

# 금속선의 주기적인 배열을 이용하여 기계적으로 형성한 파장 가변 장주기 광섬유 격자

손경락<sup>†</sup>

한국해양대학교 전파정보통신공학부  
Ⓣ 606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

김광택

호남대학교 광전자공학과  
Ⓣ 506-714 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

(2005년 4월 15일 받음, 2005년 7월 11일 수정본 받음)

본 논문에서는 250  $\mu\text{m}$  직경의 황동선을 주기적으로 배열하여 기계적으로 형성한 장주기 광섬유 격자를 제안하였으며 전류제어로 파장가변 기능을 구현하였다. 광섬유 클래딩을 감싸고 있는 물질의 굴절률 변화가 공진파장의 함수임을 이용하여 클래딩 주위에 도포된 물질의 열 광학 계수가 금속선에 인가된 전력에 의해 제어되도록 함으로서 파장가변을 유도하였으며 주어진 파장 영역내에서 인가 전력에 대한 공진파장의 가변 정도를 조사하였다. 글리세린의 열광학 효과를 이용한 경우 20 W 인가전력에 대하여 LP<sub>03</sub> 모드는 14 nm, LP<sub>04</sub> 모드는 48 nm 정도의 파장가변이 가능함을 확인하였고, 단일모드 광섬유에 대한 기하 광학적 근사방법을 적용하여 해석한 결과와 잘 일치함을 보였다.

주제어 : Long period grating, Tunable filter, Mechanically formed grating, Thermo-optic effect.

## I. 서 론

장주기 광섬유 격자는 광통신 분야 또는 광섬유 센서에 응용하기 위하여 다양한 소자 형태로 개발되고 있다. 일반적으로 단일모드 광섬유의 코어에 자외선을 조사하여 격자를 제작하는 방법이 가장 널리 알려져 있다.<sup>[1,2]</sup> 자외선 조사에 의하여 제작된 장주기 격자의 파장가변은 주로 격자가 형성된 광섬유 외부에서 코일을 만들거나 광섬유의 클래딩 표면에 금속 박막층을 형성하여 발열에 의한 격자의 굴절률 변화를 유도하는 방법을 이용하고 있다.<sup>[3,4]</sup> 장주기 광섬유 격자의 주기는 수백  $\mu\text{m}$  정도이므로 광섬유의 코어에 직접 격자를 형성하지 않아도 기계적인 압력을 광섬유의 클래딩에 주기적으로 가하여 격자 형성효과를 유도할 수 있다. 이 방법은 복잡한 고가의 제작 장치가 필요하지 않고 제작방법이 간단할 뿐만 아니라 압력이 제거되면 초기의 상태로 복원되어지므로 다양한 실험적 방법을 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 기계적으로 장주기 격자를 형성하는 방법은 현재까지는 주로 실리콘 웨이퍼 또는 금속막대에 V-홈을 만들어 사용하거나, 직경이 격자주기가 될 수 있는 흑연과 같은 원형봉을 배열하였다.<sup>[5-11]</sup> 이때 격자의 주기는 고정되어 있으므로 파장가변을 위해서 광섬유를 격자에 대하여 일정한 각도로 틀어주어 주기를 조절하였는데, 이러한 방법은 정확한 각도제어가 요구되고 수동조작이 필요하여 광통신용 소자로서의 응용에는 상당한 제약이 따른다.

본 논문에서는 금속선의 주기적인 배열로 장주기 격자를 형성할 수 있는 소자 구조를 제안하고, 금속선에 전류를 인가함으로써 전력 제어에 의한 파장가변 필터 특성을 얻을 수 있는 능동형 장주기 광섬유 격자 소자를 보고한다. 광섬유의 클래딩 주위에 열 광학 계수가 큰 폴리머 계열의 물질을 도포하고 금속선의 저항열을 이용하여 굴절률을 제어함으로써 클래딩과 클래딩 주변의 물질과의 경계면에서의 전반사에 의한 위상 차이가 달라지게 하는 원리를 이용하고 있다.<sup>[12,13]</sup> 단일모드 광섬유에 대한 기하 광학적 근사법으로 유도된 모드 방정식을 이용하여 클래딩 주위 굴절률 변화에 대한 공진파장의 이동을 해석한 결과가 실험결과와 일치함을 보임으로서 제안된 소자의 성능을 확인하고자 한다.

## II. 동작원리

제안된 소자의 개략적인 구조는 상하부 평판 사이에 격자 배열과 단일모드 광섬유가 교차하여 놓여 있는 그림 1과 같다. 일정한 간격으로 배열된 금속선과 금속선을 통하여 광섬유에 가해지는 압력이 주기적인 굴절률 변조를 유도하게 있다. 이때 광섬유 코어의 LP<sub>01</sub>모드는 클래딩의 특정모드 LP<sub>0m</sub>과 광 결합을 하게 되는데 두 모드사이의 위상 정합 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_m = (n_{co}^{01} - n_{cl}^{0m})\Lambda \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_m$ 는 m차 모드의 공진파장,  $\Lambda$ 는 장주기 격자주기,

<sup>†</sup>E-mail: krsohn@bada.hhu.ac.kr

$n_{co}^{01}$ 은 LP<sub>01</sub> 코어 모드의 유효굴절률,  $n_{cl}^{0m}$ 은 LP<sub>0m</sub> 클래딩 모드에 대한 유효 굴절률이다. 계단형 굴절률 분포를 가지는 단일모드 광섬유에 대하여 기하 광학적 근사법을 적용하여 LP<sub>0m</sub> 클래딩 모드에 대한 모드 방정식을 유도하면 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[12]</sup>

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_m}\right) d_{cl} \left( (n_{cl})^2 - (n_{cl}^{0m})^2 \right)^{1/2} - \left( m - \frac{3}{4} \right) \cdot 2\pi = 2 \cos^{-1} \left( \frac{(n_{cl})^2 - (n_{cl}^{0m})^2}{(n_{cl})^2 - (n_{sur})^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $d_{cl}$ 은 클래딩의 직경,  $n_{sur}$ 은 클래딩 주위의 굴절률이다.  $n_{cl}$ 은 파장에 대한 연속함수로 주어지는 클래딩 굴절률이며 실리카 광섬유에 대하여 Sellmeier 방정식으로부터 구해진다. 식 (2)로부터 클래딩 주위의 굴절률 변화는 공진 파장  $\lambda_m$ 의 가변을 유도함을 알 수 있다.

그림 2(a)는 각각의 모드에 대한 공진파장을 그래픽적인 방법으로 구할 수 있을 보여주고 있다. 식 (2)의 좌변항은 광섬유의 클래딩을 가로질러 진행하는 파의 횡방향에 대한 위상변화를 의미하며 그림 2(a)에서 점선으로 표시된다. 우변항은 클래딩과 클래딩을 둘러싸고 있는 물질과의 경계면에서 전반사에 기인하는 위상천이를 의미하며 몇가지 클래딩 주위의 굴절률에 대한 위상변화를 실선으로 표시하였다. 임

의 클래딩 주위 굴절률에 대하여 각각의 모드에 대한 공진 파장은 두 선의 교차점으로부터 구해진다. 여기서 모드차수가 높을수록 동일 굴절률 변화에 대하여 공진파장의 변위가 크게 일어나며 공진파장이 사라지는 차단파장 또한 더 낮은 클래딩 주위 굴절률에서 일어남을 알 수 있다. 그림 2(b)는 클래딩 주위의 굴절률 변화에 대한 각 모드별 공진파장의 이동을 보여주고 있다. 첫 번째 공진 모드( $m=1$ )의 경우 공진파장의 이동은 매우 미미하지만 모드차수가 높을수록 공진파장의 천이가 많이 일어남을 알 수 있으며 광섬유 클래딩의 굴절률 부근( $n_{cl}=1.444$ )에서 최대 변이를 보여주고 있다. 그러나 클래딩의 굴절률보다 높은 굴절률 조건 ( $n_{sur} > n_{cl}$ )에서는 클래딩 모드가 경계면에서 더 이상의 전반사를 경험하지 못하므로 공진파장의 이동은 나타나지 않는다.

III. 소자제작 및 실험결과

기계적으로 형성되는 격자는 그림 1과 같이 250 μm 직경의 금속선을 550 μm 주기로 배열한 격자를 평판 유리상부에 고정시켜 만들게 된다. 본 연구에서 상하부 평판은 절연을 위하여 75×25×1 [mm<sup>3</sup>]의 유리판을 사용하였으며, 금속선은 금속 절단 및 가공용으로 사용하는 황동선을 사용하였는데 직진성과 경도가 좋아 격자 제작이 용이할 뿐만 아니라 단위 길이당 저항이 상대적으로 높아 낮은 전류에도 높은 발열

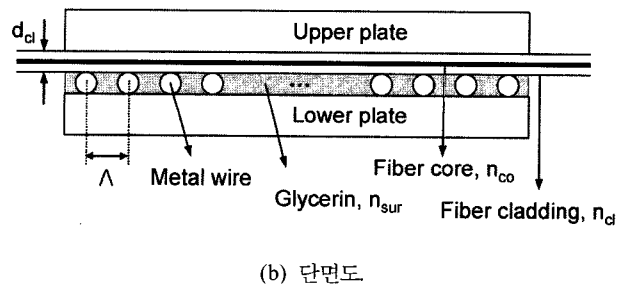
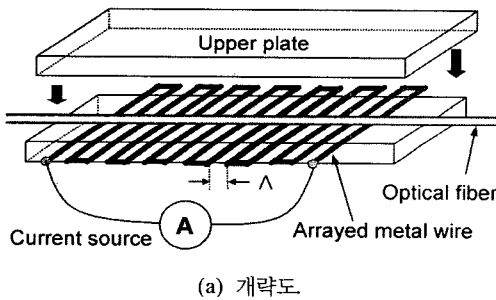
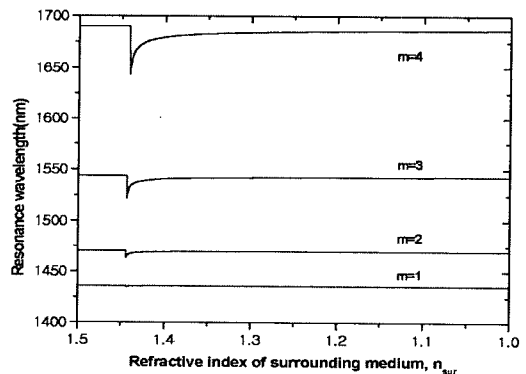
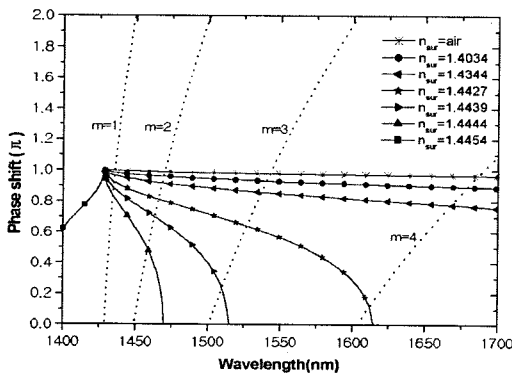


그림 1. 제안된 능동형 파장가변 장주기 광섬유 격자.



(a) 모드별 공진파장을 얻기 위한 그래픽적 해석.

(b) 클래딩 주위의 굴절률의 함수로 나타낸 각 모드별 공진파장의 이동정도.

그림 2. 광섬유 클래딩을 감싸는 주위의 굴절률이 변할 때 공진파장의 이동에 대한 이론적 해석 결과.

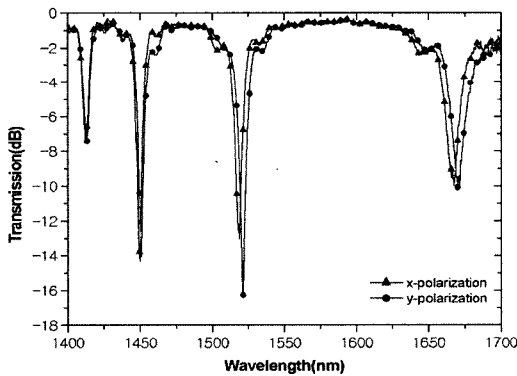
량을 내므로 저전력 파장가변 소자 구현에 매우 좋은 조건을 제공해 준다. 황동선의 배열은 주기가 일정하게 유지되는 것을 보장하기 위하여 금속막대 상에 주기적인 요철이 정밀하게 가공된 지그를 제작하였고 요철의 홈에 금속선을 한 개씩 배열하는 방법을 이용하였다. 배열된 격자의 총 개수는 80개이다.

그림 3(a)는 광섬유의 플라스틱 피복층이 있는 상태에서 측정된 제작된 소자의 투과 스펙트럼과 편광 의존성을 보여주고 있다. 측정 파장영역 내에서 4개의 공진 모드가 관측되었으며, 편광에 따른 공진파장의 차이는 그림 3(b)와 같이 모드차수가 높을수록 크게 나타나고 있다. LP<sub>03</sub> 모드(m=3)의 경우 두 직교 편광에 대한 공진파장의 차이는 3 nm 정도이다. 이는 광섬유에 특정한 방향으로 압력이 가해짐에 따라 구조적인 비대칭성이 발생하여 나타나는 복굴절 때문이다. 이러한 복굴절은 압력이 가해진 방향에 대하여 90° 회전된 방향으로 동일한 압력을 가함으로써 최소화할 수 있다.<sup>[14]</sup>

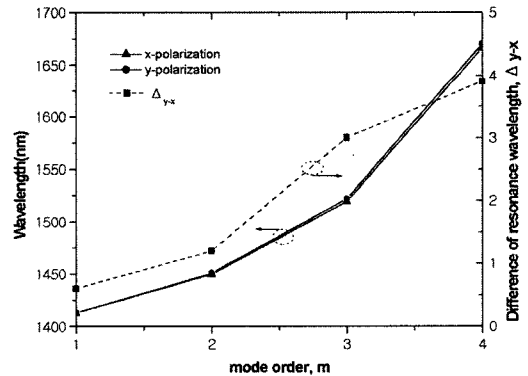
격자를 형성하고 있는 황동선은 시작부분과 끝부분이 전기적으로 연결되어 있으며 총 길이는 720 cm이고 총 저항은 약 11.5Ω이다. 그 상부에 단일모드 광섬유를 격자와 수직되게 정렬하고 또 다른 유리판으로 상부를 덮게 된다. 상부 유리판에 압력이 가해진 상태에서 유리판의 가장자리에 UV

에폭시를 발라 고정시킨다. 파장가변 특성을 얻기 위하여 상부와 하부의 유리판 사이에 있는 광섬유와 황동선 주위는 광섬유의 클래딩 굴절률 보다 약간 높은 물질로 채워진다. 파장 가변 특성은 상하부 평판 사이에 주입되어 있는 열 광학 계수를 가지는 물질과 격자를 형성하기 위하여 배열해 놓은 황동선의 저항열로부터 얻어진다. 본 연구에서는 광섬유 클래딩의 굴절률보다 약간 높은 굴절률을 얻기 위하여 희석된 글리세린( $n_{sur}=1.4476@1550\text{ nm}$ )을 사용하였다. 일반적으로 글리세린의 경우에도 음의 열 광학 계수 ( $\Delta n/\Delta T=-3.5\times 10^{-4}/\text{centigrade}$ )를 가지므로 금속선에 전류가 가해져 저항열이 발생하게 되면 광섬유를 둘러싸고 있는 외부층의 굴절률에 변화가 생겨 공진파장이 이동하게 되는 것이다. 이것은 클래딩과의 경계면에 대한 진행파의 전반사 조건에서 위상천이의 변화에 기인한다. 즉, 식 (2)의 우변항으로 표현되는 위상천이가 클래딩 주위의 물질의 굴절률의 함수가 되므로 각 공진 모드에 대한 파장 가변을 유도할 수 있다.

그림 4(a)는 금속선에 가해진 전력에 대하여 각 공진모드에 대한 파장 가변된 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 인가 전력이 없는 상태(그림 4(a)에서 \*로 표시됨)에서 글리세린의 초기 굴절률은 광섬유 클래딩의 굴절률보다 약간 높아 광섬유 코어와 클래딩간의 모드결합이 강하게 일어나지 않고



(a) 두 직교편광에 대한 투과 스펙트럼.



(b) 모드별 두 직교편광에 따른 공진파장의 차이.

그림 3. 제작된 소자의 편광 의존성.

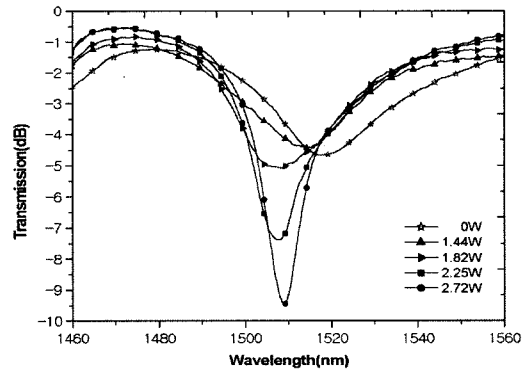
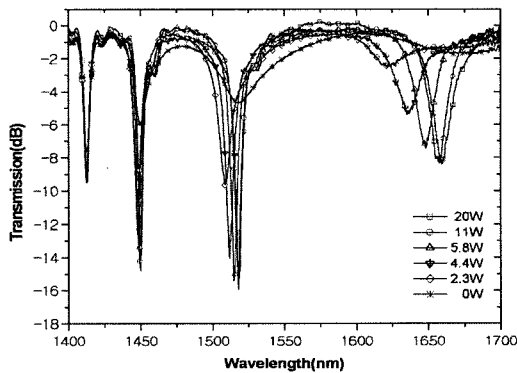


그림 4. (a) 금속선에 인가된 전력에 따른 파장 가변 투과 스펙트럼, (b) 클래딩 주변의 굴절률이 클래딩의 굴절률에 근접했을 때 투과 스펙트럼 (LP<sub>03</sub> 모드).

있다. 또한 모드차수가 높아질수록 공진 파장에서의 대역제거 깊이가 줄어들고 있음을 알 수 있으며 4번째 공진모드의 경우에는 공진파장의 위치를 거의 확인할 수 없다. 이것은 그림 2(a)의 해석결과에서 클래딩 주변의 굴절률이 클래딩의 굴절률과 동일한 상태를 지나 점점 증가할 경우 고차모드의 공진 파장이 먼저 사라지는 것으로부터 예측할 수 있다. 금속선에 인가되는 전력이 증가함에 따라 글리세린의 굴절률은 감소하게 되는데 글리세린의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 높아 공진파장의 이동은 거의 일어나지 않지만 클래딩의 굴절률보다 낮아지게 되면 코어모드와 클래딩 모드간 강한 광결합이 유도된다. 상세한 과정은 세 번째 공진 파장에서 측정한 투과 스펙트럼으로 설명하고자 하며 그림 4(b)에 나타내었다. 클래딩 주변의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 높은 조건에서 낮은 조건으로 바뀌는 순간 공진 파장의 이동 현상이 어떻게 나타나는지를 보여주고 있다. 전력이 인가되지 않은 초기조건에서는 1525 nm 부근에서 공진파장이 나타나며 1.44 W의 전력이 인가될 때까지는 3 nm 정도의 단파장 이동과 함께 공진 파장에서의 깊이가 알아지는 특성을 보인다. 이것은 손실 유전체 도파로로 볼 수 있으며 클래딩과 주위 환경과의 경계면에서 반사도가 떨어지므로 인해 일어나는 현상으로 설명된다.<sup>[15]</sup> 그러나 1.82 W의 전력이 인가되면 공진파장은 단파장 방향으로 급격히 이동되는 것을 볼 수 있다. 이후 전력이 증가하면 글리세린의 열광학 효과에 의해 굴절률이 낮아져서 공진파장은 장파장 방향으로 이동하며 공진파장의 FWHM(Full Width at Half Maximum)은 줄어든다. 장주기 격자에서  $FWHM = \Delta n \propto \frac{1}{(n_{co}^{01} - n_{cl}^{01})}$  이므로 FWHM은 유효 굴절률차에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 클래딩 주위의 굴절률이 낮아지면 대역제거 폭이 좁아지는 필터 특성이 얻어진다.

그림 5는 각각의 모드에 대한 공진파장의 이동 정도를 나타내었다. 고차 모드일수록 동일 전력에 대한 공진파장의 이동이 크게 일어남을 보여주고 있으며 그림 2(b)의 해석결과와 잘 일치하는 경향성을 보임을 확인할 수 있다. 글리세린의 열광학계수를 이용한 파장가변 측정결과 LP<sub>01</sub> 모드는 공진파장의 변화가 거의 없었으며 LP<sub>02</sub> 모드의 경우에도 미미하였다. 그러나 LP<sub>03</sub> 모드의 경우 14 nm 정도의 공진 파장 가변이 가능하였으며, LP<sub>04</sub> 모드의 경우 48 nm 정도의 공진 파장 가변이 가능함을 실험적으로 측정하였다. 금속선에서 발생하는 저항열은 광섬유와 맞닿는 부분에서 클래딩의 굴절률에 영향을 미칠 수 있으므로 이로 인한 공진파장의 영향을 고려하여야 한다. 온도에 따른 클래딩 주위의 굴절률 변화를 최소화하기 위하여 광섬유 주위의 물질을 공기층으로 하여 실험을 수행하였다. 실험결과 인가전력에 따른 출력 스펙트럼의 모양은 일정하게 유지되었으나 80 W의 전력인가에 대하여 LP<sub>03</sub> 모드는 3 nm 정도의 공진파장 이동을 보였다. 그러나 20 W 이하의 인가전력에 대해서 공진파장의 변화는 거의 없었다. 본 연구에서는 글리세린의 열광학 효과에 의한 굴절률 변화를 유도하기 위하여 최대 20 W까지 전력을

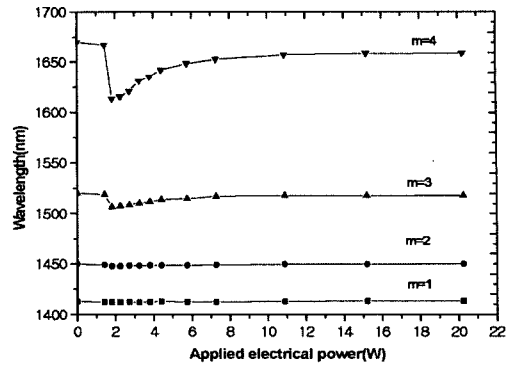


그림 5. 인가 전력의 함수로 나타낸 각 모드별 공진파장의 이동정도.

인가하였으므로 그림 5의 실험결과는 순수한 글리세린의 열광학 효과에 의한 파장가변 특성임을 보여준다. 그러므로 저항열에 의한 광섬유의 굴절률 변화 영향은 무시할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기계적으로 형성된 장주기 광섬유 격자의 공진파장을 능동적으로 가변할 수 있는 구조를 제안하였다. 광섬유 클래딩을 감싸고 있는 주위의 굴절률 변화에 따라 공진파장이 이동할 수 있는 원리에 기초하여 250 μm 직경의 황동선으로 550 μm 주기의 격자를 형성하였고, 황동선에 전류를 인가함으로써 클래딩 주변의 물질의 열 광학 효과를 이용할 수 있도록 하였다. 클래딩 주위의 굴절률의 변화에 대한 각각의 공진모드의 파장 가변이 고차모드일수록 크게 일어남을 확인하였고, 클래딩 굴절률에 근접했을 때 공진파장의 변화를 실험적으로 측정하여 제시하였다. 제작된 소자의 파장가변 특성은 단일모드 광섬유에 기하 광학적 근사법을 적용한 모드 방정식으로부터 해석된 결과와 잘 일치함을 보였다. 본 연구에서 제안된 금속선을 이용한 파장가변 장주기 광섬유 격자소자는 전력제어에 의해 공진파장이 가변되는 능동형 소자이므로 기존의 기계적으로 유도된 장주기 격자소자의 연속 파장가변 구현에 어려움이 많았던 구조적인 제약점을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국해양대학교 신진교수연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

[1] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, 1997.  
 [2] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber bragg grating technology fundamentals and overviews," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, p. 1263, 1997.

- [3] Y. G. Han, S. H. Kim, and S. B. Lee, "Flexibly tunable multichannel filter and bandpass filter based on long-period fiber gratings," *Opt. Express*, vol. 12, no. 9, pp. 1902-1907, 2004.
- [4] D. M. Costantini, H. G. Limberger, R. P. Salathe, C. A. P. Muller, and S. A. Vasilie, "Tunable loss filter based on metal coating long period grating," *ECOC '98*, Spain, 1998, pp. 391-392.
- [5] H. Kwon, N. Lee, and J. Song, "Narrowband LPFG filter based on a pair of fiber deformers," *Conference on Lasers and Electro-optics*, Baltimore, USA, 2001, pp. 262-263.
- [6] I. B. Sohn, J. G. Baek, N. K. Lee, H. W. Kwon, and J. W. Song, "Gain flattened and improved EDFA using microbanding long-period fiber gratings," *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 22, pp. 1324-1325, 2002.
- [7] I. B. Sohn, J. G. Baek, and J. W. Song, "Dual-pass two-stage EDFA with gain-flattening filters," *J. Opt. Soc. Kor.*, vol. 7, no. 2, pp. 64-66, 2003.
- [8] 장현수, 조준용, 이경식, "기계적으로 구현된 장주기 광섬유 격자 Mach-Zehnder 간섭계," *한국광학회지*, 제 14권 4호, pp. 365-368, 2003.
- [9] K. R. Sohn and K. T. Kim, "Multiwavelength all fiber ring laser using side-polished fiber comb filter and mechanically formed long-period fiber gratings," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 309-311, 2005.
- [10] 손경락, 김광택, 송재원, "금속선으로 형성된 장주기 광섬유 격자의 전류제어에 의한 파장 가변," 2005년 동계학술발표회, 한국광학회, 2005, pp. 298-299.
- [11] S. Savin, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, and H. J. Show, "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Lett.* vol. 25, no. 10, pp. 710-712, 2000.
- [12] B. H. Lee, Y. Liu, S. B. Lee, S. S. Choi, and J. M. Jang, "Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber grating induced by a change of ambient refractive index," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 23, pp. 1769-1771, 1997.
- [13] T. Allsop, L. Zhang, and I. Bennion, "Detection of organic aromatic compounds in paraffin by a long-period fiber grating optical sensor with optimized sensitivity," *Opt. Commun.*, vol. 191, pp. 181-190, 2001.
- [14] J. Y. cho and K. S. Lee, "A birefringence compensation method for mechanically induced long-period fiber gratings," *Opt. Commun.*, vol. 213, pp. 281-284, 2002.
- [15] D. B. Stegall and T. Erdogan, "Leaky cladding mode propagation in long-period fiber grating devices," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 3, pp. 343-345, 1999.

## Tunable Mechanically Formed Long-Period Fiber Gratings using Periodically Arrayed Metal Wires

Kyung-Rak Sohn<sup>†</sup>

*Division of Radio and Information Communication Engineering, Korea Maritime University,  
Dongsam-Dong, Yeongdo-Gu, Busan 606-791, Korea*

Kwang-Taek Kim

*Department of Optoelectronics, Honam University, 59-1 Seongbong-Dong, Gwangsan-Gu, Gwangju 506-714, Korea*

<sup>†</sup>E-mail: krsohn@bada.hhu.ac.kr

(Received April 15, 2005, Revised manuscript July 11, 2005)

In this paper, we have presented mechanically formed long-period fiber gratings using periodically arrayed brass wires with a 250- $\mu\text{m}$  diameter and realized the function of current-controlled wavelength-tuning. With the thermo-optic effect of the surrounding medium around the fiber cladding, the continuous displacement of the resonance wavelengths is achieved through the resistant heat of the wire which changes the refractive index of surrounding material. The tunability for each mode as a function of an applied electrical power is investigated. When the glycerin is used as a thermo-optic material, the measured tuning ranges of LP<sub>03</sub> and LP<sub>04</sub> within electrical power of 20 W reach to 14 nm and 48 nm, respectively. The experimental results are in good agreement with the theoretical that which is analyzed by a geometric-optics approximation.

OCIS Codes : 050. 2770, 060.2340, 120.2440, 120.6810.