

디지털 이미지 상관법을 이용한 치과용 복합레진의 수복 시 중합수축분포 관찰

박정훈* · 최낙삼**†

Polymerization Shrinkage Distribution of a Dental Composite during Dental Restoration Observed by Digital Image Correlation Method

Jung-Hoon Park*, Nak-Sam Choi**†

ABSTRACT: The shrinkage distribution of a dental composite (Clearfil AP-X, Kuraray, Japan) used for dental restoration was observed using a digital image correlation method. In order to analyze the shrinkage distribution formed during and after light irradiation, digital images were taken with different photographing conditions for each period. Optimal photographing conditions during LED irradiation were obtained through a preliminary experiment in which the exposure time was applied from 0.15 ms to 0.55 ms in 0.05 ms intervals. The DIC analysis results showed that the strain was non-uniform. For the initial 20 s of light irradiation the composite resin shrank to the level of 50~60% of the final curing shrinkage. Such large shrinkage amount of the composite resin lump affected the tensile stress concentration near the adhesive region between the composite resin and the substrate.

초 록: 손상된 치아의 복구에 사용되는 재료인 치과용 복합레진 Clearfil AP-X (Kuraray, Japan)을 대상으로 디지털 이미지 상관법을 이용하여 광중합 시 발생하는 수축분포를 관찰하였다. 디지털 이미지 상관분석법을 위해, CCD 카메라를 이용하여 광조사 중과 광조사 이후의 촬영 조건을 달리하여 사진을 획득하였다. 광조사중의 최적의 촬영 조건을 설정하기 위하여 노출시간을 0.15 ms부터 0.55 ms까지 0.05 ms 간격으로 촬영한 사전 실험을 통해 촬영 조건을 획득하였다. DIC 분석 결과 복합레진의 비균일한 수축 분포를 관찰하였으며 복합레진의 중심 부분에서 시편의 계면부보다 좀 더 자유로운 유동성으로 더 큰 수축이 발생하였다. 복합레진의 중합수축은 초기 20 s의 광조사에서 최종경화수축률의 50~60% 수준까지 발생하였다. 이러한 치과용 복합레진의 큰 수축량은 레진/기질계면 근처에서 인장응력이 집중하도록 영향을 주었다.

Key Words: 치과용합레진(Dental composite resin), 디지털이미지상관(Digital image correlation), 중합수축(Polymerization shrinkage), 수축분포(Shrinkage distribution), Methacrylate 기질 복합레진(Methacrylate-based composite resin), 치아수복(Dental restoration)

1. 서 론

치과용 복합레진은 용이한 작업성과 뛰어난 심미성으로 치아의 심미수복치료에 많이 사용되고 있다. 이러한 수복

용 복합레진은 광중합 개시제인 캄포퀴논을 함유하고 있어 빛에 의한 중합반응을 일으킨다. 이때, 중합반응에 의한 단량체의 상호 공유결합으로 중합수축이 발생하게 되어 치아와 복합레진 사이의 계면 결합 형성의 원인이 된다. 이러

Received 13 October 2017, received in revised form 22 December 2017, accepted 26 December 2017

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul, Korea

**†Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea, Corresponding author (E-mail: nschoi@hanyang.ac.kr)

한 결합은 수복재와 치아 사이의 계면에서 결합력보다 중합수축응력이 큰 경우 발생 확률이 높다. 발생한 결합으로 인해 시술받은 환자에게 지각과민증이 나거나 이물질이 수복물과 치질 사이로 침투하여 이차 우식, 치아 파절 등으로 이어져 치아 수명을 현저히 저하시킬 수가 있으므로 복합레진 수복재의 수축과 관련한 연구는 중요하다[1-3].

복합레진의 중합수축량을 측정하기 위해 다양한 방법이 이용되어 왔으며, 이 중 팽창계(dilatometer)는 비교적 정확한 복합레진의 중합 수축률을 측정할 수 있는 방법이다[4]. 그러나 수은 등을 이용하여 부피의 변화를 측정하기 때문에 주위의 온도 변화에 대하여 지나치게 민감하게 반응하여 실제 측정에 있어서 어려움을 나타낼 수 있다. 비중을 이용하여 복합레진의 중합 수축률을 측정하기에 진정한 의미에서 복합레진의 중합 수축 부피를 구하는 방법이라 할 수 있겠지만, 복합레진 자체가 물을 흡수하는 성질을 가지고 있어, 이에 대한 영향을 배제할 수 없다. 중합수축량을 측정하는 다른 방법으로 접촉식 변위 측정센서(LVDT transducer)를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 레진에 덮개를 놓고 굴곡을 접촉식 변위 측정센서(LVDT transducer)를 통해 계측하여 중합수축량을 결정한다. 하지만 표본의 기하학적 형태에 따라 수치가 선형 수축량의 한배에서 세배까지도 측정될 수 있는 불안정성의 문제점을 가지고 있다[5]. 이 밖의 중합수축량을 측정하는 방법으로 Feilzer 등이 고안한 linometer가 있다. 이 방법은 재료 간의 상대적인 비교를 위해서 매우 간단하면서 정확한 방법으로 평가되고 있으나[6], 시편을 담은 디스크와 시편 사이에서 발생하는 응력에 의한 영향을 받을 수 있는 한계를 가지고 있다[7]. 이러한 기존의 복합레진의 수축률 측정 방법은 레진의 자유로운 수축을 측정한 것이며 국부적인 변형 또한 관찰할 수 없었다. 또한, 복합레진의 자유로운 체적 변화량은 실제 와동(cavity)의 계면에서 발생하는 중합수축률과 크게 다를 수 있다[8]. 이는 복합레진의 중합 과정 중 발생하는 수축 변형의 크기와 방향은 와동(cavity)의 형태에 따라 다르며, 중합속도와 국소적 중합수축의 분포 그리고 경계 조건에 의해 큰 영향을 받기 때문이다[9,10].

디지털 이미지 상관(Digital image correlation, DIC) 기법은 비접촉식으로 측정 대상의 전체 영역의 변형 측정이 가능하다[11]. DIC 분석은 디지털카메라로 촬영된 변형 전과 후의 사진의 각 픽셀의 밝기 정도를 상관함수로 계산하여 가장 상관도가 큰 지점을 추적하여 변형과 이동을 추적하여 변형분포를 측정하는 방법으로 국부적인 변형률 분포를 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 DIC 기법은 복합레진의 국부적인 수축거동의 측정에 사용되고 있다. DIC 분석에 필요한 사진을 획득함에 있어 Li 등[12]은 subset window 크기, 패턴 입자의 크기, 광원의 세기, 레진 깊이에 따라 해석의 정확도가 다를 수 있음을 확인하고 DIC 분석을 통한 치아 복합레진의 수축률 측정에 주의를 기울여야

된다고 주장하였다. 또한, 복합레진의 수축거동과 관련하여 Chuang 등[13]은 치과용 복합레진의 광조사 후 치아에 작용하는 수축과 응력을 유한요소법을 통하여 분석하는데 DIC 결과를 해석에 적용하였다. Vesna 등[14]은 3D 디지털 이미지 상관법을 사용하여 치과용 복합레진의 국부적인 거동을 분석하고 복합레진의 수축이 불 균일함을 보였다. Furukawa 등[15]은 다양한 와동에 따른 광조사 중인 치과용 복합레진의 중합 수축 거동을 DIC를 통하여 관찰하였다. 하지만, 이러한 사전 연구들은 완전히 경화된 상태의 레진의 수축거동을 확인하거나 광조사시간 동안의 복합레진의 수축거동을 측정하여 광조사 시작부터 광조사 이후의 레진이 경화되기 까지 중합과정 일체를 관찰한 연구는 전무하였다.

따라서, 본 연구에서는 동 시편에서 광조사 중의 사진과 광조사이후의 사진을 획득한 후 DIC를 적용하여 중합과정 중의 수축거동을 모든 경화시간에서 관찰하고자 한다. 하지만, 광조사 중과 광조사 이후의 사진촬영 조건이 동일할 경우 광조사 중 LED광원에 의한 노출과다로 인하여 DIC 해석이 불가능한 부분이 발생하는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 추가적으로 광조사중 노출시간에 따른 DIC분석 가능영역을 확인하고 DIC분석에 최적인 이미지촬영 조건을 획득하여, 광조사중의 시편과 광조사후의 시편의 이미지촬영의 조건을 다르게 적용하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편링 제작 및 수복방법

치과용 복합레진으로 수복된 치아를 모사하기 위하여 단성계수가 일정하며 복합레진과의 접착성이 우수한 장점을 갖는 의치(denture)의 주성분인 PMMA(polymethyl methacrylate) 수지를 사용하여 외경 6 mm 높이 2 mm의 원반에 내경 4 mm의 관통형 홈을 가지는 링 형태의 기재(substrate)를 레이저 가공으로 제작하였다.

본 연구에서는 methacrylate 기반의 Clearfil AP-X (Kuraray, Japan)를 사용하였으며(Table 1) 제조사에서 제공한 자유로운 상태에서의 레진 부피수축률은 1.9%[16]으로 이를 레진의 선수축률로 환산하면 0.66%이다.

복합레진의 수복 방법은 링 시편의 내벽에 마이크로 브러쉬를 사용하여 복합레진 접착제를 충분히 반복 도포한 후 강한 결합강도를 유지할 수 있도록 10 sec 동안 약한 바람을 불어 건조시킨 다음 LED 조사기로 10 sec 동안 광조사

Table 1. Dental composite used in this study

Composite	Resin Matrix	Filler	Manufacturer
Clearfil AP-X	Bis-GMA TEDGMA	3 μ m Barium glass, Silica particle (85.5 wt%)	Kuraray

를 실시하여 접착제를 부분 중합시킨다. 이후, 시편내부에 복합 레진을 충전하여 시편의 윗면까지 채우고 수성페인트 스프레이를 이용하여 DIC분석을 위한 무작위 패턴링을 하였다. 이때, 에어스프레이를 이용하여 페인트를 도포하여 시편의 페인트입자의 크기를 작게 하였다. 패턴링이 끝난 시편을 미리 준비된 측정위치에 위치한후 수복재의 아랫면으로부터 수직으로 20 sec 동안 광조사하여 복합레진에 투과시켰다. LED 광조사기(Morita Pencure, Japan)는 모든 실험에서 시편과의 거리는 슬라이드글래스의 두께인 2 mm로 일정하게 유지되었다.

2.2 장치 구성

Fig. 1은 본 연구에 사용된 카메라측정장치의 개요도이다. 준비된 시편을 슬라이드 글래스 위에 위치하여 사진을 촬영하였다. 본 연구에서 사용한 DIC 측정장치는 GOM社의 ARMIS 2M LT(Germany)을 사용하였으며 캘리브레이션된 장치의 카메라측정시스템의 해상도와 초점거리 및 변형률 정확도를 Table 2에 정리하였다.

2.3 카메라 이미지 적정노출 설정

본 연구에서는 중합중인 복합레진의 수축거동을 측정하기 위하여 광조사중인 상태에서의 촬영 조건과 광조사이후의 촬영 조건을 다르게 하여 DIC분석에 이용될 카메라 이미지를 획득하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 광조사중에는 LED조사기에서 나오는 광원으로 인하여 광조사후 촬영시보다 광량이 현저하게 증가하게 되어 광조사중과 후의 이미지를 동일 조건으로 촬영 시에는 두가지 조건 중 한 조건은 촬영이 불가능하게 된다. 따라서, 광조사중의 적정

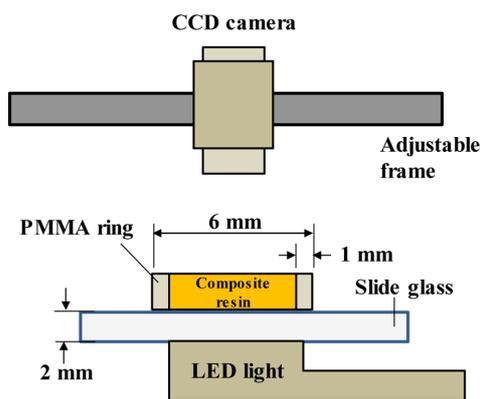


Fig. 1. Schematic of the camera measurement for DIC

Table 2. Conditions of camera measurement system

	Camera measurement condition
Resolution	1624 × 1236 pixels
Focal length	75 cm
Strain accuracy	0.01%

노출 조건을 획득하기 위하여 경화된 시편을 대상으로 노출시간을 변수로 0.15 ms부터 0.55 ms까지 0.05 ms씩 증가시켜 9단계를 촬영한 후 DIC 분석을 수행하여 분석에 최적인 조건을 찾고자 하였다. 본 연구는 DIC를 통하여 광조사중에 복합레진의 중합수축이 측정 가능한지 먼저 검토하고 측정된 수축거동의 특성을 살펴보았다.

2.4 디지털 이미지 상관 분석

2.3절에서 얻어진 조건을 기준으로 광조사중인 초기 20 s 동안의 시편의 이미지를 촬영한 뒤 노출조건을 변경하여 광조사이후 580 s 동안 이미지를 추가적으로 촬영하여 총 10 min 동안의 이미지를 획득하였다. Fig. 2은 각 촬영 조건의 획득 이미지의 예이다. DIC분석에 사용된 프로그램은 카메라 측정 시스템과 동일한 제작사 GOM의 상용 분석 툴인 ARMIS ver. 6.3.1을 사용하였으며 분석에 사용한 조건을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 이 때, 해석결과의 정확도 향상을 위하여 연산을 수행하기 위한 일정 구역 단위인 facet 간의 거리를 8 × 8 pixels로 설정하여 수축률 연산 시 중첩되어 되는 영역이 53%로 설정하였다. 또한, 복합레진 모든

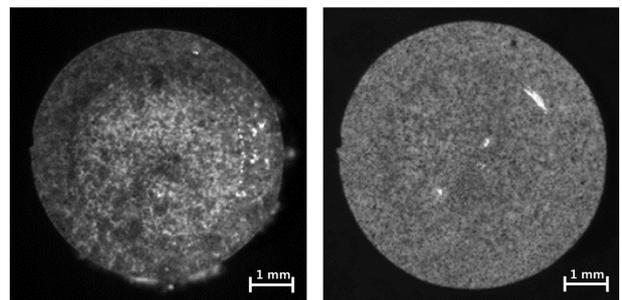


Fig. 2. Example images of photographed by camera

Table 3. Conditions of camera measurement system

	Camera measurement condition
Facet size	17 × 17 pixels
Facet step	8 × 8 pixels
Overlap area	53%

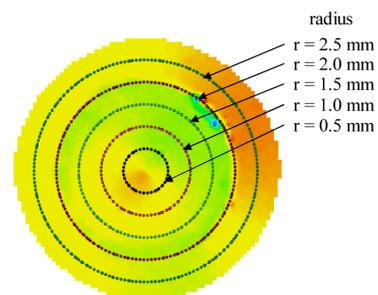


Fig. 3. Calculated circles at five perimeters

부분의 중합 시 발생하는 불 균일한 수축을 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 3과 같이 시편의 중심으로부터 0.5 mm 간격으로 각각 반지름 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm에서의 반경방향 평균수축률을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 광조사 중인 시편의 노출시간에 따른 해석가능한 영역을 나타낸 사진이다. 사진에서 음영으로 보여지는 부분이 해석가능한 영역이며 검정색과 흰색으로 나타내어지는 부분은 각각 광량이 부족하거나 지나치게 많아 해석이 불가능한 부분을 나타낸다. 0.25 ms 이하의 노출시간에서는 광량이 부족하여 해석이 되지 않는 부분이 주로 PMMA 기질에서 발생하였으며 0.45 ms 이상의 노출시간에서는 과다노출로 인하여 해석이 불가능한 부분이 복합레진에서 발생하였다. 따라서, 광조사 중인 상태의 DIC 분석을 위한 적정노출확인을 위한 실험결과 0.30~0.40 ms 구간에서 DIC 분석이 전 영역에서 가능함을 확인하였다. 본 연구에서는 시편의 모든 영역이 해석가능한 구간 중 가장 적은 노출시간인 0.03 ms로 설정하여 광조사 기간 동안 이미지를 획득하였으며 광조사이후에는 300 ms로 설정하여 DIC 분석에 사용하였다.

광중합 후 치과용 복합레진의 전체적인 수축변형을 관찰하고자 DIC 분석을 통하여 얻어진 완전경화(10 min 경과)된 상태의 복합레진 AP-X의 주변형률분포를 Fig. 5에 나타내었다. 이 그림에서 복합레진의 주변형률은 불 균일한 분포를 나타냈으며, 계면부근($r = 2$ mm)에서 주변형률 4~15%로 다른 부분보다 크게 나타났다. 복합레진의 수축변형이 불 균일한 이유는 중합전의 복합레진은 sol 상태로써 점토

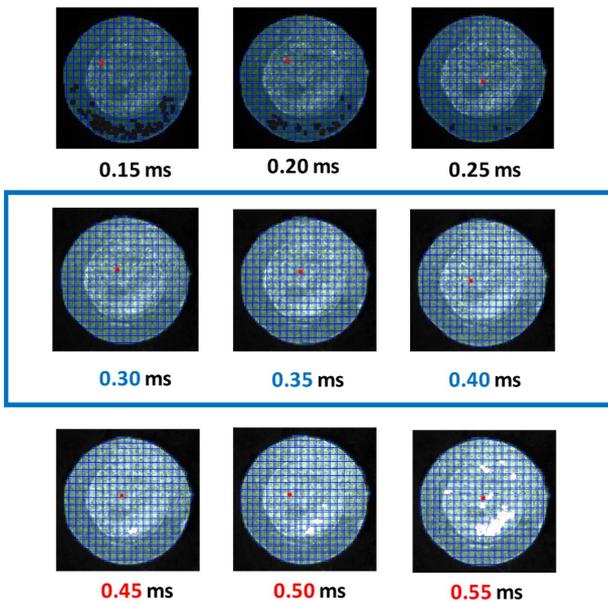


Fig. 4. Analyzed areas according to the exposure time

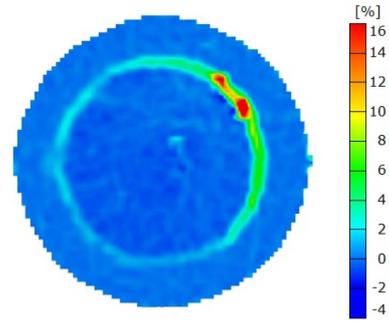


Fig. 5. Principal strain distribution of the cured resin

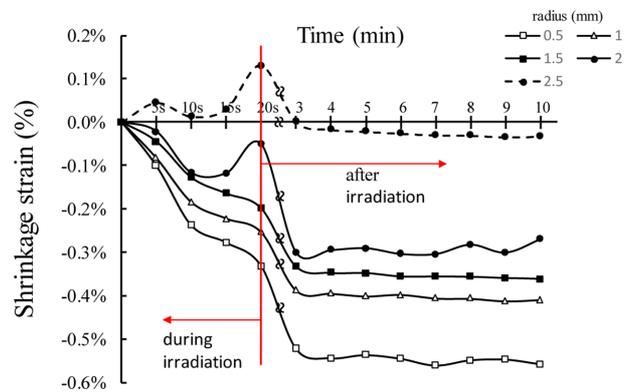


Fig. 6. Average radial shrinkage strain as a function of time during and LED irradiation

와 같이 흐름성을 가지지만 광조사이후 중합과정동안 상변화를 거쳐 gel 상태에 이르기까지 점점 흐름성이 사라지며[17] 레진의 수축에 의한 변형중에 링의 스프링반력[18]이 작용하여 레진과 기질사이에서 인장응력이 발생하기 때문이다. 또한, 치과용 복합레진은 불 균일혼합물로서 국부적으로는 다른 거동을 보이는 특성을 갖는다. 따라서, 실험시편이 달라지면 국부적으로는 다른 값들로 나타나지만 시편의 레진의 중앙부에서 더 큰 수축이 발생하고 링기판의 경계에서 인장 발생을 보이는 경향은 동일 할 것으로 사료된다.

Fig. 6는 각 반지름에 따른 평균반경수축률을 시간에 따른 함수로 나타낸 그래프이다.

지름이 0.5 mm에서 2.5 mm까지 증가함에 따라 평균반경수축률 값이 크게 감소하였다. 광조사가 끝나는 시점(20 s)에서 반지름이 0.5 mm 인 부분의 평균반경수축률은 -0.33%로 컸으나 반지름이 2.5 mm 인 부분의 +0.13%로 절대값이 크게 작아졌고 오히려 팽창하였다.

경화가 끝난 시점(10 min)에서 반지름이 0.5 mm 인 부분의 평균반경수축률은 -0.56%으로 측정 위치 중에서 가장 큰 수축을 보였고 2.5 mm 부분에서는 -0.03%로 미미하게 수축함을 보였다. 복합레진 부분($r < 2.0$ mm)에서 광조사 기간인 초기 20 s 동안, 각 반지름에서 최종경화 수축률의 50~60% 수준의 급격한 수축이 발생하였으며 중심에 가까

울수록 더 큰 수축이 발생한 것이다. 이 또한 초기 sol 상태의 복합레진의 유동성에 기인한 것으로 광조사시간인 초기 20 s 동안 시편의 중심부가 복합레진/PMMA링 계면 근처의 레진보다 좀 더 자유롭게 수축할 수 있었기 때문일 것이다.

한편, 복합레진/PMMA링 계면($r = 2 \text{ mm}$)과 PMMA링($r = 2.5 \text{ mm}$)에서는 10 s 이후 변형이 양의 값으로 증가하는 거동을 보였다. 이는 사전연구자들[19]의 연구에서 보고된 중합열과 LED광원으로 인한 열의 영향으로 발생하는 복합레진의 온도상승으로 야기되는 복합레진과 PMMA링의 팽창으로 인한 것으로 PMMA의 열팽창계수가 복합레진에 비해 2배정도 크며 경화중인 복합레진의 유동성이 낮아져 복합레진과 PMMA링 계면 부근에서 큰 인장 변형이 발생했을 것이라 사료된다. 한편, 광조사가 종료된 후 시편의 수축은 일정하게 감소하여 4 min 이후 일정 값에 수렴하는 거동을 보였으며 각 반지름에서의 수축크기 순서는 초기 발생한 순서로 유지되었다.

Fig. 7은 최종경화 후 레진의 반경방향 평균수축률을 각 반지름위치에 따라 나타낸 그래프이다. 시편의 중심에 가까울수록 복합레진의 반경방향 수축률은 더 크게 발생하였으며 반지름 0.5 mm 부분에서 AP-X 레진의 제조사에서 제공한 부피수축률[16] 1.9% 기준으로 산출한 선형수축률 값인 0.66%의 약 85% 수준으로 나타났다. 반지름위치가 증가함에 따라 계면 안쪽 부근부터 PMMA링까지는 수축률이 크게 감소함을 볼 수 있다. 이는 레진이 경화하면서 수축이 발생하면 유동성이 사라져 PMMA링의 내벽에 시편의 중심방향으로 수축되는 힘을 발생시켜, 본 저자들의 이전 연구[20]에서 FEM을 통하여 보인 것과 같이 레진과 PMMA링 기판 사이에 인장형 잔류응력이 작용하여 레진부에 인장형 변형을 주고 있음을 나타낸다.

$$\sigma_{radius} = E_{specimen} \times \epsilon_{specimen} \quad (1)$$

본 실험에서 측정된 계면 근처에서 평균수축률인 -0.27% 기준으로 식 (1)과 같이 이전 연구[19]에서 연구한 변형률

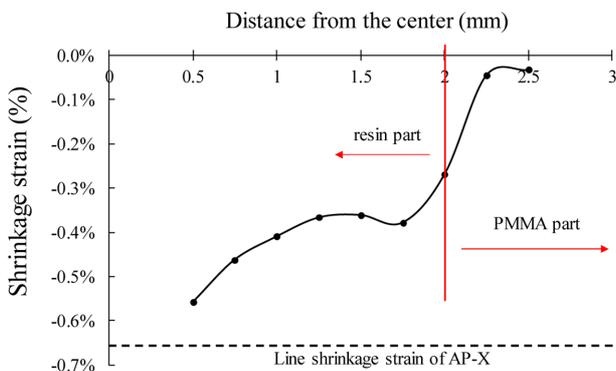


Fig. 7. Average radial shrinkage strain according to distance from the center (@10 min)

-응력 변환식을 적용하면 잔류응력은 8.64 MPa 크기의 인장형으로 작용하고 있을 것이라 예측된다. 여기서, σ 는 응력, E 는 탄성계수 ϵ 는 변형률을 나타낸다. 이러한 잔류응력의 영향으로 복합레진의 안쪽 내부보다 계면부근에서 미세파괴의 발생 가능성이 높을 것이라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 methacrylate 기반의 Clearfil AP-X 치아 수복용 복합레진을 대상으로 광조사시작부터 과정중 및 광조사후의 중합수축 기간 동안의 수축거동을 DIC를 통하여 관찰하였다. 사전실험으로 얻어진 광조사중에 촬영하여 수축률 분포를 검출가능한 최적노출시간은 0.03 ms였으며 이를 LED광조사중의 사진 촬영에 적용하여 DIC분석에 사용하였다. DIC분석결과 복합레진의 수축거동은 중심부와 가장자리부가 판이할 정도로 비 균일하였으며 계면부근에서는 인장거동이 레진의 중심부에서는 수축거동이 관찰되었다. 레진의 반경방향 평균수축률은 초기 20 s에서 총 최종경화 수축률의 50~60% 정도였음을 확인하였다. 또한 광조사시 레진과 PMMA기재사이의 열팽창계수의 차이로 인한 효과도 관찰 할 수 있었다. 본 연구를 통하여 중합수축 시작부터 최종 경화시의 AP-X 레진과 PMMA기재의 변형거동을 전체 면적에 걸쳐 관찰 가능하였다. 추후 이를 실제 수복된 치아에 적용 가능하도록 실험방법을 적용한다면 치아에 수복된 복합레진의 실제 수축거동 특성을 바탕으로 수복 후 발생될 계면결함을 예측하여 결함발생을 예방할 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No.2012R1A2A2A02010147).

REFERENCES

1. Bausch, J.R., Lange, de K., and Davidson, C.L., "Clinical Significance of Polymerization Shrinkage of Composite Resins," *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 48, No. 1, 1982, pp. 59-67.
2. Kleverlaan, C.J., and Feilzer, A.J., "Polymerization Shrinkage and Contraction Stress of Dental Resin Composites," *Dental Materials*, Vol. 21, No. 12, 2005, pp. 1150-1157.
3. Ilie, N., Kunzelmann, K.H., and Hickel R., "Evaluation of Micro-tensile Bond Strengths of Composite Materials in Comparison to their Polymerization Shrinkage," *Dental Materials*, Vol. 22, No. 7, 2006, pp. 593-601.
4. Iga, M., Takeshige, F., Ui, T., Torii, M., and Tsuchitani, Y., "The Relationship between Polymerization Shrinkage Measured by a

- Modified Dilatometer and the Inorganic Filler Content of Light-cured Composites," *Dental Materials*, Vol. 10, No. 1, 1991, pp. 38-45.
5. Feilzer, A.J., de Gee, A.J. and Davidson, C.L. "Increased Wall to Wall Curing Contraction in Thin Bonded Resin Layers" *Journal of Dental Research*, Vol. 68, No. 1, 1989, pp. 48-50.
 6. Park, S.H., Krejci, I. and Lutz, F., "A Comparison of Micro Hardness of Resin Composites Polymerized by Plasma Arc or Conventional Visible Light Curing," *Operative Dentistry*, Vol. 27, 2002, pp. 30-37.
 7. Chung, Y.C., Min, K.S., Lee, H.H., Cho, K.M., and Cho, Y.B., "A Study of Contraction Shrinkage of Composite Resins and Ormocers With Various Curing Thimes," *Journal of Korean Academy of Conservative Dentistry*, Vol. 28, No. 4, 2003, pp. 326-333.
 8. Asmussen, E., and Munksgaard, E.C., "Bonding of Restorative Resins to Dentine: Status of Dentine Adhesives and Impact on Cavity Design and Filling Techniques," *International Dental Journal*, Vol. 38, No. 2, 1988, pp. 97-104.
 9. Lee, S.H., Chang, J., Ferracane, J., and Lee, I.B., "Influence of Instrument Compliance and Specimen Thickness on the Polymerization Shrinkage Stress Measurement of Light-cured Composites," *Dental Materials*, Vol. 23, No. 9, 2007, pp. 1093-1100.
 10. Min, S.H., Ferracane, J., and Lee, I.B., "Effect of Shrinkage Strain, Modulus, and Instrument Compliance on Polymerization Shrinkage Stress of Light-cured Composites during the Initial Curing Stage," *Dental Materials*, Vol. 26, No. 10, 2010, pp. 1024-1033.
 11. Chu, T.P., Ranson, W.F., and Sutton, M.A., "Applications of Digital-image-correlation Techniques to Experimental Mechanics," *Experimental Mechanics*. Vol. 25, No. 3, 1985, pp. 232-244.
 12. Li, J.Y., Lau, A., and Fok, A.S.L., "Application of Digital Image Correlation to Full-field Measurement of Shrinkage Strain of Dental Composites," *Applied Physics & Engineering*, Vol. 14, No. 1, 2013, pp. 1-10.
 13. Chuang, S.F., Chen, T.Y., and Chang, C.H., "Application of Digital Image Correlation Method to Study Dental Composite Shrinkage," *Strain*, Vol. 44, No. 3, 2008, pp. 231-238.
 14. Miletic, V., Manojlovic, D., Milosevic, M., Mitrovic, N., Stanokovic, T.S., and Maneski, T., "Analysis of Local Shrinkage Patterns of Self-adhering and flowable Composites Using 3D Digital Image Correlation," *Quintessence International*, Vol. 42, No. 9, 2011, pp. 797-804 (PMID: 21909505).
 15. Furukawa, T., Arakawa, K., Morita, Y., and Uchino, M., "Polymerization Shrinkage Behavior of Light Cure Resin Composites in Cavities," *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 4, No. 3, 2009, pp. 356-364.
 16. Addison, O., Marquis, P.M., and Fleming, G.J.P., "Resin Elasticity and the Strengthening of All-ceramic Restorations," *Journal of Dental Research*. Vol. 86, No. 6, 2007, pp. 519-523.
 17. Sakaguchi, R.L., Peters, M.C.R.B., Nelson, S.R., Douglas, W.H., and Poort, H.W., "Effects of Polymerization Contraction in Composite Restorations," *Journal of Dentistry*, Vol. 20, No. 3, 1992, pp. 178-182.
 18. Park, J.H., and Choi, N.S., "Equivalent Young's Modulus of Composite Resin for Simulation of Stress During Dental Restoration," *Dental materials*, Vol. 33, No. 2, 2017, pp. e79-e85.
 19. Shortall, A., El-Mahy, W., Stewardson, D., Addison, O., and Palin, W., "Initial Fracture Resistance and Curing Temperature Rise of Ten Contemporary Resin-based Composites with Increasing Radiant Exposure," *Journal of Dentistry*, Vol. 41, No. 5, 2013, pp. 455-463.
 20. Park, J.H., and Choi, N.S., "Behavior of Polymer Behavior of Polymerization Shrinkage Stress of Methacrylate-based Composite and Silorane-based Composite during Dental Restoration," *Composite Research*, Vol. 28, No. 1, 2015, pp. 6-14.