

컴퓨터 시각과 입자 추적 방법을 이용한 복합레진의 선형중합수축 측정의 새로운 방법

이인복* · 민선홍 · 서덕규 · 김선영 · 권영철

서울대학교 치의학대학원 치과보존학교실

ABSTRACT

A NEW METHOD TO MEASURE THE LINEAR POLYMERIZATION SHRINKAGE OF COMPOSITES USING A PARTICLE TRACKING METHOD WITH COMPUTER VISION

In-Bog Lee*, Sun-Hong Min, Deog-Gyu Seo, Sun-Young Kim, Youngchul Kwon

Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea

Since the introduction of restorative dental composites, their physical properties have been significantly improved. However, polymerization shrinkage is still a major drawback. Many efforts have been made to develop a low shrinking composite, and silorane-based composites have recently been introduced into the market. In addition, many different methods have been developed to measure the polymerization shrinkage.

In this study, we developed a new method to measure the linear polymerization shrinkage of composites without direct contact to a specimen using a particle tracking method with computer vision. The shrinkage kinetics of a commercial silorane-based composite (P90) and two conventional methacrylate-based composites (Z250 and Z350) were investigated and compared. The results were as follows:

1. The linear shrinkage of composites was 0.33-1.41%. Shrinkage was lowest for the silorane-based (P90) composite, and highest for the flowable Z350 composite.
2. The new instrument was able to measure the true linear shrinkage of composites in real time without sensitivity to the specimen preparation and geometry. [J Kor Acad Cons Dent 35(3):180-187, 2010]

Key words: Composites, Silorane, Linear polymerization shrinkage, Computer vision, Particle tracking

-Received 2010.4.22., revised 2010.4.25., accepted 2010.4.26.-

I. 서 론

수복용 복합레진은 심미성으로 인해 전치부 뿐만 아니라 아말감이나 금 인레이와 같은 금속수복물의 심미적 대체물로서 구치부에도 사용이 점차 증가하고 있다. 현재의 복합레진은 물성의 개선으로 1년 마모도가 아말감과 거의 비슷해져 마모저항성은 초기의 제품과 달리 더 이상 문제가 되지 않을 정도로 향상되었다.^{1,2)}

수복용 광중합형 복합레진은 중합 시 2-5%의 체적 수축률을 지닌다. 중합 수축은 직접법에 의한 복합레진 수복 시 와동벽에 강한 응력을 발생시켜 접착의 실패, 수복물과 와동벽 사이에 미세 간극, 그리고 법랑질 변연의 미세 파절 등을 일으킬 수 있다. 이 결과 수복 후 과민반응이나 이차우식, 치수염 등 수복물의 실패를 가져온다.³⁻⁷⁾

중합수축은 약한 van der Waals 힘으로 느슨하게 묶여 있던 단량체 분자가 중합반응이 진행됨에 따라 공유결합으로 변하면서 고분자 내의 단량체 사이의 거리가 줄어들어 발생한다. 많은 연구자들이 이러한 중합수축을 줄이기 위해 새로운 단량체를 개발하거나 filler 체계를 개선하기 위해 많은 노력을 기울여 왔으며 복합레진의 중합수축률을 정확히 측정하는 것은 매우 중요하다.⁸⁻¹⁶⁾

중합수축률의 측정은 주로 mercury나 water dilator-

*Corresponding Author: In-Bog Lee

Department of Conservative Dentistry & Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University
275-1 Yoengyeon-Dong, Jongno-Gu, Seoul, 110-786, Korea
Tel: 82-2-2072-3953 Fax: 82-2-2072-3859
E-mail: inboglee@snu.ac.kr

ter를 사용하여 체적변화를 측정하거나 중합 전후의 비중변화를 정밀 분석저울로 측정하였다.^{4,5)} 그러나 이들 방법은 매우 번거로움을 요하는 작업을 필요로 하고 온도변화에 매우 민감하다. 이 등¹⁶⁻¹⁸⁾은 증류수 안에서 복합레진이 중합할 때 일어나는 부력변화를 이용하여 실시간으로 복합레진의 체적중합수축을 측정하는 방법을 제시한 바 있다.

체적수축률이 선형수축률의 3배가 된다는 사실에 근거하여 LVDT (linear variable differential transformer)나 strain gage를 이용하여 선형수축률을 측정한 후 체적수축률로 환산하기도 한다. 그러나 이 방법은 등방적인 수축(isotropic contraction)이 보장될 경우에만 유용하며 그렇지 못한 경우(anisotropic)는 시편의 기하학적인 형태에 따라 실제 값보다 커지거나 작아지는 단점이 있다.^{6,7,10,11,14)} 대부분의 선형수축 측정방법에서는 길이 변화를 측정하는 감지기가 복합레진 시편에 직접 혹은 간접적으로 접촉해야 하므로 시편의 형태와 수축 방향에 영향을 미치게 된다. 따라서 연구자 마다 동일한 종류의 복합레진에 대하여 서로 다른 측정값을 보고하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 컴퓨터 시각(computer vision)을 이용하여 시편에 직접 접촉하지 않으며 선형중합수축률을 실시간으로 측정할 수 있는 입자 추적 시스템을 개발하였고 이를 이용하여 수 중 광중합 복합레진의 역동적인 중합수축을 측정할 수 있었음을 보고하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 컴퓨터 시각을 이용한 입자추적 시스템의 구성요소와 동작원리

컴퓨터 시각 시스템은 768×494 화소를 가진 CCD 칼라 비디오 카메라(CS-5260 BD, Tokyo Electronic Industry Co., Tokyo, Japan)와 1 배율의 렌즈(MML1-110D, Moritex Corp., Tokyo, Japan), 영상저장장치(frame grabber, IMAQ PCI-1411, National Instrument, Austin, Texas, USA), 그리고 영상처리와 분석을 위한 소프트웨어 개발 tool kit (IMAQ Vision, National Instrument, Austin, Texas, USA)로 구성되어 있다 (Figure 1).

카메라 아래에 놓인 시편(Figure 2) 위에 놓여진 표식(marker particle)은 Figure 3의 왼쪽 그림과 같이 CCD 카메라에 잡힌 후 RGB 색상 정보로 영상저장장치의 메모리에 기록된다. 이 후 색상 별 히스토그램 분석을 거쳐 미리 정해 놓은 RGB 역치값에 따라 Figure 3의 오른쪽 그림과 같이 이진화(binarianization) 된다. 잡음을 제거하기 위해 일정 크기 이하의 입자를 제거한 후, 면적 중심법을 사용하여 표식의 X, Y 좌표를 구하게 된다(Figure 4). 면적 중심법

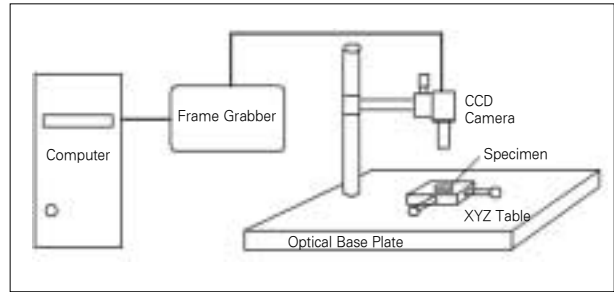


Figure 1. Schematic diagram of computer vision system.

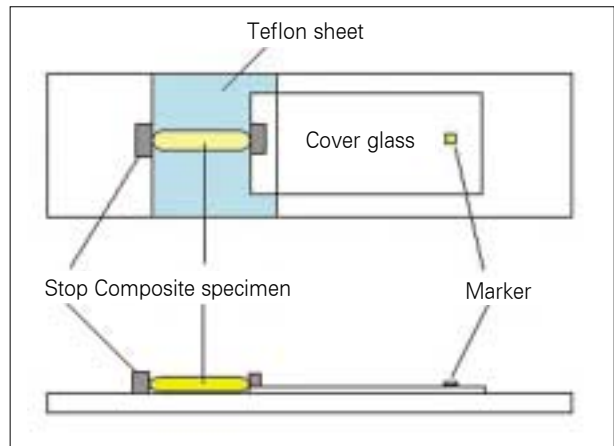


Figure 2. Specimen preparation for linear shrinkage measurement using computer vision.

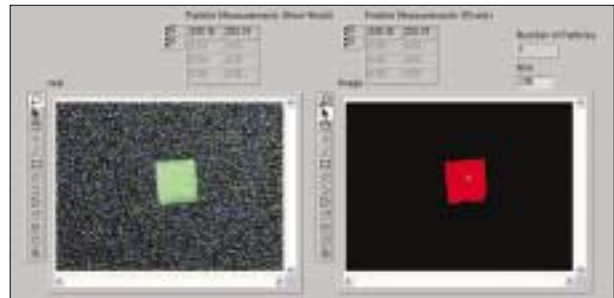


Figure 3. A captured original image (left) and a binarized image (right) after filtering. The position of an object is determined by the area center method.

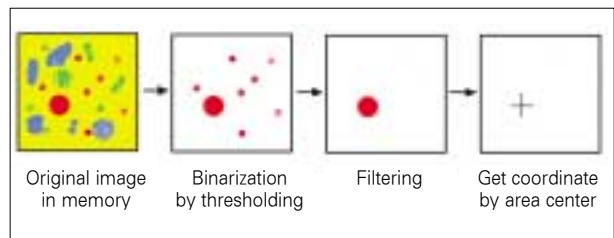


Figure 4. Algorithm to get the coordinate of an interesting particle from an image.

Table 1. Composite resins used in this study.

Material	LOT No.	Resin Matrix	Filler (wt%)	Manufacturer
Filtek Z-250	N120314	Bis-GMA, Bis-EMA, TEGDMA, UDMA	0.01-3.5 μm (average 0.6 μm) Zr/silica particles (82 wt%)	3M ESPE, St. Paul, MN, USA
Filtek Z-350 (Flowable)	8GB	Bis-GMA, Bis-EMA, TEGDMA	5-20 nm Zr/silica nanoparticles + 0.6-1.4 μm nano-clusters(65 wt%)	3M ESPE, St. Paul, MN, USA
Filtek P-90	9CE	Siloranes	0.01-3.5 μm (average 0.47 μm) Quartz particles, Yttrium fluoride(76 wt%)	3M ESPE, St. Paul, MN, USA

은 표식 입자 내의 각 화소의 x, y 좌표의 총 합을 화소의 총 개수로 나누어 중심좌표를 구한다(Appendix 참조).

2. 실험재료

전구치 수복용 hybrid 복합레진(Z250), flowable 복합레진(Z350), 그리고 silorane-based 저수축 복합레진(P90)을 대상으로 하였고 각 재료의 성분과 제조회사는 Table 1과 같다. 중합에 사용한 광조사기는 Elipar FreeLight 2 (3M) 이었고 광의 세기는 700 mW/cm² 이었다.

3. 실험방법

슬라이드 글라스 위의 한 부분을 50 μm Al₂O₃로 sand blasting 한 후 그 부위에 Z250 복합레진으로 폭 3 mm, 높이 2 mm의 stop을 광조사하여 형성하였다. 슬라이드 글라스의 나머지 부분을 15 mm 가량 Teflon tape로 감아 복합레진이 달라붙지 않도록 처리하였다. 측정하고자 하는 복합레진을 길이 10 mm, 폭 2 mm, 두께 2 mm의 원기둥 형태로 말아 한쪽을 미리 형성해 놓은 stop에 접촉하도록 한 후 Teflon tape 위로 누어 놓았다. 원기둥 형태의 복합레진 시편의 다른 free end 쪽에는 역시 끝 단에 복합레진 stop을 미리 형성해 놓은 cover 글라스를 접촉시킨 후 슬라이드 글라스 위에 가볍게 올려 놓았다. Cover 글라스 위에는 가로 세로 각각 1 mm의 하얀색 종이 표식(marker)을 붙여놓았다(Figure 2). 복합레진이 광중합 됨에 따라 원기둥 형태의 복합레진 시편의 길이가 줄어들고 결과적으로 cover 글라스를 슬라이드 글라스 위의 고정된 stop 방향으로 끌어당기게 되어 종이 표식을 움직이게 된다(Figure 2).

Base line을 잡기 위해 데이터 획득 시작 후 20초 동안 광조사 없이 방치한 후 40초 동안 광조사하였다. 총 10분 동안 5 frame rate/s로 영상을 획득하였고 위에서 기술한 알고리즘을 이용하여 복합레진이 중합됨에 따라 시간에 따라 이동하는 종이 표식의 좌표변화를 기록하였다. 중합 후

두 stop사이에 경화된 복합레진 시편의 정확한 길이를 마이크로미터를 이용하여 측정하였다. 선형 중합수축률은 $100 \times \Delta L / (L_{\text{final}} + \Delta L_{\text{final}}) \%$ 로 주어지고 이 때 ΔL 는 광조사 시작 t초 후의 길이 수축량을 의미하며 L_{final} 과 ΔL_{final} 은 각각 중합 후 시편의 길이와 변화량을 의미한다. 각 복합레진에 대하여 4회씩 측정하였고 측정 온도는 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 였다. 각 복합레진의 측정값을 비교하기 위하여 일원분산분석을 시행하였다.

III. 실험 결과

각 복합레진의 시간에 따른 중합수축의 곡선과 10분 후 선형중합수축은 Figure 5, 6 및 Table 2와 같다. Silorane 복합레진인 P90이 0.33%로 가장 낮았고 flowable 복합레진 Z350이 1.41%로 가장 높은 중합수축을 보였다. 광조사 개시 후 초기에 급격히 중합수축이 증가하다가 20-30초가 지난 후에는 서서히 수축의 증가율이 줄어들었고 광조사가 끝난 40초 이후에도 지속적으로 중합수축이 진행됨을 볼 수 있다.

Table 2. Linear polymerization shrinkage measured and calculated volume shrinkage of composites at 10 min.

Composites	Linear shrinkage (%)	Calculated volume shrinkage (%)
Z250	0.70 (0.03)	2.11
Z350	1.41 (0.08)	4.22
P90	0.33 (0.02)	0.98

Number in parenthesis is standard deviation.

Calculated volume shrinkage = $3 \times$ measured linear shrinkage.

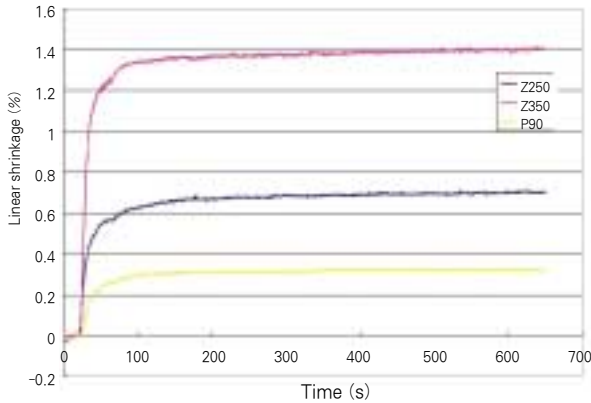


Figure 5. Linear shrinkage curves of composites as a function of time.

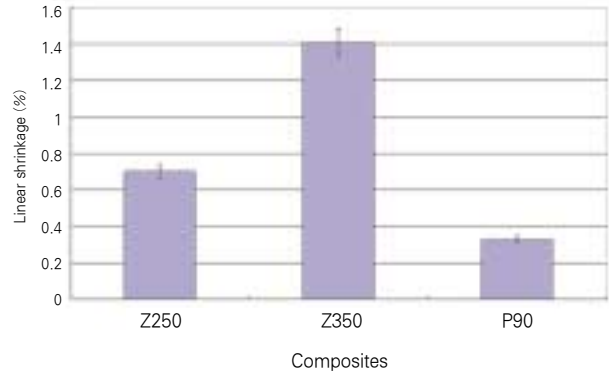


Figure 6. Linear shrinkage of composites at 10 min after curing.

선형중합수축에 3배하여 얻어진 체적중합수축량은 Z250, Z350, P90이 각각 2.11, 4.22, 0.98%이었다 (Table 2).

IV. 총괄 및 고안

복합레진의 중합수축을 측정하기 위해 여러 가지 장치들이 고안되어 사용되어 왔으며 각 장치마다 장단점을 지니고 있다. 체적 중합수축을 측정하기 위하여 기존의 연구자들이 주로 사용한 표준적인 장치는 mercury dilatometer로서 원리는 온도계와 같이 reservoir에 담겨있는 액체의 부피 변화를 모세관을 통하여 길이의 변화로 확대해 읽어내는 것으로 약간의 온도 변화도 액체 자체의 부피에 큰 영향을 주므로 치과용 레진과 같이 소량의 샘플을 사용하여 실험할 시는 큰 오차를 유발할 수 있다.^{4,5,16,17} 또한 실험 시 시료의 장착이 매우 번거로우며 flowable 복합레진처럼 점도가 낮은 시편은 측정할 수 없고 mercury에 의한 환경오염의 우려도 가지고 있다. 이 등¹⁶⁻¹⁸은 이러한 단점을 극복하기 위해 전자기적 저울과 부력을 이용하여 온도의 영향을 배제하고 여러 점도를 가지는 복합레진의 중합수축을 성공적으로 측정하였다.

실제 와동의 수복에서 수축응력을 유발하는 직접적인 원인은 길이 방향의 수축으로, 모든 방향으로 동일하게 수축하는 경우 체적수축을 γ_p 라 할 때 γ_p 는

$\gamma_p = 1^3 - (1 - \alpha_p)^3 = 3\alpha_p - 3\alpha_p^2 + \alpha_p^3$ (α_p 는 선형 수축비)로 주어지고 α_p 가 비교적 작으므로 식 뒷부분의 제곱과 세제곱 항을 무시하면 $\gamma_p \approx 3\alpha_p$ 로 체적수축은 대략 선형수축의

세배가 된다. 그러나 이러한 관계가 성립하려면 시편 내에서의 등방적인 수축(isotropic contraction)이 일어난다는 전제가 만족되어야 한다.^{6,10,11,14} 현재 axial linear shrinkage를 측정하기 위해 가장 많이 사용되는 “bonded disc method”의 경우 실제로는 두 평판 사이에 복합레진을 샌드위치 시키는 구조를 가진 실험장치의 기하학적인 한계로 얇은 디스크 형태로 되어있는 시편의 radial 방향의 수축은 접착 면에서의 마찰에 의해 제한될 수 밖에 없다. 따라서 axial 방향의 선형 수축은 시편의 aspect 비(지름과 두께의 비)에 따라 체적수축의 1/3-1배 사이로 측정된다.^{10,14} 이러한 효과는 복합레진의 점도와 관련되어 더욱 복잡해지고 부정확한 측정값을 가져온다. Strain gage와 같이 접촉성 변위센서를 사용하는 경우는 센서의 변형을 유발하기까지 극복해야 할 최소한의 기계적 저항이 존재하므로 gel point 이전의 수축은 레진의 흐름으로 보상되어 감지할 수 없고 gel 형성이 이루어져 어느 정도 레진의 탄성계수가 증가한 후의 post gel 수축만을 기록하게 된다.⁷

최근 IT (information technology) 기술의 발달에 따라 컴퓨터 시각(computer vision, machine vision)이 계측 및 제어에 이용되고 있다. 고속화된 마이크로프로세서와 저렴한 가격의 대용량 반도체 메모리는 개인용 컴퓨터에서도 빠른 영상처리와 영상분석을 가능하게 하였다. 컴퓨터 시각을 이용한 측정은 측정하고자 하는 대상에 직접적인 접촉이 존재하지 않고 CCD 카메라로 촬영된 영상을 이용하므로 시편에 영향을 미치지 않으며 비교적 고속으로 측정이 이루어진다.

위에서 기술한 체적 및 선형수축의 측정 방법들은 시편 전

체의 중합수축을 측정하는 방법으로 시편 내의 특정 점에서의 이동을 관찰하는 것은 불가능하다. 반면 본 연구에서 사용한 컴퓨터 시각을 이용한 표식 입자를 추적하는 방법은 시편 위 임의의 점에 표식을 한 후, 중합 중에 수축에 의해 일어나는 모든 방향의 이동을 실시간으로 추적할 수 있는 장점을 지닌다. Pilot 연구에서 복합레진 시편 위에 직접 표식을 올려놓고 중합수축에 의한 이동의 벡터를 구하기 위해 시도하였으나 초기 40초 동안은 광조사기의 강렬한 푸른색 조사광으로 인해 명확한 표식 영상을 취득할 수 없었다. 차선택으로 조사광의 영향을 줄이기 위해 cover 글라스를 이용하여 표식을 시편으로부터 분리해 줌으로서 명확하게 표식의 이동 궤적을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 사용한 CCD 카메라의 화소의 크기는 10 μm 로서 실험을 시작하기 전 예측되던 거리 측정 해상도는 10 μm 이었다. 저 수축 복합레진인 P90의 경우 1%의 체적수축을 지닌다 할 경우, 시편의 길이가 10 mm 인 경우 예측되는 최대 길이 수축량은 33.3 μm 에 불과하여 본 장비의 해상력으로는 세밀한 측정이 어려울 것으로 예측되었다. 그러나 pilot 연구 단계에서 실제 측정에 들어가보니 실제 해상력은 1 μm 에 달하는 것으로 나타났다. 그 이유는 표식 입자의 좌표를 구하기 위해 사용하는 “면적 중심법” 알고리즘의 효과이다. 1 × 1 mm 크기의 표식 영상 내에는 약 10,000개의 화소가 들어있어 비록 개개 화소(pixel) 한 개의 크기는 10 μm 이지만 많은 화소의 x, y좌표의 평균 효과로 1 μm 정도의 해상력을 보일 수 있다(Appendix 참조).

중합수축의 패턴은 중합반응의 속도나 중합물과 관련 지어 생각할 수 있으며 결국 중합반응의 동역학을 간접적으로 관찰할 수 있는 한 방법이 될 수 있다.¹⁶⁻²⁰⁾ 본 연구에서 볼 수 있는 바와 같이 복합레진의 중합수축은 제품별로 많은 차이를 보이고 있으며 그 중합수축의 속도도 각기 다를 수 있다.

선형수축은 Z350이 평균 1.41% (4.22 vol%)로 가장 크게 나타났는데, flowable 복합레진은 무기질 충전재 함량이 적은 만큼 레진 기질의 양이 상대적으로 많기 때문에 수축량이 큰 것으로 알려져 있다. 65 wt%의 충전재 함량을 가진 Z350에 비해 82 wt%의 충전재 함량을 가진 Z250는 평균 0.70% (2.11 vol%)의 중합수축을 보였다. 충전재 함량이 76 wt%인 P90은 중합수축이 평균 0.33% (0.98 vol%)로 측정되었다. Weinmann 등¹⁹⁾은 silorane의 수축률을 “bonded disc method”로 측정한 결과 0.94 vol%, Archimedes method로 측정한 결과 0.99 vol%를 보고하였는데 본 실험결과와 매우 근접함을 알 수 있다. 그의 설명에 의하면, silorane 단량체의 oxirane 잔기가 중합수축을 줄이는 역할을 하는데, 산성 양이온이 oxirane ring을 공격하면 ring이 열리면서 중합되기 때문에 공유결합이 형성될

때 일어나는 거리의 단축을 보상한다. Z250과 Z350의 경우에도 필자를 포함한 다른 연구자의 이전의 연구에서 각기 다른 방법으로 측정하였던 2.22-2.31 vol%와 4.12-4.41 vol%와 매우 근접한 값을 보이고 있다.²¹⁻²⁴⁾

모든 재료에서 광조사기가 꺼지는 시점에서 수축률이 갑자기 다시 증가하는 것은 광조사 동안 광조사기에서 방출되는 열로 인한 팽창으로 상쇄된 중합수축이 광조사가 완료되며 다시 수축하기 때문인 것으로 볼 수 있다.^{14,15,19)}

본 연구에서는 Teflon tape를 이용하여 슬라이드 글라스면에 복합레진이 달라붙는 현상을 방지해 줌으로서 시편을 모든 방향으로 자유롭게 수축하도록 허용한 후 선형수축을 측정하였다. 기존의 LVDT와 같이 센서 자체의 하중이 작용하거나 “bonded disc method”와 같이 시편의 기하학적 형태와 점도의 영향을 받는 경우 시편의 처리 방법에 따라 측정 값이 많은 영향을 받을 수 있다.^{10,13,14,15)} 본 측정 방법에서는 거리 변화를 감지하는 센서 자체가 광학적으로 접촉이 없고 단지 매우 가벼운 cover 글라스가 슬라이드 글라스 위에서 미끄러지는 정도의 저항만 받으므로 시편의 점도나 형태의 영향을 거의 완벽히 배제할 수 있었다(Appendix 참조).

추후 연구에서는 종이 표식 대신에, 광조사기의 빛을 받아 붉은색을 자체 발광할 수 있는 형광 물질과 470 nm의 강한 파랑색 조사광을 차단할 수 있는 붉은색 필터를 이용하여 시편 위에 존재하는 임의의 점의 움직임을 추적할 수 있는 방법을 시도하고자 한다. 실제 와동에서와 같이 한 면, 혹은 두 면을 접촉시켜 고정 시킨 후 광조사 시 시편 위의 특정 위치가 움직이는 방향과 크기를 알아내면 중합수축의 생역학적 현상을 보다 분명하게 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

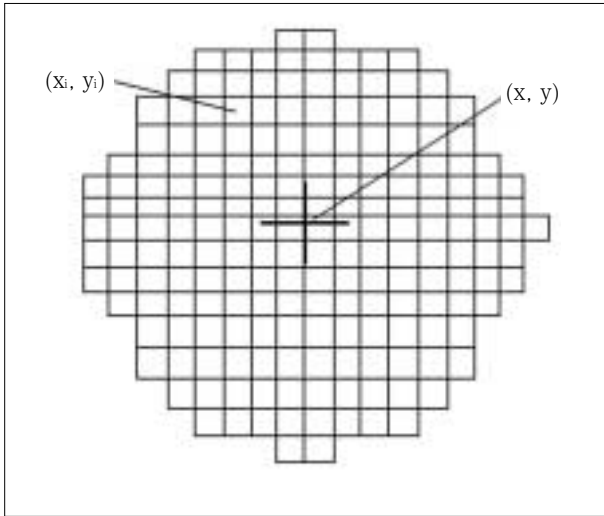
본 연구에서는 컴퓨터 시각(computer vision)을 이용하여 시편에 직접 접촉하지 않으며 광중합 복합레진의 선형중합수축을 측정할 수 있는 입자 추적 시스템을 개발하였고 이를 이용하여 silorane 및 methacrylate 기질의 광중합 복합레진의 중합수축의 양상을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복합레진의 선형중합수축은 0.33-1.41% 였으며 silorane기질의 복합레진인 P90이 가장 낮았고 Z250, Z350의 순으로 증가하였다.
2. 본 장비는 선형중합수축을 온도와 시편의 형태에 민감하지 않고, 복잡한 과정없이 실시간으로 측정할 수 있었다.

Appendix

1. 면적 중심법과 입자 추적의 위치 해상도

면적 중심법을 이용한 입자의 중심좌표 X , Y 는 입자 내 전체 화소(pixel)의 개수를 n 이라 하고, i 번째 화소의 x , y 좌표를 각각 x_i , y_i 라 할 때



$$X = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{과 같이 주어진다.}$$

화소 하나의 크기가 $10 \mu\text{m}$ 이고, $1 \times 1 \text{ mm}$ 크기의 입자 내의 화소의 개수가 $100 \times 100 = 10,000$ 개이면, 이론적으로는 입자의 중심좌표의 해상도는 $10 \mu\text{m} / 10,000 = 0.001 \mu\text{m}$ 가 된다. 그러나 실제로는 광량과 CCD 카메라와 회로에 내재된 잡음의 영향으로 본 실험에서는 $1 \mu\text{m}$ 정도의 해상력을 보였다.

2. Free linear shrinkage를 보장하는 시편의 geometry

진정한 선형수축을 측정하기 위해서는 등방적 수축이 필수적이다. 기존의 변위센서를 이용한 측정에서는 strain gage와 같이 stiff 하거나 “bonded disc method”에서와 같이 LVDT센서를 떠받치는 cover 글라스의 변형을 유발하기 위해서는 복합레진이 최소한의 점탄성에 도달해야 하며, 슬라이드 글라스와 복합레진 시편 사이의 마찰력으로 인해 등방적인 수축이 일어나기 어렵다.

본 연구에서 사용한 비 접촉식 CCD 광학센서는 직접 시편에 대한 접촉없이, Marker가 놓여있는 두 장 무게의 cover 글라스가 동일한 유리 재질의 슬라이드 글라스 위에서 미끄러질 정도의 힘만 필요하기 때문에 복합레진의 점도에 관계없이 등방적인 수축을 보장한다. 복합레진의 중합수

축력 중 cover 글라스를 움직이는데 소모되는 힘은 cover 글라스의 정지마찰력 F 와 같고 매우 작음을 알 수 있다.

$$F = \mu \times M$$

μ : cover 글라스와 슬라이드 글라스 사이의 정지 마찰계수

M : cover 글라스의 무게(본 실험의 경우 0.243 g)

참고문헌

1. B.A.M. Venhoven, A.J. de Gee and C.L. Davidson : Polymerization contraction and conversion of light-curing BisGMA-based methacrylate resins. *Biomaterials* 14:871-875, 1993.
2. Ferracane JL, Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dent Mater* 21:36-42, 2005.
3. Ferracane JL. Buonocore Lecture. Placing dental composites-a stressful experience. *Oper Dent* 33:247-57, 2008.
4. J.H. Lai and A.E. Johnson : Measuring polymerization shrinkage of photo activated restorative materials by a water filled dilatometer. *Dent Mater* 9:139-143, 1993.
5. R.W. Penn : A recording dilatometer for measuring polymerization shrinkage. *Dent Mater* 2:78-79, 1986.
6. A.J.de Gee, A.J. Feilzer and C.L. Davidson : True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dent Mater* 9:11-14, 1993.
7. R.L. Sakaguchi, C.T. Sasik, M.A. Bunczak and W.H. Douglas : Strain gauge method for measuring polymerization contraction of composite restoratives. *J Dent* 19:312-316, 1991.
8. V. Fano, I. Ortalli, S.Pizzi and M. Bonanini: Polymerization shrinkage of microfilled composites determined by laser beam scanning. *Biomaterials* 18:467-470, 1997.
9. R. Labella, P. Lambrechts, B. van Meerbeek and G. Vanherle: Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dent Mater* 15:128-137, 1999.
10. Watts DC, Cash AJ. Determination of polymerization shrinkage kinetics in visible light-cured materials: methods development. *Dent Mater* 7:281-287, 1991.
11. Lee MR, Cho BH, Son HH, Um CM, Lee IB. Influence of cavity dimension and restoration methods on the cusp deflection of premolars in composite restoration. *Dent Mater* 23:288-295, 2007.
12. Park JK, JH Chang, Lee IB. How should composite be layered to reduce shrinkage stress: Incremental or bulk filling? *Dent Mater* 24:1501-1505, 2008.
13. Feilzer AJ, de Gee AJ, Davidson CL. Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 66:1636-1639, 1987.
14. Lee IB, Cho BH, Son HH, Um CM, Lim BS. The effect of consistency, specimen geometry and adhesion on the axial polymerization shrinkage measurement of light cured composites. *Dent Mater* 22:1071-9, 2006.
15. Lee SH, Chang J, Ferracane J, Lee IB. Influence of instrument compliance and specimen thickness on the polymerization shrinkage stress measurement of light-cured composites. *Dent Mater* 23:1093-100, 2007.
16. Lee IB, Cho BH, Son HH, Um CM. A new method to measure the polymerization shrinkage kinetics of light

- cured composites. *J of Oral Rehabil* 32:304-314, 2005.
17. In-Bog Lee. A new method - real time measurement of the initial dynamic volumetric shrinkage of composite resins during polymerization. *J of Kor Acad of Cons Dent* 26:134-140, 2001.
18. Ellakwa A, Cho NK, Lee IB. The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. *Dent Mater* 23:1229-1235, 2007.
19. Weinmann W, Thalacker C, Guggenberg R. Siloranes in dental composites. *Dent Mater* 21:68-74, 2005.
20. Papadogiannis D, Kakaboura A, Palaghias G, Eliades G. Setting characteristics and cavity adaptation of low-shrinking resin composites. *Dent Mater* 25: 1509-1516, 2009.
21. Calheiros FC, Sadek FT, Braga RR, Cardoso PE. Polymerization contraction stress of low-shrinkage composites and its correlation with microleakage in class V restorations. *J Dent* 32:407-12, 2004.
22. Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites. *Dent Mater* 21:1150-7, 2005.
23. Deog-Gyu Seo, Sun-Hong Min, In-Bog Lee. Effect of instrument compliance on the polymerization shrinkage stress measurements of dental resin composites. *J of Kor Acad of Cons Dent* 34:146-52, 2009.
24. Youngchul Kwon, In-Bog Lee. Polymerization shrinkage kinetics of silorane-based composites. *J of Kor Acad of Cons Dent* 35:51-58, 2010.

국문초록

컴퓨터 시각과 입자 추적 방법을 이용한 복합레진의 선형중합수축 측정의 새로운 방법

이인복* · 민선홍 · 서덕규 · 김선영 · 권영철

서울대학교 치의학전문대학원 치과보존학교실

수복용 복합레진이 도입된 이후 많은 물성의 향상이 이루어졌으나 중합수축은 아직 해결되지 않은 주요 단점으로 남아있다. 중합수축이 적은 복합레진을 만들기 위한 많은 노력이 이루어져 최근에 silorane 기질의 저수축 복합레진이 개발되었고, 정밀하게 중합수축을 측정하기 위한 여러 방법들이 시도되었다.

본 연구에서는 컴퓨터 시각(computer vision)을 이용하여 시편에 직접 접촉하지 않으며 광중합 복합레진의 선형중합수축을 측정할 수 있는 입자 추적 시스템을 개발하였고 이를 이용하여 silorane (P90) 및 methacrylate (Z250과 Z350) 기질의 광중합 복합레진의 중합수축 거동을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 복합레진의 선형중합수축은 0.33-1.41% 였으며 silorane기질의 복합레진인 P90이 가장 낮았고 Z250, Z350의 순으로 증가하였다.
2. 본 장비는 선형중합수축을 시편의 형태에 민감하지 않고 복잡한 과정없이 실시간으로 측정할 수 있었다.

주요단어: 복합레진, Silorane, 선형중합수축, 컴퓨터 시각, 입자추적