

장주기 광섬유 격자를 위한 단일 모드 광섬유 특성화 기술

Characterization of Single-Mode Fiber for the design of Long-Period Gratings

^{1,2}배준기, ¹박남규 ²이관일, ²이상배,

¹서울대학교 전기컴퓨터공학부 광자응용시스템연구실, ²한국과학기술연구원 광기술연구센터

demian@stargate.snu.ac.kr

단일모드 광섬유에 새겨지는 장주기 광섬유 격자는, 코어로 진행하는 빛을 위상 정합 조건을 만족시키는 특정한 클래딩 모드와 결합시키는 특성을 가지며, 광통신과 센서, 필터용 소자로서 다양하게 연구되고 있다. 원하는 파장에 제거 대역을 형성시키고, 원하는 격자 스펙트럼을 구현하기 위하여는 해당 광섬유의 모드간 분산 특성에 대한 정확한 이해가 요구된다. 그러나, 모드간 분산 특성은 광섬유 구조, 광섬유 구성 물질 및 제조 공정 조건에 따라 현저하게 다른 값을 가지며, 그 온도민감성 또한 광섬유의 도핑율 등에 의하여 다양하게 변화하게 된다. 그러므로, 장주기 격자 기반의 온도 센서나, 가변 필터 소자의 스펙트럼을 해석하기 위해서는 광섬유의 생산 종류/공정마다 독립된 광섬유 특성화 과정이 요구되게 된다.

장주기 격자 스펙트럼으로부터, 광섬유를 특성화하기 위해서는, 먼저 코어와 클래딩 모드의 유효 굴절률과 격자 피크 파장간 관계, 그리고 온도에 따른 모드 특성 변화를 정확하게 이해할 필요가 있다. 일반적으로 장주기 격자의 피크 파장은 다음과 같은 코어모드와 클래딩 모드의 전파 상수간 위상 정합 조건을 만족시키는 파장으로 결정지어지게 된다.

$$\Phi = \beta_{co} - \beta_{cl} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{co}^{eff} - n_{cl}^{eff}) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

이 때, 코어의 유효 굴절률 n_{co}^{eff} , 코어의 굴절률 n_{co} 그리고 클래딩의 굴절률 n_{cl} 은 다음과 같은 정규화 주파수(Normalized frequency) V 의 식으로 단순화될 수 있으므로⁽¹⁾,

$$\frac{n_{co}^{eff} - n_{cl}}{n_{co} - n_{cl}} \cong \left(1.1428 - \frac{0.9960}{V} \right)^2 \quad (2)$$

코어와 클래딩 모드간 굴절률 차의 변화가 온도에 대해 선형적이고, 저차 클래딩 모드(1~20번째 클래딩 모드)의 유효 굴절률의 변화는 클래딩 굴절률 변화와 거의 동일하다고 가정하였을 때, 식 (2)를 이용하여 식 (1)을 미분함으로써, 온도에 따른 모드간 분산 곡선의 변화를 다음과 같이 온도 성분과 파장 성분이 분리된 단순화된 식으로 해석될 수 있다⁽²⁾.

$$\Delta\Phi(\lambda, T - T_0) \cong \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left(1.1428^2 - \frac{1.1428 \cdot 0.9960}{2.405 \cdot \lambda_{cutoff, T_0}} \cdot \lambda \right) \cdot \alpha_T \cdot (T - T_0) \quad (3)$$

이 때, λ_{cutoff, T_0} 와 α_T 는 실온에서의 차단 파장이며, α_T 는 온도에 따른 코어와 클래딩간 굴절률 차의 변화 상수이다. 이 수식에서 보는 바와 같이 광섬유의 모드간 분산의 변화는 클래딩 모드의 차수에 대해 독립적이며, 코어와 클래딩간 굴절률의 차이에 따라 결정지어지게 됨을 알 수 있다.

수식의 검증을 위하여, 우리는 서로다른 격자 주기를 가진 10개의 장주기 광섬유 격자를 제작하고, 각 온도 단계별로 격자스펙트럼을 측정함으로써, 온도에 따른 모드간 분산의 변화의 곡선을 유도하였다⁽²⁾.

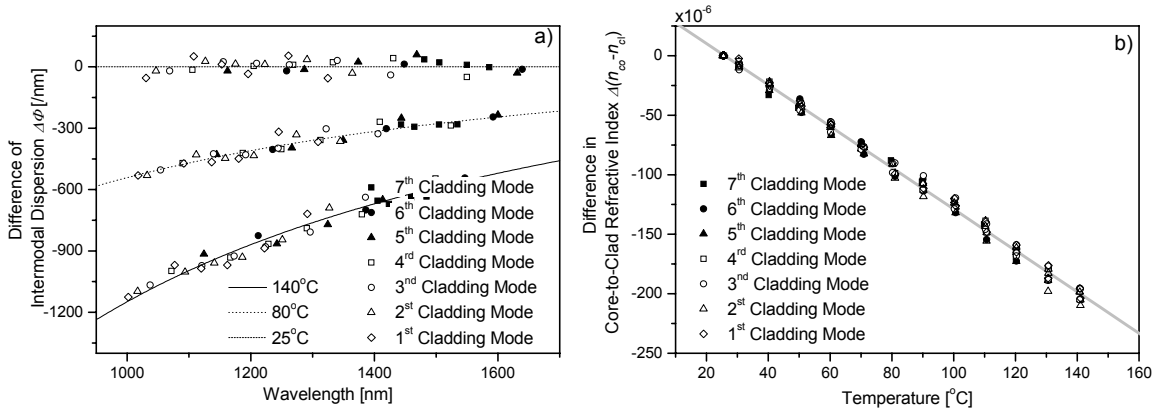


그림 1. 실험적으로 구해진, a) 온도에 따른 모드간 분산의 변화 및 b) 온도에 따른 코어와 클래딩 굴절률의 변화

그림 1에서 보는 바와 같이, 서로다른 차수의 클래딩 모드가 온도에 따라 동일한 변화를 보이고 있을 뿐만 아니라, 코어와 클래딩 굴절률의 변화가 온도에 대해 매우 선형적인 변화를 가짐을 확인할 수 있다. 장주기 격자 온도 민감성 해석을 위한 기존의 수식⁽³⁾에 식 (3)을 대입하였을 때, 장주기 격자 피크 파장의 온도 민감도는 다음과 같은 수식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} \cong \frac{-\left(\frac{8.206}{\lambda} - \frac{2.973}{\lambda_{cutoff, T_0}}\right) \cdot \alpha_T}{d\Phi/d\lambda} \quad (4)$$

실험을 통해 얻어진 온도에 따른 굴절률 변화의 상수 $\alpha_T=1.6610^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 시뮬레이션을 통해 얻어진 모드간 분산 곡선에 대입하였을 때, 장주기 격자 피크 파장의 온도 민감도는 그림 2에 도시한 바와 같다. 그림 2에서 나타난 바와 같이, 온도 민감도는 클래딩 모드 차수 뿐만 아니라, 파장에 따라 현저한 변화를 보이며, 고차 클래딩 모드(7차 이상)와 같이 격자 중심 파장의 변화가 큰 경우, 파장에 따른 온도 민감도의 변화는 심각하게 고려되어야 함을 확인할 수 있다.

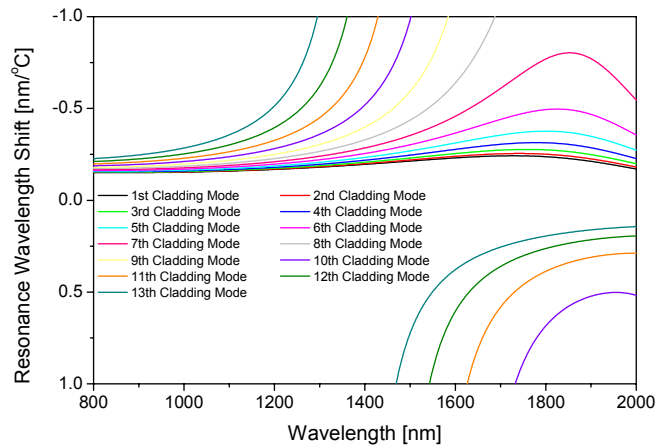


그림 2. 파장 및 클래딩 모드 차수에 따른 피크 파장의 온도 민감도의 변화

본 논문에서는 장주기 광섬유 격자를 이용하여, 광섬유를 진행하는 코어모드와 클래딩 모드의 변화를 관찰하고, 이를 통해 코어와 클래딩의 굴절률 변화를 유도해낼 수 있었으며, 장주기 광섬유 격자의 온도 민감도를 보다 심도 깊게 고찰할 수 있었다. 제안된 수식은 장주기 격자 스펙트럼의 해석 뿐만 아니라, 온도에 따른 차단 파장이나 영분산 파장의 변화 등 광섬유의 특성을 이해하기 위한 새로운 대안으로 활용될 수 있을 것이다.

1. G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communications Systems (New York: Wiley, 1997), Chap. 2.
2. Junkye Bae et al, "Semi-empirical multi-port lattice model for long-period fiber grating analysis under arbitrary temperature distributions", OE, 16, 2, Jan. 2008. (to be published)
3. T. W. MacDougall et al, "Generalized expression for the growth of long period gratings," PTL, 10, 1449-1451, Oct. 1998.