

지진-공중음파 자료를 이용한 2001년도 인공발파 식별 Artificial blasts discrimination by using seismo-acoustic data in 2001

제일영 ¹⁾
Che, Il-Young

전명순 ¹⁾
Jun, Myung-Soon

전정수 ¹⁾
Jeon, Jeong-Soo

ABSTRACT

Artificial blasts, defined as seismo-acoustic events, were discriminated from natural earthquakes in the Korean Peninsula by analyzing seismo-acoustic data. 219 seismo-acoustic events corresponding to 9 percent of total seismic events in 2001 were analyzed and classified as artificial surface blasts. Most seismo-acoustic events were concentrated in several areas. This distribution pattern was similar to the previous result in 1999-2000. Most of seismo-acoustic events especially concentrated at 7 small areas in North and South Korea. The number of seismo-acoustic events occurred in North and South Korea was 79 and 140 events, respectively. The local magnitude of seismic events from North Korea was relatively larger than from South. And some infrasound occurred from North Korea had a characteristic of sequential arrivals of signals, which reflected the different propagation in the atmosphere.

1. 서 언

한국지질자원연구원은 지진자료분석시스템의 운영으로 2001년 동안 한반도 일대(123° ~ 132°E, 32° 30' ~ 43° 30'N)에서 총 2700 여 개의 지진을 분석하였다. 지진자료분석은 자동 분석시스템의 결과에 대해 이차 분석자(reviewer)에 의해 재분석한 결과이다. 발생한 지진의 규모는 최대 4.0_M으로 대부분이 미소지진에 해당한다. 또한 상당수의 미소지진은 산업 현장에서의 발파와 같은 인공적인 이벤트가 대부분을 이루고 있어 순수한 자연지진은 그 수가 매우 적을 것으로 해석된다.

철원지역에 설치된 지진-공중음파 관측망을 이용하여 자연지진으로부터 인공발파를 식별할 수 있으며⁽¹⁾, 1999-2000 기간 중 철원 관측망에 기록된 지진파와 공중음파자료에 대한 분석으로 인공발파 이벤트 식별이 수행된 바 있다.⁽²⁾ 본 연구는 인공발파 식별연구의 연장으로서 2001년 동안의 공중음파자료를 이용하여 1년 동안의 인공발파기록을 식별하고, 또한 식별된 인공발파 진앙의 위치와 특성을 정리하여 간접적인 발파정보를 포함한 Ground Truth

1) 한국지질자원연구원 지진연구센터

의 구축으로 지진자료분석에 이용하려는데 그 목적이 있다.

지진-공중음파 자료를 이용한 인공발파식별은 기본적으로 발파로부터 발생한 지진파와 발파폭풍압 모두를 기록하고 분석하여 이루어진다. 어떠한 이벤트가 인공발파로 식별되기 위해서는 지진파의 진앙과 배열망 자료처리로 계산된 공중음파의 발생방향이 우선적으로 일치해야 한다. 또한 공중음파의 도달시간은 진앙과 철원관측망까지의 거리에 의해 결정된다. 따라서 기록된 공중음파의 발생방향이 이벤트의 진앙과 일치하고 공중음파신호가 적정시간대에 도달하는 경우 인공발파로 식별될 수 있다. 이와 같은 분석으로 식별된 이벤트를 “지진-공중음파(seismo-acoustic) 이벤트” 혹은 “인공발파 이벤트”로 정의하였다. 2001년에 기록된 모든 공중음파자료에 대해 일차적으로 필터링(0.5-5Hz)하여 시각적으로 4개 관측소에 모두 기록된 특이 음파신호를 확인하였다. 각 음파신호에 대해 배열망 자료처리로 음파신호의 발생방향을 계산하고 국내외 지진발생목록을 이용하여 유사시간에 발생한 지진 이벤트와 비교, 분석하였다.

2. 분석결과

그림 1은 철원 관측망 자료분석으로 결정된 219개 지진-공중음파 이벤트(인공발파)의 진앙지를 도시한 것이다. 이벤트들은 철원 관측망을 중심으로 반경 200 km 이내에서 특정지역에 집중되어 분포하는 특징을 보이고 있다. 이러한 인공발파 이벤트들의 분포는 관측망 설치 후 2000년 12월까지 분석된 결과와 유사한 분포를 보이고 있으며,⁽²⁾ 전체 지진목록 중 내륙에서 발생한 이벤트의 약 9%가 인공발파로 식별된 것이다.

남한과 북한지역에서 발생한 이벤트의 수는 각각 140개와 79개이며, 진앙지가 집중되는 지역을 7개 지역으로 분리하였다. 남한에서 이벤트가 집중되는 지역에 대해서는 현장조사가 이루어졌으며, 지표면에서 발파를 수행하는 발파장들이 확인된바 있다.⁽²⁾ 동해에 위치한 노천 석회석광산(지역G)과 영종도 토목공사현장(지역F)에서 각각 4개와 16개의 이벤트가 식별되었다. 또한 남한에서 발생한 상당수의 지진-공중음파 이벤트는 대부분 철원 관측망으로부터 60km 이내에 위치한 채석장(지역E) 등에서 발생한 것으로 분석된다. 2001년 8월에 지역E에 위치한 채석장에서 처음으로 이동식 음파센서와 지진계를 동시에 운영하여 발파현장에서 지진파와 발파폭풍압을 측정하였다. 지역E는 다수의 채석장이 분포하고 있어 다시 몇 개의 소지역으로 분리될 수 있으며, 이들 지역에 대한 현장조사를 필요로 한다.

북한지역에서 발생한 지진-공중음파 이벤트의 분포 또한 특정지역에 집중되어 분포하고 있어 4개 지역으로 구별하였다(지역A, B, C와 D). 그림에서 지역A는 철원관측망으로부터 약 170km 거리에서 북동-남서방향의 선형으로 진앙이 분포하고 있으며, 23개의 이벤트가 분석되었다. 이 지역에서 발생한 음파의 도달시간은 발파시간(지진파 발생시간)으로부터 약 9분 후에 관측망에 도달하여 기록되었다. 지역B는 철원을 기준으로 북서방향에서 위치하고 있으며 거리는 약 120 km로 25개의 이벤트가 식별되었다. 철원에서 북쪽방향에 위치한 지역C는 거리가 약 130km로 11개의 이벤트가 발생하였다. 마지막으로 지역D는 철원관측망 동쪽에 위치한 지역으로 15개의 이벤트가 식별되었다. A, B와 D지역에서는 2001년 중 고르게 발생하였으나, C지역에서 발생한 이벤트는 2001년 1월부터 4월에만 분포하는 특징을 보이고 있다. 북한 A지역에서 발생한 이벤트의 평균규모는 2.1M로 다른 지역에 비해 상대적으로 규모가 큰 이벤트가 발생하였다. 또한, 북한에서 발생한 인공발파의 규모는 남한에서 발생한 것에 비해 큰 것으로 나타났다.

일반적으로 발파와 관련된 공중음파 신호는 지속시간이 수초 이하인 한 개의 공중음파 위상(phase)으로 기록된다. 그러나, 북한에서 발생한 비교적 장거리(>150km)를 전파한 공중음파 신호의 경우 1개 이상의 위상이 기록되는 경우가 발생하고 있다. 그림 2는 북한 지역A에서 발생한 것으로 철원 관측망으로부터 진앙까지의 거리는 173km이며, 기록된 공중음파의 신호는 발파시간으로부터 약 525초 후에 철원에 도달하기 시작하여 약 2분 여 동안 공중음파 신호가 지속되며, 2분 동안에는 여러 개의 위상이 연속적으로 기록되었다. 단일음원에서 발생하여 상이한 전파시간으로 기록되는 위상들은 각각 다른 전파경로로 도달한 결과이다.⁽³⁾ 나중에 도달하는 위상은 이전 위상에 비해 보다 높은 고도에서 굴절하여 전파한 경우이므로 이전 신호에 비해 전파시간이 길다. 따라서 나중에 도달하는 신호는 이전 신호에 비해 보다 높은 고도에서 지표면으로 입사한다고 볼 수 있으므로, 각 위상에 대해 겹보기 속도(apparent velocity)를 구해 비교하였다. 그림 3은 2분 여 동안 지속되는 공중음파 신호에 대해 5초 크기의 시간창을 설정하고 시간축을 따라 움직이면서 해당 창에서의 겹보기 속도변화를 계산한 결과이다. 초기에 도달한 신호의 겹보기속도는 340 m/s이나, 연속적으로 도달하는 신호의 속도는 점진적으로 증가하여 마지막에 도달한 신호의 경우 겹보기 속도는 약 390 m/s까지 증가한다. 겹보기 속도(관측망 속도)의 증가는 대기로부터 철원관측망으로의 입사각(수평으로부터)의 증가를 의미한다. 즉, 뒤에 도달하는 신호는 초기에 도달하는 신호에 비해 보다 높은 고층 대기를 통해 큰 입사각으로 관측망에 도달한 결과를 지시한다.

3. 결론 및 토의

2001년 지진-공중음파자료의 분석으로 총 219개의 인공발파 이벤트를 식별하여 자연지진 목록으로부터 식별하였다. 이는 내륙에서 발생한 전체 지진발생수의 9%에 해당한다. 인공발파 이벤트는 지역적으로 특정지역에 집중 분포하고 있으며 1999-2001년 결과와도 유사한 진앙분포를 보이고 있다. 이벤트가 집중되는 지역을 7개의 소그룹으로 구별하였으며, 일부지역은 현장조사로 발파장을 확인하였다. 북한지역에 발생한 이벤트의 경우도 지역적으로 집중되어 분포하고 있으며, 남한지역에서 실시하는 발파에 비해 상대적으로 규모가 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 지진-공중음파 자료분석으로 식별된 인공발파 이벤트는 실제적으로 일부분에 해당하는 것으로 판단된다. 즉 발파음원의 규모, 관측소까지의 거리, 대기 속도구조, 배경 잡음의 영향 등으로 발파장으로부터 발생한 지진-공중음파를 관측하는데 제한되었기 때문이다. 그러나, 인공발파 이벤트 정보구축은 자연지진과 인공발파에 대한 연구에 이용될 수 있으며, 진앙이 집중되거나 확인되지 않은 지역에 대해서는 차후 현장조사로 발파장을 확인하고 발파정보 및 이동식 지진계와 음압센서의 현장운영으로 발파자료를 획득할 수 있을 것이다.

철원 관측망에 기록되는 공중음파 신호에는 지진-공중음파 이벤트와 관련된 신호이외에도 다양한 신호가 기록되고 있다. 대부분의 신호에 대해서는 발생위치와 음원이 확인되지 못하고 일부 신호에 대해서만이 음원이 확인되었다. 음파신호의 음원확인을 위해서는 먼저 발생 위치를 결정하여야 하므로 현 관측망에 대한 음원 결정기술의 개발이나 적절한 위치에 다른 지진-공중음파관측망의 운영으로 음원의 확인이 가능하리라 본다. 또한 2개 이상의 관측망의 운영으로 현재의 지진-공중음파 분석에서 발생할 수 있는 다른 소스에서 발생한 지진파와 공중음파간의 우연한 일치로 결정되는 인공발파 이벤트를 제거할 수 있으므로 자료분석의 신뢰성을 높일 수 있으리라 본다.

참고 문헌

1. 전명순, 전정수, 신인철, 김동균, 제일영, 김용성, 박정호, B. Stump, C. Hayward, J. McKenna, 1999, "철원 지진-공중음파 관측망 설치," 한국지진공학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 52-57.
2. Che, I. Y., M. S. Jun, J. S. Jeon, K. D. Min, 2002, "Analysis of Local Seismo-acoustic Events in the Korean Peninsula", Geophysical Research Letters, in press.
3. Gossard, E. E., and W. H. Hooke, 1975, Waves in the atmosphere, Elsevier Scientific Publishing Co., New York.

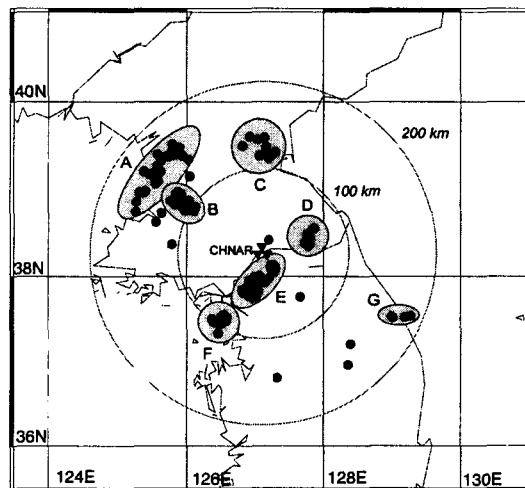


그림 1. 2001년도 지진-공중음파 이벤트의 진앙분포와 철원 관측망(CHNAR)의 위치도. 이벤트가 집중되어 분포하는 지역을 A, B, C, D, E와 F로 구별하였다.

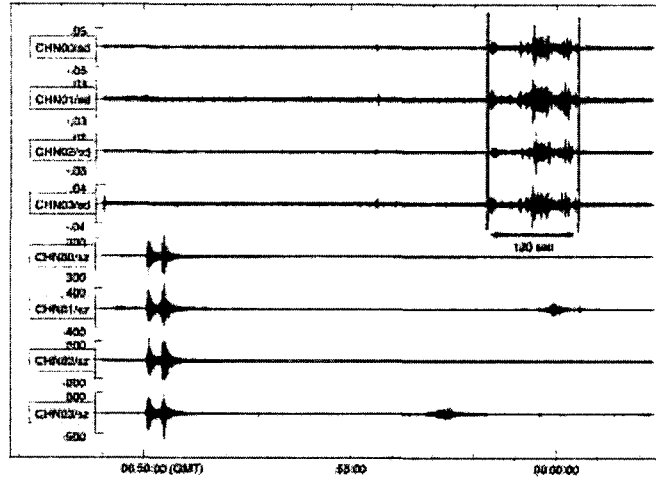


그림 2. 북한 A지역에서 발생하여 철원 관측망에 기록된 지진-공중음파 이벤트의 예. 위의 4개 파형은 0.5-5Hz로 필터링된 공중음파 파형이고 아래는 지진파 파형에 해당한다. 인공발파와 관련된 공중음파 신호가 발파시간 이후 525초부터 약 2분 여간 기록되고 있다.

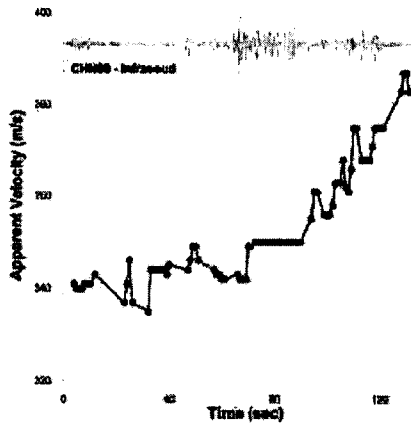


그림 3. 그림 2에서 2분 여 동안 기록된 공중음파의 겉보기 속도변화. 파형은 철원 중심관측소에 기록된 공중음파 파형.