

<Technical Report> 시추공 지진계의 방위각 결정에 관한 연구

이혜원 · 신동훈^{*}
전남대학교 지구환경과학과

요 약

이 연구에서는 2013년 6월부터 2014년 6월까지 우리나라 주변에서 발생한 규모 5.0 이상인 53개의 지진 자료로부터 P파 분극 특성을 분석하여, 2014년 6월 기준으로 국내에서 운영 중인 시추공 지진계의 방위각을 측정하였다. 그리고 향후 설치될 시추공 지진계의 방위각을 효과적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 한국지질자원연구원의 HWSB 관측소 부지의 지표에 기준 지진계를 설치하여 약 한 달 동안 운영하고, 기준 지진계와 시추공 지진계에 기록된 0.3~0.7 Hz 주파수 대역 상시 지진 잡음의 상호상관을 이용하여 방위각을 측정하였다. 지진 파형의 위상만을 이용하는 1 비트 표준화법보다 파형 전체를 이용하는 일반적인 상호상관 방법이 -123 dB 정도의 낮은 잡음 수준의 자료를 사용할 때도 안정적으로 방위각을 측정할 수 있는 것으로 확인되었다. 그리고 한 성분의 상호상관계수의 최댓값만을 비교하여 시추공 지진계의 방위각을 결정하는 방식보다 두 수평 성분 상호상관계수 평균이 최대일 때 해당하는 회전각을 방위각으로 결정하는 방식이 잡음 수준이 낮은 자료에서도 신뢰할 수 있는 값을 제시하는 것을 알 수 있었다.

주요어: 시추공 지진계, 방위각, P파 분극, 상시 지진 잡음, 상호상관

Hyewon Lee and Dong-Hoon Sheen, 2015, A study on determination of orientation of borehole seismometer. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 1, p. 93-103

ABSTRACT: We measured orientations of borehole seismometers being operated in South Korea at June 2014 by using the P wave polarization of 53 earthquake events larger than magnitude 5.0 occurring around the Korean Peninsula during the period from June 2013 to June 2014. In addition, we provide a practical guidance for measuring the orientation of borehole seismometer to be installed in the near future. A reference seismometer was installed and operated at the surface within station HWSB of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources for about one month. The orientation was measured by the cross correlation of ambient seismic noise recorded at the reference and borehole seismometers in the frequency range from 0.3 to 0.7 Hz, which is the dominant frequency band of the secondary microseism. Our result shows that even when seismic noise level is less than -123 dB, the full waveform cross correlation gives more stable estimates of the orientation than the one bit normalization method. It is also found that the rotation angle of two horizontal components corresponding to the largest mean of the correlation coefficients of horizontal components is more reliable even for the low level of seismic noise than that corresponding to the largest coefficient of a single component.

Key words: borehole seismometer, orientation, P wave polarization, ambient seismic noise, cross correlation

(Hyewon Lee and Dong-Hoon Sheen, Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Republic of Korea)

1. 서 론

최근 설치되는 대부분의 지진계는 서로 수직인 두 개의 수평 방향과 하나의 수직 방향 지진동을 동

시에 관측할 수 있도록 세 센서로 구성되어 있다. 일반적으로 수평 성분 센서는 남북, 동서 방향 지진동을 관측할 수 있도록 진북을 기준으로 설치하는데 시추공 지진계나 해저 지진계는 수평 성분 센서를

^{*} Corresponding author: +82-62-530-3454, E-mail: dhsheen@jnu.ac.kr

진북에 맞춰 설치하는 것이 매우 어렵거나 불가능할 수도 있다.

국내에서는 거의 모든 시추공 지진계가 진북에 맞춰 설치되어 있지 않다. 외국의 경우 과거에는 시추공 지진계를 진북 방향으로 배열시킬 수 있는 보조적인 링을 사용하여 지진계의 방위각을 진북에 맞춰 설치하기도 하였다. 하지만 방위각의 정확도나 유지보수 비용의 문제로 인해 현재는 이 방법을 잘 사용하지 않는다(Trnkoczy *et al.*, 2002). 지금은 시추공 지진계의 방향을 고려하지 않고 설치한 다음, 지진계의 남북 방향 센서가 가리키는 방위각을 측정하여 그 값을 지진 관측 자료와 함께 제공하고 있다. 이는 디지털 지진 파형의 수평 성분 자료를 방위각에 따라 회전 변환하면 남북, 동서 방향으로 배열된 센서가 측정한 자료처럼 손쉽게 바꿀 수 있기 때문이다.

2014년 6월을 기준으로 국내에서 운영 중인 시추공 지진관측소는 기상청 27개소(광대역 21개소, 가속도 6개소)와 한국지질자원연구원 광대역 시추공 지진관측소 10 개소가 있는데, 총 162개 지진 관측소(기상청 127개소, 한국지질자원연구원 35개소)의 23%에 달한다. 하지만 아직까지 국내 지진관측 기관에서 시추공 지진계의 방위각 정보를 지진 자료와 함께 제공하지 않기 때문에 지진 자료의 활용에 어려움이 있다. 특히 지진조기경보시스템에서 지진의 P파를 이용해 진앙을 결정할 때, P파 도달이후 1초의 시간차 동안 기록된 3 성분 자료를 이용해 추정된 P파 후방 방위각을 P파 도달시간과 함께 사용하면 관측망 밖에서 발생한 지진의 진원을 보다 안정적으로 결정할 수 있기 때문에(Sheen, 2013), 모든 종류의 시추공 지진계 방위각을 정확히 파악할 필요가 있다.

Shin *et al.* (2009)은 2008년 9월 기준으로 국내에 설치된 9개 광대역 시추공 지진계의 방위각 보정값을 추정한 바 있다. 하지만 그 이후 시추공 가속도 지진관측소를 비롯한 다수의 시추공 지진관측소가 신설되었으며, 장비의 결함이나 유지보수 등의 목적으로 시추공 지진계의 교체도 있었기 때문에 지진계의 방위각을 다시 측정할 필요가 있다.

이미 설치되어 운영 중인 관측소는 다수의 지진 관측 자료가 있으므로, 이를 이용해 시추공 지진계의 방위각을 측정할 수 있다. Ekström and Busby

(2008)는 Mw 5.5 이상 지진의 표면파 자료와 수치 모의 자료를 비교하여 USArray를 구성하는 지진계의 방위각을 측정하기도 하였다. Shin *et al.* (2009)은 한반도를 중심으로 원거리에서 발생한 지진의 P파 분극 특성을 이용해 시추공 관측소의 방위각 보정값을 추정하였다.

이미 많은 국내 지진관측소가 인간의 활동에 의한 잡음에 노출되어 있기 때문에(Sheen *et al.*, 2009), 앞으로 설치되는 대부분의 지진관측소에는 시추공 지진계가 설치될 것이다. 새로 설치된 시추공 관측소의 자료를 효과적으로 활용하기 위해서는 가능한 한 빨리 시추공 지진계의 방위각을 측정할 필요가 있다. 그런데 앞서 설명한 방법들은 충분한 수의 지진 자료가 필요하므로, 시추공 지진관측소를 설치한 뒤 상당한 시간이 지난 후에야 지진계의 방위각을 측정할 수 있다.

이에 반해 상시 지진 잡음을 이용한 방법은 비교적 짧은 기간 동안 관측한 자료로부터 시추공 지진계의 방위각을 측정할 수 있는 장점이 있다. 방위각을 알고 있는 기준 지진계를 지표에 설치하여 일정 기간 동안 자료를 수집하고, 시추공 지진계에서 관측한 상시 지진 잡음과 비교하여 시추공 지진계의 상대적인 방위각은 측정하는 것이다(Trnkoczy *et al.*, 2002; Güralp systems, 2014).

이 연구에서는 Shin *et al.* (2009)의 방법을 이용하여 2014년 6월을 기준으로 국내 시추공 지진계의 방위각을 측정하였다. 그리고 향후 설치될 시추공 지진계들의 방위각을 효과적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하기 위해, 상시 지진 잡음의 상호상관을 이용한 시추공 지진계 방위각 측정법을 검토하고 배경 잡음 수준 변화에 따른 시추공 지진계 방위각 측정값의 변화를 분석하였다.

2. P파의 분극 특성을 이용한 시추공 지진계의 방위각 측정

지진파는 각 파형(phase)에 따라 입자 운동 양상이 다르기 때문에 3성분 지진기록으로부터 분극 특성을 분석하여 지진의 P파, S파, Lg파 등을 구분하는데 이용할 수 있다(Jurkevics, 1988; Kim *et al.*, 2000). 특히 P파는 지진원으로부터 방사 방향으로 진동하며 전파하므로 P파의 분극 특성을 이용해 관

Table 1. Source parameters of earthquakes used in this study (from IRIS).

Origin time (UTC)	Hypocenter			Magnitude (Mw)
	Latitude (°)	Longitude (°)	Depth (km)	
2013/06/02 05:43:03	23.79	121.14	17	6.2
2013/07/21 23:45:56	34.51	104.26	8	5.9
2013/08/11 21:23:43	30.08	97.93	19.7	5.7
2013/08/31 00:04:18	28.23	99.37	9.8	5.6
2013/09/19 21:37:04	37.75	101.51	20	5.0
2013/10/15 00:12:32	9.88	124.12	19	7.1
2013/10/15 08:36:20	9.83	124.26	7	5.6
2013/10/15 08:42:49	9.79	123.69	16	5.7
2013/10/25 17:10:19	37.16	144.66	35	7.1
2013/10/25 21:27:34	37.11	144.67	10	5.5
2013/10/27 18:13:06	37.09	144.57	20	5.5
2013/10/31 03:03:34	44.71	124	10	5.1
2013/10/31 12:02:08	23.59	121.44	10	6.3
2013/11/09 22:37:50	35.92	139.97	64	5.6
2013/11/12 07:03:51	54.69	162.3	43	6.4
2013/11/15 02:00:33	41.43	142.18	46	5.5
2013/11/16 11:44:41	35.6	140.15	59	5.5
2013/11/22 22:04:25	44.6	124.17	10	5.3
2013/11/25 05:56:50	45.56	151	34	6.0
2013/12/03 23:58:49	6.62	126.17	30	5.6
2013/12/08 17:24:54	44.44	149.17	28	6.0
2013/12/14 04:06:15	35.65	140.65	42	5.5
2013/12/17 23:38:06	20.77	146.79	9	6.2
2013/12/21 01:34:13	35.61	140.65	35	5.5
2013/12/23 06:57:29	35.69	142.14	8	5.6
2013/12/23 09:12:27	12.77	143.04	92	5.8
2013/12/28 19:31:23	20.76	146.67	12	5.6
2013/12/31 20:01:06	19.12	120.27	11	5.7
2014/01/04 05:23:00	36.97	143.38	22	5.5
2014/01/04 19:34:25	56.75	129.53	1	5.3
2014/01/23 04:59:49	13.36	146.13	7	5.8
2014/01/23 05:23:59	13.39	146.18	10	5.7
2014/02/23 04:54:18	43.51	147.77	20	5.5
2014/03/13 17:06:50	33.68	131.82	79	6.3
2014/03/19 12:19:26	24.11	122.26	20	5.8
2014/03/29 01:53:57	36.32	141.84	20	5.5
2014/03/31 19:48:36	36.94	124.46	17	5.0
2014/04/02 23:22:47	39.16	141.8	58	5.6
2014/04/30 06:20:55	43.03	94.26	10	5.3
2014/05/02 09:15:20	37.85	144.23	16	5.6
2014/05/03 10:57:13	22.28	144.01	90	5.6
2014/05/05 11:08:43	19.66	99.67	6	6.1
2014/05/15 10:16:42	9.38	122.06	16	6.3
2014/05/21 00:21:12	23.76	121.5	13	5.6
2014/05/23 19:42:26	56.05	113.9	3	5.4
2014/05/23 20:49:21	24.97	97.84	8	5.8
2014/05/30 01:20:15	25	97.85	10	5.9
2014/05/30 15:26:14	9.39	126.47	15	5.7
2014/06/07 13:11:35	50.68	157.07	41	5.5
2014/06/14 17:31:41	39.44	140.99	92	5.5
2014/06/15 18:19:14	36.6	141.72	16	5.5
2014/06/15 20:14:50	37.1	141.11	45	5.6
2014/06/29 05:56:31	24.39	142.63	48	6.2

Table 2. Estimated orientation of borehole velocimeter.

Station code	Network*	Number of data	Average (°)	Standard deviation (°)	Median (°)	Median absolute deviation (°)	Data period
BOSB	KS	20	326.4	3.9	326.9	4.4	2013.10.15-2014.06.29
DACB	KS	20	92.4	6.3	93.1	5.2	2013.06.02-2014.06.29
EMSB	KS	26	23.0	7.2	23.8	4.9	2013.07.21-2014.06.29
EURB	KS	15	254.0	4.2	252.8	3.0	2013.10.25-2014.06.29
GAHB	KS	26	229.3	4.9	228.8	2.4	2013.07.21-2014.06.29
GOCB	KS	16	125.0	5.4	126.4	3.3	2013.06.02-2014.06.29
GSU	KG	16	212.3	36.0	203.3	38.7	2013.06.02-2014.06.29
GWYB	KS	16	236.7	4.1	237.3	3.6	2013.06.02-2014.06.29
HALB	KS	8	138.7	95.6	153.3	121.1	2013.07.21-2014.06.29
HAMB	KS	21	235.0	4.4	234.4	2.8	2013.10.15-2014.06.29
HAWB	KS	22	113.8	3.5	113.1	3.7	2013.10.25-2014.06.29
HDB	KG	19	228.3	11.0	224.1	7.8	2013.06.02-2014.06.29
HSB	KG	26	133.8	4.7	132.4	3.8	2013.06.02-2014.06.29
HWCB	KS	24	357.6	5.4	357.5	2.7	2013.07.21-2014.06.29
HWSB	KG	2	293.1	14.8	293.1	15.6	2013.07.21-2013.08.11
IMWB	KS	18	163.9	7.2	164.9	4.9	2013.06.02-2014.06.29
JJB	KG	11	240.1	112.8	301.0	84.0	2013.10.15-2014.06.29
JRB	KG	23	168.4	8.4	168.9	6.9	2013.07.21-2014.06.29
JSB	KG	16	114.7	6.5	117.5	2.7	2013.06.02-2014.06.29
KOHB	KS	9	169.6	9.1	174.9	4.6	2013.07.21-2014.02.23
		9	356.5	8.1	357.1	8.9	2014.03.19-2014.06.29
MGB	KG	23	4.0	5.3	2.4	4.3	2013.06.02-2014.06.29
NAWB	KS	24	208.8	5.8	207.9	6.9	2013.07.21-2014.06.29
OKCB	KS	26	106.5	4.0	106.8	3.1	2013.06.02-2014.06.29
OKEB	KS	15	341.8	4.3	341.1	4.1	2013.07.21-2014.06.29
SEHB	KS	24	285.1	6.7	286.4	5.6	2013.07.21-2014.06.15
SHHB	KS	14	34.4	4.4	35.1	4.6	2013.07.21-2014.06.29
SMKB	KS	12	357.6	3.8	357.0	3.0	2013.08.31-2014.03.31
		8	194.6	5.9	193.8	3.3	2014.04.02-2014.06.29
ULLB	KS	15	340.0	29.4	344.0	12.5	2013.10.25-2014.06.29
YKB	KG	30	173.0	13.9	178.8	10.4	2013.06.02-2014.06.29
YNCB	KS	29	331.6	21.5	338.8	6.3	2013.07.21-2014.06.29
YSB	KG	19	346.2	6.0	347.5	7.8	2013.06.02-2014.06.29

* KS and KG represent the seismic networks of the Korea Meteorological Administration and the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, respectively.

측소에서 진앙을 바라본 방향인 후방 방위각(back azimuth)을 측정할 수 있다.

만일 지진계가 진복을 가리키며 설치되었다면 P 파의 후방 방위각은 지진관측소와 진앙의 지리적인 분포를 이용해 계산한 각도와 일치할 것이다. 따라서 P파의 후방 방위각과 지진관측소와 진앙의 지리적인 분포를 이용해 얻은 후방 방위각을 비교하면 시추공

지진계가 가리키는 방위각을 측정할 수 있다. Shin *et al.* (2009)은 이러한 P파의 분극 특성을 이용해 2008년 9월 기준으로 운영 중이었던 9개 광대역 시추공 관측소의 방위각 보정값을 추정한 바 있다. 이 연구에서도 Shin *et al.* (2009)에서 사용한 Jurkevics (1988)의 방법을 이용해 P파 후방 방위각을 측정하였다.

미국 지진연구협회(Incorporated Research Insti-

Table 3. Estimated orientation of borehole accelerometer.

Station code	Network	Number of data	Average (°)	Standard deviation (°)	Median (°)	Median absolute deviation (°)	Data period
BOSB	KS	3	296.7	3.7	297.8	2.7	2013.10.15-2013.10.27
		3	5.3	3.5	6.1	3.4	2013.11.25-2013.12.31
DACB	KS	4	328.6	6.9	328.8	7.4	2013.10.25-2013.12.08
EMSB	KS	4	237.3	6.0	237.6	6.1	2013.07.21-2013.11.09
EURB	KS	1	46.1	-	46.1	-	2013.10.25
GAHB	KS	4	282.1	1.2	282.0	0.9	2013.07.21-2013.12.08
GOCB	KS	5	311.9	6.5	313.4	3.1	2013.10.25-2013.12.08
GSU	KG	8	52.1	5.9	50.0	5.0	2013.07.21-2014.06.29
GWYB	KS	1	196.2	-	196.2	-	2013.10.15
HAMB	KS	2	218.8	4.9	218.8	5.1	2013.11.25-2013.12.08
HAWB	KS	8	212.4	5.5	215.4	1.9	2013.10.25-2013.11.25
HDB	KG	11	3.3	9.8	3.9	8.9	2013.07.21-2014.06.29
HSB	KG	19	77.6	4.9	76.8	4.4	2013.06.02-2014.06.29
HWCB*	KS	9	349.9	8.8	351.3	8.6	2013.07.21-2013.12.08
HWSB	KG	18	5.7	10.4	2.6	6.9	2013.06.02-2014.06.29
IMWB	KS	1	167.0	-	167.0	-	2013.07.21
JRB	KG	21	208.8	9.9	211.1	8.5	2013.06.02-2014.06.29
JSB	KG	19	69.8	8.1	69.6	7.9	2013.06.02-2014.06.29
KMSA	KS	3	43.2	7.5	45.2	6.3	2013.10.25-2013.12.08
KUJA	KS	1	217.0	-	217.0	-	2013.10.27
MGB	KG	13	221.9	8.1	221.0	7.5	2013.06.02-2014.06.29
MIYA	KS	2	223.0	2.1	223.0	2.3	2013.07.21-2013.10.27
NAWB	KS	1	330.3	-	330.3	-	2013.10.25
OKCB	KS	2	349.9	1.1	349.9	1.1	2013.10.25-2013.11.09
OKEB	KS	4	234.7	2.7	234.5	2.9	2013.07.21-2013.11.25
PORA*	KS	4	268.5	5.3	267.7	3.9	2013.06.02-2013.10.31
SHHB	KS	1	139.1	-	139.1	-	2013.10.25
SMKB	KS	6	84.0	7.2	84.7	9.2	2013.07.21-2013.12.31
SUCA	KS	2	158.5	1.4	158.5	1.5	2013.10.25-2013.10.27
		1	233.1	-	233.1	-	2013.12.08
ULLB	KS	3	169.0	11.5	164.2	5.0	2013.10.25-2013.12.08
YAPA*	KS	3	67.2	0.8	67.5	0.5	2013.07.21-2013.12.08
YKB	KG	18	178.9	4.7	179.8	4.2	2013.06.02-2014.06.29
YNCB	KS	7	321.0	6.9	320.9	7.6	2013.07.21-2013.12.21
YSB	KG	5	355.2	9.8	351.2	11.0	2013.10.25-2014.06.29

* Accelerometers at these stations were replaced but the changes in their back azimuths lied within in the error range.

tutions for Seismology, IRIS)의 지진 목록으로부터 2013년 6월부터 2014년 6월까지 총 13개월 동안 북위 36°, 동경 128°를 중심으로 진앙거리 40° 이내에서 발생한 규모 6.0 이상의 지진을 선정하였다. 가급적 모든 방향의 지진 기록을 사용하기 위해 6.0 이

상의 지진이 발생하지 않았던 중국, 러시아 지역과 같은 서북 방향은 규모 5.0 이상의 지진을 추가하여 총 53개 지진의 3성분 기록을 방위각 추정에 사용하였다(그림 1; 표 1).

기록된 원시자료에서 평균값과 선형 기울기를 제

거하고 10% 코사인 테이퍼링을 적용한 다음 0.5~5 Hz 구간의 4 pole butterworth 대역통과 필터를 적용하였다. 그리고 표 1에 제시된 각 지진의 진원 정보와 IASP91 (Kennett and Engdahl, 1991) 1차원 속도구조 모델을 이용하여 P파 도달시간을 산출하고, P파 도달시간 전후 총 4분간의 지진자료에 대해 Sheen *et al.* (2012)에 제시된 STA/LTA법을 사용하여 P파를 검출하였다. 이때 STA, LTA 시간창의 길이는 각각 0.1초, 10초로 사용하였으며, STA/LTA 비는 15를 기준으로 하였다. 그리고 검출된 P파 도달시간 전후 4초 동안의 3성분 진폭의 제곱합으로부터 Shin *et al.* (2009)에 제시된 신호대 잡음비(SNR)를 측정하고 SNR이 10 dB 이상인 지진 기록만 사용하여 P파의 후방 방위각을 결정하였다. P파의 3

성분 기록을 이용해 후방 방위각을 결정하는 방법은 Jurkevics (1988)에 의해 자세히 소개되어 있으므로, 이 논문에서는 개략적으로만 기술한다.

STA/LTA법을 이용해 검출한 P파 도달시간 0.5초 전부터 총 4초 동안의 3성분 지진 기록을 서로 상호상관하여 3×3 크기의 공분산 행렬을 만들어 고유치와 고유벡터 계산한 다음 고유벡터의 수평성분들로부터 후방 방위각 측정하였다. 공분산 행렬의 고유치는 주축(principal axis)의 상대적인 크기를 나타내며 입자 운동의 특징인 직선형도(recilinearity)와 평면형도(planarity)로 나타낼 수 있는데(Jurkevics, 1988), 이 연구에서는 직선형도와 평면형도가 각각 0.8 이상일 때의 P파 후방 방위각만 방위각 측정에 사용하였다.

이 연구에서 측정한 시추공 광대역 속도계 31개와 시추공 가속도계 33개의 N성분 센서가 가리키는 방위각을 표 2와 3에 제시하였다. 이 연구에서는 평균과 중앙값을 모두 측정하였지만, 자료 수가 적은 관측소의 방위각을 제시하기 위해 중앙값을 사용하였으며, 이들의 산포도를 나타내는 중앙값 절대 편차(median absolute deviation)를 이용해 방위각의 신뢰도를 판단하였다. 광대역 속도계 중에서 GSU, HALB, JJB는 매우 큰 방위각 편차를 보였으며, HWSB, ULLB, YKB도 10° 이상의 편차가 나타났다. KOHB와 SMK는 시추공 지진계의 교체로 인한 지진계 방위각의 변화가 관찰되었는데 이 관측소의 자료는 사용에 주의가 필요할 것으로 보인다. 2014년 6월 기준으로 운영 중인 시추공 가속도계 중에서 HALB, KOHB, SEHB의 가속도계는 분석에 필요한 조건을 충족시키는 자료가 없기 때문에 방위각을 측정할 수 없었으며, JJB 관측소의 가속도계는 4개의 지진 기록으로부터 방위각을 측정하였으나 편차가 너무 크기 때문에 방위각 측정값을 제시할 수 없었다. BOSB, SUCA 관측소의 가속도계도 지진계 교체로 인해 방위각의 변화가 관찰되었다. HWCB, PORA, YAPA 관측소의 가속도계는 관측소 정비 이력에 지진계의 교체가 명시되어 있었으나 시추공 방위각의 변화가 오차 범위 내에 존재하므로 하나의 값만 제시하였다.

Shin *et al.* (2009)에서 측정한 광대역 속도계의 방위각과 본 연구에서 추정한 방위각과의 차이는 표 4에 제시하였다. 본 연구에서 편차가 작아 안정적인

Table 4. Comparison of orientation of borehole velocimeter.

Station	Previous study (°)	This study (°)	Difference (°)
GSU	217.4	203.3	14.1
HSB	135.7	132.4	3.3
HWSB	301.0	293.1	7.9
JJB	124.2	301.0	-176.8
JRB	166.3	168.9	-2.6
JSB	114.5	117.5	-3.0
MGB	225.8	5.6	220.2
ULLB	350.6	344.0	6.6
YKB	169.0	178.8	-9.8

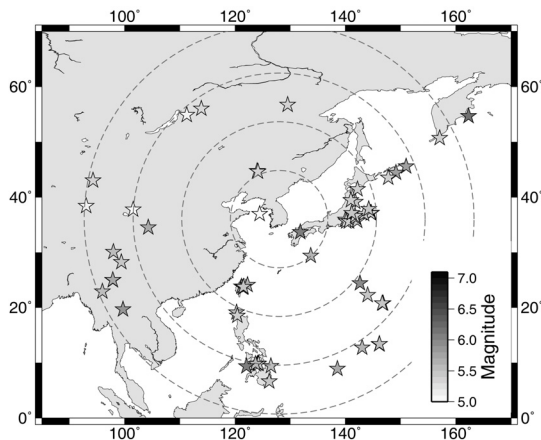


Fig. 1. Epicenter of earthquakes used in this study. Dashed circles represent epicentral distances of 10°, 20°, 30°, and 40°, respectively, from a reference location of 36°N and 128°E.

로 방위각이 측정된 것으로 판단되는 HSB, JRB, JSB 관측소는 이전 연구 결과와 매우 유사한 값으로 결정되었다. MGB 관측소는 본 연구에서 작은 값(4.3°)의 편차를 보였음에도 이전 연구와 큰 방위각 차이를 보였는데, 이는 MGB 관측소의 광대역 속도계가 2013년 1월에 다시 설치되었기 때문이다. JJB 관측소의 광대역 속도계는 표준편차(112.8°)나 중앙값 절대편차(84.0°)가 매우 크게 나타났으며 결정된 방위각은 이전 연구와 약 180° 의 차이를 보였다. P파의 후방방위각을 결정하는 과정에서 180° 방향의 불안정성을 가질 수 있으므로(Shin *et al.*, 2009), 이전 연구 결과(124.2°)와 90° 이상 차이를 보이는 측정값에 180° 보정 할 경우 중앙값은 135.9° 로 계산되었다. 이는 큰 편차를 보였던 다른 관측소(GSU, HWSB, ULLB, YKB)와 비슷한 수준의 차이를 보이는 것으로 판단된다.

3. 상시 지진 잡음을 이용한 시추공 지진계의 방위각 측정

상시 지진 잡음의 상호상관을 이용한 시추공 지진계의 방위각 측정법을 검토하기 위해 한국지질자원연구원에서 운영하는 HWSB 시추공 지진관측소 부지 내의 시추공과 매우 근접한 지표에 광대역 속도계(CMG-3T)를 진복에 맞춰 설치하여 2014년 8월 말부터 10월 초까지 지진동을 기록하였다.

HWSB 관측소에는 시추공 광대역 속도계(CMG-3TB)와 시추공 가속도계(ES-DH)가 설치되어 있는데, 비교에 사용하는 모든 지진계에 동일한 형태의 상시 지진 잡음이 기록되어 있어야 하므로 각 지진계에 기록된 상시 지진 잡음을 먼저 살펴보았다. 그림 2는 지표에 설치한 광대역 속도계(SB)와 시추공 광대역 속도계(BB), 시추공 가속도계(BA)에서 약 한 달 동안 관측한 수직 성분 자료로부터 Sheen *et al.* (2009)이 사용한 McNamara and Buland (2004)의 방법을 이용하여 배경잡음 수준을 분석한 것이다.

국내에 설치된 대부분의 지진관측소는 1 Hz 이상의 주파수 대역에서 인간 활동에 의한 영향을 받기 때문에 야간에 비해 주간에 높은 수준의 잡음이 기록되는 것으로 알려져 있다(Cho *et al.*, 2009; Sheen *et al.*, 2009). 그림 2에서도 이를 확인할 수 있는데, 모든 지진계에서 1 Hz 이상 주파수 대역의 잡음이 bimodal

형태로 높은 수준의 잡음과 낮은 수준의 잡음으로 나뉘는 것을 볼 수 있다. 그런데 높은 수준의 잡음은

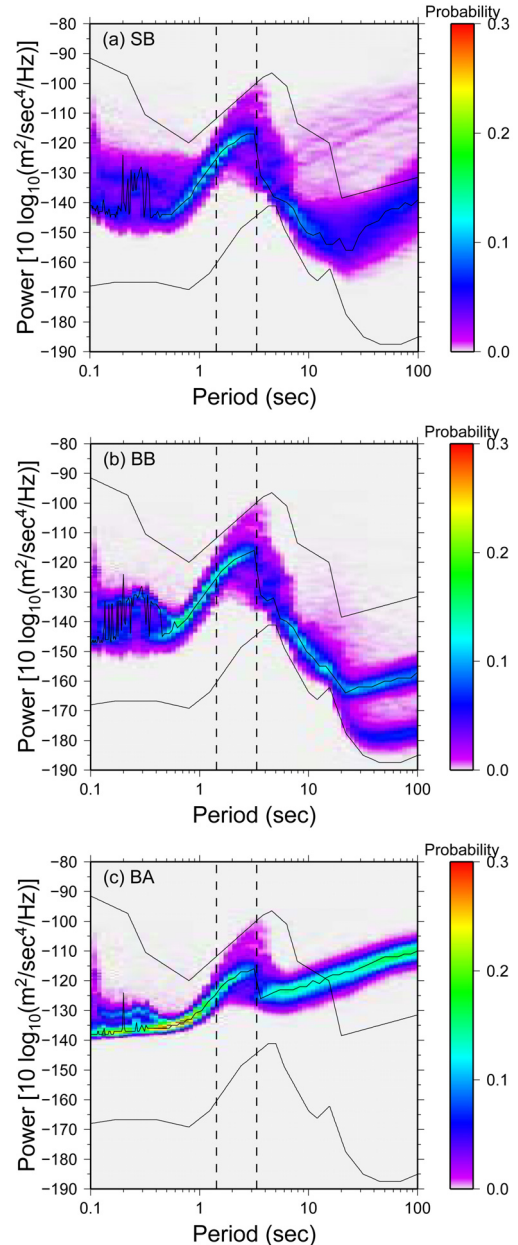


Fig. 2. Seismic noise levels for (a) the reference broadband velocimeter installed at the surface, (b) borehole broadband velocimeter, and (c) borehole accelerometer at station HWSB during the period from late August 2014 to early October 2014. Dashed lines indicate the frequency band of the secondary microseism, from 0.3 to 0.7 Hz.

모든 지진계에서 비슷한 값을 가지는 것으로 관측되었지만, 낮은 수준의 잡음에서는 가속도계가 광대역 속도계보다 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

모든 지진계는 어느 정도의 내부 잡음(intrinsic noise) 또는 자체 잡음(self noise)을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 대체로 가속도계는 광대역 속도계 보다 높은 수준의 내부 잡음(intrinsic noise)을 가진다(Havskov and Alguacil, 2004). 따라서 그림 2에서 가속도계는 높은 수준의 내부 잡음으로 인해 잡음 수준이 -140 dB 이하로 내려가지 않은 것으로 보인다.

0.3~0.7 Hz 주파수 구간에서는 세 지진계가 서로 비슷한 높은 수준의 잡음이 관측되었다. 이 주파수 대역의 상시 지진 잡음은 해양에서 발생하여 대륙 내부까지 전파되는 2차 맥동(secondary microseism)에 해당되며(McNamara and Buland, 2004), 국내에서도 잘 관찰되는 것으로 알려져 있다(Cho *et al.*,

2009; Sheen *et al.*, 2009).

시추공 가속도계인 ES-DH의 모서리 주파수는 1 Hz 이지만, 최근 사용되는 지진계는 모서리 주파수의 5배 범위까지 지진동을 관측할 수 있다고 한다(Havskov and Alguacil, 2004). 천부 매질의 영향으로 인해 고주파수 신호보다 저주파수 신호를 사용하는 것이 시추공 지진계 방위각 측정에 더 효과적인 것으로 알려져 있으므로(Trnkoczy *et al.*, 2002), 이 연구에서는 0.3~0.7 Hz 구간에 기록된 상시 지진 잡음을 이용하여 방위각을 측정하였다.

그림 3은 약 한달 동안 세 지진계의 수직 성분에 기록된 0.5 Hz 주파수 신호의 시간에 따른 잡음 수준 변화를 도시한 것이다. -123 dB 이상의 맥동이 기록된 시기에는 세 지진계가 거의 동일한 값을 보여 주지만, 그 이하인 경우 가속도계는 광대역 속도계들과는 다른 값을 보여준다. 이러한 현상도 가속도계가 가진 내부 잡음에 기인한 것으로 -123 dB 이하

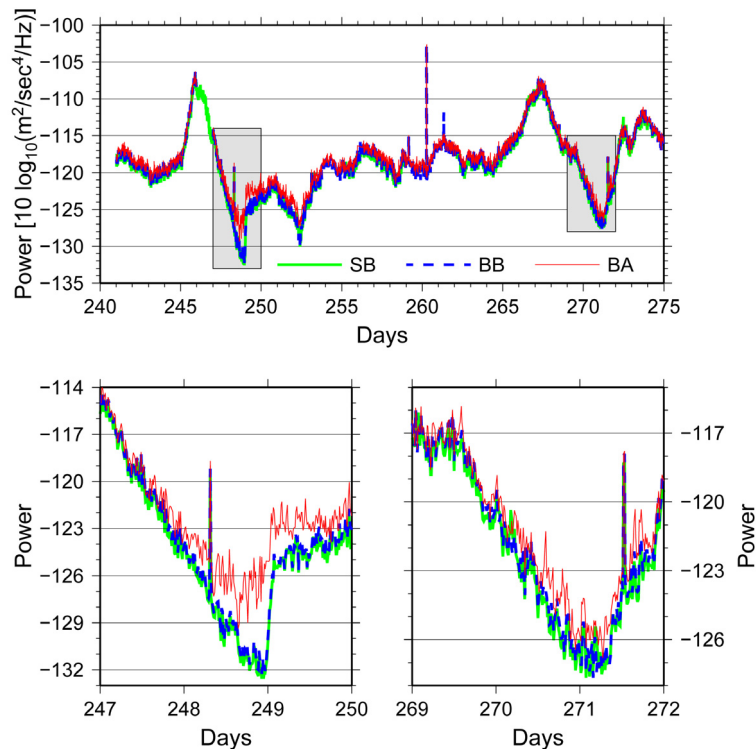


Fig. 3. Variation of seismic noise level at the frequency of 0.5 Hz during the period from late August 2014 to early October 2014. SB, BB, and BA represent surface broadband velocimeter, borehole broadband velocimeter and borehole accelerometer, respectively. Days in the abscissa denotes the Julian day, the continuous count of days since the beginning of the year.

의 2차 맥동 또한 내부 잡음의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

국내에서 주로 사용하는 광대역 시추공 지진계인 CMG-3TB의 제조사에서는 상시 지진 잡음을 이용해 시추공 지진계의 방위각을 측정할 수 있는 기능을 포함한 Scream 이라는 소프트웨어를 제공하고 있다. 이 소프트웨어는 시추공 지진계에 기록된 상시 지진 잡음의 수평 성분을 조금씩 회전시키면서 기준 지진계의 남북 방향 자료와의 상관도를 비교하여 가장 높은 상관도를 나타내는 회전각을 시추공 지진계의 방위각으로 결정한다(Güralp systems, 2014). 그런데 이 소프트웨어는 지진계의 계기보정을 하지 않기 때문에 기준 지진계가 시추공 지진계와 다른 응답 함수를 가진 지진계인 경우에는 방위각을 측정할 수 없다.

이 연구에서는 Scream을 사용하지 않고, 기준 지진계와 시추공 지진계의 잡음을 직접 비교하여 시추공 지진계의 방위각을 결정하였다. 이를 위해 세 지진계의 수평 성분 자료를 한 시간 단위로 자르고 각 지진계의 계기 응답 함수를 제거하였다. 가속도 자료는 속도 자료로 변환하였으며, 모든 지진 자료는 0.3~0.7 Hz 구간의 대역 통과 필터를 적용하였다. 이와 같이 준비된 상시 지진 잡음들을 시간 영역과 주파수 영역에서 검토하여 이상이 있는 자료들은 분석에서 제외하였다.

시추공 지진계의 수평 성분을 1° 단위로 회전 시키면서, 기준 지진계와의 상관계수를 계산하였다. 이때 지진 파형의 위상 정보만을 이용하는 1 비트 표준화(one-bit normalization) 방법(C1)과 파형 전체를 사용하는 일반적인 상관계수 측정 방법(C2)을 사용하여 비교하였다. 두 방법 모두 가장 높은 상관계수를

보여주는 회전각이 시추공 지진계의 방위각이 되는데, 남북, 동서 성분의 상관계수 최대값(CC_N , CC_E)에 해당하는 각도(A_N , A_E)와 두 계수의 평균이 최대(CC_T)가 되는 각도(A_T)를 구분하여 비교하였다.

그림 4는 배경잡음 수준에 따른 상관계수 최대값의 변화를 보여준다. (a)와 (b)는 SB-BB (Surface Broadband velocimeter-Borehole Broadband velocimeter)의 상관계수를 측정한 것이며 (c)와 (d)는 SB-BA (Surface Broadband velocimeter-Borehole Accelerometer)의 상관계수를 측정한 것인데, (a)와 (c)는 C1의 방법을 사용하였으며 (b)와 (d)는 C2의 방법을 사용하였다. 정삼각형과 역삼각형은 각각 CC_N , CC_E 를 의미하며, 원은 두 상관계수의 평균이 최대가 될 때의 값, CC_T 를 나타낸다. 수평 축은 시추공 지진계의 수평 성분의 평균 잡음 수준을 의미한다. 광대역 속도 계끼리의 상관계수(a, b)는 시추공 가속도계와의 상관계수(c, d)와 달리 배경잡음 수준 변화에 따른 영향이 적어 낮은 잡음 수준에서도 상관계수가 크게 변하지 않았으며 C2를 이용한 방법에서는 대체로 0.8 이상의 값을 유지하였다. C1을 이용한 최대 상관계수(a, c)는 C2를 이용한 것(b, d)보다 작게 측정되었으며 가속도 자료와의 상호상관에서는 배경잡음 수준에 매우 민감하여 -130 dB 이하의 낮은 수준의 잡음에서 상관계수가 0.4 이하의 낮은 상관도를 보였다.

C1은 시추공 광대역 지진계와 가속도계의 A_T 를 각각 $204.4 \pm 0.7^\circ$, $358.9 \pm 1.6^\circ$ 로 측정하였으며, C2는 $204.4 \pm 0.5^\circ$, $358.8 \pm 0.6^\circ$ 로 서로 비슷한 값을 보여주었다. 그런데 광대역 속도계의 방위각은 표 3에 제시된 HWSB 관측소의 방위각(293.1°)과 많은 차이를

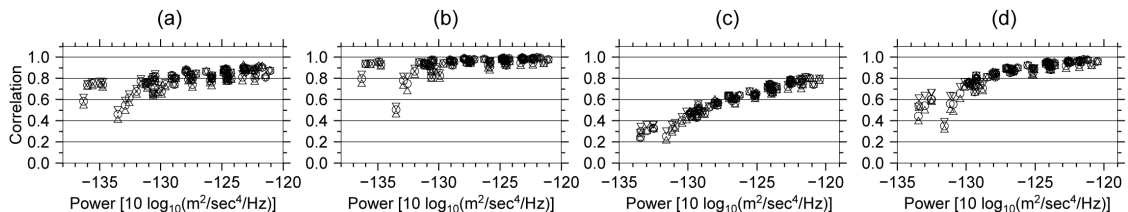


Fig. 4. Plots of the largest value of cross-correlation coefficient versus seismic noise level. (a) and (b) are obtained from the cross correlation between surface broadband velocimeter and borehole broadband velocimeter, (c) and (d) from the cross correlation between surface broadband velocimeter and borehole accelerometer. Correlation coefficients of (a) and (c) are measured by one-bit normalization method and those of (b) and (d) by full waveform cross correlation method. Inverted, normal triangles and circles represent the coefficients of EW, NS components and average of the two components, respectively.

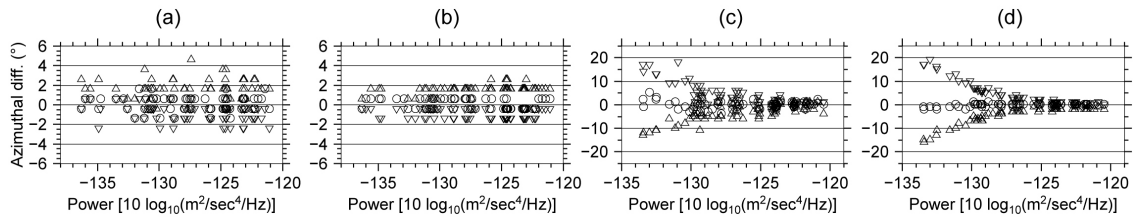


Fig. 5. Plots of the azimuthal difference from the average of orientation of borehole seismometer versus seismic noise level. The order of figures and the symbols are the same as the previous figure.

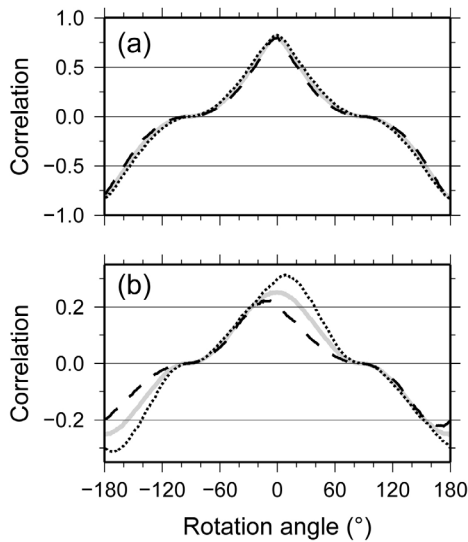


Fig. 6. Variation of cross correlation coefficient during the rotation of horizontal seismograms for (a) high noise level and (b) low noise level. Short dashed line, long dashed line and gray solid line represent coefficients of EW, NS components and the average of the two coefficients, respectively.

보이는데, 이는 2014년 7월에 HWSB 관측소의 광대역 속도계를 교체했기 때문이다.

배경잡음 수준과 시추공 지진계의 방위각 측정값과의 상관관계 보여주기 위해 방위각의 평균값과 매 시간 측정된 방위각과의 차이를 그림 5에 도시하였다. 그림의 순서와 기호는 그림 4와 동일하다. C2를 사용해 측정된 방위각(b, d)가 C1을 사용한 것(a, c)보다 훨씬 안정적으로 방위각을 측정할 수 있는 것을 알 수 있다. 광대역 속도계를 이용해 측정된 방위각(a, b)은 잡음 수준의 변화에 거의 영향을 받지 않았으며 상호 상관에 사용한 자료의 성분과 관계없이 대부분 $\pm 5^\circ$ 내에서 방위각이 측정되었다. 그런데 시추공 가속도계의 방위각(c, d)에서는 각 성분별로 측

정한 A_N , A_E 는 잡음 수준이 낮아질수록 편차가 매우 크면서 서로 대칭적으로 분포하였다. 이에 반해 A_T 는 잡음 수준에 크게 영향을 받지 않았다.

그림 6은 배경잡음 수준이 높은 9월 25일(268일)과 잡음 수준이 낮은 9월 9일(252일)의 시추공 기록을 회전시키면서 측정된 상호상관 계수의 변화를 보여준다. 짧은 점선은 동서 방향 기록의 상관계수, 긴 점선은 남북 방향의 상관계수를 의미하며 회색 실선은 두 상관계수의 평균이다. 잡음 수준이 높은 경우에는 두 수평 성분의 상관계수가 1에 가까우면서 서로 비슷한 경향을 가지며 측정되었지만 낮은 잡음 수준에서는 상관계수가 최대가 되는 회전각이 서로 일치하지 않으며, 상관계수도 낮게 나타났다. 그런데 낮은 수준의 잡음에서 측정된 두 상관계수 평균의 최댓값에 해당하는 회전각은 높은 수준의 배경잡음에서 최대 상관계수를 보이는 각도와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 5에서 두 상관계수의 평균이 잡음 수준 변화에 큰 영향을 받지 않고, 비교적 일정한 측정값을 보여주는 것을 잘 설명한다.

4. 토의 및 결론

2013년 6월부터 2014년 6월까지 우리나라 주변에서 발생한 규모 5.0 이상 53개 지진의 P파 후방 방위각을 이용해 2014년 6월 현재 국내에서 운영 중인 시추공 광대역 속도계 31개와 가속도계 33개의 방위각을 측정하였다. 이 중에서 GSU, HALB, JJB 관측소의 광대역 속도계는 측정된 방위각의 편차가 크기 때문에 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한 KOHB, SMKB 관측소의 광대역 속도계와 BOSB, SUCA 관측소의 가속도계는 2013년 6월부터 2014년 6월까지의 기간 중에 지진계의 방위각이 변경되었으며, HWSB 관측소의 광대역 속도계도

2014년 7월에 교체되었으므로 자료 사용에 주의가 필요할 것으로 보인다.

지진의 P파 분극 특성을 이용해 시추공 지진계의 방위각을 측정할 때, 가급적 다양한 방향에서 발생한 지진 자료들을 사용하는 것이 바람직하다. 지진의 방향에 따라 지진계의 방위각 측정값에 차이가 있을 수 있기 때문이다(Shin *et al.*, 2009), 이러한 자료가 축적되려면 시추공 지진계를 설치한 이후 비교적 긴 시간이 필요하다. 따라서 새로운 설치한 시추공 지진계의 방위각 측정에는 지표에 설치한 기준 지진계와 시추공 지진계에 기록된 상시 지진 잡음과 비교하는 방법이 사용된다.

이 방법의 효과적인 사용을 위해 HWSB 지진관 측소에 약 한 달 동안 지표에 기준 지진계를 설치하여 상시 지진 잡음을 관측하고, 이를 이용한 시추공 지진계 방위각 측정법을 검토하였다. 시추공 가속도계는 내부 잡음으로 인해, 2차 맥동이 잘 관찰되는 0.3~0.7 Hz 주파수 대역에서 -123 dB 이하의 낮은 수준의 상시 지진 잡음을 정확히 기록할 수 없음을 확인하였으며, 정확한 방위각 측정을 위해서는 잡음 수준 측정도 병행되어야 할 것이다. 또한 상시 지진 잡음의 상호상관계수를 측정할 때 1 비트 표준화법에 비해 파형 전체를 이용하는 상호상관법이 잡음 수준의 영향을 적게 받았다. 특히 두 수평성분 중 한 성분의 상호상관계수의 최댓값만을 비교하여 시추공 지진계의 방위각을 결정하는 것보다는 두 성분의 상호상관 계수들의 평균이 최댓값 대 해당하는 회전각을 방위각으로 결정하는 것이 시추공 지진계 방위각 결정의 정확성과 안정성을 높일 수 있음을 확인하였다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-5021)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cho, B.-J., Sheen, D.-H., Jo, B.-G., Park, S.-C. and Hwang, E.-H., 2009, Development of a standard background noise model for broadband seismic stations of KMA. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 127-141
- (in Korean with English abstract).
- Ekström, G. and Busby, R.W., 2008, Measurements of seismometer orientation at USArray transportable array and backbone stations. *Seismological Research Letters*, 79, 554-561.
- Guralp systems, 2014, <http://www.guralp.com/howtos/determining-sensor-orientation.shtml> (November, 6, 2014).
- Havskov, J. and Alguacil, G., 2004, *Instrumentation in earthquake seismology*. Springer, Dordrecht, 360 p.
- Jurkevics, A., 1988, Polarization analysis of three-component array data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 1725-1743.
- Kennett, B.L.N. and Engdahl, E.R., 1991, Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 122, 429-465.
- Kim, W.H., Park, J.C. and Cho, H.S., 2000, Phase identification using rectilinearity and planarity functions based on wavelet transforms of three component seismograms. *Journal of the Geological Society of Korea*, 36, 153-162 (in Korean with English abstract).
- McNamara, D.E. and Buland, R.P., 2004, Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94, 4, 1517-1527.
- Sheen, D.-H., Shin, J.S. and Kang, T.-S., 2009, Seismic noise level variation in South Korea. *Geosciences Journal*, 13, 183-190.
- Sheen, D.-H., Lim, I.-S., Park, J.H. and Chi, H.-C., 2012, Earthquake magnitude determination using P phase for earthquake early warning. *Journal of the Geological Society of Korea*, 48, 101-111 (in Korean with English abstract).
- Sheen, D.-H., 2013, Earthquake locationing with Bayesian theory for earthquake early warning. *Annual Conference of the Geological Society of Korea (Abstracts)*, Jeju, October 23-27, 6 p (in Korean).
- Shin, J.S., Sheen, D.-H. and Shin, I.C., 2009, Orientation correction for borehole seismic stations in South Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 47-54 (in Korean with English abstract).
- Trnkoczy, A., Bormann, P., Hanka, W., Holcomb, L.G. and Nigbor, R.L., 2002, Site Selection, Preparation and Installation of Seismic stations in New Manual of Seismological Observatory Practice, Bormann, P., ed., Potsdam: GeoForschungsZentrum. ISBN 3-9808780-0-7.

Received : December 29, 2014

Revised : January 25, 2015

Accepted : January 26, 2015