

지질자료로부터 최대 잠재지진 평가 방법

Estimation of Maximum Earthquakes from Geological Data

장 천 중, 최 원 학, 연 관 희
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 최대 잠재지진 평가의 가장 큰 문제는 제4기 단층의 활동성 평가와 더불어 단층으로부터 잠재지진을 평가하는 것이다. 단층자료로부터 잠재지진 평가는 주로 단층의 파괴길이, 단층면의 변위량 및 단층면의 파괴면적 등으로부터 도출된 경험식으로부터 얻어질 수 있다. 이러한 경험식을 적용하기 위해서는 여러 단계의 단층 발달과정에 대한 충분한 이해와 단층의 거동특성 반영되어야만 한다. 이에 따라 단층의 발달과정에 대한 연구와 거동특성이 반영된 잠재지진을 평가하고 이를 바탕으로 지진재해 평가를 실시하는 것이 바람직하다.

ABSTRACT

The most important problem for the estimation of maximum earthquake in Korea is the activities of the Quaternary faults and the evaluation of earthquake potential from the faults. The evaluation of earthquake potential from the fault parameters could be obtained from the empirical equations among the fault rupture length, fault displacement, fault area and earthquake magnitude. To apply the empirical equations the evolution process and behavior characteristics of the fault should be understood. Ultimately, to evaluate the adequate earthquake potential we suggest that the development process and behavior characteristics of the fault should be considered in analyzing the seismic hazard.

1. 서 론

우리 나라는 1970년대부터 고리 원자력발전소를 시작으로 월성, 영광, 울진 등 4개의 원전부지에 16기의 원자력발전소가 가동 중에 있다. 과거 원전 건설 초기 당시에 다른 일반 시설물과는 달리 내진설계를 위한 엄격한 기준을 적용하여 지표단층과 지진자료를 종합적으로 분석하여 가장 크게 평가되는 지진을 근거로 원전부지에서의 최대 지진을 평가

하였고, 여기에 보수성을 감안한 안전 여유도를 추가로 고려하여 적용하여왔다. 이와 같이 그 당시에는 국내외의 최고 기술과 엄격한 기술기준에 따라 설계지진이 평가되었지만 그 후 기술의 발달과 더불어 국내에서도 세부 정밀조사를 통한 연구결과 양산단층을 중심으로 울산단층 지역과 동해안 지역에 제4기 단층이 선형적으로 분포함이 확인되었고, 이들 제4기 단층들 중 일부는 활성단층으로 평가된 것들도 있지만 그 규모가 미미하여 원전의 내진설계에는 영향을 미칠만한 것이 못된다는 잠정결론에 도달하였고 또한 일부 제4기 단층들에 대한 종합적인 연구는 현재 진행 중에 있다.

국내 활성단층 평가와 잠재지진 평가의 핵심은 그동안 외국의 활성단층 기준을 사용하던 것을 어떻게 국내 고유의 지질 및 지진특성에 맞는 활성단층 기준을 마련할 것인가와 최근 발견되고 있는 제4기 단층의 자료로부터 특정 단층의 운동시기가 언제인가 그리고 이 단층의 지진 잠재력이 얼마인가 그리고 단층운동의 발생빈도(재래주기)가 얼마인가를 해석하는 것이다. 그동안 외국에 비하여 국내 관련 분야의 연구가 미비한 점은 지진 관측망 설비의 미비로 인한 관측자료의 불충분, 역사문헌에 나타난 지진피해 기록의 정량화에 대한 학자들 간의 이견 또한 최대 지진을 평가할만한 국내 지진자료의 부족과 지진 유발 단층에 대한 정량적 평가가 부족한 관계로 불확실성이 많이 내재되어 있기 때문이다. 특히 지질자료로부터 얻어지는 최대 지진 평가는 지질자료 자체에 본질적으로 내재되어있는 불확실성 때문에 선진국에서조차도 1970년대 이후에야 비로소 관심을 갖게 되었으며, 그 결과 잠재지진 평가의 해결방안으로 단층길이-지진규모, 단층변위-지진규모 등 경험식이 이용되고 있는 실정이다.

이를 적용함에 있어서 국내의 가장 큰 문제점은 최대 잠재지진을 평가하기 위하여 가장 기본이 되는 양산단층, 울산단층 및 동해안 지역에 발견되는 제4기 단층과 서로 연관된 대단층의 기하학적 특징과 성인적 발달과정에 대한 연구가 충분히 되지 못하였기 때문이며, 부분적으로 단층운동에 대한 응력 해석⁽¹⁾, 주변 지구조 운동과 단층운동 관계⁽²⁾, 단층의 분절화 해석^(3~4) 등 보다 정량적이고 구체적인 연구가 수행되면서 점차 실상이 밝혀지고 있지만, 아직도 단층발달의 전반에 대한 연구와 단층의 거동 및 분절화를 고려한 지진재해 평가에는 많은 과제를 남겨두고 있는 상태이다. 본 연구에서는 단층자료를 이용한 최대 잠재지진을 평가하기 위한 국내 현안과 대책에 대하여 살펴보았다.

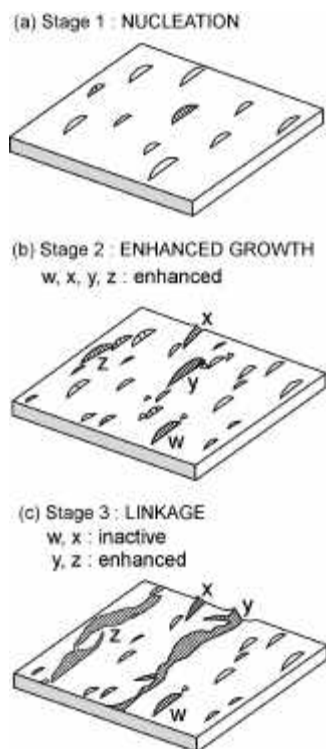
2. 단층발달 이론과 분절화

2-1. 단층발달 이론

단층으로부터 최대 잠재지진 평가는 1960년대 이후 설명되고 있는 단층운동과 지진발생의 성인적인 인과관계가 있다는 개념에서 출발한 것인데, 전세계적으로 지진관측이 1800년대 이후에나 가능했고 또한 역사문헌에 의한 지진기록이 지질시대에 비하여 터무니없이 짧기 때문에 역사기록 이전의 지진사건에 대해서는 지진발생을 야

기했던 단층작용의 흔적으로부터 파악할 수 밖에 없다. 즉 큰 규모의 단층운동의 흔적은 이에 상응하는 규모의 지진사건을 야기했을 것이라는 물리적 법칙의 가정 하에서 출발하는 것인데, 우리가 야외에서 볼 수 있는 단층은 한번의 사건 기록만이 나타난 것이 아니라 오랜 지질시대 동안 여러 번의 사건이 중첩되어 나타난 것이기 때문에 사건을 분별하는 것이 매우 중요하다. 달리 말하면 여러 번의 중첩된 사건을 한번의 지진사건으로 해석할 경우 지나치게 과대평가될 것이기 때문이다.

이에 따라 단층의 발달과정에 대한 개념을 먼저 살펴볼 필요가 있을 것이다. 단층의 생성과 발달과정은 암석역학의 실험과 야외 관찰로부터 많은 연구결과가 제시되고 있는데,^(5~6) 이들의 연구결과를 살펴보면 개별 단층의 초기 생성에 대해서는 Griffith theory로 설명되고 있고 암석 내부에는 Griffith crack으로 총칭되는 내부 균열을 가지고 있다. 암석이 응력을 받으면 내부 균열을 시발점으로 최대 압축응력에 평행한 방향으로 개개의 인장절리가 생성되면서 단층발달이 시작된다. 이와 더불어 개별균열들이 상호 연결되면서 점차 큰 규모의 단열이 발달함을 확인하였고,⁽⁷⁾ 또한 균열들이 성장할 때에는 균열-균열의 상호연결 혹은 균열-공극이 서로 연결되면서 성장⁽⁸⁾한다는 것이다. 즉, 단층을 생성시키는 인장절리는 응력을 받을 때 광물입자 간의 접촉면을 따라서 응력집중 현상이 일어나고, 개별 광물에서 최대 압축응력 방향으로 단열이 생기면서 성장하여 인접한 광물로 이어지면서 단열은 광물입자 경계를 따라서 지속적으로 발달한다.



이상의 연구들은 개별 단층의 생성에 관한 실험적 연구들이며 야외에서 관찰되는 큰 규모의 단층 혹은 단층대는 앞서 설명한 암반이 응력을 받으면 개개의 Griffith crack을 모태로 하여 균열이 성장하면서 인장절리를 발달시키고 이렇게 발달된 균열들 중 일부는 서로 연결되어 개별 단층으로 성장하기도 하고 다른 경우는 정지된다. 개별단층들은 지속적인 응력에 의하여 큰 규모의 단층으로 발달한다 (Fig. 1).

Fig. 1. Block diagram illustrating the evolution of a fault. (a) stage 1 : initial nucleation of many isolated faults, (b) stage 2 : enhanced growth of those faults which are optimally located with respect to neighboring structures (W, X, Y, Z). suppressed growth of faults which are not optimally located, (c) stage 3 : localization of deformation onto a few through-going faults (Z, Y).⁽⁹⁾

초기단계의 단층발달은 응력에 의한 단열들의 생성이 있고 (Fig. 1a) 일정 기간동안 응력을 받아 단열들이 재활동을 할 때에는 초기 생성된 단열들 중 일부가 성장하면서 크게 발달하고(Fig. 1b) 추후 좀 더 발

전하면 일부는 초기 단열의 형태를 가지나 변형작용을 받은 일부 단열들은 큰 규모의 단층으로 발달하면서 큰 단층으로 발달한다(Fig. 1c). 그런데 조사자들이 야외에서 관찰할 수 있는 단층들은 위의 3가지 경우들을 볼 수 있는데 일반적으로 큰 규모의 단층들의 그룹에서 보는 바와 같이 시간적 및 공간적으로 서로 다른 단계에서 발달한 총체적인 결과들의 종합적인 최종 산물들을 관찰할 수 있다. 따라서 잠재지진을 평가하기 위해서는 단위 지진사건에 대한 단층의 발달 과정을 분별하는 것이 매우 중요하다.

2-2. 단층의 분절화

단층발달 이론에서 설명한 바와 같이 단위 지진사건에 대한 단층의 발달을 해석하기 위한 것을 단층의 분절화라고 하는데, 야외에서 관찰되는 여러 번의 지진사건을 경험한 단층을 단위 지진사건에 의한 개별적인 파괴길을 정확하게 평가하는 것이 지진규모를 해석하는데 우선되어야 한다. 이에 대한 연구는 고지진(paleoseismology) 연구와 세계적으로 큰 규모의 활성단층 연구가 활발하게 진행되면서 대단위 단층의 발달과정에 대한 이해가 시도되었다. 단층의 분절화 개념은 1960년대 말 지진이 단층운동으로 발생된다는 개념이 정립된 이후 Allen⁽¹⁰⁾이 San Andreas 단층에서 단층을 따라서 지역적으로 지진 발생의 특징이 다르다는 점과 서로 다른 암석이 분포하는 점을 들어 같은 단층이라도 지역적으로 단층의 운동특성이 다를 수 있다는 개념 하에서 산 안드레아스 단층을 5개의 분절로 구분하면서 처음으로 제시되었다. 그 후 San Andreas 단층 대하여 분절화를 제시도하면서 각각의 단층분절에서 운동시기의 재발간격, 단위 운동에 따른 변위량, 단층운동으로 인한 최대지진을 평가하기도 하였다.⁽¹¹⁾ 이와 같이 분절화는 지진으로 인한 단층파괴가 단층대의 구조적 및 기하학적 산상과 관련이 있다는 기본적인 개념으로부터 출발하였다.

이후 단층의 분절화는 단층에서의 지진활동과 단층의 진화기구를 해석하는데 중요한 역할을 할 뿐 아니라 자연재해 평가를 목적으로 지진예지 및 장기적인 지진재해 평가에서 필수적인 요소가 되었다. 장기적인 지진재해 평가를 위해서는 제4기 지질자료로부터 지진발생의 크기와 재발주기를 해석하는 것이 일반적인데, 이는 큰 규모의 지진발생이 단층운동과 직접적으로 연관이 있다는 점에서 단층은 과거의 화석지진(fossil earthquake)으로써 과거의 지진발생 특성을 그대로 간직하고 있다는 개념으로 보았다. 이와 같이 단층으로부터 과거 지진기록을 해석하는 연구를 고지진학이라고 하는데, 고지진학적 연구는 단층의 분절화와 더불어 단층의 파괴길이, 변위량, 변위를, 재발주기 등을 조사하게 된다. 일반적으로 큰 규모의 지진으로 한번에 지표에 나타날 수 있는 지표단층의 길이는 약 50 km 정도이다. 그러므로 수백 km되는 대규모의 단층에서는 여러 번의 단층작용을 동반한 지진사건에 의하여 대규모 단층이 연속적으로 이어지면서 긴 단층구조를 보인다는 것이다. 이에 따라 연속적인 단층들로부터 주향을 따라 구조적으로 분리될 수 있는 분절경계의 특징들을 구분하는 연구가 다방면에서 수행되고 있다.

단층 분절을 나누는 기준은 그 목적에 따라 다양하지만 크게 분류하면 단층구조의 기하학적 불연속성, 구조적인 불연속성 및 운동학적 불연속성으로 구분되어진다. 기하학적 불연속성으로는 단층의 주향 변화, 단층의 굴곡(bend), 단층의 스텝오버(step over), 단층대 폭의 변화 등을 기준으로 삼을 수 있고, 구조적 불연속성으로는 단층 종지의 분기(branch) 및 종지 모양의 특징(termination type)을 근거로 하며, 운동학적 불연속성으로는 단층의 운동속도 및 거동특성인 stick-slip과 creeping behavior를 기준으로 할 수 있다.⁽¹²⁾ 국내에서 단층의 분절화 연구는 최근 원자력발전소의 지진 안전성 평가와 관련하여 양산단층대를 중심으로 단층의 활동성 및 최대 잠재지진을 평가할 목적으로 분절화에 많은 관심을 가지고 진행되고 있으나 아직 연구 초기 단계이며, 단지 최대 지진력 평가를 위한 분절화의 연구라기보다는 단층대 지진특성 혹은 단층의 발달과정을 해석하려는 목적으로 수행되었는데, 지진학적 특성을 근거로 양산단층을 3개의 분절로 해석한 연구⁽¹³⁾와 구조지질학적 특성에 의하여 분절기준을 제시하고 본 연구지역의 중앙부가 구조적으로 분절경계가 될 수 있다는 연구결과가 제시된 바 있다.⁽³⁾ 또한 구조지질학적으로 양산 단층 발달과정의 관점에서 인공위성 영상분석에 의한 선상구조의 특성, 지질분포와 층리면의 자세, 주단층의 주향변화, 단층대 폭의 변화, 고응력장 해석을 동반한 지구조 사건의 변화, 주단층과 이차 소단층의 각관계를 근거로 단층의 거동특성을 수행하여 양산단층의 분절화에 대하여 제시하였다.⁽⁴⁾ 그러나 이러한 연구의 국내 단층 분절화에 대한 기초연구로써 보다 정밀한 조사 및 분석을 통하여 세분된 분절연구가 지속적으로 수행해야 할 것이다.

2-3. 단층의 거동 특성

단층의 거동특성을 이해하기 위해서는 실제 야외규모의 단층을 직접적으로 실험할 수 없기 때문에 실험실에서 전단모델시험을 수행하여 나타난 결과를 야외 대규모 단층 체계와 비교하여 해석하는 것일 일반적이다. 과거부터 지질구조의 발달과정과 sliding mode를 이해하기 위하여 실험실 규모에서 다양한 실험들이 수행되면서 야외 단층의 기하학적 현상과 단층운동에 대한 해석이 이해되게 되었다(Fig. 2). 이러한 해석이 가능한 것은 실험실 규모에서 모래상자 실험이나 점토재료 혹은 단층물질로 모래나 혹은 점토광물들을 이용하여 일정한 응력의 조건과 변형속도를 제어하면서 발달되는 지질구조의 현상을 비교한 결과 실험실에서 관찰되는 지질구조의 현상이 규모에 관계없이 야외에서 관찰되는 지질구조의 현상과 유사하다는 사실로부터 실제 지질구조를 해석할 수 있게 된 것이다.^(14~15) 특히 단층운동의 특성에 따라 주단층의 운동양상이 어떻게 운동하느냐에 따라 단층대 내의 미구조의 발달단계와 경계단층면과 2차단열 사이의 각 관계에서 특징적인 현상을 보인다는 사실이 밝혀졌다.^(16~18) 이러한 실험은 현재에도 활동하고 있는 San Andreas 단층과 같은 대단층에서 일부 구간에는 지진이 일어남에도 불구하고 다른 구간에서는 지진이 거의 일어나지 않는다는 사실로부터 그 차이점을 해석하기 위하여 시도되었다.

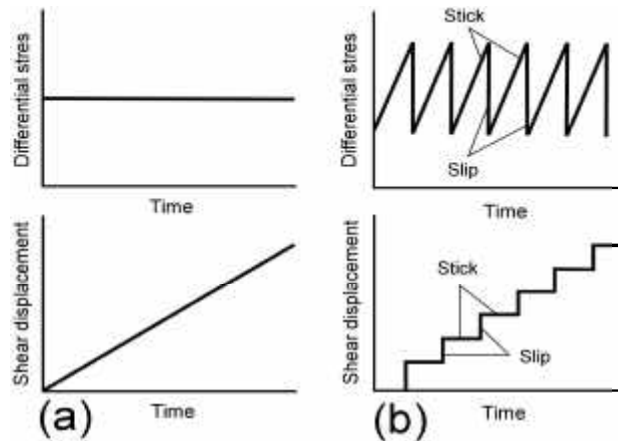


Fig. 2. Two types of faulting mode. (a) stable sliding, (b) stick-slip movement.

이를 입증하기 위한 단층대의 거동특성 연구는 야외단층을 직접적으로 실험할 수 없기 때문에 실험실에서 전단모델시험을 통하여 나타난 운동양상과 야외 대규모 단층 체계와 비교하여 해석하는 방법이 있다. 이러한 연구 결과 지질구조의 발달과정 및 운동양상(sliding mode)이 규모에 관계없이 유사함이 알려졌으며⁽¹⁹⁾, 또한 주단층의 운동과 이에 수반되는 2차 전단단열이 체계적으로 발달하고, 주단층의 운동양상에 따라 경계단층면과 2차단열 사이의 각 관계에 특징적인 차이가 있음이 밝혀졌다. 즉, 대규모 단층의 운동시 Stable sliding과 Stick-slip의 운동양상에 따라 다른 양상의 지진현상들이 나타나며 또한 단층대 내의 미세구조들의 기하특징도 달리 나타난다는 것이다. 따라서 이러한 2차단열의 분석에 의한 단층의 운동특성을 밝힘으로써 대규모 단층의 분절 경계의 설정 기준이 될 수 있을 뿐만 아니라, 이는 단층으로 인한 지진활동의 평가에 활용할 수 있을 것이다. 이러한 연구결과는 지진기록이 미흡한 지진단층으로부터 지진학적 특성을 알아내려는 고지진학적 방법인 단순 단층규모에 적용하기 보다는 단층 거동특성이 고려된 최대 잠재지진 평가에 활용할 수 있을 것이다.⁽¹²⁾

3. 최대 지진 평가 방법

원자력발전소를 포함한 지진재해 평가에서 가장 먼저 평가되어야 하는 것이 구조물의 수명기간 내에 발생 가능한 최대 지진을 평가하는 것인데, 가까운 장래에 발생 가능한 지진을 예측한다는 것은 오늘날 세계 어디에서도 그 답을 얻기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 예측 가능한 지진을 평가하기 위한 많은 노력이 지질학자들과 지진학자들간에 있어왔는데, 그 답을 얻기 위한 노력으로 지질학의 5대 법칙인 “현재는 과거의 열쇠 (the present is the key to the past)”라는 동일과정의 법칙(Uniformitarianism)을 적용하고 있다. 즉, 과거 지질학적 사건을 알아내기 위해서는 현재 일어나고 있는 지질학적 현상들이

과거에도 동일하게 작용했다는 원칙 하에 지질학의 과거 역사의 고리를 풀다는 개념인데, 미래에 일어날 수 있는 지진 사건을 예측하기 위해서는 “과거는 미래의 열쇠(the past as the key to the future)”라는 명제 하에 가까운 과거에 일어났던 지진 사건은 가까운 장래에도 같은 양상으로 나타날 수 있으므로 그 법칙을 적용하여 예측한다는 것이다.

지진재해 평가는 지진발생 혹은 지반가속도를 시간과 공간에 따라 그 변화를 예측하는 것이다. 지금까지 많은 노력에도 불구하고 자연현상에 내재되어 있는 고유의 불확실성 때문에 항상 신뢰성에 의문이 존재하지만, 어떤 지역에 과거에 발생했던 지진발생 혹은 단층운동의 패턴이 현재 혹은 가까운 장래에도 같은 경향을 보인다는 법칙 하에 평가하게 된다. 결국 같은 지구조 환경에서 과거에 발생한 지진발생 빈도, 역사문헌의 피해기록, 활성단층의 운동주기 등에 의거 해석할 수 밖에 없는데, 이들 자료들은 서로 다른 시간적 배경을 갖고 있기 때문에 각각 특성에 맞게 고려되어야 하며, 특히 원진을 대상으로 하는 장기적인 지진재해 평가에서는 이들 자료 모두가 각각의 시간 영역에 따라 활용되도록 되어있다(Fig. 3).

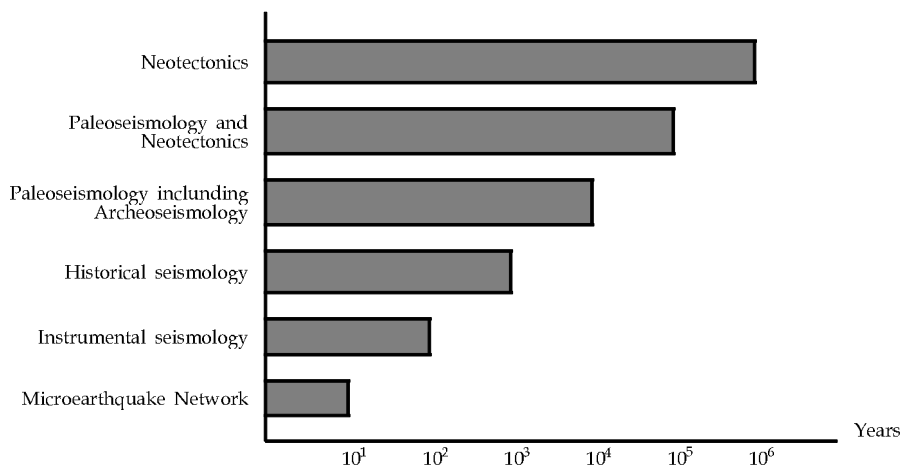


Fig. 3. Typical time windows(years) of data-sets that can be used for studying past earthquakes.⁽¹⁹⁾

지진재해 평가에서 지진의 규모 혹은 최대 지반가속도 및 그것이 발생할 위치로 표현되는 하나의 단정적인 값으로 표현되는 경우 결정론적 방법이라고 한다. 이럴 경우 최대 지진이란 최악의 상황에서 발생할 수 있는 최대 가능지진(maximum credible earthquake)을 의미하게 된다. 이와는 반대로 확률론적 방법이란 주어진 공학적 구조물의 수명기간이 고려된 일정 기간의 시간범위 내에서 그들에게 영향을 주거나 혹은 일정 크기 이상의 지반진동의 수준이 발생할 가능성을 수치적인 확률로 표현하는 것이다. 즉, 결정론적 방법에서는 하나의 단층요소로부터 최악의 상황을 야기할 수 있는 최대 지진을 이야기하는데 지진발생률 혹은 단층 변위율과 같은 시간변수에 대해서는 고려하지 않는

반면, 확률론적 방법에서는 적절한 지진원으로부터 전체를 대상으로 특정 목적에서 요구되는 수준에 맞추어 그에 따르는 각각의 등급에 따라 발생할 확률로 제시한다. 그러나 어떤 방법을 적용하던 입력자료 자체의 신뢰성과 평가과정에서 각 단계별로 관련 분야의 전문가가 직접 판단하는 것이기 때문에 두 방법 모두다 입력자료의 신뢰수준과 전문가 개인의 판단에 따라 결정적인 영향을 받을 수 있다.

장기간의 지진발생을 예측하기 위한 방법으로 제4기 지질자료로부터 지진발생의 크기를 해석하는 것은 비교적 최근에서야 활발하게 진행된 분야이다. 이러한 방법들은 현재 큰 규모의 지진발생과 이에 수반하는 단층파괴 현상을 근거로 한 경험적 연구로부터 출발하게 되었는데, 이러한 배경을 근거로 계측지진 혹은 역사기록을 넘어서는 장기적인 예측은 지질자료들로부터 얻어진다. 이러한 관점의 지진발생과 함께 나타나는 지반의 변형 연구는 아직 초기단계에 있다. 이에 대한 연구가 미국 서부의 San Andreas 단층 및 Wasatch 단층,⁽²⁰⁾ 뉴질랜드 Alpine 단층, 터키의 North Anatolian 단층 및 이탈리아 등을 중심으로 활발하게 연구가 진행되면서 단층요소로부터 잠재지진 평가에 매우 중요한 도구가 되고 있다. 최대지진을 평가하기 위해서는 단층의 파괴길이, 변위량, 변위율, 운동 재발주기 등이 고려되는데, 가장 흔히 사용되는

Table 1. Empirical relationships for magnitude estimation.^(20~25)

Rupture Length and Magnitude	
Reverse Faulting	
Bonilla et al. (1984)	$M_s = 5.71 + 0.916 \log L$ (km) (data range : M 6.5-7.7, 18-120 km)
Slemmons (1982)	$M_s = 2.021 + \log 1.142 L$ (m) (data range : M 5.8-7.7, 4-120 km)
Strike-slip Faulting	
Bonilla et al. (1984)	$M_s = 6.24 + 0.619 \log L$ (km) (data range : M 6.6=8.3, 11-440 km)
Slemmons (1982)	$M_s = 1.404 + 1.169 \log L$ (m) (data range : M 5.8-8.25, 6-450 km)
All Style of Faulting	
Wesnouskey (1988)	(Slip rate less than 1cm/yr data set) $M_s = 5.133 + 1.153 \log L$ (km) (data range : M 6.3-8.1, 11-285 km)
Rupture area and Magnitude	
Wyss (1979)	$M_s = 4.15 + \log A$ (km ²) (data range : M 5.8-9.5, 30-200,000 km ²)
Total Length and Magnitude for Strike-slip Faulting	
Slemmons (1982)	$M_s = 6.618 + 0.00012 L$ (km) (data range : M 6.8-8.25, 280-1,300 km)
Maximum Displacement and Magnitude	
Reverse Faulting	
Slemmons (1982)	$M_s = 6.793 + 1.306 \log D$ (m) (data range : M 5.9-7.7, 0.3-4 m)
Strike-slip Faulting	
Bonilla et al. (1984)	$M_s = 7.00 + 0.782 \log D$ (m) (data range : M 6.7-8.3, 0.4-9.5 m)
Slemmons (1982)	$M_s = 6.974 + 0.804 \log D$ (m) (data range : M 5.8-8.25, 0.02-9.5 m)
Seismic Moment and Magnitude	
Hanks and Kanamori (1979)	$M_w = -10.7 + 0.667 \log D$ (m) (data range : M 5.3-7.5)

것이 파괴길이와 변위량이다. 이에 대한 연구는 1960년대 말과 1970년대 초부터 원자력 발전소를 위한 지진재해를 확립하기 위하여 시작되었는데, Bonilla and Buchanan⁽²¹⁾의 단층파괴 길이-지진규모 및 단층변위-지진규모의 연구를 시작으로, 그 후 Slemmons⁽²²⁾과 Bonilla et al.⁽²³⁾에 의해 추가로 보완되었으며, Wyss⁽²⁴⁾에 의한 단층면적-지진규모의 연구가 있고, Hank and Kanamori⁽²⁵⁾에 의한 지진모멘트-지진규모의 관계에 대한 연구가 있었다(Table 1). 이에 더불어 단층의 운동양상(types of faulting)과 지구조 환경을 고려한 가장 최근의 종합적인 연구가 Well and Coppersmith⁽²⁶⁾에 의해서 215개의 지진자료를 이용하여 정리되었다(Table 2). 이들의 연구에 의하면 단층길이, 변위량 및 지진규모의 관계를 잘 보여주고 있는데, 서로 다른 단층운동의 결과들임에 불구하고 그들의 파라미터들 간의 관계에 큰 차이가 없으며, 평균 지표단층 파괴길이는 지하 단층파괴길이의 약 75%

이고, 평균 지표 변위량은 최대 지표변위의 약 50%, 그리고 평균 지표변위는 평균 지하 변위와 거의 같다는 결과를 얻었다.

Table 2. Regression relationships between earthquake magnitude and faults for worldwide earthquakes and for all styles of faulting.⁽²⁶⁾

Log(SRL) = -3.22 + 0.69 M
Log(MD) = -5.46 + 0.82 M
Log(AD) = -4.80 + 0.69 M
M = 5.08 + 1.16 Log(SRL)
M = 6.69 + 0.74 Log(MD)
M = 6.93 + 0.82 Log(AD)
Log(SRL) = 1.43 + 0.56 Log(MD)
Log(MD) = -1.38 + 1.02 Log(SRL)
Log(AD) = -1.43 + 0.88 Log(SRL)

M : moment magnitude (M_w)
 SRL : surface rupture length (km)
 AD : average displacement (m)
 MD : maximum displacement (m)

이와 같이 최대 지진평가에 단층길이-지진규모의 경험식이 가장 보편적으로 활용되고 있지만, 그 밖에 단층면적 및 평균변위로부터 아래와 같은 관계식으로 얻어질 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$M_o = \mu AD$$

$$M_w = (\text{Log } M_o - 16.05) / 1.5$$

여기서, μ : shear modulus
 A : rupture area
 D : average slip
 M_o : seismic moment
 M_w : moment magnitude

이상으로 단층길이 혹은 변위량으로 표현되는 활성단층의 파라미터로 지진규모를 평가하는 것이 경험식으로 활용될 수 있을 것이나, 지질요소의 파라미터 상호간에 물리적인 함수관계를 가지고 있으므로 설득력이 있지만 이러한 개념은 지진규모가 클수록 단층의 파괴길이가 매우 클 것이라는 일반적인 역학적 개념이 도입된 것으로써 지질학적 매질의 이방성과 불균질성에 따라 차이가 있을 수 있을 수 있고 또한 야외에서 관찰되는 단층의 분절특성과 거동에 관한 내용을 충분히 이해하기 쉽지 않기 때문에 지질학적 고유의 불확실성을 개선하고 관련분야의 전문가 집단의 의견을 고려하여 아래와 같이 각 파라미터에 대한 판단자료와 확률개념을 도입한 논리 수목도를 활용하는 것이 제안되었다.⁽²⁷⁾

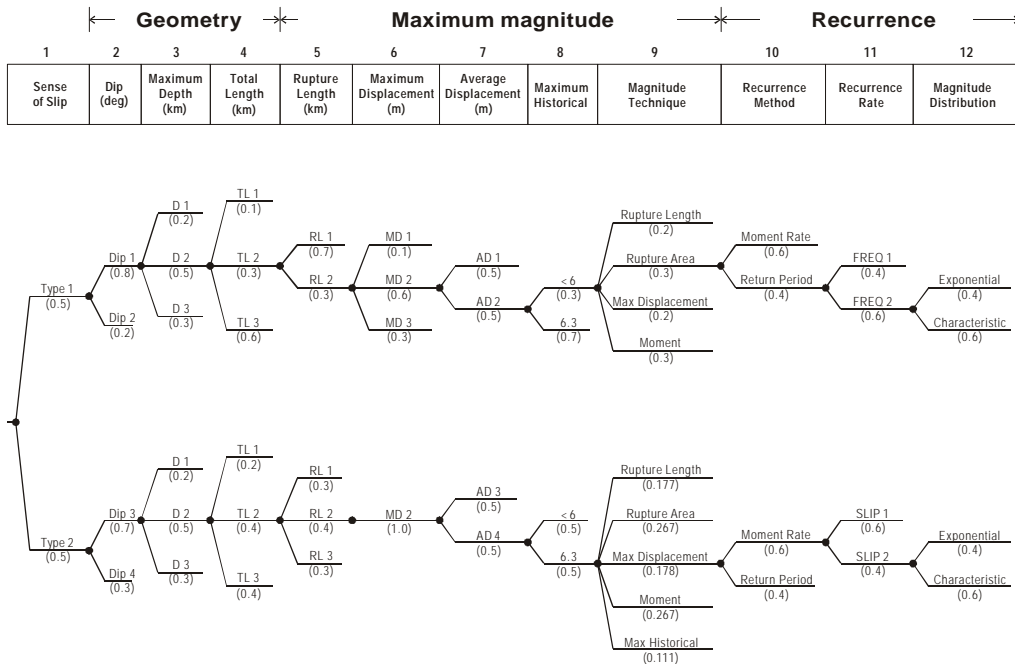


Fig. 4. Logic tree for seismic sources characterization.

4. 잠재지진 평가의 제현안

활성단층의 개념은 당초 지질학적 해석의 의미보다 공학적 의미에서 최근에 운동한 단층은 가까운 장래에 다시 운동할 것이라는 개념에서 내진설계를 위한 관점에서 평가되어 왔고 이를 위하여 정의하기를 단층의 운동시기를 근거로 설정하여 사용하여왔다. 즉 활성단층 기준은 넓은 의미에서는 제4기 단층 혹은 홀로세(Holocene) 단층 또는 특정 목적을 위한 기준으로 단층의 운동시기로써 정의되나 그 기준들이 기준설정 당시의 연대측정의 평가가능 범위 혹은 측정방법의 신뢰도에 의해 좌우된 면이 있었다. 이와 같이 국내에서의 단층 활동성에 대한 논란의 배경에는 단층의 연대측정 연구와 제4기 지각변형에 대한 연구가 매우 미미하여 그 내용들이 밝혀지지 않았기 때문이며, 최근 연구결과에 따라 양산단층과 울산단층 그리고 동해안 지역에 약 20여개소의 제4기 단층들이 발견되면서 이들 단층이 활성단층인가에 대한 연구가 진행되고 있는데, 이 기준이 단층의 운동시기를 근거로 설정하고 있다는 점에서 단층의 연대측정이 매우 중요하나 직접적인 단층의 운동시기(마지막 운동시기)를 얻는다는 것이 연대측정 시료의 제한성 때문에 쉬운일이 아니다. 이에 따라 직접적 혹은 간접적인 지질시료들의 연대측정을 시도하면서 일부 단층에 대한 연대측정이 수행되었고 국내에서도 K-Ar, Rb-Sr, ESR, OSL 및 C-14 방법에 대한 시설과 연대측정 연구가 활발하게 진행되면서 조만간 좋은 결과들을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

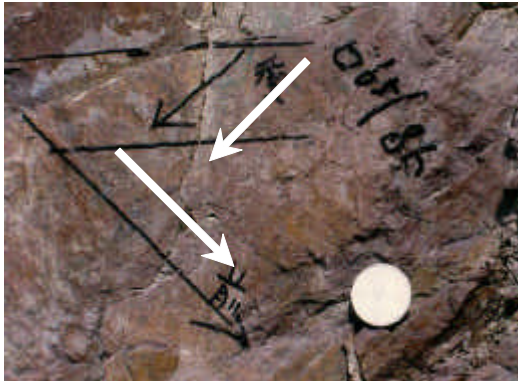


Fig. 5. Superposed fault striations show the fault was acted by polyphase deformation.

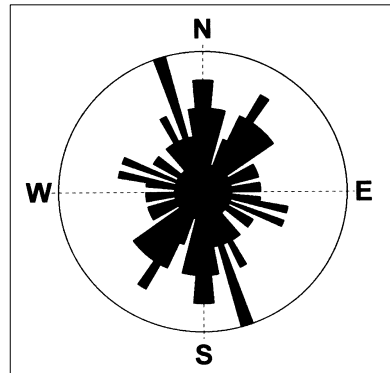


Fig. 6. Rose diagram showing the orientation of small faults measured in the Yangsan

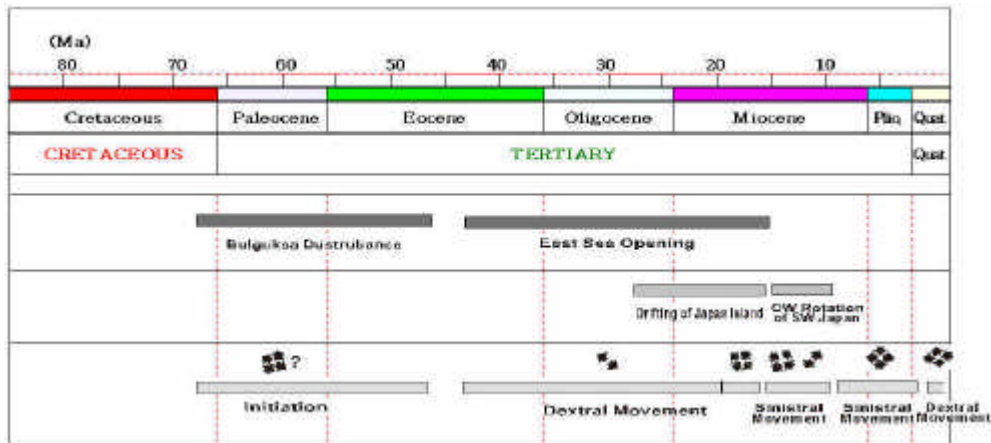


Fig. 7. Tectonic chronology of southeastern part of the Korean peninsula and the evolution of the Yangsan fault.

또한 앞서 설명한 바와 같이 국내 제4기 단층들은 양산단층대와 울산단층대를 따라 주로 발견되고 있다. 특히 대표적인 단층대인 양산단층대의 연구결과 이 단층이 한번의 운동에 의한 것이 아니라 오랜 시대 동안 다양한 운동특성을 지닌다는 것이 발표되고 있고 그 증거들을 쉽게 관찰할 수 있다. 양산단층을 따라 단층노두를 직접 관찰할 경우 지금까지 알려진 바와 같이 우수향 주향이동 성분만이 나타나는 것이 아니라 서로 다른 운동양상을 보이는 특징들을 볼 수 있고(Fig. 5), 양산단층을 따라 측정된 소단층들의 주향과 단층조선의 방향들은 양산단층이 한번의 운동을 한 것이 아니라 여러 번의 다중변형을 받았고, 서로 다른 시기에 주향이동 및 경사이동 운동의 서로 다른 운동을 한 단층구조들이 복합적인 결과들임을 지시하고 있다(Fig. 6).

이러한 현상을 좀더 살펴보고자 수행했던 양산단층의 운동을 야기했던 고응력을 분석

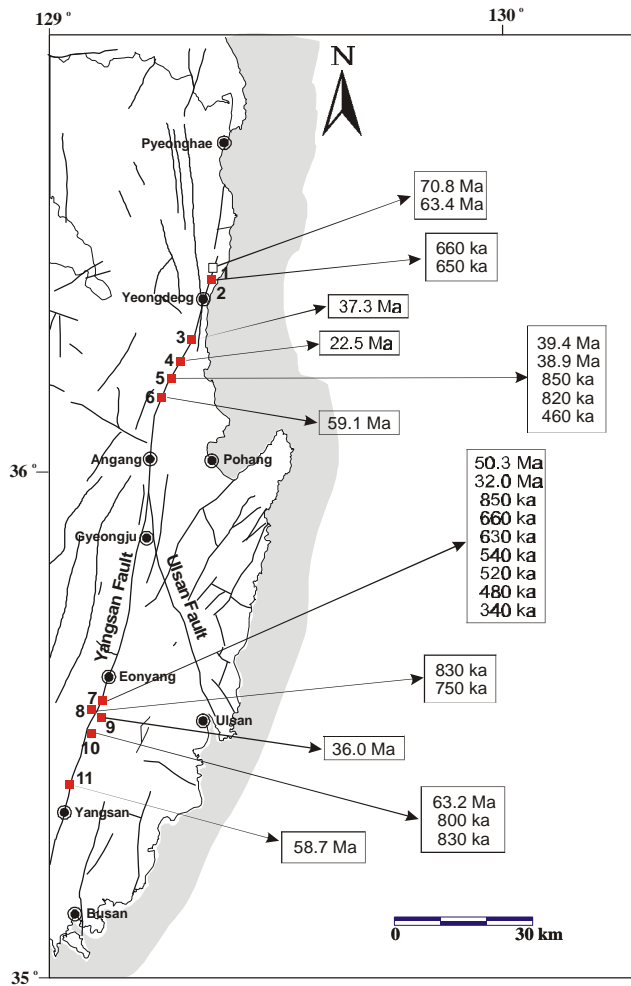


Fig. 8. Locations of the Quaternary faults (solid squares) and age data obtained from the fault gouge along the Yangsan fault.

해석하는 것으로써 향후 해결해야할 과제들이다.

5. 결론

국내 단층문제는 모두 상에서 나타난 제4기 단층 자체의 활성여부와 단층길이 및 변위량에 따른 지진규모의 추정에 집중되어 있다. 즉, 활성단층 여부에 대한 논란은 단순히 단층의 연대추정 결과만을 근거로 원전의 안전성에 대한 문제로 확산되었고, 단층길이 및 변위량에 따른 단순 경험식을 이용하여 지진규모를 환산하는 것으로 치부되고 있는 실정이다. 이러한 접근 방법은 연구 초기단계에 제기될 수 있는 불가피한 점이 없지 않지만 최근 국내 관련된 연구들이 활발해지면서 보다 본질적인 과제로 접근되어야 한다.

한 결과 주변 지구조 사건과 연관지어 제3기초부터 현재에 이르기까지 다양한 응력체계 하에서 단층이 발달하였음을 볼 수 있으며(Fig. 7), 최근 발견되고 있는 제4기 단층들이 이들 대단층대를 따라 나타남은(Fig. 8) 앞서 설명한 단층의 발달이론과 연관이 있을 것으로 생각된다. 즉 현재 발견되고 있는 제4기 단층들의 발견은 대단층의 최후 시기에 운동했던 흔적들을 말해주는 것이며 이를 포함한 단층운동의 사건을 세분하기 위해서는 대단층의 발달과정과 최후 시기에 해당되는 단층운동의 크기를 알아내면서 앞서 설명한 지진규모 평가를 위한 경험식의 적용이 가능할 것이다.

이를 위해서는 (1) 주단층대와 부분적으로 발견되고 있는 부단층들과의 기하학적 및 성인적 상호관계와 선후관계를 해석해야할 것이며, (2) 각 단층운동의 시기 파악, (3) 단층대의 분절 해석, (4) 각 분절에 대한 단층운동의 거동특성, (5) 각 단층운동과 지구조 사건과의 상호 연관성을 종합적으로 해석해야할 것이다. 즉 최근 제4기 단층연구는 개별노두에 대한 단층만을 전제로 해석되고 있으며 이는 전체의 한 부분만을 보고

큰 규모의 단층은 한번의 운동결과라기 보다는 다양한 사건의 중첩된 결과이며 또한 최근 발견되고 있는 제4기 단층들이 이들 단층을 따라 선형적으로 분포하고 있기 때문에 단층의 발달과정의 세분된 연구와 함께 분절화 해석이 이루어져야한다. 이와 같이 단위 사건에 대한 분절해석 없이 단층길이-지진규모 관계식에 적용하는 것은 문제가 많으며, 또한 같은 단위 파괴길이라도 단층의 거동에 따른 지진의 규모에 상당한 차이가 있을 수 지진을 유발할 수 있는 단층인가에 대한 검토가 함께 이루어져야한다. 이를 위해서는 현재 단편적으로 논의되고 있는 연구방향에서 전체단층에 대한 발달과 제4기 단층들의 성인적 관계, 보다 세분된 지질연대학, 단층의 분절화 연구, 단층의 거동특성 및 지구조 사건과 단층 및 지진발생 등의 연구가 종합적으로 이루어져야할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업으로 일부 수행되었으며, 이에 깊이 감사드린다.

참고문헌

1. 장천중, 장태우, "양산단층의 고응력 해석을 통한 단층의 분절화", 대한지질학회 양산 단층대 학술심포지움, pp.54-73, 1996.
2. 장천중, 장태우, "고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사", 대한지질공학회 논문집 제8권 제1호, pp.35-49, 1998.
3. 장태우, 장천중, 김영기, "연양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석", 광산지질 제26권, pp.227-236, 1993.
4. 장천중, 이종립, "양산단층의 구조적 분절화 기초연구", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집 제1권 제2호, pp.49-56, 1997.
5. A. Aydin and A.M. Johnson, "Development of Faults as Zones of Deformation Bands and as Slip Surfaces in Sandstone", Pure & Applied Geophy., Vol.116, pp.931-942, 1978.
6. P. Segall and D.D. Pollard, "Nucleation and Growth of Strike Slip Faults in Granite", Jour. of Geophy. Rese., Vol.88, pp.555-568, 1983.
7. W.F. Brace and E.G. Bombolakis, "A Note on Brittle Crack Growth in Compression", Jour. of Geophy. Rese., Vol.68, pp.3709-3713, 1963.
8. R.L. Kranz, "Crack-Crack and Crack-Pore Interactions in Stressed Granite", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, pp.37-47, 1979.
9. P.A. Cowie, "A Healing-Reloading Feedback Control on the Growth Rate of Seismogenic Faults". Jour. of Stru. Geol., Vol.20, pp.1075-1087, 1998.

10. C.R. Allen, "The Tectonic Environments of Seismically Active and Inactive Area along the San Andreas Fault System", In Dickinson, W.R. and Grantz, A. (eds.), Proceedings of the California on Geologic Problems of the San Andreas Fault System, Stanford Univ. Publications, Geological Science, Vol.11, pp.70-82, 1968.
11. P.L.K. Knuepfer, "Implications of the Characteristics of End-Points of Historical Surface Fault Ruptures for the Nature of Fault Segmentation", U.S. Geol. Surv., Open File Report, USGS-OFR 89-315, pp.193-228, 1989.
12. C.M. de Polo, D.G. Clark, D.B., Slemmons, and A.R. Ramelli, "Historical Surface Faulting in the Basin and Range Province, Western N-America ; Implications for Fault Segmentation", Jour. of Structural Geology, Vol.13, pp.123-136, 1991.
13. K. Lee, and Y.G. Jin, "Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin", Jour. Geol. Soc. Korea, Vol.27, pp.434-449, 1991.
14. J.S. Tchalenko, "Similarities between Shear Zones of Different Magnitudes", Geological Society of America Bulletin, Vol.81, pp.1625-1640, 1970.
15. E.H. Rutter, R.H. Maddock, S. Hall and S.H. White, "Comparative Microstructures of Natural and Experimentally Produced Clay-Bearing Fault Gouges", Pure and Applied Geophysics, Vol.124, pp.3-30, 1986.
16. J. Byerlee, V. Mjachkin, R. Summers, and O. Voevoda, " Structures Developed in Fault Gouge During Stable Sliding and Stick-Slip", Tectonophysics, Vol.44, pp.181-171, 1978.
17. D.E. Moore, R. Summers, and J.D. Byerlee, "The Effects of Sliding Velocity on the Frictional and Physical Properties of Heated Fault Gouge", Pure and Applied Geophysics, Vol.124, pp.31-52, 1986.
18. D.E. Moore, R. Summers, and J.D. Byerlee, "Sliding Behavior and Deformation Textures of Heated Illite Gouge", Jour. of Structural Geology, Vol.11, No.3, pp.329-342, 1989.
19. A.M. Michetti, and P.L. Hancock, "Paleoseismology : Understanding Past Earthquakes Using Quaternary Geology", Jour. of Geodynamics, Vol.24, pp.3-10, 1997.
20. D.P. Schwartz and K.J. Coppersmith, "Fault Behavior and Characteristic Earthquakes : Examples from Wasatch and San Andreas Faults", Jour. of Geophy. Rese., Vol.89, pp.5681-5698, 1984.
21. M.G. Bonilla and J.M. Buchanan, "Interim Report on Worldwide Historic Surface Faulting", U.S. Geol. Surv. Open-File-Report, 32p, 1970.

22. D.B. Slemmons, "Faults and Earthquake Magnitude," U.S. Army Engineers Waterways Exp. Stn., Vicksburg, Miss., Misc. Paper S-73-1, report 6, 166p, 1977.
23. M.G. Bonilla, R.K. Mark, and J.J. Lienkaemper, " Statistical Relations Among Earthquake Magnitude, Surface Rupture Length, and Surface Fault Displacement," Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.74, pp.2379-2411, 1984.
24. M. Wyss, " Estimating Maximum Expectable Magnitude of Earthquake from Fault Dimensions," Geology, Vol.7, pp.336-340, 1979.
25. T.C. Hank and H. Kanamori, "A Moment Magnitude Scale", Jour. Geophy. Rese., Vol.84, pp.2981-2987, 1979.
26. D.L. Well and K.J. Coppersmith, " New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area, and Surface Displacement", Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.83, pp.794-1002, 1994.
27. R,S Yeats, K. Sieh and C.R. Allen, "The Geology of Earthquakes", Oxford Univ. Press, New York, pp.447-472, 1997.