

고속 주축 상태 모니터링용 광파이버 변위 센서 설계 제작 및 성능평가

홍준희*, 박찬규+, 신우철+, 이동주++

Design and Performance Evaluation of the Optical Fiber Position Sensor for the State Monitoring of a High Speed Spindle

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

Abstract

This paper is focused on practical applicability of the optical fiber sensor considering the machine center which is going to use them. Optical fibers may be fluctuated because the machine center operates as column moving type. This causes distortion of the sensor output signal. To reduce this problem, we have improved the sensor structure and its bracket. And we evaluated performances of the sensor.

Key Words : high speed spindle system(고속 주축 시스템), state monitoring(상태 모니터링), optical fiber sensor(광파이버 센서)

1. 서론

지금까지 연구(1)~(5)되어 온 자기베어링 주축 모니터링용 광파이버 센서는 궁극적으로 머시닝 센터 적용을 목적으로 하고 있다. 본 논문은 광파이버 센서의 시스템 적용을 고려하여 발생할 수 있는 문제점을 보완한 센서 설계 및 제작에 대해 기술하고 있다.

적용될 머시닝 센터는 고정 베드에 주축이 3축 이송되는 컬럼 운동식(column moving type)이다. 따라서 주축 내부의 센서 측정부와 외부의 센서 신호 처리부 사이를 연결하는 광파이버는 주축 이송 시 굽힘 변화와 흔들림이 크게 발생하게 된다. 광파이버는 센서 측정부의 소형화와 취부의 유연성을 갖게 하는 이점을 주지만 흔들림 발생 시 센서 출력 신호가 왜곡되는 문제점이 있다.

이점을 고려하여 광파이버 센서 구조를 주축계 내부로 집적시킨 형태로 재설계하였다. 이 새로운 설계 형태는 주축내부의 제한된 공간상에 센서 구성요소들을 집적시키기 위해 파이버가 과하게 휘어지게 되어 센서 감도가 떨어지는 영향(4)이 나타난다. 또한 주축계 적용 시 센싱 위치가 주축 구조상 직경이 가장 작은 부분에서 이루어지게 되어 이로 인한 센서 감도와 선형성이 떨어지게 되었다. 이런 적용환경에 따른 센서 성능 변화를 고려하여 설계 제작된 광파이버 센서의 성능을 적용될 시스템 환경과 동일한 조건에서 평가하였다. 그리고 센서를 실제로 자기 베어링 시스템에 적용하여 기존에 사용되었던 상용 캡센서(Bently Nevada Co. NSv 3300XL)적용 시와 주축 시스템 성능을 비교하였다.

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

2. 광파이버 센서 집적 설계 및 제작

2.1 광파이버 흔들림

주축이 X, Y, Z축 이송되는 가공기에서 주축계와 연결된 케이블의 흔들림은 불가피하다, Fig.1. 특히 광파이버 센서의 신호선이 되는 광파이버의 흔들림은 센서 출력신호에 왜곡을 일으킨다. 광파이버 흔들림은 주기적인 미소 굽힘(microbending)을 일으켜 광전송에 손실(α)을 가져오기 때문이다. 결국 센서 출력 신호에 파이버 흔들림과 동기적인 파형이 실리게 되어 변위 신호의 오차를 발생시킨다.

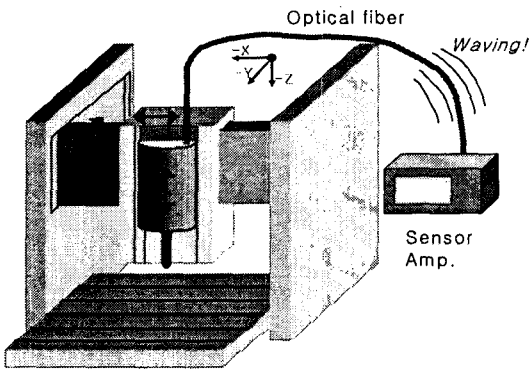


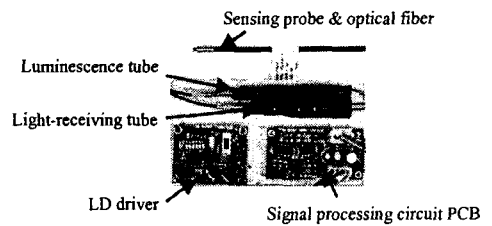
Fig.1 Appearance of waving optical fibers due to column moving type machining center

2.2 주축계 내부로 광파이버 센서 집적

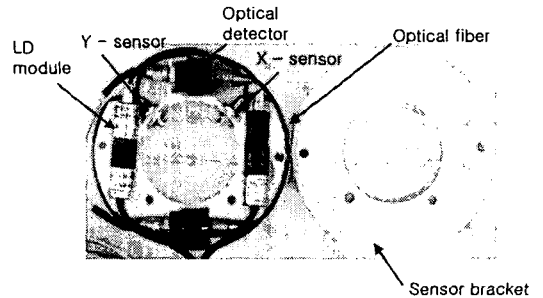
광파이버 흔들림을 최소화하기 위한 방법으로 광파이버 센서의 발광부, 수광부, 측정부를 주축계 내부로 집적한 구조 설계를 하였다. 그래서 주축계와 제어부 사이의 센서 신호선을 광파이버에서 전선으로 대체 할 수 있게 되었다. 그 결과 광파이버는 주축 내부에 매우 짧게 구성될 수 있을 뿐만 아니라 광파이버 모든 부분이 주축계와 상대운동을 하지 않게 되어 주축계가 이송 운동을 하여도 파이버 흔들림이 크게 줄어들 수 있다.

Fig.2는 기존의 센서 형태(a)를 주축 안으로 내장하기 위해 센서 브라켓에 X-Y 광파이버 센서들을 집적한 설계 제작 사진(b)을 보여주고 있다. 이

를 위해 기존의 LD(Laser Diode)와 LD 드라이버로 구성되었던 발광부를 보다 컴팩트한 구조인 LD 모듈로 대체하였다, Fig.3(a). 파이버 고정을 위해 기존에 사용했던 파이버 척 대신 크기가 보다 작은 파이버 커넥터를 이용하였다, Fig.3(b). 설계된 센서 브라켓에는 LD 모듈과 수광부가 고정될 홈과 파이버 및 전선의 배선경로가 가공되어 있다. Fig.4은 설계된 광파이버 센서가 집적된 브라켓을 주축계 내부로 조립되는 모습을 보여주고 있다.



(a) The previous optical fiber sensor



(b) The improved optical fiber sensor

Fig. 2 Reform of optical fiber sensors

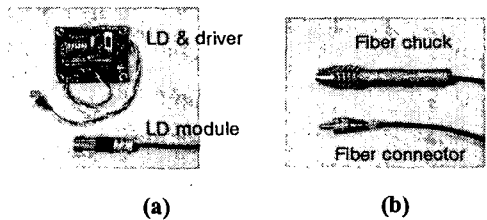


Fig. 3 Replacement of optical components of the optical fiber sensor

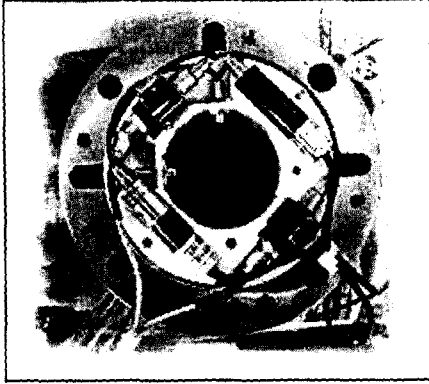


Fig. 4 Photograph of the optical fiber sensor assembly into a spindle system

3. 센서 신호처리회로 설계

광파이버 센서 신호처리회로를 보완하였다. Fig. 5는 신호처리회로도를 보여주고 있다. (a)는 기존 회로도로서(2) 왼쪽 op-amp부터 각각 current-to-voltage converter, signal amplifier, low-pass filter를 나타내고 있다. (b)는 개선된 신호처리회로도로서 두 개의

op-amp를 이용하여 구성하였다. 왼쪽 op-amp에는 current-to-voltage converter와 low-pass filter가 복합적으로 구성되어 있고 오른쪽 op-amp는 signal amplifier로서 신호 증폭과 센서 게인 조정 기능을 한다. 개선된 사항으로는 첫째 op-amp의 개수를 두 개로 줄임으로써 dual type IC 하나로 회로제작이 가능하여 회로가 간소화 되었다. 둘째 기존 회로에 적용한 op-amp는 LM358로서 BJT 트랜지스터로 구성되어 있다. 개선된 회로에서는 FET 트랜지스터로 구성된 TL082를 적용함으로써 input current를 줄였고 그 결과 amplifier 입력 노이즈 전류 영향을 크게 줄일 수 있었다. 셋째 current-to-voltage converter의 feedback 저항값을 증가하였다. 이로써 노이즈 증가보다 더 큰 신호 증폭 효과를 얻을 수 있었다. 마지막으로 기존 회로는 1차 low-pass filter로 구성되어 노이즈를 억제하였으나 개선된 회로는 2차 phase compensation 회로(7)로 설계하여 노이즈 억제와 bandwidth을 개선하였다. 이로써 신호 bandwidth를 6kHz 이상으로 유지하면서 필터 성능은 향상될 수 있었다.

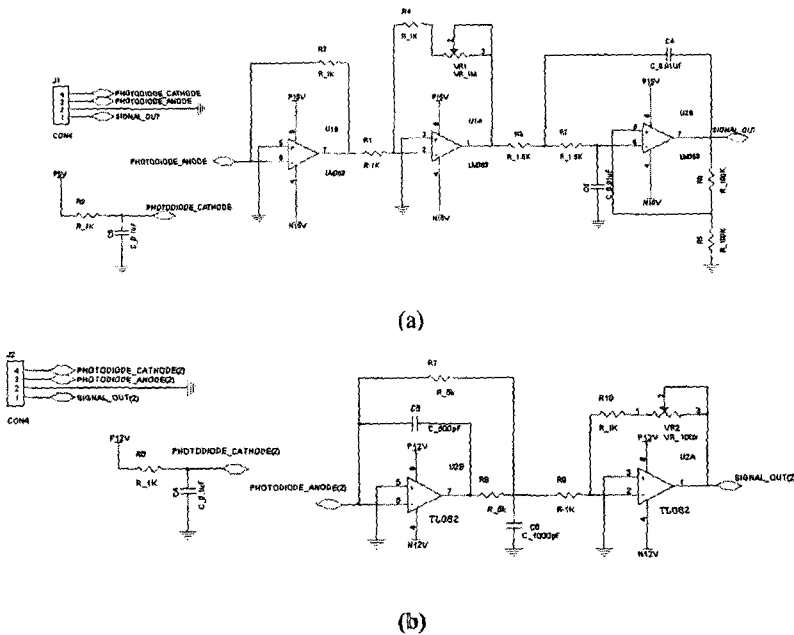


Fig. 5 Schematic of the advanced signal processing circuit for an optical fiber sensor

4. 성능 평가

설계 제작된 광파이버 센서의 성능을 적용될 주축 시스템 환경과 동일한 조건 하에서 평가하였다.

4.1 선형성

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 감도 실험 데이터와 선형회귀 곡선을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 센서의 선형성은 1.7% FSO로 평가되었다. 이는 주축의 측정부분 직경 34.7mm에 대한 평가 결과이다.

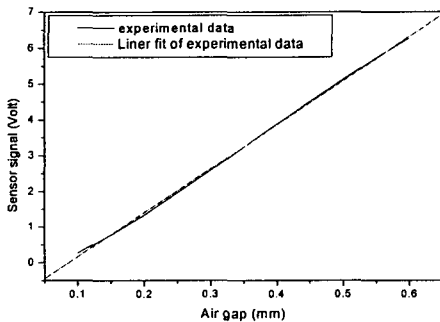


Fig. 6 Sensitivity curve of the optical fiber sensor

4.2 측정 범위

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 측정 범위는 Fig. 6 실험결과의 선형성을 갖는 범위로서 공극 0.1 ~ 0.6 mm 부분이다.

4.3 감도

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 감도는 Fig. 6에 나타난 실험결과와 선형회귀 곡선에 의해 12.3 V/mm로 평가되었다.

4.4 노이즈

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 노이즈 크기는 Fig. 7에 나타난 측정결과를 통해 4.5

mV(peak-to-peak) 임을 확인하였다.

4.5 분해능

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 분해능은 센서 감도와 노이즈 크기 비로써 아래식에 적용하여 0.37 μ m로 평가되었다.

$$resolution = \frac{noise\ magnitude}{sensitivity} = \frac{0.0045(V)}{12.3(V/mm)}$$

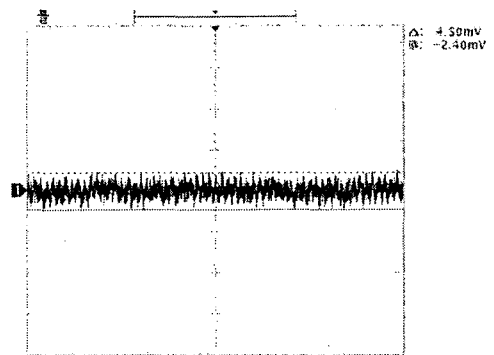
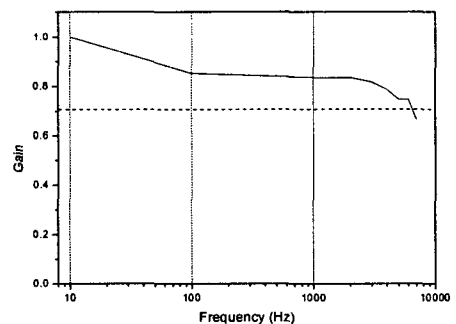


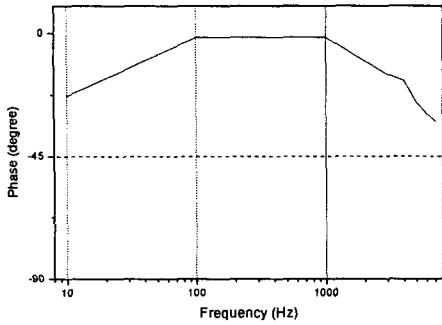
Fig. 7 Noise in output signal of the optical fiber sensor

4.6 주파수 대역

본 연구를 통해 제작된 광파이버 센서의 bandwidth은 Fig. 8의 동특성 실험 결과에 의거 6.3 kHz로 평가되었다.

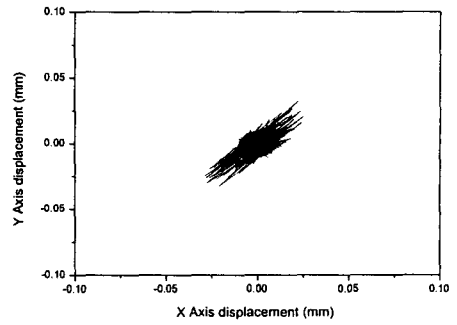


(a)



(b)

Fig. 8 Frequency response of the optical fiber sensor

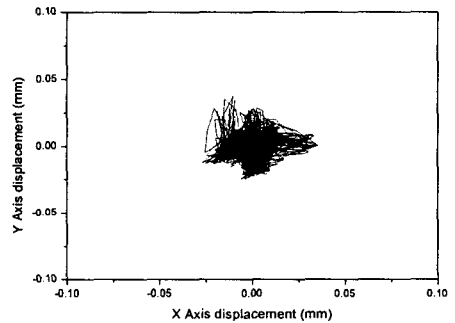


(a) Commercial eddy current sensor application

4.7 자기 베어링 시스템 적용

실제 제작된 광파이버 센서를 자기베어링 주축 시스템에 적용하여 시스템의 구동 성능을 확인하였다. 비교 데이터로서 기존의 상용 와전류 센서 (Bently Nevada Co. NSv 3300XL)에 의한 시스템 구동 성능과 비교하였다. Fig. 9는 실험 장치 구성을 보여주고 있다.

Fig. 10은 실험 결과로서 상용 와전류 센서로 자기 베어링을 구동했을 때와 제작된 광파이버 센서로 구동했을 때의 회전 응답을 보여주고 있다. 상용 와전류 센서에 비해 성능이 다소 떨어짐을 볼 수 있으나 제작된 광파이버 센서의 자기 베어링 적용 가능성을 확인할 수 있었다.



(b) Manufactured optical fiber sensor application

Fig. 10 Comparison of rotation response according to sensor type

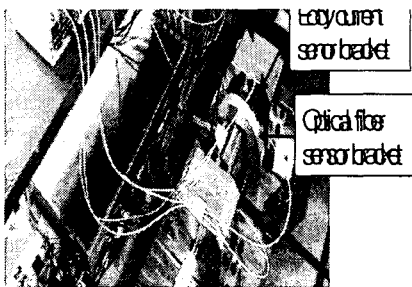


Fig. 9 Experiment setup of the magnetic bearing spindle system

5. 결론

광파이버 변위 센서를 적용한 주축이 가공기에 장착되어 동작할 때 파이버 흔들림 문제에 대한 대책으로서 광파이버 센서를 주축 내부로 집적하는 구조 설계를 하였다. 그리고 최종 시스템 적용 상태에서 센서 성능을 평가하였다. 이 중에서 선형성은 주축의 직경 크기에 관계된 사항으로써 측정 부분 축 직경이 커질수록 향상될 수 있다. 제작된 광파이버 센서의 자기 베어링 적용성은 기존에 사용되어 왔던 상용 와전류 센서 성능을 기준으로 비교 평가하였다. 센서 자체의 성능은 뒤지지 않

나 자기 베어링 적용 시 시스템 성능은 다소 떨어지는 것으로 나왔다. 이는 각 센서의 측정원리 상 특징으로서 주축 runout 신호(3)에 의한 것으로 판단된다. 광파이버 센서는 측정면 표면 거칠기 상태에 의해 runout 신호 영향을 보임으로 측정면 후처리 가공을 보완하고 소프트웨어적 런아웃 해결 방안을 적용하면 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 주관 기관 (주)성림의 위탁과제 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) H. S. Park, T. G. Jung, J. H. Hong, D. J. Lee, 2002, "The Characteristics of Fiber Optic Sensor on the Surface Roughness of Target", KSPE Spring Conference, pp.283~286.

(2) H. S. Park, T. G. Jung, J. H. Hong, D. J. Lee, 2002, "The Performance Evaluation of Fiber Optic Sensor for Monitoring Magnetic Bearing", KSMTE Fall Conference, pp.411~416.

(3) Woocheol Shin, Changyu Park, Tackgu Jung, Junhee Hong, Dongju Lee, 2003, "An Experimental Study on the Runout Characteristics of Spindle State Monitoring Using an Optical Fiber Displacement Sensor", KSMTE Spring Conference, pp.472~477.

(4) Chan-Gyu Park, Woo-Cheol Shin, Wan-Sung Pea, Jun-Hee Hong, Dong-Ju Lee, 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.

(5) Chan-gyu Park, Woo-cheol Shin, Jun-hee Hong, Dong-ju Lee, 2004, "Performance Evaluation according to Optical Power of Laser Diode of Optical Fiber Displacement Sensor for Monitoring High Speed Spindle", KSMTE Spring Conference, pp.376~380.

(6) Gerd Keiser, 2000, Optical Fiber Communications, McGraw-Hill, Singapore, pp. 100~103.

(7) Gerd Keiser, 1995, Photodiode Amplifiers Op Amp Solutions, McGraw-Hill, USA.