

<Short Note>

한반도 국지지진 규모식의 활용을 위한 관측소 보정항 도출

신동훈

전남대학교 지구환경과학부

요 약

기상청은 1978년부터 한반도와 주변에서 관측된 지진을 감지, 분석하여 지진 정보를 통보해 왔다. Sheen (2015)은 그 동안 사용되어 왔던 지진 규모식의 거리 의존성을 확인하였으며, Sheen *et al.* (2018)은 새로운 지진 규모식을 제시하였다. 본 연구에서는 2017년부터 2018년까지 한반도와 주변에서 발생한 지진의 관측 자료를 사용하여 Sheen *et al.* (2018)의 규모식 적용에 따른 거리 의존성의 개선 효과를 살펴보고, 현재 운영 중인 광대역과 단주기 지진 관측소의 관측소 보정항을 도출하였다. 그 결과로 지진 규모의 거리 의존성이 대부분 해소된 것을 확인할 수 있었으며, 규모를 과대 평가했던 단주기 지진 관측소의 규모가 적절히 보정된 것을 확인할 수 있었다.

주요어: 지진, 규모, 지진규모식, 관측소 보정항

Dong-Hoon Sheen, 2020, Development of station corrections for a local magnitude scale in South Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 4, p. 493-500

ABSTRACT: The Korea Meteorological Administration has been analyzing and reporting the information of earthquakes in and around the Korean Peninsula from 1978. Sheen (2015) showed that there were systematic dependencies on distance in the local magnitude scale that had been used and Sheen *et al.* (2018) proposed a new local magnitude scale for South Korea. In this study, using earthquakes occurring from 2017 to 2018, the improvement by the application of the new scale is investigated and station corrections for broadband and short-period seismic stations are evaluated. The result shows that the systematic dependency is greatly removed and magnitudes of short-period seismic stations that have overestimated the magnitude of earthquakes are well calibrated.

Key words: earthquake, magnitude, local magnitude scale, station correction

(Dong-Hoon Sheen, Department of Geological Environment, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

1. 서 론

일반적으로 지진 규모는 아주 복잡한 이론적 개념 또는 연산의 도움 없이, 관측된 지진파의 진폭으로부터 직접 결정될 수 있는 값이다. 하지만 지진 규모를 정확히 결정하기 위해서는 이론적 개념을 만족시킬 수 있는, 필요한 연산들이 절차에 따라 수행되어야 한다. 어떤 한 지진의 최대 진폭은 동일한 진앙 거리에서 측정하더라도 단층 운동의 방향에 따른 지진파의 방사 형태(radiation pattern), 지진파가 전파

하는 동안 발생하는 진폭 감쇠, 관측소 하부의 부지 특성 등과 같은 다양한 원인에 의해 서로 매우 큰 차이를 보일 수 있다. 또한 지진계의 기계적인 특성인 계기응답함수에 따라 관측할 수 있는 지진동의 주파수 범위와 증폭 정도가 달라, 동일한 지점에서 관측했더라도 지진파의 진폭과 파형은 지진계의 종류에 따라 서로 크게 달라질 수 있다. 따라서 지진의 규모는 관측에 사용된 지진계의 계기응답함수를 적절히 제거한 다음, 거리에 따른 지진파의 감쇠와 관측소의 부지효과를 적절히 보정하여 관측소 규모(station

* Corresponding author: +82-62-530-3454, E-mail: dhsheen@jnu.ac.kr

magnitude)를 결정해야 한다. 그리고 지진파 방사 형태의 영향을 줄이기 위해 다양한 방위각에서 측정 한 충분한 수의 관측소 규모들로부터 대푯값을 도출 하여야 신뢰할 수 있는 관측망 규모(network magnitude), 즉 일반적인 의미의 지진 규모를 결정할 수 있다.

Sheen (2015)에 의하면 기상청과 한국지질자원연구원에서 사용하는 지진 규모식에 의한 관측소 규모는 진앙거리와 양의 상관관계를 가지는 계통적으로 선형적인 의존성을 가진다. 이로 인해 근거리에서 측정 한 지진 규모에 비해 원거리에서 측정 한 지진 규모가 더 큰 값을 가지는 것으로 파악되었다. 이에 비해 한반도에서 관측된 디지털 지진자료에 기반한 Kim and Park (2002)과 Shin *et al.* (2005)의 규모식은 거리에 따른 지진 규모의 선형적인 거리 의존성이 낮기 때문에 우리나라의 지진학적 특성을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이는 신뢰할 수 있는 지진 규모 결정을 위해서 지역적인 지진학적 특성을 반영한 경험적인 지진 규모식 적용이 필요하다는 점을 잘 보여준다.

Kim and Park (2002)과 Shin *et al.* (2005)의 규모식이 한반도의 지진학적 특성을 비교적 잘 반영하고 있으나, 이를 효과적으로 적용하기 위해서는 현재 운영되는 지진관측소들의 관측소 보정향을 도출하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

Sheen *et al.* (2018)은 이와 같은 문제들을 개선하기 위해, 2001년부터 2016년까지 한반도에서 발생한 지진들을 이용해 새로운 지진 규모식을 개발하고, 연구에 사용된 89개 광대역 지진관측소의 관측소 보정향을 도출하였다. 특히 수평 성분의 관측소 보정값이 수직 성분에 비해 약 1.5배의 범위를 보였으며, 수평 성분에서 지진파의 진폭이 수직 성분에 비해 관측소 하부의 지질학적 특성이나 부지 효과에 의해 더 많은 영향을 받는 것으로 해석하였다.

기상청에서는 Sheen *et al.* (2018)의 수직 성분 규모식을 기상청의 지진 분석 시스템에 적용하여 2017년부터 2018년까지 발생한 지진 자료로부터 지진 규모를 결정하였다. 본 연구에서는 기상청의 지진 규모 결정 결과를 사용해 새로운 규모식 적용의 효과를 검토하였다. 또한 광대역 지진관측소의 관측소 보정향을 갱신하고, 더불어 단주기 지진관측소의 관측소 보정향을 새롭게 도출하였다.

2. 지진 분석 절차와 지진 자료

기상청에서는 지진 분석에 BRTT사에서 개발한 Antelope 소프트웨어를 사용하고 있다. 이 연구에서는 2017년부터 2018년까지 한반도와 주변에서 발생한 746개 지진의 14,414개 자료로부터 Sheen *et al.* (2018)의 규모식을 이용해 Antelope에서 측정 한 지진 규모들을 활용하였다. 연구에 사용된 지진의 분포는 그림 1에 제시하였다.

이 소프트웨어는 입력된 지진 파형으로부터 지진 파의 P파 또는 S파의 도달시간을 자동으로 결정하고 지진의 진원을 계산한다. 잘못 식별된 지진파 위상이나 지진파 도달시간, 자동으로 식별되지 않는 지진파 위상 등은 사용자가 직접 도달시간을 변경하거나 새로 결정할 수 있다. 지진파 식별 과정의 검토가 끝나면 다시 진원을 계산할 수 있으며, 지진 규모가 자동으로 다시 측정된다. 이때 전국에서 전송된 지진 자료 중에서 진원 결정에 사용된 지진 파형들만 관측소 규모 측정에 사용된다.

Antelope는 실시간으로 지진신호처리를 수행하기 때문에 주파수 영역에서의 분해곱(deconvolution) 연산으로 지진 파형에서 지진계의 계기응답함수를 제거하지 않는다. 대신에 지진계 보정 계수(calibration coefficient)만 사용해 시간영역에서 지진 파형을 보정한다. 또한 일반적으로 주파수 영역에서 계기응답함수의 합성곱(convolution) 연산으로 수행되는 Wood-Anderson (WA) 지진계로의 모사 과정도 Antelope에서는 시간영역의 재귀 필터로 구현하였다. 이때 WA 지진계의 증폭비는 Uhrhammer and Collins (1990)에 따라 2,080이 보정값으로 사용된다. 광대역 지진계에 기록된 지진 파형은 WA 지진계 모사를 위해 시간영역의 재귀 필터로 구현된 WA 필터를 적용하지만 단주기 지진계의 지진 파형에는 WA 필터 연산을 적용하지 않고 증폭비만 보정된다. 이것은 WA 필터의 역할이 저주파수 지진 신호의 차단이 목적이며, 단주기 지진계의 계기응답함수가 WA 지진계와 비슷한 주파수 특성을 가지기 때문이다.

수직 성분 지진 파형의 신호대 잡음비가 2.0 이상인 경우, S파 도달시간의 1초 전부터 PS시 시간 길이의 2배에 해당하는 시간창 구간에서 가장 큰 최대-최소값(peak-to-peak)을 찾아 이 값의 절반을 지진 자료의 최대 진폭으로 사용한다. 이러한 과정을 거

처 결정된 지반 변위의 수직 성분 최대 진폭이 관측소 규모 계산에 사용되며, 기상청에서 2019년 7월부터 지진 규모 계산에는 Sheen *et al.* (2018)에서 제안한 다음의 식을 사용한다.

$$M_L = \log_{10}(A) + 0.5107 \log_{10}(R/100) + 0.001699(R-100) + 3 - C \quad (1)$$

이 식에서 A 는 지진파의 최대 진폭, R 은 진앙거리이다. C 는 관측소 보정항으로 아직 보정값이 도출되지 않는 지진 관측소는 이 항을 사용하지 않는다. Sheen *et al.* (2018)은 최근에 설치된 광대역 관측소의 보정항을 도출하지 못했고, 단주기 관측소의 보정항은 해당 연구에 포함되지 않았다.

만약 규모 계산에 사용된 관측소가 3개 미만인 경우에는 단순한 산술평균으로 관측망 규모를 결정한다. 관측소 규모가 3개 이상 측정된 경우는, 진원 깊이에 의한 영향을 줄이기 위해 진앙거리가 30 km 미

만인 관측소 규모를 우선 제거하고 진앙거리가 30 km 이상인 관측소 규모만을 이용해 평균을 계산한다. 관측소 규모와 평균과의 차이가 0.5 보다 큰 관측소가 있으면 이를 제거하고 평균을 다시 계산한다. 관측소 규모가 3개 미만인 되거나 모든 관측소 규모가 평균값과 규모 0.5 차이 이내에 존재하는 조건 중 하나라도 만족하면 절삭 평균을 계산하는 과정이 종료된다. 이 같은 반복적인 과정을 통해 계산된 절삭 평균을 최종적인 관측망 규모로 결정한다.

이 연구에서 사용한 지진 규모별, 거리별 자료의 분포를 그림 2에 나타내었다. 지진들은 규모 0.6에서 5.4의 범위에 분포한다. 짧은 관측기간으로 인해 규모 1.5~2.0 정도의 작은 규모 지진의 관측 자료가 주로 사용되었으며, 대부분 진앙거리 200 km 이내에 분포한다. 이 자료는 지진의 규모와 거리 분포가 제한적이어서 새로운 지진 규모식을 개발하기에는 적합하지는 않지만, 제시된 규모식을 평가하는 데에는 충분하다고 판단된다.

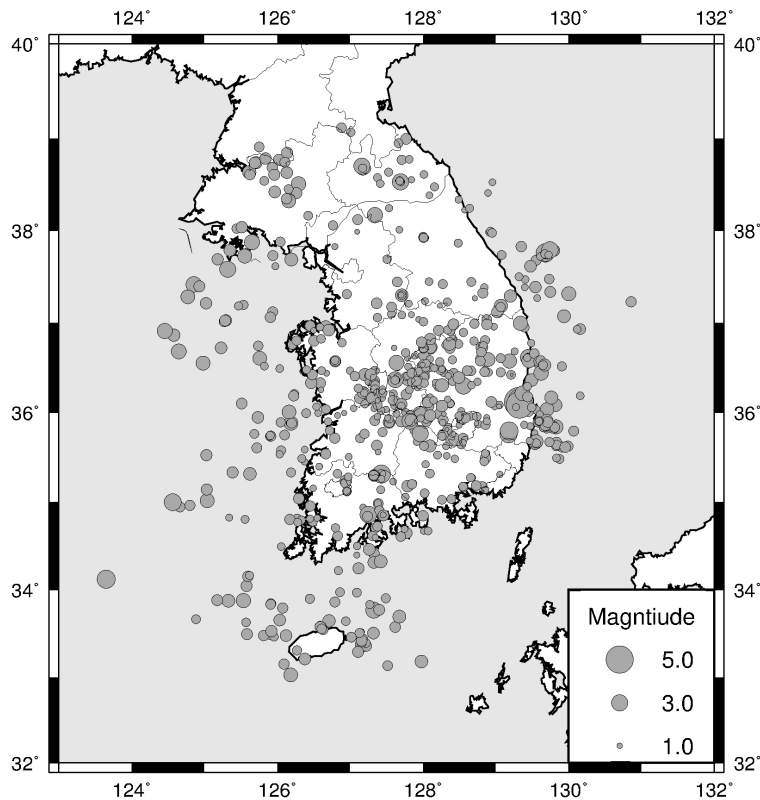


Fig. 1. Distribution of earthquakes used in this study.

그림 3에 관측소 규모와 관측망 규모의 잔차를 광대역 관측소와 단주기 관측소로 구분하여 거리에 따라 도시하였다. 관측망 규모는 광대역 관측소와 단

주기 관측소를 함께 사용하여 절삭 평균으로 결정된 것이며 점선은 최소제곱법을 이용한 회귀선을 의미한다. 거리가 100 km 씩 증가할 때 지진 규모가 0.14

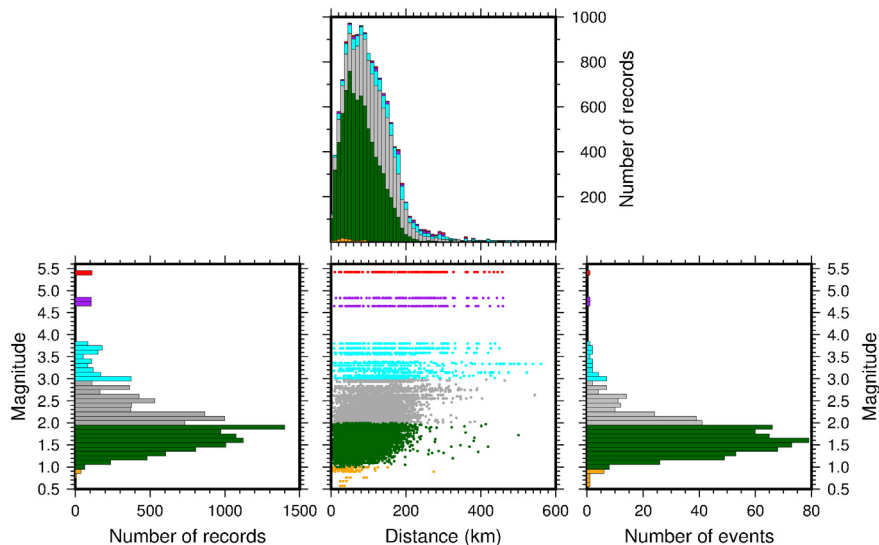


Fig. 2. Magnitude and distance distributions of the data used in this study.

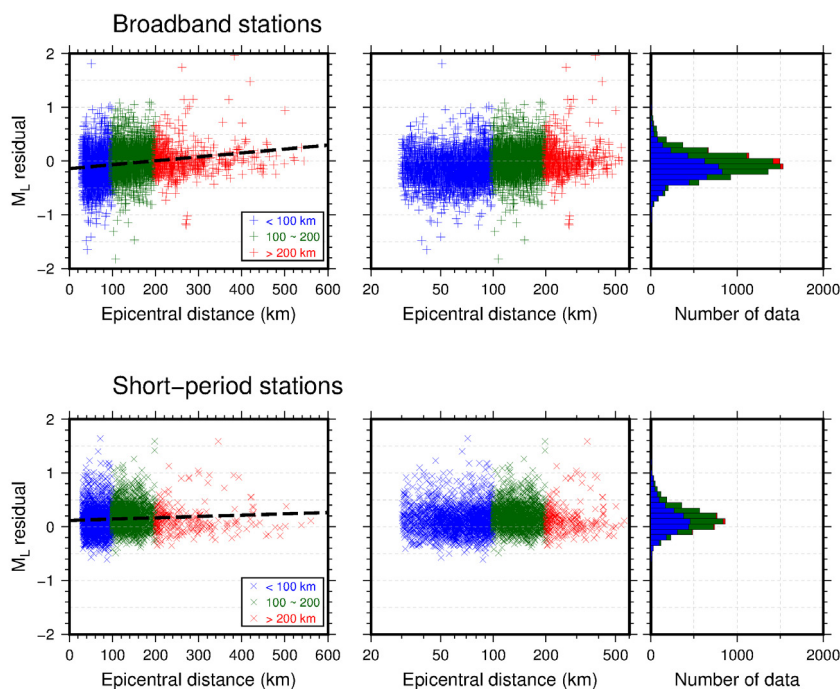


Fig. 3. Magnitude residual distributions as a function of epicentral distance for broadband and short-period stations based on the result of Sheen *et al.* (2018). The dashed lines indicate the least-squares linear regression of the residuals.

씩 증가했던 거리 의존적인 경향(Sheen, 2015)과 비교할 때, 새로운 규모식은 광대역 관측소의 경우에는 지진 규모가 100 km 마다 0.07 정도, 단주기 관측소는 0.02 정도만 증가하여 기존 규모식이 가지고 있던 거리 의존성 문제를 충분히 개선한 것으로 판단된다.

이 그림에서 광대역 관측소는 평균적으로 규모가 약 0.07 ± 0.29 정도 작게, 단주기 관측소는 약 0.16 ± 0.39 정도 크게 결정되었다. 이 결과는 2001년부터 2016년까지 운영된 89개 광대역 관측소의 지진자료에서 얻어진 보정항만을 사용한 것이므로 최근 설치된 광대역 관측소와 단주기 관측소의 보정값을 적용하지 못한 점을 감안할 필요가 있다.

3. 관측소 보정항의 도출

Sheen *et al.* (2018)의 연구에서 지진 규모식의 개발에 필요한 지진 규모 결정에 광대역 관측소의 자료만 사용한 것처럼, 본 연구에서도 새로운 관측소 보정항의 도출을 위한 각 지진의 기준이 될 수 있는 관측망 규모 결정에 광대역 관측소의 규모만 사용하였다. 우선 통계적 신뢰도를 높이기 위해 6개 이상 광대역 관측소의 관측소 규모가 측정된 지진들만 고려했으며, 앞서 설명한 방식의 절삭 평균으로 광대역 관측소의 관측소 규모들의 관측망 규모 초기값을 결정하였다. 이때 사용된 광대역 관측소의 지진 규모는 Sheen *et al.* (2018)의 보정항이 적용된 결과이다. 관측망 규모 초기값과 각 광대역 관측소의 관측소 규모와의 차이를 이용해 모든 광대역 관측소의 관측소 보정항 초기값을 결정한 다음, 이 보정항을 이용해 각 지진의 관측망 규모를 갱신하여 기준 규모를 결정하였다.

광대역 관측소의 규모와 보정항만을 사용해 도출된 기준 규모로부터 광대역 관측소의 보정항을 갱신하였으며, 동시에 단주기 관측소의 관측소 보정항도 결정하였다. 마지막으로, 본 연구에서 사용된 광대역 관측소 규모는 Sheen *et al.* (2018)의 보정항이 적용된 결과이므로, 이 보정항에 의한 규모 보정 효과를 제거하였다.

Sheen *et al.* (2018)의 연구에서 사용된 89개 광대역 관측소 중에서 2017년부터 2018년에 운영된 관측소는 모두 67개소였으며, 이번 연구를 통해 도출

된 관측소 보정항과 Sheen *et al.* (2018)의 보정항을 비교하였다(그림 4). 약 84% 정도의 광대역 관측소가 규모 0.1 이내의 차이를 보였다. SHHB 관측소는 보정항의 차이가 0.68 이었고 GWYB, HSB, SMKB 관측소도 0.2 이상의 차이를 보였는데, 계기 이상 또는 계기응답함수의 문제에 기인한 차이로 확인되었다. 큰 차이를 보이는 4개의 관측소를 제외한 63개 광대역 관측소의 평균적인 보정항 차이는 약 0.0023 ± 0.0650 이므로 대체로 Sheen *et al.* (2018)의 연구에서 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

이 연구에서는 2017년부터 2018년까지 기상청 지진 현업에서 사용한 관측소 중에서 관측 자료가 10개 이상인 관측소의 보정항을 도출하였으며 그림 5, 6과 같은 분포를 가진다. Sheen *et al.* (2018)의 연구의 연구에 비해 31개의 새로운 광대역 관측소의 보정항이 추가되어, 총 98개소의 광대역 관측소 보정항과 39개소의 단주기 관측소 보정항이 결정되었다. 광대역 관측소의 평균적인 관측소 보정값은 -0.0125 ± 0.1554 이었으며, 단주기 관측소는 0.2449 ± 0.1505 로 나타났는데, 단주기 관측소가 광대역 관측소에 비해 지진 규모를 약 0.25 정도 높게 평가하는 것으로 판단할 수 있다. 광대역 관측소 중에서 SHHB 관측소는 지진 규모를 약 0.94 정도 작게 결정하고 있으며 MRD, GWYB, SMKB 관측소는 각각 0.62, 0.39, 0.36 정도씩 지진 규모를 크게 결정했던 것으로 나타났다. 단주기 관측소 중에서는 WAN2, MUS2 관측소가 각각 0.77, 0.63 정도 지진 규모를 크게 결정했다.

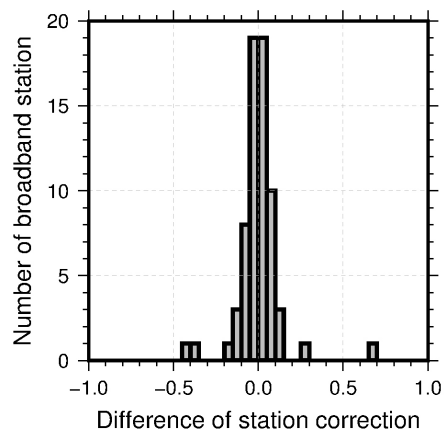


Fig. 4. Histogram of difference between station corrections from this study and those of Sheen *et al.* (2018).

이 연구에서 도출된 관측소 보정항을 적용하여 관측망 규모를 다시 계산하고, 그림 3과 비교할 수 있도록, 거리에 따른 관측소 규모와 관측망 규모의 잔차를 그림 7에 도시하였다. 관측소 보정항을 적용했을 때, 광대역 관측소는 약 0.01 ± 0.27 정도, 단주기 관측소는 약 0.003 ± 0.37 정도 지진 규모를 작게 평가하는 것으로 나타났다. 이는 관측소 보정항의 적

용으로 평균적인 관측소 규모의 잔차가 감소하여 관측망 규모와 가까운 값으로 관측소 규모가 결정되었기 때문으로 해석된다. 거리에 따른 의존성은 그림 3에서와 비슷하게 나타나는데, 광대역 관측소는 100 km 마다 지진 규모가 0.06 정도, 단주기 관측소는 0.04 정도만 증가하였다. 이를 통해 새로운 보정항을 사용했을 때에도 기존 규모식이 가지고 있던 거리 의

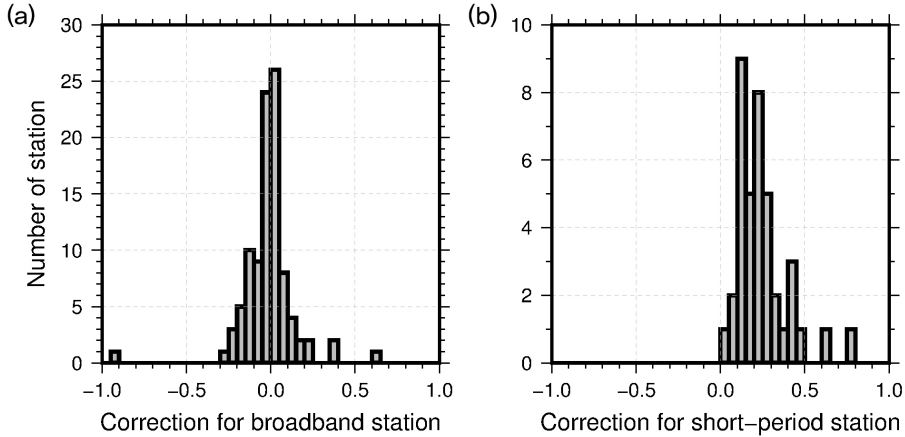


Fig. 5. Station correction for (a) broadband station and (b) short-period station.

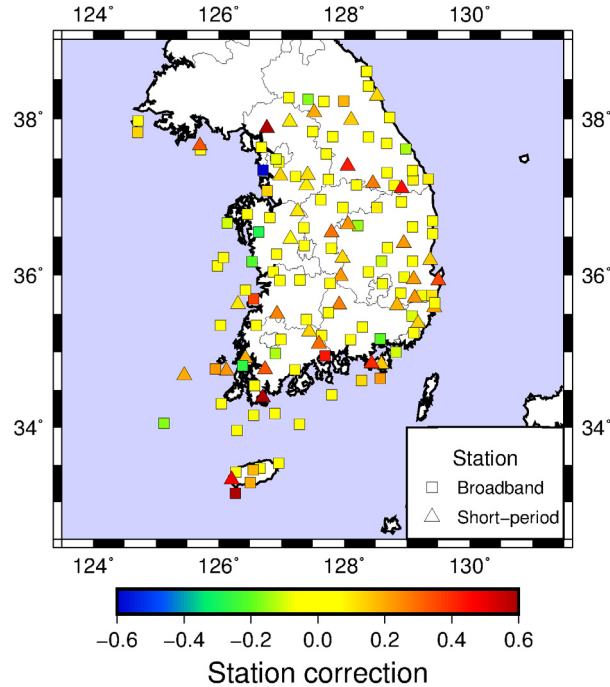


Fig. 6. Map distribution of station correction shown in Fig. 5.

존성 문제를 Sheen *et al.* (2018)의 연구와 동일한 수준에서 개선하는 것으로 판단된다.

그림 7에서 전체 거리의 범위에서 각 관측소 규모가 거리에 따라 큰 차이 없이 일정한 값을 가지는 것으로 평가할 수 있지만, 50~100 km 이내에서는 작은 범위의 비선형적인 변화도 관찰된다. Sheen *et al.* (2018)에서 사용한 매개변수법에 의한 식 (1)과 같은 형태의 기본 방정식은 그림 7에서 관찰되는 좁은 거리 범위의 비선형적인 변화까지는 고려할 수 없는 한계를 가진다. 이것은 70~130 km에서 관찰되는 SmS 파의 영향에 의한 진폭 증가 현상(Burger *et al.*, 1987; Atkinson and Mereu, 1992)으로 판단되며, 이 같은 비선형적인 진폭 변화를 고려하기 위해서는 Uhrhammer *et al.* (2011)가 캘리포니아와 그 주변 지역의 국지지진 규모식 개발에 사용한 것처럼 고차 함수를 활용한 기본 방정식을 이용한 역산이 필요할 것으로 보인다. 특히 30 km 이내의 근거리에서는 진원 깊이를 함께 고려할 필요가 있으므로, 향후에는 진원 거리를 기준으로 하는 지진 규모식의 개발이 필요하다고 판단된다.

이와 더불어 지진 가속도계의 관측소 보정항이 도출된다면, 국내에 조밀하게 설치된 가속도 자료를 지진 규모 결정에 사용할 수 있어 진앙 가까운 곳에서만 관찰되는 규모 1.0~2.0 정도의 미소 지진 규모 결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 기존에 제시된 Sheen *et al.* (2018)의 한반도 국지지진 규모식의 개선사항을 검토하고, 이 규모식을 효과적으로 사용할 수 있도록 최근 설치된 광대역 지진 관측소와 기존 단주기 관측소의 관측소 보정항을 도출하였다.

이를 위해 기상청의 지진 분석 시스템인 Antelope 소프트웨어에 Sheen *et al.* (2018)의 수직 성분 규모식을 적용하여 얻어진 지진 규모 측정 자료를 활용하였다. 2017년부터 2018년까지 발생한 규모 0.6에서 규모 5.4에 이르는 746개 지진의 14,414개의 관측소 규모 자료로부터 98개의 광대역 관측소 보정항과 39개의 단주기 관측소 보정항을 결정하였다. 이 보

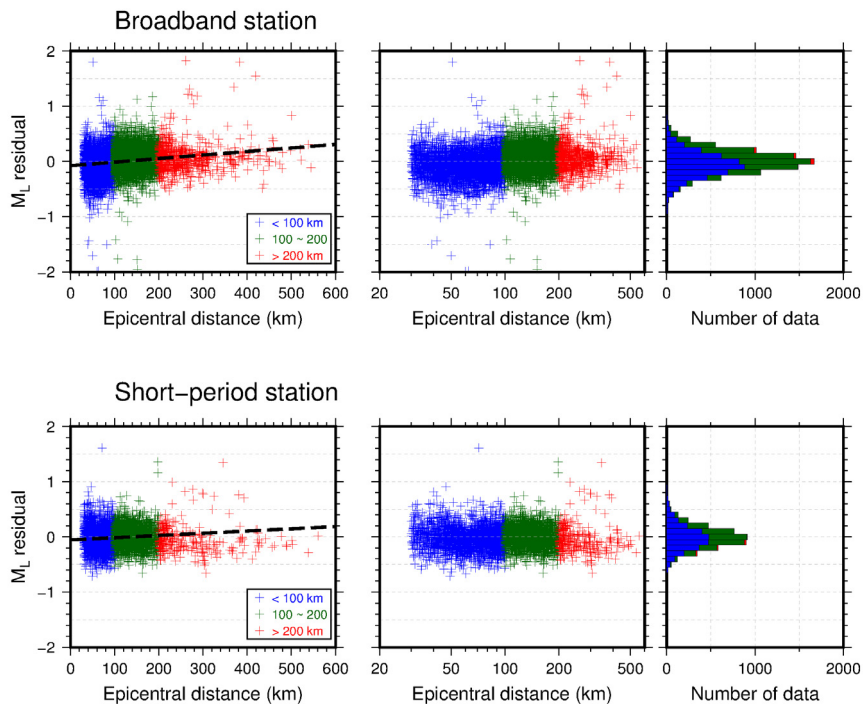


Fig. 7. Magnitude residual distributions as a function of epicentral distance for broadband and short-period stations based on the result of this study. The dashed lines indicate the least-squares linear regression of the residuals.

정값으로 인해 관측소 규모와 관측망 규모의 차이가 감소하여, 안정적으로 관측망 규모를 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 새로운 규모식의 사용으로 Sheen (2015)에서 언급된 지진 규모의 선형적인 계통적 거리 의존성은 대부분 해결된 것으로 판단된다. 하지만 근거리에서 지진 규모 결정과 50~100 km 정도의 거리에서 관찰되는 관측소 규모의 비선형적인 변화를 고려하기 위한 추가적인 연구와 가속도계의 규모 보정항 연구가 수행된다면 보다 안정적인 지진 규모 결정이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 기상지진 See-At 기술개발연구(KMI2018-00911)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원께 감사드리며, 상세한 지진 규모 측정 결과를 제공해 준 기상청에 감사드립니다.

REFERENCES

- Atkinson, G.M. and Mereu, R.F., 1992, The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82, 2014-2031.
- Burger, R.W., Somerville, P.G., Barker, J.S., Herrmann, R.B. and Helmberger, D.V., 1987, The effect of crustal structure on strong ground motion attenuation relations in eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77, 420-439.
- Kim, S.K. and Park, M.A., 2002, The local magnitude scale in the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 217-235 (in Korean with English abstract).
- Sheen, D.-H., 2015, Comparison of local magnitude scales in South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 415-424 (in Korean with English abstract).
- Sheen, D.-H., Kang, T.-S. and Rhie, J., 2018, A Local magnitude scale for South Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108, 2748-2755.
- Shin, J.S., Chi, H.C. and Cho, C.-S., 2005, Review on M_L scales in Southern Korea. *Journal of the Korean Geophysical Society*, 8, 207-209 (in Korean with English abstract).
- Uhrhammer, R.A. and Collins, E.R., 1990, Synthesis of Wood-Anderson seismograms from broadband digital records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80, 702-716.
- Uhrhammer, R.A., Hellweg, M., Hutton, K., Lombard, P., Walters, A.W., Hauksson, E. and Oppenheimer, D., 2011, California integrated seismic network (CISN) local magnitude determination in California and vicinity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101, 2685-2693.

Received : June 3, 2020

Revised : June 19, 2020

Accepted : June 19, 2020