

# 광자 결정 광섬유에서 펌프광원의 파장과 입력파위에 따른 초 광대역 광원 발생의 특성

김종두 · 이기주 · 전민용<sup>†</sup>

충남대학교 물리천문우주과학부 양자제어물성연구소  
Ⓣ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

안성준

선문대학교 정보통신공학부  
Ⓣ 336-708 충남 아산시 탕정면 갈산리 100

최용규

한국항공대학교 항공재료공학과  
Ⓣ 412-791 경기도 고양시 덕양구 화전동

(2005년 9월 23일 받음, 2005년 12월 5일 수정본 받음)

본 논문은 광자 결정 광섬유에서 100 fs의 펄스 폭을 갖는 펌프 광원의 파장과 입력파위에 따른 초 광대역 광원 생성에 대해 실험적으로 연구하였다. 적절한 파라미터들을 조절함으로써 광 스펙트럼 진폭의 균일함이 10 dB 이내에서 약 750 nm의 스펙트럼 폭을 갖는 초 광대역 광원을 얻어냈다. 사용한 광자 결정 광섬유의 길이는 2 m였고, 펌프광원으로는 모드 록킹된 Ti:Sapphire laser를 사용하였다. 또한, 펌프 광원의 여러 가지 변수들을 바꿔줌으로써 초 광대역 광원의 다양한 스펙트럼 현상을 조절할 수 있었다.

주제어 : Fiber optics and optical communications, Fiber optics source and detectors, Nonlinear optics, fibers, Ultrafast processes in fibers.

## I. 서 론

광자 결정 광섬유는 주기적으로 배열된 유리층과 공기층을 가지고 있으며, 그 주기가 상호 작용하는 빛의 파장 정도의 크기를 가진다. 광자 결정 광섬유는 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있으며, 첫째는 포토닉 밴드 갭 방식으로 광섬유 코어 주위를 광자 결정 구조로 둘러싸주어 얻어내는 것이고, 둘째는 굴절률 차이로 전파하는 방식으로 전통적인 계단 굴절률 형식의 광섬유에서 빛의 전파와 동일하다. 광자 결정 광섬유에서 반복적인 굴절률 변화는 크기, 모양, 주기를 조절하여 원하는 특성의 광자 결정 광섬유를 제작할 수 있다. 이렇게 형성된 광섬유는 넓은 파장 영역에서 단일모드 전송이 가능하며, 특이한 분산특성, 넓은 모드 분포 등 일반적인 단일모드 광섬유에서 구현하기 어려운 여러 가지 특성을 가지고 있다. 특히 코어를 작게 하여 작은 면적에 빛을 가두어 주면 매우 높은 파워 밀도를 얻을 수 있는데 이러한 특성은 높은 비선형성을 가질 수 있도록 해준다. 최근 이러한 광자 결정 광섬유의 높은 비선형 특성을 이용하여 광대역 초 연속 스펙트럼 (supercontinuum)에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데, 초단 광 펄스를 이용하여 광자 결정 광섬유에서 한 옥타브(octave) 이상 넓은 스펙트럼 영역을 갖는 광대역 광원의 생성은 그 응용성에서 많은 가능성을 보여주고 있다.<sup>[1-4]</sup> 예

들들어, 광 주파수 표준화를 위한 metrology,<sup>[5]</sup> 광 결맞음 단층촬영(Optical coherence tomography),<sup>[6,7]</sup> WDM 광통신 광원<sup>[8]</sup> 등은 초 광대역 광원을 응용할 수 있는 좋은 보기라 하겠다. 광자 결정 광섬유와 같이 높은 비선형성을 갖는 광섬유 (highly nonlinear fiber)는 일반적인 통신용 단일모드 광섬유나 분산 천이 광섬유에 비해 적게는 수배에서 많게는 수백 배의 높은 비선형 값을 갖는다. 비선형성이 큰 광자 결정 광섬유에서 초 연속 스펙트럼 광원을 얻기 위해서는 우선 입력시켜 주는 펌프 광원의 중심파장과 높은 입력 파워가 중요한 변수가 된다.<sup>[9]</sup> 높은 비선형 효과를 얻기 위해서는 사용하는 광자 결정 광섬유의 분산 값이 0인 파장 근처에서 펌핑을 해 줘야 하고, 그 파워도 또한 높은 것이 요구되는데, 이를 위해서는 연속적인 빔보다는 초단 광 펄스를 사용하는 것이 높은 첨두치 에너지로 입력시킬 수 있기 때문에 훨씬 더 효율적이다. 초 광대역 광원은 사용하는 광섬유에 따라서 펌프 파장의 다양화와 펌프 초에서 나노 초까지의 펄스 폭을 갖는 광원을 이용하여 구현되어 왔다.<sup>[3,10]</sup> 하지만 넓은 파장 범위에서 평탄한 스펙트럼을 얻는 것은 매우 어려우며, 사용하는 파장이나 광섬유의 의존성이 매우 높다. 본 논문에서는 모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저 펌프 광원을 2 m의 광자 결정 광섬유에 집속 시킨 후, 펌프 파장의 변화 및 펌프 출력을 변화시킴으로써 광자 결정 광섬유로부터 나오는 출력 특성을 조사하였다. 또한 광 범위한 파장 영역인 750 nm 대역에서 파장 스펙트럼의 진폭 변동률에 대해 10 dB 이하를 얻어냈다.

<sup>†</sup>E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

## II. 모드 록킹된 Ti:Sapphire레이저 및 이를 이용한 초 광대역 광원 실험

광자 결정 광섬유에서 초 광대역 광원을 얻기 위하여 모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저를 이용하였다. 그림 1은 모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저의 실험 장치도를 보여준다. Ti:Sapphire 레이저를 발진하기 위한 펌프레이저는 Ar레이저를 사용하였다. 이 레이저에서 모드 록킹을 구현하기 위하여 Kerr렌즈 방식을 이용하였으며, 반복률은 85MHz이다. 레이저 공진기는 길이가 4.8 mm인 Ti:Sapphire 이득 매질과 이를 둘러싸고 있는 R = 10 cm짜리 두개의 오목거울, R = 88%인 광 출력경, 그리고 GVD(group velocity dispersion) 보상을 위한 프리즘 쌍으로 이루어져 있다. Ti:Sapphire 결정을 여기 시키기 위한 장치로는 출력이 4.5 W, 파장이 532 nm인 다이오드 펌핑된 Nd:YVO<sub>4</sub> 레이저를 사용하였다. 모드록킹된 Ti:Sapphire 레이저 출력 펄스의 반치폭 [FWHM(full width at half maximum)]은 약 15 fs ~ 100 fs 정도이다. 중심 발진 파장은 프리즘 쌍 뒤에 있는 슬릿의 위치를 조절함으로써 740 nm ~ 860 nm까지 가변 시킬 수 있었다.

안정적인 레이저 동작은 파장이 800 nm 근처일 때 얻을 수 있었고, 이때 레이저의 최대 평균 출력은 500 mW 였다. 이에 대응되는 펄스의 첨두 출력은 다음 식으로부터 계산된다.

$$P_{av} = \sqrt{\pi} \frac{T_{FWHM}}{1.665} f_r P_p \quad (1)$$

여기서,  $P_{av}$ 는 평균 출력,  $P_p$ 는 펄스의 첨두출력,  $T_{FWHM}$ 은 펄스의 반치폭,  $f_r$ 은 펄스의 반복률이다. 이에 대응되는 펄스의 첨두 출력은 약 30 kW 였다. Ti:Sapphire 레이저의 모드록킹된 펄스는 렌즈 쌍을 통하여 평행 빔으로 만들어지고 이를 다시 10x 대물렌즈를 사용하여 2 m 길이의 광자 결정 광섬유에 입사된다. 이 실험에서 광섬유로의 결합효율(coupling efficiency)은 약 20~25 % 정도였다. 따라서 실제 광자 결정 광섬유에 입사하는 최대 평균 광 출력은 약 100 mW 정도이다.

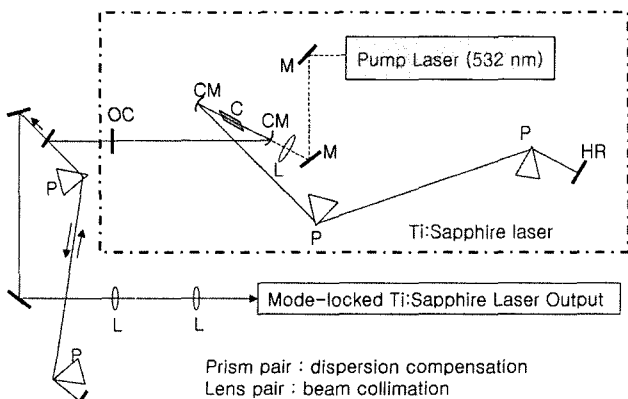


그림 1. 모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저의 실험 장치도.

그림 2는 초 광대역 광원을 발생하기 위한 실험 장치를 보여주고 있다. 모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저로부터 출력된 빛을 xyz translator에서 정교하게 정렬하여 10x 대물렌즈를 통해 광자 결정 광섬유에 집속시킨다. 광자 결정 광섬유에 입사하는 광원의 파워를 조절하기 위하여 입사하기 전에 광 감쇄기를 삽입하여 입력하는 광의 세기를 조절하였다. 광자 결정 광섬유는 그 구조가 코어를 중심으로 주기적으로 배열된 공기 층이 있어서 기존의 광섬유와 접촉하는 것은 상당히 어렵다. 융착 접속을 할 경우 공기층이 수축되면서 광손실이 상당히 크게 되어 효율면에서 효과가 많이 떨어진다. 본 실험에서는 광자 결정 광섬유의 출력을 광 스펙트럼 분석기로 분석을 위하여 정밀한 V-groove를 이용하여 단일모드 광섬유와 정렬하였다. 이때 광자 결정 광섬유의 끝이 매우 예민하여 손상을 입기가 쉬우므로 광섬유 끝이 서로 닿지 않도록 주의해야 한다. 본 실험에서 사용한 광자 결정 광섬유는 780 nm 파장에서 132(Wkm)<sup>-1</sup>의 비선형 값을 갖는 상업용 광섬유이며, Photonic Crystal사의 Item 번호는 NL-1.6-755인 제품이다. 코어의 지름은 1.6 μm이고, 영 분산 값은 단파장에서 755 nm ± 15 nm, 장파장에서 근사적으로 1300 nm의 값을 갖는다. 기존 분산천이 광섬유의 비선형 계수 값이 수(Wkm)<sup>-1</sup>에 불과함을 볼 때 광자 결정 광섬유의 비선형 계수 값이 10배 이상 큼을 알 수 있다.<sup>[11]</sup>

## III. 실험결과 및 토의

그림 3는 광자 결정 광섬유에 입사하는 펌프 파장이 768 nm일 때 펌프 출력을 증가시키면서 관측한 광 스펙트럼이다

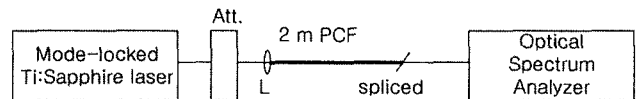


그림 2. 초 광대역 광원 발생을 위한 실험 장치도.

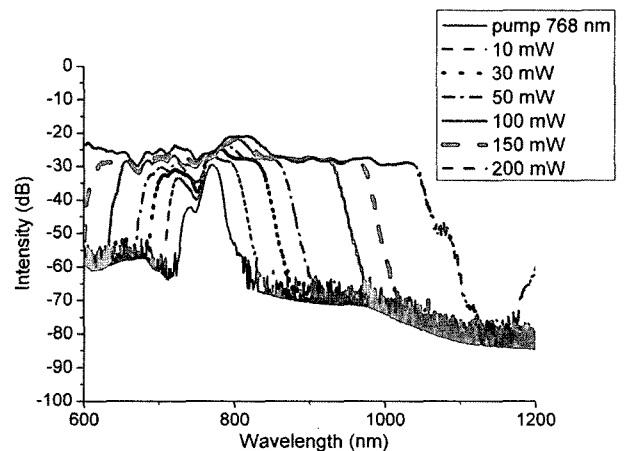


그림 3. 광자 결정 광섬유에 입사하는 펌프 파장이 768 nm일 때 펌프 출력에 따른 초 광대역 광원의 스펙트럼.

다. 768 nm에서 광자 결정 광섬유에 입사하기 전 펌프 광원의 스펙트럼 선 폭은 약 30 nm이다. 펌프 광원의 출력이 100 mW일 때 선 폭의 확장은 300 nm이고, 이 때 300 nm의 파장 범위에서 진폭의 안정도는 10 dB 이내이다. 출력을 200 mW로 올리게 되면, 선폭의 확장은 약 500 nm에 해당된다. 이 펌프 파장에서는 200 mW 이상의 출력을 얻어낼 수 없었기 때문에 더 넓은 선 폭의 확장은 측정 할 수 없었다. 그림에서 알 수 있듯이 펌프 파워를 점차 증가시키면 스펙트럼 선 폭이 균일하게 확장되고 있다. 사용한 광자 결정 광섬유의 영 분산 값이  $755 \text{ nm} \pm 15 \text{ nm}$ 이므로 이 펌프 파장은 모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저로부터 얻을 수 있는 가장 짧은 파장이고 이 값이 영 분산 파장 값에 가장 가깝다고 볼 수 있다. 만약 펌프 파워가 더욱 높다면 진폭의 안정도가 5 dB 이내에서 수백 nm 이상의 초 광대역 광원을 발생할 수 있으리라 기대된다. 그림 3으로부터 펌프 출력이 200 mW의 경우에 진폭 균일도 10 dB 이내에서 약 500 nm의 넓은 광원을 얻어낼 수 있었다.

그림 4는 펌프 광원의 파장을 800 nm로 바꾼 후 펌프 파워를 변화시키면서 측정한 초 광대역 광원의 20 dB 선폭이다. 펌프 파워가 200 mW까지는 선폭의 증가가 선형적으로 됨을 볼 수 있지만 200 mW 이상의 펌프 파워에서는 거의 증가되는 것을 볼 수 없다. 그러나 펌프 파워가 증가하면 진폭의 변화가 현저히 줄어드는 것이 관측되었다. 그림 5는 광자 결정 광섬유에 입사하는 펌프 광원의 세기에 따라서 광 스펙트럼의 변이를 보여준다. 그림 5(a)는 펌프 광원의 광 스펙트럼을 보여주며, 그림 5(b) ~ (f)까지는 레이저의 펌프 파워를 30, 100, 200, 400, 500 mW로 증가시켜가면서 측정한 광 스펙트럼이다. 이 중에서 펌프 파워가 500 mW의 경우 450 nm에서 1200 nm 이상까지 약 750 nm 영역에서 진폭의 변화가 10 dB 이내임을 볼 수 있다. 이렇게 진폭의 변화가 비교적 작은 것은 광 결맞음 단층 촬영용 광원으로 이용하기에 좋다고 알려져 있다. 만약 진폭의 변화가 크게 되면 적당한 광 필터를 이용하여 진폭 변화가 작도록 만들 수 있지만, 이 때 광 손실이 커지고 비용이 증가하게 되어 효율적이지 못하다.

그림 5의 경우 사용한 광자 결정 광섬유의 영분산 파장에서 약 50 nm 정도 떨어져 있는데, 이 때 펌프 광원의 출력이

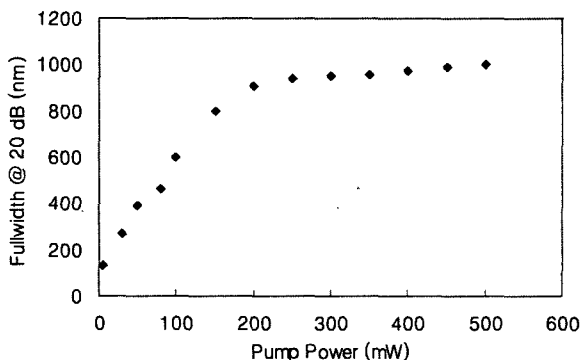


그림 4. 펌프 파장이 800 nm에서 펌프 파워에 따른 초 광대역 광원의 스펙트럼 선 폭.

400 mW 이내에서는 광 스펙트럼 변이가 매우 넓을지라도 진폭의 변화가 크을 볼 수 있다. 더 높은 출력을 입사하였을 때 광 스펙트럼 진폭의 변화가 10 dB 이내로 들어오름을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 광섬유에서 발생하는 비선형 광학 현상은 펌프 파장이 영 분산 파장 값에 가까울수록 잘 일어난다. 따라서 펌프 파장이 800 nm인 경우에도 펌프 파워를 증가시킬수록 비선형 현상은 일어나지만, 768 nm 펌프 파장을 사용했을 때처럼 진폭의 균일함을 볼 수 없었다. 하지만 펌프 파워가 500 mW의 경우 광 스펙트럼 진폭의 균일함이 10 dB 이내로 정할 경우 약 700 nm의 스펙트럼 폭이 얻어졌고, 20 dB 이내로 할 경우에는 약 1000 nm 이상의 초 광대역 광원을 얻어 낼 수 있었다.

#### IV. 결 론

모드 록킹된 Ti:Sapphire 레이저를 이용하여 2 m 광자 결정 광섬유에서 초 광대역 광원을 얻어냈다. 사용한 광자 결정 광섬유의 영 분산 파장은  $755 \text{ nm} \pm 15 \text{ nm}$ 이고, 비선형 값은 파장이 780 nm에서  $132(\text{Wkm})^{-1}$ 을 갖는다. 펌프 광원의 파장이 사용한 광섬유의 영 분산 파장 값에 가까운 768 nm일 때 펌프 파워의 증가에 따라서 스펙트럼 선폭이 균일하게 증가했으며 진폭의 변동폭은 거의 볼 수 없었다. 반면 펌프 파장이 800 nm에서는 펌프 파워의 증가에 따라서 스펙트럼 선폭이 증가하면서, 진폭의 변동폭은 감소함을 볼 수 있었다. 펌프 파워가 500 mW의 경우 광 스펙트럼 진폭의 균일함이 10 dB 이내로 정했을 때 약 750 nm의 스펙트럼 폭이 얻어졌고, 20 dB 이내로 할 경우에 약 1000 nm 이상의 초 광대역 광원을 얻어냈다. 본 연구에서 얻은 초 광대역 광원은 진폭의 변동폭이 적어야 하는 광 결맞음 단층 촬영용 백색광 간섭계의

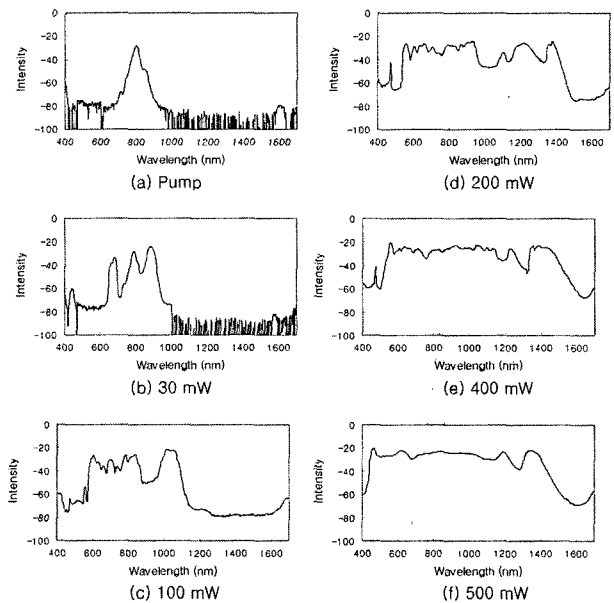


그림 5. 펌프 파장이 800 nm에서 펌프 파워에 따른 초 광대역 광원의 스펙트럼.

광원으로 사용하기에 적절할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-003-C00083).

### 참고문헌

- [1] K. M. Hilligsoe, T. V. Andersen, H. N. Paulsen, C. K. Nielsen, K. Molmer, S. Keiding, R. E. Kristiansen, K. P. Hansen, and J. J. Larsen, "Supercontinuum generation a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths", *Opt. Express*, vol.12, pp.1045-1054, 2004.
- [2] S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt, J. D. Harvey, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, and P. St. J. Russell, "White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber", *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 1356-1358, 2001.
- [3] J. M. Dudley, L. Provino, N. Grossard, H. Maillotte, R. S. Windeler, B. J. Eggleton, and S. Coen, "Supercontinuum generation in air-silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, pp.765-771, 2002.
- [4] A. V. Husakou and J. Herrmann, "Supercontinuum generation in photonic crystal fibers made from highly nonlinear glasses", *Appl. Phys. B*, Vol. 77, pp. 227-234, 2003.
- [5] D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, and S.T. Cundiff, "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis", *Science*, vol. 288, pp. 635-639, 2000.
- [6] I. Hartl, X.D. Li, C. Chudoba, R.K. Ghanta, T.H. Ko, J.G. Fujimoto, J.K. Ranka, and R.S. Windeler, "Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber", *Opt. Lett.* Vol. 26, pp. 608-610, 2001.
- [7] M. Bashkansky, M. D. Duncan, L. Goldberg, J. Koplow, and J. F. Reintjes, "Characteristics of a Yb-doped superfluorescent fiber source for use in optical coherence tomography," *Opt. Express*, vol. 3, 305-310, 1998.
- [8] T. Yamamoto, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka, and S. Yamaguchi, "Supercontinuum generation at 1.55 m in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber", *Opt. Express*, vol. 11, pp. 1537-1540, 2003.
- [9] K. M. Hilligsoe, H. N. Paulsen, J. Thogersen, S. R. Keiding, and J. J. Larsen, "Initial steps of supercontinuum generation in photonic crystal fibers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, pp. 1887-1893, 2003
- [10] A. B. Fedotov, A. N. Naumov, A. M. Zheltikov, I. Bugar, J. D. Chorvat, A. P. Tarasevitch, and D. von der Linde, "Frequency-tunable supercontinuum generation in photonic-crystal fibers by femtosecond pulses of an optical parametric amplifier", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, pp. 2156-2164, 2002.
- [11] Crystal Fibre website, <http://www.crystal-fibre.com>.

## Characterization of Supercontinuum Generation as a Function of Pump Wavelength and Intensity in Photonic Crystal Fiber

Jong Doo Kim, Ki Ju Yee and Min Yong Jeon<sup>†</sup>

*Department of Physics, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, KOREA*

<sup>†</sup>E-mail: [myjeon@cnu.ac.kr](mailto:myjeon@cnu.ac.kr)

Seong Joon Ahn

*Division of I&C Engineering, Sunmoon University, Tangjeong-myon, Asan-si, Chungnam 336-708, KOREA*

Yong Gyu Choi

*Department of Materials Science and Engineering, Hankuk Aviation University*

(Received September 23, 2005, Revised manuscript December 5, 2005)

We have experimentally studied supercontinuum generation in a photonic crystal fiber as a function of pump wavelength and intensity with 100 fs pulsewidth. A supercontinuum over 750 nm spectral width with amplitude variation less than 10 dB has been achieved. It was generated by coupling femtosecond pulses from a mode-locked Ti:Sapphire laser into a 2 m long photonic crystal fiber. Adjusting the parameters of the pump source, it was also possible to control different spectral features of the supercontinuum radiation.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2380, 060.4370, 060.7140.