자원환경지질, 제41권, 제2호, 225-242, 2008
Econ. Environ. Geol., 41(2), 225-242, 2008

국내 광대역 지진 관측소의 부지효과

위성훈[1] · 김성균[2*]
[1]한국지질자원연구원 지진연구센터, [2]전남대학교 지구환경과학부

The Site Effect of the Broadband Seismic Stations in Korea

Soung Hoon Wee[1] and Sung Kyun Kim[2*]
[1]Earthquake Research Center, KIGAM, Daejeon 305-350, Korea
[2]School of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

The site effect for 23 broadband seismic stations in the southern Korean Peninsula was estimated by using the spectral ratio of coda waves. In principle, the site effect means the pure amplification below the station excluding effects of seismic source and attenuation in the wave transmission. However, the site effect determined in this study is equivalent with the relative site amplification factor to the mean amplification for all stations. A total of 500 three-component seismograms from 35 earthquakes, of which magnitude ranged from 2.5 to 5.1 occurred from January, 2001 to January, 2007 was used to obtain the site amplification factor. The site amplification factors were estimated for the frequency bands centered at 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz. It was found that the factors for two horizontal components of transverse and radial records were concordant with each other in the all frequency bands. However, the factor for the vertical component was found to be systematically lower than those for two horizontal components. The factors obtained in the low frequency band below 2 Hz ranged from 0.5 to 1.5 in all seismic stations except for KMA and KIGAM stations in Bagryeongdo (BRD1 and BRD2) of which factor showed high value above 1.5. Some stations such as SEO, SNU, HKU, NPR, and GKP1 showed high value above 1.5 in the high frequency band from 5 to 20 Hz. Especially, the factors of GKP1 station represented extremely high value ranging from 1.8 to 7.8. Also, the factors for stations of KWJ, SND, and ULJ showed low value below 0.5. The spatial distribution for the relative amplification factor represented a tendency of being approximately lower in north-eastern area than south-western area in the southern Korean Peninsula.

Key words : site effect, seismic station, coda-normalization, Korean Peninsula

이 연구에서는 coda파 스펙트럼 비를 이용하여 한반도 남부의 광대역 지진관측소 23개소에 대한 부지효과를 추정하였다. 원리적으로 부지효과는 지진원과 전달과정중의 감쇠효과를 제외한 관측소 하부에서의 순수한 증폭효과만을 의미한다. 그러나 이 연구에서 구한 부지효과는 모든 관측소의 평균값에 대한 상대적인 부지증폭률과 같다. 2001년 1월부터 2007년 1월 사이에 발생한 규모 2.5부터 5.1까지의 지진 35개로부터 기록된 500개의 3성분 파형이 부지증폭효과를 얻기 위해 사용되었다. 부지증폭률은 중심주파수를 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 및 20 Hz로 하는 주파수대역에 대해서 계산하였다. 횡단성분과 방사성분의 수평 2성분에 대한 부지증폭률은 모든 주파수 대역에서 서로 일치하나, 수직성분의 증폭률은 수평성분에 비하여 일관되게 낮게 나타났다. 또한 증폭률은 저주파 보다는 고주파에서 일반적으로 증폭의 정도가 큰 경향을 보였다. 부지증폭률은 2 Hz 이하의 저주파에서 1.5 이상의 높은 값을 갖는 기상청과 한국지질자원연구원의 백령도 관측소(BRD1과 BRD2)를 제외한 나머지 관측소에서 0.5와 1.5사이의 값을 갖는다. SEO, SNU, HKU, NPR 및 GKP1 관측소들은 5~20 Hz 범위의 고주파 대역에서 1.5 이상의 높은 값을 보였으며, 특히 GKP1 관측소는 1.8~7.8 범위의 높은 증폭값이 나타났다. 또한 KWJ, SND 및 ULJ 관측소는 0.5 이하의 낮은 값을 나타내었다. 부지증폭률의 공간적 분포는 한반도 남부에서 대체로 북동부가 남서부에 비해 증폭의 정도가 낮은 경향을 보여 준다.

주요어 : 부지효과, 지진관측소, coda 정규화법, 한반도

*Corresponding author: kimsk@jnu.ac.kr

1. 서 언

국내에서의 지진재해에 관한 연구는 1970년대 원자력 발전소 부지의 지진 안전성 확보를 위해 각 부지별로 지진위험도가 검토되기 시작하면서 이루어졌다. 어떤 지역의 지진재해는 지진원의 특성, 지진파를 전달하는 매질의 성질 및 부지의 조건에 따라 크게 달라진다. 지진원과 전달과정중의 매질의 효과를 제외한 순수한 부지에서의 증폭효과를 부지효과(site effect) 또는 부지증폭률(site amplification factor)이라 한다(Takemura *et al.*, 1995). 부지효과에 따라 같은 크기의 지진동이라 하더라도, 연약지반에서는 특정 주파수에서 크게 증폭되어 큰 재해를 초래할 수도 있다. 예를 들면, 1923년 일본 동경부근에서 발생한 Kanto 지진에 의한 건물의 도괴율은 충적층이 두껍게 쌓인 곳에서 높았다. 그 이유는 저주파에서의 증폭률이 커서 대부분의 건물에 공진이 일어난 것과 지진동에 의하여 기초부분에 부등침하가 일어났던 것으로 해석하고 있다(Oohara, 1974). 이와 같이 연약지반에서 지반의 응답에 따라 지진동이 크게 증폭되어 큰 재해로 연결된 예는 여러 곳에서 찾을 수 있다(Takemura *et al.*, 1995). 1985년에 발생한 멕시코 지진은 진앙지로부터 약 400km 떨어진 멕시코시티의 퇴적물로 채워진 연약지반상에서 큰 재해를 일으켰다는 것은 널리 알려져 있다(Celcebi *et al.*, 1987).

지진재해에 대한 관심이 점점 커짐에 따라 한반도의 지진학적 특성에 대한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 부지효과에 관한 연구는 그 중요성에도 불구하고 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 지금까지의 지진자료를 이용하여 한반도내에서 지역에 따른 혹은 지질학적 특성에 따른 부지효과에 관한 연구는 필수적이라고 할 수 있다. 그러나 부지효과는 지역성이 커서 지체구조적 환경과 지반조건이 다른 외국의 결과를 그대로 사용하기는 곤란하다.

국내에서의 부지효과에 관한 연구는 현재로서는 충분하지 않은 실정이며, 몇 개의 선행연구가 있을 뿐이다. Kim and Baag(2002)은 한반도 남한지역에서 coda 정규화법을 이용하여 상대적인 부지증폭률을 얻었다. 그 결과 한반도 내륙 및 동해안 지역이 서해안 지역에 비해 상대적으로 부지증폭률이 크며, 주파수가 커짐에 따라 증폭률이 더 커진다는 사실을 밝혔다. 또한, Yun(2007)는 한반도 남부지역에 대한 2차원 토모그래피 역산을 수행하였다. 그는 주파수별 부지증폭함수를 관측소에서 기록된 지진의 지진파 스펙트럼의 수평/수직성분 비(H/V 비)로 가정한 후, 이를 초기값으로 하여 역산결과에 의해 얻어진 관측소별 오차평균을 합산하여 부지증폭률로 정의하였다. H/V 비를 이용하여 계산된 부지증폭률의 초기값은 1 Hz 이상의 고주파 대역에서 약 1.6배 정도 증폭되는 것으로 확인되었다. 이론적으로 계산한 1 Hz 미만의 저주파 대역에서는 H/V 비가 고주파에 비해 비교적 크게 증가하는 것으로 나타났다.

국외의 경우 미국 서부지역 및 일본을 중심으로 부지효과에 관한 연구들이 다수 수행되었다. 부지효과의 계산방법은 직달 S파를 이용하여 직접 부지효과를 구하는 방법(Hartzell, 1992; Field *et al.*, 1992; Steidl, 1993; Margheriti *et al.*, 1994; Field and Jacob, 1995; Kato *et al.*, 1995; Gao *et al.*, 1996; Hartzell *et al.*, 1996; Su *et al.*, 1996; Field, 1996)과 coda파의 스펙트럼 비를 이용하는 방법(Tsujiura, 1978; Phillips and Aki, 1986; Mayeda *et al.*, 1991; Koyanagi *et al.*, 1992; Su *et al.*, 1992; Taira and Yomogida, 2003)으로 크게 나눌 수 있다. Kato *et al.*(1995)는 미국 서부 California에서 두 방법을 통해 얻어진 부지증폭률을 비교하여 본 결과 두 방법에 의한 결과 사이의 상관계수는 0.92이며, 부지증폭률이 1.5 이내의 범위내에서 서로 잘 일치함을 밝혔다.

이 연구의 목적은 한반도 남부의 지진관측소를 대상으로 부지효과를 결정하는 것이다. 이 목적을 달성하기 위하여, 먼저 부지효과 평가에 대한 방법론을 광범위하게 조사하였으며, 양적 및 질적으로 지진자료가 충분히 축적되어 있는 국내 광대역 지진관측소를 대상으로 부지효과를 구했다. 부지효과는 관측소 지반의 상대적인 부지증폭률을 8개의 중심주파수(0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 Hz)에 대하여 분석하였다. 현재 기상청과 한국지질자원연구원에서 운영중인 광대역 지진관측소는 공간적으로 비교적 고르게 분포하고 있다. 따라서 이 관측소들을 대상으로 부지효과를 분석함으로서 한반도 지각에 대한 광역적인 부지효과의 경향을 알 수 있을 것으로 생각된다.

2. 지진 자료

이 연구에서는 관측소 부지효과를 분석하기 위하여 2001년 1월부터 2007년 1월까지 기상청과 한국지질자원연구원 지진관측망에 기록된 지진중 국지규모 2.5 이상이고 신호대 잡음비가 높으며, 9개 이상의 광대역관측소에서 지진기록이 얻어진 지진을 분석대상으로 선

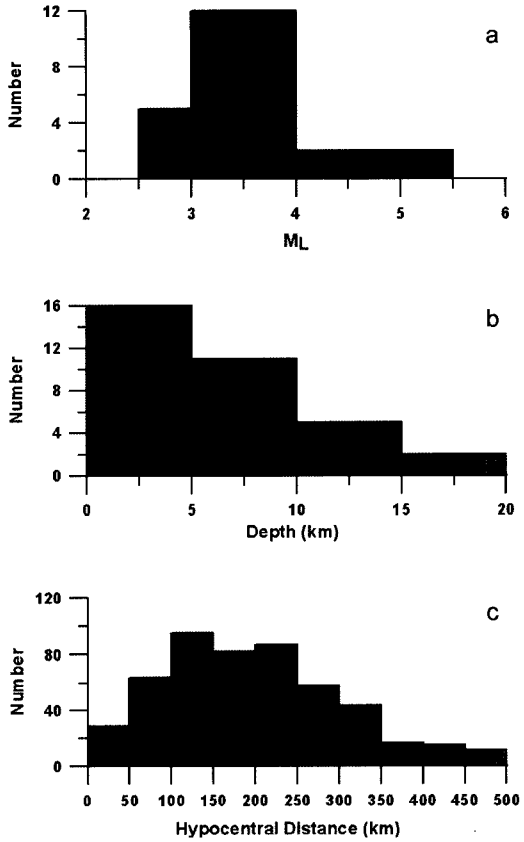

Fig. 1. Distribution of magnitude (a), depth (b), and hypocentral distance (c) of the used earthquake data.

정하였다. 부지효과 분석대상 관측소는 기록된 지진의 자료수가 충분한 기상청과 한국지질자원연구원의 광대역관측소 23개소로 한정하였다. Fig. 1에 광대역 관측소의 코드명, 좌표, 해발고도 및 운영기관을 제시하였다.

선정된 지진의 총 수는 35개로서, 지진기록의 수는 1,500개(=3성분×500개)이며, 진앙지의 좌표, 발생깊이 및 규모는 한국지질자원연구원이 결정한 값을 채택하였다. Table 2에 이 지진들의 진앙지, 발생깊이, 국지규모 및 기록된 광대역 관측소의 수를 제시하였다. 이 연구에 사용한 지진들의 규모 범위는 국지규모(M_L) 2.5~5.5 사이로 대략 2/3정도가 3.0~4.0사이에 집중(Fig. 1(a))되어 있으며, 진원깊이는 20 km 이하의 천발지진으로 3/4 이상이 10 km 이내에 집중되어 있다(Fig. 1(b)). 진원거리는 0~500 km 사이에 있으며, 대략 2/3정도가 50~300 km에 집중되어 있다(Fig. 1(c)). Fig. 2는 분석에 사용된 지진의 진앙지와 관측소 사이의 지진파 전파경로를 나타내며, 그 전파경로는 500개로써 대체로 한반도 남부 전역을 덮고 있다.

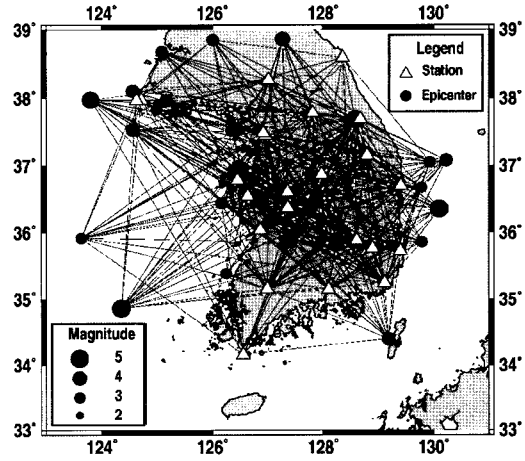

Fig. 2. Distribution of paths(line) between earthquakes (circles) and stations (triangles) in the southern Korean Peninsula used in this study.

이 연구에서 사용한 지진자료는 광대역 지진계에 기록된 속도 자료들이다. 기상청과 한국지질자원연구원의 광대역 지진계인 STS-2의 주파수 응답은 대략 0.08 Hz에서부터 25 Hz 범위내에서 평탄한 응답을 보여준다. 따라서 이 연구에서 취급하는 주파수 대역 0.2~20 Hz까지는 대체로 평탄하며, 특별한 계기응답보정이 필요하지 않다.

3. 부지효과 계산

3.1. 계산 방법

지진기록으로부터 관측소의 부지효과를 결정하는 방법으로서는 1) 직달 S파를 이용하여 미지수항 분리에 의하여 직접 부지효과를 결정하는 방법(Hartzell, 1992; Field *et al.*, 1992; Margheriti *et al.*, 1994; Field and Jacob, 1995; Kato *et al.*, 1995; Gao *et al.*, 1996; Hartzell *et al.*, 1996; Su *et al.*, 1996; Field, 1996)과 2) coda파의 스펙트럼 비를 이용하는 방법(Tsujiura, 1978; Phillips and Aki, 1986; Mayeda *et al.*, 1991; Koyanagi *et al.*, 1992; Su *et al.*, 1992; Su and Aki, 1995; Taira and Yomogida, 2003) 및 3) 수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼 비(H/V 비)를 이용하는 방법(Langston, 1979; Nakamura, 1989; Bonilla *et al.*, 1997; Horike *et al.*, 2001)이 널리 사용되고 있다.

첫 번째 방법은 S파에 대한 직달파를 이용하여 부지효과를 직접 결정하는 방법이다. 일반적으로 어떤 관

측소에서 얻어진 지진기록 스펙트럼은 지진원 스펙트럼에 전달과정중의 감쇠효과와 부지에서의 증폭효과를 곱한 것으로 나타낼 수 있다. 따라서 i번째 지진을 j번째 관측소에서 기록한 S파의 스펙트럼 진폭 $O_{ij}(f)$는 다음 식으로 나타낼 수 있다(Kato *et al.*, 1995).

$$O_{ij}(f)=S_i(f)G_j(f)R_{ij}^{-\gamma}\exp\left(-\frac{\pi R_{ij}f}{Q_s(f)v_s}\right) \quad (1)$$

여기서 $S_i(f)$와 $G_i(f)$는 각각 지진원과 부지효과 스펙트럼을 나타낸다. R_{ij}는 i번째 지진과 j번째 관측소 사이의 진원거리이며, γ는 기하학적 확장계수를 나타낸다. 또한 $Q_s(f)$는 주파수 f에서의 Q값을, v_S는 S파 속도를 나타낸다. 식 (1)의 양변에 상용대수를 취하여 아래 식과 같이 변환할 수 있다.

$$o_{ij}=s_i+g_j-\alpha_{ij}Q_s^{-1} \quad (2)$$

여기서 $o_{ij}=\log(R_{ij}^{\gamma}O_{ij})$, $s_i=\log(S_i)$, $g_i=\log(G_i)$ 이고, $\alpha_{ij}=\pi R_{ij}f\log e/v_s$ 이다. 식 (2)는 미지수가 분리된 형태의 식으로, 이 식을 최소자승 역산법으로 풀어 각 주파수에 대한 부지효과를 구할 수 있다. 그러나 이 방법으로 모든 미지수를 직접 결정하지 않고, 예를 들면 지진원 스펙트럼 $S_i(f)$를 점진원에 의한 Brune(1970)의 모델로 가정하여 미지수에서 제외하여 부지효과를 구하는 방법 (Hartzell, 1992)도 있다.

다음으로 두 번째 방법에 대하여 서술하기로 한다. Aki and Chouet(1975)에 이어 여러 연구들(Phillips and Aki, 1986; Chin and Aki, 1991; Mayeda *et al.*, 1991; Koyanagi *et al.*, 1992; Su *et al.*, 1992)에서는 지질학적 조건이 다른 여러 지역에서 부지효과를 구하는 데 있어서 coda파를 이용하는 방법이 효과적임을 보였다. Coda파를 이용하여 부지효과를 결정하는 방법중 가장 널리 사용하는 방법은 coda파의 스펙트럼 비를 이용하는 방법이며, 여기서는 Taira and Yomogida (2003)의 방법을 참조하여 상대적인 부지효과, 즉 부지증폭률을 구하는 과정을 설명하기로 한다.

보통 시간과 주파수에 의존하는 coda파 진폭은 다음과 같은 식으로 나타 낼 수 있다.

$$A_{ij}(f,t)=S_i(f)G_j(f)C(f,t) \quad (3)$$

여기서 $A_{ij}(f,t)$ 는 S파 주행시간의 2배 이상인 시간 t

Table 1. List of the broad-band seismic stations used in this study.

No.	Station Name	Station Code	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Height (m)	Organization
1	Bogildo	BGD	34.1569	126.5575	N/A	KIGAM
2	Bagryeongdo 1	BRD1	37.9743	124.7161	0.0	KIGAM
3	Bagryeongdo 2	BRD2	37.9677	124.6303	169.0	KMA
4	Busan	BUS	35.2487	129.1125	91.0	KMA
5	Chuncheon	CHC	37.7775	127.8145	245.0	KMA
6	Chungju	CHJ	36.8730	127.9748	227.0	KMA
7	Chulwon	CHNB	38.2685	127.0119	176.0	KIGAM
8	Daegu	DAG	35.7685	128.8970	262.0	KMA
9	Daegwallyeong	DGY	37.6904	128.6742	791.0	KMA
10	Kyungpook University	GKP1	35.8863	128.6083	N/A	KIGAM
11	Gyeongsang University	GSU	35.1521	128.0991	N/A	KIGAM
12	Hyodongri	HDB	35.7307	129.4012	N/A	KIGAM
13	Kyowon University	HKU	36.6102	127.3602	67.2	KIGAM
14	Hongsung	HSB	36.5526	126.6371	-7.5	KIGAM
15	Koseong	KSA	38.5926	128.3538	N/A	KIGAM
16	Kwangju	KWJ	35.1599	126.9910	213.0	KMA
17	Napori	NPR	36.0395	126.8685	19.1	KIGAM
18	Seoul	SEO	37.4879	126.9188	33.5	KMA
19	Seosan	SES	36.7893	126.4531	99.1	KMA
20	Sangdong	SND	37.1549	128.7984	600.0	KIGAM
21	Seoul University	SNU	37.4509	126.9566	N/A	KIGAM
22	Taejeon	TJN	36.3775	127.3638	54.0	KIGAM
23	Uljin	ULJ	36.7021	129.4084	77.1	KMA

Table 2. List of earthquake data used in this study.

Origine time		Latitude	Longitude	Depth	M_L	No. of	Event
yr/mon/day	hr:min:sec	(°N)	(°E)	(km)		station	ID
2002/03/17	09:25:57.10	38.1040	124.5605	0.60	3.8	12	20317
2002/04/01	07:46:02.40	37.3080	128.1160	0.27	2.9	10	20401
2002/07/09	04:01:49.90	35.8608	129.7915	11.54	3.7	14	20709
2002/07/17	06:50:30.70	37.9760	125.1647	0.84	3.4	11	20717
2002/12/10	07:42:49.80	38.8640	127.2648	0.68	4.1	11	21210
2003/01/09	17:33:21.20	37.5338	124.5678	5.00	3.9	19	30109
2003/01/10	07:56:05.10	35.8128	129.2410	1.65	3.0	11	30110
2003/03/23	05:38:39.70	34.8607	124.3507	9.60	5.1	19	30323
2003/03/30	20:10:57.00	37.9760	123.7992	4.51	4.8	20	30330
2003/04/05	00:31:32.50	36.1698	127.3390	1.23	3.1	12	30405
2003/04/16	02:55:23.90	36.4425	126.1657	0.68	3.5	21	30416
2003/06/09	10:14:00.00	35.9193	123.6302	-	3.9	15	30609
2003/10/13	18:12:04.90	36.9862	126.4750	5.41	3.9	18	31013
2004/01/05	06:11:51.60	36.1727	127.0093	0.30	3.2	15	40105
2004/01/06	01:49:42.90	38.6803	125.0888	1.00	3.4	11	40106
2004/01/29	20:22:24.60	35.8385	128.5423	16.00	2.6	10	40129
2004/04/26	13:29:25.40	35.8248	128.2392	8.10	4.0	18	40426
2004/04/30	23:43:57.40	35.7720	129.3653	5.90	3.0	11	40430
2004/05/29	19:14:24.70	36.3572	130.1047	3.70	5.1	19	40529
2004/06/01	20:22:17.30	37.0790	130.2280	6.00	3.7	15	40601
2004/08/06	05:32:53.29	35.8567	127.3318	0.30	3.6	21	40806
2004/08/13	22:42:02.09	37.5178	126.3465	8.00	3.3	12	40813
2005/02/20	22:18:38.75	35.3885	126.2443	14.10	3.5	9	50220
2005/06/10	21:14:36.70	36.7647	128.4785	12.50	2.5	10	50610
2005/06/29	23:18:03.80	34.3992	129.1821	5.50	3.7	16	50629
2005/06/30	00:25:02.48	36.6759	129.7847	6.40	3.1	14	50630
2005/10/21	12:00:31.46	37.8258	124.9934	3.30	3.2	11	51021
2006/01/19	12:25:35.49	37.1988	128.7817	3.10	3.5	13	60119
2006/04/03	18:14:03.46	38.8514	126.0079	7.70	3.5	11	60403
2006/04/28	23:47:55.32	37.0559	129.9354	12.30	2.9	10	60428
2006/04/29	11:01:13.05	37.0540	129.9351	7.80	3.2	12	60429
2006/07/25	23:29:19.64	35.8028	127.8888	2.90	2.6	14	60725
2006/11/11	01:16:02.53	35.9813	127.4657	5.80	3.2	17	61111
2006/12/04	00:51:43.05	36.4604	127.9117	16.30	3.2	17	61204
2007/01/20	20:56:53.60	37.6889	128.5841	13.10	4.9	21	70120

에 i번째 지진에 의하여 j번째 관측소에 기록된 주파수 f에 대한 coda파의 스펙트럼 진폭이고, $S_i(f)$는 i번째 지진에 대한 지진원의 효과를 나타낸다. 그리고 $G_i(f)$는 j번째 관측소에서의 부지효과를 나타내며, $C(f, t)$는 coda파의 전파효과를 나타내는 미지수항이다. 관측소의 부지효과를 구하기 위해서 동일한 지진에 대하여 동일한 경과시간에서 여러 관측소에서의 coda파 진폭을 평균한 값, $\tilde{A}(f,t)$에 의해 $A(f,t)$를 정규화하여 스펙트럼 비를 취하면,

$$\frac{A_{ij}(f,t)}{\tilde{A}_{ij}(f,t)}=\frac{S_iG_j(f)C(f,t)}{S_i\tilde{G}_j(f)\tilde{C}(f,t)}\simeq\frac{G_j(f)}{\tilde{G}_j(f)}\equiv RSAF_{ij}(f) \tag{4}$$

$$RSAF_{ij}(f)\equiv\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}RSAF_{ij}(f) \tag{5}$$

가 성립된다. 여기서 N은 관측소의 수를 나타내며, $\tilde{C}(f)$는 모든 관측소 부지효과의 평균이다. 결과적으로 스펙트럼 비 $RSAF_j$는 모든 관측소에 대한 j번째 관측

소의 상대적인 부지증폭률(the relative site amplification factor)을 의미한다. 단 식 (4)에서 절대적으로 필요한 가정은 coda파의 전파효과를 나타내는 감쇠곡선인 $C(f, t)$가 진원거리와 방향에 관계없이 모든 지진원-관측소 경로에 대하여 같다는 것이다. 따라서 식 (4)를 사용하기 전에 $C_{ij}(f,t)=\tilde{C}(f,t)$ 가 성립되는가, 즉 coda파 감쇠곡선을 사용한 모든 지진자료에 적용할 수 있는가를 확인할 필요가 있다(Taira and Yomogida, 2003). 이에 대해서는 토의부분에서 다시 검토하기로 한다.

위에 설명한 두 방법 외에도 수직성분에 대한 수평성분의 스펙트럼 비(H/V 비)에 의해 부지효과를 추정하는 방법이 있다. 이 방법은 Langston(1979)에 의해 처음으로 소개되었으며, Nakamura(1989)는 상시미동의 H/V 비를 이용하여 S파에 대한 부지증폭률을 결정하는 방법을 제안하였다. 이 후에도 여러 연구자(Bonilla *et al.*, 1997; Castro *et al.*, 1990; Horike *et al.*, 2001)에 의해 이 방법이 사용되었다. 이 기법에 대하여 Bonilla *et al.*(1997)의 방법에 따라 설명하기로 한다.

이 기법에서의 기본적인 가정은 지진파가 관측소 지하에 입사할 때 수직성분은 지하구조에 관계없이 증폭되지 않으며, 수평성분은 복잡한 관측소 지하 지질구조에 의해 증폭된다는 것이다. 따라서 다음과 같이 주파수 영역에서 H/V 비를 이용하여 다음 식과 같이 부지증폭률 H/V 비를 구할 수 있다(Bonilla *et al.*, 1997).

$$\frac{H}{V}=\frac{A_{H_{ij}}(f)}{2\sqrt{2}A_{v_{ij}}(f)} \tag{6}$$

여기서 $A_{H_{ij}}(f)$는 j번째 관측소에 기록된 i번째 지진의

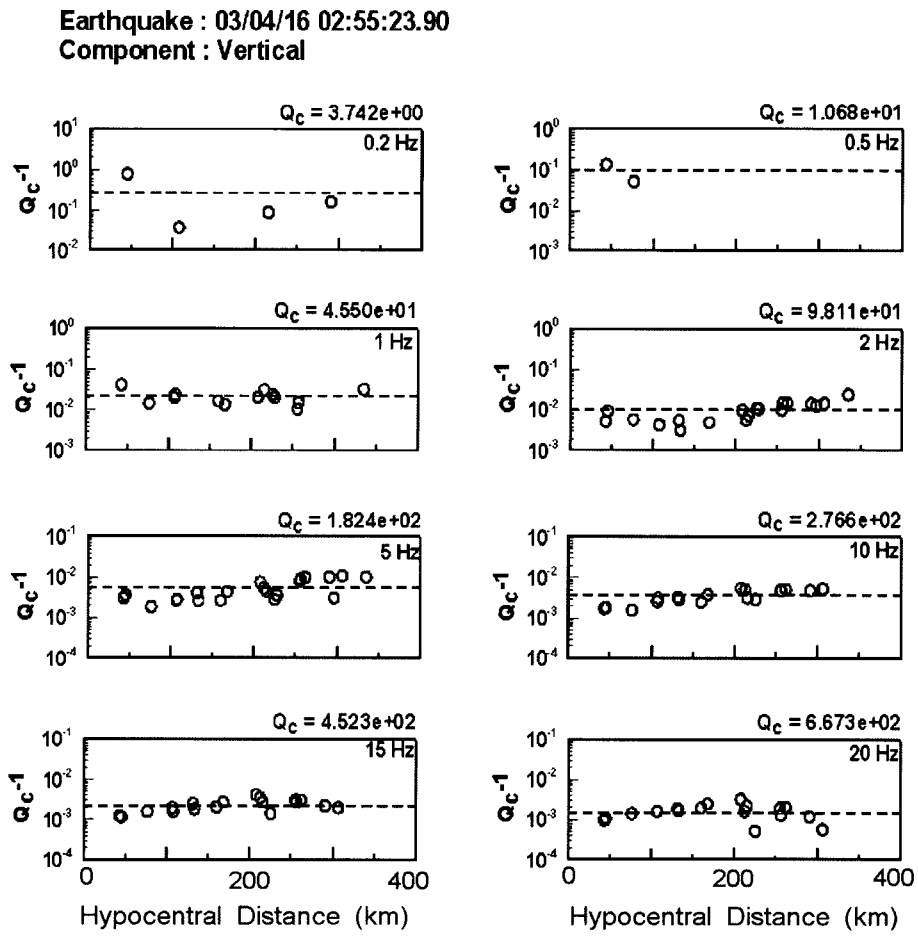

Fig. 3. Q_c^{-1} versus hypocentral distance in the vertical component for the regional earthquake, 16 April 2003, in eight central frequencies of 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz.

수평성분에서 최대 스펙트럼 진폭이고, $A_{V_{ij}}(f)$는 수직성분에서의 스펙트럼 진폭을 나타낸다. 분모에서 상수 2는 단일성분의 Fourier 스펙트럼의 대칭을 반영한 것이며, $\sqrt{2}$는 수평성분들 사이의 에너지 분배를 나타낸다 (Lachet *et al.*, 1996).

위에서 관측소의 부지효과를 결정하는 3가지 방법에 대하여 검토하였다. Kato *et al.*(1995)은 미국 서부 California에서 직달 S파를 이용하는 방법과 coda파의 스펙트럼 비를 이용하는 두 방법을 통해 얻어진 부지증폭률을 비교하여 본 결과, 두 방법에 의한 결과 사이의 상관이 크며, 부지증폭률이 1.5 이내의 범위내에서 서로 잘 일치함을 알아내었다. 한편 Su *et al.* (1996)은 두 방법의 비교를 통해서, 두 방법에 의한 부지효과가 거의 비슷하나, 진원거리 10 km 이내의 근거리 관측소의 경우에 서로 잘 맞지 않다는 사실을 지적하였다. Coda파의 스펙트럼 비를 이용하는 방법은 국지지진에서 많은 양의 지진파형에 적용이 가능하다는 장점을 갖고 있으며, 지진파 속도구조와 지진원의 전파에 따른 감쇠효과 및 지형효과에 관한 선행지식이 요구되지 않는다는 이점이 있다(Su *et al.*, 1992; Kato *et al.*, 1995). 이에 반하여 직달 S파의 지진기록에는 위상이 불분명한 큰 진폭을 가진 파들이 때때로 혼입되어 사용할 수 있는 자료가 제한된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이 연구에서는 두 번째 방법인 coda파 스펙트럼 비를 이용하는 방법을 채택하여 관측소의 부지효과를 결정하였다.

3.2. 자료처리 및 계산과정

자료처리 및 계산과정에 대한 좀 더 상세한 설명과 그림들은 Wee(2008)에 제시되어 있으므로 여기서는 그 내용을 요약하여 간단히 서술하기로 한다. 이 연구에서 사용한 지진자료는 3성분의 속도자료이다. 3성분의 속도자료 중에서 수직성분은 그대로 사용하였으며, 수평성분은 진원과 관측소 사이의 방위각을 이용하여 횡단(transverse)성분과 방사(radial) 성분으로 변환하여 사용하였다. 이 연구에서는 특히 S/N 비가 높은 자료

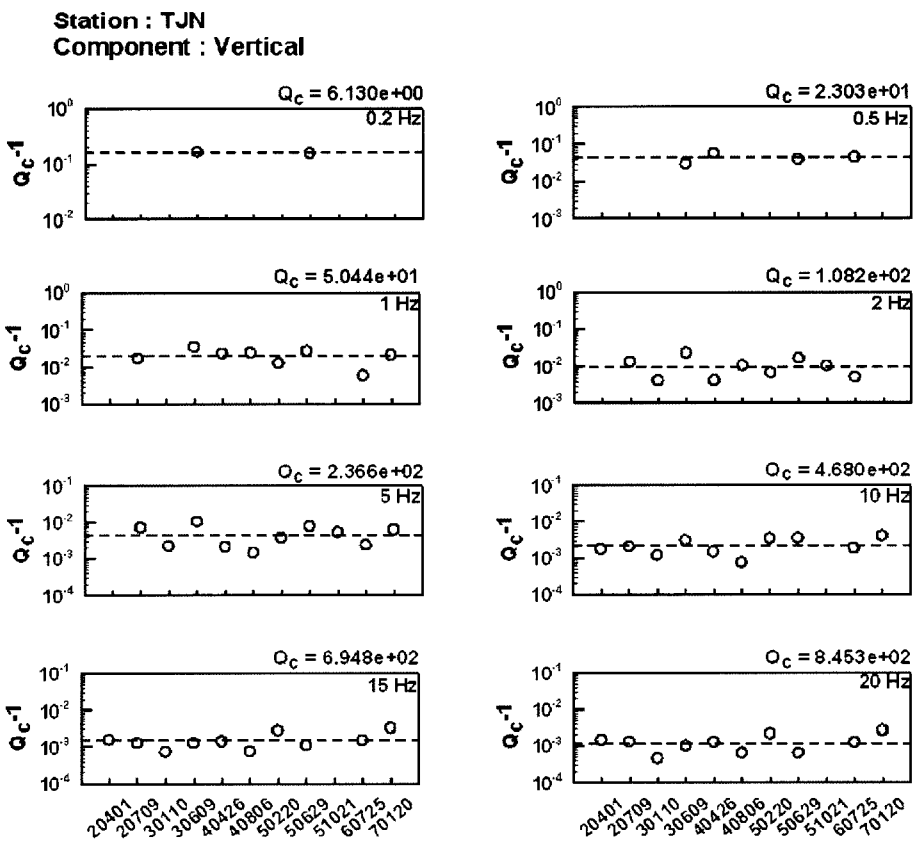

Fig. 4. Q_c^{-1} versus hypocentral distance for regional earthquakes recorded at the station TJN in eight central frequencies of 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz. The No. in the horizontal axis denotes the event No. shown in Table 2.

를 선정하기 위해서 잡음부분과 실제로 분석에 사용되는 coda파 부분의 스펙트럼 비를 조사하여, S/N 비가 2배 이상인 자료만을 사용하였다. 여기서 지진파 도달 전 5초 동안의 지진기록을 잡음으로 간주하였으며, 신호부분은 지진발생 후 S파가 도달할 때까지 걸린 시간의 2배에 해당하는 시각부터 5초 동안의 coda파 기록으로 간주하였다.

위와 같은 기준으로 선정된 3성분의 지진기록들에 대하여 먼저 자료의 선형성분과 직류성분을 제거(baseline correction)한 다음, 이 자료들을 중심주파수 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 Hz로 하는 대역통과필터를 거치도록 하였다. 대역통과필터로서는 중심주파수 f_0에 대하여 $1/\sqrt{2}f_0$~$\sqrt{2}f_0$ 의 대역폭을 가진 6차의 버터워스필터(Butterworth filter)를 사용하였다.

이 연구에서는 coda파의 스펙트럼 비를 이용하여 관측소의 부지효과, 즉 상대적인 부지증폭률을 식 (4)에 의해 추정하게 된다. 분석에 사용되는 coda파의 시간창은 5초로 하였으며, coda파의 시작은 S파 주행시간의 2배 이상이 되는 시점을 선택하였다. 어떤 한 지진에 대해서 가장 먼 관측소에서 S파 주행시간의 2배되는 시점을 coda파의 시작시간으로 정하여, 이 시각을 모든 관측소에서의 coda파 시작시간으로 설정하였다. 만약 가장 먼 관측소에 대한 coda파의 S/N 비가 2배 이하인 경우는 그 보다 가까운 관측소를 기준으로 coda파 시작시간을 정하며, 가장 먼 관측소의 자료는 제외하였다. 반대로 먼 진원거리의 관측소를 기준으로 하였을 때, 상대적으로 가까운 관측소에서의 coda파 길이가 너무 짧거나, 지진기록이 양호하지 못할 경우는 기준관측소를 적절히 변경하였다. 결과적으로 어떤 한 지진에 대하여 가능한 많은 다수의 관측소가 포함되도록 기준 관측소를 조정하였다.

주파수별 부지효과, 즉 부지증폭률은 다음과 같은 과정으로 구했다. 먼저 대상 지진기록을 앞에서 설명한 바와 같이 중심주파수를 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 Hz로 하여 대역통과시킨 후 얻은 지진파형들에 힐버트 변환(Hilbert transform)을 적용하여 지진파형 포락곡선을 얻었다. 통상 원함수 $f(t)$를 90도 위상 변환시킨 함수를 $h(t)$라 할 때, 포락곡선 $E(t)$는 다음 식으로 주어진다.

$$E(t)=\sqrt{f(t)^2+h(t)^2} \tag{7}$$

여기서 $h(t)$는 다음과 같이 정의되는 $H(\omega)$의 Fourier 역변환으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} H(\omega)&= iF(\omega) \quad \text{for} \quad \omega>0 \\ &\quad -iF(\omega) \quad \text{for} \quad \omega<0 \end{aligned} \tag{8}$$

위 식을 통해 얻어진 포락곡선은 요철을 가지고 있어 부지증폭률을 구할 때, 증폭률이 실제보다 크거나 작게 얻어질 수 있다. 이를 방지하기 위해 지진파형 포락선에 2초의 시간창을 설정하여 이동평균을 취했다.

식 (4)에서 관측소의 주파수별 스펙트럼 진폭 $A_{ij}(f, t)$는 위의 과정을 거쳐 얻은 coda파 시작시간부터 5초 동안의 진폭의 제곱근 평균(root mean square)으로 정의하였다. 또한 식 (4)의 좌변의 분모는 모든 관측소에서 얻어진 $A_{ij}(f, t)$의 평균값이 되며, 이때 평균값은 단순한 산술평균이 아닌 대수평균을 취하였다. 결과적으로 식 (4)에서 얻어진 어떤 관측소에서의 부지증폭률은 전체 평균에 대하여 어떤 관측소의 상대적인 값이 되는 것이다. 이와 같이 한 지진으로부터 대상 관측소의 부지증폭률을 구할 수 있으며, 식 (5)를 이용하여 여러 지진으로부터 관측소들의 평균적인 값을 추정하게 된다. 이때도 역시 평균값은 대수평균으로부터 구해진다.

4. 계산결과 및 토의

식 (4)로부터 S파 주행시간의 2배 이상인 시점을 coda파 시작시간으로 하여 5초의 시간창에서 3성분(vertical, transverse, radial)의 지진기록에 대하여 중심주파수(0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 Hz)별로 부지증폭률을 계산하였다. 부지증폭률을 계산하는 식 (4)에서는 coda파의 감쇠곡선 $C_{ij}(f,t)$가 관측소-진원을 연결하는 경로와 무관하며 대체로 일정하다는 가정, 즉 $C_{ij}(f,t)=\tilde{C}(f,t)$가 성립되지 않으면 안 된다. 지진발생 후 일정시간이 경과(통상 S파 주행시간의 2배 이상인 시간)한 뒤에 coda파의 진폭이 일정범위의 공간내에서 거의 같다는 가설은 Aki(1969)에 의해 제창된 이후 여러 연구들(예를 들면, Phillips and Aki, 1986; Taira and Yomogida, 2003; Fehler and Sato, 2003)에 의해서 입증되었다. 여기서는 이 가정의 성립여부를 검증하기 위하여 coda파 감쇠곡선에 대하여 조사하였다.

국지지진에서 coda파가 불균질한 매질로 구성된 지구내부에서 후방 산란된 실체파로 구성되어 있다는 가정(Aki and Chouet, 1975; Sato, 1977) 아래에서 주파수 f에 대한 시간 $C(f, t)$에서의 coda파 감쇠곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(f,t)=-t^{-1}\exp\left(-\frac{\pi ft}{Q_c}\right) \tag{9}$$

여기서 Q_c는 coda파에 대한 Q값이다. 이 식에서 coda파 감쇠곡선이 일정시간 경과후 모든 관측소-진원을 연결하는 경로에 관계없이 일정하다는 가정을 만족하기 위해서는 어떤 지진에 대하여 여러 관측소에서 얻은 Q_c값이 진앙거리와 무관하게 일정하지 않으면 안 된다. 또한 한 관측소에서 여러 지진을 이용하여 얻은 Q_c값이 일정한 값을 가져야 한다. 이러한 조건의 만족여부를 조사하기 위하여, 이 연구에서는 먼저 Kosuga(1992)의 방법으로 Q_c를 계산하였다. 일반적으로 지진발생 후 충분히 긴 시간이 경과한 다음의 coda파를 이용할 때 모든 관측소와 모든 지진에 대해 안정한 Q_c값이 얻어진다는 사실이 잘 알려져 있다(Mayeda *et al.*, 1991; Koyanagi *et al.*, 1992). 그러나 이 연구에서 사용한 지진파형들은 충분히 길지 않기 때문에 경과시간은 각각의 지진에 대해서 가장 먼 관측소의 S파 주행시간의 2배가 되는 시간으로 고정하였다.

Fig. 3은 2003년 4월 16일에 발생한 한 지진에 대하여 여러 관측소에서 구한 Q_c^{-1}값을 주파수별로 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이, 일반적으로 주파수가 증가할수록 평균 Q_c값(Fig. 3의 상단 위쪽에 나타내어 있음)은 크게 증가한다. 또한 Q_c값은 여러 주파수에서 방향과 진원거리에 관계없이 대체로 일정한 값을 보여 주고 있으나, 저주파에서는 그 편차가 약간 큰 것을 알 수 있다. 한편 대전관측소에서 관측된 여러 지진에 대하여 구한 Q_c값을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서도 역시 Q_c값이 진원거리와 방향에 관계없이 주파수별로 대체로 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 3 및 4에서 저주파에 대한 Q_c값에 대한 자료수가 적은 것은 저주파의 경우 잡음에 대한 coda파의 S/N 비가 작은 관계로 분석할 수 있는 자료수가 많지 않은 때문이다.

위에서 Fig. 3과 4를 예로 들어 coda파의 감쇠곡선이 방향과 거리에 무관하게 일정한가를 조사하기 위하여 주파수별 Q_c값의 진원거리와 방향에 따른 변화를 고찰하였다. 그러나 저주파에서는 Q_c값의 편차가 크며, 심한 경우는 약 10배 정도의 차이를 보여 준다. 이러한 편차는 진앙거리가 가장 먼 관측소에 S파가 도달한 시간의 2배되는 시간을 기준으로 모든 관측소의 coda파 감쇠를 조사하기 때문에 근거리 지진기록의 경우는 S/N 비가 낮아져 Q_c값에 큰 편차를 나타내게 되었다고 볼 수 있다. 이러한 편차는 본 연구와 같은 방법으로 부지효과를 분석한 Taira and Yomogida(2003)에서도 나타난다. Coda파의 안정성이 이러한 문제점을 내포하고 있음에도 불구하고, coda 정규화법이 널리 사용되고 있는 것은 그 분석의 간편성 때문이라고 할 수 있다(Fehler and Sato, 2003). 결론적으로 일정시간 경과 후에 구한 Q_c값이 진원거리와 방향에 관계없이 대체로 일정하다는 것을 인정한다면, 부지증폭률을 구하는 식 (4)에서 $C_{ij}(f,t)=\tilde{C}(f,t)$ 가정한 가 대체로 성립된다 할 수 있다.

식 (4)를 이용하여 한 지진에 대한 증폭률을 구한 다음, 식 (5)를 사용하여 여러 지진에 대하여 얻어진 증폭률을 관측소별로 평균하면 각 관측소별로 부지증폭률을 얻을 수 있다. Table 3, 4, 5에 이러한 방법으로 계산된 수직성분, 횡단성분, 방사성분의 부지증폭률과 그 표준편차를 여러 중심 주파수와 관측소별로 제시하였다. 또한 Table 6에는 3성분에 대한 증폭률의 평균값이 제시되어 있다. 여기서 각 관측소별 평균은 단순 산술평균이 아닌 대수평균을 취했으며, 그 이유는 각각의 값들의 분포가 정규분포보다는 대수분포에 가깝기 때문이다. 이 Table에서 괄호안의 값은 1 표준편차의 값을 나타낸다.

수직성분(Table 3)의 부지증폭률 범위는 모든 주파수 영역에 대하여 0.27에서 7.56 사이이며, 대체로 상동(SND)관측소와 울진(ULJ)관측소가 상대적으로 낮은 값을 보인다. 또한 백령도(BRD2)관측소에서 큰 값을 나타내며, 특히 경북대(GKP1)관측소에서 매우 큰 값을 보이는데 이는 관측소가 경북대학교내의 도심지에 설치되어 있어서 주변 환경에 의한 잡음의 영향을 많이 받은 것으로 생각된다. 횡단성분(Table 4)과 방사성분(Table 5)의 부지증폭률 범위는 각각 0.25~7.46 범위와 0.24~8.38 범위내에 있다. 2 Hz 이하의 주파수 영역에서 백령도(BRD1, BRD2)관측소가 상대적으로 높은 값을 보였으며, 0.5 Hz 이하의 주파수영역에서는 상동(SND)관측소의 부지증폭률이 낮게 나타났다. 수직성분과 마찬가지로 경북대(GKP1)관측소의 부지증폭률이 고주파(≥5 Hz) 영역에서 매우 큰 값을 나타낸다.

한편 수직성분, 횡단성분 및 방사성분의 부지증폭률을 평균한 Table 6을 Fig. 5에 도시하였다. 수평 2성분에 대하여 구한 부지증폭률은 각 관측소에서 주파수별로 대체로 서로 비슷하나, 수직성분의 증폭률은 수평성분에 비하여 일관되게 작게 나타났다. 또한 증폭률은 저주파 보다는 고주파에서 일반적으로 증폭의 정도가 큰 경향을 보였다. 부지증폭률은 일부를 제외하고 대부분의 관측소에서 0.5~1.5사이의 값을 나타내며, 전 주파수 영역에 걸쳐 상동(SND) 관측소의 값이 낮다. 특히 2 Hz 이하의 저주파에서 백령도(BRD1, BRD2) 관측소의 값이 1.5 이상으로 높게 나타난다. 이것은 이

Table 3. Site amplification factor and standard deviation for the central frequencies of 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz for the vertical component. The standard deviation is written in the parenthesis.

Station	Frequency (Hz)							
	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0	20.0
BGD	1.02	1.83	1.23	0.87	1.13	1.09	0.76	0.61
	(1.71)	(1.47)	(1.25)	(1.23)	(1.29)	(1.40)	(1.50)	(1.58)
BRD1	1.16	1.64	2.15	1.23	0.85	0.75	0.45	0.35
	(1.80)	(1.59)	(1.52)	(1.31)	(1.50)	(1.55)	(1.56)	(1.49)
BRD2	1.18	1.63	1.44	1.02	0.69	0.61	2.23	4.41
	(1.51)	(1.36)	(1.55)	(1.15)	(1.13)	(1.27)	(1.49)	(1.52)
BUS	1.09	1.33	1.11	1.04	1.00	1.32	1.48	1.48
	(1.69)	(1.67)	(1.37)	(1.30)	(1.25)	(1.60)	(1.51)	(1.52)
CHC	1.02	0.88	0.92	1.04	0.92	0.75	0.66	0.62
	(1.91)	(1.45)	(1.39)	(1.24)	(1.35)	(1.47)	(1.55)	(1.63)
CHJ	1.05	0.82	0.75	0.88	0.98	0.86	0.89	0.78
	(2.67)	(1.82)	(1.37)	(1.24)	(1.27)	(1.26)	(1.41)	(1.55)
CHNB	1.07	0.80	0.88	0.93	0.94	1.11	1.09	1.16
	(1.58)	(1.64)	(1.34)	(1.17)	(1.22)	(1.30)	(1.32)	(1.37)
DAG	1.24	1.11	1.06	1.10	1.08	1.07	0.91	0.83
	(1.41)	(1.48)	(1.31)	(1.18)	(1.19)	(1.39)	(1.64)	(1.74)
DGY	1.18	0.84	0.84	0.89	0.67	0.57	0.57	0.56
	(1.64)	(1.43)	(1.34)	(1.25)	(1.19)	(1.34)	(1.58)	(1.74)
GKP1	1.18	1.18	1.05	1.18	1.87	4.30	6.75	7.56
	(1.73)	(1.53)	(1.24)	(1.30)	(1.39)	(1.69)	(1.67)	(1.60)
GSU	1.07	1.34	1.21	1.25	1.57	1.09	0.80	0.71
	(1.66)	(1.65)	(1.28)	(1.21)	(1.43)	(1.57)	(1.70)	(1.73)
HDB	1.19	1.36	1.27	0.69	0.64	0.40	0.46	0.61
	(1.35)	(1.41)	(1.26)	(1.32)	(1.14)	(1.15)	(1.31)	(1.31)
HKU	1.00	0.96	1.01	1.21	1.44	1.45	1.30	1.17
	(1.93)	(1.40)	(1.26)	(1.20)	(1.42)	(1.37)	(1.66)	(1.87)
HSB	0.70	1.12	1.09	1.26	1.07	0.74	0.50	0.47
	(2.35)	(1.57)	(1.36)	(1.29)	(1.19)	(1.33)	(1.40)	(1.71)
KSA	0.97	0.92	1.14	0.86	0.78	0.81	1.12	1.40
	(1.35)	(1.85)	(1.62)	(1.29)	(1.19)	(1.21)	(1.57)	(1.79)
KWJ	0.78	1.41	0.95	0.56	0.58	0.49	0.51	0.56
	(1.67)	(1.58)	(1.73)	(1.30)	(1.35)	(1.32)	(1.31)	(1.35)
NPR	1.35	0.83	0.98	0.81	0.97	1.39	1.71	2.03
	(1.49)	(1.40)	(1.32)	(1.29)	(1.16)	(1.23)	(1.41)	(1.64)
SEO	1.01	0.96	0.88	1.01	1.26	2.61	3.10	2.74
	(1.65)	(1.41)	(1.38)	(1.31)	(1.32)	(1.53)	(1.43)	(1.36)
SES	1.27	0.97	0.92	1.03	1.05	1.04	1.15	1.61
	(1.78)	(1.55)	(1.34)	(1.23)	(1.19)	(1.21)	(1.40)	(1.48)
SND	0.27	0.27	0.59	0.76	0.52	0.37	0.29	0.29
	(3.49)	(1.85)	(1.34)	(1.33)	(1.27)	(1.51)	(1.57)	(1.66)
SNU	0.85	1.01	1.02	1.32	1.22	1.71	2.22	2.10
	(1.92)	(1.45)	(1.28)	(1.19)	(1.21)	(1.67)	(1.85)	(1.85)
TJN	1.03	0.96	0.89	1.06	1.11	1.11	1.26	1.16
	(1.71)	(1.61)	(1.23)	(1.24)	(1.20)	(1.30)	(1.41)	(1.47)
ULJ	1.06	1.04	1.45	1.01	0.76	0.40	0.31	0.29
	(2.08)	(1.30)	(1.35)	(1.20)	(1.22)	(1.47)	(1.49)	(1.57)

Table 4. Site amplification factor and standard deviation in the central frequencies of 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz for the transverse component. The standard deviation is written in the parenthesis.

Station	Frequency (Hz)							
	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0	20.0
BGD	1.31	1.47	1.18	0.87	0.92	0.91	0.76	0.89
	(2.03)	(1.72)	(1.39)	(1.33)	(1.39)	(1.58)	(1.66)	(1.72)
BRD1	0.91	2.84	3.05	2.24	1.31	0.65	0.50	0.50
	(1.96)	(1.80)	(1.63)	(1.26)	(1.48)	(1.58)	(1.98)	(2.14)
BRD2	1.53	1.64	3.02	2.57	1.22	0.66	1.19	2.68
	(1.64)	(1.43)	(1.60)	(1.21)	(1.24)	(1.39)	(1.83)	(1.63)
BUS	1.10	1.45	1.13	1.12	1.07	1.10	1.16	1.16
	(1.60)	(1.48)	(1.49)	(1.31)	(1.28)	(1.54)	(1.60)	(1.55)
CHC	0.93	0.88	0.75	0.85	0.80	0.70	0.65	0.59
	(1.59)	(1.35)	(1.37)	(1.26)	(1.35)	(1.55)	(1.64)	(1.78)
CHJ	1.01	0.79	0.73	0.78	0.80	0.77	0.81	0.74
	(2.32)	(1.75)	(1.54)	(1.43)	(1.48)	(1.56)	(1.60)	(1.69)
CHNB	1.01	0.84	1.11	0.98	1.72	2.79	1.51	1.14
	(1.82)	(1.40)	(1.34)	(1.37)	(1.33)	(1.40)	(1.41)	(1.55)
DAG	1.23	1.22	1.21	1.26	1.19	1.03	0.82	0.68
	(1.72)	(1.57)	(1.40)	(1.22)	(1.29)	(1.43)	(1.59)	(1.74)
DGY	1.08	0.78	0.76	0.73	0.59	0.65	0.69	0.67
	(1.89)	(1.55)	(1.37)	(1.36)	(1.31)	(1.59)	(1.89)	(2.04)
GKP1	1.03	1.20	1.01	1.09	1.78	3.97	6.11	7.46
	(1.59)	(1.58)	(1.46)	(1.23)	(1.46)	(1.73)	(1.72)	(1.67)
GSU	1.58	1.25	1.29	1.19	1.19	0.66	0.63	0.65
	(1.77)	(1.60)	(1.32)	(1.27)	(1.43)	(1.48)	(1.52)	(1.60)
HDB	1.08	0.99	1.08	0.78	0.39	0.47	0.70	1.00
	(2.66)	(2.60)	(2.21)	(2.25)	(2.00)	(1.95)	(2.01)	(1.97)
HKU	1.33	1.19	1.01	1.42	2.38	2.10	1.79	1.44
	(1.69)	(1.52)	(1.27)	(1.27)	(1.25)	(1.25)	(1.35)	(1.51)
HSB	0.79	1.03	1.35	1.22	0.96	0.77	0.85	0.99
	(2.52)	(1.54)	(1.31)	(1.32)	(1.57)	(1.75)	(2.02)	(2.15)
KSA	0.75	0.86	1.19	0.99	1.05	1.31	1.02	1.04
	(1.51)	(1.49)	(1.30)	(1.09)	(1.05)	(1.33)	(1.56)	(1.91)
KWJ	0.72	1.04	0.76	0.49	0.47	0.42	0.47	0.48
	(1.70)	(1.56)	(1.87)	(1.35)	(1.26)	(1.27)	(1.23)	(1.22)
NPR	1.02	1.02	0.85	0.71	0.88	1.40	1.82	2.12
	(1.87)	(1.75)	(1.70)	(1.69)	(1.60)	(1.57)	(1.71)	(1.91)
SEO	0.92	0.93	0.91	1.04	1.14	1.82	1.94	1.99
	(1.71)	(1.50)	(1.32)	(1.27)	(1.27)	(1.45)	(1.48)	(1.43)
SES	1.20	1.06	0.99	1.13	1.10	1.19	1.39	1.85
	(1.54)	(1.27)	(1.38)	(1.30)	(1.27)	(1.26)	(1.37)	(1.47)
SND	0.25	0.31	0.54	0.63	0.45	0.36	0.38	0.40
	(3.40)	(2.26)	(1.53)	(1.28)	(1.35)	(1.48)	(1.73)	(1.83)
SNU	1.13	0.96	1.10	1.27	1.51	1.56	1.49	1.22
	(1.67)	(1.48)	(1.37)	(1.29)	(1.18)	(1.51)	(1.92)	(2.13)
TJN	0.97	0.87	0.93	1.13	0.97	1.06	1.20	1.14
	(1.73)	(1.63)	(1.33)	(1.24)	(1.20)	(1.29)	(1.37)	(1.54)
ULJ	1.41	1.22	1.04	0.95	0.73	0.41	0.31	0.26
	(1.57)	(1.55)	(1.42)	(1.19)	(1.29)	(1.51)	(1.61)	(1.64)

Table 5. Site amplification factor and standard deviation in the central frequencies of 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz for the radial component. The standard deviation is written in the parenthesis.

Station	Frequency (Hz)							
	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0	20.0
BGD	1.20	1.07	1.16	0.83	0.95	0.90	0.82	1.10
	(1.68)	(1.46)	(1.37)	(1.20)	(1.19)	(1.41)	(1.53)	(1.77)
BRD1	1.14	2.60	2.85	2.39	1.21	0.61	0.42	0.37
	(1.61)	(1.70)	(1.52)	(1.42)	(1.52)	(1.66)	(1.54)	(1.46)
BRD2	1.35	2.10	2.99	2.24	1.35	0.92	1.33	2.84
	(1.59)	(1.39)	(1.33)	(1.16)	(1.23)	(1.77)	(1.91)	(1.71)
BUS	1.01	1.37	1.24	1.15	1.07	1.11	1.24	1.28
	(1.89)	(1.76)	(1.49)	(1.25)	(1.30)	(1.51)	(1.56)	(1.62)
CHC	1.01	0.83	0.77	0.79	0.82	0.67	0.64	0.57
	(1.42)	(1.47)	(1.32)	(1.27)	(1.34)	(1.60)	(1.65)	(1.83)
CHJ	0.99	0.96	0.73	0.86	0.79	0.82	0.89	0.83
	(2.29)	(1.47)	(1.31)	(1.26)	(1.21)	(1.35)	(1.45)	(1.58)
CHNB	0.97	0.81	1.00	1.02	1.60	2.56	1.45	1.16
	(1.83)	(1.46)	(1.36)	(1.17)	(1.39)	(1.38)	(1.32)	(1.56)
DAG	1.22	1.19	1.22	1.13	1.23	0.95	0.79	0.66
	(1.40)	(1.53)	(1.28)	(1.18)	(1.19)	(1.32)	(1.53)	(1.74)
DGY	1.07	0.71	0.84	0.82	0.61	0.68	0.72	0.67
	(1.75)	(1.62)	(1.34)	(1.16)	(1.24)	(1.49)	(1.68)	(1.75)
GKP1	1.33	0.97	1.00	1.08	1.72	3.49	5.62	8.38
	(1.82)	(1.43)	(1.26)	(1.22)	(1.46)	(1.65)	(1.68)	(1.84)
GSU	1.24	1.44	1.13	1.13	1.09	0.71	0.64	0.62
	(1.63)	(1.31)	(1.29)	(1.18)	(1.39)	(1.53)	(1.50)	(1.62)
HDB	1.19	1.20	1.19	0.87	0.42	0.54	0.84	1.21
	(1.74)	(2.31)	(1.74)	(1.24)	(1.39)	(1.78)	(1.83)	(1.88)
HKU	1.04	1.09	1.04	1.67	2.68	2.23	1.96	1.67
	(1.65)	(1.44)	(1.37)	(1.23)	(1.30)	(1.29)	(1.58)	(1.84)
HSB	0.84	1.06	1.34	1.11	0.94	0.81	0.89	1.00
	(2.28)	(1.62)	(1.37)	(1.37)	(1.73)	(2.11)	(2.18)	(2.26)
KSA	0.95	0.98	1.17	0.91	0.87	1.32	1.00	1.05
	(1.56)	(1.31)	(1.70)	(1.27)	(1.19)	(1.27)	(1.54)	(1.84)
KWJ	0.62	1.02	0.77	0.48	0.44	0.41	0.45	0.47
	(1.65)	(1.50)	(1.66)	(1.31)	(1.27)	(1.23)	(1.19)	(1.16)
NPR	1.11	1.04	0.97	0.86	0.98	1.48	1.72	1.83
	(1.81)	(1.47)	(1.32)	(1.30)	(1.34)	(1.24)	(1.20)	(1.26)
SEO	1.13	1.05	0.98	0.94	1.16	1.77	1.92	1.93
	(1.91)	(1.28)	(1.31)	(1.37)	(1.35)	(1.47)	(1.50)	(1.49)
SES	1.25	0.94	0.93	1.07	1.06	1.18	1.36	1.69
	(1.43)	(1.57)	(1.29)	(1.30)	(1.24)	(1.26)	(1.38)	(1.53)
SND	0.24	0.29	0.50	0.55	0.46	0.43	0.41	0.39
	(3.76)	(1.76)	(1.32)	(1.26)	(1.29)	(1.50)	(1.71)	(1.85)
SNU	1.08	0.99	1.11	1.46	1.52	1.55	1.50	1.25
	(1.61)	(1.45)	(1.28)	(1.26)	(1.26)	(1.58)	(1.87)	(2.08)
TJN	1.17	1.20	0.92	1.01	0.97	1.04	1.20	1.11
	(1.55)	(1.37)	(1.36)	(1.28)	(1.15)	(1.33)	(1.39)	(1.48)
ULJ	1.20	1.07	0.98	0.86	0.71	0.37	0.28	0.25
	(2.00)	(1.58)	(1.25)	(1.21)	(1.30)	(1.37)	(1.47)	(1.54)

Table 6. Site amplification factor and standard deviation averaged over three components in the central frequencies of 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 15, and 20 Hz. The standard deviation is written in the parenthesis.

Station	Frequency (Hz)							
	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	15.0	20.0
BGD	1.17	1.41	1.19	0.86	0.99	0.96	0.78	0.85
	(1.83)	(1.64)	(1.34)	(1.26)	(1.32)	(1.49)	(1.57)	(1.78)
BRD1	1.07	2.30	2.65	1.87	1.11	0.67	0.45	0.40
	(1.81)	(1.79)	(1.60)	(1.52)	(1.56)	(1.61)	(1.71)	(1.75)
BRD2	1.34	1.79	2.32	1.77	1.03	0.72	1.54	3.26
	(1.60)	(1.42)	(1.71)	(1.55)	(1.43)	(1.56)	(1.86)	(1.70)
BUS	1.07	1.38	1.16	1.10	1.04	1.17	1.29	1.30
	(1.73)	(1.64)	(1.45)	(1.29)	(1.28)	(1.56)	(1.58)	(1.58)
CHC	0.99	0.86	0.81	0.89	0.84	0.71	0.65	0.59
	(1.65)	(1.43)	(1.38)	(1.29)	(1.35)	(1.54)	(1.62)	(1.75)
CHJ	1.02	0.86	0.74	0.84	0.85	0.82	0.86	0.78
	(2.42)	(1.70)	(1.41)	(1.32)	(1.35)	(1.41)	(1.50)	(1.61)
CHNB	1.01	0.82	0.99	0.98	1.36	1.97	1.33	1.15
	(1.75)	(1.51)	(1.36)	(1.26)	(1.47)	(1.69)	(1.40)	(1.50)
DAG	1.23	1.17	1.16	1.16	1.17	1.02	0.84	0.72
	(1.52)	(1.53)	(1.34)	(1.21)	(1.24)	(1.39)	(1.59)	(1.76)
DGY	1.11	0.78	0.81	0.81	0.62	0.63	0.66	0.63
	(1.77)	(1.55)	(1.35)	(1.28)	(1.26)	(1.49)	(1.74)	(1.86)
GKP1	1.17	1.11	1.02	1.12	1.79	3.90	6.14	7.79
	(1.73)	(1.53)	(1.33)	(1.26)	(1.44)	(1.70)	(1.70)	(1.71)
GSU	1.27	1.34	1.20	1.19	1.27	0.80	0.68	0.66
	(1.73)	(1.54)	(1.30)	(1.22)	(1.46)	(1.62)	(1.60)	(1.66)
HDB	1.15	1.17	1.18	0.77	0.47	0.47	0.65	0.90
	(1.96)	(2.16)	(1.78)	(1.68)	(1.65)	(1.70)	(1.84)	(1.87)
HKU	1.12	1.08	1.02	1.42	2.10	1.90	1.66	1.41
	(1.78)	(1.47)	(1.30)	(1.28)	(1.47)	(1.39)	(1.59)	(1.78)
HSB	0.77	1.07	1.26	1.20	0.99	0.77	0.72	0.78
	(2.40)	(1.58)	(1.37)	(1.33)	(1.53)	(1.76)	(1.99)	(2.23)
KSA	0.90	0.92	1.16	0.91	0.88	1.09	1.05	1.17
	(1.50)	(1.59)	(1.57)	(1.25)	(1.21)	(1.40)	(1.56)	(1.87)
KWJ	0.71	1.15	0.82	0.51	0.50	0.44	0.48	0.50
	(1.69)	(1.59)	(1.77)	(1.33)	(1.33)	(1.29)	(1.26)	(1.27)
NPR	1.15	0.95	0.93	0.79	0.94	1.42	1.75	2.00
	(1.75)	(1.57)	(1.48)	(1.47)	(1.40)	(1.38)	(1.48)	(1.66)
SEO	1.02	0.98	0.92	1.00	1.19	2.04	2.27	2.20
	(1.77)	(1.40)	(1.34)	(1.32)	(1.32)	(1.54)	(1.56)	(1.48)
SES	1.24	0.99	0.95	1.08	1.07	1.14	1.29	1.71
	(1.60)	(1.48)	(1.34)	(1.28)	(1.24)	(1.25)	(1.40)	(1.50)
SND	0.25	0.29	0.54	0.63	0.47	0.39	0.36	0.36
	(3.56)	(1.97)	(1.41)	(1.33)	(1.32)	(1.51)	(1.71)	(1.81)
SNU	1.01	0.98	1.08	1.34	1.40	1.61	1.73	1.49
	(1.77)	(1.46)	(1.31)	(1.25)	(1.25)	(1.59)	(1.93)	(2.11)
TJN	1.05	0.99	0.91	1.07	1.02	1.07	1.22	1.14
	(1.68)	(1.58)	(1.31)	(1.26)	(1.20)	(1.31)	(1.39)	(1.50)
ULJ	1.21	1.10	1.14	0.94	0.73	0.39	0.30	0.27
	(1.92)	(1.49)	(1.41)	(1.22)	(1.28)	(1.45)	(1.53)	(1.59)

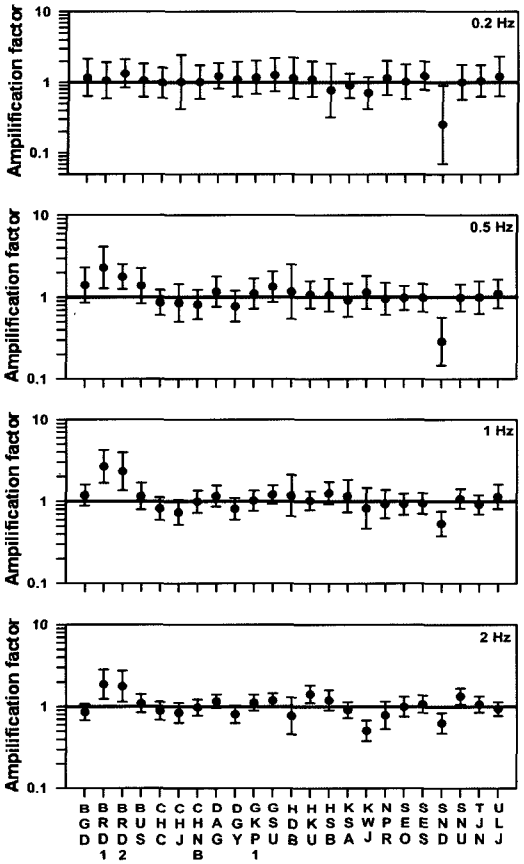

Fig. 5-1. Site amplification factor averaged over three components at all stations in the central frequencies of 0.2, 0.5, 1, and 2 Hz.

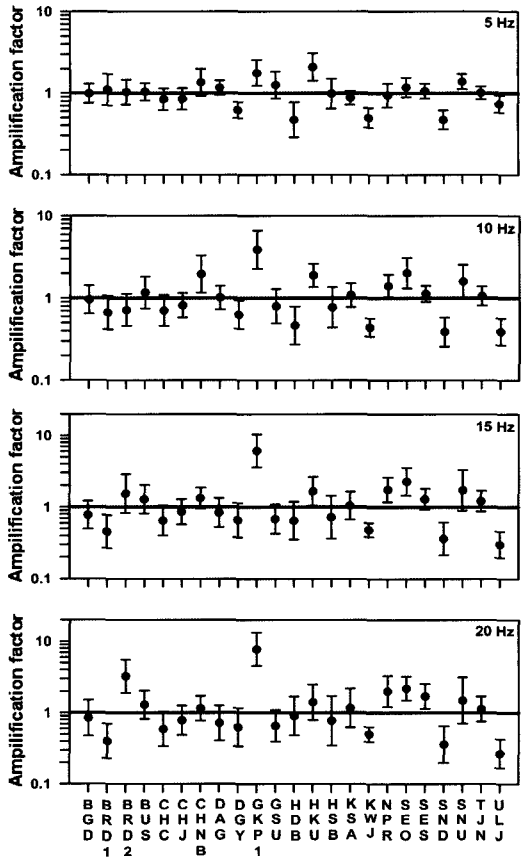

Fig. 5-2. Site amplification factor averaged over three components at all stations in the central frequencies of 5, 10, 15, and 20 Hz.

관측소들이 외해에 위치하고 있어 파랑의 영향을 많이 받고 있기 때문인 것으로 해석된다. 고주파(≥5 Hz)에서는 각 관측소별로 다양한 부지증폭률을 가지며, 서울(SEO), 서울대(SNU), 교원대(HKU), 경북대(GKP1), 나포리(NPR) 관측소에서 1.5 이상의 높은 값을 보이고 있다. 특히, 경북대(GKP1) 관측소의 경우 다른 관측소에 비해 상대적으로 높은 값(≥2)을 보이고 있다. 또한 광주(KWJ), 상동(SND), 울진(ULJ) 관측소의 경우 0.5 이하의 낮은 값을 보이고 있다.

Fig. 6은 위에서 얻어진 부지증폭률이 공간적으로 어떻게 분포하는 가를 알기 위하여, 지도위에 주파수별로 나타낸 것이다. Fig.에서 뚜렷하지는 않지만 대체로 한반도 남부에서 북동부가 남서부에 비해 증폭의 정도가 낮은 경향을 보여 준다. 즉 북동부의 철원, 고성, 춘천, 대관령, 강릉, 충주 관측소와 남서부의 광주 관측소가 대체로 1.0 보다 작은 증폭률을 나타낸다. 한편 Kim and Baag(2002)은 이 연구와 유사한 방법으로 국내 지진관측소 79개소에 대해서 1~32 Hz 범위의 주파수대역에 대한 부지증폭률을 구했다. 그들은 한반도 남부지역에서 내륙 및 동부지역이 해안가나 서부지역에 비해 상대적으로 에너지 증폭이 크며, 고주파에서 증폭의 정도가 크다는 사실을 지적하였다. 이 연구에서도 저주파 보다는 고주파에서 일반적으로 증폭의 정도가 크다는 경향은 발견되었으나, 지역적인 경향은 서로 일치하지 않는다. Kim and Baag(2002)이 대상으로 한 관측소들은 일부 광대역을 포함한 단주기 관측소가 대부분이다. 이들 관측소들의 과반수 이상은 기상청의 관측소 환경개선사업으로 새로운 장소로 이전 설치되어 관측환경이 달라졌다고 할 수 있다. 특히 부산, 대구, 춘천, 서귀포, 대관령, 충주 광대역관측소는 2001년말에 이전되어 Kim and Baag(2002)이 분석자료를 취득했을 때에 비해 S/N 비가 크게 개선되었다.

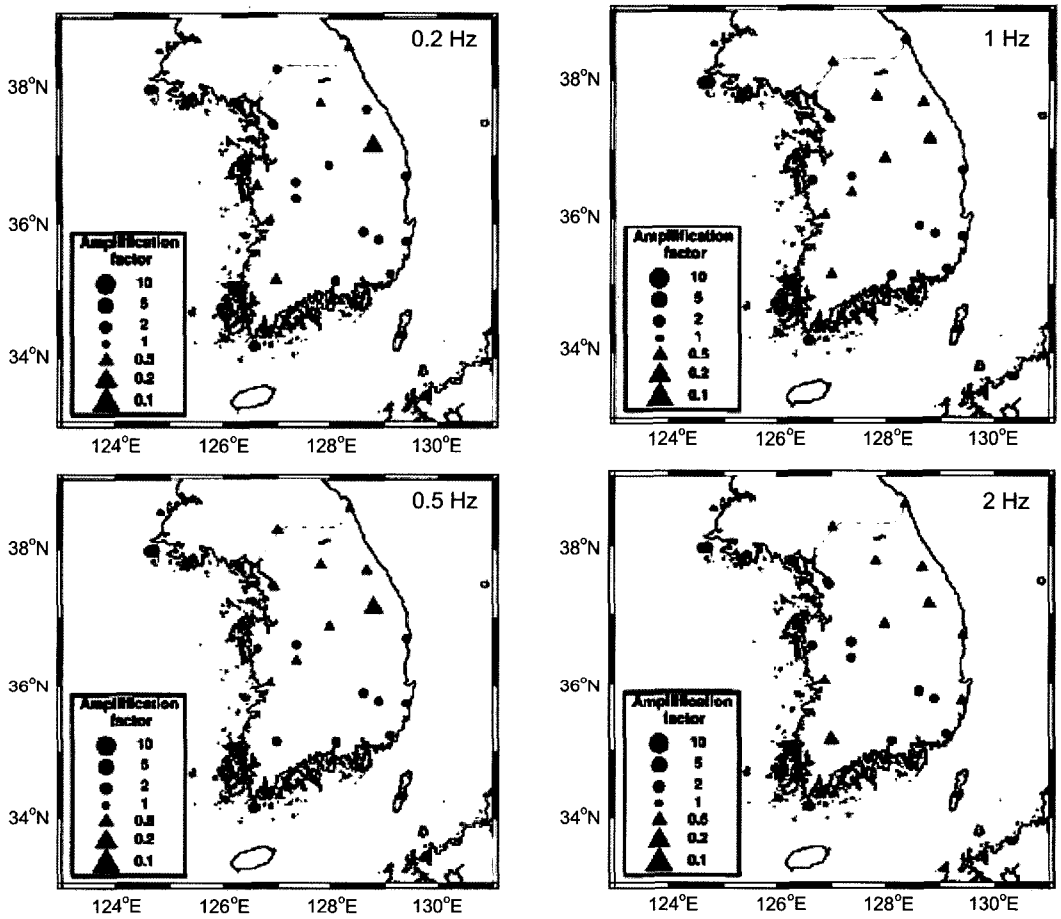

Fig. 6-1. Spatial distribution of relative site amplification factor averaged over three components in the central frequencies of 0.2, 0.5, 1, and 2 Hz.

또한 Kim and Baag(2002)은 대전관측소를 기준 관측소로 하여 기준 관측소에 대한 증폭률을 구했으나, 이 연구에서는 기준 관측소 대신 모든 관측소의 평균을 기준으로 사용한 점이 다르다. 이러한 관점에서 본 연구를 Kim and Baag(2002)의 결과와 단순 비교하기는 어렵다.

이 연구의 결과로 얻어진 부지증폭률의 분포(Fig. 6)를 한반도 남부의 광역 지질과 비교하면, 둘 사이에 특별한 상관을 찾아 보기 어렵다. The Korean Geophysical Society (2002)는 대전지방기상청내의 TEJ 광대역관측소(현재는 충주로 이전 설치됨)와 한국지질자원연구원내의 TJN 광대역 관측소의 잡음과 지진기록의 스펙트럼을 비교한 결과 그 차이가 크며, 그 원인은 두 관측소의 설치지반의 차이에 의한 것임을 밝혔다. 이러한 관점에서 볼 때, 부지증폭의 정도는 광역적인 지질학적 특성보다는 관측소 설치지반에 더 큰 영향이 있을 것으로 생각된다. 그러나 이 연구에서는 23개의 소수 관측소만을 대상으로 했기 때문에, 광역 지질과 관련이 적다는 단정적인 결론을 내리기에 부족하다.

이상에서 coda파 스펙트럼 비를 이용하여 국내 광대역관측소의 부지증폭률을 결정하였다. 그러나 이 연구를 통해서 얻은 결과가 각 관측소의 부지효과를 대표하기에는 사용한 자료의 양이 충분하지 않다고 할 수 있다. 장래에 좀 더 많은 자료를 이용하여 단주기 관측소를 포함한 국내의 모든 지진관측소에 대한 부지효과가 분석되어야 할 것이다.

5. 결 론

이 연구에서는 coda파 스펙트럼 비를 이용하여 한반도 남부의 광대역 지진관측소 23개소에 대한 상대적인

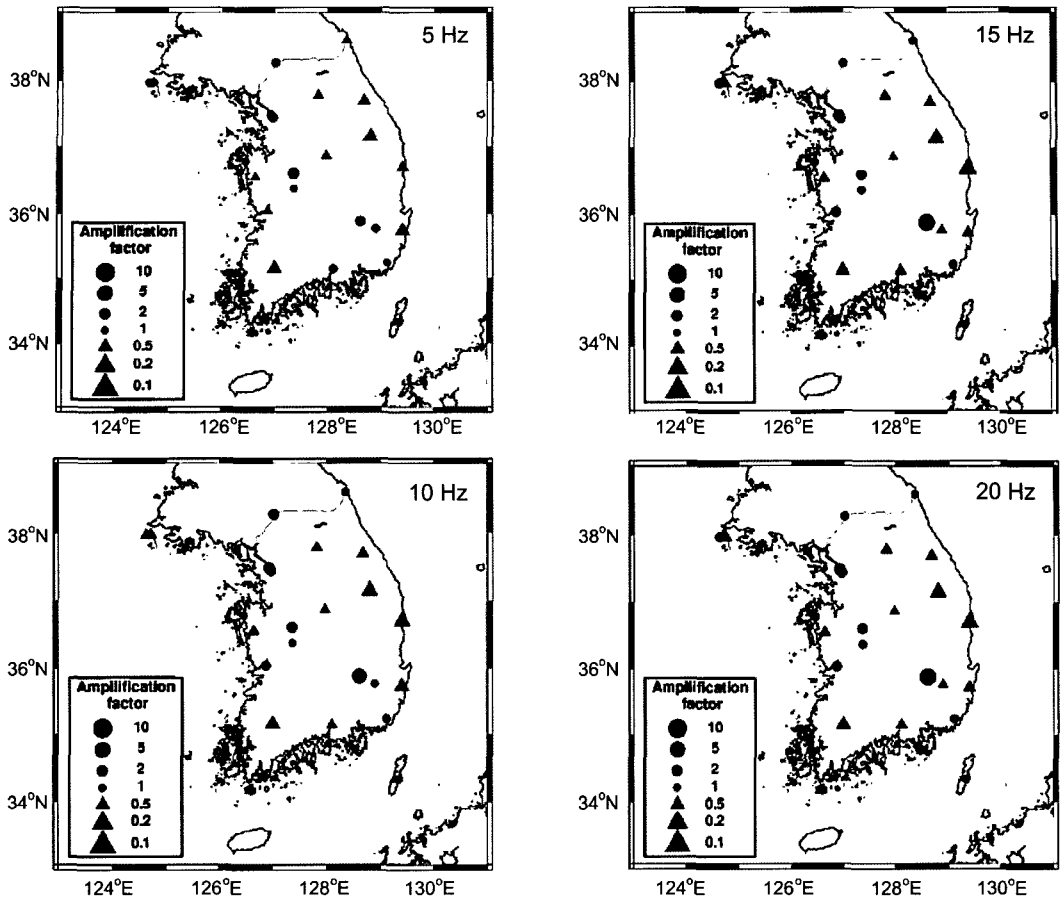

Fig. 6-2. Spatial distribution of relative site amplification factor averaged over three components in the central frequency of 5, 10, 15, and 20 Hz.

부지증폭률을 추정하였다. 사용한 자료는 2001년 1월부터 2007년 1월 사이에 발생한 규모 2.5 이상의 지진 35개이며, 지진기록의 수는 1,500개 (=3성분×500개)이다. 이 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 이 연구에서 채택한 방법은 지진발생 후 일정시간이 경과한 뒤에 coda파의 감쇠곡선이 진원거리와 방향에 관계없이 일정하다는 조건을 만족해야 한다. 여러 중심주파수에서 진원거리에 따른 coda Q값은 대체로 일정한 값을 보였으며, 이 사실은 사용한 방법의 타당성을 입증한다고 할 수 있다.

2) 수평 2성분에 대하여 구한 부지증폭률은 각 관측소에서 주파수별로 대체로 비슷하나, 수직성분의 증폭률은 수평성분에 비하여 일관되게 작게 나타났다. 또한 증폭률은 저주파 보다는 고주파에서 일반적으로 증폭의 정도가 큰 경향을 보였다.

3) 저주파(≤2 Hz)에서의 부지증폭률은 대부분의 관측소에서 0.5~1.5 사이의 값을 가지는 반면, 백령도(BRD1, BRD2) 관측소에서는 1.5 이상의 값을 갖는다.

4) 고주파(≥5 Hz)에서는 각 관측소별로 다양한 부지증폭률은 가지며, 서울(SEO), 서울대(SNU), 교원대(HKU), 경북대(GKP1), 나포리(NPR) 관측소에서는 1.5 이상의 높은 값을 보이고 있다. 특히, 경북대(GKP1) 관측소의 경우 다른 관측소에 비해 상대적으로 높은 값(≥2)을 보이고 있다. 또한 광주(KWJ), 상동(SND), 울진(ULJ) 관측소의 경우 0.5 이하의 낮은 값을 보이고 있다.

5) 부지증폭률은 공간적으로 뚜렷하지는 않지만 대체로 한반도에서 북동부가 남서부에 비해 증폭의 정도가 낮은 경향을 보여 준다.

사 사

이 논문은 2005년도 전남대학교 연구년교수연구비

지원에 의하여 연구되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드린다. 이 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 통해 논문의 질을 높여 주신 익명의 심사위원 2인과 책임편집위원인 한국지질자원연구원의 황세호 박사에게 감사드린다.

참고문헌

Aki, K. (1969) Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. Journal of Geophysical Research, v.74, p.615-631.

Aki, K. and Chouet, B. (1975) Origin of coda-waves : source, attenuation, and scattering effects. Journal of Geophysical Research, v.80, p.3322-3342.

Bonilla, L.F., Steidl, J.H., Lindley, G.T., Tumarkin, A.G. and Archuleta, R.J. (1997) Site amplification in the San Fernando Valley, California: Variability of site-effect estimation using the S-wave, Coda, and H/V methods. Bulletin of the Seismological Society of America, v.87, p.710-730.

Brune, J. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake. Journal of Geophysical Research, v.75, p.4997-5009.

Castro, R.R., Anderson J.G. and Singh S.K. (1990) Site response, attenuation and sourec spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone. Bulletin of the Seismological Society of America, v.80, p.1481-1503.

Celebi, M., Prince, J., Dietel, J., Onate M. and Chavez, G. (1987) The culprit in Mexico City - Amplification of motions. Earthquake Spectra, v.3, p.315-328.

Chin, B. H. and Aki, K. (1991) Simultaneous determination of source, path, and recording site effects on strong ground motion during the Lama Prieta earthquake: a preliminary result on pervasive nonlinear site effect. Bulletin of the Seismological Society of America, v.81, p.1859-1884.

Fehler, M. and Sato, H. (2003) Coda. Pure and Applied Geophysics, v.160, p.541-554.

Field, E.H. (1996) Spectral amplification in a sediment-filled valley exhibiting clear basin-edge induced waves. Bulletin of the Seismological Society of America, v.86, p.991-1005.

Field, E.H. and Jacob, K.H. (1995) A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent. Bulletin of the Seismological Society of America, v.85, p.1127-1143.

Field, E.H., Jacob, K.H. and Hough, S.E, (1992) Earthquake site response estimation: a weak-motion case study. Bulletin of the Seismological Society of America, v.82, p.2283-2307.

Gao, S., Liu, Davis, P.M. and Knopoff, L. (1996) Localized amplification of seismic waves and correlation with damage due to the Northridge earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, v.85, p. S209-S230.

Hartzell, S.H. (1992) Site response estimation from earthquake data. Bulletin of the Seismological Society of America, v.82, p.2308-2327.

Hartzell, S.H., Leeds, A., Frankel, A. and Michael, J. (1996) Site response for urban Los Angeles using aftershocks of the Northridge earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, v.86, p. S168-S192.

Horike, M., Zhao, B. and Kawase, H. (2001) Comparison of site response characteristics inferred from microtremors and earthquake motions. Bulletin of the Seismological Society of America, v.91, p.1526-1536.

Kato, K., Aki, K. and Takemura, M. (1995) Site amplification from coda waves: Validation and application to S-wave site response. Bulletin of the Seismological Society of America, v.85, p.467-477.

Kim, D.-I. and Baag, C.-E. (2002) Site amplification factors in southern Korea determined from coda wave. Proceedings of EESK Conference 2002-Spring, v.6, p.51-58 (in Korean).

Kosuga, M. (1992) Dependence of coda on frequency and lapse time in the Western Nagano Region, Central Japan. Journal of Physical Earth. v.40, p.421-445.

Koyanagi, S., Mayeda, K. and Aki, K. (1992) Frequency-dependent site amplification factors using the S-wave coda for the island of Hawaii. Bulletin of the Seismological Society of America, v.82, p.1151-1185.

Lachet, D., Hatzfeld, C., Bard, P.-Y., Theodulis, N., Papaioannou, C. and Avvaidis, A. (1996) Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece), comparison of different approaches. Bulletin of the Seismological Society of America, v.86, p.1692-1703.

Langston, C. A. (1979) Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. Journal of Geophysical Research, v.84, p.4749-4762.

Margheriti, L., Wennerberg, L. and Boatwright, J. (1994) A comparison of coda and S-wave spectral ratio estimates of site response in the southern San Francisco Bay area. Bulletin of the Seismological Society of America, v.84, p.1815-1830.

Mayeda, K., Koyanagi, S. and Aki, K. (1991) Site amplifications from S-wave coda in the Long Valley caldera region, California. Bulletin of the Seismological Society of America, v.81, p.2194-2213.

Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute, v.30, p.25-355.

Oohara, S. (1974) Modern earthquake engineering. Morikita Press, Tokyo, p.206 (in Japanese).

Phillips, W.S. and Aki, K. (1986) Site amplification of coda waves from local earthquakes in Central California. Bulletin of the Seismological Society of America, v.76, p.627-648.

Sato, H. (1977) Energy propagation including scattering effects, single isotropic scattering approximation. Journal of Physical Earth, v.25, p.27-41.

Steidl, J. H. (1993) Variation of site response at the UCSB dense array of portable accelerometers. Earthquake Spectra, v.9, p.289-302.

Su, F., Aki, K., Teng, T.-L., Zeng, Y., Koyanagi, S. and Mayeda, K. (1992) The relation between site amplification factor and surficial geology in Central Cal-

ifornia. Bulletin of the Seismological Society of America, v.82, p.580-602.
Su, F. and Aki, K. (1995) Site amplification factors in central and southern California determined from coda waves. Bulletin of the Seismological Society of America, v.85, p.452-466.
Su, F., Anderson, J.G., Brune, J.N. and Zeng, Y. (1996) A comparison of direct S-wave and coda wave site amplification determined from aftershocks of Little Skull Mountain earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, v.86, p.1006-1018.
Taira, T.A. and Yomogida, K. (2003) Characteristics of small-scale heterobeneities in the Hidaka, Japan, region estimated by coda envelope level. Bulletin of the Seismological Society of America, v.93, p.1531-1541.
Takemura, M., Motosaka, M. and Tamanaka, H. (1995) Strong motion seismology in Japan. Journal of Physical Earth, v.43, p.211-257.
The Korea Geophysical Society (2002) A study on the optimization plan for the seismic monitoring system. Korea Meterological Administration, p.55 (in Korean)
Tsujiura, M. (1978) Spectral analysis of the coda waves from local earthquakes. Bulletin of the Earthquake Research Institution, University of Tokyo, v.53, p.1-48.
Wee, S.H. (2008) The site effect of the seismic stations in Korea. Master Thesis of Chonnam National University, p.66 (in Korean).
Yun, K.-H. (2007) Two-dimensional Q tomography inversion for the southern part of the Korean Peninsula. Doctoral Thesis of Seoul National University, p.181 (in Korean).

2008년 1월 10일 원고접수, 2008년 4월 11일 게재승인.