



표준 측정 방법에 기반한 가속도 지진 센서 특성 평가

Evaluation of Seismic Sensors Based on the International Standard

이 용 봉* · 조 완 호† · 정 성 수* · 전 병 수*

Yong-Bong Lee*, Wan-Ho Cho†, Sung-Soo Jung* and Byung-Soo Jeon*

(Received November 16, 2018 ; Revised December 13, 2018 ; Accepted December 13, 2018)

Key Words : Seismic Sensor(지진센서), Seismometer(지진계), Calibration(교정)

ABSTRACT

The current calibration process for seismometers is not in accordance with the international meteorological standard. The contemporary increase in seismic and volcanic activity around the Korean Peninsula has highlighted the necessity for and importance of compliance with the international meteorological system. This paper details the evaluation of a characteristic seismic accelerometer according to the international standard procedure. The dynamic and static sensitivities of the seismic accelerometer are calibrated, and the degree of uncertainty of the calibration process is also evaluated based on the standard procedure for vibration accelerometers. Results indicate that the seismic accelerometer is notably sensitive to changes to the excitation frequency and direction of vibration. Therefore, the results show that the conventional method widely used in the field of seismology, of merely noting a single nominal value when using a seismometer, is subject to clear limitations.

1. 서 론

최근 들어 한반도 지역의 지진 활동 증가로 인하여, 지진 예보 및 모니터링과 관련된 사회적 관심이 증가하고 있으며, 지진 센서의 신뢰성 확보와 관련된 요구도 증가하고 있다.

현재 지진 센서와 관련해서는 국제 측정 표준 체계와 분리되어 운영되어 왔다⁽¹⁻³⁾. 이는 지진계 자체가 측정값의 동등성보다는 탐지의 민감도 등이 더 중요시되는 경향이 강했고, 관심 대역도 다른 진동 측정 범위와는 차이가 있었기 때문으로 볼 수 있다. 그러나 최근에는 국제 모니터링 망(international monitoring system, IMS) 등을 통하여 데이터가 전세계적으로 공유되고 있으며,

예측의 정확성을 높이기 위하여 국제적인 동등성 및 데이터의 신뢰성이 보장될 필요가 있다.

미국지질조사국(U.S. geological survey, USGS)에서 제안하고 있는 지진 센서들에 대한 등급 및 요구조건⁽¹⁾을 보면 일반적으로 지진센서의 측정 범위는 평탄 특성이 요구되는 범위를 기준으로 할 때, 광대역 속도 센서가 0.01 Hz ~ 50 Hz, 단주기 속도 센서의 경우 1 Hz ~ 35 Hz, 가속도 센서의 경우 0.02 Hz ~ 50 Hz이다⁽¹⁾. 그러나 국제적 동등성을 확인하기 위한 기본 과정인 국가측정표준기관(national metrology institute, NMI)간의 국제 비교에서 현재까지 수행된 주파수 하한은 0.1 Hz로⁽⁴⁾, 현 단계에서 지진계에서 요구되는 모든 주파수 범위를 대상으로 하는 데에는 한계가 있다. 이에 이 연구에서는 0.1 Hz ~ 40 Hz에서의 동적 감도를 평가하고 추가적으로

† Corresponding Author ; Member, Korea Research Institute of Standards and Science

E-mail : chowanho@kriss.re.kr

* Korea Research Institute of Standards and Science

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

로 정적 감도에 대한 평가를 수행하였다.

2. 국제 표준에 기반한 가속도계 평가

2.1 가속도 센서 표준 소급 체계

측정의 소급성(traceability)은 연속적인 교정을 통해 측정 결과를 단위의 정의에 해당하는 기준까지 연결할 수 있는 특성을 말한다⁽⁵⁾. 가속도의 단위는 m/s^2 이므로 길이와 시간에서 소급된 단위이며, 센서의 출력이 전압 신호이기 때문에 전압과도 소급성을 가져야 한다.

Fig. 1은 가속도 센서에 대한 소급체계를 간략히 보여주고 있다. 앞서 언급한 기본 단위에서 소급된 절대 교정 방법을 이용하여 기준 센서를 교정하고, 이 기준 센서를 이용하여 비교교정을 수행하여 대상 센서(device under test, DUT)에 대한 교정값을 얻게 된다.

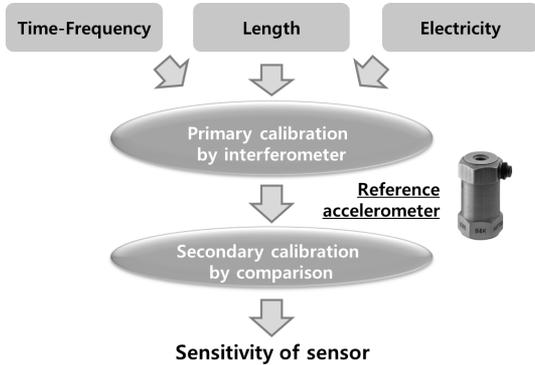


Fig. 1 Traceability chain of vibration sensors

2.2 절대 교정 방법을 이용한 기준 센서 교정

기준 센서의 교정을 위해서는 레이저 간섭계를 이용한 절대 교정 방법이 적용된다^(6,7). Fig. 2는 가속도 센서의 절대교정을 위한 시스템 구성을 보여주고 있다. 기본적인 원리는 가진기에 가속도계를 설치하고 가진부의 움직임을 레이저 간섭계를 이용하여 측정한 뒤, 가속도 센서의 출력과의 비를 가지고 감도를 결정한다.

지진 센서는 상대적으로 크기가 크고 무게가 무겁기 때문에 간섭계를 이용한 절대교정에 어려움이 있다. 그러므로 다른 형태의 정밀 계측용 기준 가속도계를 사용하는 것이 바람직하다. 이 논문에서는 기준센서로 Sherborne A263-0001-1G를 사용하였다. 이 센서를 절대 교정 시스템을 이용하여 교정한 결과 및 불확도 범위는 Fig. 3과 같다. 절대 교정과 관련된 불확도 평가 과정은 기존의 국제 비교 결과를 참조한다⁽⁸⁾.

2.3 가속도 센서의 비교교정

가속도 센서의 비교교정을 위한 시스템의 기본 구성은 Fig. 4와 같다. 기본 원리는 가진기가 연결된 동일한 구동면에 기준센서와 교정대상 센서를 동시에 부착하고, 가진기로 가진하면서 양 센서에서 나오는 출력을 비교한다⁽⁹⁾. 비교교정에 의한 감도 값은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$S_2 = \frac{V_2}{V_1} S_1 = V_R S_1 \quad (1)$$

이 때, S_1 은 기준센서의 감도, S_2 는 교정 대상 센서의 감

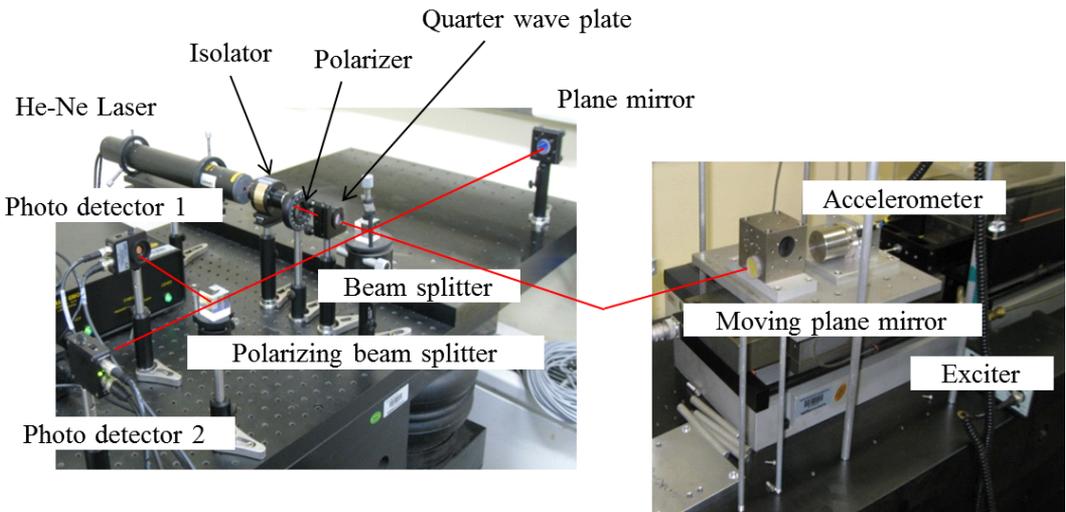


Fig. 2 Primary standard system of the accelerometer calibration

도, V_1 는 기준센서의 출력 전압, V_2 는 교정 대상 센서의 출력 전압을 의미한다.

가속도 센서 비교교정에서 기여도가 큰 주요 불확도 인자는 기준 가속도계 감도와 전압 측정 불확도이다. 두 인자에 대한 합성표준불확도는 다음 식과 같이 표현된다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{u_c^2(S_2)}{S_2} = \frac{u^2(S_1)}{S_1} + \frac{u^2(V_R)}{V_R} \quad (2)$$

기준 가속도계에 대한 불확도는 앞 절의 Fig. 3에 표시된 값을 사용한다. 상세 불확도 평가에서는 기준 센서의 장기 안정도도 포함되어야 하나, 이 측정에서는 직전에 수행된 결과를 사용하여, 장기 안정도에 의한 변화는 없는 것으로 가정하였다. 전압비 V_R 에 대한 측정 불확도는 반복 측정에 결과에 대한 표준편차를 비롯하여, 측정 기기의 측정 불확도, 분해능, 장기 안정도에 대한 합성 불확도로 표현되나, 이 측정에서는 측정 기기와 관련된 부분은 기여도가 작아 무시할 수 있다고 가정하였다. 그 외에도 측정 치구 및 온도와 같이 환경 변수의 영향도 불확도에 영향을 미치지만 그 기여도가 상대적으로 작기 때문에 반복 측정에서의 우연효과에 포함하여 평가하였다.

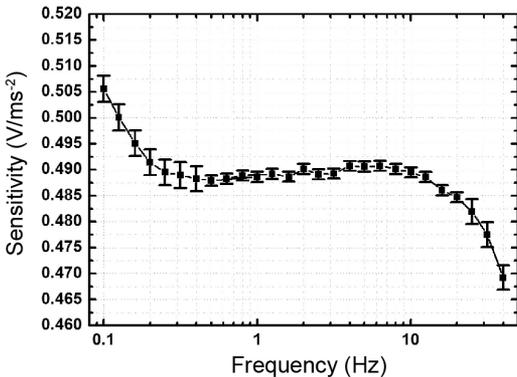


Fig. 3 Calibration result of the reference accelerometer (Sherborne A263-0001-1G)

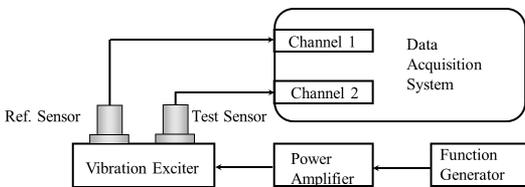


Fig. 4 Conceptual configuration of the comparison calibration system

3. 가속도 지진 센서 감도 평가

3.1 종래의 지진 센서 평가 방법

현재 지진센서의 평가에 관해서는 국제 규격으로 정해진 바는 없으며, 주로 미지질조사국 USGS에서 제시한 가이드라인⁽¹⁾을 참고로 평가가 이루어지고 있다.

이 가이드라인에서는 인수 시험을 위한 주요 평가 인자로 필요 전력, 감도, 주파수 응답 및 대역폭, 자체잡음, 동작범위, 방향성, 온도 영향 등을 들고 있다. 이 중 진동 측정 측면에서의 중요 인자는 감도 및 주파수 응답을 들 수 있다. 그러나 USGS 가이드라인에서의 감도의 측정은 교정 테이블(calibration table)이라고 불리는 장치⁽¹¹⁾를 이용하는 방법과 배정잡음에 대한 응답을 기준 센서와 비교하는 방법을 제시하고 있으며, 이는 국제 표준에 의한 진동 센서 측정 방법과는 거리가 있으며, 국제 소급체계와도 연결되어 있지 않다.

주파수 응답의 경우에도 지진 센서에 기계적인 신호를 주는 것이 아니라 교정 코일 부분에 전기적인 입력을 가하여 그에 대한 응답을 구하는 방법이 제시되어 있다⁽¹⁾. 그러나 이 방식은 실제 기계적인 입력에 대한 응답 특성이라고 보기는 어렵다. 일반적으로 지진센서의 사양을 표시할 때에도, 측정 가능 범위만 표시되거나 감도의 대표값만을 표시하며, 감도값이 측정된 주파수는 명시되어 있지 않다.

위와 같이, 지진 센서의 평가 방법은 일반적인 진동 센서의 방식과는 거리가 있으며, 국제 표준 측면에서 다양한 문제점을 내포하고 있다. 그러므로 이러한 부분을 검증하고 국제적 동등성 및 신뢰성을 보장할 수 있는 새로운 방법을 제시할 필요가 있다.

3.2 가속도 센서의 정적 감도 평가

진동 계측 센서의 경우 동적 감도만을 평가하는 것이 일반적이다. 그러나 지진 계측용 센서의 경우 매우 낮은 주파수 대역까지 측정을 해야 하기 때문에 정적 신호에 대한 특성 평가도 필요하며, 이 값을 공칭 값으로 사용하는 경우도 있다.

정적 감도의 평가를 위해서는 중력가속도에 의한 응답을 측정하는 것이 일반적이다⁽¹⁾. 중력 벡터의 크기와 방향은 일정하게 고정되어 있기 때문에, 센서를 기울이면 가속도계 기준면과 중력 벡터의 상대적인 위치 변화에 의하여 각 축에 인가되는 가속도의 크기가 변화된다. 이를 이용하여, 정적 가속도에 대한 선형성을 평

가할 수 있으며, 감도는 가속도에 대한 센서 출력의 기울기로 얻어진다. 정적 감도에 대한 소급성은 중력 가속도와 각도에서 얻을 수 있다.

Fig. 5는 정적 감도 측정을 위한 회전 테이블(tilting table)을 보여주고 있다. 테이블은 센서의 바닥면 중심을 기준으로 직교하는 2개의 회전축을 갖도록 설계되었으며, 회전각도는 0.01° 간격으로 측정할 수 있도록 구성하였다. 측정이 수행된 실험실의 중력 가속도는 9.7982 m/s², 불확도는 10⁻⁶ 수준⁽¹²⁾이며, 회전각도 분해능에 의해 발생할 수 있는 최대 오차도 0.009 % 수준으로 충분히 작다고 가정하면, 선형 근사(linear regression) 모델에서의 기울기 오차로 감도의 측정 불확도를 정의할 수 있다.

센서의 출력전압과 가속도 입력간의 관계가 선형이라고 가정하면, 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$y = S_{2,s}x + b \tag{3}$$

이 때, S_{2,s}는 센서의 정적감도, y는 전압 출력, x는 센서에 가해지는 가속도, b는 y축 절편을 의미한다. 위 관계에서 N개의 측정값을 이용하여 최소 자승(least-square) 방법으로 기울기와 절편을 구하면 다음과 같다⁽¹³⁾.

$$S_{2,s} = \frac{N\sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{N\sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i\right)^2} \tag{4a}$$

$$b = \frac{\sum_i y_i - S_{2,s} \sum_i x_i}{N} \tag{4b}$$

여기서, 각 항에 대한 불확도는 다음식과 같이 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

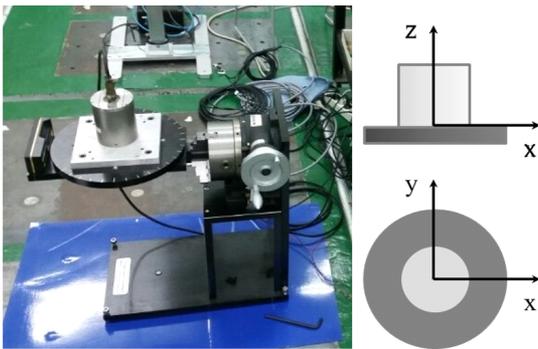


Fig. 5 Tilting table system to measure the static sensitivity of seismic sensor and its axis

$$u(y) = \left[\left(\frac{1}{n-2} \right) \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{1/2} \tag{5a}$$

$$u(S_m) = \frac{u(y)}{\left[\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}} \tag{5b}$$

$$u(b) = u(y) \cdot \left[\frac{\sum_i x_i^2}{N \cdot \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \right]^{1/2} \tag{5c}$$

Fig. 6은 가속도 지진계에 대하여, 기울임 각도에 따른 출력 변화를 측정된 결과를 보여주고 있으며, 이를 이용하여 구한 감도 및 불확도는 Table 1과 같다. 결과에서 보면, 0.07 % ~ 0.24 %의 수준의 불확도로 측

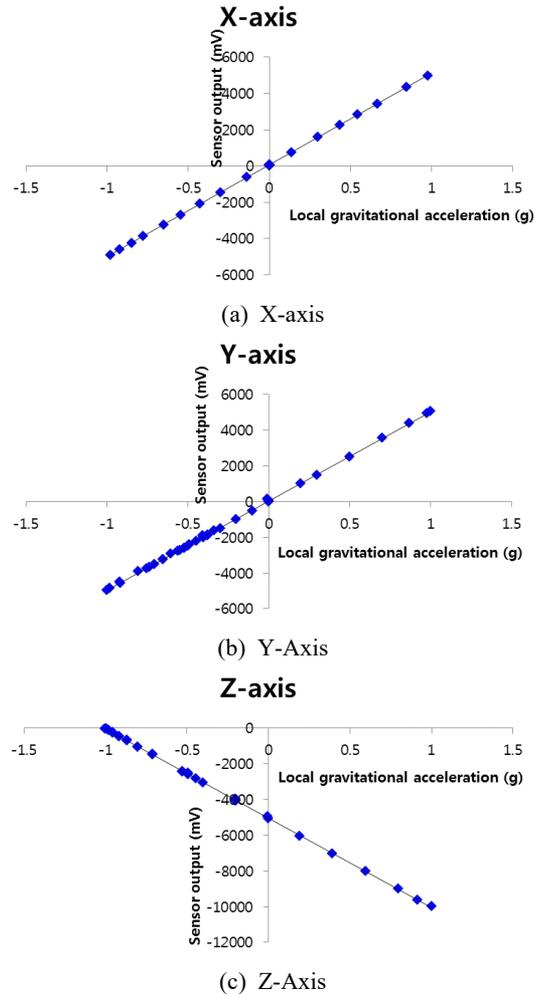


Fig. 6 Change of the sensor output according to static gravitational acceleration

정되고 있음을 알 수 있으며, 이는 일반적인 가속도계 교정과 유사한 수준이다²⁾. 또한 각 방향에 따라서 최대 1% 정도 감도의 차이가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 지진 가속도계의 사양을 표시할 때, 감도는 각 방향별로 구분하여 표시하지 않고 있기 때문에, 향후 이러한 부분에 대해서는 검토가 필요하다.

3.3 가속도 센서의 동적 감도 평가

전술한 바와 같이 지진 센서의 교정을 위해서는 2.2절에서 교정할 기준 가속도계를 이용하여 비교교정을 수행한다. 측정 시스템은 Fig. 7와 같다. 가진기는 SPEKTRA APS-129, 신호 발생기는 Agilent 33220A를 사용하였으며, 신호 수집은 Brüel & Kjær LAN-XI Type 3053 및 PULSE 소프트웨어를 이용하였다. 기준 가속도계는 앞 장에서 언급된 Sherborne A263-0001-1G를 사용하였다.

현재 시판되는 지진 센서의 많은 수는 3축 방향에 대하여 동시에 측정을 수행하는 형식이다. 교정에 사용되는 가진 시스템은 기본적으로 하나의 축에 대하여 가진이 되기 때문에 센서를 회전시키거나 가진축을 회전시켜 측정을 하여야 한다. 실험에 사용된 시스템은 수평 가진기로 수직 방향(Z 방향)의 경우 별도의 치구를 제작하여 설치하여야 한다. 일반적인 계측용 가속도계의

경우에는 비교적 용이하게 제작이 가능하나, 지진 센서의 경우 그 크기가 크고 무거우며, 가진축과 센서의 무게중심 간의 정렬 등 고려되어야 하는 사항이 많아서 이 실험에서는 수평 방향만 고려하였다.

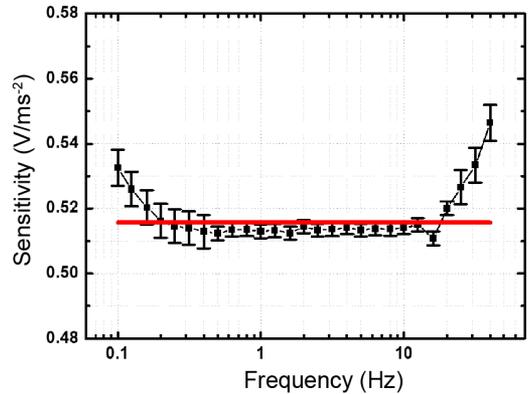
Fig. 8은 평면상의 두 축 방향(X, Y 방향)에 대하여 감도를 측정된 결과를 보여주고 있다. 검은색 심볼로 표시한 것은 10회 측정의 평균값이며, 확장불확도⁽¹⁰⁾(k=2)를 오차막대 형태로 표시하였다. 결과에서 보면 동적 감도는 주파수에 따라서 3% 내외까지 차이를 보이며, 비교적 평탄한 영역인 1 Hz~10 Hz 대역에 대해서도 정적 감도와 1% 내외의 차이가 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 정적 감도와 동적 감도가 주파수 대역에 따라서 불확도 범위 이상의 차이를 가질 수 있으며, 정적 감도나 평탄 영역의 한 점(예를 들어 1 Hz)을 대표값으로 사용할 경우 이러한 특성을 무시하게 된다는 것을 의미한다.

Table 1 The properties used in the analysis

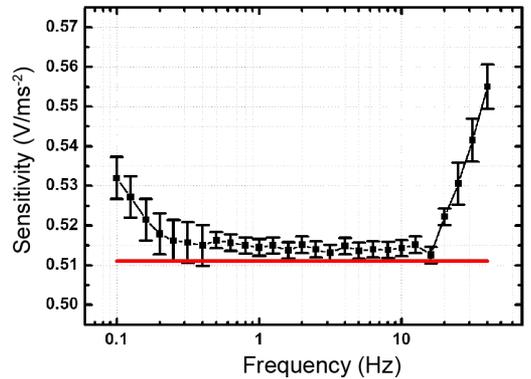
Direction	Sensitivity (mV/g)	Sensitivity (mV/ms ²)	Uncertainty (%)
X	5053.4	515.75	0.07
Y	5008.1	511.12	0.24
Z	-5003.3	-510.64	0.18



Fig. 7 System setup for comparison calibration of seismic accelerometer



(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig. 8 Measured sensitivity of the accelerometer (black square: dynamic sensitivity, red line: static sensitivity)

4. 결 론

이 연구에서는 진동 센서의 표준 교정 방법에 기초하여, 지진 센서에 대한 감도 평가를 수행하였다. 회전 테이블을 이용한 정적 감도 측정과 가속도계 비교교정 방법에 기반한 동적 감도 측정을 적용하였으며, 주파수 및 가진 방향에 따른 센서의 감도 변화를 검토하였다.

결과에서 보면, 가진주파수, 방향, 정적/동적 감도 등에서 불확도 범위 이상의 유의한 차이들이 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로, 이러한 차이들이 지진 관련 측정에 미치는 영향에 대하여 정량적인 검토가 필요하며, 이에 기반하여 지진 센서에 대한 검/교정 방법들에 대한 새로운 표준이 제안될 필요가 있다.

후 기

이 연구는 기상청 기상·지진See-At기술개발연구/지진화산기술사업(KMI2017-9100)의 지원으로 수행되었습니다.

References

(1) Hutt, C. R., Evans, J. R., Followill, F., Nigbor, R. L. and Wielandt, E., 2009, Guidelines for Standardized Testing of Broadband Seismometers and Accelerometers, USGS Open-File Report 2009-1295.

(2) ANSS Technical Integration Committee, 2007, Instrumentation Guidelines for the Advanced National Seismic System.

(3) Merchant, B. and Slad, G., 2017, Next Generation Qualification: Nanometrics T120PH Seismometer Evaluation, Sandia Report SABD2917011186.

(4) Sun, Q., Lifeng, Y., Bartoli, C., Veldman, I., Ripper, G. P., Bruns, T., Licht, T. R., Kolasa, J., Hof, C., Pineda, G. S., Dickinson, L., Ota, A., Cheung, W. S., Yankovsky, A. and Shan, C., 2017, Final Report of CCAUV.V-K3: Key Comparison in the Field of Acceleration on the Complex Charge Sensitivity, Metrologia, Vol. 54, p. 09001, doi: 10.1088/0026-1394/54/1A/09001.

(5) ISO/IEC Guide 99:2007, International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM).

(6) ISO 16063-11:1999, Methods for the Calibration of

Vibration and Shock Transducers – Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry.

(7) Lee, D. H., Cho, S. I., Lee, Y. B., Jeon, B. S. and Lee, J. K., 2005, Automation of Primary Vibration Calibration System Using Laser Interferometer, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 1241~1247.

(8) Sun, Q., and Veldman, I., 2013, Final Report on Key Comparison APMP.AUV.V-K3, Metrologia, Vol 50, p. 09001, doi: 10.1088/0026-1394/50/1A/09001.

(9) ISO 16063-21:2003, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers – Part 21: Vibration Calibration by Comparison to a Reference Transducer.

(10) ISO/IEC Guide 98-3:1995, Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

(11) Lennatz Electronic Document No. 990-0062, 2005, The CT-EW1 Calibration Table, Lennatz Electronic GmbH.

(12) Choi, I. M., 2017, Test Procedure of Absolute Gravity Measurement, KRISS Documents for Test Procedure, T-01-052-2017.

(13) Taylor, R., 1996, An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements, University Science Books, Sausalito, California.



and seismology.

Yong-Bong Lee received M.S. and Ph. D. degree in Mechanical Engineering at KAIST. He is currently working at Korea Research Institute of Standards and Science as a senior researcher. His research interests are standard for vibration measurement



the product sound quality (PSQ) and noise control.

Wan-Ho Cho received M.S. and Ph. D. degree in Mechanical Engineering at KAIST. He is currently working at Korea Research Institute of Standards and Science as a senior researcher. His research interests are in the area of acoustic metrology, sound field control, and acoustical array system. He also interests in