

광 마이크로폰 설계를 위한 경사 절단된 멀티모드 광섬유의 조도분포 해석

Irradiance Distribution Analysis of Inclined-cut Multi-mode Optical Fiber for Optical Microphone Design

김경우* · 제우성** · 권휴상†

Kyong-woo Kim, Wcc-seong Che and Hyu-sang Kwon

Key Words : inclined-cut optical fiber(경사 절단된 광섬유), optical microphone(광 마이크로폰), irradiance distribution(조도분포).

ABSTRACT

For designing intensity modulation type optical microphone, the irradiance distribution which can be applied to inclined-cut geometrical configuration is suggested. The model is important in analysis of response characteristics for intensity modulation type optical microphone. To overcome low sensitivity problem in intensity modulation type optical microphone, inclined-cut optical fiber is considered here. Based on optical geometry, the inclined-cut optical fiber sensor is designed and fabricated. The experiments are carried out to evaluate sensor performance.

1. 서 론

광 마이크로폰(optical microphone)은 기존의 콘덴서 마이크로폰에 비하여 전자파에 강건하며 크기가 작고 가볍고 높은 지향특성을 가지는 등 많은 장점을 가지고 있어 최근 들어 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 특성 때문에 광 마이크로폰은 MRI(magnetic resonance imaging), 혹은 CT(computer tomography) 촬영 시 환자와 의사 사이에 원활한 의사소통이 필요할 때와 공항에서 원거리 통제시스템에서 상황을 통제할 때 등 특수한 상황에서 적절히 사용될 수 있다^(1~3). 특히 전방 초소동과 같이 원거리에서 은밀하게 음향을 탐지하는 목적으로 매우 유용하게 사용될 수 있다.

광을 이용하여 변위를 측정하는 광 마이크로폰의 기본개념은 학문적으로나 기술적으로 오래 전부터 잘 알려져 왔다. 광을 이용하여 변위를 측정하는 방법은 광 변조방식에 따라 크게 세기변조(intensity modulation)⁽⁴⁾, 위상변조(phase modulation)^(5,6), 편광변조(polarization modulation)방식으로 나눌 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 위상변조나 편광변조 방식은 변위 감도가 높기 때문에 미세한 거동도 측정이 가능하여 감도가 높은 마이크로폰을 제작할 수 있지만 간섭계 등과 같이 계측을 위한 장비가 비싸

며 구조가 복잡하다. 또한 충격이나 진동, 온도 등과 같은 외부 요인에 쉽게 영향을 받는 단점이 있다. 그러므로 구조적으로 단순하고 외란에 강하여 경제성이 우수한 세기변조방식의 광 마이크로폰이 현실적으로 많이 연구되고 있다⁽⁷⁾.

광 세기변조방식 변위측정의 기본원리는 일정한 빛이 투광 광섬유를 통해 측정 면에 조사되면 사이 거리에 따라 인접위치의 수광 광섬유로 입사되는 반사광속 크기변화를 검출하는 방식이다. 수광 광섬유에 입사되는 반사광속의 크기는 수광 광섬유 끝 단면상의 반사광 조사면적과 그 면적내의 반사광 조도분포를 통해 유추할 수 있다. 반사광 조사면적은 측정 면을 전방사면으로 가정하면 기하학적 해석으로 비교적 쉽게 구할 수 있으나 반사광의 조도분포는 투광 광섬유로부터 방사되는 빛의 거동에 대한 구체적인 해석이 요구된다^(8,9). 이 광섬유의 투광 조도분포에 대한 기존연구를 살펴보면, 싱글모드 광섬유의 경우 대부분 가우시안 분포로 해석된다⁽¹⁰⁾. 멀티모드 광섬유 중 스텝 인덱스를 갖는 경우 He, Cook가 제안한 광섬유 투광 빔의 2 차원 기하광학적 해석에 의한 연구^(8,11), Shin 이 제안한 광섬유 투광 빔의 3 차원 기하광학적 해석에 의한 연구 예⁽⁹⁾가 있다. 이들 연구결과들은 일반적으로 사용되고 있는 광섬유의 끝 단면이 수직으로 절단된 광섬유에 한해서 조도분포 해석을 수행하였다.

Powell 은 광 세기변조 방식이 위상변조 방식이나 편광변조 방식에 비해 감도가 떨어지는 단점을 극복하기 위한 방안으로 끝 단면이 경사지게 절단한 광

† 교신저자; 정회원, 한국표준과학연구원
E-mail : hyusang@kriss.re.kr
Tel : (042) 868-5057, Fax : (042) 868-5643
* 동명대학교 대학원 메카트로닉스공학과
** 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학과

섬유를 사용하여 센서의 감도 및 신호 대 잡음비가 향상됨을 실험적으로 확인하였다^(12,13).

따라서 본 논문에서는 절단된 광섬유뿐만 광섬유의 끝 단면이 수직으로 절단된 광섬유를 사용하여 광 마이크로폰을 설계하고 할 때 이론적으로 변위 응답특성을 예측할 수 있는 설계모델 유도에 궁극적인 목적을 두고 측광학적 해석을 토대로 투광 광섬유의 조도분포에 대한 새로운 수학적 모델을 유도하고 검증하였다.

2. 투광 조도분포 모델

2.1 모델링의 기본개념

그림 1(b)와 같이 광섬유의 끝 단면이 θ_{cut} 로 경사 절단된 스텝 인덱스 지닌 멀티모드 광섬유로부터 방사되는 빛이 광섬유 단면과 평행하게 떨어진 상 평면(image plane)에 조사되었을 때 조사영역 내의 빛의 조도를 거리 별로 해석할 수 있는 모델식을 유도하였다. 조도는 어떤 면이 받는 빛의 세기를 광속으로 나타낸 양이다. 이 모델링은 광섬유 끝 단면 코어로부터 나오는 빛들에 대해 기하광학적 방법에 의한 측광학적 해석에 바탕을 두고 있다.

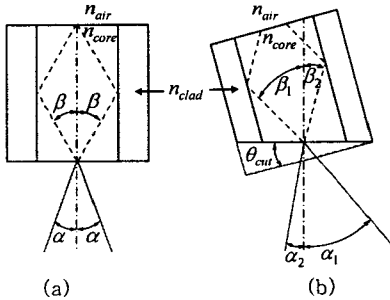


Fig. 1 Construction of (a) a typical optical fiber and (b) an inclined-cut optical fiber

그림 1(b)와 같이 광섬유의 끝 단면을 θ_{cut} 로 경사 절단하면 그림 1(a)와 같이 일반적으로 사용하는 광섬유와 비교하였을 때 크게 두 가지의 차이점을 보게 된다. 첫 번째는 광섬유 코어의 형태가 원형에서 타원형으로 변하게 되고, 이때 코어의 크기는 광섬유 코어의 반지름을 r_1 , 절단 각을 θ_{cut} 라고 하면 절단된 광섬유의 끝 단면의 단축의 길이 $r_{mi} = r_1$ 이고, 장축의 길이 $r_{ma} = r_1 / \cos\theta_{cut}$ 와 같다. 그리고 두 번째는 빛의 최대 한계 방사각(maximum critical incident angle)이 변한다. 그림 1(a)와 같이 일반적으로 사용되는 광섬유의 방사각 α 는 Snell's law 으로부터 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \sin^{-1}(n_{core} \sin \beta) = \sin^{-1} N.A. \quad (1)$$

식 (1)에서 n_{core} 은 광섬유 코어의 굴절율, n_{air} 은 공기의 굴절률이다. 최대 한계 방사각 α 는 광섬유 내부에서 전반사(total internal reflection(TIR)하기 위해 광원으로부터 광섬유에 입사하는 최대 한계 입사각이다. 식 (1)에 의해 그림 2(a)의 투광 광섬유

끝 단면의 S 를 통해 방사되는 빛들은 최대 한계 방사각 α 이하로 빛을 방사하게 되어 상 평면상에 조사되는 형상을 3 차원적으로 보면 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 원뿔 형태를 이루게 된다. 반대로 상 평면상의 A 를 지나는 빛들의 형상은 그림 2(b)와 같이 거꾸로 된 원뿔 형태를 이룬다.

그림 1(b)와 같이 광섬유의 끝 단면을 θ_{cut} 로 경사 절단하게 되면 최대 한계 방사각 α_1 과 α_2 은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_1 = \sin^{-1}[n_{core} \sin(\theta_{cut} + \beta)] \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \sin^{-1}[n_{core} \sin(\theta_{cut} - \beta)]$$

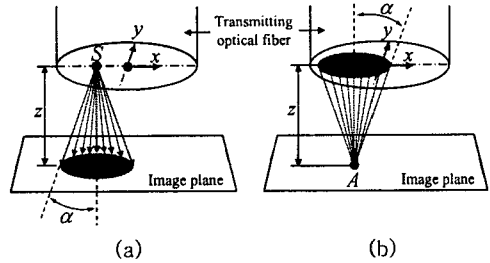


Fig. 2 (a) Ray of light radiated from a S in end surface of a typical optical fiber and (b) ray of light irradiated at a A on the image plane

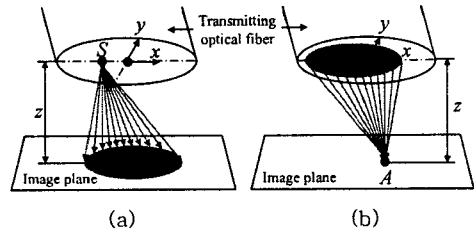


Fig. 3 (a) Ray of light radiated from a S in end surface of an inclined-cut optical fiber and (b) ray of light irradiated at a A on the image plane

식 (2)에 의해 그림 1(b)와 같이 광섬유의 끝 단면을 θ_{cut} 로 경사 절단하게 되면 광섬유 코어와 공기중의 경계 면의 법선으로부터 $\alpha_1 \sim \alpha_2$ 사이의 빛을 발산하게 되어 투광 광섬유의 끝 단면 S 를 통해 방사되는 빛들이 상 평면에 조사되는 형상을 3 차원적으로 보면 그림 3(a)와 같이 기울어진 원뿔 형태를 이루게 된다. 반대로 투광 광섬유 끝 단면에서 방사된 빛이 상 평면 상의 A 를 지나는 빛들의 형상은 그림 3(b)와 같이 거꾸로 된 형태를 이룬다.

A 를 지나는 빛들이 분포한 영역을 투광영역이라고 할 때, 투광 광섬유 끝 단면과 평행하게 만큼 떨어진 상 평면상의 투광영역은 타원형을 이루고 있으므로 장축 rt_{ma} 와 단축 rt_{mi} 으로 나누어 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$rt_{ma} = \frac{z(\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2)}{2} \quad (3)$$

$$rt_{mi} = rt_{ma} \cos \theta_{cut}$$

2.2 영역별 투광 조도분포 모델

그림 4 에 나타낸 바와 같이 투광 광섬유의 끝 단면에 위치한 $S(x, y, 0)$ 에 의해 방사된 빛이 평행거리 z 만큼 떨어진 수광 광섬유의 끝 단면 $A(x_p, y_p, z)$ 에 입사되는 광속 $\phi(x_p, y_p, z)$ 는 다음 식과 같다⁽¹⁴⁾.

$$\phi(x_p, y_p, z) = \frac{L \cos^2 \theta}{d^2} \Delta S \Delta A \quad (4)$$

식 (4)에서 L 은 투광 광섬유 끝 단면상의 S 에서의 방사회도이고, θ 은 S 에서 A 에 입사되는 각도이고, d 는 S 에서 A 까지의 거리이고, d 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$d = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z^2} \quad (5)$$

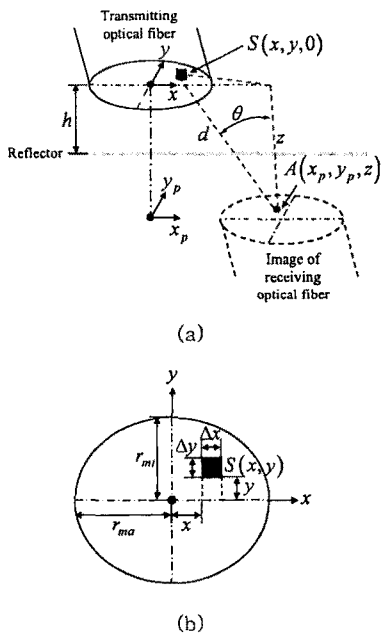


Fig. 4 Diagram of (a) light coupling between two inclined-cut optical fibers and (b) an end surface of inclined-cut optical fiber

식 (4)는 A 에 입사되는 조도 $E(x_p, y_p, z)$ 와 A 의 면적의 곱으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi(x_p, y_p, z) = E(x_p, y_p, z) \Delta A \quad (6)$$

식 (4)과 (6)로부터 S 에 의해 A 에 입사되는 조도는 다음 식과 같이 정리된다.

$$E(x_p, y_p, z) = \frac{L \cos^2 \theta}{d^2} \Delta S \quad (7)$$

그림 4 에 도식화된 바와 같이 $\cos \theta = z/d$ 이므로 식 (7)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(x_p, y_p, z) = \frac{L z^2}{d^4} \Delta x \Delta y \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 투광 광섬유 내의 $S(x, y, 0)$ 에 의해 수광 광섬유 내의 $A(x_p, y_p, z)$ 에 입사되는

조도 $E(x_p, y_p, z)$ 는 두 영역 사이 거리 d 와 투광 광섬유의 끝 단면과 상 평면의 평행거리 z 와 관계됨을 알 수 있다.

그림 3(b)에서 보는 바와 같이 A 를 지나는 빔을 방사하는 광섬유 단면상의 영역으로 S 를 확대했을 때 A 의 방사조도 E 는 투광영역에 대해 식 (8)을 적분함으로써 구할 수 있다. A 를 상점으로 간주했을 때 그 위치에 따라 그 적분영역의 형태에 따라 변하며 그 형태별로 영역 1, 2, 3 으로 구분하여 고찰할 수 있다. 이 영역의 구분은 최대 한계 방사각 α 와 광섬유 코어의 반지름 r_{ma} 에 의해 정해지며 각 영역별로 조도분포에 대한 모델식을 유도하였다.

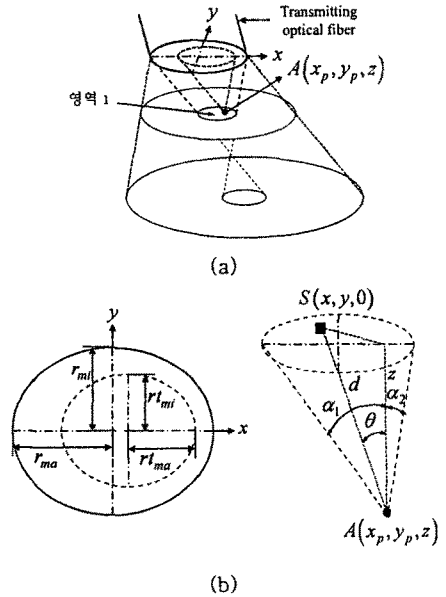


Fig. 5 Optical ray geometry associated with irradiation distribution in the area 1

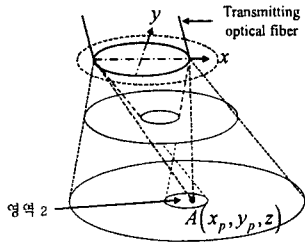
그림 5 는 영역 (그림 5(a))1 과 그 영역 내 A 를 지나는 빔을 방사하는 광섬유 단면상의 영역(그림 5(b))을 나타내고 있다. 그림 5 에서 볼 수 있듯이 A 의 위치 (x_p, y_p, z) 와 무관하게 식 (3)에 해당하는 투광영역이 광섬유 끝 단면 내에 존재하고 최대 한계 방사각인 $\alpha_1 \sim \alpha_2$ 내에 방사되는 빔을 완전히 포함하는 경우이다. A 의 위치 (x_p, y_p, z) 가 다음 조건식을 만족할 때 A 는 영역 1 내에 존재하게 된다.

$$z \tan \alpha_1 - r_{ma} \leq x_p \leq z \tan \alpha_2 + r_{ma} \quad (9)$$

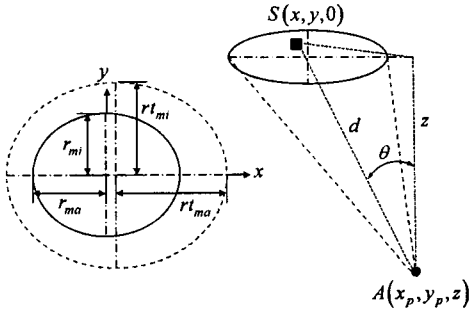
$$z \leq \frac{2r_{ma}}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}$$

따라서 영역 1 에 속한 A 의 방사조도 크기는 식 (8)에 의해 S 를 투광영역의 전 영역으로 확대함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_1 = \int_{-r_{ma}}^{r_{ma}} \int_{-r_{mi}^2(r_{ma}^2-x^2)/r_{ma}^2}^{r_{mi}^2(r_{ma}^2-x^2)/r_{ma}^2} \frac{L z^2}{\left[(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z^2 \right]^2} dy dx \quad (10)$$



(a)



(b)

Fig. 6 Optical ray geometry associated with irradiance distribution in the area 2

그림 6는 영역 2(그림 6(a))와 그 영역 내 A를 지나는 빔을 방사하는 광섬유 단면상의 영역(그림 6(b))을 나타내고 있다. 영역 2 내에서 A에 투과되는 빔의 투광영역은 식 (3)과 같지만, 빔은 투광 광섬유 끝 단면에서만 빔이 방사됨으로 A에 빔이 투과되는 투광영역은 투광 광섬유 끝 단면에 한정된다. 그러므로 영역 2의 경우 실질적인 투광영역은 식 (3)에 의한 투광영역과 투광 광섬유 끝 단면과 겹치는 부분으로 투광 광섬유의 끝 단면과 같다. A의 위치 (x_p, y_p, z) 가 다음 조건식을 만족 할 때 A는 영역 2 내에 존재하게 된다.

$$z \tan \alpha_1 - r_{ma} \geq x_p \geq z \tan \alpha_2 + r_{ma} \quad (11)$$

$$z > \frac{2r_{ma}}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}$$

따라서 영역 2에 속한 A의 방사조도 크기는 식 (8)에 의해 S를 투광 광섬유 끝 단면의 전 영역으로 확대함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_2 = \int_{-r_{ma}}^{r_{ma}} \int_{-r_{mi}^2(r_{ma}^2-x^2)/r_{ma}^2}^{r_{mi}^2(r_{ma}^2-x^2)/r_{ma}^2} \frac{Lz^2}{[(x_p-x)^2 + (y_p-y)^2 + z^2]^2} dy dx \quad (12)$$

그림 7은 영역 3(그림 7(a))과 그 영역 내 A를 지나는 빔을 방사하는 광섬유 단면상의 영역(그림 7(b))을 나타내고 있다. 영역 3 내에서 A에 투과되는 투광영역은 식 (3)과 같고, 실질적으로 A를 지나는 빔의 영역은 식 (3)에 의한 투광영역과 투광 광섬유의 겹치는 부분이다. A의 위치 (x_p, y_p, z) 가 다음

조건식을 만족 할 때 A는 영역 3 내에 존재하게 된다.

$$z \tan \alpha_2 - r_{xt} \leq x_p < z \tan \alpha_1 - r_{ma}$$

or

$$z \tan \alpha_2 + r_{ma} < x_p \leq z \tan \alpha_1 + r_{ma} \quad (13)$$

$$z \leq \frac{2r_{ma}}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}$$

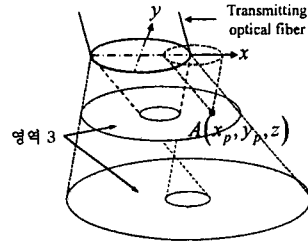
또는, 다음 조건식을 만족 할 때 A는 영역 3 내에 존재하게 된다.

$$z \tan \alpha_2 - r_{xt} \leq x_p < z \tan \alpha_1 - r_{ma}$$

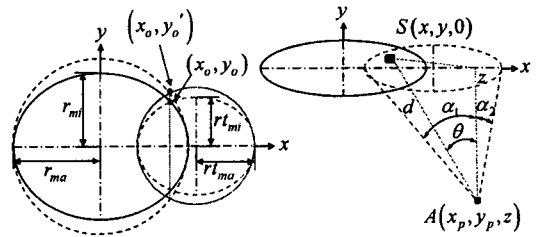
or

$$z \tan \alpha_2 + r_{ma} < x_p \leq z \tan \alpha_1 + r_{ma} \quad (14)$$

$$z > \frac{2r_{xt}}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}$$



(a)



(b)

Fig. 7 Optical ray geometry associated with irradiance distribution in the area 3

투광 광섬유 끝 단면의 타원과 A에 투과되는 투광영역의 타원의 교점 x_o 은 그림 7(b)와 같이 투광 광섬유 끝 단면의 타원형을 반지름이 r_{ma} 인 원형으로 가정하고 A에 투과되는 투광영역의 타원을 반지름이 $r_{t_{ma}}$ 인 원형으로 가정하면 두 타원의 교점 (x_o, y_o) 을 쉽게 구할 수 있다. 반지름이 r_{ma} 인 원과 반지름이 $r_{t_{ma}}$ 인 원은 원의 방정식을 이용하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$x^2 + y^2 = r_{ma}^2$$

$$(x-x_o)^2 + y^2 = r_{t_{ma}}^2 \quad (15)$$

식 (15)을 연립하여 풀면 두 원의 교점 (x_o, y_o) 인 x_o 은 위의 식을 연립방정식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_o = \frac{r_{ma}^2 + x^2 - r_{tma}^2}{2x} \quad (16)$$

$$y_o' = \sqrt{r_{ma}^2 - x_o^2}$$

식 (16)에서 반지름이 r_{ma} 인 원의 중점(0, 0)과 반지름이 r_{tma} 인 원의 중점 사이의 거리인 \bar{x} 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{x} = x_p - \frac{z(\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2)}{2} \quad (17)$$

두 원의 교점(x_o, y_o')이 식 (16)과 같을 때, 두 타원의 교점(x_o, y_o')은 원과 타원의 성질을 이용하여 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$y_o = \sqrt{r_{ma}^2 - x_o^2} \cos \theta_{cut} \quad (18)$$

따라서 영역 3 에 속한 A 의 방사조도 크기는 식 (8)에 의해 S 를 투광영역의 전 영역으로 확대함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_3 = 2 \int_{r_{ma}}^{r_o} \int_{r_{mi}^2(r_{ma}^2 - x^2)/r_{ma}^2}^{r_{mi}^2(r_{ma}^2 - x^2)/r_{ma}^2} \frac{L z^2}{[(x - x_i)^2 + (y - y_p)^2 + z^2]^2} dy dx$$

$$+ \int_{x_o}^{x_{ma}} \int_{r_{mi}^2(r_{ma}^2 - x^2)/r_{ma}^2}^{r_{mi}^2(r_{ma}^2 - x^2)/r_{ma}^2} \frac{L z^2}{[(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + z^2]^2} dy dx \quad (19)$$

3. 조도분포 실험 및 결과

유도된 투광 조도분포 모델의 타당성을 실험적으로 검증하기 위해 우선 실험에 적용할 광섬유의 최대 한계 방사각 α 를 측정하였다. 최대 한계 방사각을 측정하는 방법으로 구경 크기를 바꾸어 가는 입력 최대 한계 방사각 측정과 이미지센서를 이용하여 빛의 세기분포를 이용하는 출력 최대 한계 방사각 측정 두 가지 방법이 있다⁽¹⁵⁾. 본 논문에서는 후자의 방법으로 그림 8 과 같이 투광 광섬유 끝 단면에서 방사되는 빔을 이미지 센서에 투영하고, 이미지 센서를 0.8 mm 간격으로 이동시켜 각각의 이미지 파일로 얻었다. 이미지 센서로 획득한 조사영역 이미지파일을 2 차원 배열로 변환하고 그 배열값을 이용하여 빔을 검출한 픽셀의 수를 구하였다. 그리고 픽셀의 수에 픽셀의 크기를 곱하여 그림 9 에서 도식화된 조사반경 크기($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)를 구하고 $\alpha = \tan^{-1}[(\omega_2 - \omega_1) / z_1]$ 에 적용하여 최대 한계 방사각을 구하였다. 측정 결과를 그림 10 에 보이고 있으며 그 평균값은 약 20°이다.

최대 한계 방사각 측정실험에 적용한 광섬유는 플라스틱 광섬유로서 코어 직경 0.98 mm, NA 0.38, 스텝 인덱스 굴절 분포를 지닌다. 적용한 광원은 650 nm 파장의 레이저 다이오드를 사용하였다. 이미지 센서는 13 만 화소의 1/2 inch CMOS 이미지 센서로서 픽셀 하나의 크기는 3.6 $\mu\text{m} \times 3.6 \mu\text{m}$ 이다.

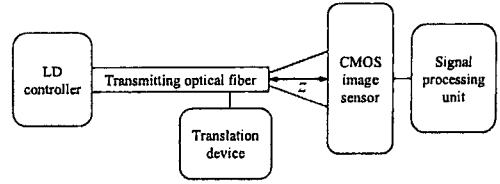


Fig. 8 Experimental setup for measuring maximum critical incident angle α

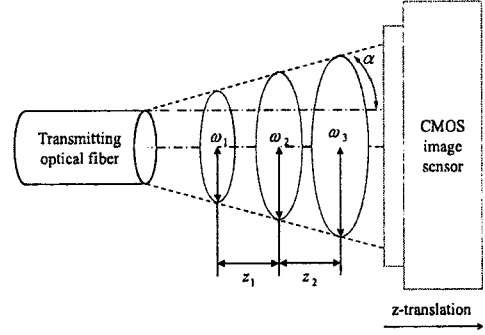


Fig. 9 Experiment method for measuring maximum critical incident angle α

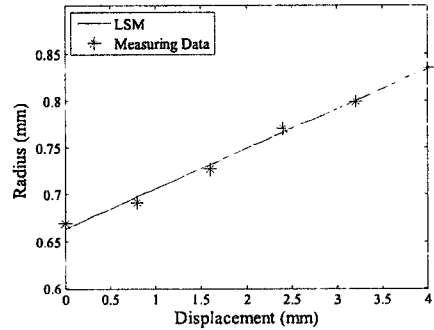


Fig. 10 Measured results of maximum critical incident angle α

그리고 유도된 조도분포 모델을 검증하기 위한 실험장치와 방법은 최대 한계 방사각 측정실험과 동일하다. 하지만, 조도분포 측정 실험에서 사용한 광섬유는 그림 11 과 같이 투광 광섬유의 끝 단면을 20°로 경사 절단하고, 이미지 센서와 투광 광섬유 사이의 거리를 1.0 mm, 1.4 mm, 1.8 mm 에 대해 0.4 mm 간격으로 이동시켜 각각의 이미지 파일로 얻어서 조도분포 실험을 하였다.

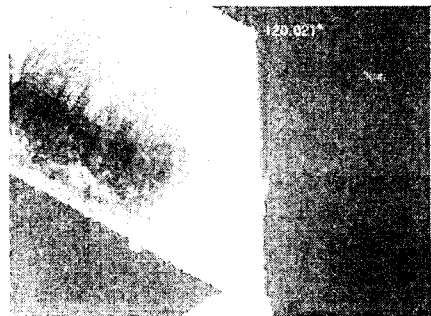


Fig. 11 Photograph of an inclined-cut optical fiber

참고 문헌

그림 12 은 조도분포 결과이다. 실험적으로 얻은 조도분포는 상대적인 분포형상만 확인할 수 있으므로 본 논문에서 제안한 영역별 조도분포 이론값과 실험값에 대해 1.0 mm 의 조도분포 피크값을 기준으로 각각 표준화(normalization)한 뒤 비교하였다. 비교 결과 본 논문에서 제안한 모델식과 실험결과가 서로 유사한 조도분포 형상을 확인할 수 있었다.

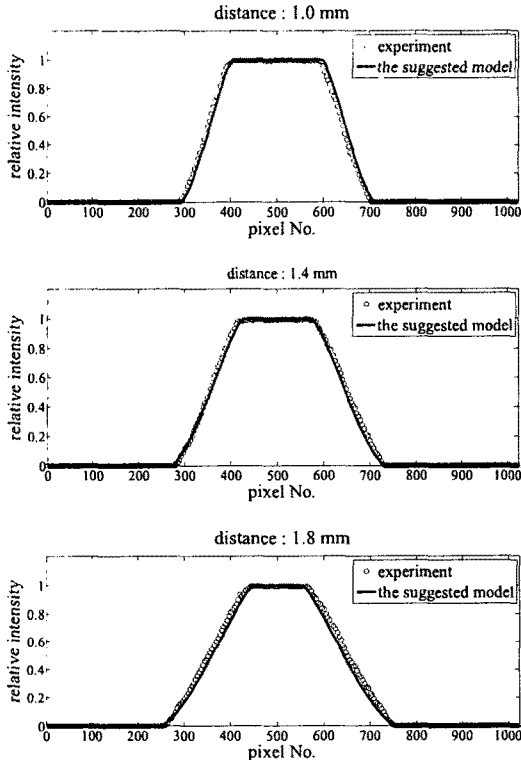


Fig. 12 Results of the suggested transmitting irradiance distribution comparison with experiment result

4. 결 론

끝 단면이 경사 절단된 광섬유를 이용한 세기 변조방식의 광 마이크로폰 설계시 중요한 부분으로 고려되는 투광 광섬유의 조도분포 모델식을 기하광학적 해석에 의해 유도하였다. 유도된 투광 조도분포 모델에 대한 검증 실험결과 유도된 투광 조도분포 모델식과 검증 실험결과가 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 광 마이크로폰뿐만 아니라 세기 변조방식의 다양한 프로브 설계시 최적의 조건을 찾아서 제작할 수 있는 기반기술을 확립하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 지원으로 한국표준과학연구원 일반사업으로 수행되었음.(KRIS-08-2402-221)

(1) Bilaniuk, N., 1997, "Optical Microphone Transduction Techniques", Applied Acoustics, Vol.50, No.1, pp.35~63.

(2) Feldmann, M. and Buttgenbach, S., 2005, "Microoptical Distance Sensor with Integrated Microoptics applied to an Optical Microphone", 2005 IEEE Sensors, pp.769~771.

(3) Song, J.H., Gu, H.M., Park, H.J., and Lee, S.S., 2006, "Optical Microphone Based on a Reflective Micromirror Diaphragm", Microwave and optical technology letters, Vol.48, No.4, pp.707~709.

(4) Nakamura, K., Toda, S. and Yamanouchi, M., 2001, "A Two-dimensional Optical Fiber Microphone Array with Matrixstyle Dada Readout", Meas. Sci. Technol., Vol.12, pp.859~864.

(5) Sagberg, H., Sudbo, A., Sogaard, O., Anne, K., Bakke, H. and Johansen, I., 2003, "Optical Microphone Based on Modulated Diffractive Lens", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.15, No.10, pp.1431~1433.

(6) Furstenau, N., Horack, H. and Schmidt, W., 1998, "Extrinsic Fabry-perot Interferometer Fiber-optic Microphone", IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.47, No.1, pp.138~142.

(7) Kwon, H.S. and Kim, K.K., "Design and Characterization of Fiber Optical Coupler for Acoustic and Vibration Measurements", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.16, No.9, pp.971~981.

(8) Cook, R. O. and Hamm, C. W., 1979, "Fiber optic lever displacement transducer", Applied optics, Vol.18, No.19, pp.3230~3241.

(9) Shin, W. C. and Hong, J. H., 2006, "Modeling of Transmitting Light Irradiance Distribution of Step-index Multimode Optical Fiber", Hankook Kwanhak Hoeji, Vol.17, No.2, pp.136~142.

(10) Zhao, Y., Li, P., Wang, C. and Pu, Z., 2000, "A novel fiber-optic sensor for small internal curved surface measurement", Sensors and Actuators, Vol.86, pp.211~215.

(11) He, G. and Cuomo, F. W., 1991, "Light Intensity Function Suitable for Multimode Fiber-Optical Sensors", Journal of Lightwave Technology, Vol.9, No.4, pp.545~551.

(12) Anthony Powell, J., "A simple two-fiber optical displacement sensor", 1974, Rev. Sci. Instrum., Vol.45, No.2, pp.302~303.

(13) Irvine, J., Hadjiloucas, S., Keating, D. A. and Usher, M. J., 1997, "An automatic optical fibre feedback photometer for transpiration studies", Meas. Sci. Technol., Vol.7, pp.1611~1618.

(14) Hadjiloucas, S., Irvine, J. and Keating, D. A., 2000, "Feedback dew-point sensor utilizing optimally cut plastic optical fibres", Meas. Sci. Technol., Vol.11, pp.1~10.

(15) Lee, B. H., Kim, D. K. and Park, S. H., 2005, "Improved method for measuring N.A. of POF using a He-Ne laser", Optical Society of Korea Annual Meeting, pp.328~329.