

지진기록계 보정과 힐버트 변환 적용에 의한 센서 주파수 응답 계산

조창수*

한국지질자원연구원

Derivation the Correction of the Component of the Recorder and the Application of Hilbert Transformation to Calculating the Frequency Response of the Sensor

Chang Soo Cho*

Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 신규 센서의 성능과 노후화된 센서의 성능 평가를 하는 것은 지진 감시 및 지진연구에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 센서 주파수 응답은 지진자료의 보정을 위해서 필수적으로 사용되고 있다. 이 연구에서는 주파수 스펙트럼비를 이용한 지진 기록계의 보정 방법과 시간영역 대역통과필터(bandpass filter)와 힐버트(Hilbert) 변환을 이용한 지진계 주파수 응답을 계산하는 방법을 제시하고자 하였다. 실내 진동대 실험에서 가속도 센서(CMG-5T 1g, 2g 센서)를 설치하고 제안된 방법으로 센서 주파수 응답스펙트럼을 구하였을 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 2011년 도호쿠 대지진에 대하여 서울대학교 관측소(SNU)의 STS-2와 ES-T에서 얻어진 자료에 대하여 제안된 방법을 적용한 결과 STS-2 광대역 센서의 저주파수 대역에 대한 주파수 응답을 얻을 수 있었다. 대역통과필터와 힐버트 변환 방법을 이용할 경우, 주파수 스펙트럼비를 이용한 방법보다 신호대 잡음이 낮은 부분에서도 명확한 주파수 응답스펙트럼을 보여주었다.

주요어: 힐버트 변환, 주파수 응답, 지진계 센서

Abstract: The validation of performance test for newly developed or old-used sensor is very important in the earthquake monitoring and seismology using earthquake data. Especially the frequency response of the sensor is mainly used to correct the earthquake data. The technique of the calculation of phase and amplitude with Hilbert transformation for earthquake data that is filtered with band limited frequency in time domain is applied to calculate the frequency response of the sensor. This technique was tested for the acceleration sensors, CMG-5T of 1g and 2g installed on the vibration table at the laboratory and we could obtain satisfactory result. Tohoku large earthquake in 2011 observed at the station SNU that has accelerometer, ES-T and seismometer, STS-2 operated by KIGAM was also used to test the field data applicability. We could successfully get the low frequency response of broad band sensor, STS-2. The technique by using band limited frequency filter and Hilbert transformation showed the superior frequency response to the frequency spectrum ratio method for noisy part in data.

Keywords: Hilbert Transform, frequency response, seismometer

서 론

지진계측시스템은 주로 지진기록계(A/D변환기)를 사용하여 땅의 움직임을 측정하는 지진계센서(속도, 가속도)의 전압을 측정하는 장치로 신규 지진계를 구매하였을 경우 제작사에서

제시한 지진기록계 및 센서의 성능 확인에 필요하다. 또한 지진관측소에 설치되어 있는 기존의 노후화된 지진계측 시스템의 성능 검증 시에도 사용된다.

지진 속도계와 가속도계의 검증을 위한 기본적인 방법과 절차는 Hutt 등(2010)에 의해 제시되었다. 이 보고서는 자체잡음 측정과 주파수 응답, 클립수준(clip level), 선형성 등 많은 시험 방법과 절차에 대하여 서술하고 있다. 캘리브레이션 기능이 있는 속도계에서 주파수 응답은 캘리브레이션 신호선(calibration cable)의 입력과 출력을 비교하는 방법을 제시하고 있다. 가속도계의 경우 진동대(shake table)에 기준 센서와 시험 센서를 올리거나 두 센서의 주파수 스펙트럼의 비교를 통해 구하는 방법을 제시하고 있다. 가속도계 경우에도 캘리브레이션 기능이 있는 경우 속도계와 동일하게 구할 수 있다.

Received: 22 March 2016; Accepted: 6 April 2016

*Corresponding author

E-mail: nemex@kigam.re.kr

Address: KIGAM, 124 Gwahangno, Yuseong, Daejeon 305-350, Korea

©2016, 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.

Havskov와 Alguacil (2005)도 지진계의 성능 검증을 위해 센서 댄핑 값, 주파수 응답, 민감도, 자체잡음 측정 등을 제시하고 있다. Havskov와 Alguacil (2005)는 Hutt 등(2010)이 제시하지 않았던 주파수 응답을 계산하는 방법에 대하여 서술하고 있다. 그러나 기본적인 자료처리 방식은 Hutt 등(2010)과 동일하게 제시하고 있다.

Pavlis와 Vernon (1994)는 캘리브레이션 기능을 가지고 있지 않는 센서에 대하여 지진동 잡음을 이용하여 센서 주파수 응답을 구하는 방법을 제시하였다. 기존 센서의 주파수 응답을 알고 있다는 가정 하에 시험 센서에 대하여 센서 자체잡음보다 큰 일정 크기 이상의 지반 잡음 신호를 이용하여 시험 센서의 주파수 응답을 계산하였다.

Ueno 등(2015)은 시간에 따른 센서 기기응답의 변화를 감지하기 위해서 특정한 시간대에 스텝 캘리브레이션 신호를 주거나 출력되는 신호를 분석함으로써 센서의 응답변화를 고찰하였다. 센서 응답변화가 상호상관에 의한 그린함수를 구할 때 미치는 영향을 고찰하였으나 센서응답은 영향을 주지 않는다고 하였다.

주파수 응답을 구하는 것은 지진계 성능검증이나 지진연구에 있어서 매우 중요하게 사용된다. 앞에서 언급한 연구자들은 푸리에 변환을 이용한 주파수 응답을 계산하였다. 이 연구에서는 기존 연구들에서 센서 주파수 응답을 구하고자 할 때 센서 자체잡음의 영향을 덜 받으며 주파수 응답을 구할 수 있는 방법으로 주파수 대역 통과 필터를 이용한 힐버트 변환 법에 대하여 제시하고자 하였다. 또한 채널간 상대적인 기록계 보정방법에 대하여 알아보하고자 하였다.

이 론

지진기록계의 채널뿐만 아니라 다른 기록계의 상대적인 보정이 필요한 경우 적용할 수 있는 기록계 보정방법과 지진계 성능 검증과 지진자료를 활용할 때 매우 중요한 센서 주파수 응답을 구하는 방법에 대하여 서술하고자 한다.

스펙트럼 비를 이용한 기록계 보정 방법

지진기록계에서 각 채널에 대하여 화이트 잡음(white noise) 스펙트럼을 입력해서 채널간 스펙트럼을 이용해 기록계 채널간 상대적 크기 비를 구하는 방법도 있지만 여기에서는 지진 기록계 각 채널에 센서를 연결하였을 때 진동대를 이용한 기록계 채널간 상대적 크기를 구하는 방법이다.

실험은 Fig. 1과 같은 시험개요도를 가진다. 먼저 기록계 채널 1번과 센서 A를 연결하고 채널 2번과 센서 B를 연결한 후 1번째 가진을 발생시키고(U_1), 시험자료에 대하여 각각 주파수 영역으로 자료 변환하여 채널 1번 자료(Z_{11})/채널 2번 자료(Z_{21})의 스펙트럼비를 계산한다. 다음으로 센서를 상호 변경하여 채널 1번에 센서 B를 연결하고 채널 2번에 센서 A를 연결

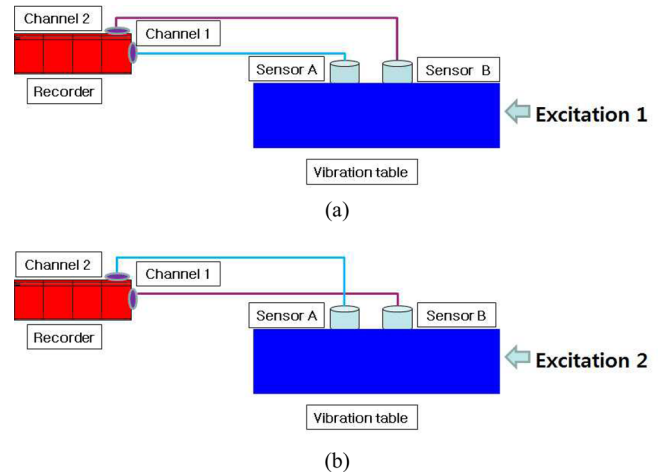


Fig. 1. Schematic Diagram for the testing of correction of the recorder. Each sensor was connected to the channel 1 and 2 at the first vibration test (a) and the connection was switched to channel 2 and 1 at the second vibration test (b).

한 후 2번째 가진을 발생시켜(U_2), 시험자료에 대하여 각각 주파수영역으로 자료 변환하여 채널 1번 자료(Z_{21})/채널 2번 자료(Z_{22})의 스펙트럼비를 계산한다. 마지막으로 가진 U_1 에서 채널간 스펙트럼비와 가진 U_2 에서 스펙트럼 비를 곱하여 1/2 승을 하게 되면 (1번 채널 기록계)/(2번 채널 기록계) 응답 기록을 얻을 수 있다.

이를 수식으로 설명하면 다음과 같다.

$$Z_{11}(\omega) = R_1 S_A U_1(\omega) : 1\text{번째 가진에 의한 채널1에서 측정된 주파수 영역 값}$$

$$Z_{21}(\omega) = R_2 S_B U_1(\omega) : 1\text{번째 가진에 의한 채널2에서 측정된 주파수 영역 값}$$

$$Z_{12}(\omega) = R_1 S_A U_2(\omega) : 2\text{번째 가진에 의한 채널1에서 측정된 주파수 영역 값}$$

$$Z_{22}(\omega) = R_2 S_B U_2(\omega) : 2\text{번째 가진에 의한 채널2에서 측정된 주파수 영역 값}$$

여기서, R_1 : 1번채널 기록계 응답, R_2 : 2번채널 기록계 응답, ω : 각주파수

S_A : A센서 응답, S_B : B센서 응답

U_1 : 1번째 가진, U_2 : 2번째 가진

$$\frac{Z_{11}(\omega)}{Z_{21}(\omega)} = \frac{R_1(\omega)S_A(\omega)}{R_2(\omega)S_B(\omega)} \quad (1)$$

$$\frac{Z_{12}(\omega)}{Z_{22}(\omega)} = \frac{R_1(\omega)S_B(\omega)}{R_2(\omega)S_A(\omega)} \quad (2)$$

$$\frac{Z_{11}(\omega)}{Z_{21}(\omega)} \times \frac{Z_{12}(\omega)}{Z_{22}(\omega)} = \left(\frac{R_1(\omega)}{R_2(\omega)} \right)^2 \quad (3)$$

위와 같은 관계식을 유도할 수 있다. 이렇게 유도된 값을 이용하여 채널 2의 기록계에 (R_1/R_2)를 곱한다면 지진기록계에 대한 보정이 가능하다.

센서 응답 스펙트럼 작성 방법

센서의 응답스펙트럼을 얻는 방법에는 두 가지 경우가 있을 수 있다. 첫 번째는 센서의 캘리브레이션 선을 이용하는 것으로 입력 신호(a(t))와 출력 신호(b(t))를 비교하는 방법이다. 두 번째는 응답스펙트럼을 알고 있는 기준센서 출력(a(t))과 시험센서 출력(b(t))을 비교하는 방법이다.

두 가지 방법에서 얻어진 a(t)와 b(t)신호를 주파수 영역으로 각각 변환한 것을 A(f)와 B(f)라 하자. 이때 f는 주파수를 나타낸다. 첫 번째 방법에서의 센서 주파수 응답은 $I(f) = B(f)/A(f)$ 로 얻을 수 있다. 두 번째 방법에서는 시험센서 주파수 응답 $I_B(f) = B(f)/A(f) \times I_A(f)$ 에 의하여 얻을 수 있다. 이때 $I_A(f)$ 는 A 센서의 응답을 나타내고, $I_B(f)$ 는 B 센서의 응답을 나타낸다.

위와 같은 주파수 스펙트럼비 방법은 자체잡음보다 큰 신호만 있을 경우에는 좋은 결과를 얻을 수 있으나 그렇지 못한 경우 주파수 스펙트럼 결과는 양호한 결과를 보여주지 못한다. 그래서 이 연구에서는 센서 자체 잡음 보다 큰 신호만을 추출하여 주파수 응답을 구할 수 있는 방법으로 힐버트 변환을 이용하고자 하였다.

Hlawatsch와 Auger(2008)에 의하면 시간 함수를 $u(t)$ 라고 하였을 때 힐버트 변환(H)은 다음과 같다.

$$\tilde{u}(t) = H[u(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau \quad (4)$$

상기 힐버트 변환을 주파수 영역으로 변환(F)을 할 경우 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$F(\tilde{u}(t)) = F(H[u(t)]) = -isgn(\omega)F(u(t)), \omega: \text{각주파수} \quad (5)$$

즉 힐버트 변환을 주파수 영역에서 보았을 때 90° 위상차를 가지는 연산자임을 알 수 있다.

일반적인 시간함수 $u(t)$ 에 대하여 해석함수(Z)를 다음과 같이 쓴다면

$$Z(t) = u(t) + i\tilde{u}(t) \quad (6)$$

이 되고 해석함수의 진폭(Amp)과 위상(ϕ)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Amp(t) = \sqrt{u(t)^2 + \tilde{u}(t)^2}, \phi(t) = \tan^{-1} \frac{\tilde{u}(t)}{u(t)} \quad (4)$$

이 연구에서는 위의 힐버트 변환을 Fig. 2와 같은 절차를 이용하여 센서 응답을 구하고자 하였다. 기준센서(a(t))와 시험센서(b(t)) 출력을 이용해 계산하는 것을 기준으로 설명하도록 하겠다.

먼저 시험 센서 응답을 계산할 때 계산하고자 하는 센서 응답 주파수 주위의 주파수 대역을 설정한다. 기준센서와 시험센서 출력 각각에 대하여 주파수 대역을 이용하여 시간영역 대

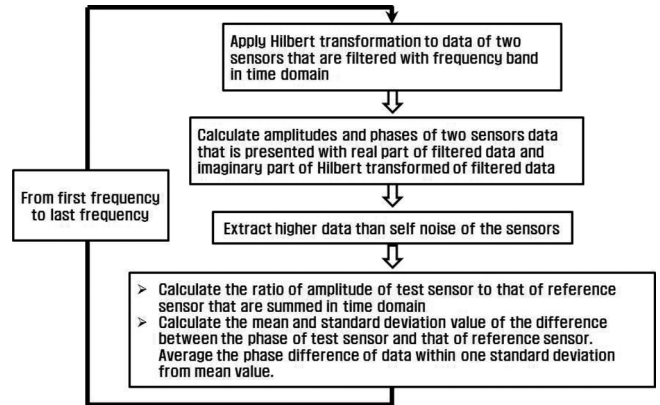


Fig. 2. Flow chart is shown to calculate the frequency response of the earthquake sensor by using bandpass filter and Hilbert transform.

역 통과필터를 적용한 후에 힐버트 변환을 하여 진폭과 위상을 구한다. 구해진 진폭이 센서 자체 잡음 평균보다 높은 값을 가지는 시간에 대하여 진폭을 합산한다. 기준센서 진폭 합산 값에 시험센서의 합산 값을 나누어주게 되면 시험센서 응답을 계산하게 된다.

시험센서 응답 위상을 계산할 때는 자체잡음 보다 높은 시간에 시험센서 위상에서 기준센서 위상을 뺀다. 이후에 각 시간에 대한 위상에 대한 평균과 표준편차를 구하고 표준편차 이내에 있는 위상에 대하여 다시 평균을 구하여 위상을 구한다.

위의 계산 절차를 Fig. 2에 나타내었다.

수치 실험 및 결과

스펙트럼 비를 이용한 기록계 보정

실내에서 Fig. 1과 같은 실험개요도에서 기록계는 Guralp사의 DM24를 이용하였고, 센서는 가속도계로 Kinematics사의 ES-T와, Guralp사의 CMG-5T를 이용하였다. ES-T는 최고 0.5g 중력가속도로 설정하였고, CMG-5T는 최대 가속도 측정이 1g 중력가속도로 설정하였다. 가진테이블은 LDS V721모 델을 사용하였다. 이 가진테이블은 1축방향 가진을 할 수 있어서 각 센서의 수평성분인 N성분을 기록계 채널 1번과 2번 채널에 각각 연결하였다.

가속도 센서를 사용해 얻어진 값을 물리적인 값으로 변환을 하지 않고 얻어진 정수값을 이용하였다. 이 연구에서는 상대적인 비 값을 구하기 때문에 절대적인 물리량은 의미가 없다. 스펙트럼비를 계산하기 위하여 송신원은 0.1 Hz에서 100 Hz까지 스위프(SWEEP)신호를 사용하였다. Fig. 3(a)에 보이는 바와 같이 신호를 1번 채널에 ES-T센서를 연결하고 2번 채널에 CMT-5T를 연결한 후에 측정된 주파수 영역 스펙트럼을 그린 것이다. 빨간색은 ES-T센서의 자료를 CMT-5T는 검은색을 나타낸다. 기록계 1번 채널에 대하여 2번 채널 스펙트럼 비를 표

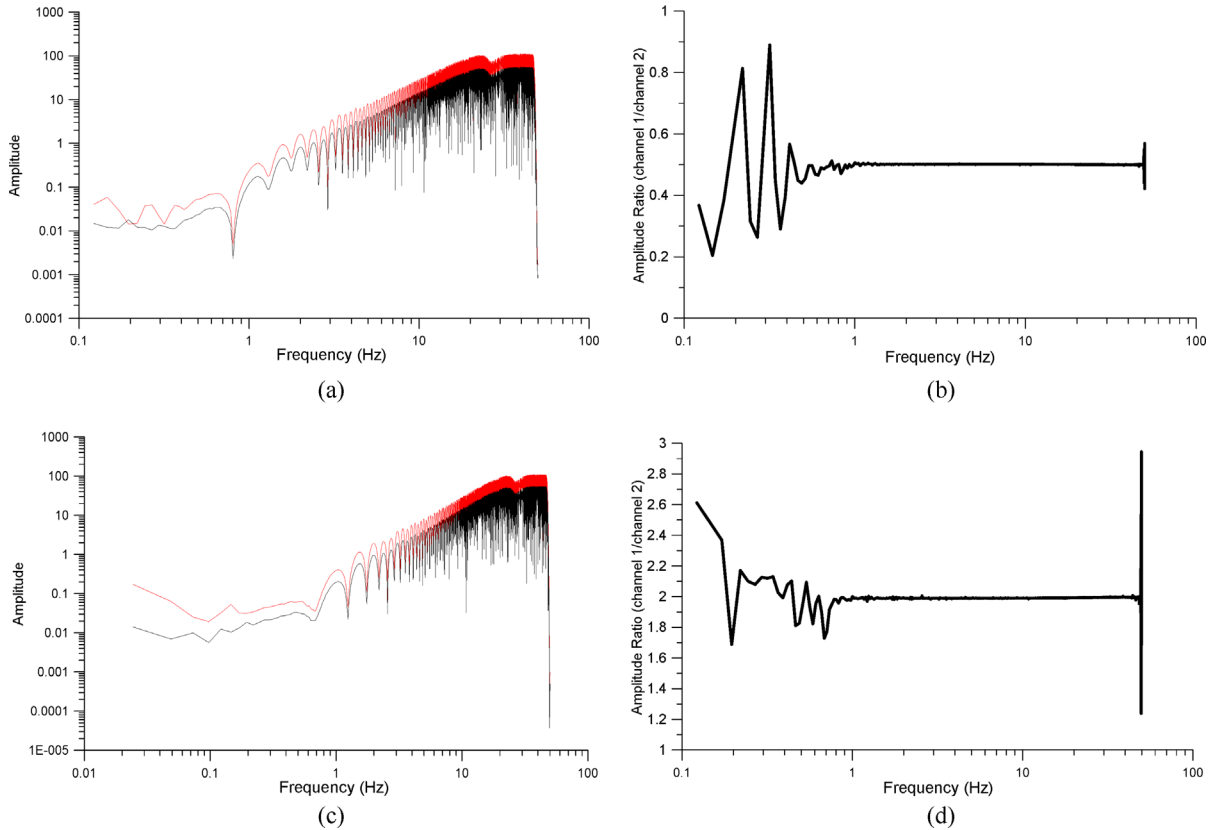


Fig. 3. Amplitude spectrum (a) of ES-T (red) and CMG-5T (black) sensors that are connected to channel 1 and 2, respectively. Ratio (b) of the amplitude spectrum of channel 1 and 2 of the DM24 recorder is shown. Amplitude spectrum (c) of ES-T (red) and CMG-5T (black) sensors after switching the connection order. Ratio (d) of amplitude spectrum of channel 1 and 2 of the DM24 recorder is shown.

시한 것이 Fig. 3(b)이다.

Fig. 3(c)은 2번째 채널에 ES-T센서를 연결하고 1번째 채널에 CMT-5T를 연결하고 가진하였을 때의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 역시 빨간색은 ES-T센서의 자료를 CMT-5T는 검은색을 나타낸다. 기록계 1번 채널에 대하여 2번 채널 스펙트럼 비를 표시한 것이 Fig. 3(d)이다.

Fig. 4(a)에는 첫 번째 실험에서 얻어진 채널간의 스펙트럼 비와 두 번째 실험에서 얻어진 채널간의 스펙트럼 비를 곱하여 나타낸 것이다. 이는 채널간 스펙트럼비의 제곱이 된다. 이를 제곱근을 하게 되면 채널간 주파수별 스펙트럼 보정값이 될 것이다. 스위한 신호와 채널간 스펙트럼비에서 신뢰할 수 있는 구간은 2 ~ 43 Hz 구간이 될 것으로 생각되어 이 구간

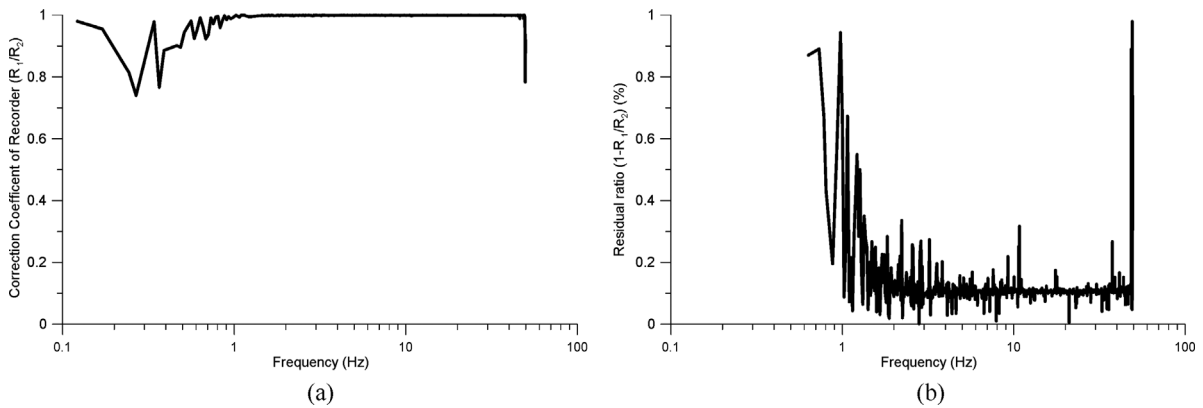


Fig. 4. Ratio spectrum (a) for the correction of channel 2 against channel 1 is shown. Ratio between channel 1 and 2 is about 0.9987. Residual ratio spectrum (b) between channel 1 and 2 is shown. The residual of ratio value is about 0.13% and is matched well with the value provided by the Guralp company.

의 평균 채널평균비를 구하였을 때 0.9989값이 얻을 수 있었고, 실제 제조사에서 제공하는 채널별 1 카운터(count)당 값은 3.162 μV 와 2.166 μV 로 채널비 값을 구하면 0.9987로 거의 동일한 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 스펙트럼 주파수별 스펙트럼 비를 빼고 나머지를 나타낸 것이 Fig. 4(b)에 보이고 있다. 각 주파수별 스펙트럼 비에서 약 0.13% 이내의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 제작사에서 제시한 채널간 비값과 거의 일치함을 알 수 있다.

힐버트 변환을 이용한 응답스펙트럼 작성

실제 가진시험이나 지진파형을 이용한 응답스펙트럼은 Fig. 5와 같은 흐름을 따라 구할 수 있다. 동종의 센서일 경우는 상관 없이 기준센서와 시험센서가 이종의 물리측정 센서일 경우 동종의 물리량으로 변환을 하여야 한다. 그리고 앞에서 설명한 응답스펙트럼 작성법에 따라 센서 응답스펙트럼을 구하게 된다. 센서 응답스펙트럼 결과를 얻거나 센서의 정상유무를 판단하기 위해서 이론적인 값과 비교를 하거나 기존의 센서 응답스펙트럼을 비교하기도 한다. 응답스펙트럼을 구하는 시험으로 첫 번째는 가진기를 이용한 시험과 2번째는 실제 이벤트의 자료를 이용하여 응답스펙트럼을 구하는 방법에 대하여 설명을 할 것이다.

가진기를 이용한 센서 스펙트럼 계산

진동대 위에 CMG-5T 1g 센서와 CMG-5T 2g 센서 두 대를 동일한 방향으로 설정해서 올려놓고 기록계는 CMG-DM24 기록계를 사용하였다. 기준센서를 CMG-5T 2g 센서를 기준센서로 설정하였다. 센서 응답스펙트럼을 계산하기 위하여 가진동 주파수는 0.1 Hz에서 100 Hz까지 스위프(sweep)을 하였다.

가진을 하였을 때 시간 영역의 자료가 Fig. 6(a)이다. CMG-5T가속도 센서 응답 스펙트럼은 Fig. 6(b)에 나타내었다. 이들 자료는 이미 동종의 2배 차이가 나는 센서임을 알고 있으므로 물리량으로 변환을 하지 않았으며 기록계에 기록된 값을 mV로 변환을 하여 이용하였다. 1g의 센서 값이 2g 센서의 값보

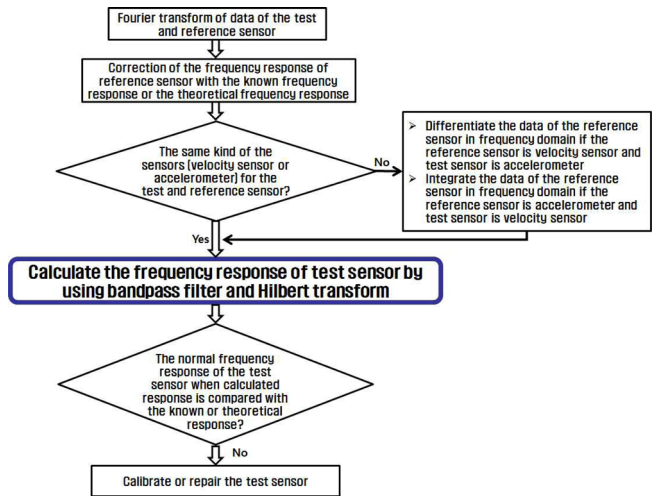


Fig. 5. Flow chart is to show how to calculate the frequency response with application of bandpass filter and Hilbert transform by comparison between test sensor and reference sensor that the response is known well.

다 2배 크게 나올 것이다. Fig. 7에는 앞에서 설명한 응답스펙트럼 계산 절차에 따라 계산한 결과를 보여주고 있다. (a)에는 진폭 스펙트럼을 (b)에는 위상스펙트럼을 나타냈다. 진폭 응답스펙트럼은 2배의 차이가 날 것이다. 이를 정규화하거나 물리적인 양으로 변환한 후 응답스펙트럼을 구한다면 이론적인 스펙트럼과 동일할 것이다. 위상스펙트럼의 경우는 거의 일치함을 알 수 있다. 이 실험에서는 저주파수의 에너지가 너무 작아서 1.0 Hz 미만의 센서스펙트럼에 대해서는 상대적으로 의미가 없다고 할 수 있겠다. 이는 진동대의 가진함수의 문제로 판단된다. 실험에서는 결과에서 알 수 있듯이 스펙트럼비를 이용한 방법과 주파수 대역폭 힐버트 변환을 이용한 방법 둘 다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

지진 이벤트를 이용한 센서 스펙트럼 계산

실제 발생하였던 이벤트 자료를 이용해 응답 스펙트럼을 구해보고자 해서 2011년 3월 11일 발생하였던 도호쿠 대지진 이

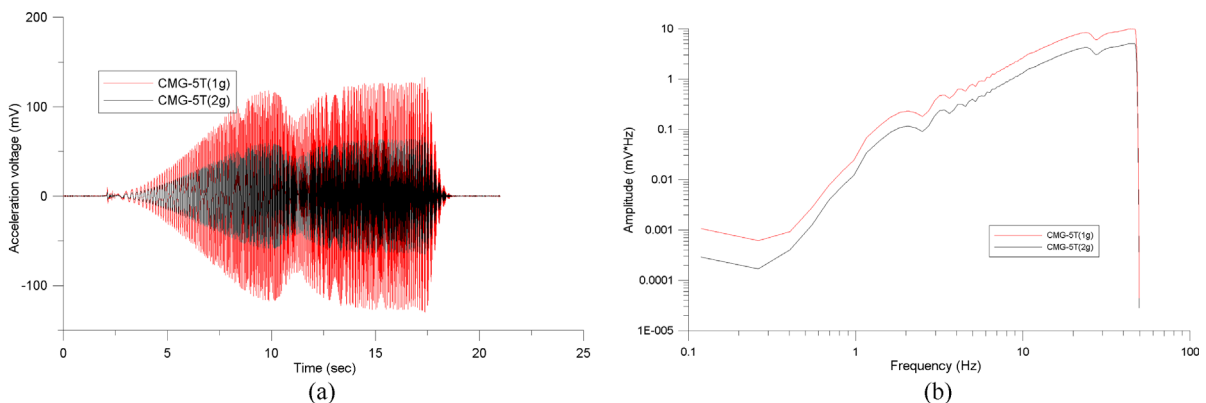


Fig. 6. The waveforms (a) of the sensor CMG5T with 1g (black) and with 2g (red) are overlapped when sweep signal are forced on vibration table. Amplitude spectrum (b) of each sensor of CMG5T with 1g (red) and with 2g (black) are shown.

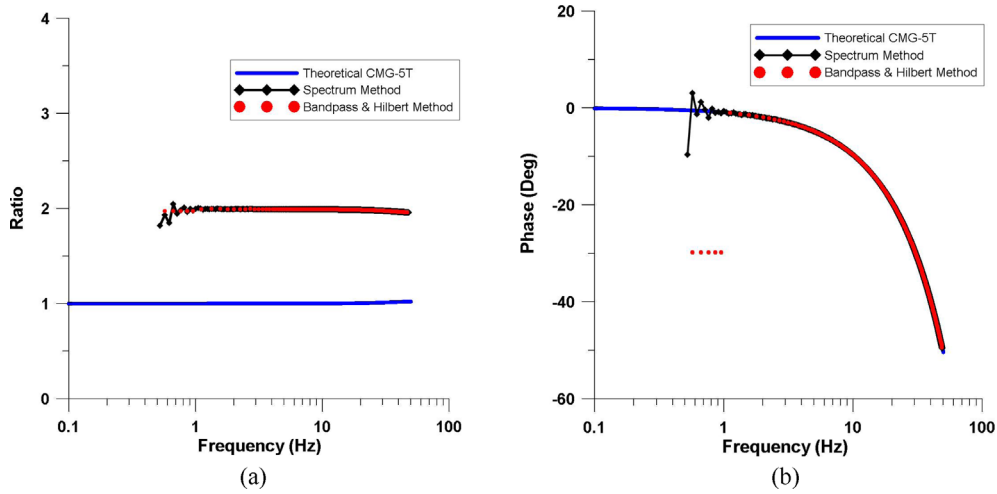


Fig. 7. The relative amplitude (a) and phase (b) responses and theoretical responses with the test of vibration table for CMG-5T sensors with 1 g and 2 g are shown. Sweep signal is forced between 0.1 ~ 100 Hz. The results of the range between 1.0 Hz and 43 Hz are good but those of low frequency below 1.0 Hz are not effective because the sweep signal of this vibration table is weak. Both spectrum ration method and Hilbert method with bandpass filter show good result.

벤트를 이용해 계산을 수행하였다. 이 때 발생하였던 자료에 대하여 한국지질자원연구원에서 운영중인 서울대학교 관측소 (SNU)의 STS-2의 저주파수 응답스펙트럼을 계산해보았다. 이 관측소는 가속도센서 ES-T도 운영을 하고 있으므로 가속도 관측소 자료를 기준센서로 사용하였다. 가속도 센서의 경우 평활한 응답스펙트럼을 가지고 있으므로 STS-2센서 응답을 계산하기에는 매우 좋은 조건을 가지고 있다고 할 수 있다.

Fig. 8(a)에는 응답스펙트럼 계산을 위해 사용된 시간 영역 자료를 보여주고 있다. 약 3600초의 시간을 사용하였다. Fig. 8(b)에는 가속도센서 ES-T자료를 이론적인 기기 응답스펙트럼을 이용해 보정한 후 속도자료로 변환한 후에 속도자료와 비교하여 도시한 것이다.

Fig. 9에는 STS-2 센서에 대하여 이론적인 응답스펙트럼과

스펙트럼 비교법, 주파수 대역폭 힐버트 변환을 이용한 응답스펙트럼 계산 결과를 동시에 나타내었다. 실제 이벤트자료를 이용한 광대역 센서(STS-2) 저주파수 대역의 응답스펙트럼 계산 시 주파수 대역폭을 이용한 힐버트변환 방법이 매우 효율적으로 계산할 수 있음을 알 수 있다. 스펙트럼 비를 이용한 계산법의 경우 약 0.1 Hz까지 구할 수 있으나 주파수 대역폭 필터를 이용한 힐버트 변환법의 경우 약 1 Hz까지의 결과까지도 매우 양호하게 얻을 수 있다. 특히 위상스펙트럼의 경우 매우 높은 주파수 까지 얻을 수 있었다. 실제 자료의 경우도 0.1 Hz 이상의 경우는 매우 진폭이 낮음을 알 수 있다.

이 결과로 보았을 때 주파수 대역폭 힐버트 변환법의 경우 신호대 잡음비가 낮은 주파수에서도 양호한 주파수 응답을 구할 수 있다. 이는 이론적인 부분에서도 설명하였듯이 자체잡음

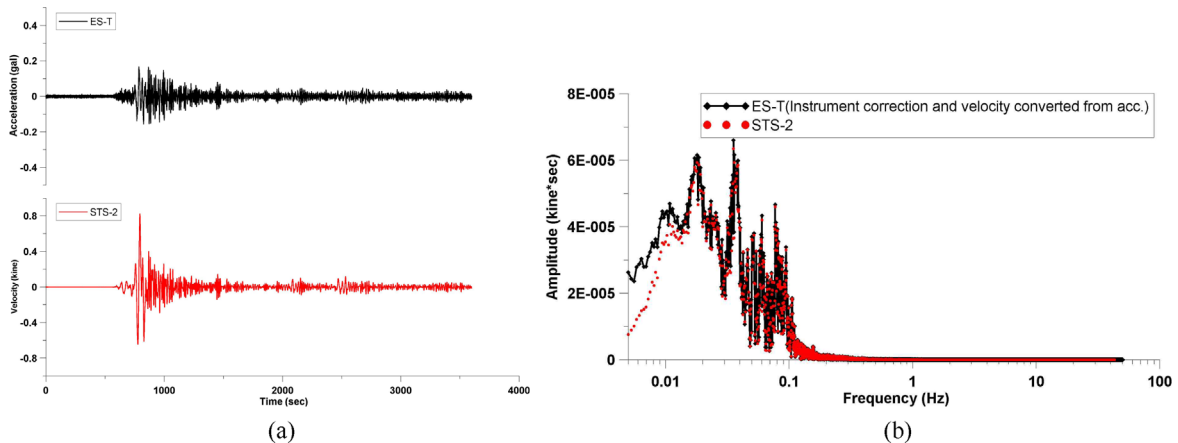


Fig. 8. Tohoku large earthquake in 2011 observed at the station SNU that has accelerometer, ES-T and Seismometer, STS-2 operated by KIGAM. The waveforms (a) of acceleration and velocity during 1 hour are shown. Acceleration data was changed into velocity after removal of instrument response. Amplitude spectrums (b) of STS-2 and velocity data transformed from acceleration data are compared.

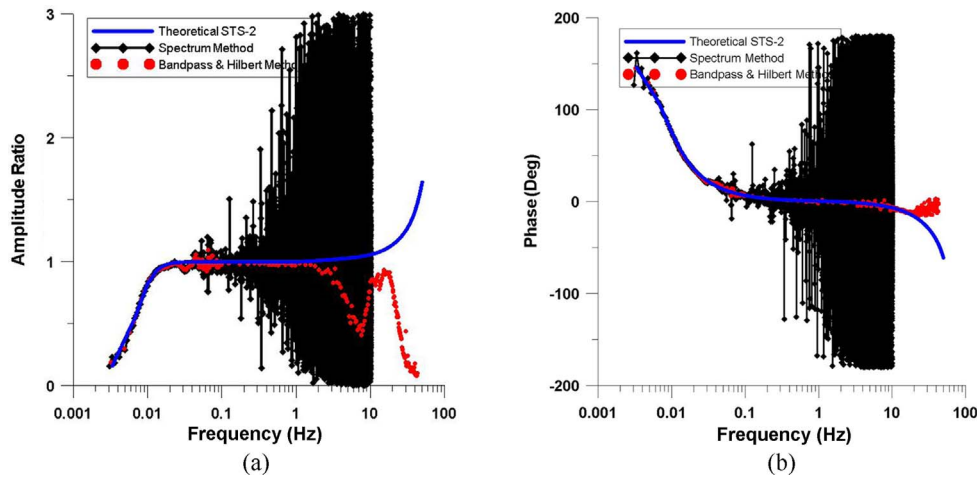


Fig. 9. The relative observed amplitude (a) and phase (b) responses and theoretical response of STS-2 were calculated with Tohoku data observed at SNU station. The reference sensor was the accelerometer. The low frequency response of broad band sensor, STS-2 was clearer than high frequency one because the large Tohoku earthquake data included low frequency data. Calculated STS-2 response of spectrum ratio method becomes contaminated as the frequency increases. On the contrary, Hilbert transform method with bandpass filter showed good amplitude response from 0.003 to 2 Hz. Phase response is much better than amplitude response.

보다 평균적으로 높은 부분의 진폭에 대해 선택적으로 진폭과 위상을 사용하기 때문이다.

향후 구현된 알고리즘은 지진센서 성능검사나 검정에 있어 유용하게 사용될 수 있을 것으로 보인다.

결 론

지진연구를 수행함에 있어 정확한 지진자료를 얻고자 하는 경우 지진기록계의 보정과 지진센서 기기보정이 필요하다. 지진기록계의 보정이 필요한 경우 또는 기록계의 측정 가능한 정보를 분실하였을 경우가 발생하는데 이러한 경우 지진기록계를 보정할 수 있는 방법을 살펴보았다. 그리고 지진자료를 사용하는 지진학자의 입장에서 센서 기기보정을 위한 응답스펙트럼을 구하고 살펴보는 것은 매우 중요하다. 이 연구에서 제시된 센서 주파수 응답 계산법에 대하여 실내시험과 실제 자료에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기록계 채널에 대한 정보 파악을 위해, 이 연구에서 개발된 채널간의 스펙트럼 비법은 상대적 보정 채널에 대하여 각주파수별로 보정이 가능하거나 평균적인 값으로도 보정이 가능하다. 다만 주파수별 정확한 정보를 위하여 센서에 가해지는 입력자료는 백색잡음을 사용하는 것이 좋다.

(2) 잡음대 신호비가 매우 높은 경우 스펙트럼비 방법이나 주파수 대역폭을 이용한 힐버트 변환 방법은 크게 차이가 없으나, 잡음대 신호비가 낮은 주파수의 경우에는 주파수 대역폭을 이용한 힐버트변환 방법이 좋은 결과를 줄 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 기상 See-At 기술개발사업인 ‘지진관측장비의 효율적 검정(KMIPA2015-3082)’ 과제(15-6703)의 지원으로 수행되었다.

References

- Havskov, J., and Alguacil, G., 2005, Instrumentation in earthquake seismology, *Springer*, Berlin, 331-365.
- Hlawatsch, F., and Auger, F., 2008, Time-frequency analysis, *Wiley*, London, 40-45.
- Hutt, C. R., Evans, J. R., Followill, F. Nigbor, R. L., and Wielandt, E., 2010, Guidelines for standardized testing of broadband seismometers and accelerometers, Open-File Report 2009-1295, *USGS*.
- Pavlis, G. L., and Vernon, F. L., 1994, Calibration of seismometers using ground noise, *BSSA*, **84**, 1243-1255.
- Ueno, T., Saito, T., Shiomi, K., and Haryu, Y., 2015, Monitoring the instrument response of the high-sensitivity seismography network in Japna (Hi-net) : effect of response changes on seismic interferometry analysis, *Earth Planets and Space*, DOI: 10.1186/s40623-015-0305-0.