섬유 보강 복합레진의 섬유 방향이 중합수축에 미치는 영향

염중원 · 이인복*
치과보존학교실, 서울대학교 치의학대학원

ABSTRACT

EFFECT OF FIBER DIRECTION ON THE POLYMERIZATION SHRINKAGE OF FIBER-REINFORCED COMPOSITES

Joongwon Yom, In-Bog Lee*
Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Seoul National University

The aim of this study was to evaluate the effect of fiber direction on the polymerization shrinkage of fiber-reinforced composite. The disc-shaped flowable composite specimens (d = 10 mm, h = 2 mm, Aeliteflo A2, Bisco, Inc., IL, USA) with or without glass fiber bundle (X-80821P Glass Fiber, Bisco, Inc., IL, USA) inside were prepared, and the longitudinal and transversal polymerization shrinkage of the specimens on radial plane were measured with strain gages (Linear S-series 350Ω, CAS, Seoul, Korea). In order to measure the free polymerization shrinkage of the flowable composite itself, the disc-shaped specimens (d = 7 mm, h = 1 mm) without fiber were prepared, and the axial shrinkage was measured with an LVDT (linear variable differential transformer) displacement sensor. The cross-section of the polymerized specimens was observed with a scanning electron microscope to examine the arrangement of the fiber bundle in composite. The mean polymerization shrinkage value of each specimen group was analyzed with ANOVA and Scheffe post-hoc test (α=0.05).

The radial polymerization shrinkage of fiber-reinforced composite was decreased in the longitudinal direction of fiber, but increased in the transversal direction of fiber ($p<0.05$). We can conclude that the polymerization shrinkage of fiber-reinforced composite splint or restoratives is dependent on the direction of fiber. [J Kor Acad Cons Dent 34(4):364-370, 2009]

Key words: fiber-reinforced composite, longitudinal direction, transversal direction, polymerization shrinkage, strain gage, linear variable differential transformer
-Received 2009.5.11., revised 2009.5.31., accepted 2009.6.25.-

Ⅰ. 서 론

치과용 복합레진은 1960 년대에 심미성을 지닌 수복재료로 처음 도입되었으나 기존 재료에 비해 강도가 약하고 중합수축이 큰 단점을 지녀 이를 개선하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다[1]. 이후에 소개된 섬유 보강 복합레진은 복합레진 내부에 물성이 좋은 섬유를 배열하여 재료의 강도와 중합수축 문제를 개선할 수 있는 대안으로 연구되고 있다[2,3]. 섬유 보강 복합레진은 우수한 기계적 성질과 심미성을 동시에 지녀 스플린트, 금관, 고정성 보철물 등 치과 수복용 재료로 광범위하게 이용될 수 있다[4]. 치과용 복합레진에 사용되는 섬유 재료는 구성성분에 따라 유리, 폴리에틸렌, 케블라, 탄소섬유 등으로 나뉘고 구성방향에 따라 단방향, 이방향, 다방향 등으로 나뉜다[5]. 사용된 섬유의 종류와 양도 중

* Corresponding Author: In-Bog Lee
Department of Conservative Dentistry,
School of Dentistry, Seoul National University
275-1 Yeongeon-Dong, Jongno-Gu, Seoul, 110-768, Korea
Tel: 82-2-2072-3953 Fax: 82-2-2072-3859
E-Mail: inboglee@snu.ac.kr

요하지만 섬유를 복합레진 내부에 어떻게 배열할 것인가도 수복 결과에 중요한 영향을 미친다[6]. 복합레진에 섬유를 보강하면 섬유가 배열된 방향을 따라 중합수축 길이가 감소한다[7].

Strain gage를 이용하여 중합수축을 측정하면 젤화점 (gel point) 이후의 수축을 측정함으로써 수복물에서 미세누출이나 수축응력이 어느 정도 나타날지 예측할 수 있다[8]. Strain gage는 합성수지 박막에 금속저항선을 일정한 방향으로 배열한 변위센서다. Strain을 측정하고자 하는 물체에 strain gage를 부착하면 물체의 변형에 따라 strain gage도 변형된다. 물체가 strain gage의 저항선과 평행한 방향으로 늘어나면 저항선이 늘어나면서 strain gage의 저항값이 커진다. 물체가 늘어난 정도와 저항이 증가하는 정도는 일정한 비율을 갖는데 이를 gage factor라 한다. 회로에 일정한 크기의 전압을 입력하고 출력 전압의 변화를 측정하면 strain gage의 저항값 변화를 알 수 있고 이를 통해 물체의 strain 값을 계산할 수 있다.

Sakaguchi 등[8]은 strain gage를 이용하여 복합레진의 중합수축을 측정하였고 광원과 부착 방법에 따라 수축 정도에 차이가 있음을 보였다. Versluis 등[9]은 biaxial strain gage를 이용하여 광원의 빛 에너지와 시편 두께에 따른 복합레진의 미세 강도와 수축 길이에 차이가 있음을 보였다. Tezvergil 등[7]은 단방향 섬유 보강 복합레진은 섬유의 길이 방향으로 수축하지 않지만 수직 방향으로는 수축한다고 하였고 Lassila 등[10]은 복합레진 내 섬유 층의 위치가 굴곡 강도에 중요한 영향을 미친다고 하였다. Dyer 등[6]은 복합레진 내 섬유의 배열 방법을 따라 탄성 계수와 인성이 달라진다고 하였다. 이러한 기존의 연구에서는 복합레진 내에 보강 섬유가 배열된 원판 형태의 시편을 이용하여 원판의 평면 방향으로 일어나는 post-gel 중합수축을 측정하였다[7].

본 연구에서는 strain gage와 LVDT (linear variable differential transformer) 변위센서[11]를 사용하여 post-gel 및 free 중합수축을 측정하였고 섬유 보강 복합레진에서 섬유의 배열 방향이 복합레진의 중합수축에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

Ⅱ. 실험 재료 및 방법

1. 실험 재료

섬유 보강 복합레진 시편을 만들기 위해 유동성 복합레진 Aeliteflo A2 (Bisco, Inc., IL, USA)과 보강 섬유로 X-80821P Glass Fiber (Bisco, Inc., IL, USA)를 사용하였다. 시편 광중합을 위한 광조사기는 VIP Junior (Bisco, Inc., IL, USA)를 사용하였다. 광조사기의 광의 세기는 600 mW/cm^2 이었다. 중합수축을 측정하기 위한 strain gage는 Linear S-series 350Ω (CAS, Seoul, Korea)을 사용하였다. 출력전압의 측정과 저장은 DAQ board NI USB-6009 (National Instruments Corporation., TX, USA)와 LabVIEW 7.1 (National Instruments Corporation., TX, USA)을 이용하였다.

2. 실험 방법

(1) 섬유가 보강된 평면 상 (radial direction) 에서 post-gel 중합수축의 측정

투명 비닐이 부착된 받침대용 슬라이드글라스 위에 지름 10 mm, 높이 1 mm의 원반 모양으로 유동성 복합레진을 위치시킨 후 그 중앙에 strain gage를 위치시킨 뒤 다시 지름 10 mm, 높이 1 mm의 원반 모양의 복합레진을 위치시켜 총 두께 2 mm의 시편을 만들었다 (Figure 1). 섬유를 보강한 실험군에서는 strain gage 아래쪽과 위쪽 복합레진에 섬유를 골고루 분포시켜 복합레진에 대한 섬유의 부피비를 10%로 조절하였다. 이를 다시 투명 비닐이 부착된 덮개용 슬라이드글라스로 덮고 두 개의 광조사기를 이용하여 시편으로부터 5 mm 상방과 하방에서 동시에 40초 동안 광조사하여 복합레진을 중합하였다. 시편은 다음과 같이 4개의 군으로 나누어 광조사 후 원판형 시편의 radial 방향의 길이 수축을 각각 5번씩 측정하였다.

· 1 군: 섬유가 포함되지 않은 원판형 시편에서 복합레진의 수축을 한 방향에서 측정

· 2 군: 섬유가 원판형 시편의 한 radial 방향으로 보강된 복합레진의 수축을 섬유의 장축에 평행한 방향 (longitudinal direction) 에서 측정

· 3 군: 섬유가 원판형 시편의 한 radial 방향으로 보강된 복합레진의 수축을 섬유의 장축에 직각인 방향 (transversal direction)에서 측정

· 4 군: 섬유가 원판형 시편의 radial 평면에서 서로 수직을 이루는 두 방향으로 보강된 복합레진의 수축을 한 방향에서 측정

Wheatstone bridge를 이용하여 strain gage 측정 회로를 꾸미고 5 V의 입력 전압에 대한 출력 전압을 100배 증폭하여 그 값을 중합 시작 이후 600초 동안 컴퓨터로 기록하였다 (Figure 2). 이를 통해 strain gage의 저항값의 변화를 측정하고 gage factor를 이용하여 시편의 radial strain 값을 계산하였다. 출력전압으로부터 strain을 측정하는 수식은 다음과 같다.

$$V_0 = V_a - V_b = \frac{1}{2} V_s - \frac{R}{2R+\Delta R} V_s = V_s \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{2R+\Delta R} \right) = V_s \left(\frac{\Delta R}{4R+2\Delta R} \right)$$

if $R \gg \Delta R$, $V_0 \cong \frac{V_s}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$이고, $G \cdot \varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$ 이므로 $V_0 \cong \frac{V_s}{4} G \cdot \varepsilon$이다.

따라서 strain은 $\varepsilon \cong \frac{4V_0}{V_s \cdot G} \times 100(\%)$ 로 주어진다.

Vo: 출력전압, Va: 두 고정저항 사이의 전압
Vb: 두 strain gage 사이의 전압, Vs: 전원전압
R: 고정저항의 저항값, ΔR: 저항값의 변화량
G: gage factor, ε: strain (%)

(2) 섬유가 들어있지 않은 Flowable 복합레진 자체의 free 중합수축의 측정

받침대용 슬라이드글라스 위에 지름 7 mm, 높이 1 mm의 원반 모양으로 유동성 복합레진을 위치시켜 시편을 만들었다 (Figure 3). 커버글라스로 덮고 그 위에 LVDT 변위센서의 탐침을 접촉시킨 후 시편으로부터 5 mm 하방에서 40초 동안 광조사하여 복합레진을 중합시켰다. 광중합 시작 후 시편의 axial 방향의 중합수축을 600초 동안 컴퓨터로 기록하였다. 시편의 axial strain은 다음과 같이 계산하였고 각각 5번씩 측정하였다[11].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L + \Delta L} \times 100(\%)$$

ε : strain (%)
L : 광중합 600초 후 경화된 시편의 두께
ΔL : 광중합 600초 후 시편의 두께 변화량

(3) 단면 관찰

각 군에서 중합된 시편을 수평, 수직 방향으로 절단한 뒤 주사전자현미경으로 복합레진 내부의 섬유배열을 관찰하였다.

(4) 통계 분석

각 군에서 측정된 평균 strain 값들을 one-way ANOVA로 비교하였고 Scheffe post-hoc test로 사후 검정하였다 (α=0.05).

Ⅲ. 실험 결과

1. Strain gage로 측정된 섬유가 보강된 평면 상 (radial direction)에서의 post-gel 중합수축

네 군의 시편 모두 광조사가 시작된 이후 수축하여 음의 strain 값을 나타냈다 (Figure 4. a). 광조사 시작 후 600초를 기준으로 평균 수축값의 크기는 3 군 (-0.71%), 1 군 (-0.59%), 4 군 (-0.36%), 2 군 (-0.16%) 순으로 나타났고 각 군은 서로 통계적인 차이를 보였다 ($p<0.05$) (Table 1, Figure 4. b).

2. LVDT로 측정된 복합레진 자체의 axial 방향의 free 선형 중합수축

광조사 시작 후 600초를 기준으로 평균 수축값의 크기는 -4.75(0.13)% 였다. 슬라이드글라스 사이에 원반 형태로 시편을 만들어 axial 방향에서 복합레진의 중합수축을 측정하는 bonded disc method의 경우, 측정된 수축값은 시편의 부피 수축값과 같아 실제 길이 수축값의 3배에 달하는 것으로 알려져 있다[11]. 따라서 측정된 수축값에 1/3을 곱하여 구한 길이 수축값은 -1.58% 였다.

3. 단면 관찰

모든 군의 시편에서 섬유가 복합레진 내에서 섬유 사이에 약간의 공극을 보이며 일정한 방향으로 배열된 모습이 관찰되었다 (Figure 5. a). Strain gage를 사용한 시편에서는 복합레진 내부에 strain gage가 부착된 모습이 관찰되었다 (Figure 5. b).

Table 1. Post-gel radial shrinkage strain measured using a strain gage for composite specimens at 600 s.

Group	1	2	3	4
Radial strain (%)	-0.59 (0.04)[b]	-0.16 (0.05)[d]	-0.71 (0.04)[a]	-0.36 (0.04)[c]

* Superscript letters mean statistically significant difference.

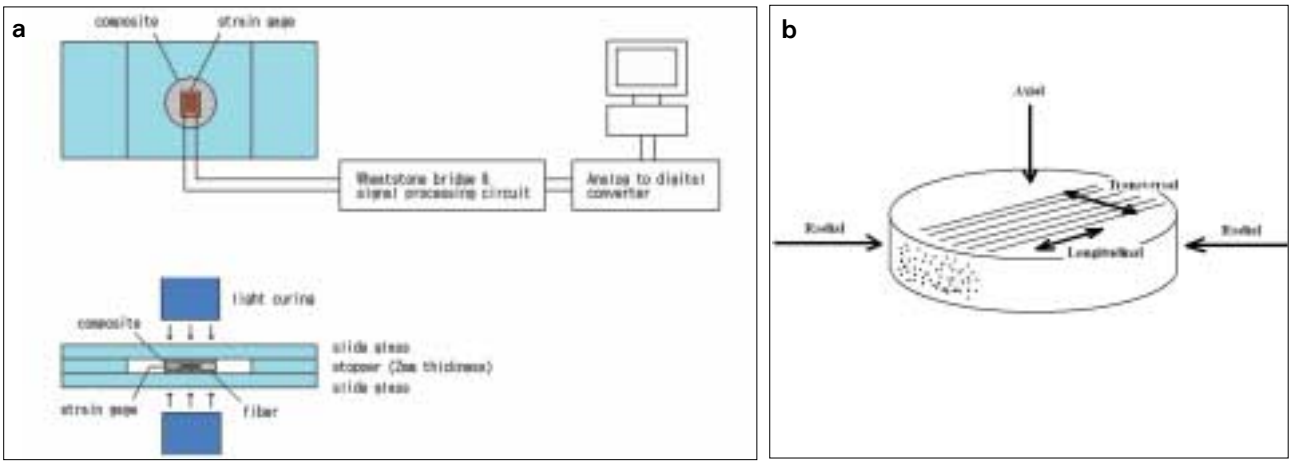

Figure 1. a) Experimental setup for the measurement of radial linear shrinkage using a strain gage.
b) Definition of directions on a disc shaped specimen in the measurement.

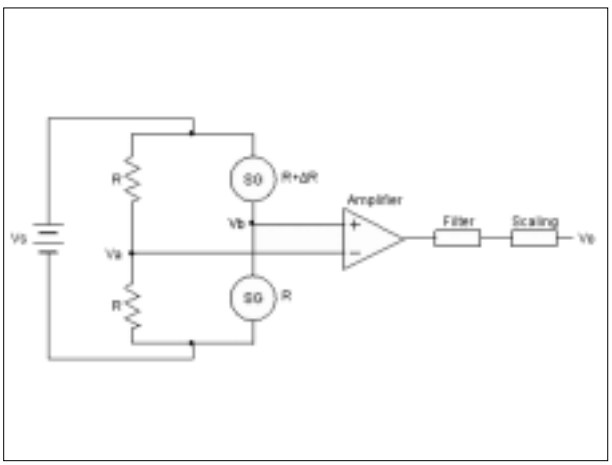

Figure 2. Electric circuit design for the strain measurement (Vo: output voltage, Va: voltage between two fixed resistances, Vb: voltage between two strain gages, Vs: input voltage, R: fixed resistance, ⊿R: resistance difference, SG: strain gage).

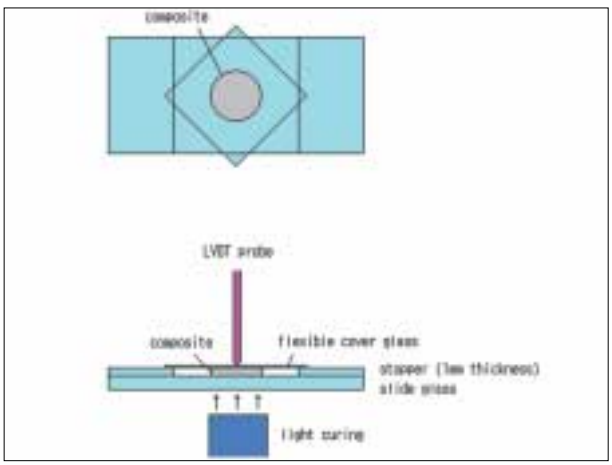

Figure 3. Experimental setup for the measurement of axial linear shrinkage using an LVDT probe.

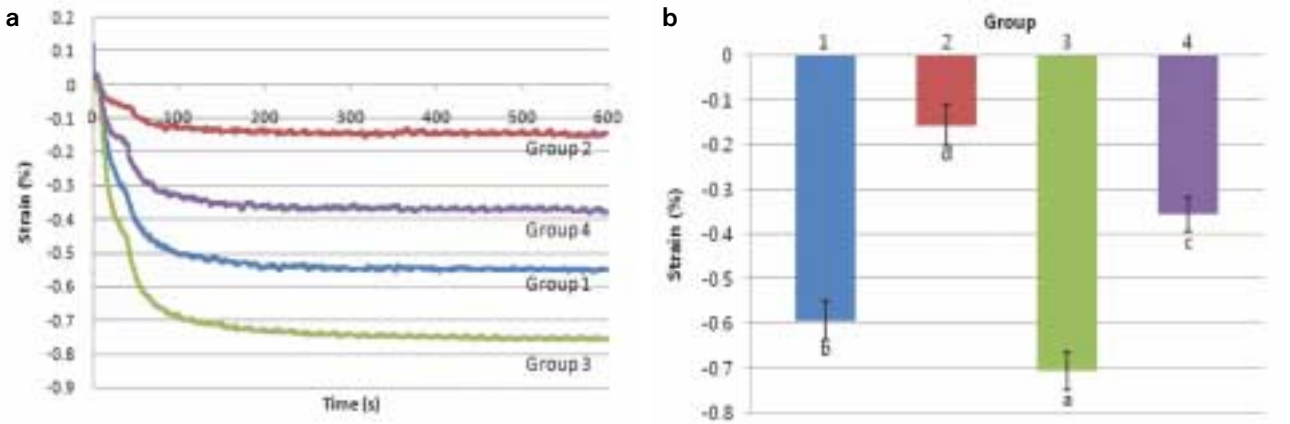

Figure 4. a) Representative curves of radial shrinkage strains for composite specimens as a function of time.
b) Post-gel shrinkage strains for four groups.

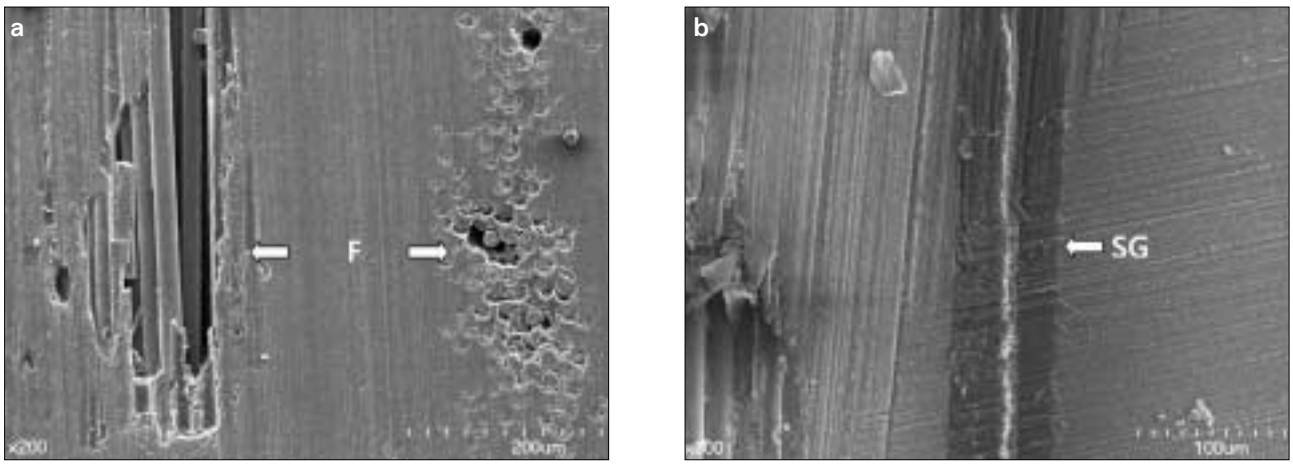

Figure 5. SEM photomicrographs showing the cross-section of composite specimens.
a) Some voids were observed between fibers. The arrows show fiber bundles (F).
b) There was an intimate contact between the strain gage and composite. The arrow shows the strain gage (SG).

Ⅳ. 고 찰

복합레진의 중합수축량과 그 방향은 직접수복 시 복합레진과 치아의 접착계면에 발생하는 중합수축응력과 간접수복물의 정밀도에 큰 영향을 미쳐 최종 수복의 질을 좌우한다. 따라서 섬유가 첨가된 복합레진의 수축의 양태를 이해하는 것은 매우 중요하다. 복합레진은 중합이 진행됨에 따라 단량체가 사슬 형태의 다량체로 변환되며 점도가 증가하게 되고 반응이 더 진행됨에 따라 교차결합이 생성되고 결과적으로 탄성계수가 증가한다. 초기에 흐름성을 지니는 점성체에서 탄성을 지니는 고체 형태로 변화하는 시점을 젤화점 (gel point)이라 한다. 따라서 복합레진은 먼저 유동적인 상태로 pre-gel 수축을 일으킨 뒤 gel 상태로 접착면에 고정되어 post-gel 수축을 일으킨다. Strain gage는 복합레진의 post-gel 수축을 측정하고 LVDT 변위센서는 복합레진의 pre-gel과 post-gel 수축 모두를 측정한다. 따라서 같은 수축량을 측정할 때 strain gage는 LVDT 변위센서보다 더 적은 수축값을 나타낼 수 있다[12]. 복합레진을 치아에 접착시켜 중합할 때 수축응력을 일으키는 것은 gel 상태 이후의 수축이므로 LVDT 변위센서에 비해 strain gage로 측정된 수축값이 임상적으로 중요한 의미를 지닐 수 있다.

Strain gage는 원판 형태의 시편 내부에서 복합레진의 radial 방향 수축을 측정하였다. Radial 방향에서 복합레진의 중합수축은 섬유가 한 방향으로 보강되었을 때 섬유와 평행한 방향에서 가장 적고 섬유의 배열과 수직인 방향에서 가장 컸다. 섬유의 중합수축 감소 효과는 섬유의 길이 방향으로 나타남을 알 수 있었다. 유리섬유는 단단한 고체이므로 복합레진의 수축을 표면에서의 마찰에 의해 낮추어준 것

으로 보인다. 섬유와 수직인 방향에서의 중합수축은 섬유를 보강하지 않았을 때보다 오히려 크게 나타났다. 이는 섬유와 평행한 방향의 수축 감소에 대한 보상이 섬유와 수직인 방향에서 수축 증가로 나타난 것으로 생각되었다. 섬유가 직각의 두 방향으로 보강되었을 때의 중합수축은, 섬유가 한 방향으로 보강되었을 때 섬유와 수직인 방향에서 측정된 수축량보다는 작지만 섬유와 평행한 방향에서 측정된 수축량보다는 컸다. 이는 섬유와 평행한 방향에서의 수축 감소 효과와 섬유와 수직인 방향에서의 수축 증가 효과가 동시에 나타난 결과로 보였다.

Strain gage로 측정된 섬유가 들어있지 않은 복합레진의 radial 방향 길이 수축값은 -0.59%로 측정되었고, LVDT 변위센서로 역시 섬유가 들어있지 않은 복합레진의 axial 방향 수축을 측정한 경우 길이 수축값은 -1.58%로 계산되었다. 전자가 복합레진의 post-gel 수축량을 나타내고 후자는 복합레진의 pre-gel 수축량과 post-gel 수축량을 모두 나타낸다고 할 때, 복합레진의 pre-gel 길이 수축값은 두 값의 차인 -0.991%로 계산되었다. 따라서 pre-gel 수축량이 post-gel 수축량보다 크게 나타났다. 비교적 단단한 플라스틱 필름에 내장된 저항선으로 구성된 strain gage를 변형시키기 위해서는 복합레진이 어느 정도의 탄성을 가져야만 하기 때문이다.

주사전자현미경으로 확인한 시편 단면에서 섬유 다발이 모여 있는 부분에는 섬유 사이의 공간이 관찰되기도 했다 (Figure 5. a). 섬유 사이의 간격이 너무 좁은 곳에는 복합레진이 잘 스며들지 않아 섬유와 복합레진의 결합을 저해하는 것으로 보였다. 섬유를 일정한 간격으로 배열하고 흐름성이 좋은 복합레진을 사용하는 것이 결합에 유리할 것으로 생각되었다. Strain gage가 포함된 시편의 단면에서는 복합레진 내부에 strain gage가 밀착되어 수축이 잘 측정된 것으로 보였다 (Figure 5. b). Strain gage를 시편 내부에 위치시킴으로써 시편의 표면에 위치시키는 경우[7]에 비해 더 잘 밀착되었을 것으로 생각된다.

Radial 방향의 중합수축 측정에서 섬유와 수직인 방향에 비해 섬유와 평행한 방향에서 복합레진의 수축이 감소한 결과는 Tezvergil 등[7]의 연구와 일치하였다. 섬유 보강 복합레진으로 스플린트나 고정성 보철물을 제작할 때 중합수축량은 보강된 섬유의 배열방향에 따라 큰 차이가 있을 것이다.

본 연구에서는 strain gage로 시편의 radial 방향 수축을 측정하고 LVDT 변위센서로 시편의 axial 방향 수축을 측정하여 섬유의 방향이 복합레진의 중합수축에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 복합레진 자켓 크라운이나 접착형 bridge 제작 시 파절강도를 증가시키기 위해 유리섬유를 지대치 주위로 둘러싸는 형태의 수복물을 만드는 경우가 흔하다. 이 경우 섬유의 배열 방향에 따라 중합수축에 의한 수복물의 변형 방향을 어느 정도 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 추후 연구에서는 섬유의 첨가 양이 전체 중합수축량에 미치는 영향과, 변화된 중합수축의 방향과 광중합 시 증가하는 복합레진의 탄성계수가 수복물 내의 잔류응력에 미치는 효과 등에 대해 심도 있는 연구가 필요하다.

Ⅴ. 결 론

섬유가 일정한 방향으로 보강된 복합레진 시편에서 중합수축을 측정한 결과 섬유가 배열된 평면 상에서 중합수축은 섬유와 평행한 방향에서 감소하고 섬유와 수직한 방향에서 증가했다.

참고문헌

1. Giachetti L, Scaminaci Russo D, Bambi C, Grandini R. A review of polymerization shrinkage stress: current techniques for posterior direct resin restorations. *J Contemp Dent Pract* 7:79-88, 2006.
2. Vallittu PK, Lassila VP, Lappalainen R. Acrylic resin-fiber composite-Part I: The effect of fiber concentration on fracture resistance. *J Prosthet Dent* 71:607-612, 1994.
3. Vallittu PK. Acrylic resin-fiber composite--Part II: The effect of polymerization shrinkage of polymethyl methacrylate applied to fiber roving on transverse strength. *J Prosthet Dent* 71:613-617, 1994.
4. Goldberg AJ, Burstone CJ. The use of continuous fiber reinforcement in dentistry. *Dent Mater* 8:197-202, 1992.
5. Butterworth C, Ellakwa AE, Shortall A. Fibre-reinforced composites in restorative dentistry. *Dent Update* 30:300-306, 2003.
6. Dyer SR, Lassila LV, Jokinen M, Vallittu PK. Effect of cross-sectional design on the modulus of elasticity and toughness of fiber-reinforced composite materials. *J Prosthet Dent* 94:219-226, 2005.
7. Tezvergil A, Lassila LV, Vallittu PK. The effect of fiber orientation on the polymerization shrinkage strain of fiber-reinforced composites. *Dent Mater* 22:610-616, 2006.
8. Sakaguchi RL, Versluis A, Douglas WH. Analysis of strain gage method for measurement of post-gel shrinkage in resin composites. *Dent Mater* 13:233-239, 1997.
9. Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH. Distribution of transient properties during polymerization of a light-initiated restorative composite. *Dent Mater* 20:543-553, 2004.
10. Lassila LV, Vallittu PK. The effect of fiber position and polymerization condition on the flexural properties of fiber-reinforced composite. *J Contemp Dent Pract* 5:14-26, 2004.
11. 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* 22:1071-1079, 2006.
12. Sakaguchi RL, Wiltbank BD, Shah NC. Critical configuration analysis of four methods for measuring polymerization shrinkage strain of composites. *Dent Mater* 20:388-396, 2004.

국문초록

섬유 보강 복합레진의 섬유 방향이 중합수축에 미치는 영향

염중원 · 이인복*
치과보존학교실, 서울대학교 치의학대학원

본 연구의 목적은 strain gage와 LVDT (linear variable differential transformer) 변위센서를 이용하여 섬유 보강 복합레진에서 섬유의 방향이 복합레진의 중합수축에 미치는 영향을 알아보기 위함이다.

지름 10 mm, 높이 2 mm의 원반 모양 유동성 복합레진 (Aeliteflo A2, Bisco, Inc., IL, USA) 중앙에 유리섬유 (X-80821P Glass Fiber, Bisco, Inc., IL, USA)를 위치시키고, 섬유가 배열된 장축 방향 (longitudinal)과 수직방향 (transversal)의 중합수축량을 strain gage (Linear S-series 350Ω, CAS, Seoul, Korea)를 이용하여 각각 측정하였다. 사용된 유동성 복합레진 자체의 free 중합수축을 구하기 위해 지름 7 mm, 높이 1 mm의 원반 모양 시편의 수직방향 (axial) free 중합수축값을 LVDT로 측정하였다. 중합된 시편들을 절단하여 주사전자현미경으로 복합 레진 내부의 섬유배열을 관찰하고 각 군에서 측정된 평균 수축값들을 ANOVA로 비교하였고 Scheffe post-hoc test로 사후 검정하였다 (α=0.05).

섬유가 배열된 평면 상에서 복합레진의 중합수축 (radial shrinkage)은 섬유와 평행한 방향에서 감소하고 섬유와 수직한 방향에서 증가했다 ($p<0.05$). 본 연구의 결과 섬유 보강 복합레진으로 스플린트나 수복물을 제작할 때 중합수축량은 보강된 섬유의 배열방향에 따라 큰 차이가 남을 알 수 있었다.

주요단어: 섬유 보강 복합레진, 수평방향, 수직방향, 중합수축, strain gage, linear variable differential transformer