

광 파이버 변위 센서를 이용한 주축 모니터링 시 나타나는 런아웃 특성에 대한 실험적 고찰

신우철*, 박찬규+, 정택구+, 홍준희**, 이동주**

An Experimental Study on the Runout Characteristics of Spindle State Monitoring Using an Optical Fiber Displacement Sensor

Woocheol Shin*, Changyu Park+, Tackgu Jung+, Junhee Hong**, Dongju Lee**

Abstract

Spindle state monitoring is getting more and more important according to the technology trend of spindle that is accurate and automated. Spindle state monitoring is to measure the state of rotation vibrations. The spindle rotation error motion detected by sensing device includes rotation object's unbalance, external forced vibrations, shape error of spindle, as well as measuring error of monitoring device. In this paper, we have inspected the runout characteristics that are connected to mechanical runout of spindle shape and electrical runout of sensing system's characteristics. Also, we introduce the way to exclude the runout elements that appear while you monitor a spindle state.

Key Words : Spindle state monitoring(주축 상태 모니터링), Optical Fiber Displacement Sensor(광 파이버 변위 센서), Mechanical Runout(기계적 회전오차), Electrical Runout(전기적 회전 오차)

1. 서론

주축계의 고속화·고정밀화·자동화의 기술 동향에 따라 주축의 상태 모니터링에 대한 필요성이 커지고 응용 분야 또한 확대되고 있다. 첫째, 주축 모니터링을 통해 주

축의 고장진단이 이루어진다. 무인 자동화 시스템의 주축 계에 있어서 주축의 고장 진단은 매우 중요하며 이를 위해 축의 회전진동 신호를 이용하는 방법이 주로 적용된다. 주축의 회전 진동 신호의 파워 스펙트럼 분석을 통해 주축의 고장을 예측할 수 있다. 특히 터보 기계류에서 주축의 회전 진동을 모니터링함으로써 터빈 로터의 안전 및 신뢰

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

성을 향상시키는 결과를 얻을 수 있다. 둘째, 주축 모니터링을 통해 각종 역학량을 예측할 수 있다. 공작 기계에서 절삭가공 시 나타나는 주축의 변형을 모니터링하여 공구의 마모 진단⁽¹⁾ 및 절삭력⁽²⁾을 측정하는 연구가 수행되고 있다. 특히 능동 자기 베어링 시스템에서 주축을 지지하는 자기력의 피드백 제어하기 위해서는 정확한 주축 회전 상태 모니터링이 요구된다.⁽³⁾⁽⁴⁾

주축 모니터링은 주축의 회전 진동 상태를 측정하는 것으로서 센싱 장치로 검출되는 주축 회전오차는 회전체의 불균형 및 외부의 강제 진동에 의한 것뿐만 아니라 회전축의 형상오차 및 모니터링 장치의 측정오차 등도 포함되어 나타난다. 본 논문은 광 파이버 센서를 이용하여 주축을 상대 모니터링 할 때 나타나는 런아웃 특성에 관한 연구로서 주축의 형상에 관련된 기계적 런아웃과 센싱 시스템의 측정 작동 특성으로 인한 전기적 런아웃으로 구분하여 고찰하였다. 더불어 광 파이버 센서를 통해 주축을 모니터링 할 때 발생하는 런아웃 요소를 배제할 수 있는 방법을 제시하고있다.

2. 광 파이버 센서

2.1 센서 구성

광 파이버 센서는 빛을 매개체로 타겟의 변위를 유추하는 비 접촉 센서로서, 센서의 구성은 발광부, 수광부, 측정부, 신호검출회로로 구분할 수 있다. Fig. 1과 같이 발광부는 광원인 레이저 다이오드(LD)와 렌즈를 이용한 집광 장치로

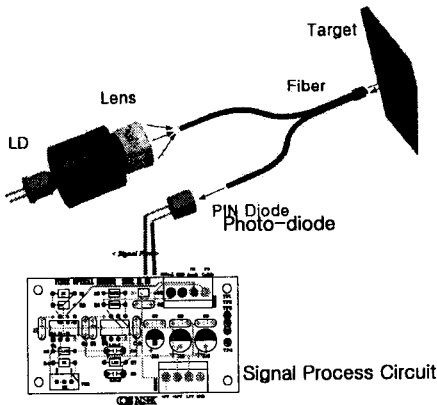


Fig. 1 Schematic of a fiber optic sensor

구성되어 광원의 빛을 발광 파이버에 집속하여 측정부까지 전달하는 역할을 한다. 측정부에서는 발광 파이버로부터 나오는 빛이 타겟 표면에 조사되고 그 반사광이 다시 수광 파이버로 입사됨으로써 타겟의 변위에 대한 정보를 얻게 된다. 수광부는 수광 파이버로 입사된 반사광을 포토다이오드(PD)에 조사시켜 조사되는 광의 양에 따라 전기적인 전류신호를 발생시키는 부분이다. 신호 검출 회로는 포토 다이오드의 전류 신호를 적당한 크기의 전압신호로 변환하고 전기적 노이즈를 제거하여 센서의 출력 신호를 내보내는 기능을 갖고 있다.

2.2 측정 원리

광 파이버 변위 센서의 측정 원리는 프로브 헤드에서 나오는 빛을 타겟 표면에 조사했을 때 헤드와 타겟 사이 거리 변화에 따른 반사광량의 변화 관계를 통해 타겟의 변위를 측정할 수 있게된다.

발광 파이버로부터 나오는 빛은 파이버 내에서 빛의 반복 반사와 파이버 재질과 공기 사이의 굴절, 광의 회절로 인해 퍼짐각 (α°)을 가지고 타겟에 조사된다. 따라서 반사광 조도는 Fig. 2에 나타나있는 것처럼 일정한 값(I_0)을 갖는 부분과 선형적으로 감소하는 부분으로 나타나게 된다.

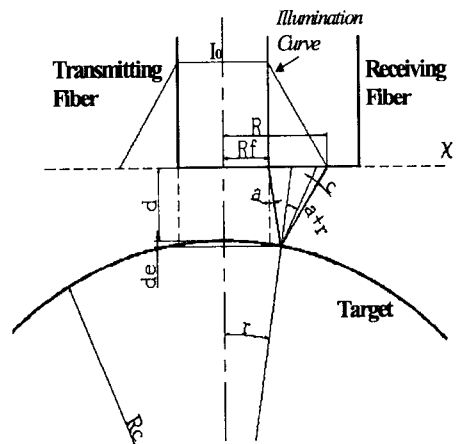


Fig. 2 Illumination curve of reflected light

이 때, 반사 광속(Φ_0)를 나타내는 다음 두 식(1),(2)을 통해 반사광 조도(I_0) 식(3)을 유도할 수 있다.

$$\Phi_0 = \rho \pi R_f^2 E_0 \quad (1)$$

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

$$I_0 = \frac{3\rho R_f^2}{R^2 + RR_f + R_f^2} E_0 \quad (3)$$

여기서, ρ 는 타겟의 반사율, R_f 는 단일 파이버 직경, E_0 는 입사광 조도를 나타낸다. R 은 파이버 끝단면 상에서 반사광이 조사되는 부분의 반경으로서 다음 식으로 구할 수 있다.

$$R = R_f + [d_e + d][\tan(a) + \tan(a + 2r + c)] \quad (4)$$

여기서 타겟이 원형일 경우,

$$d_e = R_c [1 - \cos(\gamma)] \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다.

여기서, r 은 측정면 곡률에 의해 나타나는 경사각을 의미하고, 식(4)에서 각도 c 는 표면 경사각 분포로 결정되는 한계 반사각으로서 표면 경사각은 타겟의 표면 거칠기에 의해 결정된다. 참고 문헌에서 제시한 표면 거칠기와 한계 반사각의 관계를 Table. 1에 나타내었다. ⁽⁵⁾⁽⁶⁾

Table. 1 Surface roughness vs. limited angle of reflection

Material	R_{max}	C
low-carbon steel	1 ~ 15 μm	5° ~ 21°
brass	0.5 ~ 1.0 μm	4° ~ 5°
	2.0 ~ 3.0 μm	8° ~ 9°

결국, 반사광 조도(I_0)는 타겟과의 거리(d)와 타겟의 표면 거칠기에 의한 한계 반사각(c)의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 수광 파이버로 입사되는 광량은 반사광 조도와 입사면적의 곱으로 얻을 수 있다.

2.3 성능

Fig. 3은 개발 중에 있는 광 파이버 센서의 정적 특성 곡선을 나타내고 있다. 연삭 가공된 직경 35(mm) 연강 타겟에 대한 특성이다. 센서 민감도는 3.483(V/mm)이고, 선형성이 1.0%FSO되는 측정 구간은 0.25~0.8(mm)이다. Fig. 4는 센서 출력신호를 FFT 분석한 결과로서 60Hz과 180Hz 부근에 두드러진 전기적 노이즈를 보이고 있다.

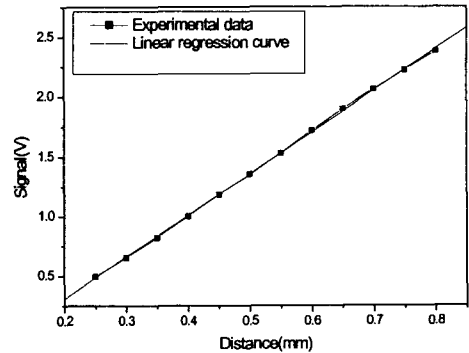


Fig. 4 Output signals from optical fiber sensor in distance measurement

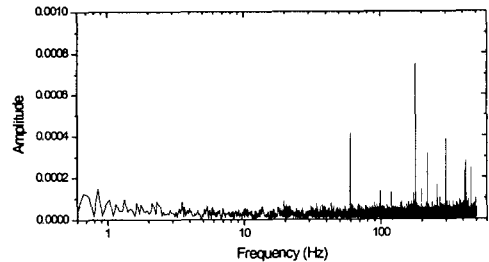


Fig. 5 Electrical noise of sensor output signal

3. 주축 모니터링의 런아웃 특성

Fig. 5는 정지 상태의 주축이 천천히 회전을 시작 할 때 광 파이버 센서의 출력 신호 변화를 오실로스코프 상에서 캡처한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 정지 상태일 때 일정했던 신호가 회전을 시작하면서 불규칙한 오실레이션 파형을 나타냄을 볼 수 있다. 주축의 회전이 저속도임을 감안할 때 이 파형의 원인은 주축의 회전 진동과는 거의 무관하다고 말할 수 있으며 광 파이버 센서로 감지되는 주축의 런아웃 특성이라 예측 할 수 있다. Fig. 6은 광 파이버 센서의 주축의 런아웃 특성을 실험하기 위한 장치를 보여 주고 있다. 테이블 회전 방식의 진원도 측정기(Rank Taylor Hobson Co., Talyron 100)

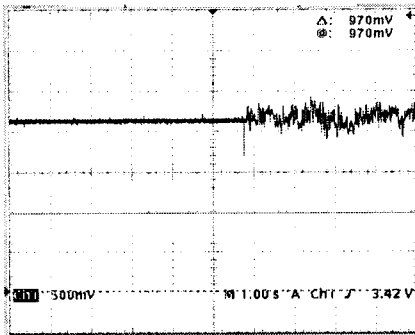


Fig. 6 Variation of sensor output signal according to spindle rotation

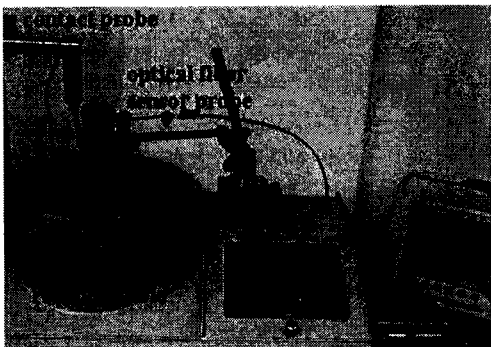


Fig. 6 Photograph of experimental setup

의 접촉식 프로브를 이용하여 가공 모형 주축 타겟의 진원

도 및 표면 프로파일을 측정하고, 같은 측정 위치 상에서 광파이버 센서의 측정 신호를 획득하여 비교하였다.

Fig. 6은 6rpm 회전속도로 회전하는 주축의 4회전 동안 광 파이버 센서의 모니터링 신호를 나타내고 있다. 10초 간격으로 나타나는 피크 신호는 주축의 1회전을 표시한다. 매 회전을 주기로 거의 일정한 패턴을 형성하고 있음을 볼 수 있다. 이때 주축의 중심과 회전축 중심과의 편차는 1.6 μm 이내로 셋팅되어 그에 해당하는 센서의 전기적 신호 크기가 5.5(mV)인 것을 볼 때, 두 축의 편심에 의한 회전 오차는 무시할 수 있는 수치이다. 따라서 Fig. 6 결과는 본 실험에 사용한 주축 타겟의 런아웃을 나타내고 있음을 알 수 있다. 런아웃 신호는 반복적인 런아웃과 비 반복적 런아웃이 존재한다. 본 논문 실험에서는 주축 회전수에 동기적인 파형으로 나타나는 반복적 런아웃이 주를 이루고 있음을 확인할 수 있었다.

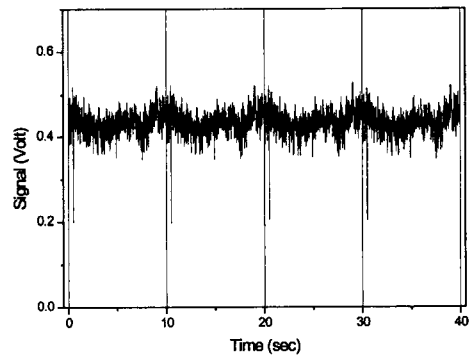
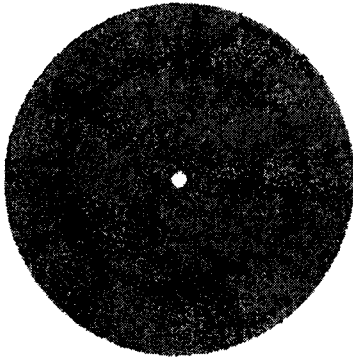
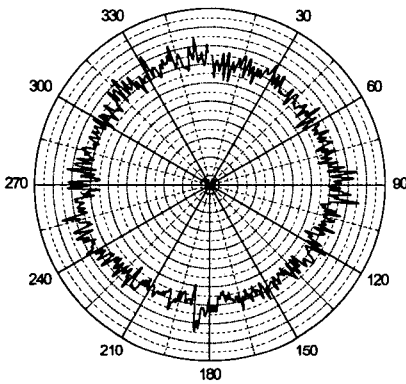


Fig. 6 Sensor output signal of spindle rotation at 6rpm

Fig. 7의 (a)는 접촉식 프로브로 측정된 주축 타겟의 프로파일을 나타내고 있다. (b)는 같은 위치에서 광 파이버 센서로 측정된 런아웃 신호로서 접촉식 프로브에 의한 프로파일과 유사한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이 실험 결과는 수광부 조도(I_0)가 측정면의 표면 거칠기에 따른 한계 반사각(c°)을 변수로 갖는 관계식 식(3), 식(4)로 표현됨을 통해 이론적으로 뒷받침 할 수 있다. 따라서 광 파이버 센서로 측정된 주축의 런아웃 특성은 주축 측정면의 표면 거칠기와 연관성이 있음을 알 수 있다.



(a) contact probe



(b) Optical fiber sensor

Fig. 7 Comparison profile of a spindle surface

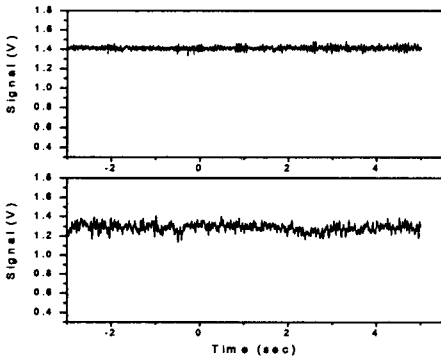


Fig. 8 Comparison of runout signals according to machined surface

Fig. 8의 아래 그래프는 연삭 가공된 주축 면을 측정

면으로 한 광 파이버 센서의 주축 런아웃 신호이고 위 그래프는 폴리싱 가공된 주축 면을 측정면으로 한 런아웃 신호이다. 두 그래프를 통해 비교할 수 있듯이 주축의 표면 가공 정도에 따라 광 파이버 센서의 주축 런아웃 신호가 차이가 남을 볼 수 있다.

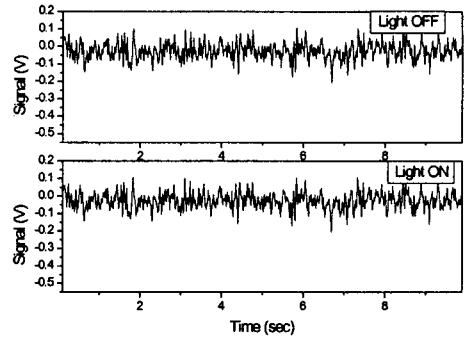


Fig. 9 Comparison of electrical runout signal of optical fiber sensor according to external light

Fig. 9는 광 파이버 센서의 전기적 런아웃 영향을 알아보기 위해 외부 빛을 차단한 경우(위 그래프)와 차단하지 않은 경우(아래 그래프)의 주축 런아웃 신호를 측정된 결과이다. 두 그래프를 통해 볼 수 있듯이 외부 빛으로 인한 센서의 런아웃 신호의 영향은 거의 찾아 볼 수 없다.

4. 결론

본 논문은 주축 모니터링 시 문제되는 주축의 런아웃에 관한 연구로서 광 파이버 센서를 이용하여 모니터링 할 때 발생하는 주축 런아웃 특성을 실험적으로 고찰하였다.

회전 주축 모니터링에 적용할 수 있는 센서는 비접촉 센서 형태가 적합하다. 비접촉 센서는 제3의 물리량을 매개체로 주축의 변위를 전기적 신호로 유추하는 공통된 기본 원리를 가지고 있다. 이때 센서의 신호가 오직 주축 사이의 공극에 의해서만 변화하지 않고 제3의 물리량에 영향을 미치는 환경 요인 및 측정대상의 특성에 의해 변하게 될 때 전기적 런아웃이 발생된다. 실례로 와전류 센서 경우에 주위 자기장 영향이나 측정면 재료의 자기적 특성에 의해 전기적 런아웃이 발생한다. 전기적 런아웃은 센서 자체적으로 극복하기에 매우 어렵고, 측정 환경 보완이나 신호 처리 기

술을 통해 그 영향을 배제하는 노력이 있어왔다. 본 논문의 광 파이버 센서는 주축의 기계적 런아웃인 측정면 프로파일에는 민감한 영향을 보이거나 전기적 런아웃은 거의 발견되지 않음을 실험적으로 확인하였다. 즉 광 파이버 센서로 주축 모니터링 시 주축의 표면 가공 기술을 통해 주축 런아웃 문제를 극복할 수 있다는 긍정적인 결론을 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 김진현, 김일해, 장동영, 한동철, "주축 변위 측정을 통한 공구 마모 진단에 관한 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp.459, 464
- (2) 김일해, 박만진, 장동영, 한동철, "주축 변위 센서를 이용한 절삭력 측정에 관한 연구", 한국공작기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.89~94
- (3) 김승중, 김하용, 이종원, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링 계에서의 런아웃 규명", 한국소음 진동공학회 1988년도 추계학술대회논문집, pp.532~537.
- (4) 김하용, 김승중, 이종원, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃, 불균형력 및 와전류 효과 규명", 한국소음진동공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp.172~177.
- (5) Katsumuasa Saito and Takashi Miyoshi, 1974, "Principles of the fiber Optics Glossmeter - Study on the Gloss Measurement of polished metal Surface by means of Fiber Optics (1st Report) -", 精機學會北海道支部學術講演會, pp. 129~134.
- (6) Takashi Miyoshi and Katsumuasa Saito, 1981, "Analysis of Concentric Distribution Optical Fiber Bundle - Development of a Sensor for Gloss Measurement of Polished Metal Surface by means of Fiber Optics (1st Report) -", 精機學會春季大會學術講演會, pp.338~343.
- (7) Gunhee Jang, Dongkyu Kim and Jaehyuk Han, 1998, "Analysis and Measurement of Runout in a Computer hard Disk Drive Spindle Motor", KSME Journal A, Vol.22, No.8, pp.1533~1541.
- (8) B. Cahill, M.A. El Baradie, 2001, "LED-based fibre-optic sensor for measurement of surface roughness", Journal of Materials Processing Technology 119, pp.299~306.