한국통신학회 1986년도 추계학술발표회 논문집 (1986.11.22)

86361

단일 모드 FIBER 에서 기본 MODE의 차단 파장 조건에 관한 연구

○김 상 준　　김 형 태　　김 기 대
*대영전자공업주식회사

A STUDY ON THE CUT-OFF CONDITION OF THE FUNDAMENTAL MODE IN MONOMODE FIBERS

○ San Jun Kim　　Heung Tae Kim　　Ki Dae kim
* Daeyoung Electronics Ind. Co., Ltd.

ABSTRACT

In this paper, The loss spectra between 1.1um and 1.7um were measured by cut-back method using tungsten-halogen lamp, a grating monochromator and an InGaAs detector.

Typical fiber lengths measured were 30 meter.
This result represent a further contribution to monomode fiber design and has been applied to some common profiles that are under study to optimize the fiber performances.

It is very important that the parameter a,Δ were designed more exactly and transmission of LP01 mode in 1.55um. Therefore, Fiber designer have to be aware of the fact that this mode coupling loss and bending loss.

1. 서 론

주로 장거리 전송선로로 사용되는 단일모드 광섬유가 갖는 특성은 광손실, 색분산, 차단 파장과 모드 필드 (mode field)등이며 단일 모드 광섬유 코어내의 전자장 분포는 광섬유를 상호 접속할 때 접속 손실 및 기본 모드 (fundamental mode)의 분산에 영향을 주는 중요한 특성이다.

광섬유의 중요한 특성중 전송손실은 중계기의 거리를 결정하는 가장 중요한 요소로서 광섬유 시스템 설계에 큰 영향을 미친다.
광섬유의 손실을 야기시키는 현상에는 산란 및 복사 현상과 재료의 흡수현상이 있다.

단일모드 광섬유로 고속 장거리 통신이 가능하게 된 것은 저손실 광섬유 제조와 저손실 접속이 이루어지면서 부터이다. 이들 광섬유 통신시스템이 단일모드 상태로 동작하고 있다는 것을 확인하기 위해서는 LP01 모드 (fundamental mode)의 차단파장 (cut off frequency) 를 특정짓는 것이 단일모드 광섬유에서 중요하다. 차단 파장을 측정하는 방법은 transmit power측정과 cutback cutoff측정 시스템이 있으나 본 논문에서는 cutback cutoff 측정 시스템을 이용하여 측정하였으며, cutoff를 측정함으로써 fiber 설계가 용이하며 profile 을 결정했을 때 사용파장을 결정하고, 전송시 손실을 측정할 수 있다.

2. 이 론

(1) cut-off (차단파장) 조건의 유도

종단 단일모드 도파관은 중심 core 영역 D의 굴절율 n1과 외부 clading n2 에 의해 특정되어 진다

$n^2(r)$ 은 전송면 도파관의 굴절율 분포이고

$$n^2(r) = n_1^2 + \Delta^2 S(r) \quad \text{--------- (1)}$$

Δ 는 Numerical aperture, S(r) 는 굴절율 분포의 무차수 함수이다.
그러므로

$$\left.\begin{array}{l} S(r) \le 1 \\ S(r) = 0 \end{array}\right\} \text{일때 } r \notin D$$

2a 는 D 의 직경 (반경=a)

기본 mode 의 차단 파장에서 scalar 파동 방정식은

$$\nabla_t^2 \phi(r) + (V^2/a^2)\, S(r)\, \phi(r) = 0 \quad \text{-------- (2)}$$

∇_t^2 은 횡방향 laplacian 함수이다.

$V = 2\pi a \Delta / \lambda$ (λ : 진공중 파장)

V 는 정규화 주파수 (normalized frequency)

$\phi(r)$ 는 wave 함수이다.

가장 적은 고유치 V 는 (2)식을 유도함으로 얻어질 수 있다. ϕ 의 조건과 정규화 함수는 core 와 cladding 사이에서 연속적이고, 기본 mode 의 차단파장 V 값으로 나타난다.

D 를 가지는 영역에서 (2) 식을 적분하고, Gauss' 정리를 적용하면

$2\pi R\left(\frac{\phi'}{dR}\right)\phi_m(R)+(V^2/a^2)\iint_D S\phi\, d^2\gamma = 0$ --- (3)

$\phi_m(R)$ 은 반경 R 의 원주상의 $\phi(r)$ 값 (3)식에서

$(V^2/a^2)\log R\iint_D S\phi\, d^2\gamma = -2\pi\phi_m(R) + 상수$ --- (4)

ϕ 는 $R\to\infty$ 일때 (4) 식으로 부터 차단파장 값 V 는

$$V^2\iint_D S\phi\, d^2\gamma = 0 \quad \text{---------- (5)}$$

어떠한 유전체 도파관에서 fundamental mode의 차단 파장의 등식이다.
첫번째로 ϕ 는 기본 mode 의 wave (파장) 함수 이고 그것은 항상 양수이어야 한다.
이것은 특별한 의미를 포함하며 (5)식으로부터 $S(r)\geq 0$ 이면 차단 파장 V 는 zero 이다.

모든경우에 있어서 등식(5) 는 아래와 같이 2개의 차단 파장 조건에서 분리 가능하다.

$$\begin{cases} V=0 & \iint_D S\, d^2\gamma \geq 0 \\ V>0 & \iint_D S\phi\, d^2\gamma = 0,\ \iint_D S(r)\, d^2\gamma < 0 \end{cases} \quad \text{---(6)}$$

이런 과정의 주 결과에서 기본 모드는 $V>0$ 인 차단 파장을 가지며, 아래와 같은 등식을 가진다.

$$\iint_D S\, d^2\gamma \leq 0\ ,\quad \iint_D [n^2(r)-n_1^2]\, d^2\gamma < 0 \quad \text{---(7)}$$

(7)식에서 결과적으로 $\iint_D [n^2(r)-n_1^2]\, d^2\gamma < 0$ 는 $n^2(r)$ 은 n_1^2 보다 적어야 하므로 아래와 같은 그림을 생각하면

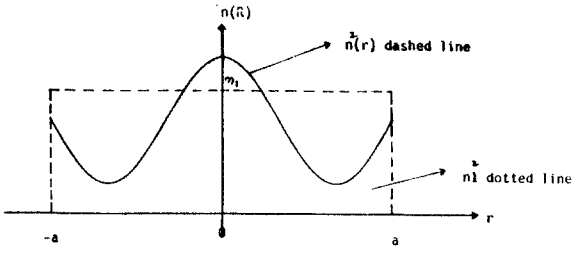

그림 1. 굴절율 분포

Fig. 1. refractive-index distribution

$n^2(r) < n_1^2$ 일 경우에만 LP_{01} mode 에서 cutoff frequency 를 가져야 할 조건이다.
그리고 (7)식을 유도하면 (1) 식에서

$n^2(r) = n_1^2 + \Delta^2 S(r)$

$n_1^2+\Delta^2 S(r) - n_1^2 < 0$ 에서

$\Delta^2 S(r) < 0$ 이므로

$n^2(r) - n_1^2 < 0$ 이다.

그러므로

$$\iint_D n^2(r)\, d^2\gamma - \iint_P n_1^2 d^2\gamma < 0$$ 이므로

$$\iint_P n^2(r)\, d^2\gamma < \iint_P n_1^2 d^2\gamma$$ 로 놓을 수 있다.

그러므로 LP_{01} mode 의 cutoff 가 될 수 있는 조건은 2가지 방법을 가진다.

첫째, 코어굴절율 분포의 평균값은 도파관 굴절율 분포의 평균값보다 높아야하며,

둘째, 도파관 굴절율 분포의 자승 $n^2(r)$ 과 코어의 굴절율 자승 n_1^2 의 차 + 부분과 - 부분의 차는 항상 음수이어야 한다.
이러한 조건은 매우 유용하며 일반적인 경우에 적용되어진다.

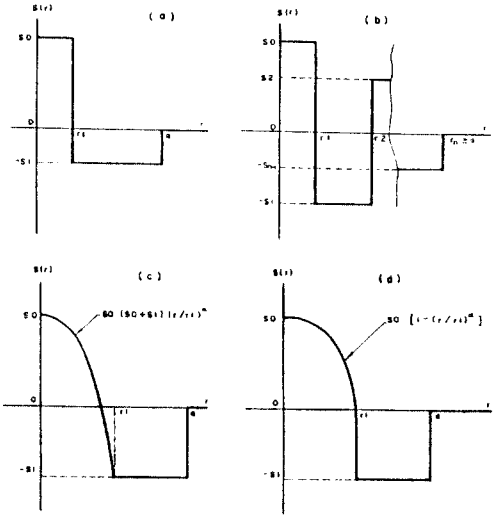

그림 2. profile함수 S(r) 의 표현

Fig. 2. representation of some actual profile function S(r)

(2) Three-Layer 광섬유의 구조및 특성

단일모드 광섬유에서 색분산, 차단파장과 spot size 의 특성을 만족시키기 위하여 코어경 및 굴절율 분포를 설계치로 부터 변동폭이 적도록 제어하는 것이 대단히 중요하다.

실험에 사용된 단일모드 광섬유는 그림 3과 같이 코어 (core), 내부 클래딩 (depressed cladding) 과 외부 클래딩의 세부분 (W형 광섬유)로 구분된다. 여기에서 코어는 세부분 중에서 굴절율이 가장 크며 내부 클래딩이 가장 작은 굴절율을 갖는 구조이다.

이러한 구조에서 코어와 내부 클래딩의 굴절율 차이가 외부 클래딩과 내부 클래딩차 보다 훨씬

크다면 단일 클래딩 만을 갖는 광섬유 (matched cladding) 보다 코어내 에너지 구속력이 훨씬 더 크게 된다.
이러한 광섬유는 도파로 분산 ($d(\beta^2/d\omega^2$)이 재료분산과 서로 반대부호를 갖는다는 것이 특징이며 필드가 강하게 코어내에 구속되기 때문에 광섬유의 구부림 손실이 적다.

이러한 요구를 만족시키기 위한 광섬유 구조는 여러가지 있을 수 있으나 본 실험에 사용된 광섬유의 코어는 계단형 굴절율 분포를 하고 있으며 외부 클래딩과의 사이에 약간 굴절율이 낮은 내부 클래딩층을 두고 있다.
이 실험용 모델의 이상적 구조는 그림 3에서 보여주고 있다.

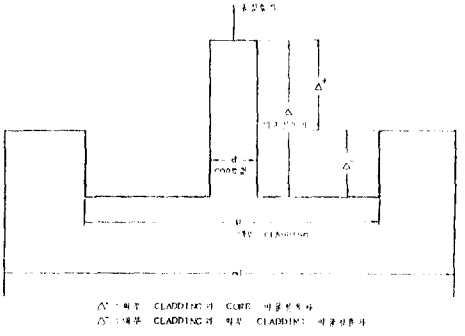

그림 3. 단일모드 fiber 의 굴절율

Fig.3. refractive-index of single mode fiber

3. 실험 방법

(1) Fundamental mode 의 cutoff 현상

본 논문에서의 중요한 실험대상은 matched cladding 광섬유인 경우에는 기본 모드의 차단은 발생되지 않지만 W -형태 광섬유인 경우는 실제로 기본모드의 차단조건이 존재한다.
이러한 W -형태 광섬유인 경우는 최소 분산파장과 spot size 의 선택이 독립적으로 가능하며 장파장에서 급격한 손실 증가가 생기는 LP_{01} 모드의 차단은 modal propagation constant β 와 wave number $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 의 비가 $\beta/k_0 < n_2$ 되는 경우에 클래딩 바깥으로 에너지를 방사하게 된다.

그러나, $\beta/k_0 < n_2$ 인 조건이라 하더라도 $\Delta^- = 0$ 인 경우에는 모든 파장에서 누설이 된다.

이러한 LP_{01} mode 의 차단 현상을 코어내에 전송되는 진행모드와 외부클래딩에 진행되는 discreate mode와의 사이에 mode coupling 이 일어나기 때문이며, 두 모드간에 위상속도가 일치하면 두개의 도파로 사이에서 에너지 교환이 일어난다.

이때 resonant loss peak 가 생긴다고 생각된다. 차단 파장 부근에서는 전자계 에너지가 외부 클래딩 속 깊숙하게 침투하고 전송 손실을 주로 이 field 의 꼬리에 의한 영향이며 bending 손실이 커지게 된다.

실험에서 사용된 W -형태 광섬유의 굴절율 분포는 그림 3에서 본 바와 같이 $\Delta^- < 0$ 인 경우에 완전한 도파관이라 하더라도 effective modal phase - index 가 외부 클래딩보다 작기 때문에 LP_{01} 이 차단되는 파장이 존재한다.
$\Delta^- = 0$ 인 경우 bending 에 더 약하며 LP_{01} 이 외부 깊숙하게 침투하는 경우 fused silica cladding 에 기인한 광손실을 갖게 된다.
이러한 복잡한 차단 조건을 구하기는 간단하지 않다.

광섬유가 일직선이라는 가정과 전자기가 코어와의 경계에서 연속이라는 조건에서 weakly guiding approximation 으로 부터 전파특성을 구한다.

$\Delta^+ = [\, n(\text{core}) - n(\text{out cladding})\,] / n2$

$\Delta^- = [\, n(\text{inner cladding} - n(\text{outer cladding})\,] / n2$

위의 식들은 W -형태 단일모드 광섬유에서 차단 과정을 구하는 식이며 정규화 주파수 V_c 는 다음과 같이 정의한다.

$$V_c^2 = \left(2\pi \frac{a n_2}{\lambda_c}\right)^2 (2\cdot\Delta) \quad \text{---------- (8)}$$

(2) Cutoff frequency 의 측정

본 실험에서 사용되는 광섬유는 코어 내부 클래딩 및 외부 클래딩을 가지며 그 중에서 코어가 굴절율이 가장 크며 다음으로 굴절율이 큰 외부 클래딩과의 사이에 가장 굴절율이 낮은 내부 클래딩 층이 있다.
또한 내부 클래딩의 두께는 코어경에 비하여 훨씬 더 크다. 이러한 W -형태 단일모드 광섬유의 실제 모델은 그림 3과 같으며 MCVD (modified chemical vaper deposition)법에 의해 제조된 광섬유의 굴절율 분포는 실제로 그림 4 과 같다.

실험용 광섬유는 5종류를 선정하였다.
1.55μm에서 LP_{01} 차단이 될때 그 파장의 차이를

확인하기 위해서 선정이 되었다.

이 광섬유는 MCVD 법으로 제조되었으며 GeO2-SiO2 코어, P2O5 와 Fluorine 의 내부 클래딩, Silica 의부 클래딩의 성분으로 구성되었다. 본 논문에서는 1.3 um 에서 전송하는 전송 시스템에 최적화된 W-형태 광섬유를 이용하여 투과손실이 적은 1.1um 에서 1.7um 대역을 가지고 가장 일반적으로 사용되는 Cut back 방법으로 LP01 mode 투과손실을 측정하였다.

광원으로서는 백색 광원인 tungsten-halogen lamp 와 monochromator 가 사용되었으며 시료의 길이는 30 m 를 선정하였다.

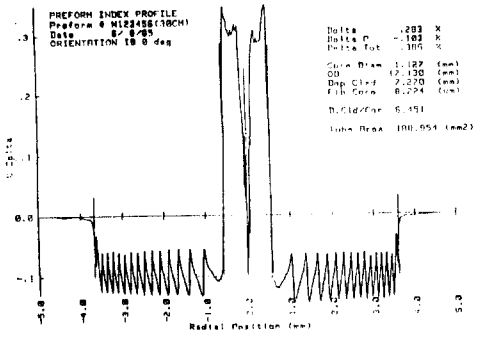

그림 4. W-형태 광섬유의 굴절율 분포

Fig. 4. index distribution of W-type

Table 1. character of the experiment optical fiber

FIBER	CHARACTER							
	Δ^+	Δ^-	b	a	2a	n1	n2	Δ
a	0.262	0.113	6.47	8.4	1.452	1.447		0.375
b	0.235	0.106	6.48	8.15	1.451	1.447		0.341
c	0.252	0.115	6.5	7.43	1.451	1.447		0.367
d	0.200	0.116	6.51	8.21	1.451	1.447		0.316
e	0.197	0.117	6.49	8.5	1.451	1.447		0.314

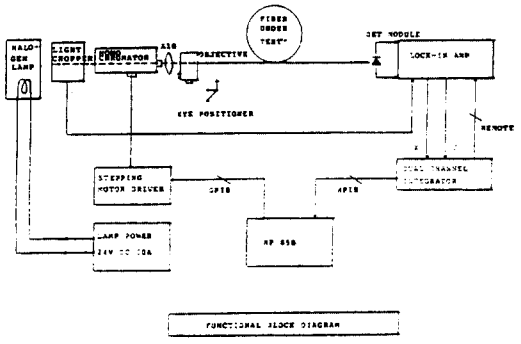

그림 5. 전체 블록 다이아그램

Fig. 5. functional block diagram

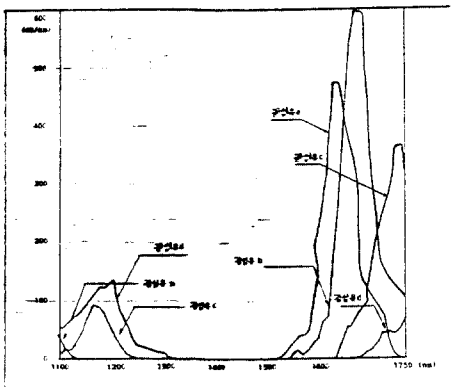

그림 6. 단일모드 fiber 의 손실 분포

Fig. 6. loss spectra of single-mode fibers with

그림 6에서 좌측의 peak loss 는 LP11 모드의 차단 현상을 나타내며 우측의 peak loss 는 LP01 모드의 차단 현상을 나타낸다.

실험실의 조건때문에 일직선으로 유지시킬 수가 없어 bending 의 영향이 유효굴절율 분포에 영향을 줄 수 없다고 판단한 70Cm 정에 장력이 전혀 가하지 않도록 느슨하게 감았다.

그림 6에서 보면 급격히 손실이 증가하는 파장을 확인할 수 있으며 LP11 모드 차단 파장이 짧아지는 것을 알 수 있으며 더 긴 파장에 대한 특성은 확인되지 않았다.

4. 실험 결과

(1) Cutoff frequency 의 측정 결과

그림 5에 의한 시스템에 의하여 시료를 측정한 결과 1.55 um 에서 LP01 차단이 될 때 그 파장의 차이를 그림 6에 나타내었으며 1.5 um - 1.8 um 대역에서의 차단 현상은 LP01 모드이며 fundamental mode 라고 부른다.

1.55 um 장파장에서 1.3 um 최적 설계 광섬유를 사용하기 위해서는 실제자는 mode coupling loss를 항상 주시하여야 하며 그러기 위해서는 LP01 모드의 광손실 측정과 함께 작은 reel 에 광섬유를 감아 bending loss 를 확인하여야 한다.

이러한 실험 결과치와 광섬유 측정 parameter 를 이용하여 차단 파장 유도식에 적용한 결과 아래와 같은 값을 얻을 수 있다.

Table 2. experiment result of cutoff frequency

FIBER	CHARACTER				
	a	n	λc(um)	Δ	Vc
a	4.2	1.447	1.65	0.375	2.13
b	4.075	1.447	1.75	0.341	1.97
c	3.715	1.447	1.85	0.367	1.88
d	4.105	1.447	1.57	0.316	1.91
e	4.25	1.447	1.63	0.314	1.97

1.55㎛ 장파장에서도 낮은 손실을 유지하기 위해서는 일정한 설계 기준이 요구된다.
설계 모델에 따라 다를 수 있으나 예를 들면 코어가 8.4㎛ nom 이며 b/a 가 6.4로 될 경우 total Δ 는 0.37, Δ⁻ 를 0.11 이상으로 유지시키는 것이 적절하다.

5. 결 론

본 논문에서는 단일 모드 광섬유의 외부 클래딩보다 낮은 내부 클래딩 굴절율을 가지는 코어의 fiber에서 기본 모드의 차단 파장 조건에 대해서 연구하였다.
간단한 수치 해석과 공식의 표현 유도를 하였으며, 이러한 결과로 단일 모드 파이버 설계에 대해서 논하였고, 공동 profile에 적용하였으며, fiber 제작에 대한 적절한 연구가 계속 진행되고 있는 단계이다.

이러한 결과로 특별한 경우의 많은 수에 적용하도록 얻어졌고, 더 큰 효과는 외부 클래딩에 의한 손실과 곡률 (curvature)에 대한 손실이 적용되도록 설계되어야 한다.
또한 LP_{01} 모드 차단 파장은 LP_{11} 모드의 차단 파장과 함께 짝아지며, 1.55㎛에서 LP_{01} 모드를 전송하기 위해서는 a, Δ 의 정확한 제어가 대단히 중요함을 알았다.

b/a= 6.4 , 2a=8.4㎛ nom인 경우 Δ 는 0.37, Δ⁻ 는 0.11 이상이어야 하며 광섬유의 설계자는 항상 1.55㎛ 에서 LP_{01} 모드 광손실 및 bending 손실을 감시하여야 한다.

참 고 문 헌

1. B.J. Ainsile, K.J. Beales, D.M. Cooper, C.R. Day and J.D. Rush, " Monomode fiber with ultra low loss and minimum dipersion at 1.55um", electron lett. 19 (1982)

2. L.G. Cohen and W.L. Mammet, "Low-loss quadruple -Clad single-mode lightguides with dispersion below 2ps/Kmnm over the 1.28um - 1.65um wave length range", electron lett. 18 (1982)

3. V.A. Bhagavatula, M.S. Sportz, W.F. Love and D.B. Kech, "Segmented-core single-mode fibers with low loss and low dispersion", electron lett. 19 (1983)

4. S. KaWaKami and S. Nishida, "Characteristics of a doubly clad optical fiber with a low index inner cladding", IEEE J. Quantum electron. QE 10 (1974)

5. A. Safaai-JaZi and G.L. Yip "Cutoff conditions in three-layer cylindrical dielectric waveguides IEEE trans. microwave theory tech. MIT 26(1978)