. 8 Example of Procedure of P_s Determination by P-Q Method
(A) Stepwise Flowrate Control, (B) Selection of Analysis Interval, (C) Determination of P_s

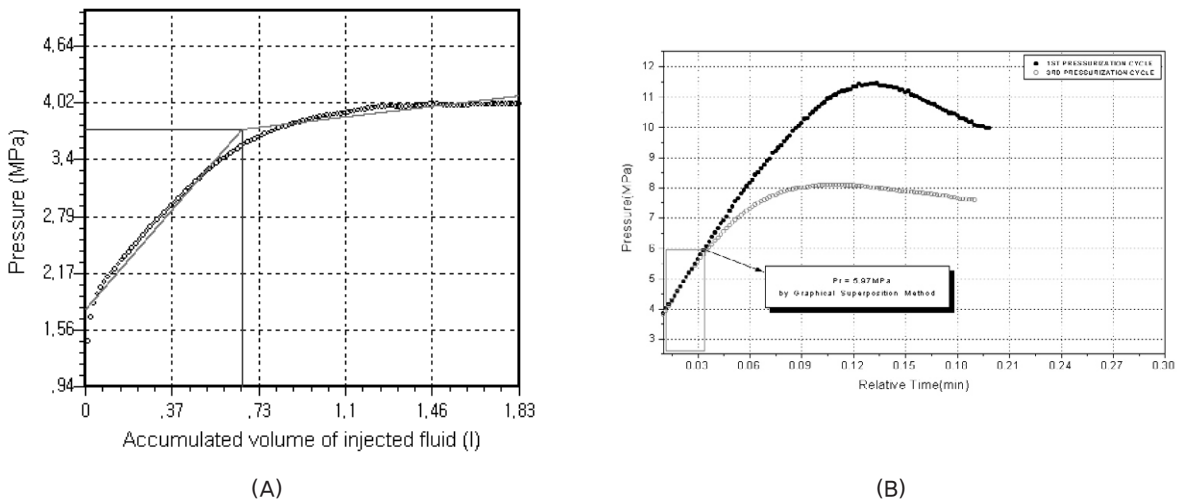


Fig. 9 Examples of Pr Determination
(A): P-V Bilinear Method, (B) Graphical Superposition Method

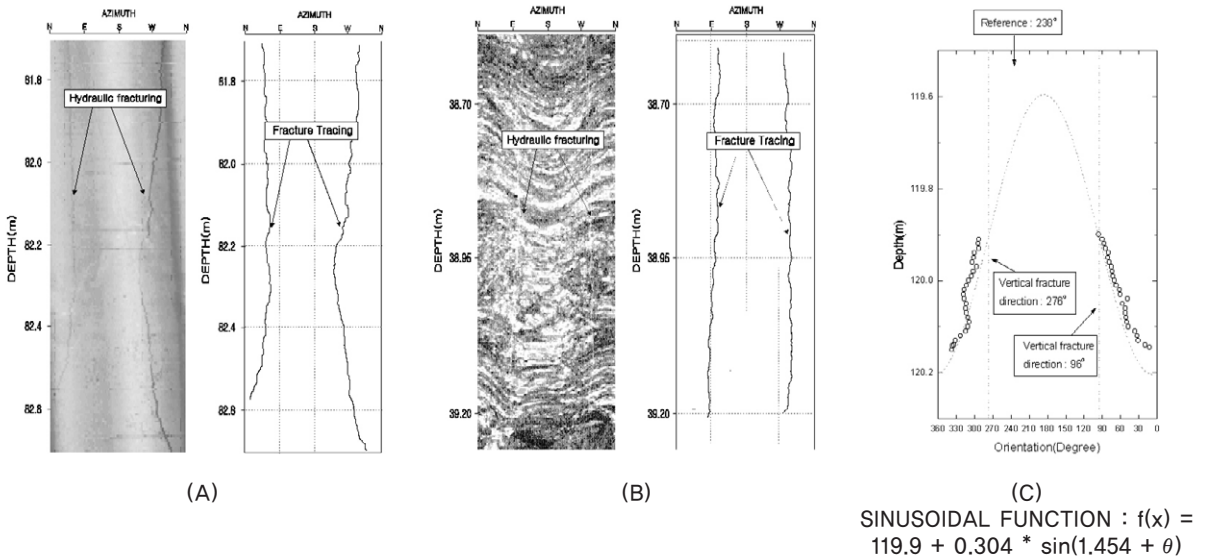
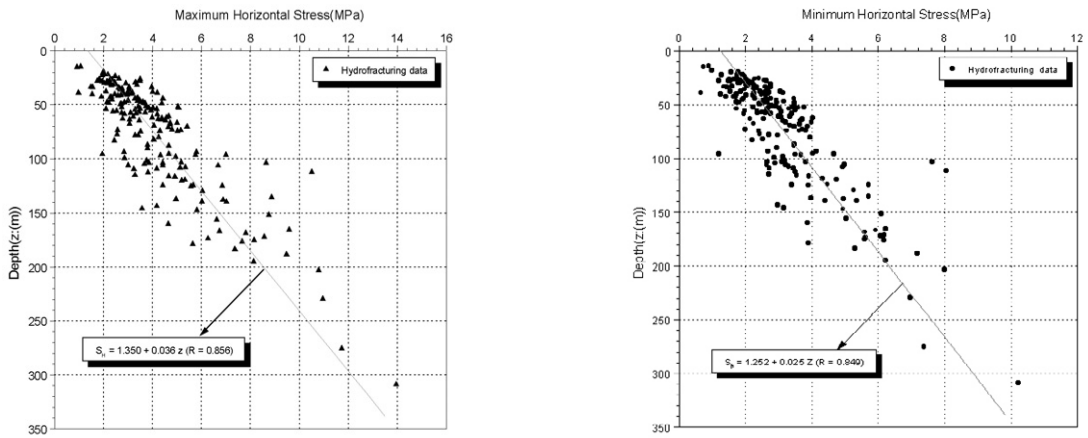


Fig. 10 Examples of Hydraulic Fracture Images and Fracture Tracings

(A) By Acoustic Televiwer, (B) By BIPS, and (C) Determination of Fracture Strike by Sinusoidal Curve Fitting Method

본 자료처리 과정에서는 측정 자료중 안정화된 가압 사이클 구간을 선택적 또는 전체적으로 선정하여 통계적 방법을 바탕으로 변수값을 결정하였으며 부분적으로 도해적 방법을 이용하였다. 해석과정에서 Ps의 결정을 위하여 지수압력 감쇠법 (exponential pressure-decay

method)과 이중선형 압력감쇠속도법 (bilinear pressure-decay-rate method) 및 부분적으로 압력-유량법 (P-Q method)을 적용하였다. Pr은 압력-부피 이중선형법 (P-V bilinear method)과 도해적 중첩법 (graphical superposition method)을 이용하여 결정하



(A) Maximum Horizontal Stress

(B) Minimum Horizontal Stress

Fig. 11 Variation of S_H and S_h with Depth by Hydraulic Fracturing Test

였다. Fig. 7과 Fig. 8은 P_s 의 결정사례를 나타내며 Fig. 9는 P_r 의 결정 사례들을 나타낸다.

균열 방향성 자료에서 균열 주향은 최대 수평응력의 작용 방향을 나타내며 균열의 형태는 실시된 수압파쇄시험의 적정성 여부를 판단하는데 사용된다. 일반적으로 주응력 성분이 수직, 수평이거나 이에 가까울 경우 균열은 공벽에 수직 또는 경사각 70° 이상의 준 수직 (pseudo-vertical)으로 형성된다. 그러나 주응력 성분이 수직, 수평방향에서 크게 벗어나거나 암반의 비등방성이 큰 조건 그리고 기존의 경사진 불연속면이 개방되는 조건에서는 경사각 70° 이하인 균열이 발생하므로 균열 분석은 매우 신중하게 이루어져야 한다. 자취가 불분명한 균열의 해석에는 보통 Lee와 Haimson이 제안한 주기 곡선 일치법 (sinusoidal curve fitting method)이 많이 적용된다. Fig. 10에서 (A), (B)는 공벽에 형성된 균열의 형태 및 방향성에 대한 정보를 얻기 위해 실시한 초음파 텔리뷰어와 BIPS 조사자료의 처리 후 이미지 및 fracture tracing의 예를 나타내며 (C)는 불분명한 자취를 가진 경사균열에 주기 곡선 일치법으로 주향을 결정한 예를 보여준다.

4. 국내 산악지형에서의 초기응력 분포 특성

4.1 수평응력 분포 및 방향성

심도 15~310 m 구간에서 수행된 수압파쇄시험 자료에 탄성 모델을 기준으로 최대, 최소 수평응력의 크기를 산정하였다. 최대 수평응력 (S_H)은 0.9~13.94 MPa 범위에, 최소 수평응력 (S_h)은 0.65~10.25 MPa 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 유사한 심도구간에서 응력값 크기의 편차가 가장 큰 구간은 심도 95~110 m로 최대 수평응력은 1.94~10.50 MPa로 최대, 최소값의 비가 5.4배, 최소 수평응력은 1.20~8.05 MPa로 비가 약 6.7배 정도인 것으로 분석되었다. Fig. 11은 최대, 최소 수평응력의 분포 범위를 나타낸다. 식 1, 2는 구해진 응력값에 선형 회귀분석을 실시한 결과를 나타낸다.

$$S_H = 1.350 + 0.036Z \quad (R=0.856) \quad \text{식(1)}$$

$$S_h = 1.252 + 0.025Z \quad (R=0.849) \quad \text{식(2)}$$

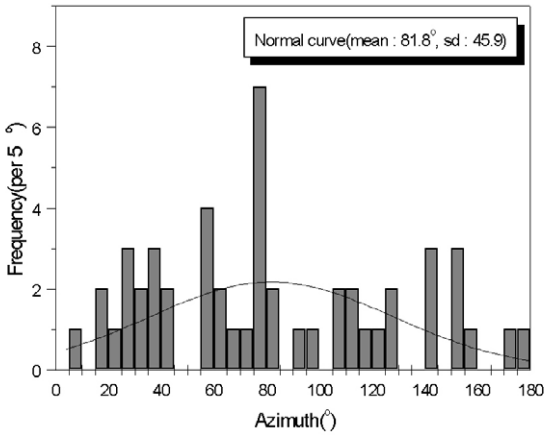


Fig. 12 Histogram of Average Azimuth of S_H (Depth Range: 15~310 m)

일반적으로 현재 한반도 지형 (geographical shape) 특히 산악지형은 중생대 백악기 (Cretaceous)~신생대 3기 (Paleogene)에 걸쳐 형성된 것으로 보고되고 있다. 따라서 NE-SW~NE 방향으로 형성된 국내의 주요 산맥들이 이 지질학적 기간에 걸쳐 발생된 NW-SE~EW 방향으로의 대규모 조산운동의 결과물이라는 사실에 근거하

여 국내의 암반내 최대 수평응력의 작용방향은 NW-SE~EW 방향이 우세할 것으로 인식되어 왔다.

Fig. 12는 수압파쇄시험이 수행된 개별 조사지점들 (시추공)에서 측정된 최대 수평응력의 평균 작용방향에 대한 분석결과를 바탕으로 구한 방위각별 빈도-히스토그램 (frequency histogram)을 나타낸다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 전체 조사지점에서 최대 수평응력의 평균 방향은 진북 기준 81.8° 의 방향성을 가지고 $70\sim 80^\circ$ 의 방위각에서 가장 높은 빈도를 나타내는 것으로 분석되었다. 절대적으로 우세한 방향은 나타나지 않았으나 NE-SW~EW 방향이 상대적으로 우세하게 나타났다. 일부지역에서는 지질학적으로 추정된 방향성에 부합되는 경향성을 보이거나 조사가 수행된 지역이나 지질조건, 대규모 불연속면의 존재 여부/위치에 따라 이방성을 가지는 국부적인 응력장 (regional stress)이 형성되어 있는 것으로 판단된다.

4.2 축압계수 분포 특성

지하에 시공되는 암반 구조물의 역학적 안정성은 수직

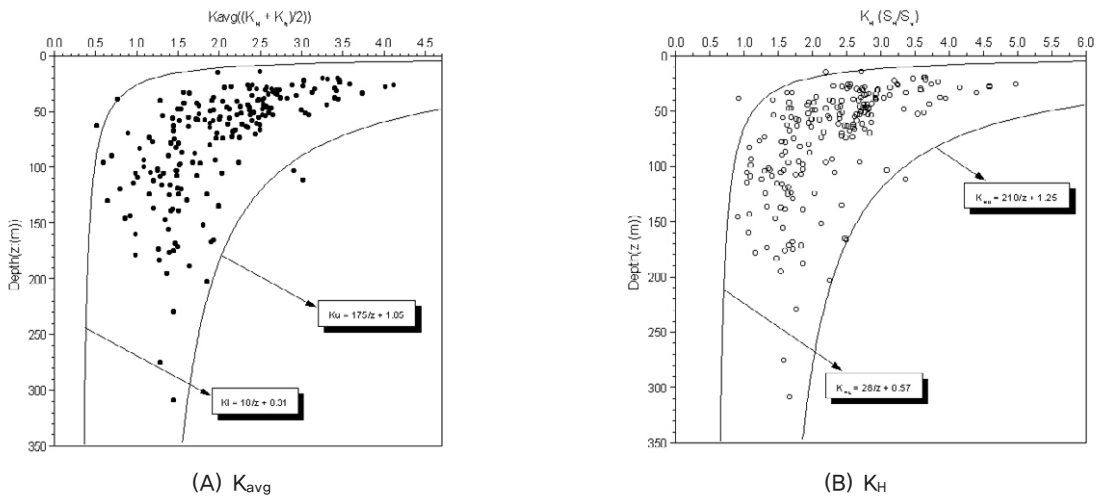


Fig. 13 Variation of K_{avg} and K_H with Depth by Hydraulic Fracturing Test: S_v^u (MPa) = $0.027 Z \times \text{Depth}^a$ (m)

응력보다는 수평응력의 상태에 상대적으로 큰 영향을 받기 때문에 지보재를 포함한 구조물 설계과정에서 축압계수 (ratio of horizontal stress to vertical stress)는 주요 입력변수로 작용한다. Fig 13은 산정된 수평응력값을 바탕으로 구해진 15~310 m 심도구간에서의 평균 축압계수 (K_{avg})와 최대 축압계수 (K_H) 분포를 나타낸다. 평균 축압계수는 약 0.5~4.1 범위, 최대 축압계수는 0.9~4.9 범위로 큰 분산도를 가지며 분포하는 것으로 분석되었다. 식 3, 4는 Fig. 13에 도시된 축압계수 분포 영역의 상, 하한 경계 (upper and lower limits)를 나타낸다.

$$18/z(m) + 0.31 < K_{avg} < 175/z(m) + 1.05 \quad \text{식(3)}$$

$$28/z(m) + 0.57 < K_H < 210/z(m) + 1.25 \quad \text{식(4)}$$

Fig. 14는 심도변화에 따른 평균 축압계수의 분포 특성을 나타낸다. 빗금 친 영역은 국내 암반 포아손비의 일반적인 값(0.14~0.40)을 이용하여 탄성학적으로 구한 축압계수의 분포 범위를 나타내는데 실측된 결과와는 크게 상이한 값을 나타냄을 알 수 있다.

일반적으로 과잉수평응력은 지체응력 외에 상부 지형, 산류응력, 수평방향 변형 (lateral straining), 지표 침식

(surface erosion) 등 여러 요인들의 영향에 의해 형성되며 심도가 얕을수록, 즉 지표면에 가까울수록 지체 응력 이외 요인들의 영향이 증가하는 것으로 알려져 있다. 국토의 65 % 이상이 산악으로 구성된 국내의 지형조건을 고려해 볼 때 시험이 수행된 산악 지역내 심도구간 (15~310 m)에서 상부 지형특성이 현재의 암반내 초기응력장에 영향을 미치는 주 요인들 중의 하나로 작용하며 특히 천부로 갈수록 영향이 증가하는 것으로 분석되었다. Fig. 14에서 평균 축압계수의 변화를 심도에 따라 2개의 영역 (A, B ZONE)으로 구분하였다. 전반적으로 지표로부터 일정 심도 (80~90 m)구간을 기준으로 상부 영역 (A-ZONE)에서는 0.5~4.1 범위의 값을 가지는데 반해 하부 영역 (B-ZONE)에서는 일부 지점을 제외하고는 약 0.6~2.2로 분산도와 크기가 감소되는 경향을 나타낸다. 앞에서 언급한 응력장에 영향을 미치는 요인들을 고려해 볼 때 국내 지형조건에서 지표로부터 80~90 m 심도구간까지는 초기 응력장이 상부 지형의 영향을 크게 받으며 그 하부로는 지형에 따른 영향이 점차 감소되는 것으로 판단된다.

수십 개의 다른 지역에서 얻어진 결과들로부터 도출된 전반적인 경향성 관점에서 볼 때 축압계수는 심도 증가에

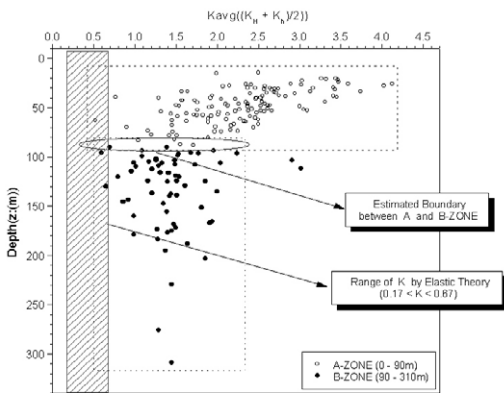


Fig. 14 Estimated Depth Boundary below which Topography Effect Diminishes Based on Hydraulic Fracturing Stress Measurement Results (about 80~90 m below surface)

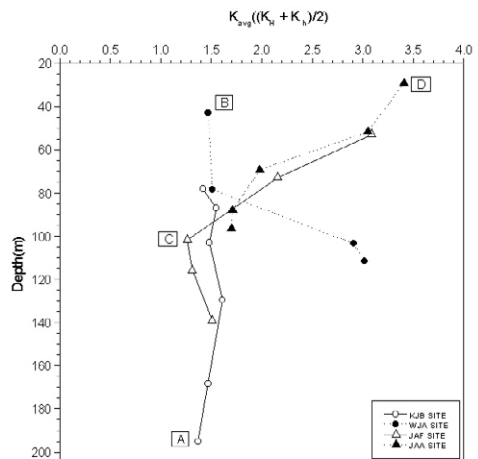


Fig. 15 Four Different Variation Patterns of K with Depth (Bae et al., 2001)

따라 크기와 분산도가 감소되지만 시험이 수행된 지역의 지질, 지형조건에 따라 축압계수는 다양하게 변화되며 크게 Fig. 15에 도시된 것과 같이 4 가지의 변화 양상을 나타내는 것으로 파악되었다.

4.3 현지 암반의 인장강도

대부분 취성 특성을 가지는 암반의 파괴나 불안정 거동은 압축응력에 비해 인장응력에 민감하게 반응한다. 암석의 인장강도는 압열 인장시험 (Brazilian tensile test), 굴곡시험 등의 실내 시험에 의해 얻어진다. 이러한 실내 시험들은 대부분 무결암의 소규모 시편에 대해 수행되기 때문에 이 값들로부터 현지 암반의 인장강도를 추정하기에는 무리가 따르며 통상 제안된 강도 추정식에 의해 값들이 산정되는 것이 일반적이다.

Fig. 16은 불국사 관입암류의 일종인 언양 화강암 지역에서 회수된 시료를 대상으로 실내 압열 인장시험과 수압 파쇄시험으로부터 산정된 인장강도 값들을 비교, 도시한 것이다. 수압파쇄시험으로 구한 값들은 실내 시험결과에 비해 31~83 % 정도의 크기를 가지며 평균적으로 약 49

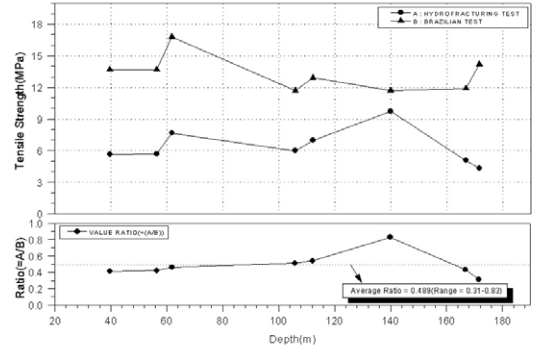


Fig. 16 Comparison of Laboratory Tensile Strength and In-situ Tensile Strength Calculated by P_b , P_r for Unyang Granite (Bae et al., 2001)

%의 값을 가지는 것으로 나타났는데 이는 크기 효과 (size effect)에 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 17은 국내에 가장 폭 넓게 분포하는 암종인 화강암과 편마암류 그리고 퇴적암의 대표적 암종의 하나인 석회암 지역에서 실시된 현장시험으로부터 산정된 현지 암반 인장강도의 분포 범위를 나타낸 그래프들이다. 가장 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 화강암류는 1.87~12.11 MPa (19.06~123.45 kg/cm²) 범위의 인장강도 값을 가지며

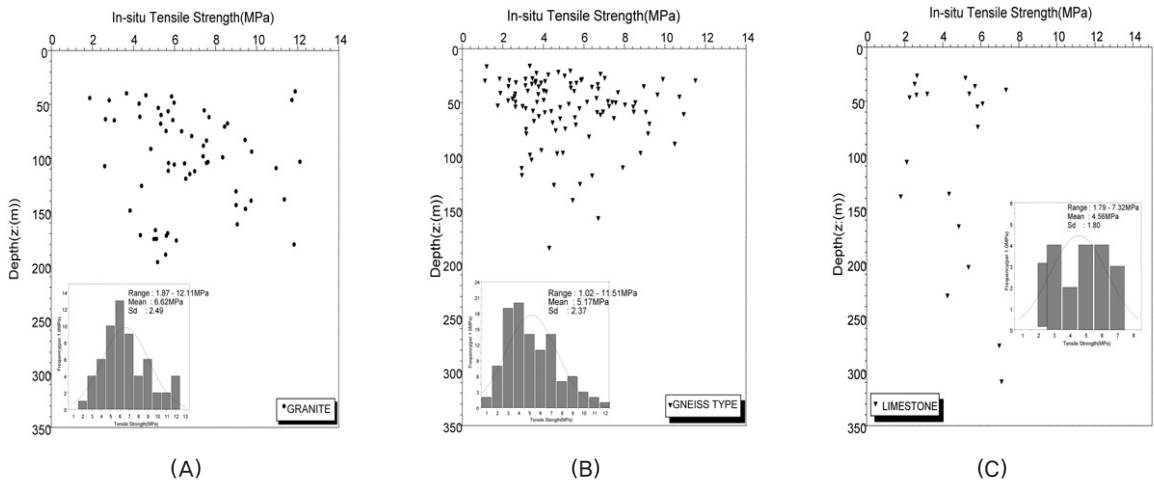


Fig. 17 Plotting of In-situ Tensile Strength of 3 Different Kinds of Rocks Calculated by P_b and P_r : (A) Granite, (B) Gneiss, and (C) Limestone

평균은 약 6.62 MPa (67.48 kg/cm²)로 산정되었고 변성 암류의 대표적 암종인 편마암류는 1.02~11.51 MPa (10.40~117.33 kg/cm²)로 평균은 5.17 MPa (52.70 kg/cm²)의 값을 가지는 것으로 나타났다. 석회암은 1.79~7.32 MPa (18.25~74.62 kg/cm²)의 인장강도를 나타내며 평균값은 4.56 MPa (46.48 kg/cm²) 가진다. 비교 암종중 화강암이 가장 큰 강도를 가지며 편마암류와 석회암은 화강암 기준으로 각각 78 %와 69 %의 크기를 가지는 것으로 분석되었다.

현장 수압파쇄시험 결과로부터 구해지는 값들은 실내 시험에 비해 수백~수천 배 부피의 암반을 대상으로 하여 얻어진 결과이므로 현저 암반 물성산정시 주요 요인인 크기 효과가 반영된 값으로 볼 수 있다. 따라서 충분한 자료 축적과 실내 압축, 인장강도 시험값들과 비교/분석 (상호 상관성 도출)이 이루어질 경우 터널 안정성 해석시 주요 입력 변수인 현저암반의 강도값 산정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

국내 산악지역내 60개 지점에서 수행된 현장 수압파쇄 시험 결과에 대한 분석으로 얻어진 내용들을 간략히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 심도 15~310 m 구간에서 수행된 현장 수압파쇄 시험 자료에 탄성 모델을 기준으로 최대, 최소 수평응력의 크기를 산정하였다. 최대 수평응력 (S_{H1})은 0.9~13.94 MPa 범위에, 최소 수평응력 (S_{H2})은 0.65~10.25 MPa 범위에 분포하는 것으로 나타났다. 유사한 심도구간에서 응력값 크기의 편차가 가장 큰 구간은 심도 95~110 m로 최대 수평응력은 1.94~10.50 MPa로 최대, 최소값의 비가 5.4배, 최소 수평응력은 1.20~8.05 MPa로 비가 약 6.7배 정도인 것으로 분석되었다.
- 2) 전체 조사지점에서 최대 수평응력의 평균 작용방향은 진북 기준 81.8°의 방향성을 가지며 70~80°의 방위각에서 가장 높은 빈도를 나타내는 것으로 분석되었다. 절대적으로 우세한 방향은 나타나지 않았으며 NE-SW~EW 방향이 상대적으로 우세하게 나타났다. 일부지역에서는 지질학적으로 추정된 방향성에 부합되는 경향성을 보이나 광역적으로 볼때 조사가 수행된 지역이나 지질조건, 대규모 불연속면의 존재 여부 및 위치에 따라 이방성을 가지는 국부적인 응력장 (regional stress)이 형성되어 있는 것으로 판단된다.
- 3) 산정된 수평응력값을 바탕으로 구해진 15~310 m 심도구간에서의 평균 측압계수 (K_{avg})와 최대 측압계수 (K_{H1})의 경우 평균 측압계수는 약 0.5~4.1 범위, 최대 측압계수는 0.9~4.9 범위로 큰 분산도를 가지며 분포하는 것으로 분석되었고 국내 암반 포아손비의 일반적인 값을 이용하여 탄성학적으로 구한 측압계수와는 크게 상이한 값을 나타낸다.
- 4) 국토의 65 % 이상이 산악으로 구성된 국내의 지형조건을 고려해 볼 때 시험이 수행된 산악지역내 심도구간 (15~310 m)에서 상부 지형특성이 현재의 암반내 초기응력장에 영향을 미치는 주 요인들 중의 하나로 작용하며 특히 천부로 갈수록 영향이 증가하는 것이 확인되었다. 평균 측압계수의 변화를 심도에 따라 2개의 영역 (A, B ZONE)으로 구분하였으며 전반적으로 지표로부터 일정 심도 (80~90 m)구간을 기준으로 상부 영역 (A-ZONE)에서는 0.5~4.1 범위의 값을 가지는데 반해 하부 영역 (B-ZONE)에서는 일부 지점을 제외하고는 약 0.6~2.2로 분산도와 크기가 감소되는 경향을 나타낸다. 천부의 초기응력장에 영향을 미치는 요인들을 고려해 볼 때 국내 지형조건에서 지표로부터 80~90 m 심도구간까지는 초기응력장이 상부 지형의 영향을 크게 받으며

그 하부로는 지형에 따른 영향이 점차 감소되는 것으로 판단된다.

- 5) 국내에서 가장 폭 넓게 분포하는 암종인 화강암과 편마암류, 그리고 퇴적암의 대표적 암종의 하나인 석회암 지역에서 획득된 현장시험자료로부터 현지 암반 인장강도에 대한 분석을 수행하였다. 가장 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 화강암류는 1.87~12.11 MPa (19.06~123.45 kg/cm²) 범위의 인장강도 값을 가지며 평균은 약 6.62MPa (67.48 kg/cm²)로 산정되었고 변성암류의 대표적 암종인 편마암류는 1.02~11.51MPa (10.40~117.33 kg/cm²)로 평균은 5.17 MPa (52.70 kg/cm²)의 값을 가지는 것으로 나타났다. 석회암은 1.79~7.32 MPa (18.25~74.62 kg/cm²)의 인장강도를 나타내며 평균값은 4.56 MPa (46.48 kg/cm²) 가진다. 비교 암종중 화강암이 가장 큰 강도를 가지며 편마암류와 석회암은 화강암 기준으로 각각 78 %와 69 %의 크기를 가지는 것으로 나타났다. 현장 수압파쇄시험 결과로부터 구해지는 값들은 실내 시험에 비해 수백~수천배 부피의 암반을 대상으로 하여 얻어진 결과이므로 현지 암반 물성산정시 주요 요인인 크기 효과가 반영된 값으로 볼 수 있다. 따라서 충분한 자료축적과 실내 압축, 인장강도 시험값들과 비교/분석 (상호 상관성 도출) 이 이루어질 경우 터널 안정성 해석시 주요 입력 변수인 현지암반의 강도값 산정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- 1) Amadei, B., Stepansson, O., 1997. Rock stress and its measurement: 2-30, 41-49, Chapman & Hall.
- 2) Bae, S. H. Choi, Y. K., Jeon, S. W., Lee, C. I., 2001. Characteristics of initial rock stress of mountainous region in Korea, ISRM Eurock 2001/Epsos/Finland, pp. 29-34.
- 3) Batchelor, A. S., Kwakwa, K.A., Proughten, A.J., Davis, N., 1997, Determination of the in-situ stresses at Sellafield : A case study, Int. Symp. On Rock Stress/Kumamoto/Japan; 265-276, Balkema.
- 4) Choy, H.H., Chan, C.F., Pun, W.K., Cheung L.S., 1997. Rock-stress measurement in the Hong Kong region, Int. Symp. on Rock Stress/Kumamoto/Japan; 391-396, Balkema.
- 5) Enever, J.R., 1993, Case studies of hydraulic fracture stress measurement in Australia. Comprehensive rock engineering Vol 3-2: 500-512, Pergamon Press.
- 6) Hudson, A., Harrison, J.P., 1997, Engineering rock mechanics-an introduction to the principles; 94-96, Pergamon.
- 7) Jager, J.C., Cook, N.G.W., 1969, Fundamentals of rock mechanics: 181-186, Methuen & Co Ltd.
- 8) KIGAM(1995), A research on the excavation, support, and environment control of large scale underground space, Research Report(KR-95(T)-8); 110-119
- 9) Lee, M.Y., Haimson, B.C., 1980, Statistical evaluation of hydraulicfracturing stress measurement parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol. 26, No. 6: 447-456, Pergamon Press.
- 10) Lee, M.Y., 1991. Advances in instrument, data analysis, and calculation in hydraulic fracturing, Doctorial Thesis: 55-79, University of Wisconsin-Madison.
- 11) Pusch, R., 1995, Rock mechanics on a geological base: 243-253, Elsevier.
- 12) Won, J.K, Lee, H.Y. & at al., 1991, The principles of Geology(2nd ed.): 595-601, Woosungmoonwhasa.