

자기베어링 모니터링용 광파이버센서 개발에 관한 연구

홍준희⁺, 한복수^{*}

(논문접수일 2002. 10. 29, 심사완료일 2002. 12. 5)

Development of Fiber Optic Sensor for Monitoring Magnetic Bearing

Jun-Hee Hong⁺, Bock-Soo Han^{*}

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 진동뿐만 아니라

불균형에 대한 자동 밸런싱도 능동제어로 유지할 수 있는 기능을 갖는다. 이러한 자기 베어링의 능동적 제어를 위해서 주축의 상태모니터링이 중요하다. 현재 자기 베어링의 상태 모니터링에 사용되고 있는 센서로는 와전류형 센서(Eddy-Current Sensor)와 정전용량형 센서(Capacitive Sensor)가 가장 일반적이며 그 외에 자기유도형 센서(Inductive Sensor)⁽³⁾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 파이

* 주저자, 충남대학교 기계공학과 (hongjh@cnu.ac.kr)

주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

+ 한밭대학교 기계공학과

버를 이용하여 빛의 전달이 용이하고 자기의 영향을 적게 받는다. 그러나 광파이버를 이용한 변위센서에 대한 연구 논문은 거의 없고 측정대상물로부터 반사되는 조도의 양에 따라 표면 거칠기와의 관계를 밝힌 논문^(1~2)이 대부분이다.

본 연구는 회전수 70,000rpm, 분해능 1 μ m에 대응하는 자기베어링의 모니터링을 위한 광파이버 센서를 개발하는데 큰 목적을 두었다. 본 논문은 센서로서의 가능성을 평가하기 위해 광 신호 검출회로를 구성하여 평면 측정대상물에 대해 정적 및 동적 특성 성능평가를 하였다.

2. 광파이버센서

2.1 이론적 고찰

단일 파이버 반경을 r_o , 입사 광 조도를 E_o , 시료 표면의 반사율을 ρ 라 하면 단일 파이버에 의한 반사면으로부터의 반사 광속(Optical flux) Φ_o 은

$$\Phi_o = \rho \pi r_o^2 E_o \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 또한 Fig. 1에 나타냈듯이 반사광 조도가 일정한 범위의 원의 반경을 r' , 그 반사광 조도를 R_o , 확산 반사광이 미치는 범위의 원의 반경을 r 로 하면 단일 파이버에 의한 반사면으로부터의 반사 광속 Φ_1 은

$$\Phi_1 = 2\pi R_o \int_0^{r'} x dx \quad (2)$$

과 같고, 확산 반사광속 Φ_2 은

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \int_{r'}^r \left(R_o \frac{-x+r}{r-r'} \right) 2\pi x dx \\ &= 2\pi R_o \int_{r'}^r \frac{r-x}{r-r'} x dx \end{aligned} \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이때 전체 반사광속은

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi_3 &= 2\pi R_o \left\{ \int_0^{r'} x dx + \int_{r'}^r \frac{1}{r-r'} (r-x) x dx \right\} \\ &= \frac{\pi}{3} R_o (r^2 - rr' + r'^2) \end{aligned} \quad (5)$$

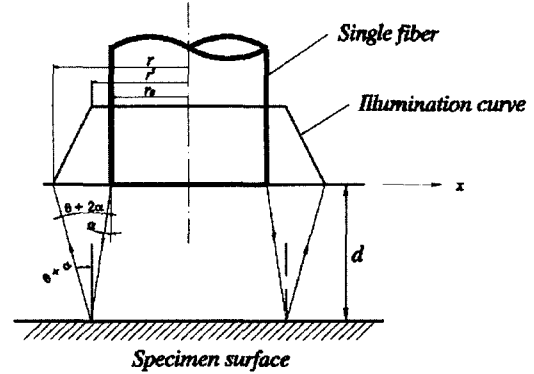


Fig. 1 Reflected light illumination curve of single fiber⁽¹⁾

이다. 식(2)와 (5)로부터 반사 면으로부터의 반사광 조도 R_o 는 식(3-7)과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi_0 = \Phi_3 \quad (6)$$

$$R_o = \frac{3\rho r_o^2}{r^2 + rr' + r'^2} E_o \quad (7)$$

여기서, r' 과 r 는 식(8), (9)와 같다.

$$r' = r_o + d \tan \alpha \quad (8)$$

$$r = r' + d \tan(\alpha + \theta) \quad (9)$$

측정 대상물로부터의 반사광을 수광하는 부분에 광다이오드를 사용하면, 광입력 P 와 광전류 I_L 사이의 관계는 식(10)과 같이 된다.

$$I_L = \frac{Pq\eta}{h\nu} \quad (10)$$

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.

이와 같은 원리를 이용하여 센싱하기 위한 센서 프로브를 Fig. 2와 같이 설정했다.

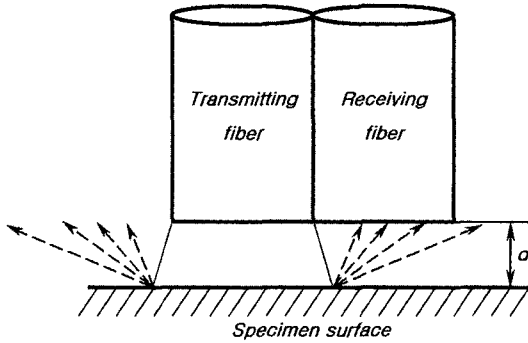


Fig. 2 Sensor probe

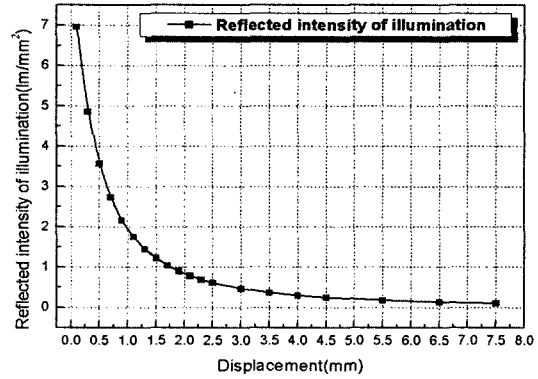


Fig. 3 Reflected intensity of illumination

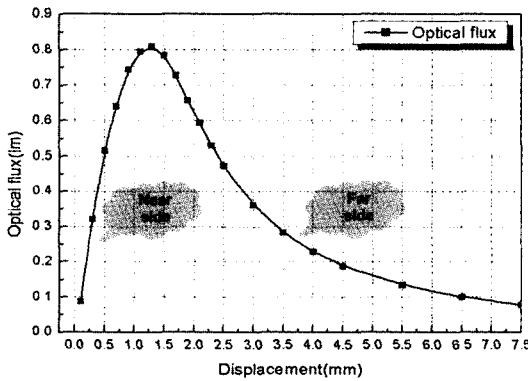


Fig. 4 Optical flux curve

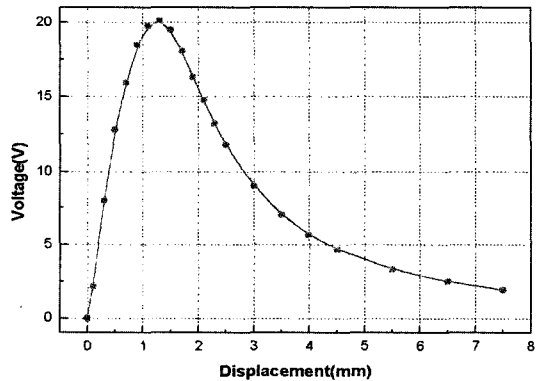


Fig. 5 Theoretical output voltage of optical flux

Fig. 3은 식(7)의 반사광 조도(R_o)의 이론 값 그래프를 나타낸 것이며 반사면과 단일 파이버 단면의 거리가 멀어짐에 따라 반사조도가 거리에 따라 작아지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 광조도(Lux)는 1m²의 면적에 1루멘(lumen)의 일정한 광속이 균일하게 분포되어 있을 때의 면의 조명도를 나타낸다. 따라서 반사광속이 단일 파이버 단면에 입사된 면의 면적이 점점 증가하면 상대적으로 광 조도는 작아지게 되는 것이다. 그러나 광파이버 센서는 수광 파이버로 입사되어 들어오는 광속의 양으로 수광 소자를 이용하여 전기신호로 출력하는 것이기 때문에 수광 파이버로 들어오는 광속의 양을 계산해 보면 Fig. 4와 같이 거리에 따라 일정구간 증가하다가 다시 감소하는 경향을 알 수가 있다. 그 이유는 입사광의 각도가 일정하므로 반사되는 확산 반사각도는 일정하며 따라서 센서 프로브의 모양이 Fig. 2와 같이 발광부와 수광부가 나란한 구조를 하고 있는 경우 간극에 따라 수

광부의 입사 광속의 양은 변하게 된다. 즉, 측정대상물에 가까울수록 수광부보다는 오히려 발광부로 반사되는 광속의 양이 많아 수광부에 적은 양의 광속이 수광되지만 간극이 커질수록 수광부에 반사되는 광속의 양이 점점 커지다가 일정 간극을 넘어서면 일정 확산 반사각으로 인하여 점점 벗어나게 되어 수광부에 수광되는 광속의 양도 작아지게 된다. 이러한 이유로 인하여 수광파이버로 입사되는 반사광속은 거리가 멀어짐에 따라 처음에는 증가하지만 거리가 멀어짐에 따라 차츰 감소하게 되는 것이다.

Fig. 4에서 출력 광속의 양을 식(10)을 바탕으로 출력 전압으로 변화시킨 것이 Fig. 5이다. 이 그림을 보면 Near side와 Far side를 나누어 센서로 이용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 감도와 정도를 요하는 부분은 Near side로 약 0.3mm~1.0mm구간에서 직선성이 좋으므로 이 부분이 본 연구에 적합한 센서로 이용될 수 있는 변위 구간이라는 것을

이론적으로 고찰할 수 있다.

2.2 회로 설계

센싱 시스템의 회로는 Fig. 6과 같이 크게 3부분으로 되어 있다. 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. 7은 I-V변환부분으로서 광전류 I_L 에 따른 출력전압 V_1 은 식(11)과 같다.

$$I_L = -\frac{V_1}{R_1} \quad V_1 = -R_1 I_L \quad (11)$$

Fig. 8은 증폭부분으로 I-V변환회로부분에 출력된 전압 신호가 매우 작기 때문에 저항비를 조절하여 출력전압을 증폭할 수 있도록 하였다.

Fig. 9는 저역통과필터부분으로 차단주파수(f_c)는 식(12)으로 나타낼 수 있으며 본 연구에서는 $f_c = 10\text{kHz}$ 로 설계하였다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (12)$$

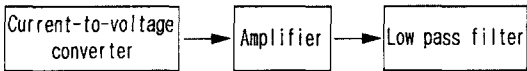


Fig. 6 Block diagram of signal detection system

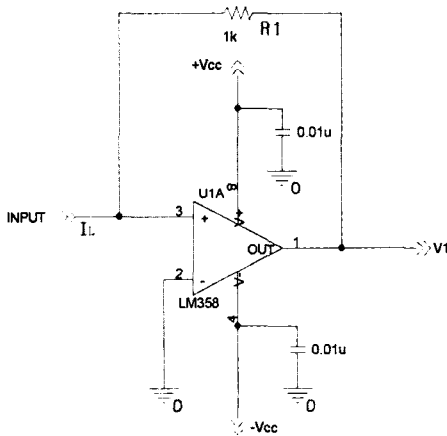


Fig. 7 Current-to-voltage converter

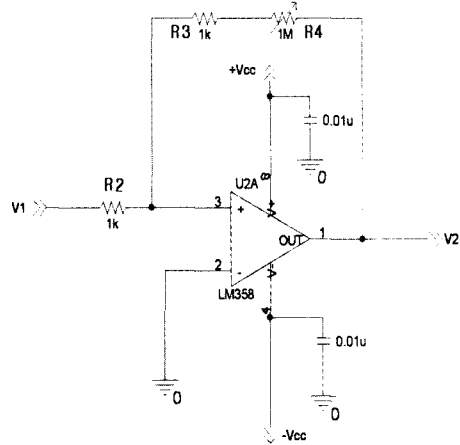


Fig. 8 Amplifier

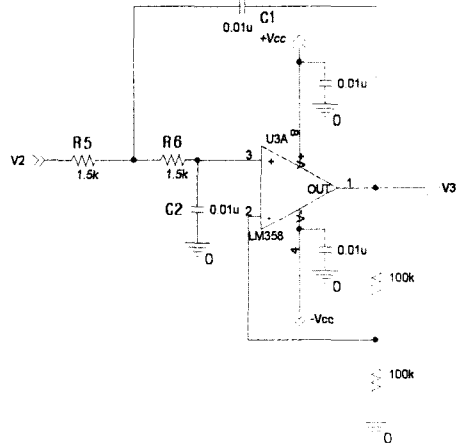


Fig. 9 Low pass filter

3. 실험장치

Fig. 10은 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. 11은 실험에 사용된 측정 대상으로 표준 표면 거칠기 시편을 이용하였다. 광파이버센서는 반사면의 표면 거칠기에 따라 센서특성이 변하므로 정확한 표면 거칠기를 알아야 하기 때문에 한국기초과학지원연구원의 비접촉 표면 거칠기 측정장비(WYKO NT-2000)를 이용하여 측정을 하였

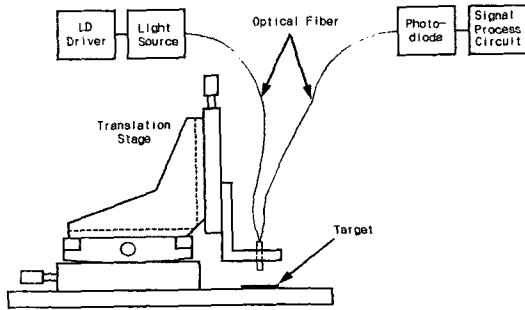


Fig. 10 Schematic of fiber optic sensor system⁽²⁾

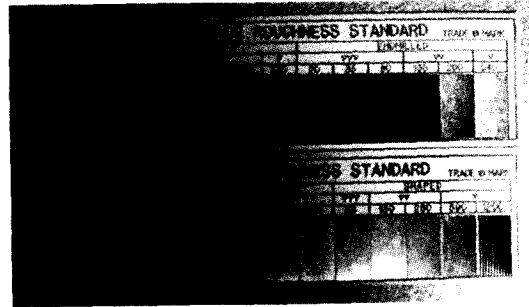


Fig. 11 Target of surface roughness

Table 1 Surface roughness of target

Nominal R_a Value (μm)	Surface roughness characteristics		
	R_a	R_z	R_t
0.14	0.18	0.19	0.3
0.24	0.31	0.24	0.29
0.59	0.73	0.47	0.5
1.34	1.55	8.33	10.22

다. Table 1은 표면 거칠기 측정 결과인 시편의 표면조도이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 정적 특성의 실험에 대한 고찰

마이크로미터를 이용한 변위이동 장치를 이용하여 측정 대상체(Mirror)의 미소변위 이동에 따른 광파이버센서의 출력 신호를 측정하였다. 그 결과 광파이버센서의 출력신호는 Fig. 12와 같이 변위의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가를 하다가 변위 1.65mm 이후에서 감소하게 된다. 이것은 Fig. 5에서 이론적으로 나타낸 결과와 거의 같은 것을 알 수 있다. 변위 1.65mm에서 증폭된 출력의 최대전압이 20V를 나타내었으며 본 실험에서는 감도가 높은 0.3~1.0mm구간에 대하여 정밀 변위 센서로서 적절한 것으로 판단하여 이 구간을 이 변위 센서의 측정 가능 구간으로 정하고 실험을 하였다.

4.1.1 선형성

변위 0.3mm에서 1.0mm까지 0.05mm씩 증가시켰을 때의 센서출력의 결과를 Fig.13에 나타내었으며 이것을 최소자승 선형보간(Linear regression)하여 직선의 방정식을 구하면 다음과 같다.

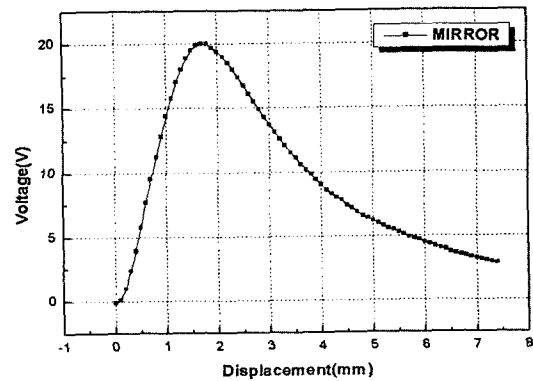


Fig. 12 Typical output response

$$Y_i = -2.88976 + 17.47143 X_i$$

또한, 선형성 계산 결과는 다음과 같다.

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

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

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

이 결과에서 알 수 있듯이 일정구간(0.3~1.0mm)에서 최대편차가 약 1.5147%이므로 선형성은 상당히 좋다. 따라서 자기베어링에서 측의 유지 간극이 0.5mm이므로 자기베어링의 간극 변위 센서로서 충분하다고 사료된다.

4.1.2 히스테리시스 오차

변위를 0.3mm에서 1.0mm까지 0.05mm씩 증가시켰을 때와 감소시켰을 때의 센서출력의 결과를 Fig. 14에 나타냈으며 이 때의 히스테리시스오차를 나타내면 다음 식과 같다.

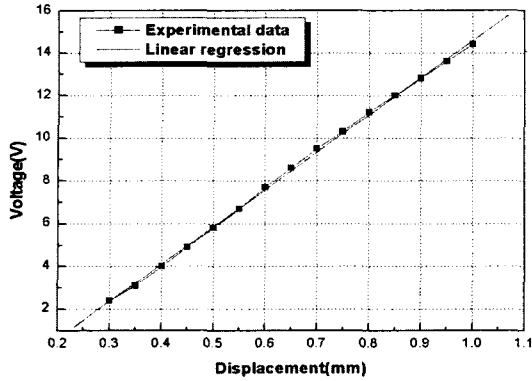


Fig. 13 Linearity

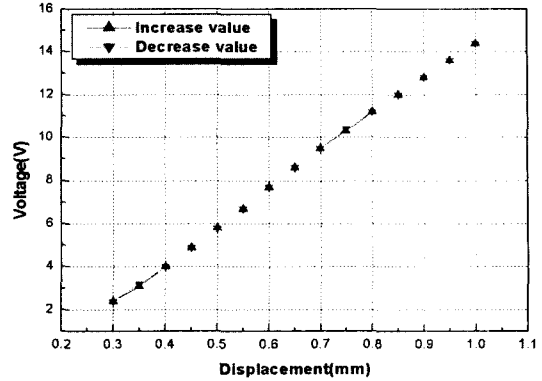


Fig. 14 Hysteresis

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

히스테리시스 오차 역시 거의 없는 것으로 판명되었으며 센서로서 충분한 조건을 갖췄다고 본다.

4.1.3 타겟의 표면조도에 따른 감도와 분해능

타겟의 표면조도가 크면 광 반사각이 넓어지고 난반사를 일으키게 되어 센서의 출력에 영향을 미치게 된다. Fig. 15는 표면조도에 따른 광파이버센서의 감도 변화를 나타낸 것이다. 타겟의 표면조도가 분해능에 미치는 영향을 고찰하기 위해 신호검출회로의 증폭비를 조절하여 Fig. 16과 같이 감도를 일정하게 조정하였다. 분해능을 고찰한 결과 4종류의

Table 2 Comparison sensitivity with resolution

	0.14 μm	0.24 μm	0.59 μm	1.34 μm
Sensitivity(V/mm)	16.86	17.14	16.71	16.57
Resolution(μm)	2.22636	2.18925	2.24538	2.26474

표면조도에서 0.14~1.34 μm 까지는 Table 2와 같이 분해능 2 μm 에서 큰 편차를 보이지 않았다. 따라서 본 실험 결과 타겟의 표면조도가 0.14~1.34 μm 범위에서 광파이버 센서의 분해능은 2 μm 정도로 가능하다.

4.2 동적 특성 실험 고찰

Fig. 17과 Fig. 18은 광파이버 센서의 동적 실험 결과를 나타내는 그래프로서 주파수에 대한 센서 출력 신호의 이득

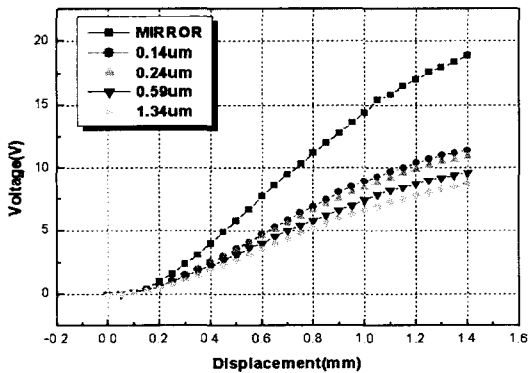


Fig. 15 Sensitivity by surface roughness

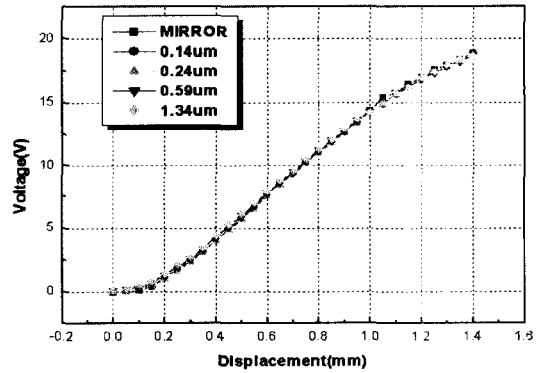


Fig. 16 Sensitivity by surface roughness after amplifier ratio arbitration

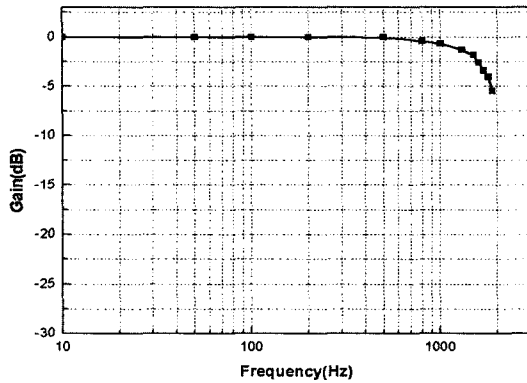


Fig. 17 Gain vs. frequency

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 주파수응답은 1.6kHz라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 자기 베어링의 모니터링을 위한 광파이버센서 제작을 목적으로 하여 광파이버센서와 광신호 검출회로를 구성하여 광파이버센서의 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 표면조도 $0.14\mu\text{m} \sim 1.34\mu\text{m}$ 에서 센서의 분해능은 약 $2\mu\text{m}$ 에서 거의 일정한 경향을 볼 수 있었다. 동적특성 실험 결과 광파이버센서의 주파수 응답은 1.6kHz가 되었다.

이론적으로 회전수 70,000rpm의 자기 베어링의 스피들을 모니터링 하기 위해 센서는 최소 1.17kHz의 응답 주파수

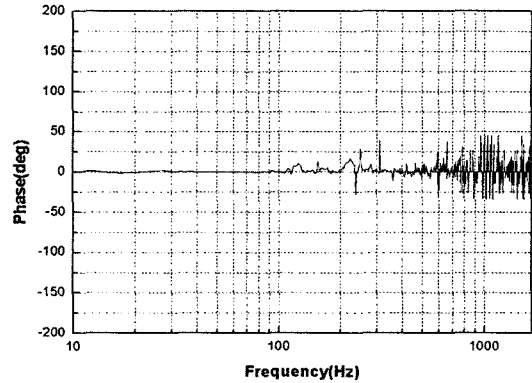


Fig. 18 Phase vs. frequency

가 필요하지만 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 광파이버센서에 대한 지속적인 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) S. Katsumasa and M. Takashi, "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 and M.A. El Baradie, "LED-Based Fibre-Optic Sensor for Measurement of Surface Roughness", Journal of Materials Processing Technology, pp. 299~306, 2001.
- (3) 신우철, 이동주, 홍준희, 노명규, "자기 베어링 주축시스템의 유도형 센서 개발", 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 32~37, 2000.