

현장 측정에 의한 춘천-양구 산악지역 내 수평응력 분포와 취성파괴 가능성에 관한 연구

배성호^{1)*}, 전석원²⁾

Characteristics of the Horizontal Stress and the Possibility of Stress Induced Brittle Failure in Chuncheon-Yanggu Mountainous Region by the In-situ Stress Measurements

Seongho Bae and Seokwon Jeon

Abstract Current initial rock stress state is one of the key factors required to evaluate the stability and failure around an excavated opening and its importance increases as the construction depth become deeper and the scale of the rock structure become larger. In this paper, the study was performed to evaluate the characteristics of the regional stress state at Chuncheon-Yanggu mountainous region, the East-North part of Kyeonggi Massif. Forty nine field stress measurements in 9 boreholes were conducted at the depth from 20 m to 290 m by hydraulic fracturing method. The fracturing tracing works were carried out by acoustic televiewer scanning. The study results revealed that the different initial rock stress states presented at different formation rock type and the excessive horizontal stress state with stress ratio(K) close to 3.0 was measured at the depth of 200 m and deeper in the intrusive granite body of the study area. The results from the investigation of excessive horizontal stress and its effect on failure mode showed that there exist several points where the localized excessive horizontal stresses are big enough to potentially induce brittle failures around the future openings greater than 100 m in depth within the granite body of the study area.

KeyWords Initial rock stress, Hydraulic fracturing test, Stress ratio(K), Excessive horizontal stress, Brittle failure

초 록 암반 내 작용하는 초기응력은 굴착되는 공동의 안정성이나 파괴 거동을 평가하는데 요구되는 주요 매개변수들 중의 하나이며 그 중요성은 암반 구조물의 시공 심도가 깊어지고 단면 규모가 커질수록 증가하게 된다. 이 논문에서는 경기육괴의 동북부에 위치한 춘천-양구 산악지역의 초기응력 분포 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 현장 초기응력 측정은 연구지역내 9개 개별 시추공을 대상으로 심도 20 m~290 m 구간의 49개소에서 시행되었다. 모든 수압파쇄 균열 조사는 초음파 주사검층을 이용하여 수행하였다. 연구 결과 조사지역 내에서 분포 압중의 차이에 따라 서로 상이한 분포 특성을 나타내는 초기응력장이 관찰되었고 특히 심도 200 m 이상의 관입 화강암체내에는 3.0에 가까운 축압계수를 가지는 높은 수준의 과잉 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 분석되었다. 그리고 조사지역내에서 초기응력 조건에 의한 취성파괴 가능성을 평가한 결과 화강암 분포 지역내 심도 100 m 이상인 영역에서는 굴착된 암반 구조물 주변에서 취성파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

핵심어 암반 초기응력, 수압파쇄시험, 축압계수(K), 과잉 수평응력, 취성파괴

1. 서 론

한반도는 지질학적으로 선캄브리아기에서 신생대에 걸친 다양한 지질시대의 지층들이 분포하고 있으며 남

쪽에서 북쪽으로 갈수록 지질연대가 오래된 경향을 나타낸다. 현재의 지형상태는 백악기말 또는 신생대 제 3기말에 걸친 대규모 조산운동에 따른 것으로 알려져 있으며 지질특성은 추가령 지구대를 경계로 남, 북지역이 상이한 차이를 나타낸다. 추가령 지구대를 경계로 남쪽에 위치한 한국은 지질학적으로 경기육괴, 옥천습곡대, 영남육괴, 경상분지, 연일분지 등 5개의 지체구조구(tectonic province)로 구분되며 이들 중 분포 면적에서 경기육괴가 가장 큰 영역을 차지하고 있다.

¹⁾ 정희원, (주) 지오제니 컨설팅트 이사

²⁾ 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수

* 교신저자 : shbae007@geogeny.biz

접수일: 2005년 4월 15일

심사 완료일: 2005년 4월 22일

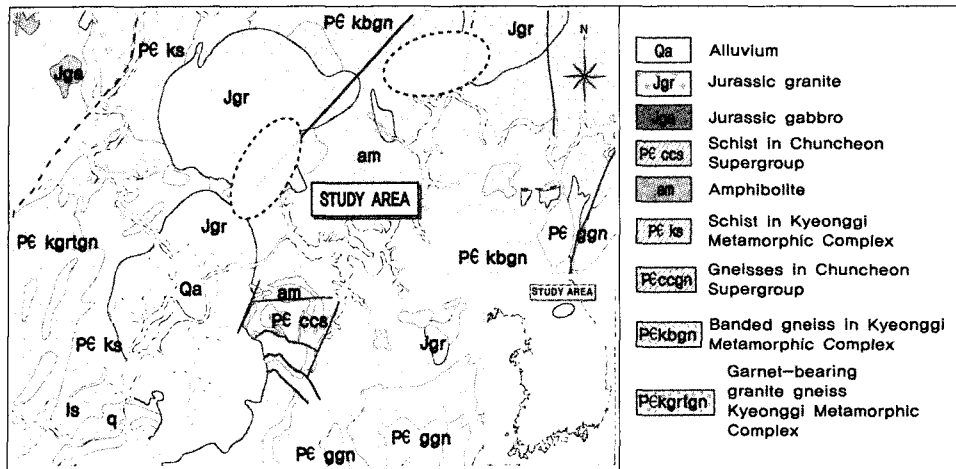


Fig. 1. Geological map of the study area(Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

이 논문의 연구 영역인 춘천-양구 산악지역은 경기육괴의 북동쪽 지역으로 강원도 춘천시 신북읍에서 강원도 양구군 남면에 이르는 험준한 산악지형에 해당한다. 본 지역은 일부 저지대를 제외하고 대부분 해발 고도 300 m~700 m의 산악으로 산계와 수계의 구별이 뚜렷하게 나타난다. 지질 특성으로는 선캠브리아기 호상편마암, 편암류 및 함석류석 편암암을 기저로 하여 중생대 화강암을 위주로 그 외에 산성, 염기성 맥암류가 불규칙하게 관입 분포하고 있다(Fig. 1).

본 연구에서는 현장 수압파쇄시험을 통해 측정된 초기응력 자료를 바탕으로 춘천-양구 산악지역 내에 형성되는 있는 초기응력의 전반적인 분포 특성을 분석하였으며 기반암인 편마암과 관입암인 화강암 분포지역의 자료 비교를 통해 상이한 지질 이력을 가진 두 암종 내에서의 초기응력장 분포 범위를 파악하였다. 본 연구지역은 공식적으로 보고되지는 않았으나 이전 수행된 현장시험에서 과잉 수평응력이 측정되었기 때문에 자료 해석을 통해 과잉 수평응력장 분포 가능성의 분석에 주안점을 두었다. 그리고 분석 결과를 바탕으로 두 암종이 분포하는 영역에서 축압계수의 분포 경계식들을 제안하였다. 마지막으로 초기응력 분포 특성 결과와 분포암종의 강도 특성 분석 결과를 이용하여 응력 강도비를 산정하였고 이를 근거로 조사지역내에서의 암반 구조물 굴착시 취성파괴 가능성을 평가하였다.

2. 현장시험 및 자료해석

2.1 현장시험 개요 및 측정 시스템

연구지역 내에서 세부 영역은 A, B 조사지역으로 구분된다(Fig. 2). 현장시험이 수행된 영역은 선캠브리아

기 기반암과 중생대에 관입한 화강암류가 함께 분포하는 지역에 해당한다. A 조사지역에서는 편마암 분포지역 내 2개 시추공, 화강암 분포지역 내 1개 시추공 등 3개소, B 조사지역에서는 편마암 분포지역 내 5개 시추공과 화강암 분포지역의 1개 시추공 등 6개소에서 초기응력 측정을 시행하였다. 시험이 진행된 전체 49개 구간들 중 정상적인 시험이 완료된 35개소 자료만 초기응력 분석에 직접적으로 적용하였다.

현장 조사는 수압파쇄법에 의해 수행되었으며 측정시스템은 국내 지형에 적합하도록 설계, 제작된 엔진 구동방식의 유압-와이어 라인 시스템을 이용하였다. 수평응력 방향성 해석을 위한 수압파쇄 균열 조사에는 결과의 정밀도가 높고 가시화된 자료를 얻을 수 있는 초음

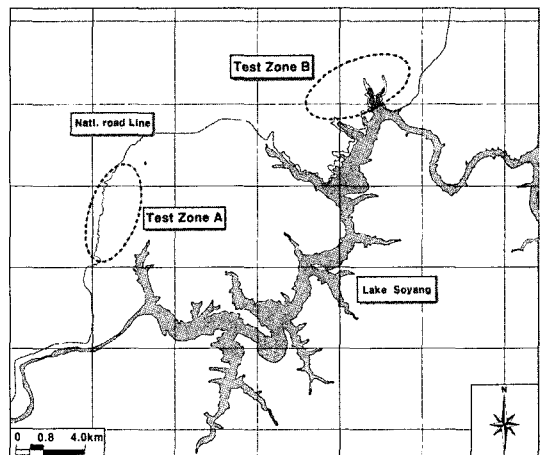
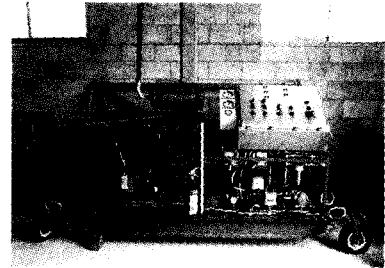
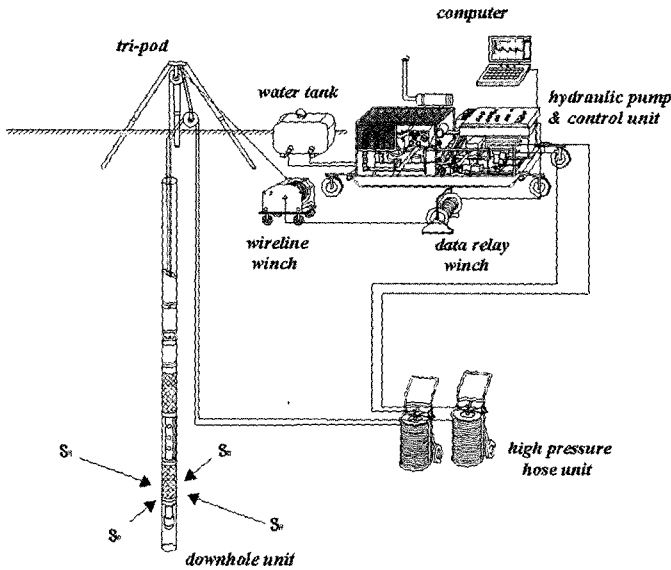
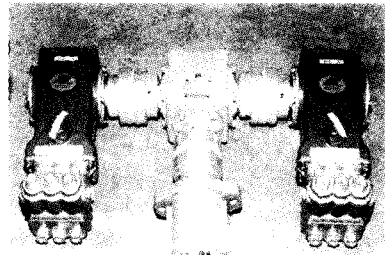


Fig. 2. Location map of the study area(Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)



- main frame -



- triplex water pump -

Fig. 3. Schematic diagram of hydraulic fracturing testing system

파 주사검층법을 적용하였다. Fig. 3은 시스템 모식도와 주요부 모습을 나타낸다.

2.2 자료 해석

현장 수압파쇄시험에서 얻어지는 초기응력에 대한 정보는 크게 수평응력 성분의 크기와 최대 수평응력의 방향성에 대한 자료로 구분된다. 수평응력의 산정에 적용되는 압력변수인 균열 폐쇄압력과 균열 개구압력값은 많은 경우 압력 변화나 전이점이 불분명하게 나타난다. 이러한 자료 조건에서 정확한 최적 압력변수값들을 결정하기 위해서는 주관적인 요소를 내포하고 있는 도해적 방법보다는 통제적 기법을 적용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 자료 처리 과정에 Lee and Haimson (1989)과 Lee(1991)에 의해 제안된 비선형 회귀분석(NLRA, Non-Linear Regression Analysis)기법을 적용하여 압력변수값들을 결정하였다. 모든 균열 형상 및 방향성 정보는 초음파 주사검층 결과를 이용하여 도출하였다. 응력 해석은 다른 수압파쇄이론들에 비해 공학적 적용성과 정확성이 큰 탄성모델을 바탕으로 수행하였다. 균열 폐쇄압력은 지수 압력감쇠법(exponential pressure decay method), 이중선형 압력감쇠 속도법(bilinear pressure decay rate method)과 압력-유량법(P-Q method)을 적용하였으며 균열 개구압력의 결정에는 이중 선형법(P-V bilinear method)을 위주로 도해적 중첩법(graphical superposition method)을 부분적으로 적용하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 현장 수압파쇄시험에서 실측된 압력

유량 이력곡선과 압력변수 결정 사례들 중 일부를 나타낸다.

균열 형상 및 방향성 측정 자료에서 유도된 인장균열의 주향은 최대 수평응력의 작용 방향을 나타낸다. 조사지점에서의 균열 특성 자료들은 최대 수평응력의 방향성 추정뿐만 아니라 수압파쇄시험의 적정성 여부를 판단하는데 사용될 수 있다. 초기응력의 방향성 자료들은 많은 경우 조사지역의 초기응력장 분포 특성을 규명하는데 있어 초기응력 크기보다 더 많은 공학적, 지질

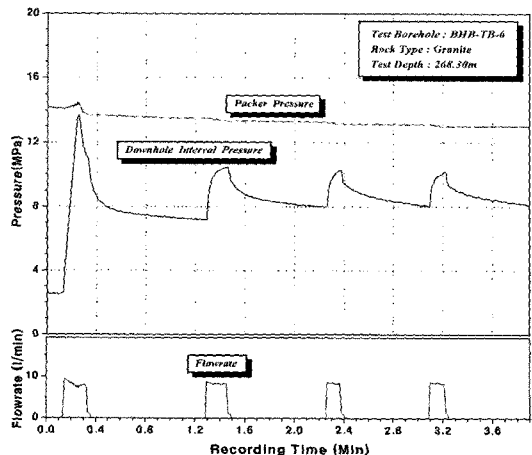


Fig. 4. Example of pressure-flowrate-time curve measured in the study area

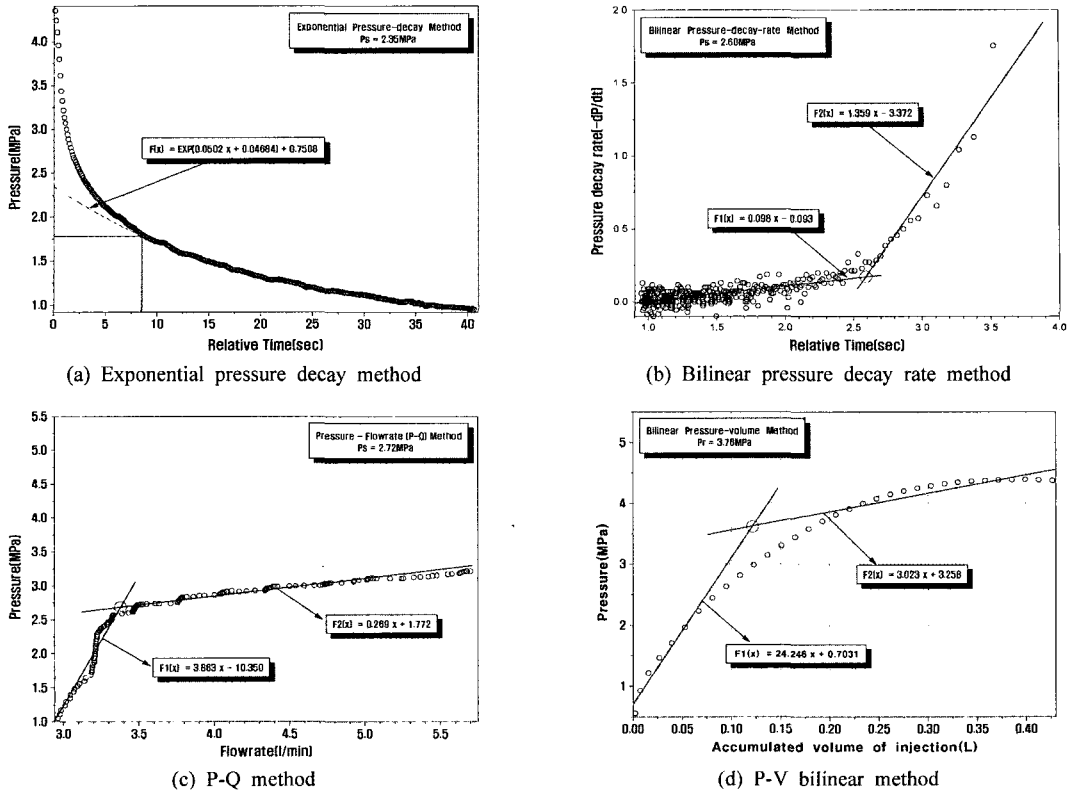


Fig. 5. Determinations of pressure parameters

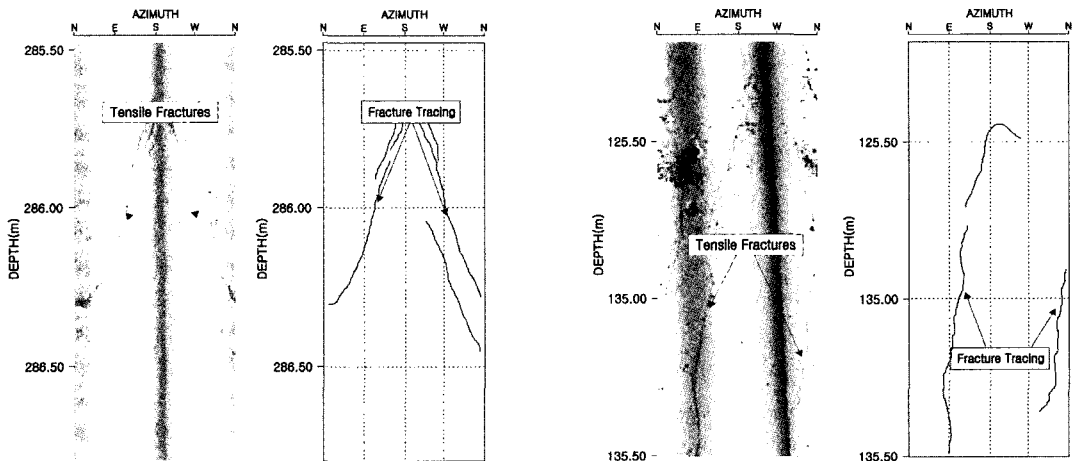


Fig. 6. Fracture tracing results for determination of the maximum horizontal stress orientation by borehole scanning tools (granite region in the test zone A)

학적 정보를 제공할 수 있다(배성호 외, 2002). 일반적으로 수직공의 조사구간 내에 기존 불연속면이 존재하지 않고 수직 성분이 주응력 성분의 하나인 조건에서 수압파쇄에 의해 유도되는 인장균열은 암반에 작용하는 최대 수평응력의 방향으로 공벽에 수직하게 형성되

며 균열의 경사각이 70° 이상인 경우 준수직 균열로 간주된다. 본 연구에서는 측정된 균열 특성 자료들 중 70° 이상의 경사각을 가지는 균열들만 방향성 해석에 이용하였다. Fig. 6은 본 조사지역 내에서 수압파쇄시험 후 측정된 균열 추적(fracture tracing) 결과들 중 일부 사

례들을 나타내는데 균열이 대칭적으로 거의 수직에 가까운 형태로 형성되어 있음을 알 수 있다.

3. 조사지역의 초기응력장 분포 특성

3.1 수평응력 분포 및 방향성

심도 20 m~135 m 구간에서 현장시험이 수행된 편마암 분포지역에서는 최대, 최소 수평응력은 각각 2.01 MPa~9.61 MPa, 1.77 MPa~5.93 MPa 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 그리고 관입암인 화강암 분포지역에서는 50 m~290 m 심도 영역에서 조사가 수행되었으며 최대, 최소 수평응력은 각각 3.42 MPa~21.13 MPa, 2.97 MPa~11.51 MPa 범위에 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 본 연구지역에서 측정된 수평응력 성분들의 심도별 분포를 나타낸다. 편마암 지역에 비해 화강암 지역에서 획득된 초기응력 자료의 수가 상대적으로 작아 대표성을 가지기에는 다소 부족한 면이 있으나 심도별 수평응력장성분의 크기는 편마암 지역과 화강암 지역에서 서로 상이한 분포 양상을 나타내는 것으로 분석되었다. 두 암종간 초기응력의 분포 특성이 상이하고 전체 자료의 수가 충분하지 않아 선형 회귀분석에 의한 응력과 심도간의 상관성 평가는 수행하지 않았다. 편마암 분포지역의 경우 화강암에 비해 낮은 수평응력을 나타내며 심도가 증가할수록 두 암종간의 수평응력 편차는 증가하는 경향을 나타내었다. 본 연구지역의 구조 지질적 특성, 즉 기저인 편마암을 관입하여 화강암이 분포하는 지층구조를 고려해 볼 때 하부 지층을 형성하는 화강암체 내에는 관입운동 당시의 지체응력 성분이 잔류되어 상부 편마암지역에 비해 상당히 높은

크기의 수평응력장이 형성되어 있고 심도가 증가함에 따라 축압계수 성분이 감소되는 것이 아니라 오히려 증가되는 양상을 나타내었다.

Fig. 8은 최대 수평응력의 심도별 분포와 방위각별 분포 히스토그램을 나타낸다. 최대 수평응력의 방향성은 두 암종 분포지역 자료들을 모두 고려하면 평균 작용 방향은 진북 기준 약 86°(N86°E)의 방향성을 나타낸다. 편마암 분포지역의 경우 최대 수평응력이 A 조사지역에서는 86°~124° 범위에 분포하고 평균적으로 약 100°(N80°W)의 방향성을 보이고, B 조사지역에서는 74°~125° 범위에서 평균값은 95°(N85°W)를 나타내어, 두 지역 모두 최대 수평응력이 ENE~WNW의 방향성을 가지는 것으로 분석되었다. 따라서 기저를 형성하는 편마암 지층에서는, 조사구간에 따라 어느 정도의 이방성을 보이겠지만, EW 방향의 초기응력장이 우세하게 형성되어 있는 것으로 예측되었다. 그리고 편마암 분포지역 내에서 최대 수평응력의 방향성은 세부 암종의 차이와 구역에 따라 비교적 큰 편차를 나타내는 열리구조의 방향성과는 상관성이 적은 것으로 조사되었다.

편마암 분포지역에서 최대 수평응력 성분이 유사한 방향성을 가지는데 비해 화강암 분포지역에서는 두 조사지역이 상이한 결과를 나타내었다. A 조사지역의 경우 104°(N76°W)의 평균 방향성을 가져 편마암 지역과 거의 유사한 방향성을 보이지만 B 조사지역에서는 평균 24°(N24°E)로 두 조사지역간에 큰 편차를 나타내었다(Fig. 9). 이러한 동일한 암종 분포지역에서 나타나는 초기응력 방향의 이방성 발생 원인으로는 지형적 요소, 지체운동, 대규모 불연속면 분포 등이 있으나 본 연구지역 내 화강암 분포지역의 경우 초기응력의 측정이 수

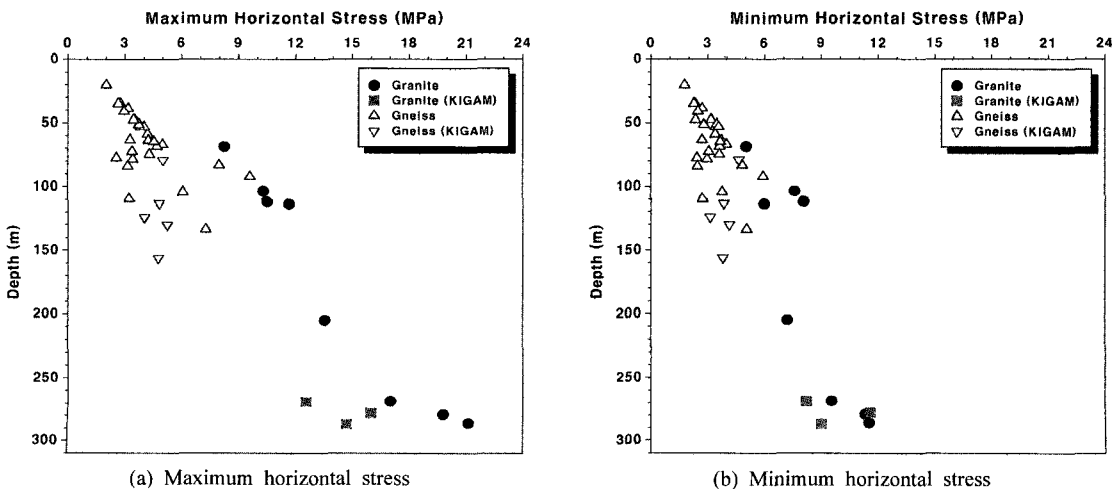


Fig. 7. Distribution of the horizontal stress components with depth in the study area(Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

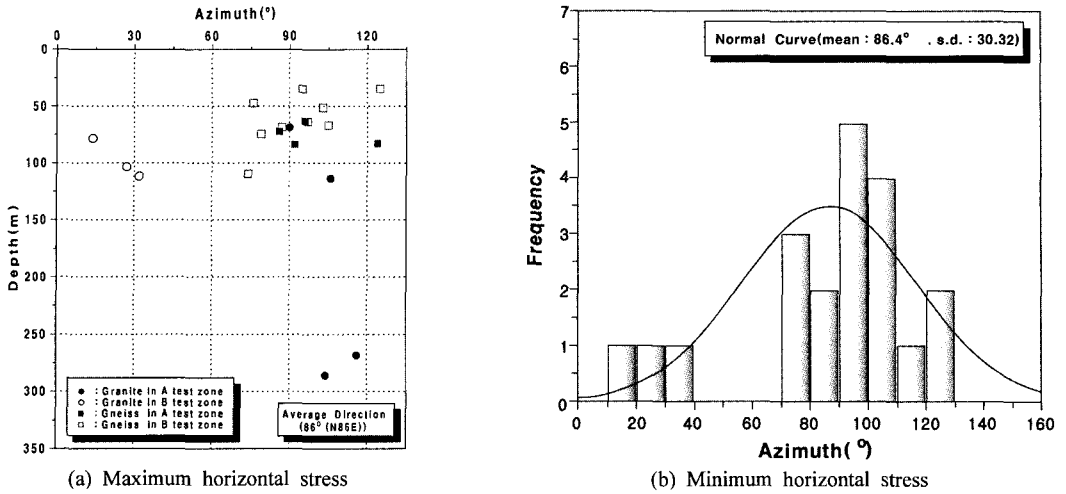


Fig. 8. Characteristics of the maximum horizontal stress orientation in the study area(Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

행된 심도와 불연속면의 분포 특성 그리고 지질 이력 등을 바탕으로 추정해 볼 때 중생대 조산운동으로 관입한 화강암체의 관입 방향이 현재의 응력장 방향성에 영향을 미친 가장 큰 요인인 것으로 추정된다. 그러나 보다 상세한 원인 규명을 위해서는 추가적인 조사 자료의 축적과 지질이력을 고려한 공학적 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 축압계수 분포 및 심도별 변화

조사지역의 초기응력장 특성 분석에는 초기응력의 크기도 중요하지만 이 보다는 초기응력 비를 의미하는 축

압계수 성분이 초기응력 분포 특성을 공학적으로 평가하는데 더 유용한 지침으로 사용될 수 있다. 본 연구지역 내에서의 축압계수는 수평응력 성분 자료에 나타난 바와 같이 편마암 지역과 화강암 지역이 서로 상이한 분포 특성을 나타낸다. 편마암 분포지역의 경우 평균 축압계수 분포 범위는 1.10~3.44로 나타났으며 최대 축압계수는 1.40~3.88 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 화강암 분포지역의 경우 평균 축압계수와 최대 축압계수는 각각 1.84~3.21, 2.35~4.46 범위의 값을 가지는 것으로 조사되었다. Fig. 10은 심도별 평균 축압계수와 최대 축압계수의 분포 양상을 나타낸다. 편마암 분포지역에서는 심도 증가에 따라 축압계수가 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내는 반면 화강암 분포지역의 경우 편마암 분포지역에 비해 높은 범위의 축압계수가 분포할 뿐만 아니라 심도에 따라 감소율도 작게 나타나며 250 m 이상의 대심도 영역에서는 역전되어 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 4.11은 심도별 평균 및 최대 축압계수 자료로부터 분석한 편마암과 화강암 분포지역 내 축압계수의 상, 하한 경계를 보여준다. 편마암의 경우 상, 하한 모두 경계식의 도출이 가능하였으나 화강암 지역에서는 100 m 상부 영역의 자료 부족으로 상한 경계식만 산정이 가능하였다. 식 (1)~식 (4)는 그 결과들을 나타낸다. 화강암 분포지역의 경우 상한 경계식이 편마암 분포지역에 비해 높은 영역에 위치하는데 이는 동일한 심도에서 큰 수평응력장의 분포 가능성이 큼을 직접적으로 의미한다. 예측된 분포 영역 경계에 대한 자료는 절대적인 의미를 가질 수는 없지만 동일한 지질이력과 유사한 암반 분포를 가지는 본 연구지역이나 인근지역 내에서는 상

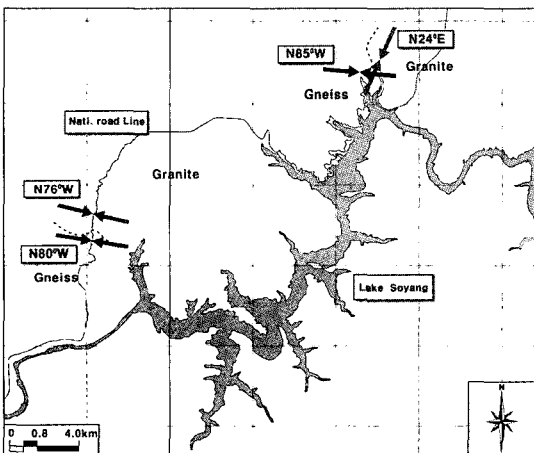


Fig. 9. Plot of average orientation of the maximum horizontal stress at the two test zones in the study area(Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

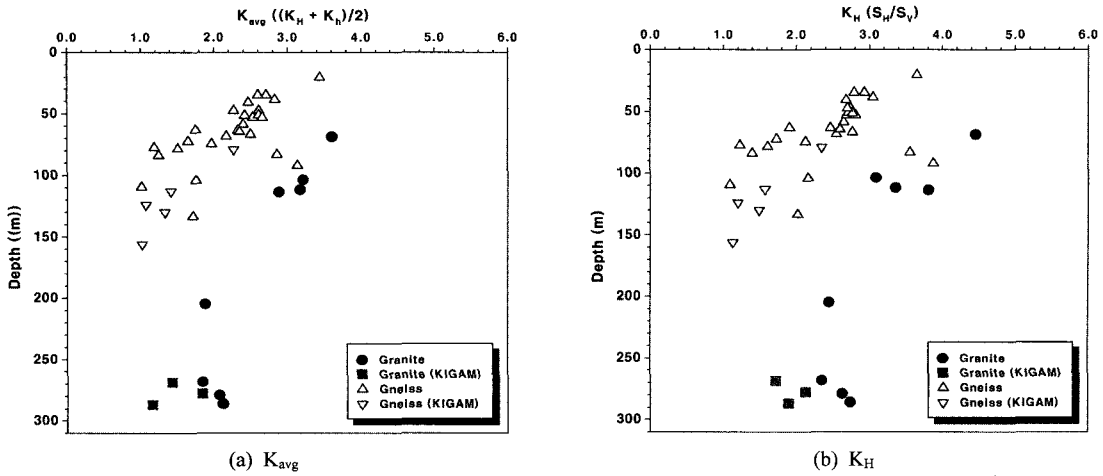


Fig. 10. Distribution of the stress ratio(K) with depth in the study area(Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

이한 특성을 보이는 암종별 초기응력장의 분포 영역을 추정하거나 암반 구조를 설계시 기본 자료로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$\frac{15}{z}(m) + 0.90 < K_{GN-avg} < \frac{275}{z}(m) + 0.10 \text{ (depth < 160m)} \quad (1)$$

$$\frac{25}{z}(m) + 0.85 < K_{GN-H} < \frac{310}{z}(m) + 0.50 \text{ (depth < 160m)} \quad (2)$$

$$K_{GR-avg} < \frac{170}{z}(m) + 1.75 \text{ (depth < 300m)} \quad (3)$$

$$K_{GR-H} < \frac{200}{z}(m) + 2.20 \text{ (depth < 300m)} \quad (4)$$

여기서,

z : 지표면으로부터의 심도(m)

K_{GN-avg} , K_{GN-H} : 편마암 분포지역에서의 평균, 최대 축압계수

K_{GR-avg} , K_{GR-H} : 화강암 분포지역에서의 평균, 최대 축압계수

3.3 조사지역내 과잉 수평응력장 분포 특성

현장시험 자료에 대한 분석을 통해 도출된 수평응력 성분의 분포 특성 자료들을 근거로 추정해 볼 때 화강암 지역 내 심도 100 m 이상의 대심도 영역에는 편압, 편마암류로 형성된 기반암을 관입하여 형성된 암체 내에 지체운동(tectonic movement) 당시 유도된 큰 고 응력장(paleostress field) 성분이 크게 소실되지 않고 잔류되어 있을 가능성이 큰 것으로 예측된다. 그리고 이러한 점이 현재 높은 수준의 과잉 수평응력장을 형성시킨 주원인인 것으로 판단된다. 앞에서 논의한 직접적인 초기응력 측정 자료 외에 A, B 조사지역의 화강암 분포 영역에서 수행된 현장시험에서 반복적으로 발생된 스

트래들 패커의 파열 현상과 B 조사지역의 화강암체로부터 회수된 코어에서 관찰된, 과잉수평응력의 하나의 지표가 될 수 있는, 코어 디스킹(core disking) 현상 등이 현재의 초기응력 상태를 설명하는 공학적인 증거 자료가 될 수 있다. 지금까지 언급한 직, 간접적인 자료들을 바탕으로 현재의 초기응력장 분포 특성을 분석해보면 본 조사지역 내 화강암 분포지역의 경우 200 m 이하 심도에서도 3.0에 가까운 높은 축압계수를 가지는 과잉 수평응력장이 형성되어 있으며 300 m 이상의 영역에도 이러한 과지압 상태가 계속 유지될 가능성이 매우 큰 것으로 예상된다.

4. 과잉 수평응력에 의한 취성파괴 가능성 분석

4.1 취성파괴 평가 기준

지하 암반 구조물의 불안정한 거동들은 일반적으로 저심도의 경우 불연속면 거동 특성에 따른 파괴 그리고 대심도 영역에서는 초기응력에 의한 취성파괴(stress induced brittle failure)가 주 요인으로 알려져 왔다 (Diederichs, 1999; Kaiser et al., 2000). 굴착 공동 주변 암반에서 발생하는 취성파괴 현상은 굴착 공동의 전체적인 파괴를 유발하지는 않으나 주변 암반의 국부적 파괴뿐만 아니라 1차 지보재의 손상과 파괴, 추가적 보강작업과 공정 지연 등 시공의 큰 장애 요인으로 작용한다(배성호, 2005). 이러한 취성파괴는 현지 암반의 초기응력, 강도조건 그리고 굴착 단면의 형태에 영향을 받으며 특히 암반 초기응력과 강도조건에 절대적인 영향을 받게 된다. 현장자료에 대한 연구를 근거로 제시된 초기응력 최대 성분(σ_1)의 암석 단축압축강도(σ_c)에 대한 비인 응력 강도비에 의한 공동 주변의 취성파괴

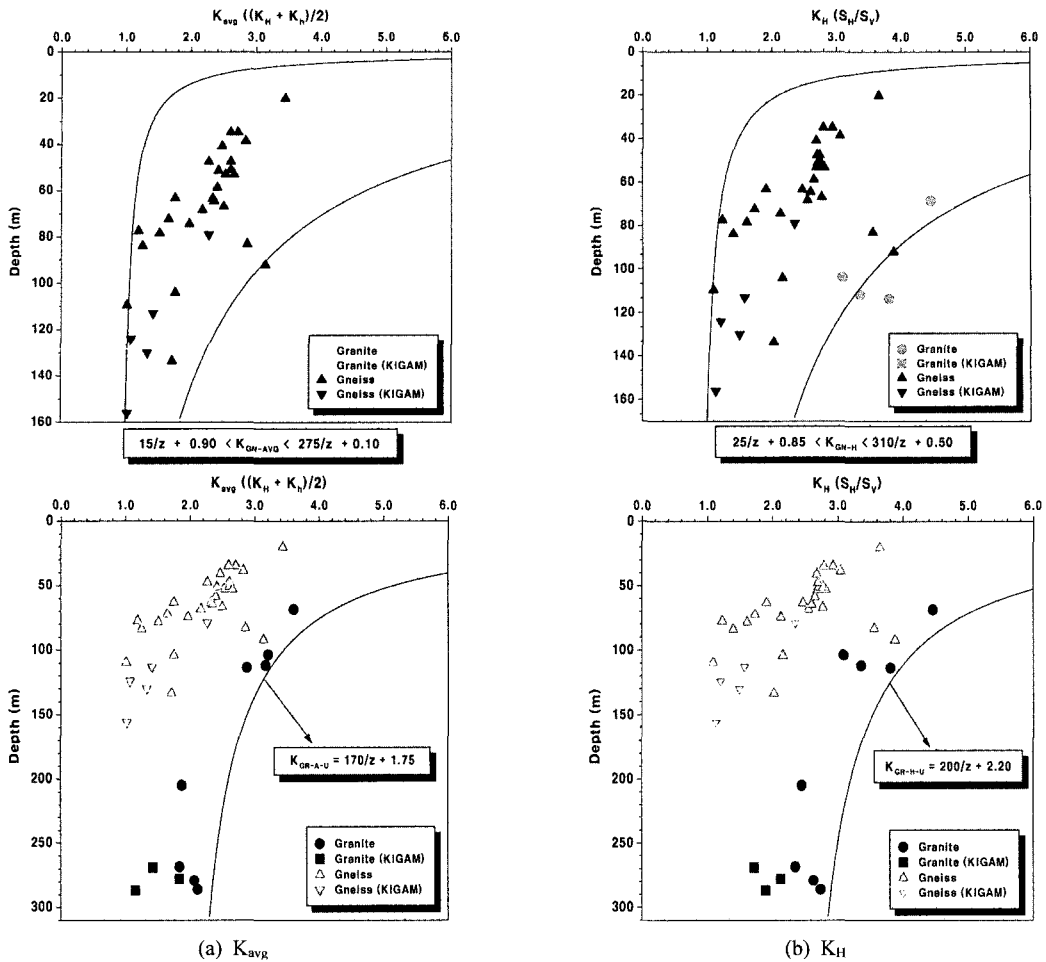


Fig. 11. Boundary of the stress ratio(K) distribution with depth at the gneiss and granite region in the study area (Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

기준(Hoek et al., 1995; Martin et al., 1999)에 따르면 응력 강도비가 약 0.15 이상인 지반 조건에서 공동 주변의 암반에 초기응력에 의한 취성파괴가 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Fig. 12). 이 기준에 근거하여 본 논문에서는 취성파괴에 개시되는 응력 강도비 값으로 0.15를 적용하였다.

4.2 연구지역 내 분포 암석의 강도 특성

연구지역 내에서의 지하 암반구조물 굴착시 잠재적으로 발생할 수 있는 취성파괴를 평가하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 초기응력의 최대 성분과 암석의 단축압축강도에 대한 정보가 요구된다. 연구지역 내 주변포 암종인 편마암과 화강암의 강도 특성 자료는 암반 구조물의 설계를 위한 지반조사 단계에서 수행된 실내 시험 결과에 대한 분석으로부터 도출하였다. 조사지역

내 18개의 개별 시추공에서 회수된 45개 암석시료를 대상으로 시행된 단축압축시험 결과 중 불연속면의 영향을 받거나 비정상적인 값이 측정된 결과는 제외하고 38개 강도값만 분석에 이용하였다. Fig. 13은 연구지역 내에 분포하는 편마암과 화강암의 단축압축강도 특성을 나타낸다. 두 암종 모두 심도가 증가함에 따라 변화의 폭은 감소하나 100 m 이상의 대심도 영역에도 강도 변화의 폭이 비교적 넓게 나타남을 알 수 있으며 300 m 이내 심도 영역에서는 심도 증가에 따른 암석의 강도 증가 양상은 나타나지 않았다. 평균값의 경우 편마암이 124.4 MPa로 111.0 MPa의 평균값을 가지는 화강암에 비해 10% 정도 높은 값을 나타내는 것으로 분석되었다.

4.3 연구지역 내 굴착시 취성파괴 가능성 평가

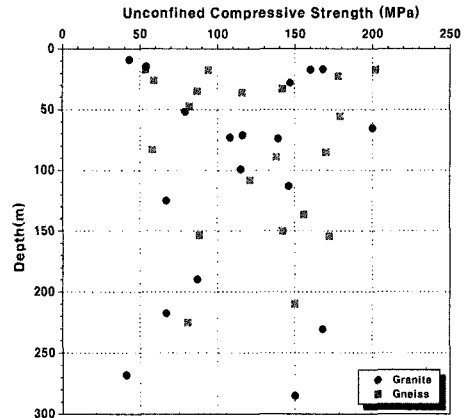
현장 초기응력 측정 자료에 대한 분석에서 도출된 최

	Massive (GSI 75)	Moderately Fractured (50 GSI ~ 75)	Highly Fractured (GSI 50)	
Low In-Situ Stress ($\sigma_1, \sigma_2 < 0.15$)	 Linear elastic response	 Failure or sliding of blocks and wedges	 Unravelling of blocks from the excavation surface	$(1.0) > (1.0)$
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 < \sigma_1, \sigma_2 < 0.4$)	 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	$0.4 > (1.0) > (1.0) > (1.0)$
High In-Situ Stress ($\sigma_1, \sigma_2 > 0.4$)	 Failure Zone Brittle failure around the excavation	 Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks	 Squeezing and swelling rock, Elastic-plastic continuum	$(1.0) > (1.0) > (1.0)$

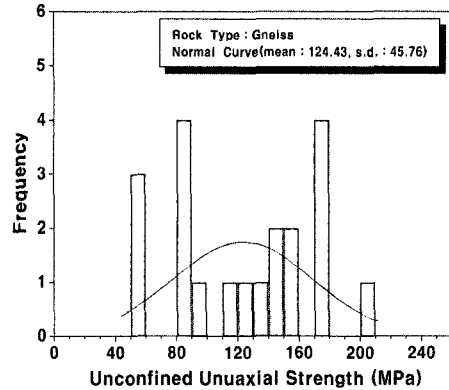
$\sigma_1/\sigma_2 < 0.15$	- Elastic response
$0.15 < \sigma_1/\sigma_2 < 0.30$	- Minor spalling - Microseismic event with moment magnitude -6 to -2
$0.30 < \sigma_1/\sigma_2 < 0.40$	- Minor slabbing and damage - Microseismic event with moment magnitude -2 to 1
$0.40 < \sigma_1/\sigma_2 < 0.50$	- Major slabbing and damage - Microseismic event with moment magnitude 1 to 2
$\sigma_1/\sigma_2 > 0.50$	- Severe damage - Microseismic event with moment magnitude 2 to 4

Fig. 12. Tunnel instability and brittle failure mode by stress level(after Hoek et al., 1995)

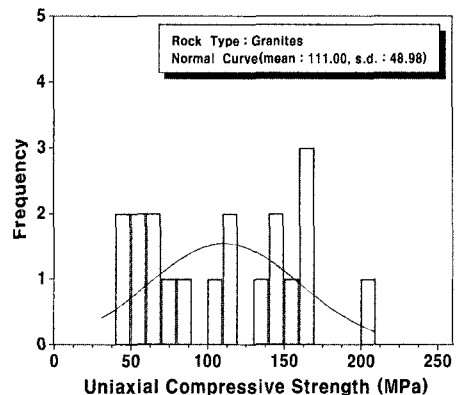
대 축압계수 분포의 상한 경계식과 실제 시험에서 측정된 편마암과 화강암의 단축압축강도 값을 이용하여 심도 300 m 이내 영역에서의 암반 구조물 굴착시 취성 파괴 가능성을 평가하였다. 취성파괴가 개시되는 응력 강도비는 앞에서 언급한 Hoek et al.(1995)이 제시한 기준에 근거하여 0.15를 적용하였다. Fig. 14는 초기응력에 의한 취성파괴 평가의 지표로 이용되는 응력 강도비의 암종별, 심도별 분포 양상과 취성파괴 가능성에 대한 평가 결과를 도시적으로 보여준다. 편마암 분포지역의 경우 일부 영역에서 0.15에 근사한 값을 나타내나 대부분 0.15 이하의 응력 강도비를 가지는 것으로 분석되었다. 이에 비해 화강암 분포지역의 경우 심도 100 m 미만 영역에서는 0.15 미만의 값을 가지나 심도가 100 m 이상으로 증가함에 따라 여러 영역에서 0.15~0.40 범위의 값을 가지는 것으로 평가되었다. 본 화강암 분포지역 내 100 m 이상 심도 영역은, 굴착시 취성파괴를 유발할 수 있는, 중간 수준에서 높은 수준의 초기응력 (intermediate~high in-situ stress) 범주에 속하는 것으로 분석되었다. 본 연구지역과 같이 대심도 영역에 과



(a) Distribution of uniaxial compressive strength for gneiss and granite



(b) Histogram of UCS for gneiss



(c) Histogram of UCS for granite

Fig. 13. Characteristics of rock strength in the study area (Chuncheon-Yanggu, Kangwon-do)

지압이 형성되어 있는 지반조건에서는 굴착에 의해 공동이 형성되는 경우 공동 주변 암반의 파괴 및 변형거

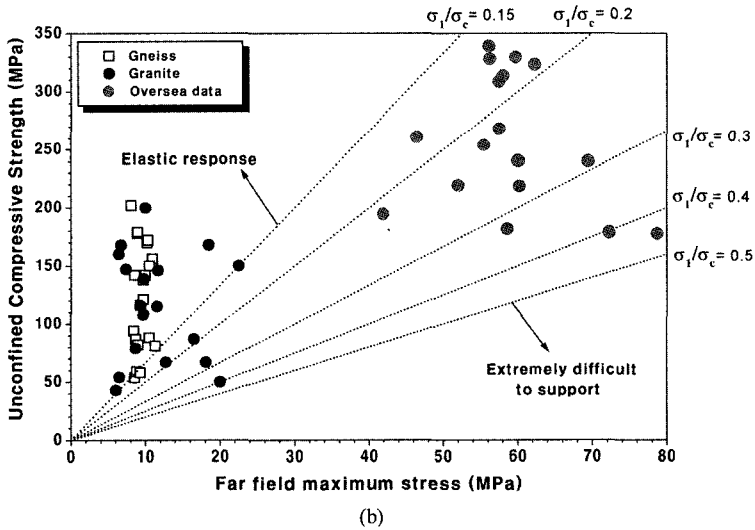
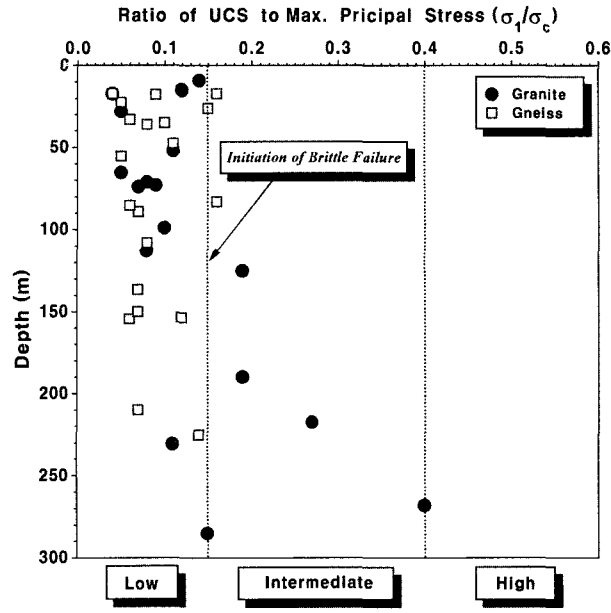


Fig. 14. Possibility of the stress induced brittle failure for future openings in the study area

동과 이에 따른 구조물의 안정성은 암반 상태에 따라 초기응력 조건에 절대적인 영향을 받게 된다. 이와 같은 과지압 조건에서 발생될 수 있는 암반의 잠재적 불안정 거동으로는 내부 균열 형성에 의한 파열음(popping) 발생, 굴착면 주변 암반이 판상으로 분리되는 슬래빙(slabbing)과 굴착면에서 발생된 균열들이 성장, 결합되어 분리 박탈되어 떨어지는 스폐링(spalling) 현상, 그리고 아주 큰 응력수준에서 축적된 변형률 에너지의 급격한 방출로 유발되는 록버스팅(rockbursting) 등의 직접

적인 파괴 현상과 기존 불연속면에 의해 형성된 암반 블록의 급격한 돌출이나 미끄러짐 등 간접적 파괴 현상들이 있다. 본 연구지역 내 심도 100 m 이상의 대심도 화강암체 내에 향후 암반 구조물이 설계, 시공되는 경우 설계의 안전성과 적정성 그리고 시공의 경제성을 확보하기 위해서는 현지 암반 내 형성된 과잉 수평응력 상태와 암반 조건에 대한 상세한 조사와 함께 취성파괴 가능성과 특성에 대한 정밀한 공학적 분석이 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

경기육괴의 북동부에 위치한 춘천-양구 산악지역에서 수행된 현장 수압파쇄시험 결과에 대한 분석으로 얻어진 주요 내용들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 심도 20 m~135 m 구간에서 현장시험이 수행된 편마암 분포 지역에서는 최대, 최소 수평응력은 각각 2.01 MPa~9.61 MPa, 1.77 MPa~5.93 MPa 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 그리고 관입암인 화강암 분포지역에서는 50 m~290 m 심도 영역에서 조사가 수행되었으며 최대, 최소 수평응력은 각각 3.42 MPa~21.13 MPa, 2.97 MPa~11.51 MPa 범위에 분포하는 하는 것으로 나타났다.
- 2) 편마암 지역의 경우 화강암에 비해 낮은 수평응력을 나타내며 심도가 증가할수록 두 암종간의 수평응력 편차는 증가하는 경향을 나타내었다. 이 지역의 구조지질적 특성, 즉 기저인 편마암을 관입하여 화강암이 분포하는 지층구조를 고려해 볼 때 하부 지층을 형성하는 화강암체 내에는 관입운동 당시의 지체응력 성분이 잔류되어 상부 편마암지역에 비해 상당히 높은 크기의 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 분석되었다.
- 3) 편마암지역에서 평균 축압계수 분포 범위는 1.10~3.44로 나타났으며 최대 축압계수는 1.40~3.88 범위에 분포하는 것으로 분석되었다. 화강암 지역의 경우 평균 축압계수와 최대 축압계수는 각각 1.84~3.21, 2.35~4.46 범위의 값을 가지는 것으로 조사되었다. 편마암 지역에서는 심도 증가 따라 축압계수가 뚜렷하게 감소하는 경향을 나타내는 반면 화강암 분포 지역의 경우 편마암 지역에 비해 높은 범위에 축압계수가 분포할 뿐만 아니라 심도에 따라 감소율도 작게 나타나며 250 m 이상의 대심도 영역에서는 다시 증가하는 경향을 나타내었다.
- 4) 초기응력 분석 결과와 분포 압중의 강도 특성 분석

결과를 근거로 조사지역내에서 암반 구조물 굴착시 취성파괴 가능성을 평가하였다. 그 결과 화강암지역에서는 심도 100 m 이상인 여러 영역에 중간 수준에서 높은 수준 범위의 응력 강도비를 가지는 지반 조건이 형성되어 있어 굴착시 취성파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 지금까지는 현장 초기응력 측정 자료가 설계 단계에서 간과되거나 충분히 반영되지 않은 것이 국내 현실이나 본 연구지역과 같이 높은 수준의 과잉 수평응력장이 확인된 지역의 경우 암반 구조물 설계의 안전성과 적정성 그리고 시공의 경제성을 확보하기 위해서는 암반 초기응력의 분포 특성과 구조물에 미치는 영향에 대한 공학적 검토가 심도 있게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 배성호, 전석원, 최용근, 김학수, 2002, 수압파쇄시험에 의한 산악지역에서의 현지 암반 초기응력 측정 및 분포특성 연구, 한국터널공학회지, 4.1, 57-70.
2. 배성호, 2005, 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
3. Diederichs, M.S., 1999, Instability of hard rockmass: The role of tensile damage and relaxation, Doctoral Thesis, University of Waterloo, Canada.
4. Hoek, E, Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1995, Support of underground excavation in hard rock, A.A. Balkema, Rotterdam.
5. Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D., Steiner, W., 2000, Underground works in hard rock tunnelling and mining, Proceedings of GeoEng2000, Melbourne, Australia, November 19-24, 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. Abst. 26, No. 6: 447-456, Pergamon Press.
7. Lee, M.Y., 1991, Advances in instrument, data analysis, and calculation in hydraulic fracturing, Doctoral Thesis: 55-79, University of Wisconsin-Madison.
8. 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., 136-151.

배 성 호



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사
 1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과 석사
 2005년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사
 Tel: 02-3472-2261
 E-mail: shbae007@geogeny.biz
 현재 (주) 지오제니 컨설턴트 이사

전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
 Tel: 02-880-8807
 E-mail: sjeon@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수