

액정을 주입한 광자결정광섬유의 온도변화에 따른 파장 스위칭

전민용[†] · 김종현

충남대학교 자연과학대학 물리학과
☎ 305-764 대전시 유성구 궁동 220번지

(2007년 2월 2일 받음, 2007년 3월 8일 수정본 받음)

본 연구에서는 클래딩 영역에 주기적인 공기층이 있는 광자 결정 광섬유에 액정을 주입하고, 온도를 변화시켜 주면서 빛의 투과 스펙트럼의 변화를 측정하였다. 액정을 주입한 광섬유는 특정 온도에서 특정 파장에 대해 여러 가지 투과 특성을 얻어 낼 수 있었다. 광섬유에 가해주는 온도에 따라서 투과하는 광 신호를 약 10~15 dB 정도 최소화 할 수 있었는데, 이를 이용하면 특정 파장 대역에서 광 신호를 소광시킬 수 있는 광 스위칭 소자에 응용 가능할 것이다.

주제어 : 광자결정 광섬유, 액정, 스위칭

I. 서 론

최근에 활발히 연구하고 있는 광자 결정 광섬유는 그것이 갖고 있는 비선형 특성이나 주기적인 공기층 배열 등에 의해 응용할 수 있는 분야가 매우 광범위하게 분포되어 있다.^[1-3] 그 중에서 광을 제어하는 디바이스로 투과하는 빛을 제어할 수 있는 광 스위칭 소자는 광 통신 뿐만 아니라 광센서 소자 등으로 응용이 가능하다. 광자 결정 광섬유는 크게 두 가지 종류로 구분할 수 있는데, 하나는 에어 코어 밴드 갭 광자 결정 광섬유로 빛이 전파되는 코어와 클래딩이 공기층으로 되어 있고, 다른 하나는 기존의 굴절률 차이로 전파하는 방식과 동일한 코어의 구조와 그 주위에 주기적인 공기층이 있는 클래딩으로 되어 있다.^[4]

주기적인 공기층이 있는 클래딩 영역은 빛과 서로 상호작용을 할 수 있는 신소재를 주입할 수 있으며, 이를 통하여 빛의 도파를 변화시켜 줄 수 있고, 빛의 상태를 제어할 수 있는 소자의 가능성이 있다. 특히, 액정은 전기적, 광학적으로 이등방성을 갖는 액체이므로 외부 물리량의 변화에 대해서 빛의 도파 특성을 변화시켜 줄 수 있는 소재로써 액정의 주기적인 배열, 굴절률, 외부 전자기장, 온도 변화 등을 이용하여 빛이 진행하는 편광 상태를 조절할 수 있다. 따라서 주기적인 공기층 클래딩을 갖고 있는 광자결정 광섬유에 액정을 주입함으로써 새로운 광 소자를 구현할 수 있다. 최근에 액정이 주입된 광자결정 광섬유를 이용하여 열광학(Thermo-optic) 스위칭을 구현한 연구결과가 보고되었다.^[5,6] 이는 광섬유 주위에 미세 열 발생기(microheater)를 감싸주어서 전류를 가함으로써 열을 발생하게 하고 이로 인하여 광섬유를 진행하는 빛의 특성을 광범위하게 제어할 수 있는 연구 결과를 보고하였다.^[5] 액정의 특성이 외부 전자기장이나 온도 변화 등에 의해서 스스로 정렬되고, 이것이 진행하는 빛의 편광을 제어할

수 있기 때문에 광자 결정 광섬유와 결합하게 되면 광통신이나 광섬유 센서 등의 광소자로 응용할 수 있다. 특히 외부 물리량의 변화에 의해 어느 특정한 파장에서 여러 가지 투과 특성이나 소광특성을 얻어낼 수 있고, 물리량의 세기에 따라서 빛의 편광을 쉽게 제어할 수 있어서 광 필터 또는 편광 소자로 구현 가능하다. 본 연구에서는 공기층이 주기적으로 배열된 클래딩을 갖고 있는 1550 nm 대역에서의 광자결정 광섬유 속에 네마틱 액정을 주입하고, 이의 온도변화에 따른 빛의 투과 특성을 보고한다. 특정 온도에서 특정 파장에 대해 여러 가지 투과 특성을 얻어낼 수 있었다.

II. 네마틱 액정 및 스위칭 원리

액정은 일반적으로 액정을 이루는 분자들이, 액체와 마찬가지로 위치에 있어서는 자유도가 있고, 방향에 있어서는 고체와 마찬가지로 일정한 방향을 향하려고 한다. 즉 액체이면서 고체와 같은 이방적 특성(전기적 또는 광학적 특성이 빛의 방향이나 진행파의 편광에 따라 달라지는 재료)을 갖는다. 액정으로 불리는 물질들은 대체적으로 nm 크기의 유기 분자로 이루어져 있는데, 이 유기 분자들이 모여서 자연스럽게 구조를 형성하고 거기에 대응하는 특정한 대칭성을 만든다. 대칭성의 차이들은 액정이 갖는 다양한 계층의 성질의 근간이 된다. 많은 액정들은 온도에 따라, 구성하는 분자에 따라, 액정의 상 즉 이방성을 나타내는 구조가 다르다. 대표적인 액정상인 네마틱(nematic)상의 경우는 위치의 질서(positional ordering)는 없고, 방향성의 질서(orientational ordering)만을 갖는다. 또한 이는 대부분이 액정 상에서 액체와 같이 매우 유동적이어서 그 위치들은 고정되지 않고 열적 요동에 의해 움직인다. 방향성의 질서는 그 크기에 따라, 즉 질서 매개변수(ordering parameter)로 불리는 방향의 양상을 평균을 나타내는 변수에 따라, 액정이 일정한 방향으로 얼마나 정렬되어 있는가를 나타낸다. 그리고 이 방향성의 질서는 액

[†] E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

정이 거시적인 크기에서 방향에 따른 전기적, 자기적, 광학적으로 이방성을 나타내도록 한다. 이런 이방성을 갖는 액체적 성질이 액정이 디바이스로 사용될 수 있는 근거를 제공한다.^[5,6]

액정 분자의 이방적 구조나 그것에 기인하는 이방적 특성을 갖는 액정의 거시적인 성격은 전기적, 자기적, 광학적 성질을 이방적으로 만들어 준다. 그것을 이용한 것이 현재 많이 사용되고 있는 액정 디스플레이이다. 액정은 많은 경우가 시광선 영역에서 매우 투과율이 높다. 굴절률은 대체적으로 1.4에서 1.7 정도 사이의 값을 갖는다. 또 파장이 높아질수록 굴절률이 미세하게 커진다. 네마틱 액정의 광학적 성질은 액정 방향자의 방향을 중심축으로 하는 네마틱 액정의 구조적 대칭성으로 인해 단축성 특성을 갖는다. 즉 축 방향으로 n_e 굴절률을 갖고, 축 방향에 대해 수직인 방향으로 n_o 의 굴절률을 갖는다. 보통은 n_e 가 n_o 보다 큰 값을 갖는다. 이 두 굴절률의 차이는 액정의 온도에 따라서 변화한다.

액정은 외부 물리량의 크기에 따라서 정해진 배열에 의해 편광에 대한 의존성을 갖게 된다. 물리량에 의한 편광조절은 광 신호의 전파에 대해 영향을 주며, 특히 전기장, 자기장 또는 온도변화 등의 외부 물리량에 따라서 액정의 방향이 변화하고 이를 적절히 이용하면 광 필터 등의 광소자에 응용할 수 있게 된다. 방향성 질서의 성질은 액정이 어떤 표면에 놓일 때 그 액정들이 특정한 방향을 갖도록 한다. 그리고 그 방향들이 표면 처리에 따라, 표면에 대해 수직, 수평 혹은 수평 방향에 대해 일정한 각도를 갖도록 변화한다.

광자결정 광섬유에 주입시켜주는 액정의 여러 종류들이 참고문헌 [6]에서 볼 수 있다. 액정들은 물질에 따른 특성과 특정한 물질의 경우 상(phase)의 변화가 온도에 따라 변화하는 모양을 보여준다. 각각은 상의 특성과 물질의 특성에 의해 외부 물리량의 반응을 달리하지만 빛의 편광을 제어하고 스위칭이 가능하게 된다.

그림 1은 본 실험에 사용한 4'-Pentyl-4-biphenylcarbonitrile 네마틱 액정의 화학적 배열을 보여준다. 분자식은 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{C}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_4\text{CN}$ 이며, 상업용(시그마 알드리히, <http://www.sigmaaldrich.com/> 제품번호: 328510)으로 구입할 수 있다. 액정은 기하학적으로 이방적인 분자로 이루어진 스스로 정렬하는 올가닉 물질이다. 이것은 순수한 고체와 순수한 액체 사이의 중간에 해당하는 물리적인 성질인 열역학적 위상을 갖고 있다. 열역학적 특성을 지닌 액정 군들은 일반적으로 온도가 변할 때 그것의 열광학 효과에 의하여 mesophase

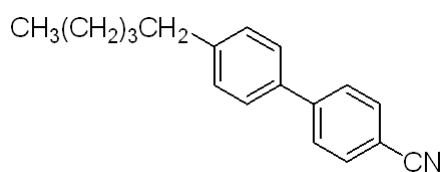


그림 1. 실험에 사용한 액정의 화학적 분자 구조.
($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{C}_6\text{H}_4\text{C}_6\text{H}_4\text{CN}$)

를 변화시킨다. 이 원리를 이용하여 광자 결정 광섬유에 액정을 주입한 후 온도를 변화시켜 주면 온도변화에 따라서 광섬유 내부에 있는 액정의 열역학적 위상이 달라지면서 굴절률이 변하게 되고, 이는 진행 하는 빛의 파장에 따른 투과율을 변화시킬 수 있다. 광자 결정 광섬유 중에서 index-guiding 광섬유는 굴절률이 높은 코어 주위에 주기적으로 구멍이 뚫린 클래딩으로 구성되어 있다. 이때 코어의 굴절률보다 더 높은 액정을 클래딩에 주입하면 코어가 클래딩보다 낮은 굴절률을 갖기 때문에 더 이상 전반사의 원리에 의해 빛을 전파하지 않는다. 하지만 빛은 photonic band gap(PBG) 효과에 의해서 빛을 코어에 가둘 수가 있다.^[7] PBG에서 진행하는 빛의 중요 성질은 진행하는 빛의 강한 파장 의존성을 갖는 것이다. 액정이 주입된 광자 결정 광섬유는 열적 특성에 따라서 어떤 특별한 파장대에서 PBG 효과가 일어날 수 있다. 그리고 투과영역은 주기적인 클래딩 영역으로의 다중 브래그 산란에 의존한다.^[8] 따라서 PBG의 특성과 액정의 열광학적 특성을 이용하면 특별한 파장에서 빛의 투과를 조절할 수 있고, 또한 스위칭(switching), 스펙트럼 필터링(spectral filtering), 감쇄기(attenuation), 편광 필터(polarization filtering) 및 편광 조절(polarization control)등에 응용할 수 있다.

III. 실험 및 결과와 토의

그림 2는 액정이 주입된 광자결정 광섬유에서 온도에 따른 파장 특성을 측정하기 위한 실험장치도이다. 1550 nm의 넓은 대역에서 파장 특성을 측정하기 위하여 EDFA용으로 사용하는 ASE(amplified spontaneous emission) 광원을 사용하였다. 액정이 주입된 광자 결정 광섬유의 길이는 15 mm이고 모세관 현상을 이용하여 광자 결정 광섬유의 공기층 클래딩에 주입할 수 있었다. 또한, 액정이 주입된 광자 결정 광섬유의 온도를 조절하기 위하여 TE cooler가 연결된 판(heating plate) 위에 광섬유를 올려놓고 온도 조절기로 열판의 온도를 조절하였다. 온도에 따른 파장 특성을 광 파장 분석기를 통하여 분석하였다. 광자 결정 광섬유는 그 구조가 코어를 중심으로 주기적으로 배열된 공기층이 있어서 기존의 광섬유와 접속하기가 매우 어렵다. 일반적으로 일반 광섬유와 광자 결정 광섬유 사이를 용착 접속할 경우 공기층이 수축되어 광 손실이 상당히 크게 되며, 이때 광 결합의 효율면에서 효과가 많이 떨어지고 광 손실이 크게 된다. 본 연구에서는 이러

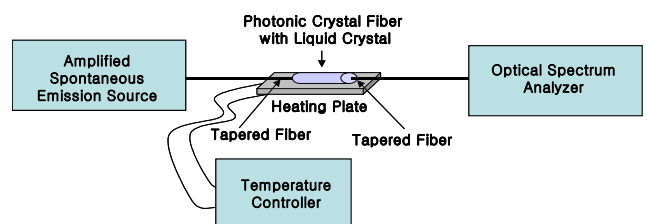


그림 2. 액정이 주입된 광자결정 광섬유의 온도변화에 따른 투과 파장 특성 측정을 위한 실험 장치도.

한 결점을 보완하기 위하여 V-groove와 tapered fiber를 이용하여 정밀하게 정렬하였다. 이때 광자 결정 광섬유의 끝이 매우 예민하므로 손상을 입기가 쉽다. 따라서 광섬유의 양 끝이 서로 닿지 않도록 세심히 주의해야 한다.

실험에 사용한 광자결정 광섬유는 Crystal Fiber사(<http://www.crystal-fibre.com>)에서 구입할 수 있으며, 모델명은 NL-1550-POS-1로 그림 3과 같다. 광섬유의 코어 직경은 2.1 μm 이고, 1550 nm 대역에서 영 분산 값을 갖는 것으로 실험에 사용한 길이는 15 mm이다. 1550 nm에서 비선형 계수 값은 $11 (\text{Wkm})^{-1}$ 이다. 표 1에 본 실험에서 사용한 광자 결정 광섬유의 특성을 보여준다.

그림 4(a)는 온도조절이 가능한 열판 위에 액정이 주입된 광자 결정 광섬유와 tapered 광섬유를 이용하여 정밀하게 정렬하는 사진이다. V-그루브위에 tapered 광섬유가 있고, 이를 광자결정 광섬유와 정밀하게 정렬하는 것을 보여준다. 또한 그림 4(b)는 현미경을 통해서 본 tapered 광섬유와 광자 결정 광섬유가 정렬되어 있는 모습이다. 이때 광 손실은 0.5 dB 이하이다.

그림 5는 액정이 주입되지 않은 광자 결정 광섬유를 열판

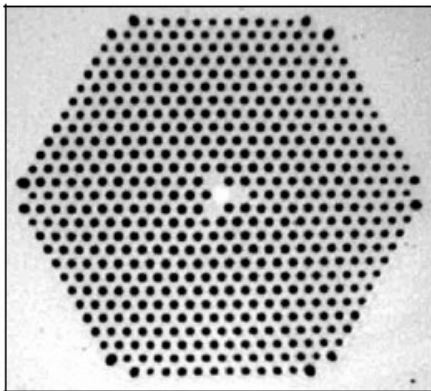


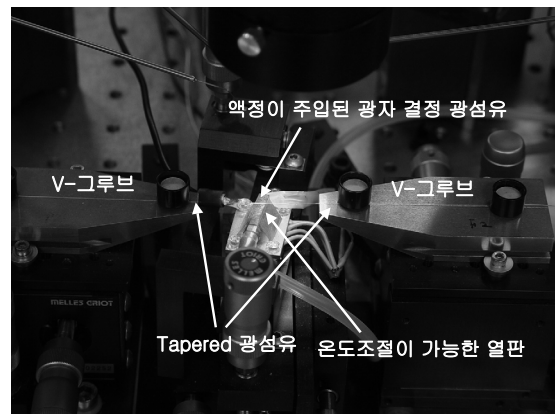
그림 3. 광자 결정 광섬유의 단면구조도^[4].

표 1. 실험에 사용한 광자 결정 광섬유의 특성

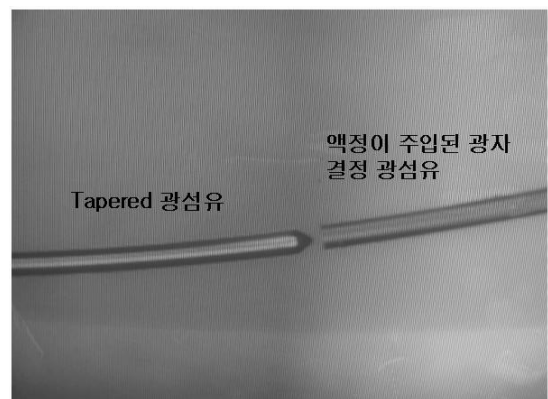
PCF의 특성	물리적/광학적 값
매질	Pure Silica
클래딩 직경	$128 \pm 5 \mu\text{m}$
코팅 직경	$250 \pm 10 \mu\text{m}$
코팅매질	Acrylate
코어 크기	$2.1 \pm 0.3 \mu\text{m}$
분산 @ 1480 - 1620 nm	$> 0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$
분산 @ 1480 - 1620 nm	$< 1.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$
감쇄정도 @ 1510 - 1620 nm	$< 9 \text{ dB/km}$
모드필드 직경 @ 1550 nm	$2.8 \pm 0.5 \mu\text{m}$
Numerical aperture @ 1550 nm	0.40 ± 0.05
비선형계수 @ 1550 nm	$\sim 11 (\text{Wkm})^{-1}$
접속손실 @ 1550 nm	$< 0.5 \text{ dB}$

위에 놓고 ASE 광원이 입력되었을 때 온도를 변화시키면서 출력된 광 스펙트럼을 보여준다. 15도에서 30도까지 변화시켰을 때 광 출력 스펙트럼에 변화가 없음을 볼 수 있다. 반면 액정이 주입된 광자 결정 광섬유를 열판위에 놓고 온도를 변화시키면 출력 광 스펙트럼이 변화하는 것을 관찰 할 수 있었다.

그림 6은 액정이 주입된 광자 결정 광섬유에 ASE 광원을



(a)



(b)

그림 4. (a) 열판 위에 액정이 주입된 PCF와 tapered 광섬유의 정렬 (b) 현미경을 통해서 본 tapered 광섬유와 PCF의 정렬.

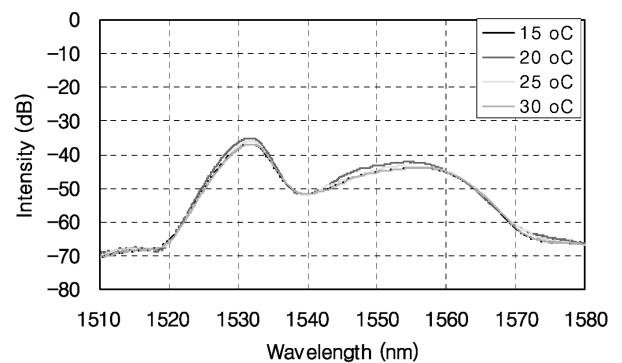


그림 5. 액정이 주입되지 않은 PCF의 온도변화에 따른 투과 스펙트럼 특성.

입사하고, 이의 온도를 변화시켰을 때의 출력 광 스펙트럼을 보여준다. 온도를 15도에서부터 35도까지 변화시켰으며, 특정 파장 대역에서는 온도에 따라서 15 dB 이상 신호가 감소함을 볼 수 있었다. 온도가 25도일 때와 35도일 때를 비교하면 파장이 1545 nm 대역에서 서로 다른 세기를 보여준다. 이 파장 영역에서는 온도가 35도보다 온도가 25도일 때 약 14 dB 정도 투과를 더 함을 볼 수 있다. 또한 1538 nm 근처에서는 15도와 그 외 25도, 30도, 35도와 비교하면 투과 비율이 12 dB 이상 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 액정이 주입된 광자 결정 광섬유에 적절한 온도 조절로 특정 파장 대역에서 투과 특성을 조절 할 수 있음을 볼 수 있다.

그림 7은 그림 6에서 15도와 35도에 대한 두 온도를 선택하여 전체 파장에 대한 투과 특성을 보여준다. 1550 nm 대역에서 15도와 35도 사이를 비교해 보면 약 10 nm 대역에서 12 dB 이상의 투과 차이를 보인다. 즉 온도변화에 따라서 특정 파장대역에서 광 신호를 크게 감쇄시킬 수 있었다. 1550 nm대역에서는 온도가 15도일 때 투과 특성이 좋고, 1535 nm 대역에서는 온도가 35도일 때 투과 특성이 좋음을 볼 수 있다. 이러한 특성을 이용하면 특정 온도에서 특정 파장의 신호를 감쇄할 수 있는 광소자 등에 응용이 가능할 것이다.

그림 8은 액정이 주입되지 않은 광자 결정 광섬유와 액정

이 주입된 광자 결정 광섬유에 각각 온도를 변화시켜서 본 ASE 출력 스펙트럼 특성이다. 온도가 15도일 때 각각 비교하면 1530 nm ~ 1540 nm에서 약 10 dB 이상의 신호를 소광시키는 것을 볼 수 있으며, 1550 nm 대역에서는 온도변화에 대해서 액정의 유무와 상관없이 거의 비슷한 투과를 보여준다. 반면, 온도가 30도일 때는 1520 nm ~ 1540 nm에서는 거의 투과되는 빛의 세기에 변화가 없지만 1542 nm ~ 1560 nm까지는 대체적으로 10 dB 정도의 투과되는 빛의 세기 차이를 보여준다. 특히 1542 nm와 1548 nm에서는 15 dB 이상 소광을 보여주는 특성이 있다.

그림 9는 광자 결정 광섬유에 액정이 없을 때와 있을 때의 상대적인 투과 파장 특성을 규격화 한 것이다. 광섬유에 가해진 온도가 15도와 30도의 경우에 서로 다른 광 밴드 갭을 볼 수 있다. 이는 액정에 가해 주는 온도에 따라서 투과 되는 파장 특성이 다르다는 것을 확연히 보여주는 것이며, 최대 투과 되는 정도는 약 15 dB임을 알 수 있었다. 온도가 15도일 경우에는 1533 nm에서 최대 투과를 보여주었고, 온도가 30도일 경우에는 1548 nm에서 최대 투과 특성을 보여주었다. 이러한 특성은 광자 결정 광섬유의 클래딩에 액정을 주입함으로써 코어의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 낮아지게 되지만, 광 밴드갭(PBG) 효과에 의해서 빛을 코어에 가둘

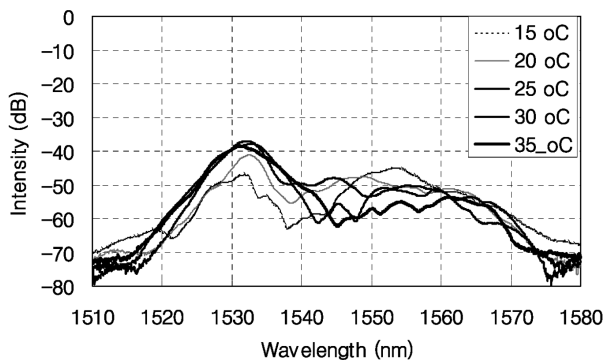


그림 6. 액정이 주입된 PCF의 온도변화에 따른 투과 스펙트럼 특성.

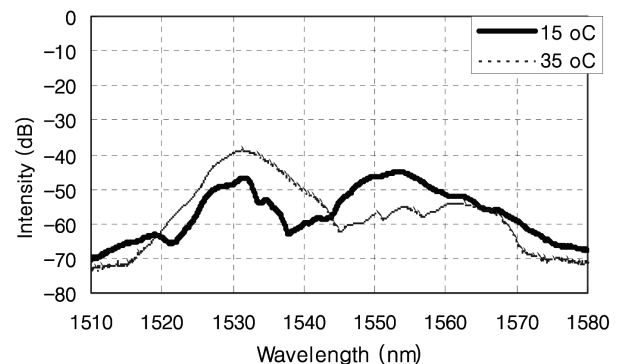


그림 7. 온도가 15도와 35도일 때 파장 투과 특성.

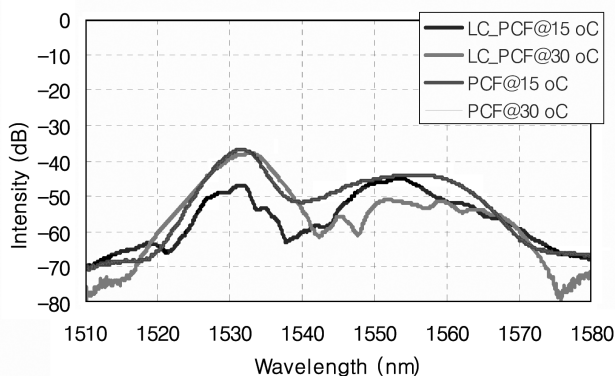


그림 8. 액정이 주입되지 않은 PCF와 액정이 주입된 PCF에 각각 온도를 변화시켜서 본 ASE 출력 스펙트럼 비교.

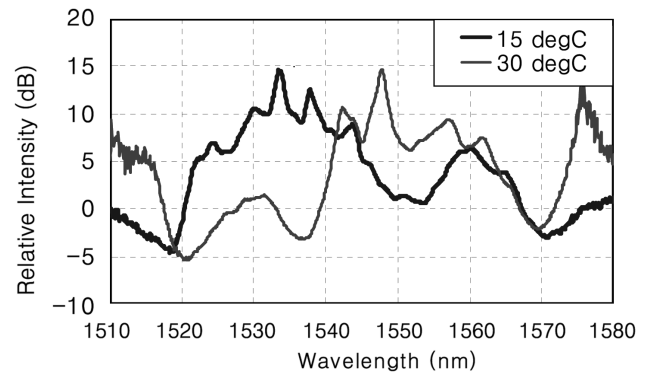


그림 9. 규격화한 상대적인 투과 파장 특성

수 있고, 또한 액정의 열광학적 효과에 의해 온도의 변화에 따른 그의 물리적 위상이 변화가 생겨 특정 파장 대역에서 투과 특성이 다르게 나타남을 볼 수 있었다.

IV. 결 론

클래딩 영역에 주기적인 공기층이 있는 광자 결정 광섬유에 액정을 주입하고, 온도를 변화시켜 주면서 빛의 투과 스펙트럼의 변화를 측정하였다. 액정이 주입한 광섬유는 특정 온도에서 특정 파장에 대해 여러 가지 투과 특성을 얻어 낼 수 있었다. 1530 nm ~ 1540 nm 대역에서는 온도가 15도일 때 투과되는 광 신호를 최소화할 수 있었고 1540 nm ~ 1560 nm 대역에서는 온도가 30도 또는 35도에서 광 신호를 최소화 시킬 수 있었다. 따라서 액정이 주입된 광자 결정 광섬유에 적절한 온도를 가해주면 원하는 파장 대역에서 투과하는 광 신호를 최소화 할 수 있음을 알 수 있었다. 본 실험에서는 투과하는 광 신호를 약 10~15 dB 정도 최소화 할 수 있었는데 이는 액정이 주입된 광자 결정 광섬유의 한쪽 면에만 온도를 변화시켜 주었기 때문이다. 향후 연구에서 전체적으로 광섬유 겉면에 온도를 균일하게 가해주면 더욱 좋은 파장 투과 스위칭 특성을 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2006-331-C00127).

참고문헌

- [1] T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen, J. C. Petersen, T. Sorensen, T. P. Hansen, and H. R. Simonsen, "Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers," *Optics Express*, vol. 12, p. 4080, 2004.
- [2] M. D. Nielsen, C. Jacobsen, N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, and H. R. Simonsen, "Low-loss photonic crystal fibers for data transmission and their dispersion properties," *Optics Express*, vol. 12, p. 1372, 2004.
- [3] T. Schreiber, J. Limpert, H. Zellmer, A. Tunnermann, and K. P. Hansen, "High average power supercontinuum generation in photonic crystal fibers," *Optics Communication*, vol. 228, p. 71, 2003.
- [4] <http://www.crystal-fibre.com>.
- [5] T. T. Larsen, J. Broeng, D. S. Hermann, and A. Bjarklev, "Thermo-optic switching in liquid crystal infiltrated photonic bandgap fibres," *Electronics Letters*, vol. 39, p. 1719, 2003.
- [6] T. T. Larsen, A. Bjarklev, D. S. Hermann, and J. Broeng, "Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres," *Optics Express*, vol. 11, p. 2589, 2003.
- [7] M. W. Haakestad, T. T. Alkeskjold, M. D. Nielsen, L. Scolari, J. Riishede, H. E. Engan, and A. Bjarklev, "Electrically tunable photonic bandgap guidance in a liquid-crystal-filled photonic crystal fiber," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 17, p. 819, 2005.
- [8] K. Abeeluck, N. M. Litchinitser, C. Headley, and B. J. Eggleton, "Analysis of spectral characteristics of photonic bandgap waveguides," *Optics Express*, vol. 10, p. 1320, 2002.

Wavelength Switching with Temperature in Liquid-Crystal-infiltrated Photonic Crystal Fibers

Min Yong Jeon[†] and Jong Hyun Kim

Department of Physics, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

[†]E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

(Received February 2, 2007, Revised manuscript March 8, 2007)

We have measured the optical spectra while varying the temperature of photonic crystal fibers (PCFs) with periodic air holes in the cladding. These are liquid crystal infiltrated fibers. For the liquid crystal infiltrated PCFs, we obtained the transmission of several wavelengths at specific temperatures. The transmission power could be reduced by about 10~15 dB by varying the applied temperature in the liquid crystal PCF. We expect that it is applicable as a wavelength switching device in the specific wavelength band.

OCIS code : 060.2310, 060.2330, 060.2340.