

## 확률론적 방법에 의한 단층의 활동도 평가

### Probabilistic Approach for Evaluation of the Fault Activity

장천중\*

최원학\*

연관희\*\*

박동희\*\*\*

임창복\*\*\*\*

Chang, Chun-Joong Choi, Weon-Hack Yun, Kwan-Hee Park, Dong-Hee Im, Chang-Bock

#### ABSTRACT

Since early 1990's, several Quaternary faults have been found in the southeastern part of the Korean peninsula with reference to fault activity. Because some of these faults could be considered a capable fault, it is a very delicate matter, which need to be deal with carefully in assessing the seismic hazard.

In determining whether or not a faults are capable, because of the low rate of seismicity and insufficient relationship between instrumental macro-seismicity and fault, there has been considerable debate among geologists and geophysicists in Korea.

In this study, we discuss the criteria and probabilistic approaches that are used to assess whether or not a fault is seismogenic. And, we preliminarily also suggest the probability of fault activity from the spatial association between faults and earthquake epicenters, fault slip and tectonic stress, and geological evidence for multiple episodes of reactivation.

#### 1. 서 론

어떤 단층이 지구조적(tectonic) 기원인가 그리고 이 단층이 지진을 유발할 가능성이 얼마인가를 평가하는 것은 원자력발전소의 부지조사 및 평가에서 가장 중요한 과제 중의 하나이다. 국내 원자력발전소의 설계기준지진(SSE : Safety Shutdown Earthquake)은 관련 규정에 따라 계기지진, 역사지진 및 단층 지진원에 대한 평가와 더불어 지진지체구조구에 따라 지진동 감쇠를 고려하여 원전부지에서의 지진동을 평가하게 된다. 특히 단층 지진원에 대해서는 활동성(capable) 여부를 먼저 평가하고 활동성 단층으로 판단될 때 단층요소에 따른 지진규모 평가 경험식에 따라 단층으로부터 야기될 수 있는 지진규모를 평가하게 되는데, 최근 국제적으로 큰 규모의 지진발생과 주요

\* 정회원 · 한전 전력연구원, 책임연구원

\*\* 정회원 · 한전 전력연구원, 선임연구원

\*\*\* 정회원 · 한전 전력연구원, 일반연구원

\*\*\*\*정회원 · 한국원자력안전기술원, 책임연구원

단층대를 따라 고지진학적 연구가 활발하게 진행되면서 이 분야 연구에 많은 진전을 보게 되었다.

국내에서는 1990년대 초 양산단층을 중심으로 단층 활동성에 관한 연구가 시작되면서 단층과 지진발생과의 관계, 단층대의 지구물리학적 및 고지진학적 연구와 연대측정에 대한 연구가 수행되면서 많은 변화를 가져왔는데, 연구 초기에는 제4기 단층 존재 여부가 중요한 과제였고, 그 후 단층운동의 연대측정, 제4기 단층의 활동성 여부, 단층의 활동이력 등으로 전전하면서 연구가 확대·심화되고 있다.

이러한 연구과정에서 초기에는 제4기 단층의 확인만으로 원전의 위험성을 제기한 학자들도 있었으나, 원전의 설계기준지진 설정 절차에 따르면 제4기 단층이 발견될 경우 단층의 활동성 여부를 먼저 판단하고, 부지로부터 거리에 따른 단층의 길이를 파악하여 일정규모 이상의 단층에 대해서만 평가 대상이 되며, 활동성 단층이 아니거나 혹은 활동성 단층일 경우라도 거리에 따른 일정 규모의 길이를 갖지 않을 때는 설계기준지진 평가에서 제외된다 [1, 2].

이와 같이 단층 지진원에 대한 지진재해 평가에서 단층의 활동성 여부 평가가 무엇보다 중요한 과제이나 지금까지는 단지 단층의 운동시기에만 기준을 두어 평가하는 경향이 많았다. 그러나, 단층대 내에서 연대측정을 위한 적절한 시료의 획득이 쉽지 않을 뿐 아니라 측정 결과에도 부분적으로 오차가 있을 수 있고, 또한 단층운동이 지구조적 운동의 결과인가 여부에 따라 해석을 달리 할 수 있기 때문에 많은 문제점으로 남아있었다. 이러한 문제점을 반영하고자 최근 확률론적 지진 재해평가 및 단층의 활동도(activity of fault) 평가 방법들이 제시되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 양산단층대를 대상으로 단층의 활동도 평가의 국내 적용성을 검토하고자 하였다.

## 2. 단층의 활동도 평가

단층의 지진 유발성(seismogenic) 정도 혹은 단층의 활동도를 평가하는 것은 지진재해 평가에서 매우 중요한 요소로서, 이와 관련하여 우선적으로 평가되어야 하는 것이 지질구조가 지구조적인가 혹은 지진유발 가능한가를 평가하는 것으로, 평가방법은 지진발생과 직접적 혹은 간접적으로 관련되어 있는 파라미터들을 도출하고 각각의 기준에 대한 상대적인 중요도를 설정하여 평가하게 된다.

먼저 단층의 활동도 평가에는 단층의 선형구조와 역사지진 혹은 계기지진의 분포에 따라 지진과 단층과의 공간적 상호관계가 중요한 요소로 판단되며, 그 외에 단층의 지하심도 연장성, 현재 지구조 응력체계와 단층의 운동슬립 관계, 단층의 재활동에 의한 반복적인 사건(multiple episodes) 등이 활용될 수 있을 것이며 이들을 상대적인 중요도를 고려하여 평가하게 된다. 평가 요소 및 상대적인 중요도는 1~10 사이에 값을 가지며 본 연구에서는 US NRC에서 제시한 절차가 비교적 적절하다고 판단하여 이를 활용하였다 [3].

### 2.1 단층과 지진발생의 공간적 관계

판 경계지역의 활성단층과 같이 어떤 단층이 규모 5 이상의 큰 지진(계기지진 및 역사지진)과 연관성을 보여준다거나 혹은 제4기 후기 반복적인 단층변위의 증거를 분명하게 보여준다면 이 단층은 지진 유발 단층이라고 100% 확신을 가질 수 있을 것이며, 규모 5 이하의 미소지진과 연관성은 큰 규모 지진과의 연관성 보다 지진유발 단층을 평가함에 있어서 신뢰성이 보다 작다고 평가

할 수 있을 것이다(그림 1).

본 연구에서는 단층과 지진발생과의 관계를 살펴보기 위하여 역사지진 169개와 계기지진으로는 기상청(1978~2005) 지진자료 21개와 한국지질자원연구원(1994~2005)의 계기지진 105개를 활용하였다. 역사지진의 경우 먼저 진도를 규모로 환산하였으며, 경상분지에서 기록된 지진에서 환산된 지진규모에 따라 규모 5이상 및 5이하로 구분하고 이들을 도시하였다. 계기지진 자료는 국내 지진관측 시스템이 비교적 폭넓게 설치된 기상청의 1978년 이후 자료들을 활용하였으며, 특히 디지털 관측 장비가 본격적으로 설치되어 신뢰도가 높다고 판단되는 1994년 이후의 한전 전력연구원 및 한국지질자원연구원의 자료들을 근거로 분석하였다. 계기지진자료들은 경상분지 내에서는 규모 5이상의 지진이 관측되지 않았고 모두 규모 5이하의 지진이다.

지진발생과 단층과의 상관관계를 통한 단층의 활동도 평가를 위하여 규모 5이상의 지진과 5이하의 지진으로 구분하여 분석하였다. 역사지진에서 보여주는 규모 5이상의 지진과 단층과의 관계에서는 일부 진앙지가 양산단층대에 위치하고 있지만 진앙지와 양산단층대와 직접적으로 연관성을 찾기가 쉽지 않아 그 상관도를 약 0.1로 추정하였다. 규모 1이상 5이하의 지진에 대해서는 역사지진 뿐 아니라 계기지진자료를 복합적으로 고려하였는데, 울산단층대 북부와 동쪽부에 집중되는 모습을 보이나 단층과 선형적인 뚜렷한 관계로 판단하기 어려우며 보수적으로 판단하여 단층과의 공간적 관계를 0.2 정도의 상관성으로 평가하였다(그림 2).

따라서 한반도 동남부에 많은 제4기 단층들이 발견되고 있지만 실질적으로 역사시대 이래 지진발생과의 공간적 관계를 통한 단층의 활동도를 평가할 때 지진발생이 특정 단층과 직접적인 관계를 보여주기 보다는 오히려 배경지진의 특성으로 볼 수 있는 것처럼 분산된 양상을 보인다.

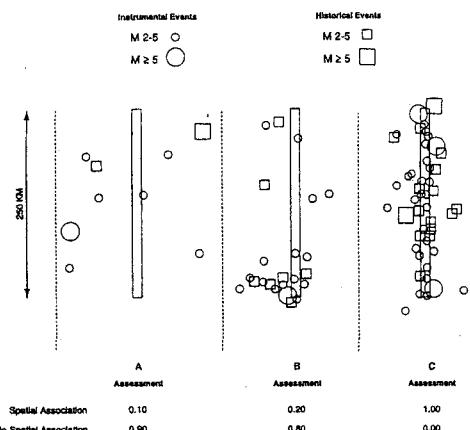


그림 1. 단층과 지진 진앙지와의 공간적 상관관계를 평가하기 위한 평가 기준[3].

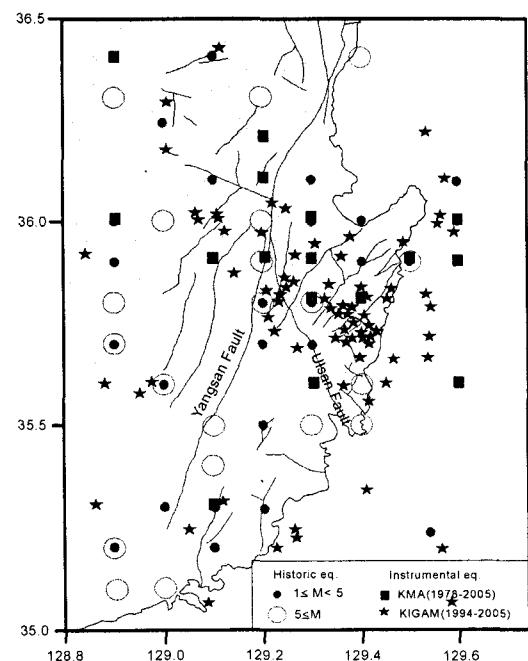


그림 2. 한반도 남동부 주요단층과 역사지진 및 계기지진의 진앙지 분포 관계.

## 2.2 지구조 응력장과 단층운동

현재 지구조 응력체계(current stress regime)와 제4기 단층들에서 나타난 단층슬립(fault slip)과의 관계를 살펴봄으로서 단층운동이 현재 지구조 응력체계 하에서 이루어진 것인가를 판단할 수 있는 기본 자료로 활용할 수 있을 것이다. 현재 한반도를 중심으로 지구조 응력체계는 여러 가지 방법으로 알 수 있다. 그 중 가장 흔히 활용되고 있는 것이 계기지진의 P파 초동을 이용한 지진발생기구(focal mechanism)를 들 수 있다. 1936~1996년 사이 발생한 22개의 지진자료를 이용한 지진발생기구에 의한 응력장은 대체로 주향이 동성을 갖는 것이 많으며 부분적으로 역단층성 자료를 보여주고 있다. 또한 이들의 최대압축 주응력 방향은 E-W 혹은 ENE-WSW 방향을 보여주고 있으며 [4], 수압파쇄 실험 [5]에 의한 결과도 유사한 결과를 보여준다(그림 3).

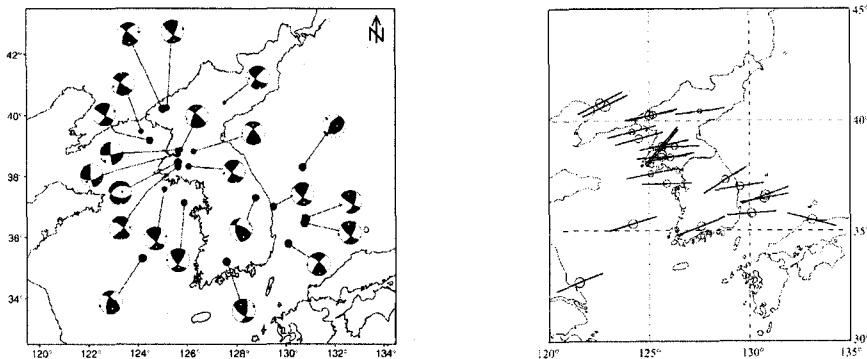


그림 3. 지진발생기구에 의한 응력장(왼쪽)과 최대수평압축응력 방향(오른쪽)  
1936~1996년, 22개의 계기지진자료 [4].

이에 따라 본 연구에서는 현재 지구조 응력체계와 제4기 단층운동과의 관계를 파악하기 위하여 양산단층, 울산단층 및 동해안 지역에서 발견된 제4기 단층 중 단층운동의 슬립을 잘 보여주는 야외 증거들을 가지고 운동성을 평가해보았다. 양산단층을 따라서 유계리, 반곡리, 벽계리, 상천리, 월평리 지역의 제4기 단층에서 관찰되고 있는 단층슬립과(그림 4), 울산단층 지역을 따라서 왕산, 감산사, 개곡, 입설, 원원사 및 이화에서 발견된 제4기 단층의 단층슬립 [6, 7]을 분석하여 단층의 배향과 단층운동의 슬립을 입체투영으로 도시하였다(그림 5).

양산단층을 따라서 발견된 제4기 단층들은 유계지역을 제외하고는 모두 고각도 경사를 가지면서 주향이 동성을 보여주고 있으며, 울산단층 지역의 경우에는 감산사와 원원사 지역의 경우 저각을 가지고 있으며 역단층성 운동을 보여주고 있다. 지구조 운동체계와 단층운동의 관계를 해석해보면 양산단층을 따라서 나타나는 주향이 동성 단층의 경우 앞서 설명한 현재 지구조 응력체계인 ENE-WSW 방향의 최대 주압축응력 방향과 설명이 곤란한 부분도 있으나, 양산단층

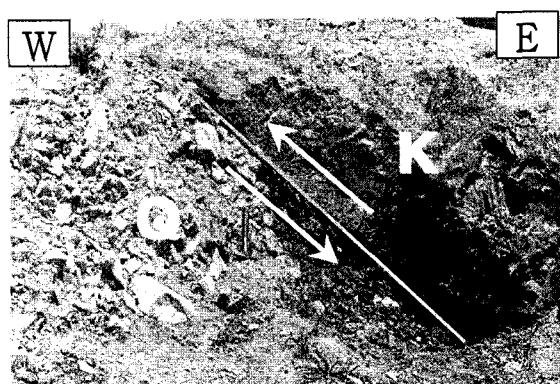


그림 4. 양산단층대 유계리 지역에서 발견된 제4기 단층.

지역의 유계리와 같이 남북방향에 동축경사를 하고 있는 역단층의 제4기 단층운동과 울산단층 지역에서 보여주는 남북 방향에 동축경사를 가지는 역단층성 제4기 단층운동은 현재 지구조 응력체계와 잘 부합된다고 할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 관계는 소단층들의 주향에 따라 같은 응력체계 하에서도 다양한 단층 슬립을 보일 수 있고, 또한 국지적인 지진자료를 분석하여 단층운동과 직접적인 연관성을 분석해야하기 때문에 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 바와 같이 지구조 응력체계와 단층운동이 일치되지 않은 부분도 있지만 지구조 응력장 해석 자체의 불확실성을 감안하고, 또한 전반적인 제4기 단층의 운동이 남북방향에 동축경사를 보여준다는 사실에 근거하여 보수적으로 평가하여 지구조 응력장과 단층운동과의 상관관계를 80%로 평가하였다.

### 2.3 단층의 재활동에 의한 다중 운동 사건

서로 다른 지질시대 동안 혹은 서로 다른 지구조 단계 동안에 활동한 단층은 각각에서 연장성이 좋은 지구조적 단층과 연관성을 갖기 쉽다. 대규모 단층들은 오랜 지질시대 동안 재활동에 의해 연속성을 가지기도 하며, 우리나라와 같은 비교적 지진활동이 덜 활발한 안정대륙에서 관찰한 결과를 보면 지구조 단층과 지진과의 연관성에 대해서 큰 규모의 지진은 재활동 운동을 경험했던 지질구조와 연관성이 있음을 발견하였다 [8]. 물론 이러한 지질구조 중에서도 직접적인 연관성을 보이지 않은 경우도 드물지 않다. 따라서 재활동에 의한 다중운동의 기준은 앞서 설명한 지진규모와 단층과의 관계보다 상대적이 비중을 낮게 고려하여 평가하였다.

양산단층과 울산단층을 따라 발견되는 단층들에서는 재활동에 의한 증거들을 쉽게 찾을 수 있다(그림 6). 특히 양산단층

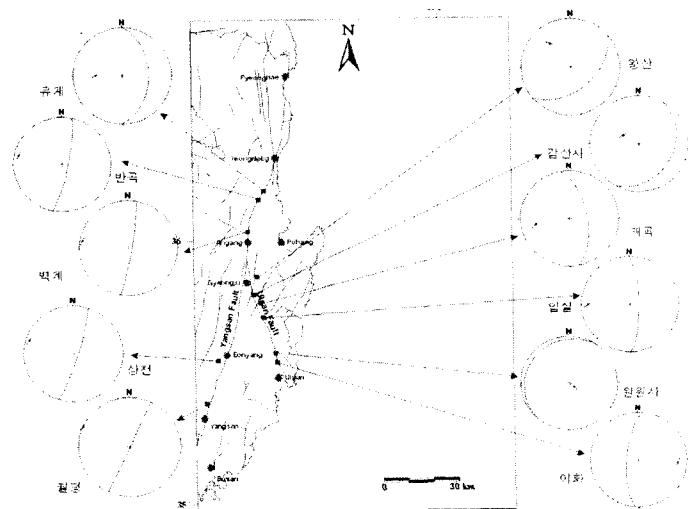


그림 5. 양산단층과 울산단층대를 따라 발견된 제4기 단층과 제4기 단층면에서 발견된 단층운동의 슬립을 도시한 입체투영.

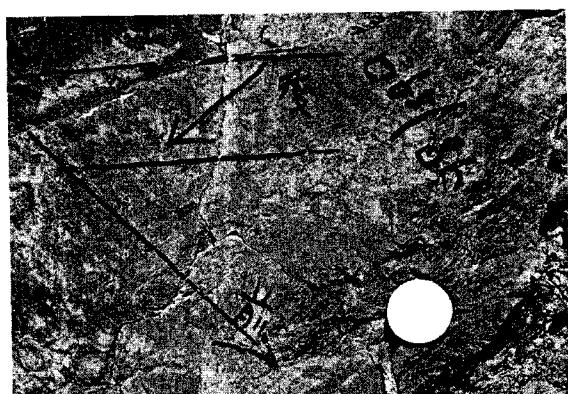


그림 6. 양산단층의 다중운동 증거로서 동일한 단층면에서 종복 운동 슬립.

이 경우 오랜 지질시대 동안 많은 사건을 경험하면서 서로 다른 지구조 환경 하에서 다중변형 작용을 받은 것으로 해석되고 있을 뿐 아니라 최근 지질시대에 와서도 다중 변형을 받은 증거를 잘 보여주고 있다 [9, 10]. 이러한 결과를 바탕으로 재활동에 의한 다중변형 작용에 의한 단층의 지진 유발성과의 상호관련성은 충분한 보수성을 감안하여 80%로 평가하였다.

## 2.4 단층의 지하심부 연장성

단층의 지하심부로의 연장성은 큰 규모의 지진발생과 단층파열을 야기하는 지구조성 단층들이 지각하부까지 연장되어 타나나는 것이 일반적이다. 이러한 사실 때문에 단층의 지하 지각 연장부에 대한 정보는 단층이 지진 유발성 정도에 대한 정보를 제공할 수 있기 때문에 단층의 지하심부 연장성은 단층의 활동도 평가의 기준이 될 수 있을 것이다. 그러나 단층의 지하심부 연장성 자체로만 어떤 단층이 지진유발 가능성은 평가하는 판단자료로 절대적인 증거가 되지 않을 뿐 아니라 중규모의 지진인 10 km 보다 낮은 천부에서 발생된 경우도 있기 때문에 지하심부 연장성에 대한 요소는 단층의 활동도 평가요소로서 그 비중을 낮게 고려하였다.

한반도 동남부 양산단층대 주변의 제4기 단층에 대해서 정밀한 지구물리 탐사 혹은 지진의 진원심도에 대한 연구결과들이 충분하게 수행되지 않았기 때문에 정확하게 평가할 수 없지만, 일부 관찰된 지진의 진원심도가 12 km 내외로서 이들 지진이 제4기 단층과 부분적으로 연관성을 가지고 있다고 판단되어지고, 또한 기존의 제4기 단층들이 이와 같은 결과를 보여준다고 판단하여 약 80 %로 매우 보수적으로 평가하였다.

## 3. 토의 및 결론

양산단층과 울산단층 지역에서 발견되고 있는 제4기 단층을 포함한 주단층들의 활동도를 평가하기 위하여 단층-지진 관계에서 규모 5이상의 지진의 경우 단층과 공간적 상관도를 0.1로 평가하였고, 규모 5이하의 지진에 대해서 단층-지진 발생과의 관계를 0.2로 평가하였으며, 단층의 심도에 대해서는 보수적으로 평가하여 0.8, 지구조 응력체계와 단층슬립의 관계도 보수적으로 고려하여 0.8로 고려하고, 제4기 단층의 재활동에 의한 다중

변형 관계를 0.8로 평가했을 때 양산단층과 울산단층에서 관찰되는 제4기 단층들의 활동도 혹은 지진유발 확률을 종합적으로 살펴볼 때 0.35로 평가되었다 (표 1).

원자력발전소 부지조사의 제일 중요한 목적은 지진원이 지표변형과 지진을 일으킬 가능성이 있는지를 평가하기 위한 것이다. 이에 따라 단층이 발견되었을 경우 충분한 조사를 통하여 이 단층이 발전소의 안전성을 떨어뜨리지 않고, 원전 시설에 위험을 초래하지 않는다는 것을 입증해야 한다. 이러한 이유로 모든 평가는 명백히 증명될 수 있도록 충분한 자료가 제시되어야 하지만, 지질

표 1. 단층 활동도의 정량적 평가 결과

Criterion	Weight	Probability	Product
Association ( $M > 5$ )	7.0	0.1	0.7
Association ( $M < 5$ )	6.0	0.2	1.2
Crustal Extent	2.0	0.8	1.6
Brittle Slip	2.0	0.8	1.6
Multiple Reactivation	2.0	0.8	1.6
Sum of Products		6.7	
Sum of weights		19.0	
Probability (Seismogenic)		0.35	

현상에 대한 장기간의 효과를 공학적으로 항상 만족스럽게 증명하기 쉽지 않으므로, 지표나 지표 근처에서의 변형에 대한 잠재성이 있는 부지는 가능하면 피하는 것을 권고하고 있다. 이에 따라 의심할만한 지질구조가 있을 경우, 원전부지 기준에 따르면 이 지질구조가 활동성이 아님을 입증하지 않으면 우선적으로 활동성이라고 가정하고 평가해야하므로 지질학적, 지진학적, 지구물리학적, 지질공학적 및 구조지질학적 조사 등 다양한 방법의 평가결과들이 제시되어야 한다 [2, 11].

이러한 관점에서 본 연구에서 수행한 단층의 활동도 평가는 단지 국내에서 처음 적용한 방법으로서 본 연구에서 평가된 각 파라미터들은 초기연구로서 매우 보수적으로 평가하였으며, 본 연구 결과만으로 살펴볼 때 양산단층과 울산단층에서 관찰되는 제4기 단층들의 활동도는 매우 낮다고 할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 결과는 현재까지 야외조사에서 관찰되는 자료들만을 근거로 평가한 것으로 충분한 자료가 제공되지 않았을 뿐 아니라 고액상화(paleo-liquefaction) 등과 같은 다른 평가요소들이 추가로 고려해야 하며, 또한 단층대를 따라 트렌치 조사와 같은 고지진학적 연구와 같은 상세한 야외 지질조사를 바탕으로 정밀한 연구가 후속적으로 추진되어야 정확한 평가가 가능할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기계획사업의 일부로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드린다.

### 참고문헌

1. 과학기술부, “원자로 시설의 위치, 구조 및 설비에 관한 기준”, 과학기술부 고시 제2000-8호, 2000.
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Reactor Site Criteria", 10 CFR Part 100, 1996.
3. Hanson, K. L., Kelson, K. I., Angell, M. A., and Lettis, W. R., "Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origin", NUREG/CR-5503, US NRC, 1999.
4. Jun, M. S., Jeon, J. S., and Che, I. Y., "Earthquake Mechanism of Korean Peninsula", Earthquake Engineering Society of Korea (EESK), Vol. 3, pp.58-63, 1999.
5. Haimson, B. C., Lee, M. Y., and Song, I., "Shallow Hydraulic Fracturing Measurements in Korea Support Tectonic and Seismic Indicator of Regional Stress", Int. Jour. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol.40, pp.1243-1256, 2003.
6. 임창복 외, “지진 안전성 평가기반 기술개발”, KINS/GR-255, 과학기술부, 2003.
7. 한국수력원자력(주), “원전부지 지진 안전성 정밀평가 기술개발”, 01NS17, 2004.
8. Johnston, A. C., Coppersmith, K. J., Kanter, L. R., and Cornell, C. A., "The Earthquakes of Stable Continental Regions, Vol. 1, Assessment of Large Earthquake Potential", Electric Power Research Institute, TR-102261-VI, 1994.
9. 장천중, 장태우, “양산단층의 고응력장과 단층의 분절화”, 대한지질학회 학술심포지움, pp.54-73, 1996.

10. 장천중, 장태우, “고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사”, 지질공학, Vol.8, pp.35-49, 1998.
11. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion", US NRC, Reg.Guide 1.165, 1997.