

## 주파수 영역에서의 인공지진과 자연지진의 식별

김성균\* · 김명수

전남대학교 지구환경과학부

## Discrimination of Natural Earthquakes and Explosions in Spectral Domain

Sung Kyun Kim\* and Myeong Su Kim

School of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Recently, the ability of earthquake detection in the Kyungsang Basin of southeastern Korean Peninsula is greatly improved since seismic stations including seismic network of KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) have been significantly increased. However, a large number of signals from explosions are recorded because of frequent medium to large chemical explosions. The discrimination between natural earthquakes and explosions in the Basin has become an important issue. High frequency local records from 43 earthquakes and 43 explosions with comparable magnitude are selected to establish a reliable discrimination technique in the Basin. Several discrimination techniques in spectral domain using spectral amplitude ratios among Pg, Sg, and Lg waves are widely examined with the selected data. Among them the Pg/Lg spectral ratio method is appeared to be a good discrimination technique to improve the discrimination power. Multivariate discriminant analysis is also applied to the Pg/Lg spectral ratios. The discrimination power of the Pg/Lg ratios for distance corrected three component record compared to uncorrected vertical component one shows distinct improvement. In the frequency band 4 to 14 Hz, Pg/Lg spectral ratio for distance corrected three component record provides discrimination power with a total misclassification probability of only 0.89%.

**Key words** : Discrimination of explosions, Pg/Lg spectral ratio, multivariate discriminant analysis

한반도 남동부의 경상분지에 한국지질자원연구원의 지진관측망을 비롯한 관측소들이 급격히 증가함에 따라, 지진관측의 능력이 최근에 들어 크게 향상되었다. 그러나, 빈번한 중소규모의 화약발파에 의한 진동이 다수 관측되고 있다. 따라서, 이 지역에서 자연지진과 발파에 의한 인공지진의 식별이 중요한 문제로 부상하였다. 이 지역에서의 인공지진과 자연지진의 적절한 식별법을 확립하기 위하여 소규모의 지역지진 43개와 이에 대응되는 인공지진 43개를 선정하였다. 이 연구에서는 주파수 영역에서 Pg파, Sg파 및 Lg파의 스펙트럼 진폭비를 이용하는 기법들이 폭 넓게 검토되었다. 그들 중 Pg/Lg 스펙트럼 진폭비를 이용하는 방법이 가장 좋은 식별법으로 나타났다. 또한, 식별능력을 향상시키기 위하여 Pg/Lg 스펙트럼비에 다변량 판별분석법을 적용하였다. 거리보정이 안된 수직성분에 비하여 거리에 대한 감쇠효과를 보정한 3성분의 Pg/Lg비에 판별분석법을 적용했을 때의 판별능력은 뚜렷한 증가를 보인다. 주파수 대역 4-14 Hz의 범위에서, 거리 보정한 3성분의 Pg/Lg비에 대한 판별분석의 결과 총 오분류비율은 0.89%에 불과한 것으로 나타난다.

**주요어** : 인공지진 식별, Pg/Lg 스펙트럼비, 다변량 판별분석

### 1. 서 론

인공지진이란 화약이나 핵폭탄의 폭발에 의해 발생되는 폭발지진(explosion earthquake)으로 전국적으로

개발과 관련된 중소규모의 채석발파장이 여러 곳에 위치하고 있어 자연지진이 아닌 인공지진이 다수 관측되고 있다. 이러한 인공지진은 특정지역에서 관측된 자연지진목록에 포함되어 지진활동 및 지진파특성 연구

\*Corresponding author: kimsk@chonnam.ac.kr

와 지진발생 통보 등에 주요한 오염원이 되고 있다. 이와 관련하여 국내에서도 지진관측소에 기록된 지진파에 대한 직접적인 파형 분석에 의한 인공지진과 자연지진의 식별에 관한 연구(유영호, 1992; 강익범 등, 2000) 및 지진-공중음파(infrasound) 분석으로 인공지진 식별을 위한 연구(전정수 등, 2001) 등이 다양하게 수행되어 왔으나, 현재까지 인공지진과 자연지진의 식별을 위한 명확한 방법이 제시되지 못하고 있다.

최근 한반도 남동부의 경상분지를 대상으로 지질학적 및 지진학적 연구가 다수 수행되고 있다. 이는 과거 역사지진활동과 활성단층 연구 결과 경상분지내의 양산단층계가 활성단층일 가능성이 있으며, 이러한 경우 이 지역 내에 위치한 다수의 원자로와 산업단지내 주요구조물의 지진에 대한 안전성이 문제가 되기 때문이다. 이와 관련하여 한국지질자원연구원은 1994년 이래 이 지역에 연구용 지진관측망을 설치, 운영하여 오고 있다. 이 관측망은 경상분지내에 9개의 관측소로 구성되어 있으며, 각 관측소에는 3성분의 단주기 지진계가 설치되어 양질의 지진자료를 제공 하고있다(지현철 등, 1998). 그러나, 인공지진과 자연지진의 객관적인 식별 없이 지진자료가 축적되고 있는 실정이다.

지진계에 기록된 파형을 육안으로 식별할 경우 자연지진과 인공지진의 구별이 뚜렷하지 않는데 이는 지진파 전파과정 중의 굴절과 반사, 그리고 합성으로 인한 파형의 복잡성과 관련이 있다(Taylor *et al.*, 1988). 그러한 이유로 시간기록이 아닌 주파수 특성을 이용한 여러 방법을 적용할 경우 식별능력을 크게 향상시킬 수 있다. 이와 같이 객관적으로 인공지진과 자연지진을 구별할 경우 경상분지의 미소지진 활동에 대한 통계적인 분석 및 지진활동의 시공간적 분석, 지진재해도 작성 등에 큰 도움이 될 수 있다.

이 연구의 목적은 경상분지에서 인공지진과 자연지진을 식별하는 기법을 확립하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위하여 한국지질자원연구소가 경상분지내에서 관측한 인공지진 43개와 자연지진 43개를 표본으로 선정하여 여러 식별방법들을 폭넓게 비교분석 하였다.

## 2. 자 료

자연지진과 인공지진의 식별기법을 확립하기 위하여, 경상분지의 한국지질자원연구원 관측망에 기록된 자연지진 43개와 인공지진 43개를 표본으로 선정하였다. 여기서 선정된 인공지진들은 지질자원연구원에서 인공지진으로 분류한 것들로서, 관측시간대가 주간이며 기록

이 얻어진 모든 관측소에서 수직성분의 초동방향이 위쪽이라는 특성을 가지고 있다. 선정된 자연 및 인공지진은 최소 3개소 이상의 관측소에서 기록된 것들이며, 실제로 이용된 파형기록의 총 수는 자연지진 3성분×147개, 인공지진 3성분×131개이다. 좀 더 객관성 있는 식별기법을 확립하기 위하여, 자연지진과 인공지진은 규모, 진앙거리 분포가 유사하도록 선정하였다.

Fig. 1에 연구에 사용된 자연지진 43개와 인공지진 43개의 진앙지 분포와 함께 경상분지내 한국지질자원

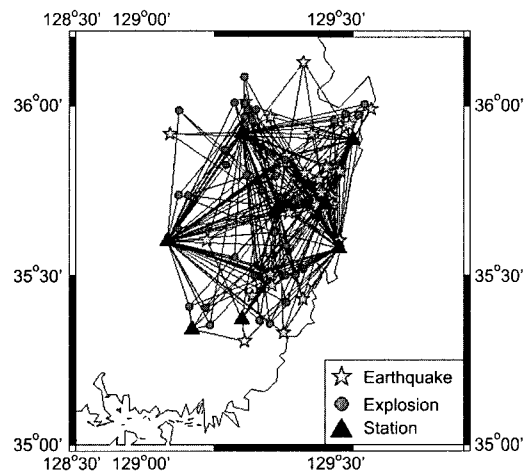


Fig. 1. Distribution of wave paths(line) from stations(triangle) to epicenters of earthquake(star) and explosion(circle).

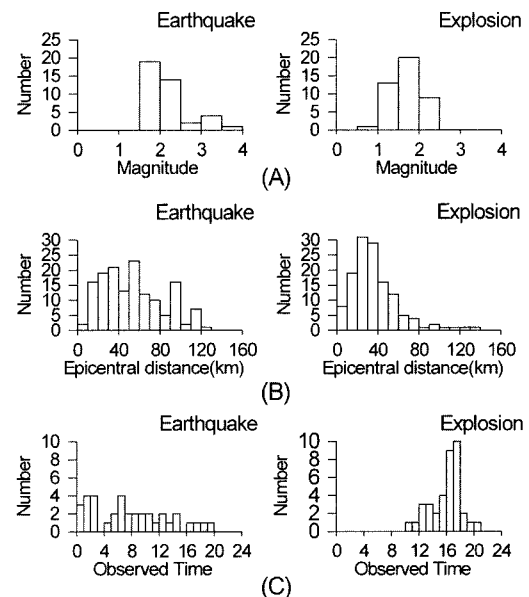


Fig. 2. Frequency distribution of magnitude(A), epicentral distance(B), and observed time(C) for events used in this study.

연구원의 지진관측소의 분포를 도시하였다. 그림에서 직선으로 나타낸 관측소와 진앙을 연결하는 전파경로들은 분지전체에 비교적 고르게 분포하고 있다.

Fig. 2는 자연지진과 인공지진들의 규모, 진앙거리, 관측시간대별 분포를 도시하였다. 그림에서 규모와 진앙거리의 분포는 대체로 유사하다. 그러나 관측시간대는 자연지진의 경우 비교적 고르게 분포하나, 인공지진

의 경우는 주간 집중됨을 보여 준다. Table 1 및 2에 이 연구에서 선정한 자연 및 인공지진의 발생시각, 진앙지, 깊이, 규모와 파형기록의 수를 각각 나타내었다. 자연지진에 대한 진앙지, 규모 및 발생시각은 한국 지질자원연구원에 의하여 발표된 값을 그대로 사용하였다. 그러나, 인공지진의 경우는 진앙지나 규모가 결정되어 있지 않으므로, 이 연구에서 아래와 같은 방법

**Table 1.** List of earthquake data used in this study.

Event No.	Origin Time		Latitude (°N)	Longitude (°E)	Depth (km)	M <sub>L</sub> (KIGAM)	Number of record
	Date	Time					
1	1995/02/14	07:02:06	35.7052	129.3706	7.92	2.2	5
2	1995/02/16	07:02:36	35.8167	129.4061	10.00	2.1	4
3	1995/09/10	04:09:12	35.6022	129.4530	6.03	2.1	3
4	1995/09/10	05:09:32	35.7176	129.4015	12.94	2.2	4
5	1995/09/11	08:09:24	35.7202	129.4166	10.51	1.8	5
6	1995/10/24	05:10:05	35.9667	129.2035	7.93	2.3	3
7	1996/02/04	20:02:14	35.7167	129.3929	13.74	1.8	4
8	1996/02/05	06:02:14	35.7217	129.3923	12.97	1.8	4
9	1996/02/27	09:02:44	35.9426	129.4868	9.96	1.9	3
10	1996/02/28	07:02:22	35.9428	129.4872	10.33	2.8	5
11	1996/03/18	22:03:34	35.7186	129.3925	14.32	1.8	4
12	1996/05/01	01:05:38	35.9900	129.5673	16.02	1.9	4
13	1996/05/05	02:05:49	35.8078	129.4541	9.28	2.3	4
14	1996/05/16	11:05:43	35.3050	129.1091	15.03	3.0	6
15	1996/06/04	16:06:26	35.8016	129.3265	12.65	2.0	3
16	1996/06/20	22:06:18	35.8228	129.4033	11.26	2.2	3
17	1996/10/22	01:10:54	35.6844	129.2689	13.34	1.9	3
18	1996/11/25	00:11:50	35.7421	129.3862	1.59	2.8	4
19	1997/06/16	10:06:14	35.6035	128.9731	1.42	2.9	3
20	1997/10/11	07:10:29	35.9172	128.8402	10.93	2.7	7
21	1997/12/04	02:12:53	35.7093	129.5375	10.00	2.0	3
22	1997/12/25	06:12:22	35.5522	129.4093	6.65	1.8	3
23	1999/02/12	12:01:06	35.7257	129.2222	5.00	2.0	3
24	1999/04/24	13:05:14	35.8428	129.2555	5.06	3.3	4
25	1999/06/02	18:12:21	35.8357	129.3353	1.43	4.0	4
26	1999/06/05	20:58:19	35.8414	129.2591	7.48	2.4	6
27	1999/07/05	14:39:01	35.7835	129.3414	1.43	1.7	4
28	1999/08/17	21:38:10	36.2067	129.5357	10.00	2.3	7
29	1999/08/21	10:01:52	35.8351	129.2590	9.41	1.8	3
30	1999/09/02	00:08:12	35.8392	129.2570	8.82	2.2	5
31	1999/09/12	05:56:51	35.8427	129.2425	5.90	3.2	7
32	2000/01/20	07:05:58	35.7838	129.3854	10.78	1.5	3
33	2000/05/17	17:42:08	35.8422	129.2567	8.32	1.9	4
34	2000/05/22	05:34:46	35.9168	129.3573	7.37	1.7	4
35	2000/06/07	01:09:04	35.7012	129.4079	6.16	1.5	5
36	2001/02/10	16:23:28	35.8465	129.2598	2.5	2.4	5
37	2001/03/06	04:57:03	35.8520	129.2612	6.54	1.7	4
38	2001/02/14	01:02:09	35.0367	128.2785	5.6	2.6	4
39	2001/03/11	07:18:41	35.7363	129.4203	4.4	1.6	4
40	2001/03/11	14:05:38	35.7278	129.4120	2.6	2.1	3
41	2001/04/25	13:18:03	36.0115	129.1132	7.56	1.8	3
42	2001/09/16	09:05:42	35.7112	129.3608	5.32	1.9	3
43	2001/10/26	08:57:42	35.7842	129.3792	1.25	2.4	5

**Table 2.** List of explosion data used in this study.

Event No.	Origin Time		Latitude (°N)	Longitude (°E)	M <sub>L</sub> (KIGAM)	Number of record
	Date	Time				
1	1995/02/16	17:29:29	35.819	129.118	1.3	3
2	1995/11/02	12:44:24	35.972	129.367	1.5	3
3	1995/12/30	16:12:18	35.734	129.292	1.4	3
4	1996/02/15	18:20:30	35.500	129.282	1.2	3
5	1996/11/19	15:25:18	35.855	129.306	1.0	4
6	1999/10/02	16:25:22	35.787	129.289	1.4	4
7	1999/10/13	10:05:19	35.737	128.957	1.9	3
8	1999/10/13	18:00:12	35.353	129.018	1.7	4
9	1999/10/13	12:53:10	35.956	129.438	1.7	5
10	1999/11/05	09:50:55	35.808	129.079	2.0	4
11	1999/11/14	13:15:28	35.404	129.005	1.2	4
12	1999/11/19	14:24:19	35.788	129.166	1.3	3
13	2000/07/04	12:01:06	36.003	129.062	1.5	3
14	2000/07/13	13:05:14	35.744	128.894	1.8	4
15	2000/07/27	18:12:21	35.726	129.168	1.7	4
16	2000/07/27	18:58:19	35.725	129.167	2.0	6
17	2000/07/29	15:39:01	35.825	129.045	1.6	4
18	2000/08/18	12:38:10	36.007	129.039	1.7	7
19	2000/08/29	10:01:52	35.835	129.329	1.8	3
20	2000/11/08	13:08:12	35.952	129.479	1.9	5
21	2000/03/25	13:46:41	35.553	129.073	0.8	7
22	2000/04/22	16:16:51	35.907	129.426	1.9	3
23	2000/05/06	15:55:21	36.006	129.042	1.9	4
24	2000/05/29	13:26:56	35.981	129.182	1.7	4
25	2000/05/29	12:41:00	35.486	129.187	1.3	5
26	2000/06/01	12:55:11	35.006	129.043	1.6	3
27	2000/06/05	17:06:11	35.725	129.240	1.0	3
28	2000/06/24	15:48:01	36.007	129.042	1.9	3
29	2001/02/01	18:08:01	35.575	129.028	1.4	3
30	2001/02/11	15:32:52	35.583	129.028	1.3	5
31	2001/03/15	13:51:09	35.916	129.496	2.2	4
32	2001/04/09	11:36:02	35.832	129.042	1.7	3
33	2001/04/14	12:18:54	35.495	129.275	1.5	3
34	2001/05/02	13:43:26	35.727	129.166	1.8	4
35	2001/05/15	17:58:28	35.552	129.189	1.3	5
36	2001/06/21	15:25:32	35.933	129.196	1.8	5
37	2001/06/27	09:48:04	35.602	129.204	1.6	3
38	2001/07/10	18:50:01	35.341	129.191	1.0	3
39	2001/07/10	11:43:52	35.480	129.338	1.9	4
40	2001/07/28	16:58:34	35.573	129.232	2.1	4
41	2001/10/25	18:46:57	35.750	129.064	2.1	3
42	2001/04/13	15:35:08	35.991	129.107	1.5	3
43	2001/04/18	11:18:29	35.976	129.135	1.5	5

으로 결정하였다.

먼저 인공지진의 규모를 결정하기 위해 한국지질지 원연구원이 자연지진에 대하여 사용하고 있는 다음의 식(지헌철 등, 1996)을 이용하여 결정하였다.

$$M = \log A_z + 1.64 \log(\Delta) + \alpha \quad (1)$$

여기서  $A_z$ 는 수직성분의 최대속도( $m/s = 10^{-5} m/$

sec)를 나타내고,  $\alpha$ 는 지진기록계의 특성을 나타내는 상수로써 그 값의 범위는 0.22~0.44이다.

한편, 진앙지와 발생시각은 HYPO71(Lee and Lahr, 1975)과 같은 알고리즘으로 작성한 컴퓨터 프로그램을 이용하여 새로이 결정하였다. 인공지진은 지표에서 발생한 것이므로 지진발생깊이는 미지수로 하지 않고 처음부터 지표로 가정하여 나머지 미지수들을 구

했다. 또한, 지진파 속도구조는 김성균 등(1985)이 경상분지 지역에서 인공지진 자료분석으로 결정한 구조를 사용하였다.

이 연구에서 사용한 자료는 Mark Land사의 단주기 속도형 수신기 JC-V100으로부터 얻어진 파형을 1초당 100개씩 수치화한 것이다. 수신기의 주파수에 대한 응답은 대략 1~25 Hz 범위내에서 평탄하다.

### 3. 자연지진과 인공지진의 식별

#### 3.1. 3차원 스펙트로그램(spectrogram)

널리 사용되고 있는 스펙트로그램은 지진기록에서 일정한 시간창을 중복되도록 이동하면서 각 주파수가 갖는 진폭을 측정하여 시간-주파수 평면에 스펙트럼진폭을 3차원 적으로 표현한 것이다(Kim *et al.*, 1994). 이 때, 시간창의 중복으로 주파수가 갖는 진폭이 비교적 정확히 측정되며, 시간에 따라 각 주파수가 갖는 진폭에너지의 변화량을 시각적으로 확인하기 쉽다. 그러나, 지진 기록에서 주파수가 갖는 진폭에너지만을 이용하여 때문에 Pg, Pn, Lg파 등의 상대적인 비교는 곤란하며, 설정된 시간창보다 긴 주기를 갖는 장주기의 스펙트럼 측정은 이루어지지 않는다. 일반적으로 인공지진에서 파의 진폭은 매질의 압축 및 팽창에 의한 P파가 우세하게 나타나는 반면, 자연지진은 단층 운동에

의한 것으로 P파보다는 수평운동에 의한 S파 및 저주파의 발달도 잘 나타난다. 또한, 인공지진의 경우 자연지진보다 고주파의 발달이 뚜렷하게 나타나는 특징을 가지고 있다. 그러한 이유로 3차원 스펙트로그램을 이용할 경우 인공지진에서는 고주파 및 P파의 에너지가 높은 반면, 자연지진은 저주파 및 S파의 에너지가 높게 나타난다. 그러나, 진원에서의 P파와 S파는 전파 도중의 매질의 층상구조, 불균질 등에 의하여 반사, 굴절, 주파수에 의존하는 감쇠 및 다른 파로의 전환이 일어나 스펙트로그램에서 인공지진의 P파가 자연지진보다 반드시 크지는 않다. 따라서, 3차원 스펙트로그램을 이용한 인공지진과 자연지진의 식별은 단순하지 않으며, 전문가의 판단을 필요로 한다(Kim *et al.*, 1997).

스펙트로그램은 시간-주파수 평면에 스펙트럼 진폭을 3차원적으로 나타낸 도형으로서, 지진파형의 주파수 특성이 시간에 따라 어떻게 변화하는가를 분석하는 데에 사용되고 있다. 이 연구에서는 이 기법에 의한 식별 가능성을 알기 위하여, 인공지진과 자연지진을 각각 2개씩 선택하여, 그 스펙트로그램을 비교하였다.

이 연구에서 스펙트로그램을 작성하기 위하여 지진 기록을 잘라내는 시간창의 길이는 2.55초(자료수=256개)로 하였으며, 좀 더 안정된 스펙트로그램을 작성하기 위하여 75%씩 중첩하여 시간창을 이동하였다. 이 때 Fourier변환 이전에 10%의 cosine taper를 적용하

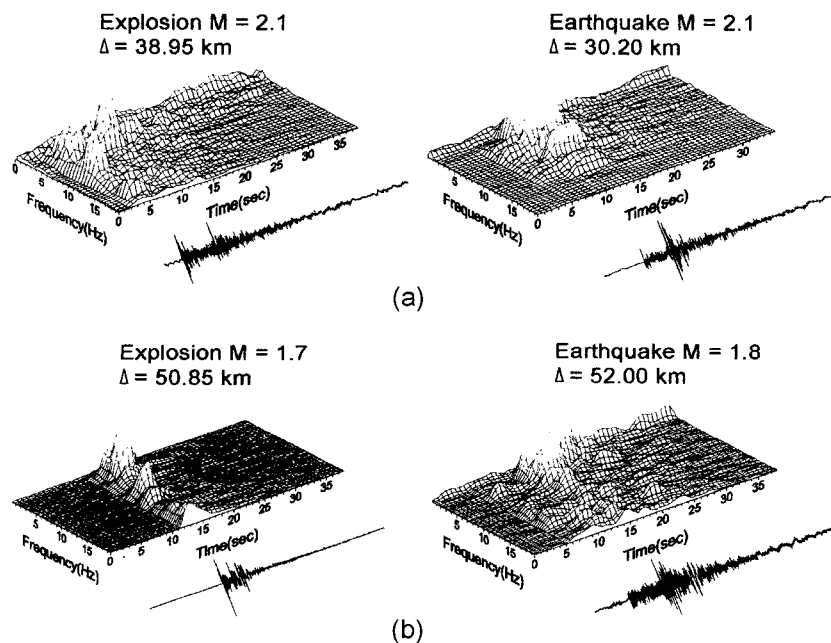


Fig. 3. 3-D spectrogram for two selected earthquakes and explosions.

였으며, 1~20 Hz 범위내에서 계산된 스펙트럼 진폭을 시간-주파수 공간에 3차원적으로 나타내었다.

Fig. 3a는 진앙거리가 유사하고 규모가 2.1인 자연지진과 인공지진 자료에 대한 3차원 스펙트로그램이다. 인공지진(좌)과 자연지진(우)의 P파는 각각 10, 6.5 Hz에서 상대적으로 높은 진폭을 보인다. 또한 인공지진의 Lg파는 6 Hz에서 자연지진의 Lg파는 2~4, 6 및 10 Hz에서 높은 진폭을 보인다. Fig. 3b는 규모가 유사하면서 진앙거리가 약간 먼 자연지진과 인공지진 자료에 대한 스펙트로그램으로, 자연지진(우)의 P파 진폭이 아주 작으며 Lg파의 경우 전체적으로 큰 진폭을 보이고 있다. 특히, 2~3 Hz에서 가장 큰 진폭을 보여주고 있으나, 반면에 인공지진의 경우 P파에서 진폭에너지가 크게 나타남을 알 수 있다. 결론적으로 인공지진은 그 에너지가 P파 부분에 대부분 집중되며, 자연지진은 S파 부분에 집중됨을 알 수 있다. 또한, 인공지진은 자연지진에 비하여 상대적으로 고주파부분의 진폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 스펙트로그램은 인공지진과 자연지진을 구별하는데 어느 정도 효과적으로 사용할 수는 있다. 그러나, 다수의 자료를 객관성있게 식별하기에는 부적합하다고 할 수 있다.

### 3.2. S파에 대한 P파의 스펙트럼 진폭비

일반적으로 인공지진에서는 자연지진에 비하여 S파의 발달이 미약하다. 이러한 특성을 이용하여 S파의 최대 스펙트럼 진폭값  $S_{max}$ 에 대하여, 이와 같은 주파수에서의 P파의 스펙트럼 진폭 P의 상용대수비  $\log_{10}(P/S_{max})$ 를 자연지진과 인공지진에 대하여 구하여 비교해 보았다. 진폭비를 구하기 위해서, 먼저 P파 및 S파 부분에 적당한 크기의 시간창을 설정하여 얻은 시간영역 자료를 Fourier변환을 거쳐 주파수영역으로 변환하였다. 여기서 구한 스펙트럼을 다시 Parzen의 Lag Window(이희연 등, 1996)에 의하여 평활화하여, 이 평활화된 스펙트럼으로부터 진폭비  $\log_{10}(P/S_{max})$ 를 얻었다. 이러한 방법으로 얻은 43개의 인공지진과 자연지진의 진폭비를 진앙거리에 대하여 그림으로 나타내어 인공지진과 자연지진의 식별을 시도하였다. 그 결과 진폭비  $\log_{10}(P/S_{max})$ 는 인공지진이 자연지진에 비하여 대체로 큰 편이지만, 진폭비만으로 인공지진과 자연지진의 뚜렷한 구별은 어렵다는 것을 확인할 수 있었다.

여기서 인공지진과 자연지진의 식별능력을 향상시키기 위하여, 두 수평성분(N-S 및 E-W)으로부터 진앙에 대한 방사성분(radial component)과 접선성분(tangential component)을 구하여 위와 같은 방법으로 각각의

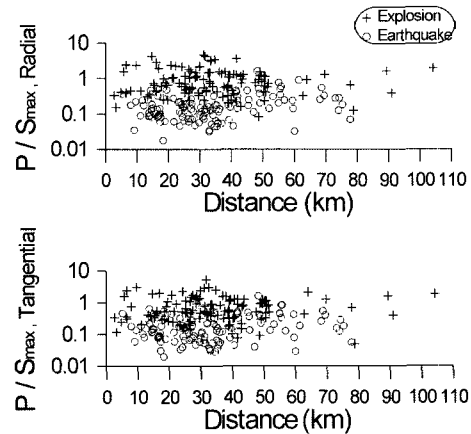


Fig. 4.  $\log_{10}(P/S_{max})$  of explosions and earthquakes versus epicentral distance for radial(up) and tangential(down) components.

진폭비  $\log_{10}(P/S_{max})$ 를 진앙거리에 대하여 도시하여 식별능력을 조사하였다(Fig. 4). 그 결과 식별능력은 앞에 비하여 약간 향상되었으나, 인공지진과 자연지진의 뚜렷한 구분은 어렵다. 한편, 유영호(1992)는 본 연구와 같은 방법으로 인공지진과 자연지진의 식별기법을 조사하여, 이 방법이 식별기법으로서 효과적임을 나타내었다. 그러나, 그의 연구에서 인공지진의 진앙거리는 50 km 이내에 분포하고 있는 반면 자연지진의 경우 100 km~200 km 내에 집중되어 있는 특징을 가지고 있어 객관적인 식별이 이루어 졌다고 보기 어렵다. 결론적으로 이 기법은 인공지진과 자연지진을 구별하는 수단으로 사용하기에 곤란한 것으로 보인다.

### 3.3. Lg파에 대한 Pg파의 진폭비

Lg파는 모호면에 입계각 이상으로 입사하여 지각내에서 다중반사한 파들에 의하여 생성되므로 진앙거리가 멀어짐에 따라 일반적으로 그 진폭이 증가하는 특성을 가지고 있다(Kulhanek, 1990). 반면에 화강암질 지각을 통과한 Pg파와 모호면 굴절파인 Pn파는 거리의 증가에 따라 감쇠가 일어나며, 감쇠는 보통 주파수에 의존한다. 이와 같이 여러 파들의 진폭의 감쇠 또는 증가는 인공지진과 자연지진의 발생깊이, 메커니즘이 다르기 때문에 서로 다르게 나타난다. 이러한 성질을 이용하여, Taylor *et al.*(1988)은 Pg, Pn 및 Lg파의 주파수 대역별 진폭비의 진앙거리에 따른 변화를 조사하였다. 그들은 미국 서부지역에서 관측된 인공지진과 자연지진의 Pg, Pn, Lg파의 6~8 Hz 진폭에 대한 1~2 Hz 진폭의 비를 진앙거리에 대하여 도시한 결과, 인공지진과

자연지진의 식별이 가능함을 알아내었으며, Lg파를 이용한 경우가 가장 식별능력이 높다는 점을 밝혔다. 그들이 사용한 지진들의 규모는 실제파규모 3~6의 범위이며, 진앙거리는 200~800 km범위로서, 본 연구에서 사용한 자료에 비하여 규모와 진앙거리가 비교가 안될 정도로 큰 편이다.

일반적으로 Lg파와 Pg파의 거리에 따른 감쇠양상은 서로 다르며, 인공지진과 자연지진에 있어서도 그 차이가 크게 나타난다. Kim *et al.*(1997)은 이러한 성질을 이용하여 Lg파에 대한 Pg파의 주파수별 진폭비 ( $\text{Log}_{10}(\text{Pg/Lg})$ )를 인공지진과 자연지진을 식별하기 위한 수단으로 사용하였다. 즉, 그들은 남부 러시아지역에서 규모 1.3~3.2 범위의 소규모 자연지진과 이에 대응되는 규모의 근거리 인공지진에 대한 주파수별  $\text{Log}_{10}(\text{Pg/Lg})$  자료에 통계학적인 판별분석법을 적용하여, 이 방법의 우수성을 입증하였다. 특히, 주파수별 진폭비  $\text{Log}_{10}(\text{Pg/Lg})$ 에 거리보정을 시행하여, 3성분에 대한 평균값을 사용하였을 때 더욱 식별능력이 향상된다고 지적하였다.

이 연구에서 사용한 인공 및 자연지진의 스펙트럼을 신호 이전의 잡음의 스펙트럼과 비교해보면 대략 4~14 Hz 범위에서 S/N비가 2 이상이고, 그 밖의 주파수 대에서는 2보다 작게 나타난다. 그 결과에 따라 이 연구에서 인공지진과 자연지진의 주파수 영역에서의 구별은 4~14 Hz 범위내로 정하였다.

Lg파의 스펙트럼은 Kim *et al.*(1997)과 같은 방법으로 계산하였다. 즉 다음과 같은 방법으로 시간창을 설정하여 시간영역의 자료를 선정하였다. 먼저 지진기록으로부터 Lg파와 Pg파에 해당하는 부분을 동정하여, 동정된 부분의 중간을 중심으로 하는 Gaussian함수를 설정하였다. 이때 Gaussian함수를 규정하는 표준편차  $\sigma$ 는 다음과 같은 식으로부터 결정하였으며, 시간창의 길이는 파의 중간을 기준으로  $\pm 2\sigma$  (대략 95%)를 취했다.

$$\sigma = \sigma_{\text{ref}} \times \Delta / \Delta_{\text{ref}} \quad (2)$$

여기서  $\Delta$ 는 진앙거리를,  $\sigma_{\text{ref}}$ 는 진앙거리 100 km (=  $\Delta_{\text{ref}}$ )에서의 시간창의 길이를 나타낸다. Lg파에 대해서는  $\Delta_{\text{ref}}=2.5$  sec를 채용하였으며, Pg파 시간창의 길이는 P파와 S파와의 평균적인 속도비를 이용하여 Lg파 시간창의 길이의 VS/VP ( $\approx 1/\sqrt{3}$ )배로 정하였다. 따라서 시간창의 길이는 진앙거리가 100 km 보다 작은 곳에서는  $\sigma_{\text{ref}}$ 보다 작으며, 100 km 이상의 거리에서는  $\sigma_{\text{ref}}$ 보다 커진다. 이때 진앙거리 100 km에서 Lg파 중간부분의 속도는 대략 3.35 km/sec이며,  $\pm\sigma$ 구간의 속

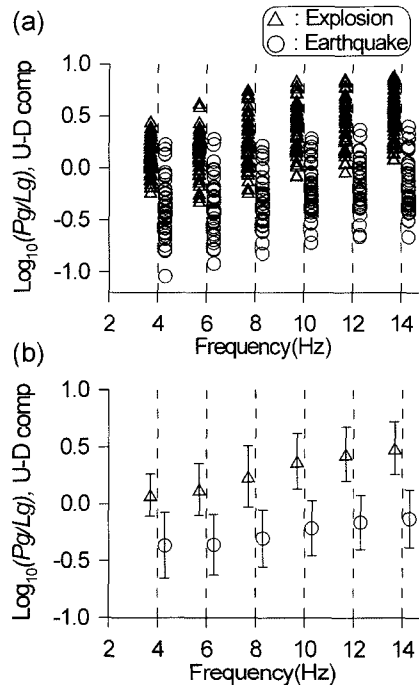
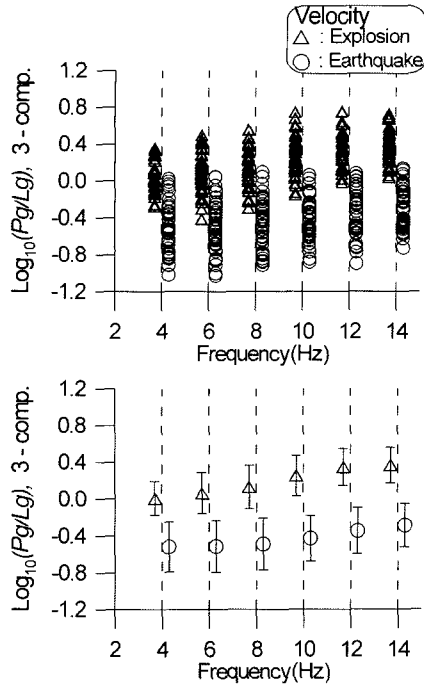


Fig. 5. Network-averaged  $\text{Log}_{10}(\text{Pg/Lg})$  spectral amplitude ratios of vertical-component at 6 discrete frequency points are plotted for earthquakes(circles) and explosions (triangles) in the upper diagram. A mean value of each discrete frequency point is plotted for earthquakes(circles) and explosions(triangles) with their arms representing one standard deviation in the lower diagram.

도는 3.09~3.66 km/sec 정도이다. 또한, 진앙거리 100km에서 Pg파 중간부분의 속도는 대략 5.55 km/sec이며,  $\pm\sigma$  구간의 속도는 4.89~6.47 km/sec 정도이다.

위와 같은 방법으로 취한 시간기록으로부터 Fourier 변환을 통하여 Fourier스펙트럼을 얻었다. 다음으로 얻어진 스펙트럼을 평활화하기 위하여, 비교적 S/N비가 큰 4 Hz부터 2 Hz 간격으로 6개의 주파수(4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz)를 중심주파수로 하여 표준편차 1 Hz의 Gaussian 함수를 위에서 얻은 스펙트럼에 곱했다. 이와 같이 새로 계산된 스펙트럼으로부터 6개의 중심주파수에 대한 진폭을 얻었다. 이러한 방법으로 계산된 스펙트럼은 6개의 주파수를 중심으로 평활화한 효과를 갖게 된다.

Fig. 5a는 주파수 4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz에서의 인공지진과 자연지진 각각 43개에 대하여 Lg파에 대한 Pg파의 상용대수비  $\text{Log}_{10}(\text{Pg/Lg})$ 를 나타낸 것이다. 여기서 진폭비는 각각의 자연지진 또는 인공지진의 수직 성분만을 대상으로 관측망의 값을 평균한 것이다. 또한, Fig. 5b는 각 주파수에서의 모든 진폭비의 평균과



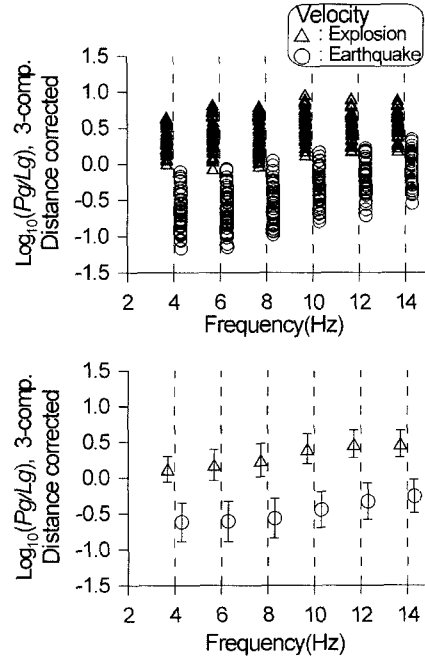
**Fig. 6.** Network-averaged  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$  spectral amplitude ratios of 3-component at 6 discrete frequency points are plotted for earthquakes(circles) and explosions(triangles) in the upper diagram. A mean value of each discrete frequency point is plotted for earthquakes(circles) and explosions(triangles) with their arms representing one standard deviation in the lower diagram.

1 표준편차 범위를 나타내고 있다. 이 그림에서 자연지진과 인공지진의 진폭비의 평균값은 차이가 있지만, 이 방법으로 양자를 완전히 구별하기는 어려움을 알 수 있다. Fig. 6은 각 관측소에서 3성분 모두를 평균한 후, 다시 관측소내의 동일 지진에 대하여 평균한 경우로서, Fig. 5의 경우에 비하여 식별능력이 더욱 향상되었음을 알 수 있다.

Kim *et al.*(1997)은  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 가 거리에 따라 감소하며, 이 효과를 보정함으로써 인공지진과 자연지진의 식별능력이 증가한다고 보고하였다. 이 결과를 참조하여 이 연구에서도 이러한 거리에 따른 감쇠효과를 다음과 같이 보정하였다. 일반적으로 진원에서의 지진파의 진폭  $A_0$ 가 거리  $R$ 에 따라 감쇠된 진폭  $A$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$A = A_0 R^{-n} e^{-\gamma R} \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 점진원(point source)으로부터 지진파선의 3차원적 방사에 따른 기하학적 확장계수(geometrical spreading coefficient)를,  $\gamma$ 는 비탄성적인 감쇠계수



**Fig. 7.** Network-averaged  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$  spectral amplitude ratios of distance-corrected 3-component(velocity) at 6 discrete frequency points are plotted for earthquakes(circles) and explosions(triangles) in the upper diagram. A mean value of each discrete frequency point is plotted for earthquakes(circles) and explosions(triangles) with their arms representing one standard deviation in the lower diagram.

(anelastic attenuation coefficient)를 나타낸다. 위 식에서 기하학적 확장에 비하여 감쇠효과가 작은  $e^{-\gamma R}$  항을 무시하면,  $A = A_0 R^{-n}$ 이 된다. 이 식의 양변에 상용대수를 취하면 다음과 같은 식으로 변형된다.

$$\text{Log } A = \text{Log } A_0 - n \text{Log } R \quad (4)$$

위 식은 진폭의 상용대수가 진원거리의 상용대수  $\text{Log } R$ 에 대한 1차식으로 표현될 수 있음을 의미한다. 따라서  $\text{Lg}$ 파에 대한  $\text{Pg}$ 파의 스펙트럼 진폭비의 상용대수  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 를 거리의 상용대수  $\text{Log } R$ 에 대하여 나타내면, 양자사이에 선형적인 관계가 기대된다. 실제의 자료를 이용하여 인공지진과 자연지진에 대하여 얻은 선형적인 관계를 참조하여,  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 의 거리에 따른 감쇠효과를 보정하였다.

위에서 분석한  $\text{Lg}$ 파에 대한  $\text{Pg}$ 파의 진폭비의 상용대수  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 의 거리에 따른 감쇠효과를 보정하여 6개의 주파수 대역(중심주파수 4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz)에 대하여  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7은 각 관측소에서의 자연지진과 인공지진의  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$



Lg)를 3성분기록에 대하여 평균한 후, 다시 관측망내에서 동일 지진기록에 대하여 평균하여 나타내고 있다. 진폭비의 거리에 대한 보정전후의 그림을 비교해 보면, 보정후가 식별능력이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

**3.4. 다변량 판별분석법**

전 항에서는 인공지진과 자연지진의 식별기법을 확립하기 위하여, Lg파에 대한 Pg파의 진폭비(Log<sub>10</sub>(Pg/Lg))를 인공지진과 자연지진기록에 대하여 조사하였다. 이 항에서는 Log<sub>10</sub>(Pg/Lg)에 통계학적인 다변량 해석 기법의 하나인 판별분석법을 적용하여, 인공지진과 자연지진의 식별능력을 조사하기로 한다.

통계학적인 판별분석이란 다수의 변수로 이루어진 다변량 자료에 의해 각 개체들이 2개 이상의 집단 중 어느 집단에 속하는가를 판별하는 분석방법으로서, 판별분석은 두 개이상의 집단에서 측정할 수 있는 변수들을 이용하여 각 집단들을 가장 잘 구분할 수 있는 판별함수를 만드는 과정을 포함한다. 또한, 판별함수를 이용하여 각 개체들이 소속 집단에 얼마나 잘 판별되는가에 대한 판별력을 측정하고, 어느 집단에 속해 있는 지를 모르는 새로운 관측치로부터 판별함수에 포함되는 변수들을 이용하여 이 관측치가 속할 확률이 가장 높은 집단을 판단하는 분석방법을 포함하게 된다. 이때 판별함수는 다변량 변수의 선형결합으로 자료의 변동을 더 많이 설명할 수 있는 새로운 함수이다(유성모, 1999; 황현식 등, 2001).

이 연구에서 인공지진과 자연지진을 식별하기 위한 판별분석의 방법과 과정은 Kim *et al.*(1997)을 참조하였다. 인공지진과 자연지진의 수는 각각 43개씩이며, Log<sub>10</sub>(Pg/Lg)를 6개의 주파수대(4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz)에 대하여 얻었기 때문에 판별분석에 이용되는 자료는 43행 6열의 행렬이 된다. 여기서 인공지진과 자연지진에 대한 사전확률을 각각 π<sub>EX</sub>, π<sub>EQ</sub>라 하면, π<sub>EX</sub>+π<sub>EQ</sub>=1 이 된다. 선형의 판별함수 D(r)을 구하기 위한 가정은 다음과 같다. 즉 자료가 정규분포를 가지며, 인공지진과 자연지진의 대한 분산 및 공분산 행렬은 같다. 또한, 이 연구에서 표본으로 채택한 43개의 인공지진과 자연지진에 분류가 정확하다는 가정을 포함한다.

위의 가정아래에서 두 집단을 분류하기 위한 판별함수는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Kim, *et al.*, 1988).

$$D(r) = \lambda^T [r - (\mu_{EQ} + \mu_{EX})/2] \tag{5}$$

이 식에서 μ<sub>EQ</sub>는 자연지진의 Lg파에 대한 Pg파의

진폭비 즉, r<sub>i</sub><sup>EQ</sup> (i=1,2,...,43)의 평균이며 μ<sub>EX</sub>는 인공지진의 평균이다. 또한 λ=S<sup>-1</sup>(μ<sub>EQ</sub>-μ<sub>EX</sub>)로, S는 분산행렬 S<sub>EQ</sub>와 S<sub>EX</sub>의 평균으로 S<sub>EQ</sub> 다음과 같다.

$$S_{EQ} = 1/42 \sum_{i=1}^{43} (r_{EQ}^i - \mu_{EQ})^T (r_{EQ}^i - \mu_{EQ}) \tag{6}$$

여기서 첨자 T는 전치행렬을 나타낸다. 어떤 인공지진 또는 자연지진에 대하여 식 (5)에 의하여 계산된 선형판별함수값 즉, 판별득점 D(r)>ln(π<sub>EQ</sub>/π<sub>EX</sub>) 일 때, 자연지진으로 식별된다. 이 연구에서는 인공지진과 자연지진의 표본수가 각각 43개씩 이므로, D(r)>0인 경우에는 자연지진으로, D(r)<0인 경우에는 인공지진으로 식별된다. 한편 식별이 잘못될 확률 즉 오분류확률 (misclassification probability) P는 다음 식으로 표현된다.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\Delta^2} \exp(-x^2/2) dx \tag{7}$$

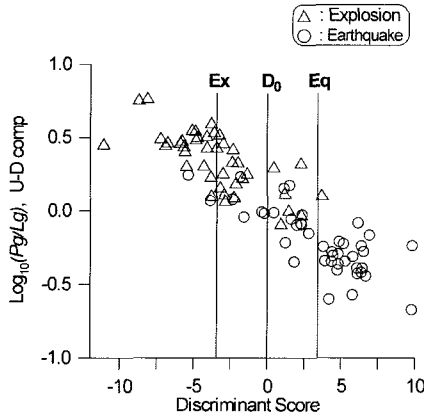
여기서, Δ<sup>2</sup>=λ<sup>T</sup>(μ<sub>EQ</sub>-μ<sub>EX</sub>)

위에서 Δ<sup>2</sup>은 두 집단의 판별득점 평균사이의 거리를 나타내며, 마할라노비스거리(Mahalanobis D-squared measure)라 불린다.

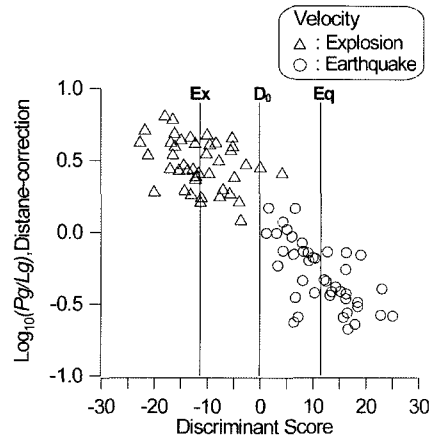
위에 서술한 판별분석법을 자연지진 43개와 인공지진 43개에 대한 Log<sub>10</sub>(Pg/Lg)에 적용하였다. 여기서 같은 사건의 경우에 관측망내의 모든 Log<sub>10</sub>(Pg/Lg)를 평균하여 자료를 구성하였다. 또한 수직성분과 3성분 모두를 평균한 경우에 대해서도 판별득점을 계산하여 비교하였다. Fig. 8과 9는 수직성분과 3성분에 대한 것이다. 여기서 D<sub>0</sub>는 두 집단이 구별되는 경계를 나타내며, E<sub>X</sub>와 E<sub>Q</sub>는 각각 인공지진과 자연지진에 대한 판별득점의 평균을 나타낸다. 수직성분과 3성분에 대한 오분류확률은 각각 9.5%, 6.7%로서 3성분의 경우가 식별능력이 약간 향상된 것을 알 수 있다. Fig. 10은 속도 3성분에 대한 Log<sub>10</sub>(Pg/Lg)를 거리보정하여 구성된 자료에 대하여 판별득점을 계산한 결과이며, 오분류확률은 0.89%로서, 거리보정의 효과가 식별능력의 향상에 크게 기여한 것을 알 수 있다. 결론적으로 가장 식별능력이 뛰어난 것은 속도 3성분에 대하여 거리보정을 실시한 경우로 나타났다.

**4. 토론 및 결론**

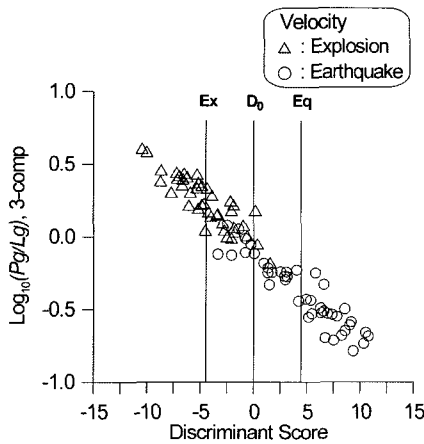
한반도 남동부의 경상분지에는 한국지질자원연구원의 연구용 지진관측망을 비롯하여, 원자력발전소 주변



**Fig. 8.** Discriminant scores of earthquakes(circles) and explosions (triangles) of the sample data are plotted with their mean network-averaged  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$  ratios of vertical component velocity records in the upper diagram. Vertical lines denoted as Ex and Eq are the projection of the multivariate means of the earthquake and explosion population, respectively. The vertical line  $D_0$  is the classification line. Seven earthquakes and seven explosions are incorrectly classified, and the total misclassification probability is 9.5%.



**Fig. 10.** Discriminant scores of earthquakes(circles) and explosions (triangles) of the sample data are plotted with their mean network-averaged  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$  ratios of 3-component velocity records in the upper diagram. Two explosions are incorrectly classified, and the total misclassification probability is 0.89%.



**Fig. 9.** Discriminant scores of earthquakes(circles) and explosions (triangles) of the sample data are plotted with their mean network-averaged  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$  ratios of 3-component velocity records in the upper diagram. Vertical lines denoted as Ex and Eq are the projection of the multivariate means of the earthquake and explosion population, respectively. The vertical line  $D_0$  is the classification line. Seven earthquakes and three explosions are incorrectly classified, and the total misclassification probability is 6.7%.

을 대상으로 하는 전력연구원과 한국원자력안전기술원의 지진감시망, 기상청의 관측소 등이 조밀하게 분포되어 있어, 지진관측의 능력이 최근에 들어 크게 향상

되어 있다. 그러나, 이 지역에는 개발과 관련된 중소규모의 채석발파장이 다수 위치하고 있어서 자연지진이 아닌 인공발파가 다수 관측되고 있는 실정이다. 따라서, 이 지역에서의 지진활동을 감시, 분석하기 위해서는 자연지진과 발파에 의한 인공지진의 식별이 우선적으로 필요하다. 이 연구에서는 경상분지에서 발생한 자연지진 43개와 인공지진 43개를 선정하여, 양자 사이의 식별기법을 연구하였다. 인공지진은 주로 낮 12시와 오후 5시 전후에 집중되며, 모든 관측소에서 초동방향이 위쪽으로 나타난다. 객관성있는 식별을 위해서 사용한 자연지진 및 인공지진의 규모와 진앙거리 분포가 대체로 같도록 자료들을 선정하였다. 지진들의 진앙거리는 120 km 이내이며, 규모는 0.5~3.5 사이에 분포한다.

경상분지에서의 식별기법을 확립하기 위하여 사용한 방법은 주로 지진기록의 스펙트럼을 비교 분석하는 것으로서 ① 시간-주파수-진폭의 3차원 스펙트로그램, ② S파에 대한 P파의 진폭비, ③ Lg파에 대한 Pg파의 진폭비( $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ )의 비교, ④  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 를 이용한 통계학적인 판별분석법 등이 사용되었다.

먼저 스펙트로그램에 의하여 인공지진과 자연지진의 식별이 가능한가를 검토하였다. 스펙트로그램상에서 객관성있는 비교를 위하여 인공지진과 자연지진은 그 규모와 진앙거리가 비슷한 것들을 각각 2개씩 선정하였다. 일반적으로 인공지진은 그 에너지가 P파 부분에 대부분 집중되며, 자연지진은 S파 부분에 집중됨을 알

수 있다. 또한, 인공지진은 자연지진에 비하여 상대적으로 고주파부분의 진폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 스펙트로그램은 인공지진과 자연지진을 구별하는데 어느 정도 효과적으로 사용할 수는 있으나, 여러 연구(Dowla *et al.*, 1990; Wang and Teng, 1995)가 지적한 바와 같이, 스펙트로그램만으로 자연지진과 인공지진을 식별하는 것은 어느 정도 전문성이 요구되며 다수의 자료를 객관성있게 식별하기에는 부적합하다는 결과를 얻었다.

다음으로 S파에 대한 P파의 진폭비에 의한 인공지진과 자연지진의 식별능력을 조사하였다. 일반적으로 인공지진에서는 자연지진에 대하여 S파의 발달이 미약하다는 특성을 이용하여, S파의 스펙트럼 진폭값 S에 대한 P파의 스펙트럼 진폭 P의 상용대수비  $\text{Log}(P/S)$ 를 자연지진과 인공지진에 대하여 비교해 보았다. 진폭비는 인공지진이 자연지진에 비하여 대체로 큰 편으로 나타났다. 또한 인공지진과 자연지진의 식별능력을 향상시키기 위하여, 두 수평성분(N-S 및 E-W)으로부터 진앙에 대한 방사성분과 집선성분을 구하여, 같은 방법으로 각각의 진폭비의 변화를 진앙거리에 대하여 조사하였다. 그 결과 식별능력은 약간 향상되었으나, 이 기법은 양자를 구별하는 수단으로 사용하기에 곤란한 것으로 보인다. 유영호(1992)는 이 기법을 적용하여 경상분지내에서 관측된 인공지진과 자연지진에 대한 구별을 시도하여, 이용 가능성을 입증한 바 있다. 그러나 그가 사용한 자료는 비교적 규모와 진앙거리가 큰 것들로서 이 연구의 결과와 대비가 곤란하다.

위에서 검토한 방법외에 Lg파에 대한 Pg파의 스펙트럼 진폭비의 상용대수  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 를 6개의 중심주파수(4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz)에서 구하여, 인공지진과 자연지진의 식별능력을 조사하였다. Kim *et al.*(1997)은  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 가 거리에 따라 감소하며, 이 효과를 보정함으로써 인공지진과 자연지진의 식별능력이 향상된다고 보고하였다. 이 결과를 참조하여 이 연구에서도 이러한 거리에 따른 감쇠효과를 보정하였다. 거리에 따른 감쇠를 고려한 경우가 더욱 식별능력이 향상되었으며, 수직성분만을 대상으로 할 때 보다 3성분의 평균값을 이용할 때 더욱 효과적인 식별이 되는 것으로 나타났다.

마지막으로 인공지진과 자연지진에 대한  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 에 통계학적인 판별분석법을 적용하여, 양자의 식별능력을 조사하였다. 그 결과 판별분석법이 가장 적합한 식별기법으로 나타났으며,  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 의 거리에 따른 감쇠를 보정하여 3성분의 평균값에 판별분석을

적용한 경우가 식별능력이 가장 뛰어난 것으로 판명되었다. 이 연구에서 표본자료로 사용한 43개의 인공지진과 자연지진에 대하여 식 (5)로부터 계산된  $D(r)$ 은 다음과 같이 선형의 식으로 표현될 수 있다.

$$D(r) = a_0 + a_1 r_1 + a_2 r_2 + a_3 r_3 + a_4 r_4 + a_5 r_5 + a_6 r_6 \quad (8)$$

윗 식에서  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 은 각각 주파수 4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz에 대한  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 를 나타내며, 또한 계수  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 은 선형회귀를 통하여 구할 수 있는 상수이다. 이 연구에서 속도 3성분을 거리보정한 자료에 대하여 계수들을 구하여 얻어진 식은 다음과 같다.

$$D(r) = -9.20 - 38.42r_1 + 9.63r_2 - 0.99r_3 - 8.35r_4 + 9.90r_5 + 14.36r_6 \quad (9)$$

이 식은 경상분지내에서 인공지진과 자연지진을 식별하기 위한 최적의 선형 판별함수이다. 따라서, 경상분지내에서 관측된 자료로부터 4, 6, 8, 10, 12, 14 Hz에 대한  $\text{Log}_{10}(Pg/Lg)$ 값을 각각  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 에 대입하여, 식 (9)의 값이 0보다 크면 자연지진으로, 0보다 작으면 인공지진으로 분류할 수 있다.

## 사 사

이 연구는 과학재단 특장기초연구(과제명: 한반도와 한반도 주변의 지진지체구조, R01-1999-0002-0005-0(2002))의 연구비 지원과 부분적으로 기상기술개발연구(과제명: 지진원 및 지진파 전달 특성 연구)의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

## 참고문헌

- 강익범, 김성배, 서만철, 전명순 (2000) 원주 KSRS 자료를 이용한 자연지진과 인공지진 구별에 관한 연구. 지구물리학회지, 3권, p. 25-36.
- 김성균, 정부흥 (1985) 한국 남부지역의 지각구조. 광산지질, 18권, p. 151-157.
- 이희현, 채원규, 남순성 공역 (1996) 지진파의 스펙트럼 해석 입문. 도서출판 골드, 260p.
- 유성모 (1999) SAS 다변량 통계분석. 자유아카데미, 195 p.
- 유영호 (1992) 한반도 동남부 지역의 미소 지진 연구. 연세대학교 석사학위논문, 54p.
- 지현철, 전명순, 전정수, 신인철 (1996) 경상분지에서의 지진연구(II). 한국자원연구소, KR-95(C)-5.
- 전정수, 제일영 (2001) 인프라사운드를 이용한 한반도 일원에서의 인공발파 식별. 대한 지질학회 2001년도 춘계 공동학술발표회 논문집, p. 354-355.
- 지현철, 이희일, 전정수, 신인철, 김동균, 박정호, 김근영

- (1998) 지진공학연구. 한국자원 연구소, KR-98(C)-06. 황현식, 김공순, 김진, 이승희, 박정수, 2001, SAS와 통계 분석. 경문사, 464p.
- Dowla, F.U., Taylor, S.R. and Anderson, R.W. (1990) Seismic discrimination with artificial neural network: preliminary results with regional spectral data. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v. 80, p. 1346-1373.
- Kim, W.-Y., Aharonian, V. Lerner-Lam, A.L. and Richards, P.G. (1997) Discrimination of earthquakes and explosions in southern Russia using regional high-frequency three-component data from the IRIS/JSP Caucasus network. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v. 87, p. 569-588.
- Kim, W.-Y., Simpson, D.W. and Richards, P.G. (1994) High-frequency spectra of regional from earthquakes and chemical explosions. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v. 84, p. 1365-386.
- Kulhanek, O. (1990) *Anatomy of seismograms*. Elsevier Science, 178p.
- Lee, W.H.K. and Lahr, J.C. (1975) HYPO71(revised): A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geological Survey Open-File Report, 75-311, 114p.
- Taylor, S.R., Sherman, N.W. and Denny, M.D. (1988) Spectral discrimination between NTS explosions and western United States earthquakes at regional distances. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v. 78, p. 1563-1579.
- Wang, J. and Teng, T.-L. (1995) Artificial neural network-based seismic detector. *Bull. Seis. Soc. Am.*, v. 85, p. 308-319.

---

2003년 3월 4일 원고접수, 2003년 4월 24일 게재승인.