

단층 지진원의 고지진 규모 결정 방법과 문제점

Methods and Problems of Determination of Paleoearthquake Magnitudes from Fault Source Parameters

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

임 창 복
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

최근 원전부지 인근에서 발견된 제4기 단층들 중 일부가 활동성으로 논란이 제기되고 있고, 이로 인하여 단층 지진원 요소로부터 최대 잠재지진 평가가 필요하게 되었다. 이에 따라 본 연구에서는 최대 잠재지진 평가방법들을 비교 분석하였으며, 조사된 단층들 중 단층의 운동 시기를 배제한 상태에서 단층 지진원으로부터 최대 가능지진을 평가해 보았다. 임의의 단층의 경우 단층변위를 1.5 m로 평가했을 때 고지진의 규모는 M 6.82~7.21의 범위 이고, 그 평균값은 M 6.98로 나타났다. 또 다른 단층의 경우 단층길이 1.5 km, 변위 4 m로 평가했을 때 평균 M 5.36과 M 7.47로 보이고, 지진모멘트를 이용하여 평가했을 때 M 6.46의 고지진 규모를 얻었다. 결과에 부분적으로 차이를 보이는 것은 각각의 방법에 과대평가 요인과 과소평가 요인이 복합적으로 작용한 것으로 판단되며, 단층의 기하학적 및 운동학적 요소가 정확하게 확인되지 못한 점도 있을 수 있을 것이다.

ABSTRACT

It has been debated that some of the Quaternary faults which were discovered near the nuclear power plant site whether are capable or not, SE Korea peninsula, thereby, it was necessary to estimate the maximum earthquake potential from the fault source parameters. In this study, we reviewed and analyzed the methods of evaluation of the maximum earthquake potential and also evaluated the maximum credible earthquake from the fault source parameters to the exclusion for the factor of faulting time. We obtained the paleomagnitude

range of M 6.82~7.21 and mean of M 6.98 from a certain fault with 1.5 m displacement of the Quaternary faults have been surveyed along the coast line of the East Sea. And, we also obtained the mean values of M 5.36, M 7.47 and M 6.46 from the other fault which is the fault surface length of 1.5 km, displacement of 4 m and the rate of seismic moment-release, respectively. We consider that a cause of the different paleomagnitudes is due to including the factors of over- and under-estimation in estimating the earthquake potential, and also may not fully identify the detailed geometry and dynamics of the faults.

1. 서론

지진의 잠재력을 평가하는 방법으로는 지진학적 방법과 지질학적 방법으로 대별되는데, 지진학적 방법은 계기지진의 기록이 $10\sim 10^2$ 년의 범위를 가지고 있고, 그 범위를 벗어난 경우에는 역사 문헌의 기록에 나타난 지진피해 기록에 의존하게 되는데 중국 혹은 그리스, 로마와 같이 오랜 역사문헌을 기록하고 있는 지역은 그 범위가 넓은 것이고, 또 다른 지역은 역사문헌의 기록에 나타난 시대가 일부분만 기록될 수 있어 시대적 범위에 많은 차이를 가질 수 있지만 대체로 그 범위는 $10^2\sim 10^3$ 년으로 한정된다.

원자력발전소의 경우에 수만 년 혹은 수십만 년의 장기적 기간에 대하여 지진 안전성을 평가해야하기 때문에 계기지진 및 역사문헌만으로는 시간적 한계를 가지고 있다. 이에 따라 역사시대 이전의 지진기록인 지질학적 사건의 기록에 의존하게 되는데, 이 방법은 역사기록보다 훨씬 긴 지진 재발간격을 가지는 활동성 단층(capable fault)으로부터 지진의 잠재성을 평가하는 방법이다. 이러한 연구는 1960년대 지진발생이 단층작용에 의한 원인으로 해석되면서 단층의 규모와 지진의 발생 에너지(지진규모) 간에 상호관계가 있다는 사실에 바탕을 두고 지진과 단층지진원의 기하학적 규모를 연관지어 분석하기 시작하였다. 이러한 연구방법을 고지진학(paleoseismology)이라 하는데, 1960년대부터 간헐적인 연구가 수행된 이후 최근 활동성 단층 연구와 함께 지진재해 평가를 위한 방안으로 세계적으로 장기적인 연구 프로그램의 계획 하에 매우 활발하게 진행되고 있다.

지금까지 국내에서의 연구는 주로 원자력발전소 건설과 관련하여 수행되어 왔는데, 연구 초기에는 원자력발전소의 건설 당시 내진설계를 위한 지진동을 평가하고자 고리 1호기 Dames & Moor (1971), 고리 2,3,4호기 D'appolonia (1975, 1977), 월성 1호기 AECL(Canatom) (1977), 울진 1,2호기 Framatome (1979), 영광 1,2호기 D'appolonia (1980) 등 외국의 기술진에 의존해 왔다. 국내에서 준용하고 있는 원자력발전소의 위치 기준 및 설계기준지진의 평가방법(10CFR Part 100 App. A)에서는 활동성 단층 평가를 선행하고 활동성 단층이 존재할 경우 이를 포함하여 설계기준지진인 안전정지지진(safe shutdown earthquake) 및 운전기준지진(operating basis earthquake)을 평가하게 되는데, 현재까지 국내 원전부지 조사에서는 활동성 단층이 발견되지 않아 이를 고려할 필요가 없었다.

그러나 최근 양산단층 및 울산단층 주변과 동해안 일대 제4기 단층들이 다수 발견되

면서 이들 중 일부는 활동성 단층일 가능성이 제기됨에 따라 국내 신기지각 변형연구에 대한 환경이 급속도로 변하고 있다. 또한 1998년부터 한전 전력연구원을 중심으로 원전 부지 지진 관측망이 운영됨에 따라 지진관측 성능이 개선되어 최근 발견된 제4기 단층과 지진과의 관계를 연구할 수 있는 환경이 조성되었다. 따라서 단층 지진원의 특성을 고려한 최대 지진 평가방법이 정립될 필요가 있으며, 본 연구에서는 단층 지진원의 지진규모 평가에 관한 최신의 연구결과들을 종합적으로 분석하여 국내 원전부지에 적용하기 위한 방안으로 최대 지진력을 산정하기 위한 방법을 정립하고자 하였다.

2. 최대 지진규모 결정 방법

2-1. 단층 지진원의 고지진 규모 평가 원리

최대 잠재지진이란 구조물의 수명기간 내에 발생 가능한 최대 지진을 말하는데, 수명기간 중 가까운 장래에 발생 가능한 지진을 예측한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 이러한 문제의 답을 얻기 위하여 지질학자들과 지진학자들이 많은 노력을 해왔는데, 지진학자들은 관측된 지진 자료를 근거로 단층의 기하학적 형상이 매우 간단하며 지진발생의 기구(mechanism)도 매우 단순하게 고려한 반면, 지질학자들은 단층의 형상이 2차원 혹은 3차원적으로 매우 복잡하며 지질의 매질의 이방성과 불균질성 등으로 인하여 매우 복잡한 것으로 고려하였다.

단층 지진원으로부터 얻어지는 지진발생 현상의 해석은 지질학의 영역에 해당되는 것으로 과거의 지진을 해석한다는 점에서 고지진학이라고 불리우지만 연구 방법 및 해석의 측면에서 보면 지질학의 영역에 해당된다고 할 수 있다. 이러한 연구에는 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 푸는 개념인데, 미래에 일어날 수 있는 지진 사건을 예측하기 위해서는 “과거는 미래의 열쇠(the past as the key to the future)”라는 개념으로 가까운 과거에 일어났던 지진 사건은 가까운 장래에도 같은 양상으로 나타날 수 있다는 법칙을 적용하여 미래 지진을 예측한다는 것이다.

최대 지진을 평가하기 위해서는 단층의 파괴길이, 변위량, 변위율, 운동 재발주기 등의 요소가 고려되는데, 가장 흔히 사용되는 것이 파괴길이와 변위량이다. 이에 대한 연구는 1960년대 말과 1970년대 초부터 원자력발전소를 위한 지진재해를 확립하기 위하여 시작되었는데, Bonilla and Buchanan (1970)의 단층파괴 길이-지진규모 및 단층변위-지진규모의 연구를 시작으로, 그 후 Slemmons (1977)과 Bonilla et al. (1984)에 의해 추가로 보완되었으며, Wyss(1979)에 의한 단층면적-지진규모의 연구가 있고, Hank and Kanamori (1979)에 의한 지진모멘트-지진규모의 관계에 대한 연구 등 다양한 연구결과가 보고되고

있다(Table 1).

2-2. 고지진 규모 평가의 영향요소

단층 지진원의 지진력 영향요소로는 단층파열의 길이, 단층파열의 깊이, 단층변위의 크기, 단층의 파열면적 그리고 이들 요소들의 조합에 따른 요소들로 구분될 수 있다. Tocher (1958)가 미국 California 지역과 Nevada 지역을 대상으로 1906년 이래 발생한 규모 6 이상의 비교적 자료가 뚜렷한 10개의 지진과 지표단층의 파열과의 관계를, Iida (1965)는 규모 6 이상의 지진 60개의 자료를 활용하여 단층변수들과의 상호관계로부터 상관성을 제시하면서 시작되었다. Wyss (1979)는 지진 위험도 평가에 최대 지반 가속도가 중요한 것으로 판단하고 최대 지반 가속도는 최대 지진규모와 연관성이 있을 것이라고 판단하고, 이를 위하여 단층 파괴면의 최대 면적으로부터 지진규모 5.6 이상의 자료들로부터 면적-지진규모의 관계식을 제시하였다. 이후 Vakov (1996)에 의해 단층운동의 종류별로 단층면적과 지진규모와의 관계를 분석하였으며, 이들의 관계식들은 다른 단층요소들보다 차이를 적게 보여준다. 특히 단층 파열면적은 Kanamori (1983)에 의한 지진발생 에너지, 지진모멘트, 모멘트 지진규모와 연관성을 갖는 물리적인 의미를 갖는 변수라는 점에서 의미를 갖게 되며, 다만 단층 파열면적이란 단층 파열의 길이와 단층의 깊이의 곱으로 나타나는 것이기 때문에 단층면적의 입력자료의 오차는 단층 파열길이와 단층의 깊이에 의존하게 된다는 점에서 불확실성은 존재하게 되어있다.

단층 지진원으로부터 최대 지진규모를 평가하기 위한 노력이 여러 연구자들에 의해 다양한 지진자료를 이용하여 수행되어 왔는데, 그 영향요소로 단층의 파열길이(평균길이, 최대길이, 지하 및 지표), 단층의 변위(최대변위와 평균변위), 단층의 파열면적 등의 변수와 이들의 상호조합 그리고 지구조 및 지리적 환경에 따른 분류, 단층운동의 형태, 지진규모의 종류(M_s 와 M_w)에 따른 변환과 통계학적 오차해석을 함께 검토하면서 수행되었다.

이들을 요약하면 대체로 지진규모 약 4.5~8.5를 가지는 자료들을 활용하였으며 크게 구분하여 보면, Tocher (1958), Slemmons (1977), Khromovskikh (1989) 등은 지진규모와 지표단층 파열길이(L_{sur}) 사이의 관계를, Chinnery (1969), Kanamori & Anderson (1975), Geller (1976), Smith (1976)는 지표파열길이 뿐 아니라 지하파열길이((length of aftershock zone(L_{af})))를 고려하였다. 그리고 지진원 메커니즘(단층운동의 형태)을 고려하여 지진규모와 지진원의 크기 사이의 관계에 대한 연구가 Scholz (1982), Bonilla et al. (1984), Wesnousky (1986), Vakov (1992), Wells & Coppersmith (1994) 등에 의해 연구되었다. 이들 결과들은 지진규모와 단층파열의 크기와의 관계가 (1) 지진발생 메커니즘(Slemmons, 1977, Vakov, 1996)에 영향을 받을 수 있다는 것, (2) 지질학적 및 지구조 환경(Archarya, 1979)에 영향을 받을 수 있다는 것, (3) 앞의 두개 파라미터 모두

(Khromovskikh et al., 1979, Bonilla et al., 1984)에 영향을 받을 수 있다는 것, (4) 이들 파라미터 어느 것도 영향을 받지 않는다는 결과들을 보여주고 있다.

Wells & Coppersmith (1994)는 여러 가지의 지구조 환경에 따라 구분하여 분석한 결과 상관 관계식의 신뢰도가 크게 향상되지 못하였으며, 대부분의 관계식들(모멘트 규모와 지진원의 크기 관계)은 단층운동의 형태에 따라 통계학적으로 다르지 않다고 보았다.

그러나 Vakov (1996)은 지진규모 4.5~8.5 범위의 400여개 전세계 자료에 대하여 지진원의 면적, 길이, 변위와 지진규모와의 관계를 단층운동의 형태에 따라(주향이동, 사교이동, 경사이동) 분석한 결과 slip mechanism type에 따라 구분하여 평가할 것을 제시하고 있다.

이상의 연구결과들 중 비교적 활용된 지진원의 특성이 종합적이고 체계적인 연구들은 Slemmons (1982), Bonilla et al. (1984), Wells & Coppersmith (1994), Vakov (1996)로 모아지며 통계학적 비교분석이 집중적으로 검토되면서 오차범위를 줄이는 방향으로 가고 있다. 이에 따라 이들의 경험식을 활용한 지진잠재력을 평가하는 결과들이 다수 보고되었다. 다만 일본에서 주로 이용하고 있는 Matsuda 경험식(The Research Group for Active Faults of Japan, 1992)과 비교할 때 Matsuda의 경험식이 작은 크기의 단층에서는 지진규모가 상대적으로 작게 평가되고 큰 규모의 단층에 대해서는 Matsuda 경험식이 상대적으로 매우 큰 값으로 산정됨을 볼 수 있다(Figs. 1, 2, 3).

보다 최근에 Working Group on California Earthquake Probabilities(1999)를 중심으로 이전의 자료들에서 지진원 특성이 보다 상세히 밝혀진 큰 규모의 지진들을 추가하여 검토한 결과 지진원 규모와 지진의 크기의 관계가 단순한 하나의 선형적인 관계가 아니라 지진규모 $M=6.71$ 또는 단층과열면적 537 km^2 을 기준으로 달리 표현되는 Bilinear source-scaling model 또는 큰 규모의 지진에 대해서는 가장 많이 인용되는 기존의 Wells & Coppersmith(1994)의 관계식보다 표준편차만큼 더 크게 표현된다는 것을 보여주고 있다.

위와 같이 최근의 연구결과를 종합할 때 국내 제4기 단층의 자료를 이용하여 지진규모를 상정할 때 국내 제4기 단층의 특성이 역단층의 경향을 보이므로 국지적인 지진원을 근거로 경험식을 이용한 결과들은 그 차이를 많이 보이므로 배제할 필요가 있고 신뢰도

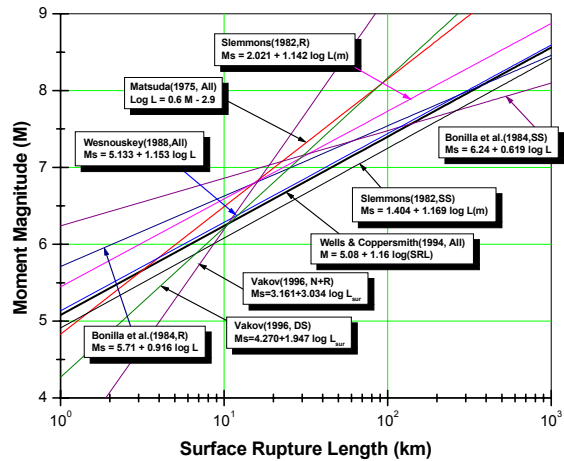


Fig. 1. Relationships between fault rupture length and earthquake magnitude

가 높은 경험식에 비중을 두어 평가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3. 고지진 규모 예비 평가 및 토의

3-1. 단층 파열길이에 의한 고지진 규모

지진원 단층의 길이와 지진규모의 관계에 대한 경험자료들로부터 단층과 열길이-지진규모의 관계식을 도출하려는 노력이 오래전부터 있어왔다. 초기 연구들은 많지 않은 지진자료들로부터 시작되었고 그 후 역사지진 혹은 계기 지진 자료들로부터 개별자료에 대한 재평가와 통계학적 신뢰도 향상을 위하여 여러 연구자들에 의해 수행되어 보고되고 있다. 이러한 작업은 지체구조적 환경의 차이에 따라 혹은 단층의 운동특성(slip mechanism)에 따라 자료들을 구분하면서 여러 가지의 경험식들이 제안되고 있다. 그 결과 일부 연구자들은 지체구조적 환경과 단층의 운동특성에 차이가 없이 전체 단층자료에 대하여 직접적으로 적용할 수 있다고 제시하고 있고, 또 다른 경우는 지체구조 환경에 따라 혹은 단층의 운동특성에 따라 통계적 오차를 보이므로 구분하여 사용할 것을 제시하고 있다.

본 연구에서는 국내 발견되고 있는 제4기 단층들의 특성이 남북방향의 주향에 동쪽경사를 가지면서 역단층의 성격을 보이므로 이를 적용하기 용이하다고 판단되는 경험식 혹은 전체자료에 포괄적으로 적용되는 관계식을 적용하여 예비적으로 야외에서 관찰되는 단층 길이를 적용하여 고지진 규모를 평가해 보았다(Table 1).

현재까지 보고된 일부 단층의 경우 야외에서 확인된 길이가 1.5km 라는 사실에 바탕

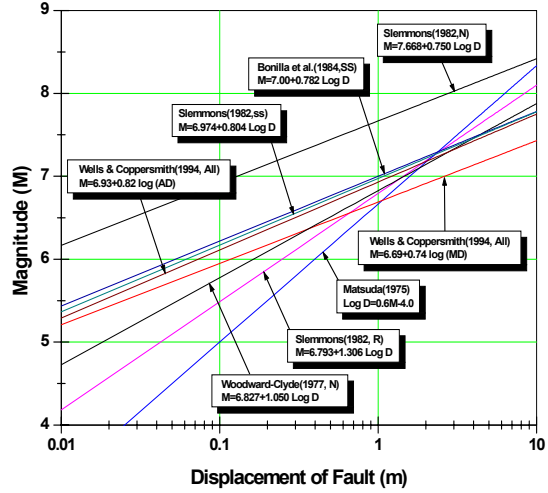


Fig. 2. Relationships between fault displacement and earthquake magnitude

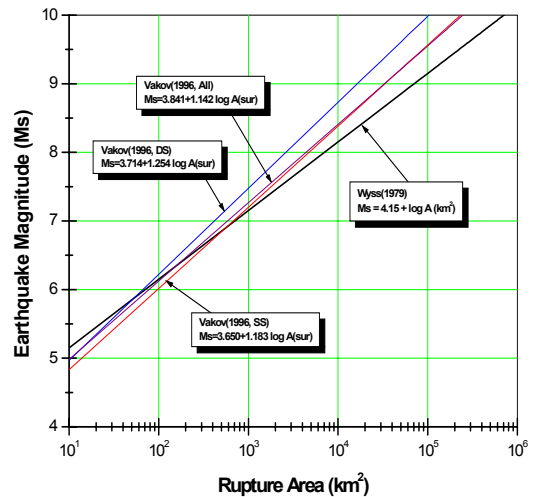


Fig. 3. Relationships between fault area and magnitude

을 두고 Matsuda(1998) 식을 적용한 결과가 M 6.44로 가장 크게 나타나고 Vakov(1996)가 제시한 수직이동 성분이 큰 경우의 경험식을 적용한 결과 최저값인 M 3.70을 보여준다. Table 1에서 보이는 바와 같이 각 경험식에 대한 고지진 규모값의 차이가 크게 나타나지만 국지적인 자료들만으로 도출된 경험식의 결과를 배제한다면 전반적으로 고른 분포를 보이며 전체 평균값은 M 5.36으로 나타난다(Fig. 4).

Table 1. Preliminary evaluations of the maximum earthquake considering the surface rupture length of the faults

Source	Equations	Rupture Length (km)			
		1	1.5	10	30
Tocher(1958)	$M = 5.65 + 0.98 \log L(\text{km})$	5.65	5.82	6.63	7.10
Iida(1965)	$M = 0.76 \log L(\text{km}) + 6.07$	6.07	6.20	6.83	7.19
Matsuda(1975)	$\log L(\text{km}) = 0.60M - 2.90$	4.83	5.12	6.49	7.28
Matsuda(1998)	$M = 6.32 + 0.693 \log L$	6.32	6.44	7.01	7.34
Ambraseys(1988)	$M = 4.63 + 1.43 \log L$	4.63	4.88	6.06	6.74
Wesnouskey(1988)	$M = 5.133 + 1.153 \log L$	5.13	5.34	6.29	6.84
Archarya(1979, Phili.)	$M = 3.5 + 1.79 \log L$	3.50	3.82	5.29	6.14
Archarya(1979, Japan)	$M = 4.86 + 1.25 \log L$	4.86	5.08	6.11	6.71
Slemmons(1982, All World)	$M = 2.062 + 1.068 \log L(\text{m})$	5.27	5.45	6.33	6.84
Slemmons(1982, R)	$M = 2.021 + 1.142 \log L(\text{m})$	5.45	5.65	6.59	7.13
Bonilla et al.(1984, R)	$M = 5.71 + 0.916 \log L(\text{km})$	5.71	5.87	6.63	7.06
Bonilla et al.(1984, Int.)	$M = 6.02 + 0.729 \log L(\text{km})$	6.02	6.15	6.75	7.10
Bonilla et al.(1984, All)	$M = 6.04 + 0.708 \log L(\text{km})$	6.04	6.16	6.75	7.09
Khromovskikh(1989, Pacific)	$M = 5.7 + 0.96 \log L(\text{km})$	5.70	5.87	6.66	7.12
Wells & Coppersmith(1994, All)	$M_w = 5.08 + 1.16 \log L$	5.08	5.28	6.24	6.79
Wells & Coppersmith(1994, R)	$M_w = 5.00 + 1.22 \log L$	5.00	5.21	6.22	6.80
Vakov(1996, N+RS)	$M = 4.171 + 1.949 \log L$	4.17	4.51	6.12	7.05
Vakov(1996, N+R)	$M = 3.161 + 3.034 \log L$	3.16	3.70	6.20	7.64
Vakov(1996, All)	$M = 4.973 + 1.273 \log L$	4.97	5.20	6.25	6.85
Average		5.13	5.36	6.39	6.99

다만 이렇게 얻어진 결과값들은 각각의 경험식에서 제시된 지진규모 혹은 단층의 파열길이에 대한 범위인 $4 < L < 640\text{km}$ (Tocher), $1 < L < 700\text{km}$ (Iida), $6.8 < M < 7.2$ (Matsuda), $18 < L < 120\text{ km}$ (Bonilla et al.), $4 < L < 120\text{ km}$ (Slemmons), $11 < L < 285\text{ km}$ (Wesnousky), $5.2 < M < 8.7$ (Khromovskikh), $1.3 < L < 432\text{km}$ (Wells & Coppersmith), $4.5 < M < 8.5$ (Vakov) 등 입력자료의 범위를 고려할 때 적용성의 한계를 검토할 필요가 있을 것이다. 여기서 고려된 대부분의 경험식들에서 입력된 자료들은 지진규모 7 이상의 큰 규모의 자료들일 뿐 아니라 단층의 파열길이가 큰 자료들을 이용한 것이기 때문이다.

또한 본 연구에서 적용한 단층의 길이란 야외에서 관찰된 지표단층의 길이만을 적용한 것이기 때문에 단위 지진사건을 대표해야한다는 점에서 지표파열길이(surface rupture length)인가 혹은 지질단층길이(geological fault length)인가 라는 관점에서 보면 지질단

층길이라는 개념이 강할 수 있기 때문에 지질단층길이를 지표파열길이를 적용했다는 점에서 고지진 규모의 값이 과대 평가될 수 있다는 점이 있다. 또한 지표파열길이를 얻어진 값이 단지 지표에서만 얻어진 연속된 자료들만을 적용한 것이기 때문에 지표 단층의 경우 안행상(En echelon) 혹은 stepping의 양상으로 발달할 경우 실제의 지표파열길이보다 축소 평가될 수 있다는 점에서 본 연구에서 적용된 지진규모는 다른 한편으로 과소 평가될 수 있다는 점도 있다. 따라서 단층의 기하학적 및 운동학적 특성이 좀더 구체적으로 해석되어야만 지표파열길이 혹은 단층분절의 정량적인 값을 적용할 수 있을 것이며 고지진 규모의 정확한 평가가 가능할 것이다.

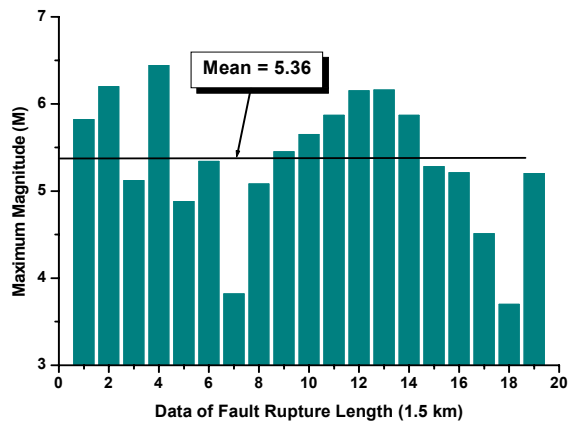


Fig. 4. Distribution of the paleomagnitude obtained from the surface rupture length

3-2. 단층변위에 의한 고지진 규모

단층의 변위를 이용한 방법은 국내의 경우 지체구조적으로 활발한 지역보다 상대적으로 오래된 단층들이 많아 침식되었을 뿐 아니라 또한 지형적 특성으로 인하여 지표단층의 연장을 직접적으로 추적하는 것이 쉽지 않다. 따라서 단층의 분절화를 이용한 분절모델(segmentation model)을 적용할 경우 불확실성이 크게 나타날 확률이 높기 때문에 단층의 변위를 이용한 최대 지진력 평가와 변위율(slip rate) 및 지진 모멘트(seismic moment)를 이용한 방법이 더 효율적일 수 있을 것이다.

단층변위-지진규모의 관계식들 중 국내 단층 특성을 잘 반영할 수 있다고 판단되는 수직변위의 성분을 잘 반영하는 경험식들만으로 고지진 규모를 추정하여 보았다(Table 2). 일부 단층에 대한 수직 변위가 1.5 m 로 가정했을 때 평가된 고지진 규모의 범위는 M 6.82~7.21로써 지표파열길이를 적용한 경우보다 상대적으로 매우 높은 분포를 보여주고 있으며 전체 평균값은 M 6.98을 나타낸다(Fig. 5). 또 다른 단층의 경우 변위를 4 m 로 보았을 때 $7.26 < M < 7.74$ 의 범위를 가지면서 평균 M 7.47을 보인다.

단층의 변위를 이용한 지진규모 평가의 경험식 또한 각 경험식의 적용에서 입력자료의 제한성을 가진다. 예를들면 $6.8 < M < 7.2$ (Matsuda), $0.4 < D < 9.5$ m (Bonilla et al.), $0.3 < D < 4$ m (Slemmons), $5.2 < M < 8.1$ (Wells & Coppersmith), $0.01 < D < 14.6$ m (Wells & Coppersmith) 등의 제한성을 갖는데 대부분 본 연구에서 적용된 변위의 길이가 그 범위에 포함되고 있다.

Table 2. Preliminary calculations of the maximum earthquake magnitude obtained from the fault displacements

Source	Equations	Fault Displacement (m)				
		1	1.5	2	4	5
Matsuda(1975)	$\log D = 0.60M - 4.0$	6.67	6.96	7.17	7.67	7.83
Slemmons(1982, All World)	$M = 6.821 + 0.847 \log D$	6.82	6.97	7.08	7.33	7.41
Slemmons(1982, R)	$M = 6.793 + 1.306 \log D$	6.79	7.02	7.19	7.58	7.71
Slemmons(1982, R-N Oblique)	$M = 6.635 + 1.037 \log D$	6.64	6.82	6.95	7.26	7.36
Bonilla et al.(1984, Int.)	$M = 6.93 + 0.665 \log D$	6.93	7.05	7.13	7.33	7.39
Bonilla et al.(1984, All)	$M = 6.95 + 0.723 \log D$	6.95	7.08	7.17	7.39	7.46
Wells & Coppersmith(1994, All)	$M_w = 6.69 + 1.74 \log D$	6.69	7.00	7.21	7.74	7.91
Average		6.78	6.98	7.13	7.47	7.58

일부 평균변위를 적용한 경험식도 있지만 단층변위-지진규모의 경험식들은 대부분 최대 변위값을 적용한 것으로 일반적으로 단층의 연장을 따라서 변위의 크기가 일정하지 않고 일정한 분포를 보인다. 따라서 야외에서 측정된 단층의 변위가 최대 변위를 나타낼 수 있는가하는 점이 논란이 될 수 있을 것이다. 고지진학적 연구에서는 단층의 운동이력을 파악하기 위해서 단층의 주향을 따라 일정한 지점에서 트렌치를 실시하고 임의의 트렌치 지점에서 측정된 단층의 변위는 최대변위를 나타내기 보다는 평균변위를 나타낼 확률이 훨씬 높다는 것이다. 그 좋은 예가 1983년 미국 Idaho 지역에서 발생한 규모 7.3의 Borah Peak 지진으로써 지진발생 후 즉시 단층주향을 따라 일정한 간격으로 62개 지점에서 변위를 측정된 결과 Fig. 6에서 보여주는 분포를 발견하였다. 즉, 임의로 선정된 단층 지점에서의 변위값이 달리 말하면 야외에서 트렌치 조사를 통한 단층변위의 측정은 트렌치 지점이 임의로 선정되는 경우가 흔하고 그 지점이 최대 변위값의 90% 이상을 나타내는 지점으로 나타날 확률은 단지 3~6% 만 보일 뿐 평균변위를 보이는 것으로 해석하였다. 따라서 최대 지진력을 산정하기 위한 최대 변위량을 얻기 위해서는 임의로 선정된 트렌치 지점에서 얻어진 평균 변위량에 2~2.5 배를 곱하면 최대 변위량을 얻을 수 있다 (McCalpin, 1996). 이러한 점에서 본 연구에서 도출한 지진규모 값은 과소평가될 수 있다

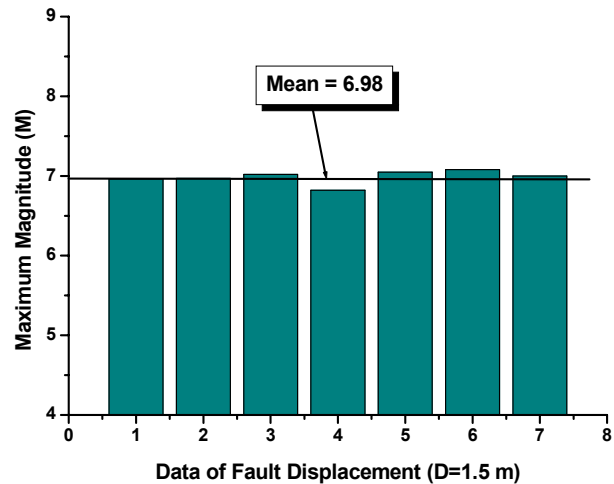


Fig. 5. Distribution of the paleomagnetism obtained from the fault displacement

는 점이 있다. 그 반면에 단층의 운동 이력이 충분히 해석된 결과를 적용한 것이 아니라 한번의 운동으로 해석한 전체 변위를 적용한 것이기 때문에 과대 평가된다는 점도 내포하고 있다. 전체 변위를 직접적으로 적용할 것이 아니라 다중변형일 경우 단위운동에 따르는 변위만을 얻어서 고지진 규모를 평가해야 할 것이다. 따라서, 국내에서 단층 상에서 발생 가능한 최대지진규모를 산정하기 위해서는 단층의 기하학적 변수들을 평가하기 위한 야외조사, 지구물리탐사 등을 통한 제4기 단층특성을 확인해야 할 뿐 아니라 트렌치 조사를 통한 단층의 변위 및 운동 횟수와 연대측정을 통한 재발주기의 평가가 정밀하게 해석되어야 할 것으로 판단된다.

3-3. 단층의 지진모멘트에 의한 고지진 규모

지진원의 크기와 지진규모와의 관계로부터 얻어지는 지진력 평가는 지질자료의 역학적 불균질성과 지진원 크기의 입력자료의 야외측정 오차 때문에 부분적인 오차를 유발할 수 있지만 일반적으로 야외 지진원 단층의 기하학적 측정치로부터 지진의 크기를 예측하는데 활용되어 왔다. 그러나 앞에서 설명된 바와 같이 각 연구자들이 제시한 경험식들에서 부분적인 차이를 가지며 특히 1995년 1월 17일 규모 7.2의 Kobe 지진의 경우를 살펴보면 지표과열길이가 약 9 km 정도 이 것을 Matsuda (1975)에 적용할 경우 M 6.4로 산정되는 결과를 보여줌으로써 실제 관측된 지진규모(M 7.2)와 상당한 차이를 보여주고 있다. 이에 따라 하나의 단층선 개념이 아니라 여러 개의 개별 단층들 (fault system) 상호간의 단층역학 등에 대한 새로운 개념을 도입할 것을 제의하고 있다(Fig. 7).

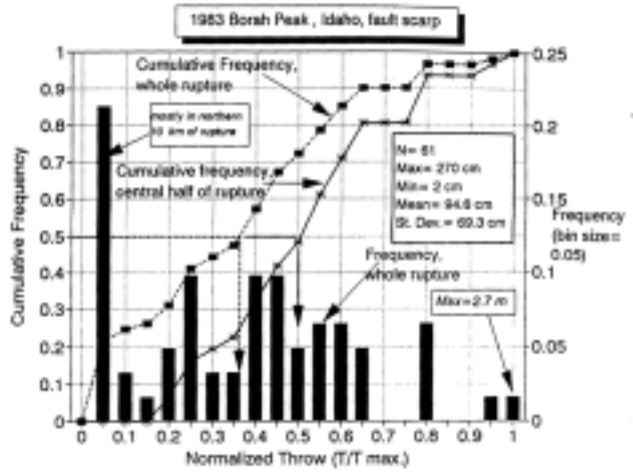


Fig. 6. Frequency distributions of normalized throws from 1983 Borah Peak surface rupture, central Idaho (after McCalpin, 1996)

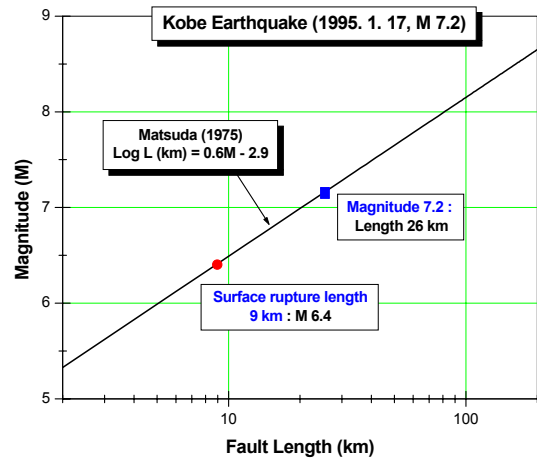


Fig. 7. Relationship between fault length and magnitude(Matsuda, 1975) and the position of the Kobe earthquake (after Toda et al., 1996)

이상의 결과를 이용한 단층 지진원으로부터 최대 잠재지진을 평가하는 방법은 물리적인 의미를 부여하기 보다는 경험식에 의존하는 것으로 Hanks & Kanamori (1979)가 제시한 지진모멘트를 이용한 방법과 지진규모와 지진모멘트의 관계(Wesnousky et al., 1982)를 이용하여 국내 단층의 지진모멘트 및 moment release rate를 이용한 지진위험도를 예비적으로 평가해 보았다. 이 경우 임의의 국내 단층에 대해서 길이를 1.5 km, 변위 4 m, 단층의 깊이 10 km, 전단강성율(shear modulus)를 3.5×10^{11} dyne/cm² 로 가정하였을 때 지진모멘트는 2.11×10^{25} dyne.cm 이고, 여기에 단층의 지속시간(elapse time)을 80,000 년으로 가정했을 때 moment release rate는 2.63×10^{20} dyne.cm/year로써 이를 근거로 seismic moment release에 의한 잠재지진을 예비적으로 평가해보면 그 때 지진규모는 M 6.46으로 보인다(Fig. 8).

이상으로 단층파열길이 혹은 변위량으로 표현되는 단층의 파라미터로 고지진의 규모를 평가하는 방법으로 경험식이 활용될 수 있을 것이나, 지질요소의 파라미터 상호간에 물리적인 함수관계를 가지고 있으므로 단층요소-지진규모의 관계가 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 있다. 다만 단층요소와 지진규모의 평가는 10CFR 100 App.A에서 지적인 바와 같이 활동성 단층이고 또한 단층의 최소길이가 1.6 km 이상일 때 안전정지지진을 도출할 때 사용하는 것으로 제4기 단층들이 활동성으로 판명되지 않거나 또한 단층의 최소 길이가 1.6 km 이하일 때에는 적용할 필요가 없을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 최근 제4기 단층의 정밀조사와 신기 지체구조 연구가 주목을 받음에 따라 제4기 단층들 중 일부 활동성 단층으로 판명될 경우를 가정하여 최대 잠재지진을 평가하기 위한 방법을 정립하고자 하는데 목적을 두었다. 이를 위하여 최근까지 발표된

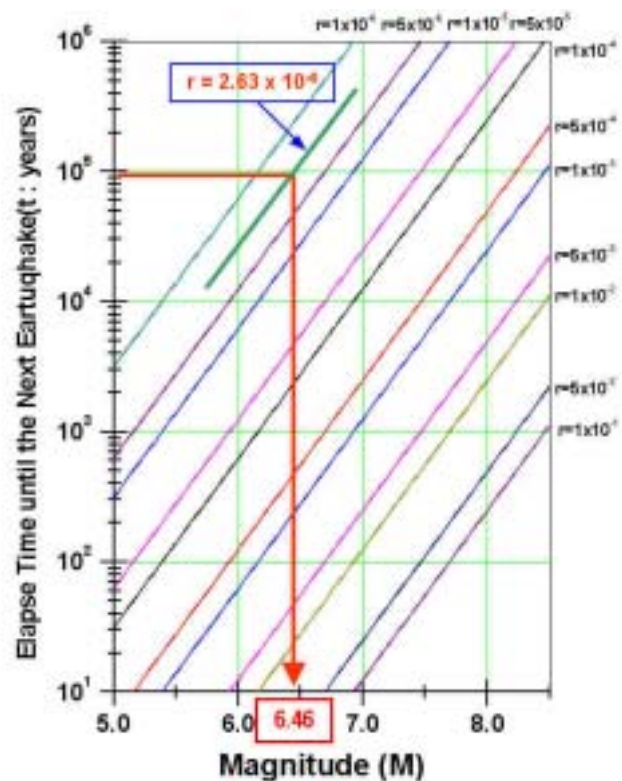


Fig. 8. Relationship between the magnitude of possible earthquake and the elapse time(t) until the next earthquake ($\times 10^{26}$ dyne.cm/year)

단층파열길이, 단층변위 및 지진모멘트를 이용한 잠재지진 평가의 방법을 비교·검토하였고, 임의의 단층에 대하여 고지진 규모를 평가해보았다. 일부 단층의 경우 단층변위를 1.5 m로 가정했을 때 고지진의 규모는 M 6.82~7.21 이고 그 평균값은 M 6.98로 나타났다. 또 다른 단층의 경우 단층길이 1.5 km, 변위 4 m로 가정했을 때 평균 M 5.36과 M 7.47로 보이고 지진모멘트를 이용하여 평가했을 때 M 6.46으로 평가되었다. 이러한 차이를 보이는 것은 각각의 방법에 의한 과대평가 요인과 과소평가 요인이 복합적으로 작용한 것으로 판단되며 단층의 기하학적 요소가 야외에서 정확하게 확인되지 못한 점도 있을 수 있을 것이다.

따라서 지질단층길이와 지표파열길이의 구분을 위한 단층분절에 관한 정밀조사 연구가 수행되어야 할 뿐 아니라 단층의 운동 이력의 정확한 해석을 위하여 정밀 지질조사와 함께 단층의 거동특성이 해석되어야 할 것이다. 이와 더불어 고지진 규모 평가에 대한 불확실성을 확률론적으로 평가하기 위한 방법도 함께 시도되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업의 일부로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드린다.

참고문헌

- Archarya, H., 1979, "Regional Variations in the Rupture-Length Magnitude Relationships and Their Dynamically Significance", Bull. Seis. Soc. Ame., Vol.69, pp.2063-2084.
- Bonilla, M.G. and Buchanan, J.M., 1970, "Interim Report on Worldwide Historic Surface Faulting", U.S. Geol. Surv. Open-File-Report, 32p.
- Bonilla, M.G., Mark, R.K. and Lienkaemper, J.J., 1984, " Statistical Relations Among Earthquake Magnitude, Surface Rupture Length, and Surface Fault Displacement," Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.74, pp.2379-2411.
- Chinnery, M.A., 1969, "Earthquake Magnitude and Source Parameters", Bull. Seis. Soc. Ame., Vol.59, pp.1969-1982.
- Geller, R., 1976, "Scaling Relations for Earthquake Source Parameters and Magnitude", Bull. Seis. Soc. Ame., Vol.66, pp.1501-1523.
- Hank, T.C. and Kanamori, H., 1979, "A Moment Magnitude Scale", Jour. Geophy. Rese., Vol.84, pp.2981-2987.
- Iida, K., 1965, "Earthquake Magnitude, Earthquake Fault and Source Dimensions", Jour. of Earth Science, Nagoya Univ., Vol.13, pp.115-132.

- Kanamori, H. and Anderson, D.L., 1975, "Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology", *Bull. Seis. Soc. Ame.*, Vol.65, pp.1073-1095.
- Kanamori, H., 1983, "Magnitude Scale and Quantification of Earthquakes", *Tectonophysics*, Vol.93, pp.185-199.
- Khromovskikh, V.S., 1989, "Determination of Magnitudes of Ancient Earthquakes from Dimensions of Observed Seismodislocations", *Tectonophysics*, Vol.166, pp.269-280.
- McCaplin, J.P., 1996, "Paleoseismology", Academic Press, San Diego, 588 p.
- Scholz, C.H., 1982, "Scaling Laws for Large Earthquakes : Consequences for Physical Models", *Bull. Seis. Soc. Ame.*, Vol.72, pp.1-14.
- Slemmons, D.B., 1977, "Faults and Earthquake Magnitude," U.S. Army Engineers Waterways Exp. Stn., Vicksburg, Miss., Misc. Paper S-73-1, report 6, 166p.
- Smith, S.W., 1976, "Determination of the Maximum Earthquake Magnitude", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.3, pp.351-354.
- The Research Group for Active Fault of Japan, 1992, "Maps of Active Faults in Japan with an Explanatory Text", Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 73p.
- Tocher, D., 1958, "Earthquake Energy and Ground Breakage", *Bull. Seis. Soc. Ame.*, Vol.48, pp.147-153.
- Vakov, A.V., 1996, "Relationships between Earthquake Magnitude, Source Geometry and Slip Mechanism", *Tectonophysics*, Vol.261, pp.97-113.
- Well, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994, " New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area, and Surface Displacement", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol.83, pp.794-1002.
- Wesnousky, S.G., 1986, "Earthquake, Quaternary Faults, and Seismic Hazards in California", *Jour. Geophy. Res.*, Vol.91, pp.12,587-12,631.
- Working Group on California Earthquake Probabilities, 1999, " Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region : 2000 to 2030, USGS Open-File Report 99-517.
- Wyss, M., 1979, " Estimating Maximum Expectable Magnitude of Earthquake from Fault Dimensions," *Geology*, Vol.7, pp.336-340.