컬러 쉴러렌 시스템을 이용한 Ho:YAG 레이저 조사에 따른 팬텀 온도 측정

김강해[1], 최민주[1*]

제주대학교 의학전문대학원 의학과[1]

Temperature measurement during Ho:YAG laser exposure at phantom using color schlieren system

Kanghae Kim[1], Min Joo Choi[1*]

[1]Department of Medicine, School of medicine, Jeju National University, Jeju, Republic of Korea

[*]mjchoi@jejunu.ac.kr

Abstract

To control the effects of the Ho:YAG laser and predict the outcome of clinical procedures, it is important to understand the thermal energy transfer in tissues. To measure the temperature inside the phantom, we used a color schlieren system. Colors in the schlieren image is related to the temperature distribution. In this study, the thermal effect and the mechanical effect due to were visualized in real time using the color schlieren system. In addition, the temperature change of the phantom due to laser irradiation was imaged using a color filter and the temperature was calculated.

1. 연구 배경

전립선 비대증 치료법으로 최근 주목받고 있는 HoLEP의 수술은 단위 시간당 단위 부피당 적용되는 에너지에 따라 광학적, 열적 및 기계적 기전에 의해 수행된다[1]. 이중 주요 기전은 빛을 열 에너지로 변환하여 조직의 온도를 높이는 것으로 조직을 100℃ 이상으로 즉시 가열하며 물을 증발시켜 기계적 효과를 일으키는 케비테이션 버블을 생성한다. 이렇게 생성된 버블은 응축되면서 열 에너지가 방출되고 조직에 전달된다[2]. Ho:YAG 레이저에 의한 직접적인 효과를 제어하고 임상 절차의 결과를 예측하려면 조직의 열 에너지 전달과정을 이해하는 것이 중요하다.

가장 일반적으로 열 카메라 또는 Thermocouples 온도 측정에 사용된다. 하지만 열화상 카메라는 공기 인터페이스에서만 동작하는 단점이 있고 Thermocouples은 한점의 위치에서만 측정이 가능하고 침습적이라는 단점이 있어 조직 내부의 온도를 측정하기에는 제한이 있다[3].

쉴러렌 방식은 공간 필터링 결과를 기반으로 매체의 밀도 변화를 시각화 하는 광학 방법이다. 기존의 쉴러렌 장치에 특정한 패턴의 컬러 필터를 사용하면 온도의 변화에 따른 밀도 변화로 인해 편향된 빔이 컬러 필터를 지나며 특정 색을 가지게 코딩할 수 있어 이를 통해 온도를 추정하는 기술이 제안 되었다[4].

본 연구에서는 컬러 쉴러렌 시스템을 사용하여 Ho:YAG 레이저의 thermal effect와 cavitation으로 인한 mechanical effect를 실시간으로 시각화 하였다. 또한 레이저 조사로 인한 팬텀의 온도 변화를 컬러 필터를 이용하여 영상화 하고 그 값을 추정하였다.

2.연구 방법

실험에 시스템에 대한 개요는 그림 1에 나와있다, 백색 연속 광원은 렌즈에 의해 포커싱되고 핀홀을 통과하여 포인트 소스를 제공한다. 발산하던 광원은 다시 렌즈를 통해 평행으로 정렬되고 이 빔은 물로 채워진 직사각형의 수조로 조사된다. 이때 물이 든 수조의 벽면은 굴절로 인한 빛의 왜곡을 방지하기 위해 평행 빔에 수직으로 배치하였다. 수조를 통과한 빔은 수조 내에 배치된 팬텀을 통과하고 다시 렌즈를 통해 포커싱 된다. 빔이 포커싱 되는 위치에는 컬러 필터를 배치하여 편향된 빛에 특정 색상을 코딩하였다. 필터를 지난 빛은 초고속 카메라(VEO710L 36G color Camera, Vision Research, Inc, USA)를 통해 촬영되었다. 영상은 60000 fps의 속도로 촬영되었으며 카메라의 exposure time은 16 μs이다.

그림 2(a)는 컬러 필터 제작에 사용된 패턴이다. 컬러 필터는 빛의 감쇄를 줄이기 위해 positive film(FUJICHROME Velvia 100, Fujifilm, Inc., JPN)을 사용하여 제작되었다. positive film을 넣은 카메라를 통해 무지개 패턴의 영상을 노출 시간 1s 로 조정하여 촬영한 후 필름을 인화하였다. 필터의 직경은 13.5 mm이고 필터의 중심부에는 검은색의 패턴을 배치하여 쉴러렌 영상의 감도를 높였다.

컬러 쉴러렌 시스템을 통해 영상을 촬영함과 동시에 팬텀에는 Ho:YAG 레이저(Holinwon prima, Wontech co., Ltd, KOR)를 조사하였다. 레이저는 2J의 에너지로 1회 조사하였고 pulse duration의 FWHM은 300 μs였다. 레이저는 광섬유를 통해 팬텀 내부에서 조사되었는데 이때 사용된 광섬유의 직경은 500 μm였다.

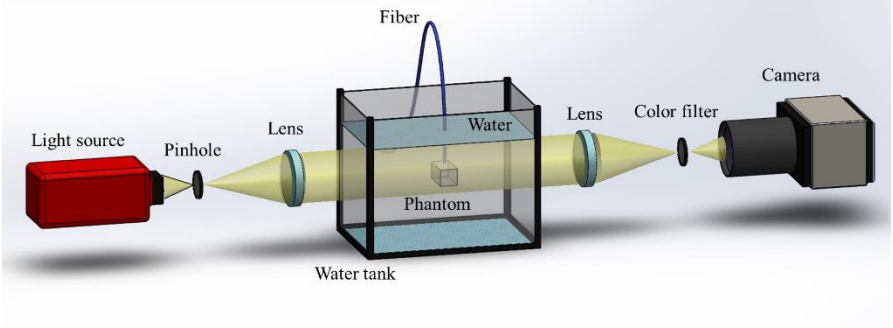

그림 1. 컬러 쉴러렌 시스템의 개략도

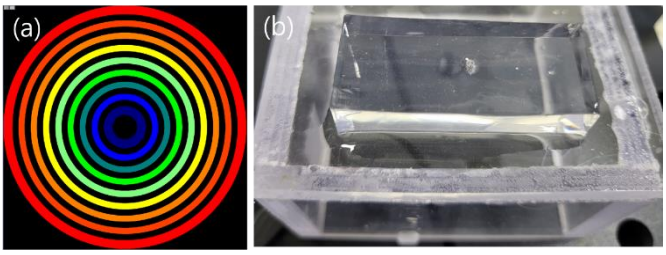

그림 2. (a) 제작된 컬러 필터 패턴 이미지, (b) 제작된 팬텀

그림 2(b)는 실험에 사용한 팬텀이다. agarose gel 8 g, 물 100 mL를 사용하여 8% Agarose gel 팬텀을 제작하였고 실험은 상온의 물속에서 진행되었다. 이때 제작된 팬텀의 크기는 15 mm × 35 mm이고 열확산도는 0.143 mm^2/s 로 측정되었다.

3. 연구 결과 및 토의

그림 3은 컬러 쉴러렌 시스템을 통해 촬영한 팬텀의 영상이다. 레이저 조사가 시작되는 시점을 기준으로 200 ms까지 영상을 촬영하였다. 레이저에 의해 생성되는 버블은 약 0.9 ms에서 최대로 성장하였으며 약 1.3 ms에서 1차로 붕괴하고 약 3.5 ms에서 잔여 버블만 남기고 진동을 멈췄다.

그림 3(e)는 쉴러렌 영상에서 가열된 버블에 의해 가장 높은 온도를 나타낸 영상이다. 검은색으로 보이는 잔여 버블 주변으로 강하게 굴절된 빛이 컬러 필터 상 최 외각인 빨간색을 나타냄을 확인할 수 있다. 그림 3(c)에서 하얀색 라인에 해당하는 각각의 화살표 빨간색, 노란색, 파란색 지점에 대해 온도를 계산하였다. 붉은색, 노란색, 파란색에 해당하는 필터의 반지름은 각각 6.5 mm, 4.5 mm, 3 mm였다. 영상에서 필터에 의해 색이 변하는 구간은 450 μm였고 빨간색, 노란색, 파란색 변위는 각각 중심축에서 210 μm, 360 μm, 420 μm 떨어진 지점에 위치하였다. 이때의 온도는 물의 굴절률이 1.3337 이라고 가정할 때 붉은색이 약 85 °C, 노란색이 약 50 °C, 파란색이 약 35 °C로 계산되었다.

레이저에 의해 가열된 팬텀은 그림 3(g)와 그림 3(h)에서 보는 바와 같이 시간이 지나면서 그 열을 잃어 가는 것을 확인할 수 있었다. 약 500 ms가 지나면 영상에서 열변화를 찾을 수가 없었다.

해당 실험에서는 레이저에 직접적으로 조사되는 팬텀 영역의 열변화와 가열된 버블에 의한 팬텀의 열변화를 구별하기가 어려웠다. 또한 컬러 필터를 통해 구성된 시스템과 그 영상에 한해 계산된 온도 결과에 대한 신뢰성을 입증할 수 있는 Thermocouples나 열화상 카메라와 같은 표준기술로의 검증 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

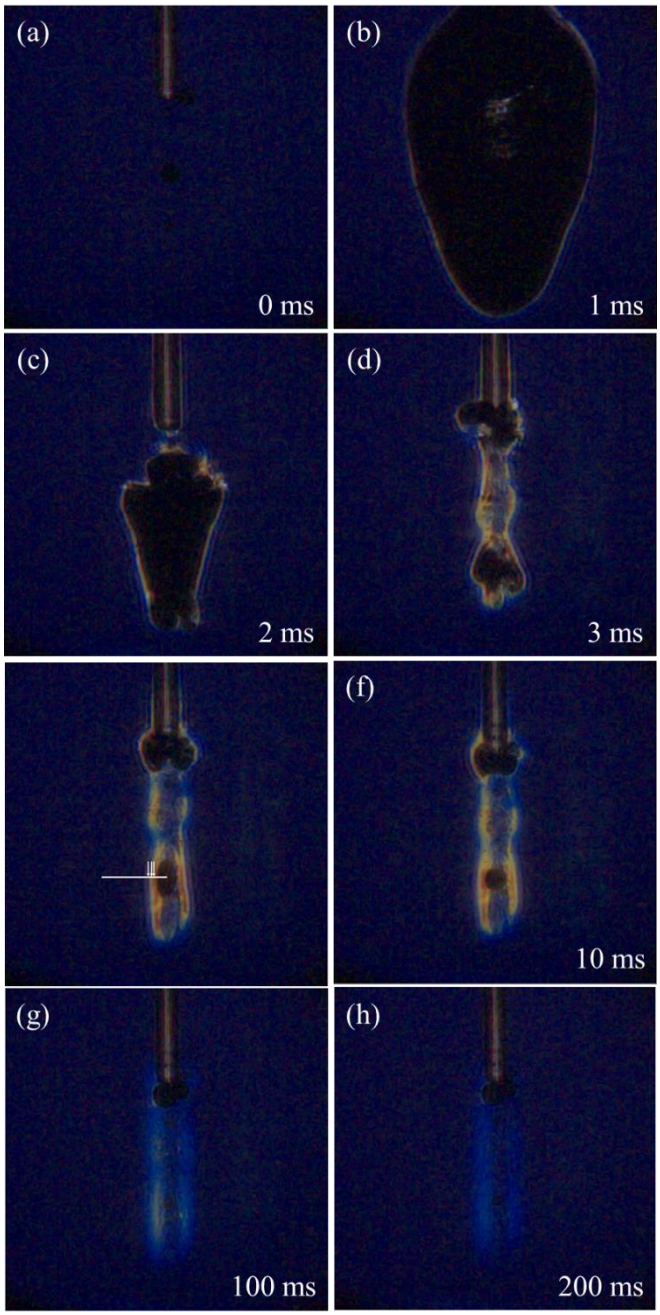

그림 3. 레이저 조사에 따른 팬텀 내부의 온도 변화의 컬러 쉴러렌 영상. 촬영 시점은 레이저가 조사되기 시작하는 시점을 기준으로 각각 (a) 0 ms, (b) 1 ms, (c) 2 ms, (d) 3 ms , (e) 5 ms , (f) 10 ms , (g) 100 ms , (h) 200 ms 이다.

4. Acknowledgements

이 논문은 2022 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2021R1I1A1A01061236). 또한 이 연구는 본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로 범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제고유번호: 20211711134987, KMDF_PR_20200901_0010-04).

5.참고 문헌

[1] Lu, Tao, et al. "Cavitation effect of holmium laser pulse applied to ablation of hard tissue underwater." Journal of Biomedical Optics 15.4 (2010): 048002.

[2] Verdaasdonk, Rudolf M., et al. "Imaging techniques for research and education of thermal and mechanical interactions of lasers with biological and model tissues." Journal of biomedical optics 11.4 (2006): 041110.

[3] Torres, Jorge H., et al. "Limitations of a thermal camera in measuring surface temperature of laser-irradiated tissues." Lasers in surgery and medicine 10.6 (1990): 510-523.

[4] Verdaasdonck, Rudolf M., and Cornelius Borst. "Optical technique for color imaging of temperature gradients in physiological media: a method to study thermal effects of CW and pulsed lasers." Laser-tissue interaction IV. Vol. 1882. International Society for Optics and Photonics, 1993.