

광조사 방식이 복합레진의 중합과 누출에 미치는 영향

박종진 · 박정원 · 박성호* · 박주명 · 권태경 · 김성교

경북대학교 치과대학 치과보존학교실, 연세대학교 치과대학 보존학교실*

ABSTRACT

THE EFFECT OF IRRADIATION MODES ON POLYMERIZATION AND MICROLEAKAGE OF COMPOSITE RESIN

Jong-Jin Park, Jeong-Won Park, Sung-Ho Park*, Ju-Myong Park, Tae-Kyung Kwon, Sung-Kyo Kim

Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Kyungpook National University, Daegu,

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University, Seoul, Korea*

The aim of this study was to investigate the effect of light irradiation modes on polymerization shrinkage, degree of cure and microleakage of a composite resin.

VIP™ (Bisco Dental Products, Schaumburg, IL, USA) and Optilux 501™ (Demetron/ Kerr, Danbury, CT, USA) were used for curing Filtek™ Z-250 (3M Dental Products, St. Paul., MN, USA) composite resin using following irradiation modes: VIP™ (Bisco) 200mW/cm² (V2), 400mW/cm² (V4), 600mW/cm² (V6), Pulse-delay (200 mW/cm² 3 seconds, 5 minutes wait, 600mW/cm² 30seconds, VPD) and Optilux 501™ (Demetron/Kerr) C-mode (OC), R-mode (OR).

Linear polymerization shrinkage of the composite specimens were measured using Linometer (R&B, Daejeon, Korea) for 90 seconds for V2, V4, V6, OC, OR groups and for up to 363 seconds for VPD group (n=10, each).

Degree of conversion was measured using FTIR spectrometer (IFS 120 HR, Bruker Karlsruhe, Germany) at the bottom surface of 2 mm thick composite specimens. V2, V4, V6, OC groups were measured separately at five irradiation times (5, 10, 20, 40, 60 seconds) and OR, VPD groups were measured in the above mentioned irradiation modes (n=5, each).

Microhardness was measured using Digital microhardness tester (FM7, Future-Tech Co., Tokyo, Japan) at the top and bottom surfaces of 2mm thick composite specimens after exposure to the same irradiation modes as the test of degree of conversion(n=3, each).

For the microleakage test, class V cavities were prepared on the distal surface of the ninety extracted human third molars. The cavities were restored with one of the following irradiation modes: V2/60 seconds, V4/40 seconds, V6/30 seconds, VPD, OC and OR. Microleakage was assessed by dye penetration along enamel and dentin margins of cavities.

Mean polymerization shrinkage, mean degree of conversion and mean microhardness values for all groups at each time were analyzed using one-way ANOVA and Duncan's multiple range test, and using chi-square test for microleakage values.

The results were as follows:

- Polymerization shrinkage was increased with higher light intensity in groups using VIP™ (Bisco) : the highest with 600mW/cm², followed by Pulse-delay, 400mW/cm² and 200mW/cm² groups. The degree of polymerization shrinkage was higher with Continuous mode than with Ramp mode in groups using Optilux 501™ (Demetron/Kerr).
- Degree of conversion and microhardness values were higher with higher light intensity. The final degree of conversion was in the range of 44.7 to 54.98% and the final microhardness value in the range of 34.10 to 56.30.
- Microleakage was greater in dentin margin than in enamel margin. Higher light intensity showed more microleakage in dentin margin in groups using VIP™ (Bisco). The microleakage was the lowest with Continuous mode in enamel margin and with Ramp mode in dentin margin when Optilux 501™(Demetron /Kerr) was used.

Key words : Composite resin, Light irradiation, Polymerization shrinkage, Microhardness, Marginal leakage

I. 서 론

광중합형 복합레진은 1970년대에 치과 영역에 소개된 이후 그 물성의 개선과 함께 임상적 사용이 광범위하게 증가하고 있다. 특히, 치과용 아말감의 문제점과 환자들의 심미적 요구가 증대되면서 전치부 수복에서 뿐만 아니라 구치부 수복에서도 사용 빈도가 높아지고 있다. 현재 사용되고 있는 광중합형 복합레진은 종래의 화학중합형 복합레진에 비해 충전시 성형이 용이하고 색조의 안정성이 우수하며, 높은 중합도와 더불어 중합시간을 단축시킬 수 있다는 장점을 가지며¹⁾, 초기 광중합형 제품에 비해서도 마모 저항성이 많이 향상되었다²⁾.

그러나 광중합형 복합레진은 제한적인 중합깊이와 중합시동반되는 수축의 문제들을 가지는데, 중합수축은 단량체 분자들이 고분자 중합체로 전환될 때 분자들이 조밀하게 응축되므로 레진의 전체 부피가 감소된 결과이다³⁾. 중합수축량은 제품에 따라 차이가 있으나 대략 2.9 내지 7.1% 정도의 부피수축을 한다고 보고되고 있으며^{4,5)}, 중합수축 응력으로 인해 수복물과 치질간의 결합이 파괴되고 미세간극이 발생하면 임상적으로 슬후 지각과민, 변연의 변색 및 이차우식 등의 문제점들이 야기될 수 있다⁶⁾. 또한 수복물과 치질간의 결합이 보존된다 하더라도 수복물에 응력이 잔류하게 되면 교두의 이동, 슬후 민감성 및 치질의 미세균 열 등의 현상이 생길 수 있다^{7,8)}. 최근까지 다양한 상아질 접착제가 개발, 소개되고 있으나 아직 중합수축에 따른 수복물과 치질 사이의 계면에서 미세간극 형성을 완전히 방지할 수는 없으며, 수복물과 치질 사이의 결합력이 우수하더라도 구강내 환경에서 시간경과에 따른 변연누출의 가능성을 완전히 배제할 수는 없다.

복합레진 수복물의 변연부 봉쇄에 영향을 줄 수 있는 인자들로서는 기질에 첨가되는 희석 단량체의 양과 종류⁹⁾, filler의 형태와 크기 및 함량^{4,10)}, 탄성율¹¹⁾ 등 복합레진 자체의 특성 외에 상아질 접착제의 접착강도¹²⁾, 수화팽창¹³⁾, 와동의 형태(C-factor)¹⁴⁾, 조사광의 강도와 조사시간^{15,16)} 등이 있다.

광중합형 복합레진의 임상 사용시 중합수축 응력을 감소시키기 위해 여러 방법들이 소개되었다. 복합레진 수복시 수복물과 치질 사이에 탄성율이 적은 이장재를 사용하여 결합계면에서 발생하는 수축응력을 균일하게 분산시키고 발생된 응력을 흡수 및 완화시키고자 하는 방법이 연구되었으며¹⁷⁻¹⁹⁾, 또한 C-factor가 큰 와동에서 소량의 복합레진을 순차적으로 충전함으로써 중합되는 복합레진의 부피를 줄이고 와동내에서 최적의 유동성을 가질 수 있도록 하여 응력을 완화시키고자 하는 방법도 소개되었다^{14,20-22)}. 최근에는 광조사 방식 즉, 광도와 광조사 시간을 변화시켜 복합레진의 중합속도를 조절하려는 많은 연구들이 있어 왔으며, 중합과정은 광원의 광도보다 조사된 광에너지 총량에 의해 영

향을 받으므로 광도와 광조사 시간을 적절히 변화시켜 우수한 중합도와 더불어 최소의 중합수축 응력을 얻고자 하는 다양한 광조사 방식들이 소개되고 있다.

광중합시 저광도를 사용할 경우 중합반응이 서서히 진행되어 유동성 기간이 증가되고 발생된 수축응력이 유동성에 의해 보상되어 변연적합성은 향상될 수 있으나²³⁻²⁶⁾, 중합도가 감소하여 기계, 물리적 성질이 저하되며 미반응 잔류 단량체의 증가로 인해 생체친화성 문제가 발생할 수 있고 또한 조사시간 연장으로 인해 시술시간이 길어질 수도 있다. 최근 소개되고 있는 고풍도 tungsten-halogen light, argon laser 및 plasma arc light 등의 고풍도를 사용하여 중합할 경우에는 강도와 중합깊이 등 물성에 영향을 미치는 중합도를 향상시키고 시술시간도 단축시킬 수 있으나, 급격한 중합수축과 이로 인한 응력발생의 문제점이 야기될 수 있다.

복합레진 수복물에서 초기 중합수축 응력의 발생속도를 감소시키기 위해 소개된 광조사 방식들로는, 저광도에서 장시간 중합하는 방식²⁷⁻³⁰⁾, 저광도에서 고풍도로 서서히 광도를 증가시키며 중합하는 방식(ramp mode)^{31,32)}, 저광도로 초기 중합 후 고풍도로 최종 중합하는 방식(2-step continuous, softstart polymerization)^{25,33-37)} 그리고 저광도로 단시간에 초기 중합한 후 적당시간 지연과정을 거치고 고풍도로 최종 중합하는 방식(2-step discontinuous, pulse-delay polymerization)^{38,39)} 등이 있으며, 이러한 광조사 방식들에 따라 다양한 광조사기들이 개발, 소개되고 있다.

광도와 조사시간에 의해 결정되는 광에너지 총량에 따라 복합레진의 중합도와 중합수축이 비슷하게 나타난다면, 저광도로 장시간 중합시키거나 저, 고풍도를 적절히 혼용함으로써 중합도의 저하 없이 변연적합성을 향상시킬 수 있을 것이다. 그러나 아직 광조사 방식의 효율도에 대한 일치된 견해가 없으며, 또한 동일한 광에너지량을 적용했을 때 복합레진에서 나타나는 중합수축과 FTIR spectrometer 및 미세경도 측정을 통한 중합도와의 상호 연관성에 관한 심도 있는 연구도 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 다양한 광조사 방식에 따른 복합레진 자체의 중합수축과 중합도를 측정, 상호 비교하고 이러한 결과들이 실제 치아 수복물의 변연누출에 미치는 영향을 알아 보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

복합레진은 전, 구치용 hybrid형의 Filtek™ Z-250(3M Dental Products, St. Paul., MN, USA)의 A2 shade를, 광조사기로는 100mW/cm²에서 600mW/cm²까지 100mW/cm² 단위로 광도조절이 가능한 VIP™(Bisco Dental Products, Schaumburg, IL, USA)와 C(contin-

Table 1. Various light curing modes used in this study

Groups	Curing units	Curing Modes	
V2	VIP™	Standard	200mW/cm ²
V4	VIP™	Standard	400mW/cm ²
V6	VIP™	Standard	600mW/cm ²
VPD	VIP™	Pulse-delay	200mW/cm ² for 3 sec, 5min wait 600mW/cm ² for 30 sec
OC	Optilux 501™	Continuous	850mW/cm ² for 20sec
OR	Optilux 501™	Ramp	100 to 1000mW/cm ² for 20sec

uous), R(ramp), B(boost) 등의 curing mode를 가진 Optilux 501™(Demetron/Kerr, Danbury, CT, USA)을 사용하였다.

광조사 방식에 따라 모두 6개의 군으로 나누어, VIP™(Bisco)를 이용하여 200, 400, 600 mW/cm²의 단일광도로 중합시킨 세 군(V2, V4 및 V6군)과 200mW/cm²의 광도로 3초간 중합시키고 5분간 방치한 후 다시 600mW/cm²의 광도로 30초간 중합시킨 군(VPD군) 그리고 Optilux 501™(Demetron/ Kerr)을 이용하여 C-mode에서 850mW/cm²의 광도로 20초간 중합시킨 군(OC군)과 R-mode로 100mW/cm²에서 1000mW/cm²까지 광도를 증가시키면서 20초간 중합시킨 군(OR군) 등으로 실험하였다 (Table 1).

복합레진의 중합과 누출은 아래의 네 가지 방법으로 측정하였다.

1. Linometer를 이용한 중합수축 측정
2. FTIR(Fourier Transform Infrared) spectrometer를 이용한 중합도 측정
3. 미세경도 측정기를 이용한 중합도 측정
4. 발거치 제5급 와동에서의 변연누출 측정

1. 중합수축 측정

Feilzer 등⁴⁰⁾이 고안한 방법에 의거하여 제작된 Linometer(R&B, Daejeon, Korea)를 사용하여 각 광조사 방식에 따른 복합레진 시편의 선형 중합수축 양을 실시간으로 측정하였다(Fig. 1).

실험에 사용된 복합레진 시편의 양을 동일하게 하기 위하여 제작한 테프론 몰드에 레진을 충전한 후 사용하였으며, 알루미늄 디스크와 유리판 사이의 거리는 1.35mm로 하여 중합전 시편의 두께를 일정하게 하였다. 복합레진 시편과 알루미늄 디스크 및 유리판 사이의 부착을 방지하기 위해 분리제(vaseline)를 두 면에 얇게 도포하였다.

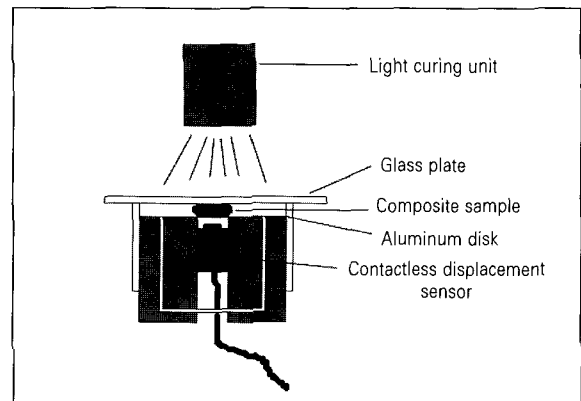


Fig. 1. Schematic drawing of the Linometer with a composite sample placed between the glass plate and aluminium disk.

유리판을 통해 V2, V4, V6, OC 및 VPD군의 두번째 광조사는 60초간, OR군은 20초간 광조사 하면서 복합레진 시편의 중합수축으로 인해 야기되는 알루미늄 디스크의 수직이동을 계측하여 선형 중합수축의 양을 평가하였다. 중합수축이 충분히 일어날 수 있도록 하기 위해 그래프상 평행선이 나타날 때까지 광조사 시간을 연장하였으며, 광조사 후에도 일정시간 동안 중합수축 변화를 관찰하였다.

각 군당 10개의 시편에서 측정하였으며, 선형 중합수축비(Lin%)와 체적 중합수축비(Vol%)는 식 1)과 2)를 이용하여 계산하였다.

$$\text{식 1) Lin\%} = \frac{\Delta L}{L + \Delta L} \times 100$$

L : thickness of sample after polymerization

ΔL : recorded displacement

$$\text{식 2) Vol\%} = 3\text{Lin\%} - 0.03(\text{Lin\%})^2 + 0.0001(\text{Lin\%})^3$$

2. 중합도 측정

FTIR spectrometer(IFS 120 HR, Bruker, Karlsruhe, Germany)를 사용하여 각 광조사 방식에 따라 중합시킨 두께 2mm의 복합레진 시편 바닥면에서 미반응 잔류 단량체의 양을 측정하여 중합도를 계산하였다.

복합레진 적당량을 아세톤에 용해시키고 KBr (Potassium Bromide, Merck, Germany)과 혼합한 후 아세톤을 증발시켰다. 시료를 절구에 넣고 갈아서 미세한 분말로 만든 후 압축기 (Grasby Specac, UK)로 가압하여 원형의 중합전 시편을 제작한 후 aliphatic C=C band와 aromatic C=C band의 흡수피크를 구하였다. 유리판을 이용하여 두께 2mm의 복합레진 시편을 만들고 V2, V4, V6 및 OC군은 각각 5, 10, 20, 40, 60초간, VPD군과 OR군은 Table 1의 방법대로 광조사하여 중합시킨 후, 시편 하방 바닥면의 중심부에서 #15 blade를 이용하여 소량의 레진분말을 채취하고 KBr과 약 1:100의 비율로 혼합하여 중합전 시편과 같은 방법으로 중합후 시편을 제작하였다. 중합전 시편은 5개, 중합후 시편은 각 군당 광조사 시간에 따라 5개씩 제작하여 실험하였다.

진공실내에 시편을 위치시키고 적외선을 조사하였으며, 해상도 4cm⁻¹에서 32회 스캔하여 600~4,000cm⁻¹ 범위의 적외선 흡수 스펙트럼 값을 얻은 뒤 이를 1500~1700cm⁻¹ 범위에서 확대하였다. Baseline method를 이용하여 1640cm⁻¹에서 aliphatic C=C band의 흡수피크와 1610cm⁻¹에서 aromatic C=C band의 흡수피크를 구하고, 식 3)을 이용하여 중합도를 계산하였다.

식 3) Degree of Conversion(%)

$$= \left(1 - \frac{(\text{Abs aliphatic C=C} / \text{Abs aromatic C=C})_{\text{polymer}}}{(\text{Abs aliphatic C=C} / \text{Abs aromatic C=C})_{\text{monomer}}} \right) \times 100$$

3. 미세경도 측정

미세경도 측정기인 FM7(Future-Tech Co., Tokyo, Japan)을 사용하여 각 광조사 방식에 따라 중합시킨 두께 2mm의 복합레진 시편에서 광조사면(top)과 바닥면(bottom)의 미세경도를 측정하였다.

직경 4mm, 높이 2mm의 주형을 제작하여 밑면에 Mylar strip을 위치시켜 유리판 위에 놓고 복합레진을 충전한 후, Mylar strip과 유리판을 덮고 가압하여 잉여 레진을 제거하였다.

V2, V4, V6 및 OC군은 각각 5, 10, 20, 40, 60초간, VPD군과 OR군은 Table 1의 방법대로 광조사하여 시편을 제작하였다. 각 군당 광조사 시간에 따라 3개씩의 시편을

제작하고, 광조사 10분 후 하나의 시편당 3회씩 미세경도 측정기로 500g의 하중을 10초간 가하여 광조사면(top)과 바닥면(bottom)의 Knoop Hardness Number(KHN) 값을 측정하였다.

4. 변연누출 측정

발거치 치경부에 형성한 제5급 와동에 복합레진을 충전하고 각 광조사 방식에 따라 중합시킨 후, 수복물의 법랑질 및 상아질 변연에서 색소침투도를 측정하였다.

우식이나 수복물, 균열이 없는 최근에 발거된 90개의 상, 하악 제3대구치를 선택하여 연조직과 치석을 제거한 후 사용하였다. 고속 다이아몬드 bur(Komet® 845KR, 314.025, 845KR EF.314.025, GEBR. Brasseler GmbH & Co., KG, Germany)를 사용하여 주수하에 치아의 원심축 치경부에 사면이 없는 원통형의 제5급 와동을 형성하였다. 법랑-백악 경계부에서 와동의 반은 법랑질 쪽에 나머지 반은 백악질 쪽에 위치하도록 하였고, 깊이 2mm, 치면쪽 직경 2.5mm, 치수쪽 직경 2.2mm 정도로 와동의 형태를 제한하였다.

90개의 치아를 무작위로 선택하여 15개씩 6개의 군으로 분류하였다. 와동내에 15초간 산부식제(Uni-Etch®, 32% phosphoric acid, semigel type, Bisco)를 도포하고 수세 후, 면구를 이용하여 blot dry시켰다. 제조회사의 지시에 따라 One-step® adhesive(Bisco)를 2회 얇게 와동의 내면에 도포하고 air-syringe로 건조시킨 후 10초간 광조사(400mW/cm²)하였다. 다시 One-step® adhesive(Bisco)를 얇게 1회 도포하고 건조시킨 후 복합레진을 와동에 bulk 형태로 충전하고, V2군은 60초, V4군은 40초, V6군은 30초간 그리고 VPD, OC, OR군은 Table 1의 방법대로 광조사하였다.

충전된 시편을 37℃, 100% 습도의 항온조에 24시간 보관한 후 Sof-Lex™ disc(3M)로 표면을 연마하였고, 5℃와 55℃의 생리 식염수에서 1분 간격으로 500회의 열순환을 시행하였다. 시편을 건조시킨 후 수복물의 변연 1mm를 제외한 전 치아 표면에 nail varnish를 2회 도포하고 2% methylen blue 용액속에 24시간 침적시킨 다음 흐르는 물에서 24시간 동안 세척하였다.

시편을 투명 아크릴릭 레진에 매몰한 후, 주수하에 저속 다이아몬드 절단기(Isomet®, Buehler Co., Lake Bluff, IL, USA)를 이용하여 치아장축에 평행하게 수복물의 중앙을 지나도록 종절단하였다. 시편의 절단면을 입체 현미경(SZ-PT 40, Olympus, Japan)으로 25배 확대, 관찰하여 Fig. 2와 같이 색소침투 정도를 평가하였다.

광조사 시간에 따른 각 군의 중합수축, 중합도 및 미세경도 측정치는 one-way ANOVA로 분석한 후 Duncan's

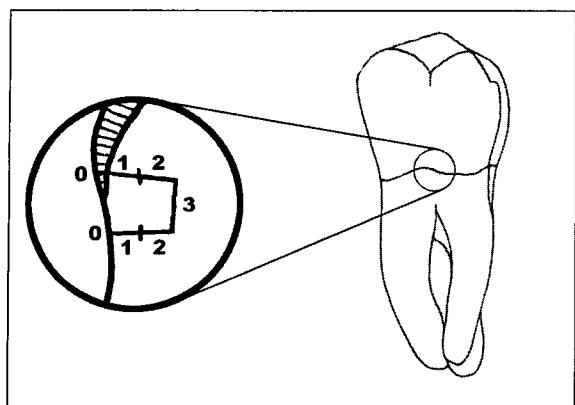


Fig. 2. Schematic representation of microleakage scoring system. Score 0: no penetration of dye; 1: penetration of dye into half of the cavity depth; 2: penetration of dye beyond half of the cavity depth; 3: penetration of dye into the cavity floor.

multiple range test로 사후 검정하였고, 범랑질과 상아질 변연에서의 미세누출 정도는 chi-square test로 분석하였다.

III. 성 적

1. 중합수축

각 실험군의 시간에 따른 선형 중합수축과 체적 중합수축은 Table 2 및 Fig. 3~5와 같이 나타났다. Table 2에서 VPD군의 경우에는 두번째 광조사시의 시간대에 따른 중합수축을 나타낸 것이다. 5, 10, 20, 40 및 60초의 시간대에서 각 실험군의 선형 중합수축 측정치를 비교해 보면, 5초에서 V6, OC 및 VPD군이 유의성 있게 큰 수축을 보였으

며, 그 다음으로 V4, V2, OR군 순으로 나타났다($p < 0.01$). 10, 20 및 40초에서는 V6, OC, VPD, V4, OR, V2군 순으로, 60초에서는 V6, OC, VPD 및 V4, V2, OR군 순으로 나타났다($p < 0.01$, Table 2).

V2, V4, V6 및 OC군에서 대부분의 중합수축이 광조사 30초 이내에서 나타났으며, 그 이후에는 완만한 증가를 보였다(Fig. 3). OR군은 20초간의 광조사 후 수축이 조금씩 감소하였으며, VPD군의 경우에는 1차 광조사시 급격한 수축의 증가 후 5분간의 지연시간 동안 완만한 상승을 보이다가 2차 광조사시 다시 증가하는 양상을 보였다(Fig. 4). V2, V4, V6군을 비교해 볼 때 광도가 높을수록 초기 중합수축이 더 급격히 증가하였으며 최종수축도 더 높게 나타났다(Fig. 3). OC군에서 초기 5초간은 V6군과 비슷한 양상을 보였으나 그 이후에는 V6군과 V4군의 중간정도 수축을 보였으며, VPD군의 최종수축은 V6군보다 낮게 나타났다(Fig. 4).

각 실험군에서 광조사 초기의 그래프 양상을 관찰해 볼 때 OR군에서 중합수축이 가장 지연되어 나타났고 V2군과 VPD군도 타군에 비해 수축발현이 늦었으며, OC 및 V6군의 중합수축 속도가 가장 빠르게 나타났다(Fig. 5).

2. 중합도

각 실험군의 광조사 시간에 따른 중합도는 Table 3 및 Fig. 6과 같이 나타났다. 5, 10, 20, 40 및 60초의 광조사 시간대에서 각 실험군의 중합도를 비교해 보면, 5 및 10초에서 OC군이 가장 높았으며, 그 다음으로 V6, V4, V2군 순으로, 20초에서는 OC, V6 및 OR, V4, V2군 순으로 나타났다. 40초에서는 OC, V6 및 VPD, V4, V2군 순으로, 60초에서는 OC, V6, V4, V2군 순으로 나타났다(Table 3).

V2, V4, V6 및 OC군을 비교해 볼 때 광도가 높을수록

Table 2. Linear polymerization shrinkage (10^{-3} mm)

Time(sec)	V2	V4	V6	OC	OR	VPD
5	2.16(0.26) ^c	3.79(0.21) ^b	5.77(0.29) ^a	5.67(0.16) ^a	1.37(0.38) ^d	5.90(0.04) ^a
10	4.23(0.10) ^f	5.80(0.08) ^d	7.55(0.07) ^a	7.08(0.07) ^b	4.89(0.15) ^e	6.64(0.05) ^c
20	5.50(0.03) ^f	6.93(0.04) ^d	8.64(0.01) ^a	7.78(0.03) ^b	6.63(0.01) ^e	7.35(0.03) ^c
40	6.23(0.01) ^f	7.56(0.03) ^d	9.17(0.02) ^a	8.05(0.03) ^b	6.37(0.03) ^e	7.77(0.02) ^c
60	6.40(0.13) ^d	7.64(0.11) ^c	9.20(0.13) ^a	7.98(0.12) ^b	6.18(0.13) ^e	7.77(0.05) ^c

Values are mean(standard deviation)*.

* The same superscript letters denote mean values with no statistically significant difference ($p > 0.01$). Duncan grouping was done only within the same time interval.

Thickness of resin specimen was 1.35mm.

n=10 in each group.

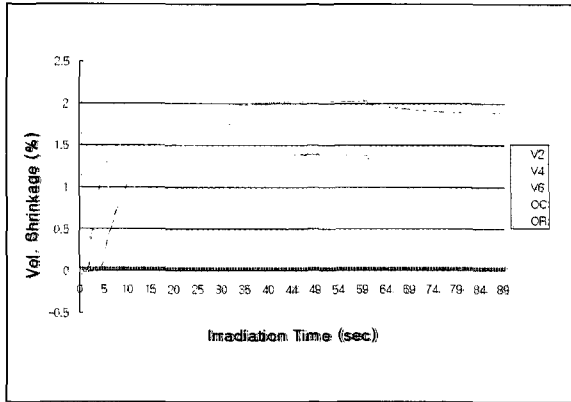


Fig. 3. Volumetric polymerization shrinkage (%).
 ↑ indicates the finishing time (20 sec) of irradiation for OR group.
 ▲ indicates the finishing time (60 sec) of irradiation for V2, V4, V6 and OC groups.
 Each data represents mean value from 10 specimens.

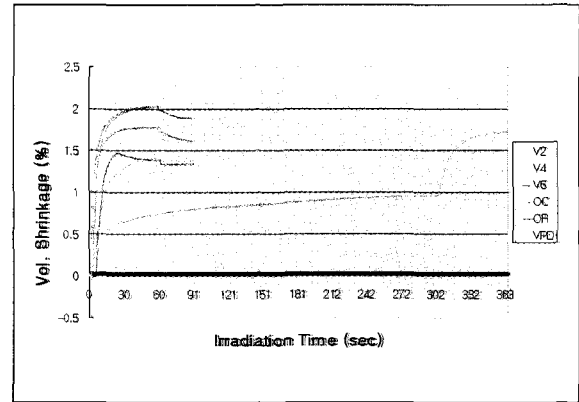


Fig. 4. Volumetric polymerization shrinkage including VPD group (%).
 ↑ indicates the finishing time (20 sec) of irradiation for OR group.
 ▲ indicates the finishing time (60 sec) of irradiation for V2, V4, V6 and OC groups.
 Δ indicates the starting time (303 sec) of second irradiation for VPD group.
 Each data represents mean value from 10 specimens.

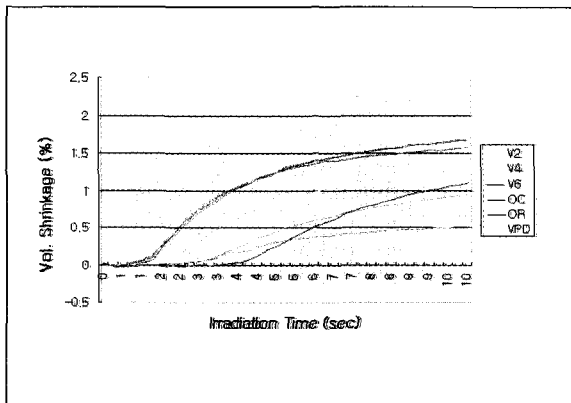


Fig. 5. Initial volumetric polymerization shrinkage(%).
 Each data represents mean value from 10specimens.

모든 광조사 시간대에서 중합도가 높게 나타났고 광조사 시간이 길어질수록 높은 중합도를 보였으며, 특히 가장 고풍도인 OC군은 본 실험군들 중 유일하게 50% 이상의 높은 중합도를 보였다. 20초 광조사시 OR 군과 40초 광조사시의 VPD군은 OC, V6 및 V4군과 유의한 중합도 차이를 나타내지 않았으나 V2군보다는 유의하게 높게 나타났다 ($p < 0.01$).

Table 3. Degree of conversion at the bottom surface of 2 mm-thickness specimens (%)

Time(sec)	V2	V4	V6	OC	OR	VPD
5	31.15(3.67) ^c	41.17(2.59) ^b	43.93(0.86) ^{ab}	45.35(2.77) ^a		
10	38.65(2.28) ^c	43.77(0.81) ^b	45.44(1.91) ^{ab}	45.90(1.33) ^a		
20	42.16(3.08) ^c	45.78(0.38) ^b	46.90(0.99) ^{ab}	48.48(0.79) ^a	47.77(0.91) ^{ab}	
40	43.90(2.18) ^c	47.13(1.34) ^b	48.77(2.85) ^{ab}	50.30(2.08) ^a		48.80(1.43) ^{ab}
60	44.77(1.94) ^c	47.52(1.36) ^{bc}	49.78(1.57) ^b	54.98(6.18) ^a		

Values are mean(standard deviation)*.

* The same superscript letters denote mean values with no statistically significant difference ($p > 0.01$). Duncan grouping was done only within the same time interval.

Thickness of resin specimen was 1.35mm.

n=5 in each group.

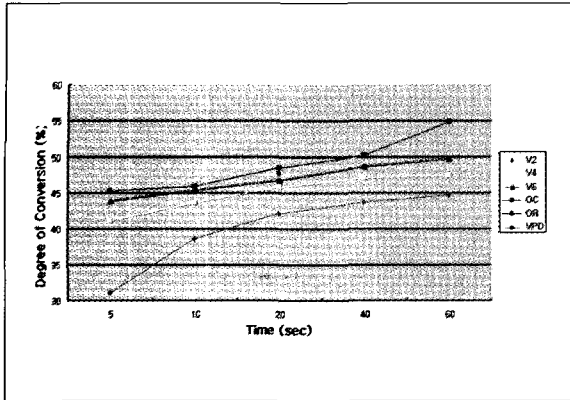


Fig. 6. Degree of conversion at the bottom surface of 2mm thickness specimens (%). Each data represents mean value from 5specimens.

3. 미세경도

각 실험군의 광조사 시간에 따른 광조사면과 바닥면의 미세경도 값은 Table 4 및 5와 Fig. 7 및 8과 같이 나타났으며 모든 실험군들 간의 통계학적 유의성은 Table 6과 같이 나타났다.

광조사면의 미세경도 값을 비교해 보면, 5초에서 OC군이 가장 높았으며, 그 다음으로 V6, V4, V2군 순으로, 10초에서 OC, V6 및 V4, V2군 순으로, 20초에서는 OC 및 OR, V6, V4, V2군 순으로 나타났다. 40초에서는 OC, V6, V4 및 VPD, V2군 순으로, 60초에서는 OC, V6, V4, V2군 순으로 나타났다. 바닥면의 미세경도 값을 비교해 보면, 5초에서 OC, V6 및 V4, V2군 순으로, 10초에서 OC, V6, V4, V2군 순으로, 20초에서 OC 및 OR, V6, V4, V2군 순으로 나타났다. 40초에서는 OC군이 가장 높았고 V6, V4,

Table 4. Knoop Hardness Number at the top surface of 2 mm-thickness specimens

Time(sec)	V2	V4	V6	OC	OR	VPD
5	20.77(1.74) ^d	30.87(1.84) ^c	34.23(0.49) ^b	39.27(0.85) ^a		
10	31.53(0.84) ^c	40.60(0.46) ^b	42.00(0.80) ^b	46.77(1.42) ^a		
20	38.83(0.72) ^c	43.83(5.58) ^b	46.46(0.31) ^{ab}	50.90(0.40) ^a	49.90(1.38) ^a	
40	43.17(1.65) ^d	47.30(0.85) ^c	51.36(0.29) ^b	55.60(0.17) ^a		48.20(0.92) ^c
60	44.93(0.06) ^d	47.40(1.91) ^c	52.80(0.20) ^b	56.30(1.35) ^a		

Values are mean(standard deviation)*.

* The same superscript letters denote mean values with no statistically significant difference ($p > 0.01$). Duncan grouping was done only within the same time interval.

Thickness of resin specimen was 1.35 mm.

n=3 in each group.

Table 5. Knoop Hardness Number at the bottom surface of 2mm-thickness specimens

Time(sec)	V2	V4	V6	OC	OR	VPD
5	0.00(0.00) ^c	10.67(0.74) ^b	11.10(2.01) ^b	16.10(0.89) ^a		
10	12.30(0.75) ^d	18.13(1.70) ^c	21.30(0.78) ^b	31.56(1.01) ^a		
20	17.16(0.65) ^d	24.53(2.68) ^c	31.40(0.96) ^b	35.57(1.20) ^a	34.97(0.93) ^a	
40	25.63(3.36) ^c	36.63(0.98) ^b	39.50(1.96) ^b	45.40(1.25) ^a		36.33(2.05) ^b
60	34.10(2.62) ^d	39.73(1.95) ^c	45.80(1.06) ^b	49.63(1.17) ^a		

Values are mean(standard deviation)*.

* The same superscript letters denote mean values with no statistically significant difference ($p > 0.01$). Duncan grouping was done only within the same time interval.

Thickness of resin specimen was 1.35 mm.

n=3 in each group.

Table 6. Statistical analysis of microhardness at the top and bottom surfaces

Group	Duncan Grouping of Top surface-value	Group	Duncan grouping of bottom surface-value
OC-60*	a**	OC-60	a
OC-40	a	V6-60	b
V6-60	b c	OC-40	b
V6-40	b c d	V4-60	c
OC-20	b c d e	V6-40	c d
OR	c d e f	V4-40	c d e
VPD	e f g	VPD	d e
V4-60	f g h	OC-20	e f
V4-40	f g h	OR	e f
OC-10	g h i	V2-60	e f g
V6-20	g h i j	OC-10	g h
V2-60	h i j k l	V6-20	g h
V4-20	i j k l	V2-40	i
V2-40	k l m	V4-20	i
V6-10	l m n	V6-10	j
V4-10	m n o	V4-10	k
OC-5	n o	V2-20	k l
V2-20	o	OC-5	k l
V6-5	p	V2-10	m n
V2-10	q r	V6-5	n
V4-5	r	V4-5	n
V2-5	s	V2-5	o

* Experimental groups are expressed as irradiation mode-exposure time.

** The same letters denote no statistically significant difference ($p > 0.01$).

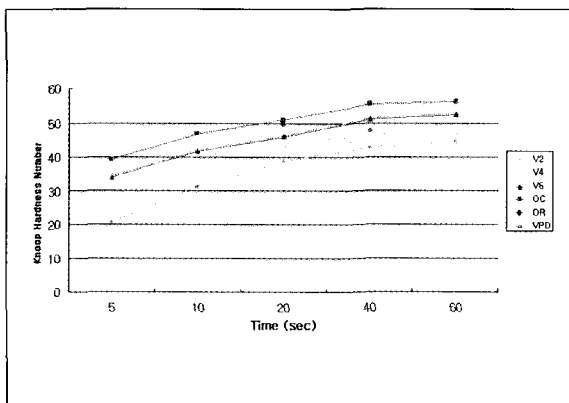


Fig. 7. Knoop Hardness Number at the top surface of 2 mm thickness specimens. Each data represents mean value from 3 specimens.

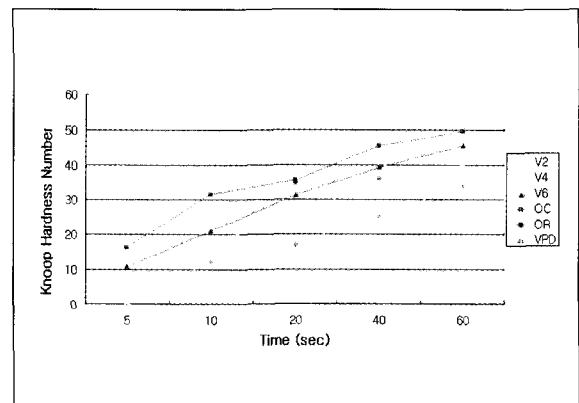


Fig. 8. Knoop Hardness Number at the bottom surface of 2 mm thickness specimens. Each data represents mean value from 3 specimens.

Table 7. Microleakage score proportions at enamel margin (%)

Group	0	1	2	3	n
V2	33.33	36.67	3.33	26.67	30
V4	40.91	31.82	9.09	18.18	22
V6	29.17	54.17	8.33	8.33	24
OC	79.17	20.83	0.00	0.00	24
OR	60.00	20.00	13.33	6.67	30
VPD	46.15	50.00	3.85	0.00	26

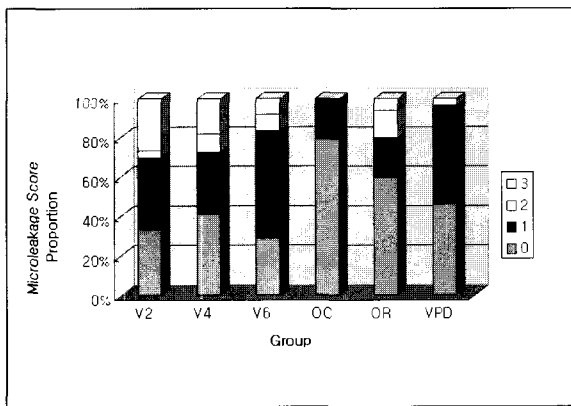


Fig. 9. Microleakage score proportions at enamel margin (%).

The data presented are representatives of 30 specimens from V2, 22 specimens from V4, 24 specimens from V6, 24 specimens from OC, 30 specimens from OR and 26 specimens from VPD group.

VPD군들 간에는 유의한 차이가 없었으며 V2군이 가장 낮게 나타났고, 60초에서는 OC, V6, V4, V2군 순으로 나타났다($p < 0.01$).

V2, V4, V6 및 OC군을 비교해 볼 때 광도가 높을수록 모든 광조사 시간대에서 미세경도 값이 높게 나타났고 광조사 시간이 길어질수록 높은 미세경도 값을 보였다. 20초 광조사에서 OR군은 광조사면에서 OC군과 V6군, 바닥면에서 OC군과 미세경도 값에 유의한 차이를 나타내지 않았고, 40초 광조사에서 VPD군은 광조사면에서 V4군, 바닥면에서 V6군 및 V4군과 유의한 차이를 나타내지 않았다($p > 0.01$).

4. 변연누출

각 실험군의 법랑질 및 상아질 변연부의 미세누출은

Table 8. Microleakage score proportions at dentin margin (%)

Group	0	1	2	3	n
V2	26.67	13.33	26.67	33.33	30
V4	9.09	9.09	13.64	68.18	22
V6	0.00	8.33	8.33	83.33	24
OC	12.50	12.50	16.67	58.33	24
OR	53.13	22.22	8.70	8.43	30
VPD	7.69	11.54	15.38	65.38	26

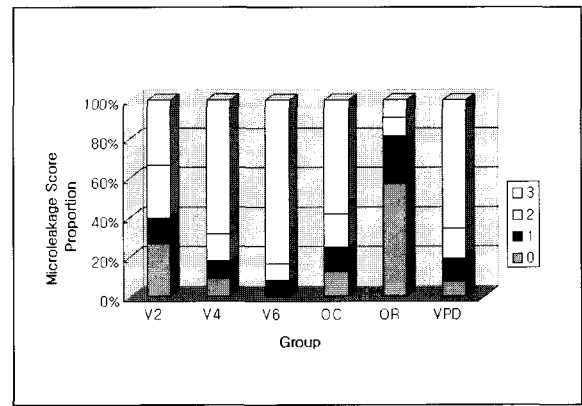


Fig. 10. Microleakage score proportions at dentin margin (%).

The data presented are representatives of 30 specimens from V2, 22 specimens from V4, 24 specimens from V6, 24 specimens from OC, 30 specimens from OR and 26 specimens from VPD group.

Table 7과 8 및 Fig. 9와 10에 나타나 있다. 전체적으로는 법랑질 변연이 상아질 변연보다 적은 미세누출을 보였다.

법랑질 및 상아질 변연에서의 각 score별 분포결과를 볼 때, 법랑질 변연에서 미세누출이 전혀 관찰되지 않은 시편의 비율은 OC군에서 가장 높았으며, 그 다음으로 OR, VPD, V4, V2, V6군 순으로, 와동저까지 누출이 관찰된 시편의 비율은 V2, V4, V6, OR, VPD, OC군 순으로 나타났다(Fig. 9). 상아질 변연에서 미세누출이 전혀 관찰되지 않은 시편의 비율은 OR, V2, OC, V4, VPD, V6군 순으로, 와동저까지 누출이 관찰된 시편의 비율은 V6, V4, VPD, OC, V2, OR군 순으로 나타났다(Fig. 10).

법랑질 변연에서는 OC군의 미세누출이 가장 적게 나타났고, 상아질 변연에서는 OR군의 미세누출이 가장 적게 나타났다. V2, V4, V6군들 간의 비교시 법랑질 변연에서는 큰 차이가 나타나지 않았으나 상아질 변연에서는 V6군이 가장

변연누출이 많았고, 그 다음으로 V4, V2군 순으로 나타났고, VPD군은 범랑질과 상아질 변연 모두에서 V6군에 비해 적은 미세누출을 보였다.

IV. 고 찰

치과수복용 복합레진의 중합과정에서 발생하는 수축은 충전외벽과 수복물간의 접촉계면에서 응력을 발생시켜 결합을 파괴하거나 주위 치질의 미세균열을 야기하여 술후 동통, 이차우식 등 임상적 문제들의 주된 원인이 된다. 따라서 복합레진의 수축과 응력에 관한 연구들이 임상보존 영역에서 그 사용 빈도가 증가되고 있는 복합레진의 재료개발과 술식개선을 목적으로 수행되어져 왔다.

복합레진에서 중합체로 전환되는 단위 부피당 methacrylate기의 수가 중합수축량에 영향을 주는 가장 중요한 요소이며³¹, Tobolsky 등⁴¹은 단량체의 반터발스힘과 이중 공유결합이 중합반응으로 단일 공유결합의 중합체로 전환되는 과정에서 중합수축이 발생한다고 하였다. Feilzer 등²⁸은 중합과정 동안 복합레진은 점성단계에서 점탄성단계를 거쳐 탄성단계에 이르게 되며, 중합반응의 초기인 점성단계에서는 응력의 발생이 없고, 점탄성단계에서는 재료 내부의 유동성과 탄성변화에 의해 부분적으로 응력이 완화되며, 최종적으로는 주위 치질의 탄성에 의해 응력이 완화된다고 하였다. Davidson과 Feilzer²³는 중합과정 동안 레진기질이 점소성인 유동성 상태에서 탄성체로 전환되는 젤화 과정을 거치게 되는데 젤화점이 수축을 보상할 수 있는 유동성을 상실하는 점이라고 하였고, Sakaguchi 등⁴²은 중합과정 중의 수축을 젤화점 이전과 이후로 나누어 분류하였는데 대부분의 중합수축 응력은 젤화점 이후에 형성된다고 하였다.

복합레진을 와동에 접착한 경우 중합 초기에는 기질의 망상구조 형성이 완료되지 않아 강도가 약하고 탄성한계도 낮아서 분자들의 이동과 재배치가 가능하여 우수한 유동성으로 인해 중합수축으로 형성된 응력이 완화될 수 있어 레진과 치질의 접착에 손상을 주지 않는다. 그러나 중합이 진행되면 유동성이 감소하고 탄성계수가 증가하여 응력이 완화될 수 없으므로 접착의 실패를 가져올 수 있다²⁴. 최근 소개된 상아질 접착제의 접착강도는 20MPa 이상으로 매우 높지만, 이것은 C-factor가 아주 작은 평면의 상아질에 접착하고 24시간 정도의 시간경과 후 측정된 값이므로 실제 임상에서와는 상당한 차이가 있을 것이며, 특히 C-factor가 큰 와동인 경우 초기 복합레진의 중합수축 응력으로 인한 결합의 파괴를 상아질 접착제가 효과적으로 막기는 어려울 것으로 생각된다.

Uno와 Asmussen²⁵은 화학중합형 복합레진의 경우 중합시 젤화과정이 지연되어 광중합형보다 유동성이 더 높으며 중합속도도 느리기 때문에 와동벽에 접착을 형성하는 과정

에서 중합수축 응력이 감소되어 광중합형보다 우수한 변연적합성을 나타낸다고 하였다. 광중합형 복합레진은 화학중합형보다 중합속도가 매우 빠르고 교차결합이 빨리 진행되어 탄성한계 도달시간이 짧으므로 형성된 응력이 복합레진의 유동성으로 완화될 가능성이 적으며, 또한 광조사 표면에서부터 중합이 시작되므로 먼저 중합된 표면쪽으로 수축이 진행되어 변연적합성에 문제가 생길 가능성이 크다.

Olive 등⁴³에 의하면 일반적인 보통광도의 광조사기를 사용하는 경우 순간적으로 최대 강도의 중합광을 조사하게 되어 수 초 내에 복합레진을 중합시키며, 이때 발생하는 반응열에 의해 중합속도가 가속된다고 하였으며, Goracci 등³¹은 그 결과 복합레진의 점성이 급속히 증가하고 수축보상을 위한 내부의 흐름이 억제된다고 하였다. 이에 초기 중합속도를 지연시켜 응력을 완화하려는 여러 연구들이 있어왔으며, 초기 중합반응의 지연은 복합레진 내부에서 점성흐름이 일어나 수축을 보상하는 시간을 연장시킴으로써 응력 발생을 지연시키고 또한 발생될 응력을 감소시킨다. 따라서 중합반응 속도의 조절은 복합레진 수복물의 중합수축 응력 감소에 중요한 영향을 미치며 이러한 속도를 조절할 수 있는 방법중의 하나가 광도와 광조사 시간을 변화시키는 것이다.

광중합형 복합레진의 중합속도는 광원의 강도를 감소시켜 지연할 수 있으며, 이 경우 복합레진의 물성을 감소시키지 않으면서 최대한 중합속도를 지연시킬 수 있는 적절한 광도와 광조사 시간의 조절이 중요하며, 또한 이것은 복합레진의 종류에 따라 각기 다르게 나타날 것이다. Harris 등⁴⁴은 동일한 광조사법으로 모든 복합레진이 최적의 중합상태를 얻을 수 없다고 하였고, Althoff와 Hartung⁴⁵은 적절한 중합을 위해 광에너지 총량의 최소량 뿐만 아니라 최대량에 대한 제한이 필요하다고 하였는데, 너무 높은 광에너지량을 적용할 경우 과도한 열이 발생될 수 있고 활성화된 개시제를 불활성화시킬 수도 있다고 하였다.

수축응력의 감소를 위해 초기 중합속도를 지연시키려는 여러 광조사 방법들이 소개되었으며, 그 중 저광도 중합법에 관한 연구들을 보면 Feilzer 등²⁸은 250mW/cm²의 저광도군과 650mW/cm²의 고광도군의 중합 후 변연적합도와 중합수축 정도를 비교한 연구에서, 저광도군에서 변연적합성이 더 우수하였으며 최종 수축량은 차이가 없었다고 하였고, Unterbrink와 Muessner³⁰은 250mW/cm²와 450mW/cm²의 광도를 40초간 조사한 후 중합수축, 굴곡강도 및 계수, 경도, 변연적합도 등을 비교한 연구에서 저광도군이 수축이나 경도의 차이없이 높은 변연적합성을 보였다고 하였으며, 응력 변화는 광도에 의해 영향을 받은 탄성계수값과 연관이 있다고 하였다. 또한 Davidson-Kaban 등⁴⁶은 175mW/cm²와 700mW/cm²의 광도를 각각 10초와 60초간 조사한 후 중합수축, 경도 및 변연적합성을 조사

한 연구에서 광조사 시간을 60초까지 연장한 경우 광도에 따른 경도차이가 없었으며 조사시간만 충분하다면 광도를 낮추는 것이 안전하다고 하였고, Ronald 등²⁷⁾은 337mW/cm², 40초군을 대조군으로 하고 241, 164 및 116mW/cm²군을 실험군으로 하여 수축응력과 중합도를 비교한 바, 응력과 광에너지 총량 사이에는 선형의 관계가 없으므로 저광도 사용시 중합도의 저하없이 응력을 감소시킬 수 있다고 하였다.

광도를 서서히 증가시키는 중합법에 관해서 Goracci 등³¹⁾은 250mW/cm², 40초 중합군과 30mW/cm²에서 250mW/cm²까지 4분에 걸쳐 광도를 서서히 증가시키면서 중합시킨 군을 비교했을 때 상아질 변연에서 적합도가 향상되었다고 하였고, 또한 Dannison 등³²⁾은 25%의 광도로 10초, 50%의 광도로 10초간 중합하고 100%의 광도로 20초간 최종 중합하였을 때 경도를 유지하면서 중합수축은 감소한다고 하였다.

저광도로 초기 중합한 후 고광도로 최종 중합하는 2단계 중합법을 사용하여 실험한 연구들을 보면, Uno와 Asmussen²⁵⁾은 110V, 30초와 220V, 30초로 중합시켰을 때 적절한 기계적 특성을 유지하면서 변연누출의 폭과 깊이가 감소된다고 하였고, Mehl 등³³⁾은 저광도로 초기 중합 후 고광도로 최종 중합하는 방법이 고광도 중합법에 비해 물성뿐 아니라 변연적합도도 향상시킬 수 있다고 하였다. Koran과 Kürschner³⁴⁾는 2단계 중합법을 통상적인 광조사법과 비교한 후 총 광조사량이 중합에 충분한 양이면 수축, 경도 및 중합도는 별 차이가 없으나 변연적합성은 2단계 방법에서 향상된다고 하였고, Sakaguchi와 Berge³⁵⁾는 2단계 중합군에서 총에너지 양으로 계산했을 때 21% 정도의 응력완화 효과가 있었고, 중합도는 저, 고광도 중합군과 비교할 때 별 차이가 없었다고 하였다. Burgess 등³⁶⁾도 최근 소개된 Elipar Highlight™(ESPE Inc., Seefeld, Germany)을 이용하여 150mW/cm²에서 10초간, 700mW/cm²에서 30초간 2단계로 중합시켰을 때 물성의 저하없이 변연적합성이 우수하게 나타났다고 하였고, 또한 Ernst 등³⁷⁾도 같은 방법으로 광조사한 경우 중합수축 응력이 감소되었다고 하였다. 그러나 Bouschlicher 등⁴⁷⁾은 2단계 방법으로 중합한 결과 중합수축 응력의 감소가 나타나지 않았다고 하였고, Friedl 등⁴⁸⁾은 제5급 와동에서 2단계법으로 변연적합성을 향상시키지 못하였는데 이는 초기 조사광도가 너무 낮아서 대부분의 중합이 두번째 광조사에 의해 일어나기 때문이라고 하였으며, Price 등⁴⁹⁾도 2단계법으로 중합한 경우 낮은 초기 광도로 인해 복합레진과 상아질간의 결합강도가 향상되지 않았다고 하여 아직 2단계 광조사법의 효과에 대한 논란이 있다.

Kanca와 Suh³⁹⁾는 1차로 300mW/cm²의 광도로 2초간 광조사한 후 약 5분간의 휴지기를 가진 다음 2차로

600mW/cm²의 광도로 10초간 최종 중합하는 pulse-delay 법을 소개하였는데, 이 방법은 낮은 광도로 1차 광조사한 후 방치하여 중합수축으로 발생한 응력이 복합레진 자체의 유동성에 의해 완화될 수 있도록 충분한 시간을 준 다음 높은 광도로 2차 광조사하여 중합을 완료하는 방법이며 5분간의 방치시간 동안 수복물의 연마를 시행함으로써 전체 시술시간을 줄일 수 있다고 하였다.

복합레진의 중합수축을 측정하기 위해 mercury-dilatometer나 water-dilatometer를 이용하여 부피변화를 측정하는 방법^{50,51)}, pycnometer와 정밀저울을 이용하여 밀도변화를 측정하는 방법^{52,53)}, linometer나 strain gauge를 이용하여 선형 중합수축률을 측정한 후 부피 중합수축률로 환산하는 방법^{40,54-56)} 등의 다양한 방법들이 사용되어져 왔다. Feilzer 등⁴⁰⁾과 de Gee 등⁵⁴⁾은 linometer를 사용하여 분리제를 도포한 알루미늄 디스크와 유리판사이에 광중합형 복합레진 시편을 위치시키고 상방에서 광조사하여 시편의 중합수축으로 인한 알루미늄 디스크의 수직방향 이동을 비접촉식 displacement sensor로 측정하여 선형 중합수축을 측정하고 이를 부피수축으로 환산하여 mercury-dilatometer에서의 부피수축 측정값과 비교한 결과 유의한 차이가 없었다고 하였으며, 이 방법이 간편하고 온도변화에 민감하지 않으므로 복합레진의 수축측정에 유용하다고 하였다. 본 실험에서도 Feilzer 등⁴⁰⁾의 방법에 따라 제작된 linometer를 사용하여 광중합형 복합레진의 선형 중합수축을 측정하고 이를 부피수축으로 환산하여 각 군에 있어서의 시간에 따른 중합수축 변화를 관찰, 비교하였다.

Linometer를 이용한 선형 중합수축 측정 실험에서 V2, V4, V6 및 OC군은 60초간 광조사하고 그 이후 30초간 시간을 연장하여 관찰하였고, OR군은 20초간 광조사 후 70초간, VPD군은 두번째 광조사를 60초간 시행하면서 관찰하였다. 5, 10, 20, 40, 60초의 시간대에서 V2, V4, V6군의 선형 중합수축을 비교해 볼 때 모든 시간대에서 광도가 높은 군일수록 통계학적으로 유의하게 높은 중합수축이 관찰되었고 중합속도도 빠르게 나타났다. 이는 광도와 중합수축이 비례관계를 보인다는 Sakaguchi 등⁶²⁾의 보고 및 고광도에서 유의적으로 높은 중합수축을 나타내었다는 Feilzer 등²⁸⁾의 보고와 일치한다. 그러나 가장 고광도인 OC군에서는 광원의 강도에 따른 수축변화가 앞의 세 군과는 다른 양상을 보였는데 이는 광조사기의 차이에 기인한 것이라 생각된다. Sakaguchi와 Berge³⁵⁾는 Demetron 400 (Demetron/Kerr, Danbury, CT, USA)을 사용하여 시간에 따른 광조사기의 광도변화를 관찰한 연구에서 최대광도는 0.55초 후 측정되었고 시간경과에 따라 광도가 감소하였으며 40초 후에는 최대광도의 77%정도만이 측정되었다고 하였다. 따라서 본 실험에서 사용된 VIP™(Bisco)와 Optilux 501™(Demetron/Kerr)도 시간경과에 따라 광도

의 변화가 있을 것으로 생각되며 단순히 광도와 광조사 시간의 곱으로 광에너지 총량을 추정하기는 어려울 것으로 사료된다. OR군을 보면 5초의 시간대에서는 통계학적으로 유의하게 가장 낮은 중합수축을 보였으나 10초와 20초대에서는 V2군보다 높은 수축을 보였는데, 이러한 현상은 초기 10초간은 100mW/cm²에서 1000mW/cm²까지 광도가 서서히 증가되고 그 이후 10초간은 1000mW/cm²의 단일 광도로 중합시키는 ramp mode의 특성 때문인 것으로 생각된다. VPD군에서 두번째 광조사시의 중합수축을 V6군과 비교해 볼 때 처음 5초간은 유의한 차이가 없었으나 최종 중합수축은 유의하게 낮게 나타났는데, 이에 따른 수축응력 측정실험이 추가로 필요하다고 생각된다.

대부분의 중합수축이 광조사 20초 이내에서 발생하였는데 이는 Dennison 등³²⁾의 실험과 유사한 결과이며 따라서 초기 20초간의 시간이 응력 발생에 중요한 시기라고 생각된다. 초기 중합수축 양상의 변화를 관찰해 볼 때 저광도군에서 수축이 지연되어 나타났는데, 이러한 수축발현의 지연 현상은 저광도군에서 젤화점 이전의 단계가 연장되어 나타나거나 또는 저광도로 인해 중합반응이 적절히 개시되지 못한 것으로 생각할 수도 있다. 변연누출 실험에서 범랑질 변연에서는 V2, V4 및 V6군간에 큰 차이가 없었으나, 상아질 변연에서는 V2군이 V6 및 OC군에 비해 상대적으로 낮은 누출정도를 보였는데, 이는 저광도군의 중합수축이 지연되어 나타난 효과로 볼 수도 있으나 최종 중합도는 고광도군에 비해 낮게 나타나 중장기적인 변연의 내구성에는 오히려 불리하게 작용할 것으로 예측된다.

치과 수복용 복합레진에서 이상적으로는 중합과정 동안 모든 단량체가 중합체로 전환되 어야 한다. 그러나 구강내 온도 범위에서 중합시켰을 때 상당한 양의 미반응 잔류 단량체가 잔존하게 되는데 이것은 교차결합된 중합체의 망상 구조가 급격히 형성되어서 반응성이 있는

부위의 이동이 제한되기 때문이다⁵⁷⁾. 최종 중합도는 복합레진의 물성 즉, 기계적 성질, 용해도, 체적 및 색조의 안정성, 생체 적합성 등과 밀접한 연관이 있으므로 수복물의 최종 성공에 중요한 영향을 미친다. 통상적인 광조사 방법으로 복합레진을 중합시켰을 때 infrared spectroscopy로 측정된 중합도는 55~75% 정도인 것으로 알려져 있으며^{55, 57 61)}, 높은 중합도가 복합레진의 물성은 향상시킬 수 있으나 중합수축 응력 또한 증가시킬 수 있다는 보고도 있다⁶²⁾.

복합레진의 중합정도를 측정하기 위해 여러 방법들이 제시되었는데 직접적인 방법으로는 적외선 다중 내반사 분광법(Infrared multiple internal reflection spectroscopy)⁶³⁾, 시차주사 열계량법(Differential scanning calorimetry)⁶⁴⁾, 미세 전반사 적외선 분광법(Microattenuated total reflection infrared spectroscopy)⁶⁰⁾ 및 Fourier 변환 적외선 분광법(FTIR spectroscopy)^{57, 58)}

등이 있으며, 간접법으로는 optical method⁶⁵⁾, scrapping method⁶⁶⁾, 경도측정 방법 등^{67, 68)}이 있다. 상기의 방법들 중 FTIR spectroscopy를 이용한 직접적인 방법과 경도를 측정하는 간접적인 방법이 흔히 이용되고 있으며 많은 연구들에서 두 방법간에 상관관계를 보인다고 하였다. Asmussen⁶⁹⁾은 Wallace경도값과 IR에서 측정된 중합도가 상관관계를 보인다고 하였고, Rueggeberg 등⁷⁰⁾은 FTIR에서 측정된 중합도가 경도나 복합레진의 누출과 연관성을 가진다고 하였다. 또한 Ferracane⁵⁷⁾은 unfilled resin에서 Knoop hardness와 FTIR spectrometer로 측정된 중합도를 비교한 결과 특정 레진에서 두 값은 상관관계가 나타나지만 모든 레진에서 경도값으로 중합도를 예측할 수는 없다고 하였으며 이것은 레진의 기계적 성질은 중합도 보다는 망상구조 형성과 더 연관이 높기 때문이라고 하였고, 특정 레진에서 경도 값으로써 여러 조건에 따른 상대적인 중합도를 예측하는 것은 가능하다고 하였다. 광중합형 복합레진의 중합도를 평가하는 방법중 경도측정법은 중합도와 상관관계가 있으나 중합깊이가 증가할수록 경도에 비해 중합도가 현저하게 감소하기 때문에 가장 민감한 방법은 중합도를 측정하는 것이라 할 수 있다.

FTIR spectrometer에서 중합도를 측정하는 원리는 대부분의 복합레진이 Bis-GMA나 그것의 isomer를 포함하고 있어 이것의 단량체가 신장흡수띠를 aliphatic 탄소 이중결합은 1640cm⁻¹에서, aromatic 탄소 이중결합은 1610cm⁻¹에서 나타내는데, 1610cm⁻¹에서 나타나는 탄소 이중결합은 중합과정 동안 강도가 변하지 않고 남아 있어서 계산과 정의 기본으로 삼을 수 있으며 1640cm⁻¹에서 나타나는 aliphatic 탄소 이중결합의 양을 측정함으로써 미반응 잔류 단량체의 양을 계산하는 것이다. 본 실험에서 FTIR spectrometer 측정시 복합레진에서 채취한 시료를 KBr과 약 1:100의 비율로 혼합 분쇄한 후 가압기로 눌러 원형의 시편을 만들어 사용하였는데, Ferracane과 Greener⁵⁸⁾는 KBr을 이용한 방법과 얇은 판막을 이용한 방법에서 중합도를 상호 비교한 결과 KBr방법이 상대적으로 두꺼운 레진을 이용하기 때문에 중합시 발생하는 발열반응으로 인한 국소적 가열효과로 판막을 이용한 방법보다 3~4% 정도 더 높은 중합도를 보였으며, 두 방법간의 실험값 차이가 통계적으로 유의하지 않아서 두 방법 모두 사용 가능하다고 하였다. FTIR에서 얻은 peak를 이용하여 중합도를 구하기 위해 baseline technique을 사용하였으며, peak의 흡수대에서 값을 정하는 방법으로 흡수대의 peak를 측정하는 방법과 흡수대의 면적을 계산하는 방법 중 본 실험에서는 각 peak의 시점과 종점만 지정해 주면 자동적으로 면적을 계산해 주는 Bimen-calc FTIR software를 이용하여 중합도를 계산하였다.

FTIR spectrometer를 이용한 중합도 실험에서 광원의

세기에 따른 네 군을 동일 시간대에서 비교했을 때 전반적으로 고광도군일수록 높은 중합도를 나타내었고, 광조사 시간이 길어짐에 따라 중합도도 증가하는 양상을 보였다. OR군은 20초대에서 V4, V6 및 OC군과 통계학적으로 유의한 중합도의 차이가 없었으며, VPD군을 40초대에서 다른 군들과 비교해 볼 때 역시 V4, V6 및 OC군과 유의한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 앞서의 중합수축 실험 결과와 비교해 볼 때 수축이 증가함에 따라 중합도도 증가한다고 볼 수 있지만 광조사 방식에 따른 수축변화가 중합도보다 더 민감한 결과를 보인다고 생각된다.

미세경도 측정 실험에서 광조사면과 바닥면 모두 중합도 실험결과와 마찬가지로 고광도 군에서 높은 경도 값을 나타내었고 광조사 시간이 길어짐에 따라 경도가 증가하는 양상을 보였다. OR군은 20초대에서 OC, V6군과 통계학적으로 유의한 차이 없이 광조사면에서 타군에 비해 높은 경도 값을 보였고, 바닥면에서는 OC군과 유의한 차이 없이 타군에 비해 높은 경도 값을 나타내었다. VPD군의 광조사면을 보면 40초대에서 V4군과 통계학적으로 유의한 차이 없이 V2군보다는 경도가 높았으나 V6군, OC군보다는 낮았고, 바닥면에서는 V4, V6군과 유의한 차이 없이 V2군보다는 높고 OC군보다는 낮게 나타났다. 중합도와 미세경도 측정 실험결과를 바닥면에서 비교해 볼 때, 각 군에서 시간대에 따른 유의성은 완전히 일치하지는 않았으나 전반적으로 광도와 광조사 시간에 따라, 즉 고광도군일수록, 광조사 시간이 길어질수록 중합도와 미세경도 값이 증가하는 양상을 보였으며, 특히 이러한 현상은 광도차이가 클수록 명확하게 나타났다. 일반적인 보통광도(400mW/cm²)에서 Z-250(3M)의 제조회사 추천 광조사 시간인 20초를 기준으로 해서 미세경도 값을 타군들과 비교해 볼 때, 광조사면에서 20초 이하의 V2군, 10초 이하의 V4군 및 5초의 OC군과 V6군에서 통계학적으로 유의하게 낮은 미세경도 값을 보였고, 바닥면에서는 20초 이하의 V2군, 10초 이하의 V6군과 V4군 및 5초의 OC군에서 유의하게 낮은 미세경도 값을 나타내었다.

응력완화에 중요한 요소 중의 하나가 와동의 형태인데 Feilzer 등¹⁴은 와동의 3차원적 형태가 복합레진의 중합수축 응력에 미치는 영향을 보고한 바 있다. 수복물에서 와벽에 접촉된 면과 비접촉된 면의 비율로써 Configuration-factor를 정의하였으며, C-factor가 클수록 레진의 유동성은 감소하고 접촉면에서 형성된 수축응력이 증가할 수 있다고 하였다. 또한, C-factor가 1보다 작은 와동의 경우 수복물은 중합수축 응력을 견딜 수 있으나, C-factor가 3보다 큰 와동의 경우 수복물의 결합상태는 시간 경과에 따라 매우 불안정해질 수 있다고 하였다. 본 실험에서는 변연누출 실험시 C-factor가 임상에서 가장 높게 나타나는 것 중의 하나인 제5급 와동을 대상으로 하였으며, 발거치를 이용한

실험에서는 치아의 상태나 보관기간이 실험결과에 상당한 영향을 미칠 수 있다고 생각되어 단시간에 다수의 치아 획득이 가능한 제3대구치를 대상치아로 하였고, 발거치에 잔존하는 미세틈으로의 색소침투를 배제하기 위해 발거시 발치 겸자나 감자의 영향이 미치지 않는 원심면에 와동을 형성하였다. 또한 충전된 복합레진의 양에 따라 중합수축 정도가 달라질 수 있으므로 와동의 크기를 일정하게 제한하는 것이 중요하다고 생각되어 Komet* 인레이 와동형성용 bur를 사용하여 bur의 모양과 유사한 원통형의 와동을 형성하였다. 변연누출 실험에서 사용한 치아는 각 군당 15개 였으나 종절단하여 입체현미경으로 관찰하는 과정에서 색소침투가 수복물의 변연부가 아닌 다른 부위에서 일어났다고 판단되는 치아들은 제외하였으므로 결과분석한 시편수가 군에 따라 다르게 나타났다.

Suh³⁸는 pulse-delay 중합법에 관한 연구에서 200mW/cm²로 3초간 초기 중합시 수복물을 연마하기에 충분한 표면경도를 얻을 수 있다고 하여 3 내지 5분간의 휴지기 동안 연마를 시행할 것을 추천하였고, Kanca와 Suh³⁹는 300mW/cm²로 2초간 초기 중합 후 1분이 지나야 연마 가능한 경도를 얻을 수 있다고 하였다. 그러나 Yap 등¹¹에 따르면 복합레진의 중합과정에서 초기 1분간의 수축률이 가장 높으며, 중합반응의 초기 단계에서는 치질과 복합레진 수복물 사이의 결합이 성숙되는 과정에 있으므로 연마술식을 연기할 것을 추천하였고, 이 등⁷²은 초기 저광도 광중합 및 연마시기의 변화가 변연누출에 미치는 영향을 평가한 연구에서 광중합형 레진에 있어서 초기 저광도 중합이 변연누출을 감소시킬 수 있었으나 초기 중합 후 즉시 연마를 시행한 경우에는 변연누출의 감소가 나타나지 않았다고 하였다. 본 실험에서는 pulse-delay군에서 3초간 200mW/cm²의 광도로 중합시켰을 때의 표면 미세경도 값을 V2군의 5초간 중합시킨 군으로 추정해 볼 때 초기 연마 과정을 시행하기에는 부적절하다고 생각되어 연마를 시행하지 않았다.

변연누출 실험에서 범랑질과 상아질 변연에서의 미세누출을 비교해 볼 때 전반적으로 범랑질 변연에서 미세누출이 적게 나타났다. 이는 중합의 결과로 생긴 수축응력으로 인해 상대적으로 결합강도가 약한 상아질 변연에서 결합분리가 많이 일어나면서 응력이 완화된 결과, 범랑질 변연에서 색소침투가 적게 나타난 것이라고 생각된다⁷³. 이러한 현상은 특히 가장 고광도인 OC군에서 두드러지는데 범랑질 변연에서 가장 고광도군인 OC군이 타군들에 비해 가장 적은 누출을 보였으며 V2, V4, V6군들 간에는 광도에 따른 누출의 뚜렷한 차이가 없었다. 상아질 변연에서는 OR군이 타군들에 비해 가장 적은 누출을 보였으며, V2, V4, V6군들 간에는 대체로 고광도군일수록 누출이 많았다. OR군에서의 우수한 변연적합성은 중합수축 실험에서의 초기 수축발현

지연현상과 연관이 있는 것으로 생각된다. 동일한 600 mW/cm²의 광도를 이용한 V6군과 VPD군의 비교시 법랑질과 상아질에서 모두 VPD군의 변연누출이 적은 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. 중합수축 그래프에서 OR군과 VPD군의 초기 수축 증가속도가 가장 완만한 것으로 나타났으며 그 결과 미세누출이 감소한 것으로 보이지만, OR군과 VPD군 사이에 상아질 변연의 누출에 차이가 나는 이유에 대해서는 추가적인 실험이 필요하다고 사료된다.

본 실험에서는 광조사 방식에 따른 6개의 실험군으로 광원의 세기에 따라 VIP™(Bisco)에서 200mW/cm², 400mW/cm², 600mW/cm²의 세가지 단일 광도군을 선택하였고 Optilux 501™(Demetron/Kerr)에서 850mW/cm²의 고광도군 하나를 설정하였으며, 또한 저, 고광도를 혼용해서 사용하는 방법으로 VIP™(Bisco)에서의 pulse-delay mode와 Optilux 501™ (Demetron/ Kerr)에서의 ramp mode를 선택하여 실험하였다. Rueggeberg 등²⁾은 복합레진 1mm를 중합시키기 위해 최소 233mW/cm²이상의 광도가 필요하다고 하여 본 실험에서도 저광도군을 200mW/cm²로 설정하였으며, 텅스텐 할로겐 램프이면서 비교적 고광도를 낼 수 있는 Optilux 501™을 이용하여 850mW/cm²의 고광도군을 설정하였다.

본 실험에서 사용된 두가지 광조사기에서 광도의 검정은 Optilux 501™(Demetron/Kerr)에 내장되어 있는 광도측정기를 이용하여 시행하였고, 실험전, 후 측정치를 비교한 결과 50mW/cm²의 오차 범위 내에 있었다. Frederick과 Rueggeberg⁷⁴⁾은 광도측정기의 정밀성에 관한 연구에서 이 기계들이 임상적으로 유용하나 광도의 절대치는 기계마다 유의한 차이를 보인다고 하였다. 따라서 본 실험에서 사용된 광도 수치도 각 군들 간의 상대적인 비교 수치로는 유용하나 다른 실험에서 사용된 광도와 단순 비교하기는 어려울 것으로 생각된다.

Nomoto 등⁷⁵⁾은 광도와 조사시간의 곱으로 계산되는 광에너지 총량이 일정하면 복합레진의 중합깊이가 동일하고 중합도 또한 연관성을 보인다고 하였고, Sakaguchi와 Berge³⁵⁾는 광에너지 총량과 중합수축 응력은 비례관계가 있으나 FTIR로 측정한 중합도와는 비례관계가 나타나지 않았다고 하였으며, Sakaguchi 등⁴²⁾은 광도와 중합수축 응력이 비례관계를 보인다고 하였다. 광에너지 총량의 관점에서 본 실험의 결과들을 비교해 보면, 200mW/cm², 60초간 조사한 경우 400mW/cm², 30초 및 600mW/cm², 20초간 조사한 경우보다 적은 수축량을 나타내었는데 이는 복합레진의 낮은 중합도에 따른 결과로 보인다. 하지만 미세경도 측정시에는 중합수축이나 중합도에서와 같은 큰 차이는 보이지 않았으며, 이러한 결과는 복합레진의 물성을 저해하지 않으면서 광도의 조절을 통해 중합수축을 줄일 수 있다는

가능성을 제시하는 것이라 할 수 있다.

중합수축, 중합도, 미세경도 및 변연누출 실험의 결과들을 종합해 볼 때 광원의 세기가 증가할수록 전반적으로 중합수축, 중합도 및 미세경도가 증가하는 양상을 보였으나 변연누출은 광원의 강도와 상관관계를 찾기 어려웠다. 저광도군에서의 느린 중합속도와 초기 수축지연 현상이 변연적합성을 향상시키는데 유리하게 작용할 것으로 생각되지만 변연누출 실험에서 저광도군의 효용성이 입증되지 못하였으며 또한 60초까지의 광조사 시간에서 볼 때 중합도가 다소 불충분하여 물성 저하의 가능성이 있는 것으로 생각된다. 저광도에서 고광도로 서서히 광도를 증가시키면서 중합하는 ramp-mode에서 광조사 초기의 느린 중합속도, 낮은 최종 수축정도 및 높은 중합도와 미세경도 값을 보였으며, 이러한 특성으로 인해 변연적합 성도 우수하게 나타난 것으로 사료된다.

복합레진 수복의 성공적인 시술은 복합레진의 중합수축률, 유동성, 탄성계수, 중합정도 및 치질과의 결합강도 등에 의해 영향을 받는데, 특히 중합수축 응력에 의한 문제를 해결하기 위해서는 수축의 형성과정 및 기전과 형성된 응력을 완화할 수 있는 방법에 관한 진전된 연구가 필요하다고 생각되며, 또한 ramp-mode를 이용한 중합법에 관해서도 많은 연구가 필요하다고 사료된다.

V. 요약

Filtek™ Z-250(3M Dental Products, St. Paul., MN, USA) 광중합형 복합레진을 대상으로 다양한 광조사 방식이 중합수축, 중합도 및 미세누출에 미치는 영향을 알아보 고자 하였다.

VIP™(Bisco Dental Products, Schaumburg, IL, USA)를 이용하여 200, 400 및 600mW/cm²의 일정한 광도로 중합시킨 세 군(V2, V4 및 V6군)과 200mW/cm²의 광도로 3초간 중합시키고 5분간 방치한 후 다시 600mW/cm²의 광도로 중합시키는 pulse-delay 방식을 이용한 군(VPD군) 그리고 Optilux 501™(Demetron/Kerr, Danbury, CT, USA)을 이용하여 C-mode와 R-mode로 중합시킨 두 군(OC군, OR군) 등 모두 6개의 군으로 나누어 실험하였으며, 복합레진의 중합과 누출을 다음의 네 가지 방법으로 측정하였다.

첫째, V2, V4, V6, OC군은 60초간, OR군은 20초간 그리고 VPD군은 두번째 광조사를 60초간 시행하면서 시간에 따른 선형 중합수축을 Linometer(R&B, Daejeon, Korea)로 측정하였다. 둘째, V2, V4, V6, OC군은 각각 5, 10, 20, 40, 60초간 그리고 OR군과 VPD군은 정해진 조건에 따라 중합시킨 2mm 두께 시편의 바닥면에서 시료를 채취한 후 KBr method로 시편을 제작하고, FTIR

spectrometer(IFS 120 HR, Bruker, Karlsruhe, Germany)로 미반응 잔류단량체의 양을 측정하여 중합도를 측정하였다. 셋째, 두번째 실험과 같은 조건으로 중합시킨 2mm 두께 시편의 광조사면과 바닥면에서 중합 10분 후 미세경도 측정기(FM7, Future-Tech Co., Tokyo, Japan)로 500g의 하중을 10초간 가하여 Knoop Hardness Number(KHN) 값을 측정하였다. 끝으로, 90개의 받거리 치경부에 제5급 와동을 형성하고 V2군은 60초간, V4군은 40초간, V6군은 30초간 그리고 OC, OR, VPD군은 정해진 조건에 따라 중합시킨 후, methylene blue 용액에 침적시키고 종절단하여 법랑질과 상아질 변연의 미세누출 정도를 측정하였다.

중합수축, 중합도 및 미세경도 측정치는 one-way ANOVA와 Duncan's multiple range test를, 변연누출 정도는 chi-square test를 이용, 통계처리하여 다음의 결과를 얻었다.

- 중합수축의 정도는 VIP™(Bisco) 사용군에서 전체 조사광도가 높을수록 큰 경향을 보여 600mW/cm²군에서 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 Pulse-delay군, 400mW/cm²군, 200 mW/cm²군 순이었고, Optilux 501™(Demetron/Kerr) 사용군에서는 Continuous 방식이 Ramp 방식보다 크게 나타났다.
- 중합도와 미세경도 값은 공히, 전체 조사광도가 높을수록 높게 나타났으며, 최종 중합도는 44.77~54.98%의 범위를, 미세경도 값은 34.10~56.30의 범위를 보였다.
- 미세누출은 전반적으로 상아질 변연이 법랑질 변연에 비해 많았고, VIP™(Bisco) 사용 군에서는 광도가 높을수록 상아질 변연에서 미세누출이 증가하는 양상을 보였으며, 법랑질 변연에서는 Optilux 501™(Demetron/Kerr)의 Continuous 방식이, 상아질 변연에서는 Ramp 방식이 가장 적은 미세누출을 보였다.

참고문헌

1. Burke F. J. : Light-activated composites : the current status. Dent. Update, 12:182, 184-188, 1985.
2. Rueggeverg F. A., Caughman W. F. and Curtis J. W. Jr. : Effect of light intensity and exposure duration on cure of resin composite. Oper. Dent., 19:26-32, 1994.
3. Venhoven B. A., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Polymerization contraction and conversion of light-curing bisGMA-based methacrylate resins. Biomaterials, 14:871-875, 1993.
4. Feilzer A. J., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Curing contraction of composites and glass ionomer cements. J. Prosthet. Dent., 59:297-300, 1988.
5. Jensen M. E. and Chan D. C. N. : Polymerization shrinkage and microleakage. In: Vanherle G. Smith DC (eds). Posterior composite resin dental restorative materials. ed 1. Utrecht, The Netherlands : szulc, 243, 1985.
6. Carvalho R. M., Pereira J. C., Yoshiyama M. and Pashley D. H. : A review of polymerization contraction : The influence of stress development versus stress relief. Oper. Dent. 21:17-24, 1996.
7. Suliman A. A., Boyer D. B. and Lakes R. S. : Cusp movement in premolars resulting from composite polymerization shrinkage. Dent. Mater., 9:6-12, 1993.
8. Hickman J. and Jacobsen P. H. : Finite element analysis of dental polymeric restorations. Clin. Mater., 7:39-46, 1991.
9. Tarumi H., Imazato S., Ehara A., Kato S., Ebi N. and Ebisu S. : Post-irradiation polymerization of composites containing bis-GMA and TEGDMA. Dent. Mater., 15:238-242, 1999.
10. Miyazaki M., Hinoura K., Onose H. and Moore B. K. : Effect of filler content of light cured composites on bond strength to bovine dentin. J. Dent., 19:301-303, 1991.
11. Feilzer A. J., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations. Dent. Mater. 6:167-171, 1990.
12. Asmussen E. : Clinical relevance of physical, chemical and bonding properties of composite resins. Oper. Dent., 2:251-256, 1985.
13. Feilzer A. J., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Relaxation of polymerization contraction shear stress by hygroscopic expansion. J. Dent. Res., 69:36-39, 1990.
14. Feilzer A. J., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. J. Dent. Res., 66:1636-1639, 1987.
15. Reinhardt K. J. : Effect of the light source on the marginal adaptation of composite fillings. Deutsche Zahn rzliche Zeitschrift, 46:132-134, 1991.
16. Pilo R. and Cardash H. S. : Post-irradiation polymerization of different anterior and posterior visible light-activated resin composites. Dent. Mater., 8:99-304, 1992.
17. Kemp-Scholte C. M. and Davidson C. L. : Complete marginal seal of class V resin composite restorations effected by increased flexibility. J. Dent. Res., 69:1240-1247, 1990a.
18. Davidson C. L. and Davidson-Kaban S. S. : Handling of mechanical stresses in composite restorations. Dent. Update, 25:274-283, 1998.
19. Dauvillier B. S., Feilzer, A. J., de Gee A. J. and Davidson C. L. : Visco-elastic parameters of dental restorative materials during setting. J. Dent. Res., 79:818-825, 2000.
20. Lutz F., Krejci I. and Lodenburg T. R. : Elimination of polymerization stresses at the margins of posterior composite resin restorations: a new restorative technique. Quinte. Int., 17:777-784, 1986.
21. Lutz J. L., Masutani S., Setcos J. C., Lutz F., Swartz M. L. and Phillips R. W. : Margin quality and microleakage of Class II composite resin restorations. J. Am. Dent. Assoc., 114:49-57, 1987.
22. Winkler M. M., Katona T. R. and Paydar N. H. : Finite element stress analysis of three filling techniques for class V light-cured composite restorations. J. Dent. Res., 75:1477-1484, 1996.

23. Davidson C. L. and Feilzer A. J. : Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *J. Dent.* 25:435-440, 1997.
24. Koran P. and Kürschner 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.
25. Uno S. and Asmussen E. : Marginal adaptation of a restorative resin polymerized at reduced rate. *Scand. J. Dent. Res.*, 99: 440-444, 1991.
26. Davidson C. L. and De Gee A. J. : Relaxation of polymerization contraction stresses by flow in dental composites. *J. Dent. Res.*, 63:146-148, 1984.
27. Sakaguchi R. L. and Berge H. X. : Effect of light intensity on polymerization contraction of posterior composite. *J Dent. Res.*, 1997:76(IADR abstract):74, #481.
28. Feilzer A. J., Dooren L. H., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Influence of light intensity on polymerization shrinkage and integrity of restoration-cavity interface. *Eur. J. Oral Sci.*, 103:322-326, 1995.
29. Saliha S., Davidson-Kagan, Carel L., Davidson C. L., Feilzer A. J., De Gee A. J. and Nejdert E. : 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.
30. Unterbrink G. L. and Muessner R. : Influence of light intensity on two restorative systems. *J. Dent.*, 23:183-189, 1995.
31. Goracci G., Mori G. and De Martinis L. C. : Curing light intensity and marginal leakage of resin composite restorations. *Quinte. Inter.*, 27:355-362, 1996.
32. Dennison J. B., Yaman P., Seir R. and Hamilton J. C. : Effect of variable light intensity on composite shrinkage. *J. Prosthet. Dent.*, 84:499-505, 2000.
33. Mehl A., Hickel R. and Kunzelmann K. H. : Physical properties and gap formation of light-cured composites with and without 'softstart-polymerization'. *J. Dent.*, 25:321-330, 1997.
34. Koran P. and Kürschner R. : Effect of sequential versus continuous irradiation of a light-cured resin composite on shrinkage, viscosity, adhesion, and degree of polymerization. *Am. J. Dent.*, 10:17-22, 1998.
35. Sakaguchi R. L. and Berge H. X. : Reduced light energy density decreases post-gel contraction while maintaining degree of conversion in composites. *J. Dent.*, 26:695-700, 1998.
36. Burgess J. O., de Goes M., Walker R. and Ripps A. H. : An evaluation of four light-curing units comparing soft and hard curing. *Pract. Periodontics Aesthet. Dent.*, 11:125-132, 1999.
37. Ernst C. P., Kürschner R., Rippin G. and Willershausen B. : Stress reduction in resin-based composites cured with a two-step light-curing unit. *Am. J. Dent.* 13:69-72, 2000.
38. Suh B. I. : Reducing the residual strain in composites with the pulse-delay cure technique. *A. P. D. N.*, July-Sep.:4-7, 2000.
39. Kanca J. and Suh B. I. : Pulse activation : Reducing resin-based composite contraction stresses at the enamel cavosurface margins. *Am. J. Dent.*, 12:107-112, 1999.
40. Feilzer A. J., De Gee A. J. and Davidson C. L. : Increased wall-to-wall curing contraction in thin bonded resin layers. *J. Dent. Res.*, 66:48-50, 1989.
41. Tobolsky A. V., Leonard F. and Roeser G. P. : Use of polymerizable ring compounds in constant volume polymerizations. *J. Polym. Sci.*, 3:604-611, 1948.
42. Sakaguchi R. L., Peters MCRB., Nelson S. R., Douglas W. H. and Poort H. W. : Effects of polymerization contraction in composite restorations. *J. Dent.* 20:178-182, 1992a.
43. Olive G. H. and Olive S. : Polymerisation katalisekinetik mekanismen. *Chemie. Weinheim Bergstraße.* 1979.
44. Harris J. S., Jacobsen P. H. and O'Doherty D. M. : The effect of curing light intensity and test temperature on the dynamic mechanical properties of two polymer composites. *J. Oral Rehabil.*, 26:635-639, 1999.
45. Althoff O. and Hartung M. : Advances in light curing. *Am. J. Dent.* 13:77-84, 2000.
46. Davidson-Kaban S. S., Davidson C. L., Feilzer A. J., De Gee A. J. and 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.
47. Bouschlicher M. R., Rueggeberg F. A. and Boyer D. B. : Effect of stepped light intensity on polymerization force and conversion in a photoactivated composite. *J. Esthet. Dent.*, 12:23-29, 2000.
48. Friedl K. H., Schmalz G., Hiller K. A. and Märkl A. : Marginal adaptation of class V restorations with and without "softstart-polymerization". *Oper. Dent.*, 25:26-32, 2000.
49. Price R. B., Bannerman R. A., Rizkalla A. S. and Hall G. C. : Effect of stepped vs. continuous light curing exposure on bond strengths to dentin. *Am. J. Dent.*, 13:123-128, 2000.
50. Lai R. L. and Johnson A. E. : Measuring polymerization shrinkage of photoactivated restorative materials by a water filled dilatometer. *Dent. Mater.*, 9:139-143, 1993.
51. Rees J. S. and Jacobsen P. H. : The polymerization shrinkage of composite resins. *Dent. Mater.*, 5:41-44, 1989.
52. Puckett A. D. and Smith R. : Method to measure the polymerization shrinkage of light cured composites. *J. Prosthet. Dent.*, 68:56-58, 1992.
53. Cook W. D., Forrest M. and Goodwin A. A. : A simple method for the measurement of polymerization shrinkage in dental composites. *Dent. Mater.*, 15:447-449, 1999.
54. De Gee A. J., Feilzer A. J. and Davidson C. L. : True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *dent. Mater.* 9:11-14, 1993.
55. Silikas N., Eliades G. and Watts D. C. : Light intensity effects on resin composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dent. Mater.*, 16:292-296, 2000.
56. Sakaguchi R. L., Sasik C. T., Bunczak M. A. and Douglas W. H. : Strain gauge method for measuring polymerization contraction of composite restoratives. *J. Dent.*, 19:312-316, 1991.
57. Ferracane J. L. : Correlation between hardness and degree of conversion during the setting reaction of unfilled dental restorative resins. *Dent. Mater.*, 1:11-14, 1985.
58. Ferracane J. L. and Greener E. H. : Fourier transform infrared analysis of degree of polymerization in unfilled resins - Methods comparison. *J. Dent. Res.*

- 63(8):1093-1096, 1984.
59. Asmussen E. : Factors affecting the quantity of remaining double bonds in restorative resin polymers. *Scand. J. Dent. Res.*, 90:490-496, 1982.
60. Eliades G. C., Vougiouklakis G. J. and Caputo A. A. : Degree of double bond conversion in light-cured composites. *Dent. Mater.*, 3:19-25, 1987.
61. DeWald J. P. and Ferracane J. L. : A comparison of four modes of evaluating depth of cure of light-activated composites. *J. Dent. Res.*, 66(3):727-730, 1987.
62. Sakaguchi R. L., Douglas W. H. and Peters M. C. R. B. : Curing light performance and polymerization of composite restorative materials. *J. Dent.*, 20:183-188, 1992.
63. Vankerckhoven H. et. al. : Unreacted methacrylate groups on the surfaces of composite resins. *J. Dent. Res.*, 61:791-798, 1982.
64. Antonucci J. M. and Toth E. E. : Extent of polymerization of dental resins by differential scanning calorimetry. *J. Dent. Res.*, 62:121-126, 1983.
65. Murray G. A., Yates J. L. and Newman S. M. : Ultraviolet light and ultraviolet light-activated composite resins. *J. Prosthet. Dent.*, 46:167-170, 1981.
66. Cook W. : Factors affecting the depth of cure of ultraviolet-polymerized composites. *J. Dent. Res.*, 59:800-808, 1984.
67. Venz S. and Antonucci J. M. : Physical and chemical characteristics of dual cured dental composites. (abstract) *J. Dent. Res.*, 67:225-231, 1988.
68. Chan K. C. and Boyer D. B. : Curing light-activated composite cement through porcelain. *J. Dent. Res.*, 68:476-480, 1991.
69. Asmussen E. : Restorative resins : hardness and strength vs. quantity of remaining double bonds. *Scand. J. Dent. Res.* 90:484-489, 1982.
70. Rueggeberg F. A. and Craig R. G. : Correlation of parameters used to estimate monomer conversion in a light-cured composite. *J. Dent. Res.*, 67:932-937, 1983.
71. Yap A. U. J., Wang H. B., Siow K. S. and Gan L. M. : Polymerization shrinkage of visible-light-cured composites. *Oper. Dent.*, 25:98-103, 2000.
72. 이상훈, 정일영, 노병덕 : 광중합형 레진에서 초기 저광도 광중합 및 연마시기가 변연부 미세누출에 미치는 영향. *대한치과보존학회지*, 25:85-90, 2000.
73. 박은숙, 김기옥, 김성교 : 광조사 방식이 복합레진 수복물의 변연누출에 미치는 영향. *대한치과보존학회지*, 26:263-272, 2001.
74. Frederick A. and Rueggeberg : Precision of hand-held dental radiometers. *Quintess. Int.*, 24:391-396, 1993.
75. Nomoto R, Uchida K. and Hirasawa T. : Effect of light intensity on polymerization of light cured composite resins. *Dent. Mater. J.*, 13:198-205, 1994.