

점도, 시편형태 그리고 접착의 유무가 광중합 복합레진의 선형중합수축의 측정에 미치는 영향

이인복 · 손호현 · 권혁춘 · 엄정문 · 조병훈*

서울대학교 치과대학 보존학교실

ABSTRACT

THE EFFECT OF VISCOSITY, SPECIMEN GEOMETRY AND ADHESION ON THE LINEAR POLYMERIZATION SHRINKAGE MEASUREMENT OF LIGHT CURED COMPOSITES

In-Bog Lee, Ho-Hyun Son, Hyuk-Chun Kwon, Chung-Moon Um, Byeong-Hoon Cho*

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Seoul National University

Objectives. The aim of study was to investigate the effect of flow, specimen geometry and adhesion on the measurement of linear polymerization shrinkage of light cured composite resins using linear shrinkage measuring device.

Methods. Four commercially available composites - an anterior posterior hybrid composite Z100, a posterior packable composite P60 and two flowable composites, Filtek flow and Tetric flow - were studied. The linear polymerization shrinkage of composites was determined using 'bonded disc method' and 'non-bonded' free shrinkage method at varying C-factor in the range of 1~8 by changing specimen geometry. These measured linear shrinkage values were compared with free volumetric shrinkage values.

The viscosity and flow of composites were determined and compared by measuring the dropping speed of metal rod under constant load.

Results. In non-bonded method, the linear shrinkage approximated one third of true volumetric shrinkage by isotropic contraction. However, in bonded disc method, as the bonded surface increased the linear shrinkage increased up to volumetric shrinkage value by anisotropic contraction. The linear shrinkage value increased with increasing C-factor and approximated true volumetric shrinkage and reached plateau at about C-factor 5~6. The more flow the composite was, reduced linear shrinkage was measured by compensation radial flow.

Key words : Anisotropy, Polymerization shrinkage, Bonded disc method, Flow, C-factor, Light cured composites

I. 서 론

수복용 광중합형 복합레진은 중합시 2~5%의 체적 수축률을 지닌다. 이러한 중합수축은 복합레진 수복시 와동벽에 강한 응력을 발생시켜 접착의 실패를 가져와 수복물과 와동벽 사이에 미세 간극을 가져올 수 있으며 경우에 따라서는 법랑질 변연의 미세 파절을 유발할 수 있다. 이 결과 수복 후 과민반응이나 이차우식, 치수염 등 수복물의 실패를 가져

온다¹⁻⁶⁾.

여러 제조회사들이 이러한 중합수축을 줄이기 위해 새로운 단량체를 개발하거나 filler 체계를 개선하기 위해 많은 노력을 기울여 왔으며 많은 연구자들이 수복 시 중합수축량을 줄이거나 상쇄시키기 위해 점층법이나 slow start polymerization, delayed cure와 같은 여러 임상적 기법을 발전시켜 왔다⁵⁻⁷⁾. 그러나 이 문제는 완전히 해결되지 않았고 아직도 많은 개선의 여지가 남아있다. 따라서 복합레진의

※ 이 논문은 2003년 서울대학교병원 집중육성연구비(03-2003-023-0) 지원에 의해 이루어진 것임.

중합수축을 정확히 측정하는 것은 매우 중요하고 치과임상에 복합레진이 도입된 이래 현재까지 계속 연구가 진행되고 있는 중요한 주제이다.

중합수축의 측정은 주로 mercury dilatometer나 water dilatometer를 사용하여 체적변화를 측정하거나 중합 전후의 비중변화를 정밀분석저울로 측정하였다^{1,3,8,9)}. 그러나 이들 방법은 매우 번거로움을 요하는 작업을 필요로 하고 온도 변화에 매우 민감하다. 보다 간편한 방법으로 선형가변차동변압기 (LVDT, linear variable differential transformer) 나 strain guage와 같은 변위 측정 센서를 이용하여 선형중합수축을 측정한 후 체적중합수축으로 환산하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 등방적인 수축(isotropic contraction)이 보장될 경우에만 유용하며 그렇지 못한 경우는 실제 값보다 커지거나 작아지는 단점이 있다¹⁰⁻¹⁶⁾.

Watt등^{7,14,15,24)}, Davidson등^{10-12,16,23)}이 사용한 선형중합수축 측정 장치의 경우 여러 종류의 변위 측정 센서를 이용하여 선형 중합수축을 측정하고 이를 체적수축으로 환산하는 방법을 이용한다. 이 경우 이론적인 체적수축비 γ_p 는
$$\gamma_p = 1^3 \dots (1 - \alpha_p)^3 = 3\alpha_p + 3\alpha_p^2 + \alpha_p^3 \quad (\alpha_p \text{는 선형 수축비})$$

로 주어지고 α_p 가 비교적 작으므로 식 뒷부분의 제곱과 세제곱 항을 무시하면 $\gamma_p \approx 3\alpha_p$ 로 체적수축은 대략 선형수축의 세배가 된다¹⁰⁾. 그러나 이러한 관계가 성립하려면 시편 내에서 모든 방향으로 등방적인 수축 (isotropic contraction) 이 일어난다는 전제가 만족되어야 한다. 그러나 실제로는 두 평판 사이에 복합레진을 샌드위치 시키는 구조를 가진 실험장치의 기하학적인 한계로 시료를 누르는 평판과 복합레진 계면 사이에, 중합수축 또는 중합수축으로 유발된 흐름에 저항하는 마찰력이 작용하여 얇은 디스크 형태로 되어있는 시편의 radial 방향의 수축은 axial 방향에 비하여 제한될 수 밖에 없다. 또한 평판과 시편에 작용하는 중력의 영향으로 측정값이 작아지거나 크게 나타날 수 있으며 이러한 효과는 레진이 가진 점성의 다양성과 관련되어 더욱 복잡해지고 부정확한 측정값을 가져온다.

Feilzer등¹⁰⁾은 Vaseline 이나 grease 같은 분리제를 사용하여 접착을 배제 함으로서 수축에 대한 저항 요소를 최대한 줄여 등방적 수축 (isotropic free shrinkage)을 유도하여 선형중합수축 측정값의 3배를 체적수축률로 계산하였다.

Feilzer등¹⁶⁾, Watt등^{14-15,24)}에 의하면 C-factor (configuration factor, bonded surface area/free unbonded surface area) 가 크고 bonded disc method¹⁵⁾에서와 같이 평판과 composite 사이의 접착이 충분히 크면 radial 방향의 수축은 거의 무시 될 만큼 작고 주로 vertical 방향의 수축만이 일어나 선형 수축비는 거의 체적 수축비에 근접하여 $\Delta L/L_0 \approx V/V_0$ 관계가 이루어짐을 보고하였다.

많은 연구자들이¹⁴⁻¹⁶⁾ Watt 와 Cash¹⁵⁾가 제안한 bonded

disc method를 이용하여 복합레진의 선형중합수축률을 측정하여 체적중합수축률을 대신하고 있다. 그러나 이들 연구에서는 선형수축률을 체적수축률로 환산 시 구체적으로 어느 정도의 C-factor 일 때 선형수축률을 체적수축률로 치환할 수 있는지에 대하여 정확하게 지적하고 있는 연구는 드물고, 복합레진의 흐름성이 선형중합 수축률의 측정에 미치는 효과에 대한 연구 또한 거의 없는 실정이다.

이러한 선형중합수축 측정 장치의 특성을 이용하면 오히려 체적중합수축과 선형중합수축 사이의 차이를 가져오는 여러 요소의 영향을 고찰할 수 있는 방법론을 제공하여 준다.

복합레진 자체의 물성비교를 위해서는 체적중합수축 측정값이 이용되나 실제 임상에서 중요한 의미를 가지는 중합수축은 선형수축이며 이는 와동의 기하학적인 형태, 와동과 충전물과의 결합강도, 복합레진의 점도와 흐름성, 그리고 중합속도에 큰 영향을 받는다.

따라서 본 연구에서는 LVDT를 이용한 선형중합수축 측정장치를 제작하여 복합레진의 선형중합수축을 측정 시 C-factor의 변화, 접착의 유무, 복합레진의 flow 정도의 차이가 선형수축의 측정값에 미치는 영향을 관찰하였고 이¹⁷⁾가 개발한 체적중합수축 장치로 측정한 값과 비교하였다.

II. 실험 재료 및 방법

1. 선형중합수축 측정장치의 구조

선형중합수축을 측정하기 위해 Watt와 Cash¹⁵⁾가 사용한 방법과 같이 LVDT를 이용하여 선형중합수축을 계속 할 수 있는 장치를 제작하였다 (Fig. 1-a).

Micrometer (Mitutoyo, Kawasaki, Japan) 가 달린 vertical stage (Micro Motion Technology, Bucheon, Korea) 상방에 LVDT probe AX-1 (Solartron Metrology, West Sussex, UK)를 장착하고 LVDT probe 하방에는 시편을 올려놓을 수 있는 원형의 금속링이 위치한다. 금속링 하방에는 복합레진 시편을 중합시키기 위한 광조사기의 tip 끝이 위치한다.

사용된 LVDT probe는 $\pm 1\text{mm}$ 범위에서 $0.1\mu\text{m}$ 이하로 길이 변화의 측정이 가능하다.

Probe의 calibration은 vertical stage 에 달려있는 micrometer를 이용하여 출력전압 10V/mm ($10\text{mV}/\mu\text{m}$)가 되도록 조정하였다. 신호 처리 회로와 저역 통과 필터를 거쳐 잡음이 제거된 신호는 National instrument사 (Mopac Expwy, Austin, TX, U.S) 의 Data acquisition board인 PCI-6024를 거쳐 디지털신호로 바뀐 후 역시 동사의 데이터 획득 및 분석소프트웨어 Labview를 이용하여 파일로 저장되었다.

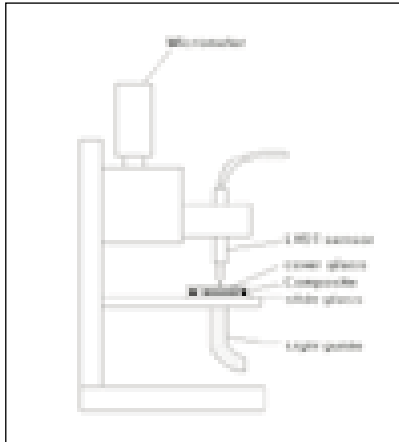


Fig. 1-a. The structure of instrument to measure linear shrinkage.

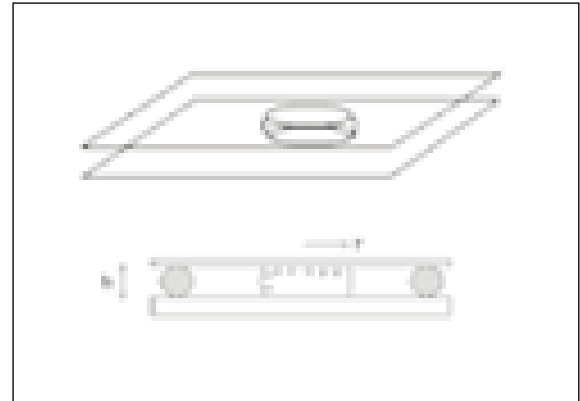


Fig. 1-b. The geometry of composite specimen sandwiched between two glass plates. Polymerization shrinkage creates axial (vertical) and radial (horizontal) contraction of the specimen.

Table 1. Materials used in this study

Materials	Code	Batch number	Type	Manufacturer
Z100	Z1	20030216	Ant-post composite	3M Co., St. Paul, MN, USA
P60	P6	20030129	Post packable	3M Co., St. Paul, MN, USA
Filtek Flow	FF	20010305	Flowable	3M Co., St. Paul, MN, USA
Tetric Flow	TF	F09392	Flowable	Vivadent AG, Schann, Liechtenstein

2. 실험재료

본 실험에서는 전구치 겸용 hybrid composite인 Z100 (Z1), flowable composite인 Filtek flow (FF) 와 Tetric Flow (TF), 그리고 구치수복용 packable composite인 P60 (P6) 을 사용하였다 (Table 1). 광조사에 이용된 광조사기는 비스코사의 VIP (Bisco Inc., Itasca, IL, USA) 이다.

3. 실험방법

1) 선형 중합수축의 측정

시편준비 : 두께 1mm, 가로 75 mm, 세로 25mm의 현미경용 slide glass (Marienfeld, Germany) 위에 복합레진을 소량 올려놓은 후 가로와 세로가 각각 18mm, 두께 0.14mm의 flexible cover glass (Marienfeld, Germany) 를 덮은 후 다른 slide glass를 이용하여 위에서 누른다 (Fig.1-b). 샌드위치된 시편의 두께는 아래쪽 slide glass와 위쪽 cover glass 가장자리 사이에 놓인 0.5mm, 1mm 두께의 금속제 wire로 된 spacer stop으로 조절된다.

Spacer stop 사이의 거리는 22.5mm로 대각선 방향의 길이가 25.5mm인 cover glass의 양 끝 단 내측에 약간 걸치게 조절하여 최대한의 flexibility를 허용하였다. C-factor를 달리하기 위해 복합레진의 양을 변화시켜 disc 형태의 시편의 크기를 달리한다. C-factor의 조절은 시편의 두께를 변화시켜서도 얻을 수 있으나 균일한 광중합 조건을 얻기 위하여 두께를 0.5mm (C-factor 3-8 범위) 와 1mm (C-factor 3.5 이하)로 고정한 후 시편의 지름을 달리하였다. 최소 지름 2mm에서 최대 지름 8mm 사이로 시편의 크기를 변화시켰다 (광조사기 tip 지름 이내로 제한).

선형수축에 미치는 bonding의 효과를 관찰하기 위해 한 그룹은 free linear contraction이 일어날 수 있도록 slide glass와 cover glass에 바셀린을 바른 후 서로 압착하며 미끄러뜨려 얇게 도포하여 복합레진과 glass 사이의 부착이 없도록 처리 후 사용하였고 (Non-bonded disc method), 다른 그룹의 glass plate는 sandblasting 한 후 물로 세척 건조 후 불산으로 (4% hydro fluoric acid gel, Bisco, Inc., Schaumburg, IL, U.S.A.) 2 분간 부식시킨 후 다시 물로 세척 건조 후 silane (Bisco, Inc., Schaumburg, IL, U.S.A.) 으로 90초 동안 처리하여 glass와 복합레진 사이

에 부착이 일어나게 한 후 사용하였다 (Bonded disc method).

측정 : C-factor는 시편의 지름을 D 라 하고 두께를 h 라 할 때 $D/2h$ 로 주어진다. 따라서 준비된 시편의 C-factor 는 1~8 이다.

디스크 형태로 압착된 시편이 샌드위치 되어 있는 slide glass를 측정장치의 시편대 위에 올려 놓은 후 LVDT probe 첨부를 둥근 시편을 덮고 있는 cover glass의 중심부 위에 위치시킨다. 이때 LVDT probe의 무게로 3.1gm중의 힘이 cover glass 위에 가해진다. Vertical stage의 micrometer를 조정하여 출력 전압이 영이 되도록 영점을 맞춘다. 광조사 없이 10초간 base line을 잡은 후 40초간 광조사 하였다. 광의 세기는 $600\text{mW}/\text{cm}^2$ 이었고 광조사기 Tip 끝과 시편 사이의 거리는 약 5mm 였다. 광중합에 의한 복합레진의 수축이 진행되면 수직 방향의 axial 수축에 의해 복합레진은 위에 덮여진 cover glass를 아래로 끌어 당긴다. 시편의 수직 방향의 길이 변화가 LVDT에 의해 계측되어 컴퓨터에 저장된다. 100 data points/sec 의 비율로 10분간 중합수축을 기록하였다. 측정 시 실내온도는 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 였다. 중합이 완료된 후 디스크 형태의 시편의 두께와 지름을 최소 측정 해상도 0.001mm의 Micrometer (Mitutoyo, Kawasaki, Japan) 로 계측하였다. 중합 후 시편의 두께를 h, LVDT로 측정된 선형수축량을 Δh , 그리고 지름을 D라 할 때 선형중합수축은 $\Delta h/(h + \Delta h) \times 100\%$ 이고 C-factor는 $D/(2 \times (h + \Delta h))$ 로 주어진다.

C-factor 의 변화에 따라 측정된 복합레진의 선형중합수축속도에 변화가 있는지 알아보기 위해 Z1의 경우, 측정된 중합수축값을 이용하여 단위시간당 중합수축율 (d(shrinkage%)/dt) 그래프를 얻은 후 최대 중합수축이 일어나는 시간 (Peak shrinkage rate time, P.T.) 을 구해 비교하였다.

2) 체적 중합수축의 측정

실제 free volumetric contraction 값을 구하기 위해 이¹⁷⁾가 고안한 실시간 체적중합 측정장치를 이용하여 각 복합레진의 체적중합수축을 10분 동안 측정하였다. 구해진 체적중합측정 값으로부터 식 $r_f = 1^3 - (1 - \alpha_f)^3 = 3\alpha_f - 3\alpha_f^2 + \alpha_f^3$ 를 이용하여 이론적인 선형수축값을 계산하였다. 각 복합레진 당 5회를 측정하였다.

3) 복합레진의 flow (viscosity, consistency) 의 측정

복합레진의 점도 차이에 의한 흐름성의 차이를 알아보기 위하여 지름 4mm, 높이 1mm 의 금속링에 복합레진을 담은 후 지름 2.32 mm의 금속막대를 이용 5gm중의 힘을 가해 복합레진 속으로 침하하는 변위를 LVDT로 계측하였다. 측정 조건 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에서 초기 0.1~0.5mm 구간의 평균 침하속도를 구하여 복합레진의 점도를 비교하였다.

III. 실험결과

Bonded disc method

선형중합측정장치로 측정된 Z1, P6, FF, TF의 중합수축의 패턴은 C-factor 가 6 일 때 Fig. 2와 같다. C-factor 가 변화함에 따른 Z1, P6, FF, TF 의 선형중합수축률 측정값의 분포는 Fig. 3-a, b, c, d 와 Table 2 에 나타나 있다. 선형중합수축률은 C-factor가 6 부근에서 FF가 4.13%로 가장 큰 값을 보였고 TF, Z1, P6 의 순이었다. 체적중합수축 측정장치로 측정된 중합수축률과 이로부터 계산된 이론적 선형수축률 값은 Table 2에 나타나 있다.

Z1의 경우 C-factor 가 0.6 일 때 선형중합수축률은 1.02%로 예측된 선형수축률 0.91% 보다 약간 큰 값을 나타냈고 C-factor 값이 증가함에 따라 측정값도 점점 증가하여 C-factor의 값이 5정도에 이르러서는 체적 수축률에 거

Table 2. Volumetric polymerization shrinkage and linear shrinkage of composite resins at varying C-factor

True Volumetric Shrinkage	Calculated Linear Shrinkage	Experimental Linear Shrinkage					
		Bonded disc method					non-bonded
		C-factor (D/2h)					
		3-4	4-5	5-6	6-	0	
Z1	2.71 (0.14)	0.91(0.05)	2.43(0.10)	2.61(0.14)	2.63(0.09)	2.72 (0.07)	0.90(0.12)
P6	2.01 (0.10)	0.68(0.03)	1.88(0.06)	1.90(0.01)	1.98(0.06)	2.01 (0.02)	0.77(0.09)
FF	4.41 (0.10)	1.49(0.03)	4.00(0.23)	4.05(-)	4.24(0.15)	4.13 (0.14)	1.22(0.13)
TF	4.10 (0.27)	1.39(0.09)	3.43(0.25)	3.54(0.09)	3.71(-)	3.72 (0.03)	1.24(0.20)

S.D. in parenthesis

N=5 in volumetric shrinkage measurement, however the number of samples varied in linear shrinkage measurement.

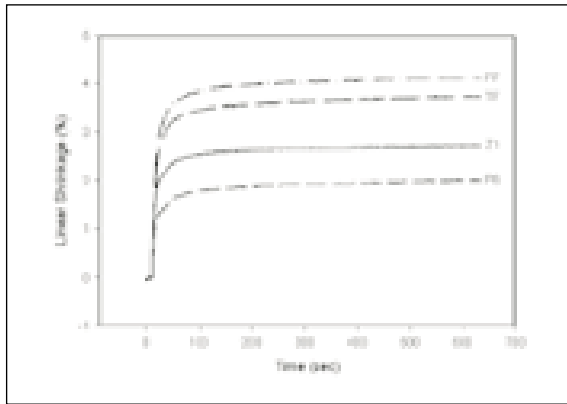
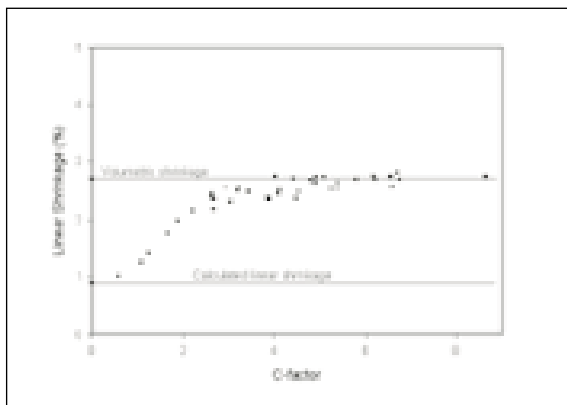


Fig. 2. Linear polymerization shrinkage curves of composites as a function of time at C-factor \approx 6.

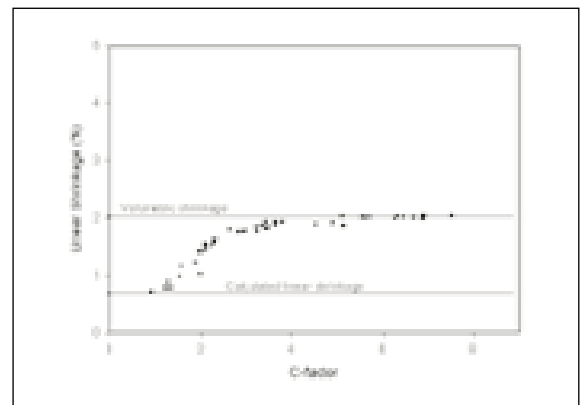
의 근사한 선형수축률을 나타냈다. C-factor가 6 이상에서는 체적중합수축률과 차이가 없이 동일한 선형수축률 값을 보였다 ($P>0.05$, Fig. 3-a, Table 2).

P6는 C-factor가 0.94 에서 선형수축률이 0.71%로 예측된 값보다 약간 큰 값을 나타냈고 역시 C-factor 가 증가함에 따라 선형수축률도 점차 증가하여 C-factor가 4 정도에 이르러서는 거의 체적 중합수축률 값에 근접하였고 C-factor가 5 이상부터는 선형수축률이 체적수축률과 같은 2.01%로 거의 일정한 값을 나타냈다 (Fig. 3-b, Table 2).

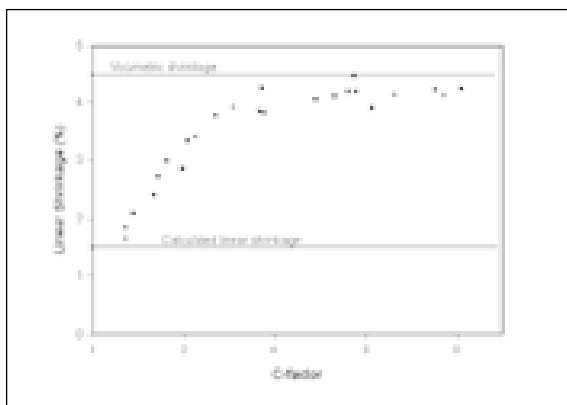
FF의 경우 역시 C-factor가 0.72일 때 0.83%의 선형수축률을 보여 예측된 선형수축률 보다 약간 큰 값을 보였다. C-factor가 증가함에 따라 선형수축률이 증가하여 C-factor가 5 이상부터는 더 이상 증가하지 않고 plateau를 이루나 체적수축률 4.41% 에는 도달하지 못하였다 (Fig. 3-c, Table 2).



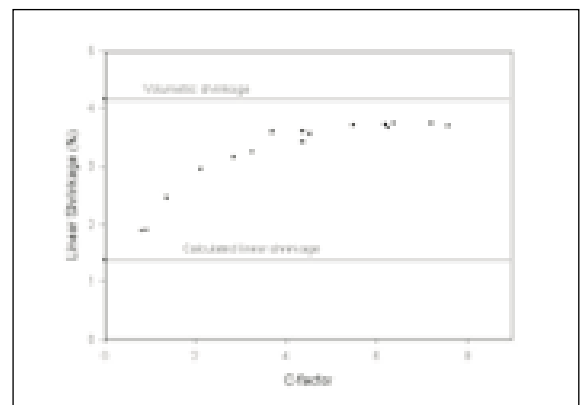
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Linear polymerization shrinkage of composites measured using *bonded disc method*. The linear shrinkage value increased with increasing C-factor and approximated volumetric shrinkage and reached plateau at about C-factor 5~6.

- a) Linear shrinkage of Z1 as a function of C-factor.
- b) Linear shrinkage of P6 as a function of C-factor.
- c) Linear shrinkage of FF as a function of C-factor.
- d) Linear shrinkage of TF as a function of C-factor.

TF의 경우 C-factor가 0.81일 때 1.89%의 선형수축률을 보여 예측된 선형수축률 1.39 보다 약간 큰 값을 보였다. C-factor가 증가함에 따라 선형수축률이 증가하여 C-factor가 5 이상부터는 더 이상 증가하지 않고 plateau를 이루나 체적수축률 4.17% 에는 도달하지 못하였다 (Fig. 3-d, Table 2).

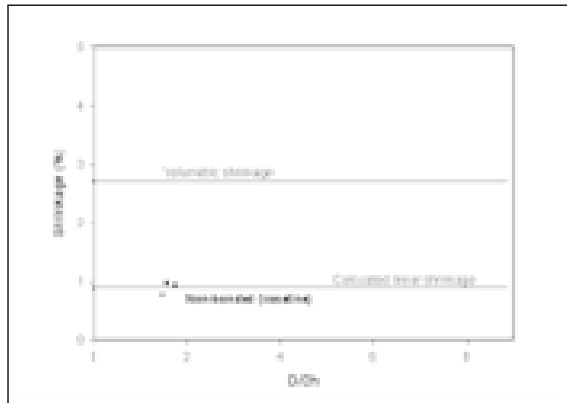
Non-Bonded disc method

Vaseline으로 처리한 경우는 glass plate와 시편 사이에 접착이 없어 bonded surface가 존재하지 않으므로 Fig. 4-a,b,c,d 와 같이 시편 지름의 변화에도 (즉 D/2h의 변화) 큰 영향을 받지 않고 비교적 일정한 선형수축률을 나타냈다. Z1의 경우는 체적수축률로부터 계산된 선형수축률과

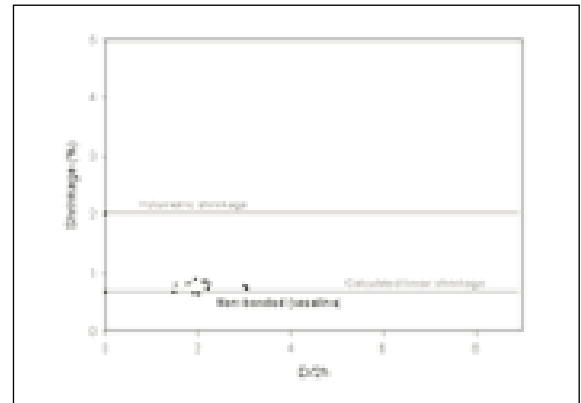
동일한 측정치를 보였고 ($p>0.01$), P6은 유의성은 없었으나 예측된 값보다 약간 큰 측정값을 보였다. FF, TF의 경우는 예측된 선형수축값 보다 유의성 있게 낮게 측정되었다 ($p<0.05$, Table 2).

Peak shrinkage rate time (peak time, P.T.) 을 기준으로 한 측정된 선형중합수축속도에 있어 C-factor의 차이에 의한 영향은 관찰되지 않았고 (Fig. 5, Table 3), FF가 평균 2.10 초로 Z1의 1.19 초 보다 중합 속도가 느렸다.

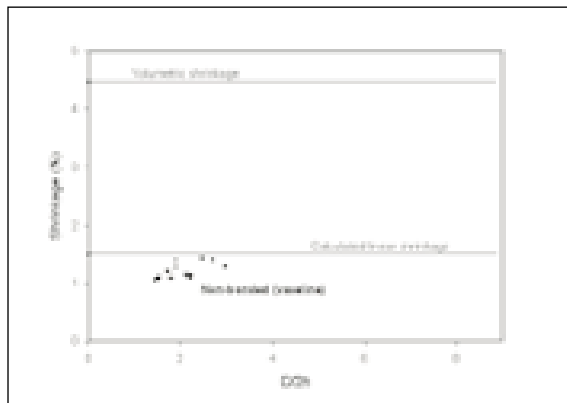
복합레진의 점도는 P6, Z1, TF, FF의 순으로 감소하였는 바, 금속 막대의 침하속도는 FF가 4.857mm/s로 가장 흐름성이 좋았고 P6가 0.013mm/s로 가장 높은 점성을 보였다 (Table 4, Fig. 6).



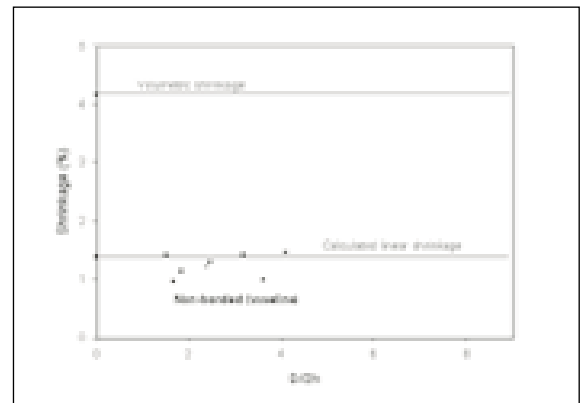
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. Linear polymerization shrinkage of composites measured using *non-bonded disc method* with Vaseline. The linear shrinkage is not affected by specimen diameter and is approximated the theoretical linear shrinkage value calculated from true volumetric shrinkage value.

- a) Linear shrinkage of Z1 as a function of specimen geometry.
- b) Linear shrinkage of P6 as a function of specimen geometry.
- c) Linear shrinkage of FF as a function of specimen geometry.
- d) Linear shrinkage of TF as a function of specimen geometry.

Table 3. Cure speed based on Peak Time (P.T.) of composites at varying C-factor

Peak Time (sec)	C-factor			
	- 3	3 - 6	6-	Mean
Z1	1.24(0.15)	1.15(0.22)	1.17(0.09)	1.19(0.15)
P6	1.21(0.13)	1.07(0.19)	1.11(0.17)	1.13(0.14)
FF	2.19(0.18)	2.11(0.20)	2.05(0.16)	2.10(0.19)
TF	1.55(0.17)	1.47(0.24)	1.36(0.14)	1.46(0.17)

S.D. in parenthesis

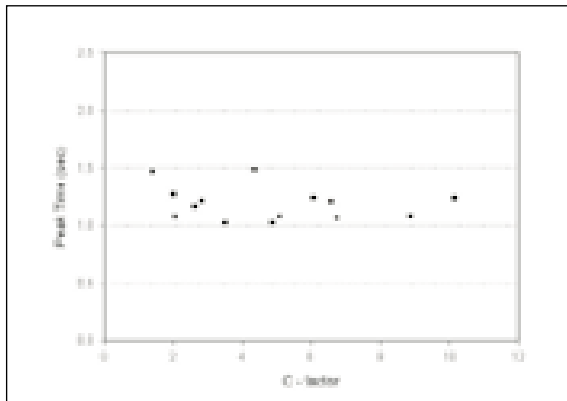


Fig. 5. Peak time (peak shrinkage rate time) of Z1 as a function of C-factor.

IV. 고 찰

Bonded disc method를 사용한 중합수축률의 측정은 mercury dilatometer 보다 사용 방법이 간편하여 여러 연구자와 복합레진 제조 회사에서 광중합 복합레진의 중합수축 정도를 비교하기 위한 방법으로 많이 사용되어 왔다. 그러나 시편의 크기나 glass plate와의 접착 상태에 대한 표준화된 방법이 없어 연구자들 마다 측정값에 많은 편차를 보인다. 더욱이 복합레진의 점성과 flow가 bonded disc method를 이용한 측정에 미치는 영향에 대한 연구는 없었

다. Z1과 P6의 경우는 C-factor가 5에 도달함에 따라 선형수축률의 값이 체적수축률의 값에 근접해 감을 관찰할 수 있다 (Fig. 3-a, b). 즉 C-factor가 증가함에 따라 중합수축을 보상할 수 있는 수축의 방향이 axial 방향 (수직방향) 으로부터 허용되고 radial 방향 (수평방향) 으로의 수축은 제한되어 짐으로서 이 현상을 설명할 수 있다. 그러나 FF와 TF의 경우는 C-factor가 8에 근접하여도 체적수축률의 값에

Table 4. Consistency (viscosity) based on the flow of composite resins

	Speed (mm/s)	Relative flow
Z1	0.295(0.036)	1
P6	0.013(0.006)	0.05
FF	4.857(0.431)	16.49
TF	3.854(0.740)	13.08

Relative flow is the flow value normalized to that of Z1
S.D. in parenthesis.

N=5

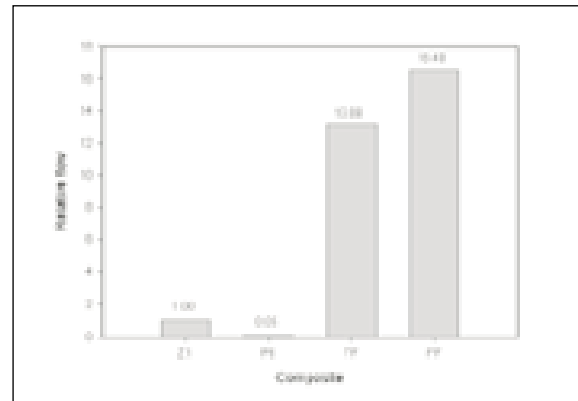


Fig. 6. Relative viscosity of composites based on flow normalized to Z1.

는 도달하지 못하는 것을 관찰할 수 있다 (각각 체적수축률의 94.9%, 90.7% Fig. 3-c, d). 이는 FF와 TF의 경우 유동성 레진이기 때문에 흐름성이 매우 좋고 (Table 4, Fig. 6) 중합속도가 Z1, P6 보다 느려 (Table 3) gel point에 도달하기 전에 radial 방향으로의 중합 수축력에 의한 flow가 일어나 vertical 방향의 수축이 줄어들 것으로 생각된다.

결론적으로 bonded disc method로 측정한 선형수축률 값으로 체적수축률을 추정할 시는 C-factor가 최소 6 이상 되도록 시편을 준비하여야 하고 측정될 복합레진의 점도도 매우 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

임상에서 깊은 1급 와동이나 abfraction에 의한 5급 와동 등과 같이 C-factor가 큰 경우는 복합레진의 선형중합수축은 체적수축률과 거의 같게 되어 매우 큰 중합수축 응력을 발생시킬 수 있으며 특히 레진인레이나 도재인레이를 복합레진 시멘트로 접착 시킬 시는 C-factor가 매우 큰 값을 가지게 되어 사용되는 레진 시멘트의 양은 비록 작을 지라도 매우 큰 수축 응력을 남길 수 있는 소지가 있겠다.

Glass plate에 Vaseline 을 도포하여 시편의 접착을 방지한 경우는 시편 지름의 변화 ($D/2h$) 에 관계없이 비교적 일정한 선형수축 측정값을 보였고 그 값은 대략 체적중합수축률로부터 계산된 선형수축률에 근접함을 알 수 있다. Vaseline을 바르고 non-bonded method로 측정 시 시편의 지름이 큰 경우는 측정 중 선형수축 측정값이 급격히 떨어지는 현상이 관찰되었는데 이는 radial 방향의 수축량이 너무 커서 전단력에 의해 시편이 cover glass로부터 탈락된 때문으로 생각된다. Z1의 경우는 측정된 선형수축률이 체적수축률로부터 계산된 예측된 값과 정확히 일치하였고 P6는 유의성은 없으나 약간 큰 값을 보였고 FF, TF는 약간 낮은 값을 보였다. P6는 점도가 매우 높아 Vaseline을 도포하였지만 시편을 압착 시 Vaseline이 얇아져 시편과 glass plate 사이에 충분한 분리제 역할을 하지 못함으로써 약간의 저항이 존재해서 완전한 radial 방향의 수축을 허용하지 못한 결과가 아닌가 생각된다. FF와 TF의 경우는 점도가 매우 낮고 워낙 흐름성이 좋아, cover glass의 탄성으로 수축에 약간의 저항이 존재하는 vertical 방향의 수축은 줄고 pre-gel stage 에서 중합수축을 주로 radial 방향의 수축으로 보상한 결과라 사료된다.

단위 시간당 중합수축률 ($d(\text{shrinkage}\%)/dt$)이 최대인 peak time을 기준으로 한 cure speed는 C-factor에 따라 달라지지 않는 것으로 관찰되었다. 이는 본 실험에서 사용된 선형중합수축 측정장치는 중합속도와 관련된 광중합 복합레진의 kinetics 연구에 간편한 측정방법으로 유용하게 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다. Peak time 을 기준으로 한 FF, TF의 중합속도는 Z1, P6 보다 약간 느렸으며 이는 FF, TF의 흐름성과 더불어 pre-gel stage의 flow에 의한 중합수축 응력을 보상하는 기전에 일정 역할을 할 것으로 생각되며 보다 심도 있는 연구가 필요한 부분이라 생각된다.

본 실험에서 사용된 측정장치 중 cover glass 가 중합수축으로 유발된 변형에 의한 굴곡에 저항하는 탄성력의 영향 (약 20 μm 정도 굴곡 시 필요한 힘) 은 Watt 와 Cash¹⁵⁾의 연구에서 보고된 바와 같이 복합레진의 수축력에 비하여 매우 미약하여 무시할 수 있다. 그렇지만 본 연구에서는 시편의 지름을 8mm이내, 즉 최대 C-factor 의 범위를 8 이하로 제한하였다. 그 이유는 예비실험 결과 sample 지름이 8mm 이상에서는 측정값의 분산이 매우 커지는 현상이 관찰되었는데 이는 크게 세가지 요인으로 기인할 것으로 생각된다. 첫째 광조사기 tip 끝의 지름이 10mm로 광조사기 tip 중심에서 외측으로 향함에 따라 광의 강도가 약화되어 시편 전면에 걸쳐 균일한 광조사가 이루어 지지 못할 수 있고, 둘째 광조사시 radial 방향의 수축에 의한 응력이 복합레진에 붙어있는 얇은 두께의 cover glass 에 변형을 가할 수 있으며 셋째, 샘플의 지름이 너무 커지면 cover glass

를 받치고 있는 stop 에 너무 근접하게 되어 flexible cover glass 의 선형적인 편위가 보장되지 못하고 비선형적인 굴곡을 가져오기 때문으로 생각된다. 즉 sample 지름이 cover glass plate 를 받치고 있는 stop 사이 거리인 22.5mm 의 1/3 이하일 때 비교적 균일한 측정값을 얻을 수 있었다.

원통형 disc 형태 시편의 부피 V 는 반지름 r 과 두께 h 의 함수로 $V=f(r,h)=\pi r^2 h$ 와 같이 주어지고 (Fig. 1 - b), 반지름 r 과 두께 h 가 각각 $r=\phi(t)$, $h=\phi(t)$ 과 같이 시간의 매개함수로 주어지면 부피의 변화율은

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial r} \cdot \frac{dr}{dt} + \frac{\partial V}{\partial h} \cdot \frac{dh}{dt} \quad \text{과 같이 주어지고}$$

이를 정리하면 $dV=2\pi r h \cdot dr + \pi r^2 \cdot dh$ (Eq-I)가 된다.

따라서 시간 t 초 후의 체적수축량은

$$\Delta V_1 = \int_0^t dV = \int_0^t (2\pi r h \cdot dr + \pi r^2 \cdot dh) \quad \text{가 된다.}$$

상기 식 Eq-I을 관찰해 보면 방정식 우측의 첫째 항은 반지름의 미소 변화에 의한 radial 방향의 수축을 의미하고 둘째 항은 미소 높이 변화에 의한 vertical (axial) 방향의 수축을 의미한다.

등방적 수축이 일어나는 경우 선형수축률을 α 라 하면, 수평방향의 수축률과 수직방향의 수축률은 $\frac{dr}{r} = \frac{dh}{h} = \alpha$ 가 되고 $rdh=hdr$ 이 된다. 이를 Eq-I 에 대입하면 $dV=2\pi r h \cdot dr + \pi r^2 \cdot dh = 2\pi r^2 dh + \pi r^2 dh$ 이 된다. 즉 체적수축량은 2/3 부분은 radial 수축으로 1/3 부분은 vertical 수축으로 상쇄된다. Radial 수축량이 vertical 수축량의 두 배가 되고 체적수축률은, $\gamma=3\alpha$, 따라서 선형수축률은 $\alpha=\frac{1}{3}\gamma$ 로 체적수축률의 1/3 이 된다(α =수직선형수축률).

본 실험에서 사용한 bonded disc method와 같이 glass 표면을 처리하여 복합레진과 접착이 일어나 radial 방향의 수축을 극단적으로 제한한 경우는 첫째 항의 $dr \approx 0$ 이 되어 $dV \approx \pi r^2 \cdot dh$ 가 된다. 이 경우 $\gamma \approx \alpha$ 가 된다. 시편의 지름이 크고 glass 표면과의 접착이 좋아 radial 방향의 움직임에 저항이 클 수록, 즉 C-factor가 증가할수록 vertical 방향의 선형수축률은 체적수축률에 근접하게 된다.

C-factor는 비 접착면에 대한 접착면의 비로서 정의된다²³⁾. 본 연구에서와 같이 bonded disc method 에서 C-factor를 계산할 때 cover glass에 접착한 면을 Feilzer 등¹⁶⁾의 연구에서와 같이 bonded로 볼 수도 있고 Watt 등의 연구¹⁴⁾와 같이 non-bonded로 볼 수도 있다. 엄밀하게 적용하면 axial (vertical) 방향으로 굴곡되어 움직임이 가능한 cover glass 면은 절대적 의미에서의 고정된 bonded surface는 아니다. 또한 radial 방향의 수축은 제한되므로 non-bonded free surface도 아니다. 그러나 본 연구에서는 radial 방향과 axial 방향으로 모두 수축이 가능한 free surface 에 대하여 상대적으로 radial 방향의 수축이 제한된 점을 고려하여 bonded 면으로 간주하여 C-factor를 계산하였다.

위에서 고찰한 바와 같이 중합수축의 방향은 시편의 기하학적 형태와 접착의 유무에 따라 등방적 수축으로부터, radial 방향의 수축이 제한되어 vertical 수축만이 가능한 비등방적 수축까지 변화한다. 따라서 vertical 방향의 선형수축률은 시편의 C-factor가 증가함에 따라 등방적 수축에서 비등방적 수축으로 이행되고 체적수축률의 1/3 ~ 1 사이로 측정된다. 체적수축을 1 이라 하면 vertical 수축 분율은 (측정된 vertical 선형수축률/체적수축률)로 구할 수 있고 그 값은 1/3 ~ 1 사이에 있다. 체적수축은 vertical 수축과 radial 수축의 합으로 구성되므로 radial 수축 분율은 (1 - vertical 수축 분율)로부터 얻어지고 그 값은 2/3 ~ 0 사이에 존재한다.

기존 연구에서 점도의 측정은 주로 두 개의 평판 사이에 복합레진을 위치 시킨 후 일정한 압력을 가한 후 넓게 퍼진 시편의 지름을 비교하는 평판 가압법^{18,19)}을 사용하였다. 그러나 이 방법은 복합레진의 점성과 탄성을 구분하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 복합레진의 점성의 차이에 따른 flow 특성을 알아내기 위해 일정 무게의 금속 막대를 사용하여 일정 압력으로 응력을 가할 시, 복합레진의 점성의 차이로 인한 금속 막대의 낙하 속도의 차이를 측정하여 점도의 비교에 사용하였다. 이러한 실험 방법의 경우 복합레진의 탄성을 배제한 점성을 측정하게 된다²⁵⁾. 본 연구의 결과와 같이 복합레진의 점도는 크게 십 배 이상 차이가 나는 것을 알 수 있고 복합레진의 flow에 의해 중합수축이 어느 정도 상쇄될 수 있음이 Feilzer등의 연구¹⁶⁾에서도 밝혀진 바 있다. 따라서 bonded disc method로 복합레진의 선형중합수축률을 측정하여 체적중합수축률을 추론하는 데는 점도와 흐름성을 고려해야 하며 상당한 주의를 요할 것으로 사료된다. 본 실험에서 사용한 Bonded disc method에서와 같이 얇은 disc 형태의 시편에서는 지름이 커 질수록 중합수축에 의해 이동해야 할 radial 방향의 절대적 거리도 비례해서 증가한다. 즉 흐름에 대한 저항에 민감해진다. Disc 형태의 시편 상단과 하단 glass plate에 접착된 부위에서는 radial 방향의 수축이 불가능해도 시편두께의 절반인 중간 부위에서는 radial 방향으로 약간의 흐름이 존재할 수 있다. 즉 흐름경사 (flow gradient)가 존재한다. 복합레진의 점도가 낮아 흐름성이 좋을 수록 radial 방향의 수축 분율이 커져 측정되는 vertical 선형수축의 값이 낮아지게 되어 본 실험결과와 합치되는 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용된 이¹⁷⁾가 제작한 체적중합수축률 측정 장치는 free volumetric shrinkage를 측정할 수 있어 pre-gel shrinkage와 post-gel shrinkage 모두를 포함한다. 그러나 bonded disc method는 cover glass의 탄성 때문에 post-gel shrinkage를 측정한다. 즉 약간의 저항을 이겨낼 수 있는 점성에 도달한 이후의 수축만을 측정하게 된다. Pre-gel 단계의 수축은 flow에 의해 어느 정도 상쇄된다.

Z1과 P6는 점도가 높고 중합속도가 빠르므로 gel point에 일찍 이르러 flow에 의한 보상의 기회가 적어 cover glass의 탄성력을 쉽게 극복할 수 있다. 그러나 FF, TF의 경우는 흐름성이 매우 좋고 중합속도가 느려 gel point에 이르는 시간이 길어져 pre-gel contraction이 flow에 의해 상당량 상쇄되어 상대적으로 줄어든 post-gel contraction만이 기록된다. 이는 strain gauge를 이용하여²⁾ 중합수축을 측정할 때와 유사한 상황이라 할 수 있다. 따라서 flexible cover glass의 두께를 증가시켜 compliance를 줄이고 탄성계수를 증가시켜 flow의 효과를 극대화 하고 curing light의 강도를 변화시켜 중합수축의 패턴을 관찰하면 복합레진 자체의 중합역학 외에도 치아 와동 안에서 복합레진 수복시 일어나는 biomechanics에 대한 연구에도 응용할 수 있는 도구가 될 수 있다.

본 연구의 결과는 다음과 같은 임상적 의미를 갖는다. 즉 같은 체적중합수축률을 보이는 재료라도 와동의 형태, 즉 C-factor의 크기에 따라 선형중합수축의 크기와 방향이 크게 달라져 수복물과 치아 계면 사이에 발생하는 변형과 이에 따른 응력도 크게 달라진다. 또한 와동과 복합레진의 접착 상태에 따라라도 선형수축의 크기와 방향이 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 복합레진 수복시에는 점층법에 의한 수복이나 Glass Ionomer 이장재 등으로 C-factor를 최대한 줄이도록 노력해야 한다. 또한 복합레진의 흐름성에 따라 중합 수축에 의한 응력이 해소될 가능성이 재료에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다^{19,20)}. 일반적으로 FF, TF와 같은 flowable 레진은 무기질 filler 함유량이 적어 점성이 낮아 흐름성이 좋은 반면 중합 수축률도 크다^{17,18,21)}. 따라서 큰 중합 수축률을 중합 시 flow에 의한 보상으로 만회될 수 있을지에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료되며, 또한 중합 후 굳어진 복합레진의 점탄성과 중합수축으로 유발되는 응력 사이의 연관성에 대한 연구도 행해져야 할 것으로 생각된다.

V. 결 론

본 연구에서는 선형중합수축 측정 장치를 이용하여 복합레진의 점도, C-factor 그리고 접착의 유무가 bonded disc method에 근거한 광중합 복합레진의 선형중합수축의 측정에 미치는 영향을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 평판과 복합레진 사이의 결합이 약할 수록 등방적 수축이 일어나 선형수축률은 실제 체적 수축률의 1/3 값에 근접한다. 반대로 결합이 강할수록 선형수축률은 매우 커져 체적수축률에 근접한다 (adhesion의 효과).

둘째, 평판 사이 접착된 복합레진의 넓이가 두께에 비하여 넓을 수록 선형수축의 값이 증가하고, C-factor의 값이 6 이상일 때 선형수축률은 체적 수축률과 같아진다 (C-factor

의 효과).

셋째, 복합레진의 점도가 감소 할 수록 수직 방향의 선형 수축값은 감소하고 점도가 증가할수록 수직 방향의 선형 수축값은 크게 측정된다. 따라서 Bonded disc method를 사용하여 중합수축률을 측정, 비교할 때는 복합레진의 점성에 의한 효과도 반드시 고려해야 한다 (flow의 영향).

참고문헌

- Lai JH and Johnson AE : Measuring polymerization shrinkage of photo activated restorative materials by a water filled dilatometer. *Dent Mater* 9:139-143,1993.
- Sakaguchi RL, Sasik CT, Bunczak MA and Douglas WH : Strain gauge method for measuring polymerization contraction of composite restoratives. *J Dent* 19:312-316,1991.
- Penn RW: A recording dilatometer for measuring polymerization shrinkage. *Dent Mater* 2:78-79,1986.
- Rees JS and Jacobsen PH: The polymerization shrinkage of composite resins. *Dent Mater* 5:41-44,1989.
- Sakaguchi RL, and Berghe HX : Reduced light energy density decreases post gel contraction while maintaining degree of conversion in composites. *J Dent* 26:695-700,1998.
- Suh BI, Feng L, Wang Y, Cripe C, Cincione F and de Rjik W : The effect of the pulse delay cure technique on residual strain in composites. *Compendium* Vol.20, No.2:4-14,1999.
- Silikas N, Eliades G and Watts DC : Light intensity effects on resin composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dent Mater* 16:292-296,2000.
- Cook WD, Forrest M and Goodwin AA : A simple method for the measurement of polymerization shrinkage in dental composites. *Dent Mater* 15:447-449, 1999.
- Puckett AD and Smith R : Method to measure the polymerization shrinkage of light cured composites. *J Prosthet Dent* 68:56-8,1992.
- de Gee AJ, Feilzer AJ and Davidson CL : True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dent Mater* 9:11-14, 1993.
- Venhoven BAM, de Gee AJ and Davidson CL : Polymerization contraction and conversion of light-curing BisGMA-based methacrylate resins. *Biomaterials* 14(11):871-875,1993.
- Feilzer AJ, de Gee AJ and Davidson CL : Curing contraction of composites and glass ionomer cements. *J Prosthet Dent* 59:297-300,1988.
- Fano V, Ortalli I, Pizzi S and Bonanini M : Polymerization shrinkage of microfilled composites determined by laser beam scanning. *Biomaterials* 18:467-470,1997.
- Watts DC and Marouf AS : Optimal specimen geometry in bonded-disc shrinkage-strain measurements on light-cured biomaterials. *Dent Mater* 16:447-451, 2000.
- Watts DC and Cash AJ : Determination of polymerization shrinkage kinetics in visible-light-cured materials: methods development. *Dent mater* 7:281-287, 1991.
- Feilzer AJ, de Gee AJ and Davidson CL: Increased wall-to-wall curing contraction in thin bonded resin layers. *J Dent Res* 68:48-50, 1989.
- Lee IB : A new method ? Real time measurement of the initial dynamic volumetric shrinkage of composite resins during polymerization. *Korean Academy of Cons Dent* 26:134-140,2001.
- Opdam NJM, Roeters JJM, Peters TCRB, et al. Consistency of resin composites for posterior use. *Dent Mater* 1996; 12: 350-354.
- Bayne SC, Thompson JY, Swift EJ, et al. A characterization of first-generation flowable composites. *JADA* 1998; 129: 567-577.
- Labella R, Lambrechts P, van Meerbeek B and Vanherle G : Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dent Mater* 15:128-137,1999.
- Lee IB, Son HH and Um CM: Rheologic properties of flowable, conventional hybrid and condensable composite resins. *Dent Mater* 19: 298-307, 2003.
- Tyas MJ, Jones DW and Rizkalla AS : The evaluation of resin composite consistency. *Dent Mater* 14:424-428, 1998.
- Feilzer AJ, de Gee AJ and Davidson CL : Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 66:1636-9, 1987.
- Watts DC and Al Hindi A : Intrinsic 'soft-start' polymerization shrinkage kinetics in a acrylate-based resin composite. *Dent Mater* 15:39-45, 1999.
- Barnes HA, Hutton JF, Walters K : An introduction to rheology, 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishing co. 1989.

조 병 훈

서울대학교 치과대학 보존학교실
110-749 서울시 종로구 연건동 28
TEL: 760-3953, 2651 FAX: 760-3859
E-mail : chobh@plaza.snu.ac.kr