

중합가시광 파장대에 따른 심미성 수복재의 미세경도 변화

김현철 · 조경모 · 신동훈
단국대학교 치과대학 보존학교실

ABSTRACT

MICROHARDNESS OF ESTHETIC RESTORATIVE MATERIALS CURED BY 3 TYPES OF NARROW-BANDED WAVELENGTH

Hyun-Churl Kim, Kyung-Mo Cho, Dong-Hoon Shin

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Dankook University

There are several factors affecting the effectiveness of polymerization of the esthetic restorative materials. Among those factors, the initiator, camphoroquinone has the unique characteristic, of which the light sensitivity is very dependent on the wavelength of blue light. Camphoroquinone shows the most light absorption ability in the wavelength range of 470nm. So most of clinically used light curing systems adopt this phenomenon as their polymerization mechanism. The most popular way of light curing system is standard 40 second curing. But the problem of standard curing technique shows the rapid increase of resin viscosity followed by the acceleration of polymerization and the limited resin flow, resulted in reduction of the physical property of restoration by retained stress.

The object of this study was to verify the effects of narrow banded wavelength on the microhardness of the esthetic restorative materials, a composite resin and a compomer, using filters which have peak wavelength of 430nm, 450nm, 470nm, respectively.

The results were as follows:

1. All the experimental groups showed lower hardness value than the control group.
2. In DyractAP, the hardness value by wavelength showed the same changing pattern on both upper and lower surfaces.
3. In DenFil, the hardness value by wavelength showed different changing pattern on upper and lower surfaces.
4. The hardness ratio showed similar pattern to the hardness variation of lower surface, but there was no significant difference between measurement in 10 minutes and 3 days later, besides the increase of hardness value.

Key words : Microhardness, Wavelength, Polymerization, Curing

I. 서 론

과거로부터 치아의 수복을 위해 여러 가지 재료들이 사용

되어 왔으나 근래 들어 치아색상의 심미성 수복재들이 그 물성의 개선과 치질 친화적인 접착력의 증대로 인해 수복용 뿐 아니라 여러 가지 용도로 사용되고 있다. 그 중 하나인

* 본 연구는 보건복지부 보건 의료기술연구개발사업(HMP 00 B 20507 00183)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

복합레진은 치과영역에서 널리 사용되고 있으며 상온에서 빠르게 중합 경화하는 상온중합형 레진으로 그 중합양식에는 화학중합과 광중합이 있다. 광중합의 경우 오래 전부터 단량체인 methyl methacrylate의 자외선 조사에 의한 중합이 알려지고 있었다. 그러나 이러한 방식의 중합은 너무나 느린 반응속도 때문에 작업 시간상의 치명적인 결함으로 무시되었었다.

그러나 광화학의 급속한 진보로 자외선에 민감한 광중합제가 발견되고 치과영역에서는 1970년에 자외선에 민감한 benzoin methyl ether를 이용하여¹⁾ 자외선 중합형 레진이 Buonocore²⁾에 의해 개발되었고 상업용으로는 L.D. Caulk사가 예방, 충전 및 교정치료에 사용하는 일련의 자외선 중합형 레진과 자외선 조사기를 합한 NUVA system을 개발하였다³⁾. 이것이 광중합형 레진의 최초 제품이다. 그러나 자외선 자체의 피부 및 안구에 대한 유해성과 낮은 투과성 때문에 널리 보급되지는 못했다⁴⁾. 1973년에 가시광선에 민감하게 반응하여 자유기(free radical)를 생성하는 광중합제인 'camphoroquinone'이 개발되었고 이 원리를 이용하여 1979년에 가시광선 중합 레진인 'Photofil'이 개발되었으며 이에 따라 가시광선 중합형 레진의 개발로 점차 자외선 중합레진은 사라지게 되었다.

광중합형 레진에 빛을 조사하면 camphoroquinone은 파장 410~500nm 영역의 가시광선을 흡수하여 활성화되고, 환원제와 작용하여 자유기를 발생시킨다⁵⁾. 이 자유기에 의해 단량체가 부가 중합되고 레진이 경화된다. 단량체는 주축(main chain)을 이루는 이중결합을 2개 이상 갖고 있으므로 중합하여 얻은 다량체(polymer)는 고밀도로 연결된 3차원 그물구조의 단단하고 강한 레진 기질(matrix)을 형성한다.

현재 임상적으로 시도되고 있는 중합방법으로는 통법의 40초 중합법(standard 40 second curing), 완속 기시 중합법(slow start), 맥동형 중합법(pulsed curing), 급속 중합법(fast curing) 등⁶⁾이 있다. 그러나 임상적으로 가장 널리 쓰이는 통법의 중합법의 문제점으로는 최대 광도로 연속 40초간 광조사시 레진 점도의 급속한 증가로 인해 중합속도가 가속화되어 응력을 상쇄할 수 있는 레진의 흐름성(flow)이 저하되므로 잔존 응력이 상존하게 되고 이에 따라 수복물의 물성이 저하된다는 점이 있다⁷⁾.

따라서 기존 중합법의 개선을 위해 Rueggeberg 등⁸⁾은 5분 이상 맥동형으로 중합하고 휴지기를 부여하는(pulse cure and relaxation) 방법을 추천하였고 Goracci 등⁹⁾은 4분에 걸쳐 광원을 점차 가깝게 위치시킴으로써 광도의 변화를 꾀한 결과, 치질 내에 균열선도 없었으며 접착면이 완벽하였다고 보고하였다. 또한 Mehl 등¹⁰⁾은 초기에 56~70%를 중합시키고 이후 40초간 100%로 중합(postcure)시킴으로써 우수한 봉쇄와 물성의 저하가 없었다고 하였으며

Burgess 등¹¹⁾은 2 phase curing을 통해 우수한 변연 적합도를 얻을 수 있었다고 보고하였다. 이러한 방법들은 camphoroquinone의 흡광도가 470nm의 파장대에서 가장 크다는 점을 이용한 것이다. 이러한 방법 이외에도 camphoroquinone의 흡광도가 각 파장대 별로 다를 수 있으며 이에 따른 파장대별 중합능 차이를 이용하여 점진적인 레진 중합을 유도하는 방법 또한 임상적으로 가치가 있으리라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 심미성 수복재의 중합도에 가시광 파장대가 미치는 영향을 측정하기 위해 정점이 430nm, 450nm, 470nm인 협폭(10nm)의 필터를 이용하여 각기 1종의 복합레진 및 콤포머를 광중합한 후 미세경도를¹²⁾ 측정한 결과 다소의 지견을 얻었기에 보고하는 바이다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

심미수복용 재료로는 복합레진인 국산 DenFil™ (VERI COM, R.O.K.)과 콤포머인 Dyract®AP (Dentsply, Germany)를 사용하였으며 색상은 공히 A3를 이용하였다.

2. 실험방법

1) 시편제작

내경 8mm, 두께 2mm의 금속주형¹³⁾을 편평한 유리판 위에 얹은 다음 각각의 재료를 주형내에 충전시키고 상면을 유리판으로 압박하였다. 이후 상면에 특수 제작된 실험용 중합기의 조사단을 위치시킨 다음 각각 정점이 430nm, 450nm, 470nm인 filter(Oriel, USA)를 통해 2분간 중합시켰고 대조군의 중합에는 XL 2500(3M, USA)을 사용하여 40초간 중합시켰다.

2) 측정 및 통계처리

미세경도 측정은 Schimadzu microhardness tester type M(Schimadzu, Japan)을 이용하여 25gF의 하중을 시편의 상하면에 15초간 가한 다음 형성된 다이아몬드형 압흔의 길이를 측정하여 경도를 산출하였다. 상하면 각기 3부위씩 무작위로 측정한 다음 평균치를 각 면의 대표 미세경도치로 평가하였다. 측정은 두차례 실시하였다. 즉 수복재 충전 후 10분 이내와 식염수가 담긴 압용기 내에서 3일간 보관한 다음 실시하였다.

Fig. 1은 현미경 상에 나타난 형태로 압흔의 길이를 측정하는 모식도이다. 이러한 과정을 거쳐 측정된 수치를 이용하여 다음과 같은 공식에 따라 Vickers hardness와 Hardness ratio를 산출한 다음 ANOVA test로 각 군간의 유의성을 검정하였다.

$$Hv = 1854.4P/d^2$$

Hv : Vickers hardness
 P : Testing load (gf)
 d : Length of indent (μm)

$$\text{Hardness ratio} = \frac{\text{Hv of bottom surface}}{\text{Hv of top surface}}$$

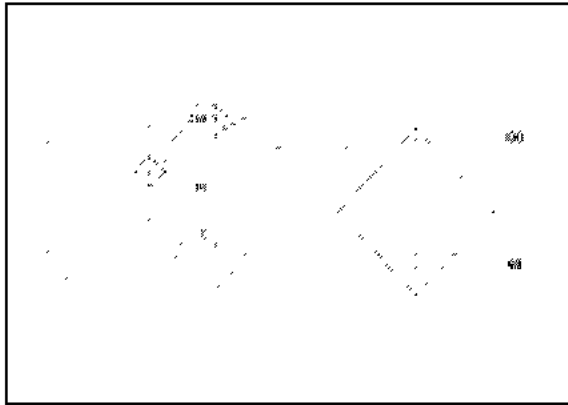


Fig. 1. Schematic drawing of checking of indent dimension.

III. 실험결과

각 군의 미세경도치는 Table 1과 같다. 시간에 따른 상면의 미세경도 변화를 보면 모든 실험군에서 DenFil과 DyractAP 각각 10분내 측정보다는 3일후 측정에서 더 높은 경도치를 보였다. 또한 DenFil이 DyractAP보다 모든 파장군에서 높은 경도치를 보였다(Table 2).

시간에 따른 경도변화를 보면 두 재료 모두에서 통계적으로 유의한 차이를 보여줌을 알 수 있다. 그러나 각 실험군별로 보면 DenFil의 경우 모든 군에서 유의하게 경도가 증가되었으나 DyractAP에 있어서는 430nm로 중합된 실험군의 경우에는 95% 신뢰도 수준에서 0.565, 450nm로 중합된 실험군의 경우에는 0.504로 약하나마 유의차가 없었다(Table 3).

또한 두 가지 재료 모두에서 상면과 하면의 경도치를 비교해 본 결과 상면의 경도치가 하면보다 통계적으로 유의하게 ($p < 0.01$) 높게 나타났다(Table 4).

DenFil의 상면에서는 430nm로 중합한 실험군을 제외한 나머지 실험군들과 XL 2500으로 중합된 대조군간에 통계

Table 1. Microhardness values of test groups (Mean (S.D.))(kg/mm²)

		Upper surface		Lower surface	
		DenFil	DyractAP	DenFil	DyractAP
Control	10 min.	52.57 (6.80)	32.22 (3.79)	45.07 (7.10)	22.09 (2.58)
	day 3	75.23 (7.09)	44.98 (5.36)	65.58 (3.76)	33.00 (3.10)
430 nm	10 min.	41.33 (3.37)	17.90 (1.67)	3.02 (0.96)	2.17 (0.46)
	day 3	49.70 (5.63)	20.42 (2.31)	5.36 (1.55)	2.85 (0.70)
450 nm	10 min.	57.66 (2.73)	31.42 (4.42)	28.53 (3.95)	11.00 (1.32)
	day 3	71.73 (4.92)	34.91 (3.38)	39.70 (3.81)	12.38 (2.20)
470 nm	10 min.	62.44 (3.03)	27.40 (3.10)	40.82 (7.95)	8.87 (2.58)
	day 3	71.98 (6.51)	32.75 (6.06)	49.60 (6.15)	10.98 (4.11)

Table 2. Microhardness values according to test time

		N	Mean		S.D.
			10 min.	day 3	
DenFil	Hardness	80	19.13	24.03	10.76
		80	19.13	24.03	14.16
		N	Mean		S.D.
			10 min.	day 3	
DyractAP	Hardness	80	41.43	53.61	18.38
		80	41.43	53.61	22.57

Table 3. Microhardness values according to wavelengths

Group		10min.	day3	Significance (95%)
DenFil	Control	48.82	70.41	0.000
	430nm	22.18	27.53	0.000
	450nm	43.09	55.71	0.000
	470nm	51.63	60.79	0.000
DyractAP	Control	27.15	39.99	0.000
	430nm	10.04	11.63	0.565
	450nm	21.21	23.65	0.504
	470nm	18.14	21.87	0.000

Table 4. Microhardness values of upper and lower surfaces

			N	Mean	S.D.
DenFil	Hardness	upper	80	60.33	12.50
		lower	80	34.71	20.83
			N	Mean	S.D.
DyractAP	Hardness	upper	80	30.25	8.88
		lower	80	12.92	9.88

Table 6. Statistical difference of the lower surface of DenFil

Group	N	Subset for alpha-0.05			
		1	2	3	4
430nm	20	4.19			
450nm	20		34.11		
470nm	20			45.21	
control	20				55.33
Significance		1.000	1.000	1.000	1.000

Table 8. Statistical difference of the lower surface of DyractAP

Group	N	Subset for alpha-0.05		
		1	2	3
430nm	20	2.51		
470nm	20		9.92	
450nm	20		11.69	
control	20			27.54
Significance		1.000	0.524	1.000

Table 10. Hardness ratio and statistical difference of DenFil

Group	N	Subset for alpha-0.05			
		1	2	3	4
430nm	20	0.09			
450nm	20		0.53		
470nm	20			0.67	
control	20				0.87
Significance		1.000	1.000	1.000	1.000

적으로 유의한 차이가 없을 정도의 미세 경도치를 보였다 (Table 5). 그러나 하면에서는 대조군이 가장 높았고 470 nm, 450nm, 430nm 순으로 경도치가 낮았으며 모든 군간

Table 5. Statistical difference of the upper surface of DenFil

Group	N	Subset for alpha-0.05	
		1	2
430nm	20	45.52	
control	20		63.90
450nm	20		64.69
470nm	20		67.21
Significance		1.000	0.729

Table 7. Statistical difference of the upper surface of DyractAP

Group	N	Subset for alpha-0.05		
		1	2	3
430nm	20	19.16		
470nm	20		30.08	
450nm	20		33.17	
control	20			38.60
Significance		1.000	0.357	1.000

Table 9. Hardness ratio between upper and lower surfaces

		DenFil	DyractAP
Control	10min.	0.86(0.08)	0.69(0.09)
	day 3	0.88(0.06)	0.74(0.11)
430nm	10 min.	0.07(0.03)	0.12(0.02)
	day 3	0.11(0.04)	0.14(0.03)
450nm	10 min.	0.50(0.07)	0.36(0.07)
	day 3	0.55(0.06)	0.36(0.06)
470nm	10min.	0.65(0.12)	0.32(0.07)
	day 3	0.69(0.10)	0.33(0.07)

Table 11. Hardness ratio and statistical difference of DyractAP

Group	N	Subset for alpha-0.05		
		1	2	3
430nm	20	0.13		
470nm	20		0.32	
450nm	20		0.36	
control	20			0.72
Significance		1.000	0.512	1.000

에 유의차가 ($p < 0.01$) 있었다 (Table 6).

DyractAP의 상면에서는 DenFil의 상면과는 달리 모든 실험 파장군이 대조군에 비해 유의하게 ($p < 0.01$) 낮은 경도

치를 보였다(Table 7). 또한 하면에서도 상면과 유사한 결과를 보여주었다(Table 8). DyractAP에서는 상하면 공히 대조군의 경도치가 가장 높았으며 470nm군과 450nm군이 중간 경도치를, 430nm군이 가장 낮은 경도치를 보였다.

상면에 대한 하면의 경도치 비율인 경도비(Hardness ratio)는 두 재료 모두에서 대조군이 가장 우수하였으며 파장이 증가함에 따라 경도비가 증가함을 보였다(Table 9). 경도비는 각 재료 하면의 경도치 변화와 유사한 양태를 보였다. 즉 DenFil에 있어서는 시간에 따른 차이가 없었으나 파장별 실험군간에는 430nm, 450nm, 470nm, 대조군의 순으로 유의한 차이가 있었다(Table 10). DyractAP의 경우도 시간에 따른 차이는 없었으나 파장별 실험군에서는 430nm군이 가장 낮았고 470nm의 군과 450nm의 군이 유사하게 나타났으며 대조군의 경도비가 가장 크게 나타났다(Table 11).

IV. 총괄 및 고안

근간의 연구에 따르면 기존의 중합법, 즉 최대의 광도로 40초간 연속적으로 중합시키는 것은 중합 초기 수초 내에 다량의 자유기를 만들어 내어 레진 경화를 일으킨다. 이러한 다량 중합 방식은 반응시 열을 발생시켜 중합 속도를 더욱 가속화시키며 이에 의해 레진 점도가 급격히 증가하는 겔 효과(gel effect)를 만드므로 레진 수축 응력을 상쇄시키기 위한 레진의 흐름성(flow)이 일어날 여지를 빼앗아 버리므로 수복물이 치질과의 접착면에서 떨어져 나오거나 수복물내에 잔존 응력으로 남아 종국에는 수복물의 물성을 떨어뜨리는 역할을 하게 한다는 문제를 보이고 있다¹⁴.

이를 보완하고자 빛의 강도(광도)와 초기 중합 시간을 줄인 다음 5분간 방치하여 응력이 제거될 수 있는 시간적 여유를 부여하고 최종 중합시 최대의 광도로 재중합시키는 맥동형 중합법(pulse cure and relaxation)¹⁵이 제안된 바도 있으나 이는 치료시간이 길어지는 단점이 있다. 또 다른 방식으로는 Goracci 등¹⁶이 레진의 중합 속도는 광도에 비례하며 광원과의 거리에 반비례한다는 사실에 착안하여 광원을 수복물에서 멀리 위치시킨 채 조사하기 시작하여 4분에 걸쳐 점차 가깝게 위치시키면서 중합시킨 결과, 치질 내에 균열선도 없었으며 접착면이 완벽하였다고 보고한 바도 있다. 이러한 접근법들의 공통점은 초기 중합을 현재와 같은 최대의 광도로 시작하는 것이 아니라 상당량 줄여 짧은 시간에 행함으로써 생길 수 있는 초기 수축 응력을 피하려 했다는 점이다.

이러한 인식에 기초하여 본 연구에서는 파장대별로 레진 중합 개시제인 camphoroquinone의 흡광도가 다를 수 있으며 그에 따른 파장대별 중합능 차이를 이용하여 점진적인 레진의 중합을 유도하는 방법 또한 임상적으로 의미가

있을 것으로 생각하여 심미성 수복재들의 가시광 파장대에 따른 중합도를 미세 경도 실험을 실시함으로써 그 경향을 알아보려고 하였다.

복합 레진의 경화는 자유기 형성에 따른 연쇄 중합 반응에 의해 경화되며 그 과정은 중합 개시제인 camphoroquinone에 의해 개시된다. Nomoto 등¹⁷에 의하면 camphoroquinone의 흡수 스펙트럼 정점이 470nm이며 이 부위에서 중합도가 높다 하였다. 본 연구 결과에서도 대조군이 모든 파장 실험군보다 높은 경도치를 보였다. Blankenau 등¹⁸은 대부분의 상업화된 광조사기는 475~490nm의 최대 파장영역을 가진 광폭의 파장대를 사용하고 있음을 보고하였다. 이에 비추어 생각해 보면 본 연구에서 사용된 실험 파장군들은 협폭의 파장대를 사용했으므로 중합능이 상대적으로 작았다고 생각된다. 또한 Nomoto 등¹⁷에 의하면 중합정도는 빛의 파장뿐 아니라 피사된 에너지(exposure energy)에 의해서도 영향을 받으므로 이러한 결과가 나오지 않았나 생각된다.

본 연구에서는 모든 군에서 상하면 모두 3일 후 경도치가 증가하였으나¹⁹ 430nm 및 450nm로 중합된 DyractAP의 경우에는 약하나마 유의차가 없었다. 이는 이 파장대에서는 중합 여력이 충분하지 못한 것이 그 이유이라 생각된다. 따라서 중합도가 너무 작음으로 인해 미세한 경도변화를 측정하기에는 사용된 측정법이 적절치 못한 것은 아닌가라는 점도 생각해 볼 수 있으며 이 외에도 시료 경화의 마지막 단계(termination stage)가 너무 빠르게 완료되는 것이 아닌 가라는 의문도 제기해 볼 수 있겠다. 또한 Bryant²⁰, Yap 등²¹에 의하면 심미성 수복재의 성분 또한 중합도를 결정하는 주요 요소 중 하나라고 보고된 바 있어 복합 레진과의 구성성분 차이로 인한 결과가 아닌가 생각된다.

DenFil의 경우 파장별 경도치가 상면과 하면에서 다른 유형을 보였다. 상면에서는 430nm를 제외한 모든 군간에 유의차가 없었던 반면, 하면에서는 모든 군간에 유의차를 보였다. 표면에서는 중합능이 크게 떨어지지 않는 파장이 아닌 이상 중합 시간을 늘이면 협폭의 파장이라도 유사한 중합을 일으킬 수 있으나 하면까지는 통과되는 광량이 적어므로 중합능의 차이가 현저하게 떨어진다. 이러한 결과는 임상치료시 표면의 경도로 수복물 전체의 중합을 가늠할 수 없다는 것을 반증해 주는 것이다²². Rueggeberg 등²³에 의하면 2mm 이상의 깊이의 레진에 있어서는 필러(filler)의 형태나 색상(shade)보다는 빛의 광도(intensity)와 중합시간(duration)에 의해 영향을 받는다고 보고하였는 바, 본 연구의 결과에 대한 설명으로 간주할 수 있겠다.

반면 DyractAP의 경우 파장별 경도치가 상면과 하면에서 같은 유형을 보였다. 즉 DenFil과 달리 상하면 모두에서 대조군에 비해 유의한 차를 보였다. 이는 재료 자체의 성분 차이, 중합 개시제의 농도, 필러 입자의 형태, 크기, 및 양

(quantity)과의 연관성 때문으로 생각된다.

경도비는 하면의 경도치 변화와 유사한 양태를 보였으나 3일 후 경도치가 증가한 양상과는 달리 10분내 측정과 3일 후 측정간에 유의차가 없었는데 이는 경도비란 상면에 대한 하면의 경도치 비율이므로 하면 변화와 유사하지만 상하면 공히 증가하므로 비율은 유의차가 없는 것으로 사료된다.

심미성 수복재의 협폭의 파장대별 중합 정도를 살펴본 본 연구의 결과로는 협폭의 430nm, 450nm, 470nm, 광폭의 대조군 순으로 중합 능력이 크게 나타났다. 이 같은 성질을 이용하면 단파장대에서 시작하여 장파장대에서 중합을 마무리하는 방식의 중합 방법 또한 기존의 중합 방법으로 인한 레진 점도의 급속한 증가를 막아 수복물의 수명을 증가시킬 것으로 생각되나 파장의 인위적 조절 방법 및 보다 적절한 재료에 대해 보다 많은 연구가 선행되어야 한다고 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 협폭 파장대의 가시광선이 심미성 수복재인 DenFil과 DyractAP의 중합에 어떠한 영향을 미치는 가를 알아보고자 430nm, 450nm, 470nm 각 파장대별로 10개씩의 시편을 광중합하고 대조군으로는 XL 2500을 사용하여 광중합한 후 Schimadzu microhardness tester type M을 이용하여 중합 후 10분 이내와 100% humidity, 압용기 내에서 3일간 보관 후 미세경도를 측정하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대조군에 비해 모든 파장실험군에서 낮은 경도치를 보였다.
2. 모든 군에서 상,하면 모두 3일 후 경도치가 증가하였으나 430nm 및 450nm로 중합된 DyractAP는 약하나마 유의차가 없었다.
3. DenFil의 경우 파장별 경도치가 상면과 하면에서 다른 유형을 보였다.

상면에서는 430nm를 제외한 나머지 군간에 유의차가 없었던 반면, 하면에서는 모든 군간에 유의차를 보였다 (p<0.01).

4. DyractAP의 경우 파장별 경도치가 상면과 하면에서 같은 유형을 보였다. 즉, DenFil과 달리 상하면 모두에서 대조군에 비해 유의한 차이를 보였다 (p<0.01).
5. 경도비는 하면의 경도치 변화와 유사한 양태를 보였으나 3일 후 경도치가 증가한 양상과는 달리 10분내 측정과 3일 후 측정간에 유의차가 없었다.

이 같은 성질을 이용하면 단파장대에서 시작하여 장파장대에서 중합을 마무리하는 방식의 중합 방법 또한 통법의 중합법으로 인한 레진 점도의 급속한 증가를 막아 수복물의 수명을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Rock WP: The use of ultraviolet radiation in dentistry, Br Dent J 136:455 458, 1974.
2. Buonocore MG: Adhesive sealing of pits and fissures for caries prevention with use of ultraviolet light, JADA 80:324 328, 1970.
3. Lutz F: The Caulk Nuva system a breakthrough? Schweiz Monatsschr Zahnheilkd, Oct;83(10):1151 62, 1973.
4. Council on Dental Materials, instruments, and equipment: Visible light cured composites and activating units, JADA 110(1):100 103, 1985.
5. Cook WD: Spectral distribution of dental photopolymerizing sources, J Dent Res 61(12):1436 1438, 1982.
6. Suh BI, Cripe CA and Yin R: Light intensity and exposure time effects on light cured composites, J Dent Res 77:Special issue B, (Abst. #73) 1998.
7. Carvalho RM, pereira JC, Yoshiyama M and Pashley DH: A review of polymerization contraction: the incidence of stress development versus stress relief, Oper Dent 21(1):17 24, 1996.
8. Rugeberg FA: Factors affecting light transmission of single use, plastic light curing tips, Oper Dent Jul 23(4):145 152, 1998.
9. Goracci G and Mori G: Esthetic and functional reproduction of occlusal morphology with composite resins, Compend Contin Educ Dent Jul; 20(7):643 648, 1999.
10. Mehl A, Hickel R and Kunzelmann KH: Physical properties and gap formation of light cured composites with and without soft start polymerization, J Dent May;25(3):321 330, 1997.
11. Burgess JO, DeGoes M, Walker R and Ripps AH: An evaluation of four light curing units comparing soft and hard curing, Pract Periodont Aesthet Dent Jan; 11(1):125 132, 1999.
12. Rugeberg FA and Craig RG: Correlation of parameters used to estimate monomer conversion in a light cured composite, J Dent Res 67(6):932 937, 1988.
13. Pires JA, Cvitko E, Denehy GE and Swift Jr EJ: Effects of curing tip distance on light intensity and composite resin microhardness, Quintessence Int 24(7):517 521, 1993.
14. Sakaguchi RL, Sasik CT, Bunczak MA and Douglas WH: Strain gauge method for measuring polymerization contraction of composite restoratives, J Dent Oct;19(5):312 326, 1991.
15. Kanca Jr III and Suh BI: Pulse activation: reducing resin based composite contraction stresses at the enamel cavosurface margins, Am J Dent Jun;12(3): 107 112, 1999.
16. Goracci G: Curing light intensity and marginal leakage of resin composite restorations, Quintessence Int 27:355 362, 1996.
17. Nomoto R: Effect of light wavelength on polymerization of light cured resins, Dent Mater Jun 16(1):60 73, 1997.
18. Blankenau EK: Wavelength and intensity of systems for visible light curing composite resins: a comparison study, JADA 106(4):471 474, 1983.
19. Leung RL: Post irradiation polymerization of visible light activated composite resin, J Dent Res 62(3):363 365, 1983.
20. Bryant R: Some principles in the selection and use of

- some tooth coloured materials and techniques 1998, Ann R Australas Coll Dent Surg Oct;14:86-93, 1998.
21. Yap AUJ: Polymerization shrinkage of visible light cured composites, Oper Dent 25:113-120, 2000.
22. Rugeberg FA: Factors affecting cure at depths within light activated composite resins, Am J Dent 6:91-95, 1993.
23. Rugeberg FA: Effect of light tip distance on polymerization of resin composite, Int J Prosthodont 6:364-370, 1993.