

한반도 남동부의 현생 지반 응력에 근거한 4기 단층의 역학적 안정성 해석

이준복^{1)*} · 장찬동¹⁾

1. 서 론

4기 단층은 전 세계적으로 지진활동과 밀접한 상관관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 이 때문에 한반도 남동부 지역에서는 4기 단층과 관련된 지구조 운동을 연구하기 위해 과거 단층에 작용했던 응력장을 분석하는 구조운동사적인 측면의 연구와 과거 지구조 운동에 대한 운동의 양상과 시기를 분석하는 운동학적(Kinematics)인 측면의 연구가 활발히 진행되어왔다. 그러나 활성단층의 정의가 각 나라마다 다르게 적용되고 활성 단층의 기준이 되는 단층의 운동 시기에 대한 절대 연대 측정 방법(ESR, OSL, C-14, TL, Tephra 등)의 어려움과 정확성의 한계로 단층의 활성 여부를 파악하는 것에는 어려움이 따른다.

본 연구에서는 지금까지 주로 연구되어진 과거의 지구조 운동에 대한 운동학적인 단층의 활성 여부 해석과는 다른 방법으로 단층의 안정성 여부에 대한 접근을 시도하였다. 단층의 활성 여부를 판별하기 위해서는 현생 지구조 체제에서 운동이 가능한지 여부가 중요한 조건이 된다. 일반적으로 지진은 기존 단층의 미끄러짐으로 발생되기 때문에 단층면에서의 마찰강도와 작용하는 응력장에 대한 분석이 단층 안정성 평가에 매우 중요하다. 이러한 점에 착안하여 한반도 남동부에서의 현생응력자료를 통한 단층의 역학적(Mechanics) 안정성 여부를 파악해 보았다.

2. 본 론

2.1 최대수평주응력 방향

본 연구지역은 한반도의 지체구조로 볼 때 경상 분지를 주된 지역으로 일부의 소백산육계(영남육계)와 옥천대를 포함하는 한반도 남동부 일대이다. 이 지역은 양산, 울산단층대를 비롯하여 4기 단층으로 밝혀진 여러 중, 소규모 단층들을 포함하고 있다.

한반도 남동부에서는 전 지역에 걸쳐 응력 측정 시험이 토목 관련 업계를 중심으로 수행된 바 있다. 이들 기존의 응력 측정 자료(총 60공으로부터의 수압파쇄 시험 결과와 총 24공으로부터의 오버코어링 시험 결과)를 수집하여 연구에 이용하였다.

각 시추공 주변 해당지역에 작용하는 최대수평주응력(σ_H)의 방향은 이들 84개 공에서 측정된 총 247개 자료의 분석을 통해 도출되었다. 본 연구를 통하여 한반도 남동부의 최대수평주응력 방향은 평균 $N66^\circ \pm 31^\circ E$ 로 나타났다.

2.2 심도에 따른 주응력의 크기

지반에 작용하는 세 방향으로의 주응력(연직응력, 최대수평주응력, 최소수평주응력)의 크기는 총 262개의 자료를 통해 분석되었다. 연직응력(σ_v)은 평균적인 상재암반하중을 이용한 식

$$\sigma_v = 0.027(\text{MPa/m}) \cdot D(\text{m})$$

를 통해 계산하였다. 여기서 D는 심도이다. 최대수평주응력의 경우 분산 정도가 크고 그 범위

주요어 : 제4기 단층, 역학적 안정성, Mohr circle, 축압계수, 마찰계수

1) 충남대학교 지질환경과학과 (ljb3mths@cnu.ac.kr)

가 깊이에 따라 증가하여 하나의 추세선으로 정의하기 어렵기 때문에 표준편차 범위 내에 있는 전체 자료를 포함하는 상하부 경계를 이용해 분석하면

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

의 범위에 들어간다. 최소수평주응력(σ_h)은 상대적으로 제한된 분포 범위를 보이며 그 크기가 연직응력과 비슷한 경향으로 나타났다. σ_h 의 크기는

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

의 범위에 들어가는 것으로 나타났다.

각 지역별 주응력의 상대적인 크기는 일부 지역(문경, 울산, 울진)에서 측정된 자료를 제외하면 전체 지역에서 $\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$ 의 순을 보이며 이는 한반도 남동부에서 현재 thrust fault stress regime이 우세함을 나타낸다.

최대, 최소수평주응력들의 값에 분산이 크기 때문에 전체 자료를 통해 한반도 남동부 응력장을 일괄적으로 분석하는 것은 무리가 있으며 지역별로 차이가 있을 수 있으므로 각 지역의 응력 특성을 알아보기 위하여 축압계수($K \equiv$ 수평응력/연직응력)를 계산하였다. 그 결과 $K_{\max} (\equiv \sigma_H/\sigma_v)$ 값과 $K_{\min} (\equiv \sigma_h/\sigma_v)$ 값은 각각 평균 1.95와 1.43으로 나타나 전반적으로는 연직응력이 최소주응력인 thrust fault stress regime이 우세한 것을 재확인할 수 있다. 심도가 깊지 않은 곳에서 K_{\max} 의 값은 최대 6정도에서 심도가 깊어짐에 따라 1-2 범위로 수렴하며 K_{\min} 의 값도 지표부근에서 최대 4정도에서 심도가 깊어짐에 따라 1-2 범위로 수렴함을 볼 수 있다.

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 상동지역에 이르는 연구지역의 남동쪽에서는 K_{\max} 와 K_{\min} 의 값이 상대적으로 낮은($0.6 < K_{\min} < 1.1$, $0.8 < K_{\max} < 1.4$) 값의 경향을 보였다.

각 지역에서의 축압계수를 일관성 있게 비교하기 위하여 일정심도(100m)로 그 값을 보정하였다. 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 분포했으며 영주와 상주를 포함하는 연구지역의 북서부와 울산과 경산을 포함하는 연구지역의 남동부에서 상대적으로 축압계수가 낮은 경향($1 < K_{\min} < 1.4$, $1.2 < K_{\max} < 1.5$)을 보였다.

2.3 단층의 방향에 따른 역학적 안정성 분석

분석된 한반도 남동부 지역의 응력장 하에서 공극압의 영향을 고려한 유효수직(σ'), 전단응력(τ)의 방향에 따른 크기를 분석한 결과 축압계수가 낮은 지역(경산, 산내)에서는 τ/σ' 비가 최대 0.21 정도로 나타났으며 축압계수가 높은 지역(양산, 거제)에서는 그 값이 최대 0.65 정도로 나타났다. 즉, 한반도 남동부에 위치한 축압계수가 높은 지역에서는 Byerlee의 마찰평형기준($\tau/\sigma' = 0.6$)을 초과하는 응력상태를 나타내며 임계상태의 방향으로 있는 단층은 역학적으로 안정되지 않을 수 있다는 것을 의미한다. 한반도 남동부의 평균 최대수평주응력 방향이 $N66^\circ \pm 31^\circ E$ 임을 감안할 때, 축압계수가 높은 지역에서 주향 $N24^\circ \pm 31^\circ W$, 경사 $30^\circ \pm 23^\circ$ 범위 내의 단층은 현재의 응력장 안에서 역학적으로 안정되지 않을 수 있다는 점을 시사한다.

2.4 한반도 남동부 4기 단층에의 적용

한반도 남동부에서 파악된 23곳의 4기 단층들은 울산단층대와 양산단층대의 주변부에 분포한다. 각 단층의 역학적 안정성을 파악하기 위해 응력특성을 기준으로 북부 양산단층대, 남부 양산단층대, 그리고 울산단층대로 크게 3개의 단층 그룹으로 나누어 분석하였다.

보고된 4기 단층들의 주향, 경사방향을 근거로 하여 각 단층에 작용하는 τ 와 σ' 을 계산한 결과 이들 단층들에 작용하는 τ 와 σ' 의 비는 0-0.4의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이들 중 유계단층, 말방단층2, 읍천단층 등은 τ/σ' 비가 각각 0.38, 0.29, 0.28로 그 외의 단층들에 비해 상대적으로 높게 나타나는 양상을 보였다.

3. 결 론

이상의 연구결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 한반도 남동부의 27개 지역에서 기존에 측정된 262회의 현생 응력의 크기와 방향을 통하여 도출한 최대 주응력방향은 평균 $N66^\circ \pm 31^\circ E$ 로 나타났으며 일부지역(문경, 울산, 울진)을 제외한 대부분의 지역에서 thrust fault stress regime ($\sigma_v < \sigma_h < \sigma_H$)을 보였다.

2) 축압계수의 비교 결과 연구지역의 북동부(삼척, 울진포함)와 남서부(양산, 거제포함)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(울산, 경산포함)에서 상대적으로 축압계수가 낮은 경향($1 < K_{min} < 1.4$, $1.2 < K_{max} < 1.5$)을 보였다. 상대적으로 축압계수가 높은 지역에서는 방향에 따라(주향 $N24^\circ \pm 31^\circ W$, 경사 $30^\circ \pm 23^\circ$ 의 범위) Byerlee의 마찰평형기준($\tau/\sigma' = 0.6$)을 초과하는 응력상태를 보이기도 하여 현생 응력장 하에서 역학적으로 안정하지 않은 단층이 있을 수 있다는 점을 시사한다.

3) 이러한 결과를 현재 한반도 남동부에 분포하는 23곳의 4기 단층에 적용해 본 결과 다른 단층에 비해 유계단층, 말방단층2, 읍천단층 등은 τ/σ' 비가 0.38, 0.29, 0.28로 다른 단층에 비해 상대적으로 높게 분포하는 양상을 보였다. 축압계수가 상대적으로 낮은 지역에 한반도 남동부의 모든 4기 단층이 분포하기 때문에 Byerlee의 이론상에서는 안정한 결과를 보였다. 하지만 단층의 안정성은 응력 외에도 다른 여러 변수(예를 들어 gouge, 높은 공극압 등)에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 이들 변수를 고려한 연구가 수행되어야 할 것이다.