

초단파길이 레이저의 치료적 이용

Therapeutic Applications of Ultrashort Pulse Lasers

김범민, *M. D. Feit, *A. M. Rubenchik, *L. B. Da Silva

연세대학교 의공학과, *Medical Technology Program, Lawrence Livermore National Laboratory
beopmkim@dragon.yonsei.ac.kr

1. Introduction

초단파길이 레이저 펄스(Ultrashort laser pulse, USLP)란 주로 시간상의 파길이가 femto- 또는 pico-second 영역에 속하는 펄스를 말하며 치료 또는 진단용으로 쓰일 때 생체조직과 독특한 상호작용을 일으킨다. 에너지가 높은 USLP는 높은 순간 세기(instant intensity)를 지니기 때문에 생체조직을 이루는 원자들을 직접 분리하여 플라즈마(이온과 전자)를 생성한다. 플라즈마는 매우 높은 흡수계수를 갖기 때문에 USLP가 진행함에 따라 대부분의 레이저 에너지가 매우 얇은 두께의 표면층(100 - 200 nm)에 집적되는 결과를 낳는다. 이렇게 집적된 고에너지 플라즈마는 그 에너지를 주위 조직에 전달하기 훨씬 이전에 폭발적으로 방출되고 그 결과 펄스당 1 micron 정도의 두께를 주위조직 손상 없이 제거할 수 있게 된다 [1-2]. 보통 쓰이는 1 kHz의 펄스 트레인을 이용하면 1초에 1 mm의 두께를 효과적으로 제거(ablation)할 수 있다. 이때 펄스의 순간세기를 높게하기 위하여 작은 반지름을 갖는 빔(지름 100 - 200 micron)을 사용하며 따라서 작은 용적의 조직을 주위손상없이 제거하는 미세수술등의 이용에 적합하다. 하지만 아직까지는 장비가 고가이고 레이저 축 방향으로 조직제거가 진행됨에 따라 제거되는 양이 작아지는 등의 개선할 부분이 남아있다(그림 1 참조). 본 연구에서는 미세수술에 USLP를 사용할 때 적합한 최적화 된 USLP의 파라미터들, 즉 펄스 길이(pulse duration), 펄스 에너지(pulse energy) 빔 크기(beam size), 펄스 반복률(repetition rate) 등을 연구하는데 중점을 두었다.

2. Results

Pulse Duration: 펄스 길이가 길어질수록 플라즈마 생성 시간이 길어지고 따라서 집적된 레이저 에너지가 주위 조직과 상호작용을 할 시간 또한 늘어난다. 반면 너무 짧은 펄스를 만들어 내기위하여 드는 비용이 크고 또한 picosecond 단위의 레이저는 광섬유로 전달이 가능하기 때문에 최적의 파길이를 찾는 일은 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서 인간 치아와 물을 대상으로 100 fs - 20 ps의 USLP를 이용한 ablation을 수행해본 결과 두 경우 모두 1 ps와 5 ps 사이에서 ablation 패턴의 전이가 일어남을 확인하였다. 치아 실험의 경우 100 fs - 1 ps 사이의 펄스는 ablation을 일으킨 후 주위조직에 거의 손상을 남기지 않은 반면 5 ps - 20 ps의 펄스는 주위조직에 열손상으로 인한 녹음(melting) 현상을 일으켰다. 또한 물을 이용한 실험에서는 펄스가 만들어내는 응력파(stress wave)를 해석 하였으며 그결과 1 ps까지의 펄스는 물 표면에서만 흡수되어 반구형의 파형(spherical wave)을 형성하였고 5 ps보다 긴 펄스는 반구형의 파형뿐만 아니라 레이저 에너지가 깊은 지역까지 투과하여 생기는 원통형 파형(spherical wave)를 만들어냄을 알 수 있었다. 결론적으로 1 ps 펄스는 100 fs 펄스와 동일한 효과를 나타내는 가장 긴 파길이라 할 수 있다 [3].

Pulse Energy: 낮은 에너지를 가진 USLP를 이용하여 ablation을 시도할 경우 제거부위(ablation crater)가 역 원추형의 형태를 가지고 어느 한계이상은 더 깊이 제거하지 못한다는 것은 알려져있는 사실이다. 그림 1은 전형적인 역 원추형 ablation 부위의 사진을 보여준다 [4]. 본 연구를 통하여 조직제거를 일으키는데 필요한 빔의 반경이 커짐에 따라 더 깊이 조직제거를 할 수 있는 반면 펄스에너지를 아무리 높이더라도 각 펄스당의 조직 제거율(ablation rate)은 향상되지 않음을 알 수 있었다. 이는 높은 펄스에너지를 제거량을 높이는 것보다는 열에너지를 높이는 데 낭비된다는 것을 나타내며 따라서 주위 조직에 열과 기계적 손상 (crack 등)을 입히는 단점이 있음이 관찰되었다. 조직제거시의 임계점(threshold)보다 2, 4, 7배의 에너지로 ablation을 실시한 결과 임계점보다 약 2배의 에너지를 쓰는 것이 효과적이라는 결론을 얻었다.

Repetition Rate and Beam Size: 펄스 반복률과 빔의 크기는 서로 상관관계를 가지며 주위 조직에 대한 열전달과 깊은 관계가 있다. USLP의 경우 대부분의 레이저 에너지는 폭발적인 플라즈마의 팽창으로 인해 빠른 속도로 제거되어 최소량의 열에너지만을 crater 주변에 남긴다. 펄스 반복률이 매우 큰 경우에는 빠른 생체조직 제거율을 얻을 수 있는 반면 각 펄스로 인한 조직제거 후 남아있는 열에너지가 축적되는 효과를 보이며 결국 주위조직에의 열손상으로 이어질 수 있음을 관찰하였다. 또한 이때 빔 크기가 지나치면 축방향으로의 1차원적인 열전달이 일어나 열제거가 효과적이지 못하므로 열손상을 가속화시키는 효과를 낸다는 사실도 알 수 있었다. 따라서 지나치게 큰 빔 과 펄스 반복률은 피하는 것이 바람직하다 [5].

3. Conclusion

이상의 실험결과로 알 수 있는 바와 같이, USLP를 사용하여 미세조직 제거를 수행할 경우 다른 도구를 사용하였을 때 보다 월등한 효과를 보이지만 펄스 파라미터를 잘못 사용할 시 원치않는 열 손상을 주위 조직에 가할 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 조직 제거율을 높이는 일도 중요한 일이며 특히 임상적인 사용을 위하여 빠른 펄스 반복률과 큰 빔 크기를 갖추는 것은 필수적이다. 이때 축방향 조직제거가 일어남에 따라 제거가 멈추는 현상과 열손실을 막기위하여 Eximer laser나 CO₂ 레이저의 이용에서처럼 빔을 일정속도로 스캐닝하는 것이 바람직하다 하겠다. 참고로 최적의 USLP 파라미터를 사용한 경우 1 mJ/pulse, 10 kHz의 펄스 트레인으로 0.63 mm²까지 조직제거율을 높일 수있다는 계산이 나온다. 이는 기존의 다른 조직 제거 기구와 비교해도 손색이 없는 제거율로 앞으로 레이저 장비의 가격 여하에 따라 의학의 여러 분야에서 사용될 수 있으리라 기대된다.

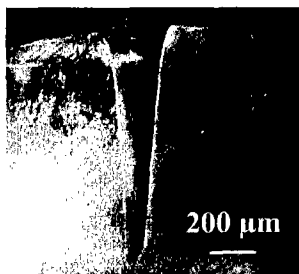


그림 1. USLP를 이용하여 인간의 치아에 형성된 전형적인 crater의 모양

1. J. Noack and A. Vogel, *IEEE J. of Quantum Electronics* **35**(8), 1156-1167 (1999)
2. B. C. Stuart, et al., *Phys. Rev. B* **53**(4), 1749-1761 (1996)
3. B.-M. Kim, et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 4001-4003 (2000)
4. A. M. Rubenchik, et al., *Proc. SPIE* **2672**, 222-230 (1996)
5. B.-M. Kim, et al., *J. Biomed. Opt.* (in press)