

# 배경잡음 자료를 이용한 국내 가속도 관측망의 방위각 보정값 측정

이 상 준\*

고려대학교 기초과학연구원, 02841, 서울특별시 성북구 안암로 145

## Determining the Orientation of Accelerograph Stations in South Korea using Ambient Noise Data

Sang-Jun Lee\*

The Institute of Basic Science, Korea University, Seoul 02841, Korea

**Abstract:** Orientation corrections for the total of 268 accelerograph stations of the Korea Meteorological Administration (KMA) were estimated using ambient noise cross-correlation. As this method uses ambient noise data instead of teleseismic waveforms from earthquakes under certain conditions, reliable orientation corrections can be obtained using only two-month long continuous seismic data from dense seismic networks in the Korean peninsula. Three-component continuous data recorded at the 268 accelerograph stations from January to February 2020 were used to estimate orientation corrections. The results are comparable to the previous results obtained from teleseismic waveforms; the overall standard deviations of the orientation corrections are less than  $5^\circ$ . Therefore, orientation corrections for the accelerograph station network can be tracked periodically by the ambient-noise method and the result can be used in various studies using the horizontal-component of acceleration data.

**Key words:** orientation correction, ambient noise cross-correlation, accelerograph stations, bore-hole stations:

**요약:** 기상청에서 운용하는 268개의 가속도 관측망에 대한 방위각 보정값을 측정하기 위해 배경잡음 교차상관 방법을 사용하였다. 이 방법은 배경잡음 자료를 사용하기 때문에 원거리 지진자료를 사용하는 방법과 달리 특정 조건에 맞는 지진을 선정할 필요가 없고, 한반도와 같은 조밀한 관측망에 적용하여 단기간의 연속 파형 자료만을 사용해 신뢰할 수 있는 방위각 보정값을 측정할 수 있다. 계산에는 2020년 1월부터 2020년 2월까지 총 268개의 기상청 가속도 관측망에 기록된 3성분 연속 파형 자료를 사용했다. 계산된 결과를 보면 기존에 원거리 지진자료를 사용한 결과와 매우 유사하며, 기존 결과에서 누락된 가속도 관측소들을 포함한 대부분 관측소의 방위각 보정 계산 결과가 표준편차  $5^\circ$  이하로 안정적으로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구들에서 사용한 방법을 활용해 기상청 가속도 관측소에 대한 방위각 보정값을 지속적으로 모니터링하고 측정된 결과를 활용하면, 가속도 자료의 수평 성분을 활용한 다양한 연구들에 활용할 수 있을 것이다.

**주요어:** 방위각 보정, 배경잡음 교차상관, 가속도계, 시추공 관측소

## 서론

기상청에서는 2021년 3월 기준, 총 265개의 가속도

계 관측소를 운용 중이다. 이 중 50개소는 지표형 가속도계를 사용하며, 215개소는 지하 20~100 m 지점에 설치된 시추공 관측소이다. 이러한 가속도계는 3성분(N, E, Z)로 구성되어 3차원적인 지반 운동을 관측하는데, 정밀한 관측을 위해서는 3성분의 방향이 정확하게 설치되어야 한다. 한편, 관측소의 개수와 기기의 정확도 증가 및 다양한 위상정보를 활용하는 연구 방법들의 발전에 따라 가속도 자료를 활용한 수신 함수 역산, 배경잡음 토모그래피, 최대지반 가속도 측정, 모멘트텐서 파형 역산 등과 같은 연구들에서 수

\*Corresponding author: stonbear@korea.ac.kr  
Tel: +82-10-2368-0785

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.

평 성분(N, E) 자료에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 수평 성분이 올바르게 설치되지 않은 경우, 북남(N) 혹은 동서(E) 방향에 대해 반시계방향으로 틀어진 정도인 방위각 보정값(Orientation correction)을 측정해야 한다. 특히 시추공 관측소의 경우 설치 혹은 정비 과정에서 수평 성분의 방향이 틀어지는 경우가 많기 때문에 수평 성분에 대한 방위각 보정값을 필수적으로 측정해야 한다.

지진계의 방위각을 측정하는 방법에는 크게 실제 지진파를 사용하는 방법과 배경잡음 자료를 사용하는 방법이 있다. 지진 파형을 사용하는 방법에는 원거리 지진의 후방위각 정보(Back Azimuth)와 P파 혹은 레일리 파(Rayleigh wave) 등의 극성을 분석하는 방법(Shin et al., 2009; Stachnik et al., 2012; Lee and Sheen, 2015), 방사형(Radial) 혹은 접선형(Tangential) 수신함수의 방위각에 따른 진폭비를 활용하는 방법(Lim et al., 2018; Kim and Rhie, 2019), 관측된 지진 파형과 이론적 합성 파형의 유사성을 측정하는 방법(Ekstrom and Busby, 2008) 등을 주로 사용한다. 기상청은 위 방법 중 Lee and Sheen (2015)에서 제안한 방법을 사용해 측정된 기상청 시추공 관측소에 대한 방위각 보정값을 매년 “지진관측자료 품질분석 보고서”를 통해 제공하고 있다(KMA, 2019). 이와 같은 지진 파형을 사용한 방위각 보정방법을 사용하기 선정되는 지진은 사용하는 방법들에 따라 특정 조건에 맞는 위치에서 발생한 것이어야 하며, 신호대 잡음비 향상을 위해 특정 규모 이상이어야 하는 제약이 있다. 이 때문에 가용한 자료의 길이에 따라 사용할 수 있는 지진의 개수가 제한될 수 있고, 관측소의 위치에 따라서는 사용할 수 있는 지진의 발생 위치가 편향적으로 집중되어 특정 방향의 지진파 전파효과가 나타나거나 제한된 자료의 개수로 인해 결과가 왜곡될 수 있는 단점이 있다(Laske, 1995).

반면, 배경잡음 자료를 사용하는 방법은 동일한 기간 동안 두 개의 지진계에 기록된 배경잡음 자료의 교차상관(Cross Correlation)을 계산하여 얻은 두 관측소 사이를 전파하는 레일리파의 역행 타원운동(Retrograde Elliptical Motion)특성을 활용한다(van Wijk et al., 2011; Zha et al., 2013; Lee and Rhie, 2015). 이 방법은 배경잡음 자료를 사용하기 때문에 특정 조건에 맞는 지진을 선정할 필요가 없고, 한반도와 같은 다수의 조밀한 관측망에 적용할 경우, 30일 정도의 단기간의 연속 파형 자료만을 사용하더라

도 신뢰할 수 있는 방위각 보정 값을 측정할 수 있다(Zha et al., 2013; Lee and Rhie, 2015).

한편, 한반도에 설치된 광대역 관측소에 대한 방위각 보정값 연구들(Lee and Sheen, 2015; Lee and Rhie, 2015; Lim et al., 2018; Kim and Rhie, 2019)은 다수 진행됐지만, 가속도계 관측소의 경우 일부 시추공 관측소에 대한 결과(Han and Hahm, 2016)만 계산됐으며, KMA (2019)에서도 117개의 시추공 관측소에 대한 방위각 계산 결과만을 보여준다. 이에 본 연구에서는 Lee and Rhie (2015)의 배경잡음 교차상관 방법을 가속도계 특성에 맞게 적용하여 기상청 전체 가속도 관측소에 대한 방위각 보정값을 계산하였다.

## 자료 및 연구 방법

이 연구에는 2020년 1월부터 2020년 2월까지 50일 동안 기상청 가속도 관측소에 기록된 3성분 연속 파형 자료를 사용하였다. 방위각 보정값 추정 대상 관측소의 개수는 총 268개소로 지표형 50개소, 시추공 218개소로 구성되어 있으며 해당 시기에는 BUS2, CHJ2, SEO2가 BUS3, CHJ3, SEO3와의 교체를 위해 동일한 위치에서 중복으로 운용되었다(Fig. 1). 각 관측소의 연속 자료에서 평균(Mean), 추세(Trend), 계기반응(Instrument Response)을 제거하고, 100 Hz에서 10 Hz로 다운 샘플링하였다. 전체 연속 자료는 1시간

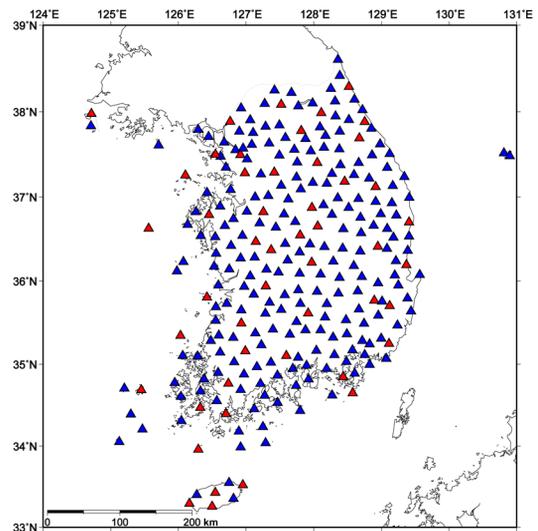


Fig. 1. Location of surface stations (red) and borehole stations (blue).

간격의 시간창(Time Window)으로 나누었으며, 이때 각 시간창이 30분씩 겹치도록 하여 한 관측소에 대해 각 성분별로 최대 2399개의 시간창을 얻었다. 그리고 각 시간창 중에서 최대 진폭이 전체의 평균제곱근(Root-mean-square)의 10배 이상 큰 시간창을 버려 지진과 같은 배경잡음 이외의 신호를 제거하였다 (Bensen et al., 2007; Lee and Rhie, 2015). 이어 별도의 시간영역에 대한 정규화(Normalization) 없이 주파수 영역에서 Spectral Whitening을 적용하였다. 전처리 이후에 모든 관측소 쌍에 대해 Z-Z, N-Z, E-Z 성분 사이의 교차상관을 각 시간창에 대해 계산하고 중첩(Stack)하여 교차상관 함수(CCF, Cross-Correlation Function) 구하고 이를 CZZ, C1Z, C2Z로 정의한다.

방위각 보정값의 계산은 Lee and Rhie (2015)의 방법을 따르되 가속도계의 계기응답(Instrumental Response) 및 교차상관 함수로부터 레일리 파 신호가 강한 주파수 영역을 고려하여, 광대역 관측소의 경우(0.05~0.45 Hz)와 다르게 0.1~1 Hz의 대역 필터를 적용하였다. CZZ의 힐버트 변환(Hilbert Transform) 함수 C'ZZ를 구하고, C1Z, C2Z를 반시계 방향으로 1°씩 회전시켜가며 구한 C'1Z, C'2Z 중 C'2Z와 C'ZZ사이의 교차상관 정규계수(NCC, Normalized Correlation Coefficient)가 가장 큰 회전값을 각 관측소 쌍에 대해 구한다. 이 때, 교차상관 정규계수는 다음과 같이 정의한다.

$$NCC = \frac{\rho(C_{2z}', C_{zz}')}{\sqrt{\rho(C_{2z}', C_{2z}')\rho(C_{zz}', C_{zz}')}} \quad (1)$$

이때,  $\rho(C_{2z}', C_{zz}')$ 는 영지연교차상관(zero-lag cross-correlation)을 의미한다. 그리고 개별 관측소에 대해 나머지 267개 관측소와의 교차상관 정규계수가 최대가 되는 회전값을 각각 구한다. 사용한 주파수 대역(0.1~1 Hz)과 관측소 사이 거리를 고려하여, 레일리 파가 최소 1파장 이상 포함될 수 있도록, 가장 가까운 관측소 10곳을 제외하고 차순위 50개 관측소에 대한 회전값을 평균하여 해당 관측소에 대한 방위각 보정값을 최종적으로 계산하였다(Lee and Rhie, 2015; Lee et al., 2021).

## 방위각 보정값 결과

기상청 가속도계 관측소에 대한 방위각 보정 결과는 Table 1과 같다. 계산된 결과를 보면 전체 관측소

중 258개 관측소(96.2%)의 방위각 보정값의 표준편차가 5° 미만으로 나타나고 있으므로 대체로 방위각 보정값이 안정적으로 계산되었음을 확인할 수 있다. 표준편차가 5° 이상인 관측소의 경우 KMA (2019)에서도 10~60°으로 크게 관측되며, 방위각 보정값 계산에 사용된 각 관측소 회전값의 교차상관 정규계수의 최대값이 0.7 미만으로 측정되며, 특히 울릉도(TAHA, ULDR)의 경우, 교차상관 정규계수의 최대값이 0.3 미만으로 계산된다. 나머지 관측소들의 교차상관 정규계수의 최소값이 0.8 이상인 것으로 보아 부지효과, 관측소 품질관리 이슈 등의 이유로 인해 계산이 안정화되지 않은 것으로 보인다. 또한, 표준편차가 5° 미만인 관측소의 경우 KMA (2019)에서 표준편차가 10° 미만인 방위각 보정 결과와 대체로 일치하는 것을 확인할 수 있다. 청일(CGIA), 개천(GACA) 등과 같은 일부 관측소는 2018년 이후 2020년까지 각각 약 180° 혹은 90° 가량 방위각이 틀어진 것으로 계산되며, 관측소 코드가 SAJA에서 SAJB로 변경된 상주 관측소와 같은 경우는 광대역 가속도 관측소로 변경되는 과정에서 기존 약 122° 틀어져 있던 방위각을 바로잡은 것으로 보인다.

일반적으로 관측소의 방위각이  $\pm 10^\circ$  이상 틀어지면 수평 성분을 활용한 연구들에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lim et al., 2018; Kim and Rhie, 2019; Lee et al., 2021). 표준편차를 고려하여 총 268개 관측소 중에서 방위각이 15° 이상 틀어진 것으로 측정되는 관측소는 72개소(26.9%)이며 이중 지표형 관측소는 7개소, 시추공 관측소는 65개소이다(Fig. 2). 지표형 관측소만을 비교했을 때 전체의 약 14.3%, 시추공 관측소의 약 28.8%가  $\pm 10^\circ$  이상 방위각이 틀어져 있는 것으로 측정되며, 이는 향후 지속적인 모니터링을 통해 방위각 보정값을 정기적으로 제공함으로써 해결할 수 있을 것으로 보인다.

## 결론 및 토의

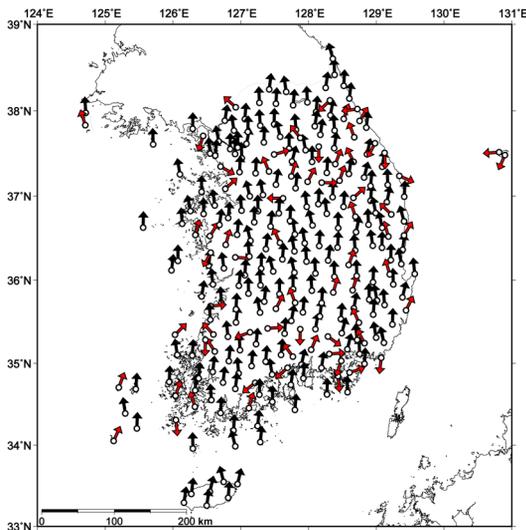
본 연구에서는 배경잡음 교차상관을 이용한 방위각 보정값 결정 방법을 기상청에서 운용하는 가속도 관측소에 적용하여 총 268개 관측소에 대한 방위각 보정값을 측정하였다. 계산된 결과는 원거리 지진자료의 파형 극성을 사용하여 계산한 KMA (2019)의 결과와 매우 유사하며, 해당 보고서에 누락되어 있는 지표형 및 시추공 가속도 관측소에 대한 방위각 보

**Table 1.** Mean and standard deviation of orientation corrections for accelerometer stations

Station	Mean (degree)	Std (degree)	Station	Mean (degree)	Std (degree)	Station	Mean (degree)	Std (degree)
ADO2	8.3	2.3	DACB	17.3	2.2	GUWB	-20.2	2.4
ADOA	-12	2.7	DAG2	0.5	2.8	GWLA	-14.5	3.0
AGSA	-6.9	2.1	DAGA	-16.2	2.3	GWYB	131	2.0
AMD	-45	2.2	DDCA	-4.1	2.0	HACA	-9.9	2.5
ANMA	-15.6	2.6	DEI2	9.4	2.3	HADA	36	50.4
ASNA	4.1	3.0	DGHA	-0.1	2.3	HAIA	-9	2.0
BAR2	3.4	1.5	DGJA	7.4	2.8	HALB	-7.1	2.5
BAU	-5.5	2.6	DGLA	6.8	2.4	HAMB	-10.5	2.1
BGDB	-2.4	2.1	DGY2	20.4	2.5	HANB	3.9	2.5
BKWA	-27.8	2.4	DKSA	-3.1	2.5	HAWA	-4.5	2.5
BLGA	-1.3	2.6	DNBA	-3.4	3.4	HAWB	-47.2	4.2
BLLA	8.7	2.0	DNYA	-2	2.9	HCNA	-6.9	1.9
BOGA	10.2	1.9	DUSB	0.5	3.3	HEDA	-18.9	1.9
BON2	7.6	2.4	ECDB	-7.3	3.2	HESA	11.1	3.1
BOSB	127.9	2.6	EMSB	89.3	3.0	HGDB	-20.6	29.4
BSAA	173.4	2.2	EURB	-125.9	2.2	HGSA	-8.1	2.9
BURB	-16.4	3.0	EUSB	4.2	2.9	HMGA	5.6	1.9
BUS2	13.6	1.4	GACA	-85.9	2.3	HMPA	32.5	2.7
BUS3	11.6	1.5	GAGA	1.6	2.9	HOCA	37.9	3.2
BUSA	-47.7	34.6	GAPB	-1.1	3.2	HONA	24.6	3.0
BUYB	-93.8	2.4	GBI2	-1.3	2.6	HTDA	8.2	2.5
CEA2	1.1	2.3	GDDB	-2.9	2.3	HUK2	-4.5	2.0
CEJA	-5.8	3.1	GEJB	2.3	2.1	HWCA	-5.4	2.9
CGAA	-2.6	2.8	GGDA	1.3	1.8	HWCB	8.1	2.7
CGDA	-10.7	2.4	GGDB	-24.2	2.3	HWDB	-2.2	2.0
CGIA	179.9	1.3	GGGA	-6.8	2.3	HWSA	8.3	2.4
CGPA	4.7	2.1	GGSA	-12.2	2.5	ICN2	22.8	1.9
CGUB	-0.1	1.8	GGTA	8.5	1.1	IJA2	-5.1	1.9
CGWB	-13.8	3.1	GH2B	162.1	2.7	IJAA	-10.6	2.8
CGYA	-15.6	2.1	GICA	2.9	2.0	IJBA	133.9	3.6
CHC2	4.5	2.7	GIGA	15.8	3.1	IJDB	8.4	2.4
CHDA	-6.2	2.0	GKSA	-6	3.2	IKSA	-3.2	3.1
CHJ2	6.2	2.6	GLCA	-18.6	4.4	IMSB	10.9	2.3
CHJ3	6.1	2.8	GLSA	-32.2	2.5	IMWB	-113	2.5
CHOA	0.2	2.2	GMDB	-5.8	2.4	INCA	-5.6	1.7
CHRB	-4.9	1.2	GMHB	-7	3.1	ISGB	-6.6	2.4
CHYB	-4.5	3.1	GMNA	-13.1	3.1	JAEA	10.4	2.2
CIGB	0.8	3.6	GMPB	10.9	2.9	JAGA	5.6	2.1
CJDB	-5.9	2.2	GOCB	42.8	2.2	JAHA	-7.2	2.8
CJD	1.2	2.6	GODA	-0.6	1.8	JASA	-27.3	2.9
CLSA	-15.1	2.2	GOS2	-8.2	3.5	JCUA	-3.9	1.9
CPR2	3.5	2.1	GSGA	-0.7	2.6	JDO2	17.3	1.9
CSDB	-4	3.8	GSNA	10.4	3.4	JECB	-90.9	2.2
CSOA	-1.2	2.7	GUJA	14.3	3.8	JEJB	-26.3	4.5
CWO2	-3.5	1.3	GUMA	-8.2	2.4	JEO2	2.6	2.3

Table 1. Continued

Station	Mean (degree)	Std (degree)	Station	Mean (degree)	Std (degree)	Station	Mean (degree)	Std (degree)
JESA	26	3.8	NJDA	0.2	1.5	TOHA	182.3	2.5
JEU2	-6.9	1.9	NLDA	-1.1	1.9	TOY2	185.7	10.1
JGNA	3.5	1.8	NOSA	5	2.1	UDO	-13.4	2.3
JINA	-22.8	2.1	OKCB	10.2	2.3	UJBA	-1.7	2.2
JJU2	-13.2	1.3	OKEB	151.7	2.8	UJNA	-2.9	2.2
JKJA	-0.6	3.0	OYDB	-0.1	2.7	ULDR	156.3	27.1
JLSA	-3.7	1.9	PGEA	18.1	2.9	ULJ2	15	4.0
JMJ2	-30.7	3.0	PHA2	10	3.8	UNCA	-1.9	1.7
JNHA	2.2	1.3	PORA	151.6	3.7	USN2	4.6	1.7
JNPA	-2.8	2.8	PTKA	13.3	3.5	WAN2	-3.1	1.7
JNUA	-0.5	2.0	PUAA	3.9	2.1	WICA	20.2	2.2
JNYA	6.2	2.1	PYCA	-8.8	1.1	WJU2	-0.5	2.7
JODB	185.4	1.9	PYCB	-21.1	2.6	WNBA	11.1	3.5
JUCA	27.9	17.3	PYSB	-4.8	1.8	YAGA	-14.9	2.8
JURA	-11.6	3.0	SACA	178.9	1.9	YALB	-3.3	1.8
KAWA	-6.5	3.1	SAJB	-3.1	3.6	YAPA	-74.2	2.4
KCH2	-4.9	1.9	SCHA	-5	1.8	YAYA	-6.8	2.9
KH2B	-1.2	2.0	SECA	7.8	1.9	YAYB	97.4	2.7
KKDA	-15.5	2.4	SEO2	-0.2	3.3	YC2B	48.1	4.4
KMSB	14.6	4.3	SEO3	-5.1	3.4	YCHB	0.4	3.5
KOJ2	13.8	1.5	SES2	0.5	2.8	YDGA	12.6	3.1
KOSB	15.1	3.6	SESA	-8.4	1.8	YEAB	2.5	3.2
KUJA	-72.3	4.0	SGMA	3.8	2.1	YEGA	178.8	1.5
KWJ2	2.9	1.8	SGNA	1.7	6.7	YESA	-8.1	1.7
LIWA	-5	2.9	SGP2	-8.4	3.6	YEYB	11.1	3.7
LMGA	-12.9	3.8	SH2B	-8	1.1	YGAA	-15.8	2.0
MALA	-5.8	1.5	SHHB	-119.5	3.6	YGBA	-13.4	2.5
MANA	-4.1	2.6	SIJA	-6.2	2.0	YGGA	2.9	3.3
MGY2	14.6	1.7	SKBA	15.8	2.6	YGJA	161	3.7
MIYA	23.5	3.6	SKC2	-3.1	1.8	YINB	-3	3.2
MJDB	-2	1.5	SLSA	-9.5	1.5	YJD3	5.2	1.4
MLGA	9.3	6.8	SMKB	-84.7	3.2	YKDB	-1.3	3.3
MMD	1.8	3.0	SMWA	3.6	2.6	YNDB	-5	3.2
MNDB	-4.7	2.8	SNDA	-9	3.4	YOA	-6.5	2.4
MND	-9.5	2.5	SNGB	-9.3	2.0	YOCB	-2.5	3.0
MOGA	12.4	3.1	SNNA	0.9	3.1	YODB	-30.9	4.4
MOPB	-4.8	1.5	SODA	-0.3	2.6	YOGA	2.1	1.9
MSNA	-4.3	4.1	SUBA	45.6	2.8	YOJB	-3.9	2.1
MUS2	-9.4	3.8	SUCA	109.8	2.7	YOW2	-18.6	4.2
NACA	7.1	2.6	SWO2	-3	2.9	YPDB	1.8	2.2
NAHA	-3.8	3.3	TAHA	94	20.3	YSAB	-6	2.5
NAJA	-5.5	2.0	TAIA	-3.2	1.8	YSDA	13.7	47.3
NAMB	4.5	2.8	TANB	3.9	3.0	YUGA	-5.9	3.2
NAWB	-85.2	2.3	TBA2	-5.7	3.2			
NCNA	-9.1	1.9	TEJ2	-7	3.0			



**Fig. 2.** Map showing sensor orientations of N-component estimated in this study. Red arrows represent stations with orientation correction exceeding  $\pm 15^\circ$  and black arrows indicate the other stations.

정값을 포함하여 전체 관측소에 대해 표준편차  $5^\circ$  미만으로 안정적으로 측정되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구들에서 사용한 방법을 활용해 기상청 가속도 관측소에 대한 방위각 보정값을 지속적으로 모니터링하고 측정된 결과를 활용하면, 가속도 자료의 수평 성분을 활용한 수신합속 역산, 배경잡음 토모그래피, 최대지반 가속도 측정, 모멘트텐서 파형 역산 등과 같은 연구들에 활용할 수 있을 것이다.

## References

- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M., Yang, Y., 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169, 1239-1260.
- Ekstrom, G., and R. W. Busby, 2008, Measurements of seismometer orientation at USArray Transportable Array and Backbone stations, *Seismological Research Letters*, 79(4), 554-561.
- Han, A., and Hahm I., K., 2016, Orientation correction of borehole seismometers using P-wave polarization in South Korea, *The Geological Society of Korea*, 159-159
- Kang, T. S., and Shin, J. S., 2006, Surface-wave tomography from ambient seismic noise of accelerograph networks in southern Korea, *Geophysical Research Letters*, 33, L17303.
- Kim, S., and Rhie, J., 2019, Calculation of Station-Representative Isotropic Receiver Functions. *Pure and Applied Geophysics*, 176(6), 2367-2382.
- KMA (Korea Meteorological Administration), 2019, 2018 annual quality analysis report of seismic data. Korea Meteorological Administration, Seoul, South Korea, available at: <https://dl.nanet.go.kr/file/fileDownload.do?linkSystemId=NADL&controlNo=MONO1201945473> (last access: 11 March 2021), 38-829 p.
- Laske, G., 1995, Global observation of off-great-circle propagation of long-period surface waves, *Geophysical Journal International*, 123(1), 245-259.
- Lee, S. J., Kim, S., Rhie, J., Kang, T. S., and Kim, Y., 2021, Upper crustal shear wave velocity and radial anisotropy beneath Jeju Island volcanoes from ambient noise tomography. *Geophysical Journal International*.
- Lee, S. J., and Rhie, J., 2015, Determining the orientations of broadband stations in South Korea using ambient noise cross-correlation. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 18(2), 85-90.
- Lee, H., and Sheen, D. H., 2015, A study on determination of orientation of borehole seismometer, *Journal of the Geological Society of Korea*, 51(1), 93-103 (in Korean with English abstract).
- Lim, H., Kim, Y., Song, T. R. A., & Shen, X., 2018, Measurement of seismometer orientation using the tangential P-wave receiver function based on harmonic decomposition. *Geophysical Journal International*, 212(3), 1747-1765.
- Shin, J. S., Sheen, D. H., 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).
- Stachnik, J. C., Sheehan, A. F., Zietlow, D. W., Yang, Z., Collins, J., Ferris, A., 2012, Determination of New Zealand ocean bottom seismometer orientation via Rayleigh-wave polarization, *Seismological Research Letters*, 83(4), 704-713.
- van Wijk, K., Mikesell, T. D., Schulte-Pelkum, V., Stachnik J., 2011, Estimating the Rayleigh-wave impulse response between seismic stations with the cross terms of the Green tensor, *Geophysical Research Letters*, 38, L16301.
- Zha, Y., Webb, S. C., Menke, W., 2013, Determining the orientations of ocean bottom seismometers using ambient noise correlation. *Geophysical Research Letters*, 40(14), 3585-3590.

Manuscript received: March 11, 2021

Revised manuscript received: April 14, 2021

Manuscript accepted: April 14, 2021