

Argon 이온 레이저 중합에 의한 Composite resin의 물성에 관한 연구

연세대학교 치과대학 보존학교실

조현경 · 이정석

I. 서 론

Albert Einstein¹⁴⁾이 레이저에 대한 기본원리를 기술한 후 1960년에 Theodore Mainman³²⁾이 처음으로 인조루비를 이용하여 레이저를 개발한 이래 여러종류의 레이저가 개발되어 그 응용분야가 점차 확대되고 있다. 이미 의학분야에서는 임상에 응용, 임상실용화 단계에 이르러 레이저를 활용한 수술이 보편화되고 있으며 치의학 분야에서는 1964년 Goldman¹⁸⁾이 루비레이저를 발거된 치아에 조사시 정상 치면에 비하여 우식 치면이 레이저 광의 흡수가 높음을 보고하고 치아 우식증 치료에 있어 레이저의 이용 가능성을 제시하였다. 치의학 분야에서 레이저의 응용은 내산성 증가등으로 인한 치아우식 예방과 와동형성에 대한 기초적 연구를 바탕으로 예방치과, 소아치과, 보존학등 임상으로 이어지고 있다.

예방치과 영역에서는, Stern⁴⁷⁾, Yamamoto⁵⁷⁾, Morioka³⁷⁾, 김⁶¹⁾이 레이저 조사후 내산성 증가로 인한 우식예방효과를 연구 발표했으며 Lobene³²⁾과 Yamamoto⁵⁶⁾은 레이저를 이용하여 범랑질을 융합시킴으로써, 또 Stewart⁴⁶⁾은 합성 hydroxyapatite를 치면 열구에 부착시킴으로써 우식증을 예방하고자 하였다.

치과보존 영역의 연구로는, Goldman¹⁸⁾, Stern⁴⁶⁾, Gordon²⁰⁾, 그리고 Kinersly²⁶⁾은 루비 레이저로, Brune⁷⁾, Scheinin⁴¹⁾, Melcer³⁴⁾은 CO₂ 레이저로, Frentzen¹⁶⁾은 ArF-excimer레이저로 와동형성 시도한 보고를 하였다.

Taylor⁵²⁾, Adrian¹⁾, Melcer³⁵⁾, Shoji⁴⁵⁾, Lentz³¹⁾, 김⁶³⁾은 레이저 조사후 치수에 나타나는 조직병리학적 변화를 관찰하였으며, 치수의 경조직(2차 상아질, 수복 상아질, 석회 변성등)이 형성된다고 보고하였다. Boehm⁶⁾, Kato²⁴⁾, 이⁶⁸⁾는 레이저 조사시 치수강의 온도 변화에 대하여 연구 발표하였으며 이외에도 Shoji⁴⁵⁾는 치수 절단술에 Hooks²²⁾와 Powell⁴⁰⁾은 근관치료기구를 소독하는데 Weichman과 Johnson^{54,55)}은 치근단공 폐쇄에, Powell³⁹⁾, Burtscher⁸⁾, Severin⁴²⁾은 Argon 이온 레이저를 이용하여 광중합 복합레진을 경화시켰으며, Kumazaki^{28,29)}은 Nd:YAG레이저를 이용하여 복합레진을 중합시키는 등의 연구나 보철기공에 응용한 보고⁵⁹⁾도 있다.

또, 충전물 변연 폐쇄에의 응용⁴³⁾, 치석 제거 및 색소침착 제거³⁵⁾, 구강내 연조직에의 응용^{21,49)}, 반도체 레이저를 이용한 지각 과민증 처치^{28,51)}등 임상에 이용하기 위한 많은 시도들이 행하여졌다.

이와같이 레이저와 연관된 응용분야가 크게 확대되고 레이저 자체의 발전이 거듭되면서 임상에 까지 부분적으로 사용하는 사례가 증가되고 있으며 보편적인 활용단계에 이르렀다. 그러나 현재까지의 보존학분야의 연구는 주로 레이저 조사시의 경조직, 연조직에 나타나는 변화를 토대로 와동 형성, 내산성 증가등으로 인한 우식 예방 및 치수 반응에 대하여 초점이 집중되어 왔다.

20세기에 들어오면서 문명이 고도로 발달하고 급속한 경제성장에 힘입어 심미적 욕구가 증대되어 치과에서조차 심미성이 매우 중요시되고 있는 실

정이다. 이러한 미래 지향적이고, 심미적인 수복 재중의 하나인 복합레진이 초기에는 전치부에만 주로 사용하였던 것이 최근에는 구치부에까지 확대 적용됨에 따라 물리적 성질의 향상이 요구되었다^{5,13, 23,64)} 이를 개선하기 위해 수복재 자체의 구성성분 또는 화학조성이 많이 변화되었고 또 경화 방법에 있어서도 화학 중합형에서 광중합형으로 바뀌으로써 혼합시 기포유입과 임상에서의 조작시간을 조절할 수 없는 등의 불편한 점이 개선되었다¹²⁾.

그리고 처음에 쓰였던 자외선의 생물학적 위해성⁴⁾ (피부암, 눈의 손상)과 경화 한계등⁹⁾을 극복하기 위해 가시광선에 의하여 경화될 수 있는 레진을 만드는 등 많은 연구^{3,38)}들이 있어왔다. 이에 본 연구에서는 가시광 램프 대신에 Argon 이온 레이저를 이용하여 광중합을 경화시킨 후 압축강도, 간접인장강도, 경도를 측정하고 변연접합성을 주사전자현미경으로 관찰하여 그 결과를 보고하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

수복 재료 : P-50(3M, 구치부용 광중합형 복합 레진, No. 9350U)

광원 : 가시광 램프 : Visilux 2[®](3M, light curing unit, beam size 6.5mm).

레이저 : Argon 이온 레이저(COHERENT, INNOVA 3055, beam size 4mm).

2. 실험방법

시편제작

1) 강도 측정용 시편 제작

직경 4.0mm, 높이 2.5mm의 강철 주형(Fig. 1)을 제작하여 P-50 레진을 충전하고 cellulose strip을 이용 상면을 평평하게 하고 압제한 후 대조군으로 이용할 시편은 Visilux 2를 이용하여 30초간 중합하였다. 또한 실험군은 Table 1과 같은 조건에서 대조군과 같은 방법을 이용하여 충전하고 Table 1과 같이 Argon 이온 레이저를 이용하여 중합하여 시편을 제작하여 37°C, 100% 습도에서 24시간 보관한 후 압축 강도 및 간접인장강도를 측정하였다.

2) 경도 측정용 시편 제작

직경 4.0mm, 높이 5.0mm의 변원형의 강철 주형 내에, P-50 레진을 충전하고 역시 cellulose strip을 이용 충전압을 가하여 상면의 평형을 맞춘 후 강

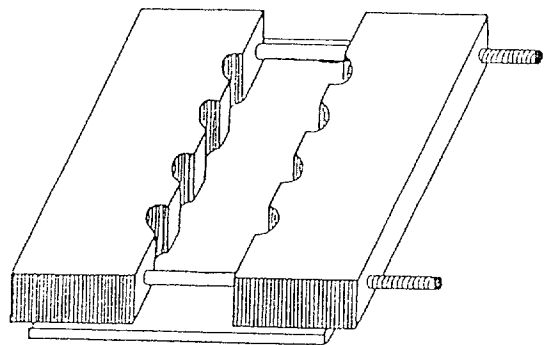


Fig. 1. Schematic diagram of mold

Table 1. Number of samples at various conditions of visible light and argon ion laser in this study.

light source	Visilux 2	Argon ion laser									
		300 mW			500 mW			1,000 mW			
amplitude											
irradiation time(sec)	30초	10초	20초	30초	10초	20초	30초	5초	10초	20초	30초
comp. strength	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
dia. tensile strength	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
curing depth	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
hardness	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

도측정용 시편제작에서와 같은 방법으로 중합을 시행하고, 즉시 미중합된 레진을 제거하고 역시 37℃, 100% 습도에서 24시간 보관후 각 깊이에 따라 표면 강도를 측정하였다.

실험방법

1) 압축강도 측정실험

제작후 24시간 동안 보관된 시편의 직경을 Vernia Calipers(Digimatic, Mitutoyo)을 이용하여 측정후 만능시험기(Instron 6022, Instron Co.)를 이용하여 측정하였다(cross head speed 1mm/min)

2) 간접인장강도 측정실험

제작후 24시간 동안 보관된 시편의 직경 및 높이를 Vernia Calipers(Digimatic, Mitutoyo)를 이용하여 측정후 만능시험기(Instron 6022, Instron Co.)를 이용하여 측정(cross head speed 1mm/min) 각각의 시험값을 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_x = \frac{2P(\text{Load})}{\pi \times D \times T(\text{Diameter} \times \text{Thickness})}$$

σ_x = diametral tensile strength(MPa)

P = Load at fracture

D = Diameter of specimen

T = Thickness of specimen

3) 경화깊이

시편 제작후 즉시 미중합된 레진을 예리한 치과용 조각도(No. 11)를 이용하여 제거하고, Digimatic을 사용하여 중합된 부분의 최대 두께를 측정하여 산출하였다.

4) 미세경도 측정

중합 깊이를 측정후 37℃, 100% 습도상에서 24시간 보관한 시편의 측면을 중합 깊이 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm 부위에서 microhardness tester(Matsuzawa Seiki Co.)를 이용하여 Vickers hardness를 구했다. 대조군에서는 중합깊이가 적어 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm에서 표면 경도를 측정하였다(Fig. 2).

5) 주사 전자 현미경적 관찰

발거된 소구치 20개를 선택하여 협면 또는 설면에 근원심 길이가 약 3mm, 깊이가 1.5~2.0mm 되고 치은

변연부가 법랑질-백악질 경계면에서 1mm 하방에 위치시키며 절단부 변연이 법랑질-백악질 경계면에서 2mm 상방에 위치하는 제5급 와동을 형성하고 와연우각이 90° butt joint를 이루도록 하였다(Fig. 3).

와동은 37% 인산 용액으로 60초간 산 탈회시키고 40초간 물로 완전히 세척한 뒤 건조시키고 Scotch-bond 2 Light Cured Dental Adhesive®(3M Dental

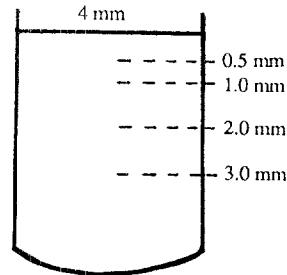


Fig. 2. Location of measured points

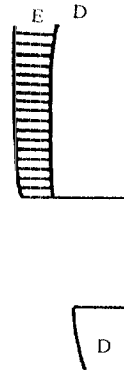


Fig. 3. Design of cavity preparation

Products)를 얇게 바른다. 10개는 10초간 가시광원을 조사하고 나머지 10개는 Argon 이온 레이저로 5초간 조사하고 나서 한번에 복합 레진을 충전한 뒤 가시광 램프(30sec)와 Argon 이온 레이저(5sec)로 각각 조사하여 중합시킨후 치아와 수복물 사이의 접촉면에서의 접합성을 주사 전자 현미경(Hitachi S-2300)으로 검경하였다.

III. 실험성적

1. 압축강도

• 가시광 램프와 Argon 이온 레이저의 출력과 조사시간에 따른 압축 강도의 변화는 Table 2 및 Figure 4과 같다.

• 대조군인 가시광 램프에 비해 Argon 이온 레이저 조사군 모두에서 더 높은 압축강도를 나타냈으며($P < 0.05$) 1W 10sec. 군에서 483.9MPa로 가장 높게 나타났다. 대조군에 비해 레이저조사군에서 출력과 조사시간에 관계없이 5~15%의 증가된 압축강도를 나타냈다.

• Argon 이온 레이저 조사군 내에서는 10초간 조사시 출력이 증가되면 압축 강도도 증가하였고($P < 0.005$) 20초간 조사시는 출력에 따라 압축 강도도 높게 나타났으나 통계적으로 유의성은 없었다($P > 0.05$) 30초간 조사한 경우는 300mW나 1000mW에 비해 500mW 출력으로 조사한 경우가 더 낮은 압축강도를 보였다($P < 0.05$).

2. 간접인장강도

• 가시광 램프와 Argon 이온 레이저의 출력과 조사시간에 따른 간접인장강도의 평균치는 Table 2와 Fig. 5와 같다.

대조군인 가시광 램프와 Argon 이온 레이저 조

사군을 비교시, 대조군에 비해 높은 간접인장강도를 보이고 있으며 통계적 유의성이 있었다($P < 0.001$). 대조군에 비해 레이저 조사군에서 출력과 조사시간에 관계없이 22~38%의 증가된 간접인장강도를 나타냈다.

• Argon 이온 레이저 조사군에서 300mW의 경우 조사시간이 길어질수록 간접인장강도가 증가($P > 0.05$)하였고 1000mW에서는 30초간 조사시 오히려 10초나 20초에 비해 감소되는 경향을 보였으나 출력과 조사시간에 따른 간접인장강도 사이에는 통계적 유의차가 없었다($P > 0.05$)

3. 경화깊이

분산분석(Kruskal - Wallis 1 - way ANOVA)결과, 조사기종간, 그리고 출력 및 조사시간에 따른 경화깊이의 변화는 통계적 유의차가 있었으며($P < 0.001$) 각 군의 평균치는 Table 2와 같다.

대조군에 비해 레이저 조사군에서 21~67%의 증가된 경화깊이를 나타냈다.

Argon 이온 레이저 조사시 출력이 증가할수록, 또한 조사시간이 길수록 경화깊이도 증가해서 1000 mW 30초간 조사한 경우가 5.03mm로 가장 높은 수치를 보였다. 대조군인 가시광 램프가 비교할 때 모두에서 더 높은 경화 깊이를 보였다($P < 0.001$).

Table 2. Compressive strength, Diametral tensile strength, and curing depth of P-50 cured by Visilux 2® and Argon ion laser at variable conditions.

light source	Visilux 2 (Control)	Argon ion laser (experimental)									
		300			500			1000			
amplitude(mW)											
irradiation time(sec)	30	10	20	30	10	20	30	5	10	20	30
comp. strength (mean± S.D.)	419.6 ± 32.5	442.2 ± 24.7	467.7 ± 18.7	468.9 ± 21.5	456.7 ± 23.5	472.9 ± 21.9	449.9 ± 17.7	449.6 ± 45.9	483.9 ± 30.7	480.8 ± 17.6	466.1 ± 17.4
Diametral tensile str. (mean± S.D.)	49.5 ± 4.7	62.5 ± 5.6	65.1 ± 7.0	68.4 ± 5.3	63.3 ± 2.6	63.2 ± 3.8	65.4 ± 6.6	60.6 ± 5.8	66.4 ± 5.1	67.2 ± 3.4	64.6 ± 4.6
curing depth (mean± S.D.)	3.01 ± 0.08	3.64 ± 0.11	4.19 ± 0.83	4.52 ± 0.14	4.11 ± 0.14	4.55 ± 0.13	4.85 ± 0.16	4.12 ± 0.12	4.41 ± 0.11	4.97 ± 0.07	5.03 ± 0.03

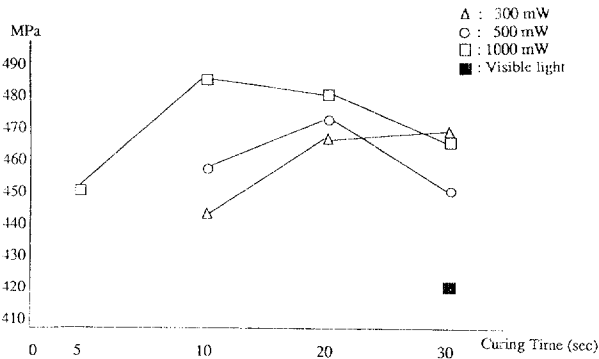


Fig. 4. Compressive strength of two groups

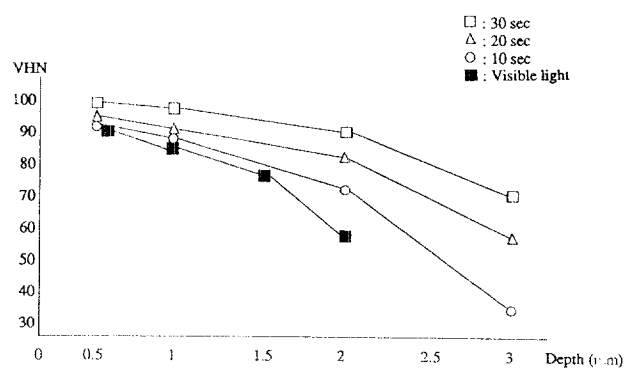


Fig. 6. VHN at 300mW

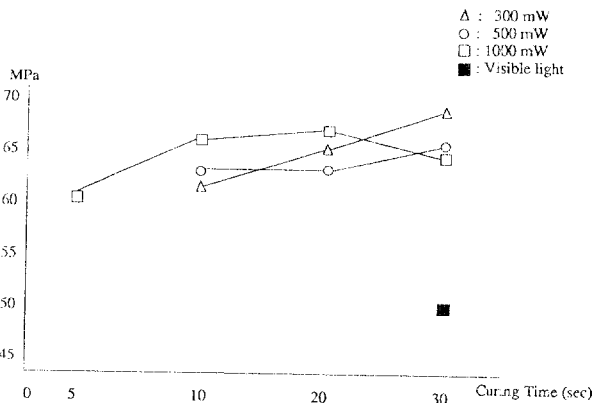


Fig. 5. Diametral tensile strength of two groups

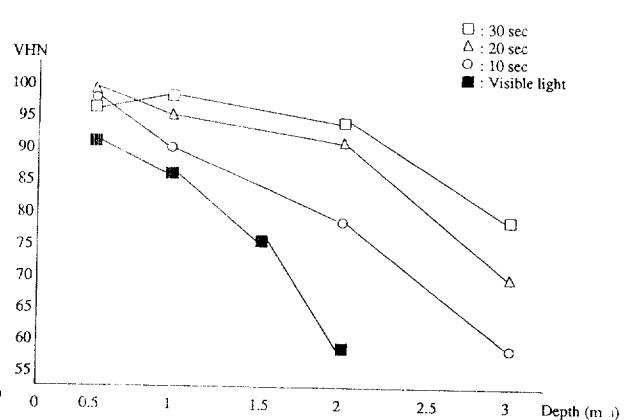


Fig. 7. VHN at 500mW

4. 깊이별 경도

대조군인 가시광 램프 조사군에서는 표층에서 심부로 내려갈수록 경도가 감소되었으며 ($P < 0.005$) 0.5mm에서 최대 경도치를 나타냈다.

Argon 이온 레이저 조사군에서 동일한 조사시간에 있어 출력이 증가할수록 깊이별 경도가 증가하였으며 ($P < 0.001$) 또한 같은 출력하에서 조사시간에 따라 또한 증가되었다 ($P < 0.001$). 300mW와 500mW에서는 가시광 램프군에서와 같이 표층에서 심부로 갈수록 경도가 감소되었다 (Fig. 6, 7). 1000mW에서는 조사시간이 증가됨에 따라 표면경도와 3mm 깊이에서의 경도가 거의 비슷하게 나타났고 1~2mm 사이 깊이에서 최대 경도치를 보였다 (Fig. 8).

전반적으로 대조군에 비해 Argon 이온 레이저군의 깊이별 경도가 크게 나타났으며 각 군의 평

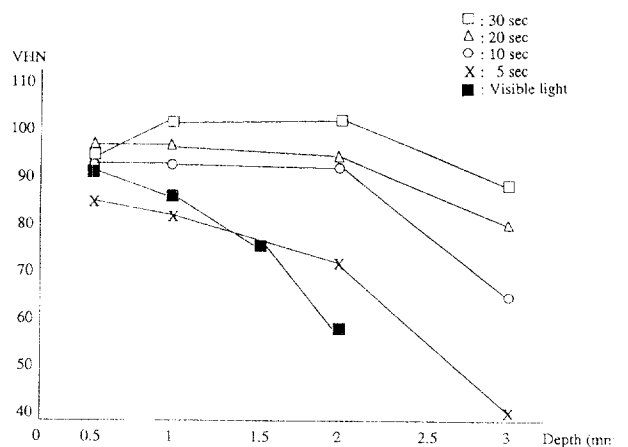


Fig. 8. VHN at 1000mW

균치는 Table 3과 같다.

Table 3. Vicker's Hardness Number at Various depth of specimen

light Source	amp. (mW)	time (sec)	Depth of specimen(mm)				
			0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
Visilux 2 (Control)		30	90.75±1.60	86.06±2.11	76.36±2.06	58.91±2.89	—
		10	92.28±3.13	87.66±3.37	—	71.56±4.30	34.65±2.82
		20	95.04±2.08	90.65±3.94	—	81.10±3.58	57.41±3.58
		30	99.48±1.38	97.31±2.98	—	90.34±2.39	70.50±2.98
Argon ion Laser (experimental)	300	10	96.64±3.10	89.94±2.15	—	78.60±2.12	58.90±7.28
		20	98.86±4.82	95.26±2.37	—	90.91±3.56	70.09±2.62
		30	95.69±4.84	97.73±4.33	—	93.96±3.47	78.59±3.42
		5	85.69±3.12	81.56±1.33	—	71.45±3.58	40.60±3.40
		10	92.95±2.89	92.79±3.12	—	92.18±1.54	65.39±5.60
		20	95.44±3.45	96.29±2.30	—	94.05±2.30	79.89±6.81
	1000	30	94.69±1.26	100.79±5.16	—	101.58±4.55	89.10±4.18

5. 주사 전자 현미경적 관찰

A. 가시광 램프 조사군(30sec)

교합 변연부의 법랑질에서는 치질과 레진이 비교적 긴밀하게 부착되어 있으나 미세누출이 발견되었다(Fig. 9). 치은 변연부에서는 복합레진의 일부가 상아질에 부착되어 있고 나머지는 중합수축에 의한 응력으로 인해 법랑질 변연쪽으로 끌려 올라가 명백한 미세누출을 관찰할 수 있었다(Fig. 10).

B. 레이저 조사군(5sec)

1000배로 확대한 법랑질 변연에서의 접합성이 매우 우수하게 나타났다. 즉 레진과 치질사이가 매우 긴밀하여 gap을 발견할 수 없었다(Fig. 11). 상아질 변연에서는 가시광 램프조사군에서와 같이 명백한 미세누출이 관찰되었다(Fig. 12).

IV. 총괄 및 고찰

치과용 복합레진은 아말감이나 금 인레이등의 금속 충전물에 비하여 물성이 낮기 때문에 전치부에 한하여 이용되었으나 심미적인 장점과 조작의 용이성등으로 그 사용이 계속 증가되고 있고 구치부 충전전제로서 광범위하게 이용될 전망이다. 이러한 재료의 결점들을 보완하기 위하여 충전재 함량을 높인다거나 새로운 상아질 접착제를 개발하고³⁸⁾

이미 중합된 광중합레진에 열을 가함으로써 물리적 성질을 향상시키려 하나⁴⁰⁾ 아직 미흡한 상태에 있다. 이에 레이저에 의하여 경화될 수 있는 새로운 체계의 레진을 만들거나 또는 이미 사용되고 있는 광중합레진에 더 강력한 중합력을 가진 레이저로 경화시켜 더 높은 압축강도, 인장강도, 경도 및 우수한 변연접합성을 얻으려 하고 있다.

광중합에 사용되는 광조사기의 빛은 400~500nm 범위의 여러 파장이 모인 빛으로 응집성(coherence)이 없어 램프에서 나오는 즉시 퍼지며 투과성이 낮고 광흡수력이 약한 물질에 사용시 거의 흡수되지 못하는 특성이 있다. 이러한 광원의 특성 때문에 광조사기 광의 파장 및 광도, 광조사 각도, 광원과 수복물 표면과의 거리 및 광투과도 등이 중합반응에 영향을 미치게 된다. 레이저빔은 보통 광원보다 응집성이 월등히 높아 단색성(monochromaticity), 지향성(directionality), 고휘도성(brightness)의 특성을 가지고 있어 보통 광원의 단점이 보완될 수 있다. 이에 본 연구에서는 광중합에 유효한 파장 범위인 488nm의 Argon 이온 레이저를 선택하였고 가시광램프의 경우는 현재 사용되고 있는 여러 광조사기 중에서 중합에 유효한 파장범위(460~480nm)내에서 광도가 가장 높다고 보고된⁶⁹⁾ Visilux 2[®]를 각각 선택하여 비교하였다. 본 실험에서 사용된 Argon 이온 레이저의 출력에 대하여 Severin⁴²⁾

는 300mW가 임상에서 가장 적당하다고 보고하였고 Burtscher⁸⁾는 20mW에서 700mW까지의 출력을 이용하였으며 Powell등⁴⁰⁾은 1W를 사용하였기에 본 실험에서도 300mW, 500mW, 1000mW의 출력으로 나누어 조사하였다. 가시광 램프군은 제조회사의 지시대로 30초간 조사하여 대조군으로 삼고 레이저 조사군은 5초, 10초, 20초, 30초의 조사시간으로 나누어 측정 비교함으로써 레이저의 출력과 조사 시간에 따른 물질 특성 연구를 시도하였다. 또 본 실험에서 사용된 출력 및 조사시간에서 치아 및 치수의 변화에 대하여는 Shoji등⁴¹⁾은 900mW의 출력으로 20초간 쥐의 구치부 교합면에 조사한 후 2주, 4주후 치수조직을 검사한 결과 어떠한 병변도 일어나지 않았다고 보고함으로써 본 실험에 사용된 출력과 조사 시간이 치수병변을 일으키지 않는 범위임을 알 수 있었다. Shoji⁴¹⁾는 치아에 광중합레진으로 충전, 경화시킨 후 900mW로 30초간 조사하여 충전물 변연부를 관찰한바, 법랑질에 변화를 주어 내산성을 향상시킬 가능성이 있어 2차 우식 방지에의 응용을 주장하기도 하였다.

본 실험에서 압축강도를 보면 대조군인 가시광 램프 조사군에 비하여 레이저 조사군이 더 높은 강도를 나타내고 있으며 1000mW군이 300mW, 500mW군에 비하여 강도가 더 크게 나타난 것은 부가적으로 열효과가 함께 작용하여 강도가 더 커진 것으로 생각된다.

간접인장강도는 수복물의 탈락, 파절 및 변연 누출과도 관계가 깊으며 복합레진은 금속충진물에 비해 현저히 낮기 때문에 문제점으로 지적되어 왔는데 본 실험에 의하면 Argon 이온 레이저 조사군에서 출력 및 조사시간에 관계없이 가시광 램프 조사군보다 높게 나타났다. Powell등⁴⁰⁾은 가시광 램프로 20초간 조사한 경우와 Argon 이온 레이저로 1W, 5초간 조사하여 압축강도, 간접인장강도를 측정, 비교한 결과 압축강도에서는 더 높았으나 간접인장강도는 대조군이 높게 나타났다고 보고하여 본 실험과 차이가 있음을 알 수 있었다.

일반적으로 광중합레진은 광원과 조사되는 수복물표면과의 거리⁶⁷⁾, 레진의 색조와 광조사각도, 광의 파장 및 광도^{25,69)}, 그리고 수복물의 두께에 따라 중합정도가 다르게 나타난다¹¹⁾. Kiuchi²⁷⁾와 방⁶⁶⁾은 광이 투과할 치질의 두께가 증가하면 레진수

복물의 경화심도는 감소되고 또 광이 직접 조사안 되는 부위에서는 중합효과는 저하된다고 보고하였고 그밖에 광조사시간과 경도와 관계등 중합반응에 관해 많은 사람들이 연구 발표했다^{7,9,10,15,17,70)}. 이와같은 보고들로부터 광중합형 복합레진은 완전하게 중합이 형성되는 것이 아니라 불완전한 중합상태^{12,53)}로 남아있는 부위가 있어 물리적 성질이 약해지는 원인이 되며 치수 자극을 야기하고 부적절한 유지로 인해 수복물의 수명에도 영향을 미치게 된다. 즉, 광중합레진은 광선이 조사되는 표면에서 심부로 경화되기 때문에 경화깊이가 한정되어 있고 심부로 갈수록 그 경도가 현저히 감소되는데 비하여 laser조사군에서는 거의 일정한 경도를 나타냈다. 가시광 램프 조사군의 경우 표면에서 심부로 내려갈수록 급격하게 경도가 저하되었으며 0.5mm 깊이에서 최대 경도치를 나타내 이등⁶⁹⁾의 실험결과와 일치하며 또 이⁶⁷⁾는 표면으로부터 1.0~2.0mm에서 최대 경도치를 보였다고 보고했다. Argon 이온 레이저 조사군의 경우를 보면 30초간 조사했을 경우 0.5mm에서의 경도와 3mm에서의 경도가 크게 차이나지 않았다. 이것은 고출력의 Argon 이온 레이저로 조사하는 표면으로부터 4mm 깊이까지 거의 비슷한 경도를 보이며 저출력의 경우에는 심부로 갈수록 점차 감소한다고 보고한 Burtscher⁸⁾의 연구와 일치된 결과를 얻었다. 가시광 램프에서는 광원과 수복물간의 거리에 따라 경화 정도에 영향을 미치는데 반해, 응집성과 지향성을 가지며 퍼짐이 없이 곧바로 진행하는 위상이 고른 연속된 단일 파장의 특성을 가진 laser에서는 크게 문제되지 않는다. 실제 본 실험에서 Argon 이온 레이저의 경우는 fiber optic delivery system이 없어 수복물과 수 cm 정도 떨어진 거리에서 조사하였으며 가시광 램프는 수복물과의 거리가 "0"인 상태에서 조사되었다.

경화깊이를 측정하는 데는 여러가지 방법이 있으나, 본 실험에서는 예리한 기구로 긁어낸(Scraping) 후 경화깊이를 대략 측정하고^{15,68,70)} 대부분의 연구에서와 같이^{33,67,69)} 경화의 정도를 나타내는 표면경도를 기준으로 판정하였다. 경화깊이는 가시광 램프의 경우 평균 3.01mm인데 반하여 Argon 이온 레이저 조사군에서는 5초간 조사시 평균 4.13mm 정도를 나타냄으로써 레이저의 중합효율(polimeri-

zation efficiency)이 높음을 알 수 있었다. 또 Argon 이온 레이저에서도 가시광 램프에서와 같이 출력이 높을수록, 조사시간이 길어질수록 경화도 더 깊게 일어남을 알 수 있었다.

깊이별 경도 측정시 본 실험에서는 0mm에서의 표면경도를 측정하지 않았으며, 그것은 광중합 레진의 표면은 산소에 의해서 중합이 억제되어 경도가 그 아랫부분보다 낮아 입상에서는 과충전한 뒤 연마과정에서 삭제하고 있어 표면으로부터 0.5mm 하방에서부터 측정하였다. 이러한 부위의 후경을 측정한 결과 100 μ m에서 크게는 700 μ m까지 나타남을 관찰하였다.

Argon 이온 레이저 조사시 치질과 수복물 사이의 결합관계에 대하여 Severin⁴²⁾은 매우 빠른 속도로 레진을 중합시킴으로써 중합시 생기는 체적변화를 줄일 수 있고 따라서 치아와 레진 사이의 stress가 감소되어 adhesive 혹은 cohesive fracture를 피할 수 있다고 보고하였다. 이러한 근거로 Powell등⁴⁰⁾은 광중합복합레진(P-50)에 가시광 램프(20초)와 Argon 이온 레이저(1W, 5초)로 각각 조사하여 법랑질과 상아질에서의 접착강도를 비교 관찰한 결과 레이저 조사군이 가시광 램프 조사군보다 더 높은 결합강도를 보였다고 보고하였다. 그러나 Argon 이온 레이저가 중합효율은 높으나 오히려 중합 수축에 있어서는 의심스럽다고 보고하는 이³⁸⁾도 있어 본 실험에서는 수복물과 치질과의 접합상태를 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 법랑질 변연에서는 가시광 조사군과 레이저 조사군 모두 우수한 변연 접합성을 관찰할 수 있었으나 상아질 변연에서는 명백한 미세누출이 관찰되었다. 이것만으로는 어느 쪽이 더 우수하다고 논하기 어려우나 레이저 조사시 중합수축이 더 문제된다고 보고한 Burtscher³⁹⁾의 견해와는 차이가 있었음을 알 수 있었다. 따라서 변연누출을 더 정확히 평가하기 위해서는 주사전자 현미경을 통하여 수복물과 치질 사이의 gap을 직접 측정하거나 dye를 이용한 평가방법 등이 필요하리라 사료된다.

이상의 사항등을 고려해볼 때 대조군에 비하여 레이저 조사군에서 물성이 향상되었다. 물성이 향상된 이유는 레이저의 특성 외에도 레이저에 의하여 경화된 레진의 구조적 변화가 있었는지를 추정하기 위하여 열적 분석을 행하였다. 열적 분석법에는

시차열 분석(DTA Differential Thermal Analysis), 시차 주사 열 분석(DSC Differential Scanning Calorimetry), 열 무게 분석(TGA Thermogravimetric Analysis) 및 열 역학 분석법(TMA Thermomechanical Analysis) 등이 있다. 이 중에서 시차 주사 열 분석기를 통하여 광 중합 레진의 기본적인 열적 특성과 레이저에 의해 경화된 레진의 열적 변화를 비교 분석하였다(Fig. 13). 분석한 결과 280 $^{\circ}$ C 부근에서 시작되는 발열반응은 분해반응으로 추정되는 열적 변화를 보이고 있는 것으로 보아 laser와 가시광 램프를 조사하여 경화시킨 각 시료(시료 B, C, D)의 열적 변화형태는 유사한 것으로 사료된다(Fig. 13 참조). 또 180 $^{\circ}$ C 부근에서 시료 D는 열적 변화가 없으나 시료 B, C는 약간의 발열 반응을 보였으며 이것은 미반응 레진이 반응하면서 발열 반응을 일으킨 것으로 추측되며 이러한 사실은 광중합 반응전의 원래 상태인 레진(시료 A)의 DSC 분석 결과 172 $^{\circ}$ C에서 크게 발열 peak를 보인 것으로부터 이 부근에서 반응이 일어나는 것을 알 수 있었다.

또한 TGA(Thermogravimetric Analysis, Dupont Instruments 950 Thermogravimetric Analyzer) 분석 결과 미반응 레진(TGA 시료 A, Fig. 14)은 3차에 걸친 무게 감소를 보였으며 124~224 $^{\circ}$ C에서는 반응에 의한 1차 감량, 340 $^{\circ}$ C 전후로 2차, 3차 감량이 나타남을 알 수 있다. 이 결과로부터 DSC분석에서 확인된 280 $^{\circ}$ C 부근부터 시작되는 발열 반응이 2차에 걸쳐 일어나며 340 $^{\circ}$ C를 경계로 앞쪽은 경화 반응, 뒤쪽은 분해반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 가시광 램프를 30초 조사한 시료(TGA, 시료 B)도 230 $^{\circ}$ C까지 약 0.27%의 감량을 보이고 있는 것으로 보아 미반응 레진의 존재를 알 수 있었고 330 $^{\circ}$ C를 전후로 경화반응과 분해반응이 일어나는 것을 알 수 있었다. 이상의 실험에서 볼 때 180 $^{\circ}$ C 부근의 미반응 레진의 양이 복합레진의 강도를 결정하는 인자가 아닌가 생각된다. 보통 고분자 물질은 600 $^{\circ}$ C 이하에서 완전 분해되고 acrylic resin은 300~400 $^{\circ}$ C인데, 본 실험에 사용된 광중합 레진(P-50)이 500 $^{\circ}$ C에서 86%의 잔량이 존재하는 것은 무기 충전제(filler)에 기인한 것으로 EDS(AN 10000 Energy Dispersive X-ray Spectrometer, Link System) 분석 결과 이 충전제는 규화물과 인화물로 구성되어

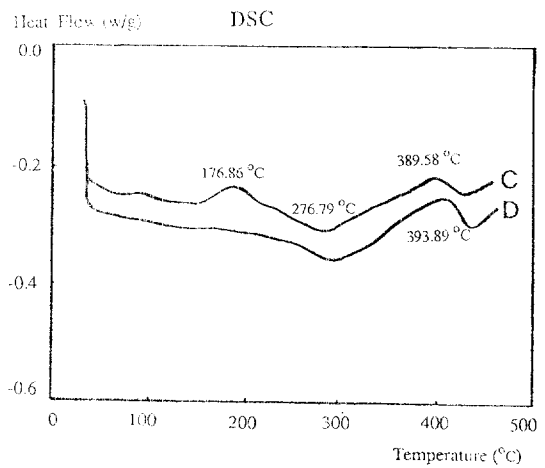
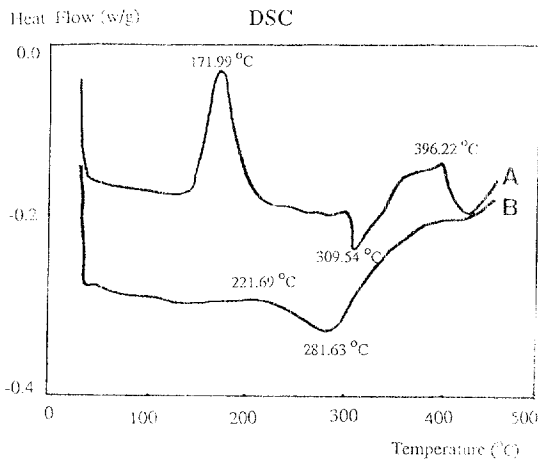


Fig. 13. DSC of each tested sample

A : resin not cured by visible light
 B : resin cured by visible light(30sec)

C : resin cured by Argon ion laser(300mW, 10sec)
 D : resin cured by Argon ion laser(1000mW, 10sec)

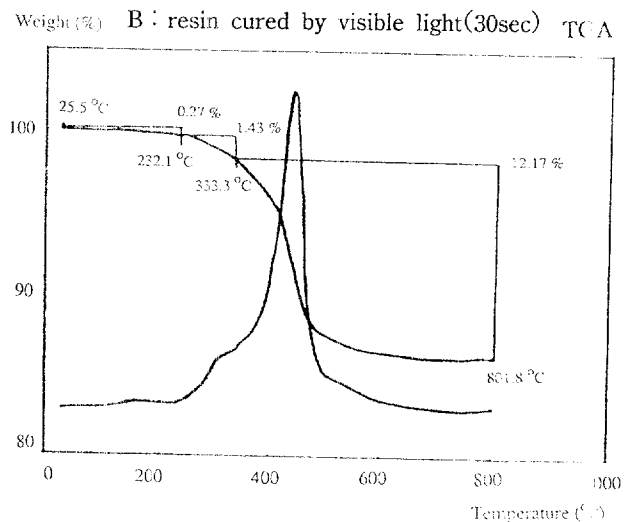
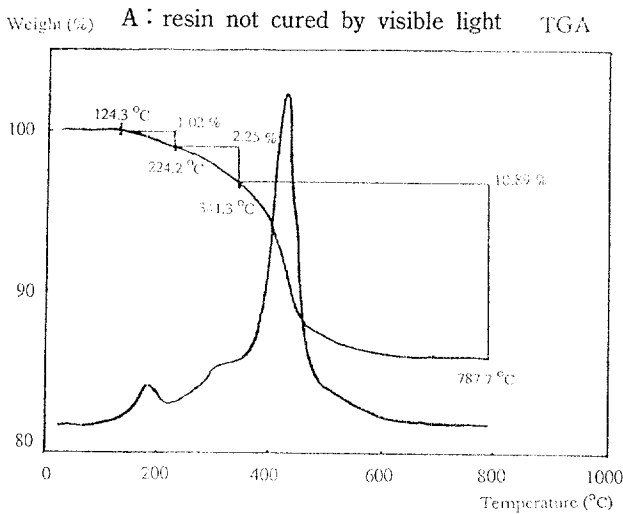


Fig. 14. TGA of each tested sample

있는 것으로 확인되었다.

본 실험에서 각 군당 시편 수가 비교적 작긴하나 기존의 가시광 램프로 30초 조사하던 것을 1/3에 해당하는 10초로 단축시켜 레이저로 조사한 경우에서도 더 깊게 경화되고 압축강도, 간접인장강도 등 물성이 향상되었음이 확인되었다. 따라서 앞으로 Argon 이온 레이저가 보존술식에 응용될 잠재적 가능성을 명백히 보여주는 실험이라 생각된다. 레이저가 가시광 램프에 비해 중합 효율이 높고 물성을 향상시켰으나 임상에 응용하기까지는 많은

연구가 요구되는 것으로, 특히 경화시 발생하는 중합수축이 어느 정도 감소하는가에 대해 명확하게 입증할 수 있어야 한다. 특히 레이저 조사시 표면에 발생하는 에너지가 치수 및 경조직에 미치는 영향에 대해서도 정확히 연구되어야 하며 이러한 조건들을 만족시키면서 물성을 최대화시킬 수 있는 최적의 출력 및 조사시간에 대한 계속적 연구가 요구된다. 아울러 더욱 우수한 상아질 접착제의 개발과 그에 대한 술식이 개선되어 변연누출에 대한 문제점이 해소될 수 있다면 머지않은 장래에 광중

합레진이 새로운 구치부용 충전재로서 각광받게 될 것이라 사료된다.

V. 결 론

광중합 레진(P-50)에 가시광 램프(Visilux 2)와 Argon 이온 레이저 조사에 따른 물성변화를 관찰하기 위하여 가시광 램프를 30초간 조사한 군을 대조군으로 하고 Argon 이온 레이저에 있어서는 300mW, 500mW, 1000mW의 출력과 10초, 20초, 30초의 조사시간으로 나누어 압축 강도, 간접인장 강도, 경화깊이 및 깊이별 미세경도를 측정하였다. 또한 발거된 소구치 20개의 협면 또는 설면에 제5급 와동을 형성하고 P-50을 충전, 가시광 램프(30초)와 Argon 이온 레이저(1W, 5sec)를 각각 조사하여 경화시킨 뒤 변연 접합성을 주사 전자 현미경으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축 강도는 대조군인 가시광 램프 조사군에 비해 Argon 이온 레이저로 조사한 모든 군에서 더 높은 강도를 나타냈으며($P < 0.05$) 1000mW 10초군에서 가장 높았다.
2. 간접인장강도는 대조군에 비해 Argon 이온 레이저 조사군이 더 높았다($P < 0.001$).
3. 경화깊이는 대조군인 가시광 램프 조사군에 비하여 Argon 이온 레이저 조사군 모두에서 더 깊게 나타났으며($P < 0.001$) 1000mW, 30sec 군에서 가장 높았다.
4. 깊이별 미세경도는 대조군에 비해 Argon 이온 레이저 조사군에서 더 크게 나타났으며($P < 0.005$) laser 조사군에서는 심부에서도 경도가 크게 감소되지 않았다.
5. 주사 전자 현미경적 관찰
법랑질에서의 변연접합성은 대조군과 레이저 조사군 모두에서 우수하게 나타났으나 상아질에서는 변연누출이 관찰되었다.
6. 가시광 램프로 광중합 레진을 경화시킨 경우보다 단일파장의 빛인 레이저로 경화시킨 경우에서 중합효율이 더 높았고, 압축강도, 간접인장강도, 경도에 있어서도 더 크게 나타났으므로 Argon 이온 레이저에 의한 중합방법이 가시광 램프에 의한 중합방법보다 더 우수하였다.

REFERENCES

1. Adrian, J. C., Bernier, J. L., and Sprague, W. G. : Laser and the dental pulp, J. A. D. A., 83 : 113-117, 1971.
2. Amer, O. M., Combe, E. C., and Watts, D. C. : Visible light - activated composites.
 1. Assessment of depth of cure
 2. Factors influence depth of cure
 J. Dent. Res., 62 : 418, 1983.
3. Bassiouny, M. A., and Grant A. A. : Physical properties of a visible light cured composite resin, J. Prosthet. Dent., 43 : 536-541, 1980.
4. Birdsell, D. C., Bannon, D. J., and Webb, R. B. : Harmful effects of near ultraviolet radiation of sealant and composite resin, J. Am. Dent. Assoc., 94 : 311, 1979.
5. Blankenau, R. J., Kelsey, I. W. P., and Calvel, W. T. : A direct posterior restorative resin inlay technigue, Quint. Int., 5 : 515-516, 1984.
6. Boehm, R. F., Chen, M. J., and Blair, C. K. : Temperatures in human teeth due to laser heating, A. S. M. E. paper, 75-WA/Bio-8, pp. 10-17, 1975.
7. Burne, D. : Interaction of pulsed carbon dioxide laser beams with teeth in vitro. Scan. J. Dent. Res., 88 : 301, 1990.
8. Burtscher, P. : Curing of composites with an Argon laser. J. Dent. Res. 70 : 526 special issue Abstr. No. 2080, 1971.
9. Cook, W. D. : Factors affecting the Depth of Cure of UN-polymerized Composites. J. Dent. Res. : 59 : 800, 1980.
10. Davidson, C. L., De Gel, A. J., and Feilser, A. : The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress, J. Dent. Res. 63 : 1396-1399, 1984.
11. De Backer, J., Dermant, L., and Bruynooghe, W. : The depth of polymerization of visible light - cured composite resins, Quint. Int. 10 : 693-701, 1985.

12. De Lange, C., Bausch, J. B., and Davidson, C. L. : The curing pattern of photo - initiated dental composites, *J. Oral Rehabil.*, 7 : 369-377, 1980.
13. Dennison, J. B., and Craig, R. G. : Physical properties and finished surface texture of composites restorative resins, *J. Am. Dent. Assoc.*, 85 : 101-108, 1972.
14. Einstein, A. : Zur Quanten Theorie der Strahlung, *Phys. Zeit.*, 18 : 121, 1917.
15. Fan, P. L., Stanford, W. B., Lenug, R., and Stanford, J. W. : Effects of Backing Reflectance and mold size on polymerization of photo - active composite resin, *J. Dent. Res.*, 63 : 1245-1247, 1984.
16. Frentzen, M. et al. : Caries removal and conditioning of tooth surface in adhesive dentistry by using 193nm Excimer laser, Presentation the 1st Int'l Congress of Laser in Dentistry, Tokyo, 5-6/8, 1988.
17. Friedman, J. and Hassen, R. : Comparison study of visible curing lights and hardness of light - cured restorative material, *J. Prosthet. Dent.* 52 : 504-506, 1984.
18. Goldman, L. and Horney, P. : Impact of the laser on dental caries, *Nature*, 203 : 417, 1964.
19. Goodman, B. D. and Kaufman, H. W. : Effect of an Argon laser on the crystalline properties and Rate of Dissolution in Acid of Tooth Enamel in the Presence of Sodium Fluoride, *J. Dent. Res.*, 56 : 1201-1207, 1977.
20. Gordon, T. E. Jr. : Some effects of laser impacts on extracted teeth, *J. Dent. Res.*, 45 : 372-375, 1966.
21. Hashimoto, K. : Clinical Application of Various Lasers in Oral Surgery - CO₂ Laser, Nd : YAG Laser, Diode Laser and Argon laser. Presentation at the 1st Int'l Congress of Laser in Dentistry, Tokyo, 15, 1988.
22. Hooks, T. W., and Adrian, J. C. : Use of the CO₂ laser in sterilization of endodontic reamers, *Oral Surg.*, 49 : 263, 1980.
23. James, D. F. : An esthetic inlay technique for posterior teeth, *Quint. Int.*, 7 : 725-731, 1983.
24. Kato, K., Nagasawa, A., Nishikawa, K., Hiras-tuka, Y., Kawahara, T., and Atsmi, K. : Basic study on change of temperature of a tooth after CO₂ Laser irradiation, *J. Japan Society for Laser Medicine*, 1 : 294, 1980.
25. Killian, R. J. : Visible light - cured composites : Dependence of cure on light intensity, *IADR, Progr. & Abstr.* 58, No. 603, 1979.
26. Kinersly, T., Jarabak, J. P., Phatak, N. M., and DeMeat, J. : Laser induced microperforations in teeth sections. *J. Dent. Res.*, 45 : 199, 1966.
27. Kiuchi, M. : Studies on hardening depth cured by the light through the tooth substance and clinical use of visible light cured resins, *Japan J. Conservative Dent.* 25 : 279-293, 1982.
28. Kumazaki, M. et al : Clinical evaluation of GaAlAs - semiconductor - laser in treatment of hypersensitivity tooth, *Japan. J. Conservative Dent.* 33 : 911, 1990.
29. Kumazaki, M., Toyoda, K., Zennyu, K., Fujii, B., and Sasano, S. : Studies on Laser Polymerized Composite Resin(Part 1), *Japan J. Conservative Dent.* 28 : 202-209, 1985.
30. Kumazaki, M., Toyoda, K., Zennyu, K., Fujii, B., and Sasano, S. : Studies on Laser Polymerized Composite Resin Part 2, Reduction of Irradiation Energy *Japan J. Conservative Dent.* 19 : 289-296, 1986.
31. Lentz, D., Pyttel, U. J., and Glide, M. : Morphologische unter suchungen zur wirkung der laser strahlung aus pulpa und mundescheinhaut, *Dtsch. Zahnarzl. Z.*, 32 : 508, 1977.
32. Lobene, R. R., Bhussary, B. R., and Fine, S. : Interaction of carbon dioxide laser radiation with Enamel & Dentin, *J. Dent. Res.*, 47 : 311-317, 1968.
33. Mahman, T. H. : Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187 : 493, 1960.
34. Melcer, J., Chaumette, M. T., Melcer, F. et al : Treatment of dental decay by CO₂ Laser

- beam, *Lasers Surg. Med.* 4 : 311-315, 1984.
35. Melcer, J., Melcer, F., Zeboulon, S., Hasson, R., Merard, R., Pinaudeau, Y., Dejardin, J., and Weil, R. : Preliminary report on the effect of the CO₂ laser beam on the dental pulp of the *Mecaca Mulatta* primate and beagle dog, *J. Endo.*, 11 : 1, 1985.
 36. Morioka, T. et al. : Effect on dental deposits and intrinsic stains with the impact on Nd : YAG laser, *The J. Japan Society for laser Medicine*, 1 : 183-188, 1980.
 37. Morioka, T. and Matuda, N. : Effect of laser irradiation on an increament of sealant adhesion and acid resistibility. *The Journal of Japan Society for Laser Medicine*, 1 : 327, 1980.
 38. Phillips, R. W. : Past, present, and future composite resin systems. *D. C. N. A.* 25 : 209-218, 1981.
 39. Powell, G. L. and Whisenant, B. K. : Comparison of lasers for dental instrument sterilization. *J. Dent. Res.*, 66(social issue. Abstr. No. 334), 1987.
 40. Powell, G. L., Kelsey, W. P., Blanknenau, R. J., and Barkmeier, W. W. : The use of an Argon laser for polymerization of composite resin. *J. Esthet. Dent.*, 1 : 34-37, 1990.
 41. Scheinin, A. and Kantola, S. : Laser induced effect on tooth structure. I. Crater production with a CO₂ laser. *Acta. Odontol. Scand.*, 27 : 173, 1968.
 42. Severin, C., Maquin, M. : Argon laser beam as composite resin photocuring agent : Proposed clinical solution & results. Presentation at the 1st Int'l Congress of laser in dentistry, Tokyo, 6-3/51, 1988.
 43. Shoji, S., Nakamura, M., and Horuchi, H. : Histological changes in dental pulps irradiated by CO₂ laser, A preliminary report in laser pulpotomy, *J. Endo.*, 11 : 379, 1985.
 44. Shoji, S. and Horiuchi, H. : Historical changes of dental pulp of rats after irradiation by argon. Presentation at the 1st Int'l Congress of Laser in dentistry, 6-5/53, 1988.
 45. Shoji, S. : 레이저와 충전물 변연. 레이저의 치과에서의 임상응용과 그 기초. Tokyo Quintessence, 213-218, 1989.
 46. Stern, R. H., and Sognaes, R. F. : Laser beam effect on dental hard tissues. *J. Dent. Res.* 43 : 873, 1964.
 47. Stern, R. H. and Sognaes, R. F. : Laser effect on resistance of human dental enamel to demineralization in vitro. *J. Sol Calif. Dent. Assoc.* 33 : 328, 1965.
 48. Stewart, L., Powell, G. L., and Wright, S. : Hydroxiapatite attached by laser : A potential sealant for pits and fissures. *Oper. Dent.* 10 : 2, 1985.
 49. Suzuki, J., Kayano, T., and Yamamoto, H. : In-vitro study of the melanin depigmentation by irradiation with Argonion laser. Presentation at the 1st Int's Congress of laser in dentistry. 1-8/28, 1988.
 50. Suzuki, S. : Studies on the visible light cured resins. - measurement of the wavelength sphere of activator light and the cured region and the surface hardness of materials polymerized. *Japan J. Conservative Dent.* 24 : 109-123, 1981.
 51. Takahara, M. et al. : 상아질 지각과민증의 치료에 응용한 저출력 레이저의 효과 판정법. *치계 전망*, 73-485, 1989.
 52. Taylor, R. et al. : The effects of laser radiation on teeth, dental pulp, and oral mucosa of experimental animals, O. S., O. M., and O. P. 19 : 786-795, 1965.
 53. Tirtha, R., Fan, P. L., Dennison, J. B. and Powers, J. M. : Invitro depth of cure of photo-activated composites, *J. Dent. Res.* 61 : 1184, 1982.
 54. Weichman, J. A., and Johnson, F. M. : Laser use in endodontics. *Oral Surg.*, 31 : 416, 1971.
 55. Weichman, J. A., Johnson, F. M., and Nitta, L. K. : Laser use in endodontics. *Oral Surg.* 34 : 828, 1972.

56. Yamamoto, M., and Ooya, K. : Potential of yttrium - aluminium - garnet laser in caries prevention. J. Oral Path., 3 : 7, 1974.
57. Yamamoto, H. and Sato, K. : Prevention of dental caries by acousto - optically Q - switched Nd : YAG laser irradiation. J. Dent. Res., 59 : 137, 1980.
58. Yoshida, K., Kakami, K., and Fukaya, M. : Nd : YAG 레이저의 구강 영역에서의 응용(3), 치계 전망, 73 : 1551, 1989.
59. 김경남 : 레이저가 치과주조용 비귀금속 합금에 미치는 영향에 관한 실험적 연구. 대한치과 의사협회지, 22 : 781, 1984.
60. 김성욱 : 치과용 레진의 시치열 분석. 대한치과기재학회지, 16 : 33, 1989.
61. 김순주 : CO₂ 레이저 조사가 법랑질의 내산성 변화에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한소아치과학회지, 12 : 9, 1985.
62. 김재찬 : 폼포깃트 레진의 물성에 관한 비교연구. 대한치과기재학회지, 17 : 169, 1990.
63. 김희중 : CO₂ laser 조사가 성견 치수에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대한치과보존학회지, 13 : 7, 1988.
64. 박연홍 : 구치부용 복합 레진 가열시 물리적 성질의 변화에 관한 실험적 연구, 대한치과보존학회지, 14 : 41-54, 1989.
65. 박진훈 : 치과용 복합레진의 파괴인성에 관한 실험적 연구, 대한치과보존학회지, 15 : 17, 1990.
66. 방상훈 : 가시광선의 치질 투과후 복합 레진 경도에 미치는 영향에 관한 연구, 대한치과보존학회지, 12 : 85-93, 1986.
67. 이병중 : 광중합 레진의 경도 측정에 관한 연구, 대한치과보존학회지, 14 : 179-187, 1989.
68. 이종만 : CO₂ 레이저 조사에 따른 치수강내 온도 변화에 관한 실험적 연구. 대한치과보존학회지, 10 : 43, 1984.
69. 이채경 : 가시광선의 파장과 광도가 광중합형 복합 레진의 경화에 미치는 영향, 대한치과보존학회지, 14 : 149-159, 1989.
70. 정세준 : 가시광선이 복합레진의 경화에 미치는 효과에 관한 연구, 대한치과보존학회지, 10 : 145, 1984.

--Abstract--

AN INVESTIGATION ON THE CHARACTERIZATION OF COMPOSITE RESIN POLYMERIZED BY THE USE OF AN ARGON ION LASER

Hyung - Kyung Cho, D. D. S., M. S. D., Chung - Suck Lee, D. D. S., Ph. D.

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University

An experimental investigation of the physical properties of light curing composite resin P-50 was performed, in which an argon ion laser beam was irradiated. The physical and mechanical properties of laser polymerized composite resin were determined by measuring the compressive strength, diametral tensile strength, curing depth and microhardness depending upon the experimental conditions such as the laser irradiation time(10sec, 20sec, 30sec) and laser power(300mW, 500mW, 1000mW).

These observations were compared with a conventional visible light curing technique. In addition, to evaluate the marginal adaptation, Class V cavity was prepared on the buccal or lingual surface of the extracted premolar and filled with P-50 light curing resin. The test samples were irradiated with both light sources so that the interface between the restoration and the tooth structure were observed under scanning electron microscope.

The most of physical and mechanical properties of the laser cured resin showed a remarkable improvement than those treated with the conventional light source, while the observations with the scanning electron microscope provided no significant difference for two polymerized sources. From the results in the experiment it appears that the potential of an argon ion laser is of important value of the use in the polymerization of composite resin.