

파장가변 필터를 위한 Plane-Concave Fabry-Perot 공진기의 해석

예윤해†

경희대학교 전자정보학부 전자공학 전공, 레이저공학 연구소
Ⓣ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

(2004년 8월 20일 받음, 2004년 11월 12일 수정본 받음)

파장가변 필터를 목적으로 plane-concave 거울쌍으로 구성된 Fabry-Perot 공진기에 대한 해석모델을 제안하고, 이를 실제 제작과정에서의 변수 값을 적용하여 해석한 결과를 제시하였다. 공진기의 결합손실과 거울의 손실이 필터의 삽입손실에 가장 큰 변수로 작용하며, plane-concave 거울쌍 구성을 이용하여 finesse가 600, FSR이 57 nm, 삽입손실(insertion loss)이 3 dB 이하인 필터를 구현하기 위해서는 손실이 0.09% 이하인 거울을 사용하여 공진기의 결합손실이 0.1% 이하가 되도록 오목거울의 곡률반경과 정렬상태를 조절하여야 하는 것으로 밝혀졌다.

주제어 : wavelength division multiplexing(WDM), fiber bragg grating(FBG), tunable filter, Fabry-Perot cavity, piezoelectric.

I. 서 론

전자상거래, 디지털 음악, 비디오와 같이 대규모 정보의 이동을 동반하는 인터넷 통신의 폭발적인 증가로 인하여 통신 서비스 제공회사들은 가까운 시일 내에 현재보다 훨씬 많은 정보를 감당할 수 있는 광통신망을 확보하여야 하며, 이를 위해 광섬유의 통신용량을 키울 수 있는 다양한 기술들이 개발되고 있다. 통신회사간의 치열한 경쟁은 저가이면서 동시에 통신대역을 필요에 따라 고객에게 적절하게 할당할 수도 있는 보다 진보된 통신망을 요구하기에 이르렀다. 이러한 요구는 전광통신망(all-optic network) 기술에 의해 충족될 수 있으며, 이를 위해 광섬유 스위치, add/drop 필터, 파장가변 필터, 파장가변 광원 등과 같은 다양한 종류의 광섬유 부품이 개발되어야 한다.

광통신 또는 광섬유센서 시스템에서는 파장가변범위(free spectral range : FSR)가 50 nm 내외, 파장선택도(finesse)가 500 전후인 파장가변 필터를 필요로 하며^[1-4], 이를 구현하기 위해 MEMS(micro electro mechanical systems)^[5], 압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)^[6], 음향광학^[7], 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: FBG)기술^[8] 등을 주로 사용하고 있다. 이들 기술은 가격이 비싸다는 문제 외에도 각 기술별 약점; MEMS와 음향광학 필터의 경우 진동에 약하고, FBG의 경우 속도가 느리고 가변범위가 제한적이다. 현재 뛰어난 성능과 빠른 동작속도 때문에 압전액츄에이터형이 가장 널리 사용되고 있으며, 최근 연구가 활발한 optical coherence tomography(OCT)용 파장가변광원 응용에서도 파장가변범위가 넓고, 속도가 빠르기 때문에 많은 응용이 기대되는 필터형이다.

그림 1은 기존의 압전액츄에이터식 파장가변 필터의 구성

을 개략적으로 보인 것으로 위에서 제시된 특성을 얻기 위해 공진기(cavity) 길이 d와 거울(M1, M2)의 반사율은 각각 20 μm 내외, 99.5% 내외로 제작한다. 이 때 공진기 내부에서의 반사광은 회절에 의해 빔사이즈가 증대되기 때문에 공진기를 이루는 두 거울의 유효반사율이 감소한다. 기존의 구성에서는 두께가 20 μm보다 약간 짧은 waveguide를 사용하여 빔이 자유공간(free space)을 진행하는 거리, D를 최대한 짧게 함으로서 이 문제를 해결하였다^[9]. 그러나 이 방법은 직경이 2 mm 정도인 ferrule의 단면이 (필터의 제작과정에서 광섬유의 취급을 용이하게 하기 위해 광섬유는 직경 2.5 mm의 ferrule에 삽입된다) 1~3 μm 간격을 두고 완전히 평행하게 유지될 것을 요구한다. 따라서 필터를 구현할 때 복잡한 정렬기구를 사용해야 하고, 필터를 취급하거나 동작시킬 때에도 평행상태가 유지될 수 있도록 세심한 주의를 기울여야 한다. 그럼에도 불구하고 공진기의 간격을 제어하기 위해 사용되는 압전액츄에이터에 역방향 전압을 인가할 경우 두 단면이 접촉하면서 파손되는 경우가 발생하기도 한다. 이 외에도

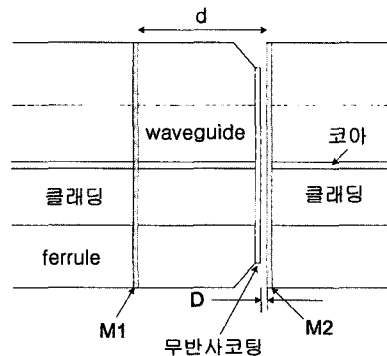


그림 1. 기존의 압전액츄에이터형 파장가변 필터의 구성.

† E-mail: kslee@skku.ac.kr

얇은 waveguide를 광섬유 코어에 정렬하여 부착하고, 무반사 코팅을 추가하는 복잡한 제작과정을 필요로 한다.^[9,10]

압전액츄에이터형 파장가변 필터의 문제점을 해결하기 위하여 공진기를 이루는 두 거울 중 하나를 곡면 거울로 대체한 그림 2의 plane-concave 거울쌍 파장가변 필터가 본 연구팀에 의해 제시된 바 있으며^[11], 이러한 필터의 특성을 계산하기 위한 시도가 있었다.^[12] 기존의 계산에서는 Marcuse 등^[13]에 의해 시도된 단일모드 계단형 광섬유(step-index single-mode fiber: SMF)-SMF 구조에 대한 해석을 토대로 두 번째 거울을 오목거울로 대체한 구조에 대하여 1회 왕복반사 후 두 번째 광섬유의 전송모드와의 결합 정도로서 정의한 결합손실을 계산하였다. 이 방식은 그림 3에서와 같이 거울에서 반사될 때마다 빔의 사이즈가 지속적으로 증대되고 동시에 정렬오차에 의해 횡방향으로의 위치이동이 동시에 발생하는 경우, 즉 공진기를 이루는 두 거울이 모두 평면거울일 경우 적용 가능한 계산방법이다. 이에 반해 그림 4에서와 같이 수신측 광섬유 단면의 거울이 곡면일 때에는 횡편차 또는 각 정렬오차(angular misalignment)가 있을 때에도 공진기 내에서 일정 횟수만큼 반사과정을 반복한 후에는 완벽하게 정렬된 경우와 동일한 반사경로를 갖게 되며, 특히 곡면의 곡률이 빔파면의 곡률과 일치할 때 공진기 내의 빔은 정재파를 이루게 된다.

본 논문에서는 그림 2의 plane-concave구성 광섬유 공진기를 해석하고, 이 결과를 파장가변 필터에 적용함으로써 plane-

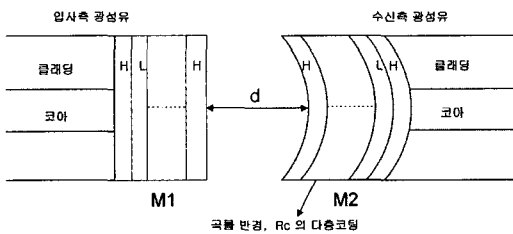
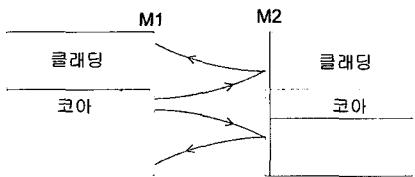
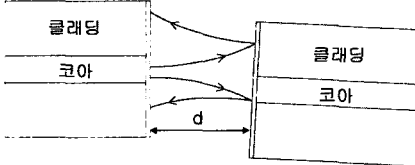


그림 2. Plane-concave 거울쌍 공진기의 구성.



(a) with perfect alignment



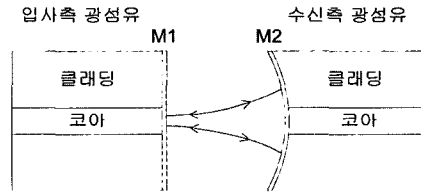
(b) with lateral offset and angular misalignment

그림 3. Plane-plane 거울쌍에서 공진기내 빔 패턴; (a) 완벽하게 정렬된 경우, (b) 횡편차와 각편차 둘 다 또는 이중 하나를 가진 경우.

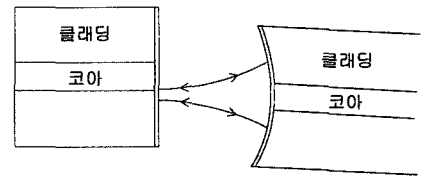
concave 거울쌍으로 구성된 파장가변 필터의 특성을 계산하고, 요구되는 성능의 필터를 구현하기 위한 변수를 도출하였다. 이를 위해 II 절에서는 공진기의 모델을 제시하고, III 절에서 II 절에서의 결과를 필터에 적용하여 필터 변수를 유도하였으며, IV 절에서는 제시된 필터의 이론적 성능한계를 구하고, 주요 변수의 영향을 정량적으로 분석하였다.

II. 공진기의 피드백 모델

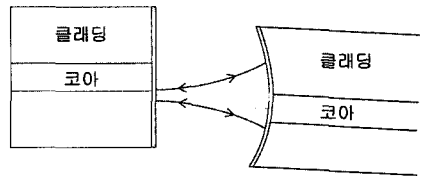
그림 5(a)에 보인 광섬유-공기-광섬유 배치의 구성에서 I, III은 각각 입사측과 출력측 광섬유의 코어를 나타내며, M1과 M2는 각각 광섬유-공기 간 경계 또는 코팅(반사거울 또는 무반사 코팅)을 나타낸다. 또한 영역 II는 공기 또는 반사를 줄이기 위한 굴절률 정합(index-matching)물질 영역을 나타낸 것이다. M1과 M2는 코팅 또는 클리빙(cleaving)이 불완전할 때 빛을 산란시킬 수 있으며, 이때의 산란 광손실을 L_{s1} , L_{s2} 로 나타내었다. $M(M1, M2)$ 의 반사율, 투과율, 손실은 각각 R_m , T_m , $L_m (R_m + T_m + L_m = 1)$ 으로 나타내었으며, L_R 은 M1과 M2의 반사율이 각각 0%, 100%일 때 광섬유 I에서 나온 빛이 영역 II를 진행한 다음 M2에서 반사되어 다시 광섬유 I의 유도모드로 결합되기까지의 결합손실을 나타낸다^[13]. 마지막으로 L_2 는 M2의 반사율이 '0' 일 때 영역



(a) with perfect alignment



(b) with lateral offset and/or angular misalignment



(c) with core-mirror misalignment

그림 4. Plane-concave 거울쌍에서 공진기내 빔 패턴; (a) 완벽하게 정렬된 경우, (b) 횡편차와 각편차 둘 다 또는 이중 하나를 가진 경우, (c) 횡편차와 각편차 둘 다 또는 이중 하나를 가지면서 오목거울의 중심과 광섬유의 코어가 횡편차를 가진 경우.

II에서 광섬유 III로의 결합손실, 즉 공진기모드와 광섬유모드 간의 결합손실(수신결합손실)로 정의하였다.

그림 5(b)는 그림 5(a)의 광학구성의 동작을 블록화 한 것으로 전기장에 대한 각 영역의 전달함수를 함께 그린 것이다. 그림 5(b)에서 $e^{-j\pi}$ 는 외부반사(external reflection)에 의한 위상반전을 나타내고, $e^{-j\phi}$ 는 빛이 길이 d 의 공진기를 지나가는 동안의 위상변화를 나타낸 것으로 영역 II의 굴절률이 n 인 경우 $\phi = \frac{2\pi nd\nu}{c}$ 로 주어진다. 그림 5(c)에 주어진 피드백 모델을 이용할 경우 전기장 E_i^o 와 E_o^o 간의 관계는

$$A = e^{-j\phi} \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{R_{m1}R_{m2}(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R)} e^{-j\phi} \quad (2)$$

를 이용하여 쉽게 구할 수 있으며, E_{o1} 은 다음의 관계식을 이용하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{E_o^o}{E_i^o} = \frac{e^{-j\phi}}{1 - \sqrt{R_{m1}R_{m2}(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R)} \cdot e^{-j2\phi}} \quad (3)$$

$$E_{o1} = \sqrt{T_{m1}T_{m2}(1-L_{\varrho})} \cdot \frac{E_o^o}{E_i^o} \cdot E_i \quad (4)$$

$$= \frac{\sqrt{T_{m1}T_{m2}(1-L_{\varrho})} \cdot e^{-j\phi}}{1 - \sqrt{R_{m1}R_{m2}(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R)} \cdot e^{-j2\phi}} \cdot E_i \quad (5)$$

따라서 공진기의 투과율, $T (= P_o / P_i = |E_{o1}/E_i|^2)$ 는 다음과 같다.

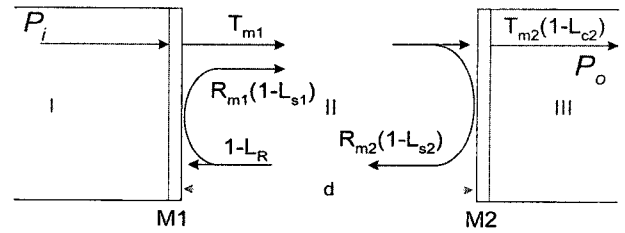
$$T = \frac{T_{m1}T_{m2}(1-L_{\varrho})}{1 + R_{m1}R_{m2}(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R) - 2\sqrt{R_{m1}R_{m2}(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R)} \cos 2\phi} \quad (6)$$

두 거울의 반사율과 투과율이 동일한 경우($R_m = R_{m1} = R_{m2}$, $T_m = T_{m1} = T_{m2}$) 공진기의 투과율, T 은 다음과 같다.

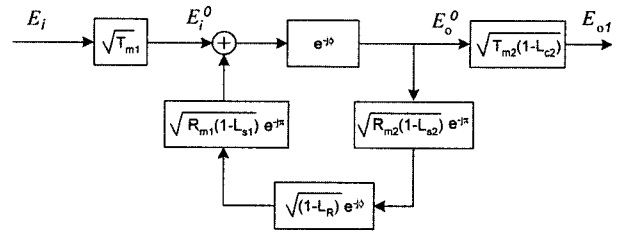
$$T = \frac{T_m^2(1-L_{\varrho})}{1 + R_m^2(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R) - 2R_m\sqrt{(1-L_{s1})(1-L_{\varrho})(1-L_R)} \cos 2\phi} \quad (7)$$

III. Plane-concave 구조 공진기의 해석

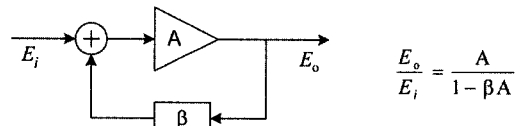
광통신망 또는 광섬유 센서에서 사용될 파장가변 필터는 파장가변범위가 통신파장영역을 모두 포함하도록 넓어야 하며, 통신용량을 크게 하기 위하여 통과파장폭(full-width at half maximum: FWHM)이 좁고 삽입손실이 작아야 한다.^[14-15] 파장가변 필터로는 압전액츄에이터를 이용하여 공진기 간격을 변화시킬 수 있도록 구성한 Fabry-Perot 공진기가 주로 이용되며, 공진기의 길이 d 는 $10 \mu\text{m}$ 이상, 거울의 반사율, R_m 은 99.5% 내외로 제작된다. 따라서 거울의 투과율과 손실에 대해서는 $T_m, L_m \ll 1$ 로 가정할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 제시된 공진기의 피드백 모델.

그림 2는 plane-concave 구조 공진기의 구성을 보인 것으로 고반사율의 다층 유전체 박막을 코팅한 단일모드광섬유(single mode fiber: SMF)와 광섬유의 단면을 곡면으로 가공된 면에 고반사율의 다층 유전체 박막을 코팅한 단일모드광섬유(concave SMF: CSMF)를 나란히 배치한 것이다.^[11] 그림에서 M1과 M2는 광손실이 작은 유전체 다층코팅 거울을 보인 것으로 H로 표기한 고굴절률 층(H층)과 L로 표기한 저굴절률 층(L층)을 각각 입사광 파장의 1/4의 두께로 번갈아 코팅하여 제작되며, 여기서 H층과 L층의 굴절률은 각각 2.3과 1.45로 가정하였다.

그림 2에서 광섬유의 단면은 이상적인 광학면으로 가정되었으며, 따라서 거울면 또한 이상적인 광학면으로 가정될 수 있다. 그림 5의 M1에서 입사측 광섬유로 반사되는 빛은 광섬유의 도파모드와 일치하므로 이 부분에서의 산란손실을 '0'으로 가정할 수 있다. 이에 반해 공진기 내부로 반사되는 빛의 경우 광섬유 단면에 부착될 수도 있는 미세 입자, 반사막 코팅의 내부, 그리고 반사막 표면에 부착된 입자에 의해 산란광이 발생될 수 있다. 그러나 제작공정이 잘 통제된 분위기인 경우 앞에서 정의된 산란광 손실, L_{s1} 과 L_{ϱ} 는 비슷한 크기로 무시할 수 있을 정도로 작다고 결론지을 수 있다. 또한 실제응용이 가능한 파장가변 필터를 위해서 공진기의 결합손실 L_R 은 0.1% 수준이어야 하므로 $(1-L_R)(1-L_{\varrho})(1-L_{s1}) \sim 1 - (L_R + 2L_{\varrho})$ 로 근사할 수 있다.

위에서의 언급에 기초하여 $L_{s1} = L_{\varrho} = L_s$ 을 가정하고, $L_f =$

$L_R + 2L_s$, $R_{eff} \equiv R_m \sqrt{1-L_t}$ 로 정의하면 공진기의 투과율은 다음과 같이 계산된다.

$$T'' \approx \frac{T_m^2(1-L_e)}{1+R_{eff}^2-2R_{eff} \cos 2\phi} = \frac{T_{max}}{1+(\frac{2\sqrt{R_{eff}}}{1-R_{eff}})^2 \sin^2 \phi} \quad (8)$$

식 (8)로부터 R_{eff} 는 반사막의 유효반사율의 의미를 갖는 것으로 해석될 수 있으며, 공진기의 FWHM, finesse F , 최대 투과율 T_{max} , 그리고 삽입손실 IL 은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$FSR_\lambda = \lambda^2/2nd, \quad FSR_\nu = c/2nd \quad (9)$$

$$FWHM = FSR_\lambda \cdot \frac{1-R_{eff}}{\pi\sqrt{R_{eff}}} \quad (10)$$

$$F = \frac{\pi\sqrt{R_{eff}}}{1-R_{eff}} \quad (11)$$

$$T_{max} = [\frac{T_m\sqrt{1-L_e}}{1-R_{eff}}]^2 = [\frac{T_m\sqrt{1-L_e}}{1-R_m\sqrt{1-L_t}}]^2 \\ \sim [\frac{T_m\sqrt{1-L_e}}{1-R_m+R_mL_t/2}]^2 = [\frac{T_m\sqrt{1-L_e}}{(1-R_m)(\frac{1-R_m+R_mL_t/2}{1-R_m})}]^2 \quad (12)$$

$$IL \equiv 10 \log (1/T_{max}) \\ \sim -20 \log [T_m/(1-R_m)] + 20 \log [(1-R_m+R_mL_t/2)/(1-R_m)] - 10 \log (1-L_e) \quad (13)$$

위에서 FSR_λ 과 FSR_ν 는 각각 파장과 주파수를 기준으로 계산한 FSR 이다. L_t 는 L_R 과 L_s 의 합으로 정의되었으나 완전거울을 가정할 때 산란손실 L_s 가 '0'이므로 공진기 내에서의 결합손실항으로 간주할 수 있으며, 따라서 식 (13)으로부터 삽입손실은 공진기 내에서 회절이 발생하지 않았을 때의 삽입손실항인 첫 번째 항, 수신측 광섬유의 모드사이즈가 무한히 크다고 가정했을 때 오목거울의 곡률오차와 거울의 유한한 반사율에 의해 야기된 두 번째 항의 회절손실 $L_{diffraction}$, 그리고 수신광섬유 끝단에서의 공진기 모드의 크기와 수신광섬유 모드간의 크기 부정합(mode mismatch)에 의한 손실항 L_{mode} 의 합으로 나누어 생각할 수 있다.

식 (13)의 유도에서는 plane-concave 구조가 그림 4(a)에서와 같이 두 광섬유가 완벽하게 정렬된 경우를 가정하였다. 그러나 실제의 경우 두 광섬유는 횡편차와 각편차(angle misalignment)를 가질 수 있으며, 이 경우 공진기로 입사된 빔은 정렬정도에 따라 일정 수만큼의 반사를 반복한 후 그림 4(b)에 그려진 공진기 모드(cavity mode)로 안정화되게 된다. 따라서 두 광섬유가 불완전하게 정렬된 경우 공진기로 입사된 후 공진기모드로 안정하기까지의 반사에 의한 안정화 손실 $L_{settling}$ 이 필터의 삽입손실에 추가되어야 한다. 그 외에도 그림 4(c)에서 보는 바와 같이 수신측 광섬유상의 오목

거울과 광섬유 코어의 횡편차에 의한 편차손실 L_{offset} 이 추가되어야 하며, 마지막으로 수신측 광섬유에 입사된 공진기 모드와 수신측 광섬유의 도파모드와의 결합손실이 추가되어야 하나 그림 2의 필터를 구현할 때 각편차는 0.2° 이내이므로 무시할 수 있다. 따라서 plane-concave 구조 공진기 필터의 삽입손실은 손실요인별로 나누어 다음으로 표현될 수 있으며,

$$IL \sim -20 \log [T_m/(1-R_m)] + L_{diffraction} + L_{mode} + L_{offset} + L_{settling} \quad (14)$$

회절손실은 다음 식으로 정의될 수 있다.

$$L_{diffraction} \equiv 20 \log [(1-R_m+R_mL_t/2)/(1-R_m)] \quad (15)$$

모드 부정합 손실과 편차손실은 광섬유 내에서 모드의 크기와 공진기 내 오목거울 표면에서의 광학모드의 크기를 w_o , w_c 라고 하고, 오목거울의 중심과 출력측광섬유의 중심간의 횡편차를 x 라고 할 때 다음 식으로 계산된다.

$$L_{offset} = -10 \log \{ \exp [-(x/w_o)^2] \} \quad (16)$$

$$L_{mode} \equiv -10 \log (1-L_e) \sim -20 \log [2/(w_o/w_c + w_c/w_o)] \quad (17)$$

IV. Plane-concave쌍 공진기 필터의 이론적 성능

필터의 특성을 결정하는 주요 변수는 식 (9)~식 (13)과 같다. 이들 중 FSR 은 공진기 길이의 함수로서 그림 6과 같으며, 필터의 제작과정과는 무관한 변수이다. $FWHM$ 또한 finesse와 FSR 로부터 계산되므로 필터의 제작과정에서 고려되어야 할 변수는 finesse와 삽입손실이다.

단일모드 광섬유(Corning SMF-28 기준)의 경우 클래딩 직경이 $125 \pm 2.0 \mu m$, 코어-클래딩 동심율이 $1 \mu m$ 이하, 그리고 클래딩 non-circularity는 2% 이하이고, 일반적으로 사용되는 클리버(cleaver)의 cleave angle은 $0.24 \pm 0.16^\circ$ 이하(York, model FK11)이다. 그러므로 2개의 광섬유를 V-홈을 이용하여 정렬할 때 그림 4(b)와 같은 횡편차는 최대 $10 \mu m$ 가 될 수 있으며, 광섬유를 회전시키거나 광섬유를 교체하는 등의 방법으로 $2 \sim 3 \mu m$ 이내로 줄이는 것은 가능하지만 완벽하게 정렬한다는 것은 불가능하다. 또한 광섬유 단면을 클리버를 이용하여 절단하거나 광섬유 단면 연마를 이용하더라도 보통 0.2° 내외의 각 정렬오차를 피할 수 없으므로 $L_{settling}$ 을 완전히 제거하는 것이 불가능하며, 그 크기를 정확히 모델링하는 것도 불가능하다. 따라서 계산에서는 20회의 왕복반사 후에 공진기 모드로 안정화되는 것으로 가정하여 $L_{settling}$ 을 계산하였다.

그림 4(c)에서 보인 수신광섬유 단면의 오목거울의 중심과 광섬유 코어와의 정렬정도는 제작공정에서의 경험을 토대로 $0.2 \mu m$ 이내로 제어하는 것이 가능하므로 이 값을 기준으로 L_{offset} 을 계산하였으며, 이 계산에서 두 광섬유의 각 정렬오

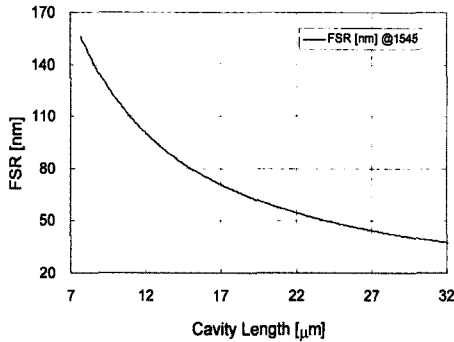


그림 6. 공진기간격 대 FSR (파장 1545 nm 기준).

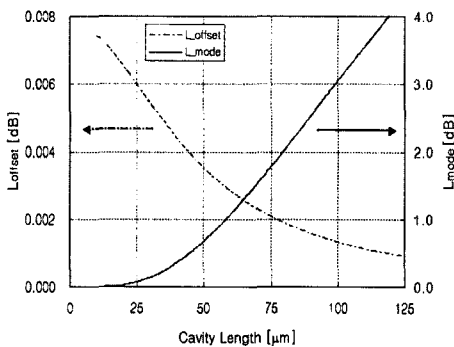


그림 7. 공진기간격 대 L_{offset} 과 L_{mode} .

차(0.2° 내외)에 의한 공진기모드와 광섬유 도파모드 간 결합 손실은 무시할 수 있는 것으로 가정하였다. 그림 7은 식 (16)과 (17)을 이용하여 광섬유의 모드직경이 $9.45 \mu\text{m}$ 일 때의 L_{offset} 과 L_{mode} 를 계산한 것으로 L_{offset} 은 L_{mode} 에 비해 무시할 수 있을 정도로 작은 것을 확인할 수 있다.

선행연구^[12]로부터 통신용 단일모드 광섬유의 모드직경이 파장 1545 nm에서 $9.45 \mu\text{m}$ 이고, 그림 4(a)에서와 같이 두 광섬유가 완벽하게 정렬된 경우 공진기의 간격을 $21 \mu\text{m}$ 로 가정하면 수신측 광섬유 단면의 곡률, R_c 에 따른 공진기의 결합손실, L_R 은 그림 8과 같이 계산된다. 그림 8에서 9 layers와 15 layers는 SiO_2 와 TiO_2 를 파장의 1/4두께로 번갈아 가면 9층 또는 15층 짝은 다층박막 거울을 말하며, 15층 거울의 경우 반사율은 99.5%인 것으로 가정하였다.

위에서의 토론을 전제로 오목거울의 중심과 광섬유 코어와의 정렬오차가 $0.2 \mu\text{m}$, 공진기 간격이 $21 \mu\text{m}$, 그리고 다층박막 거울의 손실, L_m 이 0.01%, 0.03%, 0.1%인 경우 거울의 반사율에 따른 plane-concave 거울쌍 필터의 삽입손실을 계산하여 그림 9에 나타내었으며, 그림 9(a)~(c) 각각은 정렬이 완벽한 경우(그림에서 Perfect Align으로 표기된 것)와 결합손실(L_R)이 0.015%, 0.03%, 0.05%, 0.1%인 5가지 경우의 계산 결과를 포함하고 있다. 그림 10은 오목거울의 중심과 광섬유 코어와의 정렬오차가 $0.2 \mu\text{m}$, 공진기간격 $21 \mu\text{m}$, 결합손실(L_R)이 각각 0.015%와 0.1%일 때 박막거울의 손실, L_m

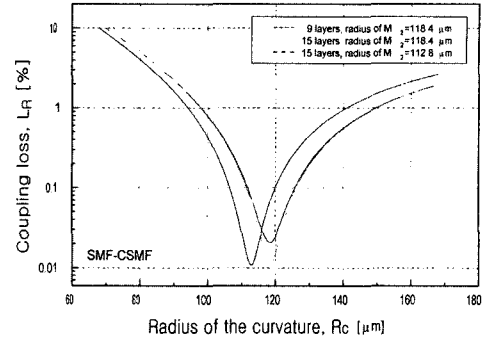


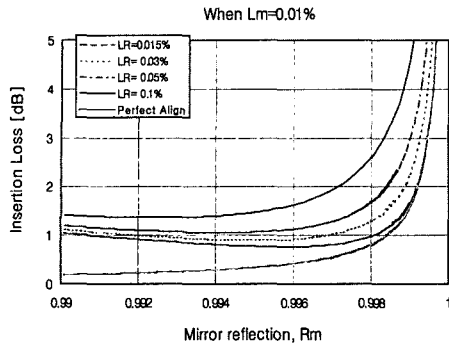
그림 8. 오목거울의 곡률반경 대 공진기의 결합손실 (공진기간격이 $21 \mu\text{m}$ 일때).

에 따른 필터의 삽입손실 변화를 보인 것으로 결합손실이 0.1% 이내일 때 삽입손실이 3 dB 이하인 필터를 구현하기 위해서는 손실이 0.09% 이하인 거울을 사용해야 함을 알 수 있다. 그림 11은 박막거울의 손실(L_m)이 0.01%, 0.05%, 0.1%, 그리고 0.15%일 때 공진기의 결합손실(L_R)에 따른 삽입손실의 변화를 보인 것으로 L_R 이 0.1% 이내일 경우 필터의 삽입손실을 4 dB 이내로 보장하기 위해서 L_m 이 0.13% 이내가 되어야 함을 알 수 있다.

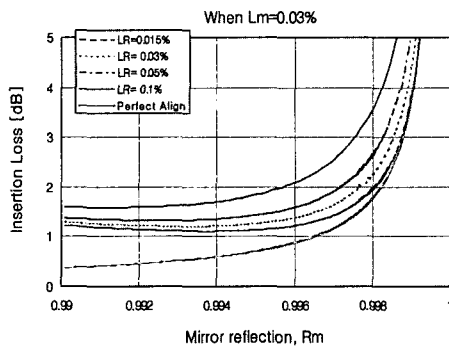
그림 12는 식 (11)을 이용하여 결합손실이 0.01%와 0.1%일 때 거울의 반사율(R_m)에 따른 finesse의 변화를 보인 것으로 그림 9(a)를 참조할 때 거울의 손실이 0.01% 이하가 되면 결합손실이 0.1%일 때에도 finesse가 2000 이상이면서 삽입손실이 5 dB 이하인 필터를 구현할 수 있다는 것을 알 수 있다. 반사율이 99.5%인 거울쌍을 결합손실을 0.1% 이하가 되게 정렬하여 공진기를 구성하면 finesse가 570~620인 필터를 제작할 수 있으며, 이 조건에서 공진기의 삽입손실을 3 dB 이내로 하기 위해서는 손실, L_m 이 0.09% 이하인 거울을 사용하여야 하고, L_m 이 이 조건을 만족할 경우 필터의 삽입손실은 0.17 dB(정렬이 완벽할 때)~3.0 dB가 된다는 것을 알 수 있다.

Finesse가 600, 파장가변범위가 57 nm, 삽입손실이 3 dB 이하인 1550 nm용 공진기 필터를 구현하고자 할 경우 반사율이 99.5%이고 손실이 0.09% 이하인 거울쌍을 이용하되 오목거울로는 곡률반경이 $118 \mu\text{m}$ 인 것을 사용하고, 공진기간격은 $21 \mu\text{m}$, 그리고 공진기의 결합손실이 0.1% 이내가 되도록 정렬하여야 하며, 이 때 공진기의 결합손실과 거울의 손실 정도에 따라 finesse는 570~620, 삽입손실은 0.17 dB~3.0 dB인 필터가 제작될 수 있다. 또한 수신측 오목거울의 곡률반경이 $118.4 \mu\text{m}$ 일 때 횡편차와 각편차가 '0'이면 공진기 간격이 $19.00 \mu\text{m}$ ~ $23.30 \mu\text{m}$ 범위(즉, $21 \mu\text{m} \pm 10\%$. 이 때 FSR은 51.6 nm~63.2 nm가 된다)에서 결합손실이 0.1% 이하가 된다. 다시 말해서 공진기 간격의 허용범위는 통과파장을 FSR만큼 바꾸는데 필요한 공진기의 간격의 변화량(파장의 1/2)인 약 $0.8 \mu\text{m}$ 의 5배 정도로 크다는 것을 알 수 있다.

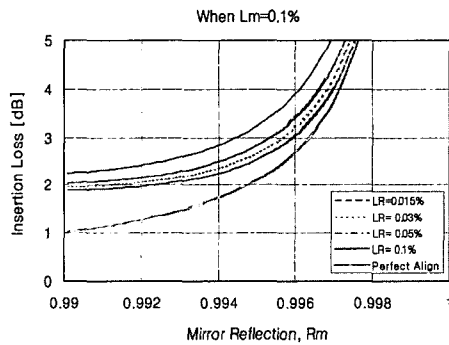
위에서와 같이 제작된 공진기를 파장가변 필터로 사용하기



(a)



(b)



(c)

그림 9. 거울의 손실에 따른 거울의 반사율 대 공진기 필터의 삽입 손실; (a) $L_m=0.01\%$, (b) $L_m=0.03\%$, (c) $L_m=0.1\%$ 일때.

위해서는 공진기의 간격을 변화시켜야하며, 통과파장을 FSR 만큼 바꾸기 위해서는 중심파장의 1/2인 약 $0.8 \mu\text{m}$ 만큼 늘이거나 줄이는 것이 필요하다. 그리고 간격을 변화시키기 위한 도구로 압전액츄에이터를 사용하면 서론에서 제시한 장점을 가진 파장가변 필터를 제작할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 파장가변 필터 중에서 성능이 우수한 것으로 알려진 기존 압전액츄에이터형 필터의 구성에서 결합손실을 줄이기 위해 사용되고 있는 waveguide를 제거함으로써 구조가 훨씬 간단한 plane-concave 거울쌍 공진기를 제안하

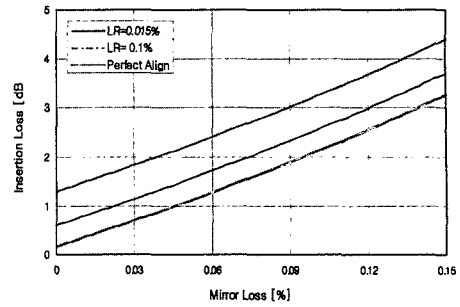


그림 10. 공진기의 결합손실에 따른 거울의 반사율 대 필터의 삽입손실.

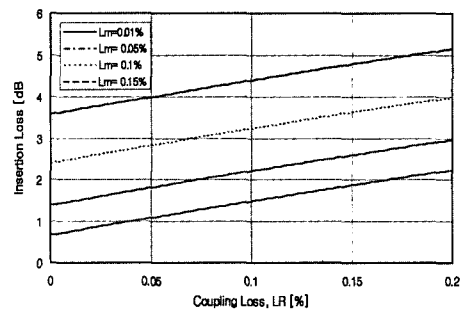


그림 11. 거울의 손실에 따른 공진기의 결합손실 대 필터의 삽입손실.

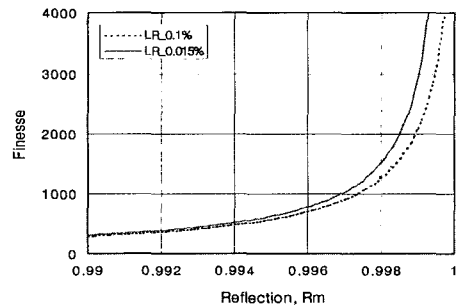


그림 12. 공진기의 결합손실에 따른 거울의 반사율 대 finesse.

고, 이 공진기를 제작할 때의 공정을 가정하여 해석함으로써 제작 조건과 예상되는 성능을 도출하였다. 그 결과 곡률반경이 $118.4 \mu\text{m}$ 이고 반사율이 99.5%인 오목거울과 반사율이 99.5%인 평면거울을 약 $21 \mu\text{m}$ 간격으로 결합손실이 0.1% 이하가 되도록 정렬하여 배치한 plane-concave쌍 공진기는 finesse가 570~620이고, FSR이 51.6 nm~63.2 nm인 필터로 동작한다. 또한 이 필터의 삽입손실이 3 dB 이하가 되려면 거울의 손실은 0.09% 이하여야 하고, 이 때 필터의 삽입손실은 0.17 dB~3.0 dB가 되며, 공진기 간격의 허용범위는 공진기 간격의 약 $\pm 10\%$ 로 통과파장의 튜닝에 필요한 공진기 간격 변화의 약 5배가 되므로 파장가변 필터의 제작에 어려움이 없다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] T. Haber, K. Hsu, C. Miller, and Y. Bao, "Tunable Erbium-doped fiber ring laser precisely locked to the 50-GHz ITU frequency grid," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12(11), pp. 1456-1458, 2000.
- [2] C. M. Miller and F. J. Janniello, "Passively temperature-compensated fibre Fabry-Perot filter and its application in wavelength division multiple access computer network," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 2122-2123, 1990.
- [3] C. G. Askins, M. A. Putnam, G. M. Williams, and E. J. Friebele, "Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower," *Opt. Lett.*, vol. 19, pp. 147-149, 1994.
- [4] C. Miller, T. Li, J. Miller, F. Bao, and K. Hsu, "Multiplexed fiber gratings enhance mechanical sensing," *Laser Focus World*, Mar. 1998.
- [5] P. Tayebati, P. Wang, M. Azimi, L. Maflah and D. Vakhshoori, "Microelectromechanical tunable filter with stable half symmetric cavity," *Electron. Lett.*, vol. 34(20), pp. 1967-1968, 1998.
- [6] J. Stone and L. W. Stulz, "Pigtailed high-finesse tunable Fabry-Perot interferometers with large, medium and small free spectral ranges," *Electron. Lett.*, 23(15), pp. 781-783, 1987.
- [7] M. G. Xu, H. Geiger, J. L. Archambault, L. Reekie, and J. P. Dakin, "Novel interrogating system for fibre bragg grating sensors using an acousto-optic tunable filter," *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1510-1511, 1993.
- [8] S. Y. Set, B. Dabarsyah, C. S. Goh, K. Katoh, Y. Takushima, K. Kikuchi, Y. Okabe and N. Takeda, "A widely tunable fiber Bragg grating with a wavelength tunability over 40 nm," in *OFC 2001*, Anaheim, California, paper MC4, 2001.
- [9] J. B. Clayton, M. A. El, L. J. Freeman, and C. M. Miller, "Tunable optical filter," U. S. Patent Office, Pat. No. 5073004, 1991.
- [10] D. Marcuse and J. Stone, "Fiber-coupled short Fabry-Perot resonators," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, pp. 869-877, 1989.
- [11] 예운해, 윤지옥, 이성필, "파장가변 광섬유 간섭형 필터 연구개발," *한국광학회지*, 제9권 3호, pp. 151-155, 1998.
- [12] 김종호, 예운해, "광섬유 Fabry-Perot 필터에서 광섬유 단면의 모양과 배치에 따른 결합손실 변화," *한국광학회지*, 제8권 3호, pp. 230-235, 1997.
- [13] D. Marcuse and J. Stone, "Coupling efficiency of front surface and multilayer mirrors as fiber-end reflectors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, pp. 377-381, 1989.
- [14] G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical by a transverse holographic method," *Opt. Lett.*, vol. 14, pp. 823-825, 1989.
- [15] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 1370-1372, 1993.

Analysis of the Plane-Concave Fabry-Perot cavity for a tunable filter

YunHae Yeh[†]

*School of Electronics & Information Engineering and Institute for Laser Engineering
Kyung Hee University, YongIn, KyungKi, 449-701, Korea*

[†]*E-mail: yhyh@khu.ac.kr*

(Received August 20, 2004, Revised manuscript November 12, 2004)

We proposed an analysis model for a Fabry-Perot cavity constructed with a plane-mirrored optical fiber and a concave-mirrored one. We presented the analysis results calculated by inserting practical values into the equations derived. The coupling loss of the cavity and the mirror loss are the most important parameters in reducing the insertion loss of the filter. In order to build a filter of finesse 600, FSR 57 nm, and insertion loss < 3 dB, the plane-concave cavity using mirrors of loss < 0.09% should be aligned for the coupling loss to be less than 0.1%.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2340, 120.2230, 170.4500, 230.5750.