

육상지진계와 해저지진계를 사용한 하기비스 태풍의 맥동 특징 분석

고지원¹ · 김태신¹ · 박지훈¹ · 오세영¹ · 장성준^{1,‡} · 김기영¹ · 이상묵² · 김영희² · Hisashi Utada³ · Hitoshi Kawakatsu³ · Hajime Shiobara³ · Takehi Isse³ · Nozomu Takeuchi³

¹강원대학교 지구물리학과

²서울대학교 지구환경과학부

³동경대학교 지진연구소

요 약

2019년에 발생한 하기비스(HAGIBIS) 태풍에 의해 서태평양에 위치한 OLDEST-1 Pacific Array 해저지진계와 일본에 위치한 육상지진계에 기록된 자료를 사용하여 지역에 따른 맥동의 잡음 수준 변화에 대한 연구를 수행했다. 태풍이 지나갈 때 육상지진계에서는 1차맥동과 2차맥동 모두 잡음 수준이 증가했지만 해저지진계에서 1차맥동의 변화는 거의 관찰되지 않았다. 해저지진계에서 단주기 2차맥동보다 장주기 2차맥동의 변화가 더 작았으며, 장주기 2차맥동은 태풍의 강도나 태풍과 지진계의 거리에 영향을 받는 것으로 보인다. 육상지진계에서는 장주기 2차맥동이 단주기 2차맥동보다 태풍의 영향이 먼저 나타났으며 해저지진계에서는 단주기 2차맥동이 장주기 2차맥동보다 먼저 나타났다. 이는 단주기 2차맥동이 장주기 2차맥동보다 육지에서 더 급속하게 감쇠하기 때문인 것으로 생각된다. 또 피어슨 상관계수를 통해 2차맥동과 유의파고를 비교한 결과 장주기 2차맥동보다 단주기 2차맥동과의 연관성이 더 높았다. 이를 통해 유의파고가 단주기 2차맥동의 직접적인 원인이 됨을 알 수 있었다.

주요어: 태풍, 맥동, 배경잡음, 해저지진계, 파워스펙트럼밀도

Ji-won Ko, Tae-shin Kim, Ji-hoon Park, Se-young Oh, Sung-Joon Chang, Ki Young Kim, Sang-Mook Lee, YoungHee Kim, Hisashi Utada, Hitoshi Kawakatsu, Hajime Shiobara, Takehi Isse and Nozomu Takeuchi, 2021, Analysis on microseism characteristics by typhoon ‘HAGIBIS’ using land and ocean-bottom seismometers. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 3, p. 339-352

ABSTRACT: We use seismic data recorded at OLDEST-1 Pacific Array ocean-bottom seismometers (OBSs) in the Western Pacific and land seismometers in Japan by the typhoon HAGIBIS in 2019 to study spatial background noise level changes. While noise levels in both the single-frequency microseisms (SFMs) and the double-frequency microseisms (DFMs) increase in the land seismometers by HAGIBIS, changes in the SFMs due to the typhoon are barely observed in the OBSs. The changes in the long-period DFMs (LPDFMs) are smaller than those in the short-period DFMs (SPDFMs) in the OBSs, because the LPDFMs may be affected by the intensity of the typhoon and the distance to the typhoon. The LPDFMs begin to increase earlier than the SPDFMs in the land seismometers because of relatively rapid attenuation of SPDFMs in the land, but the opposite case is observed for the OBSs. We also compare the DFMs with the significant wave height (SWH) using Pearson's correlation coefficient and find that the SPDFMs are more correlated with the SWH than the LPDFMs. This may indicate that the SWH is the main cause for the SPDFMs.

Key words: typhoon, microseism, background noise, ocean-bottom seismometer, power spectral density

(Ji-won Ko, Tae-shin Kim, Ji-hoon Park, Se-young Oh, Sung-Joon Chang and Ki Young Kim, Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Sang-Mook Lee and YoungHee Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Hisashi Utada, Hitoshi Kawakatsu, Hajime Shiobara, Takehi Isse and Nozomu Takeuchi, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo 113-8654, Japan)

[‡] Corresponding author: +82-33-250-8581, E-mail: sjchang@kangwon.ac.kr

1. 서 론

지진계에는 지진에 의한 파형뿐만 아니라 다양한 배경잡음들이 함께 기록된다. 배경잡음은 지진 연구에 있어 방해요소이기 때문에 제거 대상이 되지만 배경잡음을 통해 지진 관측소에서 얻은 자료의 신뢰도를 평가할 수 있고 부지의 특성 등을 파악할 수 있다(e.g., Lee *et al.*, 2015). 또 지진계는 비교적 넓은 지역에 설치되어 있으며 부표나 인공위성보다 먼저 기록이 시작되었다. 따라서 이런 장점 때문에 20세기부터 해양학이나 대기학 등의 분야에서 배경잡음이 꾸준히 연구되었다(Obrebski *et al.*, 2012). 배경잡음 중 지구에서 발생하는 연속적인 지진 에너지를 맥동(microseism)이라고 한다(e.g., Bromirski *et al.*, 2005; Kedar and Webb, 2005). 맥동은 파도의 활동, 대기압 변화, 해양파 사이의 비선형 상호작용 등에 의해 발생하며(e.g., Cho *et al.*, 2009) 파도의 활동으로 만들어진 지진파는 레일리파와 P파로 전파되어 광대역 지진계에 기록된다(e.g., Lin *et al.*, 2017). 맥동은 발생 원인에 따라 1차맥동과 2차맥동으로 나뉜다. 1차맥동(single-frequency microseism, SFM)은 해안선이나 수심이 낮은 해저면에 해양파가 부딪히면서 발생하는 압력 변화에 의해 기록되기 때문에 파도와 같은 주파수 범위를 가지며(e.g., Bromirski *et al.*, 2005; Davy *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2018) 11~20초 주기에 기록된다. 반면 2차맥동(double-frequency microseism, DFM)은 수심과 관련 없이 해저면에 작용하는 압력 변화에 의해 발생한다. 같은 주파수를 가진 파가 정방향과 역방향으로 이동하면서 서로 중첩되어 생성된 정상파에 의해 발생하는 2차맥동은 원래의 파도의 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 갖게 되며(e.g., Bromirski *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2018) 2~11초 주기에 기록된다. 2차맥동의 잡음 강도는 반대 방향으로 전파하는 해양파의 진폭과 중첩이 발생하는 지역과 관련이 높다(e.g., Lin *et al.*, 2017). 즉, 해안가를 향해 진행하는 파도와 해안가에 부딪혀 반사된 파도의 중첩에 의해 발생할 수 있으며(e.g., Stutzmann *et al.*, 2012), 공해의 경우 파도의 상호작용이나 태풍에 의해서 발생할 수도 있다(e.g., Chen *et al.*, 2015; Xiao *et al.*, 2018).

Dorman *et al.* (1993)은 먼 거리에 있는 태풍과 지역적인 바람에 의해 형성된 해양파가 맥동을 만든다

고 했으며 그 결과 2차맥동에서는 두 개의 최대점이 발견된다(e.g., Stephen *et al.*, 2003). Bromirski *et al.* (2005)는 2차맥동 영역에서 나타나는 두 최대점을 단주기 2차맥동(short-period double-frequency microseism, SPDFM)과 장주기 2차맥동(long-period double-frequency microseism, LPDFM)으로 분류했다. 해안가(e.g., Bromirski *et al.*, 2005; Bromirski, 2009)와 공해(Obrebski *et al.*, 2012)가 장주기 2차맥동의 발원지가 될 수 있으며, 단주기 2차맥동은 관측소 근처에서 해양 중력파의 비선형적인 상호작용에 의해 주로 발생한다고 보고되었다(Bromirski *et al.*, 2005; Ardhuin *et al.*, 2011; Lepore and Grad, 2020). Lin *et al.* (2017)은 수심이 깊은 해양분지에서는 단주기 2차맥동만 관찰되었으며 태풍이 수심이 얕은 쪽으로 올수록 단주기 2차맥동과 장주기 2차맥동이 나타났다고 보고했다. Xiao *et al.* (2018)는 해저지진계가 발생원으로부터 멀거나 해저지진계에 기록되는 다른 잡음 요소에 의해 장주기 2차맥동을 관찰하기 어렵다고 주장했다. 하지만 일정하지 않고 계속해서 변화하는 바람의 속력과 압력 등의 기상 요소와 파도의 특징 때문에 2차맥동이 형성되는 원인과 발생 지역에 대한 매커니즘은 여전히 논쟁중에 있다.

본 연구는 2019년 10월 4일부터 10월 22일까지 발생한 태풍 ‘하기비스(HAGIBIS)’에 의해 발생한 맥동에 대해 연구하고자 한다. 하기비스 태풍은 사파어-심프슨 허리케인 풍속등급(Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale)을 기준으로 재앙 수준의 피해를 줄 수 있는 5등급 태풍으로 분류되었으며 일본에 심각한 피해를 주었다. 북서태평양에서 발생한 하기비스 태풍은 무역풍의 영향으로 서쪽으로 이동하다가 북위 30°에서 편서풍의 영향으로 일본 동쪽 해상을 지난다. 수심이 깊은 해양분지와 수심이 얕은 해안가 지역을 지나기 때문에 하기비스 태풍에 의한 맥동의 지역에 따른 변화를 연구하기에 적합하다고 판단하였다. 서태평양에 설치된 11개의 OLDEST-1 Pacific Array 해저지진계와 일본 육상지진계에서의 변화를 파워스펙트럼밀도(power spectral density)로 계산된 스펙트로그램으로 도시하고, 태풍 경로에 따라 각 주기에서 변화하는 잡음 강도를 비교관찰하였다. 또 Chi *et al.* (2010)와 같이 파고 모델을 이용하여 2차맥동과 파고의 상관관계를 분석하였다.

2. 자료 획득과 분석방법

하기비스는 서태평양 지역에서 발달하기 시작하여 OLDEST-1 Pacific Array를 관통하였으며 북상하면서 일본의 내륙, 해안가, 섬에 위치한 지진관측소인 JGF, JSG, JHJ2(그림 1; 표 1, 2)를 각각 통과하였다.

OLDEST-1 Pacific Array는 2018년 11월부터 2019년 11월까지 설치되어 있었다. 서태평양 지역은 주로 9월부터 11월까지 태풍이 빈번하게 발생하며, 태풍의 강도가 강할수록 지진계에 기록되는 태풍에 의한 맥동의 변화가 뚜렷하게 관찰되기 때문에 하기비스 태풍을 선택하였다. 2019년 10월 4일부터 열대

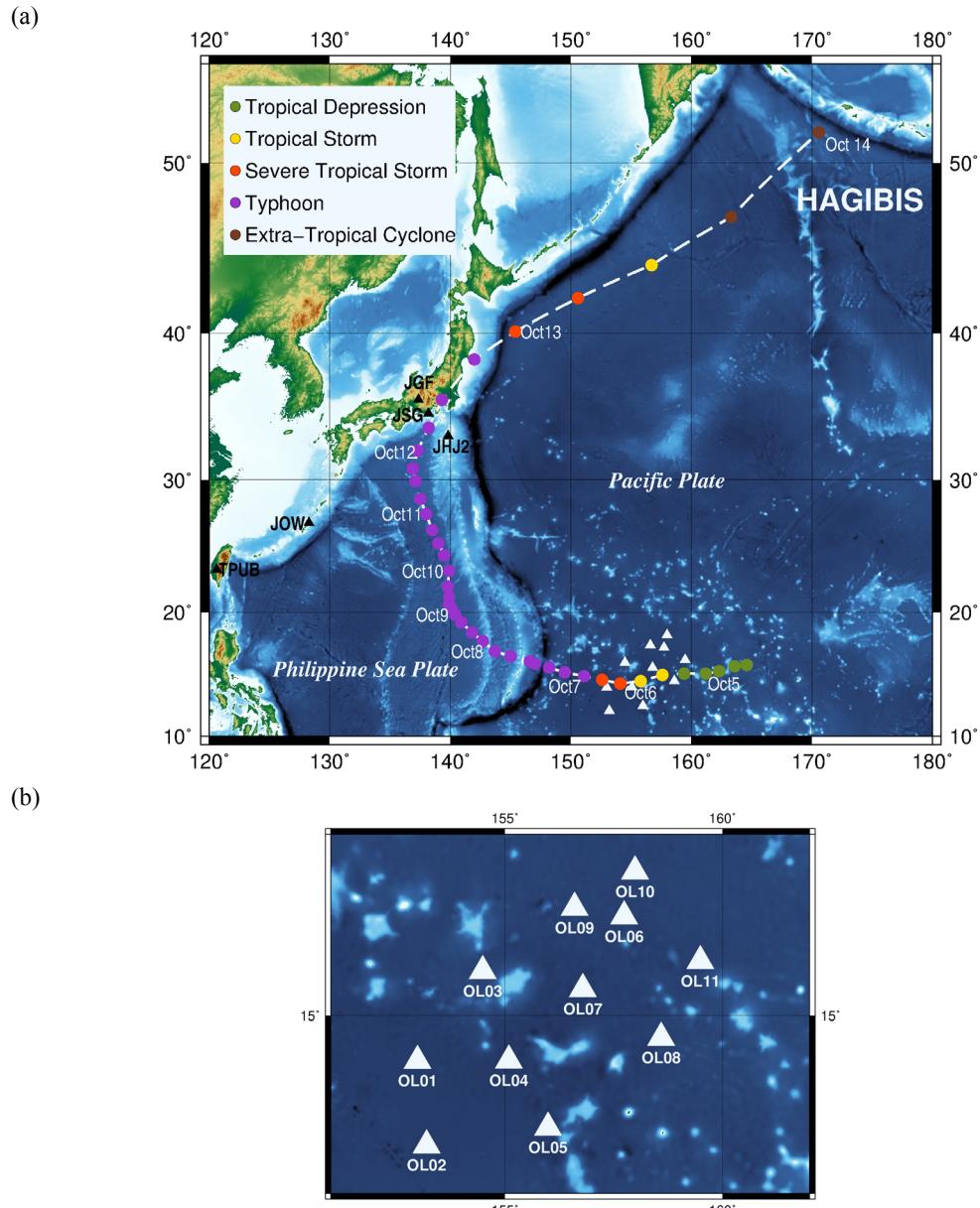


Fig. 1. (a) Locations of seismic stations used in this study and the track of the typhoon HAGIBIS. The black and white triangles indicate land and ocean-bottom seismometers (OBSs), respectively. (b) Locations of OBSs of OLDEST-1 Pacific Array.

Table 1. Locations of OLDEST-1 OBS stations in the Western Pacific.

Station name	Location		
	Lat. (°N)	Lon. (°E)	Depth (m)
OL01	152.99	13.99	5960
OL02	153.20	12.09	5934
OL03	154.49	15.9	5687
OL04	155.09	14.00	6033
OL05	155.99	12.49	5942
OL06	157.74	17.2	5790
OL07	156.79	15.59	5974
OL08	158.59	14.51	5765
OL09	156.6	17.39	5755
OL10	157.99	18.19	5684
OL11	159.49	16.21	5766

Table 2. Locations of land broadband stations.

Nation	Station Name	Location		
		Lat. (°N)	Lon. (°E)	Site
Japan	JGF	35.604	137.354	inland
	JSG	34.677	138.183	coastline
	JHJ2	33.115	139.814	island
	JOW	26.836	128.272	island
Taiwan	TPUB	23.3005	120.6296	island

성 저기압으로 발달하기 시작한 하기비스는 10월 13일부터 온대성 저기압으로 세력이 점차 감쇠하였으며, 22일에 완전히 소멸하였다. 해저지진계와의 비교를 위해 일본 육상에 설치된 지진계 자료를 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)로부터 획득하였다(표 2). 2019년에 서태평양 지역에서 발생한 태풍의 자료는 미국 합동태풍경보센터 (Joint Typhoon Warning Center)로부터 획득하였으며, 태풍의 강도는 세계기상기구(World Meteorological Organization)의 최대 풍속을 따라 분류했다(표 3). 유의파고(significant wave height)는 미국 환경예측 센터(National Centers for Environmental Prediction)의 WAVEWATCH III 모델(Bromirski *et al.*, 2005)의 데이터를 사용했으며, 유의파고와 2차맥동의 상관관계를 분석하기 위해 암스테르담 대학교에서 개발한 통계분석 프로그램인 JASP (<https://jasp-stats.org>)를 사용하였다.

2.1 파워스펙트럼밀도(Power Spectral Density)

파워스펙트럼밀도는 시간 영역의 지진자료를 주파수 대역에서 진폭 스펙트럼값으로 표현한 것으로 이를 통해 배경잡음을 정량화시켜 표현할 수 있다. 전처리 과정에 사용되는 자료는 1시간(3,600초)가 기준이 되며 분석 단위는 1일(24시간)이다. 연속적인 24시간의 자료를 1시간 단위로 나누어 50%씩 중첩되게 한다. 본 연구에서 사용된 자료는 초당 100개의 샘플을 획득하므로, 시간당 360,000개의 디지털 값을 갖는다. 자료 분석을 위해 고속푸리에변환을 해야하는데 이때 360,000에 가장 가까운 2의 자승값은 262,144이므로 총 262,144개의 자료(총 2621.44초)가 사용된다. 또 파워스펙트럼밀도를 평탄화시키기 위해 1시간 단위의 연속 자료를 13개 부분으로 나눈 뒤 75%씩 중첩시켜 고속푸리에변환을 사용하여 지진파 자료로부터 파워스펙트럼밀도를 계산한다 (McNamara and Buland, 2004).

Table 3. Classification of typhoon intensity from the World Meteorological Organization.

Wind Speed		Classification
Knots	m/s	
≥ 34	≥ 17	Tropical Depression
34 - 47	17 - 24	Tropical Storm
48 - 63	25 - 32	Severe Tropical Storm
64 ≤	33 ≤	Typhoon

$$Y(f, T_r) = \int_0^{T_r} y(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$\rho_{X,Y} = \frac{E[(X-u_X)(Y-u_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (5)$$

연속적인 시계열 자료 $y(t)$ 의 고속푸리에변환은 식 (1)이며 T_r 은 연속적인 시간의 길이이다. 이산주파수 f_k 의 푸리에 성분은

$$Y_k = \frac{Y(f_k, T_r)}{\Delta t} \quad (2)$$

로 정의되며, Y_k 는 스펙트럼의 진폭, $f_k = k/N\Delta t$, Δt 는 샘플의 간격(0.01초) 그리고 N 은 시계열 샘플의 수이다. 푸리에 성분을 사용해서 최종적으로 파워스펙트럼밀도를 정의하면 다음과 같다.

$$P_k = \frac{2\Delta t}{N} |Y_k|^2 \quad (3)$$

최종적으로 평탄화된 파워스펙트럼밀도 값은

$$P_k = 10 \log_{10}(P_k) \quad (4)$$

식 (4)를 통해 데시벨(dB, $(meters/second^2)^2/Hertz$) 단위로 변환하여 나타낼 수 있다. 또 시간 순서에 따라 얻어진 스펙트럼들을 배열하여 지진 기록에 대한 시간 주파수 스펙트로그램을 얻을 수 있으며, 특정 주기의 파워스펙트럼밀도 값을 사용하여 맥동의 잡음 수준 차이를 관찰할 수 있다.

2.2 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)

서로 다른 변수인 X, Y 의 선형 관계성을 나타내는 수치를 피어슨 상관계수 혹은 상관계수라고 한다. 피어슨 상관계수의 식은

로 나타낼 수 있다. u_X 는 변수 X 의 평균값, u_Y 는 Y 의 평균값을 나타내며, σ_X 와 σ_Y 는 각각 두 변수의 표준편차이다. 두 변수의 연관성을 측정하는 통계적인 방법으로, 계산된 상관계수는 -1부터 1 사이의 값을 갖게 된다. -1 또는 1과 가까울수록 두 변수 사이의 연관성이 크다는 것을 의미하고, 0에 가까울수록 두 변수의 유의미한 상관관계가 작다는 것을 의미한다.

3. 자료처리 및 해석

하기비스 태풍이 지진계에 미치는 영향을 보기 위해 태풍의 경로에 위치한 지진계의 파형을 관찰하였다(그림 2). 하기비스 태풍은 해저지진계에서 OL07, OL04 그리고 OL02와 OL01을 순서대로 지나며, 태풍이 지진계로부터 멀어질수록 지진계의 신호도 작아졌다. 태풍의 눈으로부터 약 1800 km 떨어진 TPUB 관측소에서는 비교적 낮은 수준의 잡음이 기록되었지만 태풍의 영향이 기록되었다. JHJ2, JSG 그리고 JGF 관측소에서는 태풍의 직접적인 영향을 받는 10월 10일과 12일 사이에 잡음 수준이 크게 나타났다.

3.1 스펙트로그램 분석(Spectrogram Analysis)

내륙, 해안가, 섬 그리고 해저에 설치된 지진계에서 맥동 영역에 나타나는 태풍의 영향을 관찰하기 위해 파워스펙트럼밀도로 계산된 스펙트로그램을 사용하였다(그림 3). 그림 3a는 태풍이 발생하지 않은 날 동안의 스펙트로그램이고 그림 3b은 하기비스 태풍이 발생한 날 동안의 스펙트로그램이다. JGF 관측소의 경우 일본 열도에 위치했지만, 해안과의 거

리가 100 km 이상이므로 내륙으로 분류하였다. 육상지진계는 모든 주기 대역에서 태풍이 지진계와 가까워짐에 따라 잡음의 수준이 증가하였으며 섬, 해안가, 내륙에 위치한 지진계 순서대로 잡음 수준이 높게 나타났다.

또 태풍의 영향을 직접적으로 받는 날 동안에 해저지진계에서는 0.02~0.1초 주기에서 강한 잡음 수준이 나타났다(그림 4). 반면 1차맥동 영역(11~20초)에서는 육상지진계와 달리 태풍에 의한 잡음 변화가 나타나지 않았다(그림 3). 1차맥동은 해안가에 부딪힌 파도에 의해 발생하기 때문에(e.g., Bromirski *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2018) 해양분지에 위치한 OLDEST-1 Pacific Array 해저지진계에서는 1차맥동의 잡음 변화를 관찰하기 어려운 것으로 판단된다. 또 20초 이상의 주기 대역에서도 태풍의 영향이 관찰되지 않았다. 20초 이상의 주기 대역은 장주기 중력외파의 영향을 받는다. 수심이 깊을수록 장주기 중력외파에 의한 영향이 작아 잡음 수준도 감소하며 변화의 정도도 작다(Yang *et al.*, 2012). 장주기 중력외파에 의한 압력신호가 나타나는 최대 주파수를 f_{\max} 라고 했을 때, 중력가속도(g)와 수심(d)과의 관계를 통해 다음과 같이 쓸 수 있다(Bell *et al.*, 2014).

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{g}{2\pi d}} \quad (6)$$

위 식 (6)을 통해 해저지진계가 설치된 수심이 깊어 질수록 최대 주파수는 작아지게 되므로 장주기에 나타나게 되는 것을 알 수 있다. 또 해수면에서 압력신호의 진폭(P_0)과 해저면에서 압력신호의 진폭(P_b)의 관계는

$$P_b = \rho g \xi / \cosh(kh) \approx P_0 e^{(-kh)} \quad (7)$$

이며 h 는 수심, ρ 는 물의 밀도, 해수면의 파도 높이 ξ 를 의미한다. 태풍이 발생하면 파도 높이 ξ 가 증가하게 되지만 하기비스 태풍이 해저지진계와 근접한 10월 5일과 6일에 발생한 태풍의 강도는 세계기상기구의 분류에 따르면 열대 폭풍 정도의 약한 태풍 강도를 보인다. 또 파랑예측모델인 WAVEWATCH III의 데이터를 통해 최대 유의파고를 분석한 결과, 하기비스 태풍이 발생한 날의 OLDEST-1 Pacific Array 가 위치한 지역의 최대 유의파고는 약 3.8 m로, 평균 수심 5,800 m에 설치된 해저지진계에 비해 파고가

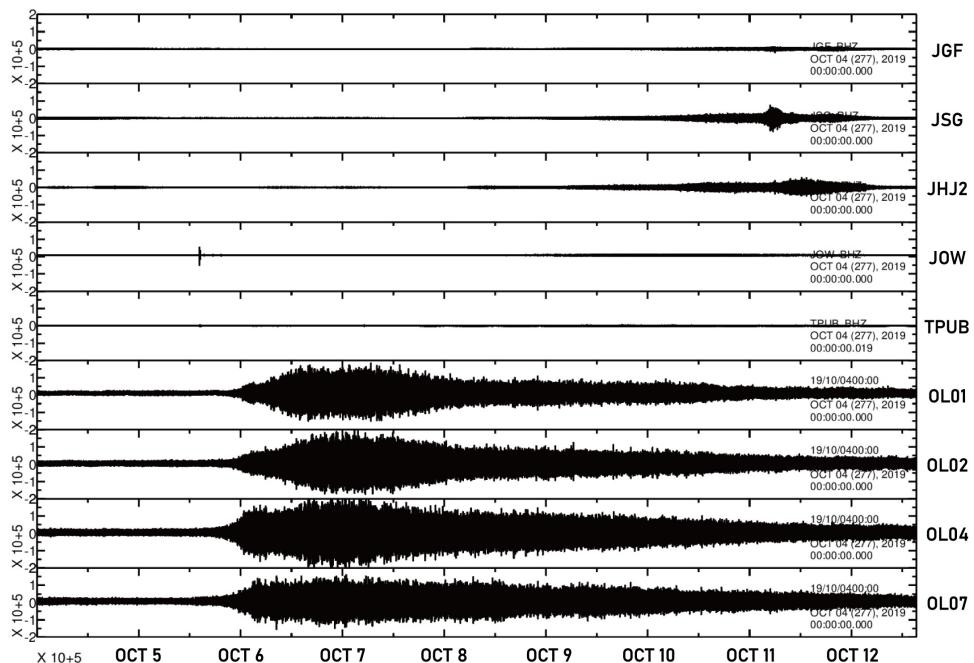


Fig. 2. Waveforms by the typhoon HAGIBIS at each station.

크게 증가하지 않았다. 따라서 식(7)에서 해저지진계가 설치된 수심이 깊을수록 압력신호의 세기가 약해지기 때문에(Webb *et al.*, 1991) 20초 이상 장주기 대역에서 태풍이 발생하는 관계없이 잡음 수준이 크게 변화하지 않는 것으로 생각된다.

3.2 육상지진계와 해저지진계에서의 SFM, SPDFM, LPDFM 비교

그림 3에서 보면 해저지진계에서는 단주기 2차맥동과 장주기 2차맥동의 구분이 육상에 설치된 지진계에 비해 제대로 되지 않은 것처럼 보인다. 그러나 1년동안의 배경잡음을 사용하여 확률밀도함수를 계

산하여 모드값을 그려보면 대체적으로 단주기 2차맥동과 장주기 2차맥동이 거의 모든 해저지진계에서 구별되어 기록이 되는 것을 볼 수 있다(그림 5). 따라서 해저지진계와 육상지진계에서의 1차맥동, 단주기 2차맥동, 장주기 2차맥동의 변화를 주기별로 나누어 비교하고자 한다.

1차맥동과 단주기 2차맥동 그리고 장주기 2차맥동이 나타나는 지역을 관찰하기 위해 파워스펙트럼 밀도로 계산된 주기별 자료의 값을 하기비스 태풍이 발생한 시간에 따라 나타냈다(그림 6). 태풍과의 거리가 가까워질수록 모든 육상지진계에서 1차맥동과 2차맥동의 잡음 수준이 증가하였으며 태풍에 의한

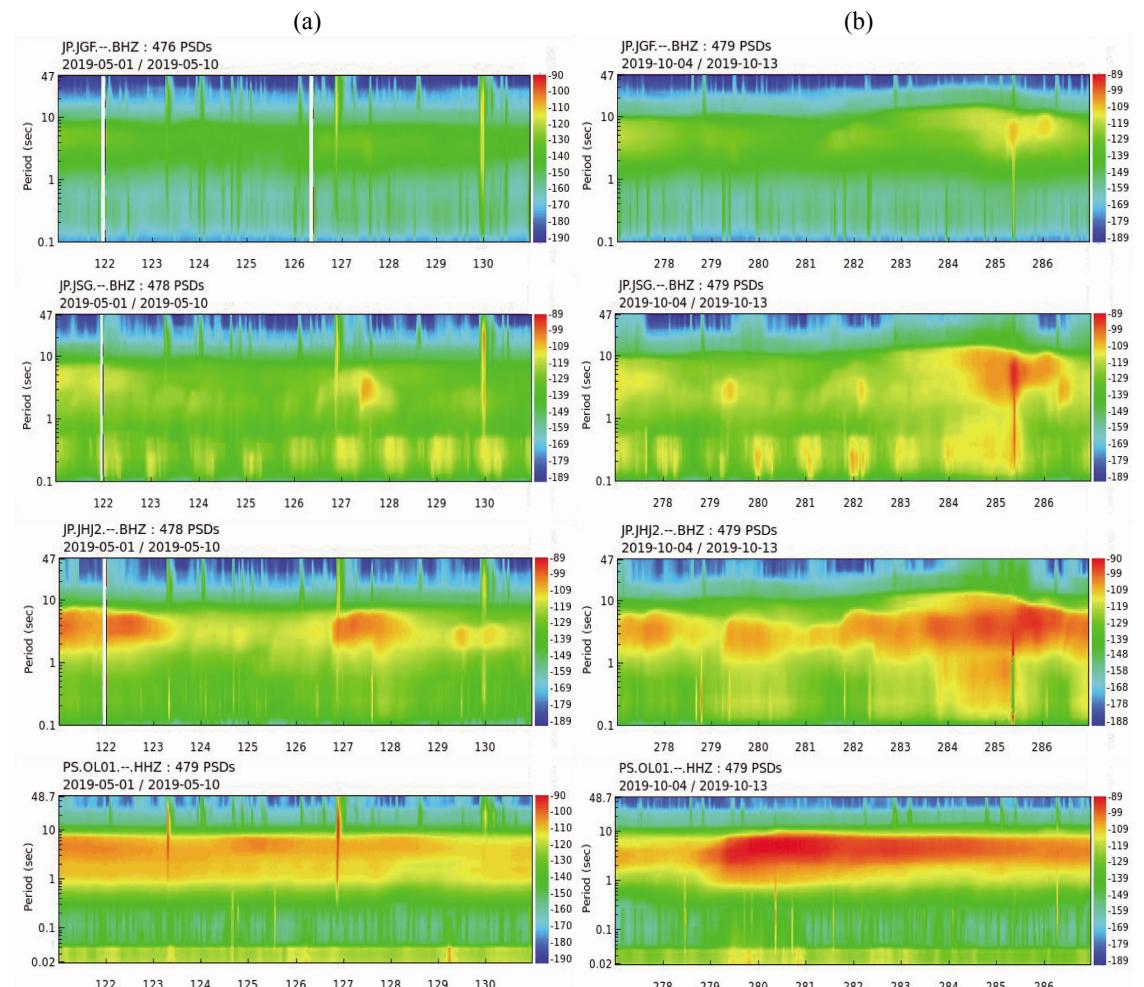


Fig. 3. Spectrograms of vertical components from stations JGF, JSG, JHJ2, and OL01 (a) during non-typhoon period (from 1 May to 10 May 2019) and (b) during the period when the typhoon HAGIBIS was active (from 4 Oct to 13 Oct 2019).

장주기 2차맥동의 변화가 단주기 2차맥동의 변화보다 크게 나타났다. 파도의 활동에 의해 생성된 단주기 2차맥동은 레일리파 형태로 발생된 지점으로부터 멀리 전파되면서 감쇠가 발생하여 해양분지에 설치된 OL01, OL04, OL07 그리고 OL10 지진계보다 더 낮은 수준의 잡음 수준을 보인다(e.g., Bromirski *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2017).

해저지진계는 1차맥동에서 태풍이 통과한 뒤 잡음의 수준이 약하게 증가하였지만, 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다(그림 6). 해저지진계에서도 태풍에 의해 단주기 2차맥동이 증가하였지만, 육상지진계

와 달리 장주기 2차맥동이 단주기 2차맥동에 비해 낮은 잡음 변화를 보였다. 이는 태풍이 해저지진계를 통과할 시기에 아직 열대 폭풍 정도로 성장이 덜 되었기 때문인 것으로 생각된다. 또 태풍과 가까운 OL01과 OL04 지진계보다 태풍과 지진계 거리가 먼 곳에 위치한 OL07과 OL10의 장주기 2차맥동의 잡음 수준의 변화가 작았다. 따라서 장주기 2차맥동은 태풍의 강도와 지진계와의 거리에 영향을 받는 것으로 생각된다(e.g., Lin *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2018). 또한 해저지진계의 장주기 2차맥동이 태풍이 지나간 후에도 다시 상승하는 양상을 볼 수 있는데(그림

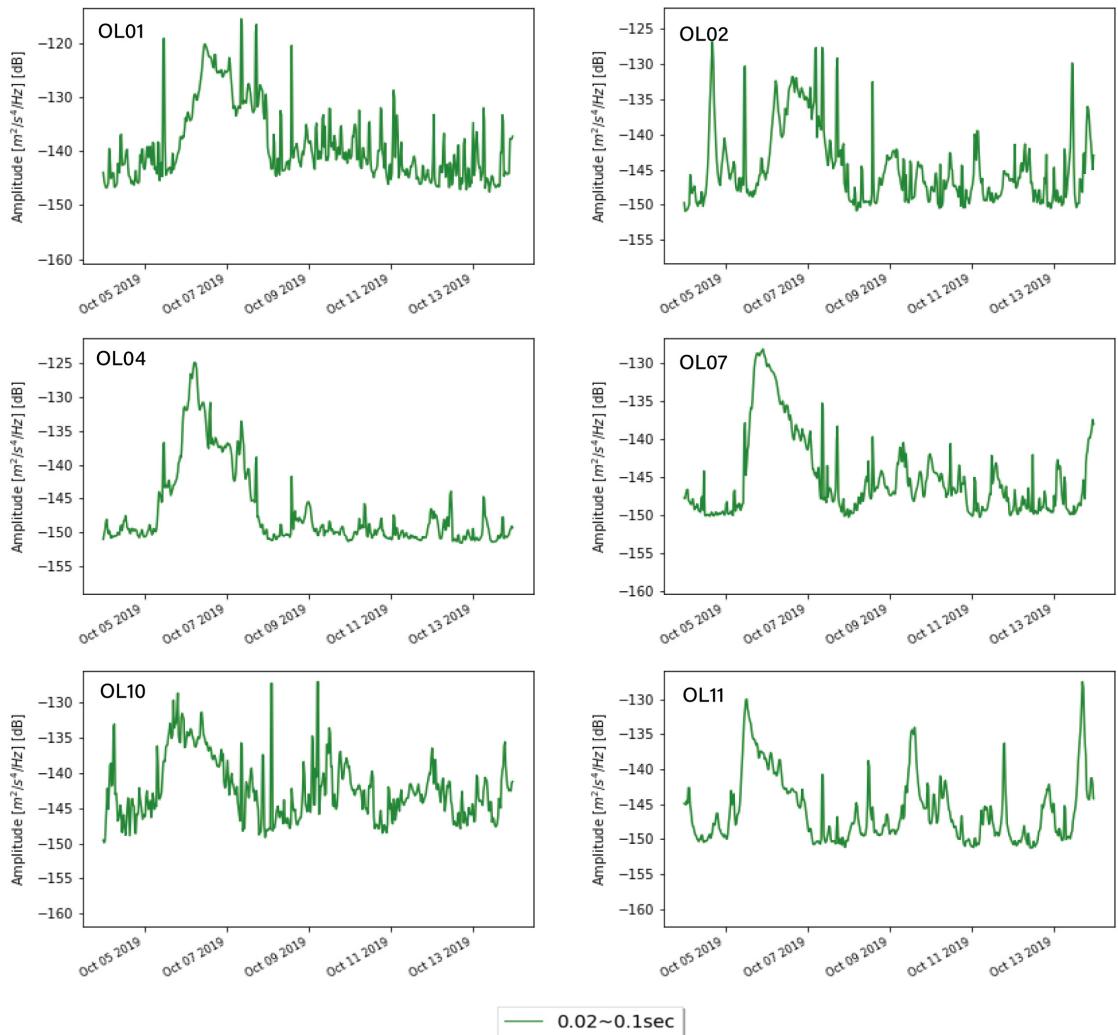


Fig. 4. Sequential evolutions of a short-period range in the period band of 0.02-0.1 sec in the ocean (OL01, OL02, OL04, OL07, OL10, OL11) when the typhoon HAGIBIS was active (from 4 Oct to 13 Oct 2019).

6), 이는 태풍이 성장하면서 태풍과의 거리가 멀어지더라도 해저지진계의 장주기 2차맥동에 영향을 끼치는 것으로 생각된다.

반면 육상지진계에서는 단주기 2차맥동과 장주기 2차맥동의 최대 점이 구분되어 나타난다(그림 6). 해안가에 위치한 JSG 관측소와 섬에 위치한 JHJ2 관측소의 단주기 2차맥동(2~5초)이 내륙에 위치한 JGF 관측소보다 비교적 높은 잡음 수준을 보이며 태풍과 지진계의 거리가 가까워질수록 장주기 2차맥동(5~11초)에도 잡음이 강하게 나타났다(그림 3과 6). 특히 해저지진계인 OL01에서는 1차맥동의 변화 없이 2차맥동에만 변화가 나타났으며, 태풍이 발생하지 않은 날 섬에 위치한 JHJ2 지진계에서도 1차맥동의 변화 없이 2차 맥동에만 변화가 있었다(그림 3). Sheen (2014)은 1차맥동이 수반되지 않은 2차맥동은 심해파 상호작용에 의해 생성되었을 것으로 보고했다.

육상지진계와 해저지진계에서 단주기 2차맥동과 장주기 2차맥동의 잡음수준의 관측시간에도 차이가 나타났다. 그림 6의 각 관측소에서 관찰되는 맥동의 최대 진폭은 태풍의 눈이 통과한 뒤 바람이 가장 강할 때 나타났으며, 육상지진계의 경우 장주기 2차맥동이 단주기 2차맥동보다 잡음이 먼저 증가하기 시작했다. 반면 해저지진계는 단주기 2차맥동이 장주기 2차맥동보다 잡음이 먼저 증가하였으며, 최대 강도도 장주기 2차맥동이 더 늦게 나타났다. 해양파가 분산될 때 저주파수를 갖는 해양파가 고주파수의 해양파보다 더 빠르기 때문에 저주파수 해양파가 해안가에 먼저 도달한다(Lin *et al.*, 2017). 이는 다음의 해양파 분산 현상과 관련이 있다.

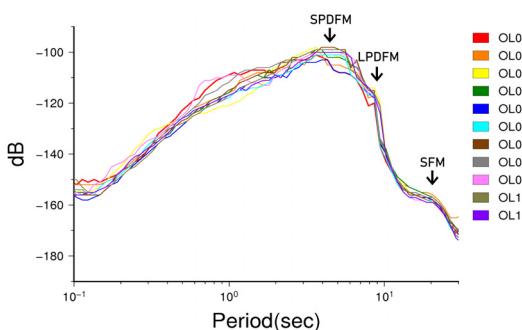


Fig. 5. Mode values of probability density functions of background noises recorded at the Pacific Array for the period of one year. Peaks for SPDFM, LPDFM, and SFM are well observed.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (8)$$

식 (8)은 파동 분산방정식으로 ω 는 각주파수, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 는 파수, g 는 중력가속도, h 는 수심이다.

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (9)$$

파속은 식 (9)와 같다. 따라서 파속에 대해 정리하면

$$\frac{\lambda^2}{T^2} = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) = C^2 \quad (10)$$

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 쓸 수 있다. 만약 심해파($\frac{h}{\lambda} > 0.5$)라면 파속은 다음과 같으며

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{gT}{2\pi} = \frac{g}{2\pi f} \quad (12)$$

천해파($\frac{h}{\lambda} < 0.05$)라면 파속은 식 (13)과 같이 정의 된다(Dean and Dalrymple, 1991).

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\frac{2\pi h}{\lambda}} = \sqrt{gh} \quad (13)$$

따라서 육상지진계에서는 장주기 2차맥동과 1차맥동이 단주기 2차맥동보다 더 빨리 전파되어 기록되는 것으로 해석된다. 반면 해양분지에 위치한 해저지진계의 경우 태풍에 의해 발생한 파도가 무역풍에 의해 형성된 파도나 서쪽에 위치한 북마리아나제도로부터 형성된 장주기 2차맥동이 해저지진계에 기록되면서 장주기와 단주기 2차맥동에 시간의 차이가 나타나는 것으로 생각된다.

3.3 유의파고와 2차맥동 간의 피어슨 상관계수 계산

육상지진계와 해저지진계에서 나타나는 2차맥동과 파도의 높이의 연관성을 알고자 피어슨 상관

계수를 계산했다. 파고의 높이는 파랑예측시스템인 WAVEWATCH III의 데이터로부터 얻은 유의파고 (Significant wave height)의 자료를 사용하였다. 유

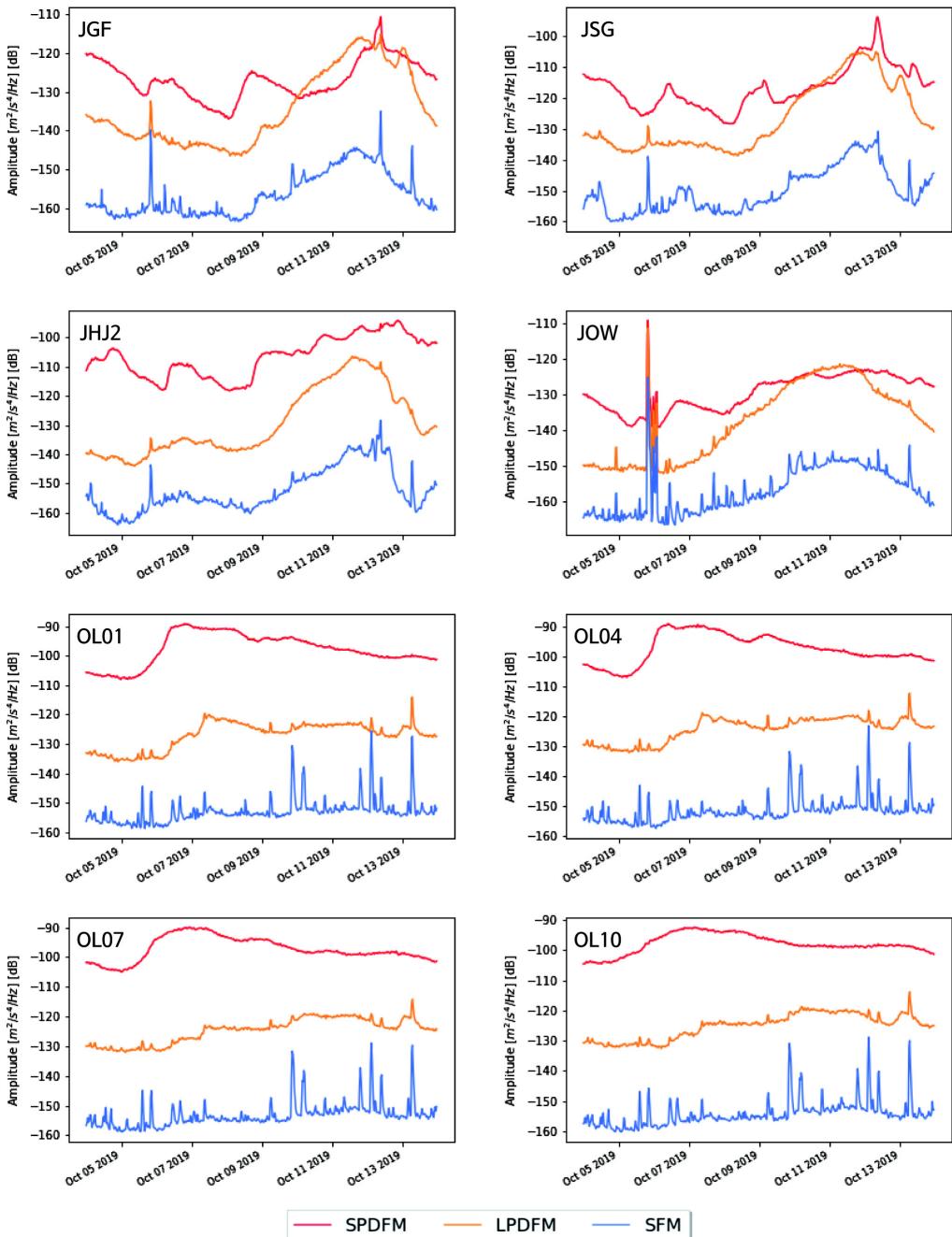


Fig. 6. Sequential evolutions of the SFMs (blue lines), LPDFMs (orange lines), and SPDFMs (red lines) in the period band of 11-20 sec, 5-11 sec, and 2-5 sec, respectively, in the land (JGF, JSG, JHG2, JOW) and the ocean (OL01, OL04, OL07, OL10) when the typhoon HAGIBIS was active (from 4 Oct to 13 Oct 2019).

의파고는 특정 주기 내에서 형성되는 전체 파고 관측치 중 가장 높은 3분의 1에 해당하는 파고의 평균 높이로, 높은 파고가 보이는 평균적인 경향을 의미 한다.

그림 7은 유의파고와 2차맥동을 비교한 그래프이며, 대체적으로 육상지진계에서는 장주기 2차맥동과의 상관관계가 높아보이고, 해저지진계에서는 단주기 2차맥동과의 상관관계가 높아보인다. 정량적으로 2차맥동과 유의파고의 상관관계를 구하기 위해 피어슨 상관계수를 계산한 결과 섬(JHJ2)과 해안가(JSG)에 위치한 육상지진계에서는 파고와의 상호 상관값이 장주기 2차맥동과 단주기 2차맥동에서 비슷한 값을 보였다(그림 8). 그러나 내륙(JGF)에 위치

한 경우 단주기 2차맥동과의 상관계수가 훨씬 더 낮았다. 단주기 2차맥동은 파장이 상대적으로 짧기 때문에 감쇠가 잘 되는 얕이의 지각으로부터 영향을 많이 받게 되므로 감쇠가 많이 일어나게 된다. 따라서 해안과의 거리가 멀수록(맥동이 발생한 지역과 멀수록) 단주기 2차맥동이 장주기 2차맥동보다 감쇠가 많이 일어나기 때문에 상관계수가 낮게 나온 것으로 생각된다. 해저지진계에서는 단주기 2차맥동이 파고와 더 높은 연관성을 보였다. 이는 장주기 2차맥동은 멀리 떨어진 해안선에 부딪힌 파도에 의해 형성되고 단주기 2차맥동은 국지적인 바람에 의한 해양의 변화로 인해 형성된다는 Bromirska *et al.* (2005)의 결과와 같다.

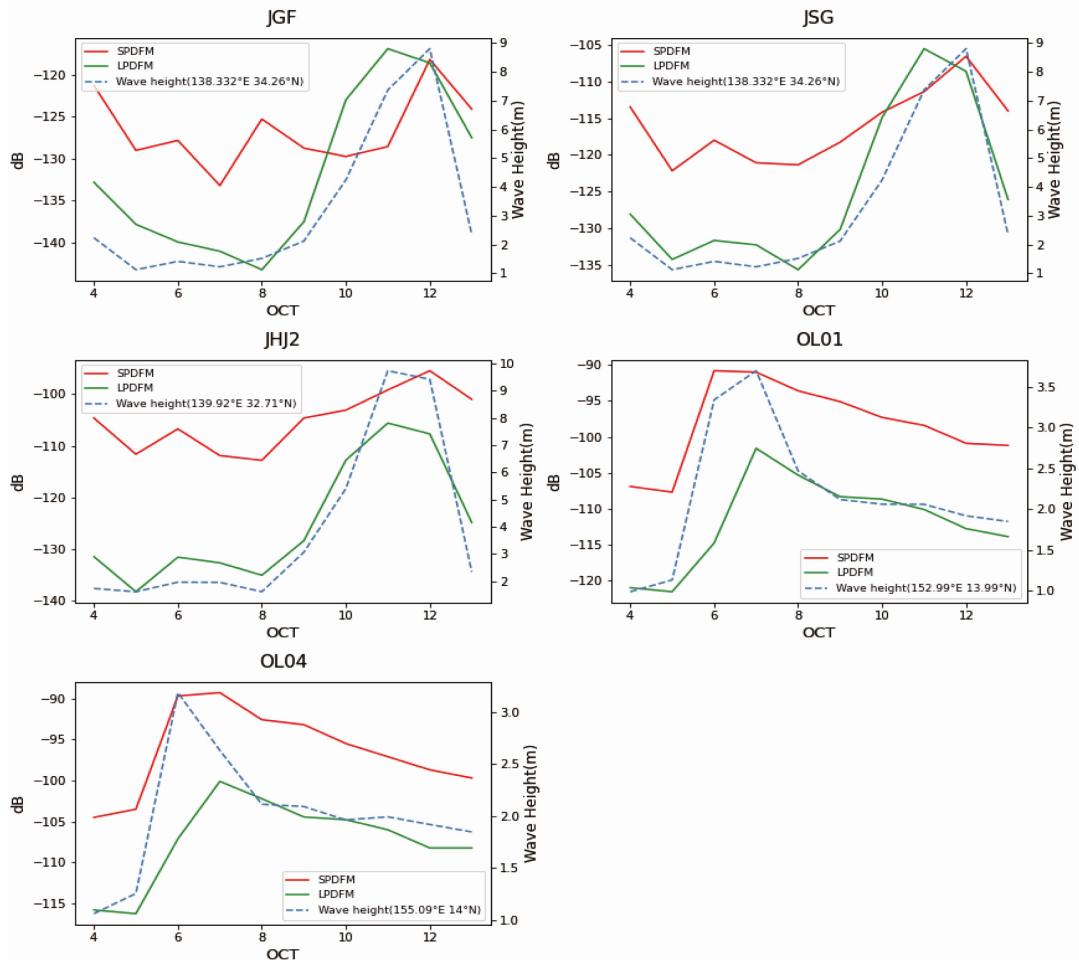


Fig. 7. Sequential evolutions of the LPDFMs (green lines) and SPDFMs (red lines) in the period band of 5-11 sec and 2-5 sec, respectively, in the land (JGF, JSG, JHJ2) and the ocean (OL01, OL04) and the significant ocean wave height (blue dashed lines) when the typhoon HAGIBIS was active (from 4 Oct to 13 Oct 2019).

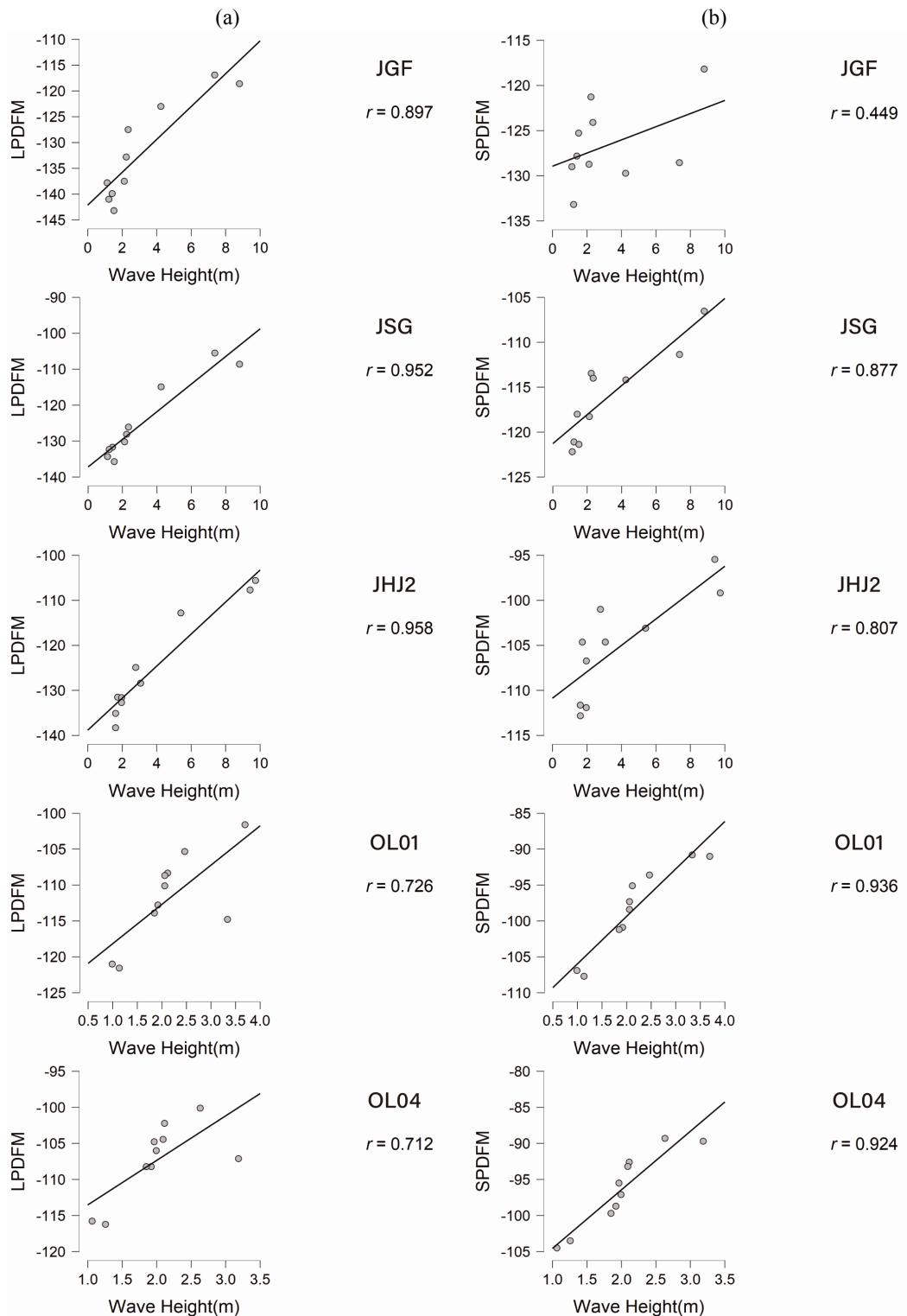


Fig. 8. Correlation of significant wave heights with (a) LPDFMs and (b) SPDFMs at stations JGF, JSG, JHJ2, OL01 and OL04.

4. 결 론

본 연구는 서태평양 지역에 설치된 OLDEST-1 해저지진계와 일본에 설치된 육상지진계에서 태풍에 의해 나타나는 맥동의 변화에 대해 연구하였다. 육상지진계와 해저지진계에 나타나는 태풍의 영향을 관찰하기 위해, 그리고 또한 1차맥동과 2차맥동의 변화를 관찰하기 위해 파워스펙트럼밀도로 계산된 주기에 따른 dB 자료의 분석을 수행하였다. 또 파고 높이와 2차맥동의 상관관계를 분석하고자 피어슨 상관계수 방법을 사용했다.

해저지진계가 육상지진계보다 맥동의 잡음이 더 컸으며 육상지진계에서는 섬, 해안가, 내륙 순서로 맥동의 잡음 강도가 커졌다. 육상지진계에서 1차맥동과 2차맥동 모두 태풍에 의해 맥동의 크기가 증가했다. 하지만 변화 정도에는 차이가 있었는데, 단주기 2차맥동이 장주기 2차맥동과 1차맥동보다 변화 수준이 작았다. 또 장주기 2차맥동이 단주기 2차맥동 보다 태풍에 의한 영향이 일찍 나타났는데 태풍에 의해 발생한 저주파수의 장주기 2차맥동이 고주파수의 단주기 2차맥동보다 더 빠르게 전달되기 때문에 판단된다. 반면 해저지진계에서는 1차맥동의 변화는 관찰되지 않았고, 태풍과의 거리나 강도에 따라 2차맥동의 수준 변화가 관찰되었다. 특히 장주기 2차맥동이 단주기 2차맥동보다 태풍과의 거리와 강도에 영향을 많이 받았다. 해저지진계에서 단주기 2차맥동과 유의파고의 상관계수가 장주기 2차맥동 보다 더 높았으며, 태풍에 의한 영향이 장주기 2차맥동에서 더 늦게 나타나는 것은 멀리 떨어진 해안가나 무역풍에 의한 파도의 영향으로 생각된다. 육상지진계에서는 해안가로부터 멀수록 단주기 2차맥동과 파고의 연관성이 낮았는데 이는 레일리파 형태로 전달되는 2차맥동이 내륙으로 전파되면서 고주파수 일수록 감쇠가 커지는 특성에 의한 것으로 해석되며 해안가나 섬에 위치한 지진계는 장주기 2차맥동과 단주기 2차맥동의 상관계수가 비슷했다.

감사의 글

이 연구는 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었으며 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행

된 기초연구사업임(No. 2019R1A6A1A03033167). 한국해양과학기술원의 지원을 받아 이 연구에 사용된 해저지진계를 설치하고 회수함(PE99656, PE99796). 또한 해저지진계 제공에 일본과학진흥협회의 지원을 받음(JSPS KAKENHI Grant Number 18H03735).

REFERENCES

- Ardhuin, F., Stutzmann, E., Schimmel, M. and Mangeney, A., 2011, Ocean wave sources of seismic noise. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, 1-21.
- Bell, S.W., Forsyth, D.W. and Ruan, Y., 2014, Removing noise from the vertical component records of ocean-bottom seismometers: Results from year one of the Cascadia Initiative. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 300-313.
- Bromirski, P.D., 2009, Earth vibrations. *Science*, 324, 1026-1027.
- Bromirski, P.D., Duennebier, F.K. and Stephen, R.A., 2005, Mid-ocean microseisms. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6, 1-19.
- Chen, X., Tian, D. and Wen, L., 2015, Microseismic sources during Hurricane Sandy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 6386-6403.
- Chi, W., Chen, W., Kuo, B. and Dolenc, D., 2010, Seismic monitoring of Western Pacific typhoons. *Marine Geophysical Researches*, 31, 239-251.
- 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 (in Korean with English abstract).
- Davy, C., Barruol, G., Fontaine, F.R., Sigloch, K. and Stutzmann, E., 2014, Tracking major storms from microseismic and hydroacoustic observations on the seafloor. *Geophysical Research Letters*, 41, 8825-8831.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1991, Water wave mechanics for engineers and scientists (vol.2). World Scientific, Singapore, 353 p
- Dorman, L.M., Schreiner, A.E., Bibee, L.D. and Hildebrand, J.A., 1993, Deep-water sea-floor array observations of seismo-acoustic noise in the eastern Pacific and comparisons with wind and swell. In: Kerman, B.R. (eds.), *Natural Physical Sources of Underwater Sound*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 165-174.
- Kedar, S. and Webb, F.H., 2005, The ocean's seismic hum. *Science*, 307, 682-683.
- Lee, J.H., Lee, D.G., Jeon, Y.S., Park, S.C., Ham, I.G., Jo, E.Y., Lee, W.J., Yoon, W.J., Yang, H.J., Park, E.H., Kim,

- K.Y., Lee, J.H., Choi, Y.H., Han, S.M., Han, A.R., Lee, H.S., Hong, S.I., Lee, J.M., Jung, H.J. and Kang, H.J., 2015, Research for the Meteorological and Earthquake Observation Technology and Its Application (IV)- Study on Development and Application of Earthquake Monitoring Techniques. Korea Meteorological Administration, Seoul, 147 p (in Korean with English abstract).
- Lepore, S. and Grad, M., 2020, Relation between ocean wave activity and wavefield of the ambient noise recorded in northern Poland. *Journal of Seismology*, 24, 1075-1094.
- Lin, J., Lin, J. and Xu, M., 2017, Microseisms generated by super typhoon Megi in the Western Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 9518-9529.
- McNamara, D.E. and Buland, R.B., 2004, Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 1517-1527.
- Obrebski, M.J., Ardhuin, F., Stutzmann, E. and Schimmel, M., 2012, How moderate sea states can generate loud seismic noise in the deep ocean. *Geophysical Research Letters*, 39, 1-6.
- Sheen, D.H., 2014, Microseisms from huge Indian Ocean storms in May 2007. *Geosciences Journal*, 18, 347-354.
- Stephen, R.A., Spiess, F.N., Collins, J.A., Hildebrand, J.A., Orcutt, J.A., Peal, K.R., Vernon, F.L. and Wooding,
- F.B., 2003, Ocean seismic network Pilot Experiment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, 1-38.
- Stutzmann, E., Ardhuin, F., Schimmel, M., Mangeney, A. and Patau, G., 2012, Modelling long-term seismic noise in various environments. *Geophysical Journal International*, 191, 707-722.
- Webb, S.C., Zhang, X. and Crawford, W., 1991, Infragravity waves in the deep ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96, 2723-2736.
- Xiao, H., Xue, M., Yang, T., Liu, C., Hua, Q., Xia, S., Huang, H., Le, B.M., Yu, Y., Huo, D., Pan, M., Li, L. and Gao, J., 2018, The characteristics of microseisms in South China Sea: Results from a combined dataset of OBSs, broadband land seismic stations, and a global wave height model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 3923-3942.
- Yang, Z., Sheehan, A.F., Collins, J.A. and Laske, G., 2012, The character of seafloor ambient noise recorded offshore New Zealand: Results from the MOANA ocean bottom seismic experiment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13, 1-10.

Received : April 22, 2021
 Revised : June 4, 2021
 Accepted : June 7, 2021