

레이저를 이용한 치아우식증의 예방과 치료

부산대학교 치과대학 구강내과학교실

조교수 박 준 상

지난 30여년간 치아우식제거와 충전을 위한 와동형성에 치과용 드릴을 거의 변함없이 사용하여 왔지만, 치과용 드릴(핸드피스)의 진동과 소음에 대한 공포와 두려움으로 치과방문을 꺼리는 환자들이 많이 있습니다. 만약 치과 진료실에서 치과용 드릴의 진동과 소음이 사라진다면 많은 환자들이 편안한 마음으로 치과를 방문하게 될 것입니다. 하지만 기존의 드릴은 다이아몬드 버를 이용하여 인체에서 가장 단단한 법랑질과 상아질을 깨끗하게 깎아낼 수 있을 뿐 아니라 모든 치과 의사에게 친숙하고 비교적 비용이 적게 드는 도구이므로 이를 대체하기 위한 새로운 도구는 유사한 절삭능력을 갖추고 있으면서 동통이나 마취의 필요성이 없어야 하겠습니다.

쇠나 단단한 물체를 자를 수 있는 광선, 즉 레이저로 치과용 드릴을 대신하여 치아를 삭제하려는 연구가 시도되어 왔습니다. 사실 1960년 Maiman에 의해 루비레이저가 개발된 이후, "광학 드릴"에 대한 연구가 시작되었습니다. 레이저의 치아에 대한 영향을 규명하기 위한 기초적인 연구가 Goldman(1964)과 Stern과 Sognnaes(1964)에 의해 시행되었고, 1970년대에는 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저를 이용한 연구가 실시되었으나 치수 손상, 상아질의 탄화, 법랑질의 균열 등과 같은 당시로서는 피할 수 없는 결점들이 발견되어 레이저가 와동형성에 사용되지 못하였습니다.

그 이후 레이저기술의 지속적인 발전이 이루어져 오늘날에 이르러서는 10종류 이상의 레이저가 치의학 분야에 사용되고 있고 상당수의 연구논문이 발표되

고 있으며 점차 치아경조직의 치료에 있어 레이저의 장점도 보고되고 있습니다.

치아경조직의 광학적 특성

레이저를 이용한 안전하고 효과적인 치료를 위해서는 레이저와 조직과의 광학적 상호작용에 대한 충분한 지식이 있어야 한다. 레이저의 조사조건(parameters)이나 조직 고유의 광학적 특성에 따라 나타나는 조직반응이나 치료결과는 달라진다. 레이저의 조사조건에는 파장, 펄스 반복율, 펄스당 에너지 및 시간적 특성이 있고, 조직의 광학적 특성에는 빛에 대한 굴절지수, 산란계수, 흡수계수 등이 있다. 레이저를 조직에 조사하면 해당 부위 및 인근 부위는 조직의 형태 및 화학적 구조가 변하게 되는 데, 변화정도는 온도상승의 정도에 의하며, 온도상승은 조직내부로 축적된 에너지와 열전도에 의한 결과이다.

흡수율이 높은 조직의 경우, 조사된 레이저 에너지는 조직표면에서 모두 흡수되어 열로 전환되어 빛의 산란은 의미가 없으며, 조직내 에너지의 이동은 열전도에 의해 이루어진다. 하지만 흡수율이 낮은 조직의 경우, 조사된 레이저 에너지는 표면에서 흡수되지 못하므로 산란된 빛이 조직내 에너지 축적에 중요한 역할을 하게 된다.

법랑질(enamel)은 매우 단단하고, 97%의 무기광물질과 약 3%의 유기질, 약간의 물로 구성된 투과성 물질이며 높은 열전도율($k=9.34 \times 10^3 \text{W/cm}^\circ\text{C}$)을 지닌다. 가시광선(visible light, 400-700nm)과 근적외선(near infrared, 1053nm)영역의 빛은 법랑질내에

거의 흡수되지 않고(낮은 흡수계수) 중증도로 산란된다. 일부 자외선(ultraviolet, 240-300nm)영역의 빛도 중증도로 흡수된다.

상아질(dentin)은 70%의 무기질과 30%의 유기질, 그리고 물로 구성되어 있으며 열전도율($k=5.69 \times 10^{-6} \text{W/cm}^{\circ}\text{C}$)이 법랑질에 비해 매우 낮다. 내부에는 치수면, 백악질, 법랑질과 통하는 상아세관(dentinal tubules)이 있다. 가시광선영역에서 상아질은 파장에 관계없이 일정한 강도의 흡수계수를 보인다. 그러나 산란계수는 매우 다양한데 이는 상아세관의 배열이나 분포에 따라 변한다.

법랑질이나 상아질과 같은 치아경조직은 carbonated hydroxyapatite라는 무기광물질을 함유하고 있으며 구성성분중 phosphate, carbonate, hydroxyl 이온은 적외선영역내에 강한 흡수 영역을 가지고 있다. CO₂ 레이저(파장 9.3, 9.6, 10.3, 10.6 μm) 파장은 phosphate의 흡수영역을 포함하므로 법랑질 표면에서 강하게 흡수된다. 특히 9.6 μm 은 다른 파장보다 강한 흡수를 보이며 더 높은 표면 온도를 보인다. Erbium(2.79 μm , 2.94 μm)과 excimer(193, 248, 308nm)도 치아경조직에 강하게 흡수된다. ArF excimer (193nm) 레이저는 치아경조직 절제에 효과적이며, XeCl(308nm)은 단백질 흡수 영역과 일치한다. 248nm는 암발생이나 돌연변이의 가능성 때문에 구강내 적용이 바람직하지 않다. Erbium은 경조직내 함유하고 있는 물이나 OH⁻이온에 효과적으로 흡수된다. Er:YSGG(2.79 μm)는 OH⁻ 흡수영역과 일치하므로 Er:YAG(2.94 μm)에 비해 경조직 제거에 효과적이다(그림1).

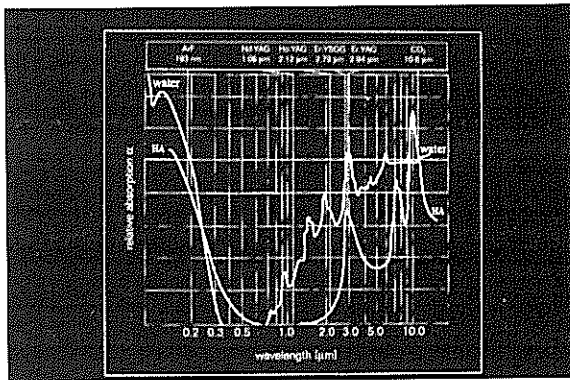


그림 1. 200nm에서 10 μm 에 이르는 스펙트럼 영역별 레이저파의 물(water)과 수산화인회석(HA)에서의 흡수능

레이저를 이용한 치아우식증 예방

치아우식을 예방하는 방법은 산(acid) 침투에 저항할 수 있도록 레이저로 치아표면을 변화시키는 것이다. Stern 등은 ruby(693.4nm)레이저로 치아 법랑질을 가열하면 표면하 탈회에 대한 저항력을 증가시킬 수 있다고 보고하였다. Yamamoto 등은 Nd:YAG(1640nm) 레이저를 매우 강한 출력(약 1GW/cm²)으로 사용하면 법랑질을 용융시킬 수 있고 이는 용해에 저항력이 매우 강하다고 보고하였다. 하지만 초기 연구에서 사용한 근적외선이나 가시광선 영역은 치아경조직에 미약하게 흡수되므로 원하는 효과를 얻기위해서 매우 강한 출력(10⁷W/cm²이상)을 적용하였고 따라서 플라즈마(plasma) 형성과 치수(pulp) 손상을 초래하였다. 이후 CO₂를 이용한 연구에서 빛에서 열로 효과적으로 변환이 가능해 짐으로서 보다 낮은 에너지 수준을 채택하게 되었다. 법랑질, 백악질, 상아질을 구성하는 무기광물질은 carbonated apatite이며 이 성분은 9.0-11.0 μm 적외선 영역에서 강한 흡수대를 지니므로 CO₂ 레이저의 적외선 영역이 가시광선 영역에 비해 효과적으로 이용될 수 있게 되었다. Launay 등은 pulsed Nd:YAG (200-2,000J/cm²)는 법랑질의 표면을 녹이지 못하였고, argon (300-10,000J/cm²)은 표면에 형성된 유기물 때문에 일관된 결과를 얻지 못하였으며, 연속파 CO₂ (250-1,000J/cm²)는 표면을 녹이지만 치수의 과열을 동반하였다고 보고하였다. 최근 Featherstone 등은 파장 9.3 μm 과 9.6 μm 이고 펄스지속 시간이 100 μs 인 pulsed CO₂ 레이저가 낮은 에너지 강도(25kW/cm² 이하)에서 법랑질 표면을 가열하는 데 매우 효과적이라고 보고하였다.

레이저 조사에 따른 우식병소형성억제에 대한 기전으로 법랑질 표면의 폐쇄나 투과도의 변화를 들 수 있다. Ruby 레이저는 법랑질의 표면을 폐쇄시켜 이온 확산을 위한 투과도를 감소시키는 반면, argon 레이저는 경조직내 유기물, 물, carbonate를 제거하여 미세한 기공(microspace)을 형성하므로 투과도를 증가시킨다. 다른 기전으로는 표면의 구성성분의 변화로 인한 것이다. Pulsed CO₂ 레이저는 경조직 표면의 온도를 1,000 $^{\circ}\text{C}$ 이상 상승시켜 carbonated apatite로 구

성된 법랑질을 녹여 5 μ m이하의 용융 지역을 형성하고 그 아래 10-40 μ m에는 구성성분의 변화를 겪는 지역을 형성하여 carbonate 성분이 현저히 감소하고 표면은 hydroxyapatite와 Ca₄(PO₄)₂O가 형성된다. Fowler와 Kuroda에 의하면 650°C 이하로 레이저처리를 한다면 acid phosphate HPO₄²⁻가 탈회를 억제시키는 P₂O₇로 전환되게 된다고 한다. 이 P₂O₇은 hydroxyapatite의 용해율을 영(zero)으로 만들어 준다. 반면 1,200°C 이상으로 열처리를 한다면 α 와 β -Ca₃(PO₄)₂와 Ca₄(PO₄)₂O가 형성되므로 산 용해에 감수성이 증가한다.

레이저 조사와 불소의 국소도포를 병용하는 방법은 우식예방에 효과적이다. Nd:YAG 레이저로 법랑질의 표면을 처리한 후 acidulated phosphate fluoride (APF)로 국소도포하면 내산성(acid resistance)이 매우 상승한다. 이는 레이저로 처리된 법랑질 표면이 APF를 강력하게 흡수하기 때문이다. Featherstone 등은 pulsed 9.3 μ m CO₂ 레이저를 법랑질내 치아우식병소에 조사한 후 APF로 처리한 결과, 우식병소의 진행을 완전히 억제할 수 있었다고 보고하였다. 10.6 μ m 연속파 이산화탄소레이저를 건전한 법랑질에 조사한 후 불소 (fluoride), DAC (dodecylamine HCl), EHDP (ethane-1-hydroxyl-1,1-diphosphonic acid)로 처리한 후 관찰하였는 바, pH 4.5에서 어떠한 용해도 발생되지 않았다. 이는 레이저에 의한 열처리와 불소도포와 같은 화학적 억제 요법은 상호 상승 효과를 발휘한다고 할 수 있다. Nd:YAG와 CO₂ 레이저뿐만아니라 argon, excimer, erbium 레이저 등도 활용가능하다.

치아 경조직의 절제

치과용 드릴을 대체하기 위한 레이저의 이용 가능성에 대한 초기의 연구에서 치수에 비가역적인 손상을 유발할 만한 심각한 열이 생성되는 것이 관찰되었다. 하지만 레이저와 치아경조직간의 상호작용을 밝히려는 연구는 계속되었다. Melcer 등은 CO₂ 레이저로 치아우식을 치료하였고 이후 많은 연구자들이 치아경조직과 골조직에 대한 영향을 평가하였다. Dederich 등은 Nd:YAG 레이저를 근관벽에 적용한 후 그 변화를 조사하였고 Harris와 Wigdor는 Q-

switched Nd:YAG 레이저를 법랑질에 적용하여 열적손상이 없다는 것을 보고하였다. 하지만 Koort와 Frentzen은 치아 경조직에 적용된 여러 레이저의 효과를 비교한 결과 상아질과 법랑질에 균열이 발견하였다. 경조직 절제에 이용되는 다른 레이저로는 excimer, Er:YAG, Er:YSGG 레이저 등이 있다.

Er:YAG(파장 2.94 μ m)과 Er:YSGG(파장 2.79 μ m)은 물과 OH⁻ 흡수곡선의 적외선 정점에 근접하므로 조직에 강력하게 흡수되어 온도상승과 압력증가로 폭발이 일어나 조직이 제거된다. 이런 특성이 치아 경조직 제거에 가장 유망한 레이저로 대두되게 하였다. Hibst와 Keller는 Er:YAG레이저(10Hz, 50J/cm²)의 법랑질 절제 속도가 0.33mm/sec라고 하였고 우식병소는 건전 치질에 비해 훨씬 빠르게 제거되었는데 이는 우식부의 인장강도(tensile strength)가 건전 치질에 비해 매우 약하므로 보다 낮은 온도와 압력에 쉽게 제거될 수 있기 때문이다. 그러므로 우식병소만을 선택적으로 제거하면서 인근 정상조직에 대한 손상을 최소한으로 줄일 수 있다. Er:YAG 레이저를 치아에 적용하였을 때 30°C 이상의 온도 상승이 관찰되며 이는 인근 상아질과 법랑질에는 아무런 손상을 주지 않는다 하더라도 치수에는 심한 손상을 주어 괴사를 초래할 수 있다. 5°C 이상의 온도상승이 1분이상 지속된다면 치수는 비가역적인 변화를 겪게 되기 때문이다. 그러므로 레이저 조사시 물분사 냉각이 필요하며 적절한 분사냉각을 사용한다면 온도상승을 3°C이하로 유지할 수 있다. Er:YAG가 지닌 다른 문제는 충격파로 인한 치아의 균열(cracking)인데 치아경조직의 절제를 위해서는 폭발에 의한 제거

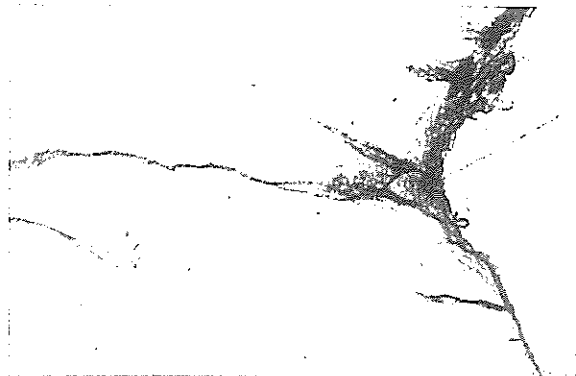


그림 2 Er:YAG 레이저 조사시 물분사 냉각을 시행한 법랑질의 비탈회 표본(100배).인근 조직의 균열이 광범위하게 관찰된다.

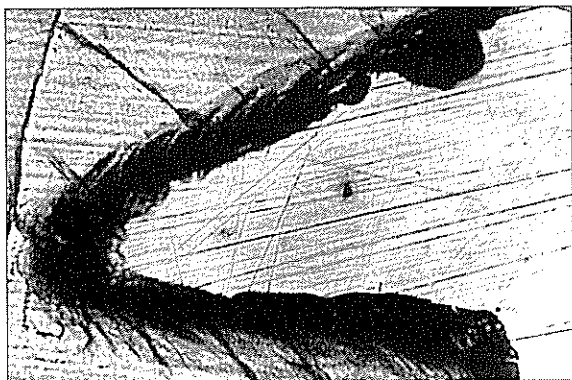


그림 3. 물분사 냉각 없이 Er:YAG 레이저에 조사된 법랑질의 비탈회 표본(100배). 탄화가 균열이 현저하게 관찰된다.

가 필요하므로 이런 부작용을 최소화하면서 원하는 절제 조건을 찾는 것이 중요하다(그림 2, 그림 3). 기존 수복물의 제거에 관해서 살펴보면, 레진이나 시멘트의 제거는 쉽게 이루어지지만 아말감의 제거는 고온에 의한 독성과 빠른 속도로 튀는 파편을 고려하여야 한다.

초기의 연속파 이산화탄소 레이저는 치질 삭제를 할 수 없었고 표면만을 탄화(char)시켰고 치수강의 온도를 상승시켰다. 하지만 짧은 펄스의 이산화탄소 레이저는 효과적으로 경조직을 절제할 수 있다. 특히 펄스지속시간 0.1~2.0 μ sec이고 파장 10.6 μ m인 TEA CO₂ 레이저는 물과 carbonated hydroxyapatite에 강력하게 흡수되는 성질을 지녔고 빠른 압력증가로 절제가 이루어진다. 유도된 압력은 우식병소를 선택적으로 제거하는 것을 용이하게 한다. TEA CO₂는 절제시 플라즈마(plasma)를 형성하며 플라즈마에 의해 입사 레이저에너지가 흡수되고 충격파가 발생되어 손상을 유발한다. 그러므로 플라즈마 형성을 최소화하도록 하고 치아과열을 물분사냉각으로 해결하여야 한다(그림 4).

색소 촉진 레이저 절제 (dye enhanced laser ablation)는 특정 레이저의 흡수를 증강시키기 위해 조직의 표면에 indocyanine green과 같은 색소를 소량씩 분사하는 방법으로 diode(파장 805nm)와 tunable alexanderite(파장 700~825nm) 레이저가 이용된다. 레이저 펄스가 색소분사후 바로 적용되고 다시 색소가 분사되고 레이저 펄스가 적용되는 과정을 반복하게 된다. 펄스당 삭제가 우수하고 형성된



그림 4. TEA CO₂ 레이저에 조사된 상아질의 비탈회 표본으로 탄화나 균열이 없는 깨끗한 경계를 지닌 와동이 형성되었다(100배).

절제부는 균열이 없고 매끈한 벽을 형성하지만 색소 분사와 레이저적용이라는 반복 과정의 속도가 느린 것이 단점이다.

Excimer 레이저는 자외선 파장으로 골조직의 절제에 효과적이며 치과치료에도 유용하다(그림 5). ArF(193nm)와 XeCl(308nm)은 Er:YAG보다는 에너지와 절제율이 낮지만, 선택된 조사조건에 따라 표면 온도가 상승한다. 장점은 물에 대한 흡수가 미약하므로 물분사 냉각을 사용하여도 에너지의 소실이 적다. 우식제거는 건전 치질의 절제에 드는 에너지의 4분의 1이면 충분하므로 선택적이 우식제거가 가능하다.

Holmium은 Nd:YAG 보다는 치아에 더 강하게 흡수되고 열손상도 적어 피사 지역이 50 μ m 정도이다. erbium이나 excimer 보다는 절제 효율이 부족하지만, 파장 2.1 μ m는 광섬유를 통하여 에너지의 소실없이 전달이 가능하고 구강내 적용이 매우 용이하다. 하지만 균열과 치수강에 대한 열손상의 문제는 해결되어야 한다.

레이저 치료의 현재와 미래

치아경조직에 적용 가능한 레이저를 본격적으로 임상에서 사용한 때를 미국식품의약국(FDA)의 판매승인을 기준으로 한다면 1997년 6월부터라고 할 수 있다. 18세 이상 성인의 치아우식제거 및 와동 형성, 법랑질 표면 부식처리 등을 위해 Centauri Er:YAG 레이저(Premier Laser System)가 적용될 수 있다는 것이 그 시작이었다. 그 이후 1997년 10월에는 경조직

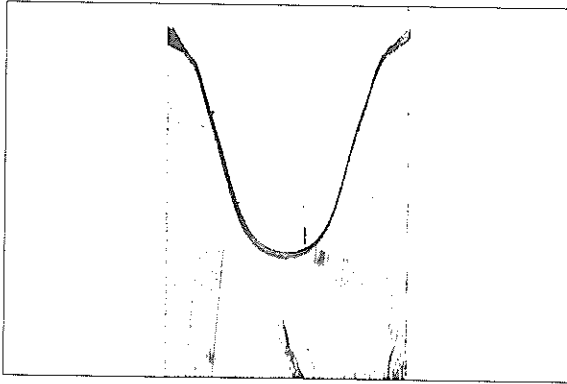


그림 5. ArF excimer 레이저로 법랑질에 형성한 외동으로 인접한 조직에 병리적 소견이 관찰되지 않는다(60배)

에 적용가능한 두 번째 레이저로 Millennium Hydrokinetic ErCr:YSGG(erbium chromium, yttrium scandium gallium garnet, BioLase Technology)가 승인되었다. 이는 레이저 에너지가 물 분자를 분쇄하고 그 때의 힘으로 치아를 절제하는 유체동역학(hydrokinetics)을 이용한 기기이다. 1999년 6월부터 어린이에게도 적용이 가능하게 되었다. 또한 1999년 5월에는 법랑질내 초기 우식치료용으로 PulseMaster Nd:YAG(American Dental Technologies) 레이저가 승인되어 pulsed Nd:YAG의 활용 범위가 확대되었다.

치아경조직 치료를 위한 레이저의 미래는 Er:YAG 나 YSGG와 같이 치아경조직 제거에 우수한 광학적 특성을 지닌 파장들이 점차 임상에서 실용화될 것이고, Excimer, pulsed CO₂ laser, Optical parametric oscillators, Diode, Alexanderite, 및 Holmium 등이 임상에 도입될 것이다. 치아경조직을 절제하는 레이저의 개발뿐만 아니라 치아우식병소를 조기에 진단하고 찾아내는 방법들이 개발될 것이다. 몇 예로는 방사선 사진에는 나타나지 않는 초기 우식병소의 진단에 활용될 수 있는 optical coherence tomography, 치아우식을 찾는 laser fluorescence, 치수의 상태를 조기에 진단할 수 있는 laser Doppler flowmetry 등이 치아우식증의 예방과 치료에 큰 변화를 가져올 방법들이다. 치아우식증을 조기에 진단하여 찾아내어 레이저로 표면처리 및 불소처리를 하거나, pit and fissure 우식부를 절제하고 수복치료한다면 치과진료실에 대한 공포는 먼 옛날 이야기가 될 것입니다.

참고 문헌

1. 대한구강내과학회 역, 치아경조직에 대한 레이저의 효과, 레이저 치의학, 서울, 지성출판사, 1996, p57-70
2. Wigdor HA, Walsh JT, Featherstone JDB et al., Lasers in Dentistry, Lasers in surgery and medicine 1995;16:103-133
3. Fried D, Featherstone JDB, Glana RE et al, The nature of light scattering in dental enamel and dentin at 543, 632, and 1053 nm. In : "Lasers in Orthopedic, Dental, and Veterinary Medicine II." Bellingham, WA:SPIE 1993, 1880;p240-245.
4. Fried D, Glana RE, Featherstone JDB, Multiple pulse irradiation of dental hard tissues at CO₂ laser wavelengths. In : "Lasers in Dentistry" Bellingham, WA:SPIE 1995, pp41-50.
5. Seka W, Fried D, Featherstone JDB, Glana RE, Time-dependent reflection and surface temperatures during CO₂ laser irradiation of dental hard tissues with 100- μ s pulses. In : "Lasers in Dentistry" Bellingham, WA:SPIE 1995, 2394;p51-56.
6. Keller U, Hibst R, Effects of Er:YAG laser in caries treatment : A clinical pilot study, Lasers in surgery and medicine 1997;20:32-38
7. Hennig T, Rechmann P, Jeltner P, Kaufmann R, Caries selective ablation: the second threshold, In : "Lasers in Dentistry" Bellingham, WA:SPIE 1993, 1880;p117-124.