

광 결정 섬유 분산 특성 설계

Designing the dispersion properties of photonic crystal fibers

박제형, 황인각*, 한영근, 이주한, 김상혁, 이용희*, 이상배

한국과학기술연구원 광기술센터, *한국과학기술원 물리학과 나노광학연구실

e-mail: jhbahk@empal.com

본 발표에서는 최근 주목받고 있는 새로운 광섬유, 즉 광 결정 섬유(Photonic Crystal Fibers)⁽¹⁾의 단면 구조를 변형하여 우리가 원하는 분산 특성을 자유롭게 얻을 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 광 결정

섬유는 그림 1에서 보는 바와 같이 그 단면구조가 주기적인 공기 구멍(클래딩 구멍)의 삼각 배열로 이루어져 있으며, 중앙의 공기 구멍 하나를 막아서 코어 영역을 형성한다. 일반적으로 알려진 광 결정 섬유의 클래딩 구멍은 모두 동일한 반지름을 가지고 배열되어 있으나, 이렇게 할 경우 광섬유의 설계 변수가 구멍의 반지름과 구멍과 구멍 사이의 거리(Pitch, Λ) 등 두 가지로 제한되어 원하는 다양한 분산 특성을 설계하기 힘들다.⁽²⁾ 그래서 우리는 그림 1과 같이 최 내각 클래딩 공기 구멍들의 반지름을 바깥 구멍들의 반지름과 다르게 설계한 새로운 형태의 광 결정 섬유를 제안하며, 이 새로운 광 결정 섬유의 설계 변수들을 적절히 조절하여 원하는 형태로 분산 특성을 조절하는 방법을 보이기로 한다.

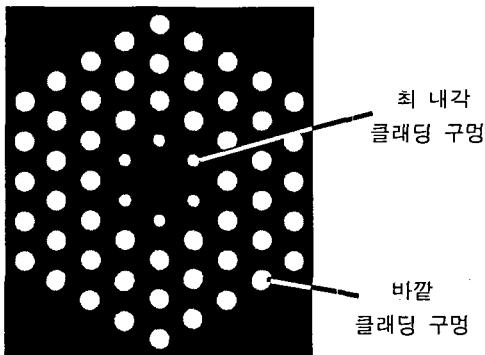


그림 1. 제안된 광 결정 섬유의 단면도. 최 내각 클래딩 구멍의 크기와 바깥 클래딩 구멍의 크기가 다르다. (검은 부분: pure silica, $n=1.45$, 하얀 부분: air, $n=1.0$)

제안된 광 결정 섬유는 최 내각 클래딩 구멍의 크기, 바깥 클래딩 구멍의 크기, 그리고 구멍과 구멍 사이의 간격(pitch)

등 세 가지 설계 변수를 갖는다. 그림 2는 이와 같이 제안된 새로운 광 결정 섬유의 분산(dispersion) 특성 그래프를 보여준다. 분산은 도파로 분산(waveguide dispersion)과 물질 분산(material dispersion)을 합한 것으로서, 물질 분산은 Sellmeier equation⁽³⁾으로 근사한 값을 사용하였다. 그림 2에서, 바깥 클래딩 구멍의 반지름 R_{clad} 은 0.25Λ 로 고정한 채, 최 내각 클래딩 구멍의 반지름을 $R_{in} = 0.25\Lambda \sim 0.10\Lambda$ 로 변화시켜 가면서 분산을 구하였다. 단, 구멍 간격 Λ 은 $1.3\mu\text{m}$ 로 고정하였다. $R_{in} = 0.25\Lambda$ 일 때는 기존의 광 결정 섬유와 동일한 경우이며, 최 내각 구멍의 크기가 작아지면 작아질수록, 통신 주파수 $1.5\mu\text{m}$ 부근에서 분산 값이 증가하면서 그 기울기가 음의 값에서 양의 값으로 변화함을 알 수 있다. 즉 최 내각 구멍의 크기를 조절함으로써 우리가 원하는 분산의 기울기 값을 찾아낼 수 있다.

이제 pitch와 R_{in} 을 고정시키고, 바깥 클래딩 구멍의 반지름, R_{clad} 을 변화시킬 때의 분산 특성의 변화 패턴을 알아보면 그림 3과 같다. 바깥 클래딩 구멍이 커질수록 전체적인 분산의 레벨이 상승함과 동시에 미세하게 분산의 기울기가 변화한다. 즉, R_{clad} 의 조정을 통해 미세한 분산 기울기의 조정과 분산 레벨의 조정 두 가지를 한꺼번에 이룰 수 있다. 그림 4는 마지막으로 구멍과 구멍 사이의 간격, pitch를 조정할 때의 분산의 변화를 보여준다. pitch가 커질수록 분산의 레벨이 상승하고 있음을 알 수 있다. 그림 4의 경우에는 $\text{pitch}=1.6\mu\text{m}$ 일 때 통신 주파수 부근의 주파수 대역의 분산값이 0에 도달하고 있는 모

습을 보여주고 있다. R_{in} 과 R_{clad} 를 조절하여 분산 기울기를 충분히 줄이면 평평한 분산 특성 (flattened dispersion)을 얻을 수 있고, 여기서 마지막으로 pitch를 결정해주면 분산이 평평한 부분이 0 레벨 근처에 가도록하여, 매우 큰 주파수 영역에서 분산값 0이 되는 광섬유를 설계할 수 있다. 실제로 $R_{in} = 0.15\Lambda$, $R_{clad} = 0.22\Lambda$ 일때 주파수 $1.3\mu\text{m}$ 에서 $2.0\mu\text{m}$ 까지 분산값의 최대 차이가 1ps/nm/km 가 되며, pitch 즉, $\Lambda = 1.58\mu\text{m}$ 로 맞추면 이 주파수 영역에서 분산값이 $+0.48\text{ps/nm/km}$ 에서 -0.30ps/nm/km 영역 안에 들어오는 것을 관찰하였다. 이는 참고문헌⁽²⁾에 보고된 일반 광 결정 섬유 543nm 영역에서 $\pm 1\text{ps/nm/km}$ 평평도보다 더 넓은 영역에서 두 배 이상의 향상된 평평도를 보이는 것이다.

결론적으로, 광 결정 섬유의 최 내각 클래딩 구멍의 크기를 바깥 구멍들의 크기와 다르게 설계함으로써, 원하는 주파수 영역에서 큰 음의 분산 기울기에서 큰 양의 분산 기울기 등의 매우 큰 분산값을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 넓은 영역에서 분산값이 평평해지고 0에 가깝게 만들 수 있음을 확인하였다.

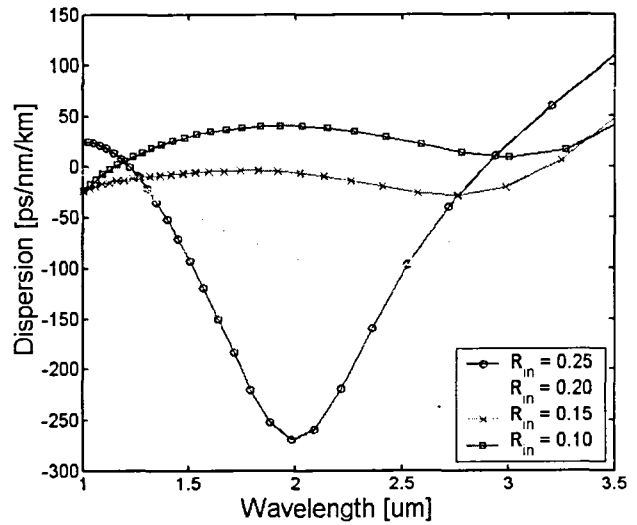


그림 2. 분산 특성 그래프 1. 바깥 클래딩 구멍의 반지름 $R_{clad} = 0.25\Lambda$ 로 고정한 채, 최내각 클래딩 구멍의 반지름 $R_{in} = 0.25\Lambda \sim 0.10\Lambda$ (아래쪽부터)로 변화시킴 ($\Lambda = 1.3\mu\text{m}$)

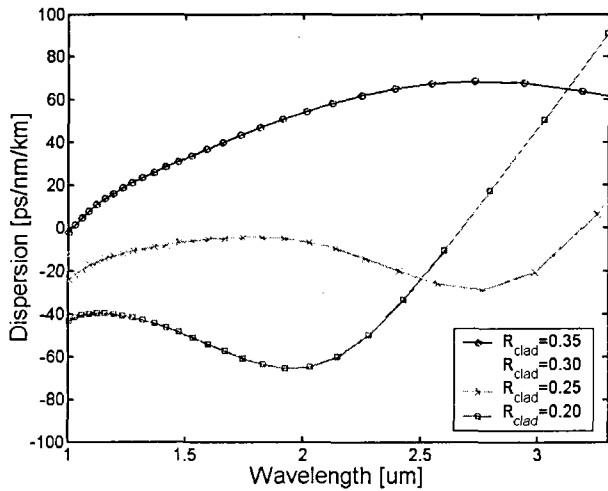


그림 3. 분산 특성 그래프 2. 최내각 클래딩 구멍의 반지름 $R_{in} = 0.15\Lambda$ 로 고정시킨뒤, 바깥 클래딩 구멍의 반지름을 $R_{clad} = 0.20\Lambda \sim 0.35\Lambda$ (아래쪽부터)로 변화시킴 ($\Lambda = 1.3\mu\text{m}$)

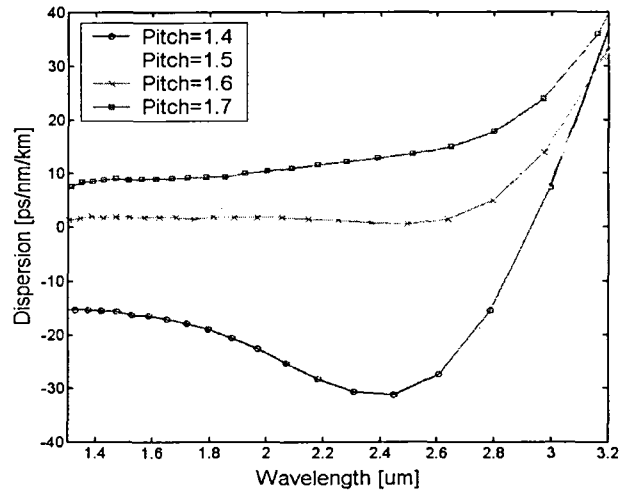


그림 4. 분산 특성 그래프 3. 최내각 클래딩 구멍의 반지름 $R_{in} = 0.15\Lambda$, 바깥 클래딩 구멍의 반지름을 $R_{clad} = 0.22\Lambda$ 로 각각 고정시킨 후 pitch $\Lambda = 1.4\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ (아래쪽부터)로 변화시킴

T
F

1. P. Russell, "Photonic Crystal Fibers," *SCIENCE* 299 358 (2003)
2. A. Ferrando *et al*, "Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers," *OPTICS EXPRESS*, 9(13), 687 (2001)
3. G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication systems* 2nd ed., John Wiley & Sons Inc. (1997)