

파장가변 광섬유 간섭형 필터 연구개발

예윤해 · 윤지옥

경희대학교 공과대학 전자공학과, 레이저공학 연구소

이성필

경남대학교 공과대학 전자공학과

(1998년 5월 13일 받음, 1998년 6월 9일 수정본 받음)

회절손실을 줄이기 위해 별도로 빔의 크기를 제한하기 위한 부품이나 정렬용 부품을 사용하지 않고도 공극이 10 μm 이상인 새로운 구조의 Fabry-Perot형 파장가변 필터를 제작하였다. 이를 위해서 FP 공진기를 이루는 두 광섬유중 수신용 광섬유의 단면을 1차측 광섬유에서 나오는 Gaussian 빔 파면의 곡률과 같은 곡률의 곡면으로 가공하였다. Cleaved된 광섬유 단면과 곡면가공된 광섬유 단면에 고반사율 유전체 코팅을 수행한 후 단일모드 광섬유-곡면가공 단일모드 광섬유로 배치한 FP공진기형 필터를 제작하였으며, 제작된 필터의 통과파장폭, free spectral range, 삽입손실은 각각 1.47 nm, 52 nm, 그리고 5.6 dB이었다.

I. 서 론

파장분할 다중화 광통신(WDM) 시스템 또는 광섬유 Bragg 회절격자형 센서시스템의 구현을 위한 핵심소자로 통과파장 가변형 필터를 들 수 있으며, 이를 위해서는 광섬유 Fabry-Perot(FP) 공진기가 가장 적합한 것으로 알려져 있다.^[1] WDM 통신시스템에서 FP공진기를 필터로 사용하고자 할 때 공진기의 파장 가변폭, 즉 free spectral range(FSR)는 기본적으로 WDM시스템에서 널리 사용될 것으로 예상되는 광섬유 증폭기의 이득대역폭 40 nm을 포함하여야 한다. 따라서 광섬유 FP 공진기의 통과파장 가변을 위해 압전소자(piezoelectric device)를 이용한다고 가정할 때 FP공진기는 공극(air gap)으로 구성되어야 하고, 공극의 간격은 수 μm ~수십 μm 정도이어야 한다. 공극의 간격이 10 μm 이상으로 증가하게되면 공극내 공진모드가 커져 광섬유 모드와의 모드 mismatching이 심해지게 되고, 따라서 FP공진기의 삽입손실(throughput)은 급격히 증가하게 된다. 공극의 증가에 따른 삽입손실의 증가 문제를 해결하기 위해 이용할 수 있는 방법으로는 공극내 공진모드의 크기를 제한하거나 광섬유 모드를 키우는 방법을 생각할 수 있다. 공진모드의 크기를 제한하기 위해서는 짧은 광섬유조각을 공극내에 삽입함으로써 공극내에서 빔의 회절을 최소화하는 방법,^[2] hollow 유전체 튜브를 이용하여 공극내 빔의 크기를 광섬유의 외경으로 제한하는 방법,^[3] 또는 수신측 광섬유 단면의 곡률을 조절하는 방법^[4]이 있으며, 광섬유 모드의 크기를 키우는 방법으로는 모드사이즈가 큰 광섬유를 사용하거나 GRIN 렌즈를 사용하는 방법이 있다.^[3,5] 그러나 곡률가공한 단면을 가진 광섬유를 수신측 광섬유로 사

용하는 경우 외에는 광섬유 조각 또는 waveguide 조각을 필요로 하거나 모드사이즈가 큰 특수광섬유 또는 GRIN 렌즈를 사용하여야 한다. 이 경우 이들 부품을 FP공진기를 이루는 두 광섬유에 정렬된 상태로 연결해야하는 어려움이 있으며, 따라서 정렬을 위해 정밀가공 부품을 추가로 사용해야만 한다. 이로인해 경제성 있는 광섬유 필터를 구현하기에는 어려움이 있으며, 동시에 정렬구조의 복잡화로 인한 추가적인 문제를 겪게된다.^[2] 본 논문에서는 FP공진기의 공극이 10 μm 이상일 때에도 추가적인 정렬 도구를 사용하지 않고, 요구되는 삽입손실을 얻을 수 있도록 수신측 단면을 곡률가공하여 구성한 FP공진기의 특성을 보고함으로써 단순한 구조의 FP 간섭형 파장가변 광섬유 필터를 실현할 수 있음을 보였다.

II. 이 론

WDM 시스템에의 응용을 위한 광섬유 간섭형 필터를 위해 그림 1과 같은 단일모드광섬유(SMF)-곡률가공된 단일모드광섬유(CSMF) 구조의 도출과 이 구조에 대한 이론적인 계산은 본 논문의 한 저자에 의한 논문^[4]에 기술되어 있으며, 그림 2에는 2개의 90°로 절단한 광섬유 단면에 반사율 100%의 이상적인 거울을 부착한 SMF 2개를 간격, d 로 배치한(SMF-

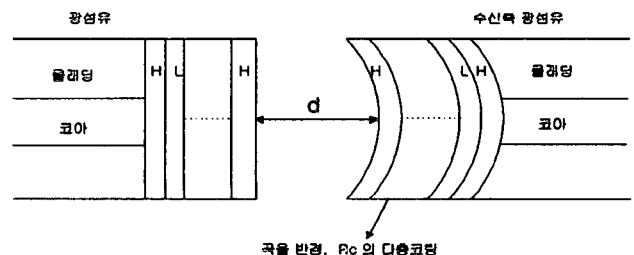


그림 1. SMF-CSMF 구조의 FP공진기.

* 본 연구는 '95년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구 과제 연구비에 의해 연구되었음.

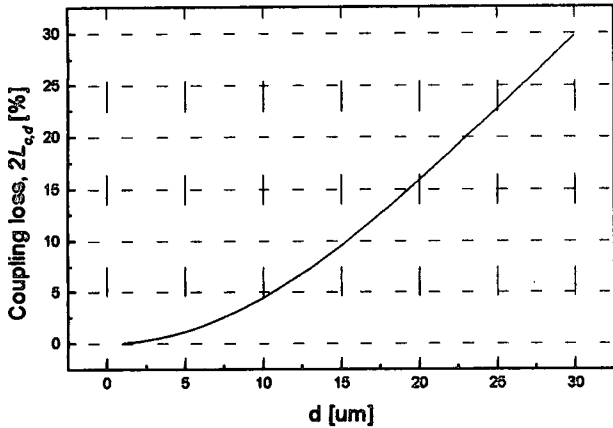


그림 2. SMF-SMF구조에서 공극의 간격 대 결합손실.

SMF 구조) 광섬유 FP공진기의 결합손실을 계산한 것으로서 광섬유 모드의 반경은 4.72 μm, 광원의 파장은 1.52 μm을 기준으로 하였다. 광섬유 단면의 거울이 이상적이지 못한 경우, 즉 이 논문에서 이용하고자하는 TiO₂와 SiO₂의 다층막인 경우에 d가 10 μm 이상이면 그림 2의 결과를 그대로 이용할 수 있다. 간섭형 필터의 특성은 finesse와 삽입손실로 주어지며, 여기서 finesse는 필터의 분해능, 즉 WDM시스템에서 파장분할 다중화할 수 있는 채널의 수와 직접적인 관련이 있다. 또한 필터의 삽입손실은 통과파장에 대한 투과율을 의미한다.

FP형 필터의 FSR을 Δf, 투과광 성분에 대한 투과율의 1/2로 정의한 통과파장폭(full width at half maximum, FWHM)을 δf로 표기할 때 FP 공진기의 finesse, F는 다음과 같이 정의된다.

$$F \equiv \frac{\Delta f}{\delta f} \tag{1}$$

필터의 FSR, 삽입손실, 그리고 Finesse는 FP 공진기를 이루는 두 거울의 특성이 서로 같고, 반사율, 투과율, 손실이 각각 R, T, L_m(R+T+L_m=1로 가정)일 때, 공극의 간격, d가 충분히 작아서 회절에 의한 손실이 없다고 가정할 경우 다음과 같이 주어진다.

$$FSR = \frac{c}{2nd} \tag{2}$$

$$T_c = \left(\frac{1-R-L_m}{1-R} \right)^2 = \left(\frac{T}{L_m+T} \right)^2 \tag{3}$$

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \tag{4}$$

식(2)에서 n은 공극의 굴절률이다. 그러나 공극의 간격이 10 μm 이상인 경우 회절에 의해 공극내 공진모드의 크기는 계속 증가하게 되며, 이는 수신측 단일모드광섬유의 일정한 모드 반경을 고려할 때 공극을 이루는 거울의 실효반사율의 감소를 초래하게 된다. 공극내에서의 회절에 의한 공진모드의 크기증대, 정렬오차 등에 따른 실효반사율의 감소를 고려하기 위해 FP공진기의 공극을 1회 왕복할 때 발생된 총결합손실을 2L_c로 정의할 때 FP공진기의 FSR, 삽입손실, 그리고 이때의 finesse F_d는 다음과 같이 유도된다.

$$FSR_d = \frac{c}{2nd} \tag{5}$$

$$T_{c,d} = \left(\frac{1-L_m-R}{1-R+L_c} \right)^2 = \left(\frac{T}{L_m+L_c+T} \right)^2 \tag{6}$$

$$F_d = \frac{\pi\sqrt{R-L_c}}{1-R+L_c} \tag{7}$$

FP공진기에서의 결합손실 요인으로는 공극의 간격에 따른 회절손실, 두 광섬유를 정렬할 때의 횡편차에 의한 횡편차 손실, 두 광섬유 배치의 배치각도 오차에 의한 각편차 손실, 광섬유 단면가공시 광섬유 단면에 만들어진 곡면의 곡률오차에 의한 곡률 손실 또는 곡률 이득 등이 있으며, 이들 요인에 의한 각각의 영향은 참고문헌 4에 자세하게 제시되어 있다. 참고문헌 4로부터 횡편차 손실은 횡편차가 0.5 μm일 때 1.1%이고, 각편차 손실은 배치각도의 오차가 0.2°에서 0.5%로 계산되었으며, 이들 손실은 예시된 크기의 편차와 오차범위 내에서 회절손실에 추가적인(additive) 손실 향으로 나타난다. 또한 광섬유 단면의 거울을 완전거울로 가정하고, 공극거리 d에 따른 SMF-SMF 구조의 FP 공진기에 대해 공극내를 1회 왕복할 때의 회절 만에 의한 결합손실 2L_{c,d}는 그림 2와 같으며, 이상의 논의로부터 d가 22 μm이고, 횡편차가 0.5 μm, 배치각도 오차가 0.2°일 때 1회 왕복에서의 총 결합손실 2L_c는 20.2%로 계산되었다. 그림 3과 4는 거울의 손실, L_m을 0으로 가정하였을 때 거울의 반사율에 따른 Finesse와 FP공진기의 삽입손실을 공진기를 이루는 두 광섬유의 결합손실을 매개변수로 계산한 결과이다.

그림 3과 4로부터 FP공진기 거울의 반사율이 98%이고, 손실이 0일 때 d가 22 μm인 FP 공진기의 finesse는 최대 24이고, throughput은 -15.6 dB인 것으로 계산되었다. 이로부터 SMF-SMF 구조의 FP공진기를 이용한 간섭형 필터를 제작하였을 때 이론적인 필터의 특성은 F ≤ 24, T_c ≤ -15.6 dB임을 알 수 있다. 그러나 수신측 광섬유의 단면을 곡면으로 가공한 SMF-CSMF 구조의 FP공진기에서 수신측 광섬유의 곡률이 이 거울에 입사하는 입사광의 곡률과 일치할 때 회절손실을 무시가능한 수준으로 낮추는 것이 가능하며, 그림 5에는 d가 22 μm일 때 회절만에 의한 결합손실을 계산한 것으로 유전체

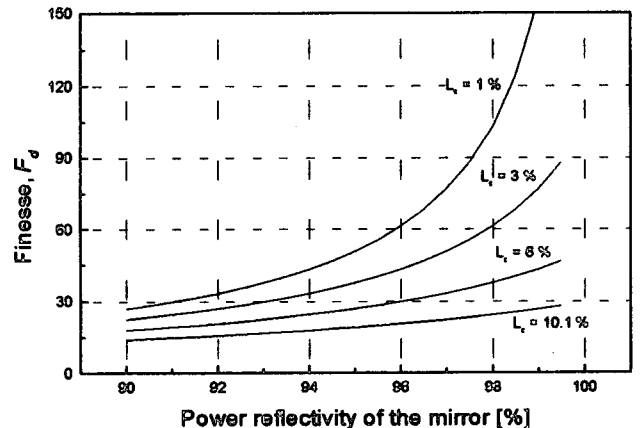


그림 3. FP공진기를 이루는 거울의 반사율 대 Finesse.

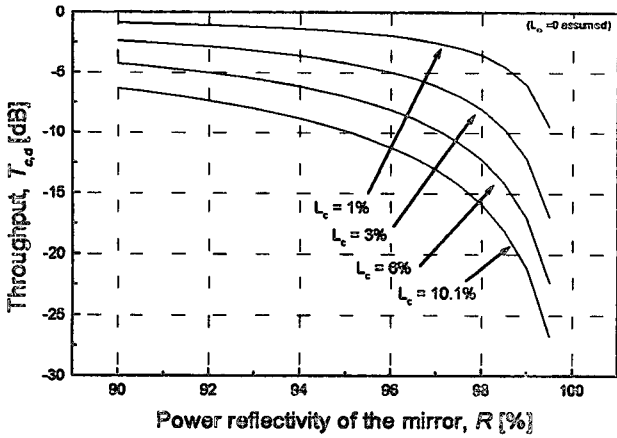


그림 4. FP공진기를 이루는 거울의 반사율 대 삽입손실.

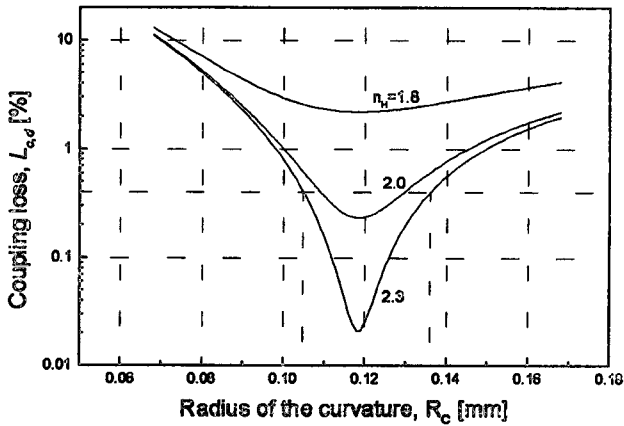


그림 5. SMF-CSMF구조에서 n_H 에 따른 곡률반경 대 결합손실 ($d=22 \mu\text{m}$ 일 때).

다층코팅에서 굴절률이 높은 층의 굴절률(n_H)을 매개변수로 하였다. CSMF 광섬유 단면의 곡률반경에 대한 오차를 25%로 가정할 때 회절손실은 0.4%이하로 유지되며, 따라서 SMF-CSMF구조를 채택하게되면 곡률반경오차가 25%이하, 광섬유 배치의 횡편차와 각편차가 각각 $0.5 \mu\text{m}$, 0.2° 이하인 경우에는 d 가 $22 \mu\text{m}$ 일 때에도 1회 왕복에서의 총 결합손실 $2L_c$ 는 2%이하로 유지될 수 있다. 이때 SMF-CSMF구조의 광섬유 FP공진기의 finesse와 throughput은 그림 3과 4로부터 최소 103, -3.5 dB임을 알 수 있다.

III. 실험 및 토의

종래에 비해 단순한 구조의 파장가변형 광섬유 FP간섭 필터를 위한 SMF-CSMF 구조의 FP 공진기를 만들기 위하여 단일모드 광섬유(Corning사 제품-model SMF-28 와 LG전선 제품)를 광섬유 cleaver(York사 model FK11)를 이용하여 90° 로 자른 후 이 광섬유 단면의 중심에 FP공진기의 공극이 $22 \mu\text{m}$ 일 때 수신측 광섬유 단면에서의 Gaussian beam 파면의 곡률과 같도록 곡률 $118 \mu\text{m}$ 의 오목곡면을 가공하였다. 곡면가공된 광섬유와 곡면가공하지 않은 광섬유의 단면에 electron

beam evaporator를 이용하여 유전체 다층막을 코팅하였으며, 코팅막으로는 TiO_2 와 SiO_2 막을 이용하였다. 각 층의 두께는 필터의 중심 통과파장이 될 $1.52 \mu\text{m}$ 의 1/4로 하였으며, 두께의 제어를 위해서는 공정에 소요되는 시간을 조절하였다. 가능한 한 최대의 반사율을 얻기 위해 TiO_2 , SiO_2 의 순서로 총 15층을 코팅하였으며, 코팅막의 투과율을 그림 6에 보였다. 그림 6에서 코팅막에서의 손실이 없다고 가정할 때 코팅막의 반사율은 파장 1621 nm , 1541.6 nm , 1489.5 nm 에서 각각 92.5%, 97.73%, 98.64%로 계산되었다.

코팅된 광섬유는 V-groove상에서 그림 1과 같이 배치되었으며, 이러한 FP 공진기의 투과특성을 측정하기 위해 LED광원(3M model Photodyne 2XT)을 입사측 광섬유에 연결하였으며, 수신측 광섬유에는 클래딩 모드를 제거하기 위한 mode stripper를 거친 후 optical spectrum analyzer (Ando model AQ-6315B)에 연결하였다. 그림 7은 실험에 사용된 LED광원의 스펙트럼이며, 파장 1489.5 nm , 1541.6 nm 에서의 광출력은 각각 -37.2 dBm, -34 dBm으로 측정되었다. 그림 8은 제작된 광섬유 FP공진기의 투과 스펙트럼을 보인 것으로

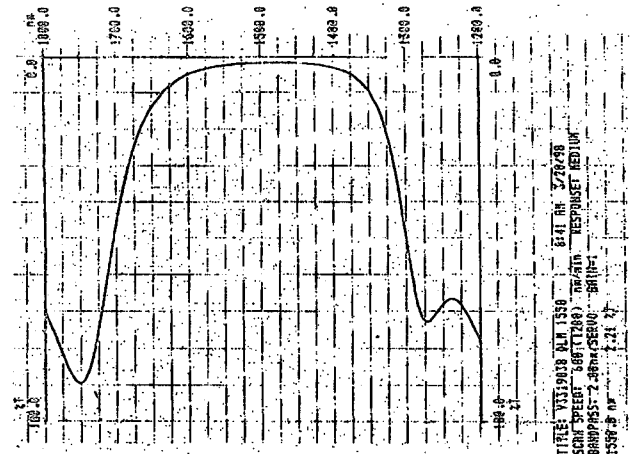


그림 6. 코팅막의 투과율 스펙트럼.

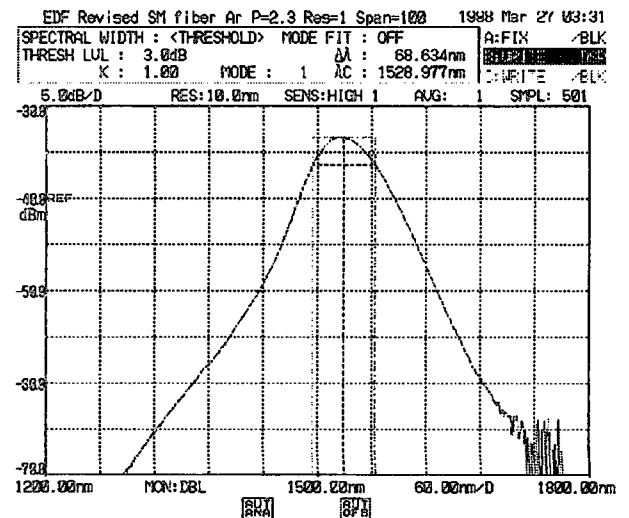


그림 7. 실험에 사용된 광원(3M photodyne 2XT)의 스펙트럼.

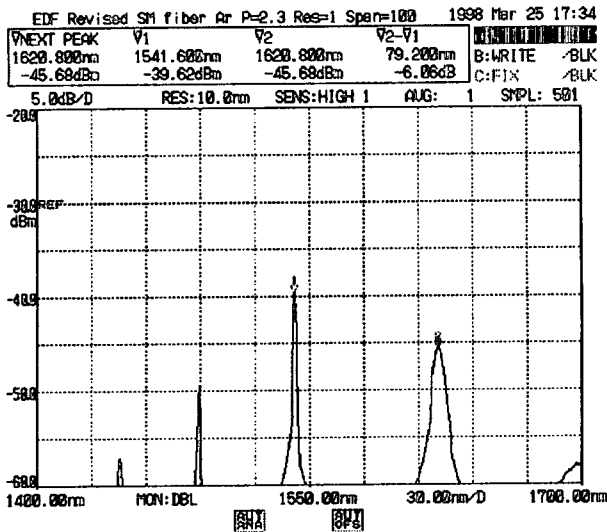


그림 8. 제작된 FP공진기형 필터의 스펙트럼 특성.

표 1. d=22 um인 광섬유 FP공진기의 구조에 따른 특성비교.

	SMF-SMF	SMF-CSMF (이론)	SMF-CSMF (제작)
FSR	52 nm	52 nm	52 nm
FWHM	>2.17 nm	>0.5 nm	1.47 nm
Finesse	<24	103	35.5
Throughput	<-15.6 dB	<-3.5 dB	<-5.6 dB (-10.1 dB)

오른쪽에서 2번째 peak의 중심파장은 1621 nm로 이 파장에서 코팅막의 반사율이 92% 정도밖에 되지 않는다. 따라서 파장 1541.6 nm와 1489.5 nm에서의 데이터를 이용하여 제작된 FP공진기의 특성을 계산하면 FSR과 FWHM은 각각 52.1 nm, 1.466 nm로서 이 FP공진기의 Finesse는 35.5인 것을 알 수 있다. 또한 파장 1489.5 nm, 1541.6 nm에서 계산한 삽입손실은 각각 5.6 dB, 10.1 dB이다.

표 1은 이상의 결과를 종합한 것으로 제작된 SMF-CSMF 구조의 광섬유 FP 공진기의 특성은 SMF-SMF구조보다는 훨씬 우수한 특성을 보이나 이론적인 예측치와는 거리가 있다. 삽입손실은 이론적인 값에 어느 정도 근접하므로 식(6)을 통하여 L_c 가 예측치에 근접함을 알 수 있으며, Finesse는 이론치와는 상당히 거리가 있으므로 식(7)로부터 코팅박막 거울의 손실, L_m 이 무시될 수 없는 정도로 큼을 알 수 있다. 박막거울의 손실은 거울을 이루는 다층막 재질에서의 흡수, 가공된 곡면의 불완전 정도(불완전한 곡면은 광의 산란을 통하여 손실

을 유발함), 다층막 경계면의 smoothness 등에 의해 좌우되며, 따라서 이론적인 성능의 광섬유 FP공진기를 위해서는 곡면 가공 공정의 개선, 코팅이 수행될 단면의 cleaning공정의 개선, 코팅공정의 개선 및 고반사를 박막을 얻기 위한 실시간 코팅두께 모니터링 장치를 필요로 함을 알 수 있다. 따라서 다층막 거울의 손실을 줄일 경우 광섬유배치의 횡편차와 각 오차를 각각 0.5 μ m, 0.2°이하로 유지하는 경우에는 별도의 정렬보조 장치의 도움 없이 Finesse 100, 삽입손실 3 dB정도의 파장가변형 필터를 제작할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 광섬유 배치의 횡편차와 각 오차를 각각 0.5 μ m, 0.2°이하로 유지하는 것은 본 실험에서 사용된 fiber cleaver의 cleave angle이 $0.24 \pm 0.16^\circ$ 이하이며, 본 실험에 사용된 장거리 통신용 범용 광섬유인 SMF-28의 경우 클래딩 직경이 $125 \pm 2.0 \mu$ m, 코어-클래딩 동심율이 1 μ m이하, 그리고 클래딩 non-circularity가 2%이하인 점을 고려하면 일반 통신용 광섬유를 연마하지 않고 단순히 cleaving하는 것만으로 가능함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 파장가변형 광섬유 간섭형 필터 중에서 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 알려진 FP공진기형 필터를 별도의 추가부품을 사용하지 않고도 WDM 통신 시스템용으로 적합한 성능으로 값싸게 제작하기 위한 실험 연구로 진행되었으며, 공극이 10 μ m이상인 경우에도 cleaving한 일반 통신용 광섬유와 단면을 곡률가공한 광섬유를 SMF-CSMF구조로 FP형 공진기를 구성할 경우 V-groove를 이용한 단순한 정렬만으로도 어느 정도 성능의 필터를 구현할 수 있음을 보였다. 또 이를 증명하기 위해 제작된 FP공진기형 필터는 FSR, FWHM, Finesse, 그리고 삽입손실이 각각 52 nm, 1.47 nm, 35.5, 5.6 dB이었으며, 곡면가공 및 코팅공정을 개선함으로써 실제로 적용 가능한 광섬유 필터를 제작할 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] P. E. Green, Fiber Optic Networks(Prentice-Hall, London, 1993) p. 115.
- [2] J. Stone and L. W. Stulz, Electron. Lett., **23**(15), 781(1987).
- [3] D. Marcuse and J. Stone, J. Lightwave Technol., **7**, 869(1989).
- [4] 김종호, 예윤해, 한국광학회지, **8**, 230(1997).
- [5] 김윤중, 김창민, 김명진, 윤대원, COOC '97, 335(1997).

Tunable fiber interference filter for sensors and communication system

Yun-Hae Yeh and Ji-Wook Youn

*Dept. of Electronic Engineering and Institute for Laser Engineering
Kyung Hee University, YongIn, KyungKi, 449-701, Korea*

SungPil Lee

*Dept. of Electronic Engineering
Kyung Nam University, Masan, KyungNam, 631-701, Korea*

(Received May 13, 1998, Revised manuscript received June 9, 1998)

A new Fabry-Perot tunable filter has been built with simple construction, which does not require any additional aligning and/or beam-confining components for the reduction of the diffraction loss. For this feature, one of the two fibers for the filter is processed to have a concave mirror whose curvature is the same as that of the wavefront of the Gaussian beam from the first fiber. After high reflection coatings, the two fibers are aligned to result in an FP filter whose bandwidth, free spectral range, and insertion loss is 1.47 nm, 52 nm, and 5.6 dB respectively.