

## KSRS 관측자료에 의한 b-값 평가 Estimation of b-value for Earthquakes Data Recorded on KSRS

신진수\*            강익범\*            김근영\*\*  
Shin, Jin Soo    Kang, Ik Bum    Kim, Geun-Young

---

### ABSTRACT

The b-value in the magnitude-frequency relationship  $\log N(m) = a - bm$  where  $N(m)$  is the number of earthquakes exceeding magnitude  $m$ , is important seismicity parameter in hazard analysis. Estimation of the b-value for earthquake data observed on KSRS array network is done employing the maximum likelihood technique. Assuming the whole Korea Peninsula as a single seismic source area, the b-value is computed at 0.9. The estimation for KMA earthquake data is also similar to that. Since estimate is a function of minimum magnitude, we can inspect the completeness of earthquake catalog in the fitting process of b-value. KSRS and KMA data lists are probably incomplete for magnitudes less than 2.0 and 3.0, respectively. Examples from probabilistic seismic hazard assessment calculated for a range of b-value show that the small change of b-value has seriously effect on the prediction of ground motion.

---

### 1. 서론

일반적으로 지진 규모에 따른 발생 빈도수는 Gutenberg-Richter 식  $\log N(m) = a - bm$ 을 따르는 것으로 알려져 있다. 이 식에서  $N(m)$ 은 규모  $m$ 이상인 지진발생 횟수이다. Gutenberg-Richter 식은 매우 단순한 모양으로 표기되어 있지만 이 식의 상수 계수  $a$ 와  $b$ 는 한 지역의 지진활동 정도를 나타내는 중요한 기능을 한다.  $a$ 값은 그 지역의 절대적인 지진활동 수준을 지시하는 것으로 높은  $a$ 값은 높은 지진발생 빈도를 의미한다. 반면에  $b$ -값은 전체 지진 발생 횟수에서 규모별 지진발생 횟수의 상대적인 분포를 지시한다. 높은  $b$ -값은 큰 규모의 지진발생 횟수가 상대적으로 적음을, 낮은  $b$ -값은 큰 규모의 지진발생 횟수가 많음을 의미한다. 따라서 지진발생 횟수가 유사하더라도 낮은  $b$ -값의 지역이 지진재해도가 높게 평가된다.

군발지진(Swarm earthquake) 지역을 제외하고 세계 대부분의 지역에서  $b$ -값은 0.7 또는 0.8 에서

---

\* 한국지질자원연구원 선임연구원

\*\* 한국지질자원연구원 연구원

1.0 사이이며<sup>11)</sup> 지진학적으로 특이 지역 외에 제한된 지역에서 급격히 변화하지 않는다. b-값은 미래의 지진발생 확률 특히 지진피해를 발생시키는 큰 규모의 지진 발생을 예측하는데 사용되는 계수이기 때문에 한 지역의 지진재해도 분석에 중요한 자료이다. 우리나라에서는 Lee and Jung<sup>(1)</sup>이 1900년대 초에 관측된 63개의 지진자료를 분석하여 한반도에서의 b-값을 0.8 정도로 평가한바 있으나 이후 몇몇 연구자들이 역사 지진 기록에서 진도-발생 회수 관계식 연구를 수행한 것 외에 후속적인 연구가 진행되고 있지 않았다. 이는 우리나라에서 통계적으로 처리할 수 있을 정도의 충분한 계기 지진 기록이 누적되어 있지 않았기 때문이다.

여기에서는 한국지질자원연구원에서 운영 중인 KSRS(Korean Seismic Research Station) 배열 관측망에서 관측된 지진자료로부터 최우도 방법(Maximum Likelihood Method) 한반도의 b-값을 평가하였다. b-값의 결정 과정에는 결과에 영향을 주는 여러 요소 - 최대 및 최소 규모 값, 규모 증분, 자료 수집 기간, 계산 방법 등 -가 있다. 하지만 각 요소에 세부적인 민감도 분석은 수행되지 않았다. 기상청 지진자료로부터 같은 방법으로 b-값을 평가하여 두 결과를 비교하였다. 마지막으로 간단한 지진원 구역 모델을 설정하여 b-값의 변화가 확률론적 지진재해도 계산에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 지진 자료 정리 및 b-값 계산

### 2.1 b-값 계산 방법

지진규모( $m$ )와 발생 빈도관계( $N$ )를 나타내는 Gutenberg-Richter 식은 상용대수 함수 또는 자연대수 함수 식으로 표시된다.

$$\log N(m) = a - bm$$

$$\ln N(m) = \alpha - \beta m$$

이 식으로부터 전체 관측지진 개수가  $N$ 인 경우 각 규모 구간에 지진발생 빈도가 분포할 확률은 다음과 같다<sup>(3)(4)</sup>.

$$f(k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{N!}{\prod_{i=1}^n k_i!} \left[ \frac{1 - \exp(-\beta \Delta m)}{1 - \exp(-n\beta \delta m)} \right]^N \exp \left[ -\beta \Delta m \sum_{i=1}^n (i-1) k_i \right]$$

여기에서  $n$ 은  $n\Delta m = m_{\max} - m_{\min}$ 의 관계를, 규모구간에 지진발생 회수인  $k_i$ 는  $\sum_{i=1}^n k_i = N$ 의 관계를 지닌다. 최우도방법에 의하여  $b$  또는  $\beta$ 를 결정하는 것은 위 확률식에서  $\partial \log f / \partial \beta = 0$ 을 구하는 것이다. 그런데 실제 자료처리 과정에서 b-값은 최대 지진규모  $m_{\max}$ , 최소 지진규모  $m_{\min}$ , 규모증분  $\Delta m$ 의 설정에 따라 조금씩 변화한다. 이번 계산에서는  $m_{\max}$ 는 자료목록에서

최대 값으로 고정하였고 여러 경우의  $m_{\min}$ 은 설정하여 그 변화를 보았다. 한편  $\Delta m$ 은 0.5로 하였다.

## 2.2 지진자료

b-값 평가를 위하여 1998년 9월부터 2002년 7월까지 KSRS 관측망에 기록된 약 7800여 개의 관측기록을 수집하였다. 전체 자료는 우리나라의 일반적인 지진활동 특성과 비교하여 볼 때 상당히 많은 수이다. 이는 자료 목록에 많은 양의 발파 기록이 포함되어 있기 때문이다. 그림 1.a에서 볼 수 있듯이 규모 1.0 미만의 기록 분포가 경기북부 지역과 중부 내륙 지역에 집중된다. 이는 우리나라에서 영남 해안에서 충청 북부해안을 잇는 지역과 경기만 일대에 지진발생 빈도가 상대적으로 높다는 사실과 일치하지 않는 결과이다. 그림 1.b는 규모 2.0 이상 기록의 분포인데 이 그림은 우리나라의 지진활동 특성과 비교적 일치한다. 이와 같이 규모에 따라 진앙분포의 차이를 보이는 원인은 규모 2.0 미만의 미소지진목록에 많은 수의 인공발파 기록이 포함되어 있기 때문이다.

그림 2.a는 발파로 추정되는 기록을 제거하지 않고 계산한 b-값 계산 결과이다. 계산 결과에서 보면 최소규모가 1.0에서 2.0 사이 일 때 b-값이 0.9 이상이었다가 이후 약 0.9에 수렴하는 것을 볼 수 있다. b-값이 크게 나타나는 것은 전체 자료수에서 작은 규모 자료 분포가 상대적으로 많은 것을 의미한다. 이는 규모 2.0 미만의 목록에 지진이 아닌 발파 기록이 많이 포함되어 있음을 반영하는 것이다. 그림 2.a는 발파진동이 포함된 목록에서 구한 b-값 계산의 전형적인 결과로 볼 수 있다.

신뢰도 있는 b-값 평가를 위하여서는 지진목록에서 발파기록을 제거해야만 한다. 정확한 지진 목록을 작성하기 위하여서는 기록된 파형을 분석하여 발파와 지진을 구분하거나 또는 진앙위치 현장을 방문하여 발파 여부를 확인하는 작업이 있다. 하지만 몇 개 지진에 대한 세밀한 연구가 아니고 많은 수의 자료를 처리할 때 위 두가지 방법은 현실적으로 어려움이 있다. 또 다른 한가지 용이한 방법은 발파가 많은 광산, 채석장 또는 대형 건설현장 주변의 모든 기록을 지진 목록에서 제거하는 것이 있으나 미소 진동의 경우 큰 규모의 지진보다 진앙 결정 오차 범위가 크기 때문에 목록에서 제거할 진앙분포의 범위를 결정하기가 어렵다. 여기에서는 지진자료의 발생 시간 분포를 분석하여 발파 진동을 없애는 방법을 적용하였다.

지진파는 다르게 발파의 경우 대개 주간에 발생하기 때문에 오후 8시부터 다음날 6시까지의 진동기록은 지진에 의한 것으로 볼 수 있다. 각 규모 구간 별로 주간 시간에 야간 시간대에 평균 지진발생 횟수 보다 많은 자료의 갯수는 인공발파에 의한 것으로 판단하고 이를 인위적으로 제거하여 지진목록을 새롭게 작성하였다. 그림 2.b는 수정된 지진목록으로부터 계산된 b-값 결과이다. 최소 규모  $m_{\min}$ 을 2.0을 설정했을 때부터 b-값이 0.9에 수렴하는 모양을 보여준다. 이하 구간에서 b-값은 이보다 작은 값으로 구해지는데 이는 2.0 미만의 기록이 충분하지 않음을 말한다. 즉 KSRS 배열 관측망이 규모 2.0 미만의 미소 지진을 완벽하게 관측하지 못하는 것으로 볼 수 있다.

비록 자료 수집 기간이 짧아 계산 결과에 신뢰도가 낮을 수는 있으나, 한반도의 b-값이 0.9 정도로 평가된 것은 합리적인 결과이다. 전 세계적으로 b-값은 0.7~1.0 사이로 나타나고 있다(ref Bold). 미국 지질조사소(USGS)의 연구에 의하면 캘리포니아 지역에서 b-값은 0.9정도로 또한 이

지역을 제외한 미국 서부에서 b-값은 0.8 정도로 평가되고 있다. 미국 중동부에서 b-값은 0.95 정도이다. 미국의 이 값들은 서부에서 큰 규모 지진의 재래주기가 동부보다 짧은 것을 잘 반영하고 있는 것이다.

동일한 방법을 적용하여 1978년 이후 현재까지 기상청 지진자료를 이용하여 b-값을 계산하여 위 결과와 비교하였다. 기상청 자료에 의한 b-값 역시 0.9 정도로 평가되어 같은 결과를 보여준다 (그림 3). 그런데 기상청 자료분석 과정에서 나타난 특징은 최소규모  $m_{\min}$ 이 3.0 이하 일 때 b-값이 0.9 이하로 급격히 감소하는 것이다. 이는 이 규모이하 지진목록이 불완전하여 나타나는 것으로 기상청 지진관측망 혹은 자료분석 과정이 이 규모 이하의 지진기록을 충분히 담지 못하고 있는 것으로 여겨진다.

### 3. 지진 재해도 분석에서 b-값 영향

확률론적 지진재해도 분석이란 일정 기간동안 한 장소에서 지진에 의하여 지반운동의 최고 가속도가 정해진 확률보다 초과할 값을 계산하는 것이다. 지진재해도 계산에 관한 일반적인 원리는 Cornell<sup>(5)</sup>, Frankel<sup>(6)</sup> 등에 의하여 제시되었는데 최대 지반운동이  $u_0$ 를 초과할 확률  $\lambda(u > u_0)$ 를 계산하는 기본적인 식은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\lambda(u > u_0) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^N 10^{\log n^{ref}/T - b(M_j - M_{ref})} P(u > u_0 | D_k, M_j)$$

여기서  $N_s$ 는 지진원대(Seismic source zone)의 개수로써 면진원, 또는 선진원 과 같은 형태로 주어진다.  $n^{ref}/T$ 는 지진관측기간 T 시간 동안 기준규모  $M_{ref}$  지진의 발생 빈도수이다.  $P(u > u_0 | D_k, M_j)$ 는 규모  $M_j$ 의 지진이 발생 했을 때 진앙거리  $D_k$ 에서 지반운동이  $u_0$ 를 넘을 확률로써 지반운동 감쇠식으로 구해진다. 이 식에서 볼수 있듯이 지진재해도 계산에 중요한 요소는 지반운동감쇠식과 그 지역의 지진활동 정도이다. 지진 활동 정도는 b-값과 기준규모 지진의 생 빈도수로 표시된다.

다른 요소-감쇠식, 기준규모 발생 빈도수 등-을 고정하고 b-값을 0.5에서 1.5까지 변화시키면서 지진재해도 계산에 b-값이 미치는 영향을 알아보았다. 사용된 지진원은 길이 100 km 의 선진원과 300×300 km의 면진원 두 종류이다. 계산에서 기준규모  $m_{ref}$ 는 4.5로 하였고 선진원의 경우 연간 0.5회, 면진원의 경우 0.2회 발생하는 것으로 가정하였다. 지진재해도가 계산되는 지점은 선진원 중앙으로부터 10km 거리이고 면진원은 중앙부이다. 그림 4의 계산 결과에서 볼 수 있듯이 작은 b-값에서는 지진재해도 값이 높게 평가되고 b-값이 증가할수록 지진재해도 값이 감소한다. 이는 작은 b-값은 큰 규모의 지진 비율이 높은 것을 의미하기 때문이다. 그림 4.b에서 b-값이 0.8, 0.9, 1.0 일 때 재현주기 2,500년일 때 추정되는 최대 지반가속도는 각각 0.20g, 0.17g, 0.14g로써 b-값이 0.1 정도 변화 할 때 지반가속도도 약 0.03g 정도 바뀐다. 반대로 같은 b-값에 대한 지반가속도 0.2g에 대한 재현주기는 약 2,500년, 3,800년, 5,900년이다. 여기에서 지진재해도 해석에서 b-값이 중요한 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

KSRS 배열 관측망에 자료에 의한 한반도의 b-값은 0.9로 평가된다. 자료분석 과정에서 보면 규모 2.0 미만의 지진자료에는 상당수의 발파 진동이 포함되어 있음을 알 수 있다. 지진 목록에서 이들 발파 진동을 제거하였을 때 b-값 평가를 위한 최소 규모가 2.0 이하 일 때 b-값은 0.8 이하로 계산된다. 전 세계적으로 b-값은 0.7 또는 0.8에서 1.0사이에서 결정된다. b-값이 1.0 이상 일 때는 지진자료에 미소 지진의 발생 횟수가 예측되는 것보다 많은 것으로 자료에 인공적인 발파 기록이 포함되어 있을 가능성이 높다. 반대로 0.8 또는 0.7이하 일 경우에는 미소 지진의 발생 횟수가 예측보다 작은 것으로 지진 관측망의 관측 능력이 일정 규모 이하의 미소 지진을 완전히 기록하지 못한 것으로 볼 수 있다.

KSRS 자료의 경우 이 두가지 현상이 동시에 나타나는데 원시자료에서는 발파진동 자료의 영향으로 b-값이 높게 평가된 반면 발파 진동을 제거한 경우 b-값이 낮게 평가되는 수도 있었다. 이는 KSRS 관측망 자료에 미소 규모 크기의 많은 수의 발파 진동이 포함되는 반면에 비교적 원거리에서 발생하는 미소지진은 완벽하게 기록하지 못하기 때문이다. 기상청 기록 분석에서도 최소 규모  $m_{min}$ 이 3.0 이상일 때부터 계산된 b-값이 0.9 정도에 수렴하는 것을 보였다. 이 이하의 최소규모 설정 구간에서는 b-값이 낮게 계산되는 것으로 보아 규모 3.0 미만의 지진자료가 완벽하지 않음을 알 수 있다.

확률론적 지진재해도 모델 계산은 정확하지 b-값 변화가 최대 지반가속도 예측에 많은 영향을 주는 것을 보여 주었다. 필요한 다른 요소가 일정하게 고정하였을 때 작은 b-값은 높은 재해도를, 큰 b-값은 낮은 재해도 계산 결과를 이끈다. 따라서 정확한 한반도의 정확한 지진재해도 예측을 위하여서는 정확한 b-값 평가가 선행되어야 한다.

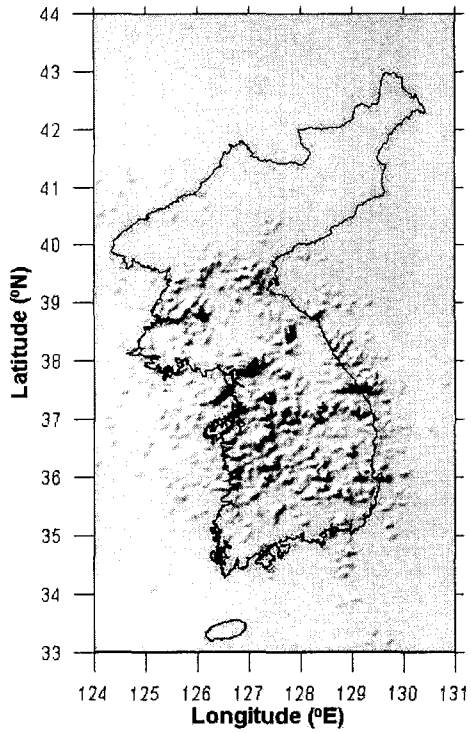
#### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업인 “지진원 및 지진파 전달특성 연구” 과제의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사한다.

#### 참고문헌

1. Bolt, B. A. Earthquakes 4th edition, W. H Freeman and Company, New York, 1999.
2. Lee, K and Jung, H. O., A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula, *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 16, 1980, pp. 32-45.
3. Bender, B., Maximum likelihood estimation of b values for magnitude group data., *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 73, 1983, pp 831-847.
4. Weichert, D. H., Estimation of earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 70, 1980, pp 1337-1346.
5. Cornell, C. A., Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 66, 1968, pp 1583-1606.
6. Frankel, A. F., Mapping seismic hazard in the central and eastern United States, *Seismological Research Letters*, Vol. 66, 1995, pp 8-21.

a)



(b)

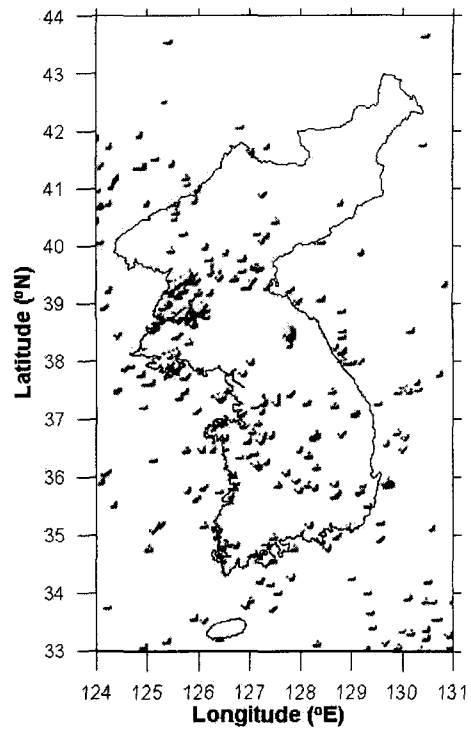
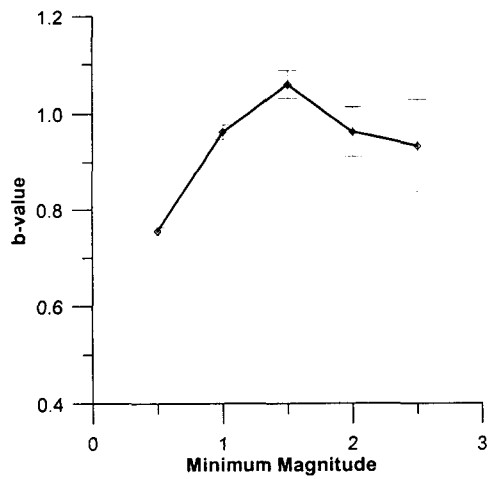


Figure 1. Probability density function display of event with magnitude less than 1.0(a), greater than 2.0(b) recorded on KSRS array station of KIGAM.

(a)



(b)

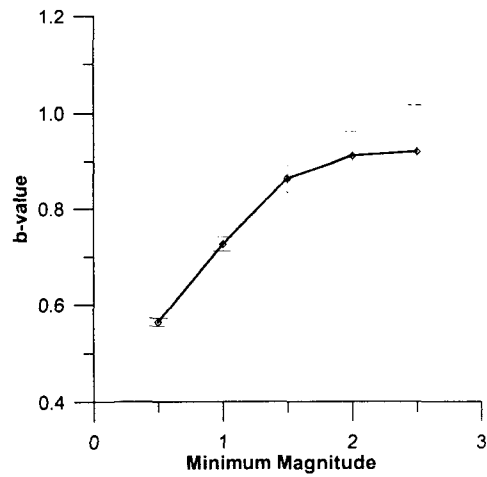


Figure 2. Estimates of b-value as a function of minimum magnitude  $m_{\min}$  for KSRS raw(a) and corrected(b) event data.

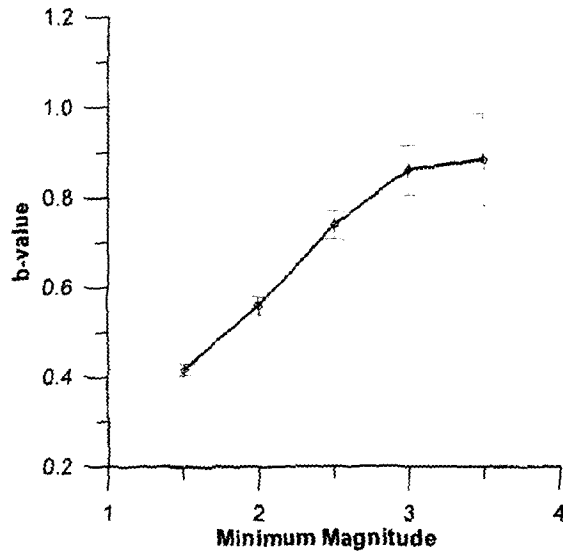


Figure 3. Estimates of b-value as a function of minimum magnitude  $m_{min}$  for KMA data

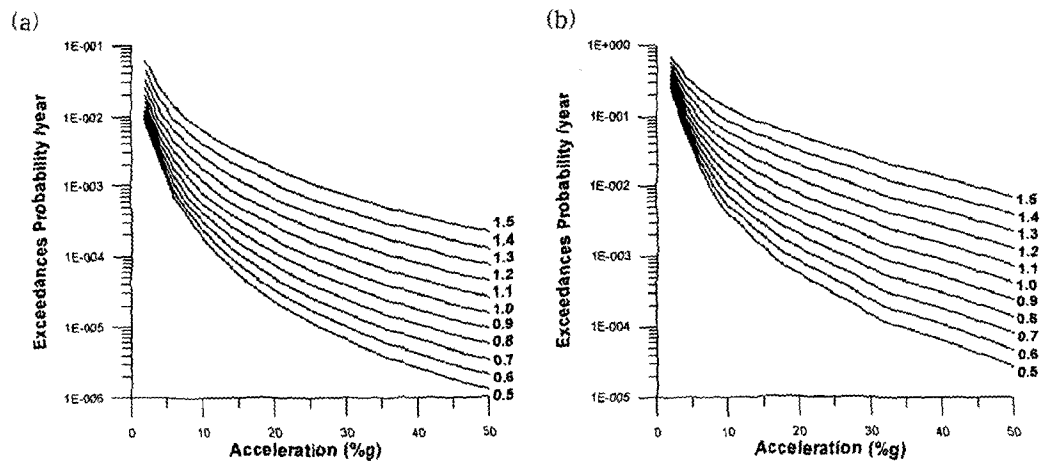


Figure 4. Acceleration exceedances probabilities at a site as function of  $b$ -value for a fixed earthquake rate. (a): Site is center of area source with a rectangle  $300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ , The rate  $N(m_{ref})$  is  $0.2/\text{year}$ . (b): Site is  $10 \text{ km}$  from center of line source with length  $100 \text{ km}$ . The rate  $N(m_{ref})$  is  $0.5/\text{year}$