

# 파장 무의존형 광섬유 결합기의 제작 및 특성

## Fabrication and Characteristics of Wavelength Insensitive Optical Fiber Coupler

張眞賢\*, 申東浩\*\*, 鄭鎮豪\*\*\*, 韓旭\*\*\*\*, 金映權\*\*\*\*  
 ( Jin-Hyeon Chang\*, Dong-Ho Shin\*\*, Jin-Ho Jung\*\*\*, Wook Han\*\*\*\*,  
 and Yung-Kwon Kim\*\*\*\* )

### 요약

광섬유형 결합기는 광통신용으로 폭넓게 사용되고 있는 핵심 광수동부품이다. 본 논문에서는 제작공정이 어려운 파장 무의존형 광 결합기(WIC)를 광섬유가 서로 다른 광섬유 파라미터를 갖는 경우와 서로 다른 클래딩 직경을 갖는 경우에 대해 제작하여 그 특성을 측정하고 이론적 시뮬레이션과 비교 분석하였다. 실험 결과  $1310 \pm 40nm$  와  $1550 \pm 40nm$  의 대역에서 1.0dB 이내의 균일성과 과잉손실이 0.1dB 이하인 우수한 특성을 얻었다.

### Abstract

Optical fiber coupler is a crucial optical passive component for optical transmission systems. In this paper, we fabricate wavelength insensitive optical coupler(WIC), of two types for which the processing procedures are complicate and difficult. These couplers are fabricated by two optical fibers having either different fiber parameters or different cladding diameters. To clarify the validity, we measure the optical characteristics and compare to the data of theoretical simulation. The experiment results reveal that it has uniformity of about 1.0 dB and excess loss of less than 0.1 dB in the range of  $1310 \pm 40nm$  and  $1550 \pm 40nm$ .

### I. 서론

오늘날 광중계기, 광증폭기, OFDM방식을 이용한

초고속, 대용량 광통신시스템 등에 폭넓게 사용되는 광결합기는 1970년초부터 많은 연구가 되어온 분야이다[1]-[7]. D. Marcuse, A. W. Snyder 등에 의해 결합 현상에 대한 상세한 이론적 보고가 있었고, D. B. Mortimore, V. J. Tekippe 등에 의해 광섬유형 결합기에 대한 많은 실험적인 보고가 이루어졌다[4]-[12]. 파장 무의존형결합기는 결합부분의 테이퍼 요소를 고려함으로써 이전의 논문들에 비해 비교적 정확한 이론적 모델링을 제시한 보고가 있었다[6]. 그러나 제작공정이 비교적 난해하여 아직까지 실제적인 구현시 많은

\* 斗日電子通信(株)  
(Dewell Electronics-Telecomm. Inc.)

\*\* 電子部品綜合研究所  
(KETI)

\*\*\* 湖西大學校 電氣電子制御工學部  
(Dept. of Elec. Eng. Hoseo Univ.)

\*\*\*\* 建國大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., KonKuk Univ.)

接受日: 1998年9月10日, 修正完了日: 1998年11月27日

어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 실제 제작시 발생 되는 현상을 중심으로 이론적으로 보고된 결과와 비교하였다. 본 논문에서는 서로 다른 차단파장을 갖는 두 광섬유로 제작하는 방법과 서로 다른 클래드 반경을 갖는 광섬유를 이용하여 만드는 방법으로 파장무의존형결합기를 제작하여 각각의 특성을 비교하였고, 결합기의 파장의존 특성을 나타내었다.

II. 이론적인 배경

파장무의존형 광커플러는 그림 1과 같이 1310nm와 1550nm의 넓은 파장범위에서 OFDM, 광 CATV 등 다양한 용도로 사용될 수 있으며,

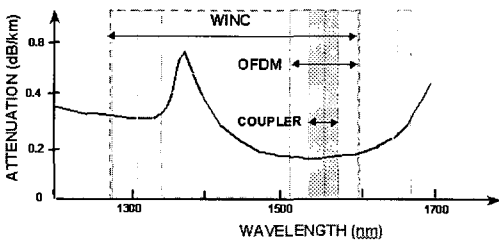


그림 1. 파장무의존형커플러의 용도  
Fig. 1. Use of the WIC.

광섬유형 결합기의 결합특성은 정상모드 해석방법과 결합모드 해석방법으로 표현할 수 있는데, 정상모드로 해석하면 모드들은 다음과 같은 전계를 가진다

$$E(x, y, z) = e(x, y)e^{i\beta z} \quad (1)$$

약도와 광섬유이기 때문에 스칼라 고유치 방정식으로 표현하면 위 식은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\nabla_t^2 + k^2 n^2(x, y) - \beta_{\pm}^2) e_{\pm}(x, y) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $n^2(x, y)$  은 굴절률, + - 는 각각 광섬유에서의 우수 및 기수 모드이며, 위 식을 만족하는 모드들은 다음과 같이 직교성을 갖는다.

$$\int_{A_{\infty}} e_+ e_- dA = 0 \quad (3)$$

이때 동일한 광섬유에서는 직교성을 만족하지만 동일하지 않은 광섬유의 경우는 위의 조건이 만족되지 않아서 완전한 전력의 전달이 이루어지지 않으며, 이 조건은 파장무의존형결합기의 전력전달 특성을 설명하는 기본이 된다.

식(1)을 근사적으로 해석하면 모드필드를 다음과 같이 각각의 두 코어의 기본모드의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$e_{\pm}(x, y) \approx \psi_1(x, y) + a_{\pm} \psi_2(x, y) \quad (4)$$

여기서  $\psi_1, \psi_2$  는 개별적인 광섬유에서의 기본 모드이다.

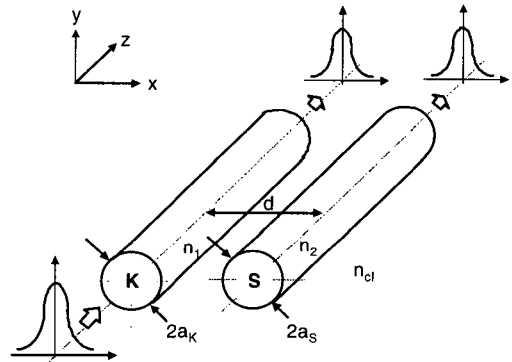


그림 2. 모드결합현상  
Fig. 2. Mode coupling phenomenon.

결합모드로 해석을 하면, 그림 2에서와 같이 두 파이버 K와 S에서 진행방향에 따른 광섬유의 기본모드의 크기는 다음 식과 같은 결합방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dA_K}{dz} + i\beta A_K = -i \sum A_S C_{KS} \quad (5)$$

여기서  $A_K, A_S$  는 광섬유 K와 S의 기본모드 진폭이며,  $C_{KS}$  는 두 광섬유 모드들간의 결합계수이다. 결과적으로, 정상 모드로 해석한 식(4)와 결합모드로 해석한 식(5)의 결과는 동일하다. 동일한 광섬유의 경우는  $a_K = a_S = a$  이고  $n_K = n_S = n_{co}$  이며,

$C_{KS} = C_{SK}$ 가 되어 광섬유간의 결합계수를 나타내면 다음 식과 같이 표시할 수 있다[2].

$$\begin{aligned}
 C_{KS} &= C_{SK} \\
 &= \sqrt{\frac{2}{a^2} \frac{(\Delta_1 \Delta_2)^{1/4}}{(V_1 V_2)^{3/2}} \cdot \frac{U_1 U_2 K_0 (W_1 d/a)}{K_1 (W_1) K_1 (W_2)}} \quad (6) \\
 &= \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0 (Wd/a)}{a V^3 K_1^2 (W)} \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서,  $\Delta = (n_{\infty}^2 - n_{cl}^2) / 2 n_{\infty}^2$ ,  $a$ 는 코어의 반경,  $d$ 는 두 광섬유 사이의 거리,  $K$ 는 변형 베셀 함수,  $U, V$ 와  $W$ 는 정규화 주파수이며  $\int V^2 = U^2 + W^2$ 이다.

굴절률과 코어반경등 광섬유 파라미터가 다른 경우는 다음 식과 같이 일반적인 형태로 표시할 수 있다

$$\begin{aligned}
 C_{KS} &= \sqrt{2\Delta_S} \frac{U_1 U_2}{a_K V_K} \frac{K_0 (W_S d/a_K)}{K_1 (W_1) K_1 (W_2)} \\
 &\times \left( \frac{\overline{W}_K K_0 (W_S) I_1 (\overline{W}_K) + W_S K_0 (W_S) I_0 (\overline{W}_K)}{\overline{W}_K^2 + U_S^2} \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

여기서,  $I$ 는 변형베셀함수이고,  $\overline{W}_i = W_i a_S / a_K$ 이다. 두 광섬유를 통해 전달되는 광전력은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_1(z) &= 1 - F^2 \sin^2(Cz/F) \\
 P_2(z) &= F^2 \sin^2(Cz/F) \quad (9)
 \end{aligned}$$

여기서, 결합계수  $C = \sqrt{C_{KS} + C_{SK}}$  이고, 광전력의 진폭은 다음 식과 같이 표현된다.

$$F^2 = [1 + (\beta_K - \beta_S)^2 / 4 C_{KS} C_{SK}]^{-1} \quad (10)$$

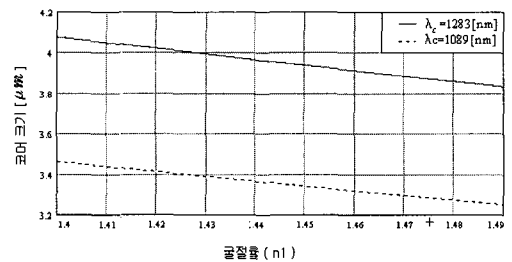
두 광섬유의 코어가 동일한 경우는  $\beta_K = \beta_S$ ,  $C_{KS} = C_{SK}$ 이 되어 광전력전달이 100%에 이르며, 결합길이  $z = \pi / 2 C_{KS}$ 에서  $P_K = 0, P_S = 1$ 이 된다. 그러나 동일하지 않은 광섬유에서는 광전력전달이 광섬유 파라미터에 따라 변하게 된다.

과장무의존형결합기의 제작시 굴절률은 같고 코어반경이 다른 광섬유를 사용하는 방법과 차단파장이

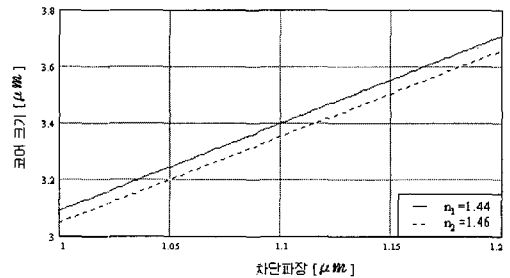
다른 광섬유를 사용하는 방법은 이론적으로 동일하다. 다음의 수식에서 알 수 있듯이 코어반경은 차단파장, 코어 굴절률과 밀접한 관계가 있으며, 그림 3과 같이 굴절률을 증가시킬 때 코어 반경이 줄어드는 효과를 가져오며, 차단 파장이 증가함에 따라 코어반경이 증가함을 알 수 있다.

$$a = \frac{2.405 \lambda_c}{2 \pi n_1 (2\Delta)^{1/2}} \quad (11)$$

여기서  $n_1$ 은 코어의 굴절률,  $\Delta$ 는 비굴절률이다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 코어 크기와 굴절률 (b) 코어크기와 차단파장

Fig. 3. (a) Coresize vs. core refractive index (b) Coresize vs. cutoff frequency.

이들 광섬유 파라미터들의 변화량이 다른 광섬유 파라미터에 미치는 영향은 다음과 같다.

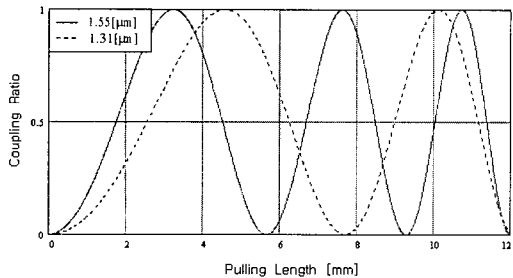
$$\delta n \approx 1.75 n_{\infty} (\delta a/a) \frac{d}{V} \quad (12)$$

여기서  $\delta n$ 은 굴절률의 변화,  $\delta a$ 는 코어반경의

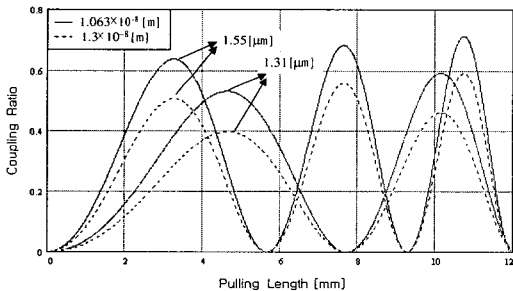
변화량이다. 즉,  $\Delta = 0.003$  이고  $v=2.4$ 일 때 코어 굴절률의 변화( $\delta n / n_{co}$ )가 0.05% 발생할 경우 코어 반경의 차이( $\delta a / a$ )가 10% 차이가 나는 효과를 발생시키며, 이때 최대 결합률  $F^2 = 12\%$  가 된다. 즉,  $\delta n$  을 약간만 증가시켜도 코어 반경이 상당히 줄어든 효과를 발생시킨다.

III. 파장 무의존형 결합기 제작

동일한 광섬유를 이용한 경우에 인장길이에 따른 결합률을 그림 2의 광섬유 K 출력에서 보면 그림 4(a)와 같으며, 장파장이 먼저 결합이 일어난다. 이러한 특성곡선에서 1310nm와 1550nm 두 파장이 동시에 50%의 광전력을 만족하는 조건을 구하기는 매우 힘들다. 따라서, 파장 무의존형 결합기의 제작을 위해서는 그림 4(b)와 같은 인장특성을 이용한다. 이때, 광섬유 코어 반경의 차( $\delta a / a$ )가 각각



(a)

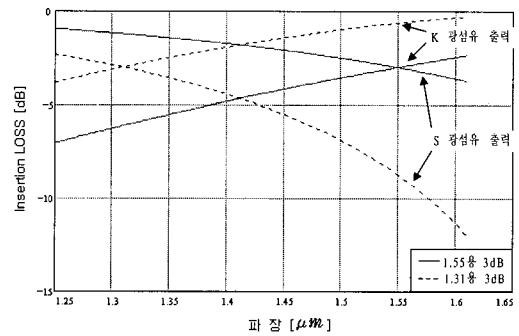


(b)

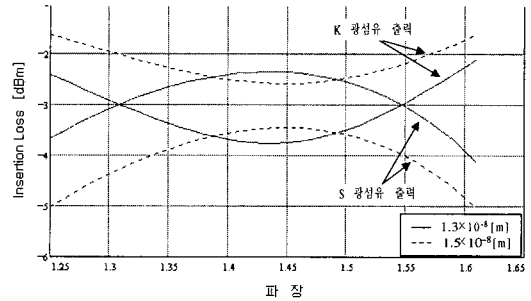
그림 4. 인장길이에 대한 최대결합률의 변화  
(a) 일반 3 dB 결합기, (b) WIC

Fig. 4. Maximum coupling ratio vs. pulling length  
(a) Standard 3 dB coupler, (b) WIC.

$1.063 \times 10^{-8}$  [m],  $1.3 \times 10^{-8}$  [m]일 때 인장길이에 대한 결합률의 변화를 1310nm와 1550nm 파장에 대해서 동시에 나타내었다. 이때 코어 반경차이가  $1.063 \times 10^{-8}$  [m]이고, 인장길이가 4mm에서 1310nm와 1550nm 두 파장이 동시에 50%의 광전력을 만족할 수 있음을 알 수 있다. 전체파장에 대한 파장의존특성을 알아보기 위해서 일반 3dB 결합기와 파장 무의존형 결합기의 파장특성을 그림 5에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 5. 광섬유형 결합기의 파장 의존 특성

(a) 일반 3dB 결합기, (b) WIC

Fig. 5. Wavelength dependency of optical fiber coupler  
(a) Standard 3 dB coupler, (b) WIC.

일반 결합기는 1310nm 또는 1550nm의 한 파장대에서만 3dB를 만족하고 다른 파장에서는 큰 차이가 있지만 파장무의존형 결합기는 전체적으로 평탄한 파장특성을 보임을 알 수 있다. 파장 무의존형 결합기의

제작방법은 다음 표 1과 같이 3가지 방식이 사용되고 있으며, 본 실험에서는 상업적인 대량생산에 적합한 서로 다른 클래드 반지름을 갖는 광섬유를 이용한 방법과 서로 다른 차단 파장을 갖는 광섬유를 이용한

표 1. 파장 무의존형 결합기의 제작종류

Table 1. Fabrication types of WIC.

방 법	장 점	단 점
클래딩 지름이 다른 광섬유 : P방법 - Prepulling - Etching	일반 파이버 사용	공정절차 추가 재현성 떨어짐
클래딩지름은 같으나 코어 구조인자가 다른 광섬유 이용 : D방법 (Different cutoff wavelength)	공정이 단순	파이버 특성에 민감 (특수 파이버 사용)
Si-도파로형	다분기, 소형화 대량생산에 유리	공정이 복잡 투자비 큼

방법 2가지를 사용하여 제작하였다. WIC는 전체적인 파장에서 비교적 평탄한 특성을 보여줄을 알 수 있다. Si-도파로형은 경로차를 이용한 MZ-간섭계 구조의 제품이 보고되고 있으며[5], 아직까지 국내에서 양산체는 확립되지 않은 상태이다.

파장 무의존형 결합기의 실제 제작 조건은 표 2와 같으며, P방법은 그림 6과 같이 한쪽 광섬유를 600[μm]정도 예인장 시켜서 광섬유 반경차이를 발생시킨 후, 정상적인 광섬유와 융착공정을 시킨다. 이때 예인장길이는 반복적인 실험을 통하여 최적의 값을 산출하였으며 일반적으로 주위환경에 따라 500 ~ 650 [μm] 범위를 가진다. D 방법은 일정한 차단파장이 차이가 나는 두 광섬유를 이용하여 별도의 예인장없이 제작한다. 차단파장이 140nm 차이 나는 두 광섬유를 이용하여 제작한 보고가 있었으며[7]. 본 실험에서는 200nm 의 차단파장차이가 나는 광섬유들을 사용하였다. 예인장 길이와 차단파장의 차이는 그림 4(b)와 같이 이상적인 제작조건을 설정해주는 매우 결정적인 제작조건이다.

표 2. 파장 무의존형 결합기의 제작조건

Table 2. Fabrication conditions of WIC.

방 법	MFD [μm]	Clad Dia [μm]	Cut-off [μm]	Index Change	비 고
P	1 9.3 (10.5)	125	1250	0.36 %	SMF-28
	2 9.3	125-dd	1250	0.36 %	
D	1 9.2	125.3	1283	0.377 %	NTTI 제공
	2 8.7	125.2	1089	0.377 %	

IV. 파장무의존형 광 결합기의 특성측정

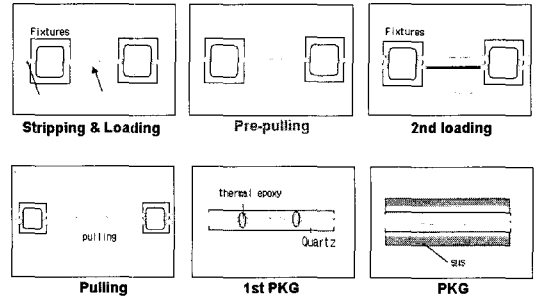


그림 6. 파장 무의존형 광 결합기 제작과정

Fig. 6. Fabrication Process of WIC.

전체적인 제작 공정 및 패키징은 그림 6과 같이 측정장치는 그림 7과 같이 백색광원을 기준으로 하여 스펙트럼 분석기를 이용하여 파장 의존특성을 측정하였고, 광섬유형 결합기의 제조 장비는 NTT사 OPX202와 E-TEK사 FCPW-2000 두 대의 장비를 이용하였다[12].

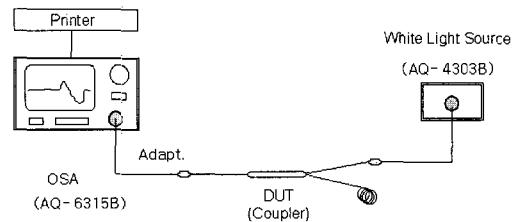
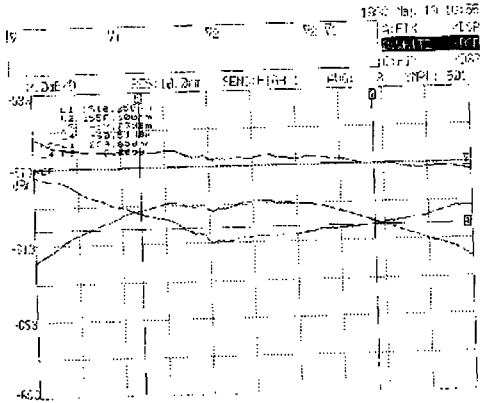


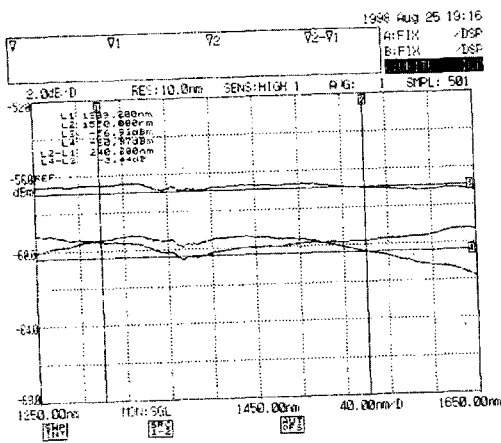
그림 7. 파장 의존 특성 측정 구성도

Fig. 7. Setup for measure the wavelength dependency.

그림 8에 실제 제작한 제품의 제작특성을 각각 나타내었다. 두 가지 방법 모두 평탄한 파장특성을 보여줌을 알 수 있었고,  $1310 \pm 40nm$ 와  $1550 \pm 40nm$ 의 대역에서 1.0dB 이내의 균일성과 0.1dB 이하의 과잉손실을 갖는 제품을 얻을 수 있었으며 양품의 최종 제작수율은 60%정도였다. 두 방법으로 제작시 장단점을 요약하면, P방법은 예인장길이가 주위환경이나 융착온도에 따라 미세하게 변하며, 2차 로딩작업시 구현성이 흔들리는 단점을 가지고 있다. D방법은 편리하기는 하나 광섬유 특성에 매우 결정적으로 의존하기 때문에 특성이 좋은 광섬유의 사용이 가장 중요하며, 이 방법 또한 융착온도 등에 영향을 받기는



(a) D 방법



b) P방법

그림 8. 제작된 WIC 특성

Fig. 8. Characteristics of the fabricated WIC.

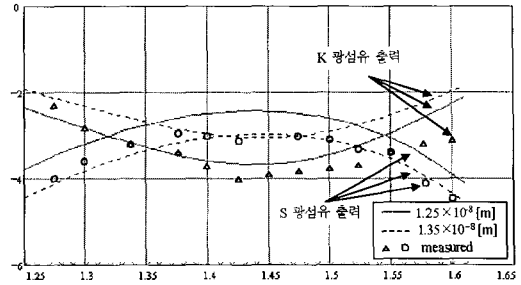


그림 9. 시뮬레이션과 실제데이터의 비교

Fig. 9. Comparison of simulation and fabricated data.

마찬가지였다. 일정한 차단파장을 갖는 광섬유로 조건을 잡는 것 이외에 1) 제조장비의 모터정밀성 2) 컴퓨터로 데이터 감지시 충분한 데이터의 실시간 확보 3) 실제 제작시에는 예인장 혹은 일정한 가스의 흐름 및 융착정도가 매우 중요한 영향을 미치며, 이러한 요소가 만족되지 않을 때는 원하는 특성을 얻을 수 없었다. 두 가지 방식의 차이는 예인장 유무의 방법상의 차이로써 패키징 방식 이후는 모두 동일하다.

### V. 결론

파장 무의존형 광 결합기는 두가지 제작방법으로 제작되었으며, 그 결과  $1310 \pm 40nm$ 와  $1550 \pm 40nm$ 의 대역에서 1.0dB 이내의 균일성과 과잉손실이 0.1dB 이하인 우수한 특성을 얻었다. 특수한 광섬유의 공급을 보장받지 못하는 한 예인장에 의한 제작방법이 유일한 방법이다. 이론적으로 파장무의존형 광결합기를 논의하고 시뮬레이션하여 실험결과와 비교분석하였다. 제작된 WIC는 OFDM, 광증계기에서 핵심적으로 사용될 수 있으며, 향후 다양한 광섬유 파라미터 변화에 따른 정확한 모델링, 실제적인 제작기술, 광섬유의 공급, PMC등이 더욱 연구되어야 할 것이다.

### 참고 문헌

[1] D. Marcuse, " Theory of dielectric optical waveguides 2nd edition ", Academic press Inc, (1991)

[2] A. W. Snyder, Adrian Ankiewicz, " Optical fiber couplers - Optimum solution for unequal cores ", J. Lightwave Technol., vol. 6. No. 3, pp. 463-474 (1988)

[3] Horng Shou Huang, Hung Chun Chang, " Analysis of Optical fiber directional coupling based on the HE11 modes - part I : The identical - Core case", J. Lightwave Technol., vol. 8. No.6, pp. 823-831 (1990)

[4] I. Yokohama, K.Okamoto and J.Noda : " Fiber coupler fabrication with automatic fusion elongation processes for low loss and high coupling ratio accuracy", J. Lightwave Technol., vol. LT-5, pp. 910-915 (1986)

[5] 신장욱, 성희경외, "도파로형 광커플러 기술이전 보고서" (1998)

[6] K. Okamoto : " Theoretical investigation of light coupling phenomena in wavelength flattened couplers ", J. Lightwave Technol., vol. 8, pp.678-683 (1990)

[7] H. Hanafusa, Y. Takeuchi, and J. Noda : "Wavelength flattened couplers fabricated from single mode fibers with different core parameters ", Springer Proceedings in Physics, vol.44, pp.334-338 (1989)

[8] D. B. Mortimore : "Wavelength-flattened fused couplers", Electron. Lett., vol. 21, pp. 742-743 (1985)

[9] T. A. Birks and C. D. Hussey : " Wavelength flattened couplers : Performance optimisation by twist tuning ", Electron. Lett., vol. 25, pp.407-408 (1989)

[10] R. Zengerle and O. G. Leminger : " Wavelength selective directional coupler made of nonidentical single mode fibers ", J. Lightwave Technol., vol. LT-4, pp.823-827 (1986)

[11] F. Gonthier, D. Ricard, S. Lacroix and J. Bures : " Wavelength flattened 2\*2 splitters made of identical single mode fibers ", Opt. Lett., vol. 16, pp.1201-1203 (1991)

[12] 장진현, 이익희, 신동호, 윤대원 : "광대역특성을 갖는 광섬유 커플러 제작 ", 제5회 광 전자공학 학술대회, (1998)

저 자 소 개



張 眞 賢 (會員申請中)  
 1995.2~1998.11 현재 두일전자통신 (주) 광소자 개발팀장, 1997.3~1998.11 현재 건국대학교 대학원 전자공학과 박사과정  
 주관심분야 : 광섬유 응용소자, 색 분산 보상방법



申 東 浩 (會員申請中)  
 1998.11 현재 전자부품종합연구소 선임 연구원.  
 주관심분야 : LD, 섬유형 소자, 도 파로 소자 시뮬레이션

鄭 鎭 豪 (正會員)

第 1卷 第 1號 論文 97-01-06 參照.  
 現在 湖西大學校 電氣電子制御工學部 副教授



韓 旭 (會員申請中)  
 현재 삼성전자 전송연구팀 통신개발실 정보통신본부 선임연구원

金 暎 權 (IEEE senior member)  
 第 1卷 第 1號 論文 97-01-14 參照.  
 現在 建國大學校 電子工學科 教授.