

중국-한국 육괴에서 진도-규모의 관계식 추정

Intensity-Magnitude Relation in the Sino-Korean Craton

이기화*
Kichwa Lee

이전희**
Jun Hee Lee

ABSTRACT

In order to establish the intensity-magnitude relation for the Korean earthquakes, those relations for the earthquakes in the Sino-Korean craton were estimated. In this process, earthquake data of northeastern China region whose geological environment is similar to Korea Peninsula were also utilized. These data were analyzed not only with linear fit, but also with non-linear fit. The following relation, $M=0.57 \times I_c + 2.86$, seems appropriate for the present, but its validity should be tested more in the future.

주요어: *Intensity-magnitude relation, Sino-Korean craton, northeastern China, Korean Peninsula,*

1. 서론

한반도는 유라시아 판내에 위치하여 이의 지진활동은 시공간적으로 매우 불규칙하며 전형적 판 내부 지진활동의 특성을 보이고 있다(Lee, 1987).

잘 알려진 바와 같이, 지진자료는 역사지진과 계기지진자료로 나뉘며 우리 나라에는 약 2000 년 간의 역사문헌에서 검색된 역사지진자료가 있어 계기지진자료와 함께 한반도 지진활동 특성 분석의 기초자료로 활용되어 왔다. 역사지진자료는 계기지진자료에 비해 관측기간이 길어 지진활동의 중·장기 특성 분석에 유용한 정보를 제공하나, 근본적으로 정성적인 자료이므로 정량적인 해석에는 한계가 있다. 특히 역사지진은 일반적으로 규모를 알 수 없으며 진도값만을 계산할 수 있다. 최근 가옥모형 및 인공지진과 작성을 통한 역사지진의 규모를 추정하는 연구가 있었으나 아직 확실한 결론이 나오지는 않은 실정이다(서정문, 최인길, 1998). 따라서 역사지진의 연구에 있어 필수적인 규모값의 평가를 수행하기 위해서 계기지진자료를 이용하여 진도-규모의 관계식을 정립할 필요가 있다.

본 연구에서는 한반도만으로는 부족한 지진자료를 보충하기 위하여 이와 지질환경이 유사한 중국 북동부에서 발생한 지진자료를 이용하였다. 또한 중국 북동부의 응력 방출량의 시간적 변이(Mei, 1960)는 한반도의 값과 매우 유사하다(Lee, 1998).

* 서울대학교 지구환경과학부, 교수

** 기상청 지진담당관실, 기상연구소

따라서 본 연구에서는 중국 북동부 5개 성(省)과 황해에서 발생한 지진들을 분석하여 각각 진도와 규모의 관계식을 계산하였으며 끝으로 이들을 한반도에서 발생한 지진과 함께 종합하여 최종적으로 분석하였다. 한반도와 황해 및 중국 북동부 5개성에 해당하는 지역은 Fitches 등(1991)이 제안한 중국-한국 육괴(Sino-Korea craton) 지역과 대체로 일치한다(Fig. 1).

2. 본론

2.1. 진도와 규모와의 관계

규모란 지진 자체의 크기를 나타낸 에너지 총량의 값으로 보통 소수 첫째 자리까지 나타내며 규모 1의 증가는 에너지 값의 약 30 배씩의 증가를 의미한다. 반면 진도란 발생한 지진에 따라 어떤 장소에서 진동의 정도를 사람의 느낌이나 구조물의 흔들린 정도에 따라 계급으로 구분한 값으로 보통 정수의 형태로 나타내며 기준에 따라 몇 가지 등급으로 구분된다. 일반적으로 전세계적으로 많이 쓰이는 MM 진도는 I부터 XII 까지 12 단계로 구분되며 일본 기상청에서 사용하는 JMA 진도는 0부터 7까지 8 단계로 구분되며 이 중 5와 6은 강, 약 두 등급으로 세분되어 총 10 단계로 구분된다. 다시 말하여 규모와 진도와의 관계는 빛의 광원과 밝기(조도)와의 관계와 유사하며 규모는 어느 장소에서든 동일하나, 피해정도(진도)는 진원으로부터의 거리에 따라 다르게 나타난다.

그러나 진앙에서의 진도(최대진도)는 규모의 값과 어느 정도 규칙적인 관계식을 설정할 수 있으며 따라서 그 지역의 지질학적 조건에 따라 다르게 나타나므로 보통 경험적으로 이루어진다.

규모 결정이 이루어지지 않은 지진에 대하여 진앙지의 MM 진도로부터 지역규모값 M_L 을 변환해 내는 식은 여러 전문가들에 의해 다음과 같이 계산되었다.

$$M_L = 1/2 \times I_e + 1.75 \quad (2.2.1)$$

$$M_L = 2/3 \times I_e + 1.0 \quad (2.2.2)$$

$$M_L = 2/3 \times I_e + 0.44 \quad (2.2.3)$$

$$M_L = 2/3 \times I_e + 1.6 \quad (2.2.4)$$

식 (2.2.1)은 미국 중부의 지진자료에서 계산된 식이며(Nuttli and Hermann, 1978), 두 번째 식 (2.2.2)은 Gutenberg 와 Richter(1956)가 미국 서부의 자료에 대하여 계산한 식으로 전세계에서 가장 많이 이용된다. 세 번째 공식 (2.2.3)은 Mei(1960)가 중국의 자료로부터 도출한 식이며 네번째 (2.2.4)식은 Karnik(1961)이 유럽의 지진자료를 이용하여 도출한 식이다. 전문가들이 제시한 공식들은 각각의 지역 특성을 반영하므로 모두 동일한 중요성을 지니고 있다.

그밖에 세계 각국에서의 진도-규모 관계식으로는 Tinti 등(1986)이 이탈리아 지역을, Nowroozi(1985)가 이란 지역을, Greenhalgh 등(1988)이 오스트레일리아 지역을 대상으로 하여 구한 바 있다.

2.2. 본 연구에 사용된 지진자료

우리나라에서 계기지진은 1905년부터 인천에 지진계가 설치된 이후부터의 자료를 말하나 이것이 체계적으로 정리되기 시작한 것은 1978년 기상청에서 전국적인 관측망이 설치되어 본격적인 지진관측이 시작된 이후부터의 일이다(기상청, 2001). 기상청의 자료에서는 1978년부터 2000년까지

지 총 469 회의 국내지진이 관측되었으며 이중 유감지진은 147 회이다. 기상청에서는 2000 년까지 JMA 규모를 발표하였으나 2001 년부터 MM 규모로 대체되었다.

본 연구에서는 1978 년 이전의 지진자료는 분석에서 제외하였다. 이 지진자료는 자료의 출처가 다양할 뿐만 아니라 여러 가지 규모를 혼용하고 있어 규모를 균질화하는 작업이 선행되어야 하기 때문이다.

본 연구에서는 한반도만의 지진자료를 이용하여 진도-규모의 관계식을 도출하기에는 자료가 부족한 것으로 판단, 한반도와 지질환경이 유사한 중국 북동부에서 발생한 지진자료를 이용하였다. 중국 및 황해 지역에서 발생한 지진자료는 중국 지진국(地震局)에서 발행한 중국근대지진목록(中國近代地震目錄, 1999)에서 발췌하였다. 여기에는 1912 년에서 1990 년까지 중국 및 그 일대에서 발생한 규모 4.7 이상의 지진 4298 회가 기록되었다. 이 자료에서는 유감지진의 경우 MM 진도가 이용되었으며 그 규모값은 계기지진의 경우 표면파 규모를 우선적으로 나타내되 실체파 규모(m_b)나 지역규모(M_L)만을 알 수 있을 경우 이를 사용했으며 이를 평가할 수 없는 역사지진의 경우 기록에서 진앙진도값을 계산한 다음에 다음의 변환식을 거쳐서 규모값을 계산하였다.

$$M=0.58 \times I_s + 1.5 \quad (2.2.1)$$

본 연구에서는 이들 자료 가운데 중국 북동부 지역 5 개 성(省) 및 황해에서 발생한 지진자료를 이용하였다. 따라서 이 자료들과 일관성을 유지하기 위하여 기상청에서 발표한 한반도 발생 지진 가운데 규모 4.5 이상의 자료들을 분석에 이용했다. 본 연구에서 이용한 지진들의 각 지역은 Fig. 1 에 나타낸 바와 같다.

2.2. 각 지역의 지진학적 특성

(1) 지린성(吉林省)

지린성(吉林省)은 한반도 바로 위에 북쪽에 위치한 간도지역 대부분을 포함하고 있는 성으로 남쪽으로는 두만강과 압록강의 대부분이 위치하며 북쪽으로는 송화(松花)강이 위치하고 있다. 본 연구에서 사용한 목록에서는 이 지역에서 총 29 회의 지진이 발생했으며 그 중 유감지진은 5 회였다. 이 가운데 규모가 가장 큰 지진은 1917 년 7 월 31 일 훈춘 남서쪽에서 발생한 규모 7.5 의 지진이었으며 진도가 가장 큰 지진은 1960 년 4 월 13 일 유슈 근처에서 발생한 진도 VII(규모 5.8)의 지진이었다.

(2) 랴오닝성(遼寧省)

랴오닝성(遼寧省)은 지린성 바로 서쪽에 위치한 성으로 요동반도와 그 일대를 차지하고 있는 만주지역이다. 이 지역에서는 목록에 나온 기간 동안 총 27 회의 지진이 발생했으며 그 중 유감지진은 10 회가 발생했다. 이 가운데 가장 큰 지진은 1975 년 2 월 4 일 만주 하이칭(海城) 지역에서 발생한 규모 7.5, 진도 IX+에 해당하는 지진이었다. 이는 또한 중국 당국이 지진을 미리 예보하여 피해를 최소화시킨 사례로도 널리 알려져 있다.

(3) 헤베이성(河北省)

헤베이성(河北省)은 중국의 수도인 베이징(北京) 및 톈진(天津)이 위치한 성으로 많은 인구가 거주하고 있으므로 지진 위험도를 평가하는데 있어 매우 중요한 지역이다. 목록상의 기간 동안에

145 회의 지진이 발생하였으며 그 가운데 37 회가 유감지진이었다. 이 가운데 가장 크고 잘 알려진 지진은 1976년 7월 28일 탕산(唐山) 지역에서 발생한 지진으로 규모는 7.8, 진도는 XI에 해당하는 대지진이었다. 이는 하이켄 지역의 성공적인 지진예보 이후 자신을 가졌던 중국 지진국에서 예측에 실패한 지진으로도 알려져 있다.

(4) 산시성(山西省)

산시성(山西省)은 헤베이성에서 더 서쪽에 위치한 지역이다. 이 지역은 우타이(五台)산맥이 가로지르고 있는 비교적 고지대이며 타이위안(太原) 등의 도시가 있다. 이 지역에서 목록의 기간 동안 36 회의 지진이 발생했고 그 중 유감지진은 18 회였다. 가장 큰 지진은 1989년 10월 19일에 잉셴(應縣) 지역에서 발생했으며 이의 규모 5.9, 진도는 VIII에 해당했다.

(4) 산둥성(山東省)

산둥성(山東省)은 황해 바로 서쪽에 위치한 성으로 산둥반도와 화북평야가 위치한 저지대 지역이며 칭따오(靑島), 지난(濟南) 등의 도시가 위치한 곳이다. 이곳에서는 본 목록의 기간 동안 총 10 차례의 지진이 발생했으며 그 중 8 회가 유감지진이었다. 이 가운데 가장 큰 사건은 1937년 8월 1일 하핑(荷萍) 지역에서 일어난 규모 7.0, 진도 IX에 해당하는 지진의 발생이었다.

(5) 황해(黃海)

황해(黃海)는 우리나라에서는 서해라고도 불리며 한반도와 중국의 경계에 속하는 바다이다. 이곳에서는 본 목록에서 17 회의 지진이 기록되었으며 그 중 6.5 규모의 지진도 3 차례나 발생했으나 유감지진은 없었다.

(6) 한반도

위에서 설명한 바와 같이 한반도에서는 1978년부터 2000년까지 총 469 회의 국내지진이 기록되었으며 이 중 유감지진은 147 회 발생했다. 한반도에서는 20세기 들어 두 차례 큰 지진을 겪었는데 이는 1938년의 쌍계사 지진 및 1976년의 홍성 지진이다. 이 가운데 쌍계사 지진은 기상청 지진관측망이 설립되기 이전의 지진이라 본 연구에서는 이용되지 못했으며, 여기에서는 1978년 이후 국내에서 발생한 지진 가운데 규모 4.5 이상의 지진 총 13 회 가운데 유감지진 11 회를 이용하였다. 또한 기상청에서는 2000년 이전의 지진자료의 경우 JMA 진도를 이용하였으므로 이를 MM 진도로 변환하는 작업을 수행했다. 이에 따르면 이 기간 중 홍성 지진이 진도 VIII로 가장 피해가 컸으며 가장 큰 규모는 5.3 이었다.

2.3. 연구 결과

(1) 각 지역에서의 지진활동 매개변수

Table 1은 2.2 절에서 조사한 각 지역별 최대 규모 및 진도, 발생 빈도(activity rate) 및 Gutenberg-Richter 식에서의 b-값 등의 지진활동 매개변수(seismicity parameter)를 최소자승법으로 구한 결과를 보여준다. 이 결과를 보면 전반적으로 중국 지역에서의 Gutenberg-Richter 식의 b-값이 한반도에 비해 낮은 값을 갖는 것을 볼 수 있으며 특히 황해 지역의 경우 이 값은 특히 낮은 편이다. 이는 중국 지역에서 작은 규모의 지진이 누락되는 경우가 많은 데에서 나온 결과로 보인다. 또한 한반도 지진의 경우 과거의 연구에서 나온 b-값보다 높은 값이 나타났는데 이는 중국지진과의 자료의 일

관성을 위하여 최소 규모(threshold magnitude)값을 4.5로 높인 것이 그 이유로 보여진다.

발생 빈도의 경우는 해베이성이 가장 높은 값을 나타냈는데 이는 당산 지진의 경우처럼 지진활동이 활발한 지역이라고 볼 수도 있으나 수도가 위치하여 많은 인구가 분포하는 지역인 탓에 소규모 지진들도 누락되지 않고 모두 기록된 탓으로 볼 수도 있다.

(2) 진도-규모 관계식

한반도 및 중국 북동부 지역에서 발생한 지진들을 이용하여 규모-진도값을 그래프상에 도시한 후에 최소자승법을 이용한 회귀곡선식으로 규모-진도 관계식을 구해 보았다. 이에 따르면 각 지역에서의 관계식은 다음과 같이 계산된다.

$$(지린성) \quad M=0.45 \times I_s + 2.64 \quad (2.3.1)$$

$$(랴오닝성) \quad M=0.82 \times I_s + 0.69 \quad (2.3.2)$$

$$(해베이성) \quad M=0.51 \times I_s + 1.86 \quad (2.3.3)$$

$$(산시성) \quad M=0.56 \times I_s + 2.03 \quad (2.3.4)$$

$$(산둥성) \quad M=0.86 \times I_s + 0.55 \quad (2.3.5)$$

$$(한반도) \quad M=0.65 \times I_s + 1.13 \quad (2.3.6)$$

$$(전체 지역) \quad M=0.57 \times I_s + 1.76 \quad (2.3.7)$$

황해 지역은 유감지진이 기록된 바가 없으므로 본 연구에서 진도-규모 관계식의 결정에는 이용할 수 없었다. Fig. 2~Fig. 8에 이 결과를 그림으로 도시하였다.

결론적으로 본 연구에서 이용된 한반도 및 중국 북동부 지역의 진도-규모 관계식을 식 (2.3.7)과 같이 도출할 수 있었으나 이 결과를 그대로 우리나라에 적용할 수 있을지는 앞으로 더 지켜보아야 할 과제로 보인다.

3. 결론

본 연구에서 한반도와 중국 북동부 지역의 지진들을 대상으로 구한 결과 $M=0.57 \times I_s + 2.86$ 의 값을 구했다. 그러나 바로 이 값을 우리나라 진도와 규모의 관계식에 적용할 수 있을지 여부는 아직 더 연구할 과제로 여겨진다.

Cavallini와 Rebez(1996)는 진도와 규모의 관계식을 직선이 아닌 S자 곡선으로 나타낸 바 있다. 이는 규모와 최대진도와의 관계식을 구하는데 있어 선형이 아닌 비선형 방정식으로서 잘 알려진 Error(Erf) 함수를 이용하며 일반적으로 $M=\square+\square\text{Erf}'[I/6-1]$ 의 형태로 나타난다. 본 연구에서는 중국 북동부 및 한반도의 전체 지진자료를 이용하여 회귀식으로 이 식에서 잘 맞는 상수값을 구한 결과 $\square=3.17$, $\square=1.74$ 의 결과를 얻었다. 그러나 선형식과 비선형식 가운데 우리나라에 더 알맞은 관계식이 무엇인지 아직 확실히 결정하기는 이른 것으로 생각된다.

3. 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터의 ‘한반도 지진의 지진운동’ 제 1-1 세부과제 2차년도 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Table 1. The Seismicity parameters of each regions in this study

Division	Max. Intensity	Max. Magnitude	Activity rate(/year)	b-value
Jilin Province	VII	7.5	0.37	0.79
Liaonin Province	IX	7.5	0.35	0.84
Hebei Province	XI	7.8	1.86	0.92
Shanxi Province	VIII	5.9	0.46	0.87
Santung Province	IX	7.0	0.13	0.64
The Yellow Sea	-	6.5	0.22	0.48
Korean Peninsula	VIII	5.3	0.59	1.13



Fig. 1. The map of Sino-Korean craton. The earthquakes occurred in five provinces of China, the Yellow sea area, and the Korean Peninsula were used in this study. In this figure, A, B, C, D, E, F, G represent Jirin, Liaoning, Hebei, Shanxi, Santung Province, the Yellow sea, and the Korean peninsula, respectively.

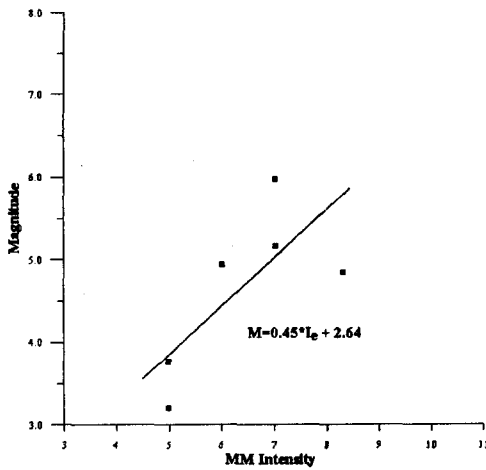


Fig. 2. The magnitude-intensity regression curve of earthquakes in Jilin Province

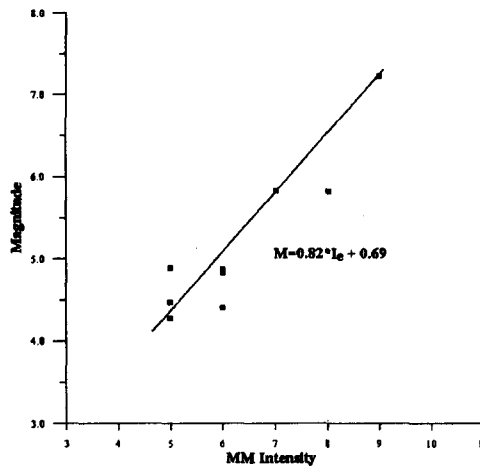


Fig. 3. The magnitude-intensity regression curve of earthquakes in Liaonin Province

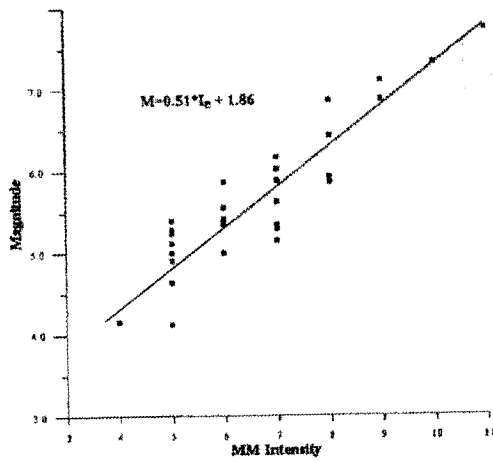


Fig. 4. The magnitude-intensity regression curve of earthquakes in Hebei Province

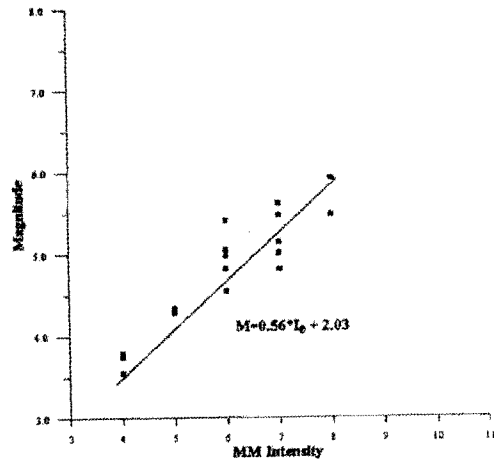


Fig. 5. The magnitude-intensity regression curve of earthquakes in Shanxi Province

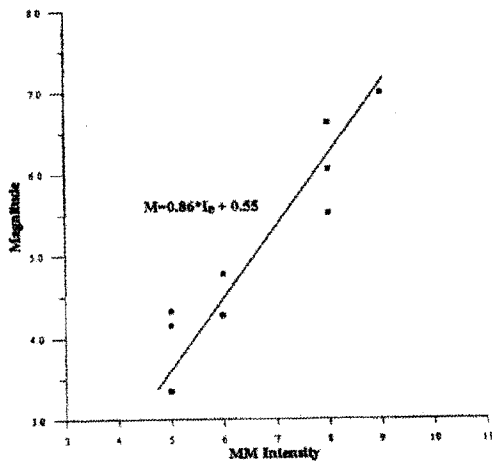


Fig. 6. The magnitude-intensity regression curve of earthquakes in Santung Province

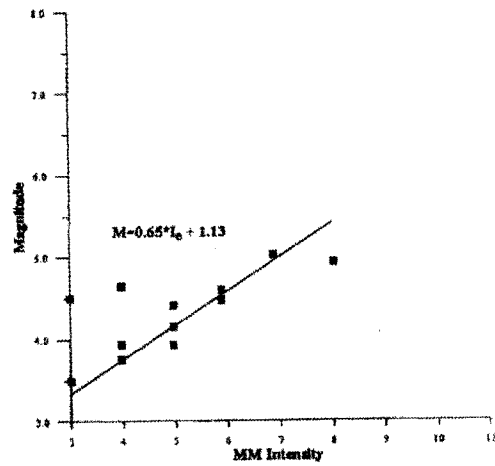


Fig. 7. The magnitude-intensity regression curve of earthquakes in the Korean Peninsula

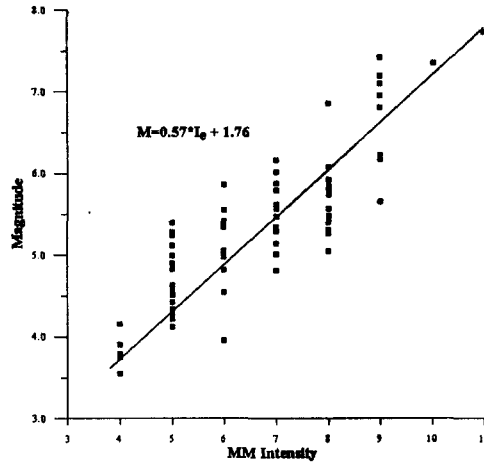


Fig. 8. The magnitude-intensity regression curve of total earthquakes in this study

참고문헌

1. 기상청 (2001), "1978-2000 지진관측보고", 기상청, 서울.
2. 서정문, 최인길 (1998), "지진특성 및 가옥의 노후도를 고려한 역사지진의 지진규모 추정", 한국 지진공학회 논문집, 제 2권 4호, pp 1-10.
3. 中國地震局震害防禦司, (1999), "中國近代地震目錄", 中國科學技術出版社, 北京
4. Cavallini, F. and Rebez, A. (1996), "Representing Earthquake Intensity-Magnitude Relationship with a Nonlinear Function", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.86, No.1, pp. 73-78.
5. Fitches, W. R., Fletcher, C.J.N. and Jiawei, X. (1991), "Geotectonic relationships between cratonic and Korea", Journal of Southeast Asian Earth Sciences, Vol.6 pp. 185-199.
6. Greenhalgh, S.A., Denham, D., McDougall, R., and Rynn, J.M.W., (1988), "Magnitude-Intensity Relations for Australian Earthquakes", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.78, No.1, pp. 374-379.
7. Gutenberg, B. and Richter C.F., (1956), "Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.46, pp. 105-145.
8. Karnick, V., (1961), "Seismicity of Europe, Progress Report II", International Union of Geodesy and Geophysics, Monograph, 9
9. Lee, K. (1987), "Earthquakes": in Lee, D.S. (editor), "Geology of Korea", Kyohaksa, Korea
10. Lee, K. (1988), "Historical earthquake data of Korea", Jour. of the Korea Geophy. Soc. 1, pp 3-22.
11. Mei, S., (1960), "The Seismic Activity of China", Izv. Geophys., 121, 247-267.
12. Nowroozi, A. A. (1985), "Empirical Relations between Magnitude and Fault Parameters for Earthquakes in Iran", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.75, No.5, pp. 1327-1338.
13. Nuttli, O.W. and Hermann, (1978), "Credible Earthquakes for the Central United States", Report 12, Misc, paper S-73-1, U.S. Army Eng. Waterways Exp. Station(Vicksburg)
14. Tinti, S., Vittori, T. and Mulargia, F. (1986), "Regional Intensity-Magnitude Relationships for the Italian Territory", Tectonophysics, Vol.127, pp. 129-154.