

한반도의 지진재해도 작성연구

A Study on Seismic Hazard Map of Korea

김성균¹, 김소구², 김우한³, 김준경⁴, 박창업⁵, 이기화⁵, 전명순⁶, 조봉곤⁷

Kim Sung Kyun, Kim So Gu, Kim Woo Han, Kim Jun Kyoung, Baag Chang-Eob, Lee Kiwha, Jun Myung-Soon, and Jo Bong Gon

ABSTRACT

It has been known that the seismicity of the Korean Peninsula is relatively inactive than those of adjacent northern China and southwestern Japan. Recently the recognition for seismicity of the Korean Peninsula was changed through the review of long term historical records and recent seismicity. In addition, it is considered that the modern society is more vulnerable to seismic hazard because of high urbanization and industrialization. From this viewpoint, the improvement and modification of the present regulation for aseismic design is strongly proposed. The purpose of the present study is to prepare seismic hazard maps for Korea to be used in improving the present regulation.

The present study was performed as a cooperative project of eight Korean seismologists. Each seismologist calculated independently seismic hazard value at the given grid points based on his own judgement about methodology and seismicity. Then the values are unified with equal weight to produce a seismic hazard map. Seven seismic hazard maps for peak acceleration with 10 percentile probability of exceedance in 5, 10, 20, 50, 100, 250, 500 years are presented. This probability of exceedance in such years corresponds to return period of 48, 95, 190, 475, 950, 2373, 4746 years, respectively. It is recommended to use a hazard map to be selected on the basis of the importance and the design level of structures.

1. 전남대학교 지질학과 2. 한양대학교 지구해양학과 3. 경상대학교 지질학과 4. 세명대학교
자원환경공학과 5. 서울대학교 지질학과 6. 한국자원연구소 7. 전북대학교 지질학과

1. 서론

1985년에 발생한 멕시코시티 지진(규모 8.1)직후 건설부는 대한건축학회에 건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구용역을 의뢰하였다. 이 연구에서는 우리나라를 지진구역 0, 1, 2의 세 구역으로 나누어 지진재해에 파급효과가 큰 공공건물과 인구밀집건물, 고층건물에 적용할 내진설계기준을 작성, 제안하였다(건설부, 1987). 이 기준안에서 지진구역 0에 대해서는 내진설계를 적용하지 않고, 구역 1, 2에 대해서는 각각 0.08, 0.12g를 적용하도록 하였다. 그러나 1995년에 발생한 일본 효고현 남부지진(규모 7.8)이후, 국가적, 사회적으로 지진방재에 대한 관심이 크게 높아졌으며, 현재의 내진설계기준에 대한 재검토 및 보완의 필요성이 제기되었다. 이러한 필요에 부응하여 건설교통부는 1996년에 내진설계기준에 관한 1단계 연구(건설교통부, 1996)를 수행하였다. 이 연구에서는 기존의 지진구역을 약간 수정하는 데에 그쳤다.

본 연구는 건설교통부에서 한국지진공학회에 의뢰한 시설물별 내진설계기준 보완을 위한 2단계 연구용역의 일환으로 수행된 것으로, 기존의 지진재해지도와 지진구역을 재검토하여, 좀더 정밀한 지진재해지도를 작성하며 그 결과에 따라 지진구역을 재조정하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서 얻어진 결과는 각종의 시설물별로 작성된 기존의 내진설계기준안의 검토, 보완 및 신규작성안에 기초자료로서 제공된다. 본 연구에서 제공되는 지진재해도는 한반도에서 각각 5, 10, 20, 50, 100, 250, 500년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 가속도를 등치선의 형태로 나타낸 것이며, 이러한 기간과 확률에 해당하는 평균재현주기는 각각 50, 100, 200, 500, 1000, 2400, 4800년에 해당한다. 따라서 시설물별 내진설계기준의 작성에서는 시설물의 중요도와 설계수준에 따라 적절한 재해지도를 선택하여 사용하게 된다.

어떤 지역에 적절한 지진재해도를 작성하기 위해서는 장기간의 지진목록과 합리적인 재해도 계산방법이 필요하다. 한반도의 지진자료는 A.D. 2년부터 1904년까지의 역사지진자료와 1905년부터의 계기지진자료로 나눌 수 있다. 역사지진자료는 역사문헌속에 문장으로 기술되어 있어, 개개의 지진을 평가하여 진앙지와 및 지진의 크기를 결정하는 데에 있어서 해석자에 따라 주관성이 개

입되기 쉽다. 계기지진자료 역시 자료출처에 따라 진앙지, 규모, 발생일시 등에 대한 기록이 상이하거나 누락 또는 잘못 기재된 경우가 많다. 이러한 원인으로 현재 작성되어 있는 지진목록(예를 들면 한국동력자원연구소, 1983)은 연구자와 기관에 따라 다르다.

우리나라의 지진재해도를 계산한 연구들(한국동력자원연구소, 1983; 김성균, 1995)에서는 다양한 방법(Algermissen and Perkins, 1976; Shakal and Willis, 1972)이 사용되어 왔다. 그러나 어떤 지역의 지진자료를 이용하여 확률적으로 지진재해도를 계산하기 위해서 어떤 방법을 사용할 것인가는 지진자료 못지않게 결과에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 기존의 여러 지진재해도 계산방법을 검토하여 우리나라의 지진자료 특성에 맞는 합리적인 계산방법의 선택이 또한 선행되어야 한다.

본 연구는 국내의 지진학자 8인의 공동연구로 수행되었다. 그러나 각각의 전문가는 독립적으로 연구를 수행하여 그 결과를 통합하는 방식으로 추진되었다. 연구에 참여한 8인의 전문가중 6인은 위에서 지적한 지진목록과 지진재해도 계산방법에 관한 문제점을 공통인식하여, 본 연구에서 제작성한 목록을 공동으로 사용하며, 지진 재해도 계산에 있어서도 같은 방법론을 적용하기로 합의하였다. 단지 지진목록중 어떤 기간을 선택할 것인가? 또는 지진파의 감쇠에 어떤 공식을 적용할 것인가는 개개의 연구자가 선택하도록 하였다. 이에 반하여, 나머지 2인은 완전히 독립적으로 연구를 수행하였다. 그 결과, 얻어진 8개의 지진재해도는 동일한 가중치에 의하여 통합되어 하나의 지진재해도로서 추천된다.

2. 지진재해도 계산방법

확률론적 지진재해도란 설계된 기간동안에 어떤 장소에서 지진에 의한 지반운동의 최고 가속도가 정해진 확률에 의해 초과할 값을 뜻한다. 그리고 확률론적 지진재해도의 지리적 분포를 지도에 등가속도 곡선으로 나타내면 확률론적

지진재해 지도가 된다.

기존의 전통적인 지진재해도 계산방법은 대상지역 내에 활성단층을 포함하는 수개의 진원구역을 설정하고(Cornell, 1968; Algermissen and Perkins, 1976), 이 구역내의 지진활동은 균질한 것으로 간주하여 계산을 하였다. 본 연구에서 일부의 연구자는 이 방법을 채택하여 지진재해도를 계산하였다. 그러나 나머지 다수의 연구자는 이 방법을 개량한 Frankel(1995)의 방법을 사용하였다. 기존의 방법은 비교적 활성단층이 뚜렷이 나타나는 미국 서부지역과 같은 곳에서는 적절한 방법이지만 지진활동과 관련한 활성단층의 양상이 뚜렷하지 않은 미국 동부지역이나 우리나라에서는 적절한 방법이 될 수가 없다. 이 계산법에서는 지진원 구역을 어떻게 설정하느냐에 따라서 재해도의 양상이 달라진다. 그러므로 의견을 달리하는 많은 수의 연구자들의 지진구역 모델들이 필요하게 된다. 최근 미국 동북부 지역 지진재해도 계산법에 대한 워크샵에서 이러한 문제점을 보완하기 위해 새로운 계산법이 제시되고 또한 검증이 되었다(Frankel, 1995). 즉 지진활동이 활발치 않은 지역에서는 정확한 지진발생의 원인이 되는 구조를 파악하기가 어렵기 때문에 지진활동을 공간적으로 평활화시켜서 계산함으로써 진앙지의 위치의 부정확성에 의한 오류를 줄일 수 있는 이점이 있다.

지진재해도의 계산에 관한 이론적 원리는 Cornell(1968), Algermissen and Perkins(1976) 및 Frankel(1995)에 의해 기술되어 있으므로 여기서는 이 연구에서 다수의 연구자가 주로 사용한 지진재해도의 계산과정만을 서술한다.

먼저 대상지역을 격자화시키고 지진자료를 입력하여 각 격자에서의 규모별 지진발생횟수를 구한다. 그리고 각 격자마다 주변에서 발생한 지진 중에서 부지의 격자에 u_0 가 넘는 가속도를 일으키는 지진의 연간발생률을 $\lambda(u > u_0)$ 라 한다. 지진의 연간 발생률은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda(u > u_0) &= \sum_{q=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_T \frac{n_i'(u > u_0)}{T} \\ &= \sum_{q=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_T \frac{n_i'}{T} P(u > u_0 | D_k, M_i) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $n'_i(u > u_0)$ 는 i 번째 격자 내의 지진 중에서 부지에 u_0 보다 큰 가속도를 일으키는 i 번째 규모의 지진갯수를 뜻한다. 또한 T 는 지진자료에 해당하는 총 관측기간(년)을 뜻하며 N_2 는 지진구역의 개수, N_q 는 q 번째 지진구역에서의 격자의 개수를 나타낸다. 이 지진구역은 지진원 구역과는 다르며, 지진활동의 특성 (규모-빈도수 관계식에서 b 값)은 같으나, 지진활동정도 (a 값)이 다른 지역은 다른 지진구역으로 정의된다. $P(u > u_0 | D_k, M_i)$ 는 확률을 나타내는 것으로 부지에서 거리 D_k 떨어져 있는 지점에서 일어난 규모 M_i 의 지진에 의해 부지에서 형성된 가속도 u 가 u_0 보다 크게 되면 1이 되고 그 외에는 0이 된다. 이와 같은 확률은 지진파에너지 감쇠공식을 통하여 계산된다. 감쇠공식의 표준편차의 크기에 따라 이 확률의 값이 0과 1 사이의 경계부가 완만한 경사의 연속적인 값으로 계산된다.

한편 Gutenberg-Richter의 지진규모-발생빈도의 관계인 $\log \frac{n'}{T} = a - bM_i$ 를 만족시키는 지진의 경우에는 전 대상 지역 또는 수 개로 나누어진 지진 구역내에서의 b 값을 최대 가능성 방법(maximum likelihood method)과 규모에 대한 불균등 관측기간을 고려한 방법을 이용하여 계산한다. 그 다음에는 각 격자 지역 내에서 a 값을 계산한다. 이때 앞에서 구한 b 값은 고정시키고 평균적 a 값을 계산한다. 그리고 평균적인 a_i 값으로부터 기준규모(reference magnitude)에 해당하는 a_i^{ref} 값을 계산한다.

Frankel(1995)의 방법은 위에서 구한 b 값과 a_i^{ref} 값에 의해 기준규모에서의 발생빈도 n_i^{ref} 를 구할 수 있으며, 이 값은 다음과 같이 Gaussian function에 의해 공간적으로 평활화시킨다. 이에 반하여 기존의 방법에서는 이 과정이 포함되지 않는다.

$$n_i^{ref} = \frac{\sum_j n_j^{ref} e^{-\Delta_{ij}/c^2}}{\sum_j e^{-\Delta_{ij}/c^2}} \quad (2)$$

여기서 Δ_{ij} 는 i, j 격자사이의 거리를 나타내고 c 는 진앙지의 부정확성에 대한

고려를 해 주는 것으로 연관성이 있는 지역을 연결하는 거리값을 나타낸다. 이와 같은 과정을 통하여 부지에서 u_0 이상의 가속도를 일으키는 주변지진의 연간발생률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda(u > u_0) &= \sum_{q=1}^{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} \sum_j \frac{\tilde{n}_i^j}{T} P(u > u_0 | D_k, M_i) \\ &= \sum_{q=1}^{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} \sum_j 10^{\log \frac{\tilde{n}_i^j}{T} - b(M_i - M_{eq})} P(u > u_0 | D_k, M_i) \end{aligned} \quad (3)$$

한편 Gutenberg-Richter의 지진규모-발생빈도 관계를 만족시키지 않는 특성지진의 경우는 주어진 지진자료 그 자체 그대로를 평활화시킨 다음 별도로 지진의 연간발생률을 계산하게 된다.

$$\lambda(u > u_0) = \sum_{q=1}^{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} \sum_j \frac{\tilde{n}_i^j}{T} P(u > u_0 | D_k, M_i) \quad (4)$$

이와 같은 방법으로 각 격자에서의 연간발생률을 구한 다음 역으로 미리 지정해주는 연간 확률에 해당하는 가속도값에 근사하는 값을 보간하여 구한다.

연간 발생확률은 $\lambda = \frac{1}{t_r}$ 이며 t_r 은 재현주기로서 다음과 같이 표현된다.

$$t_r = \frac{1}{1 - (1 - p)^{\frac{1}{t_d}}} \quad (5)$$

여기서 t_d 는 구조물의 설계기간(design life time)이며 p 는 초과확률을 나타내며 주로 10%를 사용한다.

3. 계산결과

이번 연구에 참여한 연구자들이 각각 사용한 지진자료와 감쇠공식은 표 1과 같다. 연구자 1에서 3은 연관 거리(correlation distance)로 50km를 사용하였으며 지진 구역은 역사지진의 경우에는 2개로 구분하였고 계기지진에서는 1개로 하여 계산을 수행하였다. b 값을 계산하는 과정에서 역사지진의 경우에는 규모 4.5이상의 지진을 사용하였고 계기지진의 경우에는 규모 3.5이상의 지진을 사용하였다. 그리고 지진의 연간발생률을 구할 때 사용되는 파괴규모(destructive magnitude)는 4.5로 규정하였다. 또한 특성지진의 경우 6.5이상의 지진을 정의하였고 재현주기는 임의로 1000년으로 정하여 계산하였다.

연구자 4에서 6은 연관거리(correlation distance)를 50 및 70 km로 규정하였으며 지진구역은 모든 경우에 2개로 구분하여 계산하였다. b 값은 규모 4.5이상의 지진을 사용하여 계산하였으며 파괴규모(destructive magnitude)는 모든 경우에 규모 4.5로 하여 계산을 하였다.

연구자 7은 독립적인 방법(Cornell, 1968)과 감쇠공식을 사용하여 지진재해도를 계산하였다.

이상과 같이 모든 연구자가 각 격자점에 대하여 계산한 값을 동일한 가중치를 사용하여 평균하였다. 그 결과로 얻은 5, 10, 50, 100, 250, 500년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도를 그림 1에서 6까지에 나타내었으며, 각각에 해당하는 평균재현주기는 48, 95, 475, 950, 2373, 4746년이다. 연구자 8은 역시 독립적인 계산법과 감쇠공식을 사용하여 계산하였으나 지나치게 큰 비정상적인 결과를 얻었기 때문에 고려대상에서 제외하였다.

지진재해지도를 살펴보면 대략적으로 지진 구역이 두 부분으로 구분되는 것을 볼 수 있다. 즉, 함경남북도 지역과 제주도에서는 가속도값이 상대적으로 작고 그 외의 지역은 가속도값이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다. 평안도와 남한지역의 가속도값이 대체로 크지만 그 중에서도 특히 평양지역과 대구지역의 가속도값이 가장 크게 나오는 것을 볼 수 있다.

표 1. 각 연구자들이 사용한 가중치와 감쇠 공식

연구자	가 중 치				감쇠공식
	역사시대 (2~1904)	조선시대 (1392~1904)	조선시대 +계기지진 (1392~1996)	계기지진 (1905~1996)	
1	0.1	0.6	0.3 *		1
2	0.3	0.7			1
3			1.0		1
4		1.0			2
5		0.7		0.3	2, 3
6			1.0		3
7	역사시대 + 계기지진 (2~1996)				4

* 특성지진까지 포함한 것을 뜻함

4. 결론 및 제안

본 연구는 건설교통부에서 한국지진공학회에 의뢰한 시설물별 내진설계기준 보완을 위한 2단계 연구용역의 일환으로 수행된 것이다. 본 연구의 목적은 기존의 지진재해지도와 지진구역을 재검토하여, 좀더 정밀한 지진재해지도를 작성하여, 그 결과에 따라 지진구역을 재조정하는 것이다.

본 연구는 국내의 지진학자 8인의 공동연구로 수행되었다. 그러나 각각의 전문가는 독립적으로 연구를 수행하여 그 결과를 통합하는 방식으로 추진되었다. 연구에 참여한 8인의 전문가중 6인은 지진목록과 지진재해도 계산방법에 관한 문제점을 공통인식하여, 본 연구에서 재작성한 목록을 공동으로 사용하며, 지진 재해도 계산에 있어서도 같은 방법론을 적용하기로 합의하여 동일한 컴퓨터 프로그램을 사용하였다. 단지 지진목록중 어떤 기간을 선택할 것인가? 또한 지진파의 감쇠에 어떤 공식을 적용할 것인가는 개개의 연구자가 선택하도록 하였다. 이에 반하여, 8인의 연구자중 나머지 2인은 완전히 독립적으로 연구를 수행하였다. 그 결과, 얻어진 8개의 지진재해도는 동일한 가중치에 의하여 통합

되었다.

본 연구에서는 한반도에서 각각 5, 10, 20, 50, 100, 250, 500년 동안에 초과 확률 10%에 해당하는 가속도 값을 등치선의 형태로 나타낸 지진재해도를 작성하였다. 이러한 기간과 확률에 해당하는 평균재현주기는 각각 48, 95, 190, 475, 950, 2373, 4746년에 해당한다. 여기서 제시된 지진재해도를 사용하는 데에 특히 주의할 점은 지진재해도 계산에 입력자료로 사용한 역사지진의 진앙지가 내륙에만 있는 관계로 해안 근처의 가속도 값이 작고 내륙쪽으로 갈수록 커진다는 점이다. 이 결과는 역사지진 자료의 특성 때문에 나타나는 것이며, 실제의 지진활동을 충분히 반영한다고 보기는 어렵다. 따라서 해안 근처의 구조물에 가속도 값을 적용할 때는 해안보다 약 20~30Km 안쪽 내륙의 값을 사용하는 것이 바람직하다.

결론적으로 본 연구에서 얻어진 결과는 금후 지진관측 자료의 축적, 활성단층의 연구진전과 재해도 계산방법의 발전에 따라 수정, 보완되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김성균, 송미정, 1995, 한반도의 확률론적 지진위험분포, 지질공학, 45-48.
- 건설부, 1987, 건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구.
- 건설교통부, 1996, 내진설계기준연구(I).
- 한국동력자원연구소, 1983, 한반도의 지진위험도.
- Algermissen, S.T. and Perkins, D.M., 1976, A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States, U.S.G.S. Open File Report 76-416.
- Cornell, C. A., 1968, Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606
- Frankel, A., 1995, Mapping seismic hazard in the central and eastern United States, Seism. Research Letters, 66, 8-21.
- Shakal, A.F. and Willis, D.E., 1972, Estimated earthquake probability in the North Circum-Pacific area, Bull. Seis. Soc. Am., 62, 1397-1410.

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 5 Years

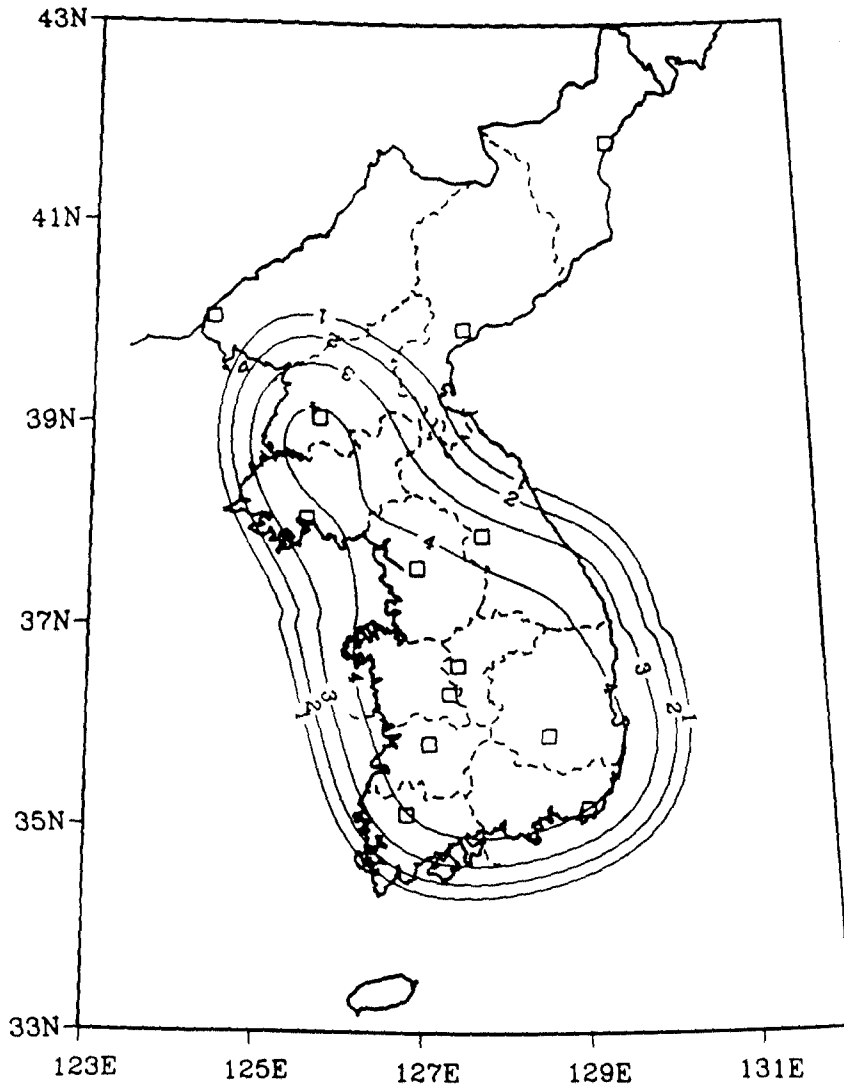


그림 1. 5년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도
(평균재현주기는 48년).

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 10 Years

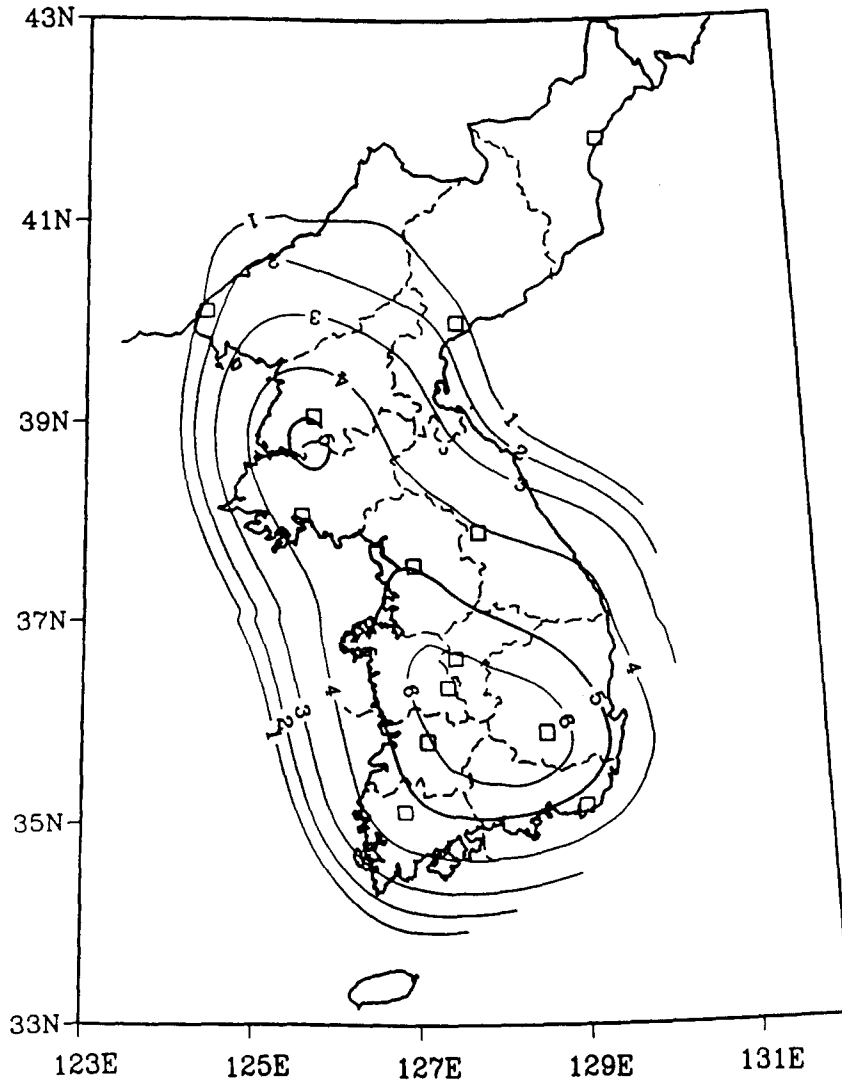


그림 2. 10년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도
(평균재현주기는 95년).

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 50 Years

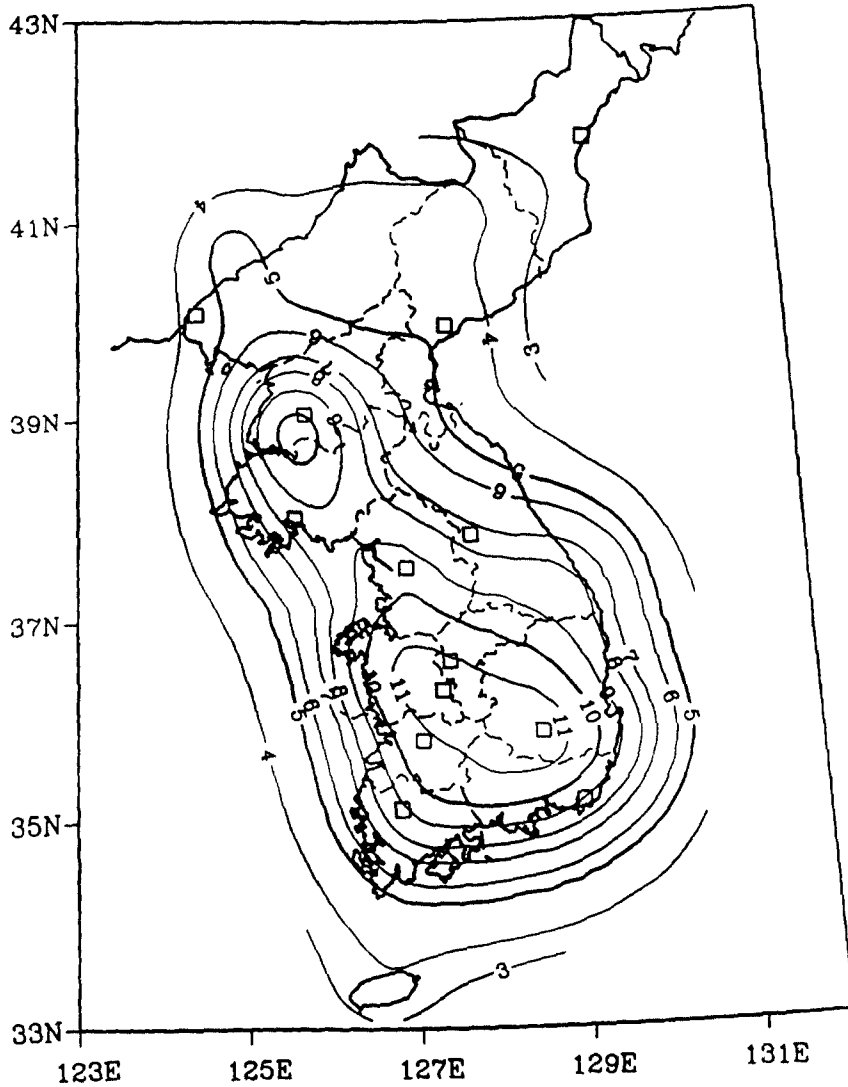


그림 3. 50년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도
(평균재현주기는 475년).

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 100 Years

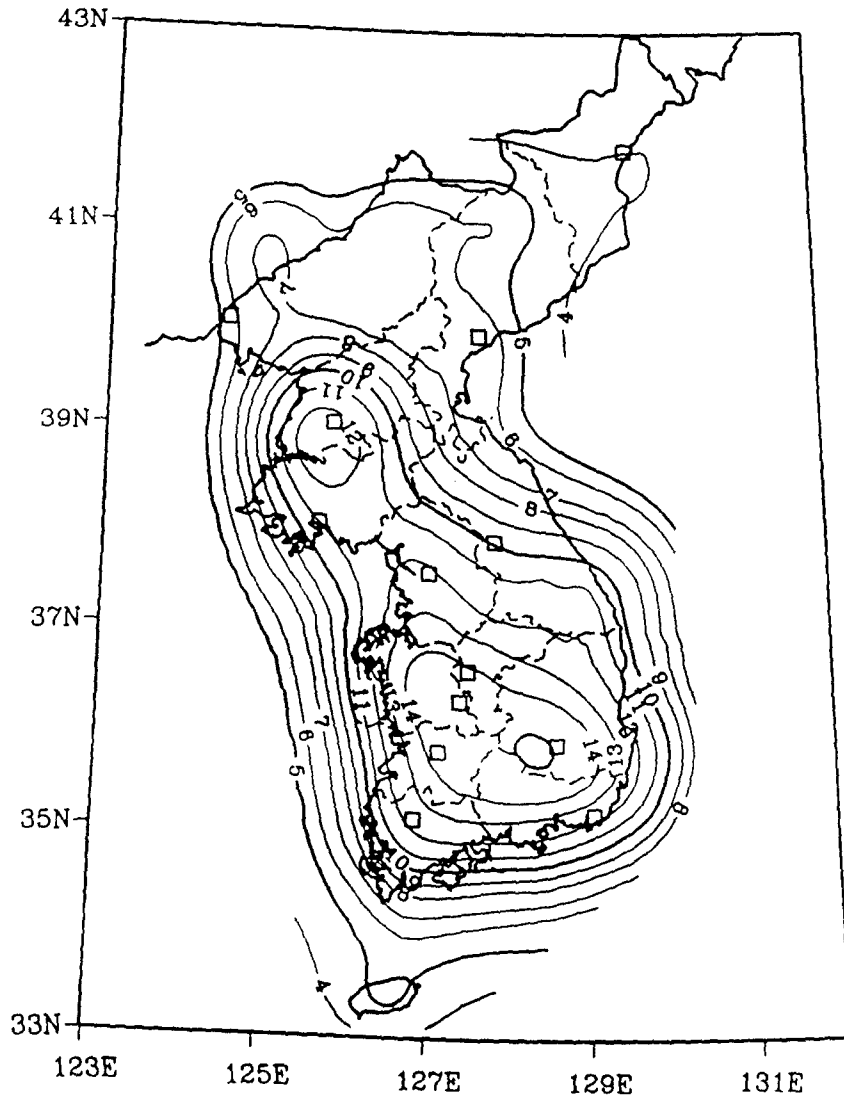


그림 4. 100년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도
(평균재현주기는 950년).

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 250 Years

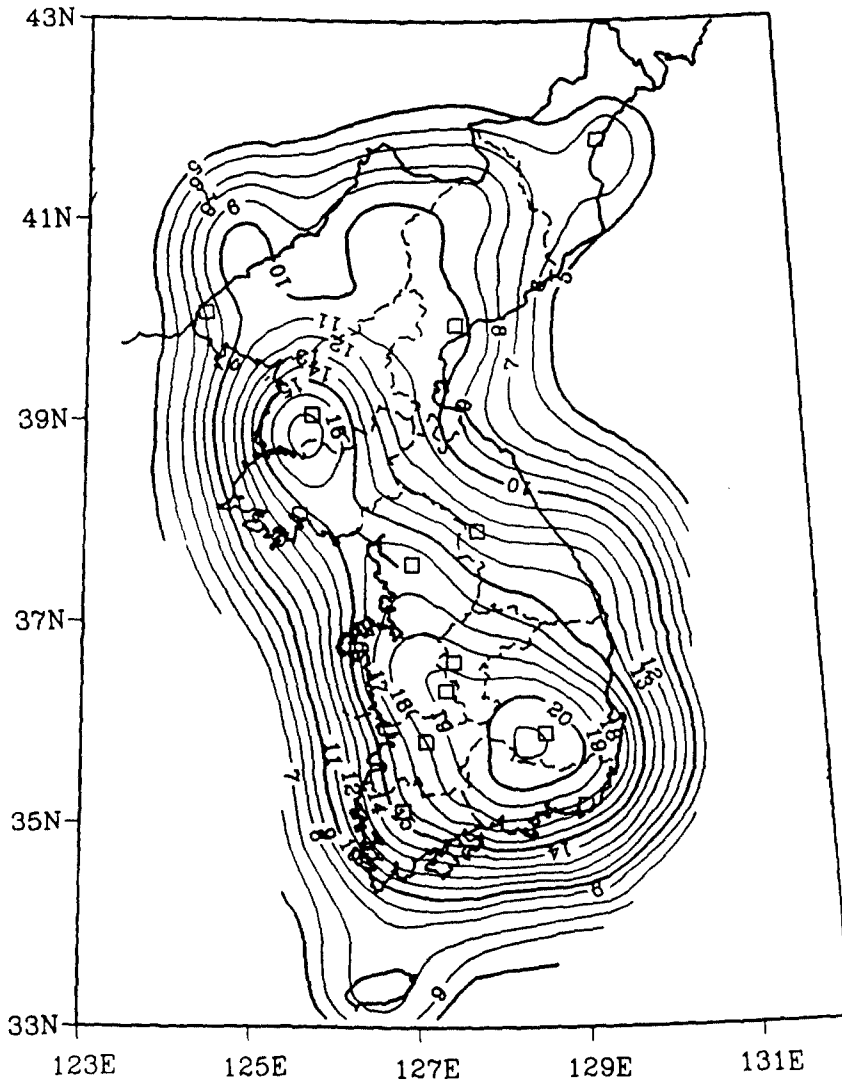


그림 5. 250년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도
(평균재현주기는 2373년).

Peak Acceleration (%g) with 10% Probability
of Exceedance in 500 Years

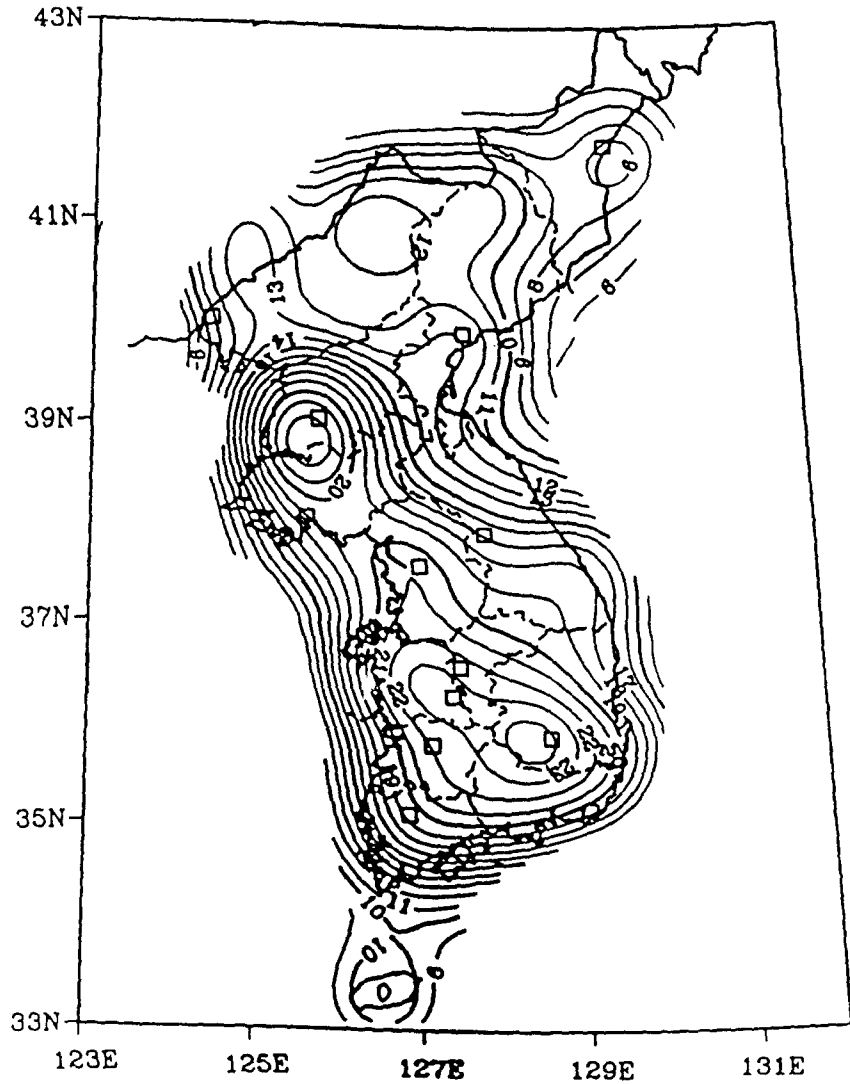


그림 6. 500년 동안에 초과확률 10%에 해당하는 지진재해지도
(평균재현주기는 4746년).