

인프라사운드 관측을 통한 지구물리학적 연구

제일영* · 전정수

한국지질자원연구원 지진연구센터

Geophysical Study Through Infrasound Observation

Il-Young Che* and Jeong-Soo Jeon

Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Atmospheric infrasound is defined as low frequency inaudible sound waves generated from natural phenomena and human activities. One property of long-distance travelling of infrasound makes it possible to detect the wave propagated from remote sound sources and to understand many geophysical phenomena generating it. Recently, advanced global infrasound sensor arrays are being deployed to monitor the clandestine nuclear test and to study geophysical phenomena in the world. In Korea, five seismo-acoustic arrays consisting of co-located seismometer and micro-barometer have been operated to discriminate the artificial explosions from the natural earthquakes in and around the Korean Peninsula. In addition to the discrimination purpose, these arrays also record distinct infrasonic signals from natural phenomena on global scale such as large earthquake, bolide event, volcanic explosion, typhoon, and so on. As a new frontier in monitoring the earth, infrasound is being applied to understand various phenomena in and above the earth's surface.

Key words : infrasound, seismo-acoustic array, artificial explosion, earthquake

인간의 가청주파수 보다 낮은 저주파수대역의 음파로 정의되는 인프라사운드는 대기압력 변화를 수반하는 다양한 자연현상이나 인간 활동에 의해 지속적으로 발생하여 대기 중으로 전파하고 있다. 인프라사운드의 장거리 전파특성은 음원에 대한 원거리 관측과 분석을 가능하게 하여 자연현상에 대한 지구물리학적 이해와 대규모 인위적 음원에 대한 탐지기술로 응용되고 있다. 이에 최근 비밀 핵실험 감시와 순수한 지구물리학적 연구를 목적으로 진보된 관측망이 전 세계적으로 구축되는 등 인프라사운드에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 국내에는 지진파와 인프라사운드를 동시에 관측할 수 있는 지진-음파 관측망이 운영되고 있으며, 이들 자료의 실시간 관측과 분석으로 한반도 및 주변지역에서 발생하는 지진 중 상당수의 인공지진을 명확히 식별하고 있다. 또한 인공지진탐지 이외에도 대규모 자연지진, 운석폭발, 화산폭발, 태풍 등의 자연현상에서 발생한 인프라사운드를 국내 관측망에서 관측하여 분석하고 있다. 지구물리학적 관점에서 인프라사운드 관측은 상부지각과 대기권 등 지구표면에서 일어나고 있는 대규모 자연 혹은 인위적 현상을 관측할 수 있는 새로운 지구관측기술의 하나로 이용되고 있다.

주요어 : 인프라사운드, 지진-음파 관측망, 인공지진, 자연지진

1. 서 론

자연 혹은 인위적 현상으로부터 발생하는 대기 중 압력파동은 광범위한 주파수 범위로 진동하게 된다. 일반적으로 대규모 폭발에서 형성되는 비선형 충격파를 제외한 압력파동은 음향학적 음파로의 접근이 가능하다

(Johnson, 2000). 음파는 인간의 가청주파수 대역을 중심으로 초음파(>20 kHz)와 저주파수 음파(infrasound, <20 Hz)로 나뉜다. 일반적으로 인프라사운드는 음향스펙트럼에서 매우 낮은 주파수 대역에 해당하며 대기 매질을 전파하는 음파로 정의된다.

지구물리학적 관점에서 인프라사운드를 발생시키는

*Corresponding author: che10@kigam.re.kr

음원(sound source)은 크게 자연현상에서 발생하는 자연음원과 인간 활동으로부터 수반된 인공음원으로 구분된다. 자연현상으로는 대기권 운석폭발, 대규모 지진, 오로라, 화산폭발, 해양 폭풍, 산·눈사태 등이 있으며, 인공음원으로는 대기권 및 지하핵실험, 대규모 지표발파, 초음속 비행체 이동, 대형 폭발사고 등이 있다. 이외 코끼리 등 일부 동물들이 멀리 떨어져 있는 동료들과 의사소통 수단으로 인프라스운드를 이용하는 것으로 알려져 있다.

다양한 음원으로부터 발생한 인프라스운드는 대기권에 형성된 음파속도구조에 의해 전파하게 된다. 대기권 음파속도구조는 고도별 온도와 바람성분에 의해 결정되며, 인프라스운드는 속도구조에 의해 굴절, 반사, 회절, 채널 내 전파 등 다양한 형태로 전파하게 된다. 지진학에서 전파경로가 다른 지진파 위상이 존재하듯이, 음원에서 발생한 에너지는 대기 중 전파경로를 달리 하는 다양한 형태의 인프라스운드 위상으로 관측망에 도달한다. 음원에서 발생한 고주파수 에너지는 전파거리가 증가할수록 급격히 감쇠하나, 저주파수 대역의 에너지는 작은 감쇠효과로 수백 내지 수천 km의 장거리 전파가 가능하다(Donn and Rind, 1971). 예를 들어 1,000 Hz의 음파가 7 km 전파했을 때 90%의 에너지가 대기 중으로 흡수되나, 1 Hz의 경우 3,000 km까지 전파가 가능하고, 0.01 Hz는 지구 한바퀴 이상의 전파가 가능하다(Bedard and Georges, 2000). 따라서 인프라스운드는 원거리에서 관측이 가능하며 원거리 자연현상에 대한 이해와 인위적 폭발에 대한 탐지와 분석에 이용될 수 있다.

인프라스운드와 관련된 연구는 음향학적 특성연구 이외에도 인프라스운드를 발생시키는 대상을 기준으로 수행되고 있다. 화산폭발과 관련된 연구로는 Stromboli (Vergnolle *et al.*, 1996), Unzen (Yamasato, 1998), Sakurajima (Garcés *et al.*, 1999a) 등 활화산의 화산폭발 과정에서 발생하는 저주파수의 음향 에너지로부터 화산가스 방출특성과 모니터링에 대한 연구가 수행되었다 (Johnson, 2000). 또한 대기권 운석폭발을 관측하고 분석하여 운석의 궤적추적과 폭발규모 계산 등의 운석폭발현상을 규명하는 연구가 수행되고 있다(Evers and Haak, 2001). 자연현상 중의 하나인 대규모 천발지진의 경우, 지반운동에 의한 미세한 압력변화로 진앙지역에서 음파가 발생하며(Donn and Posmentier, 1964), 진앙에서 떨어진 지역에서는 표면파에 의한 지표 변위로 인프라스운드를 발생시키게 된다(Mutschlecner and Whitaker, 2005). 이외에도 최근에는 지진해일(Le

Pichon *et al.*, 2005), 오로라 현상과 관련된 인프라스운드 연구가 수행되고 있다(Wilson, 2005).

대기권 및 지하핵실험은 인프라스운드의 전 지구적 전파와 관측을 가능케 하는 대표적인 인공음원의 하나이다. 인프라스운드 관측기술은 과거 1940~1950년대 대기권 핵실험 감시에 중요한 방법으로 인식되어 전 세계적인 관측망이 구축되었으나, 1963년 대기권 및 수중 핵실험 금지조약에 의해 대기권 핵실험이 금지되자 관측소 운영이 거의 중단되었다. 그러나 1996년 유엔에서 핵무기와 관련된 일체의 실험을 금지시키기 위해 ‘포괄적 핵실험 금지조약’(CTBT, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty)을 제의함으로써, 전 지구적 핵실험 감시업무를 담당하는 IMS(International Monitoring System)에서는 지진파, 수중음파, 핵종감시와 함께 인프라스운드를 4대 주요 관측기술로 채택하여 핵실험 감시에 이용하고 있다. 현재 IMS에서는 전 세계에 60개 인프라스운드 관측망 구축을 계획하고 활발히 수행 중에 있으며, 핵실험과 관련된 많은 연구가 수행되고 있다(Donn *et al.*, 1963; Gossard and Hooke, 1975; Haak and de Wilde, 1996). 최근에는 핵실험 뿐만 아니라 대규모 지표발파에서 발생하는 저주파수 음파를 관측하고 분석하는 연구가 수행되었다(Che *et al.*, 2002; Hagerty *et al.*, 2002). 또한 대규모 폭발사고와 초음속 비행체 이동 중에 발생하는 저주파수 음파 역시 인공음원의 하나로 연구되고 있다(Waldemark, 1997; Koketsu *et al.*, 2002).

인프라스운드 음원에 대한 연구와 함께 대기 중 음파의 전파특성연구가 병행되고 있다. 음파의 전파모델링은 대기권 상층부까지 음파속도구조를 설정하고 지진학에서 사용되는 파선추적방법(ray-tracing)을 적용하여 음파의 전 지구적 전파경로를 계산하고 있다(Garcés *et al.*, 1998, 1999b; Gibson *et al.*, 1999; Hagerty *et al.*, 2002). 또한 신호 대 잡음 비를 높이기 위한 저주파수 음파 센서 및 대기 흡입장치(noise reducing system)의 개발과 효과적인 관측망 배열 등 관측기술 관련 연구도 활발히 진행되고 있다.

국내의 경우 한국지질자원연구원은 미국 남감리대학(Southern Methodist University)과 공동으로 국내에 5개 지진-음파 관측망(seismo-acoustic array)을 설치하여 지진파와 동시에 인프라스운드를 관측하고 있다(전명순 등, 1999; Stump *et al.*, 2004). IMS 인프라스운드 관측망 원형(prototype)을 따른 국내 관측망은 한반도 및 주변지역의 인공지진 모니터링을 목적으로 운영되고 있다. 본 연구에서는 국내에서 운영되고 있는

인프라사운드 관측망 소개와 인프라사운드를 이용한 인공지진 식별기술 현황 및 자연현상에 기인한 인프라사운드 신호관측과 분석을 다루려 한다.

2. 국내 인프라사운드 관측망과 지진파-음파 분석

한국지질자원연구원과 미국 남감리대학은 한반도에서 인공지진 탐지와 자연현상에 기인한 인프라사운드 관측을 목적으로 1999년 국내 최초로 강원도 철원지역에 지진-음파 관측망을 설치하였다. 그 후 인프라사운드 관측범위의 확대와 독립적인 음원 위치결정 기술개발 등을 목적으로 2003년과 2004년에 강원도 간성과 백령도지역에 지진-음파 관측망을 추가로 설치하였다. 2005년에는 경기도 김포지역에 소형 인프라사운드 관측망을 추가하였으며, 대전에 위치한 연구원 내에 실험용 인프라사운드 관측망을 구축한 상태이다.

IMS 인프라사운드 관측망 원형을 따르고 있는 철원, 간성관측망은 약 1 km 크기의 삼각형모양이며, 관측망 내에 4개 단주기 수직성분 지진계가 시추공 바닥에 위치하고 있다. 지진계가 설치된 지표에는 정밀음압계(micro-barometer)가 설치되어 있으며, 약 100 meter의 거리를 두고 보조 정밀음압계가 설치되어 있다. 또한 3개 정밀음압계로 구성된 약 60~70 meter 크기의 소형 관측망이 추가되어 각 관측망은 총 11개의 정밀음압계로 구성되어 있다(Fig. 1). 백령도관측망은 5개 지진관측소와 13개 정밀음압계로 구성되어 있으며, 관측망 크기는 철원, 간성관측망과 유사하다. 김포관측망과 연구원관측망은 약 200 meter 크기의 소형 인프라

사운드 관측망에 해당하며 각각 6개와 4개의 정밀음압계로 구성되어 있다. 정밀음압계(Chaparral Model 2)는 센서 내 표준부피의 상대적인 압력변위를 측정하는 상대 음압센서에 해당하며 0.1~200 Hz 주파수대역에서 일정한 반응을 갖도록 설계되었다. 정밀음압계는 지표면에 설치된 다공성 호스배열과 연결되어 있다. 다공성 호스는 관측소 주변 바람에 의한 잡음을 제거하기 위한 목적이다. 현재 8 meter 길이의 10개 다공성 호스를 방사상으로 배열하고 정밀음압계와 연결하여 배경잡음을 최소화 하고 있다. 모든 관측망의 지진과 인프라사운드 자료는 초당 40샘플로 획득되고 있으며 전용회선을 통한 실시간 자료획득이 이루어지고 있다.

인프라사운드 신호분석에는 상당부분 지진자료 분석 방법과 응용 프로그램이 이용되고 있으며, 기본적으로 실시간 연속자료에 대한 신호탐지와 특정 음파신호에 대해 주파수-과수 분석(frequency wavenumber analysis)과 같은 관측망 신호처리(array processing)로 음원의 발생방향(후방방위각)과 관측망속도(겉보기 속도) 등을 계산하고 있다. 대기로부터 관측망에 입사하는 음파를 평면파로 가정할 때 관측망 내 센서에 기록되는 음파신호 간에는 관측소간의 거리에 의해 시간차(time delay)가 발생한다. 따라서 관측소간에 발생하는 시간차와 관측소간의 상대적 거리로부터 최소자승법에 의해 음파의 발생방향과 관측망속도를 계산할 수 있다. 최근에는 지진학에서 개발된 PMCC(Progressive Multi-Channel Correlation) 방법을(Cansi, 1995) 인프라사운드 자료에 적용하여 음파신호의 특성을 분석하는데 이용하고 있다.

한국지질자원연구원은 지진-음파 관측망 자료를 이용한 자연지진과 인공지진의 식별을 위해 지진파-음파

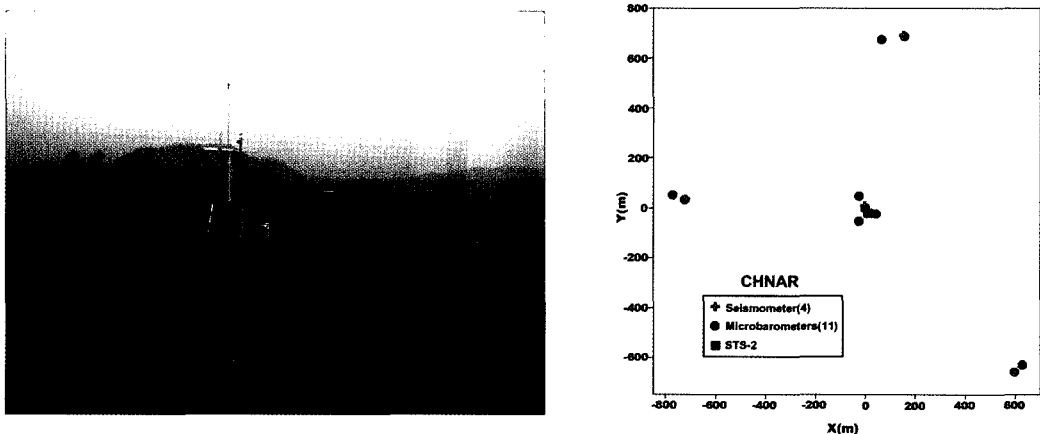


Fig. 1. Site view and array configuration of Chulwon seismo-acoustic array (CHNAR).

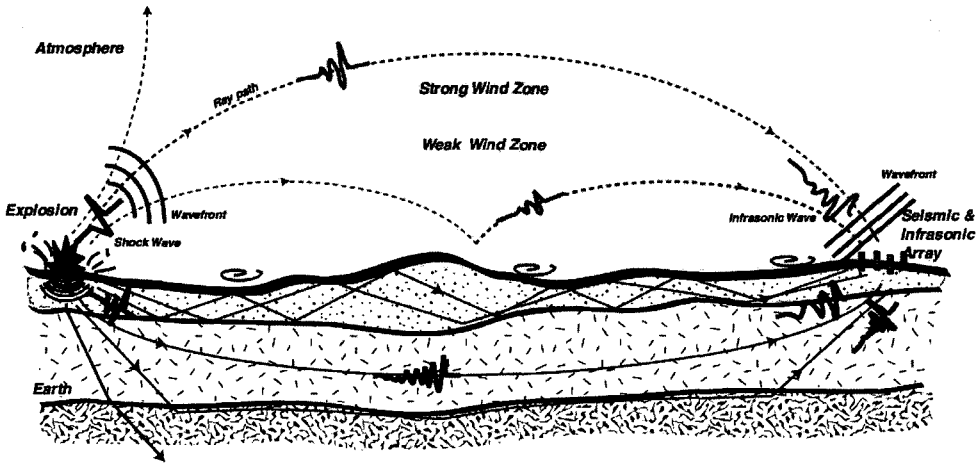


Fig. 2. Surface explosion and conceptualization of seismo-acoustic analysis.

분석(seismo-acoustic analysis)을 정의하고 관측망 자료에 적용하여 인공지진을 식별하고 있다(Che *et al.*, 2002). Fig. 2는 인공지진의 하나인 지표발파로부터 발생한 지진파와 인프라스운드의 전파과정을 도시한 것이다. 일반적으로 지하 수 km 이하 깊이에서 발생하는 자연지진은 대부분의 에너지가 지진파로 방출되는데 반해, 지표 혹은 지하 수백 meter 이내에서 발생하는 인공지진은 지진파뿐만 아니라 발파에너지 일부가 대기 중으로 음파를 형성하게 된다. 발파과정에서 형성되는 폭풍압은 고주파수대역의 진동과 구조물에 피해를 주는 저주파수대의 진동을 모두 포함하고 있으며, 이중 인프라스운드 대역의 음파는 장거리 전파가 가능하기 때문에 원거리에서 관측이 가능하다. 지진파-음파 자료를 이용한 인공지진 식별은 기본적으로 지표발파로부터 발생하는 지진파와 인프라스운드 모두를 관측하고 분석함으로써 이루어진다. 어떠한 지진파의 지진원이 인공지진으로 식별되기 위해서는 지진파의 진앙과 음파신호의 발생방향이 일치해야 한다. 또한 지진파와 음파신호 간의 도달시간 차이가 진앙거리를 고려한 이론적인 도달시간과 일치하는 경우 지진파와 음파신호를 하나의 인공지진에서 발생한 것으로 분석될 수 있다. 지진파-음파 분석방법은 먼저 국내 지진관측소의 지진자료로부터 결정된 모든 지진의 진앙과 지진요소를 이용한다. 음파자료에 대해서는 0.5~5.0 Hz 대역통과 필터링 후 인프라스운드 관측망으로부터 진앙까지의 수평거리를 고려한 음파 도달가능시간대에서 특이 음파신호를 탐지한다. 도달가능시간대는 음파의 걸보기 속도를 약 250~400 m/s로 가정하고 진앙거리로부터

계산한 시간대이다. 탐지된 음파신호에 대해서 관측망 자료처리로 음파신호의 관측망속도와 후방방위각을 계산할 수 있다. 후방방위각은 지진파와 음파신호를 동일한 지표발파에서 발생한 것으로 결정하는 중요한 인자로, 지진파와 음파신호의 후방방위각 차이가 $\pm 10^\circ$ 이내일 때 두 신호가 하나의 지표발파에서 발생한 것으로 결정하여 인공지진으로 식별할 수 있다. 지진파의 진앙과 음파신호의 후방방위각 차이는 지진자료를 이용한 진앙계산 과정이나 음파자료 분석 시 발생하는 오차, 그리고 음파의 전파방향에 직각으로 부는 바람에 의한 편향을 고려한 것이다. 이와 같은 분석으로 식별된 지진을 “지진파-음파 이벤트” 혹은 “인공지진 이벤트”로 정의하고 있다.

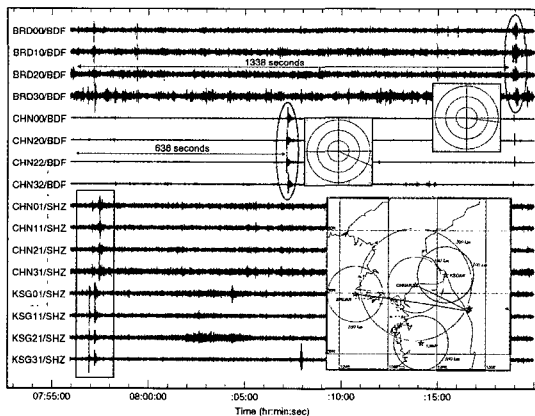
3. 인프라스운드 관측을 통한 인공지진 식별

한반도에서 발생하는 주요 지진 관측과 연구는 기상청, 한국지질자원연구원, 전력연구원 등에서 운영하는 지진관측망에 의해 이루어지고 있다. 이들 지진관측망 자료는 한반도에서 발생하는 중규모 이상의 지진에 대한 비교적 정확한 분석을 가능케 한다. 최근 국내 지진관측소의 증가와 계측장비의 성능 향상으로 중규모 지진 이외에도 규모가 작은 미소지진의 관측과 분석이 가능하게 되었다. 기상청 자료에 의하면 국내에서 연간 약 40회 정도의 주요 지진이 발생하고 있는 것으로 보고되고 있으나, 실제 미소지진을 포함한 전체 지진은 연간 3,000회 이상으로 한반도지역의 지진 데이터 베이스는 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 이들 지

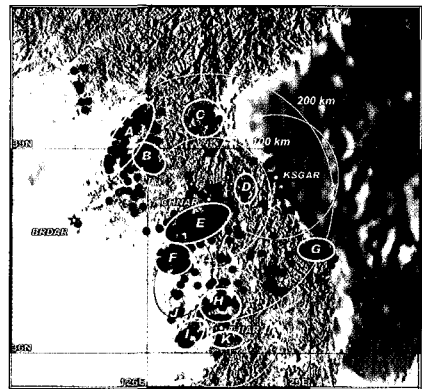
진은 자연지진이외에도 광산발파, 대규모 토목공사, 군사 활동 등 인위적인 인공지진을 상당수 포함하고 있다. 인공지진은 정확한 자연지진 데이터베이스에 바탕을 둔 한반도 지진위험도 작성이나 지진재해 및 자연지진 연구에 중대한 오염원으로 작용하므로 이들에 대한 식별이 우선적으로 요구된다. 전 세계적으로 지진파형을 이용한 자연지진과 인공지진 식별연구가 다수 수행되고 있으나 아직 명확한 방법이 제시되지 못하고 있다(Bennett and Murphy, 1986; Wüster, 1993; Carr and Garbin, 1998; Hedlin, 1998; Koch, 2002). 또한 제시된 식별기술이 연구지역에 매우 의존하는 결과를 보이고 있어(Rodgers and Walter, 2002), 한반도 지역에 적합한 자연지진과 인공지진 식별기술이 독립적으로 요구된다. 국내 지진의 대부분을 차지하는 미소지진은 신호 대 잡음 비가 작고, 천부지각구조에 대한 정보가 미비하고, 양질의 관측 수가 적어 다양한 지진파형 식별기술을 적용하는데 어려움이 있으며, 식별결과는 어느 정도 불확실성을 포함한다. 그러나 인프라사운드는 인공지진의 일부 에너지가 대기 매질을 통해 독립적으로 전파한 경우에 해당하므로, 인공지진에서 발생한 인프라사운드 관측만으로도 원거리 인공지진을 가장 명확히 식별할 수 있다. 이에 한국지질자원연구원은 앞에서 정의한 지진파-음파 분석으로 한반도에서 발생하는 인공지진을 지속적으로 식별하고 있다(제일영 등, 2002, 2003, 2004, 2005).

Fig. 3(a)은 지진파-음파 분석의 한 예이다. 사각형 내에 표시된 신호는 철원, 간성 관측망에서 기록한 지진파 신호이고, 시간 차이를 두고 타원으로 표시된 신호

호는 철원, 백령도 관측망에서 기록한 음파신호에 해당한다. 지진파 신호로 분석한 진앙(별모양)은 강원도 동해안에 위치하며, 지진파 발생시간으로부터 약 10분과 22분후에 철원, 백령도관측망에 신호 대 잡음 비가 높은 특이 음파신호가 도달하고 있다. 두 관측망에서 기록한 음파신호의 발생방향을 결정하기 위하여 주파수-과수 분석을 수행하고 그 결과를 각 신호 옆에 도시하였다. 음파신호의 발생방향은 지도에 표시된 것처럼 지진파 진앙을 향하고 있으며, 후방방위각 교차점은 진앙과 거의 일치하고 있다. 또한 진앙으로부터 관측망간의 수평거리를 고려할 때 관측망에 도달한 음파신호는 음파 도달가능시간대 내에 위치하고 있다. 결론적으로 다른 매질을 통해 관측망에 도달한 지진파와 음파신호는 하나의 지표발파로부터 발생한 것을 의미하며, 인프라사운드를 관측함으로써 지진파의 지진원을 자연지진이 아닌 인공지진으로 식별할 수 있다. 이 지역은 이미 대규모 지표발파를 수행하는 석회석 노천광산지역으로 확인되었다. 지진파-음파 분석은 지진파의 진앙과 음파신호의 후방방위각을 비교하고 음파신호가 수평거리를 고려한 도달가능시간대에 위치하는가를 판단하여 인공지진을 식별하고 있다. 만약 음파관측망과 지진파 진앙을 잇는 선상에서 적당한 시간대에 인공지진과 관계없는 음파가 발생한다면 지진파의 지진원을 인공지진으로 오인할 수도 있다. 그러나 Fig. 3(a)의 예처럼 2개 이상의 다중 음파관측망에서 음파신호를 관측하고 교차점으로 음원의 위치를 결정함으로써 그와 같은 분석오류를 피할 수 있다. 또한 다년간의 분석결과, 예시된 지역에서 유사한 형태의 지진파와 음



(a)



(b)

Fig. 3. (a) An example of seismo-acoustic event occurred at open-pit limestone mine (details are in text). (b) Epicentral distribution of seismo-acoustic events from 1999 to 2005.

파가 상당수 관측되고 있어, 지진파와 그와 관계없는 음파간의 우연한 일치 제거할 수 있다.

Fig. 3(b)은 1999년부터 2005년까지 지진파-음파 분석으로 구한 한반도지역의 인공지진 진앙분포도이다. 인공지진은 해마다 발생하는 전체 지진의 약 10%를 차지하고 있으며, 특정지역에 집중적으로 분포하고 있다. 일부지역에 대한 현장조사에서 지표발파를 수행하는 채석장, 광산, 토목공사장 등이 확인되었다. 지진파-음파 분석연구는 인공지진의 시간적, 공간적 모니터링도 가능케 하고 있다. 예를 들어 Fig. 3(b)에서 북동-남서 방향으로 선형의 진앙분포를 보이는 북한 A 지역의 경우 단층대를 따라 분포하는 자연지진 다발지역으로 해석될 수 있으나, 지진파-음파 분석결과 인공지진 발생지역으로 분석되었다. 해당지역의 인공지진은 대부분 2000년부터 2001년 사이에 발생한 것으로 분석되었으며, 언론에 보도된 개천-태성호간 수로공사와 관련된 지표발파로 해석된다. 남한지역의 인공지진 발생 수가 북한지역에 비해 많으나, 인공지진의 규모에 있어서는 북한지역의 인공지진이 남한지역에 비해 큰 것으로 나타났다. 이는 직접적인 발파규모에 의해 차이가 발생할 수 있으나, 국내 산업현장에서 생산성 증대와 발파장 주변 지진동 및 소음 피해를 줄이기 위해 대부분이 자연발파를 수행하고 있어 남한지역의 인공지진 규모가 상대적으로 작은 것으로 해석된다.

4. 자연음원 관측과 분석

국내 인프라사운드 관측망은 원거리 인공지진 탐지

와 분석을 주된 목적으로 운영되고 있으나, 인공지진 이외에도 이들 관측망은 한반도 및 주변지역에서 발생하는 대기권 운석폭발, 대규모 지진, 태풍, 화산폭발 등의 자연현상과 관련된 인프라사운드를 관측하고 있다. 특히 일본에서 발생하는 다수의 대규모 지진은 국내 관측망에서 관측이 가능한 특징적인 인프라사운드를 발생시키고 있다.

2005년 8월 16일 02:46분경(GMT) 일본 혼슈 연안에서 규모 7.2의 강진이 36 km 깊이에서 발생하였다. 지진발생 후 수분 이내에 지진파가 국내 지진관측소에 기록되었을 뿐만 아니라, 약 1시간 후에 지진으로부터 형성된 특징적인 인프라사운드 신호가 간성, 철원, 백령도 인프라사운드 관측망에 순차적으로 기록되었다. Fig. 4(a)에서 아래 파형은 백령도관측망에서 기록한 지진파형이고 위의 파형은 음파자료에 해당한다. 음파자료 중 타원으로 표시된 부분이 일본 지진으로부터 발생한 특징적인 인프라사운드 신호에 해당한다. 지진파형과 달리 인프라사운드 신호는 지속시간이 약 30분에 이르는 비교적 장시간의 렌즈모양 음파신호로 기록되었다. 3개 관측망자료에 PMCC 분석을 적용하여 음파신호의 발생방향과 결보기속도를 계산하였다.

백령도관측망의 경우 렌즈모양의 음파신호 앞부분에서는 약 113° 방향에서 음파가 발생한 것으로 분석되었으며 점진적으로 발생방향이 감소하여 음파신호의 뒷부분에서는 약 60° 방향으로 계산되었다. 간성과 철원 관측망에서도 비슷한 모양의 인프라사운드 신호가 관측되었으며, PMCC 분석결과 백령도 관측망과 유사한 음파신호의 발생방향 변화를 보였다. Fig. 4(b)는 백령

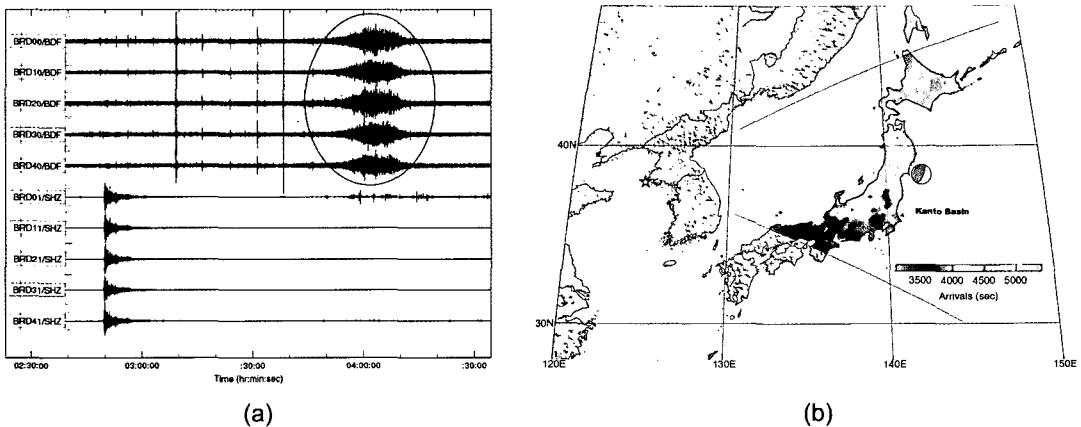


Fig. 4. (a) Seismic and infrasonic recordings from a large earthquake in Japan. (b) Sound sources localization from infrasonic data.

도관측망에서 구한 음파신호의 발생방향으로부터 음원의 위치를 계산한 결과이다. 백령도관측망에 도달한 인프라사운드 신호는 진앙을 기준으로 일본 남서부지역에서 발생하기 시작하여 점진적으로 음원의 위치가 북동방향으로 이동하여 신호의 뒷부분은 일본 북동부지역에서 발생한 것으로 계산되었다. 진원에서 발생한 지진파는 단시간 내에 일본전역을 통과하게 되며, 특히 지표를 따라 전파하는 표면파는 지표근처의 대기압을 교란(coupling)시켜 인프라사운드를 형성하게 된다. 따라서 인프라사운드는 진앙 주변 뿐만 아니라 일본 전 지역에서 발생하게 된다. 백령도관측망을 기준으로 상대적으로 거리가 가까운 일본 남서부지역의 음파가 가장 먼저 백령도관측망에 도달하고 일본 북동부지역에서 형성된 음파는 전파거리가 먼 관계로 나중에 도달한 것으로 설명된다. Fig. 4(b)에 표시된 칸토분지(Kanto basin)의 경우 다른 지역에 비해 인프라사운드를 장시간 발생시킨 것으로 계산되었다. 이는 일반적인 분지 내에서 지진파 증폭과 간섭 현상을 설명해 주고 있다. 렌즈모양의 인프라사운드 신호에서 최대 진폭에 해당하는 부분은 진앙 및 주변지역에 해당하고 상대적으로 진폭이 작

은 앞부분과 뒷부분의 신호는 진앙으로부터 먼 거리에 위치하고 있어 일반적인 지진파의 전파특성과 일치하고 있다.

2004년 12월 11일 한반도에서 약 2,000 km 떨어진 중국 북서지방 란저우 상공에서 운석이 폭발하였다. 상당수의 현지 주민들이 섬광과 함께 강력한 폭발음을 증언하였다. 운석폭발로부터 발생한 인프라사운드는 약 1시간 30분 후에 백령도, 철원, 간성 인프라사운드 관측망에 연속적으로 기록되었다. 3개 관측망에 기록된 인프라사운드 신호의 지속시간은 약 6~8분 정도이며 약 1 Hz 대역의 특이 신호로 기록되었다. Fig. 5(a)는 백령도관측망 자료에 대한 PMCC 분석결과이다. 백령도관측망을 포함한 3개 관측망에서 계산한 음파의 발생방향은 271~274°로 운석이 폭발한 란저우 방향과 일치하고 있다(Fig. 5(b)). 대기 중 인프라사운드의 파선추적결과 국내 관측망에 도달한 인프라사운드는 성층권을 경유한 음파로 계산되었다(Lee *et al.*, 2005). 성층권을 경유한 인프라사운드 음원의 크기는 음파신호의 주기로부터 산정할 수 있다(ReVelle and Whitaker, 1999). 인프라사운드 신호로 구한 운석폭발의 크기는 약 170톤 정도의

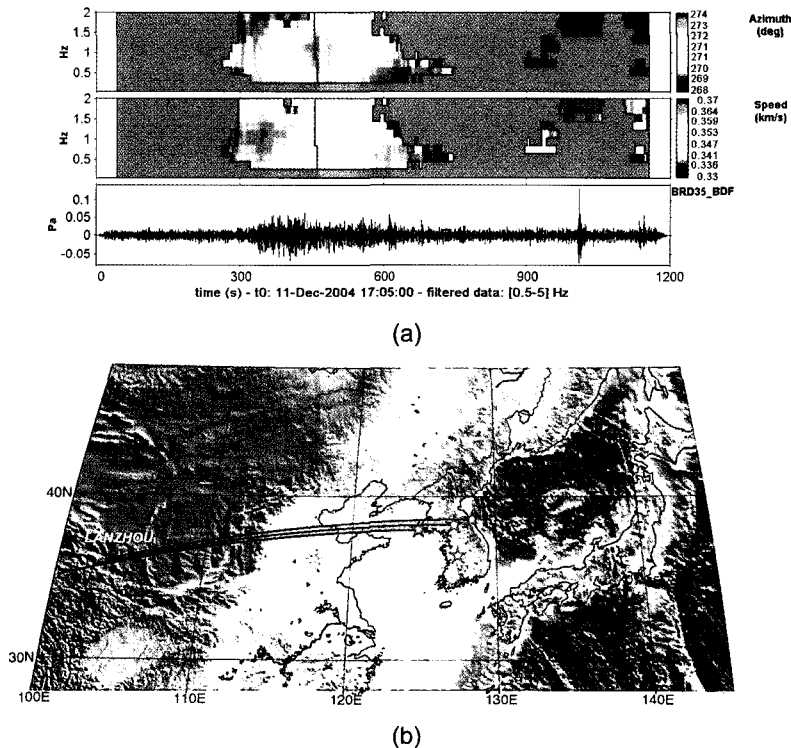


Fig. 5. (a) PMCC results for infrasonic signal generated from bolide event. (b) Location of the bolide event, Lanzhou in China. Each blue line indicates calculated back-azimuth from infrasonic array.

다이내믹 폭발과 같은 것으로 계산되었다.

5. 인프라사운드 대기전파 모델링

인프라사운드 대기전파 모델링은 MSISE90 (Mass Spectrometer Incoherent Scatter)과 HWM93 (Horizontal Wind Model 1993) 등의 대기경험모델로부터 유효음파속도구조를 설정하고 파선추적방법을 적용하여 음원 위치결정이나 전파경로추적에 이용된다. 전 지구적 규모의 대기경험모델은 다년간 관측된 기상자료의 평균을 의미하며 실제 하부대기층의 정확한 대기정보를 제공하지는 못한다. 전파경로 모델링 결과, 대기경험모델은 거시적 규모의 장거리 전파경로를 계산하는데 적합하나, 지표음원에 대해서 약 250 km 반경의 인프라사운드 음영대(shadow zone)를 형성하는 것으로 나타났다. 그러나 지진파-음파 분석으로 식별된 국내 인공지진의 상당수는 인프라사운드 관측망으로부터 250 km 이내에 위치하고 있다. 인공지진에서 발생한 인프라사운드가 250 km 이내 근거리 관측망에 도달하기 위해서는 대류권과 같은 하부대기층에서 굴절되어 지표로 되돌아오는 경우에 가능하다. 즉 하부대기층 내에서 고도가 증가할수록 음파속도가 증가하는 대기층이

존재해야 한다. 이에 하부대기층의 실제 기상정보를 제공하는 고층기상관측자료가 근거리 인프라사운드 전파 특성연구에 이용되고 있다.

지진파-음파 분석결과, 동일한 발파장에서 발생한 음파신호는 계절, 시간에 따라 전파시간의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 계절적, 시간적으로 하부대기층의 온도, 풍향, 풍속이 지속적으로 변화하는데 기인한다. 계절에 따른 인프라사운드 전파시간을 비교하기 위하여 철원관측망 남서쪽 49.6 km 지점 채석장에서 발생한 인공지진을 대상으로 전파경로 모델링을 수행하였다. 발파장으로부터 철원관측망에 도달한 전체 음파신호의 평균 전파시간은 143초이나 계절에 따라 최대 15초의 전파시간 차이를 보였다. Fig. 6(a)은 하절기에 관측한 상기 채석장의 지진파와 음파신호 예이다. 발파시간으로부터 철원관측망까지 도달하는데 소요된 음파의 전파시간은 140.1초로 관측되었다. Fig. 6(b)은 고층기상자료와 대기경험모델로부터 구한 고도별 음파속도, 풍속 및 유효음파속도구조를 고도 17 km 까지 도시한 것이다. 온도함수인 음파속도구조는 두 자료 간에 유사한 것으로 나타났으나 하부대기층의 수평바람성분에서는 많은 차이를 보이고 있다. 대기경험모델로 구한 유효음파속도구조는 고도가 상승하면서 전

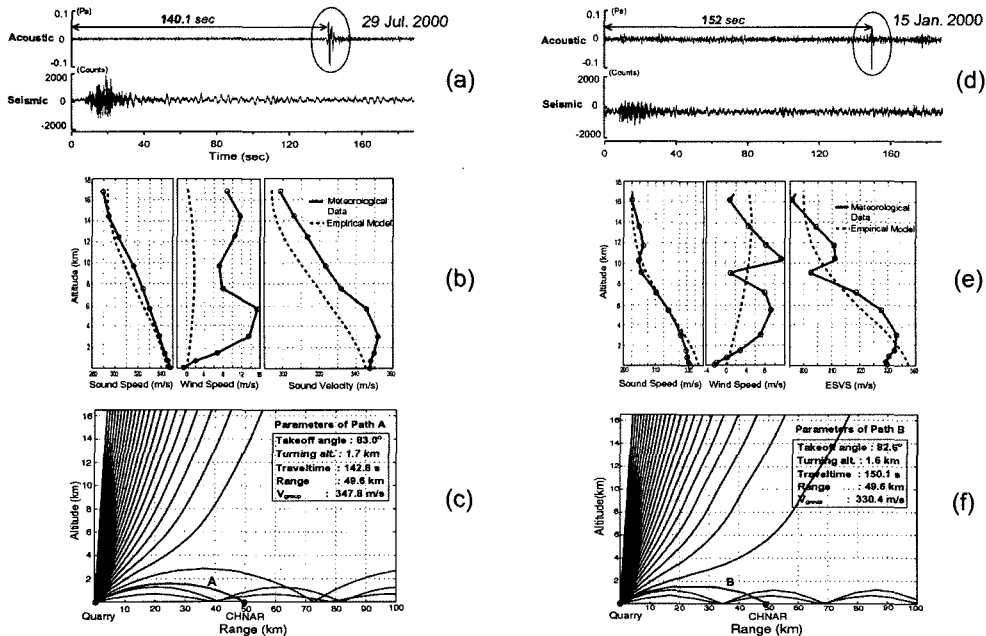


Fig. 6. Seasonal depending short-distance infrasonic ray path modeling. (a) A pair of seismic and infrasonic recordings from a rock quarry for summer season. (b) Sound speed, wind speed, and effective sound velocity profiles for ray-tracing. (c) Ray-tracing results using meteorological data, path A is a possible trajectory from the rock quarry to CHNAR. (d), (e), and (f) for winter season.

체적으로 속도가 감소하는 구조를 보이고 있으나, 고층기상자료는 대기경험모델에 비해 복잡한 속도구조를 보이고 있다. 고층기상자료의 바람성분은 대기경험모델이 제공하지 못하는 매우 지역적이고 실질적인 자료로 음파의 전파경로를 결정하는데 중요한 역할을 하게 된다. 고도가 상승하면서 음파속도는 감소하나 일부 고도에서 형성되는 전파방향으로의 강한 바람성분은 유효음파속도를 증가시켜 음파의 굴절을 일으키는 전파통로를 형성하게 된다. Fig. 6(c)은 고층기상자료의 유효음파속도구조를 이용하여 채석장으로부터 철원관측망까지의 전파경로를 계산한 것이다. 수직으로부터 15°에서 87° 사이 대기 중으로 입사하는 음파의 전파경로와 전파시간 및 편향거리를 계산하였다. Fig. 6(c)에서 경로 A는 채석장에서 형성된 음파 중 철원관측망에 도달 가능한 음파의 전파경로를 지시한다. 경로 A의 대기 입사각은 83.0°, 굴절고도는 1.7 km, 전파시간은 142.6초, 편향거리는 +0.11 km이다. 계산된 음파번호의 전파시간은 실제 관측한 전파시간 140.1초와 비슷한 결과를 보이고 있다. 편향거리는 채석장으로부터 철원관측망까지 직선방향에서 우측 (+)으로 편향된 거리이며, 수평전파거리를 고려한 편향각 ($\tan^{-1}(\text{편향거리}/\text{수평전파거리})$)은 +0.1°이다. Fig. 6(d)은 동절기에 관측한 지진파-음파 파형 예이다. 음파의 전파시간은 하절기 (Fig. 6(a))에 비해 약 12초가 긴 152초로 기록되었다. Fig. 6(e)은 발파시간대의 고층기상자료와 대기경험모델로 구한 유효음파속도구조이다. Fig. 6(f)은 고층기상자료의 유효음파속도구조를 이용하여 구한 전파경로와 전파시간 모델링 결과이다. 전파경로 B는 82.6°로 입사하여 고도 1.6 km에서 굴절되어 철원관측망에 도달하였으며, 계산된 음파의 전파시간은 150.1초로 실제 관측한 전파시간과 유사하다. 고층기상자료는 실질적인 대기 음파속도구조이며 하부대기층에서 굴절 가능한 속도구조를 형성하고 있어 인프라사운드의 근거리 전파특성을 설명할 수 있었다. 또한 동일한 채석장에서 발생한 근거리 음파번호의 전파시간은 발생시기에 따라 차이가 있으며 고층기상자료를 이용한 전파 모델링 결과와 일치하고 있다.

6. 결론 및 향후 과제

인프라사운드에 대한 지구물리학적 관심은 1883년 Krakatoa 화산폭발과 1908년 시베리아 운석폭발을 시작으로 대기권 및 지하핵실험 감시목적으로 냉전시대에 절정을 이루었다. 이후 1963년 대기권 및 수중 핵

실험 금지로 인해 인프라사운드의 대한 관심과 연구가 줄어들었으나, 최근 지진파, 수중음파, 방사능 핵종감시 기술과 함께 전 세계 핵실험(1kt 이상) 감시를 목적으로 세계적인 관측망 구축과 연구가 진행되고 있으며, 또한 상부지각과 대기권에서 발생하는 순수한 자연현상에 대한 이해와 규명을 목적으로 인프라사운드 연구가 진행되고 있다.

국내의 경우 한반도 및 주변지역에서 발생하는 지진의 지진원 식별을 목적으로 1999년부터 인프라사운드 관측망 구축과 운영이 이루어지고 있다. 지진파-음파 분석으로 한반도에서 관측되는 전체 지진목록 중 약 10%의 지진을 인공지진으로 명확히 식별하여 데이터 베이스를 구축하고 있어 인공지진의 시간적, 공간적 모니터링이 가능하게 되었다. 인프라사운드 관측을 통한 인공지진 데이터베이스는 순수 자연지진목록을 구축하는 기본정보를 제공하는데 이용된다. 또한 국내에 분포하는 대규모 노천 발파장에 대한 정보를 제공하고, 발파장에서 획득되는 발파정보는 지진분석시스템의 정밀도 향상 등 지진자료를 이용한 한반도 지각구조연구 등에 기본 정보를 제공할 수 있다. 최근에는 임시 이동식 인프라사운드 관측망을 구축하고 활용하여 소규모 지역의 지진재해연구를 위한 선행연구로 지진원 식별에 이용되고 있다. 부수적으로, 국내 인프라사운드 관측망은 일본, 중국 등에서 발생하는 대규모 지진, 운석폭발, 화산폭발 등의 자연현상을 관측하고 분석하는데 이용되고 있다.

인프라사운드 자료분석은 기본적으로 지진파 분석기술을 따르고 있으나 시간불변적인 지구내부구조와 달리 역동적인 대기조건이 반영되어야 보다 정량화된 분석이 가능하다. 최근 국내외에서 수행되고 있는 인프라사운드 관련 연구는 다음과 같다. 첫째, 관측소 주변 배경잡음의 영향을 최소화 할 수 있는 대기흡입장치 개발과 효과적인 관측망 배열 등 관측기술 향상을 위한 연구가 수행되고 있다. 둘째, 대기 속도구조를 이용한 인프라사운드 파형 모델링과 역으로 관측 자료를 이용한 대기속도구조 계산이 시도되고 있다. 셋째, 지진 규모식과 같이 근거리 혹은 원거리 인프라사운드 음원에 대한 규모식이 개발되고 있다. 넷째, 핵실험 혹은 지표발파 탐지를 위한 실시간 모니터링 분석시스템 개발이 진행되고 있으며 현재 어느 정도 개발이 완료된 상황이다. 기타 일부 국가에서는 눈사태, 화산폭발과 같은 자연재해 발생가능 지역에서 인프라사운드를 관측하여 단기 경보시스템, 지역별 통계자료 획득이 이루어지고 있다.

국내 인프라사운드 관측망은 전 세계에 분포하고 있는 관측망과 비교할 때 매우 조밀한 관측망 네트워크로 구성되어 있어 인프라사운드 탐지능력이 뛰어나며 원거리 음원의 위치결정이 가능하다. 향후 지속적인 관측기술의 향상과 관련연구의 수행으로, 인프라사운드 관측은 한반도 주변에서 인공지진탐지와 지구표면과 하부대기층에서 발생하는 다양한 자연현상을 이해하고 규명하는 새로운 지구물리학적 관측기술로 발전이 가능하리라 판단된다.

사 사

이 논문은 민경덕 교수님의 정년퇴임기념호를 위하여 작성되었다. 또한 이 연구는 기상청 기상지진기술 개발사업(CATER 2006-5103)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 전명순, 전정수, 신인철, 김동균, 제일영, 김용성, 박정호, B. Stump, C. Hayward, J. McKenna (1999) 철원 지진-공중음과 관측망 설치, 한국지진공학회 1999년도 춘계학술대회 논문집, 3권, p. 52-57.
- 제일영, 전명순, 전정수 (2002) 지진-공중음과 자료를 이용한 2001년도 인공발파 식별, 한국지진공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, 6권, p. 59-63.
- 제일영, 전정수, 이희일, 신인철 (2003) 지진-공중음과 자료를 이용한 2002년도 인공발파 식별, 한국지진공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 7권, p. 38-44.
- 제일영, 신인철, 전정수, 이범규, 김근영, 임인섭, B. Stump, C. Hayward (2004) 지진-음과 자료를 이용한 2003년도 인공발파 식별과 간성 지진-음과 관측망 설치, 한국지진공학회 2004년도 춘계학술발표회 논문집, 8권, p. 127-133.
- 제일영, 전정수, 신인철 (2005) 지진-음과 자료를 이용한 2004년도 인공발파 식별과 백령도 지진-음과 관측망 설치, 한국지진공학회 2005년도 학술발표회 논문집, 9권, p. 68-73.
- Bedard, A.J. and Georges, T.M. (2000) Atmospheric infrasound, *Physics Today*, Mar, 32-37.
- Bennett, T. J. and Murphy, J.R. (1986) Analysis of seismic discrimination capabilities using regional data from western United States events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 76, 1069-1086.
- Cansi, Y. (1995) An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1021-1024.
- Carr, D.B. and Garbin, H.D. (1998) Discriminating ripple-fired explosions with high-frequency (>16 Hz) data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 963-972.
- Che, I.Y., Jun, M.S., Jeon, J.S. and Min, K.D. (2002) Analysis of local seismo-acoustic events in the Korean Peninsula, *Geoph. Res. Lett.*, 29, 1-4.
- Donn, W.L., Pfeffer, R.L. and Ewing, M. (1963) Propagation of Air waves from nuclear explosions, *Science*, 139, 307-317.
- Donn, W.L. and Posmentier, E.S. (1964) Ground-coupled air waves from the Great Alaskan Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 69, 5357-5361.
- Donn, W.L. and Rind, D. (1971) Natural infrasound as an atmospheric probe, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 26, 111-133.
- Evers, L.G. and Haak, H.W. (2001) Listening to sounds from an exploding meteor and oceanic waves, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 41-44.
- Garcés, M.A., Hansen, R.A. and Lindquist, K.G. (1998) Traveltimes for infrasonic waves propagating in a stratified atmosphere, *Geophys. J. Int.*, 135, 255-263.
- Garcés, M.A., Iguchi, M., Ishihara, K., Morrissey, M., Sudo, Y. and Tsutsi, T. (1999a) Infrasonic precursors to a vulcanian eruption at Sakurajima Volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 2537-2540.
- Garcés, M.A., Hansen, R. and Lindquist, K. (1999b) Variability of the lower atmosphere and its effect on the propagation of infrasonic waves, In *Proceedings of the 21st Annual Seismic Research Symposium on Monitoring A Comprehensive Test Ban Treaty*, 21-24 September 1999, 105-111.
- Gibson, R., Norris, D. and Farrell, T. (1999) Development and application of an integrated infrasound propagation modeling tool kit, In *Proceedings of the 21st Annual Seismic Research Symposium on Monitoring A Comprehensive Test Ban Treaty*, 21-24 September 1999, 112-121.
- Gossard, E.E. and Hooke, W.H. (1975) *Waves in the atmosphere*, Elsevier, New York.
- Haak, H.W. and de Wilde, G.J. (1996) Microbarograph systems for the infrasonic detection of nuclear explosions, *Tech. Rep. WR 96-06*, Royal Neth. Meteo. Inst., The Netherlands.
- Hagerty, M.T., Kim, W.Y. and Martysevich, P. (2002) Infrasound detection of large mining blasts in Kazakhstan, *Pure appl. geophys.*, 159, 1063-1079.
- Hedlin, M.A.H. (1998) A global test of a time-frequency small-event discriminant, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 973-988.
- Johnson, J.B. (2000) Interpretation of infrasound generated by erupting volcanoes and seismo-acoustic energy partitioning during Strombolian explosions, Ph. D. Thesis, University of Washington.
- Koch, K. (2002) Seismic event identification of earthquakes and explosions in Germany using spectral Lg ratios, *Pure appl. geophys.*, 159, 759-778.
- Koketsu, K., Takahashi, M. and Sakai, S. (2002) Accidental explosions observed by seismometers, *Seism. Res. Lett.*, 73, 136-143.
- Le Pichon, A., Herry, P., Mialle, P., Vergoz, J., Brachet, N., Garcés, M., Drob, D. and Ceranna, L. (2005) Infrasound associated with 2004-2005 large Sumatra earthquakes and tsunamis, *Geoph. Res. Lett.*, 32, L19802, doi:10.1029/2005GL023893.
- Lee, H.I., Che, I.Y. and Le Pichon, A. (2005) An analysis of infrasound signal from the 11th December 2004 Meteorite at Lanzhou in China, *Infrasound Technology Workshop at Tahiti*, November 28-December 2, 2005.
- Mutschlechner, J.P. and Whitaker, R.W. (2005) *Infrasound*

- from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 110, D01108, doi:10.1029/2004JD005067.
- ReVelle, D.O. and Whitaker, R.W. (1999) Infrasonic detection of a Leonid Bolide: November 17, 1998, *MAPS*, 34, 995-1005, 1999.
- 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.*, 159, 679-700.
- Stump, B., Jun, M.S., Hayward, C., Jeon, J.S., Che, I.Y., Thomason, K., House, S.M. and McKenna, J. (2004) Small-Aperture Seismo-Acoustic Arrays: Design, Implementation, and Utilization, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94(1), 220-236.
- Vergnolle, S., Brandeis, G. and Mareschal, J.C. (1996) Strombolian explosions, 2, Eruption dynamics determined from acoustic measurement, *J. Geophys. Res.*, 101, 20449-20466.
- Waldemark, K. (1997) A statistical study of propagation of infrasound generated during supersonic flights, *IRF Scientific Report 243 March 1997*, ISSN 0284-1703.
- Wilson C. (2005) Infrasound from Auroral Electrojet Motions at I53US, *InfraMatics*, 10.
- Wüster, J. (1993) Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe-A case study, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1184-1212.
- Yamasato, H. (1998) Nature of infrasonic pulse accompanying low frequency earthquake at Unzen Volcano, Japan, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 43, 1-13.

2006년 6월 12일 원고접수, 2006년 8월 17일 게재승인.