

한반도 남동부의 현생 응력장

이준복¹ · 장찬동^{1*}

¹충남대학교 지질환경과학과

Current State of Stress in South-East Korea

Jun Bok Lee¹, and Chandong Chang^{1*}

¹Dept. of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University

한반도 남동부 지역 총 84개의 시추공에서 수행된 수압파쇄시험과 오버코어링시험 자료를 수집하여 현생 응력의 방향과 크기를 분석하였다. 한반도 남동부에 작용하는 평균 최대수평주응력 방향은 N66°±31°E로 나타났다. 주응력간의 상대적인 크기는 대부분의 지역에서 최대, 최소 수평주응력(σ_H , σ_h)에 비해 연직응력(σ_v)이 가장 작은 thrust fault stress regime을 보였다. 축압계수(K, 수평응력/연직응력)는 연구지역의 북동부(삼척과 울진 포함)와 남서부(양산과 거제 포함)에서 상대적으로 높은 값(2.2<K<2.6)을 보였으며 연구지역의 북서부(영주와 상주 포함)와 남동부(부산과 경산 포함)에서 상대적으로 낮은 값(1.2<K<1.5)을 보였다. 분석 결과는 K값이 높은 일부 지역에서 특정방향의 단층에 작용하는 전단응력이 마찰평형상태까지 높은 값을 보일 수 있으며 이러한 방향의 단층이 있을 경우 역학적으로 불안정할 수 있다는 점을 시사한다.

주요어 : 한반도 남동부, 현생 응력장, 축압계수, 단층

We collected data of hydraulic fracturing tests and overcoring tests conducted in 84 boreholes in the south-east Korea in order to analyze the contemporary state of stress in this region. The average direction of the maximum horizontal stress was determined to be N66°±31°E. The relative magnitudes of the three principal stresses was σ_v (vertical stress) < σ_h (minimum horizontal stress) < σ_H (maximum horizontal stress), indicating thrust fault stress regime. The stress ratio K (horizontal stress/vertical stress) was relatively high (2.2<K<2.6) at the NE region (including Samcheok and Uljin) and at the SW region of the study area (including Yangsan and Geoje), while it was relatively low (1.2<K<1.5) at NW (Youngju and Sangju) and at SE (Pusan and Kyeongsan) region. The analysis results indicate that along faults oriented at certain directions in some high K regions, the shear stress can reach values as high as Byerlee's frictional equilibrium, suggesting that some faults (if exist) can be mechanically unstable.

Key words : south-east Korea, contemporary stress, stress ratio, faults

서 론

대규모 지하 구조물(터널, 지하저장시설 그리고 방사성 폐기물 처분장 등)의 건설 요구 증가와 한반도에서 발생한 일련의 지진(1996년 영월 진도 4.5, 1997년 경주 진도 4.2, 2007년 평창 진도 4.8)의 영향으로 지반 응력장 규명에 대한 관심과 필요성이 높아지고 있다. 특히 원자력 발전소와 LPG저장소 등의 대규모 구조물들과 양산단층과 울산단층을 비롯한 여러 단층들이 분포

하는 한반도 남동부 지역의 현생 응력장 규명은 지질공학적인 측면에서 대단히 중요하다.

한반도 남동부 지역에서는 그동안 여러 가지 다른 방법을 통하여 응력장을 규명하려는 노력이 진행되어 왔다. 먼저 단층활면과 단층조선의 방향성을 통해 과거 단층에 작용했던 응력장을 분석하는 구조운동사적인 방법(Hwang and Jacques, 1992; 장천중과 장태우, 1998; 장태우, 2001; Kim and Park, 2006; Park *et al.*, 2006; 장태우 외, 2007)과 암석이 가지고 있는 자기적 성질이나 광

*Corresponding author: cchang@cnu.kr

물들의 변형, 미세구조, 파쇄상 등을 통한 응력장 연구(김인수, 1988; 김인수, 1990; 김영화 외, 1996; 장보안과 정해식, 2005), 그리고 현생 지진을 통한 응력장 연구(김소구와 송지석, 1999; 전명순 외, 1999; 경재복 외, 2001) 등이 그것이다. 특히 Park *et al.*(2006)과 전명순 외(1999)는 4기 단층과 한반도 지진 자료 분석을 통해 최대수평주응력 방향을 N70°E 내외로 추정하였으며 김영화 외(1996)는 미세균열의 시료 분석을 통하여 경상 분지 고응력장이 주로 strike-slip fault stress regime ($\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$)이라는 결과를 얻었다.

기존의 연구들은 주로 과거에 작용했던 응력장에 대한 연구이며 4기 단층과 역사 지진자료를 통한 현생 응력장의 분석이라 할지라도 응력의 방향만을 중심으로 연구가 진행되었을 뿐 응력의 크기에 대한 정량적인 연구는 미흡한 실정이다. 이 때문에 분석결과를 단층의 역학적 안정성 해석이나 지하구조물의 파괴거동과 같은 다양한 역학적 분석에 직접적으로 적용하는 것에는 한계가 있다. 본 연구에서는 토목 관련업계에서 측정된 현생 지반응력의 크기와 방향 자료를 수집하여 한반도 남동부의 응력장을 분석하였다. 이러한 응력장 분석을 통하여 연구지역의 응력장 분포 특성을 알아보고 현생응력장의 특성에 근거한 단층의 역학적 안정성 분석을 시도하였다.

연구지역 및 지반 응력자료

본 연구지역은 한반도의 지체구조로 볼 때 경상분지를 주된 지역으로 일부의 소백산육계(영남육계)와 옥천대를 포함한다. 경상분지는 주라기 말과 백악기 초의 육성 퇴적층, 화산암류 그리고 화산쇄설성 퇴적암의 호층으로 구성되며, 후기 백악기 내지 제3기 초기의 산성암류에 관입당하고 있다(대한지질학회, 1999). 소백산육계(영남육계)와 옥천대의 지질의 분포는 전자의 경우 편마암복합체, 편암복합체 그리고 화강암질로 구성되어 있으며 후자의 경우 편마암류와 편암복합체를 기반암으로 하여 그 상부에 변성 퇴적암류와 화성암류, 그리고 작은 규모의 제3기 퇴적암, 화산암 그리고 관입암류가 분포한다(대한지질학회, 1999). 또한 양산, 울산단층대를 비롯한 제4기 단층으로 밝혀진 많은 단층들을 포함하고 있는 지역이다.

본 연구지역에서는 그동안 도로, 발전소, 지하저장소 등의 건설 및 대규모 토목공사 목적으로 다수의 지반응력 측정이 이루어졌으며 이들 기존의 자료들을 최대한

수집하여 한반도 남동부 지역의 응력장 분석에 이용하였다. 수집된 응력장 자료들은 대부분 수압파쇄법을 통해 얻어졌으며 일부 오버코어링법으로 얻어진 자료들을 포함한다. 두 가지 응력측정법 모두 국제 암반역학회에서 공인된 응력측정법이다(International Society for Rock Mechanics, 1987).

수압파쇄법은 시추공내의 측정심도 구간 상하를 팍커로 밀폐한 뒤 이 구간 내에 수압을 가하여 시추공벽 암반을 인장파괴한 후 발생한 수압파쇄 균열의 열림과 닫힘에 따른 압력 변화양상의 측정을 통해 지반 응력을 산정하는 방법이다. 발생한 수압파쇄 인장균열은 시추공 주변 국지적 압축응력이 최소화되는 최대수평주응력 방향의 시추공벽 마주보는 두 방향으로 발생하며 공내 영상검층이나 임프레션 팍커를 이용하여 그 방향을 파악한다. 오버코어링법은 변위 계측기를 설치한 시험공 외곽의 오버코어링을 통해 초기응력을 해방시킴으로써 발생한 암반 변형을 통해 응력을 간접적으로 산출하는 방법이다.

한반도 남동부 일대 60개의 시추공에서 수압파쇄 시험을 통해 측정된 총 254개의 응력자료(각 공당 깊이마다 2-11개의 자료로 구성)를 수집하였으며 24개의 시추공에서 오버코어링법을 통해 측정된 8개의 응력자료(3조의 시추공에서 1개의 응력텐서 측정)를 수집하였다(임한욱과 이정인, 1991; 최성웅, 1997; 김수정, 2002; Haimson *et al.*, 2003; 배성호 외, 2005; 최성웅 외, 2005).

임한욱과 이정인(1991)은 오버코어링법을 이용하여 전국의 광산 및 지하 저장소에서 상대적으로 깊은 심도(142-802 m)의 지반 응력을 측정하였으며 이 중 한반도 남동부에 해당되는 울진과 울산의 자료를 이용하였다. 최성웅(1997)은 국내 다수의 지역에서 수압파쇄 시험을 통해 측정된 응력 자료를 보고하였으며, 그 중 본 연구지역에 포함되는 영천, 여천 그리고 무주의 지반 응력 자료를 이용하였다. 김수정(2002)은 토목 건설 목적으로 산업계에서 측정된 다수의 지반 응력 자료들을 수집하였다. Haimson *et al.*(2003)은 서울, 평택, 여수, 거제 지역에서의 수압파쇄 시험결과를 보고하였으며 이들 자료 중 본 연구지역에 속하는 여수와 거제 자료를 본 연구에서 이용하였다. 현재 이 결과는 World Stress Map database에 등재되어 있다. 최성웅 외(2005)는 수압파쇄법을 이용하여 양산단층 서측과 동측의 지반응력을 측정하여 단층의 거동 특성을 파악하였다. 이들 자료 중 일부는 자료의 질적인 판단을 하기에는 취득 과정에 대한 상세한 기술이 없었다. 단지 각각의 자료 취득 기

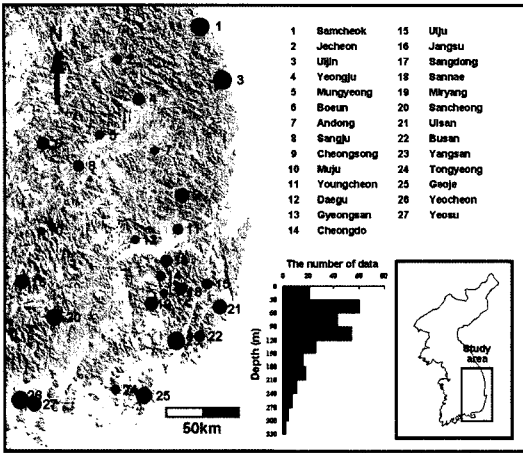


Fig. 1. Stress measurement locations. The size of circles indicates the maximum depth at which stress field was determined.

관들에 자료를 요청하여 확인하는 작업을 거쳐 최대한 신뢰성을 높이려는 노력을 하였다. 또한 자료수집과 더불어 본 연구의 일환으로 양산단층 서편 인접지역(경남 양산시 물금읍)에 연직심도 300 m의 연구용 시추공을 굴착하였으며 수압파쇄응력측정을 수행하여 기존 응력 자료와 비교함으로써 자료의 신뢰성을 높이려는 시도를 하였다.

총 84개의 시추공에서 규명된 응력자료를 편의상 27 개의 지역으로 나누어 본 연구에 이용하였다. 각 지역의 위치는 최대 응력측정심도에 따라 크기를 구분하여 Fig. 1 에 도시하였다. 저 심도에서의 응력 측정값은 지형적 기복, 지질학적 구조, 암종 등에 따라 국지적 영향을 받을 수 있으므로 심도별로 응력 자료에 대한 질적 구분을 하는 것은 중요하다(Haimson *et al.*, 2003). World stress map에 의하면 응력자료의 질적인 상태에 따라 A, B, C, D, E의 5개의 등급으로 구분한다(Zoback, 1992). 본 연구에서 이용된 자료는 그 결과로만 판단할 때 대부분 B 내지 C 등급에 속한다.

연구결과

최대수평주응력 방향

지각 내 주어진 응력상태에서 임의의 면에 작용하는 전단응력(shear stress)이 0이 되는 면에 작용하는 수직 응력을 주응력(principal stress)이라 하며 주응력은 한 점에서 직교하는 세 성분이 있으며 상대적 크기에 따라 최대, 중간, 최소 주응력이라 정의된다. 수압파쇄법과 오

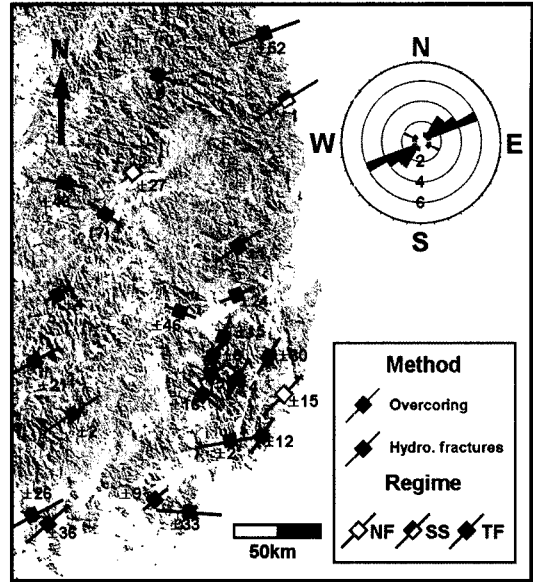


Fig. 2. Maximum horizontal stress directions indicated by lines. The length of the lines indicates the maximum depth at which stress field was determined. The number marked adjacent to each location indicates the standard deviation of maximum horizontal stress directions.

버코어링법을 통해 측정된 각 시추공 주변 해당지역에 작용하는 최대수평주응력(σ_H)의 방향은 총 262개의 응력자료 중에서 방향이 측정되지 않은 15개의 자료를 제외한 247개의 자료 분석을 통해 도출되었다. Fig. 2에 보인 지역별 최대수평주응력 방향은 각 시추공별 평균 최대수평주응력 방향을 계산한 후에 이를 근거로 각 지역별 평균값을 산정하여 도시한 것이다. Fig. 2에서 선의 방향은 해당 지역의 최대 수평주응력방향을 나타내며 선의 길이는 응력이 측정된 최대심도를 나타낸다.

최대수평주응력의 방향은 전체적으로 ENE 방향의 경향을 보인다. 이러한 경향은 전체 지역의 최대수평주응력 방향을 도시한 rosette diagram을 통해 보다 명확히 확인할 수 있다. 그러나 일부 한반도 내륙지역(상주, 보은, 제천, 대구 등)에서는 최대수평주응력 방향이 ESE 방향의 경향을 보이기도 한다. 이러한 경향은 낮은 측정 심도(제천: 41 m, 보은: 65 m, 상주: 64 m, 대구: 32 m)에 따른 지형적 영향으로 사료된다. Fig. 2의 각 지역에 표시한 숫자는 최대수평주응력 방향에 대한 표준편차를 의미한다. 각 지역별 최대수평주응력 방향에 있어서 표준편차는 대부분 $\pm 36^\circ$ 이내의 비교적 일관된 방향으로 나타났으며 일부 지역(삼척, 보은, 대구)에서는 표준편차

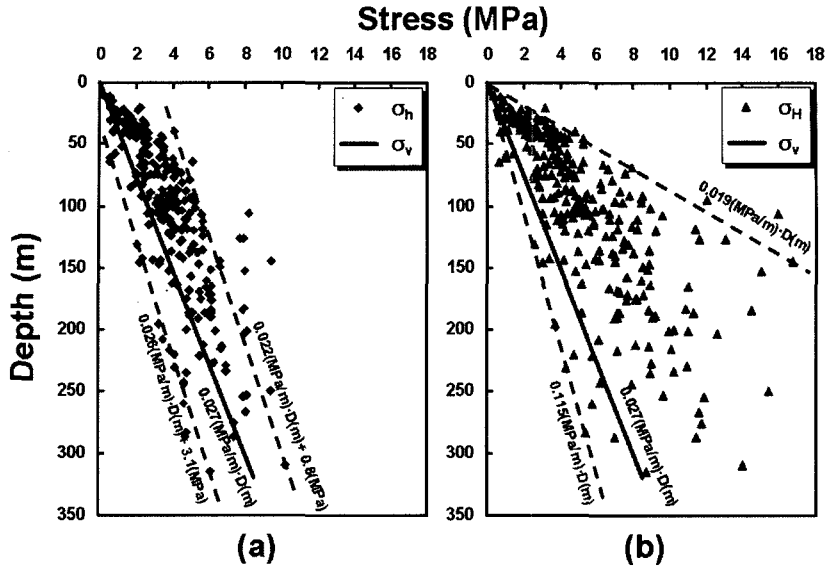


Fig. 3. Magnitudes of the least principal stresses (a), and the maximum principal stresses (b) plotted as a function of depth.

가 상대적으로 크게($\pm 40^\circ$ 이상) 나타났다. 삼척, 보은 지역의 경우 다른 지역에 비해 다양한 측정심도(삼척: 31-309 m, 보은: 28-152 m)의 여러 수직공(삼척 7개, 보은 6개)에서 측정된 응력자료이며, 대구 지역의 경우 비교적 낮은 측정심도(최대 40 m)에서 얻은 자료라는 점에서 지형적 요인이 크게 작용한 것으로 사료된다.

수압파쇄법을 통한 주응력 방향의 유추는 연직 방향이 하나의 주응력 축이고 다른 두 주응력은 수평면에 위치한다는 가정 하에 이루어진다. 실제로 수압파쇄 균열의 방향이 연직적인지 기울어져 있는지가 이 가정의 적합성을 판별할 수 있지만 우리가 이용한 대부분의 자료에서 그러한 정보를 구체적으로 얻을 수 없었으므로 그 타당성을 직접적으로 증명하기에는 한계가 있다. 다만 세 주응력의 방향을 독립적으로 측정하는 오버코어링법 결과에서의 최대수평주응력 방향이 수압파쇄법의 결과와 서로 유사한 경향을 보이므로 일정정도 자료에 일관성이 있음을 보여준다.

본 연구를 통하여 한반도 남동부의 평균 최대수평주응력 방향은 $N66^\circ \pm 31^\circ E$ 로 나타났다. 본 연구에서 얻은 최대수평주응력 방향은 기존의 다른 방법을 통해 얻은 결과와 상당히 유사하다. 동일지역 4기 단층의 단층조선 방향을 통해 추정된 최대수평주응력 방향은 장태우(2001)가 밝힌 $N83^\circ \pm 30^\circ E$ 의 준 수평방향(plunge $10^\circ \pm 10^\circ$)과 Park et al.(2006)이 밝힌 $S70^\circ W$ 의 준 수평방향(plunge 8°)과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한 전

명순 외(1999)가 한반도 지진자료의 focal mechanism을 통해 구한 $S74^\circ \pm 11^\circ W$ 의 준 수평방향(plunge $2^\circ \pm 7^\circ$)과도 유사하다. 다만 전자의 fault slip analysis법을 통해 유추한 최대주응력 방향의 경우 과거에 발생한 단층의 변위로부터 도출하기 때문에 약간의 시기적인 차이가 있을 수 있으며 focal mechanism을 통해 구한 방향의 경우 기존 단층의 slip에 의한 displacement field를 이용하여 간접적으로 최대 주응력 방향을 유추하기 때문에 직접적인 측정방법을 통해 구한 본 연구의 최대 수평주응력 방향과 방법적인 차이를 보일 수 있다. 이러한 차이에 대한 연구는 앞으로 추가적인 연구를 통하여 보다 명확히 규명되어야 할 부분이다.

주응력의 크기

오버코어링법의 경우 세 방향의 주응력 크기를 모두 파악할 수 있는 반면에 수압파쇄법은 시험의 특성상 수평응력의 크기만을 산정할 수 있다. 수압파쇄시험의 경우 연직응력은 상재하중(overburden)을 통해 산정한다. 즉 연직응력(σ_v)은

$$\sigma_v = \gamma \cdot D \tag{1}$$

로 주어진다. 여기서 γ 는 시험 깊이까지 부과되는 평균 상재하중(본 연구에서는 0.027 MPa/m 를 사용)이며 D 는 심도(m)이다. 연직응력 산정에 있어 상재하중의 가정은

세계 여러 지역에서 측정된 실제자료와 비교해 볼 때 큰 무리가 없다(Brown and Hoek, 1978; McGarr and Gay, 1978).

연직응력과 더불어 연구지역내 84개 시추공에서 측정된 총 262개의 수평응력 측정 자료를 Fig. 3에 심도의 함수로 도시하였다. 최대수평주응력(Fig. 3b)은 분산정도가 깊이에 따라 증가하여 전체적으로

$$0.019(\text{MPa/m}) \cdot D(\text{m}) < \sigma_H < 0.115(\text{MPa/m}) \cdot D(\text{m}) \quad (2)$$

의 구간 내에 부채꼴 모양으로 분포한다. 반면에 최소수평주응력(Fig. 3a)은

$$0.026(\text{MPa/m}) \cdot D(\text{m}) + 3.07(\text{MPa}) < \sigma_h < 0.022(\text{MPa/m}) \cdot D(\text{m}) + 0.76(\text{MPa}) \quad (3)$$

의 상대적으로 제한된 분포 범위를 보이며 심도에 따른 증가율이 연직응력과 비슷한 경향으로 나타난다. 최소수평주응력 크기는 연직응력 크기에 비해 다소 높게 나타나는 경향이 있다. 그러나 최대수평주응력과 최소수평주응력의 분산이 크기 때문에 전체 자료를 통해 한반도 남동부 응력장을 일괄적으로 파악 하는 것은 다소 무리가 있다.

각 지역별 주응력의 상대적인 크기를 비교해 보면 문경과 울산지역($\sigma_h < \sigma_H < \sigma_v$), 울진지역($\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$)을 제외

한 대부분의 지역에서 연직응력이 최소주응력이 되는 thrust fault stress regime($\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$)을 보인다(Fig. 2 참조). 이 결과는 한반도 남동부에 위치한 양산단층의 주된 운동양상(주향이동)과 상이한 결과이다. 하지만 상대적으로 과거(백악기와 제3기)에 복잡한 운동양상을 보인 양산단층의 주된 운동양상과 현생 응력장의 직접적인 비교는 다소 무리가 있다. 다만 현재 본 연구지역에서는 다수의 제 4기 역단층이 발견되고 있어(최위찬 외, 1998; 이봉주 외, 1999; 장태우, 2001; 경북북과 장태우, 2001; 최범영, 2002; Park *et al.*, 2006) 본 연구결과와 타당성을 부분적으로 보여준다. 또한 stress regime은 심도에 따라서도 변할 수 있기 때문에(McGarr *et al.*, 1982; Zoback and Hickman, 1982) stress regime과 단층의 운동양상의 규명은 앞으로 대심도의 응력측정과 같은 추가적인 연구를 통하여 보다 명확하게 규명되어야 할 부분이다.

측압계수

연구지역의 응력 특성을 알아보기 위하여 측압계수($K = \text{수평응력} / \text{연직응력}$)를 계산하였다. 연직응력은 상재 하중(또는 밀도)에 비례하여 심도에 따라 거의 선형적으로 증가하므로 연직응력에 대한 수평응력의 비인 측압계수는 해당 지역의 응력 특성을 나타낸다. 두 수평주응력(σ_H, σ_h)에 대한 각각의 측압계수 K_{max} 와 K_{min} 를 Fig. 4에 심도에 따라 나타내었다. 평균 K_{max} 값과 K_{min}

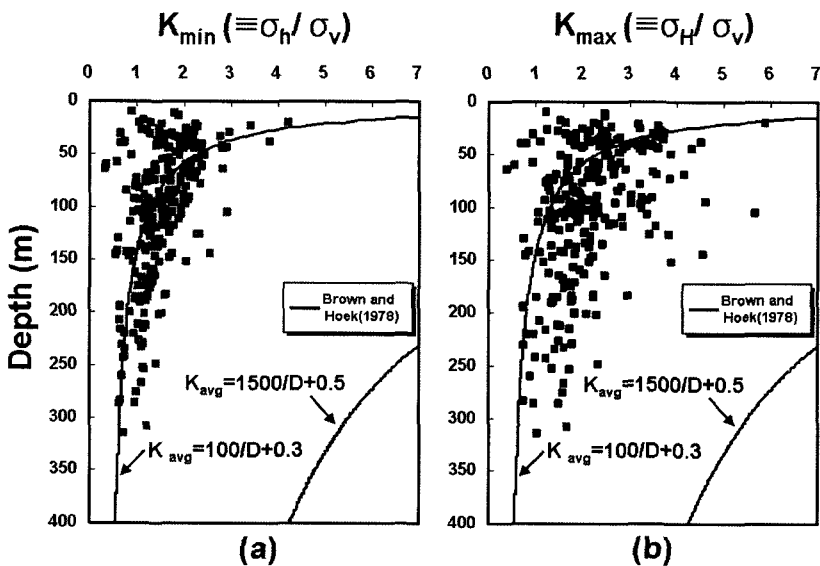


Fig. 4. Stress ratio of σ_h/σ_v (a) and of σ_H/σ_v (b). Also plotted are two reference lines obtained by Brown and Hoek (1978) for comparison. K_{avg} is the stress ratio between the mean horizontal stress and vertical stress.

값은 각각 1.95와 1.43으로 나타나 전반적으로 연직응력이 최소주응력인 thrust fault stress regime이 우세한 것을 재확인할 수 있다. 각 축압계수의 심도에 따른 분포 경향을 자세히 살펴보면 심도가 깊지 않는 곳에서 K_{max} 의 값은 최대 6정도의 값을 보이다가 심도가 깊어짐에 따라 점차 감소하여 약 2정도의 값으로 수렴함을 보였다. K_{min} 의 값도 K_{max} 의 값과 비슷한 경향으로 지표부근에서 최대 4정도의 값을 보이다가 심도가 깊어짐에 따라 점차 감소하여 약 1정도의 값으로 수렴함을 보였다.

한반도 남동부 지역의 응력상태는 세계 여러 지역에서 측정된 축압계수를 근거로 제시한 Brown and Hoek (1978)의 축압계수 하한 경계선에 그 값이 대부분 위치하는 것으로 나타났다. 특히 상대적으로 심도가 깊지 않은 지역(50 m내외)에서 측정된 상당한 양의 자료들이 Brown and Hoek(1978)의 축압계수 상, 하한 경계에 포함되지 않는 것을 볼 때 어느 지역의 응력은 반드시 해당 지역에서 측정되어야 한다는 점을 알 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 보인 바와 같이 한반도 남동부 일대의 심도에 따른 응력 분포 경향을 일괄적으로 분석하기에는 자료의 분산정도가 크기 때문에 지역에 따라 응력장 크기의 변화가 있을 것으로 유추된다. 이를 확인하기 위하여 각 응력장 크기의 자료를 근거로 하여 지역별 응력 변화 양상을 분석하였다. Fig. 5는 응력 측정 지역에서의 K_{max} 와 K_{min} 값을 기준으로 그 사이 지역들을 선형 내삽하여 전 지역에서의 축압계수 변화양상을 나타낸 그림이다. 다만 각 지역에서의 축압계수는 응력 측정 심도에 따라 일부 영향(Fig. 4참조)을 받기 때문에 이를 고려하여 최대 응력측정심도에 따라 원의 크기를

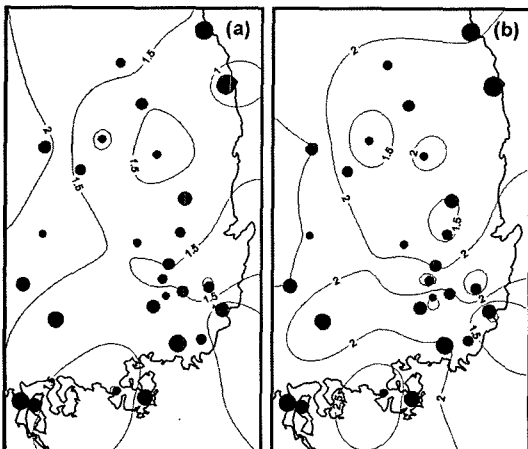


Fig. 5. Contour of stress ratio K (horizontal stress/vertical stress) (a) K_{min} ($=\sigma_H/\sigma_V$), (b) K_{max} ($=\sigma_H/\sigma_V$).

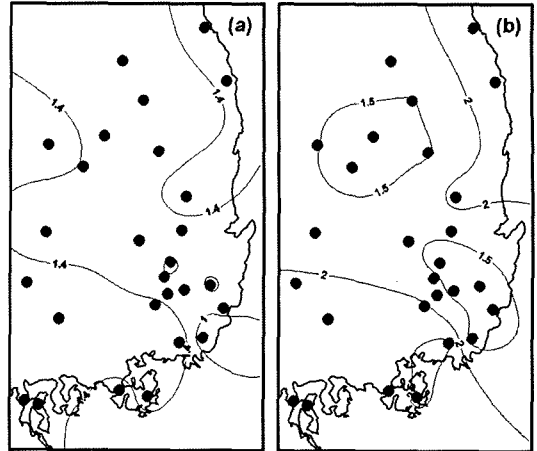


Fig. 6. Contour of stress ratio K (after depth correction). (a) K_{min} ($=\sigma_H/\sigma_V$) (b) K_{max} ($=\sigma_H/\sigma_V$).

달리하여 도시하였다.

축압계수를 통하여 각 지역의 응력특성을 비교해 보면 무주와 장수를 포함한 연구지역의 서쪽, 울주를 포함하는 동쪽 일부지역, 그리고 통영을 포함하는 연구지역의 남쪽에서 K_{max} 와 K_{min} 의 값이 상대적으로 높게 ($1.8 < K_{min} < 2.2$, $2.5 < K_{max} < 3.2$) 나타나는 반면에 문경, 울진, 청송에 이르는 연구지역의 북동쪽과 울산과 상동 지역에 이르는 연구지역의 남동쪽에서는 K_{max} 와 K_{min} 의 값이 상대적으로 낮음($0.6 < K_{min} < 1.1$, $0.8 < K_{max} < 1.4$) 값의 경향을 보였다.

그러나 Fig. 4에 보인 바와 같이 축압계수는 심도에 따라 그 값이 변하기 때문에 단순히 측정심도가 다른 축압계수 값의 비교만으로는 지역에 따른 일관적인 응력장 비교를 할 수 없다. 따라서 일정심도(100 m)로 그 값을 보정하여 응력특성을 비교하였다(Fig. 6). 그 결과 삼척 울진을 포함하는 연구지역의 북동부와 양산과 거제를 포함하는 연구지역의 남서부에서 축압계수가 상대적으로 높은 경향($1.4 < K_{min} < 1.8$, $2.2 < K_{max} < 2.6$)으로 분포하며 영주와 상주를 포함하는 연구지역의 북서부와 부산과 경산을 포함하는 연구지역의 남동부에서 상대적으로 축압계수가 낮은 경향($0.7 < K_{min} < 1.4$, $1.2 < K_{max} < 1.5$)을 보인다. 낮은 축압계수 분포 지역이 마치 울산단층대를 따라 나타나는 경향은 흥미롭다.

토 론

지금까지 분석된 한반도 남동부 지역의 응력장은 여

러 용도로 활용될 수 있다. 먼저 지질공학적으로 지하구조물 안정성 분석에 있어 필수적으로 요구되는 지반 응력장 자료의 기본을 제공한다. 즉, 지역에 따른 응력 특성에 대한 응력지도를 제공함으로써 지하구조물 설계시에 일차적인 응력의 근사값으로 이용될 수 있다. 또한 응력장은 단층의 역학적 안정성을 분석하기 위해서도 이용될 수 있다. 여기서는 후자의 경우에 대해 기술하려 한다.

단층의 역학적 안정성을 분석하기 위해서는 크게 두 가지 요소를 이해하여야 한다. 지반에 작용하는 응력장(크기와 방향)과 단층운동을 발생시킬 수 있는 응력상태(즉, 단층 강도)이다. 작용하는 응력장을 단층역학에 이용할 때에는 지반에 작용하는 공극압(p_0)을 빼 준 유효 응력의 개념,

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p_0 \delta_{ij} \quad (4)$$

를 이용해야한다. 여기서 σ'_{ij} 와 σ_{ij} 는 각각 유효응력과 전응력(total stress)이며 δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 즉, 공극압은 수직응력에서만 감해진다. 공극압의 크기는 피압 대수층에서 국지적으로 다소 크게 나타날 수 있으나 거시적으로는 지각 내에서 정수압 상태로 작용하는 것으로 알려져 있다(Townend and Zoback, 2000; Zoback and Townend, 2001).

단층강도, 즉 단층 slip이 발생하는 응력 조건은 보통 Coulomb 기준식으로 주어진다. 즉,

$$\tau_{cr} = \mu \sigma' \quad (5)$$

여기서 τ_{cr} 은 단층운동을 유발시키는 임계전단응력이며 σ' 은 단층면에 작용하는 유효수직응력, μ 는 마찰계수이다. 마찰계수는 불연속면의 특성(거칠기, 충전물, 변형속도, 온도, 임중 등)에 따라 다르지만 대체로 0.6-1.0의 범위에 드는 것으로 알려져 있다(Byerlee, 1978).

앞에 분석된 한반도 남동부의 응력상태를 토대로 정수압으로 가정된 공극압을 고려하여 각 지역에서의 유효수직응력을 계산하였다. 이를 통해 해당지역의 방향에 따른 유효수직응력(σ')과 전단응력(τ)을 산정하여 식 (5)로 주어지는 단층강도식과 비교하였다. 방향에 따른 응력상태는 Mohr응력원의 형태로 표현되는데 각 지역에서의 최대, 최소수직응력을 기준으로 Mohr원을 Fig. 7에 도시하였다. 측정 심도의 차이를 배제하기 위해 유효연직응력으로 정규화하여 도시하였다. 즉, Fig. 7의 Mohr원은 27개 지역에서의 방향에 따른 σ' 와 τ 의 자취점이다.

Fig. 7에 식 (5)로 주어지는 강도식과 비교해보면 측압계수가 낮은 지역의 Mohr원은 $\mu=0.6$ 기준선을 넘지 못하는데 반해 측압계수가 높은 지역(양산, 거제)의 Mohr원은 그 일부가 $\mu=0.6$ 기준선을 넘어서는 결과를 보인다. 이 결과는 한반도 남동부에 위치한 측압계수가 높은 지역에서 $\mu=0.6$ 기준선을 넘어서는 방향의 단층이 마찰평형상태에 있고 역학적으로 안정되지 않을 수 있다는 것을 지시한다. 연구지역의 최대수평주응력 방향($N66^\circ \pm 31^\circ E$)을 고려하면 측압계수가 높은 지역에서 $N24^\circ \pm 31^\circ W$ 주향의 $30^\circ \pm 14^\circ$ 경사 단층은 현재의 응력장 하에서 역학적으로 안정되지 않을 수 있다는 점을 시사한다.

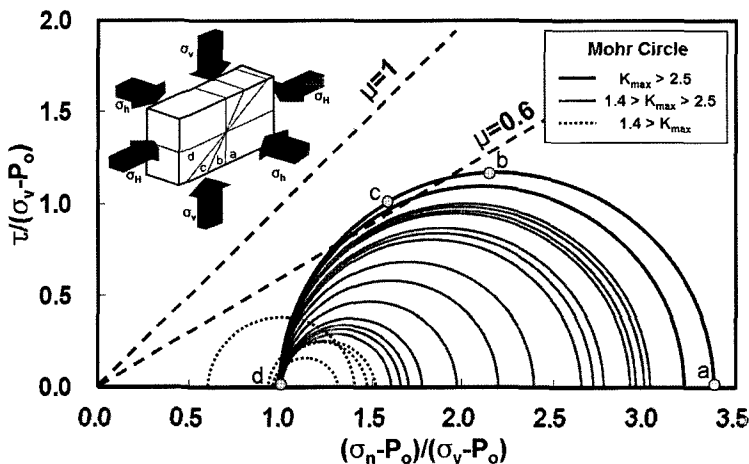


Fig. 7. State of stress in the south-east Korea plotted in the Mohr diagram. Shear and normal stresses on the planes at different orientations for a given state of stress are indicated by different points designated with a, b, c and d.

결 론

본 연구에서는 기존에 측정된 응력의 크기와 방향자료를 수집하여 한반도 남동부의 응력장을 분석하였으며 그 결과를 이용하여 현생응력에 근거한 단층의 역학적 안정성 분석을 시도하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 한반도 남동부의 27개 지역에서 총 262회의 응력 자료 수집 및 분석 결과 최대수평주응력 방향은 평균 $N66^{\circ}\pm 31^{\circ}E$ 로 나타났다.

(2) 한반도 남동부의 응력상태는 normal fault stress regime 2개 지역($\sigma_H < \sigma_H < \sigma_V$, 문경, 울산)과 strike-slip fault stress regime 1개 지역($\sigma_H < \sigma_V < \sigma_H$, 울진)을 제외한 대부분의 지역에서 thrust fault stress regime($\sigma_V < \sigma_H < \sigma_H$)을 보였다.

(3) 등심도로 보정된 축압계수의 지역적 비교 결과 연구지역의 북동부(삼척, 울진포함)와 남서부(양산, 거제 포함)에서 상대적으로 축압계수가 높은 경향($1.4 < K_{min} < 1.8$, $2.2 < K_{max} < 2.6$)을 보였으며 연구지역의 북서부(영주, 상주포함)와 남동부(부산, 경산포함)에서 상대적으로 축압계수가 낮은 경향($0.7 < K_{min} < 1.4$, $1.2 < K_{max} < 1.5$)을 보였다.

(4) 축압계수가 상대적으로 높은 지역(양산, 거제)에서는 Mohr원의 일부가 $\mu=0.6$ 기준선을 넘어서며 이는 한반도 남동부의 평균 최대주응력의 방향이 $N66^{\circ}\pm 31^{\circ}E$ 임을 감안할 때 $N24^{\circ}\pm 31^{\circ}W$ 주향의 $30^{\circ}\pm 14^{\circ}$ 경사 단층이 현재의 응력장 하에서 역학적으로 안정되지 않을 수 있다는 점을 시사한다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원사업(과제 번호:R01-2006-000-10457-0)의 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

경재복, 정태웅, 이재구, 이덕기, 이은아, 2001, 남한 중부지역에서 발생한 미소지진의 단층면해와 응력장 해석, 한국지구과학회지, 22(4), 292-300.
 경재복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리일대의 신기 단층운동, 지질학회지, 37(4), 563-577.
 김수정, 2002, 한국의 지질에 적합한 설계정수 도출에 관한 연구, 경북대학교 이학박사 학위 논문, 320.
 김소구, 송지석, 1999, 화강분리를 이용한 한반도 주변의 응력장 연구, 한국지구과학회지, 20(2), 166-178.
 김영화, 장보안, 박상욱, 1996, 양산단층 지역의 화강암

체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고응력장, 32(5), 367-378.
 김인수, 1988, 부산지역 백악기 다대포층에 대한 고자기학적 연구: 그의 층서적, 지구조적 의의, 지질학회지, 24(3), 211-233.
 김인수, 1990, 포항이남 제3기분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장, 광산지질, 23(1), 59-71.
 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 336-342.
 배성호, 전석원, 김학수, 김재민, 2005, 수압파쇄법에 의한 국내 과잉 수평응력 분포 특성에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 21(5), 103-110.
 이봉주, 류충렬, 최위찬, 1999, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층. 지질학회지, 35(1), 1-14.
 임한욱, 이정인, 1991, 심도에 따른 암반내 초기응력의 변화와 그 경향성, 터널과 지하공간, 1, 91-101.
 장보안, 정해식, 2005, 마산 및 양산 일대의 백악기 화강암류의 아문 미세균열과 유체포유물 연구를 통한 백악기 및 신생대 고응력장 분석, 지질학회지, 41(1), 59-72.
 장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사, 지질공학, 8(1), 35-49.
 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동, 지질학회지, 37(3), 431-444.
 장태우, 정재혁, 장천중, 2007, 한반도 동남부 제3기 어일분지 및 와읍분지의 지구조 운동, 지질공학, 17(1), 27-40.
 전명순, 전정수, 제일영, 1999, 한반도 지진의 메카니즘 특성, 한국지진공학회 추계학술대회 논문집.
 최범영, 이창범, 류충렬, 최영섭, 김주용, 현혜자, 김유성, 김중렬, 최위찬, 2002, 제4기 말방단층의 기하분석: 시추자료 및 지표자료의 해석, 지질학회지, 38(2), 163-174.
 최성용, 1997, 현지암반 초기지압의 분포특성 및 암반터널설계에의 적용, 터널과 지하공간, 7, 323-333.
 최성용, 이병주, 신희순, 2005, 양산단층대 주변의 현지암반 응력 분포 특성에 관한 역학적 지질공학적 연구, 한국지구시스템공학회지, 42(3), 214-224.
 최위찬, 이동영, 이봉주, 류충렬, 최범영, 최성자, 조등룡, 김주용, 이창범, 기원서, 양동운, 김인준, 김유숙, 유장한, 채병근, 김원영, 강필중, 유일현, 이희권, 1998, 활성단층 조사평가 연구: 한반도 동남부 지역, 한국자원연구소 연구보고서, KR-98-(C)-22, 276-280.
 Brown E. T., Hoek E., 1978, Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15, 211-215.
 Byerlee, 1978, Friction of Rocks, Pageoph, 116, 615-626.
 Haimson B. C., Lee M. Y., Song I., 2003, Shallow hydraulic fracturing measurements in Korea support tectonic and seismic indicators of regional stress, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 40, 1243-1256.
 Hwang J. H., Angelie J., 1992, Paleostress reconstructions and the tectonic evolution of the Kyungsang Basin: a case example near Goryeong-eub, Journal of Geological Society of Korea, 28(5), 471-482.
 International Society for Rock Mechanics, 1987, Suggested methods for rock stress determination, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 24(1), 53-73.
 Kim Y. S., Park J. Y., 2006, Cenozoic deformation history

- of the area around Yangnam-Yangbuk, SE Korea and its tectonic significance, *Journal of Asian Earth Sciences*, 26, 1-20.
- McGarr A., Zoback M. D., Hanks T. C., 1982, Implications of an elastic analysis of in situ stress measurements near the San Andreas Fault, *Journal of Geophysical Research*, 87(B9), 7797-7806.
- McGarr A., Gay N. C., 1978, State of stress in the earth's crust, *Earth Planet. Sci.*, 6, 405-436.
- Park Y., Ree J. H., Yoo S. H., 2006, Fault slip analysis of Quaternary faults in southeastern Korea, *Gondwana Research*, 9, 118-125.
- Townend J., Zoback M. D., 2000, How faulting keeps the crust strong, *Geology*, 28(5), 399-402.
- Zoback M. D., Hickman S., 1982, <In situ> study of the physical mechanisms controlling induced seismicity at Monticello Reservoir, S. Carolina, *Journal of Geophysical Research*, 87, 6959-6974.
- Zoback M. D., Townend J., 2001, Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere, *Tectonophysics*, 336, 19-30.
- Zoback M. L., 1992, First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project. *Journal of Geophysical Research*, 97(B8), 11703-11728.

이준복

충남대학교 지질환경과학과 응용지질실험실
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-821-7563
Fax: 042-823-5636
E-mail: ljb3mths@cnu.ac.kr

장찬동

충남대학교 지질환경과학과 응용지질실험실
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
Tel: 042-821-6430
Fax: 042-823-5636
E-mail: cchang@cnu.ac.kr

2007년 5월 12일 원고접수, 2007년 6월 15일 게재승인