

## 지진-공중음파 자료를 이용한 2002년도 인공발파 식별 Artificial blasts discrimination by using seismo-acoustic data in 2002

제일영<sup>1)</sup>      전정수<sup>1)</sup>      이희일<sup>1)</sup>      신인철<sup>1)</sup>  
Che, Il-Young    Jeon, Jeong-Soo    Lee, Hee-II    Shin, In-Cheol

---

### ABSTRACT

Artificial blasts, defined as seismo-acoustic events, were discriminated from natural earthquakes in the Korean Peninsula by the seismo-acoustic analysis. Total 197 seismo-acoustic events corresponding to 9 percent of seismic events in 2002 were analyzed and classified as artificial surface blasts. Events distribution pattern of the seismo-acoustic events in 2002 was similar to the previous result in 1999-2001, except for two regions. Newly determined seismo-acoustic events were added to the previous artificial blast database. To extend infrasound detection capability, new small-scale infrasound array(TJIAR) was installed in KIGAM. Preliminary analysis for the small array was conducted to discriminate artificial blasts in the southwestern part of the Korean Peninsula. The small array discriminated 5 seismo-acoustic events during short period analysis. And two infrasound arrays(TJIAR and CHNAR) were used to determine approximate sound source location by cross bearing method.

---

### 1. 서 언

한국지질자원연구원 지진연구센터에서는 대규모 지표발파로부터 발생하는 지진파와 공중음파(infrasonic wave) 신호를 관측하기 위하여 철원 지진-공중음파 관측망(seismo-acoustic array)을 운영하고 있다<sup>(1)</sup>. 또한 지진-공중음파 분석(seismo-acoustic analysis)으로 공중음파를 수반하는 지진파의 지진원(seismic source)을 인공발파(지표발파)로 정의하고 있으며, 한반도에서 발생하는 자연지진목록으로부터 식별하고 인공발파 데이터베이스를 구축하고 있다<sup>(2)</sup>.

본 연구는 기존 “지진-공중음파 분석을 통한 인공발파 식별연구”<sup>(3)</sup>의 연장으로 2002년도 한반도 및 인근지역에서 발생한 지진목록으로부터 인공발파를 식별하는데 목적이 있다. 또한 당해연도 인공발파의 특징을 이전결과(1999-2001년)와 비교하고 최종적으로 인공발파 데이터베이스에 추가하고자 한다.

---

1) 한국지질자원연구원 지진연구센터

현재까지 분석된 인공발파의 진앙은 철원관측망을 중심으로 200 km 이내의 북한지역과 남한 중부지역에 한정되어 분포하고 있다. 지역적으로 제한된 공중음파 관측범위의 확대를 위하여 최근 연구원내에 소규모 공중음파 관측망을 계획하고 설치하였다. 본 연구에서는 연구원관측망 설치와 특성을 소개하고자 한다. 또한 단기간 획득된 공중음파 자료에 대한 예비분석으로 한반도 남서부에서 발생하는 인공발파 식별과 철원관측망과의 동시분석으로 음원의 개략적인 위치를 결정하고자 한다.

## 2. 2002년도 철원 지진-공중음파 자료 분석

지진-공중음파 자료를 이용한 인공발파(지표발파) 식별은 기본적으로 지표면 발파로부터 발생하는 지진파와 음압변화(공중음파) 모두를 기록하고 분석하여 이루어진다. 어떠한 지진파의 지진원이 인공발파로 정의되기 위해서는 지진파의 진앙과 음파신호의 발생방향이 우선적으로 일치해야 한다. 다음과 같은 일련의 분석을 철원관측망 자료에 적용하여 지표발파와 관련된 지진파와 공중음파 신호를 관측하고 분석하였다. 먼저 한국지질자원연구원 지진분석시스템(KEMS, Korea Earthquake Monitoring System)이 분석한 한반도 및 인근지역에서 발생한 지진기록의 진앙위치와 지진발생시간을 이용하였다. 음파기록에 대해서는 0.5 ~ 5 Hz로 필터링 처리 후, 철원관측망으로부터 각 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 공중음파 신호를 동일한 지표발파에서 발생한 것으로 결정하는 중요한 인자로, 후방 방위각이 지진파로 결정된 진앙의 후방 방위각과  $\pm 10$ 도 이내일 경우 해당 지진파와 공중음파 신호를 하나의 지표발파에서 발생한 것으로 해석하고 인공발파로 식별하였다. 지진파로 결정된 진앙의 후방 방위각과 공중음파신호의 후방 방위각의 차이는 지진파의 진앙계산과 공중음파신호의 배열망 분석 시 발생하는 오차 그리고 바람에 의한 공중음파 신호의 편향을 고려한 것이다. 이와 같은 분석으로 식별된 이벤트를 “지진-공중음파(seismo-acoustic) 이벤트” 혹은 “인공발파 이벤트”로 정의하였다<sup>(2)</sup>.

본 연구의 분석기간은 2002년 1월부터 2002년 11월까지 총 11개월이며, 연구지역은 한반도 및 인근지역(위도 :  $32.5^{\circ} \text{ N} \sim 43.5^{\circ} \text{ N}$ , 경도 :  $123^{\circ} \text{ E} \sim 132^{\circ} \text{ E}$ )을 대상으로 하였다. 분석기간 동안 지진분석시스템(KEMS)은 연구지역에서 하루평균 6개 이상의 총 2100 여 개의 지진을 분석하였다. 이중 지진파와 공중음파 신호를 함께 수반하는 197 개의 인공발파 이벤트가 식별되었다. 그림 1은 지진목록(지진분석시스템 결과) 중 지진-공중음파 분석으로 식별된 인공발파(지표발파)의 진앙분포도이다. 그림 1(a)는 관측망 설치 이후부터 2001년까지 분석된 총 453개 인공발파의 진앙분포이고 (b)는 2002년도에 분석된 197 개의 진앙분포도이다. 2002년도에 분석된 이벤트 중 21개는 북한지역에서 발생하고 나머지는 남한지역에서 발생하였다. 진앙분포도에서 진앙이 집중되는 지역을 A부터 I까지 총 9개 지역으로 분류하였다. 북한지역에서 진앙이 집중되는 지역을 A, B, C와 D지역으로, 남한지역에서는 E, F, G, H와 I지역으로 분류하였다. 기존에 분석된 인공발파 이벤트의 진앙분포(a)와 2002년도 분석결과(b)를 비교할 때, 북한 A와 C지역의 인공발파가 2002년도에는 발생하지 않은 특징을 보이고 있다. 두 지역을 제외하고는 남북한의 진앙분포가 이전 결과와 유사하게 나타나고 있다. 남한지역에서 발생한 인공발파의 대부분은 철원으로부터 50 km 이내의 근거리지역, 영종도 인근지역과 강원도 동해에 분포하고 있다. 이들 지역에 대해서는 이미 현장조사

로 지표발파를 수행하는 지역으로 확인된바 있다<sup>(4)</sup>. H와 I지역은 인공발파 발생수가 증가하고 있는 지역으로 향후 이들 지역에 대한 현장조사를 필요로 한다.

2002년도 지진-공중음파 분석으로 한반도에서 발생한 전체 지진목록 중 약 9%에 해당하는 인공발파 이벤트를 식별하였다. 2002년도 분석결과를 기존 인공발파 데이터베이스 (Ground Truth Database)에 추가하여 관측망 운영이후 현재까지 총 650개의 인공발파 정보를 구축하였다.

### 3. 연구원내 공중음파 관측망 설치와 운영

철원 지진-공중음파 관측망의 운영과 분석으로 지표발파(인공발파) 식별이 가능하였다. 그러나 분석된 인공발파의 진앙은 철원을 중심으로 200 km이내의 북한지역과 남한의 중부지역에 한정되고 있다. 결과적으로 200 km 이상의 거리에서 발생하고 있는 인공발파는 식별되지 못하고 있다. 따라서 한반도 남서부지역에서 발생하는 인공발파 식별을 위하여 새로운 공중음파 관측망 설치를 계획하였다. 새로운 관측망의 설치목적은 공중음파 관측범위의 확대외에도 저가의 소규모 공중음파(인프라사운드) 관측망 설치와 운영의 가능성을 평가하는데 있다. 또한 철원관측망과 연계된 음원의 위치추적 등의 공중음파 관련 연구 및 기술개발에도 목적이 있다. 본 관측망은 기존 철원관측망에 비해 소규모로 설계되었으며, 설치가 간단하고 저가의 비용으로 운영된다는 특징이 있다. 설치장소는 관측망 유지보수가 용이하고 설치에 따른 공간문제를 해결하기 위하여 연구원내로 결정하였으며, 새로운 관측망을 “연구원관측망(TJIAR)”으로 명명하였다.

연구원관측망은 철원관측망(CHNAR)과 같은 삼각형 모양의 4개 관측소로 이루어졌으나, 관측소간의 최대거리가 293미터로 철원관측망에 비해 소규모로 구성되었다. 또한 철원관측망과 달리 각 관측소에는 지진계가 설치되지 않고 공중음파 센서만을 설치하였다. 설치비용의 절감을 위하여 유선으로 각 관측소의 자료를 전송하여 1개 기록계에서 자료를 획득하였다. 그림 2는 연구원내 4개 시험용 공중음파 관측소의 위치도이다. 삼각형 내부에 위치한 중심관측소(TJI00)는 연구원내 지진관측소(TJN)와 동일한 장소에 설치하였고, TJI01은 중심관측소로부터 북동쪽 135 m에 위치하고 TJI02는 남쪽으로 147 m에 위치하며, TJI03은 북서쪽 142 m에 위치하고 있다. 음원의 정확한 후방 방위각 계산을 위하여 광파거리측정기로 관측소간의 상대거리와 표고차이를 측정하였다. 기록계는 지진관측소(TJN)에 설치하였으며, 삼각형 꼭지점에 위치한 각 관측소까지는 250 m 자료전송선을 중심 관측소(TJI00)까지는 30 m 유선을 사용하였다. 전송선은 자료전송 및 음파센서에 전원을 공급하는데 이용된다. 유선 자료전송과정에서 발생하는 잡음을 최소화하기 위해 각 관측소에는 증폭기(pre-amplifier)를 사용하여 신호증폭 후 전송하도록 구성하였다. 공중음파센서는 미국 남감리대학(SMU)에서 제작한 공중음파센서(Seattle Q microphone)를 사용하였다. 공중음파 센서는 공중음파 주파수영역인 0.5 ~ 5 Hz에서 음압에 대해 일정한 반응을 갖도록 설계되었다. 사진 1(a)는 음파센서 내부사진으로 8개의 마이크로폰으로 구성되었으며, 외부흡입장치(다공성 호스) 8개를 연결할 수 있도록 설계되었다. 사진 1(b)는 기록계와 각 관측소에 설치된 장비구성이다.

### 4. 연구원관측망 자료의 예비분석

연구원관측망에서 획득된 공중음파 자료에 대한 예비분석을 실시하였다. 예비분석은 주파수-파수 분석으로 특이 음파신호에 대한 후방 방위각 계산 등 철원관측망 자료처리와 동일하게 수행하였다. 예비분석 결과 연구원관측망(대전)으로부터 100 km 이내에 위치하는 5개 근거리 인공발파 이벤트를 식별할 수 있었다. 그림 3은 연구원관측망 예비분석으로 식별된 인공발파 이벤트의 분석결과이다. 그림 3(a)에서 위의 4개 파형은 연구원관측망의 공중음파 파형이고, 아래는 철원관측망에 기록된 지진파형이다. 지진파의 진앙은 관측망 서쪽 50km에 위치하고 있으며 지진파 발생시간(origin time)이후 139초 후에 특이 음파신호가 연구원관측망에 기록되었다. 특이 음파신호에 대한 주파수-파수분석으로 결정된 음원의 후방 방위각은 270°로 진앙의 후방 방위각과 일치하고 있다. 지진파의 진앙과 음원의 후방 방위각을 그림 3(b)에 도시하였다. 진앙은 그림 1(b)의 "I" 지역에 해당하고 예비분석 기간동안 2개의 지진-공중음파 이벤트가 분석되었다.

연구원관측망 운영목적 중의 하나는 음원의 개략적인 위치결정에 있다. 철원관측망과 연구원관측망 모두에 기록된 음파신호의 후방 방위각을 계산하여 교차하는 지점(cross bearing)을 개략적인 음원의 위치로 결정할 수 있다. 음원의 위치결정을 위해서는 대규모 음원이 발생해야 하고 211 km 떨어진 철원과 연구원관측망 모두에 기록이 되어야 한다. 또한 후방 방위각이 교차하는 지점에서 두 관측소까지 도달하는 음파신호의 이론적인 전파시간 차이와 실제 기록된 음파신호간의 시간차이가 유사하여야 한다. 그림 4(a)는 두 관측망 모두에 기록한 공중음파 파형으로 각 관측망에는 3분 간격의 두 음파신호가 기록되었다. 3분간 지속되는 신호에 대해 시간창(time window)을 이동시켜 각 시간창에서 후방 방위각을 계산하였다. 철원관측망과 연구원관측망에서 계산된 후방 방위각은 각각 282 ~ 285° 와 308 ~ 312°이다. 그림 4(b)는 각 관측망에서 계산된 후방 방위각 범위를 도시하여 구한 개략적인 음원의 위치를 보이고 있다. 음파의 발생지역은 서해북부지역에 위치하고 있으며, 이와 같은 형태의 신호가 2002년 12월 19일과 20일 이틀간 12회 발생하였다.

## 5. 결론 및 토의

2002년 지진-공중음파자료 분석으로 총 197 개의 인공발파 이벤트를 자연지진목록으로부터 식별하였다. 이는 전체 지진 발생수의 약 9%에 해당한다. 인공발파 이벤트는 지역적으로 특정지역에 집중 분포하고 있으며 1999-2001년 결과와 유사한 진앙분포를 보이고 있다. 특징적으로 북한 A, C지역에서 발생했던 인공발파 이벤트가 2002년도에는 발생하지 않았다. 본 연구에서 분석된 결과를 기존 인공발파 데이터베이스에 추가하여 현재까지 총 650개의 인공발파가 식별되었다.

공중음파 관측범위의 확대와 음원의 위치 결정을 위하여 한국지질자원연구원 내에 제 2의 공중음파 관측망을 설치하였다. 연구원관측망 자료에 대한 예비분석으로 한반도 남서부 지역에서 발생한 5개의 인공발파를 식별하였다. 또한 철원관측망과 연구원관측망 모두에 기록된 공중음파 신호의 후방 방위각을 구하여 음원의 개략적인 위치를 결정할 수 있었다. 연구원관측망 자료에 대한 예비분석결과 향후 저가의 소규모 공중음파관측망 설치로 인공발파 식별등 공중음파와 관련된 연구범위를 확대할 수 있으리라 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. 전명순, 전정수, 제일영, 2000, "지진과 인공발파의 식별", 대한화약기술학회 2000년도 추계 학술심포지엄, (주)한화 인천공장 9월 30일, pp 83-88.

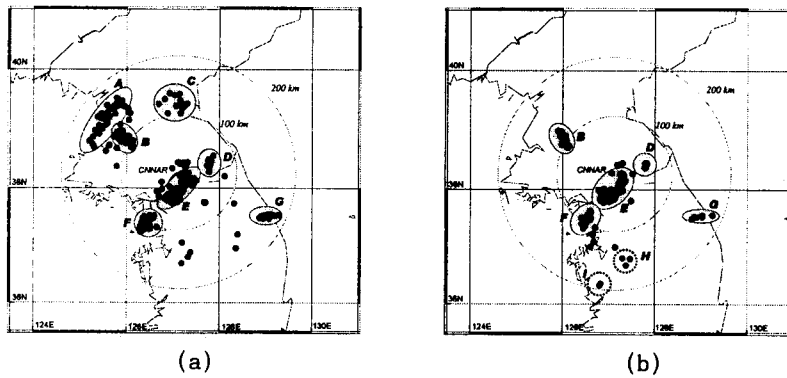


그림 1. (a) 1999년 - 2001년 기간동안 분석된 인공발파의 진앙분포도. (b) 2002년도에 분석된 인공발파의 진앙분포도.

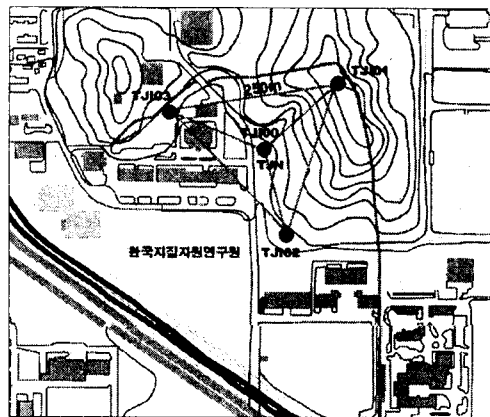
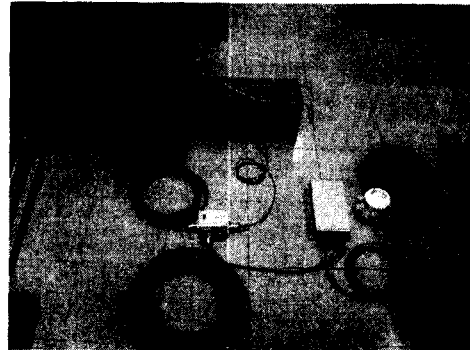
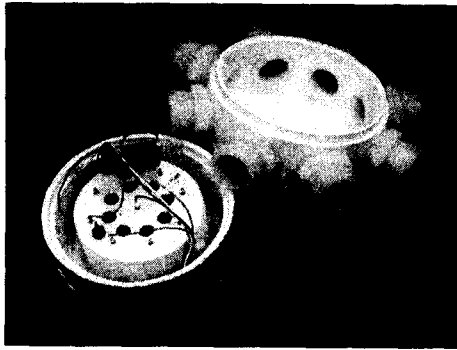


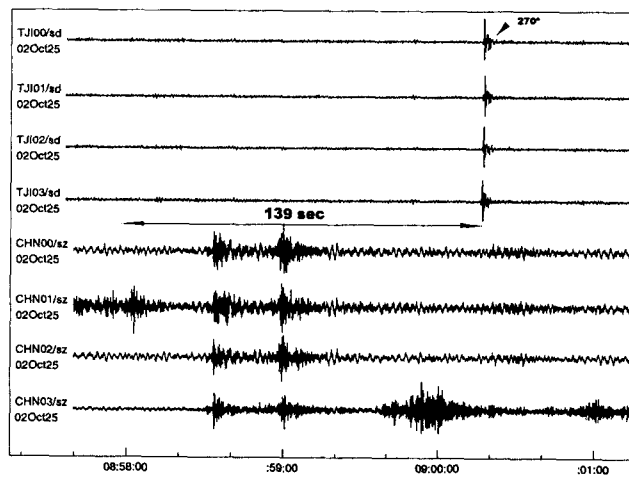
그림 2. 연구원내 시험용 공중음파 관측망 구성도.



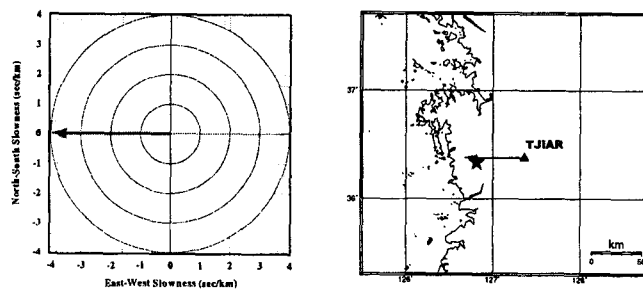
(a)

(b)

사진 1. (a) 음압센서 내부사진. (b) 각 관측소 장비구성.

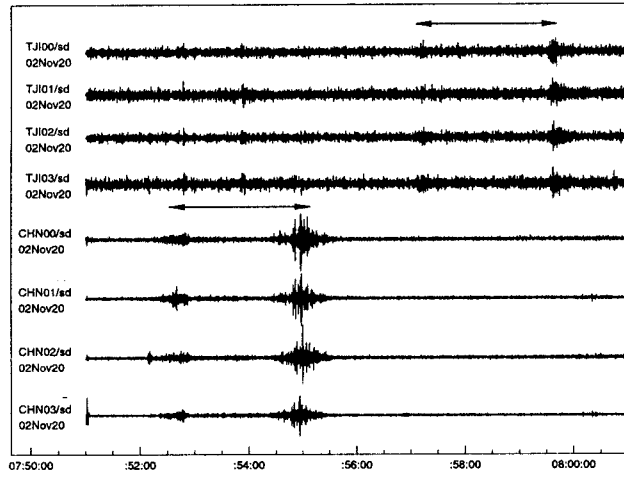


(a)

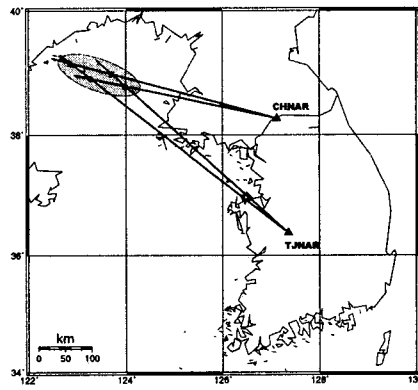


(b)

그림 3. 연구원관측망을 이용한 인공발파 식별분석. (a) 연구원관측망에 기록된 공중음파 파형(위 4개 파형)과 칠원관측망에 기록된 지진파형(아래 4개 파형). (b) 공중음파 신호의 주파수-파수분석과 근거리 인공발파의 진앙위치도.



(a)



(b)

그림 4. (a) 2002년 11월 20일, 연구원관측망과 철원관측망에 기록된 공중음파 신호. (b) 후방 방위각 교차(cross bearing)로 결정된 개략적인 음원의 위치.