

지진활동 매개변수 추정을 위한 기상청 지진목록의 최소규모 분석

노명현 · 이상국 · 최강룡
한국원자력안전기술원

요 약

기상청 지진목록에 대하여 지진활동 매개변수 추정을 위한 최소규모를 분석하였다. 한반도 남부 지역 전체에 대하여, 규모별 발생빈도의 시간적 변화로부터 규모 3.0 이 적절한 최소규모로 추정되었다. 최소규모 3.0 이상 지진의 발생빈도로부터 추정된 b 값은 1.11로서 이전의 연구결과에 비하여 크게 나타났다. 한반도 남부지역을 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 격자로 나누어 최소규모의 공간적 분포를 분석한 결과 많은 지점에서 최소규모에 대한 통계적 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 통계적 기준을 만족하는 지점은 주로 동부지역에 집중되며, 이 지역에서 최소규모는 2.4 ~ 3.5이다. 또한 b 값은 0.75 ~ 1.73이며, 평균은 1.08로서 한반도 남부지역 전체에 대한 값과 유사하다.

주요어: 기상청 지진목록, 최소규모, 지진활동 매개변수

Myung Hyun Noh, Sang Kook Lee, Kang Ryong Choi, 2000, Minimum magnitudes of earthquake catalog of Korea Meteorological Agency for the estimation of seismicity parameters. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 4, p. 261-268

ABSTRACT: Minimum magnitudes (M_c) for estimation of seismicity parameters were analyzed for the earthquake catalog of Korea Meteorological Agency (KMA). The temporal variation of earthquake frequency suggests that a proper M_c be 3.0 for the whole southern part of the Korean Peninsula. The b-value with M_c of 3.0 is estimated to be 1.11, which is larger than those of the previous studies. To see the spatial variation of M_c , the southern part of the peninsula were divided into grids of 0.1×0.1 degree. At the greater portion of grid points, the local earthquake catalogs do not satisfy given statistical criteria. The grid points whose local earthquake catalogs meet the criteria mostly distribute in the eastern part. M_c at these points range 2.4 to 3.5 and b values range 0.75 to 1.73 with the average of 1.08 which is comparable to that for the whole southern part of the peninsula.

Key words: earthquake catalog of KMA, minimum magnitude, seismicity parameters

(Myung Hyun Noh, Sang Kook Lee, Kang Ryong Choi, Korea Institute of Nuclear Safety, Gusong-Dong 19 Taejon Korea, 305-600; e-mail: k343nmh@kins.re.kr)

1. 서 론

지진재해도 분석에 있어 정확한 지진활동 매개변수의 추정은 매우 중요하다. 지진활동 매개변수 추정에 이용되는 지진목록에 대한 전제조건은 완전성이나, 실질적으로 모든 지진목록은 완전하지 않다. 대표적인 불완전성 요인으로 지진관측망의

관측 한계에 의한 작은 지진의 누락과 여러 가지 규모의 혼용에 의한 규모의 불균질성을 들 수 있다. 그러므로, 지진활동 매개변수 추정시 반드시 지진목록의 완전성에 대한 분석이 선행되어야 한다.

우리 나라에는 약 2000년간의 역사문헌에서 검색된 역사지진자료가 있어 계기지진자료와 함께 한반도 지진활동 특성 분석의 기초자료로 활용되

어왔다. 알려진 바와 같이, 역사지진자료는 계기 지진자료에 비해 관측기간이 길어 지진활동의 중·장기 특성 분석에 유용한 정보를 제공하나, 근본적으로 정성적인 자료이므로 정량적인 해석에는 한계가 있다.

우리 나라에 최초로 지진계가 설치된 것은 1905년이나, 체계적으로 정리된 지진목록은 1978년 이후부터이다(기상청, 2001). 1978년 이전의 지진자료는 국내·외의 다양한 자료로부터 구할 수 있다. 이 논문에서는 1978 ~ 2000년에 발생한 지진에 대한 기상청의 지진목록(기상청, 2001)을 대상으로 목록의 완전성에 대한 최소규모(M_c)를 분석하였다. 최소규모는 지진목록에 지진활동의 통계적 특성이 온전히 나타나는 것으로 추정되는 규모의 하한 값을 의미한다. 이 분석에서 기상청 지진목록에 기재된 규모의 종류(magnitude type)가 균질하다는 가정을 하였다. 이 가정으로부터 1978년 이전의 지진자료는 분석에서 제외하였다. 이 지진자료는 자료의 출처가 다양할 뿐만 아니라 여러 가지 규모를 혼용하고 있어 규모를 균질화하는 작업이 선행되어야 하기 때문이다. 1978년 이전의 지진자료에 대한 분석은 후속 논문에서 다루어질 예정이다.

2. 방 법

최소규모 추정방법은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있는데, 하나는 지진관측망/관측소의 관측한계를 고려한 방법이며, 다른 하나는 규모-빈도 분포를 이용하는 방법이다. 관측한계를 고려한 방법에는 주·야간 지진관측망의 민감도 변화(Rydelek and Sacks, 1989), 주변지역 감쇄특성 및 신호 대 잡음비(Sereno and Bratt, 1989; Harvey and Hansen, 1994), 또는 잡음을 고려한 진폭하한(Gomberg, 1991) 등이 있다. 규모-빈도 방법은 지진목록에 기재된 지진의 규모-빈도 관계와 식 (1)의 이론적 모델 사이의 상관도를 이용하는 방법이다(Wiemer and Wyss, 2000).

$$\log_{10} N = a - bM \quad (1)$$

위에서 N 은 규모 M 이상 지진의 발생빈도이다. 이 논문에서는 두 번째 방법을 이용하였다. 이 방법은 첫 번째 방법에 비하여 간편하다는 장점이 있는 반면, 길으로 드러난 통계적 특성만을 고려한다는 단점이 있다. 그러나 지진재해도 분석을 위한 지진활동 매개변수 추정에 충분히 적합한 방법이라 할 수 있다.

실제 관측된 지진의 규모-빈도 관계는 규모가 감소함에 따라 기울기가 감소한다(Fig. 2 참조). 이는 일부 작은 지진이 관측에서 누락되었음을 의미한다. 따라서 이 부분은 분석에서 제외해야 한다. 분석에 이용될 수 있는 지진규모의 하한 값, 즉 최소규모(M_c)를 추정하는 것이 이 논문의 주목표이다.

최소규모는 다음의 절차에 따라 결정된다(Wiemer and Wyss, 2000). 먼저, $M \geq M_i$ 인 지진을 이용하여 a 및 b 값을 추정한다. 이 논문에서는 a 및 b 값 추정에 최소제곱법을 이용하였다. 다음 a , b , M_i 를 식 (1)에 대입하여 규모-빈도 자료를 모사한다. 모사된 자료와 관측자료 사이의 상관도는 식 (2)의 일치도(Goodness of fit; GOF)를 이용하여 측정된다. 이 과정을 M_i 를 증가시키면서 반복하여 식 (2)에서 계산된 GOF 가 최초로 설정된 기준값을 초과하는 M_i 가 M_c 이다. 최소규모의 공간적 분포 분석시 85%를 GOF 기준으로 적용했다.

$$GOF(a, b, M_i) = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{M_i}^{M_{max}} |B_i - S_i|}{\sum B_i} \right) \quad (2)$$

위에서 B_i 와 S_i 는 각 규모구간에서의 누적빈도로서 관측 값과 예측 값을 나타낸다.

3. 분석결과

3.1. 한반도 남부지역 전체에 대한 분석

GOF 를 이용한 정량적 분석에 앞서 한반도 남부지역(북위 $34^\circ \sim 38^\circ$, 동경 $126^\circ \sim 130^\circ$)에

서 발생한 지진의 규모별 발생빈도를 발생연대에 따라 살펴보았다. 분석 지역을 한반도 남부로 국한한 것은 북부 지역이 기상청 관측망 바깥에 있어 지진관측력의 차이가 명백하기 때문이다. Fig. 1은 한반도 남부지역에서 발생한 지진의 빈도를 0.2의 규모구간으로 나누어 연도별로 도시한 것

이다. 규모 3.0 이상의 지진발생빈도가 평균빈도(점선)를 중심으로 변화를 보이는 반면, 규모 3.0 미만의 지진발생빈도는 1980년대까지는 평균빈도보다 작게, 그 이후는 크게 나타난다. 이는 작은 지진이 현재보다 과거에 더 많이 관측에서 누락되었음을 의미한다. 특히, 규모 3.0 이하 작은 지

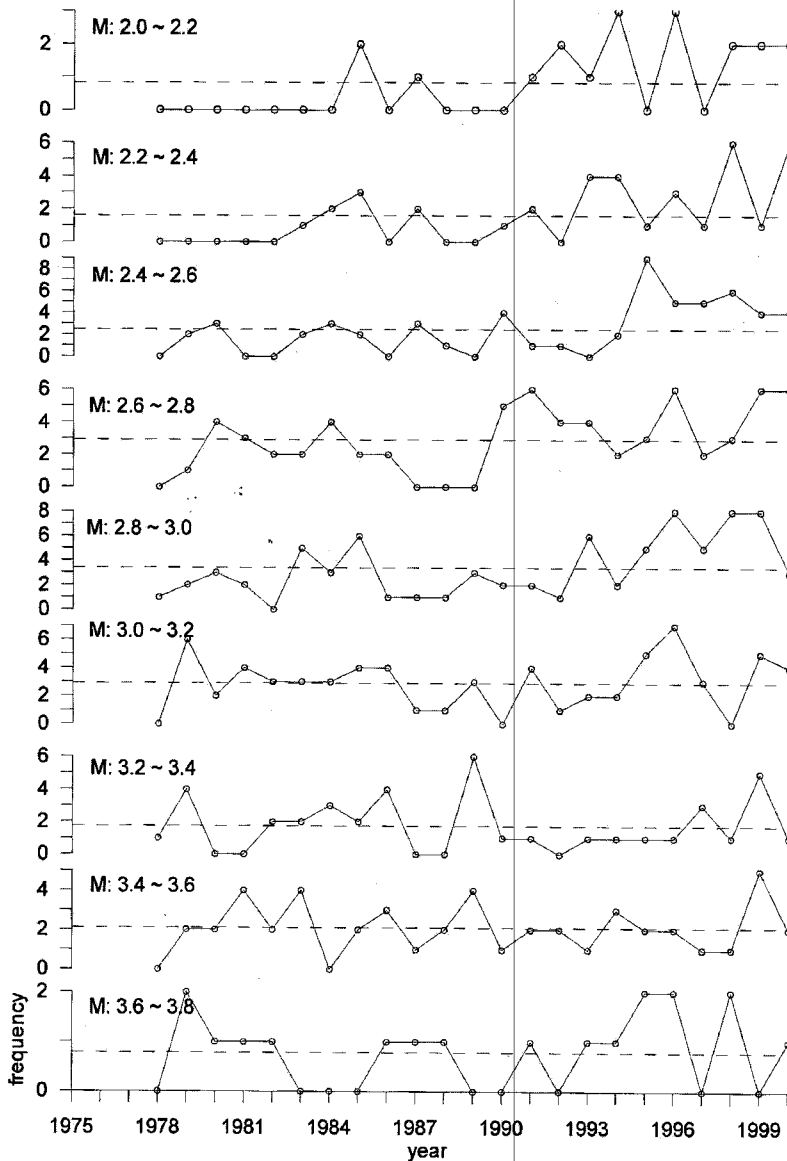


Fig. 1. Temporal variation of magnitude-grouped earthquake frequency in the southern part of the Korean Peninsula. Horizontal dashed lines represent mean earthquake frequencies.

진의 경우 1990년 이후에 발생빈도가 증가한 것은 1991년에 시작된 기상청 장비현대화사업(기상청, 2001)을 통하여 지진관측소 숫자가 증가한 것과 무관하지 않을 것으로 생각된다. Fig. 1로부터 한반도 남부지역 전체에 대한 기상청 지진목록은 규모 3.0 이상부터 완벽하다고 할 수 있다.

Fig. 2에서 왼쪽 그림은 관측 누적빈도와 $M_c = 3.0$ 에 대한 예측 누적빈도를 비교하고 있다. 규모 3.0 이상에서 관측 값과 예측 값이 잘 일치함을 알 수 있으며, 이는 규모별 지진발생빈도의 시간적 변화 분석결과와 부합한다. 오른쪽 그림에는 $M_c = 1.9$ (관측 최소지진) 및 $M_c = 3.3$ (GOF가 최초로 85% 초과)인 경우를 추가하였다. $M_c =$

1.9, 3.0, 3.3에 대하여 $GOF = 59, 83, 85\%$ 이며, $b = 0.78, 1.11, 1.17$ 이다. GOF 의 최대 값은 86%이며, 이때 $M_c = 3.4, b = 1.18$ 이다.

이상의 분석결과에 기초할 때, 한반도 남부지역 전체에 대한 최소규모는 $M_c = 3.0$ 이 적합한 것으로 판단된다. $M_c = 3.0$ 에 대하여 추정된 $b = 1.11$ 은 기존의 연구결과(기상청, 1992, 2001)에 비하여 매우 큰 값이나, 안정대륙지역(Stable continental region) 중 한반도가 포함된 지역에서의 분석 값 $b = 1.016 \pm 0.107$ (Johnston, 1994)과 부합한다.

관측 누적빈도와 $M_c = 3.0$ 에 대한 예측 누적빈도를 비교하면 Table 1과 같다. Table 1에서 예측 누적빈도는 $a = 5.66$ 와 $b = 1.11$ ($GOF =$

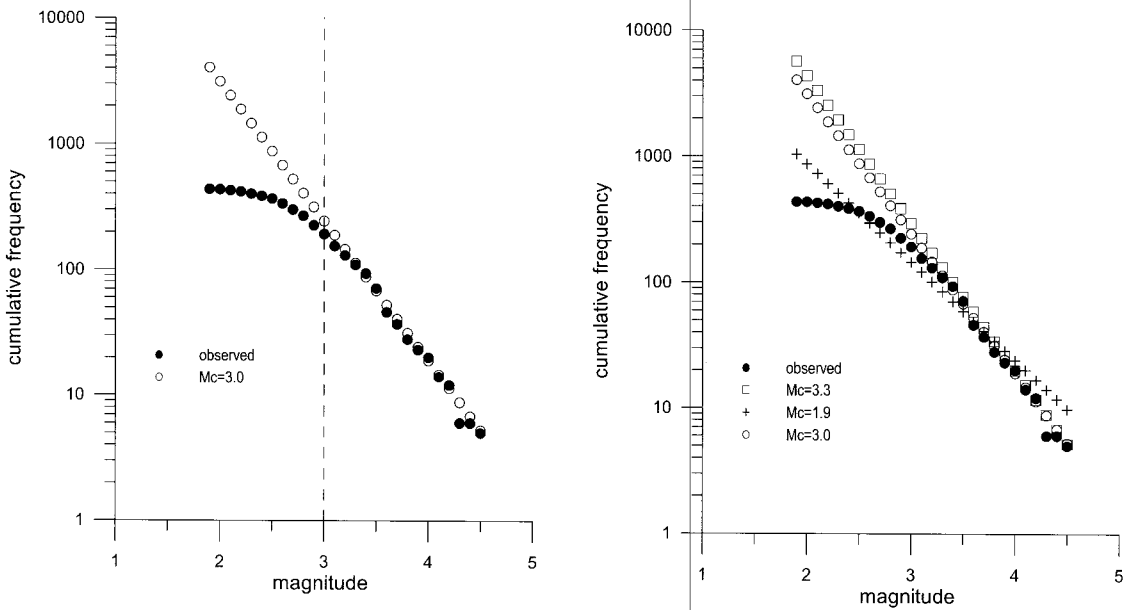


Fig. 2. Comparison of observed and predicted cumulative earthquake frequencies for various M_c . Left: observed (closed circles) and predicted (open circles) cumulative earthquake frequencies for $M_c = 3.0$. Right: predictions for $M_c = 1.9$ (crosses) and $M_c = 3.3$ (squares) are superimposed.

Table 1. Comparison of observed and predicted cumulative frequencies for $M_c = 3.0$. The observation period is 23 years, A.D. 1978 to 2000. The predicted frequencies were calculated by equation (1) with $a = 5.66$ and $b = 1.11$.

	$M = 2.0 \sim 2.5$	$M = 2.5 \sim 3.0$
Observed frequency (f_o)	68	173
Predicted frequency (f_p)	2258	629
$(f_p - f_o)/\text{year}$	95	20

83 %)을 식 (1)에 대입하여 계산되었다. Table 1로부터 $M=2.0 \sim 3.0$ 지진 중 연간 115 개가 기상청 관측에서 누락되었음을 알 수 있다. 그러나 기상청 지진목록(기상청 2001)의 관측기간 중 1/2 이상이 장비현대화사업 이전임을 감안할 때, 지진관측소의 숫자가 장비현대화사업 이전보다 증가된 현재의 상황은 이보다 개선되었을 것으로 판단된다.

3.2. 공간적 변화분석

최소 규모 및 지진활동 매개변수의 공간적 변화를 분석하기 위하여 한반도 남부 지역을 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 의 격자로 나누고, 각 격자점에서 지역지진목록(Local earthquake catalog)을 작성하였다. 지역지진목록은 격자점을 중심으로 반경 50 km 내의 지진으로 구성된다. 지역지진목록에 포함될 지진의 최소 빈도는 200 개로 하였다. 지진 빈도가 200 개보다 작을 경우 반경을 10 km씩 단계적

으로 증가시켜 200 km까지 확장하였으며, 반경 200 km내 지진발생빈도가 200 개보다 작은 격자점은 분석에서 제외하였다.

지진의 최소 빈도 200 개 및 최대 반경 200 km는 주관적으로 결정된 값이다. 최소 빈도를 크게 할 경우 통계적 신뢰도는 증가하지만, 이 조건을 만족시키는 격자점의 수가 감소한다. 격자점의 수가 감소하는 것을 방지하려면 반경을 증가시켜야 한다. 반경은 지역지진목록에 포함될 지진의 숫자에 직접적인 영향을 미칠뿐만 아니라 분석대상 요소의 공간적 해상도와도 관계된다. 남서부 일부 지역을 제외한 모든 내륙지역에서 반경 200 km 내 200 개의 빈도기준을 만족시키는 것으로 나타났다(Fig. 4 참조). 빈도기준을 만족시키는 최소 반경은 110 km으로 나타났다.

Fig. 3은 기상청 지진목록(기상청, 2001)에 기재된 지진의 진앙분포를 보여준다. 진앙 밀집 지

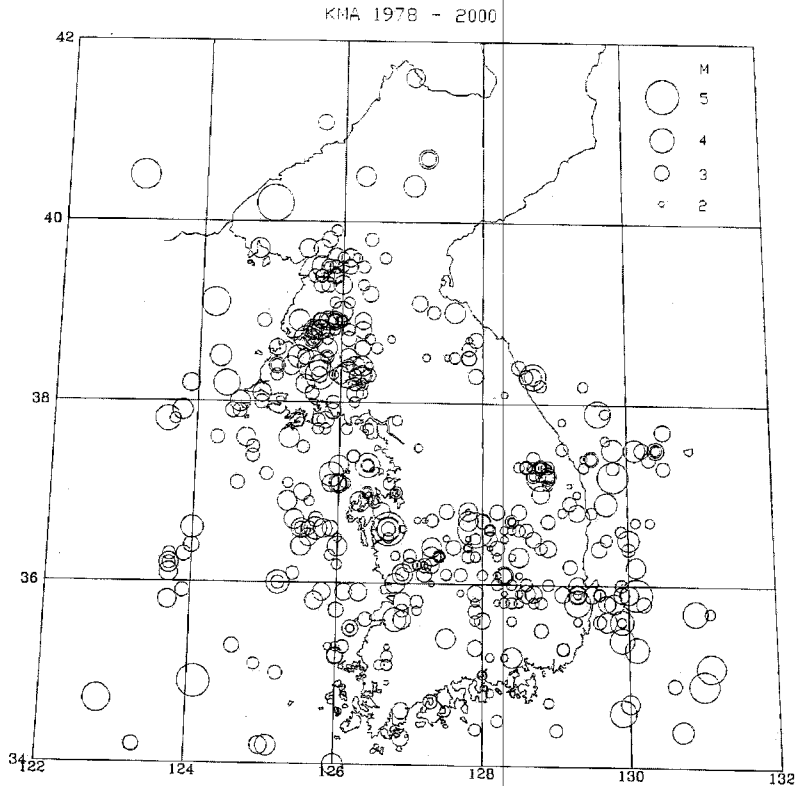


Fig. 3. Distribution of earthquakes reported by Korea Meteorological Agency (2001).

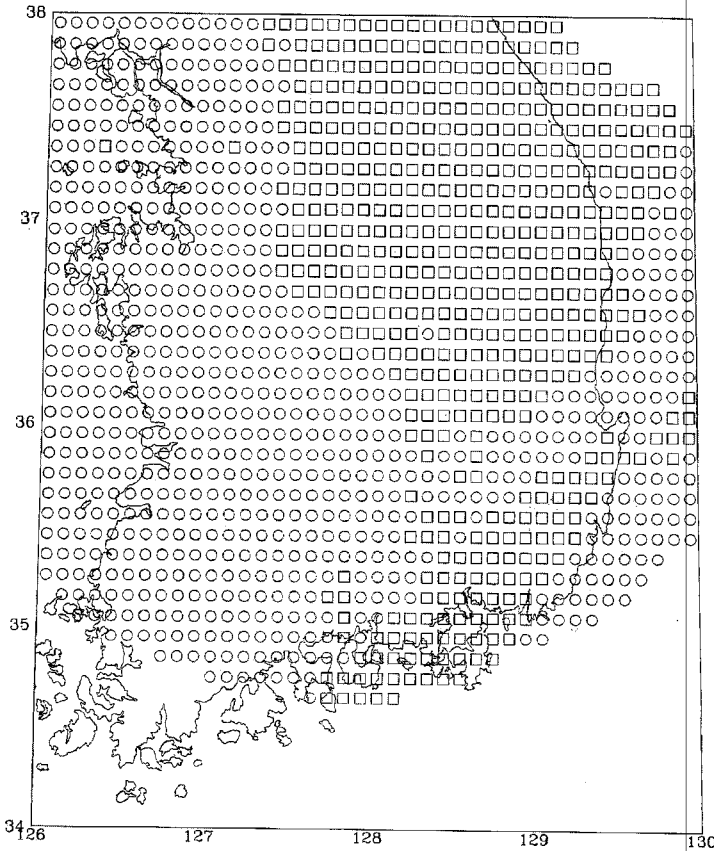


Fig. 4. Distribution of grid points whose local earthquake catalogs meet the given criteria: (1) more than 200 events within the radius of 200 km, (2) $GOF \geq 85\%$. Squares represent the grid points satisfying both the criteria (1) and (2), while circles represent those satisfying only the criterion (1). Grid spacing is 0.1° both in latitude and longitude.

역은 서쪽에서 남-북 방향으로 내려오다 남쪽에서 동-서 방향으로 이어지는 'L' 형태를 보인다. 반경 200 km 이내에서 200 개 이상의 지진을 갖는 격자점을 Fig. 4에 표시하였다. 이 그림에서 원은 지진건수 200 개 이상의 기준만을 만족시키는 격자점을, 사각형은 $GOF \geq 85\%$ 기준도 동시에 만족시키는 격자점을 나타낸다. GOF 기준을 만족시키는 격자점만의 분포는 Fig. 6 및 7에서 명확하게 확인할 수 있다.

GOF 기준을 만족시키는 격자점의 분포는 동부 지역에 집중되어 있어 Fig. 3의 진앙 밀집 지역과 대조를 이룬다. 이는 어느 지역의 지진활동 특성이 단순히 관측된 지진의 수가 많다고 하여 잘 드러나는 것이 아님을 보여준다. 이에 대한 가능한 설명 중의 하나가 Fig. 5이다. Fig. 5는 지진건수 200 개 이상의 기준은 만족시켰지만 GOF

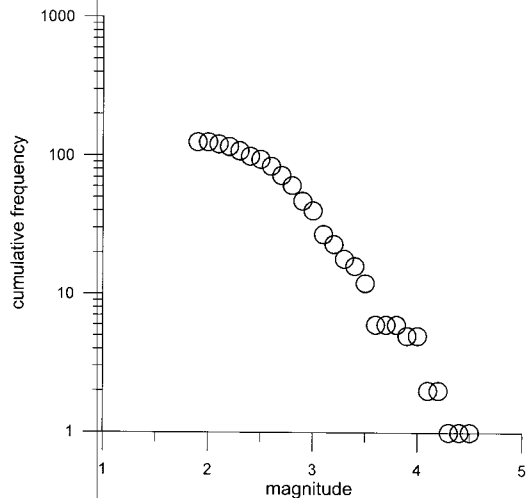


Fig. 5. Example of incomplete magnitude-frequency distribution at a grid point whose local earthquake catalog contains more than 200 events within 200 km but GOF is below 85%.

≥85%의 기준을 만족시키지 못한 지역지진목록 으로부터 작성한 규모-빈도 분포이다. Fig. 5는 규모 3.5 이상에서 큰 산포도를 보이는데, 이는 이 지역지진목록에서 규모 3.5 이상 지진이 완전하게 기록되지 않았음을 의미한다. 지진건수 200 개 이상의 기준만 만족하는 격자점의 지역지진목록을 검토한 결과 Fig. 5와 유사한 양상을 보이며, 2중 분포(Bimodal distribution)에 대한 분명한 증거는 관찰되지 않았다.

Fig. 6은 최소 지진건수 및 GOF를 만족시키는 격자점에서 분석된 M_c 의 분포이다. M_c 의 범위는 2.4 ~ 3.5이며, 격자점 군집의 외곽에 큰 M_c 가 분포함을 알 수 있다. 이는 내부보다 외곽의 지역지진목록이 상대적으로 불완전하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 b 값의 분포를 나타낸다. 일부 외곽에서 큰 b 값을 보이지만 이러한 경향이 Fig. 6에서와 같이 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 이는 지진목록의 불완전성이 항상 큰 b 값으로 연결되는 것은 아니기 때문이다. b 값의 범위는 0.75 ~ 1.73이며, 평균은 1.08로서 한반도 남부지역 전체

에서 구한 값과 유사하다.

4. 결론

기상청 지진목록(기상청, 2001)의 완전성에 대한 최소규모(M_c)를 분석하고 이로부터 b 값을 추정하였다. 우리 나라는 판내지역(Intraplate region)으로서 지진활동도가 낮아 불과 23년간의 기상청 지진목록으로부터 추정된 지진활동 매개변수가 확정적인 것이라고 할 수 없다. 보다 확정적인 지진활동 매개변수 추정을 위해서는 관측기간이 긴 지진목록이 이용되어야 한다. 이러한 측면에서 1978년 이전 계기지진자료의 활용이 중요하다. 그러나 이 자료는 자료의 출처 및 보고된 규모의 종류가 다양하여 규모의 균질화 작업이 선행되어야 한다.

이 논문에서 분석된 기상청 지진목록의 지진통계적 특성은 다음과 같이 요약된다. 이는 기상청 지진목록의 가치 및 한계에 대한 평가로서 향후 기상청 지진목록의 활용에 중요한 판단기준을 제공한다.

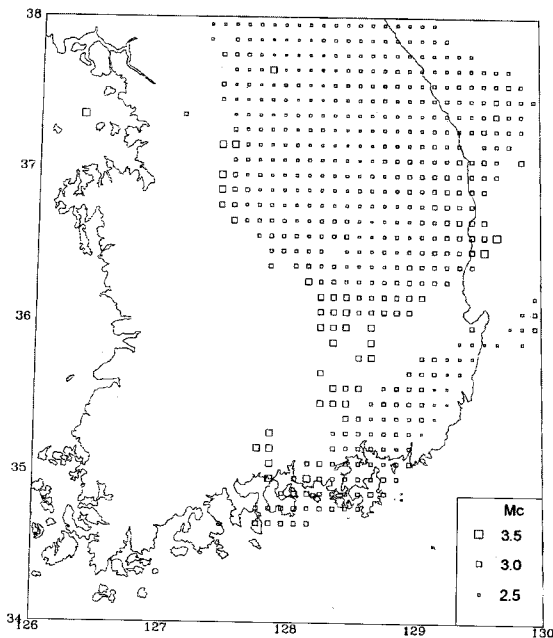


Fig. 6. Spatial variation of M_c .

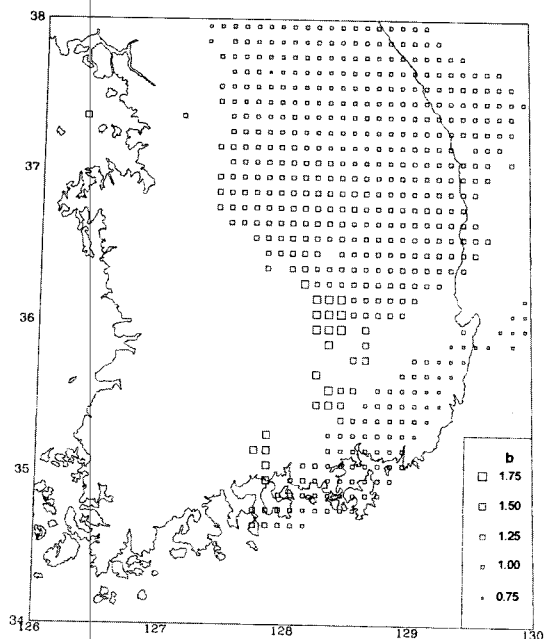


Fig. 7. Spatial variation of b values. Average value is 1.08.

1. 지진목록은 한반도 남부지역 전체에 대하여 규모 3.0 이상부터 완전하며, 이때 $a = 5.66$, $b = 1.11$ 이다. 이로부터 계산된 지진빈도와 관측된 지진빈도를 비교한 결과, 규모 2.0 ~ 3.0 지진 중 연간 100 여개가 관측에서 누락되었다. 규모 3.0 이하 지진의 발생빈도는 1990년 이후 증가하는 추세를 보이는데, 이는 기상청 장비현대화사업과 관련이 있는 것으로 보인다.

2. $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 구간 격자점에서 생성된 지역지진 목록 중 부가된 분석기준을 만족시키는 목록은 한반도 중부 및 동부에 집중되어 진양밀집지역과 대비된다. 즉, 지진발생 건수와 지진목록의 완전성은 비례하지 않는다. 이들 격자점에서 M_c 의 범위는 2.4 ~ 3.5이며, b 값은 0.75 ~ 1.73이다. b 값의 평균은 1.08 로서 한반도 남부지역 전체에서 구한 값과 유사하다.

사 사

이 연구는 과기부에서 한국원자력안전기술원에 지원한 기관고유사업 중 원전부지진진감시와 원자력안전규제기술개발 과제 중 세부과제 구조 및 부지 안전성평가 규제기술 개발의 일환으로 수행되었다. 이 논문의 완성도를 높일 수 있도록 조언을 해 주신 익명의 심사자들에게 감사드린다.

참고문헌

기상청, 1992, 지진관측보고. 기상청, 서울.
 기상청, 2001, 지진관측보고. 기상청, 서울.
 Gomberg, J., 1991, Seismicity and detection/location threshold in the southern Breat Basin seismic network, *Journal of Geophysical Research*, 96, 16401-16414.
 Harvey, D., and Hansen, R., 1994, Contributions of IRIS data to nuclear monitoring, *IRIS Newsletter*, 13, 1.
 Johnston, A. C., 1994, Seismotectonic interpretations and conclusions from the stable continental region seismicity database: in Schneider, J. F., Ed., *The earthquakes of stable continental regions, Volume 1: Assessment of large earthquake potential*. Electric Power Research Institute (EPRI).
 Rydelek, P. A., and Sacks, I. S., 1989, Testing the completeness of earthquake catalogs and the hypothesis of self-similarity, *Nature*, 337, 251-253.
 Sereno, T. J. Jr., and Bratt, S. R., 1989, Seismic detection capability at NORESS and implications for the detection threshold of a hypothetical network in the Soviet Union, *Journal of Geophysical Research*, 94, 10397-10414
 Wiemer, S., and Wyss, M., 2000, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 859-869.

2000년 10월 10일 원고접수

2000년 12월 20일 원고채택