

가속도계 정밀 위상 교정 시스템

Precision Phase Calibration System of Accelerometers

이용봉¹, 정성수¹, 진종한^{2,✉}

Yong Bong Lee¹, Sung Soo Jung¹ and Jonghan Jin^{2,✉}

¹ 한국표준과학연구원 음향진동센터 (Center for Acoustic and Vibration, KRISS)

² 한국표준과학연구원 길이센터 (Center for Length, KRISS)

✉ Corresponding author: jonghan@kriss.re.kr, Tel: 042-868-5867

Manuscript received: 2010.12.30 / Accepted: 2011.2.7

Accelerometers have been exploited widely in various fields from monitoring vibration of precision machines to detecting an earthquake wave. The precision calibration of the accelerometers is required to maintain the measurement reliability when measuring the vibration of objects with accelerometers for modal analysis. Among evaluation factors for determining sensitivity of accelerometers, phase delay term should be also considered for accurate calibration. In this paper, a new calibration system of accelerometers capable of measuring phase delay as well as magnitude of its sensitivity was proposed and realized in the frequency range of 20 Hz to 5 kHz.

Key Words: Accelerometers (가속도계), Phase Calibration (위상 교정), Sensitivity (감도), Laser Interferometer (레이저 간섭계)

1. 서론

모든 기계 장치나 구조물은 저주파에서부터 고주파까지 진동을 수반한다. 일반적으로 이런 원치 않는 진동을 제거하기 위해 현장에서는 설계 단계에서부터 조심스럽게 검토되고 있지만 현실적으로 완벽히 제거하지는 못하기 때문에 이에 기인하여 유발될 수 있는 고장이나 오동작을 최소화하기 위한 노력이 절실히 요구된다. 이런 원치 않는 진동을 점점하고 억제하기 위한 부가적인 노력은 진동을 직접 측정함으로써 시작된다. 이를 위해 가속도센서의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이와 함께 측정의 신뢰도 향상을 위한 정밀 교정의 수요 또한 커지고 있다.^{1,2}

최근에는 이런 가속도 센서들이 초정밀 기계 뿐만 아니라 안전한 삶을 영위하기 위한 지진파 검출 시스템에 까지 활용되고 있어 측정 신뢰성

확보를 위한 정밀 교정의 중요성은 무엇보다 크다고 할 것이다. 이를 위해서는 저주파수부터 고주파수까지 넓은 주파수 범위에서 높은 정밀도로 정확한 진동을 측정할 수 있는 가속도계 교정 시스템의 확보가 절실히 요구된다.

외부의 진동을 전기적 출력으로 변환해 주는 장치인 가속도센서의 감도는 가해진 진동의 크기와 이로 인하여 가속도센서로부터 발생하는 전기적 출력의 비로 정의된다. 이런 가속도센서의 감도는 일반적으로 크기와 위상을 갖는 복소량으로 주어지며, 감도의 크기 성분만을 알고 있으면 외부 진동의 정확한 형태를 파악할 수 없기 때문에 위상 특성 또한 함께 정확히 파악되어야만 진동센서에 의해 발생하는 신호 왜곡을 정확히 평가할 수 있다.

현재 국내에서 널리 사용되는 진동센서의 감도를 평가하기 위해 한국표준과학연구원(KRISS)에서

는 감도의 크기 성분 만을 통한 교정을 수행하고 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 초정밀 기계에서 부터 지진 예측에 이르기까지 수요가 넓어지고 있으며, 요구되는 교정 정밀도도 또한 높아지고 있어 위상 교정까지 가능한 가속도계 정밀 교정 시스템이 절실히 필요하다.

독일, 일본 등의 선진 외국 표준기관들도 이와 관련한 교정 시스템이 구축 중에 있으며, 독일의 표준연구원인 PTB 에서 가속도계 위상 교정 시스템을 운영하고 있다. KRISS 에서도 이런 교정 수요에 맞춰 안정화된 레이저 간섭계를 통한 가속도계 정밀 위상 교정 시스템을 구현하고자 한다. 이를 통하여 국내의 정밀 교정 수요를 충족시키고자 하며 5 년 주기로 각국의 표준 기관들 사이에 수행하는 국제 비교(Key comparison, KC)를 통해 국제적인 측정 신뢰성을 확보하고자 한다. 그 동안은 전세계적으로 KC 에서 가속도계 감도의 크기만을 비교하였으나, 2010 년 이후부터는 감도의 위상 측정이 선택사항으로 반영되어 국제 비교가 수행되고 있다.

본 논문에서는 우리나라에서 사용되는 가속도계의 신뢰성을 유지함과 동시에 국제적인 교정 능력과 신뢰성을 평가 받기 위한 가속도계 정밀 위상 교정 시스템을 제한하고 구현하고자 한다. 이는 최근 선진 외국 표준기관들이 개발하고 있는 가속도계 위상 교정 시스템과는 광학 잡음 감소를 위한 간섭계의 구성, 두 광검출기 신호의 상대적인 크기 보정 및 위상 분리기법에서 차별성을 두고 있으며, 이를 통해 우리나라의 독자적인 가속도계 특성 평가 시스템을 확보하고자 한다.

2. 기본 이론 및 실험 장치

가속도계의 교정은 잘 정의된 진동을 입력으로 가하고, 가속도계의 출력 및 그 진동을 측정함으로써 이루어진다. 일반적으로 가해지는 진동은 충격 가진과 단일 주파수로 정현 가진하는 경우로 나눌 수 있으며, 범용 가속도계 교정을 위해서 일반적으로 정현 가진이 널리 사용된다.

정현 교정의 경우 가속도계에 정현파 형태의 진동이 입력으로 가해지고 이에 따른 미세 변위를 단일모드 레이저 간섭계를 통해 측정하게 된다. 이렇게 측정된 신호를 정현파로 근사하고 미분하여 가속도를 결정한다. 이 신호를 가속도계 출력 신호와 비교함으로써 감도의 진폭 성분과 가속도

계의 위상 지연 등을 평가할 수 있다.^{1,2}

본 논문에서 사용된 가진 시스템은 정현파 발생기(Agilent 33120A)와 전자기식 가진기(B&K 4808)를 사용하여 구현하였다. 가속도계의 미세 변위를 측정하기 위해서 사용된 레이저 간섭계는 길이 표준에 대한 소급성 확보를 위해 안정화된 헬륨네온 레이저(Melles Griot 901)를 광원으로 사용하여 마이켈슨 간섭계 형태로 구성하였다. 레이저 간섭계의 파장은 632.8 nm 이며, 길이 소급성 확보를 위해 정밀 파장 교정을 수행하였다. 가속도계의 전기적 출력은 저잡음 신호수집장치(NI 5124)를 통하여 측정을 수행하였다.

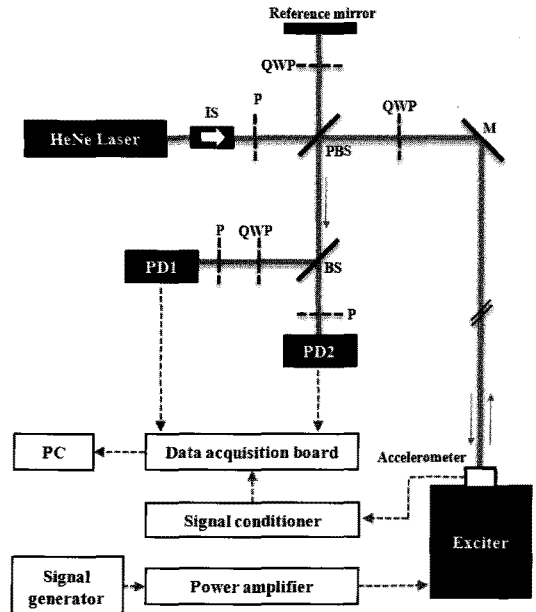


Fig. 1 Experimental setup - block diagram (P: Polarizer, QWP: Quarter-wave plate, PBS: polarization beam splitter, M: mirror, BS: beam splitter, PD: photo-detector, IS: isolator)

전체적인 가속도계 정밀 위상 교정 시스템은 Fig. 1 과 같이 크게 세 부분으로 구성되어진다. 정확한 정현 가진을 위한 진동 가진 시스템, 외부 잡음 없이 측정 주파수 대역이 넓은 진동 파형 측정에 적합한 단일모드 레이저 간섭계, 정밀한 전기 신호의 수집과 이를 분석하기 위한 평가 시스템으로 이루어져 있다. 현재 위상 교정이 가능한 주파수 범위는 국제적으로도 널리 평가되는 20 Hz ~ 5 kHz 로 정하였다. 레이저 간섭계는 단일 모드

레이저를 사용한 마이켈슨 형태의 간섭계로써 Fig. 1 과 같은 구성으로 이루어져 있다. 각종 광학 부품들에서 반사되어 나온 빛이 광원으로 되반사되어 입사되면 광원의 주파수 안정도에 영향을 줄 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 일차적으로 간섭계의 편광 방향을 고려하며 간섭계를 구성하였고, 동시에 광감쇄기(isolator)를 사용하여 완벽히 되돌아 가는 빛을 차단하였다. 변위의 방향성을 알기 위해 편광 성분을 분리하여 두 개의 광검출기(PD1 과 PD2)를 통해 각 편광 방향에 따른 간섭 신호를 획득하였다. 이렇게 획득된 신호는 이론적으로 정확히 90°의 위상차이를 갖는다. 이 두 신호의 위상 지연을 통해 최종적으로 변위의 방향성을 결정할 수 있다.

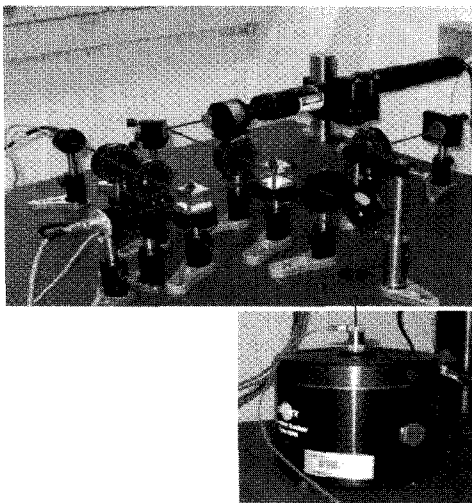


Fig. 2 Photographic view of the calibration system

가진기에서 발생하는 진동이 레이저 간섭계 부분으로 전달되는 것을 차단하기 위하여 가진기 부분과 레이저 간섭계 부분을 물리적으로 분리하였으며, 특히 레이저 간섭계 부분은 방진테이블 위에 Fig. 2 와 같이 설치하였다. 레이저 간섭계의 기준면은 방진테이블 위에 설치되어 있으며, 가속도계의 미세 진폭을 측정하기 위해 측정면으로 향하는 빛은 거울을 통해 방진 테이블의 아래에 있는 가진기 및 가속도계 방향으로 전송된다. 가속도계의 윗면은 일반적으로 거친 상태이므로 반사되는 광량이 적어 간섭 신호를 획득하기 어렵기 때문에 미세 거울을 부착하여 반사량을 향상시켰다. 이를 통해 가진 시스템에 의해 주기적인 진동을 하는

가속도계의 변위를 측정할 수 있다.

일반적인 간섭 신호는 식(1)과 같이 간단히 표현할 수 있으며, 여기서 편광 방향에 따라 Fig. 1 의 PD1 과 PD2 에서 얻어지는 두 간섭 신호는 배경광, I_0 을 제거하면 식(2)와 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 얻고자하는 위상, ϕ 은 두 광검출기에서 얻어진 신호를 나눠주고, 역탄젠트 함수(arc tangent)를 취하여 식(4)와 같이 결정할 수 있다.

$$I = I_0(1 + \gamma \cdot \cos(\phi)) \tag{1}$$

$$I_{PD1} \propto A \cdot \cos\phi \tag{2}$$

$$I_{PD2} \propto B \cdot \sin\phi \tag{3}$$

$$\phi = \tan^{-1}(I_{PD2} / I_{PD1}) \tag{4}$$

여기서, I_{PD1} 과 I_{PD2} 는 광검출기, PD1 과 PD2 에서 얻어진 간섭 신호이며, A 와 B 는 각 광검출기에서 얻어진 간섭 신호의 진폭이다. I_0 는 배경광의 크기이며, γ 는 간섭 신호의 가시도이다.

3. 실험결과

본 연구에서는 가속도 센서 감도의 크기 및 위상 지연을 평가하기 위해, 기준기급 가속도 센서(B&K 8305)를 선정하여 실험하였다. 가속도 센서는 앞서 언급한 바와 같이 정현 가진기 위에 설치되어 있으며, 가속도 센서에서 나오는 신호와 단일모드 레이저 간섭계의 신호를 비교함으로써 가속도 센서의 감도를 정밀 교정할 수 있다. 본 논문에서 구현한 가속도계 정밀 위상 교정 시스템의 평가를 위해 가진기에 20 Hz 에서 5 kHz 의 정현파를 입력으로 가하였다. 측정신호로부터 가속도계 감도의 크기와 위상을 구하기 위해 사인파 추정법(sine-approximation method, SAM)을 적용하였다.³⁻⁵ 서로 90°위상차를 갖는 간섭신호는 두 광검출기(photo detector)를 통하여 각각 1 초 동안 100 MHz 의 샘플링 주파수로 획득하였다. 획득된 신호는 식(4)에 의해 위상변화를 결정할 수 있다. 이 때, 간섭 신호의 위상 불연속이 생기지 않도록 하기 위해 위상 펼침(phase unwrapping)한 뒤, 최소자승법(least-square method)을 적용하여 정현 함수로 근사

한다. 이렇게 얻어진 정현 함수로부터 위상신호의 크기와 초기위상을 결정한다.⁶

변위 신호는 위상신호에 비례하므로 위상신호의 크기 및 초기위상으로부터 변위 신호의 크기 및 초기위상을 결정할 수 있다. 가속도 신호는 변위 신호를 미분하여 결정하였다. 가속도계의 전기적 출력 신호에 대해서도 앞서 언급한 바와 마찬가지로 최소자승법을 적용하여 정현 함수로 근사하고 크기 및 위상을 계산하였다.

가속도계 출력 신호의 크기와 가속도의 크기를 나누어 가속도계 감도의 크기를 결정하고, 가속도계 출력 신호의 위상과 가속도 위상의 차이로부터 가속도계 감도의 위상 지연을 결정한다. 여기서, 두 광검출기의 출력신호의 크기가 동일하지 않거나, 정확히 90°위상차를 이루지 못하게 되면 위상 지연을 평가할 때 오차가 발생할 수 있기 때문에 이를 줄이기 위해서 두 광검출기 신호에 대해서도 보정을 수행해야 한다.

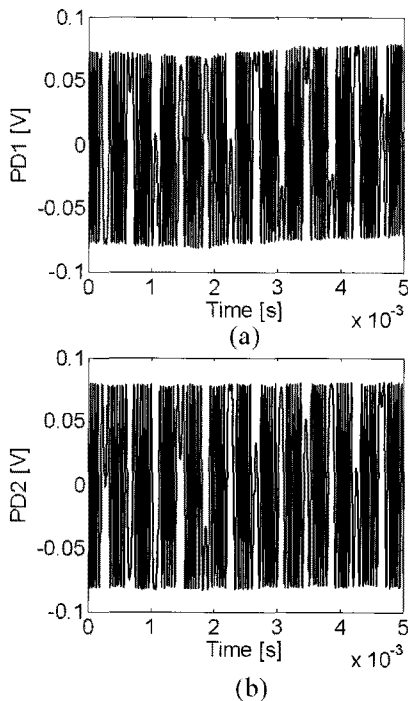


Fig. 3 Two photo detector outputs at 1.25 kHz; (a) interference signal at PD1, (b) interference signal at PD2

일반적으로 레이저 간섭계의 두 광검출기에서 획득된 신호의 크기가 동일하지 않으면 두 광검출

기 신호의 리사쥬(Lissajous) 파형은 타원을 이루게 된다. 이는 빛을 나누는 광학 부품 자체가 이상적으로 완벽하지 않아 완벽히 동일하게 광량을 나누어주지 못해 발생한다. 비록 두 광검출기 신호의 크기가 동일하더라도 위상차가 정확히 90°를 이루지 못하면 두 신호의 리사쥬 파형이 완전한 원을 이루지 못하고 타원 형태를 나타내게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최소제곱법, 고유치 해석 등의 신호처리를 통하여 타원 형태의 리사쥬 파형을 원(circle) 형태의 리사쥬 파형으로 변환하여 광검출기 신호에 대한 보정을 완료하였다.

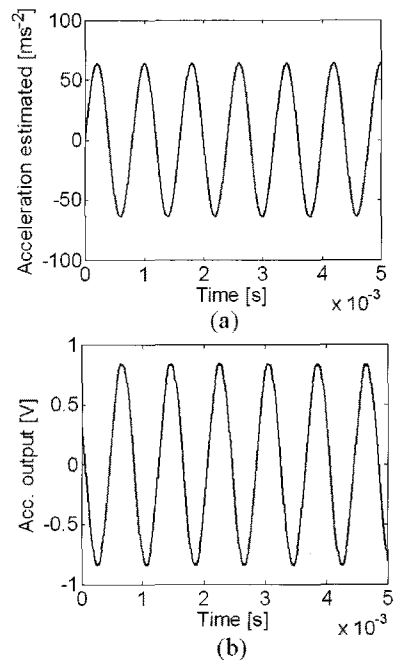


Fig. 4 Acceleration obtained by the laser interferometer and the accelerometer; (a) acceleration obtained by laser interferometer, (b) output signal of the accelerometer

레이저 간섭계를 통해 얻어진 가속도계의 변위에 대한 간섭신호는 Fig. 3 과 같다. 이 때 간섭신호는 본 연구에서 목표로 하는 가진 주파수가 20 Hz ~ 5 kHz 중에 1.25 kHz 인 것을 대표로 선정하여 나타내었다. Fig. 3(a)는 광검출기 1(PD1)에서, Fig. 3(b)는 광검출기 2(PD2)에서 획득된 것이다. Figure 4(a)는 앞서 언급한 분석 과정을 통해 두 간섭신호로부터 얻어진 가속도 신호를 보여준다. 이 때 가속도계 자체에서 출력되는 전기 신호를 저잡음 신

호수집장치에 의해 획득하였으며, Fig. 4(b)는 이렇게 획득된 신호를 보여준다. Figure 5는 두 간섭 신호에서 얻어지는 원형 리사주 파형을 보여주며, 이는 광검출기에 얻어진 간섭 신호에 대해 보정이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

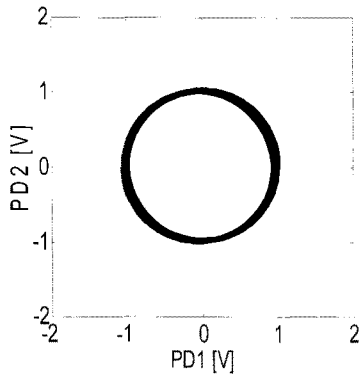


Fig. 5 Lissajous pattern generated by two interference signals after signal processing

Table 1 Sensitivity of accelerometer

Frequency (Hz)	Magnitude (mV/ms ⁻²)	Phase lag (degree)
20	11.2	-29.3
40	12.2	-15.5
80	12.5	-7.9
160	12.6	-4.0
630	12.6	-0.9
1250	12.7	-0.1
2500	12.6	0.7
3000	12.7	0.9
4000	12.7	1.7
5000	12.6	2.1

정현파 가진에 의해 진동하는 가속도 센서의 변위를 통해 얻어진 가속도 파형과 가속도 센서 자체의 전기 신호 출력을 비교하여 가속도 센서 감도의 크기 및 위상 지연을 구하였다. 가진 주파수에 따른 가속도계 감도의 크기 및 위상은 Table 1에 정리하였고, 가진 주파수에 대한 경향성을 Fig. 6에 도시하였다. 가속도계 감도의 크기는 주파수가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 가속도계의 일반적인 특성이다. 감도의 위상 지연도 저주파에서는 큰 차이를 보이다가 주파수

가 높아지면서 작아지는 특성을 보인다. 일반적으로 가속도계는 신호증폭기(signal conditioner)와 함께 사용되므로 측정 결과에는 증폭기의 특성이 혼합되어 있다. Table 1에 따르면 교정에 사용한 가속도계는 가진 주파수 630 Hz ~ 5 kHz의 범위에서는 감도의 크기는 평균 12.7 mV/ms⁻²로 평가되며, 감도의 위상지연은 2°이내로 평가되었다.

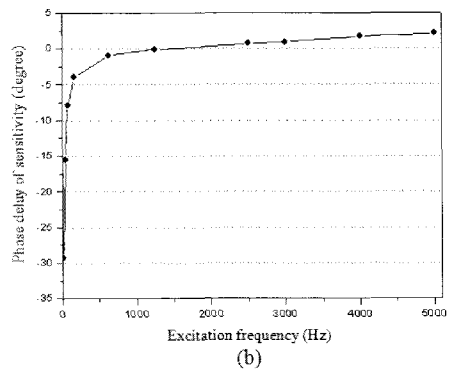
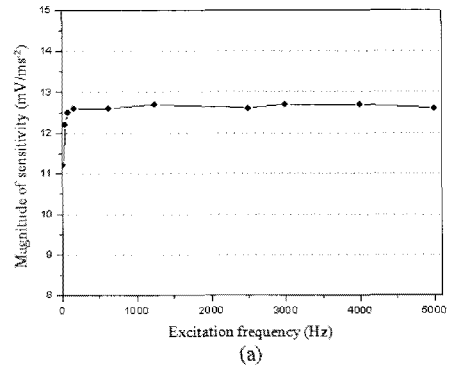


Fig. 6 Sensitivity of accelerometer

4. 결론

국내에는 지진센터를 비롯한 여러 종류의 가속도센서에 대한 교정 수요가 늘고 높은 정확도도 또한 요구되고 있다. 본 논문에서는 가속도계의 감도 뿐만 아니라 위상지연까지 평가할 수 있는 정밀 교정 시스템을 구현하였다. 이를 통해 KRISS에서는 가진 주파수 20 Hz에서 5 kHz의 범위에서 길이 및 시간 표준에 소급하여 가속도계 감도 교정이 가능한 측정 시스템을 확보하게 되었다. 이를 통해 일반적으로 널리 사용되는 가속도 센서(B&K 8305)의 감도 측정을 수행하였으며, 가진 주파수 630 Hz ~ 5 kHz의 범위에서 가속도 센서 감도

의 크기는 평균 12.7 mV/ms^2 , 감도의 위상지연은 2° 이내로 평가되었다.

본 연구를 통해 전세계적으로 선진 표준기관들을 중심으로 구축되고 있는 가속도계 정밀 위상 교정 시스템을 광학 잡음 감소를 위한 간섭계 구성, 두 광검출기 신호의 상대적인 크기 보정 및 위상 분리기법에 차별성을 두고 KRISS 에서 독자적으로 확보함으로써 국내에서도 세계적인 수준의 정밀 가속도계 교정이 가능할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 ‘기반측정표준 확립 및 교정측정능력 선진화 연구’ 과제에 의해 지원받아 수행된 결과입니다.

참고문헌

1. Lee, Y. B., Jung, S. J. and Jin, J., "Development of accelerometer phase lag calibration system," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1059-1060, 2010.
2. Lee, Y. B., Kim, H. C. and Kim, S. W., "Determination of the sensitivity phase of an accelerometer based on an analysis of the harmonic components of the interference signal," Vol. 19, No. 4, Paper No. 045204, 2008.
3. ISO 16063-1, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers : Part 1: Basic concepts," 1998.
4. ISO 16063-11, "Methods for the calibration of vibration and shock transducers : Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry," 1999.
5. Sun, Q., Wabinski, W. and Bruns, T., "Investigation of primary vibration calibration at high frequencies using the homodyne quadrature sine-approximation method: problems and solutions," Meas. Sci. Technol., Vol. 17, No. 8, pp. 2197-2205, 2006.
6. Dobosz, M., Usuda, T. and Kurosawa, T., "Methods for the calibration of vibration pick-ups by laser interferometry: I Theoretical analysis," Meas. Sci. Technol., Vol. 9, No. 2, pp. 232-239, 1998.