

레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계 절대교정 시스템 자동화

Automation of Primary Vibration Calibration System Using Laser Interferometer

이 두 희† · 조 승 일* · 이 용 봉** · 전 병 수*** · 이 중 규****

Doo Hee Lee, Seung Il Cho, Yong Bong Lee, Byeong Su Jeon and Jong Kyu Lee

(2005년 4월 14일 접수 ; 2005년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Calibration(교정), Accelerometer(가속도계), Laser Interferometer(레이저 간섭계)

ABSTRACT

An automation of primary vibration calibration system was developed and tested. Using GPIB interface, the console PC make the control of equipments, signal collecting and save measuring results automatically by the instructions in the program by Visual Basic. Several trials of automatic calibration for the accelerometer(ENDEVCO 2270) using this developed system give the reliable results.

1. 서 론

현재 진동 분야의 국가표준 보급은 ISO 16063-1⁽¹⁾과 16063-11⁽²⁾에 따른 레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계 절대교정 방법으로 이루어져 있다. 진동 분야 교정 검사기관이 12개 이상으로 늘어났고, APMP, AUV.V-K1과 CCAUV, V-K1 등 핵심 측정표준 국제비교와 실험실간 상호비교 등이 빈번해짐에 따라 진동 가속도계 절대 교정에 대한 수요가 크게 증가하였다^(3,4).

교정검사기관에서 이루어지는 비교교정의 기준용 가속도계로 사용되는 가속도계를 절대교정할 경우 교정 주파수는 20 Hz부터 5 kHz까지의 주파수 범위에서 옥타브 밴드로 선정하며, 수동으로 교정을 하는 경우 측정, 데이터 입력 및 계산 등에 32시간(4일) 정도가

소요되고 있다. 국제비교의 경우는 교정 주파수를 1/3-옥타브 밴드로 선정하고, 가속도계 측정면 위의 최소 3-점 이상에서 독립된 측정으로 얻어진 감도를 평균하여 감도를 구하도록 기술규약으로 정하므로 측정에 소요되는 시간은 훨씬 늘어난다.

진동 분야 국가표준 보급의 효율성을 제고하고 신뢰성 향상을 위해서는 교정 소요 시간을 단축시킬 수 있는 교정 시스템의 자동화가 요구된다. 교정 자동화로 교정 소요 시간이 단축되면 환경 변화에 따른 영향을 줄여 불확도 개선효과를 얻을 수 있고, 특히 고도의 전문성을 요하는 가속도계 절대교정에서 비숙련 측정자도 측정 매뉴얼에 따라 쉽게 교정할 수도 있다.

이 연구의 목적은 이두희 등⁽⁴⁾이 제작한 진동 가속도계 절대교정 시스템의 자동화이다. 이를 위해 절대교정 시스템의 구성장비들을 제어용 컴퓨터와 GPIB 인터페이스 시키고, 구성 장비들의 제어와 신호 수집 및 측정 결과 저장 등 전체 절대교정 과정을 자동으로 수행하는 절대교정 자동화 프로그램을 Visual Basic으로 작성하였으며, 자동화된 시스템의 유효성을 기준가속도계를 사용하여 20 Hz에서 5 kHz의 주파수 범위에서 평가하였다.

† 책임저자 : 정희원, 한국표준과학연구원 음향·진동그룹
E-mail : dhlee@kriss.re.kr

Tel : (042) 868-5309, Fax : (042) 868-5643

* 정희원, 환경진단연구원 기술팀

** 정희원, 한국표준과학연구원 음향·진동그룹

*** 한국표준과학연구원 음향·진동그룹

**** 부경대학교 물리학과

2. 이론적 배경

2.1 Michelson 간섭계

진동 가속도계의 교정은 사용 주파수 영역에 걸쳐 가속도계의 측정면에 입력된 진동 가속도와 가속도계로부터 나오는 출력전압 또는 전하량의 비, 즉 감도 (sensitivity 또는 calibration factor)를 정해주는 것으로 진동 변위, 진동 주파수 및 가속도계로부터의 출력 신호의 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. 여기서 l_1 과 l_2 는 각각 기준광 (reference beam)과 탐사광(probe beam)이 광분할기 (beam splitter)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.

광검출기(photodetector)가 보는 광세기 $I(t)$ 는 다음 식으로 주어진다.

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

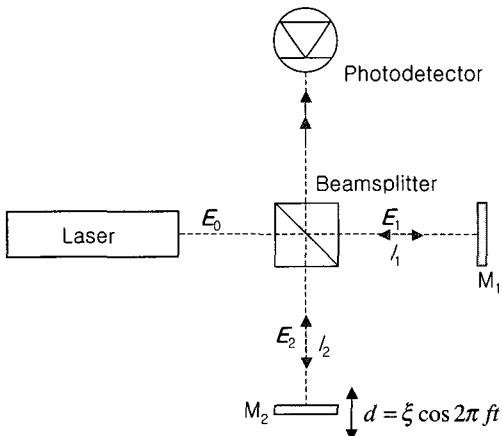


Fig. 1 Michelson interferometer

여기서 A와 B는 기준광과 신호광의 광세기와 편광상태에 따라 정해지는 상수이고, $L = l_2 - l_1$ 이다.

2.2 간섭무늬 계수법

식 (3)에서 알 수 있듯이 Michelson 간섭계에서 간섭무늬 하나의 이동은 $\lambda/2$ 의 변위에 해당하며, 진동거울 M_2 가 $\xi_0 \cos 2\pi ft$ 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.

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

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

정현 진동의 경우 진동 가속도 a_0 는 다음과 같이 주어진다.

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

파장 λ 가 632.81 nm인 He-Ne 레이저를 사용한다면 $a_0 = 3.1228 \times 10^{-6} \times f \times N_{1s}$ 가 되고, 감도 S는 다음과 같이 주어진다.

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

여기서 V는 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 함수비 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 반비례

하여 감소한다. 따라서 800 Hz 이상의 주파수 영역에서 진동 변위를 측정할 때 간섭무늬 수 계수법을 적용하는 경우 간섭무늬 수가 적어져 진동 변위의 정밀한 측정이 곤란해진다. 이러한 경우 광세기 $I(t)$ 의 주파수 스펙트럼을 고려하여 진동 변위를 구할 수 있다.

식 (3)의 광세기 $I(t)$ 를 급수 전개하면 다음과 같다.

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

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.

아래의 두 식과 같이 간섭신호의 두 고조파 성분의 비를 측정하여, Bessel 함수표를 이용하여 ξ_0 를 구할 수 있다.

$$\frac{J_3\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi_0\right)}{J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi_0\right)} = \frac{V_3}{V_1} \quad (9)$$

$$\frac{J_4\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi_0\right)}{J_2\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi_0\right)} = \frac{V_4}{V_2} \quad (10)$$

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

3. 시스템 구성

Fig. 2는 레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계 절대교정 시스템의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 10 Hz~10 kHz의 주파수 범위에서 대략 3~300 m/s^2 의 가진레벨을 발생시킬 수 있고, 5 nm~12 mm의 진동진폭을 측정할 수 있다.

크게 보면 교정될 가속도계에 정현파 진동을 가해주는 진동 발생 시스템과 진폭 측정을 위한 레이저 간섭계 및 가속도계의 출력 측정부 세 부분으로 구성되어 있다.

정현파 진동 발생시스템은 신호 발생기(signal generator HP 3326A)와 전력증폭기(power amplifier B&K 2712) 및 진동 발생기(vibration exciter B&K 4808)로 구성되어 있다. 정현 진동의 진폭을 측정하기 위한 간섭계의 광원으로 파장이 632.81 nm인 stabilized He-Ne laser(melles griot 05-STP-901)를 사용하였고, 응답속도가 5 ns인 광검출기(Newport 875 PIN photodetector)로 검출되는 간섭신호는 간섭무늬 계수기(universal counter agilent 53131A)와 주파수 분석기(dynamic signal analyzer HP 3562A)

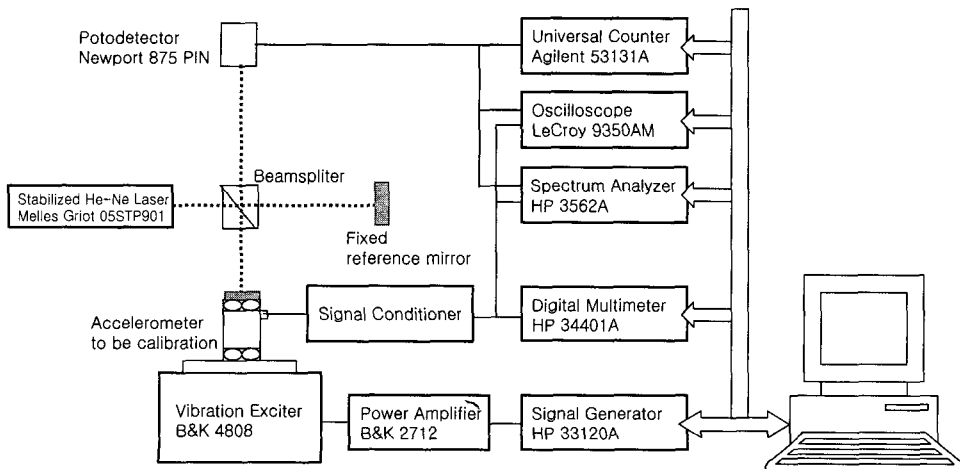


Fig. 2 Block diagram of automated accelerometer calibration system using laser interferometer

및 오실로스코프(tektronix 2230)를 사용하여 측정하였다. 가속도계의 출력값은 신호 증폭기를 통하여 멀티미터(digital multimeter HP 34401A)에 나타난다.

레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계 절대교정 시스템의 구성장비들은 절대교정 자동화 프로그램이 설치된 산업용 PC에 GPIB 케이블을 사용해 인터페이스하였다. 교정 자동화 프로그램은 비주얼 베이직으로 작성하였으며, 종래 수동으로 하던 교정 주파수 선정, 교정 가속도 진폭 조정 및 측정 결과의 기록을 자동으로 실시하고 측정된 모든 결과를 EXCEL 파일로 저장하도록 하였다.

4. 절대교정 시스템의 자동화 기법

이 구에서 개발한 진동 가속도계 절대교정 자동화 프로그램은 Fig.3에 나타난 것과 같이 File, Tool, Setup, Service 및 Window의 5개의 기본 골격에 세부 기능을 갖는 구조로 구성되어 있다.

이 교정 자동화 프로그램의 기능에는 진동 가속도계의 절대교정 자동화 기능과 같은 기본 기능 이외에도 교정 장비 설정, 업체 분류, 교정중 진행 표시, 교정 결과 자동 저장 기능의 부가 기능과 증폭기 교정, Analyzer 테스트와 같은 응용 기능들이 있다.

절대교정 자동화 프로그램을 실행시키면 컴퓨터에 GPIB 인터페이스된 장비들의 ON/OFF상태, GPIB 어드레스들을 점검하여 Fig.4에 나타난 것과 같이 메인

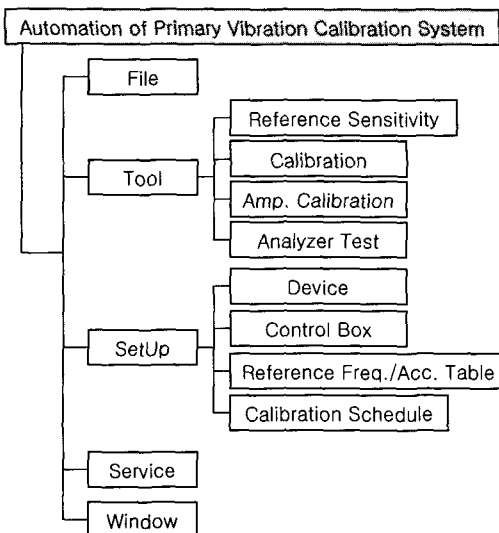


Fig.3 Chart of the program for automatic calibration of accelerometer

인 화면의 왼쪽 아래에 보이는 상태 창에 점검 결과를 표시한다. 프로그램이 실행된 도중에 교정 장비를 켜거나, 통신에 문제가 발생된 경우에는 GPIB 설정 창으로 들어가 장비의 ON/OFF상태, GPIB 어드레스를 재점검하고, 이 결과는 상태 표시 창에 결과를 다시 표시하게 된다.

교정 의뢰된 교정 대상 가속도계에 대한 일반적인 정보로서 의뢰기관, 가속도계와 신호 증폭기의 모델 및 일련번호를 Fig.5에 보이는 화면에 입력한다. 또한 가속도계와 전용 신호 증폭기를 하나의 시스템으로 한 전하감도를 교정할 것인지 아니면 가속도계만의 전하감도를 교정할 것인지에 따라 정해지는 절대교정 구성 장비들의 품명과 일련번호를 확인하여 수정/입력하고, 신호 증폭기의 이득 등 설정치를 입력하여 저장한다. 입력된 정보는 측정 결과 파일의 첫 번째 페이지에 저장된다.

자동화 프로그램으로 교정을 수행할 때 선택된 교

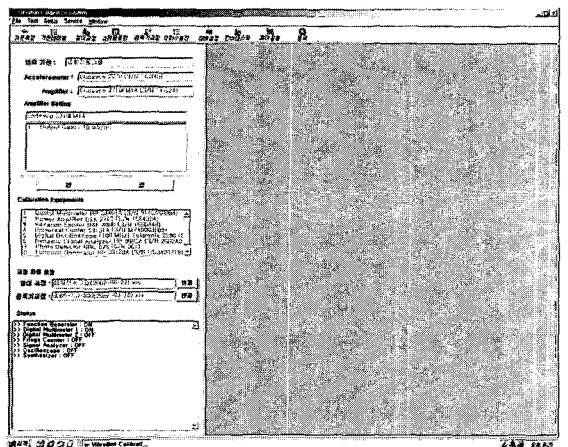


Fig.4 Main dialogue box of the program for automatic calibration of accelerometer

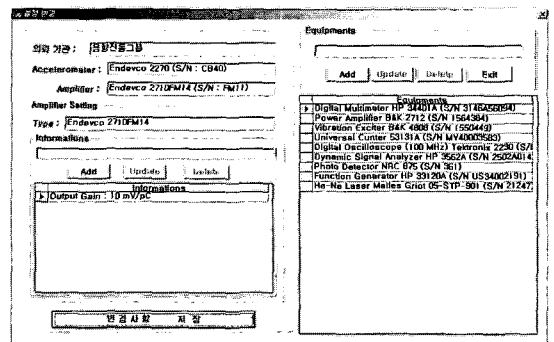


Fig.5 General information dialogue box of automated program

정 주파수에서 원하는 진폭값으로 교정 가속도를 제어하는 것이 중요하다. 따라서 절대교정을 수행하기 전에 교정 가속도 제어의 기준값으로 사용할 기준 전압감도, 즉 기준 주파수 및 기준 가속도 진폭에서의 감도를 측정하여야 한다. 보통 기준 주파수는 160 Hz(또는 80 Hz)로 선택하며, 기준 가속도 진폭은 rms로 100 m/s^2 (또는 50 m/s^2)을 선택한다. Fig. 6은 간섭 무늬 수 측정 방법으로 실행되는 기준 전압감도 측정 화면을 나타내고, 미리 설정된 측정 횟수 n 회씩 가속도계와 신호증폭기 조합의 출력전압 V 와 간섭무늬수 N_{1s} 를 읽어 전압감도 $S_V = 2\sqrt{2}V/(\pi^2 f N_{1s} \lambda)$ 를 계산하고 n 회의 측정이 종료되면 n 회 측정결과와 평균을 기준 전압감도로 저장하고 표시한다.

교정될 진동 가속도계의 기준 전압감도 측정이 끝나면 실제 교정을 실시할 교정 주파수, 교정 가속도 레벨 및 측정 방법을 설정해 주어야 한다. 현재 기준 가속도계의 절대교정 서비스는 교정 주파수를 옥타브 밴드로 20, 40, 80, 100, 160, 315, 630, 1250, 2500, 및 5000 Hz의 10-점을 기본으로 선정하고, 교정 가속도 진폭은 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300 m/s^2 에서 선택하고 있다. 그러나 진동 가속도계 국제 비교에서는 교정 주파수를 1/3 옥타브 밴드로 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000 Hz 등으로 세분화하여 선택하는 것이 추세이고 또한 의뢰자가 특정 주파수와 특정 가속도에서 교정

을 요구하는 경우가 있어 임의의 교정 주파수와 교정 가속도를 설정해 줄 필요가 있다. 다양한 상황을 고려하여 setup-절대교정 스케줄에서 미리 설정된 고정 테이블(setting1~setting4)과 임의로 설정을 변경할 수 있는 테이블(manual)을 선택할 수 있게 하였다. 이러한 교정 주파수와 교정 가속도에 대해 측정 방법 즉 간섭무늬 계수법과 고조파 성분비 방법을 선택할 수 있게 하고, 또한 교정될 가속도계에 가해지는 정현 진동의 왜곡을 측정하기 위한 가속도계의 출력신호의 주파수 분석여부를 선택할 수 있게 하였다. 이러한 왜곡은 가속도계 절대교정의 불확도 평가에서 중요한 인자 중 하나로 작용한다.

Setup-제어공통 설정에는 비례-적분 제어기, 측정회수가 포함되어 있다. 비례-적분 제어기는 오차에 대한 비례계수를 곱하고 적분계수를 곱해서 그 값이 신호발생기의 출력전압을 제어해서 출력을 각각의 가속도 레벨에 따른 전압 값에 맞추는 기능을 하고, 그 전압 값에 대해 오차범위와 정정회수를 설정할 수 있게 하였다. 이 제어공통 설정창은 자동 측정의 시간을 결정짓는 요소이기 때문에, 최상의 조건을 입력해 줄 필요가 있다.

교정 시작 버튼을 누르면 앞에서 설정한 절대교정 스케줄에 따라 교정을 진행하고, Fig. 7에서와 같이 현재 교정하고 있는 주파수와 가속도 레벨, 간섭무늬

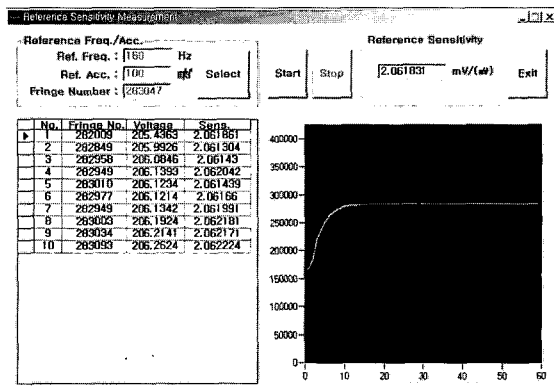


Fig. 6 Dialogue box of calibration for reference voltage sensitivity by fringe counting method

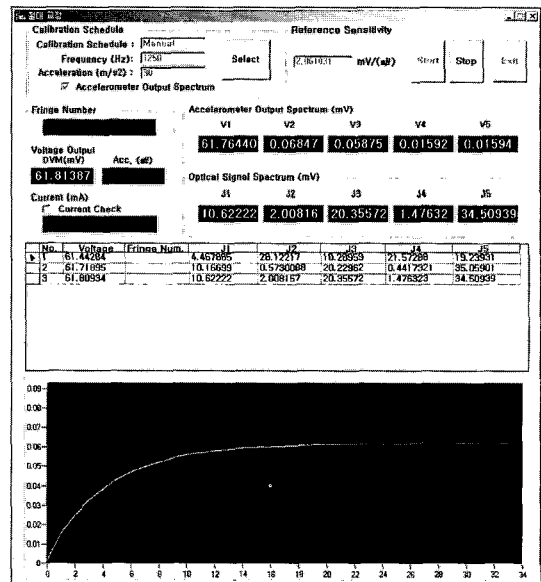


Fig. 7 Dialogue box of experiment for calibration of standard accelerometer

수, 가속도계의 출력전압과 주파수 스펙트럼, 출력 신호의 스펙트럼값을 표시하고, 교정 진행 상황은 그래프로서 바로 확인할 수 있게 하였다.

간섭무늬 계수법으로 측정된 결과와 고조파 성분비법으로 측정된 결과는 측정 결과 파일의 두 번째와 세 번째 파일에 각각 실시간으로 저장된다.

5. 절대교정 자동화 시스템의 유효성 평가

진동 가속도계 절대교정 자동화 프로그램의 유효성을 확인하기 위해 20 Hz부터 5 kHz까지의 주파수 범위에서 1/3 옥타브 밴드로 면대면형 기준 가속도계 (back-to-back design standard accelerometer : ENDEVCO 2270, S/N CB40)에 대해 교정을 수행하였다.

Fig. 8은 기준 주파수인 160 Hz에서 가속도 레벨에 대한 가속도계의 출력 전압의 특성을 나타낸 것으로, 양호한 선형성을 가짐을 알 수 있다.

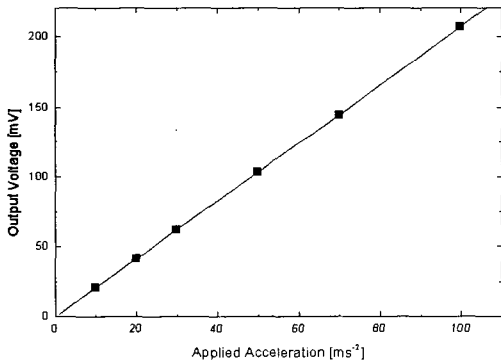


Fig. 8 Linearity of standard accelerometer at 160 Hz

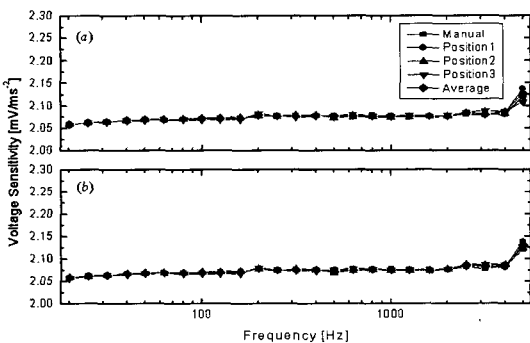


Fig. 9 Calibration results of the standard accelerometer. Applied acceleration (a) 50 m/s², (b) 100 m/s²

Fig. 9의 (a)와 (b)는 각각 가속도 레벨을 50 m/s², 100 m/s²을 가해준 경우에, 각 주파수에 대한 가속도계의 전압 감도를 나타내었고, 기존의 수동 교정에 의한 결과와 가속도계 측정면 위 3-점에서 진동 가속도계 절대교정 자동화 프로그램으로 교정한 결과를 보여준다. 여기서 평균은 3-점에서 구한 가속도계 감도값을 산술평균한 것이다.

수동으로 측정된 감도의 표준 불확도는 0.001~0.04 %인데 비해 자동 측정된 표준 불확도는 0.001~0.17 %로 나타났다. 그러나 절대교정의 상대 확장 불확도는 주로 B형에 의해 정해지고 A형의 감도 측정 표준불확도의 영향은 최대 0.05 % 정도로 크지 않으며, 상대 확장 불확도에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.⁽⁵⁾

6. 결 론

진동 분야 국가표준 보급의 효율성을 제고시키기 위해 레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계 절대교정 시스템을 자동화하였다. Visual Basic으로 작성된 자동화 프로그램을 개발하여 제어용 컴퓨터와 GPIB 인터페이스된 절대교정 구성 장비들의 제어와 신호수집 및 측정결과 저장 등의 절대교정 과정을 자동으로 실시할 수 있게 되었다.

진동 가속도계 교정 자동화 프로그램은 수동 교정과 마찬가지로 진동분야의 국제 표준으로 인식되고 있는 ISO 16063 방법을 수용하여 630 Hz 이하에서는 간섭무늬 계수법을 적용하고, 630 Hz 이상의 주파수에 대해서는 고조파 성분비 측정법을 적용하여 감도를 구하도록 하였다. 자동화 프로그램을 이용한 절대교정의 불확도는 95 %의 신뢰수준에서 상대 확장 불확도가 0.5 % 이하인 것으로 판명되었다.

종래의 수동 교정방법으로 측정된 표준 가속도계의 감도와 자동화 프로그램을 사용하여 얻은 감도를 비교하여 유효성을 평가하였다. 수동 측정에 비해 자동화 측정에서 실험 표준편차가 약간 커졌지만 확장 불확도에 미치는 영향은 최대 0.05 % 정도로 미미한 것으로 평가되었다. 그러나 종래 수동 교정에 소요되었던 32시간을 16시간 이내로 줄일 수 있었다. 이에 따라 표준보급, 표준유지 등으로 가속도계 절대교정이 연간 25건 정도 실시되고 있는 것을 감안하면 연간 50일(400시간) 정도를 절약할 수 있어 다른 연구/개

발 업무에 투입할 수 있는 효과를 볼 수 있다.

이 연구의 결과를 활용하면 진동 측정, 진동 신호 수집/분석 장치의 개발도 가능하며, 외산 “진동 가속도계 비교교정 자동화 프로그램”의 도입을 검토하고 있는 국가교정검사기관들에 대해 교정 시스템 자동화 지원이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) ISO 16063-1, 1998, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 11 : Basic Concepts.

(2) ISO 16063-11, 1999, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 11 : Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry.

(3) 이두희, 2001, “APMP 진동 가속도계 국제비교”, 한국음향학회지, 제 20 권, 제 1 호, pp. 449~452.

(4) 이두희, 이용봉, 전병수, 2001, “레이저 간섭계를 이용한 진동 가속도계의 절대교정” 한국소음진동 공학회 추계학술대회논문집, pp.1356~1360.

(5) Calibration Procedure C-08-1-0071-2002(E), Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry, KRISS.