화천 지진관측소 지표와 시추공의 배경잡음 특성 비교

윤원영¹ · 박순천^{1*} · 김기영²

¹기상청 국립기상연구소, ²강원대학교 지구물리학과

Comparison of Background Noise Characteristics between Surface and Borehole Station of Hwacheon

Won Young Yun¹, Sun-Cheon Park^{1*}, and Ki Young Kim²

¹National Institute of Meteorological Research

²Department of Geophysics, Kangwon National University

요 약: 화천 시추공 지진관측소의 부지특성을 살펴보기 위해 지표와 시추공 자료에 기록된 배경잡음과 지진신호의 특성을 분석하였다. 배경잡음을 분석한 결과, 비교적 잡음유입이 적은 밤 시간대에 비하여 낮 시간대에서 지표/시추공 잡음에너지 비가 약 15배 높게 나타났으며, 저주파에서 고주파로 갈수록 지표/시추공 스펙트럼 비가 크게 나타났다. 지진신호에 대해서는 P파와 SH파의 우세주파수 양상을 비교하였는데, 진앙거리가 가깝고, 규모가 작은 국내지진은 지표자료에서 8 Hz와 46 Hz에서 우세주파수를 보이며 시추공 자료와 다른 값을 나타내었다. 이는 수평/수직 스펙트럼 비 분석으로 구한 퇴적층의 공명주파수(7.4 Hz, 46 Hz)와 일치하며 상부 퇴적층에 영향을 받아 증폭현상이 나타나고 있음을 시사한다. 이번 연구를 통해 지표 관측소에 비하여 시추공 관측소에서는 배경잡음이 최대 20,000배 이상 감소되고, 상부퇴적층에 의한 증폭현상이 나타나지 않아 양질의 자료를 획득하여 지진관측능력이 향상될 수 있음을 알 수 있었다.

주요어: 시추공 지진관측소, 부지특성, 배경잡음

Abstract: To look into site characteristics of the Hwacheon borehole seismic station, we analyzed property of earthquake and microtremor recorded on surface and borehole seismometers. According to analysis result of microtremor, the surface-to-borehole energy ratio was approximately 15 times greater during the daytime than during the nighttime, and the surface-to-borehole ratios of spectral amplitudes as frequency increases. For earthquake data, amplitude spectra and dominant frequency were computed using surface and borehole data. As a result, small earthquakes with short distance recorded on surface seismometer peaked at 8 Hz, 46 Hz. This result corresponds to resonance frequencies (7.4 Hz, 46 Hz) calculated by H/V spectral ratio. We confirmed amplification effect by site characteristics of overburden. Background noise level was approximately 20,000 times smaller at borehole seismic station than surface seismic station. These results provide strong evidence for the superior recording of earthquakes using borehole seismometers instead of surface seismometers.

Keywords: borehole seismic station, site characteristics, background noise

서 론

지진관측소에 기록된 지진자료는 지진원, 지진파 전파경로, 부지효과, 지진계 특성 등의 여러 가지 요인이 조합되어 하나

의 파형으로 기록된다. 그 중, 장비에 의한 영향을 제거하고, 지진원과 전파경로가 동일하다고 가정한다면 각 관측소의 부지특성에 의하여 지진파가 다르게 기록될 수 있다. 부지특성에는 외부환경에 의한 배경잡음에 의한 영향과 퇴적층에 의한 증폭효과가 포함되며, 최적의 지진관측 환경이 되기 위해서는 이러한 부지특성의 영향이 최소화되어야 할 것이다. 국내 대부분의 지진관측소는 지표에 드러난 기반암 혹은 퇴적층 위에 설치되어 있으며, 관측소 하부의 물성에 따라 지반증폭현상이 발생하게 된다. 이러한 지표 지진관측소에서의 정확한 지진기록을 위해서 지진관측소 부지고유의 지반 증폭현상 및 배경잡음에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 상시미동을 이용한 수평/수직 스펙트럼 비 계산을 통해 국내 지진관측소의 부지증

2013년 4월 8일 접수; 2013년 8월 27일 수정; 2013년 8월 30일 채택

*Corresponding author

E-mail: suncheon@korea.kr

Address: National Institute of Meteorological Research, 45 Gisangcheong-gil, Dongjak-gu, Seoul 156-720, Korea

©2013, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

폭력에 대한 연구가 선행되었으며(Wee and Kim, 2008; Kim and Kim, 2009), 토양층과 암반에서 기록된 지진자료의 스펙트럼 비를 비교하여 상부 퇴적층으로 인한 공명주파수 및 지진과 감쇠에 대한 연구가 많이 이루어졌다(Abercrombie, 1997; Beresnev and Wen, 1996; Satoh, 2006; Rodriguez and Midorikawa, 2003; Cocco *et al.*, 2001). 또한, 외부환경에 의한 배경잡음 영향에 관한 연구도 선행되었는데, Sheen and Shin (2010)는 주, 야 배경잡음 수준을 고려하여 국내 광대역 지진관측망의 지진 관측 능력을 평가하였고, Ringdal and Bungum (1977)은 일변화, 계절변화에 따른 배경잡음수준이 지진관측능력에 미치는 영향을 연구하였다.

시추공 지진계는 지중 암반 내에 설치되어 있으며, 상부 퇴적층에 의한 부지증폭효과나 지표 배경잡음의 영향을 적게 받으므로 지표 지진계에 비해 비교적 정확한 지진관측이 가능하다(Liu *et al.*, 1991). 이번 연구에서는 지진관측소의 부지증폭효과를 정량화하기 위하여, 현재 기상청에서 운영 중인 화천 시추공 지진관측소에 대하여 지표와 시추공 자료의 배경잡음 수준을 비교하고, 스펙트럼 진폭 비를 분석하였다. 이를 바탕으로 시추공 지진관측소에서 지표 배경잡음의 감소효과와 부지증폭영향이 실제 나타나지 않는지 기대할 수 있으며, 관측 자료의 질이 얼마나 향상되는지 정량적으로 확인하고자 한다. 또한, 부지영향을 받아 기록되는 지진신호가 지표와 시추공 지진계에 어떤 특징을 보이는지 알아보고자 한다.

화천 시추공 지진관측소 위치 및 자료기록

기상청은 지진조기경보체계 구축을 위해서 양질의 데이터를 획득하고자 시추공 지진관측소를 설치하고 있으며, 2013년 1월 현재, 21개소의 광대역 시추공 관측소를 운영하고 있다. 토양층 내에서의 부지효과를 정량적으로 분석하고 시추공 지진관측소의 지진관측 특성을 이해하기 위해서 화천 시추공 지진관측소를 대상으로 지표와 지중에서의 관측자료를 수집하였다.

화천 시추공관측소 위치는 북위 38.22, 경도 127.67로 화천군 상서면 산양리 군부대 내에 위치하고 있다(Fig. 1). 이 지역에는 선캠브리아 함석류화강편마암이 모암으로 분포하며 표토층은 약 10 m로 추정된다. 화천 시추공 관측소에는 건물 내부 지하 96 m에 시추공 광대역 지진계 (CMG-3TB), 18 m에 시추공 가속도계(Hyposensor)가 설치되어 있으며, 기록계로는 Q330S가 사용된다. 화천 시추공 지진관측소에는 별도의 지표 지진계가 설치되어 있지 않으므로 이동식 지진계를 이용하여 지표의 지진 및 상시미동 자료를 획득하였다. 2011년 4월 18일 ~ 6월 15일까지 시추공 지진계가 위치한 수직 상단부에 이동식 지진계를 설치하였으며, 광대역 지진계 CMG-3T와 가속도계 Episensor, 기록계 Q330을 이용하였다. 지표에서는 고르기 빈도 200 Hz로 3성분 자료를 기록하였고, 같은 기간 동안 시추공 지진계에 고르기 빈도 100 Hz로 기록된 관측자료를 분석에 이용하였다.

Fig. 1. Map of Hwacheon borehole seismic station (triangle) and earthquake events (red circle) in Hwacheon seismic station from April 18 to June 15, 2011.

배경잡음 특성

지진계에 기록되는 파형에는 지진에 의한 신호와 주변에서 발생하는 잡음이 동시에 기록되며 잡음에 의하여 지진파의 신호가 증폭되거나 왜곡될 수 있다. 따라서 지진에 의한 진동을 배경잡음으로부터 구분할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 주변 환경에 의한 배경잡음수준을 파악하고, 잡음의 일변화 및 우세 주파수대역을 파악하여 그 영향을 최소화해야 한다.

먼저, 화천 시추공 관측소의 배경잡음 수준과 특성을 파악하기 위하여, 상시미동 자료의 파워스펙트럼밀도(Power Spectrum Density; PSD)를 계산하고, 이것의 확률밀도함수(Probability Density Function; PDF)를 분석(McNamara and Buland, 2004)를 분석하였다. Fig. 2는 화천 관측소의 배경잡음 분석결과를 나타낸다. 전체적으로 1 Hz 미만의 장주기 대역에서는 지표와 시추공의 배경잡음수준이 유사한 양상을 보이거나, 1 Hz 이상의 고주파수대역에서는 지표와 시추공의 분석결과가 다르게 나타

Fig. 2. PSD (Power Spectrum Density) analysis results for 3-component (from left to right EW, NS, UD components) surface and borehole data in Hwacheon station. From top to bottom, surface acceleration, borehole acceleration, surface broadband and borehole broadband data are shown.

나는 것을 확인할 수 있다. 0.5 Hz ~ 수십 Hz에 이르는 주파수 대역은 주로 인공잡음에 의한 영향을 받으며, 교통수단, 공장 등의 인공적인 진동원과 바람, 해파와 같은 자연적인 진동원도 잡음원이 될 수 있다(Kim *et al.*, 2004; Cho *et al.*, 2009). 이 인공잡음 대역 중 10 Hz 부근의 배경잡음수준이 가장 높은 곳을 측정하여 비교하면, 지표에 위치한 지진계는 -75 dB ~ -100 dB를 보이며 높은 잡음수준을 나타내고, 지중 96 m에 위치한 광대역 지진계는 -117 dB ~ -140 dB로 낮은 수준을 보였다. 일반적으로 알려진 바와 같이 인공잡음 대역인 고주파 성분은 지표에서 지하로 갈수록 기하급수적으로 그 에너지가 감쇠되며, 이에 따라 지표 자료에 비하여 시추공 자료에서 잡음수준이 낮게 나타난다. 화천 시추공 지진관측소의 배경잡음 수준 결과도 지표에 비하여 시추공에서 낮게 나타났으며, 지표와 지중의 배경잡음 수준차이는 약 40 dB를 보였다.

다음으로 지표와 시추공 지진계에 기록되는 배경잡음에 대하여 각 성분별, 요일별로 시간에 따른 지표/시추공 잡음에너지 비와 주파수대역별 지표/시추공 진폭 비를 구하여 잡음의 특성을 알아보았다. 지표에서 관측이 수행된 기간 중 기상청에서 발표한 규모 2.0이상의 지진 이벤트가 있는 날을 제외한 29 일간의 상시미동 자료를 이용하였으며, mini-SEED 포맷의 자료를 SAC (Seismic Analysis Code) 포맷으로 변환하여 사용하였다. 지진계와 기록계에 의한 영향을 보정하고, 선형기울기에 의한 효과를 보정하였으며 평균값을 제거하였다. 시추공 지진자료가 고르기 빈도 100 Hz인 것에 비하여 지표에 기록된 자료는 고르기 빈도 200 Hz이므로 안티 알리아싱 필터를 적용하여 고르기 빈도 100 Hz로 변환하였다. 잡음 에너지 계산을 위하여 기록된 상시미동 자료를 1시간 단위로 분류한 뒤, 각각의 시간창 안에서 진폭을 제공하고 RMS값을 계산하였다. 수평성분은 동서성분과 남북성분의 값을 각각 제공하여 제공근을 취한 형태로 하나의 수평 값을 사용하였고, 수평성분과 수직성분 각각에 대한 지표/시추공 잡음에너지 비를 계산하였다.

Fig. 3은 지표/시추공 잡음에너지 비의 일변화를 나타낸 것이다. 가로축은 오전 9시부터 익일 9시까지의 시간변화를 나타내고, 세로축은 지표 잡음에너지와 시추공 잡음에너지의 비를 나타낸다. 빨간 실선은 수평성분의 잡음에너지 비이고, 빨간 점선은 수직성분의 잡음에너지 비이다. 또한, 파란 실선과 점선은 29일 자료 중 주말만 분석한 결과로 수평과 수직성분의 잡음에너지 비를 나타낸다. 주중의 자료로 분석한 결과는 주말과 주중을 모두 포함한 29일의 분석결과와 유사한 양상을 나타내어, 별도로 도시하지 않았다. 그 결과, 전체적으로 인간 활동이 시작되어 잡음 유입이 많은 오전 6시부터 밤 12시 전까지는 지표/시추공 잡음에너지 비가 크게 나타났고, 잡음유입이 적은 밤 시간대보다 잡음유입이 많은 낮 시간대의 잡음에너지 비율은 평균적으로 15배 높게 나타났다. 성분별로는 수직성분에 비하여 수평성분의 잡음에너지 비가 평균적으로 34

Fig. 3. Diurnal variation of noise energy ratio between surface and borehole data at Hwacheon seismic station.

배 큰 값을 보였고, 주말에 비하여 주중의 평균 지표/시추공 잡음에너지 비율은 1.5배 높게 산정되었다. 수평성분에 대하여 평균 지표/시추공 잡음에너지 비율은 오전 10시 ~ 11시 사이에 21,872의 값을 보이며 가장 크게 나타났고, 주말에는 오전 6시 ~ 7시 사이에 14,553으로 지표/시추공 잡음에너지 비율이 높게 나타났다. 새벽 2시 ~ 3시 사이에 주중과 주말의 잡음에너지 비율이 각각 416, 412의 유사한 값을 보이면서 낮은 지표/시추공 잡음에너지 비를 나타내었다. 이를 통해 잡음유입이 적고 조용한 밤 시간대에는 지표와 시추공 지진계에 미치는 잡음에너지가 큰 차이를 보이지 않으며, 지표의 잡음수준이 시추공과 유사한 것을 알 수 있다. 이와 같이 주중과 주말, 낮과 밤의 지표/시추공 잡음에너지 비의 일변화 패턴은 화천 관측소 지역의 인간활동에 따른 주변 잡음의 영향을 잘 반영하는 것을 알 수 있다.

주파수에 따른 잡음변화 양상을 알아보기 위하여 잡음유입이 많은 오전 9시 ~ 10시, 잡음유입이 적은 새벽 2시 ~ 3시 각각 1시간 자료에 대하여 푸리에 변환하고, 0.01 Hz부터 나이퀴스트 주파수인 50 Hz까지 스펙트럼 분석을 하였다. 그 후, 수평성분과 수직성분 각각의 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비를 로그형식으로 도시하였다. Fig. 4에 가로축은 0.01 Hz ~ 50 Hz까지 주파수를 선형으로 나타내고, 세로축은 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비를 로그형식으로 도시하였다. 빨간 실선은 잡음유입이 많은 오전 시간대(오전 9시 ~ 10시)의 수평성분 스펙트럼 진폭 비이고, 빨간 점선은 수직성분 스펙트럼 진폭 비를 나타낸다. 파란실선과 점선은 각각 잡음유입이 적은 밤 시간대(밤 2시 ~ 3

Fig. 4. Variation of noise spectral amplitude ratio between surface and borehole data at Hwacheon seismic station.

시)의 수평성분과 수직성분의 스펙트럼 진폭 비이다.

평균적으로 밤 시간대에 비하여 잡음유입이 많은 오전시간대에 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비가 3배 높았다. 또한, 전체적으로 저주파대역은 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비 차이가 크지 않은 반면, 고주파대역으로 갈수록 그 차이가 높게 나타나는 양상을 보였으며, 수직성분에 비해서는 수평성분이 약 7배 높게 나타났다. 약 3 Hz 부근에서부터 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비율이 증가하기 시작하여 5 Hz 이상에서는 그 비가 10배 이상 차이 나고, 46 Hz에서 가장 높게 나타났다. 46 Hz에서 오전과 밤 각각 1,449, 390의 최대값을 나타내었다. PDF를 이용한 배경잡음수준 분석결과(Fig. 2)에서 1 Hz 이상 고주파대역의 배경잡음수준이 지표와 시추공 자료 간에 큰 차이를 보

인 것과 같이 스펙트럼 진폭 비 분석결과에서도 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비 차이가 고주파대역에서 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

지진 신호 특성

앞서 배경잡음분석을 통해 시간과 주파수대역에 따른 지표와 시추공 자료간의 차이를 확인하였다. 만약, 잡음유입이 많은 시간에 고주파대역이 영향을 받는 지진이 발생한다면, 지표와 시추공 지진계에 기록되는 자료는 큰 차이를 보일 것이다. 또한, 주로 규모가 작은 지진은 고주파대역이, 상대적으로 규모가 큰 지진은 저주파대역의 에너지가 우세하다고 알려져 있는데, 진앙거리가 가깝고 규모가 작은 한반도내에서 발생하는 지진의 경우, 고주파대역의 영향을 받아 지표와 시추공 자료에서 진폭 차이를 보일 것으로 예상된다. 실제 지진 신호가 지표와 시추공 지진계에 기록될 때 부지에 의한 영향이 어떤 특성을 보이는지 알아보기 위하여, 규모 2.0 이상의 지진 17회에 대한 스펙트럼분석을 실시하였다.

연구에 사용된 지진정보는 Table 1과 같으며, Fig. 1에 진앙을 표시하였다. 일반적으로 진앙거리 100 km 미만에서 발생한 지진을 국지지진(local earthquake)이라 하며, 지역지진(regional earthquake)은 100 km 이상, 1,400 km 이하($1^\circ \leq \Delta \leq 13^\circ$)의 진앙거리에서 발생한 지진을 말한다. 또한, 진앙거리 $13^\circ \leq \Delta \leq 30^\circ$ 는 저속도층을 포함하는 상부맨틀을 통과하는 거리(upper-mantle distance)로 분류되며, 진앙거리가 $30^\circ \leq \Delta$ 이면 원거리지진에 속하게 된다(Lay and Wallace, 1995). 지표에 이동식 지진계를 설치한 현장관측 기간(2011. 4. 18 ~ 6. 15) 중 기록된 지진 이벤트는 대부분 지역지진 범위에 속하

Table 1. List of events recorded in Hwacheon seismic station from April 18 to June 15, 2011.

Group	No.	Epicentral Distance (km)	Date	Origin time (KST)	Lat (°)	Lon (°)	Magnitude (M)	Back Azimuth (°)
A	1	169	2011.06.02	10:50:18	36.7 N	127.9 E	2.7	171
	2	176	2011.05.11	21:09:04	39.2 N	126.0 E	2.8	309
	3	237	2011.04.24	16:37:30	37.8 N	125.0 E	3.1	260
	4	308	2011.05.29	10:22:50	35.5 N	128.7 E	2.9	161
	5	311	2011.05.28	15:41:50	35.9 N	129.6 E	2.5	144
	6	508	2011.05.25	18:29:47	33.6 N	127.2 E	2.0	184
	7	567	2011.06.04	01:57:00	35.1 N	132.7 E	5.1	126
	8	628	2011.05.11	00:26:05	43.2 N	131.0 E	5.4	25
B	9	1213	2011.04.21	22:37:00	35.6 N	140.9 E	6.0	99
	10	1241	2011.05.20	09:46:00	35.8 N	141.3 E	5.8	98
	11	1246	2011.04.28	18:28:00	37.4 N	141.8 E	5.7	89
	12	1336	2011.04.23	19:13:00	39.2 N	143.0 E	6.0	80
	13	1379	2011.05.24	12:41:00	39.7 N	143.5 E	5.8	78
	14	1478	2011.05.05	23:58:00	38.3 N	143.9 E	5.9	84
C	15	1946	2011.04.29	22:12:47	21.3 N	122.2 E	6.2	197
	16	6409	2011.04.23	13:16:55	10.4 S	161.2 E	6.9	139
	17	7732	2011.05.10	17:55:11	20.2 S	168.2 E	7.1	139

는데, 이를 두 그룹으로 분류하여 진앙거리 1,000 km 미만을 그룹 A, 1,000 km 이상 1,400 km 이하를 그룹 B로 지정하였다. 예외적으로 2011년 5월 5일에 발생한 일본 혼슈지역의 지진은 진앙거리가 1,478 km로 분류범위에서 벗어나지만, 일본 혼슈 인근에서 발생하고 진앙거리 기준을 크게 벗어나지 않아 그룹 B에 속하였다. 또한, 원거리지진은 그룹 C로 분류하였다.

지진자료는 배경잡음 분석에서의 상시미동 자료처리와 같은 방법의 전처리를 거쳐 사용하였다. P파 분석을 위해서는 수직 성분이 사용되었으며, 동서성분과 남북성분에 대해 후방위각(Back-azimuth)를 이용하여 지진파 전파방향으로 회전(rotate)시킨 후, 횡방향(Tangential) 성분을 이용하여 SH파 스펙트럼을 계산하였다. 분석에 사용된 시간창은 Utsu *et al.* (2001)에서 언급한 규모에 따른 진원지속시간을 참고하여 설정하였다. 규모 3.0일 때 진원지속시간은 0.16초를 보이고, 규모 5.0의 경우는 1.6초, 규모 7.0에서는 16초의 진원지속시간을 보인다는 것(Utsu *et al.*, 2001)을 이용하여 지진규모에 해당하는 진원지속시간의 10배로 시간창을 설정하였다.

각각의 스펙트럼을 분석한 후 그 최대값을 지수 그래프로 도시하여 Fig. 5에 나타내었다. A그룹은 P파, SH파 모두 지표

와 시추공자료의 우세주파수가 다르게 나타났다. 특히 한반도 내륙에서 발생한 지진에 대해서는 지표자료에서 40 Hz 이상과 8 Hz 부근에서 우세주파수를 보였으나, 시추공 자료에서는 1 ~ 3 Hz 주파수대역에서 우세주파수를 보였다. SH파의 경우에는 좀 더 먼 진앙거리까지 지표와 시추공의 우세주파수 값이 차이나는 것을 알 수 있었다. 그룹 B와 C에서는 지표와 시추공 자료의 우세주파수 값이 거의 일치하는 경향을 보였고, 거리가 멀어짐에 따라 저주파대역으로 우세주파수의 값이 이동하였다.

A그룹에서는 우세주파수 대역이 지표(8 Hz, 40 Hz 이상)와 시추공(1 Hz ~ 3 Hz)에서 다르게 나타났다. 지표의 우세주파수 대역은 Fig. 6에 나타난 수평/수직 스펙트럼비의 우세주파수대역(7.4 Hz, 46 Hz)과 유사한 것을 알 수 있다. Fig. 6은 지표 자료의 상시미동을 이용하여 수평/수직 스펙트럼 비를 하루 동안 시간변화에 따라 분석하였고, 그 결과 지속적으로 우세주파수를 보이며 공명주파수임을 확인하였다. 암반위에 설치되어 있는 지진계는 지진파의 진폭이 증폭되는 퇴적층의 영향이 없으므로 수평/수직 스펙트럼 비는 1로 가정된다. 그러나 퇴적층에 설치되었을 경우 암반과 상부퇴적층 사이의 임피던스 차이가 발생하여 수평/수직 스펙트럼 비가 1 이상을 보이면서 공명을 유발하는 우세주파수가 계산되고, 이를 통해 부지 증폭이 발생하게 된다(Nakamura, 1989). 또한, Fig. 4에서 지표/시추공 스펙트럼 진폭비가 40 Hz 이상에서 높은 값을 나타내는 것으로 보아 고주파 대역 배경잡음의 영향도 포함하고 있을 것으로 예상된다.

위와 같이 지표 자료에서 퇴적층에 의한 증폭현상이 발생한다면 거리에 관계없이 분석된 모든 지진에 대하여 지표자료의 증폭현상이 발생할 수 있지만, 실제 분석결과(Fig. 5)에서는 일정거리 이상에서 지표자료의 우세주파수가 시추공자료 결과와

Fig. 5. Frequency of peak spectral amplitude for (a) P and (b) SH waves as a function of distance.

Fig. 6. H/V spectral ratio of microtremor records at HWCB surface station. It has two peak frequencies at 7.4 Hz and 46 Hz.

일치하였다. 그 이유는 진앙거리가 먼 지진일수록 지진파가 전파함에 따라 고주파성분이 감쇠되고 상대적으로 저주파 에너지가 우세하게 나타나며, 또한 지진규모의 크기나 지진발생 시간 등의 조건에서 잡음보다 신호가 우세하게 나타났기 때문으로 추측된다. 실제로 분석된 지진을 발생시간에 따라 낮과 밤으로 나누어 본 결과, 대부분의 지표와 시추공의 우세주파수가 차이를 보인 A그룹은 주로 잡음이 유입되는 낮 시간대에 많이 분포하고 있었다. B나 C그룹의 지진도 낮 시간대에 분포하지만 지표와 시추공의 우세주파수가 같은 경우에는 규모가 5.0 이상으로 크고, 지역지진 진앙거리보다 멀어서 고주파성분이 감쇠가 된 지진임을 확인할 수 있었다.

지표와 시추공 자료를 이용하여 지진 발생 전 잡음과 지진 신호에 신호 대 잡음 비를 계산해 보았다. 전체적으로 시추공에서는, 지표에 비해 P파는 9.06배, SH파는 138.8배 정도 신호 대 잡음비가 향상되는 것을 알 수 있었으나, 거리나 지진 발생 시간 등의 분류로는 신호 대 잡음 비가 뚜렷한 양상을 보이지 않았다. 이는 역시 지진발생시간과 지진의 규모, 진앙거리 등의 여러 요인에 영향을 받기 때문으로 생각된다.

토의 및 결론

이 연구에서는 화천 시추공관측소의 부지특성에 따른 영향을 정량적으로 나타내기 위해 지표와 시추공 자료를 이용하여 배경잡음과 지진신호의 특성을 분석하였다. 배경잡음에 대해서는 상시미동자료를 이용하여 시간영역의 지표/시추공 잡음에너지 비와 지표/시추공 스펙트럼 진폭 비를 계산하였다. 그 결과, 잡음유입이 많은 낮 시간대의 지표/시추공 잡음에너지 비가 잡음유입이 적은 밤 시간대보다 15배 높게 나타났으며, 저주파에 비하여 고주파로 갈수록 지표/시추공 스펙트럼 비가 크게 나타났다. 또한, 상대적으로 진앙거리가 가까운 한반도에서 발생한 지진은 지표와 시추공자료의 우세주파수가 다르게 나타났으며, 지표자료에서는 주로 8 Hz와 40 Hz 이상에서 우세주파수를 보였다. 이는 수평/수직 스펙트럼 비로 구한 퇴적층의 공명주파수와 거의 일치하며, 상부 퇴적층의 영향을 받아 증폭되어 나타난 것으로 사료된다.

지표와 시추공 지진계에 기록된 지진자료의 진폭은 진앙거리가 멀어질수록 유사하게 기록되었으나, 진앙거리가 가까운 지진은 진폭의 차이를 보였다. 그 예로 Fig. 7은 지표와 시추공 자료에 기록된 진앙거리 169 km인 국내 지진의 지진파형 진폭 차이를 보여준다. 지표 자료는 부지에 의한 증폭 효과, 시추공 자료는 지표반사에 의한 효과가 있으므로 진폭계산 시 이러한 점을 고려하여야 하고, 그렇지 않을 경우 규모 계산 시 오차가 발생할 수 있을 것이다. 지진자료 스펙트럼 분석결과 지표와 시추공 자료에서 우세주파수가 다르게 나타난 국내 지진 6회에 대하여 Tsuboi (1954) 규모식(Loccal Magnitude, M_L)을 이용하여 규모를 계산하였다. 그 결과, 시추공 자료에

Fig. 7. Amplitude comparison of 2 June, 2011 event, the top and bottom are raw data of surface station and borehole station.

비하여 지표 자료를 이용하여 규모를 계산하였을 때, 0.2 ~ 0.5 정도 크게 산정되었다.

이번 연구에서 국내에서 발생하는 지진은 고주파성분이 우세하기 때문에 지표에 설치된 지진계의 경우 상부퇴적층에 의한 영향을 받으며, 이로 인해 시추공 자료의 규모 계산결과보다 크게 산정될 수 있음을 확인하였다. 또한, 외부환경에 의한 배경잡음은 지표에 비하여 시추공에서 고주파에너지가 감쇠되어 배경잡음에 의한 지진관측능력이 20,000배 이상(Fig. 3) 향상될 것으로 예상된다. 이는 시추공 관측소가 외부환경에 의한 배경잡음과 상부퇴적층에 의한 증폭효과가 많이 감소되며, 지표 관측소에 비하여 지진관측능력이 향상된다는 것을 의미한다. Steidl *et al.* (1996)은 토양층 위에 위치한 지표 지진계, 암반위에 위치한 지표 지진계, 암반에 위치한 시추공 지진계에 대하여 각각의 스펙트럼 비를 이용해 부지효과의 영향을 받지 않는 기준부지에 대한 연구를 진행하였는데, 시추공 지진계에 기록된 지표면 반사로 인한 간섭효과가 고려된다면 충분히 시추공 지진계의 환경도 기준부지로 효과적이라고 제시하였다. 따라서, 시추공 자료에 기록된 지진의 진폭과 산정된 규모는 부지효과의 영향이 없는 자유장 상태의 지표 암반의 결과와 유사하다고 가정할 수 있으며, 지표 지진계의 기록에 비하여 양질의 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 관측·지진기술 지원 및 활용 과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사하고 유익한 조언을 해 주신 익명의 두 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

Abecrombie, R. E., 1997, Near-Surface Attenuation and Site Effects from Comparison of Surface and Deep Borehole

- Recordings, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **87**, 731-744.
- Beresnev, I. A., and Wen, K. L., 1996, The Accuracy of Soil Response Estimates using Soil-to-Rock Spectral Ratio, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 519-523.
- Cho, B.-J., Sheen, D.-H., Jo, B.-G., Park, S.-C., and Hwang, E.-H., The Site Effect of the Broadband Seismic Stations in Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, **45**(2), 127-141.
- Cocco, M., Ardizzone, F., Azzara, R. M., Dall'Olio, L., Delladio, A., Di Bona, M., Malagnini, L., Margheriti, L., and Nardi, A., 2001, Broadband waveforms and site effects at a borehole seismometer in the Po alluvial basin (Italy), *Annals of Geophysics*, **44**, 137-154.
- Kim, S. K., Nam, S.-T., and Ryoo, Y., 2004, Characteristics of the background noise of seismograph station in Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, **40**, 515-536.
- Kim, S. Y., and Kim, S. K., 2009, Characteristics of Site Amplification of the Broad-band Seismic Stations in Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, **30**, 810-823.
- Lay, T., and Wallace, T. C., 1995, *Modern Global Seismology*, Academic press, 203.
- Liu, H. P., Warrick, R. E., Westerlund, R. E., and Fletcher, R. E. J. B., 1991, A Three Component Borehole Seismometer for Earthquake Seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **81**, 2458-2485.
- McNamara, D. E., and R. P. Buland, 2004, Ambient Noise Levels in the Continental United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **94**, 1517-1527.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, *Quarterly Reports*, **30**, 25-30.
- Ringdal, F., and Bungum, H., 1977, Noise level variation at NORSAR and its effect on detectability, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **67**, 479-492.
- Rodriguez, V. H. S., and Midorikawa, S., 2003, Comparison of spectral ratio techniques for estimation of site effects using microtremor data and earthquake motions recorded at the surface and in boreholes, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, **32**, 1691-1714.
- Satoh, T., 2006, Inversion of QS of Deep Sediments from Surface-to-Borehole Spectral Ratios Considering Obliquely Incident SH and SV Waves, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 943-956.
- Sheen, D.-H. and Shin, J. S., 2010, Earthquake detection thresholds of broadband seismic networks in South Korea considering background seismic noise levels, *Journal of the Geological Society of Korea*, **46**, 31-38.
- Steidl, J. H., Tumarkin, A. G., and Archuleta, R. J., 1996, What Is a Reference Site?, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**, 1733-1748.
- Tsuboi, C., 1954, Determination of the Gutenberg-Richter's magnitude of earthquakes occurring in and near Japan, *Zisin*, **7**, 185-193.
- Utsu, T. et al., 2001, *Encyclopedia of earthquakes*, Asakura shoten, 284.
- Wee, S. H., and Kim, S. K., 2008, The Site Effect of the Broad-band Seismic Stations in Korea, *Journal of Economic and Environmental Geology*, **41**, 225-242.