기상청 신규 인프라스운드 관측망 탐지 능력 평가

Evaluation of the Detection Ability of New Infrasound Networks Installed by Korea Meteorological Administration

민경민*

Min, Kyungmin*

Abstract

The Korea Meteorological Administration (KMA) installed infrasound networks in Cheorwon and Yanggu. These networks have been operated for detecting infrasound generated from artificial explosions, such as those due to North Korea's nuclear tests, and from natural phenomena such as the volcanic eruption of Mt. Baekdu. Currently, the KMA is simultaneously performing infrasound analysis and seismic wave analysis to discriminate between natural and artificial earthquakes. To efficiently perform the discrimination and analysis of artificial earthquakes, three infrasound networks were expanded in the West Sea and northern Gyeonggi-do Gyodong-do, Paju, and Yeoncheon. In this study, 22 cases of artificial earthquake events that occurred in North Korea in January 2020 were analyzed to test the analysis capabilities of the three newly installed infrasound networks. The results of the analysis confirmed that the newly installed infrasound networks exhibited a higher infrasound detection rate than the existing Cheorwon and Yanggu infrasound networks. The Cheorwon and Yanggu observation networks are being planned for relocation and installation due to aging and poor site conditions. The use of the new infrasound network is expected to improve the detection rate and analysis accuracy with respect to artificial earthquakes. Furthermore, it is expected to enhance the detection capability of infrasound generated from various physical phenomena such as nuclear tests performed by North Korea and volcanic eruption of Mt. Baekdu.

Key words : Infrasound, Artificial Earthquake, Infrasound Networks, Earthquake

요 지

기상청에서는 북한 핵실험과 같은 인위적인 폭발 현상에 의해 발생하는 인프라스운드와 백두산 화산 분화 등 자연적인 현상에서 발생하는 인프라스운드 관측을 목적으로 철원과 양구에 인프라스운드 관측망을 설치하여 운영 하고 있다. 현재 기상청은 자연지진과 인공지진을 식별하기 위하여 지진파를 활용한 분석과 함께 인공지진에서 발생하는 인프라스운드 분석을 수행하고 있다. 인공지진의 식별 및 분석 업무에 효율적인 수행을 위해 관측 공백 지역인 서해 및 경기도 북부지역 교동도, 파주, 연천에 인프라스운드 관측망 3개소를 신규 확충하였다. 이번 연구에서는 신규 설치한 인프라스운드 관측망 3개소의 분석능력을 테스트 하기 위해 2020년 1월 북한지역에서 발생한 22회의 인공지진 이벤트 사례를 분석하였다. 분석 결과 신규 인프라스운드 관측망은 기존에 운영 중인 철원과 양구 인프라스운드 관측망보다 높은 탐지율을 보이는 것을 확인하였다. 철원과 양구 관측망은 노후화와 열악한 부지환경으로 이전 및 설치를 계획하고 있다. 신규 인프라스운드 관측망의 활용을 통해 인공지진 탐지율 및 분석 정확도의 향상과 북한 핵실험 및 백두산 화산 분화 감시 등 다양한 물리적인 현상에서 발생하는 인프라스운드 탐지 능력의 향상이 기대된다.

핵심용어 : 인프라스운드, 인공지진, 인프라스운드 관측망, 자연지진

1. 서 론

인프라스운드는 자연 또는 인위적인 현상에서 대기압의 변화를 수반하는 다양한 물리적인 현상에서 발생하며 인간

의 가청주파수 대역인 20~20,000 Hz 구간을 기준으로 이보다 낮은 20 Hz 이하의 저주파수의 대역을 말한다. 인간의 가청주파수 대역에서 발생한 에너지는 전파 거리가 증가할 수록 크게 감쇠하지만, 저주파수 대역의 인프라스운드 에너지

*교신저자, 정회원, 기상청 지진화산감시과 연구원(Tel: +82-2-2181-0785, Fax: +82-2-841-7664, E-mail: mkmzx@korea.com)
Corresponding Author, Member, Researcher, Earthquake and Volcano Monitoring Division, Korea Meteorological Administration

지는 거리에 따른 감쇠가 적어 수백~수천 km의 원거리를 전파하는 특성을 가지고 있다(Donn and Rind, 1971). 인프라스운드 대역인 1 Hz의 저주파수는 약 3,000 km까지 전파가 가능하고, 0.01 Hz의 인프라스운드는 지구를 한 바퀴 돌아올 수 있다고 알려져 있다(Bedard and Georges, 2000). 인프라스운드의 관측기술은 과거 1940~1950년대에 대기권에서 수행하던 핵실험을 감시하는 목적으로 사용하며 발전했다. 인프라스운드를 활용한 연구는 인위적인 현상으로 발생하는 지하 핵실험(Che et al., 2014; Park et al., 2018), 미사일 발사(Yoon et al., 2016), 폭발사고(Kundu et al., 2021) 등과 자연적인 현상에서 발생하는 대규모 지진(Che and Jeon 2006; Walker et al., 2013), 화산(Fee and Matoza, 2013; Marchetti et al., 2019), 운석(Elgabry et al., 2017), 지진해일(Le Pichon et al., 2005) 등이 있다. 지진, 화산 폭발과 같은 자연재해 모니터링에 지진-인프라스운드 관측망을 활용한 연구가 많이 수행되고 있으며, 지진-인프라스운드 모니터링 시스템을 활용하여 에콰도르에서 2006년 발생한 화산 폭발의 피해를 막은 사례가 있다(Kumagai et al., 2007). 이 밖에도 동물의 경우 고래, 기린, 하마, 코뿔소, 코끼리 등이 인프라스운드 대역으로 의사소통을 하는 것으로 알려져 있으며, 코끼리의 경우 약 10 km 가량 떨어진 무리와 소통하는 것이 관찰되었다(Clemins and Johnson, 2003). 인프라스운드 연구는 지하 핵실험, 미사일 발사, 운석의 이동경로 등 위치를 추정하는 연구뿐만 아니라 화산 폭발, 지진해일, 태풍 등의 연재해를 실시간으로 감시하기 위해 지진-인프라스운드 관측망을 활용하여 실시간 조기 경보를 목적으로 하는 연구들도 활발하게 진행되고 있다. 한반도에서 발생하는 지진은 자연지진 외에도 광산 발파, 대규모 토목공사, 군사 활동 등 인위적인 폭발에 의해 발생하는 인공지진을 포함하고 있다. 지진파를 이용하여 자연지진과 인공지진을 식별하는 많은 연구가 수행되고 있으나 식별방법이 연구지역의 지질구조에 의존하는 결과를 보이며(Rodgers and Walter, 2002) 미소지진의 경우 신호 대 잡음비가 낮고 양질의 지진 관측 수가 적어 다양한 지진파형 식별 기술을 적용하는데 어려움이 있다(Che and Jeon, 2006). 인프라스운드는 지표 발파에 의한 작은 규모의 인공지진을 식별하는데 적합한 식별 기술로 평가된다. 기상청에서는 기존에 철원과 양구 2곳에서 운영 중인 인프라스운드 관측망의 관측 공백지역인 서해·경기북부 지역의 교동도, 파주, 연천 3곳에 인프라스운드 관측망을 추가로 설치하여 인프라스운드를 관측하고 있다. 기상청에서 운영하는 인프라스운드 관측망은 유엔 포괄적 핵실험 금지 조약 기구(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO)의 International Monitoring System (IMS) 인프라스운드 관측망 원형을 따라 설계하고 설치하여 북한 핵실험 및 백두산 화산 분화 모니터링을 목적으로 운영하고 있다.

이번 연구에서는 기상청에서 운영 중인 철원, 양구 인프라스운드 관측망과 새로 설치하여 운영을 시작한 교동도, 파주,

연천 관측망의 소개와 인프라스운드 관측망을 활용하여 인공지진 식별 및 폭발 사고 분석을 통해 기존 관측망의 문제점을 파악하고 신규 관측망의 관측 능력을 검토하였다.

2. 기상청 인프라스운드 관측망

기상청은 북한 핵실험 및 백두산 분화 감시를 목적으로 2011년 양구와 2013년 철원에 고정식 인프라스운드 관측망을 설치하고 지진파와 인프라스운드 자료를 상호 보완적으로 활용하여 분석을 수행하고 있다. 양구 및 철원의 인프라스운드 관측망은 각각 약 1 km 간격으로 5개의 지점에 3개의 인프라스운드 센서를 설치하여 총 15개의 센서로 구성되어 있다. 철원 관측망과 양구 관측망의 설치 환경은 산 정상 등의 높은 고도에 위치하고 있어 낙뢰로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있으며, 특히 양구 관측망은 고도 1,000~1,200 m 높이에 위치하고 있기 때문에 바람과 영향과 낙뢰에 의한 피해에 취약하고, 부지가 전반적으로 좁고 지형이 경사가 험한 지형에 위치하여 음원을 수집하는 다공질 호스가 경사진 사면을 따라 배치되어 곧게 배열되지 못하는 요소들이 관측 성능에 문제가 있는 것으로 파악되었다. 양구, 철원 관측망의 장비 노후화와 관측소 부지의 열악한 환경으로 인프라스운드 탐지율이 떨어지고, 관측 공백지역인 서해 및 경기 북부지역 교동도, 파주, 연천지역에 지진-인프라스운드 관측망을 추가로 설치하여 인프라스운드 탐지를 위한 관측 공백지역의 문제를 해결하고 탐지 범위를 확대하여 효과적인 감시 체계를 구축하였다. 또한 양구 관측망의 경우 높은 지대에 위치하여 낙뢰 피해에 취약하고 관측 성능에 문제가 있어 강원도 인제로 교체 및 이전을 추진하여 2020년 12월 설치환경 조성 및 설치를 완료하였다.

새로 설치한 교동도, 파주, 연천의 인프라스운드 관측망은 IMS 인프라스운드 관측망의 규격을 따라서 구성을 하였으며, 관측망을 구성하는 센서의 수, 센서 배열 간격 등은 설치 환경의 조건에 따라 차이가 있다. 관측 장비는 대기압에 의한 표준 부피 변위를 정밀기압계(microbarometer)로 0.01 μ bar (1 MPa)까지 측정할 수 있으며, 저주파수 대역에서 일정한 반응을 나타내야 한다.

IMS 인프라스운드 관측망의 배열은 다양한 형태를 가지고 있으며 기본적으로 중심 관측망을 기준으로 삼각형, 오각형 배열과 스파이럴 형태의 비정형 배열 등이 있으며 센서 사이의 간격은 짧게는 약 80 m 길게는 약 4,000 m 떨어져 배열되어 있다. Fig. 1은 철원, 양구, 교동도, 파주, 연천의 인프라스운드 관측망 인프라스운드 정밀 기압계의 배치 및 구성을 나타낸다. 철원과 양구 관측망은 15개의 센서로 구성되어 있으며, 새로 설치한 교동도, 파주, 연천 관측망은 각각 8개, 6개, 7개로 정밀기압계가 구성되어 있다. 기존 관측망과 신규 관측망의 배경 잡음 저감장치에는 차이가 있다. 철원과 양구 관측망의 정밀 기압계는 Fig. 2(a)와 같이

Fig. 1. Information of KMA Infrasound Networks

지표면에 방사상으로 배열된 여러 개의 다공질 호스와 연결되어 있으며, 다공질 호스는 바람의 영향으로 발생하는 주변의 대기압 배경 잡음을 감쇠시켜 음원의 신호 대 잡음비를 향상시킨다. 반면, 신규 관측망은 Fig. 2(b)와 같이 배경 잡음을 감쇠시키는 장치가 호스가 아닌 관으로 구성되어 있으며 장미 모양으로 구성되어 rosette 필터라고 불린다. 새로 설치한 교동도 관측망은 해안가를 북쪽을 바라보며 해안가를 따라 센서가 배치되어 있으며, 인접한 센서의 간격은 약 2,000 m이고, 최대 간격은 1번과 8번 센서 사이의

Fig. 2. Different Types of Wind Noise Reduction System

약 8,000 m이다. 교동도 관측망은 15~30 m의 고도에 설치환경을 고려하여 IMS 관측망보다 큰 간격으로 설치되었다. 파주 관측망은 센서의 간격이 약 500~1,000 m, 고도는 약 50~200 m, 연천 관측망은 약 500~3,500 m의 간격으로 50~150 m의 고도에 관측망을 구성하였다. 국내의 관측망 설치환경은 부지 사용권 확보의 어려움 등의 여러 가지 문제를 가지고 있기 때문에 다양한 부지 후보 중 사전 조사를 실시한 후 부지를 소유하고 있는 기관과의 협조를 통해 최적의 부지를 선정하였다.

3. 인프라사운드 분석 결과

기상청 통합지진업무시스템의 지진 목록 중 2020년 1월 한달간 관측된 인공지진 목록을 작성하여 해당 이벤트에 대한 인프라사운드 분석을 수행하였다(Table 1). 분석에 사용한 인프라사운드 관측망은 기존에 운영 중인 철원과 양구 2곳과 새로 설치한 신규 관측망인 교동도, 파주, 연천 3곳을 포함하여 총 5곳의 관측망 자료를 활용하여, 철원, 양구 관측망과 신규 관측망의 인공지진에서 발생한 인프라사운드 탐지율을 비교 분석 하였다. 인프라사운드 신호탐지는 배열식 관측망 신호처리 기법인 Progressive Multi-Channel Correlation (PMCC; Cansi, 1995) 방법을 사용하며, 관측망으로부터 진앙까지의 거리를 고려한 음파 도달 가능 시간대에서 음파신호를 탐지한다. 음파 도달 가능 시간대는 음파의 겹속도를 250~400 m/s로 가정하고 진앙의 위치에서 인프라사운드 관측망까지의 수평거리를 고려하여 계산한 시간대로 Eq. (1)과 같다.

$$t_{1,2} = \frac{d}{v_{1,2}} \quad (1)$$

Table 1. List of Artificial Earthquakes for Infrasound Analysis

No.	KST	Magnitude (M_L)	Latitude ($^{\circ}$ N)	Longitude ($^{\circ}$ E)
1	2020/01/04 11:59:52	2.1	38.88	126.06
2	2020/01/04 12:02:55	1.6	38.48	125.82
3	2020/01/04 12:10:00	2.1	38.84	126.10
4	2020/01/05 17:26:06	1.5	37.77	126.16
5	2020/01/07 18:03:53	1.6	38.69	127.12
6	2020/01/10 16:16:24	1.6	37.79	125.18
7	2020/01/11 11:59:37	1.7	38.79	126.17
8	2020/01/12 17:58:55	1.5	38.65	127.17
9	2020/01/13 13:00:23	2.7	39.46	126.09
10	2020/01/13 18:02:48	1.7	38.69	127.14
11	2020/01/15 12:07:07	1.8	38.22	125.76
12	2020/01/15 12:07:39	1.9	38.84	126.07
13	2020/01/17 12:00:06	1.7	38.86	126.09
14	2020/01/17 16:57:40	1.4	38.74	127.31
15	2020/01/24 11:59:25	2.1	38.86	126.09
16	2020/01/24 13:09:55	1.6	38.76	127.13
17	2020/01/24 18:07:50	1.6	38.73	127.14
18	2020/01/28 11:59:35	2.1	38.44	127.41
19	2020/01/28 12:01:37	1.8	38.50	126.65
20	2020/01/30 12:14:52	2.7	39.40	126.08
21	2020/01/31 11:59:11	1.9	38.96	126.03
22	2020/01/31 12:00:09	1.9	38.66	127.97

Eq. (1)에서 d 는 진앙거리, v_1 , v_2 는 음파의 겹보기 속도로 각각 400, 250 m/s이며, t_1 과 t_2 는 각각 v_1 과 v_2 에 의해 계산된 음파가 도달하는데 걸린 시간이다. 이를 통해 이벤트 발생 후 $t_1 \sim t_2$ 사이의 시간차를 음파 도달 가능 시간대로 정하고 인프라스운드 신호를 탐지하고 있다. PMCC 분석결과 계산된 음원의 방향(방위각)과 겹보기속도는 지진파와 음파신호를 동일한 인공지진에서 발생한 것으로 결정하는 보조적인 수단으로 활용하며, 계산된 방위각이 이론적 방위각과의 차이가 $\pm 10^{\circ}$ 이내일 때 두 신호를 하나의 인공지진에서 발생한 것으로 결정하여 인공지진으로 식별할 수 있다 (Che and Jeon, 2006).

통합지진업무시스템의 지진 목록 중 2020년 1월에 북한 지역에서 발생한 인공지진은 총 22회로 5개의 관측망 중 한 곳 이상 인프라스운드를 탐지한 횟수는 총 16회로 탐지율은 72.7%로 나타났다. 인프라스운드 탐지율은 “(인프라스운드 탐지 이벤트 수)/(전체 이벤트 수) $\times$ 100 (%)”로 계산하였다. 각 관측망에서의 탐지율은 분석에 활용한 전체 인공지진 이벤트 22회 중 각 관측망에서 몇 회의 인프라스운드 신호를 탐지 하였는지를 의미한다. 인프라스운드를 탐지한 인공지진 이벤트는 Fig. 3에서 확인 할 수 있다. Fig. 3에서 파란색 삼각형은 기상청에서 운영중인 인프라스운드 관측망을 나

Fig. 3. An Artificial Events Occurred in North Korea on January 2020

타내고, 빨간색 원은 인프라스운드를 탐지한 인공지진 이벤트, 흰색 원은 미탐지한 이벤트를 나타낸다. 각 관측망 별 이벤트 탐지횟수를 살펴보면 철원, 양구, 교동도, 파주, 연천

Table 2. Result of Infrasound Analysis on January 2020

KST	Magnitude	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Azimuth (°)
2020/01/04 11:59:52	2.1	38.88	126.06	GD: 351.72, PY: 330.65, YC: 316.92
2020/01/04 12:02:55	1.6	38.48	125.82	GD: 331.45, PY: 307.88, YC: 290.39
2020/01/04 12:10:00	2.1	38.84	126.10	GD: 351.12, PY: 330.46, YC: 316.25
2020/01/05 17:26:06	1.5	37.77	126.16	GD: 253.77, PY: 261.79, YC: 239.14
2020/01/10 16:16:24	1.6	37.79	125.18	GD: 271.39, PY: 267.78, YC: 257.04
2020/01/11 11:59:37	1.7	38.79	126.17	GD: 353.39, PY: 331.66, YC: 317.23
2020/01/13 13:00:23	2.7	39.46	126.09	GD: 356.49, PY: 342.97, YC: 334.89
2020/01/15 12:07:07	1.8	38.22	125.76	GD: 316.96, PY: 294.06, YC: 275.01
2020/01/15 12:07:39	1.9	38.84	126.07	GD: 350.54, PY: 330.84, YC: 317.41
2020/01/17 12:00:06	1.7	38.86	126.09	YC: 317.71
2020/01/17 16:57:40	1.4	38.74	127.31	YG: 305.75
2020/01/24 11:59:25	2.1	38.86	126.09	CW: 292.85, PY: 330.51, YC: 316.60
2020/01/28 11:59:35	2.1	38.44	127.41	CW: 314.55, YC: 43.57
2020/01/30 12:14:52	2.7	39.40	126.08	CW: 307.90, GD: 351.87, PY: 339.76, YC: 331.64
2020/01/31 11:59:11	1.9	38.96	126.03	CW: 296.90, YG: 295.91, GD: 349.64 PY: 333.86, YC: 317.90
2020/01/31 12:00:09	1.9	38.66	127.97	CW: 36.62, YG: 348.80, GD: 59.17 PY: 50.09, YC: 51.75

Fig. 4. Example of Infrasound Analysis Results

관측망에서 각각 5회, 3회, 12회, 13회, 15회였으며 탐지율은 22.7%, 13.6%, 54.5%, 59.1%, 68.2%였다.

기준에 운영중인 철원과 양구 관측망에서는 총 22회의 인공지진 이벤트 중 5회와 3회의 인프라사운드 신호를 탐지하여 저조한 탐지율을 보였으나, 신규 관측망의 경우 연천에서 최다 탐지인 15회를 탐지하였고, 파주와 교동도에서 각각 13회, 12회의 인프라사운드 신호를 탐지하여 50% 이상의 탐지율을 보였다. Table 2에 인프라사운드를 탐지한 인공지

Fig. 5. Example of Estimating the Artificial Earthquake Epicenter

진의 발생시간, 규모, 위치정보와 PMCC 분석을 통해 계산된 방위각 정보를 나타냈다. Fig. 4는 2020년 1월 31일 발생한 2건의 인공지진 이벤트 중 연천 관측망의 PMCC 분석 결과로 Fig. 4(a)에서 탐지된 인프라사운드 신호를 확인 할 수 있으며, Fig. 4(b)에서 계산된 방위각 정보 및 음원의 겉보기 속도 등을 확인 할 수 있다. Fig. 5는 2020년 1월 31일 11시 59분 11초 북한 평양 동남동쪽 25 km 지역(빨간색 별, 검은색 선)과 12시 00분 09초에 북한 회양 동쪽 32 km 지역(노란색

별, 보라색 선)에서 발생한 인공지진 이벤트에 대하여 각 관측망에서 PMCC 분석을 수행하여 계산된 방위각을 관측망에서 방위각 방향으로 선을 연장하여 지진파 분석으로 계산된 진앙 위치와 비교하여 이벤트 위치를 추정할 결과이다. 방위각을 통해 추정된 결과는 진앙 위치를 잘 지시하고 있으며, 두 이벤트는 5개의 관측망에서 인프라사운드를 모두 탐지하였다.

4. 결론 및 토의

이번 연구에서는 기상청에서 북한 핵실험 및 백두산 화산 감시를 목적으로 운영 중인 인프라사운드 관측망의 소개와 기존에 운영 중인 관측망의 관측 공백 지역을 보완하기 위해 서해 및 경기북부 지역에 추가로 설치한 3개소의 신규 인프라사운드 관측망의 자료를 활용하여 인공지진 사례 분석 결과를 바탕으로 관측능력을 검토하였다. 이를 통해 얻어진 결과는 아래와 같다.

- (1) 양구 인프라사운드 관측망은 2011년 북한 핵실험 및 백두산 모니터링을 목적으로 운영을 시작하였으며, 관측망의 노후화와 열악한 설치 환경으로 낙뢰와 바람의 영향을 크게 받는 등 인프라사운드 탐지율이 낮아 관측성능에 문제가 있어 2021년 인제로 이전하였으며, 2012년 운영을 시작한 철원 관측망도 이전을 위한 적정 부지 조사를 실시하고 보다 개선된 환경으로 이전 설치를 계획하고 있다.
- (2) 기존 인프라사운드 관측망 철원과 양구에서는 2020년 1월 북한 지역에서 발생한 인공지진 22회 중 각각 5회, 3회 인프라사운드를 탐지하여 탐지율이 22.7%, 13.6%로 매우 낮은 탐지율을 보인다. 반면에, 신규 인프라사운드 관측망은 교동도, 파주, 연천에서 각각 12회, 13회, 15회 탐지하여 탐지율은 54.5%, 59.1%, 68.2%로 기존 관측망에 비해 월등히 높은 탐지율을 보여준다. 기존 관측망으로만 분석을 수행하였을 경우 22회의 인공지진 중 인프라사운드를 6회 탐지 하였지만, 신규 인프라사운드 관측망을 설치하여 운영함에 따라 총 16회의 인공지진을 탐지하여 10회 더 탐지할 수 있게 되었다. 신규 관측망의 배경 잡음 저감장치는 기존 관측망의 다공질 호수에서 더 발전된 방식인 관 형태의 rosette 필터로 구성되어 신호 대 잡음비가 우수하며, 안정적인 고도에 설치되어 바람과 낙뢰의 영향에 취약했던 기존 관측망 보다 우수한 탐지율을 보이는 것으로 판단된다. 이를 통해 신규 관측망의 증설로 인프라사운드의 탐지율이 매우 높아졌고 인공 지진 탐지 및 식별에 보조적인 수단과 백두산 화산 분화 감시 등 다양한 인프라사운드 음원 탐지에 효과적인 활용이 가능할 것으로 기대된다.
- (3) 현재 기상청에서는 북한에서 발생하는 인공지진을

식별하기 위한 보조적인 수단으로 인프라사운드 분석을 주로 수행하고 있으며, 본문에 언급하지는 않았지만 원거리 지역에서 발생한 필리핀 Taal 화산 분화, 한반도에서 발생한 폭발 사고, 충청도 상공 운석에 의한 인프라사운드 신호를 분석하며 다양한 음원에 대한 연구 또한 수행하고 있다. 최종적으로 음원의 위치 결정 정확도를 향상시킬 수 있도록 분석기술의 추가적인 기술 개발과 적용과 더불어 개발된 대기전파 모델을 적용하여 분석 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 「지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발 과제(NTIS과제번호: 1365003423)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Bedard, A.J., and Georges, T.M. (2000). Atmospheric infrasound. *Physics Today*, Vol. 53, No. 3, pp. 32-37.
- Cansi, Y. (1995). An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 22, pp. 1021-1024.
- Che, I.-Y., and Jeon, J.-S. (2006). Geophysical study through infrasound observation. *Economic and Environmental Geology*, Vol. 39, No. 4, pp. 495-505 (in Korean).
- Che, I.Y., Park, J., Kim, I., Kim, T.S., and Lee, H.I. (2014). Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophysical Journal International*, Vol. 198, No. 1, pp. 495-503.
- Clemins, P.J., and Johnson, M.T. (2003). Application of speech recognition to African elephant (*Loxodonta africana*) vocalizations. *Proc. of IEEE ICASSP 2003*, pp. 484-487.
- Donn, W.L., and Rind, D. (1971). Natural infrasound as an atmospheric probe, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol. 26, pp. 111-133.
- Elgabry, M.N., Korrat, I.M., Hussein, H.M., and Hamama, I.H. (2017). Infrasound detection of meteors. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol. 6, No. 1, pp. 68-80.
- Fee, D., and Matoza, R.S. (2013). An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 249, pp. 123-139.
- Kumagai, H., Yepes, H., Vaca, M., Caceres, V., Nagai, T.,

- Yokoe, K., et al. (2007). Enhancing volcano-monitoring capabilities in ecuador. *Eos Transactions American Geophysical Union*, Vol. 88, No. 23, pp. 245-252.
- Kundu, B., Senapati, B., Matsushita, A., and Heki, K. (2021). *Atmospheric wave energy of the 2020 August 4 explosion in Beirut, Lebanon, from ionospheric disturbances*. Scientific Reports, 11, Article No. 2793.
- Le Pichon, A., Herry, P., Mialle, P., Vergoz, J., and Brachet, N. (2005). Infrasound associated with 2004-2005 large Sumatra earthquakes and tsunami. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No. 19, pp. 1-5.
- Marchetti, E., Ripepe, M., Campus, P., Le Pichon, A., Vergoz, J., Lacanna, G., et al. (2019). *Long range infrasound monitoring of Etna volcano*. Scientific Reports volume 9, Article No. 18015.
- Park, J., Che, I.Y., Stump, B.W., Hayward, C., Dannemann, F., Jeong, S.J., et al. (2018). Characteristics of infrasound signals from North Korean underground nuclear explosions on 2016 January and September 9. *Geophysical Journal International*, Vol. 214, No. 3, pp. 1865-1885.
- Rodgers, A.J., and Walter, W.R. (2002). Seismic Discrimination of the May 11, 1998 Indian Nuclear Test with Short-period Regional Data from Station NIL (Nilore, Pakistan). *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 159, pp. 679-700.
- Walker, K.T., Le Pichon, A., Kim, T.S., De GroodOHedlin, C., and Garces, M. (2013). An analysis of ground shaking and transmission loss from infrasound generated by the 2011 Tohoku earthquake: TOHOKU INFRASOUND. *J. geophysical Research Atmospheres*, Vol. 118, No. 23, pp. 12,831-12,851.
- Yoon, W.J., Jeon, Y.S., Lee, D.K., Lee, J.H., Yang, J.H., and Park, K.S. (2016). A study on ballistic missile sound localization using infrasound. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 35, No. 6, pp. 411-418.

Received	June 30, 2021
Revised	June 30, 2021
Accepted	July 12, 2021