

# 파장 가변 필터의 분석

## Analysis of Tunable Wavelength Filters

장도일(D.I. Chang)      광섬유광자탐 선임연구원  
안준태(J.T. Ahn)      광섬유광자탐 선임연구원  
서호형(H.H. Suh)      광섬유광자탐 선임연구원  
김경현(K.H. Kim)      광섬유광자탐 책임연구원, 팀장

파장 가변 필터는 부품의 소재나 동작 방식에 따라 그 특성이 다르기 때문에 시스템의 용도와 목적에 맞는 필터를 선택하여 사용하기 위해서는 이에 대한 충분한 이해가 필요하다. 이를 위해 본 고에서는 파장 가변 필터를 구현하기 위한 여러 가지 기술들에 대한 동작 원리를 살펴보았다. 현재까지 개발되어 상용화된 파장 가변 필터와 현재 연구중에 있는 새로운 개념의 파장 가변 필터에 대해서도 그 특성을 비교 분석하였다.

## I. 서론

파장분할다중(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 광전송 기술은 파장이 다른 몇 개의 광파장을 각각 별개의 전기신호로 변환한 후 한 가닥의 광섬유를 이용하여 데이터를 각 파장에 실어 양방향으로 전송하는 방식이다. 이 기술은 대용량 광통신을 위한 핵심기술로 알려져 있으며, 이에 따른 많은 연구가 진행되어 왔다. 현재까지의 WDM 방식은 수동형 파장분할 광소자를 이용한 정적(static) WDM 기술이 주를 이루어 왔다. 그러나 차세대 정보통신 시대에는 고화질 영상 정보의 교류와 더불어 가상현실을 포함하는 실감형 정보 서비스에 이루어질 것으로 기대되며 향후 10년 동안 통신 트래픽은 매년 거의 두 배 이상 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 이러한 첨단 서비스를 제공하는 시대에 요구되는 정보의 양은 테라급 이상으로, 이에 따라 이들 트래픽 예상량과 가변량에 대처하기 위해서는 전송 자원의 공유를 최적화하여야 하는데 이를 위한 해결

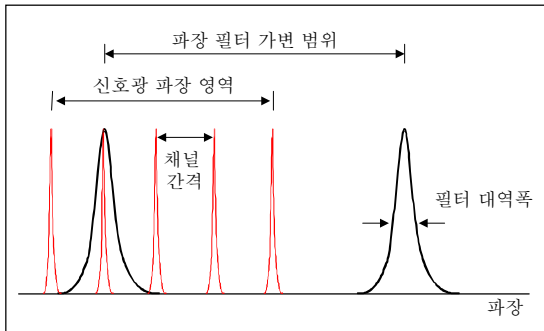
책이 능동형 광소자를 이용한 동적(dynamic) WDM 방식이다. 파장 가변형 광필터는 이 같은 동적 WDM 광통신을 구현하기 위한 핵심소자이며 그 용도는 네트워크의 종류에 따라 아래와 같다.

- msec급의 저속형 광필터:  
→circuit-switched 네트워크
- $\mu$ sec~nsec급의 고속형 광필터:  
→packet 및 cell switched 네트워크

본 논문에서는 시스템의 용도와 목적에 맞는 필터를 선택하기 위해 현재까지 연구된 파장 가변 필터의 동작 원리 및 장·단점을 살펴보고 최근의 기술 동향을 요약 정리하였다.

## II. 파장 가변 필터 기술의 동작 원리 및 장·단점

(그림 1)은 신호광의 채널과 파장 가변 필터와의 관계를 나타낸 것이다. 채널의 개수는 파장 필터의



(그림 1) 채널과 파장 가변 필터와의 관계

가변 범위를 채널 간격으로 나눈 수에 해당하므로 가능한 한 많은 채널을 수용하기 위해 파장 가변 필터의 가변 범위는 넓을수록 좋고 채널 간격은 좁을수록 좋다. 필터의 대역폭은 다른 채널과의 누화 잡음(cross talk)을 방지하기 위해서 좁을수록 좋으나, 원하는 채널의 변조된 신호를 투과하기에는 충분할 정도로 넓어야 한다. 일반적으로 파장 가변 필터의 요구되는 특성은 다음과 같다.

- ① 많은 채널을 수용하기 위한 넓은 가변 파장 영역
- ② 인접한 채널과의 낮은 누화 잡음
- ③ 액세스(access) 시간을 최소화하기 위한 빠른 가변 속도
- ④ 적은 삽입 손실
- ⑤ 낮은 편광 의존성
- ⑥ 소자의 집적도
- ⑦ 동작의 안전성과 재현성
- ⑧ 낮은 가격
- ⑨ 적은 전력 소모

앞으로 기술하는 파장 가변 필터는 이미 상용화된 것도 있으며 아직 연구단계에 머물고 있는 것도 있다. 일반적으로 msec 동작이 가능한 소자의 경우 이미 많은 성능 향상이 이루어져 필드에서 사용되고 있으나, nsec급 동작이 가능한 초고속 파장 가변 필터의 경우, 대부분이 상용화를 위해서는 앞으로 성능 향상을 위한 많은 연구가 필요한 기술들이다. 본문에서는 WDM 광전송 시스템에 적용 가능한 필터들에 대해 다루기로 하겠다.

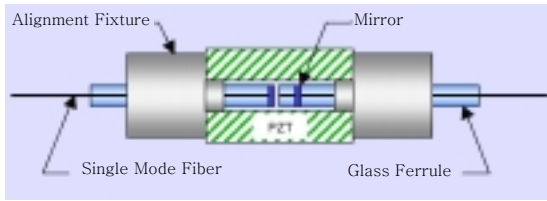
## 1. Fabry-Perot 파장 가변 필터

FP(Fabry-Perot) 필터는 두 개의 거울로 이루어진 선형 공진기의 형태로 이루어져 있다. 입사된 빛이 두 개의 거울에서 연속해서 반사되거나 일부가 투과되면서 이루어지는 빛들과의 간섭 현상으로 인해 일정 간격의 파장에서 공명이 일어나 투과율이 100%에 가까운 최대치가 주기적으로 나타내는 투과특성을 보인다. 연속된 두 개의 공명 최대치간의 거리를 FSR(Free Spectral Range)이라 하며, 이는 필터의 파장 가변 범위를 뜻한다. FSR은  $FSR = c/2nL$ 으로 주어지며 여기서  $c$ 는 광속,  $n$ 은 필터 내의 굴절률, 그리고  $L$ 은 경계면간의 거리이다. 공명 최대치의 급격함 정도를 finesse  $F$ 라 정의하며  $F = 4R/(1-R)^2$ 로 값이 주어진다. 여기에서  $R$  값은 공진기를 구성하는 거울의 입사 파장에 대한 반사율이며 이 값이 1에 가까워 질수록  $F$ 의 값이 커져 좁은 선폭을 갖는 필터를 구현할 수 있다. FP 필터의 파장 가변을 위해서는 두 거울의 간격을 조절하거나 물질의 굴절률을 조절할 수 있으며 이에 따라 여러 가지 방식의 FP 파장 가변 필터를 구현할 수 있다.

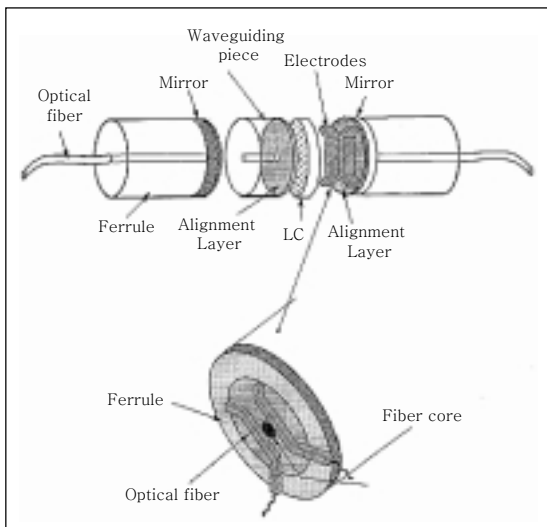
### 가. PZT Fabry-Perot 필터

FP 필터의 공진기를 구성하는 두 거울을 PZT(Pie-Zoelectric Transducer)에 부착하여 전압을 걸어주면 전압에 대한 PZT의 팽창에 의해 두 거울 사이의 간격이 변하게 되므로 파장 가변이 이루어진다.

(그림 2)는 광섬유 소자로 제작된 PZT-FP 파장 가변 필터의 구조이다. 광섬유의 종단면에 고반사 코팅을 하여 공진기를 구성한 후, 그 간격을 PZT를 사용하여 가변한다. PZT-FP 필터의 경우 역학적인 변형을 통하여 파장 가변을 구현하기 때문에 동작 속도는 msec대로 비교적 느린 편이다. 이 방식으로 제작된 필터의 선폭(bandwidth)은 0.5nm 이하, 그리고 삽입 손실은 2dB 정도가 가능하다. PZT-FP 파장 가변 필터는 좁은 선폭의 필터를 구현하기가 용이하고 신호광의 편광상태에 따른 특성 변화가 없



(그림 2) PZT-PP 광섬유 파장 가변 필터의 구조



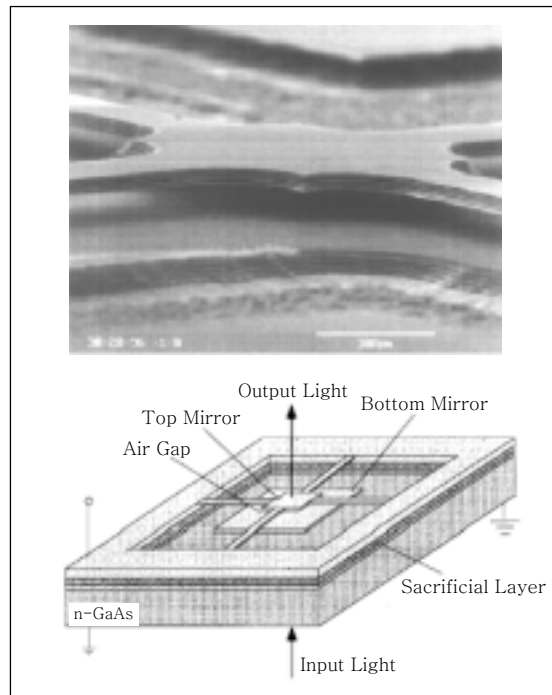
(그림 3) FLC-PP 광섬유 파장 가변 필터의 구조

다는 장점이 있으며, 단점으로는 느린 응답특성 및 소자의 열적, 역학적 불안전성 등이 있다.

#### 나. Liquid Crystal FP 필터

액정은 일정한 세기 이상의 전기장이 걸리면 액정 분자들이 재배열하는 Freedericksz 전이 현상을 보인다. 이 현상을 이용하면 전기장의 세기에 따른 액정의 굴절률을 조절할 수 있으며, 이를 이용하여 공진기의 굴절률을 가변할 수 있다. 최근에는 비교적 빠른 응답성을 지닌 강유전성 액정(Ferroelectric Liquid Crystal: FLC)이 많이 사용되고 있다.

(그림 3)은 광섬유 소자로 제작된 저손실 파장 가변 필터의 구조를 보여준다[1]. 이 필터의 경우 광섬유 이음관(ferrule)의 양쪽에 고반사 거울을 부착하여 공진기를 구성하였으며 삽입 손실을 최소화하기 위하여 전극을 측면에 위치하게 하였다. 일반적



(그림 4) Micro Machined 파장 가변 필터 구조

으로 액정을 이용한 파장 가변 필터의 경우 파장 가변 범위는 약 50nm 정도에 선폭은 0.2~0.3nm 정도이며, 동작 속도는 수십에서 수백  $\mu\text{sec}$ , 삽입 손실은 3dB 정도가 가능하다. 액정을 이용한 파장 변환기의 경우 전력 소모가 매우 낮으며, 광섬유 소자로 만들기가 비교적 용이하고 PZT 소자에 비해 안정적인 동작이 가능하다. 그러나, 일반적으로 신호광의 편광 상태에 따라 특성 변화를 보이며, nsec급 이상의 초고속 응답특성을 보이는 물질은 아직까지 알려진 바가 없다.

#### 다. Micro Machined Device

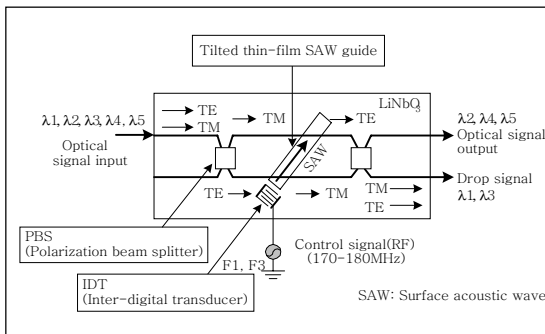
전기력(electrostatic force) 또는 열에 의해 미세한 변형이 일어나는 반도체를 이용하여 FP 필터의 간격을 조절하면 파장 가변 필터를 구현할 수 있다 [2, 3]. 최근에는 Ga(Al)As- $\text{AlO}_x$  소재를 사용하여 59nm 정도의 가변 범위 내에서 선폭 0.5nm, 삽입 손실은 0.9dB 정도의 특성을 보이는 파장 가변 필터를 구현하였다[2]. (그림 4)에서는 반도체 기술로 제

작된 Micro machined FP 필터의 구조를 보여준다.

Micro-machined 필터는 반도체 소자기술이 응용되기 때문에 집적성과 안전성에서 유리하며, 이득 매질로도 동시에 사용할 수 있다. 이 소자에 대해서는 최근 많은 연구가 진행되어 특성이 계속 향상되고 있다.

## 2. 모드 커플링을 이용한 파장 가변 필터

모드 커플링(mode coupling)이란 광도파로에서 섭동(perturbation)에 의해 모드간 에너지 교환이 일어나는 현상을 의미하고, 특정 파장에 대한 두 개 모드간의 커플링을 이용하면 파장 가변 필터 특성을 구현할 수 있다. 섭동은 음광, 전광 자기광 효과 등을 통해 구현할 수 있으며, 모드 커플링은 변환되는 모드 종류에 따라 편광 모드 변환과 공간 모드 변환 필터로 구분될 수 있다.



(그림 5) 편광 모드 변환 AOTF의 구조

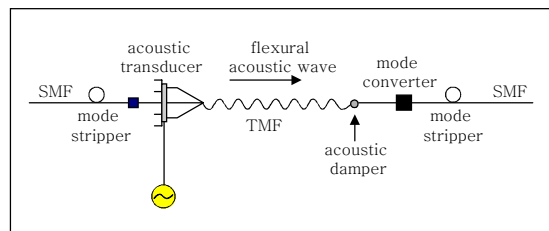
### 가. 편광 모드 변환 AOTF

(그림 5)는 편광 모드 변환 AOTF의 구조를 보여준다.

편광 모드 변환 AOTF(Acousto-Optic Tunable Filter)는 광도파로 내에서 SAW(Surface Acoustic Wave)를 통해 일어나는 섭동에 의한 TE(Transverse Electric) 모드와 TM(Transverse Magnetic) 모드간의 모드 커플링을 이용하여 구현된다. AOTF의 동작 원리는 다음과 같다. TE, TM 모드가 섞여 있는 빛이 TE/TM 모드 분리기(PBS)로 들어가면

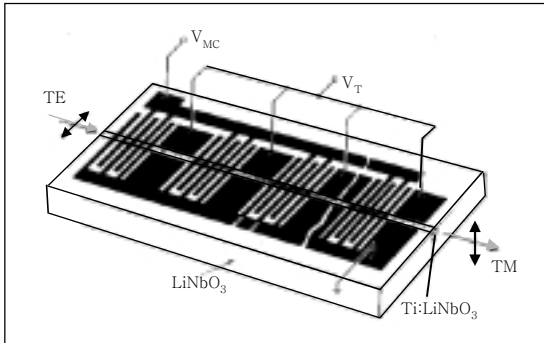
TE, TM으로 나누어진 후 각각 TE ↔ TM 변환기로 들어간다. 이 때 TE ↔ TM 변환기에 가해진 음파에 의한 섭동의 주파수와 들어간 빛의 파장의 TE 모드와 TM 모드간의 위상 정합 조건이 맞을 때만 TE, TM 변환이 일어나므로 변환된 파장의 빛과 변환되지 않은 파장의 빛이 두번째 TE/TM 모드 분리기에서 구분되어 출력된다. 파장 가변은 위상 정합 조건의 변화에 의해 일어나며 음향효과에 의한 섭동의 경우 위상 정합 조건은  $|\beta_{TE} - \beta_{TM}| = k_{ac}$ 이다. 여기서  $\beta_{TE}$ 와  $\beta_{TM}$ 는 각각 광파의 TE와 TM 편광의 파수(wave number)이고  $k_{ac}$ 는 SAW의 파수이다. AOTF의 경우 파장 가변은 SAW의 주파수를 변화시킴으로써 이루어질 수 있다. 동작 시간은 SAW가 소자를 진행하는 시간에 의존하며 수십에서 수백  $\mu$ sec 정도의 응답특성을 보인다. AOTF는 여러 개의 주파수 신호를 동시에 입력시킬 경우 여러 채널을 동시에 제어할 수 있는 장점이 있다. 단점으로는 4dB 이상의 높은 접속 손실과 강한 사이드 로브(side lobe)에 의한 채널간 누화 그리고 소자의 편광 의존성과 비선형 특성에 의한 주파수 이동(frequency shift) 등을 들 수 있다. 최근에는 두 단계(dual stage) AOTF를 사용해서 4.1dB의 접속 손실과 1.6nm의 선폭, 그리고 40nm 이상의 파장 가변 범위를 가지는 필터를 구현한 결과가 보고되었다[4].

### 나. 공간 모드 변환 AOTF



(그림 6) 공간 모드 변환 AOTF의 구조

공간 모드 변환 필터는 섭동에 의해 이중모드 광섬유(Two Mode Fiber: TMF) 내에서 일어나는 LP<sub>01</sub> 모드와 LP<sub>11</sub>간의 모드 커플링을 이용한다[5]. 구성은 (그림 6)과 같이 음파 변환기(acoustic trans-

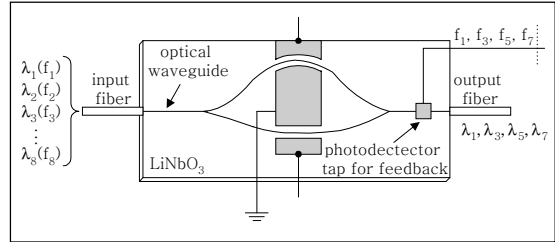


(그림 7) 편광 모드 변환 EOTF의 구조

ducer)를 이용한  $LP_{01} \leftrightarrow LP_{11}$  변환기와, 모드 변환기(mode converter)와 모드 스트리퍼(mode stripper)로 이루어진  $LP_{11}$  모드 선택 장치로 되어 있다. SMF를 통해 입사된 신호광 중 음파 변환기에 의해 모드 커플링되어  $LP_{11}$  모드로 변환된 파장만 모드 선택장치에 의해 선택되어 단일모드 광섬유(Single Mode Fiber: SMF)로 재입사한다. 편광 모드 변환 AOTF와 마찬가지로 이 소자도 음파의 주파수 특성에 따라 파장 가변 특성을 보이며 동시에 여러 개의 채널을 제어할 수 있다. 특히 공간 모드 변환 필터는 전 광섬유(all fiber) 형태로 구현되기 때문에 편광 모드 변환 AOTF에 비해서 작은 삽입 손실과 편광 의존성을 보이는 장점이 있다.

다. 편광 모드 변환 EOTF

편광 모드 변환 AOTF와 마찬가지로 편광 모드 변환 EOTF(Electro-Optical Tunable Filter) 역시 도파로상의 TE, TM 간의 모드 커플링을 통해서 일어난다. 이 경우 모드 커플링은 도파로 굴절률의 섭동을 통해서 일어나는데, 이러한 섭동은 (그림 7)에서와 같이 도파로상에 주기적으로 배치되어 있는 전극을 통한 전기광학(electro-optic) 효과를 통해 발생시킨다. 파장 변환은 전기장의 세기에 따라 변화하는 굴절률의 변화 정도에 따라서 일어날 수 있다. 이 현상을 이용한 소자는 nsec급의 매우 빠른 가변 속도를 보일 수 있다는 것이 큰 장점이지만, 가변 범위가 매우 좁다는 점과 높은 제어 전압이 필요한 것이 단점이다.



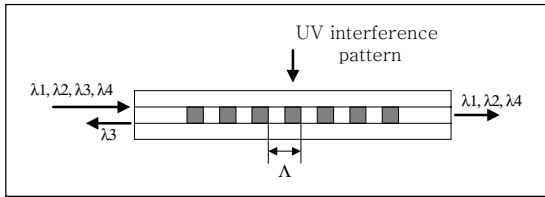
(그림 8) MZ 간섭계의 구조

3. Mach-Zender Interferometer

MZ(Mach-Zender) 간섭을 이용한 파장 가변 필터는 (그림 8)에서와 같이 두 개의 3dB 결합기 사이에 빛이 지나가는 광도파로에 위상 변조기가 있는 구조로 되어 있다. 3dB 결합기에서 갈라진 두 개의 도파로에서 제각기 다른 위상변조를 거친 후, 다른 3dB 결합기에서 합쳐지게 되는데, 입사된 빛이 겪는 위상 변조의 크기에 따라 출력단에서 나오는 세기가 파장에 따른 주기적인 투과특성을 보인다. 좁은 선폭의 투과특성을 갖는 파장 가변 필터를 구현하기 위해서 일반적으로 여러 개의 MZ 파장 가변 필터를 연속적으로 연결해서(cascaded) 사용한다. 위상 변조 장치로서는 LiNbO<sub>3</sub>를 많이 사용하며 이 경우 동작 속도는 수십 nsec로 동작 가능하기 때문에 고속 필터로 사용될 수 있다. 최근 3단계의 MZ 필터를 이용하여 0.4nm 정도의 파장선택성과 50nsec 정도의 동작 속도 그리고 19dB의 삽입 손실의 특성을 갖는 파장 가변 필터가 보고된 바 있다[6]. 리소그래피(lithography) 기술을 사용하여 제작할 경우 MZ 파장 가변 필터는 낮은 가격에 제작 가능하고 가변폭이 넓은 장점 등을 보이며, 단점으로는 구조가 복잡하며 제작이 어렵다는 점이다.

4. Fiber Bragg Gratings

광섬유 회절격자는 (그림 9)와 같이 광섬유를 따라 주기적으로 굴절률의 변화를 줌으로써 이루어진다. 굴절률의 변화를 주기 위하여 일반적으로 UV 영역의 광원을 사용하며 주기적 변화를 주기 위해서 홀로그래픽(holographic) 방법이나 위상마스크(phase



(그림 9) 광섬유 회절격자의 동작원리

mask)를 사용한다.

광섬유에 주기적인 굴절률 변화를 주었을 때 반사되는 파장  $\lambda_B$  는 다음과 같다.

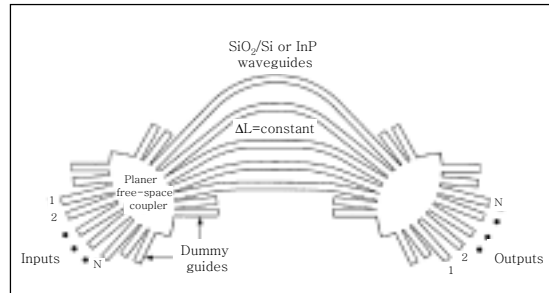
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Delta$$

여기서  $\Delta$ 는 격자의 주기이며,  $n_{eff}$ 는 그 파장대에서의 굴절률을 의미한다. 회절격자로 가변형 필터를 만들기 위해서는 파장에 따른 반사특성을 변화시켜야 한다. 주로 광섬유를 잡아 늘이거나(stretching) 압축(compressing)하여 회절격자의 격자의 주기  $\Delta$ 를 바꾸는 방법을 사용하며, 열을 가해서 격자의 주기를 변화시키기도 한다. 역학적인 변형을 가하기 위해서 사용되는 능동형 소자는 주로 PZT를 사용한다. 이와 같은 방식을 사용하는 경우 가변 파장 폭은 10nm 정도, 속도는 약 2msec 정도가 가능하다. 또한 최근에는 자석을 이용한 가변 장치(magnet based translation stage)를 사용하여 약 16nm의 파장 가변을 한 연구 결과도 발표되었다[7]. 광섬유 회절격자는 파장분할다중 결합기나 광순환기(optical circulator) 그리고 MZ 필터와 함께 사용해서 작은 선폭의 파장 가변형 필터를 구성하기도 한다.

## 5. AWG

AWG(Arrayed Waveguide Grating)는 정적(static) 파장다중 광통신에서의 핵심소자로 WDM용 파장다중화 장치, 광네트워크에서 애드/드롭 필터 및 WDM 광수신기 등으로 다양하게 활용되고 있다.

AWG의 구조는 (그림 10)과 같이 인접 채널간의 경로차가 일정한 채널 도파로 열로 이루어졌으며, 입력 및 출력에 평면 공간 도파로를 갖는다. 다중파장 입력 광은 첫번째 슬랩(slap)을 거쳐 도파로 열로



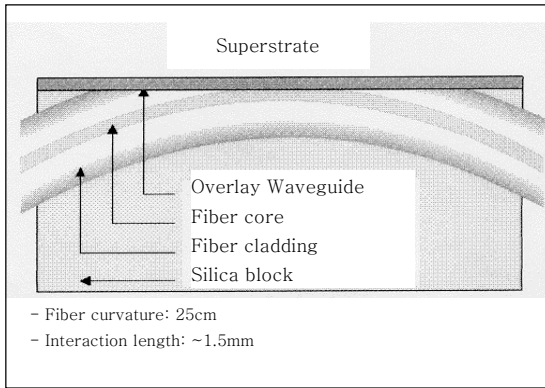
(그림 10) Arrayed Waveguide Grating의 구조

입사하여 각 채널의 광신호가 타 채널에 비해 상이한 양만큼 위상차가 되어 반대편 슬랩에서 간섭을 일으킨다. 이 과정에서 상이한 파장은 상이한 위치에서 최대 보강 간섭이 일어난다. 이러한 위치는 출력 포트와 일치하게끔 제작하여 신호를 역다중화시킬 수 있다. 도파로 열의 수는 파장선택성의 대역폭과 관계가 있으며 많을수록 좁은 대역폭을 얻을 수 있으나 손실도 증가하게 된다. AWG 소자는 수동소자이므로 파장 가변형 필터를 구현하기 위해서는 온도 가변 광스위치와 같은 추가적인 광부품이 필요하게 된다[8].

## 6. Side Polished Fiber Tunable Filter

Side polished 광섬유 가변 필터는 (그림 11)에서 보이는 바와 같이 단일 모드 광섬유를 일정한 곡률을 가지도록 고정된 후, 크래딩을 제거하여 그 위치에 오버레이(overlay) 도파로를 구성하여 제작한다. 이 경우 신호광의 소멸파(evanescent field)는 코어의 일정한 영역 내에서 오버레이 도파로와 반응하여 결합될 수 있다[9]. 오버레이로 여러 가지 다른 물질을 사용하거나 굴절률 등을 능동적으로 변화시킴으로써 도파로 사이에 결합되는 광의 파장특성을 변화시킬 수 있으며, 이를 파장 가변 필터에 응용한다. 오버레이의 물질로 폴리머를 사용하여 온도 가변을 통한 파장 가변을 구현하거나 액정 또는 LiNbO<sub>3</sub>의 전기 광학적 효과를 이용하여 파장 가변 필터를 구현할 수 있다. 이 필터는 광섬유 구조로 이루어져 있기 때문에 삽입 손실이 매우 적으며 오버





(그림 11) Side Polished 광섬유 가변 필터

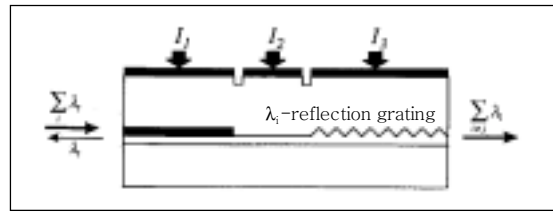
레이의 소재 및 구조에 따라 여러 가지 원하는 특성을 구현할 수 있다. 그러나 일반적으로 필터의 선폭이 넓고 파장 가변 범위가 작다는 단점을 보인다.

### 7. Semiconductor Filters (Tunable filters based on Semiconductor laser structures)

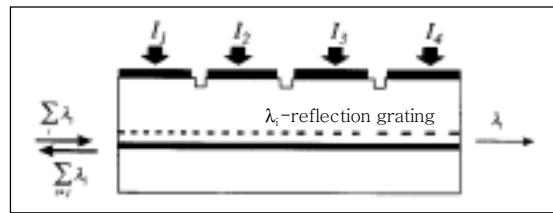
반도체 레이저 다이오드는 기본적으로 증폭 매질을 포함한 공진기 구조로 이루어져 있기 때문에 종모드(longitudinal mode) 선택특성을 보인다. 이와 같은 레이저를 임계 조건 이하에서 동작시킴으로써 공진기의 특성을 통한 필터를 구현할 수 있다. 이와 같은 소자는 추가적으로 신호광에 대해 이득을 줄 수 있다는 이점을 지니고 있다. 공진 파장 가변은 전류 주입(current injection)이나 온도 가변을 통해서 일어날 수 있는데, 전자는 nsec급 초고속 가변 필터에 후자는 msec급 저속 가변 필터에 응용할 수 있다.

#### 가. DFB/DBR 파장 가변 필터

DFB(Distributed Feedback)/DBR(Distributed Bragg Reflector) 타입의 필터는 크게 반사형과 투과형으로 다시 나뉜다. 반사형 DBR 레이저 필터의 대표적인 그림은 (그림 12)에 나타내었다. 전류  $I_1$ 은 활성층에 전류를 공급하여 이득을 얻는 영역이고,  $I_2$ 는 위상 조절 전류,  $I_3$ 는 회절격자에 전류를 주입하여 유효 굴절률의 변화를 줌으로써 회절격자의 반사파



(그림 12) 반사형 DBR 필터



(그림 13) 투과형 DBR 필터

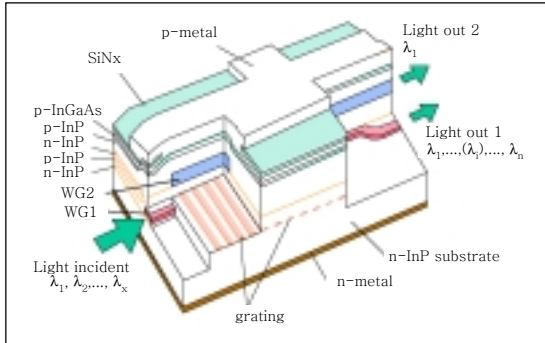
장을 조절하기 위한 것이다. 이러한 DBR 타입의 필터는 튜닝 범위가 수십 nm까지 가능하다.

투과형 DBR 가변 필터는 chirped 광섬유 회절격자와 비슷한 동작원리를 가지며 (그림 13)과 같이 동작한다. (그림 13)은 4채널 투과형 DBR 필터를 나타낸 것으로 회절격자의 주기가 미리 정의된 파장에 정확히 맞아야 하며 전류를 주입하지 않았을 경우 4채널의 파장 모두 반사한다. 채널에 전류를 주입하면 격자의 유효 주기가 바뀌게 되어 선택적으로 원하는 파장을 투과시킬 수 있다.

FP 형태의 DFB 레이저를 이용한 결과도 보고되고 있다. DFB 레이저 필터는 파장 가변 범위가 2nm 내외이다. 이 구조의 장점은 이득 영역이 포함되어 있으므로 광섬유와의 결합 손실을 보상해 줄 수 있다는 점과 집적구조에 유리하고 대역폭이 좁다는 점이며, 단점으로는 열 및 전류에 대한 안정화 장치가 필요하다는 점과 편광 의존성 등이 있다.

#### 나. GACC 필터

GACC(Grating Assisted codirectional coupler) 가변 필터는 두 도파로를 인접시킨 후 한 도파로에 입사된 광을 다른 도파로에서 추출하는 형태의 방향 결합기형 필터이다. 두 도파로 사이의 유효 굴절률



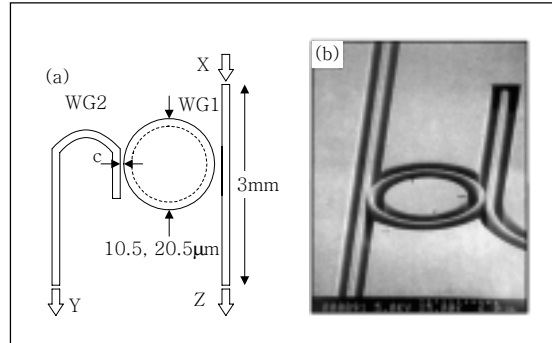
(그림 14) GACC 파장 가변 필터

이 일치할 때 두 도파로 사이에서 결합이 일어나며, 각 도파로의 파장에 따른 유효 굴절률 곡선이 형태가 다른 점을 이용하여 추출되는 파장을 가변할 수 있다. 파장 가변 필터의 선폭은 두 도파로 사이의 유효 굴절률의 기울기 차이가 클수록 좁게 나타나게 되며, 유효 굴절률이 원하는 파장에서 일치하지 않을 때에는 회절격자를 도파로 사이에 삽입하여 이를 보상한다.

(그림 14)는 GACC 파장 가변 필터의 구조를 보여준다[10]. 이 방식의 파장 가변 필터는 빠른 응답 특성과 좁은 선폭 그리고 넓은 파장 가변 영역을 보이고 있으나, 편광 의존성 그리고 사이드 로브에 의한 신호광의 왜곡 등은 아직 해결해야 할 문제점으로 남아 있다.

### 8. Ring Resonator Tunable Filters

광공진기는 광도파로를 고리(ring) 형태로 만들고 이를 방향성 결합기로 여기(excitation) 혹은 출력시키는 구조로 고리 자체의 고유 광경로가 파장의 정수배가 될 경우 주기적으로 공진이 일어나며, 공진 조건이 아닌 파장은 광도파로 고리 내에서 손실로 감쇄한다. 이 경우 위상변조기가 공진기 내에 위치하고 있으면 외부 신호에 의해서 전기적으로 파장 가변이 가능하다. 최근에는 나노 구조(nano structure) 소자의 개발로 광도파로의 길이를 수  $\mu\text{m}$  정도로 크게 줄일 수가 있었으며, 따라서 필터의 FSR과 파장 가변 범위를 크게 늘일 수 있었다.



(그림 15) 공진기형 필터의 구조

(그림 15)는 단일 공진기 가변 필터의 기본 개략도를 보여준다.  $\text{LiNbO}_3$ 와 같은 소재를 이용하여 수 나노 초 정도의 빠른 응답특성을 얻을 수 있으며 최근 개발된 나노 구조를 통해 FSR을 20nm 이상, finesse 120 정도의 결과를 얻을 수 있다[11]. 이 구조는 반도체를 이용하여 제작될 경우 보다 넓은 범위의 가변폭과 더욱 빠른 응답성을 지닌 소자의 구현이 가능하다.

<표 1>에서는 파장 가변 필터의 특성 및 장단점을 정리 요약해 놓았다.

### III. 결론 및 향후 연구방향

이미 WDM 광통신은 point to point 전송 링크의 주된 기술이 되어 있으나, 능동형 네트워크 단계에서는 아직까지 많은 연구가 필요한 수준에 있다. 이는 패킷 스위치나 셀 스위치 네트워크와 같은 복잡한 구조에서 필요한 능동형 동작을 하는 소자의 개발이 완료되어 있지 않다는 점이 주된 이유이다. 필요한 능동형 소자의 동작에는 필터링, 라우팅(routing), 애드/드롭 멀티플렉싱, 파장 변환(wavelength conversion), 광 크로스 커넥터(optical cross connects), header leading 등이 있다. WDM 통신에서 채널을 선택하기 위해 필요한 파장 필터는 가장 중요한 능동형 소자 중의 하나이다.

본 논문에서는 파장 가변 필터를 구현하기 위한 여러 가지 기술들에 대해서 검토해 보았다. 그 중 특별히 소재의 개발이 필요치 않은 광섬유 회절격자나



<표 1> 파장 가변 필터의 비교 분석

Type		Insertion Loss/Bandwidth(3dB)	Channel Spacing /Isolation	Tuning Range/Tuning Speed	Tuning Mechanism	Advantage	Disadvantage
Fabry-Perot	PZT-FP	2dB/<0.5nm	2nm/30dB	~10nm/ms	PZT	Low polarization dependence	Mechanical instability Low speed
	LC-FP	3dB/<0.5nm	2nm/30dB	~50nm/μs	Crystal orientation	Low power consumption	Polarization dependence
	Micro-machined FP	1dB/<0.5nm	2nm/30dB	~60nm/100μs	Micro-machine	Integration Possible gain	Complexity
Mode Coupling	AOTF TE/TM	4dB/~1.5nm	4nm/30dB	>60nm/μs	Acousto-optic	Wide tuning range Simultaneous multiwavelength tuning	Complexity Necessary of acoustic generator
	AOTF LP <sub>00</sub> /LP <sub>01</sub>	<1dB/~2nm	-	>60nm/μs	Acousto-optic		
	EOTF TE/TM	4dB/~1.5nm	4nm/25dB	~50nm/ns	Electro-optic	High speed	Narrow tuning range
Cascaded MZI		19dB/<0.2nm	0.4nm/22dB	~4nm/50ns	Electro-optic	High speed Small bandwidth	Insertion loss Multi-stage operation
Fiber Bragg Grating		0.1dB/<0.2nm	1.6nm/22dB	<10nm/2ms	Temperature stretching	Low loss Small bandwidth	Low speed
AWG tunable configuration		8dB/<0.2nm	0.8nm/30dB	~40nm/10ms	Thermo-optic	Small bandwidth	Insertion loss Low speed
Side polished fiber filter(LC)		0.5dB/>5nm	>10nm/20dB	~40nm/50μs	Crystal orientation	Low loss	Broad bandwidth
SC active filter	DFB/DBR	Gain/<0.1nm	-	~10nm/ns	Current injection	High speed Gain	Cross talk Polarization dependence
	GACC	-/~1nm	-	~10nm/ns	Current injection	High speed	Cross talk Polarization dependence
Ring resonator		3dB/~0.2nm	2nm/30dB	20nm/ms	Temperature	Integration	Low speed

FP 형태의 필터는 대부분이 상용화되어 있으나, 이 소자의 응답속도는 msec 수준으로 패킷 스위치나 셀 스위치 네트워크에 사용되기에는 많이 느리다. 반면 micro machine 필터나 AOFT와 같은 가변 필터는 동작 속도가 μsec 수준으로 능동형 네트워크에 사용 가능하다. 그러나 앞으로 다가올 초고속 통신 시스템에서 요구하는 능동형 소자는 nsec의 응답특성을 필요로 하며, 이러한 동작이 가능한 방식은 전기 광학 현상이나 전류 주입(current injection) 방식만이 가능하다. 따라서 micro resonator 필터나 반도체 소자를 이용한 DBR 레이저 필터나 GACC 등의 소자들이 이를 해결해 줄 것으로 기대되며, 앞으로

많은 연구가 필요할 것이다.

### 참고 문헌

[1] Anat Sheh *et al.*, "High-Speed Continuously Tunable Liquid Crystal Filter for WDM Networks," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 6, June 1996.

[2] P. Tayebati *et al.*, "Widely Tunable Fabry-Perot Filter Using Ga(AL)As-AlOx Deformable Mirrors," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 3, Mar. 1998.

[3] E.C. Vail *et al.*, "GaAs Micromachined Widely Tunable Fabry-Perot Filters," *Electron. Lett.*, Vol. 31, No. 3, Feb. 1995.

- [4] H. Herrmann *et al.*, "Low Loss Tunable Integrated Acoustooptical Wavelength Filter in LiNbO<sub>3</sub> with Strong Sidelobe Suppression," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No 1, Jan. 1998.
- [5] Seok Hyun Yun *et al.*, "All-Fiber Tunable Filter and Laser Based on Two Mode Fiber," *Opt. Lett.*, Vol. 21, No. 1, Jan. 1996.
- [6] Ed L. Wooten *et al.*, "Rapidly Tunable Narrowband Wavelength Filter Using LiNbO<sub>3</sub> Unbalanced Mach-Zender Interferometers," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 11, Nov. 1996.
- [7] S. Jin *et al.*, "Magnetically Tunable Filter Bragg Gratings," *OFC ThJ2-1*, 1999.
- [8] Senichi Suzuki *et al.*, "Integrated Multichannel Optical Wavelength Selective Switches Incorporation an Arrayed Waveguide Grating Multiplexer and Thermo Optic Switches," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 16, No. 4, Apr. 1996.
- [9] K. MaCallion *et al.*, "Tunable in-line Fiber-Optic Bandpass Filter," *Opt. Lett.*, Vol. 19, No. 8, Apr. 1994.
- [10] C.Y. Park *et al.*, "Fabrication of Wavelength-Tunable InGaAs/InP Grating Assisted Codirectional Coupler Filter with Very Narrow Bandwidth," *Electron. Lett.*, Vol. 33, 1997.
- [11] D. Rafizadeh *et al.*, "Wavelength Coupled AlGaAs/GaAs Microcavity Ring and Disk Resonators with High Finesse and 21.6nm Free Spectral Range," *Opt. Lett.*, Vol. 22, 1997.