

광소자와 헬륨-네온 레이저를 이용한 디스크 캠의 진동 측정

유 응 재,* 이 규 섭,** 김 재 도***

Measurement of Vibration of Rotating Disk Cam using He-Ne Laser and Photodiode

W. J. Yoo,* G. S. Lee,** J. D. Kim***

ABSTRACT

The laser measurement system has been developed using He-Ne laser and photodiode. The laser beam intensity transmitted on a photodiode was disturbed by eccentrically rotating disk cam with various speeds. The photodiode and an amplifier were used to change the detected beam intensity into voltage. The digitized data through the developed system were recorded on a micro-computer by using a signal analysis program. Its reliability was ascertained by using FFT analyzer. The vibration of rotating disk cam can be analyzed by measuring the intensity change of laser beam which the results by FFT analyzer were similar to. The amplifier was devised to be able to modulate the fluctuations of laser beam. The voltage could be linearly recorded with the change of the laser beam intensity.

Key Words : He-Ne Laser, Photodiode, Rotating Disk Cam, Measurement

1. 서 론

기존의 계측방법은 대부분 접촉식 측정법으로 측정 후에 측정물에 변형을 초래할 수 있으며, 센서를 측정물에 직접 접촉시킬 수 없는 경우에는 계측할 수 없는 단점이 있다. 이에 따라 고가의 측정장비에 따른 제약에도 불구하고 최근에는 비접촉식 측정법에 관한 연구

가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 그 중에서 레이저빔을 이용한 계측은 진동측정 및 유속측정에 이용되고 있다.

레이저빔과 광센서를 이용한 계측은 이미 각종 공작기계를 운동 오차를 측정하는 방법, 소형정밀기계의 미세진동 측정^{1,2)} 등에 사용되고 있으며, 레이저를 이용한 재료가공시 발생하는 레이저빔의 산란 및 강도변화를

* 인하대학교 대학원

** 국방과학연구소

*** 인하대학교 기계공학과

포토다이오드를 이용하여 측정을 한뒤 이를 되먹임하여 레이저 가공의 제어^{15,16}에 이용하고 있다.

최근에는 반도체레이저와 IC의 발달로 소형 경량으로 취급하기 쉬운 계측기가 개발되고 이들이 기계의 일부로서 내장되는 경향이 있으며 메카노옵틱스(mechano-optics)라는 용어가 사용되고 있다. 선전각국에서는 레이저를 이용해서 위치를 측정하는 트랙킹(tracking) 시스템의 개발^{16,17}과 고효율 레이저를 이용하여 인공위성의 운동 상태의 계측과 제어¹⁸등 다양한 연구를 수행하고 있다. 한편 레이저빔을 이용한 기술은 기계적인 계측이나 제어 외에 레이저와 파이버(fiber)를 사용한 광통신의 분야에도 연구가 행해지고 있다.

모터의 불균형에 의한 진동은 고속회전체의 경우 큰 문제를 일으키며 경우에 따라서는 기계의 파손을 가져오기도 하며, 초정밀 가공용 공작기계의 경우에는 회전축의 진동으로 말미암아 요구되는 정밀도를 맞추지 못할 수도 있다. 이러한 요인들 때문에 회전하는 모터의 진동을 정밀측정하는 방법이 필요하게 되었다. 그러나 이를 측정하기 위해서는 회전축에 직접 센서를 접촉시킬 수가 없기 때문에 반드시 비접촉식 측정법을 사용해야 한다. 비접촉식 측정법으로 정밀측정이 가능해지면 이를 되먹임(feedback)시켜서 모터의 진동을 능동적으로 제어할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 레이저빔을 이용한 저가의 계측장비를 구성하며 이에 대한 신뢰성을 검토하는 것을 목적으로 한다. 고안한 계측장비를 이용하여 모터에 의해 회전하는 원판캠의 미세진동을 계측하여 얻어지는 신호를 모터의 회전수 변화에 따라 비교함으로써 계측장비가 회전하는 물체의 미세진동 측정에 적합함을 검토하고자 한다. 이를 위해 편심회전하는 원판캠에 레이저 빔을 조사하고 후방에 포토다이오드를 설치하여 편심 회전에 따른 레이저빔의 강도분포변화를 포토다이오드와 증폭기를 통하여 전압의 변화로 측정을 하며, A/D 변환기를 통하여 이산화된 신호로서 컴퓨터의 신호해석 프로그램과 연결되어 실시간 측정을 할 수 있도록 하였다.

2. 레이저 기본 이론

2.1 레이저빔 모드

레이저 공진기 공동 내에서 나오는 광선의 형태는 수 많은 전자파들이 중첩으로 이루어져 있고 이들 각 전자파는 광축을 따라 진행하나 약간씩 다른 방향을 가지고

있다. 공진기에서 전자파의 전기장 분포는 전자파들이 거울축 사이에서 반사됨에 따라 왕복 진행되는 것으로 공진모드는 3차원의 성격을 가지게 된다. 일반적으로 레이저 공진기 공동 내에서 레이저 공진기의 축방향 길이가 횡단면의 길이보다 훨씬 크므로 전기장의 구조를 종축 모드와 횡축 모드로 분리시킬 수 있다.

광학 공진기의 반사거울 사이에서 왕복진행되는 전기장의 형태를 종축 모드(longitudinal mode)라 하며 전파 방향에 수직인 면의 전기장의 형태를 횡축 모드(Transverse Electro Magnetic:TEM mode)라 한다.

레이저빔의 분포변화의 주원인은 레이저 공진기 내에서의 파면(波面)의 흔들림이다. 경우에 따라서는 거울면 위의 먼지나 오물에 의한 손실로 복잡한 모드가 되기도 하며 이런 경우 직진성, 집광성이 떨어진다.

2.2 레이저 빔의 강도분포

레이저빔은 전자파이기 때문에 빔의 단면형태와 강도의 분포는 원형이지만 분포는 일정하지 않다. 일반적으로 비입의 강도 분포는 중앙이 크고, 중에서 멀어질수록 완만하게 작아지는 분포이다. 일반적인 레이저빔의 3차원 강도 분포는 식(1)로 표현할 수 있다.^{19,20)}

$$I = I_0 \exp(-x^2/2a^2 - y^2/2b^2) \cdot f(z) \quad (1)$$

여기서 $f(z)=az$, I_0 는 레이저빔의 첨두 강도(peak intensity)이다.

레이저빔의 강도분포는 가우시안 분포로 해석을 할 수 있다. 만약 $a=b=r_0$ (r_0 :레이저빔의 반경), $x=y=r$ (r :빔의 중심으로부터 원주방향의 거리)이면 식(1)은 아래와 같이 된다.

$$I = I_0 \exp(-r^2/r_0^2) \quad (2)$$

2.3 레이저 빔 분포의 Fourier변환

2차원 함수 $f(x, y)$ 의 Fourier변환은 아래와 같이 정의된다.^{21,22)}

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (3)$$

그리고

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{-j2\pi(ux+vy)} du dv \quad (4)$$

여기서 $F(u, v)$ 는 $f(x, y)$ 의 스펙트럼분포로서 변수 u 와 v 는 각각 x 축과 y 축을 따라 분포하는 주파수 변수

(frequency variables)이다.

또한 Fourier 변환의 분리성(separability)을 이용하면 아래 $f(x,y)$ 인 경우는

$$f(x,y) = f_1(x)f_2(y) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F(u,v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)f_2(y)e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)e^{-j2\pi ux} dx \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y)e^{-j2\pi vy} dy \\ &= F_1(u)F_2(v) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식 (3), (4), (6)를 이용하여 2차원 타원형 가우시안(Gaussian) 분포(식(7))를 가지는 레이저빔을 스펙트럼의 분포로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(x,y) &= e^{-(x^2/2a^2+y^2/2b^2)} = e^{-x^2/2a^2} \cdot e^{-y^2/2b^2} \quad (7) \\ F(u,v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(x^2/2a^2+y^2/2b^2)} \cdot e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2/2a^2} \cdot e^{-j2\pi ux} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-y^2/2b^2} \cdot e^{-j2\pi vy} dy \\ &= \sqrt{2\pi a^2} e^{-u^2/2a^2} \cdot \sqrt{2\pi b^2} e^{-v^2/2b^2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $a=1/2\pi\alpha$, $b=1/2\pi\beta$ 이다.

식(8)은 각각 x 축과 y 축을 따라 분포하는 레이저빔을 주파수 변수 u 와 v 로 나타낼 수 있으며 1차원적인 방법으로 해석할 수 있음을 의미한다.

2.4 입사된 레이저빔의 Fourier 변환

레이저빔이 포토다이오드의 표면에 수직으로 입사된 경우 이에 대한 해석 방법이 필요하다. 즉 2차원의 함수 $f(x,y)$ 가 x 축 위에 조사되면 아래와 같은 함수 $p(x)$ 로 나타낼 수 있다.

$$p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) dy \quad (9)$$

이에 대한 Fourier 변환은

$$p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) dy e^{-j2\pi ux} dx \quad (10)$$

한편 식 (10)은 식 (3)의 형태로 표현할 수 있다.

$$p(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-j2\pi(ux+0y)} dx dy = F(u,0) \quad (11)$$

이는 x 축에 조사된 함수 $p(x)$ 는 Fourier 변환을 통하여 주파수변수 u 와 v 로서 스펙트럼분포 $F(u,v)$ 로 나타낼 수 있다. 또한 레이저빔이 x 축에 대해 θ 의 각을 이루면서 조사된 경우 스펙트럼분포의 해석이 가능하다.

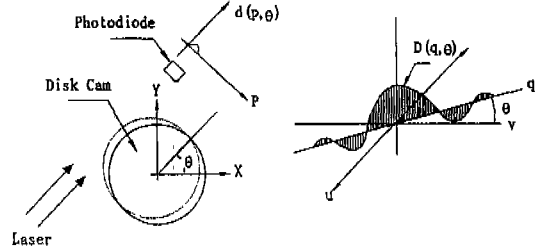


Fig. 1 Transmitted laser beam intensity distribution

2.5 편심 회전에 따른 레이저 빔 강도 분포 변화

레이저빔이 편심회전하는 원판캠에 조사될 경우 편심회전에 따라 포토다이오드에 입사되는 레이저빔의 강도 분포가 변하게 된다. Fig.1에서와 같이 레이저빔이 x 축에 대해 θ 의 각을 이루면서 원판 캠에 조사될 경우 입사된 강도 분포 함수, $d(p,\theta)$ 는 식(12)와 같이 주어진다.²²⁾

$$d(p,\theta) = \ln \left[\frac{I_0}{I(p,\theta)} \right] \quad (12)$$

여기서 I_0 는 조사된 레이저빔 침투강도이며, $I(p,\theta)$ 는 포토다이오드에 입사된 레이저 빔의 강도 분포로서 포토다이오드와 평행한 P 축 위의 한점에서 측정된 값이다.

2.6 포토 다이오드

포토다이오드를 등가회로로 표시하면 Fig.2과 같이 된다.

$$I_0 = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_0}{kT} - 1 \right) - I' \quad (13)$$

(I_s : 역방향 포화전류, k : 볼츠만 상수, q : 전자전하, T : 소자의 절대온도)

개방전압 V_{op} 는 $I_0=0$ 일 때의 출력전압으로

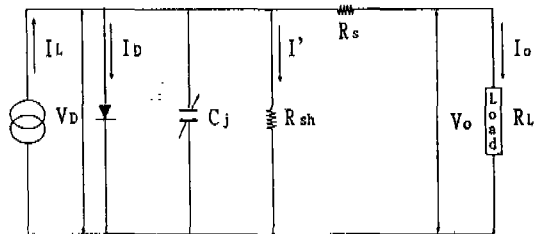


Fig. 2 Circuit of photodiode

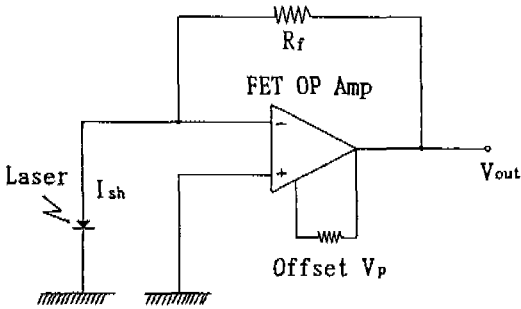


Fig. 3 Connection OP Amp and photodiode

$$V_{op} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L - I'}{I_s} + 1\right) \quad (14)$$

이 되고, I' 가 무시될 때 I_s 는 주위 온도에 대해 지수적으로 증가하므로 V_{op} 는 I_L 의 대수(對數)에 비례하고 주위 온도에 반비례하게 된다. 그러나 미약광이 되면 이 관계가 붕괴된다. 이것에 대해서 I_{sh} 는 $R_L=0$, $V_0=0$ 일 때의 출력 전류로

$$I_{sh} = I_L - I_s \left(\exp \frac{q \cdot I_{sh} \cdot R_s}{kT} - 1 \right) - \frac{I_{sh} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (15)$$

이 된다. 여기서 제 2항과 제3항이 I_{sh} 의 직선성의 한계를 결정하는 요인이 된다.

OP 앰프를 전류입력형으로 사용하면 포토다이오드는 이상에 가까운 I_{sh} 동작을 하기 때문에 입사광량과 부하 저항의 제약이 없어진다. Fig. 3와 같이 귀환증폭기의 가상 접지점이 제로 전위가 되도록 OP 앰프의 제로점을 조정한다. OP 앰프의 입력전류는 오차가 되므로 입력 바이어스가 전류가 작은 FET 입력형의 OP 앰프를 사용한다.

제로 바이어스형 검출회로에서 제로 바이어스(역바이어스 전압을 걸지 않는다.)로 인해 센서의 접합용량이 커지므로 고속동작을 할 수 없지만, 역전류의 영향이 적으므로 직선성이 양호하다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 실리콘 포토다이오드

본 실험에 사용된 실리콘 포토다이오드는 Melles Griot 사의 제품으로 분광감도 영역이 350~1100nm

로 특히 600~900nm의 파장영역에서 감도가 최대가 되며 입사광량에 대한 출력 전류의 직진성과 고속의 응답성을 가지고 있다. 또한 실리콘 포토다이오드는 온도에 의한 변화가 적고, 암전류(dark current)가 적으며 잡음특성(NEP)이 우수하다. 본 실험에 사용된 실리콘 포토다이오드의 제원과 특징은 각각 Fig. 4와 Table 1에 나타나 있다.

3.1.2 광전소자 증폭기

포토다이오드에서 출력되는 전류신호를 다루기 용이한 전압신호로 변환시키고, 전압신호에서 다시 필요한 성분만을 골라내는 작업이 필요하다.

Fig. 5는 증폭소자(OP Amp)인 FET(Field Effect

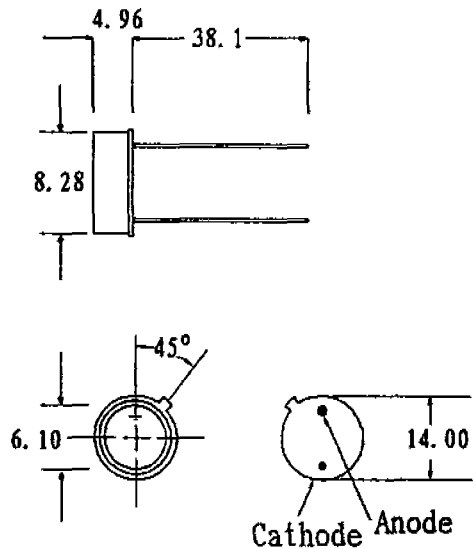


Fig. 4 Apparatus of photodiode

Table 1 Specification of Si photodiode

Type	13 DS1 007
유효면적 (mm ²)	30.0
분광감도 (nm)	350~1100
출력전류 (Amps/Watt)	0.45
암전류 (nA)	10.0
잡음등가전류 (W/Hz)	4.1 X 10 ⁻¹⁴

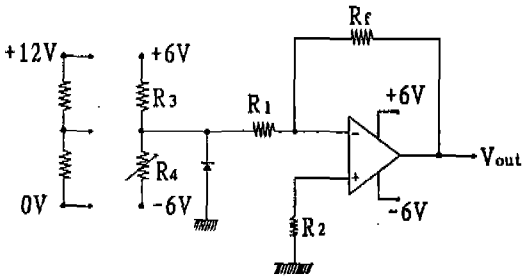


Fig. 5 Actual circuit of OP Amp TL 082
($R_1=1M\Omega$, $R_2=1K\Omega$, $R_3=3K\Omega$, $R_4=10k\Omega$, $R_f=10M\Omega$)

Table 2 Relationship of supply voltage and DC motor rpm

전압 (V)	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	12.0
회전수 (rpm)	720	1700	2800	3960	4600	5500	6000

Transistor) 입력형 TL 082가 관계된 포토다이오드 증폭기의 회로도이다. 포토다이오드에서 나오는 신호를 증폭하기 위하여 컴퓨터로부터 12V의 전원에 저항을 연결시킴으로써 각각 +6V, 0V, -6V를 만들었으며, 10k Ω 의 반고정 저항을 이용하여 offset을 조정하게 하였다. 포토다이오드에 증폭기를 연결하여 전류-전압 신호로 변환을 하고, 증폭비(R_f/R_1)를 결정하는 저항의 크기는 레이저빔의 강도에 따라 결정된다. 한편 변환된 전압신호는 인터페이스를 통해 컴퓨터에 입력되며 입력되는 신호의 잡음의 제거를 위해 증폭기에 입력감도 조절스위치를 설치하였다.

3.1.3 원판캠회전장치

DC모터의 회전축의 중심으로부터 5mm 편심된 원판캠을 설치하여 회전에 따라 포토다이오드에 입사되는 레이저빔의 강도분포를 변화시킬 수 있도록 하였다. 한편 전압의 조절이 가능한 전원공급장치를 사용하여 DC모터의 속도조절에 이용하였으며, 광학테이블에 설치하여 회전속도의 증가에 따른 모터의 요동을 줄일 수 있도록 하였다. Table 2는 각 전압에 따른 모터의 회전수를 측정 한 값이다.

3.1.4 He-Ne 레이저

- 실험에 사용한 He-Ne레이저는 Melles Griot사의 제품으로 출력이 10mW, 파장의 길이가 632.8nm이며 빔

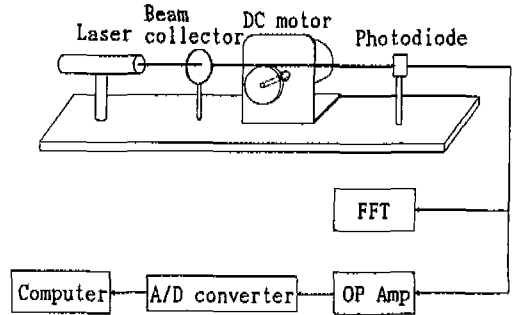


Fig. 6 Schematic diagram of experimental apparatus

의 직경이 0.68mm로 계속적으로 많이 사용되는 소형 레이저이다. 이 빔의 직경을 측정 대상인 원판캠의 편심량을 고려하여 8mm로 확대하여 시험에 적용하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서 구성된 실험장치는 He-Ne 레이저와 전원 공급장치의 발광부분과 포토다이오드, 증폭기, A/D 변환기, 컴퓨터, FFT(Aco Type 8330) 등으로 구성된 수신부분으로 이루어져 있다. 한편 모터와 전원공급장치, 모터의 회전축에 부착된 원판캠 등으로 측정대상을 구성하였다.

레이저빔을 모터에 의해 회전하는 원판캠의 끝면에 조사하여 편심회전에 따른 레이저빔 강도 분포의 변화를 측정하였으며 이를 통하여 원판캠이 부착된 모터의 회전상태를 측정할 수 있도록 하였다.

모터에 부착한 원판캠에 편심을 주어 회전에 따른 높이의 변화를 주었으며, 높이의 변화에 따라 조사된 레이저빔의 강도분포변화를 측정하기 위해 포토다이오드를 설치하였다. 즉 레이저빔을 원판캠의 중심으로부터 최고위치에 조준을 하였으며, 회전에 따라 레이저빔이 포토다이오드에 입사와 차단을 반복할 수 있도록 하여 강도분포변화를 측정하였다. 한편 레이저빔이 포토다이오드의 수광 면적을 포함할 수 있도록 높이 게이지를 이용하여 포토다이오드의 위치를 조절하였다.

포토다이오드에서 발생하는 전류는 증폭기를 통하여 전압으로 변환을 하고 이를 A/D 변환기와 컴퓨터의 신호해석 프로그램과 연결하였다. 아울러 구성된 신호해석 프로그램에 의해 얻어지는 주파수 분석의 신뢰성을 위해 포토다이오드에서 얻어지는 전류의 변화를 FFT로 측정을 하여 이를 주파수 영역에서 비교하였다. 입사되

는 레이저빔 강도분포의 측정장치 개략도는 각각 Fig. 6 과 같다.

4. 실험 결과 및 고찰

레이저빔의 특징인 단색성, 지향성, 고휘도를 조합하여 시간적, 공간적으로 활용하면 종래의 방법으로 측정할 수 없던 각종 계측이 가능하다. 레이저빔은 전기장과 자기장이 결합된 특성을 지닌 횡파의 전자기 방사선으로 일정한 좁은 폭을 갖고 지속되는 정현파이며, 이 파의 주파수는 340MHz로 수백Hz 대역의 기계진동을 계측하는 데 있어서 충분히 높은 주파수를 가지고 있다. Fig. 7은 본 실험에 앞서 계측 시스템의 선형성 및 이득을 확인하기 위한 Calibration Chart이다. 그림에서 x축은 편심된 원판 캠의 변위를 나타내며, 변위가 커지면 포토 다이오드에 조사되는 레이저 광의 차단량이 증가하게 된다. y축은 포토 다이오드에서 발생하는 전류를 앰프를 통하여 증폭한 신호로서 계측 시스템의 출력에 해당한다. Calibration 결과는 5% 내외에서 선형성이 유지되고 있으며, 센서출력 대 변위량(민감도)은 1.65mV/mm의 관계를 갖고있다.

Fig. 8에서 Fig. 13은 모터의 회전수를 변화시키며 원판캠의 곡면부분에 레이저 빔을 조사하여 원판캠의 변위에 따른 레이저 빔의 분포를 계측한 후 그 결과를

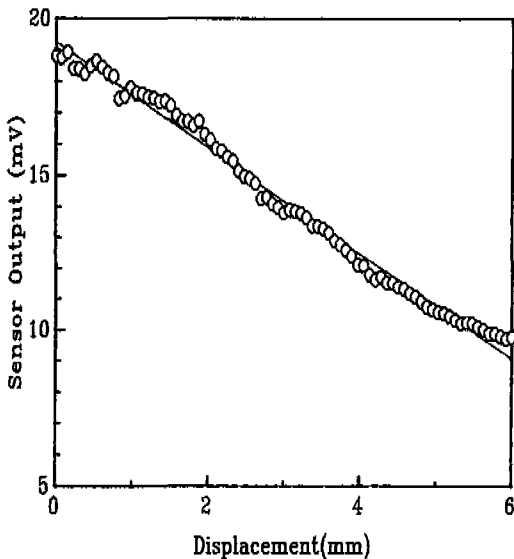


Fig. 7 Sensor calibration chart

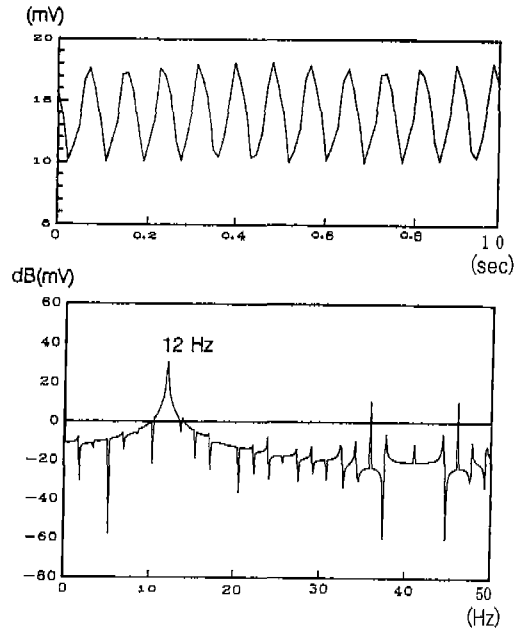


Fig. 8 Laser beam distribution plotted in time and frequency domains. (supply voltage:1.5V, 720rpm)

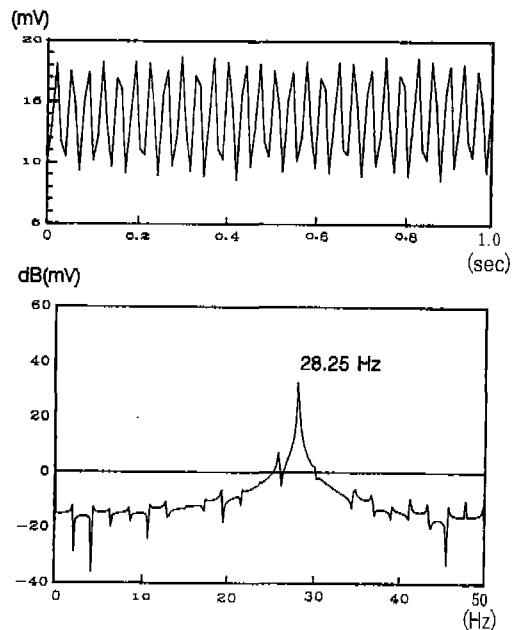


Fig. 9 Laser beam distribution plotted in time and frequency domains. (supply voltage:3.0V, 1700rpm)

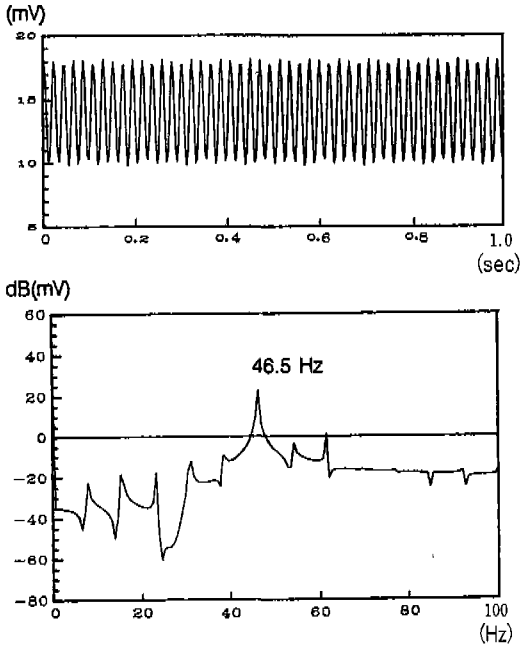


Fig. 10 Laser beam distribution plotted in time and frequency domains. (supply voltage:4.5V, 2800rpm)

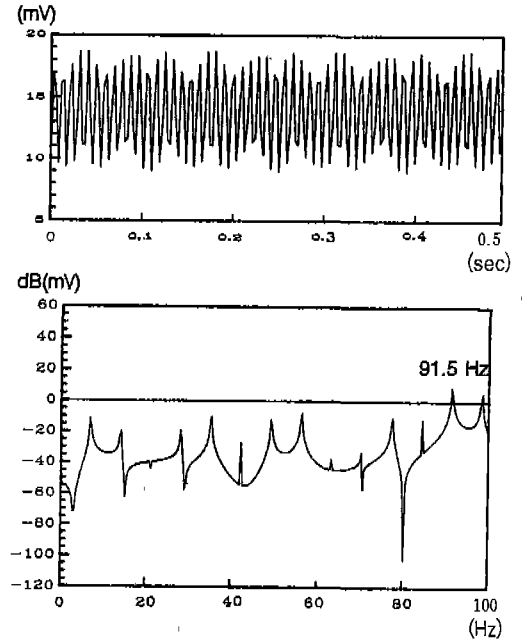


Fig. 12 Laser beam distribution plotted in time and frequency domains. (supply voltage:9.0V, 5500rpm)

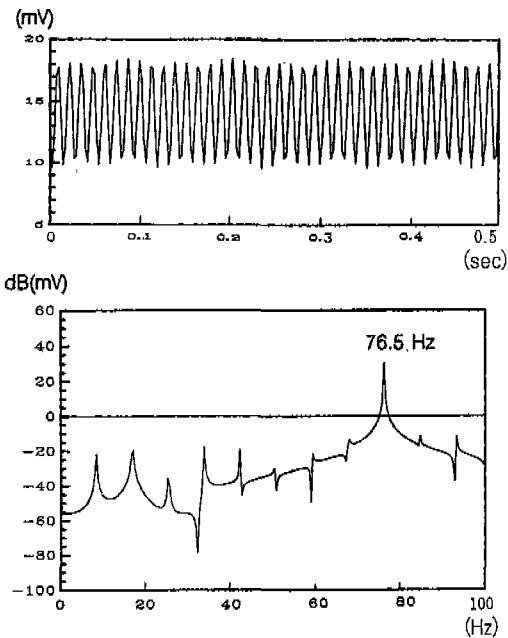


Fig. 11 Laser beam distribution plotted in time and frequency domains. (supply voltage:7.5V, 4600rpm)

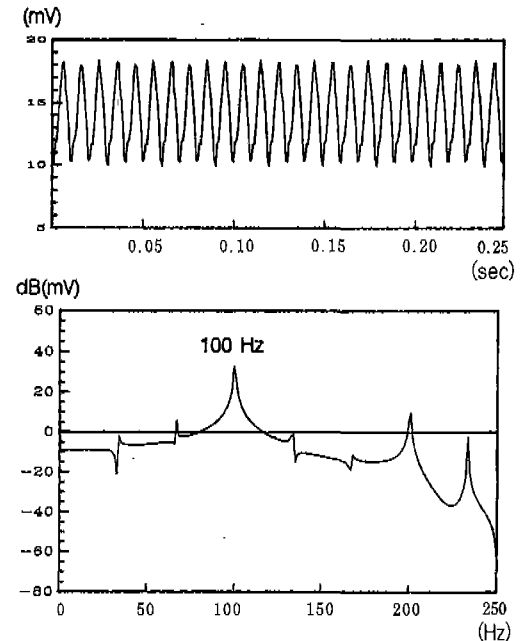


Fig. 13 Laser beam distribution plotted in time and frequency domains. (supply voltage:12.0V, 6000rpm)

시간 축 및 주파수 축에 도시한 것이다. 시간 축상의 결과를 살펴보면 계측신호는 10mV~18mV 사이에 존재하여 그 크기는 약 8mV가 된다. 계측 시스템의 민감도를 고려하면 측정된 편심변위는 4.85mm로 계산되며 실제 값 5mm에 대해 95% 이상의 정밀도로 계측 가능함을 알 수 있다.

또한 계측 결과 편심변위의 크기가 일정하지 못한 것은 원판캠의 편심량에 의해 회전중 진동변위가 발생한 것에 기인하는 것으로 판단되며 특히 공진 주파수와 연관된 회전수에서 이러한 영향이 큰것으로 생각된다. 주파수 축상의 결과를 살펴보면 전체적으로 회전수와 관련된 주된주파수 성분과 노이즈성분과는 20dB 이상 차이가 나고 있어 이 계측 시스템의 S/N비가 양호하다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.12에서는 주된 주파수 91.5Hz(5500rpm)의 성분과 99Hz 성분의 크기가 약 5dB 정도 만의 차이를 보이고 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 회전 장치계의 고유진동수와 관련된 것으로 판단되며, Fig.13의 200Hz 부근의 성분이 peakd성분은 가진 주파수가 200Hz 공진점의 1/2배 부근으로 접근함에 따라 발생하는 Subharmonic 성분으로 판단된다.

이상의 실험 결과로써 본 연구에서 제시하는 레이저와 포토 다이오드에 의한 변위 계측시스템은 100Hz 이내의 동적변위를 5% 미만의 정확도로써 계측 가능함을 확인할 수 있었다. 그러나 정밀측정을 위한 계측시스템으로 개선하기 위해서는 선형성, 민감도 및 정밀도 측면에서 연구가 계속되어야 할 것으로 생각되며 측정 가능 주파수의 상한선을 결정하기 위한 주파수 특성시험도 병행되어야 하겠다.

5. 결 론

본 논문은 레이저를 이용한 계측시스템을 구성하여 측정에 사용될 경우 발생할 수 있는 문제점과 이에 대한 해결방법을 제시함을 목적으로 하였다. 이에 따라 레이저의 발광부분과 포토다이오드, 증폭기장치, A/D 변환기, 컴퓨터 등의 수광부분으로 시스템을 구성하였으며, 모터에 의해 구동하는 원판 캠의 회전상태를 측정해 이에 대한 타당성을 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 본 실험에 사용된 레이저와 포토 다이오드를 이용한 변위 계측시스템은 5% 내외에서 선형성을 유지하고

있으며, 100Hz이내의 동적 변위 측정이 가능한 것으로 확인되었다.

2) 모터의 회전수 변화에 따른 원판캠의 편심량을 레이저 빔의 강도 분포 변화를 실시간 계측하였으며, S/N비가 20dB 이상 유지되어 양호한 결과를 얻었다.

3) 모터의 회전수 변화에 따라 원판캠 축 계의 공진 현상이 계측되었으며, 이 계측시스템의 정밀도 및 신뢰성을 향상시킨다면 회전기계 진동 등의 계측에 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Akiyoshi Hayakawa, Kouichi Miyashita, Kozo Yasuda and Bobuhiro Ishihara, "Measurement of Transverse Displacement by Laser", Proceedings of LAMP '92, pp. 231-234, 1992.
2. K. Kim, K. F. Eman and S. M. Wu, "Analysis of Alignment Errors in a Laser-Based In-Process Cylindricity Measurement System", J. of Engineering for Industry, pp.321-329, Vol.109, 1987.
3. Decker I., "Process Control in Laser Beam Cutting by Measurement of Light Emission", SPIE 650, pp.210-215, 1986.
4. Hansmann M., Decker I. and Ruge J., "Direct Observation of the Laser Cutting Process", SPIE 801, pp.55-59, 1987.
5. Zheng H.Y., Brookfield D.J. and Steen W.M., "The Use of Fibre Optics for In-Process Monitoring of Laser Cutting", ICALEO'89, pp.140-154, Vol.69, 1989.
6. H. B. Chen, L. Li, D. J. Brookfield, K. Williams and W. M. Steen, "Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors", ICALEO'91, pp.113-122, 1991.
7. G. Chryssolouris and P. Sheng, "Process Control of Laser Grooving Using Acoustic Sensing", Transactions of the ASME, Vol.113, pp.268-275, 1991.
8. Eckhard Beyer and Peter Abels, "Process

- Monitoring in Laser Materials Processing", Proceedings of LAMP'92, pp.433-438, 1992.
9. Flemming O. Olsen, Henning Jorgensen and Claus Bagger, "Recent Investigations in Sensories for Adaptive Control of Laser Cutting and Welding", Proceedings of LAMP'92, pp.405-414, 1992.
 10. G. Chryssolouris and P. Sheng, "Recent Developments in Three-Dimensional Laser Machining", ICALEO'90, pp.281-293, 1990.
 11. D. Maischner, A. Drenker, B. Seldel, P. Abels and Beyer, "Process Control During Laser Processing", ICALEO'91, pp.150-155, 1991.
 12. L. Li and W. M. Steen, "Non-Contact Acoustic Emission Monitoring During Laser Processing", ICALEO'92, pp.719-728, 1992.
 13. L. Li, W.M. Steen, K. Shi and D. J. Brookfield, "Sensor Development for In-process Quality Inspection and Optimization of High Speed Laser Can Welding Process", Proceedings of LAMP'92, pp. 415-420, 1992.
 14. Keren Shi, L. Li, W. M. Steen and D. J. Brookfield, "Real Time Expert System for Laser can Weld Diagnosis", Proceedings of LAMP'92, pp.451-456, 1992.
 15. Hideki Okado, Adiyoshi Hayakawa, Kouichi Miyashita and Kozo Yasuda, "A Study of Mirror Alignment System for Laser Resonator", Proceedings of LAMP'92, pp.197-200, 1992.
 16. M. Vincze, J.P. Prenninger and H. Gander, "A Laser Tracking System to Measure Position and Orientation of Robot End Effects Under Motion", The International J. of Robotics Research, pp.305-314, vol.13, No.4, 1994.
 17. C. During, "Real Time Optical Measurement of Position", Mechatronics, pp.125-138, Vol.4, No.2, 1994.
 18. K. I. Schultz and S. Fisher, "Ground-based laser rader measurement of satellite vibrations", J. of Applied Optics, pp. 7690-7695, Vol.31, No.36, 1992.
 19. 김도훈, "레이저 가공학", 경문사, 1992.
 20. Michael Bass, "Laser Materials processing", North-Holland Publishing Company, Newyork, 1983.
 21. E. Oran Brigham, "The fast fourier transform and its applications", Prentice-Hall international Editions, 1988.
 22. Rafael C. Gonzalez, Paul Wintz, "Digital Image Processing", Addison-Wesley Publishing Company, 1977.