

論 文

파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 이중굴절을 분포를 가진  
광섬유의 특성에 관한 연구

正會員 崔 泰 一\* 正會員 李 周 珩\*\* 正會員 崔 炳 河\*

A Study on the characteristics of the Double  
Refractive Index Fiber in the 1.55 $\mu\text{m}$

Tae Il CHOI\*, Joo Hyung LEE\*\*, Byung Ha CHOI\* *Regular Members*

**要 約** 본 논문에서는 최저 손실 파장인 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 단일모드 광섬유 특성을 연구 하기 위하여 사다리꼴 분포를 일반화시킨 이중굴절을 분포 [ $\alpha$ 승분포( $\alpha=2-\infty$ )+삼각형분포]를 제안하고 색분산 특성 [색분산을 영(zero)으로 하는 최적 코어반경, 상대 굴절률차의 최소화, 파장에 대한 색분산의 변화율]을 구하였다.

그리고 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 계단형 분포보다 큰 코어 직경을 갖는 삼각형 분포와 특성을 비교해서 좋은 특성을 얻을 수 있었고,  $\alpha$ 의 값을 2- $\infty$ 범위로 변화시키면서 특성을 구한 결과  $\alpha$ 의 값이 2이상에서도 거의 같은 특성을 얻었다. 그러므로 사다리꼴 분포의 계단형부분이  $\alpha$ 승 분포( $\alpha=2-\infty$ ) 형태로 제조되어도 같은 특성을 가지는 이론적 연구결과를 얻었다. 또한 본 논문에서 제안한 굴절을 분포는  $\alpha$ 의 값에 따라서 여러 굴절을 분포를 나타내므로, 다중 크래딩 광섬유, Segmented Core Fiber 등이 굴절을 분포를 적용하여 여러 특성을 연구할 수 있다.

**ABSTRACT** In this paper, the double-refractive index profile, which is generalized a trapezoidal index profile, is proposed to study the characteristics of a optical fiber in the wave length 1.55 $\mu\text{m}$ .

Being compared with a triangle profile, it has many advantages over an optimum core radius, the minimum refractive index difference and the change of chromatic dispersion characteristics with wavelength. Though the value of  $\alpha$  varies from 2 to infinite, the same results are approximately obtained. Therefore, in fabrication of a fiber, the step part of trapezoidal index profile can replace the profile of  $\alpha$ -power refractive index. Because the refractive index presented in this paper varies with  $\alpha$ , it can be applied to multiple cladding fiber or segmented core fiber. And it is expected that the characteristics of the fiber are obtained.

I. 서 론

광통신에서 무중계 전송거리(link distance)와 전송속도를 최대로 할 수 있는 장거리 통신시스템의 전송로로써 단일모드(single mode) 광섬유(optical fiber)가 사용되고 있다. 단일모드 광섬유를 사용하여 이와같은 시스템을 설계하는 데 제한이 되는 두 가지 주요요인이 있는데, 이것은 재료

\*仁荷大學校 電子工學科  
Dept. of Electronic Engineering In Ha University.

\*\*三星電子綜合研究所  
Samsung Electronics R & D Center  
論文番號 : 89-55(接受1989. 8. 29)

손실(material loss)과 색분산(chromatic dispersion)이다.<sup>(1-4)</sup>

재료손실은 Rayleigh 산란에 기인하며 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 최소화되며, 색분산은 축방향의 전파상수  $\beta$ 가 주파수에 대한 비선형에 기인하여 나타나는 현상으로써 펄스퍼짐을 가져온다.<sup>(5-7)</sup> 또한 단일모드 광섬유의 경우에는 코어반경을 크게 함으로써 코어내부로 광을 입사시키기가 용이하며, 광섬유들간의 접속손실도 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러므로 재료손실이 최소가 되는 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 색분산이 최소가 되고, 큰 코어반경을 갖는 단일모드 광섬유의 연구가 진행되고 있다.  $\alpha$ 승(power-law) 분포의 광섬유는 계단형(step index), 언덕형(graded index), 삼각형(triangle index) 분포로 분류된다. 그리고 각각의 파이버들에 대하여 감쇠상수, 색분산, 접속손실, 마이크로벤딩(micro-bending) 등에 대한 장단점들이 비교되어졌다.<sup>(8-11)</sup> 특히 삼각형분포는 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 계단형분포와 언덕형분포보다 최적 코어반경을 크게 할 수 있으므로, 접속손실을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 여기서 계단형분포는 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 색분산이 영(zero)이 되는 최적 코어반경이 삼각형분포보다 훨씬 더 감소함으로써 접속손실이 증가되어, 장거리 통신에 제한을 받게 된다. 그래서 M.I.E.L-Ashegh<sup>(12)</sup>는 단일클래딩(single cladding)을 갖는 단일모드 광섬유에서 코어의 굴절율 분포가 사다리꼴(trapezoidal index) 분포를 가진 광섬유를 제안하였다. 여기서 사다리꼴 분포는 삼각형 굴절율분포의 제조과정에서 근사적으로 계단형 분포와 삼각형분포를 결합한 이중굴절율 분포로 구성되며(그림1), 또한 재료손실이 최소인 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 삼각형 분포와 특성을 비교하여 저분산(low dispersion), 낮은 상대 굴절율차, 큰 코어반경, 파장에 대한 분산감도가 둔화되는 장점이 있다.

본 논문에서는 파장 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 기존의 단일  $\alpha$ 승분포 특성보다 개선된 특성을 얻기위하여 사다리꼴 분포를 일반화시킨 이중 굴절율분포를 고안하여 개개의 분포에 대한 특성을 연구하였다. 여기서 이중 굴절율분포들은 이미 발표된 바 있는

계단형분포와  $\alpha$ 승분포( $\alpha=1-\infty$ )의 결합형<sup>(13)</sup> 및 사다리꼴분포의 계단형부분을  $\alpha$ 승분포로 일반화시킨  $\alpha$ 승분포 ( $\alpha=2-\infty$ )와 삼각형분포의 결합형으로 분류하였다. 특히 본 논문에서 제시한  $\alpha$ 승 분포와 삼각형분포로 결합된 광섬유는 분산, 상대굴절율차, 코어반경, 파장에 대한 분산감도의 둔화특성에 있어서 삼각형분포 보다 좋은 특성을 얻을 수 있었다. 또한  $\alpha$ 의 값을 2- $\infty$ 범위로 변화시키면서 각각의  $\alpha$ 값에 대응하여 특성을 구한 결과  $\alpha=2$  이상에서 거의 같은 특성을 나타낸다. 그러므로 사다리꼴 분포의 계단형 부분이 제조방법에 따라서  $\alpha$ 승분포 ( $\alpha=2$ 이상)로 제조되어도 같은 특성을 얻을 수 있고, 임의의 이중 굴절율분포에서 삼각형 분포를 포함하는 이중 굴절율 분포들이 가장 큰 코어반경을 나타내는 장점을 이론적 연구결과로써 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 이중 굴절율분포는  $\alpha$ 의 값에 따라서 여러 굴절율분포를 나타내므로, 다중클래딩 광섬유와 Segmented Core 광섬유등에 이 굴절율분포를 적용하여 특성을 연구할 수 있다.

## II. 수치해석에 의한 전송상수

색분산의 규격화 전파상수 B, 이것의 B', B'' 들

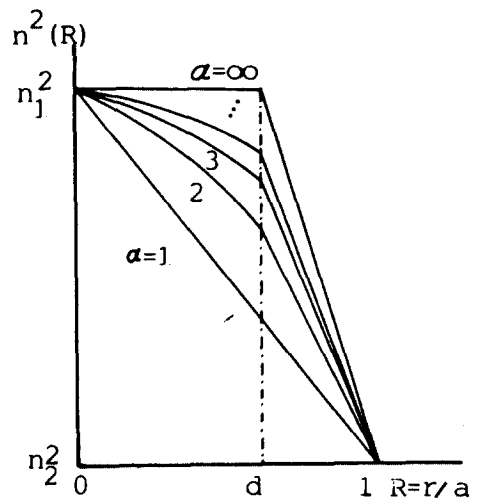


그림 1. 이중 굴절율분포.  
The double-refractive index profile

을 구하기 위해 코어영역의 굴절률분포를 결정해야 한다. 따라서 본 논문에서는 그림1에서 도시한 바와 같이 α승 굴절률분포와 삼각형굴절률분포를 결합한 이중굴절률분포를 제시하였고 식(1)은 이러한 분포에 대한 분포식을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 n^2(R) &= n_1^2 - (n_1^2 - n_2^2) R \\
 &= n_1^2 - (n_1^2 - n_2^2) f(R) \dots\dots\dots R < d \\
 &= n_1^2 - (n_1^2 - n_2^2) \left[ \frac{(d^\alpha - 1)R + (d - d^\alpha)}{(d - 1)} \right] \\
 &\dots\dots d < R < 1 = n_2^2 \quad R > 1 \quad (1)
 \end{aligned}$$

그림1과 식(1)에서 파라미터값을 정의하면 R =  $\frac{r}{a}$ , a: 코어반경 f(R): Profile shape, n1: 코어에서 최대굴절률, n2: 클래딩에서 굴절률이다. 그림1에서 d는 0과 1사이로 이동할 수 있으며 d=1일 때는 단일 α승분포를 나타낸다. 그리고 α의 값에 따라서 여러분포형태로 나타낼 수 있으며, 특히 α=1일 때는 삼각형분포이고 α=∞일 때는 사다리꼴분포이다.

분산 특성을 구하기 위한 수치 해석 방법은 Weakly Guided Fiber의 경우에 있어서 스칼라 파동방정식<sup>(14)</sup>으로 치환하여 전자계를 구할 수 있다. 그러므로 이 분포식에 대한 모우드필드 Φ(R)코어에서 식(2)와 같이 나타낸다.

$$\frac{d^2\Phi}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dR} + V^2[1 - B - f(R)]\Phi = 0 \quad R < 1 \quad (2)$$

식(2)의 R=0와 R=1에서 Φ(R)에 대한 경계조건은 다음의 식으로 나타내며 Kn(w)은 n차 변형 Bessel 함수이다.<sup>(15)</sup>

$$\left. \frac{d\Phi(R)}{dR} \right|_{R=0} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{1}{\Phi(R)} \frac{d\Phi(R)}{dR} \right|_{R=1} = -W \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (4)$$

여기서 함수G(R)을 식(5)와 같이 치환하여 Ricatti 변환하면 식(2)는 1차 미분방정식으로 치환되며 그때의 G(R)에 대한 도함수는 식(6)과 같다.

$$G(R) = \frac{1}{\Phi(R)} \frac{d\Phi(R)}{dR} \quad (5)$$

$$\frac{dG}{dR} = V^2 f(R) - V^2(1 - B) - G(R) / R^2 - G^2(R) \quad (6)$$

코어(R<1)에서 굴절률분포가 이중굴절률분포이므로 식(2)와 식(6)에서 R의 범위가 0<R<d 일때 f(R) =  $(\frac{r}{a})^\alpha$ 으로 치환되며, 또한 d<R<1에서는

$$f(R) = \frac{(d - 1)R + (d - d^\alpha)}{d - 1}$$

으로 치환된다. 그리고 계단형과 α승분포의 결합형인 이중굴절률분포<sup>(13)</sup>에 있어서는 R의 범위가 0<R<d에서 f(R)=0이며, d<R<1에서는 f(R) =  $(\frac{R-d}{1-d})^\alpha$ 로 치환된다. 식(6)에서 V(규격화상수) =  $k_0 a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ 이며, K0는 자유공간에서 파수(wave number)이며 식(6)의 우변은 R=0에서 결정할 수 없으므로 R=0에서 극한치를 취해 식(7)과 같이 놓는다.

$$\left( \frac{dG}{dR} \right)_{R=0} = V^2 f(0) - V^2(1 - B) / 2 \quad (7)$$

그리고 Ricatti: 변환된 함수 G(R)에 대한 경계조건은 식(2)와 식(3)으로부터 식(8)과 식(9)와 같다.

$$G(R=0) = 0 \quad (8)$$

$$G(R=1) = -W \frac{k_1(W)}{K_0(W)} \quad (9)$$

위의 식(6)에서 식(9)까지를 이용하여 정규화된 전파상수 B를 4차 Runge-Kutta 방법으로 구하였

으며 B의도함수 B', B''도 같은 방법으로 구할 수 있다.

### III. 계산결과 및 검토

2장의식(1)에서 식(9)를 통하여 얻은 규격화 전파상수 B 및 이것의 도함수 B', B''를 색분산 관계식<sup>(15)(16)</sup>에 적용하여 파라미터(코어반경, 상대 굴절율차, 파장)들에 대한 색분산 특성을 구하여 도시하였으며, 또한 이러한 특성을 가지고 삼각형 분포 및 사다리꼴분포 특성과 비교하였다. 그림1의  $\alpha$ 승( $\alpha=2-\infty$ ) 분포와 삼각형분포로 결합된 분포에서  $\alpha$ 의값에 따라서 여러 분포형태를 나타내며, 여기서  $\alpha=1$ 은 삼각형 분포이며  $\alpha=\infty$ 는 사다리꼴 분포이다. 본 논문에서 d를 0에서 1사이로 변화 시키면서  $\alpha$ 의 값을 2,3,5,∞에 대하여 특성을 구하여 그림 2,3,4,5에 도시하였고, 사다리꼴 분포<sup>(12)</sup>와 비교 하기 위하여 같은 상대 굴절율차 0.8%를 선택 하였다. 그림2는 상대굴절율차 0.8%에 있어서 최적 코어반경에 대한 색분산 특성을 도시하였으며, 특히 d가 0.2 주위에서 가장 큰 코어반경을 나타낸다.

또한  $\alpha$ 의 값을 2-∞의 범위로 변화 시키면서 특성을 연구한 바  $\alpha$ 의 값이 2이상에서 사다리꼴분포와 거의 같은 코어반경(3.24 $\mu$ m)을 가짐을 알수 있다.

그림2에서 d=0이면 삼각형분포가 되는데, 이 분포의 색분산이 영을 만족하는 코어반경이 사다리꼴 분포의 코어반경과 같게 하기 위해서는 상대굴절율차를 0.2%를 높여야 하므로 게르마늄 도우핑에 의한 손실증가를 가져온다.

그림3은 d의 변화에 대한 최적 코어반경을 도시하였다. 여기서 사다리꼴분포는 d가 증가함에 따라 최적코어반경이 현저하게 감소됨을 알 수 있다. 그러나 여기서 제시한 분포에서  $\alpha=2$ 인 분포는 d가 증가함에 따라 최적 코어반경의 변화가 둔화됨을 알수 있으므로 제조과정에 있어서 d의 값을 선정하는데 이점이 있다.

그림4는 파장 1.55 $\mu$ m에서 상대굴절율차의 최소

치가 d에 대하여 변화 하는 과정을 도시하였다. 여기서 d=0인 삼각형분포에서 상대굴절율차의 최소치는 0.73%이며 d=0.2에서  $\alpha$ 의 값에 따라서 상대굴절율차의 최소치를 조사한 바 사다리꼴 분포와 거의 같은 상대굴절율차의 최소치를 얻을 수 있다. 그러므로 이중 굴절을 분포 들은 사다리꼴분포의 경우와 같이 상대 굴절율차에 기인하는 감쇠상수를 줄일 수 있다. 그림5는 파장의 변화에 대한 분산의 변화율을 도시하였다. 최적코어 반경이 가장 크게되는 d=0.1에서 파장에 대한 분산변화율은 d=0인 삼각형분포의 경우와 비교해서 15%이하로 줄일 수 있다. 그리고  $\alpha$ 의 값을 2-∞ 범위로 변화시키면서 분산 변화율을 조사한 바 사다리꼴 분포와 거의 같음을 알수 있다.

본 논문에서 제안한 이중 굴절율분포를 사용하여 최적 코어반경, 상대굴절율차의 최소치, 파장에 따른 분산변화율, d에 대한 최적코어 반경 들에 대한 특성을 구한 바 삼각형분포 보다 좋은 특성을 얻을 수 있었다. 또한  $\alpha$ 의 값을 2-∞로 변화 시키면서 특성을 조사한 바  $\alpha$ 의 값이 2이상에서 거의 같은 특성을 얻었으며, 특히 d에 대한 최적 코어반경에서는  $\alpha=2$ 인 분포가 가장좋은 특성을 나타내었다.

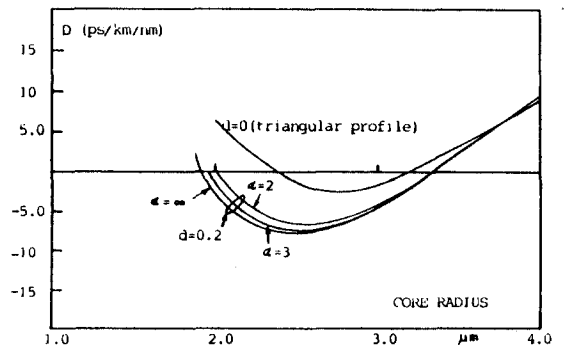


그림 2. 코어 반경에 대한 색분산.  
The dependence of chromatic dispersion on the core radius for a relative refractive index difference 0.8%, with d as a parameter.

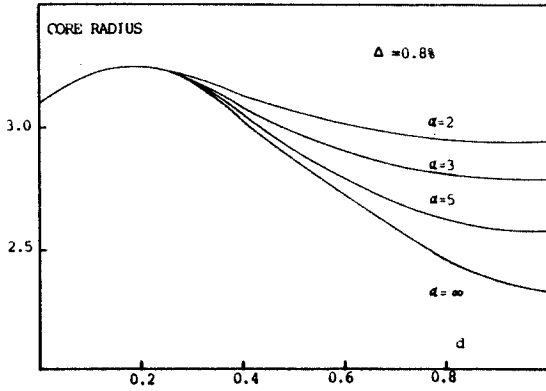


그림 3. d에 대한 코어 반경.  
The dependence of the core radius on d, with the relative refractive index difference as a parameter.

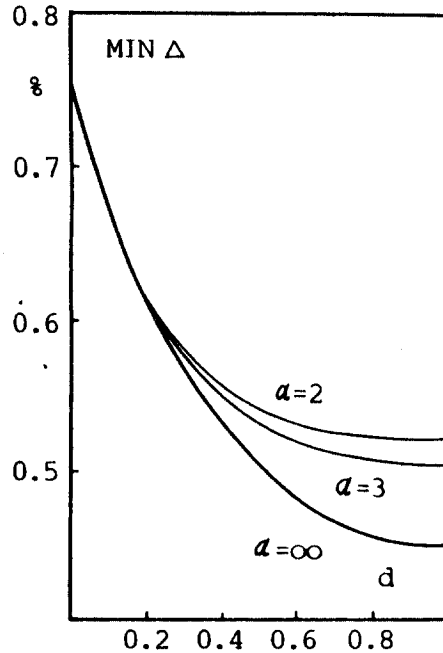


그림 4. d에 대한 상대굴절율차의 최소치.  
The dependence of the minimum value of the relative refractive index difference on d.

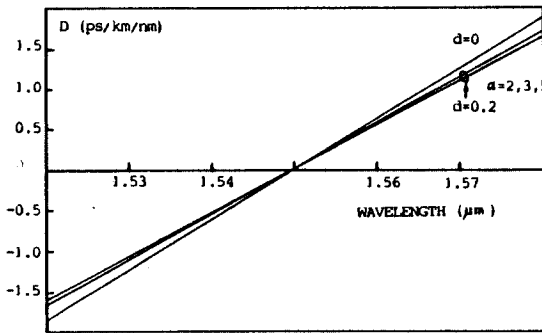


그림 5. 파장에 대한 색분산의 변화.  
The change of the dispersion with wavelength, with d as a parameter.

#### IV. 결 론

코어의 굴절율분포가  $\alpha$ 승분포와 삼각형분포로 결합된 이중굴절율분포에 관하여 특성을 연구한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

최적코어반경, 상대굴절율차의 최소치, 파장에 대한 색분산의 변화율에서 삼각형분포와 비교한 결과 좋은특성을 얻을 수 있었으며,  $\alpha$ 의 값을 2 -  $\infty$ 로 변화시키면서 특성을 조사한 바 코어반경이 가장 커지는 부분인  $d=0.2$  주위에서  $\alpha$ 의 값이 2이상이면 거의 같은 특성을 가지므로 사다리꼴분

포의 계단형부분이  $\alpha$ 승분포로 제조되어도 같은 특성을 나타내는 결론을 얻었다. 그리고 임의의 이중굴절율분포 중에서 삼각형 분포와 결합된 이중굴절율분포가 가장 큰 코어반경을 나타냄을 확인할 수 있었다.

또한 본 논문에서 제안한 이중 굴절율분포는 삼각형분포와 사다리꼴 분포를 일반화시킨 분포식으로써 segmented core, multiple cladding 파이버에 적용하여 특성을 연구할 수 있으며, 필드가 굴절률분포에 민감한 영향을 받는 다중모드 파이버에도 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. H.Kogelnik, "High-speed lightwave transmission in optical fibers", Science, Vol.28, pp 1043-1048, 1985.
2. P.J. Chidgey, B.R. White, M.C. Brain, R.C. Hooper, D.R. Smith, P.P Smyth, P.J. Fiddymont, A.W. Nelson, and L.D. Westbrook, "1,2 Gbit / s optical fiber transmission over 113.7km using a 1.528 $\mu$ m distribution feedback ridge-waveguide laser", Electron Lett., Vol.20, pp.707-709, 1984.
3. R.A. Linke, B.L. Kaspere, J.C. Campbell, A.G.Dentai, and I.P. Kaminow, "120km lightwave transmission experiment at 1 Gbit / s using a new long-wave length avalanche photodetector", Electron Lett., Vol.20, pp.498-499, 1984.
4. N.A. Olsson, R.A. Logan, and L.F. Johnson, "Transmission experiment at 3 Gbit / s with close-spaced wavelength division multiplexed single frequency lasers at 1.5 $\mu$ m", Electron Lett., Vol.20, pp.673-674, 1984.
5. B.J. Ainslie, K.J. Bales, D.M. Cooper, C.D. Ray, and J.D. Rush, "Mono mode fiber with ultra low loss and minimum dispersion at 1.55 $\mu$ m", Electron Lett., Vol.18, pp.842-843, 1982.
6. A.D. Perason, L.G. Cohen, W.A. Reed, J.T. Krause, E.A. Siegty, F.V. Dimacello, and A.G. Richardson, "Optical Transmission in dispersion-shifted single mode spliced fiber and cables", J. Lightwave Technol., Vol.LT-2, pp. 346-348, 1984.
7. K. Inda, "Recent progress in fiber fabrication techniques by vapor-phase and axial deposition", IEEE J. Quantum Electron, Vol.QE-18, pp. 1424-1431, 1982.
8. A. Carnevale, U.C. Peak, and G.E. Peterson, "Single mode fiber with graded index of refraction", U.S. Patent 41412722, Nov. 1, 1983.
9. M.A. Saifi, S.J. Jang, G.Cihen, and J. Stone, "Triangular profile single mode lightguides with index profiles", Bell Syst. Tech. J., Vol.60, pp.583-598, 1981.
10. U.C. Peak, G.E. Peterson, and A. Carnevale, "Dispersionless single mode lightguides with index profiles", Bell Syst. Tech.J., Vol.60, pp.583-598, 1981.
11. M.A. Safti, S.J. Jang, L.G. Cohen, and J. Stone, "Triangular profile singlemode fiber", Opt. Lett., Vol. 7, pp.43-45, 1982.
12. M.I. El-Ashegh and M.Y. El-Ibiary, "Trapezoidal index single-mode fibers for the 1.55 $\mu$ m band", J.Lightwave Technol., Vol.LT-5, No.2,pp.252-259, 1987.
13. C. Yeh, G. Lindgren, "Computing the propagation characteristics of radially stratified fibers", Appl. Opt., Vol, 16, pp.483-493, 1977.
14. 최태일, 최병하, "과장 1.55 $\mu$ m에서 Segmented Core Fiber에 관한 수치해석 방법", 仁荷大學校 産業科學技術研究所 論文集, 第 17 輯 pp.113-118, 1989.
15. M.R. Spiegel, "Mathmetical handbook of formulas and tables" New York, ch.24, p.31, 1968.
16. M. Pires, Rogers, and Souza, "Prediction of laser wavelength for minimum total dispersion in single-mode step index fiber", IEEE Trans. Microwave Theory Tech, Vol.MTT-30, pp.131-139, 1982.
17. J.W. Fleming, "Material dispersion in lightguide glasses", Electron Lett., Vol.14, pp.326-328, 1979.



崔 泰 一(Tae Il CHOI) 正會員  
 1975年 7月 5日生  
 1985年 2月 : 仁荷大學校 電子工學科 卒業  
 1988年 8月 : 仁荷大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)  
 現在 : 仁荷大學校 大學院 電子工學科博士課程 在學中



李 周 珩(Joo Hyung LEE) 正會員  
 1940年 7月 7日生  
 1961年 12月 : 仁荷大學校 電氣科 卒業  
 1976年 8月 : 仁荷大學院 電子工學科 卒業  
 1968年 5月 : 原子力 研究所 入社  
 1971年 8月 : KIST 入社  
 1977年 2月 : 三星半導體通信(株)入社  
 1988年 6月 : 三星半導體通信研究所 在職中



崔炳河(Byung Ha CHOI) 正會員  
1936年12月3日生  
1960年2月：仁荷大學校 電氣工學科 卒業  
1962年2月：仁荷大學校 大學院 電氣工學科 卒業(工學碩士)  
1975年：仁荷大學校 大學院 電氣工學科 卒業(工學博士)  
現在：仁荷大學校 電子工學科 教授