

편광상이 고리 기반 2차 광섬유 유연 빗살 필터의 투과 스펙트럼 특성 분석

(Analysis of Transmission Spectrum Characteristics of Second-Order Fiber Flexible Comb Filter Based on Polarization-Diversity Loop)

박경수* · 이용욱**

(Kyoungsoo Park · Yong Wook Lee)

Abstract

In this paper, we propose a second-order fiber flexible comb filter based on a polarization-diversity loop(PDL). The proposed filter consists of a polarization beam splitter, four half-wave plates(HWPs), and three high birefringence fiber(HBF) segments. In the previous Solc-type second-order filter based on the PDL, HBF segments were fusion-spliced with a fixed angle offset between their principal axes with each other. But, the proposed filter implemented by inserting two HWPs between three HBF segments has a great flexibility in adjusting relative angular difference between the principal axes of two adjacent HBF segments. Owing to this flexibility, second-order transmission spectra, which had a channel spacing of $\sim 0.8\text{nm}$, could be interleaved by controlling the orientation angles of four HWPs. The output transmission spectra of the proposed filter were theoretically analyzed and experimentally verified.

Key Words : Fiber Comb Filter, High Birefringence Fiber, Polarization-Diversity Loop

1. 서 론

편광상이 고리(polarization-diversity loop: 이하 PDL) 구조를 기반으로 하는 광섬유 빗살 필터(optical fiber comb filter)는 다파장 선택(multiwavelength selection) 특성을 갖는 필터로서 편광 빔 분배기(polarization beam splitter: 이하 PBS)를 이용하여 사냥 복굴절 간섭계(Sagnac birefringence interferometer)를 구성함으로써 구현되며, 구조의 단순성과 사용의 편의성, 그리고 입력 편광 무관성 등의 여러 장점을 갖는다[1-2]. 이러한 광섬유 빗살 필터는

* Main author : Pukyong National University, Interdisciplinary Program of Biomedical Mechanical & Electrical Engineering
** Corresponding author : Pukyong National University, School of Electrical Engineering, Associate Professor; Pukyong National University, Interdisciplinary Program of Biomedical Mechanical & Electrical Engineering, Associate Professor
Tel : 051-629-6323, Fax : 051-629-6305
E-mail : yongwook@pknu.ac.kr
Received : 2015. 7. 12.
Accepted : 2015. 10. 6.

다파장 광섬유 레이저(fiber laser), 고속 파장 분기(wavelength routing), 광 레이블 스위칭(all-optical label switching), 그리고 광 펄스열 발생(optical pulse train generation)과 같은 여러 응용 분야에 적용될 수 있다[3-5]. PDL 기반 빗살 필터의 사냥 고리 즉, PDL 내에 고복굴절 광섬유(high-birefringence fiber: 이하 HBF)를 여러 개 사용할 경우, 평탄한 투과 스펙트럼(transmission spectrum)을 얻을 수 있는 고차 빗살 필터를 만들 수 있으며, 특히 동일 길이의 HBF들을 HBF의 주축(principal axis) 간 일정한 각도 차가 나도록 연결하면 Solc형 고차 빗살 필터를 구현할 수 있다[6-7]. 기존의 PDL 기반 2차 Solc형 빗살 필터의 경우 세 HBF들을 주축 간 각도가 30°씩 차이가 나도록 결합하여 2차 빗살 필터 형태의 평탄 대역 모드(flat-top band mode) 및 협대역 모드(narrow-band mode) 스펙트럼 특성을 나타내었다[7]. 그러나 주축 간 각도 차가 고정되었기 때문에 평탄 대역 및 협대역 모드 스펙트럼들에서의 파장 스위칭은 불가능하였다. 본 논문에서는 PDL 기반 2차 Solc형 빗살 필터 구조에서 각 HBF 사이에 1/2 파장판(half-wave plate: 이하 HWP)을 삽입함으로써 각 HBF의 주축 간 각도 차를 유효하게 조절 가능하도록 구현하였다. 이를 통해 Solc형 복굴절 조합에서 Fan 방식과 Folded 방식 복굴절 조합을 자유롭게 선택할 수 있어 PDL 기반 2차 빗살 필터에서 고차 투과 스펙트럼의 파장 스위칭을 구현할 수 있었다. 제안된 필터의 출력 스펙트럼 특성은 이론적으로 분석되었고, 분석된 결과는 실험적으로 증명되었으며, HWP를 적절히 조절하여 평탄 대역 및 협대역 모드에서의 인터리빙(interleaving) 동작을 구현할 수 있었다.

2. 필터의 구성 및 동작 원리

2.1 제안된 필터의 구조

그림 1은 PDL 기반 2차 광섬유 유연 빗살 필터의 모식도를 보여주고 있다. 제안된 필터에서 PDL은 한 개의 PBS(OZ Optics), 세 개의 HBF 묶음(Fibercore), 네 개의 HWP(OZ Optics)로 구성된다. 광대역 광원

(Fiberlabs ASE-FL7004)에서 출력되는 빛이 제안된 필터의 IN 단자로 입력되면, 입력된 빛은 PBS에 의해서로 직교하는 선형 편광 성분(수평 및 수직 선형 편광 성분)들로 나뉜다. 수평 및 수직 선형 편광 성분들은 각각 PBS의 출력 단자 1과 2로 출력되고, 이렇게 출력된 빛은 각각 시계(clockwise: 이하 CW) 및 반시계(counterclockwise: 이하 CCW) 방향으로 PDL 내의 사냥 고리 내부를 회전하게 된다. HBF들 사이 또는 PBS와 HBF 사이에 삽입된 HWP들은 필터 내부를 순환하는 빛의 편광 상태를 제어하거나 HBF들의 주축 간 각도 차를 조절하기 위해 사용되며, 이를 통해 제안된 필터의 투과 스펙트럼 특성을 조절할 수 있다. 그리고, 제안된 필터의 투과 스펙트럼 특성은 필터의 IN 단자에 광대역 광원을 입력시킨 뒤, 필터의 OUT 단자 출력을 광 스펙트럼 분석기(Yokogawa AQ6370C)로 측정하여 측정된 스펙트럼을 기반으로 분석하였다.

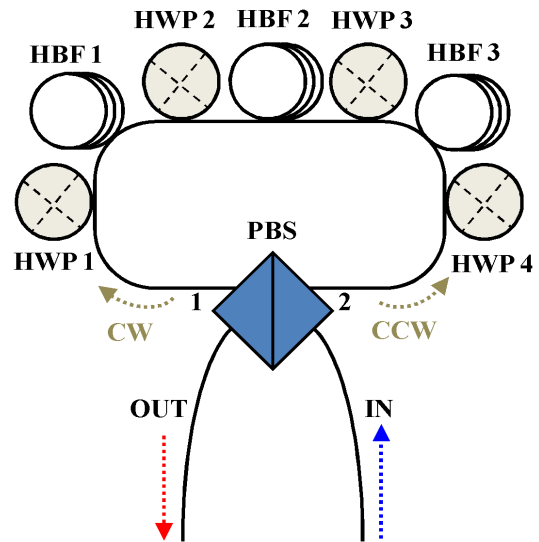


Fig. 1. Schematic diagram of second-order fiber flexible comb filter based on PDL

2.2 제안된 필터의 동작 원리

제안된 광섬유 빗살 필터에서 PDL 내부로 진행하는 빛은 HBF의 복굴절에 의해 두 주축(고속 및 저속 축)에 따라 정렬된 선형 편광 성분들 간에 위상차(phase difference)가 발생하고, 위상차를 갖는 두 선

형 편광 성분들이 필터 출력단에서 하나의 편광으로 합쳐지게 되면 간섭(interference)을 일으키게 된다[7]. 그림 2는 제안된 필터 내에서 진행되는 빛이 입력단을 거쳐 각 필터 구성 요소들을 순서대로 거치는 과정을 보여주고 있다. 필터로 입력된 빛은 PBS의 출력 단자 1과 2로 출력된 뒤 각각 CW 및 CCW 방향으로 회전하게 되며, 우선 CW 방향으로 진행되는 수평 편광된 빛은 HWP 1, HBF 1, HWP 2, HBF 2, HWP 3, HBF 3, HWP 4를 지나 수평 편광기(PBS의 단자 2에서 단자 OUT으로의 통과)를 거쳐 출력된다. 한편, CCW 방향으로 진행되는 수직 편광된 빛은 CW 방향의 경우와는 반대로 HWP 4, HBF 3, HWP 3, HBF 2, HWP 2, HBF 1, HWP 1을 지나 수직 편광기(PBS의 단자 1에서 단자 OUT으로의 통과)를 거쳐 출력된다.

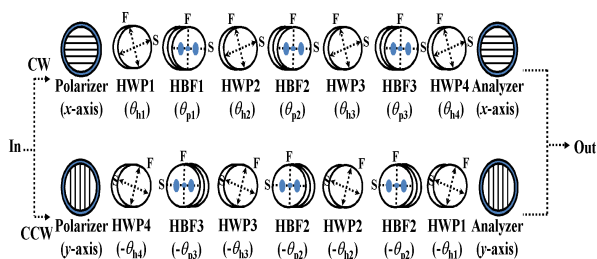


Fig. 2. Propagation path of light circulating within proposed filter

CW 및 CCW 방향으로 회전하며 필터를 통과한 두 출력 광은 각각 간섭 스펙트럼을 생성하고, 서로 직교하는 편광을 갖기 때문에 최종적으로는 두 간섭 스펙트럼들이 서로 중첩(superposition)되어 출력된다. 상기 광학 요소들 중 HBF는 간섭 스펙트럼을 만드는 복굴절 요소로 작용하며, HWP는 HBF에 입사되는 빛의 편광을 조절하거나, HBF들의 주축 간 실효 각도(effective angle) 차를 조절하는 역할을 한다. PBS는 CW 및 CCW 각 경로의 입력과 출력단에서 편광기 역할을 수행하며, 각 경로에서 HBF에 의해 위상차가 발생한 두 직교 편광 성분들 간에 편광 간섭(polarization interference)이 발생되도록 만든다. 특히 PBS는 각 경로에서 만들어진 두 간섭 스펙트럼들이 출력단에서 중첩되도록 하는 역할도 수행한다. 그림 2와 같이 모

델링된 빛의 진행 경로를 고려하면, CW와 CCW 방향으로 각각 진행되는 빛의 경로들에 대한 존스 전달 행렬(Jones transfer matrix) T_{CW} 와 T_{CCW} 를 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{CW} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} T_{H4}(\theta_{h4}) T_{P3}(\theta_{p3}) T_{H3}(\theta_{h3}) T_{P2}(\theta_{p2}) \\ \times T_{H2}(\theta_{h2}) T_{P1}(\theta_{p1}) T_{H1}(\theta_{h1}) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$T_{CCW} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} T_{H1}(-\theta_{h1}) T_{P1}(-\theta_{p1}) T_{H2}(-\theta_{h2}) \\ \times T_{P2}(-\theta_{p2}) T_{H3}(-\theta_{h3}) T_{P3}(-\theta_{p3}) \\ \times T_{H4}(-\theta_{h4}) \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

T_{CW} 와 T_{CCW} 에서 θ_{h1} , θ_{p1} , θ_{h2} , θ_{p2} , θ_{h3} , θ_{p3} , θ_{h4} 는 필터를 구성하는 광학 요소들 즉, HWP 1, HBF 1, HWP 2, HBF 2, HWP 3, HBF 3, HWP 4의 방위각(orientation angle)들을 각각 나타낸다. 또한, T_{H1} , T_{P1} , T_{H2} , T_{P2} , T_{H3} , T_{P3} , T_{H4} 는 순서대로 상기 광학 요소들의 개별 존스 행렬을 의미한다. 그리고, 제안된 필터의 전체 존스 전달 행렬 T 는 아래의 식과 같이 T_{CW} 와 T_{CCW} 의 행렬 합으로 구할 수 있다. 특히 전체 전달 행렬 $T = T_{CW} + T_{CCW}$ 를 이용하여 아래와 같이 필터의 투과도(transmittance) t_{filter} 도 얻을 수 있다.

$$t_{filter} = \left\{ \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \cos^2 \frac{\Gamma}{2} [\cos 2(\theta_{h1} - \theta_{h2} - \theta_{h3} + \theta_{h4} + \theta_{p2}) \right. \\ + \cos 2(\theta_{h1} + \theta_{h2} - \theta_{h3} + \theta_{h4} - \theta_{p1}) \\ + \cos 2(\theta_{h1} - \theta_{h2} + \theta_{h3} + \theta_{h4} - \theta_{p3})] \\ \left. - \sin^3 \frac{\Gamma}{2} \cos 2(\theta_{h1} + \theta_{h2} + \theta_{h3} + \theta_{h4} - \theta_{p1} - \theta_{p2} - \theta_{p3}) \right\}^2 \\ + \left\{ \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \cos^2 \frac{\Gamma}{2} [\cos 2(\theta_{h1} + \theta_{h2} + \theta_{h3} - \theta_{h4} - \theta_{p1} - \theta_{p2}) \right. \\ + \cos 2(\theta_{h1} - \theta_{h2} - \theta_{h3} - \theta_{h4} + \theta_{p2} + \theta_{p3}) \\ + \cos 2(\theta_{h1} + \theta_{h2} - \theta_{h3} - \theta_{h4} - \theta_{p1} + \theta_{p3})] \\ \left. - \cos^3 \frac{\Gamma}{2} \cos 2(\theta_{h1} - \theta_{h2} + \theta_{h3} - \theta_{h4}) \right\}^2$$

여기서 $\Gamma = 2\pi BL/\lambda$ 이며, B, L, λ 는 각각 HBF의 복굴절, HBF의 길이, 파장을 의미한다. 상기 투과도에서 HWP들의 방위각이 특정한 값을 갖는 경우에만 고차(2차) 특성을 지닌 투과 스펙트럼을 얻을 수 있고, 각 고차 투과 모드에 해당하는 투과도는 식 (1)~(4)와 같이 표현된다. 여기서 식 (1)의 t_f 와 식 (2)의 $t_{f,i}$ 는 각각 2차 평탄 대역 및 인터리빙된 2차 평탄 대역 모드의 투과도를 나타내고, 식 (3)의 t_n 과 식 (4)의 $t_{n,i}$ 는 각각 2차 협대역 및 인터리빙된 2차 협대역 모드의 투과도를 나타낸다.

$$t_f = 4\sin^2\frac{\Gamma}{2}\cos^4\frac{\Gamma}{2} - 4\sin^4\frac{\Gamma}{2}\cos^2\frac{\Gamma}{2} \quad (1)$$

$$+ \sin^6\frac{\Gamma}{2} + \frac{27}{4}\sin^4\frac{\Gamma}{2}\cos^2\frac{\Gamma}{2}$$

$$t_{f,i} = 4\sin^4\frac{\Gamma}{2}\cos^2\frac{\Gamma}{2} - 4\sin^2\frac{\Gamma}{2}\cos^4\frac{\Gamma}{2} \quad (2)$$

$$+ \cos^6\frac{\Gamma}{2} + \frac{27}{4}\sin^2\frac{\Gamma}{2}\cos^4\frac{\Gamma}{2}$$

$$t_n = \frac{1}{4}\sin^4\frac{\Gamma}{2}\cos^2\frac{\Gamma}{2} \quad (3)$$

$$- \sin^2\frac{\Gamma}{2}\cos^4\frac{\Gamma}{2} + \cos^6\frac{\Gamma}{2}$$

$$t_{n,i} = \frac{1}{4}\sin^2\frac{\Gamma}{2}\cos^4\frac{\Gamma}{2} \quad (4)$$

$$- \sin^4\frac{\Gamma}{2}\cos^2\frac{\Gamma}{2} + \sin^6\frac{\Gamma}{2}$$

표 1은 식 (1)~(4)에 제시된 각 투과도(투과 모드)가 얻어지는 HWP들의 방위각 $\theta_{H1}, \theta_{H2}, \theta_{H3}, \theta_{H4}$ 를 나타내고 있다. 표에서 HBF들의 방위각($\theta_{p1}, \theta_{p2}, \theta_{p3}$)이 HWP들의 방위각을 결정하는 것을 알 수 있다. 그런데, 표에 제시된 모든 투과 모드들은 HBF들이 특정한 주축 간 각도 차를 이루어야 가능하므로[7], 특정한 HWP 방위각들에서 상기 투과 모드들이 얻어진다는 것은 HBF 사이에 있는 HWP가 HBF들의 주축 간 상대적 각도 차를 변화시킬 수 있다는 것을 의미한다. 표 1로부터 평탄 대역 모드 및 인터리빙된 평탄 대역

모드는 HWP 2와 HWP 4의 방위각을 조절함으로써 투과 모드 간 스위칭이 가능하다는 것을 알 수 있으며, 협대역 모드와 인터리빙된 협대역 모드도 HWP 2와 HWP 4의 방위각을 조절하여 모드 간 스위칭이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Various transmission modes according to orientation angles of four HWPs(i is an integer.)

	θ_{H1}	θ_{H2}	θ_{H3}	θ_{H4}
평탄 대역 모드(t_f)	$\theta_{p1}/2+$ ($6i-1$) $\times \pi/24$	$(\theta_{p1}+\theta_{p2})$ $/2$ $+\pi/12$	$(\theta_{p2}+\theta_{p3})$ $/2$ $-\pi/12$	$\theta_{p3}/2+$ ($6i+1$) $\times \pi/24$
인터리빙된 평탄 대역 모드($t_{f,i}$)	$\theta_{p1}/2+$ ($6i-1$) $\times \pi/24$	$(\theta_{p1}+\theta_{p2})$ $/2$ $-\pi/12$	$(\theta_{p2}+\theta_{p3})$ $/2$ $-\pi/12$	$\theta_{p3}/2+$ ($6i-1$) $\times \pi/24$
협대역 모드(t_n)	$\theta_{p1}/2+$ ($6i-1$) $\times \pi/24$	$(\theta_{p1}+\theta_{p2})$ $/2$ $+\pi/12$	$(\theta_{p2}+\theta_{p3})$ $/2$ $-\pi/12$	$\theta_{p3}/2+$ ($6i-5$) $\times \pi/24$
인터리빙된 협대역 모드($t_{n,i}$)	$\theta_{p1}/2+$ ($6i-1$) $\times \pi/24$	$(\theta_{p1}+\theta_{p2})$ $/2$ $-\pi/12$	$(\theta_{p2}+\theta_{p3})$ $/2$ $-\pi/12$	$\theta_{p3}/2+$ ($6i+5$) $\times \pi/24$

2.3 이론적 스펙트럼 특성 분석

그림 3 (a)와 3 (b)는 이론적으로 계산된 평탄 대역 및 협대역 모드 투과 스펙트럼들을 보여주고 있으며, 각 그림에서 역삼각형 기호로 표시된 스펙트럼은 원형 기호로 표시된 스펙트럼이 인터리빙된 것을 나타낸다. 채널 간격(channel spacing)은 국제전기통신연합(ITU)에서 규정한 0.8nm(중심파장: 1550nm)로 설정하기 위해, $\sim 4.58 \times 10^{-4}$ 의 복굴절을 가지는 HBF의 길이를 ~ 6.55 m로 설정하였다. 여기서 HWP의 파장 의존성과 필터를 구성하는 광학 요소들의 삽입 손실(insertion loss)은 고려하지 않았다.

제안된 필터의 대역폭(bandwidth) 비교를 위해 그림 4에 기본형 필터(conventional filter)의 스펙트럼과 제안된 필터의 평탄 대역 및 협대역 모드 스펙트럼들을 1550nm 부근에서 나타내었다. 그림에서 평탄 대역 및 협대역 모드에서 투과 스펙트럼의 대역폭은 기본

형과 비교해 각각 훨씬 넓어지거나 줄어들어는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 협대역 모드 스펙트럼에서는 다른 투과 스펙트럼과는 달리 부 모드(side mode)들이 발생하며, 이러한 부 모드들의 주 모드 대비 억제율(side-mode suppression ratio)은 $\sim 19.0\text{dB}$ 이었다. 기본형 필터에 비해 변화된, 제안된 필터의 채널 대역폭을 정량적으로 분석하기 위해 -1 또는 -3dB 대역폭의 채널 간격(0.8nm)에 대한 비율을 성능 지수(figure of merit: 이하 FOM)로 정의하였다.

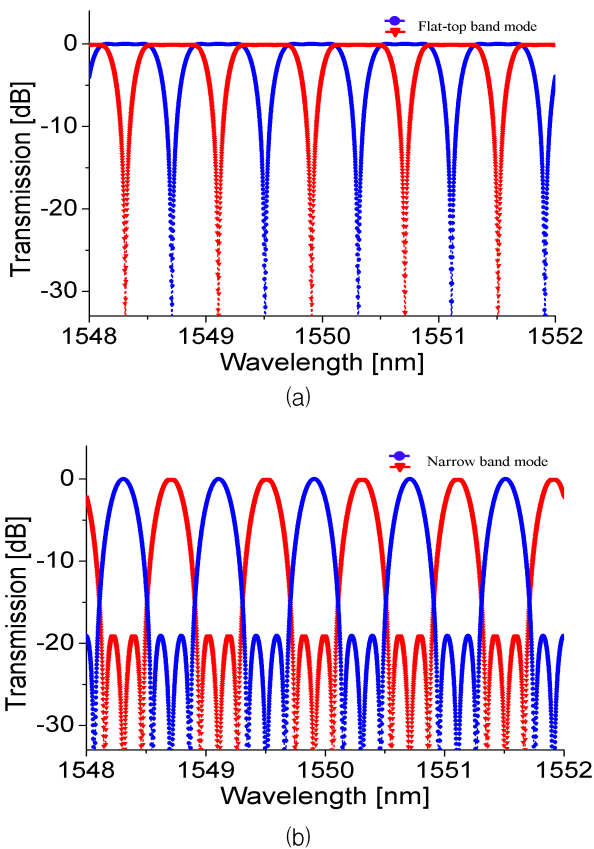


Fig. 3. Calculated transmission spectra in (a) flat-top band and (b) narrow band modes

표 2는 제안된 필터의 두 동작 모드(평탄 대역 및 협대역 모드)와 기본형 필터의 이론적 FOM을 나타내고 있다. 평탄 대역 모드의 경우 -1 및 -3dB 에서의 이론적 FOM은 각각 ~ 62.9 및 $\sim 74.4\%$ 를 나타내며, 이는 투과 대역폭이 기본형 필터에 비해 각각 ~ 109.7 및

$\sim 48.8\%$ 증가되었다는 것을 의미한다. 협대역 모드의 경우 -1 및 -3dB 에서의 이론적 FOM은 각각 ~ 15.1 및 $\sim 25.7\%$ 로 계산되었으며, 이는 투과 대역폭이 기본형 필터에 비해 각각 ~ 49.7 및 $\sim 48.6\%$ 감소되었다는 것을 의미한다.

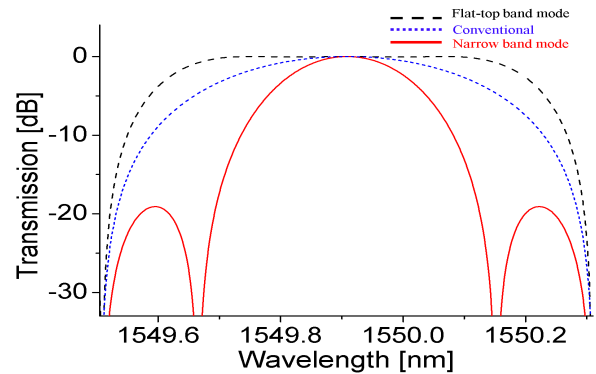


Fig. 4. Bandwidth comparison of theoretically calculated filter spectra

Table 2. Theoretical FOMs at various operation modes of proposed filter

	-1dB FOM(%)	-3dB FOM(%)
평탄 대역 모드	~ 62.9	~ 74.4
협대역 모드	~ 15.1	~ 25.7
기본형	30.0	50.0

2.4 실험적 스펙트럼 특성 분석

그림 5 (a)와 5 (b)는 4nm 의 파장범위에서 측정된 평탄 대역 및 협대역 모드의 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 평탄 대역과 협대역 모드에서의 삽입 손실은 각각 ~ 9.3 과 $\sim 9.2\text{dB}$ 로 측정되었다. 그림 3의 이론적으로 계산된 투과 스펙트럼과 비교할 때 삽입 손실이 증가한 이유는 필터 구성요소인 PBS 및 네 개의 HWP들의 삽입 손실과 단일 모드 광섬유(single-mode fiber: 이하 SMF) 및 HBF 간 용착 접속 손실, 그리고 SMF 간 용착 접속 손실 때문으로 사료된다. 소거율은 평탄 대역과 협대역 모드에서 각각 ~ 18.7 과 $\sim 20.2\text{dB}$ 로 측정되었으며, 협대역 모드의 경우 부 모드 억제율은 $\sim 16.3\text{dB}$ 로 측정되었다. 부 모드 억

제올도 이론적으로 예상된 수치에 비해 $\sim 2.7\text{dB}$ 감소하였으며, 이는 필터를 구성하는 광학 요소들의 연결에 사용된 SMF에 존재하는 미약한 복굴절[8] 또는 HBF들 간의 길이 차이에 의한 것으로 사료된다. 각각의 측정된 투과 스펙트럼들에서 청색 원형 기호와 적색 삼각형 기호는 인터리빙되는 두 스펙트럼들을 보여주고 있으며, 평탄 대역 및 협대역 모드 모두에서 인터리빙이 가능한 것을 확인할 수 있다. 그림 5 (b)에 도시된 측정된 협대역 모드의 경우, 그림 3 (b)에 도시된 이론적 계산 결과와 비교할 때 부 모드들의 스펙트럼 모양이 왜곡된 것을 볼 수 있다. 이러한 왜곡 현상은 필터에 사용된 SMF에 존재하는 미약한 복굴절과 HWP들의 파장 의존성에 의한 것으로 사료된다[8].

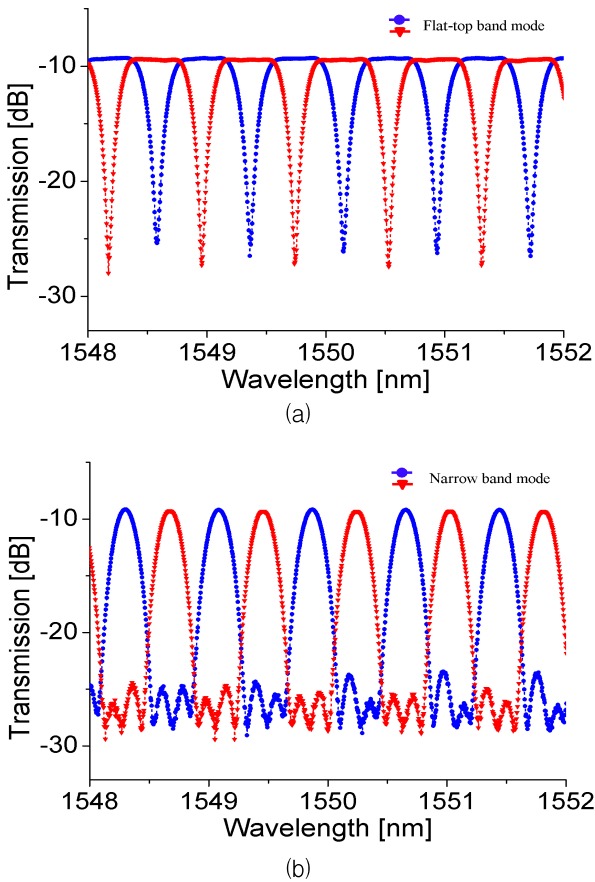


Fig. 5. Measured transmission spectra in (a) flat-top band and (b) narrow band modes

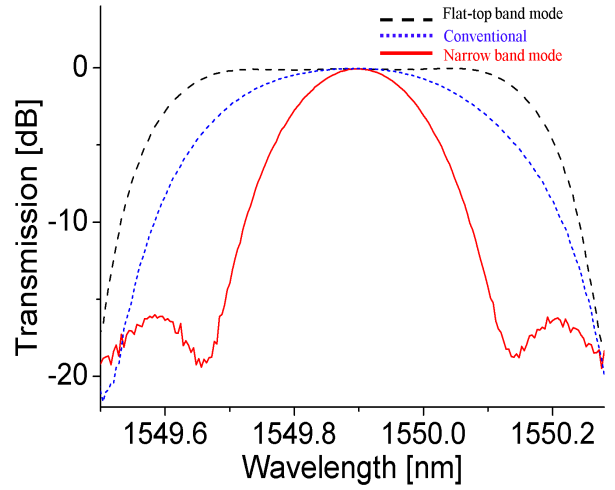


Fig. 6. Bandwidth comparison of measured filter spectra

그림 6은 제작된 필터의 대역폭 비교를 위해 제안된 필터에서 측정된 평탄 대역 및 협대역 모드의 스펙트럼들을 기본형 필터에서 측정된 스펙트럼과 비교하여 보여주고 있다. 상기 필터들에서 측정된 투과 스펙트럼들의 채널 간격은 $\sim 0.80\text{nm}$ 이었으며, 명확한 대역폭 비교를 위해 각 투과 스펙트럼들의 삽입 손실은 무시하고 함께 그림에 도시하여 비교하였다. 그림 6에서 각각의 투과 스펙트럼에서 측정된 대역폭에 대하여 각각의 FOM을 평가하여 표 3에 나타내었다. 평탄 대역 모드의 경우 -1 및 -3dB FOM은 각각 ~ 61.8 및 $\sim 73.5\%$ 로 측정되었으며, 이는 이론적 FOM과 비교할 때 각각 ~ 1.1 및 $\sim 0.9\%$ 씩 감소된 값이다. 협대역 모드의 경우 -1 및 -3dB 의 FOM은 각각 ~ 15.0 및 $\sim 25.5\%$ 로 측정되었으며, 이는 이론적 FOM에 비해 각각 ~ 0.1 및 $\sim 0.2\%$ 씩 감소된 수치이다. 또한, 대역폭 비교를 위해 제작된 기본형 필터 투과 스펙트럼의 -1 및 -3dB FOM은 각각 ~ 33.1 및 $\sim 51.9\%$ 로 측정되었으며, 이론적 FOM과 비교할 때 각각 ~ 3.1 및 $\sim 1.9\%$ 만큼 큰 값을 나타내었다. 이론적 및 실험적 FOM 간의 오차는 측정된 투과 스펙트럼에서 소거율이 감소되는 원인과 동일한 요인에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 상기 언급된 HWP들의 파장 의존성도 추가적으로 영향을 줄 것으로 사료된다.

Table 3. Experimental FOMs at various operation modes of proposed filter

	-1dB FOM(%)	-3dB FOM(%)
평탄 대역 모드	~61.8	~73.5
협대역 모드	~15.0	~25.5
기본형	~33.1	~51.9

3. 결 론

본 논문에서는 HWP들을 이용하여 PDL 내 HBF들의 주축 간 유효 각도 차를 자유롭게 조절할 수 있는 2차 Solc형 광섬유 유연 빔살 필터를 제안하였다. 제안된 필터 구조는 Solc형 복굴절 조합에서 Fan 방식과 Folded 방식의 복굴절 조합을 자유롭게 선택할 수 있어 기존의 PDL 기반 2차 Solc형 필터에서는 구현되지 못했던 고차 투과 스펙트럼의 인터리빙 동작을 구현할 수 있었다. 0.8nm의 채널 간격을 갖도록 제작된 제안된 빔살 필터는 이론적인 예측 결과와 같이 평탄 대역 및 협대역 투과 스펙트럼을 구현할 수 있었으며, 두 대역 모드에서 각각 인터리빙 동작이 가능하였다. 제작된 필터의 대역폭을 정량적으로 비교하기 위해, 각 대역 모드에서 -1 및 -3dB FOM을 측정하였으며, 평탄 대역 모드의 경우 각각 ~61.8 및 ~73.5%, 그리고, 협대역 모드의 경우 각각 ~15.0 및 ~25.5%의 수치를 얻을 수 있었다. 제안된 빔살 필터는 평탄 대역 및 협대역 모드에서의 과장 인터리빙 특성을 통해 고밀도 과장 분할 시스템(dense wavelength division multiplexing)에서의 효율적인 광 필터링에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

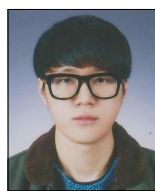
감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(No. 2013R1A2A2A01068390)

References

- [1] Y. W. Lee, K. J. Han, B. Lee, and J. Jung, "Polarization-independent all-fiber multiwavelength-switchable filter based on a polarization-diversity loop configuration," *Optics Express*, vol. 11, pp. 3359-3364, 2003.
- [2] Y. W. Lee, K. J. Han, J. Jung, and B. Lee, "Polarization-independent tunable fiber comb filter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 2066-2068, 2004.
- [3] X. Fang, K. Demarest, H. Ji, C. Allen, and L. Pelz, "A subnanosecond polarization-independent tunable filter/wavelength router using a Sagnac interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, pp. 1490-1492, 1997.
- [4] Z. Jia, M. Chen, K. Xu, Y. Dong, and S. Xie, "Performance analysis of optical label eraser," *Optics Communications*, vol. 205, pp. 265-269, 2002.
- [5] G. Zhu, Q. Wang, H. Chen, H. Dong, and N. K. Dutta, "High-quality optical pulse train generation at 80 Gb/s using a modified regenerative-type mode-locked fiber laser," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, pp. 721-725, 2004.
- [6] Y. W. Lee, J. Jung, and B. Lee, "Wavelength-switchable flat-top fiber comb filter based on Solc type birefringence combination," *Optics Express*, vol. 13, pp. 1039-1048, 2005.
- [7] Y. W. Lee, H-T. Kim, and Y. W. Lee, "Second-order all-fiber comb filter based on polarization-diversity loop configuration," *Optics Express*, vol. 16, pp. 3871-3876, 2008.
- [8] Y. Kim and Y. W. Lee, "Study on spectral deviation of high-order optical fiber comb filter based on polarization-diversity loop configuration," *Optics Communications*, vol. 301-302, pp. 159-163, 2013.

◇ 저자소개 ◇



박경수 (朴晷洙)

1990년 9월 27일생. 2014년 8월 부경대학교 전기공학과 졸업. 2014년 9월 부경대학교 대학원 의생명기계전기융합공학협동과정 입학. 현재 부경대학교 대학원 의생명기계전기융합협동과정 재학.



이용욱 (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 부교수.