

자기베어링 모니터링용 광파이버센서의 성능 평가

박한수*, 정택구(충남대학교 대학원), 홍준희, 이동주(충남대학교)

The Performance Evaluation of Fiber Optic Sensor for Monitoring Magnetic Bearing

Hansoo Park*, Tackgu Jung (Mech. Eng. Dept., Grad. School, Chungnam Univ.), Junhee Hong, Dongju Lee (Mech. Eng. Dept., Chungnam Univ.)

ABSTRACT

In a high speed spindle system, it is very important to monitor the state of rotating rotor. Particularly in active control spindle system, the position sensor must provide feedback to the control system on the exact position of the rotor. In order to monitor the state of a high speed spindle exactly, high accuracy and wide frequency bandwidth of sensors are important. The focus in this paper is to make a fiber optic sensor for monitoring rotor of magnetic bearing, to design the circuit for detecting optical signal, and to evaluation static and dynamic characteristics of fiber optic sensor.

Key Words : Dynamic characteristics(동적 특성), Frequency bandwidth(주파수 대역), Fiber optic sensor(광파이버 센서)

1. 서론

최근 회전기계류(Rotating Machinery)에 대한 세계적인 기술추세를 볼 때 고속화와 정밀화에 대한 요구가 한층 강조되고 있으며, 이러한 측면에서 자기 베어링(Magnetic Bearing)에 대한 활용기술은 증대되고 있는 실정이다. 자기베어링의 장점은 기계적인 마찰, 마모가 없기 때문에 에너지 손실이 적고 수명이 반영구적이다. 특히 비접촉 베어링이어서 최대 허용속도를 매우 높일 수 있으며, 전기적인 제어가 가능하여 회전 시스템의 내·외부 진

동뿐만 아니라 불균형에 대한 자동 밸런싱도 능동 제어로 유지할 수 있는 기능을 갖는다. 이러한 자기 베어링의 능동적 제어를 위해서 주축의 상태 모니터링이 중요하다. 현재 자기 베어링의 상태 모니터링에 사용되고 있는 센서로는 와전류형센서(Eddy-Current Sensor)와 정전용량형 센서(Capacitive Sensor)가 가장 일반적이며 그 외에 자기유도형 센서(Inductive Sensor)와 본 연구에서 다루게 될 광파이버 센서(Fiber Optic Sensor) 등이 있다. 광파이버센서가 다른 센서와 비교할 때 우수한 점은 입사광량에 따른 출력전류의 선형성이 우수하고 응답특성이 뛰어나다. 또한, 고속응답이 가능하며 파이버를 이용하여 빛의 전달이 용이하고 자기의 영향을 적게 받는다.

본 논문은 회전수60,000rpm, 분해능 2 μ m에 대응하는 자기베어링의 모니터링을 위한 광파이버 센서를 제작하고 광 신호 검출회로를 구성하여 광파이버 센서에 대한 정적 및 동적 특성 성능평가에 중점을 두었다.

2. 광파이버센서

2.1 광파이버 측정원리

단일 파이버 반경을 r_0 , 입사광 조도를 E_0 , 시료 표면의 반사율을 ρ 로 하면 단일 파이버에 의한 시료 표면으로부터의 반사 광속 Φ_0 는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_0 = \rho \pi r_0^2 E_0 \quad (2.1)$$

또한 Fig. 1에 나타냈듯이 반사광 조도가 일정한 범위의 원의 반경을 r' , 그의 조도를 I_0 , 확산 반사광이 미치는 범위의 원의 반경을 r 로 하면 단일 파이버에 의한 측정표면으로부터의 반사광속 Φ_0 는 식(2.2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= 2\pi I_0 \left\{ \int_0^{r'} x dx + \int_{r'}^r \frac{1}{r-r'} (r-x) x dx \right\} \\ &= \frac{\pi}{3} I_0 (r^2 + r r' + r'^2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

식(2.1)과 (2.2)로부터 측정표면으로부터의 반사광 조도 I_0 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_0 = \frac{3\rho r_0^2}{r^2 + r r' + r'^2} E_0 \quad (2.3)$$

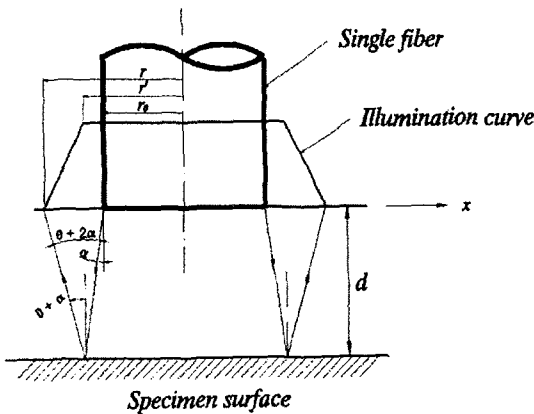


Fig. 1 Reflected light illumination curve of single fiber

측정 대상물로부터의 반사광을 수광하는 부분에 광다이오드를 사용하면, 광입력 P 와 광전류 I_L 사이의 관계는 식(2.4)와 같이 된다.

$$I_L = \frac{P q \eta}{h \nu} \quad (2.4)$$

여기서, q 는 전자의 전하량(Electronic charge)

이고, $h\nu$ 는 광자에너지(Photon energy), η 는 전환효율(Conversion efficiency)을 나타내는 상수이다. 따라서 광다이오드의 광전류 I_L 은 측정 대상물로부터 입사하는 광입력 P 에 비례하며 이것은 거리에 따라 변하게 된다. 따라서, 광전류의 변화를 측정하므로써 측정대상물로부터의 변위를 구할 수 있게 된다.

2.2 광검출 회로 설계

광검출 회로는 Fig. 2와 같이 크게 세부분으로 되어있다. 즉, I-V변환부분, 증폭부분, 저역 통과필터부분이다. I-V변환기는 광다이오드로부터 출력되는 전류신호를 전압신호로 변환시킨다. 이렇게 변환된 신호는 아주 작기 때문에 증폭기를 거쳐 증폭된 후 저역통과필터를 거치면서 10kHz이상의 고주파 노이즈가 차단된다.

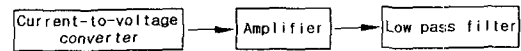


Fig. 2 Block diagram of signal detection system

Fig. 3은 I-V변환부분으로서 광전류 I_L 에 따른 출력전압 V_1 은 식(2.5)와 같다.

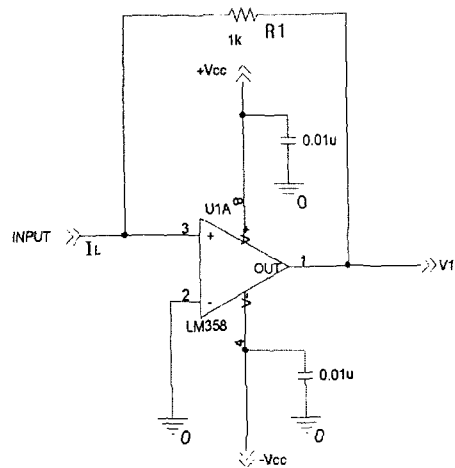


Fig. 3 Current-to-voltage converter

$$I_L = -\frac{V_1}{R_1} \quad V_1 = -R_1 I_L \quad (2.5)$$

Fig. 4는 증폭부분으로 I-V변환회로부분에 출력된 전압신호가 매우작기 때문에 저항비를 조절하여 출력전압을 증폭할 수 있도록 하였다.

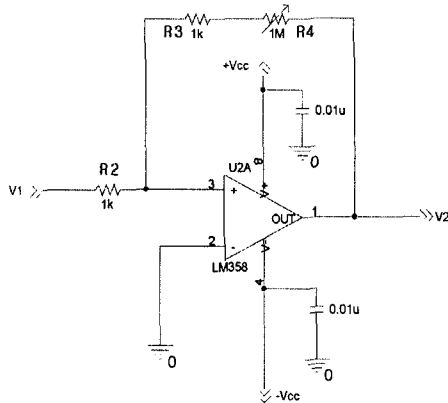


Fig. 4 Amplifier

Fig. 5는 저역통과필터부분으로 차단주파수 (f_c)는 식(2.6)으로 나타낼 수 있으며 본 연구에서는 $f_c = 10\text{kHz}$ 로 설계하였다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.6)$$

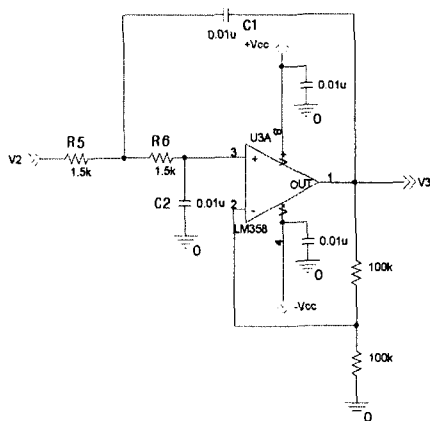


Fig. 5 Low pass filter

3. 실험장치

Fig. 6은 광파이버센서 프로브의 개략적인 모습을 나타낸 것이다. 각 타겟은 평면으로 하였으며 레이저다이오드는 출력 10mW, 파장 655nm를 사용하였다. 또한 실험에 사용된 파이버는 플라스틱 파이버로 코어의 직경이 1mm인 것을 사용하였다.

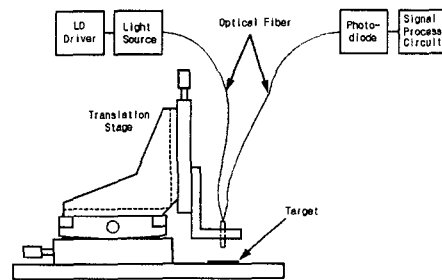


Fig. 6 Schematic of fiber optic sensor system

Fig. 7은 발광부 사진으로서 전원 공급 장치에 레이저 드라이버를 설치하고 전류의 공급을 제어하여 광의 세기를 일정하게 나오도록 하였다.

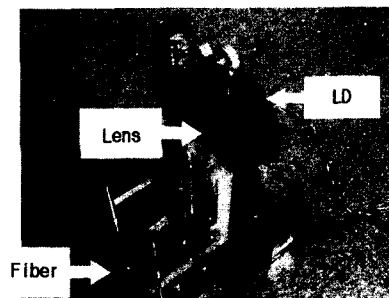


Fig. 7 A part of light source

Fig. 8은 수광부 사진으로서 파이버 끝에서 나오는 빛의 각도는 60° 이다. 빛의 손실을 최소화하여 수광소자에 집광될 수 있도록 초점거리 10mm의 렌즈와 밴드패스필터(B.P.F.) 렌즈($650 \pm 10\text{nm}$)를 파이버와 수광소자 사이에 설치하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정적 특성의 실험에 대한 고찰

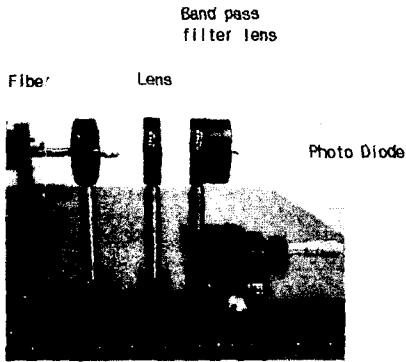


Fig. 8 A part of light sensor

Table. 1은 실험에 타겟으로 사용된 시편의 표면조도이다.

Table 1 Surface roughness of target

Nominal R_a Value (μm)	Surface roughness characteristics		
	R_q	R_z	R_t
0.25	0.18	0.19	0.3
0.24	0.31	0.24	0.29
0.59	0.73	0.47	0.5
1.54	1.55	8.33	10.22

Fig. 9는 광파이버센서의 동적 특성을 실험하기 위한 실험 장치를 보여주고 있다. 가진기를 이용하여 측정 대상체를 진동하여 진동 주파수에 따른 센서의 출력 신호의 크기와 위상을 측정하고 분석하였다.

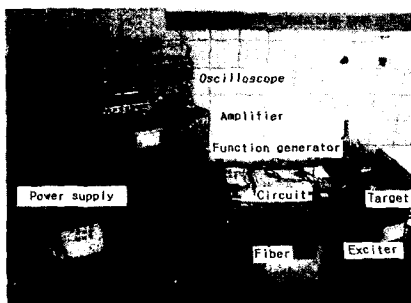


Fig. 9 Experiment setup for dynamic characteristic test

마이크로미터를 이용한 변위이동 장치를 이용하여 측정 대상체(Mirror)의 미소변위 이동에 따른 광파이버센서의 출력 신호를 측정하였다. 그 결과 광파이버센서의 출력신호는 Fig. 10과 같이 변위의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가를 하다가 변위 1.65mm이후에서 감소하게 된다. 이때 증폭된 출력의 최대전압은 20V를 나타내었다. 본 실험에서 요구되는 측정구간은 0.7mm이므로 민감도가 높은 0.3~1.0mm구간에 대하여 실험을 하였다.

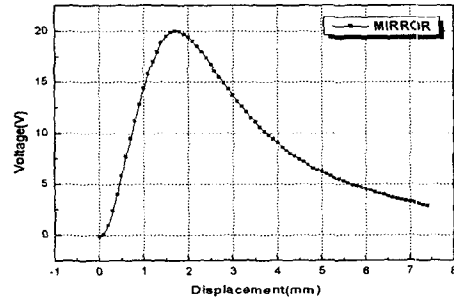


Fig. 10 Typical output response

4.1.1 선형성

실험 데이터를 선형보간(Linear regression)하여 직선의 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$Y_i = -2.88976 + 17.47143 X_i$$

또한, 선형성 계산 결과는 다음과 같다.

$$R(\text{Correlation coefficient}) = 0.99963$$

$$SD(\text{Standard deviation}) = 0.11016$$

$$\text{최대 편차} = 1.5147\% \text{ FSO(Full out scale)}$$

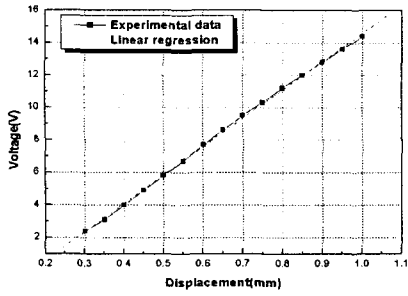


Fig. 11 Linearity

이상의 결과를 그래프로 나타내면, Fig. 11과 같으며 일정구간(0.3~1.0mm)에서 상당히 좋은 선형성을 보이고 있다. 따라서 0.7mm이내의 간극 범위 센상에는 충분하며, 센서의 FSO가 5%미만이면 상당히 좋은 성능을 발휘하므로 이번 정적특성 실험에서 나온 최대편차가 약 1.5147%이므로 상당히 신뢰성이 있다고 사료된다.

4.1.2 히스테리시스 오차

Fig. 12를 보면 거의 히스테리시스 오차는 거의 없는 것으로 판명되었으며 센서로서 충분한 조건을 갖췄다고 본다. 히스테리시스 오차는 다음과 같이 나타났다.

$$\begin{aligned} \text{hysteresis} &= \frac{0.1\text{V}}{(14.4-2.4)\text{V}} \times 100 \\ &= 0.83333\% \text{ FSO} \end{aligned}$$

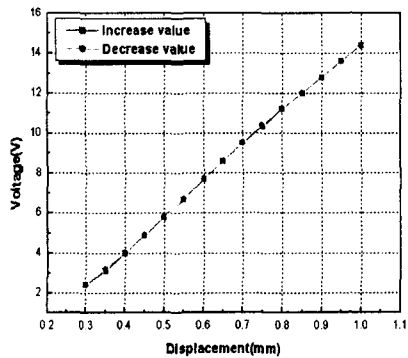


Fig. 12 Hysteresis

4.1.4 타겟의 표면조도에 따른 민감도와 분해능

타겟의 표면조도가 크면 광 반사각이 넓어지고 난반사를 일으키게 되어 센서의 출력에 영향을 미치게 된다. Fig. 13은 표면조도에 따른 광파이버센서의 민감도 변화를 나타낸 것이다. 차겟의 표면조도가 분해능에 미치는 영향을 고찰하기 위해 신호검출회로의 증폭비를 조절하여 Fig. 14와 같이 민감도를 일정하게 조정하였다. 분해능을 고찰한 결과 4종류의 표면조도에서 0.14~1.34 μm까지는 Table 2와 같이 분해능 2μm에서 큰 편차를 보이지 않았다. 따라서 본 실험 결과 타겟의 표면조도가 0.14~1.34μm범위에서 광파이버센서의 분해능은 2μm정도로 가능하다.

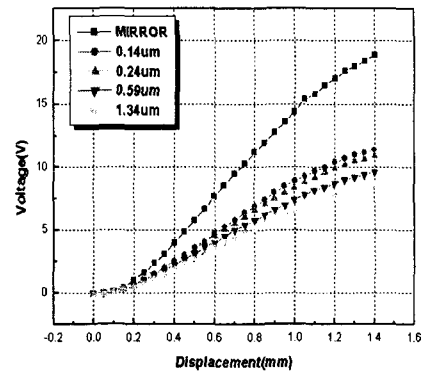


Fig. 13 Sensitivity according to surface roughness

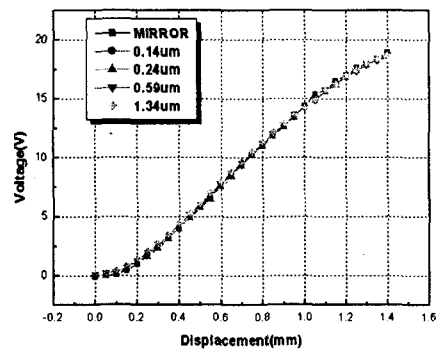


Fig. 14 Sensitivity according to surface roughness after amplifier ratio arbitration

Table 2 Comparison sensitivity with resolution

	0.14 μ m	0.24 μ m	0.50 μ m	1.34 μ m
Sensitivity	16.86	17.14	16.71	16.57
Resolution	2.22636	2.18925	2.24538	2.26474

4.2 동적 특성 실험 고찰

Fig. 15과 Fig. 16는 광파이버 센서의 동적 실험 결과를 나타내는 그래프로써 주파수에 대한 센서 출력 신호의 이득 값(gain)변화와 위상(phase)변화를 나타내고 있다. 본 연구에서 광파이버 센서의 동적 특성 실험 결과를 보면 위상변화는 비교적 일정한 반면 이득 값은 1.6kHz에서 -3dB를 나타냈다. 따라서 광파이버 센서의 주파수 응답은 1.6kHz라 할 수 있다.

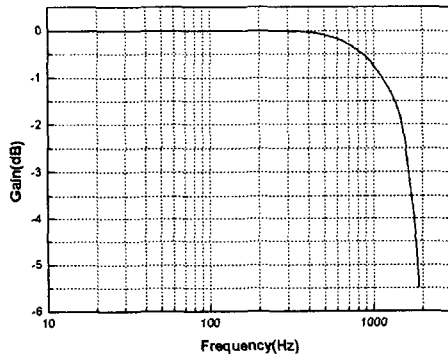


Fig. 15 Gain vs. frequency

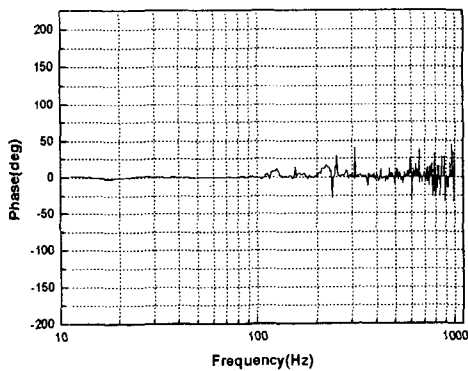


Fig. 16 Phase vs. frequency

5. 결론

본 연구는 자기 베어링의 모니터링을 위한 광파이버 센서 제작을 목적으로 하여 광파이버 센서와 광신호 검출회로를 구성하여 광파이버 센서의 정적 및 동적 특성에 대하여 실험을 통해 고찰하였다. 정적 특성 중 선형성은 최대 편차 1.5147% FSO를 보였으며, 히스테리시스 특성은 최대 0.83333% FSO로 양호하게 나왔다. 타겟의 표면 조도 0.14 μ m~1.34 μ m에서 센서의 분해능은 약2 μ m에서 거의 일정한 경향을 볼 수 있었다. 동적 특성 실험 결과 광파이버 센서의 주파수 응답은 1.6kHz가 되었다.

이론적으로 회전수 60,000rpm의 자기 베어링의 스피들을 모니터링 하기 위해 센서는 최소 1kHz의 응답 주파수를 필요하나 센서의 신뢰성 문제를 고려할 때 5~10배 이상의 응답주파수가 요구되고 있다. 본 연구에서의 광파이버 센서에 요구되는 응답주파수와 분해능은 아직 실용적인 수준에 이르지 못하고 있지만 향후 센서의 주파수 응답성과 분해능을 높이기 위해서 신호 검출회로의 성능 향상과 광파이버 센서에 대한 지속적인 연구를 수행할 예정이다.

6. 참고문헌

1. Katsumasa Saito, Takashi Miyoshi, "Principles of the Fiber Optics Glossmeter," -Study on the Gloss Measurement of Polished Metal Surface by means of Fiber Optics (1st Report)-, pp. 129-131, 1974.
2. B. Cahill, M.A. El Baradie, "LED-based fibre-optic sensor for measurement of surface roughness" Journal of Materials Processing Technology pp. 299-306, 2001