

# 자기조립으로 형성된 중공광섬유 내 미세유체의 온도에 따른 1차원적 주기 구조

## Temperature dependent Self-Assembled 1-D Periodic Microfluidic Structure in a Hollow Optical Fiber and its device applications

안소희, 하우성, 정용민\*, 오경환  
연세대학교 물리 및 응용물리 사업단,

\*Optoelectronic Research Center, University of Southampton, U.K  
soheean@yonsei.ac.kr

주기적인 2차원적 air hole 구조로 인해 다공성광섬유(holey fiber) 사람들에게 많은 주목을 받아왔다 [1]. 특히, 이러한 air hole에 액체를 주입하고 [2], 기체의 압력 변화와 광섬유 테이퍼 공정을 통해 hole 크기를 조절하고 [3], hole 내에 액정(liquid crystal)을 형성하는 등 [4], hole 엔지니어링 기술에 대한 연구가 지속적인 관심을 받고 있다. 최근 공기로 채워진 hole이 있는 광섬유에 변경 가능한 세로방향의 주기적인 미세구조를 형성하였으나 공기와 액체가 정확하게 번갈아 주입되어야 하는 제약이 있었다 [5].

이 논문에서 저자는 중공광섬유(hollow optical fiber, HOF) [6] 내부에 공기와 물의 주기적인 1차원적 미세유체 구조를 자기조립적으로 제작하였다. 형성된 구조의 주기는 flame에 의한 온도를 통해 얻을 수 있었으며, 투과 스펙트럼을 측정하고 결과에 대해 정성적으로 분석하였다.

물은 낮은 점성과 강한 표면장력을 가지고 있기 때문에 진공형성장치 없이 모세관 현상만으로도 HOF의 미세 hole로 스며들 수 있다. Washburn's equation에 따르면, 시간  $t$ 동안 점성이  $\eta$ 이고 표면장력이  $\gamma$ 인 유체가 반지름  $r$ 인 모세관에 접촉각  $\theta$ 로 닿을 때 스며드는 길이  $L$ 은 다음과 같다 [7].

$$L^2 = \left( \frac{\gamma \cos\theta}{\eta} \right) rt. \quad (1)$$

상온에서 6.3- $\mu\text{m}$ -hole의 HOF에 1초당 스며드는 물의 길이는 이론적으로 약 1.55 cm이다. 이 HOF와 단일모드광섬유(single mode fibers, SMFs)를 용착 접속함으로써 물을 HOF의 air hole 안에 가둘 수 있으며, 그러한 SMF-HOF가 접속된 부분의 실제 사진이 그림 1에 나타난다.

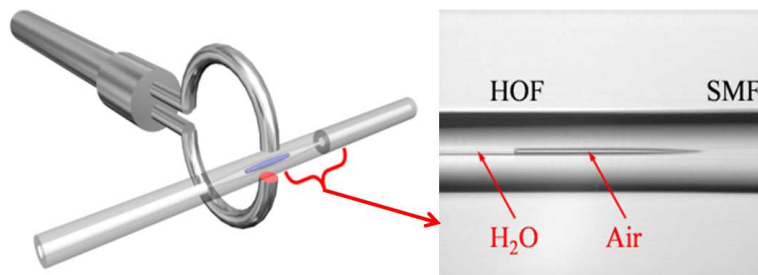


그림 1. 제조과정 개념도(왼쪽)와 표시된 실제 SMF-HOF 용착 접속 영역의 현미경 사진(오른쪽).

Flame brushing 과정동안 mass flow controller의 프로판-산소 가스 혼합 비율을 변화시킴으로써 가

열조건을 변경할 수 있었다. HOF 내에 갇힌 물은 특정한 조건 아래에서만 주기적으로 배열되는데, 프로판의 비율이 아주 높거나 낮을 때는 주기적인 배열이 관찰되지 않았다. 프로판과 산소 비율의 적절한 온도 범위에서 공기-물이 같은 비율로 이루어진 일차원적 주기적인 구조가 형성되었다.

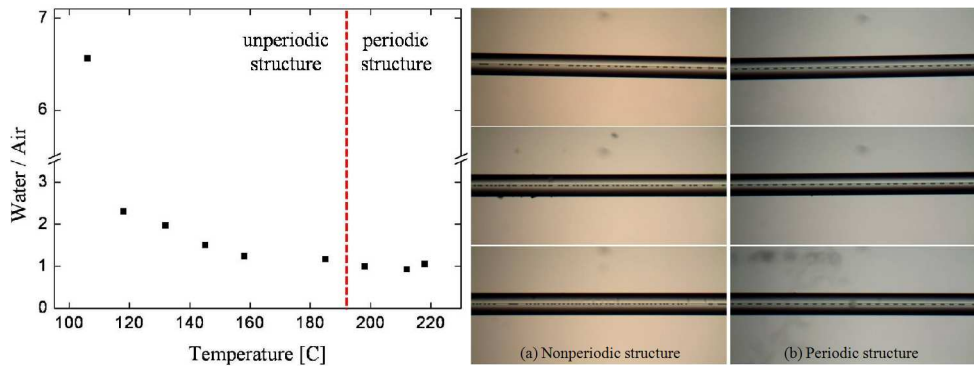


그림 2. 가스 혼합비율로 인한 특정 온도 범위 내에서 형성되는 물 조각의 주기와 길이는 각각 다음과 같다; (a) Non periodic structure (b) 위에서부터 각각의 period 44.76, 48.13, 40.62 에서 water와 air의 ratio는 1.05, 0.93, 0.99

그림 2의 (b) 에서 형성되어 있는 주기적인 구조는 최적의 열역학적 조건 하에서 자발적으로 조립된 구조라 말할 수 있다. Flame brushing 과정에서 증가된 온도는 air hole에 갇힌 물을 증발시킴과 동시에 높은 압력에 의해 액체를 이동시키는 원인이 된다. Flame brushing 과정 후에는 온도가 낮아지면서 수 증기는 액체로 응결된다. 응결핵을 중심으로 응결과정이 이루어질 때, 국부적인 열원의 진행으로 말미암아 겪게 되는 기화, 압력증가, 응축단계들은 공기와 물의 주기적인 구조를 만든다.

주기적인 공기-물의 반복 구조에 의한 스펙트럼상의 효과를 관찰하기 위해 백색광원을 제작된 소자에 입사시키면서 출력부에서의 투과 스펙트럼을 광학 스펙트럼 분석기 (optical spectrum analyzer, OSA)로 측정하였다. 그 결과, 장주기 광섬유 격자(Long period fiber gratings, LPFGs)와 비슷한 공명 피크가 1500 nm 와 1600 nm 사이에서 나타남을 확인하며 대역 소거 특성을 가짐을 알 수 있었다. 일반적인 LPFG의 주기인 500  $\mu\text{m}$  정도인 반면에, 이 보다 작은 100  $\mu\text{m}$  정도 주기의 LPFGs를 미세액체 조각을 통해 만들 수 있으므로 더욱 집약된 광섬유 격자의 제작이 가능하다. 광학적 스펙트럼은 공명 특성을 보였고, 이것은 주기적인 결합 소자에 적용될 수 있을 것으로 보인다.

이 논문은 한국과학재단 (과제번호 ROA-2008-000-20054-0, R15-2004-024-00000-0), 국제과학기술협력재단 (과제번호 2009-8-1339, 2008-8-1893 (GOSPEL project)), 한국산업기술평가원 (과제번호 2007-8-2074, 2008-8-1195), 그리고 한국학술진흥재단 두뇌한국 21 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

1. P. St. J. Russell, J., "Photonic-Crystal Fibers", *Lightwave Technol.* **24**, 4729 (2006).
2. Y. Huang, et al., "Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique", *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5182 (2004).
3. W. J. Wadsworth, et al., "Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibres", *Opt. Express* **13**, 6541 (2005).
4. T. T. Larsen, et al., "Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres", *Opt. Express* **11**, 2589 (2003).
5. C. Kerbage, et al., "Tunable microfluidic optical fiber gratings", *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1338 (2003).
6. K. Oh, et al., "Novel hollow optical fibers and their applications in photonic devices for optical communications", *J. Lightwave Technol.* **23**, 524 (2005).
7. E. W. Washburn, *Phys. Rev.* **17**, 273 (1921).