

<Technical Report> 국내 지진계의 센서 기기 응답

임호빈 · 김영희[‡]

서울대학교 지구환경과학부

요 약

국내에서 운용 중인 152개 영구 관측소의 속도지진계 기기 응답 파일을 만들었다. 기상청에서 운용하는 지진 관측소 중에서 117개 속도 지진계, 한국지질자원연구원의 22개, 그리고 한국수력원자력의 13개 관측소의 기기 응답 파일을 만들었다. 2020년 1월 기준 152개의 관측소 중 123개 관측소는 캘리브레이션 시트를 반영하였다. 파일은 온라인에 업로드하여 접근이 편하도록 하였다(<https://doi.org/10.5281/zenodo.3700312>).

주요어: 지진계 기기 응답

Hobin Lim and YoungHee Kim, 2020, A dataset of seismic sensor responses of South Korea seismic stations. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 4, p. 515-524

ABSTRACT: We provide seismic instrument response files for 152 velocity seismometers of South Korea permanent network, consisting of 117 stations of Korea Meteorological Administration, 22 of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, and 13 of Korea Hydro & Nuclear Power. The files for 123 stations among the total 152 stations (as of January 2020) are based on calibration information of the sensor. The files for the seismic instrument response can be accessed at '<https://doi.org/10.5281/zenodo.3700312>'.

Key words: seismic instrument response

(Hobin Lim and YoungHee Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea)

1. 서 론

국내 영구지진관측망은 지진 및 심부 구조 연구에 유용하게 활용되었다. 영구지진관측망은 한 곳에서 장기간 데이터를 축적한다는 점과 언제 발생할지 모르는 지진의 지진파형을 기록할 수 있다는 점에서, 연구에 효용이 크다. 예로, 2004년 5월 29일 발생한 모멘트 규모(Mw) 5.1의 울산 앞바다 지진, 2007년 1월 20일 Mw 4.6 오대산 지진, 2009년 5월 2일 Mw 3.7 안동 지진, 2010년 2월 9일 Mw 3.1 시흥 지진, 2016년 9월 12일 Mw 5.5 경주 지진과 2017년 11월 15일 Mw 5.5 포항 지진은 발생 당시 운용 중이던 국내 지진관측망 데이터를 활용하여 지진의 물리적 성질을 얻고 발생 메커니즘이 연구될 수 있었다(Kang and Baag, 2004; Choi and Noh, 2010; Kim, W.-Y.

et al., 2010; Kim and Kim, 2014; Kim, Y. et al., 2017; Kim, K.-H. et al., 2018; Woo et al., 2019; Lim et al., 2020).

2020년 1월 기준으로 기상청(Korea Meteorological Administration; KMA or KS), 한국지질자원연구원(이하 지자연; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources; KIGAM or KG)과 한국수력원자력(이하 한수원; Korea Hydro & Nuclear Power; KHNP or KN)에서는 많은 수의 지진 관측소를 운영하고 있다(그림 1). 기상청은 관측소를 20년 동안 꾸준히 증설했으며, 현재는 133개의 지진관측소(속도계)를 운용 중이다. 기상청은 '국가지진종합정보시스템(이하 NECIS)' 웹 서비스로, 파형 데이터와 지진계에 관한 정보를 제공한다. 지자연은 광대역 속도지진계 24개를 운용 중이다. 한수원은 광대역 속도

[‡] Corresponding author: +82-2-880-6735, E-mail: younghkim@snu.ac.kr

지진계 13개를 운용 중이다(2017년 8월 기준). 하지만, 많은 수의 관측소 데이터가 연구에 바로 활용되기에는 문제가 있다. 첫째로 이 중 67개 관측소는 시추공에 삽입된 지진계이며, 2개의 수평 성분을 이용하기 위해서는 임의의 방향으로 회전된 방위각을 먼저 보정해 주어야 한다. Lim *et al.* (2018)은 광대역 속도지진계의 방위각 변화 이력을 2005년부터 2016년까지 결정하였다.

다른 문제는 같은 양식으로 정리된 지진계 기기 응답 파일이 없다는 점이다. 기상청 NECIS는 지진계 응답에 관한 정보를 캘리브레이션 시트(calibration sheet)의 형태로 제공하고 있다. NECIS에서 제공하는 캘리브레이션 시트는 지진계 기기 응답을 구하기 위한 정보를 포함하고 있지만, 이것에서 바로 기기 응답 파일을 만드는 데는 다음의 어려움이 있다. 캘리브레이션 시트는 스캔 된 파일이라서, 정보를 텍스트화할 필요가 있다. 또한, 다양한 지진계 제품이 이용되고 있기 때문에, 기기 응답 파일을 일괄적으로 만드는 것이 간단하지 않다(그림 1). 예로, 기상청

은 Güralp 사의 CMG-3TB, CMG-40T-1, Streckeisen 사의 STS-2, STS-2.5 그리고 STS-5A 제품도 많이 사용하고 있다. 그 외에 Güralp 사의 CMG-3T, Kinematics 사의 SS-1와 Geotech 사의 GS-13도 적지만 사용하고 있거나 사용했다. 그 밖에, 지자연에서는 STS-2, STS-2.5, 그리고 STS-5A를, 한수원에서는 STS-2.5를 사용하고 있다. 제조사나 제품에 따라 캘리브레이션 시트의 양식과 공식이 다르다. 따라서, 캘리브레이션 시트에서 기기 응답을 같은 양식으로 정리하는 일은 모든 연구자가 각자 수행하기에는 시간을 많이 소모한다.

지진계 기기 응답 정보는, 비물리적인 단위로 저장된 원형데이터(raw data)를 지표의 미세한 진동에 관한 물리량(즉, 속도나 변위)으로 변환할 때 사용한다. 또한, 기기 응답 정보는 지진계가 진동수에 따라서 다르게 반응하는 것을 보정해주는 역할을 한다. 기존에는 국내 지진 관측소에 대한 기기 응답 정보가 일관성 있게 정리되어 있지 않았기 때문에, 이용 가능한 관측소나 방법론에 제한이 있었다. 즉, 계산

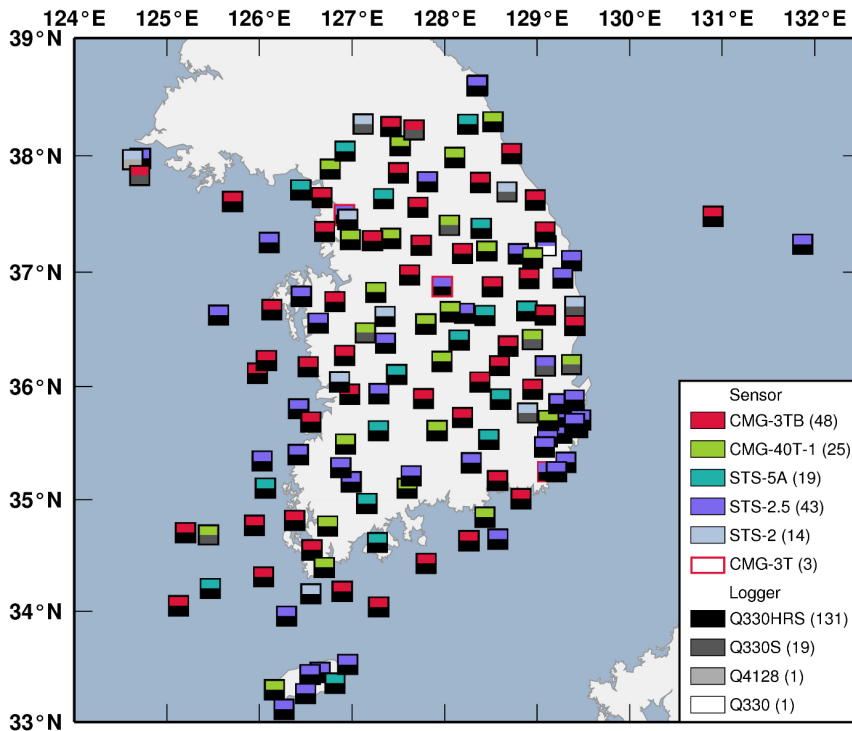


Fig. 1. Distribution of 152 velocity instruments (as of January 2020). The map includes information on different types of sensors and loggers. In the legend, the number of instruments is indicated in a parenthesis. We note that three CMG-3T instruments have been replaced with new ones at the same location.

과정에서 기기 응답이 저절로 상쇄되는 방법이 많이 사용되었다(예로, Lim *et al.*, 2018; Shen *et al.*, 2019). 하지만, 지진파 진폭의 절대적인 값이 필요하거나 지진계의 코너진동수(corner frequency)보다 낮은 진동수를 사용할 때는 기기 응답 파일이 꼭 필요하다. 예를 들면, 지진의 규모나 포컬메커니즘(focal mechanism)을 결정할 때, 또는 낮은 진동수의 표면파나 원거리 지진 실체파를 이용하는 경우에는 반드시 기기 응답을 보정해 주어야 한다. 본고는 기기 응답 파일을 공유하여, 국내 지진 관측소 데이터의 활용성을 높이고자 한다.

2. 방 법

2.1 지진계 기기 응답

지진계 기기 응답은 하나의 실수와 유한개의 복소수로 표현한다. 실수는 편의상 여러 실수의 곱으로 표현한다. 각진동수(angular frequency)를 변수로 하는 기기 응답 함수 $T(\omega)$ 는 식 (1)과 같다. 지표의 속도 스펙트럼에 $T(\omega)$ 가 곱해지면, 원형데이터(raw data)의 스펙트럼이다(Scherbaum, 2001).

$$T(\omega) = L \cdot S \cdot A_0 \cdot \frac{\prod_{i=1}^{N_z} (j\omega - z_i)}{\prod_{i=1}^{N_p} (j\omega - p_i)} = L \cdot S \cdot A_0 \cdot H(\omega) \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

복소수 z_i 는 영점(zeros), 복소수 p_i 는 극점(poles), 정수 N_z 는 영점의 개수, 정수 N_p 는 극점의 개수, j 는 허수단위이다. 각진동수 ω 는 'rad/s'를 단위로 한다. A_0 는, $\omega = \omega_n$ 일 때, $A_0 \cdot H(\omega_n) = 1$ 를 만족하는 정규화하는 상수이다. S 는 센서(sensor)가 속도를 전압으로 변환하는 실수이고 단위는 'V/m/s'이다. L 은 기록계(logger)가 전압을 디지털화하여 정수로 변환하는 실수이고 단위는 'count/V'이다.

캘리브레이션 시트는 보통 극점과 영점을 진동수의 단위인 'Hz'로 표현하며, 각진동수의 단위인 'rad/s'를 사용하는 프로그램을 사용할 때는 단위를 변환해 주어야 한다. 기기 응답 함수 $T(\omega)$ 의 f 에 대한 표현은, 식 (2)를 (1)에 대입하여, 식 (3)과 같이 얻을 수 있다. f 의 단위는 'Hz'이다.

$$T(f) = L \cdot S \cdot [A_0 \cdot (2\pi)^{N_z - N_p}] \frac{\prod_{i=1}^{N_z} (jf - z_i/2\pi)}{\prod_{i=1}^{N_p} (jf - p_i/2\pi)} \quad (3)$$

'Hz'를 단위로 할 때, 윗첨자에 'Hz'를 두어 표현하면 식 (4)와 같다. 식 (4)를 이용해서 A_0 , 극점과 영점의 단위를 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_0 \cdot (2\pi)^{N_z - N_p} &= A_0^{\text{Hz}} \\ z_i/2\pi &= z_i^{\text{Hz}} \\ p_i/2\pi &= p_i^{\text{Hz}} \end{aligned} \quad (4)$$

기기 응답 파일 양식 중 가장 간단한 Seismic Analysis Code 양식(이하 SAC 양식)을 사용하였다(Seismic Analysis Code, 2011). SAC 양식은 A_0 , 극점과 영점의 단위로 'rad/s'를 사용한다. SAC 양식에서는 하나의 실수 상수인 CONSTANT만을 입력하며, CONSTANT는 $L \cdot S \cdot A_0$ 와 같다.

2.2 센서의 기기 응답

관측소별 캘리브레이션 시트를 NECIS에서 얻었다(last accessed on 4 January 2020). 세 관측소(CHC2, JEO2, SES2)의 캘리브레이션 시트는, 새 버전으로 Streckeisen 사로부터 따로 받았다(personal communication on 3 March 2020). 프로그램 PDF-X Change Editor (version 6 January 2020)의 내장 기능인 'OCR (Optical Character Recognition)'을 이용하여 스캔 된 캘리브레이션 시트에서 텍스트 정보를 자동 인식하였다. 이후에, 잘못 인식한 파라미터가 있는지 확인하고 고쳤다. 캘리브레이션 시트로부터 얻은 영점과 극점은, 미국지진연구소에서 제공하는 명목 기기 응답(nominal instrument response)과 비교하여 캘리브레이션 범위 밖으로 크게 벗어나는 것이 있는지 확인하였다(Templeton, 2017).

2.3 기록계의 변환 상수(L)

센서에서 나오는 연속적인 전압 신호는 기록계(logger)로 전달되어 디지털화된 뒤에 저장된다. 디지털화하는 과정에서 전압은 일정한 범위의 정수에 선형적으로 대응되어 변환된다. Kinematics 사의 기록계 Q330HRS의 L 은 A포트와 B포트가 다르다. A포트는 1,677,720

Table 1. Scaling factor of the loggers.

Product	Preamplifier	L (count/V)
Q330HRS (A port) [†]	1	1,677,720
Q330S	1	419,430
Q4128	1	419,430
Q330	1	419,430

The values of L are from Templeton (2017).

[†] L for the B port of the Q330HRS is 419,430 count/V.

count/V이고 B포트는 419,430 count/V이다(표 1). 속도계가 A포트에 꽂혀있다면, 함께 가동 중인 가속도계는 B포트에 꽂혀있을 것이고, 반대의 경우도 가능하다. 한수원의 속도계는 A포트에, 가속도계는 B포트에 꽂혀 있는 것을 확인하였다(personal communication with the KHNP on 6 April 2020). 우선 속도계는 A포트에 꽂혀있다고 가정하고, 기기 응답 파일을 만들었다. 만약, 반대로 꽂혀 있다면, 매우 가까운 곳에서 함께 가동 중인 속도계와 가속도계의 파형의 진폭이 다를 것이다. Q330S, Q4128과 Q330의 L 은 419,430 count/V이다(표 1).

Q330HRS, Q330S과 Q330은 L 을, 정해진 증폭값(preamplifier)만큼 높게 설정하는 것이 가능하다. 이것은 큰 지반 움직임은 기록하지 못하는 대신에, 작은 지반 움직임을 더 미세하게 기록하기 위한 기능이다. Q330HRS는 20배 큰 값으로, Q330S과 Q330은 30배 큰 값으로 설정할 수 있다.

기록계의 캘리브레이션 시트에서는 증폭값이 어떻게 설정되어 있는지 정보를 얻지 못하였다. 따라서, 증폭값(preamplifier)의 기본 설정이 '1'인 것을 고려하여(personal communication with Kinemetrics, Inc on 17 March 2020), 증폭값이 '1'일 때의 기기 응답을 얻었다. 그리고 원거리에서 발생한 지진의 P파 진폭을 비교하였다. 원거리에서 발생한 지진의 P파는 평면파(plane wave)와 유사하기 때문에 관측소별 진폭이 비슷할 것이다. 만약 증폭값이 '1'이 아닌 관측소가 있다면, 그 관측소의 P파 진폭 보정값은 다른 관측소 보다 약 20배(Q330HRS) 또는 30배(Q330S, Q330) 더 클 것이다.

2.4 기록계의 더 정확한 기기 응답

2.1-2.3장에 걸쳐 설명했듯이, 기록계의 기기 응답을 진동수에 대해 상수(L)로 간주하였다. 사실은, 기

록계 내부에서 데시메이션 필터(decimation filter)가 적용되므로, 이를 기기 응답에 반영하여야 더 정확하다. 하지만, 기록계의 필터 설정이 어떤지 알지 못하여 반영하지 않았다. 이것을 반영하지 않아 발생하는 인위적 신호의 진폭은 작지만, P파 도달 이전에 작은 신호(precursory signal)가 발생할 수 있기 때문에 이를 유의해야 한다(e.g., Scherbaum and Bouin, 1997).

3. 결 과

3.1 파일의 구성

지진계의 기기 응답은 SAC 양식으로 만들었다. SAC 양식은 영점 극점 그리고 하나의 상수(CONSTANT)를 담고 있다. 계산에 사용되지는 않지만, 유용한 파라미터는 파일 내 '코멘트'의 형태로 남겨두었다. 예를 들면, INSTTYPE는 지진계의 제품명, INPUT UNIT는 기기 응답 제거 후의 파형의 단위이다(Seismic Analysis Code, 2011).

기상청 관측소 중에서는, Güralp 사의 CMG-3T가 설치된 관측소 3개, CMG-3TB가 설치된 관측소 48개, CMG-40T-1가 설치된 관측소 25개, Streckeisen 사의 STS-2(3세대)가 설치된 관측소 7개, STS-2.5가 설치된 관측소 17개, 그리고 STS-5A가 설치된 관측소 17개, 모두 117개 관측소의 기기 응답을 구하였다(표 2). STS-2가 설치된 7개 관측소(DAG2, DGY2, ULJ2, BAR, CHJ, KWJ, 그리고 SEO)의 기기 응답 파일은 명목 기기 응답으로 대신하였고(Templeton, 2017), 나머지는 모두 캘리브레이션 시트를 반영하였다(표 2).

지자연 관측소 중에서는 STS-2가 설치된 관측소 11개(2세대 또는 3세대), STS-2.5가 설치된 관측소 10개, STS-5A가 설치된 관측소 1개의 기기 응답 파일을 명목 기기 응답으로 구하였다(Templeton, 2017; 표 2). 관측소별 센서와 기록계가 변경되는 시기에 맞추어서 유효 기간을 구분하였다(2019년 4월 12일까지의 변경 이력 반영; personal communication with the KIGAM). 한수원 관측소는 캘리브레이션 시트를 반영하여 STS-2.5가 설치된 관측소 13개의 기기 응답을 구하였다(표 2).

채널의 이름은 기상청, 지자연, 그리고 한수원이 사용하는 채널 이름에 맞추었다. 수직 성분(Z) 기준,

샘플링 레이트(sampling rate)가 100 Hz인 채널의 이름으로 HHZ (CMG-3T, CMG-3TB, STS-2, STS-2.5 그리고 STS-5A)와 ELZ (CMG-40T-1)를 사용하고,

20 Hz인 채널의 이름으로 BHZ 그리고 SLZ를 사용한다. 또한, HHZ와 BHZ (또는 ELZ와 SLZ)의 기기 응답 파일의 내용은 같지만, 이름이 다른 파일을 중

Table 2. Summary of the instrument responses files.

Operator	Product name of sensor	Number	Note
KMA	CMG-3T	3	
	CMG-3TB	48	
	CMG-40T-1	25	
	STS-2 (3rd gen)	7	Nominal
	STS-2.5	17	
	STS-5A	17	
KIGAM	STS-2 (2nd, 3rd gen)	11	Nominal
	STS-2.5	10	Nominal
	STS-5A	1	Nominal
KHNP	STS-2.5	13	

KMA: Korea Meteorological Administration. KIGAM: Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. Gen: Generation.

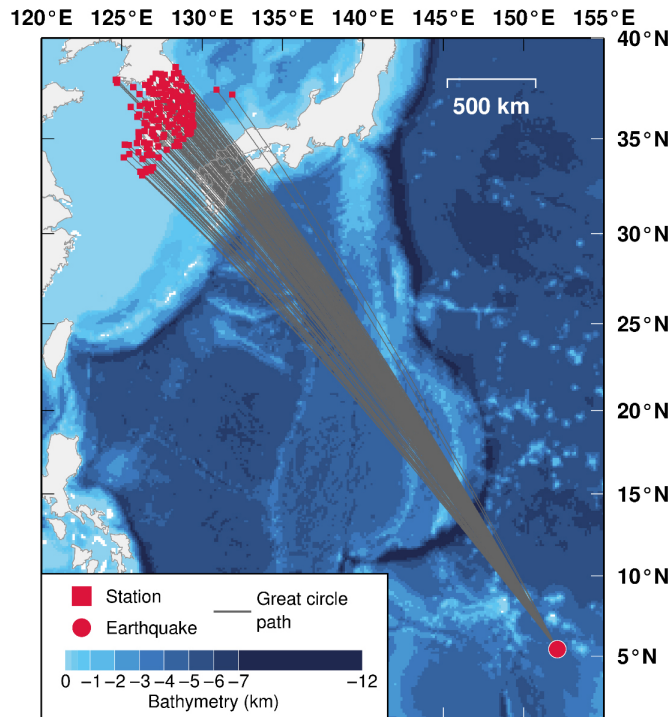


Fig. 2. A map showing great circle path from the Mw 6.2 teleseismic earthquake, which was used to validate the response file, to the stations shown in Fig. 1. The earthquake occurred at latitude of 5.451°S and longitude of 152.098°E at a depth of 31 km on 9 February 2020, 06:04. The distances to the stations are 40-50°, and backazimuth are 140-151°. The earthquake information is from '<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>' (last accessed on 13 March 2020). Bathymetry data is taken from Smith and Sandwell (2018).

복해 두었다. STS-2.5와 STS-5A의 캘리브레이션 시트는 센서 3성분별(U, V, 그리고 W) 기기 응답에 대한 정보를 제공한다. Z (vertical), N (north), 그리고 E (east) 파라미터는 센서 3성분의 영점, 극점 그리고 CONSTANT의 평균으로 하였다.

그림 4는 기상청 관측소 SEO3의 HHU 채널의 기기 응답을 예시로 보여준다. 약 0.01-50 Hz에서 기기 응답의 절대값(absolute of T)이 최대이면서 평탄하고, 위상(phase of T)이 0°에 가까운 것을 확인할 수 있다.

3.2 기록계 변환 상수(L)의 검증

원거리에서 발생한 지진의 P파 진폭이 모든 관측소에서 유사할 것이라고 가정하고, 기록계의 증폭값

(preamplifier)이 '1'인지 검증하였다. 2020년 2월 9일 6시 4분(Coordinated Universal Time)에 진앙 거리 40-50°에서 발생한 규모 6.2의 지진을 사용하였다(그림 2). 최근에 발생한 지진을 사용하여, 최근 이면서 최대한 많은 기상청 관측소의 기록계를 검증할 수 있도록 하였다. 기기 응답을 제거한 기상청 관측소 113개(가동 중단된 기상청 4개 관측소 제외)의 파형 속 P파의 극성이 모두 양(positive)의 방향으로 일치하는 것을 확인하였다(그림 3a). 자세한 데이터 처리 과정은 부록 A에 설명해 두었다.

파형의 최댓값을 그림 3b에 나열하였다. 최댓값의 중간값(median)은 3.0 $\mu\text{m/s}$ 이다. 만약, 기록계의 증폭값(preamplifier)이 '1'이 아니라면, Q330HRS의 경우, 이보다 약 20배 큰 이상치를 보이는 관측소

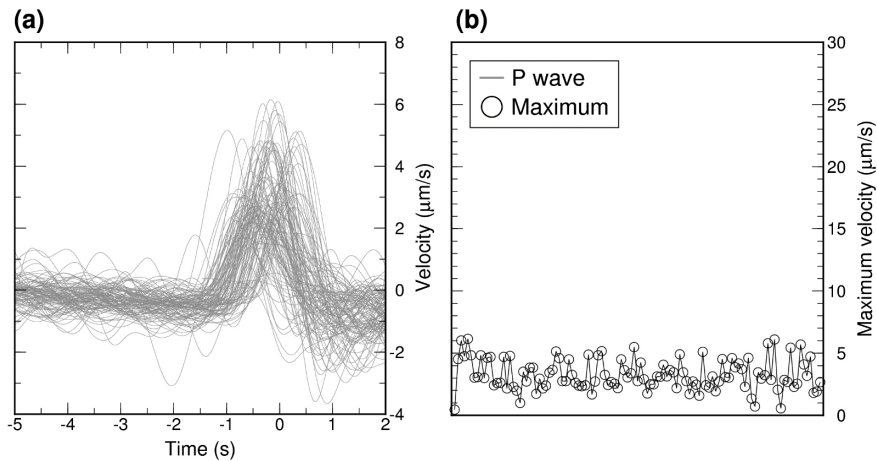


Fig. 3. Polarity and amplitude of 113 vertical component waveforms. Their instrument responses are removed using our files and filtered in 0.1-1.5 Hz. (a) P wave of the example earthquake (Fig. 2). The waveforms are aligned by theoretical P arrival times at 0 s (Kennett *et al.*, 1995). (b) Maximum of the waveforms. Median is 3.0 $\mu\text{m/s}$.

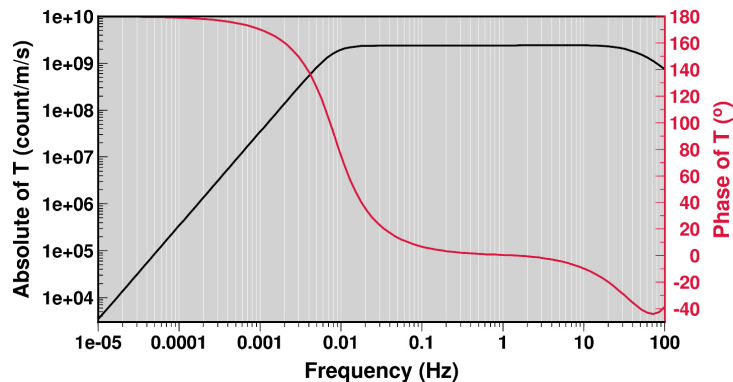


Fig. 4. Bode plot of the instrument response as an example. HHU channel of station SEO3 (STS-2.5) is used.

가 있을 것이다(Q330S 또는 Q330는 약 30배). 하지만, 그러한 이상치를 보이는 관측소는 없었다. 따라서, 기록계의 증폭값(preamplifier)은 모두 기본 설정인 '1'인 것으로 보인다.

기상청에서 운용하는 모든 속도계는 가속도계가 함께 운용 중이다(NECIS; last accessed on 21 April 2020). 관측소 중 Q330HRS 기록계를 사용중인 관측소의 속도계와 가속도계를 비교하여 A포트는 속도계에, B포트에는 가속도계가 꽂혀있는 경우의 예외가 있는지 확인하였지만 없음을 확인하였다. 이때, 속도계와 가속도계 둘 다 운용 중인 관측소에만 한한다. 한수원의 경우는 센서와 포트 연결 상태에 대한 정보를 직접 얻을 수 있었으며, 속도계는 모두 A포트에 꽂혀 있다(personal communication with the KHNP on 6 April 2020).

4. 결 론

국내 영구 지진 관측소(속도계)는 꾸준히 증설되어, 기상청 관측소의 경우 133개에 이른다. 이로써, 앞으로 발생할 수 있는 국내 지진을 정밀하게 연구할 수 있는 하드웨어적인 토대가 마련되었다. 하지만, 많은 데이터를 효율적으로 사용할 때 필요한, 기기 응답 파일이 없어서 데이터 활용이 어려웠다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 기상청에서 운용하는 속도 지진계 관측소 중 117개 관측소, 한국지질자원 연구원의 22개 관측소, 그리고 한국수력원자력의 13개 관측소의 기기 응답 파일을 만들었다. 기록계의 변환 상수가 어떻게 설정되어 있는지 확인하기 위해 원거리 지진을 이용하여 진폭을 비교하였다. 또한, 가속도계 파형과 비교하여 Q330HRS 기록계의 A포트와 B포트의 변환 상수가 다른 것을 해결하였다. 파일은 온라인에 업로드 하여 쉽게 접근할 수 있도록 하였다(<https://doi.org/10.5281/zenodo.3700312>). 국내에서 발생하는 지진뿐만 아니라, 한반도 심부 구조에 대한 지진학 방법론에도 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 기상청 “한반도 지하단층 속도 구조 통합모델 개발 사업”(KMI2019-00110)의 연구비 지원

에 의해 수행되었다. 지진파형 데이터를 제공해 준 기상청(국가지진종합정보시스템), 한국지질자원연구원과 한국수력원자력에 감사드린다. 캘리브레이션 시트를 제공해 준 기상청, 한국수력원자력과 Streckeisen 사에 감사드린다. 문의에 답변해주고 의견을 준 한국수력원자력 중앙연구원 홍성일과 연세대 이준형에게도 감사드린다. 편집위원장 이진용 교수님, 편집위원과 익명의 심사위원께도 감사드린다.

REFERENCES

- Choi, H. and Noh, M., 2010, Source parameters of the May 2, 2009 Andong earthquake in South Korea. *Geosciences Journal*, 14, 269-276.
- Kang, T.-S. and Baag, C.-E., 2004, The 29 May 2004, Mw=5.1, offshore Uljin earthquake, Korea. *Geosciences Journal*, 8, 115-123.
- Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R. and Buland, R., 1995, Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes. *Geophysical Journal International*, 122, 108-124.
- Kim, K.-H., Ree, J.-H., Kim, Y., Kim, S., Kang, S.-Y. and Seo, W., 2018, Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science*, 360, 1007-1009.
- Kim, W.-Y., Choi, H. and Noh, M., 2010, The 20 January 2007 Odaesan, Korea, Earthquake Sequence: Reactivation of a Buried Strike-Slip Fault?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100, 1120-1137.
- Kim, W.-Y. and Kim, K.-H., 2014, The 9 February 2010 Siheung, Korea, Earthquake Sequence: Repeating Earthquakes in a Stable Continental Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104, 551-559.
- Kim, Y., He, X., Ni, S., Lim, H. and Park, S., 2017, Earthquake Source Mechanism and Rupture Directivity of the 12 September 2016 Mw 5.5 Gyeongju, South Korea, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107, 2525-2531.
- Lim, H., Deng, K., Kim, Y.H., Ree, J.-H., Song, T.-R.A. and Kim, K.-H., 2020, The 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake, South Korea, and poroelastic stress changes associated with fluid injection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, doi: 10.1029/2019JB019134.
- Lim, H., Kim, Y., Song, T.-R.A. and Shen, X., 2018, Measurement of seismometer orientation using the tangential P-wave receiver function based on harmonic decomposition. *Geophysical Journal International*, 212, 1747-1765.
- Scherbaum, F., 2001, *Of Poles and Zeros, Modern Approaches in Geophysics*. Springer Netherlands, Dordrecht.

- Scherbaum, F. and Bouin, M.-P., 1997, FIR filter effects and nucleation phases. *Geophysical Journal International*, 130, 661-668.
- Seismic Analysis Code, 2011, SAC Command Reference Manual (transfer). <http://ds.iris.edu/files/sac-manual/commands/transfer.html> (14 March 2020).
- Shen, X., Kim, Y., Song, T.-R.A. and Lim, H., 2019, Data-oriented constraint on the interpretation of S receiver function and its application to observations of seismic discontinuities in the lithosphere-asthenosphere system. *Geophysical Journal International*, 219, 496-513.
- Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T., 2018, Topography, v9.1, 1/60-degree.
- Templeton, M.E., 2017, IRIS Library of Nominal Response for Seismic Instruments. Incorporated Research Institutions for Seismology. Dataset, <https://doi.org/10.17611/S7159Q> (14 March 2020).
- Woo, J.-U., Kim, M., Sheen, D.-H., Kang, T.-S., Rhie, J., Grigoli, F., Ellsworth, W.L. and Giardini, D., 2019, An In-Depth Seismological Analysis Revealing a Causal Link Between the 2017 M_w 5.5 Pohang Earthquake and EGS Project. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124, 13060-13078.

Received : March 27, 2020
 Revised : April 22, 2020
 Accepted : May 15, 2020

Appendix A: 기기 응답 제거 예시

SAC 양식의 기기 응답 파일과 SAC 프로그램을 이용해서 원형데이터의 기기응답을 제거하는 방법을 간단히 소개한다. SAC 프로그램에서 수행해야 하는 명령어(Command; C)를 표 A-1에 나열해 두

었고, 과정별 파형을 그림 A-1에 그려두었다. C1은 원형데이터(raw data)를 읽는 과정이다(그림 A-1a). C2-4는 차례대로, 평균을 파형에서 빼고, 선형 트렌트(linear trend)를 빼고, 지진파형 시간 구간의 양 끝단이 부드럽게 0이 되도록 하는 테이퍼링(tapering)을 하는 절차이다. 그림 A-1b의 200초와 1,200초 근

Table A-1. Commands of SAC for removing the seismic instrument response.

Number	Command
C1	r raw.sac
C2	rmean
C3	rtr
C4	taper
C5	trans from polezero s ./SAC_PZs_KS_DACB_HHZ to none freq 0.0005 0.001 10 20
C6	w removed.sac

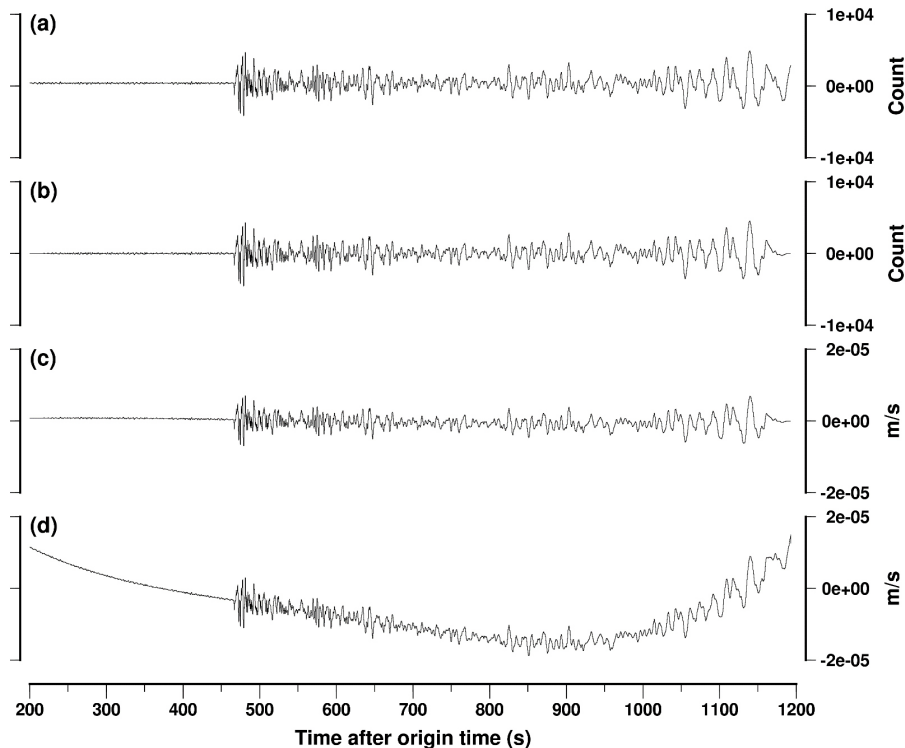


Fig. A-1. Example of seismic waveforms of Mw 6.5 earthquake. (a) Raw waveform data. (b) Preprocessed waveform from (a). Mean and linear trend are removed and the waveform is tapered. (c) Instrument-response corrected waveform. Instrument response is removed by deconvolution from (b). (d) Waveform without the preprocessing in (b) but with the instrument response removed. Note that a low-frequency artifact is observed. Origin time, latitude, longitude, and depth of the earthquake are 2019-09-25 23:46, 3.453°S, 128.370°E, and 12 km, respectively (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>; last accessed on 20 March 2020). The epicentral distance to the station (DACB) is 41°.

처 진폭이 그림 A-1a와는 달리 0이 된 것을 알 수 있다. C5는 기기 응답을 제거하는 명령어이다. 해당 관측소의 채널에 대응하는 SAC 기기 응답 파일을 'from polezero s' 뒤에 입력한다. 'freq' 뒤에는 FIR 필터(Finite impulse response filter)의 네 개 진동수(f_1 , f_2 , f_3 , 그리고 f_4 ; 단위: Hz) 파라미터를 입력한다. 필터의 통과대역은 f_2 와 f_3 사이이고, f_1 와 f_4 는 각각 낮은 진동수와 높은 진동수에서 필터의 응답이 얼마나 빨리 감소하는지 결정한다. 경험적으로 $f_1 = f_2/2$ 그리고 $f_4 \geq 2f_3$ 가 되도록 설정하면 적합하다(Seismic Analysis Code, 2011). 그림 A-1d는 'trans' 명령어(C5 in 표 A-1)를 사용하기 전, 전처리(C2-4)를 생략하면 발생할 수 있는 인위적인 효과를 보여준다. 큰

진폭의 낮은 진동수 노이즈가(noise)가 발생하였다(그림 A-1d). 이 노이즈는 원형데이터의 시간 구간 양 끝(200초와 1,200초)의 진폭이 다르기 때문에 발생한다. 이러한 효과는 C2-4의 명령어로 예방할 수 있다(표 A-1).

Appendix B: 기기 응답 파일 예시

그림 B-1에 기상청 관측소 SEO3의 HHZ채널의 기기 응답 파일을 예시로 보여준다. 극점, 영점, 그리고 CONSTANT는 HHU, HHV, 그리고 HHW의 평균으로 한 것이고, HHU, HHV, 그리고 HHW는 모두 캘리브레이션 시트의 값을 반영한 값이다.

```

KS/SAC_PZs_KS_SEO3_HHZ
File Edit View Search Terminal Help
* ****
* NETWORK (KNETWK): KS
* STATION (KSTNM): SEO3
* LOCATION (KHOLE):
* CHANNEL (KCMPNM): HHZ
* CREATED : 2020-03-25T16:43:15
* START :
* END :
* DESCRIPTION :
* LATITUDE :
* LONGITUDE :
* ELEVATION :
* DEPTH :
* DIP :
* AZIMUTH :
* SAMPLE RATE :
* INPUT UNIT : M/S
* OUTPUT UNIT : COUNTS
* INSTTYPE : STS-2.5
* COMMENT :
* ****
ZEROS 8
-1.570796e+01 +0.000000e+00
-1.570796e+01 +0.000000e+00
-6.050707e+02 +0.000000e+00
-5.215044e+02 -9.606990e+02
-5.215044e+02 +9.606990e+02
-9.479232e+02 +0.000000e+00
+0.000000e+00 +0.000000e+00
+0.000000e+00 +0.000000e+00
POLES 7
-1.608370e+01 +0.000000e+00
-1.606275e+01 +0.000000e+00
-3.240658e+02 -1.190664e+02
-3.240658e+02 +1.190664e+02
-9.479232e+02 +0.000000e+00
-3.698451e-02 -3.696084e-02
-3.698451e-02 +3.696084e-02
CONSTANT +4.056926e+05
~
~
1,1 All

```

Fig. B-1. An example of the instrument response file with a format of Seismic Analysis Code (SAC).