

# 탄소나노튜브 포화흡수체의 열적 손상에 의한 어븀 첨가 모드 잠금 레이저의 특성 변화에 관한 연구

## Instability of an output pulse of an Er-doped fiber laser caused by thermal damage of a SWNT-SA

\*류성윤<sup>1</sup>, #김수현<sup>1</sup>, 김경수<sup>1</sup>, 이협<sup>1</sup>, 김진환<sup>1</sup>, 이상욱<sup>1</sup>

\*S. Y. Ryu<sup>1</sup>, #S. H. Kim(peaceall@kaist.ac.kr)<sup>1</sup>, K. S. Kim<sup>1</sup>, H. Lee<sup>1</sup>, J. H. Kim<sup>1</sup>, S. W. Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원 기계공학과

Key words : SWNT, Saturable absorber, Er-doped fiber, mode-locking, thermal damage

### 1. 서론

탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)는 광학적 비선형성이 타 재료에 비해 높기 때문에 극초단 펄스를 생성시키기 위한 포화흡수체(saturable absorber, SA)로 많이 활용되고 있다. 특히 파이버를 이용한 모드 잠금 레이저의 경우, 필름 형태로 제작된 단일벽 탄소나노튜브 포화흡수체(SWNT-SAs)를 파이버 연결부에 간단히 삽입하는 방식을 이용하여 극초단 펄스를 생성시킬 수 있기 때문에 최근 들어 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.

영국 캠브리지 대학의 Sun 팀은 stretched-pulse 타입의 파이버 레이저 내부에 SWNT와 PVA(polyvinyl alcohol)를 합성하여 제작한 SWNT-SA를 삽입하여 113fs의 펄스폭과 33.5nm의 밴드폭을 가지는 극초단 펄스를 생성시켰으며[1], 일본 동경 대학의 Shohda 팀은 폴리아미드(polyamide)로 코팅된 SWNT 필름을 솔리톤(soliton) 타입의 파이버 레이저 내부에 삽입하여 113fs의 펄스폭과 42MHz의 반복율을 가지는 극초단 펄스를 생성시킨 바 있다[2]. 하지만 SWNT-SAs를 이용한 모드 잠금 파이버 레이저의 경우 SWNT-SAs의 국소 영역에 강한 펄스가 집중됨에 따라 SWNT-SAs의 손상이 유발될 수 있기 때문에 그 출력이 ~수 mW로 제한적이다.

본 연구에서는 SWNT 필름의 양면을 PDMS(polydimethylsiloxane)로 코팅하여 제작한 SWNT-SA를 이용하여 어븀 첨가 파이버 레이저의 펄스 출력 특성을 장시간에 걸쳐 조사해 보았다. 레이저 공동(cavity) 내의 SWNT-SA에 입사되는 펄스의 파워가 4mW 이상일 때 출력 펄스의 특성이 변하는 것을 확인하였다. 임계치 이상의 파워를 가지는 빛이 SWNT-SA에 입사될 경우 흑연화(Graphitization) 현상이 발생하며 이로 인하여 SWNT-SA의 광학적 특성이 변하는 것을 확인할 수 있었다.

### 2. SWNT-SA의 제작 및 특성

HiPCO(high-pressure carbon monoxide) 방식으로 제작된 0.03wt%의 SWNT 용액을 1wt%의 SDS(sodium dodecyl sulfate)와 혼합 후 초음파 파쇄기(tipsonicator)를 이용하여 140W의 파워로 10분, 540W의 파워로 30분 동안 초기 분산을 수행하였

다. 그 후 초원심분리기(ultracentrifuge)를 이용하여 30,000rpm의 속도로 1시간 30분 동안 SWNT 용액을 분산시켰다. 다중 진공 여과(multiple vacuum filtration) 방식을 이용하여 SWNT 필름을 제작하였으며, 제작된 SWNT 필름의 양면을 PDMS를 이용하여 스핀 코팅한 후 80℃의 오븐에 건조시켜 SWNT-SA 필름을 완성하였다. 완성된 SWNT-SA 필름의 전체 두께는 90.29μm이며, SWNT 필름의 두께는 약 2.11μm 인 것을 확인하였다.

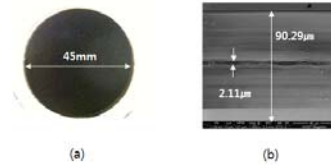


Fig. 1 SWNT-SA (a) Photograph and (b) SEM image of a fabricated SWNT-SA

제작된 SWNT-SA는 1550nm의 파장에서 0.845의 흡광도를 가지며, 펄스의 첩두 강도에 따른 흡광도의 변조 폭(modulation depth)이 약 18.8%인 것을 확인할 수 있었다.

### 3. SWNT-SA의 열적 손상

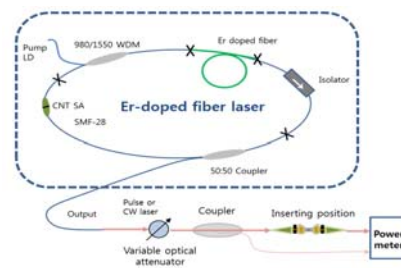


Fig. 2 Schematic of measuring system for change in absorbance of a SWNT-SA with time

제작된 SWNT-SA 필름의 시간에 대한 특성 변화를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 시스템을 구축하였다. 광감쇠기(variable optical attenuator)를 이용하여 측정 샘플에 입사되는 빛의 강도를 조절하였으며, 커플러를 통과한 빛 중 90%는 SWNT-SA에 입사된 후 파워미터에 입력되고 나머지 빛은 다른 파워미터에 직접적으로 입력되도록 시스템을 구성함으로써 시간에 따른 SWNT-SA의 흡광도 변화를 측정할 수 있었다.

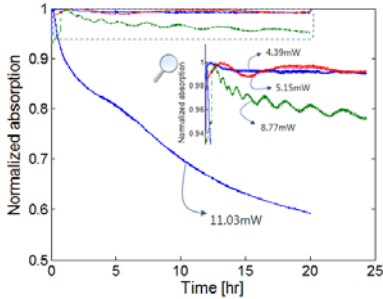


Fig.3 Changes in absorbance a function of incident power levels

구축된 시스템을 이용하여 4 종류의 출력 파워(4.39mW, 5.15mW, 8.77mW, 11.03mW)에 대한 SWNT-SA의 흡광도 변화를 측정한 결과, 4.39mW의 입사광에 대해서는 흡광도가 장시간에 걸쳐 일정한 값으로 유지되지만, 입사광의 파워가 5.15mW 이상이 되면 흡광도 특성이 시간에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 특히 입사광의 파워가 8.77mW 이상이 될 경우 흡광도가 시간에 따라 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있으며 11mW의 입사광에 대해서는 약 40% 이상의 흡광도 감소가 발생하였다.

SWNT-SA 필름에 8.88mW의 빛을 조사시킨 후 조사 전·후의 광학 이미지 변화를 Fig. 4에서와 같이 측정해 보았다.

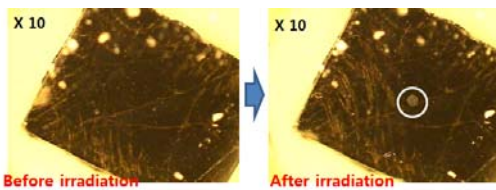


Fig. 4 Optical microscope images of a SWNT-SA

빛이 통과한 SWNT-SA의 영역(Fig 4에서 흰색 원)이 열적 손상에 의하여 광학 이미지가 달라진 것을 확연히 알 수 있다.

CNT 필름에 임계치 이상의 에너지를 가지는 빛이 조사(irradiation)될 경우 흑연화 현상이 발생하며 이로 인해 단달링 본드(dangling bond)나 결함(defect)이 발생하는 것으로 알려져 있다[3]. 흑연화

현상의 발생 유무는 CNT 필름에 대한 라만 스펙트럼(Raman spectrum) 측정을 통해 확인할 수 있는데, 빛의 조사 전·후에 대한 D peak와 G peak의 비율 변화로부터 흑연화 정도를 파악할 수 있다.

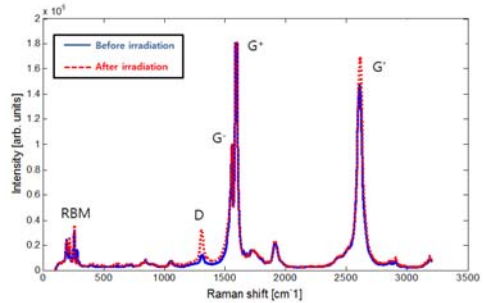


Fig. 5 Raman spectrum of the SWNT-SA

실험에 사용된 SWNT-SA 필름에 대하여 라만 스펙트럼을 측정한 결과 빛이 투과하기 전에는  $I_G/I_D$  값이 13.93이었던 것에 비하여 빛이 투과한 후에는 그 값이 5.67로 현저하게 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

SWNT-SA에 임계 에너지 이상의 빛이 조사될 경우 흑연화 현상에 의해 SWNT-SA의 특성이 변하게 되며 이로 인해 모드 잠금 펄스의 출력 특성이 불안정해지는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 모드 잠금 파이버 레이저의 펄스 파워가 106mW 이하일 때 SWNT-SA의 열적 손상이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 약 3.85mW의 출력 파워와 12nm의 파장폭, 300fs의 펄스폭을 가지는 극초단 펄스가 약 300시간 이상 안정적으로 출력되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후기

본 연구는 교과부 2010년 중견연구자지원사업(도약연구:도전) 2차년도 과제 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Sun, J., Hasan, T., Wang, F., Rozhin, A. G., White, I. H., and Ferrari, A. C. " Ultrafast Stretched-Pulse Fiber Laser Mode-Locked by Carbon Nanotubes," Nano Res. 3, 404-411, 2010.
2. Shohda, F., Nakazawa, M., Mata, J., and Tsukamoto, J., " A 113 fs fiber laser operating at 1.56  $\mu\text{m}$  using a cascaded film-type saturable absorber with P3HT-incorporated single-wall carbon nanotubes coated on polyamide," Opt. Express 18, 9712-9721, 2010
3. Nakamiya, T., Ueda, T., Ikegami, T., Ebihara, K., and Tsuda, R., "Thermal analysis of carbon nanotube film irradiated by a pulsed laser," Current Applied Physics 8, 400-403, 2008