

# 평면도파로형 2×32 광커플러의 설계와 제작에 관한 연구

정희원 신기수\*, 최영복\*, 류근호\*\*, 문동찬\*\*\*

## A Study on the Design and Fabrication of the Planar Light Waveguide type 2×32 Optical Coupler

Key-soo Shin\*, Young-bok Choi\*, Keun-ho Ryu\*\*, Dong-chan Moon\*\*\* *Regular Members*

### 요 약

2×32 커플러는 마하젠더 간섭기와 Y분기 커플러로 구성되어 제작하였다. 커플러의 설계를 위해 유효굴절율법을 이용하여 3차원의 도파로 구조를 2차원 구조로 대체하였고 2차원 유한차분 빔전파법을 이용하여 도파로 구조에 대한 최적의 설계요소를 찾아내었다. 전산모사에 의하여 두 도파로 간의 높이가 43.6 μm(경로차 0.668 μm)로 제작한 2×32 커플러가 가장 우수한 특성을 나타냈다. 코어층의 식각 특성에 있어서 산화실리콘과 마스크인 알루미늄의 식각비는 30:1이었고 코어의 식각률은 2600 Å/min이었다. 식각 균일도는 ±5% 내외로 균일하였다. 2×32 커플러의 삽입 손실은 최대 손실이 19.2dB 이하였고 균일성은 2dB이었다.

### ABSTRACT

The 2×32 coupler consists of Mach-Zehnder interferometer and Y branch coupler. For the designs of this coupler, three dimensional rectangular core waveguide decomposed to two-dimensional structure by the effective index method. To optimize the waveguide structure, the confinement factor was investigated with two-dimensional finite difference Beam Propagation Method. The 2×32 coupler fabricated by simulation with height between Mach-Zehnder arms, H=43.6 μm(path difference 0.668 μm) was showed best characteristics. In the results of dry etching of core layer, the etching rate of core layer was above 2600 Å/min, the etching ratio of SiO<sub>2</sub> to Al mask was 30:1 and the uniformity of etching was ±5%. The maximum insertion loss and the uniformity of 2×32 coupler were below 19.2dB, 2dB respectively.

### 1. 서 론

광통신의 최종 목적은 각 가정까지 광섬유를 연결하여 일반인들도 많은 정보를 신속하고 쉽게 접할 수 있게 하는 것, 즉, 광가입자망(Fiber To The

Home, FTTH)의 실현이라고 할 수 있다. 그러나 여러 가지 문제점으로 인해 아직까지는 일부 실험 지역 내에 국한되어 있다. 광가입자망의 실현을 위한 이론적 방법으로 광섬유를 정보 전달소에서 각 가정까지 직접 연결하는 것이 있으나, 이 방법은 경제적 면에서 경쟁력을 갖출 수 없을 뿐 아니라 물

\* 한국통신 가입자망연구소(cyber@kt.co.kr)

\*\* 충북대학교 컴퓨터과학과

\*\*\* 광운대학교 전자재료공학과

논문번호 ; 99157-0424, 접수일자 ; 1999년 4월 24일

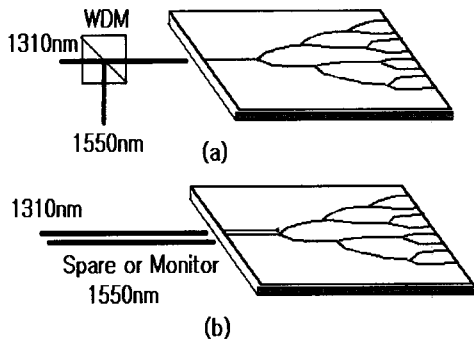


그림 1. 광수동소자 전송 방식  
(a) 1×N 커플러 (b) 2×N 커플러

리적인 부피 증가로 인해 현실적으로 실현 불가능하다고 할 수 있다.

이런 문제를 해결하기 위해 나온 방법 중 하나가 광분기 소자를 이용한 광수동소자망<sup>[1]-[3]</sup>(Passive Optical Network, PON)이다. 이 방법은 정보 전달소축의 전송 장비와 광선로를 여러 가입자가 공유할 수 있기 때문에 가입자당 가격을 낮출 수 있다는 장점이 있다. 광수동소자망의 핵심소자인 광분기 소자는 현재 광섬유형 커플러<sup>[4][5]</sup>에서 대량 생산이 가능한 평면도파로형 소자로 연구<sup>[6]-[9]</sup>가 진행되고 있으며 평면도파로형 소자의 연구 분야 내에서도 단순 분기형에서 다양한 용도의 복합 다기능 소자로 발전<sup>[10][11]</sup>하였다.

한편, 이러한 광수동소자망 구성에 있어서 기존망인 1310nm 파장 영역과 앞으로 사용될 1550nm의 파장 분할 다중화 망(Wavelength division multiplexing, WDM)이 동시에 사용이 가능하고 가입자계의 확산을 위해 단순하고 간편한 전송 시스템이 요구된다.

일반적으로 광수동소자망을 이용한 광가입자망 구축 방법에는 입력단 수에 의하여 그림 1과 같이 1×N 커플러를 이용한 전송 시스템과 2×N 커플러를 이용한 전송 시스템으로 구분할 수 있다. 1×N 전송 시스템에서는 파장에 무관하게 동작되는 단순 Y분기를 이용한 소자를 사용할 수 있는 장점이 있으나, 단선등 고장시에 발생하는 문제점과 양방향 통신이나 1310/1550nm의 파장을 동시에 사용할 경우, 추가적으로 WDM소자를 사용해야한다는 단점을 가지고 있다. 2×N 전송 시스템에서는 1×N 전송 시스템의 단점을 해결할 수 있으나 2개의 입력단을 갖는 커플러는 2개의 도파로가 상호 영향 주

기 때문에 파장 무관형 2×N 커플러의 제작이 어렵다. 일반적인 방법으로 전단에 2×2 방향성 결합기를 이용한 소자가 있으나 이 소자는 파장에 대하여 분기 특성이 달라지는 단점이 있다. 이에 따라서 국내외적으로 파장에 의존하지 않는 커플러에 관하여 여러 가지 모델<sup>[12]</sup>이 제시되고 있지만 이에 대한 연구가 충분하지 않은 실정이다. 본 논문은 이러한 문제를 해결하는 시도로서 마하젠더 간섭기와 Y분기를 이용하여 파장에 무관하게 동작하는 2×32 분기 소자의 설계와 제작에 관한 것이다.

## II. 본 론

### 1. 광커플러 설계

광커플러는 그림 2 (a)처럼 2×32 파장 무의존성 커플러는 전단부분에 2×2의 마하젠더 부분(그림 2 (b))과 후단 부분에 30개의 Y분기의 가지(tree)형태로 결합되어 이루어진다. 전단부분에 있는 파장 무의존성 커플러가 되기 위해서는 분기비가 1200nm에서 1600nm의 파장대에서 일정<sup>[13][14]</sup>해야 한다. 특히 광증폭기와 연결하려면 최소한 1500nm에서 1600nm 영역에서 균일한 분배 특성을 가져야 한다.

도파로의 코어와 광섬유의 접속시에 모드직경이 같아야 하기 때문에 코어의 크기를 광섬유와 유사하게 8μm × 8μm로 하였다. 이러한 코어의 준단일모드 유지조건을 만족시키기 위하여 크래드의 굴절률이 1550nm에서 1.447, 코어의 굴절률이 1.4503인 Δn=0.3%로 정하였다. 이와 같은 조건으로 마하젠더 부분과 Y 커플러를 동일하게 설계하였다. 설계된 2 × 32 파장 무의존성 커플러의 단면은 그림 3에 나타내고 있다.

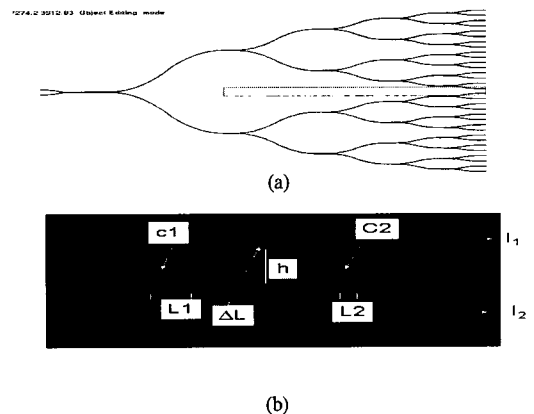


그림 2. 설계된 도면 (a) 2 × 32 커플러 (b) 마하젠더

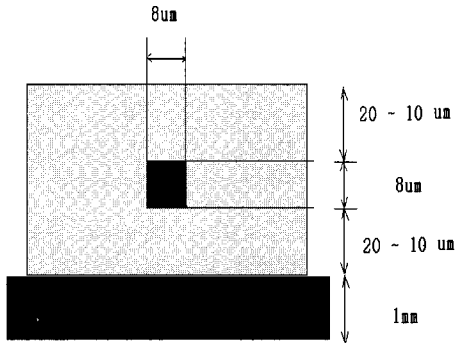


그림 3. 2 × 32 커플러의 단면 구조

1-1. 마하젠더 간섭기

마하젠더형 파장 무의존성 커플러의 구조는 그림 2에 묘사된 두 개의 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>의 방향성 결합기와 길이 차이가 있는 두개의 광경로로 구성되어 있다. 마하젠더형 커플러의 결합률에 영향을 미치는 설계 변수는 결합길이(L<sub>1</sub>,L<sub>2</sub>)와 도파로간의 간격(g<sub>1</sub>,g<sub>2</sub>)이고 간섭효과에 의한 출력에서의 분기비 조정은 long arm과 short arm간의 경로차에 의해서 결정되어진다. 본 논문에서는 결합률에 관련된 설계 변수를 일정하게 유지하고 마하젠더의 long arm과 short arm간의 높이 H를 변수로 하여 출력단에서 분기비가 50%가 되는 최적의 조건을 찾았다.

마하젠더 부분의 구조 변수는 표 1과 같이 정하였다. 전사 모사를 통하여 높이 H를 42.8 μm에서 46 μm까지 0.8 μm씩 증가하면서 (경로차는 0.642 μm에서 0.704 μm까지 변화하면서) 파장에 따른 분기비를 측정하였다. 그림 4는 이에 대한 결과를 나타낸 것이다. 전사 모사의 결과는 arm의 높이 H가 43.6 μm(경로차는 0.668 μm 일 경우)인 그림 4 (b)에서 전 파장에 걸쳐 분기비가 50% 지점과 근접하는 가장 좋은 특성을 나타낸다. 이 설계 지점을 중심으로 해서 다른 설계 변수를 넣었을 경우에 출력의 분기비는 중심 지점으로부터 편차가 발생하였다. 단파장으로 갈수록 오차의 범위는 더욱 벌어졌다. 이에 따

표 1. 마하젠더형 커플러의 변수

결합길이 (L <sub>1</sub> )	결합길이 (L <sub>2</sub> )	도파로 간격(g <sub>1</sub> )	도파로 간격(g <sub>2</sub> )	arm의 높이(H)
985 μm	254 μm	12 μm	13 μm	42.8 μm ~ 46 μm

라서 이점을 최적의 설계 변수로 설정하였다.

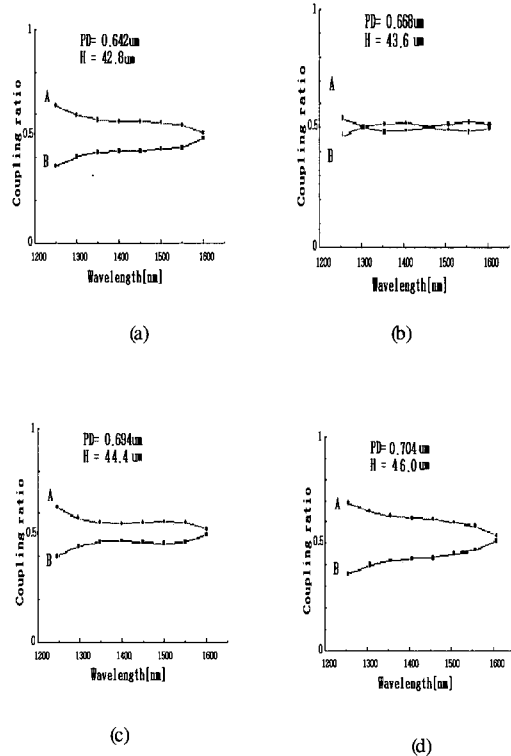


그림 4. 마하젠더 arm의 높이 H의 변화와 파장에 관하여 시뮬레이션한 분기비 (경로차 PD)

- (a) H=42.8 μm (PD=0.642 μm)
- (b) H=43.6 μm (PD=0.668 μm)
- (c) H=44.4 μm (PD=0.694 μm)
- (d) H=46.0 μm (PD=0.704 μm)

1-2. Y분기 커플러

설계된 Y분기 커플러의 분기지점 연결시에 S bend를 주로 사용하였다. 굴절율차가 0.3%인 조건에서 구부림에 의한 손실은 거의 없도록 곡률 반경을 30,000 μm으로 하였다. 곡률이 반대방향으로 바뀌는 경우에 offset을 주었으며 offset값은 S-band와 직선도파로의 연결에서는 0.2 μm으로 하였고 (+) 곡률 반경을 갖는 S-band와 (-)곡률 반경을 갖는 S-band의 연결에서는 0.4 μm으로 하여 접속 손실을 최소화 시켰다.

1-3. 2×32 커플러

최적으로 설계된 마하젠더 부분과 30개의 Y커플러 부분을 결합하여 프로그램을 수행하였다. 이 때 z 의 길이를 58,000 μm, x의 길이를 8,000 μm 하였으며, 임의로 주어진 간격 Δx를 0.25 μm, Δz

를 1  $\mu\text{m}$ 으로 하였고 프로그램 수행은 24시간 있었으며 이 때 사용한 파장은 1550nm이었다.

그림 5는 전사 모사 결과로 거리에 따른 입사광원의 분기비를 나타낸 것이다. 매우 양호한 분배 특성을 나타내었다. 여기서 32 port의 출력을 전부 수행하는 것은 과도한 시간이 소모되어 양단에 대칭인 2개의 포트(port)를 사용하였다.

중단부는 광섬유 블록과 도파로를 접속하기 위하여, 32 포트를 각각 4 그룹으로 만들고 그룹내에서 도파로의 간격을 250  $\mu\text{m}$ 하였고 그룹간에는 간격은 320  $\mu\text{m}$ 으로 설정했다.

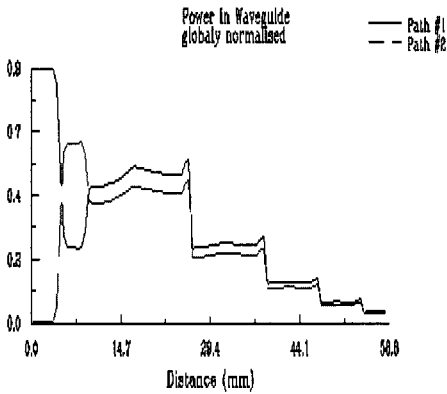


그림 5. 도파로의 거리에 따른 2 × 32커플러의 시뮬레이션한 분기비

2. 제작 및 평가

도파로 제작에 있어 박막 형성공정은 실리콘 기판상에 화염기수분해법(Flame Hydrolysis Deposition, FHD)을 이용하여 수트 상태의 산화실리콘 입자를 형성시켰고 막의 균일성을 증진시키기 위하여 스테이지를 일정 온도로 가열하였다. 증착되는 수트 입자의 균일성을 조정하기 위하여 토치의 거리 및 각도, 스테이지 이동 속도 등을 조정하였다. 도파로의 굴절률은 수트 입자의 조성비로 조정하였으며 수트 입자의 조정은 원료 공급장치의 수송 기체 유량 등으로 조정하였다.

고밀화 공정은 FHD 공정에서 실리콘 기판상에 증착된 수트 입자를 투명한 유리막으로 만드는 공정으로, 1200°C 이상의 고온에서 일정시간 유지시켜 수트 입자를 완전히 용융하여 유리화시킨다. 고밀화 온도는 인이나 붕소등의 이온을 첨가하여 조정하였다. 하부클래딩의 역할을 할 수 있도록 FHD로 산화실리콘을 20 $\mu\text{m}$ 의 두께로 증착하였다. 코어

층은 Ge이 첨가하여 8 $\mu\text{m}$  두께로 증착하여 형성하였다.

광도파로 식각공정은 ICP작업으로 이루어졌으며 코어막의 식각 깊이는 8 $\mu\text{m}$ 이었고 식각의 이방성은 85° 이상으로 하였다. FHD를 사용하여 산화실리콘으로 상부클래딩을 20 $\mu\text{m}$ 의 두께로 증착하였다.

광도파로를 측정하기 위하여 광특성 분석을 직접 근접거리에서 구성된 적외선 비디오 카메라와 자동 측정장치를 사용하였다. 광원과 광도파로를 정렬한 후 광섬유 블록으로 입력단을 먼저 정렬시킨 다음, 출력단에 다시 광섬유 블록을 사용하여 Surugaseiki사의 자동 정렬장치로 미세 조정시켰다.

광섬유 블록과 도파로를 연결시키는 과정에서 이러한 정렬 과정은 손실을 발생시키는 요인으로 크게 작용할 수 있다. 특히 코어의 크기가 작은 광도파로의 경우에는 입사광의 많은 부분이 손실될 수 있으므로 정확한 측정이 이루어지기 어렵다.

측정시 각 부품 사이에는 굴절률 정합체를 사용하여 접속 손실을 최소화하였고 정렬을 완성한 후 광도파로의 진행손실을 그림 6과 같이 cutback 방법<sup>[15][16]</sup>을 사용하여 측정하였다. 이 방법은 초기에 광도파로가 연결되어 있는 상태에서 측정된 값( $P_{out}$ )에 광도파로의 전단과 후단에 있는 광섬유를 절단하고 광섬유를 융착접속으로 접속한 후, 광섬유만 연결하여 측정된 값( $P_{in}$ )을 감하여 도파로에서의 손실을 추정하는 방법이다. 입력광원은 가변형 LD와 광대역 광원인 LED를 사용하였으며 출력단은 스펙트럼 분석기를 이용하여 파장에 따른 삽입손실을 측정하였다.

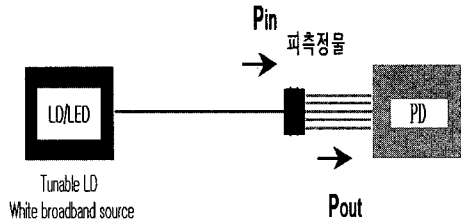


그림 6. 광커플러의 광학적 특성 측정법

커플러의 광학적 성능 측정으로 1250nm에서 1600nm의 파장 영역에서 삽입손실(insertion loss)과 균일성(uniformity)을 측정하였다. 광커플러의 특성

은 표2와 같이 정의하며 항목<sup>[17][18]</sup>에 맞추어 특성을 측정하였다.

표 2. 광커플러의 파라미터

과잉손실 (excess loss)	광커플러에서 발생하는 순수 손실 EL = -10 log (IL/TL) (IL):삽입 손실,(TL):이론적 손실
삽입손실 (insertion loss)	단자별 손실 IL = -10 log (Pout/Pin) (Pout) : 출력 파워 (Pin) : 입력 파워
균일성 (uniformity)	삽입손실값 간에 편차의 최대 범위

3. 제조결과

사진 1은 게르마늄이 첨가된 산화실리콘 위에 증착된 알루미늄 마스크 패턴을 보인 것이다. 코어층의 식각특성은 마스크 역할을 하는 알루미늄 상태에 의존하였으며 산화실리콘과 알루미늄 선택도는 약 30:1 이고 8μm의 코어를 식각하는데 약 33분이 소요되어 식각률은 2600 Å/min이었다.

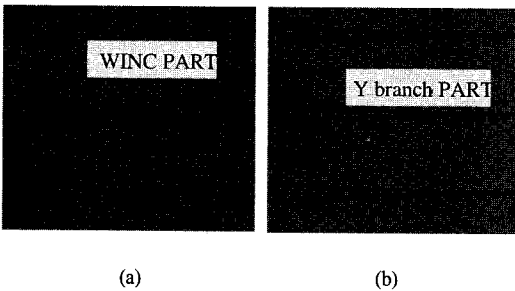


사진 1. Al의 패턴 (a) 마하젠더 (b) Y 분기

사진 2는 ICP로 2×32 광커플러 코어층을 식각한 후에 전자현미경으로 본 모습이다. 사진 2(a)는 Y 분기 부분 단면의 모습이며 사진 2(b)는 마하젠더 부분이다. 식각 균일도는 5% 내외로 비교적 균일한 식각률을 얻었다.

그림 7은 마하젠더의 높이 H를 42.8μm, 43.6μm, 44.4μm, 46μm(경로차:0.642μm, 0.668μm, 0.694μm, 0.704μm)로 실제 제조한 각각의 샘플을 측정한 결과이다. 여기에서 가장 우수한 특성을 보인 시제품은 그림 7(b)에서와 같이 마하젠더의 arm의 높이 H가 43.6μm(경로차는 0.668μm)인 샘플이 전 파장에 걸쳐 분기비가 50%에 가장 근접한 가장 좋은 특성을 나타냄으로서 그림 4의 전자

모사와 제조된 샘플의 결과가 거의 유사하여 설계와 제작이 일치함을 알 수 있었다.

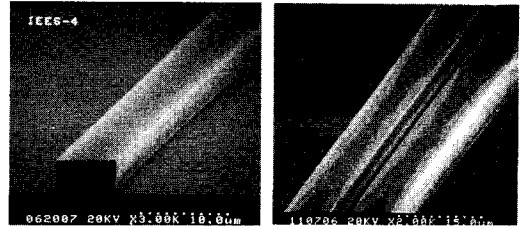
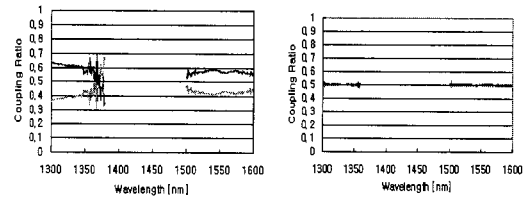
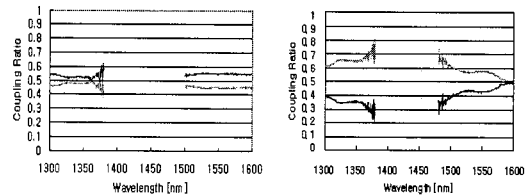


사진 2. 단면 형상 (a) Y 분기 (b) 마하젠더



(a) (b)



(c) (d)

그림 7. 마하젠더 커플러 시제품의 분기비

- (a) H=42.8μm(PD=0.642μm)
- (b) H=43.6μm(PD=0.668μm)
- (c) H=44.4μm(PD=0.694μm)
- (d) H=46.0μm(PD=0.704μm)

마하젠더 2×32 커플러의 광학적 특성은 2×32 광커플러의 칩 상태에서 광학적 특성을 측정하였으며, 입, 출력단에 광섬유 블록 2개를 사용하여 입력부 포트와 중단 최외각에 있는 출력부 포트 1번을 정렬하여 최대 광파워를 측정하고, 출력부의 광섬유 블록을 다음 출력 포트로 이동하여 다시 정렬한 후 측정하였다.

그림 8은 arm의 높이 H가 43.6μm에서 경로차는 0.668μm 일 때, 전 파장에 걸쳐 낮은 삽입 손실과 분기비를 유추할 수 있는 삽입손실의 편차의 폭이 작아 우수한 특성을 나타냄으로서 2×32 커플

러 역시 전사 모사의 결과가 거의 유사하여 설계와 제작이 일치함을 알 수 있었다. 따라서 arm의 높이 H가  $43.6\mu\text{m}$ 에서 경로차는  $0.668\mu\text{m}$  일 때, 가장 우수한 특성의 커플러를 제작 할 수 있음을 알 수 있었다.

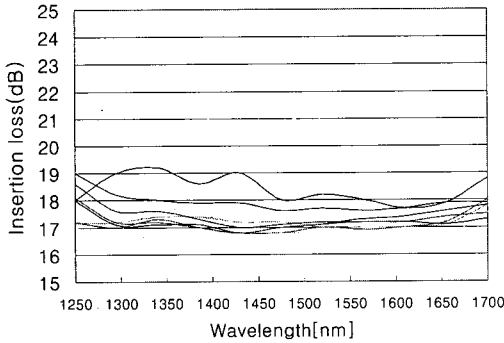


그림 8. 시제품  $2 \times 32$  커플러의 광학적 특성  
[H= $43.6\mu\text{m}$  (PD= $0.668\mu\text{m}$ )]

최적으로 설계로 제작한  $2 \times 32$  커플러의 광학적 특성 측정 결과는 전 파장(1200nm에서 1600nm 영역에서 측정)에 걸쳐 파인손실은 4.2dB이하, 삽입손실은 최대 손실이 19.2dB이하, 균일성은 2dB이하의 광학적 특성을 나타내었다.

마하젠더형  $2 \times 32$  커플러의 특성은  $1 \times 32$ 와 다르게 전단에 마하젠더 간섭기가 있으므로 커플러 제조 공정 변수에 영향을 많이 받는다. 따라서 파장 무의존성  $2 \times 32$  커플러의 제작시에는 코아와 클래드의 굴절률을 정확하게 제어해야 한다.

### III. 결론

$2 \times 32$  파장 무관형 커플러는 마하젠더 커플러와 30개의 Y부기 커플러를 이용하여 제작하였고  $2 \times 32$  커플러의 설계와 제작은 여러 설계 변수 중에 가장 크게 영향을 주는 경로차를 조정하여 최적의 조건을 도출하였다. 전사 모사에 의하여 두 도파로 간의 높이가  $43.6\mu\text{m}$ (경로차  $0.668\mu\text{m}$ )로 제작한  $2 \times 32$  커플러가 가장 우수한 특성을 나타냈다. 제작된  $2 \times 32$  커플러의 광학적 특성은 1200nm에서 1600nm의 파장에서 파인손실은 4.2dB이하이고 삽입손실은 최대 손실 19.2dB이하이며 균일성은 2dB 이하의 매우 양호한 광학적 특성을 나타내었다.

### 참고 문헌

- [1] D. B. Keck, A. J. Morrow, D. A. Nolan and D. A. Thomson, "Passive components in the subscriber loop", *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 11, pp. 1623-1633, 1989
- [2] K. W. Murphy, "Couplers let fiber phone home", *TE&M*, April, no. 1, pp. 60-65, 1990
- [3] W. G. Morrel, "Passive components for the subscriber loop", *SPIE* 1363, pp. 40-47, 1990
- [4] J. A. Bebbington, G. Barbarossa, J. R. Bonar, and J. S. Althison, "Rare earth doped silica waveguides on Si fabricated by flame hydrolysis deposition and aerosol doping." *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 4, pp. 337-339, 1993
- [5] V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic components made by the biconical taper process," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 9, 1990, pp. 97-123
- [6] N. Sharch. E. M. starr, "Integrated optic  $1 \times 4$  splitter" *Electronics letter* vol. 25, No. 15, pp. 981-982, 1989
- [7] O. Wada(ed.), "Optoelectronic Integration : Physics, Technology and Application", *Kluwer Academic Publishers*(1994)
- [8] 성희경, 심재기, 신장욱 "광통신 수동부품 기술 개발 1994", *전자통신연구소 보고서* p. 273
- [9] S. L. Chuang, "Physics of Optoelectronic Devices", *John Wiley & Sons. Inc.*(1995)
- [10] A. Takagi "Silica-based waveguide type wavelength insensitive couplers with series-tapered coupling structure", *Journal of lightwave technology*, vol. 10, no. 12, pp. 1814-1825
- [11] Kaname Jinguji, "Planar Lightwave Circuit", *NTT Review*, Vol. 7, No. 1, pp. 80-86, 1995
- [12] K. Jingji, "Mach Zehnder interferometer type optical waveguide coupler with wavelength-flattened coupling ratio", *Electron Lett.*, vol. 26, no. 17, pp. 1326-1327, 1990
- [13] T. A. Birks and C. D. Hussey, "Wavelength-Flattened Couplers : Performance Optimisation by Twist-Tuning", *Electronics Letters*,

Vol. 25, No. 6, pp. 407-408, 1989

- [14] Bellcore GR-1209-CORE (General Requirements for Fiber Optic Branching Components)
- [15] Generic Requirements for Optical Fiber Connectors And Connectorised Jumper Cables, *Bellcore Technical Reference TR-NWT-000329*, Issue 2, March, 91
- [16] Test Methods Of Connectors For Optical fiber Cords, JIS C 5961, 1990
- [17] IEC 875-1 (Fiber optic branching devices Part 1 : Generic specification, 1992)
- [18] Bellcore, "Generic Requirements for Fiber Optic Branching mponents", *GR-1209-CORE*, ISSUE 1, NOVEMBER, 1994
- [19] J. H. Marsh, R. M. DeLaRue(ed.), "Waveguide Optoelectronics", *Kluwer Academic Publisher*, 1992
- [20] IEC 875-2 (Fiber optic branching devices Part 2 : Sectional specification Non-wavelength selective branching devices, 1992)
- [21] EIA/TIA 445-180 (Measurement of the Optical Transfer Coefficients of a Passive Branching Device (Coupler), 1991)

류 근 호(Keun-ho Ryu)

정회원

현재 : 충북대학교 컴퓨터과학과 교수  
한국통신학회 논문지 제 4권 제 4B호 참조

문 동 찬(Dong-chan Moon)

정회원



1957년 2월 : 연세대 이공대  
물리학과 졸업.  
1965년 2월 : 연세대 대학원  
물리학과 석사  
1981년 2월 : 연세대 대학원  
물리학과 박사

1982년 : 미국 라이트-페더슨 공군연구소 초빙과학자  
현 재 : 광운대학교 공대 전자재료공학과 교수  
<주관심 분야> 재료공학, 물리학, 광통신 공학

신 기 수(Key-soo Shin)

정회원



1973년 2월 : 한국항공 대학교  
전자공학과 졸업  
1978년 4월 : 전자통신연구소  
1984년 1월 : 한국통신 연구개발단  
현재 : 한국통신 연구개발원  
가입자망연구소 연구팀장

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

최 영 복(Young-bok Choi)

정회원



1989년 2월 : 광운대학교 전자  
재료공학과 졸업  
1991년 2월 : 광운대학교 전자  
재료공학과 석사  
1999년 2월 : 광운대학교 전자  
재료공학과 박사

1993년 3월~현재 : 한국통신 가입자망연구소

<주관심 분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학