

복합 레진의 간헐적 광중합 방법이 중합 수축 속도와 치아의 교두 변위에 미치는 영향

김민경 · 박성호 · 서덕규 · 송윤정 · 이 윤 · 이찬영*

연세대학교 치과대학 치과보존학교실

ABSTRACT

EFFECT OF INTERMITTENT POLYMERIZATION ON THE RATE OF POLYMERIZATION SHRINKAGE AND CUSPAL DEFLECTION IN COMPOSITE RESIN

Min Kyung Kim, Sung Ho Park, Deog Gyu Seo, Yun Jung Song, Yoon Lee, Chan Young Lee*

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University

This study investigated the effect of intermittent polymerization on the rate of polymerization shrinkage and cuspal deflection in composite resins.

The linear polymerization shrinkage of each composite was measured using the custom-made linometer along with the light shutter specially devised to block the light at the previously determined interval. Samples were divided into 4 groups by light curing method: Group 1) continuous light (60s with light on); Group 2) intermittent light (cycles of 3s with 2s light on & 1s with light off for 90s); Group 3) intermittent light (cycles of 2s with 1s light on & 1s with light off for 120s); Group 4) intermittent light (cycles of 3s with 1s light on & 2s with light off for 180s). The amount of linear polymerization shrinkage was measured and its maximum rate (Rmax) and peak time (PT) in the first 15 seconds were calculated. For the measurement of cuspal deflection of teeth, MOD cavities were prepared in 10 extracted maxillary premolars. Reduction in the intercuspal distance was measured by the custom-made cuspal deflection measuring machine. ANOVA analysis was used for the comparison of the light curing groups and t-test was used to determine significant difference between the composite resins.

Pyramid showed the greater amount of polymerization shrinkage than Heliomolar ($p < 0.05$). There was no significant difference in the linear polymerization shrinkage among the groups. The Rmax was group 4 $<$ 3, 2 $<$ 1 in Heliomolar and group 3 $<$ 4 $<$ 2, 1 in Pyramid ($p < 0.05$). Pyramid demonstrated greater cuspal deflection than Heliomolar. The cuspal deflection in Heliomolar was group 4 $<$ 3 $<$ 2, 1 and group 4, 3 $<$ 2, 1 in Pyramid ($p < 0.05$).

It was concluded that the reduced rate of polymerization shrinkage by intermittent polymerization can help to decrease the cuspal deflection. [J Kor Acad Cons Dent 33(4):341-351, 2008]

Key words: Intermittent polymerization, Rate of polymerization shrinkage, Cuspal deflection, Composite resin

* Corresponding Author: **Chan Young Lee**

Department of Conservative Dentistry,
College of Dentistry, Yonsei University
134 Shinchon-Dong, Seodaemun-Ku, Seoul, 120-752, Korea
Tel: 82-2-2228-8700 Fax: 82-2-313-7575
E-mail: chanyoungl@yuhs.ac

- Received 2008.4.22., revised 2008.5.15.,
accepted 2008.5.20.-

I. 서 론

현대 치의학에서 광중합형 복합 레진은 탁월한 심미성과 치질 접착성을 가짐과 동시에 아말감이나 세라믹에 비견할 만한 물성으로 치아의 수복재로써 널리 사용되고 있다. 그러나 광범위하게 증가된 임상적 사용에도 불구하고 저작에 대한 부적절한 마모저항성과 중합 수축 등으로 복합 레진은 그 적용이 제한될 수 밖에 없다.

광중합 복합 레진에 있어서 중합 수축은 주로 단량체가 van der Waals distance에 위치해 있다가 covalent distance내로 움직여 중합체가 되면서 일어나고 레진 종류에 따라 선형수축은 0.2 ~ 2% 그리고 부피수축은 1.7 ~ 5.7% 범위에서 일어난다¹⁾.

이런 중합 수축으로 인해 변연부 누출이나 치아에 발생하는 응력 등의 문제점이 생기는데^{2,3)} 이런 응력은 수축량, 수축 속도, 레진의 탄성률, 중합 초기의 레진의 흐름성, 중합의 속도 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁴⁾.

Bouschlicher와 Rueggeberg⁵⁾는 급속한 중합반응(rapid conversion)으로 인해 중합 수축 속도가 상승하면 치아-수복물 계면의 접착의 소실이 일어날 수 있다고 하였고, 결과적으로 이런 계면에 형성된 미세간극(interfacial gap)은 수복물의 변색, 변연 누출, 술 후 민감성, 그리고 이차우식증의 원인이 된다^{6,7)}. 반면, 이 접착 계면이 완전하게 유지된다면 수축력이 주변 치아구조에 stress를 전달하고⁸⁾, 수복물의 c-factor에 따라 치아의 파절을 발생시킬 가능성이 있다⁹⁾. 또한 수복물과 치아 사이의 문제 이외에 수복물 자체에도 미세 균열이 생겨 결국 수복물의 마모도가 증가되기도 한다¹⁰⁾.

Sakaguchi 등¹¹⁾에 의하면 중합 수축의 속도는 중합 반응의 초기 30 - 40초 내에 가장 높게 나타난다고 하였다. 중합 초기의 수축 속도가 중요한 이유는 중합의 초기에 접착 계면의 유지가 급격하게 영향을 받기 때문이며 더불어 치아와 수복물에서 초기에 발생하는 stress는 접착의 상실과 파절을 일으킬 수 있으므로 이런 초기의 stress를 감소시키는 것이 중요하다고 할 수 있으나 이에 대한 정확한 이론은 정립되어 있지 않은 상태이다.

지금까지 복합 레진의 중합 반응 속도를 측정하는 방법으로, 시차주사열계량법(differential scanning calorimetry, DSC)을 비롯한 열 분석법, 푸리에변환 적외선분광분석법(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 그리고 체적측정법(mercury dilatometer or water dilatometer) 등을 이용해 왔다. 그러나 열 분석법은 발열률(heat flow rate, dH/dt)을 얻는 과정에서 열전도에 소요되는 시간지연을 피할 수 없고, FTIR은 spectrum의 적정한 해상도를 얻기 위해 긴 시간이 소요되어, 수 초 내에

급격하게 이루어지는 광중합 레진의 초기중합연구에서 그 한계를 지니고 있다^{12,13)}. 또 체적측정법의 경우 매우 번거로운 작업을 필요로 하고 온도 변화에 민감한 단점이 있다.

Linometer는 시편의 양과, 시편부와 디스크 사이의 윤활 상태 등에 의하여 영향을 받지만, 매우 간편하면서도 실용적인 방법으로서, 주위 환경에 영향을 비교적 덜 받으면서 임상과 관련된 여러 가지 실용적인 연구들을 할 수 있는 장점이 있다¹⁴⁾. 특히 중합 초기에 급격히 일어나는 수축 속도는 distance-time graph에서 직선으로 나타나고, 이 경사도가 평균 속도이므로 중합 주기를 달리하여 나타나는 수축 속도의 변화를 쉽게 분석할 수 있다¹⁵⁾.

중합 수축의 속도에 영향을 주는 요인으로는 광중합 방법, 단량체의 조성 및 농도, 중합개시제의 종류와 농도 그리고 filler의 함량 등으로 알려져 있다. 지금까지 저광도 중합법^{16,17)}, Soft-start curing^{18,19)}, Ramped light curing^{20,21,5)} 그리고 Pulse-delay cure technique⁹⁾ 등 다수의 연구자들에 의해 광조사 강도와 시간을 조절하여 중합 수축의 속도를 감소시키기 위한 시도가 있었으나, 다양한 중합 주기를 이용한 간헐적 중합방법에 관한 연구는 미미한 실정임으로 이에 관하여 구체적인 연구가 필요하다.

또한 중합 수축의 속도를 감소시키기 위한 광조사 방법들은 복합 레진의 중합도와 경도를 감소시킬 가능성이 있으며, 이런 방식으로 중합된 복합 레진의 물리적 성질에 대해 여러 이견이 존재한다. 복합 레진의 물리적 성질은 단량체의 전환율과 밀접한 관련성을 가지고 있는데, 미세경도를 측정해 봄으로써 중합도와 중합 깊이를 확인할 수 있으며 중합 수축 속도가 물리적 성질에 미치는 효과를 적절하게 평가할 수 있다²²⁾.

이 등²³⁾이 시행한 광중합형 수복 재료의 중합 수축력과 치아에 수복한 후 나타난 교두 변위 양의 상관관계를 알아본 실험에서 두 측정값에는 상관관계가 없다고 보고하였으나, 같은 연구 재료를 사용한 박 등¹⁴⁾의 실험과 연관 지어 유추해 보면 선 수축량과 교두 변위 사이에는 비례 관계가 성립됨을 알 수 있다. 대부분의 교두의 이동은 중합 후 처음 15분 내에 일어나게 되는데²⁴⁾, 중합의 초기에 수축 속도를 감소시켰을 때 교두 변위가 어떤 영향을 받을 것인지에 대해서는 아직까지 심도 있는 연구가 부족하다.

이에 저자는 광중합 복합 레진을 이번 실험을 위해 자체 제작한 광조사 차단장치를 이용하여 간헐적으로 광중합시켜 기존의 연속 광중합법과 비교함으로써 중합 수축 속도의 변화를 알아보고 중합 속도가 미치는 교두 변위에 대한 영향을 평가, 분석하여 다음의 결과를 보고하는 바이다.

II. 연구재료 및 방법

1. 연구재료

본 실험에는 A2 shade의 2가지 광중합 복합 레진을 사용하였다 (Table 1).

2. 연구방법

가. 중합 수축 측정

(1) Linometer를 이용한 중합 수축량 측정

직경이 4.5 mm이고 깊이가 1.3 mm인 원주형의 몰드에 복합 레진을 적용하여 동일한 양의 레진 시편을 제작하였다. 시편과의 접촉을 방지하기 위해 glycerin gel을 금속디스크와 slide glass위에 얇게 도포한 다음 중합 수축을 측정하기 위해 자체 제작한 Linometer (R&B Inc., Daejeon, Korea)¹⁴⁾의 금속디스크 위에 레진 시편을 위치시키고 slide glass를 덮었다.

Slide glass 상부에 이번 실험을 위해 자체 제작한 광조사 차단장치 (R&B Inc., Daejeon, Korea)를 위치시키고 이 장치가 움직일 때 방해 받지 않는 한도 내에서 최대한 가까이 광조사기를 위치시킨 다음 각각의 중합 주기 (Table 2): (1) 연속 광중합 (60초간 계속 광조사); (2) 2초 광조사, 1초 광차단 (90초 시행); (3) 1초 광조사, 1초 광차단 (120초 시행); (4) 1초 광조사, 2초 광차단 (180초 시행)에 따라 중합시켰으며 군 별로 총에너지량이 동일하도록 중합 시간을 조절하였다. 광조사가 진행됨에 따라 복합 레진은 빛의 방향으로 수축을 하며, 복합 레진과 함께 금속디스크도 같이 이동을 하게 되는데, 디스크의 변위량을 sensor가 0.5초 ~ 0.55초 간격으로 측정하게 되며, 측정된 결과는

컴퓨터에 저장되게 된다.

광조사 차단장치는 직경 8 cm의 금속디스크에 직경 1.5 cm의 원형의 hole이 뚫려 있고, 컴퓨터와 연결되어 지시된 셔터 막 on time과 off time에 따라 수평면에서의 회전운동을 반복함으로써 광중합시 레진과 광조사기 사이에 위치시켜 원하는 주기로 중합을 할 수 있도록 제작되었다 (Figure 1).

광조사기는 Curing light XL 3000 (3M dental Product, St. Paul, MN, USA)을 사용하였고, 2종류의 레진을 각 군별로 10회 측정하였다. 광조사가 완료된 시점에서의 중합 수축량을 레진과 군 간의 비교를 위해 t-test와 1-way ANOVA를 사용하여 통계 분석하였다.

빛의 광도에 대한 monitoring은 Coltolux Light Meter (Coltene, Altstätten, Switzerland)를 이용하였고 그 수치는 650 mW/cm²였다.

(2) 중합 수축 속도

측정된 중합 수축 data를 가지고 Excel program을 이용하여 중합 시작에서부터 15초까지의 초기 중합 수축의 속도를 계산하였다. 광중합 레진의 초기 중합 수축의 속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$St = (L_{t+\Delta t} - L_{t-\Delta t}) / (T_{t+\Delta t} - T_{t-\Delta t})$$

St : Speed of polymerization shrinkage at time t

$L_{t+\Delta t}$: Amount of linear shrinkage at time $t + \Delta t$

$L_{t-\Delta t}$: Amount of linear shrinkage at time $t - \Delta t$

$T_{t+\Delta t}$: The time when $L_{t-\Delta t}$ was measured.

$T_{t-\Delta t}$: The time when $L_{t-\Delta t}$ was measured.

(Δt was 0.5-0.55s in this study)

Table 1. Restorative materials used in this study

	Manufacturer	Lot. No
Heliomolar	Ivoclar Vivadent, Liechtenstein	E54834
Pyramid	Bisco, Schaumburg, U.S.A.	100014949

Table 2. List of investigated curing methods with their curing cycles

	Curing type	Curing cycle
1	continuous	Cycles of 60s with light on & 0s with light off for 60s
2	intermittent	Cycles of 3s with 2s light on & 1s with light off for 90s
3	intermittent	Cycles of 2s with 1s light on & 1s with light off for 120s
4	intermittent	Cycles of 3s with 1s light on & 2s with light off for 180s

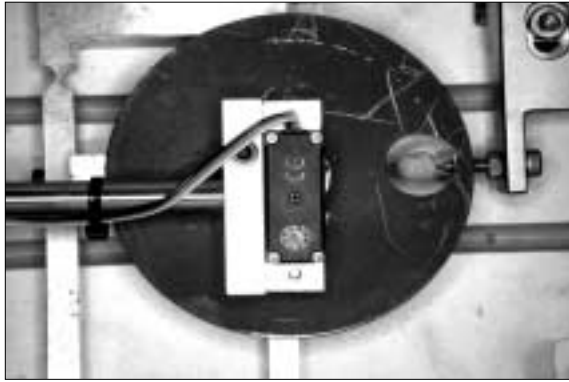


Figure 1. Upper view of the light shutter.

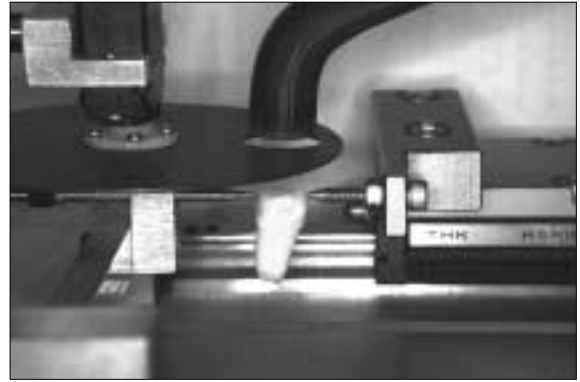


Figure 2. Close up of the cuspal deflection measuring machine, the light shutter and the curing light tip. Samples were placed between rod ends.

위의 식에 의해 중합 시 최고 속도를 보인 peak time (PT)과 중합 수축의 최고 속도 (R_{max})를 구할 수 있다. 각 군의 PT와 R_{max} 를 비교하기 위하여 95%의 신뢰도하에서 t-test와 1-way ANOVA를 사용하여 통계 분석하였다.

나. 재료 중합 시 치아의 교두 변위 측정

(1) 치아의 와동 형성

치관의 균열이나 우식이 없는 교정치료를 목적으로 발거된 건전한 상악 소구치를 생리 식염수에 보관한 후 고속 다이아몬드 바를 이용하여 해당 치아에 와동을 형성하였다. 레진으로 수복하기 전까지 습윤상태로 유지하였고, 와동의 크기는 협설 측으로 3.5 mm, 깊이 3 mm로 제2급 와동을 변형시킨 형태이다²³⁾

(2) 재료의 중합 시 치아의 교두 변위 측정

와동 형성 후 상아질 접착제는 Clearfil SE bond (Kuraray, Okayama, Japan)를 제조사의 지시대로 도포하고 광중합 하였다. 접착제를 도포한 후 와동에 복합 레진을 충전하는 과정에서 복합 레진 충전 전, 후의 치아 무게를 측정하여 충전되는 복합 레진의 무게가 0.2 g이 되도록 조정하였다. 이와 같이 복합 레진이 충전된 치아를 자체 제작된 치아 변위 측정기 (R&B Inc., Daejeon, Korea)에 위치시켰다 (Figure 2).

이번 연구에 사용된 기기는 치아의 협설 면에 접촉할 수 있는 두 개의 탐침이 장치되어 있어서 수복 재료가 중합 수축되면서 나타나는 치아의 교두 변위를 감지할 수 있도록 제작되었다. 두 개의 탐침 중 한 쪽은 고정되어 있으며 다른 쪽은 치아의 위치 변화에 따라 변할 수 있도록 제작되었

으며 탐침의 위치가 변하는 값은 이 기기에 연결되어 있는 소프트웨어를 통해 측정치로 기록되도록 하였다.

치아를 기기에 위치시킨 후 그 상태의 교두간 거리를 영점 으로 조정하였으며, 조정이 끝난 후 광조사기로 각 군 당 총 중합시간이 교합면에서 60초, 근심면에서 60초, 기계의 디자인상 원심면의 접근이 어려워 교합면에서 다시 60초간 광중합을 시행하였다. 교두 변위는 총 10분 동안 측정하였으며, 각 군에 10개의 협설 측 크기가 동일한 치아를 무작위로 분배하였다.

t-test와 1-way ANOVA를 이용하여 재료간의 차이와 각 군간의 교두 변위 값의 통계학적 유의차를 알아보았다.

Ⅲ. 결 과

1. 중합 수축량 및 중합 수축속도

두 종류의 레진을 이용하여 각 군 별 측정된 선 수축량의 결과를 Table 3에 요약하였다. Heliomolar의 선 수축량은 3군, 1군, 2군, 4군 순으로 (Figure 3) 그리고 Pyramid의 선 수축량은 2군, 3군, 4군, 1군 순으로 (Figure 4) 크게 나타났으나 군 간에 차이는 없었고 ($p > 0.05$), 레진 별로는 Pyramid가 Heliomolar보다 모든 군에서 수축량이 컸다 ($p < 0.05$).

Peak time은 Heliomolar와 Pyramid 레진 모두에서 1군, 2군, 3군, 4군 순으로 기록되었다. 즉, 두 레진 모두 최고속도를 보인 peak time은 연속광중합군인 1군이 가장 빠르게 나타났고, 4군에서 가장 늦게 나타났다 (Table 4). R_{max} 는 Heliomolar는 4군 < 3군, 2군 < 1군 순이었고 (Figure 5), Pyramid는 3군 < 4군 < 2군, 1군 순으로

Table 3. Amount of linear polymerization shrinkage (μm)

	1	2	3	4
Heliomolar	8.98 (0.51)*	9.22 (0.22)*	8.94 (0.68)*	9.32 (0.30)*
Pyramid	12.08 (0.54)	11.67 (0.26)	11.71 (0.64)	12.01 (0.56)

There is no statistical difference in all groups of the same resin. * indicates significant difference in the amount of linear polymerization shrinkage between Heliomolar and Pyramid at 95% level of confidence. Figures in the parenthesis indicate standard deviations.

Table 4. Peak time (PT) which showed the highest rate of polymerization and maximum rate of polymerization shrinkage (R_{max})

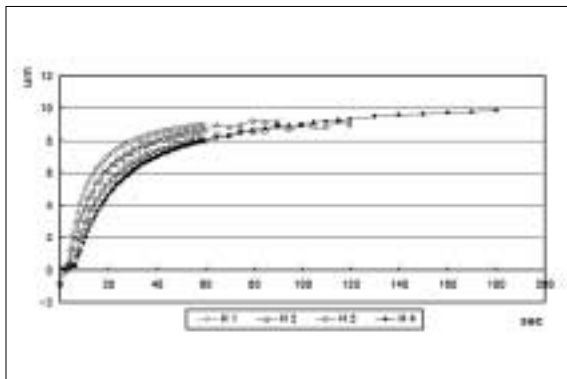
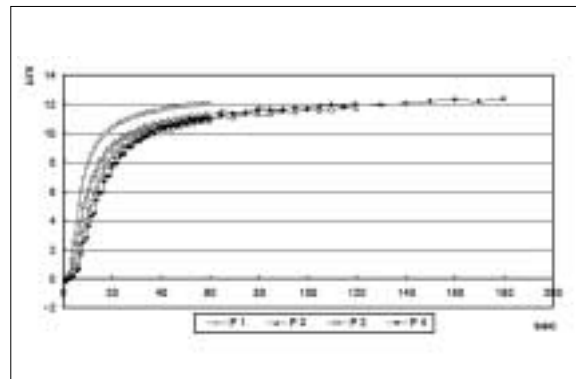
		1	2	3	4
Heliomolar	PT (sec)	3.82 (0.51)	5.50 (1.24)	7.56 (1.55)	8.06 (2.29)
	R_{max} ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	0.92 (0.09) ^a	0.74 (0.12) ^{*b}	0.74 (0.20) ^{*b}	0.60 (0.10) ^{*c}
Pyramid	PT (sec)	3.80 (0.71)	5.01 (1.37)	7.15 (1.53)	8.87 (3.16)
	R_{max} ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	1.29 (0.14) ^a	1.13 (0.08) ^a	0.89 (0.30) ^c	1.03 (0.28) ^b

Means with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ level. * indicates different maximum rate of polymerization shrinkage (R_{max}) between Heliomolar and Pyramid at 95% levels of confidence.

Table 5. Mean value of cuspal deflection at 10 min (μm)

	1	2	3	4
Heliomolar	13.06 (1.62) ^{*a}	12.16 (2.30) ^{*a}	10.93 (1.50) ^{*b}	10.08 (1.75) ^{*c}
Pyramid	19.84 (2.41) ^a	19.35 (2.09) ^a	17.04 (0.92) ^b	16.46 (1.42) ^b

Means with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ level. * indicates different the mean value of cuspal deflection between Heliomolar and Pyramid at 95% levels of confidence.


Figure 3. Change in the amount of linear polymerization shrinkage of Heliomolar versus time.

Figure 4. Change in the amount of linear polymerization shrinkage of Pyramid versus time.

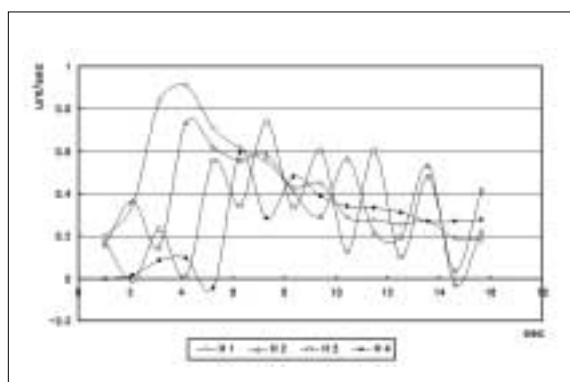


Figure 5. Change in the rate of polymerization shrinkage versus time on Heliomolar.

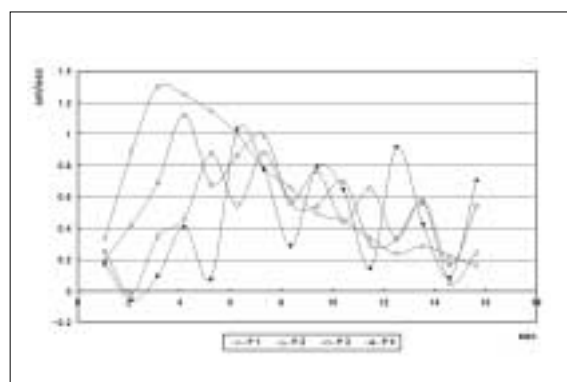


Figure 6. Change in the rate of polymerization shrinkage versus time on Pyramid.

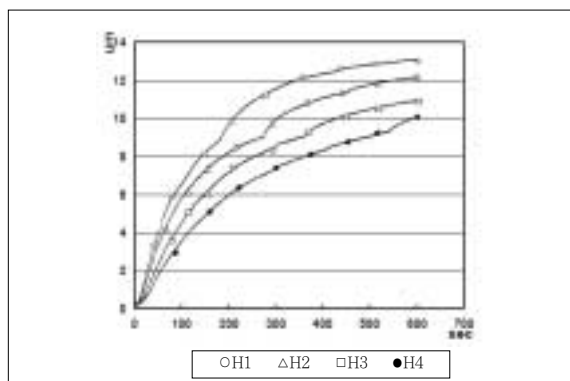


Figure 7. Change of cuspal deflection of Heliomolar versus time.

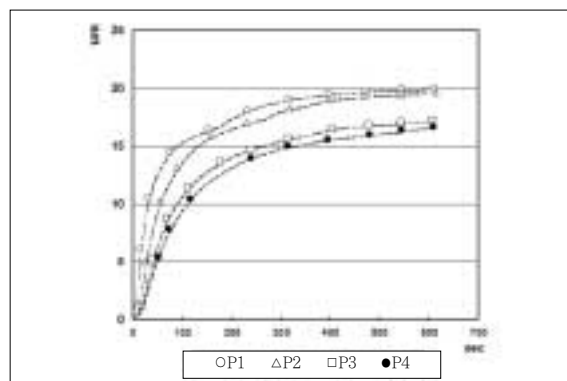


Figure 8. Change of cuspal deflection of Pyramid versus time.

(Figure 6) 측정되었다 ($p < 0.05$). 레진 간에는 Pyramid가 Heliomolar에 비해 최고속도가 더 높게 나타났다 ($p < 0.05$).

2. 치아의 교두 변위 측정

Table 5에서는 10분 후의 최종적인 교두 변위 값을 μm 단위로 정리하였다. Heliomolar는 4군 < 3군 < 2군, 1군 그리고 Pyramid는 4군, 3군 < 2군, 1군 순으로 교두변위가 크게 측정되었으며 ($p < 0.05$), Pyramid가 Heliomolar보다 교두 변위가 크게 나타났다 ($p < 0.05$).

Figure 7는 중합을 시작한 후 10분 동안 측정된 Heliomolar에서 치아의 교두 변위 양상을 나타내고 있으며, Pyramid의 교두 변위는 Figure 8에서 보여주고 있다. 두 레진 모두 간헐적 광중합 시 교두 변위의 양이 감소하였고, 연속 광중합군인 1군에 비해 간헐적 광중합 군에서 교

두 변위가 더 느린 속도로 이루어짐을 관찰할 수 있다.

IV. 고 찰

광중합 복합 레진은 많은 장점에도 불구하고 중합시 단량체의 분자간 거리가 감소함으로써 발생하는 체적의 수축에서 오는 여러 문제점들이 해결과제로 남아 있다²⁾. 중합 수축으로 인한 stress는 치아와 수복 레진 간의 결합을 파괴하거나 주변 치아 구조의 deflection을 일으키게 되고, 임상적인 문제 즉 술 후 민감성, 치아 파절 그리고 미세누출과 이차우식증 등의 원인이 되는 수복물의 변연 누출을 일으키게 된다²⁵⁾.

이러한 중합 수축이 급격하게 일어나게 되면 이로 인한 stress 발생의 문제점이 야기될 수 있고³⁾ 치아와 수복물에서 초기에 발생하는 stress는 접착의 상실과 파절을 일으키므로 이런 stress를 감소시키고자 다양한 연구들이 진행되어 왔다.

Step curing, Ramped light curing, 그리고 Pulse-delay cure technique 등 여러 연구자들에 의해 광강도와 조사시간을 다양하게 적용한 실험이 행하여졌고, Obici 등²⁶⁾은 기존의 광중합 방법과 비교하기 위하여 stepped light 과 intermittent light을 조사하는 광중합 방법을 실험하였는데 변연의 간극과 중합 수축량의 감소를 보고하였다. 한편, Alvarez-Gayosso 등¹⁾은 레진의 성분이 수축 속도에 미치는 영향을 밝힌 바 있고, Brackett 등²⁷⁾은 빠른 중합속도가 wall-to-wall contraction의 증가를 초래한다고 하였다.

지금까지 치아와 수복물에서 복합 레진의 중합 수축 속도가 미치는 영향에 대한 다수의 연구가 행하여졌으나 아직 많은 이견이 존재하고 그 기전에 대한 정확한 이해가 부족한 상태이다.

본 연구에서는 두 종류의 광중합 레진을 가지고 광조사 차단장치를 사용하여 간헐적 광중합시킴으로써 중합 수축의 속도를 감소시키고 이에 따른 교두 변위를 측정하였다.

Walls 등²⁸⁾은 중합 수축에 영향을 미치는 인자로 단량체 분자량, filler 함량, 중합의 정도 그리고 레진 자체의 특성과 중합 방식을 들었는데, 이번 실험에서 광조사가 완료된 시점에서 측정된 수축량은 군 간에 유의차를 보이지 않았다. 이는 동일한 광에너지가 조사되었으므로 같은 정도의 단량체 전환율의 적용 즉, total energy concept으로 설명할 수 있다²⁹⁻³³⁾.

이는 Feilzer 등¹⁶⁾, Unterbrink와 Muessner¹⁷⁾의 실험들과 일치하는 결과이나, Dennison 등²¹⁾, Obici 등²⁶⁾의 중합 수축 속도가 중합 수축량에 영향을 준다고 한 연구와는 상반된 것이다. 이에 대해서는 앞으로 더 많은 논의가 필요하리라 생각된다.

두 종류의 레진 간에는 유의하게 Heliomolar보다 Pyramid가 더 수축량이 크게 측정되었고, 수축 속도 역시 크게 나타났다. Heliomolar는 높은 레진 content를 함유하지만 conversion rate은 낮아서 중합 수축이 더 작게 일어나고, 성분 중에 더 이상 수축이 안 되는 중합이 이미 이루어진 particle의 형태인 것이 있다²⁴⁾. 또한 Heliomolar는 단량체가 urethane dimetacrylate (UDMA)같은 이중결합이 적은 높은 분자량의 단량체로 구성되어 있는데, UDMA는 점도는 낮추면서 높은 urethane linkage flexibility를 보이는 특유의 탄력성을 가짐으로써 탄성계수는 낮추고 중합 수축이나 수축 속도에서도 잇점을 가진다¹⁾.

Pyramid와 같은 구치부 전용 복합 레진은 물성을 증진시키기 위해 높은 함량의 filler가 포함된다. 이렇게 증가된 filler 함량을 나타내는 레진들은 상대적으로 중합을 담당하는 단량체의 함량이 적기 때문에 낮은 중합 수축량을 보일 것으로 추측할 수 있다. 그러나 filler의 함량 증가로 조작성이 떨어지므로 조작성을 조절하기 위해 낮은 분자량의 단량체를 사용하게 되는데 이런 분자량이 낮은 단량체가 재료의

점도를 낮추게 되고 재료의 점도가 낮으면 낮을수록 단량체의 운동이 활발해짐으로써 중합 과정에 있어 더 많은 단량체가 관여하게 되면서 중합 수축량이 커지게 되고 수축 속도 또한 증가하게 된다. Pyramid에서 사용된 낮은 분자량의 단량체는 triethylene glycol dimethacrylate (TEGDMA)로 점도를 낮추기 위해 사용되나, 더불어 중합 수축이 증가하는 효과를 가져오고 수축 속도도 커지게 된다¹⁾. Asmussen과 Peutzfeldt³⁴⁾도 이런 유동성이 높은 단량체 일수록 전환율이 높고 중합 반응 역시 빠르게 일어난다고 하였다.

또한 Pyramid의 높은 탄성계수 역시 중합 수축을 증가시킨 한 요인으로 추정할 수 있다. Lambrechts 등³⁵⁾은 filler 성분이 적은 hybrid나 microfill type보다 filler 성분이 많은 hybrid 레진이 elastic modulus가 크다고 보고하였다. 종류가 다른 레진은 같은 중합 방식으로 반응하지 않으며 이것은 두 레진의 다른 반응 양상에 대한 설명이 될 수 있다.

전형적인 중합 수축의 유형을 보면 초기 광중합 시기의 직선 부위가 수축 속도인데 이 직선의 경사도 ($\Delta L/\Delta t$)로써 수축 속도를 표현할 수 있다. 이번 연구 결과 사용한 선형 수축 길이 측정 기기는 중합의 양상 즉 측정된 선 수축길이를 데이터파일로 저장한 후 저장된 데이터를 시간함수에 대한 선 수축길이의 변화로 변환, 도시하여 역동적인 중합 수축을 관찰할 수 있으며 중합 수축률 뿐 아니라 각각의 시점에서 중합 수축의 속도를 비교할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 중합 속도와 관련된 광중합 복합 레진의 kinetics 연구에 간편한 측정 방법으로 의미있게 사용될 수 있다고 사료된다.

중합 반응은 광원을 조사시 Photon들이 camphoroquinone같은 광개시제 분자에 도달하여 광개시제 분자들이 활성화되고 활성화된 광개시제는 아민과 반응하여 free radical을 발생시켜 단량체의 탄소 이중결합을 파괴하면서 시작한다. 이런 free radical이 많이 형성될수록 중합반응은 더 빨리 일어나게 된다. 따라서 연속 광중합시킨 1군이 가장 중합 수축 속도가 빠르게 나타나고, 간헐적 광중합군은 conversion rate가 감소되면서³⁰⁾ 결과적으로 flow는 증가되어 중합 수축 속도가 감소하였다고 설명할 수 있다.

Figure 5, 6은 두 레진의 역동적인 중합 수축 속도의 양상을 잘 나타내고 있다. 1군은 중합 개시 후 PT까지 급격히 속도가 증가하다가 최고속도에 이른 후 서서히 속도가 감소되는 전형적인 결과를 보여주고 있고, 간헐적 광중합군인 2, 3, 4군은 광조사의 차단여부에 따라 수축 속도의 증감이 반복되고, PT 후에는 증감을 반복하면서 1군과 유사하게 서서히 속도가 감소하는 양상을 관찰할 수 있다. PT는 1군, 2군, 3군, 4군의 순으로 나타나는데 광강도와 조사시간으로 결정되는 conversion에 의해 나타난 결과이며, conversion

rate이 수축 속도와 밀접한 연관성을 가짐을 입증하는 결과이기도 하다.

Pyramid의 경우 간헐적 광중합군 중 2군의 경우 1군과 수축 속도에서 유의차를 나타내지 않은 것은 3, 4군에 비해 중합 초기에 단량체가 중합체로 전환하기에 충분한 광에너지가 전달되기 때문으로 추정할 수 있다. 또 교두 변위 실험에서도 최종 교두 변위양이 1군과 2군이 유의차가 없게 측정되었는데 이는 급속하게 일어나는 중합 과정에서 초기 2초의 광조사가 중요한 의의를 가짐을 의미하며, 앞으로 최적의 중합 방법을 찾기 위한 좀 더 구체적인 중합 주기에 대한 연구가 필요하다고 생각한다.

이번 연구에서 자체 제작한 광조사 차단장치를 이용하여 복합 레진을 간헐적으로 광중합시킴으로써 중합 수축의 속도를 감소시킬 수 있었다. Obici 등²⁶⁾의 실험에서는 일정한 광도에서 1/2초 간격으로 할로겐광의 조사와 차단을 반복할 수 있는 광조사를 자체 제작하여 광중합을 시행하였으나, 광조사가 자체에서 이런 주기로 중합광을 적용할 경우 최대광도에 즉시 도달하지 못하고, 결국 조사된 총 에너지양이 감소되는 문제점이 있다. 본 실험에서는 광조사 차단장치를 시편과 광조사기 사이에 위치시켜 복합 레진을 중합함으로써 실제적인 광조사 거리가 증가하는 한계가 있으나 중합광의 총 에너지양을 일정하게 유지할 수 있고, 보다 간편하게 다양한 주기를 적용함으로써 중합 수축의 속도를 조절할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다. 추후 이 광조사 차단장치는 중합반응의 속도에 관한 연구에서 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

이번 실험에서 주목할 만한 점은 중합 수축의 속도와 교두 변위가 대체로 일치하는 결과를 나타냈다는 것이고, 이런 교두 변위의 감소는 치아와 레진 둘 다에 축적되는 stress를 줄여서 최종적으로 치아와 수복물의 수명을 향상시킬 수 있을 것이다. 간헐적으로 광중합시켜 수축 속도가 감소한 3군과 4군이 1군에 비해 유의성 있게 교두 변위양이 감소하였다.

이런 결과는 중합의 속도가 감소하면 polymer network와 cross-link들이 서서히 형성되면서 레진의 flow가 느리게 증가하고⁴⁾, 분자들이 재배열할 수 있는 시간이 더 주어짐으로써 gel phase가 연장되어 결국 중합 수축에 의한 stress가 완화되면서 교두간의 contraction이 감소하는 것으로 해석할 수 있다³⁶⁾.

또한 초기의 중합 속도가 낮을 때 아주 작은 양의 camphoroquinone 성분 만이 활성화되고 거의 growth center이 형성되지 않으면서 linear한 polymer이 형성되지만, 반대로 초기의 중합 속도가 높으면 많은 수의 camphoroquinone 분자들이 활성화되고 growth center들의 형성이 증가되면서 branched polymer를 형성하는 경향을 보이게 되는데³⁷⁾, 이런 중합체 구조의 linearity가 증가할수록 탄성 계수가 감소하게 되므로, 초기의 중합 속도가 감소되면 교

두 변위가 감소하게 된다고 추측할 수 있다³⁸⁾.

또 다른 영향 인자로는 degree of conversion이 있는데 특히 Heliomolar의 경우 낮은 degree of conversion이 급속한 속도의 중합을 보상하여 교두의 이동을 더욱 감소시켰을 가능성이 있고³⁹⁾, 저중합(undercured)된 와동 하방의 레진층이 초기의 stress를 감소시키는 작용을 했을 것으로 사료된다⁴⁰⁾. 그 외 이번 실험에서 사용된 상아질 접착제의 접착강도가 충분히 높지만 본 실험에서와 같이 실제 임상보다 큰 형태의 와동에서 초기 복합 레진의 중합 수축 응력으로 인한 접착의 상실이 일어났을 가능성을 배제할 수 없으며 이런 현상이 교두 변위의 측정에 영향을 줄 수 있다.

실험 교두 침에 pin을 위치시켜 수복 전후에 측정한 수치를 교두변위로 표현한 Ericson 등²⁵⁾의 실험과 달리 본 연구에 사용된 측정 기기는 중합시작부터 10분 동안의 변화를 계속 관찰할 수 있었고, 특히 중합 속도가 다른 상태에서 교두 변위의 속도 역시 차이가 있음을 관찰할 수 있는 장점이 있었다. 그러나 교두 변위 측정 기기의 외형상 광조사 차단장치를 광조사기와 치아의 중간에 위치시켰을 때 광조사의 거리가 멀어져서 중합이 충분히 일어나기 어려운 문제점을 가지고 있다. Mehl 등¹⁹⁾은 시편과 광조사기 사이의 거리를 0 mm 일때 100%의 광강도를 가진다고 하면 10 mm이면 50%의 광강도를 가진다고 하였는데, 전환율이 낮은 Heliomolar의 경우 Figure 7에서 2, 3, 4군은 10분이 경과한 시점에서도 계속 교두의 이동이 일어나고 있는 것을 관찰할 수 있으며 정확한 교두 변위 양상을 알기 위해서는 10분 이상의 관찰 시간이 필요하다고 생각한다.

그리고 Figure 8을 보면 Pyramid의 교두 변위가 나타나는 양상이 중합 수축과 유사함을 관찰할 수 있다. 즉 1군에서는 급격하게 일어나고 3, 4군은 보다 완만한 속도의 교두 변위를 보인다. 앞으로 광중합 복합 레진의 연구에 있어서 교두 변위의 속도 역시 필히 논의되어야 할 사항으로 사료된다.

결론적으로 복합 레진을 간헐적 광중합시킴으로써 conversion rate이 감소하고 결국 중합 수축 속도가 감소하게 되며 중합응력 또한 감소한다. 그러나 조사광의 총 에너지양이 같고 이에 따라 유사한 정도의 degree of conversion이 적용되었으므로 수복물의 물리적 성질이 저하되지 않을 것으로 유추해 볼 수 있다.

앞으로 궁극적으로는 중합 수축 속도를 감소시키면서 광조사 시간을 최대한 줄일 수 있는 광조사 방법을 개발해야 할 것이고, 재료 면에서는 감소된 중합 수축량, 수축 속도를 가지는 동시에 우수한 기계적 성질, 편리한 조작성이 가능한 광중합 복합 레진에 대해 접근을 해야 할 것이다. 더불어 감소된 교두변위가 수복물의 변연 뿐 아니라 치아와 수복물의 계면에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 미세현미경적 연구가 요구된다.

V. 결 론

이번 연구의 목적은 광중합 복합 레진을 간헐적 중합법으로 중합시킴으로써 기존의 연속 중합법과 비교하여 중합 수축의 속도를 측정하고, 각 군별 교두 변위에 대한 영향을 평가해보고자 하는 것이었다. 간헐적 중합법은 본 실험을 위해 자체적으로 제작한 광조사 차단 장치를 이용하였으며 결과는 다음과 같다.

1. 중합 수축량은 중합 방법에 관계없이 군 간에 유사하게 나타났다 ($p > 0.05$).
2. 최대 수축 속도를 나타낸 Peak time은 1, 2, 3, 4군 순으로 측정되었다.
3. 중합 수축 속도는 간헐적 광중합시 감소하였고 ($p < 0.05$) 광조사 주기에 따라 영향을 받았다.
4. 교두 변위는 중합 수축 속도와 밀접한 관계를 보이며 중합 수축 속도가 감소하면 교두 변위양도 감소하며 ($p < 0.05$), 교두 변위의 속도 또한 감소하였다.

이상의 결과로 간헐적 중합법에 의해 중합 수축 속도가 감소함으로써 교두 변위가 감소하였다.

참고문헌

1. Alvarez-Gayosso C, Barcelo-Santana F, Guerrero-Ibarra J, Saes-Espinola G, Canseco-Martinez MA. Calculation of contraction rates due to shrinkage in light-cured composites. *Dent Mater* 20(3):228-235, 2004.
2. Baush JR, de Lange K, Davidson CR, Peters A, de Gee AJ. Clinical significance of polymerization shrinkage of composite resins. *J Prosthet Dent* 48:59-67, 1982.
3. Jorgensen KD, Asmussen E, Shimokobe H. Enamel damages caused by contracting restorative resins. *Scand J Dent Res* 83:120-122, 1975.
4. Davidson CL, de Gee AJ. Relaxation of polymerization contraction stresses by flow in dental composites. *J Dent Res* 63:146-148, 1984.
5. Bouschlicher MR, Rueggeberg FA. Effect of ramped light intensity on polymerization force and conversion in a photoactivated composite. *J Esthet Dent* 12:328-339, 2000.
6. Eick JD, Welch FH. Polymerization shrinkage of posterior composite resins and its possible influence on post-operative sensitivity. *Quintessence Int* 17:103-111, 1986.
7. Kemp-Scholite CM, Davidson CL. Marginal sealing of curing contraction gaps in Class V composite resin restorations. *J Dent Res* 67(5):841-845, 1988.
8. Lutz F, Krejci I, Barbakow F. Quality and durability of marginal adaptation in bonded composite restoration. *Dent Mater* 10:197-213, 1991.
9. Kanca J, Suh BI. Pulse activation : Reducing resin-based composite contraction stresses at the enamel cavosurface margins. *Am J Dent* 12:107-112, 1999.
10. Roberts JC, Powers JM, Craig RG. Fracture toughness of composite and unfilled restorative resins. *J Dent Res* 56:748-753, 1977.
11. Sakaguchi RL, Peter MC, Nelson SR, Douglas WH, Poort HW. Effects of polymerization contraction in composite restorations. *J Dent* 20(3):178-182, 1992.
12. Antonucci JM, Toth EE. Extent of polymerization of dental resins by differential scanning calorimetry. *J Dent Res* 62:121-125, 1983.
13. Venhoven BAM, de Gee AJ, Davidson CL. Light initiation of dental resins : dynamics of the polymerization. *Biomaterials* 17:2313-2318, 1996.
14. 박성호, 이순영, 조용식, 김수선. 광중합형 구치부 수복재료의 중합 수축량과 중합 수축력. *대한치과보존학회지* 28:348-353, 2003.
15. de Gee AJ, Feilzer AJ, Davidson CL. The linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dent Mater* 9:11-14, 1993.
16. Feilzer AJ, Dooren LH, de Gee AJ, Davidson CL. Influence of light intensity on polymerization and integrity of restoration-cavity interface. *Eur J Oral Sci* 103:322-326, 1995.
17. Unterbrink GL, Muessner R. Influence of light intensity on two restorative systems. *J Dent* 23:183-189, 1995.
18. Uno S, Asmussen E. Marginal adaptation of a restorative resin polymerized at reduced rate. *Scand J Dent Res* 99:440-444, 1991.
19. Mehl A, Hickel R, Kunzelmann KH. Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without 'softstart-polymerization'. *J Dent* 25:321-330, 1997.
20. Goracci G, Mori G, de Martinis LC. Curing light intensity and marginal leakage of resin composite restorations. *Quintessence Int* 27:355-362, 1996.
21. Dennison JB, Yaman P, Seir R, Hamilton JC. Effect of variable light intensity on composite shrinkage. *J Prosthet Dent* 84:499-505, 2000.
22. Rueggeberg FA, Craig RG. Correlation of parameters used to estimate monomer conversion in a light activated resin composite. *J Dent Res* 67:932-937, 1988.
23. 이순영, 박성호. 광중합형 구치부 수복재료의 중합 수축력과 교두 변위의 상관관계. *대한치과보존학회지* 29:346-352, 2004.
24. Suliman AA, Boyer DB, Lakes RS. Cusp movement in premolars resulting from composite polymerization shrinkage. *Dent Mater* 9:6-10, 1993.
25. Ericson D, Paulsson L, Sowaik H, Derand T. Reduction of cusp deflection resulting from composite polymerization shrinkage, using a light-transmitting cone. *Scand J Dent Res* 102:244-248, 1994.
26. Obici AC, Sinhoreti MA, de Goes MF, Consani S, Sobrinho LC. Effect of the photo-activation method on polymerization shrinkage of restorative composites. *Oper Dent* 27:192-198, 2002.
27. Brackett WW, Haisch LDA, Covey DA. Effect of plasma arc curing on microleakage of Class V resin-based composite restorations. *Am J Dent* 13:121-122, 2000.
28. Walls AWC, McCabe JF, Murray JJ. The polymerization contraction of visible-light activated composite resins. *J Dent* 16:177-181, 1988.
29. Rueggeberg FA, Caughman WF, Curtis JW Jr. Effect of light intensity and exposure duration on cure of resin composite. *Oper Dent* 19:26-32, 1994.
30. Rueggeberg FA. Contemporary issues in photocuring. *Compendium* 20:S4-15, 1999.
31. Davidson-Kaban SS, Davidson CL, Feilzer AJ, de Gee

- AJ, Erdilek N. The effect of curing light variations on bulk curing and wall-to-wall quality of two types and various shades of resin composites. *Dent Mater* 13:344-352, 1997.
32. Koran P, Kurschner R. Effect of sequential versus continuous irradiation of a light-cured resin composite on shrinkage, viscosity, adhesion and degree of polymerization. *Am J Dent* 11:17-22, 1998.
33. Asmussen E, Peutzfeldt A. Flexural strength and modulus of a step-cured resin composite. *Acta Odontol Scand* 62:87-90, 2004.
34. Asmussen E, Peutzfeldt A. Influence of UEDMA, Bis-GMA and TEGDMA on selected mechanical properties of experimental composite resins. *Dent Mater* 14:51-56, 1998.
35. Lambrechts P, Braem M, Vanherle G. Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentine adhesives. In: Derrick DD, editor. *The Dental Annual*. London: Butterworth and Co. Ltd, 147-187, 1988.
36. Suh BI, Feng L, Wang Y, Cripe C, Cincione F, de Rijk W. The effect of the pulse-delay cure technique on residual strain in composites. *Compendium* 20:4-12, 1999.
37. Asmussen E, Peutzfeldt A. Influence of pulse-delay curing on softening of polymer structures. *J Dent Res* 80:1570-1573, 2001.
38. Sideridou I, Tserki V, Papanastasiou G. Study of water sorption, solubility, and modulus of elasticity of light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Biomaterials* 24:655-65, 2003.
39. Peutzfeldt A, Sahafi A, Asmussen E. Characterization of resin composites polymerized with plasma arc curing units. *Dent Mater* 16:3320-3326, 2000.
40. Lim BS, Ferracane JL, Sakaguchi RL, Condon JR. Reduction of polymerization contraction stress for dental composites by two-step light-activation. *Dent Mater* 18:436-444, 2002.

국문초록

복합 레진의 간헐적 광중합 방법이 중합 수축 속도와 치아의 교두 변위에 미치는 영향

김민경 · 박성호 · 서덕규 · 송윤정 · 이 윤 · 이찬영*

연세대학교 치과대학 치과보존학교실

지금까지 다수의 연구자들에 의해 광중합형 복합 레진을 중합하는 방법에 있어서 광조사 강도, 시간을 조절하여 중합 수축의 속도를 감소시키기 위한 시도가 있었으나, 간헐적 중합법에 관한 구체적인 연구가 부족하다. 이에 저자는 광중합 복합 레진을 간헐적으로 광중합시켜 기존의 연속 중합법과 비교하여 중합 수축의 속도를 측정하고 교두 변위에 대한 영향을 평가해 보고자 하였다.

실험에 사용된 수복 재료는 2종의 광중합형 복합 레진으로 Heliomolar와 Pyramid이며, 중합 수축량을 측정하기 위해 자체 제작한 Linometer (R&B Inc., Daejeon, Korea)을 사용하였고 광중합시 광조사 차단장치를 시편과 Linometer 사이에 위치시켜 각각의 서로 다른 중합 주기: (1) 연속 광중합 (60초간 계속 광조사); (2) 2초 광조사, 1초 광차단 (90초 시행); (3) 1초 광조사, 1초 광차단 (120초 시행); (4) 1초 광조사, 2초 광차단 (180초 시행)로 중합시켰다. 군 별로 조사된 총에너지량이 동일하도록 중합 시간을 조절하였고, 최종 중합 수축량을 측정하였으며 중합 수축의 최고속도 (R_{max})와 최고속도를 나타낸 peak time (PT)을 계산하였다.

교두 변위의 측정을 위해서는 각 군별로 10개의 건전한 상악 소구치에 변형시킨 제2급 와동을 형성한 다음 상아질 접착제를 도포하고 일정량의 복합 레진을 충전한 후 치아를 자체 제작된 치아 변위 측정기 (R&B Inc., Daejeon, Korea)에 위치시켜 교두 변위양을 알아보았다. 통계분석은 ANOVA test를 이용하여 군 간의 비교를 하였고, 재료간의 비교를 위해서는 t-test를 시행하였다.

실험 결과는 1) 선수축량은 군 간에 차이가 없었고 ($p > 0.05$), Pyramid가 Heliomolar보다 중합 수축량이 컸다 ($p < 0.05$). Peak time은 Heliomolar와 Pyramid 레진 모두에서 간헐적 광중합시 더 늦게 나타났다. R_{max} 는 Heliomolar는 4군 < 3군, 2군 < 1군 순이었고, Pyramid는 3군 < 4군 < 2군, 1군 순으로 측정되었다. 2) Heliomolar는 4군 < 3군 < 2, 1군 그리고 Pyramid는 4, 3군 < 2, 1군 순으로 교두 변위가 컸으며 ($p < 0.05$), Pyramid가 Heliomolar보다 교두 변위가 크게 나타났다 ($p < 0.05$).

이번 실험을 통해 복합 레진을 광조사 차단장치를 이용하여 간헐적 광중합 시켜 중합 수축 속도를 늦춤으로써 교두 변위 양이 감소됨을 알 수 있었다.

주요어: 간헐적 광중합, 중합 수축 속도, 교두 변위, 복합 레진