

편광 빔 분배기와 광섬유 결합기를 이용한 광섬유 인터리빙 필터

(Fiber-Optic Interleaving Filter Based on Polarization Beam Splitter and Fiber Coupler)

장 옥* · 이용욱**

(Jang Wook · Yong-Wook Lee)

요 약

본 논문에서는 편광 빔 분배기와 광섬유 결합기를 이용하여, 입력 편광에 무관한 반사형 및 투과형 인터리빙 필터로 동작할 수 있는 다파장 스위칭 가능한 광섬유 인터리빙 필터를 제안한다. 제안된 필터는 50:50 광섬유 결합기, 편광 유지 광섬유, 그리고 2개의 1/4 파장판으로 구성되는 Sagnac 복굴절 필터의 출력 양단을 편광 빔 분배기의 출력 양단과 연결함으로써 구성하였다. 제작된 필터는 반사형 및 투과형 모두 0.8[nm]의 채널 간격을 가지는 것으로 측정되었으며, 필터 내부의 1/4 파장판의 방위각을 조절함으로써 0.4[nm]의 스위칭 변위를 갖는 인터리빙 동작이 가능하였다. 또한, 필터의 채널 고립도는 반사형과 투과형에서 각각 ~3[dB]와 > 18[dB]로 측정되었다.

Abstract

By incorporating a polarization beam splitter and fiber coupler, we propose a fiber-optic multiwavelength-switchable interleaving filter that can function as a polarization-independent transmission or reflection-type one. The proposed filter consists of a polarization beam splitter and a Sagnac birefringence loop that is composed of a 50:50 coupler, polarization-maintaining fibers, and two quarter-wave plates. In the proposed filter, a transmission-type filter with a channel isolation > 18[dB] or a reflection-type one with a channel isolation ~3[dB], whose channel spacing and switching displacement were 0.8 and 0.4[nm] in common, respectively, could be obtained. Channel interleaving operation could be performed by the proper control of waveplates within the Sagnac birefringence loop.

Key Words : Optical Fiber, Multiwavelength, Filter, Polarization Beam Splitter, Coupler

1. 서 론

다파장 스위칭 가능한 광섬유 필터(multiwavelength-switchable fiber-optic filter)는 동적 전송 특성을 통해 광통신 시스템의 성능을 크게 향상시킬 수 있기 때문에, 고밀도 파장 분할 다중화(wavelength-division-multiplexing) 네트워크의 효율적 운용을 위해 필수적인 소자이다. 수많은 다파

* 주저자 : 부경대학교 전기공학과 석사
 ** 교신저자 : 부경대학교 전기공학과 전임강사
 Tel : 051-629-6323, Fax : 051-629-6305
 E-mail : yongwook@pknu.ac.kr
 접수일자 : 2009년 6월 19일
 1차심사 : 2009년 6월 26일
 심사완료 : 2009년 8월 13일

장 선택성 광섬유 필터 중에서 Sagnac 복굴절 루프(Sagnac birefringence loop: 이하 SBL)를 바탕으로 하는 복굴절 필터는 그 사용 편이성과 간단한 구조로 인해 많은 관심을 받아왔다. 특히, SBL의 양단에 방향성 결합기(directional-coupler)의 출력 양단을 결합하여 구성되는 Sagnac 복굴절 필터(Sagnac birefringence filter: 이하 SBF)는 간단한 구조로도 주기적인 간섭 스펙트럼(interference spectrum)을 생성시켜 다파장 필터링을 구현할 수 있기 때문에, 광통신, 광센서, 그리고 광신호처리 등 다양한 분야에 적용되어 왔다[1-4]. 그러나 SBF의 파장 스위칭 즉, 필터 채널(channel)의 파장 위치 조절을 위해서는, SBL에 사용되는 편광 유지 광섬유(polarization-maintaining fiber: 이하 PMF)에 물리적 변형이 가해질 수 있는 기계적 및 열적 기법들이 필요하였다[5]. 이러한 파장 스위칭 기법들은 PMF의 내구성에 영향을 미칠 수 있고, 광섬유를 진행하는 편광을 변화시켜 출력 특성을 왜곡시킬 우려도 있다.

본 논문에서는 PMF의 내구성에 어떠한 물리적 손실도 주지 않으면서, 광섬유를 진행하는 빛의 편광만을 편광 조절기(polarization controller: 이하 PC)로 제어하여 채널 파장을 스위칭시킬 수 있는 다파장 스위칭 가능한 광섬유 인터리빙 필터를 제안한다. 제안된 필터는 크게 편광 빔 분배기(polarization beam splitter: 이하 PBS)와 SBL로 구성되는데, 여기서 SBL은 50:50 결합기와 PMF, 그리고 2개의 1/4 파장판(quarter-wave plate: 이하 QWP)으로 구성된다. 제안된 필터에서는 SBL 내부에 위치하는 두 QWP들의 방위각을 적절히 조절함으로써 채널 파장의 스위칭 변위가 간섭 스펙트럼 주기의 절반이 되도록 스위칭시킬 수 있었다. 이러한 반주기 스위칭은 스위칭 전후의 각 다파장 채널들이 서로의 사이에 위치하도록 만드는 효과를 내기 때문에 인터리빙(interleaving)이라고 한다. 제작된 필터에서, 투과형 인터리빙 필터의 채널 고립도(isolation)는 18[dB] 이상, 반사형의 경우 ~3[dB] 정도를 얻을 수 있었다. 또한, 필터의 채널 간격과 스위칭 변위는 필터 형태 즉, 반사(reflection) 및 투과(transmission)형과 관계 없이 각각 ~0.8[nm]와 ~0.4[nm] 정도로 측정되었다.

2. 동작 원리

그림 1은 제안된 필터의 개략도를 나타내며, PBS는 입력되는 빛을 두 개의 직교하는 편광 요소(orthogonal polarization components)로 나누거나, 이 두 요소들을 합하여 하나의 광섬유로 출력 시켜주는 역할을 한다. 그리고, 그림에서 점선으로 표시된 부분은 SBL을 나타내며, 입력 편광에 무관한 다파장 필터로 동작한다[1]. 그림 1에서 빛이 필터에 입력되면 빛은 8개의 경로를 따라서 필터 내부를 진행하며, 이러한 경로들은 반사와 투과형 모두 1-3-4-1, 1-3-4-2, 1-4-3-1, 1-4-3-2, 2-3-4-1, 2-3-4-2, 2-4-3-1, 2-4-3-2로 나타낼 수 있다. 예로 1-3-4-1 경로는 그림 1과 같이 입력 빛이 PBS에서 나와 지점 1에 도달하고, 50:50 결합기를 거쳐 지점 3에 도달한 뒤, PC와 PMF를 거쳐 지점 4에 이르고, 다시 결합기를 통과해 지점 1에 이르는 경로를 의미한다.

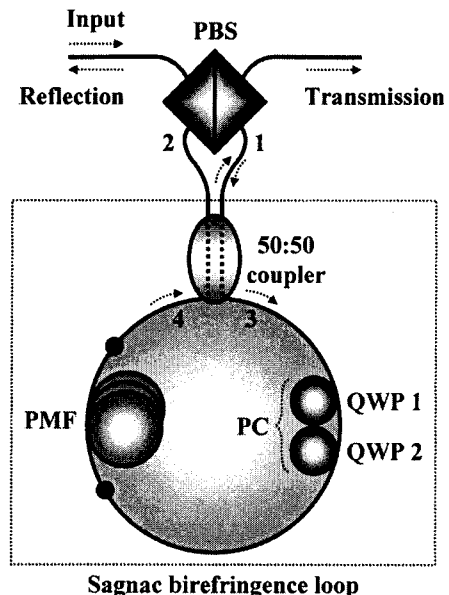


그림 1. 제안된 인터리빙 필터의 모식도(●: PMF와 단일모드 광섬유의 융착접속 지점)
 Fig. 1. Schematic diagram of the proposed interleaving filter(●: fusion splicing points between the PMF and single-mode fiber)

제안된 필터의 이론적인 투과도(transmittivity) 및 반사도(reflectivity)를 구하기 위해서는 필터 내부에서 빛이 겪는 손실을 제외하고, 반사되거나 투과되는 빛만을 계산에 포함시켜야 한다. 따라서 이론적인 계산에서 50:50 결합기, QWP, PBS와 같은 필터에 포함되는 모든 광소자들은 손실이 없는 이상적인 소자라고 가정한다. 상기 8개의 경로를 순서대로 고려하면, 반사 및 투과 출력에 대한 Jones 행렬 RE와 TR을 각각 구할 수 있고[6-7], 이를 통해 아래와 같은 반사도(R) 및 투과도(T)를 구할 수 있다.

$$RE = \frac{1}{2}(iHPQ_2Q_1H + VPQ_2Q_1H + iHQ_1^iQ_2^iP^iH) \quad (1)$$

$$+ i^2VQ_1^iQ_2^iP^iH + i^2HPQ_2Q_1V + iVPQ_2Q_1V + HQ_1^iQ_2^iP^iV + iVQ_1^iQ_2^iP^iV)$$

$$R = 1 - [\sin(\theta_1 - \theta_2)\cos(\theta_1 - \theta_2)\cos(\Gamma/2) + \sin(2\theta_p - \theta_1 - \theta_2)\cos(\theta_1 - \theta_2)\sin(\Gamma/2)]^2 \quad (2)$$

$$TR = \frac{1}{2}(iVPQ_2Q_1H + HPQ_2Q_1H + iVQ_1^iQ_2^iP^iH) \quad (3)$$

$$+ i^2HQ_1^iQ_2^iP^iH + i^2VPQ_2Q_1V + iHPQ_2Q_1V + VQ_1^iQ_2^iP^iV + iHQ_1^iQ_2^iP^iV)$$

$$T = [\sin(\theta_1 - \theta_2)\cos(\theta_1 - \theta_2)\cos(\Gamma/2) + \sin(2\theta_p - \theta_1 - \theta_2)\cos(\theta_1 - \theta_2)\sin(\Gamma/2)]^2 \quad (4)$$

여기서, H, V, P, Q_1, Q_2 는 각각 수평편광자, 수직편광자, PMF, QWP1, QWP2의 Jones 행렬들을 나타낸다. 그리고, $\Gamma = 2\pi BL/\lambda$ 는 복굴절이 B 이고, 길이가 L 인 PMF의 진공중 파장 λ 에서 고속 및 저속축(fast and slow-axis) 요소들 간의 위상차를 나타내고, $\theta_1, \theta_2, \theta_p$ 는 각각 PBS의 수평축(horizontal axis)을 기준으로 QWP1, QWP2, PMF의 고속축 방향각(orientation angle)을 나타낸다. 임의의 방위각 θ_p 에서 PMF의 Jones 행렬 P 는 회전행렬 R 을 이용하여 $R(-\theta_p) \begin{bmatrix} e^{i\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma/2} \end{bmatrix} R(\theta_p)$ 로 표현된다. 여기서, $R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 이고, P_i 는 빛의 진행경로가 반사

계 방향일 경우 PMF의 Jones 행렬을 표현하는 것으로 θ_p 대신 $(-\theta_p)$ 가 적용된다. Q_1, Q_2 도 임의의 방위각 θ_1, θ_2 에 대해서 P와 마찬가지로 표현되어야 한다. 식 (2)와 (4)를 살펴보면, θ_1 과 θ_2 의 값에 따라서 필터의 진폭 그리고, 스펙트럼이 최고/최소일 때의 파장이 변하는 것을 알 수 있다. 이 수식들에서 PBS의 두 출력단으로 나와서 SBL로 입력되는 빛의 세기 분포는 입력 편광에 의존하지만, 필터의 출력(R 또는 T)은 입력 편광에 무관하다는 것을 알 수 있다.

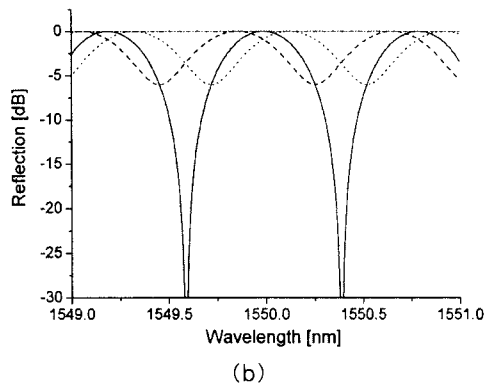
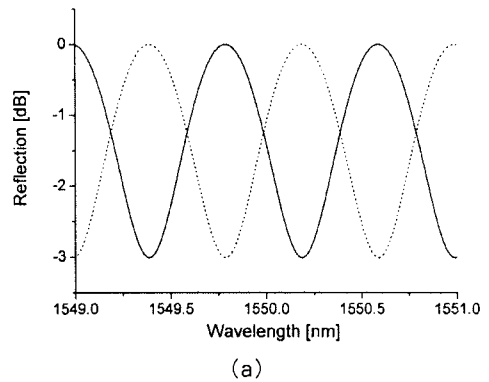


그림 2. (a) 인터리빙 동작 조건과 (b) 그 외의 조건에서의 제안된 필터의 계산된 반사 스펙트럼
Fig. 2. Calculated reflection spectra at (a) interleaving sets and (b) other QWP sets for channel switching

우선 수식 (2)로 표현되는 필터의 반사도를 살펴보면, 반사형 필터의 특성은 QWP 방위각들의 조합 (θ_1, θ_2)에 따라 4개의 범주로 나눌 수 있다. 각각은

편광 빔 분배기와 광섬유 결합기를 이용한 광섬유 인터리빙 필터

[a] 반사형 인터리빙 필터, [b] 30[dB]이상의 채널 고립도를 갖는 반사형 파장 선택성 다파장 필터, [c] 100[%] 반사기, 그리고 [d] 채널 고립도는 동일하지만 서로 인터리빙 동작은 할 수 없는 반사형 파장 선택성 다파장 필터 한 쌍이다. 4개의 범주 중에서 [a] 범주는 단지 SBF만 사용할 경우 구현이 불가능하며, 본 논문에서는 QWP를 조절하여 최적 QWP 각도 조합(인터리빙 설정)에서 [a] 범주를 구현할 수 있다. 다시 말해, 인터리빙 설정인 (θ_1, θ_2) 에서 서로 180[°]의 위상차를 갖는 간섭 패턴 형태의 주기적인 다파장 스펙트럼 한 쌍을 얻을 수 있다.

그림 2 (a)는 QWP의 인터리빙 설정에서 계산된 필터의 반사 스펙트럼을 보여주고 있으며, (b)는 그 외의 조건에서 계산된 필터의 반사 스펙트럼을 보여 준다. 그림 2 (a)의 인터리빙 동작을 위한 두 QWP 각도 조합 (θ_1, θ_2) 는 각각 실선부와 점선부가

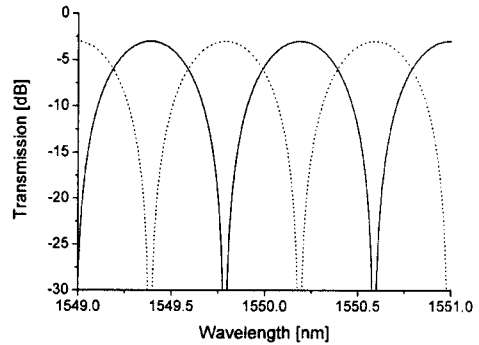
$$\left\{ \theta_p - \left\{ (n-m-1) - \frac{1}{4} [(-1)^n - (-1)^m] \right\} \frac{\pi}{2}, \right. \\ \left. \theta_p - \left\{ (n+m-1) - \frac{1}{4} [(-1)^n + (-1)^m] \right\} \frac{\pi}{2} \right\} \text{ 및} \\ \left\{ \theta_p - \left\{ (n-m) - \frac{1}{4} [(-1)^n - (-1)^m] \right\} \frac{\pi}{2}, \right. \\ \left. \theta_p - \left\{ (n+m) - \frac{1}{4} [(-1)^n + (-1)^m] \right\} \frac{\pi}{2} \right\}$$

로 표현된다(단, n 과 m 은 정수).

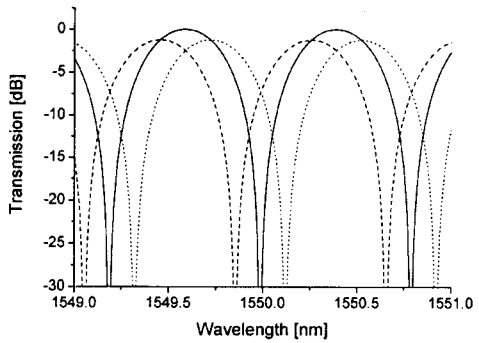
인터리빙 설정을 제외한 일반적인 QWP 각도 조합에 대해서는 그림 2 (b)에 보이는 것과 같은 스펙트럼 특성을 보인다. 여기서, 실선 스펙트럼은 [b] 범주, 단속점선(dash-dotted line)의 평평한 스펙트럼은 [c] 범주, 그리고 단속선(dashed line) 및 점선으로 된 두 스펙트럼은 [d] 범주를 나타낸다. 실선 스펙트럼은 $(\theta_p - [2n-1]\pi/4, \theta_p - [2n-1]\pi/4)$ 와 같은 QWP 각도 조합(n 은 정수)에서 얻어지며, 필터의 채널 고립도는 30[dB] 이상이지만, 이 범주에서 인터리빙 동작이 구현되는 QWP 각도 조합은 존재하지 않는다. 그리고 단속점선 스펙트럼은 $(\theta_p - n\pi/2, \theta_p - n\pi/2)$ 또는 $\theta_1 - \theta_2 = [2m-1]\pi/2$ (n, m 은 정수)를 만족하는 QWP 각도 조합에서 얻어지며, 100[%]의 반사도를 갖는 거울과 같은 특성을 보인다. 단속선 및 점

선으로 된 두 스펙트럼은 각각 $(\theta_p - \pi/4, \theta_p - \pi/12)$ 와 $(\theta_p - \pi/4, \theta_p - 5\pi/12)$ 의 QWP 각도 조합에서 얻어지며, 채널의 파장 위치는 서로 다르지만 채널 고립도는 동일하다. 이 범주에서도 마찬가지로 인접한 두 채널이 인터리빙 동작을 하도록 만들어주는 QWP 각도 조합은 없었다. 인터리빙 설정을 제외한 위와 같은 범주들([b], [c], [d])의 이론적 스펙트럼 특성은 실험을 통해 확인되었다.

두 수식 (2)와 (4)를 비교하면 투과와 반사 스펙트럼 사이에 상보적 관계(complementary relationship)가 있음을 알 수 있다. 그러므로 수식 (4)를 바탕으로 한 투과형 필터의 특성 또한 QWP 각도 조합에 의존하는 4개의 범주로 분류될 수 있음을 예상할 수 있고, 특히 각 범주에서의 투과 스펙트럼은 해당



(a)



(b)

그림 3. (a) 인터리빙 동작 조건과 (b) 그 외의 조건에서의 제안된 필터의 계산된 투과 스펙트럼
Fig. 3. Calculated transmission spectra at (a) interleaving sets and (b) other QWP sets for channel switching

범주의 반사 스펙트럼과 상보적 관계를 갖는 스펙트럼으로 대응시킬 수 있다. 여기서, 4개의 범주는 각각 [a] 투과형 인터리빙 필터, [b] 30[dB] 이상의 채널 고립도를 갖는 투과형 다파장 필터, [c] 100[%] 흡수기(absorber), 그리고 [d] 채널 고립도는 동일하지만, 인터리빙 동작은 구현될 수 없는 투과형 다파장 필터 쌍이다. 반사형 필터의 경우와 마찬가지로, 4개의 범주들 중에서 인터리빙 동작을 구현하기 위해서는 [a] 범주의 특성을 이용하여야 한다.

그림 3 (a)는 QWP의 인터리빙 설정에서 계산된 필터의 투과 스펙트럼을 보여주고 있으며, (b)는 그 외의 조건에서 계산된 필터의 투과 스펙트럼을 보여준다. 그림 3 (a)에서 QWP의 인터리빙 설정은 그림 2 (a)의 경우와 동일하며, 그림 3 (b)에서 실선은 [b] 범주, 단속선 및 점선은 [d] 범주를 나타내며, 편의상 [c] 범주는 그래프에서 생략하였다. 모든 경우에서 QWP 각도 조합 (θ_1, θ_2)는 반사형 필터의 해당 범주들의 조합과 동일하였으며, 필터 특성 또한, 100[%] 흡수기의 경우([c] 범주)를 제외하면 동일한 경향을 보였다. 투과형 필터 역시 각 범주들의 스펙트럼 특성은 실험을 통해 확인하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

이론적으로 예측한 필터의 응답 특성을 실험적으로 검증하기 위해서 그림 1과 같이 PBS(OZ Optics), PMF(Fibercore), 50:50 결합기, 그리고 두 개의 QWP(OZ Optics)를 사용하여 제안된 필터를 제작하였다. 그림의 점 표시(·)는 PMF와 단일모드 광섬유(single-mode fiber: 이하 SMF)간의 융착접속(fusion splicing) 지점을 나타낸다. 실험에 사용된 나비넥타이(bow-tie)형 PMF의 복굴절 및 길이는 각각 $\sim 4.8 \times 10^{-4}$ 와 6.25[m]이었고, 여기서 PMF의 길이는 필터의 채널 간격이 0.8[nm]가 되도록 설계되었다(채널 간격 = $\lambda c/BL$, λc : 중심 파장). 그리고, PMF 복굴절의 온도 의존성 효과를 최소화시키기 위해, 물로 채워진 스티로폼(styrene foam) 보온함에 PMF를 넣고 그 주변을 일정한 온도로 유지시켰다.

그림 4 (a)와 4 (b)는 각각 인터리빙 동작 조건에

서 측정된 제안된 필터의 반사 및 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 이론적인 예상과 마찬가지로 서로 상보적 관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 측정된 결과는 이론적 예상치와 비교하면, 채널의 진폭과 파장 위치에서 약간의 차이를 보이는데, 이는 각각 50:50 결합기와 PBS의 삽입 손실의 불균일성(unevenness) 그리고, 실험에 사용된 PMF의 방위각 θ_p 와 이론적 계산에 사용된 θ_p 의 불일치에 기인한다. 반사 및 투과형 필터의 통상적인 채널 고립도는 각각 ~ 3 [dB]와 ~ 18 [dB]로 측정되었고, 삽입 손실은 각각 6.1[dB]와 9.0[dB] 이하로 측정되었다. 투과형의 경우 채널 고립도는 반사형보다 훨씬 컸지만, 삽입 손실은 ~ 3 [dB]가 더 증가하여 서로 상보적 관계를 보였다.

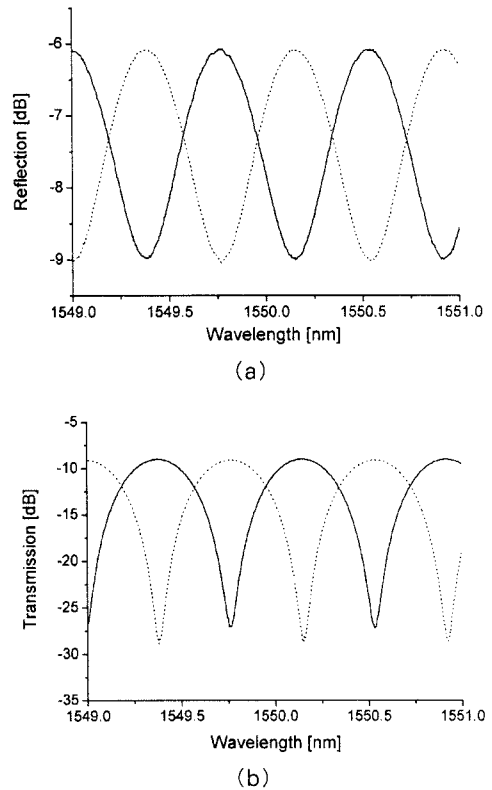


그림 4. 인터리빙 동작 조건에서 측정된 제안된 필터의 (a) 반사 스펙트럼과 (b) 투과 스펙트럼
Fig. 4. Measured (a) reflection and (b) transmission spectra of the proposed filter at interleaving sets

편광 빔 분배기와 광섬유 결합기를 이용한 광섬유 인터리빙 필터

여기서 삽입 손실은 주로 QWP(전체: $\sim 1.5[\text{dB}]$), PBS(한 방향: $\sim 0.93[\text{dB}]$, 전체: $\sim 1.16[\text{dB}]$), 50:50 결합기(한 방향: $\sim 0.58[\text{dB}]$, 전체: $\sim 1.16[\text{dB}]$), 그리고 PMF와 SMF간 용착접속 손실($\sim 1.47[\text{dB}]$)에 의해 발생하였다. 이러한 삽입손실은 저손실 파장판 및 PBS를 사용하고, 용착접속 손실을 개선함으로써 줄일 수 있다. 추가적으로, 두 QWP의 각도를 고정시켰을 경우, 스펙트럼의 평평함(flatness)은 $\sim 0.12[\text{dB}]$ 이하로 측정되었다. 특히, 필터의 입력편광에 대한 무관함을 조사해보기 위해서, 필터의 입력단에 추가적인 PC(Agilent 8169 A)를 설치하고, PC 내부의 QWP 및 1/2 파장판(half-wave plates)을 조절하면서 출력 스펙트럼의 편광 민감도를 측정하였다. 이 때, PC 내부의 파장판들은 입력편광이 모든 편광 상태를 가질 수 있도록 임의의 방향으로 회전시키면서 측정을 수행하였다.

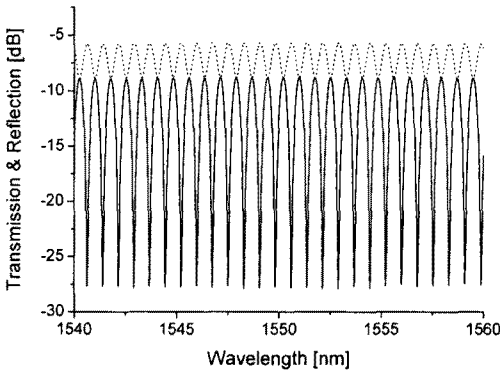


그림 5. 인터리빙 동작 조건 중 한 조건에서 20(nm)의 파장 영역에 걸쳐 측정된 반사 및 투과 스펙트럼
Fig. 5. Reflection and transmission spectra of the proposed filter measured at one of the interleaving sets over a wide wavelength range of 20(nm)

그림 5는 인터리빙 동작 조건 중 한 조건에서 20[nm]의 파장 영역에 걸쳐 측정한 반사(점선) 및 투과(실선) 스펙트럼을 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이, 반사와 투과 스펙트럼은 에너지의 보존 법칙을 따르기 위해서 서로 상보적 관계를 갖는 것을 확인할 수 있다. 20[nm]에 해당하는 넓은 파장 영역에서 반사 및 투과 스펙트럼의 평평함은 필터 내부

의 두 QWP를 고정시켰을 경우 $\sim 0.12[\text{dB}]$ 이하로 측정되었다. 특히, 제안된 필터의 스위칭 속도는 ns의 응답시간을 갖는 전기적으로 제어되는 리튬 나이오베이트(lithium niobate) 기반의 PC를 사용함으로써 크게 향상될 수 있다[8].

4. 결 론

본 논문에서는 입력 편광에 무관한 반사형 및 투과형 인터리빙 필터를 제안하고 그 특성을 분석하였다. 필터 내부의 QWP를 조절함으로써 채널 파장을 스위칭할 수 있도록 구현하였고, 반사 및 투과형 필터의 통상적인 채널 고립도는 각각 $\sim 3[\text{dB}]$ 와 $\sim 18[\text{dB}]$ 를 얻을 수 있었으며, 삽입 손실은 각각 6.1[dB]와 9.0[dB] 이하로 측정되었다. 제안된 필터의 채널 파장 스위칭 능력은 기존 SBF의 스펙트럼 영역이 고정되는 한계를 극복하고, 필터 적용범위를 확장시킬 수 있으며, 특히 파장 선택성 인터리빙 필터로서 광섬유 레이저나 센서에도 적용될 수 있다 [9-10].

감사의 글

이 논문은 2008학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PKS-2008-006).

References

- [1] X. Fang and R. O. Claus, "Polarization-independent all-fiber wavelength division multiplexer based on a Sagnac interferometer," *Optics Letters*, Vol.20, No.20, pp. 2146-2148, 1995.
- [2] X. Fang, H. Ji, C. T. Allen, K. Demarest, and L. Pelz, "A compound high-order polarization-independent birefringence filter using Sagnac interferometers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.9, No.4, pp. 458-460, 1997.
- [3] S. Chung, J. Kim, B.-A. Yu, and B. Lee, "A fiber Bragg grating sensor demodulation technique using a polarization-maintaining fiber loop mirror," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.13, No.12, pp. 1343-1345, 2001.
- [4] S. Chung, B.-A. Yu, and B. Lee, "Phase response design of a polarization-maintaining fiber loop mirror for dispersion compensation," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.15, No.5, pp. 715-717, 2003.
- [5] Y. Shiquan, L. Zhachui, D. Xiaoyi, Y. Shuzhong, K. Guiyun, and Z. Qida, "Generation of wavelength-switched optical pulse from a fiber ring laser with an F-P

semiconductor modulator and a HiBi fiber loop mirror," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.14, No.6, pp. 774-776, 2002.

- [6] R. C. Jones, "New calculus for the treatment of optical system," Journal of Optics Society of America, vol. 31, pp. 488-492, 1941.
- [7] Y. W. Lee, J. Jung, and B. Lee, "Multiwavelength-switchable SOA-fiber ring laser based on polarization-maintaining fiber loop mirror and polarization beam splitter," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.16, No.1, pp. 54-56, 2004.
- [8] F. Heismann and M. S. Whalen, "Broadband reset-free automatic polarization controller," Electronics Letters, Vol.27, No.4, pp. 377-379, 1991.
- [9] X. P. Dong, S. Li, K. S. Chiang, M. N. Ng, and B. C. B. Chu, "Multiwavelength-doped fiber laser based on a high-birefringence fiber loop mirror," Electronics Letters, Vol.36, No.19, pp. 1609-1610, 2000.
- [10] S. Roh, S. Chung, Y. W. Lee, I. Yoon, and B. Lee, "Channel-spacing- and wavelength-tunable multiwavelength fiber ring laser using semiconductor optical amplifier," IEEE Photonics Technology Letters, Vol.18, No.21, pp. 2302-2304, 2006.

◇ 저자소개 ◇

장 옥 (張 旭)

1988년 8월 25일생. 2009년 8월 부경대학교 전기공학과 졸업. 2009년 8월 부경대학교 대학원 전기공학과 입학. 현재 부경대학교 전기공학과 대학원 재학(석사과정).

이용옥 (李鎔旭)

1975년 4월 25일생. 1998년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업. 2000년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기공학과 전임강사.