

수압파쇄법에 의한 국내 과잉 수평응력 분포 특성에 관한 연구

Characteristics of Excessive Horizontal Stress in Korea by Hydraulic Fracturing Stress Measurement

배 성 호¹ Bae, Seong-Ho

전 석 원² Jeon, Seok-Won

김 학 수³ Kim, Hag-Soo

김 재 민⁴ Kim, Jae-Min

Abstract

In this paper, the characteristics of excessive horizontal stress components in Korea were studied using more than five hundred measured data set of in-situ hydraulic fracturing test. Based on the in-situ testing data, the magnitude and orientation of the horizontal stress component and variation of stress ratio (K) with depth were investigated. And also horizontal stress magnitude versus depth relationships and distribution limits of stress ratio components were suggested. For the depth less than 310 m in the entire territory, the stress ratio has a tendency to diminish and stabilize with depth, but for some areas, it was revealed that the excessive horizontal stress fields with stress ratio close to 3.0 below 200 m in depth have formed. The results from the investigation of excessive horizontal stress regions showed that there existed several regions where the localized excessive horizontal stress was big enough to potentially induce brittle failure around the openings at less than 300 m in depth.

요 지

이 논문에서는 현장 수압파쇄시험에서 얻어진 500개 이상의 측정 자료들을 이용하여 국내 과잉 수평응력의 분포 특성에 대한 연구를 수행하였다. 현장 자료를 바탕으로 수평응력 성분의 크기와 작용방향성, 축압계수 분포에 대한 상세 분석을 하였다. 또한 심도에 따른 수평응력 성분들의 상관식과 축압계수 분포 영역의 상, 하한 경계식을 제안하였다. 심도 310m 미만 영역에서 축압계수는 심도 증가에 따라 감소되고 안정화되는 경향을 나타내지만 지역에 따라 심도 200m 이상의 영역에 3.0에 가까운 축압계수를 가지는 과잉 수평장이 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 과잉 수평응력장 분포지역에 대한 평가 결과 국내 여러 지역의 심도 310m 이내 구간에서 암반 구조물 굴착시 응력에 의한 취성파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

Keywords : Brittle failure, Excessive horizontal stress, Hydraulic fracturing test, Stress ratio (K)

1. 서 론

지하 암반 구조물의 파괴 거동에 있어 저심도의 경우 불연속면의 거동 특성에 따른 파괴 그리고 대심도 영역에서는 스폐링, 슬래빙(slabbing) 및 록버스팅(rockbursting)

등과 같은 초기응력에 의한 취성파괴(stress induced brittle failure)가 주 요인으로 알려져 왔다(Diederichs, 1999; Kaiser et al., 2000). 굴착 공동 주변 암반에서 발생 되는 취성파괴 현상은 구조물의 안정성뿐만 아니라 1차 지보재의 파괴, 추가적 보강작업과 공정 지연 등 시공

1 정회원, 지오제니 컨설턴트 이사 (Member, Director, Geogeny Consultants Group Inc., shbae007@geogeny.biz)

2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

3 지오제니 컨설턴트 대표이사 (Ceo, Geogeny Consultants Group Inc.)

4 지오제니 컨설턴트 차장 (Dept. Manager, Geogeny Consultants Group Inc.)

의 큰 장애 요인으로 작용한다. 이러한 취성파괴는 현지 암반 초기응력, 강도조건 그리고 굴착 단면의 형태에 영향을 받으며 특히 암반 초기응력과 강도조건에 절대적인 영향을 받게 된다. 국내의 경우 지하 암반 구조물 설계를 위해 지반조사 단계에서 수행되는 초기응력 측정은 물량 면에서는 크게 증가하고 있으나 그 중요성에 비해 상세 연구는 매우 부족한 실정이다. 암반 구조물의 시공 심도가 깊어지고 규모가 대형화되어가는 국내 현실을 고려해 볼 때 설계의 적정성과 시공의 경제성 확보에 직접적으로 영향을 미치는 암반 초기응력 분포 특성에 대한 정량적인 정보를 확보할 수 있는 체계적이고 심도 있는 분석과 연구가 필요하다.

본 논문에서는 지난 5년간 실측된 현장 측정 자료들을 바탕으로 수평응력 성분의 방향성 분포, 축압계수 분포와 심도에 따른 변화 특성을 분석하였다. 다음으로 이러한 초기응력 분포 특성에 대한 정량적인 자료와 국내 분포하는 암석의 강도 특성 분석 자료를 근거로 국내 310m 이내 심도 영역에서 과잉 수평응력장이 형성되어 있는 지역을 평가하였다.

2. 현장시험 및 자료해석

2.1 현장시험

본 논문에서 활용된 초기응력 자료들은 대부분 지하 암반 구조물의 설계 및 시공과 관련된 상세 지반조사 단계에서 현장 수압파쇄시험을 통해 획득된 결과들을 바탕으로 하였다. 현장 초기응력 측정은 전체 국토 영역에서 지하 암반 구조물의 많은 부분이 시공되는 심도 15~310m의 110개 개별 시추공을 대상으로 540개의 시험구간을 선정하여 수행하였다. 전체 540개의 측정자료

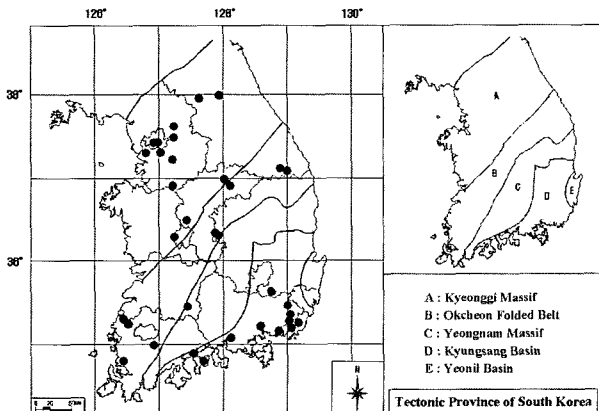


그림 1. 지체구조구별 현장 수압파쇄시험 위치도 (각 조사지역에는 2~9개의 개별 시험공들이 포함됨)

들 중 불연속면의 개방 거동이나 기타 장비의 오류에 의해 측정된 비정상적인 측정값들은 해석의 보조 자료로만 활용하고 정상적인 측정값이 얻어진 380개의 자료만 응력 해석에 직접적으로 이용하였다.

그림 1은 현장 초기응력 측정이 이루어진 조사 지역의 위치를 나타내는데 각 조사지역에는 2~9개의 개별 시추공들이 포함된다. 수행된 현장시험을 빈도 면에서 구분해 보면 국토를 구성하는 지체구조구들 중 경기육괴와 경상분지에서 각각 45.5%, 33.6%의 조사가 수행되었으며 다음으로 옥천습곡대에서 15.4%가 수행되었다. 조사가 수행된 대상 암종은 대표적으로 편마암, 화강암, 안산암의 순으로 높은 비율을 차지한다. 조사 심도 면에서는 50m 이내 구간이 약 37%, 50~100m와 100m 이상 구간이 각각 32%, 31%를 차지한다.

2.2 측정시스템 및 자료 해석

본 연구에 사용된 모든 자료는 국내의 지형조건에 적합하도록 설계, 제작된 엔진 구동방식의 유압-와이어 라

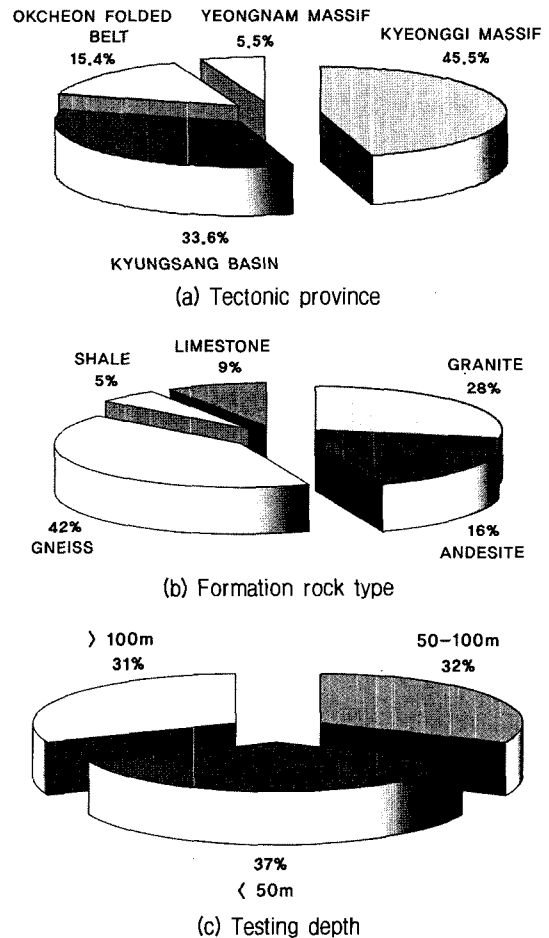


그림 2. 현장 수압파쇄시험에 대한 통계자료

인 시스템에 의해 측정되었다(그림 3). 일반적으로 수직 시추공에 대한 수압파쇄시험 결과의 해석에 적용 가능한 모델은 크게 탄성모델, 공극 탄성모델, 파괴역학 모델 그리고 균열 가압모델로 구분된다. 본 연구에서는 탄성모델에 근거 자료 해석을 수행하였다.

수압파쇄 현장 시험 결과로부터 암반내 초기응력과 기타 정보를 얻기 위해서는 두 종류의 매개변수 값들이 결정되어야 한다. 하나는 초기응력의 크기에 관련된 압력값 자료이며 다른 하나는 유도된 인장 균열의 특성, 즉 초기 응력의 작용방향에 관련된 것이다. 압력 매개변수값에는 균열 발생압력(P_b), 균열 폐쇄압력(P_c), 균열 개구압력(P_i) 등이 포함되며 수평응력의 방향성 산정과 시험결과의 적정성 판별에 이용되는 균열 특성 자료들은 여러 방식의 공내 조사장치에 의해 획득이 가능하다. 본 논문의 자료 처리 과정에서는 측정 자료 중 안정화된 가압 사이클 구간을 선택적 또는 전체적으로 선정한 다음 Lee and Haimson(1989)에 의해 제안된 비선형 회귀분석 기법을 적용하여 변수값을 결정하였으며 부분적으로 도해적 방법을 이용하였다. 균열 폐쇄압력값의 결정에는 기본적으로 지수압력 감쇠법(exponential pressure decay method)과 이중 선형 압력감쇠속도법(bilinear pressure decay rate method)을

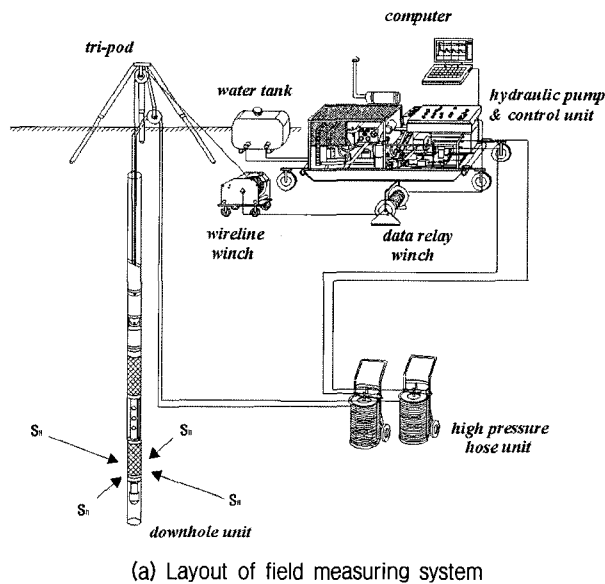


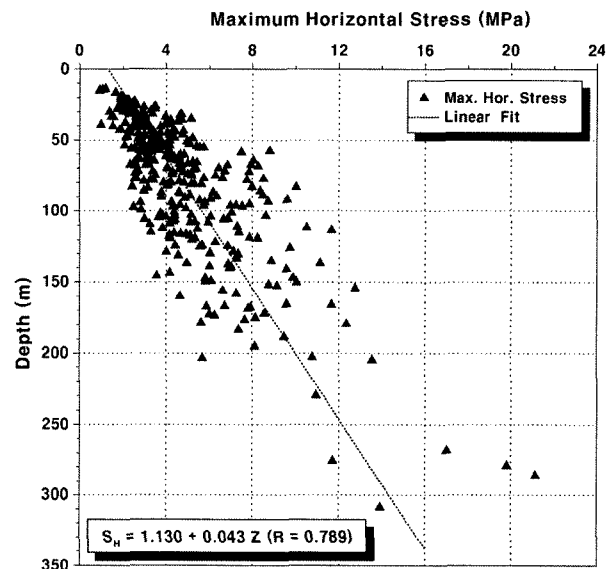
그림 3. 현장 수압파쇄시험 시스템 구성도

적용하였고 부분적으로 압력-유량법(P-Q method)을 이용하였다. 균열 개구압력은 압력-부피 이중선형법(P-V bilinear method)과 도해적 중첩법(graphical superposition method)을 이용하여 결정하였다. 그리고 균열의 방향성 해석에는 결과의 정밀도가 높고 영상 이미지의 제공이 가능한 초음파 주사검층과 공내 영상촬영법을 적용하였다.

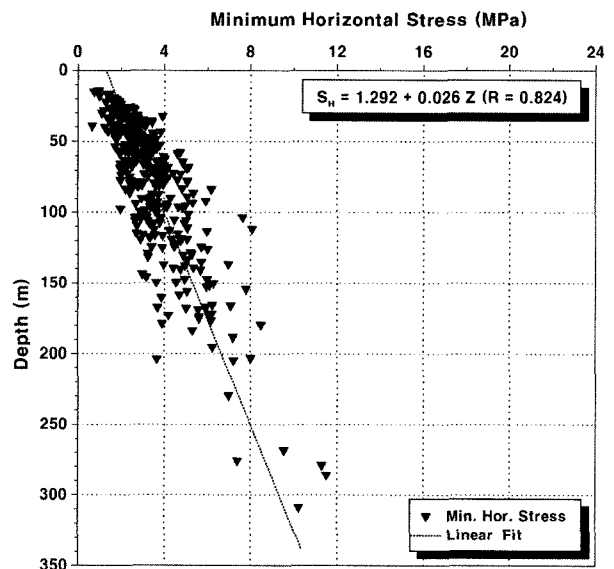
3. 국내 수평응력의 분포 특성

3.1 최대, 최소 수평응력의 크기

15~310m 구간에 대한 응력해석 결과 최대 수평응력



(a) Maximum horizontal stress



(b) Minimum horizontal stress

그림 4. 국내 수평응력 성분들의 심도별 변화 특성(심도 : 15~310m)

(S_H)은 0.90~21.13MPa 범위의 값을 가지며, 최소 수평 응력(S_h)은 0.65~11.51MPa의 값을 가지는 것으로 나타났다. 유사한 심도구간에서 응력값 크기의 편차가 가장 큰 구간은 심도 95~110m로 최대 수평응력은 1.94~10.50MPa 범위로 최대, 최소값의 비가 5.4배, 최소 수평응력은 1.20~8.05MPa로 비가 약 6.7배 정도인 것으로 분석되었다(배성호 2005). 그림 4는 수평응력 성분들의 심도별 변화 양상을 보여준다. 수평응력과 심도 상호간의 회귀 분석 결과 여러 회귀함수들 중에서 선형관계식이 가장 높은 상관성을 보였고 식 (1)과 식 (2)는 구해진 선형 회귀식을 나타내는데 최소 수평응력 대 심도(z)의 상관식의 상관계수가 0.824로 최대 수평응력보다 다소 높은 상관성을 나타내었다.

$$S_H(MPa) = 1.130 + 0.043z(m) \quad (R = 0.789, z < 310m) \quad (1)$$

$$S_h(MPa) = 1.292 + 0.026z(m) \quad (R = 0.824, z < 310m) \quad (2)$$

3.2 최대 수평응력의 방향성

초기응력 조사가 수행된 모든 구간에서 방향성 자료를 측정하였고 응력해석이 이루어진 380개 전체 자료중 175개 지점, 약 46%의 시험구간에서만 균열 방향성 해석이 가능하였다. 그림 5(a)는 최대 수평응력 작용방향의 심도별 분포 특성을 보여주는데 특정 방향성을 나타내기 보다는 심도별로 큰 이방성을 나타냄을 알 수 있다. 그림 5(b)는 최대 수평응력 방향의 방위각별 빈도-히스토그램과 분포 특성을 나타내는데 절대적으로 우세한 방향성은 나타나지 않았으나 진북기준 70°~90° 방위각 범위 (N70°E~EW)에서 상대적으로 높은 빈도를 나타내며 반대로 160°~170°의 방위각 범위(N10°W~N20°W)에서 가장 낮은 빈도를 나타내었다. 평균 작용 방향은 진북기준 약 77°의 값을 가지는 것으로 분석되었다. 그림 5(c)는 개별 조사지점의 방향성 분석 자료에 근거하여 작성한 조사 지역별 최대 수평응력의 평균 방

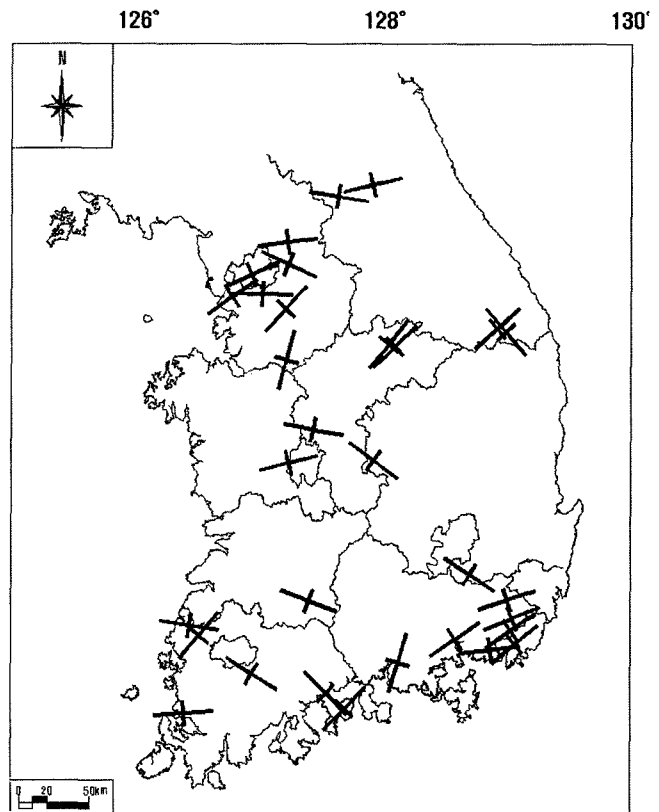
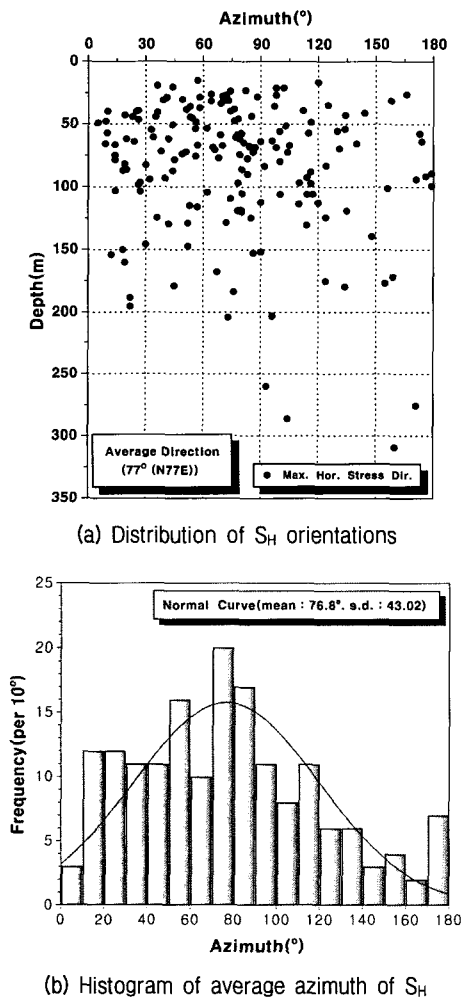


그림 5. 국내 최대 수평응력 평균 작용방향의 분포 특성

향성을 나타낸다. 일부 영역에서는 유사한 방향성을 나타내지만 전체적으로는 지역에 따른 이방성이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

현재 한반도 지형 특히 산악지형은 중생대 백악기(Cretaceous)에서 신생대 3기(Paleogene)에 걸쳐 형성된 것으로 알려져 있다. NS~NE-SW 방향으로 형성된 국내 주요 산맥들이 이 지질학적 기간에 걸쳐 발생된 EW~NW 방향으로의 대규모 조산운동의 결과라는 지질학적 연구결과에 근거하여 국내 현지 암반내 최대 수평응력 주 작용방향은 EW~NW 방향이 우세한 것으로 인식되어 왔다. 그러나 지금까지 분석한 바와 같이 최대 수평응력의 방향성은 평균적으로는 지질학적으로 추정된 방향성과 유사한 경향성을 나타내나 조사가 수행된 지역이나 지질조건, 대규모 불연속면의 존재 여부 및 위치에 따라 큰 이방성을 가지는 국부적인 응력장이 형성되어 있는 것으로 분석되었다.

3.3 축압계수 (K)의 분포

지하 암반 구조물의 역학적 안정성은 심도에 따른 암반 자중의 선형적 변화값과 유사한 분포 특성을 나타내는 수직응력 성분과 비해 매우 큰 이방성을 가지는 수평응력장 특성에 상대적으로 큰 영향을 받는다. 이러한 이유로 굴착에 따른 안정성 해석이나 설계과정에서 축압계수는 주요 입력변수로 작용한다. 축압계수는 실측된 수평응력 성분들의 크기에 비해 응력의 분포나 심도별

변화 특성을 분석하는 기준으로 적합하다. 평균 축압계수는 수평응력 성분의 전반적인 분포를 평가하는데 용이하며 최대 축압계수의 경우 굴착시 구조물의 안정성이나 파괴 거동을 평가하는데 직접적으로 적용될 수 있다.

그림 6은 실측된 수평응력값들을 바탕으로 구해진 15~310m 심도구간에서의 평균 축압계수(K_{avg})와 최대 축압계수(K_H)의 분포를 나타낸다. 평균 축압계수는 약 0.52~4.91 범위, 최대 축압계수는 0.83~5.63 범위로 큰 분산도를 가지며 분포하는 것으로 조사되었다. 심도가 증가함에 따라 축압계수의 분포 범위가 좁아지며 다소 안정화되는 경향이 나타나지만 지역에 따라 심도 200m 이상의 대심도 구간에도 2.5 이상의 높은 축압계수를 가지는 과잉 수평응력장(excessive horizontal stress field)이 형성되어 있는 것으로 분석되었다(배성호 2005).

식 (3)과 식 (4)는 축압계수 분포 영역의 상, 하한 경계식을 나타내는데 이는 암반 구조물의 안정성이나 파괴 거동을 평가하는데 하나의 객관적인 지표로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 7은 전체 자료에서 심도 영역별 수평응력 성분들의 상대적 비율 즉 최소 축압계수 대한 최대 축압계수의 상대적 크기 분포와 크기별 빈도 히스토그램을 보여준다. 분석 결과 전체 수평응력비(K_H/K_v , horizontal stress ratio)는 1.03~1.95 범위에 분포하는 것으로 조사되었으며 평균적으로 1.34의 값을 나타내었다. 지표에 가까울수록 1.30 이하의 낮은 범위에 집중되며 심도가 증가함에 따라 점차 넓은 영역에 분산되어 나타나는 경향을 보였

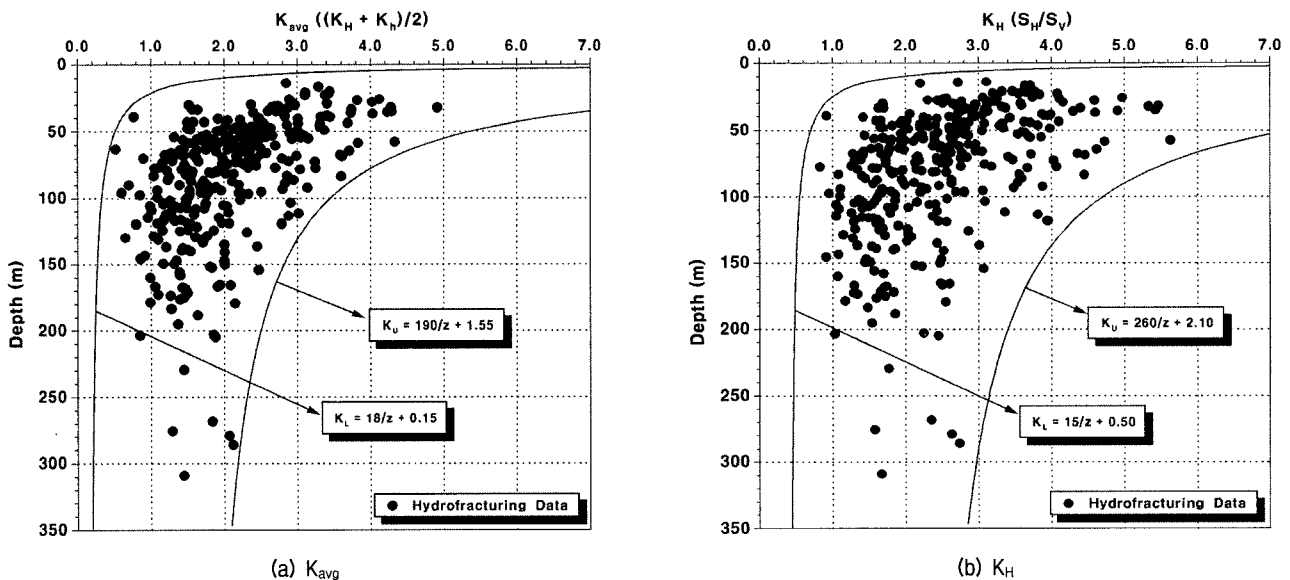


그림 6. 국내 축압계수(K) 성분들의 심도별 분포 특성(심도 : 15~310m)

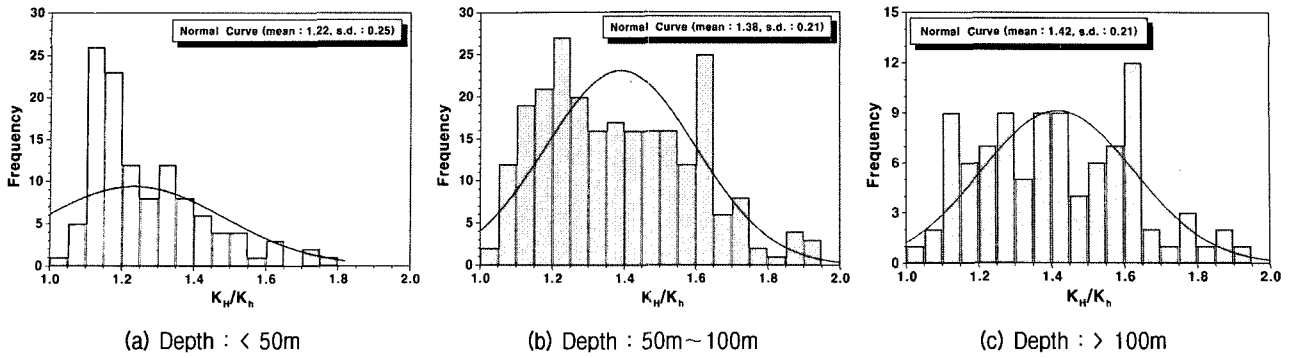


그림 7. 수평응력비(K_H/K_v)의 심도별 분포 특성(심도 : 15m~310m)

다. 심도 50m 미만 영역에서는 평균 1.22(1.03~1.78), 심도 50~100m 영역에서는 1.38(1.05~1.95)의 수평응력비를 나타내었고 100m 이상 심도에서는 1.42(1.04~1.97)의 평균값을 가져 심부에서 천부 영역으로 갈수록 수평응력 성분비가 감소되는 경향을 보였다. 심도 50m 미만 천부 영역의 경우 산악지역에 비해 지형의 영향을 받지 않은 평지구간에서의 수평응력비가 상대적으로 더 낮은 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 이러한 심도가 낮을수록 수평응력비가 감소되고 낮은 범위에 집중되는 현상은 지표에 근접할수록 구속 상태로 형성되어 있던 수평응력 성분들의 이완작용에 따른 것으로 판단된다.

$$\frac{18}{z}(m) + 0.15 < K_{uvy} < \frac{190}{z}(m) + 1.55 \quad (z < 310m) \quad (3)$$

$$\frac{15}{z}(m) + 0.50 < K_H < \frac{260}{z}(m) + 2.10 \quad (z < 310m) \quad (4)$$

4. 과잉 수평응력 분포 지역 평가

4.1 국내 암반의 강도 특성

국내 암반의 특성은 신생대 4기층이 분포하는 지역을

제외한 대부분 지역에 취성도가 높은 암석들이 폭넓게 분포하고 있다. 따라서 초기응력 수준이 높은 지역에서는 일정 심도 이상 영역에서 굴착작업이 진행될 경우 응력에 의한 취성파괴의 발생 가능성을 항상 내포하고 있다. 본 연구에서는 지난 5년간 국내 심도 20~420m 영역에서 회수된 암석 시료들을 대상으로 수행된 실내 시험에서 구해진 무결암의 일축압축강도 자료를 이용하여 심도별 강도 분포 특성을 분석하였다. 그림 8은 심도별 일축압축강도 변화를 분석한 것으로 영역은 심도 50m 미만, 50~100m, 100m 이상 등 세 영역으로 구분하였다.

심도 50m 미만에서는 20~286MPa 범위의 강도값을 가지며 평균은 96MPa을 나타내었다. 심도 50~100m 영역에서는 23~226MPa 범위에 분포하고 평균값은 103.9MPa을 나타내었으며 100m 이상의 심도에서는 25~325MPa에 분포하고 121.4MPa의 평균값을 가지는 것으로 분석되었다. 50m 미만 심도에 비해 50~100m와 100m 이상 심도 영역에서 평균 일축압축강도 값은 각각 8.2%, 26% 정도 증가하는 양상을 보였다. 심도 증가에 따라 암석의 강도 특성이 증가하는 양상이 관찰되었으나 개별 심도 영역에서 강도 분포의 분산도가 매우 크게 나타났다.

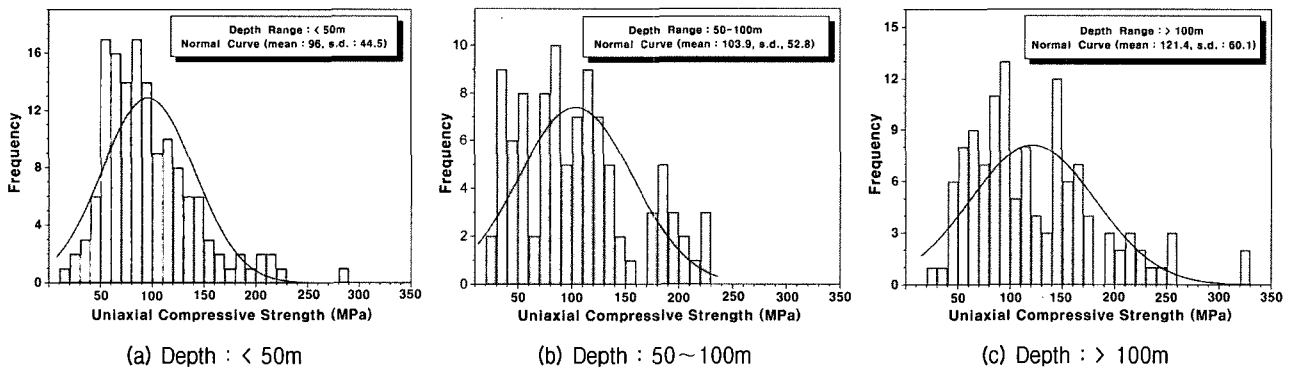


그림 8. 국내 암반 강도의 심도별 분포 특성(심도 : 15~310m)

100m 이상의 심도 영역에서도 평균값은 저심도에 비해 높은 값을 가지나 여러 심도에서 50~60MPa 이하의 낮은 일축압축강도를 가지는 암석이 분포하는 것으로 조사되었다.

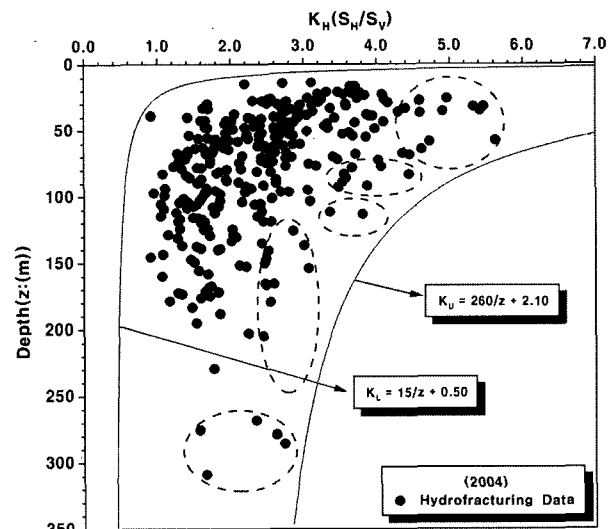
4.2 응력 강도비에 따른 공동 주변의 취성파괴 가능성 평가

국내 암반내 작용하는 초기응력 분포 특성 결과 수평 응력 성분들은 많은 경우 수직응력에 비해 큰 값을 가지기 때문에 축압계수는 대부분 1 이상을 값을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 수평응력 성분들은 수직응력과 편차가 클수록 즉 축압계수가 클수록 굴착시 암반내 굴착되는 공동의 불안정성을 가져오는 주 요인으로 작용한다. 그리고 대심도인 지반조건에서는 축압계수가 크지 않더라도 과지압 상태를 유발하게 된다. 현장자료들에 근거하여 제시된 초기응력 성분들 중 최대 주응력(σ_1)의 매질 일축압축강도(σ_c)에 대한 비인 응력 강도비

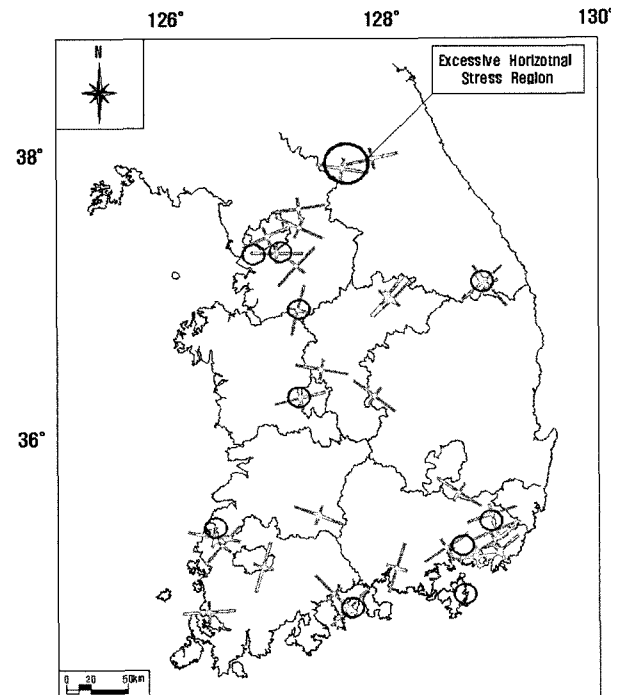
	Massive ($GSI > 75$)	Moderately Fractured ($50 > GSI > 75$)	Highly Fractured ($GSI < 50$)	
Low In-Situ Stress ($\sigma_1/\sigma_c < 0.15$)	 Linear elastic response.	 Falling or sliding of blocks and wedges.	 Unravelling of blocks from the excavation surface.	$D_i > 0.4$ (± 0.1)
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 > \sigma_1/\sigma_c > 0.4$)	 Brittle failure adjacent to excavation boundary.	 Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.	 Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.	0.4 (± 0.1) $> D_i < 1.1$ (± 0.1)
High In-Situ Stress ($\sigma_1/\sigma_c > 0.4$)	 Failure zone around the excavation.	 Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.	 Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic continuum.	$D_i > 1.1$ (± 0.1)
$\sigma_1/\sigma_c > 0.15$	- Elastic response			
$0.15 < \sigma_1/\sigma_c < 0.30$	- Minor spalling - Microseismic event with moment magnitude -6 to -2			
$0.30 < \sigma_1/\sigma_c < 0.40$	- Minor slabbing and damage - Microseismic event with moment magnitude -2 to 1			
$0.40 < \sigma_1/\sigma_c < 0.50$	- Major slabbing and damage - Microseismic event with moment magnitude 1 to 2			
$\sigma_1/\sigma_c > 0.50$	- Severe damage - Microseismic event with moment magnitude 2 to 4			

그림 9. 응력 수준에 따른 터널 안정성 및 취성파괴 평가 기준 (after Hoek et al. 1995; Martin et al. 1999)

에 따른 공동 주변의 파괴 기준(Hoek and Brown 1980; Martin et al. 1999)에 따르면 응력 강도비(σ_1/σ_c)가 약 0.15 이상인 지반조건에서 공동 주변 매질에 응력에 의한 취성파괴가 발생하는 것으로 보고되고 있다(그림 9). 국내에도 지역에 따라 100m 이상의 심도 영역에도 높은 수준의 과잉 수평응력장이 분포하고 있으며 암반의 강도 특성도 대부분의 공학적 구조물이 설계, 시공되는 500m 미만 심도에서 일축압축강도 분포가 높은 분산도를 가지는 점을 고려해 볼 때 국내 심도 200m 미만인



(a) Plot of excessive horizontal stress field with $\sigma_1/\sigma_c > 0.15$



(b) Location of excessive horizontal stress region

그림 10. 국내 과잉 수평응력장 분포 지역(심도 : 15m~310m)

영역에도 암반 굴착시 초기응력에 의한 공동 주변의 취성파괴 가능성과 위험성이 항상 잠재되어 있는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 초기응력 측정이 수행된 개별 지역들을 대상으로 굴착시 취성파괴 가능성이 높은 과잉 수평응력 분포지역을 평가하였다. 취성파괴가 유발되는 응력강도 비 기준은 0.15를 적용하였으며 최대 주응력 조건은 국내 수평응력에 대한 분석에서 도출된 최대 축압계수 분포의 상한 경계식을 적용하였다. 암석의 강도 기준은 50m 미만인 경우 50MPa, 50~100m와 100m 이상 영역에서는 각각 60MPa과 70MPa의 강도값을 적용하였다. 상기 설정한 기준을 적용하여 분석한 결과 취성파괴의 잠재적 위험성을 유발할 수 있는 범위는 심도 250m 이하 영역에서는 1.50 이상의 축압계수, 130~250m 심도 구간에서는 2.50, 80~130m 구간에서는 3.50 그리고 80m 미만 심도 영역에서는 약 4.50~5.0 이상의 축압계수를 가지는 응력 수준에 해당하는 것으로 나타났다. 그림 10은 앞에서 제시한 기준으로 구분한 심도별 최대 축압계수 분포 중 과잉 수평응력장에 해당하는 범위와 이를 근거로 평가한 암반 구조물 시공시 취성파괴의 잠재적 위험성을 가지는 지역을 나타낸다. 이 중 강원도 춘천-양구지역에는 넓은 영역에 걸쳐 과잉 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 조사되었다.

5. 결론

본 연구에서 얻어진 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 국내 심도 310m 미만 영역에서 최대 수평응력은 0.9~21.13MPa 범위의 값을 가지며, 최소 수평응력은 0.65~11.51MPa의 값을 가지는 것으로 분석되었다. 최대 수평응력 작용 방향의 경우 절대적으로 우세한 방향성을 나타내지는 않았으나 N70°E~EW 범위에서 상대적으로 높은 빈도를 나타내며 평균

약 N77°E의 값을 가지는 것으로 분석되었다.

- (2) 축압계수는 심도 증가에 따라 분포 범위가 좁아지며 안정화되는 경향을 나타내지만 지역에 따라 200m 이상 대심도 구간에도 3.0에 가까운 축압계수를 가지는 과잉 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 조사되었다.
- (3) 과잉 수평응력 분포지역을 평가한 결과 여러 지역에서 공동 굴착시 응력에 의한 취성파괴의 잠재적 위험성이 있는 것으로 분석되었다. 지금까지는 현장 초기응력 측정 자료가 설계 단계에서 간과되거나 충분히 반영되지 않은 것이 국내 현실이나 암반 구조물의 시공 심도가 100m 이상인 지반 조건에서는 설계의 안전성과 적정성 그리고 시공의 경제성 확보에 직접적으로 영향을 미치는 암반 초기응력의 분포 특성과 구조물에 미치는 영향에 대한 공학적 검토가 심도 있게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 배성호 (2005), 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체 구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원, pp.120-128.
2. Diederichs, M.S. (1999), Instability of hard rockmass : *The Role of Tensile Damage and Relaxation*, Doctorial Thesis, University of Waterloo, Canada, pp.1-13.
3. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), *Underground Excavation in Rock*, The Institute of Mining & Metallurgy, London, pp.183-220.
4. Hoek, E, Kaiser, P.K., Bawden, W.F. (1995), *Support of Underground Excavation in Hard Rock*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp.99-105.
5. Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D. and Steiner, W. (2000), "Underground Works in Hard Rock Tunnelling and Mining", *Proc. of GeoEng2000*, pp.841-926.
6. Lee, M.Y., Haimson, B.C. (1989), "Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, Vol.26, No.6, pp.447-456.
7. Martin, C.D., Kaiser, P. K., and McCreath, D. R. (1999), "Hoek-Brown Parameters for Predicting the Depth of Brittle Failure Around Tunnels", *Can. Geotech. J.*, pp.136-151.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)