

## 배경잡음 교차상관을 이용한 국내 광대역 지진계의 방위각 보정값 측정

이상준 · 이준기\*

서울대학교 지구환경과학부

### Determining the Orientations of Broadband Stations in South Korea using Ambient Noise Cross-correlation

Sang-Jun Lee and Junkee Rhie\*

*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University*

**요약:** 배경잡음 교차상관을 이용하여 국내에 설치된 지표 및 시추공 관측소 지진계의 방위각 보정값을 계산하였다. 이 방법은 원거리 지진자료를 사용하던 기존 연구들과는 달리 배경잡음 자료를 이용하며, 수직-수직성분 배경잡음 교차상관 함수를 90° 위상변화시키면 수직-방사성분 교차상관함수의 위상과 일치하게 된다는 특성을 이용한다. 2007년 1월부터 2008년 9월까지의 연속 자료를 중합하여 계산한 결과는 원거리 지진자료를 이용하여 계산된 이전 연구결과와 매우 유사하며, 계산 결과의 표준편차도 대부분 5° 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 한편, 자료를 30일씩 중합하여 계산한 결과 역시 표준편차가 5° 이하로 낮게 계산되며, 시간에 따른 방위각 보정값의 변화가 거의 없는 것으로 미루어 2007년 1월부터 2008년 9월 사이 기간에는 전체 관측소의 지진계 방위각이 크게 바뀌지 않은 것으로 보인다. 배경잡음 교차상관 분석 방법의 중합기간에 대한 민감도를 분석한 결과, 국내 지진관측소에 대한 신뢰할 수 있는 방위각 보정값을 얻는데 필요한 배경잡음 연속 기록의 최소 기간은 30일 정도로 추정된다.

**주요어:** 방위각 보정값, 배경잡음 교차상관, 시추공 지진 관측소

**Abstract:** Orientation corrections for Korean seismic stations were calculated by using ambient noise cross-correlation. This method uses Rayleigh waves extracted from ambient noise cross-correlation instead of teleseismic waveforms from earthquakes, which have been generally used for previous studies. The theoretical background of the method is that the phase of radial-vertical cross-correlation function should be the same as that of 90° phase-shifted vertical-vertical cross-correlation function. The results calculated from stacked cross-correlograms from Jan. 2007 to Sep. 2008 are comparable to the previous results obtained from teleseismic waveforms. In addition, overall the standard deviations of orientation corrections are less than 5°. The temporal variation in orientation corrections calculated for every 30 days shows no significant change and also standard deviations of them are mostly less than 5°. This means that the orientations of stations used in this study have been kept constant during the period. The sensitivity test for stacking period of the ambient noise cross-correlation method shows that continuous ambient noise record of at least about 30 days is required for estimating reliable orientation corrections.

**Keywords:** orientation correction, ambient noise cross-correlation, bore-hole seismograph station

Received: 30 April 2014; Final version Received: 13 May 2015; Accepted: 22 May 2015

\*Corresponding author

E-mail: rhie@snu.ac.kr

Address: School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

©2015, 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.

## 서 론

국내에 설치된 상시 광대역 관측소는 약 60개소로 기상청, 한국지질자원연구원, IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) 등에서 운영 중이다. 이 중 절반에 해당하는 30여 곳은 지진계가 지하 20 ~ 100 m 지점에 설치되어 있는 시추공 관측소이다. 지하는 지표면에 비해 배경잡음의 세기가 낮기 때문에 시추공에 지진계를 설치하면 신호대 잡음의 비율이 높아져서 작은 신호도 관측이 가능하다는 장점이 있다. 현재 사용되는 지진계들은 대부분 지반의 3차원적인 운동을 관측하기 위하여 3성분(북-남, 동-서, 상-하)의 센서로 구성되어 있으며, 정확한 관측을 위해서는 수평 성분 센서를 방향에 맞게 설치하거나 관측 자료의 보정을 위하여 수평 성분 센서가 틀어진 각도를 측정하여야 한다. 여기서 수평 성분 센서가 틀어진 각도는 방위각 보정값(Orientation correction)이라고 부르고 동-서 성분 센서의 방향이 정동에서부터 시계 반대 방향으로 얼마나 틀어져 있는지를 측정하는 것으로 정의한다. 관측 자료의 보정이 이루어지지 않을 경우 수평 성분 파형 자료를 필요로 하는 모멘트 텐서 파형역산, 수신함수 분석 등과 같은 중요한 연구들을 수행 할 수 없게 된다. 시추공 관측소의 경우 지진계의 방향이 틀어지게 설치되는 경우가 많기 때문에 필수적으로 수평 성분 센서의 방위각 정보가 제공되어야 하지만 현재 기상청과 한국지질자원연구원에서는 운영하는 시추공 지진계의 방위각 정보를 제공하고 있지 않다. 지진계의 방위각 측정을 위해서는 크게 두 가지 방법이 사용된다. 첫 번째는 지진자료를 사용하는 방법이고, 다른 하나는 배경잡음 자료를 이용하는 방법이다. 지진자료를 사용하는 방법 중에는 발생위치를 알고 있는 지진의 P파 혹은 레일리 파(Rayleigh wave)의 극성을 분석하거나(Shin *et al.*, 2009; Stachnik *et al.*, 2012; Lee and Sheen, 2015), 합성파형과 관측파형의 상관성을 분석하는 방법(Ekstrom and Busby, 2008)이 많이 사용된다. 하지만 이러한 방법들은 신호대 잡음비가 높은 지진파형 자료를 확보할 수 있을 때만 적용이 가능하기 때문에 정확한 방위각 측정을 위해서는 적절한 지진의 발생을 기다려야 하고, 지진파가 대원 경로(Great Circle Path)를 따라 전파한다는 가정을 사용하기 때문에 측정에 사용한 지진들의 후방위각(Back Azimuth)이 한 쪽 방향으로 치우쳐 있을 경우 속도 구조에 수평적 변화에 따른 파선 휘어짐(Ray Bending)의 영향으로 결과가 왜곡될 가능성이 있다(Laske, 1995). 두 개의 지진계에 기록된 배경잡음의 교차상관으로부터 두 관측소 사이를 전파하는 레일리 파를 추출할 수 있다는 사실은 이미 수 많은 연구에서 증명 되었다(e.g., Shapiro, 2004; Bensen *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2008; Kang and Shin, 2006). 배경잡음 교차상관을 이용하여 지진계의 방향을 측정하는 방법은 레일리 파가 전파할 때 지표에서 역행 타원운동(Retrograde Elliptical Motion)을 하기 때문에 지진계에 기록된 레일리 파의 수직성분(Vertical Component)과

방사성분(Radial Component) 사이에는 90°의 위상차이가 있어야 한다는 성질을 이용한다(van Wijk *et al.*, 2011; Zha *et al.*, 2013). 다시 말하면 진원에 해당하는 A 관측소와 수신기에 해당하는 B 관측소의 수평 성분 센서가 모두 방향에 맞게 놓여져 있을 경우 A 관측소의 수직성분 배경잡음과 B 관측소의 수직성분 배경잡음의 교차상관함수를 힐버트 변환(Hilbert Transform)을 이용하여 90°의 위상변화를 시키면 A 관측소의 수직성분 배경잡음과 B관측소의 방사방향 배경잡음의 교차상관함수와 진폭은 다를 수 있지만 형태가 일치해야 한다는 뜻이다. 배경잡음을 이용하는 방법은 지진을 기다릴 필요가 없다는 장점과 함께 일반적으로 지진계 사이의 거리가 지진-지진계 사이의 거리보다 짧기 때문에 파선 휘어짐 효과가 적고, 균일하게 설치된 많은 지진계의 방위각을 동시에 측정할 경우 여러 방향의 자료를 이용할 수 있기 때문에 파선 휘어짐의 영향을 더 줄일 수 있다는 장점이 있기 때문에 한반도와 같이 조밀하게 지진계가 설치된 지역에 적용하기 좋은 방법이다(Zha *et al.*, 2013). 따라서, 본 연구에서는 Zha *et al.* (2013)에서 제시한 배경잡음 교차상관 방법을 한반도 관측소 상황에 맞게 적용하여 시추공 관측소의 방위각 보정값을 측정하였다.

## 자료 및 방위각 보정값 측정 방법

본 연구에서는 2007년 1월부터 2008년 9월 사이에 기상청 및 지질자원연구원의 30개 관측소에 기록된 3성분 연속파형 자료를 사용하였다(Fig. 1). 이 기간을 선택한 이유는 같은 기간 동안 관측된 원거리 지진의 P파 입자운동 자료를 분석하여 방위각 보정값을 계산한 Shin *et al.* (2009)의 연구 결과와의 비교를 통해 본 연구에서 사용한 방법의 타당성을 검증하기 위해서이다.

획득한 자료에서 평균(Mean), 추세(Trend), 계기반응(Instrument Response)을 제거한 후 초당 20 샘플로 기록된 자료를

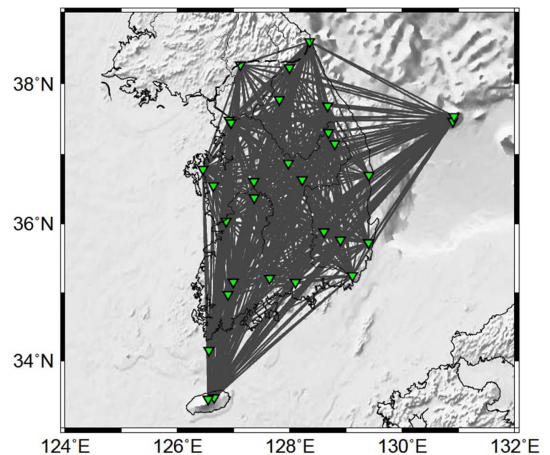


Fig. 1. Distribution of broadband stations and possible paths to calculate cross-correlation functions (CCFs).

초당 1 샘플로 다운샘플링하였다. 이어 연속자료를 30분씩 겹치게 1시간 간격의 시간창(Time Window)으로 나눈 후 0.01에서 0.45 Hz의 대역필터를 적용하였다. 이 때 지진신호와 같은 비정상적인 신호를 제거하기 위하여 각 시간창내에서 가장 큰 진폭값이 해당 시간창 전체의 제곱평균근(Root-mean-square)보다 10배 이상 클 경우 해당 시간창은 계산에서 제외하였고, 추가로 시간영역에서 One-bit 정규화(Normalization)와 주파수 영역에서 Spectral Whitening을 적용하여 이상 신호의 영향을 최소화 하였다.

위와 같이 전 처리를 마친 후 모든 관측소 쌍 별로 교차상관을 계산하였다. 각 관측소 쌍에 대하여, 진원에 해당하는 관측소의 상-하 성분과, 수신기에 해당하는 관측소의 3성분(상-하, 동-서, 북-남)에 대해 각각 교차상관을 계산하여 교차상관 함수(CCF, Cross-Correlation Function)를 구하였다. 이 때 수신기에 해당하는 관측소의 실제 수평성분 방향을 모르기 때문에 북-남 성분을 1, 동-서 성분을 2로 정의하여 교차상관 함수를 계산하였다. 이렇게 각 구간에 대해 계산된 교차상관 함수를 두 가지 방법으로 중합(Stack)하여 보정값을 계산하였다. 첫 번째는 2007년 1월부터 2008년 9월 사이 전체 구간에 대하여 하나의 방위각 보정값을 계산한 Shin *et al.* (2009)의 결과와의 비교를 위하여 전체 구간에 대하여 중합한 후 보정값을 계산하였다. 두 번째는 관측소 방위각 보정값이 기기 수리 등의 이유로 기간별로 달라질 가능성을 고려하여 15일씩 겹치도록 30일 간격으로 중합하여 총 41개의 기간에 대하여 각각 중합하여 보정값을 계산하였다. 이때 계산된 교차상관의 신호 대잡음비(Signal-to-Noise Ratio)가 10보다 작은 경우는 중합에서 제외하였고, 진원에 해당하는 지진계의 수직성분과 수신기에 해당하는 지진계의 상-하, 1, 2성분간의 교차상관함수를 중합한 결과를  $C_{zz}$ ,  $C_{1z}$ ,  $C_{2z}$ 로 정의한다. 또한 레일리 파의 신호를 강화하기 위하여  $C_{zz}$ ,  $C_{1z}$ ,  $C_{2z}$ 에 0.05 ~ 0.45 Hz의 대역 필터를 추가 적용하여 보정값계산에 사용하였다.

보정값을 계산하는 과정은 아래와 같다. 먼저  $C_{zz}$ 를 힐버트 변환(Hilbert Transform)하여 90° 위상변화된  $C'_{zz}$ 를 계산한다.  $C_{1z}$ ,  $C_{2z}$ 을 시계 반대 방향으로 1°씩 점진적으로 회전(rotation) 변환시켜  $C'_{1z}$ 와  $C'_{2z}$ 를 계산하고  $C'_{2z}$ 과  $C'_{zz}$ 의 영지연교차상관(zero-lag cross-correlation)값이 최대가 되는  $C'_{2z}$ 를  $C_r$ 라고 정의한다(Fig. 2). 두 관측소의 위치 정보로부터 수신기에 해당하는 지진계와 진원에 해당하는 지진계 사이의 후방위각(back azimuth)  $\alpha$ 를 계산하고, 영지연교차상관 값이 최대가 될 때의 회전 각  $\theta$ 를 측정하면, 관측소의 현재 북-남 성분이 실제 정북 방향에 대해 얼마나 틀어졌는지를 나타내는 값  $\psi$ 를 다음과 같이 구할 수 있다(Fig. 3).

$$\psi = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \pi) - \theta = -\frac{\pi}{2} - \alpha - \theta \quad (1)$$

여기서 계산된  $\psi$ 의 신뢰도를 나타내주는 교차상관 정규계

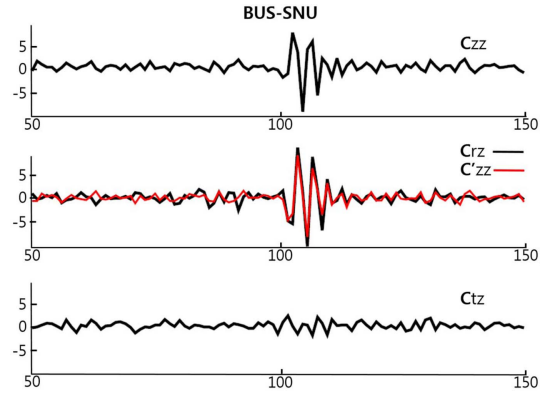


Fig. 2.  $C_{zz}$ ,  $C_{rz}$ , and  $C_{tz}$  calculated from cross-correlation functions between station pair BUS-SNU and rotated to a true radial-transverse coordinate system. Top to bottom:  $C_{zz}$ ,  $C_{rz}$ , and  $C_{tz}$  are shown in black; red line in middle panel represents  $C'_{zz}$ , 90 phase-shifted  $C_{zz}$ .

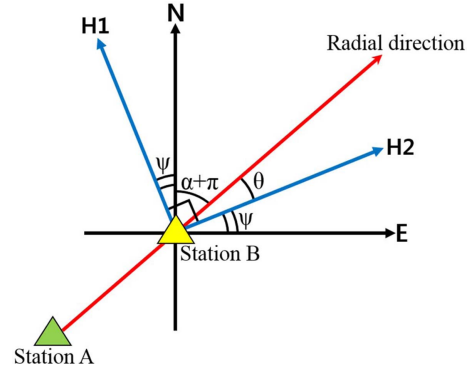


Fig. 3. Schematic plot of the coordinate systems. Red arrow means propagating direction of Rayleigh wave from station A to station B. H1 and H2 are two orthogonal horizontal components of station B.  $\alpha$ ,  $\psi$  and  $\theta$  represent back-azimuth from station B to station A, orientation angle of H1 (or H2) from true north (or east) and exact angle to rotate H1-H2 coordinate system to transverse-radial direction.

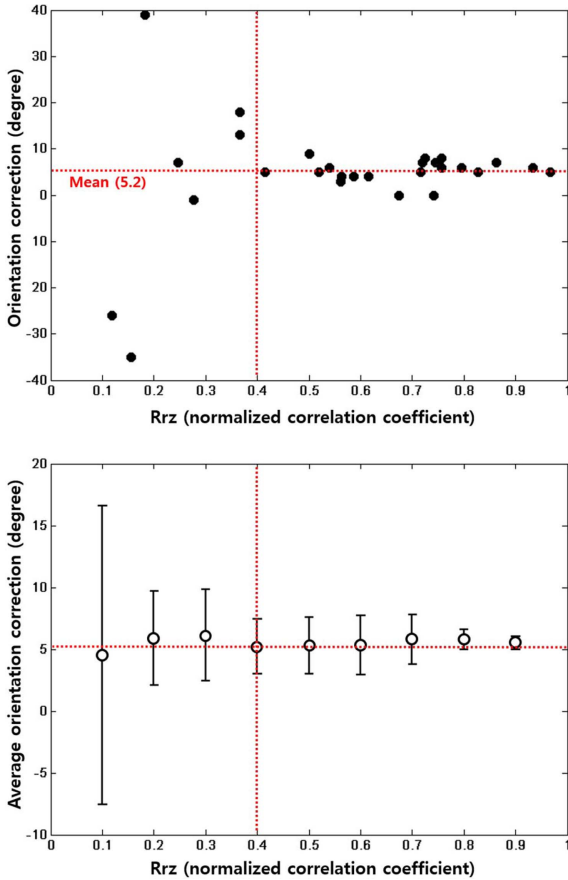
수(normalized correlation coefficient)  $R_{rz}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$R_{rz} = \frac{\rho(C_{rz}, C'_{zz})}{\sqrt{\rho(C_{rz}, C_{rz})\rho(C'_{zz}, C'_{zz})}} \quad (2)$$

여기서  $\rho(C_{rz}, C'_{zz})$ 는  $C_{rz}$ 과  $C'_{zz}$ 의 영지연교차상관(zero-lag cross-correlation)을 의미한다. 그림 4과 같이  $R_{rz}$ 가 0.4 미만인 경우에는  $\psi$ 가 안정적으로 결정되지 않기 때문에 최종적인 방위각 보정값 계산에는  $R_{rz}$ 가 0.4 이상인 자료만 사용하였다(그림 4).

### 방위각 보정값 계산 결과

전체 기간으로 중합하여 계산한 방위각 보정값을 Shin *et al.*



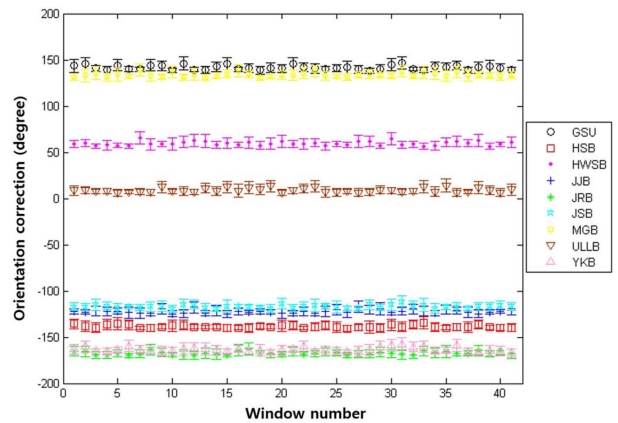
**Fig. 4.** Orientation correction measurements and average orientation corrections as a function of  $Rrz$  at station SNU.

(2009)의 결과와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 지표에 설치된 관측소 10곳의 경우 본 연구에서 계산한 방위각 보정값은 TJN(대전)을 제외하면 Shin *et al.* (2009)에서 제시한 결과의 오차범위에 들어간다. 또한 TJN의 경우에도 두 결과의 오차범위 내에서 겹치는 것으로 나타나고 차이는  $5.1^\circ$ 에 불과하다. 이는 본 연구에서 사용한 방법도 일반적으로 사용되는 P파의 위상분석을 이용한 방법처럼 방위각 보정값 측정에 타당한 방법이라는 것을 보여준다. 본 연구에서 계산된 보정값의 오차(Standard Deviation)는 지표 관측소의 경우 대부분  $5^\circ$  이하의 값을 가지며 시추공 관측소의 경우에도 제주(JJB), 양구(YKB), 홍성(HSB)를 제외하면 모두  $5^\circ$  이하의 값을 가진다. 본 연구에 사용한 지진계 중 보정값 오차가 가장 크게 계산된 관측소는 YKB로 오차가  $8^\circ$ 로 계산되었으나, 이전 연구에서 제시된  $12.4^\circ$ 에 비하면 상대적으로 작다. 하지만 JJB와 HSB의 경우에는 이전 연구결과 보다 높은 오차를 보여주기 때문에 방법의 정확도를 기준으로 두 가지 방법간의 우위를 결정하기는 어렵다.

다음으로 구간을 30일로 나눈 후 종합하여 계산한 결과를 보면, 각 관측소에 대해 구간별로 계산된 결과가 대체로 각각의 표준편차 내에서 변하기 때문에 시간에 따른 관측소 방위

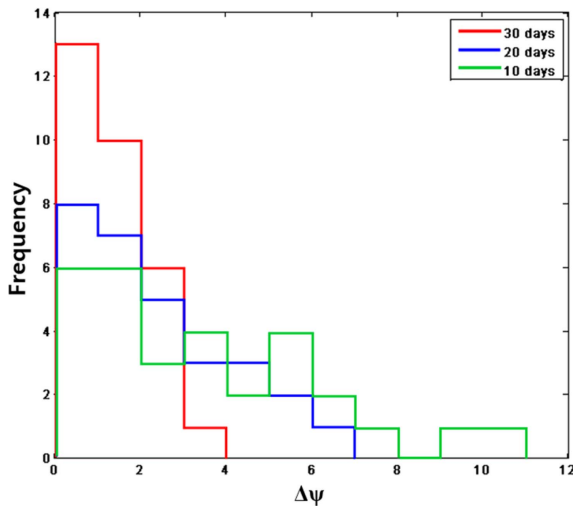
**Table 1.** Mean and standard deviation of orientation corrections for broadband stations

Station	Shin <i>et al.</i> (2009)		This study	
	Mean (degree)	Std (degree)	Mean (degree)	Std (degree)
BGD	-0.2	4	-2.8	3.8
BRD	4.8	2.6	5	5.3
CHNB	13.5	2.9	15.3	2.5
GKP1	4.2	2.7	3.4	5.5
HKU	9.1	3.6	5.6	4
KSA	0.7	4.7	1.2	2.5
NPR	4.3	3.6	4.2	4.3
SND	-1	3	-1.6	2.4
SNU	5.5	2.6	5.2	2.2
TJN	0.1	3.4	-5	2.2
Borehole Station	Mean (degree)	Std (degree)	Mean (degree)	Std (degree)
GSU	142.6	3.7	140.8	3.1
HSB	-135.7	3.7	-138.4	5.2
HWSB	59	2.7	59	2.8
JJB	-124.2	3.6	-122.4	7.5
JRB	-166.3	4	-167.5	3.5
JSB	-114.5	4.1	-117	2.1
MGB	134.2	3.7	133.2	4.1
ULLB	9.4	4.6	8.5	2.5
YKB	-169	12.4	-164.3	8



**Fig. 5.** Temporal variation in orientation correction of borehole stations.

각의 변화는 무시할 수 있고(Fig. 5), 구간별로 계산된 결과의 표준편차도 대부분  $5^\circ$  미만으로 나타난다. 이는 30일 정도의 상대적 짧은 기간 동안 관측된 자료만을 이용하더라도 유의미한 방위각 보정값을 계산할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 본 연구에서 사용한 기간 내에서는 나타나지 않지만, 기기 수리를 포함한 여러 이유로 방위각이 바뀔 경우에도 30일 정도의 기간 동안만 같은 방향으로 유지된다면 측정이 가능하다는 것을 의미한다. 지진 자료를 이용할 경우 사용 가능한 지진(규모



**Fig. 6.** Histogram of  $\Delta\psi$ .  $\Delta\psi$  indicates an absolute difference between orientation correction obtained for shorter stacking periods (10, 20, and 30 days) and one for full period (60 days). Frequency indicates the number of stations of which  $\Delta\psi$  belongs to given range.

모 6이상이며 진앙거리 30° 이내)의 개수가 1개월(30일)에 보통 5개 미만이기 때문에 1개월의 기간을 고려한다면 배경잡음을 이용하여 방위각 보정값을 계산하는 것이 더 효과적일 것으로 보인다. 한편, 중합하는 기간을 10, 20, 30일로 바꾸었을 때, 각 관측소 별로 계산되는 방위각 보정값과 60일 동안 중합하여 계산한 결과를 비교하면 Fig. 6과 같다. 60일 중합 자료에서 계산한 결과가 실제 방위각 보정값을 나타낸다고 가정하고 10, 20, 30일 결과와 비교해 보면 30일의 경우 60일 결과를 기준으로 관측소 별 편차가 4° 미만으로 나타나지만 중합기간이 짧아질수록 그 편차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 국내 지진 관측소의 경우 신뢰할 수 있는 방위각 보정값을 계산하기 위한 최소한의 중합 기간은 30일 정도인 것으로 판단된다. 최소 중합 기간을 30일 보다 줄이기 위해서는 정교한 전처리 과정 및 교차상관에 사용되는 단일 시간창의 길이를 줄이는 방법을 사용할 수 있을 것으로 보이나 이에 따른 계산 시간도 길어지고, 각 구간별로 계산된 교차상관 값 중에서 신호대잡음비(SNR)가 낮은 구간의 비율이 높아질 것으로 보이기 때문에 이 점을 고려한 시간창 및 구간 설정이 필요하다.

### 결론 및 토의

본 연구에서는 배경잡음 교차상관을 이용한 방위각 보정값 결정 방법을 한반도 관측소에 적용하였다. 계산결과를 보면 2007년 1월부터 2008년 9월까지 전체 자료를 중합하여 구한 방위각 보정값이 원거리 지진자료를 사용한 결과와 매우 유사하며, 표준편차가 5° 이하로 나타나는 것으로 보아 신뢰할 수

있는 방위각 보정값이 계산된 것으로 보인다. 또한 1개월 정도의 자료만을 사용하더라도 유사한 결과값과 5° 이하의 낮은 표준편차를 보이는 것으로 보아 단기간의 자료만을 사용하더라도 방위각 보정값의 계산이 가능할 것으로 추정된다. 따라서 기기수리 등으로 인해 발생할 수 있는 관측소 방위각 변화를 30일 범위 내에서 효과적으로 계산할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서 제안된 방법을 활용하여 한반도 지진계 특히 시추공 지진계의 방위각 보정값을 결정하면 정확한 수평성분 파형 자료를 필요로 하는 많은 연구를 가능하게 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20132510100060).

### References

Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Shapiro, N. M., and 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.

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.

Laske, G., 1995, Global observation of off-great-circle propagation of long-period surface waves, *Geophysical Journal International*, **123**(1), 245-259.

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).

Lin, F. C., Moschetti, M. P., and Ritzwoller, M. H., 2008, Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh and Love wave phase velocity maps, *Geophysical Journal International*, **173**(1), 281-298.

Shapiro, N. M., 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophysical Research Letters*, **31**, L07614.

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).

Stachnik, J. C., Sheehan, A. F., Zietlow, D. W., Yang, Z., Collins, J., and 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., and 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., and Menke, W., 2013, Determining the orientations of ocean bottom seismometers using ambient noise correlation. *Geophysical Research Letters*, **40**(14), 3585-3590.