

위상 변화 정도에 따른 장주기 격자의 센서 특성 비교

김영민, 이병호
서울대학교 전기컴퓨터공학부

Sensor characteristic comparison of long-period fiber gratings with respect to phase shift ratio

Youngmin Kim and ByoungHo Lee
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 광섬유에 여러 가지의 위상변화를 준 장주기 격자에 대한 센서 특성을 비교하여 분석하였다. 위상변화의 정도에 따라서 센서의 특성을 유효하게 할 수 있는지 비교하여 센서로서의 타당성을 가지는 위상변화 정도의 범위를 알아보았다. 장주기 격자는 아르곤 레이저를 이용하여 point by point 방식으로 제작되었으며, 위상 변화를 주기 위해서 linear stage를 이용하였다.

1. 서 론

광섬유 격자(fiber grating)는 광민감성(photosensitivity)을 지닌 광섬유가 광 굴절률(refractive index)의 변화 정도에 따라서 생성된 일정한 굴절률 패턴을 말한다. 이런 광섬유 격자는 특정 파장의 빛을 선택적으로 투과 혹은 반사하는 특성을 가지고 있기 때문에 응용 범위가 넓다[1, 2]. 이 중에서도 특히 장주기 격자(long-period fiber gratings)는 이득 평탄화 필터, 분산 보상기, 가변 필터, 광대역 애드드랍 다중화기, 광섬유 센서[3]로 이용이 되고 있다[4, 5]. 그런데 최근 위상 변화를 준 장주기 격자를 이용하여 온도나 구부러진 정도, 스트레인 등을 각각, 혹은 동시에 측정하는 센서에 관한 연구가 진행되고 있다[6]. 센서로서 연구되고 있는 위상 변화 장주기 격자들은 대부분 π 만큼 위상 변화를 주어 수행되고 있다. 본 논문에서는 그 위상 변화 정도에 따라서 센서의 특성을 유효하게 할 수 있는지 비교하여 센서로서의 타당성을 가지게 되는 위상변화 정도의 범위를 알아보았다.

2. 본 론

2.1 이론

장주기 격자는 진행하는 코어 모드의 빛을 특정 파장의 진행 방향의 클레딩 모드와 결합시켜서 감쇠시키는 원리를 이용한 것이다. 코어 내로 진행하는 모드와 같은 방향으로 진행하는 클레딩 모드들 간의 위상 정합 조건(phase matching condition)은 다음과 같다.

$$\beta_{01} - \beta_{cl} = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

여기서 Λ 는 기본 모드(fundamental mode)를 클레딩 모드로 결합시키기 위한 격자 주기이며, β_{01} 은 기본 모드(LP₀₁)의 전파 상수(propagation constant)이고, β_{cl} 은 클레딩 모드의 전파 상수이다. 일반적으로 장주기 격자의 파장 제거 영역은 20 - 40 nm 정도로 매우 넓다. 또한 동일방향 결합 모드 이론에 기반하여 위상 변화 장주기 격자를 진행한 뒤의 코어와 클레딩 모드의 모드 진폭은 다음의 식에서 쉽게 유도가 된다.

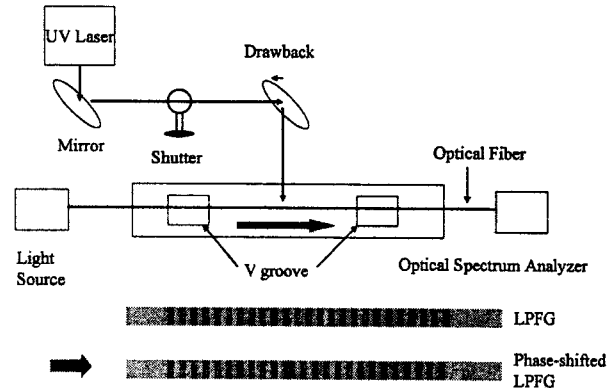
$$\begin{pmatrix} a_{co} \\ a_{cl} \end{pmatrix}_{out} = T_N \cdot \begin{bmatrix} e^{i\phi} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi} \end{bmatrix} \cdot T_{N-1} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\phi} & 0 \\ 0 & e^{-i\phi} \end{bmatrix} \cdots \cdot T_1 \cdot \begin{pmatrix} a_{co}(0) \\ a_{cl}(0) \end{pmatrix}$$

여기서 T_i 는 장주기 격자의 전달 매트릭스의 결합 상수이며, a_{co} 와 a_{cl} 은 코어와 클레딩 모드의 모드 진폭을 나타낸다. ϕ 는 격자의 위상 변화된 정도를 나타낸다.

2.2 실험 구성

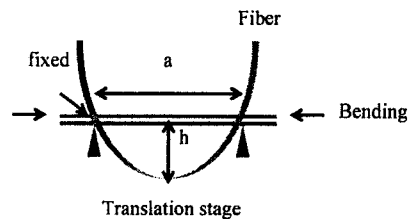
우리는 위상 변화 장주기 격자를 제작하기 위하여 그림 1과 같은 실험 셋업을 구성하였다. 사용된 레이저는 아르곤 레이저(244 nm)이며, 사용된 광섬유는 단일 모드 광섬유(SMF-28)이고 광민감성을 위하여, 상온에서 수 초치리를 약 2주간 진행시켰다. 장주기 격자는 point by point 방법으로 제작되었다. 위상 변화 장주기 격자를 새기기 위하여 linear stage를 이용하였는데, 다음과 같은 방법으로 제작하였다. 광섬유는 아르곤 레이저를 이용하여 UV에 노출을 시키는데, 이 때 전기적으로 제어가 가능한 셔터를 사용하면 장주기 격자의 격자 주기를 결정할 수 있게 된다. 격자의 주기는 235 μ m이며, duty cycle은 50 %, 격자의 길이는 3.29 cm이다. Linear stage의 속도는 60 μ m/s이고, 아르곤 레이저의 세기는 74 mW이다. 아르곤 레이저를 사

용하여 장주기 격자를 광섬유의 절반까지 노출을 시킨 후에, 원하는 위상 변화 정도에 따라 linear stage를 조정하여, 다시 아르곤 레이저로 장주기 격자를 형성하면 위상 변화된 장주기 격자를 제작할 수 있다. Linear stage의 조정 정도에 따라서 여러 종류의 위상 변화된 장주기 격자를 제작할 수 있으므로, 우리는 센서의 특성을 비교하기 위하여 위상 변화 정도를 다르게 하여(π , $\pi/2$, $\pi/3$, $\pi/4$) 장주기 격자를 제작하였다. 제작된 위상 변화 장주기 격자는 광섬유의 광민감성을 제거하기 위하여 24시간 동안 열처리를 하였다.



〈그림 1〉 위상 변화 장주기 격자(phase-shifted LPPG)를 새기기 위한 레이저 셋업

제작된 위상 변화 장주기 격자로 센서로서의 타당성을 가지는지 실험해 보기 위하여 그림 2와 같은 실험 구성을 사용하였다[7]. 그림 2에서 a는 85 cm이며, h는 가해진 힘에 비례하여 일정한 곡률을 갖게 된 정도를 나타내고, 광섬유의 양단은 고정되어 있다.



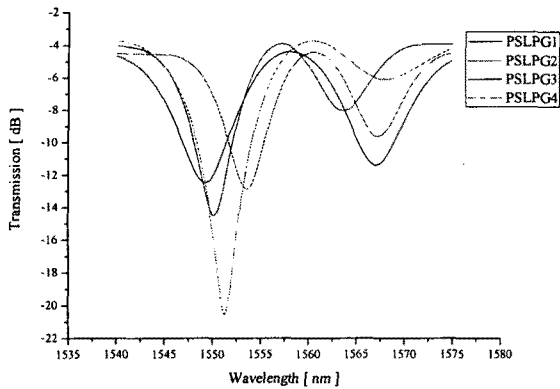
〈그림 2〉 가해진 힘에 의해 곡률을 갖게 된 광섬유

2.3 실험 결과

그림 3은 제작된 위상 변화 장주기 격자의 투과 스펙트럼이다. PSLPG1, PSLPG2, PSLPG3, PSLPG4는 각각 위상 변화를 π , $\pi/2$, $\pi/3$, $\pi/4$ 만큼 주어 제작된 위상 변화 장주기 격자이다. 위상 변화 장주기 격자가 대칭성을 띄기 때문에 $-\pi$, $-\pi/2$, $-\pi/3$, $-\pi/4$ 는 결과를 생략하였다.

제작된 광섬유를 가지고 그림 2에서 설명한 측면 변위의 정도에 대한 투과 스펙트럼의 정도를 측정하였다. 위상 변화 장주기 격자에 의해서 생긴 투과 스펙트럼의 모양은 위상 변화 정도가 π 에서 0으로 갈수록 단일 장주기 격자와 비슷한 모양이 된다. 생성된 파장 대역은 약 1550 nm와 1565 nm이고, 투과 정도는 π 위상 변화 장주기 격자의 경우 약 9 dB정도이며, 투과 정도가 0에 가까울수록 단일 장주기 격자와 모양이 비슷해지며 투과 정도는 약 17 dB이다.

제작된 위상 변화 장주기 격자로 그림 2의 실험을 수행하였다. 고정대에 광섬유를 고정하고, 광섬유 양 단에서 힘을 가하여 광섬유가 일정한 곡률을 갖도록 하였을 때, 어느 정도 범위까지 힘을 가하면 장주기 격자의 투과 스펙트럼이 변하는지에 대한 것은 그림 그대로 제시되었다. 먼저 단일 장주기 격자에 대한 측면 변위 정도에 따른 파장의 변화와 투과 스펙트럼을 측정



〈그림 3〉 서로 다른 위상 변화 장주기 격자에 대한 투과 스펙트럼

하고, 그에 맞는 측면 변위에 대하여 위상 변화 장주기 격자에 대한 실험을 수행하였다. 단일 장주기 격자에 가해진 힘에 대한 측면 변위는 0 - 3.5 mm 정도이며, 그에 대하여 타당한 관계를 보이는 파장 변화와 투과 스펙트럼의 변화를 관찰할 수 있었다. 따라서 위상 변화 장주기 격자도 마찬가지로 비슷한 범위인 0 - 3.5 mm의 측면 변위에 대한 투과 스펙트럼을 관찰하였다. 위상 변화 장주기 격자의 왼쪽 공명 띠는 투과 정도가 비교적 크므로, 오른쪽 공명 띠의 투과 정도와 센서로서의 효용성에 대한 범위를 알아 보았다.

그림 4로부터 위상 변화 장주기 격자의 왼쪽 공명 띠는 예상대로 투과 정도가 오른쪽에 비해서 크므로 그림 2의 실험 구성대로 수행하였을 경우에 파장의 변화와 투과 정도가 비교적 선형적으로 유효 범위까지 움직이는 것을 알 수 있다(약 25-30 nm 위상 변화, 투과 정도의 변화는 1.5-8 dB). 하지만, 오른쪽 공명 띠는 $\pi/4$ 부분에서 투과 정도가 매우 미미하게 변화하므로 앞의 π , $\pi/2$, $\pi/3$ 에 비해서 센서로서의 효용성이 떨어진다는 것을 알 수 있다. $\pi/5$ 의 위상 변화에 대해서도 실험을 수행하였지만, 그 경우엔 위상 변화가 거의 없는 단일 장주기 격자와 비슷한 투과 스펙트럼이 측정되었으므로, 위 실험 결과는 $\pi/4$ 위상 변화까지 측정된 것을 바탕으로 수행하였다.

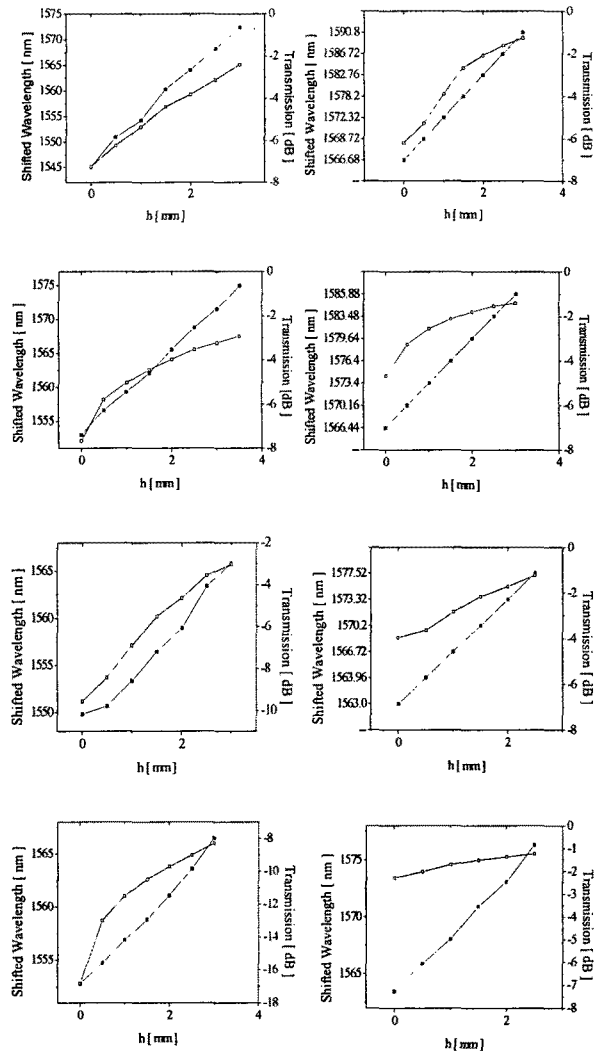
3. 결 론

이상의 실험에서 point by point 방법을 바탕으로 위상 변화 장주기 격자를 위상 변화 정도를 다르게 하여 제작하여, 그것으로 센서의 특성을 비교하여 보았다. 단일 장주기 격자에서 가해질 수 있는 유효 측면 변위인 0 - 3.5 mm의 범위에서 위상 변화 장주기 격자에 대한 실험을 수행한 결과 센서로서의 타당성을 가지는 장주기 격자의 위상 변화 정도는 $\pi/3$ 에서 $4\pi/3$ 정도의 위상 변화를 주었을 때, 비교적 좋은 결과를 보이는 것을 알 수 있었다.

〔참 고 문 헌〕

[1] J. Jung, H. Nam, J. H. Lee, N. Park, and B. Lee, "Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single-fiber Bragg grating and an erbium-doped fiber amplifier," *Applied Optics*, 38, 2749-2751, 1999.
 [2] J. Jung, N. Park, and B. Lee, "Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium:ytterbium-doped fiber," *Applied Optics*, 39, 1118-1120, 2000.
 [3] K. J. Han, Y. W. Lee, J. Kwon, S. Roh, J. Jung, and B. Lee, "Simultaneous measurement of strain and temperature incorporating a long-period fiber grating inscribed on a polarization-maintaining fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, 16, 2114-2116, 2004.

[4] Y. Zhu, P. Shum, C. Lu, B. M. Lacquet, P. L. Swart, and S. J. Spammer, "EDFA gain flattening using phase-shifted long-period grating," *Microwave and Optical Technology Letters*, 37, 153-157, 2003.
 [5] Y. Zhu, B. M. Lacquet, S. J. Spammer, P. Shum, and C. Lu, "Device for concatenation of phase-shifted long-period grating and its application as gain-flattening fiber filter," *Optical Engineering*, 42, 1445-1450, 2003.
 [6] Y. Han, J. Lee, and S. B. Lee, "Discrimination of bending and temperature sensitivities with phase-shifted long-period fiber gratings depending on initial coupling strength," *Optics Express*, 12, 3204-3208, 2004.
 [7] M. N. Ng, Z. Chen, and K. S. Chiang, "Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect", *IEEE Photonics Technology Letters*, 14, 361-362, 2002.



〈그림 4〉 측면 변위 정도에 대한 파장 변화와 투과 정도 (위에서부터 π , $\pi/2$, $\pi/3$, $\pi/4$)