

스텝 인덱스 멀티모드 광섬유의 투광 조도분포 모델링

신우철 · 홍준희[†]

충남대학교 기계공학과

☎ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

(2006년 2월 3일 받음, 2006년 3월 28일 수정본 받음)

광강도 변조방식 광섬유 센서의 변위응답해석에 필요한 투광 조도분포를 수학적으로 모델링 하였다. 유도된 조도분포 모델은 스텝 인덱스 멀티모드 광섬유를 대상으로 하며 실험적 검증을 통해 타당성을 확인하였다. 검증된 조도분포 모델을 적용하여 얻은 광섬유 센서의 변위응답 해석결과를 변위측정 결과와 비교하여 거의 일치함을 확인하였다. 또한 기존의 가우시안 조도분포 모델을 적용한 해석결과와 비교했을 때 제안한 조도분포 모델이 보다 정확한 결과를 나타냄을 보이고 있다.

주제어 : Step index multimode optical fiber, Transmitting light, Irradiance distribution, Optical fiber sensor.

I. 서 론

광을 매개체로 하는 변위측정 방식 중 광섬유를 이용한 광강도 변조방식은 타방식에 비해 구조가 간단하고, 측정 프로브가 작고 경량이며 신호처리가 용이한 장점을 지니고 있다. 또한 주파수 응답특성이 대체로 양호하고 전자파 방해(EMI) 잡음에 강인하여 일반적으로 미소 변위 및 진동 측정, 미세 구조형상 검출 등에 적용되고 있다.^[1,2] 구체적인 예를 든다면 질량측정을 목적으로 질량에 따른 스프링 변형량 측정에 적용한 연구,^[3] 하드디스크 드라이브 헤드와 같은 소형경량 부품의 모달(modal) 해석에 적용한 연구,^[4] 초음파로 구동되는 의료기구나 용접장치의 진동측정에 적용한 연구,^[5] 자기 베어링으로 지지되는 고속주축의 회전상태 모니터링에 적용한 연구,^[6] 암나사의 나사산 검사용으로 나사구멍에 들어 갈 만한 소형 프로브를 제작하여 적용한 연구^[7] 등이 있다.

광강도 변조방식 변위측정의 기본원리는 일정한 빛이 투광 섬유를 통해 측정면에 조사되면 사이거리에 따라 인접위치의 수광섬유로 입사되는 반사광속 크기변화를 검출하는 방식이다. 이때 수광섬유 입사 반사광속의 크기는 수광섬유 끝단면상의 반사광 조사면적과 그 면적내의 반사광 조도분포를 통해 유추할 수 있다.^[8] 이때 반사광 조사면적은 측정면을 전반사면으로 가정하면 기하광학적 해석으로 비교적 쉽게 구할 수 있으나 반사광의 조도분포는 광섬유로부터 방사되는 빛의 거동에 대한 구체적인 해석이 요구된다.

이 광섬유의 투광 조도분포에 대한 기존연구를 살펴보면 싱글모드 광섬유의 경우 대부분 가우시안 분포로 해석된다.^[1,9] 멀티모드 광섬유 중 스텝 인덱스를 갖는 경우 광섬유 투광빔의 2차원 기하광학적 해석에 의한 연구^[8,10]와 가우시안 수식 형태의 실험식을 제시한 연구^[2] 예가 있다. 이들 연구결과들

은 각각 2차원적 해석으로 인한 오류와 근접거리에서 상대적으로 큰 오차를 수반하고 있음을 볼 수 있다.

본 연구는 스텝 인덱스 멀티모드 광섬유를 이용하여 광섬유 변위센서를 설계하고자 할 때 이론적으로 변위 응답특성을 예측할 수 있는 설계모델 유도에 궁극적인 목적을 두고 있다. 이를 위해선 광섬유로부터 나오는 빛의 거리별 조도분포 해석이 필요한데 기존의 가우시안 분포 해석결과를 적용하게 되면 근접거리 영역에서 다소 큰 오차가 나타난다. 본 논문은 이 문제를 해결하고자 측광학적 해석을 토대로 광섬유 투광 조도분포에 대한 새로운 수학적 모델을 유도하고 검증하였다. 그리고 검증된 조도분포 모델을 광섬유 변위센서의 변위응답 해석에 적용하여 그 결과의 타당성을 확인하였다.

II. 변위측정 원리

그림 1은 광강도 변조방식 광섬유 센서의 변위측정 원리를 보여주고 있다. 고유한계 방사각 α 를 갖는 투광섬유로부터 나오는 빛이 측정면에 조사될 때 그 반사광 중 일부는 인접한 수광섬유 끝단면상에 조사된다. 측정면을 전반사면으로 가정할 때 반사광 조사면적(그림에서 빛금 친 영역) A는 기하광학적 해석에 의해 다음 식들로 나타낼 수 있다.

$$r_r = r_c + 2D \tan\alpha \quad (1)$$

$$A = 2 \int_0^{z_1} \int_{2r_c + S - \sqrt{r_c^2 - z^2}}^{\sqrt{r_c^2 - z^2}} dx dz \quad (2)$$

이때 수광섬유로 입사되는 반사광속 ϕ_r 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 E는 A영역 내에 분포된 조도를 의미한다.

$$\phi_r = \int_A E dA \quad (3)$$

[†] E-mail: hongjih@cnu.ac.kr

결국 ϕ_r 을 구하기 위해서는 E에 대한 해석이 필요하다.

제조조건을 고려하고 있다.

III. 투광 조도분포 모델

광섬유로부터 방사되는 빛의 조도분포 모델링에서 다음 전

- (1) 광섬유의 끝단면은 광섬유 축에 수직하다.
- (2) 코어단면상의 굽힘이나 오물로 인한 방사의 영향과 회절은 고려하지 않는다.
- (3) 광섬유로부터 나온 빛의 조도분포는 광섬유 축을 중심으로 대칭구조를 갖는다.
- (4) 스텝 인덱스 멀티모드 광섬유를 대상으로 하며 방사발산도(radiant exitance)는 코어단면상에 일정한 분포를 갖는다.
- (5) 광섬유로부터 나오는 빛은 코어와 클래드의 굴절률로 정해지는 한계 방사각 이내로 방사된다.

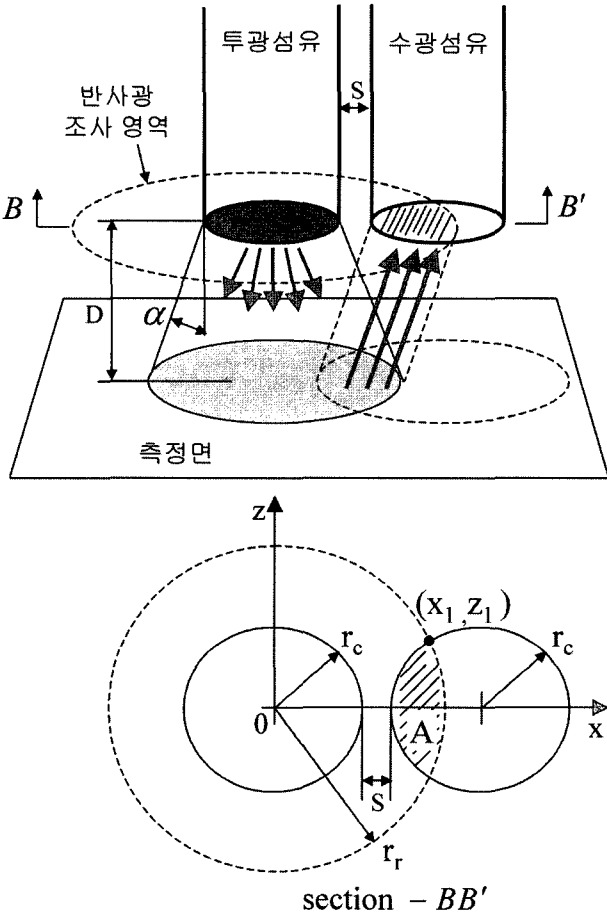


그림 1. 광강도 변조방식 변위측정 원리.

전제조건 (4), (5)를 기반으로 본 논문에서 제안하는 조도분포 모델의 기본개념은 그림 2(a)와 같이 투광섬유 끝단면의 미소면적 Δa 로부터 균일한 강도분포를 이루는 빔들이 광섬유 한계 방사각 α 이하로 방사되는 형상에 기인한다. 이 형상을 단면 전영역으로 확장했을 때 형성되는 방사빔들의 분포를 토대로 그림 2(b)는 상평면(image plane)에 조사되는 빔들 중 미소면적 ΔA 를 지나는 빔들의 구성이 원뿔 형태를 이룸을 보여주고 있다. 그리고 그 빔들을 방사하는 코어단면상의 영역은 반경 r_α 의 원형영역을 이루고 있다.

따라서 광섬유 끝단면상의 미소면적 Δa 의 방사휘도(luminance)와 그것에 의한 상평면상 미소면적 ΔA 의 방사조도(irradiance) 해석을 기반으로 광섬유 투광 조사영역 내 위치별 조도분포를 모델링 하였다.

Δa 의 방사휘도 L은 다음과 같이 정리할 수 있다. 먼저 그림 3에 도식된 Δa 의 θ 위치 방사강도(radiant intensity) ΔI_θ 은 다음식과 같다.

$$\Delta I_\theta = L \Delta a \cos \theta \tag{4}$$

Δa 에서 l만큼 떨어지고 $d\theta$ 에 해당하는 영역(그림에서 빛금 친 부분)의 입체각 $d\omega$ 는 다음식과 같다.

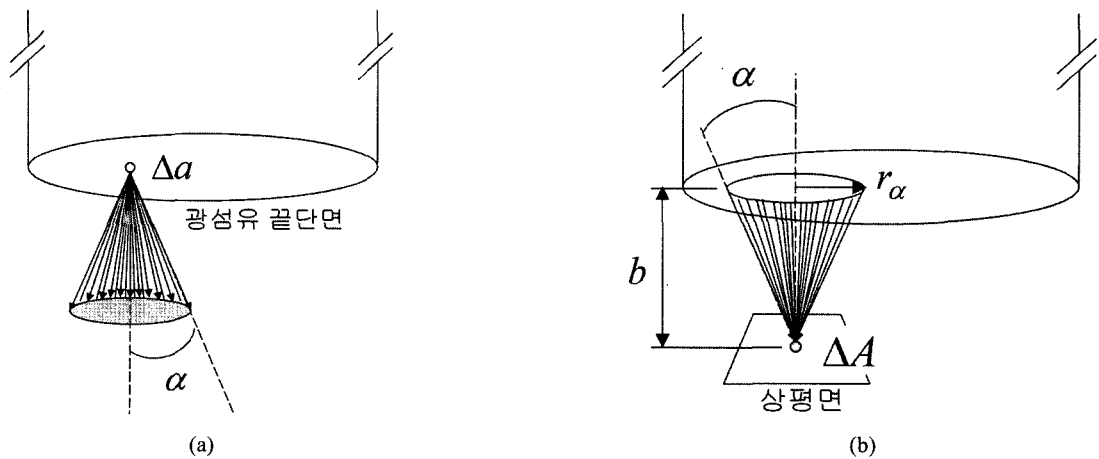


그림 2. 투광 조도분포 모델링 기본개념.

$$d\omega = 2\pi \sin\theta d\theta \quad (5)$$

따라서 Δa 의 $d\theta$ 영역의 방사속 $\Delta\Phi_\theta$ 은 다음과 같다.

$$\Delta\Phi_\theta = (L \Delta a \cos\theta)(2\pi \sin\theta d\theta) \quad (6)$$

Δa 의 총 방사속 $\Delta\Phi$ 은 위 식을 $0^\circ \sim \alpha$ 영역에 대해 적분하여 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\Delta\Phi = \frac{\pi L \Delta a}{2} (1 - \cos 2\alpha) \quad (7)$$

Δa 의 방사발산도 M 은 광원의 단위 면적당 방사속으로서 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{\Delta\Phi}{\Delta a} = \frac{\pi L}{2} (1 - \cos 2\alpha) \quad (8)$$

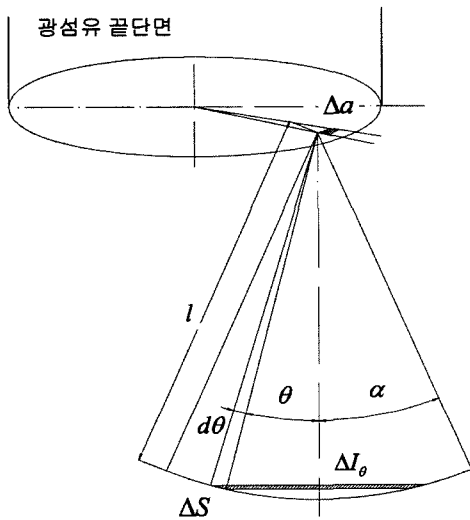


그림 3. 광섬유 끝단면 미소면적 방사휘도.

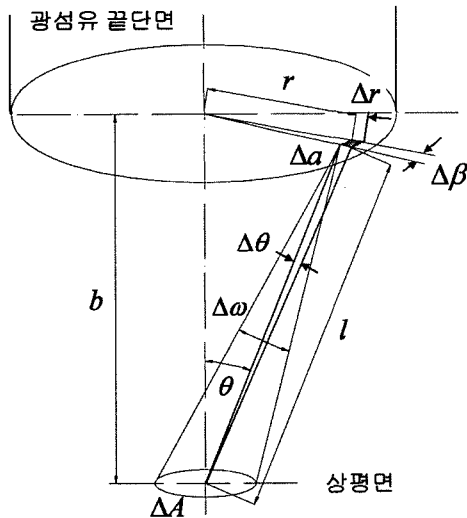


그림 4. 광섬유 끝단면 미소면적에 의한 상평면 미소면적 방사조도.

따라서 방사휘도 L 은 다음식으로 정리된다.

$$L = \frac{2M}{\pi(1 - \cos 2\alpha)} \quad (9)$$

전제조건에서 코어 끝단면상 일정한 방사발산도를 가정하였으므로 위 식을 통해 방사휘도 역시 일정함 알 수 있다.

그다음, Δa 에 의한 ΔA 의 방사조도는 다음과 같이 정리된다. 그림 4에 도식된 것처럼 Δa 와 평행거리 b 만큼 떨어진 상평면의 ΔA 에 조사되는 방사속 $\Delta\Phi'$ 은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\Phi' = \Delta I_\theta \Delta\omega = \frac{\Delta I_\theta \Delta A \cos\theta}{l^2} \quad (10)$$

위식에 식 (4)를 대입하면 Δa 에 의한 ΔA 의 방사조도 ΔE 는 다음과 같다.

$$\Delta E = \frac{\Delta\Phi'}{\Delta A} = \frac{L \Delta a \cos^2\theta}{l^2} \quad (11)$$

또한 $l = b/\cos\theta$, $r = b\tan\theta$, $\Delta r = b\sec^2\theta \Delta\theta$, $\Delta a = r \Delta r \Delta\phi$ 에 의해 다음 식으로도 나타낼 수 있다.

$$\Delta E = \frac{L \sin 2\theta}{2} \Delta\beta \Delta\theta \quad (12)$$

Δa 를 광섬유 끝단면 전영역으로 확장했을 때 ΔA 의 방사조도는 그림 2(b)에 보인 끝단면상 해당영역에 대해 ΔE 를 적분함으로써 구할 수 있다. 이 적분영역은 투광영역 내 ΔA 의 위치에 따라 형태가 변하므로 그림 5와 같이 세 구간으로 나누어 각각 방사조도 모델 식을 유도하였다.

그림 6은 광섬유 투광영역(I)과 그에 속한 ΔA 의 위치(x_p, y_p)에 대한 적분영역을 나타내고 있다. 이 구간 적분영역의 특징은 그림 2(b)에 보인 반경 r_α 의 원형영역이 광섬유 끝단 코어단면에 반드시 포함되는 점이다. 따라서 영역에 속한 ΔA

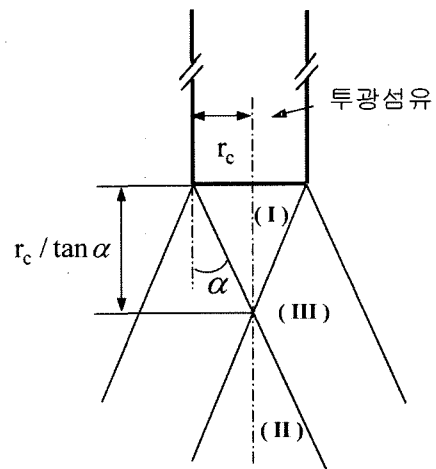


그림 5. 광섬유 투광 조도분포 모델링 영역구분.

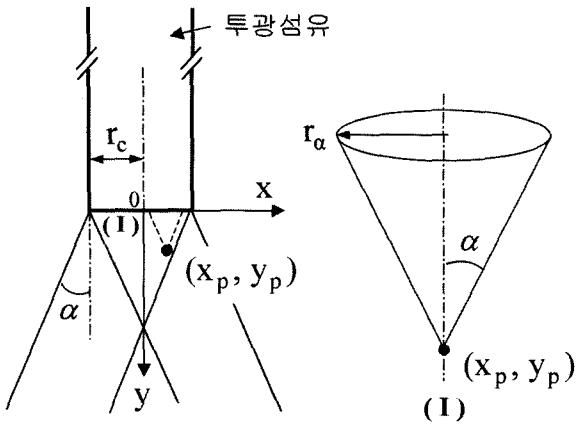


그림 6. 광섬유 투광 영역(I)의 조도분포 모델.

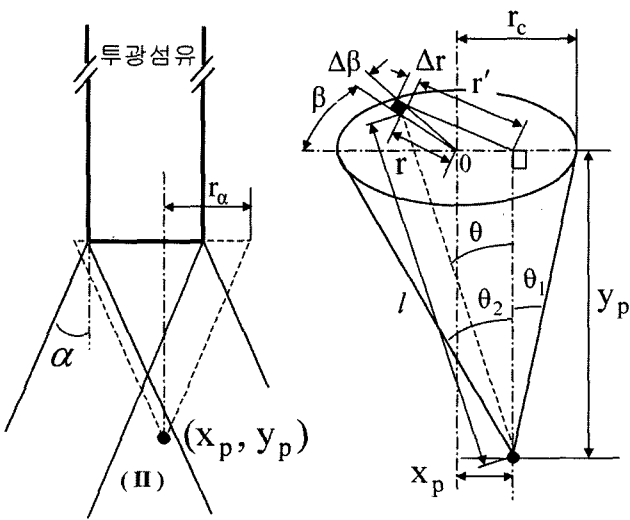


그림 7. 광섬유 투광 영역(II)의 조도분포 모델.

의 방사조도 크기는 식 (12)을 해당 적분영역에 대해 적분함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_I = \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \frac{L \sin 2\theta}{2} d\beta d\theta = \frac{L\pi}{2} [1 - \cos(2\alpha)] \quad (13)$$

여기에 식 (9)을 대입하면 다음 식으로 정리된다.

$$E_I = M \quad (14)$$

즉, 광섬유 투광영역(I)의 방사조도는 일정하며 그 크기는 방사발산도와 같음을 보이고 있다.

그림 7은 광섬유 투광영역(II)와 그에 속한 ΔA 의 위치 (x_p, y_p) 에 대한 적분영역을 나타내고 있다. 이 구간 적분영역 특징은 그림 2(b)에 보인 반경 r_α 의 원형영역이 광섬유 끝단 코어단면을 반드시 포함하는 점이다. 즉 이 구간 ΔA 을 지나는 빔은 코어단면적 전영역에서 방사된다.

식 (11)에 $\Delta a = r \Delta r \Delta \phi$, $\cos \theta = \frac{y_p}{l}$, $l = \sqrt{r'^2 + y_p^2}$ 관계를

적용하여 다음과 같이 ΔE 를 나타낼 수 있다.

$$\Delta E = \frac{L y_p^2 r \Delta r \Delta \beta}{(r'^2 + y_p^2)^2} \quad (15)$$

위 식을 적분영역이 되는 코어 끝단면 전영역으로 적분하면 투광영역(II)내 (x_p, y_p) 위치에서 ΔA 의 방사조도는 다음 식과 같다.

$$E_{II} = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_c} \frac{L y_p^2 r}{(r'^2 + y_p^2)^2} dr d\beta = \frac{L\pi}{2} \left[1 - \frac{y_p^2 - (r_c - x_p)(r_c + x_p)}{\sqrt{y_p^2 + (r_c - x_p)^2} \sqrt{y_p^2 + (r_c + x_p)^2}} \right] \quad (16)$$

위치좌표 (x_p, y_p) 에 대해 다음 관계식을 적용하면

$$\theta_1 = \sin^{-1} \frac{r_c - x_p}{\sqrt{y_p^2 + (r_c - x_p)^2}} \\ \theta_2 = \sin^{-1} \frac{r_c + x_p}{\sqrt{y_p^2 + (r_c + x_p)^2}} \quad (17)$$

광섬유 투광영역(II) 방사조도식이 다음과 같이 정리된다.

$$E_{II} = \frac{L\pi}{2} [1 - \cos(\theta_2 + \theta_1)] \quad (18)$$

그림 8은 광섬유 투광영역(III)과 그에 속한 ΔA 의 위치 (x_p, y_p) 에 대한 적분영역을 나타내고 있다. 이 구간의 적분영역은 광섬유 끝단 코어단면과 그림 2(b)에 보인 반경 r_α 의 원형영역 사이에 포함되는 특징을 보이지 않는다. 즉 도식된 바와 같이 일부 교차영역이 적분영역이 된다. 따라서 이 영역 내의 방사조도는 다음과 같이 유도된다.

$\cos \theta = \frac{y_p}{l}$, $\Delta a = dx dz$, $l = \sqrt{y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2}$ 을 식 (11)에 적용하여 ΔE 를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta E = \frac{L y_p^2}{[y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2]^2} dx dz \quad (19)$$

위 식을 해당영역으로 적분하면 투광영역(III)내 (x_p, y_p) 위치에서 ΔA 의 방사조도는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$E_{III} = 2 \left[\int_{x_p - r_\alpha}^{x_0} \int_0^{\sqrt{r_\alpha^2 - (x-x_p)^2}} \frac{L y_p^2}{(y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2)^2} dz dx + \int_{x_0}^{r_c} \int_0^{\sqrt{r_c^2 - x^2}} \frac{L y_p^2}{(y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2)^2} dz dx \right] \quad (20)$$

유도된 방사조도 식 (14), (18), (20)을 통해 광섬유 투광 조도분포를 그림 9에서 그레이 스케일 그래프로 나타내고 있다. 그래프에서 역삼각형 모양의 백색영역이 투광영역(I)에

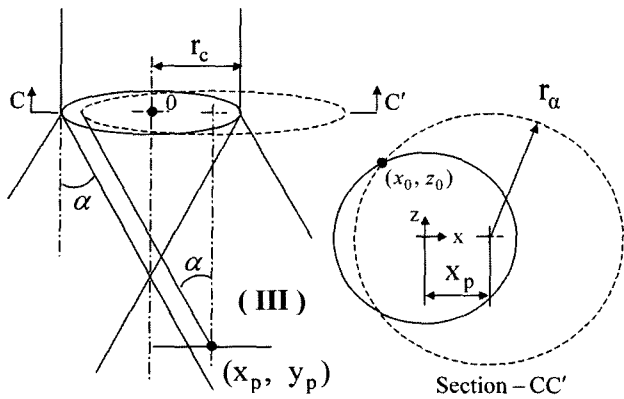


그림 8. 광섬유 투광 영역(III)의 조도분포 모델.

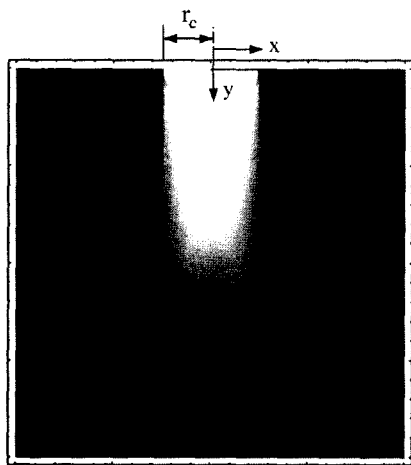


그림 9. 광섬유 투광 조도분포 해석결과 그래프.

해당한다. 투광 조도분포 중 가장 큰 값을 가지며 영역 내에 일정하게 분포함을 보인다. 투광영역(II), (III)은 코어 끝단면에서 멀어질수록 점차 작아지는 조도분포를 나타내고 있다.

IV. 투광 조도분포 모델 검증

유도된 조도분포 모델을 검증하기 위해 동일한 조건의 조도분포 측정결과와 비교하였다. 검증실험에 적용한 광섬유는 플라스틱 광섬유(Nuvitech Co., NuviLight J1-1000)로서 코어 직경 $0.98\text{mm} \pm 0.04$, NA 0.38, 스텝 인덱스 굴절 분포를 지닌다. 적용한 광원은 650nm 파장의 레이저 다이오드를 사용하였다.

첫 번째 검증실험은 광섬유 축을 기준으로 횡방향 조도분포에 대해서 수행하였다. 실험장치는 그림 10에 나타난 바와 같이 투광섬유로부터 나오는 빛을 이미지 센서에 조사하여 각 픽셀이 검출한 빛의 강도를 통해 횡방향 조도분포를 측정하였다. 사용한 이미지 센서는 13만 화소의 1/2 inch CMOS 센서로서 픽셀 하나의 크기는 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$ 이고 빛의 강도를 255단계로 구분할 수 있다. 실험방법은 일정한 빛이 조사되는 투광섬유 끝단과 이미지 센서 감광부 사이 거리를 각각

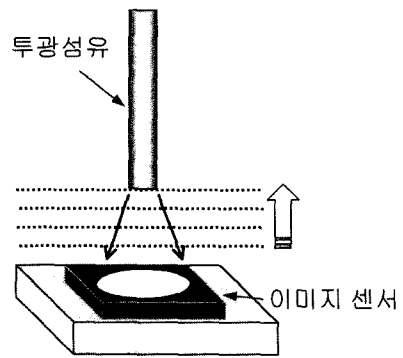


그림 10. 광섬유 투광 횡방향 조도분포 검증실험.

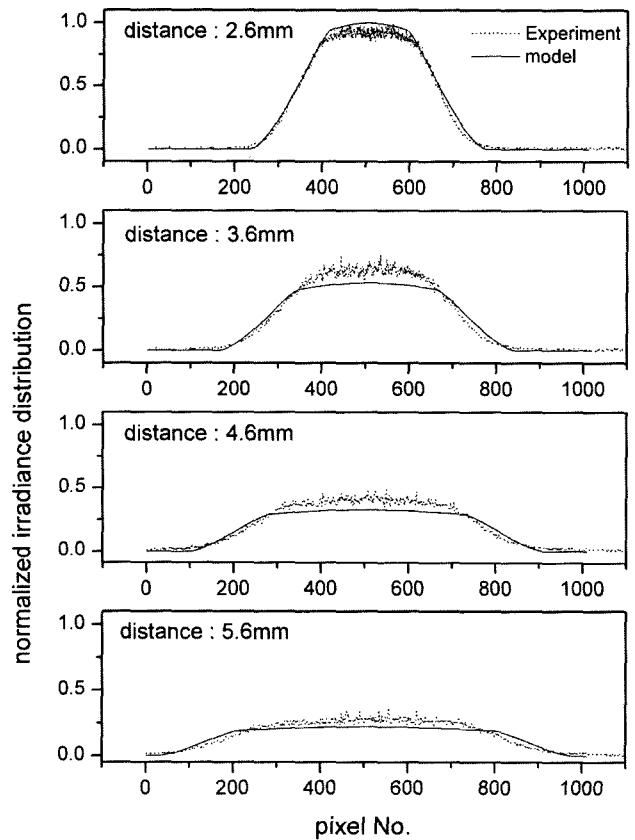


그림 11. 광섬유 투광 횡방향 조도분포 검증실험 결과.

2.6 mm, 3.6 mm, 4.6 mm, 5.6 mm로 두었을 때 각 픽셀이 검출한 강도크기 데이터를 획득 하였다. 이때 모든 픽셀의 검출 강도 총합이 거리별로 일정한지 여부를 확인함으로써 픽셀의 포화(saturation) 발생 여부를 판단하였다. 포화된 픽셀이 존재하면 검출 강도 총합이 상대적으로 작게 되고 그 부분 조도분포형상은 왜곡된다. 검증실험에서 2.6 mm보다 근접했을 때 포화현상이 크게 발생하여 이 거리가 근접거리의 한계가 되었다.

그림 11은 횡방향 조도분포 검증결과이다. 실험적으로 얻은 조도분포는 상대적인 분포형상만 확인할 수 있으므로 이론값과 실험값에 대해 거리 2.6 mm의 조도분포 피크값을 기

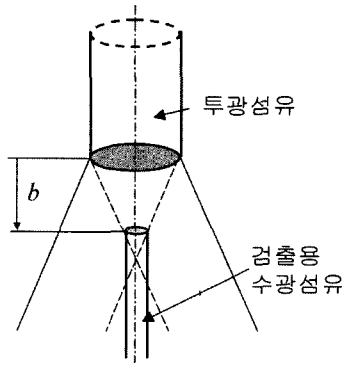


그림 12. 광섬유 투광 축방향 조도분포 검증실험.

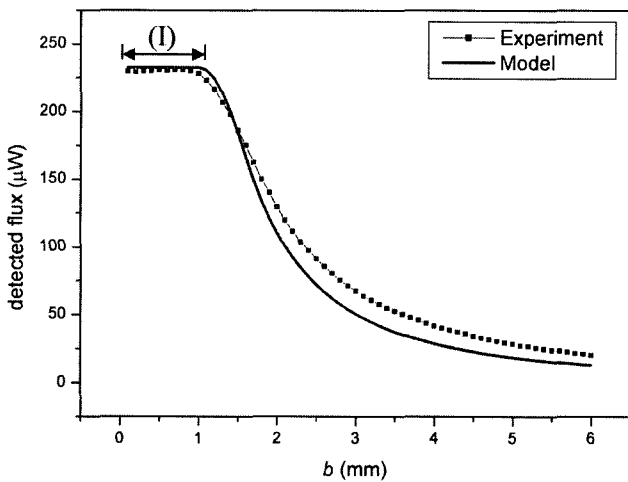


그림 13. 광섬유 투광 축방향 조도분포 검증실험 결과.

준으로 각각 표준화(normalization)한 뒤 비교하였다. 비교결과 서로 유사한 조도분포 형상을 확인할 수 있었다. 특히 이론결과에서 나타내는 비교적 평평한 피크부분 특징을 실험 결과로도 확인할 수 있었다.

두 번째 검증실험은 광섬유 축방향 조도분포에 대해 수행하였다. 실험장치는 그림 12에 나타난 바와 같이 일정한 빛이 방사되는 투광섬유와 동축상에 검출용 수광섬유를 정렬한 뒤 두 광섬유 끝단 사이의 거리변화에 따른 수광섬유의 검출광속을 측정하였다. 실험에 적용한 투광섬유는 횡방향 검증실험과 동일하고 검출용 수광섬유는 코어직경 0.25 mm의 광섬유를 적용하였다. 횡방향 검증실험이 상대적인 조도분포형상만을 비교하는데 반해 축방향 검증실험은 절대크기를 비교 검증한다. 그리고 축방향 검증실험의 측정값은 횡방향 조도분포에서 피크부분 크기를 나타내는 것으로 거리에 따른 횡방향 조도분포의 크기수준 변화를 검증하는 의미를 갖는다. 이는 광섬유 센서의 변위응답 해석에 있어서 변위 측정영역에 해당하는 거리에 대해서 조도분포의 크기변화를 의미한다.

그림 13은 축방향 조도분포 검증결과이다. 비교결과 최대 오차율은 9.3%로 평가되었다. 특히 광섬유 투광 영역(I)에 해당하는 0~1 mm 부근에서 이론적으로 일정한 조도크기를

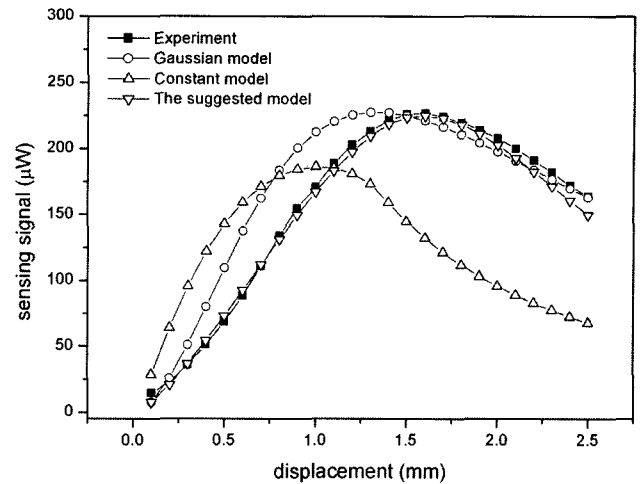


그림 14. 광섬유 센서 변위응답 해석 비교검증.

갖는 특징이 실험결과로도 확인되었다.

그림 14는 검증된 투광 조도분포식을 식 (3)에 적용하여 얻은 광섬유 변위센서의 변위응답 해석결과와 변위 측정실험 결과를 비교한 그래프를 보여주고 있다. 또한 기존 투광 조도분포 모델을 적용한 해석결과와도 비교하고 있다. 비교결과 본 논문에서 유도한 조도분포 모델을 적용한 해석결과가 실험결과에 가장 유사한 경향을 보였다. 반면에 조사영역 내에서 동일한 조도크기를 갖는 모델(constant model)을 적용한 해석결과는 큰 오차를 보였다. 이것은 변위응답 해석에 있어서 조도분포 해석이 중요한 부분을 차지하고 있음을 보여주는 것이다. 그리고 일반적으로 인식되는 가우시안 조도분포 모델(gaussian model)을 적용한 해석결과는 변위가 작은 측정구간에서 비교적 큰 오차를 보였다. 이것은 가우시안 분포 모델이 스텝 인덱스 멀티모드 광섬유 경우 끝단과 근접 영역에서는 큰 오차를 보이는 것으로 판단된다. 광섬유 끝단을 확대광원으로 간주할 때 근접거리에서 조도분포는 방사발산도 분포와 거의 동일하게 된다. 싱글모드 광섬유는 코어의 직경이 10 μm 이하로 상대적으로 매우 작으며 끝단에서 빛을 방사하는 면적이 코어단면에 국한되지 않고 클래드 영역으로 확산 분포되는 특징을 지니고 있다. 따라서 광섬유 끝단과 근접거리에서 조도분포 역시 확산분포형태를 지니게 된다. 그러나 멀티모드 스텝 인덱스 굴절분포를 갖는 광섬유는 끝단면 방사발산도 역시 스텝 분포를 갖게 되기 때문에 근접거리에서 조도분포를 가우시안 분포로 나타낼 때 큰 오차를 수반하게 되는 것으로 사료된다.

V. 결 론

광강도 변조방식 광섬유 변위센서의 변위응답 해석을 위해 필요한 광섬유 투광 조도분포 모델을 유도하였다. 스텝 인덱스 멀티모드 광섬유에 대한 모델로서 투광 영역을 세부분으로 나누고 각 영역에 대한 방사조도 이론식을 다음과 같이 유도하였다.

$$E_I = M$$

$$E_{II} = \frac{L\pi}{2} [1 - \cos(\theta_2 + \theta_1)]$$

$$E_{III} = 2 \left[\int_{x_p - r_a}^{x_0} \int_0^{\sqrt{r_c^2 - (x - x_p)^2}} \frac{L y_p^2}{(y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2)^2} dz dx \right. \\ \left. + \int_{x_0}^{r_c} \int_0^{\sqrt{r_c^2 - x^2}} \frac{L y_p^2}{(y_p^2 + z^2 + (x_p - x)^2)^2} dz dx \right]$$

유도된 투광 조도분포 모델에 대한 횡방향과 축방향 검증 실험결과 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 유도된 모델을 광섬유 변위센서의 변위응답 해석에 적용한 해석결과가 변위측정 결과와 매우 유사함을 확인함으로써 그 타당성을 확인하였다. 또한 기존의 조도분포 모델로서 조사영역 내 동일한 조도크기를 나타내는 모델과 가우시안 분포를 나타내는 모델을 적용했을 때 해석결과와 비교하여 제안한 조도분포 모델을 적용했을 때 해석결과가 보다 정확함을 확인하였다.

참고문헌

[1] Y. Zhao, P. Li, C. Wang and Z. Pu, "A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement," *Sensors and Actuators*, vol. 86, pp. 211-215, 2000.
 [2] Y. Yang, K. Yamazaki, H. Aoyama and S. Matsumiya, "Fiber optic surface topography measurement sensor and its design study," *Precision Engineering*, vol. 24, pp. 32-40, 2000.
 [3] H. Golnabi, "Mass measurement using an intensity-modulated optical fiber sensor," *Optics and Laser in Engineering*,

vol. 38, pp. 537-548, 2002.
 [4] M. E. Patton and M. W. Trethewey, "A Technique for Non-intrusive Modal Analysis of Very lightweight Structures," 5th International Modal Analysis Conference, 1987.
 [5] F. J. Crispi, G. C. Maling and A. W. Rzent, "Monitoring Microinch Displacement in Ultrasonic Welding Equipment," *I.B.M. Journal of Research and Development*, vol. 10, no. 3, 1972.
 [6] K. S. Lee, J. H. Hong and W. C. Shin, "Development of Optical Fiber Displacement Sensor for Non-contact Vibration Measurement in the High Speed Rotation System," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, vol. 22, no. 8, pp. 50-56, 2005.
 [7] Y. Zhao and Y. Liao, "Single-mode fiber-based reflex sensor for internal surface in-line measurement of small products," *Sensors and Actuators A*, 3476, pp. 1-7, 2002.
 [8] R. O. Cook and C. W. Hamm, "Fiber optic lever displacement transducer," *APPLIED OPTICS*, vol. 18, no.19, pp. 3230-3241, 1979.
 [9] T. Qiu, L. S. Kuo and H. C. Yeh, "A novel type of fiber optic displacement sensor based on Gaussian beam interference," *Optics Communications* 234, pp.163-168, 2004.
 [10] G. He and F. W. Cuomo, "A Light Intensity Function Suitable for Multimode Fiber-Optical Sensors," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 9, no. 4, pp. 545-551, 1991.

Modeling of Transmitting Light Irradiance Distribution of Step-index Multimode Optical Fiber

Woo-Cheol Shin and Jun-Hee Hong[†]

Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University 220, Kung-Dong, Yusong-Gu, Daejeon, 305-764, South, KOREA

[†]*E-mail: hongjh@cnu.ac.kr*

(Received February 3, 2006, Revised manuscript March 28, 2006)

This paper presents irradiance distribution model of light radiated from a step-index multimode optical fiber. The model is important in analysis of displacement response characteristics for intensity modulation type optical fiber sensors. The induced model was verified by experimental results. And the displacement response analysis result induced by using the irradiance distribution model was verified by experimental results and compared with using existing irradiance distribution models such as the constant model or the gaussian model. The experiment has better agreement with the analysis result using the induced model in this study than with the others models.

OCIS Codes : 060.2370, 080.2720.