

# 성형결합기로 구성된 광도파로 격자 라우터의 설계방법에 관한 연구

正會員 문성욱\*, 정영철\*

## A Study on Design Method of Waveguide Grating Router Composed of Star Couplers

Sungwook Moon\*, Youngchul Chung\* *Regular Members*

※이 연구는 1995년도 한국과학재단 연구비지원(KOSEF 951-0916-013-2)에 의한 결과임.

### 요 약

본 논문에서는 성형결합기로 구성된 광도파로 격자 라우터를 설계하기 위한 효율적인 알고리즘을 제안하였다. 성형결합기 파라미터들 사이의 관계를 분석하여 얻어진 알고리즘을 이용하면 성형결합기를 쉽게 최적화 상태로 조정할 수 있음을 보였다. 이러한 방법은 성형결합기 설계 초기단계에서 전체적인 광도파로 격자 라우터의 주파수 특성 예측을 가능하게 한다. 2.75nm(343GHz) 채널간격을 갖는 5×5 광도파로 격자 라우터를 제안된 알고리즘을 통하여 설계하였다. BPM(Beam Propagation Method) 전산모사 결과 설계된 채널간격과 일치하였으며 2.5dB 이하의 손실과 -21dB이하의 누화를 유지하는 우수한 구조임을 확인하였다.

### ABSTRACT

In this paper, the efficient algorithm for design of waveguide grating router(WGR) composed of star couplers is proposed. It is well demonstrated that a star coupler design can be easily adjusted to the optimum state using the proposed design method, which analyzes relations between various parameters. This method enables designers to estimate the spectral properties of waveguide grating router at the initial design level of the star coupler. A 5×5 WGR with 2.75nm(343GHz) channel spacing is designed using the proposed scheme. The BPM(Beam Propagation Method) simulation results show that the channel spacing of the WGR agrees very well with the design, the excess loss is smaller than 2.5dB, and the crosstalk is less than -21dB.

\*광운대학교 전자통신공학과 신기술연구소  
Department of Electronic Communications Engineering, Institute of New Technology Kwangwoon University  
論文番號:96249-0813  
接受日字:1996年 8月 13日

## I. 서 론

WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술은 국간의 대용량전송, 유연한 광네트워크의 구성, 또는 광가입자망등의 차세대 광통신시스템에서 매우 중요한 위치를 차지할 것으로 기대되고 있다. 이러한 WDM 전송기술의 장점은 시스템 대역폭의 대폭적인 증가와 하나의 단일모드 광섬유에 양방향 통신이 가능하며, 기존 시스템의 향상을 도모하고자 할때 광섬유 케이블을 부가적으로 포설할 필요가 없다는 점이다. WDM시 하나의 파장채널은 수 gigabit의 신호를 무리없이 처리할 수 있기 때문에 terabit 네트워크로 발전할 잠재적인 가능성을 갖고 있다.

WDM 광통신망을 실현하기 위해서는 파장가변 레이저 또는 광필터와 같은 부품들이 요구되며, 현재 국내외적으로 WDM 방식의 부품 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 광필터의 경우, 마이크로 광학을 이용한 격자형태 또는 용융 광섬유결합기의 파장의 존성을 이용한 것등이 있으나 장차 대량생산의 관점에서 기존의 반도체기술을 원용하여 공학적인 접근이 가능한 광집적회로 형태가 매우 유망하다. 최근에는 WDM시스템 구축에 있어서 중요한 광집적회로 소자로서 광도파로 격자 라우터(WGR: Waveguide Grating Router)의 제작 및 응용에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 특히 손실이 매우 작은 특성으로 인하여 실리콘 도파로를 근간으로 하는 WGR을 연구개발하려는 노력이 구미 각국에서 진행되고 있다[1], [2]. 한편, 실리콘 재료에서는 집적의 한계가 있으므로 보다 간결한 구조의 제작 및 광원과의 집적이 용이한 InP를 근간으로하는 광도파로소자 개발 또한 매우 중요하다.

본 연구에서는 WGR을 실현하기 위한 성형결합기와 광도파로열의 설계와 설계상 고려해야되는 여러가지 파라미터의 최적화를 효율적으로 구현하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법을 통하여 InP 광도파로를 근간으로 하는 도파로 격자 라우터(WGR)의 설계를 제시하였고, 설계된 WGR을 전산모사하여 그 특성들을 평가하였다.

## II. 도파로열의 설계

그림 1은 전체적인 5×5 광도파로 격자 라우터의

개략도를 나타내고 있다. 설계된 두개의 성형결합기들을 WDM소자로서 이용하기 위해서는 성형결합기들을 연결하는 도파로열을 설계하여야 한다. 역할면에서 살펴보면 성형결합기는 단순히 입사되어진 광파를 동일한 양으로 분기시켜주는 역할을 수행하고 분기되어진 광파는 옆의 도파로와 동일한 길이 차이들을 갖는 도파로열을 지나서 두번째 성형결합기에 도달한다. 그리고 도달되어진 두번째 성형결합기의 slab도파로 영역에서의 광파들의 위상은 일정한 차이를 갖게된다.

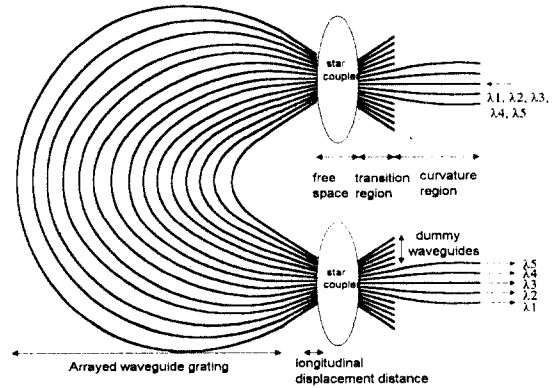


그림 1. 5×5 광도파로 격자 라우터의 개략도.

Fig. 1 Schematic layout of a 5×5 waveguide grating router.

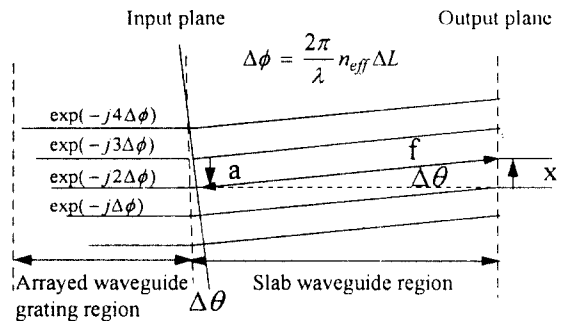


그림 2. 광도파로 격자 라우터의 출력단의 기본동작원리를 나타내는 개략도.

Fig. 2 Schematic diagram showing basic principle of arrayed waveguide grating

그림 2는 두번째 성형결합기의 입력단에 배열된 광파의 위상배열관계를 나타내고 있다. 광도파로열을 통과하여 정렬된 위상 차이의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \Delta L \quad (1)$$

여기서  $\Delta L$ 은 도파로열 격자의 도파로들간의 길이 차이,  $n_{eff}$ 는 도파로열 격자의 유효굴절율을 나타내고 있다. 여기서 다음과 같이  $-\pi$ 와  $\pi$  사이의 값을 가지는 정규화된 위상  $\Delta\phi'(\lambda)$ 을 정의한다.

$$\Delta\phi'(\lambda) = \Delta\phi(\lambda) - 2\pi m \quad (2)$$

여기서  $m$ 은  $n_{eff} \Delta L/\lambda$ 에 가장 가까운 양의 정수로서 도파로열 격자(Array Waveguide Grating)의 차수를 의미한다.

한편, 성형결합기 입력단에서 인접한 광파들 사이의 위상 차이  $\Delta\phi'(\lambda)$ 와 그림 2에 보인 tilt angle  $\Delta\theta$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta\phi' = \frac{2\pi}{\lambda} n_c a \sin \Delta\theta \quad (3)$$

여기서  $n_c$ 는 자유영역의 굴절율,  $a$ 는 입력단에서 도파로열들 사이의 간격 그리고  $\Delta\theta$ 는 자유영역을 지나는 평면파의 기울어진 각도를 의미한다. 식 (2)과 식 (3)의 관계를 이용하여 입력단에 초점거리  $f$ 의 렌즈를 두었다고 가정할 때 초점이 나타나는 위치  $x$ 를 광장의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$x = f \sin \Delta\theta = f \frac{\lambda \Delta\phi'}{2\pi n_c a} = f \frac{\lambda}{n_c a} \left( \frac{n_{eff} \Delta L}{\lambda} - m \right) \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 파장의 변화에 따른 출력단의 위치의 변화는 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dx}{d\lambda} = - \frac{fm}{n_c a} \quad (5)$$

광도파로 격자 라우터에서는 입력 및 출력단의 도파로열 들이 서로의 중심을 향하도록 하므로써 렌즈를 구성하게 된다. 식 (4)를 살펴보면, 중심 파장을 기준으로 단파장일 경우에는 정규화된 위상 차이  $\Delta\phi'$ 가

양의 값을 갖게 되어서 출력단면의 중심을 기준으로 왼쪽으로 상이 발생되어지고 장파장일 경우는 정규화된 위상 차이  $\Delta\phi'$ 가 음의 값을 갖게 되어 아랫쪽에 상이 발생됨을 예상할 수 있다.

식 (5)을 이용하면 채널간격( $\Delta\lambda_{ch}$ )은

$$\Delta\lambda_{ch} = \frac{n_c a^2}{mf} \quad (6)$$

임을 알 수 있다. 한편, 광필터의 FSR(Free Spectral Range)는 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta f_{FSR} = \frac{C}{n_{eff} \Delta L} \quad (7)$$

식 (7)을 주파수 관계에서 파장관계로 전환하면 다음과 같다.

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{n_{eff} \Delta L} = \frac{\lambda}{m} \quad (8)$$

제시되어진 식 (6)과 식 (8)를 통하여 알 수 있듯이 임의의 격자차수의 선정, 초점 간격과 도파로 열의 간격등이 유기적인 관계를 형성하므로 설계시 이들의 관계를 적절하게 결정하여야 한다.

### III. 성형결합기의 설계

그림 3은 5×5 성형결합기의 구조를 나타내고 있다. 성형결합기는 광도파로 격자 라우터(WGR)의 입출력단에 사용하게 되며 그의 적정 설계는 전체 광도파로 격자 라우터의 성능을 좌우하기 때문에 매우 중요하다. 일반적으로 입력단과 출력단의 수가 같은 N×N 구조의 도파로열로 균일하게 구성되어 있으며 자유영역의 중심을 기준으로 대칭적으로 배열되어 있다. 동작적인 면에서 살펴볼때 시작점의 곡선도파로가 옆의 도파로와 충분히 멀리 떨어져 있어서 상호결합의 영향을 받지않고 곡선도파로를 지나간다. 그리고 서서히 옆의 도파로와 간격을 좁혀가며 자유영역 전까지 직선도파로가 위치해 있다. 본 논문에서는 자유영역과 접해있을때 중심간 도파로간격을 4μm가 되게 설계하였다. 입력단의 도파로에 여기되어진 광파가 slab도파로 형태인 자유공간에 도달되어진 순간의

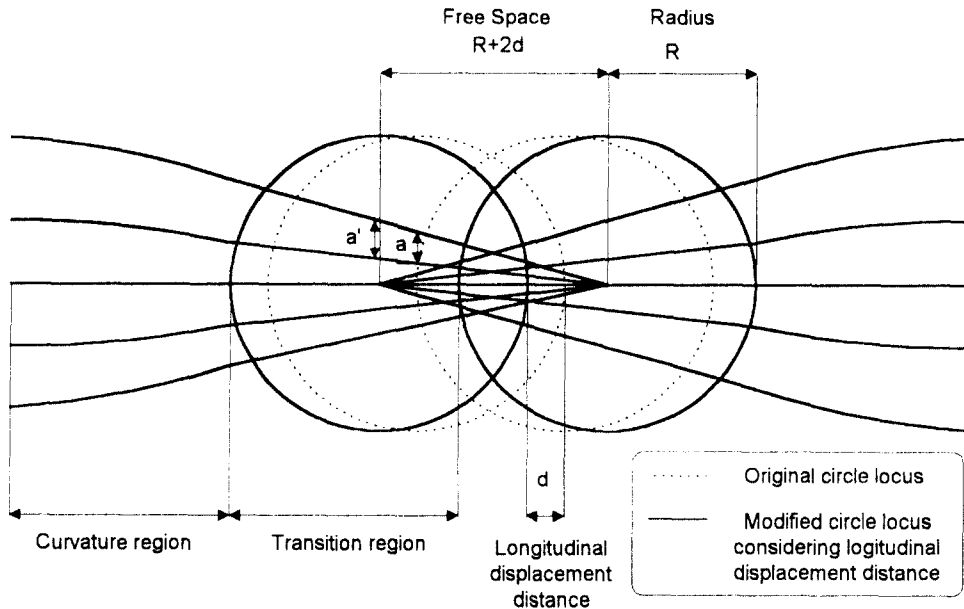


그림 3. 5×5 성형결합기의 구조

Fig. 3 Geometrical structure of a 5×5 star coupler

광파는 방사되어서 출력단의 도파로에 균일한 광전력을 전달해 준다. 자유영역에 해당된 영역은 두개의 원이 교집합을 형성하듯이 이루어져 있으며 이 두원의 중심은 상대원의 호위에 위치해 있다[3].

자유영역근처에서는 입력도파로들이 가까이 존재하므로 근접해있는 도파로쪽으로 광전력의 일부를 넘겨주는 상호 결합이 발생하게 된다. 이러한 상호 결합의 발생은 광전력의 분배에는 크게 영향을 미치지 않으나 광도파로 격자 라우터의 설계시 위상중심을 실제의 도파로와 slab도파로 사이의 경계로부터 물려나게 하는 효과를 발생시킨다. 따라서 어긋나있는 초점 위치를 맞추어 주기 위해서 초점의 이동을 통한 보상(longitudinal displacement distance)이 필요하다[4]. 그리고 방사패턴의 형태를 일정하게 유지하기 위한 고려로서 가장자리 도파로 옆에 사용하지 않는 도파로를 일부러 두어서 최외각 도파로에 여기되어진 광파의 형태가 중심에 위치한 광파와 같은 모양을 갖도록 유도하였다. 또 광도파로의 갯수가 증가함에 따라 나타나는 주파수특성이 누화에 의한 영향을 직계 받는 것으로 보고되었다[5]. 따라서 본 논문에서도 방사

패턴의 균형성과 누화에 대한 고려로서 17개의 광도파로 옆을 사용하였다.

성형결합기를 설계하기 위한 파라미터 최적화 알고리즘은 반경과 초점 보상거리의 관계를 고려하여 크게 두가지로 생각할 수 있다.

첫번째는 일반적인 방법으로서 반경과 초점 보상거리를 독립적으로 생각함으로써 입출력단에 놓여 있는 도파로의 간격과의 관계를 분리시키는 것이다. 이러한 알고리즘을 통한 설계의 구현은 먼저 성형결합기에서 도파로 옆의 간격을 고정시켜놓고 입력 중심단을 여기시켜 적절하게 광파가 퍼져갈 수 있는 반경을 설정한다. 그리고 상호결합을 고려한 초점 거리보상을 결정할때 도파로 옆들이 바라보는 초점의 중심을 반경과 무관하게 뒤로 물러서게 놓는다. 이런 결과는 입출력단의 간격을 고정시켜놓고 단지 도파로의 각만을 변화시켜서 비교적 도파로각이 커서 잘 따라가지 못한 광파를 출력도파로에 잘 유도되도록 조작하는 방법이다. 하지만 이 방법은 성형결합기만을 고려해 볼 때는 쉽게 정상적으로 동작하는 구조를 설계할 수 있으나 각각의 파라미터가 독립적인 관계가 형성

되어 있어서 전체적인 광도파로 격자 라우터 설계를 고려하여 성형결합기를 최적화하기 위해서는 문제가 있다. 그 이유는 설계단계에 고려해야할 여러가지 파라미터를 전산모사 이전에 간략하게 수식적인 관계를 통해 확인할 필요가 있는데 독립적인 파라미터관계가 형성되어 있어서 수정된 파라미터를 되먹임할 때 각각의 파라미터를 변화시켜주는 과정을 반복해야 최적화시킬수 있으므로 설계자의 입장에서는 시간소비가 비교적 많이 필요한 방법이기 때문이다.

이와달리 제안된 방법은 원의 반경과 초점거리의 보상 그리고 그에 따른 도파로열의 간격이 상호의존적으로 존재하는 구조이다. 이 방법을 통한 설계의 과정은 적절한 반경을 대략적으로 설정한 후 도파로열이 지속적으로 자유공간을 이루고 있는 두원의 중심을 향해 초점이 맞추도록 설정시켜 놓는다. 그리고 원의 중심을 이동시켜가면서 상호결합에 따른 초점거리 보상을 자연스럽게 고려하는 것이다. 원의 중심이 뒤로 물러남에 따라 교집합을 형성하듯 구성되어 있는 자유영역에도 변화가 발생된다. 따라서 적절한 원의 반경과 상호결합에 따른 초점의 이동이라는 보정을 통해 전체 파라미터들을 유기적으로 변화시키고 두 원의 중심이 뒤로 물러남에 의해서 고정되었던 도파로열의 간격과 도파로열이 원의 중심을 바라보는 각 또한 변화하게 된다. WGR의 가능한 파장 채널의 갯수는 다음과 같이 주어진다.

$$N = \frac{\Delta\lambda_{FSR}}{\Delta\lambda_{ch}} = \frac{\lambda f}{n_c a'^2} \quad (9)$$

여기서 보정된 성형결합기의 초점에서 도파로 사이의 간격  $a'$ 과 원래의 도파로 사이의 간격  $a$ 의 관계는 그림 3을 참조하면 다음과 같다.

$$a' = \frac{R+2d}{2R+2d} 2a \quad (10)$$

그리고 초점의 보정에 따라 초점거리를 다음과 같이 양원의 중심(초점) 사이의 거리로 확장하여 고려해보면  $f=R+2d$ 로 설정할 수 있다. 이러한 초점 위치 보정을 통해 고려된 파라미터를 사용가능한 채널갯수와의 관계를 식 (9)와 식(10)을 통해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{\lambda(R+d)^2}{n_c a^2(R+2d)} \quad (11)$$

여기서,  $R$ 은 자유공간을 형성하는 원의 반경,  $d$ 는 상호결합을 보상하기 위한 초점 위치의 이동거리이다.

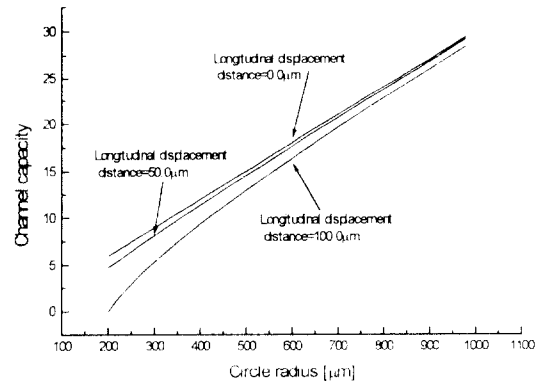


그림 4. 제안된 성형결합기 설계 알고리즘을 통한 원의 반경과 초점 보상거리의 변화에 따른 광도파로 격자 라우터에 사용가능한 채널갯수(중심간 도파로간격이 4μm일 때).

Fig. 4 The expected channel capacity of waveguide grating router as a function of circle radius and longitudinal displacement distance using the proposed scheme (when waveguide spacing is 4μm).

그림 4는 식 (11)를 이용하여 전산모사에 사용될 성형결합기의 파라미터들을 고려하여 초점 보상거리와 원의 반경의 변화에 따른 광도파로 격자 라우터에 사용할 수 있는 채널의 수를 나타내었다. 그림 4를 이용하면 원하는 채널 갯수를 얻기 위한 반경 및 초점거리 보상을 설계의 초기 단계에서 결정할 수 있다. 이와 같은 초기 설계값을 가지고, 초점거리 보상  $d$ 를 변화 시키면서 BPM 전산모사하여 WGR에 사용하기에 최적의 성형결합기를 최종 설계한다. 제안된 최적화 과정을 통하여 5×5 광도파로 격자 라우터를 구성하기 위한 성형결합기를 설계하였고 2.0dB이내의 잉여 손실과 0.5dB이내의 균형성이 우수한 구조를 설계하였다.

#### IV. 전산모사

본 논문에서는 그림 5에 보인 InP/InGaAsP/InP 구조에서 1.4 $\mu\text{m}$ 를 식각시켜 도파로를 형성시켰으며 유효굴절률차는 0.9%이고 도파로의 폭이 2 $\mu\text{m}$ 를 갖는 광파의 구속력이 큰 ridge형태의 광도파로를 고려하였다. 이러한 구조의 선택은 인접 도파로와 독립적관계를 유지하여 상호결합으로 인한 채널간 누화를 감소시키기 위함이다. 그리고 전산모사에 사용되어진 성형결합기의 형태는 200 $\mu\text{m}$ 의 반경과 30 $\mu\text{m}$ 의 초점보상거리를 갖는 잘 집적된 구조이다. 설계된 성형결합기 구조를 그림 4에 적용시켜보면 5~6개 정도의 채널이 형성되어짐을 알 수 있다. 즉 주어진 파라미터 하에서는 5 $\times$ 5 WGR이 가능함을 알 수 있다. 그리고 격자차수( $m$ )를 100으로 정하였을 때, 식 (6)과 식 (8)를 이용하면 채널간격은 2.78nm(347GHz)이고 FSR

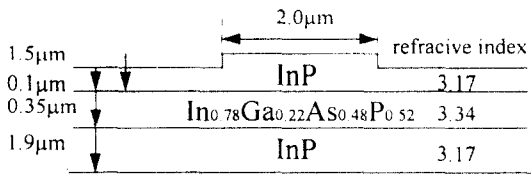


그림 5. 광도파로 격자 라우터의 설계시 고려된 단위도파로의 횡단면 굴절률 분포.

Fig. 5 Refractive index profile of individual waveguide considered in the design of waveguide grating router.

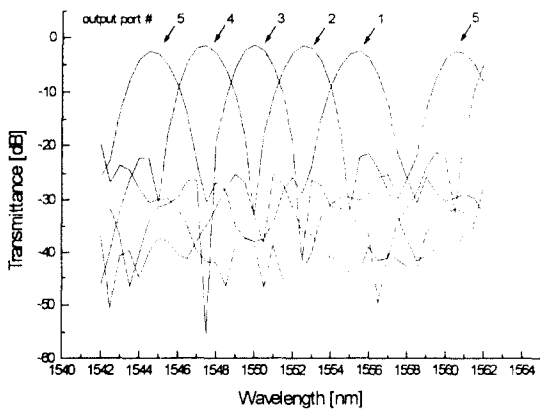


그림 6. BPM 전산모사를 통한 5 $\times$ 5 광도파로 격자 라우터의 주파수 응답(3번째 입력단이 여기되었을때).

Fig. 6 Spectral response of a 5 $\times$ 5 waveguide grating router using BPM simulation(when Input port 3 is excited).

은 15.5nm임을 예측할 수 있다. 그리고 이러한 예상된 결과의 타당성을 입증하기 위해서 BPM(Beam Propagation Method)을 이용하여 전산모사를 하였다[6].

그림 6은 전산모사를 통한 파장의 변화에 따른 주파수응답을 나타내고 있다. 보여진 채널간격은 2.75nm이고 FSR은 15.5nm로 주파수 특성이 제안된 알고리즘을 통해 예상한 결과와 동일함을 알 수 있다[7]. 그리고 각 채널파장들에서 삽입손실은 2.5dB이내, 전체적인 균일성은 1dB이내이며 누화(crosstalk)는 모든 채널에서 -21dB이하로 유지하는 구조임을 알 수 있다. 그리고 각 채널 중심 파장을 기준으로 1nm-window에서 -15dB이하의 누화를 유지하고 있다.

표 1. 5 $\times$ 5 광도파로 격자 라우터의 라우팅 상대표.

Table 1. Routing table of the designed 5 $\times$ 5 waveguide grating router. ( $\lambda_1 = 1555.4\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 1552.7\text{nm}$ ,  $\lambda_3 = 1550\text{nm}$ ,  $\lambda_4 = 1547.3\text{nm}$ ,  $\lambda_5 = 1544.6\text{nm}$ )

출력단 번호 \ 입력단 번호	1	2	3	4	5
1	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
2	$\lambda_5$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
3	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$
4	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_1$
5	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_1$	$\lambda_2$

표 1은 전산모사 결과 관측된 입력단의 변화에 따른 출력단에 나타나는 파장의 변화를 나타내고 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한 파장의 변화에 따른 위상차의 부호와 여기되어진 입력단의 위치에 따른 평면파의 constant phase plane 기울기에 의한 예상에 잘 부합되고 있다. 궁극적으로는 입출력단의 위치에 따라 대응되어지는 파장이 고유하게 발생됨으로서 파장의 변화에 따라 신호를 라우팅할 수 있다는 것을 의미한다.

## V. 결 론

본 논문에서는 성형결합기를 이용한 5 $\times$ 5 광도파로 격자 라우터를 설계하는데 있어서 여러가지 파라미터들을 최적화하는 효율적인 알고리즘을 제안하였다. 이러한 알고리즘은 성형결합기를 설계할때 단지 분지적인 특성만을 고려하지 않고 광도파로 격자 라

우터의 단계까지 고려하여 해석함으로써 설계단계에서 오는 반복적인 시행착오를 최대한 줄일 수 있다. 그리고 전산모사 결과는 제안된 알고리즘에 의해 예측된 설계치와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이는 제안된 방법의 의한 성형결합기의 설계가 광도파로 격자 라우터로 동작하기 위한 제반 파라미터들을 최적화하고 있음을 의미한다. 따라서 제안된 알고리즘이 광도파로 격자 라우터(WGR: Waveguide Grating Router)의 설계에 유용하게 적용됨이 입증되었으며 설계된 5×5 광도파로 격자 라우터는 5채널 모두에서 손실이 2.5dB 이내이고 -21dB 이하의 누화를 갖고 있는 우수한 구조임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구를 지원해준 한국과학재단(951-0916-013-2)과 한국전자통신연구소(통신부품연구실)에 고마움을 표합니다.

참 고 문 헌

1. C. Dragone et al., "Integrated Optics N×N Multiplexer on Silicon," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 10, pp. 896-899, 1991.
2. C. Dragone et al., "Efficient Multichannel Integrated Optics Star Coupler on Silicon," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 1, No. 8, pp. 241-243, 1989.
3. Sungwook Moon and Youngchul Chung, "Design of 5×5 Star Coupler for Arrayed Waveguide Grating WDM Component," Photonics Conference '95, pp. 131-132, 1995.
4. C. Dragone et al. "Integrated Optics NxN Multiplexer on Silicon," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 10, pp. 896-899, 1991.
5. C. Dragone, "An N×N Optical Multiplexer Using a Planar Arrangement of Two Star Couplers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 3, No. 9, pp. 812-815, 1991.
6. Youngchul Chung et al., "An Assessment of Finite Difference Beam Propagation method," IEEE J. Quantum Electron., Vol. 26, No. 8, pp. 1335-1339, 1990.

7. Sungwook Moon and Youngchul Chung, "Design of 5×5 Waveguide Grating Router Composed of Star Couplers," 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집(上), Vol. 15, No. 1, pp. 353-356, 1996.



문 성 욱(Sungwook Moon) 정회원  
 1991년~1995년: 광운대학교 전자통신공학과(공학사)  
 1995년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 석사과정 재학중  
 ※관심분야: WDM용 광소자 및 광도파로 설계



정 영 철(Youngchul Chung) 정회원  
 1981년: 서울대학교 전자공학과(공학사)  
 1983년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
 1992년: Electrical and Computer Engineering(박사), University of California, Santa Barbara(UCSB)  
 1981년~1986년: 금성전선기술연구소  
 1987년~1988년: 한국과학기술연구원(KIST)  
 1992년~1993년: Optoelectronics Technology Center (UCSB) 연구원  
 1993년~현재: 광운대학교 전자통신공학과 조교수  
 ※관심분야: 광통신용 소자 및 광통신 시스템