

## 현장 측정을 통한 경상분지의 천부 초기응력장 특성에 관한 연구

배성호<sup>1)\*</sup>, 전석원<sup>2)</sup>, 김재민<sup>3)</sup>, 김장순<sup>4)</sup>

### Characteristics of the Regional Rock Stress Field at Shallow Depth in the Kyungsang Basin with In-situ Rock Stress Measurements

Seongho Bae, Seokwon Jeon, Jaemin Kim, Jangsoon Kim

**Abstract** It is nearly impossible to estimate the exact state of the current rock stress of interest site by the theoretical and physical approaches except some specific geological situations. This means that in-situ stress measurement is a unique way to obtain reliable information on rock stress especially for civil and mining engineering related problems. Since late in the 90's, in-situ rock stress tests have been widely conducted to provide the quantitative information on the stress state of engineering site at the design stage of an underground rock structure in the Kyungsang Basin, Korea. The study area is the near surface regions at the depth less than 300 m in the Kyungsang Basin. It includes Yeosoo to the west and Busan to the east. Totally, 270 in-situ stress measurements were conducted in the surface test boreholes at the depth from 14 m to 300 m by hydraulic fracturing method. In this paper, based on the measurement data set, the overall characteristics of the current in-situ rock stress fields in the study area are briefly described. And also the investigation results on the difference between the stress distributions for the granitoid and the andesitic rock region are also introduced. Finally, the distributions of the regional horizontal stress directions in Busan and the Yangsan faults area are shown.

**Key words** In-situ rock stress, Hydraulic fracturing test, Kyungsang Basin, stress ratio (K), Excessive horizontal stress

**초 록** 특수한 지질조건을 제외하면 이론적이거나 물리적인 방법으로 특정지역의 정확한 암반 초기응력 상태를 예측하기는 거의 불가능하다. 이는 토목공학이나 광업개발과 관련된 문제에 있어 암반 응력에 대한 신뢰성 있는 정보를 얻는 유일한 방법은 현장 측정에 위해서만 가능함을 의미한다. 1990년대 이후 국내 경상분지 영역 내 암반 구조물 설계단계에서 정량적인 정보를 획득하기 위해 많은 현장 초기응력 측정이 수행되어 오고 있다. 본 논문의 연구지역은 경상분지의 지표로부터 심도 300 m 미만 지하공간으로 위치적으로 동쪽의 부산에서 서쪽으로로는 여수를 포함하는 광범위한 지역을 포함한다. 현장 초기응력 측정은 대부분 지표 시험공을 이용하여 심도 14 m~300 m 영역에서 수압파쇄법에 의해 총 270회 시행되었다. 본 논문에서는 현장 측정 자료를 바탕으로 전체 연구지역에 현재 형성되어 있는 초기응력 상태, 화강암류와 안산암류 지역에서의 초기응력 분포 특성 차이에 대해 논의하고자 한다. 그리고 마지막으로 부산 일원과 양산 단층대 지역 내 수평응력 방향성의 국부적 분포 양상에 대해 소개하도록 하겠다.

**핵심어** 암반 초기응력, 수압파쇄시험, 경상분지, 측압계수 (K), 과잉 수평응력

### 1. 서론 및 배경

1990년대 이후 산악지역의 암반을 대상으로 한 대단

<sup>1)</sup> (주) 지오제니 컨설턴트 상무이사  
<sup>2)</sup> 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 부교수  
<sup>3)</sup> (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부 부장  
<sup>4)</sup> (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부 과장  
\* 교신저자 : shbae007@geogeny.biz  
접수일 : 2008년 4월 11일  
심사 완료일 : 2008년 4월 23일

면 교통터널, 에너지 비축시설 및 산업용 저장소와 같은 대형 토목 구조물의 필요성과 시공 사례가 크게 증가하고 있는 추세이다. 전 세계적으로 지하공간을 대상으로 한 공학적인 용도의 토목 암반 구조물은 90% 이상이 지표로부터 심도 500 m 이내 영역에서 이루어지는 것으로 알려져 있다(Hudson and Harrison, 1997). 국내의 경우에도 300 m~400 m 이내 심도 영역에서 지하철, 철도터널, 도로터널 및 각종 지하시설 등 대부분의 암반 구조물이 설계, 시공되어 오고 있다. 국내의 경

우 암반의 측압계수(stress ratio, K) 성분들은 대부분은 1.0 이상의 값을 가지며 지형조건, 복잡한 지질구조의 영향으로 지반 조건에 따라 수평응력 이방성(horizontal stress anisotropy)이 매우 크기 때문에 이론적 방법에 의한 평가가 거의 불가능하며 현장시험과 분석에 의해서만 신뢰성 있는 값을 확보할 수 있다.

일반적으로 초기응력의 중요성은 심도증가에 따라 커지나 심도 200 m 미만에서 발생된 취성파괴 사례는 천부 영역에서도 과지압 조건이 형성될 수 있음을 보여준다. Table 1은 지표로부터 심도 50 m 미만의 천부 영역에서 10 이상의 높은 측압계수가 보고된 국내의 사례들 중 일부를 나타낸다. 이러한 천부 구간에 형성되어 있는 매우 높은 수준의 과잉 수평응력장 분포는 현장시험의 필요성과 초기응력의 중요성을 직접적으로 보여준다. 사회 기반시설과 관련된 각종 암반 구조물에 대한 사회적 수요가 증대됨에 따라 전국의 많은 지역을 대상으로 정밀지반조사 과정에서 현장 초기응력 측정이 수행되어 오고 있다. 측정 물량 면에서 국토를 구성하는 5개의 지체 구조구(tectonic province)들 중 경기육괴(Kyeonggi Massif)와 경상분지(Kyungsang Basin) 영역에서 상대적으로 많은 조사가 수행되어 왔다.

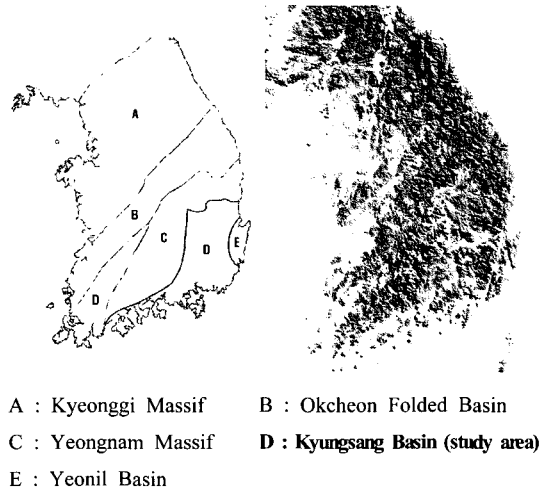
본 연구의 대상 영역인 경상분지는 위치상으로 한반도의 동남부지역인 경상남북도의 대부분을 차지하며 일부는 남부 해안을 따라 전라남도 여수시 서쪽 지역까지 분포하고 있다. 서쪽으로는 영남육괴(Yeongnam Massif)와 동쪽으로는 신생대 3기의 퇴적분지인 연일분지(Yeonil Basin)와 접하고 있다. 경상분지는 중생대 대보 조산운동 이후 류라기말에서 백악기에 걸쳐 육상 쇠설성 퇴적물에 의해 형성된 경상누층군과 백악기말에서 신생대 3기에 걸쳐 발생한 여러 차례의 화산운동으로 인해 분출된 화성암류가 넓게 분포하고 있다. 서쪽으로부터 최하부인 신동층군과 상부의 하양층군이 위치하며 동쪽으로는 경상누층군의 최상부인 유천층군이 분포한다. 화산활동에 의한 불국사화강암과 여러 화산암이 여러 지역에 분포하며 특히 유천층군 지역은 심한 화산활동의 영향으로 화강암, 안산암, 응회암 등의 화성암류 사이에 퇴적암이 협재된 상태로 분포하는 경향을 보인다.

한정된 측정 자료들을 바탕으로 넓은 면적을 가지며 복잡한 지질구조 이력을 가지는 경상분지 내 개별 지역에 형성되어 있는 암반 초기응력의 상세 특성을 분석하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 지질학적 측면에서는 천부 영역에 해당하지만 지하 암반 구조물의 많은 부분이 시공되어 공학적인 측면에서 중요성이 큰 심도 300 m 미만 심도 영역의 초기응력 분포 특성 파악에 주안점을 두었다. 본 논문에서는 현장 수압파쇄시험으로부터 측정된 초기응력 해석 결과를 근거로 연구 지역 내 형성되는 있는 수평응력 성분들의 전반적인 분포 특성, 암종 성인별 변화 양상, 그리고 부산 일원과 양산단층대 지역에 대한 상세 분석 결과에 대해 논의하고자 한다.

2. 현장시험 및 자료해석

2.1 현장시험 개요 및 측정 시스템

현장조사는 대부분 암반 구조물의 설계단계에서 시행되었으며 동쪽으로는 부산시, 양산단층대 지역, 서쪽으로는 해안선을 따라 여수시 지역이 조사 영역에 포함된다. 전체적으로 수압파쇄시험을 적용한 현장 초기응력



A : Kyeonggi Massif      B : Okcheon Folded Basin  
 C : Yeongnam Massif      D : Kyungsang Basin (study area)  
 E : Yeonil Basin

Fig. 1. Tectonic Provinces in Korea

Table 1. Example for the high horizontal stresses at the depth less than 50 m

| Site               | depth(m) | In-situ rock stress state              | Estimated K |
|--------------------|----------|--|-------------|
| Kobbelv, Norway    | 25~30    | ■ horizontal stress: 15 MPa~27 MPa     | 18.5~33.3   |
| Forsmark, Sweden   | 5~15     | ■ horizontal stress: 20 MPa            | > 36.5      |
| S. Ontario, Canada | < 25     | ■ horizontal stress: 5 MPa~15 MPa      | 7.4~22.2    |
| Stockholm, Sweden  | < 25     | ■ horizontal stress: 3 MPa~9 MPa       | 4.4~13.3    |
| Bucheon, Korea     | < 40     | ■ horizontal stress: 2.85 MPa~8.18 MPa | 7.3~12.6    |

측정은 경상분지에 속하는 18개 개별 지역 내 57개 시험공을 대상으로 총 270회 시행되었으며 그 중에서 비정상적인 측정값을 제외한 212개 자료의 응력 해석 결과만 본 연구에 이용하였다. Fig. 2는 초기응력 측정이 수행된 조사지역의 위치를 나타내는데 각 조사지역에는 2~8개의 시험공들이 포함된다. 측정 빈도 면에서 현장시험은 화성암지역에서 80.1%, 퇴적암지역에서 15.2%, 변성암지역에서 4.7% 시행되었으며 화성암지역의 경우 화강암, 안산암, 응회암, 섬록암 순이며 퇴적암은 세일, 사암 순이다. 측정 심도면에서는 50 m 미만이 21.9%, 50~100 m 구간이 42.9% 그리고 100 m 이상 구간이 35.2%를 차지한다(Fig. 3).

현장 조사에서 측정시스템은 국내 지형에 적합하도록 설계, 제작된 엔진 구동방식의 유압-와이어 라인 시스템을 이용하였다. 수평응력 방향성 해석을 위한 수압파쇄 균열 조사에는 공내 지하수 유무와 공내수 탁도 조

건에 따라 초음파 주사검층법과 공내 영상촬영법을 선택적으로 적용하였다.

### 2.2 응력 및 방향성 해석

일반적으로 수직 시추공에 대한 수압파쇄시험 결과의 해석에 적용 가능한 모델은 크게 탄성모델, 공극 탄성모델(poroelastic model), 파괴역학 모델 그리고 균열 가압 모델(fracture pressurization model)로 구분된다. 본 연구에서 적용한 탄성모델은 Hubbert and Willis(1957)에 처음 의해 제안된 후 Kehle(1964) 등에 의해 보완, 개선된 이론으로 제한적인 요소를 내포하고 있지만 실내 시험을 통해 구해지는 변수 없이 실측된 자료만으로 수평응력의 크기가 계산되므로 공학적인 면에서 적용성이 가장 큰 모델이다. 이 모델에서는 시추공 주변의 응력상태를 평면 변형을 하에서 탄성이론에 근거한 Kirsch solution으로부터 유도된 응력조건과 현지 암반의 인장강도와 공극수압 개념을 결합하여 응력값을 산정하게 된다. Fig. 4는 수압파쇄의 발생 메커니즘을 개념적으로 보여주는데 Kirsch solution(Jaeger and Cook, 1969)을 바탕으로, 시추공벽에서의 접선응력 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 수압파쇄 시 시추공 내부에서 공벽에 가해지는 압력이 점차 증가하여  $3P_2 - P_1$ 을 초과하는 경우  $P_1$  방향으로부터 공벽에는 접선 인장응력(tangential tensile stress)이 형성된다. 이 때 형성된 유효 접선 인장응력이 현지암반 인장강도의 절대값을 초과하면  $P_1$  방향의 공벽에 인장 균열이 형성되는데 이것으로 수압파쇄 균열의 발생 메커니즘은 간단하게 설명된다.

현장 수압파쇄시험에서 얻어지는 초기응력에 대한 정보는 크게 수평응력 성분의 크기와 최대 수평응력의 방향성에 대한 자료로 구분된다. 수평응력의 산정에 적용되는 압력변수인 균열 폐쇄압력과 균열 개구압력은 많은 경우 압력 변화나 전이점이 불분명하게 나타난다. 이러한 자료 조건에서 정확한 최적 압력변수값들을 결

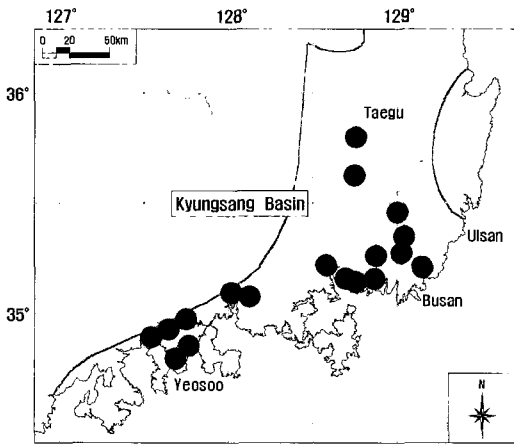


Fig. 2. Location map of the in-situ hydraulic fracturing stress measurement in the Kyungsang Basin(Each circle includes 2~8 test boreholes.)

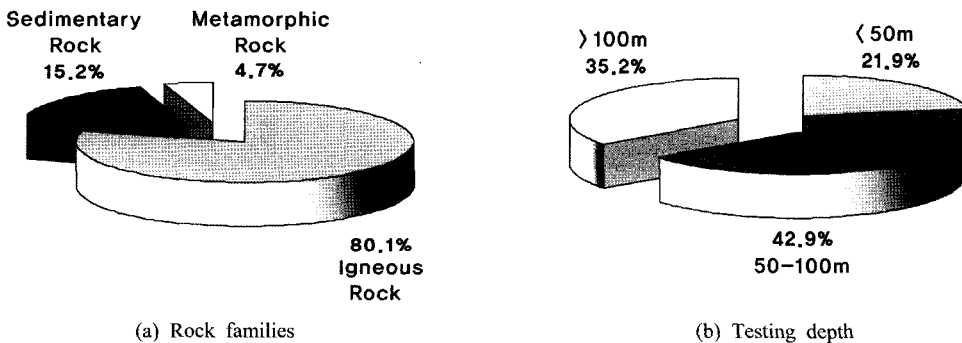
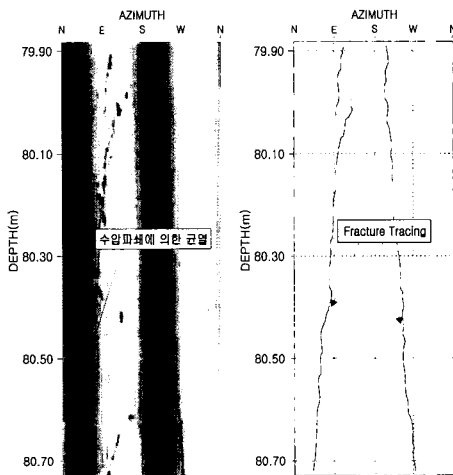


Fig. 3. Statistics on the in-situ hydraulic fracturing stress measurements in the Kyungsang Basin

정하기 위해서는 주관적인 요소를 내포하고 있는 도해적 방법보다는 통계적 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. 균열폐쇄압력과 균열개구압력값 결정의 정확성과 신뢰성을 향상시키기 위해 적용된 각 가압 사이클들의 해석에서 구해진 값들의 평균을 대표값으로 사용하였다. 측정 심도가 깊어지는 경우 공극수압이 결과에 영향을 미치게 된다. 응력 해석 과정에서 최대 수평응력의 산정에 탄성 매질 내 원형 공동 주위의 응력상태를 바탕으로 공극수압을 고려한 식과 고려하지 않은 식을 적용할 수 있다. 개별 식들을 적용할 명확한 판단 기준은 없으나 본 연구에서는 비교적 깊은 심도에 해당하는 100 m를 기준으로 하부 구간에는 공극압을 적용한 식을 적용하였다.

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, 지질학적 정보를 제공할 수 있다(배성호 외, 2005). Fig. 5는 본 연구지역 내에서 수압파쇄시험 후 측정된 균열 추 (fracture tracing) 결과들 중 일부 사례들을 나타내는데 균열이 대칭적으로 거의 수직에 가까운 형태로 형성되어 있음을 알 수 있다.



(a) TB-2-2, at Bujeon-dong, Busan

### 3. 조사지역 초기응력장의 전반적 분포 특성

경상분지 내 총 57개 개별 시추공에서 획득된 측정 자료들 중 정상적인 측정이 이루어진 212개 심도별 자료들을 분석에 이용하였다. Fig. 6은 본 연구지역에서 측정된 수평응력 성분들의 심도별 분포를 나타낸다. 분석 결과 최대 수평응력( $S_H$ ) 성분과 최소 수평응력( $S_h$ )

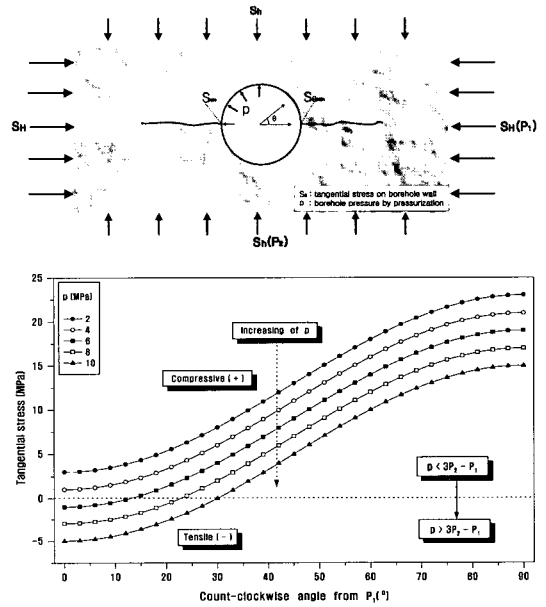
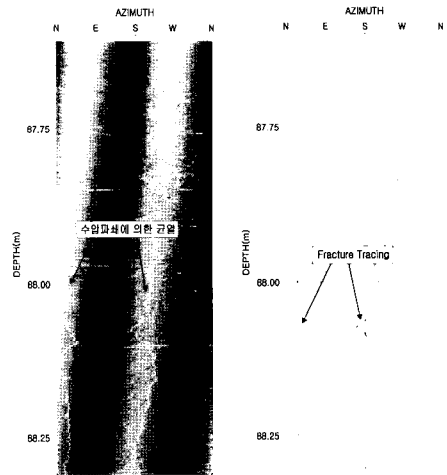


Fig. 4. Variation of the tangential stress around a borehole wall for stepwise increase of borehole pressure



(b) TB-20, Sinpoong-ri, Suncheon

Fig. 5. Example of the fracture tracing results for determination of the maximum horizontal stress orientation by borehole scanning tools

성분은 각각 1.18 MPa~20.73 MPa, 0.84 MPa~10.92 MPa 범위에 분포하는 것으로 조사되었다. 식 (1)과 식 (2)는 심도별 응력값들에 대한 선형회귀 분석 결과를 나타낸다. 최대, 최소 수평응력 성분 모두 통계적으로는 0.7 이상의 상관계수를 가지는 것으로 나타났으나 두 성분 모두 심도 약 150m를 기준으로 대심도 구간에서는 최대, 최소수평응력간의 편차(분산)가 상부에 비해 큰 것으로 분석되었다.

최대 수평응력 방향성 분석에서는 해석 가능한 179개 개별 심도의 공내 스캐닝 자료를 활용하였다. Fig. 7은 심도별 최대 수평응력이 작용하는 방위각(Azimuth) 별 빈도 히스토그램을 보여준다. 절대적으로 우세한 방향성은 관찰되지 않으나 빈도 면에서 상대적으로 진북 기준 60°~100° 방위각이 우세한 경향을 나타내었다. 모든 조사 지점의 평균 방향은 진북 기준 84°(N84°E)인 것으로 분석되었다. Fig. 8은 18개 개별 조사 지역에서의 지역별 평균 방향성을 도시한 것이다. 일부 지역들에서는 유사한 방향성을 나타내나 전체적으로 조사 위치에 따른 초기응력 방향들의 방위각 편차가 크게 나타남을 알 수 있다. 지금까지 언급한 바와 같이 경상분지 내 최대 수평응력들의 평균 방향성은 거시적 구조지질학적 측면이나 국내 지형 조건을 근거로 추정된 방향성에 부합되는 양상을 보이거나 지질조건, 대규모 불연속체 존재 여부 및 과거 지질이력에 따라 큰 이방성을 가지는 국부적인 응력장이 형성되어 있는 것으로 분석되었다.

$$S_H = 1.660 + 0.040 z(m) \text{ (MPa)} \text{ (depth < 300m)} \quad (1)$$

$$S_h = 1.588 + 0.022 z(m) \text{ (MPa)} \text{ (depth < 300m)} \quad (2)$$

#### 4. 화강암류와 안산암류 분포 지역의 초기응력 분포 특성

연구의 대상지역은 지표로부터 심도 300 m 미만인 영역으로 시험이 수행된 지점의 분포 암종 면에서 화강암류(granitoid)와 안산암류(andesitic rock)가 약 80% 이상을 차지한다. 따라서 본 연구에서는 전체 조사 자료 외에 이 둘 대표적 분포 암종에 대한 별도의 분석을 수행하였다.

##### 4.1 수평응력 성분

화강암류 분포지역에서는 심도 15m~296m 영역에서 초기응력 측정을 수행하였으며 정상적인 자료가 얻어진 79개 개별 측정값을 분석에 적용하였다. 최대 수평응력은 2.20~20.73 MPa 범위에 분포하는 것으로, 최소 수평응력은 1.66~10.92 MPa 범위에 분포하는 것으로 조사되었다. 안산암류 분포지역에 대해서는 14~262m 심도 영역에서 얻어진 89개 지점의 자료를 분석한 결과, 최대, 최소 수평응력은 각각 1.18~15.08 MPa, 0.98~8.83 MPa 범위에 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 9와 Fig. 10은 조사심도별 수평응력 성분들의 분포와 선형 회귀분석 결과를 나타낸다. 회귀분석 결과 상관계수는 0.70 이상으로 높은 값을 나타낸다. 이러한 회귀식으로 부터 수평응력의 일반적인 경향성에 정보를 얻을 수는 있으나 응력값들의 이산도가 크기 때문에 공학적인 측면에서의 직접적인 응용에는 다소 무리가 따른다고 볼 수 있다.

화강암류 분포지역과 안산암류 분포지역의 자료를 비교한 결과 최대 수평응력의 경우심도 증가에 따른 수평

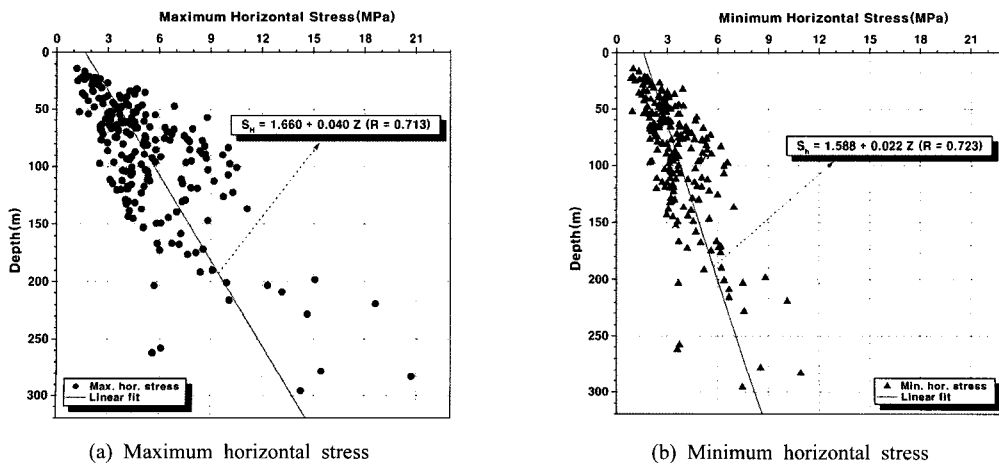


Fig. 6. Distribution of the horizontal stress components in the study area

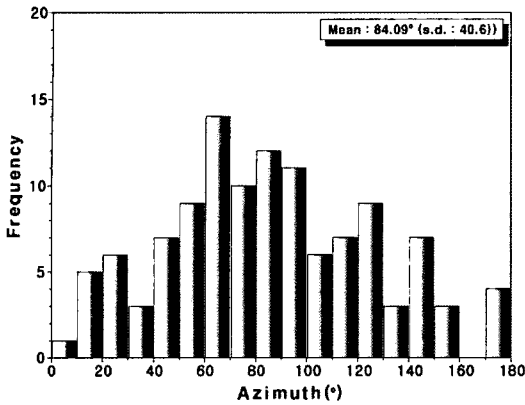


Fig. 7. Azimuth frequency histogram for the maximum horizontal stress directions in the study area

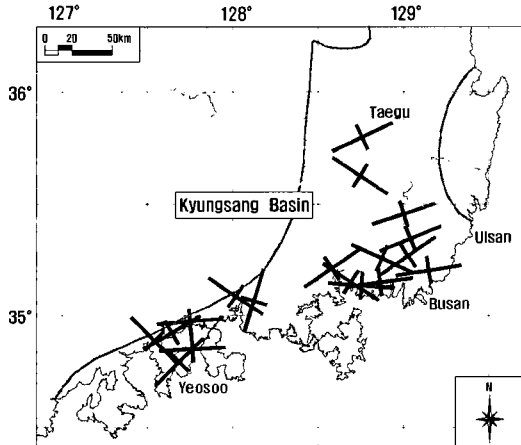


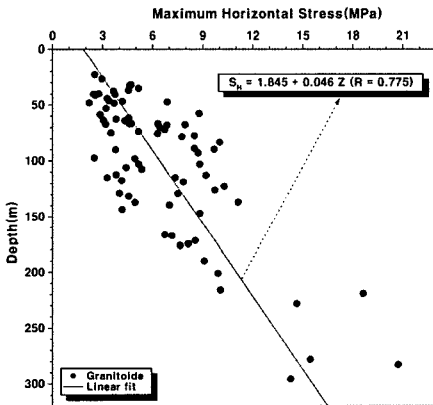
Fig. 8. Distribution map of the average azimuth of the maximum horizontal stresses in the individual test regions at the depth less than 300 m

응력 증가율(stress gradient)은 화강암류 분포지역에서는 약 0.046 MPa/m로 0.031 MPa/m의 값을 가지는 안산암류 분포지역에 비해 약 1.5배 정도 높은 값을 가지는 것으로 분석되었다. 화강암류 분포지역에서 안산암류 분포지역에 비해 높은 응력 증가율을 나타내는 이유는 두 암종이 생성되는 구조 지질학적 생성 메커니즘의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 화강암류는 심성암이나 반심성암의 형태로 비교적 심부에서 형성되거나 관입암 형태로 안산암류 하부에 분포할 가능성이 크기 때문에 응력 이완(stress release)의 정도가 상대적으로 낮고 지표에 가까운 영역이라도 잔류응력 성분이 작용하고 있을 가능성이 크다. 반면 안산암류의 경우에 지표에 분출되어 화산암의 형태로 고결되기 때문에, 화강암류에서 안산암류로 점이적으로 변화되는 암종 경계부를 제외하면, 화성암류에 비해 상대적으로 응력 이완의 가능성이 크기 때문에, 이러한 응력 증가율의 차이를 나타내는 것으로 추정된다.

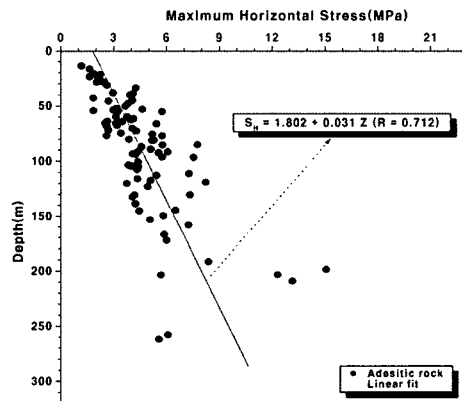
4.2 측압계수 분포 양상

일반적으로 암반구조물 설계 및 안정성 평가단계에서 주요 입력변수의 하나인 측압계수의 경우 평균값은 수평응력 성분의 심도별 전반적 분포 특성을 이해하는데, 그리고 최대값은 강도 특성과 함께 굴착시 취성파괴 가능성을 분석하는데 주요 변수로 유용하게 활용된다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 화강암류와 안산암류 분포지역에서의 최대 측압계수와 평균 측압계수 분포를 보여준다. 식 (3)~식 (6)는 각각의 경우 측압계수 분포의 상한 경계식을 나타낸다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 안산암류 분포지역에 비해 화강암류 분포지역에서 상대적으로 높은 수평응력



(a) Granitoid



(b) Andesitic rock

Fig. 9. Distribution of the maximum horizontal stress with depth for the granitoid and the andesitic rock region in the study area

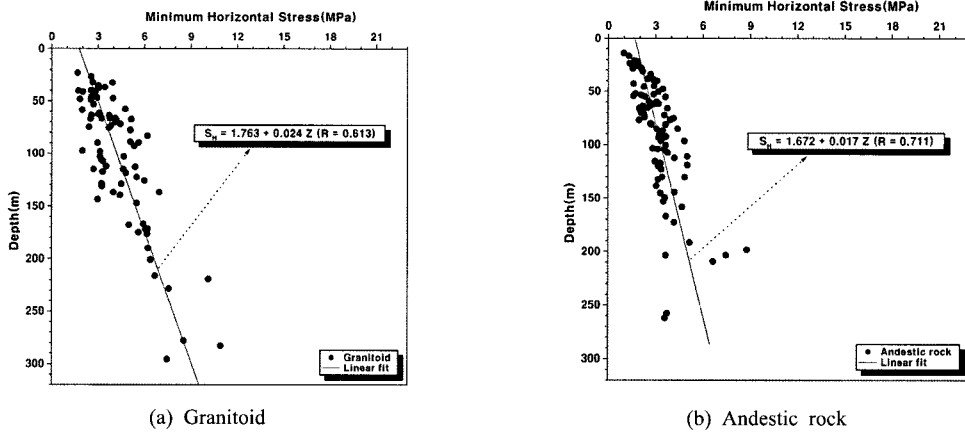


Fig. 10. Distribution of the minimum horizontal stress with depth for the granitoid and the andesitic rock region in the study area

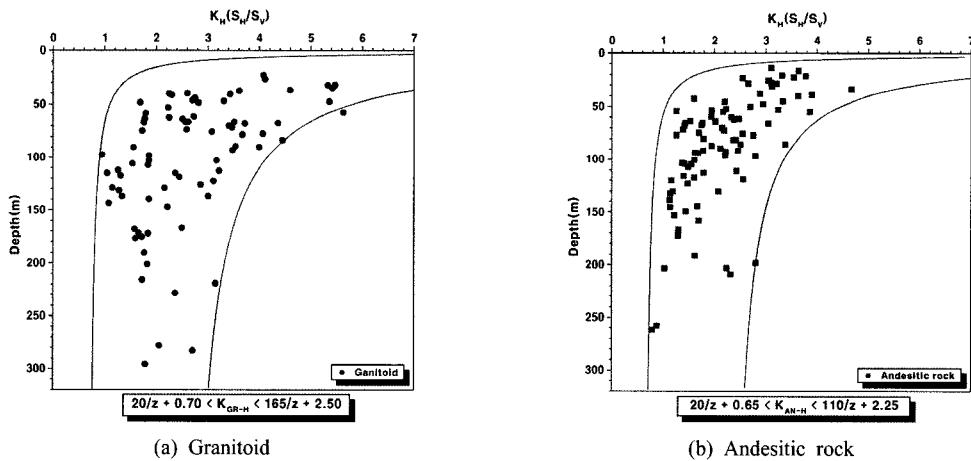


Fig. 11. Boundary of the maximum stress ratio( $K_H$ ) distribution with depth for the granitoid and the andesitic rock region in the study area

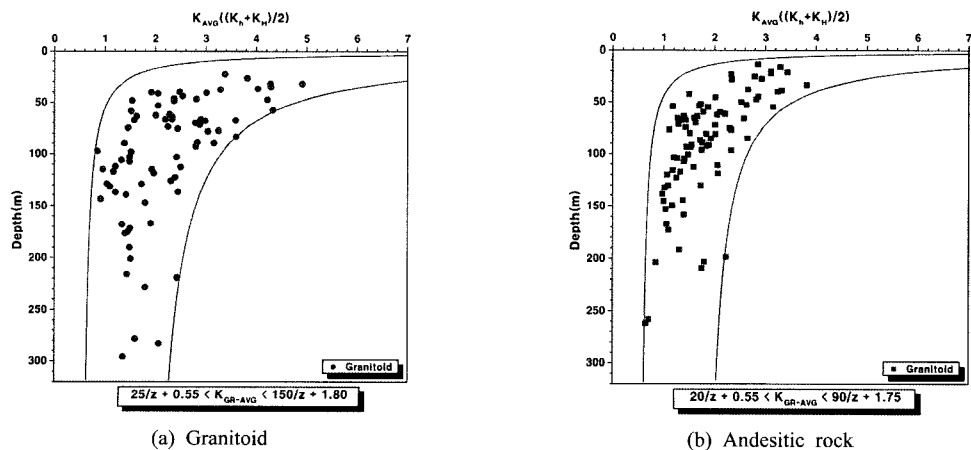


Fig. 12. Boundary of the average stress ratio( $K_{AVG}$ ) distribution with depth for the granitoid and the andesitic rock region in the study area

성분들이 관찰된다. Fig. 11에 도시된 바와 같이 최대 축압계수 분포에서 심도가 100 m 이상으로 증가됨에 따라 안산암류 분포 지역에서는 일부 자료를 제외하고 1.0~1.5 범위에 값들이 수렴하는데 비해 화강암류 분포 지역에서는 값들의 분산도가 높을 뿐만 아니라 150 m 하부 영역에도 2.5 이상의 축압계수를 가지는 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 분석되었다. 평균 축압계수의 경우에도 분포 영역의 차이는 있으나 유사한 분포 경향을 나타내었다. 따라서 안산암류 분포지역은 심도가 증가할수록 축압계수 성분이 안정화되고 화강암류 분포지역에 비해 응력 분산도가 작으며 100 m 심도 이하 영역의 경우 굴착시 응력에 의한 취성파괴의 가능성이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 그러나 화강암류 분포지역에서는 150 m 이하의 깊은 심도에서도 과잉 수평응력장이 형성되어 있을 가능성이 크기 때문에 암반 구조물 설계를 위한 사전 조사에서 상세한 초기응력 특성 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

$$\frac{20}{z}(m) + 0.70 < K_{GR-H} < \frac{165}{z}(m) + 2.50(\text{depth} < 300m) \quad (3)$$

$$\frac{25}{z}(m) + 0.55 < K_{GR-AVG} < \frac{150}{z}(m) + 1.80(\text{depth} < 300m) \quad (4)$$

$$\frac{20}{z}(m) + 0.65 < K_{AN-H} < \frac{110}{z}(m) + 2.25(\text{depth} < 300m) \quad (5)$$

$$\frac{20}{z}(m) + 0.55 < K_{AN-AVG} < \frac{90}{z}(m) + 1.75(\text{depth} < 300m) \quad (6)$$

여기서  $z$  : 지표면으로부터의 심도 (m)

$K_{GR-H}$ ,  $K_{GR-AVG}$  : 화강암류 분포지역에서의 최대, 평균 축압계수

$K_{AN-H}$ ,  $K_{AN-AVG}$  : 안산암류 분포지역에서의 최대, 평균 축압계수

## 5. 부산 일원과 양산 단층계 지역의 초기응력 분포 특성

부산 지역과 양산 단층계(Yangsan fault system) 지역에서는 초기응력의 절대 크기보다는 최대 수평응력장의 방향성 분포를 위주로 분석을 수행하였다. Fig. 13 연구지역 내에서의 개별 조사 지역별 최대 수평응력의 평균 작용 방향성 분포를 보여준다.

### 5.1 부산 일원

부산지역의 경우 대부분 화강암과 안산암류가 분포하

는 도심의 20 m~150 m 미만 심도구간에서 측정된 자료를 분석하였다(F, G and H in Fig. 13). F zone은 도심에 위치한 산악지역이며 G, H zone은 평지이거나 산악지역 내 평탄한 지역에 해당한다. 평지이거나 상부 지형의 영향을 적게 받는 지역에서는 20 m~30 m 이상의 심도 구간부터는 일정한 경향성을 가지는 초기응력의 방향성이 관찰되었다. 이러한 평탄한 지형 내 저심도 구간에서의 초기응력 분포 특성은 서울 중심부 편마암 분포지역 저심도 구간 분석 결과에서도 확인된 바가 있다(배성호 외, 2003).

최대 수평응력의 평균 방향성 분석 결과 부산지역에서는 NE(N40°E~N60°E)와 EW 방향(N87°W)이 우세한 것으로 조사되었다. 산악지역에서는 지형적 영향이나 단층, 파쇄대와 같은 대규모 불연속면의 존재 여부에 따라 국부적인 편차가 나타나겠지만, 도심이나 평탄한 지역의 경우 NE와 EW 방향이 현재 형성되어 있는 초기응력장의 주 방향성일 가능성이 크다고 판단된다. 부산시 서쪽에 위치하며 해안에 인접한 김해시 일원(D and E in Fig. 13)에서도 부산지역과 유사한 방향성(N71°E~N88°E)이 관찰되었지만 마산시 방향으로 진행할수록 초기응력 방향성이 시계방향으로 회전하여 NW~WNW(N49°W~N74°W)로 변화되는 경향성이 관찰되었다(A, B and C in Fig 13).

### 5.2 양산 단층계 지역

부산에 인접한 북부지역에는 국내 최대의 단층대인 양산 단층계가 분포한다(I-N Fig. 13). 양산 단층계에는 NNE의 방향성을 가지는 주요 단층인 양산단층과 동래단층을 중심으로 서쪽으로 밀양단층, 모량단층이 위치하며 동쪽으로는 일광단층과 NNW 방향의 울산단층이 분포하고 있다. 김해에서 평해 지역까지 170 km 이상의 연장성을 가지는 양산단층과 70 km 이상의 연장성을 가지는 동래단층의 생성 시기는 신생대 3기초~중기로 것으로 알려져 있으나 양산단층대를 구성하는 단층들 중 양산단층을 제외한 나머지에 대한 연구는 미미한 실정이다.

양산단층대의 경우 한 번의 지체운동이 아닌 신생대 3기말에 발생한 일련의 지각변동에 따른 5~6차례 이상의 다중 변형(multiple deformation)의 결과로 생성되었다는 설이 일반적이다. 생성시기에 대한 학자들 간의 이견은 크지 않으나 단층의 특성을 규명하는 주요 요인인 생성 메커니즘에 대해서는 여러 주장이 공존하고 있다. 현재 양산단층대가 주향이동단층이라는 점은 여러 연구결과들이 이를 뒷받침하고 있으나 주 단층대를 형성시킨 고 응력장과 이후 발생한 응력장 변화를 설명하



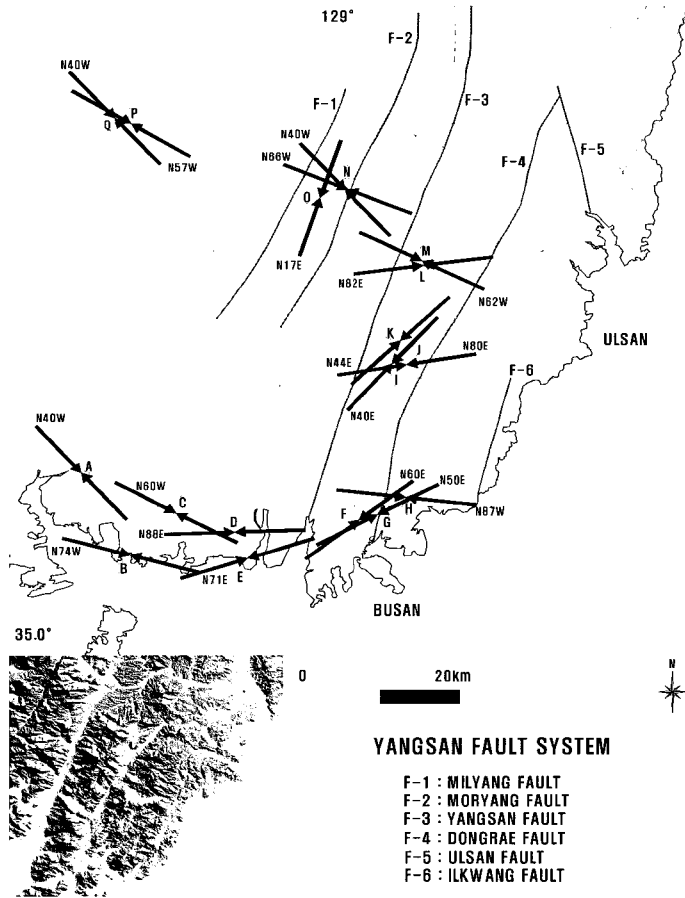


Fig. 13. Average orientation map of the maximum horizontal stress for Busan and the Yangsan faults area, Kyungsang Basin

는데 상반된 주장도 제기되고 있다. 양산단층이 우수향 주향이동이라는 주장(채병곤, 장태우, 1994)이 있는 반면 자기 비등방성(magnetic anisotropy) 해석을 통해 WNW 방향의 압축성 좌수향 주향이동운동(trans-compressional sinistral strike slip movement)의 지배를 받았다는 상반된 주장도 제기되고 있다(이준동 외, 1993).

양산단층대 지역은 주 단층대의 생성 이후 발생한 지체운동으로 유발된 지질구조와 고 응력장의 변화에 대한 제반 특성들이 현재 단층대의 상태와 동해의 생성기원을 규명하는데 매우 중요한 정보들을 제공할 수 있기 때문에 학문적 중요성이 매우 큰 지역이다. 과거 지질 이력에 따라 현재의 지질구조를 생성한 고 응력장은 여러 차례 변화되어 왔지만 현재의 암반 내 초기응력 상태는 시기적으로 가장 최근에 발생한 지체운동에 수반되는 변형작용과 직접적으로 관련되어 있다. 따라서 현장 초기응력 측정은 시기적으로 가장 최근 형성된 지질 구조를 생성시킨 지체응력의 영향을 밝히는 과정으로

볼 수 있다.

현재 이 지역에 형성된 초기응력 특성을 분석하기 위해 11개 개별 시험공에서 시행된 초기응력 측정 자료를 분석하였다. 조사 영역은 지표로부터 40~190 m 심도 영역에 해당한다. 전체 시험공 중 2개소는 밀양단층과 모량단층 중간지점, 3개소는 모량단층 인접지역(200 m 이내) 그리고 6개소는 양산단층과 동래단층 사이의 영역에 위치한다. 전체 초기응력 자료와 기존에 수행된 양산 단층대의 고 응력장과 관련된 일부 지질학적 연구 결과를 비교 분석하여 수압파쇄 균열조사에서 산정된 현재 암반 내 형성되어 있는 최대 수평응력 방향성 정보를 도출하였다. 밀양단층과 모량단층 사이 밀양 얼음골 내 O 지역의 경우 밀양단층의 주향과 유사한 NNE (N17°E)의 방향성을 나타내었다. 모량단층과 매우 인접한 N 지역에서는 측정된 3개 시험공(2개소는 단층경계에서 200 m, 1개소는 70 m 이격)에서의 조사 결과 모든 시험공의 100 m 이하 심도에서 최대 응력 성분인

최대 수평응력은 모량단층의 주향에 거의 수직인 NW~WNW(N40°W~N66°W) 방향으로 작용하고 있는 것으로 분석되었다. Fig. 14와 Fig. 15는 앞에서 언급한 두 지역에서 수압파쇄시험 후 시추공 영상촬영법과 초음파 주사검층으로 획득된 인장 균열의 형태와 방향성 측정 결과를 나타낸다. 밀양 얼음골 O 지역과 모량단층에 인접한 N 지역 모두 수직 또는 준 수직 균열이 형성되었고 균열의 주향이 매우 일정한 방향성을 가짐을 확인할 수 있다.

모량단층 인근지역에서는 언양 화강암 관입시기로부터 신생대 4기 퇴적층이 형성되기 전 기간 동안 두 차례의 취성 단층작용(brittle fault activity)에 의한 지질구조의 변동이 발생된 것으로 보고되고 있다. 1차 단층작용은 동북동 방향의 좌수향 주향이동단층을 생성시켰으며 이는 NE~NNE 방향의 압축력이 주 동력원임을 나타낸다. 이후 발생한 2차 단층작용은 ENE 방향의 압축력으로 NNE 방향의 우수향 주향이동단층을 형성시킨 운동으로 모량단층을 우수향 주향이동단층으로 변화시킨 것으로 해석된다(윤운상, 2003). 이러한 신생대 4기 이전의 단층작용 외에 4기 지층을 변위시킨 지체운동의 뚜렷한 증거는 기반암 상부 퇴적된 충적층으로 인해 확인되지 않았지만 WNW 방향의 압축응력에 의한 단층운동의 가능성이 보고되고 있다(최성자 외, 2000).

이러한 지질학적 연구결과와 모량단층에 근접한 시험공에 실시된 초기응력 측정 결과를 바탕으로 분석된 현재 모량단층 주변의 최대 수평응력 응력의 평균 작용방

향을 비교하였다. 그 결과 현장 측정으로부터 산정된 NW~WNW 범위의 최대 수평응력 방향성은 앞에서 제기된 1, 2차 단층운동 이후 제 4기 단층을 형성시킨 것으로 추정되는 WNW 방향의 압축응력과 유사한 방향성을 가지는 것으로 나타났다. 현재 조사지역과 자료가 매우 제한적이어서 직접적으로 평가하기는 어려우나 추가적인 현장응력 측정이 수행될 경우 이 지역의 정확한 지질 이력을 규명하는데 매우 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 16은 I, J 지역에서 수행된 균열 방향성 분석으로 추정된 최대 수평응력의 심도별 변화 특성을 나타낸다.

I와 J 지역은 양산 동면 법기리 일원의 화강암 분포 지역으로 NNE 방향의 법기단층을 기준으로 좌, 우 영역에 위치한다. I 지역의 경우 최대 수평응력 평균 작용 방향은 진북기준 40°(N40°E)을 나타내나 하루로 갈수록 반시계 방향으로 회전하여 14°(N14°E)의 방향성을 가진다. J 지역의 경우 심도별 방향성 변화는 크지 않고 평균적으로는 80°(N80°E)의 방향성을 나타낸다. 이러한 암중 내에서 응력 회전(stress rotation) 현상의 정확한 원인 규명은 어려우나 두 지역 사이 존재하는 NNE 방향으로 존재하는 우수향 주향이동단층인 법기단층을 생성시킨 지체운동에 따른 현상으로 추정된다. L과 M 지역은 양산 통도사 우측에 위치한 정족산 인근의 불국사 화강암과 안산암질암이 분포하는 영역이다. 상부 지형의 영향이 감소되는 지표로부터 100 m 이상 구간에서 최대 수평응력장은 화강암이 분포하는 L 지점에서 82°(N82°E) 방향으로, 안산암류 지역인 M 지역에서

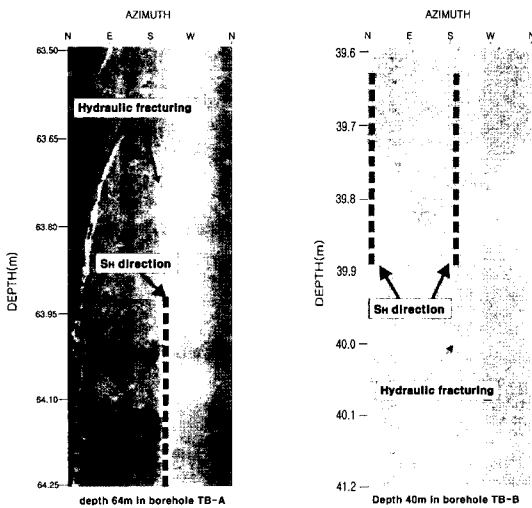


Fig. 14. Results of hydraulic fracture tracing by BIPS for the estimation of the maximum horizontal stress(O zone, Kyungsang Basin)

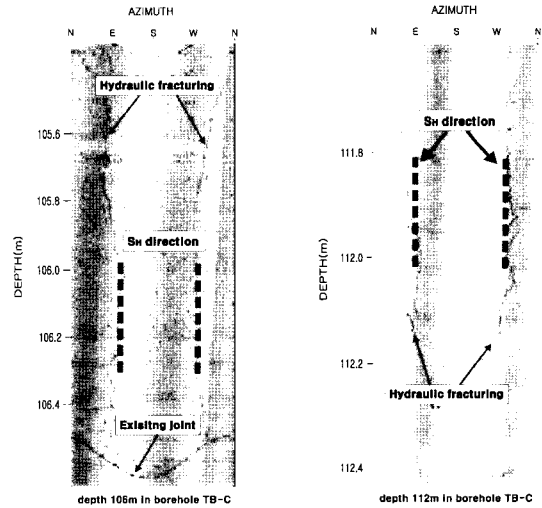


Fig. 15. Results of hydraulic fracture tracing by acoustic televiewer for the estimation of the maximum horizontal stress(N zone adjacent to Moryang fault, Kyungsang Basin)

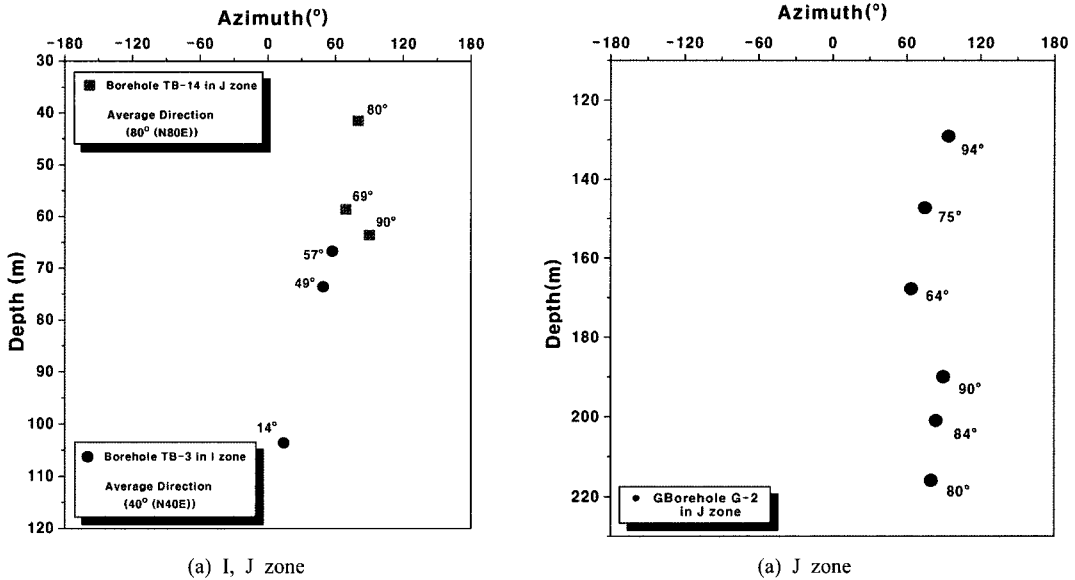


Fig. 16. Variation of the max. hor. stress orientations with depth in I and J zone of the study area, Kyungsang Basin

는 298°(N62°W) 방향으로 작용하고 있는 것으로 분석되었다.

지금까지 양산 단층계 내 일부 지역에 형성된 초기응력 방향성 특성에 대하여 간단하게 논의하였는데 조사 지역 및 과거의 지구구조(tectonic sequences) 특성에 따라 초기응력 방향성 편차가 확인되었다. 모량단층에 인접한 지역에서는 NW~WNW 방향이 우세한 것으로 나타났고 밀양단층과 모량단층 사이의 밀양 얼음골 지역에서는 NNE 방향의 최대 응력장이 확인되었다. 양산 동면의 화강암 지역에서는 NE~ENE 방향으로 작용하는 최대 수평응력장이 조사되었고 양산 통도사 우측 유천층군의 안산암류와 이를 관입한 불국사 화강암 분포 지역에서는 EW~NW에 가까운 최대 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 절대적으로 우세한 방향성은 나타나지 않았으나 빈도 면에서 WNW~NW, NE~ENE 방향 순으로 나타났다. 앞에서 언급한 바와 현장 초기응력 측정에서 분석되는 응력장 특성은 시기적으로 현재와 가장 가까운 시기의 지체운동에 수반되는 변형작용과 직접적으로 관련되어 있다. 따라서 향후 이 지역의 지체사를 연구하는데 있어 현장시험을 통한 현재의 초기응력장 분포 특성에 대한 정량적 정보가 필수적으로 요구될 것으로 예측된다.

## 6. 결 론

현장 수압파쇄시험 자료를 근거로 경상분지의 천부

초기응력장 특성에 관한 연구를 수행한 결과 얻어진 주요 내용들을 요약하면 다음과 같다.

1. 경상분지 전체 영역에서 최대 수평응력 성분과, 최소 수평응력 성분은 각각 1.18 MPa~20.73 MPa, 0.84 MPa~10.92 MPa 범위에 분포하는 것으로 조사되었다. 회귀분석 결과 최대, 최소 수평응력 성분 모두 통계적으로는 0.7 이상의 상관계수를 가지는 것으로 나타났으나 두 성분 모두 심도 약 150 m를 기준으로 대심도 구간에서는 조사 구간에 따른 응력 이방성이 상부에 비해 큰 것으로 분석되었다. 최대 수평응력 방향성은 절대적으로 우세한 방향성은 관찰되지 않으나 빈도 면에서 상대적으로 진북 기준 60°~100° 방위각이 우세한 경향을 나타내었으며 평균 방향은 진북 기준 84°(N84E)인 것으로 분석되었다.
2. 화강암류 분포지역과 안산암류 분포 지역의 자료를 비교한 결과 심도별 평균 응력 증가율의 경우 화강암류 분포지역의 약 0.046 MPa/m로 0.031 MPa/m인 안산암류 분포지역에 비해 약 1.5배 정도 높은 값을 가지는 것으로 분석되었다. 화강암류 분포지역에서 안산암류 분포지역에 비해 높은 응력 증가율을 나타내는 원인은 암종이 생성되는 지질학적 생성 메커니즘의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.
3. 화강암류는 심성암이나 반심성암의 형태로 비교적

심부에서 형성되거나 관입암 형태로 안산암류 하부에 분포할 가능성이 크기 때문에 안산암류에 비해 응력 이완 정도가 상대적으로 낮고 지표에 가까운 영역이라도 잔류응력 성분이 작용하고 있을 가능성이 크기 때문에 이러한 응력 증가율의 차이를 나타내는 것으로 추정된다.

4. 부산지역의 평지구간에서는 NE(N40°E~N60°E)와 EW 방향(N87°W)이 우세한 것으로 조사되었다. 지형적 영향이나 단층, 파쇄대와 같은 대규모 불연속면의 존재 여부에 따라 국부적인 이방성은 나타나겠지만, NE와 EW 방향이 부산지역 평지구간에 형성된 초기응력장의 주 방향성일 가능성이 매우 크다고 판단된다.
5. 양산 단층계 지역에서는 조사 위치 및 과거 지구조사 특성에 따라 초기응력 방향성 편차가 확인되었다. 모량단층에 인접한 지역에서는 NW~WNW 방향이 우세한 것으로 나타났고 밀양단층과 모량단층 사이의 밀양 얼음골 지역에서는 NNE 방향의 최대 응력장이 확인되었다. 양산 동면의 화강암 지역에서는 NE~ENE 방향으로 작용하는 최대 수평 응력장이 조사되었고 양산 통도사 우측 유천층군의 안산암류와 이를 관입한 불국사 화강암 분포 지역에서는 EW~NW에 가까운 최대 수평응력장이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 절대적으로 우세한 방향성은 나타나지 않았으나 빈도 면에서 WNW~NW, NE~ENE 방향 순으로 나타났다.
6. 지금까지 현장 조사 자료를 근거로 경상분지 내 300 m 미만 심도 영역의 초기응력 분포 특성에 대해 간략하게 논의하였는데 보다 상세하고 포괄적인 공학적 정보를 얻기 위해서는 300 m 이상의 대심도 영역에 대한 조사와 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 배성호, 2005, 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
2. 배성호, 전석원, 최용근, 김재민, 서울 중심부 편마암 분포지역 저심도 구간의 압반 초기응력 분포특성 연구, 한국터널공학회, Vol. 5, No. 2, pp. 147-159.
3. 이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화, 1993, 연양지역을 중심으로 한 양산단층에 관한 연구-특히 파쇄작용과 자기비등방성 고찰을 중심으로-, 대한지질학회지, Vol. 29, No. 2, pp. 128-144.
4. 윤희상, 2003, 단열 구조 분포 특성화와 사면 안정성 해석 연구, 이학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
5. 채병근, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달상태, 지질학회지, Vol. 30, pp. 379-394.
6. 최성자, 최위찬, 류충렬, 이영준, 2000, 모량 단층 중북부의 분절현상, 한국자원공학회, 대한자원환경지질학회, 한국지구물리탐사학회, 춘계 공동 학술발표회 논문집, pp. 105-106.
7. Jager, J.C., Cook, N.G.W., 1969, Fundamentals of rock mechanics, Methuen & Co Ltd.
8. Kelhe, R.O., 1964, The determination of tectonic stress through analysis of hydraulic well fracturing, Journal of Geophysical Research, Vol. 69, pp. 259-273.
9. Lee, M.Y., Haimson, B.C., 1989, Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Geomechanics Abstracts, Vol. 26, No. 6, pp. 447-456.
10. Lee, M.Y., 1991, Advances in instrument, data analysis, and calculation in hydraulic fracturing, Doctoral Thesis, University of Wisconsin-Madison, U.S.A..
11. Hubbert, M.K., Willis, D.G., 1957, Mechanics of hydraulic fracturing, Trans., AIME, Vol. 210, pp. 153-166.
12. Hudson, A., Harrison, J.P., 1997, Engineering rock mechanics-An introduction to the principles, Pergamon.

**배 성 호**



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공  
학석사  
2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스  
템공학부 공학박사  
Tel: 02-3472-2261  
E-mail: shbae007@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 상무이사

**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@rockeng.snu.ac.kr  
현재 서울대학교 공과대학 지구환경  
시스템공학부 부교수

**김 재 민**



1993년 안양과학대학교 전자계산학과 공  
학사  
Tel: 02-3700-9312  
E-mail: kjm504@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부  
부장

**김 장 순**



2000년 세명대학교 자원공학과 공학사  
2003년 세명대학교 대학원 환경안전시  
스템공학과 공학석사  
Tel: 02-3472-2261  
E-mail: kjm\_js@geogeny.biz  
현재 (주) 지오제니 컨설턴트 지반사업부  
과장