

펨토초 펄스로 인한 조직 제거시 생성된 압력파의 특성 연구

Ablation characteristics of femtosecond laser pulse-induced pressure waves in biological tissue

김범민, A. Komashko*, M. Feit*, A. Rubenchik*

연세대학교 의공학과, *Lawrence Livermore National Laboratory

beopmkim@dragon.yonsei.ac.kr

1 picosecond 보다 짧은 펄스길이를 갖는 초단파길이 레이저 펄스 (Ultrashort laser pulse, USLP)를 이용한 물질의 절제 (ablation)는 여타 nanosecond 영역의 레이저 절제와 많은 차이를 보인다⁽¹⁾. USLP는 순간 파워가 매우 높기 때문에 직접적으로 물질의 원자를 분리시켜 자유전자를 형성한다. 이들 자유전자는 일반 선형흡수체 (linear absorbing chromophore)보다 흡수계수가 몇십배로 높아 대부분의 펄스에 에너지가 표면 100-200 nm 이내의 극히 작은 지역에 밀집되게 된다. 이렇게 작은 지역에 밀집된 높은 에너지로 인하여 순간적으로 플라즈마가 공기중으로 배출 (ejection)되며 이때 $1\mu\text{m}$ 정도 깊이의 물질이 제거된다. 플라즈마의 배출속도가 매우 빠르고 rarefractive 파의 영향 때문에 압력파의 세기도 물질 내로 진행하면서 급격하게 감소되어 절제 지역 주위에 열적/기계적 손상을 거의 입히지 않는다. 이러한 장점을 이용하여 90년대 이후 USLP를 미세조직 제거 등 의학 분야에 사용하려는 노력이 세계 여러 연구기관에서 이루어지고 있다⁽²⁻³⁾. 본 연구의 목적은 1 picosecond 내외의 펄스 (0.1 ps - 10 ps)를 사용하여 연조직의 절제를 시도하였을 때 만들어지는 압력파의 세기와 압력파 내의 기계적 에너지를 마하-젠더 간섭계 (Mach-Zehnder interferometer)를 이용하여 정량적으로 측정하고 펨토초 레이저를 생체조직 제거에 사용할 때 주위조직에 가해질 수 있는 충격을 정량화 하는데 있다.

일반적으로 생체조직은 높은 밴드갭 (large band-gap)을 갖는 절연체 (dielectric)로 볼 수 있으며 따라서 연조직의 모델로는 증류수를 사용하였다. 그림 1 은 마하-젠더 간섭계를 이용한 실험 장치의 개략도이다. USLP는 cuvette에 담긴 증류수의 표면에 수직으로 입사하여 압력파를 형성하고 형성된 압력파는 5 ns의 펄스길이를 갖는 dye-laser로 관찰하였다. 이를 이용하여 표면으로부터 발생하는 구형파 (spherical wave)가 관찰되는 fluence를 측정하여 임계 fluence를 측정하였다 (그림 2참조). 간섭무늬 (interference fringe)를 관찰한 결과 임계 fluence에서 1 ps 보다 짧은 펄스와 5 ps 보다 긴 펄스를 사용하였을 때 생기는 압력파의 형태에 차이가 남을 확인할 수 있었다⁽⁴⁾. 1 ps 이하의 짧은 펄스를 사용하였을 경우 표면 흡수로 인한 구형파 만이 생성되었고 5 ps 이상의 긴 펄스는 구형파 외에도 실린더형 파 (cylindrical wave)를 생성시켰다 (그림 3 참조). 일반적으로 USLP가 입사할 때는 표면 흡수가 일어나기 때문에 구형파가 생성되는 것이 보통이나 5 ps보다 긴 펄스를 사용할 때에는 표면보다 깊은 지역으로 투과되는 빛 에너지의 비율이 높아지고 따라서 물분자 또는 물 속에 포함된 불순물에 의하여 흡수되는 양이 증가함에 따라 광경로 전체에서 급격한 온도 상승이 일어나게 된다. 급격한 온도상승은 굴절률의 변화로 나타나고 그림 3(b)와 같이 레이저 축방향에서 간섭무늬가 선명하지 못하게 되는 현상이 나타난다. 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 100 fs과 10 ps을 사용했을 때 표면으로부터 20 μm 보다 더 깊은 지역으로 투과되는 빛 에너지는 약 3.5배 차이가 남을 보여 실험 결과를 뒷받침해 주었다 (표 1 참조). 압력파의 속도를 측정하였을 때 50 μm 보다 먼 구형파의 경우 일반적인 압력파 (1.55 km/s)가 생성되고 충격파 (shockwave)는 보이지 않았으며 더욱이 그 파의 세기는 급속하게 감쇠함을 보였다. 최대 압력을 측정한 결과 압력파가 물질속으로 약 50 μm 진행하였을 때 약 1000 bar 정도 였지만 300 μm 진행시 100 bar 정도로 급격하게 감소되었다. 또한 입사하는 총에너지의 1% 보다 작은 양만이 기계적인 압력파로 전이됨을 밝혀 (그림 4) USLP가 주위조직에 손상을 적게 주는 현상을 설명할 수 있었다.

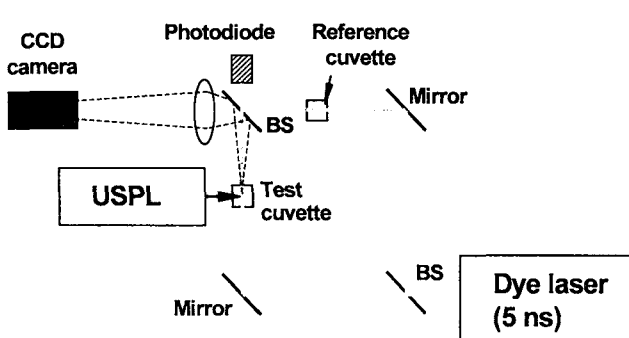


그림 1. Mach-Zehnder 간섭계를 이용한 물의 압력과 측정장치. USPL는 수직으로 cuvette에 담긴 증류수 표면에 입사함.

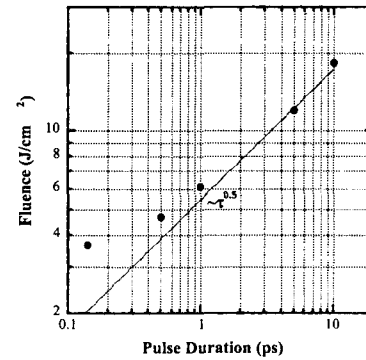
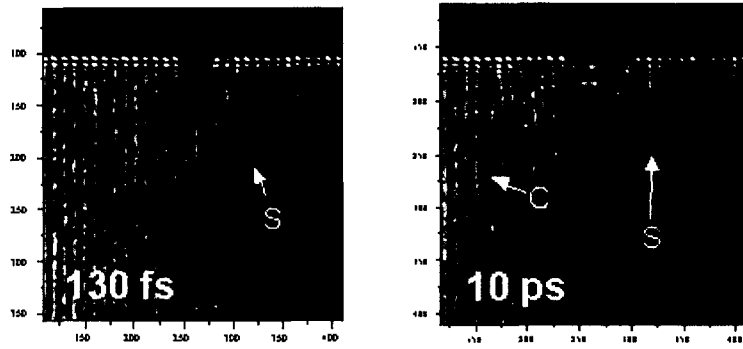


그림 2. 물의 표면에서 구형파 형성에 대한 임계 fluence.



(a) (b)
그림 3. USPL의 수직 입사로 인하여 생성된 압력파의 모양 (S: spherical wave, C: cylindrical wave)

Pulse duration [ps]	Incident fluence [J/cm^2]	Fluence reflected [J/cm^2]	Depth [μm]	Fluence absorbed [J/cm^2]	Fluence transmitted [J/cm^2]
0.1	3.9	2	20	1.21	0.73
10	18.4	7.52	20	8.3	2.57

표 1. 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 USPL 입사시 생기는 에너지 분포계산 결과. 20 μm 보다 깊은 영역으로 투과되는 에너지의 양이 3.5배 정도 차이를 주목.

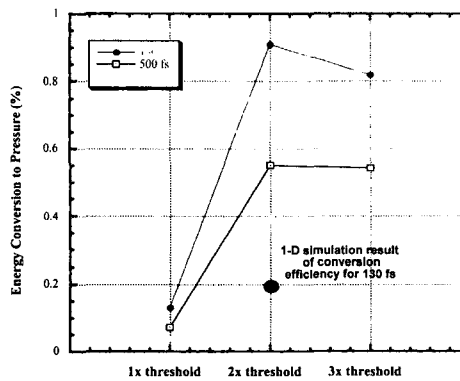


그림 4. 입력된 펄스 에너지에 대한 압력파 내부에너지. 실험치와 시뮬레이션 결과가 모두 1% 이하의 에너지 변환치를 나타내어 정성적으로 일치함을 보여준다.

참고문헌

1. Stuart, et al., "Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics," Phys. Rev. B, vol. 53, pp. 1749-1761, 1996.
2. J. Neev et al., "Ultrashort pulse lasers for hard tissue ablation," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics vol. 2, pp.790-800, 1996.
3. J. Noack et al., IEEE J. of Quantum Electronics 35(8), 1156-1167, 1999
4. Kim et al., "Effects of high repetition rate and beam size on hard tissue damage due to subpicosecond laser pulses," Appl. Phys. Lett., vol. 76, pp. 4001-4003, 2000.