

미소 변위 진동측정을 위한 광학 시스템 설계 및 제작

황 응 · 권진혁†

영남대학교 물리학과

Ⓣ 712-749 경북 경산시 대동 214-1

(2002년 12월 23일 받음, 2003년 4월 17일 수정본 받음)

미세하게 진동하는 물체의 변위를 비접촉식으로 측정할 수 있는 광학계를 설계하고 제작하였다. 도플러효과에 의한 방법과는 달리, 하나의 볼록렌즈를 이용하여 물체 표면에 비스듬하게 입사하여 물체 표면에서 반사되는 광점의 위치 변화를 PSD(position-sensitive detector)로 검출하였다. 이러한 방법으로 전체적인 장비의 크기를 작게 하였고 빠른 응답 속도를 구현하였다. 본 장비는 ±1.0 μm의 분해능을 나타내었으며, 스피커의 진동 실험 및 CD-ROM 안에서 회전하는 CD의 진동을 측정하였다.

주제어 : displacement, vibration, position sensing.

I. 서 론

레이저를 이용한 진동측정 장비들은 CD, HDD, DVD등의 피업장비들을 비롯하여 음향기기의 진동해석이나 자동차 소음 관련, 마이크로 머신 관련 분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 이 장비들 가운데 대표적인 것으로서 홀로그래픽 간섭계^[1]와 레이저 도플러 간섭계^[2-5]를 들 수 있다. 홀로그래픽 간섭계는 대상물의 진동모드를 관측하는데 유용하며, 레이저 도플러 간섭계는 변위나 시간 응답성의 분석에 사용된다. 본 변위 및 진동 측정 장치는 레이저 도플러 간섭계와 같이 변위 및 시간 응답성 측정을 목적으로 개발되었다. 기존의 도플러 간섭계는 높은 정밀도를 갖고 있는 장점이 있지만 광학계 및 신호처리계의 구조가 복잡하며 부피가 크고 고가의 단점이 있다. 대상물의 여러 지점을 동시에 측정하여야 할 경우 여러 가지 제약이 뒤따르게 된다. 이에 반해서 본 연구에서 개발한 장치는 광학계와 신호처리계가 간단하여 소형으로 제작이 가능하고, 다중 측정이 용이한 장점이 있다.

해상도는 광학적 배율을 조정함으로써 최대 약 10 nm까지 올릴 수 있지만, 본 연구에서는 실제 산업계에서 가장 많이 사용되는 1 μm 영역을 기준으로 연구 개발하였다.

변위 측정 장치에서는 대상물이 광축에 수직으로 이동하는지는 계측장비에서 대단히 중요한 요소가 된다.^[6,7] 대상물의 광축에 대한 각도에 따라 대상물의 진동 값과 센서가 감지한 변위값 사이에 차이가 생기기 때문이다. 실제 대상물의 진동 값이 절대적인 변위 값이 되지 못하고 상대적인 값으로 되어 버린다. 본 논문에서는 이런 문제점을 해결하기 위한 방법으로 입사한 광점의 위치를 높은 정밀도로 측정해주는 소자로 많이 사용되고 있는 PSD(position sensitive detector)센서^[8-10]를 2개 사용하여 광축에 대한 대상물의 각도 변위를 측정하는 방법을 고안하였으며 대상물의 각도 변화에 따른 오차 값을 측정하였고, 스피커와 CD의 진동을 측정하였다.

II. 구조 및 동작원리

본 논문에서는 출력광의 위치 검출을 위해 1차원의 PSD를 사용하였다. PSD는 실리콘 표면에 P-I-N 접합을 한 포토다이오드의 일종으로 횡방향 광기전력 효과를 이용하여 입사한 광점의 위치를 검출한다. PSD는 구조가 간단하며, 0.2 μm의 높은 위치 분해능, 빠른 응답 속도 그리고 간단한 신호 해석 등의 장점을 갖고 있다.

PSD의 표면에 입사된 광은 그 표면 층에서 광전자를 발생시킨다. 이 광전자들은 PSD의 양쪽 단자를 통해서 광전류의 형태로 출력된다. 이때, 광전류(I)는 다음과 같다.

$$I_0 = \frac{e\eta P_0}{h\nu} \quad (1)$$

식 (1)에서 e 는 전자의 전하(electronic charge)이고, P_0 는 광출력(optical power), $h\nu$ 는 광자에너지(photon energy), η 는 전환효율(conversion efficiency)을 의미한다.

그림 1에서 PSD의 중앙을 원점으로 해서 위치 Δy 에 광점이 입사할 때, PSD의 양 단자로 흐르는 광전류의 크기 I_1, I_2 는 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta y}{L} \right) I_0 \quad (2-a)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta y}{L} \right) I_0 \quad (2-b)$$

여기서 L 은 PSD의 길이이다. 이 식에서 위치 Δy 는

$$\Delta y = \frac{L}{2} \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \quad (3)$$

와 같이 되는데 식 (3)에서 보면 입사광의 광출력 P_0 가 포함된 광전류 I_0 가 소거되었다. 즉, PSD의 위치 검출에 입사광의 세기는 무관함을 알 수 있다.

†E-mail: jhkwon1@yu.ac.kr

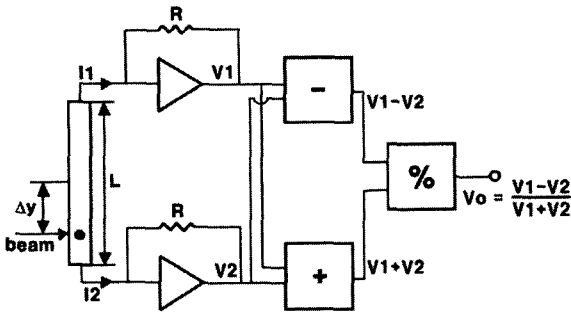


그림 1. PSD와 PSD 신호처리 회로의 블록 다이어그램.

입사광에 의해 발생한 광전류는 PSD의 양단으로 출력되고 그림 1과 같이 전류-전압 변환 회로를 거쳐 전압값으로 변환된다. 광전류 I_1, I_2 의 연산 증폭기에 의한 변환 값 V_1, V_2 는 빼기와 더하기 연산을 한 후 나누기 연산까지 거치면서 V_0 의 출력 값을 얻게 된다.

$$V_0 = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (4)$$

이 값을 식 (3)에 적용하면 다음과 같다.

$$\Delta y = \frac{L}{2} \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \right) = \frac{L}{2} V_0 \quad (5)$$

V_0 는 선형증폭기에 의해 연산된 출력 값이다. 이처럼 PSD는 출력전압이 광의 위치에 직접적으로 비례하므로 신호 해석이 매우 간결하다.

그림 2는 PSD와 볼록렌즈를 사용하여 물체의 변위를 측정하기 위한 개략도이다.

LD(laser diode)에서 나온 레이저광은 렌즈의 한쪽 모서리를 통과하여 대상물에 초점을 맺는다. 대상물에 반사된 광은 다시 렌즈를 통과하여 PSD에 상을 맺게 되는데 대상물의 진동에 따라 PSD에서의 광의 위치도 선형적으로 변하게 된다.

식 (6)의 렌즈 공식에 대상물과 광경로의 변위 값인 Δy 와 h 를 적용하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\Delta y = \frac{a-f}{f} h = Mh \quad (7)$$

식 (7)에서 $M = \frac{a}{b}$ 로서 광학적 배율이며, h 는 그림 2에서 나타난 대로 두 광선 사이의 거리이고 다음과 같다.

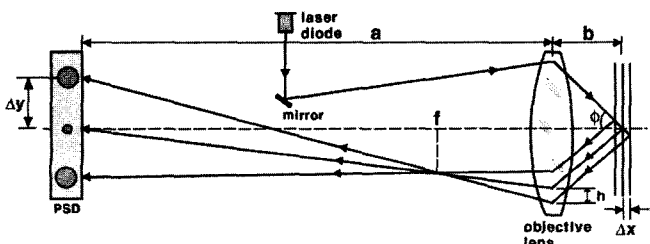


그림 2. 하나의 볼록 렌즈를 이용한 진동 측정 장비의 개념도.

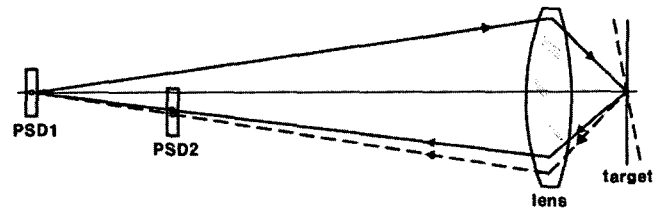


그림 3. 대상물의 각도변화에 따른 광의 경로차 변화 및 PSD 위치에서의 광점 변화.

$$h = 2\Delta x \tan \phi \quad (8)$$

따라서

$$\Delta y = 2M \tan \phi \Delta x = S \Delta x \quad (9)$$

가 된다. 여기서 $S = 2M \tan \phi$ 이며 상수이다. 즉, 두 대상물 사이의 간격 Δx 는 렌즈를 거치면서 광학적 전달 배율 $S = 2M \tan \phi$ 만큼 확대되어 PSD에 Δy 로 나타나게 된다. 그러나 광의 입사각인 ϕ 를 정확히 측정하기 어렵기 때문에 대상물을 이동시키면서 PSD의 변위를 측정하여 실험적으로 광학적 전달배율의 값을 구하였다.

그림 3은 대상물이 광축에 대해 수직으로 진동하는지를 측정하는 모습이다. 대상물을 광축에 대해 수직으로 맞추기 위해 2개의 PSD를 사용하였다. PSD1은 진동신호를 읽고 PSD2는 대상물의 광축에 대한 각도 변화를 읽는다. 대상물이 광축에 대해 기울어져 있어도 초점은 한 점에 맺히게 되므로 이 신호를 PSD1에서 읽을 수 있다. PSD2는 그림 3에서처럼 광축에 대한 대상물의 각도 변화 때문에 나타나는 광경로의 차이를 이용하여 그 각도 변화를 읽을 수 있다.

본 논문에서는 대상물이 광축에 대해 가지는 각도의 변화에 의해 생기는 광학적 전달 배율의 차이를 실험하였다. 대상물의 반사율에 따라서도 광학적 전달 배율 값이 변할 것이라 생각하여 이에 대한 변화율도 실험하였다.

측정된 진동 신호는 그 스펙트럼을 분석해 봄으로써 진동 신호의 구성 성분을 알아 낼 수 있다. 정현파의 경우 그 스펙트럼을 분석해 보면 하나의 주파수 성분만이 존재한다. 그러나 사각파일 경우는 정현파와 달리 하나의 주파수 성분만이 존재하지는 않는다. 이들은

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n2\pi ft + \phi_n) \quad (10)$$

의 형태로 나타나게 된다. 즉, 기본주파수 f 의 정수배 진동의 합성으로 나타낼 수 있다. 이때 C_n 은 진동수 f_n 의 성분파의 진폭이다. 즉, 사각파는

$$x(t) = \cos 2\pi = \frac{1}{3} \cos 3 \cdot 2\pi ft + \frac{1}{5} \cos 5 \cdot 2\pi ft + \dots \quad (11)$$

의 형태로 무한급수의 합성으로 얻어진다.

정리해 보면 정현파는 f 의 단일 주파수 성분으로 구성되어 있으며 복합파의 경우는 $f, 2f, 3f, \dots$ 의 합성으로, 사각파는 f 의 합성으로 구성되어 있다.

본 논문에서는 스피커에 사인파와 사각파의 신호를 주어 진동을 측정하였고 그때의 파워 스펙트럼을 분석하였다.

III. 실험 및 결과

그림 4는 대상물의 진동을 측정하기 위한 시스템의 개략도이다. LD와 대물렌즈 그리고 대상물을 먼저 위치시켜 그림 3과 같이 장치를 구성하여 대상물을 광축에 수직으로 맞춘 후 나머지 부품들을 위치시켰다. 반도체 레이저 LD에서 나온 광선은 조리개를 거친 후 대물렌즈의 한 쪽 측면으로 입사한다. 반사되어 돌아온 광선은 빔스플리터 BS2에 의하여 일부 나누어 PSD2로 입사하고, 나머지는 BS3에 의하여 둘로 나누어 PSD1과 CCD로 입사한다. PSD1은 실시간적 광점의 위치변화를 검출하여 물체의 변위 혹은 진동을 측정하며, CCD는 물체의 간격을 측정하는데 사용된다.

대상물이 광축에 대해 기울어지게 되면 두 광은 같은 위치에 초점을 맺게 되지만 광의 경로는 변하게 된다. 이를 이용하여 광의 초점에 있는 PSD1에서는 대상물의 진동을 측정하게 되고 초점보다 앞쪽에 위치한 PSD2에서는 대상물의 광축에 대한 기울기 변화를 측정하게 된다. PSD2의 광점은 정확한 초점의 위치에 있지 않기 때문에 상은 조금 흐려지지만 PSD가 전체적인 평균값을 계산하는 것이므로 위치 계산에는 무리가 없다.

대상물을 광축에 대해 수직으로 맞추는 방법을 보면 대상물이 광축에 수직으로 놓여있지 않을 때 PSD1에 입사한 광을 PSD1의 중점에 맞추면 PSD2의 광은 PSD의 중점에 위치하지 않게 되므로 대상물의 기울어진 정도를 감지할 수 있다. 즉, 광점이 두 개의 PSD 중점에 모두 맞추어 져야 한다.

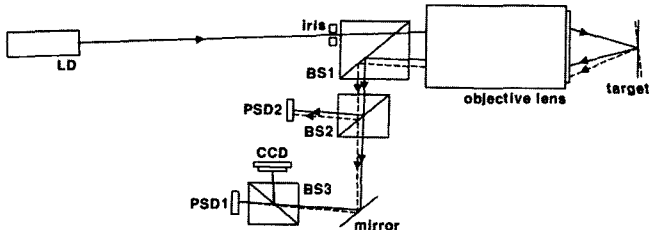


그림 4. 실험장치 구성도. PSD1은 광의 초점에 위치하면서 대상물의 진동 값을 읽는다. PSD2는 광의 초점보다 앞쪽에 위치하면서 대상물의 광축에 대한 각도 변위 값을 읽는다. LD: laser diode, objective lens: 20X, BS: beam splitter.

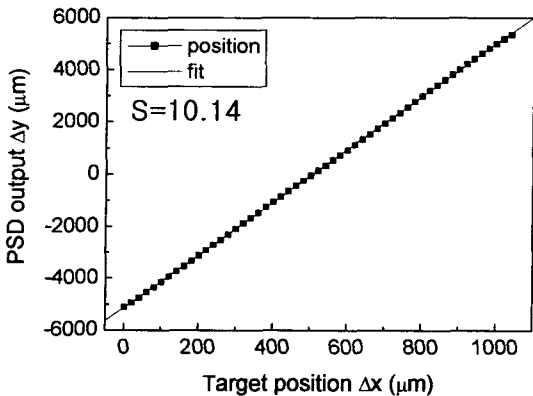


그림 5. 입사광의 위치에 따른 PSD의 출력 특성.

그림 2에서 보았던 광학적 전달 배율 S 를 구하기 위해 대상물을 선형적으로 움직이며 PSD1의 출력 값을 읽었다. 그림 5에 PSD1의 출력 값이 선형적으로 나온 것을 볼 수 있다. PSD의 출력 값을 실제 대상물의 위치 값으로 환산해 보면 대상물이 $1 \mu\text{m}$ 이동했을 때 PSD에서는 $10.14 \mu\text{m}$ 이동하였고 광학적 전달배율 S 임을 알 수 있다. 시스템이 가지는 노이즈에 의해 결정되는 위치 분해능은 약 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 정도였다.

대상물이 광축에 대해 수직으로 진동하지 않으면 실제 대상물이 진동하는 값과 측정 장치가 측정하는 값에는 차이가 생기게 된다.

그림 6에는 광축에 대해 대상물의 각도를 변화시키며 광학적 전달 배율 S 값을 측정한 결과를 보이고 있다. 그림 7에는 대상물의 표면 형태나 반사율에 의해 PSD에 입사하는 광의 형태나 세기가 변하기 때문에 PSD에 입사하는 광의 세기 변화에 따른 광학적 전달 배율 S 값의 측정결과를 보였다. 식 (3)에 의하면 광점의 위치는 입사하는 광량에 관계없어야 하나 그림 7에 나타나 있듯이 광학적 전달 배율이 조금씩 변화하는 것은 실제로 PSD가 1차원이 아니라 2차원 효과가 나타나기 때문으로 해석된다. 즉, PSD의 크기는 폭 1 mm , 길이 12 mm 이며, 광점의 크기는 0.3 mm 정도이기 때문에 엄밀한 관점에서 볼 때 PSD는 완전한 1차원으로 볼 수 없기 때문이다.

그림 6에서는 대상물의 각도 1° 변화에 대해 S 가 0.81의 차이를 보였는데 이는 광학적 전달 배율이 약 변하는 것을 나타

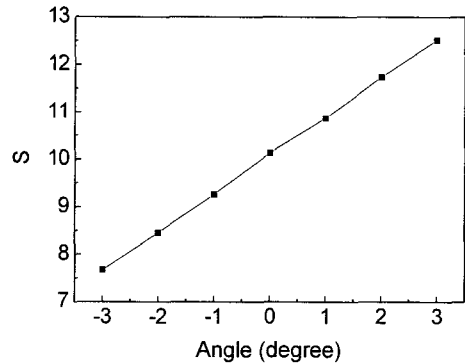


그림 6. 대상물의 각도 변화에 대한 광학적 전달배율 S 의 변화.

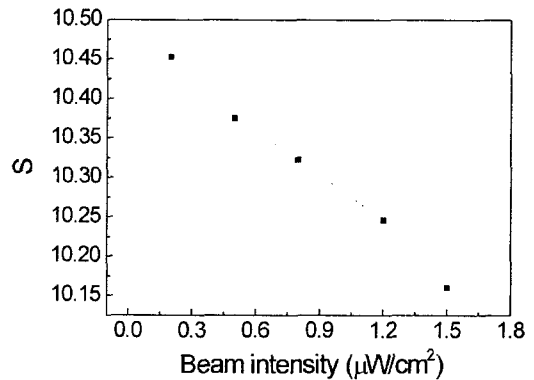


그림 7. PSD에 입사하는 광의 세기에 대한 광학적 전달배율 S 의 변화.

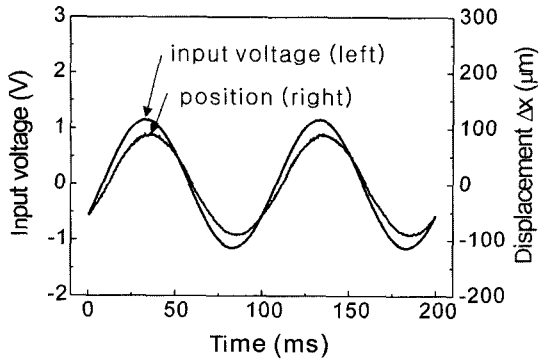


그림 8. 10 Hz 사인파 입력에 대한 스피커 변위 측정결과.

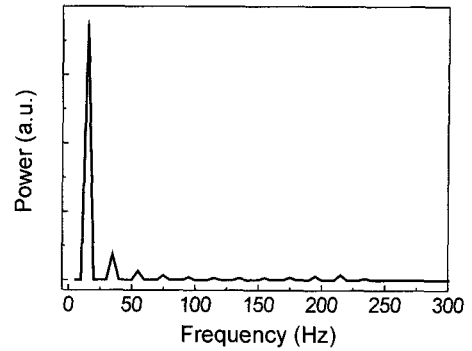


그림 11. 10 Hz 사각파 입력에 대한 스피커의 변위 진동의 파워 스펙트럼.

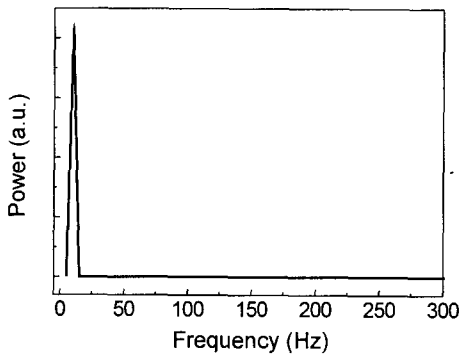


그림 9. 10 Hz 사인파 입력에 대한 스피커의 변위 진동의 파워 스펙트럼.

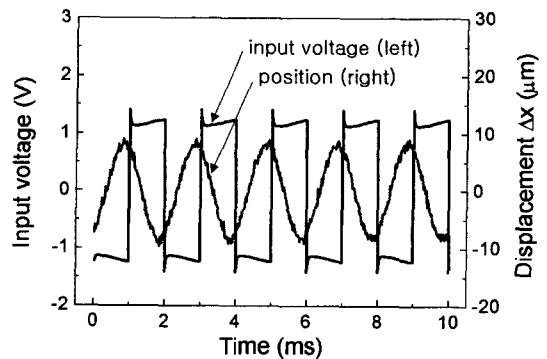


그림 12. 500 Hz 사각파 입력에 대한 스피커 변위 측정결과.

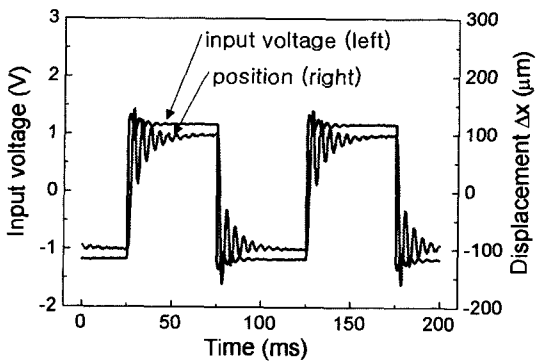


그림 10. 10 Hz 사각파 입력에 대한 스피커 변위 측정결과.

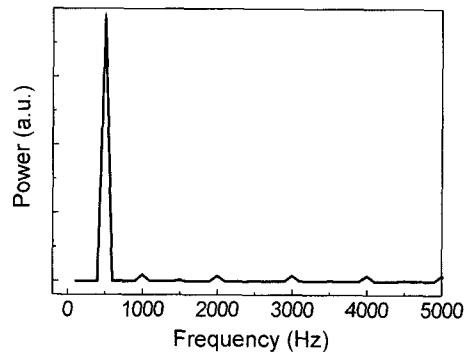


그림 13. 500 Hz 사각파 입력에 대한 스피커의 변위 진동의 파워 스펙트럼.

내며, 그림 7에서는 PSD에 입사하는 광의 세기 $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 변화에 대해 0.22의 광학적 전달 배율 값의 변화를 보였는데 이는 약 2%의 광학적 전달 배율 변화를 의미한다.

다음으로 이번에 개발된 장치의 응용 예로써 스피커에 10 Hz에서 1 kHz사이의 사인파와 사각파를 인가하면서 진동과 파워 스펙트럼을 측정하는 실험을 하였다. 그림 8은 스피커에 10 Hz, 1.1 V의 사인파를 인가하였을 때 스피커가 $\pm 91 \mu\text{m}$ 정도 진동하였고 그림 9의 파워 스펙트럼에는 10 Hz의 주파수 성분이 나오는 것을 볼 수 있다.

스피커에 500 Hz, 1.1 V의 사인파를 인가하였을 때는 스피커가 최대 $\pm 7 \mu\text{m}$ 정도 진동하였으며 파워 스펙트럼에서는 500 Hz의 주파수 성분이 나오는 것을 확인하였다.

그림 10과 그림 12에서는 스피커에 사각파를 인가했을 때

스피커의 진동을 보여주고 있다. 10 Hz, 1.1 V의 사각파를 인가하였을 때 스피커가 최대 $\pm 100 \mu\text{m}$ 정도 진동하는 것을 볼 수 있고 500 Hz의 사각파에서는 최대 $\pm 8 \mu\text{m}$ 정도 진동하는 것을 볼 수 있다. 낮은 주파수에서는 스피커가 사각파를 잘 따라가지만 100 Hz를 넘으면서 스피커는 사인파처럼 진동하는 것을 볼 수 있었다. 그림 11과 그림 13에서는 출력 신호의 파워 스펙트럼을 볼 수 있는데 사인파와 달리 사각파에서는 무한급수의 합성 성분들이 나타나는 것을 볼 수 있다.

다음으로 본 연구에서 개발된 장비를 이용하여 CD-ROM (TEAC사 CD-532E, 32X)에서 회전하는 CD의 진동을 측정하였다. 그림 14는 CD-ROM을 눕혀놓은 상태에서 회전 시켰을 때의 진동이다. CD-ROM을 세워 놓은 상태에서의 진동을 측

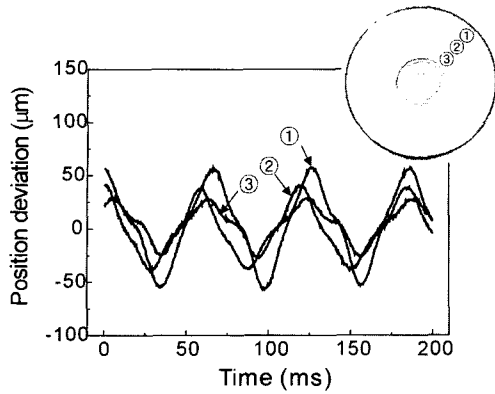


그림 14. CD-ROM을 눕혀놓은 상태에서의 CD 표면의 진동측정.

정한 결과 눕혀 놓은 것보다 CD 바깥쪽에서 최대 20 μm정도 더 진동하는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 비접촉식의 광학적 방법을 이용해서 변위 및 진동을 측정하는 장치를 개발하였다. 하나의 볼록렌즈를 사용하여 장치를 소형으로 만들었으며 PSD 센서를 사용하여 빠른 응답 속도를 얻었다. 또한 본 연구에서 개발된 장치는 보조 PSD를 이용하여 대상물을 광축에 대해 수직으로 놓을 수 있도록 하였으며 1 μm의 분해능으로 1100 μm 범위의 진동을 측정할 수 있었다.

변위에 대한 PSD의 출력 선형성, 대상물이 광 축과 이루는 각도 변화에 따른 오차값 그리고 PSD에 입사하는 광의 세기 변화에 따른 오차값을 측정하였다. 응용 예로써 스피커에 사인파와 사각파의 신호를 주어 진동과 파워 스펙트럼을 측정하였다. 사각파 입력의 경우 주파수가 높아질수록 스피커 표면의 응답성이 떨어져 사인파 형태로 변화하는 것을 관측하였으며, CD-ROM 안에서 회전하는 CD의 진동 측정으로부터 CD-ROM을 눕혀 놓은 것이 세워놓은 것보다 최대 20 μm정도 작게 진동하는 것을 알 수 있었다.

비접촉식의 광학적 방법을 이용하여 진동을 측정할 수 있는 본 장치는 대상물을 광 축에 수직으로 놓는 방법과 빠른 응답

속도를 가졌고 소형이기 때문에 CD나 DVD등의 픽업장비들을 비롯하여 마이크로 머신 관련 산업 분야의 변위측정 및 진동해석에 폭 넓게 응용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] Suezou Nakadate and Masaki Isshiki, "Real-time vibration measurement by a spatial phase-shifting technique with a tilted holographic interferogram," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 1, pp. 281-284, 1997.
- [2] Roberto Marsili, Luciano Pizzoni, Gianluca Rossi, "Vibration measurements of tools inside fluids by laser Doppler techniques uncertainty analysis," *Measurement*, vol. 27, no. 2, pp. 111-120, 2000.
- [3] M. A. Gondal, J. Mastromarino and Uwe K. A. Klein, "Laser Doppler velocimeter for remote measurement of polluted water and aerosols discharges," *Opt. and Lasers in Eng.*, vol. 38, no. 6, pp. 589-600, 2002.
- [4] M. A. Stafne, L. D. Mitchell, R. L. West, "Position calibration of galvanometric scanners used in laser Doppler vibrometers," *Measurement*, vol. 28, no. 1, pp. 47-59, 2000.
- [5] Lorenzo Scalise and Nicola Paone, "Laser Doppler vibrometry based on self-mixing effect," *Opt. and Lasers in Eng.*, vol. 38, no. 3-4, pp. 173-184, 2002.
- [6] W.-O. Wong, "Vibration Analysis by Laser Speckle Correlation," *Opt. Lasers in Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 277-286, 1997.
- [7] J. Lu, R. Hou, J. P. Chen, H. Shao, X. W. Ni, "A new detection technique for laser-generated Rayleigh wave pulses," *Opt. Commun.*, vol. 195, no. 1-4, pp. 221-224, 2001.
- [8] J. K. Kim, M. S. Kim, J. H. Bae, J. H. Kwon, H. B. Lee and S. H. Jeong, "Gap measurement by position-sensitive detectors," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 16, pp. 2584-2591, 2000.
- [9] J. H. Bae, J. K. Kim, S. G. Kang, E. H. Nam, J. H. Kwon, T. Y. Jeong and K. M. Shin, "Measurement of shadow mask vibration and Q value using two position-sensitive detectors," *Rev. of Sci. Inst.*, vol. 73, no. 1, pp. 216-220, 2002.
- [10] W. S. Park, H. S. Cho and Y. K. Byun, "Measurement of vibrational motions using a three-facet mirror," *Proc. SPIE*, vol. 4564, pp. 302-310, 2001.

Noncontact optical system for measurement of displacement and vibration

Woong Hwang and Jin Hyuk Kwon[†]

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, KOREA

[†]*E-mail: jhkwon1@yu.ac.kr*

(Received December 23, 2002; Revised manuscript April 17, 2003)

A noncontact optical system that can measure displacement or vibration of an object is designed by employing the oblique ray method. By using a single convex lens which serves as both the input and output lenses, we made the optical system very compact and reliable. In addition, the bandwidth of the vibration measurement is more than 100 kHz by using the position-sensitive detector as the beam position sensor. The resolution and capture range of the system are $\pm 1 \mu\text{m}$ and 1100 μm , respectively. As a sample test, the vibrations of a speaker and a rotating compact disc surface were measured.

OCIS Codes : 120.0120, 120.2380, 120.7280.