

한반도 남부 지진의 지역 규모식 The M_L scale in southern Korea

홍태경* 박창엽**
Hong, Tae-Kyung Baag, Chang-Eob

ABSTRACT

The distance correction term $-\log A_0$ of the local magnitude scale was estimated for earthquakes in southern Korea using linear least-squares inversion and interpolation scheme. Total 1054 short-period velocity seismograms from 107 local events recorded at hypocentral distances ranging from 10 to 480 km were used in this study. Simulated Wood-Anderson amplitudes were obtained from velocity seismograms with use of revised Wood-Anderson instrument response with static magnification 2080, damping factor 0.7, and natural period 0.8 sec. The estimated distance correction term for southern Korea is found to be $-\log A_0 = 1.137 \log(r/17) + 0.001159(r-17) + 2.0$, where r is hypocentral distance in kilometers. The attenuation rate of this distance correction term falls between those of southern California and eastern North America.

1. 서 론

Richter 의 연구^{1),2)} 이후로, 지진의 지역규모는 보편적으로 이용되어 왔다. 이와 같이 그 지역의 지진규모를 결정하는데는 지진기록의 진폭에 근거를 둔 지역규모식의 설정이 필요하다. 같은 크기의 지진에 대해 지진기록의 진폭이 지역에 따라 다르게 기록되므로, 지역지진 규모식은 각 지역에 따라서 다르게 결정된다. 현재까지 한반도 에서는 지역규모식이 설정되지 않은 상태이므로, 각 지진의 지역규모값이 발표기관에 따라서 차이가난다. 기상청에서 공식적으로 발표하는 각 지진의 규모는 지진기록의 지속시간에 의존하는 지속규모로 결정한다 (김우규 외, 1998)³⁾. 한국자원연구소는 관측망을 통해 획득한 자료를 이용하여 지역규모를 결정하고, 이를 연례보고서를 통하여 발표한다. 즉 단주기 속도기록 중 수직성분만을 이용한 경험식을 통해 지역규모가 결정이 된다. 이 경험식은 관측소의 위치와 지형적 특성을 고려하는 관측점 수정요소(station correction factor)를 포함하지 않는다. 이 경험식은 다른 지역의 연구결과와 수치적으로 비교하는데에도 어려움이 있다. 그러므로 Richter의 본래의 제안²⁾에 따른 안정된 규모식을 설정하는 것이 중요하다.

* 서울대학교 대학원 지구환경과학부 석사과정, 학생회원(현재 Australian National University 박사과정)

** 서울대학교 대학원 지구환경과학부 교수, 정회원

이 연구에서는 지진파의 기하학적 확산과 감쇠를 포함하는 거리 수정요소를 결정하기 위해, 선형 최소자승 역산법과 보간법을 함께 사용한다. 진원 거리에 따른 자료의 분포를 고려하여 전체 진원 거리구역을 작은 여러개의 소구역으로 나눈다. 이 때 각각의 소구역은 인접한 소구역과 일부 겹치도록 한다. 각각의 소구역에서 기하학적 확산 매개변수, 감쇠계수, 거리수정요소, 관측점 수정요소, 및 지역규모를 선형 최소자승 역산법을 통해서 동시에 결정한다. 전체 진원거리 구역을 대표하는 거리 수정요소는 각각의 소구역에서 구해진 거리 수정요소를 보간법으로 결정한다. Hutton and Boore (1987)⁴⁾의 제안과 Langston 외 (1998)⁵⁾의 개선된 방법에 따라 선형 최소자승법을 실행한다. 사용된 자료는 1995년 12월부터 1998년 10월까지 한국자원연구소 관측망에서 기록된 1054개의 단주기 3성분 속도기록이다.

2. 지진기록 자료

1999년 12월 현재, 한국자원연구소는 2개의 광대역 지진관측소와 17개의 단주기 지진관측소를 운영하고 있다. 이 중 9개 관측소는 한반도 남부에 위치한 경상분지내에 설치되어 있다. 하지만, 단주기 지진 관측소 중 5개는 1998년 12월 이후로 설치가 되었으며, 포천(PCH)에 설치된 단주기 지진관측소는 양질의 자료수집이 이루어지지 않고 있다. 그래서, 이 연구에서는 한반도 남부에 설치된 11개의 단주기 지진관측소(그림 1)로부터 수집된 지진자료를 이용하였다. 그림 2는 이 연구에 이용된 1995년 12월부터 1998년 10월까지 발생한 107개 지진의 분포도이다. 107개의 지진이 주지한 기간에 발생한 전체지진이 아니며, 동시에 3개이상의 관측소에서 기록된 지진중에서 선별한 결과이다. 총 1054개의 3성분 단주기 속도 기록이 107개의 지진으로부터 기록되었고, 이들의 진원 거리는 10km에서 480km사이에 분포되어 있다. 본 연구에서 진앙위치와 진원깊이는 자원연구소 연례보고서에 발표된 값들을 이용하였다^{6),7),8)}.

3. 분석

지역 규모(M_L)는 Richter(1935, 1958)^{1),2)}에 의해 다음 식과 같이 정의되었다.

$$M_L = \log A - \log A_0 + S_i \quad (1)$$

여기서 A 는 관측된 수평성분 우드-앤더슨 최대변위값이고, A_0 는 기하학적 확산 (geometrical spreading)과 거리에 따른 물질감쇠(material attenuation for the distance)를 고려한 기준변위이다. S_i 는 관측점 수정 요소(station correction factor)로서 각 관측소 성분마다 따로 정해지도록 되어 있다. 그리고, i 는 EW 혹은 NS 성분을 가리킨다. 진원거리 100-km를 기준으로한 거리 수정요소 $-\log A_0$ 는 다음 식과 같다(Hutton & Boore, 1987)⁴⁾.

$$-\log A_0 = n \log(r/100) + K(r-100) + 3.0 \quad (2)$$

그리고 17-km를 기준으로 한 거리 수정요소는 다음 식과 같이 주어진다(Boore, 1989)⁹⁾.

$$-\log A_0 = n \log(r/17) + K(r-17) + 2.0 \quad (3)$$

여기서 n 은 기하학적 확산계수, K 는 감쇠계수, r 은 킬로미터 단위의 진원거리이다. 지역에 따라 지반을 구성하는 물성이 달라지므로 n 과 K 값이 지역에 따라 변화하게 되고, 거리수정요소 $-\log A_0$ 도 지역에 따라 달라지게 된다.

거리수정요소 계산을 위한 최소자승 역산법(Langston 외., 1998)⁹⁾은 대부분의 자료가 특정범위에 편재되어 있을 경우 오류를 포함한 결과를 낼 수 있다. 거리 수정요소 $-\log A_0$ 는 대상 범위의 평균적인 감쇠 효과를 반영하므로, 본 연구에 이용되는 편재된 자료로서는 연구대상 전체범위를 대표할 거리 수정요소를 최소 자승 역산법만으로는 구할 수 없다. 거리 수정요소를 결정하는데 이용되는 또 다른 방법인 보간법(Kim, 1998¹⁰⁾; Savage & Anderson, 1995¹¹⁾)은 각각의 소구역에 포함된 자료들이 충분히 분포되어 있을 때 적용될 수 있는 방법이므로, 보간법만을 적용하는 것은 합리적이지 못하다. 이 연구에서 사용되는 현재까지 축적된 지진기록자료가 전체 대상범위의 거리에 걸쳐 자료가 균등하게 분포되어 있지 않으므로, 전체 연구대상 범위를 대표하는 거리수정 요소를 결정하기 위하여 보간법을 응용한 최소 자승 역산법을 사용하였다. 전체 대상범위를 자료의 분포를 고려하여 여러 소범위로 구분하고 각 소범위별로 최소자승 역산법을 이용하여 거리수정요소를 결정 후, 보간법을 통해 전체범위를 대표하는 거리수정요소를 정하게 된다. 이때 Kim(1998)¹⁰⁾과 Savage & Anderson(1995)¹¹⁾의 방법과는 달리 각각의 소범위는 앞뒤의 소범위와 일정 거리의 범위씩 겹치도록 하였다. 이는 근거리에 편재된 자료를 여러 소범위에 포함시키기 위해서이다. 최소자승 역산법에 이용되는 관계식은 기준 거리에 따라 식(1)과 (2)이거나 식(1)과 (3)이다. 합성 방정식은 다음 식과 같다.

$$\log A_j + 3.0 = -n \log(r_j/100) - K(r_j-100) + M_L - S_j \quad (4)$$

혹은

$$\log A_j + 2.0 = -n \log(r_j/17) - K(r_j-17) + M_L - S_j \quad (5)$$

여기서 j 는 자료의 순서를 나타내는 첨자이다.

식(4)와 (5) 모두 역산에 적용되는 방식이 일치하므로, 식(4)를 이용하는 방법을 중심으로 역산과정을 설명하기로 한다. 식 (4)는 행렬형태로 표현이 가능하며, 그 모양은 다음과 같다.

$$y = Bm \quad (6)$$

여기서 y 는 최대변위를 나타내는 $q \times 1$ 행렬이고, B 는 $q \times p$ Jacobian 행렬이며, m 은 $p \times 1$ 모델 행렬이다. 역산을 통해 행렬 m 의 원소를 결정한다. 행렬 y 의 총 행수인 q 는 "전체 자료수 (N_{data})+1"에 해당한다. 행렬방정식이 해를 가지기 위해서 미확정 경우(underdetermined case)를 피하기 위하여 제한방정식(constraint equation) 하나를 포함하게 된다. 행렬 m 의 총 행수인 p 는 n , K , M_L , S_j 와 같은 미지수의 수와 일치한다. 연구에 이용되는 자료들이 11개 지점의 지진관측소에서 기록된 자료이므로, 전체 S_j 의 수는 이용된 관측소 수의 두 배인 22개이다. 미지수 M_L 은 전체 이용된 지진의 수(I)만큼 존재한다. 그러므로 p 값은 $2+I+11 \times 2=24+I$ 에 해당하게 된다.

4. 거리 수정요소 $-\log A_0$

전체 자료의 89 퍼센트의 자료가 진원거리 200km내에 존재한다. 그러므로, 각각의 소범위의 구간을 진원거리에 비례하여 구간을 설정한다. 전체 연구대상범위를 22개의 소범위로 구분하고, 각각의 소범위는 앞 뒤 소범위의 영향을 고려하기 위하여 부분적으로 중복되도록 한다. 자료가 밀집되어 있는 근거리에서는 범위의 크기를 100km로 일정하게 유지하고, 원거리 범위에서는 110km, 130km, 140km, 160km, 180km, 200km, 220km, 250km, 260km, 300km로 점차 증가시킨다. 원거리(200 km이상)에 분포된 자료의 수는 전체의 11 퍼센트로 구간의 크기(200-480 km)에 비해 자료의 수가 적지만, 이 구간에 속하는 소범위의 거리수정요소는 보간법을 이용하여 전체 거리수정요소를 결정하는데 중요한 역할을 한다. 그러므로, 각 소범위의 구간 설정이 중요하다.

각 소범위별로 보간법을 적용할 때, 우리는 이용된 소범위의 분포자료의 수에 따라 가중을 준다. 보간법이 적용된 거리 수정요소에 대한 최소 자승 맞춤(least-squares fitting)은 전체 범위중 자료가 5번이상씩 이용된 10-390 km 구간에서 적용되었다. 100km 기준식으로 표현된 최소자승맞춤(least-squares fitting)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$-\log A_0 = 1.137\log(r/100) + 0.001159(r-100) + 3.0 \quad (7)$$

여기서 r 은 진원거리이다. 이와 같은 100km 기준식을 사용하든지 또는 17km 기준식을 이용하든지 관계없이 n 및 K 값은 일치하게 역산이 된다. 그러므로 Hutton & Boore(1987)⁴⁾과 Boore(1989)⁹⁾의 제안에 따라, 식(7)의 n 과 K 를 이용하여 17km 기준식으로 표현할 수 있다. 그러므로 한반도남부의 거리수정요소는 다음과 같이 주어진다.

$$-\log A_0 = 1.137\log(r/17) + 0.001159(r-17) + 2.0 \quad (8)$$

그림 3은 다른 지역의 거리수정요소와 본 연구 결과의 비교이다. 비교의 편의를 위하여 동부 북아메리카 거리수정요소의 기준깊이를 (h_{ref}) 8km로 하였다. 거리수정요소의 비교결과, 한반도 남부는 아프리카 탄자니아를 제외한 다른 지역과 진원거리 200km 내에서 비슷한 정도의 감쇠를 보였으며, 이후 남부 캘리포니아지역보다 감쇠가 약한 것으로 나타난다.

5. 관측소 수정요소와 지역 규모값

앞서 구해진 거리수정요소 $-\log A_0$ 를 이용하여, 각 관측소의 수평 성분별 관측점 수정요소와 지진의 지역규모값을 정한다. 우리는 선형 최소자승 역산법을 다음과 같은 합성된 지역규모 공식에 적용한다.

$$\log A_j + 2.0 + n\log(r_j/17) - K(r_j-17) = M_L - S_j \quad (9)$$

여기서 n , K 는 앞절에서 구한 바대로 각각 1.137 및 0.001159이다.

그림 4는 이 연구에서 계산된 지역 규모값(\overline{M}_L)과 자원연구소 발표값(M_L^{KIGAM}), 기상청별표값(M_L^{KMA})과의 차를 나타낸다. 이 연구에서 계산된 지역규모값은 자원연구소 발표값에 비해 0.1-0.5 M_L 작은 값을 보이고, 기상청 발표값에 대해 -0.3 to 0.4 M_L 의 차이를 보인다.

그림 5는 본 연구에서 계산된 지역규모값(\overline{M}_L)과 거리수정요소와 관측소 수정요소를 이용하여 각 자료별로 넓은 범위에 걸쳐 분포하지만, 95퍼센트 신뢰도에 의한 분포는 원거리(>200km)에 비해 좁은 범위에 걸쳐 분포하는 형태를 보인다.

6. 토의 및 결론

이 연구에서 Anderson and Wood에 의해 제안된 우드-앤더슨 지진계의 표준응답 (정적 증폭 = 2800, 감쇠 계수 = 0.8, 자연주기 = 0.8초) 대신에 Uhrhammer and Collins (1990)¹²⁾에 의해 새로이 제안된 우드-앤더슨 지진계 응답 (정적증폭 = 2080, 감쇠계수 = 0.7, 자연주기 = 0.8초)을 이용하였다. 만일 Uhrhammer and Collins의 수정된 지진계응답이 잘 못되고 표준응답이 옳다고 하더라도, 이 연구에서 산출된 거리수정요소 $-\log A_0$ 는 영향을 받지 않는다. 이용된 자료의 대부분이 지진원거리 200 km 이내에 분포되어 있으므로, S파의 주 주파수 대역이 8 Hz 이상이 된다. 이 주파수 대역에서는 Uhrhammer and Collins¹²⁾의 응답모델은 표준응답모델에 비해 상수 0.13 M_L 의 차이를 보이게 된다 (Kim,1998)¹⁰⁾. 그러므로 이 경우에는 거리수정요소의 변환없이 지역규모 값을 0.13 M_L 만큼 증가 시키면 표준응답에 의한 지역규모 값을 얻을 수 있다.

거리수정요소의 결정에 최소자승 역산법과 보간법을 함께 이용하는 방법은 지진 자료가 진원거리에 대해 불균등하게 분포된 경우에도 효과적으로 작용하며, 진원거리에 대한 자료의 편중에 의해 발생하는 오차를 줄일 수 있었다.

참고문헌

1. Richter, C.F. (1935). An Instrumental Earthquake magnitude Scale, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **25**, 1-31.
2. Richter, C.F. (1958). *Elementary Seismology*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, 758 pp.
3. 김우규, 김상조, 김동호, 박삼근, 홍 윤, 류용규, 정성훈, 이호만, 장호수 (1998). *지진재해 조기경보 경감 시스템 구축*, 과학기술부, 147 pp.
4. Hutton, L.K. and D.M. Boore (1987). The M_L Scale in Southern California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**, 2074-2094.
5. Langston, C.A., R. Brazier, A.A. Nyblade, and T.J. Owens (1998). Local Magnitude Scale and Seismicity Rate for Tanzania, East Africa, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 712-721.
6. 자원연구소 (1995). *경상분지 지진 연구 (II)*, 자원연구소 연구 보고서, 자원연구소, 79 pp.
7. 자원연구소 (1996). *경상분지 지진 연구 (III)*, 자원연구소 연구 보고서, 자원연구소 127 pp.
8. 자원연구소 (1997). *경상분지 지진 연구 (IV)*, 자원연구소 연구 보고서, 자원연구소, 124 pp.
9. Boore, D.M. (1989). The Richter Scale: Its Development and Use for Detecting Earthquake

Source Parameters, *Tectonophysics*, **166**, 1-14.

10. Kim, W.-Y. (1998). The M_L Scale in Eastern North America, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **88**, 935-951.
11. Savage, M.K. and J.G. Anderson (1995). A Local-Magnitude Scale for the Western Great Basin-Eastern Sierra Nevada from Synthetic Wood-Anderson Seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**, 1236-1243.
12. Uhrhammer, R.A. and E.R. Collins (1990). Synthetic of Wood-Anderson Seismograms from Broadband Digital Records, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 702-716.

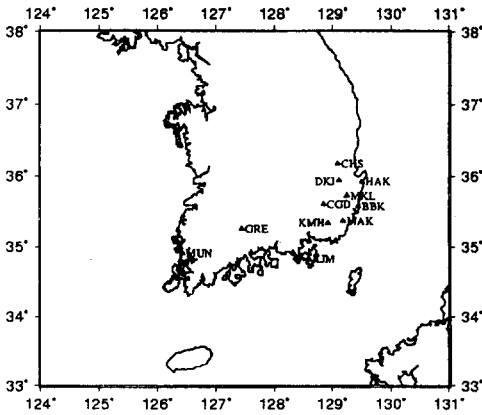


그림 1. 지진 관측소 분포도

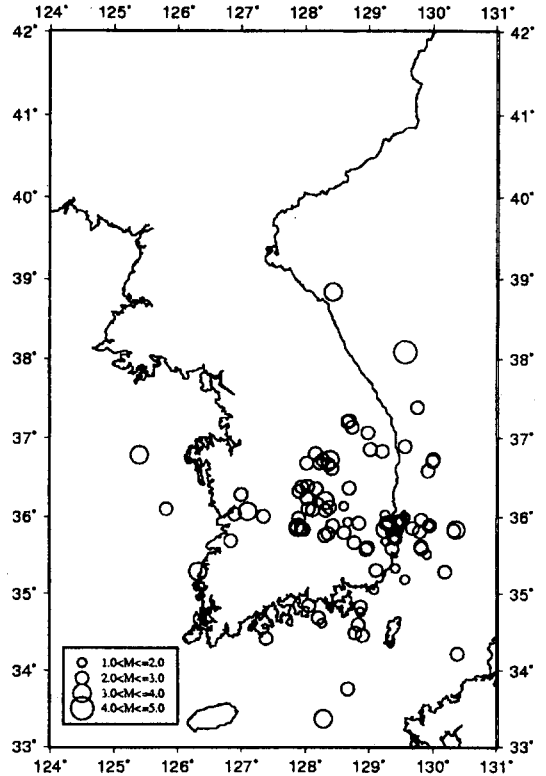


그림 2. 연구에 이용된 1995년 12월부터 1998년 10월까지 발생한 107개 지진의 분포도

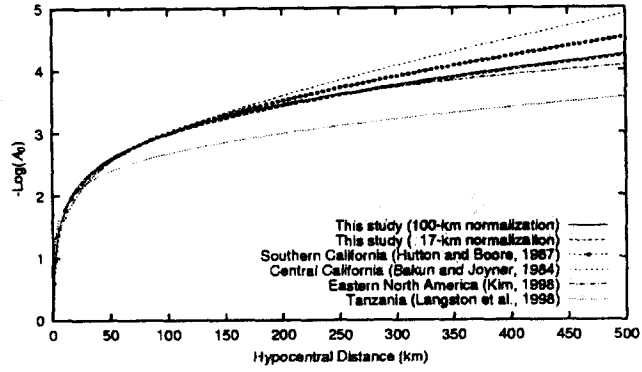


그림 3. 다른 지역의 거리 수정 요소와 이 연구의 결과와의 비교. 편의상, 동부 북아메리카 거리 수정 요소의 기준 깊이 (h_{ref})를 8 km로 가정한다.

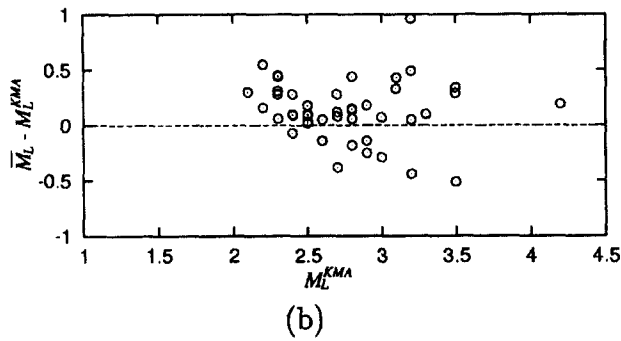
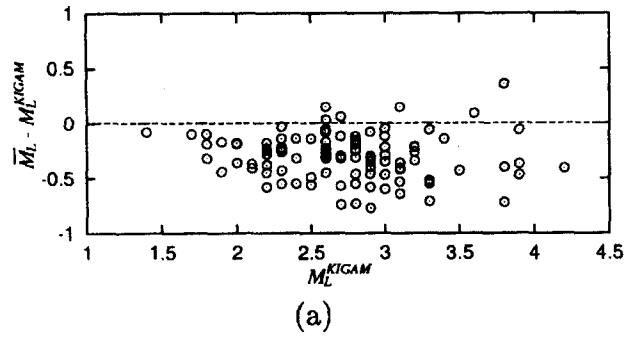
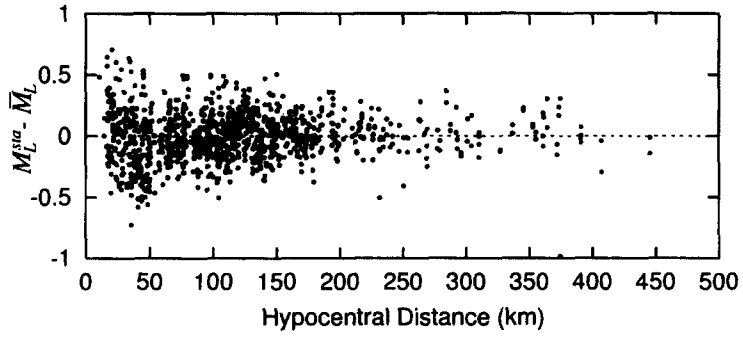
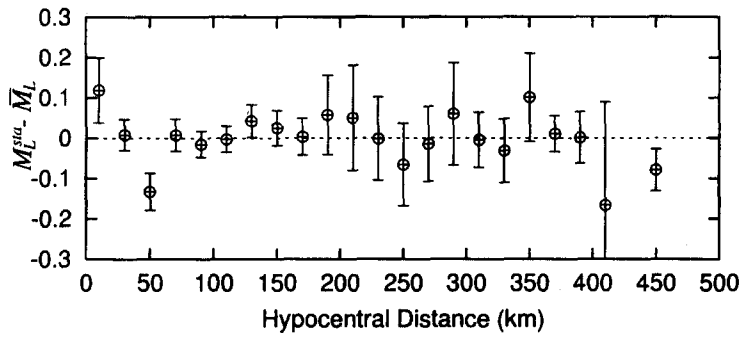


그림 4. 계산된 지역 규모값(\overline{M}_L)과 한국자원연구소 발표값(M_L^{KIGAM})의 차(a)와 기상청 발표값(M_L^{KMA})의 차(b).



(a)



(b)

그림 5. 계산된 지역 규모값($\overline{M_L}$)과 설정된 거리 수정 요소와 관측소 수정 요소를 이용한 각 자료별 규모값(M_L^{sta})의 잉여값(a)과 95 퍼센트 신뢰도의 20 km 구간별 자료의 규모값의 잉여값(b). 십자원은 평균값을 나타낸다.