

## 양산단층계 지진활동의 통계적 분석

### A Statistical Analysis of the Seismicity of the Yangsan Fault System

이 기 화 (Kiehwa Lee)

서울대학교 지질학과

이 전 희 (Junhee Lee)

서울대학교 지질학과

경 재 복 (Jai Bok Kyung)

한국교원대학교 지구과학교육과

#### 요약 / ABSTRACT

양산단층계는 한반도의 동남부에 위치한 백악기 경상분지내의 주요한 구조대로서 지금까지 많은 역사지진의 기록이 남아있으며 최근에 북부, 중부, 남부의 세 구역으로 나뉘어질 가능성이 시사된 바도 있다. 서기 2년부터 1997년까지 양산단층의 주변에서 발생한 지진자료를 조선시대 이전의 불완전한 자료와 그 이후의 완전한 자료로 구분하여 최우도 방법을 적용하여 단층 전체와 각 지진구역에 대하여 지진발생률, 규모-빈도 관계의  $b$ 값, 최대가능규모 등의 지진활동 매개변수들을 결정하였다. 그 결과 양산단층의 지진활동은 각각의 구역에 따라 많은 차이를 보임을 알 수 있었으며 단층 전체에 대한  $b$ 값은 대략 0.85로 나타났다. 북부, 중부 및 남부구역에 대한 최대 가능규모는 각각 5.2, 6.8 6.0으로 나타났으며 이들의 재래주기는 1000년을 초과하는 것으로 나타났다. 또한 각각의 지진구역 및 전 단층대에 대하여 지진자료의 규모-빈도 관계식을 분석하여 지진 발생모델 중 Gutenberg-Richter 모델과 특성지진모델에 대한 적합성을 검증하였다. 이 결과 양산단층의 지진활동은 Gutenberg-Richter 모델보다 특성지진모델에 적합한 모양임을 알 수 있었으나 각각의 구역에 대한 검증은 자료가 부족한 관계로 의미있는 결과를 얻지 못하였다.

The Yangsan fault system of Kyungsang Basin in the southeastern part of Korean peninsula is one of the most important structures in the peninsula. A number of strong earthquakes occurred in the vicinity of the fault. It was suggested that this fault can be divided into three segments: northern, central and southern ones. Earthquake data around the Yangsan fault were classified into two groups as incomplete and complete ones; the former is the data before the Choseon Dynasty and the latter is

those since the dynasty. The maximum likelihood method was applied to compute seismicity parameters such as earthquake occurrence rates, b-values of frequency-magnitude relation and maximum possible magnitudes for each segment and the entire fault. These parameters show considerably different values from segment to segment. The b-value for the entire fault turned out to be 0.85 and maximum possible magnitudes for the northern, central and southern segments are 5.2, 6.8 and 6.0, respectively. The mean return periods for the maximum possible magnitudes for each segments are greater than 1000 years. In addition, according to the analysis of the frequency-magnitude relation, the occurrence pattern of earthquakes around the Yangsan fault show more similarity to the characteristic earthquake model than the Gutenberg-Richter model. The data for each segments are, however, too scarce to obtain any physically meaningful results.

## 서 언

양산단층은 한반도의 남동쪽에 위치한 길이 170km 이상의 대규모 단층이다. 이 단층은 지질학적으로 한반도에서 가장 최근에 형성된 중요한 구조대 가운데 하나로서 이 일대의 울산, 동래, 언양 단층 등과 함께 일종의 단층대(fault system)를 이루고 있다. 이 단층대는 대체로 불국사 변동때 형성된 것으로 알려져 있다.

지진학적 관점에서 볼 때, 양산단층에서 가장 중요한 점은 이 단층 일대에서 과거 수많은 역사지진의 기록이 존재한다는 점이다(Lee and Jin, 1991). 역사 문헌들은 지난 2000년의 기간동안 이 단층 일대에서 상당히 큰 지진들을 여럿 기록하고 있으며 이 사실은 양산단층이 활성단층일 가능성을 시사하고 있다. 따라서 이 단층의 지진학적 연구는 한반도 남동부의 제 4기(Quaternary) 지각변동을 파악하는데 있어 매우 중요한 정보를 제공할 수 있다. 과거 많은 지구물리학적 연구가 양산단층대에 잘 발달된 파쇄대가 존재함을 확인한 바 있다(김인수와 김중렬, 1983; 김영화 외, 1990; Kim and Lee, 1988; Lee et al., 1985, 1992; Lee and Um, 1992).

현재 양산단층대에 인접하여 여러 기의 원자력 발전소와 중요 산업시설이 위치하여 이 단층대의 지진학적 특성을 파악하는 것은 지질학자들뿐만 아니라 공학자 및 일반 대중들에게도 중요한 관심사가 되고 있다. Lee and Na(1983)가 이 일대의 역사

지진 및 미소지진들을 이용하여 양산단층대가 지진학적으로 활성임을 지적한 이래 많은 논란이 뒤따른 바 있다. 그들은 양산단층의 활성임을 입증하는 증거로서 (1) 적어도 10개의 MM진도 VIII 이상의 파괴적인 역사지진이 양산단층이 통과하는 경주 부근에서 발생했으며 (2) 1982년 8월-12월 동안 양산단층 및 이 근방의 동래, 언양 단층에서 약 100회의 미소지진이 관측되었음을 제시하였다. 한편, 1992년 수행된 한일 공동 연구는 양산단층대의 지질을 탐사하여 이 일대가 지진학적으로 활성임을 입증하였다(Okada et al., 1993).

최근의 지진학의 연구경향은 활성단층의 지진학적 특성에 집중되고 있는데 이는 대규모 지진들이 활성단층과 연관되어 발생하기 때문이다(Kasahara, 1981). 활성단층의 존재가 불명확할 경우, 그 일대 전체의 광역 지진활동의 특성이 조사된다. 그러나 만일 활성단층의 존재와 위치가 확실하게 알려져 있는 경우, 그 지역에서 각각의 활성단층들의 지진학적 특성을 연구하는 것이 더 타당하다. 따라서 근래 대부분의 지진활동 연구들은 주로 활성 단층들의 특성을 알아내는 데에 집중되어 있다(Working group on California Earthquake Probabilistics, 1995).

지금까지 많은 연구들은 전세계의 활성단층들이 각각 다른 지진활동을 갖는 몇 개의 구역으로 나누어질 수 있음을 보이고 있다(e.g. Schwartz and Coppersmith, 1984; Crone et al., 1987; Yeats and

Schwartz, 1990). Lee and Jin(1991)은 양산단층의 지진활동을 분석하여 이를 북부, 중부, 남부의 3개 지진구역으로 나눈 바 있다. 그들은 북부 구역과 중부 구역의 경계 및 중부 구역과 남부 구역의 경계를 각각 북위 36.2° 및 북위 35.5°지점으로 설정하였다(Fig. 1). 이들 지진구역에서 진도-빈도 관계식

의 b 값 및 이동률(slip rate)이 상당한 차이가 나타남을 알 수 있었다. 과거 지전기학적 연구를 통하여 이들 경계 구역의 파쇄대 깊이를 조사한 바 있으며 그 결과는 두 곳이 모두 실제 구역간의 경계 지역일 가능성이 높은 것으로 나타났다(Lee and Lee, 1997).

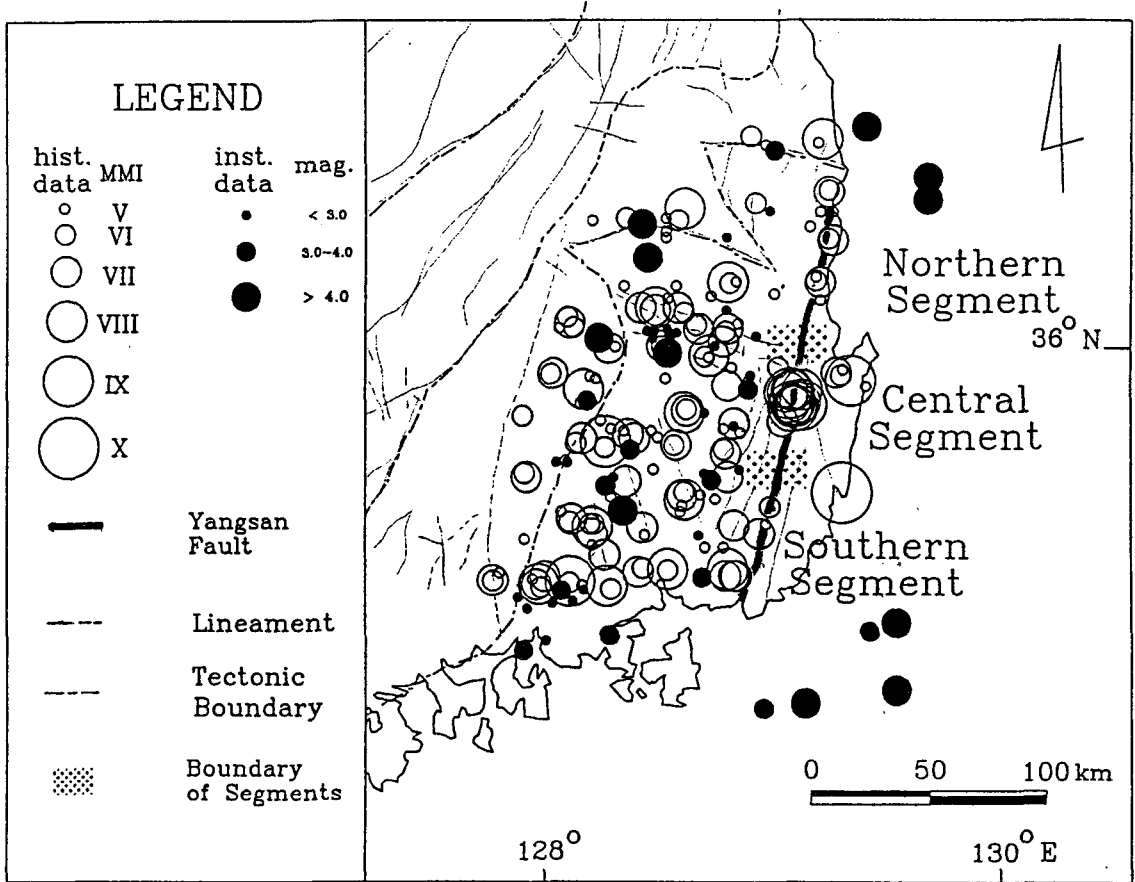


Fig. 1. Epicenters of earthquakes during A.D. 2-1997 in the Kyungsang Basin and the proposed segments of the Yangsan fault system.

### 양산단층의 지질

양산단층은 한반도에서 가장 최근에 형성된 구조대의 하나로서 지금까지 수많은 지질학적, 지구물리학적 연구의 주제가 되어 온 중요한 지질구조이다. 이 단층대는 한반도의 동남부를 덮고 있는

경상분지의 동쪽 지역에 위치한다. 이 단층대는 경상 파쇄대 지역과 밀접한 관계가 있으며 동해안으로 연장된 지질학적 증거도 나타난다(Kang, 1984).

양산단층대의 지질은 백악기의 퇴적암, 심성암 및 화산암으로 구성되어 있다. 백악기의 화산암과 화강편마암은 일반적으로 양산단층의 서쪽지역에

분포하는 반면, 퇴적암은 단층의 동쪽 지역에 국한되어 있다. 경주 북쪽의 양산단층 북부지역의 지질은 백악기 하양군의 퇴적암 및 불국사 화강암의 일종인 흑운모 화강암, 석영반암으로 구성된다(Kim et al., 1990). 경주 남쪽의 양산단층 중부지역의 지질은 일반적으로 단층 동쪽 지역에 위치한 백악기

퇴적암과 단층 서쪽에 위치한 백악기 심성 화강편마암과 화산암으로 특징지어진다(Kim and Lee, 1988). 또한 양산단층의 남부 지역의 지질은 불국사 화강암계 및 경상 누층군으로 구성된다(김인수 및 김종렬, 1983). Fig. 2에 경상분지의 지질도를 간략하게 나타내었다(Lee, 1988).

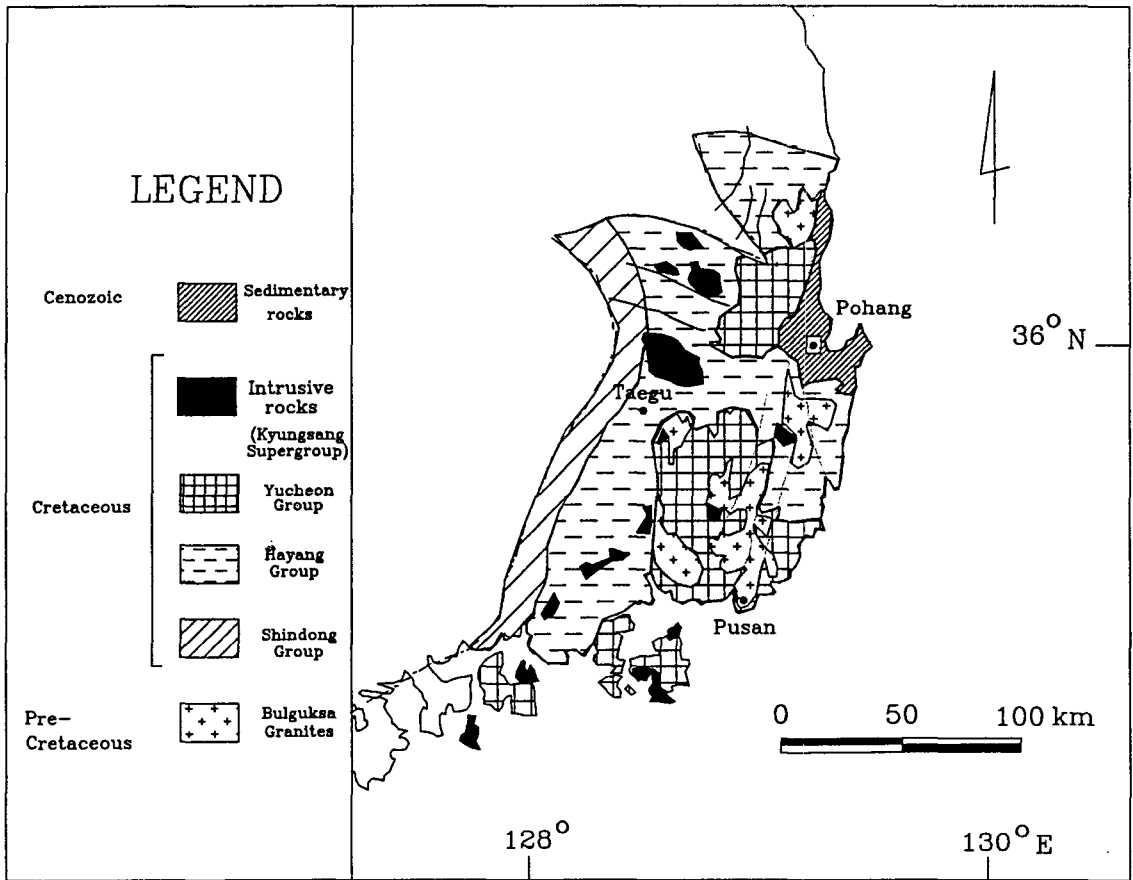


Fig. 2. Simplified geologic map of Kyungsang Basin(after Geology of Korea, 1988, edited by Lee, D.S.).

## 지진 자료 분석

### 자료의 수집

본 연구에서는 양산단층대 일대에서 발생한 역사 및 계기지진 자료를 수집하여 분석하였다. 한반도의 지진자료는 역사지진과 계기지진의 두 가지

자료로 나뉜다. 역사지진은 서기 1905년 인천에 우리나라 최초로 지진계가 설치되기 이전의 자료를 가리키며 계기지진은 그 이후의 지진자료를 의미한다. 역사지진자료는 이기화(1998)가 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등의 역사문헌을 통해 수집한 자료를 이용하였는데 약 1900회의 지진자료가 수집되

었다. 그러나 이중 조선시대 이전의 지진자료는 당시의 희박한 인구밀도 및 기록의 유실 때문에 불완전하다고 여겨진다. 또한 역사지진의 경우 정확한 진앙위치와 진도의 평가가 계기지진에 비하여 어려운 상황이다.

본 연구에서 계기지진은 BMO(Bulletin of the Meteorological Observatory of the Government General of Korea), KCMO (Korea Central Meteorological Office), PSH(박수희, 1969), L&J(Lee and Jung, 1980), KSJ(Kim, S.J., 1980) 등의 지진관측기관에서 수집한 것이다. 이 지진자료들은 서기 1905년부터 서기 1997년 6월의 기간을 망라한다.

한국자원연구소에서는 경상분지에 미소지진을 연구하기 위한 지진관측망을 운영하고 있다. 이들 미소지진자료들은 비교적 균질한 데이터 집합을 형

성하며 다른 계기지진자료에 비하여 질적으로 큰 차이가 난다. 이들 미소지진 자료들은 별도의 연구가 필요할 것으로 생각되어 본 연구에서는 제외하였다.

한편, 본 연구에서는 양산단층대의 지진활동을 조사하기 위하여 단층으로부터 40km 폭을 갖는 지역에서 발생한 지진들을 대상으로 분석하였다(Fig. 1). 이 40km 폭의 지역 내에서 113개의 역사지진 및 20개의 계기지진이 발생하였다. 이 자료 가운데 MM진도 V이상을 갖는 역사지진 36개와 20개의 계기지진 자료가 각각 Table 1과 2에 기록되었다. 역사지진 및 계기지진에서 각 출처(source)은 Table 1과 2의 하단에 주어졌다. Fig. 3은 양산단층대에서 전 기간동안 발생한 모든 지진들의 지진활동을 시간-거리(위도)별로 도시한 것이다. 이를 보면 특히 조선왕조(15세기 이후)이래로 발생횟수가

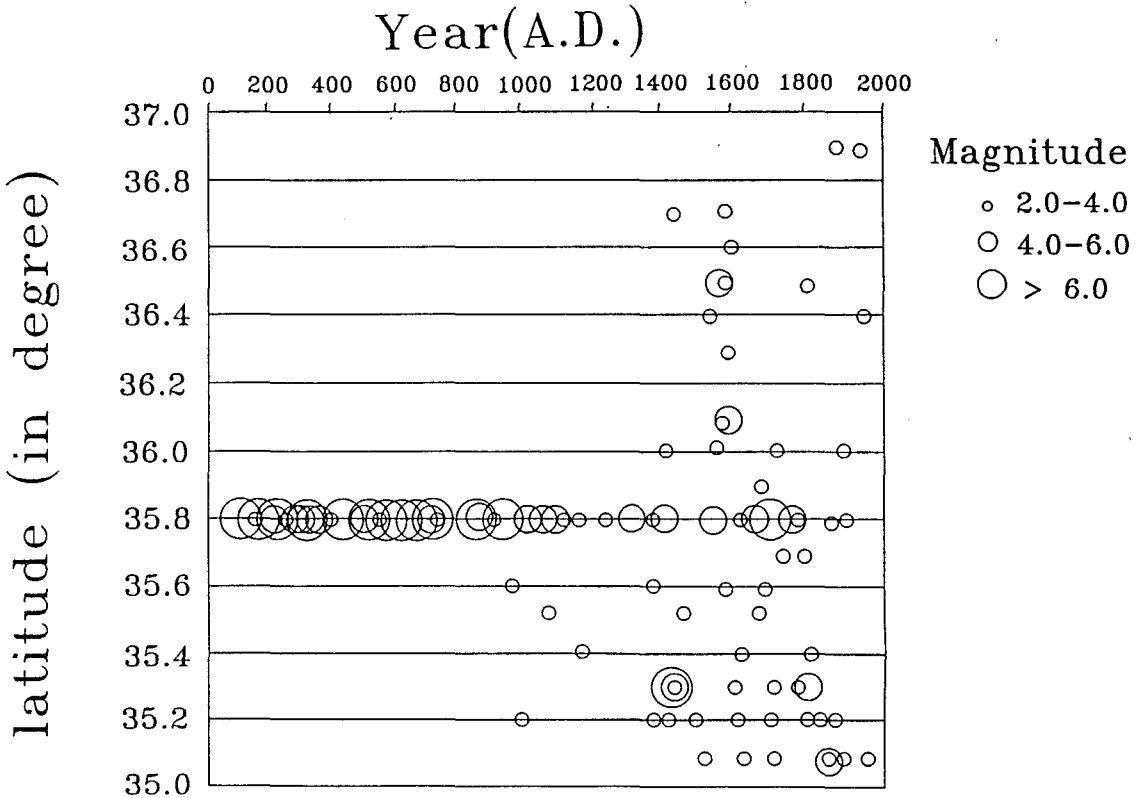


Fig. 3. Time-distance plot of seismicity in the Yangsan fault system during A.D. 2-1997.

Table 1. Catalogue of historical earthquakes (MMI  $\geq$  V) occurred in the vicinity of the Yangsan fault.

year	month	day	latitude	longitude	magnitude	source
34	2	0	35.80	129.30	6.44	1
100	10	0	35.80	129.30	6.44	1
123	5	0	35.80	129.30	6.44	1
304	8	0	35.80	129.30	6.44	1
304	9	0	35.80	129.30	6.44	1
458	2	0	35.80	129.30	5.77	1
471	3	0	35.80	129.30	6.44	1
510	5	0	35.80	129.30	6.44	1
630	0	0	35.80	129.30	6.44	1
742	2	0	35.80	129.30	3.77	1
768	6	0	35.80	129.30	5.77	1
779	3	0	35.80	129.30	6.44	1
844	10	0	35.80	129.30	3.77	1
916	10	0	35.80	129.30	3.77	1
1013	12	29	35.50	129.10	4.44	2
1035	9	23	35.80	129.30	5.11	2
1036	8	23	35.60	129.00	4.44	2
1430	3	22	35.30	129.00	3.77	3
1430	10	9	36.00	129.20	5.11	3
1480	4	7	35.10	129.00	4.44	4
1515	3	29	35.20	128.90	3.77	3
1516	4	26	36.30	129.40	4.44	3
1518	4	27	36.10	129.30	3.77	3
1523	12	20	35.40	129.00	4.44	3
1525	5	7	36.50	129.40	3.77	3
1525	10	20	36.40	129.40	4.44	3
1526	9	23	35.80	129.30	5.11	3
1526	12	25	35.30	129.10	3.77	3
1532	11	10	35.60	129.00	4.44	3
1554	9	28	35.10	128.90	4.44	3
1564	6	18	35.90	129.20	4.44	3
1667	5	1	35.40	129.00	5.11	3
1694	5	1	35.70	129.20	3.77	3
1710	1	31	35.20	129.10	3.77	3
1736	11	7	36.50	129.40	3.77	3
1743	3	25	35.50	129.20	3.77	3

\* Source : 1. Samguksagi, 2. Koryeosa, 3. Choseonwangjosilok, 4. Musha(1951)

양산단층계 지진활동의 통계적 분석

Table 2. Catalogue of instrumental earthquakes occurred in the vicinity of the Yangsan fault during A.D. 1905-1997.

year	month	day	latitude	longitude	magnitude	source
1914	5	10	35.20	129.10	2.33	BMO
1921	3	20	35.80	129.30	3.67	BMO
1921	11	15	35.20	129.10	2.33	BMO
1928	5	8	35.90	129.20	3.70	BMO
1930	11	2	36.00	129.40	1.67	BMO
1932	11	17	35.60	129.20	3.50	KSJ
1936	3	7	35.20	129.10	3.30	L&J
1937	7	29	35.80	129.30	2.33	BMO
1939	9	22	35.20	129.10	2.33	BMO
1939	9	22	35.20	129.10	2.60	BMO
1939	9	24	35.20	129.10	2.40	BMO
1939	10	22	35.80	129.30	3.60	BMO
1949	10	0	36.00	129.40	2.33	PSH
1952	12	0	35.10	129.00	2.33	PSH
1959	5	0	35.10	129.00	2.33	PSH
1993	12	24	35.90	129.10	3.10	KCMO
1996	5	16	35.30	129.10	2.80	KCMO
1996	11	25	35.60	129.30	2.30	KCMO
1997	6	16	35.30	129.10	2.70	KCMO
1997	6	26	35.80	129.30	4.00	KCMO

\* Source : 1. BMO(Bulletin of the Meteorological Observatory of the Government General of Korea), 2. KCMO (Korea Central Meteorological Office), 3. PSH(박수희, 1969), 4. L&J(Lee and Jung, 1980), 5. KSJ(Kim, S.J., 1980)

늘어나며 왕조의 수도 이외의 장소에도 지진의 기록이 나타나는 것으로 보아 기록이 삼국, 고려 시대에 비하여 정확해짐을 알 수 있다.

자료 분석 방법

일반적으로 활성단층의 지진학적 특성은 다음 3가지의 변수로서 나타난다. 즉 연간 지진 발생률  $\lambda$ , Gutenberg-Richter 관계식의 b값, 그리고 특정

단층에서 발생할 수 있는 최대 지진이다. 지금까지 양산단층에서 b값 및 발생률이 구해진 바 있으나 (Lee and Jin, 1991) 최대가능지진은 아직 구해지지 않았다. 지각을 구성하는 암석의 강도에 한계가 있기 때문에 단층에서 발생하는 지진의 규모에 상한, 즉 최대가능지진이 존재한다는 가설은 물리적으로 타당하다. Yegulalp and Kuo(1974)은 전세계 46개 지역의 지진 데이터를 분석하여 최대치 분포에 상

한이 존재하는 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 규모-빈도 관계식이 Gutenberg-Richter 관계식에 더 잘 일치함을 보였다. 또한 단층에서의 지진에너지가 유한할 때 규모값의 상한은 항상 존재한다는 것을 증명했다.

규모의 상한은 실제적으로도 매우 중요한 의미를 갖는다. 예를 들면 핵발전소의 내진설계에 있어 이 상한 값은 바로 설계지진(design earthquake)으로 간주될 수 있다. 규모의 상한은 활성단층이 확실히 파악되는 경우 단층의 길이로부터 또는 이동률(slip rate)과 규모의 상호관계로부터 얻어질 수 있다(Wells and Coppersmith, 1994). 그러나 대부분의 활성단층에서 그 구역의 경계가 명확하지 않은 경우가 많다. 이러한 경우 지진 발생률  $\lambda$ , Gutenberg-Richter 관계식의  $b$ 값, 그리고 특정 단층의 최대 지진 등 지진활동 매개변수를 평가하기 위해서 다양한 통계적인 방법이 제시되었다.

만일 지진 데이터가 넓은 시간과 규모의 영역에서 비교적 완전하게 기록되었다면 지진발생이 포아송 과정을 따르며 전 관측자료는 최대치와 최소치가 존재하는 이중 절단(doubly truncated)형의 Gutenberg-Richter 관계식을 따른다는 가정하에 지진활동 매개변수들을 평가할 수 있다(Cosentino et al., 1977). 규모의 상한은 또한 단층에서의 연간 평균 지진 에너지로부터 평가할 수 있다(Makropoulos and Burton, 1983, 1985).

만일 지진자료가 불완전하다면 지진활동 매개변수는 자료의 일부를 이용하여 얻을 수 있다. 이 경우는 특정 기간에서의 최대 지진을 이용하는 극대치 방법이 적용된다. Gumbel(1958)이 발표한 3가지 형태의 극대치 분포모델에서 상한이 존재하는 경우는 제 III형의 분포모델이 이용되며 실제 데이터를 모델에 적용하여 규모의 상한을 결정한다(Yegulalp and Kuo, 1974; Burton, 1979; Burton and Makropoulos, 1985; Osella et al., 1992). 그러나 Gumbel의 방법에서는 자료들이 특정 기간별로 배열이 되어야 하며 만일 지진 데이터가 시간에 대해 불규칙적으로 나열되어 있을 경우는 이 방법의 적용에 어려움이 있다. 이 문제를 해결하기 위하여 Kijko and Dessokey(1987) 및 Kijko(1990)는 이중 절단된 Gutenberg-Richter 관계식에 최우도 방법(maximum likelihood method)을 적용시킨 새로운

방법을 제안하였다.

Kijko(1990)의 방법에서는 두 가지의 지진목록을 대상으로 한다. 하나는 오랜 기간동안 주로 큰 지진을 기록한 강지진 자료이고 또 하나는 비교적 짧은 기간동안 기록된 완전한 계기지진 자료이다. 이 방법을 양산단층 일대의 지진활동에 적용하기 위해서 두 가지로 접근할 수 있다. 하나는 모든 역사지진들은 강지진 자료로, 모든 계기지진들을 완전한 자료로 가정하는 것이고 두 번째는 삼국시대 및 고려시대의 자료를 불완전한 강지진 자료로, 조선시대의 역사지진자료와 계기지진자료를 완전한 자료로 간주하는 것이다. 위에서 언급한 바와 같이 조선시대에 수집된 지진자료는 그 이전의 자료에 비해 훨씬 완전하다고 볼 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 두 번째의 방법을 적용시켰다.

#### 지진활동 매개변수 평가

양산단층의 구역화에 관한 연구에서 Lee and Jin(1991)은 최소자승법 및 최우도 방법을 사용하여 다음 진도-빈도 Gutenberg-Richter 관계식에서의  $a$ 와  $b$ 값을 구했다.

$$\log N = a - bI \quad (1)$$

이 때  $a$ 와  $b$ 는 상수이다.

최우도 방법에서  $b$  값은 다음과 같이 구해진다.

$$b = \log e / (I_a - I_l) \quad (2)$$

여기서  $I_a$ 와  $I_l$ 는 각각 평균 진도 및 최소(threshold)진도를 의미한다.

최소자승법에서 계산된  $b$ 값은 소수의 큰 지진에 의하여 영향을 많이 받아 불안정한 반면 최우도 방법은 이에 대해 안정된 결과를 낳는다(Bullen and Bolt, 1985). 이에 따라, 소규모 지진 중 누락된 것이 없는 비교적 완벽한 자료에 대해서는 최우도 방법을 사용하는 것이 더 타당하다(Noh and Kim, 1996). 양산단층의 각 구역에 대하여 Lee and Jin(1991)이 최우도 방법으로 계산한  $b$ 값은 북부, 중부, 남부에 대하여 각각 1.8, 0.4, 0.7 이며 전 단층에서는 0.7의 값이 계산되었다.

매개변수를 추정하는 과정에서 역사지진과 계기 지진 자료를 한데 묶기 위하여 진앙에서의 MM 진도  $I_a$ 와 규모  $M$ 간의 관계식이 필요하다. 과거에는 주로 Gutenberg-Richter(1956)의 다음 관계식을 이



용하였는데 이는 판 경계지역으로 높은 지진활동을 보이는 캘리포니아의 지진자료를 이용하여 얻어낸 식이다.

$$M = \frac{2}{3} I_e + 1.0 \quad (3)$$

그러나 본 연구에서는 아래와 같은 Mei(1960)의 관계식을 사용하였는데 이 식은 지구조적으로 우리나라와 매우 유사한 중국 북동부의 지진자료로부터 얻어진 것으로서 Gutenberg-Richter의 진앙진도-규모 관계식보다 더 타당한 결과를 낳는 것으로 보인다.

$$M = \frac{2}{3} I_e + 0.44 \quad (4)$$

이 방법을 이용하여 빈도-규모 관계식을 결정하기 위하여 조선시대 이전의 역사지진을 불완전한 강지진자료로, 조선시대 이후의 역사지진 및 계기 지진 자료를 완전한 지진자료로 간주한다. 본 연구에서 지진활동 매개변수를 구하기 위한 Kijko (1990)의 방법이 적용되었다.

Kijko의 매개변수들의 평가방법은 기본적으로 이중 절단된 Gutenberg-Richter 분포 함수  $F(x)$ 에 최우도 방법을 적용함으로써 얻어지는 것이다. 이 때  $F(x)$ 는 다음과 같이 주어진다(Kijko, 1990).

$$F(x) = P(M \leq x) = \frac{A_1 - A(x)}{A_1 - A_2} \quad (5)$$

$$M_{\min} \leq x \leq M_{\max}$$

$$\text{이 때, } A_1 = \exp(-\beta * M_{\min})$$

$$A_2 = \exp(-\beta * M_{\max})$$

$$A(x) = \exp(-\beta * x)$$

Kijko의 방법에서는 강지진이 기록된 극대치 지진자료와 비교적 적은 기간에 기록된 완전한 지진자료, 두 개의 지진자료를 사용하며 매개변수  $\beta$  ( $\ln 10$ )와  $\lambda$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{\lambda} = r_1 \frac{\langle t \rangle A_2 - \langle tA \rangle}{A_2 - A_1} + T_2/n \quad (6)$$

$$\frac{1}{\beta} = \langle x \rangle - \gamma + r_1 \lambda \left[ \frac{\langle tx_1 A \rangle - \langle t \rangle A_2 M_{\max}}{A_2 - A_1} - \gamma \frac{\langle tA \rangle - \langle t \rangle A_2}{A_2 - A_1} \right] \quad (7)$$

$$\text{이 때, } r_1 = n_1/n, \quad n = n_1 + n_2$$

$$\langle t \rangle = \sum_{i=1}^{n_1} t_i / n_1$$

$$\langle tA \rangle = \sum_{i=1}^{n_1} t_i * A(x_{1i}) / n_1$$

$$\langle tx_1 A \rangle = \sum_{i=1}^{n_1} t_i * x_{1i} * A(x_{1i}) / n_1$$

$$\gamma = (M_{\max} A_2 - M_{\min} A_1) / (A_2 - A_1)$$

이 식에서  $\langle t \rangle$ ,  $\langle tA \rangle$ ,  $\langle tx_1 A \rangle$  항들은 불완전한 강지진 목록으로부터 계산된 값으로  $t_i$ 는  $i-1$ 번째 지진과  $i$ 번째 지진의 시간 간격,  $x_i$ 는  $i$ 번째 지진의 규모,  $A(x_i)$ 는  $x_i$ 로부터 계산된  $A(x_i) = \exp(-\beta * x_i)$  값이다. 또한  $n_1$ 과  $n_2$ 는 강지진 목록과 완전한 지진목록에서의 지진발생 횟수를 각각 의미한다.

한편, 시간간격  $T$ 에서의 최대 가능 규모는 다음의 식으로 주어진다.

$$X_{\max} = M_{\max} - \frac{E_1(Tz_2) - E_1(Tz_1)}{\beta \exp(-Tz_2)} \quad (8)$$

여기에서  $X_{\max}$ 는 관측된 최대의 규모를 의미하고  $z_1, z_2, \lambda_1$ 은 각각,

$$z_1 = \lambda_1 A_1, \quad z_2 = \lambda_1 A_2$$

$$\lambda_1 = -\lambda / (A_2 - A_1)$$

이며  $E_1(z)$ 은 지수적분함수를 나타낸다.

$$E_1(z) = \int_z^{\infty} \exp(-\xi) / \xi d\xi$$

만일  $r_1$ 이  $0(n_1=0)$ 이 되면 불완전한 강지진 자료는 고려에 넣지 않는다는 의미이다. 그럴 경우 목록은 하나의 완전한 지진자료만으로 구성되며 이때의 매개변수 평가 공식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{\lambda} = T_2/n \quad (9)$$

$$\frac{1}{\beta} = \langle x \rangle - \frac{M_{\max} A_2 - M_{\min} A_1}{A_2 - A_1} \quad (10)$$

식 (9)는 포아송 분포를 따르는 시계열의 평균 활동률을 구하는 최우도 평가 방법이다. 만일  $M_{\max} \rightarrow \infty$ 인 조건이 덧붙을 경우 식 (10)은 잘 알려진 먼저의 식 (2)로 환원된다.

Table 3은 조선시대 이래의 자료를 완전한 지진, 그 이전의 자료를 불완전한 지진자료로 간주하여

계산한 매개변수  $b$ ,  $\lambda$ ,  $M_{max}$ 의 값들을 나타낸 것이다. 이 가운데  $b$  값들은 최소 규모(threshold magnitude)에 따라 변동하는데 본 연구에서는 강지진의 경우 최소한 규모 5.0 이상이라고 가정하여

0.85의 값을 얻었다.

Lee and Jung(1980)은 1926-1943년간 발생한 한반도의 계기지진 자료를 분석하여  $b$  값으로 0.80의 값을 얻었으며 이는 본 연구에서 얻어진  $b$  값 0.85

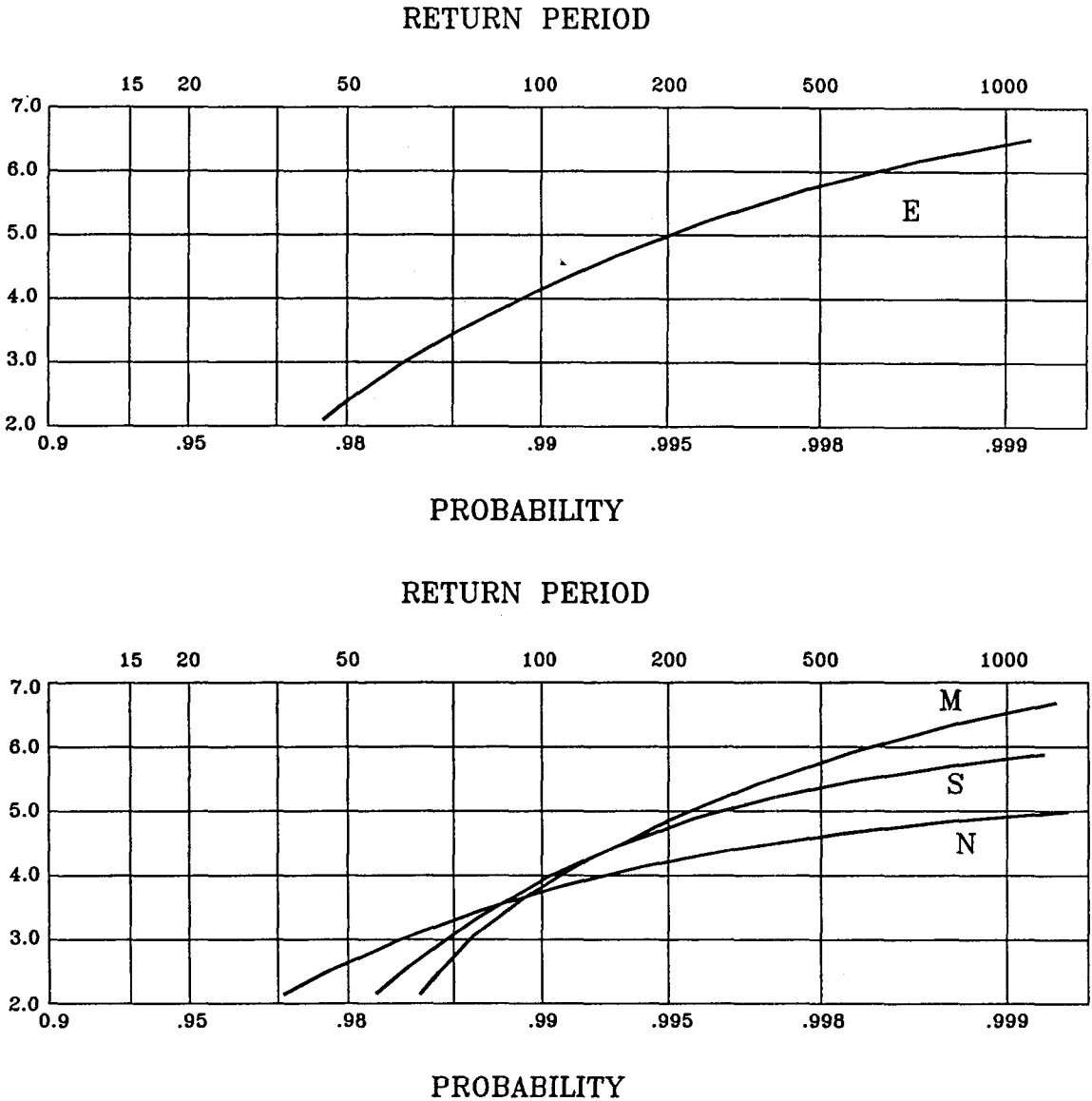


Fig. 4. Mean return periods and probability that certain magnitude will not be exceeded in any year for the Yangsan fault system and its segments. E., N., C. and S. represent the entire fault system, northern segment, central segment and southern segment, respectively.

와 잘 부합한다. 단층의 각 구역에서의 b값이 전 단층의 평균치와 상당히 차이가 나는 현상은 자료의 부족 또는 다음에 논의되는 특성지진발생 모델의 효과라고 생각된다. Table 3에서 양산단층 북부, 중부 및 남부 구역의 최대 예상 지진 규모는 대략 5.2, 6.8 및 6.0이며 양산단층 전체에 대하여는 6.7로 나타났다. 물리적으로 보아 양산단층 전체에 대한 최대규모는 분절화된 각 구역들의 최대규모보다 같거나 큰 경우가 타당하다고 할 수 있으나 본 연구에서 중부 구역의 최대규모가 이보다 더 큰 값이

나온 것은 부족한 지진 데이터를 통계적으로 분석하여 나온 결과로 보이며 이 값들은 오차범위 내에 존재한다.

Table 3에 의하여 특정 규모의 평균 재래 주기 및 한 해에 초과되지 않을 확률을 양산단층의 각 구역 및 전 단층대별로 Fig. 4에 나타내었다. 이들 곡선은 식 (8)에서 도출된 것이다. Fig. 4에서 양산단층 전체 및 북부, 중부, 남부 구역에서 예상되는 최대지진들의 재래주기는 대략 1000년이 넘는 것으로 나타났다.

Table 3. Seismic risk parameters with standard deviations for the Yangsan fault system and its segments from the mixed data with complete part since Choseon Dynasty and extreme part before the Choseon Dynasty.

Segment	b-value	$\lambda$	$M_{max}$
Northern	1.62±0.18	2.38×10 <sup>-3</sup> (/year)	5.17±0.49
Central	0.49±0.31	3.92×10 <sup>-2</sup> (/year)	6.75±1.14
Southern	1.26±0.27	1.26×10 <sup>-3</sup> (/year)	6.02±0.56
Entire fault	0.85±0.34	4.28×10 <sup>-2</sup> (/year)	6.69±0.84

### 지진 발생 모델

최근에 활성단층이 구역화될 때 그 구역에서의 규모-빈도 관계식은 Gutenberg-Richter 관계식을 따르지 않는다는 사실이 밝혀졌다. 즉 이 경우는 최대 규모 주위에서 특성지진(characteristic earthquake)들이 연속적으로 발생하며 작은 규모의 지진들만 Gutenberg-Richter 관계식을 따른다는 것이다 (Schwartz and Coppersmith., 1984). Wesnousky et al.(1983)도 일본의 제 4기 단층에서 지질학적으로 결정된 이동(slip)량과 400년간의 역사지진 활동을 비교한 결과 유사한 결론을 얻게 되었다.

Schwartz et al.(1984)은 3개의 단층 활동 모델을 기술하였다. 첫째는 가변 이동 모델(variable slip model)이고, 두 번째는 균일 이동 모델(uniform slip model), 끝으로 특성 지진 모델(characteristic earthquake model)이다. 가변 이동 모델은 여러 크기의 지진(단층이동)들이 단층을 따라 무작위적으

로 발생하여 시간이 지남에 따라 결국 단층을 따라 균등한 이동이 이루어진다. 균일 이동 모델은 같은 크기의 큰 규모의 지진보다 작은 규모의 지진들이 더욱 많이 발생하여 결국 단층 전체로서는 균일한 이동이 일어난다. 특성지진 모델은 단층 구역에서 일정한 크기의 지진이 연속적으로 되풀이되며 따라서 단층을 따르는 이동(slip)량은 변화하는 값을 보인다. 가변이동 모델과 균일이동 모델은 Gutenberg-Richter의 규모-빈도 관계식을 따르나 특성지진 모델은 Gutenberg-Richter 관계식을 따르지 않는다. 최근에는 두 가지 새로운 모델이 이들 단층 활동 모델에 추가되었다(Berryman and Beanland, 1991).

Fig. 5는 특정 단층 일대에서의 지진발생 누적횟수와 규모의 관계를 Gutenberg-Richter 모델 및 특성지진 모델별로 각각 나타낸 것이다(Wesnousky, 1994). 이 그림에서 Gutenberg-Richter 모델은 직선의 기울기가 대체로 일정하다가 최대지진 근처에

서 갑자기 가파르게 나타나며 전반적으로는 위로 볼록인 곡선으로 나타나게 된다. 반면 특성지진 모델에서는 최대지진의 근처에서 기울기가 더 낮아지며 전반적으로 아래로 볼록인 곡선의 형태가 나타난다. Fig. 5의 특성지진 모델에서  $M_{max}$ 는 실제로 발생한 최대 지진규모로 이는 특성지진에 해당하며  $M_a$ 는 이들 특성지진의 발생을 제외한 선형의 규모-빈도 관계식에서 도출되는 최대 지진규모로 일반적으로는 최대 여진(aftershock)의 규모에 해당하게 된다.

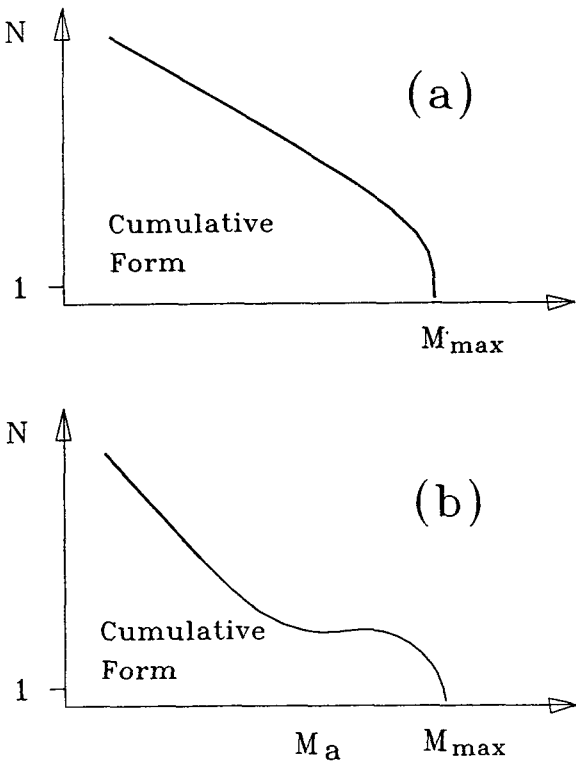


Fig. 5. The distribution of the cumulative number of events versus magnitude for (a) the Gutenberg-Richter model and (b) the characteristic earthquake model.  $M_{max}$  represents the maximum magnitude and  $M_a$  represents magnitude of the largest aftershock for the characteristic earthquake model(after Wesnousky, 1994).

Gutenberg-Richter 모델은 일반적으로 정체적인(stationary) 모델로서 어떤 시간 간격동안 단층에서 모든 크기의 지진들이 무작위적으로 발생하게 되며 이들 지진들의 크기 분포는 Gutenberg-Richter 관계식을 따르게 된다. 반면 특성지진 모델은 특정한 단층 또는 단층구역에서는 최대 규모의 특성지진만이 발생한다는 개념을 의미한다. 즉 특성지진 사이의 시간에서는 이들의 전진(foreshock)이나 여진(aftershock), 또는 낮은 규모의 배경지진(background earthquake)들을 제외하고는 발생하는 지진이 없다는 것이다. 이는 광역적으로 적용되는 Gutenberg-Richter 관계식은 이 지역 내 여러 다양한 단층들과 그들의 특성지진들이 합성된 결과임을 암시한다.

만일 Gutenberg-Richter 관계식이 특성지진을 무시한 채, 전 지진데이터에 적용된다면 대형 지진들의 발생빈도가 실제에 비해 과소평가될 우려가 있다. 여기서 특성지진은 단층에서 발생할 수 있는 최대 규모의 지진으로 간주할 수 있다. 따라서 활성단층의 주변 건조물의 설계지진(design earthquake)도 특성지진에 의하여 고려될 수 있다. Wesnousky(1994)는 캘리포니아 내 활성단층들의 규모-빈도 관계식을 분석하여 몇몇 단층대에서는 특성지진 모델이 Gutenberg-Richter 모델보다 더 잘 들어맞음을 보인 바 있다.

양산단층 일대에서 발생한 지진 자료를 규모-누적빈도의 형태로 도시하였다(Fig. 6). 위에서 언급한 대로 Fig. 5에서 Gutenberg-Richter 모델은 최대 지진 근처에서 경사가 급해지며 특성지진 모델은 이 근처에서 경사가 완만해진다. 양산단층의 지진 자료를 이용하여 만든 Fig. 6을 보면 지진 규모 약 5.0 근처 지점에서 경사값이 완만해지며 전체적으로 아래로 볼록한 형태가 나옴을 알 수 있다. 이 그림에서 작은 규모의 영역을 보면 이곳에서도 역시 경사가 완만해짐을 볼 수 있는데 이는 미소지진들이 지진관측망에 충분히 포착되지 않은 현상으로 설명할 수 있다. 결론적으로 양산단층의 전 지진 데이터는 Gutenberg-Richter 모델보다 특성지진 모델에 잘 맞는 것으로 보인다. 각각의 구역에 대한 지진자료도 역시 분석해 보았으나 자료가 너무 적은 탓으로 의미있는 결과를 얻지 못하였다. 이 경우 규모 5.0 이상의 대형 지진들은 대부분 중부 구

역에서 발생하는 만큼 세 구역을 합한 결과가 특성 지진 모델을 나타내는 것은 양산단층 전체가 하나의 단층으로 활동함을 나타내는 것이 아니라 특성 지진 모델을 따르는 중부 구역의 자료에 북부와 남부의 소규모 지진자료가 합쳐져서 나타나는 것으로 보인다. 따라서 북부 및 남부의 지진 모델은 현재로서 알기 힘들며 지진자료가 축적되기를 기다려야 할 것으로 보인다.

링으로 연결되어 있는 N개의 블록들을 가정하고 외부 장에 연속적인 변화에 주면서 이에 따르는 내부 장의 불연속적인 변화를 기록하는 것이다. 이 모델로 행한 모의 실험에서 결과로 나온 지진 분포의 규모-누적 발생빈도  $N(M)$ 는 Wesnousky(1994)가 제안한 특성지진의 규모-빈도 관계식과 상당히 일치된 형태를 보이고 있다. 양산단층의 지진학적 특성에 관한 이론적인 모델은 앞으로의 연구과제이다.

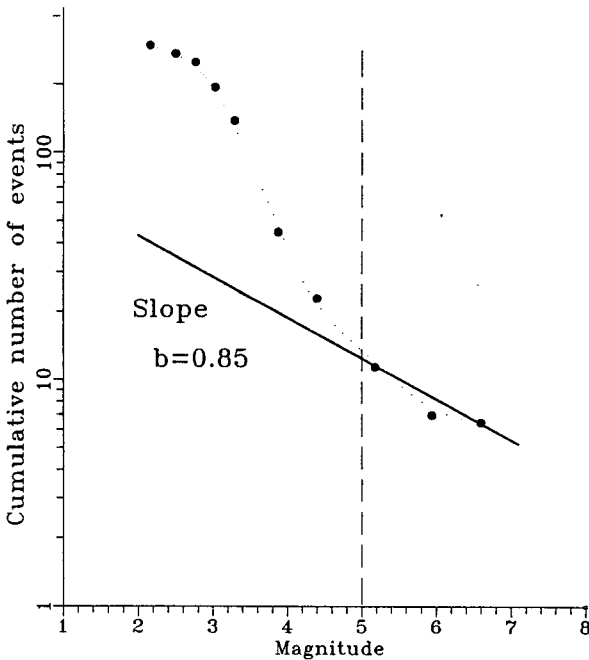


Fig. 6. Cumulative number of events versus magnitude for the Yangsan fault system during A.D. 2-1997. The line represents the Gutenberg-Richter relation for earthquakes of magnitude  $M \geq 5.0$ .

최근 비교적 간단한 수학적인 모델을 이용하여 지각의 동력학 과정을 설명하는 모델이 제시되었다 (Carlson et al., 1989). 이는 대부분의 지진현상들이 판과 판의 경계에서 발생하는 것에 착안하여 판 경계의 응력/변위의 장들을 기술함으로써 만들어진 것이다. 이 모델의 단순한 원리는 과거 Burridge et al.(1968)이 제안한 바 있는데 이는 질량  $m$ 인 스프

## 결론

양산단층계의 지진활동 자료를 불완전한 조선시대 이전의 자료와 완전한 그 이후의 자료로 구분하여 극대치 이론과 최우도 방법을 적용하여 통계적으로 분석함으로써 다음의 결론을 얻었다.

1. 지진활동 매개변수인 연간 지진 발생률, 규모-빈도 관계식에서의  $b$ -값, 최대 가능 규모들이 계산되었으며 양산단층의 각 구역별로 이들을 구한 결과 각각의 값은 서로 상당한 차이를 보였다. 이 사실은 제안된 구역경계가 사실일 가능성을 시사해준다. 규모 5.0 이상의 지진들을 대상으로 할 때 단층 전체에 대한  $b$  값은 0.85로 나타났다. 각 구역별 최대 예상 지진 규모는 북부, 중부, 남부 구역별로 각각 5.2, 6.8, 6.0이며 단층 전체로서는 6.7이다. 이들 최대규모들의 재래기간들은 1000년을 초과한다.

2. Wesnousky(1994)는 2가지의 지진 발생 모델을 제안하였는데 첫번째는 Gutenberg-Richter 모델을 제안하였는데 두 번째는 특성지진 모델이다. 본 연구에서는 양산단층의 지진 데이터로부터 규모-누적 빈도 곡선을 작성한 후 이로부터 양산단층의 지진 데이터가 Gutenberg-Richter 모델보다 특성지진 모델에 잘 맞는 것임을 보였다. 각각의 구역에 대한 지진 자료도 역시 분석해 보았으나 자료가 너무 적은 탓으로 의미 있는 결과를 얻지 못하였다.

## 사사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(96-0703

-05-01-3) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김영화, 이기화, 성일경, 1990, 경주 북쪽에 있어서의 양산단층의 구조에 관한 지전기학적 연구, 지질학회지, 26, 393-403.
- 김인수, 김종렬, 1983, 경상분지 연양단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질, 16, 11-18.
- 박수희, 1982, 지진과 방재, 신광출판사.
- 이기화, 1998, 한반도 역사지진 및 계기지진 분석, 한국지진재해도 분석을 위한 기초자료, 한국원자력연구소.
- Berryman, K. and Sarah Beanland, 1991, Variation in fault behavior in different tectonic provinces of New Zealand, Jour. of Struct. Geology, 13, 2, 177-189.
- Bullen K.E. and Bolt, B.A., 1985, An introduction to the theory of seismology, Cambridge University Press.
- Burridge, R. and Knopoff, L., Model and theoretical seismicity, 1967, 57, 341-371.
- Burton, P.W., 1979, Seismic risk in southern Europe through to India examined using Gumbel's third distribution of extreme values, Geophys. J.R. astro. Soc., 59, 249-280.
- Burton, P.W. and Makropoulos K., 1985, Seismic risk of Circum-Pacific earthquakes: II. Extreme values using Gumbel's third distribution and the relationship with strain energy release, Pure and Appl. Geophys. 123, 849-869.
- Carlson, J.M and Langer, J.S., 1989, Properties of earthquakes generated by faults dynamics, Physical Review Letters, 62, 2632-2635.
- Cosentino, P. Ficara, V. and Luzio, D., 1977, Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics, Bull. Seism. Soc. Am., 67, 1615-1623.
- Crone, J.A., Machette, M.N., Bonilla, M.G., Lienkaemper, J.J., Pierce, K.L., Scott, W.E. and Bucknam, R.C., 1987, Surface faulting accompanying the Borah Peak earthquake and segmentation of the Lost River fault, Central Idaho, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 739-770.
- Gumbel, 1958, Statistics of Extremes, Columbia Univ. Press, New York.
- Gutenberg-Richter, 1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, Bull. Seism. Soc. Am., 46, 105.
- Kang, P.J., 1984, A study on remote sensing application for the tectonic-framework of the Korean Peninsula, Ph.D. thesis, Dept. Geology, Korea University.
- Kasahara, K., 1981, Earthquake mechanics, Cambridge University Press.
- Kijko, A. and Dessokey, 1987, Application of the extreme magnitude distributions to incomplete earthquake files, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1429-1436.
- Kijko, A., 1990, Estimation of earthquake hazard parameter for incomplete and uncertain data files, Natural Hazards, 3, 1-13.
- Kim, S.J., 1980, Study of earthquakes of Korea based on the local data of 1926-1943, Jour. Kor. Inst. Mining Geol., 20, 140-146.
- Kim, Y.H. and Lee, K., 1988, A geoelectric study on the Yangsan Fault in the South of Kyungju, J. Geol. Soc. Korea, 24, 47-61.
- Lee, D.S., 1988, Geology of Korea, Geological Society of Korea, Kyohak-sa.
- Lee, K. and Jung, H.O., 1980, A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula, J. Geol. Soc. Korea, 16, 32-45.
- Lee, K. and Na, S.H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault, J. Geol. Soc. Korea, 19, 127-135.
- Lee, K., Jeong, B. and Kim, Y., 1985, A geophysical study of the Yangsan Fault

- Area(II), J. Geol. Soc. Korea, 21, 79-89.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan Fault System : Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin, J. Geol. Soc. Korea, 27, 434-449.
- Lee, K., Cheon, K. and Um, C.R., 1992, Geoelectric surveys of the Dongrae fault, the Eonyang fault and the Ilkwang fault : Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin, J. Geol. Soc. Korea, 28, 218-226.
- Lee, K. and Um, C.R., 1992, Geoelectric surveys of the Ulsan fault : Geophysical studies on the major faults in the Kyeongsang Basin, J. Geol. Soc. Korea, 26, 32-39.
- Lee, K. and Lee, J.H., 1997, Geoelectric study on the possible seismic segment boundaries of the Yangsan fault zone, Geoscience Journal, 1, 16-25.
- Lee, K., 1997, Analysis of Korean earthquake data in historical documents and publications during the Japanese rule of Korea., KAERI, 63pp.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W., 1983, Seismic risk of Circum-Pacific earthquakes, I. Strain energy release, Pure and Appl. Geophys., 121, 247-267.
- Makropoulos, K.C. and Burton, P.W., 1985, Seismic hazard in Greece. I. Magnitude recurrence, Tectonophysics, 117, 205-257.
- Mei, S., 1960, The seismic activity of China, Izv. Geophys. Series, p. 381-395.
- Musha, K., 1951, Catalog of earthquakes and volcanoes which occurred in and near Japan(in Japanese), Mainichi Press.
- Noh, M. and Kim, Y.J., 1996, Sensitivity analysis of seismic risk curve of Korea, J. Geol. Soc. Korea, 32, 199-207.
- Okada, A., Watanabe, M., Sato, H., Jun, M.S., Jo, W.R., Kim, S.K. and Oike, K., 1993, Active fault topography and trench survey at the central part of the Yangsan fault, southeast Korea, Proceedings of the Joint Conference of Seismology in East Asia, Seismology in East Asia, Seismological Society of Japan, 64-65.
- Osella, A.M., Sabbione, N.C. and Cernadas, 1992, Statistical analysis of Seismic data from northwestern and western Argentina, Pure and Appl. Geophys., 139, 277-292.
- Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J., 1984, Fault behavior and characteristic earthquakes from the Wasatch and San Andreas faults, J. Geophys. Res., 89, 5681-5698.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 974-1002.
- Wesnousky, S.G. Scholtz, C.H., Shimazaki, K. and Matsuda, T., 1983, Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting, J. Geophys. Res., 88, 9331-9340.
- Wesnousky, S.G., 1994, The Gutenberg-Richter or Characteristic Earthquake distribution, Which is it?, Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1940-1959.
- Working group on California Earthquake Probabilistics, 1995, Seismic hazards in southern California : Probable earthquakes, 1994 to 2004, Bull. Seism. Soc. Am. 85, 379-439.
- Yeats, R.S. and Schwartz, D.P., 1990, Paleoseismicity : Extending the record of earthquakes into prehistoric time, Episodes, 13, 9-12.
- Yegulalp, T.M. and Kuo, J.J., 1974, Statistical prediction of the occurrence of maximum magnitude earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 64,393-414.

이기화, 이전희, 경제복

---

이기화, 이전희

서울대학교 지질학과

151-742, 서울특별시 관악구 신림동 산56-1

TEL : (02)883-1572

FAX : (02)886-0543

경제복

한국교원대학교 지구과학교육과

363-791, 충북 청원군 강내면 다락리

TEL : (0431)230-3742

FAX : (0431)232-7176

e-mail : jbkung@knuecc-sun.knue.ac.kr