

유동성 및 응축성 복합레진의 점탄성에 관한 유변학적 연구

이인복 · 조병훈 · 손호현 · 권혁춘 · 엄정문
 서울대학교 치과대학 치과보존학교실

ABSTRACT

RHEOLOGIC STUDY ON THE VISCOELASTIC PROPERTIES OF FLOWABLE AND CONDENSABLE RESIN COMPOSITES

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

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

The purpose of this investigation was to observe the viscoelastic properties of five commercial flowable(Aeliteflo, Flow it, Revolution, Tetric flow, Compoglass flow), three conventional hybrid(Z-100, Z-250, P-60) and two condensable(Synergy compact, SureFil) resin composites.

A dynamic oscillatory shear test was done to evaluate the storage shear modulus (G'), loss shear modulus(G''), loss tangent($\tan \delta$) and complex viscosity(η^*) of the resin composites as a function of frequency - dynamic frequency sweep test from 0.01 to 100 rad/s at 25°C - by using Advanced Rheometric Expansion System(ARES).

To investigate the effect on the viscosity of resin composites of filler volume fraction, the filler weight % and volume % were measured by means of Archimedes' principle using a pyknometer.

The results were as follows

1. The complex viscosity η^* of flowable resins was lower than that of hybrid resins and significant differences were observed between brands. The complex viscosity η^* of condensable resins was higher than that of hybrid resins. The order of complex viscosity η^* at $\omega=10$ rad/s was as follows, Surefil, Synergy compact, P-60, Z-250, Z-100, Aeliteflo, Tetric flow, Compoglass flow, Flow it, Revolution. The relative complex viscosity of flowable resins compared to Z-100 was 0.04~0.56 but Surefil was 30.4 times higher than that of Z-100.
2. The storage shear modulus G' and the loss shear modulus G'' of flowable resins were lower than those of hybrid resins but those of condensable resins were higher. The patterns of the change of loss tangent, $\tan \delta$, of resin composites with increasing frequency were significantly different between brands. The phase angles, δ , ranged from 30.2~78.1° at $\omega=10$ rad/s.
3. All composite resins represent pseudoplastic nature with increasing shear rate.
4. The complex shear modulus G^* and the phase angle δ was represented by the frequency domain phasor form, $G^*(\omega) = G^* e^{i\delta} = G^* \angle \delta$. The locus of frequency domain phasor plots in a complex plane was a valuable method that represent the viscoelastic properties of composite resins.
5. There was no direct linear relationship but a weak positive relation was observed between filler volume % or weight % and the viscosity of the resin composites.

Key Words : Complex viscosity, Condensable composite, Flowable composite, Viscoelastic, frequency-domain phasor plot

I. 서 론

수복용 복합레진이 개발된 이래 물성이 꾸준히 향상되어 최근에는 은 아말감이나 금 인레이의 심미적 대체물로서 사용빈도가 점차 증가하고 있다. 개발 초기에는 이들 금속 수복물에 비하여 기계적 물성과 안정성의 열세로 인해 주로 전치부의 심미적 수복재로 사용되어 왔으나 단량체 조합기술 및 적절한 filler의 배합으로 그 적용영역이 크게 확장되었다. 현재의 구치부 복합레진은 1년 동안의 마모도가 아말감과 거의 비슷해져 마모저항성은 초기의 제품과 달리 더 이상 문제되지 않을 정도로 개선되었다. 따라서 현재까지 개발된 복합레진은 주로 중합후의 물성에 중점을 두고 연구 개발되어 왔으며 이는 주로 무기질 filler의 성분 및 크기, 형태, 함량에 따라 큰 영향을 받는다. 결과적으로 복합레진의 분류는 주로 무기질 filler 함량, 크기분포와 같은 형태학적 기준에 따라 구분되어 왔다¹⁾.

레진수복의 빈도가 증가함에 따라 임상가들은 레진은 아말감에 비하여 다루기가 까다롭고 시간이 많이 걸리며 술식의 존도가 높음을 지적하고 있다. 특히 class II 와동의 인접치면과 같은 곳은 레진 특유의 점성에 기인한 끈적끈적함으로 인해 손기구에 달라붙어 와동벽에 밀착시키기가 어려우며 적절하고 긴밀한 접촉점을 형성하기 어렵다. 또한 전치부의 정중이개 수복과 같이 주변에 레진을 유지시켜 줄 수 있는 와동벽이 전혀 없는 부위에서 정확한 형태의 부여와 접촉점의 유지는 전적으로 술자의 숙련도와 섬세함에 달려 있다. 이런 경우 술자는 사용하는 레진의 점성(viscosity)과 유동성(fluidity)에 따라 레진 적용 후 가압(apply and press)에 의해 형태를 부여할 것인지 아니면 적용후 끌기(apply and drag)방법으로 수복할 것인지 경험에 의존하여 결정해야 한다. 이와 같이 복합레진의 점성은 시술부위에 적용의 용이성과 같은 조작특성과 치아 표면의 점착력에 직접 관련되어 성공적인 수복과정과 그 결과에 큰 영향을 미친다.

1996년 후반부터 시판되기 시작한 유동성 복합레진은 이러한 조작의 용이성에 대한 요구에 응답하기 위해 개발되었다²⁾. 이들은 기존의 hybrid 복합레진과 같은 크기 분포의 filler를 가지나 함량을 줄이고 레진 기질의 성분을 조절하여 점성을 감소시켰다. 그 결과 손기구를 사용하지 않고 주사기와 적절한 구경의 주사바늘/loading tip)을 이용하여 직접 와동에 적용할 수 있으며 그 유동성과 표면장력으로 인하여 와동의 미세부위까지 쉽게 도포된다. 제조회사가 제시한 바에 의하면 유연한 유동성을 이용하여 일반적인 수복 목적 외에도 아말감 변연, 복합레진, 금관변연, 도재수복물의 보수 및 tunnel 와동의 수복, 소와열구 전색제로 사용할 수 있다. 그러나 Bayne 등³⁾은 유동성 레진은 기존의 hybrid 레진에 비하여 여러 기계적 물성이 떨어지므로 작은 class III 와동이나 class V 와동과 같이 낮은 응력을 받는

부위나 여러 수복물의 결손부위의 보수, 접근이 어려운 class II 와동의 인접면의 이장재등으로 사용 가능하고 소구치나 대구치의 class I, class II 와동의 수복에는 주의를 요한다 하였다.

이러한 유동성 복합레진은 점성을 줄여 그 유동성을 극대화하여 와동면의 자연스런 자가접착 효과를 이용한다 하여 이와는 반대로 점도를 크게 증가시켜 아말감과 같이 packing에 의한 충전을 가능하게 한 응축성 복합레진이 등장하였다. 응축성 레진은 class I, class II 구치부 아말감수복의 대체물로서 특히 class II 와동의 인접면 와동에서 matrix band를 충분히 팽창시켜 지지하여 긴밀한 인접면 접촉을 얻기 위해 개발되었다. 제조회사에 의하면 이들의 특성은 높은 filler 함량과 더불어 filler 자체의 형태와 표면 조도를 거칠게 변화시켜 filler입자 사이의 interlocking, filler와 레진 기질 사이의 상호작용에 의하여 흐르지 않고 아말감과 같이 응축 할 수 있는 유사한 조작특성을 가진다고 하였다^{3,4)}.

최근 수년동안 조작을 용이하게 하기 위해 새로 등장한 레진 수복재료의 다양화는 점도에 기초한 새로운 복합레진의 분류체계가 필요함을 말해준다. 조작성에 가장 큰 영향을 미치는 각 재료별 점도와 그와 관련이 있는 재료의 물성의 측정은 1차적으로 시행되어야 할 과제이고 이는 임상가에게 직접적으로 도움을 줄 수 있는 유용한 정보가 될 수 있다. 2차적으로는 그러한 점도와 물성을 나타내게 하는 복합레진의 기질의 조성비율, filler의 양과 모양, 크기분포 및 상호작용들에 대한 미시적인 접근이 필요하며 이는 레진 재료의 개선이나 새로운 재료의 개발에 필수적인 요소라 하겠다.

Opdam 등⁵⁾은 수중 구치수복용 복합레진의 상대적 점도를 평판가압법으로 측정하여 비교하였고 Bayne 등²⁾은 역시 평판가압법을 이용하여 유동성 복합레진과 hybrid 복합레진을 비교하여 유동성 복합레진 사이에도 많은 점도의 차이가 있음을 보고하였다. 그러나 이들 연구는 복합레진 사이의 단순한 상대적인 점도의 비교일 뿐 재료 자체 고유의 특성에 관한 정보는 전혀 제공하지 못한다.

특정 재료의 점도는 여러 가지 방법으로 측정될 수 있고 측정대상 물질의 성상과 점도의 크기의 수준에 따라 측정방법이 결정되며 측정도구에 따라 얻을 수 있는 정보의 질과 양도 다양하다. 일반적으로 치과용 복합레진과 같은 호제 형태의 고분자 재료는 점성과 탄성을 동시에 지니는 점탄성 재료이다. 즉 금속(고체)과 같은 탄성체와 물이나 기름(액체)과 같은 점성체의 중간영역에 위치한다. 따라서 특정재료의 점성과 탄성의 절대값과 상대적 비율은 그 물질이 외력에 대해 반응하는 특성을 결정짓는 중요한 재료함수이다⁶⁻⁸⁾. 점탄성의 측정방법에는 크리프테스트(creep test)⁹⁻¹²⁾, 응력완화실험(stress relaxation test)^{7,8)}, 동적실험(dynamic test)¹³⁻¹⁵⁾등이 있으며 이중 고분자의 선형 점탄

성 성질을 결정하는 데는 동적회전전단실험(dynamic oscillatory shear test)^{6-8,14,15)}이 가장 많이 사용된다.

수복용 복합레진의 점탄성에 대한 연구는 극히 드물며 최근 도입된 유동성 레진과 응축성 레진의 점탄성에 대한 연구는 전혀 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수복용 복합레진의 사용시 조작성과 가장 큰 관련이 있는 레진의 점탄성을 알아보기 위해 동적회전전단실험을 시행하여 유동성 레진과 응축성 레진 및 기존의 hybrid 레진의 점탄성 특성을 측정 비교하였고 이에 영향을 줄 수 있는 여러 요인 중 filler량과의 상호 관련성에 대하여 조사하였다.

II. 이론적 배경

1. 동적회전전단실험(dynamic oscillatory shear test)

재료의 점탄성을 알아보기 위해서는 시편에 정현파의 변형을 가한 후 나타나는 응력을 측정한다. 이상적인 탄성체는 응력과 변형의 위상이 동일하고(In phase, phase shift $\delta=0$) 이상 점성재료에서는 응력과 변형은 90° 의 위상차이가 발생한다(90° out of phase, $\delta=90^\circ$). 전술한 바와 같이 복합레진과 같은 고분자재료는 탄성과 점성의 조합으로 점탄성 거동을 보인다. 이러한 점탄성 재료는 응력과 변형 사이에 $0\sim 90^\circ$ 의 위상지연을 보이며 이는 재료의 중요한 물성값이다.

재료의 선형 점탄성 거동을 알아보기 위해서는 보통 정현파 모양의 동적 진동을 가한 후 그 응답특성을 파악하여 고찰한다. 만일 어떤 재료에 진동수 ω 의 동적회전전단변형(dynamic oscillatory shear strain)을 가했을 시 변형과 응력은 다음과 같이 표현된다.

전단변형 $\gamma(t) = \gamma_0 \sin \omega t$ (식 - 1)

응력 $\sigma(t) = \sigma_0 \sin (\omega t + \delta)$ (식 - 2)

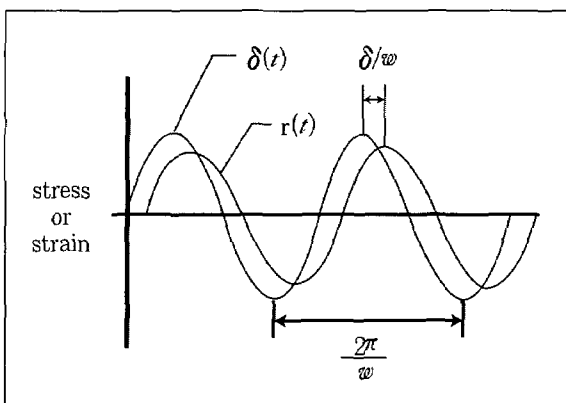


Fig. 1. 응력과 변형 사이에 위상지연을 가지는 재료의 점탄성 반응

여기서 δ 는 응력과 변형 사이의 위상각(phase angle) 또는 위상지연(phase lag)이다.

(식 - 2)를 전개하면

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos \delta \sin \omega t + \sigma_0 \sin \delta \cos \omega t$$
 (식 - 3)

두 성분으로 나타낼 수 있으며 한 성분은 변형과 위상이 같은(In phase) $\sigma_0 \cos \delta$ 이고 다른 성분은 변형과 위상이 90° 다른 (90° out of phase) $\sigma_0 \sin \delta$ 이다.

(식 - 3)을 고쳐 쓰면

$$\sigma(t) = \gamma_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t)$$
 (식 - 4)

여기서 두 계수를 정의할 수 있으며

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta = G_0 \cos \delta$$
 (식 - 4a)

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta = G_0 \sin \delta$$
 (식 - 4b)

G' 은 변형과 응력 사이에 위상차가 없어 에너지 손실이 없는 탄성계수로 저장전단탄성계수(shear storage modulus)라 하고 G'' 은 위상차가 $\pi/2$ 로 에너지 손실이 있는 성분의 것으로 손실전단탄성계수(shear loss modulus)라 한다. 저장탄성계수는 재료의 탄성성분을 나타내며 저장된 에너지의 척도이고 손실탄성계수는 재료의 점성을 나타내고 열로서 손실된 에너지의 척도이다. 여기서 특히 G' 은 dynamic rigidity 라고도 한다.

다른 표현법으로 복소수함수를 사용하여 G' 과 G'' 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma(t) = \gamma_0 e^{i(\omega t)}$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)}$$

$$G^* = \frac{\sigma(t)}{\gamma(t)} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta)$$

$$= G' + iG''$$
 (식 - 5)

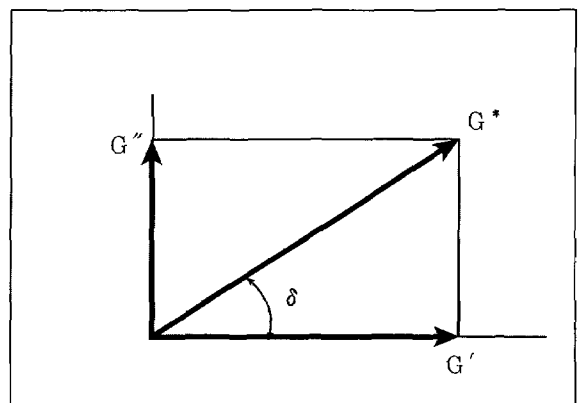


Fig. 2. 실수(저장)전단탄성계수와 허수(손실)전단탄성계수 사이의 관계

여기서 G' 과 G'' 은 각각 실수전단탄성계수(real shear modulus)와 허수전단탄성계수(imaginary shear modulus)라고도 한다. 그리고 G^* 은 복소전단탄성계수(complex shear modulus)라 하며 그 크기는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_0}{\gamma_0} = |G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$$

(식 - 4a) 와 (식 - 4b) 로부터 $\tan\delta = \frac{G''}{G'}$ 이 되며 이를 손신탄젠트(loss tangent)라 하고 Loss tangent = $\tan\delta = \text{energy loss/energy stored} = G''/G'$ 으로 이는 고분자 물질의 점탄성 거동을 나타내는 중요한 척도중의 하나이고 이값의 물리적 의미는 고분자 물질의 내부마찰 또는 제동(damping)을 나타낸다.

동적회전전단 실험 결과를 나타내는 또 다른 표현 방법은 두 개의 물질함수 $\eta'(\omega)$ 과 $\eta''(\omega)$ 을 사용하는 것으로 여기서 $\eta'(\omega)$ 는 동적점도(dynamic viscosity)라 부른다.

$$\eta' = \frac{G''}{\omega}$$

$$\eta'' = \frac{G'}{\omega} \quad \text{이고}$$

복소점도 η^* 과 그 크기는 다음과 같다.

$$\eta^*(\omega) = \eta'(\omega) - i\eta''(\omega)$$

$$|\eta^*| = \sqrt{(\eta')^2 + (\eta'')^2}$$

2. 원추와 평판 점도계(cone and plate viscometer)

원추와 평판 점도계의 기하학적 모양은 Fig. 3과 같다. Gap angle θ 가 작을시 전단율은 평판위의 모든 지역에서 균일하다. 전단율은

$$\text{shear rate} = \frac{dr}{dt} = \Omega / \theta \quad (\text{식 - 1})$$

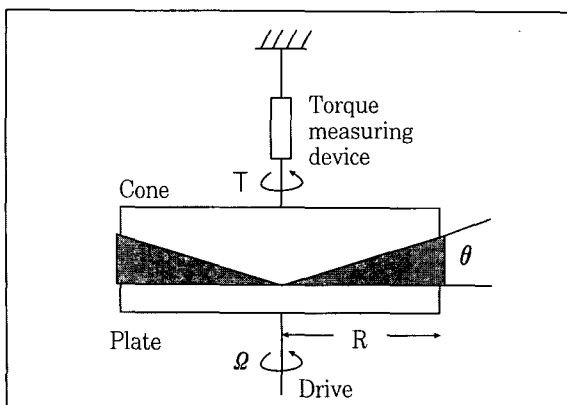


Fig. 3. 원추와 평판형 점도계(cone and plate viscometer) 단면의 기하학

여기서 Ω 는 각속도이고 전단응력은 유체응력으로 인한 원추 표면의 총 토크를 나타내어 정한다. 총 토크는

$$T = \int_0^R (r \cos\theta) (\sigma) (2\pi r \cos\theta) dr = \frac{2\pi R^3 \cos^2\theta}{3} (\sigma) \quad (\text{식-2})$$

이다. 그러므로

$$\sigma = \frac{3T}{2\pi R^3 \cos^2\theta} = \frac{3T}{2\pi R^3} \quad (\text{식 -3})$$

여기서 R 은 원추의 지름이다. 따라서 점도는 (식 - 1)과 (식 - 3) 으로부터

$$\eta = \frac{3T\theta}{2\pi R^3 \Omega} \quad (\text{식 -4})$$

와 같이 토크와 각속도를 측정함으로써 구할 수 있다. 단순 전단이 유효하도록 하기 위해서는 장치의 크기에 대한 제한과 원심력으로 인한 방사속도가 없도록 하는 최대 회전율에 대한 한계점이 존재한다.

III. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

현재 국내에서 사용되고 있는 5종의 유동성 복합레진과 2종의 응축성 복합레진 및 3종의 hybrid 복합레진을 대상으로 실험하였으며 제품명과 제조회사 및 제품번호는 Table 1과 같다.

2. 실험방법

복합레진의 동적 점탄성 특성을 측정하기 위해 실험에 사용한 기기는 Rheometric Scientific(One possumtown Road Piscataway, NJ 08854-2103)사의 ARES (Advanced rheometric expansion system)였다. 본 기기는 측정 대상이 되는 시편의 성상과 형태에 따라 적절한 부속물을 사용하여 유동체의 점도 측정과 함께 DMTA (Dynamic mechanical thermal analyser)로서 고체 시편의 동적 점탄성을 측정할 수 있는 다용도 rheometer 이다. 본 연구에서는 복합레진의 성상이 호제므로 본 기기의 제조회사에서 제공하는 여러 측정 모듈중 plate 직경 25mm, cone angle 0.1rad의 cone and plate를 사용하였다.

1) 주파수 변화에 따른 동적 점탄성특성의 측정(Dynamic frequency sweep)

복합레진의 점탄성을 측정하고 전단율 변화에 따른 점도의 변화를 알아보기 위하여 25℃로 조절된 상태에서 시편을 plate위에 올려놓은 후 온도조절 chamber의 문을 닫아

Table 1. Composite resins used in this study

Brand	Code	Resin component	Filler%	Batch No.	Manufacturer
AEliteflo	AF		60wt.%	079157	Bisco U.S.A.
Flow it	FI	Ethoxylated Bis-GMA TEGDMA	70.5wt.%	880910	Jeneric/Pentron U.S.A.
Revolution	RT	BisGMA	62wt.%(46vol.%)	909775	Kerr U.S.A.
Tetric flow	TF	BisGMA,UDMA TEGDMA	67.8wt.%	B11828	Vivadent Liechtenstein
Compoglass flow	CF	UDMA,TEGDMA compomer	66.8wt.%(41.8vol.%)	A03343	Vivadent Liechtenstein
Z-100	Z1	BisGMA,TEGDMA	85wt.%(66vol.%)	9EJ	3M U.S.A.
Z-250	Z2	BisGMA,UDMA BisEMA	60vol%	9AK	3M U.S.A.
P-60	P6	BisGMA,UDMA BisEMA	61vol%	9AF	3M U.S.A.
Synergy compact	SC	BisGMA TEGDMA	74wt.%(59vol.%)	7838	Coltene Swiss
SureFil	SF	urethane modified BisGMA	82wt.%(66vol%)	545112	Densply U.S.A.

빛을 차단한 후 cone과 plate사이의 간격을 0.055mm까지 접근시켰다. 잔여 응력이 사라진 것을 확인한 후 plate에 변형진폭 6.28%의 전단변형으로 0.01~100rad/s 범위의 주파수로 정현파 진동 입력을 가한 후 cone에 나타나는 출력 응답특성을 측정하여 동적전단탄성계수 G' , 동적전단손실계수 G'' , 손실각 δ , 복소점도 η^* 를 측정 비교하였다.

Frequency sweep 전 예비 실험 단계에서 먼저 strain sweep test를 시행하여 점도 η^* 가 일정하게 나타나는 범위를 알아낸 후 측정이 정확히 되도록 충분한 torque를 발생시키기 위하여 최대한의 strain을 정하여 6.28%로 하였다.

2) 무기질 filler 함량의 측정

복합레진 속에 함유되어 있는 무기질 filler 함량을 측정하기 위하여 각 재료를 일정량 취해 미리 무게를 측정해 놓은 비중병(Pyknometer)에 넣어 다시 무게를 측정하고 증류수와 아르키메데스의 원리를 이용 복합레진의 무게와 부피를 구하였다. 증류수를 버리고 아세톤을 이용하여 복합레진을 용해시킨 다음 원심분리기에 넣어 filler를 침전시킨 후 상층용액을 따라냈다. 상기과정을 반복 순수한 filler성분만 남게 한 후 비중병을 아세톤으로 가득 채워 역시 아르키메데스의 원리와 아세톤에 의한 부력차이를 구한 다음 건조시

켜 무게를 측정하여 filler weight %와 filler volume %를 구하였다.

복소점도 η^* 과 filler 함량과의 상관관계를 알아보기 위해 correlation analysis를 시행하였다.

IV. 결 과

1. 주파수 변화에 따른 동적 점탄성 특성의 측정 (Dynamic frequency sweep)

진동 주파수의 변화에 따른 저장전단탄성계수 G' 은 Table 2, Fig. 4와 같고 손실전단탄성계수 G'' 은 Table 3 및 Fig. 5와 같다. 두 탄성계수 모두 주파수가 증가함에 따라 같이 증가하는 양상을 보이고 제품에 따라 크기가 다르며 증가하는 형태에 있어 차이를 보였다.

저장탄성계수에 대한 손실탄성계수의 비인 loss tangent와 위상각 δ 는 Table 4, Table 5 및 Fig. 6, Fig. 7에 나타나 있다. 주파수 변화에 따른 위상각과 loss tangent의 변화는 각 제품별로 고유의 거동을 나타냈고 위상각 δ 는 $\omega = 10\text{rad/s}$ 일 때 30.2~78.1°의 범위를 보였다.

모든 복합레진은 주파수가 증가함에 따라 복소점도 η^* 가 감소하는 pseudoplastic한 성질을 보였다(Table 6, Fig.

Table 2. Storage shear modulus(G') of composite resins at various frequency

composite resin	(G') (dyn/cm ²)				
	$\omega=0.01$ (rad/s)	0.1	1	10	100
AF	2600	2554	6850	175	16716
FI	1579	1366	2519	3358	3911
RT	340	911	1190	1666	2860
TF	153	1881	3180	5192	10282
CF	872	1100	1284	1399	1623
Z1	7190	15842	26474	46294	78012
Z2	4493	10560	22128	44319	67548
P6	10180	21027	41321	76687	108150
SC	68603	54977	68882	86332	86056
SF	493670	697320	1002245	1417850	2030100

Table 3. Loss shear modulus(G'') of composite resins at various frequency

composite resin	(G'') (dyn/cm ²)				
	$\omega=0.01$ (rad/s)	0.1	1	10	100
AF	8833	11250	23709	24593	24924
FI	1897	1900	2360	3102	6270
RT	294	462	667	1725	6518
TF	157	1138	2245	7838	36118
CF	1850	1847	2757	6661	26561
Z1	6759	8413	13060	27755	78208
Z2	5256	8255	18866	54913	212020
P6	10791	13947	29373	75191	250460
SC	77078	43393	48595	86332	86056
SF	501187	564000	634110	823590	1720700

8). 진동 주파수가 $\omega=10\text{rad/s}$ 일 때의 복소점도는 RT가 240poise로 가장 유동성이 컸고 SF가 163970 poise로 가장 높은 점도를 나타냈으며 그 순서는 RT, FI, CF, TF, AF, Z1, Z2, P6, SC, SF로 점도가 증가하였다. 각 레진의 상대적 점도를 알아보기 위해서 $\omega=10\text{rad/s}$ 에서 Z1에 대한 복소점도의 비를 알아보면 유동성 레진은 0.044~0.560의 범위를 보였고 응축성 레진은 SC와 SF가 각기 2.158, 30.376을 나타냈으며 hybrid 레진인 Z2와 P6는 1.307과 1.990이었다(Table 7, Fig. 9).

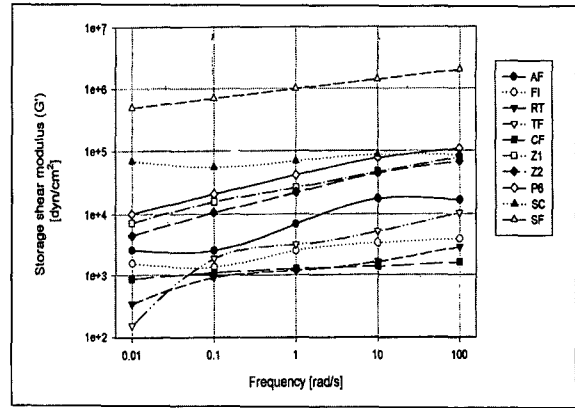


Fig. 4. Storage shear modulus (G')

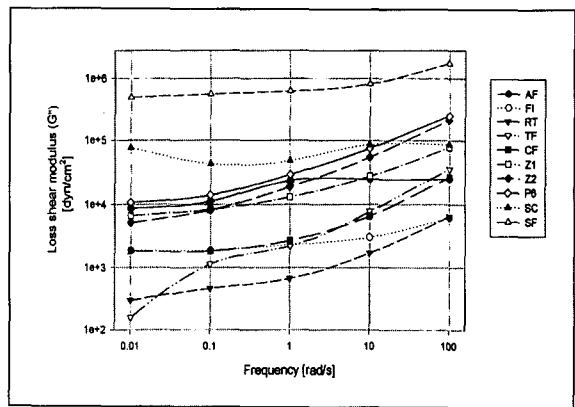


Fig. 5. Loss shear modulus (G'')

2. 무기질 filler 함량의 측정

측정된 복합레진의 무기질 filler량은 Table 8과 같으며 유동성레진의 filler 함량은 53.1~67.2wt%와 31.1~43.8vol%로 hybrid resin에 비하여 낮았다. 그러나 응축성레진인 SC의 경우는 오히려 hybrid 레진보다 낮은 filler 함량을 나타냈다.

Correlation analysis 결과 복합레진의 점도와 무기질 filler량 사이의 직접적인 선형 상관관계는 존재하지 않았다 ($R=0.642$ in vol %, $R=0.590$ in wt % at $\omega=10\text{rad/s}$) (Fig. 15).

각 복합레진의 복소전단탄성계수 G^* 와 위상각 δ 를 phasor 표현법을 사용하여 $G^*(\omega)=|G^*|\angle\delta$ 의 형태로 나타내면 Table 5와 같고 $\omega=10\text{rad/s}$ 일 때 이를 극좌표상에 도시하면 Fig. 10과 같다. 주파수 $\omega=0.01\sim100\text{rad/s}$ 의

Table 4. Loss tangent ($\tan \delta$) of composite resins at various frequency

composite resin	$\tan \delta$				
	$\omega=0.01$ (rad/s)	0.1	1	10	100
AF	3.40	4.40	3.46	1.40	1.49
FI	1.25	1.39	0.94	0.92	1.60
RT	0.87	0.51	0.56	1.04	2.28
TF	1.03	0.61	0.71	1.51	3.51
CF	2.12	1.68	2.15	4.76	16.37
Z1	0.94	0.53	0.49	0.60	1.00
Z2	1.17	0.78	0.85	1.24	3.14
P6	1.06	0.66	0.71	0.98	2.32
SC	1.12	0.79	0.71	0.91	2.05
SF	1.02	0.81	0.63	0.58	0.85

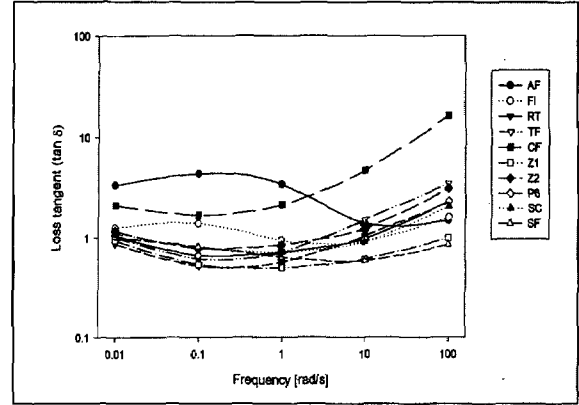


Fig. 6. Loss tangent ($\tan \delta$)

Table 5. Phasor presentation of the complex shear modulus (G^*) and phase angle(δ) of composite resins at various frequency

composite resin	$G^*(dyn/cm^2) \angle \delta(^{\circ})$				
	$\omega = 0.01$ (rad/s)	0.1	1	10	100
AF	9208 \angle 73.6	11537 \angle 77.2	24679 \angle 73.9	30231 \angle 54.4	30011 \angle 56.2
FI	2430 \angle 51.3	2341 \angle 54.3	3452 \angle 43.1	4572 \angle 42.7	7389 \angle 58.0
RT	450 \angle 40.9	1022 \angle 26.9	1364 \angle 29.3	2398 \angle 46.0	7118 \angle 66.3
TF	219 \angle 45.7	2198 \angle 31.2	3893 \angle 35.2	9401 \angle 56.5	37553 \angle 74.1
CF	2045 \angle 64.8	2150 \angle 59.2	3041 \angle 65.0	6807 \angle 78.1	26611 \angle 86.5
Z1	9868 \angle 43.2	17937 \angle 30.0	29520 \angle 26.3	53977 \angle 30.9	110460 \angle 45.1
Z2	6915 \angle 49.5	13404 \angle 38.0	29079 \angle 40.5	70567 \angle 51.1	222520 \angle 72.3
P6	14835 \angle 46.7	25232 \angle 33.6	50697 \angle 35.4	107400 \angle 44.4	272810 \angle 66.6
SC	103190 \angle 48.3	70039 \angle 38.3	84299 \angle 35.2	116483 \angle 42.2	195901 \angle 63.9
SF	703490 \angle 45.4	896856 \angle 39.0	1185998 \angle 32.3	1639695 \angle 30.2	2661224 \angle 40.3

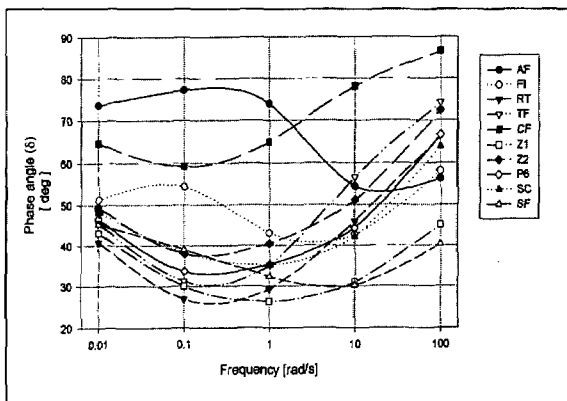


Fig. 7. Phase angle (δ)

Table 6. Complex viscosity (η^*) of composite resins at various frequency

composite resin	η^* (Poise)				
	$\omega=0.01$ (rad/s)	0.1	1	10	100
AF	920771	115370	24679	3023	300
FI	243050	23407	3452	457	74
RT	44951	10217	1364	240	71
TF	21929	21979	3893	940	376
CF	204510	21500	3041	681	266
Z1	986800	179370	29520	5398	1105
Z2	691480	134040	29079	7057	2225
P6	1483500	252320	50697	10740	2728
SC	10319000	700390	84299	11648	1959
SF	70349000	8968560	1185998	163970	26612

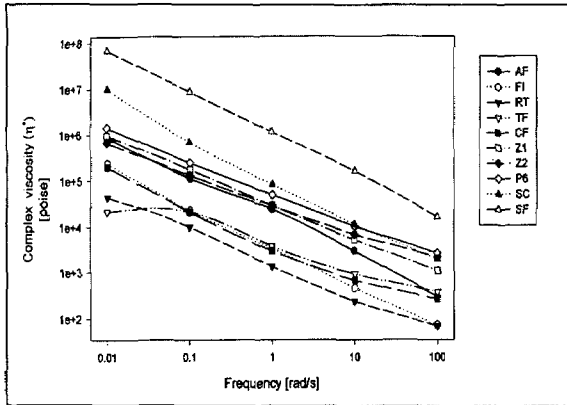


Fig. 8. Complex viscosity (η^*)

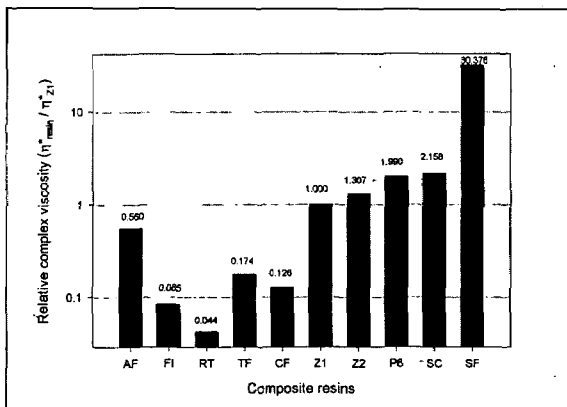


Fig. 9. Relative complex viscosity of composite resins to Z1 at $\omega = 10$ rad/s

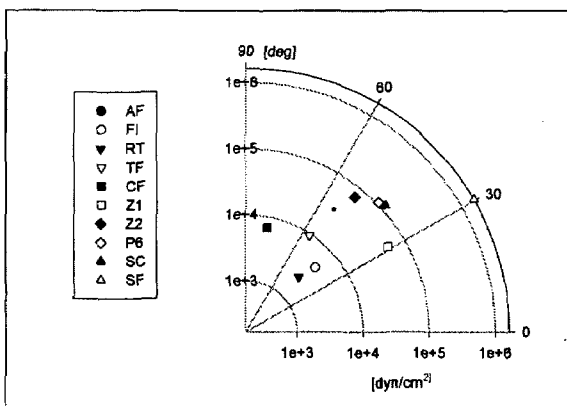


Fig. 10. Phasor representations of G^* and $\delta(G^* e^{i\delta} = G^* \angle \delta)$ of composite resins at $\omega = 10$ in a polar coordinate system

Table 7. The ratio of G' , G'' and η^* of composite resins to Z-100 at frequency $\omega = 10$ rad/s

composite resins	G'	G''	η^*
AF	0.380	0.886	0.560
FI	0.073	0.112	0.085
RT	0.036	0.062	0.044
TF	0.112	0.282	0.174
CF	0.030	0.240	0.126
Z1	1.000	1.000	1.000
Z2	0.957	1.978	1.307
P6	1.657	2.709	1.990
SC	1.865	3.111	2.158
SF	30.627	29.674	30.376

Table 8. The filler weight % and volume % of composite resins

composite resins	filler wt %	filler vol %
AF	56.5	31.1
FI	62.6	39.5
RT	53.1	32.5
TF	66.8	43.3
CF	67.2	43.8
Z1	79.2	66.8
Z2	78.3	63.9
P6	75.9	57.7
SC	68.0	51.3
SF*	80.5*	not determined

SF* was little soluble to acetone and its filler weight % was determined by ashing at 700°C for 30min.

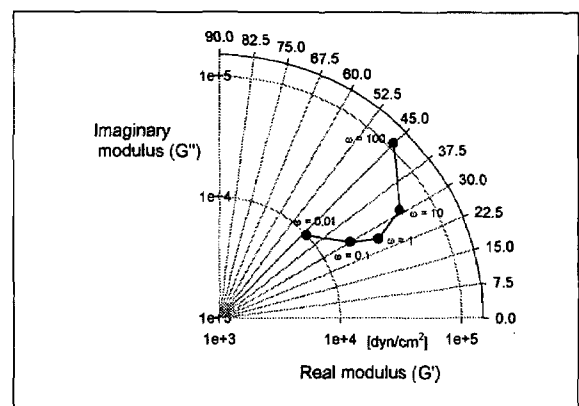


Fig. 11. Locus of frequency domain phasor plots. $G^*(\omega) e^{i\delta} = G^*(\omega) \angle \delta$ of Z1 at $\omega = 0.01 \sim 100$ in a complex plane

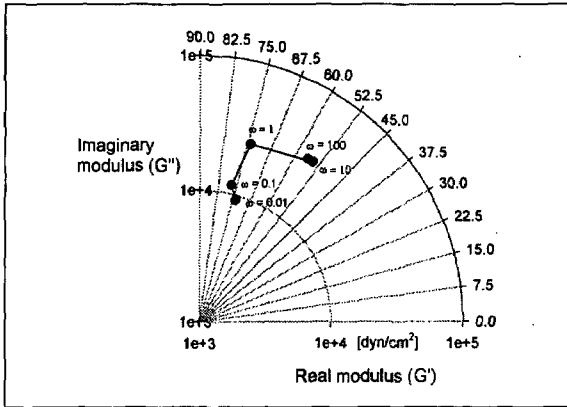


Fig. 12. Locus of frequency domain phasor plots of AF at $\omega=0.01\sim100$

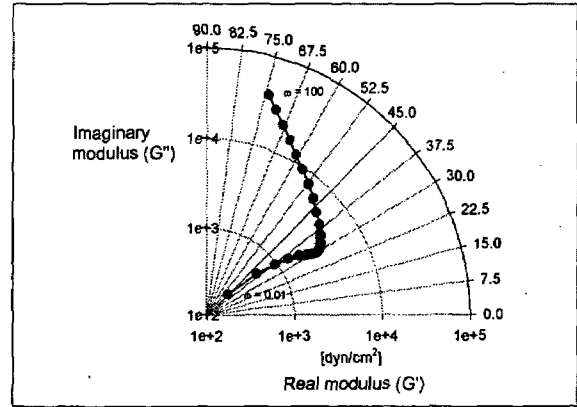


Fig. 13. Locus of frequency domain phasor plots of TF at $\omega=0.01\sim100$

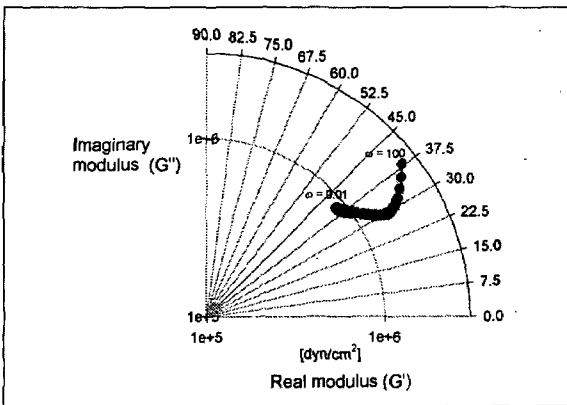


Fig. 14. Locus of frequency domain phasor plots of TF at $\omega=0.01\sim100$

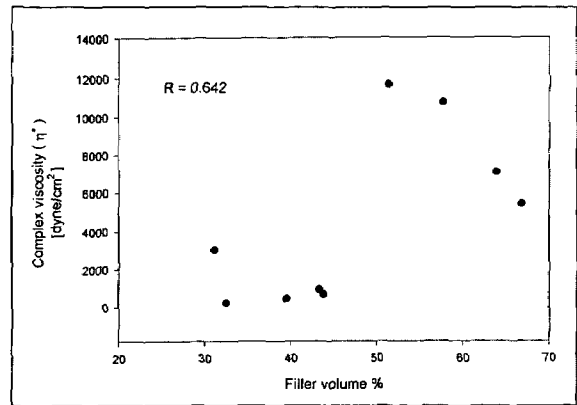


Fig. 15. Direct linear correlation was not present between filler volume % and complex viscosity

범위에서 각 재료별 주파수 영역 페이지 표현법(frequency domain phasor representation)으로 복소평면에 도시한 점들의 궤적(locus of frequency domain phasor plot)은 Fig. 11~ Fig. 14와 같다.

V. 총괄 및 고찰

유변학은 물질의 변형과 흐름에 관한 학문으로 그 기원은 Robert Hook의 탄성에 관한 법칙과 Isaac Newton의 액체의 점성에 관한 고찰로부터 유래한다. 현존하는 대부분의 물질은 탄성과 점성을 모두 지니고 있으며 극단적으로 "모든 것은 - 산 조차도 - 충분한 시간이 경과하면 흐른다!"⁶⁾ 따라서 유변학적 연구에서는 관심의 대상이 되는 물질의 점탄성을 측정하기 위해서는 적절한 측정도구와 현실적인 측정도의 시간 함수가 필요하다.

본 연구에서 사용한 ARES는 측정하고자 하는 물질의 성상에 따라 적절한 전단변형과 변형속도를 정할 수 있으며 측정된 토오크와 위상각으로부터 전단응력, 저장전단탄성계수, 손실전단탄성계수, 손실탄젠트, 복소점도등을 동시에 계산해내고 도시할 수 있는 소프트웨어를 지니고 있다.

최근 수복용 복합레진의 개발 추세는 과거와 달리 중합 후 나타나는 물성의 향상 추구에서 진일보하여 술자가 임상에서 더 사용하기 쉽고 균일한 임상적 결과를 얻을 수 있는 조작성의 향상에 많은 노력이 기울여지고 있다. 그 결과 와동에 복합레진을 적용할 시 손 기구가 아닌 적절한 구경의 tip과 주사기를 이용하거나 carrier를 사용하여 loading의 자동화를 이루어 시간절약과 진료의 용이성으로 술자의 피로의 감소 및 균질화된 진료를 할 수 있게 되었다. 본 연구에서 사용된 유동성 레진과 응축성 레진은 각각 점도를 감소시키거나 증가시켜 이러한 목적을 달성하기 위해 새로 등장

한 재료들이다.

본 실험에서 사용된 모든 복합레진의 저장전단탄성계수 G' 과 손실전단탄성계수 G'' 은 모두 진동주파수가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였으며 제품에 따라 많은 차이를 보였다. 진동주파수가 달라짐에 따라 각 값의 순위가 역전되는 양상을 보이기도 하였으며 G' 의 순위와 G'' 의 순위가 반드시 일치하지는 않았으나 대체적으로 비슷한 순위를 보였다. 여기서 G' 은 복합레진의 고체성질 즉 탄성을 나타내며 G'' 은 복합레진의 액체성질, 점성을 나타낸다. G' , G'' 과 더불어 중요한 물질함수인 loss tangent($\tan\delta$), 즉 G''/G' 과 위상지연 δ 를 살펴보면 AF와 FI는 0.01~100 rad/s의 범위에서 진동주파수가 증가함에 따라 극대 극소 값을 갖는 변이곡선을 보였으나 기타 다른 레진들은 극소점만 갖는, 감소 후 증가하는 이차곡선 모양을 나타냈다. 이는 각 제품마다의 특징적 거동으로 진동 주파수가 변함에 따라 각 복합레진을 구성하는 기질과 무기질 filler 사이의 상호작용에 의한 것이 아닌가 생각된다. loss tangent, 위상지연이 클수록 진동 입력시 복합레진 내에서의 에너지 상실을 즉 damping이 큼을 나타내며 이는 주로 열로서 발산된다. G' 에 대한 G'' 의 상대적 수치인 loss tangent의 값이 높다고 해서 반드시 유동성이 높고 이 값이 낮다고 해서 유동성이 낮거나 고형성이 크다는 것을 의미하지는 않는다. 즉 점탄성 연구에서 이 값은 복합레진 사이의 상대적인 질적특성을 의미하지 절대적인 양적비교의 대상은 아니다.

진동주파수가 증가함에 따라 모든 복합레진의 복소점도 η^* 는 감소하는 pseudoplastic 한 성질을 보였다. 이는 전단율(shear rate)이 증가함에 따른 점도감소 효과로서 "전단 묽어짐(shear thinning)" 이라 한다. 이는 실제 임상에서 복합레진이나 레진시멘트를 사용하여 도재인레이나 레진인레이를 접착시 초음파 기구로 고주파 진동(high frequency agitation)을 가하여 시멘트의 점도를 감소시켜 보다 긴밀한 안착을 얻을 수 있는 이론적 근거를 제공한다^{16,18)}. 진동주파수 ω 와 전단율($-\frac{d\gamma}{dt}$) 사이의 상호관련성에 대하여 고찰해 보자. Cox-Merz rule에 의하면 oscillatory shear test에서의 복소점도 $|\eta^*(\omega)|$ 는 steady shear test에서의 점도 $\eta(\dot{\gamma})$ 와 근사적으로 동일하다⁶⁾. 이는 동일한 재료에 대하여 loading tip의 구경을 줄임으로서 전단율을 증가시켜 점도를 조절할 수 있는 가능성에 대한 실험적 근거를 제공한다.

Fig. 8과 Table 6에서 볼 수 있는 바와 같이 주파수가 0.01rad/s ~ 100rad/s 로 변함에 따라 응축성 레진인 SF의 경우 10^7 poise ~ 10^4 poise 단위의 복소점도 변화를 보이며 유동성 레진인 RT는 10^4 poise ~ 10 poise 수준의 점도변화를 나타냈다. 또한 각 레진별 복소점도의 절대값의 비교에서 주파수 영역별로 약간씩의 순위 변화를 보이기도 한다. 따라서 각 재료별 상대적인 점도를 비교해 보기 위해서는 측정시의 주파수가 매우 중요한 변수이며 본

연구에서는 실제 임상에서 loading시의 전단율과 가장 비슷한 $\omega = 10$ rad/s 를 기준으로 하였다(Table 7, Fig. 9). Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 최근 수년간 임상에서 널리 사용된 전치 및 구치부 수복용 hybrid 복합레진인 Z1의 복소점도를 기준으로 하였을 시 상대적인 복소점도의 비는 0.044~30.376 이었다. 유동성레진인 RT가 가장 점도가 낮았으며 FI, CF, TF, AF의 순으로 증가하였다. 3M 회사에서 Z1의 후속 모델로 선보인 전구치부 혼용 복합레진 Z2는 Z1보다 약간 점도가 높은 1.307의 상대적 점도를 보였으며 구치부 전용 복합레진인 P6는 좀 더 높아 두 배 가까운 1.990의 상대적 점도를 나타냈다. 응축성 복합레진인 SF는 무려 30.376배의 점도를 보였는 바, 실험시 cone과 plate 사이에 시료를 올려놓고 간극을 0.055mm로 조절하는데 많은 어려움이 있었으며 가끔 토르크 sensor에 과부하가 걸려 실험이 중단되는 경우도 있었다. 유동성 레진으로 시판되고 있는 AF는 상대적 점도가 0.56으로 다른 유동성 레진이 0.044~0.174인데 비하여 월등히 높은 점도를 지녀 유동성 레진과 Z1의 중간 정도의 점도를 나타냈으며 응축성 레진이라 표기되어 있는 SC는 Z1에 대한 상대점도가 2.158로 다른 응축성 레진인 SF 보다 훨씬 낮아 오히려 비응축성 hybrid 레진인 P6와 비슷한 점도를 보였다. 본 연구결과에서 알 수 있는 바와 같이 같은 종류의 복합레진이라 할지라도 그 점도의 차이는 매우 큼을 알 수 있고 이는 평판가압법을 이용하여 유동성레진의 상대적 점도를 평가한 Bayne 등²⁾의 연구결과와 일치한다.

이러한 복합레진의 다양한 점탄성 성질을 간략히 나타내고 시각적으로 표현하여 종류별 grouping을 쉽게 하기 위하여 각 시료의 복소전단탄성계수 G^* 와 위상각 δ 를 전기공학에서 주로 사용하는 페이지 표현법으로 $G^*(\omega) = |G^*| \angle \delta$ 와 같이 나타내면 Table 5와 같고 $\omega = 10$ 일 때 이를 극좌표상에 도시하면 Fig. 10과 같다. 여기서 원점으로부터 각 점까지의 거리는 $|G^*|$ 이고 원점에서 각 점을 연결한 벡터와 x축 사이의 각이 위상각 δ 이다. 따라서 각 벡터의 x축 성분은 $|G^*| \cos\delta = G'$ 이고 $|G^*| \sin\delta = G''$ 이다. 본 도표에는 우리가 알고자 하는 모든 점탄성에 관한 정보가 담겨있으며 극좌표 평면상에서 각 점 사이의 상대적 거리는 각 복합레진 사이의 유변학적 친소관계를 나타낸다 할 수 있다.

주파수 변화에 따르는 복합레진의 점탄성변화의 거동을 알아보기 위하여 상기 페이지 표현법을 $\omega = 0.01 \sim 100$ rad/s에 대하여 확장하여 그 페이지의 궤적을 복소평면상에 도시하면 Fig. 11~14와 같이 각 시편별로 독특한 패턴을 나타낸다. 이 그래프들로부터 주파수가 증가, 즉 전단율이 증가함에 따른 실수(저장)전단탄성계수와 허수(손실)전단탄성계수의 변화와 비율을 직관적으로 관찰할 수 있으며 복소점도 및 위상각의 변화도 즉각 알 수 있는 큰 장점과 유용성을 지닌다. 이러한 도시법을 주파수영역 페이지 표현

법(frequency domain phasor representation)이라 하고 이는 각 재료의 유변학적 지문(rheological fingerprint)과 같다 볼 수 있다.

일반적으로 복합레진의 점성은 레진 기질의 종류와 비율, filler 입자의 형태와 크기 및 양에 의해 크게 영향을 받으며 특히 filler 입자 사이의 interlocking 및 filler 입자와 기질 사이의 interfacial interaction 에 의해 좌우된다^{3,4)}.

복합레진의 점도 또는 응축성(condensibility)을 증가시키는 방법으로는 첫째, filler 함량을 증가시키는 방법이 있으나 이는 porosity 의 증가를 가져올 수 있으며 둘째, 거친 표면을 갖는 filler를 사용할 수 있고 셋째, incorporate glass fiber를 첨가시키는 방법이 있다^{3,4)}.

보통 filler의 양을 줄이면 점성이 감소되고 늘이면 점도가 증가될 것으로 생각되나 본 연구의 결과 filler량과 점도 사이에 직접적이고 선형적인 상호관련성은 관찰되지 않았고 단지 약한 양의 상관관계를 보였다(R = 0.642), 즉 복합레진의 점도는 보다 많은 여러 요소에 의해 결정된다 하겠다. 본 연구에서는 상관관계 분석시 filler weight %만을 사용하지 않고 filler volume %를 기준으로 하였는 바 그 이유는 점성은 filler 입자의 밀도가 아닌 입자의 표면 또는 응집체에 작용하는 hydrodynamic force에 크게 의존하기 때문이다. 본 연구의 결과에서도 vol %를 기준으로 하였을 시 R=0.642로 wt %를 이용하여 계산된 R=0.590 보다 약간 더 큰 상관관계를 보인 것을 알 수 있다. 본 실험에서 측정된 filler volume %가 다른 연구자²⁾나 제조회사가 제시한 수치보다 작게 나타난 바 그 이유는 본 연구에서는 아세톤을 이용하여 레진기질을 녹여낸 후 아세톤 액에 침전시켜 filler 사이의 공극을 완전히 배제한 상태의 절대 부피비를 구하였고 다른 연구자나 제조회사의 경우는 ashing 후의 응집되고 그을린 filler를 사용하여 측정하였거나 공극을 완전히 배제하지 않는 겉보기 밀도를 이용한 부피비를 표기한 때문으로 사료된다. 일반적으로는 다른 모든 조건이 동일할 경우 percent volume fraction 이 클수록 점도가 증가하게 되며 같은 volume %에서는 입자의 모양이 구형(spheres) < 격자(grains) < 판상(plates) < 막대형(rods) 의 순으로 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 glass fiber 와 같은 막대형 입자의 경우 길이/지름의 비율이 클수록 점도가 커진다⁶⁾.

일반적으로 임상에서 부딪히는 모든 경우의 수복에 대하여 적용할 수 있는 술식과 조작성을 뒷받침 할 수 있는 재료는 드물다. 게다가 편리한 조작성과 뛰어난 중합 후 물성을 다 같이 지닌 이상적인 재료는 더더욱 존재하지 않는다. 즉 모든 좋은점을 지닌 재료란 역설적으로 한가지도 탁월한 장점을 지니지 못했다 할 수 있다. 따라서 임상가는 특정용도에는 그 용도에 가장 적절한 점성(조작성)과 중합후 물성을 고려하여 각 임상적 상황에 맞는 재료를 사용하는 것이 최선의 방법이라 생각된다. 여러 연구자의 연구에 의하면 일

반적으로 유동성 레진은 기존의 hybrid 레진이나 응축성 레진에 비하여 중합 후 여러 기계적 성질이 떨어지는 것으로 밝혀지고 있다²⁾. 그러나 레진 적용시의 편리함이나 미세한 틈을 비집고 들어가는 탁월한 흐름성은 유동성 레진만이 지닌 장점이라 보여지며 큰 교합력을 받지 않는 작은 class I 와동이나 class V 와동, 접근이 어려운 class III 와동 및 금속 post와 결합한 core 형성에 편리하게 사용할 수 있는 재료라 여겨진다. 또한 응축성 레진의 물성 및 다져 넣을 수 있는 장점과 결합시켜 class II 와동의 경우 와동저의 미세한 point angle이나 line angle 부위는 먼저 유동성 레진의 흐름성을 이용하여 적용 이장한 후 응축성 레진으로 교합면을 마무리하면 중합 후 기계적 성질도 뛰어나며 유동성 및 응축성 레진의 뛰어난 조작성을 취할 수 있는 연합술식이 될 수 있을 것으로 사료된다^{3,4)}. 이 경우 두 종류 레진 경계면 사이의 접착력이나 교합력에 의한 변형시 응력의 분포 및 온도 변화시 열 팽창계수의 차이에 의한 와동내에서 수복물의 뒤튤림과 같은 주제에 관한 심도있는 연구가 필요하다 하겠다.

유변학에 대한 연구는 크게 변형과 흐름이란 현상을 관측하여(겉보기 점탄성의 측정과 같은) 그 결과를 해석하는 현상론적, 거시적 접근방법과 이러한 현상을 나타내는 물질의 역학적 특성을(점탄성을) 나타내는 요인들에 대한 물질구조(내부구조, 분자구조)의 입장에서 해석하려는 분자론적, 현미경적, 미시적 접근 방법이 있는 바 본 연구에서는 거시적 접근에 제한을 두었다. 앞으로 본 연구의 결과를 가져 온 레진 기질을 구성하는 단량체의 종류 및 비율, 무기질 filler의 종류 및 형태와 양, 기질과 filler, filler와 filler 사이의 상호작용 및 유화제와 같은 소량 첨가물의 효과와 같은 여러 요인들에 대한 미시적 접근과 해석에 대한 연구가 행해져야 할 것으로 사료된다.

유동성 레진 및 응축성 레진의 중합률이나 중합 후 물성에 대한 연구도 꾸준히 행해져야 하겠고 또한 광중합시 레진의 점성이 중합속도에 끼치는 영향에 대한 동력학적인 연구가 행해져야 하겠다.

VI. 결 론

수복용 복합레진의 사용시 조작성과 가장 큰 관련이 있는 레진의 점성을 알아보기 위해 동적회전전단실험을 시행하여 유동성 레진과 응축성 레진 및 기존의 hybrid 레진의 점탄성 특성을 측정 비교하였고 이에 영향을 줄 수 있는 여러 요인 중 filler량과의 상호 관련성에 대하여 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동성 레진은 hybrid 레진에 비하여 복소점도 η^* 가 낮았고 제품별로 차이가 있었으며 응축성 레진은 hybrid 레진에 비하여 복소점도 η^* 가 높았으며 그 순서는 $\omega = 10\text{rad/s}$ 일 때 Surefil, Synergy compact, P-60, Z-

- 250, Z-100, Aelite flo, Tetric, Compoglass flow, Flow it, Revolution 이었다. 유동성 레진은 Z-100 과 비교하여 0.04~0.56의 상대적 점도를 나타냈고 응축성 레진인 Surefil은 30.4배의 상대적 점도를 보였다.
2. 유동성 레진의 저장탄성계수 G' 과 손실탄성계수 G'' 모두 hybrid 레진에 비하여 낮았고 응축성 레진은 높았다. Loss tangent($\tan \delta$)의 값은 제품별로 크게 달랐으며 주파수 증가에 따른 변화도 제품마다 고유의 거동을 나타냈다. 위상각 δ 는 $\omega = 10$ 일 때 $30.2 \sim 78.1^\circ$ 의 범위를 보였다.
 3. 모든 복합레진은 주파수 ω 가 증가함에 따라 점도는 감소하는 pseudoplastic한 성질을 나타냈다.
 4. 복소탄성계수 G^* 과 위상각 δ 를 주파수영역 페이지표현 (frequency domain phasor form) $G^*(\omega) = G^* e^{i\delta} = G^* \angle \delta$ 으로 나타냈고 복소평면상에서 주파수 변화에 따른 페이지의 궤적(locus)은 간결하게 각 제품별 고유의 점탄성 특성을 표현할 수 있는 유용한 기법이였다.
 5. Filler volume % 와 복합레진의 점도 사이에는 직접적인 선형적 상관관계는 관찰되지 않았으나 약한 양의 상관관계를 보였다($R=0.642$).

참 고 문 헌

1. Willems G, Lambrechts P, Braaem M, et al. : A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics. Dent Mater 8: 310-319, 1992.
2. Bayne SC, Thompson JY, Swift EJ, et al. : A characterization of first-generation flowable composites. JADA 129: 567-577, 1998.
3. Leinfelder KF, Prasad A : A new condensable composite for the restoration of posterior teeth. Dent Today 17(2): 112-6, 1998.
4. Leinfelder KF, Radz GM, Nash RW : A report on a new condensable composite resin. Compendium 19(3): 230-237, 1998.
5. Opdam NJM, Roeters JJM, Peters TCRB, et al. : Consistency of resin composites for posterior use. Dent Mater 12: 350-354, 1996.
6. Barnes HA, Hutton JF, Walters K : An introduction to rheology. Elsevier Science Publishing co. 1989.
7. 문탁진 : 유변학. 민음사. 1st edi. 7-80, 190-195, 1988.
8. 김상용 : 고분자물리학, 서울대학교출판부. 2nd edi. 7-26, 1994
9. Craig RG : Restorative dental materials. Saunders co. 10th edi. 77-83, 1993.
10. Duran RL, Powers JM, Craig RG : Viscoelastic and dynamic properties of soft liners and tissue conditioners. J Dent Res 58(8): 1801-1807, 1979.
11. Goldberg AJ : Viscoelastic properties of silicon, polysulfide, and polyether impression materials. J Dent Res 53(5): 1033-39, 1974.
12. Watt DC : Elastic moduli and visco-elastic relaxation. J Dent. 22: 154-158, 1994.
13. McCabe JF, Bowman AJ : The rheological properties of dental impression materials. Brit dent J. 151: 179, 1981.
14. Jacobsen PH, Whiting R, Richardson PCA : Viscosity of setting anterior restorative materials. Brit dent J. 143: 393, 1977.
15. Braden M : Viscosity and consistency of impression rubbers. J Dent Res 46(2): 429-433, 1967.
16. Noack MJ, Roulet JF, Bergmann P : A new method to lute tooth colored inlays with highly filled composite resins. J Den Res 70: 457 Abstr. No. 1528, 1991.
17. Ferracane JL, Moser JB, Greener EH : Rheology of composite restoratives. J Dent Res 60(9): 1678-85, 1981.
18. Meerbeek BV, Inokoshi S, Davidson CL, et al. : Dual cure luting composites - Part II: Clinically related properties. J Oral Rehab 21: 57-66, 1994