

원주 KSRS 자료를 이용한 자연지진과 인공지능 구별에 관한 연구

강익범* · 김성배** · 서만철** · 전명순*

*한국자원연구소 지진연구센터 · **공주대학교 지질환경과학과

요 약

총 22개의 지진발생기록(event)을 이용하여 3-D Spectrogram을 분석한 결과 대체적으로 인공지능의 경우 자연지진과 비교해 볼 때 P파의 에너지가 우세하게 나타난다. 자유표면 효과 보정을 수행한 후 15개 주파수 대역을 사용하여 P (Pn, Pg)/Lg 스펙트럼 비의 상용대수를 계산한 결과 자연지진의 경우 대체로 스펙트럼 비의 상용대수가 -1.2~-0.9의 값, 인공지능의 경우는 대체로 -0.7~-0.1의 값을 보여주고 있다. 이는 -0.6의 스펙트럼 비의 상용대수 값이 자연지진과 인공지능을 구별하기 위한 기준이 될 수 있다는 연구 결과(Kim · Park, 1997)와도 잘 일치하고 있다. 자연지진과 인공지능으로 추정되는 2개의 지진발생기록에 대해 추가로 Complexity를 계산해 본 결과 인공지능의 Complexity 값이 자연지진의 Complexity 값과 비교해 볼 때 현저히 작은 값을 보여주고 있다. 이는 상대적으로 인공지능의 경우 P파의 발달이 우세하기 때문인 것으로 사료되며 앞에서 계산한 3-D Spectrogram 분석 결과와도 잘 일치하는 것이다.

주요어: 자연지진, 인공지능, 3-D Spectrogram, 스펙트럼비, Complexity

Kang, Ik Bum, Kim, Sung Bae, Suh, Man Cheol and Jun, Myung-Soon, 2000, Study on Discrimination between Natural Earthquakes and Man-made Explosions using Wonju KSRS Data. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 1, p. 25-36.

ABSTRACT: 3-D Spectrograms for 22 events are drawn to discern about whether those are earthquakes or explosions. Generally, in case of explosions relative to the case of earthquakes, amplitude of P phase is more dominantly shown. According to the results on logarithm of spectral ratio of P (Pn, Pg)/Lg after removing free-surface effects from 3-D (U-D, N-S, E-W) seismogram, -1.2~-0.9 is shown for earthquakes and -0.7~-0.1 is shown for explosions. This result is consistent with previous researches (Kim · Park, 1997) that -0.6 of spectral ratio between P and Lg after taking logarithm may be the criterion for the discrimination between earthquakes and explosions in Korea. In addition, Complexity is applied to two events as another discrimination method. The value of Complexity of explosion is much smaller than that of earthquake. This may be due to well-developed P-wave in explosion compared to that in earthquake. This result is in accordance with that of 3-D Spectrogram.

Key words: earthquake, explosion, 3-D Spectrogram, spectral ratio, Complexity

(Kang, Ik Bum and Jun, Myung-Soon, Korea Earthquake Research Center, Korea Institute of Geology, Mining & Materials, Yusung-Gu, Taejon 305-350, Korea; Kim, Sung Bae and Suh, Man Cheol, Geo-Environment Science, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea. email:kang@rock25t.kigam.re.kr)

1. 서 론

자연지진과 핵실험을 비롯한 인공지능을 구별하는 방법은 지진규모(mb/Ms ratio) 및 초동에 의한 구별 등 여러 가지 방법이 개발되어 있다(Evernden,

1969; Douglas *et al.*, 1974; Blandford, 1977). 그 중 주파수 특성에 의한 구별 방법은 일반적으로 많이 이용하는 방법으로, 매우 신빙성이 높고 중요한 방법이다. 이 방법은 정확한 지진요소를 결정 한 후에 지진기록의 시간축에 대하여 시간창

(time window)을 이동시키면서 주파수의 진폭을 계산하고 이를 주파수(Frequency)-시간(Time)-진폭(Amplitude)축에 표시하는 방법으로 속도분석 및 주파수 분석을 통해 자연지진과 인공지진의 특성을 연구하고, P파와 S파 및 표면파의 진폭의 크기를 비교하여 자연지진과 인공지진을 구별할 수 있다(Kim *et al.*, 1994). 본 연구에서 이용한 자료는 한국자원연구소가 미공군기술지원센터와 공동 운영중인 원주 KSRS (Korea Seismic Research Station) 지진관측망에서 기록한 자료이다.

원주 KSRS 지진관측소는 UN CTBT에서 전세계 지하 핵실험을 감시하기 위해 구축한 321개 국제 핵실험 탐지관측망 중 50개 주요 지진관측망의 하나이며, 아시아에서 최대 규모의 관측망이다. 1970년대 설립 이후 지금까지 미소지진을 비롯한 한반도 자연지진뿐만 아니라 관측소 주위에서 발생하는 석산 및 공사장 발파 등을 포착하여 왔으며 1955년과 1996년 중국 신장성 핵실험, 1998년 인도 및 파키스탄 핵실험 등 근래에 발생한 핵실험을 포함한 중요 핵실험을 감지하여 온 한반도 유일의 배열형식(Seismic Array)의 지진관측망으로 19대의 단주기, 6대의 장주기 및 1대의 광대역 지진계로 총 26대의 지진계로 구성되어 있다(전명순 외, 1996).

본 연구에서는 3-D Spectrogram을 이용하여 자

연 및 인공지진의 주파수 특성을 비교하였다. 국지적인 거리에서 발생한 지진파의 경우 입사파에 따른 증폭효과 등에 의하여 자유표면에 의한 영향이 크게 작용한다. 이를 보정하기 위해 Kennett (1991)이 개발한 수식을 이용하여 자유표면효과를 보정하였다. 또한 파형위상의 지속시간이 진앙 거리에 따라 달라질 수 있기 때문에 군속도를 계산하여 각 파형에 대한 정확한 시간차를 구하고자 하였다. 이를 이용해 15개 주파수 대역(0.5-2.5, 1.0-3.0, 1.5-3.5, 2.0-4.0, 2.5-4.5, 3.0-5.0, 3.5-5.5, 4.0-6.0, 4.5-6.5, 5.0-7.0, 5.5-7.5, 6.0-8.0, 6.5-8.5, 7.0-9.0, 7.5-9.5)에서의 P (Pn, Pg)/Lg 파의 스펙트럼 비를 계산하였다.

현재 채석장이나 광산에서는 안전성을 고려하여 발파시 지연발파를 주로 사용하는데, 지진계에 기록된 파형은 초동 및 육안으로 식별할 경우 자연지진과의 구별이 명확하지 않으나 주파수 특성에 의해 본 연구에서 이용한 방법으로 구별할 경우 상당부분 명확해 질 수 있다. 이렇게 명확하게 자연지진과 인공지진을 구별할 경우 지진재해도 작성 및 내진 설계 등 한반도 지진 방재 연구에도 큰 도움이 될 수 있다.

2. 지진 관측 자료

2.1. 원주 KSRS 지진 자료

19대의 단주기와 1대의 광대역, 6대의 장주기

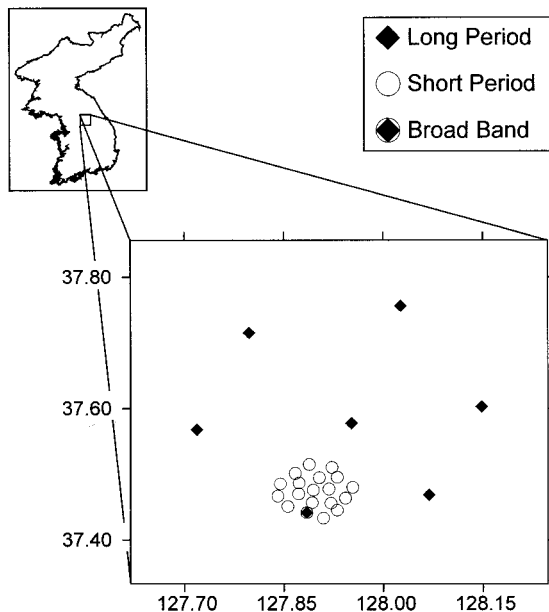


Fig. 1. Location map of Wonju KSRS.

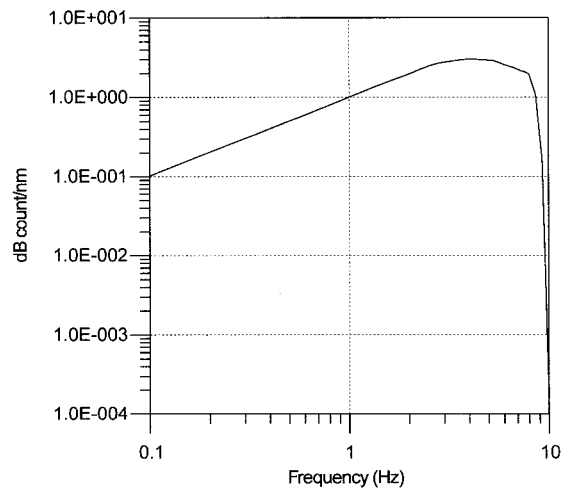


Fig. 2. Response curve of BB seismometer of KSRS.

Table 1. List of earthquakes.

Event No.	Date YY/MM/DD	O.T. hh:mm:ss	Lat. °N	Lon. °E	B. Azimuth °	Epi. km
1	96/12/13	04:27:06.705	37.2510	128.6690	106.79580	72.499
2	96/12/14	06:17:52.372	37.2298	128.6475	109.05310	71.438
3	96/12/15	07:20:40.145	37.2360	128.6530	108.40430	71.671
4	96/12/20	07:47:39.980	37.2246	128.6486	109.46220	71.724
5	98/11/29	23:57:57.002	37.2710	128.6897	104.72060	73.635
6	99/01/12	12:51:01.894	38.2954	128.6848	33.27434	117.99
7	99/01/23	16:01:50.363	37.2016	128.7181	109.6854	78.378
8	99/02/07	21:36:32.189	37.1578	128.8717	109.60050	92.824
9	99/03/05	14:41:42.786	40.4148	127.5447	355.02610	331.669
10	99/03/14	11:31:02.011	37.5496	130.3765	86.12997	220.054
11	99/04/07	14:43:17.942	37.1815	128.7959	109.50160	85.589
12	99/04/07	15:40:22.405	37.0933	128.7444	116.74450	85.368
13	99/04/07	16:09:30.124	37.1653	128.7418	111.83040	81.799
14	99/04/21	02:24:12.376	36.7459	127.2721	215.23540	94.511
15	99/04/23	03:41:37.654	37.1915	128.8393	107.97250	88.873
16	99/04/23	16:35:11.535	35.8216	129.3412	143.75560	222.058
17	99/04/25	09:35:53.243	35.5215	127.2184	195.77810	221.583
18	99/05/03	18:09:53.704	37.2174	129.1253	102.45230	112.463
19	99/05/08	23:11:46.401	37.6862	130.3240	82.06311	216.610

Table 2. List of explosions.

Event No.	Date YY/MM/DD	O.T. hh:mm:ss	Lat. °N	Lon. °E	B. Azimuth °	Epi. km
20	99/03/12	08:04:17.933	37.7134	128.9850	72.38732	101.519
21	99/04/04	03:21:49.567	37.4997	126.5169	273.45380	120.786
22	99/05/16	03:22:02.480	37.8072	127.7538	344.22080	42.172

지진계로 구성된 KSRS 지진관측망은 강원도 원주를 중심으로 경기도 양평, 강원도 춘성, 홍성, 횡성군 약 600 mile² (30×40 km)에 걸쳐있는 방사성 배열(array) 형식으로 분포되어 있다(Fig. 1).

KSRS 지진계는 Teledyne/Geotech사의 제품으로 디지털 지진 기록 방식으로 단주기(모델: KS23900)와 광대역(모델: KS54000) 지진계의 샘플링 간격은 0.05 초, 장주기(모델: KS54000)의 샘플링 간격은 1초다.

단주기 지진계의 경우 Nyquist 주파수는 10 Hz이며, 1 Hz의 고유 주파수 수신기를 이용하였다. Fig. 2는 광대역(broad band) 지진계의 응답곡선을 도시한 것이다.

2.2. 자연지진 및 인공지진 자료

자연지진과 인공지진을 구별하기 위해 사용된 자료는 총 22개로 국지 및 광역 거리에서 발생한 19개의 지진발생기록과 인공지진으로 사료되는 3개의 지진발생기록을 선정하였다. 원주 KSRS 지진 자료가 한국자원연구소에 실시간으로 입수되기 시작한 1996년 이후의 지진 자료를 이용하였고, 1996년 12월 강원도 영월 및 1999년 1월 강원도 태백에서 발생한 지진 등 최근 지진 자료도 포함되어있다. Table 1, 2는 각각 자연지진과 인공지진의 발생 시간과 진원의 위치, 후방위각(Back Azimuth) 그리고, 진앙 거리를 보여주는 표이다(Fig. 3). 인공지진 자료의

경우 자료수집에 어려움이 있었으나 초동이 상향 방향을 나타내며, 일과시간에 발생한 자료를 선택 하고 현장조사를 실시한 결과 비행장 공사장, 채석 장임을 확인한 후 인공지진 자료로 이용하였다.

각 진원의 위치를 결정하기 위해서는 자유표면을 갖는 1차원 수평 다층속도 구조모델을 이용하였는데 이는 현재 한국자원연구소에서 지진요소를 결정하기 위해 사용하고 있는 지하속도구조모델로 지하 120 km 보다 천부의 한반도 속도 지하구조 모델 IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior)과 속도지하구조모델을 합성한 지하속도구조모델을 이용한 것이다(Fig. 4).

3. 자료 분석 과정

3.1. 3-D Spectrogram

진원의 위치 및 발생시간 및 오차범위를 결정하기 위해 반복 비선형 역산법(iterative non-linear inverse method)을 이용하고 여기서 사용된 지하속도 구조 모델은 Fig. 4와 같다. 배열 지진계의 경

우 F/K분석을 통해 진앙지를 결정하는데 하나의 관측소 자료로부터 결정된 결과보다 높은 정확성을 기할 수 있다. F/K분석은 slowness 벡터를 구하기 위한 분석작업으로 한 관측소를 중심으로 시간 지연을 주파수 영역에서 계산하는 방법으로 일정 간격의 모든 slowness 벡터를 고려하여 Beam-forming을 실시한 후 최대값을 가지는 beam power point에서 slowness 벡터(파의 방향과 속도)를 결정하는 방법을 이용하였다.

시간-주파수에 대한 진폭분석을 실시하는 방법인 3-D Spectrogram분석은 지진파형 주파수 특성 분석에 이용하는 방법(Kim *et al.*, 1994)으로 본 연구에서도 이를 이용하였으며 다음과 같이 수행한다.

- ① 시간영역의 자료를 3.2초간의 시간창을 정하고, 주파수에 관한 진폭을 계산한다.
- ② 창을 75%로 중첩하여(0.8초 간격) 시간창을 이동시키면서 연속적으로 계산을 수행한다.
- ③ 모든 시간창의 스펙트럼을 시간-주파수 공간에 표시한다.

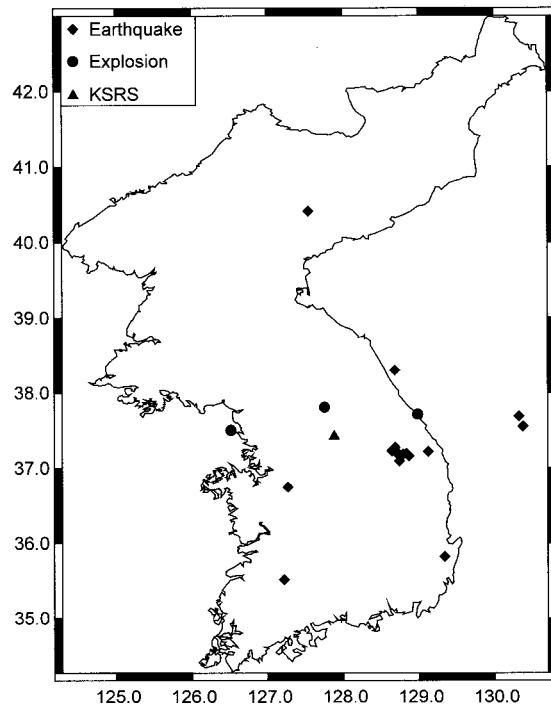


Fig. 3. Location of 22 events.

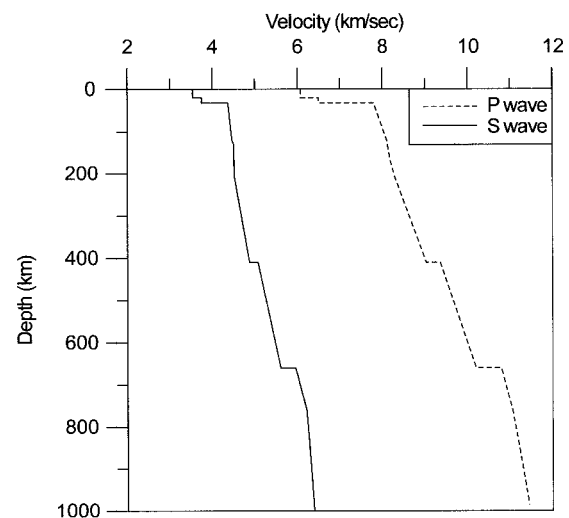


Fig. 4. Velocity model for P- and S- wave.

위와 같은 방법으로 원주 KSRS 지진 자료를 이용 3-D Spectrogram을 작성하여 주파수별-시간별 스펙트럼분석을 10 Hz이하에서 실시하였다.

Fig. 5는 1996년 12월 13일 강원도 영월에서 발생한 지진의 3-D Spectrogram이다. 진폭이 비교적 전주파수 대역에 걸쳐 분포하고, P파의 경우 약 4.5 Hz에서 Lg파의 경우 약 3.5 Hz에서 높은 진폭을 보인다. Fig. 6은 1999년 3월 5일 북한에서 발생한 지진으로 진앙거리가 약 331 km로 본 연구에서 이용한 자료들 중에서 가장 원거리에서 발생한 지진이다. 이 지진 역시 거의 전주파수 대역에 진폭이 분포하고 Pg파의 경우 약 2.5 Hz부근에

서, Lg파의 경우 약 2~3 Hz의 주파수 대역에서 높은 진폭을 갖는다. 이는 지진파가 원거리를 전파하면서 고주파에너지의 감쇠가 빨리 일어나기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 7은 1999년 3월 12일에 발생한 지진발생기록으로 진앙거리가 약 100 km이다. Pg파의 경우 5 Hz에서, Lg파의 경우 2~4 Hz부근에서 높은 진폭을 보이고 있으며, 앞에서 보여준 자연지진에 비해 P파의 발달이 상대적으로 우세한 것을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 7에서 보여준 지진발생기록의 3-D Spectrogram에서처럼 비슷한 진앙거리와 후방위각에서 발생한 지진이라도 후자에서 P파의 발달이 상대적으로 우세한 것을

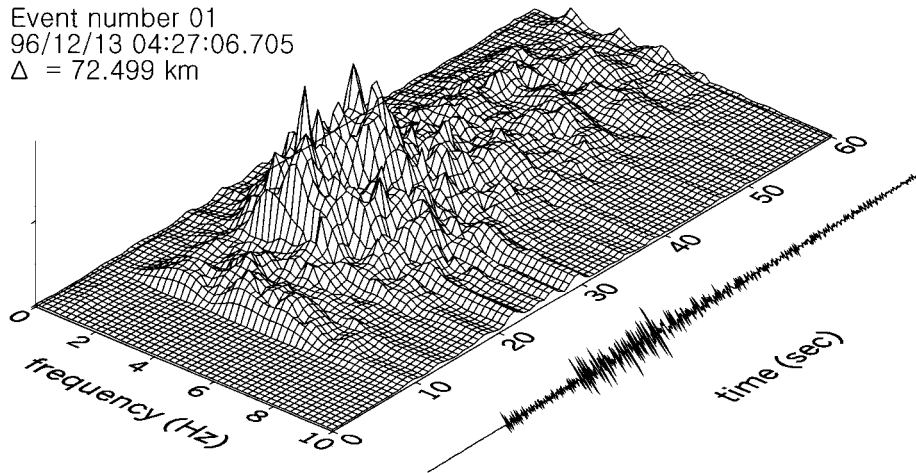


Fig. 5. 3-D Spectrogram of Event No. 01 (Table 1).

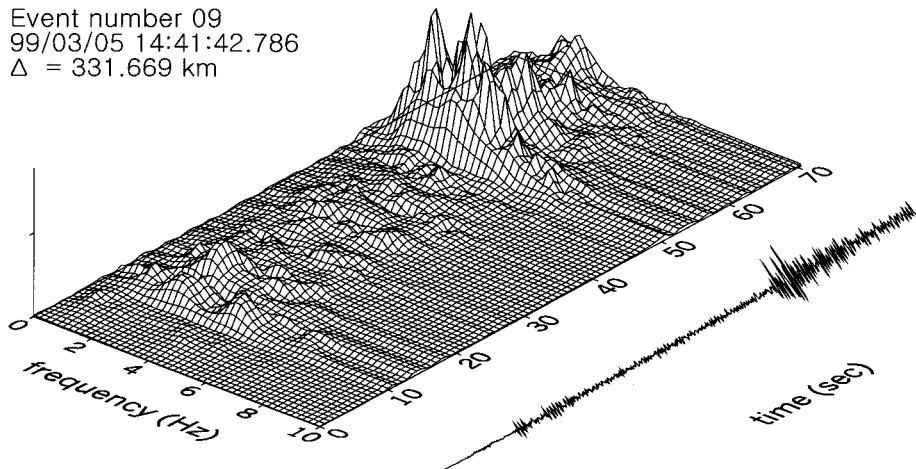


Fig. 6. 3-D Spectrogram of Event No. 09 (Table 1).

알 수 있다.

3.2. 균속도 측정

주파수에 의한 균속도 측정 연구는 주파수-균속도 대역에 진폭을 계산하여 등치선도를 작성하는 것으로 지각의 구간 및 표면파 특성연구 등에 많이 사용되는 방법으로 본 연구에서는 균속도 측정에만 이용하였다.

주파수에 의한 균속도를 계산하는 방법(Dziewonski et al., 1969)으로 다음과 같이 실행한다.

- ① 정확한 지진요소를 계산
- ② 식 (1)을 이용하여 3.2초간의 시간창(time window)을 정하고, 주파수에 관한 진폭을 계산
- ③ 창을 75%로 중첩하여 시간창을 이동시키면서 연속적으로 계산을 수행
- ④ 각각의 시간창에 대하여 진폭 계산
- ⑤ 식(2)를 이용하여 진앙거리(Δ) 만큼 떨어진 곳에서의 균속도를 계산 후 균속도-주파수에 스펙트럼 진폭 표시

$$W(t) = 1 : \text{inside windows}$$

$$\tau_n - (1/2 * T) < t < \tau_n + (1/2 * T) \quad (1)$$

$$W(t) = 0 : \text{outside windows}$$

여기서, $W(t)$: 시간창
 τ_n : 시간창의 중심 시간
 t : 시간
 T : 시간창의 길이

$$v_n = \Delta / \tau_n \quad (2)$$

여기서, v_n : 균속도
 Δ : 거리

Fig. 8은 1999년 1월에 발생한 지진으로 균속도 별로 주파수 진폭을 계산한 후 이를 주파수와 균속도에 관한 등치선도로 나타낸 그림이다. 대체로 자연지진의 경우 균속도 약 5.0 km/s 이상 구간에서 보여주는 P파는 진폭이 균속도가 약 3.5 km/s 이하 구간에서 보여주는 Lg파를 비롯한 표면파의 진폭보다 크게 낮은 것을 보여주고 있다. Fig. 9는 1999년 3월 5일 발생한 지진(Table 1)의 주파수와 균속도에 관한 등치선도로 나타낸 그림이다. Pn파의 경우 대부분의 에너지가 균속도 5.88 km/s에서 6.03 km/s 사이에 2.5 Hz와 4.5 Hz의 주파수 대역에 분포하고 있으며, Pg파의 경우 균속도 5.28 km/s에서 5.60 km/s 사이에 2.5 Hz의 주파수 대역에 대부분의 에너지가 분포하고 있다. Lg파의 경우 균속도 3.35 km/s에서 3.55 km/s 사이에 1~3 Hz의 주파수 대역에 대부분의 에너지가 분포하고 있음을 보여주고 있다.

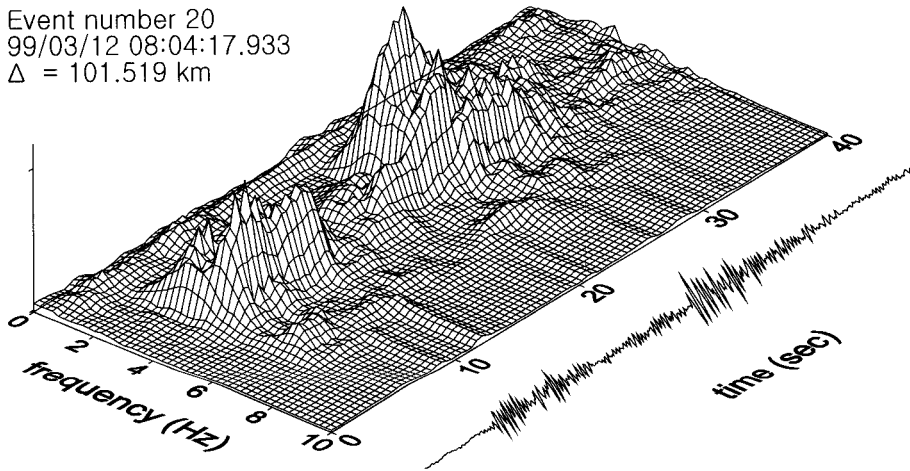


Fig. 7. 3-D Spectrogram of Event No. 20 (Table 2).

3.3. 3성분 지진 자료에서 자유표면효과 보정

진원에서부터 관측지점에 이르기까지의 지진파는 여러 가지 현상이 복합되어 전달되는데 지진파 감쇠현상, geometrical spreading, 관측소 반응효과, 자유표면에서의 입사파(incoming wave)의 상호 작용

등과 같은 여러 효과를 포함하여 전달된다. 국지적인 거리에서의 지진기록일 경우 자유표면에 의한 영향이 크게 작용하는데 이는 입사파에 대한 증폭으로 나타난다. 이러한 자유표면 효과보정을 3성분기록에서 직각으로 운동하는 입사파로 복원

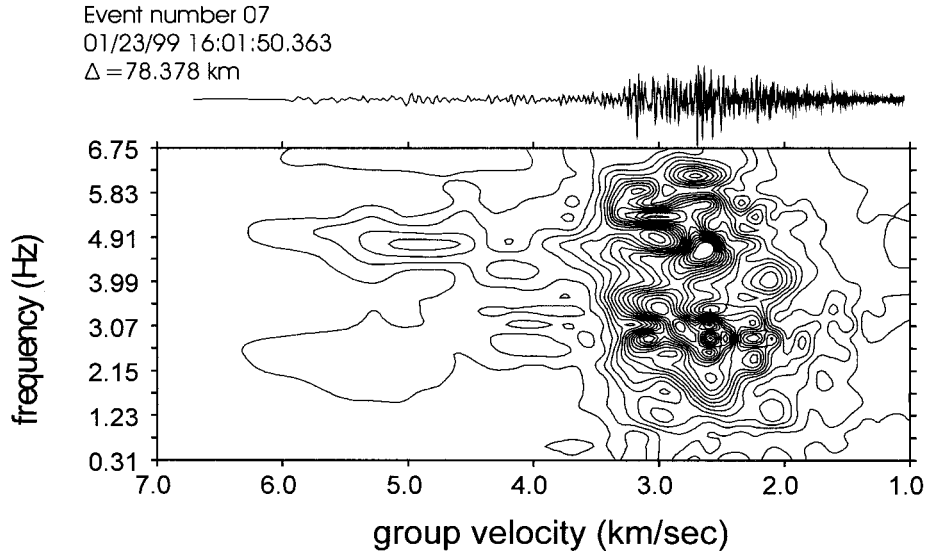


Fig. 8. Group velocity estimated by contouring the amplitude in Frequency (Event No. 07, Table 1). The seismogram on the top is the waveform scaled linearly versus apparent group velocity.

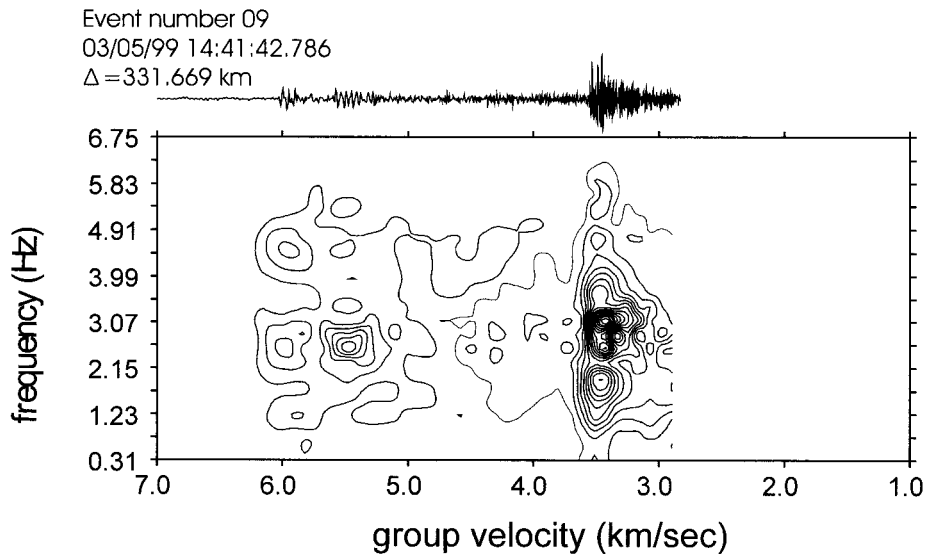


Fig. 9. Group velocity estimated by contouring the amplitude in Frequency (Event No. 09, Table 1). The seismogram on the top is the waveform scaled linearly versus apparent group velocity.

시키는 간단한 변환으로 보정할 수 있는 방법이 여러 학자들에 의해 개발되었다(Kennett, 1991).

자유표면 효과보정은 식(3)과 같이 진원에서 관측소로 입사하는 파를 방위각을 이용하여 수평성분을 회전시켜 진행방향(radial) 성분과 법선방향(tangential) 성분(Z, R, T)으로 변환시킨 후 입사한 P, SV 파의 운동을 진행방향 성분 R과 수직성분 Z의 선형적인 복합에 의해 표면에서의 영향을 제거할 수 있으며 입사파의 SH 성분은 방위각으로 회전시킨 법선방향 성분 크기의 1/2로 나타나고 이는 방위각에 따라 매우 민감하게 반응한다.

$$\begin{pmatrix} P(p, \omega) \\ S(p, \omega) \\ H(p, \omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{PZ}(p) & V_{SZ}(p) & 0 \\ V_{PR}(p) & V_{SR}(p) & 0 \\ 0 & 0 & V_{HT}(p) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z(p, \omega) \\ N(p, \omega) \\ E(p, \omega) \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, p : 수평성분 slowness

ω : 각주파수

$V_{PZ}, V_{PR}, V_{SZ}, V_{SR}, V_{HT}$:

자유표면변위행렬의 상관계수

θ : 입사각(incident azimuth)

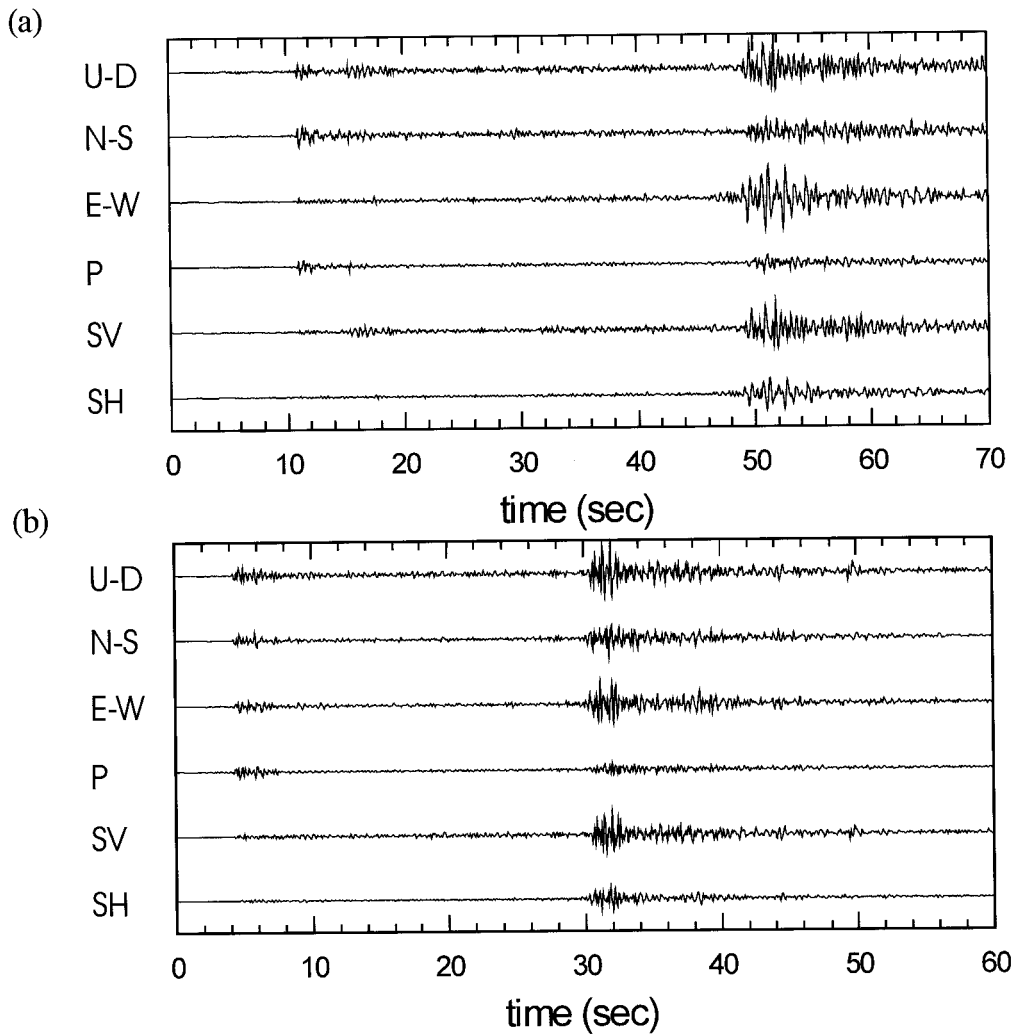


Fig. 10. Example of free-surface correction data; (a) Event No. 09 (Table 1), (b) Event No. 16 (Table 1). Each Figure lower three traces (P, SV, and SH) are produced from upper three traces (U-D, E-W, and N-S) after applying free surface correction.

본 논문에서는 Kennett (1991)가 개발한 자유표면효과 보정식을 이용, 국지 및 광역거리에서 관측된 지진파형에서 나타나는 위상 Pn 또는 Pg, Lg 파에 대하여 계산된 군속도에 의거하여 시간차를 나누어 수직성분에서의 Hilbert 변환을 실시하고 위상변화를 보정한 후, 모든 3성분 자료에 관하여 자유표면에 관한 보정을 실시하였다.

Fig. 10은 1999년 3월 5일 발생한 지진과 1999년 4월 23일 경북 포항에서 발생한 지진의 자유표면 효과를 보정하기 전 3성분 기록과 보정 후의 순수한 P, SV, SH 성분을 보여준다. 3성분 자료에 대해 자유표면효과를 보정한 후 P 성분 지진기록의 경우 S파에서 확연히 크기가 줄어들어 보여지며 SV, SH 성분 지진기록의 P파에서 크기가 크게 작아짐을 보여준다. 이와 같이 위상 식별이 용이하여 위상 식별 시 발생하기 쉬운 오차를 줄일 수 있게 된다.

4. 스펙트럼 비의 계산

인공지진의 경우 대체로 P파의 진폭이 S파 및 표면파보다 크게 나타나기 때문에 P파와 S파 및 표면파와의 주파수대역 스펙트럼 비는 자연지진과 인공지진을 구별하는데 많이 이용되는 중요한 방법중 하나이다(Wüster, 1993; Walter *et al.*, 1995, Kim · Richards, 1996).

자유표면효과 보정이 수행된 자료를 이용하여 주파수 영역에서 P (Pn, Pg)파와 Lg파의 진폭을 비교하였다. 각 위상에서의 진폭을 계산하기 위해서 군속도 자료를 이용하였는데 P (Pn, Pg)파에 관해서는 군속도가 4.0 km/s에서 5.8 km/s인 구간을, Lg 파의 경우 2.6 km/s에서 3.9 km/s의 구간에 대하여 푸리에 변환을 실시하여(Keilis-Borok, 1989) 식(4)를 이용하여 대역별 스펙트럼 비를 계산하였다.

$$\frac{P(Pn, Pg)}{Lg} = \frac{Pn \text{ or } Pg_P}{\sqrt{(Lg_{SV})^2 + (Lg_{SH})^2}} \quad (4)$$

여기서,

- $Pn \text{ or } Pg_P$: P성분에서의 P파의 스펙트럼 진폭의 평균
- Lg_{SV} : SV성분에서의 Lg파의 스펙트럼 진폭의 평균
- Lg_{SH} : SH성분에서의 Lg파의 스펙트럼 진폭의 평균

사용된 주파수 대역의 진폭은 0.5-2.5, 1.0-3.0, 1.5-3.5, 2.0-4.0, 2.5-4.5, 3.0-5.0, 3.5-5.5, 4.0-6.0, 4.5-6.5, 5.0-7.0, 5.5-7.5, 6.0-8.0, 6.5-8.5, 7.0-9.0, 7.5-9.5 Hz의 15개 대역이다.

자연지진의 경우 대역별 스펙트럼 비를 계산하고 이에 대한 상용대수를 취한 결과 대체로 -1.2 ~ -0.9의 값을 보이고, 인공지진의 경우는 대체로 -0.7 ~ -0.1의 값을 보여주고 있다. 원거리지진의 경우 고주파의 감쇠가 빨리 일어날 수 있기 때문에 자연지진의 스펙트럼비가 상대적으로 분산이 커지는 경향을 보여주고 있으며 대체적으로 저주파보다는 고주파 주파수 대역으로 갈수록 자연지진과 인공지진 스펙트럼 비 상용대수 값의 차이가 커짐을 보여주고 있다(Fig. 11).

5. Complexity를 이용한 자연지진과 인공지진 구별

자연지진과 인공지진을 구별하기 위해 계산한

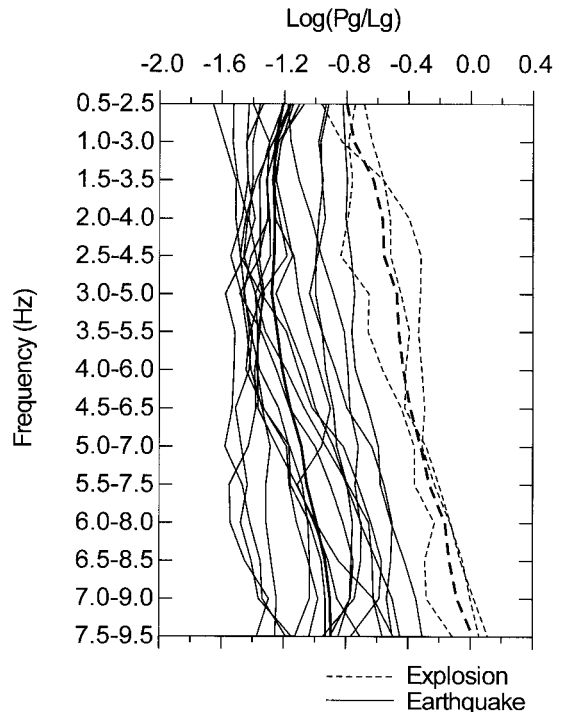


Fig. 11. P (Pn, Pg)/Lg ratio for 22 events in 15 frequency bands are represented by thin lines. The average for those of events, both earthquakes and explosions, are plotted by thick solid line and thick dotted line, respectively.

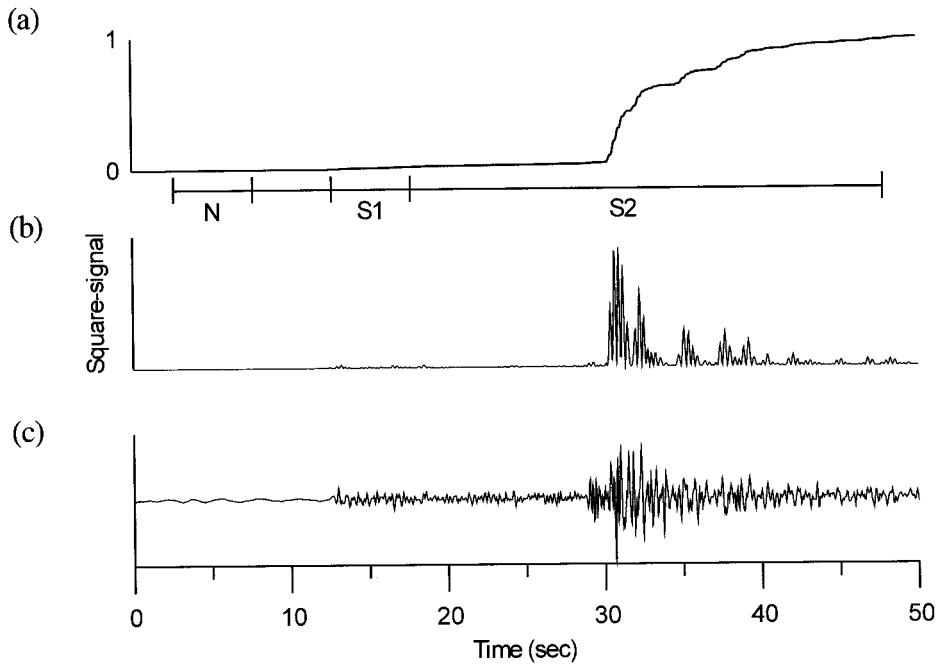


Fig. 12. (a) Normalization of U-D component of seismogram (c) for calculation complexity, (b) Square of seismogram (c), (c) U-D component of broad band seismogram of Event No. 18 (Table 1).

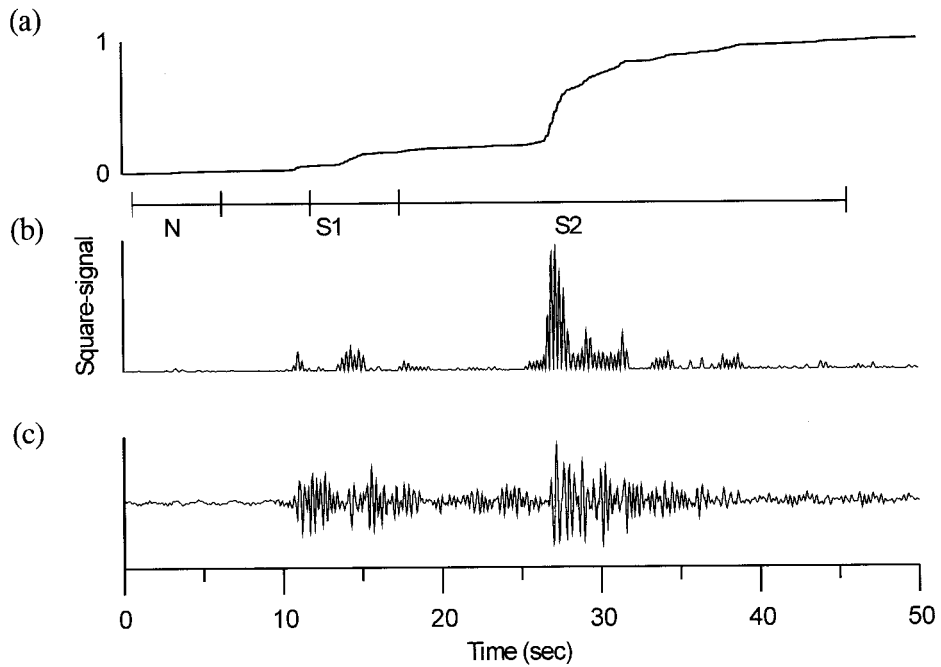


Fig. 13. (a) Normalization of U-D component of seismogram (c) for calculation complexity, (b) Square of seismogram (c), (c) U-D component of broad band seismogram of Event No. 20 (Table 2).

3-D Spectrogram과 스펙트럼 비의 결과를 확인하기 위해 2개의 지진발생기록에 대하여 추가로 Complexity를 계산하였다. Complexity는 초동 P파와 이후의 파형과의 진폭비를 계산하여 인공지진과 자연지진을 구별하는 방법으로 필터대역을 적용한 후 다음과 같이 실시하였다(Fig. 12, 13). 본연구에서는 한반도 및 한반도 주변에서 발생하는 지진의 주파수 대역을 고려하고 이전에 시행한 Complexity 관련연구(Koch *et al.*, 1999)에서 사용하였던 5초, 30초간의 시간창을 이용하였다.

- ① 초동 10초 전에서 5초간의 시간창을 선정 잡음(N)을 계산
- ② 초동 후 5초간의 시간창을 선정하여 진폭(S₁)을 계산
- ③ 초동 5초 후 30초간의 시간창을 선정하여 진폭(S₂)을 계산
- ④ 식(5)를 이용하여 Complexity (e)를 계산

$$e = \frac{S_2 - N}{S_1 - N} \quad (5)$$

지진발생기록 18 (Table 1)과 지진발생기록 20 (Table 2)에 대하여 필터대역을 이용한 후 시간창에 대한 진폭 S₁, S₂를 계산한다. 두 개의 기록에 대해 Complexity (e)를 계산한 결과 인공지진(지진발생기록 20, Table 2)의 경우 상대적으로 P파의 발달이 우세하기 때문에 Complexity의 값이 지진발생기록 18 (Table 1)의 Complexity의 값보다 현저하게 작아짐을 보여주고 있으며, 앞에서 보여준 3-D Spectrogram과 스펙트럼 비의 계산 결과와도 잘 일치하고 있다.

6. 결과 및 토의

자연지진과 인공지진을 구별하기 위해 총 22개의 지진발생기록에 대해 3-D Spectrogram과 P (Pn, Pg)파와 Lg파의 스펙트럼 비를 계산하여 이를 비교하였다. 이는 인공지진의 경우 매질의 압축 및 팽창으로 인하여 P파가 우세하게 나타나고, 자연지진의 경우 단층 운동에 의한 것으로 사료되는 바 P파뿐만 아니라 수평운동에 의한 S파 및 저주파의 발달도 잘 나타나는 현상과 상대적으로 인공지진의 경우 자연지진보다 고주파의 발달이 뚜렷하게 나타나는 현상을 이용하여 식별하기 위함이다.

3-D Spectrogram 분석 결과 상대적으로 Lg파의 파형에서 최대 진폭을 가지고 나타나며 5.0 Hz 이하에서 에너지가 골고루 분포되어 있는 자연지진에 비해 인공지진의 경우 상대적으로 P파의 발달이 우세하게 나타나고, 4.0 Hz 이상에서도 많은 에너지가 분포하고 있다.

P (Pn, Pg)파와 Lg파의 스펙트럼 비의 상용대수를 취한 결과 자연지진의 경우 대체로 -1.2에서 -0.9의 값을 보이고, 자료 수집이 어려워 많은 자료를 얻지는 못했지만 인공지진의 경우 대체로 -0.7~-0.1의 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Pg파와 Lg파의 진폭 비가 6~8 Hz 대역에서 가장 잘 구별이 되며, 이 대역에서 Log (Pg/Lg)비가 -0.6을 기준으로 그 이상의 값은 폭발로 그리고, 그 이하의 값은 지진으로 구별할 수 있다는 이전의 연구 결과(Kim · Park, 1997)와도 일치하는 결과를 보여준다. 저주파보다는 고주파 주파수 대역으로 갈수록 자연지진의 스펙트럼비가 상대적으로 분산이 커지는 경향을 보여주고 있으며 대체적으로 자연지진과 인공지진 스펙트럼 비 상용대수 값의 차이가 커짐을 보여주고 있다(Fig. 11).

추가로 지진발생기록 18 (Table 1)과 지진발생기록 20 (Table 2)에 대하여 인공지진과 자연지진을 구별하기 위해 Complexity (e)를 계산해 본 결과 지진발생기록 20 (Table 2)의 Complexity가 지진발생기록 18 (Table 1)의 Complexity 값보다 현저히 떨어지는데, 이는 상대적으로 인공지진의 경우 P파의 발달이 우세하기 때문이며 이는 3-D Spectrogram과 스펙트럼 비 계산 결과와도 잘 일치하고 있다.

사 사

본 연구는 국무조정실 공공기술이사회 지원으로 이루어진 기관고유연구과제(00-3611)의 일부로, 연구비를 지원하여 주신 관계기관 및 관련자에게 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 전명순, 강익범, 지현철, 전정수, 신인철, 1996, Annual report on the KSRS seismic array operation, 한국자원연구소, KR-96(B)-6.
- Blanford, R.R., 1977, Discrimination between Earthquakes and Underground Explosions, Ann Rev Earth

- Planet Science, 5, 111-122.
- Douglas, A., Hudson, J.A., Marshall, P.D., and Young, J. B., 1974, Earthquakes that look like Explosions, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 36, 227-233.
- Dziewonski, N.I., Bloch, S., and Landismann, M., 1969, A technique for the analysis of transient seismic signals, Bulletin of the Seismological Society of America, 59, 427-444.
- Evernden, J.F., 1969, Identification of earthquakes and explosions by use of teleseismic data, Journal of Geophysical Research, 75, 3828-3856.
- Keilis-Borok, V.I., 1989, Seismic surface waves in a laterally inhomogeneous earth, Kluwer academic publishers, 247-280.
- Kennett, B.L.N., 1991, The removal of free surface interactions from the three- component seismograms, Geophysical Journal International, 104, 153-163.
- Kim, S.G. and Park, Y.C., 1997, Discrimination of local microearthquakes and artificial underground explosions on the basis of time-frequency domain, Journal of Engineering Geology, 7, 63-79.
- Kim, W.Y., Simpson, D.W. and Richards, P.G., 1994, High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions, Bulletin of the Seismological Society of America, 84, 1365-1386.
- Kim, W.Y. and Richards, P.G., 1996, Discrimination of regional earthquakes and explosions using three-component high-frequency digital data, Modern Seismology-Proceedings of The Korea-China International Joint Seminar and Seismological Workshop edited by S. G. Kim, 46-61.
- Koch, K. and Schlittenhardt, J., 1999, On the use of teleseismic P-wave complexity for CTBT event screening-preliminary results from GRF array data, IDC Technical Experts Meeting on Seismic- Acoustic Event Screening.
- Walter, R.W., Mayeda, K.M., and Patton, H.G., 1995, Phase and spectral ratio discrimination between NTS earthquakes and explosions. Part I: Empirical observations, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1050-1067.
- Wüster, J., 1993, Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe-A case study, Bulletin of the Seismological Society of America, 83, 1184-1212.

1999년 10월 12일 원고접수

2000년 3월 21일 원고채택