시효와 열순환 처리가 수복용 복합레진의 인장강도에 미치는 영향

전북대학교 치과대학 치과보존학교실 및 구강생체과학연구소

이미정·유미경·이광원

An Effect of Aging and Thermocycling on the Tensile Strength of Restorative Composite Resins

Mi-Jeong Lee, DDS, PhD., Mi-Kyung Yu, DDS, PhD., Kwang-Won Lee, DDS, PhD

Department of Conservative Dentistry & Institute for Oral Bioscience, School of Dentistry, Chonbuk National University

The purpose of this study was to evaluate effect of aging and thermocycling on the tensile strength of restorative composite resins. Eight commercially available light-cured restorative composites (Heliomolar: HM, Palfique Estelite: PE, Spectrum: ST, UniFil-F: UF, Z100: ZH, Clearfil AP-X: CA, P60: PS, and Palfique Toughwell: PT) were selected as experimental materials. Rectangular-shaped tensile test specimens were fabricated in a teflon mold giving 5 ㎜ in gauge length and 2 ㎜ in thickness. All samples were stored in distilled water at 37℃ for 100 days. Every 10 days, specimens were thermocycled for 1,000 cycles with 15 seconds of dwelling time in each 5℃ and 55℃ water baths. Tensile testing was carried out at a crosshead speed of 0.5 ㎜/min and fracture surfaces were observed with a scanning electron microscope.

The results obtained were summarized as follows;

1. The strength degradation of thermocycled group was severer than that of the aged group ($P<0.01$).
2. The tensile strength of the CA and ST groups were significantly higher than that of other groups after thermocycling treatment ($P<0.05$).
3. Fracture surfaces showed that the composite resin failure developed along the matrix and the filler/resin interface region.

Key words : Aging, Thermocycling, Tensile Strength, Composite Resins

시효와 열순환 처리가 수복용 복합레진의 인장강도에 미치는 영향

전북대학교 치과대학 치과보존학교실 및 구강생체과학연구소

이미정·유미경·이광원

Ⅰ. 서 론

광중합형 수복용 복합레진은 심미성이 우수하고 조작이 간편하기 때문에 임상에서 널리 적용되고 있지만, 구강 내에서는 교합 및 저작과정에서 높은 응력과 반복 응력이 작용하고, 음식물에 의한 온도 변화와 수분, 타액과 박테리아 등의 복합적 요인이 수복재의 내구성에 영향을 미치므로, 임상적 상황을 예측하기 위해 종종 수중에서의 시효나 열순환 처리가 수복재의 물성에 미치는 영향에 관한 평가가 빈번하게 이루어져 왔다. Söderholm[1] 과 Indrani 등[2]은 수분흡수로 인한 기질 레진의 가소성 증가 및 실란결합의 가수분해로 인해 레진과 필러 계면에서의 결합이 약화되어 강도의 저하가 일어난다고 하였고, Bae 등[3]은 시효와 열순환 처리 과정에서 일어난 표면층의 열화(degradation)가 강도에 크게 영향을 미친다고 하였다. Arikawa 등[4]은 수중에서 일어난 실란 결합의 가수분해로 인해 수중침적 기간이 길어질수록 굽힘강도의 저하가 더 크게 나타난다고 하였고, Yamamoto와 Takahashi[5]는 수중에서의 시효처리로 인한 강도 저하는 hybrid 형에 비해 microfiller 형에서 더 크게 나타난다고 하였다. Asmussen과 Jörgensen[6] 그리고 Roulet[7]는 저작에 의한 반복응력의 작용으로 복합레진의 표면층에서 피로 균열이 생성될 경우 표면층 구조가 약화되어 강도와 내마모성이 저하될 수 있다고 하였고, Drummond[8]는 응력부식으로 인한 미세균열의 진전과 균열선단에서의 수분확산 등으로 인해 강도의 저하가 일어날 수 있다고 하였다.

취성재료는 인장시험이 용이하지 않으므로, 파절강도를 측정하기 위해 압축시험이 널리 적용되고 있지만, 파절은 주로 인장응력을 받는 결합부에서 균열진전으로 일어나므로 압축이나 굽힘에 의해 시편에 인장응력을 발생시켜 파절을 유도하는 방법이 빈번하게 적용되고 있다. 간접인장시험법(diametral tensile test)은 원주상 시편의 압축에 의해 간접적으로 인장강도를 측정하는 방법이지만, 파절이 일어나기 전에 시편 형상이 변화하는 경우에는 파절면에 복합응력이 형성되므로 정확한 인장강도의 측정이 어렵게 된다. 석고, 시멘트 및 세라믹 재료 등 취성이 큰 재료의 경우에는 간단하게 적용할 수 있지만, 복합레진의 경우에는 기질 레진이 갖는 가소성으로 인해 시편의 압축과정에서 변형이 일어날 수 있는 문제점이 있다. 굽힘시험법은 굽힘에 의해 시편에 인장응력을 발생시켜 파절을 유도할 수 있지만, 인장시험과는 달리 시편의 인장면 중앙부에 최대응력이 발생하므로 가장 큰 결함부에서 파절이 일어나지 못하는 단점이 있다. 이러한 문제점으로 인해 최근 몇몇 연구에서는 소형 인장시편을 이용한 인장강도 측정법이 적용되어 왔다[5,9,10].

본 연구에서는 구강환경 조건이 광중합형 수복용 복합레진의 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 37℃의 증류수 중에서 100일 동안의 시효처리 및 시효처리 중에 10일 간격으로 5℃와 55℃의 수조에서 열순환처리를 시행한 다음 이들 환경적 변화가 인장강도에 미치는 영향에 관하여 조사하였다.

Ⅱ. 연구재료 및 방법

1. 연구재료

본 연구에서는 전치부용의 Heliomolar와 전·구치겸용의 Palpique Estelite, Spectrum, UniFil F 및 Z100, 구치부용의 Clearfil AP-X, P60 및 Palpique Toughwell 등 8종의 광중합형 수복용 복합레진을 대상으로 하였다(Table 1).

2. 연구방법

인장시편을 제작하기 위해 평행부의 단면적이 1.5×2.0㎟이고 측정부 길이가 5㎜인 테플론으로 제작한 몰드를 이용하였다(Fig. 1). 몰드 내에 복합레진 페이스트를 약간 넘치도록 채우고 폴리에스테르 필름을 개재한 상태에서 유리판에 압력을 가하여 여분의 레진을 제거하였으며, 이어서 광조사기(Optilux, Kerr Co, USA)로 상면과 하면에서 각각 20초씩 총 40초간 광중합하여 각 군 공히 총 40개씩의 시편을 제작하였다(Fig. 2). 구강환경과 유사한 액상의 조건에서의 시효와 열순환 처리가 복합레진의 인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 준비한 시편을 3개의 군으로 분류하였다. 1군은 23℃의 건조기에서 10일간 건조처리 하였고, 2군은 37℃의 증류수 중에서 100일간 침적처리 하였으며, 3군은 100일간의 수중침적 중에 5℃와 55℃의 수중에서

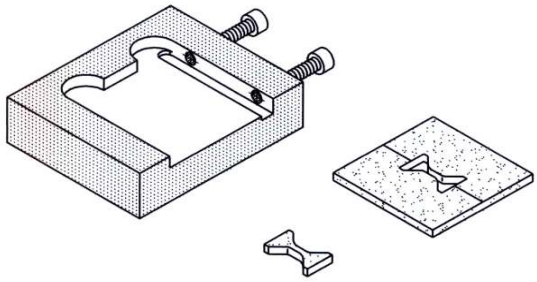

Fig. 1. Schematic diagram of mold and device to fabricate the specimen.

Table 1. Materials used in this study

Material	Code	Composition	Filler loading (vol%/wt%)	Manufacturer
Heliomolar	HM	collodial silica Bis-GMA, UDMA, DCDMA	46/66.7	Vivadent, Schann Liechtenstein
Palpique Estelite	PE	zirconia silica Bis-GMA, TEGDMA	52/67	Tokuyama Soda Japan
Spectrum	ST	barium silicate glass/Bis-GMA, Bis-EMA, TEGDMA	57/77	Dentsply, USA
UniFil F	UF	silicate glass, silica microfiller UDMA, TEGDMA	-/75	GC, Japan
Z100	ZH	zirconia silica Bis-GMA, TEGDMA	66.0/84.5	3M, USA
Clearfil AP-X	CA	barium silicate glass Bis-GMA, TEGDMA	70/85.5	Kuraray, Japan
P60	PS	zirconia silica/Bis-GMA, UDMA, Bis-EMA	61/-	3M, USA
Palpique Toughwell	PT	zirconia silica/UDMA, Bis-MPEPP, TEGDMA	-/83	Tokuyama Soda Japan

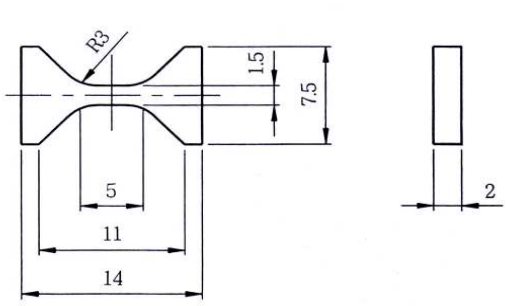

Fig. 2. Dimensions of specimen (㎜).



Fig. 3. Tensile testing device.

10일 간격으로 1000회씩 총 10,000회의 열순환처리를 시행하였다. 열순환 처리는 5℃에서 유지되는 냉동순환수조(Jeio Tech Co, Ltd, RW-3025G)와 55℃에서 유지되는 외부순환수조(Jeio Tech Co, Ltd, WBC-3030)로 구성된 순환장치를 이용하여 수중침적시간 15초와 계류시간 15초의 조건에서 실시하였다. 인장시험은 재료시험기(Instron Co., Model 4201)에 인장용 지그를 장착한 다음 crosshead 0.5㎜/min에서 실시(Fig. 3)하였으며, 파절 양상을 평가하기 위해 파면을 주사전자현미경(S-4000, Hitachi Co, Japan)으로 관찰하였다.

측정된 결과는 시험재료 사이의 차이를 평가하기 위해 분산분석에 의해 통계적 유의성을 검증한 다음, 각 군간의 차이를 Tukey 다중범위검증법에 의해 비교하였다.

재료 내의 결함이 강도에 민감하게 영향을 미치는 취성재료에서는 파절강도의 분석 시에 통계적 분석이 요구되며, 일반적으로 최약환설(weakest link theory)로부터 유도된 Weibull 통계가 널리 적용되고 있다(Wakamatsu 등, 1990). 인장강도 σ의 재료가 이보다 낮은 응력에서 파괴를 일으킬 확률을 P_f라 하면 인장강도와 파괴확률 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$P_f = 1 - \exp[-(\sigma/\sigma_o)^m] \quad (1)$$

여기에서, m은 Weibull 계수, σ_o는 특성강도(characteristic strength) 이다. 식 (1)을 대수변환하여 ln ln[1/(1-P_f)]와 lnσ의 관계로 표시하면 식 (2)가 얻어진다.

$$\ln\ln\frac{1}{1-P_f} = m\ln\sigma - m\ln\sigma_o \quad (2)$$

측정된 n개의 강도 데이터를 오름차순으로 배열하여 순위를 정하고 파괴확률을 계산하기 위해 식(3)에 표시한 median rank 법을 적용하면 i 번째 순위의 강도에 대한 파괴확률 P_i를 계산할 수 있다.

$$P_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (3)$$

회귀분석에 의해 ln ln[1/(1-P_f)]와 lnσ 사이의 상관관계를 구하면 Weibull 계수 m과 특성강도 σ_o 값을 계산할 수 있다.

Ⅲ. 결 과

Fig. 4-6은 건조처리군, 시효처리군 및 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 Weibull 분포 선도이고, Table 2-4는 그의 분포특성을 표시하는 값들을 표시한 것이다. Weibull 분포는 single mode에 잘 일치하는 경향을 보였다(r^2>0.779). 특성강도는 모든 시험군에서 건조처리군, 시효처리군 및 열순환처리군의 순으로 순차적으로 낮은 값을 보였다. Weibull 계수는 PS 군에서 가장 높은 값을 보였고, 시효 및 열순환처리를 거치면서 CA 군에서만 건조처리군에 비해 증가를 보였을 뿐 모든 군에서 건조처리군, 시효처리군 및 열순환처리군의 순으로 Weibull 계수가 낮게 나타났다.

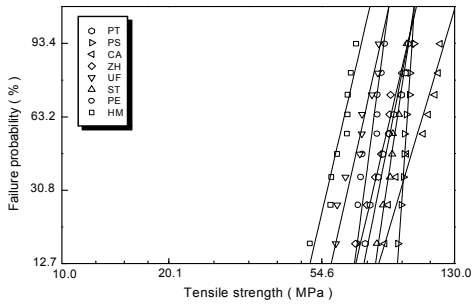

Fig. 4. Weibull plot of light-cured composite resins after drying for 10 days.

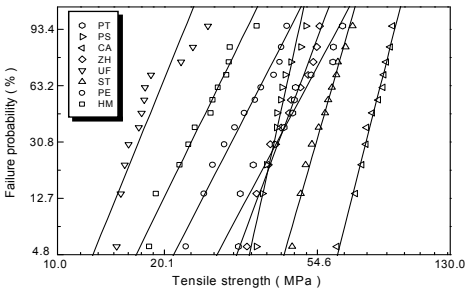

Fig. 6. Weibull plot of light-cured composite resins after aging for 100 days at 37℃ and thermocycling of 10000 cycles between 5℃ and 55℃.

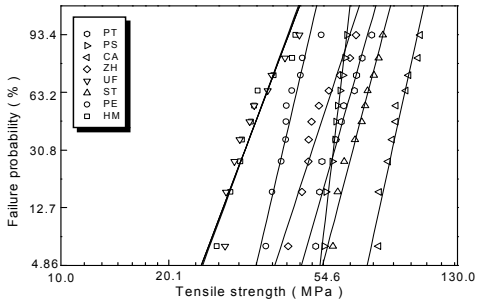

Fig. 5. Weibull plot of light-cured composite resins after aging for 100 days at 37℃ distilled water.

Fig. 7은 건조처리군, 시효처리군 및 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 평균 인장강도의 변화를 도시한 것으로, 각 군 상호간에 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($P<0.01$). 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 인장강도는 CA 군에서 78.7 MPa로서 가장 크고 UF 군에서 18.5 MPa로서 가장 낮은 값을 보였으며, Tukey test에 의해 분석 결과, CA 군, ST 군, PT 군 및 ZH 군과 PE군, HM군 및 UF군, PS군과 HM군 및 UF군, PE군과 UF군 사이에서 상호간에 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 ($P<0.05$).

Table 2. Weibull analysis data after drying for 10 days

Para \ Group	HM	PE	ST	UF	ZH	CA	PS	PT
$\sigma_f(0.5)$	60.7	75.1	87.1	69.3	82.0	100.2	94.2	84.1
m	8.43	13.57	13.56	8.83	8.46	6.58	30.2	9.88
σ_o	63.4	77.2	89.5	72.2	85.6	105.9	95.4	87.3
r^2	0.959	0.862	0.983	0.944	0.943	0.929	0.947	0.877
$\sigma_{f(avg)}$	60.0	74.4	86.4	68.5	81.1	99.0	93.8	83.2
cv	0.121	0.077	0.080	0.121	0.128	0.161	0.036	0.109
N	10	10	10	10	10	10	10	10

$\sigma_f(0.5)$=median fracture strength in MPa; m=Weibull moudulus; σ_0= Characteristic strength in MPa; r^2=Weibull distribution regression coefficient squared; $\sigma_{f(avg)}$= Mean fracture strength in MPa; cv=coefficient of variation; N=number of samples.

Table 3. Weibull analysis data after aging for 100 days at 37℃ distilled water

Para \ Group	HM	PE	ST	UF	ZH	CA	PS	PT
$\sigma_f(0.5)$	36.0	44.5	70.3	36.0	55.0	89.9	59.8	62.9
m	6.47	10.21	9.88	6.43	7.47	11.24	22.47	8.70
σ_o	38.1	46.1	73.0	38.1	57.8	92.9	60.8	65.6
r^2	0.870	0.851	0.961	0.852	0.878	0.902	0.969	0.919
$\sigma_{f(avg)}$	35.6	44.0	69.6	35.6	54.4	89.0	59.5	62.2
cv	0.169	0.107	0.109	0.168	0.145	0.096	0.048	0.123
N	10	10	10	10	10	10	10	10

Table 4. Weibull analysis data after aging for 100 days at 37℃ and thermocycling of 10000 cycles between 5℃ and 55℃

Para \ Group	HM	PE	ST	UF	ZH	CA	PS	PT
$\sigma_f(0.5)$	26.9	35.1	58.0	18.8	46.2	79.6	43.3	47.6
m	5.36	5.13	9.24	5.21	7.06	10.54	11.45	4.75
σ_o	28.8	37.7	60.3	20.2	48.7	82.4	44.7	51.4
r^2	0.941	0.952	0.976	0.779	0.970	0.984	0.906	0.902
$\sigma_{f(avg)}$	26.6	34.8	57.3	18.5	45.7	78.7	42.9	47.1
cv	0.201	0.209	0.120	0.207	0.154	0.103	0.096	0.227
N	12	12	12	12	12	12	12	12

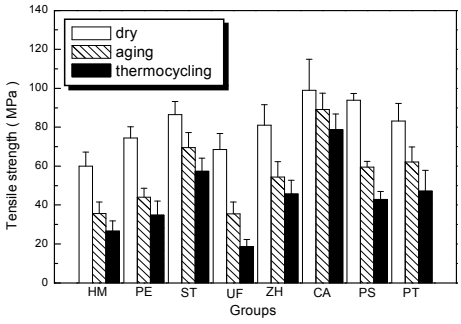

Fig. 7. Comparison of tensile strength of light-cured composite resins.

Fig. 8은 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 인장시험 후의 파절면에 대한 주사전자현미경 사진이다. 파면에서는 균열이 레진과 필러의 계면 및 기질 레진을 가로질러 전파하는 양상을 보였다. 혼합형 필러를 함유하는 상대적으로 인장강도가 높은 전구치 겸용 및 구치부용의 복합레진 군(CA, ST, ZH 및 PT 군)에서는 노출된 필러의 표면에 레진이 치밀하게 부착되어 있는 양상을 보였다. 상대적으로 인장강도가 낮은 유리성 필러를 함유하는 UF 군에서는 부분적으로 필러 표면의 노출이 관찰되었으며, 또한 collodial silica 필러를 함유하는 전치부용의 HM 군에서는 균열진전 과정에서 기중합된 입자(prepolymerized particle)의 필러가 부분적으로 탈락된 양상이 관찰되었다.

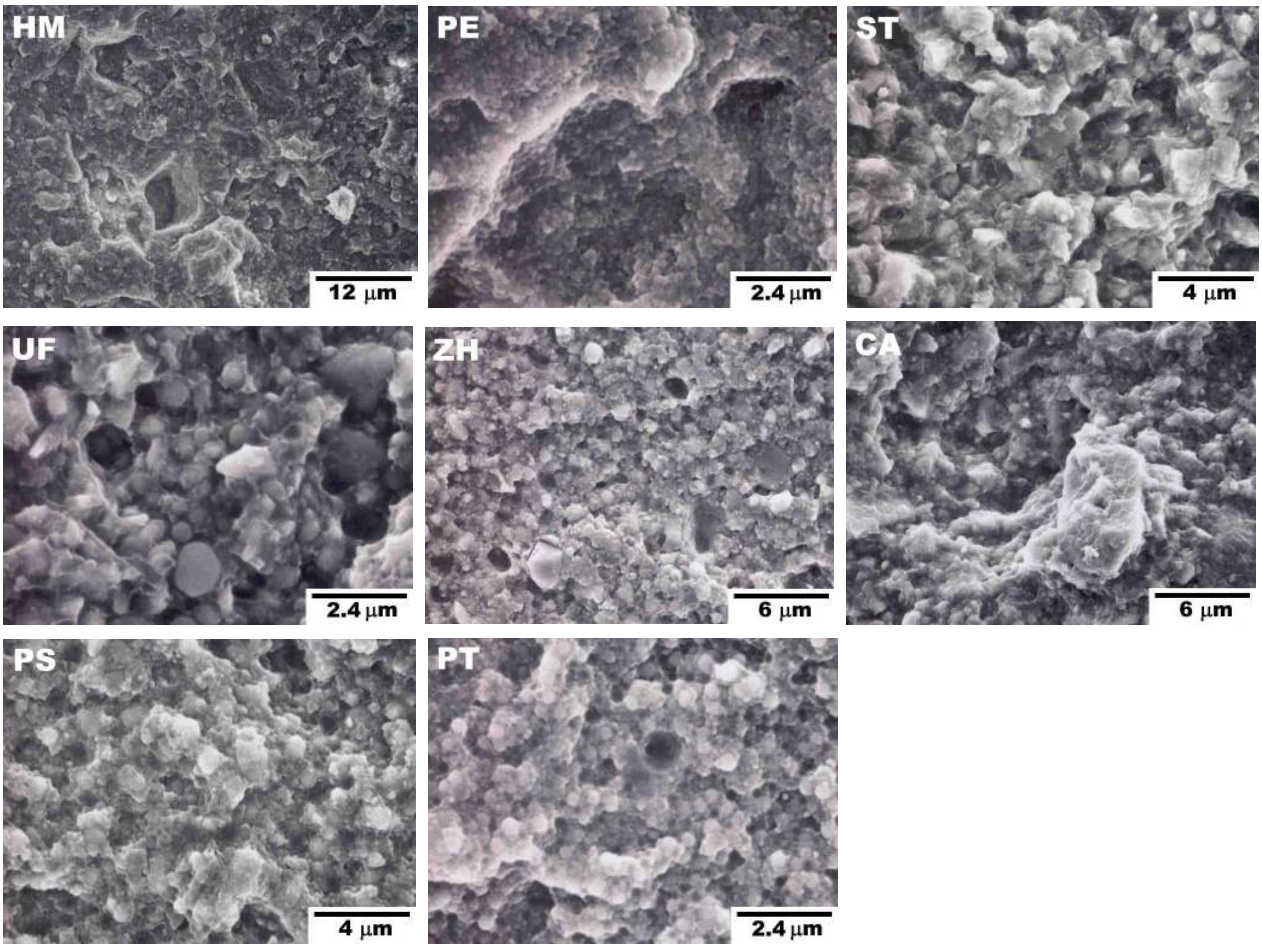

Fig. 8. Scanning electron micrographs of fracture surfaces after aging for 100 days at 37℃ and thermocycling of 10000 cycles between 5℃ and 55℃.

Ⅳ. 고 찰

복합레진은 기질 레진과 필러 및 이들 두 상을 결합시키는 결합제로 구성되며, 필러의 표면처리와 배합하는 기술의 진보로 혼합형 복합레진이 도입되면서 전치부는 물론 구치부 수복용 재료로서 그의 사용이 크게 증가하고 있다.

복합레진에서 필러의 배합량이 증가할 경우 압축강도와 경도 등의 기계적 성질이 개선되지만, 반면 취성이 증가하므로 인장강도의 감소를 나타낸다. 복합레진이 구치부 수복용 재료로서 내구성을 갖기 위해서는 높은 저작력에 견딜 수 있어야 하며, 특히 수복물 변연부에 높은 인장응력이 발생하는 점을 감안할 때 인장강도에 관한 충분한 검토가 요구된다[5,9,10].

취성재료에 외력이 작용할 때 파절은 가장 취약한 결함부에 인장응력이 집중됨에 따라 균열이 진전하여 일어나지만, 수복물의 표면과 내부에는 다양한 크기의 결함이 존재하여 그의 크기를 표준화하는 것이 어렵기 때문에 통계적 분석이 요구되며, 일반적으로 파절강도가 재료의 균질성의 함수로 표시되는 Weibull 통계가 널리 적용되고 있다. Weibull 통계를 적용할 경우 파괴확률은 분포의 특성을 표시하는 Weibull 계수 m과 특성강도 σ_o의 영향이 크게 나타난다. 특성강도가 클수록 파절강도가 높게 되고, 파절강도가 동일한 경우에도 Weibull 계수 m 값이 클수록 강도의 분산이 작아지게 되어 평균치보다 낮은 응력 조건에서 파괴가 일어날 확률이 감소하게 된다[11].

본 연구에서는 구강환경 조건이 광중합형 수복용 콤포짓트 레진의 인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 37℃의 수조에서 100일 동안의 시효처리

및 시효처리 중에 5℃와 55℃의 수조에서 10일 간격으로 1000회씩 10000회의 열순환처리를 시행한 다음 이들 환경적 변화가 인장강도에 미치는 영향에 관하여 조사하였다. 건조처리군, 시효처리군 및 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 인장강도에 대한 Weibull 통계 분석 결과, 특성강도가 모든 시험군에서 건조처리군, 시효처리군 및 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 순으로 순차적으로 감소를 나타냈을 뿐만 아니라 Weibull 계수 또한 CA 군을 제외한 모든 군에서 유사한 감소 양상을 나타내어 구강환경 조건에서 일어날 수 있는 시효와 열충격(thermal shock)이 복합레진의 강도에 영향을 미칠 수 있음을 보여주었다[3]. CA 군에서는 시효와 열순환처리 후 Weibull 계수가 증가하여 건조처리군에 비해 높은 값을 보였는데, 이는 기질 레진과 필러 사이의 결합력과 기질 레진이 갖는 강도의 영향이 시효와 열순환 처리 과정에서 일어난 수분흡수 및 열충격으로 생성된 결함의 영향보다 더 크게 작용하였기 때문으로 생각된다.

복합레진의 인장강도는 구강환경 조건에서 수분흡수로 인한 기질 레진의 가소성 증가, 수분에 의한 실란결합의 가수분해[1,2,12,13], 미중합 레진의 중합수축으로 인한 레진과 필러 계면의 내부응력 증가[14,15] 및 수분에 의한 필러와 레진 계면의 응력부식[8,16] 등 복합적 요인으로 변화를 보일 수 있다. 본 연구에서 광중합형 수복용 복합레진의 인장강도를 비교한 결과, 건조처리군, 시효처리군 및 시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 순으로 인장강도가 낮게 나타났다(P<0.01). 시효처리로 인한 강도의 저하는 기질 레진의 수분흡수로 인한 가소성의 증가와 실란결합의 가수분해의 영향 때문으로 생각된다. 시효처리군보다 시효처리중에 열순환처리를 시행한 군에서 더 큰 인장강도의 감소를 보이는 것은 열순환처리가 수중에서 이루어지므로 수중침적에 의한 영향 이외에도 반복 열충격이 가해지는 동안에 일어난 미중합 레진의 중합수축으로 인한 필러와 레진 계면에서의 내부응력 증가와 표면층 레진의 열화, 레진과 필러의 계면에서의 응력부식 및 계면에 생성된 미세균열부로의 수분확산 등 복합적 요인이 작용하였기 때문으로 생각된다.

시효처리 중에 열순환처리를 시행한 군의 인장강도는 혼합형 필러를 함유하는 전구치 겸용 및 구치부용 복합레진 군(CA, ST, ZH 및 PT 군)에서 상대적으로 높게 나타났으며, 특히 CA 군에서 높은 인장강도를 보였는데, 이는 주사전자현미경 관찰로부터 미루어 생각할 때 고밀도로 분산된 필러에 의해 일어난 균열의 굴곡 이외에도 상대적으로 큰 필러에 의한 crack bridging으로 균열의 진전이 억제되었기 때문으로 생각된다. UF 군이 상대적으로 낮은 강도를 보인 이유는 이온유리성 분말을 필러를 함유하고 있으므로 시효와 열순환처리가 이루어지는 과정에서 레진과 필러 사이의 결합력이 저하되었기 때문으로 생각된다. 전치부용 복합레진 군이 전구치 겸용 및 구치부용 복합레진 군에 비해 열순환처리 후 상대적으로 낮은 인장강도를 보이고 있는데, 이는 미세 필러를 함유하여 파절에 대해 상대적으로 낮은 저항성을 보였기 때문으로 생각된다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 구강환경 조건이 광중합형 수복용 복합레진의 인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 건조처리, 37℃의 수조에서 100일 동안의 시효처리 및 시효처리 중에 5℃와 55℃의 수조에서 10일 간격으로 1000회씩 10000회의 열순환처리를 시행한 다음 이들 환경적 변화가 인장강도에 미치는 영향에 관하여 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강도의 저하는 시효처리군에 비해 열순환처리군에서 더 심하게 나타났다(P<0.01).
2. 열순환처리 후 CA 군과 ST 군의 인장강도는 나머지 시험군에 비해 유의하게 높은 값을 보였다(P<0.05).
3. 파면에서는 균열이 레진과 필러의 계면 및 기질 레진을 가로질러 전파하는 양상을 보였다.

참 고 문 헌

1. Söderholm KJ. Degradation of glass filler in experimental composites. *J Dent Res* 60:1867-1875, 1981.
2. Indrani DJ, Cook WD, Televantos F, Tyas MJ, Harcout JK. Fracture toughness of water-aged composite restorative materials. *Dent Mater* 11:201-207, 1995.
3. Bae TS, Kim TJ, Kim HS. Effect of Immersion in water

and thermal cycling on the mechanical properties of light-cured composite resins. *J KOSOMBE* 17:327-335, 1996.
4. Arikawa H, Kuwahata H, Seki H, Kanie T, FujiiK, Inoue K. Deterioration of Mechanical properties of composite resins. *Dent Mater J* 14:78-83, 1995.
5. Yamamoto M, Takahashi. Tensile fatigue strength of light cure composite resins for posterior teeth. *Dent Mater J* 14:175-184, 1995.
6. Asmussen E, Jörgensen KD. Fatigue strength of some resinous materials. *J Dent Res* 90:76-79, 1982.
7. Roulet JF. Degradation of dental polymers : 1st ed New York : Karger, pp60-160, 1987.
8. Drummond JL. Cyclic fatigue of composite restorative materials. *J Oral Rehabil* 16:509-520, 1989.
9. Miyazaki T, Fujisima A, Suzuki E, Miyaji T. Tensile strength of posterior restorative composite resins. *J J Dent Mater J* 5:685-693, 1986.
10. Fujisima A, Miyazaki T, Kuneshita H, Suzuki E, Miyaji T. The direct tensile test of composite resins using the small specimen -Effect of the preparation of specimen, the size of specimen and the testing condition on the tensile properties- *J J Dent Mater* 9:728-733, 1990.
11. Ban S, Haserawa J, Anusavice KJ. Effect of loading conditions on bi-axial flexure strength of dental cements. *Dent Mater* 8:100-104, 1992.
12. Chen TM, Brauer GM. Solvent effects on bonding organosilane to silica surfaces. *J Dent Res* 61:1439-1443, 1982.
13. Kamel IL, Neri GA. Radiation modified filler for dental restorative composities. *J Math Phys Chem* 14:603-611, 1979.
14. Mair LH, Vowel R. The effect of thermal cycling on the fracture toughness of seven composite restorative materials. *Dent Mater* 5:23-26, 1989.
15. Troung VT, Tyas MJ. Prediction of in vivo wear in posterior composite resins : A fracture mechanics approach. *Dent Mater* 4:318-327, 1988.
16. Bascom WD. The surface chemistry of moisture induced composite failure. In : Interface chemistry in polymer Matrix Composites. vol 6(ed Pluddenmann EP), Academic Press, New York 79, 1974.

Correspondence to: Dr. Kwang-Won Lee, Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Chonbuk National University, 634-18, Geumam-dong, Chonju, Chonbuk, 561-712, Korea, E-mail: mkyou102@hanmail.net, Tel: 82-63-250-2119, Fax: 82-63-250-2129