

응력변화에 따른 양산-울산단층계의 진화 모델링

한승록¹ · 박준영² · 김영석^{1,‡}

¹부경대학교 환경지질과학과 지질구조재해연구실

²(주) 지오제니컨설턴트

요 약

큰 지진은 우리나라에서 비교적 자주 발생하지 않지만 중소규모 계기지진 분포특성을 보면 남한에서는 충청 지역과 한반도 남동부 지역에 상대적으로 많은 지진이 집중되어 있음을 보여준다. 특히, 경주 인근 지역에 상대적으로 많은 지진이 발생하고 있는데, 이 지역에는 우리나라에서 신기까지 운동한 대표적 단층인 양산단층과 울산단층이 발달하고 있다. 최근에는 양산단층과 울산단층 주위에서 40여 개 이상의 제4기 단층들이 발견되어 이 단층들의 활동성에 관심이 모아지고 있다. 양산단층과 울산단층에 대한 선형구조 및 지형지질학적 분석 결과, 두 단층은 기존에 보고된 λ -단층의 특징들과 매우 잘 일치하고 있음을 보여준다. 따라서 이번 연구에서는 양산단층과 울산단층 주변에서의 응력변화와 이들 사이의 단층진화 특성을 이해하기 위하여, 양산-울산단층계와 λ -단층 사이의 형태적 유사성과 지구조적 진화모델을 바탕으로 Coulomb 3 프로그램을 이용한 응력변화 모델링을 실시하였다. 이 결과는 양산-울산단층계의 λ -단층으로의 진화가능성뿐만 아니라, 높은 응력변화를 보이는 지역이 제4기 단층들의 분포와 매우 잘 일치하고 있음을 보여주었다. 그러므로 이러한 양산-울산단층계 주위에 발달하는 제4기 단층들의 분포는 이 지역에서 제4기 동안의 단층진화에 수반된 응력변화와 밀접한 연관이 있을 것으로 판단된다. 우리나라에서는 아직 초기단계인 이러한 응력변화 모델링 연구는 앞으로 더 정밀한 조사와 연구가 이루어진다면 지진재해를 비롯한 다양한 연구에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: Coulomb 3, λ -단층, 양산단층, 울산단층, 제4기 단층

Seung-Rok Han, Joonyoung Park and Young-Seog Kim, 2009, Evolution modeling of the Yangsan-Ulsan fault system with stress changes. Journal of the Geological Society of Korea. v. 45, no. 4, p. 361-377

ABSTRACT: Many moderate, light, minor earthquakes occur around the central and southeastern part of South Korea. Especially, many earthquakes including historical earthquakes occurred around the Yangsan fault (YSF) and the Ulsan fault (USF), which are major young faults in Korea. Recently, more than 40 Quaternary faults have been discovered around the Yangsan-Ulsan fault system (YUFS). In this study, the lineament, geology and geomorphology around YUFS were analysed, which is analogous to the characteristics of reported λ -faults. Therefore, the fault system of YSF and USF is interpreted here as a λ -fault. Numerical modeling of the YUFS with stress change has been performed, using the USGS open program Coulomb 3. This modeling is carried out based on the structural similarity between the YUFS and λ -fault, and a previously suggested tectonic evolution model of the YUFS. The result of this modeling shows not only the possibility of the YUFS as a λ -fault, but also the consistency of the area with high stress changes and Quaternary faults around the YSF and the USF. The result of this study indicates that these kinds of modeling studies on fault evolution can contribute to various geologic studies such as seismic hazard assessments.

Key words: Coulomb 3, λ -fault, Yangsan fault, Ulsan fault, Quaternary fault

(Seung-Rok Han and Young-Seog Kim, Geological Structure & Geohazard Research Group, Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea; Joonyoung Park, Geogency Consultants Group Inc., 807-2, Bangbae-Dong, Seocho-Gu, Seoul, Korea)

[‡] Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

1. 서 론

수마트라 지진 (2004, $M=9.1$)과 쓰촨성 지진 (2008, $M=7.8$) 등 최근 세계적으로 대규모 지진에 의한 피해가 자주 발생하고 있다. 자연재해는 현대의 과학기술로도 거의 막을 수가 없는데 그 중 지진은 태풍과 같은 기상재해와는 달리 현재까지는 정확한 예보가 거의 불가능하고 그 피해의 규모도 매우 크다 (Hyndman and Hyndman, 2006).

한반도는 판구조론적으로 판의 경계로부터 떨어져 있어 지진으로부터 상대적으로 안전하다고 여겨져 왔었다. 따라서 우리나라에는 건축물의 내진설계나 방재시스템, 그리고 지진 발생 이후의 대처 시스템 등이 매우 열악한 실정이다. 하지만 최근 한반도와 그 주변지역에서 지진이 빈번하게 발생하고 있어서 (그림 1) 이에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 연 구지역이 포함되는 한반도 남동부 지역은 100여명이 사망한 것으로 기록되어 있는 서기 779년의 경주

지진 (추정규모 6.7)을 비롯하여, 1643년의 울산지진 (추정규모 7.0)과 같이 한반도 내에서도 상대적으로 많은 지진이 발생하고 있는 지역이다 (Lee and Na, 1983; 이기화, 1997). 이 지역에는 한반도에서 대표적으로 신기까지 운동한 단층으로 알려진 양산단층과 울산단층이 발달하고 있고, 그 주위에서 40여개 이상의 제4기 단층들이 보고 되었다 (e.g. Okada *et al.*, 1994; 류충렬 외, 1996; 경재복과 장태우, 2001; 장태우, 2001; Ree *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004b; Ree and Kwon, 2005; 기원서 외, 2009). 따라서 이들 단층의 활동이 앞에서 기술한 지진들의 발생과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정되어 왔다.

'양산단층'은 한반도 남동부의 경상분지에서 북북동-남남서 방향으로 뚜렷한 선형구조를 보이며 발달하는 단층으로, 양산도폭 (이민성과 강필종, 1964)에서 $N15^{\circ}E$ 방향의 단층에 대해 최초로 명명되었다. 이후, 김종환 외 (1976)는 양산단층을 따른 양쪽의 지질분포 차이와 인공위성 영상을 판독한 결과를

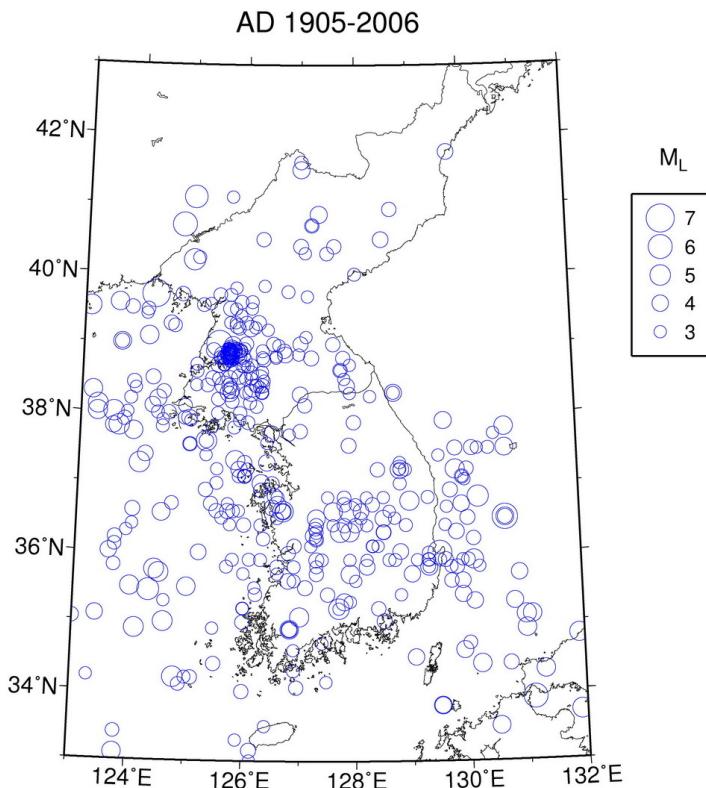


Fig. 1. Instrumental earthquake distribution around the Korean peninsula (from Baag and Kang, 2007).

바탕으로 양산단층의 존재를 주장하였다. 1980년대에 들어서 양산단층에 대한 지구물리학적 조사가 수행되었는데, 김인수와 김종열 (1983)의 양산-언양간 전기비저항 탐사, 민경덕과 정종대 (1985)에 의한 왜관-포항 간 중력탐사, Lee *et al.* (1984)의 중력 탐사에 의한 광역적 중력치 및 잔류자기 이상대의 분포 분석 등을 통하여 구체적인 양산단층 파쇄대의 위치가 인지되었다. 또한, 이 시기부터 양산단층에 대한 지구물리학적 조사뿐만 아니라 구조지질학적 해석이 이루어지기 시작했는데 (e.g. 김종열, 1988; 채병곤과 장태우, 1994; 장천중과 장태우, 1998) 이들 연구에 의하면 양산단층을 따라 주향이동성 운동 뿐만 아니라 경사이동성 운동도 수차례에 걸쳐 발생하였던 것으로 해석되었다. 이 주향이동단층을 따른 변위는 양산단층 중부에서 약 25 km (Choi *et al.*, 1980), 북부에서는 약 35 km (Chang *et al.*, 1990)의 우수향 변위를 가지는 것으로 보고 되었다. 최근 또 다른 연구에서는 양산단층의 양측에서 발견되는 화강암의 특성을 비교하여 양산단층의 변위를 약 21 km로 추정한 바 있다 (Hwang *et al.*, 2007).

‘울산단층’의 구조적 특성분석이나 운동학적 해석은 양산단층에 비해 상대적으로 많이 이루어지지 못하고 있다. 소위 울산단층은 Kim (1973)에 의해 울산만에서 동천을 따라 북북서-남남동 방향으로 발달하고 있는 약 20 km 연장의 대규모 선형구조를 대상으로 명명되었고, Reedman and Um (1975) 또 한 비슷한 시기에 유사한 단층을 기재하였다. 1990년대 이후 울산단층 주변에서 제4기 단층이 보고 되면서 많은 연구자들에 의해 트렌치 조사와 연대측정을 포함하는 구조지질학적, 지구물리학적, 지구화학적 연구들이 수행되었다 (e.g. Lee and Um, 1992; Okada *et al.*, 1998; 류충렬 외, 2002; 장태우, 2001). 하지만 울산단층의 주 단층대 대부분이 신기 퇴적물들로 피복되어 있기 때문에 울산단층에 대한 명확한 증거는 나타나지 않았고, 이로 인해 울산단층을 단층이라고 할 수 있는지에 대해서도 의견이 분분한 상태였다. 따라서 이들 두 단층에 대한 연구는 주 단층 주변에서의 부수단층에 대한 연구 또는 지구물리 탐사 등과 같은 간접적 방법을 통해 주로 이루어져 왔다. 최근에 울산시 북쪽의 동천강 계곡에서 울산단층을 가로질러 수행된 탄성파 굴절법 및 반사법 탐사에서 남-북 방향의 겉보기 주향과 고각의 경사

를 가지는 단층들이 인지된 바 있다 (Kim *et al.*, 2008).

이번 연구에서는 이 두 단층이 경주부근에서 서로 교차하고 있기 때문에 이 지역에 대한 조사결과를 바탕으로 두 단층들이 서로 어떻게 진화해왔는가를 알아보고자 하였다. 따라서 이러한 단층의 진화 특성을 이해하기 위하여 우선 이 지역의 지질구조적 특성을 파악하고, 단층진화모델을 바탕으로 미국지질조사소 (USGS)에서 개발한 Coulomb 3 프로그램을 이용하여 간단한 모델링을 실시하여 그 결과를 이 지역의 특징적인 지질구조와 비교하고자 하였다.

양산단층과 울산단층이 교차하는 경주지역에서는 상대적으로 많은 역사지진활동이 보고 되고 있어서 이 두 단층의 진화과정과 상관관계를 규명하는 것은 양산단층과 울산단층 인근 지역의 지진 발생 원인을 규명하고 대책을 수립하는 데에도 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 또한 이러한 결과는 이 지역의 지표변형 및 지진재해의 특성을 해석하는데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구지역

연구지역은 한반도 남동부에 위치하고 있으며 경상분지의 백악기 퇴적암을 기반암으로 하여 후기에 이를 관입한 화강암과 화산암 등으로 구성되어 있다 (그림 2). 연구지역에는 북북동-남남서 방향으로 양산단층 (이민성과 강필종, 1964)이 발달하고 있고, 양산단층의 동남쪽에는 북북서-남남동 방향으로 소위 울산단층 (Kim, 1973)이 발달하고 있다.

연구지역 내에 위치하고 있는 부산, 울산, 경주 등의 대도시에는 많은 인구가 밀집되어 있고, 월성, 고리 원자력 발전소 등을 비롯한 많은 주요 국가산업 시설들이 위치하고 있다. 특히 양산단층과 울산단층이 만나는 경주지역은 서기 779년의 지진을 비롯한 많은 역사지진뿐만 아니라 (e.g. Lee and Na, 1983; 이기화, 1997), 최근에도 중소규모의 지진 (e.g. 1997년 6월 $M_w = 4.2$)이 종종 발생하여 한반도에서는 다른 지역에 비해 지진의 활동도가 상대적으로 높은 지역으로 알려져 있다.

3. 연구방법

먼저 이번 연구를 위하여 양산단층과 울산단층이

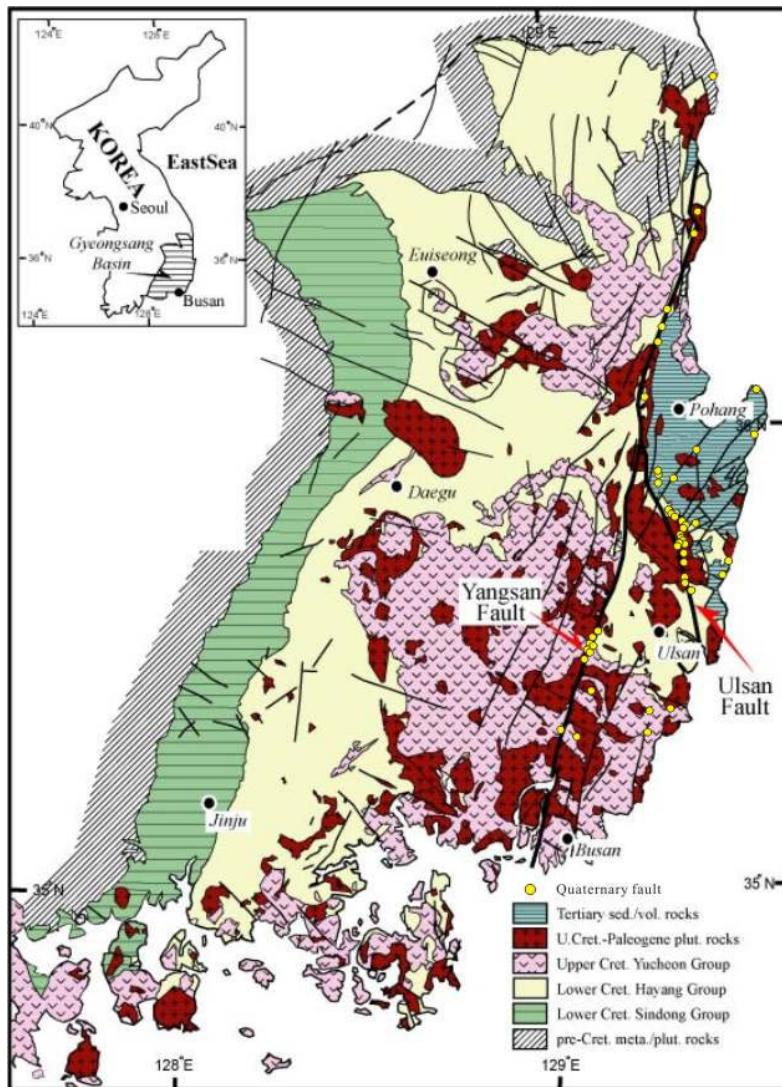


Fig. 2. Regional geologic map of Gyeongsang basin, the SE part of the Korean peninsula, and Quaternary faults (circles) around the Yangsan and Ulsan faults (modified from Lee, 2000).

접하는 지역의 항공사진, 위성사진, 음영기복도 분석을 실시하였고, 지질조사를 통하여 지질구조의 분포특성과 단층의 진화특성을 규명하였다. 이 결과를 바탕으로 수립된 양산-울산단층계에 대한 지구조 진화모델을 기초로 하여 컴퓨터 모델링을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

이 Coulomb 3 모델링 프로그램은 단층 및 지진으로 인한 단층 주변에서의 응력변화를 연구하기 위하여 개발된 프로그램으로, 특히 지진으로 인해 발생되는 응력의 변화 및 여진의 분포, 그리고 지진 발

생 후 이어지는 여진의 유발을 설명하기 위하여 사용되어 왔다 (King *et al.*, 1994; Hardebeck *et al.*, 1998; Stein *et al.*, 1997; Toda *et al.*, 2002a, 2005). 뿐만 아니라 지진과 화산활동 간의 상호작용 (Nostro *et al.*, 1998), 암맥의 관입 (Toda *et al.*, 2002b), 그리고 고기 단층에서의 열수 이동과 광상의 배태 등을 연구하기 위해서도 사용되었다 (Cox and Ruming, 2004; Micklithwaite and Cox, 2004).

지진이 발생하면 전단이 일어나는 단층 상에서의 전단 응력은 감소하지만, 단층의 말단과 같은 일부

영역에서는 전단 응력이 증가하게 된다 (Chinnery, 1963). 이처럼 단층 주위에서 응력의 증가가 발생하는 지역은 지진 발생 이후의 여진 분포와 일치하는 것으로 밝혀졌다 (Das and Scholz, 1981; Stein and Lisowski, 1983; Oppenheimer *et al.*, 1988). Stein (1999)에 따르면 이러한 쿨롬 응력변화 ($\Delta\sigma_f$)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu (\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (1)$$

$\Delta\tau$ 는 단층면 상에서 단층의 전단 방향과 일치하는 전단 응력변화를 의미하고, $\Delta\sigma_n$ 은 단층면에 대한 수직 응력의 변화를 의미한다. ΔP 는 단층대 내에서 공극 수압의 변화 (positive in compression)를 의미하고, μ 는 내부마찰계수를 의미한다. 만약 지진에 의하여 어떤 지역에서 $\Delta\sigma_f$ 가 증가한다면 그 지역은 앞으로 단단층의 전파나 여진의 집중과 같은 변화로 파괴 (failure)가 일어날 수 있음을 지시하고, 반대로 $\Delta\sigma_f$ 가 감소한다면 이러한 파괴가 일어나기 어렵다는 것을 지시한다. 실제 단층에서 공극수압의 변화 (ΔP)를 알아내는 것이 어렵기 때문에, 유효마찰계수 μ' 이 $\Delta\sigma_f$ 의 계산에 이용된다. 공극수압의 변화 (ΔP)는 단층면에 대한 수직응력의 변화 ($\Delta\sigma_n$)에 반하여 작용하는데, 이러한 ΔP 와 $\Delta\sigma_n$ 의 관계를 이용하여 유효마찰계수로의 변환이 가능하다. 이에 따라 변환된 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n \quad (2)$$

이 연구에서 영률 (Young's modulus)과 포와송비 (Poisson's ratio)는 각각 지각 내의 암석이 가지는 평균적인 수치인 0.8MPa, 0.25로 각각 가정하였다 (King *et al.*, 1994). 유효마찰계수 (μ')는 일반적인 주 단층에서 나타나는 수치인 0.4로 가정하였다 (Harris and Simpson, 1998). 따라서 이 연구에서는 주응력 방향의 변화에 따른 단층계 주위에서의 쿨롬 응력 변화 ($\Delta\sigma_f$)와 이에 따른 단층계의 진화를 모식화하였다.

4. 선형구조분석

지형이 지질의 분포 및 지질구조와 매우 높은 연

관성을 가지고 있음은 이미 잘 알려져 있다 (e.g. Richard and Groshong, 1999). 특히, 조사지역인 양산-울산단층계의 경우 비교적 젊은 퇴적층과 지질구조들이 많이 발달하고 있기 때문에 그러한 경향이 더욱 높게 나타난다. 따라서 야외조사를 수행하기 이전에 선형구조를 비롯한 지형적 특성을 분석함으로써 지질구조적 특징을 예측하고 분석하여 정밀 지질조사에 활용하는 것은 중요한 의미를 가진다.

이 연구에서는 항공사진, 위성사진 그리고 음영기복도를 이용하여 연구지역에 대한 선형구조들을 분석하였고, 이들을 야외지질조사를 통하여 확인한 결과와 비교하여 그림 3과 그림 4b에 도시하였다. 한반도 남동부에 대한 음영기복도를 이용한 선형구조분석 결과, 북북동-남남서 방향과 북북서-남남동 방향의 선형구조가 우세하게 발달하고 있다 (그림 3). 양산단층과 울산단층이 만나는 지점의 항공사진과 인공위성영상상을 이용한 선형구조분석 결과 역시 동북동-서남서 방향과 서북서-동남동 방향의 선형구조가 뚜렷하게 관찰 된다 (그림 4b). 다음으로는 양산단층, 울산단층의 방향과 유사한 북북동-남남서, 북북서-남남동의 선형구조들이 뚜렷한 직진성과 연장성을 보이며 발달하고 있다. 선형구조의 밀도에 있어서는 동북동-서남서, 서북서-동남동 방향으로 발달하는 선형구조들이 우세하지만 북북동-남남서 또는 북북서-남남동 방향으로 발달하는 선형구조들이 전자에 비하여 연장성이 우세하고 큰 규모를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 양산단층과 울산단층 및 이들과 평행하게 발달하는 2차적 단층의 방향성과 비교적 잘 일치하는 것으로 선형구조와 단층의 구조적 연관성을 잘 나타낸다.

5. 양산단층과 울산단층 교차지점 부근에서의 지질구조

양산-울산단층계와 λ -단층의 유사성을 밝히기 위하여 양산단층과 울산단층의 접경부인 보문 소분지 (e.g. 황치옥 외, 1992)를 포함하는 지역에 대한 정밀지질조사를 실시하였다. 연구지역 내 제3기 마이오세의 보문 소분지는 포항분지의 선상지-삼각주계의 일부로 해석되었으며, 여러 조의 단층들로 경계지워진다 (그림 4b). 경주지역에 존재하는 양산단층과 울산단층의 경우 단층대가 가지는 풍화에 대한

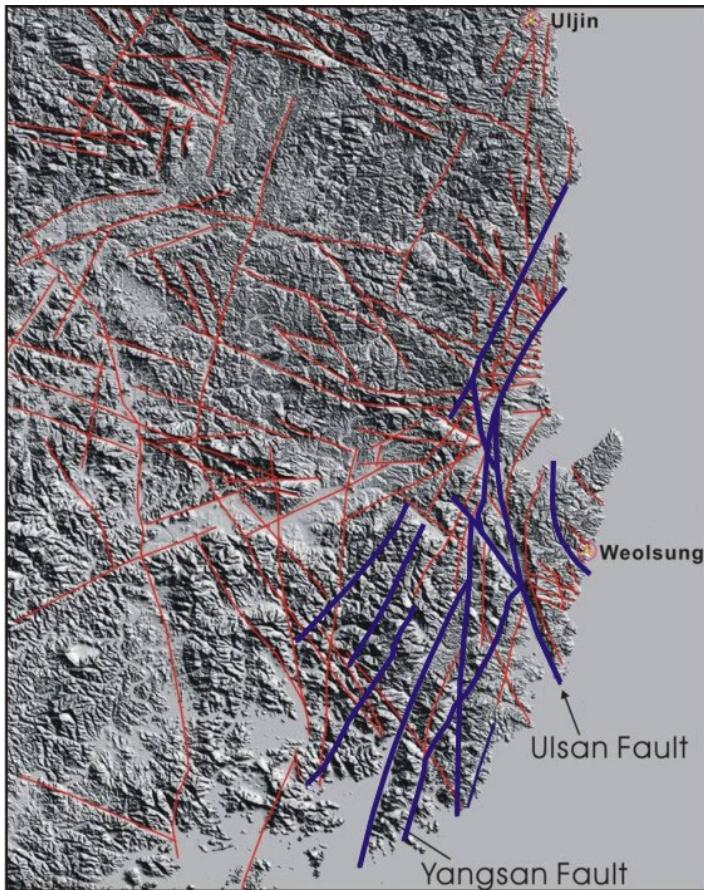


Fig. 3. Analysis of tectonic lineaments in the SE part of the Korean peninsula. The thick line is major lineament and the thin line is secondary lineament.

취약성으로 인해 주 단층대의 대부분이 제4기의 퇴적물에 의해 피복되어 있기 때문에 주 단층대에 대한 직접적인 연구를 하는 것에는 많은 어려움이 있다. 따라서 주 단층에 수반되어 생성되는 2차적인 단층과 단열, 이와 연관된 구조를 연구함으로써 간접적으로 주 단층의 운동 및 광역적인 지구조적 변화들을 인지할 수 있었다 (e.g. Pollard and Segall, 1987; Cox and Scholz, 1988; 최진혁 외, 2009).

양산단층과 울산단층이 교차하는 경주 인근 지역에는 백악기 퇴적암류 및 제3기 퇴적암들이 발달하고 있다. 경주 지역에 분포하는 백악기 퇴적암류 내의 층리는 평균적으로 $N05^{\circ}E/18^{\circ}NW$ 의 방향성을 가진다. 이는 양산단층 서측 하양층군의 일반적인 층리방향과는 다른 방향이며, 이러한 주향과 경사의 차이는 이후의 화성활동에 의한 지층 경사의

변화나 양산단층계 주변에서의 변형에 의한 결과로 해석된다 (최범영 외, 2002; 김영식 외, 2002a).

연구지역 내에는 다양한 형태의 단층들이 발달하고 있다. 백악기 퇴적암류를 절단하고 있는 정단층 및 주향이동단층을 비롯하여, 제3기 퇴적암류를 절단하고 있는 주향이동단층 및 역단층, 그리고 제4기 단층도 발견되고 있어서 이 지역이 여러 번의 복합적인 변형작용의 영향을 받았음을 알 수 있다. 양산단층과 울산단층이 접하는 경주 인근 지역에 대한 야외조사 결과, 이 지역의 단층들은 북동-남서 또는 북북동-남남서 방향과 북서-남동 방향으로 우세하게 발달하고 있다. 북북동~북동 방향으로 우세하게 발달하는 단층들은 주로 정단층 및 우수향의 주향이동단층으로 나타나며 일부 지역에서는 역단층으로 관찰된다. 이에 반해 북서~서북서 방향의 단층들은

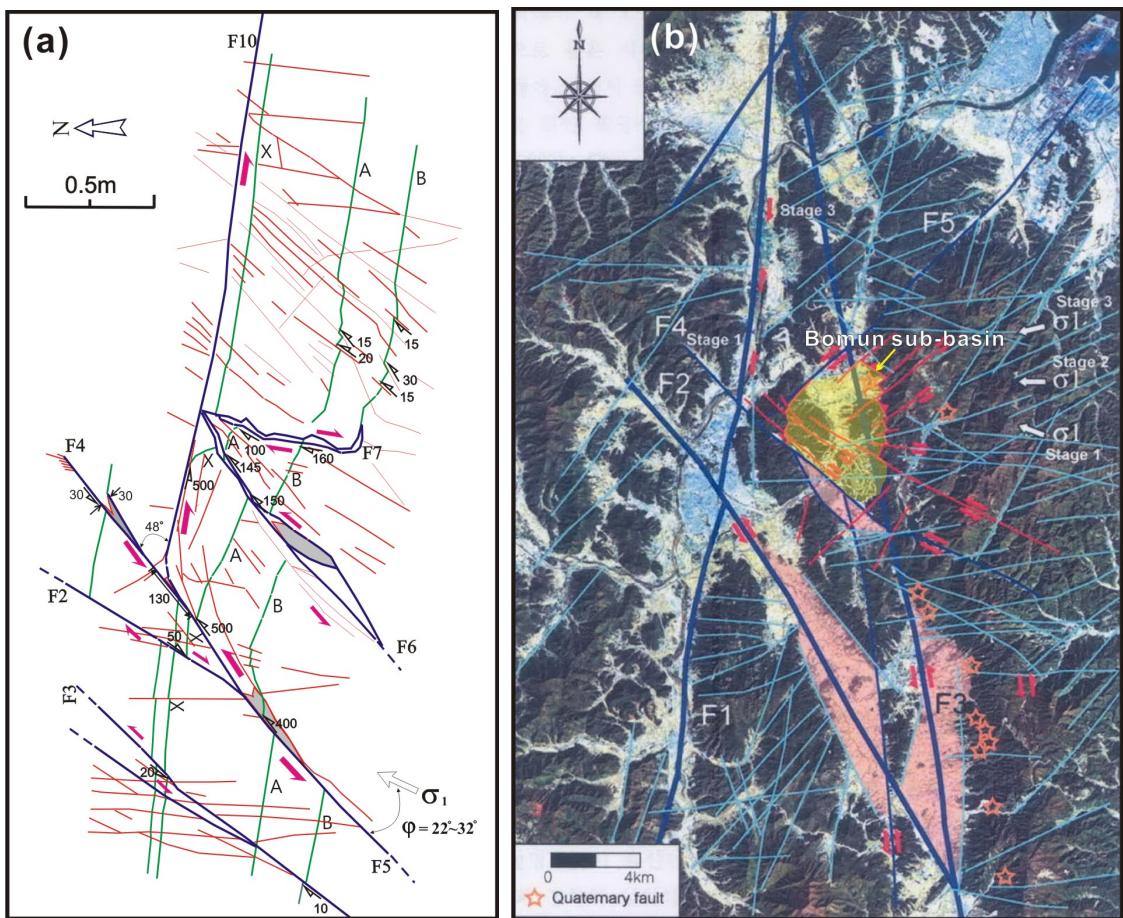


Fig. 4. Similarity between the small scale λ -fault reported by Kim *et al.* (2000) and the Yangsan-Ulsan fault system. (a) Plan view of a small scale λ -fault (from Kim *et al.*, 2000). The angle between the minor fault (F5) and major fault (F10) which follows bedding is 48°. Assuming the direction of σ_1 as N20°-30°E from joint and fault analyses, the angle (ϕ) between σ_1 and the merging fault (F5) is 22°-32°, so that the propagation direction of the minor fault is in accord with the predicted direction of Du and Aydin (1995). (b) Distribution of lineaments around the Yangsan and Ulsan faults. F1: Yangsan fault, F2: a segment of the Ulsan fault, F3: another segment of the Ulsan fault, F4: boundary fault of the Bomun sub-basin, F5: reactivated right-lateral strike-slip fault (modified from Park, 2004).

좌수향 주향이 동단층으로 관찰되며, 일부는 정단층 및 분지 내에서의 역단층으로도 관찰된다.

우세하게 발달하고 있는 북동-남서 및 서북서-동남동 방향의 단층들이 제3기 분지들을 절단하고 있는 점과 이들 단층의 운동감각을 고려해 볼 때, 이 지역에 작용한 최후기 최대주응력의 방향은 동-서 방향으로 해석된다. 따라서 이 지역의 신기구조를 발달시킨 최대주응력은 이 지역에서 현재 응력장으로 보고 되고 있는 방향과 매우 유사하며, 이들이 최신기의 단층운동을 제어한 것으로 해석된다.

6. λ -단층의 정의와 양산-울산단층계에 대한 적용

양산단층과 울산단층에 대한 선형구조분석 결과와 지질조사 결과를 종합해볼 때, 두 단층의 관계는 과거 Du and Aydin (1995)에 의해 제시되었고, Kim *et al.* (2000)에 의해 보고된 λ -단층과 형태적으로 매우 유사한 특성을 보인다.

6.1 λ -단층의 정의

λ -단층은 서로 다른 주향을 가지는 두 개의 주향 이동단층이 인접하여 성장해 나갈 때, 만들어지는

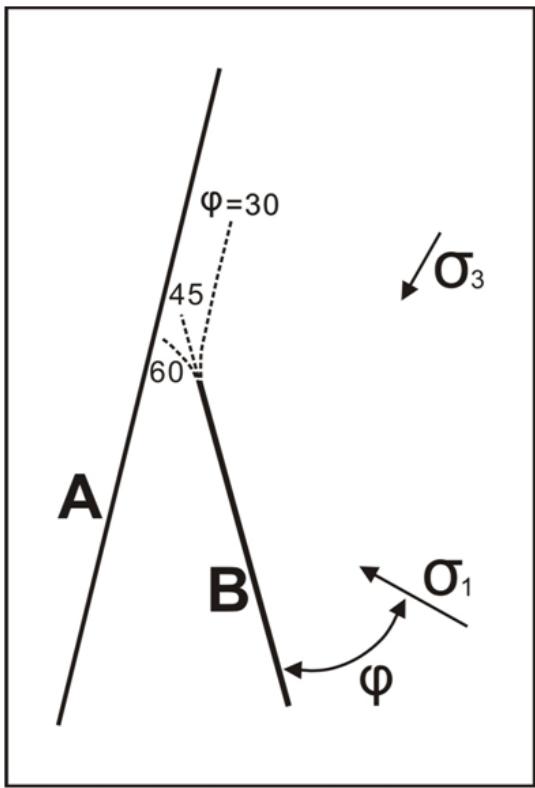


Fig. 5. Simulated shear fracture patterns of λ -faults for various stress orientations (modified from Du and Aydin, 1995).

단층의 형태가 λ 의 형태를 가지기 때문에 이렇게 명명되었다 (Du and Aydin, 1995). 이 단층에서는 하나의 단층이 다른 하나의 단층을 향해 전파되어 나갈 때 전파되어 나가는 단층과 최대주응력 (σ_1)이 이루는 각 (φ)에 따라 계속적으로 전파되어 나가는 단층의 방향이 결정되게 된다. 그림 5는 시뮬레이션 (Du and Aydin, 1995)을 통하여 얻은 결과로, 전파되어 나가는 단층과 최대주응력 (σ_1)이 이루는 각도가 45°를 이루면 B단층은 원래의 전파방향을 유지하면서 A단층을 향하여 전파되어 나가게 된다. 만약 φ 가 30°이하를 이루면, B단층은 A단층과 평행한 방향으로 굽곡하며 전파되어 나가게 된다. 그러나 φ 가 60°이상일 때는, B단층은 A단층을 향하여 고각 (~65°)으로 굽곡하며 전파된다.

Du and Aydin (1995)이 λ -단층의 모델을 제시한 이후 Kim *et al.* (2000)은 영국의 Crackington Haven에서 발달하는 소규모 주향이동단층계에서 λ -단층

으로 해석될 수 있는 구조를 발견하고 이에 대해 보고하였다 (그림 4a). 여기서 보고된 소규모 λ -단층에서는 북동-남서 방향으로 발달하고 있는 단층 (F5)이 서북서-동남동 방향으로 발달하는 층리에 평행한 단층 (F10)을 향하여 전파되어 기존 단층을 일정 부분 절단하면서 굽곡하는 가지단층을 발달시켰다. 단층들 주위에서 발달하고 있는 이차 단열의 방향을 통해 최대주응력 (σ_1)의 방향을 약 N30°로 추정하면, F5단층과 최대주응력 사이의 각도 (φ)는 약 22°~35° 정도를 이룬다. 따라서 Du and Aydin (1995)에 의해 제시된 λ -단층의 전파방향과 관련하여 φ 가 약 30°를 이루므로 전파되는 단층이 기존의 단층방향과 평행하게 회전하며 전파된 것으로 판단된다. 이 구조에서 F5단층을 따라 발생한 변위는 F10단층을 관통한 이후로 급격히 감소하고, 아니라, F10단층을 따라 그 변위가 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 F5단층이 F10단층과 연결되면서 F10 단층을 따라 F5단층의 변위가 전파된 것으로 해석될 수 있다 (Kim *et al.*, 2000).

6.2 소규모 λ -단층과 양산-울산단층계의 유사성

양산단층과 울산단층이 교차하는 지역에 대한 지질조사와 선형구조분석 결과를 종합하면 (그림 4b), 이 두 단층이 기존에 보고된 λ -단층과 매우 유사한 패턴을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 먼저 Kim *et al.* (2000)에 의해 보고된 소규모 λ -단층의 특징들은 다음과 같다 (그림 4a).

- ① 단층이 성장하면서 다른 한 단층에 근접하여 성장하는 단층의 진행방향이 변하는 현상
- ② 성장하는 단층과 기존 단층이 교차하였을 때 성장하는 단층이 기존 단층을 일부 절단하는 현상
- ③ 후기의 단층이 기존에 발달하던 단층과 연결된 후 후기 단층에 의하여 절단된 지괴가 계속되는 압축력에 의하여 쪄기형태로 변형되는 현상
- ④ 성장하는 단층의 성장방향이 기존의 단층 방향으로 편향되면서 세맥 물질들이 채워진 확장성 공간형성 (소규모의 당겨-열림 분지)
- ⑤ 성장하는 단층과 비슷하거나 최대주응력 방향과 평행한 방향을 가지는 이차 단열의 발달
- ⑥ 기존 단층에 의해 구획되어진 지괴가 후기의 단

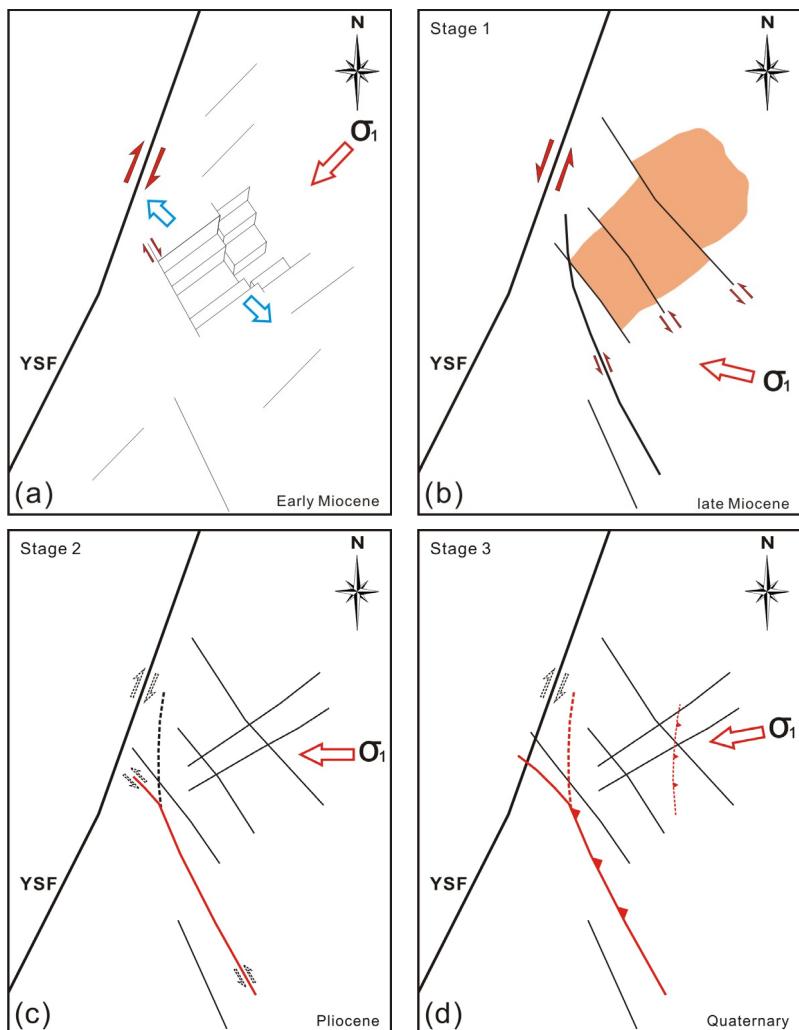


Fig. 6. Simplified model of tectonic evolution in the study area (modified from Park, 2004). (a) Initiation of the Ulsan fault, Early Miocene. (b) Stage 1 showing left-lateral movement of the Ulsan fault, late Miocene. (c) Stage 2 showing propagation of a new segment from the Ulsan fault, Pliocene. (d) Stage 3 showing predominance of thrust faulting, Quaternary.

층에 절단되면서 후기의 응력에 의하여 하나의 지괴로 운동하는 현상(활구조 운동)

⑦ 단층으로 구획되어지는 각 부분(지괴)들이 단층의 운동감각과 반대방향으로 회전하는 현상

위에 열거한 Crackington Haven에서 보고된 소규모 λ -단층의 특징과 양산-울산단층이 접하는 지역에 대한 선형구조와 지질구조적 분석 결과를 비교해보면; 그림 4b에서 음영처리 된 지역은 제3기 분지 퇴적 이후에 현재에도 지형적으로 저지대를 형성

하여 현생에도 지역적인 소규모 분지들일 가능성이 있어 계속적 연구가 필요해 보인다 (④). 항공사진 및 위성사진을 통한 선형구조분석 결과는 울산단층이 양산단층과 교차하며 양산단층을 관통하여 성장하였을 가능성을 시사하고 있으며 (②), 연구지역 내의 제3기 분지가 울산단층과 나란히 발달한 단층들에 의해 절단되며 이들과 북동-남서 방향의 우수향 주향이동단층들에 의해 쪼기모양의 압축변형대를 형성함도 잘 보여준다 (③). 또한 양산단층과 울산단층으로 구획되어지는 이 지역이 여타 지역에 비

하여 활泼 활동성이 높고 (류충렬 외, 1996; 장태우, 2001; 김영석 외, 2002a, b; Choi *et al.*, 2001, 2002), 시계방향으로 회전하였으며 지층들이 경동되어 있음 (⑦)이 선행 연구자들에 의하여 보고 되어 있다 (Choi *et al.*, 2001, 2002). 그들 중 일부는 후기의 응력에 의해 양산단층이 분절되어 울산단층과 양산단층으로 구획되는 북동부가 반원형의 지괴로 이동 (⑥)한다고 제안하기까지 하였다 (Choi *et al.*, 2002). 또한 단층 주위에서 발달하는 이차 단열의 방향성 또한 유사하게 나타나고 있어 (⑤), 선행구조분석 및 지질조사를 종합한 결과는 양산-울산단층계가 λ -단층으로 진화하였을 가능성을 지시하고 있다 (①). 따라서 양산단층과 울산단층에 대한 선행구조분석 및 야외조사 결과는 기존에 Kim *et al.* (2000)에 의해 보고된 소규모 λ -단층의 특징들과 매우 잘 일치하고 있으므로, 양산단층과 울산단층은 λ -단층의 관계를 보이고 있다고 해석될 수 있다.

6.3 양산-울산단층계의 지구조적 진화 모델

동해의 확장과 관련된 한반도의 응력장에 대한 관심이 고조되면서 많은 연구가 진행되어 왔다 (e.g. 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995; 문태현 외, 2000; Choi *et al.*, 2001; 최범영 외, 2002; 손문 외, 2002). 이들 연구에서 일반적으로 일치하는 내용은 다음과 같다.

(1) 마이오세초 북동-남서 방향의 압축력에 의해 정단층이 형성되고, 북서~남북방향의 우수향 주향이동단층이 형성되어 포항분지 및 양남분지가 형성되었다 (그림 6a).

(2) 후기 마이오세초에 시작된 서북서-동남동 또는 북서-남동 방향의 횡압력에 의해 기존 주향이동단층이 좌수향으로 재활성하여 정단층들이 역단층으로 역전 (inversion)되기 시작하였다 (그림 6b). 현재 양산단층과 울산단층 주위에서 발달하고 있는 선행구조의 방향성으로 미루어 볼 때, 이 시기에는 서북서-동남동 방향의 최대주응력이 작용하였고, 이에 대하여 울산단층이 이루는 각 φ 는 $30^\circ\sim40^\circ$ 내외를 유지하였을 것으로 판단된다. 따라서 울산단층은 양산단층을 향하여 접근한 이후 양산단층과 접하고 지괴들이 회전하면서 양산단층과 평행한 방향으로 성장했을 것으로 추정된다 (그림 4b, F3).

(3) 연이어 태평양판의 섭입과 인도판의 충돌 영향이 가중되며, 주응력의 방향이 서서히 반시계방향으로 회전하면서 주로 한반도에 역단층 운동을 일으킨 제3기말 플라이오세 이후의 동-서 방향 내지 동북동-서남서 방향의 압축력이 작용하게 되었다 (그림 6c, d). 이 시기에는 울산단층과 최대주응력이 이루는 각 (φ)이 60° 내외로 증가하였기 때문에, 양산단층과 교차하는 F2와 F4 같은 단층들이 발달하게 되면서 지역적인 소규모 분지가 형성되었고, 기존에 존재하던 F3와 같은 단층들은 응력의 방향을 고려해 볼 때 역단층으로 재활성된 것으로 보인다 (그림 4b). 양산-울산단층계가 λ -단층으로 진화하였다는 가정 하에서, 마이오세 후기 이후에 한반도 남동부에 작용한 최대주응력의 방향과 양산단층에 접하는 울산단층의 두 개 분절의 형성 순서를 고려해 보았다. 만약 서북서-동남동 방향의 최대주응력이 작용했던 마이오세 후기에 양산단층을 고각으로 관통하는 분절 (F2)이 먼저 형성되었고, 동-서 ~ 동북동-서남서 방향의 최대주응력이 작용했던 플라이오세 이후 양산단층에 저각으로 접하는 울산단층의 분절 (F3)이 형성되었다면, 전파되는 단층과 최대주응력이 작은 각도를 이를 때 고각의 단층 (F2)이 발달하고, 수직에 가까운 고각으로 작용할 때 저각으로 접하는 단층 분절 (F3)이 발달한 것으로 해석된다. 하지만 이러한 해석은 Du and Aydin (1995)의 λ -단층 모델과는 배치된다. 따라서 울산단층의 두 개 분절 (F2, F3)의 형성 순서는 먼저 마이오세 후기에 서북서-동남동 방향으로 최대주응력이 작용했던 시기에 양산단층에 저각으로 접하는 분절 (F3)이 먼저 형성되었고, 이후 최대주응력의 방향이 반시계 방향으로 회전하여 울산단층에 대해 고각으로 작용함에 따라 양산단층과 상대적으로 고각을 이루며 관통하는 울산단층의 새로운 분절 (F2)이 형성되었으며, 기존에 형성된 분절 (F3)은 이때 역단층으로 재활성 되었을 것으로 판단된다. 최근에 이루어진 물리탐사 결과 또한 울산단층이 주향이동단층으로 형성된 이후 역단층으로 재활성되었을 가능성을 시사하고 있다 (Kim *et al.*, 2008). 즉, 현재에 활발히 연구되고 있는 이 지역의 제4기 단층들은 기존의 정단층들과 함께 활성화되었던 울산단층 혹은 이의 부수 단층의 일부가 재활성된 것일 가능성이 높으며, 울산단

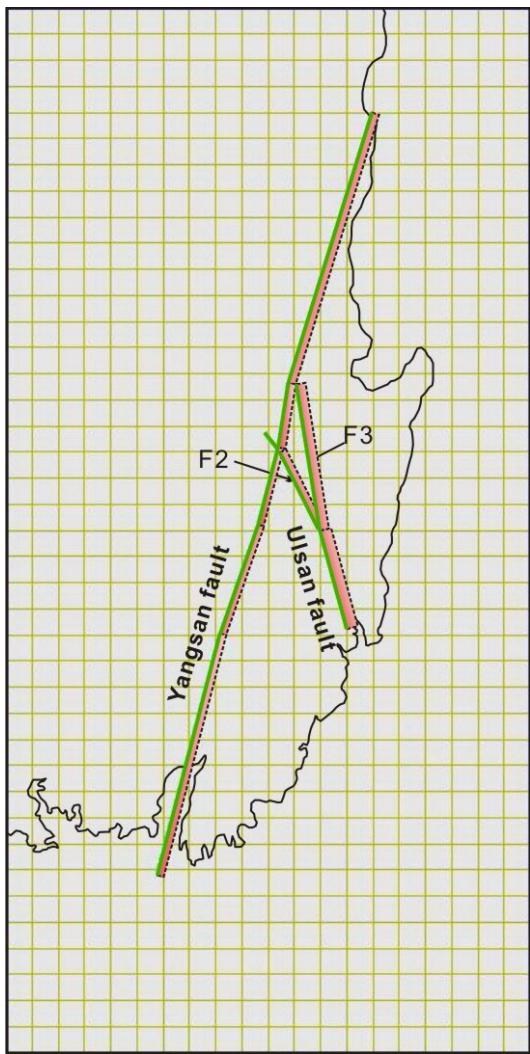


Fig. 7. Model setup for the evolution of the Yangsan-Ulsan fault system. Solid lines are the fault traces at surface, and shaded areas and dashed lines indicate fault planes and dip directions of the faults used in the modelling.

층에 대한 지구물리팀사 또한 이러한 현상을 뒷받침하고 있다.

학자들에 따라서 이 사건들 이후 현재까지의 응력변화를 보는 견해에는 약간의 차이가 있지만, 동북동-서남서 내지 동-서 방향의 압축력이 지금까지 계속되고 있다고 보는 견해가 지배적이다 (손문 외, 2002; 최범영 외, 2002). 이러한 연구결과들을 바탕으로 한반도 남동부의 양산-울산단층계에 대한 진화와 지구조 운동사를 간단한 모델로 제시하였다 (그림 6; 박준영, 2004).

7. 양산-울산단층계 주위의 응력변화 모델링

양산-울산단층계 주위의 지구조 진화 모델에 기초하여 양산단층과 울산단층이 λ -단층의 형태로 진화했을 것으로 가정하여, Coulomb 3 모델링 프로그램을 이용해 단층 진화 모델링을 실시하였다. 단층의 분포와 특성은 현재 한반도 남동부에 대한 선형 구조분석 결과와 야외조사 결과를 토대로 설정하였다 (그림 7). 양산단층의 경우 수직에 가까운 주향이 동단층으로 설정하였고, 울산단층의 경우에는 주변에 분포하는 제4기 단층의 형태가 동쪽으로 약하게 경사지는 경향을 보이고 있기 때문에 이러한 방향성을 고려하여 70° ~ 80° 동쪽으로 경사진 것으로 설정하였다. 특히 양산-울산단층계의 진화와 관련된 지구조 진화 모델 (그림 6)에 기초하여 울산단층의 F2, F3 단층분절의 발달을 시기별로 나누어 모델링을 실시하였다. 양산단층과 울산단층으로 설정된 단층 선 주위에서 나타나는 영역의 색상이 푸른색에서 붉은색으로 갈수록 응력변화의 정도가 크다는 것을 의미한다 (그림 8).

이 모델링에서는 먼저 마이오세 후기에 양산단층과 울산단층이 현재와 같이 연결되기 이전의 상황을 설정하고, 서북서-동남동 방향을 최대주응력으로 설정하여 모델링을 실시했다. 모델링 결과 울산단층의 북서쪽 말단 부근에서 응력의 변화가 집중됨을 확인할 수 있다 (그림 8a). 이러한 결과는 계속해서 동일한 방향의 최대주응력이 주어졌을 때 응력의 변화가 집중되는 영역을 향해서 단층이 진행되어 나갈 수 있음을 지시하는 것으로 해석될 수 있다. 그러나 실제 양산단층과 울산단층의 해안 쪽 말단은 정확히 확인할 수 없기 때문에 이 모델링의 결과에서 양산단층의 북쪽과 남쪽 단층말단, 울산단층의 남쪽 단층말단 부근에서 나타난 응력변화는 큰 의미를 가지지 않는다. 따라서 응력조건의 변화가 없다면 울산단층은 응력의 변화가 집중되는 지역인 북서쪽의 말단을 향해 양산단층 쪽으로 계속 진행되어 나가는 것으로 해석할 수 있다.

그러나, 마이오세 후기 이후 최대주응력의 방향이 반시계 방향으로 회전함에 따라 동-서 방향으로 최대주응력이 작용했던 상황을 설정하여 다시 모델링을 실시하였다. 이 시기에는 지구조적 진화 모델에서 제시된 양산-울산단층이 λ -단층으로 진화함에

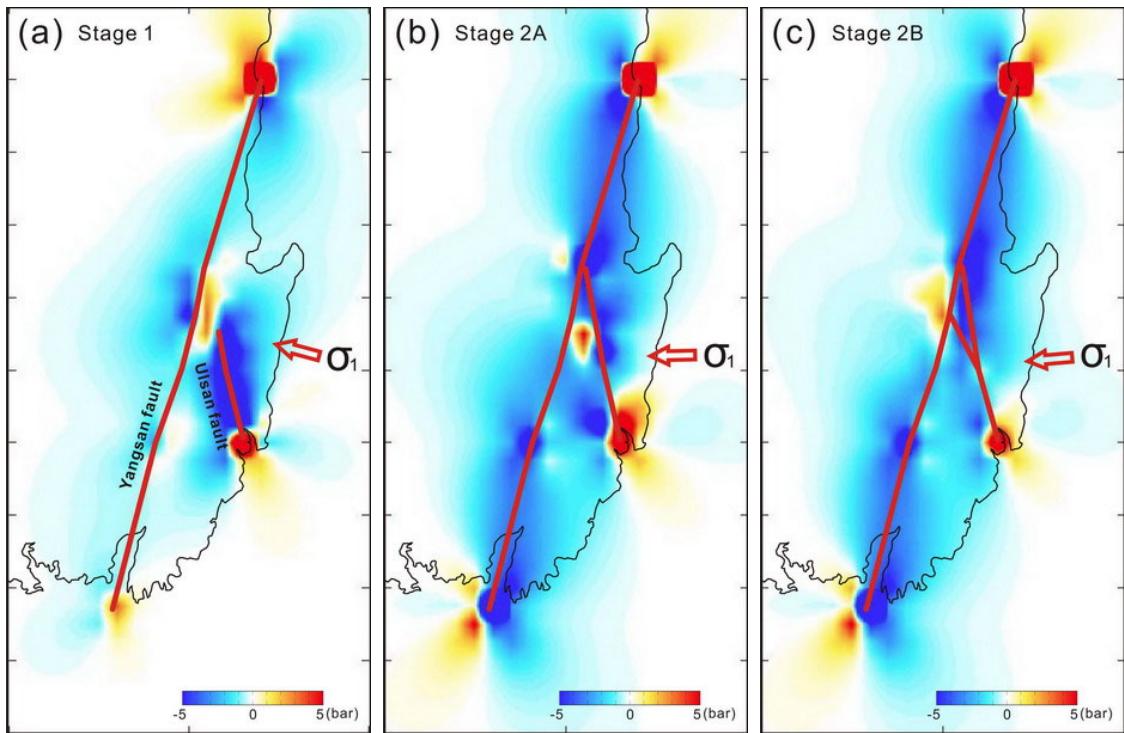


Fig. 8. The evolution modeling of the Yangsan-Ulsan fault system through the λ -fault. Coulomb stress changes are shown onto horizontal plane. Red region indicates positive coulomb stress change, and blue is negative. The region of increased coulomb stress indicates the possibility of propagation of the Ulsan fault. (a) Coulomb stress changes are increased at the tip of the Ulsan fault. (b) Coulomb stress changes are increased between the Yangsan fault and the Ulsan fault. This region indicates a potential of new segment propagation of the Ulsan fault. (c) Coulomb stress changes are increased at the tip of the new segment of the Ulsan fault.

따라 앞에서 설명한 λ -단층의 전파모델에 의해 단층과 최대주응력 사이의 각 (φ)이 45° 내외로 증가하여 울산단층이 양산단층을 향해 굽절되며 전파될 수 있는 가능성을 검증하기 위하여 모델링을 실시하였다. 그 결과 울산단층의 서측에서 양산단층을 향하여 응력의 변화가 집중되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다 (그림 8b). 이는 Du and Aydin (1995)이 제시한 λ -단층의 모델에서 나타난 것과 같이 단층의 발달과 최대주응력이 이루는 각도에 의해 울산단층이 양산단층에 대하여 상대적으로 더 고각을 이루면서 굽절되며 성장해 나가는 것으로 해석할 수 있다.

또한, 울산단층의 새로운 분절이 양산단층을 향해 발달하여 양산단층과 연결된 이후 계속 동-서 방향의 최대주응력이 작용할 경우를 가정하여 다시 모델링을 실시해 보았다 (그림 8c). 그 결과 울산단층

이 양산단층과 연결된 이후에도 양산단층을 통과한 서측 부근에서 응력의 변화가 집중되는 것으로 나타났다. 이는 계속해서 울산단층에 대하여 고각으로 작용하는 동-서 방향의 최대주응력이 작용할 경우 Du and Aydin (1995)의 λ -단층에 대한 모델과 Kim *et al.* (2000)에 의해 보고된 야외 노두에서의 소규모 λ -단층과 같이 울산단층이 양산단층을 관통하여 계속 진행되어 나갈 수 있음을 지시하는 것으로 해석된다. 이러한 결과는 현재 양산단층과 울산단층이 연결되는 지점에 대한 선형구조분석 결과와도 매우 잘 일치하는 결과이다 (그림 4b).

마지막으로 울산단층이 양산단층을 관통한 이후 현재의 지질구조적 분포를 형성하였고, 계속적으로 동북동-서남서 방향의 최대주응력이 주어졌다고 가정하여 모델링을 실시하였다 (그림 9). 이 경우는 최근의 응력상태를 가정한 것으로 각 단층과 최대주응

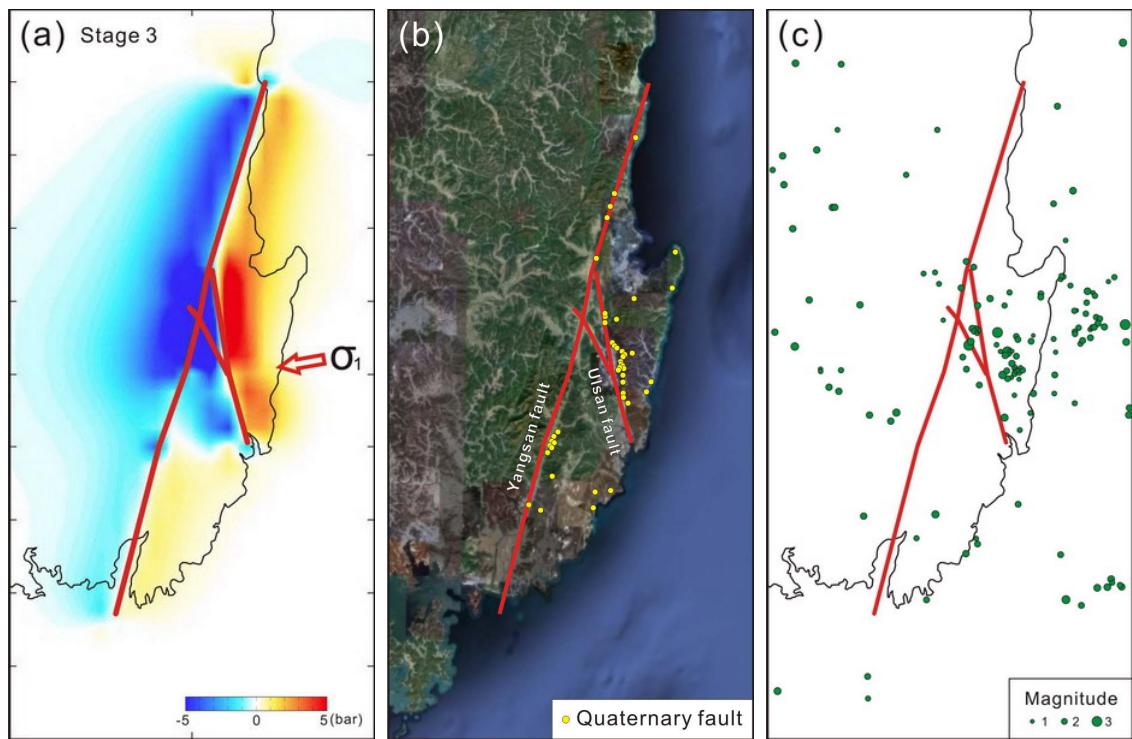


Fig. 9. Comparison between coulomb stress changes, distribution of Quaternary faults and epicenters of earthquakes around the Yangsan-Ulsan fault system. (a) Coulomb stress changes are concentrated in the eastern and southeastern region of the Yangsan fault and eastern region of the Ulsan fault. (b) Locations of Quaternary faults around the Yangsan-Ulsan fault system (modified from Kee *et al.*, 2009). (c) Earthquake distributions around the southeastern part of the Korean peninsula (1994-1998). Green circles indicate the epicenters of the recent earthquakes. Earthquakes are concentrated in the eastern part (hanging wall) of the Ulsan fault (modified from Jeon, 2009).

력이 이루는 각 관계에 의해 양산단층은 미약한 우수향 운동을, 울산단층은 미약한 좌수향 운동과 함께 주로 역단층성 운동을 하는 경우로 모델링을 실시하였다. 그 결과 울산단층의 북서쪽 말단에 응력 변화가 집중되어 나타나던 지금까지의 결과와는 달리 양산단층의 동측과 동남부, 울산단층의 동측에서 응력의 변화가 집중되어 나타나는 현상을 보여주었다. 이러한 모델링 결과는 흥미롭게도 현재 양산단층과 울산단층의 주위에서 발견되는 제4기 단층의 분포뿐만 아니라 지진의 분포와도 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다 (그림 9).

8. 토 론

지진 발생 이후 단층 주위의 쿨롬 응력변화는 여진의 분포와도 밀접하게 연관되어 있다 (King *et al.*,

1994; Stein *et al.*, 1996; Stein, 1999). 최근의 연구에 의하면 주 단층에서 일어나는 지진은 단층 주위에서 쿨롬 응력의 (coulomb stress)의 변화를 초래하는데, 이러한 쿨롬 응력이 증가되는 영역에서 여진이 야기되는 것으로 밝혀졌다 (Reasenberg and Simpson, 1992; King *et al.*, 1994; Toda *et al.*, 1998). 실제로 Morgan Hill 지진 (1984), Landers 지진 (1992), Northridge 지진 (1994) 등에 대한 연구는 쿨롬 응력의 변화와 여진의 분포가 밀접하게 연관되어 있음을 보여주고 있다 (Oppenheimer *et al.*, 1988; Harris and Simpson, 1992; King *et al.*, 1994; Stein *et al.*, 1992; Hardebeck *et al.*, 1998).

반면에 지진 발생 이후 단층 주위에서 여진이 상대적으로 발생하지 않는 영역이 존재하는데 이를 응력 그늘 (stress shadow)이라 한다. 응력 그늘은 지진이 발생했을 때 단층 주위에서 쿨롬 응력이 감소

하는 영역으로, Ft Tejon 지진 (1857), Nobi 지진 (1891), 캘리포니아 지진 (1992) 등에서 인지되었다 (Simpson and Reasenberg, 1994; Harris and Simpson, 1996; Jaumé and Sykes, 1996). 이러한 연구들은 단층의 운동과 쿨롬 응력의 변화가 매우 밀접하게 연관되어 있으며, 지진이 발생했을 때 단층 주위에서 쿨롬 응력이 증가하는 영역에서 상대적으로 많은 변형작용이 일어남을 지시하고 있다.

현재 한반도에 작용하는 응력의 방향과 단층의 최후기 운동방향을 가정한 모델링 결과는 양산단층의 동측과 동남부, 울산단층의 동측에서 쿨롬 응력이 증가하는 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 현재까지 양산-울산단층계 주위에서 발견된 제4기 단층들의 분포뿐만 아니라, 양산-울산단층계 주위에서 발생한 지진들의 진앙 분포와도 매우 잘 일치하고 있다 (그림 9c). 또한 양산단층과 울산단층의 서측 및 두 단층이 교차하는 지점인 경주 남쪽의 지역에서는 쿨롬 응력이 감소하는 응력 그늘이 나타나는데, 노두의 빈약이나 조사의 부족 등의 이유도 있겠지만 이러한 지역에서는 흥미롭게도 현재까지 제4기 단층이 거의 보고 되지 않고 있다.

이러한 결과는 단층운동에 의해 단층 주위에서 발달되는 단층손상대 (fault damage zone; e.g. Kim *et al.*, 2004a)의 특성과 매우 유사함을 보여준다. 단층손상대는 주 단층운동에 수반되어 2차적인 단층 활동, 단열, 습곡 등의 변형을 받은 부분으로, 주 단층면의 양쪽으로 비대칭적으로 발달한다 (McGrath and Davison, 1995; Kim *et al.*, 2004a). 이러한 단층손상대는 단열밀도의 증가와 변형작용 뿐만 아니라 (Kim *et al.*, 2004a; Micarelli *et al.*, 2006a, b), 지진의 생성과 전파 (Sibson, 1985; King, 1986; Aki, 1989; Thatcher and Bonilla, 1989), 단층 주위의 여진 분포 (Sibson, 1989)와도 밀접한 연관을 가지는 것으로 보고 되었다 (Kim and Sanderson, 2006). 따라서 모델링 결과 양산-울산단층계 주위에서 쿨롬 응력변화가 증가하는 영역은 상대적으로 많은 변형이 집중되는 영역으로 해석될 수 있으며, 앞으로의 단층 활동성도 높을 것으로 평가될 수 있을 것이다.

이러한 연구결과는 양산-울산단층계의 동측이 다른 지역에 비하여 많은 변형을 받았을 뿐만 아니라, 현재 한반도 남동부에 작용하고 있는 동북동-서남서 방향의 압축력에 대해서도 상대적으로 활성화될

가능성이 높음을 지시하는 것으로 해석된다. 따라서 현재의 응력조건하에서 양산-울산단층계를 따라 지진이 발생한다면, 모델링 및 야외지질조사 결과 응력변화와 지표변형이 집중되는 지역으로 나타난 울산단층과 양산단층의 동측에서 상대적으로 더 많은 피해가 발생할 수 있음을 시사하고 있다.

9. 결 론

양산-울산단층계에 대한 선형구조분석과 야외지질조사 결과는 Du and Aydin (1995)이 제시한 단층의 모델 및 Kim *et al.*, (2000)에 의해 보고된 λ -단층의 예와 형태적으로, 그리고 지형지질학적으로 매우 유사하다. 이러한 유사성에 기초하여 양산-울산단층계를 λ -단층으로 해석하였고, 이러한 해석을 바탕으로 Coulomb 3 프로그램을 이용하여 단층계 주위의 쿨롬 응력변화에 대한 모델링을 실시하였다.

컴퓨터 모델링을 실시한 결과, 마이오세 후기 이후에는 울산단층의 북서쪽 말단 부근에 응력변화가 집중되는 현상을 보여주었는데, 이는 울산단층의 전파방향과 λ -단층으로의 진화를 지시하는 것으로 해석되었다. 제4기 이후의 지구조 운동에 대한 모델링 결과는 양산단층과 울산단층의 동측, 그리고 양산단층의 동남부에 응력변화가 집중됨을 보여준다. 이는 현재 발견된 제4기 단층들의 분포와도 매우 잘 일치하여 응력의 변화가 단층의 활동도와 밀접하게 연관되어 있음을 지시하는 것으로 해석된다.

앞으로 양산-울산단층계에 대한 정확한 단층 분절의 설정, 단층의 변위와 단층의 운동 시기 등에 대한 연구 등이 더욱 깊이 있게 이루어진다면 이러한 모델링의 정밀도가 더 향상될 것으로 사료된다. 특히, 아직까지 명확하게 밝혀지지 않은 울산단층에 대한 더 많은 연구가 수행되어 그 실체가 밝혀진다면 정확한 임력자료의 수집을 통하여 더욱 정밀한 모델링이 이루어질 수 있을 것이다. 이러한 연구는 단층진화뿐만 아니라 제4기 단층들의 활동성과 지진재해에 대한 연구에도 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 교육과학기술부 원자력연구개발과제 지표변형평가 최적화 기반자료 분석연구 (과제번호

2007-02090)의 지원에 의해 수행되었다. 논문의 심사과정에서 많은 유익한 조언을 해주신 최원학 박사님과 손문교수님께도 깊은 감사를 드린다. 또한, 이 연구를 진행하는데 많은 도움을 준 부경대학교 환경지질과학과 지질구조재해연구실의 연구실원들에게도 진심으로 감사를 드린다.

참고문헌

- 경재복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리 일대의 신기 단층운동. *지질학회지*, 37, 563-577.
- 기원서, 최원학, 김유홍, 송교영, 2009, 하정단층과 구만단 층의 제4기 단층운동 특성. 2009년 춘계지질과학기술 공동학술대회 논문집, 260 p.
- 김영석, 박준영, 김정빈, 2002a, 신월성 원전 지질조사 보고서 - 신월성(봉길) 원전 부지반경 1 km 지역 정밀지질조사 자문보고서, 52 p.
- 김영석, 박준영, 김정환, 김정빈, 신현조, 2002b, 경북 경주시 양남면-양북면 일대의 지구조 진화과정에 대한 연구. 제57차 대한지질학회 추계 공동학술 발표회 초록집, 113 p.
- 김인수, 김종열, 1983, 경상분지 언양단층 지역에 대한 전기 비저항 탐사 연구. *광산지질*, 16, 11-18.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주 향이동운동. *지질학회지*, 28, 84-109.
- 김종열, 1988, 양산단층의 산상 및 운동사에 관한 연구. 부산 대학교 대학원 박사학위논문, 97 p.
- 김종환, 강필종, 임정웅, 1976, LANDSAT-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구. *대한지질학회지*, 12, 79-89.
- 류충렬, 양경희, 김인수, 1996, 울산단층 주변의 제4기 단층: 활성단층인가? 제51차 대한지질학회 추계 공동학술 발표회 초록집, 79-80.
- 류충렬, 이봉주, 손문, 이용희, 최성자, 최위찬, 2002, 경주시 외동읍 개곡리의 제4기 단층. *지질학회지*, 38, 309-323.
- 문태현, 손문, 장태우, 김인수, 2000, 한반도 동남부 제3기 분지 지역에서의 신생대 고응력장 복원. *지구과학회지*, 21, 230-249.
- 민경덕, 정종대, 1985, 중력탐사에 의한 경상충군 내 왜관-포항 간의 지하지질구조 연구. *광산지질*, 18, 321-329.
- 박준영, 2004, 경주 일대 제3기 분지의 구조적 특성 연구. 서 울대학교 대학원 석사학위논문, 128 p.
- 손문, 정혜윤, 김인수, 2002, 한반도 남동부 연일구조선 남부 일원의 지질과 지질구조. *지질학회지*, 38, 175-197.
- 이기화, 1997, 한반도의 지진. 대한지질학회, 대한자원환경지질학회 발표논문집, 86-99.
- 이민성, 강필종, 1964, 양산도폭 (1:50,000) 및 설명서. 국립 지질조사소, 1-21.
- 장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조 운동사. *지질공학*, 8, 32-49.
- 장태우, 2001, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 지구조 운동. *지질학회지*, 37, 431-444.
- 전정수, 2009, 경상남북도 일원에서의 미소지진 모니터링. 2009년도 대한지질학회 원자력분과위원회 춘계 Workshop.
- 채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕 지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달상태. *지질학회지*, 30, 379-394.
- 최범영, 류충렬, 권석기, 최위찬, 황재하, 이승렬, 이병주, 2002, 포항-울산 지역의 단층 구조 분석: 활구조 운동에 대한 접근. *지질학회지*, 38, 33-50.
- 최진혁, 양석준, 김영석, 2009, 울산시 상천리 일대에 발달하는 남부 양산단층의 단층대 분류와 지질구조적 특성. *지질학회지*, 45, 9-28.
- 황치옥, 이하영, 윤혜수, 1992, 흔적화석에 의한 제3기 보문 소분지(포항분지)의 고환경. *한국고생물학회지*, 2, 236-252.
- Aki, K., 1989, Geometric features of a fault zone related to the nucleation and termination of an earthquake rupture. *United States Geological Survey Open-File Report* 89-315, 1-9.
- Baag, C.-E. and Kang, T.-S., 2007, Earthquake-induced hazard and earthquake-resistant design criteria in Korea, *Proceedings of Innovative Technology of Hazard Preparedness for Super Tall Buildings*. Korea Conference on Innovative Science and Technology 2007, Jeju, Korea.
- Chang, K., Woo, B., Lee, J., Park, S. and Yao, K., 1990, Cretaceous and Early Cenozoic stratigraphy and history of eastern Kyongsang Basin, South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 26, 471-481.
- Chinnery, M.A., 1963, The stress changes that accompany strike-slip faulting. *Bulletin of the Seismological Society of America* 53, 921-932.
- Choi, H.I., Oh, J.H., Shin, S.C. and Yang, M.Y., 1980, Geology and geochemistry of the Gyeongsang strata in Ulsan area. *Korea Institute of Energy and Resources Bulletin*, 20, 33 p.
- Choi, P.Y., Kwon, S.K., Hwang, J.H., Lee, S.R., An, G.O., 2001, Paleostress analysis of the Pohang-Ulsan area, Southeast Korea: Tectonic sequence and timing of block rotation. *Geoscience Journal, Korea*, 5, 1-18.
- Choi, P.Y., Kwon, S.K., Lee, S.R., Hwang, J.H., Angelier, J., An, G.O., 2002, Late Mesozoic-enozoic tectonic sequence of Southeast Korea. In: Jin, M.-S., Lee, S. R., Choi, H.-I., Park, K.-H., Koh, S.-M. and Cho, D.-L., (Eds), *Mesozoic Sedimentation, Igneous Activity and Mineralization in South Korea. 1st & 2nd Sym. The Geology of Korea*, KIGMR, Spec. Publ. No. 1, 52-88.
- Cox, S.F. and Ruming, K., 2004, The St Ives mesothermal gold system, Western Australia-a case of golden after-

- shocks? *Journal of Structural Geology*, 26, 1109-1125.
- Cox, S.J.D. and Scholz, C.H., 1988, Rupture initiation in shear fracture of rocks: an experimental study. *Journal of Geophysical Research*, 93, 3307-3320.
- Das, S., and Scholz, C.H., 1981, Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 1669-1675.
- Du, Y. and Aydin, A., 1995, Shear fracture patterns and connectivity at geometric complexities along strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, 100, 18093-18102.
- Hardebeck, J.L., Nazareth, J.J., Hauksson, E., 1998, The static stress change triggering model: constraints from two southern California after-shock sequences. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24427-24437.
- Harris, R.A. and Simpson, R.W., 1992, Changes in static stress on southern California faults after the 1992 Landers earthquake. *Nature*, 360, 251-254.
- Harris, R.A. and Simpson, R.W., 1996, In the shadow of 1857—the effect of the great Ft. Tejon earthquake on subsequent earthquakes in southern California. *Geophysical Research Letters*, 23, 229-232.
- Harris, R.A. and Simpson, R.W., 1998, Suppression of large earthquakes by stress shadows: a comparison of Coulomb and rate-and-state failure. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24439-24451.
- Hwang, B.H., Lee, J.D., Yang, K.H., McWilliams, M., 2007, Cenozoic Strike-Slip Displacement along the Yangsan Fault, Southeast Korean Peninsula. *International Geology Review*, 49, 768-775.
- Hyndman D. and Hyndman, D., 2006, Natural Hazards and disasters. Thomson Brooks/Cole, Belmont, 490 p.
- Jaumé, S.C. and Sykes, L.R., 1996, Evolution of moderate seismicity in the San Francisco Bay region, 1850 to 1993: Seismicity changes related to the occurrence of large and great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 101, 765-789.
- Kim, K.Y., Kim, D.H., Lee, S.Y., 2008, Near-surface geophysical studies in the Ulsan Fault Zone of Korea. *Exploration Geophysics*, 39, 78-84.
- Kim, S.W., 1973, A study on the Terraces along the southeastern coast (Bangeojin-Pohang) of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 9, 47-88.
- Kim, Y.-S., Andrews, J.R., Sanderson, D.J., 2000, Damage zones around strike-slip fault systems and strike-slip fault evolution, Crackington Haven, southwest England. *Geoscience Journal*, 4, 53-72.
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., 2004a, Fault damage zones. *Journal of Structural Geology*, 26, 503-517.
- Kim, Y.-S., Park, J.-Y., Kim, J.H., Shin, H.C., Sanderson, D.J., 2004b, Thrust geometries in unconsolidated Quaternary sediments and evolution of the Eupchon Fault, southeast Korea. *The Island Arc*, 13, 403-415.
- Kim, Y.-S., and Sanderson, D.J., 2006, Structural similarity and variety at the tips in a wide range of strike-slip faults: a review. *Terra Nova*, 18, 330-344.
- King, G.C.P., 1986, Speculations on the geometry of the initiation and termination processes of earthquake rupture and its relation to morphology and geological structure. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 567-585.
- King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J., 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 935-953.
- Lee, J.I., 2000, Provenance and thermal maturity of the lower Cretaceous Gyeongsang Supergroup, Korea. Ph.D. Thesis. Seoul National University.
- Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 127-135.
- Lee, K. and Um, R.Y., 1992, Geoelectric survey of the Ulsan fault: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 32-39.
- Lee, K.H., Jeong, B.I., Kim, Y.H. and Yang, S.J., 1984, (A) Geophysical study of the Yangsan Fault area. *Journal of Geological Society of Korea*, 20, 222-240.
- McGrath, A.G. and Davison, I., 1995, Damage zone geometry around fault tips. *Journal of Structural Geology*, 17, 1011-1024.
- Micarelli, L., Benedicto, A., Wibberley, C. A. J., 2006a, Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, 28, 1214-1227.
- Micarelli, L., Morettia, L., Jauberta, M., Moulouela, H., 2006b, Fracture analysis in the south-western Corinth rift (Greece) and implications on fault hydraulic behavior. *Tectonophysics*, 426, 31-59.
- Micklithwaite, S. and Cox, S.F., 2004, Fault-segment rupture, aftershock-zone fluid flow, and mineralization. *Geology*, 32, 813-816.
- Nostro, C., Stein, R.S., Cocco, M., Belardinelli, M.E., Marzocchi, W., 1998, Two-way coupling between Vesuvius eruptions and southern Apennine earthquakes (Italy) by elastic stress transfer. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24487-24504.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M. S., Jo, W. R., Kim, S. K., Jeon, J. S., Chi, H. C. and Oike, K. 1994, Active fault topography and trench survey in the central part of the Yangsan fault, southeast Korea. *Journal of Geography*, 103, 111-126.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J. B., Jo, W.

- R., Kim, S. K., Oike, K. and Makamura, T., 1998, Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan fault system, southeast Korea. *Journal of Geography*, 107, 644-658.
- Oppenheimer, D.H., Reasenberg, P.A., Simpson, R.W., 1988, Fault-plane solutions for the 1984 Morgan Hill, California, earthquake sequence: Evidence for the state of stress on the Calaveras fault. *Journal of Geophysical Research*, 93, 9007-9026.
- Pollard, D.D. and Segall, P., 1987, Theoretical displacements and stresses near fractures in rock: With applications to faults, joints, veins, dikes and solution surface. In *Fracture mechanics of Rock* (ed. B. K. Atkinson). Academic Press Geology Series, Academic Press, 277-349.
- Reasenberg, P.A. and Simpson, R.W., 1992, Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 255, 1687-1690.
- Ree, J.-H., Lee, Y.-J., Rhodes, E.J., Park, Y., Kwon, S.-T., Chwae, U., Jeon, J.-S. and Lee, B., 2003, Quaternary reactivation of Tertiary faults in the southeastern Korean Peninsula: Age constraint by optically stimulated luminescence dating. *The Island Arc*, 12, 1-12.
- Ree, J.-H. and Kwon, S.-T., 2005, The Wangsan Fault: One of the most 'active' faults in South Korea? *Geoscience Journal*, 9, 223-226.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, *Geology of Korea*. Geological and Mineralogical Institute of Korea, 139.
- Richard, H. and Groshong, Jr., 1999, *3-D Structural Geology: a practical guide to surface and subsurface map interpretation*. Springer, New York, 25 p.
- Sibson, R.H., 1985, Stopping of earthquake ruptures at di-lational fault jogs. *Nature*, 316, 248-251.
- Sibson, R.H., 1989, Earthquake faulting as a structural process. *Journal of Structural Geology*, 11, 1-14.
- Simpson, R.W., and Reasenberg, P.A., 1994, Earthquake-induced static-stress changes on central California faults, in Simpson, R. W., ed., *The Loma Prieta, California, earthquake October 17, 1989-Tectonic processes and models: U.S. Geological Survey Professional Paper 1550-F*, F55-F89.
- Stein, R.S., and Lisowski, M., 1983, The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation. *Journal of Geophysical Research*, 88, 6477-6490.
- Stein, R.S., King, G.C.P., Lin, J., 1992, Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 Magnitude = 7.4 Landers earthquake. *Science*, 258, 1328-1332.
- Stein, R.S., Dieterich, J.H., Barka, A.A., 1996, Role of stress triggering in earthquake migration on the North Anatolian Fault. *Physics and Chemistry of the Earth*, 21, No. 4, 225-230.
- Stein, R.S., Barka, A.A., Dieterich, J.H., 1997, Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*, 128, 594-604.
- Stein, R.S., 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence. *Nature*, 402, 605-609.
- Thatcher, W. and Bonilla, M.G., 1989, Earthquake fault slip estimation from geologic, geodetic and seismologic observations: implications for earthquake mechanics and fault segmentation. *United States Geological Survey Open-File Report 89-315*, 386-399.
- Toda, S., Stein, R.S., Reasenberg, P.A., Dieterich, J.H., Yoshida, A., 1998, Stress transferred by the $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *Journal of Geophysical Research*, 103, 24543-24565.
- Toda, S. and Stein, R.S., 2002a, Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga-Núñez Earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield. *Journal of Geophysical Research*, 107, 10.1029/2001JB000172.
- Toda, S., Stein, R.S., Sagiya, T., 2002b, Evidence from the 2000 Izu Islands swarm that seismicity is governed by stressing rate. *Nature*, 419, 58-61.
- Toda, S., Stein, R.S., Richards-Dinger, K., Bozkurt, S., 2005, Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research*, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Uleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.

투 고 일 : 2009년 7월 14일

심 사 일 : 2009년 7월 14일

심사완료일 : 2009년 8월 28일