

# 모드 잠금 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저로부터 발생된 초 광대역 광원을 이용한 광통신 파장 영역의 표준 가스의 흡수스펙트럼

이종민 · 전민용<sup>†</sup>

충남대학교 물리학과

Ⓞ 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지

유한영 · 서호성

한국표준과학연구원 양자응용 SI연구단

Ⓞ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2008년 1월 4일 받음, 2008년 2월 10일 수정본 받음)

적외선 영역에서 극초단 펄스 폭을 갖는 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 광자 결정 광섬유에 입사하여 초 연속 스펙트럼을 갖는 광원을 얻어 냈다. 이 광원을 이용하여 광통신 파장 영역에서 많은 흡수 전이선을 갖는 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 및 시안화 수소(H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N) 분자의 흡수 스펙트럼을 측정하였다. 초 연속 스펙트럼을 얻기 위해 펌핑 광원으로 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 사용하였다. 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저는 중심파장이 1510 nm 대역에서 반복률이 100 MHz이고, 펄스폭은 75 fs이다. 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저 출력을 20 m의 광자 결정 광섬유에 집속시켜 진폭변동이 ±5 dB이하에서 400 nm 이상의 평탄한 초 연속 스펙트럼을 얻었으며, 전체적으로 한 octave 이상의 초 광대역 광원을 얻었다. 이 광원을 이용하여 50개 이상의 흡수 전이선을 갖는 아세틸렌 분자(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)와 시안화 수소 분자(H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N)의 흡수 스펙트럼을 측정하고, Voigt 곡선 맞춤을 이용하여 Lorentian 성분의 흡수 선폭을 각각 측정하였다. 이와 같은 초 광대역 광원의 스펙트럼을 이용하면 O, S, C, L 밴드와 같은 대역에 존재하는 분자의 흡수 스펙트럼 측정에 있어 유용하게 사용될 수 있다.

주제어 : Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저, Fiber optics and optical communications, Nonlinear optics Ultrafast lasers, Supercontinuum generation, 아세틸렌

## I. 서 론

최근의 광통신 시스템은 1.5 μm 파장 대역에서 고밀도 파장 분할 다중화(DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 시스템을 통하여 광원, 필터, 다중화기, 역 다중화기의 핵심 부품이 함께 발전하였다. DWDM 시스템의 발전은 채널 사이의 간격이 줄어들어 서로 이웃하는 채널 사이에 혼선(crosstalk) 등의 영향을 줄 수 있어서 시스템 성능 저하 등의 문제점을 갖는다. 따라서 1.5 μm 파장 대역에서 DWDM 시스템에 들어가는 각종 광통신 부품의 파장 정확도를 향상시킬 필요성이 있으며, 이를 위한 파장 교정용 표준물질 개발이 필요하게 되었다. 일반적으로 파장 표준물질로는 온도, 압력, 외부 전자기장과 같은 외부 환경에 안정한 분자가스를 이용한다. 광통신 영역에서 흡수 전이 선들을 갖는 분자로는 아세틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), 시안화수소(HCN), 일산화탄소(CO) 등이 있다. 아세틸렌은 1513 nm에서 1541 nm 영역인 S-band(Short-band) 일부와 C-band(Conventional-band) 영역에서 파장 기준 표준물질로 사용하고, 시안화수소는 1528 nm에서 1563 nm 영역인 C-band의 전 영역에서 파장 기준 표준물질로서 사용한다.<sup>[1-3]</sup>

한편, 분자 기체로부터 흡수 전이 선들을 얻기 위해서는 넓은 발진 파장 대역을 갖는 광원이 필요하다. 크롬이 첨가된 Cr<sup>4+</sup>:YAG(Cr<sup>4+</sup>:Y3A15012) 물질은 적외선 영역에서 넓은 발진 파장대역을 갖고 있으며 연속적으로 파장 가변이 가능하다. 발진 파장대역은 1350~1650 nm이며, 이득 대역이 넓어서 상온에서 극초단 펄스 방출을 가능하게 하므로 1.5 μm 영역의 레이저 이득매질로 많이 사용하고 있다. 최근 Cr<sup>4+</sup>:YAG를 이용하여 100 펨토초 이하의 펄스를 발진한 연구 결과를 국내에서 발표하였다.<sup>[4,5]</sup> 극초단 광 펄스는 펄스 중심에 높은 에너지를 갖고 있어서 비선형 광학 현상을 이용하면 넓은 선폭을 갖는 초 광대역 광원(supercontinuum)을 발진시킬 수 있다. 특히 최근 몇 년 전부터 개발하고 상용화한 광자 결정 광섬유는 짧은 길이의 광섬유만으로 높은 비선형 효과를 얻어낼 수 있어서 초 광대역 광원을 발진시키기 위한 최적의 매질로 이용해 왔다.<sup>[6-8]</sup>

아세틸렌 및 시안화 수소와 같은 분자들의 흡수 스펙트럼 측정을 위한 광원으로는 EE-LED(edged emitting light emission diode), ECLD(external cavity laser diode) 등의 파장가변 레이저가 많이 이용되나, 그 광원이 지닌 파장 대역의 한계로 여러 파장 대역에 존재하는 분자들의 흡수 스펙트럼을 측정하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 하지만 광자 결정 광섬유를 이용하여 발생된 한 octave 이상의 초 광대역 광원을

<sup>†</sup>E-mail: myjeon@cnu.ac.kr

이용하면 이러한 한계점을 해결 할 수 있다. 또한 넓은 발진 대역을 갖는 초 광대역 광원은 분자기체의 흡수 전이선을 이용한 광 주파수 절대 측정의 응용광원으로 사용 가능하다. 본 논문에서는 중심파장 1510 nm에서 100 fs 이하의 극초단 펄스를 갖는 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저를 개발하였고, 이 레이저를 펌프 광원으로 하여 1.5 μm에서 비선형 값이 큰 광자 결정 광섬유에 입사함으로써 넓은 대역폭을 갖는 초 광대역 광원을 얻어낸 결과를 보고한다. 또한, 연속 스펙트럼의 넓은 파장 대역의 출력특성을 이용하여 C-밴드 영역(1530~1565 nm)의 광통신 밴드에 주로 분포하는 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 및 시안화수소(H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N)와 같은 기준 분자의 흡수선 스펙트럼을 측정할 연구 결과를 보고한다.

## II. 모드잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저 실험 장치도

본 연구에서 사용된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 공진기 형태는 그림 1과 같이 두개의 평면거울과 두개의 오목거울을 사용한 X형 접합 공진기 구조이다.<sup>[4]</sup> 이때 길이 20 mm, 직경 6 mm 그리고 양면이 Brewster 각으로 가공된 레이저 이득 매질인 Cr<sup>4+</sup>:YAG 결정은 두개의 오목거울 사이에 위치하게 된다.

레이저 공진기 길이는 1.5 m로 반복률이 100 MHz가 되도록 하였으며, 레이저 매질의 광범핑은 최대출력이 10 W이고 중심파장이 1064 nm인 Nd:YVO<sub>4</sub> 레이저를 사용하였다. 펌프 빔을 집속시키기 위해서 양면이 1064 nm 영역에서 반사 방지(AR: Anti-reflection) 코팅된 초점거리가 100 mm인 볼록렌즈를 사용하였다. 이때 펌프 빔이 레이저 공진기에 입사하기 전에 λ/2 파장판을 통해 펌핑 레이저의 편광을 90도 회전시켜 효율적으로 집속하도록 하였다. 공진기에서 사용되는 모든 거울은 1064 nm 파장영역은 투과시키고, 1350~1650 nm 영역파장에는 99.9% 이상 반사시키도록 전반사 코팅된 제품을 사용하였다. 출력 경(Output Coupler: OC)은 광대역 코팅된 거울로서 1.5% 투과를 갖는 고반사를 평면거울이다. 또한, 극초단 펄스가 매질을 통과하게 되면서 생기는 양의 군속도 분산을 보상해주기 위해 프리즘 쌍을 사용하였다. 이때 프리즘 간격을 변화시키며 분산에 따른 펄스 특성을 확인한 결과 최적조건의 프리즘 간격이 140 mm임을 확인하였다.

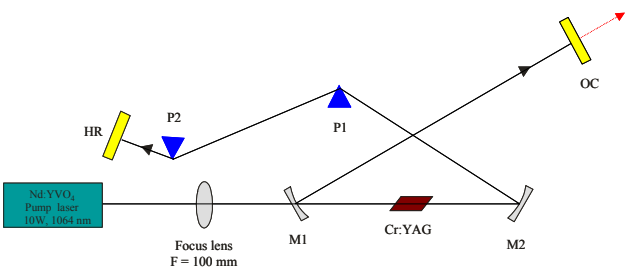


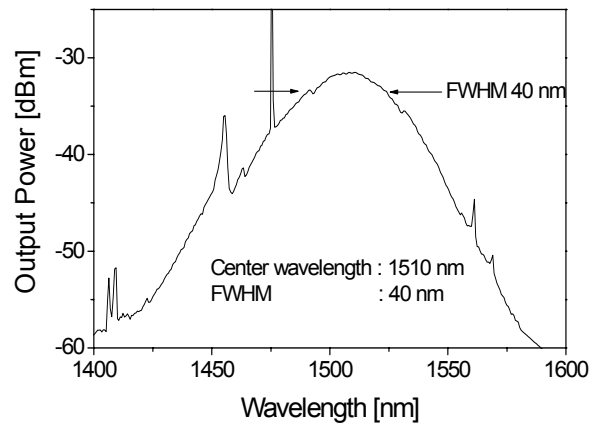
그림 1. Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 실험 장치도. M1, M2 : HR concave mirror (ROC = 100 mm), HR : broadband high reflection flat mirror for 1350 nm ~ 1650 nm, OC : output coupler (T = 1.5%), P1, P2 : IR FS prisms

본 연구에서는 Kerr-lens mode-locking을 위해 프리즘 P2를 이용하여 공진기의 길이를 낮은 주파수로 변조시키는 방법으로 모드잠금을 유도하였다.

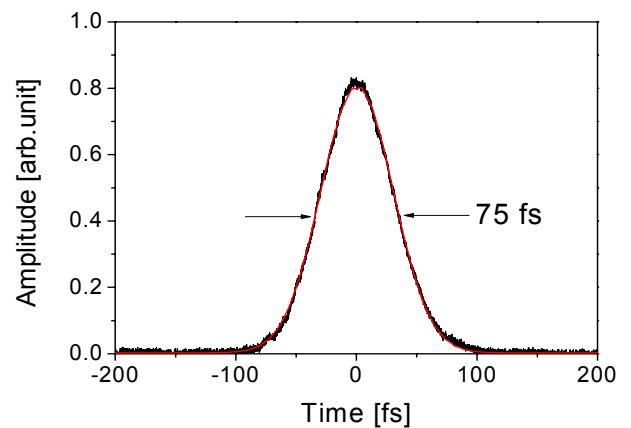
그림 2는 모드잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 출력 특성을 보여준다. 그림 2(a)는 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 발진 파장을 보여주며 중심파장은 1510 nm이다. 이때 측정된 3 dB 선폭은 40 nm이다. 그림에서 약간의 연속 발진 스펙트럼 성분을 볼 수 있지만 질소 기체를 이용하여 상대적으로 안정된 모드 잠금 된 펄스를 얻어낼 수 있었다.<sup>[4]</sup> 그림 2(b)는 자체 상관계(auto-correlator, 모델명 : FEMTOCHROME, RESEARCH. INC., FR-103MN)를 이용하여 레이저의 펄스 폭을 측정할 결과이며, 가우시안 한계 펄스형태로 가정할 때 75 fs의 펄스 폭을 갖는다.

## III. 초 광대역 스펙트럼 발생 실험

본 절에서는 1550 nm 대역에서 비선형 계수 값이 큰 광자 결정 광섬유 20 m를 이용하여 초 광대역 광원을 발생한 결과를 보고한다. 그림 1의 실험 장치도로부터 얻어낸 모드 잠



(a) 모드잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 스펙트럼



(b) 자체상관계를 이용한 선폭.

그림 2. 모드잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 특성.

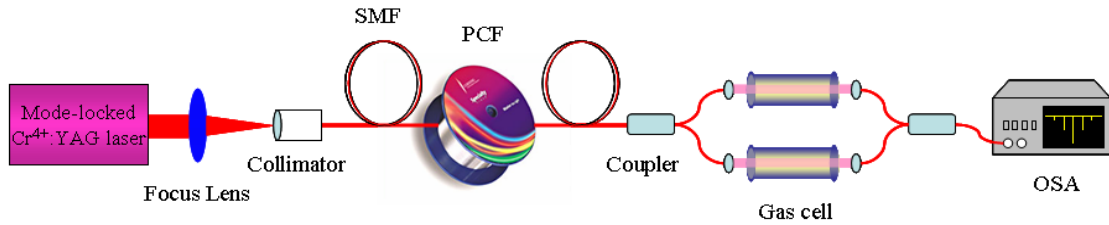


그림 3. 표준가스의 흡수 분광을 위한 실험장치도.

금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저 출력과 비선형성이 큰 광자 결정 광섬유를 이용하여 초 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 발생 할 수 있었다. 기존에 초 광대역 광원 발생을 위해 사용한 광섬유는 주로 비선형 계수 값이 단일모드 광섬유(Single mode fiber)에 비해 상대적으로 큰 분산 천이 광섬유(Dispersion shifted fiber)나 최근에 개발된 높은 비선형성 광섬유(Highly nonlinear fiber)를 이용하였다. 이것들을 사용한 광섬유는 짧게는 수 m에서 길게는 수 km까지 사용하였다. 최근 몇 년 동안 새롭게 개발된 광자 결정 광섬유는 기존 광섬유들과 비교하여 상대적으로 짧은 길이(수 cm ~ 수십 m) 만으로 그 효과를 충분히 얻어낼 수 있게 되었다. 높은 침투치를 갖는 광을 비선형성이 높은 광자 결정 광섬유에 입사하면 광대역 초 연속 스펙트럼(supercontinuum)을 갖는 광원을 쉽게 얻어 낼 수 있다.<sup>19)</sup> 또한, 초 연속 스펙트럼 광원을 얻기 위한 중요한 변수로써 입력시켜 주는 펌프 광원의 중심파장과 사용한 광자 결정 광섬유의 영 분산 파장 값의 일치도이다. 이 값의 일치도가 높을수록 사용하는 광섬유의 길이가 짧아도 된다. 하지만 펌프 광원의 중심파장과 사용하는 광자결정 광섬유의 영 분산 파장이 많이 다르면 충분한 비선형 효과를 얻기 위해서는 더 많은 길이의 광섬유가 필요하게 된다. 본 실험에서는 광대역 초 연속 스펙트럼을 갖는 광원을 얻기 위하여 코어 직경이 2.1 μm이고 1550 nm 파장 대역에서 높은 비선형 특성을 갖는 광자 결정 광섬유 20 m를 이용하였다.

그림 3은 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저와 광자결정 광섬유를 이용해서 초 광대역 광원을 얻어내고, 이를 이용하여 표준 분자의 흡수 스펙트럼을 측정하기 위한 실험 장치도이다. 보통 사용하는 광섬유의 길이보다 긴 길이를 사용한 것은 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 중심파장이 사용한 광자결정 광섬유의 영 분산 파장과 많이 다르기 때문이다. 광자결정 광섬유는 앞 쪽에 일반 단일 모드 광섬유와 융착 접속하여 빛이 효율적으로 광자 결정 광섬유에 입사하도록 하였다. 높은 출력의 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저 광원을 포커스 렌즈를 통하여 일반 단일모드 광섬유(SMF)에 입사시켜 효율적으로 광자 결정 광섬유에 접속시킬 수 있었다. 광자결정 광섬유로 접속시킨 후 진폭의 평탄도가 ±5 dB 이내에 대해 1300 nm 대역에서 1700 nm 대역 너머로 약 400 nm 이상의 평탄한 초 광대역 연속스펙트럼을 얻을 수 있었으며, 이때 접속된 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 최대출력은 160 mW이었다. 본 실험에서 사용된 광자 결정 광섬유는 crystal-fibre 사의 NL-1550-pos-1인 제품이다. 특성은 표 1과

표 1. 광자 결정 광섬유(NL-1550-pos-1)의 특성.

Length	20 m
Dispersion @ 1480 ~ 1620 nm	0.5 < D < 1.5 ps/nm · km
Attenuation @ 1510 ~ 1620 nm	< 9 dB/km
Splicing loss @ 1550 nm	< 0.5 dB
Numerical aperture @ 1550 nm	0.40 ± 0.05
Nonlinear coefficient	~ 11 (Wkm) <sup>-1</sup>

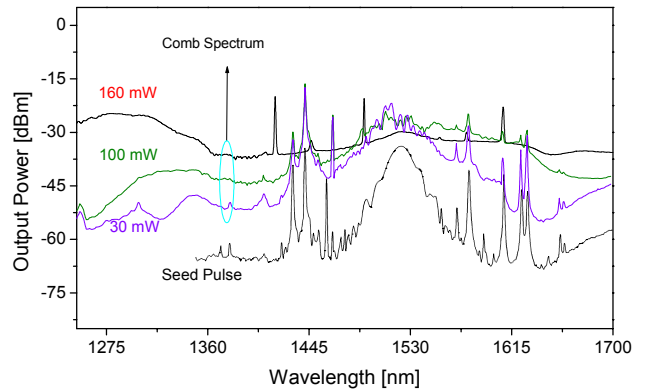


그림 4. 광자 결정 광섬유에 입사하는 펌프 파워에 따른 초 광대역 스펙트럼.

같다.

광자 결정 광섬유에 입사하는 펌프 광원의 출력을 변화시키면서 나오는 출력을 광 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정 하였다. 그림 4는 펌프 광원의 중심파장이 1510 nm이고, 광자 결정 광섬유에 입사되는 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 출력을 30 mW부터 160 mW까지 단계별로 변화시켜 가면서 출력된 광대역 초 연속 스펙트럼 분포를 보여준다. 펌프 광원의 입력 파워가 증가할수록 비선형 광학 현상이 일어나면서 스펙트럼 분포가 점차 확장되어져 가는 것을 확인할 수 있었다. 펌프 광원의 입력 파워가 증가되어도 여전히 약간의 연속발전 성분이 남아 있음을 볼 수 있다. 펌프 광원의 입력 파워의 증가에 따라 최대 1100 nm 이상의 초 광대역 광원을 얻어 낼 수 있었다. 그림 5는 모드 잠금된 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저의 입력 파워가 160 mW일 때 600 nm~1700 nm 이상까지 약 1100 nm 대역에 걸친 광대역 초 연속 스펙트럼을 보여준다. 그림 5의 inset은 1500 nm ~ 1600 nm 사이에서 초 광대역 광원의 출력의 진폭변화가 거의 없음을 보여주며, 또한 이 영역은 표준 분자 셀의 흡수 스펙트럼을 측정하기 위한

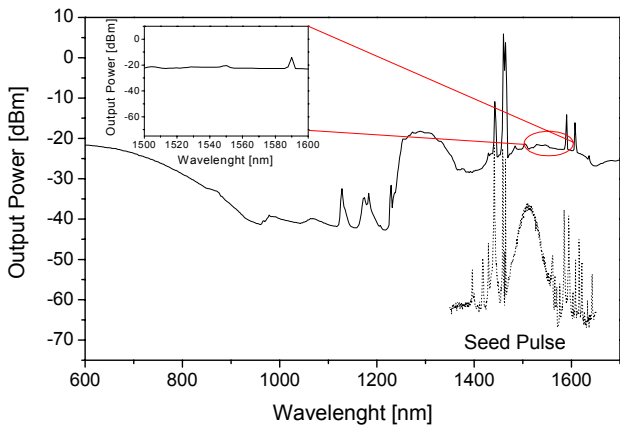


그림 5. 160 mW 펌프 출력일 때 600 nm ~ 1700 nm의 초 광대역 스펙트럼.

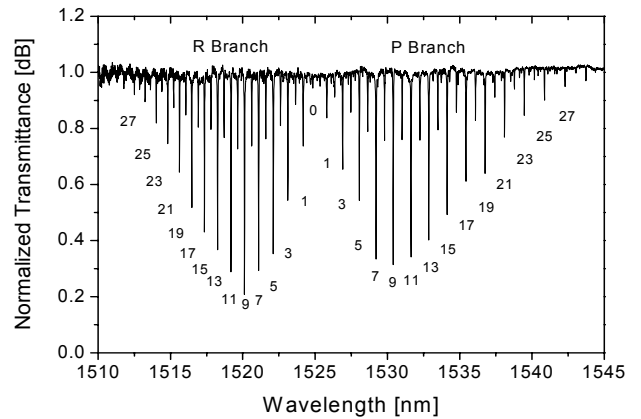


그림 6. 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 흡수 스펙트럼.

파장 대역이 된다.

#### IV. 표준분자 기체의 흡수 스펙트럼 측정 실험

그림 3의 실험장치도에서 초 광대역 광원을 이용하여 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 및 시안화수소(H<sub>13</sub>C<sub>14</sub>N) 분자의 흡수 스펙트럼을 측정하였다. 초 광대역 광원은 넓은 스펙트럼 특성으로 그림 3의 실험장치도에서 보는바와 같이 동시에 여러 가지 분자기체 셀의 흡수 스펙트럼을 측정할 수 있는 이점을 가진다. 본 연구에서는 안정화된 레이저로 교정한 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer)를 이용하여 분자기체들의 흡수 스펙트럼을 측정하였다. 광 스펙트럼 분석기는 상대 파장 안정도 10<sup>-11</sup> 을 갖는 안정화된 레이저<sup>[10]</sup>로 교정하였다. 최대 분해능은 0.01 nm(1.25 GHz)이며, 흡수 스펙트럼 측정을 위해 최대 분해능을 사용하였다. 모드 잠금된 160 mW 출력의 Cr<sup>4+</sup>:YAG 레이저 빔을 광자결정 광섬유에 통과시켜 발생된 초 광대역 광원을 표준분자 셀에 각각 통과시켜 광 스펙트럼 분석기로 스펙트럼을 확인하였다. 그림 6과 그림 7에서 보는바와 같이 50개 이상의 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) 흡수 스펙트럼과 시안화수소(H<sub>13</sub>C<sub>14</sub>N) 흡수 스펙트럼 결과를 얻을 수 있었다.

실험에 사용된 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)의 분자 셀의 길이는 5 cm 이고, 상온에서 200 torr의 압력을 갖는다. 또한 시안화수소(H<sub>13</sub>C<sub>14</sub>N) 분자 셀의 길이는 15 cm이고, 압력은 100 torr이며 두 표준가스 셀의 윈도우는 각각 무반사 코팅 되어있다. 그림 6의 아세틸렌 분자의 흡수선(1513 nm ~ 1541 nm)은 광통신 밴드 중에서 S-밴드인 1490 nm ~ 1530 nm에서 광통신 파장의 절대 기준선을 제공한다. 또한, 그림 7의 시안화수소 분자의 흡수선(1528 nm ~ 1563 nm) 들은<sup>[2]</sup> 광통신 밴드 중에서 C-밴드인 1530 nm ~ 1560 nm 영역에 분포하고 있어 이 영역의 절대 기준선을 제공한다.

흡수 선폭은 가우시안 선폭과 로렌시안 선폭의 조합으로 오리진(ver 7.0) 프로그램의 Voigt 곡선 맞춤을 이용하여 가우시안 성분과 로렌시안 성분을 각각 분리하여 흡수선폭을 분석 할 수 있다.

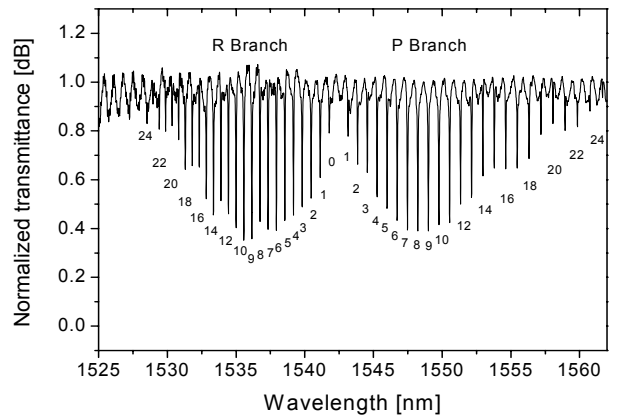


그림 7. 시안화수소(H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N) 흡수 스펙트럼.

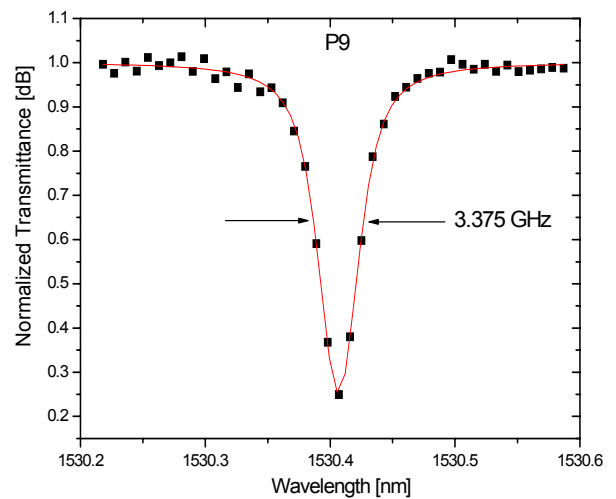
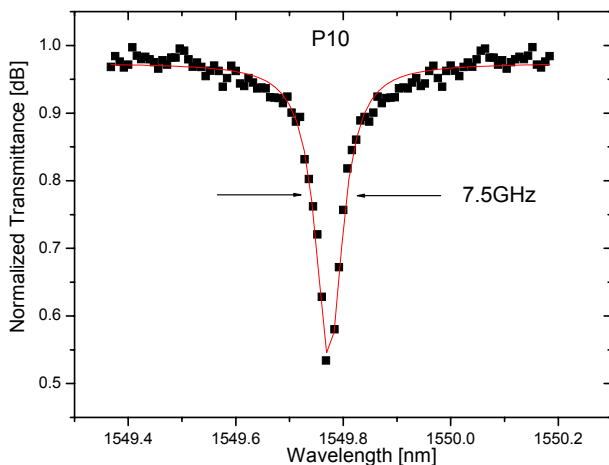


그림 8. 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) P9 선폭.

그림 8과 그림 9에 보이는 흡수 스펙트럼은 각각 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)의 P9에 해당하는 흡수선과 시안화수소(H<sub>13</sub>C<sub>14</sub>N)의 P10에 해당하는 흡수선으로 흡수 정도가 각각 약 75%, 45% 이다. 이때 그림 8에서와 같이 아세틸렌(<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)의 경우 Voigt 곡선 맞춤 결과 흡수선의 선폭은 약 3.375 GHz 정도로 측정

그림 9. 시안화수소( $H^{13}C^{14}N$ ) P10 선폭.

되었고, 도플러 선폭확대(500MHz) 보다 약 6.7배 정도 큰 선폭을 가짐을 알 수 있었다. 그리고 그림 9에서와 같이 시안화수소( $H^{13}C^{14}N$ )의 경우 선폭은 약 7.5 GHz 정도로 측정되었다. 선폭이 증가한 이유는 셀 내부에 기체 분자의 압력이 높기 때문에 분자들 상호간의 충돌에 의한 선폭 확대(collision broadening)가 가장 중요한 원인이다.

## V. 결 론

중심파장이 1510 nm이고, 펄스폭이 75 fs인 모드잠금된  $Cr^{4+}$ :YAG 레이저를 이용하여 코어 직경이 2.1  $\mu m$ 인 높은 비선형 특성을 갖는 20 m의 광자 결정 광섬유를 통과시킨 후 octave 이상의 초 광대역 연속 스펙트럼과 진폭 평탄도가  $\pm 5$  dB 이내에서 400 nm 이상의 평탄한 광대역 광원을 얻었다. 이 연속 스펙트럼의 넓은 파장대역의 출력특성을 이용하여 C-밴드 영역(1530~1565 nm)의 광통신 밴드에 주로 분포하는 아세틸렌( $^{12}C_2H_2$ ) 및 시안화수소( $H^{13}C^{14}N$ )와 같은 기준 분자 기체의 흡수선 스펙트럼을 측정하였다.

$Cr^{4+}$ :YAG 레이저의 파장을 1.5  $\mu m$  파장 영역에서 좁은 선폭의 흡수선을 갖는 아세틸렌 분자에 안정화하여 사용하게 되면 주파수 표준 분야, 고밀도 파장 분할 다중화 시스템의 발전 향상, 분자 분광학 등의 절대 파장 기준을 제공하는 중요한 광원으로의 가능성이 있으며,  $Cr^{4+}$ :YAG 레이저의 초 광대역 연속 광원은 광 주파수 절대 측정이나, L-밴드의 영역(1560 nm ~ 1605 nm)에 분포하는 CO(carbon monoxide) 기체나 HI(hydrogen iodide) 기체의 분광에도 활용될 수 있을 것이다. 또한, 기체 고유분자의 흡수 스펙트럼 측정은 향후 광통신 핵심소자 제작을 위한 파장기준을 제공할 뿐만 아니라 광 부품 시험 기관이나 신뢰성 평가 기관의 시험기준용 파장 기준을 제공할 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] W. C. Swann and S. L. Gilbert, "Pressure-induced shift and broadening of 1510-1540 nm acetylene wavelength calibration lines," *J. Opt. Soc. Am. B* vol. 17, pp. 1263-1270, 2000.
- [2] W. C. Swann and S. L. Gilbert, "Line centers, pressure shift, and pressure broadening of 1530-1560 nm hydrogen cyanide wavelength calibration lines," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, pp. 1749-1756, 2005.
- [3] S. L. Gilbert, W. C. Swann, and C. M. Wang, "Hydrogen cyanide  $H^{13}C^{14}N$  absorption reference for 1530-1560 nm wavelength calibration SRM 2519," *Natl. Inst. stand. Technol. (US) Spec. Publ.* 260-137, 1998.
- [4] 조원배, 이상민, 김종두, 전민용, 서호성, "수동 모드 잠금된 100 MHz  $Cr^{4+}$ :YAG 레이저에서의 펄스초 펄스 발생," *한국광학회지*, vol. 16, pp. 535-541, 2005.
- [5] 이봉연, 이동한, 이치원, 윤석범, 추한태, "극초단 펄스  $Cr^{4+}$ :YAG 레이저의 제작 및 동작 특성," *한국광학회지*, vol. 15, pp. 455-460, 2004.
- [6] V. L. Kalashnikov, E. Sorokin, S. Naumov, I.T. Sorokina, V. V. Ravikanth Kumar, and A. K. George, "Low-threshold supercontinuum generation from an extruded SF6 PCF using a compact  $Cr^{4+}$ :YAG laser" *Appl. Phys. B* vol. 79, pp. 591-596, 2004.
- [7] H. Hundertmark, D. Wandt, C. Fallnich, V. V. Ravi Yanth Kumar, A. K. George, J. C. Knight, "Octave-spanning supercontinuum generation in an extruded PCF with an Er-doped fiber laser-amplifier system" in *Optical Fiber Communication Conference 04*, Los Angeles, USA, vol. 2, pp.4-6, February, 2004.
- [8] W. J. Wadsworth, N. Y. Joly, F. Biancalana, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, "Compact supercontinuum generation and four-wave mixing in PCF with 10ns laser pulses" *Conference on Lasers and Electro-Optics 04*, San Francisco, USA, v. 2, pp. 37-38, May, 2004.
- [9] 김종두, 이기주, 전민용, 안성준, 최용규, "광자 결정 광섬유에서 펌프광원의 파장과 입력파위에 따른 초 광대역 광원 발생의 특성," *한국광학회지*, vol. 16, pp. 490-493, 2005.
- [10] T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of the optical frequency standards (2001)," *Metrologia* vol. 40, pp. 103-133, 2003.



## Absorption Spectra of Standard Gases for Wavelength Reference in C-band using a Supercontinuum Source Based on a Mode-locked Cr<sup>4+</sup>:YAG Laser

Jong Min Lee and Min Yong Jeon<sup>†</sup>

*Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea*

<sup>†</sup>*E-mail: myjeon@cnu.ac.kr*

Han Young Ryu and Ho-Suhng Suh

*Division of Optical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea*

(Received January 4, 2008, Revised manuscript February 10, 2008)

We report on the measurements of absorption spectra from acetylene (<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) and hydrogen cyanide (H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N) for wavelength reference in the C-band (conventional band) region using a supercontinuum optical source generated from a mode-locked Cr<sup>4+</sup>:YAG laser. The center wavelength of the mode-locked Cr<sup>4+</sup>:YAG laser was 1510 nm and the pulse duration was 75 fs at 100 MHz repetition rate. The supercontinuum source achieved a flatness of ±5 dB over a wavelength range of more than 400 nm, using a 20 m long photonic crystal fiber. The measured absorption spectra from acetylene (<sup>12</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) and hydrogen cyanide (H<sup>13</sup>C<sup>14</sup>N) had more than 50 lines and were analyzed for wavelength standardization.

OCIS code : 140.0140, 060.0060, 140.4050, 320.2250, 320.7090.