

## 보상법을 적용한 광섬유 변위센서의 개발

김병준<sup>\*\*\*</sup>, 김수현<sup>\*</sup>, 이윤우<sup>\*\*\*</sup>, P. Sainsot<sup>\*\*</sup>, L. Flamand<sup>\*\*</sup>, 곽윤근<sup>\*</sup>

### Development of Optical Fiber Coupled Displacement Probe Sensor with a New Compensation Method

Boung Jun Kim<sup>\*\*\*</sup>, Soo Hyun Kim<sup>\*</sup>, Yoon Woo Lee<sup>\*\*\*</sup>, Philippe Sainsot<sup>\*\*</sup>, Louis Flamand<sup>\*\*</sup>  
and Yoon Keun Kwak<sup>\*</sup>

#### ABSTRACT

The intensity modulated type (reflective method) optical fiber sensor is a well-known method and widely applied to the displacement measurements and other industrial purposes. This type sensor has the advantages of relatively cheap cost, small sensor size and easiness of operation. The sensitivity of the sensor is very dependent of several error terms; the variation in the intensity of the light source and the changes in the surface reflectivity of the object. An optical fiber coupled displacement probe with a new compensation method is presented in this paper. The proposed displacement sensor can measure the displacements of the target surface independent of surface reflectivity error that is caused by the materials and surface processing grade.

**Key Words :** Optical fiber(광섬유), Displacement sensor(거리센서), Compensation method(보상법), Probe (프로브)

#### 1. 서론

변위측정은 공학과 산업 기술에 있어서 가장 기본적인 것으로 온도, 습도, 압력, 진동특성, 표면 조도, 품질관리 등 거의 모든 측정 대상 물성치의 기본이 된다. 변위는 인류가 문명을 이루면서 측정을 시도한 가장 기초적인 값이면서 오늘날에 모든 물성 측정에 있어서도 가장 기본적인 측정 대상이라 할 수 있다.<sup>(1),(2),(5)</sup>

이러한 변위측정 방식으로는 가장 간단한 육안을 이용한 목측법과 자(Scale)나 기준 대상물체를 이용한 비교측정방식으로 발전하였고, 기술이

발전함에 따라서 마이크로미터, 캘리퍼스 등의 좀 더 정밀한 측정기구와 표준측정자(ex, 게이지블록, 표준자, 단위원기) 그리고 현미경 등 광학적 도구를 이용한 방법으로 발전되어 왔다. 현재에 있어서 변위측정은 산업적인 측면에 있어서도 가장 널리 사용되는 것으로 반도체 제조 등의 초정밀 산업에 있어서는 필수불가결한 기술이라고 할 수 있겠다.

현재에 있어서 이러한 초정밀 측정에 널리 이용되는 변위 측정기술 중 광학을 이용한 비접촉 방식으로는 광위상간섭을 이용한 인터페로미터(interferometer) 방식, 이중초점을 이용한 콘포컬

Received 2001년 9월 10일 접수  
<sup>\*</sup> KAIST 기계공학과  
<sup>\*\*</sup> LMC, INSA-Lyon, France  
<sup>\*\*\*</sup> 한국표준과학연구원

(confocal) 방식, 광량변조(intensity modulated) 방식 등이 있으며 전기적 변위 측정 방식으로는 가변저항(variable resistance)을 이용한 방식, 스트레인게이지(strain gauge), 정전용량형(capacitance pickups) 축전식, 인덕턴스(variable inductance pickups) 방식 등이 있다. 유도기전력을 이용한 방식으로는 LVDT(linear variable differential transducer), 와전류(eddy current)를 이용한 방법 등이 있으며 그 밖에 원자의 반발력을 이용한 AFM(atomic forces microscope) 방식, 초음파를 이용한 방식, 압전소자(piezoelectric material)를 이용한 방식 등이 널리 쓰이고 있다.(4),(5)

이러한 여러 변위 측정 방식 중에서도 광을 이용한 각종 변위 측정 방식은 측정대상물과의 비접촉성, 빠른 측정속도, 측정대상 물체의 비파괴성 등의 여러 장점을 갖기 때문에 현 산업계에서 아주 널리 사용되고 있다.

일반적인 광량변조방식의 변위센서는 측정대상물, 대상물의 가공정도, 표면 반사계수에 따라서 측정되는 광량에 오차가 늘 있기 때문에 이를 보상해주는 방식을 적용하여 사용하거나 특정한 표면반사계수와 가공 정도를 갖는 특정한 측정물에 대해서만 한정적으로 사용되어온 것이 사실이다.(3),(6)

이러한 광량변조방식의 가장 큰 단점인 측정대상물에 따른 보상(compensation)의 문제점을 개선하여 매 측정 시 보상을 필요로 하지 않는 광량변조방식의 변위 측정기의 개발을 본 논문의 연구 주제로 정하였다.

본 논문에서는 이러한 광학적 변위 측정 센서 중에서도 측정기의 비교적 간단한 구조, 저렴한 측정기 가격, 빠른 측정 속도, 광섬유를 이용한 측정 헤드의 유연한 적용 등 많은 장점을 갖고 있어 오늘날 산업계에서 널리 사용되고 있는 광량변조 방식(intensity modulated method)의 변위센서의 새로운 보상방법을 제안하였으며 광량변조방식의 변위 측정기에 관한 이론적 고찰과 함께 제안된 변위 측정기의 컴퓨터 모의 실험의 결과, 다양한 표면 반사 계수를 갖는 측정 시편에 대한 측정 결과를 함께 제시하였다.

## 2. 광량변조방식의 변위 측정기

### 2.1 기본특성

광학적인 방식으로 사용되는 변위 측정기 중 광량변조 방식의 것은 그 간단한 구조와 사용의 편리성 때문에 산업현장에서 널리 사용되고 있음을 이야기 하였다. 이전에 시험 제작한 바 있는 광섬유를 이용한 광량 변조 방식의 변위 측정기의 형태는 Fig. 1 과 같으며 이 시스템에서는 가공된 평면 공초점 렌즈를 광원의 조사부와 수광부에 접합시켜 수광 능력의 향상을 도모하였다.

센서의 프로브는 광원 조사용으로 이용되는 한 개의 광섬유와 측정 면에서 반사된 광량을 측정기(P.D. : photo diode)로 전달하는 다른 한 개 혹은 다발의 광섬유로 구성되어 있으며 측정 물체의 특성과 측정의 명확성을 위해서 광원의 조사부와 수광부에 공초점 렌즈(confocal lens)를 사용하기도 한다.(7)

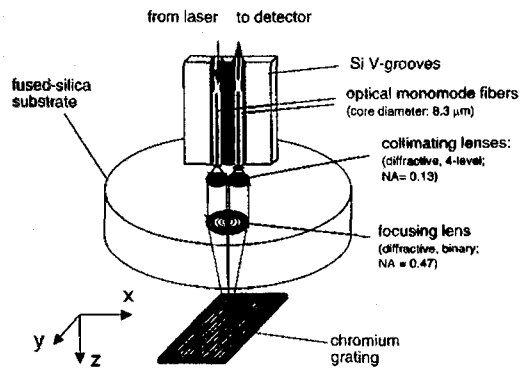


Fig. 1 Basic experimental set-up of intensity modulated displacement sensor

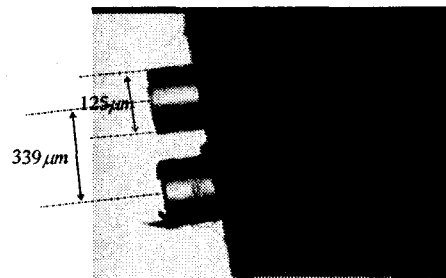


Fig. 2 Magnified cross section of the two fibers (one for beam emitting; the other for beam receiving)

Fig. 1 에서 제시된 측정기에는 광원(He-Ne 633nm 5mW laser)의 조사용과 수광용으로 지름

125 $\mu$ m 를 갖는 단일모드(single mode) 광학 섬유를 사용하였다.

광학 섬유의 고정과 정확한 배열을 위해서 실리콘 박판을 가공한 V 자 형태의 틀(v-groove)을 만들어서 두 개의 광섬유를 고정하였다. Fig. 2 는 두 개의 광섬유가 배열된 모습을 나타내어 주고 있다.

### 2.2 광량변조방식의 한계점

앞에서 살펴본 바와 같이 광량 변조 방식의 변위 측정 센서는 간단한 광학 부품의 사용과 이로 인한 측정기의 최소화와 저렴한 측정비용 등을 가장 큰 장점으로 꼽을 수 있으나 측정 물체와의 거리에 따른 반사광량의 차이에 따라 변위 정보를 읽어내는 것이 측정의 기본적인 원리인 만큼 다음과 같은 단점들을 가지고 있다.

첫째, 측정 대상물의 재질이 달라서 표면의 반사효율(reflection coefficient)이 다른 경우 절대적인 변위 측정이 불가능하다. 이러한 경우에 있어서는 측정물체의 표면 반사효율을 염두에 둔 보정(compensation)이 늘 필요로 하며, 특정한 재질과 반사효율을 갖는 물체에 대해서만 이러한 보정이 측정이 가능하다.

둘째, 같은 재질과 같은 반사효율을 갖는 측정 대상물이라고 하더라도, 측정대상물의 가공정도나 표면상태(ex, 이물질이 묻었거나 표면이 코팅처리된 경우)에 따라서 반사되어 수광부에 입사되는 광량의 차이는 존재하기 마련이기 때문에 같은 재질의 물체라 하더라도 표면 상태에 따라서 실험 결과의 보정이 필요 하다고 할 수 있겠다.

이러한 두 가지의 제약점으로 인하여 광량변조 방식의 변위 센서는 한정된 재질과 가공정도를 갖는 측정물에 있어서만 측정이 가능하거나, 측정물과 표면가공 정도에 관한 보상표(compensation table)을 만들어 매번 측정시마다 보정을 해 주어야 하는 불편함이 따른다. 경우에 따라서는 이러한 보정의 불편함을 상쇄하기 위해서 측정물체의 표면에 표준화된 반사테이프를 접착하여 측정하는 경우도 있으나 이러한 경우에 있어서는 측정대상물의 사이즈에 따라 측정 결과가 영향을 받게 되며 측정물체가 매우 민감한 경우라면 측정이 제약이 있어지는 단점이 있을 수 있다고 할 것이다

### 3. 보정이 필요 없는 광량변조 변위 측정

#### 3.1 측정의 개요

Fig. 3 은 본 연구에서 제안한 광량변조 변위 측정법의 실험장치 개념도이다. 상기한 광량변조 방식 변위 측정기의 치명적인 단점인 보정이 늘 필요로 한다는 문제점을 극복하기 위해서 네 개의 광섬유를 다발(bundle)로 제작하였다.

그림에서와 같이 새로운 보상법을 적용한 광량변조방식의 변위 센서는 크게 광섬유 다발로 이루어진 프로브, 광원부, 반사된 광의 수광부 등 세 부분으로 나누어져 있다. 각 부분을 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

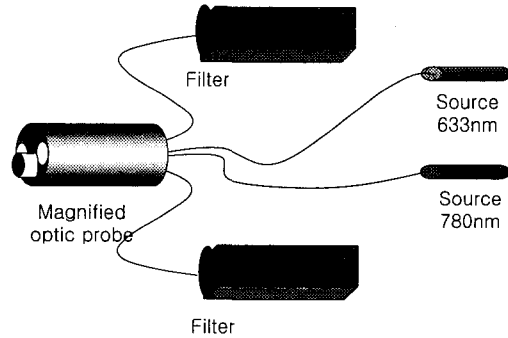


Fig. 3 Basic experiment set-up of the new compensation method

첫째 광원부, 새로운 보상법을 적용하기 위해서 두개의 레이저 광원을 사용하였다. 하나는 파장 633nm 를 갖는 He-Ne 레이저로 파워는 5mW 이고, 다른 하나는 파장 780nm 를 갖는 파워 5mW 의 반도체 레이저다. 두 개의 광원은 각각 접속렌즈를 통해서 광섬유에 집속된다.

둘째 광학프로브, 두 개의 광원을 조사하기 위한 두 개의 광섬유와 이를 각각 두 개의 수광부로 보내기 위한 광섬유 두 개를 포함하여 총 네 개의 광섬유로 구성되어 있다. 새로운 보상법을 적용하기 위해서 633nm 의 광원 조사를 위한 광섬유는 780nm 파장의 광원을 조사하는 광섬유보다 오프셋길이(offset length)만큼 돌출되어 있으며 이 길이의 조정은 추후 측정범위의 조정을 통해서 가능하다.

셋째 수광부, 두 개의 수광소자(photo diode)와 증폭기로 구성되어 데이터를 측정하며 633nm 와 780nm 광원을 분리 수광하기 위하여 수광부 앞에는 각각 700nm 이하 파장과 700nm 이상 파장을 선별하여 수광하는 필터를 장착하였으며 각각 수

광부에서 획득한 결과는 추후 비교를 통하여 변위 측정을 가능하게 해준다.

### 3.2 기본 측정 원리

측정의 기본적인 원리를 설명하기 위하여 변위 센서의 프로브 부분을 확대하여 Fig. 4 에 나타내었다.

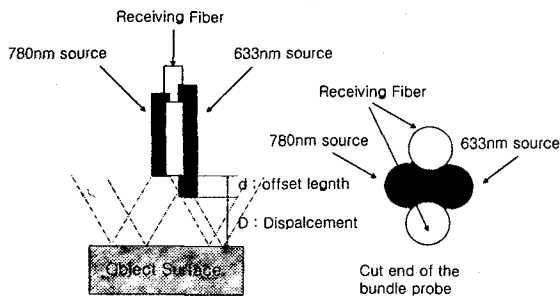


Fig. 4 Basic concept for the compensation method

Fig. 4 에서 보는 것처럼 광섬유를 다발로 묶은 프로브는 네 개의 광섬유로 이루어져 있으며 두 개는 광원 조사용으로 나머지 두 개는 광원 수광용으로 쓰이게 된다.

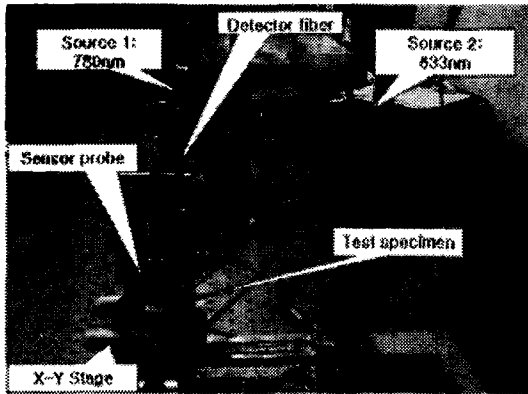


Fig. 5 Experimental setup

광원 조사용 광섬유중 633nm 파장은 프로브에서 음셋길이(offset length : d) 만큼 측정 대상물과의 거리가 가깝게 되어 780nm 파장을 갖는 광원 소자보다 항상 많은 광량이 수광부에 도달하게 된다. Fig. 5 는 실제 구성한 실험장치를 나타낸다.

광섬유는 내부의 코어와 주변을 둘러싼 클래딩의 굴절율의 차이로 인하여 광을 전반사시켜 전달하는 장치로 광섬유 끝단에서의 광의 확산각( $\theta_0$ )은 코어, 클래딩, 진공상태 각각의 굴절률  $n_1, n_2, n_0$ 에 관하여 다음과 같이 결정된다.<sup>(9)</sup>

$$\theta_0 = \sin^{-1}(\sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_0) \quad (1)$$

이러한 원리로 광섬유 끝단에서 확산각( $\theta_0$ )로 발산된 광량의 세기는 광섬유로부터 떨어진 거리의 제곱에 반비례 하는 특성을 갖게 되는데 이러한 원리를 이용하여 물체와의 거리 정보를 나타낼 수 있다.

633nm 파장의 광 섬유가 측정물체까지 거리를 D 라고 할 때, 780nm 의 파장을 조사하는 광섬유의 측정대상물까지 거리는 (D+d)가 되어 반사되어 수광부에 도달하는 광량은 이들 거리의 함수로 나타낼 수 있음을 보여준다. 즉 측정 프로브와 측정 대상물의 거리가 가까워 저서 D 가 줄어들수록 측정광량 함수에서 d 값이 미치는 영향이 커져서 측정된 두 파장의 광량은 측정물과의 거리에 따라서 그 비율이 달라지게 된다.

### 3.3 보상방법

두 개의 광원에서 나오는 입사전 광원의 초기 광량을 파장 633nm 에 해당하는 것을  $I_B$  그리고 파장 780nm 의 것을  $I_R$  로 나타내었다.  $K_1, K_2$  는 각각 광원 조사용과 광원 수광용 파이버의 광손실 계수 그리고  $K_3$ 는 측정물체 표면의 반사효율,  $K_B, K_R$  은 수광소자에 장착된 각 필터의 투과율 이라고 정의하면, 초기에 광원에서 조사되어 조사용 광섬유를 통과한 광원의 광량은 각각  $K_1 I_B, K_1 I_R$  값이 되며  $F_B, F_R$  을 측정물체까지 거리(D)와 음셋길이 (d)로 된 광량의 거리 매개 함수로 나타내면 수광면에서 측정되는 633nm 와 780nm 파장의 측정 광량은 수식 (2)에서와 같이  $Q_B$  와  $Q_R$  로 나타낼 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} Q_B &= K_1 K_2 K_3 K_B I_B F_B \\ Q_R &= K_1 K_2 K_3 K_R I_R F_R \end{aligned} \quad (2)$$

광섬유가 선택되면  $K_1, K_2$  는 상수값이 되며 그 외의 상수값 계수들을  $K = K_B I_B / K_R I_R$  와 같이 대

표상수 K 로 나타내면 광량  $Q_B$  와  $Q_R$  을 비교하여 비율로 나타낸 값  $Q_{B/R}$  을 새로운 광량의 거리 매개함수인  $F_D$  를 이용하여 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{B/R} = \frac{Q_B}{Q_R} = \frac{K_1 K_2 K_3 K_B I_B F_B}{K_1 K_2 K_3 K_R I_R F_R} \quad (3)$$

$$= \frac{K_B I_B}{K_R I_R} \cdot \frac{F_B}{F_R} = K \cdot F_D$$

이렇게 측정된 광량의 비율 Q 는 단지 측정물과 측정프로브 사이의 거리에만 관계된 함수 값임을 알 수 있다.

#### 4. 실험결과 분석

실험의 정확성과 오차요인을 제거하기 위하여  $Q_B$  와  $Q_R$  의 단순 비교량 대신에 두 광량의 차이 값을  $Q_B$  값으로 나눈 새로운 비율식  $(Q_B - Q_R)/Q_B$  을 측정 결과식으로 사용하기로 하였다.

Fig. 4 에서와 같이 읍셋길이(d) 만큼 측정대상물에 가까운 633nm 파장을 갖는 광원은 780nm 파장보다 많은 광량을 수광부에 전달할 수 있다. 측정하려고 하는 비율식  $(Q_B - Q_R)/Q_B$  는 다음과 같은 정형된 형태를 나타내게 된다. 비율식의 결과는 측정물체의 표면 재질과 가공정도에 관계없이 거리에만 관련된 값을 알 수 있다.

측정 비율값  $(Q_B - Q_R)/Q_B$  는 필터의 광투과계수  $K_B, K_R$  을 같은 값으로 선택하고 광섬유 끝단에서 발산된 광량의 세기가 거리의 제곱에 반비례하는 것을 적용하면 식 (4) 로 나타낼 수 있다. 본 실험에 앞서 633nm 프로브의 읍셋길이(d)를 매개 변수로 하여 30μ m 에서 300μ m 까지 변화시켜 컴퓨터 모의 실험을 실시 하였다.

$$Q_{(ratio)} = \frac{Q_B - Q_R}{Q_B} = \left( \frac{I_B F_B - I_R F_R}{I_B F_B} \right) \quad (4)$$

$$\cong \left( \frac{I_B}{D^2} - \frac{I_R}{(D+d)^2} \right) \frac{D^2}{I_B}$$

Fig. 6 에 변위에 따라 예상되는 측정값을 나타내었다. 그리고 Fig. 7 에는 수행된 모의 실험의 결과를 나타낸다. 읍셋길이(d)가 300μ m 에 가까워질수록 측정대상물체와 프로브 사이의 제한된 영

역(0~1000μ m) 범위내에서 결과 비율식  $(Q_B - Q_R)/Q_B$  이 비교적 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있다.

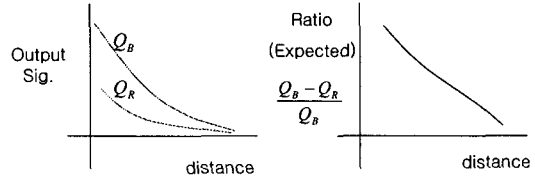


Fig. 6 Expected result of the experimental set-up

컴퓨터 모의 실험을 기초로 하여 633nm 프로브의 읍셋길이를 300μm 로 맞추어 프로브를 제작하여 실험을 진행하였다. 실험에서는 제작된 프로브가 광량변조방식 변위 센서가 갖는 취약점인 표면 반사계수(reflection coefficient)가 다른 여러 물체에 대하여 동일한 변위 정보를 읽어 낼 수 있는지를 검증하기 위하여 R=0.85, 0.63, 0.27 등 세가지 종류의 반사계수를 갖는 측정 대상물을 대상으로 하여 실험을 진행하였으며 결과는 Fig. 8 에 나타내었다.

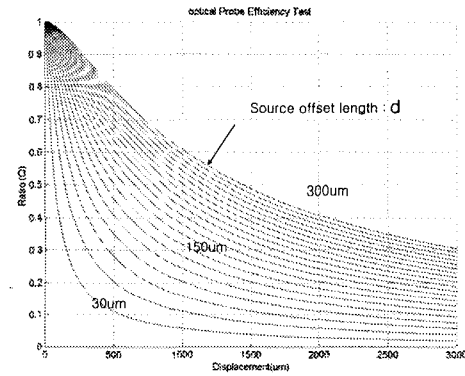


Fig. 7 Computer simulated experiments result

Fig. 8 에서 보는 것과 같이 각기 다른 세 개의 반사계수를 갖는 세 개의 측정 물체에 대하여 500μm 이내의 거리에서 변위를 측정해 보았다. 각기 다른 세 개의 반사계수를 갖는 측정대상물에 대해서 거리별로 측정비율값(Q\_Ratio)을 측정하여 나타냈다.

그래프는 측정을 10 회 실시하여 나타난 평균

결과이다. 오차는 측정 거리가 240  $\mu\text{m}$  일 때 가장 컸으며 이때 반사계수 0.27의 측정물과 반사계수 0.63 측정물의 측정비율( $Q_{\text{Ratio}}$ )값이 약 3.7%의 오차를 나타내었으나 이를 제외한 다른 부분에선 측정 오차 값이 이보다 작은 오차를 나타내어 측정결과가 거의 근접한 모양을 나타내었다. 이는 제안한 변위측정기가 측정대상물의 표면상태에 관계없이 변위만을 특별한 보정 없이도 측정할 수 있음을 나타내는 것이다.

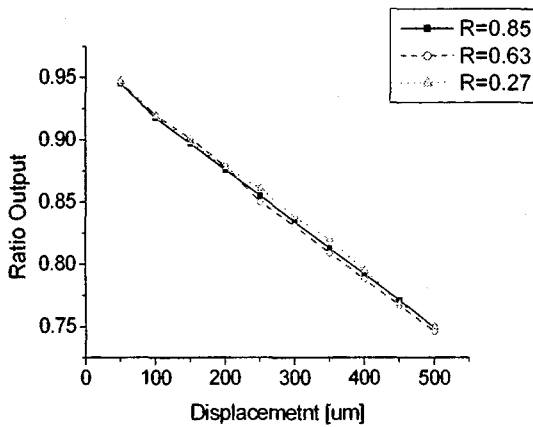


Fig. 8 Result of the real experimental set-up

#### 4. 결론

본 연구에서는 이러한 광량변조 방식의 변위 센서가 갖는 취약점인 보정 문제를 해결하기 위해서 각기 다른 두 개의 파장을 갖는 광원과, 빔 조사용 광섬유에 옵셋길이를 두고 측정한 두 파장을 분리 측정하여 이의 비율을 계산하는 방식으로 보정이 필요로 하지 않는 프로브를 구현하였으며 컴퓨터 모의 실험을 실시 하였다. 완성된 프로브는 측정 시편의 한정된 변위(500 $\mu\text{m}$ )의 범위 내에서 각기 다른 반사계수를 갖는 세 개의 측정 시편에 대해서 동일한 결과를 나타내어 제안된 변위측정기가 측정물체의 표면반사계수와 관계없이 변위 측정이 가능하다는 것을 증명하였다.

#### 참고문헌

1. Ernest O. D., "Measurement System," McGraw-Hill Book co., USA, 1990.

2. Thomas T. R., "Trends in Surface Roughness," *Int. J. Mech. Tools Manufact.*, Vol. 38, pp. 405-411, 1998.
3. Udupa G., M., Sirohi R. S. and Kothiyal M. P., "Characterization of surface topography by confocal microscopy," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 315-329, 2000.
4. Haronian, D., "Displacement sensing using geometrical modulation in reflection mode (GM-RM) of coupled optical waveguides," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol.8, pp. 323-326, 1998.
5. 김승우, "Precision Engineering metrology," 정밀측정공학교재, KAIST, 1995.
6. Murphy P. J. and Coursolle T. P., "Fiber optic displacement sensor employing graded index lens," *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 4, p. 544, 1990.
7. R. Brodmann, G. Rodenstock, and G. Thurn, "An optical instrument for measuring the surface roughness in production control," *Ann. CIRP*, Vol. 33, No. 1, p. 403, 1984.
8. Katsuhoru Lwamoto et al., "Liquid-Level Sensor Optical Fiber," *Appl. Opt.*, Vol. 31, No.1, pp. 51-54, 1992.
9. Kjell J. Gasvik, "Light propagation through optical fibers," *Optical metrology*, Vol. 2, pp. 277-278, 1995.