

# 레이저 유도 캐비테이션 버블에서 방출되는 압력파의 시각화

김강해<sup>1</sup>, 권오빈<sup>2</sup>, 최민주<sup>1,2\*</sup>

제주대학교 의학전문대학원 의학과<sup>1</sup>, 제주대학교 의공학협동과정<sup>2</sup>

## Visualization of the pressure wave emitted from a laser-induced cavitation bubble

Kanghea Kim<sup>1</sup>, Ohbin Kwon<sup>2</sup>, Min joo Choi<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Medicine, School of medicine, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

<sup>2</sup>Interdisciplinary Postgraduate Programme in Biomedical Engineering, Jeju National University, Republic of Korea

\*mjchoi@jejunu.ac.kr

### Abstract

본 연구에서는 Laser-induced cavitation(LIC) 수술의 기전을 이해하고 최적화하기 위해 Laser-induced cavitation를 시각화하여 분석하였다. short mode와 long mode의 두가지 레이저 조사 방법에 따른 수중에서의 laser-induced cavitation 버블 영상을 촬영하였다. 그리고 각 레이저 조사 모드에 따른 실러렌 압력파 영상과 PCD 신호를 분석하였다. 실러렌 압력파 영상 시각화와 PCD 신호 분석 결과 short mode에서 발생하는 압력파의 크기가 long mode에서 발생하는 압력파의 크기보다 크게 나타났다. 이는 기존 연구 결과와 일치하는 결과로 Laser-induced cavitation에서 발생하는 압력파에 대한 시각화를 통한 정성적 분석이 가능함을 보여주는 결과이다.

### 1. 연구 배경

Laser-induced cavitation(LIC)은 thermal effect와 cavitation으로 인한 mechanical effect를 모두 가지고 있다. 이 수술 기전으로 주로 사용하는 시술기법중 Holmium laser enucleation of prostate (HoLEP)은 경요도전립선절제술, KTR 등 기화 레이저, 개복수술 등 치료법의 장점만 취한 수술법으로 절개상처나 수혈이 필요 없고 조직을 태우지 않아 완전제거가 가능하다. 또한 비대증 크기와 관계없이 적용이 가능하고 후유증이 적어 회복이 빠르다는 장점이 있다[1].

Laser-induced cavitation(LIC)은 Holmium laser가 물에 조사되면 일종의 heated gas bubble을 만드는 현상을 말하며, 이때 생성되는 bubble은 물을 밀어내며 대류 현상을 일으킨다[3]. 생성된 bubble은 짧은 시간 후 collapse하며 관성으로 1차 2차 이상 다회의 충격파를 생성한다[3]. HoLEP 시술에는 이러한 충격파와 열 효과의 복합적인 기전으로 진행되며 각각에 대한 복합적인 연구가 요구된다[2].

전립선 비대증 시술 시 수중 레이저 조사에 따른 thermoacoustic effect에 대한 체계적이고 심도 있는 연구가 요구됨에 따라, 레이저로 인해 생성되는 기포에 대한 시각화는 이미 많은 그룹에서 수행되어 있으나, 동시에 온도 및 압력파에 대한 정보를 분석하는 연구는 미흡하다[3]. 레이저 조사에 따른 온도 변화는 짧은 시간에 급격하게 조직 내부의 온도를 상승시키기 때문에 측정에 제약이 많다[4]. 반면 cavitation에 의해 생성되는 압력파는 Passive cavitation detector (PCD)를 이용하여 제한적으로 측정이 가능하다. 또한 실러렌 시스템을 활용하여 bubble이 collapse 하며 발생하는 충격파에 대한 시각화가 가능하다.

본 연구에서는 Laser-induced cavitation의 기포를 초고속 카메라를 통해 촬영하고 실러렌 시스템을 활용해 압력파를 시각화 하였다. 또한 PCD를 통한 압력파의 측정을 통해 시각화한 압력파와 비교하였다. 이를 통해 HoLEP 수술의 상세한 기전을 이해하고 수술 환경에 최적화된 레이저 조사 특성을 연구 할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

### 2. 연구 방법

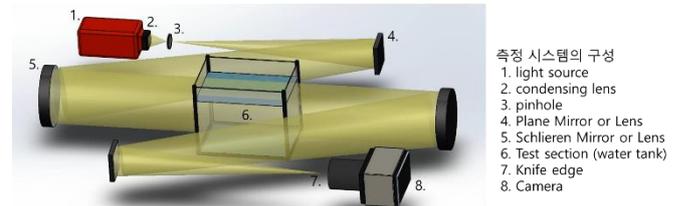


그림 1. 실러렌 시스템의 구성.

Ho:YAG laser (MOSES Pulse 120H, Lumenis, Israel) 로 발생하는 캐비테이션 기포를 High speed camera (VEO710L, vision research Inc, USA) 와 Lens (24-85mm, Nikon, Japan) 를 이용하여, 200,000FPS (해상도 128x128 pixels) 속도로 촬영하였다. Passive cavitation detector (PCD)로 0.5MHz transducer (H-107, Sonic concepts, USA)을 이용하였다.

레이저 출력은 임상에서 주로 사용하는 1 J로 고정하였고, 사용된 파이팅의 코어 크기는 0.365 mm이다. 레이저 모드는 short mode와 long mode으로 압력파 변화를 확인하고자 하였다(Moses mode 제외). 레이저 파형을 측정하기 위해 900-2600 nm Photo detector(PDA10D2, Thorlabs, USA)와 Absorptive filter(0.003762% 투과)를 사용하여 시간에 따른 Power를 확인하였다. 실험 환경으로 수온은 20°C, 실험실 실내 온도는 22°C이다.

실러렌 시스템은 빛의 반사를 위한 반사거울 두개와 focusing을 위한 초점 거리 2000 mm의 오목거울 두개를 사용하여 구성하였다. 백색 연속 광원에서 나온 빛은 렌즈에 의해 focusing 되어 핀홀을 향한다. 핀홀에서 나온 빛은 포인트 소스로 정렬되며 그 빛은 반사거울과 오목거울을 통해 평행으로 정렬된다. 평행으로 정렬된 빛은 물이 든 수조를 지나고 다시 오목거울과 반사거울을 통해 포커싱 된다. focusing된 빛은 focal length에 위치한 칼날에 의해 제한되고 제한되지 않은 빛은 카메라를 통해 영상화 된다(그림1).

### 3. 결과 및 토의

그림2은 레이저 장비 1 J 출력 설정에서의 레이저 파형을 보여주고 있다. PCD에서 측정된 1차 붕괴신호를 Trigger로

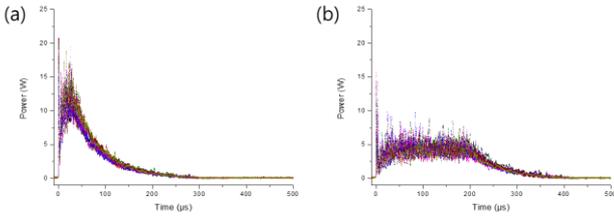


그림 2. 1J 출력 설정에서 Ho:YAG laser에 의해 생성된 공기 중 레이저 파형(N=10). (a) short mode, (b) long mode.

설정하였다. Short mode에서 레이저 파형의 FWHM은  $65.25(\pm 3.17) \mu s$ 로 나타났다. 이 때, 최대  $W_{max}$ 는  $15.56(\pm 2.41) W$ 로 확인되었다. Long mode에서의 측정값은 FWHM  $223.82(\pm 7.81) \mu s$ ,  $W_{max}$   $8.47(\pm 1.12) W$ 로 나타났다.

그림3은 각 레이저 조사 모드에 따른 레이저 파형으로부터 최대 버블 크기일 때, 영상이다. 레이저 파형의 FWHM이 길수록 버블의 모양이 Transverse 방향으로 더 길게 나타나고, 원형 모양에서 벗어남을 확인할 수 있다.

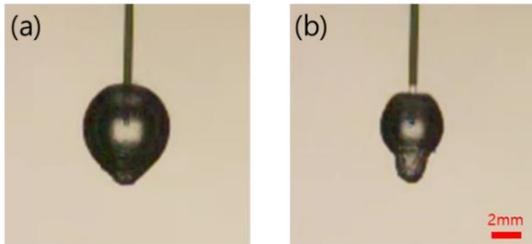


그림 3. 수중에서의 laser-induced cavitation의 레이저 조사 모드에 따른 버블 영상. (a) short mode, (b) long mode.

그림 4는 short mode 단일 레이저 펄스에서 일반적인 초고속카메라 영상과 쉐러렌 영상 및 PCD 신호로 보여주고 있다. 그림4. A는 레이저 조사가 시작된 직후의 버블과 이로 인한 원형으로 전파되는 충격파 선이 미세하게 보인다. 이후 버블이 최대로 성장 후 가장 강력하게 붕괴하여, PCD

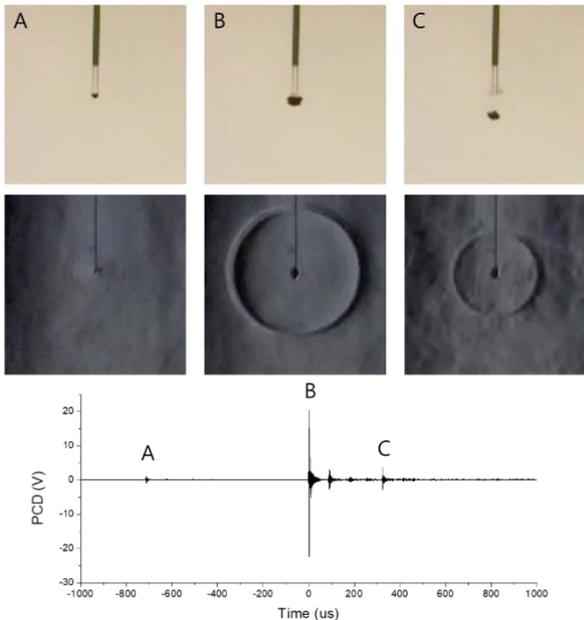


그림 4. Short mode에서 측정된 초고속카메라 영상과 PCD 결과. 일반적인 카메라 영상 (위쪽), 쉐러렌 영상 (가운데), PCD 신호(아래).

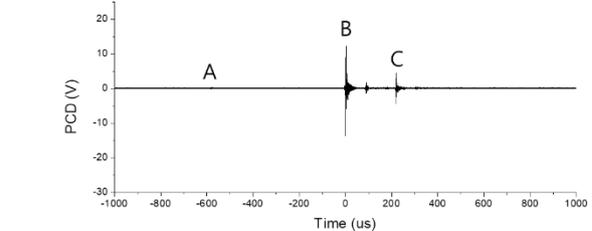
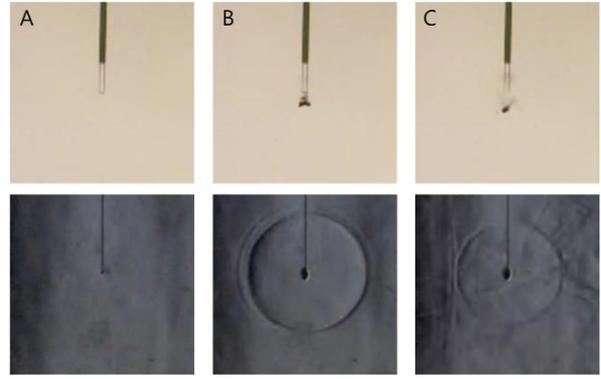


그림 5. Long mode에서 측정된 초고속카메라 영상과 PCD 결과. 일반적인 카메라 영상 (위쪽), 쉐러렌 영상 (가운데), PCD 신호(아래).

신호에서 B로 표기하였다. 그림의 가운데 쉐러렌 영상에서 강력하게 붕괴 후 생성된 충격파 펄스가 가시화되어 나타남이 선명하게 나타났다. C는 1차 붕괴 이후 2차 붕괴 후 생성되는 충격파 펄스를 보여주고 있다. B 신호의 최대 크기( $V_{max}$ )는  $18.22\pm 3.59 V$ (N=10)이다. 버블생존시간은  $706.00\pm 35.02 \mu s$  (A에서 B까지 시간)으로 나타났다.

그림5는 그림4와 같이 표현된 long mode 단일 레이저 펄스에서의 결과이다. 전반적인 경향은 비슷하나, 붕괴 시 충격파 신호 크기가 short mode의 결과의 비해 10.2 % 감소하였다( $V_{max}$ :  $16.36\pm 2.08 V$ , N=10). 또한, A와 B 사이 시간( $589.58\pm 11.03 \mu s$ )과 B와 C 사이 시간 간격도 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이 두 모드의 에너지는 동일한 1J에도 이러한 차이가 발생할 수 있음 시사하고 있다.

버블 모양의 변화가 쉐러렌 영상에서의 가시화된 충격파 펄스에 영향을 주는 것으로 보인다. 그림4에서와 다르게 파형이 2개가 겹친 것처럼 보인다.

#### 4. Acknowledgements

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처 전주기의료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행 연구임(1711134987, KMDF\_PR\_20200901\_0010-04)

#### 5. 참고 문헌

- [1] Cho, M., Bae, J., Ku, J., Oh, S., Kim, S., & Paick, J. (2009). MP-06.07: Comparison of Outcomes between Potassium-Titanyl-Phosphate Photoselective Vaporization of the Prostate (PVP) and Holmium Laser Enucleation of the Prostate (HoLEP): An Interim Analysis. *Urology*, 74(4), S70.
- [2] Jeon, S. S., HYUN, J. H., & LEE, K. S. (2005). A comparison of holmium: YAG laser with Lithoclast lithotripsy in ureteral calculi fragmentation. *International journal of urology*, 12(6), 544-547.
- [3] Lü, T., & Li, Z. (2011). Underwater holmium-laser-pulse-induced complete cavitation bubble movements and acoustic transients. *Chinese Science Bulletin*, 56(12), 1226-1229.
- [4] Verdaasdonck, R. M. (1995, May). Imaging laser-induced thermal fields and effects. In *Laser-Tissue Interaction VI* (Vol. 2391, pp. 165-175). International Society for Optics and Photonics.