

지질구조 자료를 이용한 원전부지 지진재해 평가 방법
Seismic Hazard Analysis of Nuclear Power Plant Site
Using Geological Structure Data

장 천 중, 최 원 학, 연 관 희, 이 중 립

한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소 부지에 대한 지진재해 평가는 관측지진자료, 역사문헌 피해기록, 최근 단층운동으로부터 크게 영향을 받는다. 국내 원전부지 지진재해 평가의 가장 큰 문제는 제4기 단층의 활동성 평가와 이들 단층으로부터 잠재지진을 평가하는 것이다. 일반적으로 단층자료로부터 잠재지진을 평가는 주로 단층의 파괴길이, 단층면의 변위량 및 단층면의 파괴면적 등으로부터 계산된 경험식으로부터 얻어질 수 있다. 이러한 경험식은 몇가지 문제점 있음에도 불구하고 일본 원자력발전소 설계지진을 평가와 일부 학술적인 의미로 잘 활용되고 있으나, 단층의 거동특성이 반영되어 있지 않기 때문에 신뢰도 및 일부 과대 평가된다는 점에서 문제점들이 있다. 이에 따라 단층의 거동특성이 반영된 잠재지진을 평가하고 이를 바탕으로 지진재해 평가를 실시하는 것이 바람직하다.

ABSTRACT

The seismic hazard assessment for the nuclear power plant is mainly controlled by the instrumental earthquake data, the record of historical earthquake damages, and the data of recent faulting. The important problems of the seismic hazard analysis in Korea are the evaluation of the Quaternary fault activities and the calculation of earthquake potential from the faults. Generally, the evaluation of earthquake potential from the fault parameters could be obtained from the empirical relationship equations among the fault rupture length, fault displacement, fault area and earthquake magnitude. In spite of the these empirical equations have some problems, these equations have been usefully applied to the siting of the nuclear power plant in Japan and the academic research. However, because of these equations are not considered the characteristics of fault behavior, there are some problems of overestimation and uncertainty to evaluate the earthquake potential. Ultimately, to evaluate the adequate earthquake potential we suggest that the characteristics of fault behavior should be considered in analyzing the seismic hazard.

1. 서 론

원전부지 지진재해 평가라 함은 원전에 미칠 수 있는 최대 지진을 산정하고, 원전 수명기간 내에 경제성 개념을 적용하여 최적의 내진설계 및 시공함으로써 완결된다고 볼 수 있다. 국내 원전

의 경우 엄격한 기준에 의해 원전에 미치는 최대지진을 계산하고, 또한 이에 대한 보수성을 감안하여 건설 운영되고 있음에도 불구하고, 지금까지 간헐적으로 원전에 대한 지진안전성이 논의되어 왔다. 이에 대한 논의의 중심에는 최대 지진을 평가할만한 국내 지진자료의 부족과 지진유발 단층에 대한 정량적 평가가 부족한 관계로 최대 잠재지진의 불확실성이 내재되어 있기 때문이다. 특히 지질자료로부터 얻어지는 최대 지진 평가는 지질자료 자체에 본질적으로 내재되어있는 불확실성 때문에 선진국에서조차도 1970년대 이후에야 비로소 관심을 갖게 되었으며, 그 결과 부분적인 해결방안으로 단층길이-지진규모, 단층변위-지진규모 등 경험식을 이용하는 것이 이용되고 있는 실정이다. 그러나 같은 규모의 단층이라도 단층의 거동특성에 따라 그 결과에 많은 차이가 있기 때문에 단순히 적용하는데는 문제점이 있다. 즉, 같은 변위의 단층이라도 안정된 운동(Stable sliding)을 한 단층과 급격 운동(Stick-slip movement)을 한 단층과는 단순 경험식으로 최대 잠재지진을 평가하는데는 차이가 있기 때문이다. 이러한 방법은 지진재해 평가방법이 결정론적 방법이든 혹은 확률론적 방법이든 입력자료에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 신중히 고려되어야 한다 (Fig. 1).

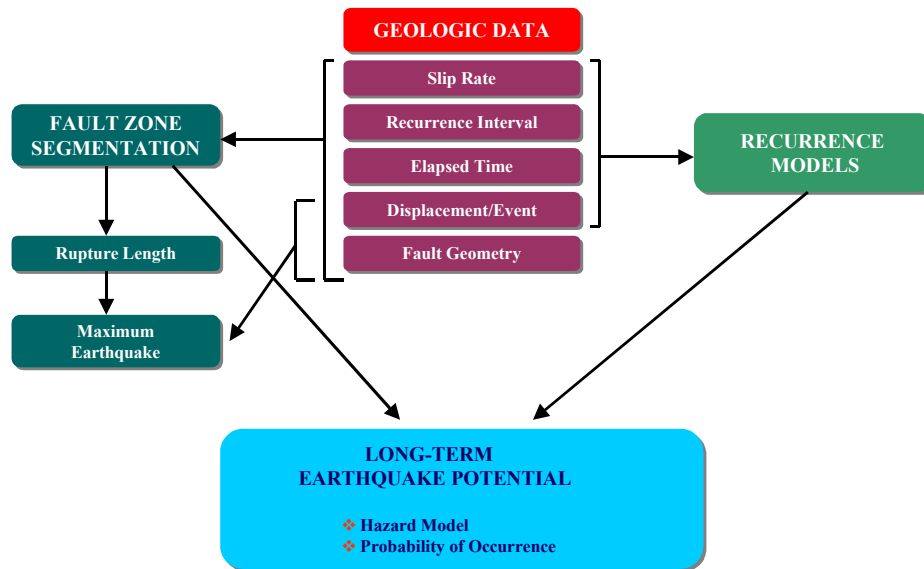


Fig. 1. Relationship between geological data and aspects of seismic hazard evaluation

이를 위한 지질 및 지진에 대한 입력자료의 신뢰성을 확보하기 위한 노력이 국내에서도 최근 활발하게 진행되고 있는데, 지진 연구분야로는 1) 지진원 특성 및 지진파 전달특성 연구, 2) 지각 구조연구, 3) 지진관측망 설치 연구, 4) 국내 통합 지진관측망 네트워크 구축연구 등이 진행되고 있고, 지질 연구분야에서는 1) 활성단층 조사 연구, 2) 활성단층 평가 기준수립 연구, 3) 내진설계를 위한 기반구축 연구, 4) 지각변형 연구 등이 진행되고 있다.

이 보다 먼저 주 관심 대상인 양산단층에 대해서는 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 단층의 거동 및 분절화를 고려한 지진재해 평가에는 많은 과제를 남겨두고 있는 상태이다.

본 연구에서는 지진재해 평가에 있어서 핵심 내용인 최대 잠재지진을 평가하기 위한 방법과 현재 과대 평가되고 있는 단층의 길이 및 변위량-지진규모 경험식의 문제점과 단층 거동특성에 대한 연구의 중요성에 대하여 살펴보았다.

2. 국내 원전의 설계기준 지진

우리 나라는 1970년대 고리 및 월성 원자력발전소를 시작으로 4개 부지에 16기의 원자력발전소가 가동 중에 있다. 이들 발전소의 부지 지진안전성에 대한 평가는 원전부지 조사 당시 일반적인 조사의 개념을 넘어서 조사 당시 적용 가능한 최고의 기술과 엄격한 기술기준에 따라 실시되었다 (Fig. 2). 이에 따라 국내 최초 원전인 고리 원전의 설계기준 지진은 반경 320km 범위 내에 지표 단층과 지진자료를 분석하여, 20세기의 가장 큰 지진인 지리산 지진(1936.7.3 JMA V)을 원전에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 지진으로 평가하고 이를 부지까지 감쇠현상을 적용하여 안전정지지진(SSE)를 0.19g로 설정하였다. 이와 더불어 동해안에 위치한 월성원전 및 울진원전의 설계지진은 같은 지리산 지진에 기초하여 거리에 따른 영향을 고려하여 원전부지에 미치는 지반가속도를 각각 0.14g 및 0.15g로 산정하였으며, 서해안에 위치한 영광원전의 경우에는 황해지진(1910.1.8)으로부터 산정한 결과 최대 지반가속도를 0.165g 평가하였다. 따라서 국내 원전의 경우 계산된 원전부지에서의 최대 지반가속도는 0.13~0.19g로써 여기에 안전 여유도를 추가로 고려하여 국내 모든 원전의 설계지진을 0.2g로 한 것이다(Table 1).

Table 1. Maximum ground acceleration (g value) of the nuclear power plants in Korea

원전부지	입력 지진	지반가속도(g)		확률론적 지진재해도 분석결과
		계산값	추천값	
고 리	지리산 지진(1936.7.3) 규모 5.0	0.19	0.2	$1.41 \times 10^{-4}/\text{년}$
월 성	지리산 지진(1936.7.3) 규모 5.0	0.14	0.2	$1.76 \times 10^{-4}/\text{년}$
영 광	황해 지진(1910.1.8) 규모 6.75	0.165	0.2	$1.3 \times 10^{-4}/\text{년}$
울 진	지리산 지진(1936.7.3) 규모 5.0	0.15	0.2	$1.0 \times 10^{-4}/\text{년}$

그러나 1980년대 이래 월성원전 인근 양산단층의 활동성과 관련하여 월성 원전에 대한 내진설계 보수성에 대한 의문이 제기된 바 있어 학자들간에 많은 논란이 있어왔는데, 최대 지반가속도 평가의 중심에는 첫째 지진관측망 설비의 미비로 인한 관측지진 자료의 불충분, 역사문헌에 나타난 지진피해 기록의 정량화에 대한 학자들 간의 이견, 즉 역사지진의 지진카탈로그의 해석에서 통일된 결과를 제시하지 못하고 있기 때문이다.

다음으로 국내 실정에 적합한 활성단층 기준 설정과 단층요소로부터 최대 잠재지진을 평가가 여전히 풀리지 않은 숙제로 남아있다. 활성단층 기준은 국내 원전부지의 지진 안전성에 핵심적인 주제로 논의 되어왔는데, 논쟁의 중심에는 단층자료로부터 특정 단층의 운동시기가 언제인가 그리

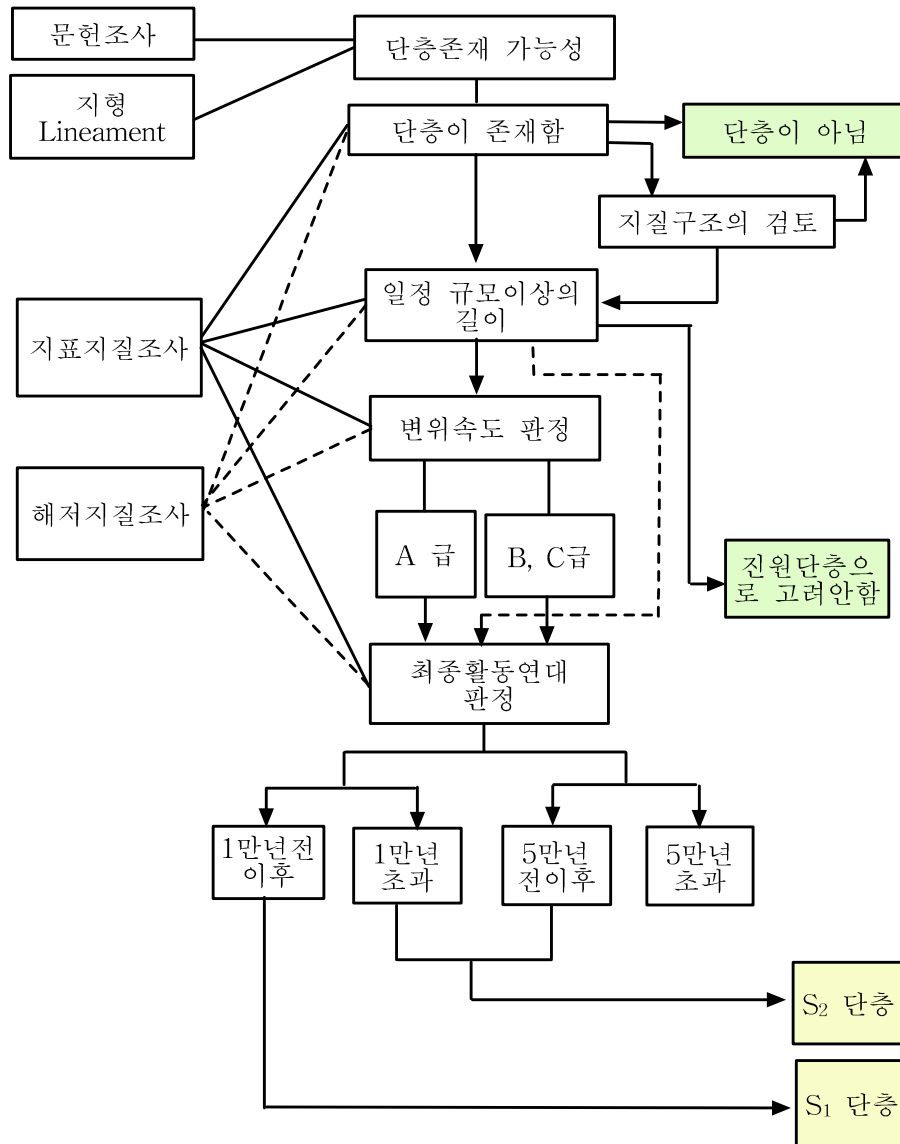


Fig. 2. Process of geological survey for the evaluation of seismic design earthquakes of NPP

고 이 단층의 지진 잠재력이 얼마인가 그리고 단층운동의 발생빈도(재래주기)가 얼마인가에 대한 정확한 답이 제시되지 않고 있기 때문이었다. 그러나 이러한 해답을 얻는 것은 뚜렷한 활성단층 혹은 지진단층이 빈발하지 않은 국내 지질환경과 자연현상으로부터 지진발생의 크기와 빈도를 예측한다는 것 자체의 불확실성 때문이었다. 이와 관련하여 1999년부터 과학기술부 원자력중장기 계획사업으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

3. 지진재해 평가 방법

구조물에 대한 지진 방재를 위해서는 일정 규모의 지진발생을 충분히 예측하여 설계에 반영하

는 것이 필수적이다. 즉, 어떤 지역에 얼마의 지진피해가 우려되는가를 해석하는 것인데, 가장 간단한 지진재해 평가라고 하면 활성단층도(Active fault map)라고 할 수 있으며, 또 다른 방법으로는 역사지진의 등진도도, 지역별로 서로 다른 지진재해의 등급을 표현하는 지진재해구역도(Seismic zoning map) 그리고 일정한 지반진동의 수준을 초과하는 확률로 표현하는 방법 등 여러 가지가 있다.

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 환경(Tectonic regime)에서 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 원전을 대상으로 하는 장기적인 지진재해 평가에서는 이들 자료 모두가 각각의 시간 영역에 따라 활용되도록 되어있다(Fig. 3).

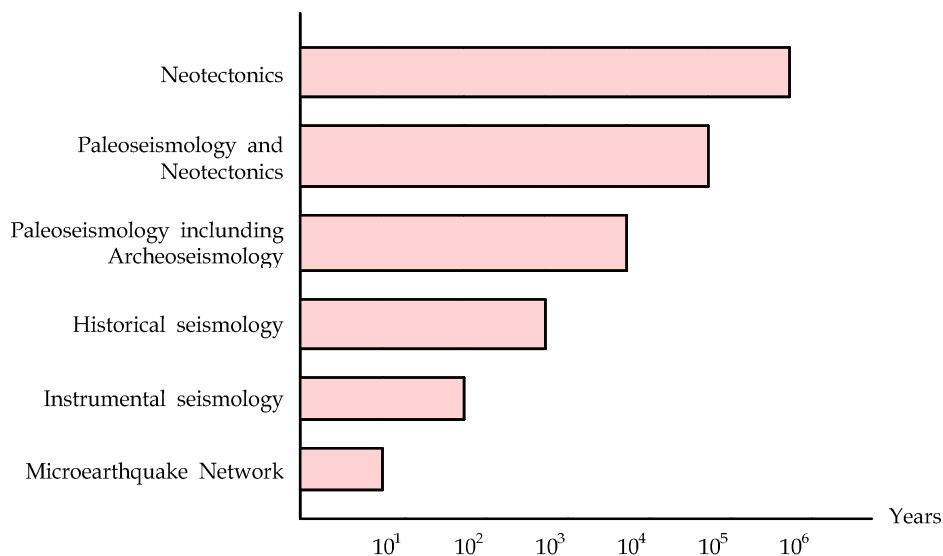


Fig. 3. Typical time windows(years) of data-sets that can be used for studying past earthquakes⁽⁵⁾

지진재해 평가에서 지진의 규모 혹은 최대 지반가속도, 및 그것이 발생할 위치로 표현되는 하나의 단정적인 값으로 표현되는 경우 결정론적 방법이라고 한다. 이럴 경우 표현되는 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 시간 범위 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 단층변위률과 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 전문

가가 직접 판단하는 것이기 때문에 두 방법 모두다 입력자료의 신뢰수준과 전문가 개인의 판단에 따라 결정적인 영향을 받을 수 있다.

4. 지질자료로부터 최대 잠재지진 평가

4-1. 단층활동성 평가

현존하는 모든 단층은 활성(Active) 혹은 비활성(Inactive)로 2가지 중 하나로 구분된다. 따라서 일반적인 개념으로 활성단층 지역은 비활성 지역 보다 위험하다고 말할 수 있지만, 자연현상이란 또한 이분법에 의해 그렇게 단순하게 평가될 수 없다. 지난 20여년 동안 많은 연구 결과 특정 단층을 따라 전체 지역이 같은 정도의 활동도(Degree of activity)를 갖는 것이 아니라는 것이 알려졌다. 일단 단층의 활동도를 평가하기 위해서는 가장 먼저 우선되어야 할 과제가 단층의 운동시기를 해석하는 것인데, 최근 이를 해결하기 위한 방법들이 다양하게 개발되면서 많은 발전이 있어왔다. 즉 활성단층 기준은 넓은 의미에서는 제4기 단층 혹은 홀로세(Holocene) 단층 또는 특정 목적을 위한 기준으로 단층의 운동시기로써 정의되나 그 기준들이 기준설정 당시의 연대측정의 평가 가능 범위 혹은 측정방법의 신뢰도에 의해 좌우되었다. 예를 들면 미국 NRC 규정에 의한 활성 단층 기준은 1970년대 설정당시 단층운동의 시기 결정 가능범위를 기준으로 3만 5천년 혹은 50만 년으로 설정하게 되었으며, 이는 1990년대 연대측정에 대한 새로운 방법들의 개발되고 또한 과거 연구결과와 경험적 결과를 근거로 5만년 혹은 50만년으로 그 기준이 개정되게 이른다.^{(6),(7)}

국내에서의 단층 활동성 유무에 대한 논란의 배경에는 지금까지 단층의 연대측정 연구와 제4기 지각변형에 대한 연구가 매우 미미하여 그 내용들이 밝혀지지 않았기 때문이며, 최근 관련 분야의 연구가 활발하게 진행되면서 약 20여개소의 제4기 단층들이 발견되었다. 그러나 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.

4-2. 단층요소로부터 잠재지진 평가

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. 특히, 과거의 화석지진을 해석하는 분야를 고지진학(Paleoseismology)라 하는데,^{(8),(9)} 이에 대한 연구가 미국 서부의 San Andreas 단층 및 Wasatch 단층,⁽¹⁰⁾ 뉴질랜드 Alpine 단층, 터키의 North Anatolian 단층 및 이탈리아 등을 중심으로 활발하게 연구가 진행되면서 단층요소로부터 잠재지진 평가에 매우 중요한 도구가 되고 있다. 최대 지진을 평가하기 위해서는 단층의 파괴길이, 변위량, 변위를, 운동 재발주기 등이 고려되는데, 가장 흔히 사용되는 것이 파괴길이와 변위량이다. 이에 대한 연구는 1960년대 말과 1970년대 초부터 원자력발전소를 위한 지진재해를 확립하기 위하여 시작되었는데, Bonilla and Buchanan⁽¹¹⁾의 단층파괴 길이-지진규모 및 단층변위-지진규모의 연구를 시작으로

로, 그 후 Slemmons⁽¹²⁾과 Bonilla et al.⁽¹³⁾에 의해 추가로 보완되었으며, Wyss⁽¹⁴⁾에 의한 단층면적-지진규모의 연구가 있고, Hank and Kanamori⁽¹⁵⁾에 의한 지진모멘트-지진규모의 관계에 대한 연구가 있었다. 이에 더불어 단층의 운동양상(Types of faulting)과 지구조 환경을 고려한 가장 최근의 종합적인 연구가 Well and Coppersmith⁽¹⁶⁾에 의해서 215개의 지진자료를 이용하여 정리되었다 (Table 2, Fig. 4). 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 지표 변위의 약 50%, 그리고 평균 지표변위는 평균 지하변위와 거의 같다는 결과를 얻었다.

이러한 연구의 실제 적용은 일본 원자력발전소의 설계지진 평가에 잘 활용되고 있는데, 일본에서는 원전의 설계 지진을 평가하기 위해서 Fig. 2에 나타난 흐름도에 따라 평가하게 되는데, 부지 중심으로 반경 30km 범위 이내에 정밀 지질조사를 실시하여 단층의 운동시기를 1만년 혹은 5만년으로 구분하고 또한 단층의 파괴길이 및 변위량을 근거로 지진규모를 산정하여 설계에 반영하고 있다.⁽¹⁷⁾

Table 2. Regression relationships between earthquake magnitude and faults for worldwide earthquakes and for all styles of faulting⁽¹⁶⁾

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

M : moment magnitude (Mw)
 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⁾

$$M_0 = \mu AD$$

$$M_w = (\text{Log } M_0 - 16.05) / 1.5$$

여기서, μ : shear modulus
 A : rupture area
 D : average slip
 M_0 : seismic moment
 M_w : moment magnitude

이상으로 단층길이 혹은 변위량으로 표현되는 활성단층의 파라미터로 지진규모를 평가하는 것이 경험식으로 활용될 수 있을 것이며, 또한 파라미터간 상호간에 함수관계를 가지고 있으므로 같

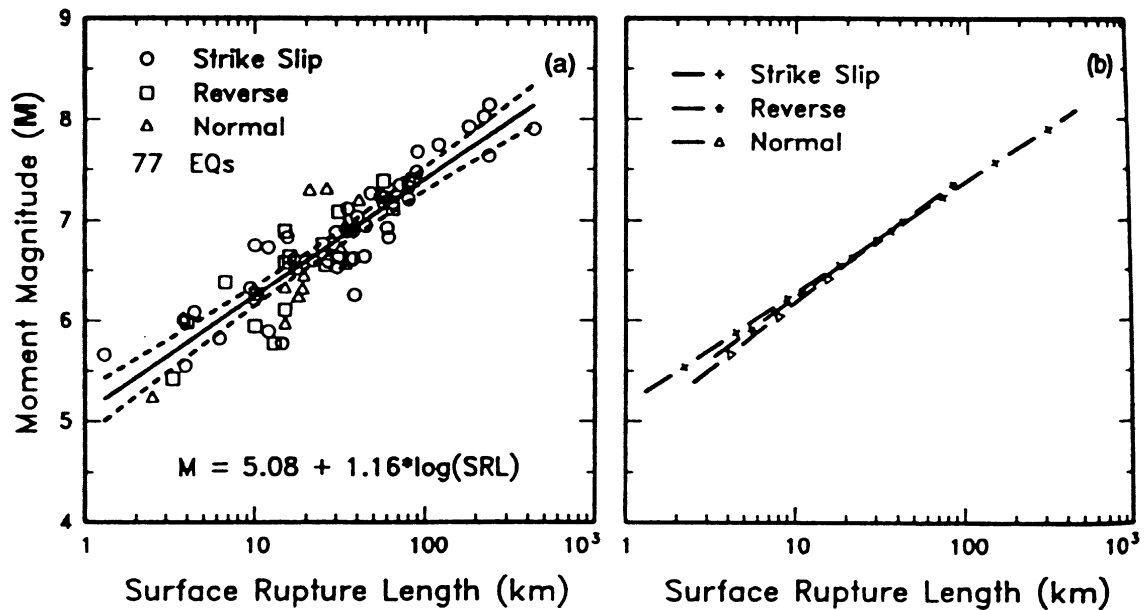


Fig. 4. Regression of surface rupture length on magnitude for worldwide earthquakes of all slip types. Solid line is ordinary least-squares fit. Dashed lines indicate 95% confidence intervals ⁽¹⁶⁾

은 의미를 가진다고 볼 수 있다. 다만 이러한 개념은 지진규모가 클수록 단층의 파괴길이가 매우 클 것이라는 일반적인 역학적 개념이 도입된 것으로써 지질학적 매질의 이방성과 불균질성에 따라 차이가 있을 수 있으므로 그 환경이 함께 고려되어야 할 것이다.

4-3. 단층의 분절화 해석

큰 규모의 지진이 발생했을 경우 신선한 지표 파괴를 본다는 것은 그리 흔하지 않을 뿐 아니라 단층 자체가 연약대이므로 지진응력이 주어질 때 기존의 단층이 재이동하는 것이 일반적이다. 따라서 현재 야외에서 관찰되는 단층이란 여러번의 지진사건을 경험한 결과이기 때문에 단위 지진 사건에 의한 개별적인 단층 분절의 파괴길이를 정확하게 평가하는 것이 지진규모를 해석하는데 우선되어야 한다. 이에 대한 연구가 활발하게 진행된 것이 터키의 North Anatolian 단층에서 이루어졌는데 1939-1967년 사이 기간동안 지진발생에 따른 단층의 발달과정이 해석되면서 점차 구체화되었다.⁽¹⁷⁾

여기서 대규모 단층의 경우 분절화 해석이 매우 중요한 과정으로 남아있는데, 단층 분절을 해석하기 위한 분절기준으로 기하학적 특징인 주향의 변화, 단층 선단의 형태, 단층대내 지질구조 양상, 단층 양쪽 선단의 상호작용 등으로 구분될 수 있고, 단층매질의 불균질성에 의한 요소인 단층대 폭의 변화, 응력장 분포, 단층변위를 등을 기준으로 나눌 수 있으며, 또한 지진학적 요소로는 지역별로 지진 규모별 발생빈도에 따른 변수들을 이용하여 분절을 해석할 수 있을 것이다.

국내에서의 분절화 연구는 원전 지진재해와 관련 양산단층이 주요 관심 대상이 되어 지진학적 특징을 이용하여 양산단층을 3개의 분절로 구분한 연구⁽¹⁸⁾와 단층 양측의 퇴적암의 자세, 단층의 주향변화, 단층 선단부의 형태, 응력장의 변화 및 단층대 폭의 주기적 변화를 근거로한 단층구조

에 의한 분절화 연구⁽⁴⁾가 있다. 그러나 이러한 연구의 국내 단층 분절화에 대한 기초연구로서 보다 정밀한 조사 및 분석을 통하여 세분된 분절연구가 지속적으로 수행해야 할 것이다.

4-4. 단층의 거동 해석

최대 지진을 평가하기 위한 단층거동 해석의 중요성은 활성단층대에서도 지역에 따라 지진발생의 규모와 빈도에 차이가 있음이 알려짐으로써 관심이 모아졌다. 예를 들면 미국 서부의 San Andreas 단층대의 경우 북쪽 분절과 남쪽 분절에서는 큰 규모의 지진이 빈발하지만 중앙 지역에서는 큰 규모의 지진이 발생하지 않음이 알려졌다. 이로써 같은 규모의 단층 파괴길이 및 변위량에도 불구하고 발생하는 지진규모에 차이가 있으며, 이러한 현상은 역학적 관점에서 단층의 거동 특성과 연관이 있다는 것으로 밝혀졌다.

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 알려졌다⁽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 기하특정도 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.

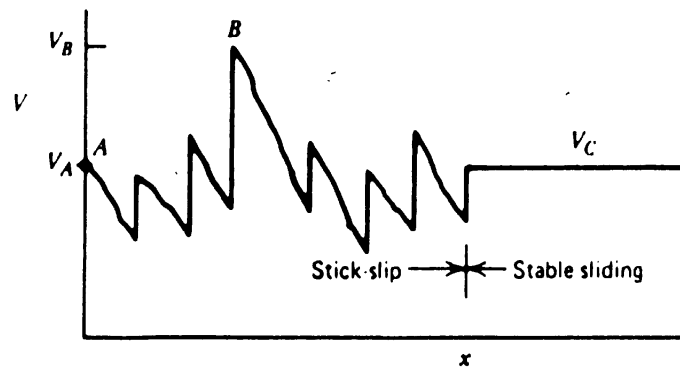


Fig. 7. Two types of faulting mode such stable sliding and stick-slip movement

일반적으로 단층대에 나타나는 2차단열의 발달은 암석역학적으로 Coulomb 이론으로 설명하고 있다. 이 이론에 의하면 주단층의 운동이 시작되면 1차적으로 Coulomb 전단에 해당되는 R-Shear(경계단층과 약 15°)가 먼저 발달하고, R-Shear 발달에 따른 단층대의 응력장이 변화되고 변위가 진행되면서 더 작은 각도의 R-Shear와 Y-Shear 및 P-Shear이 발달한다.^(20~22)

그런데 전단실험에 의한 2차단열의 발달과정을 분석한 결과 R-Shear와 Y-Shear가 P-Shear 보다 우세하게 발달하며, R-Shear의 집중도와 방향은 전단거동과 연관이 있는 것으로 알려졌다. 즉, Stable sliding에서는 R-Shear의 각이 10° 이하이고 Stick-slip에서는 14° 보다 더 크게 나타나며, R-shear의 최대값에서 가장 큰 응력강하(stress drop)이 있음이 알려졌다⁽²³⁾(Table 3). 이러한 연

구결과는 지진기록이 미흡한 지진단층으로부터 지진학적 특성을 알아내려는 고지진학적 방법인 단순 단층규모에 적용하기 보다는 단층 거동특성이 고려된 최대 잠재지진 평가에 활용할 수 있을 것이다.⁽²⁴⁾

Table 3. Relationships between sliding behavior and Riedel shear angle⁽²³⁾

Maximum Riedel shear angle		
$R < 10^\circ$	$10^\circ < R < 14^\circ$	$14^\circ < R$
Stable	Stable, part stable/ part stick-slip or stick-slip	Stick-slip

5. 결 론

국내 원전의 지진안전성과 관련하여 양산단층대의 활동성 및 단층운동 특성이 반영된 지진재해 평가가 중요한 주제로 되어 있다. 지금까지의 국내 단층문제의 논쟁은 일부 노두에서 나타난 제4기 단층이 활성단층인가 여부와 단층길이 및 변위량에 따른 지진규모의 추정에 집중되었다. 즉, 활성단층 여부에 대한 논란은 단순히 단층의 연대측정 결과만을 근거로 원전의 안전성에 대한 문제로 확산되었고, 단층길이 및 변위량에 따른 단순 경험식을 이용하여 지진규모를 환산하여 기존의 내진설계 기준에 문제가 있다는 형식으로 논란이 집중되었다.

이러한 논란의 문제점은 전체 단층이 한번에 파괴된 것이 아니라 한번의 지진사건을 대표할 수 있는 분절해석 없이 단층길이-지진규모 관계식에 적용한 관계로 해석의 결과가 과대평가된 면이 있으며, 또한 같은 단위 파괴길이라도 단층의 거동특성(안정운동 및 급격운동)에 따른 지진의 규모에 상당한 차이가 있을 수 있으므로 같은 길이의 파괴길이라 하더라도 또한 지진규모가 과대평가될 수 있다는 문제점이 있다.

따라서 현재 단편적으로 논의되고 있는 단층자료에 의한 지진규모 평가는 1) 지질연대학, 2) 지질구조, 3) 단층구조의 정량화(단층길이 및 변위), 4) 단층의 분절화 연구, 5) 단층의 거동해석 등의 순서로 종합적인 해석이 이루어진 후에 평가하는 것이 합리적이라고 판단된다. 이에 대한 연구는 최근 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업으로 총체적이고 다양한 방법으로 연구가 수행되고 있으므로 조만간 좋은 결과를 제시할 것으로 예상된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 장천중, 장태우, “양산단층의 고응력 해석을 통한 단층의 분절화”, 대한지질학회 양산단층대 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, "언양지역 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.M. Michetti, and P.L. Hancock, "Paleoseismology : Understanding Past Earthquakes Using Quaternary Geology", Jour. of Geodynamics, Vol.24, pp.3-10, 1997.
 6. US NRC, "Reactor Site Criteria", 10 CFR 100, January 1997.
 7. US NRC, "Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion," US NRC, Office of Nuclear Regulatory Research, Regulatory Guide 1.165, March, 1997.
 8. R.S. Yeats and C.S. Prentice, " Introduction to Special Section : Paleoseismology", Jour. of Geophy. Rese., Vol. 101, pp. 5847-5853, 1996.
 9. E. Vittori, S.S. Labini, and L. Serva, "Paleoseismology : review of the state-of-the-art", Tectonophysics, Vol.193,pp.9-32, 1991.
 10. 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.
 11. M.G. Bonilla and J.M. Buchanan, "Interim Report on Worldwide Historic Surface Faulting", U.S. Geol. Surv. Open-File-Report, 32p, 1970.
 12. 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.
 13. 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.
 14. M. Wyss, " Estimating Maximum Expectable Magnitude of Earthquake from Fault Dimensions," Geology, Vol.7, pp.336-340, 1979.
 15. T.C. Hank and H. Kanamori, "A Moment Magnitude Scale", Jour. Geophy. Rese., Vol.84, pp.2981-2987, 1979.
 16. 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.
 17. N.N. Ambraseys, "Studies in Historical Seismicity and Tectonics", in The Environmental History of the Near and Middle East, W.C. Brice, ed., Academic Press, New York, pp.185-210, 1978.
 18. 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.
 19. J.S. Tchalenko, "Similarities between Shear Zones of Different Magnitudes", Geological Society of America Bulletin, Vol.81, pp.1625-1640, 1970.

20. R. Summers, and J.D. Byerlee, " A Note on the Effect of Fault Gouge Composition on the Stability of Frictional Sliding", *Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, Vol.14, pp.155-180, 1977.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.