

지진-음파 자료를 이용한 2004년도 인공발파 식별과 백령도 지진-음파 관측망 설치

Discrimination of artificial explosions by using seismo-acoustic data in 2004 and installation of BRDAR

제일영¹⁾

전정수¹⁾

신인철¹⁾

Che, Il-Young Jeon, Jeong-Soo Shin, In-Cheol

ABSTRACT

In succession of the previous works, seismo-acoustic analysis was conducted to collect ground truth events and to discriminate surface explosions from natural earthquakes in the Korean Peninsula for 2004. In this period, total 510 seismo-acoustic events corresponding to 10.8 percent of total seismic events occurred in and near the Korean Peninsula were analyzed and discriminated as artificial surface explosions. Events distribution of the seismo-acoustic events in 2004 is similar to the previous results of 1999-2003. And newly determined seismo-acoustic events were added to the surface explosions database. To extend infrasound detection capability, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) and Southern Methodist University (SMU) installed new seismo-acoustic array (BRDAR) in Baekryoung Island last November, 2004. The array configuration and design is nearly same to previous seismo-acoustic arrays CHNAR, KSGAR, a triangular 1 km aperture. BRDAR consists of 5 short period vertical seismometers (GS-13) in seismic vaults and 13 microbarometers (Chaparral Model 2). Preliminary analysis using data collected from BRDAR shows an extension of infrasound detection capability to western part of the Korean Peninsula. Also, multiple observations of infrasound at BRDAR and other arrays gave an opportunity to localize sound source regions.

1. 서언

한국지질자원연구원 지진연구센터에서는 대규모 지표발파로부터 발생하는 지진파와 저주파수 음파신호(infrasonic wave)를 관측하기 위하여 철원, 간성, 대전지역에 지진-음파 관측망 (seismo-acoustic array)을 운영하고 있다⁽¹⁾. 또한 지진파-음파 분석(seismo-acoustic analysis)으

1) 한국지질자원연구원 지진연구센터

로 저주파수 음파를 수반하는 지진파의 지진원을 인공발파(인공지진)로 정의하고 있으며, 한반도에서 발생하는 자연지진과 구분하여 인공지진 데이터베이스를 구축하고 있다⁽²⁾. 본 연구는 지진파-음파 분석을 통한 인공발파 식별연구의⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 연장으로 2004년도 한반도 및 인근지역에서 발생한 지진목록으로부터 인공발파를 식별하는데 목적이 있다. 또한 당해연도 인공발파의 특징을 이전결과(1999-2003년)와 비교하고 최종적으로 인공발파 데이터베이스에 추가하는데 있다.

한반도 중심부에 위치한 철원관측망은 인공발파에서 형성되는 저주파수 음파를 관측하여 인공발파를 식별하는데 매우 유용한 것으로 밝혀졌다. 이에 한국지질자원연구원은 한반도 동부지역까지 인공발파 관측범위를 확대하기 위하여, 2003년도에 강원도 간성지역에 신규 지진-음파 관측망을 설치하여 운영하고 있다. 2개 이상의 관측망 운영은 인공발파 관측범위의 확대와 함께, 저주파수 음파를 두 관측망에서 동시에 관측함으로써, 음원 발생 위치를 추정하는데 이용이 가능하였다. 이에 한국지질자원연구원과 미국 남감리대학(Southern Methodist University)은 한반도 서부지역에 대한 인공발파 관측범위 확대와 음원 발생 위치 모니터링을 위하여 신규 지진-음파 관측망을 2004년 11월 백령도지역에 설치하였다. 본 연구에서는 백령도 관측망 설치와 특성을 소개하고자 한다. 또한 백령도관측망 자료에 대한 예비분석으로 인공발파 식별과 철원, 간성관측망과의 동시분석으로 음원의 위치를 결정하고자 한다.

2. 지진파-음파 분석을 통한 2004년도 인공발파 식별

지진연구센터에서는 1999년 철원관측망 설치 후 연도별 인공발파 식별연구를 수행하고 있으며, 본 연구는 기존연구의 연장으로 2004년도 한반도에서 발생한 인공발파를 분석하는데 목적이 있다. 지진파-음파 분석으로 자연지진과 인공발파를 식별하고 있으며, 철원, 간성 및 연구원소형관측망 자료와 백령도관측망 일부자료가 이용되었다. 지진-음파 자료를 이용한 인공발파 식별은 기본적으로 지표면 발파로부터 발생하는 지진파와 저주파수 음파 신호 모두를 기록하고 분석함으로써 이루어진다. 어떠한 지진파의 지진원이 인공발파로 정의되기 위해서는 지진파의 진앙과 음파신호의 발생방향이 우선적으로 일치해야 한다. 인공발파를 식별하기 위해 지진파-음파 분석이 정의되었으며, 다음과 같은 일련의 분석을 관측망 자료에 적용하여 지표발파와 관련된 지진파와 음파 신호를 관측하고 분석하였다. 먼저 한국지질자원연구원 지진분석시스템이 분석한 한반도 및 인근지역에서 발생한 지진기록의 진앙위치와 지진발생시간을 이용하였다. 음파자료에 대해서는 0.5 ~ 5 Hz로 필터링 처리 후, 관측망으로부터 진앙까지의 수평거리를 고려한 음파 도달 가능 시간대에서 특이 음파신호를 확인하였다. 확인된 음파신호에 대해서는 주파수-파수분석으로 후방 방위각(back-azimuth, 관측망으로부터 음원의 방향)을 계산하였다. 후방 방위각은 지진파와 음파 신호를 동일한 지표발파에서 발생한 것으로 결정하는 중요한 인자로, 후방 방위각이 지진파로 결정된 진앙의 후방 방위각과 $\pm 10^\circ$ 이내일 경우 해당 지진파와 음파 신호를 하나의 지표발파에서 발생한 것으로 해석하고 인공발파로 식별하였다. 지진파로 결정된 진앙의 후방 방위각과 음파신호의 후방 방위각의 오차는 지진파의 진앙계산과 음파신호의 배열망 분석 시 발생하는 오차 그리고 바람에 의한 음파 신호의 편향을 고려한 것이다. 이와 같은 분석으로 식별된 이벤트를 “지진파-음파(seismo-acoustic) 이벤트” 혹은 “인공발파 이벤트”로 정의하였다⁽²⁾.

본 연구의 분석기간은 2004년 1월부터 12월까지이며, 연구지역은 한반도 및 인근지역(위도 : 32.5° N ~ 43.5° N, 경도 : 123° E ~ 132° E)을 대상으로 하였다. 분석기간 동안 지진분석시스템은 연구지역에서 하루평균 13개의 지진 이벤트를 분석하여, 총 4,700여개의 이벤트를 분석하였다. 이중 음파 신호를 수반하는 510개의 인공발파 이벤트가 지진파-음파 분석으로 식별되었다. 이는 전체 지진이벤트 중 약 10.8%에 해당하며, 2004년도 분석결과를 기존 인공발파 데이터베이스 추가하여 현재까지 총 1,551개의 인공발파 정보를 구축하였다. 그림 1은 지진목록(지진분석시스템 결과) 중 지진파-음파 분석으로 식별된 510개의 인공지진 진앙분포도이다. 2004년도에 분석된 이벤트 중 63개는 북한지역에서 발생하고 나머지 447개는 남한지역에서 발생하였다. 2004년도 인공발파의 대부분은 B, E, F, G, H, I지역에서 집중되고 있어, 기존 데이터베이스와 유사한 분포를 보이고 있다. 특징적으로 간성 및 대전 연구원관측망 자료가 추가되어 한반도 동부 및 남서부지역(H, I지역)의 인공발파 식별이 지속적으로 증가하고 있다.

3. 백령도 지진-음파 관측망 설치

철원, 간성 및 대전 지진-음파 관측망 자료에 대한 분석으로 한반도 일원에서 발생하는 인공지진에 대한 명확한 식별이 가능하게 되었다. 백령도 관측망은 한국지질자원연구원과 미국 SMU와 공동으로 지진-음파 관측망 설치, 운영 및 자료처리 수행 등의 MOU 체결 하에 설치되었다. 백령도 관측망 설치 목적은 인공지진 관측범위의 확대와 철원, 간성관측망과 연계된 자료분석으로 음원의 위치결정과 대기 중 음파의 전파특성연구를 수행하는데 있다. 공동연구 기관인 SMU는 관측장비를 제공하고, 한국지질자원연구원은 백령도 내 관측망 설치부지확보와 전력 및 통신망설계, 지진계 및 정밀음압계 설치를 위한 수진기실 설치공사, 실시간 자료전송을 담당하였다.

지진-음파 관측망 설치, 운영 및 신뢰성 있는 자료획득과 분석을 위한 관측망 부지는 여러 기준을 만족하여야 한다. 관측망 부지선정에 우선적으로 요구되는 것은 관측망 주변의 지진파 및 음파 배경잡음에 있다. 관측망 부근 음파의 배경잡음은 주파수대역 약 $0.5 - 5\text{Hz}$ 범위에서 최소가 되어야 한다. 관측망내의 지진계와 정밀음압계는 가능한 동일 지점에 위치하여야 하며, 특히 정밀음압계간의 상대적 고도차가 작은 평탄한 지형에 위치하여야 한다. 또한, 관측소 설치, 운영을 위해서는 접근이 용이하고, 전원공급 및 자료전송을 위한 전화선 등의 사용이 용이한 지역이어야 한다. 백령도 지역에 대한 사전 야외조사를 실시하여 상기 조건을 만족하는 최적의 부지를 선정하였다. 선정된 부지는 백령도 북서해안지역이며, 이 지역은 군사지역으로 인공적인 음파의 교란을 일으킬 수 있는 공항, 고속도로 및 고층 건물이 없어 잡음의 영향이 적은 지역이다(그림 2). 백령도 관측망 구성은 중심관측소(BRD0)를 포함한 삼각형 모양(BRD1, BRD2, BRD3)과 북서-남동 방향으로 전파하는 신호에 대한 관측능력의 향상을 위하여 보조관측소(BRD4)를 추가로 설치하여 총 5개 관측소로 구성하였다.

기존 철원, 간성관측망의 지진계는 시추공 내에 설치하였으나, 백령도 관측망의 경우 맨홀형 수진기실을 설치하여 지진계를 설치하였다. 5개 관측소 수진기실 내에 지진계를 설치하고 근접한 위치에 주 정밀음압계를 설치하였다. 또한 주 관측소로부터 약 100m이내에 보조 정밀음압계를 설치하였다. BRD3 관측소에는 약 60m 간격으로 정밀음압계 3개 관측소를 추가로 설치하였다. 따라서

백령도 지진-음파 관측망은 5개 단주기 지진계와 13개 정밀음압계로 구성되었다. 정밀음압계는 0.1~100 Hz의 주파대역의 신호를 탐지할 수 있도록 제작되었다. 정밀음압계는 관측소 지표면에 설치된 10개의 방사상으로 배열된 8미터 길이의 다공성 호스와 연결되어 있다. 다공성 호스는 바람의 영향으로 생성되는 지역적인 대기압의 배경 잡음을 감쇠시키기 위해 설치된 것으로 음파의 신호 대 잡음비를 높이는 역할을 한다. 상용전원 또는 태양전지를 이용한 전원공급장치로 GPS, 기록계 및 자료전송을 위한 무선자료송신장치에 전원을 공급하도록 하였다. 중심관측소에는 기상 장비가 설치되어 풍향, 풍속 및 대기온도를 기록하도록 하였다. 기록계는 지진자료와 음파자료를 초당 40개 자료로 기록하여 나이퀴스트 주파수를 20Hz로 향상시켰으며, 기상자료는 분당 1개 자료로 기록하도록 하였다. 5개 관측소에서 얻어진 자료는 2.4GHz 라디오 모뎀을 통하여 중앙기록실로 전송되어 PC에 저장되고, 모아진 자료는 전용선을 통하여 한국지질자원연구원으로 전송되도록 구성하였다.

4. 백령도관측망 자료의 예비분석 및 음원위치결정

백령도 지진-음파 관측망 설치 후 단기간 획득한 자료에 대해 예비분석을 실시하였다. 예비분석은 주파수-파수 분석으로 특이 음파신호에 대한 후방 방위각 계산 등 기존관측망 자료처리와 동일한 방법이 적용되었다. 예비분석은 백령도관측망자료를 이용한 인공발파 식별과 철원, 간성 및 연구원관측망 자료와 함께 음원의 위치를 결정하는데 목적이 있다. 그림 3(a)은 북한지역에서 발생한 인공지진을 백령도관측망과 철원관측망에서 기록한 파형으로, 지표발파로부터 발생한 지진파와 음파 신호가 두 지진-음파 관측망에서 동시에 기록된 예이다. 지표발파로부터 발생한 음파는 각각 339초와 624초 후에 철원관측망과 백령도관측망에 도달하였다. 주파수-파수 분석으로 음파신호의 후방 방위각을 계산한 결과, 철원관측망과 백령도관측망에서 계산된 음파신호의 후방 방위각은 각각 308.9°와 51.9°이다. 그림 3(b)은 지진자료로 결정한 진앙(별 모양)과 음파 신호의 후방 방위각 교차로 구한 음원의 위치(원 모양)를 표시하고 있으며, 진앙과 음원간의 거리는 약 8.7km로 나타났다. 예비분석 결과, 백령도관측망 자료는 한반도 중서부지역을 포함한 인공발파 식별에 이용될 수 있었다. 또한 기존의 철원, 간성, 연구원관측망과의 동시분석으로 음파신호에 대한 음원의 위치결정이 가능하였다. 인공발파는 지진파와 음파를 동시에 발생시키므로 지진자료처리로 결정된 진앙과 상기 예와 같이 음파신호로 결정된 음원위치는 향후 지진파-음파 분석과정에서 인공발파 진앙을 결정하는데 보다 정확한 정보로 이용될 수 있다.

5. 결론 및 토의

'지진파-음파 분석을 통한 인공발파 식별연구'의 연장으로, 지진-음파자료 분석을 통하여 2004년도에 총 510개의 인공발파 이벤트를 지진목록으로부터 식별하였다. 이는 한반도 및 인근지역에서 발생한 전체 지진이벤트의 약 10.8%에 해당한다. 인공발파 이벤트는 지역적으로 집중되어 분포하고 있으나, 1999-2003년 결과와 유사한 진앙분포를 보이고 있다. 본 연구에서 분석된 결과를 기준

인공발파 데이터베이스에 추가하여 현재까지 총 1,551개의 인공발파가 식별되었다.

한반도 인공발파 관측범위의 확대와 저주파수 음파 특성연구를 위하여 백령도지역에 지진-음파 관측망을 2004년도에 추가로 설치하였다. 백령도관측망은 기존 지진-음파 관측망과 동일한 장비로 구성되었으나, 관측소 배열의 기하학적 형태와 자료전송은 지역적인 특성에 맞게 변경되어 설계되었다. 백령도관측망 설치로 한국지질자원연구원은 현재 4개의 음파 관측망을 운영하고 있다. 백령도관측망 추가설치로 인공발파 식별능력 향상과 인공발파 분석 수를 증가시킬 수 있으며, 음원에 대한 독립적인 위치결정이 가능하게 되었다. 또한 인공발파 이외의 다양한 음원으로부터 발생하는 음파신호를 관측함으로써 음원특성 및 저주파수 음파의 대기전파특성 연구가 가능하리라 판단된다.

참고 문헌

1. Hayward, C., B. Stump, P. Golden, E. Herrin, M. S. Jun and J. S. Jeon, 1999, "The Korean seismo-acoustic array", in Proceedings of the 21st Annual Seismic Research Symposium on Monitoring A Comprehensive Test Ban Treaty, 21-24 September 1999.
2. Che, I. Y., M. S. Jun, J. S. Jeon, K. D. Min, 2002, "Analysis of Local Seismo-acoustic Events in the Korean Peninsula", Geoph. Res. Let., vol. 29, no. 12.
3. 제일영, 전명순, 전정수, 2002, "지진-공중음파 자료를 이용한 2001년도 인공발파 식별", 한국지진공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, vol. 6, no. 1, pp. 59-63.
4. 제일영, 전정수, 이희일, 신인철, 2003, "지진-공중음파 자료를 이용한 2002년도 인공발파 식별", 한국지진공학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, vol. 7, no. 1, pp. 38-44.
5. 제일영, 신인철, 전정수, 이범규, 김근영, 임인섭, B. Stump, C. Hayward, 2004, "지진-음파 자료를 이용한 2003년도 인공발파 식별과 간성 지진-음파 관측망 설치", 한국지진공학회 2004년도 춘계학술발표회 논문집, vol. 8, no. 1, pp. 127-133.

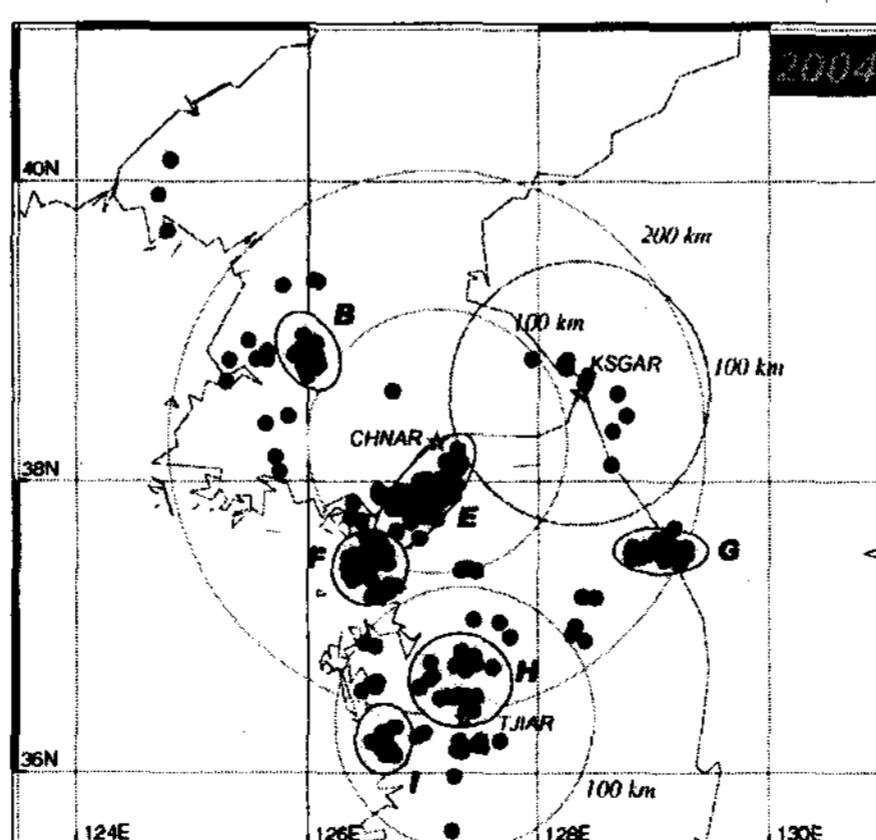


그림 1. 지진파-음파 분석을 통한 2004년도 인공발파 진앙분포도.

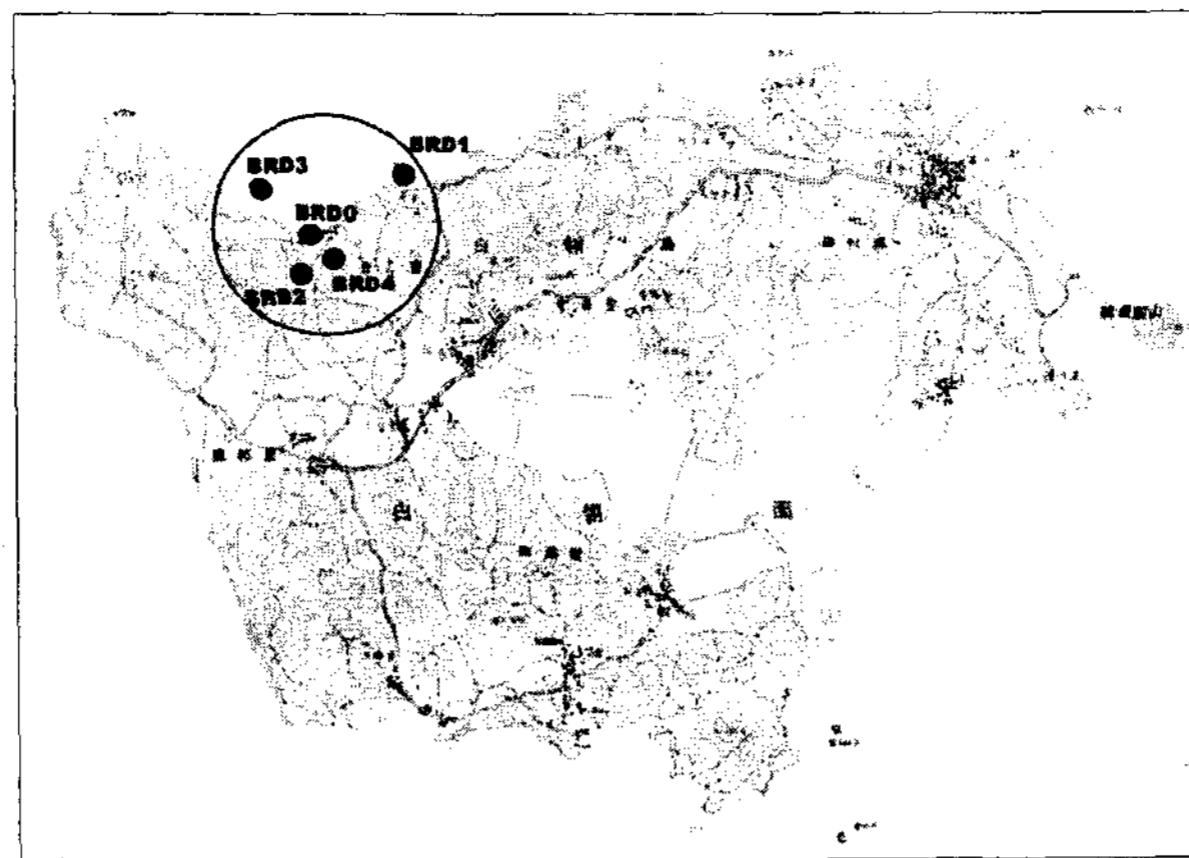


그림 2. 백령도 지진-음파 관측망 위치도.

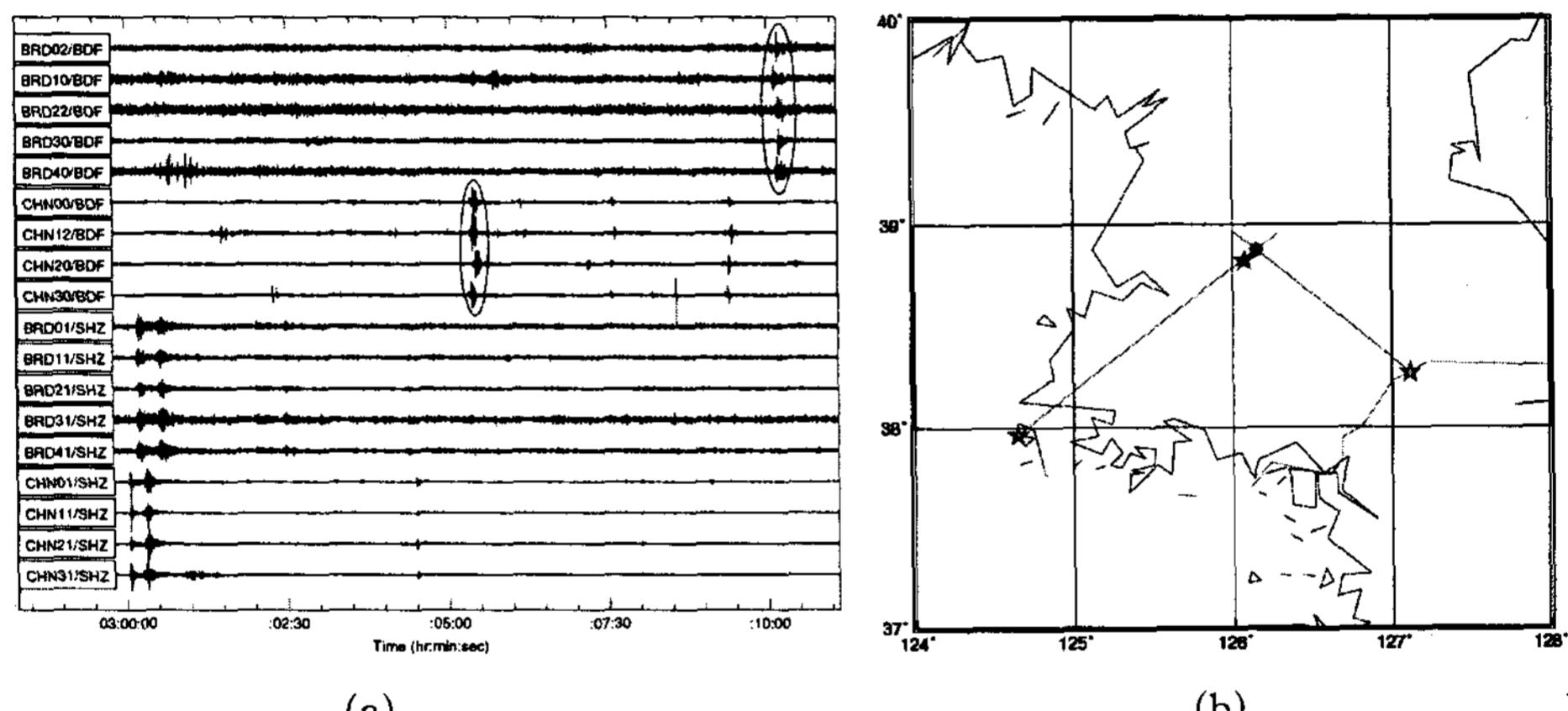


그림 3. (a) 철원, 백령도 관측망에 기록된 인공지진 예. (b) 진앙(별 모양)과 후방 방위각 교차(cross bearing)로 결정한 음원위치(원 모양).