

## 남극 장보고과학기지의 임시 지진관측소에 기록된 인위 신호 분석

강태섭<sup>1,\*</sup> · 공창환<sup>2</sup> · 유현재<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부  
<sup>2</sup>국방부  
<sup>3</sup>부경대학교 지질환경연구소

### Analysis of man-made signals recorded at a temporary seismograph station at the Jang Bogo Station, Terra Nova Bay, Antarctica

Tae-Seob Kang<sup>1,\*</sup> · ChangHwan Kong<sup>2</sup> · Hyun Jae Yoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Pusan 48513, Republic of Korea*

<sup>2</sup>*Ministry of National Defense, Anyang 14047, Republic of Korea*

<sup>3</sup>*Institute of Environmental GeoSciences, Pukyong National University, Pusan 48513, Republic of Korea*

#### 요 약

남극 장보고과학기지의 제2차 월동연구대 활동 기간 중 기지에 설치한 임시 지진관측소의 지진 기록을 분석하여 인위 신호의 특성을 파악하였다. 기지가 외부로부터 고립되는 월동 기간에 필요한 물자 보급과 인력 교대를 위하여 쇄빙연구선 아라온호가 기지 인근에 정박한 2015년 3월 8일 하루 동안의 지진 기록을 분석하였다. 아라온의 정박 동안, 기지에서 다양한 인위 신호가 발생하였다. 대표적인 신호 발생원으로 기지 운영과 아라온 작동에 필수적인 발전기 등의 기계장치와 인력과 물자 수송을 위한 헬리콥터와 운송 장비 등이 있다. 이들은 엔진이나 모터를 이용하므로 특정한 주파수 대역의 인위 신호를 발생시킨다. 지진 기록으로부터 인위 신호의 특징을 파악하고 알려진 기계장치의 제원을 이용하여 계산할 수 있는 신호의 주파수 대역을 비교하였다. 각 기계장치에 대한 계산 신호는 관측 신호와 정확하게 부합한다. 이로부터 기계장치의 작동 시간과 움직임 및 경로에 대한 정보를 파악할 수 있다. 이러한 결과는 지진 기록 분석을 인위 신호의 원인을 밝혀내기 위한 조사에 활용할 수 있음을 보여준다.

**주요어:** 남극 장보고과학기지, 쇄빙연구선 아라온호, 지진 기록, 스펙트럼 분석, 인위 신호

**ABSTRACT:** The characteristics of man-made signals were identified by analyzing the records of a temporary seismograph station installed at the Jang Bogo Station in Terra Nova Bay, Antarctica, during the activities of the second overwinter party. The records were from March 8, 2015, when the icebreaker Araon was anchored near the isolated station to provide necessary supplies and winter personnel change. While the Araon was in the anchorage, various man-made signals were generated at the station. Representative sources of such signals include machinery such as generators essential to operate the station and the Araon as well as helicopters and vehicles that transport personnel and materials. Since the machinery uses engine or motor, they generate signals at specific frequency bands. Characteristics of such man-made signals were identified from seismic records. They were then compared to the frequency bands of signals that could be calculated using the specifications of known mechanical devices. The signal computed for each device was an exact match for the signal observed, and could be used to obtain information about the operating times, movements, and paths of the sources. Thus, these results showed that seismic records can be used to investigate the causes of man-made signals.

**Key words:** Antarctic Jang Bogo Station, ice-breaking research vessel Araon, seismic records, spectral analysis, man-made signals

\* Corresponding author: +82-51-629-6632, E-mail: [tskang@pknu.ac.kr](mailto:tskang@pknu.ac.kr)

## 1. 서론

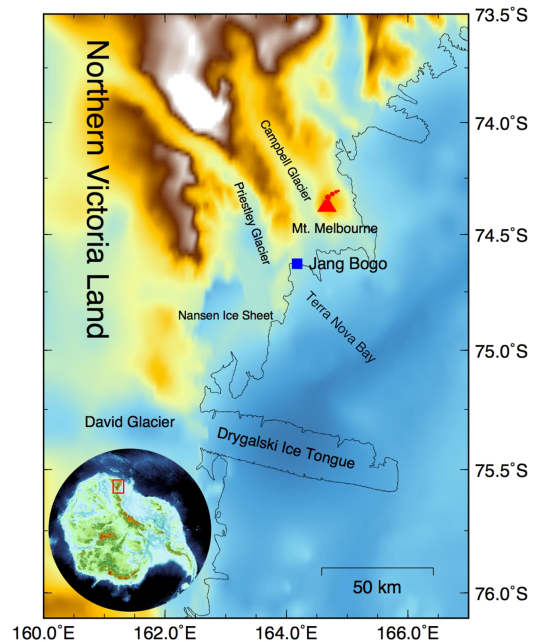
지진계는 다양한 원인으로 발생하는 지반운동을 기록하는 장치이다. 대부분의 경우, 지진계를 설치하는 가장 중요한 목적은 조구조 운동 또는 화산 활동 등과 같은 자연적인 원인의 지진을 관측하기 위한 것이다. 지진 기록은 모든 종류의 지반 진동을 기록하기 때문에, 본래 목적의 자연지진뿐만 아니라 잡음으로 분류되는 다양한 원인의 신호를 포함한다. 지진으로 인하여 발생한 지진파의 기록을 신호로 하고, 나머지를 모두 잡음으로 분류하고 제거하는 것은 일반적인 지진파 신호 처리의 목적이다. 잡음은 바람과 같은 자연적인 진동을 비롯하여 인간의 활동에서 비롯된 인위적인 진동을 포함한다. 다양한 원인의 진동을 분류하고 그 특성을 파악하여 신호 처리를 통한 지진 신호의 분해능을 향상할 수 있다 (Nakata *et al.*, 2019).

남극 대륙은 인간이 주로 거주하는 다른 대륙에 비하여 인위적인 진동이 매우 제한적이다. 현재 남극 대륙에는 여러 나라에서 운영하는 과학기지가 분포한다. 이곳에서 인간 활동의 대부분은 기지에서 이루어지며, 생활을 위하여 필수적인 전기와 물 생산, 그리고 다양한 공조 시설 등을 일상적으로 유지한다. 이들 생활 기반 시설은 엔진이나 모터를 구동하여 작동하는 것이 일반적이기 때문에, 이들이 상시 진동의 원인이다. 또한 조사를 위한 이동이나 물자와 인력 수송 등을 위한 선박의 접근 등의 활동으로 인하여 일시적으로 발생하는 인위적인 진동이 있다. 자연 원인의 진동이 대부분 임의적인데 비하여, 인위 진동은 일반적으로 규칙적인 특징이 있다. 대부분 특정한 주파수의 협대역(narrowband) 신호이며, 경우에 따라 기본주파수의 정수배인 배음(또는 고조파; harmonics) 또는 정수비인 하행배음(subharmonics) 신호가 발생한다(Bormann and Wielandt, 2012). 이와 같은 특징을 정확하게 파악할 수 있으면, 지진 기록에서 이들 신호의 주파수에 대하여 노치(notch) 필터를 적용하는 등의 제어가 가능하다(Gubbins, 2004).

우리나라는 2014년에 동남극 북빅토리아랜드의 테라노바만 연안에 장보고과학기지를 준공하여 상시 운영하고 있다(<https://www.kopri.re.kr/kopri/html/infra/03040101.html>; 그림 1). 부경대학교 연구진 가운데 한 명이 장보고과학기지의 제2차 월동연구

대(활동 기간: 2014년 12월 1일 ~ 2015년 12월 1일)에 참여하여 기지 주변의 다양한 지진 활동 감시를 위하여 이동식 광대역 지진계를 이용한 임시 지진관 측소를 약 9개월 동안 운영하였다(Kong, 2017). 지진계를 기지의 주요 구조물과 인접한 위치에 설치하였기 때문에, 기지 내부에서 발생하는 다양한 종류의 크고 작은 인위적인 신호의 영향을 피할 수 없다. 특히 장보고과학기지에는 다양한 운영설비, 운송장비 및 통신장비가 운용되고 있다. 이들 가운데 발전기, 담수화기, 공조기 등을 상시 또는 정기적으로 가동하여 기지가 원활하게 유지될 수 있도록 운영하고, 레이더와 대기관측 등을 위한 연구 장비를 거의 상시 가동하고 있다. 또한 기지에 인력 수송과 물자 보급을 위하여 쇄빙선 아라온호가 입남극하고, 헬리콥터와 차량을 이용한 인력 수송과 물자 하역 작업이 이루어진다. 이러한 인위적인 설비와 장비의 작동으로 인한 신호가 지반에 전달되어 자연적인 원인의 지반 진동과 함께 이동식 지진계에 기록된다.

이동식 지진계에서 획득한 지진 기록으로부터 인위적인 활동으로 인한 신호가 가장 다양하고 활발하



**Fig. 1.** Shaded relief topography of the northern Victoria Land overlain with main ice streams and Mt. Melbourne showing the location of Antarctic Jang Bogo Station. Inset of Antarctica with a box showing the location of the main figure.

계 발생한 시점인 아라온 입남극일의 연속 지진파형을 분석하였다. 먼저 시간 영역에서 연속 지진 파형의 특징을 살펴보고 주파수 영역에서 스펙트로그램으로부터 다양한 신호의 주파수 성분과 시간 지속성 등을 분석하여 인위 신호의 원인을 특정하였다. 인위 신호와 이미 알려져 있는 장보고과학기지의 설비, 아라온 및 제반 이동 장비의 특성들을 연관하여 해석하였다.

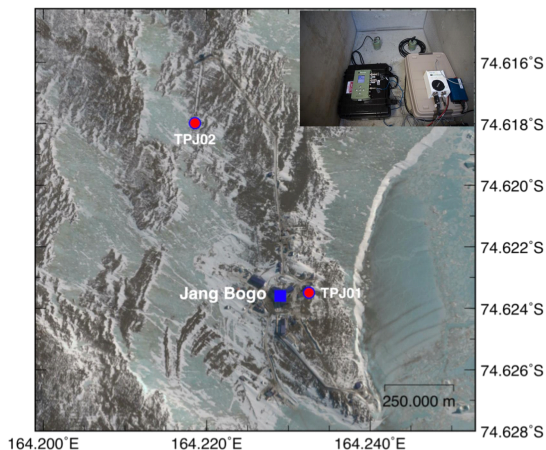
## 2. 지진관측 자료와 장보고과학기지의 인위 신호원

제2차 월동연구대 기간 동안 장보고과학기지에 이동식 지진계를 설치한 임시 관측소는 모두 2개소이다. 하나는 기지 주 건물인 본관동 인근의 지구물리장비시험동 옆에 설치되었고(TPJ01), 다른 하나는 본관동에서 보다 먼 대기구성물질관측동 인근에 설치하였다(TPJ02; Kong, 2017; 그림 2). 이동식 지진계는 Nanometrics사의 Trillium Compact 120s 센서와 Taurus 디지털타이저로 이루어져 있다. 두 지진계를 초당 200 샘플의 연속 기록 방식으로 설정하였으며, 전체 작동 기간은 2015년 1월부터 10월 사이의 약 9개월이다. 두 임시 관측소 사이의 거리는 약 700 m로 가까워서 거의 동일한 지진 기록 양상

을 보여준다. 이 연구에서는 주로 본관동 주위에서 발생하는 기계장치와 아라온 및 이동 장비 등에 의하여 발생하는 인위 신호 분석을 위하여, TPJ01의 기록을 분석에 사용하였다.

제2차 월동연구대 활동 기간 동안, 아라온이 장보고과학기지에 입남극한 횟수는 모두 3회이다. 이 가운데 임시 지진관측소를 설치한 이후에 해당하는 마지막 3항차 입남극이 2015년 3월 8일에 있었다(그림 3). 아라온의 3항차 입남극때 약 9시간 동안 장보고과학기지로의 마지막 물자 보급과 하계 연구 인력의 철수를 위한 수송이 이루어졌다. 이 시간 동안에는 기지 시설 운영에 필요한 상시 및 정기 설비의 작동과 더불어 선박의 정박과 물자 및 인력의 운반과 이동에 필요한 다양한 기계 장치가 가동되었다. 따라서 아라온의 입남극일은 임시 지진관측소의 지진계가 기록할 수 있는 인위적인 활동에 의한, 즉 일반적인 지진파형 분석에서 ‘잡음’으로 분류되는 ‘신호’가 가장 다양하고 풍부한 시점이라고 할 수 있다. 이 시기에 기지와 주변에서 기계적인 운동에 의하여 발생할 수 있는 주요 인위 신호원을 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 장보고과학기지는 10여 개의 크고 작은 독립 건물로 이루어져 있다. 이 가운데 발전동에는 상시 또는 정기적으로 가동되는 운영설비로 엔진 구동이 필요한 275 kW 열 병합 상용발전기 3대와 비상발전기 1대, 담수화기, 매연 저감장치, 배기가스 열



**Fig. 2.** Map showing the location of Jang Bogo Station and two temporary seismograph stations of TPJ01 and TPJ02 on an image captured from Google Earth. Inset of the station interior with two seismographs of TPJ01 (left) and the Korea Polar Research Institute (right; Park *et al.*, 2014).



**Fig. 3.** Image with boxes indicating the heliport at Jang Bogo Station, station TPJ01, and the ice-breaking research vessel Araon. A double-sided arrow shows the main path of the helicopter operations for transporting personnel and supplies between Jang Bogo Station and Araon.

교환기 등이 있다(<https://www.kopri.re.kr/kopri/html/infra/03040103.html>). 특히 Caterpillar 3406C 275 kW 상용발전기는 기지에 상시 전원을 공급하기 위하여 상시 엔진을 가동하는 가장 핵심적인 인위 신호원이라고 할 수 있다. 다른 장치는 정기적으로 혹은 필요에 따라 엔진을 구동하여 작동하는 설비이다.

쇄빙연구선 아라온은 엔진 구동 추진 방식의 일반 선박과 달리 과학 조사 연구에 적합하도록 저소음, 저진동, 부드러운 변속 능력을 확보하기 위하여 전기 추진 방식으로 운항을 한다. 이를 위하여 5,000 kW의 전방위추진장치(Azimuth Thruster) 2기와 1,200 kW의 선추진장치(Tunnel 또는 Bow Thruster) 2기 및 3,500 kW 주발전기 4대, 비상발전기 1대, 정박발전기 1대를 장착하였다(<https://www.kopri.re.kr/kopri/html/infra/03030102.html>). 기지 정박은 전방위추진장치와 선추진장치를 작동하지 않는 상태를 의미한다. 또한 3항차 장보고과학기지 입남극일에 약 9시간 정도의 짧은 시간 동안 정박하였기 때문에, 주요 선내 설비 운영을 위하여 주발전기를 계속 가동하고 비상발전기와 정박발전기는 가동하지 않았다(선박 관계자와의 개인 교신). 따라서 아라온의 정박 시간 동안에 가동되는 주요 엔진은 4대의 MAN B&W 7L32/40 3,400 kW 주발전기로 압축할 수 있다.

또 다른 인위 신호원은 운송 장비이다. 운송 장비 가운데 가장 큰 엔진 출력을 갖는 것은 아라온과 기지 사이의 물자와 인력의 수송을 위하여 아라온에 탑재한 AS350-B2 헬리콥터이다. 아라온 입남극일에 기지의 헬리포트와 아라온 사이의 거리는 약 1 km이며, 운송을 위하여 수십 차례 반복 비행을 하였다. 또한 헬리포트에 하역한 물자를 기지 내의 창고로 운반하기 위하여 지게차와 페이로더와 같은 중장비가 작동하였으며, 포터 화물차와 픽업트럭 등이 왕복 운행을 하였다. 이러한 운송 장비가 기지 주변에서 작동하면서 헬리콥터의 회전날개에서 발생하는 음파가 공기에서 지면에 전달되거나 운송 차량의 엔진음이 지면에 직접 전달되어 기지의 임시 지진관측소에 설치된 지진계에 기록된다.

이와 같이, 아라온의 입남극일에 남극 장보고과학기지에서 발생할 수 있는 기계적인 요인의 인위 신호는 크게 기지의 275 kW 상용발전기, 아라온의 3,400 kW 주발전기, 헬리콥터 및 차량으로 요약할

수 있다. 다음 절에서 임시 지진관측소 지진계의 지진 파형으로부터 이와 같은 인위 신호의 특성을 분석하고, 회전운동으로 작동하는 기계 장치의 진동 특성에 대하여 설명한다.

### 3. 인위 신호 모델링과 지진기록 분석

#### 3.1 회전운동 기계 장치의 진동

기계 장치의 엔진과 모터로 인하여 발생하는 일반적인 진동의 주파수 특성을 살펴보자. 회전체의 회전수( $n$ )를 나타내는 단위로 rpm(revolutions per minute)을 사용하므로, 이 값은 곧 회전체의 1초당 회전수인 기본주파수( $f_0$ )와 관계된다:

$$f_0 = \frac{n}{60} \quad (1)$$

동력을 얻기 위하여 일반적으로 사용하는 내연기관의 엔진을 나타내는 운동 요소는 엔진의 회전수와 실린더 갯수( $l$ ) 및 행정이다. 행정은 엔진의 연소 과정과 순서를 나타내며, 엔진에서 발생하는 가장 중요한 충격은 폭발 행정에서 일어난다. 소형 원동기 등에서 사용하는 2행정 기관과 그밖에 자동차와 발전기 등의 대부분의 내연기관에서는 4행정 기관이 사용된다. 2행정 기관은 실린더의 피스톤이 1번의 왕복 운동으로, 4행정 기관은 2번의 왕복 운동으로 폭발이 일어난다. 따라서 엔진의 폭발주파수( $f_p$ )는 운동 요소와 다음의 관계를 갖는다(Archer and McCarthy Jr., 2018):

$$f_p = \frac{l \times f_0}{m} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 폭발 행정에 필요한 피스톤의 왕복 운동 횟수이다.

식 (2)로부터, 4행정 기관을 구성하는 각 실린더의 폭발주파수는 기본주파수의 절반인  $f_0/2$ 가 됨을 알 수 있다. 따라서 4행정 엔진의 폭발 행정에 의하여 야기된 진동은 엔진 기본주파수의 절반으로부터 이 값에 대한 각 실린더 개수에 해당하는 정수배로 나타날 것임을 예상할 수 있다(Hassoun *et al.*, 2019). 한편 헬리콥터나 풍력발전기와 같이 회전날개가 일

으키는 충격파의 주파수를 구하기 위하여, 식 (2)에서  $l$ 이 회전날개의 개수에 해당하고, 각 회전날개가 한 번의 회전으로 발생하는 충격에 대하여  $m$ 이 1인 값을 사용할 수 있다.

파동은 기본주파수와 이것의 정수배로 발생하는 배음으로 이루어진다. 스펙트럼에서 연이은 배음의 극값 사이 간격을 구하면, 이 값이 곧 기본주파수가 된다. 스펙트로그램에서 엔진이나 모터와 같이 일정한 회전수를 갖는 기기로부터 발생한 신호는 특정한 주파수에서 시간축에 평행한 선으로 나타난다. 이들 선 사이의 간격이 일정하게 반복하는 주파수 간격을 측정하여 기본주파수를 얻고, 이 기본주파수에 대한 정수배를 찾아서 배음을 구할 수 있다.

인위 신호를 야기하는 기계 장치의 진동으로 발생한 파동은 발생원의 위치에 따라 다양한 매질을 통해 전파한다. 선박의 진동은 수중에서 음파로 전달되다가 해저면에 이르러 지반을 통해 육상의 지진계에 도달한다. 소리가 거리에 따라서 감쇄하는 정도는 물에서 주파수의 제곱에 비례하는 반면(Zhao and McGough, 2016), 암석에서는 주파수와 거의 선형적인 비례 관계를 갖는다(White, 1965; Aki and Richards, 2002; Cormier, 2011). 그러므로 음파의 고주파수 성분일수록 해저면에 이르기 전에 바닷물을 통과하면서 더 빠르게 감쇄하기 때문에, 선박에서 발생한 인위 신호는 주로 지진 기록의 저주파수 대역에서 우세하게 나타날 것으로 예상할 수 있다. 한편 비행체의 진동은 공중에서 음파로 전달되다가 지반을 통해 지진계에 도달하며, 기체에서 음파의 감쇄는 액체나 고체보다 훨씬 크다.

### 3.2 지진 기록 시간-주파수 분석

임시 관측소 TPJ01에서 기록한 세계시(UT; 지역시-13h) 기준 2015년 3월 8일 24시간 동안의 연속 파형에 대하여 시간-주파수 분석을 실시하였다. 원시 자료에 대하여 선형 기울기와 평균을 제거한 후, 파형에 포함된 신호의 주파수 대역을 조사하기 위하여 시간-주파수 분석을 적용하였다. 신호의 주파수 대역을 확인하는 것이 주 목적이므로, 지진계의 계기 보정이나 어떤 종류의 필터도 적용하지 않았다. 따라서 지진 기록의 단위는 광대역 지진계의 속도 물리량이 아닌 기록계의 원시 자료인 전압 수(voltage count)이다. 지진 기록의 초당 샘플수가 200이기 때

문에, 이론적으로 최대 100 Hz의 나이퀴스트(Nyquist) 주파수까지의 전체 대역에서 발달한 신호를 확인할 수 있다. 지진 파형의 시간-주파수 특성은 스펙트로그램(spectrogram)으로 분석한다. 스펙트로그램은 신호의 주파수 성분이 시간에 따라 변화하는 양상을 나타내는 영상이다. 일반적으로 스펙트로그램의 가로축은 시간을 나타내고 세로축은 주파수이며, 영상의 색 농도는 특정한 시간에 특정한 주파수의 진폭 크기를 표현한다. 스펙트로그램을 계산하기 위하여 시간창의 크기를 10.24초에 해당하는 2048 샘플로 하고 이동 시간창 사이의 간격을 2.56초인 512 샘플로 하였다. 지진 파형으로부터 이동 시간창 간격을 갖는 매 시간창에 대하여 이산 푸리에 변환 계산을 반복하였다. 푸리에 변환 결과에 절대값을 취하여 진폭을 구하고 스펙트로그램으로 나타냈다.

그림 4는 TPJ01 관측소 지진 기록에 대한 스펙트로그램이다. 저주파수 신호의 큰 진폭으로 인하여 상대적으로 고주파수 성분을 갖는 작은 진폭의 신호가 가려지는 효과를 피하기 위하여 스펙트로그램을 1,000 전압 수의 스펙트럼 진폭에서 포화시켰다. 지진 파형은 다소 불규칙적인 장주기 변화 이외에 지진 신호와 같은 뚜렷한 임펄스 형태의 이벤트를 관찰하기 어렵다. 한편 스펙트로그램은 다양한 가로와 세로 줄무늬 형태의 신호를 보여준다. 전체적으로 가로 줄무늬는 특정한 주파수를 갖는 시간에 따른 연속적인 신호를 가리키며, 세로 줄무늬는 특정한 시간 또는 제한된 시간 범위 내에서 발생하는 넓은 주파수 대역의 이벤트 신호를 나타낸다. 보통 지진 파 자료 처리에서는 이벤트 신호를 추출하고 분석하여 지진의 특성을 규명하는데, 이 예에서와 같이 특정한 주파수를 갖는 연속적인 신호들이 많이 포함되었을 경우에 지진 기록의 신호 대 잡음 비를 감소시켜서 이벤트 신호를 추출하기 어렵게 하는 원인이 된다. 예를 들어, 지진계 작동을 위하여 상시 전원을 사용할 경우에는 지진 기록에 60 Hz 교류 주파수 신호가 항상 포함된다. 또한 지진계 주변에 엔진 또는 모터를 구동하는 기계 장치가 있을 경우에, 동력원의 회전수에 해당하는 일정한 신호가 지진 기록에 포함될 수 있다. 이와 같은 신호는 대부분 인간 활동과 관계가 있으므로 생활 잡음(cultural noise)으로 분류하는데(Webb, 2002), 이 연구에서는 남극 장보고과학기지의 특수성을 고려하여 인위 신호(man-made

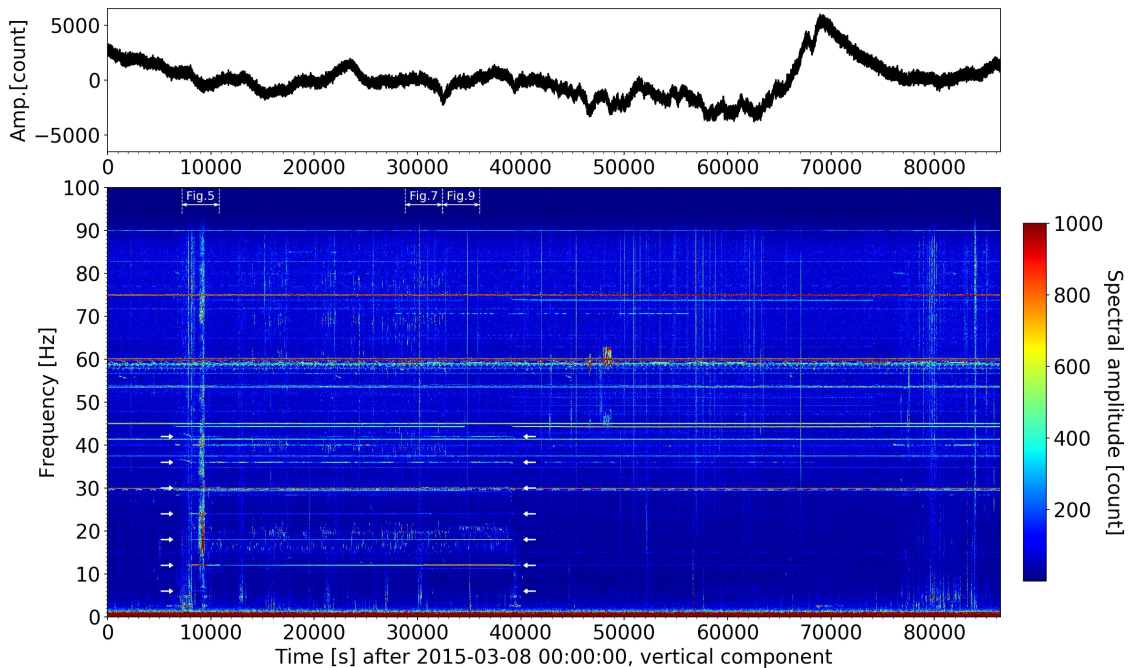
signal)로 정의한다.

스펙트로그램으로부터 확인할 수 있는 인위 신호를 크게 전체 시간에 걸쳐 나타나는 지속 신호와 약 7,000 ~ 40,000초 사이에만 나타나는 단기 신호로 구분할 수 있다. 지속 신호는 장보고과학기지 내에서 상시 발생하는 신호이며, 단기 신호는 아라온이 입남극한 이후 출남극할 때까지 약 9시간 정박하는 동안 발생한 신호이다. 따라서 지속 신호에 대하여 장보고과학기지에서 작동하는 기계 장치의 특성과 연관하여 해석할 수 있다. 또한 단기 신호는 아라온의 선박 자체에서 운용하는 기계 장치의 특성과 더불어, 정박 중에 인력과 물자 수송을 위하여 아라온과 기지 사이를 비행한 헬리콥터와 기지에서 운행한 중장비와 차량의 특성과 연관되어 있다.

#### 4. 인위 신호 해석 결과

아라온 입남극일 하루 동안, 장보고과학기지 내부와 외부에서 발생한 인위 신호 특성을 분석하였

다. 엔진이나 모터 등과 같이 일정한 회전수를 갖는 기계 장치를 포함하는 주요 인위 신호원에 대하여, 지진 기록의 스펙트로그램에서 확인할 수 있는 인위 신호의 주파수 특성과 대비하였다. 제2절에서 설명한 바와 같이, 장보고과학기지에서도 가장 우세한 인위 신호원은 기지에 상시 전원을 공급하기 위하여 24시간 상시 가동되는 3대의 275 kW 상용발전기이며, 이로 인한 지속 신호는 임시 지진관측소에서 관측한 지진 기록의 스펙트로그램에서 전체 시간에 걸쳐 나타나야 한다. 또한 아라온 입남극에서 출남극까지의 시간 동안에 가동되는 4대의 3,400 kW 주발전기에 의하여 발생한 단기 신호는 스펙트럼에서 정박 동안 지속적으로 나타나야 하며, 같은 시간 동안 인력과 물자 수송을 위한 헬리콥터와 차량의 이동 신호는 단속적으로 나타나야 한다. 다음 세부 절에서는 장보고과학기지과 아라온에서 가동되고 있는 이들 주요 기계 설비의 제원을 파악하고, 해당 인위 신호 특성을 모델링하여 지진 기록의 스펙트로그램에 나타나는 주파수 신호와 비교한다.



**Fig. 4.** One-day long seismogram recorded at station TPJ01 on 8 March 2015 when the ice-breaking research vessel Araon arrived at Antarctica and the corresponding spectrogram with a scale bar. Pairs of thick arrows facing each other indicate the fundamental firing frequency and its harmonics of the Araon's main generators. The texts 'Fig. 5', 'Fig. 7', and 'Fig. 9' with double-headed arrows limited by vertical dashed lines show ranges of the corresponding figures.

#### 4.1 장보고과학기지

남극 장보고과학기지는 전력 공급을 위하여 275 kW 열 병합 주발전기 3대와 비상발전기 1대, 그리고 50 kW 비상발전기 1대를 보유하고 있다. 비상 상황을 제외한 일상에서는 주발전기 3대를 교대로 운전함으로써 기지에 필요한 전기를 생산한다. 주발전기는 Caterpillar 3406C 모델로 60 Hz 교류 주파수와 220 V 전압으로 275 kW의 전력을 생산하기 위하여 1,800 rpm, 직렬 6 실린더, 4 행정, 수냉식 디젤 엔진으로 작동한다(Caterpillar, 2015). 이와 같은 발전기의 제원을 식 (1)과 (2)에 적용하면, 각 실린더의 기본주파수는 30 Hz이며 폭발주파수는 15 Hz이고, 전체 폭발주파수는 90 Hz이다. 따라서 발전기 폭발주파수의 배수에 해당하는 주파수 신호가 스펙트로그램에 나타나야 한다. 즉, 그림 4의 스펙트로그램으로부터 지진 기록의 나이퀴스트주파수 범위 내에서 15, 30, 45, 60, 75, 90 Hz의 지속 신호가 기지의 주발전기 신호를 포함한다고 추정할 수 있다. 그림에서 이 배수에 해당하는 신호는 전체 스펙트로그램에서 가장 강한 신호를 이룬다.

#### 4.2 아라온

아라온은 3월 8일 02시(남극 장보고과학기지 시각 15시) 경에 기지에 도달하여 약 9시간 동안 정박하였다. 아라온과 같은 대형 선박은 단시간 동안 정박하는 경우에는 선박의 각종 시스템을 계속 유지하기 위하여 주발전기를 가동한다. 아라온의 주요 엔진은 크게 전기 추진에 사용되는 모터와 발전기로 이루어져 있다. 이 가운데, 추진 모터는 정박 중이므로 고려할 필요가 없다. 아라온은 선박의 전력 공급을 위하여 3,500 kW 주발전기 4대와 430 kW 비상발전기 1대 및 410 kW 정박 발전기 1대를 탑재하고 있다. 단시간 정박을 위하여 주발전기가 계속 가동되고 있기 때문에, 비상발전기와 정박 발전기 역시 고려할 필요가 없다.

주발전기는 MAN B&W 7L32/40 모델을 사용한다(Korea Polar Research Institute, 2011). 이 모델은 추진 중 최대 750 rpm 및 교류 발전 구동 720 rpm의 직렬 7 실린더, 4 행정의 수냉식 디젤 엔진을 사용한다(MAN Energy Solutions, 2021). 식 (1)과 (2)를 이용하여, 아라온 정박 중에 교류 발전을 위하여 구동하는 발전기의 각 실린더별 기본주파수와 폭

발주파수는 각각 12 Hz와 6 Hz이고, 전체 폭발주파수는 42 Hz임을 알 수 있다. 이들 각 실린더와 발전기의 전체 폭발주파수에 해당하는 신호를 아라온 정박 시간 동안 스펙트로그램에서 확인할 수 있어야 한다. 즉, 각 실린더의 폭발주파수인 6 Hz의 배수로, 발전기를 구성하는 전체 7개 실린더에 대한 폭발주파수 42 Hz까지 모두 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 Hz의 신호를 예상할 수 있다. 확실히 그림 4에서 특정한 주파수의 서로 마주하는 굵은 화살표 쌍의 위치로부터 이들에 대한 신호를 확인할 수 있다. 또한 이들 신호의 시작과 끝 시간으로부터 아라온의 도착과 출발 시점을 추정할 수 있다.

한편 스펙트로그램으로부터 아라온 정박 전후 시점에서 몇 가지 특징적인 신호를 관찰할 수 있다. 먼저, 그림 4에서 약 7,000 ~ 8,000초 사이의 36 Hz와 42 Hz 신호는 아라온 입남극 시점에서 근소하게 보다 높은 주파수에서 시작하여 시간이 지남에 따라 일정하게 해당 주파수에 놓이게 됨을 확인할 수 있다. 아라온은 전기 추진 방식의 선박으로, 앞에서 설명한 3,500 kW 발전기 4대가 생산하는 전력을 이용하여 5,000 kW 전방위추진장치 2대와 1,200 kW 선수추진장치 2대를 가동하여 전진 및 후진과 방향을 전환한다. 아라온이 이동하는 중에는 이들 추진장치를 가동하는데 필요한 동력을 얻기 위하여 발전기를 최대 750 rpm으로 가동하다가, 정박 지점에 도착하여서는 추진동력이 필요없기 때문에 교류 발전만을 위하여 720 rpm으로 감속 운전을 한다(MAN Energy Solutions, 2021). 아라온의 정박 직전에 관찰할 수 있는 발전기 신호의 고주파에서 저주파로의 변화는 바로 이러한 발전기 회전수의 감속과 관련이 있는 것으로 추정된다.

또한 그림 5는 3월 8일 02시부터 1시간 동안의 스펙트로그램이며, 여기서 약 1,600 ~ 2,200초 사이에서 넓은 주파수 범위에 걸친 큰 진폭의 신호를 관찰할 수 있다. 해당 지진파형 신호의 시작 시간이 불분명하고 지속시간이 긴 특징으로부터 자연지진의 가능성은 매우 낮다. 또한 이 시기에 기지 주변에 다른 자연적인 원인에 의한 충격은 발생하지 않았기 때문에, 인위적인 원인에 의한 신호일 가능성이 높다. 이 신호가 아라온의 입남극 시점에서 발생한다는 점 때문에, 아라온이 정박하기 위하여 자리를 잡는 과정에서 발생한 진동을 신호원으로 추정할 수 있다. 아

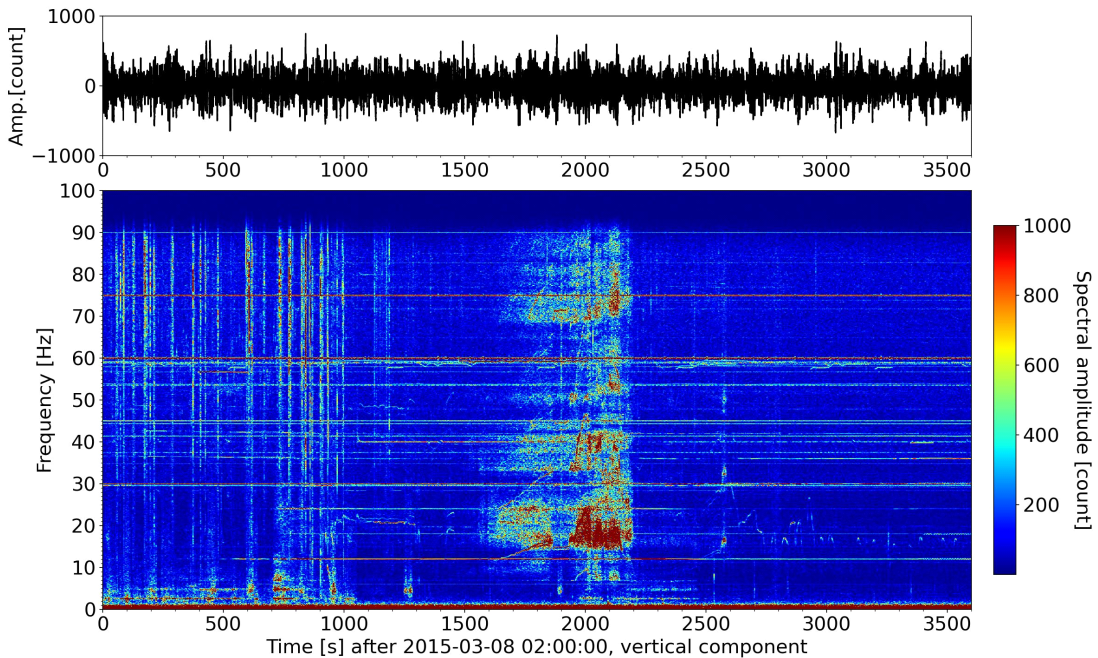
라온은 위성항법시스템(Global Positioning System; GPS)을 통하여 선박의 위치를 자동으로 유지시키는 동적자동위치제어시스템(Dynamic Positioning System; DPS)을 운용한다. 이 시스템은 아라온에 위치한 4기의 추진장치(선박 후미의 전방위추진장치 2기, 선수추진장치 2기)를 이용하여 파도나 강한 바람 속에서 선박 위치를 안정적으로 고정하거나, 방향을 자유자재로 회전시킬 수 있도록 한다. 이 시스템을 이용하여 아라온은 제자리에서 360도 회전도 가능하다. 또한 아라온은 일반 선박의 프로펠러가 아닌 이 추진장치를 이용하여 기동하는 방식을 사용한다. 아라온이 기지 근처 근해까지 도착한 후에 정박 지점에서 일정한 방향을 향하여 선박을 고정하기 위하여 이들 추진장치를 사용한다. 특히 아라온과 같은 대형 선박에서 전진 또는 후진이 아닌 선체를 회전하기 위하여 추진장치를 사용하는 경우에, 소음과 진동의 크기는 매우 큰 것으로 알려져 있다(예: [https://www.youtube.com/watch?v=rOwz\\_gy9Oq4](https://www.youtube.com/watch?v=rOwz_gy9Oq4) 참조). 아라온이 정박하는 동안, 이와 같은 신호가 간헐적으로 나타나는 것을 스펙트로그램에서 확인할 수 있다. 한편 그림 3에서 아라온 정박 지점 주변에 해수

면의 얼음이 깨져있는 상태를 관찰할 수 있다. 그림의 위쪽에서 얼음의 깨진 흔적은 거의 직선으로 기지를 향하여 진입한 아라온의 경로를 보여주며, 아라온 오른쪽의 얼음이 갈라진 곳까지 전진한 이후에 다시 후진하면서 주변의 얼음을 깬 것으로 추정된다. 이렇게 아라온이 정박을 위하여 자리를 잡는 과정에서 전후좌우로 얼음을 깨면서 발생한 충격은 추진장치의 진동과 함께 복합적으로 지진기록의 신호에 영향을 주었을 것이다. 이러한 신호의 양상은 아라온이 떠난 이후에 더 이상 나타나지 않는다. 한편 선박이 원인이 아닌 지진계 인근 육상에서 작업을 하면서 발생한 미상 원인의 진동 또한 신호원으로 가능하지만, 약 10분 정도의 신호 지속 시간으로 판단하였을 때, 그 가능성은 매우 낮다.

### 4.3 헬리콥터와 차량

#### 4.3.1 헬리콥터 신호 특성

아라온이 기지 인근에 도착하여 함께 실어온 헬리콥터를 조립하고 약 두 시간 후부터 운행이 시작되었다. 남극 장보고과학기지 2차 월동대 활동에 필요한 마지막 물자 보급과 인력 수송을 위하여 정박



**Fig. 5.** Seismogram recorded at station TPJ01 between AM 02 and 03 hours in universal time clock on 8 March 2015 and the corresponding spectrogram with a scale bar. The seismogram was high-pass filtered at the corner frequency of 0.01 Hz.



한 아라온과 기지 사이의 운송 수단으로 Aerospatiale AS-350-B2 Ecureuil (헬리콥터 등록명: ZK-HJY) 이 사용되었다(그림 6). 이 헬리콥터는 모두 3개의 주회전날개와 2개의 꼬리회전날개를 가지고 있으며, 주회전날개와 꼬리회전날개의 최대회전수는 각각 약 394 rpm과 2,086 rpm이다(Eurocopter, 1990; European Aviation Safety Agency, 2012). 그러므로 식 (1)에 따라 주회전날개와 꼬리회전날개의 기본주파수는 각각 6.57 Hz와 34.77 Hz이다. 날개의 회전으로 발생하는 충격파 주파수는 식 (2)에 따라 날개 갯수와 회전수의 곱으로 주회전날개에 대하여 19.7 Hz이며, 꼬리회전날개에 대하여 69.53 Hz이다.

헬리콥터는 엔진으로 날개를 회전시켜서 얻은 양력을 이용하는 비행체이다. 헬리콥터의 엔진과 중앙상단의 주회전날개와 후미에 있는 꼬리회전날개의 회전에 의해 대기중에 음파가 발생한다. 음파는 대기중에서 직접 또는 지면을 통해 전파하여 지진계에 기록된다(Damarla and Ufford, 2008). 대부분의 헬리콥터의 주회전날개는 일정한 속도로 회전한다. 대

신 주회전날개를 구성하는 회전날개의 각도를 조절하여 상승이나 하강하는데 필요한 힘을 얻고, 주회전날개의 회전날개면 경사를 변경하여 수평으로 이동하는 힘을 얻는다.

헬리콥터는 항상 주회전날개의 회전수와 거의 같은 진동수에서 흔들리기 때문에, 동체를 구성하는 다양한 부품들이 함께 흔들리는 것을 피하기 위하여 이 회전수와 같은 고유진동수를 갖지 않도록 설계되어 있다. 만약 회전날개의 회전수가 비행중에 달라진다면 동체의 피로 파괴에 대한 저항이 낮아져서 효과적이지 않다. 고정된 회전수를 유지하는 것은 헬리콥터를 기동하기 위한 기본이다. 그래서 대부분의 헬리콥터는 비행중에 주회전날개 또는 꼬리회전날개의 분당 회전수를 변화시키지 않으며, 이차륙이나 낮은 대기 속도에서만 허용된 범위 내에서 변화시킨다(Federal Aviation Administration, 2019).

거의 일정한 날개 회전수를 갖는 헬리콥터의 기동으로 인한 충격파가 장보고과학기지에 설치한 임시 지진계에 어떻게 기록되었는지 살펴본다. 기지의 헬리포트와 아라온 사이의 거리는 약 1 km이며, 그림 3과 같은 방향으로 수 십 차례 반복 비행을 실시하였다. 그림 4에서 약 14,000 ~ 33,000초 사이 동안 주회전날개의 충격파 주파수와 그 배음을 관찰할 수 있으며, 이 시간으로부터 헬리콥터가 기동한 시간대를 확인할 수 있다. 이 가운데 헬리콥터 운행이 가장 빈번하게 이루어진 3월 8일 08시부터 1시간 동안의 지진 기록과 스펙트로그램을 그림 7에 나타냈다. 그림 7로부터 19.7, 39.4, 59.1, 69.53, 78.8 Hz를 중심으로 시간에 따라 주파수 변화를 보이는 다소 불규칙적이되 반복적인 신호를 확인할 수 있다. 이 가운데 19.7, 39.4, 59.1, 78.8 Hz의 신호는 운행에 사용한 AS-350-B2 헬리콥터의 주회전날개에 의한 충격파 주파수 19.7 Hz와 그 정수배인 배음에 해당한다. 배음 가운데 59.1 Hz 신호는 기지의 지속 신호 가운데 하나인 교류 전류 60 Hz를 포함한 여러 종류의 인위 신호가 비슷한 주파수 대역에서 나타나고 있기 때문에 상대적으로 구별하기가 어렵다. 또한 이들 주회전날개의 충격파 주파수 배음과 다른 69.53 Hz에서의 꼬리회전날개 충격파 주파수 신호를 확인할 수 있다. 이 신호는 주회전날개의 배음 간격과 다른 반면, 시간축을 따라 주회전날개의 배음 신호가 등장하는 시점과 일치하여 나타난다. 즉, 이



**Fig. 6.** Image showing helicopter operation at the heliports of ice-breaking research vessel Araon (top: loading) and Jang Bogo Station (bottom: unloading).

는 하나의 헬리콥터 동체에서 움직이는 주회전날개와 꼬리회전날개의 작동으로 발생하는 충격파 주파수 신호임을 설명한다.

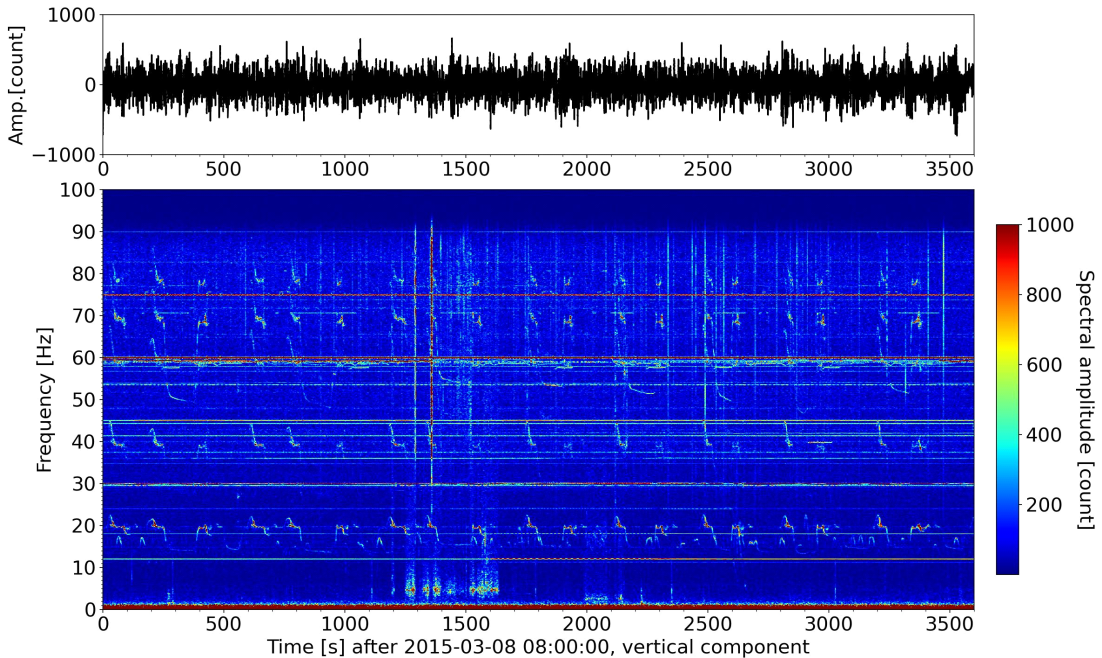
### 4.3.2 헬리콥터 기동

그림 7에서 헬리콥터의 충격파 주파수 및 배음에 해당하는 신호가 시간에 따라 변화하는 양상을 관찰할 수 있다. 이와 유사하게 헬리콥터에 의한 신호를 지진 기록으로부터 감지하고 비행체의 특징을 파악하는 연구가 일부 소개된 바 있다(예: Eibl *et al.*, 2015, 2017; Meng and Ben-Zion, 2018). 이동하는 신호의 주파수 변이는 도플러 효과(Doppler effect)로 잘 알려져 있다. 즉, 어떤 음원이 관찰자에게 접근하면 음파의 파장이 짧아져서 음원이 내는 소리보다 더 높은 소리를, 멀어지면 더 낮은 소리를 듣게 된다. 마찬가지로, 일정한 충격파 주파수를 갖는 헬리콥터가 어떤 속력으로 지진계에 접근할 때, 지진계는 헬리콥터의 고유한 충격파 주파수보다 높아진 주파수를 감지한다.

스펙트로그램에서 헬리콥터가 아래온을 향할 때와 장보고과학기지를 향할 때의 신호는 다른 양상을

보인다. 스펙트로그램으로부터 두 경우의 각각에 대한 신호 특성을 규명하는 것은 어느 시점에서 헬리콥터가 어느 위치에 있었는지를 파악하는데 중요한 단서를 제공한다. 이는 직접적인 수치 또는 물리 모델링을 수행하지 않아도 각 신호의 도식적 양상에 도플러 효과를 적용하여 쉽게 추정할 수 있다.

그림 8은 헬리콥터의 기동으로 장보고과학기지 방향과 아래온 방향을 각각 대표하는 두 개의 특징적인 신호가 함께 나타나는 시간대를 확대한 것이다. 그림에서 지진파형은 스펙트로그램에 세로 줄로 나타나는 일시적인 신호를 확인할 목적으로 해당 지진 기록의 양 끝에서 전체의 5% 길이에 코사인 테이퍼링(cosine tapering)을 하고 1 Hz의 모서리주파수를 갖는 고주파통과 필터를 적용한 결과이다. 헬리콥터의 주회전날개 충격파 주파수인 19.7 Hz를 정상 상태로 하여, 그림에서 150초 이전에 나타나는 신호는 충격파 주파수 이상에서 정상 상태로 변화하는 양상이다. 그 이후에 나타나는 신호는 반대로 충격파 주파수 이하에서 정상 상태로 변화하는 양상이다. 이러한 주파수 변이 양상은 주회전날개 충격파 주파수의 배음과 꼬리회전날개 충격파 주파수인



**Fig. 7.** Seismogram recorded at station TPJ01 between AM 08 and 09 hours in universal time clock on 8 March 2015 and the corresponding spectrogram with a scale bar. The seismogram was high-pass filtered at the corner frequency of 0.01 Hz.

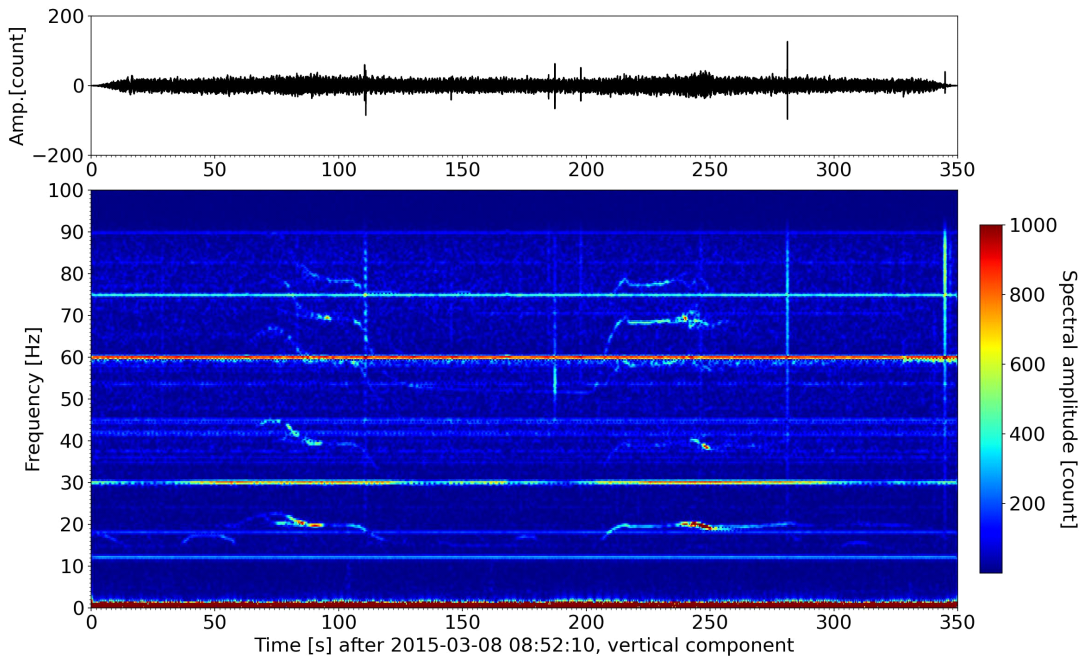
69.53 Hz의 신호에 대해서도 뚜렷하다.

헬리콥터는 아라온 헬리포트에서 상승하여 장보고과학기지를 향하여 고도를 유지하다가 기지의 헬리포트로 하강한다(그림 6). 이 방향은 헬리콥터가 임시 지진계에 접근하는 방향이다. 따라서 이 기동은 임시 지진계에서 충격파 주파수를 높아지게 한다. 이후 헬리포트에서 화물을 내려놓거나 매달기 위하여 보통 10 ~ 30초 정도를 정지한 상태에서 고도를 유지하는데, 이 시간 동안은 임시 지진계에 일정한 충격파 주파수의 정상 상태 신호가 기록된다. 다시 헬리콥터는 아라온을 향하여 상승한 후 기지에서 멀어지고, 이 기동으로 인하여 충격파 주파수 이하로 낮아지는 신호가 지진계에 감지된다. 그러므로 그림 8에서 150초 이전에 나타나는 신호는 헬리콥터가 아라온에서 장보고과학기지를 향하는 기동에 의하여 발생한 충격파를 나타낸다.

이와 반대로 헬리콥터가 장보고과학기지 헬리포트에서 상승하고 아라온을 향하면서 충격파 주파수는 낮아지고, 그 진폭이 작아지면서 스펙트로그램에서 신호가 불분명해진다(약 120 ~ 200초 구간). 다시 헬리콥터가 아라온에 거의 접근하여 고도를 낮추

어 아라온 헬리포트 상공에 정지한 상태로 고도를 유지하면서 화물을 매달거나 내려놓는다. 헬리콥터는 일반적으로 충분한 양력을 확보하기 위하여 먼저 상승한 후 이동하고 다시 하강하는 고도를 기준으로 U자 형태의 기동을 한다. 따라서 공중에서 아라온 헬리포트로 하강하면서 지진계까지의 거리는 감소한다. 이 과정은 지진계에서 충격파 주파수를 정상 상태까지 높아지게 한다. 이후 아라온 헬리포트 상공에서 정지한 상태를 유지하는 동안 화물 하역을 하고, 다시 장보고과학기지 헬리포트로 이동을 반복한다. 지진계에서는 이 과정의 충격파 주파수 신호가 거의 정상 상태를 유지하다가 고도를 높이면서 신호가 약해지고 불분명해진다. 따라서 그림 8에서 150초 이후에 나타나는 신호는 헬리콥터가 아라온에 접근하여 있는 동안의 충격파 주파수 변화를 나타낸다.

그림 7에 나타낸 3월 8일 08시부터 한 시간 동안의 스펙트로그램에서 헬리콥터 신호 양상은 대략 1,700초를 전후로 변화한다. 그 이전에는 아라온과 장보고과학기지 사이에서 지면을 기준으로 U자 형태의 비행경로를 따라 이동하였다(그림 3). 그 결과, 장보고과학기지 헬리포트에 접근하면서 먼저 임시



**Fig. 8.** Seismogram recorded at station TPJ01 during 350 seconds from AM 08h 52m 10s in universal time clock on 8 March 2015 and the corresponding spectrogram with a scale bar. The seismogram was cosine-tapered with the width of 5% on each end and then high-pass filtered at the corner frequency of 1 Hz.

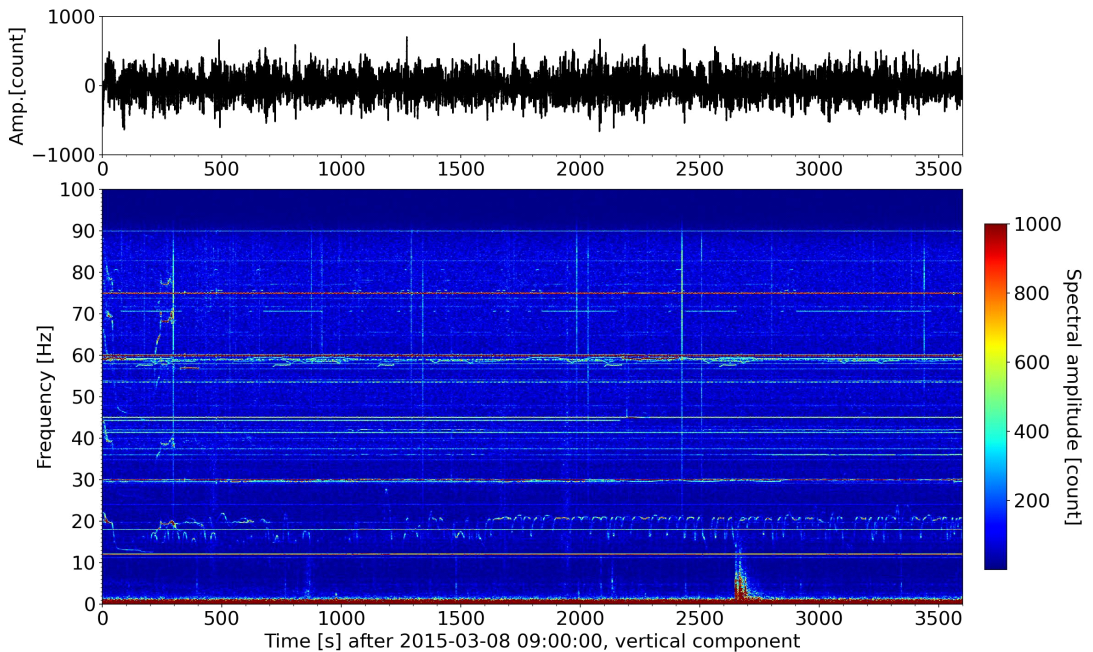
지진관측소에 최근접하는 비행을 한 후, 헬리콥터를 떠나면서 다시 임시 지진관측소에 최근접하는 비행을 한다. 따라서 스펙트로그램에서 기지 접근과 출발에 따른 충격파 주파수 변이 신호가 연이어 나타나고, 이어서 아라온 접근에 따른 신호가 나타나는 형태가 반복된다. 한편 그림 7의 약 1,700초 이후에는 장보고과학기지 방향을 나타내는 한 개의 신호에 이어서 아라온 방향을 나타내는 신호가 나타난다. 즉, 이러한 변화로부터 헬리콥터 기동 초기에 아라온과 장보고과학기지 사이의 지면 기준 U자 형태의 비행경로가 직선에 가까운 경로로 바뀌었다고 추정할 수 있다.

한편 그림 8에서 먼저 나타나는 장보고과학기지 접근 시의 충격파 주파수 신호는 근소하게 주파수가 분기(bifurcation)하는 형태를 보이며, 당일에 동일한 경로 방향의 모든 헬리콥터 신호에서 공통적이다. 이러한 현상은 헬리콥터에서 발생한 서로 다른 충격파 주파수 신호가 동시에 지진계에 감지되었다는 것을 의미한다. 아라온과 기지 사이를 왕복하는 헬리콥터 비행 중에 특별한 변화는 기대하기 어려우므로, 이러한 서로 다른 신호는 충격파의 전파 경로

와 관계가 있을 것으로 추정할 수 있다. 즉, 아라온에서 기지로 비행하면서 충격파가 공기를 통하여 음파 속도로 지진계에 진행하는 직접파와 해안선에 이르러 공기에서 지반을 통해 훨씬 더 빠른 속도로 진행하는 굴절파가 지진계에 동시에 도착하는 경우이다. 이 경우 굴절파는 직접파보다 헬리콥터가 지진계에서 훨씬 멀리 위치한 지점에서 출발하기 때문에 상대적으로 약하고 낮은 주파수를 보이는 반면에, 이와 동시에 도착하여야 하는 직접파는 지진계에 매우 가까운 지점에서 출발한 것이어야 하므로 상대적으로 진폭이 크고 높은 주파수여야 할 것이다. 이와 같이 동시성의 서로 다른 전파 경로를 갖는 충격파가 스펙트로그램을 통하여 분기 형태로 나타났을 것으로 추정한다.

#### 4.3.3 차량

헬리콥터 수송을 마친 후, 장보고과학기지 헬리콥터 주변에 놓인 하역 물품을 기지 내 적재장소에 이동하기 위하여 중장비와 차량이 사용되었다. 중장비로는 지게차와 페이로더가 사용되었고, 차량은 포터 트럭과 SUV 차량이 동원되었다. 그림 9는 3월 8



**Fig. 9.** Seismogram recorded at station TPJ01 between AM 09 and 10 hours in universal time clock on 8 March 2015 and the corresponding spectrogram with a scale bar. The seismogram was high-pass filtered at the corner frequency of 0.01 Hz.

일 09시부터 1시간 동안의 스펙트로그램이다. 약 300 초를 마지막으로 헬리콥터 신호는 더 이상 나타나지 않는 반면, 약 22 Hz 이하에서 주파수 변화가 반복되는 신호는 계속 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 약 1,600초 이후부터는 이러한 신호가 이전보다 빈번한데, 이것은 헬리콥터 운항 종료로 장애를 받지 않고 기지의 헬리포트에 하역한 물자를 더 빠르게 이동시킬 수 있었기 때문이다. 이들 육상 운송장비의 움직임으로 인한 신호는 스펙트로그램에서 헬리콥터 신호보다 짧은 지속시간을 갖는 특징이 있으며, 배음 신호가 없기 때문에 헬리콥터 신호와 확연히 구분된다. 지진계에서 이들 육상 운송장비의 이동과 관련된 신호는 아라온 도착과 거의 비슷한 시간에 시작되어 아라온 출발과 비슷한 시간에 마무리된다(그림 4).

약 4시간에 걸친 인력과 물자 수송을 완료한 후, 3월 8일 11시(장보고과학기지 시각 3월 9일 자정)경에 출발 준비를 마친 아라온은 남극을 떠나 뉴질랜드로 향하게 되면서 지진 기록에서 아라온의 주발전기 신호도 사라진다. 이후에는 아라온 도착 이전부터 확인할 수 있었던 장보고과학기지의 기계장치 설비의 인위 신호만을 스펙트로그램에서 확인할 수 있다.

## 5. 토의 및 결론

지반운동은 지구의 운동이나 지구 물질 사이의 상호작용으로 인한 지진과 미진(microseism과 tremor), 바람이나 번개 등의 환경 활동 및 전기, 기계, 차량과 항공기 등과 같은 인위적인 활동으로 인한 신호가 중첩된 결과이다. 이 가운데 인간 활동으로 발생한 인위 신호는 지진 기록의 신호 대 잡음 비를 낮추어서 지진원 요소 분석과 같은 본래 목적의 지진 분석을 어렵게 만드는 중요한 원인이다. 지진관측소 설치 장소의 제약으로 불가피하게 포함되는 인위 신호의 특성을 파악할 수 있다면, 지진 기록에 대한 신호 처리를 통하여 원하는 신호의 품질을 높일 수 있다.

남극은 지구상의 다른 지역에 비하여 인간 활동이 매우 제한적인 지역으로, 지진 기록에서 자연적인 원인의 다양한 신호를 관측하기에 좋은 조건을 갖추고 있다. 그러나 혹독한 남극의 자연 환경으로 인하여 접근하기가 어렵기 때문에, 지진 관측 활동에 많은 제약이 있다. 먼저 남극 대륙의 대부분이 눈

과 얼음으로 뒤덮여 있어서 지진계를 설치하고 운용하기에 적합한 장소를 찾기가 어렵다. 또한 지진관측소를 세우더라도 남극의 낮은 온도와 수시로 급변하는 대기 변화로 인하여 지진계 작동에 필요한 전원 확보에 어려움을 겪는다. 지진계와 전원 배터리 등에 사용하는 전기 및 전자 장치는 일정한 작동 온도 범위가 있는데, 남극의 겨울 동안에는 이 범위를 벗어나는 경우가 흔하여 특별한 보온 조치가 없으면 정상적인 작동을 기대하기가 어렵다(Park *et al.*, 2014). 이러한 지진계 설치와 운영 및 유지관리의 어려움으로 남극에서 상시 지진관측 활동은 대부분 과학기지 또는 그 주변에서 이루어진다. 그러므로 기지의 인위적인 활동이 상시 지진관측 기록에 영향을 미친다.

이 연구에서는 남극 장보고과학기지의 제2차越冬연구대 활동 기간 중에 기지에 설치한 임시 지진관측소의 지진 기록을 분석하고 인위적인 활동에 의한 신호의 특징을 파악하였다. 기지 시설물 주변에 이격 거리 약 700 m의 두 곳에 설치한 이동식 지진계(TPJ01과 TPJ02) 가운데 상대적으로 가장 활동이 많은 기지의 주 건물에 가까운 TPJ01 지진계에서 기록한 자료의 인위 신호 분석 결과를 제시하였다. 분석 자료는 2015년 3월 8일 쇄빙연구선 아라온호의 입남극일의 24시간 연속 지진파형이다. 같은 시간대에 다른 TPJ02 지진계 역시 대부분의 인위 신호 발생원으로부터 거리가 멀어서 다소 약한 진폭을 갖지만 거의 동일한 형태의 인위 신호를 기록하였다.

지진 기록의 스펙트럼 분석을 통해 얻은 스펙트로그램은 기지와 주변에서 이루어진 다양한 기계장치 작동으로 발생하는 특정 주파수 대역의 지속적인 신호와 단속적인 신호를 보여주었다. 기지의 고립된 환경을 고려하였을 때, 당일의 지속적인 인위 신호 발생원은 장보고과학기지의 운영과 관련된 기계장치의 작동, 특히 기지의 전원 공급을 위한 발전기의 상시 가동으로 대표할 수 있다. 아라온 입남극과 정박 동안의 선박 기능 유지를 위한 발전기의 상시 가동 또한 주요 인위 신호 발생원이다. 아라온과 기지 사이에 인력과 물자 수송을 위하여 기동한 헬리콥터의 충격파는 위치와 이동에 따른 특징적인 신호로 나타난다. 또한 기지의 헬리포트에 하역한 물자의 적치를 위하여 운행한 차량과 증장비가 인접한

지진계의 지반운동 기록에 영향을 주었다. 대부분의 이들 기계장치의 제원은 이미 잘 알려져 있기 때문에, 기계 작동에 필요한 엔진과 날개의 폭발 행정과 회전운동 정보를 바탕으로 지진계에 감지되는 충격파 신호의 주파수를 계산하였다. 지진 기록의 스펙트로그램으로부터 관찰할 수 있는 인위 신호의 주파수와 각 기계장치에 대하여 계산한 주파수는 정확하게 일치하였다. 또한 이동하는 헬리콥터의 회전날개에서 발생하는 충격파 신호의 주파수 변화 양상으로부터 헬리콥터의 이동 방향과 경로를 추정하였다. 그 결과는 당시 기지에서 육안으로 관찰한 내용을 잘 뒷받침한다.

인위 신호를 정확하게 파악하는 것은 지진관측의 가장 기본이고 전통의 목적인 자연적인 원인에 의한 신호 분석의 정확도를 향상시키는데 중요하다. 예를 들어, 헬리콥터와 같이 이동하는 물체에 의한 신호는 도플러 효과로 설명하는 주파수 변화를 나타내므로, 화산성 미진과 같이 마그마와 고온의 지하수가 유동하면서 주변 모암과 상호작용하는 신호와 유사한 특징을 나타내는 것으로 알려져 있다(Eibl *et al.*, 2015). 그러나 최근의 연구는 이것이 단순히 지진 분석의 신호 품질 향상에 그치지 않는다는 것을 반증한다. 지진 기록 분석의 본래 목적과는 별개로, 인위 신호의 분석 자체가 인위적인 활동의 실체와 효과를 규명하는데 결정적인 단서를 제공한다(Kim *et al.*, 2001; Kogan *et al.*, 2008; Sheen *et al.*, 2009; Hinzen *et al.*, 2016; Díaz *et al.*, 2017; Eibl *et al.*, 2017; Meng and Ben-Zion, 2018; Hong *et al.*, 2020). 따라서 지진관측 기록 분석을 다양한 사회문화와 산업경제 활동 영역에서 발생하는 진동의 원인을 규명하기 위한 중요한 수단으로 활용할 수 있다. 이를 통하여 진동을 일으키는 다양한 일상의 사건과 사고를 규명하는데 지진학의 지식이 기여할 수 있다. 그러므로 이 연구는 전통적인 지진학 연구의 영역을 자연지진학(earthquake seismology)에서 사회지진학(social seismology)으로 확대하였다는데 중요한 의의가 있다.

## 감사의 글

원고를 개선하는데 도움 의견을 주신 편집위원과 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 부경대학교 자

율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었습니다.

## REFERENCES

- Aki, K. and Richards, P.G., 2002, Quantitative Seismology. 2<sup>nd</sup> ed., University Science Books, Sausalito, 700 p.
- Archer, A. and McCarthy Jr., J., 2018, Quantification of diesel engine vibration using cylinder deactivation for exhaust temperature management and recipe for implementation in commercial vehicles. SAE Technical Paper 2018-01-1284, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1284>.
- Bormann, P. and Wielandt, E., 2012, Seismic signals and noise. In: Bormann, P. (ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; <http://nmsop.gfz-potsdam.de>; [https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_1-62](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_1-62).
- Caterpillar, 2015, 3406C Generator Set Electric Power - Technical Spec Sheet Standard. [https://emc.cat.com/pubdirect.ashx?media\\_string\\_id=SS-8426679-18321430-000.pdf](https://emc.cat.com/pubdirect.ashx?media_string_id=SS-8426679-18321430-000.pdf).
- Cormier, V.F., 2011, Seismic, viscoelastic attenuation. In: Gupta, H. (ed.), Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Springer, Dordrecht, 1279-1289.
- Damarla, T.R. and Ufford, D., 2008, Helicopter detection using harmonics and seismic-acoustic coupling. Proceedings of SPIE, 6963, 69630W, <https://doi.org/10.1117/12.776899>.
- Díaz, J., Ruiz, M., Sánchez-Pastor, P.S. and Romero, P., 2017, Urban seismology: on the origin of earth vibrations within a city. Scientific Reports, 7, 15296, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15499-y>.
- Eibl, E.P.S., Lokmer, I., Bean, C.J. and Akerlie, E., 2017, Helicopter location and tracking using seismometer recordings. Geophysical Journal International, 209, 901-908.
- Eibl, E.P.S., Lokmer, I., Bean, C.J., Akerlie, E. and Vogfjörd, K.S., 2015, Helicopter vs. volcanic tremor: Characteristic features of seismic harmonic tremor on volcanoes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 304, 108-117.
- Eurocopter, 1990, Flight Manual AS 350 B2.
- European Aviation Safety Agency, 2012, EASA Type-Certificate Data Sheet. EASA TC No.: R.008, Issue 6, 25.05.2012.
- Federal Aviation Administration, 2019, Helicopter Flying Handbook. FAA-H-8083-21B.
- Gubbins, D., 2004, Time Series Analysis and Inverse Theory for Geophysicists. Cambridge University Press, Cambridge, 255 p.

- Hassoun, H., Hallal, J., Hammoud, M. and Duhamel, D., 2019, Identification of dominant noise sources in a diesel power group. 23rd International Congress on Acoustics, September 2019, Aachen, Germany, hal-02915347.
- Hinzen, K.-G., Reamer, S.K. and Fleischer, C., 2016, Analysis of a Burglaram. *Seismological Research Letters*, 87, 193-195.
- Hong, T.-K., Lee, J., Lee, G., Lee, J. and Park, S., 2020, Correlation between ambient seismic noise and economic growth. *Seismological Research Letters*, 91, 2343-2354, <https://doi.org/10.1785/0220190369>.
- Kim, W.-Y., Sykes, L.R., Armitage, J.H., Xie, J.K., Jacob, K.H., Richards, P.G., West, M., Waldhauser, F., Armbruster, J., Seeber, L., Du, W.X. and Lerner-Lam, A., 2001, Seismic waves generated by aircraft impacts and building collapses at World Trade Center, New York City. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82, 565-571, <https://doi.org/10.1029/01EO00330>.
- Kogan, M.G., Kim, W.-Y., Bock, Y. and Smyth, A.W., 2008, Load response on a large suspension bridge during the NYC Marathon revealed by GPS and accelerometers. *Seismological Research Letters*, 79, 12-19.
- Kong, C., 2017, Analysis of Seismic Records at Jang Bogo Station, Antarctica, M.S. thesis, Pukyong National University, Busan, 66 p.
- Korea Polar Research Institute, 2011, The ice-breaking research vessel ARAON: Passenger Guide (in Korean).
- MAN Energy Solutions, 2021, MAN 32/40 Project Guide - Marine four-stroke diesel engine compliant with IMO Tier II.
- Meng, H. and Ben-Zion, Y., 2018, Characteristics of airplanes and helicopters recorded by a dense seismic array near Anza California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 4783-4797.
- Nakata, N., Gualtieri, L. and Fichtner, A., 2019, *Seismic Ambient Noise*. Cambridge University Press, Cambridge, 344 p.
- Park, Y., Yoo, H.J., Lee, W.S., Lee, J., Kim, Y., Lee, S.-H., Shin, D. and Park, H., 2014, Deployment and performance of a broadband seismic network near the new Korean Jang Bogo Research Station, Terra Nova Bay, East Antarctica. *Seismological Research Letters*, 85, 1341-1347.
- Sheen, D.-H., Shin, J.S., Kang, T.-S. and Baag, C.-E., 2009, Low frequency cultural noise. *Geophysical Research Letters*, 36, L17314, <https://doi.org/10.1029/2009GL039625>.
- Webb, S.C., 2002, Seismic noise on land and on the sea floor. In: Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C. and Kisslinger, C. (eds.), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Academic Press, London, 305-318.
- White, J.E., 1965, *Seismic Waves Radiation, Transmission and Attenuation*. McGraw Hill, New York, 302 p.
- Zhao, X. and McGough, R.J., 2016, Time-domain comparisons of power law attenuation in causal and noncausal time-fractional wave equations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139, 3021-3031.

---

Received : February 10, 2022

Revised : February 17, 2022

Accepted : February 17, 2022