

고속회전체의 진동 측정용 비접촉 광섬유 변위센서 개발

이기석*, 홍준희#, 신우철*

Development of Optical Fiber Displacement Sensor for Non-contact Vibration Measurement in the High Speed Rotation System

Kee Seok Lee*, Jun Hee Hong# and Woo Cheol Shin*

ABSTRACT

This paper is described a development of an optical fiber displacement sensor. The optical fiber sensor using an intensity modulated measures the displacement between target and sensor. A prototype sensor is composed of a transmitting part, a receiving part and a signal processing circuit. The experiment was conducted not only the sensor performance but also factors that affect intensity. The main performance of this sensor is resolution of $0.37 \mu\text{m}$ and the non-linearity 0.7% FS and the dynamic bandwidth of about 6.3 kHz. As a result of rotation test, the prototype sensor showed an equivalent performance to a commercial eddy current sensor.

Key Words : Optical fiber(광섬유), Linearity(선형성), Bandwidth(대역폭), Displacement measurement(변위측정), Active magnetic bearing(능동자기베어링), Eddy current(와전류)

1. 서론

고속 회전체의 대표적인 능동 자기베어링 시스템의 원리는 회전체가 회전 중심선 위치(centerline position)에서 벗어난 회전중심 오차를 센서로 감지하고 제어기의 제어 신호에 따라 각각의 전자석에 공급되는 전류를 제어함으로써 회전체의 안정된 부상 회전을 이루는 것이다. 따라서 자기 부상체의 중심 위치를 측정하기 위한 센서가 필요하다.¹

회전체의 회전중심선 위치 오차 측정용으로 사용되는 센서 형태로 정전용량형(Capacitive), 와전류형(Eddy current), 유도형(Inductive)등이 대표적으로 사용된다. 정전용량형 센서는 주파수 대역폭이

좁고, 유도형 센서는 구조가 간단하나 상대적으로 성능이 떨어진다. 와전류형 센서는 정확도가 좋고 동적 특성이 우수하기 때문에 회전체 회전 오차 측정용으로 가장 많이 사용하나 높은 가격으로 경제적인 자기 베어링 시스템 생산 및 고장허용작동을 위한 운용 비용 측면에서 어려움이 있다.² 이를 극복하기 위하여 저가의 센서 개발 및 자체 측정(self-sensing) 개념의 능동 지능 자기베어링의 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.³

본 논문의 목적은 고가의 와전류형 센서의 대안으로 능동 자기베어링 시스템에 적용 가능한 광섬유 변위센서를 개발하는데 있다. 여러 변위 측정 방식중에서도 측정 대상물과의 변위에 의한

· 접수일: 2005년 1월 17일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

* 충남대학교 기계공학과 대학원

교신저자: 충남대학교 기계공학과

E-mail hongjh@cnu.ac.kr. (042) 821-5642

광량 변화를 이용한 변위 측정은 비접촉성, 빠른 측정속도, 측정 대상물의 비파괴성등과 더불어 전자기적 장애(EMI)를 거의 받지 않으며, 비교적 구조가 간단하고 절연이 불필요한 여러 장점을 가지고 있다.^{4,6} 또한 빛이 지닌 고속의 성질을 바탕으로 측정 대역폭에 대한 설계 유연성이 좋으므로 고속 회전체 적용에 적합한 형태라 사료된다. 특히 광섬유를 적용함으로써 센서 프로브가 간단하고 센서를 취부하는데 유연한 구조를 갖고 있어 자기베어링 시스템 적용에도 용이하다. 광섬유 변위센서는 제작이 용이하며, 경제성 및 성능이 우수하나 광원의 안정도 그리고 측정 대상물의 측정 표면상태, 진동, 온도등의 주위 환경에 의한 영향에 민감하다.

따라서 본 논문에서는 센서의 성능중에서 정적, 동적 특성인 정밀도와 주파수 응답특성에 중점을 두었으며, 자기베어링 적용을 고려한 센서 구조, 센서의 성능에 영향을 미치는 인자에 대해 살펴 보았다.

2. 광섬유 변위 센서의 측정원리

2.1 기본 구조

광섬유 변위센서는 측정 대상물의 변위에 의해 변하는 반사광의 세기를 수광소자를 이용하여 전기신호로 나타내는 방식을 이용한 센서이다. 센서의 구조는 레이저다이오드(LD)와 구동회로로 빛을 발생시켜 투광용 광섬유를 통해 대상물 표면까지 전달시키는 투광부, 대상물 표면에서 반사된 광을 수광용 광섬유를 통해 입사된 광량을 전기신호인 전류로 변환하는 포토다이오드(PD)인 수광부, 그리고 변환된 전류신호를 전압신호로 변환 및 증폭기능을 가진 신호처리회로로 구성되어 있다.⁵ Fig. 1 은 광섬유 변위센서의 기본 구성 개략도이다.

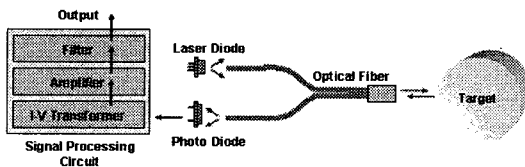


Fig. 1 Schematic of optical fiber displacement sensor

2.2 변위측정 원리

일반적으로 임의의 표면인 금속 대상으로부터의 반사광에는 정반사와 대상물의 표면거칠기에 의해 결정되는 확산 반사광으로 구분된다. Fig. 2 는 단일 광섬유의 입사광 조도곡선(illumination curve)을 나타낸 것이다.⁷ 광섬유 끝단에서 광의 확산각 θ_0 는 광섬유의 코아 및 클래딩, 공기와의 굴절률에 의해 결정된다.⁴

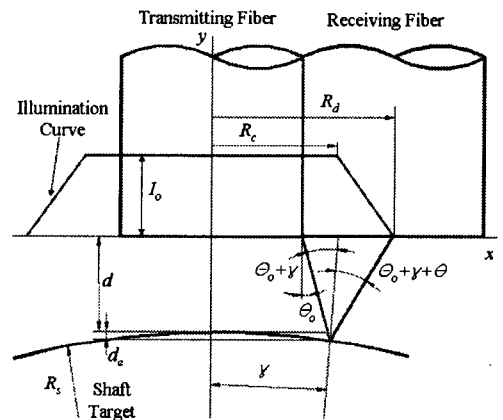


Fig. 2 Measurement principle of the sensor

$$\theta_0 = \sin^{-1}(\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} / n_{air}) \quad (1)$$

여기서 n_1 은 광섬유의 코아(core) 굴절률이고, n_2 는 클래딩 굴절률이다.

Fig. 2 에서 단일(single) 광섬유의 코아 반경을 r_c , 입사광 조도를 E_0 , 대상물의 표면 반사율을 ρ 라 하면, 평면 대상물과 동일한 원리로 단일 광섬유에 의한 대상물 표면에서의 반사광속 Φ_0 는 식(2) 과 같이 나타낼 수 있다.⁷

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

반사광 조도가 일정한 정반사 범위의 반경을 R_c , 이때의 반사광 조도를 I_0 라 하고, 확산 반사광이 미치는 범위의 반경을 R_d 라 하면 입사광에 의한 반사광속 Φ_0 을 정반사 범위에서의 반사광속 Φ_c 와 확산 반사광이 미치는 범위에서의 반사광속 Φ_d

의 함으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_o &= \Phi_c + \Phi d \\ &= 2\pi I_o \left[\int_0^{R_c} x dx + \int_{R_c}^{R_d} \left(\frac{R_d - x}{R_d - R_c} \right) x dx \right] \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)와 (3)은 등식이 성립하므로 이를 정리하여 반사광 조도 I_o 를 구하면 식(4)와 같다.

$$I_o = \frac{3 \rho r_c^2}{R_d^2 + R_d R_c + R_c^2} E_o \quad (4)$$

R_d 와 d_e 는 다음과 같다.

$$R_d = r_c + [de + d] [\tan(\theta_o) + \tan(\theta_o + 2\gamma + \theta)] \quad (5)$$

$$d_e = R_c [1 - \cos(\gamma)] \quad (6)$$

여기서 γ 는 측정면 곡률에 의한 경사각, θ 는 표면거칠기에 따라 결정되는 반사 한계각이다. 식(4)에서 반사광의 조도는 광섬유 단면의 거리가 측정 대상물에서 멀어짐에 따라 작아짐을 볼 수 있다.

3. 센서 설계 및 제작

고속 회전체 자기베어링 시스템에 사용하는 센서는 높은 회전분해능, 빠른 응답성능, 넓은 주파수 대역폭을 가져야 한다.

본 논문에서 기술하고 있는 광섬유 변위센서는 발광부, 수광부, 신호처리회로로 구성되어 있다. 발광부는 파장(wave length) 650nm, 출력 10mW의 레이저 다이오드(LD)를 사용하였고, 수광부는 수광용 섬유 코어와 포토 다이오드(PD)로 구성되어 있다. 광섬유 배열방식은 선형성이 우수한 H형 배열형으로 코어 직경이 0.98mm인 플라스틱 광섬유로 선정하였다. 신호처리회로는 I-V 변환회로, 증폭회로, 저역통과필터(Low pass filter)등 세부분으로 구성되어 있다. 전류신호는 직선성이 우수하므로 포토다이오드 신호원으로 사용한다. I-V 변환회로의 출력 전압을 증폭회로에서 가변저항을 이용하여 원하는 증폭비를 얻을 수 있다.^{8,9} 증폭된 전압신호에 포함된 고주파 잡음(noise)을 차단하기 위하여 차단주파

수(f_c)가 8kHz인 저역통과필터를 설계하였다. 또한 회로를 단순화, 소형화로 제작하고자 다양한 형태의 신호처리회로 시뮬레이션을 수행함으로써 I-V 변환회로와 저역통과필터를 증폭기 한단에 집적화하였다. Fig. 3은 신호처리회로의 개략도이다.

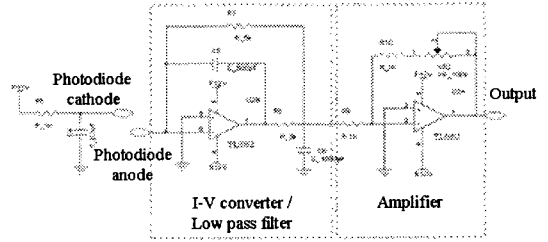


Fig. 3 Schematic of signal processing circuit

광섬유 변위센서의 가장 취약점인 광섬유의 진동 문제를 최소화시키고, 실제 자기베어링 시스템에 적용시켜 실험할 수 있도록 변위센서의 측정부, 발광부, 수광부 구성품들을 고정할 수 있는 센서 브라켓을 회전체와의 인터페이스를 고려하여 설계하였다. Fig. 4는 제작된 브라켓의 형상으로 90° 방향으로 두개의 광섬유 센서를 장착하였다.

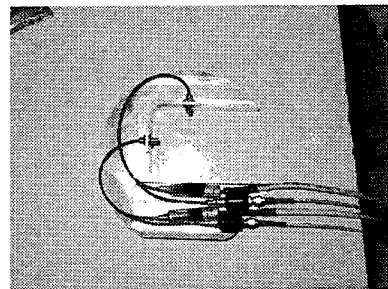


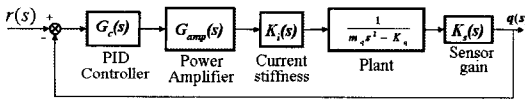
Fig. 4 Sensor bracket

4. 실험 결과 및 고찰

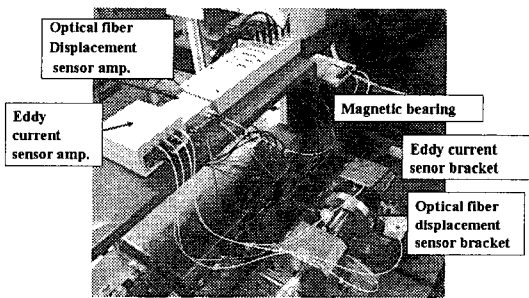
4.1 실험장치 구성

광섬유 변위센서의 성능을 평가하기 위하여 본 연구에 사용될 자기베어링 시스템의 실험장치를 구성하였다. Fig. 5는 실험장치 구성도이다. 자기베어링 시스템에서 전자식 코어는 와전류의 영

향을 방지하기 위해 0.35mm 두께의 규소 강판을 100 매 적층하여 제작하였다. 전자석의 코일은 직경 0.6mm 의 도선으로 각 전자석의 극에 110 회 감았으며 전자석의 인덕턴스는 30mH 이다.¹⁰ 회전체의 전체 길이는 460mm, 직경은 50mm 이며, 탄소강인 SM45C 로 제작하였다. 자기베어링은 외부에 설치한 모터와 축이 커플링으로 연결되어 구동된다. 또한 자기베어링이 안정적으로 작동되고, 자기 부상체의 위치를 제어하기 위해 플랜트, 전력증폭기 및 전자석의 동특성을 포함하는 페루프 시스템에 대한 안정영역에서 Routh-Hurwitz 안정도 판별법을 이용한 실험적 반복 튜닝을 거쳐 최종 PID 제어기의 이득을 결정하였다.¹¹⁻¹² 여기에 사용한 PID 제어기의 미분제어 분모항에는 고주파 잡음의 영향을 억제하기 위해 높은 시정수를 갖는 저역통과필터(Low pass filter)를 추가하였다. Fig. 5(a) 는 자기베어링 시스템에 PID 제어기를 적용한 페루프 시스템의 블록선도이고, Fig. 5(b)는 자기베어링 실험장치 구성을 보여주고 있다.



(a) Block diagram of PID controller



(b) Experimental setup

Fig. 5 Block diagram of PID controller and experimental setup for active magnetic bearing system

회전 실험을 위해 구성된 Fig. 5(b)의 실험장치 제어원은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of magnetic bearing system

Pole face area, A(m ²)	0.00035
Number of turn, N	110
Angle of ploe, θ (°)	22.5
Mass of rotor, m(Kg)	5.774
Mass moment of inertia (Kg/m ²)	0.0737
Polar moment of inertia (Kg/m ²)	0.0017
Current stiffness, N/A	66.87
Position stiffness, N/m	134,460
Shaft surface roughness(Ra μm)	1.5
Amplifier gain, A/N	2
Time constant of controller	0.000032
Eddy current sensor	
- Sensor gain, V/m	8,720
- Bandwidth, kHz	10
- Displacement range, mm	0.25~1.75

4.2 센서의 성능 평가 결과 및 고찰

4.2.1 정특성 및 동특성 성능

Fig. 6 은 센서의 정특성 결과를 나타낸 것으로 센서의 출력은 충분한 선형성을 가지고 있으며, 자기베어링의 변위 폭인 0.4mm 내에서 최대 비직진성은 0.7% FS 로 센서로서의 성능을 충족할 수 있는 선형성을 보였다. 센서의 감도는 11.18 V/mm 로 측정되었고, 분해능은 센서 감도와 잡음 크기로부터 0.37 μm 를 얻었다. 여기서 변위점 0 의 위치는 자기베어링 시스템의 특성을 고려하여 회전체 표면과 광섬유 끝단과의 공극을 0.5mm 로 설정하여 계산한 결과이다.

센서의 동특성을 평가하기 위하여 센서의 주파수 응답을 측정하였다. 측정 방법으로는 함수발생기에서 정현파 신호의 주파수를 조정하여 레이저다이오드 모듈을 통해 나온 빛을 센서로 감지하여 그때의 크기(magnitude)와 위상(phase)을 측정하였다. Fig. 7 에서 보듯이 이득 여유나 위상 여유의 영향없이 고주파 잡음 영향을 억제하기 위하여 위상지상(phase lag) 회로를 추가하여 위상은 (-)로부터 시작된다. 동특성 측정결과 대역폭이 6.3kHz 로 측정되었다. 이는 70,000rpm 고속 회전체의 진동 측정용을 사용할 수 있음을 확인하였다. 주파수 응답특성 실험 결과는 Fig. 7 과 같다.

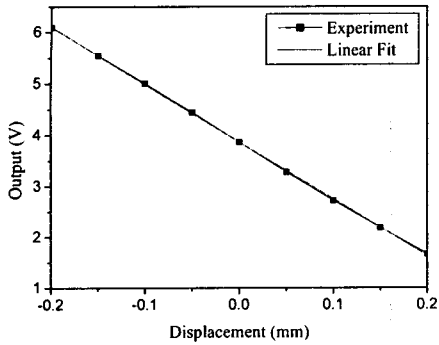
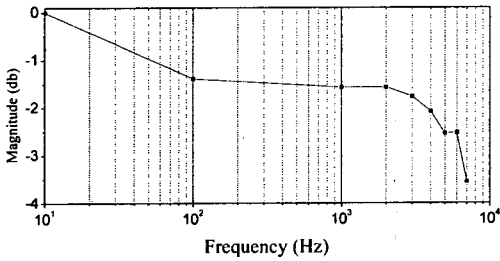
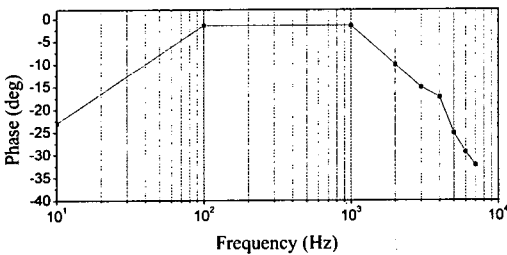


Fig. 6 Linearity of static sensor output



(a) Magnitude vs. frequency



(b) Phase vs. frequency

Fig. 7 Experimental result of frequency response

4.2.2 측정 대상물의 표면거칠기에 따른 영향

광섬유 변위센서는 측정 원리상 측정면의 반사를 변화에 민감하므로 표면거칠기 및 광택의 균일성(Gloss uniformity)등이 매우 중요하다. 측정 대상물의 표면거칠기는 선형성에 영향을 미치지 않으나 감도는 표면거칠기가 양호할수록 향상되는 경향을 보였다. 특히 측정면의 불균일등에 의한 전기적인 런아웃은 제어루프내에서 증폭되어 실제 회

전체의 회전정밀도를 저하시키므로 이에 대한 방안이 강구되어야 한다.

Table 2 Surface roughness of cylindrical targets

	Type A	Type B
Surface roughness(Ra)	1.1	0.5
Sensitivity (V/mm)	11.29	12.50

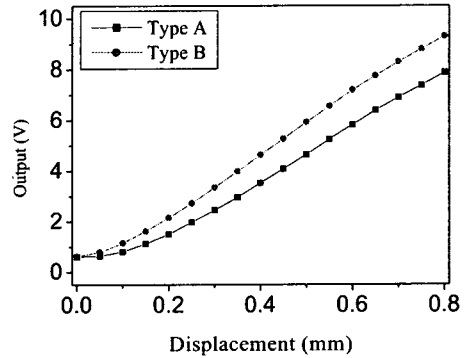


Fig. 8 Sensitivity by surface roughness

4.2.3 광섬유 굽힘 곡률 반경에 따른 광손실 영향

광섬유 변위센서를 자기베어링 실험장치 설치 시 실험장치와의 인터페이스로 인하여 Fig. 4 와 같은 형상으로 설치해야 한다. 따라서 광섬유의 굽힘에 대한 센서 감도 변화를 고찰하기 위하여 광섬유 출력신호의 손실이 없는 경우인 곡률반경이 무한대(∞)인 직선일 때를 기준으로 굽힘으로써 나타나는 센서 출력 신호의 변화 관계를 Fig. 9 에 보였다. 광섬유가 90° 휘어지는 경우와 180° 휘어지는 경우에 대해서 각각 고찰하였다. 직경 1.0mm 인 플라스틱 광섬유인 경우 곡률 반경이 45mm 이상일때는 곡률반경 무한대인 값에 비해 2% 이하의 신호감소 결과를 보였고, 곡률반경이 20mm 인 경우에는 10%이상의 신호 감소를 보였다. 따라서 곡률 반경을 45mm 이상으로 하면 감도에 큰 영향이 없음을 확인하였다.

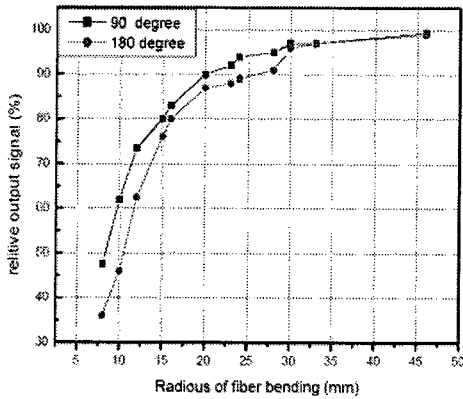
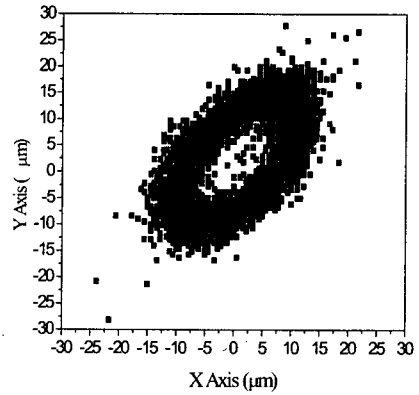


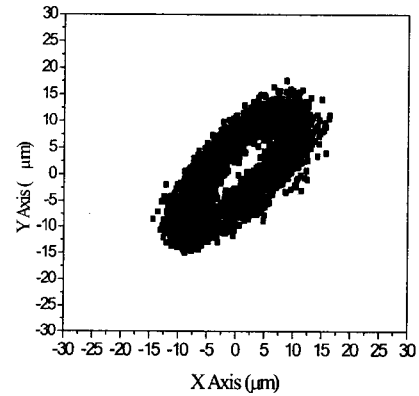
Fig. 9 Effect of output signal according to curvature radius

4.2.4 회전중심선 위치 변위 측정 실험 결과

본 연구에서 설계 제작한 광섬유 변위센서를 자기베어링 시스템에 적용하여 회전축의 회전중심선 위치 변위를 측정함으로써 센서의 성능을 확인하였다. 이러한 성능을 검증하기 위하여 상용 와전류 센서(Bently Nevada NSV3300XL)에 의한 성능 결과와 비교하였다. 두 센서의 성능 비교는 와전류 센서와 광섬유 변위센서를 동일한 위치에 설치한 후 와전류 센서의 출력값을 제어 입력값으로 사용하는 경우와 광섬유 변위센서의 출력값을 제어 입력값으로 사용하는 경우로 나누어서 각각의 경우에 대한 두 센서의 출력값을 동시에 측정하여 비교 고찰하였다. 와전류 센서의 출력값을 제어 입력값으로 사용하는 자기 부상 실험에서 광섬유 변위센서로 측정한 회전축 중심선에서의 회전 오차와 와전류 센서에서 측정한 회전 오차의 실험 결과를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10에서 보듯이 자기베어링 시스템을 3,600rpm으로 회전하였을 때 와전류 센서는 y 축 방향으로 -15 ~ +20 μ m, 광섬유 변위센서는 -15 ~ +15 μ m 변위로 회전축의 제어를 수행하였다. 광섬유 변위센서가 와전류 센서와 마찬가지로 동일한 성능으로 회전축을 모니터링 함을 입증하였다. 이는 센서 브라켓에 의한 센서 흔들림 방지, 신호처리회로의 저잡음 구현, 표면의 균질성 등으로 인한 광원의 안정화에 기인된 것으로 사료된다.



(a) Eddy current sensor



(b) Optical fiber displacement sensor

Fig. 10 Rotation centerline position error measured by two type sensors at the 3,600 rpm

5. 결론

본 논문에서는 자기베어링 시스템의 회전축 변위 측정을 위해 고속·고정도 성능을 가진 광섬유 변위센서를 개발하는 것을 그 목표로 하였다.

본 연구에서 개발한 광섬유 변위센서는 0.7% FS의 비직진성과 0.37 μ m의 높은 분해능, 6.3kHz의 주파수 대역폭 성능을 가지는 것으로 평가되었다. 또한 회전체의 진동 측정 성능도 상용 와전류 센서에 뒤떨어지지 않는 우수한 성능을 보였다. 부수적으로 광섬유 변위센서의 설계 및 제작 기술을 확보하였으며, 회전체 진동 측정 적용시 필요한 기술 및 변위 센서의 성능 평가기법을 정립하여 광섬유 변위센서를 적용한 자기베어링 시스템

의 구현 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구와 관련한 추가 연구로는 측정 대상물의 재질, 표면거칠기, 광특성, 변위 등 광량변화에 영향을 미치는 인자에 대한 수학적 모델링, 그리고 50,000rpm 이상 구동 가능한 초고속 회전체에 적용 성능 실험을 통한 검증 및 동적 특성 개선과 온도에 저감한 신호처리회로의 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 산업자원부 중기거점과제의 일환으로 주관기관 (주)성림의 위탁과제 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Nancy, Morse T., Roy, S. Smith, "Magnetic Bearing Measurement Configurations and Associated Robustness and Performance Limitations," J. of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol. 124, pp. 589-598, 2002.
2. Kim, D. W., "New Sensor Engineering," TaeHoon Press, pp230-312, 2001.
3. Noh, M. D., Maslen, E. H., "Self Sensing Active Magnetic Bearings Based on Parameter Estimation," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, pp.45-50, 1997.
4. Kim, B. J., Kim, S. H., Lee, Y. W., Sainsot, P., Flamand, L., Kwak, Y. K., "Development of Optical Fiber coupled Displacement Probe Sensor with a New Compensation Method," Journal of KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 27-32, 2002.
5. Bruce, E. Briley, "An Introduction to Fiber Optics System Design," North-Holland, pp 25-45, 1991.
6. Taiqing, Q., Kuo, L. S., Yeh, H. C., "A Novel type of Fiber Optic Displacement Sensor based on Gaussian Beam Interference," Optics Communications 234, pp. 163-168, 2004.
7. Hong, J. H., Han, B. S., "Development of Fiber Optic Sensor for monitoring Magnetic Bearing," Transactions of the Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol.12, No.1, 2003.
8. Jerald, G. Graeme, "Photodiode Amplifiers OP Amp Solutions," McGraw Hill, pp. 31-81, 1996.
9. Stefano, C., Franco, M. and Marco, M., "High-Efficiency Linear Power Amplifier for Active Magnetic Bearings," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No 1, pp. 17-24, 2000.
10. Park, J. K., Ro, S. K. and Kyung, J. H., "Design of Cone-shaped magnetic Bearing Spindle System for High Speed Internal Grinding Machine," Journal of KSPE, Vol. 19, No. 2, pp.213-219, 2002.
11. Ro, S. K., Kyung, J. H. and Park, J. K., "Runout control of a magnetically Suspended High Speed Spindle using Adaptive Feedforward Method," Journal of KSPE, Vol. 19, No. 12, pp.57-63, 2002.
12. Yasundo, T., Michael, J. R. and David, M. A., "Control and Dynamic Systems," Adison-Wesley Publishing Company, pp.317-343, 1993.