

## 불완전한 자료 및 완전한 자료 목록을 이용한 한반도 지진구들의 지진활동 매개변수 평가

### Estimation of seismicity parameters of the seismic zones of the Korean Peninsula using incomplete and complete data files

이기화\*1)                      이진희\*\*2)  
Lee, Kie Hwa                  Lee, Jun Hee

---

#### ABSTRACT

An estimation of seismic risk parameters by seismic source zones of the Korean Peninsula in order to calculate the seismic hazard values using these was performed. Seven seismic source zones were selected in consideration of seismicity and geology of Korean Peninsula. The seismicity parameters that should be estimated are maximum intensity, activity rate and b value in the Gutenberg - Richter relation. For computation of these parameters, least square method or maximum likelihood method is applied to the earthquake data in two ways; the one for the data without maximum intensity and the other with maximum intensity.

Earthquake data since Choseon Dynasty is regarded as complete and estimation of parameters was made for these data and using above two ways. And recently, a new method is published that estimate the seismicity parameters using mixed data containing large historical events and recent complete observations. Therefore, this method is applied to the whole earthquake data of the Korean Peninsula.

It turns out that the b value computed considering maximum intensity is slightly lower than that computed considering without maximum intensity, and it becomes still lower when the incomplete data prior to Choseon Dynasty is used. In the case of the activity rates, the values obtained without maximum intensity and that with maximum intensity are similar, though they are lower when the incomplete data is used. The values of maximum intensities are usually lower when considering incomplete data. In the seismic source zone including the Yangsan Fault zone, however, the values are higher when considering the incomplete data.

---

#### 1. 서론

특정 지역의 지진 위험도를 평가하기 위하여 반드시 필요한 지진활동 매개변수(seismicity

---

\* 서울대학교 교수, 정회원

\*\* 서울대학교 박사과정

parameter)들에는 최대진도, 활동률, 그리고 진도 - 빈도 관계식에서의 b 값이 있다. 여기에서 최대진도( $I_{max}$ )는 특정 지역에서 앞으로 발생할 가능성이 있는 최대의 지진을 의미하며 활동률( $\lambda$ )은 연간 특정규모이상의 지진이 발생할 예상 횟수를 의미한다. 진도 - 빈도 관계식에서의 b 값은 잘 알려진 다음의 Gutenberg-Richter 식,

$$\log N = a - bI_0 \quad (a, b \text{는 상수})$$

즉 어떤 지역에서  $I_0$  이상 진도의 지진이 N회 발생하는 것으로 표현되는 진도 - 빈도수 그래프에서의 기울기를 나타내는 것으로 상대적으로 큰 지진과 작은 지진의 발생비율 관계를 의미한다.

이들을 계산하기 위하여 필요한 지진 자료는 다음과 같은 두 가지로 나뉘어 질 수 있다. 하나는 수백년 혹은 수천년간 기록되어 온 강지진 자료이고 다른 하나는 비교적 짧은 기간 동안 기록된 완전한 지진 자료이다. 강지진 자료는 사실상 역사지진이라고 할 수 있으며 완전한 지진자료는 일반적으로 계기지진 자료인 경우가 많다.

그런데 비록 철저히 평가한다고 하더라도 특정 지역의 지진위험도를 평가하기 위한 지진 자료를 정확하게 작성하기는 어려운 일이다. 더욱이 역사지진의 경우 그 자료의 정확도는 계기지진에 비해 훨씬 떨어진다. 이러한 자료들의 부정확성에는 두 가지 종류가 있는데 그 하나는 진앙의 위치를 결정하는데 있어 나타나는 오차이고 또 하나는 지진에 있어 진도나 규모의 오차이다. Bath(1979)에 의하면 대부분의 지진들의 진앙지 결정 오차는 약  $1/4^\circ \sim 1/2^\circ$  이고 진도의 오차는 약  $\pm 1$ 이다. 따라서 매개변수들을 계산하고 이에 따라 지진위험지도(seismic risk map)를 작성하는 데에 있어 이러한 불확실성과 오차범위를 감안하는 것은 반드시 필요하다고 할 수 있다.

완전한 자료만을 이용하여 위험도를 평가하는 데에는 그 짧은 자료수집기간으로 인하여 많은 오차를 낳을 수 있으므로 역사지진을 함께 이용하기 위한 움직임은 많이 있었으나 Kijko(1989, 1992)등은 이 분야를 통계적으로 연구하여 매우 효율적인 매개변수 평가공식을 개발했다. 이러한 식에 따라 한반도의 지진 위험도를 계산하기 위한 지진활동 매개변수들을 지진원구역(seismic source zone)별로 나누어 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

지금까지 Gutenberg-Richter 식에서의 b 값을 구하는데 있어 널리 사용되는 것은 최소자승법(Least square method)과 최우도 방법(Maximum Likelihood Method)이다. 최소자승법은 모든 자료의 진도와 그 누적빈도의 Log값을 그래프에 도시한 후에 가장 오차가 적은 선형 관계식을 도출해 내는 것이고 최우도 방법은 지진자료가 있을 때 다음의 공식을 이용하여 값을 계산하는 것이다.

$$b = \frac{\log e}{I_m - I_0}$$

여기에서  $I_m$ 은 사용된 진도값의 최소치  $I_0$ 보다 같거나 큰 모든 진도값의 평균에 해당한다.

이러한 두 가지 방법의 차이는 최우도 방법이 특이한 자료가 있는 경우에 더 안정된(robust) 결과를 도출한다는 데에 있다.(Bullen and Bolt, 1985)

서론에서 언급한 대로 지진 자료에는 강지진자료와 완전한 지진자료가 있는데 이를 이용하여 지진자료 분석을 하는 데에는 두 가지 방법이 있다. 하나는 극대치 이론(extreme value theory)을 이용하는 것으로 전 자료를 특정 시간 간격으로 나누어 각 기간 내의 최대 지진들을 산출하여 분석하는 것이다. 이는 시간간격을 조절하여 강지진 자료를 가장 효율적으로 이용할 수 있는 방법을 찾을 수 있는 반면, 완전한 지진자료도 같은 식으로 평가하여야 하므로 많은 소규모 지진자료들이 분석되지 못하고 낭비된다는 결점을 지니고 있다. 다른 한 가지 방법은 불완전한 강지진 자료를 이용하지 않고 완전한 지진자료만을 분석하는 것이다. 이는 자료 수집기간이 짧은 관계로 오차가

매우 커지는 단점이 있다(Knopoff and Kagan, 1977).

Kijko(1989, 1992)는 지금까지와는 다른 새로운 방법으로 지진활동 매개변수들을 계산하는 방법을 제시했는데 이는 단순히 경험적인 공식이 아니라 일반적으로 받아들여지는 지진발생공식에서 이론적으로 도출된 것이다. 이 방법에 따르면 강지진 자료는 극대치 값을 이용하고 완전한 지진자료는 전 자료를 이용할 수 있다. 또한 완전한 지진자료를 몇 개의 부분으로 나누어 각각의 최소진도(threshold intensity)를 다르게 잡을 수도 있으며 도중에 기록이 되지 않은 부분을 단절 부위(gap)로 처리할 수도 있다. 이 방법을 사용하는 데에는 두 가지의 가정이 필요한데 하나는 지진의 규모와 그 발생횟수의 Log값 사이에는 선형관계가 성립하며 또 하나는 지진의 규모와 진앙에서의 진도값 사이에 선형 관계가 성립한다는 것이다.

### 3. 매개변수의 평가

본 연구에서 채택한 매개변수의 계산과정에 대한 이론적 원리는 다음과 같다.

지진의 발생이 활동률  $\lambda$ 와 이중으로 truncated된 Gutenberg-Richter 식을 갖는 포아송(Poisson) 분포로 나타난다고 가정한다. 그러면 이중 truncated된 누적확률 분포는 다음의 식으로 나타나게 된다.

$$F(x) = P(x \leq X) = \frac{A_1 - A(x)}{A_1 - A_2}, \quad I_0 \leq x \leq I_{\max} \quad (1)$$

여기서  $A_1 = \exp(-\beta I_0)$ ,  $A_2 = \exp(-\beta I_{\max})$ , 그리고  $A(x) = \exp(-\beta x)$ 이다.  $I_{\max}$ 는 최대 가능 진도,  $I_0$ 는 최소 진도이며  $\beta$ 는  $\ln 10$ 에 해당하는 매개변수 값이다. 여기에서 시간 간격을  $t$ 로 놓고 극대치 함수를 구하면

$$G(x|t) = \exp\left[-\lambda t \left(\frac{A_2 - A(x)}{A_2 - A_1}\right)\right] \quad (2)$$

의 형태로 나타난다. 여기서  $I_{\max}$ 를  $\infty$ 로 보내고  $I_0$ 를 0으로 놓으면

$$G(x) = \exp[-\lambda \exp(-\beta x)] \quad (3)$$

이 되어 Gumbel의 제 1형 분포와 같은 형태가 된다.

(2)식에서 우도함수(likelihood method)를 구하면

$$L_0(\theta|x) = \prod_{i=1}^{n_0} g(x_{0i}, t_i|\theta) \quad (4)$$

이 때,  $\ln g(x, t|\theta) = \frac{A_2 - A(x)}{A_1 - A_2} + \ln \frac{\lambda \beta}{A_1 - A_2} - \beta x$

이로서 강지진 자료에 대한 우도 함수를 구할 수 있으며 전체 자료에 대한 우도함수는 각각의 자료에 대한 우도함수의 곱으로 주어지기 때문에 쉽게 구할 수 있다. 매개변수  $\theta = (\beta, \lambda)$ 를 최우도 방법으로 구하기 위하여 이 전체 우도 함수를 각각의 매개변수에 대하여 편미분을 하며  $\partial \ln(\theta|x) / \partial \beta = 0$ , 그리고  $\partial \ln(\theta|x) / \partial \lambda = 0$ 으로 놓음으로서 최우도 방법에 의한 매개변수의 값을 구할 수 있다. 이 방법에 의한 매개변수의 평가값들은 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$\frac{1}{\lambda} = r_1 \frac{\langle t \rangle A_2 - \langle tA \rangle}{A_2 - A_1} + T_2/n \quad (5)$$

$$\frac{1}{\beta} = \langle X \rangle - \gamma + r_1 \lambda \left[ \frac{\langle tx_1 A \rangle - \langle t \rangle A_2 I_{\max}}{A_2 - A_1} + \gamma \frac{\langle tA \rangle - \langle t \rangle A_2}{A_2 - A_1} \right]$$

$$r_1 = n_1/n, \quad n = n_1 + n_2$$

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

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

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

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

또한,  $X_{\max} = I_{\max} \frac{E_1(Tz_2) - E_1(Tz_1)}{\beta \exp(-Tz_2)}$  (6)

여기서  $X_{\max}$  는 관측된 최대진도이며,

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

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

또한  $E_1(\cdot)$  함수는 지수적분함수(exponential integral function)를 나타낸다.

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

이 때, 매개변수 값들의 오차는 다음과 같은 형태의 분산 - 공분산 행렬 A로부터 구할 수 있다.

$$A = \{a_{ij}\} = -\partial^2 \ln L / \partial \theta_i \partial \theta_j, \quad (i, j = 1, 2)$$
 (7)

#### 4. 한반도 지진구들의 적용

그림 1은 한반도의 내의 7개 지진원 구역도를 도시한 것이다. 이 그림은 Lee and Jin(1987)의 지진구역도를 참고하여 이를 다소 수정한 것이다. 이 구역들은 단지 한반도 내의 35%의 면적만을 차지하고 있으나 한반도에서 발생한 모든 지진자료의 약 85%를 차지하고 있다.

그림에서 보이듯이 지진구 1은 평안 분지의 서쪽 일대를 차지하고 있고 MMI V이상의 역사지진 125회, 규모 3.0 이상의 계기지진 7회가 기록되고 있다. 지진구 2는 경기육괴의 서남부를 차지하고 있으며 한반도에서 가장 지진활동이 높은 지역 중 하나이다. MMI V이상의 역사지진 137회, 규모 3.0 이상의 계기지진 5회가 기록되고 있다. 지진구 3은 경기육괴와 옥천대의 경계에 위치하며 MMI V이상의 역사지진 109회, 규모 3.0 이상의 계기지진 4회가 기록되고 있다. 지진구 4는 옥천대와 영남육괴의 경계에 위치하며 MMI V이상의 역사지진 99회, 규모 3.0 이상의 계기지진 4회가 기록되고 있다. 지진구 5는 영남육괴와 경상분지의 경계에 위치하며 MMI V이상의 역사지진 93회, 규모 3.0 이상의 계기지진 5회가 기록되고 있다. 지진구 6은 경상분지의 내부에 위치하며 MMI V이상의 역사지진 58회, 규모 3.0 이상의 계기지진 3회가 기록되고 있다. 지진구 7은 경상분지 내의 양산단층과 울산단층을 포함하는 지역으로 MMI V이상의 역사지진이 36회 발생했다.

일반적으로 완전한 지진자료는 계기지진자료를 의미하나 우리나라에서는 다소 사정이 다르다. 19세기 이후로 갑자기 지진활동이 급격히 감소하였기 때문에 20세기의 계기지진만 분석할 경우 18세기 이전의 활발하던 지진활동을 고려하지 못하게 되며 시간적인 변화도 파악할 수 없기 때문이다. 또한 우리나라의 경우 역사문헌에서의 지진기록이 비교적 충실하기 때문에 조선시대 이후의 지진자료는 비교적 완벽하다고 보여진다. 따라서 조선시대 이후의 자료를 완전한 자료로, 그 이전의 자료를 강지진 자료로 간주하였다. 과거의 연구에서도(Lee and Jin, 1991) 조선시대 이후의 역사지진 자료를 완벽化的 것으로 보고 이 자료만을 이용, 최소자승법이나 최우도 방법으로 b값을 계

산하였다. 도표 1은 조선시대 이후의 자료만을 이용하여 최대가능지진을 고려하지 않고 구한  $b$  값 및 활동률( $\lambda$ )을 나타낸 것이다. 여기서  $b$  값은 최소자승법 및 최우도 방법으로 계산하였으며  $\lambda$  값은 발생횟수를 기간으로 나누어 구하였다. 도표 2는 같은 자료를 이용, 최대가능지진을 고려하여 최우도 방법으로 각 지진원 구역별 매개변수들의 값을 나타내었다. 도표 3은 Kijko의 방법을 이용, 조선시대 이전의 자료를 불완전한 강지진자료로, 그 이후의 자료를 완전한 자료로 간주, 매개변수를 구한 결과이다.

도표 1. 최대가능지진을 고려하지 않고 최소자승법 및 최우도 방법으로 계산한 진도 - 빈도 관계식에서의  $b$  값. 조선시대 이후의 자료만을 이용했음.

지진원 구역	b 값		활동률( $\lambda$ )
	최소자승법	최우도 방법	
1	0.81	0.85	0.25
2	0.69	0.72	0.27
3	0.55	0.57	0.21
4	0.50	0.53	0.19
5	0.64	0.68	0.18
6	0.49	0.52	0.11
7	0.44	0.51	0.07
전 국	0.59	0.61	1.58

## 5. 결론 및 토의

한반도의 지진 위험도값을 계산하기 위한 지진활동 매개변수들을 지진원구역별로 나누어 추정하였다. 한반도에서 지진활동 및 지질을 고려하여 7개의 지진원구역들이 선택되었다. 추정해야 할 지진활동 매개변수에는 최대진도, 활동률, 그리고 진도-빈도 관계식에서의  $b$  값이 있다.

조선시대 이후의 지진자료를 완벽한 것으로 간주하여 이들을 이용, 최대진도를 고려하는 방법과 고려하지 않는 방법으로 매개변수를 추정하였으며 완전한 지진자료와 불완전한 강지진자료를 함께 고려하는 방법을 이용하여 다시 지진활동 매개변수 값을 결정하였다.

도표 2. 지진원 구역별로 계산된 지진활동 매개변수들. 조선시대 이후의 자료를 완전한 것으로 간주하여 이 자료만을 고려한 결과.

지진원 구역	b	$\lambda$	$I_{max}$
1	$0.80 \pm 0.03$	$0.24 \pm 0.03$	$9.22 \pm 0.73$
2	$0.67 \pm 0.02$	$0.27 \pm 0.02$	$9.75 \pm 0.64$
3	$0.52 \pm 0.07$	$0.21 \pm 0.03$	$9.87 \pm 0.56$
4	$0.49 \pm 0.04$	$0.20 \pm 0.03$	$9.42 \pm 0.45$
5	$0.64 \pm 0.03$	$0.18 \pm 0.01$	$9.90 \pm 0.24$
6	$0.51 \pm 0.04$	$0.12 \pm 0.02$	$9.54 \pm 0.21$
7	$0.49 \pm 0.05$	$0.07 \pm 0.01$	$10.12 \pm 0.46$
전 국	$0.57 \pm 0.06$	$1.58 \pm 0.03$	$10.44 \pm 0.79$

도표 3. 지진원 구역별로 계산된 지진활동 매개변수들. 조선시대 이후의 자료를 완전한 것으로, 이전의 자료를 불완전한 것으로 간주하여 함께 고려한 결과.

지진원 구역	b	$\lambda$	$I_{max}$
1	$0.78 \pm 0.04$	$0.22 \pm 0.05$	$9.18 \pm 0.83$
2	$0.62 \pm 0.03$	$0.24 \pm 0.03$	$9.52 \pm 0.75$
3	$0.49 \pm 0.08$	$0.19 \pm 0.03$	$9.73 \pm 0.57$
4	$0.46 \pm 0.04$	$0.16 \pm 0.02$	$9.25 \pm 0.39$
5	$0.58 \pm 0.03$	$0.15 \pm 0.01$	$9.78 \pm 0.22$
6	$0.44 \pm 0.03$	$0.09 \pm 0.02$	$9.45 \pm 0.18$
7	$0.41 \pm 0.05$	$0.07 \pm 0.01$	$10.15 \pm 0.49$
전 국	$0.54 \pm 0.06$	$1.32 \pm 0.03$	$10.17 \pm 0.58$

결과치는 최대진도를 고려하는 경우가 고려하지 않을 때보다  $b$ 값이 다소 낮아지나 큰 차이는 없으며 조선시대 이전의 불완전한 기록을 고려할 경우 다소 더 낮아지는 것으로 나오고 있다. 활동률의 경우는 최대진도값을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우가 거의 비슷한 값이 나오나 불완전한 기록을 고려할 경우 다소 낮아진다. 최대진도값도 역시 불완전한 기록을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우에 큰 차이가 나타나지는 않으며 보통 불완전한 기록을 고려하는 경우가 다소 낮은 값이 나오나 양산단층 일대를 포함한 지진원의 경우, 오히려 이 경우가 다소 큰 값을 갖는다. 결론적으로 불완전한 강지진자료와 완전한 지진자료를 조합하여 수행한 지진활동 매개변수의 추정치는 상당히 안정적이며 따라서 이 방법을 비교적 신뢰할 수 있음을 보여주고 있다.

## 참고문헌

1. Båth, M., 1979, Introduction to seismology, Birkhä user Verlag.
2. Bullen, K.E. and Bolt, B.A., 1985, An introduction to the theory of seismology, Cambridge University Press.
3. Kijko, A. and Sellevoll, M.A., 1989, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am., 79, 645-654.
4. Kijko, A. and Sellevoll, M.A., 1992, Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 120-134.
5. Knopoff, L. and Kagan, Y., 1977, Analysis of the theory of extremal values as applied to earthquake problems, J. Geophys. Res., 82, 5647-5657.
6. Lee, K. and Jin, Y.G., 1989, A probabilistic analysis of the seismic risk in Korea(II), Jour. Geol. Soc. Korea, 25, 59-71.
7. Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan Fault System: geophysical studies on major faults in the Kyungsang Basin, Jour. Geol. Soc. Korea, 27, 434-449.

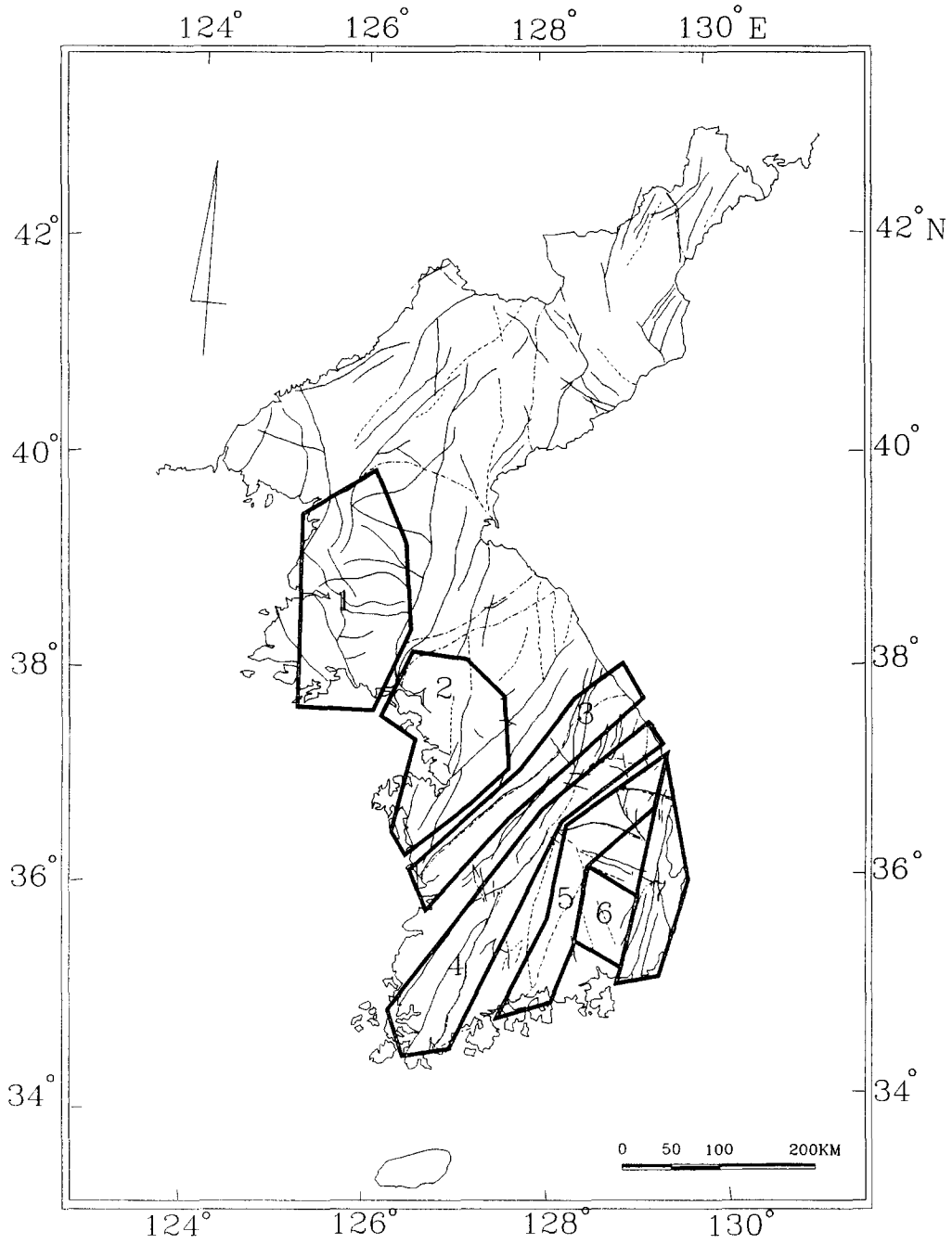


그림 1. 한반도 내의 7개 지진원 구역도 도시