

서울 수도권 일원의 지진위험 분석(I)

An Analysis of Seismic Risk of Seoul Area(I)

이 기 화* 이 태 국**

Lee, Kie hwa Lee, Tae Gook

국문요약

MM진도(Modified Mercalli Intensity) V이상의 한반도 지진자료에 의거하여 서울 수도권일원(위도 37.0° ~ 37.8° N, 경도 126.5° ~ 127.5° E)의 확률론적인 지진위험도가 점지진원방법에 의해 추정되었다. 전지진자료를 이용하여 추정된 지진위험도는 비교적 완전하다고 여겨지는 조선시대이후의 지진자료를 이용하여 추정된 지진위험도보다 더 낮다고 추정되었다. 수평지반가속도 0.1g이상의 파괴적인 지진은 90%의 초과확률로서 전지진자료와 조선시대이후의 지진자료가 이용되었을 때 각각 500년과 200년기간에 발생한다.

주요어 : 확률론적 지진위험도, 지진활동, 서울 수도권지역, 점지진원방법

ABSTRACT

The probabilistic seismic risk in Seoul Metropolitan Area(latitude 37.0° ~ 37.8° N, longitude 126.5° ~ 127.5° E) based on all Korean earthquake data of MM Intensity equal to or greater than V is evaluated by point source method. The seismic risk estimated from all data turned out to be lower than that from the data since the Choseon Dynasty during which seismic data appear to be rather complete. The damaging earthquake of peak horizontal ground acceleration greater than 0.1g turns out to occur with 90% probability of being exceeded in 200 years and 500 years when the data since Choseon Dynasty and all data are used, respectively.

Key words : probabilistic seismic risk, seismicity, seoul metropolitan area, point source method

1. 서 론

근년에 우리나라에서 비교적 낮은 지진활동이 지속되었으나 지난해(1996년)와 금년에 영월과 경주에서 규모 4.0이 넘는 지진들이 발생하여 지진에 대한 국민의 경각심이 고조되었다. 과거의 역사기록에 의하면 우리나라는 한반도 전역에서 다수의 파괴적인 지진들이 발생하였으며, 특히 15-18세기에는 놀라울 만큼 높은 지진활동이 지속되었다.⁽¹⁾ 현재 우리나라에서 지진위험도에 관한 연구는 아직 시작단계에 있으며 주로 한반도 전역의 지진위험도분석^{(2),(3)}에 제한되었고 특정한 지역을 대상으로한 연구는 수행되지 않았다.

본 연구에서는 우리나라의 수도이자 경제, 문화, 사회활동의 중심지인 서울일원의 지진위험도를 분

석하고자 한다. 현재 서울의 인구는 1000만을 넘으며, 수많은 고층건물과 아파트 등 지진재해에 취약한 건조물이 다수 있다.

서울은 지질학적으로 경기육괴에 속하며 Lee 등⁽⁴⁾에 의하면 경기육괴에서 서기 27년부터 1984년까지 260여회의 역사 및 계기지진 기록이 있으며 서울 일원은 육괴내에서 지진활동이 가장 활발했던 지역에 속한다. 특히 서기 89년에 발생한 MM진도 IX의 지진으로 집들이 무너지고, 많은 사람들이 사망했다는 기록이 있다. 앞으로 서울에서 MM진도 IX의 강진이 발생할 경우 그 재해는 가히 가공할만 하리라고 예상된다.

본 연구에서는 서울 일원의 지진위험도를 분석하기 위하여 점지진원방법(point source method)에 의한 확률론적인 접근이 시도되었다. 방법은 Milne와 Davenport⁽⁵⁾에 의하여 제시되었으며, 과거지진들의 진앙을 지진원으로 보고, 지진감쇠공식을 적용하

* 정회원 · 서울대학교 지질학과 교수

** 서울대학교 지질학과 석사과정

여 임의의 격자 위의 일련의 점들에서 누적빈도분포를 얻어 이를 확률론적으로 분석한다. 점지진원방법의 결점은 지진원의 규정에 지질학적 정보가 고려되지 않는 점이다. 따라서 이 방법은 과거 지진활동이 그 지역 지진활동을 완전하게 표현한다는 전제하에 유효하다.

한편 Cornell⁽⁶⁾이 제시한 구역원방법(zonal source method)은 연구지역을 지진활동이 균질한 구역 또는 선들로 나누고 각 구역에서 지진발생률이 일정하며 지진발생은 Poisson분포를 따른다고 가정한다. 본 연구에서는 수도권 일원을 지진활동이 균질한 구역으로 나누는데 필요한 지질 및 지진학적 정보가 부족하기 때문에 구역원방법을 사용하지 않았다. 한반도 전체에 대한 구역원방법을 이용한 지진위험분석이 Lee 와 Jin⁽⁵⁾에 의해서 행해졌다.

구역원방법은 지진활동(seismicity), 구조(tectonics) 그리고 그 지역의 지질에 기초하여 각 연구자에 의해 각기 다른 지진구로 나누어지는 문제점이 있다.

2. 지진발생 모델과 확률분포

지진발생이 random process는 아니지만 이를 예측할 수 있는 결정론적인 방법이 없으므로 확률론적 분석을 위하여 지진발생에 관한 통계적 모델을 가정하지 않을 수 없다. 본연구에서는 Gan과 Tung⁽⁷⁾의 다음 통계적 모델을 적용하였다.

- (1) 지진 발생은 Poisson 분포를 따른다. 즉, T 기간동안 지진발생수 n 의 확률분포는 다음과 같이 주어진다.

$$P(n = k) = \frac{\exp(-\lambda T)(\lambda T)^k}{k!} \quad (1)$$

$k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 이고, λ 는 연간지진발생률이다.

- (2) 지진 규모 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, k)$ 는 통계적으로 독립이고, 다음 확률누적분포함수의 X 와 동일한 분포를 이룬다.

$$P(X \leq x) = F(x) \quad (2)$$

- (3) T 기간동안 지진발생수 n 과 지진 규모 X_i 는 통계적으로 독립이다. 즉, 임의의 자연수 k 와

규모 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots)$ 에 대해서 다음이 성립된다.

$$P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n | n = k) = P(X_1 \leq x_1) \cdot P(X_2 \leq x_2) \cdots P(X_k \leq x_k) \quad (3)$$

여기서 $P(\cdot | \cdot)$ 는 조건 확률을 의미한다.

위의 (1), (2) 및 (3)으로부터 극대치(extreme value)의 확률분포는 다음과 같이 주어진다.⁽⁷⁾

$$G(x) = P(X^* \leq x) = \exp(-\lambda T(1 - F(x))) \quad (4)$$

여기에서 $X^* = \max(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 이다.

만일 $F(x)$ 가 주어지면 $G(x)$ 는 (4)에 의하여 결정된다.

한편 규모와 지진 빈도수 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.⁽⁸⁾

$$\log N = a - bM \quad (5)$$

여기서 N 은 규모가 M 보다 크거나 같은 지진의 총 수를 의미하고, 상수 a 는 지진의 전체 발생수, 상수 b 값은 지진의 규모가 증가함에 따라 발생빈도가 감소하는 비율과 연관된다. 위의 관계식으로부터 규모의 확률누적분포함수는 다음과 같이 유도된다.

$$F_M(x) = P(M \leq x) = 1 - \exp(-\beta_M(x - m)) \quad x \geq m \quad (6)$$

여기서 m 은 사용된 지진의 최소규모를 의미하고, β_M 과 상수 b 값 사이에는

$$\beta_M = b \cdot \ln 10$$

이라는 관계가 성립한다.

한반도 역사지진의 경우, 그 규모는 결정할 수 없고 오직 진도만을 추정할 수 있다. 만일 한반도 지진들의 최대진도 I_0 와 규모 M 사이에 California 지진의 경우처럼

$$M = 1 + \frac{2}{3} I_0$$

와 유사한 선형관계가 성립한다고 가정하면⁽⁹⁾ 진도의 확률누적분포함수는 다음과 같이 보여질 수 있다.

$$F_{i_0}(x) = P(I_0 \leq x) = 1 - \exp(-\beta(x - i_0)) \quad x \geq i_0 \quad (7)$$

여기서 i_0 는 사용된 최소 지진 진도값을 의미한다. 지진공학적 측면에서 지진위험도의 평가는 보통 주어진 기간내에 특정위험도, 예로서 지반가속도가 발생할 확률로서 표현된다. 즉, 어떤 건조물의 수명을 T라고 할 때, 그 건조물이 존속할 기간에 특정한 확률로서 발생할 설계지진이 문제가 된다.

식 (4)를 변형하면

$$G(x)_{x=z} = \exp(-\lambda T(1 - F(Z))) = 1 - p(X^* > Z) \quad (8)$$

을 얻고, 그 해는

$$Z_{p,T} = Z(\lambda; p, T) \quad (9)$$

로 주어진다. 이 경우 T년 기간에 가장 큰 지진이 진도(또는 규모) $Z_{p,T}$ 를 초과할 확률이 p가 되는 것이다.⁷⁾ 식 (8)의 $F(x)$ 에 식 (7)의 확률누적분포함수 $F_{i_0}(x)$ 로 대입하여 정리하면 $Z_{p,T}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Z_{p,T} = -\ln(-\ln(1-p)/\lambda T)/\beta + i_0 \quad (10)$$

3. 위험도 계산

본 연구에서 역사지진자료는 이기화⁽¹⁾의 지진목록과 계기지진자료는 이기화⁽¹⁾와 기상청의 자료를 이용하였다. 지진자료 기간은 서기 27년부터 1996년까지를 포함한다. 본 연구지역은 그림 1과 같이 서울을 중심으로 하여 위도 37° ~ 37.8° N, 경도 126.5° ~ 127.5° E 에 위치한다.

연구지역에서 발생한 지진 중 MM진도 V이상의 지진자료만 분석에 이용되어 있으며 이 지진들의 세기별 발생빈도는 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 이 지역에서 MM진도 V이상의 총 84회의 지진들이 발생했다. 20세기에는 MM진도 $\geq V$ 의 지진발생기록이 없다. 본 연구지역에서 발생한 지진 중 MM진도 $\geq VIII$ 의 파괴적 지진들의 자세한 기록이 부록 I에 주어졌다. 한반도의 역사지진들의 진도의 오차는 대략 ± 1 로 추정된다.⁽¹⁰⁾

진앙의 오차는 정확한 평가가 불가능하나 대부분의 경우 50km미만으로 추정되며 모든 방향으로 가능하므로 다수의 자료를 통계적으로 처리할 경우

오차의 효과는 커다란 문제가 될 수 없다. 계기지진의 경우에도 진앙 오차의 범위는 0.25° ~ 0.5° 의 범위로 추정됨이 알려졌다.⁽⁹⁾

본 연구에서 진도감쇠식은 Lee⁽¹¹⁾의 다음 공식을 이용하였으며 이 공식을 적용하여 연구지역 외부에서 발생한 지진 중 연구지역까지의 최단거리에서 감쇠된 지진의 MM진도가 V이상되는 6개의 지진도 분석에 포함시켰다.

$$I = I_0 + 0.191 - 0.834 \ln R - 0.0068R \quad (11)$$

여기서 I_0 는 진앙지점에서의 진도이고, R은 진원 거리이다. 역사지진의 진원깊이를 결정할 수 없으므로 계기지진의 평균깊이를 고려하여 진원 깊이는 일괄적으로 10km로 가정하였고 이 경우 진원깊이 R과 진앙거리 Δ 사이에는 다음관계가 성립한다.

$$R^2 = \Delta^2 + 100 \quad (12)$$

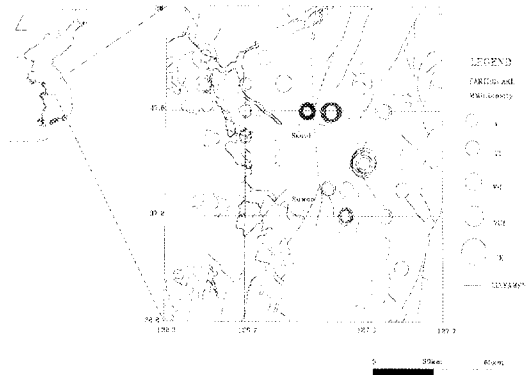


그림 1 연구지역의 선구조 및 진앙

표 1 수도권 일원의 세기당 지진(MM진도 $\geq V$) 발생횟수

세기 \ MM	1	4	12	14	15	16	17	18	19	계
V	1			1	3	27	9	13	1	55
VI						7	3	1		11
VII						8	4	1		13
VIII					1					1
IX	2	1	1							4
계	3	1	1	1	3	43	16	15	1	84

지진위험도 분석을 위하여 연구지역을 0.1° 위도 × 0.1° 경도 간격으로 나누어 결과로 생기는 99격자점에 대하여 연구지역 내의 84지진자료와 밖의 6개의 지진자료로부터 각 격자점까지 식 (11)을 적용하여 감쇠된 진도를 계산하고 감쇠된 진도 I이상의 자료에 한하여 지진변수 β와 λ를 추정한다. 각 격자점에서 T기간 중 감쇠된 진도 I이상의 자료수가 N이라면 λ는 T/N이 된다. β는 다음의 최대우도 방법으로 결정하였다. 즉,

$$\frac{1}{\beta} = \langle X \rangle - i_0 \quad (13)$$

이 식에서 <X>는 진도의 평균치이다.

이와 같은 방법으로 결정한 λ와 β를 식 (10)에 대입하면 특정한 기간 T에 대하여 초과확률 p에 해당하는 진도 $Z_{p,T}$ 를 구할 수 있다. 지진공학적인 측면에서 지진위험도는 보통 가속도로 표현되기 때문에 본 연구에서도 지진위험도는 진도와 수평지반가속도 사이의 다음 변환식을 이용하여 가속도로 표현하였다.⁽¹²⁾

$$\log a_g = 0.14 + 0.30I \quad IV < I < X \quad (14)$$

우리나라의 지진자료에서 이조시대 이후의 자료는 비교적 완전하다고 여겨지나 그 이전의 자료는 적은 인구, 고르지 못한 인구분포, 국경이 한반도의 일부에 제한되는 등의 이유로 불완전하다. 따라서 본 연구에서는 지진자료를 이조시대 이후의 자료와 서기 27년 이후 전 기간의 지진자료로 구분하여 지진위험도를 분석하였다.

본 연구에서는 기간 100년, 200년, 500년, 1000년에 대하여 초과확률 90%의 지반가속도를 구하여 지진위험지도(seismic risk map)를 작성하였으며 그 결과가 그림 9에 표시되어 있다. 서울의 지진위험도는 그림 9에서 보는 바와 같이 조선시대이후의 자료를 이용하여 분석한 결과가 전지진자료의 경우에 비하여 현저하게 높음을 알 수 있다. 조선시대 이전에 발생한 많은 지진들이 기록에 누락되었을 가능성을 고려할 때 서울 일원의 지진위험도는 조선시대 이후 자료로 평가된 수치에 더욱 가까우리라 생각된다. 또 연구지역의 북부서울을 중심으로 지진위험도가 가장 높음을 알 수 있다. 건조불에 피해를 줄 수 있는 지반가속도는 대략 0.1g 이상이 된다.

이에 비추어 볼 때 전지진자료와 조선시대 이후

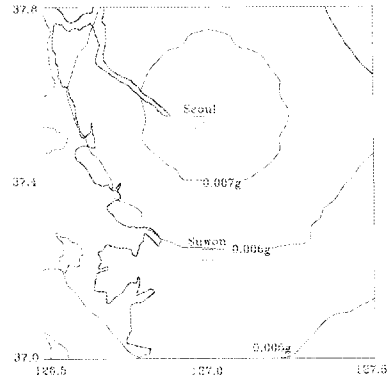


그림 2 한반도 전지진자료에 대하여 100년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

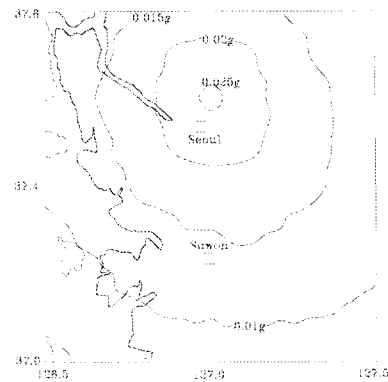


그림 3 한반도 전지진자료에 대하여 200년 기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

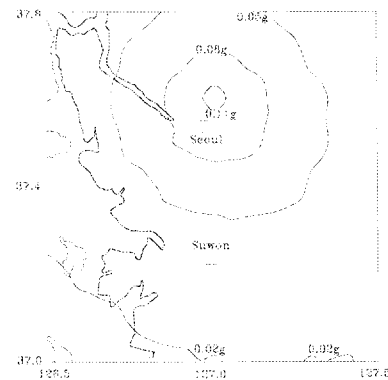


그림 4 한반도 전지진자료에 대하여 500년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

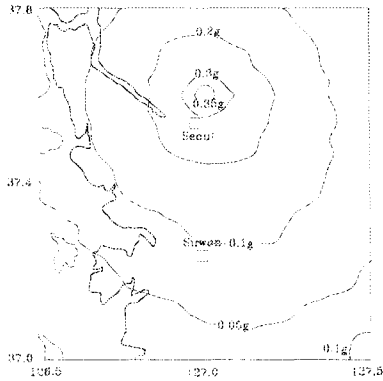


그림 5 한반도 전지진자료에 대하여 1000년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

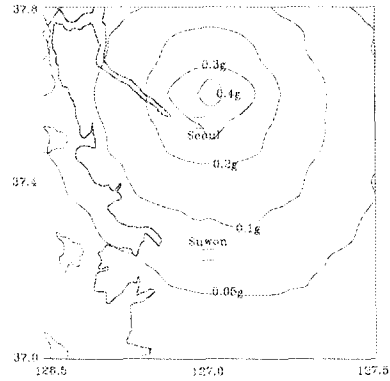


그림 8 조선이후의 한반도 지진자료에 대하여 500년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

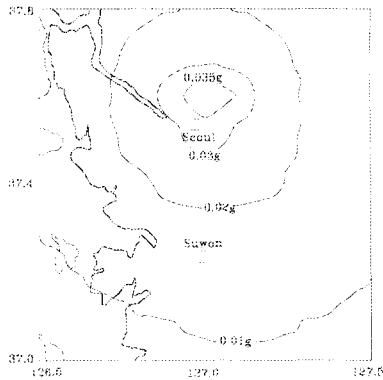


그림 6 조선이후의 한반도 지진자료에 대하여 100년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

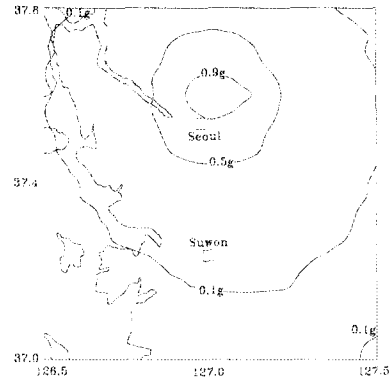


그림 9 조선이후의 한반도 지진자료에 대하여 1000년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

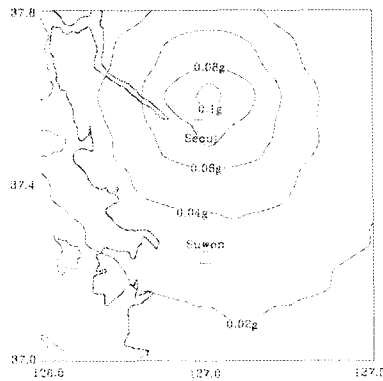


그림 7 조선이후의 한반도 지진자료에 대하여 200년기간에 초과확률 90%의 수평지반가속도

의 지진자료에 대하여 서울지역에서 파괴적인 지진들이 대략 500년과 200년 간격으로 발생함을 알 수 있다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 점지진원방법에 의하여 서울일원의 지진위험도를 분석하였다. 점지진원방법은 연구 지역의 지질학적 정보가 고려되지 않고 과거의 지진자료가 연구지역의 지진활동을 완전하게 표현한다는 전제하에 의미를 갖는 결함이 있다. 현재로서는 서울일원은 지진활동이 균질한 지역원들로 구분하는데 필요한 지질 및 지진학적 자료가 부족한 형편이다.

이러한 전제하에서 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 지진자료가 불완전한 조선이전의 자료가 포함된 전지진자료를 분석한 지진위험도보다 자료가 완전하다고 여겨지는 조선이후의 지진자료만을 분석한 지진위험도가 훨씬 높게 나타났다.
2. 수도권일원에서 지진위험도는 서울을 포함한 상부에서 상대적으로 높게 나타났다.
3. 수도권 중심부의 건물에 피해를 줄 수 있는 0.1g 이상의 수평지반가속도가 90%의 초과확률로서 전기간의 자료를 사용하였을 경우 약 500년기간에, 조선시대이후의 자료를 사용하였을 경우에는 약 200년 기간에 발생한다.

앞으로 수도권일원의 지진위험도는 최대규모를 갖는 구역원방법과 불완전한 조선시대 이전자료에 대한 통계적 보정⁽¹³⁾을 고려하여 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 97년도 한국자원연구소 국책과제 “지진감시모니터링 및 재해대응기술개발”에 의하여 지원되었다.

참고 문헌

1. 이기화, “한반도 역사지진 및 일제시대 계기지진 분석,” 한국원자력 연구소 연구보고서, 1997, pp. 98.
2. Lee, K., and Noh, M.H., "A Probabilistic Analysis of the Seismic Risk in Korea(I)," *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol.24, 1988, pp. 62-70.
3. Lee, K., and Jin, Y.G., "A Probabilistic Analysis of the Seismic Risk in Korea(II)," *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol.25, 1989, pp. 59-71.
4. Lee, K., Kwon, B.D., and Chang, T.W., "Seismicity of the Korean Peninsula," *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol.23, 1987, pp. 257-276.
5. Milne, W.G., and Davenport, A.G., "Statistical Parameters Applied to Seismic Regionalization," *Proc. 3rd World Conf. Earthquake Engng.*, New Zealand, Vol.3, 1965, pp. 181-194.
6. Cornell, C.A., "Engineering Seismic Risk

Analysis," *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol.58, 1968, pp. 1583-1606.

7. Gan, Z.J., and Tung, C.C., "Extreme Value Distribution of Earthquake Magnitude," *Phys. Earth and Planetary Interiors*, Vol.32, 1983, pp. 325-330.
8. Gutenberg, B., and Richter, C.F., "Frequency of Earthquakes in California," *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol.34, 1944, pp. 185-188.
9. Bath, M., *Introduction to Seismology*, Birkhäuser Verlag, Basel and Stuttgart, 1973.
10. 이기화, “한반도의 지진”, 제 13차 공동학술강연회 논문집, 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 1997, pp. 86-99.
11. Lee, K., "A Study on Intensity Attenuation in the Korean Peninsula," *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol.20, 1984, pp. 140-146.
12. Trifunac, M.D., and Brady, A.G., "On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.65, 1975, pp. 139-162.
13. Kijko, A., and Sellevoll, M.A., "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part I. Utilization of Extreme and Complete Catalogs with Different Threshold Magnitude," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.79, 1989, pp. 645-654.

부록 I. 수도권 일원의 파괴적 지진기록

1. 서기 27년 10월(百濟 湍祖 45년 10월)
(한산(漢山)에서) 지진이 일어나 인가가 기울어지고 무너졌다(진도 IX). (삼국사기)
2. 서기 89년 6월(百濟 己婁 13년 6월)
(한산(漢山)에서) 지진이 일어나 땅이 갈라졌으며 민가가 무너져 죽은 사람이 많았다(진도 IX). (삼국사기)
3. 서기 380년 5월(백제 근구수 6년 5월)
(한산(漢山)에서) 땅이 갈라졌는데 깊이가 5장(丈) 너비가 3장(丈)이나 되었으며 3일만에 다시 합쳐졌다(진도 IX). (삼국사기)

4. 서기 1191년 8월(高麗 明宗 21년 8월)

덕수현(德水縣)에서 땅이 함몰되었는데 그 깊이가 3장(丈)이나 되었다(진도 IX). (고려사)

(牛峰)·강음(江陰)과, 충청도 진천(鎭川)·음성(陰城)·평택(平澤) 등 고을에도 지진이 일어났다(진도 VIII). 영의정 정광필, 좌의정 이행, 우의정 장순손이 와서 아뢰기를,

5. 서기 1531년 10월 17일(世宗 26년 8월 戊申일)

(서울에) 지진이 일어나 집들이 모두 흔들렸는데 소리가 우뢰 같았다. 강원도 삼척(三陟)·낭천(狼川)·간성(杆城)·춘천(春川)·양구(楊口)·인제(麟蹄)·평창(平昌)·평강(平康)·안협(安峽)·이천(伊川)·고성(高城)·회양(淮陽)·철원(鐵原)·원주(原州)·횡성(橫城)·홍천(洪川)과, 황해도 서흥(瑞興)·연안(延安)·곡산(谷山)·토산(坭山)·신계(新溪)·백천(白川)·우봉

“오늘 새벽의 지진은 여느때처럼 약간 흔들린 정도가 아닙니다. 사람들이 모두 깜짝 놀라고 닭과 개가 소리를 질렀으니 참으로 근래에 없던 변고입니다. 이런 재이(災異)는 반드시 사람 때문에 일어나는 것이니, 신들로서는 직에 있기가 매우 미안합니다. 체직시켜 주소서.” (조선왕조실록)