

역단층성 변위에 의한 Coulomb stress transfer

고민석¹⁾, 장찬동¹⁾, 이준복¹⁾, 심택모²⁾

¹⁾충남대학교 지질환경과학과, soulgg@cnu.ac.kr

²⁾한국원자력안전기술원

Coulomb stress transfer due to reverse faulting displacement field

Min Suk Ko¹⁾, Chandong Chang¹⁾, Jun Bok Lee¹⁾, Taek Mo Shim²⁾

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

²⁾Korea Institute of Nuclear Safety,

요약 : 소규모 역단층성 변위에 의한 단층주변부의 Coulomb stress의 변화를 모델 분석하였다. 본 연구에서 사용된 단층의 기하학적 형태와 응력자료는 경주시에 위치한 제4기 단층인 읍천단층의 조건을 적용하였다. Coulomb stress 모델링에서 단층면을 따라 역단층성 소규모 변위(10cm)를 가정할 경우 단층의 가장자리 주변(주향방향 양끝과 경사방향)에서 Coulomb stress의 변화가 상대적으로 높게(>2 bar) 나타났고 단층의 상하부에서 감소하는 경향을 보였다. 단층의 수직적인 단면에서는 단층의 직하부와 단층 주향의 수직방향에 “T” 자 형태의 낮은 응력의 값을 보였다. 본 연구 결과는 주 단층의 역단층성 변위에 의해 나타나는 여진의 전파경로 양상을 보여준다.

주요어 : Coulomb stress, 읍천단층, 역단층성 변위

Abstract : We analyzed the Coulomb stress transfer near a small-scale reverse fault. For the modeling we used the geometry of a Quaternary fault in Gyeongju area, Eupcheon fault. For an assumed reverse faulting slip of 10cm, the resulting values of the Coulomb stress change are relatively higher (>2 bar) near the edges (both downward and lateral) of the fault, and diminish slightly upward and downward. The equivalents are negative in the zone immediately below and above the fault, exhibiting a "T" shape of low stress zone in the vertical profile of the fault. This study demonstrates the possible ranges and directions the aftershock energy would propagate after a reverse faulting.

Keywords : Coulomb stress, Eupcheon fault, reverse-faulting displacement field

1. 서론

일반적으로 지진은 기존 단층의 움직임으로 일어난다. 이 때문에 전 세계적으로 반복해서 지진이 발생하는 지역에서는 지진의 발생을 예측하고자 단층과 관련된 여러 연구들이 진행 중에 있다. 최근에 한반도에서도 일련의 지진(1996년 영월 규모4.5, 1997년 경주 규모4.2, 2007년 평창 규모4.8)이 발생함에 따라 단층의 안정성 평가와 더불어 지진 발생과 지각구조에 대한 관심이 높아지고 있다(전명순, 1997; 김성균 등, 2006; 이준복,

장찬동, 2007). 이와 더불어 진행중인 연구 중 하나가 단층거동에 따른 응력의 변화 양상을 파악하여 지진 발생 이후 다음 지진이 예상되는 지역이나 여진의 분포를 파악하는 연구이다. 현재 전 세계적으로 대규모 활성단층이나 다수의 지진이 발생된 곳에서 이러한 연구가 진행 중에 있다(Lin and Stein, 2004; Ganas *et al.*, 2006).

본 연구에서는 단층거동에 따른 주변지반의 변형 형태와 그 변형으로 인한 응력의 변화를 시뮬레이션 할 수 있는 모델링 코드인 Coulomb 3.1을 이용하여 소규모 역단층성 변위에 의한 Coulomb stress의 변화를 분석하였다. 모델링에 필요한 입력자료는 한반도 남동부 지반의 기본적인 암석 물성과 지반에 작용하는 현생응력을 적용하였다.

2. Coulomb stress

Coulomb stress(σ_f)는 주응력방향으로부터 β 만큼 회전한 방향의 면에 작용하는 수직응력, 전단응력, 마찰계수를 이용하여 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu\sigma_\beta \quad (1)$$

여기서 τ_β 는 단층면에 작용하는 전단응력, μ 는 마찰계수, σ_β 는 단층면에 작용하는 수직응력이다. Coulomb stress change($\Delta\sigma_f$)는 Coulomb stress의 변화 값으로 지진에 의해 변화된 전단응력(τ_β^q)과 수직응력(σ_β^q)으로 계산된 Coulomb stress 값을 의미하며 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\Delta\sigma_f = \tau_\beta^q - \mu\sigma_\beta^q \quad (2)$$

이러한 Coulomb stress change를 이용한 기존의 연구에서는 지진이후 여진이 주로 발생하는 지역과 $\Delta\sigma_f$ 가 0.5 bar 보다 높게 나타나는 지역이 거의 일치하는 결과를 제시하였다. 그 예로 1992년 발생한 조슈아트리 지진에 의해 발생한 여진 분포는 $\Delta\sigma_f$ 가 높게 나타난 지역과 일치하는 경향을 보인다(Kings *et al.*, 1994). 따라서 지진이 일어난 후에 다음 지진이 예상되는 지역과 여진의 분포는 Coulomb stress의 변화를 연구하여 파악하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 단층의 역단층성 변위에 따른 Coulomb stress의 변화를 알아보았다.

3. 모델링 입력 물성

단층에서 변위 발생시 그에 따라 유발되는 Coulomb stress의 지역별 변화양상을 산정하기 위해 본 연구에서는 Matlab 기반의 모델링 코드 Coulomb 3.1을 사용하였다. Coulomb 3.1은 단층의 미끄러짐에 따라 변화하는 Coulomb stress의 변화와 지반 변위에 대하여 분석이 가능하다. 본 연구에서는 경주시에 위치한 제4기 단층인 읍천단층의 조건을 고려하여 역단층성 운동에 따른 Coulomb stress의 변화에 대한 수치해석을 시도하였다.

(1) 지질모델

본 연구에서는 제4기 해안 **단구층을 절단하면서 벽악기 기반암층에 발달한** 읍천단층을 지진모델로 선정하였다. 읍천단층에서 수행된 트랜치, 지구물리탐사, 암석물성시험 등을 통하여 연구되어진 단층의 기본 물성을 모델링에 적용하였다. 단층의 기본 형태는 다수의 트랜치와 지표 지질조사 등을 근거로 제시된 단층의 형태를 적용하여 총 길이는 1.5 km, 주향 N34E, 경사 45SE로 결정하였다(Kim *et al.*, 2004; 최범영, 2005; 기원서 등, 2007).

(2) 현생 지반 응력

모델링 적용시 필요한 암석물성인 현장응력은 읍천단층 인근 지역에서 기존에 측정된 응력자료의 분석을 통하여 산정하였다. 본 연구에서는 26개 시추공에서 수압파쇄 시험을 통해 측정된 95개의 응력자료(각 공당 깊이에 따라 1-7개의 자료로 구성)와 18개 시추공에서 오버코어링 시험을 통해 산정된 6개의 응력자료(3조의 시추공에서 1개의 응력탄서를 측정)를 이용하였다.

최대수평주응력 방향은 각 지역에서 시추공별 평균 최대수평주응력 방향을 계산한 후에 이를 근거로 최대 수평주응력의 방향을 산정하였다. 그 결과 연구지역의 최대 수평주응력의 방향은 N57° ±34° E로 나타났다.

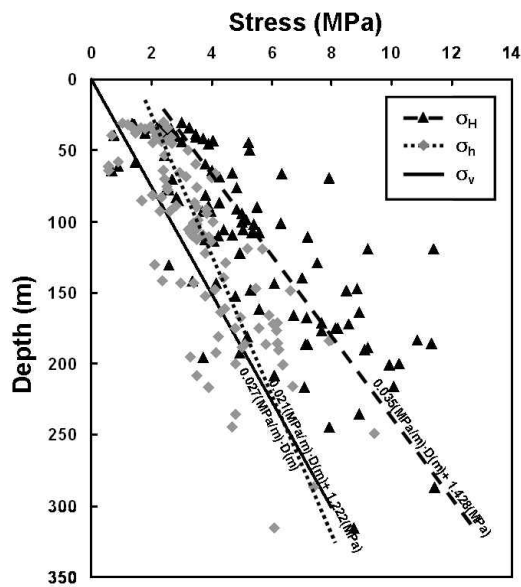


Fig. 1. Magnitudes of the least principal stresses and the maximum principal stresses plotted as a function of depth.

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

$$\sigma_v = \gamma \cdot D \tag{3}$$

로 주어진다. 여기서 γ 는 시험 깊이까지 부과되는 평균 상재하중(본 연구에서는 0.027 MPa/m를 사용)이며 D 는 심도(m)이다.

연직응력과 더불어 연구지역내 44개 시추공에서 측정된 총 101개의 수평응력 측정 자료를 Fig. 1에 심도의 함수로 도시하였다. 그 결과 최대수평주응력은 분산정도가 깊이에 따라 증가하며 전체적으로

$$\sigma_H = 0.035(MPa/m) \cdot D(m) + 1.428(MPa) \tag{4}$$

의 기울기의 값으로 분포한다. 반면에 최소수평주응력은 상대적으로 제한된 분포범위를 보이며

$$\sigma_h = 0.021(MPa/m) \cdot D(m) + 1.222(MPa) \tag{5}$$

의 추세선으로 심도에 따른 증가율이 연직응력과 비슷한 경향으로 나타난다. 최소수평주 응력 크기는 연직응력 크기에 비해 다소 높게 나타나는 경향이 있다.

4. 분석결과

본 연구에서는 읍천단층의 소규모 역단층성 변위를 고려한 단층주변 지역의 Coulomb stress의 변화를 분석하였다. 지표면 위는 자유면인 half-space하에서 지반을 탄성체로 가정하면 직사각형형태의 단층 거동에 따른 변위장은 Fig. 2와 같이 단층 끝보다는 중앙의 변위가 큰 특징을 보인다(Okada, 1992). 이러한 변형 패턴에 의해 유발되는 응력의 변화를 계산하여 Coulomb stress의 변화로 나타낼 수 있다.

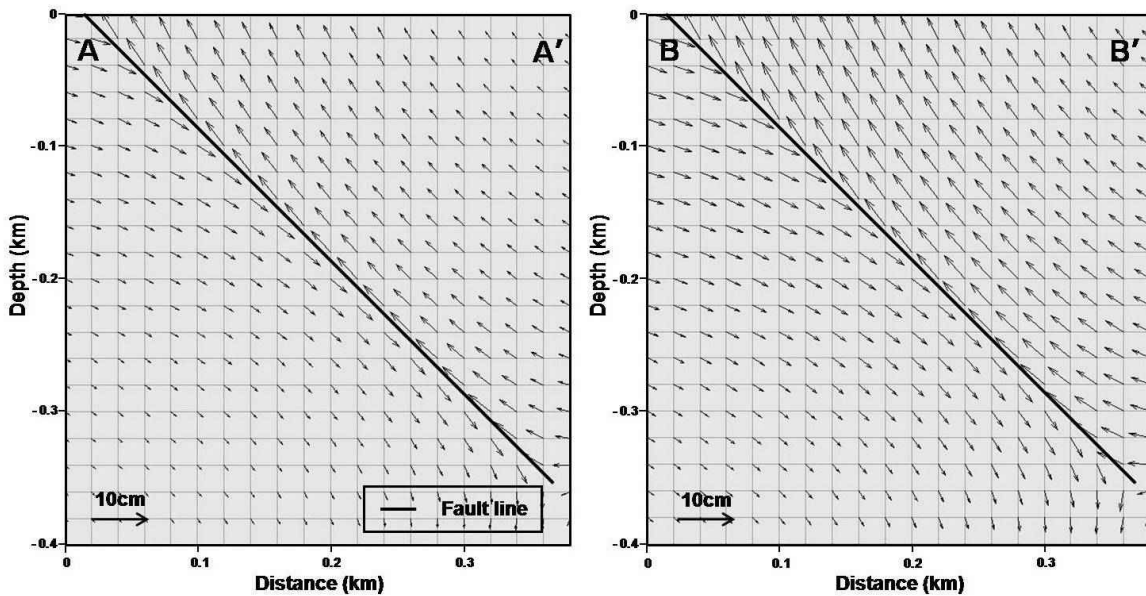


Fig. 2. Cross-sections of displacement field (a) in tip of the fault and (b) in middle of the fault (length of arrow means magnitude of displacement, A-A' and B-B' are marked Fig. 3.)

Fig. 3는 심도 200m에서 Coulomb stress의 수평적 변화를 보여준다. 그림에서 적색을 나타내는 지역은 상대적으로 높은 $\Delta\sigma_f$ 를 의미하며 반대로 보라색과 파란색을 나타내는 지역은 상대적으로 낮은 $\Delta\sigma_f$ 를 의미한다. 국지적으로 단층 최하단부 주변과 단층의 주향 방향 양끝 방향에서 2 bar 이상의 높은 $\Delta\sigma_f$ 의 값을 보이며 단층면에서는 가장 낮은 $\Delta\sigma_f$ 의 값을 보였다. 역단층성 단층에서는 지반이 경사방향을 따라 움직이기 때문에 Coulomb stress의 수직적 변화 양상을 분석하는 것이 더 효과적이다.

따라서 본 연구에서는 단층에서 변위가 가장 작게 나타나는 A-A'와 가장 큰 B-B'의 단면을 통하여 Coulomb stress의 수직적인 변화양상을 살펴보았다(Fig. 4). $\Delta\sigma_f$ 는 단면 B-B'가 단면 A-A'보다 조금 더 큰 변화를 보였지만 전체적으로 비슷한 경향을 보였다. $\Delta\sigma_f$ 의 값은 단층면에서 가장 낮은 값을 보였으며 단층의 직하부와 단층주향의 수직방향에 T자의 형태로 낮은 음의 값을 보였다. 2 bar 이상의 가장 높은 변화량을 보인 단층의 최하단부를 기점으로하여 지표방향과 단층의 경사 방향으로부터 멀어짐에 따라 그 값이 상대적으로 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 경향들은, 만약 읍천단층에서 역단층성

지진이 발생한다고 가정할 경우, 앞에서 살펴본 $\Delta\sigma_f$ 가 높게 나타난 지역에서 여진이나 다음 지진이 발생할 가능성이 큰 것을 의미한다.

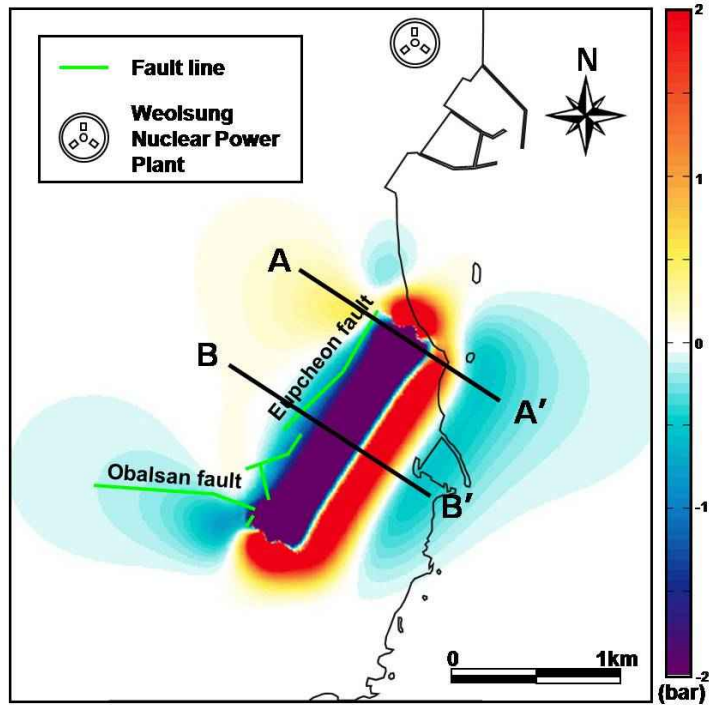


Fig. 3. Coulomb stress change around the Fault

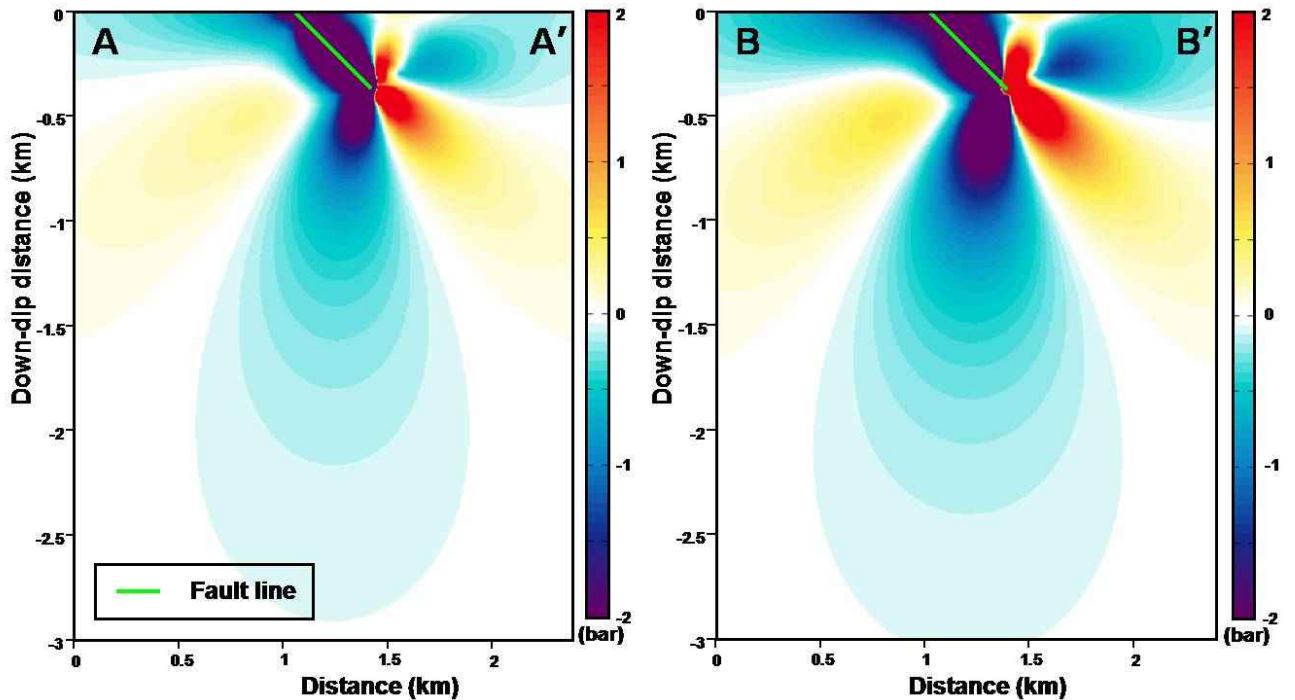


Fig. 4. Cross-sections of Coulomb stress change (a) in tip of the Fault and (b) in middle of the Fault

5. 결론

본 연구에서는 단층의 역단층성 거동에 따라 변화하는 Coulomb stress의 변화 양상을 알아보기 위해 모델링기법을 이용하여 다양한 분석을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 단층의 역단층성 거동에 따른 Coulomb stress의 변화는 전체적으로 단층면 최하단부와 단층의 주향방향 양끝 지역에서 국지적으로 높은 값을 보였다. 심도에 따른 Coulomb stress change의 값을 살펴보면 단층의 직하부와 단층주향의 수직방향에 T자의 형태로 낮은 음의 값을 보였으며 가장 높은 변화량을 보인 단층의 최하단부를 기점으로 하여 지표방향과 단층의 경사 방향으로부터 멀어짐에 따라 그 값이 상대적으로 낮아지는 경향을 보였다.

(2) 만약 단층이 10cm의 역단층성 거동을 할 경우, Coulomb stress의 변화가 0.5bar보다 큰 지역인 단층최하단부 주변과 단층의 주향방향 양끝에서 다음 지진이 발생하거나 여진이 발생할 가능성이 높은 것을 의미한다.

5. 참고문헌

- 김성균, 전명순, 전정수, 2006, 국내 지진활동 및 지각구조 연구동향, 자원환경지질학회지, **39**, 369-384.
- 이준복, 장찬동, 2007, 한반도 남동부의 현생 응력장, 지질공학회지, **17**, 299-307.
- 전명순, 1997, 지진발생의 메커니즘, 대한지질학회·대한자원환경지질학회 제 13차 공동 학술강연회 발표논문집, 1-21.
- 정태중, 1996, 대구지역에 분포하는 백악기 세일의 역학적 특성, 한국지구과학회지, **17**, 489-496.
- 최범영, 2005, 제4기 읍천단층의 기하분석: 트렌치 단면의 해석, 지질학회지, **41**, 129-140.
- Ganas, A., Sokos, E., Agalos, A., Leontakianakos, G., and Pavlides, S., 2006, Coulomb stress triggering of earthquakes along the Atalanti Fault, central Greece: Two April 1894 M6+ events and stress change patterns, *Tectonophysics*, **420**, 357-369.
- Lin, J., and Stein, R. S., 2004, Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults, *Journal of Geophysical Research*, **109**, B02303.
- Kim, Y. S., Park, J. Y., Kim, J. H., Shin, H. C., and Sanderson, D. J., 2004, Thrust geometries in unconsolidated Quaternary Sediments and evolution of the Eupchon Fault, southeast Korea, *The Island Arc*, **13**, 403-415.
- King, G. C. P., Stein, R. S., and Lin, J., 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**, 935-953.
- McGarr, A., and Gay, N. C., 1978, State of stress in the earth's crust, *Ann. rev., Earth Planet. Sci.*, **6**, 405-436.
- Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.