한국음향학회지 제33권 제1호 pp. 31~39 (2014)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.33, No.1 (2014)
http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2014.33.1.031

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

고정밀 회전엔코더를 이용한 회전진동 교정시스템

Calibration System for Angular Vibration Using Precision Rotary Encoder

남승환, 백경민*, 정완섭*†

(Seunghwan Nam, Kyungmin Baik*, and Wan-Sup Cheung*†)

과학기술연합대학원 측정과학, *한국표준과학연구원 유동음향센터

(접수일자: 2013년 6월 26일; 수정일자: 2013년 10월 1일; 채택일자: 2013년 10월 30일)

초 록: 본 논문은 고정밀 회전엔코더를 이용한 회전진동 교정시스템의 실현방안을 제안한다. 제안된 시스템과 비교를 위해 한국표준과학연구원의 회전진동 절대교정시스템을 소개하며 회전진동 센서의 교정을 위한 장치와 측정 불확도 모델을 각각 제시한다. 제안된 방법은 회전엔코더의 교정방법에 따라 두 가지 로 나뉘는데 첫 번째는 레이저 간섭계를 이용하여 교정된 엔코더를 사용하는 방법이고, 두 번째는 제조사가 제공하는 성적서를 이용하여 교정 불확도를 평가하는 방법이다. 0.4 ~ 200 Hz의 교정주파수 구간에서 각가속도계를 교정한 결과, 첫 번째 제안된 방법은 절대교정시스템을 기준으로 감도 차이가 0.1 % 그리고 위상 차이는 0.01°이내였으며 최대 확장불확도 진폭은 0.6 % 그리고 위상은 0.4° 이었다. 두 번째 제안된 방법은 절대교정시스템을 기준으로 감도차이가 진폭은 0.1 % 그리고 위상차이는 0.6° 이내였으며 최대 확장불확도는 진폭 4.8 % 와 위상 2.8°이었다.

핵심용어: 회전진동, 회전진동센서, 회전엔코더, 측정불확도, 각가속도계 교정

ABSTRACT: In this paper, two calibration methods for angular vibration pickups using a precision rotary encoder are proposed. The KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science) primary angular vibration calibration system and the calibration procedures are briefly explained. The rotary encoder is shown to be calibrated in two methods: The one is to use the laser interferometer to calibrate the rotary encoder under test and the other is to exploit the certificate of the encoder supplied. Complex sensitivities measured from the first are shown to be less than 0.1 % difference in magnitude and 0.01° difference in phase shift in reference to those of the primary calibration system. Their expanded uncertainties were observed to be less than 0.6 % in magnitude and 0.4° in phase shift over the range of 0.4 to 200 Hz. Under the same calibration conditions, complex sensitivities evaluated by the second method are shown be 0.1 % difference in magnitude and 0.6° difference in phase shift in reference to those of the primary calibration system. Their expanded uncertainties were seen to be less than 4.8 % in magnitude and 2.8° in phase shift.

Keywords: Angular accelerometer calibration, Angular vibration, Angular vibration pickups, Rotary encoder, Measurement uncertainty

PACS numbers: 43.40.-r

I. 서 론

진동축의 방향으로 주기적인 병진운동을 하는 선형진동과 달리 진동축을 중심으로 주기적인 회전운동 하는 것을 회전진동이라 하며 본 연구에서는 후자인 회전진동의 특성에 주된 관심이 있다. 오늘날 IT제품이나 차량의 자세제어 시스템에 사용되는 회전진동 센서들은 MEMS 제조 기술의 발전으로 인해 대량생산이 가능해지고 응용분야가 늘어났지만 이들 회전진동 센서를 교정하는 데에 있어서는 여전히 기술적 한계점을 가지고 있다. 선형진동 교정 분야

†**Corresponding author:** Wan-Sup Cheung (wansup@kriss.re.kr)
Center for Fluid Flow & Acoustics, Korea Research Institute of Standards and Science, 1 Doryoung-Dong, Yuseong-Gu, Deajeon 305-340, Republic of Korea
(Tel: 82-42-868-5302, Fax: 82-42-868-5643)

에는 이미 많은 국가표준기관들이 절대교정 시스템을 갖추고 있으며 절대교정 시스템에서 교정된 기준급 센서를 이용한 2차 교정방법(비교교정)[1]이 산업현장에서 널리 사용되고 있는 반면 회전진동 교정분야는 ISO 16063-15[2]에서 레이저 간섭계를 이용한 절대교정 방법을 제안하고 있음에도 국가표준기관 중 독일연방물리기술청(PTB)과 한국표준과학연구원(KRISS) 만이 회전진동 절대교정 시스템을 갖추고 있을 뿐이며 신호증폭기의 불안정한 저 저주파 특성문제[3]와 낮은 주파수에서의 센서 자체 공진문제로 인해 기준급 회전진동센서를 선정하기도 힘든 실정이다.

본 연구는 산업현장에서 사용 가능한 회전진동 비교교정에 적용 가능한 기준기급 센서가 무엇이 있을지에 대한 질문에서부터 시작되었으며 그 대답으로 고정밀 회전엔코더를 이용한 회전진동 교정시스템을 제안한다. 정적인 각도 정밀 측정 분야에서 널리 쓰이고 있는 회전엔코더를 이용함으로써 설치 및 유지 측면에서도 효율적일 뿐만 아니라 기존의 기준급 회전진동 센서의 높은 불확도 문제점 또한 회피할 수 있는 방법을 소개한다.

II. 교정시스템

2.1 KRISS 회전진동 절대교정 시스템

회전진동 교정에 대한 연구는 PTB[4]에서 처음 시작되었으며 후발주자인 KRISS 역시 독자적인 기술을 구축하며 교정능력을 세계 수준[5]까지 도달시켰다. Fig. 1의 KRISS 회전진동 절대교정 시스템은 Zygo사의 앵글프리즘 기반 차동평면거울 레이저간섭계(DPMI)[6]와 KRISS에서 자체 개발한 다층 PCB 기법을 이용한 회전가진기[7]를 사용하는 것이 특징으로 레이저간섭계의 각변위신호는 Zygo사의 측정보드(ZMI 4004)로 수집하고, 회전가진기는 파형발생기(NI PXI 5421)와 전력증폭기(B&K Type 2719)로부터 신호를 입력받아 교정에 필요한 회전진동을 발생시킨다. 본 연구에서 사용된 피교정 회전진동센서는 전압출력형 각가속도계 Lucas ASMP-200이며 각가속도계의 전압출력은 16비트 아날로그 디지털 변환기(NI PXI 6123)로 측정했다. 고속디지털 입출력 보드(NI PXI 6541)가 주위 보드들에게 동기클락을 제공하고 위치 카운터(NI PXI-6608)가 전압 및 각변위 측정보드에 외부 샘플클락을 공급하도록 구성함으로써 전압과 각변위 샘플들이 정확하게 동시에 측정되게 하였다. 또한 동기 및 샘플클락의 모니터링을 위한 주파수카운터(Agilent 53131A)와 측정보드들이 꼽혀있는 PXI섀시(NI PXI-1044)에는 루비듐원자시계(SRS FS725)의 10 MHz 외부 기준 클락을 공급하여 정확한 시간 및 주파수 측정이 가능하게 하였다. Fig. 2는 회전진동 절대교정 시스템 진동테이블의 사진이다. 함께 설치된 회전 엔코더에 대한 자세한 설명은 3장에서 소개한다.

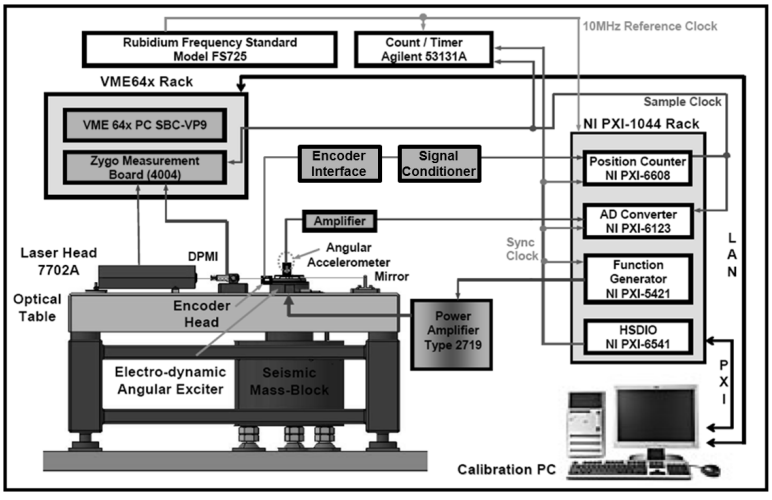

Fig. 1. Configuration diagram of the angular vibration primary calibration system in KRISS.

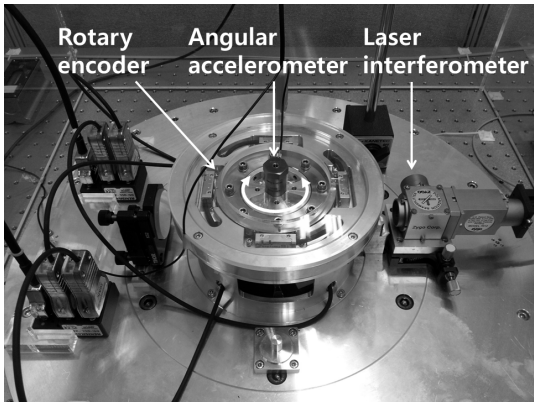

Fig. 2. Photograph of the rotary encoder system assembled on the vibration table of the primary calibration system.

2.2 각 가속도계의 복소수 전압 감도 환산

식(1)~(4)는 KRISS 연구팀에서 개발된 퓨리에 이산변환 기법을 이용한 복소수 전압 감도 계산모델[8]이다. 먼저 레이저 간섭계의 기준 각변위신호 Φ와 피교정 각가속도계의 전압출력 신호 V의 cosine, sine 성분 $\{C_\Phi(m), S_\Phi(m), C_V(m), C_V(m)\}$을 이산 퓨리에 변환을 이용하여 구한다. m은 매 주기별 색인, N_p는 주기 당 샘플수, $\triangle t$는 샘플링 간격이다.

$$C_\Phi(m)=\frac{2}{N_p}\sum_{n=1}^{N_p}\Phi(((m-1)\cdot N_p+n)\triangle t)\cdot\cos\left(\frac{2\pi n}{N_p}\right),$$
$$S_\Phi(m)=\frac{2}{N_p}\sum_{n=1}^{N_p}\Phi(((m-1)\cdot N_p+n)\triangle t)\cdot\sin\left(\frac{2\pi n}{N_p}\right), \quad (1)$$

$$C_V(m)=\frac{2}{N_p}\sum_{n=1}^{N_p}V(((m-1)\cdot N_p+n)\triangle t)\cdot\cos\left(\frac{2\pi n}{N_p}\right),$$
$$S_V(m)=\frac{2}{N_p}\sum_{n=1}^{N_p}V(((m-1)\cdot N_p+n)\triangle t)\cdot\sin\left(\frac{2\pi n}{N_p}\right). \quad (2)$$

m번째 주기의 cosine성분과 sine성분으로부터 기준진동과 전압출력 사이의 전달함수(Frequency response function) $H(m)$을 구한다.

$$H(m)=R(m)+iI(m)$$
$$=\frac{(C_V(m)-iS_V(m))\cdot(C_\Phi(m)+iS_\Phi(m))}{C_\Phi^2(m)+S_\Phi^2(m)}. \quad (3)$$

전달함수의 실수부 $R(m)$과 허수부 $I(m)$의 M개 주기에 대한 평균값을 각각 R_M와 I_M라고 할 때, 주파수 f에서 각가속도계의 복소수 전압감도의 크기 S와 위상 $\triangle\varphi$는 다음과 같이 구한다.

$$S(f)=\frac{1}{4\pi^2f^2}\sqrt{R_M^2+I_M^2},\ \triangle\phi(f)=\pi+\arctan\left(\frac{I_M}{R_M}\right). \quad (4)$$

2.3 복소수 전압감도의 불확도 환산[8]

식(4)에서 소개된 복소수 전압감도 크기와 위상의 합성 표준불확도는 각각 식(5)와 (6)과 같이 구해지며 ,식(5)에 아랫첨자 r은 크기와 관련된 불확도들이 상대적인(relative) 값임을 의미한다.

$$u_{r,c}(S)=\left\{u_{r,S}^2(R_M,I_M)+u_r^2(\Phi)+u_r^2(V)+u_r^2(S_{RE})\right\}^{1/2}, \quad (5)$$

$$u_c(\triangle\phi)=\left\{u_{\triangle\phi}^2(R_M,I_M)+u_{\triangle\phi}^2(\Phi)+u_{\triangle\phi}^2(V)+u_{\triangle\phi}^2(S_{RE})\right\}^{1/2}. \quad (6)$$

식(5)와 (6)에서 $u_{r,S}(R_M,I_M)$와 $u_{\triangle\phi}(R_M,I_M)$는 복소수 전압감도의 크기와 위상의 A형 표준불확도[8]로 식(7)과 식(8)로 계산하였다.

$$u_{r,S}^2(R_M,I_M)=\frac{R_M^2}{R_M^2+I_M^2}u^2(R_M)+\frac{I_M^2}{R_M^2+I_M^2}u^2(I_M)+\frac{2R_MI_M}{R_M^2+I_M^2}u^2(R_M,I_M), \quad (7)$$

$$u_{\triangle\phi}^2(R_M,I_M)=\frac{I_M^2}{R_M^2+I_M^2}u^2(R_M)+\frac{R_M^2}{R_M^2+I_M^2}u^2(I_M)-\frac{2R_MI_M}{R_M^2+I_M^2}u^2(R_M,I_M). \quad (8)$$

식(5)와 (6)에서 $u_r(\Phi)$와 $u_{\triangle\phi}(\Phi)$는 레이저 간섭계를 이용한 각변위 Φ 측정에 대한 표준불확도 모델[8]로 식(9)와 같다.

$$u_r(\Phi)=\left\{(1/\Phi)^2u_{AP}^2+u_{r,BA}^2\right\}^{1/2}.$$
$$u_{\triangle\phi}(\Phi)=(180/\pi)u_r(\Phi) \quad (9)$$

식(9)의 u_{AP}는 앵글프리즘 교정성적서 데이터의 선

형회귀모델을 통해 평가된 표준불확도로 각변위 0°에서 2.406×10^{-6}°의 값을 갖는다. 식(9)의 $u_{r,BA}$는 측정된 각변위의 배경잡음과 관련된 상대 표준불확도로서 교정주파수 범위 내에서 매우 낮은 수준인 4.404×10^{-8}~4.419×10^{-6}으로 평가되었다.

식(5)와 (6)에서 u_r(V)와 $u_{\triangle\phi}$(V)는 전압출력 V 측정에 대한 표준불확도[8]이며 식(10)과 같다.

$$u_r(V)=\left\{u_{r,GC}^2+u_{r,CN}^2\right\}^{1/2}$$
$$u_{\triangle\phi}(V)=(180/\pi)u_r(V) \quad (10)$$

식(10)의 $u_{r,GC}$는 ADC의 선형회귀 모델로부터 평가된 상대 표준불확도로서 교정주파수 범위 내에서 5.03×10^{-6} ~ 2.52×10^{-5}사이의 값을 갖는다. 그리고 $u_{r,CN}$는 측정된 각가속도계와 ADC의 배경잡음과 관련된 상대표준불확도로 3.54×10^{-7}~ 8.40×10^{-4}사이의 값을 갖는 것으로 측정되었다.

식(5)와 (6)에서 $u_r(S_{RE})$와 $u_{\triangle\phi}(S_{RE})$는 반복도 실험결과 평가된 감도의 표준불확도이며, 한국표준과학연구원의 교정 주파수범위에서 평가된 반복도 표준불확도[8]는 크기 0.1 %~0.2 %, 위상차이 0.06°~0.12° 수준이다.

본 연구에서는 측정 불확도의 주요 요인들만 선정한 간략형 불확도 모델을 소개하였지만, 한국표준과학연구원의 회전진동 절대교정 절차서[8]는 ISO 표준규격[2]이 제시하는 불확도 모델의 자세한 이론적 기술과 모든 불확도 인자들에 대한 상세한 평가결과를 포함하고 있다.

III. 교정장치 및 방법

3.1 회전엔코더를 이용한 교정장치

앞서 소개한 회전진동 절대교정 시스템의 회전진동테이블 원주 상에 회전 엔코더링을 Fig. 3과 같이 일체형으로 설치하여, 앵글프리즘 기반 레이저간섭계를 이용한 각가속도계의 절대교정 뿐만 아니라 회전엔코더를 이용한 각 가속도계 비교교정까지 가능하게 장치를 구성하였다.

Fig. 4와 같이 고정밀 엔코더링(Renishaw REXM 115) 주위에 두 쌍의 엔코더 헤드(Renishaw T2011-05A)를 각각 180도 반대 위치에 설치하고 서로 다른 보간(interpolation) 계수를 갖는 두 엔코더 인터페이스(Renishaw TI2000A20A와 TI20KDA20A)를 연결하였다. 본 연구에서는 저주파 회전진동의 측정을 위해 TI20KDA20A 모델 보다 10배 넓은 속도측정 범위 갖는 TI2000A20A 모델을 이용했다. 또한 회전축 편심율과 미소 선형운동성분이 회전 엔코더의 각변위 측정에 미치는 영향을 최소화하기 위해 차동형 각변위 측정 모듈(Renishaw DSi-QUL-20)[9]을 사용하였다. 앞서 2.1절에서 소개한 절대교정 시스템의 측정보드 Zygo ZMI 4004와 동기화 된 32비트 변위측정 위치 카운터(NI PXI 6608)를 이용하여 엔코더의 각변위를 실시간 측정했다.

회전엔코더를 이용한 회전진동(각가속도계) 교정시스템에 필요한 회전진동 발생장치와 전압출력 측정장치는 2.1절에서 소개한 절대교정 시스템의 측정 장치를 그대로 사용하였다. 따라서 절대교정 시스템의 전압 측정 불확도 모델이 비교교정 시 동일하게 사용될 수 있도록 하였다.

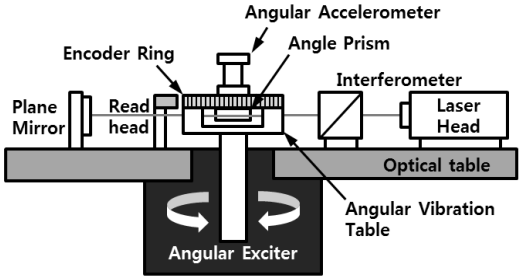

Fig. 3. Conceptual configuration of the rotary encoder system assembled on the vibration table of the primary calibration system.

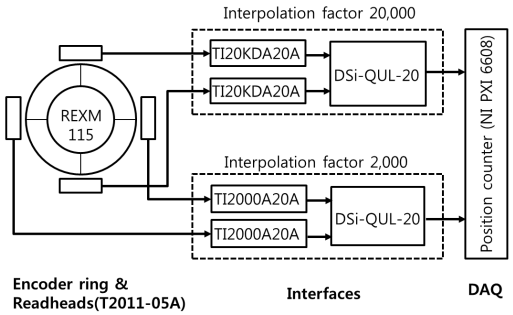

Fig. 4. Configuration diagram of Renishaw rotary encoder system.

각가속도계 교정 이전에 선행되어야할 기준 회전엔코더의 교정방법을 두 가지로 나누어 다음 절에서 각각 소개한다.

3.2 첫 번째 제안: 레이저 간섭계를 이용한 회전엔코더의 교정

2.1절에 소개한 절대교정 장치와 3.1절에 추가된 회전엔코더장치가 함께 설치 된 시스템(Fig. 2 참고)에 주파수 0.4 Hz, 진폭 26°-peak의 정현파 회전진동을 가진하고 80 kHz의 샘플링속도로 6초 동안 480,000개 각변위를 측정하였다. 레이저 간섭계에 의해 측정된 각변위 Φ_{REF}와 회전엔코더에 의해 측정된 각변위 Φ_{ENC} 사이의 관계를 식(11)로 정의하고 회전엔코더의 이득율 a, 영점 각도차이 b, 시간지연 τ를 구하고자 하였다. n은 샘플색인이며 $\triangle t$는 12.5 μs이다.

$$\Phi_{ENC}(n\triangle t) = a \cdot \Phi_{REF}(n\triangle t - \tau) + b. \tag{11}$$

먼저 τ를 계산하기 위해 a의 초기값은 1.0을, b의 초기값은 Φ_{ENC}와 Φ_{REF}의 DC성분 차이 1.153°를 대입하고 식(12)의 비용함수 $J(\tau)$를 최소로 하는 τ를 구했다.

$$J(\tau) = \frac{\sum_{n=1}^{N} \| \Phi_{ENC}(n\triangle t) - a\,\Phi_{REF}(n\triangle t - \tau) - b \|^2}{N}. \tag{12}$$

추정된 τ만큼 보상한 Φ_{ENC}신호와 Φ_{REF}신호사이에 최소제곱법을 이용하여 보다 정확한 a와 b를 다시 구하였다. 이런 과정을 반복함으로써 특정 값에 수렴하는 a, b, τ를 구하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

레이저 간섭계를 이용하여 교정된 회전엔코더의 각변위측정 표준불확도 모델은 식(13)으로 계산했으며, 그 중 앵글프리즘의 표준불확도 u_{AP}는 식(9)에서 설명한 바와 같다.

$$\begin{aligned} u_r(\Phi) &= (1/\Phi)\left\{u_{AP}^2 + u_{EN}^2 + u_{QU}^2\right\}^{1/2}. \\ u_{\triangle\phi}(\Phi) &= (180/\pi)u_r(\Phi) \end{aligned} \tag{13}$$

식(13)에서 u_{EN}는 식(14)의 선형회귀모델에 의해 정의된 회전 엔코더의 표준불확도 모델이다.[10]

$$\begin{aligned} u_{EN}(\Phi) = &\left(\frac{\sum_{n=1}^{N}(\Phi_{ENC}(n\triangle t) - \hat{\Phi}_{ENC}(n\triangle t))^2}{N-2}\right)^{1/2} \\ &\times\left(\frac{1}{N} + \frac{(\Phi - \overline{\Phi}_{REF})^2}{\sum_{n=1}^{N}(\Phi_{REF}(n\triangle t) - \overline{\Phi}_{REF})^2}\right)^{1/2}. \end{aligned} \tag{14}$$

식(14)의 $\hat{\Phi}_{ENC}$는 식(11)에 의해 추정된 엔코더 각변위를 의미한다. N은 총 샘플갯수로서 딜레이 τ를 보상하는 과정에서 하나가 줄어 479,999개이다. $\overline{\Phi}_{REF}$은 Φ_{REF} 평균값으로 불확도 모델의 대칭성을 위해 원점과 같게 취급하였다. Fig. 5에 각변위 ± 26° 범위 안에서 계산된 회전엔코더 표준불확도 u_{EN}를 나타내었으며, 각변위 0°에서 u_{EN}의 값은 6.19×10^{-8}°이다. 식(13)에서 u_{QU}은 사용된 회전 엔코더의 분해능 10^{-5}°에 의한 불확도로서, 이는 양자화 표준불확도로서 측정오차가 분해능 안에 균일하게 분포되어있다는 가정하에 2.887×10^{-6}°$(=10^{-5}\,^{\circ}/\sqrt{12})$로 계산되었다.

Table 1. Estimated parameters of the rotary encoder under calibration.

	τ (sec)	a	b (°)
Initial condition	-	1	1.153
1st step	7.643×10^{-6}	0.999959775	1.152991803
2nd step	8.091×10^{-6}	0.999959754	1.152994906
3rd step	8.100×10^{-6}	0.999959753	1.152994968
4th step	8.100×10^{-6}	0.999959753	1.152994968
5th step	8.100×10^{-6}	0.999959753	1.152994968

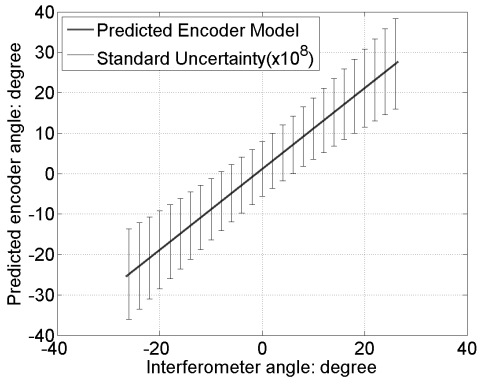

Fig. 5. Standard uncertainty of rotary encoder calibrated by using laser interferometer u_{EN}.

회전엔코더 교정시스템의 전압측정 표준불확도 모델은 절대교정 시스템의 장비를 그대로 사용하기 때문에 식(10)과 동일하다.

3.3 두 번째 제안: 제조사성적서를 이용한 회전엔코더의 교정

실제 산업현장에서 레이저 간섭계를 이용할 수 없는 경우 엔코더 제조사에서 제공하는 교정성적서(calibration sheet)를 이용하여 회전엔코더의 불확도를 계산할 수 있다. 고정밀 엔코더 제조사에서 제품에 발급하는 교정 혹은 시험 성적서에는 제품의 에러범위가 명기되어 있는데, 본 연구에 사용된 고정밀 회전엔코더 링 Renishaw REXM 115(S/N: 55Y585)의 경우 ± 0.76 arcsec 이다. 제조사 성적서를 이용하여 교정된 회전엔코더의 각변위측정 표준불확도는 식(15)과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} u_r(\Phi) &= (1/\Phi)\left\{u_{CE}^2 + u_{QU}^2\right\}^{1/2} \\ u_{\triangle\phi}(\Phi) &= (180/\pi)u_r(\Phi) \end{aligned} \quad . \tag{15}$$

위 식에서 u_{CE}은 제조사 성적서에 명기되어있는 에러범위 안에 측정오차가 균일하게 분포되어 있다는 가정 하에 계산된 표준불확도이다. 본 연구에 사용된 회전엔코더의 경우 제조사 성적서에 명기된 에러범위가 ±0.76 arcsec이었으므로 표준불확도는 $1.22\times 10^{-4}{}^{\circ}(=0.76\,\mathrm{arcsec}/3600/\sqrt{3})$로 계산되었다. Fig. 6에 교정성적서를 이용하여 교정된 회전엔코더 표준불확도 u_{CE}을 ± 26° 범위 안에서 나타내어 Fig. 5의 레이저간섭계를 이용하여 교정된 회전엔코더 표준불확도 u_{EN}와 비교할 수 있게 하였다. Fig. 5의 u_{EN}은 10^8배 과장되어 표시한 반면 이보다 큰 값을 갖는 Fig. 6의 u_{CE}는 10^5배 과장되어 표시되었다. 식(15)의 u_{QU}는 식(13)에서 설명한 것과 동일하다.

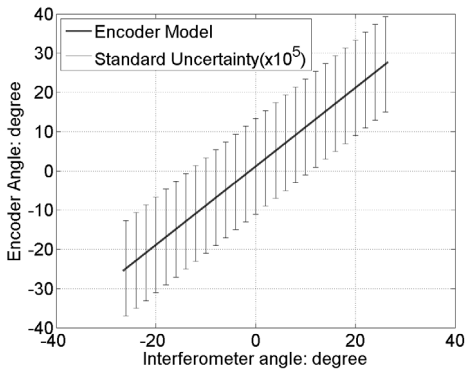

Fig. 6. Standard uncertainty of rotary encoder calibrated by certificate supplied by maker u_{CE}.

IV. 각가속도계 교정결과

4.1 각가속도계의 복소수 전압감도 비교

앞서 2와 3장에서 설명한 각가속도계 교정시스템들은 세 가지로 나뉠 수 있다. 첫째 기존의 절대교정 시스템, 둘째 레이저 간섭계를 이용하여 교정된 회전엔코더를 이용한 교정시스템(이하 첫 번째 제안), 셋째 제조사성적서를 이용하여 교정된 회전엔코더를 이용한 교정시스템(이하 두 번째 제안)이다. Table 2에 위 세 교정시스템들을 이용한 각가속도계(Lucas ASMP-200) 교정결과를 나타내었다. 교정 주파수는 0.4~200 Hz이며 각 주파수 당 세 번씩 교정을 반복 실험하였고 측정된 결과로부터 복소수 전압감도와 확장불확도를 계산하였다. 이때 첫 번째 제안의 경우 3.2절에서 구한 회전엔코더의 파라미터들 a, b, τ를 보상한 엔코더신호를 기준으로 복소수 전압감도를 계산하였고, 두 번째 제안의 경우 보상하지 않은 엔코더신호를 기준으로 계산하였다. 가진 레벨은 2.0 rad/s^2-peak~141.4 rad/s^2-peak의 가속도로 주였으며 2 Hz ~8 Hz에서는 가진 레벨이 회전엔코더의 제한속도 2.34 rad/s-peak를 넘지 않도록 주의하였다.

Table 2에서 볼 수 있듯이 세 시스템의 복소수 전압감도 크기는 큰 차이를 보이지 않는다. 주어진 주파수 범위 내에서 제안된 두 시스템의 감도크기는 절대교정시스템의 감도크기를 기준으로 0.1 % 이내의 차이를 보였다. 회전엔코더의 이득율 a가 1에 매우 근접하기 때문에 a의 보상 유무는 정확한 감도크기 측정에 결정적인 역할을 하지 않았다. 각가속도계의 복소수 전압감도 평가에 DC성분은 기여하지 않으므로 영점 차이 값 b의 보상은 사실 의미가 없다. 하지만 복소수 전압감도의 위상의 경우 엔코더의 시간지연 τ의 보상유무에 따라 큰 차이를 보인다. 주어진 주파수 범위 안에서 첫 번째 제안된 시스템의 경우 절대교정시스템과의 감도위상 차이가 0.01° 이내에

Table 2. Calibration results for the angular accelerometer(ASMP-200) with respect to three calibration systems.

frequency	Acceleration	Primary calibration system				First proposed system				Second proposed system			
		Complex voltage sensitivity		Expanded uncertainty		Complex voltage sensitivity		Expanded uncertainty		Complex voltage sensitivity		Expanded uncertainty	
		Magnitude	Phase	Mag.	Phase	Magnitude	Phase	Mag.	Phase	Magnitude	Phase	Mag.	Phase
Hz	rad/s^2-pk	mV/(rad/s^2)	°	%	°	mV/(rad/s^2)	°	%	°	mV/(rad/s^2)	°	%	°
0.4	2	27.17	179.5	0.5	0.3	27.17	179.5	0.5	0.3	27.17	179.5	0.5	0.3
0.5	2.5	27.15	179.4	0.5	0.3	27.15	179.4	0.5	0.3	27.15	179.4	0.5	0.3
0.64	5	27.13	179.2	0.3	0.2	27.13	179.2	0.3	0.2	27.13	179.2	0.3	0.2
0.8	7.07	27.12	179.1	0.3	0.2	27.12	179.1	0.3	0.2	27.12	179.1	0.3	0.2
1	10	27.10	178.9	0.3	0.2	27.10	178.9	0.3	0.2	27.10	178.9	0.3	0.2
1.25	14.1	27.10	178.7	0.3	0.2	27.10	178.7	0.3	0.2	27.10	178.7	0.3	0.2
1.6	25	27.13	178.3	0.6	0.2	27.13	178.3	0.6	0.2	27.13	178.3	0.6	0.2
2	25	27.09	177.9	0.3	0.2	27.09	177.9	0.3	0.2	27.09	177.9	0.3	0.2
2.5	35.5	27.09	177.4	0.3	0.2	27.09	177.4	0.3	0.2	27.09	177.4	0.3	0.2
3.2	50	27.11	176.7	0.3	0.2	27.11	176.7	0.3	0.2	27.11	176.7	0.3	0.2
4	50	27.10	175.9	0.3	0.2	27.10	175.9	0.3	0.2	27.10	175.9	0.3	0.2
5	70.7	27.11	174.9	0.3	0.2	27.11	174.9	0.3	0.2	27.11	175.0	0.3	0.2
6.4	100	27.19	173.6	0.3	0.2	27.19	173.6	0.3	0.2	27.19	173.6	0.3	0.2
8	100	27.19	172.0	0.3	0.2	27.20	172.0	0.3	0.2	27.20	172.0	0.3	0.2
10	141.4	27.29	170.0	0.3	0.2	27.30	170.0	0.3	0.2	27.30	170.0	0.3	0.2
12.5	141.4	27.34	167.6	0.3	0.2	27.34	167.6	0.3	0.2	27.34	167.6	0.3	0.2
16	141.4	27.43	164.0	0.3	0.3	27.43	164.0	0.3	0.3	27.43	164.1	0.3	0.3
20	141.4	27.70	160.0	0.3	0.2	27.70	160.0	0.3	0.2	27.70	160.0	0.3	0.2
25	141.4	28.53	154.7	0.3	0.4	28.53	154.7	0.3	0.4	28.53	154.8	0.4	0.4
32	141.4	29.18	145.7	0.3	0.2	29.18	145.7	0.3	0.2	29.19	145.8	0.4	0.2
40	141.4	29.51	134.8	0.3	0.2	29.52	134.8	0.3	0.2	29.52	134.9	0.3	0.2
50	141.4	29.40	119.6	0.3	0.2	29.40	119.6	0.3	0.2	29.41	119.7	0.4	0.3
64	141.4	27.20	96.6	0.3	0.2	27.21	96.6	0.3	0.2	27.21	96.8	0.6	0.4
80	141.4	22.13	72.2	0.3	0.2	22.13	72.2	0.3	0.2	22.13	72.4	0.9	0.5
100	141.4	15.54	49.2	0.5	0.3	15.54	49.2	0.5	0.3	15.55	49.5	1.3	0.8
125	141.4	9.99	30.5	0.5	0.3	9.99	30.5	0.5	0.3	9.99	30.9	1.9	1.1
160	141.4	5.91	14.5	0.5	0.3	5.90	14.5	0.5	0.3	5.90	15.0	3.1	1.8
200	141.4	3.65	2.7	0.5	0.3	3.64	2.7	0.5	0.3	3.64	3.2	4.8	2.8

불과한 반면 두 번째 제안된 시스템은 200 Hz에서 절대교정시스템과 최대 0.6°의 감도위상 차이를 보였다. 이러한 위상차는 엔코더의 연산 프로세스로 인한 시간지연 τ로부터 유발되는 것으로 두 번째 제안된 시스템의 단점으로 확인되었다.

4.2 복소수 전압감도의 확장불확도 비교

복소수 전압감도의 확장불확도[8]는 식(5)와 (6)의 합성 표준불확도에 coverage factor($k=2$)를 곱하여 95% 신뢰수준에서 나타내었다. 세 시스템에 해당하는 각 변위측정 표준불확도는 각각 식(9), (13), (15)으로 평가하였으며 각 실험에 대한 A형 표준불확도는 식(7)과 (8)로 계산하였다. 식(10)의 전압측정 표준불확도와 반복도 표준불확도 평가결과는 세 시스템 모두 공통적으로 적용되었다.

50 Hz 미만의 주파수 구간에서는 세 시스템의 확장불확도가 비슷한 수준을 보이지만 50 Hz 이상의 주파수 구간에서는 두 번째 제안된 시스템의 불확도

가 나머지 두 방법에 비해 증가한다. 이는 식(15)의 두 번째 제안된 시스템 각변위측정 표준불확도가 식(9)의 절대교정 시스템 각변위측정 표준불확도보다 최대 45배, 식(13)의 첫 번째 제안된 시스템 각변위측정 표준불확도보다 최대 30배 크기 때문에 발생한 불확도 차이이다. 또한 각가속도가 141.4 rad/s^2-peak로 유지되는 가운데 주파수가 증가함에 따라 각변위 Φ의 크기가 줄어들어 각변위측정에 대한 상대 표준불확도가 높아짐을 확인하였다. 위상감도의 표준불확도는 감도 크기의 상대 표준불확도와 합성되어있기 때문에 크기와 위상 불확도는 함께 증가하였다.

반면 첫 번째 제안된 시스템의 경우 주어진 교정 주파수 전 범위 안에서 절대교정시스템과 같은 불확도 수준을 유지하는 것을 확인하였다. 식(13)의 첫 번째 제안된 각변위측정 표준불확도가 식(9)의 절대교정시스템 각변위측정 표준불확도 보다 최대 1.5배 높지만 그 차이가 상대적으로 작아 전압측정 표준불확도와 반복도 표준불확도 같은 다른 불확도 요소들에 의해 가려졌다.

마지막으로 1.6 Hz에서 나타난 감도크기 상대 확장불확도의 이상값(outlier)들은 식(7)과 (8)의 A형 표준불확도에서 기인한 것으로 B형 표준불확도와는 상관이 없다.

V. 결 론

본 연구는 아직 상용화 되지 않고 있는 기준기급 회전진동센서를 대체하여 고정밀 회전엔코더를 이용한 회전진동 교정시스템의 구축이 가능함을 실험적으로 규명한 논문이다. 제안된 회전엔코더를 이용한 교정시스템의 구성을 3.1절에서 소개하였고, .3.2절과 3.3절에서 두 가지 회전진동 교정시스템의 구현 방법을 제안하였으며 그들의 교정 불확도를 각각 제시하였다. 실험결과 주어진 교정 주파수 범위 내에서 첫 번째 제안은 절대교정시스템을 기준으로 최대 감도차이가 0.1 % 그리고 위상 0.01°이내였으며 최대 확장불확도는 0.6 % 와 위상 0.4° 이었다. 두 번째 제안은 절대교정시스템을 기준으로 감도 차이가 0.1 % 그리고 위상 0.6° 이내였으며 최대 확장불확도는 크기 4.8 % 그리고 위상 2.8°이었다.

제조사 성적서를 이용한 두 번째 제안된 방법만으로도 40 Hz 이하의 주파수 구간에서 절대교정시스템과 비슷한 수준의 교정능력을 보였지만, 50 Hz 이상의 고주파 구간에서 감도 위상을 정확하게 측정하고 측정 불확도를 낮추기 위해서는 첫 번째 제안 방법인 레이저 간섭계를 이용하여 엔코더를 교정하는 방법을 권장한다. 첫 번째 제안된 방법에서 확인된 우수한 측정 불확도는 사실 기 구축된 회전진동 절대교정장치와 측정 소급성을 갖추었기 때문이며, 회전진동 절대 교정장치의 필요성과 중요성이 다시금 확인되었다.

감사의 글

본 연구내용은 한국표준과학연구원의 유동음향센터에서 2012년과 2013년 수행한 표준유지과제의 일부 내용입니다.

References

1. ISO 16063 part 21, *Methods for the calibration of vibration and shock transducers: Vibration calibration by comparison to a reference transducer*, 2001.
2. ISO 16063 part 15, *Methods for the calibration of vibration and shock transducers: Primary angular vibration calibration by laser interferometry,* 2006.
3. S. Nam, Y. Lee and W. Cheung “Method of calibrating charge amplifier using a dynamic spectrum analyzer,” IMEKO 20th Congress, TC22, (2012).
4. H. Martens, “Dynamic cailbration of rotational transducers by diffraction grating interferometry,” PTB Mitt. **103**, 19-26 (1992).
5. W. Cheung and T. Licht, “Progress in development of calibration systems for angular vibration pickups,” IMEKO 19th Congress, TC22, (2009).
6. W. Cheung and C. Chung, “Angle prism-based laser interferometer for high precision measurement of angular vibration,” IMEKO 18th Congress, TC22, (2006).
7. W. Cheung “Improved features of angular vibration exciters,” IMEKO 20th Congress, TC22, (2012).
8. W. Cheung, “Primary calibration procedure of angular vibration transducers,” KRISS., Tech. Rep., 2011.
9. A. Ellin, and G. Dolsak. “The design and application of rotary encoders.” Sens Rev. **28**, 150-158 (2008).
10. J. Bendat and A. Piersol, *Random Data* (WILEY Publication, INC., 2010), pp. 102-105.

저자 약력

▸ 남 승 환(Seunghwan Nam)

2012년 2월: 한밭대학교 전파공학 학사
2012년 3월 ~ 현재: 과학기술연합대학 측정과학 석사과정

▸ 백 경 민(Kyungmin Baik)

1996년 2월: 고려대학교 물리학과 학사
2000년 2월: 고려대학교 물리학과 석사
2008년 5월: WSU 물리학과 박사
2010년 6월: ISVR, Research fellow
2012년 4월: WHOI, Postdoctral scholar
2012년 5월 ~ 현재: 한국표준과학연구 선임연구원

▸ 정 완 섭(Wan-Sup Cheung)

1993년: 영국 ISVR/University of Southampton, 박사
1984년 0월 ~ 현재: 한국표준과학연구 원 책임연구원
2005년 3월 ~ 현재: UST 측정과학 교수
2011년 1월 ~ 현재: 한국음향학회 부회장