

## 지진과 스펙트럼특성과 선형판별분석을 이용한 자연지진과 인공지진 식별

### Discrimination between earthquake and explosion by using seismic spectral characteristics and linear discriminant analysis

제일영<sup>1)</sup>            전정수<sup>1)</sup>            이희일<sup>1)</sup>  
Che, Il-Young    Jeon, Jeong-Soo    Lee, Hee-Il

---

#### ABSTRACT

Discriminant method using seismic signal was studied for discrimination of surface explosion. By means of the seismic spectral characteristics, multi-variate discriminant analysis was performed. Four single discriminant techniques -  $Pg/Lg$ ,  $Lg1/Lg2$ ,  $Pg1/Pg2$ , and  $Rg/Lg$  - based on seismic source theory were applied to explosion and earthquake training data sets. The  $Pg/Lg$  discriminant technique was most effective among the four techniques. Nevertheless, it could not perfectly discriminate the samples of the training data sets. In this study, a compound linear discriminant analysis was defined by using common characteristics of the training data sets for the single discriminants. The compound linear discriminant analysis was used for the single discriminant as an independent variable. From this analysis, all the samples of the training data sets were correctly discriminated, and the probability of misclassification was lowered to 0.7%.

---

#### 1. 서 언

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

지진파-음파 분석은 지표발파로부터 발생하는 대기압력 변화를 관측하고 분석함으로써 인공지진에 대한 명확한 식별을 가능케 하고 있다. 그러나 지진파-음파 분석은 한반도 일원에서 관측된 전체 지진목록 중 약 9%에 해당하는 지진기록만을 인공지진으로 식별하고 있으며, 음파 신호를 수반하지 못하는 지진파에 대해서는 인공지진으로 정의 할 수 없다. 지진파-음파 분석으로 식별된

1) 한국지질자원연구원 지진연구센터

인공지능 이외의 지진기록은 모두 순수한 자연지진이 아닌 것으로 판단된다. 따라서 음파 신호를 관측할 수 없는 인공지능의 식별을 위해서는 지진기록에 대한 직접적인 식별분석이 필요하다.

지진원에 대한 지진학적 관심 이외에도 핵실험 감시목적으로 자연지진과 인공지능을 식별하기 위한 많은 연구가 수행 중에 있다. 현재까지 지진자료를 이용한 다양한 식별기술 (discriminant method)이 제안되었으나, 식별기술의 성공여부는 연구지역에 따라 다른 결과를 보이고 있다. 따라서 지진자료를 이용한 객관적이고 명확한 식별을 위해서는 연구지역의 지질조건과 지진원특성에 맞는 식별기술이 개발되어야 한다. 또한 단일 식별기술의 제한적인 식별능력을 향상시키기 위해서 다양한 식별기술을 동시에 적용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 한반도에서 발생하는 자연지진과 인공지능의 지진파 특성을 비교하고, 지진원 차이에서 나타나는 지진파 스펙트럼 정보를 이용한 지진원 식별방법을 연구하고자 한다. 또한 식별능력의 향상을 위해 단일 식별기술을 동시에 적용하는 식별방법을 연구하고자 한다.

## 2. 자연지진과 인공지능 식별기술

본 연구에서는 현재까지 제안된 다양한 식별기술 중 비교적 적용이 간단하고 효과적인 지진파 스펙트럼 비를 이용한 식별방법을 적용하였다. 지진파 위상 간의 진폭스펙트럼 비 (phase spectral amplitude ratio)와 위상내의 스펙트럼 비(cross spectral amplitude ratio) 등의 식별기술은 연구자와 연구지역에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 사용되고 있는 효과적인 식별기술이다. 또한 스펙트럼 특성을 이용한 단일 식별기술에서 발생하는 오차를 줄이기 위하여 여러 개의 단일 식별기술을 동시에 사용하는 판별분석을 연구방법으로 선정하였다.

판별분석에 사용되는 변수, 즉 스펙트럼 비를 계산하기 위하여 지진파 기록에서 Pg파, Lg파, Rg파의 최대 진폭을 보이는 시간을 중심으로 시간차를 설정하였다. 시간차는 Gaussian 함수의 표준편차  $\sigma$ 로부터  $\pm 1.96\sigma$  ( $\approx 95\%$ )의 길이로 설정하였다. Lg파의 해당하는 시간차의 표준편차는  $\sigma = \sigma_{ref} \times \Delta / \Delta_{ref}$  로 진앙거리 ( $\Delta$ )에 따라 다르게 정하였다.  $\Delta_{ref}$ 는 기준거리 100 km이고,  $\sigma_{ref}$ 는 기준거리에서 시간차의 표준편차이며, 본 연구에서는 2.0초로 설정하였다. Rg파에 대해서도 동일한 시간차를 적용하였으며, Pg파의 시간차는 P파와 S파의 평균적인 속도 비를 이용하여 Lg파 시간차의  $V_s / V_p (\approx 1/\sqrt{3})$  배로 정하였다<sup>(3)</sup>. 지진자료는 약 1 km 간격의 4개 관측소로 구성된 철원 지진-음파 관측망 자료를 이용하였다. 각 지진파 위상에 해당하는 4개 진폭스펙트럼을 평균한 스펙트럼 (network-averaged amplitude spectrum)을 판별분석에 이용하였다. 단일 관측소 자료는 관측 당시의 배경잡음이나 각 관측소 하부지하구조 특성으로, 지진원의 스펙트럼 특성이 왜곡될 수 있기 때문에 관측망 평균을 이용한 방법이 우수한 것으로 연구되었다<sup>(3)(4)</sup>.

관측망 평균 진폭스펙트럼 자료로부터 Pg파와 Lg파 간의 주파수 대역별 진폭스펙트럼 비를 구하여 선형판별분석에 이용하였다. 이를 "Pg/Lg 식별기술"로 명하였다. 또한 동일 위상내의 주파수 대역별 스펙트럼 비를 이용하였으며, 이를 "Lg1/Lg2 식별기술", "Pg1/Pg2 식별기술"로 명하였다. 마지막으로 지진파 기록 중 Rg파가 관측되는 자료에 대해서는 Rg파와 Lg파의 주파수 대역별 진폭스펙트럼 비를 구하였다. 이를 "Rg/Lg 식별기술"로 명하였다. 각 식별기술에서 주파수 대역별 스펙트럼 비를 변수로 사용하여 선형판별식을 구하고 각 지진기록의 판별특점을 계산하였다. 표본

이 획득한 판별특점으로 단일 식별기술 간의 판별능력을 비교하였다. 또한 단일 식별기술을 종합한 복합 선형판별함수 (compound linear discrimination function)를 구하여 자연지진과 인공지진을 식별하였다.

여기서 다변량 판별분석이란 두 개 이상의 모집단에서 추출된 다변량 관측치 정보를 이용하여 어떠한 다변량 관측치가 어느 모집단에 포함될 것인가를 결정해 줄 수 있는 기준을 찾는 분석을 말한다<sup>(5)</sup>. 두 개 이상의 모집단에서 측정할 수 있는 변수를 이용하여 모집단을 가장 잘 구분할 수 있는 판별함수 (discriminant function)가 판별분석의 기준이 된다. 모집단을 구분하는 최적의 판별함수는 모집단에 포함된 표본이 얼마나 잘 판별되었는가 하는 판별력을 측정한다. 또한 새로운 표본 관측치를 판별함수에 적용하여 이 관측치가 속할 수 있는 확률이 가장 높은 모집단을 판단하게 된다. 따라서 최적의 판별함수 도출과 새로운 관측치에 대한 판별확률을 높이기 위해서는 모집단을 구성하는 표본이 정확히 분류되어 있어야 한다. 선형판별함수는 독립변수 즉 다변량 관측치 간의 선형조합으로 구성되며, 두 개 이상의 모집단을 구분하는데 있어 오분류 (misclassification)를 최소화 할 수 있는 함수이다. 선형조합을 이루는 독립변수는 두 모집단 판별특점 (discriminant score) 평균 간의 거리가 최대가 될 수 있도록 각 독립변수에 가중치가 부여된다.

### 3. 자연지진 및 인공지진 표본자료의 구축

한반도에서 발생하는 자연지진과 인공지진의 지진파 특성비교와 식별기술 적용을 위하여 자연지진과 인공지진으로 구성된 표본집단 (training set)을 구축하였다. 신뢰성 있는 판별함수와 효과적인 판별분석을 위해서는 정확한 자연지진과 인공지진 표본집단이 구성되어야 한다. 본 연구에서는 인공지진이 야간에 발생하지 않는다는 조건으로 자연지진을 선정하였다. 자연지진 선정은 한국 지질자원연구원 지진분석시스템 분석결과 중 야간에 발생한 지진기록을 대상으로 하였다. 야간에 발생한 지진목록 중 지역적으로 고른 분포를 보이고, 인공지진의 공간적 분포와 유사하도록 자연지진을 선택하였다. 대규모 지표발파 등에서 발생하는 인공지진은 현장확인으로 어느 정도 자료구축이 가능하나, 현실적으로 많은 표본집단을 구성해야 하는 상황에서 모든 인공발파에 대한 현장조사는 어렵다. 광범위하게 분포하는 발파장에 대한 현장조사를 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하기 때문이다. 그러나 지진파-음파 분석<sup>(2)</sup>으로 지표발파로부터 발생하는 인공지진의 정확한 식별이 가능하므로, 인공지진 표본선정이 자연지진에 비해 보다 객관적이라 할 수 있다 (Fig. 1). 본 연구에서는 지진파-음파 분석결과 중 일부를 선정하여 인공지진 표본집단을 구축하였다.

Fig. 2은 본 연구에 사용된 38개 자연지진과 76개 인공지진의 진앙분포와 철원 지진-음파 관측망의 위치도이다. 철원관측망을 중심으로 지역적으로 고른 진앙분포를 보이고 있으며, 인공지진과 자연지진의 진앙거리는 각각 20 - 216 km, 20 - 282 km 범위이다. 인공지진은 발파장으로 제한되기 때문에 지역적으로 편중된 분포를 보이고 있다. 본 연구에서 사용하는 철원관측망 지진자료는 Teledyne-Geotech사의 단주기 수직성분 속도형 지진계 GS-13로부터 얻어진 파형을 초당 40개로 수치화 한 자료이다. 따라서 지진파 스펙트럼정보는 20 Hz까지 사용이 가능하다.

### 4. 판별분석 결과

자연지진과 인공지진 표본집단에 4개 단일 식별기술을 독립적으로 적용한 판별분석에서 Pg파와 Lg파의 진폭스펙트럼 비를 이용한 판별분석이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 Lg파 내의 저주파수와 고주파수 대역 간의 스펙트럼 비 역시 자연지진과 인공지진을 식별하는데 유용하였다. 반면 Pg파를 이용한 방법은 Pg/Lg, Lg1/Lg2 식별기술에 비해 판별능력이 떨어졌다. Rg파 관측과 이를 이용한 식별은 유용할 수 있으나, 진앙거리 100 km 이내의 적은 수의 표본에만 적용이 가능하였다. 단일 식별기술을 적용한 결과, 통계적으로 Pg/Lg 식별기술의 판별능력이 가장 뛰어나더라도 모든 표본자료에 대해서 완벽한 식별이 이루어지지 못하는 못했다.

Fig. 3은 4개 단일 식별기술을 인공지진 표본집단에 적용하여 구한 판별특점의 변화를 도시한 것이다. EX31과 EX71로 표시된 인공지진은 Pg/Lg 식별기술로 오분류 되었으나, Lg1/Lg2, Pg1/Pg2 및 Rg/Lg 식별기술을 적용한 결과 인공지진으로 식별되었다. EX49 인공지진은 Lg1/Lg2 식별기술로 오분류 되었으나, Pg/Lg와 Pg1/Pg2 식별기술을 적용했을 때 인공지진으로 식별되었다. Pg1/Pg2 식별기술을 적용했을 때 오분류 되는 EX47 인공지진 역시 다른 식별기술에서는 높은 판별특점으로 식별되고 있다. Fig. 4은 4개 단일 식별기술에 대한 자연지진 표본집단의 판별특점 변화이다. 인공지진 표본과 마찬가지로 특정기술에 대해서 오분류 되었거나 판별특점이 0에 가까운 모호한 표본이 다른 식별기술에서는 자연지진으로 정확히 식별되고 있다.

일부 표본의 경우, 지진원특성, 전파경로상의 영향, 신호 대 잡음비, 자료처리상의 오차 등에 의해 오분류 되었거나, 모호한 식별결과를 보인다. 그러나 Fig. 3과 Fig. 4에 나타났듯이, 표본집단으로 선정된 인공지진의 일반적인 특징은 위의 4개 식별기술을 적용할 때 양수 (positive)의 판별특점을 획득하며, 자연지진의 경우 음수 (negative)의 판별특점을 획득하는 것이다. 결론적으로 인공지진이나 자연지진 표본이 특정 식별기술에서 오분류 되거나 모호한 식별결과를 보이더라도, 다른 단일 식별기술로부터 정확한 식별이 가능하였다. 따라서 어떠한 지진파의 지진원을 자연지진이나 인공지진으로 명확히 식별하고 판별능력을 향상시키기 위해서는 상기 4개 단일 식별기술을 동시에 이용해야 한다. 본 연구에서는 Pg/Lg 식별기술, Lg1/Lg2 식별기술, Pg1/Pg2 식별기술, Rg/Lg 식별기술을 동시에 사용하는 복합 선형판별함수를 정의하였다. 복합 선형판별함수는 4개 단일 식별기술을 독립변수로 사용하는 판별분석이다. 각 식별기술의 변수값은 각 기술을 적용했을 때 표본이 획득한 판별특점을 이용하였다. 4개 단일 식별기술을 동시에 이용한 복합 판별분석 결과 표본에 대한 오분류가 없는 정확한 식별이 이루어 졌다. 또한 새로운 관측치에 대한 잠재적 오분류 확률은 0.7%로 모든 판별분석 중 가장 낮았다.

## 5. 토의 및 결론

지진원 이론에 기초한 Pg/Lg, Lg1/Lg2, Pg1/Pg2, Rg/Lg 4개 단일 식별기술에 대한 선형판별분석으로 최적의 판별함수를 계산하고 판별능력을 평가하였다. 단일 식별기술을 표본집단에 적용한 결과 Pg/Lg 식별기술이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 저주파수보다 고주파수 대역 (> 8 Hz)에서 판별능력이 향상되었다. 인공지진의 저주파수 특성을 이용한 Lg1/Lg2 식별기술도 지진원 식별이 우수한 것으로 평가되었다. Lg파에 비해 진폭이 작고 기록시간이 짧은 Pg파의 경우 상대적으로 판별능력이 떨어졌다. Rg/Lg 식별기술은 진앙거리가 100 km 이하인 표본자료에 적용되어 지진원 식별이 가능하였다. 그러나 Rg파는 천발지진에서도 발생할 수 있으므로, 향후 Rg/Lg 식별

기술 적용은 신중히 고려되어야 할 것이다. 판별분석 결과 단일 식별기술 간에는 상대적인 판별능력의 차이가 있으나, 단일 식별기술로는 자연지진과 인공지진 표본을 완벽하게 식별하지 못하였다. 이는 일부 표본이 모집단과 다른 지진원특성을 가지거나, 전파경로상의 영향, 신호 대 잡음비, 자료처리상의 오차 등에 의해 오분류 되거나, 모호한 식별결과를 보일 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 판별능력의 향상을 위하여 복합 선형판별분석을 정의하였다. 복합 선형판별분석은 단일 식별기술에 대한 모집단의 공통적인 특성을 이용한 것으로 각 단일 식별기술을 독립변수로 사용하는 방법이다. 4개 단일 식별기술에 대해 인공지진은 모두 양수의 판별특점을 획득하여야 하며, 반대로 자연지진은 음수의 판별특점을 획득하여야 한다. 전체 표본 중 일부 표본이 특정 단일 식별기술에서 오분류 되더라도, 다른 식별기술에서는 모집단의 공통적인 특성을 보이는 것으로 분석되었다. 모집단의 공통적인 특성을 갖는 표본의 경우, 복합 선형판별분석으로 보다 명확하게 모집단으로 식별된다. 또한 특정기술에서 식별이 잘못되더라도 다른 식별기술이 이를 보완하여 복합 선형판별분석에서 정확히 모집단으로 식별될 수 있다. 4개 식별기술 모두를 사용했을 때의 복합 판별함수가 가장 우수한 판별능력을 보였다. 표본집단에 대해서 정확한 식별이 가능하였으며, 새로운 지진 관측치에 대한 오분류 확률은 0.7%이하로 계산되었다.

#### 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. Kim, W. Y., V. Aharonian, A. L. Lerner-Lam, and P. G. Richards, 1997, Discrimination of earthquakes and explosions in Southern Russia using regional high-frequency three-component data from the IRIS/JSP Caucasus Network, Bull. Seism. Soc. Am., 87, 569-588.
4. Koch, K., 2002, Seismic event identification of earthquakes and explosions in Germany using spectral Lg ratios, Pure appl. geophys., 159, 759-778.
5. Swan, A. R. H., M. Sandilands, and P. McCabe, 1995, Introduction to geological data analysis, Blackwell Science Ltd.

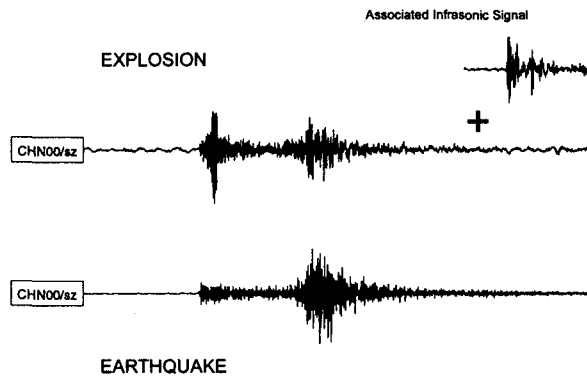


Fig. 1. Seismic recordings of an explosion event and an earthquake of the training data sets. Explosion events for training data set are selected from the result of seismo-acoustic analysis and natural earthquakes are selected by temporal distribution.

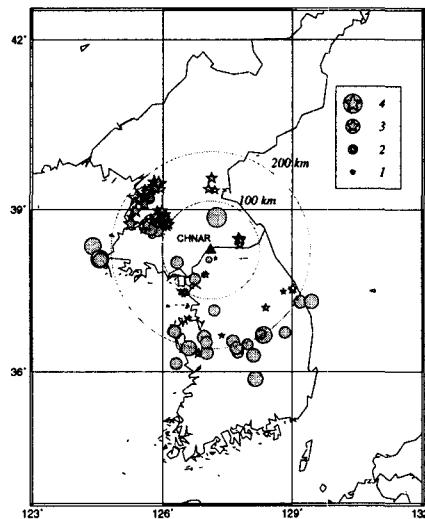


Fig. 2. Epicentral distribution of 76 explosion events (stars) and 38 natural earthquakes (circles) of the training data sets. Event symbols are scaled by catalog magnitude ( $M_L$ ) of KEMS. Triangle indicates the location of the seismo-acoustic array, CHNAR.

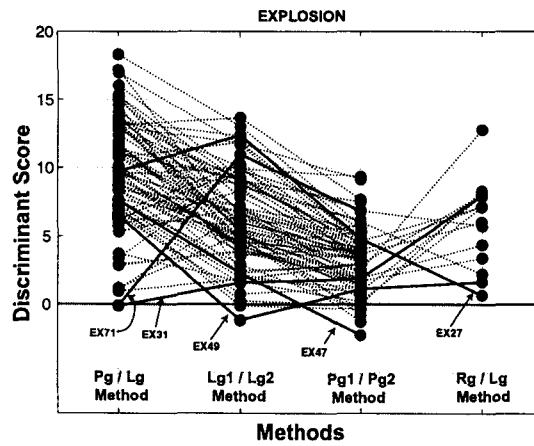


Fig. 3. Discriminant scores change of the explosion samples among four individual discriminant methods.

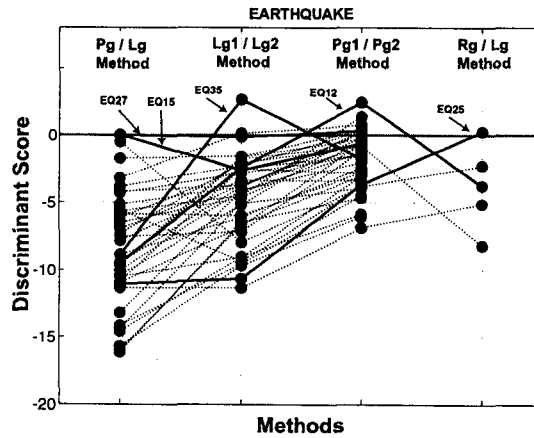


Fig. 4. Discriminant scores change of the earthquake samples among four individual discriminant methods.