

서울 수도권 일원의 지진위험 분석 Analysis of Seismic Risk of Seoul Metropolitan Area

이 기화¹⁾
Lee, Kie-Hwa

이 태국²⁾
Lee, Tae-Gook

ABSTRACT

The seismic risk in Seoul Metropolitan Area(latitude $37.0^{\circ} \sim 37.8^{\circ}$, longitude $126.5^{\circ} \sim 127.5^{\circ}$) based on all Korean earthquake data of Modified Mercalli Intensity equal to or greater than V is evaluated by extreme value method and point source method. The seismic risk estimated from all data turned out to be lower than that from the data since the Chosen dynasty during which seismic data appear to be rather complete.

The damaging earthquake of peak horizontal ground acceleration grater than 0.1g turns out to occur with 90% probability of being exceeded in 200 years when the data since the Chosen Dynasty are used.

I. 서언

서울은 우리나라의 수도로서 현재 인구가 집중되고, 수많은 고층건물과 중요한 산업 설비를 포함하고 있고 앞으로도 더 많은 시설이 갖추어 질 거대도시이다. 최근에 외국에서 빈발하는 대규모 모지진 재해를 의식해서 정부에서 서울시내 고층건물에 대한 내진설계를 법제화 했으나 서울시의 지진위험의 정밀한 평가가 아직까지 이루어지지 않은 실정이다.

서울은 지질학적으로 경기육괴에 속하며 이기화 등(1987)에 의하면 경기육괴에서 서기 27년부터 1984년까지 260여회의 역사 및 계기지진 기록이 있으며 서울 일원은 육괴내에서 지진활동이 가장 활발했던 지역에 속한다. 특히 서기 89년에 발생한 수정 머컬리 진도 IX의 지진으로 집들이 무너지고, 많은 사람들이 사망했다.

본 연구에서는 서울 일원의 지진위험을 측정하기 위해 확률론적인 접근이 이용되었으며, Milne와 Davenport(1965)의 점원방법이 시도되었다. 점원방법에서는 지진기록들을 각각 지진점원으로 보고, 지진감쇄공식에 적용하여 임의의 격자 위의 일련의 점들에서 누적빈도분포들을 얻었다.

Cornell(1968)이 제시한 구역지진원방법(areal source method)은 본 연구에서는 사용되지 않았

1)서울대학교 교수, 정희원

2)서울대학교 석사과정

다. 한반도 전체에 대한 구역지진원방법을 이용한 지진위험분석이 Lee and Jin(1989)에 의해서 행해졌다. 구역지진원방법은 지진활동도(seismicity), 구조(tectonics) 그리고 그 지역의 지질에 기초하여 각 연구자에 의해 각기 다른 지진구조로 나누어지기 때문에 주관적인 측면이 강하게 대두된다.

II. 지진발생 모델

다음의 가정들이 지진발생에 관한 모델이 된다.

(1) 지진 발생은 Poisson 분포를 따른다. 즉, T 기간동안 지진발생수 n의 확률함수는 다음과 같이 주어진다.

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

단, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 이고, λ 는 매년 일어난 평균지진발생수이다.

(2) 지진 규모 X_i ($i=1, 2, 3, \dots, k$)는 통계적으로 독립이고, 다음 확률분포함수의 X와 동일한 분포를 이룬다.

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

(3) T 기간동안 지진발생수 n과 지진 규모 X_i 는 통계적으로 독립이다. 즉, 임의의 자연수 k와 규모 x_i ($i=1, 2, 3, \dots$)에 대해서 다음이 성립된다.

$$\begin{aligned} P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n | n=k) \\ = P(X_1 \leq x_1) \cdot P(X_2 \leq x_2) \cdots P(X_k \leq x_k) \end{aligned}$$

여기서 $P(\cdot | \cdot)$ 는 조건 확률을 의미한다.

III. 최대치 방법

지진분포에서 상한값이 존재하지 않는다고 가정하면 위의 지진발생모델에 의해 최대치 분포함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다. (Gan and Tung, 1983)

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

단 여기서 $X^* = \max(X_1, X_2, \dots, X_k)$ 이고, $G(x)$ 는 $F(x)$ 가 결정이 되면 명확한 형태로 표현할 수 있다.

규모와 지진 빈도수 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다. (Gutenberg and Richter, 1944)

$$\log N = a - bM \quad (2)$$

여기서 상수 a는 지진의 전체 발생수에 관계하고, 상수 b값은 지진의 규모가 증가함에 따라 발생빈도가 감소하는 비율을 나타낸다. 그리고, N은 규모가 M보다 크거나 같은 지진의 총 수를 의미한다. 위의 관계식으로부터 규모의 누적분포함수를 다음과 같이 유도해 낼 수 있다.

$$F_M(x) = P(M \leq x) = 1 - \exp(-\beta_M(x - m)) \quad x \geq m \quad (3)$$

여기서 m 은 사용된 지진의 최소규모를 의미하고, β_M 과 상수 b 값 사이에는 $\beta_M = b \times \ln 10$ 이라는 관계를 가지고 변환이 가능하다.

한편 규모 M 과 진앙에서의 진도 I_0 사이에는 다음과 같은 간단한 선형관계를 가정할 수 있다.

$$M = a_1 + a_2 I_0 \quad (4)$$

여기서 a_1, a_2 는 상수이다.

이로부터 진도의 누적확률 분포함수는 다음과 같이 보여질 수 있다.

$$F_{I_0}(x) = P(I_0 \leq x) = 1 - \exp(-\beta(x - i_0)) \quad x \geq i_0 \quad (5)$$

여기서 i_0 는 사용된 최소 지진 진도값을 의미한다.

주어진 재래주기 T 에 대하여 초과확률 p 인 지진규모는 다음과 같이 주어진다.

$$G(x)_{x=z} = \exp(-\lambda T(1 - F(z))) = 1 - p \quad (6)$$

그리고, 그 해는 $Z_{p,T} = Z(\lambda; p, T)$ 이고, 그 의미는 다음과 같다. T 년 동안의 지진관측이 행해졌다면, 관측된 지진 중 가장 큰 지진이 지진진도(또는 규모) $Z_{p,T}$ 를 초과할 확률이 p 가 되는 것이다.

식(1)에서의 $F(x)$ 를 식(5)에서 구한 $F_{I_0}(x)$ 로 대체하여 식(6)에 대입하여 정리하면 $Z_{p,T}$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Z_{p,T} = -\frac{\ln\left(-\frac{\ln(1-p)}{\lambda T}\right)}{\beta} + i_0 \quad (7)$$

IV. 위험도 계산

본 연구에 쓰이는 지진자료는 이 기화에 의해 정리되어 만들어진 지진목록을 참조하였다. 본 지진자료는 서기 27년부터 1996년까지를 포함한다. 본 연구지역은 그림.1에 나와 있듯이 서울을 중심으로 하여 위도 $37^\circ \sim 37.8^\circ$, 경도 $126.5^\circ \sim 127.5^\circ$ 에 위치하고 있다. 이 지역에 포함되는 지진자료는 도표.1에 나타나 있듯이 수정 머컬리 진도(Modified Mercalli Intensity) V이상의 지진만을 취급하여 조선이전의 지진과 조선이후의 지진을 합하여 총 84개의 역사지진을 포함한다. 그리고, 연구지역 외부지진의 각 진원으로부터 본 연구지역까지의 최단거리에 대해 감쇄된 진도가 V이상인 6개의 지진을 포함한다. 그러나 20세기에 들어와서 본 지역에서는 수정 머컬리 진도 V이상의 지진은 발생하지 않고 있다.

지진위험분석을 위해 본 연구지역을 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 의 간격으로 세분하여 99개의 격자점으로 나누어 각 격자점들에 대해 계산이 수행되었다. 그리고, 본 연구에서 조선이후의 지진자료는 비교적 완전함에 비하여 그 이전의 자료는 불완전하다고 판단하여 27년부터 1996년까지의 전지진자료로 분

석한 것과 조선이후의 지진자료만으로 분석한 것을 비교하려 하였다.

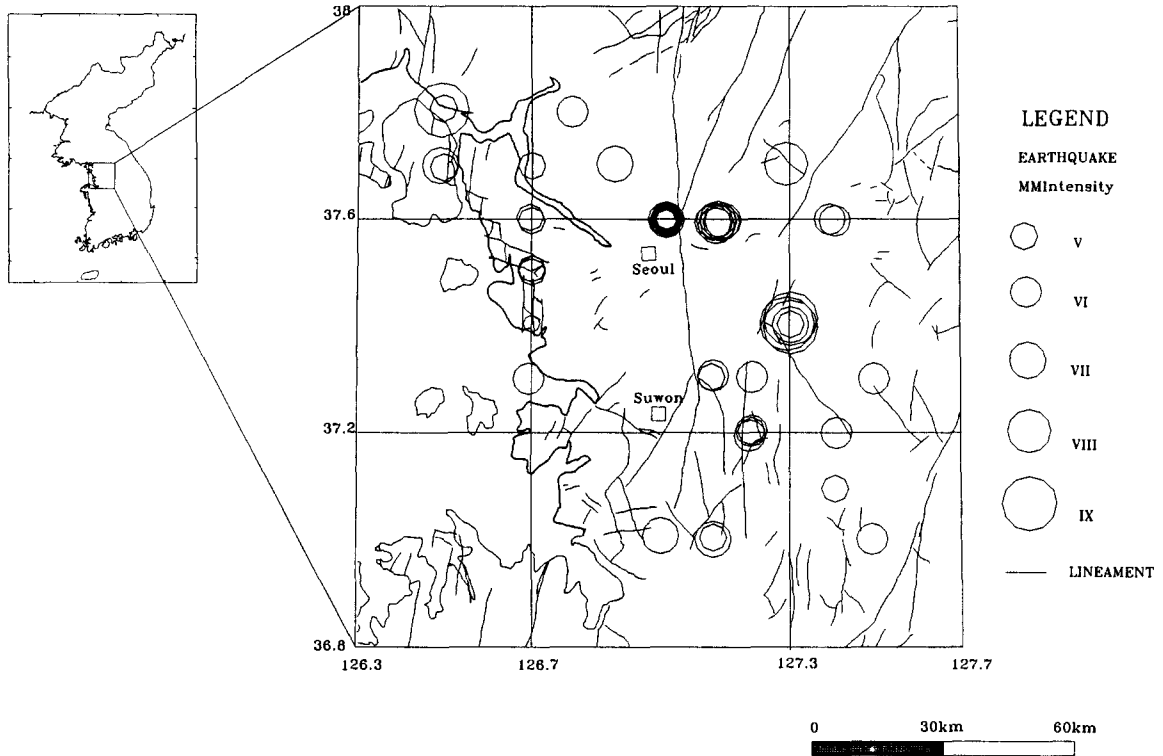


그림.1. 연구지역의 선구조 및 진앙(MMI≥V)의 위치를 도시한 지도

각 점원으로부터 각 격자점까지 감쇄된 진도값을 얻기위해 이 기화(1984)에 의해 제안된 다음의 진도감쇄공식을 이용하였다.

$$I = I_0 + 0.191 - 0.834 \ln R - 0.0068R$$

여기서 I_0 는 진앙지점에서의 진도이고, R 은 진원거리이다. 역사지진의 진원지를 정확히 파악할 수 없으므로 계기지진의 평균깊이를 고려하여 진원 깊이는 일괄적으로 10 km로 가정하였다.

변수 β 는 다음의 최대우도추정법에 의해 추정되었다. 즉,

$$\beta^{-1} = \bar{I} - i_0$$

여기서 \bar{I} 는 모든 지진자료들의 평균진도값을 의미하고, i_0 는 하한 진도값을 의미한다. 본 연구에서는 하한 진도값을 1로 정하였다. 그리고, 최대진도를 최대수평지반가속도 a_h 로 변환하기 위해 Trifunac and Brady(1975)가 제안한 다음의 경험식을 이용하였다.

$$\log a_k = 0.14 + 0.30I$$

단, $IV < MMI < X$

이 공식을 이용하여 최대진도로 표시된 것을 최대수평지반가속도로 변환하여 지진위험지도에 표시하였다.

도표 1. 수도권 일원의 세기당 지진($MMI \geq V$)의 수

		지진의 수									
C \ I		1	4	12	14	15	16	17	18	19	총계
V	I	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
총계		3	1	1	1	3	43	16	15	1	84

I:수정머컬리 진도(MMI) C:세기

지진위험분석은 지진자료를 서기 27년이후의 지진자료와 조선이후의 지진자료로 나누어 100년, 200년, 500년, 1000년의 기간동안 90%의 초과확률로 발생할 최대수평지반가속도를 추정하였다. 이는 그림.2-9에 표시되어 있다.

V. 결론 및 토의

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 지진자료가 불완전한 조선이전의 지진자료를 포함하여 나타낸 지진위험보다 지진자료가 완전한 조선이후의 지진자료만을 포함하여 나타낸 지진위험이 훨씬 크게 나타났다. 이 현상은 한반도 지진활동이 판내부 지진활동으로서 시간적으로 매우 불규칙함에도 그 원인이 있다고 생각된다.
2. 본 연구지역에서 지진위험이 상대적으로 큰 지역은 서울을 포함하여 서울상부지역임을 알 수 있고, 지진위험이 상대적으로 적은 지역은 연구지역의 하부지역임을 알 수 있다.
3. 수도권 중심부의 건물에 피해를 줄 수 있는 0.1g이상의 최대수평지반가속도가 90%의 초과확률로서 전기간의 자료를 사용하였을 경우 약 500년기간에, 조선시대이후의 자료를 사용하였을 경우에는 약 200년 기간에 발생한다.

더 합리적인 결과를 얻기 위해 지진의 상한경계를 고려한 점원방법을 이용하여 지진위험도를

계산하여야 하겠고, 연구지역을 중심으로 지진활동도, 지질구조를 고려하여 지진구를 구획하여 구역지진원방법을 활용하는 방법도 연구되어야 하겠다.

VI. 참고문헌

1. B. Gutenberg, and C.F. Richter(1944), "Frequency of earthquakes in California," Bull. Seis. Soc. Am., vol.34, pp185-188.
2. C.A. Cornell(1968), "Engineering seismic risk analysis," Bull. Seis. Soc. Am., Vol.58, pp.1583-1606
3. Kiehwa Lee(1984), "A study on Intensity Attenuation in the Korean Peninsula," Jour. Geol. Soc. Korea., Vol.20, pp.140-146.
4. Kiehwa Lee, Byung Doo Kwon and Tae Woo Chang(1987), "Seismicity of the Korean Peninsula: 3.Seismicity of the Kyeonggi Massif," 10. Kiehwa Lee(1984), "A study on Intensity Attenuation in the Korean Peninsula," Jour. Geol. Soc. Korea., Vol.23, pp.257-276.
5. Kiewha Lee and Myung-Hyun Noh(1988), "A Probabilistic Analysis of the Seismic Risk in Korea(I)," Jour. Geol. Soc. Korea., Vol.24, pp.62-70.
6. Kiehwa Lee and Young-Geun Jin(1989), "A Probabilistic Analysis of the Seismic Risk in Korea(II)," Jour. Geol. Soc. Korea., Vol.25, pp.59-71.
7. M.D. Trifunac, and A.G. Brady(1975), "On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion," Bull.Seism.Soc.Am.,vol.65, pp139-162.
8. W.G. Milne and A.G. Davenport(1965), "Statistical parameters applied to seismic regionalization," Proc 3rd World Conf. Earthquake. Engng., New Zealand, vol.3, pp181-194.
9. Z.J. Gan, and C.C. Tung(1983), "Extreme value distribution of earthquake magnitude," Phys. Earth and Planetary Interiors, Vol.32, pp.325-330.

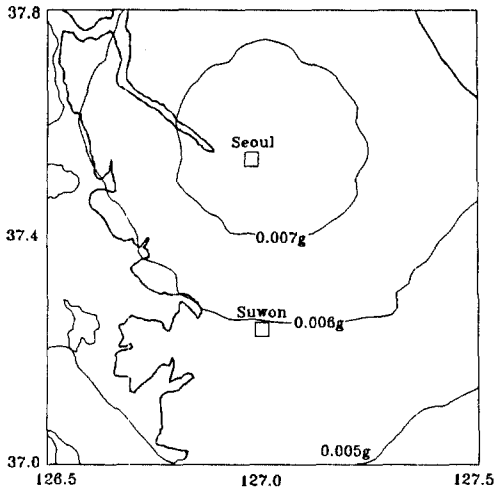


그림. 2. 서기 27년이후의 한반도 지진자료
를 이용하였을 때 재래기간 100년동
안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속
도

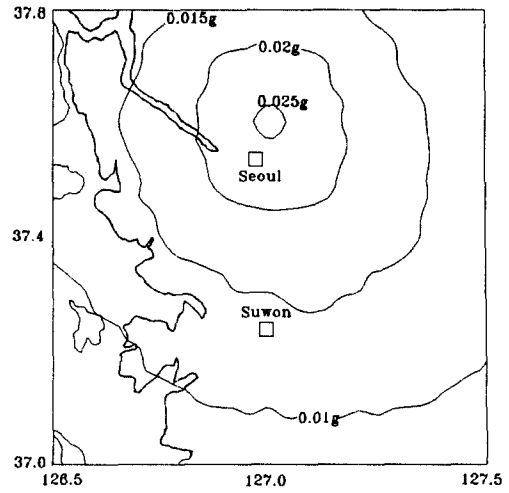


그림. 3. 서기 27년이후의 한반도 지진자료
를 이용하였을 때 재래기간 200년동
안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속
도

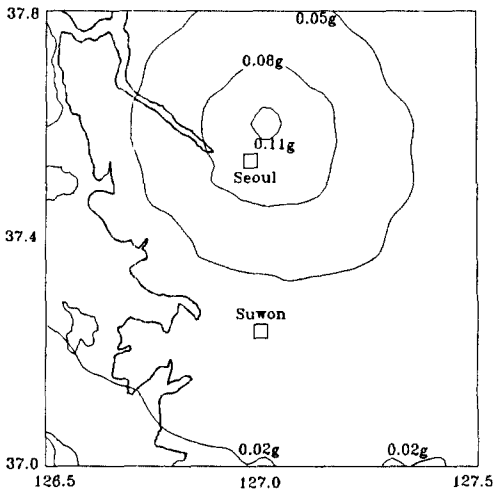


그림. 4. 서기 27년이후의 한반도 지진자료
를 이용하였을 때 재래기간 500년동
안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속
도

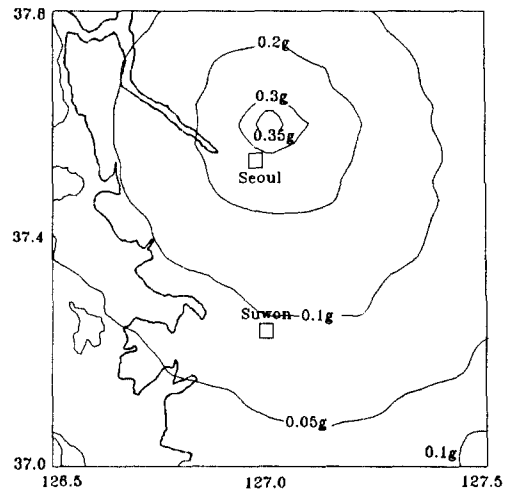


그림. 5. 서기 27년이후의 한반도 지진자료
를 이용하였을 때 재래기간 1000년동
안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속
도

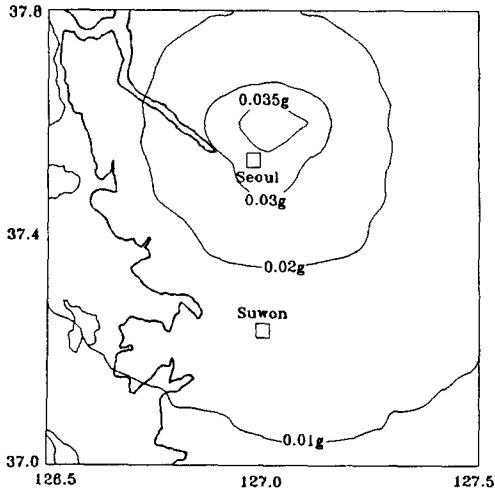


그림.6. 조선이후의 한반도 지진자료를 이용하였을 때 재래기간 100년동안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속도

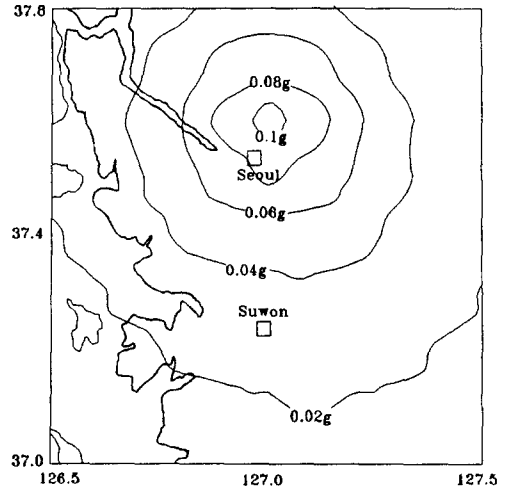


그림.7. 조선이후의 한반도 지진자료를 이용하였을 때 재래기간 200년동안 확률 90%로 초과될 최대수평지반가속도

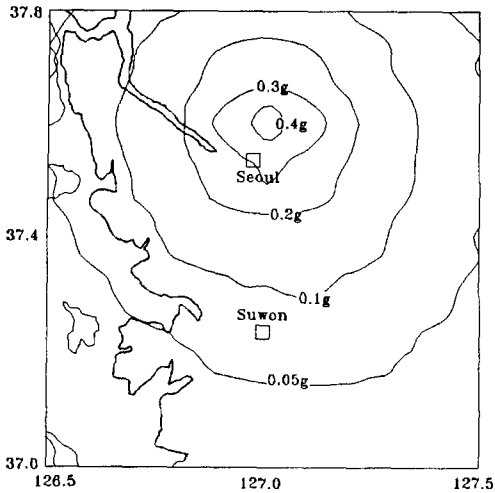


그림.8. 조선이후의 한반도 지진자료를 이용하였을 때 재래기간 500년동안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속도

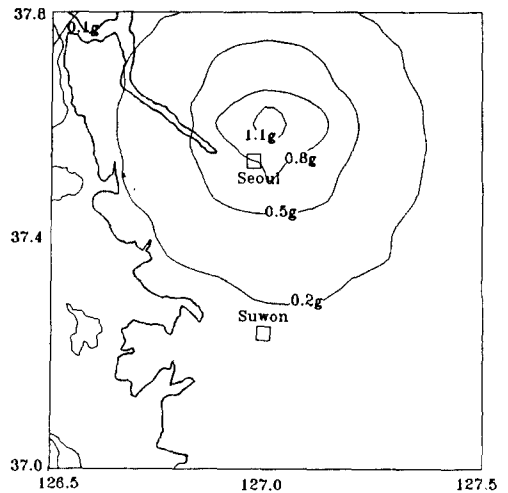


그림.9. 조선이후의 한반도 지진자료를 이용하였을 때 재래기간 1000년동안 확률90%로 초과될 최대수평지반가속도