

纖維光學(fibre optics)과 光學纖維(optical fibre)의 利用

李 相 洙

韓國科學院 教授, 博理

1. 緒 論

誘電體導波管(dielectric waveguide)에 對한 最初의 研究는 1910年 Hondros와 Debye¹⁾에 依하여 이루어 졌다. 그들은 誘電棒(dielectric rod)을 따라서 傳播하는 電磁波모우드(mode)에 對하여 理論的인 取扱을 하였다. 其後 1916年에 Zahn²⁾이 實驗的으로 약간의 低位모우드를 觀察하였다. 이리하여 오늘날의 纖維光學(fibre optics)의 基盤이 이루어 져서, 其後 여러 研究室에서 實驗과 理論이 開發되어 1960年代에 이르면서, 레이저(laser)의 發展과 더불어 光波動에 對한 誘電體導波管理論과 實驗 및 그 利用이 크게 發展하게 되었다. 光學纖維導波管에 關한 여러가지 貢獻이 London大學校, Imperial College出身인 Kapany³⁾에 依하여 이루어 졌다.

光波의 振動數에 比하여 이것이 작은 radio波나 microwave波에 對하여 우리는 radiative process(輻射過程)와 conductive process(電子의 흐름)을 情報通信에 利用하나, 波長이 짧아짐에 따라서 즉 光波動領域에 들어서면, 全的으로 radiative process를 通信에 利用할 수 밖에

없다. 그러나 大氣中에서 光波動은 그의 高振動性 또는 短波長性때문에 여러가지 散亂—Rayleigh散亂, Tyndall散亂, density fluctuation 效果 등과 吸收를 免하기 어려우며, 따라서 大氣圈內에서 長距離光通信은 根本的인 難點을 지니고 있다. 그러나 우리가 光纖維를 通하여 光通信을 한다면 앞서 말한 여러가지 難點을 避할 수 있게 된다. 여기에 오늘날의 數많은 光纖維 研究의 目的이 있다. 勿論 光纖維通信에는 適切한 光源이 있어야 하는데, 그러한 光源으로서는 別途로 開發되고 있는 레이저(laser)가 있다. 따라서 光源에 對한 걱정은 할 必要가 없게 되었다. 根本的인 問題는 吸收가 거의 없는 光學纖維를 만드는데 있는데, 이 光學纖維는 斷面積의 中心部에서 屈折率이 크고, 밖으로 나가면서 그 값이 減衰(Gauss 誤差函數型)하여야 한다. 이러한 光學纖維는 CVD(chemical vapour deposition)方法으로 또는 熔融鹽속에서 유리纖維의 여러가지 金屬이온과 熔融鹽의 이온 사이에서 ion-exchange가 일어나도록 研究, 開發中에 있으며, 日本製品인 selfog(self focussing glass fibre)가 後者 process에 依하여 製作된 것으로

傳해지고 있다. 또한 유리纖維에다 plastic coating을 施行하여서 또는 屈折率이 큰 유리棒을 屈折率이 작은 유리中空管에 넣어서 同時에 局所加熱, 熔融시키면서 光學纖維를 뽑는 方法들도 있다. 이리하여 오늘날 1dB/km의 吸收밖에 없는 良質의 optical fibre가 生産되고 있으며, 나머지는 情報를 레이저光에 실리는 變調方法이 남아 있다고 하겠다. 이 方面에서도, 勿論, 數 많은 發展이 이루어 저서, 앞으로 纖維光學의 利用은 날이 갈수록 擴大될 것으로 보인다.

以上은 레이저 光通信을 생각하면서, 이 方面의 利用을 重點으로 말하였다. 그러나 光學纖維는 其外에도 많은 應用面을 지니고 있다.

오늘날 先進國에서 開發되고 있는 coherent computer는 金屬導線을 거의 쓰지 않고, 光學纖維를 써서 信號를 處理하고 있다. 電子의 흐름을 쓰지 않으므로 信號는 電磁波速度로 傳達되며 其以上 더 빠른 computer는 있을 수 없게 되고, 또한 電子 repeater 代身에 optical pumping을 하여 줌으로써, computer의 크기도 더욱 작아질 것이다. Optical fibre의 用치—

bundle—는 optical image의 傳播에 잘 利用되고 있다. 電子通信系가 時間的인 信號를 處理하고, 光學系는 空間的인 信號를 傳播, 處理하는 것으로, 兩쪽 通信理論 또는 情報理論이 完全하게 平行한다. 따라서 optical fibre bundle에 依한 image transmission은 自然的으로 생각할 수 있는 通信의 한가지 方法이라고 하겠다. image intensifier(multi-stage), pico-second photography(photronics), image converter등에서 像信號를 다음 像增幅器에 넘기는데 効率的으로 利用되고 있다. 醫學部門에서 利用되는 것은 周知의 事實이겠다.

其他 航空機內의 通信, Landsat 人工衛星에 搭載되어 있는 multi-spectral scanner에서 像과 PM管을 連結하는데에 利用되고, glass(Nd⁺⁺⁺)로 만든 optical fibre의 bundle은 pumping 効率が 좋은 glass laser製作에 利用되고 있다. 特異한 利用으로서, 暗號利用 또는 秘密通信 分野가 있다. 光學纖維를 無秩序하게 헝클어서 fibre bundle을 만든 다음 中心部 한 토막을 잘라내면, 이 토막을 插入하여야만 像이 제대로 이루어 진다.

潛水艦司令部에서 잘린 토막 하나를 갖고 있어서, 이 토막을 通하여 나오는 像을 電送하면, 受信하는 潛水艦에서는 艦長이 中間토막을 갖고 있고, 副艦長이 나머지 토막을 갖고 있으므로, 이 두 사람 以外는 電送된 內容을 알 수 없게 된다.

纖維光學 乃至 光學纖維의 利用은 其外에도 얼마든지 있다. 天文學에서의 利用을 한가지 들어 보겠다. 별에서 나오는 빛이 弱할때, 大型望遠鏡을 쓸 수 있겠으나, 圓錐形으로 뽑은 光學纖維로 fibre bundle을 만들면, 光線이 集束되어, 分光學研究는 充分히 높은 信號對 雜音比

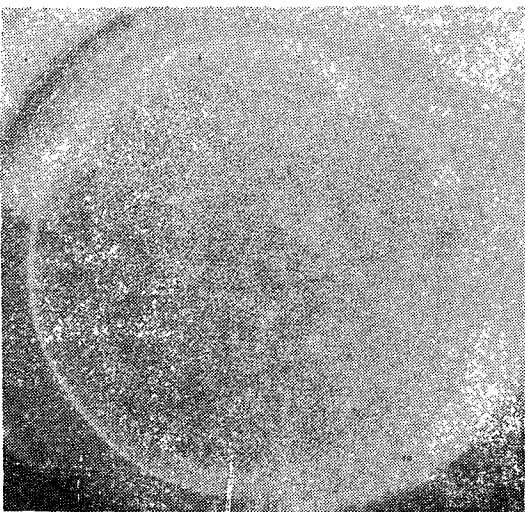


그림 1. Fibre bundle for computer optical reading.

아래서 遂行될 수 있게 된다.

2. 平面導波管(planar waveguide)과 圓形導波管(circular waveguide)理論

넓은 유리基板위에 좋은 誘電體인 ZnS(硫化亞鉛, 可視部中心에서 $n \approx 2.4$)의 薄膜이 眞空蒸着되어있고, 그 굵기는 波長程度이고, 레이저光波가 prism coupler를 통하여 導入되었다 하면, 이 薄膜內에서 電磁波는 拘束되어 있고, 陽의 整數로 規定되는 形態의 場分布를 갖게 되며, 이때 誘電體內의 場은 다음의 Maxwell 方程式으로 주어 진다.

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \vec{E} - \epsilon\mu(1-i\sigma/\epsilon\omega) \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

但 電導度 $\sigma \approx 0$

여기서 나오는 記號들은 電磁氣學에서 一般的으로 쓰이는 뜻 그대로 이다. 이 方程式의 解로서 $E_x=0, E_y, E_z=0$, 즉 transverse electric mode (TE mode, Z 方向으로 傳播)를 생각하면, E_y 는 $e^{i(\omega t - kz)}$, 但 h 는 \vec{k} 의 z 分値, 의 依存性을 지니고 있는 故로,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \beta^2 E_y = 0 \dots\dots\dots (2)$$

但 $\epsilon\mu\omega^2(1-i\sigma/\epsilon\omega) = k^2, k^2 - h^2 = \beta^2$

의 單振子方程式을 얻게 된다. (2)式의 解는 誘電體平面導波管的 안과 밖에서,

$$\left. \begin{aligned} E_{y,i} &= A \cos(ux/a) \cdot \exp i(\omega t - hx); \\ E_{y,o} &= B \exp(-v|x|/a) \cdot \exp i(\omega t - kz); \\ &\left. \begin{aligned} &\text{內部, } x < a, \\ &\text{外部, } |x| > a, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

但, $u = \beta_1 a, v = \beta_2 a, \beta_i (i=1,2)$ 는 導波管內外的 β 값이고, 平面導波管的 굵기는 $2a$ 이다.

가 된다.

(3)式을 보면, 導波管 壁에서부터 光波動이

evanescent(減衰)임을 알 수 있고, 또 導波管內에서

$$\frac{ux}{a} = \frac{\pi}{2} (2N+1), N \text{는 陽整數}$$

의 N 값에 따라서 場이 零이 됨을 알 수 있다. 즉 $N=0$ 일 때는 TE第0次 모우드이고, $N=1$ 이면, TE第1次모우드가 된다. 또한 $x=a$ 에서 E_y 의 continuity 條件에서부터 $B = Ae^v \cos u$ 임을 알 수 있고, 이 E_y 값을 Maxwell 基本方程式에 代入함으로써 磁場과 Poynting vector 즉 光波의 強度 즉 power를 얻을 수 있다.

以上の 取扱은 纖維光學의 基本理論이 原理上으로는 直觀的이고도 簡單하다는 點을 強調하기 爲한 것이고, 原理上으로 簡單하다고 해서 實用價值있는 複雜한 導波管에 關한 具體的인 實例에서 그렇게 容易한 것은 아니다. 導波管內에서 屈折率이 變한다든가, 導波管이 二重 또는 多重膜으로 이루어져 있다든가, 導波管表面이 完全하게 깨끗하지 않을 때에 惹起되는 問題들은 여러가지로, 理論上, 實驗上의 어려움을 招來하고 있다.

다음으로 圓形導波管的 基本理論을 살펴 보자. 오늘날에 흔히 쓰는 纖維導波管이 바로 圓形導波管이다. 이 纖維의 半徑을 a 라 하면,

電磁場은

$$\left\{ \begin{aligned} \vec{E}(x,y,z,t) \\ \vec{H}(x,y,z,t) \end{aligned} \right\} = \left\{ \begin{aligned} \vec{F}(x,y,h,\omega) \\ \vec{G}(x,y,h,\omega) \end{aligned} \right\} \times e^{i\omega t - i h z} \dots\dots\dots (4)$$

이고, x,y 平面上에서 極座標 ρ, ϕ (z 軸이 纖維의 길이 方向)을 잡으면, $x = \rho \cos \phi, y = \rho \sin \phi$ 이고, 또한

$$\rho = a \text{에서, } E_z = E_\phi = 0 \dots\dots\dots (5)$$

의 境界條件이 成立한다.

(4)式을 波動方程式

$$\nabla^2 - \epsilon\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \left\{ \frac{\vec{E}}{H} \right\} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

에 代入하면

$$\left. \begin{aligned} (\nabla^2 + \beta^2) \left\{ \frac{\vec{F}}{\vec{G}} \right\} &= 0, \\ \beta^2 &= \omega^2 \epsilon \mu - h^2 \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

을 얻는다. 한편 Maxwell 方程式에서부터,

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

인 故로,

$$\left. \begin{aligned} \nabla_t \times \vec{F} - ih \vec{Z}_1 \times \vec{F} &= -i\omega\mu \vec{G} \\ \nabla_t \times \vec{G} - ih \vec{Z}_1 \times \vec{G} &= i\epsilon\omega \vec{F} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

\vec{Z}_1 는 z軸方向의 單位 vector

를 얻고, 다시

$$\vec{Z}_1 = \vec{F}_t + \vec{F}_z, \quad \vec{G} = \vec{G}_t + \vec{G}_z \dots\dots\dots (9)$$

로 分解하면

$$\left. \begin{aligned} \nabla_t \times \vec{F}_z - ih \vec{Z}_1 \times \vec{F}_t &= -i\omega\mu \vec{G}_t \\ \nabla_t \times \vec{G}_z - ih \vec{Z}_1 \times \vec{G}_t &= i\omega\epsilon \vec{F}_t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

를 얻는다. 이 式의 두번째 式에 $-i\omega\mu$ 를 乘한

다음에 첫번째 式에서 얻는 \vec{G}_t 값을 代入하면

$$\beta^2 \vec{F}_t = -i\omega\mu \nabla_t \times \vec{G}_z - ih \nabla_t F_z, \dots\dots\dots (11)$$

恰似한 演算으로

$$\beta^2 \vec{G}_t = i\omega\epsilon \nabla_t \times \vec{F}_z - ih \nabla_t G_z \dots\dots\dots (12)$$

但 $F_z = |\vec{F}_z|, G_z = |\vec{G}_z|$

에 이르는데, F_z 로서 trial solution으로 $f(\rho)e^{in\phi}$

(이 n 은 整數)를 잡고 波動方程式에 代入하여,

$$\frac{d^2 f}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{df}{d\rho} + (\beta^2 - \frac{n^2}{\rho^2})f = 0$$

의 Bessel微分方程式과 그의 解 Bessel函數 J_n 를

얻음으로써

$$F_z(\rho, \phi, h, \omega) = AJ_n(\beta\rho)e^{in\phi} \dots\dots\dots (13)$$

를 얻게 된다. 이 式을 (11)式에 넣고, $G_z=0$

(TM mode)로 하면

$$F_\phi = -(ih/\beta^2\rho) \frac{\partial F_z}{\partial \phi} = (nh/\beta^2\rho) AJ_n(\beta\rho)e^{in\phi} \dots\dots\dots (14)$$

A 는 任意常數

을 얻는다. (13)式과 (14)式이 (5)式의 境界條件을 滿足하려면, $\rho=a$ 에서의 $\beta\rho$ 의 값으로서 $J_n(u_{n,m})=0$ 을 滿足하는 $u_{n,m}$ 값과 같게 잡아야하는 故로

$$\left. \begin{aligned} \beta a &= u_{nm} \\ \text{또는 } \beta &= \frac{u_{nm}}{a} \equiv \beta_{nm} \\ m &= 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

의 β 값을 取하여야 한다. β 값이 β_{nm} 로 規定될 때, \vec{k} 즉 光波의 傳播 vector의 Z -分値인 h 값은 (7)式에 依하여 얻는

$$h^2_{nm} = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2_{nm} \dots\dots\dots (16)$$

式에서부터 얻게 되고, F_ρ 는 (11)式과 (12)式에서 誘導된다. 다음에 \vec{F} 의 값을 (10)式에 代入함으로써 磁場($G_z=0$ 으로 定함, 즉 transverse magnetic field)이 決定되어 다음의

$TM_{n,m}$ mode의 場의 表現을 얻게 된다.

$$\left. \begin{aligned} E_z &= AJ_n(\beta\rho) \\ E_\phi &= (nh/\beta^2\rho) AJ_n(\beta\rho) \\ E_\rho &= (-ih/\beta) AJ_n(\beta\rho) \\ H_z &= 0 \\ H_\phi &= (-i\omega\epsilon/\beta) AJ_n(\beta\rho) \\ H_\rho &= (-\omega\epsilon_n/\beta^2\rho) AJ_n(\beta\rho) \\ \text{但 } J_n(\beta a) &= 0, h^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 \\ j_n &= \frac{dJ_n(x)}{dx} \quad n \text{는 整數 또는 零,} \\ \beta, h \text{의 값은} & \text{(15)式 및 (16)式으로} \\ & \text{規定된 } \beta_{nm}, h_{nm} \text{의 값임.} \\ & \times e^{i(n\phi + \omega t - hz)} \dots\dots\dots (17) \end{aligned} \right\}$$

(17)式에서 $H_z=0$ 인 故로 transverse magnetic mode인데, TM_{nm} 로서, 이 mode를 表現하되, TE_{nm} mode도 꼭 같은 節次를 거쳐 얻을수 있다. 즉 TE_{nm} mode는,

$$\begin{aligned}
 E_z &= 0 \\
 E_r &= (i\omega\mu/\beta) B J_n(\beta\rho) \\
 E_\phi &= (n\omega\mu/\beta^2\rho) B J_n(\beta\rho) \\
 H_z &= B J_n(\beta\rho) \\
 H_r &= (nh/\beta^2\rho) B J_n(\beta\rho) \\
 H_\phi &= (-ih/\beta) B J_n(\beta\rho)
 \end{aligned}$$

B 는 常數

$$\times \exp i(n\phi + \omega t - h_z z) \dots \dots \dots (18)$$

은 mode記號 $HE_{n,m}$ 및 $EH_{n,m}$ 로서 表現되고, $TM_{0,m}$ 가 곧 $HE_{0,m}$ 와 같고, $TE_{0,m}$ 가 $EH_{0,m}$ mode와 같다는 것을 알 수 있다. 이미 앞에서指摘한 대로 纖維光學의 基本理論은 直觀的이라고 말할 수 있겠으나, 여기서 퍼져나가는 理論體系들은 精巧하여서, 여러가지 計算에는 電子計算機의 利用이 必須的이다.

가 된다.

(17)式과 (18)式으로 주어지는 電磁場이 充分하게 正確한가 하면 그렇지 않다.

光學纖維內的 場을 더욱 正確하게 얻고자 할 때 우리는 Bessel函數, Hankel函數의 操作을 通하여서, 이들 (17)式, (18)式의 場을 包含하는 새로운 場의 表現을 얻게 되고, 이들은 새로

3. Optical Mode의 實驗 및 觀察

理論的으로 導入되는 여러가지 mode를 實地로 觀察하고 檢出하는데는 그림 2의 實驗裝置⁴⁾를 쓴다. 光學纖維의 굵기가 數 10μ 의 直徑을 갖고 있으니, 顯微鏡寫眞을 찍음으로서, Poynting

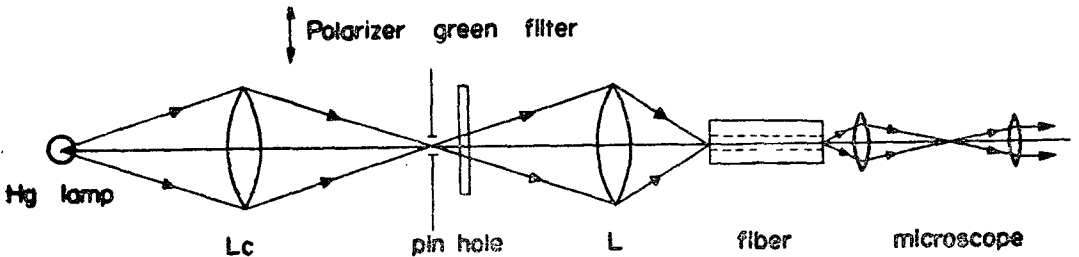


그림 2. Optical schematics of exciting discrete modes in optical waveguides using Airy disk.

vector로 주어지는 場의 power에 比例하는 寫眞 記錄을 얻을 수 있다. 그림 3에 中空유리纖維(hollow glass fibre)의 모우드패턴(mode pattern)이 제시되었는데, 中空유리纖維內的 場이 導入되고, 각 모우드의 模樣이 電子計算機를 써서 決定되고, 이들의 結合된 模樣과 檢出된 像과 比較됨으로서 各各의 모우드가 決定된 것이다. 本 研究室에서는 그림 1의 裝置를 써서, 12가지의 coupled mode pattern과 single mode pattern을 얻었다. 이들 mode pattern은

의 세가지 種類에서 얻어졌으며, 屈折率이 Gaussian form으로 變하는 纖維 또는 特殊한 構造를 갖고 있는 纖維들에 對하여서는 아직 研究를 못하였다. 實驗에서 쓰인 유리纖維들은 모두 손으로 뽑은 것으로 유리纖維內的 屈折率의 分布는 一樣하다고 假定하였다. 또한 兩손으로 最大限으로 길게 뽑음으로써 纖維의 直徑이 一定하도록 配慮는 하였으나, 亦是 굵기에 變化가 있음이 判明되어서, 그림에서 보는 모우드패턴들이 若干씩 distortion을 지니고 있다.

1. hollow fibre
2. clad fibre
3. rod fibre

4. 像傳送(Image Transmission)

Fibre bundle은 像傳送에 쓰이는데, 單一纖

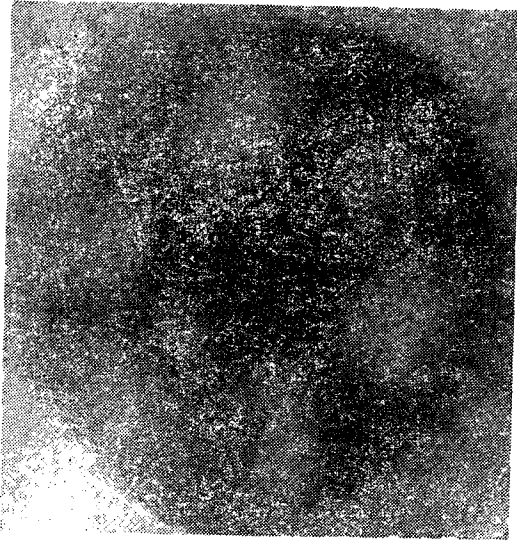
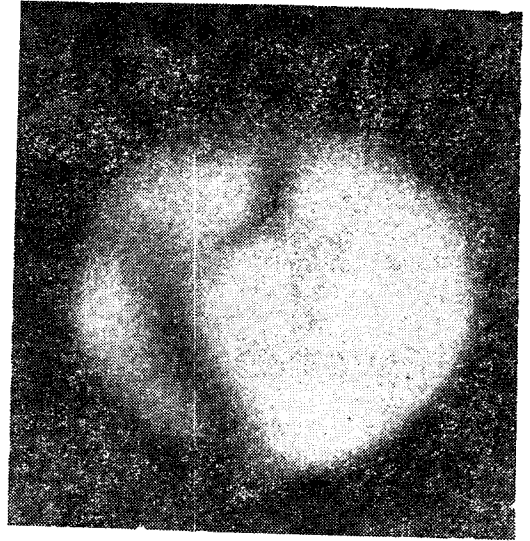


그림 3. $(EH_{2,1} + EH_{4,1})$ modes,
hollow fibre, ID=165 μ ,
OD=1.2mm.



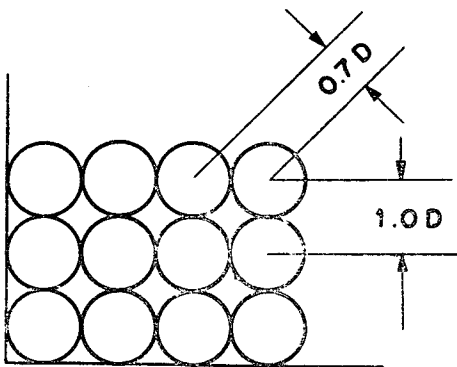
$(EH_{0,2} + HEi_{2,2})$ modes
hollow fibre, ID=29.9 μ s
OD=0.4mm.

維의 frequency response(但 이 frequency는 空間的인 振動數로서 單位길이 當의 一次元格子의 數)는 纖維의 直徑을 D , spatial frequency 를 R 로 할때

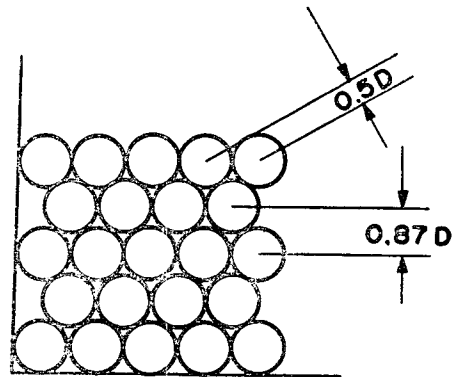
$$2J_1(\pi RD) / \pi RD \dots\dots\dots (19)^{5)}$$

J_1 은 Bessel函數 第一種, 第一次에 比例하며, 따라서 纖維의 直徑 D 가 작을수록 좋다. 이 纖維들은 그림 4에서 보는 바와 같

이 여러가지 array를 만들어서 쓸수 있는데, resolution上 hexagonal close packed array가 有利하다. 이 fibre로 像을 傳送할때, fibre bundle을 固定시킬 때와 微小振幅으로 振動시킬때와 두가지가 있다. 前者가 static scanning이고, 後者가 dynamic scanning이다. fibre bundle에 依한 像傳送(image transmission)理論은 다루지 않고 實驗結果만을 보인다면, 本 研究室에

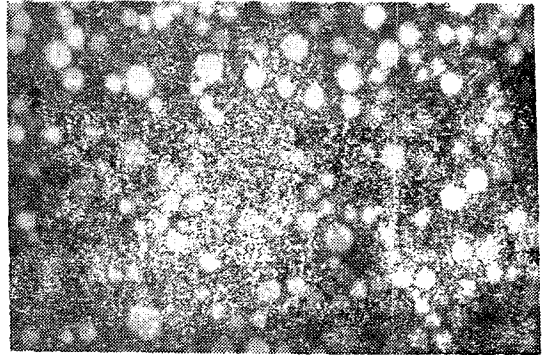
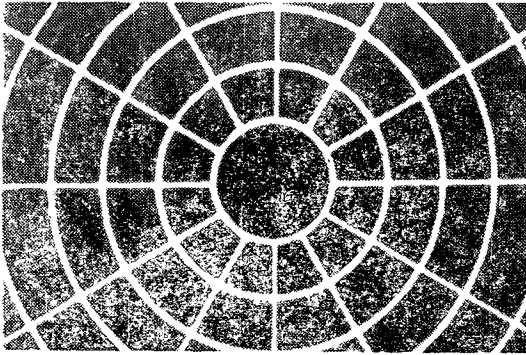


Square array.

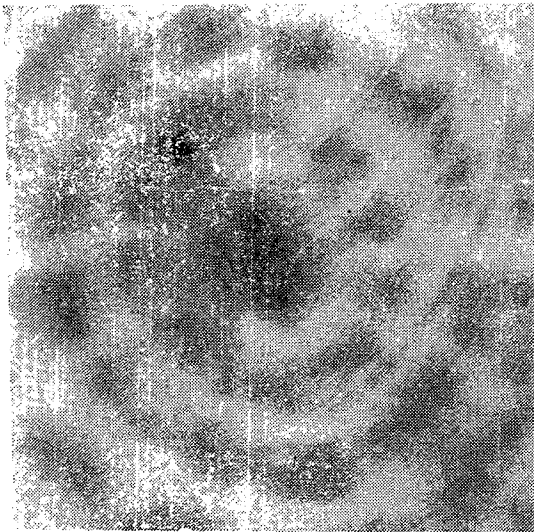


Hexagonal close packed array.

그림 4. Packing of fiber into bundles.



Static scanning



Dynamic scanning ($f = 2\text{Hz}$)

그림 5. Spider web test chart.

서 얻은 test pattern 傳送寫眞의 하나가 그림 5에 提示되었다. 이때 쓰인 fibre bundle은 本研究室에서 製作한 것이고, fibre의 直徑이 高르지 못하였다. 이때 static scanning에서 pattern을 確認하기 어려울 程度였으나, dynamic scanning에서는 더욱 좋은 像傳送이 이루어졌다.

5. 光學纖維의 利用에 關한 展望^{6,7)}

纖維光學에서 研究할 問題들이 山積되어 有

다. 한개의 光學纖維의 構造가 아직도 極히 單純하며, 數없이 많은 變化를 試圖하여 보아야 하겠다. 各各의 變化된 構造에 따라서, 纖維內의 電磁場은 새롭게 計算되어 結局 Poynting vector가 算出되고, 場의 空間分布가 모우드에 따라서 誘導되어야 하겠다⁹⁾.

纖維光學은 薄膜光學(thin film optics) 또는 積分光學(integrated optics)과 不可分의 關係에 있다. 理論上으로 그러하고 實用上으로도 그러하다. 즉 光學纖維에 따라서 受信된 信號는 한개의 基板위에 形成되어 있는 小型의 IO(integrated optics)系에서 處理될 수 있다. 이렇게 되면, 小出力의 He-Ne레이저 (1mW) 한개로서 한개의 發電所의 control room에 있는 모든 計器의 panel을 볼 수 있게 될 것이고, 모든 計器들의 小型化도 아울러 이루어질 것이다.

美國과 日本에서는 이미 레이저와 纖維 cable을 써서 “完全情報都市”를 만들어서 {(레이저)+(optical fibre)} 通信을 實地로 實驗하고 있다. 光學纖維의 利用은 앞으로 크게 擴大될 것으로 믿는다. 이 過程에서, 物理를 專攻한 學徒들과 通信工學, 電子工學을 專攻한 學徒들의 協력이 大端히 重要한 것으로 생각 한다.

附 記

本 解説에 掲載된 內容과 資料는 모두 未發表의 것들이며, 本 研究室에서 碩士學位論文(1977年 2月 提出)을 쓴 曹在喆君(現職, 韓國科學技術研究所, 應用光學研究室)의 研究結果로서, 不遠間에 韓國物理學會誌에 發表될것임.

參 考 文 獻

- (1) D. Hondros und P. Debye, Ann. Phys. **32**, 465(1910).
- (2) H. Zahn, Ann. Phys. **49**, 907(1916).
- (3) N.S. Kapany and J.J. Burke, J. Opt. Soc. Amer., **51**, 1067(1961).
- (4) J.C. Jo, Msc Thesis, Optical modes and image transmission in optical fibres, Korea Advanced Institute of Science, Seoul, Korea.
- (5) N.S. Kapany, J. Opt. Soc. Amer., **49**, 770(1959).
- (6) E.M. Conwell, Physics Today, **29**, 48(1976).
- (7) A.G. Chynoweth, Physics Today, **29**, 28 (1976).
- (8) N.S. Kapany and J.J. Burke, *Optical Waveguide*, Academic Press, New York (1972).

List of Figures.

- Fig. 1. Fibre bundle for computer optical reading.
- Fig. 2. Optical schematics of exciting discrete modes in optical waveguides using Airy disk.
- Fig. 3. Typical low order modes.
- Fig. 4. Packing of fibres into bundles.
- Fig. 5. Static and dynamic scanning of test pattern.