

레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계의 절대교정

Primary vibration calibration by laser interferometry

이 두 회*, 이 용 봉*, 전 병 수*

Doo-Hee Lee, Yong-Bong Lee, and Byung-Soo Jun

Abstract

A number of calibration methods are described in ISO 16063 (revision of ISO 5347) and they may be used for special purposes. However, the use of a laser interferometer is recommended for primary calibration. This paper introduces the primary vibration calibration by measuring displacement amplitude and frequency using laser interferometry.

1. 서론

국제표준화기구(International Organization for Standardization)에서는 1987년 진동 및 충격 센서 교정방법 일반^[1]을, 1993년에는 레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계의 절대교정 방법^[2,3]을 제정·발표하였다. 진동 가속도계는 보통 교정될 가속도계에 정현파 진동을 가해주고 이의 진동 주파수와 진동변위를 측정하여 가속도를 결정하고, 이와 동시에 가속도계의 전기적 출력력을 측정함으로써 교정된다. 실효 진동 가속도 10 m/s^2 가 가해지는 경우 진동변위는 1 Hz에서 0.36 m로부터 10 kHz에서 3.6 nm까지 크게 변한다. 따라서 진동 및 충격 가속도계의 정밀한 교정을 위해서는 넓은 범위의 진동변위를 정밀하게 측정할 수 있는 기술이 요구된다. 여기서 가속도계를 교정하는데 사용되는 간섭계는 보통 Michelson 형으로 구성하며 진동변위가 비교적 큰 600 Hz 이하의 주파수 영역에서는 간섭무늬 계수법을, 진동변위가 작아지는 고주파수 영역에서는 간섭무늬 소멸법 또는 Bessel 함수비 (J_3/J_1 또는 J_4/J_2) 방법을 사용하도록 권고하고 있다.

측정표준의 국제적 일치를 확보하는 방안으로서 측정분야별로 국제비교가 활성화되고 있는 추세이며, 1996년 2월부터 1997년 8월까지 APMP(Asia-Pacific Metrology Program)의 진동 가속도계 국제비교^[4]가 ISO 5347의 방법에 따

라 실시되었다. 산업 전반에 걸쳐 음향·초음파·진동 분야의 정밀계측 필요성이 증대되어 1998년도에 CIPM 산하에 음향·초음파·진동 자문위원회 (CCAUV; Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration)가 신설되었으며^[5], 진동분야의 첫 번째 활동으로 KRISS, PTB, NIST, NRLM 등 12개국 측정표준기관이 참여하는 진동 가속도계 Key Comparison(CCAUV.V-K1)이 2000년 1월부터 2001년 6월에 걸쳐 진행되었다.

앞으로 계속하여 진행될 진동분야의 핵심측정표준 국제비교나 국제표준의 보완·수정작업 등 일련의 국제적 활동에 동참하여 진동분야 국가측정표준의 국제적 일치를 확인하고 KRISS의 국제적 위상을 확보하기 위해서는 진동 가속도계 절대교정의 정밀도 향상연구에 대한 지속적인 연구 수행이 요구된다.

여기서는 진동분야 국가표준으로 KRISS에서 확립·유지하고 있는 레이저 간섭계를 이용한 가속도계 절대교정 시스템을 간단히 소개한다.

2. 레이저 간섭계를 이용한 진동변위 측정

2-1. Michelson 간섭계

진동 가속도계의 교정은 사용 주파수 영역에 걸쳐 가속도계의 측정면에 입력된 진동 가속도와 가속도계로부터 출력되는 전압 또는 전하량의 비, 즉 감도(sensitivity)를 정해주는 것으로

* 한국표준과학연구원

진동 변위, 진동 주파수 및 가속도계로부터의 출력신호의 크기를 측정하면 가속도계의 감도를 결정할 수 있다. 가속도계 측정면의 진동 변위를 측정하기 위한 간섭계는 일반적으로 Fig. 1에서 보는 것과 같이 Michelson 형으로 구성된다. 기준 거울(reference mirror) M_1 은 고정되어 있고 다른 거울 M_2 가 진동한다.

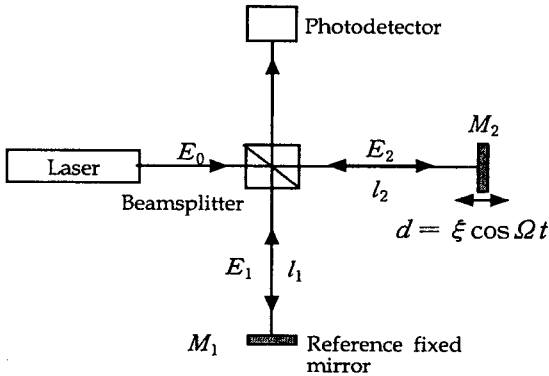


Fig. 1. Michelson interferometer.

여기서 l_1 과 l_2 는 각각 기준광(reference beam)과 탐사광(probe beam)이 광분할기(beamsplitter)를 통과한 후 지나는 실제 경로이며, 기준광과 탐사광의 전기장 벡터 E_1, E_2 는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$E_1 = A_1 \exp \left[j \left(\omega t + \frac{4\pi}{\lambda} l_1 \right) \right] \quad (1)$$

$$E_2 = A_2 \exp \left\{ j \left[\omega t + \frac{4\pi}{\lambda} (l_2 + d) \right] \right\} \quad (2)$$

여기서 λ 는 레이저 광원의 파장이다.

광검출기가 보는 광세기 $I(t)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$I(t) = |E_1 + E_2|^2 = A + B \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} (L + d) \right] \quad (3)$$

여기서 A 와 B 는 기준광과 신호광의 광세기와 편광상태에 따라 정해지는 상수이고, $L = l_2 - l_1$ 이다.

2-2. 간섭무늬 계수법

광세기의 표현식 (3)에서 알 수 있듯이 Michelson 간섭계에서 간섭무늬 하나의 이동은 $\lambda/2$ 의 변위에 해당하며, 진동거울 M_2 가 $\xi_0 \cos 2\pi f t$ 의 정현 진동을 한다면, 진동의 한

주기 동안에 진동거울은 $4\xi_0$ 만큼 이동하므로 진동의 한 주기 동안 발생하는 간섭무늬의 수 N_{1p} 는 다음과 같다.

$$N_{1p} = \frac{4\xi_0}{(\lambda/2)} = 8 \frac{\xi_0}{\lambda} \quad (4)$$

이로부터 진동 진폭 ξ_0 는 다음과 같이 주어진다.

$$\xi_0 = N_{1p} \cdot \frac{\lambda}{8} = \frac{\lambda}{8} \times \frac{N_{1p}}{f} \quad (5)$$

여기서 N_{1p} 는 1 초 동안에 측정된 간섭무늬 수이고 f 는 진동 주파수이다.

정현 진동의 경우 진동 가속도 a_0 는 다음과 같이 주어진다.

$$a_0 = (2\pi f)^2 \xi_0 = \frac{1}{2} \pi^2 \cdot \lambda \cdot f \cdot N_{1p} \quad (6)$$

파장 λ 가 632.8 nm인 He-Ne 레이저를 광원으로 사용한다면 $a_0 = 3.1228 \times 10^{-6} \times f \times N_{1p}$ 가 되고, 감도 S 는 다음과 같이 주어진다.

$$S = 0.3202 \times 10^6 \times \frac{V}{f \times N_{1p}} \quad (7)$$

여기서 V 는 전하증폭기를 통하여 나오는 가속도계의 출력 전압이다.

이러한 간섭무늬 계수법(fringe counting method)은 진동 변위가 비교적 큰 800 Hz 이하의 주파수 범위에서 가속도계를 교정할 때 주로 이용된다.

2-3. Bessel 함수 방법

진동 발생기(vibration exciter)로 발생시킬 수 있는 최대 진동 가속도 a_{max} 는 보통 70 g 미만으로 어떤 한계를 가지며, 진동 변위는 $\xi = a/(2\pi f)^2$ 로 주어지므로 진동 주파수가 증가함에 따라 f^2 에 반비례하여 감소한다. 따라서 800 Hz 이상의 주파수 영역에서 진동 변위를 측정할 때 간섭무늬 수 계수법을 적용하는 경우 간섭무늬 수가 적어져 진동 변위의 정밀한 측정이 곤란해진다.

식 (3)의 광세기 $I(t)$ 를 급수 전개하면 다음과 같으므로 $I(t)$ 의 주파수 스펙트럼을 생각함으로써 몇 가지 방법들을 고안할 수 있다.

광세기 $I(t)$ 를 급수 전개하면 다음과 같다.

$$I(t) = A + B \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \left\{ J_0 \left(\frac{4\pi \xi_0}{\lambda} \right) \right.$$

$$\begin{aligned}
& -2J_2\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right)\cos(2\omega_1t) \\
& + 2J_4\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right)\cos(4\omega_1t) - \dots \} \\
& - B \sin \frac{4\pi L}{\lambda} \left\{ 2J_1\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right)\cos(\omega_1t) \right. \\
& \left. - 2J_3\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right)\cos(3\omega_1t) + \dots \right\}
\end{aligned}$$

즉

$$\begin{aligned}
I(t) = & A + B \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) J_0\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right) \\
& + 2B \sin\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n-1}\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right) \cos(2n-1)\omega t \\
& + 2B \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right) \cos 2n\omega t \quad (8)
\end{aligned}$$

여기서 $J_m\left(\frac{4\pi\xi_0}{\lambda}\right)$ 는 인수(argument)가 $4\pi\xi_0/\lambda$ 인 m 차의 제 1종 Bessel 함수이다.

2-3-1. 간섭무늬 소멸법

광세기 $I(t)$ 의 주파수 스펙트럼에서 진동 주파수 f 의 m 차 고조파 성분의 크기가 n 번째 0 이 되도록 진동 진폭 ξ_{mn} 을 조절하면

$$J_m\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_{mn}\right) = 0$$

을 풀어서 ξ_{mn} 를 구할 수 있다.

진동 진폭을 조절하고 진동 변위 ξ_{mn} 와 진동 가속도 a_{mn} 은 다음식으로 주어진다.

$$\xi_{mn} = j_{mn} \times \frac{\lambda}{4\pi} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
a_{mn} = & 4\pi^2 \times f^2 \times \xi_{mn} \\
= & 39.478 \times 10^{-6} \times \xi_{mn} \times f^2 \quad (10)
\end{aligned}$$

여기서 ξ_{mn} 은 m 차 Bessel 함수 값이 n 번째 0이 되는 점에서의 변위 진폭이며 j_{mn} 은 m 차 Bessel 함수 값이 n 번째 0이 되는 인수이다. 즉, $J_m(j_{mn}) = 0$ 이다.

2-3-2. Bessel 함수비 방법

위의 방법대로 진폭을 조절하는 것이 어려울 경우는 아래와 같이 간섭신호의 두 고조파 성분의 비를 측정하고 Bessel 함수표로부터 ξ_0 를 구할 수 있다.

$$\frac{J_3\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_0\right)}{J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_0\right)} = \frac{V_3}{V_1} \quad (15)$$

$$\frac{J_4\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_0\right)}{J_2\left(\frac{4\pi}{\lambda} \xi_0\right)} = \frac{V_4}{V_2} \quad (16)$$

를 풀어서 ξ_0 를 구한다. 여기서 V_1, V_2, V_3 및 V_4 는 각각 기본, 1차, 2차, 3차 및 4차 고조파 성분의 크기이다.

3. 진동 가속도계 절대교정 시스템

3-1. 진동 가속도계 절대교정 시스템

Fig. 2는 한국표준과학연구원의 레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계 절대교정 시스템의 구성도를 보여준다. 진폭측정을 위한 레이저 간섭계, 교정될 가속도계에 진동을 가해주는 진동 발생기 및 가속도계 출력전압 측정부 세 부분으로 구성되어 있다. Fig. 2에서 보는 것처럼 교정될 진동 가속도계는 측정면(measuring surface)이 위로 향하도록 진동 발생기(Vibration Exciter B&K 4808; s/n 1550449)의 운동부분(head)위에 10-32 UNF stud를 사용하여 2 N·m의 토크로 볼트결합되며, 전력증폭기(Power Amplifier B&K 2712; s/n 1564384)를 통하여 연결된 신호발생기(Signal Generator HP 3326A; s/n 2519A01126)에 의해 정현진동을 한다.

정현진동의 진폭을 측정하기 위한 간섭계의 광원으로는 파장이 632.8 nm인 stabilized He-Ne laser (Melles Griot 05-STP-901; s/n 21247)을 사용하고, 상승시간(rising time)이 5 ns인 광검출기(Newport 875 PIN Photodetector; s/n 361)로 검출된 간섭신호는 간섭무늬 계수기와 주파수 분석기(Dynamic Signal Analyzer HP 3562A; s/n 2502A01424) 및 오실로스코프(Tektronix 2230; s/n 3146A56094)에 연결되어 있다.

3-2. 교정환경 (calibration environments)

- room temperature : 23 ± 3 °C
- relative humidity : 55 ± 5 %
- air pressure : 100 ± 5 kPa

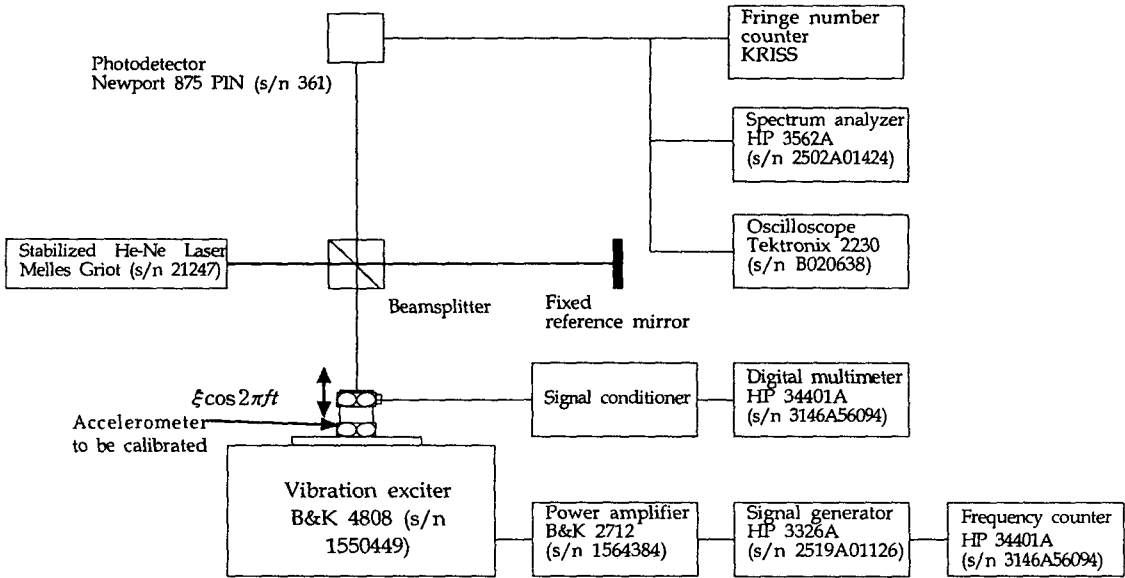


Fig. 2. KRISS accelerometer calibration system using laser

4. 절대교정 시스템의 교정 불확도

Fig. 3은 표준 가속도계 (B&K Type 8305 ; s/n 1610202)와 전하 증폭기(B&K Type 2626; s/n 1242511)로 구성된 표준시료 세트에 대해 실시된 APMP (Asia Pacific Metrology Program)의 진동가속도계 국제비교 결과를 보여준다. 8개국 참가 표준기관은 교정시 전하 증폭기의 이득과 필터는 다음과 같이 설정하도록 하였다.

Settings of the Charge amplifier;

"Transducer Sensitivity" : 1.26 pC/Unit

"Range" : 0.01 Volt/Unit

"Lower Frequency 3 dB Limit : 0.3 Hz

"Upper Frequency Limit : 30 kHz.

가속도계와 전하 증폭기 조합의 감도는 가속도계의 측정면에 가해지는 진동 가속도를 레이저 간섭계를 사용하여 구하고 그 때의 전기적 출력을 비교함으로써 정해진다. 진동 주파수에 따라 진동변위가 크게 달라지므로 주파수에 따라 진동변위 측정방법을 아래와 같이 적용하였다.

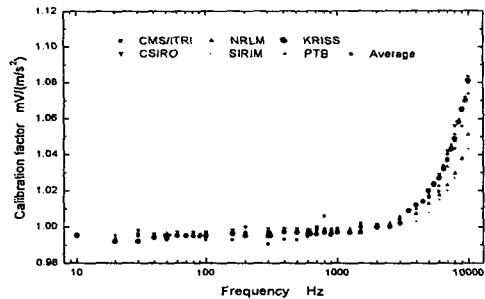


Fig. 3. APMP international comparison results on vibration accelerometer.

- 가. 10 Hz부터 800 Hz 까지의 주파수 영역에서는 2-1절에 기술된 간섭무늬 수 계수법을 적용하여 감도를 정하였으며,
- 나. 600 Hz부터 5 kHz 까지의 주파수 영역에서는 2-3-1에 기술된 간섭무늬 소멸법과 2-3-2의 고조파 성분비 측정법을 별도로 적용하여 감도를 정하고,
- 다. 5 kHz부터 10 kHz 까지의 주파수 영역에서는 2-3-2에 기술된 고조파 성분비 측정법을 적용하여 감도를 구하였다.

표준시료의 기준감도는 측정 주파수마다 다른 측정값들과 분명하게 차이가 나는 값들을 제외시키고 일치성을 갖는 측정값들의 평균으로 얻어진다. KRISS의 측정결과는 모두 기준감도 계산에 이용되었으며, 총 41개의 측정점 중에서 31개(76 %)가 ± 0.15 %, 35개(85 %)가 ± 0.2 % 이내로 기준감도와 일치하고 있으며, 30 Hz와 1.5 kHz에서는 기준감도보다 약 0.3 % 작게 나타난다.

교정 불확도 (calibration uncertainty)는 모든 측정 불확도 요인들을 고려하여 측정불확도 표현지침에 따라 평가하여야 한다. KRISS 진동 가속도계 절대교정 시스템의 주요 인자별 상대 표준 불확도(relative standard uncertainty)가 Table 1에 요약되어 있는데 모두 B형으로 대칭 직사각형 분포로 간주된다. A형의 실험 표준 불확도는 B형에 비해 무시될 수 있는 정도이다.

Table 1 Relative standard uncertainties of accelerometer calibration.

Parameter	Relative standard uncertainty at CL = 95% %
실효전압 측정	$0.10/\sqrt{3} = 0.058$
진동파형의 왜율	$0.11/\sqrt{3} = 0.064$
진동진폭 측정 (간섭 무늬 계수 불확도)	$0.01/\sqrt{3} = 0.006$
tilting 및 광선 정렬 오차	$0.05/\sqrt{3} = 0.029$
transverse sensitivity of accelerometer	$0.10/\sqrt{3} = 0.058$
진동테이블의 잡음 진동	$0.01/\sqrt{3} = 0.006$
진동 주파수 측정 불확도	$0.01/\sqrt{3} = 0.006$

160 Hz의 기준 주파수와 100 m/s²의 기준 가속도에서 감도 교정의 상대 확장 불확도(relative expanded uncertainty)는 95%의 신뢰 수준에서 다음과 같다.

$$U = \frac{2.6}{\sqrt{3}} \sqrt{0.1^2 + 0.11^2 + 3 \times 0.01^2 + 0.05^2 + 0.1^2} = 0.28 \%$$

5. 결론

진동분야 국가표준으로 확립되어 유지되고 있는 KRISS의 레이저 간섭계를 이용하는 진동 가속도계 절대교정 시스템과 절대교정 방법을 간단히 살펴보았다. 가속도계에 정현진동을 가해 주고, 레이저 간섭계를 이용하여 가속도계에 가해지는 정현진동의 변위를 측정하여 가속도를 결정하고, 가속도계로부터의 전기적 출력과 비교함으로써 감도를 구하는 이 방법은 현재 진동분야의 국제표준으로 인식되고 있다.

측정표준의 국제적 일치를 확보하는 방안으로 측정분야별로 활성화되고 있는 국제비교와 국제표준의 보완·수정작업 등 일련의 국제적인 활동에 동참하여 국제적 위상을 확보하기 위한 지속적인 정밀도 향상연구가 요구된다.

참고문헌

1. ISO 5347-0: Methods for the calibration of vibration and shock pickups - Part 0 : Basic concepts (1987).
2. ISO 5347-1: Methods for the calibration of vibration and shock pickups - Part 1 : Primary vibration calibration by laser interferometer (1993).
3. ISO 5347-6: Methods for the calibration of vibration and shock pickups - Part 6 : Primary vibration calibration at low frequencies (1993).
4. APMP International Comparison of Standard Accelerometer, APMP-IC-4-95, (1998).
5. 제 21차 국제도량형총회보고서, 한국표준과학연구원 (1999).