

비접촉 얇은 투명체의 두께 측정에 관한 기초연구

The Study of Non-contact Thickness Measurement of Thin Transparent Object

홍준희^{1,✉}, 정석규², Simon S. Park³
Jun Hee Hong^{1,✉}, Seok Kyu Jeong² and Simon S. Park³

¹ 충남대학교 기계공학과 BK21 패키트로닉스 사업단 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ.)

² 충남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ.)

³ 캘거리대학교 기계공학과 (Department of Mechanical & Manufacturing Engineering, Univ. of Calgary)

✉ Corresponding author: hongjh@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-5642

Manuscript received: 2009.6.29 / Accepted: 2009.9.6

In this paper, we investigate a new method to measure the thickness of thin transparent objects utilizing a step index multi-mode optical fiber sensor. The method mainly depends on the refraction rate of transparent target, the diameter of optical fibers and the distance to reflector. We confirmed the effects of these parameters through the experimental verification tests. The comparison between the theoretical vs. analytical results shows good agreements with each other. The proposed model also enables users to measure the thickness of thin transparent objects without considering the reflection from the target. This approach provides simple, cost-effective and non-contact solutions to measure the thickness.

Key Words: Optical Fiber Sensor (광섬유 센서), Refraction Rate (반사율), Transparent Target (투명체), Reflector (반사체)

기호설명

d = Distance to reflector
 r_c = Radius of optical fiber
 r_r = Radius of reflected diffusion light
 S = Gap between transmitting and receiving fiber
 t = Thickness of transparent target
 α = Diffusion angle
 β = Refracting angle

1. 서론

사람의 눈은 녹내장을 앓게 되면 안구의 내압이 정상적인 사람에 비해 증가하게 된다. 이러한 안구의 내압의 증가로 각막의 두께에 변화가 일어난다. 즉, 녹내장이 심하게 되면 각막의 두께가 내

압으로 정상적인 때보다 얇아지게 되므로 시신경의 손상을 일으킬 수 있어 실명으로 이어질 수 있다. 따라서 녹내장의 징후를 미리 검진할 수 있으면 녹내장의 치료에 많은 도움을 줄 수 있다. 녹내장의 검진을 위해 사용해 왔던 Tonometer는 눈에 진동을 주어 정상적인 사람의 진동에 대해 변화의 양을 측정하는 것^{1,3}으로 대부분이 접촉식으로 눈병을 전염시킬 수 있는 문제점과 정확성에서 떨어지며 휴대하기가 어려우며 매우 비싸다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 비접촉식의 측정이 필요하며 가격이 저렴하고 휴대가 간편하며 정확성을 가지고 있어야 한다. 이러한 문제점을 상당 부분 해결해 줄 수 있는 측정 방법으로 광섬유를 이용한 측정 방법이 유용할 것으로 판단한다.

지금까지 투명체의 두께에 대한 연구는 레이저

광 간섭에 의한 것이 있으며 최근에는 1~2 μm 의 반투명 필름의 두께 측정에 LASER Interferometry 를 이용하여 측정된 것이 ⁴ 있을 뿐 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구는 광섬유 센서를 이용하여 두께가 0.5mm 정도인 각막의 두께 변화를 비접촉 형태이고 휴대하기 편리하며 정밀하게 측정 가능한 측정기를 만드는 것을 궁극적인 목적으로 하고 있다. 이번 논문에서는 그의 기초 연구로서 눈이나 투명체 코팅과 같은 측정물을 대상으로 광섬유를 이용한 투명체 측정 모델링을 새로이 제안 하였으며 실험적 검증을 통해 얇은 투명체 두께의 측정 가능성을 확인하였다.

2. 투명체의 두께검출 모델링 및 이론적 해석

2.1 투명체의 두께검출 해석 모델링

투명체에 대한 광섬유 센서에서의 빛의 굴절 및 반사 모양을 보면 Fig. 1 과 같다. 투명체 표면에서 미량의 반사가 있으며 대부분은 반사체에서 반사된다.

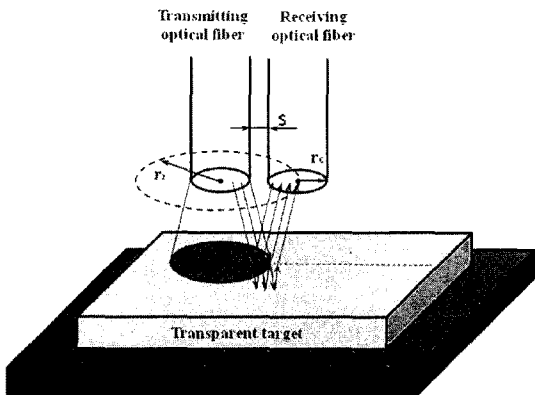


Fig. 1 The schematic of fiber optic sensing for transparent target

Fig. 1 에서 투명체 표면의 반사량은 재질에 따라 다르므로 재질에 따라 보정하면 되므로 본 논문에서는 두께 검출 해석 모델링을 투명체에 대해서 반사량이 없는 것으로 가정하여 Fig. 2 와 같이 기하광학적으로 하였다. Fig. 2 는 얇은 두께를 가진 투명체 표면에 투광섬유를 수직으로 빛을 조사해서 반사되는 빛을 수광섬유로 검출하는 모습을 2 차원적으로 모델링한 것이다. 그림에서 반사체와 광섬유 센서 끝 단까지의 거리를 일정하게 놓으면

투명체의 두께에 따라 굴절되어 반사체로부터 반사되는 빛의 양이 변하므로 반사광 조사영역이 변하며 이를 도식적으로 나타낸 것이 Fig. 3 이다. 여기서 중요한 변수는 투광섬유의 방사각, 투명체의 굴절각, 광섬유 사이의 간격, 검출물의 두께 및 수광섬유의 직경이 된다. 이 모델은 광 강도 변조방식 ^{5,6} 에서 변위를 일정하게 놓고 중간의 투명체에 의한 반사 빛의 변화를 투명체의 두께와 대응시키는 방법이다.

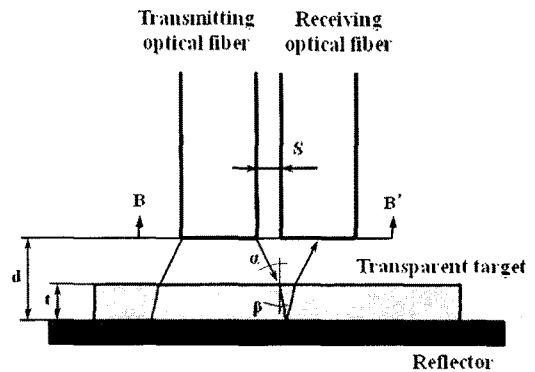


Fig. 2 The model of the thickness measurement for the thin transparent target

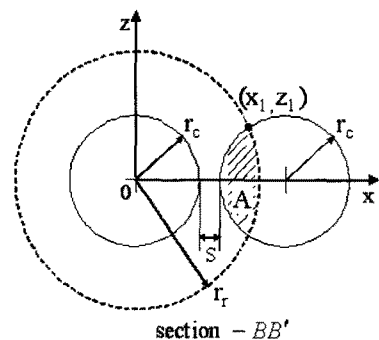


Fig. 3 Light distribution of transmitting and receiving optical fiber probe end section

2.2 투명체의 두께 검출 이론식

Fig. 3 을 토대로 반사광의 조사 면적은 기하광학 해석을 통해 구할 수 있다. 관계변수로는 반사체까지의 거리 d , 수광 섬유 코어반경 r_c , 두 광섬유 사이의 간격 S 그리고 광섬유의 최대 한계 방사각 α 에 의해 결정된다. α 는 선정된 광섬유의 개구수(NA)를 통해 결정된다. 두께 t 인 투명체와 대

기(air) 사이의 굴절각 β 역시 스넬의 법칙에 의해 결정된다. 반사면을 전반사면으로 가정할 경우 반사광 조사영역의 반경 r_r 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$r_r = r_c + 2(d-t)\tan\alpha + 2t\tan\beta \quad (1)$$

광섬유단면과 반사면 사이의 거리 및 투명체의 두께가 커짐에 따라 반사광의 반경이 점점 커지다가 수광섬유 최외곽 경계에 일치하는 경우의 r_r 은 $3r_c + S$ 이다. 이 의미는 광섬유단면과 반사면 사이 거리 d 및 투명체 두께 t 가 더 커지더라도 반사광의 조사영역이 수광섬유 단면을 이미 모두 포함한 상태이기 때문에 수광섬유로 입사되는 반사광의 광량이 더 이상 증가하지 않는 시점이 된다.

따라서 r_r 크기에 따른 조사 영역 A 크기는 다음 식과 같다.

$r_r \leq 3r_c + S$ 일 때,

$$A = 2 \int_0^{r_1} \int_{r_c+S-\sqrt{r_c^2-z^2}}^{\sqrt{r_r^2-z^2}} dx dz \quad (2)$$

$r_r > 3r_c + S$ 일 때

$$A = \pi r_c^2 \quad (3)$$

앞서 언급한 바와 같이 수광 섬유 내로 입사되는 광속의 크기는 Fig. 3에서 빛금 친 영역인 수광 섬유 끝 단면상의 반사광 조사영역 면적 A 와 그 영역 내의 방사조도의 곱으로 유추할 수 있다. 반사광의 조도분포가 일정크기로 분포한다고 가정할 경우 반사거리에 따른 조도크기 E_r 은 다음 식에 의해 결정된다.

$$E_r = \frac{r_c^2}{r_r^2} E_t \quad (4)$$

여기서 E_t 는 투광섬유로부터 방사되는 조도크기를 의미한다.

결과적으로 수광 섬유 입사 광속 Φ_r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_r = AE_r \quad (5)$$

2.3 투명체의 두께 검출 시뮬레이션

센서에서 중요한 정적 특성의 하나가 직선성을 가져야 한다. 한편 반사체와 센서 프로브 끝 단까지의 거리가 일정 해야 하는 센싱 형태이므로 반사체와 센서 프로브 끝 단까지의 거리를 최적으로 하기 위한 시뮬레이션이 필요하다

투명체의 굴절각은 스넬의 법칙에 의해 구한다. 즉, 광섬유의 방사 임계각 α 는 실험을 통해 알아본 결과 20° 이었으며 투명체(광학유리; CaF2)의 반사율 n_2 를 1.399(제조사 제공), 공기의 굴절률 n_1 을 1로 하면 투명체의 굴절각 β 는 다음과 같다.

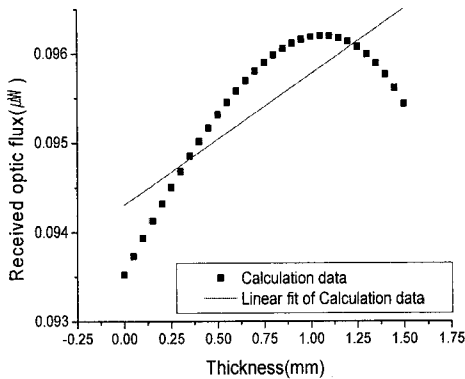
$$\sin\beta = \frac{n_2}{n_1} \sin\alpha = \frac{1.00}{1.399} \sin 20^\circ = 0.24453$$

$$\therefore \beta \approx 14^\circ$$

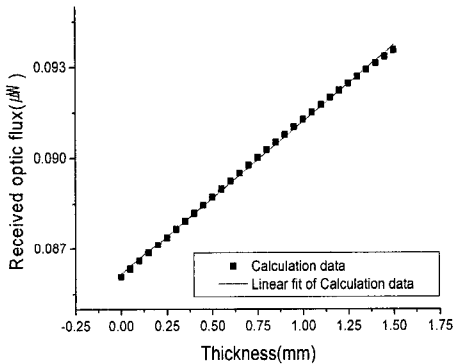
따라서 해석 시뮬레이션에 적용된 관련 변수는 실제로 두께검출 실험에 사용할 광섬유 센서와 투명체에 대한 것으로 Table 1과 같다.

Table 1 Variables in analysis simulation

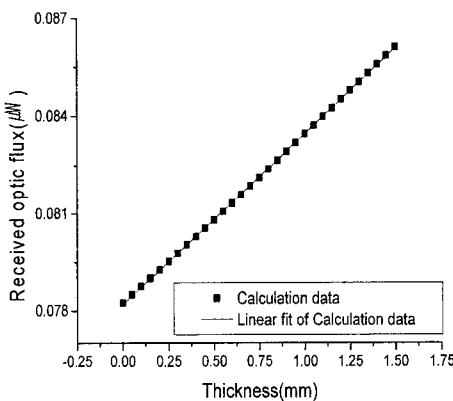
Variables		Size	Unit
Optical fiber	Core radius (r_c)	0.5	mm
	Limit diffusion angle (α)	20	degree
	Gap between two fibers (S)	0.01	mm
	Intensity of illumination in radiation (E_t)	1	lx
Transparent target	Refraction angle (β)	14	degree



(a) Distance 1.6mm



(b) Distance 2.0mm



(c) Distance 2.5mm

Fig. 4 The relation between distance and out put

이 시뮬레이션 결과가 Fig. 4 이다. 이 결과에 따르면 센서 프로브 끝 단과 반사판 사이의 거리가 2mm 부터 3mm 사이에서 좋은 직선성을 나타냈으나 그 가운데 2.5mm 의 경우가 가장 표준편차가 작고 기울기가 좋은 것을 확인하였다. 따라서 실험에서는 이 거리를 적정거리로 설정하고 실험을 행하기로 하였다.

3. 실험 및 고찰

3.1 측정 시스템의 구성

3.1.1 측정 대상물

측정 대상물은 투명체로 굴절률을 알 수 있는 영국 Crysran 의 광학 유리(CaF₂)를 대상으로 하였다. 광학유리는 0.5mm 와 1mm 두께를 가진 것으로 제품 사양을 간단히 정리한 것이 Table 2 이다.

Table 2 Specification of optical glass

Product name	Refractive index	Reflection loss	Transmission Range
Calcium Fluoride (CaF ₂)	1.399	5.4%	0.13~10 μm

3.1.2 광섬유 센서 프로브 및 광원

광섬유 센서 프로브는 멀티모드 플라스틱 광섬유로 Autronics 사의 FD-620-10 을 사용하였다. 코어 직경이 1mm 이고 광의 최대 퍼짐각이 20° 이다. Fig. 5 는 광섬유 센서 프로브의 개략도를 나타낸 것이다.

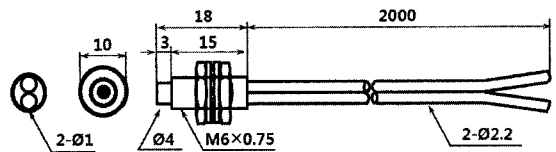


Fig. 5 Schematic of optical fiber probe

광원은 LANICS 의 반도체 레이저(파장; 655nm) LM-6506NG 를 사용했다.

3.1.3 광파워미터

검출 광을 측정할 수 있는 광파워 미터는 Thorlab 의 S110 & S120A 모델을 사용하였다. 이것의 사양에 대해 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Specification of optical power meter

Spectra range	Optical power range	Resolution	Measurement uncertainty
400~1100nm	20nW~10mW	3.5nW	+/-5%

3.1.4 측정 시스템

Fig. 6 은 광섬유 센싱 시스템의 개략도를 나타

낸 것이다. 측정시스템은 광원(LD)으로부터 나온 빛이 투광섬유를 통과하여 반사판 위에 놓여진 투명체(광학유리)에 조사되며 이 빛은 굴절하여 반사판에 닿고 반사되어 투명체를 다시 통과하여 수광섬유로 입사된 빛은 광과워 미터에 의해 출력 파워가 검출되는 시스템으로 구성되었다. Fig. 7 은 실험시스템의 사진이다.

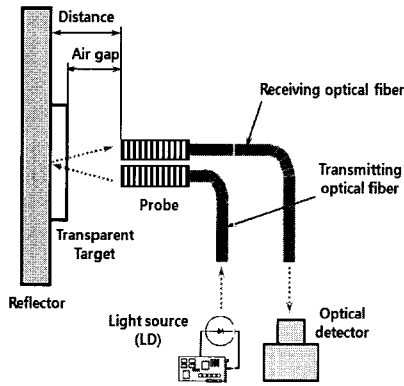


Fig. 6 Schematic of optical fiber sensing system

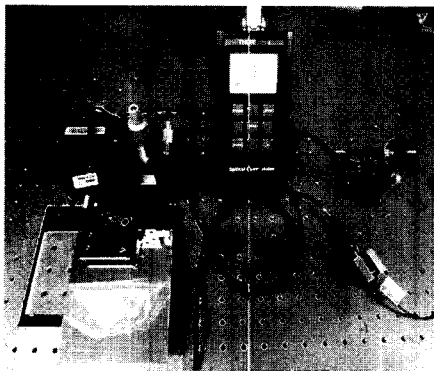


Fig. 7 Photograph of experimental system

3.2 실험 결과 및 고찰

실험은 시뮬레이션에서 얻은 센서 프로브 끝단과 반사판 사이의 최적 검출 거리인 2.5mm 를 유지한 채 각각 두께 0.5mm 와 1.0mm 의 광학유리에 대해 x, y 스테이지를 움직이면서 10 번씩 측정 한 결과를 Table 4 에 나타내었다. 또한 반사판 대신에 반투명한 반사판 위에 투명체의 측정물이 올려 있을 경우도 어떠한 결과가 검출 되는지를 알기 위해 반사판 위에 반투명한 습자지를 올려놓고 x, y 스테이지를 움직이면서 10 번씩 측정 한 결과를 Table 5 에 나타내었다.

Table 4 Experimental results on the reflector

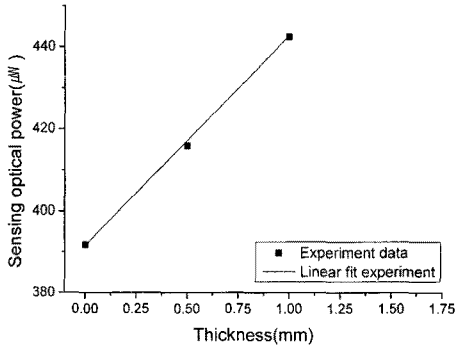
Ex. No.	Thickness(mm)		
	0.0	0.5	1.0
1	392	418	444
2	392	412	447
3	392	417	440
4	391	414	444
5	390	418	441
6	392	415	443
7	392	416	441
8	392	414	443
9	392	417	439
10	393	418	442
Average	352.50	374.15	398.30

Table 5 Experimental results on the translucent paper

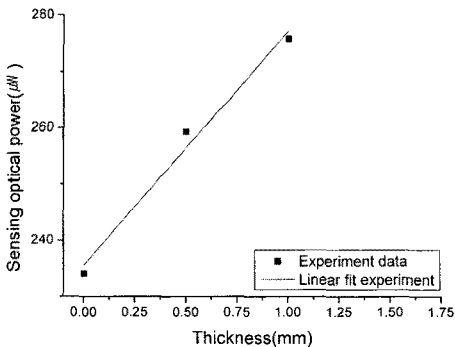
Ex. No.	Thickness(mm)		
	0.0	0.5	1.0
1	234	260	278
2	231	263	273
3	232	260	279
4	237	254	275
5	232	256	275
6	231	260	273
7	238	261	276
8	233	257	279
9	234	262	274
10	239	260	276
Average	210.20	233.35	248.30

Fig. 8(a)는 반사면 위에 투명체의 측정대상물을 올려놓고 투명체의 두께를 측정한 결과와 이에 대해 커브피팅한 직선을 나타낸 것이었으며, Fig. 8(b)는 반투명한 습자지 위에 투명체의 측정대상물을 올려놓고 투명체의 두께를 측정한 결과와 이에 대해 커브피팅 한 직선을 나타낸 것이다. 10 번의 측정 평균값에 대한 커브피팅 기울기는 반사체 위의 경우 51.03 이고 반투명체 위의 경우는 41.7 이었으며 표준편차는 반사체 위의 경우 0.36%이고 반투명체 위의 경우는 3.24%이었다. 이 결과를 보면 반사광량은 반투명체 위에 투명체의 측정대상물을 올려놓고 한 것이 반사체 위에 올려놓고 한 것보다 표준편차가 떨어지지만 충분히 측정 가능하다는 것을 알 수 있었으며 더 많은 실험에 의해 보

정을 행하면 여러 종류의 반사체 위에 투명체의 측정대상물이 놓여 있을 경우 투명체의 두께를 측정할 수 있다는 것을 확인했다.



(a) On the reflector



(b) On the translucent paper

Fig. 8 Experiment results and curve fitting

한편, 반사면 위에 투명체의 측정대상물을 올려놓고 투명체의 두께를 측정한 실험 결과치와 이론에 의해 시뮬레이션 한 결과치를 비교한 것이 Table 6 이다. 여기서 이론치는 투명체를 올려 놓지 않은 경우의 실험치를 기준으로 보정을 한 것이다. 이 결과로부터 이론적으로 고찰한 두께에 따른 결과치와 실험적으로 나온 결과치가 최대 24.1 의 차이를 나타냈다. 이 차이의 경우는 이론적 모델에서 완전 투명체로 가정하여 투명체로부터의 반사광이 없는 것으로 간주하였기 때문으로 사료된다. 실제로 광학유리의 경우 Table 2 에서 알 수 있듯이 투명체의 두께가 1mm 인 경우 투명체의 반사량을 고려하지 않은 이론치와의 차이가 5.44%이었다. 이 차이를 분석하면 측정 시스템에서 반사체까지의 거리가 2.5mm 이고 투명체의 두께가 1mm 이므로 반사체까지의 거리를 1.5mm 로 하여 반사체로

부터의 출력량을 검출한 결과 455.5μW 가 나왔으며 이것의 5.4%(광학유리의 반사율)는 24.597μW 가 되므로 Table 6 에서 이론치와 실험치와의 차이가 1mm 인 경우 24.1μW 인 것을 감안하면 이론치와 차이가 거의 나지 않는 것을 알 수 있다. 두께가 0.5mm 인 경우는 투명체로부터의 반사광의 일부가 센서의 구조상 수광섬유로 모두 수광되는 것이 아니므로 이론치와의 차이가 5.4%보다 작게 나왔다고 판단할 수 있다.

결과적으로 본 논문에서 제안한 광섬유 센서 이용 투명체 두께 측정 모델은 투명체의 반사에 의한 영향은 생각하지 않았지만 충분히 투명체 두께의 측정에 유용하다는 것을 입증하였다.

Table 6 The error of two average results

Thickness (mm)	Theoretical results(μW)	Experiment results(μW)	Error (%)
0.0	392	391.8	0.00
0.5	405.1	415.9	2.61
1.0	418.3	442.4	5.44

4. 결론

투명체의 두께 측정에 광섬유 센서를 이용하는 방법을 제안하고 이의 유효성을 입증하기 위해 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 광섬유 센서를 이용한 투명체의 두께 측정에 대한 모델링과 이론식을 정립하였다.
- 2) 실험한 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 제안한 광섬유 센서 이용 투명체 두께 측정 모델은 투명체의 반사에 의한 영향은 생각하지 않았지만 충분히 투명체 두께의 측정에 유용하다는 것을 입증하였다.
- 3) 광섬유 센서에 의한 투명체의 두께 측정이 간단히 이루어질 수 있으므로 투명체 측정 장치의 간소화와 간편함을 줄 수 있다.
- 4) 반투명체 반사면 위에 투명체가 놓여 있는 경우도 광섬유 센서를 이용하여 충분히 반투명체 투명체 두께를 측정할 수 있음을 입증하였다.

참고문헌

1. Ehlers, N., Bramsen, T. and Sperling, S., "Applanation tonometry and central corneal thickness," Acta

- Ophthalmologica, Vol. 53, No. 1, pp. 34-43, 1975.
2. Stahl, J. and Vold, S., "Effect of corneal thickness on the accuracy of intraocular pressure measurement in rabbits after excimer laser photoablation," *Journal of Cartaract and Refractive Surgery*, Vol. 26, No. 5, pp. 736-743, 2000.
 3. Alam, S. K., Richards, D. W. and Parker, K. J., "Detection of Intraocular Pressure Change in a Human eye Model using Sonoelastic Doppler Ultrasound," *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 1057-1060, 1992.
 4. Conroy, M., "Advances in thick and thin film analysis using interferometry," *Wear*, Vol. 266, No. 5-6, pp. 502-506, 2009.
 5. Hong, J. H. and Shin, W. C., "Design Model of Intensity Modulation Type Displacement sensor Using Step-index Multimode Optical Fiber," *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 17, No. 6, pp. 500-506, 2006.
 6. Lee, K. S., Hong, J. H. and Shin, W. C., "Development of Optical Fiber Displacement Sensor for Non-contact Vibration Measurement in the High Speed Rotation System," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 8, pp. 50-56, 2005.