

## 국내 저주파수 무작위 지진잡음의 특성 연구

박이슬<sup>1</sup> · 김기영<sup>1\*</sup> · 변중무<sup>2</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지구물리학과

<sup>2</sup>한양대학교 자원환경공학과

### Characteristics of Low-frequency Ambient Seismic Noise in South Korea

Iseul Park<sup>1</sup>, Ki Young Kim<sup>1\*</sup>, and Joongmoo Byun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Kangwon National University

<sup>2</sup>Department of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

**요약:** 저주파 ( $\leq 5$  Hz) 무작위 지진잡음의 시공간적 변화 특성을 밝히기 위하여, 국내 지표 가속도 관측소에서 2014년도 1년간 기록된 자료를 저주파( $< 1$  Hz)와 고주파( $\geq 1$  Hz) 성분으로 분리한 후, 평균제곱근 진폭과 파워 스펙트럼 밀도를 계산하였다. 지진잡음은 주로 섬과 해안가 관측소에서 크게 기록되었으며, 고주파 성분은 내륙의 대도시 지역에서도 큰 진폭으로 관찰되었다. 고주파 성분은 야간시간대보다 주간시간대에 약 34% 크고, 일요일 및 명절연휴에는 평일보다 감소하여 인간 활동과 밀접한 연관이 있는 것으로 분석된다. 저주파 성분은 일변화 및 주간변화가 뚜렷하지 않지만, 겨울철에 크게 기록되어 계절별 차이를 보인다. 유의파고와도 높은 상관성을 보여 바다 등 주로 자연적 기작에 의해 발생된 것으로 해석된다. 또한 저주파 성분의 진폭은 태풍 중심까지의 거리에 따라 지수함수 형태로 감소하며, 지수  $-0.76$ 은 표면파뿐만 아니라 실체파 성분도 함께 포함되어 있을 가능성을 제시한다. 파워 스펙트럼 밀도의 정극 주파수는 이중주파수 범위에 해당하는  $0.34$  Hz 정도로, 뚜렷한 시간적 변화를 보이지 않는다.

**주요어:** 저주파 지진잡음, 평균제곱근 진폭, 파워 스펙트럼 밀도, 이중주파수

**Abstract:** To investigate spatial and temporal variations of low-frequency ( $\leq 5$  Hz) ambient seismic noise, we analyzed the noise data recorded for one whole year of 2014 at surface accelerometer stations in South Korea. After decomposed into low-frequency (LF;  $< 1$  Hz) and high-frequency (HF;  $\geq 1$  Hz) components, the root-mean-squared (RMS) amplitudes and power spectral densities (PSD) of the noise data were computed. The RMS amplitudes were larger on islands and near-shore stations, but also large RMS amplitudes were observed at inland stations in large cities only for HF components. The RMS amplitudes of HF components were larger in the daytime than at nighttime and during weekdays than on Sunday and holidays. This indicates the HF components are closely related to human activities. On the contrary, daily and weekly variations were not clear in the LF components while they showed seasonal variations with its maximum during the winter and a good correlation with significant wave height. Therefore, we interpret the mechanism of LF components is closely related to natural phenomena such as sea. The amplitude of LF components decreased as an exponential function of the distance to the center of typhoons. The exponential index of  $-0.76$  suggested that ambient seismic noise included both surface and body waves. Peak frequencies of the PSD curves were near  $0.34$  Hz indicating the double frequency. No temporal variation in the peak frequency was clearly noticed.

**Keywords:** low-frequency seismic noise, root-mean-squared amplitude, power spectral density, double frequency

Received: 23 February 2016; Revised: 30 March 2016;

Accepted: 28 April 2016

\*Corresponding author

E-mail: [kykim@kangwon.ac.kr](mailto:kykim@kangwon.ac.kr)

Address: Department of Geophysics, Kangwon National University,

Chuncheon, Gangwon-do, Korea

©2016, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

미소진동(microseisms)으로 불리는 무작위 지진잡음(ambient seismic noise; 이하 ‘지진잡음’)은 지진과 무관하게 파도, 태풍 등과 같은 자연적 원인뿐만 아니라 교통과 산업 등 인간 활동으로 인한 인위적 원인에 의해서도 지속적으로 발생된다. 일반적으로 지진잡음은 이차 미소진동(secondary microseisms) 또는 이중주파수(double-frequency; DF)로 알려진 0.10 ~ 0.50 Hz 주파수 대역에서 우세하게 기록된다(Sheen *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012; Koper and Burlacu, 2015). 이전 지진 학자들은 이 주파수 대역의 신호를 각종 지진연구에 방해가 되는 잡음으로 간주하였지만, 현대 기계의 발달로 자료가 연속적으로 기록되면서 지진잡음에 대한 관심이 높아졌다(Tanimoto *et al.*, 2015).

이러한 지진잡음은 여러 유용한 정보를 포함하고 있어서 최근 들어 표면파 분산곡선 역산을 통한 암권구조 구명 등의 연구(Shapiro *et al.*, 2005; Kang and Shin, 2006; Zheng *et al.*, 2008)에도 이용되고 있다. 국내에서는 지진관측소의 관측능력 분석을 위한 지진잡음 자체의 특성(Sheen and Shin, 2010; Yun *et al.*, 2013), 수평/수직 스펙트럼 비 분석을 통한 부지증폭(Kim, 2006; Kim and Kim, 2009; Hong and Kim, 2010)과 지각 및 암권의 속도구조(Kang and Shin, 2006; Kim and Hong, 2012; Witek *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2015) 구명 등을 목적으로 연구된 바 있다.

지진잡음에 관한 물리학적 이론 및 시간 및 주파수 영역의 특성이 여러 연구자들에 의해 발표된 바 있다(Longuet-Higgins, 1950; Toksöz and Lacos, 1968; Vinnik, 1973; Peterson, 1993). 국내에서는 Kim *et al.* (2004)이 2003년 1월부터 2004년 5월 까지 21개소의 광대역 지진관측소에서 기록된 지진잡음의 변화를 시간 및 주파수 영역에서 분석하였으며, 2005년부터 2007년까지 광대역 지진계 30대에 기록된 잡음의 특성은 Sheen *et al.* (2009)에 의해 발표되었다. 또한 Cho *et al.* (2009)은 2007년 1월부터 2008년 6월까지 13개 광대역 관측소에서 관측된 지진잡음 자료를 분석하여 기상청 광대역 표준 지진잡음 모델을 개발하였으며, Yun *et al.* (2013)은 지표 및 시추공에 설치된 광대역 지진계와 가속도계에 기록된 잡음자료의 특성을 비교하였다.

이 연구는 한반도 지각구조 구명을 위한 수동적 실체파 간섭법의 선행 연구로, 지진잡음의 시·공간적 특성을 분석코자 하였다. 다중반사된 실체파 추출 및 분석하여 적합한 지진잡음 자료를 선택하기 위하여, 속도계 관측소보다 배치간격이 짧은 지표 가속도 관측소 자료를 사용하였으며, 2014년 1년간 연속적으로 기록된 5.00 Hz 이하의 지진잡음 자료만을 대상으로 시간과 주파수 영역에서 공간 및 시간에 따른 변화 특성을 살펴 보았다.

## 자료 및 분석 방법

2015년 1월 1일 기상청과 한국지질자원연구원은 각각 99개소와 20개소의 지표 가속도 관측소 및 27개소와 10개소의 시추공 가속도 관측소를 운영하고 있다. 기상청에서 운영 중인 지표 가속도계는 모두 동일한 모델로 Kinometrics ES-T이며, 한국지질자원연구원 관측망에 연결된 지표 관측소에는 ES-T 16대와 Güralp 3성분 가속도 지진계(CMG-5T) 5대가 설치되어 있다. 이 연구를 위하여 두 기관에서 UTC (Coordinated Universal Time)를 기준으로 2014년 1년간 20 Hz 샘플률로 기록한 하루 단위의 3성분 지진자료를 MiniSEED 형식으로 제공 받았다. 시추공 가속도계에 기록된 지진동 진폭은 부지효과에 의해 증폭된 지표 가속도계 자료의 진폭과 다르기 때문에 (Yun *et al.*, 2013; Kim and Park, 2015), 적절한 보정과정 없이 두 지진계 자료의 진폭 및 주파수를 분석하기에는 무리가 있다. 또한 보정과정에서 발생하는 오류 가능성을 원천적으로 차단하기 위하여, 이 연구에서는 지표 가속도 관측소 자료만을 분석대상으로 선택하였고, 센서가 CMG-5T 모델인 5개 관측소(BBK, DKJ, NPR, YIN, YPD) 자료를 제외하였다. 또한 자료가 1시간 이상 연속적으로 기록되지 않은 3개 기상청 관측소(CEJ, CHY, CPR) 자료를 추가로 제외함으로써, 이 분석연구에는 112대 가속도계에 기록된 수직성분 지진자료만을 사용하였다.

### 자료편집

제공받은 24시간 길이의 MiniSEED 형식 자료를 SAC (Seismic Analysis Code) 형식으로 변환한 후, 자료의 평균값 및 선형성분을 제거하였다. 0.10 ~ 5.00 Hz의 주파수 대역만을 분석하기 위해서 대역필터(0.05-0.10-5.00-10.00)를 적용 후, 계기응답함수를 제거하고 지진동 가속도 값으로 환산하였다. 이 자료를 MATLAB 형식으로 변환하고, 계기보정 과정에서 종종 발생하는 가속도 자료의 인위적 이상 신호를 제거하기 위해서 자료의 시작과 마지막 부분의 100초씩을 자료처리 및 분석에서 제외하였다. 푸리에변환 등 자료 분석의 효율적 수행을 위하여 1시간 길이의 자료로 재편집하였으며, 길이가 연속적으로 1시간이 되지 않는 자료는 분석에서 제외하였다.

연속 지진자료에는 자연적 지진잡음 뿐만 아니라 지진신호 및 관측소 주변의 인위적 잡음과 장비 오작동 등 다른 이상 신호도 함께 포함되어 있다. 따라서 지진 및 장비 이상에 의한 순간신호(transient signal)가 기록된 자료를 인지하고 제거하기 위하여, 각 1시간 길이 자료의 평균제곱근(root-mean-squared; RMS) 진폭  $A_{RMS}$ ,

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N A_i^2}{N}} \quad (1)$$

를 구하였다. 여기서  $A_i$ 는  $i$ 번째 샘플의 진폭,  $N$ 은 자료의 샘플 수이다. 각 샘플의 절대진폭이  $A_{RMS}$ 의 10배 이상인 자료(즉,  $|A_i| \geq 10 \times A_{RMS}$ )를 제외함으로써 지진잡음 자료만을 선택하였다. 또한 이상치를 통계적으로 제거하기 위하여 상위 5%의  $A_{RMS}$ 를 갖는 자료를 제외시킴으로써, 지진잡음 외의 지진동 자료가 분석에 사용될 수 있는 가능성을 추가적으로 감소시켰다.

**시간영역 분석법**

일반적으로 지진잡음은 1 Hz를 기준으로 자연적인 원인에 기인한 저주파 성분과 인위적 원인으로 발생하는 고주파 성분으로 구분된다(Young *et al.*, 1996; McNamara and Buland, 2004). 이 연구에서는 추후 심부지각구조 연구에 사용할 이중 주파수 범위(0.10 ~ 0.50 Hz; Sheen *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012; Koper and Burlacu, 2015)가 포함된 저주파 성분을 분리해 내기 위하여, 원시자료에 모서리 주파수가 0.05-0.10-1.00-2.00 Hz인 주파수 대역필터를 적용하였다. 또한 비교적 천부의 지각구조 연구에 사용할 가능성이 있는 고주파 성분 추출을 위하여 0.50-1.00-5.00-10.00 Hz의 대역필터를 적용하여 두 주파수 범위로 나누어 분리한 후 편집하였다. 저주파 성분 자료의 경우, 주변 배경잡음수준이 매우 높은 해안가의 YES 관측소 기록자료를 제외한 총 111개 가속도 관측소 자료만을 분석에 사용하였다. 고주파 자료의 경우에는 YES 관측소뿐만 아니라, 주변 배경잡음수준이 높고 기계적 이상신호(glitch)가 크게 기록된 2개 관측소(JAH, TOH)를 제외한 나머지 109개소 관측소 자료를 시간영역 분석에 이용하였다(Fig. 1).

지진잡음의 공간적 변화를 규명하기 위하여, 관측소별로 고주파와 저주파 성분의  $A_{RMS}$ 를 식 (1)을 이용하여 따로 계산하였다(Fig. 1). 시간적 변화 양상을 밝히기 위하여 모든 관측소 자료의 1시간 단위  $A_{RMS}$ 를 일차로 구하였고(Fig. 2), 이를 24시간 평균하여 일변화와 주변화 및 계절적 변화를 분석하는데

사용하였다(Fig. 3). 또한 국내 기상상태 및 태풍 등의 영향을 분석하는데도 사용하였다(Figs. 4 & 6).

**주파수영역 분석법**

주파수영역에서 지진잡음의 특징을 분석하기 위해서, 파워스펙트럼 밀도(power spectral density; PSD)를 0.10 ~ 5.00 Hz 주파수 대역에서 계산하였다. 각 주파수별 에너지의 분포를 나타내는 PSD는 1시간 자료  $x(t)$ 를 푸리에 변환(Fourier transform), 즉

$$PSD(f) = \frac{2\Delta t}{N} \left| \int_0^T x(t)e^{-2i\pi ft} dt \right|^2 \tag{2}$$

와 같이 계산하였다(McNamara and Boaz, 2005). 여기서  $N$ 은 자료의 샘플 수이며  $\Delta t$ 는 고르기 비율(sampling rate)이고,  $\frac{2\Delta t}{N}$ 는 정규화 요소(normalization factor)이다. 이 PSD를 데시벨(dB) 형태인

$$PSD = 10\log_{10}PSD \tag{3}$$

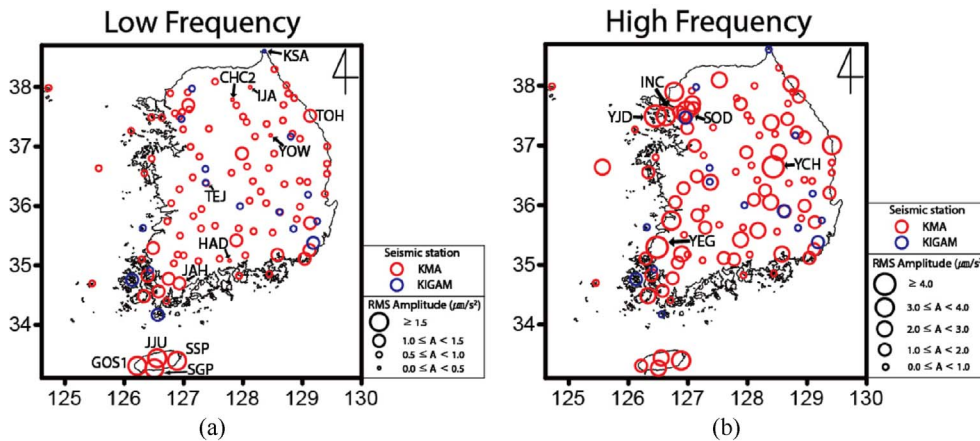
으로 표현하기도 하며, 이 때 단위는 dB/Hz이다.

주파수별 공간적 특성을 분석하기 위하여, 관측소별로 2014년 1년간 평균 PSD를 계산하였으며(Fig. 7), 시간대별 변화 특성을 밝히기 위하여 모든 관측소 자료의 평균 PSD를 주간 및 야간 시간대로 구분하였다(Fig. 8). 또한 정꼭 주파수(peak frequency)의 일변화 및 월변화 양상을 밝히기 위하여 시간평균과 월평균 PSD를 계산하였다(Fig. 9).

**지진잡음 특성**

**시간영역 분석**

2014년 1년간 국내 지표 가속도계(Fig. 1)에 기록된 지진잡음에 대역필터를 적용한 후의 평균  $A_{RMS}$  ( $\bar{A}_y$ )는  $0.97 \pm 0.72$



**Fig. 1.** Root-mean-squared (RMS) amplitudes of (a) low- (< 1 Hz) and (b) high-frequency ( $\geq 1$  Hz) background seismic noise recorded in 2014 at 111 and 109 accelerometer stations, respectively, on the Korea Meteorological Administration (red) and the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (blue) networks. The coded stations are mentioned in the main text.

$\mu\text{m/s}^2$ 이며, 이를 1 Hz를 기준으로 저주파 성분과 고주파 성분으로 구분하여 분석하였다. 저주파 성분의 경우, 111개 지표 가속도계에 기록된  $\bar{A}_y$ 는  $0.83 \pm 0.51 \mu\text{m/s}^2$ 이고, 대부분 관측소(> 75%)에서의 기록은  $0.50 \sim 1.00 \mu\text{m/s}^2$  범위에 집중되어 있다(Fig. 1a).  $\bar{A}_y$ 가  $1.50 \mu\text{m/s}^2$  이상인 곳은 제주도에 위치한 4개 관측소(JJU, SSP, SGP, GOS1) 뿐이며,  $0.50 \mu\text{m/s}^2$  이하인 곳은 CHC2, HAD, IJA, KSA, YOW 관측소이다.

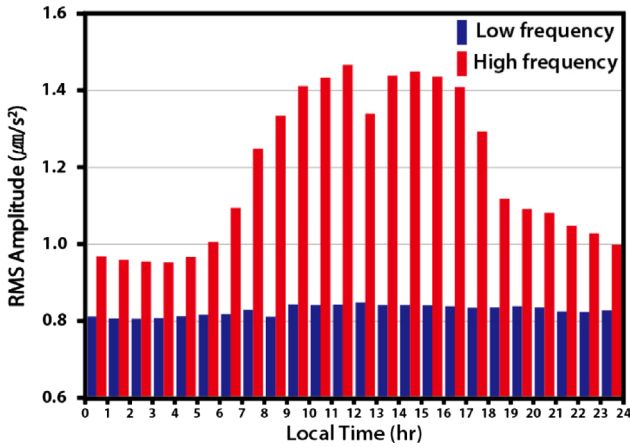
고주파 성분의 경우, 109개소의  $\bar{A}_y$ 은  $1.17 \pm 0.91 \mu\text{m/s}^2$ 로 나타났으며, YCH, YEG, YJD 관측소에서는  $4.00 \mu\text{m/s}^2$  이상으로 다른 관측소보다 지진잡음이 비교적 크게 기록되었다(Fig. 1b). 저주파 성분의 결과와 유사하게 섬과 해안가에 위치한 관측소들에서  $\bar{A}_y$ 가 큰 값을 보이지만, 저주파 성분이 미약하게 기록되었던 SOD와 INC 등 내륙의 대도시에 위치한 관측소에서도 고주파 성분의 진폭이 크게 기록되어 저주파 성분

과 차이를 보였다.

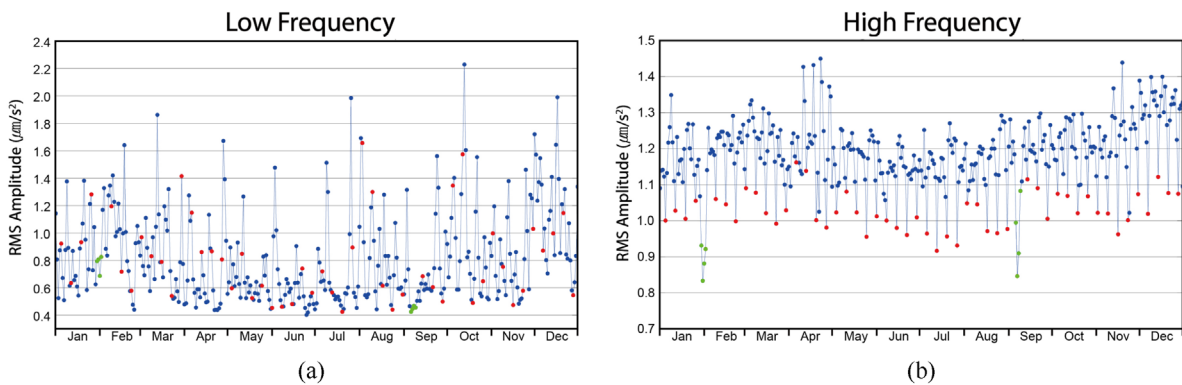
전체적으로 고주파 성분의  $\bar{A}_y$ 가 저주파 성분보다 약  $0.34 \mu\text{m/s}^2$  정도 크게 나타났으나, 고주파 성분의 주파수 대역폭이 넓으므로, 단위 Hz 당 지진동 에너지가 더 많이 분포한다고 볼 수는 없다. 오히려 기존의 여러 연구에서 밝혀진 바와 같이 (Sheen *et al.*, 2009; Tanimotoe *et al.*, 2015),  $0.10 \sim 0.50$  Hz 대역의 이중주파수(double frequency; DF)를 중심으로 에너지가 크게 기록되어 있는데(Fig. 7), 주파수 성분별 분석은 다음 절에서 자세히 기술할 것이다.

1시간 단위 고주파 성분 자료의 1년 평균  $A_{RMS}$  ( $\bar{A}_h$ )는 11 ~ 12시 사이에 가장 크게 나타나서 2003년 1월부터 2004년 5월 까지 21개소의 광대역 지진관측소에서 기록된 지진잡음의 분석결과와 일치한다(Kim *et al.*, 2005). 이 고주파 성분은 야간 시간대(00 ~ 06시 및 18 ~ 24시)보다 인간 활동이 활발한 주간 시간대(06 ~ 18시)에 진폭이 34% ( $0.35 \mu\text{m/s}^2$ ) 정도 더 크게 기록되었다(Fig. 2). 이는 국내 광대역 지진관측 자료를 분석한 기존의 연구결과와 유사하다(Cho *et al.*, 2009; Sheen *et al.*, 2009; Sheen and Shin, 2010). 그러나 이러한  $\bar{A}_h$ 의 일변화 양상은 저주파 성분에서는 뚜렷이 관찰되지 않으며, 일변화 폭이  $0.02 \mu\text{m/s}^2$  이내로 매우 작은 것으로 분석되었다.

고주파 성분의 일평균  $A_{RMS}$  ( $\bar{A}_d$ )은 거의 모든 일요일에 극솟값이 나타나서 주말에 인간 활동이 감소하였음을 뚜렷하게 반영하지만, 저주파 성분의 경우에는 특징적인 주간 변화가 관찰되지 않는다(Fig. 3). 또한 고주파 성분의  $\bar{A}_d$ 는 설날(1월 30일 ~ 2월 2일)과 추석연휴(9월 7일 ~ 10일) 기간에 연평균  $A_{RMS}$ 인  $\bar{A}_y$ 보다 각각  $0.31$ 와  $0.21 \mu\text{m/s}^2$  정도 작은 값이 나타나며, 일요일보다도 오히려 평균  $0.13$ 과  $0.03 \mu\text{m/s}^2$  정도 작아서 연휴기간 동안 인간 활동이 전국적으로 크게 감소하였음을 보여준다. 그러나 저주파 성분의 경우는 명절 연휴의  $\bar{A}_d$ 가  $\bar{A}_y$ 보다 다소 작은 값을 보이지만 고주파 성분처럼 뚜렷이 나타나지는 않는다. 계절평균  $A_{RMS}$  ( $\bar{A}_s$ )은 고주파 성분의 경우에 겨울철(1, 2, 12월)이 여름철(6 ~ 8월)보다 약 6% 더 크며,



**Fig. 2.** Diurnal variation of hourly averaged RMS amplitude ( $\bar{A}_h$ ) of the low- (blue bars) and high- (red bars) frequency components. The  $\bar{A}_h$  of high-frequency components varied significantly with time while it stayed nearly constant for the low-frequency components. For the high-frequency components, the average amplitude in the daytime (06 ~ 18 hr) is  $0.35 \mu\text{m/s}^2$  larger than that in the nighttime (00 ~ 06 and 18 ~ 24 hr).



**Fig. 3.** Variations of daily averaged RMS amplitude ( $\bar{A}_d$ ) of (a) the low- and (b) high-frequency components in 2014. The  $\bar{A}_d$  of low-frequency components were greater in the winter than in summer while those of the high-frequency components were minimal on Sundays (red dots) and during national holidays (green dots).

저주파 성분의 경우에는 그 차이가 6배 이상(38%)에 달한다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 고주파 성분은 사람의 활동과 직·간접적인 연관성이 높은 반면, 저주파 성분은 자연적 원인에 의해 발생하는데 기인한다고 판단된다.

이러한 계절별 변화는 자연현상인 기상과 관련이 있어 보인다. 따라서 대표적 자연현상인 기상에 대한 영향을 분석하고자 주파수 성분별로 월평균  $A_{RMS}$  ( $\bar{A}_m$ )과 한반도 기상상태(강수량, 풍속, 유의파고)의 상관성을 분석하고자 하였다. 강수량과 풍속은 국내 94개 기상관측소에서 관측된 통계자료를 이용하였으며, 상위 1/3에 해당하는 파고의 평균 높이인 유의파

고는 해양기상 부이 17대와 등표 기상관측장비 9대로 관측한 통계자료를 이용하였다(NCDSS, 2015). 기상관측소와 가까운 지점에 설치된 가속도계 자료를 이용하여 계산한 상관계수 (correlation coefficient,  $r$ )는 주변의 다른 변수의 영향을 많이 받는 것으로 보인다. 따라서 국내 기상관측소에서 기록된 모든 기상상태를 평균하여 국내 월평균 기상상태와  $\bar{A}_m$ 의 상관성을 분석하였다(Fig. 4).

월평균 강수량은 8월에 연간 총 강수량의 32% (394.5 mm)로 가장 높게 나타났으며, 1월의 강수량이 14.0 mm로 가장 작았다. 풍속은 12월이 2.6 m/s로 가장 높고, 다음으로 3월과 5월이 2.4 m/s로 높았으며, 유의파고는 12월이 1.21 m로 연평균보다 0.46 m 정도 높게 나타났고 6월에 0.49 m로 가장 낮았다.  $\bar{A}_m$ 과 강수량과의 상관계수는 저주파와 고주파 성분에서 각각 -0.22와 -0.31로 나타나 거의 상관성이 없음을 보인다. 풍속의 경우에는 저·고주파 성분에서 상관계수가 각각 0.43과 0.57로 나타나 저주파 성분보다는 고주파 성분이 풍속의 영향을 좀 더 많이 받은 것으로 판단된다. 유의파고와의 상관계수는 저주파와 고주파 성분에서 각각 0.97과 0.79로 각각 나타나서, 기존의 연구 결과(Friedrich *et al.*, 1998; Sabra *et al.*, 2005b; Sheen *et al.*, 2009)와 같이 지진잡음의 RMS 진폭과 관련성이 매우 높은 것으로 분석되었다.

이미 여러 연구를 통해 잡음과 태풍의 관련성이 발표되었으며(Gutenberg, 1947; Gilmore and Hubert, 1948; Sheen and Shin, 2009; Lee *et al.*, 2012), 대서양(Ebeling and Stein, 2011), 태평양(Lin *et al.*, 2014), 인도양(Davy *et al.*, 2014) 등 바다에서 생성된 강력한 폭풍에 의해서 기상 에너지가 해양 중력파로 전환되고 이 에너지의 일부가 지진잡음을 발생시키

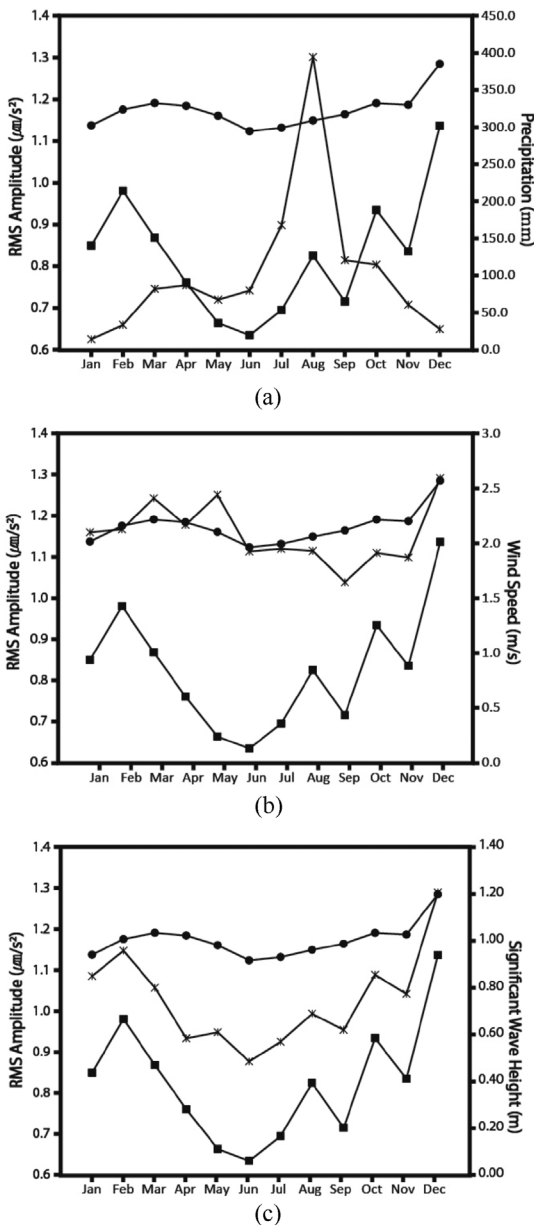


Fig. 4. Monthly averages of (a) precipitation, (b) wind speed, and (c) significant wave height (asterisks) superimposed on the monthly averaged RMS amplitude ( $\bar{A}_m$ ) of the low (squares) and high (circles) frequency components in 2014.

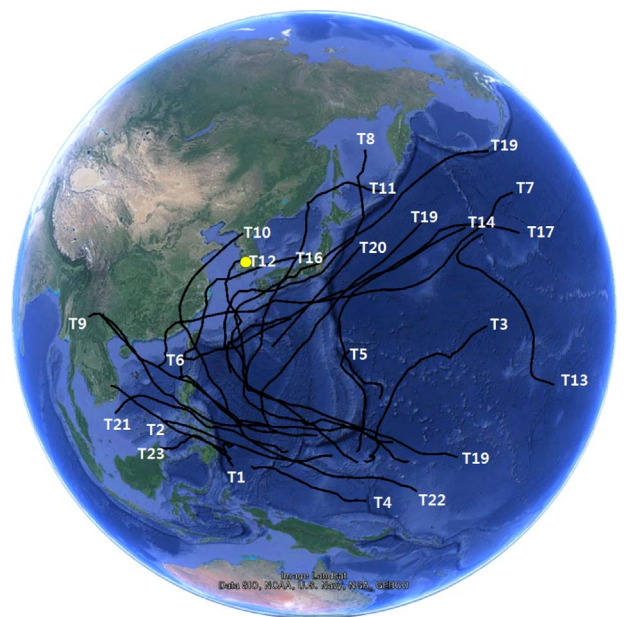


Fig. 5. Tracks of 23 typhoons (T1 ~ T23) occurred in 2014 (modified from Google earth).

는 것으로 알려져 있다(Ebeling and Stein, 2011). 국내에서는 한반도로 다가오는 태풍으로 유발된 유의파고와 이중주파수 에너지의 유사한 경향성을 분석하였고(Sheen and Shin, 2009), KSRS 배열에 기록된 0.2 ~ 0.7 Hz 잡음과 태풍의 후방위각을 비교하여 태풍이 이중주파수 지진잡음의 실질적 원인이 될 수 있음을 발표한 바 있다(Lee *et al.*, 2012).

비록 태풍이 지진잡음의 유일한 원인은 아니나, 이 연구에서는 태풍의 발생기간, 발생위치, 중심기압, 최대풍속에 따른 지진잡음의  $\bar{A}_d$  변화 특성을 규명코자 하였다. 이를 위하여, 2014년 1년간 북서태평양에서 활동한 23개 태풍에 관한 기상청 국가태풍센터(NTC, 2015) 및 일본 National Institute of Informatics (NII, 2015)의 자료를 이용하였다(Fig. 5). 2014년 태풍이 발생한 기간(163일) 동안 모든 관측소의  $\bar{A}_d$  1년 평균치는 저주파와 고주파 성분별로 각각  $0.84 \pm 0.52 \mu\text{m/s}^2$ 와  $1.17 \pm 0.91 \mu\text{m/s}^2$ 으로, 발생하지 않았던 202일간의  $0.82 \pm 0.50 \mu\text{m/s}^2$  및  $1.17 \pm 0.92 \mu\text{m/s}^2$ 와 거의 차이가 없다. 또한 저주파와 고주파 성분 모두,  $\bar{A}_d$ 와 태풍의 중심기압 및 최대풍속과의 상관성이 높지 않은 것( $r \leq 0.50$ )으로 분석되었다. 한반도 중심부인 대전에 위치한 TEJ 관측소(Fig. 1)로부터 태풍 중심까지의 거리에 따른 태풍의 영향을 분석하였다(Fig. 6). 고주파 성분의 경우에는 거리에 따른  $\bar{A}_d$ 의 변화가 뚜렷하게 발견되지 않으며, 저주파 성분의 경우는 대략 2,000 km 이하에서 거리 증가에 따라 감소하는 양상이 보인다. 그러나 그 이상의 거리에서는  $0.43 \sim 1.72 \mu\text{m/s}^2$  범위에 고르게 분포되어 있는데, 이는 태풍이 한반도에서 멀리 위치할 경우에 태풍보다는 관측소 주변의 기상상태 등에 더욱 영향을 많이 받기 때문일 것으로 해석된다.

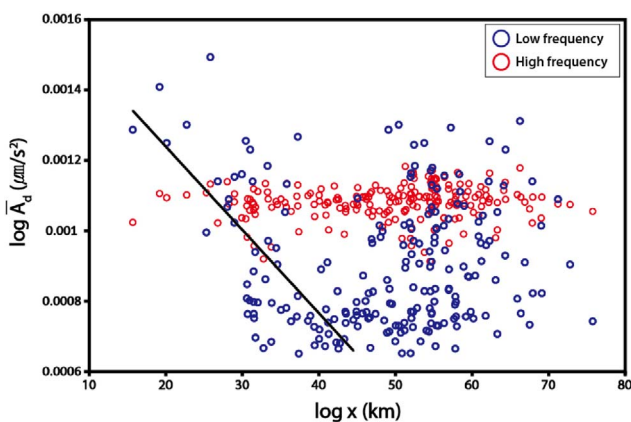
여러 선행연구에서 지진잡음은 주로 표면파 성분으로 구성되어 있는 것으로 알려져 있으며(Shapiro and Campillo, 2004;

Sabra *et al.*, 2005a; Koper *et al.*, 2010; Tanimoto *et al.*, 2015), 국내에는 주로 해안가에서 발생하는  $L_g$  성분이 우세한 것으로 알려져 있다(Koper *et al.*, 2010). 그러나 상부지각의 불균질성으로 레일리파가 단주기 실체파로 변환되거나(Roux, *et al.*, 2005), 그밖에 여러 원인(Koper *et al.*, 2010; Sheen, 2014; Sheen and Shin, 2016)으로도 실체파가 발생된다는 의견이 제시된 바 있다.

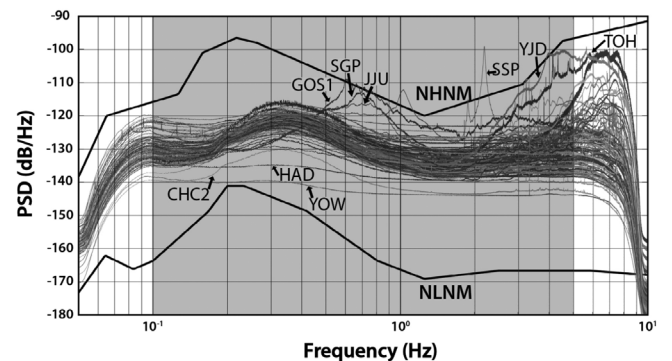
거리 2,000 km 이하에 위치한 태풍에 의해 발생한 저주파 성분  $\bar{A}_d$ 의 감쇠양상을 분석하여 지진잡음 내에 실체파 존재를 분석하고자 하였다(Fig. 6). 이론적으로 진폭과 거리 값에 모두 대수(logarithm)를 취하고 구한 회귀직선(regression line)의 기울기가 표면파의 경우에는 진폭과 거리가 반비례 관계이기 때문에  $-0.50$ 이 나타나고, 실체파의 경우에는 거리제곱에 반비례하기 때문에  $-1.00$ 로 나타난다(Liner, 2003). 이 연구에서 계산한  $\bar{A}_d$ 를 이용하여 구한 회귀직선의 기울기는  $-0.76$ 으로, 이론적인 표면파 기울기와 실체파 기울기 사이의 값을 갖는다. 이는 지진잡음의 저주파 성분에 표면파뿐만 아니라 실체파 성분도 함께 포함되어 있을 가능성을 제시한다. 그러나 결정계수(determination coefficient,  $R^2$ )가 0.50으로 크지 않고 회귀분석에 사용한 자료가 65개로 충분하지 않아서, 보다 높은 신뢰성 확보를 위해서는 더 많은 자료를 이용한 추가 분석이 필요할 것이다.

### 주파수영역 분석

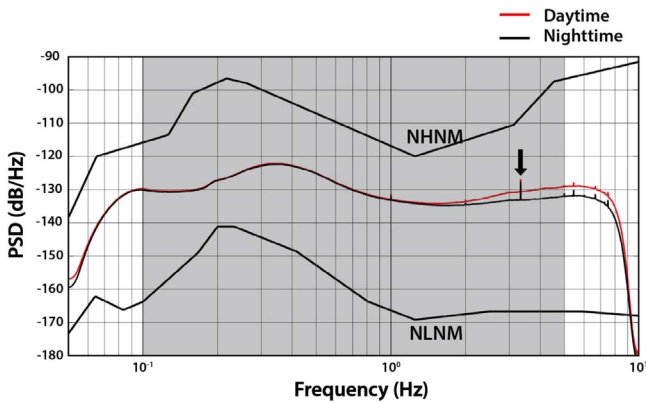
주파수영역에서의 지진잡음 분석은 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)를 계산하여 실시하였으며, 이미 전처리과정에서 자료에 주파수 대역 통과필터를 적용하였기 때문에 0.10 ~ 5.00 Hz 대역 자료만을 분석하였다. 2014년 1년 동안 기록된 111개 가속도 관측소별 지진잡음의 PSD는 대부분 Peterson의 잡음모델(Peterson, 1993)인 NHNM (new high noise model)과 NLNM (new low noise model)사이 값으



**Fig. 6.** Variation of daily averaged RMS amplitude ( $\bar{A}_d$ ) with the distance ( $x$ ) between the center of typhoon and TEJ station in logarithmic scales. Blue and red circles indicate low- and high-frequency components, respectively. The regression line of  $\bar{A}_d$  with the low-frequency components is superimposed on distances less than 2,000 km.



**Fig. 7.** Power spectral density (PSD) of the background noise in the frequency range of 0.10 to 5.00 Hz. The PSD curves (thin gray lines) for the 111 seismic stations were superimposed on the Peterson's new high (NHNM) and low noise models (NLNM). The noise records at the labeled nine stations are mentioned in the main text.

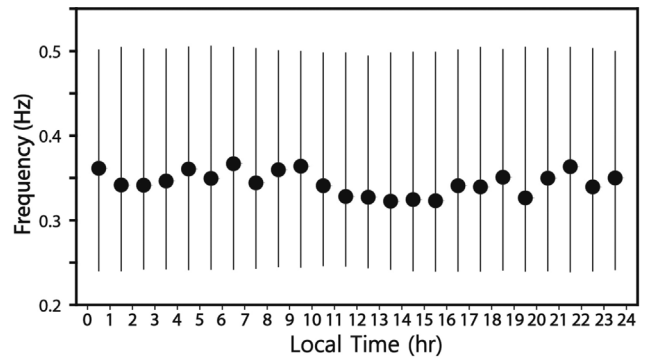


**Fig. 8.** Difference in average PSD of the ambient seismic noise between daytime (red line) and nighttime (black line). The two PSD curves are almost identical below 1 Hz while the difference is distinct above 2 Hz indicating different source origins. The arrow at 3.33 Hz indicates an abnormal spike that was not fully smoothed by stacking PSD curves.

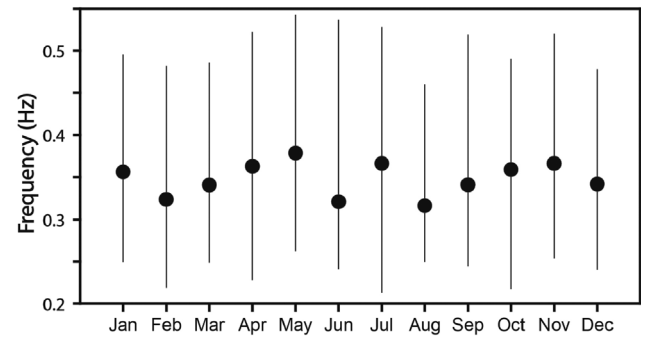
로 나타나며, 제주도의 4개 관측소(GOS1, JJU, SGP, SSP)와 TOH 및 YJD 관측소(Fig. 1)의 PSD는 일반적인 잡음모델과는 달리 0.60 ~ 3.00 Hz 사이에 정곡 주파수를 갖는 특이한 양상으로 나타났다(Fig. 7). 따라서 이 6개 관측소에서 기록한 자료를 제외한 105개 관측소 자료만을 주파수 분석에 이용하였다. 시간영역 분석 결과와 마찬가지로 저주파 성분에서 CHC2, HAD, YOW 관측소의 연평균 PSD가 작게 나타난다.

모든 관측소의 1시간 길이 자료의 1년 평균 PSD를 분석한 결과, 1 Hz 이하의 저주파 영역에서 주간(06 ~ 18시)과 야간 시간(00 ~ 06 및 18 ~ 24시)에 따른 PSD의 변화는 미미하지만, 고주파 영역에서는 주간시간대 PSD가 야간시간대보다 최대 3.77 dB 정도 크게 나타나서 인간 활동에 의한 것임을 다시 지시한다(Fig. 8). 이는 주·야간 시간대별로 4 dB 정도 차이를 보이는 이전 연구 결과(Sheen *et al.*, 2009)와 비교적 잘 일치한다. 3.33 Hz를 비롯한 고주파 성분의 여러 주파수에 PSD 이상신호가 주·야간 시간대에서 모두 기록되었는데(Fig. 8), 이는 PSD의 인위적 왜곡을 최소화하기 위하여, 주파수 영역에서 평활화(smoothing) 과정을 별도로 수행하지 않은 결과로, 특별한 물리적 의미는 없는 것으로 생각된다.

1 시간 단위로 구한 연평균 PSD 정곡 주파수(peak frequency)는 0.32 ~ 0.37 Hz 범위에 나타나며(Fig. 9a), 출퇴근 시간대에 다소 증가하는 것을 볼 수도 있으나 경향성이 뚜렷하지는 않다. 0.34 Hz의 평균 PSD 정곡 주파수는 Peterson (1993)의 잡음모델에서 나타나는 최대 이중주파수보다 약간 높은 주파수에서 관찰되며, 이는 기상청 광대역 관측소에 기록된 배경잡음의 정곡 주파수가 2.5초에서 나타나는 이전 연구결과와 유사하다(Cho *et al.*, 2009). 이는 한반도의 관측소가 Peterson이 이용한 관측소들보다 전반적으로 해안에 더 가깝게 위치하여 고주파수 성분의 감쇠가 상대적으로 적은데 기인할 가능성이



(a)



(b)

**Fig. 9.** (a) Diurnal and (b) monthly variations in peak frequency of the noise data. The maximum values (solid circles) and the widths of 3 dB down (bars) indicate no significant temporal variation.

있으며(NIMR, 2007), 아울러 발생환경과 전파경로 및 수신위치의 지질특성을 반영하는 것으로도 볼 수 있다(Gerstoft *et al.*, 2008; Landès *et al.*, 2010; Koper and Burlacu, 2015; Sheen and Shin, 2016). 월 단위로 평균하여 구한 정곡 주파수는 0.32 ~ 0.38 Hz 범위에서 나타나며, 특징적인 월별 혹은 계절별 변화를 보이지 않는다(Fig. 9b).

## 결론

2014년 국내 지표 가속도 관측소에 기록된 5 Hz 이하의 배경잡음을 1 Hz를 기준으로 고주파 성분과 저주파 성분으로 분리한 후, 시·공간적 변화를 시간 및 주파수 영역에서 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 관측소별 지진배경잡음의 연평균 RMS 진폭은 섬이나 해안가에 위치한 관측소에서 전반적으로 크게 관찰되었으며, 고주파 성분의 경우는 내륙의 대도시 지역에서도 큰 진폭으로 나타났다.
2. 인간 활동과 연관이 있는 고주파 성분의 경우, RMS 진폭이 주간시간대가 야간시간대보다 34% 이상 크며, 일요일 및 명절연휴에는 평일보다 각각 15% 및 22% 이상 감소된 양상을 보였다.
3. 자연적 발생기작과 관련이 있는 저주파 성분의 경우, 뚜

렸한 일변화나 주간변화 양상을 보이지 않으나, 겨울철의 평균 RMS 진폭은 연평균보다 23% 정도 높아서 계절적 변화가 있음을 보였다.

4. 기상요소 중, 국내 월평균 강수량 및 풍속은 월평균 RMS 진폭과의 상관성이 크지 않으나, 저주파 성분의 진폭과 유의파고는 상관계수가 0.97로 나타나서 바다 상태의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다.

5. 태풍의 경우, 관측소로부터 대략 2,000 km 이하의 거리에 서는 저주파 성분의 진폭이 거리의 지수함수 형태로 나타나며, 지수가  $-0.76$ 으로 지진잡음 기록 내에 표면파뿐만 아니라 실체파도 기록되어 있을 가능성을 제시하였다.

6. 파워 스펙트럼 밀도의 정곡 주파수는 이중주파수 범위인 0.34 Hz 정도로 나타났으며, 특징적인 월별 및 계절별 변화를 보이지 않는다.

7. 이러한 배경잡음의 향후 시·공간적 변화 양상에 대한 정보는 지진배경잡음에서 실체파를 추출코자 할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(KMIPA2015-7010)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다. 2014년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호-120140226)을 밝힙니다. 지진기록자료를 제공해주신 기상청과 한국지질자원연구원 관계자 분들께 깊이 감사드리며, 논문에 질적 향상을 위하여 세심한 심사와 조언을 해주신 심사위원분들께도 진심으로 감사드립니다.

## References

- Cho, B.-J., Sheen, D.-H., Jo, B.-G. Park, S.-C., and Hwang, E.-H., 2009, Development of a standard background noise model for broadband seismic stations of KMA, *Journal of the Geological Society of Korea*, **45**, 127-141.
- Davy, C., Barruol, G., Fontaine, F. R., Sigloch, K., and Stutzmann, E., Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor, *Geophysical Research Letters*, **41**, 8825-8831.
- Draganov, D., Wapenaar, K., Mulder, W., Singer, J., and Verdel, A., 2007, Retrieval of reflections from seismic background-noise measurements, *Geophysical Research Letters*, **34**, doi:10.1029/2006GL028735.
- Ebeling, C. W. and Stein, S., Seismological identification and characterization of a large hurricane, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**, 399-403.
- Friedrich, A., Krüger, F., and Klinge, K., 1998, Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array, *Journal of Seismology*, **2**, 47-64.
- Gerstoft, P., Shearer, P. M., Harmon, N., and Zhang, J., 2008, Global P, PP, and PKP wave microseisms observed from distant storms, *Geophysical Research Letters*, **35**, doi:10.1029/2008GL036111.
- Gilmore, M. H. and Hubert, W. E., 1948, Microseisms and Pacific typhoons, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **38**, 195-228.
- Gutenberg, B., 1947, Microseisms and weather forecasting. *Journal of Meteorology*, **4**, 21-28.
- Hong, M. H. and Kim, K. Y., 2010, H/V Spectral-ratio Analysis of Microtremors in Jeju Island, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **13**, 114-152.
- Kang, T.-S. and Shin, J. S., 2006, Surface-wave tomography from ambient seismic noise of accelerograph networks in southern Korea, *Geophysical Research Letters*, **33**, doi:10.1029/2006GL027044.
- Kim, J. K., 2006, Analysis of site amplification characteristics of several seismic stations distributed in the Southern Korean peninsula, *Journal of Korean Society of Rack Mechanics*, **6**, 486-494.
- Kim, K. Y. and Hong, M. H., 2012, Shear-wave velocity structure of Jeju Island, Korea, *Geosciences Journal*, **16**, 35-45.
- Kim, K. Y. and Park, Y.-G., 2015, Microtremor response of the Cheongcheon dam in Korea, *Exploration Geophysics*, <http://dx.doi.org/10.1071/EG15019>.
- Kim, S. K., Nam, S.-T., and Ryoo, Y. G., 2004, Characteristics of the background noise of seismograph stations in Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, **40**, 515-536.
- Kim, S. Y. and Kim S. K., 2009, Characteristics of Site Amplification of the broad-band seismic stations in Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, **30**, 810-823.
- Koper, K. D. and Burlacu, R., 2015, The fine structure of double-frequency microseisms recorded by seismometers in North America, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **120**, 1677-1691.
- Koper, K. D., Seats, K., and Benz, H., 2010, On the composition of Earth's short-period seismic noise field, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 606-617.
- Landès, M., Hubans, F., Shapiro, N. M., Paul, A., and Campillo, M., 2010, Origin of deep ocean microseisms by using teleseismic body waves, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**, doi:10.1029/2009JB006918.
- Lee, S.-J., Rhie, J., Kim, S., Kang, T.-S., and Kim, G. B., 2015, Ambient seismic noise tomography of the southern East Sea (Japan Sea) and the Korea Strait, *Geosciences Journal*, **19**, 709-720.
- Lee, W.-D., Jo, B.-G., Schwab, F., and Jun, S.-B., 2012, Typhoon-generated microseisms observed from the short-period KSRS array, *Geosciences Journal*, **16**, 447-454.
- Lin, J.-Y., Lee, T.-C., Hsieh, H.-S., Chen, Y.-F., Lin, Y.-C., Lee, H.-H., and Wen, Y.-Y., 2014, A study of microseisms induced by typhoon Nanmadol using ocean-bottom seismometers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **104**, doi:10.1785/0120130237.
- Liner, C. L., *Elements of 3D seismology*, 2nd Ed., PennWell Books.



- Longuet-Higgins, M. S., 1950, A theory of the origin of microseisms, *philosophical transactions, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **243**, 1-35.
- McNamara, D. E. and Boaz, R. I., 2005, Seismic noise analysis system, power spectral density probability density function: stand-alone software package, U.S. Geological Survey open-file No. 2005-1438.
- McNamara, D. E. and Buland, R. P., 2004, Ambient noise levels in the continental United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 1517-1527.
- National Climate Data Service System (NCDSS), 2015, Surface Observation, <http://sts.kma.go.kr/jsp/home/contents/main/main.do> (accessed September 30, 2015).
- National Institute of Informatics (NII), 2015, 2014 Typhoon information, <http://agora.ex.nii.ac.jp/~kitamoto/> (accessed September 30, 2015).
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), 2007, Development of earthquake monitoring environment and tsunami forecasting technique in Korea Peninsula, research report, 4-17p.
- National Typhoon Center (NTC), 2015, 2014 Typhoon Analysis Report, <http://typ.kma.go.kr/index.jsp> (accessed September 30, 2015).
- Peterson, J., 1993, Observations and modeling of seismic background noise, U.S. Geological Survey, Open-File Report 93-322.
- Poli, P., Campillo, M., Pedersen, H., and LAPNET Working Group, 2012 Body-wave imaging of Earth's mantle discontinuities from ambient seismic noise, *Science*, **338**, 1063-1065.
- Roux, P., Sabra, K. G., Gersoft, P., and Kuperman, W. A., 2005, P-wave from cross-correlation of seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **32**, doi:10.1029/2005GL023803.
- Sabra, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A., and Fehler, M. C., 2005a, Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **32**, doi:10.1029/2004GL021862.
- Sabra, K. G., Gerstoft, P., Roux, P., Kuperman, W. A., and Fehler, M. C., 2005b, Surface wave tomography from microseisms in Southern California, *Geophysical Research Letters*, **32**, doi:10.1029/2005GL023155.
- Shapiro, N. M. and Campillo, M., 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **31**, doi:10.1029/2004GL019491.
- Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., and Ritzwoller, M. H., 2005, High-resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, **307**, 1615-1618.
- Sheen, D.-H., 2014, Microseisms from huge Indian Ocean storms in May 2007, *Geosciences Journal*, **18**, 347-354.
- Sheen, D.-H. and Shin, J. S., 2010, Earthquake detection thresholds of broadband seismic networks in South Korea considering background seismic noise levels, *Journal of the Geological Society of Korea*, **46**, 31-38.
- Sheen, D.-H. and Shin, J. S., 2016, Observation of continuous microseismic P waves in Asia, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 248-259.
- Sheen, D.-H., Shin, J. S., and Kang, T.-S., 2009, Seismic noise level variation in South Korea, *Geosciences Journal*, **13**, 183-190.
- Tanimoto, T., Heki, K., and Artru-Lambin, J., 2015, Interaction of solid Earth, atmosphere, and ionosphere, *Treatise on Geophysics*, **4**, 421-443.
- Toksöz, M. N. and Lacos, R. T., 1968, Microseisms: Mode structure and sources, *Science*, **159**, 872-873.
- Vinnik, L. P., 1973, Sources of microseismic P waves, *Pure and Applied Geophysics*, **103**, 282-289.
- Witek, M., van der Lee, S., and Kang, T.-S., 2014, Rayleigh wave group velocity distributions for East Asia using ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **41**, 8045-8052.
- Young, C. J., Chael, E. P., Withers, M. M., and Aster, R. C., 1996, A comparison of the high-frequency (> 1 Hz) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**, 1516-1528.
- Yun, W. Y., Park, S.-C., and Kim, K. Y., 2013, Comparison of background noise characteristics between surface and borehole station of Hwacheon, *Geophysics and Geophysical Exploration*, **16**, 203-210.
- Zheng, S., Sun, X., Song, X., Yang, Y., and Ritzwoller, M. H., 2008, Surface wave tomography of China from ambient seismic noise cross correlation, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **9**, doi:10.1029/2008GC001981.