DBpia

論 文

Graded Index 光纖維의 Mode Coupling Coefficient 決定에 關한 硏究

正會員 李 鎬 俊* 正會員 金 炳 贊**

A Study on the Determination of Mode Coupling Coefficient in Graded-Index Optical Fiber

Ho Joon LEE*, Byung Chan KIM** *Regular Members*

要 約 本 論文에서는 모우드 파우어에 대한 結合 微分方程式의 解를 구하기 위하여 Fourier Transform이 使用되었고, phasor型態의 試圖解를 使用하여 세 개의 모우드 結合係數 方程式을 誘導하였다. 이 모우드 結合係數 理論은 다른著者들에 의해 제안된 理論을 包含한다. 또한 光源이 正弦函數에 의하여 變調되는 경우에도 이 式이 잘 適用됨을 알 수 있었다. 實驗에서 多 모우드 언덕型 屈折率 光纖維의 모우드 結合係數는 正弦函數로 變調된 光源을 使用함에 의하여 決定되었다.

ABSTRACT In this paper, the Fourier Transform is employed to solve the coupled differential equations of modal power and three equations of the mode coupling coefficient are derived using the phasor form trial solution. The theory of the mode coupling coefficient contains a few theories proposed by earlier authers. Also it is seen that in case the optical source is modulated by a sinusoidal function, this theory is applied as well. In experiment, the mode coupling coefficient is determinded for a multimode graded-index fiber by using the optical source, which modulated by a sinusoidal function.

I. 序 論

多 모우드 光纖維의 傳送特性은 모우드 群速度(modal group velocity), 모우드 損失(modal loss), 모우드 結合係數(mode coupling coefficient)로 表現된다. 따라서 모우드結合係數는 重要한 要素이며 또한 損失과 帶域幅(bandwidth)을 豫想하는데 利用된다[1].

모우드 結合을 解析하는 方法은 理想的 導波路의 모우드에 代한 觀點에서 波動 結合 方程式을 誘導하는 方法[2]과 local normal 모우드의

*湖西大學 通信工學科
Dept. of Telecommunication Engineering, Ho Seo College, Cheon An, 330, Korea.
**成均館大學校 工科大學 電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Sung Kyun Kwan University, Seoul, 110, Korea.
論文番號 : 88-15(接受1988. 2. 3)

www.dbpia.co.kr

觀點에서 誘導하는 方法[3]이 있다. 이러한 解析으로 多 모우드 또는 單一 모우드 光纖維에서 發生하는 모우드 結合과 放射現象을 적어도 原理的으로는 說明할 수 있으나 모든 모우드의 位相과 振幅이 波動 結合 方程式에 包含되기 때문에 實際의 光纖維에 適用하기는 어렵다. 그러나 大部分의 境遇 各 모우드나 모우드 群에 의하여 傳達되는 파우어의 平均量을 아는 것으로 充分하기 때문에 平均파우어에 對한 結合 方程式[4]이 考案되었다.

모우드 파우어의 觀點에서 結合의 程度를 測定하는 方法에는 여러가지가 있는데 階段型 光纖維에서 Gambling et. al[5]은 結合係數를 常數로 보고 모우드 損失 γ를 $\gamma=\gamma_0+A\theta^2$로 表現하여 測定하였으며, Jeunhomme과 Pocholle[6]은 導波 모우드(guided mode)에서 損失 γ를 영으로 放射 모우드(radiation mode)에서는 무한대로 假定하였으며 또한 光纖維의 met microbending 損失을 알고 定常狀態에서 光파우어 分布를 測定함으로써 모우드 結合係數를 決定하였다. Kawakami et. al[7]~[9]은 多 모우드 光纖維의 모우드 파우어 波形간에 時間差(temporal difference)가 存在하는 原理에 根據하여 階段型 屈析率 光纖維에 對하여 모우드 結合 係數를 測定하였으나 이때는 모우드 群速度를 알아야 한다. Nagano et. al.[10]은 모우드 光파우어 分布(modal power distribution : MPD)가 모우드 結合과 모우드 損失에 의하여 光纖維를 따라 서서히 變化하는 現象에 根據하여 測定하였으며 光纖維 入力에 가까운 地點과 出力點에서 光파우어 分布를 測定하여야 한다. 또한 Jeunhomme의 理論에 의하여는 bare光纖維와 cabling된 光纖維의 境遇에 대하여 모우드 結合係數의 測定이 몇 편 報告[11],[12] 되었다.

本 論文에서는 파우어 結合 方程式을 Fourier tramsform하고 trial solution을 假定함으로써 모우드 結合係數를 求하는 式을 誘導하였다. 그리고 언덕型 光纖維에 대하여 모우드 結合係數를 測定하는데 利用되는 모우드 파우어 分布를 計算하기 위하여 near field 패턴을 測定하였다. 光信號의 形態는 모우드 파우어分布 計算에 便利한 正弦函數를 利用하였으며 모우드 結合係數 式에 包含된 모우드 群速度는 언덕型 光纖維에 對하여 理論的으로 號想되는 값을 利用하여 모우드 結合係數를 決定하였다.

Ⅱ. 結合係數 測定理論

多 모우드 光纖維에서 導波 모우드간에 임의의 結合을 가질때 모우드 平均 파우어의 傳達을 나타내며, 모우드를 連續스펙트럼으로 表現한 파우어 結合 方程式[1],[13]은

$$\frac{\partial P(m,z,t)}{\partial z}+\tau(m)\frac{\partial P(m,z,t)}{\partial t}=$$
$$-\gamma(m)P(m,z,t)+\frac{1}{m}\frac{\partial}{\partial m}\left[mh(m)\frac{\partial P(m,z,t)}{\partial m}\right] \quad (1)$$

이다. 여기서 m은 主 모우드수(principal mode number)이고, $\tau(m)$은 m번째 모우드의 平均 遲延時間이고, $\gamma(m)$은 m번째 모우드群의 減衰率의 平均値이고, $h(m)$은 $m+1$ 모우드 群과 m 모우드 群사이의 結合에 對한 平均値이며, 또한 $0\leq m\leq M(\alpha)$이다. 電力 結合 方程式의 解를 구하기 위하여 一般的으로 Laplace變換[13]이나 Fourier 變換[14]을 使用한다.

Fourier 變換을 式(1)에 適用하면

$$\frac{\partial\overline{P}(m,z,\omega)}{\partial z}=-[\gamma(m)+j\omega\tau(m)]\overline{P}(m,z,\omega)$$
$$+\frac{1}{m}\frac{\partial}{\partial m}\left[mh(m)\frac{\partial\overline{P}(m,z,\omega)}{\partial m}\right] \quad (2)$$

가 된다. 이 式의 解는

$$\overline{P}(m,z,\omega)=Q(m,z,\omega)\cdot\exp[-j\omega T(m,z,\omega) \quad (3)$$

로 表現되며, 여기서 $Q(m,z,\omega)$는 모우드 振幅分布이며 減衰率이 包含된다. $T(m,z,\omega)$는

www.dbpia.co.kr

$$T(m, z, \omega) = T_r(m, z, \omega) + \tau_0'(z, \omega) \cdot z \quad (4)$$

가 된다. 여기서 $\tau_0'(z, \omega) \cdot z$는 모든 모우드에서 共通인 遲延時間이며, 모우드 間 相對 遲延時間은 $T_r(m, z, w)$로 表現되었다. 모우드 結合이 存在하지 않을때 單位 길이當 遲延時間 $\tau(m)$은 τ_0와 $\tau_r(m)$의 合으로 表示되며 그림 1은 모우드 結合의 유무에 따라 相對遲延時間 分布를 나타낸다.

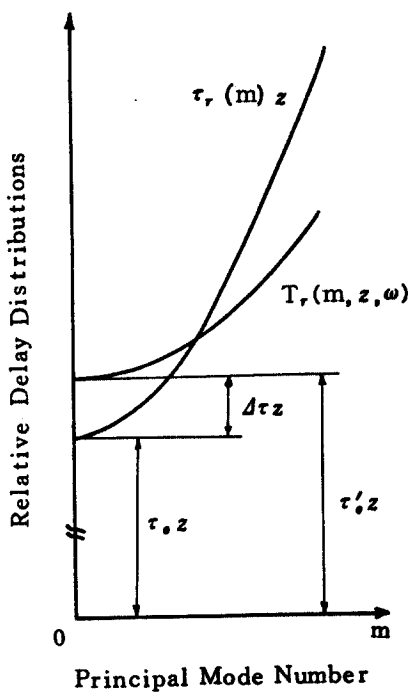


그림 1 主 모우드數에 대한 相對遲延時間
Relative delay time versus principal mode number.

만일 모우드 結合이 存在하는 光纖維에서 定常狀態에 도달했다고 假定하면, $Q(m, z, \omega)$는

$$Q(m, z, \omega) = Q'(m, \omega) \exp[-\lambda(\omega) z] \quad (5)$$

가 되며 $T(m, z, \omega)$는

$$T(m, z, \omega) = T_r'(m, \omega) + \tau_0'(\infty, \omega) \cdot z \quad (6)$$

로 表現된다. 여기서 $Q'(m, \omega)$는 z의 函數가 아니며 이때를 에너지分布 定常狀態(energy distribution steady state)라 하며, $T_r'(m, \omega)$가 z의 函數가 아닌것을 動的平衡(dynamic equlibrium) 또는 時間遲延 定常狀態(temporal difference steady state)라 한다. 減衰率 $\lambda(w)$는 c.w. 固有置(eigen value) λ_0와 ω의 함수의 項으로 表現되고 定常狀態에서 모든 모우드에 共通인 遲延時間은 $\tau_0'(\infty, \omega) \cdot z$가 된다.

모우드 結合이 存在할때를 考慮하기 위하여 trial solution(3)을 모우드 結合 方程式(2) 에 代入하고 이 式에서 實數部만 取하고 ω가 0 일때, 즉 c.w.인 境遇에

$$\frac{1}{m}\left[\frac{\partial}{\partial m}\left\{mh(m)\frac{\partial Q}{\partial m}\right\}\right] = \left[\frac{\partial Q}{\partial z} + \gamma(m) Q\right] \quad (7)$$

가 된다. 式(7)에서 모우드 結合係數를 計算하기 위하여 $Q(m, z, \omega)$가 必要하며 定常狀態에서는 式(5)로 表示된다. 이 式은 c.w. 일때

$$Q(m, z, \omega) = Q_0(m) \exp[-\lambda_0 z] \quad (8)$$

가 된다. 여기서 λ_0는 式(7)의 固有置 中 가장 작은 값이며 定常狀態 損失이다. $Q_0(m)$은 定常狀態 파우어分布이다. 式(8)을 式(7)에 代入하여 모우드 結合係數 h(m)에 對하여 整理하면

$$h(m) = \frac{1}{m\partial Q_0/\partial m} \int_0^m [\gamma(m) - \lambda_0] Q_0 m \, dm \quad (9)$$

이 되어 Jeunhomme과 Pochelle[6]에 의해 誘導된 式과 같다. 式(9)로 부터 모우드 結合係數 計算을 위하여 모우드 損失 $\gamma(m)$과 定常狀態 損失 λ_0가 要求되며 光纖維에 c.w.光 信號를 入射시켜 定常狀態에서의 파우어分布 Q_0를 測定하여야 한다.

다음에 式(2)에 式(3)을 代入하여 虛數部를 취하고, 兩邊에 Q를 곱하여 整理하면

www.dbpia.co.kr

$$\frac{1}{m}\left[\frac{\partial}{\partial m}\{mh(m)Q^2\frac{\partial T}{\partial m}\}\right]=\{\frac{\partial T}{\partial z}-\tau(m)\}Q^2 \tag{10}$$

으로 表示되며 式(10)을 모우드 結合係數h(m)에 대해 整理하면

$$h(m)=\frac{1}{mQ^2(m,z,\omega)\partial T(m,z,\omega)/\partial m}\times \int_0^m\left[\frac{\partial T(m,z,\omega)}{\partial z}-\tau(m)\right]\cdot Q^2(m,z,\omega)\ m dm \tag{11}$$

이 된다. 만일 動的 平衡에 到達했다면 T(m, z, ω)는 式(8)과 같이 되어 光纖維 길이에 따라 相對 遲延時間 T_r'가 變化하지 않는다. 따라서 光纖維 길이에 對한 遲延時間의 變化率은

$$\frac{\partial T(m,z,\omega)}{\partial z}=\tau_0'(\infty,\omega) \tag{12}$$

가 된다. 이러한 動的 平衡狀態 또는 時間差 定常狀態는 모우드 結合係數에 逆比例하는 距離傳送後에 이루어지며 모든 모우드는 같은 遲延時間 τ_0'를 갖는다[7], [8]. 이때 τ_0'는

$$\tau_0'=\frac{\int_0^m\tau(m)Q^2(m,z,\omega)\,m\ dm}{\int_0^m Q^2(m,z,\omega)\,m\ dm} \tag{13}$$

이 된다. 式(12)를 式(11)에 代入하면 모우드 結合係數 h(m)은

$$h(m)=\frac{1}{mQ^2(m,z,\omega)\partial T(m,z,\omega)/\partial m}\times \int_0^m[\tau_0'-\tau(m)]\,Q^2(m,z,\omega)\,m\ dm \tag{14}$$

가 된다.

다음에 入力되는 光파우어의 形態가 에너지 信號인 境遇에 Q(m, z, ω), T(m, z, ω)는 각각 모우드 에너지 E(m)과 平均 到達時間(mean arrival time) Γ(m)으로 표시된다. 따라서 光纖維 入力에 單一 光 펄스를 入射했을 때 모우드 結合係數 h(m)은

$$h(m)=\frac{1}{mE^2(m)\partial\Gamma(m)/\partial m}\times \int_0^m[\tau_0'-\tau(m)]\,E^2(m)\,m\,dm \tag{15}$$

과 같이 된다. 이 式은 Miyagi에 의해 誘導된 式과 같으며 그는 에너지와 Action을 먼저 定義하고 平均 到達時間에 對한 聯立 微分方程式을 電力結合 方程式으로 부터 얻어냄에 의하여 式(15)를 誘導하였다. 또한 이 式을 계산하기 위하여 모우드 遲延時間이 必要하며, 모우드 에너지와 모우드 平均 到達時間을 알기위하여 受信된 펄스波形을 測定하여야 하는 어려움이 있다.

光纖維에 入射되는 信號가 正弦函數로 直接光度變調 (direct intensity modulation)시켰을때 Fourier스펙트럼은 正弦函數의 周波數에서 크기가 振幅의 π倍인 delta 函數와 ω가 0에서 크기가 時間平均값의 2π倍인 delta函數로 表現된다. 光纖維 終端에서 受光器에 의하여 電氣信號로 變換하고 增幅할 때 AC增幅器를 使用하여 直流成分을 除去한다면 Q(m, z, ω)와 T(m, z, ω)는 각각 正弦波의 振幅 Q(m)과 遲延時間 T(m)으로 表示된다. 따라서 모우드 結合係數는 式(14)로 부터

$$h(m)=\frac{1}{mQ^2(m)\partial T(m)/\partial m}\times \int_0^m[\tau_0'-\tau(m)]Q^2(m)\,m\,dm \tag{16}$$

가 된다. 式(16)으로부터 모우드 結合係數를 계산하기 위하여 모우드 振幅 Q(m)과 遲延時間 T(m)을 測定하고 모우드 遲延時間 τ(m)을 理論式[15]

$$\tau(m)=\frac{N_1L}{c}\left[1+\frac{\alpha-2-\varepsilon}{\alpha+2}\Delta\left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}}\right.$$

www.dbpia.co.kr

$$+\frac{3\alpha-2-2\varepsilon}{2(\alpha+2)}\Delta^2\left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{4\alpha}{\alpha+2}}+0(\Delta^3)] \tag{17}$$

을 이용한다. 이 式은 α 乘型 光纖維에서 M은 主 모우드數의 최대값, Δ는 屈析率差이고

$$N_1=n_1-\lambda\frac{\partial n_1}{\partial\lambda} \tag{18}$$

$$\varepsilon=\frac{-2n_1}{N_1}\left(\frac{\lambda}{\Delta}\right)\left(\frac{d\Delta}{d\lambda}\right) \tag{19}$$

이다. 여기서 n_1은 core의 屈析率의 최대값이다.

以上과 같이 모우드 結合이 存在하는 境遇 光信號의 Fourier變換을 假定함으로써 c.w. 를 使用하고 에너지 分布 定常狀態에서 모우드 結合係數를 誘導하였으며, 單一 光 펄스를 光纖維에 入射시켰을때 時間遲延 定常狀態에서 모우드 結合係數를 誘導하였다. 또한 正弦函數를 光信號로 入射했을때 모우드 結合係數를 誘導하여 어떤 形態의 光信號를 使用하더라도 모우드 結合係數를 얻어낼 수 있도록 一般化한 理論을 展開하였다.

Ⅲ. NFP와 MPD

언덕型 屈析率 光纖維에서 모우드 電力分布를 求하기 위한 硏究가 많은 著者들에 의하여 이루어 졌다. Piazzola[16]는 α乘 屈析率 多 모우드 光纖維에서 NFP (near-field intensity pattern)를 測定함에 의하여 MPD (modal power distribution)를 計算하였으며, Grau[17]等은 FFP (far-field intensity pattern)으로 부터 誘導하였다.

本 論文에서는 NFP를 測定하여 모우드 파우어 分布를 計算하였으며 時間에 따라 光度가 正弦函數로 變化하는 境遇에 對하여 理論을 展開하였다.

NFP와 MPD의 관계식[16]은

$$P(m)=-2\pi\left(\frac{a}{V}\right)^2\frac{a}{\alpha}\frac{1}{\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha-1}}\times\frac{dI(r)}{dr}\Bigg|_{r=a\left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{2}{\alpha+2}}} \tag{20}$$

이며, 여기서 V는 正規化 周波數이고, a는 光纖維 半径이고, I(r) 은 NFP이다.

光纖維에 入射되는 光 信號가 正弦函數 일때 NFP와 MPD는 phasor로 表現될 수 있으며, 이것을 각각 $\bar{I}(r)$과 $\bar{P}(m)$으로 表示한다. 따라서 NFP $\bar{I}(r)$과 MPD $\bar{P}(m)$은

$$\bar{I}(r)=Q(r)\ \exp[-j\phi\ (r)] \tag{21}$$

$$\bar{P}(m)=Q(m)\exp[-j\omega T(m)] \tag{22}$$

이 되며 여기서 Q(r)을 near field 振幅 分布라 하고, $\phi(r)$을 near field 位相 分布라 定義한다. 그리고 Q(m)은 모우드 振幅 分布라 하고, T(m)은 모우드 遲延時間이라 定義한다. 式(21)과 式(22)를 式(20)에 代入하여

$$Q(m)=2\cdot\pi\left(\frac{a}{V}\right)^2\frac{a}{\alpha}\frac{1}{\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha+1}}\times\sqrt{Q'^2(r)+Q^2(r)\cdot\phi'^2(r)}\Bigg|_{r=a\left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{2}{\alpha+2}}} \tag{23}$$

$$T(m)=\frac{1}{\omega}\left[\phi(r)+\tan^{-1}\frac{Q(r)\phi'(r)}{Q'(r)}+\pi\right]_{r=a\left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{2}{\alpha+2}}} \tag{24}$$

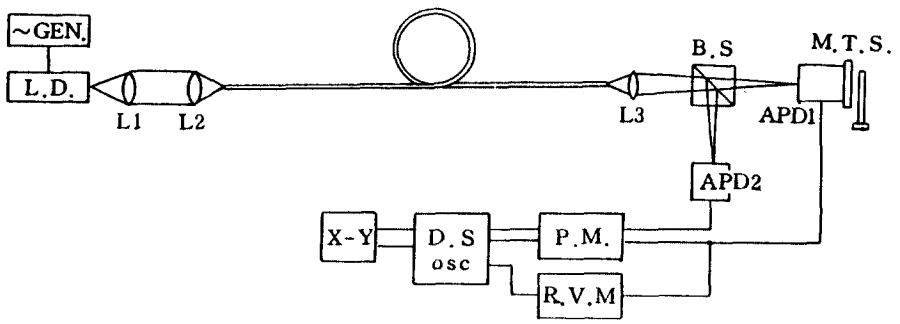
를 얻는다.

언덕型 光纖維에서 near field를 scan함에 의하여 바로 모우드 파우어分布를 얻을 수 없기 때문에 式 (23)과 式(24)를 使用하여 求한다.

Ⅳ. 實驗 方法및 結果

언덕型 光纖維의 모우드 結合係數를 測定하

www.dbpia.co.kr



L1－L3 : Microscope Objective Lens
B.S. : Polarized Beam Spliter
M.T.S. : Motorized Translation Stage
~GEN. : Sine Wave Generator
L.D. : Laser Diode Drive Unit
A.P.D. : Avalanche Photo Diode
P.M. : Phase Meter
R.V.M. : RMS Voltmeter
D.S osc : Digital Storage Oscilloscope
X-Y : X-Y Recorder

그림 2 實驗 裝置圖
Experimental setup.

기 위한 시스템 構成은 그림 2와 같다. 시스템은 크게 나누어 光學裝置와 電子裝置로 나누어지며 光學裝置는 laser를 光纖維에 結合시키기 위한 部分과 光纖維 終端의 near field 패턴을 擴大하는 部分으로 되어있고 電子裝置는 10MHz의 正弦信號로 laser를 구동하기 위한 部分과 基準波에 對하여 near field를 scan하여 얻어지는 波와의 位相差와 振幅을 貯藏하였다가 plot 하는 部分으로 構成된다.

實驗에 使用된 laser 다이오드는 NDL 3108로서 發振中心 波長이 0.85μm 이고, 光出力이 8.0 mW인 連續發振型을 使用하였으며, 驅動回路에는 自動 光파우어 制御 回路를 添加하였다. 光受信器에 使用된 光 다이오드는 NDL 1202 실리콘 APD이며, 傳達 임피이던스 增幅器를 前置增幅器로 使用하였다. 正弦函數로 光度變調된 laser 出力을 光纖維에 結合하기 위하여 L_1은 倍率이 20이고, L_2는 倍率이 10인 현미경 대물렌즈를 使用하였다. 光纖維는 금성 광통신에서 제조된 直徑 50μm의 언덕型을 使用하였고, 減衰率은 0.85μm에서 2.61dB/km, ε는 0.05, N_1은 1.468, α는 1.94, Δ는 1.019, N.A.는 0.21, 길이는 1 km이다. 光纖維의 出力 NFP를 觀測하기 위하여 倍率이 60인 현미경 대물렌즈 L_3로 약 77倍 擴大하였다. 이 패턴은 서보 모터를 使用하여 약 100μm/s의 均一한 速度로 移動하는 光受信器에 의하여 스캔되었다. 그림 3－(a)는 光 送信器의 變調 信號이며 (b)는 APD 1로 受信한 波型이다. 이 受信된 信號는 振幅을 測定하기 위하여 實效置 電壓計에 入力하였고 位相을 測定하기 위하여 位相計의 채널A에 入力하였다. 또한 位相의 基準 信號는 비임 splitter에 의하여 나누어진 빛을 APD 2가 연결된 受信器로 檢出하여 位相計 채널B에 入力하여 位相

www.dbpia.co.kr

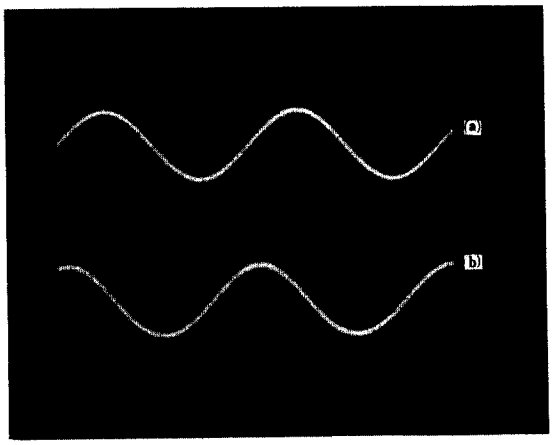


그림 3 -(a) 光 送信器의 變調 信號(1V/div, 0.02 μs/div)
(b) 光 受信器의 出力 信號(20mV/div, 0.02μs/div)

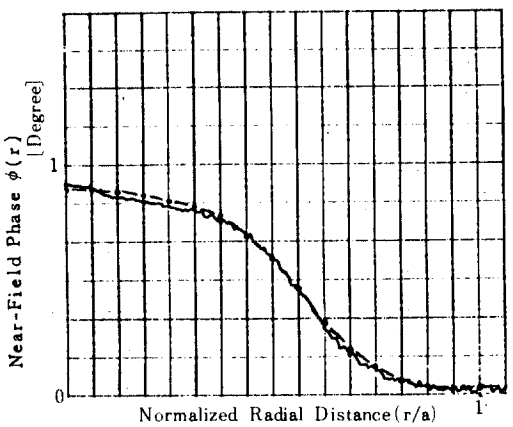


그림 5 Near-field位相 分布
Near-fileld phase distribution.

差 B-A로 測定하였다.

NFP를 스캔함에 따라 測定된 振幅과 位相은 각각 實效 電壓計와 位相計로 出力되며 이 信號를 디지탈 storage 오실로스코우프에 저장하였다가 차트 記錄計에 出力하였다.

測定된 near field 振幅의 相對値와 near field 位相은 그림 4와 5에서 實線으로 表示하고 있다. 그리고 實驗 오차를 減少시키기 위하여 near-field振幅의 實驗 데이터를 近以曲線

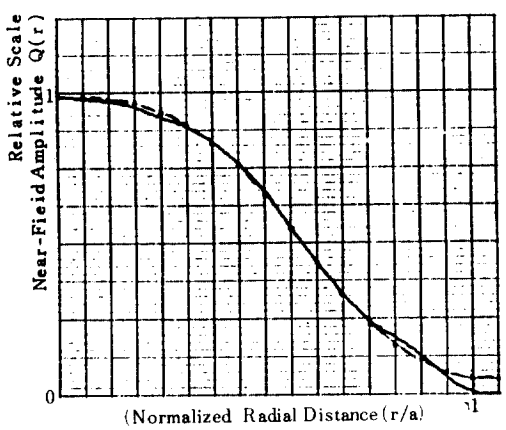


그림 4 Near-field 振幅 分布
Near-field amplitude distribution.

$$Q(r) = q_a \frac{\exp\left[-\left(\frac{r}{qe}\right)^2\right]}{1+\left(\frac{r}{qt}\right)^{p_0}} \tag{25}$$

에 fit하였다. 最小自乘法을 利用하여

$$q_a = 1,\ q_e = 8.524,\ q_t = 5.479,\ q_0 = 5.245 \tag{26}$$

를 얻었으며 그림 4에 이 값에 의한 曲線을 點으로 表示하고 있다. Near field 位相도

$$\phi(r) = p_a \frac{\exp\left[-\left(\frac{r}{qe}\right)^2\right]}{1+\left(\frac{r}{p_t}\right)^{p_0}} \tag{27}$$

에 近以하였으며

$$p_a = 1.36,\ p_e = 6.94,\ p_t = 4.96,\ p_0 = 8.397 \tag{28}$$

를 얻었으며 그림 5에서 點으로 表示하고 있다.

이 near field振幅 Q(r)과 位相 φ(r)에서 모우드 振幅分布 Q(m)과 모우드 遲延時間 T(m)을 求하기 위하여 式(23)과 (24)를 利用하였다. 計算 結果는 그림 6과 7에 나타냈다.

www.dbpia.co.kr

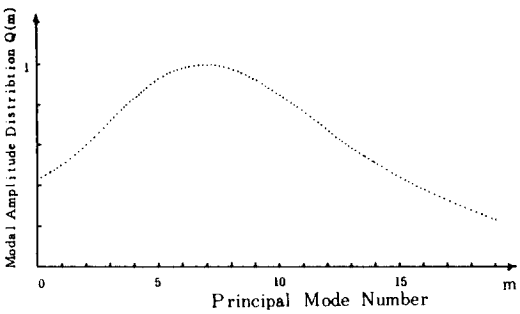


그림 6 모우드 振幅 分布
Modal amplitude distribution.

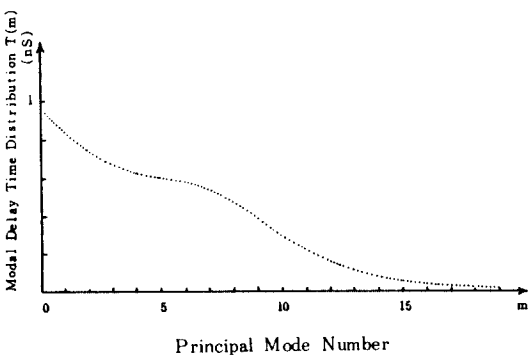


그림 7 모우드 遲延時間 分布
Modal delay time distribution.

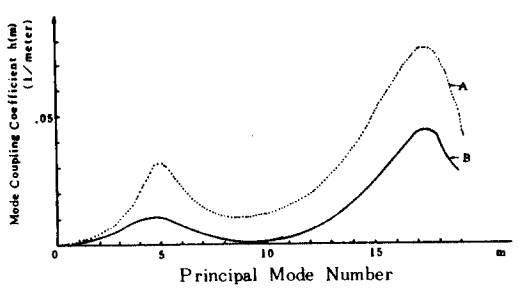


그림 8 모우드 結合係數
Mode coupling coefficient.

動的平衡狀態가 이루어졌다고 假定하였을때 式(16)을 利用하여 모우드 結合係數를 計算할 수 있고, 이것을 式圖 모우드 結合係數라 하며 그림 8에 點으로 나타내었다. 그러나 이 結果는 動的平衡狀態를 假定하였으므로 컴퓨터 시뮬레이션을 利用하였다. m과 z 의 微分 方程式(10)을 M個의 聯立 方程式으로 바꾸면

$$\frac{\partial T_m}{\partial z} = \tau_m + \frac{Q_{m+1}}{Q_m} h_m (T_{m+1} - T_m) - \frac{m}{m+1} \frac{Q_{m-1}}{Q_m} h_{m-1} (T_m - T_{m-1}) \quad (29)$$

이 되며 誘導過稿은 附錄에 첨가하였다. 이 式에서 τ_m, Q_m, $T_m(L)$은 아는 값이거나 測定된 값이며 모우드 파우어 比가 光纖維 內에서 傳送되는 동안 크게 變하지 않기 때문에 式(29)로 부터 $T_m(Z) = T(m,Z)$에 對한 聯立 線型 微分方程式을 풀 수 있다. 모우드 結合係數가 주어졌을때 數値積分에 의해서 入力으로부터 任意의 距離 떨어진 地點에서 $T_m(Z)$를 計算할 수 있다. 따라서 h(m)을 적절히 選擇함에 의하여 Z = 1〔km〕에서 實驗的으로 얻어진 時間遲延 $T_m^{(e)}$를 數値解 $T_m(L)$과 같게 할 수 있다.

Z = 0에서 $T_m(Z) = 0$이며 數値積分을 위하여 Gill係數를 利用한 Runge-Kutta 方法이 使用되었고 Δz는 2m로 하였다. 먼저 動的 平衡狀態에서 求한 $h_m^{(0)}$를 利用하여 光纖維 길이 1 km에서의 T_m을 計算하고 다음에 모우드結合係數를 修正하기 위하여

$$d_m = \frac{T_{m+1} - T_m}{T_{m+1}^{(e)} - T_m^{(e)}} \quad (30)$$

을 定義하였다. 修正된 모우드 結合係數 $h_m^{(1)}$은

$$h_m^{(1)} = d_m \cdot h_m^{(0)} \quad (31)$$

가 된다. 다시 式(29)에 의하여 모우드 遲延時間을 얻을 수 있고 또 式(31)에 의해 h_m을 計算하는 反復的 計算으로 d_m이 1%이내의 誤差를 가질때 計算을 끝내도록 하였으며 이때 모우드

www.dbpia.co.kr

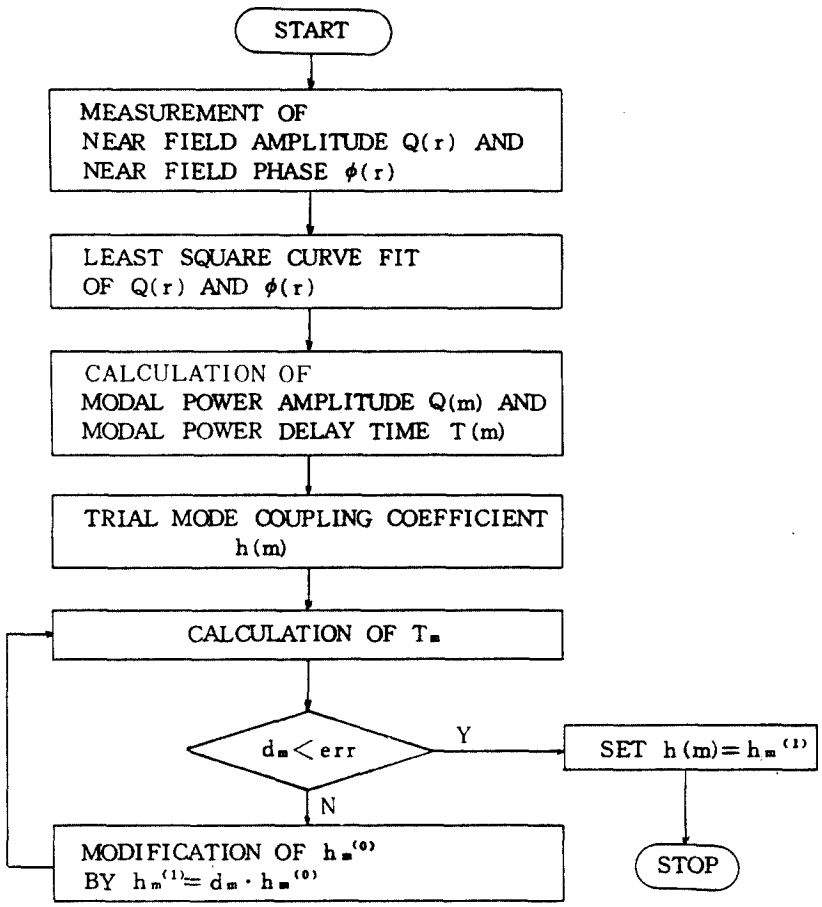


그림 9 모우드 結合 係數를 구하기 위한 flow chart
Flow chart to obtain the mode coupling coefficient.

結合係數 h_m이 얻어진다. 이 計算의 flow-chart는 그림 9와 같다. 結果는 그림 8에서 直線으로 나타냈다. 動的 平衡狀態를 假定하고 求한 모우드 結合係數와는 差異가 있으며 이것은 1 km 傳送後 動的 平衡에 到達되지 않았음을 意味한다. 主 모우드 數가 4까지 增加됨에 따라 모우드 結合係數는 增加하고 主 모우드 數 10까지는 減少하다가 다시 增加하는 것을 알 수 있다. 이것은 低次 모우드 보다 高次 모우드가 코어-클래딩 境界不均一에 더 敏感하다고 볼 수 있다.

定常狀態 far-field 測定에 의한 方法[6]은 光信號로 c.w. 를 使用하기 때문에 簡便하나 모우드 損失係數의 理論的 使用이 困難하여 導波 모우드에서는 영, 放射 모우드에서는 無限帶라 假定하였기 때문에 모우드 結合係數 計算에 正確度가 떨어진다. 그리고 언덕型 光纖維의 境遇에 모우드 時間差 測定에 의한 方法[7]~[9] 에 의하여 모우드 結合係數를 計算할 때 모우드 파우어 分布는 NFP나 FFP로 부터 얻어지는데 이 때 光信號로 펄스를 使用하기 때문에 모우드 파우어分布의 計算이 困難하나 光信號로 正弦 函數를 使用하였을 때 簡短히 計算되는 것을 알 수 있었다.

本 論文에서 硏究된 方法은 階段型 光纖維나

www.dbpia.co.kr

언덕型 光纖維에서 모두 測定可能하며 모우드遲延時間으로 理論式을 適用하나 理論式 內의 모든 파라미터는 實際 測定한 값을 使用함으로써 正確性을 維持하였고 光纖維 終端에서 動的 平衡에 到達되지 않았을 때에도 computer simulation을 使用하여 正確한 모우드 結合係數를 計算할 수 있었다.

V. 結 論

本 論文에서는 파우어 結合 方程式에 Fourier 變換을 하여 얻어지는 微分方程式에 試圖解를 代入함으로써 이미 報告된 두 理論을 모두 包含하여, 光信號를 正弦函數로 했을때도 適用된다.

모우드 結合係數를 實驗을 通하여 測定하기 위하여 언덕型 光纖維를 使用하였고 光信號는 아직 報告되지 않은 正弦函數를 使用하였다. 모우드 振幅, 遲延時間 分布는 NFP로부터 計算하였다.

이 方法에 의하여 決定된 모우드 結合係數는 모우드 마다 獨立이며 一般的으로 低次 모우드보다 高次 모우드에서 係數값이 커지는 것을 알 수 있었다. 모우드 結合係數 測定으로 多 모우드 光纖維 通信 시스템 設計와 光纖維 製造에 많이 利用되리라 본다.

附 錄

모우드 結合은 選擇法則에 의하여 隣接 모우드 群 사이에서 주로 發生된다. 이때 主 모우드數 m이 不連續일때 모우드 結合 方程式은 周波數 영역에서 光纖維 축을 따라 위치 z의 函數로서

$$\frac{\partial \bar{P}_m}{\partial z} + j\omega\tau_m \bar{P}_m = -\gamma_m \bar{P}_m + h_m(\bar{P}_{m+1} - \bar{P}_m) - \frac{m}{m+1} h_{m-1}(P_m - P_{m-1}) \quad (A-1)$$

로 表示된다[18]. 또한 이 式은 모우드 數m을 連續이라 假定할때 擴散 方程式(2)가 된다. 式(A-1)의 解를

$$\bar{P}_m = Q_m \cdot \exp[-j\omega T_m] \quad (A-2)$$

라 假定하고, 이 式을 式(A-1)에 代入하여 虛數部를 취하면

$$\omega Q_m\left(\frac{\partial T_m}{\partial z} - \tau_m\right) = h_m Q_{m+1} \operatorname{Sin}[\omega(T_{m+1} - T_m)] - \frac{m}{m+1} h_{m-1} Q_{m-1} \operatorname{Sin}[\omega(T_m - T_{m-1})] \quad (A-3$$

이 되며 隣接 모우드 間에 遲延時間의 차는 상당히 작기 때문에 $\operatorname{Sin}[\omega(T_{m+1} - T_m)] \approx \omega(T$ $(T_{m+1} - T_m)$, $\operatorname{Sin}[\omega(T_m - T_{m-1})] \approx \omega(T_m - T_{m-1})$이 되어 式(A-3)은 式(29)와 같이 된다.

參 考 文 獻

(1) R. Olshansky, "Mode Coupling Effects in Graded-Index Optical fibers", Applied Optics, Vol. 1, No. 4, pp. 935-945, 1975.

(2) D. Marcuse, "Coupled Mode Theory of Round Optical Fibers", B. S. T. J., Vol. 52, No. 6, pp. 817-842, 1973.

(3) A. Snyder, "Mode Propagation in a Nonuniform Cylindrical medium", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-19, No. 4, pp. 402-403, 1971.

(4) D. Marcuse, "Derivation of Coupled Power Equation", B. S. T. J., Vol. 51, No. 1, pp. 229-237, 1972.

(5) W. Gambling, D. Payne and H. Matsumura, "Mode Conversion Coefficients in Optical Fiber", Appl. Opt., Vol. 14, pp. 1538-1542, 1975.

(6) L. Jeunhomme and J. Pocholle, "Angular Dependence of the Mode-Coupling Coefficient in a Multimode Optical fiber", Electron. Lett., Vol. 11, pp. 425-426, 1975.

(7) S. Kawakami, "New Principle to Measure Loss and Mode-Conversion Parameters of Multimode Fibers", Electron. Lett., Vol. 13, pp. 706-707, 1977.

(8) M. Miyagi, S. Kawakami, M. Ohashi and S. Nishida, "Measurement of Mode-Conversion Coefficients and Mode Dependent Losses in a Multimode Fiber", Appl. Opt., Vol. 17, pp. 3238-3244, 1978.

www.dbpia.co.kr

(9) K. Kitayama and M. Ikeda, "Mode Coupling Coefficient Measurements in Optical fibers", Appl. Opt., Vol. 17, pp. 3979-3983, 1978.
(10) Nagano and S. Kawakami, "Measurements of Mode Conversaion Coeffjcients in Graded-Index fibers", Appl. Opt., Vol. 19, pp. 2426-2434, 1980.
(11) M. Ohashi, K. Kitayama and S. Seikai, "Mode Coupling Effects in a Graded-Index Fiber Cable", Appl. Opt., Vol. 20, pp. 2433-2438, 1981.
(12) K. Nagano and S. Kawakami, "Mode Conversion Coefficients in Graded-Index Fibers with Various Fiber-Coating Schemes: Measurements", Appl. Opt., Vol. 21, pp. 542-546, 1982.
(13) D. Gloge, "Impulse Response of Clad Optical Multimode fiber", B. S. T. J., Vol. 52, No. 6, pp. 801-816, 1973.
(14) G. Cancellieri and P. Fantini, "Frequency Dependent Steady-State Pistribution of Optical Power in Multimode Fibers", Opt. and Quan. Electron., Vol. 13, pp. 229-239, 1981.
(15) R. Olshansky and Donald B. Keck, "Pulse Broadening in Graded-Index Optical Fibers", Appl. Opt., Vol. 15, No. 2, pp. 483-491, 1976.
(16) S. Piazzola and G. de Marchis, "Analytic Relations Between Modal Power Distribution and Near-Field Intensity in Graded-Index Fibers", Electron. Lett., Vol. 15, pp. 721-722, 1979.
(17) G. Grau and O. Leminger, "Relations Between Near-Field and Far-Field Intensities, Radiance and Modal Power Distribution of Multimode Graded-Index Fibers", Appl. Opt., Vol. 20, pp. 457-459, 1981.
(18) K. Kitayama, S. Seikal and N. Uchida, "Impulse Response Prediction Based on Experimental Mode Coupling Coefficient in a 10-Km Long Graded-Index Fiber", IEEE J. Quan. Electron., Vol. 16, pp. 356-362, 1980.

李 鎬 俊(Ho Joon LEE) 正會員
1955年 8 月21日生
1978年 2 月：成均館大學校 電子 工學科 卒業(工學士)
1980年 2 月：成均館大學校 大學院 電子工學科 卒業 (工學碩士)
1980年 3 月～1983月 6 月：陸軍士官學校 電子科專任 講師
1987年 2 月：成均館大學校 大學院電子工學科 卒業(工學博士)
1987年 3 月～現在：湖 西大學 通信工學科 助敎授

金 炳 贊(Byung Chan KIM) 正會員
1923年10月23日生
1947年8月：國立서울大學校 工學大學 電氣工學科 卒業
1955年 9 月～1966年 7 月：國立 慶北大學校 敎授
1960年～1962年12月：Denmark 原子力 硏究所 電子工學硏究室에서 硏究
1968年 7 月～1969年 6 月：Manchester 理工大學(UMIST) 大學院에서 電子工學 硏究
1966年 7 月～現在：成均館大學校 電子工學科 敎授
1983年 2 月～1987年 2 月：成均館大學校 副總長歷任

www.dbpia.co.kr