

한반도 남부 지역의 지역규모와 모멘트규모의 관계

최호선 · 노명현 · 최강룡
한국원자력안전기술원

The Relation Between Local Magnitude and Moment Magnitude in the Southern Part of the Korean Peninsula

Hoseon Choi · Myunghyun Noh · Kang Ryong Choi
Korea Institute of Nuclear Safety, KOREA

요 약 : 2001년 1월부터 2004년 2월까지 한반도 남부 지역에서 발생한 지진의 모멘트규모를 계산하여 기상청과 한국지질자원연구원의 지역규모와의 관계를 분석하였다. 분석 결과 기상청의 지역규모는 한국지질자원연구원의 지역규모에 비해 모멘트규모와의 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 또한, 발표된 지역규모와 계산된 모멘트규모의 회귀 분석을 통해 모멘트규모 환산식을 유도하였다. 유도된 모멘트규모 환산식은 지진목록의 규모 단일화에 이용될 수 있고, 규모가 단일화된 지진목록은 지진활동 특성 분석, 지진재해도나 감쇄식 등에 필요한 인자로서 활용될 수 있다.

주요어 : 모멘트규모, 지역규모, 환산식

ABSTRACT : We calculate moment magnitudes of earthquakes occurred in the southern part of the Korean Peninsula from January, 2001 to February, 2004 and compare them with local magnitudes published by KMA(Korea Meteorological Administration) and KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). From this study, we find that local magnitudes of KIGAM have higher correlation with moment magnitudes than local magnitudes of KMA have. We induce a proper conversion formula by analyzing relation between published local magnitudes and calculated moment magnitudes. The induced formula can be used to unify kinds of magnitudes in earthquake catalogues and unified earthquake catalogues can be applied as necessary factors for analyzing earthquake characteristics, seismic hazards or attenuation formulas in the southern part of the Korean Peninsula.

Key words : moment magnitude, local magnitude, conversion formula

1. 서 론

한반도 남부 지역에서 일어난 지진의 규모는 공식적으로 기상청(KMA)에서 발표하고 있으며, 한국지질자원연구원(KIGAM)에서도 같은 지진에 대해서 다른 방법으로 지역규모를 산정하여 발표하고 있다. 이와 같이 같은 지진에 대해서 다른 방법으로 지역규모를 계산하므로 지진의 규모를 이용하는 타 연구에 어려움을 주고 있다. 또한, 지역규모는 한정된 지역에서 사용할 수 있는 규모이므로 타 지역의 연구결과와의 비

교가 용이하지 않다. 따라서 진앙거리, 지진의 크기에 구애받지 않는 지진규모와 이 규모로 단일화된 지진목록 작성이 중요하다. 이 연구에서는 2001년 1월부터 2004년 2월까지 한반도 남부 지역에서 발생한 지진 중에서 기상청 또는 한국지질자원연구원에서 지역규모가 발표된 지진을 선택하여 이 지진들의 모멘트규모를 계산하고 비교한 후 적절한 환산식을 유도하였다. 이 모멘트규모 환산식은 지진연구의 기초자료인 지진규모를 재검토하고 모멘트규모로 단일화된 지진목록을 작성하는데 활용될 수 있다.

Corresponding Author : 노명현(mhnoh@kins.re.kr)

원고접수일 : 2004년 5월 13일 게재승인일 : 2004년 7월 25일

2. 본 론

2.1. 계산방법

모멘트규모 계산을 위한 변위진폭스펙트럼의 기본식은 식 (1)과 같다.

$$A(R, f) = S(f) \cdot D(f) \cdot G(R) \cdot I(f) \cdot SE(f) \quad (1)$$

식 (1)에서 S 는 진원항(source term), D 는 비탄성 감쇄항(unelastic attenuation term), G 는 기하학적 감쇄항(geometrical attenuation term), I 는 지진계 전달함수항(instrumental transfer function term), SE 는 부지효과항(site effect term)이다. 통상적인 Ω^2 모델을 가정할 경우 진원항의 변위진폭스펙트럼은 식 (2)로 표현된다.

$$|S_i(f)| = n_i \cdot \frac{R_{\theta\phi} F}{4\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (2)$$

$R_{\theta\phi}$ 는 방사특성(radiation pattern)이며, F 는 지표 효과(free surface effect)로 각각 $\sqrt{2/5}$ (전단파일 경우)와 2를 대입하였고, ρ 와 β 는 진원지역의 밀도와 전단파의 속도이며, 각각 2.7 g/cm^3 와 3.5 km/sec 를 대입하였다. n_i 는 벡터 분할(partition ratio)을 의미하는데, 기존의 연구에서는 수직성분 혹은 수평성분만의 자료를 사용했기 때문에 이러한 인자가 필요했지만, 현재 한반도 남부 지역에서 운영되는 지진관측망의 지진계 센서와 기록계는 3성분을 감지하고 기록하기 때문에 3성분 합성스펙트럼을 사용하면 이 인자에 대한 가정이 필요 없게 된다. 3성분 합성스펙트럼이란 3성분 지진자료를 주파수 영역에서 벡터적으로 합성한 스펙트럼으로, 단일 성분에서 나타나는 벡터 분할을 제거하고 푸리에 스펙트럼(Fourier spectrum)의 형상을 강화하는 장점이 있다(노명현 외, 2003).

비탄성 감쇄항 D 와 기하학적 감쇄항 G 은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} D(f) &= e^{-\frac{\pi f}{vQ(f)}} \\ G(R) &= \frac{1}{R^n} \end{aligned} \quad (3)$$

v 는 전단파 속도이며, Q 는 매질의 감쇄특성을 나타내는 인자이다. 비탄성 감쇄항과 기하학적 감쇄항은 김성균 외(2002)가 발표한 식을 사용하였다. 이들은 한반도 남부 지역에서 거리 10~300 km 범위 내에 기록된 지진자료를 이용하여 거리에 따른 감쇄를 주파수의 함수로 조사하였다. 이들 자료는 9개소의 광대역 관측소와 11개소의 단주기 관측소에 기록된 108개 지진에 대한 680개의 디지털 지진기록으로 구성되었다. Fig. 1은 진앙거리에 대한 주파수별 감쇄곡선을 도시한 것이다.

지진계 전달함수항 I 는 기록된 지진자료에서 지진계 센서의 전달함수에 의한 영향을 제거하여 실제 지진동으로 복원하는데 사용된다.

부지효과항 SE 는 각 관측소의 지반 특성을 나타내는 항이지만 별도로 구해진 연구자료가 없기 때문에 이 연구에서는 1로 고정하였다. 이는 모든 주파수에서 관측소 부지가 지진자료에 미치는 영향이 없다는 것을 의미하지만, 별도의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2.2 모멘트규모

모멘트규모를 구하기 위해 사용된 자료는 다음과 같다. 기상청에서 공식적으로 발표한 지진중 2001년 1월 29일부터 2004년 2월 26일까지 일어난 지진 122

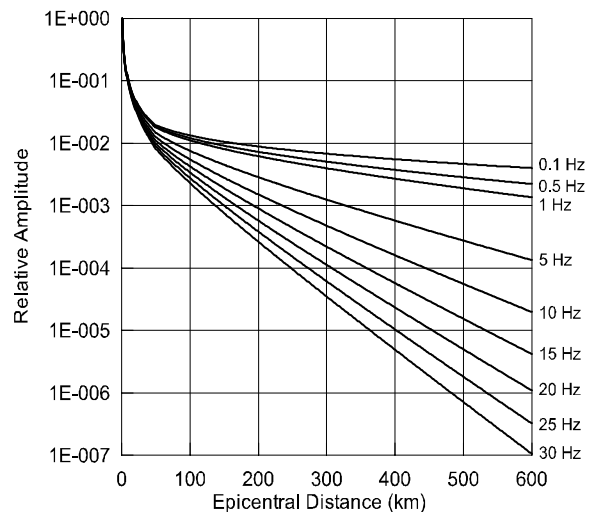


Fig. 1 Attenuation curves classified by each frequency according to an epicentral distance (All curves are normalized as 1).

개에 대한 739개의 광대역 자료를 사용하였다. 지진이 기록된 지진관측소 중 자료가 사용된 곳은 1개소부터 18개소까지 다양하다. 이는 지진규모에 따라 또는 지진이 내륙에서 일어난 것인가 해양에서 일어난 것인가에 따라 사용될 수 있는 관측소의 수가 한정될 수 있기 때문이다. 보통 지진규모가 크고 내륙에서 일어났다면 사용될 수 있는 관측소의 수가 많다. 사용된 지진은 기상청 지역규모를 기준으로 1.7과 5.0 사이에 분포하고 있지만, 주로 지역규모 2와 3 사이에 집중되어 있으며, 지진자료는 진앙거리를 기준으로 10.3과 571.3 km 사이에 분포하고 있다. Fig. 2는 사용된 지진의 진앙 분포를 보여주고 있다.

지진자료를 사용하기 위해서 P파 도달 이전의 약 10초 구간(10.24초)을 배경잡음으로 가정하였고, S파 도달 이후 약 164초 구간(163.84초)을 변위진폭스펙트럼을 구하기 위한 시간창(time window)으로 설정하였다. S파 도달 이후의 164초 시간창은 Sn, Sg, SmS, Lg 등 S파 계열(S wave trains)의 파열들이 함께 공존하는 충분한 길이의 구간이다. 실제 S/Lg파가 도달하기 시작하는 시간을 정확히 지정하는 것은 어렵기 때문에, S/Lg파의 도달시간은 육안으로 구분가능한 곳으로 지정하였다. 사용된 거리는 진앙거리를 사용하였는데 이는 기상청에서 깊이에 대한 정보를 공식적으로 발표하지 않고 있기 때문이다.

모멘트규모와 모서리주파수(corner frequency)를 결정하기 위해서 격자탐색법(grid search)을 이용하였다. 사용된 주파수 영역의 하한(lower limit)은 지진 규모에 따라 조금씩 다르며(지진의 규모가 커질수록 사용할 수 있는 주파수 영역의 하한이 작아짐), 상한(upper limit)은 30 Hz로 고정하였다. 격자탐색법의 장점은 지역최소값(local minimum)에 빠질 염려가 없어서 찾고자 하는 모멘트규모와 모서리주파수를 전체 구간에서 오차가 최소로 되는 전체최소값(global minimum)을 찾을 수 있다는 것이다. 이번 연구에서는 식 (4)의 오차함수가 최소가 되도록 지역규모와 모서리주파수를 결정하였으며, n 의 값은 1을 사용하였다.

$$E = \left[\sum_i |a_{i, obs} - a_{i, synth}|^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

식 (4)에서 $a_{i, obs}$ 는 지진자료의 변위진폭스펙트럼,

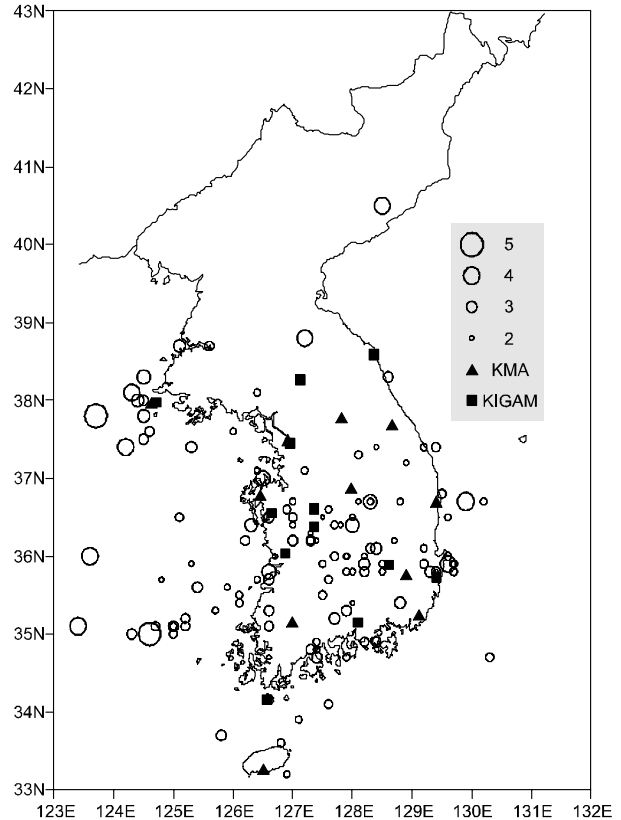


Fig. 2 Distribution map of epicenters and stations used in this study.

$a_{i, synth}$ 는 모델변위진폭스펙트럼을 의미한다.

Fig 3은 2001년 11월 24일 경북 울진 동남동쪽 약 50 km 해역에서 일어난 지진이 PUS(부산기상청) 관측소에 기록된 지진자료를 사용해서 모멘트규모와 모서리주파수를 구한 예이다. 진앙거리는 약 194.1 km이다. Fig 3(a)에는 지진자료의 변위진폭스펙트럼과 모델변위진폭스펙트럼, 그리고 잡음의 변위진폭스펙트럼이 도시되어 있다. 전체최소값을 찾기 위해 모멘트 규모는 0.1의 간격으로 1부터 7의 구간을 사용하였고, 모서리주파수는 0.1 Hz의 간격으로 0.1 Hz부터 30 Hz의 구간이 사용되었다. 탐색해야할 총 격자의 수는 18300개(61×300)이다. Fig 3(b)는 모멘트규모와 모서리주파수 범위에서 전체최소값을 구한 예이며, 구해진 모멘트규모는 3.9, 모서리주파수는 2.6 Hz이다.

각 관측소에서 구한 모멘트규모는 진앙거리, 후방위 각(back azimuth) 그리고 관측소가 위치하고 있는 지역의 부지특성 등에 따라 조금씩 달라질 수 있고, 한반도 지각의 평균적인 감쇄식을 사용해서 진원에서

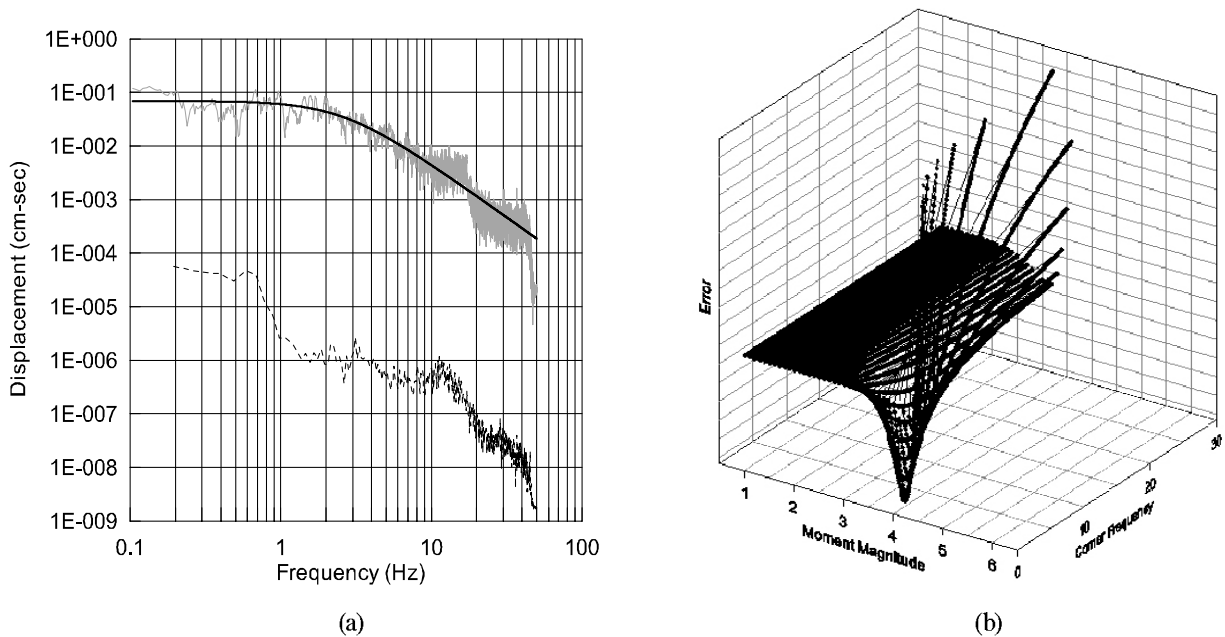


Fig. 3 (a) The displacement amplitude spectrum of the earthquake of Nov. 24, 2001 (The solid black line means calculated model displacement amplitude spectrum. Gray and dotted line stand for each displacement amplitude spectrum of signal and noise.) (b) Moment magnitude and corner frequency calculated by grid search method (In this figure, calculated moment magnitude and corner frequency are 3.9 and 2.6 Hz, respectively.)

각 관측소까지 지진파의 매질에 대한 감쇄특성을 정확히 반영하지 못하기 때문에 가능한 한 많은 관측소에서 모멘트규모를 계산해야 한다. 하나의 지진에 대해 각 관측소에 기록된 자료로부터 얻어진 모멘트규모를 평균하여 그 지진의 모멘트규모를 설정한다. Fig 4는 관측소별 모멘트규모와 평균 모멘트규모의 차이의 수를 히스토그램을 표시한 것이다. 최대오차는 [평균모멘트규모±0.3] 이지만, 대부분 [평균모멘트규모±0.1]에 집중되어 있다.

Fig 5는 기상청과 한국지질자원연구원 지역규모 사이의 관계를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 같은 지진에 대해 지역규모를 구하더라도 구하는 방식이 다르고, 각 기관에서 자체적으로 운영하는 지진관측소의 자료만을 주로 이용하기 때문에 산정된 지역규모의 차이가 난다. 보통 한국지질자원연구원의 지역규모가 기상청 지역규모에 비해 크게 나타나며, 그 편차는 약 0.2이다.

Fig 6(a).는 기상청 지역규모와 모멘트규모를 비교한 것이고, Fig 6(b).는 한국지질자원연구원의 지역규모와 모멘트규모를 비교한 것이다. 기상청 지역규모와

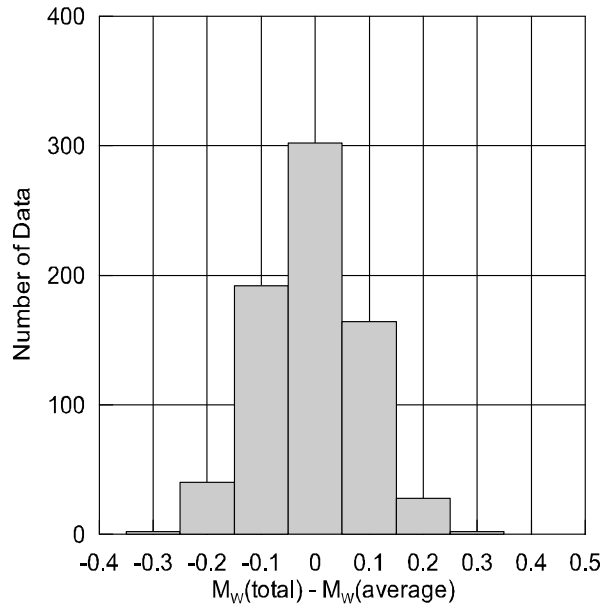


Fig. 4 The histogram shows differences between moment magnitudes calculated at each station and their average moment magnitudes. Most differences are concentrated within absolute value 0.1.

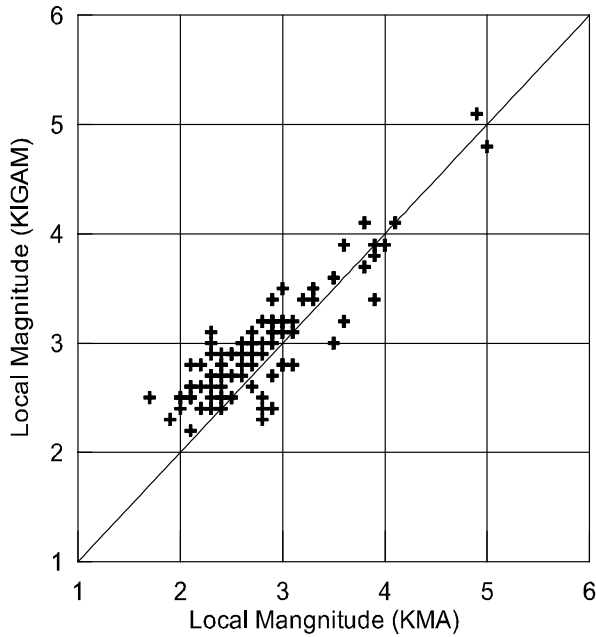


Fig. 5 Comparison between KMA local magnitudes and KIGAM local magnitudes.

모멘트규모의 차이는 -0.06 ± 0.27 , 한국지질자원연구원과 모멘트규모의 차이는 0.13 ± 0.15 이다. 즉, 모멘트규모는 기상청 지역규모보다는 약간 크고(-0.06), 한국지질자원연구원 지역규모보다는 작으며(0.13), 그 편차는 기상청 지역규모(0.27)가 한국지질자원연구원 지역규모(0.15)보다 크다. 앞에서 제시된 오차범위를 보면 예상할 수 있지만, Fig 6에서도 이 연구에서 계산된 모멘트규모와 한국지질자원연구원의 지역규모가 상관성이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 기상청 지역규모는 규모가 작을수록 모멘트규모와의 편차가 커지며, 모멘트규모와의 상관성이 작다. 식 (5)는 각 기관의 지역규모와 모멘트규모의 관계를 이차방정식으로 회귀해서 구한 결과이다.

$$M_W = 1.92 - 0.04M_{KMA} + 0.13M_{KMA}^2 \quad (1.7 \leq M_{KMA} \leq 5)$$

$$M_W = 0.49 + 0.67M_{KIGAM} + 0.04M_{KIGAM}^2 \quad (2.2 \leq M_{KMA} \leq 5.1) \quad (5)$$

식 (5)는 2001년부터 2004년 초반까지의 자료만을 사용해서 얻어진 식이므로, 더 많은 자료를 추가할 필요

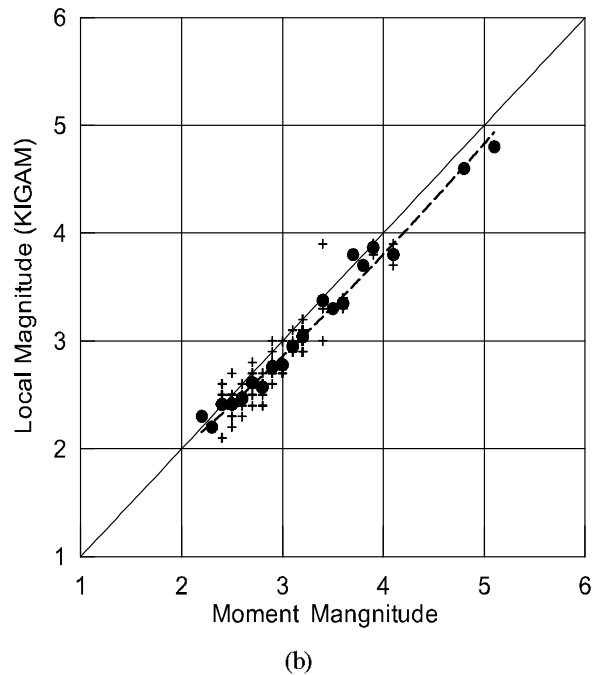
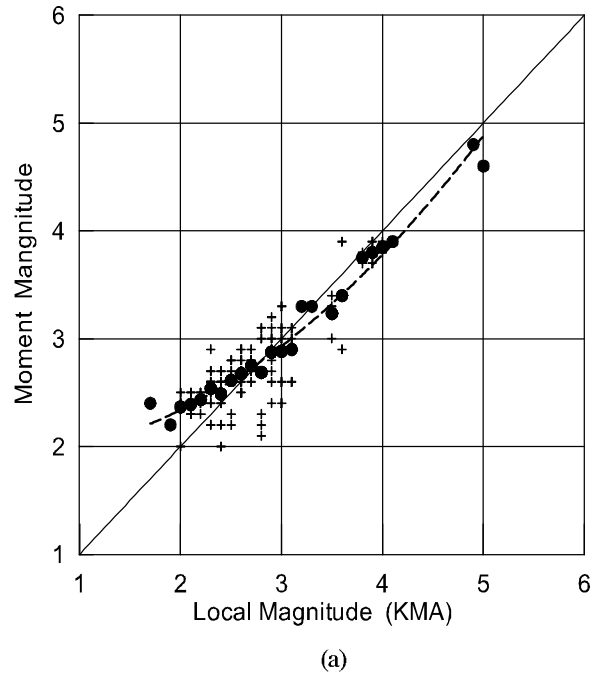


Fig. 6 (a) Comparison between KMA local magnitudes and moment magnitudes, (b) Comparison between KIGAM local magnitudes and moment magnitudes, (Plus signs and closed circles mean distributions of local magnitudes at the same moment magnitude and their averages, respectively).

성이 있다.

Table 1은 이 연구에서 구해진 모멘트규모와 Hermann 과 유현재(개인연락)가 구한 모멘트규모 그리고 IRIS에서 발표한 모멘트규모 중에 일치되는 지진을 찾아서 서로 비교한 것이다. 비교 결과 이 연구에서 구한 값과 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

2.3 모서리주파수와 부지특성

격자탐색법에 의해서 모멘트규모 뿐만 아니라 모서리주파수를 구할 수 있다. 모서리주파수는 진폭스펙트

럼의 기울기가 급격하게 변하는 곳의 주파수를 의미하는데 일반적으로 모서리주파수는 단층의 크기 즉 지진의 규모와 관계가 있다. 즉, 지진의 규모가 클수록 모서리주파수는 작아진다. Fig 7(a)는 육안으로 선택한 모서리주파수 평균값과 모멘트규모를, Fig 7(b)는 격자탐색법으로 선택한 모서리주파수 평균값과 모멘트규모를 서로 비교하고 있는데, 육안으로 확인한 모서리주파수가 계산에 의한 모서리주파수보다 작은 경향을 보인다. 계산에 의한 모서리주파수는 자료의 질에 따라 민감하게 반응할 수 있으므로, 육안으로 확인하는 것이 반드시 필요하다. 하지만 육안에 의한 확인도 사

Table 1 Comparison between moment magnitudes calculated by this study, Hermann and Yoo and IRIS

Date	This study	Herrmann and Yoo*	IRIS**	M_{KMA}	M_{KIGAM}
2001/11/24	3.9	-	3.8	4.1	4.1
2003/01/09	3.8	3.82	-	3.9	3.9
2003/03/23	4.8	4.83	-	4.9	5.1
2003/03/30	4.6	4.61	-	5.0	4.8
2003/10/13	3.9	3.80	-	3.6	3.9

* : Robert B. Hermann, Saint Louis University, Yoo Hyunjae, Seoul National University

** : Incorporated Research of Institution for Seismology

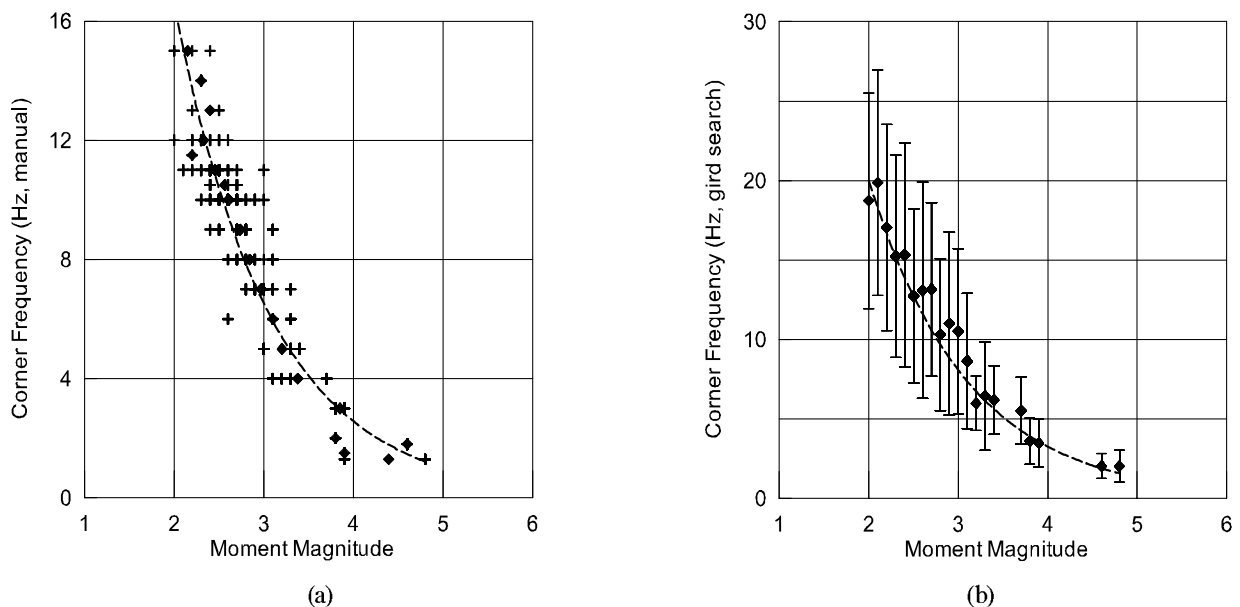


Fig. 7 (a) Corner frequencies selected manually (Closed diamond means average corner frequencies and dotted line means their regression result.), (b) Corner frequencies calculated by grid search method (Closed diamond means average corner frequencies and dotted line means their regression result. Vertical line means a standard deviation.)

람에 따라 달라질 수 있으며, 하나의 지진에 대해서도 각 관측소의 지진기록에 따라 결정되는 모서리주파수가 달라질 수 있다.

모서리주파수와 모멘트규모는 거리와 규모에 따라 달라질 수 있다. 작은 규모의 지진일 경우 고주파 영역의 빠른 감쇠로 인해서 진앙거리가 커질수록 모서리주파수가 작아지는 반면, 큰 규모의 지진일 경우 저주파 영역이 우세하므로 진앙거리에 따른 감쇠가 미미하여 진앙거리에 의해 큰 영향을 받지 않을 수 있다. Fig 8에서 이러한 사실을 확인할 수 있다. 실제 진원의 모서리주파수는 진앙거리에 대해 외삽하여 결정할 수 있지만, 이에 대한 연구는 아직까지 미미한 실정이다.

앞에서 언급된 것처럼 스펙트럼 계산시에 부지효과항을 1로 가정하였는데, 실제로는 부지효과가 뚜렷이 나타나는 관측소가 있다. 실제 어떠한 관측소도 이러한 경향을 갖고 있다. 뚜렷한 부지효과를 나타내는 관측소의 자료를 사용해서 구한 지진규모와 모서리주파수는 이번 연구에서는 사용하지 않았는데, 다른 독립적인 방법으로 부지효과항을 제거하는 것이 중요하다. Fig 9는 CHNB(철원) 관측소에서 기록된 지진 중에서 지진규모가 작은 것부터 큰 것까지 몇 개를 골라서 나타낸 변위진폭스펙트럼이다. 8 Hz 부근에서 지

진이 발생한 날짜, 지진규모 등에 상관없이 스펙트럼의 진폭이 커진 것을 알 수 있다. 원인은 상세하게 알 수 없지만, 이는 이 관측소가 지진의 규모에 상관없이 특정한 주파수 대역에서 부지의 증폭특성을 보여주며, 정확한 스펙트럼 분석을 위해 부지효과항 제거가 필요함을 보여준다.

3. 결론 및 보완

현재 기상청에서 공식적으로 지진규모를 발표하고 있는데, 그 규모는 지역적으로 한정해서 사용되고 있는 지역규모이다. 기상청의 지역규모 및 한국지질자원 연구원의 지역규모는 외국의 특정 규모식에 기반을 둔 것으로 한반도의 지진특성을 고려한 보정이 이루어지지 않아 상호간에 차이를 보이고 있다. 또한, 1978년 이전의 지진에 대한 규모는 지역규모와 다른 규모로 평가되어 있어 한반도 지진활동 특성분석에 장애가 되고 있다. 이처럼 지역규모를 사용하기보다는 지진의 물리적 특성을 반영하고 지진규모에 구애를 받지 않는 모멘트규모를 사용하는 것이 지진규모를 산정하는 적절한 선택이다.

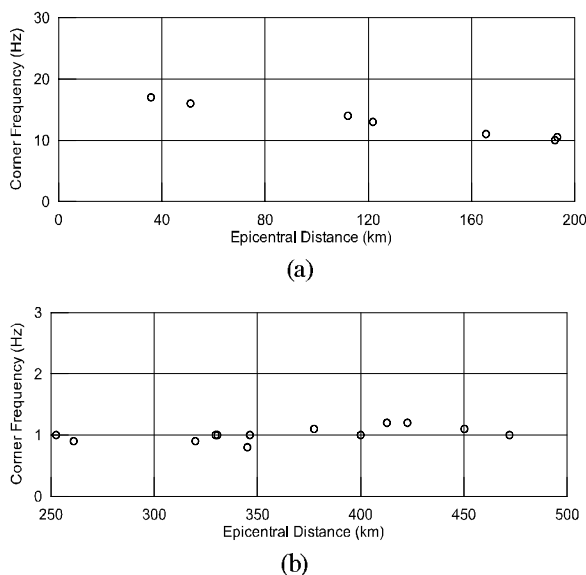


Fig. 8 Dependency of a corner frequency on an epicentral distance and magnitude, (a) moment magnitude 2.3, (b) moment magnitude 4.8.

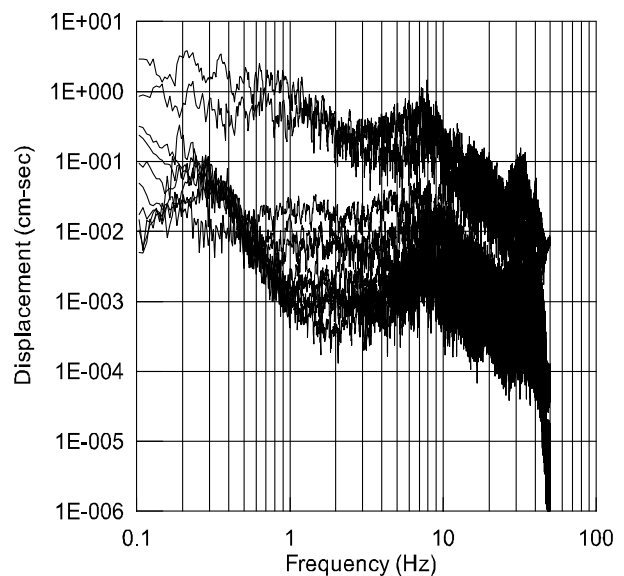


Fig. 9 Various displacement amplitude spectrums at CHNB station show site effects clearly.

모멘트규모를 구하기 위한 디지털자료를 사용할 수 있는 해가 아무리 빨라도 1994년 이후이므로, 1994년 이전 지진에 대한 모멘트규모는 1994년 이후 디지털 자료를 이용해서 모멘트규모를 구하고 난 후 지역규모의 환산식을 통해서 간접적으로 구해야 한다. 모멘트 규모와 모서리주파수는 계산방법에 따라 약간의 차이가 있으므로 계산방법, 자료 및 관측소의 특성을 충분히 검토해서 결정해야 한다. 이 연구에서는 지역최소값에 빠질 염려가 없는 격자탐색법을 사용하였다. 이 연구에서 얻어진 환산식은 2001년부터 2004년까지의 지진자료만을 사용하였으므로 디지털자료가 있는 1994년까지 확장하여 계산을 해야만 신뢰성 있는 환산식이 구해질 것이다. 모멘트규모 환산식이 구해지면 기상청에서 발표한 지진에 대한 지진목록을 기상청 지진규모에서 모멘트규모로 환산해서 지진목록의 규모 단일화에 사용할 수 있다.

이 외에도 모서리주파수를 구할 때에 속도자료와는 별도로 가속도자료를 사용해서 이 둘에 의해 구해진 모서리주파수를 비교할 필요가 있으며, 독립적인 방법에 의해서 관측소의 부지효과를 고려하여 모멘트규모 계산시에 제거해줄 수 있다면 신뢰성이 있는 모멘트규모를 산정할 수 있다.

이렇게 구해진 모멘트규모는 모멘트규모로 단일화된 지진목록 작성에 이용할 수도 있고, 지진목록의 지진통계적 완전성 평가, 지진발생특성 분석(연간발생빈도, Richter b, 최대가능지진, 지체구조와의 관계 등) 그리고 지진재해도나 감쇄식 등에 필요한 인자로서 활용될 수 있다.

참고문헌

- 김병철, 2002, 최근 한반도 발생지진의 지진원 상수, 전남대학교 석사학위 논문.
- 김성균, 김수경, 지현철, 2002, 한반도 남부에서의 주파수별 가속도 최대진폭의 감쇄, 지질학회지, 38, 237-250.
- 김성균, 박민아, 2002, 한반도의 국지지진규모, 지질학회지, 38, 217-235.
- 노명현, 최강룡, 김태경, 2003, 3성분 지진기록 합성에 의한 푸리에 진폭스펙트럼 분석, 지구물리학회지, 6, 25-29.
- Anderson, J. and Hough, S., 1984, A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequency, BSSA, 74, 1969-1993.
- Andrews, D. J., 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, 5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics, American Geophysical Union, Washington, D. C. 259-267.
- No, M. H., 1994, Spectral analyses of earthquakes in the southeastern part of the Korean Peninsula, Thesis for an Ph. degree.
- Fletcher, J. B., 1995, Source parameters and crustal Q for four earthquakes in south Carolina, SRL, 66. 44-58.
- Jo, N. D., 1999, Stochastic prediction of strong ground motions in Southern Korea, Thesis for an M. S. Degree.
- Junn, J. G., 2001, Stochastic simulation of strong ground motions in Southern Korea considering the finite-fault effects, Thesis for an M. S. Degree.
- Ottmoller, L., Havskov, J., 2003, Moment magnitude determination for local and regional earthquakes based on source spectra, BSSA, 93, 203-214.
- Snoke, A., 1987, Stable determination of (Brune) stress drop, BSSA, 75, 530-538.
- Steven L. Kramer, 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall.