

논문 2002-11-5-03

침입 감지기능을 가진 다중모드 GRIN(graded-index) 광섬유 내에서의 광파의 전파

손영호*

Light Propagation in Multimode GRIN(graded-index) Fibers with Intrusion Sensing Capability

Young-Ho Sohn*

요 약

광섬유의 침입 감지기능을 개발하기 위하여 다중모드 GRIN(graded-index) 광섬유의 휨에 의한 광섬유내의 광전파 특성변화를 고찰하였다. 다중모드 GRIN 광섬유의 data파는 기본(fundamental) 모드로, 침입 감시용 감시파는 높은 차수의 모드로 동시에 전파 되게 하고, 광섬유의 휨(bending)에 의한 데이터 유출시도는 높은 차수 모드의 감시파의 감쇠를 가져오고, 결국 수신측의 경보를 작동하도록 한다. 또한 일정한 곡률반경으로 감겨진 광섬유에 기본 모드만 선별적으로 주입된 경우에 있어서, 다중모드 GRIN 광섬유 내에서의 광파의 전파과정을 이론적으로 해석하고, 광섬유가 휘게 되는 경우 여러 모드 사이에 결합(coupling)이 생겨나게 되는데, 광섬유가 감겨진 곡률반경을 변경해가면서 결합되는 기본모드의 power 변화를 수치해석을 이용한 프로그램 시뮬레이션을 통하여 조사하였다. 이 연구결과는 광섬유의 휨에 의하여 방출되는 데이터 도청 및 침입자 감지에 다중모드 GRIN 광섬유 활용 가능성과 광섬유의 곡률반경이 1cm 정도까지는 Asawa-Taylor의 모델[4]이 정당함을 보였다.

Abstract

An intrusion-sensitive capability of multimode graded-index (GRIN) optical fibers under bending has been investigated. In this system, the data light is transmitted in the fundamental mode while alarm monitor light is launched in a high-order mode at the same time. An attempted intrusion to drain data by bending the fiber results in greater attenuation of a monitor signal in higher order modes, thereby setting off an alarm at the receiver. Light propagation in a multimode graded-index fiber is also analyzed theoretically when the fundamental mode is selectively excited and the fiber is bent around a constant radius mandrel. The bending generates coupling between the various modes of the fiber. Power transitions of the fundamental mode by changing the bending radius were also analyzed numerically using program simulation. It is shown that Asawa-Taylor model[4] is valid up to 1cm of the radius of curvature of the fiber bend.

1. 서 론

광통신 기술은 1970년 저 손실 광섬유의 출현 이래 매우 빠른 속도로 발전해왔다. 통신선로

로서의 광섬유는 기존의 동선에 비해 가볍고, 전자기파의 간섭을 받지 않으며, 열악한 환경이나 기후에도 내구성이 강하다는 장점을 가지고 있다^[1]. 또한 광섬유를 이용한 통신은 기존의 통신방식보다 많은 양의 데이터를 먼 거리까지 잘 전달할 수 있어서 최근 매우 각광 받고 있다.

광통신이 출현한 초기부터 부당한 방법으로 광섬유 내에서 전송되고 있는 데이터나 정보를 도청 또는 유출하기위한 시도가 계속되어 왔다.

* 영남대학교 전자정보공학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University)
<접수일자 : 2002년 8월 3일>

1980년 Steensma^[2]에 의해서 다중모드 SI (step-index) 광섬유에 데이터파는 낮은 차수의 모드로, 감시파는 높은 차수의 모드로 전달하여, 감시파의 더 많은 감쇠를 통한 통신보안체계 방법이 소개 되었다. 하지만 다른 연구기관에서 실험으로 밝힌 결과에 의하면 이 방법은 평범한 성과만 보였을 뿐 아니라 다중모드 GRIN 광섬유와 단일모드 SI 광섬유가 일반화 되었고, 다중모드 SI 광섬유는 주문생산에만 의존하고 게다가 이들은 고가로 인하여 크게 주목 받지 못하게 되었다. 한편, 광통신 체계에 다중모드 GRIN 광섬유를 사용하여 침입자 감시 및 정보체계를 가능하게 한 것이 Asawa^[3]에 의해서 처음으로 시도되었다.

위에서 기술한 데이터파와 감시파의 양모드 전파(bimodal transmission) 외에도 효율적인 통신체계가 되기 위해서는 보다 안정적인 데이터파의 전달에 관한 연구가 필요하게 되었다. 이에 휘어진 다중모드 GRIN 광섬유 내에서의 높은 안정성을 지닌 기본모드를 통한 데이터파의 전달에 관한 연구가 Asawa와 Taylor^[4]에 의해서 이루어졌다. 그들은 이 연구결과로 아주 작은 곡률반경에도 불구하고 광섬유 내에서 기본모드로 전달되는 광파는 일부 낮은 차수의 모드에 간혀있음을 보였다.

GRIN 광섬유의 휨(bending)에 대한 여러 연구가 최근 이루어지고 있는데, Donlagic과 Culshaw는 휘어진 GRIN 광섬유 내에서의 기본모드 전파를 센서에 응용하기 위한 연구를 하였고^[5], Arrue 등은 굴절에 영향을 주는 매개변수(parameter)에 대한 연구를 진행하였다^[6].

본 연구는 다중모드 GRIN 광섬유를 전달 매체로 하여 침입자 감지기능을 부여함과 동시에 광섬유의 휨에 의하여 방출되는 데이터 도청방지를 위한 시도이다.

II. 이론의 전개

이 이론의 전개는 높은 안정성을 지닌 데이터 파 전달을 위해 연구되었던 Asawa-Taylor 모델을 확장하고, 전파광의 광섬유의 휨 효과(effect of bending) 분석에 그 목적을 둔다.

우리는 여기서 GRIN 광섬유 내에서 굴절에 의해 유도된 기본모드로부터의 모드결합의 영향

에 관심을 가지게 된다. 이 연구는 Taylor와 Asawa의 논문에서 해결되지 못했던 부분을 다루게 되는데, 휘어진 광섬유 내에서의 코어의 굴절률 분포 변화(refractive index variation)를 나타내는 식

$$n = n_1 - \Delta n(x^2 + y^2)/a^2 \quad (1)$$

을 편의상 무한 코어("infinite core" case)로 가정하고 연구하였다^[4]. 여기서 n_1 은 코어의 굴절률이고 a 는 코어의 반경이다. 하지만, 우리는 GRIN 광섬유의 실제에 더 가까운 유한 코어(finite core) 경우의 유용한 모델을 제시하고, 그 광섬유의 휨에 의한 모드간 결합효과를 고찰하고자 한다.

유한 코어(finite core)의 경우에는 작은 곡률반경으로 인한 강한 모드간 결합(strong intermode coupling)이 생길 때 낮은 차수의 모드에서 손실이 생겨남을 예견할 수 있다. 여기에 주안점을 두고 이론을 전개하여 수치해석과 시뮬레이션을 통하여 이 손실을 수량화 할 필요가 있다. 또 이 문제를 다루기 위해서는 광섬유 내에서 진행되는 각 모드의 광파에 해당하는 파동방정식의 해를 구하여야 한다.

유한 코어(finite core) GRIN 광섬유의 굴절률(n) 변화(refractive index variation)는

$$n = n_1 - \Delta n(x^2 + y^2)/a^2, \quad x^2 + y^2 \leq a^2 \quad (2)$$

$$n = n_1 - \Delta n, \quad a^2 < x^2 + y^2 < b^2 \quad (3)$$

인데, n_1 은 코어의 굴절률이고, a 는 코어의 반경이며, b 는 클래딩을 포함하는 광섬유의 반경이다. 그리고 Δn 은 n 의 변화량이고, x 와 y 는 파동의 전파방향 z 축에 수직인 축들을 나타낸다.

광섬유내의 광파를 시간에 종속적인 고조파(time-dependent harmonic wave)로 가정했을 경우 파동방정식은

$$\nabla^2 \psi + n^2 k_0^2 \psi = 0 \quad (4)$$

과 같이 표현할 수 있는데, 여기서 ψ 는 파동함수이고 k_0 는 파수(wave number, $= 2\pi/\lambda$)이다. 원통 좌표계에서 ψ 는 다음과 같은 형태를 지닌다.

$$\psi(r, \theta, z) = u(r, \theta)e^{-ibz} \quad (5)$$

단, β 는 전파상수(propagation constant)이다. 식 (4)을 다시 쓰면

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2)u = 0 \quad (6)$$

과 같고, 모드장(mode field)을 나타내는 $u_{lm}(r, \theta)$ 는 이 방정식의 해로서

$$u_{lm}(r, \theta) = f_{lm}(r)e^{im\theta} \quad (7)$$

와 같다. 여기서 m 은 임의의 정수이고 l 은 양의 정수이다. f 에 대한 식 (6)는

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{df}{dr} - \frac{m^2 f}{r^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2)f = 0 \quad (8)$$

이다. 이제 f 는 r 에 대한 함수이므로, 경계조건을 결정할 수 있게 된다. 코어 내부에서는 $f(r) = P(r)e^{-\alpha^2 r^2/2}$ 의 형태로 되는데, 여기서 $P(r)$ 은 r 에 대한 다항식(polynomial)이고, $\alpha = (2\pi NA/\lambda a)^{1/2}$ 와 같이 정의 된다. 그리고 수치구경은 $NA = (2n_1 \Delta n)^{1/2}$ 로 표현된다.

예를 들어, 만약 NA 가 0.2, $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, 그리고 코어의 직경이 $50\mu\text{m}$ ($a = 25\mu\text{m}$)인 경우 $\alpha = 0.196/\mu\text{m}$ 가 된다. 코어 외부에서는, 수정된 형태의 Bessel 함수로 해가 표시될 것이다. 경계조건은 f 와 f' 가 $r = a$ 에서 연속적이고, $f(b) = 0$ 라고 둔다. Bessel 함수는 다루기가 쉽지 않은 관계로 이 식을 풀기 위하여 수치해석을 통한 고유치 문제(eigenvalue problem)로 다룬다.

이제 일정한 곡률반경에 의해서 생기는 각각의 모드간 결합을 고려해 보면, 식 (7)에서 구한 표준화된 장 분포(normalized field distribution) $u(r, \theta)$ 를 이용해서 각 모드간 결합상수(coupling constants) k_{ij} 를 결정할 수 있게 된다. 일단 이 값들을 알게 되면, 광섬유 종거리 z 의 함수로 하는 각 모드의 크기 변화의 관계를 구할 수 있게 되고, 각 모드의 power를 구할 수 있다.

일정한 휨을 가진 광섬유 내에서 거리를 함수

로 하는 각 모드의 power 분포를 결정하기 위해서는 원형 휨(circular bend)에 의한 결합 모드 해석(coupled mode analysis)을 따른다. 우선 광섬유의 축이 임의의 각 ϕ 만큼 바뀌는 첫 휨점(bending point)에서 전장분포(electric field distribution)가 $u_{lm}(r, \theta) = f_{lm}(r)e^{im\theta}$ 인 광파가 접근하고 있다고 가정하면, 휨점후 모드의 전장분포는

$$u(r, \theta) = \sum A_{l'm'} u_{l'm'}(r, \theta) \quad (9)$$

와 같이 쓸 수 있고 여기서 $A_{l'm'}$ 는 상수이다.

작은 ϕ ($\phi \ll 1$)를 가진 미세한 휨 부분에서 장정합 조건(field matching condition)을 이용하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$u_{lm} = \sum A_{l'm'} u_{l'm'} = u_{lm} e^{i\beta_c x \phi} \quad (10)$$

여기서, $\beta_c = 2\pi n_1/\lambda$ 이고, $r^2 = x^2 + y^2$ 이다. 작은 ϕ ($\phi \ll 1$)에 대하여, $e^{i\beta_c x \phi} \approx 1 + i\beta_c x \phi$ 로 치환할 수 있다. 식 (10)의 양변을 $u_{l'm'}^*$ 로 곱하고 적분하면,

$$A_{l'm'} \cong i\beta_c \phi \iint x u_{lm} u_{l'm'}^* dx dy \quad (11)$$

를 얻을 수 있고,

$$x = r \cos \theta = r \left[\frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \right] \text{를 대입해}$$

$$A_{l'm'} = i\beta_c \phi \iint r^2 \left[\frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \right] u_{lm} u_{l'm'}^* r dr d\theta, \quad (12)$$

로 다시 쓸 수 있다. 여기서 $m' = m \pm 1$ 이 아닌 경우 0이 된다.

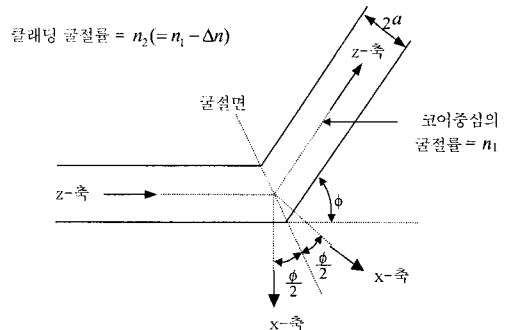


그림. 1. 굴절 부위에서의 좌표축.

Fig. 1. Local coordinate axis for a corner bend.

이해를 돕기 위하여 그림 1에 휨 부위에서의 좌표축을 그림으로 나타내었다.

위의 결과들은 미세한 휨에 해당하는 것이지만 일반적인 휨은 이러한 미세한 휨의 연속으로 볼 수 있으므로^[7] 광파의 진행방향의 미세한 거리 Δz 를 가진 미세한 각 $\Delta\phi$ 의 연속된 휨으로 간주할 수 있다.

아주 작은 값 $\Delta z \rightarrow 0$ 일 때 $\Delta\phi/\Delta z$ 는 상수로 남게 된다. 이때, $\Delta\phi/\Delta z = 1/R$ 이 되고 R 은 휘어진 광섬유의 곡률반경(radius of curvature of the bend)이 된다. 그러므로

$$\frac{dA_{l'm'}}{dz} = i \sum_{lm} k_{(l'm')(lm)} A_{lm} e^{i\Delta_{(l'm')(lm)}Z} \quad (13)$$

을 얻는다. 여기서,

$$\Delta_{(l'm')(lm)} = \beta_{l'm'} - \beta_{lm} \quad (14)$$

$$k_{(l'm')(lm)} = \frac{\beta_c}{R} \iint r^2 \left[\frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} \right] u_{lm} u_{l'm'}^* dr d\theta \quad (15)$$

가 된다. 이제 식 (13)을 사용하여 연속된 굴절로 인한 모드간 결합을 수치적으로 풀 수 있게 되었다. 여기서 GRIN광섬유의 전파상수의 차를 나타내는 위상 부정합 요소(phase mismatch factor) $\Delta_{(l'm')(lm)}$ 와 결합상수(coupling constant) $k_{(l'm')(lm)}$ 는 중요한 매개변수가 된다. 두 상수 $k_{(l'm')(lm)}$ 와 $\Delta_{(l'm')(lm)}$ 는 주어진 변수들로부터 구해질 수 있다.

본 연구에서는 $n_1 = 1.46$, $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $\alpha = 0.196/\mu\text{m}$ 로 가정하였다. 식 (15)에서 알 수 있다시피 결합상수는 광섬유의 곡률반경 R 과 반비례함을 알 수 있다. 다시 말하면 반경 R 이 작아질수록 더 강한 결합이 일어남을 알 수 있다.

그리고, 결합 섭동(coupling perturbation)은 $x = r \cos \theta = r(e^{i\theta} + e^{-i\theta})/2$ 에 비례하는데, 이것은 일차원적인 문제로써 굴절축과 수직인 방향으로 전장의 변화가 생기는 관계로 결합은 모드 $m = m_0$ 와 모드 $m = m_0 \pm 1$ 사이에서만 일어나기 때문이다.

III. 시뮬레이션

컴퓨터 연산을 위하여 식 (8)을 차분 방정식

(difference equation) 형태로 바꾸면, $f_{j+1} = (Q/Q_p) \cdot f_j + (Q_m/Q_p) \cdot f_{j-1}$ (16)

로 쓸 수 있고, 여기서 $Q = 2 - n_j \cdot (\Delta r)^2$,

$Q_p = 1 + 0.5 \cdot \Delta r/r_j$, $Q_m = 0.5 \cdot \Delta r/r_j - 1$

이며, $r_j = j \Delta r$ 이다. 이 방정식에서는 $\Delta(\beta^2)$

을 고유치로 써서 각모드의 크기를 구할 수 있게 된다. 식 (16)을 풀기 위해서 작은 Δr 을 선택

하고, f_0 와 f_1 값을 결정한 다음, 식(16)을 이용

하여 $f_2, f_3, f_4 \dots f_N$ 을 구한다. 그리고 $|f_N| < \epsilon$

를 만족시켜주는 $\Delta(\beta^2)$ 을 찾을 때까지 차분 방

정식을 반복해서 실행하게 된다. 여기서 ϵ 은 미

리 결정된 아주 작은 값이다. 이 연구에서 Δr

은 $0.1\mu\text{m}$, ϵ 은 10^{-7} 으로 놓고 프로그램을 실행

하였다. 이렇게 해서 구한 해와 고유치를 써서

Array를 구성한 다음, 거리 z 를 변수로 하는

일정하고 연속된 광섬유의 휨에서 모든

power분포를 결정하는 식 (13)을 수치적으로

풀기 위해서 C/C++ 프로그램을 구성 하였

다. 여기서 모든 power는 $z=0$ 일 때 한 모

드에만 존재하는 것으로 가정하였고 수치 해석

방법으로 Runge-Kutta방법을 사용하였다.

유한 코어로 설정된 본 연구의 경우 잘 유도

된 모드의 결과는 어느 정도 크기의 R 까지는

Asawa와 Taylor^[4]의 결과와 일치한다. 이것

은 식 (8)과 (13)의 타당성을 확인해 주는 좋

은 예가 된다.

IV. 결과 및 고찰

광파 진행거리 z 에 대한 기본모드의 상대적인

광 power를 곡률반경 R 을 바꿔가면서($R =$

3.53cm , 0.9413cm , 그리고 0.5883cm 일

때) 계산해 본 결과가 그림 2, 3와 4와 같다.

그림 5은 Asawa 와 Taylor의 결과이다. 그림

2, 3, 그리고 4에서 알 수 있는 바와 같이

$R=3.53\text{cm}$ (그림 2)인 경우 그림 5의 $R=1$

cm 결과의 진동형태와 큰 차이가 없으나, R

$=0.9413\text{cm}$ (그림 3), $R=0.5883\text{cm}$ (그

림 4)인 경우는 첫 맥 간격(beat length)에

서 진동 되어 되돌아 오는 power가 각각

99%, 90%정도 밖에 복귀되지 않음을 알 수

있고 맥 간격도 1mm 및 0.95mm 정도로 좁아져 있음을 알 수 있다.

이는 Asawa-Taylor 모델은 이론적으로 취급을 용이하게 하기 위하여 너무 단순화 하였기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 이 연구를 통하여 Asawa-Taylor 모델은 곡률반경 1cm 이하의 큰 곡률에서는 더 이상 유효하지 않는 한계성을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 광섬유의 곡률반경이 아주 작은($<1\text{cm}$) 경우에도 기본 모드로

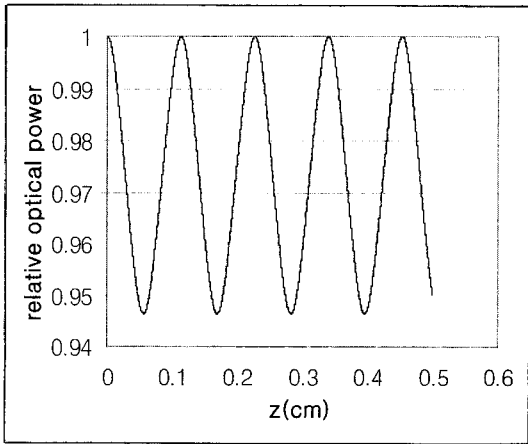


그림 2. 기본모드의 Optical power 와 거리 z의 관계(곡률반경 $R = 3.53\text{cm}$).

Fig. 2. Relative optical power in fundamental mode vs. z, for bend radius $R = 3.53\text{cm}$.

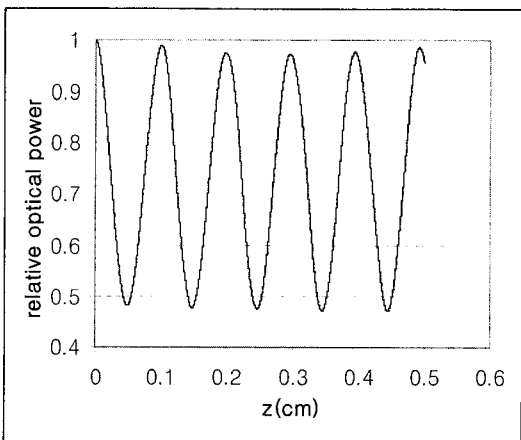


그림 3. 기본모드의 Optical power 와 거리 z의 관계(곡률반경 $R = 0.9413\text{cm}$).

Fig. 3. Relative optical power in fundamental mode vs. z, for bend radius $R = 0.9413\text{cm}$.

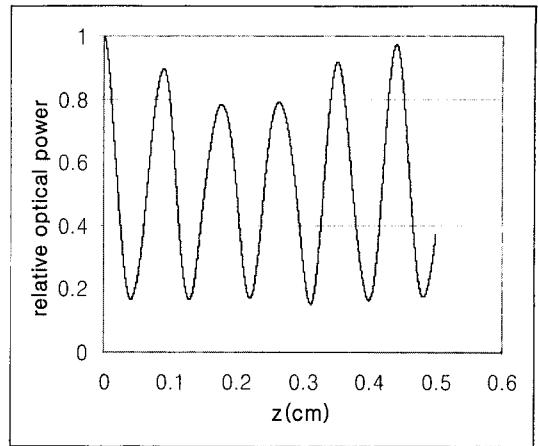


그림 4. 기본모드의 Optical power 와 거리 z의 관계(곡률반경 $R = 0.5883\text{cm}$).

Fig. 4. Relative optical power in fundamental mode vs. z, for bend radius $R = 0.5883\text{cm}$.

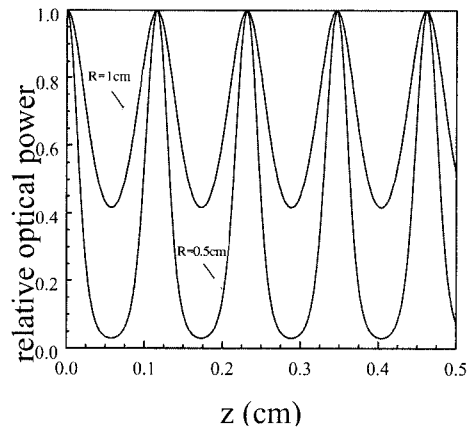


그림 5. Asawa와 Taylor모델의 결과[4].

Fig. 5. Result by Asawa and Taylor[4].

주입된 데이터파는 일부 낮은 차수의 모드에서 여전히 진동하고 있음을 알 수 있다.

여기까지 우리는 기본모드로 주입된 데이터파의 전파와 Asawa-Taylor 모델의 한계점에 대하여 관찰해 보았다. 이 연구가 광통신 Link로써 침입 감지기능을 가진 유용한 모델이 되기 위해서는 기본모드보다 높은 차수로 전파되고 있는 감시파가, 힘이 생길 경우 데이터파보다 훨씬 먼저 감쇄가 생기도록 충분히 높은 차수로 주입되어야 할 것이다.

V. 결 론

이론적 해석의 용이함을 위해서 너무 단순화된 Asawa-Taylor의 모델을 훨씬 더 현실적이고 실제적인 이론적 모델로 구현하는데 중점을 두었다. 이 연구결과는 Asawa-Taylor의 모델은 광섬유의 곡률반경 1cm 이하에서는 더 이상 유효하지 않음을 나타내고 있다.

그리고 이 결과에서 본 바와 같이 광섬유의 곡률반경이 아주 작은 경우($\sim 1\text{cm}$)에도 기본모드로 주입된 데이터파는 거의 감쇄되지 않고 낮은 차수의 모드에서 진동하고 있음을 알 수 있다. 광섬유가 휘어짐으로 인해서 기본 모드로 주입된 광파가 power의 큰 감쇄 없이 일부 낮은 차수의 모드에서 진동하는데, 이것은 기존의 예측과는 다른 것이다. 이 원인을 밝혀내는 것은 흥미로운 일일 것이며, 앞으로의 연구에서 이것을 밝혀지기를 기대한다.

감사의 글

이 연구를 위하여 많은 조언을 해주신 Texas A&M University의 Dr. Henry F. Taylor 와 연구동기 및 실험부분에서 도움을 주신 Dr. Charles K. Asawa 두분께 깊이 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] H. Zanger and C. Zanger, *Fiber Optics: Communication and Other Applications*, New York: Maxwell Macmillan, 1991.
- [2] P. D. Steensma, Method and apparatus to provide a secure optical communication system, U. S. Patent 4 211 468, July 27, 1980.
- [3] C. K. Asawa, Bimodal intrusion detection in an optical fiber communication system using graded index fiber, U. S. Patent 5 003 623, March 26, 1991.
- [4] C. K. Asawa and H. F. Taylor Propagation of light trapped within a set of lowest-order modes of graded-index multimode fiber undergoing bending, *Applied Optics*, Vol. 39, No. 13, pp. 2029-2037, May 2000.
- [5] D. Donlagic and B. Culshaw, Propagation of the Fundamental Mode in Curved Graded Index Multimode Fiber and Its Application in Sensor Systems, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 334-342, March 2000.
- [6] J. Arrue, J. Zubia, G. Durana, and J. Mateo, Parameters Affecting Bending Losses in Graded-Index Polymer Optical Fibers, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 7, No. 5, pp. 836-844, September/October 2001.
- [7] H. F. Taylor Bending effects in optical fibers, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. LT-2, No. 5, pp. 617-628, October 1984.

著 者 紹 介

손 영 호

1966년 8월 1일생.

1989년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2002년 5월 Texas A&M University,

Electrical Engineering Dept.(공학박사)

2002년 9월 ~ 현재 영남대학교 전자정보공학부 BK21 객원교수

주관심 분야 : Fiber Optics, Fiber Optic Communication, Fiber Diagnostics