

주축 상태 모니터링 용 광파이버 변위센서 제작 및 성능평가

신우철*, 홍준희⁺, 박찬규⁺⁺

(논문접수일 2005. 7. 19, 심사완료일 2005. 9. 26)

Fabrication and Performances Tests of the Optical Fiber Position Sensor for Application to Spindle State Monitoring

Woo-cheol Shin*, Jun-hee Hong⁺, Chan-gyu Park⁺⁺

Abstract

This paper presents fabrication techniques of the optical fiber position sensor for spindle state monitoring. These include selection of components such as optical fibers, a laser-diode, a photo-diode, and op-amp IC of the signal process circuit. We also describe electric runout problem. The fabricated sensor has a linearity of 1.7% FSO in the air gap range 0.1 ~ 0.6mm, a resolution of 0.37 μ m and a bandwidth of 6.3kHz. Finally, we have successfully operated a magnetic bearing spindle system using the sensors.

Key Words : Spindle state monitoring(주축 상태 모니터링), Optical fiber sensor(광파이버 센서), Electric runout(전기적 런아웃), Magnetic bearing(자기 베어링)

1. 서론

주축 상태 모니터링은 주로 고속 주축의 고장진단을 목적으로 하며⁽¹⁾ 특히 자기 베어링 시스템의 경우는 주축 모니터링에 의한 위치 제어를 통해 주축의 안정된 지지가 실현될 수 있다⁽²⁾.

회전체의 위치 측정은 주축 원주면과 센서 사이의 간극을 측정하여 회전 중심축의 위치 좌표를 얻는 방법이 일반적이

다. 여기에 적용 가능한 센서 형태로서 비접촉식 갭 센서를 들 수 있다.

본 논문에서 다루고 있는 광파이버 센서는 비접촉식 갭센서 중에 하나로서 광을 매개체로 하여 응답성이 뛰어나고 센서 구조가 간단하다. 또한 광파이버를 적용함으로써 다음과 같은 장점을 지닌다. 첫째 빛의 형태로 신호를 전달하므로 전자기파에 의한 노이즈 발생이 거의 없다. 따라서 프로브가 장착된 주축계로부터 유입되는 전도 노이즈가 없을 뿐만 아

* 충남대학교 기계공학과 대학원
+ 교신저자, 충남대학교 기계공학과 (hongjh@cnu.ac.kr)
주소: 305-764 대전시 유성구 궁동 220
++ 충남대학교 기계공학과 대학원

나라 주축계와 신호처리회로 사이 거리가 광파이버 길이만큼 이격됨으로 주축계로부터의 방사 노이즈 영향도 줄여줄 수 있다. 둘째 광파이버 끝단이 곧 측정 프로브가 되므로 그 외형 크기가 타 센서에 비해 상대적으로 작고 경량이다⁽³⁾. 따라서 주축계 내부 센서 프로브 장착 시 제한을 덜 받게 된다.

본 논문은 선행 연구⁽⁴⁾를 토대로 광파이버 센서 프로토타입 제작 시 적용했던 기술들을 정리하고 시스템 적용 시 고려했던 전기적 런아웃 문제에 대해 분석 및 대책을 제시하고 있다. 그리고 제작된 광파이버 센서의 기본 성능 평가를 한 뒤 자기 베어링 주축 시스템에 적용함으로써 주축 모니터링 적용성을 검증하였다. 이때 상용 캡센서를 적용한 경우의 주축 회전 응답과 서로 비교함으로써 제작된 광파이버 센서의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 기본구성

Fig. 1은 광파이버 변위센서의 기본 구성을 나타내고 있다. 광원인 레이저다이오드 및 그 구동회로를 통해 발생한 빛은 투광파이버(Transmitting optical fiber)를 통해 측정부로 전송된다. 전송된 빛은 타겟 측정면에 조사되고 그 반사광은 수광파이버와 나란히 배치된 수광파이버(Receiving optical fiber) 안으로 일부 입사된다. 이때 두 광파이버 끝단과 타겟 측정면의 사이의 간극 변화에 따라 수광파이버 내로 입사되는 반사광속이 변하게 된다. 이 광속 변화는 수광파이버를 통해 포토다이오드로 전송되어 전류 신호로 변환된다. 전류 신호는 신호처리회로를 통해 센서 출력 전압 신호가 된다.

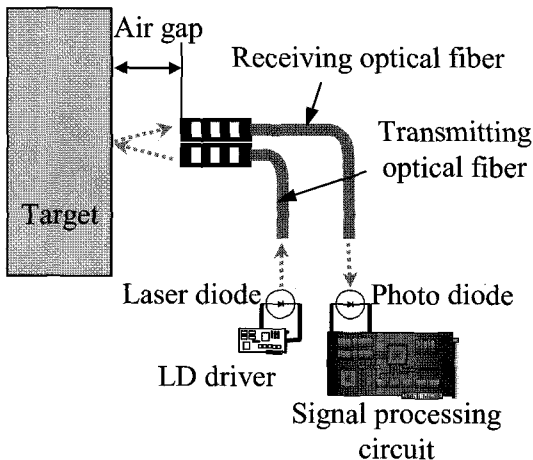


Fig. 1 Schematic of an optical fiber sensor

3. 설계 및 제작

3.1 광학부

광파이버의 종류는 재료에 따라 유리 광파이버와 플라스틱 광파이버로 구분할 수 있다. 플라스틱 광파이버는 유리 광파이버에 비해 전송 손실이 크고 대역 특성이 좋지 못하지만 대구경 코어를 경제적으로 용이하게 제작할 수 있고 힘에 대한 허용 정도가 양호하여 근거리 광전송 분야에서 응용이 확대되고 있다. 또한 개구수(Numerical Aperture)가 높아 접속 효율이 좋기 때문에 고정밀도를 지닌 고가의 광커넥터가 필요 없고 단면 처리에 있어서도 유리 광파이버에서 필요했던 고가의 단면 연마가 필요 없다. 이런 이유로 본 논문은 Fig. 2와 같은 직경 1mm의 플라스틱 광파이버(Autronics Corp., FD 620-10)를 이용하였다. Fig. 3은 본 논문에서 적용한 파이버 끝단 폴리싱 처리 도구를 보여주고 있다. 커터로 절단한 광파이버를 폴리싱 디스크에 고정된 뒤 폴리싱 필름을 폴리싱 패드 위 놓고 디스크를 그림에서와 같이 ∞형태로 슬라이딩시켜 파이버 단면을 폴리싱 처리 하였다. Fig. 4는 광파이버 끝단에 SMA 타입 광커넥터를 부착한 뒤 레이저다이오드 모듈과 포토다이오드 모듈에 정렬하여 연결한 모습을 보여주고 있다. 코어 단면 직경과 레이저다이오드 소자의 투

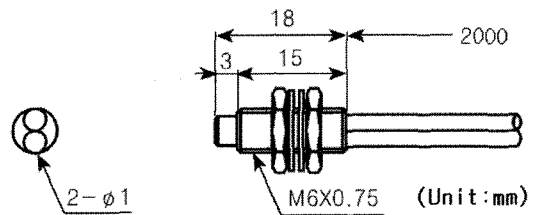


Fig. 2 Schematic of the optical fiber probe

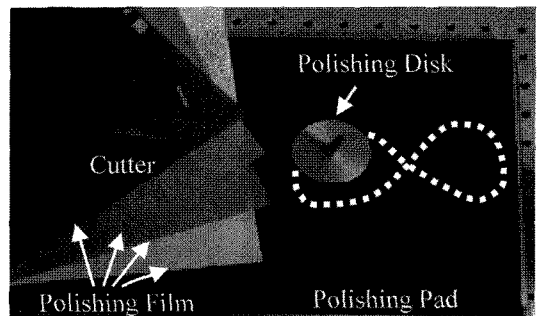


Fig. 3 Polishing tool for machining fiber cross sections

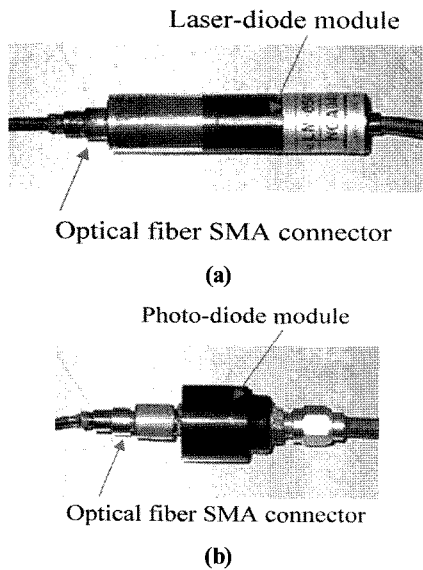


Fig. 4 Connections of an optical fiber (a) with a laser-diode module, (b) with a photo-diode module

광 홀 직경 크기가 비슷하기 때문에 별도의 집광 렌즈 없이 끝단을 서로 가까이 근접시켜 정렬하였다. 이 형태로도 광 전송률이 80% 이상이 됨을 확인할 수 있었다. 적용한 포토다이오드 소자의 감광부 역시 면적이 3.6mm×3.6mm로서 파이버 단면에 비해 충분히 크므로 바로 근접시켜 정렬하였다.

적용한 레이저다이오드는 파장 650nm, 출력 5mW(CW)에 TO-18 5.6mm 팩키지 형태이다. 파장 선정은 플라스틱 광파이버의 파장 대역별 전송률과 포토다이오드의 응답성 그리고 단가를 고려하였다. 레이저다이오드 드라이버는 APC (Auto Power Control)타입과 ACC(Auto Current Control) 타입이 있다. APC타입은 레이저다이오드 소자에 내장된 모

니터 포토다이오드 신호를 피드백 받아 일정하게 광 출력을 유지하도록 회로 내부에 제어기능을 갖춘 드라이버이다. ACC타입은 레이저다이오드로 공급되는 전류량의 정보를 피드백 하여 일정하게 전류가 공급되도록 회로 내부에 제어 기능을 갖춘 드라이버이다. 두 타입을 비교한 결과 APC 타입이 ACC 타입에 비해 레이저다이오드 출력의 안정화 시간이 십여 분 정도 짧으나 안정화된 이후의 광출력의 안정성은 비슷하게 나타났다. 본 논문에서는 레이저다이오드 모듈 (Lanics Co., Ltd. LM-6505NG)로써 레이저다이오드와 ACC타입 드라이버를 구성하여 적용하였다.

포토다이오드는 PIN 다이오드(THORLABS INC., SM05-PD1A)를 적용하였다. 검출 파장 대역은 350nm에서 1100nm 이고 12V의 역 바이어스를 걸어줄 때 20ns의 상승/하강 시간을 갖는 응답성을 지니고 있다.

3.2 신호처리회로

Fig. 5는 광파이버 센서의 신호처리회로도를 보여주고 있다. 왼쪽 연산 증폭기에는 포토다이오드의 전류신호를 전압 신호로 바꾸는 변환기(current-to-voltage converter)와 저역통과필터가 구성되어 있고 오른쪽 연산 증폭기는 신호증폭기를 구성하여 센서 게인 조정 기능을 갖추고 있다.

광파이버 센서의 주파수 대역을 제한하는 요인으로는 포토다이오드의 응답성을 들 수 있다. 즉, 포토다이오드의 커패시턴스(C)에 따라 주파수 대역이 다음식으로 정해진다.

$$f_{BW} = \frac{1}{2\pi C R_T} \quad (1)$$

R_T 은 전류-전압 변환기 피드백 저항 5k Ω 이다. 센서에 적용한 포토다이오드의 커패시턴스가 20nF이므로 약 1.6Mhz의 대역폭을 보이게 된다. 이는 고속 스피들의 회전 주파수

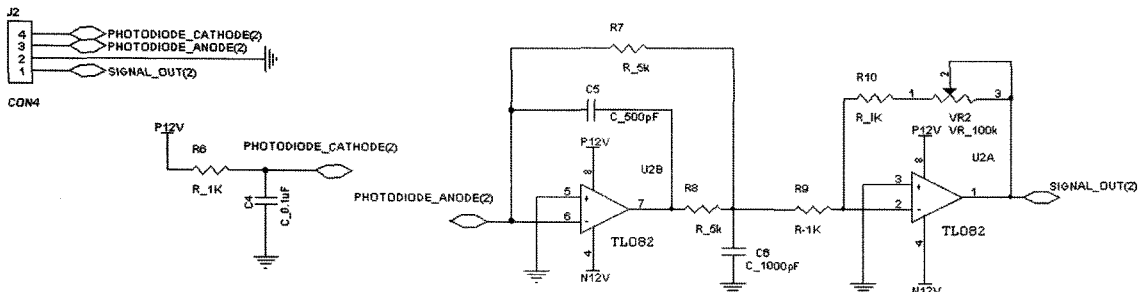


Fig. 5 Schematic of signal processing circuit of the optical fiber sensor

가 수 kHz 수준인 것을 감안 할 때 매우 넓다고 볼 수 있다. 필요 이상의 주파수 대역은 오히려 고주파 노이즈의 문제를 떠안게 되므로 저역통과필터를 통해 적당한 주파수 대역으로 제한할 필요가 있다. 결국 저역통과필터의 차단주파수가 센서의 주파수 대역을 결정하게 된다. 이처럼 광파이버 센서는 구성 요소의 응답성이 대체로 뛰어나기 때문에 센서 주파수 대역 설정이 유연한 편이다. 본 논문에서는 저역통과 필터의 차단주파수를 8kHz로 설계하였다.

차단 주파수 이하의 노이즈 성분에 대한 대책 중에서 본 연구에서 가장 큰 효과를 본 부분은 전류-전압 변환 회로를 구성하고 있는 연산 증폭기 IC 타입을 기존의 LM358에서 TL082로 교체한 것이다. BJT 트랜지스터로 구성된 LM358은 입력 바이어스 전류가 45nA 정도로서 포토다이오드의 전류신호가 수 μ A대인 것을 감안할 때 무시할 수 없는 크기이다. 반면에 FET 트랜지스터로 구성된 TL082의 입력 바이어스 전류는 30pA이다. 교체 후 센서 출력신호 노이즈 레벨이 약 1/7로 줄어드는 효과를 보였다.

4. 전기적 런아웃 고찰

갭센서를 이용한 주축 모니터링 시 간극 크기에 대한 변위 신호 이외에 측정면 원주 방향의 어떤 특성이 센서로 감지되어 나타나는 신호를 전기적 런아웃이라고 한다⁽⁵⁾. 광파이버 센서의 전기적 런아웃 특성을 고찰하기 위해 Fig. 6과 같은 실험 장치를 구성하였다. 진원도 측정기(Rank Taylor Hobson Co., Talyrond 100)의 회전 테이블에 주축 타겟을 놓고 6rpm 속도로 회전 시킨다. 이때 타겟 중심과 테이블 회전축 중심과의 편차를 1.6 μ m 이내로 설치하였다. 광파이버 센서 프로브로는 주축 타겟과 측정 범위 내의 간극을 유지하도록 장착하였다. Fig. 7은 정지 상태 주축이 회전을 시작 할 때 광파이버 센서의 출력 신호 파형을 오실로스코프 상에서 캡처한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 회전 시작과 동시에 불규칙한 파형이 나타남을 볼 수 있다. 주축의 회전속도를 감안할 때 이 파형은 중심축 편차에 의한 변위 신호와는 무관하다는 것을 알 수 있다. 즉 주축 측정 원주면에 대한 센서의 전기적 런아웃 신호이다.

이 전기적 런아웃의 원인을 광파이버 센서의 측정 원리에서 고찰해 볼 수 있다. 먼저 Fig. 8 (a)는 광파이버 센서의 변위측정 원리를 보여주고 있다. 간극의 크기에 따라 반사광 조사영역이 변하게 되어 수광파이버 단면 내로 들어가는 반사광속 변화로써 타겟의 변위 정보를 유추하게 된다. 이때

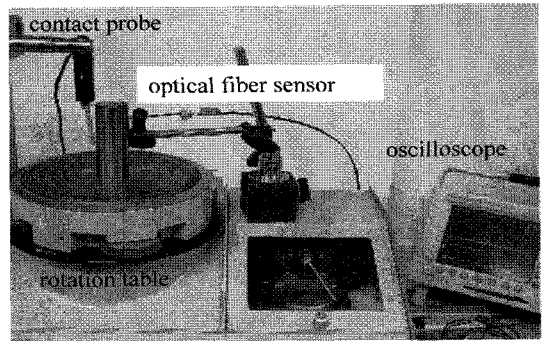


Fig. 6 Experiment setup for detecting runout signal

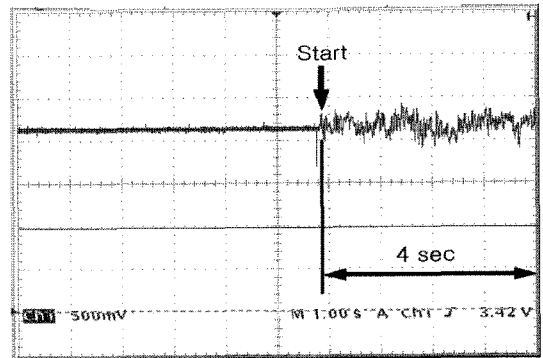
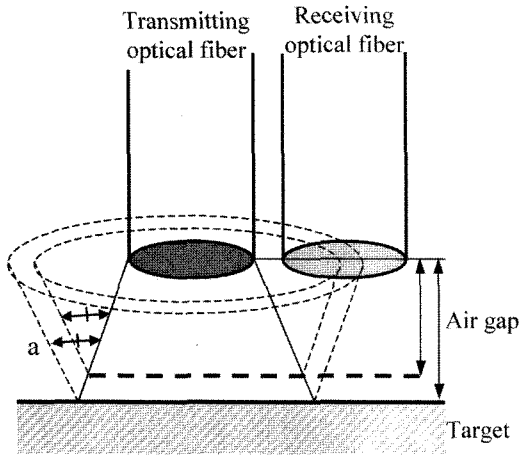


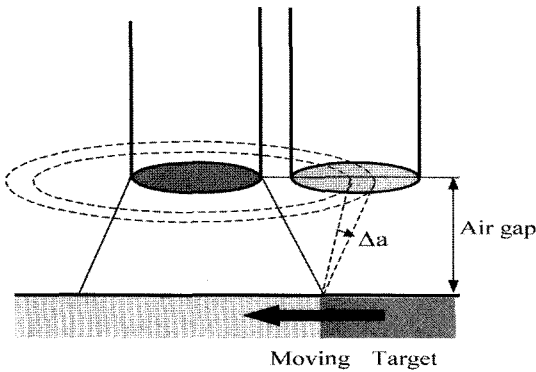
Fig. 7 Measured time behavior of the sensor output signal according to spindle rotation

전제조건으로서 반사각도 a는 간극 크기에 무관하게 일정해야 한다. 그러나 Fig. 8 (b)와 같이 타겟이 횡방향으로 이동하는 경우 측정면의 표면조도에 변화가 있을 수 있으며 이로 인해 측정면에서 빛의 산란특성이 변하여 반사각의 변화 Δa 가 일어난다^(6,7). 즉 간극이 일정할지라도 측정면 조도차에 의한 반사각 변화에 의해 신호가 변하게 된다.

이 현상을 실험적으로 확인하기 위해 Fig. 9 (a)에 보인 표준 거칠기 시편을 측정면으로 하여 일정 간극을 두고 광파이버 센서 프로브를 회살표 방향으로 이동하였다. 적용한 표준 거칠기 시편의 각 표면의 조도값과 가공법은 Table 1과 같다. 실험 결과 Fig. 9 (b)와 같은 센서 신호의 변화를 확인할 수 있었다. 동일한 가공법에 의한 측정면들 사이에서는 조도가 클수록 센서 신호의 변화폭이 크게 나타났다. 가공법에 있어서 상대적으로 낮은 조도 연삭면(V1~V4)보다 세이퍼 가공면(V8, V9)에 대한 신호의 변화폭이 작게 나타났다. 즉, 연삭가공에 의한 측정면이 센서의 전기적 런아웃 측면에서 볼 때 좋지 못함을 발견할 수 있었다.



(a)



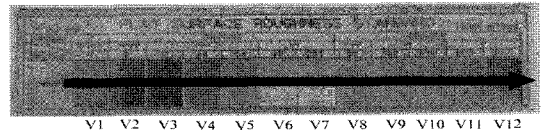
(b)

Fig. 8 The cause of the electric runout

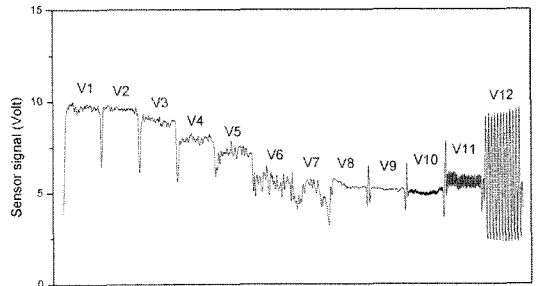
Table 1 Ra values and machining of each standard surface

label	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
machining	GROUND						
Ra(μm)	0.127	0.152	0.305	0.610	1.473	2.413	6.502
label	V8	V9	V10	V11	V12	-	-
machining	SHAPED					-	-
Ra(μm)	1.727	3.302	6.604	14.986	30.480	-	-

위 실험적 고찰을 토대로 여러 가지 후처리 가공한 주축면에 대한 센서의 전기적 런아웃 특성을 실험적으로 확인하였다. Fig. 10의 (a)는 원통 연삭가공 후 #330 사포로 원주 방향으로 가공처리 한 측정면의 런아웃 신호, (b)는 원통 연삭가공 후 랩핑 필름을 이용하여 원주 방향으로 연마한 측정면의 런아웃 신호, (c)는 원통 연삭가공 후 폴리싱 파우더를

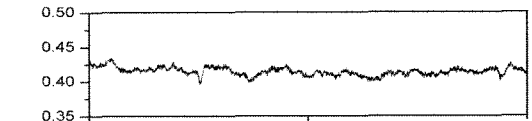


(a)

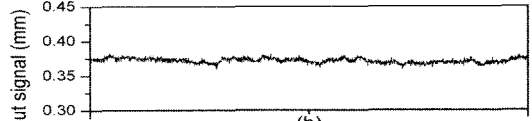


(b)

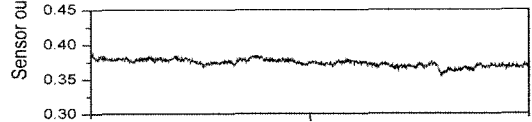
Fig. 9 (a) Flat surface roughness standard, (b) Sensing results of flat surfaces



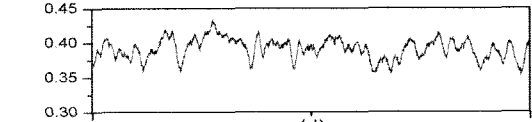
(a)



(b)



(c)



(d)

circular surface (1 cycle)

Fig. 10 Comparison of runout signals according to machined surface

이용하여 연마한 측정면에 대한 런아웃 신호, (d)는 원통 연삭가공만 한 측정면의 런아웃 신호이다. 각 측정면에 대한 센서 감도 차이가 있기 때문에 센서 출력 전압 신호를 변위

신호로 환산하여 비교하였다. 예상대로 원통 연삭면에 대해 전기적 런아웃 신호가 가장 크게 나타나고 랩핑 필름과 폴리싱 파우더에 의해 연마된 측정면이 양호하게 나타남을 확인할 수 있다.

5. 성능 평가

5.1 기본 성능

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 기본 성능을 실험적으로 평가하였다. 기본 성능 중 변위에 따른 감도 특성은 광파이버 직경 및 배열에 의해 결정됨을 선행 연구를 통해 확인한 바 있다⁽⁸⁾. Fig. 11은 Fig. 2의 프로브 형태에 대한 결과로서 공극 0.1~0.6mm 영역에 대해서 1.7% FSO 선형성과 12.3V/mm 감도를 확인할 수 있었다. 이 때 센서의 노이즈 크기는 실험실 환경에서 측정된 결과 Fig. 12와 같이 약 4.5mV(peak-to-peak)임을 확인하였다. 위 결과들로 부터 분해능은 0.37 μ m로 평가되었다.

제작된 광파이버 센서의 동특성 실험결과를 Fig. 13에 보이고 있다. 0.707 게인과 45도 위상 지연을 기준으로 6.3 kHz의 주파수 대역을 확인 하였다. 이것은 앞서 제시한 저역통과필터의 차단 주파수에 못 미치는 값으로 그 원인은 포토다이오드 커패시턴스 영향과 회로상의 부유용량에 의한 것으로 사료된다.

5.2 자기 베어링 시스템 적용

제작된 광파이버 센서를 자기베어링 주축 시스템에 적용하였다. 주축의 센서 측정면은 Fig. 10의 결과에 따라 랩핑 가공 되었다. Fig. 14는 적용된 자기 베어링 주축 시스템 모

습을 보여주고 있다. 주축의 직경은 50mm이며 베어링과 주축과의 간극은 0.3mm로 설계되어 있다.

제작된 광파이버 센서의 주축 모니터링 적용성을 비교 검

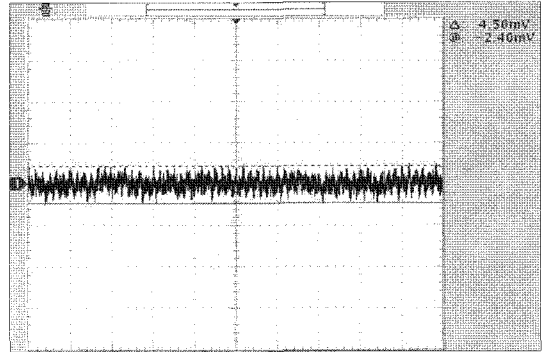
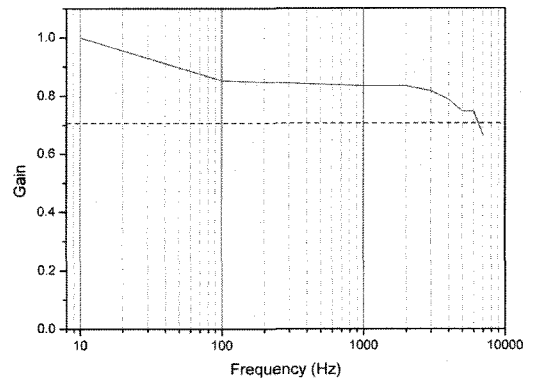
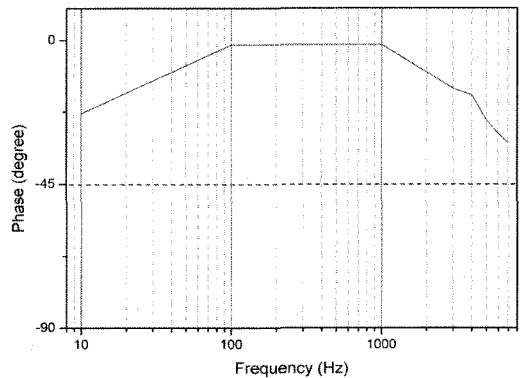


Fig. 12 Output signal noise of the optical fiber sensor



(a)



(b)

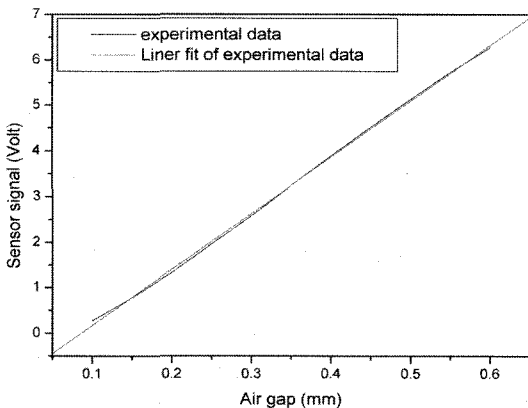


Fig. 11 Response curve of the optical fiber sensor

Fig. 13 Frequency response of the optical fiber sensor

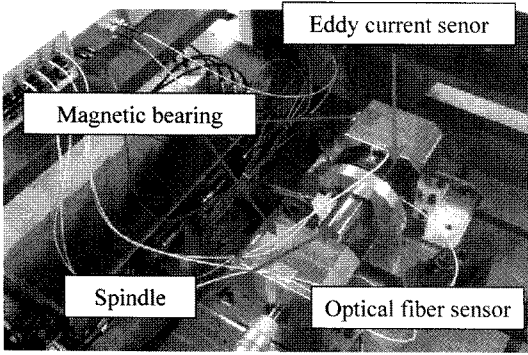


Fig. 14 Experiment setup of the magnetic bearing spindle system

증하기 위해 상용 와전류형 갭센서(Bently Nevada Co. NSv 3300XL)에 의한 주축 회전응답과 비교하였다. 상용 갭센서는 0.25~1.75mm의 측정범위와 8.7V/mm 감도, 0.48 μ m 분해능, 10kHz 주파수 대역 성능을 지닌다. 센서를 제외한 나머지 자기 베어링 시스템의 구성 요소들과 제어기 설정은 모두 동일하게 적용하였다. Fig. 15는 3000rpm 주축 회전에 대해 상용 와전류 센서로 모니터링하여 자기 베어링을 구동했을 때 주축의 회전 응답 (a)과 제작된 광파이버 센서로 모니터링하여 구동했을 때 회전 응답 (b)에 대한 실험 결과를 보여주고 있다. 파형의 모습이 다소 차이를 보이는 이유는 와전류 센서 경우 전기적 노이즈 영향이 있고, 광파이버 센서 경우는 전기적 런아웃 영향이 남아있는 것으로 사료된다. 측정면 랩핑 가공을 통해 전기적 런아웃 영향이 크게 줄어들었지만 Fig. 10 (b)에서 볼 수 있듯이 완전히 제거되지는 못

했기 때문이다. 최대 회전 오차 크기 면에서 볼 때 두 경우가 큰 차이는 없음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 광파이버 센서 프로토타입 제작 시 적용했던 기술들을 정리하고 주축 모니터링 적용 시 고려했던 광파이버 센서의 전기적 런아웃 문제를 다루었다. 그리고 제작한 광파이버 센서의 성능을 평가하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 광파이버 센서의 전기적 런아웃은 주축 측정면의 표면 조도와 관계됨을 고찰 하였다. 대책으로서 전기적 런아웃이 될 발생하는 주축 측정면 가공법을 제시하고자 원통연삭, #330 사포 연마, 랩핑 필름 연마, 폴리싱 처리한 각 측정면에 대해 전기적 런아웃 특성 실험을 한 결과 랩핑 처리면과 폴리싱 처리면이 그 중 양호하게 나타났다.
- (2) 제작된 광파이버 센서의 기본 성능을 평가한 결과 0.1~0.6mm 측정범위에서 1.7% FSO의 선형성과 0.37 μ m의 분해능을 보였다. 주파수 대역은 6.3kHz으로 평가되었다.
- (3) 제작된 광파이버 센서를 자기 베어링 주축 시스템에 적용하여 주축 모니터링 기능을 검증하였다. 상용 와전류형 갭센서를 적용하여 자기 베어링을 구동했을 때의 주축 회전 응답과 광파이버 센서를 적용하여 구동했을 때의 회전 응답을 비교한 결과 최대 회전 오차 크기 면에서 유사하게 나타났다. 이로써 제작된 광파이버 센서의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

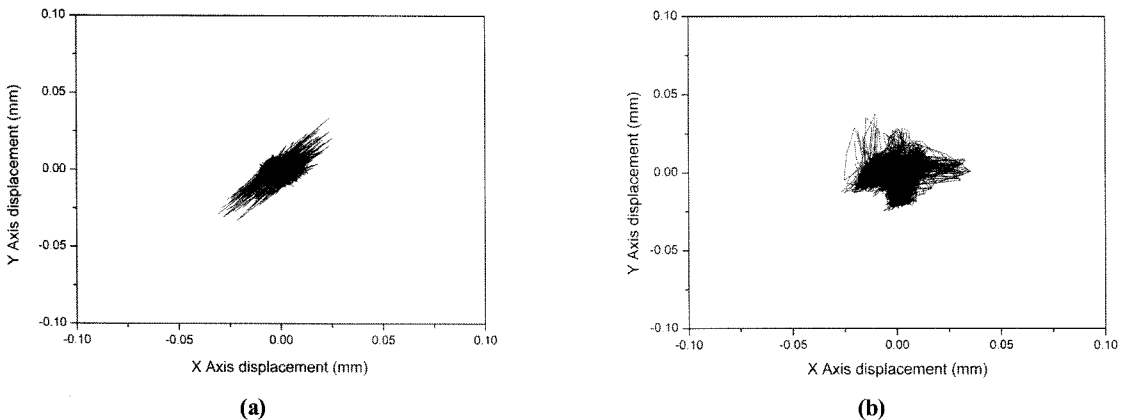


Fig. 15 Comparison of rotation response according to sensor type (a) Commercial eddy current sensors, (b) Fabricated optical fiber sensors

참 고 문 헌

- (1) Xie, D. M., Song, X., Zhou, H. L., and Guo, M. W., 2002, "Fuzzy Vibration Fault Diagnosis System of Steam Turbo-Generator Rotor," *IEEE, International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, pp. 411~415.
- (2) Kang, J. G., Shin, W. C., and Hong, J. H., 2003, "A Study on the Static Levitation Control of Magnetic Bearing using Optical Fiber Displacement Sensors," *KSMTE Fall Conference*, pp.131~136.
- (3) Lee, B., 2003, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Optical Fiber Technology*, Vol. 9, pp. 57~79.
- (4) Hong, J. H., and Han, B. S., 2003, "Development of Fiber Optic Sensor for Monitoring Magnetic Bearing," *KSMTE*, Vol.12, No.1, pp. 65~71.
- (5) Ro, S. K., Kyung, J. H., and Park, J. K., 2002, "Runout Control of a Magnetically Suspended High Speed Spindle Using Adaptive Feedforward Method," *KSPE*, Vol. 19, No.12, pp. 57~63.
- (6) Cahill, B. and El Baradie, M. A., 2001, "LED-based fibre-optic sensor for measurement of surface roughness," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 119, pp. 299~306.
- (7) Zhang, K., Butler, C., Yang, Q., and Lu, Y., 1997, "A Fiber Optic Sensor for the Measurement of Surface Roughness and Displacement Using Artificial Neural Networks," *IEEE TRANSACTIONS*, Vol. 46, No. 4, pp. 899~902.
- (8) Park, C. G., Shin, W. C., Pea, W. S., Hong, J. H., and Lee, D. J., 2003, "A Study on the Performance of Optical Fiber Displacement Sensor for Monitoring High Speed Spindle according to Properties of Optical Fiber," *KSMTE Fall Conference*, pp. 385~389.