

펄스형 Nd-YAG 레이저 조사에 의한 법랑질 내산성 증가 기전에 관한 연구

연세대학교 치과대학 소아치과학교실

이영순 · 손흥규

Abstract

A STUDY OF THE MECHANISM OF IMPROVING ACID RESISTANCE OF BOVINE TOOTH ENAMEL AFTER PULSED Nd-YAG LASER IRRADIATION

Young-Soon Lee, Heung-Kyu Shon

Department of Pediatric Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University

The purpose of this study was to examine the mechanism of improving acid resistance of Nd-YAG laser irradiated tooth enamel and determine the most effective energy density for improving acid resistance. The bovine tooth enamel were lased with a pulsed Nd-YAG laser. The energy densities of exposed laser beam were varied from 10 to 70 J/cm².

To investigate the degree of improving acid resistance by irradiation, all the samples were submerged to demineralize in 0.5 N HClO₄ solution for 1 minute. After 1 minute, 0.05% LaCl₃ was added to the solution for interrupting the demineralization reaction. The amounts of dissolved calcium and phosphate in the solution were measured by using an atomic absorption spectrophotometer and the UV/VIS spectrophotometer, respectively.

To examine the mechanism of improving acid resistance, X-ray diffraction analysis, infra-red spectroscopy, and scanning electron microscopy were taken. The X-ray diffraction pattern of the samples were obtained in the 10°~80°2θ range with Cu-Kα radiation using M18HF(Mac Science Co.) with X-ray diffractometer operating at 40 KV and 300 mA. The infra-red spectra of the ground samples in 300 mg KBr pellets 10 mm diameter were obtained in the 4000 cm⁻¹ to 400 cm⁻¹ range using JASCO 300E spectrophotometer. The scanning electron microscopy was carried out using JSM6400(JEOL Co.) with 500~2000 times magnification.

The results were as follow

1. The concentration of calcium dissolved from laser irradiated enamel with $50\text{J}/\text{cm}^2$ was significantly lesser than that of unlased control group ($p < 0.05$)
2. From the result of the X-ray diffraction analysis, β -TCP, which increases acid solubility, was identified in lased enamel but the diffraction peaks of (002) and (004) became sharp with increasing energy density of laser irradiation. This means that the crystals in lased samples were grown through the c-axis and subsequently, the acid solubility of enamel decreased.
3. The a-axis parameter was slightly increased by laser irradiation, whereas the c-axis parameter was almost constant except for a little decrease at $50\text{J}/\text{cm}^2$.
4. In the infra-red spectra of lased enamels, phosphate bands ($600\sim 500\text{ cm}^{-1}$), B-carbonate bands ($870, 1415\sim 1455\text{ cm}^{-1}$), and A-carbonate band (1545cm^{-1}) were observed. The amounts of phosphate bands and the B-carbonate bands were reduced, on the other hand, the amount of the A-carbonate band was increased by increase the energy density.
5. The SEM experiments reveal that the surface melting and recrystallization were appeared at $30\text{ J}/\text{cm}^2$ and the cracks were observed at $70\text{ J}/\text{cm}^2$.

From above results, It may be suggested that the most effective energy density for improving acid resistance of tooth enamel with the irradiation of Nd-YAG laser was $50\text{J}/\text{cm}^2$. The mechanism of improving acid resistance were reduction of permeability due to surface melting and recrystallization of lased enamel and reduction of acid solubility of enamel due to decrease of carbonate content and growth of crystal.

Key words : acid resistance, tooth enamel, β -TCP, Nd-YAG laser, X-ray diffraction, infra-red spectroscopy, scanning electron microscopy

I. 서 론

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 약자인 레이저 (Laser)는 1960년 Maiman에 의해 발견된 이래 단일파장(monochromatic)의 고집적 에너지를 가진 빛을 원하는 부위에 집중시킬 수 있다는 장점 때문에 여러 분야에서 응용되고 있다.

레이저는 활성물질의 종류와 성상, 출력의 강약, 파장, 연속파인가 펄스파인가에 따라 분류된다. 활성물질에 따라서 고체레이저(Ruby, Nd-YAG, Nd-Glass), 기체레이저(He-Ne, CO_2 , Argon), 액체레이저(Dye) 그리고 반도체레이저 등으로 대별할 수 있으며,

출력에 따라서 저출력, 중출력, 고출력레이저로 분류할 수 있다. 이와 함께 발진된 레이저의 파형에 따라 연속파와 펄스파로 분류할 수 있다. 치과영역에서 사용되는 레이저는 대부분 중출력으로 연속파와 펄스파가 사용된다. 파장에 따라서 적외선, 가시광선 및 자외선 영역의 레이저로 분류할 수 있다.

레이저는 파장에 따라 다양한 조직반응이 나타난다. 중적외선과 원적외선 영역의 레이저(Er-YAG, 탄산가스 레이저)는 물에 잘 흡수되는데, 대부분의 생체조직은 다량의 물을 함유하므로 조직과의 반응이 매우 강하다. 이들 파장은 방사에너지를 흡수하는 다른 색소포나 색소체를 필요로 하지 않는다. 자외선영역의

레이저 (엑시머 레이저)는 모든 조직의 생활력을 상실하게 할 수 있다. 특히 350nm보다 짧은 파장사용시 조직을 절제할 수 있다. 가시광선영역내 파장을 사용한 레이저 (아르곤 레이저, 크립톤 레이저)는 광화학 반응을 유도하는 에너지를 제공할 수 있고 흡수된 레이저 파장의 에너지는 열로 전환되어 광응고 등의 비가역적 손상을 야기할 수 있다. 이 영역의 레이저는 흡수를 촉진하는 멜라닌, 헤모글로빈 같은 색세포가 존재할 경우 에너지가 충분히 흡수되고 따라서 온도가 충분히 높아져 조직을 기화시킬 수 있다.

레이저는 각 조직에 조사되면 흡수되거나, 투과되거나, 반사 또는 산란된다. 조직에 조사된 레이저광 에너지는 조직에 흡수되어 유효한 열에너지로 전환되어 작용하며 일부는 반사되어 조직에 어떠한 작용도 초래하지 않는다. 또한 일부 레이저는 일정하지 않은 방향으로 산란된 후 다른 부위로 흡수되어 분산된 낮은 열 효과를 나타낸다. 투과되는 레이저는 조직에 거의 작용 없이 통과한다. 레이저광이 조직에 흡수되면 광화학효과 (photochemical effect), 광열반응 (photothermal effect), 광전리반응 (photoionizing effect) 등이 일어난다. 광화학효과는 생체에 저 출력의 레이저를 조사하는 경우에 나타나는 반응으로, 이는 세포를 자극하는 치료법과 암치료 등에 이용된다. 광열효과는 조직을 레이저의 열로 용해시키는 광열 (hyperthermia, 40~60°C), 지혈작용이 가능한 열 응고 (60~100°C) 그리고 절개와 감염조직제거 (100°C 이상) 등이 있다. 이런 효과는 레이저광을 흡수한 온도에 따라 달라진다. 광전리효과는 혈관형성술, 치과경조직의 제거 등에 사용되는 작용이다.

레이저와 조직과의 상호작용을 결정하는 레이저의 특성으로 레이저의 파장, 광선의 출력 밀도 (power density), 연속파인지 펄스파인지 여부, 최대출력 (peak power) 등이 있다. 레이저의 파장은 장단에 따라 조직에 흡수되는 정도가 달라지므로 각각의 용도에 맞춰 선택해야한다. 출력밀도는 초점에 모아진 레이저 출력의 집중정도로 (W/cm^2) 조직을 제거하는

경우 효율성을 좌우하는 중요한 요소이다. 펄스형태의 레이저 방출은 펄스의 지속시간을 짧게 하여 연속파에 비해 높은 피크에너지를 공급하면서 조직의 손상을 줄일 수 있다. 최대출력은 조사된 레이저가 갖는 에너지의 최대값을 의미한다. 최대출력은 레이저가 야기하는 조직효과의 형태 즉 조직응고(tissue coagulation), 기화(vaporization), 분절(fragment) 등을 결정한다. 평균출력이란 펄스지속시간에 관계없이 일정기준시간동안 발생한 에너지의 양이다. 레이저는 이런 여러 가지 조건을 조절하여 조직에 원하는 효과를 낼 수 있다⁷⁾.

다양한 레이저중 치과용으로는 아르곤, 탄산가스, Nd-YAG 레이저가 흔히 사용된다. 치과수술에 사용되는 레이저는 대부분 치료되어야 할 목표조직에 강력하게 흡수되어 인접조직에 영향을 주지 않는 레이저 파장을 선택해야 한다. 이중 아르곤 레이저는 출력이 약해서 조사시간이 길어지므로 치아에 손상을 줄 수 있는 단점이 있어 우식예방용으로 부적합하고 치과 영역에서는 레진의 중합 및 연 조직 처치 등에 사용된다. 탄산가스 레이저는 착색도포제 없이도 조직에 흡수하므로 초기에 경조직 처치에 사용되었으나 수분에 의한 흡수력도 높아 세포와 조직을 무차별 탄화, 연소, 파괴하는 성질이 있다. 따라서 사용이 제한될 수밖에 없고 또한 파장이 길어서 광유도관을 사용하여 구강내에 쉽게 도달하기 어렵다는 단점이 있어 최근에는 치아삭제등에 Er-YAG 레이저 이용에 대한 연구가 활발하다. Nd-YAG 레이저는 광유도선을 사용하여 쉽게 구강내 도달할 수 있고 조직내 침투성이 있어 치과 경조직 치료 및 연 조직 처치에 많이 사용된다.

치과영역에서도 1964년 Goldman이 치아우식부위 제거에 레이저를 처음 사용한 이래, 치아삭제, 우식예방, 치아과민증 치료 등의 여러 분야에서 레이저 이용이 활발히 논의되고 있다. 레이저 도입 초기에는 치아와동 형성 및 우식증 제거에 관심이 집중되었으나, 이 경우 사용되는 에너지 밀도가 커서 치아 및 치수 손상에 대한 우려가 높아 현재는 주로 치아우식 예방과 초기 우식증 치료영역에 관심이 집중

되고 있다.

치아우식 예방과 초기치료 영역에서 진행되는 레이저 이용은 레이저 조사에 의한 법랑질의 투과도 감소나 용해도 변화 또는 화학적 기전에 의한 내산성 증가 여부에 관한 연구가 있는데, 이는 치아우식 예방 뿐 아니라 초기 우식증 치료를 목적으로 한다. 그 외에 레이저 조사에 의한 치은연상 및 치은연하, 치석제거에 관한 연구, 레이저의 순간적 고열로 살균 및 항균 작용을 이용한 치태 생성억제 연구, 레이저에 의한 세균내 독소의 파괴연구, 레이저 조사로 상아세관 밀봉을 통한 치아지각 과민증 처치 연구 등이 있다⁸²⁾.

이중 치아우식 예방 분야에서는 1964년 Stern과 Sognnaes⁶²⁾가 YAG 레이저를 이용한 와동형성 실험중 조사부위의 내산성 강화현상을 발견하여 처음으로 치아우식 예방가능성을 시사하였으며, 1972년 같은 연구자들⁶⁸⁾이 최초로 생체실험을 통한 내산성증가를 확인하여 임상적 응용가능성에 대한 길을 열어 주었다. 이후 Yamamoto와 Sato^{74,75)}, Nelson⁵⁴⁾, Oho 와 Morioka⁵⁷⁾, White⁷⁷⁾ 등이 레이저 조사로 법랑질 및 상아질에서 내산성이 증가함을 보고하였고, Goodman과 Kaufman²⁴⁾은 불소도포 후 아르곤 레이저를 조사한 결과 내산성의 증가를 보고 하였다. 국내에서는 김 등¹¹⁾이 정상 법랑질에서 탄산가스 레이저 조사에 의한 내산성의 증가를 보고하였으며 이 등⁹⁾은 인공우식 법랑질에서 탄산가스 레이저 조사시 내산성 증가를 보고한 바 있고 정 등¹²⁾은 상아질에서 펄스형 Nd-YAG 레이저 조사에 의한 내산성 증가를 보고한 바 있다. 이와 같이 레이저 조사에 의하여 법랑질 및 상아질의 내산성증가는 치아의 광열반응을 이용하는 것으로, 레이저를 치면에 조사할 경우 빛에너지가 열에너지로 바뀌면서 치면에 온도가 순간적으로 상승하여 이에 따른 치면의 물리 화학적 변화에 의해 내산성이 증가하는 것으로 알려져 있으나^{26,64)} 정확한 기전에 대해서는 아직 논란이 많다.

레이저 조사에 의한 법랑질 내산성 증가기전에 대한 설명중 하나로 법랑질 용합에 의한 투과도 변화⁶⁰⁾, 법랑질 유기물 (organic matter)

의 변화에 의한 투과도 감소^{64,74,75)}가 있다. 또 다른 설명으로는 법랑질 구성성분의 변화에 의한 용해도의 감소인데, Kuroda 등³⁸⁾은 낮은 에너지밀도의 레이저 조사시 pyrophosphate가 형성되어 용해도를 낮추나 과도한 레이저 조사시 α , β -Tri calcium phosphate (TCP), tetra calcium phosphate (TETCP)가 형성되어 법랑질용해도를 증가시킨다고 하였으며, Kimura 등³⁷⁾은 용합된 법랑질 내에서 결정구조의 재배열에 의한 밀도의 증가와 상의 변화로 용해도가 감소된다고 하였다. Nelson 등⁵⁵⁾은 10~50 J/cm² 레이저 조사시 용합된 표면에 TETCP가 형성되어 법랑질 용해도를 증가시키나, 탄산염의 함유량이 감소하여 수산화인회석 활성도를 낮추어 용해도를 감소시킨다고 하면서 내산성 증가기전은 투과도 감소와 용해도 감소가 동시에 일어난다고 하였다. 반면에 얇은 법랑질 막에 탄산가스 레이저 조사 후 이온의 투과도를 직접 조사한 실험에서 투과도가 감소하기보다 오히려 증가함을 보고하면서 내산성 증가는 법랑질의 화학적 변화 때문이라는 주장도 있다¹⁷⁾. 또다른 설명으로는 수분과 탄산염의 소실로 인한 결정크기의 변화와 같은 물리적 변화⁷³⁾ 등이 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 현재까지는 종합적인 실험을 통한 내산성 증가기전에 대한 명확한 결론이 없고 또 사용한 레이저의 종류도 다양해서 실험간 비교를 하기도 어렵다. 따라서 본 연구에서는 조직내 침투성이 있고 우식에 방용으로 적합한 펄스형 Nd-YAG 레이저를 법랑질에 조사했을 때 내산성증가에 가장 효과적인 에너지 밀도에 대해 알아보고 레이저 조사에 의한 법랑질 내산성 증가기전을 밝히기 위한 내산성 측정, X-선 회절분석, 적외선 분광분석 및 주사현미경 관찰을 시행하였다. 조사 에너지 밀도를 달리하여 준비된 시편의 내산성 증가에 대한 가장 효과적인 에너지 밀도를 구하였고, X-선 회절분석을 통해 레이저 조사에 의한 새로운 상의 형성, 결정 크기의 변화, lattice strain의 변화를 관찰하였다. 아울러 적외선 분광분석을 시행하여 레이저 조사에 의한 치아 내 원자간의 화학결합의 변화를 관찰하였고

주사전자현미경을 통해 레이저 조사에너지 밀도에 따른 법랑질 표면구조의 변화를 관찰하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

소의 영구전치중 우식이나 결함이 없는 치아를 선택하여 치관을 절단한 후, 이를 다시 순설면으로 절단하여 설면을 제거하고 순면부위를 불소와 오일이 포함되지 않은 치과용 치면연마제로 연마하였다. 증류수를 사용하여 초음파 세척기로 세척한 다음 준비된 순면의 소치아를 포르말린이 함유된 증류수에 보관하였다.

2. 실험방법

가. 표본의 제작

보관된 순면의 소치아를 $5 \times 5 \times 1\text{mm}$ 가 되도록 치과용 절삭기구로 절단한 후 레이저가 잘 흡수 되도록 흑색 유성잉크를 도포 하였다.

나. Nd-YAG 레이저 조사

본 연구에 사용한 레이저는 한국원자력연구소에서 개발한 펄스발진형 Nd-YAG 레이저로서 조사조건은 조사직경 5mm, 펄스반복율은 10 pps, 펄스폭 1ms, 조사시간 1초였다. 일정한 면적을 조사하기 위해 시편을 초점렌즈 하방 일정거리에 위치한 지그에 올려서 단위면적당 10, 30, 50, 70 J/cm²의 에너지 밀도가 되도록 발진출력을 변화시켰다. 레이저 조사 후 99% ethanol로 흑색잉크를 세척하였다.

다. 법랑질 내산성검사

(1) 시편제작

시편의 순면부 평활면에 직경 3mm window를 형성한 접착테이프 (No. 471, 3M Co.)를 붙이고 나머지 면에 바니쉬 (nail varnish)를 2회 도포한 다음, 접착테이프를 떼어 모든 시편에서 같은 표면적으로부터 용출되는 양을

측정하게 하였다.

(2) 칼슘 용출량 측정

앞서 기술한 방법으로 준비한 시편을 0.1 N HClO₄ 용액 1ml에 1분간 부식시킨 후, pH 5.2로 조절된 total ionic strength adjustment buffer (TISAB) type II 1ml을 첨가하여 반응을 중지시킨 후 부식용액중 0.1ml를 취하여 인산에 의한 방해물 없애기 위해 0.5% lanthanum chloride 용액 2.9ml에 첨가한 후 원자흡수분광측정기 (Atomic Absorption Spectrophotometer, IL model 457, Instrumentation Lab Co. USA)를 이용하여 산에 용해된 칼슘이온 양을 측정하였다.

(3) 인 용출량 측정

칼슘 용출량 측정에서와 같은 방법으로 준비된 부식용액을 0.1ml 취하여 2% ascorbic acid, 10% trichloroacetic acid 용액 1 ml에 첨가한 후 이 용액에 1% ammonium molybdate 0.5ml용액을 첨가하여 혼합한 후, 2% arsenite, citrate용액 1ml를 첨가하여 혼합한 후 15분 후 자외선 흡수 분광 분석기(Uvikon 860, Kontron Co, Switzerland)를 이용해 840nm에서 인의 양을 측정하였다.

라. X-선 회절분석

X-선 회절분석은 새로운 상(phase)의 형성 여부, 결정크기변화 및 결정 내 잔류응력을 알아보는 분석방법으로 각 군에서 2개의 시편을 SRA M18XHF (Mac science Co.)로 시행하였다. 분석조건은 Cu-K α 선, 가속전압 40kV, 가속전류 300mA, 주사속도 4°/min으로 $10^\circ < 2\theta < 80^\circ$ 에서 측정했다, 특히 α -TCP와 β -TCP의 생성여부를 알기 위해 $25^\circ < 2\theta < 35^\circ$ 구간에서는 0.01° 간격으로 4초동안 유지하는 step scanning방법을 이용하여 자세히 조사하였다.

Lattice parameter는 $10^\circ < 2\theta < 80^\circ$ 구간 사이의 (002), (202) 피크에서 계산하였다.

마. 적외선 분광분석

적외선 분광분석은 원소간의 결합력을 측정

하여 원소결합의 양과 종류를 알아보는 분석 방법으로 레이저를 조사한 법랑질표면을 다이아몬드 줄을 이용해 약 1mg 채취한 후 약 300mg KBr을 섞고 가압형성하여 10mm의 disk형으로 제조하여 Jasco 300E를 이용하여 4000~400 cm^{-1} 영역에서 적외선 분광분석을 시행하였다.

바. 주사전자현미경 관찰

레이저 에너지 밀도에 따른 법랑질의 표면 변화를 관찰하기 위해 각군의 시편을 금으로 피복하여 주사전자현미경(JSM 6400, JEOL Co.)으로 관찰하였다.

사. 실험자료의 분석

용출된 칼슘, 인은 정량분석하고 SAS (statistical analysis of science) program에 의해 Duncan's multiple range test를 시행하여 오차율 0.05% 이하로 통계학적 유의성을 평가하였다.

III. 실험결과

1. 내산성검사

용출된 칼슘과 인의 양을 정량분석하고 Statistical Analysis of Science (SAS) program에 의해 통계 처리하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 측정 결과 얻은 칼슘과 인의 용출량 및 두 원소간의 용출량 비율 표 1에 나타내었으며 조사된 에너지 밀도에 따른 변화를 그림 1에 도시하였다. 표 2, 표 3, 표 4는 각 시편으로부터 얻은 칼슘과 인의 용출량 및 칼슘과 인의 용출량의 비율 각군간의 통계학적 유의차가 있는지의 여부를 각각 정리하였다.

칼슘의 용출량은 50 J/cm^2 조사군까지는 레이저조사 에너지 밀도가 증가할수록 감소하였으나 70 J/cm^2 에서 증가하였다. 각군의 평균치간의 개별비교 (Duncan's multiple range test) 결과 50 J/cm^2 조사군이 레이저를 조사하지 않은 대조군에 비해 통계학적 유의차가 있고 나머지

Table 1. Calcium and Phosphorus content release from enamel surface in demineralized solution

	Ca ($\mu\text{g}/\text{mm}^2$)	P ($\mu\text{g}/\text{mm}^2$)	Ca/P ratio (wt%)
control	7.71 \pm 1.20	2.25 \pm 0.55	3.55 \pm 0.68
10 J/cm^2	7.37 \pm 1.94	2.92 \pm 1.16	2.71 \pm 0.62
30 J/cm^2	6.87 \pm 2.93	2.14 \pm 0.72	3.47 \pm 1.81
50 J/cm^2	5.02 \pm 1.05	1.85 \pm 0.57	2.88 \pm 0.75
70 J/cm^2	8.58 \pm 1.95	3.26 \pm 0.73	2.83 \pm 1.18

Table 2. Statistical evaluation of calcium content release from enamel surface between groups

Ca	Control	10 J/cm^2	30 J/cm^2	50 J/cm^2	70 J/cm^2
control					
10 J/cm^2	NS				
30 J/cm^2	NS	NS			
50 J/cm^2	S	S	S		
70 J/cm^2	NS	NS	S	S	

S : significant, NS : non-significant

Table 3. Statistical evaluation of phosphate content release from enamel surface between groups

P	Control	10 J/cm ²	30 J/cm ²	50 J/cm ²	70 J/cm ²
control					
10J/cm ²	S				
30J/cm ²	NS	S			
50J/cm ²	NS	S	S		
70J/cm ²	S	NS	S	S	

S : significant, NS : non-significant

Table 4. Statistical evaluation of ratio of calcium to phosphate release from enamel surface between groups

Ca/P	Control	10 J/cm ²	30 J/cm ²	50 J/cm ²	70 J/cm ²
control					
10J/cm ²	S				
30J/cm ²	NS	NS			
50J/cm ²	NS	NS	NS		
70J/cm ²	NS	NS	NS	NS	

S : significant, NS : non-significant

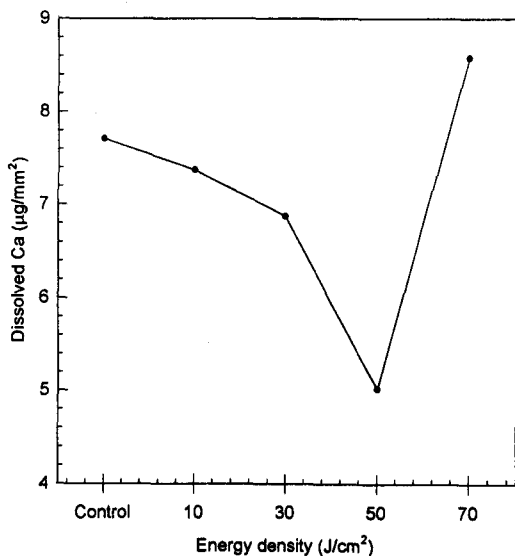


Fig 1. Amount of released Ca⁺⁺ of enamel samples which were exposed to normal pulsed Nd-YAG lasers

군은 대조군과 유의차가 없었다($p < 0.05$).

인의 용출량은 10 J/cm² 조사군에서 레이저를 조사하지 않은 대조군에 비해 약간 증가하였으나 에너지 밀도가 증가할수록 감소하다가 70 J/cm²에서 급격히 증가하였다.

Ca/P의 비는 레이저를 조사하지 않은 대조군에 비해 레이저 조사군에서 감소하였으나, 대조군과 10 J/cm² 조사군 사이에서만 통계학적 유의성이 있었다.

2. X-선 회절검사

에너지밀도를 달리하면서 레이저를 조사한 범랑질로부터 얻은 X선 회절도는 그림 2와 같다. 그림에 나타난 주요한 피크의 상단의 수치는 해당 피크의 발생근원으로 여겨지는 수산화인 회석 면의 면지수 이다. 또한 α -TCP 및 β -TCP의 생성에 대한 정보를 알기 위해 $25^\circ < 2\theta < 35^\circ$ 를 자세히 조사한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 각 피크를 발생시키는 상을

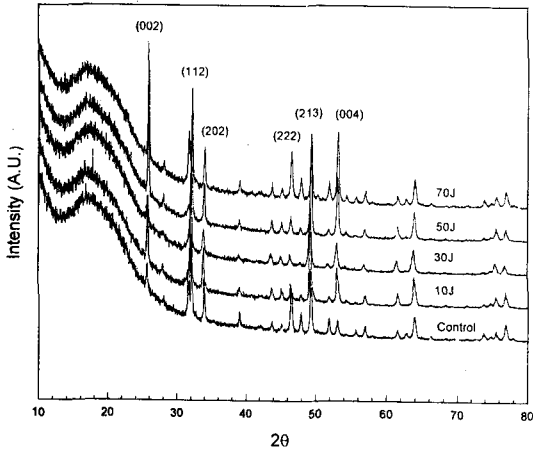


Fig 2. X-ray diffraction spectra of lased enamel.

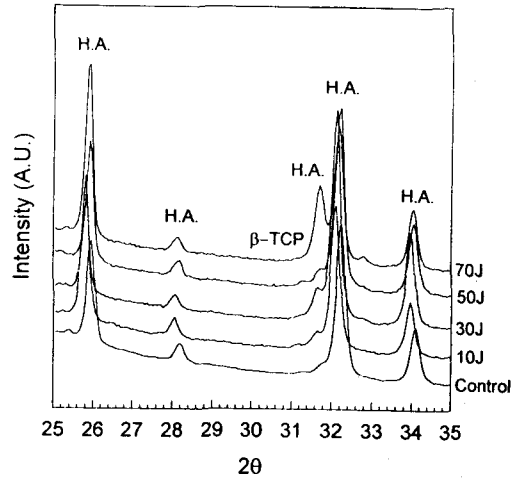


Fig 3. X-ray diffraction spectra, obtained by step scanning of 25° -35° (2θ) regions

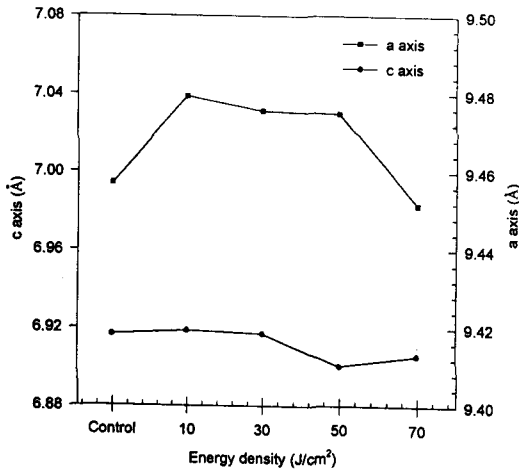


Fig 4. Changes of lattice parameters in lased enamel.

피크의 상단에 표시하였다.

레이저를 조사한 치아와 대조군의 법랑질의 X-선 회절 피크는 거의 유사하게 나타났다. 다만 레이저조사시 에너지 밀도에 비례해서 β-TCP (2θ=31°)가 약간 증가하는 양상을 보였다.

레이저를 조사한 법랑질은 에너지밀도가 높을수록 대조군에 비해 (002), (004) 회절 피

크에서 폭이 가늘고 크게 나타났다. 이는 c축 방향으로 수산화인회석 결정이 성장했음을 나타낸다.

sin과 cos 사이의 기울기 η는 lattice strain을 나타내는데, 본 연구에서는 레이저 조사에 의한 특별한 효과는 나타나지 않았다.

레이저의 에너지 밀도에 따른 lattice parameter의 변화를 알아보기 위하여 X-선 회절 측정 결과 중 (002) 및 (202) 회절피크의 위치로부터 a축 및 c축의 길이를 구하였다. lattice parameter는 그림 4에 나타내었는데 레이저를 처리한 법랑질과 대조군의 a축과 c축의 값은 천연 수산화인회석 보다 컸으며 (a=9.418, c=6.877Å) 레이저를 처리한 법랑질은 대조군에 비해 a축은 50 J/cm²까지는 약간 증가했으나 70 J/cm²에서는 대조군보다 감소했다. c축은 에너지밀도에 따른 길이변화가 거의 없이 일정했다. 내산성이 가장 크게 증가하는 50 J/cm²에서 대조군에 비해 c축의 약간의 수축과 a축의 신장이 일어났다.

3. 적외선 분광분석

에너지 조사밀도에 따른 적외선 분광분석 그래프는 그림 5에 나타내었다.

575, 605, 875, 960, 1040, 1085, 1430, 1455, 1542, 2823, 2860, 3400 cm⁻¹에서 피크가

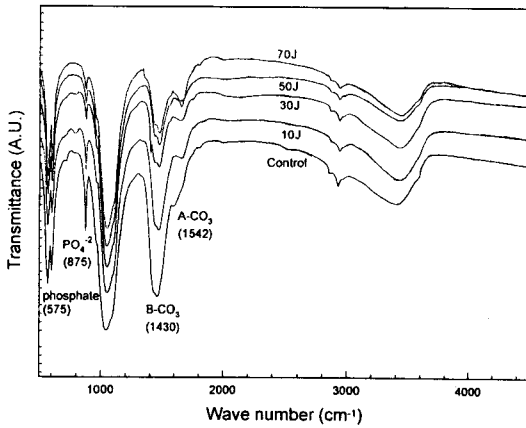


Fig 5. Infrared spectra of lased enamel.

나타났는데, 이중 레이저 조사의 영향으로 phosphate band ($600-550\text{ cm}^{-1}$)와 B-carbonate band ($=870, 1415-1455\text{ cm}^{-1}$)는 감소하고 A-carbonate band (1542 cm^{-1})는 증가했다. 레이저 조사후 시편을 가습 상태에서 보관했으므로 레이저 조사에 따른 수분의 증감상태는 알 수 없었다.

4. 주사전자현미경 관찰

레이저를 쬐지 않은 대조군에서는 법랑질시편을 연마하여 정상적으로 존재하는 굴곡은 볼 수 없고 연마흔적과 소공을 볼 수 있었으며(사진 1, 2). 10 J/cm^2 조사군에서는 비조사 치면과 유사한 부분도 있고 약간의 치질파괴를 관찰할 수 있었다(사진 3, 4). 30 J/cm^2 조사군에서는 일부 법랑소주의 융합과 함께 일부 산 부식 소견처럼 법랑질소주가 명확히 나타났다(사진 5, 6, 7). 50 J/cm^2 법랑질소주의 균일한 융합으로 평활한 면을 보이면서 모자이크 형태의 미세한 균열을 볼 수 있었다(사진 8, 9, 10). 70 J/cm^2 에서는 치면의 균열과 치질의 파괴가 심화되는 곳을 볼 수 있었다(사진 11, 12).

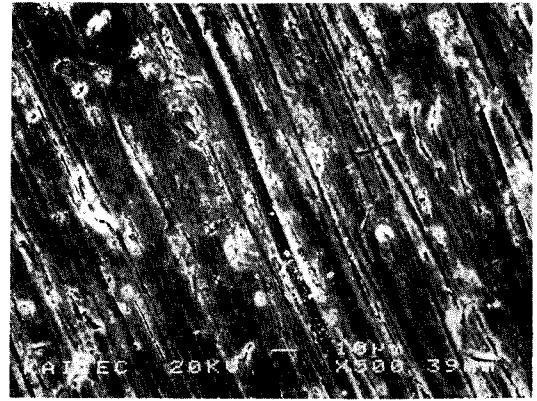


사진 1. 대조군의 주사전자현미경 소견($\times 500$)

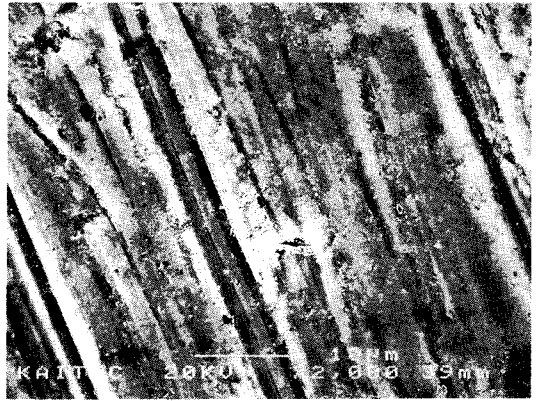


사진 2. 대조군의 주사전자현미경 소견($\times 2000$)

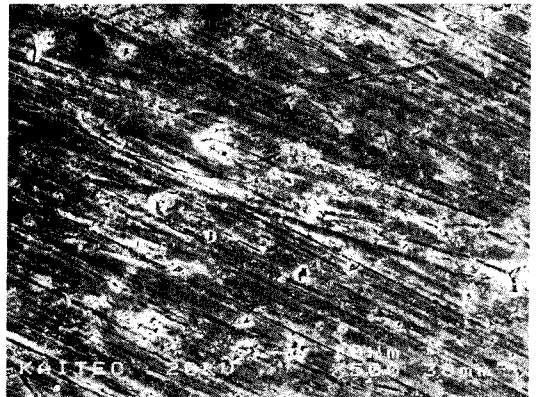


사진 3. 10 J/cm^2 조사군의 주사전자현미경 소견($\times 500$)



사진 4. 10 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×2000)

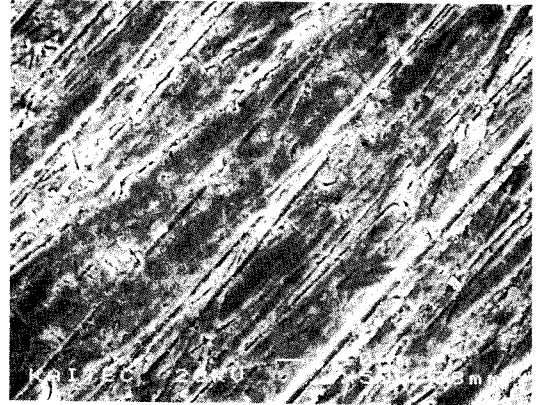


사진 7. 50 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×500)

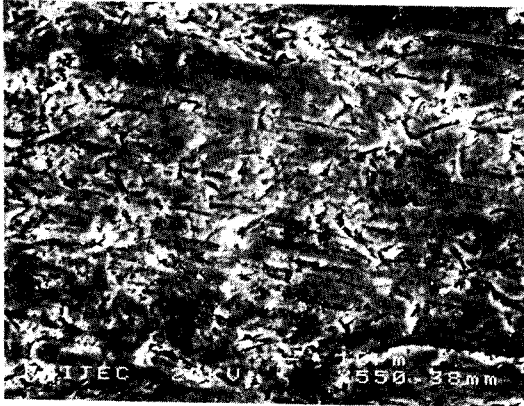


사진 5. 30 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×500)



사진 8. 50 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×2000)

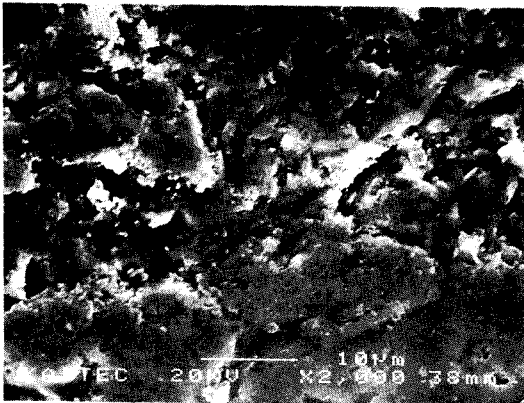


사진 6. 30 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×2000)

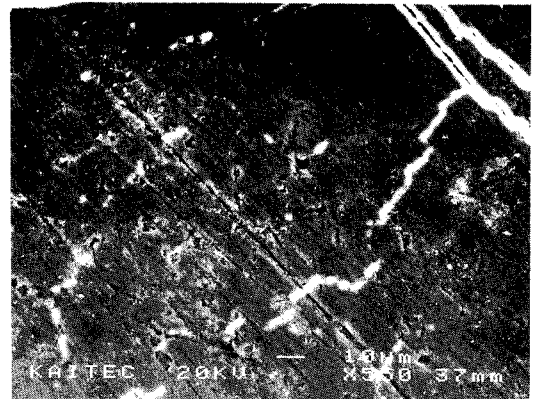


사진 9. 70 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×500)

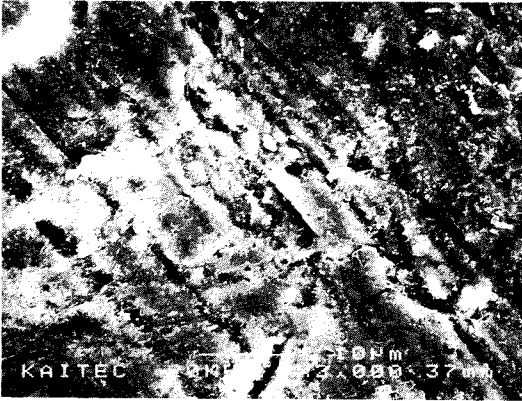


사진 10. 70 J/cm² 조사군의 주사전자현미경 소견(×2000)

IV. 총괄 및 고찰

과거에 우식 예방법으로 불소와 치면열구전색제를 치아에 부착시키는 방법을 이용하였으나 최근 새로운 우식예방법으로 레이저를 이용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. Morioka 등⁴⁵⁾, Morita 등⁴⁶⁾과 Suzuki 등⁷¹⁾은 다양한 종류의 레이저를 사용해 본 후 정상발진형과 음향광-Q-switched Nd-YAG 레이저가 임상용으로 적합하다고 하였다. 그중 두 종류의 레이저를 비교했을 때 정상발진형 Nd-YAG 레이저가 동일한 에너지 밀도에서 내산성이 높고 치면에 손상이 적어서 임상용으로 더 적합하다고 하였다. 여기서 YAG는 Yttrium Aluminum-Garnet의 약어로 보석의 Garnet (석류석)과 동일한 결정구조를 가지는 인조다이아 Y₃Al₅O₁₂를 의미한다. 높은 투과성을 가진 이 물질을 모체로 하여 광자에너지를 부여하여 레이저 발진을 일으키는 활성물질인 Neodymium을 혼입한 것이 Nd-YAG 레이저이다.

레이저의 생체조직에 대한 반응은 광생물학적 반응이라고 말하며 광열반응, 광화학반응, 광면역반응, 광효소반응으로 분류할 수 있다. 치아에 레이저 조사시 내산성 증가는 치아의 광열반응을 이용하는 것으로 레이저를 치면에 조사할 경우 빛에너지가 열에너지로 바뀌면서 치면에 온도가 순간적으로 상승하여 이에 따른

치면의 물리화학적 변화에 의해 내산성이 증가하는 것으로 알려져 있으나 정확한 기전에 대해서는 아직 논란이 많다.

레이저 조사시 법랑질증가 기전은 크게 치아의 구조적 변화와 치아화학적성분의 변화로 나누어 생각해 볼 수 있다. 먼저 구조적 변화는 투과도의 감소를 생각해 볼 수 있다. 고온의 레이저에 의해 치아세관이 융합되어 미세소공을 폐쇄⁶⁸⁾ 시키거나 유기물질의 열분해에 따른 생성물이 법랑질표면의 소공을 폐쇄시켜⁶⁹⁾ 투과도가 감소될 수 있다. Yamamoto 등⁷⁵⁾은 융합 이외에 법랑질소주의 결정구조의 변화와 미세한 수분 및 구성무기물의 변화 때문에 법랑질 투과도가 감소된다고 하였다. 그러나 Bogreven 등은 소의 법랑질에 탄산가스 레이저 조사후 이온 및 분자의 투과도를 직접 측정한 결과 투과도가 감소하기보다 오히려 증가함을 관찰하고 내산성의 증가는 투과도의 감소보다는 화학적인 변화 때문인 듯 하다고 하였다. 또한 Tagomori 와 Morioka⁷²⁾도 펄스발진형 Nd-YAG 레이저 조사후 불소도포 시 많은 양의 불소가 흡착됨을 주사전자현미경으로 관찰하고 투과도가 증가되었다고 주장하였다. 본 연구에서는 주사전자현미경상에서 30 J/cm² 이상의 레이저 조사시 법랑질의 융합을 관찰할 수 있었고 70 J/cm²의 과도한 레이저 조사시 치질의 파괴를 관찰할 수 있었다.

내산성 증가기전에 대한 두 번째 주장은 법랑질 용해도가 감소한다는 것이다. Oho 와 Morioka⁵⁷⁾는 레이저 조사시 상아질에서 탄산염 소실과 lattice strain감소로 용해도가 감소한다고 하였다. lattice strain의 감소는 용해도를 감소시키는 원인이 될 수 있다. Fowler 와 Kuroda²¹⁾는 레이저 조사시 발생하는 열에 의해 새로운 상(phase)이 형성되어 용해도가 변한다고 하였다. 레이저 조사시 치아표면에서 온도가 1400℃ 이상 이르는 것으로 알려져 있다. Fowler 와 Kuroda²¹⁾는 치아법랑질에 열을 가하여 일어나는 변화와 용해도에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 100~650℃ 가열 시 변형된 인회석 상이 형성되고 pyrophosphate가 형성되어 용해도가 감소한다. 650~1000℃ 가열 시

수산화인회석 주위의 Ca/P비와 형성된 TCP와 TETCP의 양에 따라 용해도가 증가하기도 하고 감소하기도 한다. 1100°C 이상 가열 시에는 용해도가 큰 α -TCP, TETCP가 형성되어 용해도가 증가한다고 하였다. 산에 대한 용해도는 TETCP, α -TCP, β -TCP, 수산화인회석 순이며 따라서 과도한 레이저 조사는 표면의 용해도를 오히려 증가시켜 우식예방에 불리하고 적당량의 레이저 조사가 용해도를 감소시킨다.

실제로 치아에 레이저를 조사했을 때 에너지 밀도에 따른 효과에 대한 연구를 보면 저 에너지 밀도 (10~50 J/cm²)의 레이저 조사시 표면하 탈회(脫珪)가 억제되는 것으로 연구되어 있다^{68, 73, 75}). 이런 작용은 용해도의 변화보다는 투과도의 감소에 의한 효과인 것으로 알려져 있다. Nelson 등⁵⁵)은 탄산가스레이저 50 J/cm² 조사후 적외선 분광분석시 TETCP 생성과 탄산염 감소를 관찰하였다. 이때 생성된 TETCP는 법랑질 용해도를 증가시키는 반면 탄산염의 감소는 용해도를 감소시킨다. 또한 고 에너지 밀도 (10³~10⁴ J/cm²)의 레이저 조사시에는 용해도를 증가시키는 α -TCP, TETCP 가 소량 생성되나 대부분의 법랑질 결정은 수분, 단백질, 탄산염 및 염소원소가 감소하고 수소이온이 탄소이온으로 치환되어 용해도가 낮은 결정구조로 변화됨을 관찰하였다³⁸). 탄산가스 레이저를 사용한 이전의 연구에서 조사시간 0.1~5초, 10⁴~10⁵ J/cm²의 에너지밀도로 조사시 X-선 회절분석에서 수산화인회석 이외에 α -TCP^{35, 38, 40})와 TETCP^{38, 55}) 등의 다른 phase를 관찰하였다. 그러나 Oho & Morioka⁵⁷)는 67~120 J/cm² 아르곤레이저 조사시 새로운 생성물은 없다고 하였다. 본 연구에서는 10~70 J/cm² 에너지밀도로 펄스 반복율 10 pps, 펄스폭 1ms으로 1초가 조사했을 때 X-선 회절검사서 약간의 β -TCP의 생성 외에 다른 새로운 성분은 나타나지 않았다(그림 3). 이는 레이저 조사에 의한 치면 온도 상승이 700~1200°C 정도임을 나타낸다. 본 연구에 사용된 레이저 에너지 밀도가 10~70 J/cm²로 다른 연구와 조사 조건이 다르기 때문에 다른 phase 형성은 없는 듯 하다.

X선 회절검사서 회절피크의 높이가 높을

수록 반최대값 (half maximum width)의 폭이 좁을수록 결정입자의 크기가 크고 결정 내 잔류응력이 작다고 할 수 있다. 본 연구에서는 조사 에너지 밀도에 비례해서 (002)와 (004) 회절피크에서 레이저 조사군이 회절강도가 높고 반최대값이 좁고 날카롭게 나타났다. 이는 Goodman과 Kaufman²⁵)의 이전 연구와도 일치하는 결과로, 법랑질의 인회석결정이 C축 방향으로 성장했음을 나타낸다. 이런 극성은 레이저가 치아를 예열 (annealing)하여 (00l) plane에 영향을 주는 strain을 해소시키기 때문인 것으로 사료된다²³). Kantola³⁵)도 탄산가스 레이저로 10~50 J/cm² 조사시 X-선 회절검사시 수산화인회석의 재결정화와 결정크기의 증가로 투과도가 감소함을 관찰하였다.

X-선 회절검사서 레이저 조사후 법랑질 결정에서 이온의 배열이 더욱 안정화되어 lattice strain감소를 볼 수 있다는 연구도 있었으나⁵⁷) 본 연구에서는 레이저 조사에 의한 lattice strain의 일정한 변화는 볼 수 없었다. 이는 연구에 사용된 치아 시편들의 원래 lattice strain이 일정하지 않을 뿐만 아니라 조사조건이 이전의 연구와 다르고 조사시간이 짧기 때문인 것으로 사료된다.

격자상수(lattice parameter)는 내산성증가가 가장 뚜렷한 50J/cm² 조사군에서 대조군에 비해 a축은 약간 신장하였고 c축은 약간 수축하였다. a축의 길이 변화는 탄산염(carbonate)의 존재 위치 (A or B site)와 수분의 양에 의해서 영향을 받는다³⁰). 본 연구에서 대조군 치아의 격자상수(lattice parameter) a축 값이 천연 수산화인회석에서의 값 (a=9.418) 보다 0.04Å 크게 나타났는데 이는 결정 내에 존재하는 수분(structurally incorporated water) 때문이다. 레이저를 조사한 경우 a축 값은 조사 에너지 밀도가 50 J/cm²까지 수축하다가 70 J/cm²가 되면 다시 신장하였다. 이는 레이저 조사후 시편을 수분에 보관하였으므로 결정수소 소실에 의한 영향은 나타나지 않을 것이므로, A위치 탄산염 증가에 의한 것으로 사료된다. Oho와 Morioka⁵⁷)는 아르곤 레이저 조사시 내산성 증가가 나타나는 에너지 밀도에서 a축은 수축하고 c축은

변화가 없다고 하였다. 열처리한 법랑질에서는 0~400°C까지 a축 값이 급격히 감소하다가 800°C까지 증가한 후 다시 감소하는 양상을 보인다³⁰⁾. 이는 결정수가 급격히 소실하기 때문에 a축 값이 감소하며 800°C까지 a축 값이 신장하는 것은 A 위치의 탄산염 증가에 기인한다. 그러나 Yamamoto와 Sato⁷⁴⁾는 낮은 에너지 밀도(20 J/cm²)의 탄산가스 레이저 조사시 수산화인회석 이외의 다른 회절피크를 관찰하지 못하였으며, 레이저 조사후 격자상수나 line width의 변화를 볼 수 없다고 주장하였다.

치아에 25~1000°C 까지 가열 시 탄산염 (CO₃²⁻), 수산기 (OH), 결정수(structurally incorporated H₂O), 염산기 (Cl⁻), 인산염 (HPO₄²⁻)이 감소한다는 연구가 있었다³⁰⁾. 그런데 레이저 조사한 법랑질에서는 적외선 분광검사 시 수분, 탄산염, 유기물의 소실을 볼 수 있다. 법랑질에서 수분, 탄산염, 유기물의 소실은 미세소공 형성의 원인이 된다. 그리고 미세소공의 증가는 투과도 증가의 원인이 된다. 또한 수분과 탄산염의 감소는 a축의 수축에 기여한다. 한편 탄산염의 소실은 수산화인회석의 활성도를 감소시켜 용해도를 감소시킨다^{32,49)}. 본 연구에서 적외선 분광검사 결과 시편이 가습 상태로 보관되어 레이저 조사에 의한 수분의 증감 여부는 알 수 없었으나 B 위치 탄산염 밴드와 인산염 밴드의 뚜렷한 감소는 관찰할 수 있었으며 탄산염의 감소는 용해도 감소에 기여할 것으로 사료된다.

Ferreira²⁰⁾는 레이저를 조사한 치아를 TEM으로 관찰했을 때 selected area diffraction (SAD)에서 α-TCP, TETCP는 없이 수산화인회석만이 존재했고 1-1.5 J/cm² 에너지 조사시 거친 법랑질(roughed enamel)과 crazing 법랑질만이 존재했으나 5.3-200 J/cm²에서 에너지밀도가 증가할수록 crazing and crater 법랑질이 증가하였다. crazing 법랑질은 대부분의 결정구조가 대조군과 유사하나 어떤 부위에서는 기포가 존재했고 crazing and crater 법랑질은 결정구조 내에 기포가 많고 인회석의 용융 및 재결정화가 되어 결정구조가 커지고 모양도 달라졌으며 prismatic 구조를 상실하였다. 이는

레이저 조사시 강도저하와 표면하 탈회의 감소를 부분적으로 설명해 준다.

주사현미경상 10 J/cm² 조사군에서부터 약간의 치질파괴가 보이고 30 J/cm² 조사군에서는 산부식 소견처럼 법랑질 간질이 파괴되고 법랑소주가 명확해지는 양상을 보인다. 50 J/cm² 조사군에서는 치면의 융합으로 평활한 면을 볼 수 있는데 이와 같은 평활한 면은 치태의 침착을 어렵게 할 뿐 아니라 미생물의 부착을 어렵게 하고 투과도를 감소시킨다. 70 J/cm² 조사군에서는 심한 치질의 파괴가 나타나 투과도가 증가되어 내산성이 증가되는 양상을 보인다. Crack은 레이저 조사로 열 충격에 의한 팽창과 수축에 의해 일어난 결과로 Tagomori와 Morioka⁷⁵⁾는 그 깊이가 50~100 μm에 이른다고 보고한 바 있다. Ferreira 등²⁰⁾은 crack과 crater가 나타나는 부위가 약 2~11 μm라고 하였다. Nelson⁵⁴⁾는 레이저 조사에 의해 용융되는 깊이는 약 5μm라고 하였고 열적효과는 10~20 μm까지 미친다고 하였다.

레이저 조사에 의해 법랑질의 어느 정도 깊이까지 내산성을 획득했는지를 아는 것은 어렵지만 Tomita 등⁸⁰⁾은 레이저 조사로 내산성을 얻을 수 있는 깊이는 매우 얇다고 하였고, Sato 등⁸³⁾은 레이저 조사에 의한 산 용해성 저하 부위는 법랑질 표면에 그치지 않고 심부까지 미친다고 하였으나 구체적인 깊이를 나타내지는 않았다. 이에 반해 Suzuki 등⁸⁴⁾은 Ca 용출량에서 법랑질의 내산성이 부여된 깊이를 예측하여 AOQ-sw Nd-YAG 레이저에서는 20μm이 상이고, Nd-YAG 레이저에서는 5μm정도라고 했으며 Yamada⁷⁹⁾는 AOQ-sw Nd-YAG 레이저로 65 J/cm² 에너지를 조사할 때 80μm의 깊이까지 현저한 내산성이 얻어진다고 하였다.

레이저는 파장에 따라 특정색소에 잘 흡수된다. 탄산가스 레이저와 같은 중적외선 및 원적외선 레이저는 색소에 관계없이 표면에 잘 흡수되고 가시광선 레이저 중 He-Ne 레이저는 적색에, 아르곤레이저는 청록색에, 근적외선 영역인 Nd-YAG 레이저는 흑색색소에 잘 흡수된다. 그래서 본 연구에서는 치아에 흑색 유성잉크를 도포하여 레이저의 흡수를 도모하였

다. 더욱이 Morioka 등⁸²⁾은 법랑질에 흑색 도포체를 도포하고 세 가지의 YAG 레이저를 pulse 폭 2×10^{-8} sec로 에너지 밀도 140 J/cm^2 으로 조사시 표면온도는 1400°C 에 달하지만 열 효과가 미치는 깊이는 12 m 로 얇은 반면, AOQ-switched pulse에서는 에너지 밀도 140 J/cm^2 으로 연속 pulse로 조사시 표면온도는 1170°C 로 낮지만 도달심도는 1.2 mm 로 연속파 레이저 조사시와 유사하게 법랑질의 심부까지 미친다고 하였다.

레이저 조사에 의한 Ca/P 비율의 변화를 보면 Nelson 등⁵⁴⁾은 탄산가스 레이저를 10 J/cm^2 조사한 결과 $\text{Ca/P} = 1.62$ 였다고 하였으며 레이저를 켜 법랑질의 Ca/P의 비율은 높으나 단위면적당 Ca, P의 농도는 대조군보다 낮았다. 50 J/cm^2 조사량에서는 1.76 으로 대조군의 1.56 에 비해 증가했음을 관찰했는데 이는 수산화인회석보다 칼슘함량이 많은 TETCP등의 새로운 성분형성에 기인한다고 하였다. 김 등¹⁾, 이 등⁹⁾도 Ca/P의 변화를 보고했으나 Stern 등⁶⁸⁾은 레이저 조사에 의한 Ca/P의 변화를 관찰하지 못했다고 하였다. 본 연구에서 산에 용해된 칼슘과 인의 용해율의 변화를 관찰해 보면 대조군에 비해 레이저 조사군에서 Ca/P의 비가 감소했다. 그러나 대조군과 10 J/cm^2 에서만 통계적 유의성이 있고 나머지 군 사이에서는 통계학적 유의성은 없었다.

레이저 조사시 가장 효과적인 에너지밀도에 대해서 Tagomori와 Morioka⁷²⁾는 다양한 에너지밀도에서 실험을 통해 50 J/cm^2 조사에서 가장 현저히 증가하며 62.5 J/cm^2 가 되면 오히려 탈회 증가한다고 하였다. 본 연구에서도 대조군에 비해 50 J/cm^2 까지는 에너지 증가에 따라 내산성이 증가하지만 70 J/cm^2 에서는 오히려 내산성이 감소하였다. 이는 주사전자현미경상에서도 관찰할 수 있듯이 저 에너지 밀도에서는 법랑질 용융으로 평활한 면을 보이면서 투과도가 감소하지만 에너지 밀도가 증가할수록 법랑질 균열이 증가하여 산의 투과도가 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

레이저 조사에 의한 치면의 온도상승과 도달심도는 조직과 치수에 대한 영향을 주기때

문에 매우 중요하다. 치면의 온도상승은 내산성에 영향을 주는 열적 변화를 일으킬 수 있어야 하고 치수강에서는 거의 온도변화가 없어야 한다. 치면의 온도변화에 대해 $10\text{-}50 \text{ J/cm}^2$ 탄산가스 레이저 조사시 치면에 온도가 $810\text{-}1005^\circ\text{C}$ 까지 도달한다고 하였으며⁵⁵⁾, Boehm¹⁶⁾은 탄산가스 레이저를 표면에 조사시 치수강의 온도변화를 측정된 결과 12 J/cm^2 에서 1.6°C , 22 J/cm^2 에서 3°C 상승함을 보고하였다. 또한 Yamada 등⁸⁰⁾은 Nd-YAG 레이저 73.1 J/cm^2 를 법랑질 면에 조사시 6.42°C 의 치수강 온도상승을 보고하면서 생체 내의 치아에서는 혈액순환이라는 완충작용으로 열이 신속히 확산되므로 65 J/cm^2 이하의 조사시 치수에 대한 손상은 거의 없을 것이라고 하였다. 그러므로 본 연구에서 조사한 $10\text{-}70 \text{ J/cm}^2$ 정도의 레이저 강도에서는 치수에 위해 작용이 크지 않을 것으로 사료되며 임상에서는 냉각수와 같이 사용하여 치수 손상을 억제할 수 있을 것이다.

레이저조사에 의한 열적효과는 조사에너지 밀도와 조사부위의 크기, 조사시간 등에 의해 달라진다. 김 등²⁾은 레이저 조사시간 보다는 출력의 변화가 인회석의 구조를 더 변화시키는 더 중요한 요인이라고 하였다. 같은 에너지 밀도로 조사시 출력이 약하고 조사시간이 증가해도 원하는 효과를 얻을 수 없다. 빠른 용융과 재결정화를 위해서는 작용시간을 짧게 하고 상대적으로 낮은 에너지 밀도의 펄스발진형 레이저를 사용해야 한다.

$10^3\text{-}10^5 \text{ J/cm}^2$ 고 에너지 밀도의 레이저 조사시 법랑질표면에 pitting과 융합이 일어나 투과도를 감소시키나 상대적으로 수산화인회석보다는 용해도가 큰 $\alpha\text{-TCP}$ 와 TETCP와 같은 결정상이 나타나고 열충격에 의한 crack이 형성되고 치질 손상이 야기된다. 상대적으로 낮은 에너지밀도의 레이저 조사시 투과도가 감소하기보다는 증가한다는 연구가 있었다¹⁷⁾. 위에서 살펴본 바와 같이 낮은 에너지밀도에서 내산성의 증가의 기전은 아직 확실히 밝혀지지 않았다. 그러나 본 연구에 의하면 낮은 에너지 밀도에서도 법랑질 결정의 크기 증가가 나타나 용해도를 감소시키고 $\alpha\text{-TCP}$ 와 TETCP같은 용

해도가 큰 물질이 생성되지 않으며 수산화인 회석의 활성도를 증가시키는 탄산염의 감소가 나타나 내산성이 증가하는 것으로 밝혀졌다. 즉 레이저 조사시 법랑질 내산성증가는 투과도의 감소와 용해도의 감소가 함께 작용하여 나타나는 것으로 생각된다.

V. 결 론

레이저 조사에 의한 법랑질 내산성변화를 측정하기 위해 펄스발진형 Nd-YAG 레이저를 조사한 후 칼슘의 용출량을 측정하고 방사선 회절분석, 적외선 분광분석 및 주사전자현미경으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 칼슘의 용출량은 조사한 레이저의 에너지 밀도가 증가할수록 감소하다가 70 J/cm²에서 증가하였다. 각군의 평균치간의 개별비교 결과 50 J/cm²과 나머지 군간의 통계학적 유의차가 있었다. (P<0.05)
2. X-선 회절분석결과 레이저를 조사한 후 용해도를 증가시키는 β-TCP가 약간 생성되었지만 에너지 밀도가 높을수록 (002), (004) 피크가 가늘고 크게 나타나 결정이 c축방향으로 성장했음을 나타내어 결정의 산에 대한 용해도는 감소할 것으로 사료된다.
3. 내산성이 크게 증가한 50J/cm²에서 격자상수 (lattice parameter)는 a축은 신장되었으며 c축은 약간 감소하였으나 큰 변화는 없었다.
4. 적외선 분광분석 결과 레이저 조사 에너지 밀도가 증가할수록 phosphate band (600~550 cm⁻¹)와 B-carbonate band (=870, 1415~1455 cm⁻¹)는 감소하고 A-carbonate band (1590 cm⁻¹)는 증가하였다.
5. 레이저 조사후 주사전자현미경상 관찰시 50 J/cm² 조사군까지는 치면의 융합이 일어나 평활한 면을 보이므로 투과도가 감소할 것으로 생각되며 70J/cm² 레이저 조사군에서는 치질의 파괴를 보여 법랑질 투과도가 증가할 것으로 생각된다.

이상의 결과로 보아 법랑질에 Nd-YAG 레이저 조사시 50 J/cm²에서 내산성이 가장 크게

증가하였으며 법랑질 내산성증가는 법랑질 융합에 의한 투과도의 감소와 탄산염 소실 및 결정 크기 증가 등에 의한 용해도의 감소가 함께 작용하여 나타나는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김순주, 이종갑 : 탄산가스 레이저 조사가 법랑질의 내산성변화에 미치는 영향에 관한 실험적 연구. 대한소아치과학회지 12 : 9-17, 1985.
2. 김종배, 백대일, 신승철 : 불소도포 법랑질 결정구조에 대한 아르곤 레이저 조사의 영향에 관한 연구. 서울치대논문집 8 : 53-59, 1984.
3. 김현철 : 임상가를 위한 치과용 레이저의 임상. 치과계 74-79, 1996(2)
4. 김현철 : 임상가를 위한 치과용 레이저의 임상. 치과계 75-81, 1996(3)
5. 김현철 : 임상가를 위한 치과용 레이저의 임상. 치과계 76-81, 1996(4)
6. 모현철, 양규호 : Nd-YAG 레이저 조사와 불소도포가 법랑질의 내산성 변화에 미치는 영향에 관한 실험적 연구. 대한소아치과학회지 19 : 141-158, 1992.
7. 박준상, 김기석 역 : 레이저 치의학. 덴탈기획. 1995.
8. 백병주, 배태성, 권선자, 김철중 : Nd-YAG 레이저 조사에 따른 법랑질의 변화에 관한 실험적 연구. 대한소아치과학회지 19 : 521-536, 1992
9. 이상호, 이종갑 : 레이저 조사의 치아우식 억제효과에 관한 실험적 연구. 대한소아치과학회지 18 : 1-18, 1991.
10. 이명숙, 이종갑 : 탄산가스 레이저 조사 치면의 주사현미경적 관찰 및 레진 부착력에 관한 실험적 연구. 대한소아치과학회지 17 (1) : 160-172, 1990.
11. 장계봉, 이정석, 이찬영, 이승종 : 탄산가스 레이저 조사가 치아경조직에 미치는 영향에 관한 EPMA분석 및 주사현미경적 연구. 대한치과보존학회지 : 12 : 51-62, 1986.

12. 정동진, 손홍규 : Nd-YAG 레이저 조사가 상아질의 내산성 및 레진의 전단결합 강도에 미치는 영향, 석사학위논문, 연세대학교 대학원, 1995.
13. Adrian, J. C., Bernier, J. L., and Sprague, W. G. : Laser and the dental pulp. *JADA*. 83 : 113-117, 1971
14. Aoba, T., Okazaki, M., Takahashi, J., and Moriwaki, Y. : X-ray diffraction study on remineralization using synthetic hydroxyapatite pellets. *Caries Res.* 12 : 223-230, 1978
15. Bahar, A., Tagomoris, S. : The effect of normal pulsed Nd-YAG laser irradiation on pits and fissures in human teeth. *Caries Res.* 28 : 460-467, 1994
16. Boehm, R., Baechler, T., Webster, J., and Janke, S. : Laser processes in preventive dentistry. *Practical App. of low power laser.* 92 : 164-168, 1976
17. Boggren, J.M.P.M., Van Duk, J.W.E., and Driessens, F.C.M. : Effect of laser irradiation on the permeability of bovine dental enamel. *Arch. Oral Biol.* 25 : 831-832, 1980
18. Brune, D. : Interaction of pulsed carbon dioxide laser beams with teeth in vitro. *Scan. J. Dent. Res.* 61 : 1070-1076, 1982
19. Dedrich, D. N. : Laser/tissue interaction. *JADA* 124 : 57-61, 1993
20. Ferreira, J. M., Palamara, J., Phakey, P. P. : Effect of continuous-wave CO² laser on the ultrastructure of human dental enamel. *Arch. Oral Biol.* 34 : 551-562, 1989
21. Fowler, B. O., and Kuroda, S. : Changes in heated and in laser-irradiated human tooth enamel and their probable effects on solubility. *Calcific. Tissue Int.* 38 : 197-208, 1986
22. Fox, J. L., Yu, D., Otsuka, M., Higuchi, W. I., Wong, J., and Powell, G. L. : Initial dissolution rate studies on dental enamel after CO² Laser irradiation. *J. Dent. Res.* 71(7) : 1389-1398, 1992
23. Glas, J. E. and Omnell, K. A. : Studies on the ultrastructure of dental enamel. 1. Size and shape of the apatite crystallites as deduced from X-ray diffraction data, *J Ultrastructure Res.* 3 : 334-344, 1960
24. Goldman, L., Gray, J. A., Goldman, J., Goldman, B., and Meyer, R. : Effect of laser beam impacts on teeth. *JADA.* 70 : 601-606, 1965
25. Goodman, B. D., and Kaufman, H. W. : Effects of argon laser on the crystalline properties and rate of dissolution in acid on tooth enamel in the presence of sodium fluoride. *J. Dent. Res.* 56(10) : 1201-1207, 1977
26. Garcia, J. T., and Moody, W. E. : Thermal analysis of human dental enamel. *J. Dent. Res.* 53 : 571-580, 1974
27. Gordon, Jr. T. E. : Some effects of laser impacts on extracted teeth. *J. Dent. Res.* 45 : 2372-2375, 1966
28. Gron, P., Spinelli, M., Trautz, O., and Brudevold, F. : The effect of carbonate on the solubility of hydroxyapatite. *Arch. Oral Biol.* 8 : 251-263, 1963.
29. Hoffman, S., Mcewan, W. S., and Drew, C. M. : Scanning electron microscope studies of dental enamel. *J. dent. Res.* 48(2) : 242-250, 1969.
30. Holcomb, D. W., and Young, R. A. : Thermal decomposition of human tooth enamel. *Calcif. Tissue Int.* 31 : 189-201, 1980
31. Hicks, M. J., Flaitz, G. M., Berg, J. H., Lankeau, L., and Powell, G. L. : Caries like lesion initiation and propagation in sound enamel following argon laser irradiation. : An in vitro study. *J. Dent. Child.* 201-206, 1993
32. Ingram, G. S. : The role of carbonate in

- dental mineral. *Caries Res.* 7 : 217–230, 1973
33. Jeffrey, I. W. M., Lawrenson, B., Longbottom, C., and Saunders, E. M. : CO² laser application to the mineralized dental tissues—the possibility of iatrogenic sequelae. *J. Dent.* 18 : 24–30, 1990
 34. Kantola, S. : Laser induced effects on tooth structure. V. Electron probe microanalysis of polarized light microscopy of dental enamel. *Acta Odontol. Scand.* 30 : 475–484, 1972
 35. Kantola, S., Laine, E., and Tarna, T. : Laser induced effects on tooth structure VI. X-ray diffraction study of dental enamel exposed to CO² laser. *Acta Odont. Scand.* 31 : 369–379, 1973
 36. Kay, M. I., and Young, R. A. : Crystal structure of hydroxyapatite. *Nature.* 204 : 1050–1052, 1964
 37. Kimura, H., Sohmura, T., Tsutsumi, N., and Okazaki, M. : Application of laser on dental treatment. *J. Osaka Univ. Dent. Sch.* 23 : 31–42, 1983
 38. Kuroda, S., and Fowler, B. O. : Compositional, structural, and phase changes in vitro laser-irradiated human tooth enamel. *Calcif. Tissue Int.* 36 : 361–369, 1984
 39. Kutsch, V. K. : Lasers in dentistry : Comparing wavelengths. *JADA.* 124 : 49–54, 1993
 40. Lobene, R. R., Bhussry, B. R., and Fine, S. : Interaction of carbon dioxide laser radiation with enamel and dentin. *J. Dent. Res.* 47 : 311–317, 1968
 41. Makinen, R. R., Meurman, J.H., Luomannen, M., Torkko, H., and Paunio, I. : Irradiation of human dental tissues with CO², Nd-YAG, and CO²-Nd : YAG combination laser. *Scand. J. dent. Res.* 99 : 470–475, 1991
 42. McKee. : Effect of CO² laser irradiation in vivo on rat alveolar bone and incisor enamel, dentin, and pulp. *J. Dent. Res.* 72 (10) : 1406–1417, 1993
 43. Meurman, J. H., Vogel, J. C., Makinen, R. R., Thomann, P. : Effects of carbon dioxide, Nd-YAG and carbon dioxide-Nd:YAG combination lasers at high energy densities on synthetic hydroxyapatite. *Caries Res.* 26 : 77–83, 1992
 44. Miller, M., and Truhe, T. : Lasers in dentistry : An overview. *JADA* 124 : 32–35, 1993
 45. Morioka, T., Morita, E., Suzuki, K. : An increment of acid resistance of dental enamel with the irradiation of various type of laser beam(1st ed.) *J. Jap. Soc. Laser Med.* 3 : 605–612, 1982
 46. Morita, E., Suzuki, K., Morioka, T. : An increment of acid resistance of dental enamel with the irradiation of various type of laser beam(3rd ed.) *J. Jap. Soc. Laser Med.* 3 : 619–624, 1982
 47. Myers, T. D., and Myers, W. D. : The use of a laser for debridement of incipient caries. *J. Protho. Dent.* 53(6) : 776–779, 1985
 48. Myers, M. L. : The effect of laser irradiation on oral tissues. *J. Protho. Dent.* 66 : 395–397, 1991
 49. Nelson, D. G. A. : The influence of carbonate on the atomic structure and reactivity of hydroxyapatite. *J. Dent. Res.* 60(c) : 1621–1629, 1981
 50. Nelson, D. G. A., Featherstone, J. D. B., Duncan, J. F., and Cures, T. W. : Effect of Carbonate and fluoride on dissolution behaviour of synthetic apatite. *Caries Res.* 17 : 200–211, 1983
 51. Nelson, D. G. A., Jongebloed, W. L., and Arends, J. : Morphology of enamel surfaces treated with topical fluoride agents : SEM considerations. *J. Dent. Res.* 62

- (12) : 1201-1208, 1983
52. Nelson, D. G. A., Jongebloed, W. L., and Arends, J. : Crystallographic structure of enamel surfaces treated with topical fluoride agent : TEM and XRD considerations. *J. Dent. Res.* 63(1) : 6-12., 1984
 53. Nelson, D. G. A., Jongebloed, W. L., and Featherstone, J. D. B. : Laser irradiation of human dental enamel and dentin. *New Zealand Dent. J.* 82 : 74-77, 1986
 54. Nelson, D. G. A., Shariati, M., Glana, R., Shields, C. P., Featherstone, J. D. B. : Effect pulsed low energy infrared laser irradiation on artificial caries-like lesion formation. *Caries Res.* 20 : 289-299, 1986
 55. Nelson, D. G. A., Wefel, J. S., Jongebloed, W. L., Featherstone, J. D. B. : Morphology, histology and crystallography of human dental enamel treated with pulsed low-energy infrared laser irradiation *Caries Res.* 21 : 411-426, 1987
 56. Newesely, H. : High temperature behaviour of hydroxy- and fluorapatite. *J. Oral Rehabil.* 4 : 97-104, 1977
 57. Oho, T., and Morioka, T. : A possible mechanism of acquired acid resistance of human dental enamel by laser irradiation. *Caries Res.* 24 : 86-92, 1990
 58. Palamara, J., Phakey, P. P., Rachinger, W. A., and Orams, H. J. : The ultrastructure of human dental enamel heat-treated in the temperature range 200°C to 600°C. *J. Dent. Res.* 66(12) : 1742-1747, 1987
 59. Peck, S., and Peck, H. : Laser radiation : some specific dental effects and an evaluation of its potential in dentistry. *J. Pros. Dent.* 17(2) : 195-203, 1967
 60. Pick, R. M. : Using lasers in clinical dental practice. *JADA* 124 : 37-47, 1993
 61. Poole, D. F. G., and Brooks, A. W. : The arrangement of crystallites in enamel prisms. *Arch. Oral Biol.* 5 : 14-26, 1961
 62. Sakae, T. : X-ray diffraction and thermal studies of crystal from the outer and inner layers of human dental enamel. *Arch Oral Biol.* 33(10) : 707-713, 1988
 63. Sakae, T., and Okuda, A. : Crystallographical analysis of tooth enamel using milligram samples. *J. Ultra. Res.* 91 : 77-81, 1985
 64. Sato, K. : Relation between acid dissolution and histological alteration of heated tooth enamel. *Caries Res.* 17 : 490-495, 1983
 65. Scheinen, A. and Kantola, S. : Laser induced effects on tooth structure. II. microradiography and polarized light microscopy of dental enamel and dentine. *Acta Odont. Scand.* 181-192, 1968
 66. Stern, R. H., Eastgate, H., Mautner, W., and Morgan, C. : The laser in dentistry : potential clinical application. *Optical and Laser Tech.* : 22-24, 1975
 67. Stern, R. H., and Sognnaes, R. F. : Laser beam effect on dental hard tissues. *J. Dent. Res.* 43(5) : 873, 1964
 68. Stern, R. H., and Sognnaes, R. F. : Laser inhibition of dental caries suggested by first tests in vivo. *JADA* 85 : 1087-1089, 1972
 69. Stern, R. H., Sognnaes, R. F., and Goodman, F. : Laser effect on in vitro enamel permeability and solubility. *JADA* 73 : 838-843, 1966
 70. Stewart, L., Powell, G. L., and Wright, S. : Hydroxyapatite attached by laser : a potential sealant for pits and fissures. *Op. Dent.* 10 : 2-5, 1985
 71. Suzuki, K., Morioka, K., Morioka, T. : An increment of acid resistance of dental enamel with the irradiation of various type of laser beam(2nd ed.) *J. Jap. Soc. Laser Med.* 3 : 442-452, 1982
 72. Tagomori, S. and Morioka, T. : Combined

- effects of laser and fluoride on acid resistance of human dental enamel. *Caries Res.* 23 : 225-231, 1989
73. Yamamoto, H., and Ooya, K. : Potential of Yittrium-aluminum garnet laser in caries prevention. *J. Oral Pathol.* 3 : 7-15, 1974
 74. Yamamoto, H., and Sato, K. : Inhibition of dental caries by laser irradiation. *Laser medicine and dentistry.* : 242-248
 75. Yamamoto, H., and Sato, K. : Prevention of dental caries by acosto-optically Q-switched Nd-YAG laser irradiation. *J. Dent. Res.* 59(2) : 137, 1980
 76. Yamamoto, H., and Sato, K. : Prevention of dental caries by Nd-YAG laser irradiation. *J. Dent. Res.* 59 : 2171-2177, 1980
 77. Vogel, G. L., Chow, L. C., and Brown, W. E. : A microanalytical procedure for the determination of calcium, phosphate and Fluoride biopsy samples
 78. White, J. M., Goodies, H. E., Setcos, J. C. : Effect of pulsed Nd-YAG laser energy on human teeth. *JADA* 124 : 45-51, 1993
 79. Wigdor, H., Abt, E., Ashrafi, S., and Walsh, J. T. : The effect of lasers on dental hard tissues. *JADA* 124 : 65-70, 1993
 80. 山田恵子 : 小児歯科領域におけるレ-ソ-による 蝕豫防に関する研究. *小児歯誌* 23 : 575-591, 1985
 81. 富田房子, 鈴木幸江, 金子ケイ子, 三田昭太郎, 小野塚實, 岩田太一, 管 谷英一 : レ-サ-照射と 蝕抑制(1)-特に抵エネルギーレベルにおける エナノル質の耐酸性について-. *神奈川歯學* 16 : 362-373, 1981.
 82. 森岡俊夫, 三田恵美子, 領木和雄 : 各種レ-サ-照射によるエナノル質耐酸性 向 に関する研究, 第1報-歯面黒色塗布剤の應用並びに龜裂の發生-. *日本レ-サ-齒學會誌* 3 : 605-612, 1982.
 83. 森岡俊夫, 神山紀久男, 壓司 茂, 南里獄仁 : レ-サ-齒學, Quintessence, Toyko, 1988
 84. 佐藤秀人 : 人工初期 蝕に対する超音波スイッチ Nd:YAG レ-サ-照射の 影響について. *齒基礎誌* 24 : 914-926, 1982.
 85. 鈴木幸江, 富田房子, 山鳥野浪江, 三田昭太郎, 松尾敏正, 小野塚實, 管谷英一 : レ-サ-照射と 蝕抑制(V)-フツ化物塗布とレ-サ-照を併用つした時のエナノル質の状態變化と耐酸性について-. *神奈川歯學* 17 : 385-391, 1981