

복합레진의 초기 동적 체적 중합수축의 실시간 측정 - 새로운 측정장치의 개발에 대한 소고 -

이인복

서울대학교 치과대학 치과보존학교실

ABSTRACT

A NEW METHOD - REAL TIME MEASUREMENT OF THE INITIAL DYNAMIC VOLUMETRIC SHRINKAGE OF COMPOSITE RESINS DURING POLYMERIZATION

In-Bog Lee D.D.S., M.S., Ph.D.

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

The polymerization shrinkage of composite resins is an important drawback although the composites have many advantages more esthetic and conservative than metallic restoratives etc.

The purposes of this research were to develop a new measurement method and to manufacture an instrument that can measure the initial dynamic volumetric shrinkage of composite resins during polymerization. The instrument was basically an electromagnetic balance that constructed with a force transducer using position sensitive photo detector(PSPD) and a negative feedback servo amplifier of proportional derivative(PD) controller. The volumetric change of composites during polymerization was detected continuously as buoyancy change in distilled water by means of Archimedes' s principle. It was converted to continuous electrical voltage signal in real time. The signal was properly conditioned and filtered and then it was stored in computer by a data acquisition(DAQ) board.

By using this electronic instrument, the dynamic patterns of the polymerization shrinkage of eight commercial(Z 100, DenFil, AeliteFil, Z 250, P 60, SureFil, Synergy compact, and Tetric ceram) composite resins were measured and compared.

The results were as follows.

1. From this project of developing instrument, the ability has been achieved that can acquire and process data of electrical signal transformed from various physical phenomenon by using temperature, displacement, photo, and force transducer. As a consequence, the instrumentation and measurement system used to analyze the physical characteristics of various dental materials in dental research field can be designed, manufactured and implemented in lab.
2. This instrument has some advantages. It was insensible to temperature change and could measure true dynamic volumetric shrinkage in real time without complicated process. It showed accuracy and high precision results with small standard deviation.
3. The polymerization shrinkage of composites was significantly different between brands and ranged from 2.47% to 3.89%. The order of polymerization shrinkage was as follows, in order of increasing shrinkage, SureFil, P60, Z250, Z100, Synergy compact, DenFil, Tetric ceram, and AeliteFil.
4. The polymerization shrinkage rate per unit time, $dVol\%/dt$, showed that the instrument can provide an indirect research method for polymerization reaction kinetics.

Key words : Composite resins, Polymerization shrinkage, Photo sensor, Negative feedback servo amp

※본 연구는 보건복지부 보건의료기술 연구개발사업(HMP 99 E 10 0003)의 지원에 의하여 이루어진 것임.

I. 서 론

수복용 복합레진은 은 아말감이나 금 인레이와 같은 금속 수복물의 심미적 대체물로서 사용이 점차 증가하고 있다. 현재의 구치부 수복용 복합레진은 1년 마모도가 아말감과 거의 비슷해져 마모저항성은 초기의 제품과 달리 더이상 문제가 되지 않을 정도로 향상되었다. 그러나 수복용 광중합형 복합레진은 중합시 2~5%의 체적 수축률을 지닌다. 이러한 중합 수축은 직접법에 의한 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 파민반응이나 이차우식, 치수염등 수복물의 실패를 가져온다.

중합수축은 약한 van der Waals force로 느슨하게 묶여 있던 단량체 분자 사이의 결합이 중합반응이 진행됨에 따라 공유결합으로 변하면서 polymer 내의 단량체 사이의 거리가 줄어들어 유발된다. 많은 연구자들이 이러한 중합수축을 줄이기 위해 새로운 단량체를 개발하거나 filler 체계를 개선하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 따라서 복합레진의 중합수축률을 정확히 측정하는 것은 매우 중요한 의미를 지닌다^{1,2}.

기존의 중합수축률의 측정은 주로 mercury dilatometer 나 water dilatometer를 사용하여 체적변화를 측정하거나 중합 전후의 비중변화를 정밀분석저울로 측정하였다^{3,5,7,9}. 그러나 이들 방법은 매우 번거로움을 요하는 작업을 필요로 하고 온도변화에 매우 민감하며 주로 중합전과 중합후의 정적인 체적변화를 측정 비교하는데 제한되고 광중합이 진행되는 과정의 역동적인 체적변화는 관찰하기 어렵다. 또한 우회적인 방법으로 linometer나 strain guage를 이용하여 선형 중합수축률을 측정한 후 체적 중합수축률로 환산하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 등방적인 수축(isotropic contraction)이 보장될 경우에만 유용하며 그렇지 못한 경우는 실제 값보다 커지거나 작아지는 단점이 있다^{1,2,4,6,10}. 이외에 computer vision을 이용한 영상분석방법^{12,20}이 사용되는 경우도 있으나 매우 고가이고 역동적인 중합수축의 과정을 관찰하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 온도변화에 민감하지 않으며 실제 체적 중합수축률을 복잡한 과정 없이 측정할 수 있는 장치를 개발하기 위해 힘 또는 위치감지변환기와 데이터 획득 시스템 및 컴퓨터를 이용하여 중합이 진행됨에 따라 실시간으로 복합레진의 부피변화를 측정할 수 있는 측정시스템을 제작하였고 이를 이용하여 여러 광중합 복합레진의 역동적인 중합수축의 패턴을 측정 비교하여 보았다.

II. 실험재료 및 방법

1. 구성요소와 동작원리

본 측정 시스템의 전체 구성도는 Fig. 1과 같다.

광조사기에 의해 조사된 복합레진은 중합이 진행됨에 따라 중합수축이 일어나 부피가 감소한다. 따라서 용기에 담긴 증류수에 의한 부력이 감소하게 되어 저울의 균형이 기울어 지게되고 이는 빛 감지기(photo transistor, position sensitive photo detector, PSPD)에 의해 검출되어 servo amp에 입력, 즉각적으로 구동코일에 전류가 흘러 기울어진 균형을 원상복귀 시키는 토크를 발생시킨다. 이때 흐르는 전류의 양을 전압으로 변환하여 저역 통과 필터를 거쳐 신호처리 후 데이터 획득장치를 통해 컴퓨터에 입력시킨다. 입력된 신호를 시간함수에 대한 부피변화로 변환, 도시하여 역동적인 중합수축을 관찰할 수 있다(Fig. 1).

광 센서 및 servo amp부와 signal conditioning부의 회로도도는 Fig. 2와 같다.

저울의 위치감지기로는 하나의 적외선 발광 다이오드와 두개의 적외선 감지 트랜지스터를 이용하였고 두 광센서의 출력전압을 연산증폭기로 구성된 차동증폭기의 반전 및 비반전 단자에 입력시켜 미약한 신호를 증폭한 후 비헤미분제어기(PD controller)를 거쳐 저울의 코일에 입력시켜 저울의 기울어짐을 순간적으로 상쇄시키도록 음궤환 서보 앰프 회로를 구성하였다.

데이터 획득장치(DAQ)에 입력하기 전 신호처리 및 조절 회로를 구성하였다. 서보앰프로부터 나오는 전압신호의 영점조정과scaling을 위해 calibration회로를 가변저항과 연산증폭기를 이용하여 제작하였고 불필요한 잡음제거를 위해 저항, 커패시터를 이용한 저역필터를 삽입하였다(Fig. 2).

잡음이 제거된 신호는 National instrument사(Mopac Expwy, Austin, TX, U.S)의 DAQ board인 PCI 6024를 거쳐 디지털신호로 바뀐 후 역시 동사의 데이터 획득 및 분석소프트웨어 Labview를 이용하여 파일로 저장되었다.

2. 실험재료

전구치 수복용 hybrid 복합레진 4종(Z 100, DenFil, AeliteFil, Z 250)과 구치부용 복합레진 4종(P 60, SureFil, Synergy compact, Tetric ceram)을 대상으로 하였고 실험에 사용한 복합레진은 Table 1과 같다.

3. 실험방법

복합레진 50~100mg을 지름 4mm의 알루미늄 시료접시

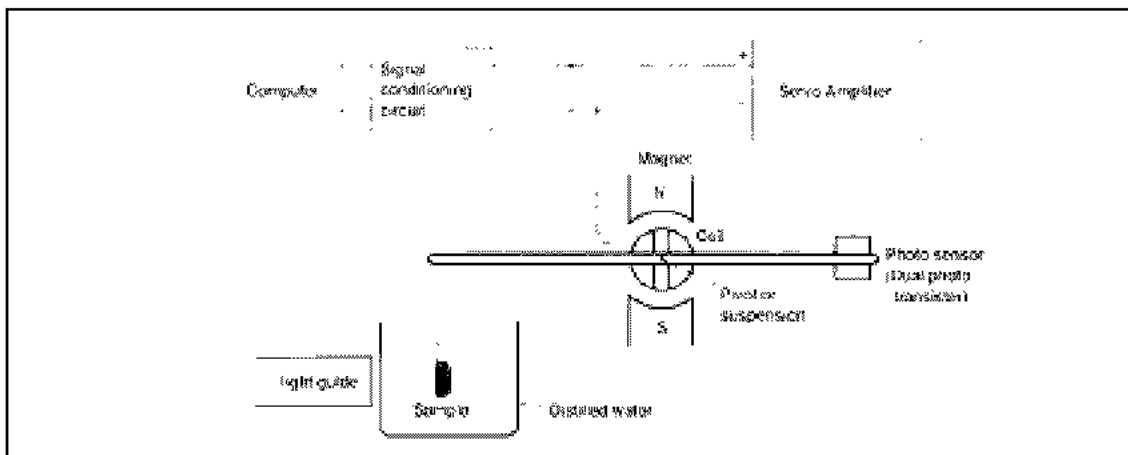


Fig. 1. System configuration of instrument.

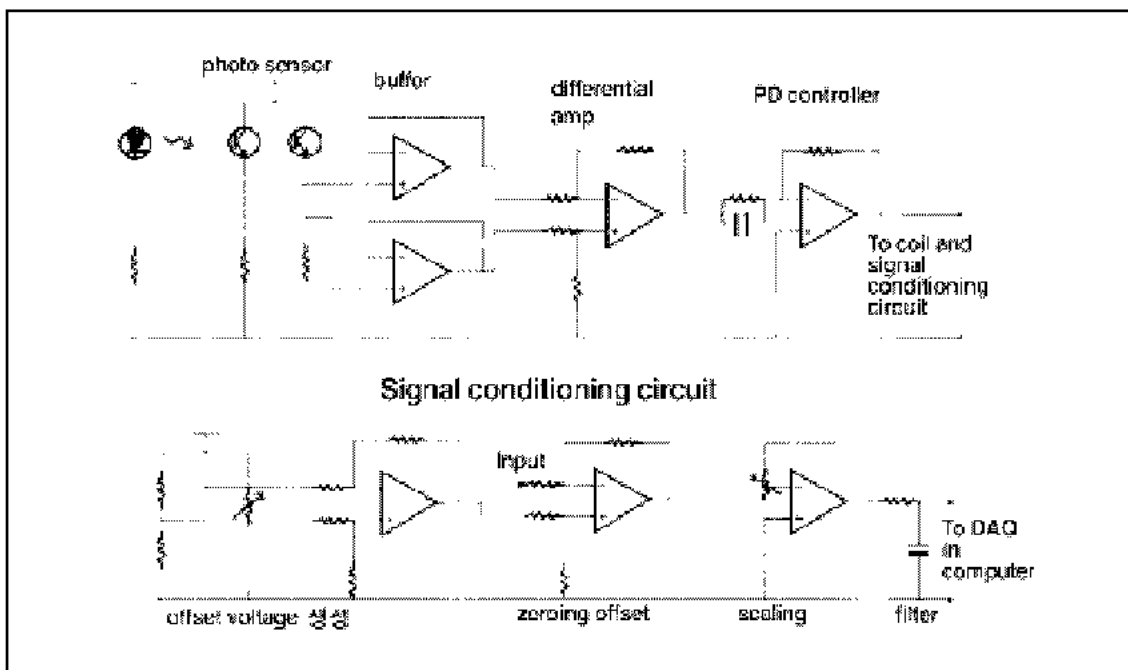


Fig. 2. Driver servo amp circuit.

Table 1. Composites used in this study.

Composites	Code	Batch no.	Manufacturer
Z-100	Z1	OHG	3M Co., St. Paul, MN, USA
DenFil	DF	FA03	Vericom, Seoul, Korea
P-60	P6	20000309	3M Co., St. Paul, MN, USA
AeliteFil	AF	049218	Bisco Inc., Itasca, IL, USA
Z-250	Z2	9AF	3M Co., St. Paul, MN, USA
SureFil	SF	981022	Dentsply, York, Pa, USA
Synergy compact	SC	7838	Coltene, Altstätten, Switzerland
Tetric ceram	TC	A16238	Vivadent AG, Schann, Liechtenstein

에 담아 저울의 팔에 장착한 후 영점을 조절하였다. Base line을 잡기위해 데이터 획득 시작 후 30초 동안 광조사 없이 방치한 후 40초 동안 광조사하였다. 총 10분 동안 100mV/mg으로 조절된 출력전압을 100samples/s로 기록하여 부력변화 Δm_{gt} 를 구하였고 다시 부피변화 ΔV_t 로 환산하였다. 이때 중류수의 온도는 $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 조절하였고 이때 중류수의 밀도는 0.998g/cm^3 로 계산하였다.

중합 후 경화된 시료의 무게를 측정하였다. 비중병을 이용하여 측정하여 놓은 각 복합레진의 밀도를 이용하여 시편의 중합 전 초기 부피를 구하였다.

중합수축률은 $100 \times \Delta V_t / V_{\text{initial}}(\%)$ 로 주어지고 이 때 ΔV_t 는 광조사 시작 t초 후의 체적수축량을 의미하며 V_{initial} 은 중합 전 시편의 초기 체적을 의미한다.

실험에 사용한 광조사는 3M사의 XL 3000 이고 시편 표면에서 광의 세기는 200mW/cm^2 였다.

III. 실험 결과

각 복합레진의 1분후, 5분후의 중합수축은 Table 2, Fig. 8과 같다. 구치부 전용 복합레진인 P6와 SF가 2.47%로 가장 낮았고 전구치 혼용인 AF가 3.89%로 가장 높은 중합수축을 보였다. 그 순서는 AF, TC, DF, SC, Z1, Z2, P6와 SF였다. Fig. 3에 광조사 시작 후 4종 복합레진의 초기 60초간의 역동적인 중합수축을 나타냈다. 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. 단위시간당 중합수축률의 변화를 관찰하기 위해 $dVol\%/dt$ 를 Fig. 4~7에 나타냈다. Z1의 경우 광조사 개시 후 급격히 수축률이 증가하여 2초가 약간 지나서는 최대값 0.26vol\%/s 에 이른 후 지속적으로 감소하여 대략 30초가 경과한 이후론 미약한 수축만이 진행됨을 알 수 있다.

Table 2. Volumetric polymerization shrinkage of composite resins.

Code	Polymerization shrinkage(%)	
	1min	5min
Z1	2.18(0.06)	2.68(0.05)
DF	2.38(0.04)	2.98(0.09)
P6	1.84(0.03)	2.47(0.12)
AF	3.17(0.10)	3.89(0.16)
Z2	1.90(0.11)	2.49(0.11)
SF	1.80(0.05)	2.47(0.11)
SC	2.29(0.11)	2.94(0.16)
TC	2.51(0.04)	3.38(0.15)

Number in parenthesis is standard deviation.

Table 3. Shrinkage values of composites measured by using different methods in other research.

Composite	volumetric shrinkage %			
	ACCU-VOL	LVDT (linometer)	ACCU-VOL	gas pycnometer
Z-100	2.7 ^{2b}	2.54(0.4) ⁴	2.3 ^{2b}	2.12(0.34) ^{2b}
AeliteFil	3.7 ^{2b}		3.7 ^{2b}	
Tetric ceram		2.66(0.2) ⁴		
SureFil	2.3 ^{2b}			

Number in parenthesis is standard deviation.

Each data have been measured in condition of different light intensity, cure time and elapsed time.

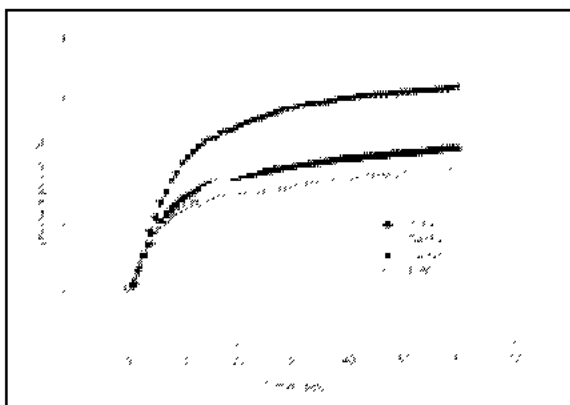


Fig. 3. Comparison of the polymerization shrinkage of Z-100, DenFil, Aelitefil and P-60.

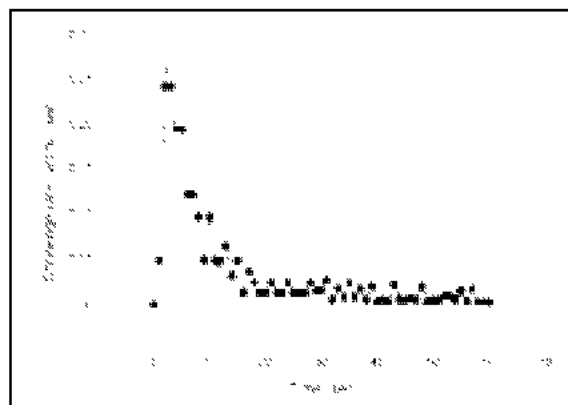


Fig. 4. Polymerization shrinkage rate of Z-100.

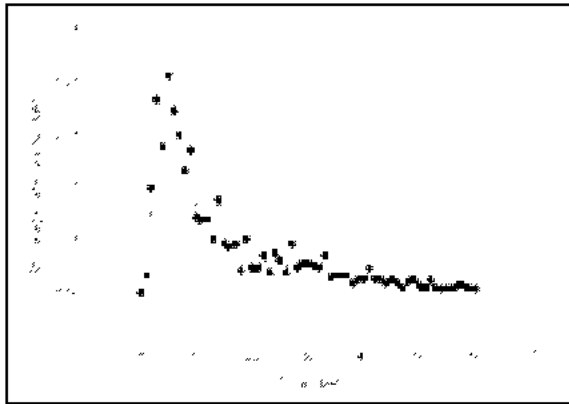


Fig. 5. Polymerization shrinkage rate of DenFil.

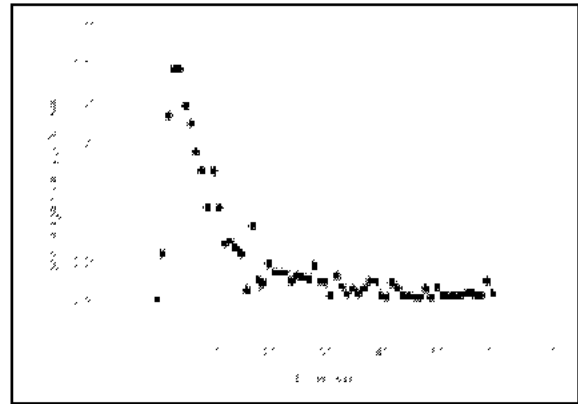


Fig. 6. Polymerization shrinkage rate of Aelitefil.

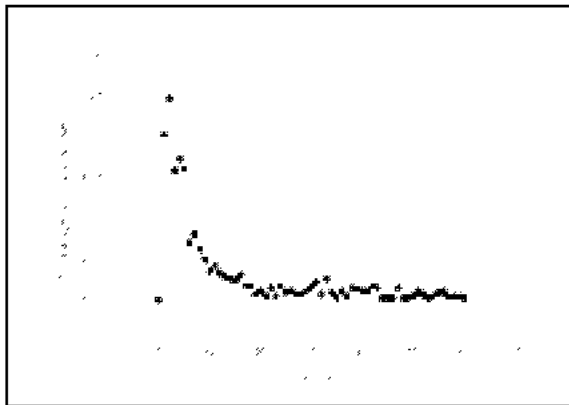


Fig. 7. Polymerization shrinkage rate of P-60.

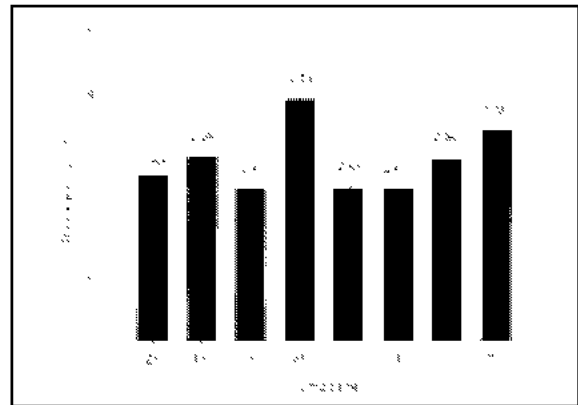


Fig. 8. Polymerization shrinkage of composite resins.

DF와 AF는 peak에 이르는 시간이 좀 더 지연되었고 좀 더 완만한 지수감소곡선을 나타내어 30초 경과시에도 상당량의 초당 중합수축률을 나타냈다. P6는 Z1과 비슷한 모양의 곡선을 보였으나 약간 빠른 중합수축의 진행을 나타냈다.

IV. 총괄 및 고안

중합중에 일어나는 복합레진의 수축은 복합레진의 여러 장점에도 불구하고 가장 큰 단점으로 지적되어 왔다. 이러한 중합 수축은 직접법에 의한 복합레진 수복시 외동벽에 강한 응력을 발생시켜 접착의 실패를 가져오거나 수복물과 외동벽 사이에 미세 간극을 유발한다. 이 틈으로 세균이 침투하여 이차우식이나 치수염을 일으키는 원인이 될 수 있다. 또한 강한 잔존 응력은 경우에 따라서는 법랑질 변연의 미세 파절을 유발할 수 있고 수복 후 과민반응이나 저작시 동통등의 원인이 된다. 따라서 중합수축의 정도는 임상적으로 매우 중요한 의미를 지니며 여러 제조회사들이 이를 줄이려 많은 노력을 기울여 왔고 많은 연구자들이 수복시 중

합수축량을 줄이거나 상쇄시키기 위해 점층법이나 slow start polymerization, delayed cure와 같은 여러 임상적 기법을 발전시켜 왔다^{11,12}. 그러나 이 문제는 완전히 해결되지 않았고 아직도 많은 개선의 여지가 남아있는 상태다. 따라서 중합수축률의 정밀한 측정은 치과임상에 레진이 도입된 이래 현재까지 계속 연구가 진행되고 있는 중요한 주제이다.

단량체의 구성이나 무기질 filler 함유량과 같은 복합레진 자체의 특성이나 광의세기, 광조사 방법과 같은 임상적 처리기법에 따른 중합수축 양태의 변화는 어떤 방법으로 그것을 측정하는가에 따라 실험의 정확성과 신뢰도가 좌우된다. 결국 실험 방법론의 문제로 귀착된다.

기존의 연구자들이 사용한 장치는 주로 water dilatometer 혹은 mercury dilatometer와 linometer이다. Johnson 등⁵과 Jacobsen 등⁶이 사용한 dilatometer의 원리는 온도계와 같이 reservoir에 담겨있는 액체의 부피 변화를 모세관을 통하여 길이의 변화로 확대해 읽어내는 것으로 약간의 온도 변화도 액체 자체의 부피에 큰 영향을 주며

로 치과용 레진과 같이 소량의 샘플을 사용하여 실험할 시 큰 오차를 유발할 수 있다. 또한 실험 시 시료의 장착등이 매우 번거로우며 mercury dilatometer의 경우는 환경오염의 우려도 가지고 있다. Davidson 등¹²⁾이 사용한 Linometer의 경우 여러 종류의 길이 측정 센서를 이용하여 선형 중합 수축을 측정하고 이를 체적수축으로 환산하는 방법을 이용한다. 이 경우 체적수축비 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 동방적인 수축(isotropic contraction)이 일어난다는 전제가 만족되어야 한다. 그러나 실제로는 두 평판 사이에 복합레진을 샌드위치 시키는 구조를 가진 실험장치의 기하학적인 한계로 얇은 디스크 형태로 되어있는 시편의 radial 방향의 수축은 제한되어질 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. 또한 strain gauge와 같은 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 된다⁸⁾. 중합수축을 비교적 간단하게 측정할 수 있는 방법으로는 비중병(pycnometer)과 정밀 저울을 사용하여 중합전후의 밀도변화를 측정하는 방법이 있다⁹⁾. 이 방법은 특별한 장치를 필요로 하지 않고 간편하나 중합중의 연속적인 부피변화를 관찰하기는 어렵다.

본 연구에서는 “첫째, 체적 중합수축량을 결정 할 수 있어야 하며 둘째, 실시간으로 연속적인 동적 중합수축을 기록할 수 있어야 한다. 셋째, 컴퓨터에 인터페이스시켜 측정조건과 시간을 조절할 수 있어야 하고 저장할 수 있어야 한다.” 는 조건을 만족시키고 더불어 사용하기 쉬우며 온도변화에 민감하지 않고 소량의 시료를 가지고도 정밀한 실험이 가능한 장치의 개발에 역점을 두었다.

본 장치의 동작을 구성하는 핵심 개념은 첫째, 부피변화를 부력변화 즉 중량변화로 바꾸어 주는 아르키메데스의 원리(Archimedes' principle)¹⁸⁾. 둘째, 무게변화로 유발된 저울의 비 선형적인 편위(nonlinear displacement)를 감지하여 순간적으로 영 위치(null point)로 되돌려 주어 선형적(linear)으로 부력변화를 인지 할 수 있는 힘 센서(force transducer)를 구성하게 해주는 음피환(negative feedback) 서보(servo)와 광 검출 기술이다^{13, 15)}.

본 장치의 제작에서 기술적으로 가장 어려웠던 점은 중량변화가 가해졌을 시 저울의 팔이 진동하지 않고 짧은 시간

에 안정되도록 비례미분제어기(PD controller)의 비례계수 K_p 와 미분계수 K_d 값을 결정하는 문제와 잡음의 제거였다. K_p 와 K_d 값은 많은 실험과 시행착오를 거쳐 적정 값으로 결정할 수 있었으나 잡음문제는 간단치가 않았다. 워낙 mV(0.01mg)수준의 미약한 신호를 다루다 보니 약간의 진동이나 바람에도 영향을 받았다. 실험장치 주변의 모터와 같은 전자기적 잡음 요인들도 좋지 않은 영향을 미쳤고 특히 60Hz 전원 잡음을 완전히 배제하는 것은 매우 어려운 문제였다. 잡음은 차폐와 접지를 통해 일차적으로 차단하였고 신호처리부에서 아날로그 저역통과필터를 이용하여 하드웨어적으로 많이 줄일 수 있었다. 최종적으로 출력신호에 남는 잡음은 주로 전원노이즈였으며 이는 일단 데이터를 저장한 후 디지털 신호처리 방법 중 소프트웨어적인 디지털 필터링 방법으로 매끈한 그래프를 얻어낼 수 있었다^{13, 14, 16, 17)}.

Table 3에 다른 연구자들^{4, 12, 20, 21)}에 의한 중합수축의 측정값을 비교를 위해 제시하였다. 각 연구자 마다 다른 측정기기를 사용하여 각기 다른 실험조건(조사광의 세기와 광조사 시간 및 가장 중요한 요소인 측정시 까지 경과된 시간 등)에서 얻어진 결과이므로 절대 비교를 할 수는 없지만 대략적인 중합수축 정도의 순서는 본 연구와 일치하였다.

본 기기의 특성은 Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 표준편차가 0.16 이내로서 다른 연구자들의 것보다 비교적 작아 신뢰성 있는 결과들을 보여주고 있으며 Fig. 3과 Fig. 4~7과 같이 시간 경과에 따라 동적으로 빠르게 변화하는 중합수축의 양상을 실시간으로 보여줄 수 있는 장점이 있다. Fig. 4~7의 곡선들은 열분석방법 중 시차주사열계량법(DSC)으로 얻을 수 있는 중합반응시의 발열곡선과 매우 유사함을 알 수 있다. 즉 중합수축의 동력학적 패턴은 중합반응의 속도나 중합률과 관련 지어 생각할 수 있으며 결국 중합반응의 동력학을 간접적으로 관찰 할 수 있는 한 방법이 될 수 있다.

본 연구에서 볼 수 있는 바와 같이 복합레진의 중합수축은 제품별로 많은 차이를 보이고 있으며 그 중합수축의 속도도 각기 다를 수 있다. 일반적으로 현재의 구치부 수복용 복합레진의 점도는 전치부용 복합레진보다 높아 와동에 condenser등을 이용하여 다져넣을 수 있도록 제조되어 있다. 무기질 filler 함량이 증가할수록 점도는 증가하며 중합수축은 감소하므로 구치부용 복합레진의 중합수축이 상대적으로 작을 것으로 예측하여 볼 수 있다. 그러나 본 실험의 결과는 반드시 그러하지는 않음을 보여주고 있다. 즉 구치부 수복용 복합레진인 SC와 TC는 각기 2.94%와 3.38%로 전구치 혼용인 Z1, Z2보다 중합수축도가 높으며 전구치 혼용인 Z2는 2.49%로 구치부용 레진인 P6, SF와 거의 대동한 중합수축을 보인다. 이 등¹⁹⁾의 복합레진의 점탄성에 관한 유변학적 연구에 의하면 복합레진의 점성은 단순히 무기질 함유량의 대소에 의해서만 결정되는 것이 아니고 단량체

의 조성이나 filler의 모양과 크기 등 여러 요소의 종합적인 결과임이 밝혀진 바 있다. 구치부용 응축성 레진인 P6는 filler함량이 75.9%로 Z1의 79.2%보다 적음에도 불구하고¹⁰⁾ 점성은 더 높고 중합수축은 더 낮은 결과를 보이는 것으로 볼 때 중합수축도 이와 마찬가지로 무기질 filler 함량뿐만 아니라 레진 기질을 구성하는 단량체의 종류와 비율에 의해서도 큰 영향을 받을 것으로 사료되며 이들의 상관관계에 대한 보다 심도 있는 연구가 지속적으로 행해져야 하겠다.

본 연구의 범위는 이들 사이의 관련성에 대한 연구는 배제하였으나 앞으로 기존의 복합레진을 개선하거나 새로운 종류의 단량체를 개발하였을 시 본 기기는 이들의 특성시험에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

본 연구에서는 온도변화에 민감하지 않으며 체적 중합수축률을 복잡한 과정 없이 측정할 수 있는 장치를 개발하기 위해 힘 또는 위치감지변환기와 데이터 획득 시스템 및 컴퓨터를 이용하여 중합이 진행됨에 따라 실시간으로 복합레진의 부피변화를 측정할 수 있는 계측시스템을 제작하였고 이를 이용하여 여러 광중합 복합레진의 역동적인 중합수축의 패턴을 측정 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 기기의 제작과정을 통하여 온도, 변위, 힘 센서를 이용하여 여러 물리적 변수를 전기 신호로 변환, 데이터를 획득, 처리할 수 있는 능력을 얻게 되었고 결과적으로 치과영역에서 사용되는 여러 재료들의 물성 분석 시 필요한 실험장치를 직접 설계, 제작, 구현할 수 있는 능력을 획득하였다.
2. 본 기기는 온도변화에 민감하지 않고 실제 체적 중합수축률을 복잡한 과정 없이 실시간으로 측정할 수 있으며 중합이 진행됨에 따른 역동적인 중합수축의 과정도 관찰할 수 있었다. 또한 표준편차가 비교적 작아 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다.
3. 복합레진의 중합수축은 제품에 따라 큰 차이를 보였고 2.47~3.89%의 범위였으며 SF, P6, Z2, Z1, SC, DF, TC, AF의 순으로 증가하였다.
4. 단위시간에 대한 중합수축의 변화율 $dVol\%/dt$ 는 중합반응의 동역학에 관한 간접적인 연구방법이 될 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

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* Vol. 14 No.11:871 875,1993.
2. A.J.de Gee, A.J. Feilzer and C.L. Davidson : True lin

- ear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dent Mater* 9:11 14, 1993.
3. A.D. Puckett and R. Smith : Method to measure the polymerization shrinkage of light cured composites. *J Prosthet Dent* 68:56 8,1992.
4. N. Silikas, G. Eliades and D.C. Watts : Light intensity effects on resin composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dental Materials* 16:292 296,2000.
5. 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.
6. 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.
7. R.W. Penn : A recording dilatometer for measuring polymerization shrinkage. *Dent Mater* 2:78 79,1986.
8. J.S. Rees and P.H. Jacobsen : The polymerization shrinkage of composite resins. *Dent Mater* 5:41 44,1989.
9. A.J. Feilzer, A.J. De Gee and C.L. Davidson : Curing contraction of composites and glass ionomer cements. *J Prosthet Dent* 59:297 300,1988.
10. V. Fano, I. Ortalli, S.Pizzi and M. Bonanini : Polymerization shrinkage of microfilled composites determined by laser beam scanning. *Biomaterials* 18:467 470,1997.
11. R.L. Sakaguchi, and H.X. Berghe : Reduced light energy density decreases post gel contraction while maintaining degree of conversion in composites. *J Dent* 26:695 700,1998
12. B.I. Suh, L. Feng, Y. Wang, C. Cripe, F. Cincione and W. de Rjik : The effect of the pulse delay cure technique on residual strain in composites. *Compendium* Vol.20, No.2:4 14,1999.
13. P. Horowitz and W. Hill : The art of electronics. 2nd edi. Cambridge university press, 1998.
14. T.L. Floyd : Electronic devices. 5th edi. Prentice Hall International, Inc. 1999.
15. B.C. Kuo : Automatic control systems. 7th edi. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
16. J.H. McClellan, R.W. Schafer and M.A. Yoder : DSP first A multimedia approach. Prentice Hall international Inc. 1998.
17. J.W.Dally, W.F. Riley and K.G. McConnell : Instrumentation for engineering measurements. 2nd edi. John Wiley & Sons, Inc. 1993.
18. P.M. Fishbane, S. Gasiorowicz and S.T. Thornton : Physics for scientist and engineers. 2nd edi. Prentice Hall International Inc. 1996.
19. I.B. Lee and C.M. Um : Rheological study on the viscoelastic properties of flowable and condensable resin composites. *The J of kor academy of conservative dentistry* Vol.25.No.3,359 370,2000.
20. 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.
21. W.D. Cook, M.Forrest and A.A. Goodwin : A simple method for the measurement of polymerization shrinkage in dental composites. *Dent Mater* 15:447 449,1999.