

가속도계 고정기구의 동특성에 대한 연구

Study for Dynamic Characteristics of the Accelerometer Mounting Fixtures

이 종 규* · 조 승 일† · 김 성 부* · 이 두 희** · 배 동 명*** · 신 창 혁***
Jong Kyu Lee, Seung Il Cho, Sung Boo Kim, Doo Hee Lee,
Dong Myung Bae and Chang Hyuk Shin

(2007년 2월 12일 접수 ; 2007년 3월 20일 심사완료)

Key Words : Accelerometer Mounting Fixture(가속도계 고정기구), Finite Element Method(FEM, 유한요소해석), Laser Interferometer(광학 간섭계)

ABSTRACT

Accelerometer mounting fixtures were prepared with the different materials(Ti and SUS). The dynamic characteristics of the mounting fixture were analyzed by finite element method(FEM), and the mode shape of each order and the displacement response for modelling the mounting fixture were analyzed by ANSYS, then resonant frequencies of the mounting fixtures with Ti and SUS were 22.700 and 23.390 kHz, respectively. The dynamic characteristics of the mounting fixture with the different positions were obtained by using laser interferometer. The response of the accelerometer was nearly a constant from 40 Hz to 500 Hz, but the change of the acceleration was increased with an increase of the frequency above 500 Hz.

1. 서 론

오늘날 정밀 측정이나 정밀가공 등 산업의 고도화에 따라 수반되는 제반문제의 하나로 진동 문제가 있다. 이러한 진동 문제를 해결하기 위해서는 진동의 발생원인, 전달 경로 및 기계·구조물의 동특성 등을 파악해야하며 이러한 과정에 필수적인 요소가 진동계측이다.

이러한 진동측정을 위한 가속도계는 보통 진동 발생기에서 정현파 신호를 가해주고 진동 주파수와 진동 변위를 측정하고, 이와 동시에 가속도계의 전기

적 출력을 측정함으로써 교정(calibration)된다^(1~4). 가속도계를 교정할 때, 진동 발생기에서 발생하는 진동을 교정할 가속도계에 전달해 주기 위해 진동 발생기의 운동 부분과 가속도계 설치면 사이에 가속도계 고정기구(mounting fixture)를 삽입하여야 한다. 이 경우 가속도계 고정기구가 완전한 강체가 아니기 때문에 측정 위치에 따라 진동 변위가 달라져 가속도계 교정의 불확도 요인으로 작용을 하게 된다. 따라서 고정기구의 주파수에 따른 동적거동의 영향을 파악하여 보정을 해 주어야 한다. 진동 변위를 측정하는 방법으로 여러 가지 기술이 사용되어 왔으나 광학 간섭계를 이용하는 방법이 가장 일반적이고 정밀한 것으로 인식되고 있다. 광학 간섭계를 사용하여 진동 진폭을 측정하는 방법으로 진동 변위가 큰 저주파수 영역에서는 간섭무늬 수 측정 방법(fringe counting method)^(5~7), 진동 변위가 작은 경우에는 Bessel 함수 방법(Bessel function method)^(8~11) 등

† 교신저자; 정회원, 부경대학교 물리학과
E-mail : chosi3@hotmail.com
Tel : (051) 620-6358, Fax : (051) 611-6357

* 부경대학교 물리학과

** 정회원, 한국표준과학연구원 지적자원경영팀

*** 정회원, 부경대학교 조선해양시스템공학과

이 연구되어왔다.

이 논문에서는 가속도계 고정기구를 제작하여, 이 두회 등^(1,2)이 사용한 Michelson 간섭계를 이용하여 고정기구의 측정위치에 따른 주파수별 응답특성을 조사하였다. 또한 유한요소해석을 통해 고정기구의 동적응답특성을 구하기 위해 가속도계 고정기구를 유한요소모델링하고 형상과 재질에 따른 물성치를 주어 이에 대한 고유치해석을 수행하였으며, 단위 힘을 1N으로 한 조화해석을 수행하였으며, 이 결과를 실험치와 비교하였다.

2. 제작 및 실험방법

2.1 가속도계 고정기구의 설계 및 제작

가속도계 고정기구는 진동 발생기에서 발생된 힘이 일정하게 가속도계에 전달될 수 있도록 매개체 역할을 하는 장치로서, 진동 발생기와 가속도계 사이의 변환기로서 작동하게 된다. 고정기구는 진동 발생기 운동부분의 네 개의 연결 홀에서부터 가속도계가 연결되는 지점까지 최소한의 손실과 왜곡을 가지고 힘이 전달되어야 한다. 즉 진동 발생기와 가속도계 사이에서 고정기구는 충분한 강성이 유지되어야 한다. 이것이 고정기구 설계의 첫 번째 조건이다. 진동 발생기의 가속도 레벨은 진동 발생기가 구동시켜야 할 전체 질량에 반비례하므로 가능하다면 가벼운 것이 좋다. 이것이 두 번째 조건이다. 그러므로 이상적인 고정기구는 모든 주파수 영역에서 무한 강성을 가지고 질량이 영이어야 한다.

일반적으로 가속도계 고정기구의 재질로는 알루미늄(Al), 스테인레스 스틸(SUS), 티타늄(Ti)을 사용한다. 특수한 경우에 베릴륨이 종종 사용되지만 비싼 가격과 가공의 어려움 때문에 일반적으로 사용하는 곤란하다. 재질의 영률과 밀도와의 비율 E/ρ 는 고정기구의 공진 주파수를 조절하는 주요한 요소로서 작용한다.

이 논문에서는 Fig. 1과 같이 SUS, Ti 재질로 고정기구를 제작하였다. 고정기구의 직경은 진동발생기의 운동부분과 같은 62.5mm로 하였고, 진동발생기의 운동부분과 부착하기 위해 12개의 원형 구멍을 내어 M8 볼트로 결합할 수 있게 하였다. 중심에는 10-32 UNF 나사산을 가공하여 상용으로 시판되는 가속도계로 스타드(stud)를 사용하여 쉽게 설치할

수 있도록 하였다. 고정기구의 윗면은 폴리싱을 하여 레이저 빔이 반사될 수 있도록 하였다.

제작한 고정기구의 공진주파수를 알아보기 위해 먼저 고정기구가 반지름이 a 이고 두께가 h 인 원판이라고 가정하고 자유조건 경계조건을 가질 때의 공진주파수 f_n 은

$$f_n = \frac{\lambda}{2\pi a} \sqrt{\frac{16Eh^3}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 E 는 영률, λ 는 모드함수로서 무차원 상수, ρ 는 단위체적당 질량, ν 는 푸아송비이다.

Table 1은 고정기구의 재질에 따른 물성치 및 식(1)을 이용하여 구한 공진주파수를 나타낸 것이다. 실험적으로 구한 공진주파수는 고정기구를 줄에 매달아 순간적인 타격을 가하여 구한 것이다. 여기서 실험과 이론에 의한 공진주파수가 차이가 나는 것은 고정기구의 형태를 원판이라고 가정하는데서 오는 것으로 사료된다.

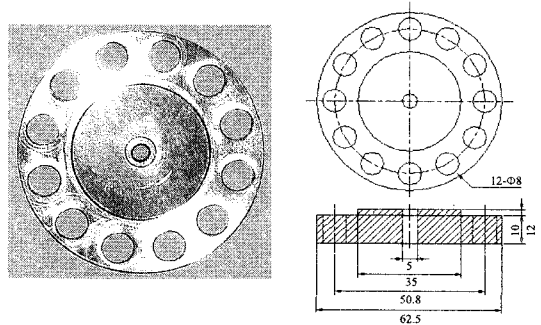


Fig. 1 Geometry of the fabricated mounting fixture

Table 1 Properties and resonant frequency of the mounting fixture

Quality of the material	SUS	Ti
Young's modulus $\times 10^{10}$ (N/m ²)	20.0	10.6
Density (kg/m ³)	7,84	4,51
Poisson ratio	0.30	0.34
Mass(g)	212.0	119.4
Resonant frequency (kHz)	Calculation	22.42
	Experiment	21.72
		21.25

2.2 실험방법

Fig. 2는 가속도계 고정기구의 위치에 따른 주파수별 응답특성을 구하기 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 광원은 파장이 632.8 nm인 헬륨-네온 레이저를 사용하여 Michelson 간섭계를 구성하였다. 신호 발생기에서 정현파를 발생시켜 파워증폭기를 통해 진동발생기를 구동시킨다. 이때 가진 레벨은 입력단에 들어가는 전류 70 mA로 제어를 하였다. 헬륨-네온 레이저에서 나온 광은 광분할기에 의해 둘로 나누어져 일부는 기준거울로, 다른 일부는 수직방향의 진동 발생기에 부착된 가속도계 고정기구의 측정면에 입사된다. 출력신호는 광검출기를 통해 카운터기와 주파수 분석기에서 각각 간섭무늬 수와 고조파 성분 V_1 과 V_3 를 측정하여 진동변위를 구하였다. 40~630 Hz까지는 간섭무늬수를 측정하는 간섭무늬 계수법을 이용하였고, 630~5,000 Hz까지는 스펙트럼 분석을 이용한 Bessel 함수비법을 이용하였다.

동일한 조건을 주기 위해 진동 발생기에 제작한 고정기구를 토크렌치를 사용해 5 N·m로 M8 볼트를 사용해 고정시켰고, 측정위치는 1번 점(P1)은 중심으로부터 5 mm 이격시키고, 2, 3번 점(P2, P3)부터는 4 mm 간격으로 일정하게 나누어 세 점에서 가속도계 고정기구의 동적응답을 각각 구하였다.

3. 수치해석

유한요소해석을 통해 운동방정식 중 감쇠행렬을 비례감쇠로 나타낼 수 있을 때 모드의 직교조건을 이용하여 전체응답을 1자유도계 응답의 중첩으로 나타낼 수 있다. 이 특성을 이용하여 각 진동모드에 대응

하는 등가의 1질량모델의 시간이력응답을 Duhamel 적분 등에 의해 계산하고 그 결과를 중첩시켜 대상 진동계의 시간이력응답을 구할 수 있다.

이 논문의 해석대상인 가속도계 고정기구를 유한요소모델링(Fig. 3)하였고 형상과 재질(SUS, Ti)에 따른 물성치(Table 1)를 입력하였다. 모델링한 고정기구의 질량과 실제 질량을 비교하여 수치해석에 필요한 각 재질에 대한 밀도 값을 보정하였다. 자유경계조건일 때의 고유치해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타났다. 가속도계 고정기구의 동적

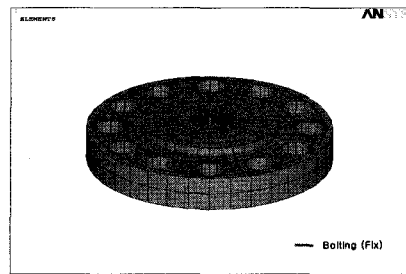


Fig. 3 Modeling of the mounting fixture

Table 2 Resonant frequencies with modes of the mounting fixtures

Mode	Resonant frequency [kHz]	
	SUS	Ti
1st	13.696	13.048
2nd	21.241	20.871
3rd	24.991	23.858
4th	36.487	35.230

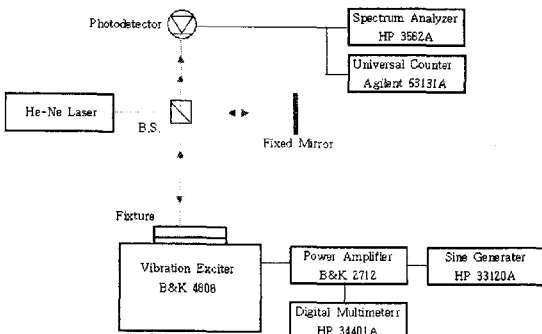


Fig. 2 Experiment system

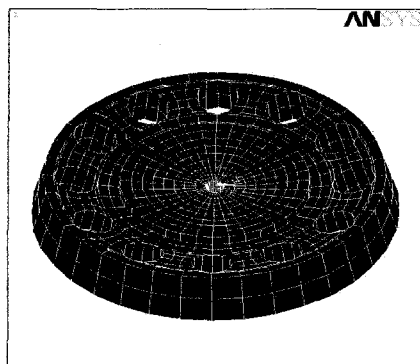


Fig. 4 The 2nd mode of Ti fixture(20.871 kHz, Ti)

거동에서 관심이 있는 부분은 측정면의 수직 방향의 운동이다. 자유경계조건에 대해 Fig. 4와 같이 2차 모드가 수직 방향의 운동에 관련된 모드임을 알 수 있었다. 이 결과와 앞 절에서 구한 공진주파수를 비교해 보면 잘 일치함을 알 수 있다.

단위 힘을 1N으로 한 조화해석을 수행하여 Type 1의 고정기구에 대해 각각의 측정 위치에서의 동적 특성을 구하였다. 이때 경계조건은 실제로 가속도계 고정기구가 진동발생기 운동부분의 4개의 결합용 구멍에 볼팅이 됨으로 Fig. 3과 같이 볼트가 체결될 4개의 구멍을 x, y, z축에 대해서 자유도를 0으로 경계조건을 주었다.

4. 결과 및 분석

Fig. 5는 측정 위치가 P3 지점이고 가진 주파수가 1 kHz일 때, SUS 재질의 가속도계 고정기구의 입력

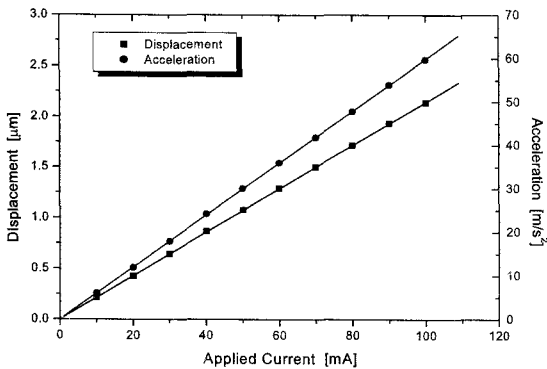


Fig. 5 Displacement and acceleration vs. applied current at 1 kHz

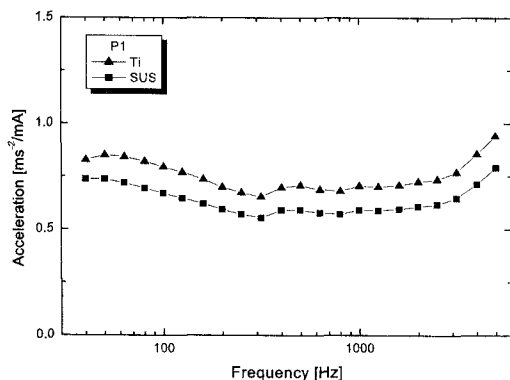


Fig. 6 Acceleration vs. frequencies for SUS and Ti fixture

전류에 대한 진동변위 및 가속도 응답을 나타낸 것으로 양호한 선형성을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 SUS와 Ti 재질의 고정기구에 대해 측정 위치 P1지점에서 주파수에 따른 단위 전류당 가속도 크기를 비교한 것이다. 진동 발생기의 가속도 레벨은 진동 발생기가 구동시켜야 할 전체 질량(진동 발생기의 운동부분, 고정기구, 가속도계)에 반비례한다. Fig. 6에서 보면 Ti 고정기구(119.4 g)가 SUS 고정기구(212.0 g)보다 평균 15% 정도 가진 효율이 좋음을 알 수 있다.

Fig. 7(a)는 SUS 가속도계 고정기구에 대한 각 위치별 주파수에 따른 단위 전류당 변위응답을 나타낸 것이고 Fig. 7(b)는 P1 지점에서 측정된 변위를 기준으로 P2, P3 지점에 대한 오차(%)를 구한 것이다. P2 지점을 보면 1kHz 이하의 영역에서는 P1 지점에 비해 0.1~0.5% 정도 변위가 작게 측정되었고, 1 kHz 이상에서는 0.5~1.5% 정도 변위가 작게 측정되었다. 4 kHz에서 변위는 오히려 P1 지점보다 0.8% 크게 측정되었다. P3지점을 보면 1 kHz 이하의 영역에서는 P1 지점에 비해 0.3~0.9% 정도 변위가 작게 측정되었고, 1 kHz 이상에서는 P2 지점보다 변위가 작은 것으로 관찰되었다.

Fig. 8(a)는 Ti 가속도계 고정기구에 대한 각 위치별 주파수에 따른 단위 전류당 변위응답을 나타낸 것이고 Fig. 8(b)는 P1 지점에서 측정된 변위를 기준으로 P2, P3 지점에 대한 오차(%)를 구한 것이다. P2 지점을 보면 측정 주파수 영역에 대해 P1 지점

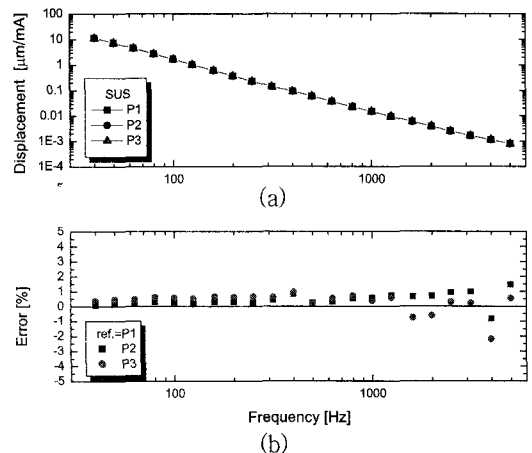


Fig. 7 Response of displacement(a) and error(b) vs. frequencies of SUS fixture

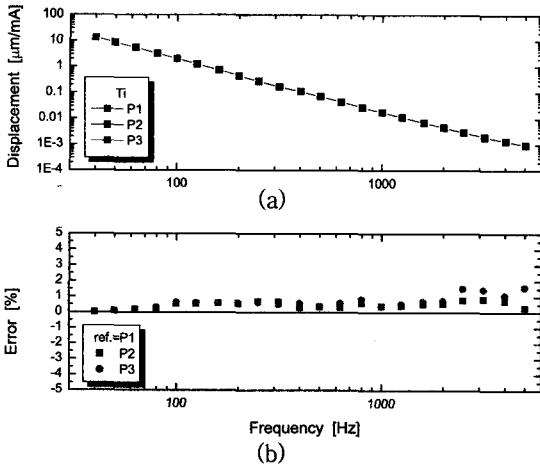


Fig. 8 Response of displacement(a) and error(b) vs. frequencies of Ti fixture

에 비해 0.01~0.8% 정도 변위가 작게 측정되었고, P3 지점을 보면 2 kHz 이하의 영역에서는 P1 지점에 비해 0.02~0.8% 정도 변위가 작게 측정되었다. 2 kHz 이상에서는 1.0~1.6% 정도 변위가 작게 측정되었다. 전반적으로 진동변위는 계속위치가 P1 지점에서 P3 지점으로 갈수록 작아짐을 알 수 있다. 주파수에 따른 측정 위치별 진동 변위의 변동과 진동 발생기가 가해줄 수 있는 가진 레벨의 측면에서 보면 Ti 고정기구가 SUS 고정기구보다는 우수하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 볼트가 체결될 4개의 구멍을 x, y, z축에 대해서 자유도를 0으로 경계조건에서 SUS와 Ti 가속도계 고정기구에 대해 중앙 절점에 1N의 힘으로 조화해석을 수행한 응답을 나타내고 있다. 측정 위치는 중앙에서 각각 5 mm(P1), 9 mm(P2), 13 mm(P3) 떨어진 3개 지점이다. SUS와 Ti 고정기구에 대한 공진 주파수는 각각 23.39, 22.70 kHz로서 앞에서 언급한 자유 경계조건일 때 수직 방향에 관련된 진동모드의 공진주파수에 8.8%, 10.0% 정도 오차가 남을 알 수 있었다. 또한 5 kHz까지의 주파수영역에서 SUS, Ti 고정기구에 대해 P1을 기준으로 P2, P3 지점에서의 변위는 각각 0.3%, 0.5% 작게 해석되었다. 실험에서 측정된 변위와 차이가 나게 된 원인은 FEM 해석은 고정기구 자체에 대해 중앙 절점에서 힘을 가해 구한 것이고 실제 실험에서는 진동 발생기의 운동부분과 고정기구가 결합하여 전체가 힘을 받아 정현진동을 하기 때문이다.

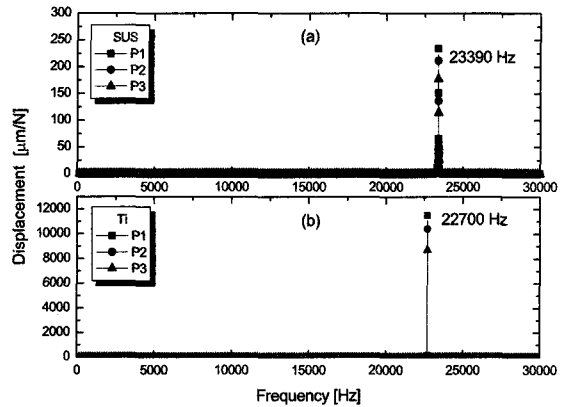


Fig. 9 Harmonic analysis for SUS and Ti fixture

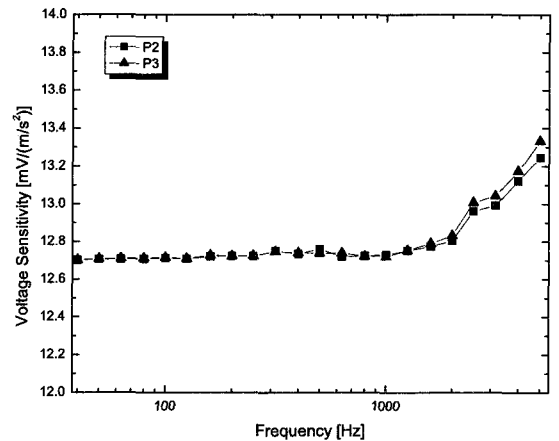


Fig. 10 Voltage sensitivity of accelerometer according to the distance from the center of Ti fixture

Fig. 10은 기준 가속도계(B&K 8305)를 Ti 고정기구에 설치하여 P2, P3 측정지점에서 구한 주파수에 따른 전압 감도를 나타낸 것이다. 이 때 가해준 가진 레벨은 50 m/s²이다. 고주파수에서 측정 위치에 따라 가속도계의 감도값에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

가속도계 교정에서 가속도계 감도에 영향을 주는 가속도계 고정기구에 대해 연구하였다. Ti, SUS 재질로 직경이 62.5 mm인 가속도계 고정기구를 제작하였다. 가속도계 고정기구에 대해 레이저 간섭계를 이용하여 중앙에서 5 mm(P1), 9 mm(P2), 13 mm(P3)

떨어진 지점에서 위치에 따른 동적응답 특성을 구하였다. Ti 고정기구는 P2 지점을 보면 측정 주파수 영역에 대해 P1 지점에 비해 0.01~0.8% 정도 변위가 작게 측정되었고, P3 지점을 보면 2 kHz 이하의 영역에서는 P1 지점에 비해 0.02~0.8% 정도 변위가 작게 측정되었다. 2 kHz 이상에서는 1.0~1.6% 정도 변위가 작게 측정되었다. SUS 고정기구는 P2 지점을 보면 1 kHz 이하의 영역에서는 P1 지점에 비해 0.1~0.5% 정도 변위가 작게 측정되었고, 1 kHz 이상에서는 0.5~1.5% 정도 변위가 작게 측정되었다. 4 kHz에서 변위는 오히려 P1 지점보다 0.8% 크게 측정되었다. P3 지점을 보면 1 kHz 이하의 영역에서는 P1 지점에 비해 0.3~0.9% 정도 변위가 작게 측정되었고, 1 kHz 이상에서는 P2 지점보다 변위가 작은 것으로 관찰되었다. 진동 발생기의 가속도 레벨은 진동 발생기가 구동시켜야 할 전체 질량에 반비례하기 때문에 Ti 고정기구(119.4 g)가 SUS 고정기구(212.0 g)보다 평균 15% 정도 가진 효율이 좋음을 알 수 있었다. 또한 볼트가 체결될 4개의 구멍을 x, y, z축에 대해서 자유도를 0으로 경계조건에서 SUS와 Ti 가속도계 고정기구에 대해 중앙 절점에 1 N의 힘으로 조화해석을 수행한 결과, Ti와 SUS 고정기구에 대한 공진 주파수는 각각 22.70, 23.39 kHz로 나타났으며 5 kHz까지의 주파수영역에서 Ti, SUS 고정기구에 대해 P1을 기준으로 P2, P3 지점에서의 변위는 각각 0.3%, 0.5% 작게 해석되었다.

후 기

이 논문은 2004년 부경대학교 기성회 학술연구비에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Lee, D. H., Cho S. I., Lee, Y. B., Jeon, B. S. and Lee, J. K. 2005, "Automation of Primary Vibration

Calibration System Using Laser Interferometer", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 1084~1091.

(2) Lee, D. H., Lee, Y. B. and Jeon, B. S., 2001, "Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry", Proceedings of the KSNVE Autumn Annual Conference, pp. 1356~1360.

(3) ISO 160-1:1998, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 11: Basic concepts.

(4) ISO 160-11:1999, Methods for the Calibration of Vibration and Shock Transducers - Part 11: Primary Vibration Calibration by Laser Interferometry.

(5) Bowie, G. E. 1963, "Interferometric Measurement of Vibration Amplitude", Appl. Optics, 2, 1061.

(6) Martens, H. J. 1987, "Interferometric Counting Methods for Measuring Displacements in the Range 10⁻⁹ m to 1 m", Metrologia, Vol. 24, p. 163.

(7) Payne, B. F., 1986, "An Automated Fringe Counting Laser Interferometer for Low Frequency Vibration Measurements", Proc. Instr. Soc. Am. Intern. Instr. Symp., May.

(8) Schmidt, V. A., Edeiman, S., Smith, E. R. and Jones, E., 1961, "Optical Calibration of Vibration Pickups at Small Amplitude", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 33, p. 748.

(9) Goldberg, J. L. 1971, "Interferometric Method for the Standardization of Oscillatory Displacement", Metrologia, Vol. 7, p. 87.

(10) Clark, N. H. 1983, "An Improved Method for Calibrating Reference Standard Accelerometers", Metrologia, Vol. 19, p. 103.

(11) Clark, N. H. 1989, "An Interferometric Method to Measure Oscillatory Displacements, 2 nm - 255 nm", Metrologia, Vol. 26, p. 127.