

회전 진동 교정 장치 구현을 위한 고정밀 측정기법에 대한 연구

○정 완섭*, 이 용봉*, 이두희*
*한국표준과학연구원, 음향진동 그룹

Study on the Precision Method of Measuring angular displacement for the Angular Vibration Calibration System

○Wan-Sup Cheung*, Yong-Bong Lee*, Doo-Hee Lee*
*Acoustics and Vibration Lab, KRISS

ABSTRACT

This paper addresses the study on developing the angular vibration calibration system which requires the highly accurate measurement technique of the amplitude and period of an oscillating angular motion. Two developed models for the low and high frequency ranges are introduced and their main features are also compared. In addition to the angular vibration exciters, a new measurement method, referred to the "equi-angle sampling method", is proposed and its theoretical backgrounds are introduced. The proposed method is shown to provide much less measurement uncertainty, compared the fringe counting method. Experimental results demonstrate what amount of angular vibration amplitude measurement uncertainty is improved by using the proposed equi-angle sampling method.

1. 서론

회전운동 성분의 측정기술은 국방 및 우주항공 분야의 관성항법장치의 핵심기술로 그 중요성이 이미 국외에서는 인식되어오고 있으며, 최근 우리의 국방, 정보통신 및 우주항공 분야에도 또한 꼭 필요한 고정밀 측정기술로 그 필요성이 점차 증가하고 있는 상태이다. 그리고, 고급 자동차의 필수품으로 인식되고 있는 위치정보장치(GPS) 등의 제품화에까지 회전운동 측정기술은 활용되고 있다. 이러한 국내외적 수요를 만족하기 위하여 본 연구팀은 회전운동 측정용 센서들을 정밀하게 교정할 수 장치 개발에 착수 하였다.

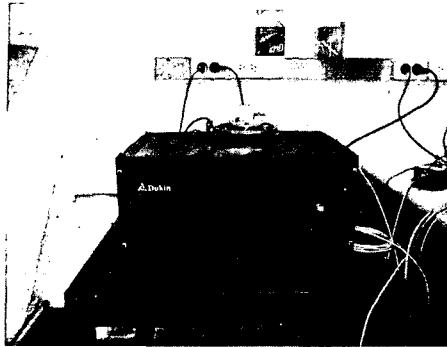
회전진동 교정에 대한 국외 연구로는 독일의 표준연구원(PTB)에 국한되어 있으며, 그들의 최대측정능력(BMC, best measurement capability)은 0.3 ~ 1,000 Hz 주파수 범위에서 회전진동 가속도 10 ~ 2,000 rad/s² (회전각도 1 μrad ~ 10 rad)의 크기로 진폭에 대한 확장 불확도 0.2 % ~ 0.5 % 범위(coverage factor k = 2)와 위상에 대한 확장 불확도 0.2° ~ 0.5° 범위(coverage factor k = 2)라고 국제도량형(BIPM) 부록 C(appendix C)에 보고되어 있다. 본 연구팀은 2001년 8월 독일 표준연구원을 방문하여 고정밀 회전진동 교정 장치와 관련 기술들에 대한 조사⁽²⁻⁶⁾를 수행한 바 있으며, 이를 토대로 2002년부터 회전진동

교정장치 개발 연구를 착수하였다. 제 2 절에서는 개발한 교정장치에 대한 내용을 소개한다. 제 3 절에서는 등각도 신호 수집기법의 이론적 배경과 회전진동의 주기 추정 방법을 간략히 소개한다. 그리고 4 절에서는 교정장치의 측정 불확도 개선내용과 최대측정 능력평가 결과를 고찰한다. 마지막으로 본 연구의 주요결과를 4절에서 요약 소개한다.

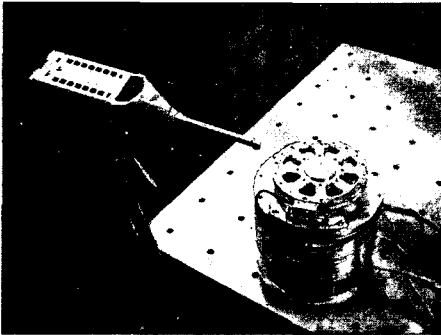
2. 회전진동 교정장치

그림 1 (a)는 10 Hz 이하의 대 진폭 회전진동을 발생하는 저주파용 가진기를 그리고 그림 1 (b)는 10 Hz 이상의 고주파를 발생하는 가진기를 각각 보이고 있다.⁽¹⁾ 저주파 가진기는 상용화된 고정밀 서보 모터를 채택하여 제작비용의 최소화와 더불어 기존의 제어기술을 활용하였다. 그러나 서보모터는 20 Hz 이상의 고주파 진동에 대한 응답특성에 한계를 2002 년 연구에서 확인하였다. 2003 년부터 고주파용 회전 가진기 개발을 착수하였으며 그림 2 (b)는 금년 제작 완료한 고주파용 가진기를 보이고 있다. 고주파용 가진기는 회전력 (Rotentz force)을 발생하기위한 전자기부와 회전운동 시 발생하는 마찰력을 최소화 하기위한 공기 베어링을 특수

제작하였다. 두 장치를 이용하여 수행한 실험결과는 제 4 절에서 소개한다.



(a) Low frequency model



(b) High frequency model

Figure 1. Photos of angular motion generator

그림 2 는 회전운동 진폭을 정밀하게 측정하기 위하여 개발한 측정장치를 보이고 있다. 우선 회전 가진기에서 발생하는 주기적 진동신호의 개괄적 특성을 분석하기 위하여 회전진동 센서(ATA Dyna-ILC)와 주파수 분석기(HP 35660A)를 각각 이용하였다. 그림 2 의 점선으로 표시된 부분이 회전각 측정장치의 핵심요소로 이는 진동 회전 encoder 출력신호의 shaping 회로부와 가진 주파수별 등각도 신호수집(equi-angle sampling, EAS) 장치로 구성되어 있다. 제작 일차년도에 회전각 측정은 회전 encoder 의 출력신호인 quadratic 신호 A 와 B (ϕ_A, ϕ_B) 중 신호 A 하나만을 선정하여 회전각을 측정하였다. 즉 Quadratic 신호 A 의 positive-going 조건과 negative-going 조건에서 각각의 펄스를 세는 방법을 이용하였으며, 이때 회전각도 분해능은 $2.667 \mu\text{rad}$ ($2,356,194 \text{ pulses/revolution}$)의 회전각 분해능 얻을 수 있었다.

이차년에는 quadratic 신호 B 의 positive-going 조건과 negative-going 조건에서 각각의 펄스를 발생하는 회로를 추가함으로써, 두 quadratic 신호 A 와 B (ϕ_A, ϕ_B)의 상태 변환 펄스를 함께 셀 수 있는 전자회로를 추가하였다. 이러한 펄스 발생 회로를 펄스 "shaping circuit"라 하며 본 회로의 출력 신호는 그림 2 보인 바와 같이 범용 counter(HP 53131A)로

입력된다. 이러한 회전 encoder 신호의 shaping circuit 를 개발하여 2 차년에는 회전 encoder 의 최대 회전각 분해능인 $1.333 \mu\text{rad}$ ($4,712,388 \text{ pulses/revolution}$)를 구현할 수 있게 하였다. 이는 PTB 의 측정 분해능보다 3.14 배 높은 수준이다.

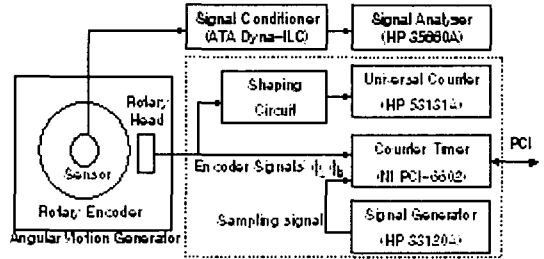


Figure 2. Schematic diagram of angular motion measurement system

PTB의 저주파 회전각 측정⁽²⁻⁶⁾ 방법은 일정한 시간동안 레이저 간섭계(laser interferometer)의 광 검출기 출력의 펄스 수를 세는 방법(fringe-counting method)을 사용하고 있다. 본 방법은 일차년도 회전각 측정과 동일한 방법으로 이용하였으며, 이는 회전 encoder의 출력신호의 시간당 평균 발생 펄스 수로부터 회전각을 산출하였다. 펄스 수를 세는 방법(fringe-counting method)의 이상적 측정 불확도 표준오차 $2 \cdot \Delta \phi$ ($\Delta \phi$: encoder resolution, rad/pulse) 보다 매우 큰 값들이 관측되었다. 이러한 문제를 체계적으로 접근하기 위하여 한 주기 동안의 진폭의 변화를 세분화하여 측정하는 방법을 고안하였다. 즉 한 주기를 수천 혹은 수만 등분하여 각각의 시간에 대응되는 회전각을 측정 방법을 시도하였다. 이는 한 주기에 대응되는 360° 위상을 수천 혹은 수만의 등 간격(equi-angle)으로 나누어 각각의 위상에 대응되는 회전각을 측정하는 방법으로 이를 등각도 수집(equi-angle sampling) 기법이라 칭하며, 이론적 고찰은 다음 절에서 자세히 고찰한다.

고정 진동 주파수 f 에 대하여 등각도 신호수집 주파수 $M \cdot f$ (M = 등각도 분할 수)를 발생하는 장치는 시간 안정화 기능을 갖는 함수발생기(HP33120A, 시간 안정도 1.0 ppm)를 이용하였다. 함수 발생기의 동기신호(synchronization signal) 출력은 회전각 측정장치의 외부 수집신호 시간(external sampling clock)신호에 입력하여, 고정 주파수별 등각도 신호수집을 구현하였다. 본 연구에서 구축한 회전각 측정 장치는 80 MHz 의 속도와 32-bit 의 레지스터 용량을 갖는 counter(NI, model PCI-6602)를 사용하였다. 회전각 측정용 32-bit counter 는 encoder 의 A 상 B 상 신호를 직접 입력하며, A 상 B 상 신호를 이용하여 4 배의 분해능을 제공하는 신호 shaping function 회로를 내장하고 있어 회전 각 측정용 encoder 의 최대 회전각 분해능인 $1.333 \mu\text{rad}$ 을 얻을 수 있도록 하였다. Encoder 의

A 상과 B 상 신호의 상대적 위상정보로부터 변위의 정 방향과 역 방향을 구분하여 정 방향일 경우 입력 펄스 당 up-counting 을 반대로 역 방향일 경우는 down-counting 을 수행한다. 32-bit 의 up/down counter 의 내용은 매 등각도 수집(equi-angle sampling) 주기마다 보조 메모리(FIFO)에 저장되어지며, 보조 메모리의 내용은 PCI-bus 를 통하여 실시간으로 컴퓨터로 전송된다. 이러한 회전각 측정을 수행하는 프로그램은 NI 사의 Labview software 를 이용하여 작성하였다.

3. 등각도 신호수집 기법

회전 encoder 의 출력 신호 A 와 B (ϕ_A, ϕ_B)의 상대적 위상을 이용하여 신호 A 가 B 보다 90 도 앞선 경우는 양의 회전방향으로 up-counting 을 하고 역으로 신호 B 가 A 보다 90 도 앞선 경우는 음의 회전방향으로 down-counting 을 하는 장치("up/down counter")를 사용하였다. 본 장치는 그림 2 에 보인 Counter/Timer(NI 모델 PCI-6602)을 사용하였다. 이러한 up/down-counter 의 값은 시간영역의 회전각 신호로 측정값으로 표현된다. 주파수 f 의 회전진동 주기를 M 등분할 값을 선정하면, 시간 안정화 기능을 갖는 함수발생기(HP33120A)의 동기신호 출력 단을 통하여 32-bit counter / timer(NI PCI-6602)의 외부 sampling 신호 입력 단으로 공급되며, sampling 주파수는 M·f Hz 이다. 따라서, 매 주기마다 M sample 의 이산화된 각도 신호 $\{\theta_n; n = 1, 2, \dots, M\}$ 을 수집하게 된다. 물론 1 초 동안에 $N_T = M \cdot f$ 개의 신호를 수집하게 된다. 이와 같이 수집된 회전각 신호로부터 진동 주파수 f 에 해당되는 진폭 뿐 아니라 식 (1)에 주어진 고조파 성분 또한 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A_k = \sqrt{(C_k^2 + S_k^2)} \quad (k=1, 2, \dots, K)$$

$$C_k = \frac{2}{N_T} \sum_{n=1}^{N_T} \theta_n \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{k \cdot n}{M}\right) \quad (1)$$

$$S_k = \frac{2}{N_T} \sum_{n=1}^{N_T} \theta_n \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{k \cdot n}{M}\right)$$

급변 연구에서는 식 (1)에 따라 측정된 회전각 신호로부터 10 차 고조파 성분(K = 10)을 얻었다. 본 기법은 기존의 fringe-counting 방법보다 한층 개선된 측정 불확도를 얻기 위하여 개발된 측정 기법이다. 다음절의 실험결과에서 개선된 정도를 소개한다.

회전 진동의 교정에 수반되는 업무는 앞서 고찰한 진폭과 더불어 측정된 진동 신호의 주기 측정을 수반한다. 기존의 급변 연구에서는 새로이 고안한 등각도 신호수집 기법은 진동 주기를 M 등분한 시간마다 회전 진폭 측정 신호를 제공한다. 본 연구에서는 30 초 동안의 연속되는 회전각

신호로부터 다음과 같은 방법에 따라 매 주기를 추정하였다. 즉, (1) 수집신호 $\{\theta_n\}$ 의 DC 성분 제거 (2) 수집된 신호 $\{\theta_n\}$ 로부터 음의 값에서 양의 값으로 변화는 두 근접점 선정, (3) 두 근접점을 지나는 0 점을 내삽 원리를 통하여 시간 결정, (4)다음 주기의 zero-crossing 점 구하기 위하여 위 절차 (2)을 반복하는 순서에 따라 수행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

회전 진동 교정업무는 회전 진동의 진폭과 주기의 동시 측정을 수반한다. 급변연구에서 시도한 회전 진동 진폭 측정은 encoder 의 펄스(A 상 혹은 B 상)의 신호를 누적 counting 하는 fringe-counting 방법과 새로이 고안한 등각도 수집(equi-angle sampling)기법을 이용하여 회전각 측정을 시도하였다. 표 1 은 20 회 수행한 회전각의 시간 평균 펄스 수를 주파수 대역별 측정된 평균값과 표준편차를 나타내고 있다.

Table 1. Comparison of averaged pulses measured at each second (1 pulse equal to resolution $\Delta\Phi = 1.333 = 2/4,712,388 = 1.333 \mu\text{rad}$)

Frequency (Hz)	Fringe counting Method		Equi-angle sampling method	
	Mean ($\times \Delta\Phi$)	S.T.D ($\times \Delta\Phi$)	Mean ($\times \Delta\Phi$)	S.T.D ($\times \Delta\Phi$)
0.5	499,758.2	6.1 (0.002%)	499,758.2	1.9 (0.0004%)
1	248,155.8	7.1 (0.003%)	248,145.7	1.0 (0.0004)
2	123,184.8	11.1 (0.01%)	123,258.1	3.2 (0.003%)
2.5	98,427.7	7.8 (0.08%)	98,504.6	3.3 (0.003%)
4	61,678.2	10.8 (0.018%)	61,702.3	1.4 (0.002%)
5	49,505.0	7.7 (0.016%)	49,553.6	1.6 (0.003%)
8	31,582.2	5.5 (0.018%)	31,597.2	1.4 (0.002%)
10	35,784.0	9.1 (0.04%)	25,763.1	1.4 (0.002%)
12.5	21,128.4	32.1 (0.015%)	21,193.5	5.3 (0.025%)
16	17,272.7	12.2 (0.07%)	17,424.5	9.6 (0.055%)

표 1 에 보인 바와 같이 fringe-counting 방법에 의한 측정 각도의 표준편차(standard deviation)가 모든 주파수에서 이상적 진폭측정 표준오차 $2 \cdot \Delta\Phi$ 를 초과하고 있다는 점을 관찰할 수 있었다. 이러한 실험결과는 기존의 선형 진동 절대 교정의 진폭 측정에서도 항상 수반되는 문제로 간주되어 오고 있으며, 상대적 표준편차가 0.1% 이하의 크기가 되도록 진폭을 조정하면서 사용한다. 등각도 신호 수집기법(equi-angle

sampling method)을 이용하여 얻어진 회전진동의 진폭 추정 결과 또한 표 1 우측부분에 제시되어 있다. 이들 결과에서 확인되듯이 10 Hz 이하의 회전 진동에 대하여 얻어진 표준편차는 이상적 진폭측정 표준오차 $2 \cdot \Delta \Phi$ (2 펄스)보다 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 등각도 신호수집 기법으로 회전진동 진폭 측정의 불확도를 줄일 수 있다는 점을 확인하였다.

Table 2. Estimated periods (ΔT = Sampling time)

Frequency [Hz]	Sampling Rate [Hz]	Period	
		Mean ($\times \Delta T$)	Standard Deviation ($\times \Delta T$)
0.5	10,240	20,479.9	0.093 ($4.4 \times 10^{-3}\%$)
1	10,240	10,234.0	0.107 (0.001%)
2	20,840	10,239.9	0.306 (0.0031%)
2.5	25,600	10,240.0	0.266 (0.0026%)
4	40,960	10,240.0	0.580 (0.0057%)
5	51,200	10,239.9	1.61 (0.016%)
8	40,960	5,120.0	0.88 (0.017%)
10	51,200	5,120.0	1.39 (0.027%)
12.5	64,000	5,120.0	2.71 (0.053%)
16	40,960	2,560.0	2.01 (0.079%)

표 2 는 제 3 절에서 소개한 회전진동 신호의 주기를 추정한 결과를 보이고 있다. 100 회의 주기 추정의 결과를 표 2 에 제시하고 있다.

Table 3. Comparison of amplitude estimation results over the high frequency range (1 pulse equal to resolution $\Delta \Phi = 1.333 = 2/4,712,388 = 1.333 \mu\text{rad}$)

Frequency (Hz)	Estimated amplitude [$\times \Delta \Phi$]		Standard deviation [$\times \Delta \Phi$]	
	Equi-angle sampling method	Fringe counting method	Equi-angle sampling method	Fringe counting method
20	2,758.0	2762.9	3.2 (0.12%)	5.5 (0.20%)
40	685.90	687.03	1.6 (0.23%)	6.3 (0.91%)
50	442.07	452.40	3.0 (0.67%)	7.7 (1.7%)
100	115.90	117.78	0.56 (0.48%)	6.9 (5.8%)

주파수별 주기의 추정 값인 평균값과 표준편차를 sampling time ΔT 의 배수로 각각 표시하고 있다. 10

Hz 까지 주기추정의 상대적 표준편차의 값이 0.017 % 이하로 매우 낮은 불확도 범위에서 추정이 이루어짐을 확인하였다.

표 3 은 그림 1 (b)에 보인 고주파 회전진동 발생장치를 이용하여 20 Hz 이상의 고주파 회전진동 진폭의 측정결과를 보이고 있다. 상대적으로 진폭의 크기가 작은 고주파 회전진동에 대하여도 등각도 신호수집 기법에 의한 회전진동의 진폭 추정치가 보다 낮은 표준편차를 제공함을 확인하였다. 특히, 100 Hz 정도의 고주파에서 약 배 배정도의 측정 불확도 차이가 있다는 점을 확인하였다.

5. 맺음말

본 논문에서는 국내 최초로 연구가 진행 중인 회전진동의 고정장치에 대한 연구결과를 소개하고 있다. 저주파형과 고주파 형으로 구분하여 개발된 회전 가진기의 소개와 더불어 기존의 fringe counting method 를 이용한 회전각도 정밀측정에 대한 문제점을 지적한다. 회전각도 정밀 측정을 위하여 본 연구팀이 개발한 등각도 신호수집 기법(equi-angle sampling method)을 새로이 제시한다. 본 기법은 기존의 fringe counting method 보다 개선된 회전각 측정 불확도를 제공함을 실험적 결과를 통하여 입증한다. 그리고 최근 제작이 완료된 고주파 회전 가진기의 측정결과와 그들에 대한 토의 점들을 소개한다.

본 연구내용은 한국표준연구원의 음향진동그룹에서 2004 년 수행한 표준유지 과제 의 일부 내용이다.

참고문헌

- [1] 강 대임 외 다수, 물리표준 유지향상 연구, KRISS/IR--2003-016, 한국표준과학연구원, 2002.
- [2] H.-J. von Martens, "Current state and trends of ensuring traceability for vibration and shock measurements," *Metrologia*, 36, pp 267-373, 1999
- [3] H.-J. von Martens, *et al*, "Traceability of vibration and chock measurements by laser interferometry," *Measurement*, 28, pp. 3-20 2000.
- [4] H.-J. von Martens, "Dynamic Calibration of Rotational Transducers by Diffraction Grating Interferometry," *PTB Mitteilungen*, 103, pp 19-26, 1992.
- [5] Angelika Taubner and H.-J. von Martens, "Measurement of angular accelerations, angular velocities and rotational angles by grating interferometry," *Measurement*, 24, pp. 21-32, 1998.
- [6] H.-J. von Martens, "Generalization and analysis of the fringe-counting method for interferometric measurement of motion quantities," *Measurement*, 25, pp. 71-87, 1999.