

고속주축 모니터링용 광파이버 변위센서의

파이버 특성에 따른 센서 성능 연구

박찬규*, 신우철+, 배완성+, 홍준희**, 이동주**

A Study on the Performance of Optical Fiber Displacement Sensor for Monitoring High Speed Spindle according to Properties of Optical Fiber

Chan-Gyu Park*, Woo-Cheol Shin+, Wan-Sung Pea+, Jun-hee Hong**, Dong-ju Lee**

Abstract

To make high speed spindle system work properly, sensors with outstanding resolution and dynamic characteristics are essential. An optical fiber displacement sensor is based on simple principles. Electrical signal responds to the optical flux change due to the displacement change between a target and a sensor probe. In this paper, the performance of optical fiber displacement sensor has been investigated according to properties of optical fiber. Firstly, optical loss has been measured before and after polishing optical fiber endface. Secondly, allowance of optical fiber bending has been tested. thirdly sensitivity and linear range of the sensor has been found out according to the shape of cross section of optical fiber.

Key Words : high speed spindle, optical fiber sensor

1. 서 론

최근 기술동향에 따라 고속 · 정밀한 주축계가 요구되고 그에 따라 새로운 여러 기술이 접목되면서 고속 · 정밀한 기계가 등장하고 있다. 고속의 주축을 정확히 제어하여 진동이 생기지 않게 하기 위해서는 높은 분해능과 동적특성을 가진 모니터링이 필수적이다. 광파이버 형태의 센서는 측정 대상체의 변위에 의해 변하는 광량변화를 수광소자를 이용하여 전기신호로 나타내는 원리로 비접촉식이며, 비교적 구조가 간단하다. 또한 측정속도가 빠르고 전자파의 영향이 없어 변위 측정뿐만 아니라 공작기계의 회전주축의

고장진단, 공구의 마모, 절삭력을 측정하는 등 여러 분야에서 연구가 진행되고 있다.

본 논문은 고속 주축 모니터링용 광파이버 변위 센서를 개발하기 위한 일환으로 첫째, 광파이버 단면의 폴리싱 처리로 발광부에서 집광시 광파이버의 단면 처리상태에 따른 광손실을 측정하였다. 둘째, 광파이버 센서의 고속 주축 시스템에 적용 시 광파이버 허용곡률반경을 실험을 통하여 살펴보았다. 셋째, 파이버직경 0.5mm, 1.0mm의 평행형 광파이버와 동축형 광파이버에 따른 센서감도 및 선형범위를 분석하였다

* 주저자, 충남대학교 기계공학과 대학원 (parkchangyu2003@yahoo.co.kr)

주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

+ 충남대 기계공학과 대학원

++ 충남대 기계공학과

2. 광파이버 센서

2.1 광파이버 센서 구성

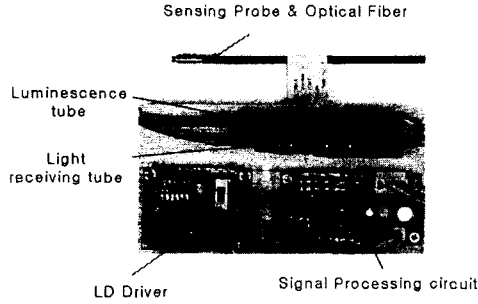


Fig. 1 Optical fiber sensor

Fig. 1은 광파이버 센서의 기본구성을 나타내고 있다. 발광부, 측정부, 수광부, 신호처리부로 구분할 수 있다. 발광부는 파장 550nm, 출력 10mW의 레이저 다이오드와 이를 구동하는 레이저 다이오드 드라이버와 광파이버로 구성되어 있다. 측정부는 타겟에 투광하는 투광파이버와 타겟에서 반사된 광을 받아들이는 수광파이버로 구성되어 있다. 수광부는 수광파이버와 포토다이오드로 구성되어 포토다이오드에 들어온 광량을 전류 신호로 바꾸어준다. 신호처리부는 포토다이오드에서 생성된 전류를 전압으로 바꾸어주는 I-V 변환기와 미약한 신호를 증폭하기 위한 반전 증폭기와 고주파 노이즈를 제거하기 위한 로우 패스 필터로 구성되어 있다.

2.2 광파이버

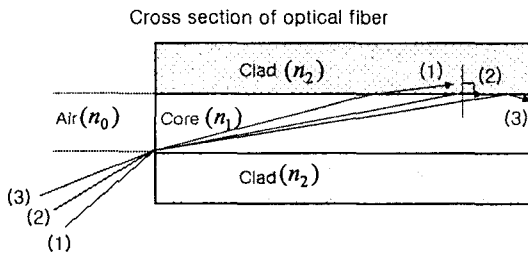


Fig. 2 Ray optics representation of the propagation mechanism

광파이버는 Fig. 2에 보인 바와 같이 굴절율이 낮은 클래드와 굴절율이 높은 코어로 구성되어 있다. 따라서 코어내의 광이 클래드 경계면에 입사하는 각도와 임계각(전반사가 일어나는 경계면의 각도로서 입사각이 이 각도보다 크면 전반사가 일어남)보다 큰 경우에는 광은 전반사되어 클래드로 누설되지 않고 전파하는 것이 가능하다.

2.3 이론적 배경

광파이버 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 있게 된다.

발광파이버로부터 나오는 빛은 광파이버 내에서 빛의 반복 반사와 광파이버 재질과 공기 사이의 굴절, 광의 회절로 인해 퍼짐각 (a°)을 가지고 타겟에 조사된다. 따라서 반사광 조도는 Fig. 3에 나타나있는 것처럼 일정한 값(I_0)을 갖는 부분과 선형적으로 감소하는 부분으로 나타나게 된다.

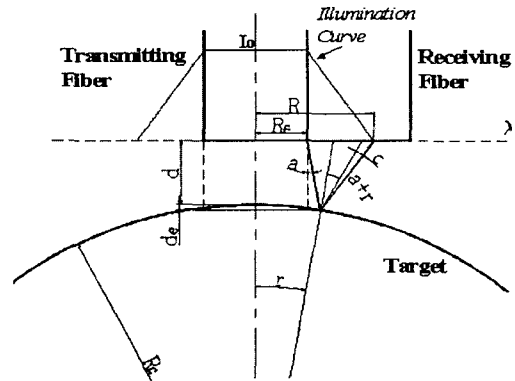


Fig. 3 Illumination curve of reflected light

입사광 조도 E_0 와 반사광 조도 I_0 의 관계는

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

으로 나타낼 수 있다. 여기서, ρ 는 타겟의 반사율, R_f 는 단일 광파이버 반경, R 은 광파이버 끝단면 상에서 반사광

이 조사되는 부분의 반경으로서 다음 식으로 구할 수 있다.

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

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

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.

결국 반사광 조도(I_0)는 타겟과의 거리(d)와 타겟의 표면 거칠기에 의한 한계 반사각(c)의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 수광파이버로 입사되는 광량은 반사광 조도와 입사면적의 곱으로 얻을 수 있다. 즉, 광파이버 센서는 타겟과의 거리와 타겟 표면 거칠기에 의해 출력 신호가 결정됨을 알 수 있다.

3. 광파이버 특성에 따른 광파이버 변위센서 성능 고찰

3.1 광파이버 단면 처리에 따른 광손실

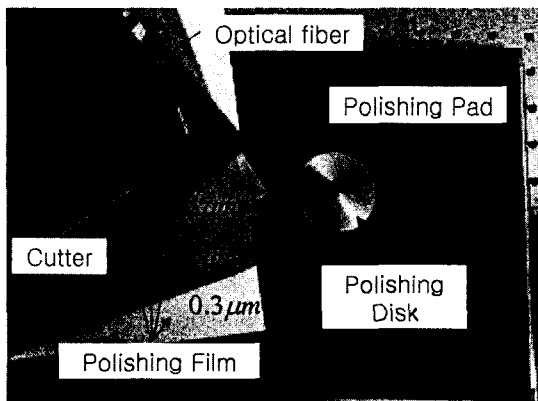


Fig. 4 Polishing Tools

Fig. 4는 광파이버 단면을 폴리싱하기 위한 도구를 나타내고 있다. 폴리싱 단계는 먼저 커터로 자른 후 광파이버를 폴리싱 디스크에 삽입한 후 $5\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ 폴리싱 필름을 순서대로 사용하여 마무리한다.

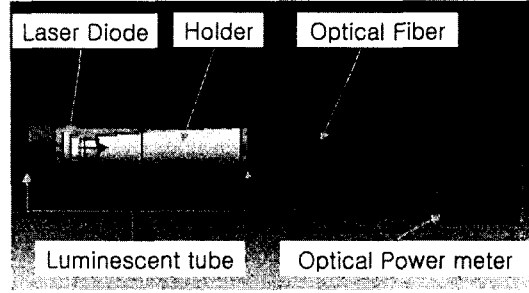


Fig. 5 Measurement of optical power

Fig. 5는 투광파이버에서 조사되는 광파워를 측정하기 위한 개략도를 나타내고 있다. 레이저다이오드의 출력은 7.7mW 로 조절하였다.

Table 1 Optical power loss rate

	Optical power(mW)	Loss rate(%)
After Cutting	4.92	36
After $5\mu\text{m}$ Polishing	4.93	36
After $3\mu\text{m}$ Polishing	5.01	35
After $1\mu\text{m}$ Polishing	4.97	35
After $0.3\mu\text{m}$ Polishing	5.16	33

Table 1은 8번 측정한 결과의 평균이다. 발광부를 거쳐 투광파이버에서 조사되는 광의 손실이 폴리싱을 끝내면 커터로 단면을 자른 경우보다 광손실률이 3% 가량 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

3.2 광파이버의 허용 곡률 반경

광파이버 센서의 고속 주축 시스템에 적용 시 발생할 광파이버 휨에 대한 센서 출력 신호 영향을 고찰하였다. 광파이버가 직선일 때를 기준으로 휨으로써 나타나는 센서 출력 신호의 변화 관계를 fig. 6에 나타내는 두 가지 경우, 광파이버가 90° 휘어지는 경우(a)와 180° 휘어지는 경우(b)에 대해서 각각 고찰하였다. 여기서 R 은 곡률 반경을 나타낸다. fig. 7은 파이버직경 1mm 의 평행형 플라스틱 광파이버의 휨 곡률 반경에 대한 센서 출력 신호의 변화를 곡률 반경이 무한대 일때를 기준으로 상대값으로 나타내고 있다. 곡률 반경이 50mm 이상일 때는 두 경우 모두 거의 직선일 때와

유사하게 나왔으며 곡률 반경이 20mm까지 거의 10%이내의 신호 감소를 보였다. 20mm이하부터 급격한 손실을 나타내었고, 곡률 반경이 작아질수록 (a)경우와 (b)경우의 차가 크게 나타남을 고찰할 수 있다.

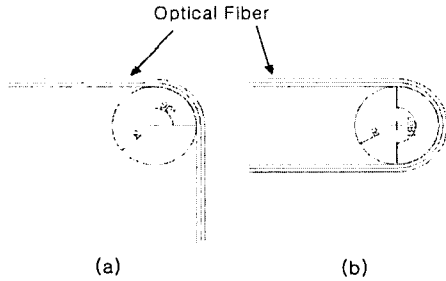


Fig. 6 Two bending types of optical fiber

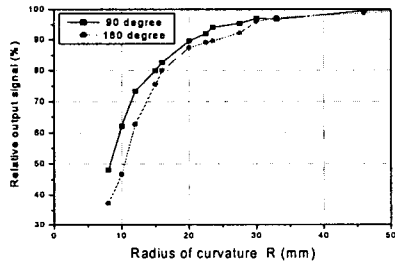


Fig. 7 Relations of output signal and curvature radius

3.3 광파이버 단면 형상에 따른 민감도 비교

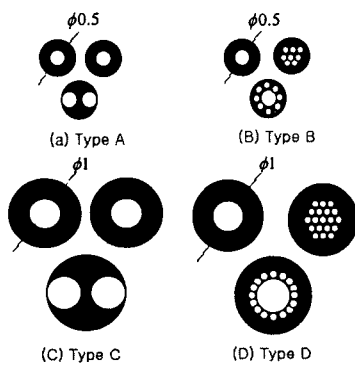


Fig. 8 Cross section types of optical fiber

Fig. 8은 각각 위의 왼쪽이 투광파이버, 위의 오른쪽이 수

광파이버, 아래쪽이 광파이버 프로브의 단면 형상을 나타낸다. 타입 A, B는 투광파이버의 파이버직경이 0.5mm, 타입 C와 D는 1.0mm이다. 타입 A와 C는 평행형이고 타입 B, D는 동축형에 속한다.

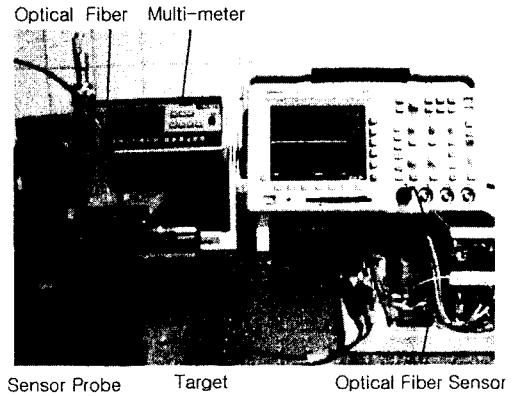


Fig. 9 Sensor calibration equipment

Fig. 9는 광파이버 변위 센서를 캘리브레이션하기 위한 장치이다. 타입 A, B, C, D에 대하여 균일한 조건으로 맞춰주기 위해 각각 투광파이버 끝단에서의 광출력을 5mW로 조절하였다. 센서프로브와 타겟과의 변위를 0mm에서 1.15mm 까지 0.05mm 단위로 이동하며 그 때마다 센서의 출력신호를 측정하였다.

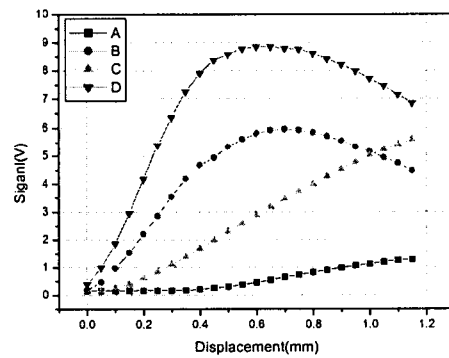


Fig. 10 Sensitivity of optical fiber sensor

Table 2 Linear range and sensitivity of type A, B, C, D

Type	Linear range(mm)	Sensitivity(V/mm)
Φ0.5	A	0.6
	B	0.25
Φ1.0	C	0.65
	D	0.15

Fig. 10은 투광파이버 직경이 0.5mm인 타입 A, B 광파이버와 투광파이버 직경이 1.0mm인 타입 C, D 광파이버의 단면의 형상에 따른 센서 감도를 나타내는 그래프이다.

Table 2는 광파이버 형상별 선형범위와 감도를 비교한 표이다.

3.3.1 동축형 광파이버와 평행형 광파이버의 고찰

Table 2에서 파이버경이 0.5mm인 평행형 타입 A와 동축형 타입 B를 비교하면 선형범위는 타입 A가 타입 B보다 2.4배가 길고 감도는 B가 20.4배가 좋다.

파이버경이 1.0mm인 평행형 광파이버 타입 C와 동축형 광파이버 타입 D를 비교하면 선형범위는 타입 C가 4.3배가 길고 감도는 D가 3.8배가 좋다.

그러므로 동축형 광파이버가 선형범위는 평행형 광파이버보다 작지만 더 좋은 감도를 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다

3.3.2 광파이버직경 0.5mm와 1.0mm의 고찰

Table 2에서 파이버경이 0.5mm인 평행형 타입 A와 파이버경이 1.0mm인 평행형 타입 C를 비교하면 선형범위는 타입 C가 타입 A보다 약간(1.08배) 길고 감도는 C가 3.52배가 좋다.

파이버경이 0.5mm인 동축형 타입 B와 파이버직경이 1.0mm인 동축형 타입 D를 비교하면 선형범위는 타입 B가 타입 A보다 1.66배가 길고 감도는 C가 1.5배가 좋다.

광파이버 직경이 커지면 평행형의 경우 감도가 좋아지고 동축형은 나빠지는 것이 확인됐고 선형범위는 평행형인 경우 직경이 증가함에 따라 약간 증가하고 동축형인 경우에는 감소하는 것으로 나타났다.

센서의 중요한 성능중 하나가 분해능이다 분해능은 신호 노이즈를 감도로 나눈 값이 되므로 좋은 민감도는 좋은 분

해능과 결부된다. 위의 결과 고속 주축 마그네틱 베어링의 간격이 0.2mm인 것을 감안하면 B 타입을 적용하는 것이 가장 좋은 것으로 나타났다. 한편, 감도는 다소 떨어지지만 일반적인 적용범위를 고려하면 C 타입이 좋은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문은 고속 주축 모니터링용 광파이버 센서 설계를 위한 광파이버 특성에 따른 센서 성능을 고찰 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- ① 파이버직경 1mm 평행형 광파이버의 단면 폴리싱 처리에 따른 광전송 손실 특성 고찰 결과 폴리싱 처리로 3% 가량의 광손실을 줄일 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.
- ② 파이버직경 1mm 평행형 광파이버의 허용 곡률반경을 확인하였으며 굽힘 곡률반경이 20mm에서부터 급격한 손실이 일어나고 50mm 이상이면 굽힘에 의한 손실은 0%에 가까웠다.
- ③ 광파이버의 형상에 따른 광파이버 센서의 선형범위 및 민감도를 분석결과 파이버직경 0.5mm인 동축형 파이버가 평행형 광파이버보다 센서감도에서 더 우수한 것을 확인했다.

향후 연구 계획으로는 광 측정부의 이론적 모델링을 통해 최적의 설계 변수를 적용하여 센서 성능을 향상 시키고자 한다.

참 고 문 헌

- (1) Teak-gu Jeong, 2003, *Study of characteristics of optical fiber gap sensor for cylindrical target*, pp.6~20
- (2) Han-ha Kim, 1995, Dong Seo, *Optical communication practice*, Seoul, pp. 1~87
- (3) Jun-Sik Kim, 2002, Sung An Dang, *Sensor Engineering*, seoul, pp. 100~109
- (4) Takashi Miyoshi, Katsumasa Saito, 1974, "Principles of the Fkber Optics Glossmeter", *Study on the Gloss Measurement of Polished Meta Surface by the means of Fiber Optics (2st Report)*, pp. 227~232