

지진과 인공발파의 식별

Discrimination between Earthquake and Man-made Blast

전 명 순, 전 정 수, 제 일 영

Myung-Soon Jun, Jeong-Soo Jeon, Il-Young Che

한국자원연구소 지진연구센터

초 록

국내 지진관측소로부터 분석된 지진기록에는 자연지진 이외의 상당수의 인공발파를 포함하는 것으로 해석된다. 자연지진에 대한 지진특성연구, 지질학적 지진의 진원지연구 등을 위해서는 지진목록에서 인공발파를 식별할 필요가 있다. 한국자원연구소는 인공발파 식별을 위한 연구의 일환으로 지진-공중음파 관측망을 운영 중에 있다. 지진-공중음파 자료분석으로 구분된 인공발파 기록의 대부분이 발파를 실시하는 산업현장과 일치하고 있음이 확인되었다. 발파장의 위치, 발파시간, 규모 및 발파방법 등의 정보는 공중음파를 이용한 인공발파 식별에 관한 정량적 연구와 자연지진에 관한 연구 등에 기본적인 정보(Ground Truth Database)를 제공하리라 판단되므로 국내에서 실시되는 인공발파에 대한 정보가 요구된다.

핵심어 : 자연지진, 인공발파, 지진-공중음파 관측망

1. 서 언

한국자원연구소는 1998년 이후 국내 지진 관측소에서 관측된 자료에 대한 지진자료 자동분석시스템의 운영으로 지진의 진앙, 규모, 심도 및 발생시간을 결정하여 지진목록을 작성하고 있다. 국내 지진관측소의 증가와 지진계의 정밀도 향상으로 미소지진에 대한 관측 및 분석이 가능하며 한반도 내의 발생한 지진 발생 수는 1998년 9월 이후 1400여 개에 이른다.(그림 1(a)) 그러나 일부 지진의 진앙이 특정지역에 집중되어 분포하는데, 이들 지역은 지질학적으로 자연지진이 발생할 수 있는 곳 이외의 대규모 채석장, 광산 및 토목공사 등의 산업현장과 일치하고 있다. 또한 이들 지

역에서 나타나는 지진에 대한 시간대별 발생 빈도(그림 1(b))를 도시하였을 때 대부분이 일과시간에 편중되어 발생하는 경향으로 보아 지진목록에는 자연지진 이외에도 인공발파를 상당수 포함하는 것으로 해석된다.¹⁾

따라서 한반도 내의 지진관측 및 분석을 통한 발생시간, 위치, 발생심도 및 규모 등의 지진특성 결정에 앞서 지진목록에서 자연지진과 인공발파를 구별하는 작업이 선행되어야 한다. 한국자원연구소는 자연지진과 인공발파를 구별하기 위한 목적으로 발파 시 발생하는 음파를 관측하여 인공발파를 식별하고 있다. 지진파와 음파를 관측하는 지진-공중음파 관측망은 강원도 철원지역에 1999년 8월에 설치되어 운영되고 있다.

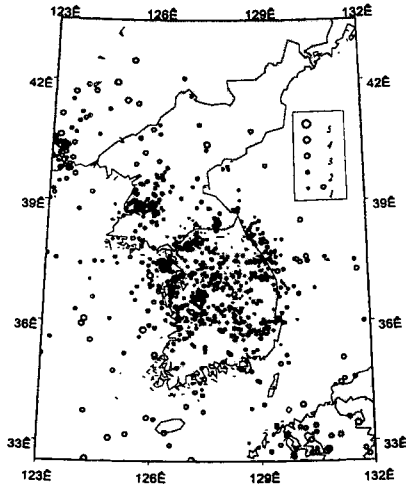
에 기본적인 정보를 제공하리라 판단된다.

2 월원 지진-공중음파 관측망

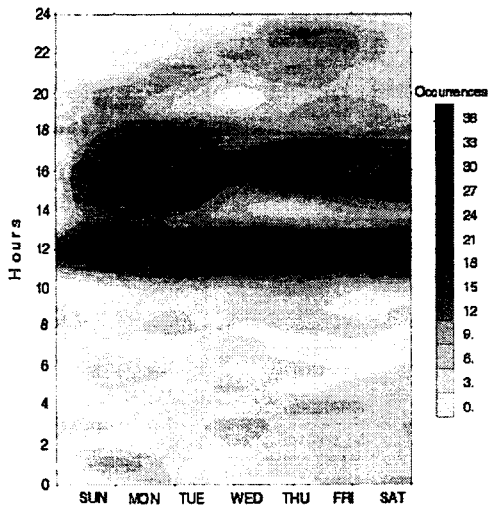
인공발파가 지진목록에 포함되면 지질학적인 응력구조연구 등에 영향을 주게 되므로, 지진목록에서 인공발파를 식별하여 분류하는 과정은 지진연구에 필수적이다. 자연지진과 인공발파의 식별을 위한 방법으로는 직접적인 지진파 분석연구가 진행되고 있으나 현재까지 명확한 방법이나 기준이 설정되어 있지 않은 상황이다.

한국자원연구소는 자연지진과 인공발파를 구별하기 위한 연구의 일환으로 지진-공중음파 관측망을 구축하여 인공발파를 구별하고 있다. 일반적으로 지하 심부에서 발생하는 자연지진은 대기로 음파를 형성하지 못하고 지진파만을 형성하게 된다. 그러나 인공발파 시에는 지진파와 함께 대기로 음파를 발생하게 된다. 따라서 음파를 수반하는 지진파의 관측 및 분석으로 인공발파를 구별할 수 있다. 음파 중 약 0.01-5Hz에 해당하는 저주파수의 음파는 인프라스운드(Infrasound wave)로 정의되며, 핵실험, 화산폭발, 운석의 이동, 태풍, 산사태, 오로라, 지진(Ground coupled waves), 인공발파, 초음속 비행기, 미사일 발사 등의 음원에서 발생한다. 대기로 전파하는 저주파수대 음파의 감쇠는 매우 약하여 상부대기층까지 전파가 가능하며, 대기층의 반사면(turning point)과 지표사이에 형성된 전파통로(propagation duct)를 따라 장거리 전파하여 수백 km 떨어진 지역에서도 관측이 가능하다.

인공발파 시 발생하는 지진파는 수km/s 속도로 전파하나 발파와 동시에 발생한 음파는 약 250-400m/s의 속도로 대기 중에 전파하게 된다. 일반적으로 대기에서 음파속도는 온도, 밀도, 압력 및 대기조건에 영향을 받으나, 근사적으로 온도함수로 계산되어 대기온도가 상



(a)



(b)

그림 1. (a) 한반도 내의 지진 진앙지 분포도
(b) 시간대별 지진발생 빈도.

발파정보에 해당하는 발파위치, 발파시간 및 발파규모 등은 명확하므로 지진-공중음파 자료분석에 적용되어 인공발파 식별연구에 중요한 정보를 제공하리라 본다. 또한 발파자료는 지진자료 자동분석 시스템의 정밀도 향상 등 지진자료를 이용한 한반도 지각구조 연구

승할 때 음파의 속도는 증가하게 된다.⁵⁾ 음파의 직접적인 전파경로 계산에 사용되는 유효 음파속도구조는 온도함수인 음파속도구조와 대기층에서의 바람의 벡터합으로 얻어진다. 따라서 계절적, 시간적으로 변화하는 고도별 온도와 바람구조 및 전파방향에 따라 음파의 전파경로와 전파시간이 결정된다.

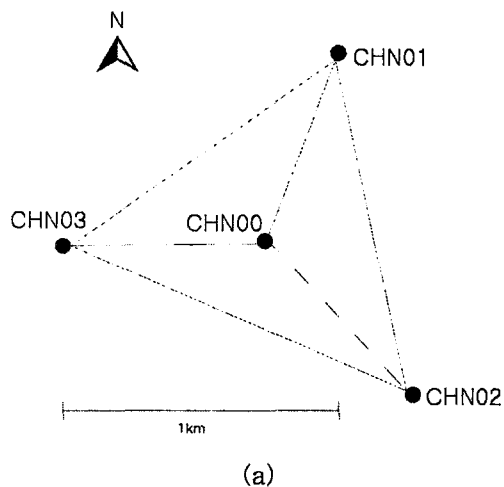


그림 2. (a) 철원 지진-공중음파 관측망 구성도 (b) 중심관측소 전경.

그림 2는 한국자원연구소가 운영중인 지진-공중음파 관측망의 구성도와 중심관측소의 사

진이다. 강원도 철원에 설치된 본 관측망은 중심관측소를 포함한 1km 간격의 4개 관측소가 삼각형모양으로 이루어져 있으며, 각 관측소에는 지진계와 대기의 기압변화를 측정하는 정밀기압계가 설치되어 있다. 4개 관측소에서 얻어진 자료는 무선통신과 전용선을 통하여 실시간으로 한국자원연구소로 전송되어 자동 분석이 이루어지고 있다.⁴⁾

3 지진-공중음파 자료를 이용한 인공발파 식별

현재까지 공중음파자료만을 이용한 음원의 위치결정은 이루어지지 못하나, 지진자료 분석방법을 적용한 공중음파 자료분석과 발파장의 기록 등의 정보를 이용하여 인공발파를 구별하고 있다. 공중음파 자료로부터 인공발파를 식별하기 위하여 먼저 본 관측망 및 국내 관측망의 지진자료를 이용하고 있다. 실시간으로 획득되는 지진기록에서 특정 이벤트가 결정되면 진앙지와 관측망간의 방향 및 거리가 결정되게 된다. 진앙과 관측소간의 거리와 음파의 속도를 고려할 때 음파가 도달할 수 있는 시간대가 형성된다. 음파기록에서 도달 가능 시간대의 자료에 대한 일관성분석이나 필터링에 의해 시간 지연을 갖는 특정 음파신호를 4개 음파신호에서 탐지할 수 있다. 본 관측망이 1km 간격의 4개 관측소로 이루어져 있으므로 특정 음파신호에 대한 주파수-파수 분석 등의 관측망 자료분석으로 음원의 방향을 결정할 수 있다. 음파의 전파방향이 진앙지와 일치하는 경우 지진신호와 음파신호는 동일한 발파에서 발생된 것으로 결정하여 자연지진이 아닌 인공발파로 분류할 수 있다.

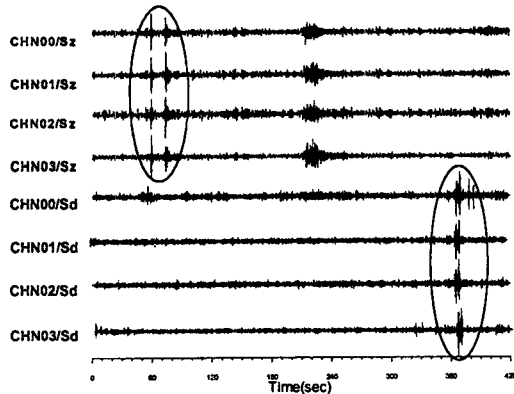


그림 3. 1999년 12월 5일 철원 관측망에 기록된 지진파(위)와 공중음파(아래) 파형.

지금까지 지진-공중음파 자료분석으로 지진 목록에서 상당수의 인공발파를 구별하고 있으며, 특정 지역에서 동일한 특성을 갖는 다수의 지진-공중음파 신호들이 발생하고 있다. 다수의 지진-공중음파가 발생하는 지역은 영종도 신공항 건설지역, 의정부 및 포천 근교에 위치한 채석장, 동해시에 위치한 석회석 광산으로 200km이하의 근거리 지역이다. 그림 3은 1999년 12월 5일 영종도에서 발생한 지진-공중음파 자료의 예이다. 위의 4개 파형은 지진파이고 아래 파형은 음파 파형이다. 지진자료분석으로 계산된 지진발생시간으로부터 철원관측망 중심관측소까지 음파의 도달시간은 325초이다.

동일한 발파장에서 발생한 음파가 관측망에 도달하는데 걸리는 전파시간은 지진-공중음파 기록들간 수초의 시간차이를 보이고 있다. 또한 발파 시 발생하는 음파가 관측망에서 기록되지 못하는 경우도 발생하는데, 이는 발파 당시의 대기조건과 바람의 영향으로 전파속도 구조의 차이 때문으로 해석된다.²⁾

4 발파조사 및 자료획득

발파현장에서 발파장의 위치와 정확한 발파

시간의 측정은 국내 대기조건에서 음파의 전파특성을 이해하는데 중요한 정보로 이용되어 지진목록에서 인공발파를 식별하는데 필요하다. 또한 발파규모와 발파형태에 대한 정보는 지진관측소에서 관측된 발파신호해석에도 유용하다. 발파정보를 획득하기 위하여 영종도 토목공사장, 포천, 의정부 채석장 및 동해에 위치한 석회석 광산에서 발파를 기록하였다.

그림 4는 철원 관측망에서 기록된 2000년 4월 6일 영종도 발파에 해당하는 지진 및 음파 파형이다. 발파장에서 관측망 중심까지의 거리는 107.0km이며, 정확한 발파시간으로부터 관측망까지 도달하는 시간은 323초로 음파의 수평전파속도는 331.3m/s로 계산된다. 음파의 전파시간이 직접적인 발파로 확인되지는 못했으나 지진-공중음파분석에 의해 발파로 분류된 그림 3의 전파시간과 유사하게 나타난다. 상기 분석에 의해 그림 3의 이벤트가 발파로 분류된다면, 지진파를 이용한 진앙의 위치는 영종도 발파장으로 결정되어야 한다. 그러나, 계산된 진앙지의 위치는 발파장과 오차를 보이고 있으므로 진앙지의 재결정을 필요함을 지시한다.

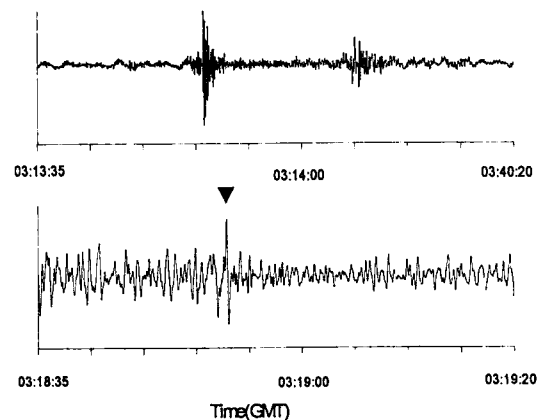


그림 4. 2000년 4월 6일 철원 관측망에서 기록된 영종도 발파의 지진파(위) 및 공중음파(아래) 파형. 음파 파형에 표시된 부분이 발파와 관련된 음파신호.

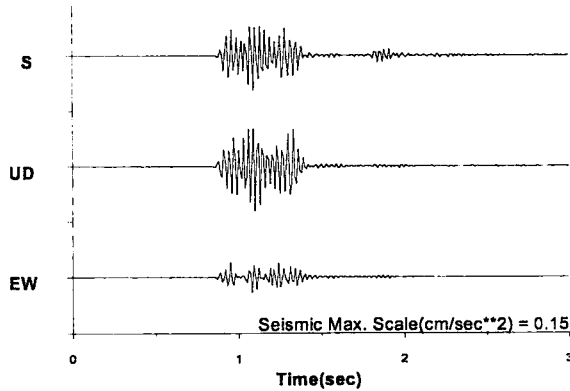


그림 5. 2000년 9월 28일 동해 석회석 광산에서 측정된 지진파형.

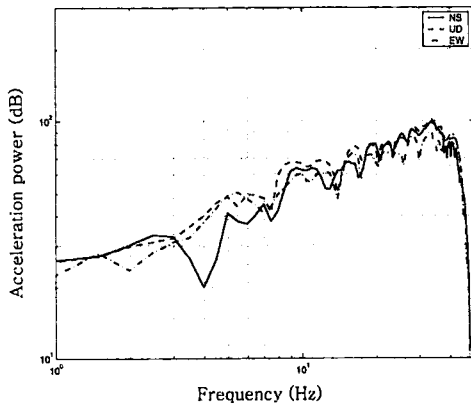


그림 6. 그림5 지진파형의 스펙트럼

그림 5는 2000년 9월 28일 동해 석회석 광산발파를 이동식 지진계로 측정된 지진파형이다. 그림 6은 지진파형의 스펙트럼으로 자연발파의 경우 스펙트럼의 최대치에 해당하는 주파수는 발파지연시간에 해당한다. 스펙트럼의 최대치에서의 주파수는 약 33Hz이므로 발파지연시간은 30ms로 계산되나, 스펙트럼의 분포는 발파지연시간 이외의 공간적인 발파형태, 발파방법, 발파지속시간 등의 영향을 받을 것을 고려해야 한다.³⁾ 자연지진과 인공발파를 구별하는 방법으로 시간-주파수 영역에서 미소

지진과 인공발파의 주파수특성 연구가 일반적으로 이용된다. 따라서 현장에서 측정된 인공발파의 발파지연특성은 지진관측소에서 관측되는 지진파형의 주파수 특성에 이용되어 향후 자연지진과 인공발파연구에 이용될 수 있다.

5 결론

한국자원연구소는 지진목록 중 인공발파를 구별하기 위한 목적으로 지진-공중음파 관측망을 설치 운영 중에 있다. 지진-공중음파 자료분석으로 음파를 수반하는 지진파를 인공발파로 분류하였으며, 인공발파로 분류된 기록은 주요 산업시설에서 발생한 것으로 조사되었다.

발파현장에서 정확한 발파시간을 측정된 결과 동일지역에서 인공발파로 분류된 기록의 음파 전파시간과 비교적 잘 일치하고 있다. 향후 발파현장에서의 정확한 발파시간과 발파폭풍압의 측정은 공중음파의 전파경로와 음파파형 모델링에 정량적으로 이용될 수 있다. 또한 발파정보의 구축으로 지진파 주파수특성을 이용한 자연지진과 인공발파 식별연구에 이용될 수 있다.

참고 문헌

1. 전명순, 김동균, 강익범, 김성배, 전정수 (1999), 지진관측의 문제점 및 향후 대책, 한국자원연구소 논문집.
2. 제일영, 전명순, 전정수, 김용성, 박윤경, 김동균, 2000, 국내 인프라사운드 전파특성연구, 한국지진공학회 2000년도 춘계 학술발표회 논문집.
3. Albert T. S., 1989, High-frequency seismic observations and models of

- chemical explosions: implications for the discrimination of ripple-fired mining blasts, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 79, No. 4, pp. 1089-1110.
4. 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.
 5. Wessels, H. R. A., C. A. Velds, 1983, Sound propagation in the surface layer of the atmosphere, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 74, No. 1, pp. 275-280.