

# 비접촉식 광파이버 변위 센서의 기술동향 및 응용



홍준희

충남대학교 기계공학과



신우철

충남대학교 기계공학과

## 1. 머리말

변위 측정은 공학과 산업기술에 있어 가장 기본이 되는 기술로서 그 자체 목적뿐만 아니라 질량, 압력, 진동, 속도, 표면형상 등 타측정 분야의 기반이 된다. 현재 변위 측정 기술은 디스플레이, 반도체 등 초정밀 산업에 있어서 자동 제어, 가공, 검사 분야의 핵심 기술로서 산업의 기술 척도를 판가름 할 수 있는 지표로 여겨지기도 한다.

특히 비접촉 변위 측정 방식은 측정압에 의한 오차와 마모·마찰에 의한 접촉 오차가 없음을 뿐만 아니라 고속 측정이 가능하고 측정 자동화에 용이한 장점을 지니고 있다. 기본 개념은 전기장, 자기장 또는 빛 등을 매개체로 측정대상과 측정 프로브 사이 공극(air gap) 크기에 따른 매개체의 물성치의 변화를 정량화하여 전기 신호로 출력하는 원리이다. 각 특성을 살펴보면 전기장을 이용하는 정전용량형 센서는 현재 나노급 분해능 수준에 있으나 상대적으로 선형

구간이 짧은 편이며 측정 대상이 금속으로 제한되고 측정면의 오염에 민감하게 영향을 받는 문제점이 있다<sup>1)</sup>. 자기장을 이용하는 센서는 크게 와전류형 센서와 유도형 센서로 구분할 수 있다. 대체적으로 가격대 성능비가 양호하고 측정 환경에 존재할 수 있는 먼지, 물, 절삭유에 대한 영향을 덜 받는 편이므로 현재 마이크론 대 측정 분야에 널리 보급되어 있다. 와전류 센서 역시 측정 대상이 금속으로 국한되어 있고 전도률에 따라 센서의 감도가 바뀌는 특성을 지니고 있다. 유도형 센서는 측정 대상이 강자성체일 때 감도가 향상되는 반면 와전류 발생 시 성능이 크게 떨어지는 단점을 지니고 있다<sup>2)</sup>. 광을 이용하는 변위 센서는 크게 광위상각을 이용한 인터페로미터(interferometer) 방식과 광삼각법(optical triangulation)에 의한 방식 그리고 광강도 변조(intensity modulation) 방식 등이 있다. 광을 이용한 방식은 대체적으로 응답 특성이 양호하고, 전자파 방해(EMI) 잡음에 강인하며 측정대상이 금속뿐만 아니라 비금

속 재질도 가능한 특징을 가지고 있다<sup>(3,4)</sup>. 반면에 측정면의 반사효율과 기울어짐에 의해 센서의 감도 특성이 변하는 문제점을 지니고 있다<sup>(5~7)</sup>.

여기에서는 광파이버를 적용한 광강도 변조 방식의 변위 센서(이하 광파이버 변위 센서)에 관한 내용을 다루고 있다. 센서의 기본 구성 및 광파이버에 의한 변위 측정 원리<sup>(8)</sup>를 설명하고 변위 센서로서 타센서 타입과 구별되는 장점과 더불어 해결해야 할 문제점에 대해 정리하였다. 연구 동향으로서 기존 변위 센서로서 지녔던 문제점을 개선하려는 연구와 특수 목적의 센서로 응용되거나 다른 물성치 측정에 적용된 연구 예를 소개하고 있다.

## 2. 측정 원리

Fig. 1은 광파이버 변위센서의 기본 구성을 나타내고 있다. 광원인 레이저 다이오드(Laser Diode, LD) 또는 LED에 의해 발생한 빛은 투광파이버(transmitting optical fiber)를 통해 측정부로 전송되어 측정 대상(target) 면에 조사된다. 다시 측정면에 의해 반사된 빛은 투광파이버와 나란히 배치된 수광파이버(receiving optical fiber)에 일부 입사되며 그 광속(optical flux)의 크기는 공극 크기에 따라 변하게 된다. 수광파이버 내로 입사된 반사광속은 포토다이오드(Photodiode, PD)로 전송되어 전류 신호로 변환되고 전류 신호는 신호처리회로를 통해 센서 출력 전압 신호가 된다. 단일 파장 빛에 대해서 변위 측정 시 포토다이오드의 특성은 일정함으로 광파이버 센서의 변위 검출은 공극 크기에 따른 수광파이버로 입사되는 반사광속의 변화 관계로써 이루어진다고 할 수 있다.

Fig. 2에 도식화된 바와 같이 투광파이버로부터 나오는 확산광은 투광파이버의 개구수(numerical aperture)에 의해 최대 한계 확산각  $a$ 가 정해지고<sup>(9)</sup> 그 각도 내에서 일정한 형태의 광강도 분포를 갖는다. 측정면이 정반사면일 경우 동일한 각도로 반사되어 일부 수광파이버 단면에 조사된다. 공극이 없을 때는 측정면에 반사된 빛이 대부분 투광파이버로 되돌아가기 때문에 수광 파이버로 입사되는 반사광은 존재하지 않는다. 공극의 크기가 커질수록 수광파

이버 단면 내로 조사되는 반사광 영역이 확장됨으로써 수광파이버로 입사되는 광속이 증가하게 된다. 더불어 공극의 크기가 커질수록 투광파이버와 수광파이버 사이의 광경로가 길어짐으로써 확산광의 조도가 거리 제곱에 반비례적으로 줄어드는 현상도 일어난다. 이 두 가지 현상이 동시에 작용하여 Fig. 3과 같은 공극에 대한 센서 신호 응답 곡선이 나타나게 된다. front slope는 공극 크기가 커질수록 수광파이버 내의 반사광 입사 영역이 증가되는 현상에 주로 지배를 받아 나타나는 응답 곡선 부분이고 back slope 영역은 수광파이버의 단면이 반사광 입사 영역에 완전히

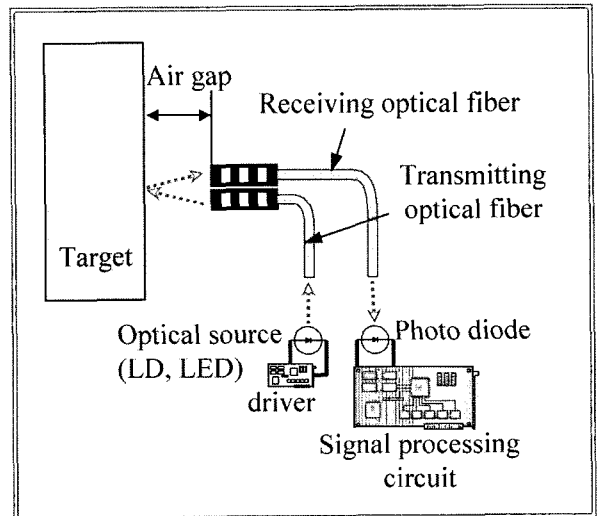


Fig. 1 Basic structure of an optical fiber sensor

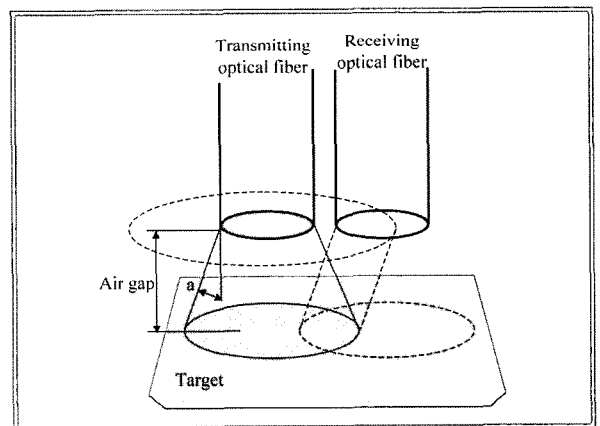


Fig. 2 Schematic of a basic optical fiber sensor probe

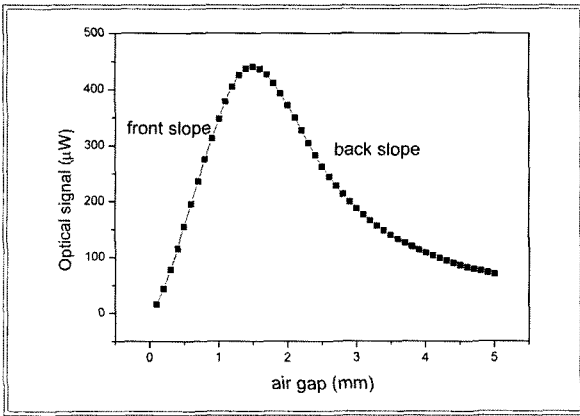


Fig. 3 Typical response curve of an optical fiber sensor

포함된 후 광 경로가 멀어질수록 조도가 줄어드는 현상에 의해서만 생성된 응답 곡선 부분이다. 이는 광파이버 변위 센서의 전형적인 응답 곡선 형태이며 동일한 측정면에 대해서 투광파이버로부터 나오는 확산광의 최대 한계각 크기, 광파이버 코어의 직경, 투광파이버 코어와 수광파이버 코어 사이의 배치 간격 그리고 확산광의 강도 분포에 의해 결정된다.

### 3. 광파이버 변위 센서의 특성

광파이버 변위 센서의 가장 큰 장점은 매우 다양한 측정면에 동작이 가능하다는 것이다. 즉, 측정면의 전도성과 무관하므로 비금속 측정 대상도 가능하고 표면 상태는 정반사면에서부터 확산반사면에 이르기까지 측정이 가능하다. 따라서 다른 타입의 비접촉식 변위 센서에 비해 측정 대상에 대한 융통성이 좋은 편이다. 또한 전자기파 방해에 강인하다는 점을 들 수 있다. 이것은 측정 프로브에 어떠한 전류도 흐르지 않기 때문에 측정부가 전자기파가 심한 환경에 있을 지라도 그 영향이 신호처리부로 전도되지 않는다. 따라서 신호처리부에 대한 방사 노이즈 대책만 고려된다면 센서 노이즈 문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 그리고 광을 매개체로 하기 때문에 동적 응답성이 좋은 장점이 있다. 광파이버 변위 센서 구성 부품들 중에 가장 낮은 응답성을 갖는 요소는 광검출소자인 포토다이오드이다. 그럼에도 일

반적인 포토다이오드 응답성이 수십 ns 수준이므로 변위 측정에는 충분하다고 할 수 있다. 그 밖에 장점으로는 구성이 단순하고 간편하여 제작이 용이한 점과 측정 프로브 크기가 작고 가벼워 유연한 적용특성을 갖는 점, 신호처리가 용이한 점 등을 들 수 있다.

반면에 광파이버 변위 센서가 해결해야 할 문제점은 다음과 같다. 첫째 광파이버의 외란 즉, 과도한 구부림, 외부 압력, 흔들림에 의해 센서의 정밀도가 영향을 받는다. Fig. 4는 코어 직경 1mm의 플라스틱 광파이버를 대상으로 구부러지는 곡률 반경에 대해 90도 구부러진 경우와 180도 구부러진 경우 신호 전달 효율 특성을 보여주는 실험 결과이다. 곡률 반경 30mm 이하부터 광전송률이 크게 떨어짐을 볼 수 있다. 둘째 광원 출력의 불안정성 또한 센서 정밀도에 영향을 준다. 특히 반사광이 다시 투광파이버로 입사되어 광원인 레이저 다이오드로 전달되면 그 정도에 따라 광원이 불안정해지게 되고 그 결과로 센서 출력신호가 요동치게 될 수 있다<sup>(6)</sup>. 셋째 측정 원리상 확산광을 이용하므로 측정 변위가 커질수록 측정 스폿(spot)의 크기도 커지게 된다. 이것은 좁은 폭을 갖는 내부 측정면에 대해서는 적용에 한계를 가져온다<sup>(6)</sup>. 넷째 측정면의 반사특성의 변화로 인해 센서의 감도가 바뀌는 점이다. 특히 측정 대상의 재질이 바뀔 경우 표면의 반사효율이 다르면 센서 감도가 바뀌므로 절대적인 변위 측정이 불가능하게 된다. 다시 말하면, 측정물의 표면 반사효율을 고려한 보정이 매번 필요하게 된다. 또한 같은 재료라도 측정면의 표면 조도에 따라 센서 감도가 변하게 된다<sup>(6)</sup>. Fig. 5는 동일 재질로 이루어진 표면 거칠기 시편의 각 조도면을 측정면으로 하여 변위를 측정하는 실험 결과이다. 표면 조도에 따라 센서 감도가 다르며 조도가 좋을수록 감도도 좋은 경향을 보이고 있다. 또한 측정면의 경사 여부와 측정면이 곡면일 경우 곡률 크기에 따라 센서의 감도에 변화를 가져온다. 따라서 초기 측정 셋팅 시 측정면에 수직인 측정 프로브 장착에 신경을 써야 하며 회전체의 상태 모니터링에 적용 할 경우 직경의 크기에 따라 센서 감도 변화를 감안해야 한다. Fig. 6은 직경이 서로 다른 원통 타겟에 대해 변위를 측정하는 실험결과이다. 직경이 45mm, 55mm일 때는 감도가 유사하나 35mm에 대해서는 센서 감도가 다소 떨어짐을 볼 수 있다.

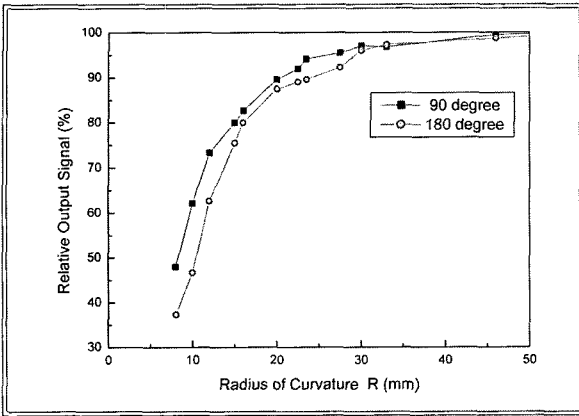


Fig. 4 Relations of output signal and curvature radius

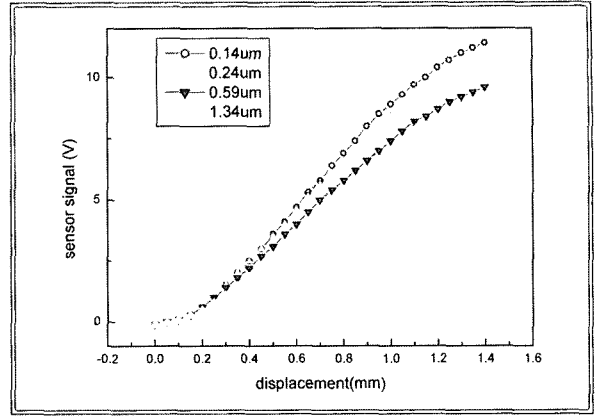


Fig. 5 Response curve according to surface roughness

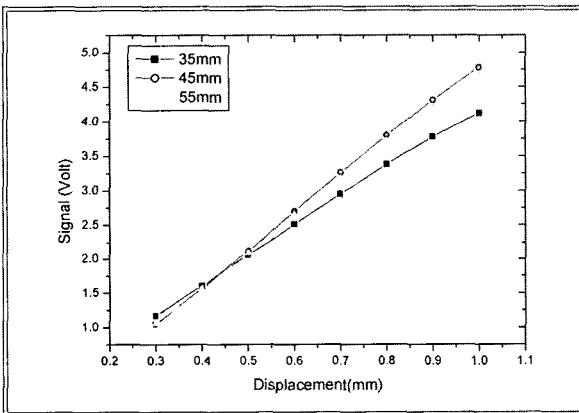


Fig. 6 Response curve according to diameters of cylindrical target

#### 4. 연구 동향 및 응용 예

광파이버 변위 센서의 연구 동향은 크게 두 가지의 흐름으로 구분할 수 있다. 하나는 변위 측정 시 앞서 설명한 문제점을 극복하기 위한 연구이고 다른 하나는 특수 목적의 적용 또는 변위 측정 원리를 응용하여 다른 물성치 측정에 적용을 시도한 연구이다.

먼저 문제점 극복에 관한 연구로서 측정면 반사효율에 대해 특별한 보정 없이 변위 정보를 획득하는 보상법 적용에 관한 연구가 있다<sup>(11)</sup>. 이는 기존 방법인 측정 대상의 재질과 가공조도에 대한 보상표(compensation table)를 만들어 측정 시 보정하는 방법이나 측정 대상에 표준화된 반사

테이프를 붙여서 측정하는 방법에 비해 번거로움을 크게 줄이는 데 목적을 두고 있다. 기본 원리는 Fig. 7과 같이 서로 다른 파장을 갖는 두 광원에 두 쌍의 투광·수광파이버를 일정 옅셋 거리를 두고 구성된 뒤 두 수광파이버의 변위 신호와 옅셋 거리값을 이용하여 측정대상물의 표면상태에 관계없이 변위값만을 얻는 방법이다. 연구 결과로서 표면조도 R 0.85, 0.63, 0.27에 대해 500 $\mu$ m 측정구간 내에서 거의 동일한 감도 곡선을 보여주고 있다. 또 다른 연구 주제로는 측정면의 형상을 고려한 변위 측정 연구가 있다. Fig. 8과 같이 투광파이버를 중심으로 여러 개의 수광파이버를 원형으로 배열한 구조의 프로브를 제작하여 각 수광파이버로부터 독립적으로 신호를 획득함으로써 측정 대상과의 거리뿐만 아니라 경사각도를 측정하는 연구<sup>(12)</sup>와, 곡면에 대한 보상 알고리즘의 개발에 관한 연구<sup>(9)</sup>가 있다. 또한 회전 주축의 상태 모니터링을 목적으로 광파이버 변위 센서를 적용 할 때 주축 측정 원주면의 표면 조도가 센서의 정밀도에 영향을 미침을 실험적으로 분석하고 그에 대한 대책으로서 적합한 주축 측정면의 후처리 가공 방법을 제시한 연구가 있다<sup>(13)</sup>.

변위 측정 원리의 응용 연구로서 액체의 수위를 검출하는 시스템에 관한 연구가 있다<sup>(14,15)</sup>. 특히 폭발의 위험이 있는 액체의 경우 전기 신호를 이용하여 검출할 경우 스파크의 위험을 배제할 수 없으므로 광파이버 적용이 적합한 예가 된다. Fig. 9에 기본 원리를 보여주고 있다. 공기와 액체의 굴절률 차이를 이용한 것으로 반사면이 액체 중에도

달했을 때 굴절되어 나가는 빛만큼 수광파이버의 입사광속이 줄어들게 되며 이를 감지하여 수위를 검출하는 원리이다. 그 다음 표면 조도계로 응용한 연구<sup>(16,17)</sup>로 측정면에 조사된 빛이 측정면의 표면 조도에 따라 확산 반사되는 정도 차를 이용한 원리이다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 반사광의 확산 각도(diffuse reflection angle)에 따른 수광파이버 입사 광속 크기로서 신호를 획득하게 된다. 암나사의 나사산 검사용으로 나사 구멍에 삽입되는 구조의 광파이버 측정 프로브를 설계하여 적용한 연구가 있다<sup>(6)</sup>. Fig. 11에 프로브 구조와 원리를 보여주고 있다. 실린더형 프로브에는 두 개의 광파이버 센서가 내장되어 있으며 크기를 최소화

화하기 위해 45° 마이크로 반사 프리즘을 적용해 측정 헤드의 90° 굽힘 구조를 대신하고 있다. 부가적으로 프로브 하단에 광전 근접 스위치를 장착하여 나사 구멍 바닥면 근접 여부를 감지하는 기능이 있다. Fig. 12와 같이 질량 측정을 목적으로 질량에 따른 스프링의 변형량을 광파이버 변위 센서를 이용하여 검출하는 연구가 있다<sup>(18)</sup>. 그 밖에 하드 디스크 드라이브의 헤드와 같은 소형 경량의 부품의 모달 해석에 적용한 예<sup>(19)</sup>, 구름 베어링의 성능 평가에 적용한 예<sup>(20)</sup>, 광파이버 센서의 우수한 주파수 특성을 고려하여 초음파로 구동되는 의료기기나 용접 장치의 진동 주파수 및 진폭 측정에 적용한 예<sup>(21)</sup>, 폭발의 위험을 고려하여 광파이버

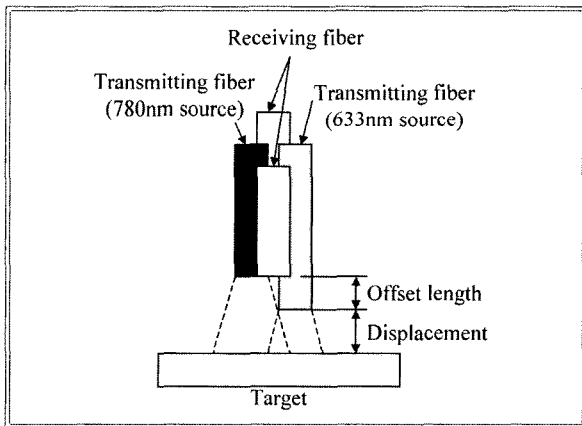


Fig. 7 Basic concept for the compensation method

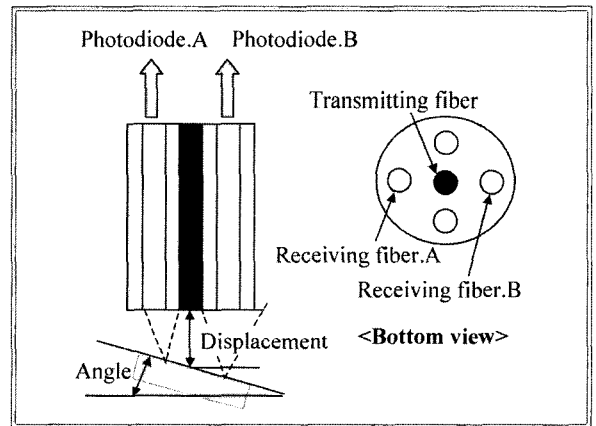


Fig. 8 Measurement of surface inclination angle and displacement using an optical fiber sensor

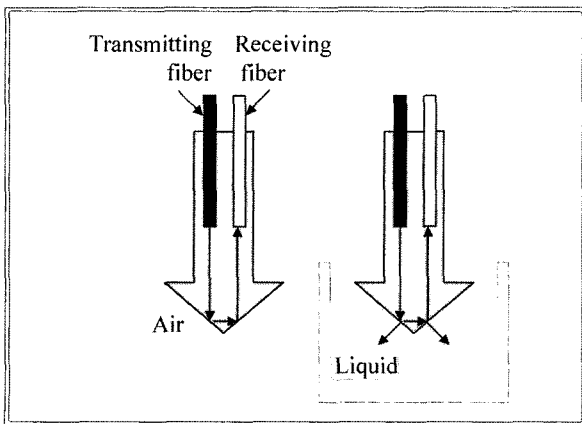


Fig. 9 Measurement of liquid-level using an optical fiber sensor

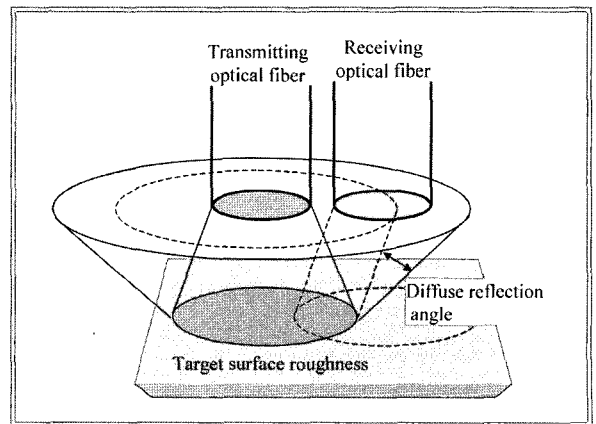


Fig. 10 Measurement of surface roughness using an optical fiber sensor

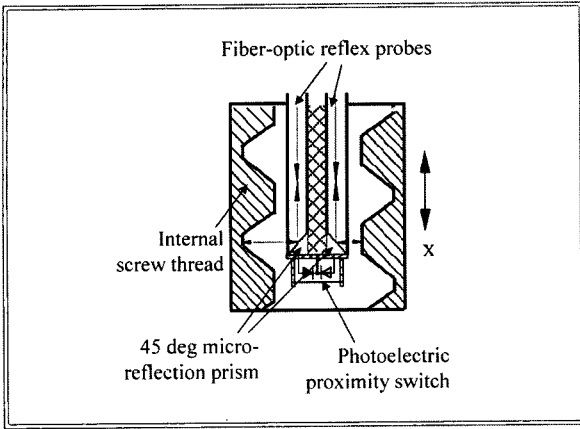


Fig. 11 Sensor probe and measurement principle for internal screw thread

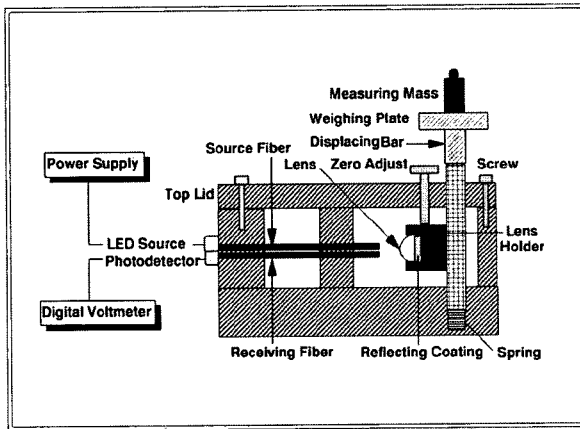


Fig. 12 Measurement of mass using an optical fiber sensor

버 센서를 이용하여 액체 산소 내에서 작동하는 회전 장치의 베어링 상태 모니터링에 적용한 예<sup>(22)</sup> 등이 있다.

## 5. 맺음말

센서에 요구되는 사항에는 기본 측정 성능 외에 측정 대상의 융통성, 측정 환경 EMI에 대한 내성, 소형, 경량, 고속측정, 액체 또는 폭발 위험 환경에서의 안정성 등을 들 수 있다. 이 모든 사항을 만족할 수 있는 형태가 바로 광파이버 센서이다. 더불어 광파이버 변위 센서를 구성하는 주요 구성 요소인 레이저 다이오드 또는 LED, 포토다이오드,

광파이버, 광커넥터 등의 성능 개발과 대량 생산 체제로 인해 간편하고 저렴하게 센서 구성이 가능한 것도 광파이버 센서 개발 및 적용에 유리한 점이라 할 수 있다. 앞으로는 측정 자체를 주목적으로 하는 단일 독립품목 개념의 계측기 형태 보다는 적용 시스템의 구성요소 개념으로 각 시스템에 적합한 형태로 설계되어 시스템이 요구하는 성능을 갖추고 기상 관측이나 작동 상태의 실시간 모니터링과 같은 역할을 수행하는 센서 형태에 대한 요구가 보다 늘어날 것으로 예상된다. 광파이버 변위 센서는 이에 부응하는 성능과 유연성, 경제성을 갖춘 센서 타입이라고 생각한다.

## 참고 문헌

1. Kim, J. Y., Lee, L. D., Park, K. H., Ma, S. D., Yang, D. J., 2002, "Precision in situ Measurement using Non-Contacting Capacitive Sensor with 4-Electrodes", KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 33~38.
2. Noh, M. and Jeong, M. K., 2001, "The Effect of Eddy Currents and Hysteresis on the Performance of Inductive Position Sensor for Magnetic Bearings", KSME Spring Conference B, pp. 36~41.
3. Lee, B., 2003, "Review of the present status of optical fiber sensors", Optical Fiber Technology, Vol. 9, pp. 57~79.
4. Grattan, K. T. V. and Sun, T., 2000, "Fiber optic sensor technology: an overview", Sensors and Actuators, Vol. 82, pp. 40~61.
5. Zhao, Y., Li, P., Wang, C. and Pu, Z., 2000, "A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement", Sensors and Actuators, Vol. 86, pp. 211~215.
6. Zhao, Yong and Liao, Yanbiao, 2002, "Single-mode fiber-based reflex sensor for internal surface in-line measurement of small products", Sensors and Actuators A, 3476, pp. 1~7.
7. Baik, S. H. and Park, S. K., 2005, "Shape measurement by using optical triangulation", KSPE,

- Vol.22, No.4, pp. 13~18.
8. Cook, R.O. and Hamm, C.W., 1979, "Fiber optic lever displacement transducer", APPLIED OPTICS, Vol. 18, No. 19, pp. 3230~3241.
  9. Keiser, G., 2000, "Optical fiber communications", McGRAW-HILL, p. 41.
  10. 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.
  11. Kim, B. J., Kim, S. H., Lee, Y. W., Sainsot, P., Flamand, L., 2002, "Development of Optical Fiber Coupled Displacement Probe Sensor with a New Compensation Method", KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 27~32.
  12. Yang, Y., Yamazaki, K., Aoyama, H. and Matsumiya, S., 2000, "Fiber optic surface topography measurement sensor and its design study", Precision Engineering, Vol. 24, pp. 32~40.
  13. 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.
  14. Raatikainen, P. Kassamakov, I., Kakanakov, R., Luukkala, M., 1997, "Fiber-optic liquid-level sensor", Sensors and Actuators A, Vol. 58, pp. 93~97.
  15. Yang, C., Chen, S., Yang, G., 2001, "Fiber optical liquid level sensor under cryogenic environment", Sensors and Actuators A, Vol. 94, pp. 69~75.
  16. Cahill, B. and El Baradie, M. A., 2001, "LED-based fibre-optic sensor for measurement of surface roughness", Journal of Materials Processing Technology, 119, pp. 299~306.
  17. Zhang, K., Butler, C., Yang, Q., 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.
  18. Golnabi, H., 2002, "Mass measurement using an intensity-modulated optical fiber sensor", Optics and Lasers in Engineering, 38, pp. 537~548..
  19. Patton, M. E., and Trethewey, M.W., 1987, "A Technique for Non-intrusive Modal Analysis of Verylightweight Structures", 5th International Modal Analysis Conference.
  20. Phillip, G. J., 1978, "Bearing Performance Investigation Through Speed Ratio Measurements", 23rd Annual Meeting of American Society of Lubrication Engineers.
  21. Crispi, F. J., Maling, G. C., Jr. and Rzant, A. W., 1972, "Monitoring Microinch Displacement in Ultrasonic Welding Equipment", I.B.M Journal of Research and Development, Vol. 10, No. 3.
  22. Hampson, M. E., Collins, J. J., Randall, M. R., and Barkhoudarin, S., 1986, "SSME Bearing Health Monitoring Using a Fiber Optic Deflectometer", Proceedings of Advanced Earth to Orbit Propulsion Technology Conference.