

와동 형태와 충전 방법에 따른 Class V 복합 레진 수복치의 유한요소법적 응력 분석

손윤희 · 조병훈 · 엄정문

서울대학교 치과대학 치과보존학교실

ABSTRACT

FINITE ELEMENT STRESS ANALYSIS OF CLASS V COMPOSITE RESIN RESTORATION SUBJECTED TO CAVITY FORMS AND PLACEMENT METHODS

Yoon-Hee Son, Byeong-Hoon Cho, Chung-Moon Um

Dept. of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Seoul National University

Most of cervical abrasion and erosion lesions show gingival margin where the cavosurface angle is on cementum or dentin. Composite resin restoration of cervical lesion shrink toward enamel margin due to polymerization contraction. This shrinkage has clinical problem such as microleakage and secondary caries. Several methods to diminish contraction stress of composite resin restoration, such as modifying cavity form and building up restorations in several increments have been attempted. The purpose of this study was to compare polymerization contraction stress of composite resin in Class V cavity subjected to cavity forms and placement methods.

In this study, finite element model of 5 types of Class V cavity was developed on computer tomogram of maxillary central incisor. The types are : 1) Box cavity 2) Box cavity with incisal bevel 3) V shape cavity 4) V shape cavity with incisal bevel 5) Saucer shape cavity. The placement methods are 1) Incisal first oblique incremental curing 2) Bulk curing. An FEM based program for light activated polymerization is not available. For simulation of curing dynamics, time dependent transient thermal conduction analysis was conducted on each cavity and each placement method. For simulation of polymerization shrinkage, thermal stress analysis was performed with each cavity and each placement method. The time-temperature dependent volume shrinkage rate, elastic modulus, and Poisson's ratio were determined in thermal conduction data.

The results were as follows :

1. With all five Class V cavities, the highest Von Mises stress at the composite-tooth interface occurred at gingival margin.
2. With box cavity, V shape cavity and saucer cavity, Von Mises stress at gingival margin of V shape cavity was lower than the others. And that of box cavity was lower than that of saucer cavity.
3. Preparing bevel at incisal cavosurface margin decreased the rate of stress development in early polymerization stage.
4. Preparing bevel at incisal cavosurface margin of V shape cavity increased the Von Mises stress at gingival margin, but decreased at incisal margin.

※ 본 연구는 1999년도 보건복지부 보건의료기술연구개발사업 (HMP-99-E 10-0003)의 지원에 의한 결과임.

5. At incisal margin, stress development by bulk curing method was rapid at early stage. Stress development by first increment of incremental curing method was also rapid but lower than that by bulk curing method, however after second increment curing final stress was the same for two placement methods.
6. At gingival margin, stress development by incremental curing method was suddenly rapid at early stage of second increment curing, but final stress was the same for two placement methods.

Key words : Polymerization shrinkage stress, Cavity forms, Placement methods

I. 서 론

수복치과의 많은 영역에서 사용하고 있는 복합 레진은 최근의 기술적인 발전으로 물성과 심미성이 증진되었으나 중합 수축과 관련된 문제점, 불완전한 중합, 수분 흡수 등의 단점을 가지고 있다. 복합 레진의 물리적 성질은 단량체의 조성, filler의 함량, 중합률 등의 영향을 받는다. 복합 레진의 중합 수축율은 중합에 의해 만들어지는 공유결합의 수와 단량체의 분자량과 관련이 있으며, 복합 레진은 분자량이 큰 BIS-GMA를 단량체로 할 때 중합 수축을 줄일 수 있다. 그러나 BIS-GMA는 점도가 높아 TEGDMA(triethylenglycoldimethacrylate)를 약 40~50% 첨가하여 점도를 조절하며, 이에 의해 중합률을 높일 수 있다¹⁾. 그러나 이에 의하여 1.5~3.0 Vol%의 중합 수축이 일어난다²⁾. Filler를 많이 첨가하여 중합 수축을 줄일 수 있지만 filler를 많이 첨가할수록 복합 레진의 점도를 조절하기 위해 낮은 분자량의 단량체를 첨가해야 하기 때문에 중합 수축은 피할 수 없다³⁾. 복합 레진의 중합 수축으로 발생하는 응력은 변연의 미세 누출을 일으키는 중요한 원인이 되며, 미세 누출에 의한 재차 우식은 복합 레진 실패의 이유 중의 하나이다⁴⁾. 또한 접착 강도가 중합 수축 응력을 견딜 만큼 충분히 강하다면 수복 치아의 변위를 일으켜 시술 후 과민증이나 법랑질의 미세 파절을 초래하기도 하며^{5,6)}, 변위에 의한 접착 계면의 잔류 응력은 접착 계면의 내구성을 저하시킨다⁷⁾. 또한 복합 레진의 미세 파절을 일으키기도 한다⁸⁾. 따라서 복합 레진으로 수복된 치아는 교합력에 의하여 변위가 일어나기 전에 잔류 응력을 가지고 있는 상태가 된다⁹⁾.

복합 레진의 중합 수축은 실험 방법에 따라 상이하게 보고되고 있으며^{8,10,11)}, 따라서 보고된 중합 수축 결과들을 상호 비교하기는 어렵다. 실제 와동에 접착된 복합 레진은 균일한 수축이 일어나지 않기 때문에 복합 레진 시편의 자유로운 체적 변화를 측정할 결과는 실제 와동 계면에서 발생하는 중합 수축 응력과 직접적 연관성이 적다¹²⁾. 복합 레진의 중합 과정 중 발생하는 응력의 크기와 방향은 와동의 형태에 따라 다르며, 중합 속도, 국소적 중합 수축의 분포, 그리

고 경계 조건(boundary condition: 즉 자유로운 중합 수축을 제한하는 요소)에 의해 큰 영향을 받는다. 와동에 접착된 복합 레진은 균일한 수축이 일어나지 않는다. 접착되지 않은 면의 복합 레진은 비교적 자유롭게 수축하지만, 와동과 접착된 면의 복합 레진은 자유로운 중합 수축을 방해받아 접착면에서는 수축 응력이 발생한다. 접착면에서 발생하는 중합 수축 응력은 비교적 자유로운 수축이 일어나는 접착되지 않은 면이나 중합이 덜 된 부위의 flow에 의하여 경감된다. 복합 레진의 flow는 와동의 형태에 따라 다르며, Feilzer 등¹³⁾은 C-factor라는 개념으로 수축 응력에 대한 와동 형태의 역할을 연구하였다. 그들의 보고에 의하면 와동벽이 견고하며, 수복물의 응집성 파괴가 없다면 복합 레진의 중합 수축 응력은 수복물의 탄성 변위와 비접착면에서의 flow에 의하여 경감된다. 따라서 접착면이 많을수록 flow에 의한 응력의 경감 효과가 저하되어 접착면에 더 강한 수축 응력이 발생한다고 하였으며, C-factor가 1보다 작아야 수축 응력에 견딜 수 있는 접착을 얻을 수 있으며, 1보다 클 경우 접착의 유지는 예측 불가능하다고 하였다. De Gee 등²⁾은 복합 레진의 중합 수축에 의하여 접착면에서는 13 - 17MPa 정도의 응력이 발생한다고 하였으며, Davidson 등¹⁴⁾은 광중합 복합 레진은 수축 응력을 극복할 정도의 상아질에 대한 최대 접착 강도에 도달하기 전에 빠르게 수축한다고 하였다. 따라서 flow에 의한 응력의 경감 효과는 자가 중합 레진에 비하여 효과가 적으며, 광중합 초기에 비교적 큰 수축 응력이 발생한다¹⁵⁾. Feilzer¹⁶⁾에 의하면 광중합 레진의 경우 광조사기에 가까운 부위의 빠른 수축 응력은 광조사기에서 멀리 떨어진 복합 레진의 flow에 의하여 어느 정도 경감된다고 하였다.

치경부의 마모 또는 침식은 영구치의 18% 정도에서 나타난다고 알려져 있다¹⁷⁾. 이러한 병소의 대부분은 치은 변연이상아질 또는 백악질로 이루어져 있으며, 이를 적절히 수복하는 목표는 최소의 치질 삭제를 하여 최상의 유지력과 최소의 미세 누출을 얻으며, 심미적으로 만족스러워야 한다. 그러나 복합 레진을 이용하여 수복하는 방법은 중합 수축에 의하여 보다 강한 접착 강도를 가진 법랑질 변연쪽으로 수

축되며, 이는 치은 변연에서의 미세 누출의 원인 중의 하나이다. Crim 등¹⁸⁾은 Class V 와동의 치은 변연에서 상아세관의 주행 방향은 접착 계면과 평행하며, 이는 미세 누출에 큰 영향을 줄 것이라고 하였다. 4세대 상아질 접착제를 포함한 현재의 어떤 상아질 접착제도 치은 변연에서의 미세 누출을 완전히 제거 할 수 없다¹⁹⁻²⁵⁾.

복합 레진의 중합 수축의 문제점을 극복하기 위한 여러 가지 방법이 보고되고 있다. 하나는 중합 수축력보다 큰 상아질에 대한 초기 접착 강도를 가지며, 법랑질에 대한 접착 강도와 동등한 상아질 접착제의 개발이다. 둘째는 복합 레진과 접착할 상아질 표면에 수축 응력을 흡수할 수 있는 탄성 계수가 낮은 이장제를 사용하는 것이다²⁶⁾. 최근의 상아질 접착제를 사용하면 접착제와 상아질 사이에 혼합층이 형성되며, 이 혼합층은 낮은 탄성계수를 갖는 이장제 역할을 한다²⁷⁾. 세 번째는 복합 레진의 수축 응력을 줄일 수 있도록 와동 형태를 변화시키거나²⁸⁾ 한 번에 중합하는 복합 레진의 체적을 줄이기 위한 분할충전법²⁸⁻³⁰⁾이다. 그러나 분할충전법은 변연의 gap은 줄여주지만 잔류 응력이 높아지거나 교두의 변위를 증가시킨다는 보고도 있다³¹⁾.

이러한 복합 레진의 중합 수축에 대한 연구는 많은 방법에 의하여 여러 학자에 의하여 시도되었으며, 와동의 형태 및 충전 방법에 따른 변연에서의 중합 수축 응력에 관하여 실험 방법에 따라 각각 상이한 결과를 보고하고 있다. 본 실험에서는 상아질을 치은 변연으로 한 치경부의 Class V 와동에서 와동 형태와 충전 방법에 따른 광중합 복합 레진의 중합 과정중의 동적인 중합 수축 응력을 유한요소법에 의하여 분석하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 유한요소모델의 제작

발거한 상악 중절치를 컴퓨터 단층촬영(Picker IQ, U. S. A.)에 의하여 0.5mm 간격의 횡단면과 종단면의 영상을 얻었으며, 이를 토대로 치관에서 치근까지의 유한요소모델을 제작하였다. 상악 중절치의 유한요소모델을 제작한 후 치관과 치근의 협축 일부를 잘라 협축의 치경부에 Box 형태, V형태, 이에 각각 bevel을 부여한 형태, 그리고 접시형태(saucer shape)의 Class V 와동을 형성하였다. 와동의 치은 변연 정중부는 백악-법랑 경계로 하였으며, 절단 변연은 치경부 1/3로 하였다. Box형태 와동과 V형태 와동, 그리고 접시형태 와동의 변연 위치는 동일하게 하였으며, 와동 깊이는 표면에서 2mm로 동일하게 설정하였다. Box형태 와동과 V형태 와동에 bevel을 부여한 와동은 절단벽의 상아-법랑 경계부에서 절단벽과 45° 각도를 이루도록 형성했다. 3차원 유한요소모델의 좌표계는 근심-원심방향을 X

축, 설측-협축방향을 Y축, 그리고 치경부-절단면 방향을 Z축으로 설정하였다. 중합 수축에 의한 응력을 분석하기 위하여 모델 협축을 제외한 상부, 하부, 근심, 원심, 후면은 변위를 방지하기 위하여 모든 방향에 대하여 고정된 것으로 하였다. 와동과 복합 레진의 경계는 수축 응력을 충분히 견딜 수 있도록 완전 결합으로 하였다. 와동의 유한요소모델 제작을 위한 전처리기(preprocessor)로는 SDRC (Structural Dynamics Research Corporation)의 I-DEAS program을 이용하였으며, hard ware는 IRIS 4D/310 VGX Work-station(Silicon Graphics Co.)을 사용하였다. 사용된 3차원 요소는 4개의 절점을 갖는 사면체로 구성하였다. 사용된 절점, 요소의 수는 Table 1과 같다.

2. 유한요소모델에서의 복합 레진 중합 과정 시뮬레이션

복합 레진의 광중합 과정 중 중합 속도, 국소적인 수축 속도의 분포, 물성의 변화 속도에 관하여 아직 명확하게 밝혀지지 않은 부분이 많으며, 또한 광원에 의한 중합을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소법은 아직까지 보고된 바 없다. 그러나 유한요소법은 열에 의한 어떤 물질의 수축과 팽창에 의한 응력을 분석할 수 있다. 따라서 중합에 의한 수축은 유한요소법에 있는 열에 의한 수축, 팽창 계산법을 응용할 수 있다. 유한요소법을 이용한 복합 레진의 중합 수축 응력 분석을 위해 Katona 등³²⁾과 Winkler 등³³⁾ 그리고 Versluis 등^{34,35)}은 인위적인 열 응력 분석법(thermal stress analogy)을 이용하였다. 그러나 이들의 방법은 중합 과정을 시간에 따른 수축과 물성의 변화가 없는 거의 정적인 과정으로 모방하거나^{32,33)}, 시간에 따른 수축과 탄성 계수의 변화가 있지만 표면과 기저부가 같은 속도로 중합되도록 한 방법³⁴⁾이다. 본 유한요소분석에서도 복합 레진의 중합 과정은 유한요소법의 열 응력 분석법을 이용했다. 그러나 본 실험에서는 표면에서부터 기저부까지의 모든 절점이 다른 중합 속도로 중합이 진행되도록 시간에 따른 수축률과 물성의 변화를 입력하였다. 이러한 방법에 의해 중합이 이루어지지 않은 심부의 레진과 중합이 느린 속도로 진행되고 있는 레진의 flow를 시뮬레이션(simulation)할 수 있다. 광중합 복합 레진의 중합 과정에 따른 물리적 성질의 변화와 수축 속도는 시간에 따른 중합률과 관련이 있다. 중합 과정은 복합 레진의 표면에 광원 대신 열원이 있다고 가정하고 열이 표면에서 복합 레진의 기저부까지 순차적으로 전도되도록 하였으며, 이에 의해 시간에 따른 각 절점의 열전도 과도 해석(thermal conduction transient analysis)을 수행하였다. 표면의 절점에 임의의 100℃의 열원이 있다고 가정하였으며, 기저부까지 0℃에서 100℃까지 열의 전도가 되도록 충분한 시간 동안 열전도 해석을 하였다. 중합 수축은 복합 레진의 체적의 변화이다. 따라서 복합 레진이 4% 수축하도록 임의의

열팽창계수를 음값(-0.0004/°C)으로 가정하여 각 절점의 열전도의 값과 열팽창 계수를 곱하여 시간에 따른 각 요소의 중합 수축을 계산하였다. 본 유한요소 응력 분석에 4%의 체적 수축을 사용한 이유는 충분한 수축에 의하여 수축 응력의 결과를 질적으로 평가하는데 유용하기 때문이다. 100°C의 온도와 -0.0004/°C의 열팽창계수는 임의의 수치로서 시간에 따른 각 요소의 수축은 아래의 식과 같이 각 절점에서의 시간에 따른 전도된 온도와 열팽창계수의 곱으로 얻어진다.

$$\text{Polymerization shrinkage (temperature dependent)} \\ \epsilon(\Delta T(t)) = \alpha \times \Delta T(t)$$

여기서 $\Delta T(t)$ 는 시간에 따른 각 절점의 열전도이며, α 는 인위적 열 팽창계수이다. 열 해석에서 얻어진 자료를 근거로 시간에 따른 각 절점의 열전도의 온도에 따라 아래의 식과 같이 elastic modulus와 Poisson's ratio를 중합전의 물성에서 완전 중합의 물성까지 입력하였다.

$$\text{Elastic modulus (temperature dependent)} \\ E(\Delta T(t)) = E_{\min} + \Delta T(t) \times (E_{\max} - E_{\min}) / 100$$

$$\text{Poisson's ratio (temperature dependent)} \\ \nu(\Delta T(t)) = \nu_{\text{pre}} + \Delta T(t) \times (\nu_{\text{post}} - \nu_{\text{pre}}) / 100$$

E_{\max} 는 완전 중합 후 복합 레진의 탄성 계수이며, E_{\min} 은 중합 전 복합 레진의 탄성 계수이다. ν_{post} 는 완전 중합후의 복합 레진의 Poisson's ratio이며, ν_{pre} 는 중합 전 복합 레진의 Poisson's ratio이다. 실험에 사용된 물성은 Table 2와 같다.

3. 외동 형태에 따른 중합 수축에 의한 응력 분석

각각의 외동과 충전 방법에서 시간에 따른 각 절점에서의 열전도 해석을 통하여 얻은 자료를 이용한 열전도에 따른

수축과, elastic modulus 그리고 Poisson's ratio의 변화에 의하여 중합 수축 응력은 생기기 시작하며, 열전도 해석과 중합 수축에 의한 응력 해석은 MSC/Nastran program (VERSION-69.0.1, THE MACNEAL-SCHWENDLER)을 이용하였다. 각각의 외동과 충전 방법에 따른 변연에서의 Von Mises stress의 시간에 따른 변화 자료를 얻었으며, 이를 graph화하여 외동 형태와 충전 방법에 따라 비교하였다.

4. 각 외동의 체적의 계산

각 외동마다 사면체의 요소의 모양과 수가 다르며, 결국 체적이 동일하지 않으므로 복합 레진의 체적의 계산을 하였으며, 이는 MATLAB software를 이용하였다.

5. 충전 방법에 따른 중합 수축에 의한 응력 분석

충전 방법은 절단 변연 축벽을 먼저 충전한 후 치은 변연 축벽을 나중에 충전하는 사면(oblique) 분할충전법과 한번에 충전 중합하는 방법 두 가지로 하였다. Box 형태 외동의 분할충전법은 절단 변연에서 치은치수선각까지의 연결선을 첫 번째 중합층으로 하였으며, 중합 과정의 시뮬레이션은 한번에 충전 중합하는 방법과 동일한 열전도 조건으로 하였으며, 첫 분할층의 열전도 해석을 한 후에 두 번째 분할층의 열전도 해석을 수행했다. 첫 분할층과 두 번째 분할층의 결합은 완전 결합으로 가정하였으며, 두 번째 분할층의 열전도 해석을 하는 동안 첫 분할층은 완전 중합된 것으로 가정하였다. V형태 외동의 분할충전법은 절단 변연에서 치은벽의 중간을 연결한 선을 첫 번째 중합층으로 하였으며, 분할충전법

Table 1. The numbers of node and element subjected to cavity form.

	Box	Box with belvel	V shape	V shape with belvel	Saucer
Node	1511	1437	1722	1334	1517
Element	6961	6575	8151	5993	6876

Table 2. Material properties.

Material	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient(/°C)
Resin	10 ²⁰ ~13,500	0.45~0.38	-0.0004
Enamel	84,000	0.33	0
Dentin	18,000	0.31	0

Elastic modulus, Poisson's ratio : Katona et al.³²⁾

Thermal expansion coefficient : arbitrary

의 시뮬레이션은 Box형태 와동과 같은 방법으로 하였다.

- 1) Box형태 와동, 한번에 충전 중합하는 방법(Box cavity, Bulk curing method)
- 2) Box형태 와동, 사면 분할충전법(Box cavity, Incisal first oblique incremental curing method)
- 3) V형태 와동, 한번에 충전 중합하는 방법(V shape cavity, Bulk curing method)
- 4) V형태 와동, 사면 분할충전법(V shape cavity, Incisal first oblique incremental curing method)

III. 실험성적

1. 체적의 계산

분석에 사용된 상악 중절치 모델의 체적은 1.7321E6mm³이며, 복합 레진 충전을 위한 와동의 체적, V형태의 와동을 1로 했을 때의 비율 그리고 bevel에 의한 체적의 증가 비율은 Table 3과 같다.

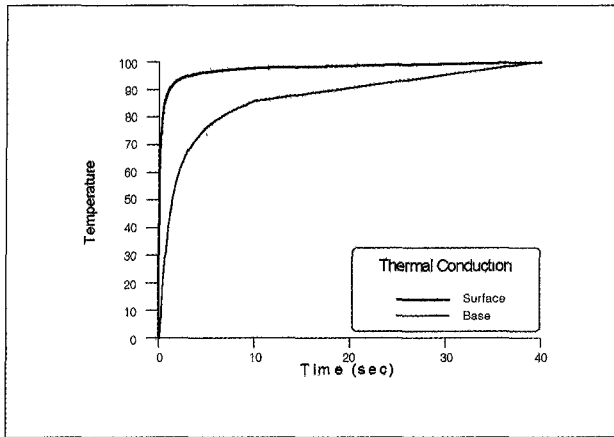


Fig. 1. Thermal conduction in box shape cavity.

2. 열전도해석

1) 열전도에 의한 중합을 해석

광중합 동안 복합 레진의 물성의 변화와 수축율은 중합률과 관련이 있다. 따라서 중합 과정은 복합 레진의 표면의 열원에 의한 표면에서 복합 레진의 기저부까지 순차적으로 전도되는 것으로 시뮬레이션하여 시간에 따른 표면과 심부의 절점에서의 열전도를 해석한 결과 표면은 열전도의 속도가 빨랐으며, 기저부는 충분한 시간이 지난 후에 열전도가 이루어졌다. Fig. 1은 Box형태의 와동에서의 열전도 해석 결과이며, 다른 와동도 같은 방법으로 열전도해석을 하였다.

2) 열전도에 의한 중합수축 속도의 해석

열팽창계수 α 는 $-0.0004/^\circ\text{C}$ 이므로 열전도에 따른 중합수축의 자료는 아래의 식으로 각 절점에서 얻었다.

$$\epsilon(\Delta T(t)) = -0.0004/^\circ\text{C} \times \Delta T(t)$$

Box형태의 와동에서 광중합에 의한 각 절점의 중합 수축은 Fig. 2와 같으며, 계산된 복합 레진의 중합 수축은 표층은 중합 초기에 급격히 수축하며, 기저부 층은 서서히 수축한다.

3) 열전도에 의한 탄성계수의 변화 해석

Elastic modulus는 중합율에 따라 중합되지 않은 상태의

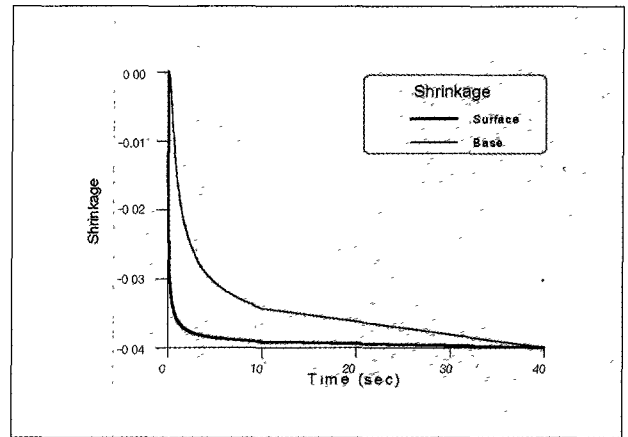


Fig. 2. Temperature dependent polymerization shrinkage in box shape cavity.

Table 3. Cavity volume, Volume ratio, and Bevel effect.

	Box	Box with bevel	V shape	V shape with bevel	Saucer
Volume(mm ³)	7.952E4	8.8821E4	5.3048E4	5.6210E4	6.261E4
Ratio	1.45	1.67	1	1.06	1.18
Bevel effect		12% increase		6% increase	

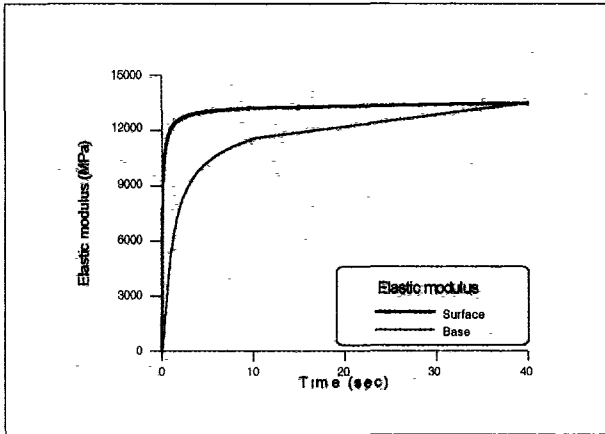


Fig. 3. Temperature dependent elastic modulus in box shape cavity.

수치에서 중합이 완전히 된 상태로 변화하며, E_{min} 은 10²⁰MPa로 무시해도 좋은 값이며, E_{max} 는 13,500MPa이므로 수식은 아래와 같다.

$$E(\Delta T(t)) = E_{min} + \Delta T(t) \times (E_{max} - E_{min}) / 100$$

$$E(\Delta T(t)) = \Delta T(t) \times 13.5$$

즉 중합에 따른 탄성 계수의 변화는 시간에 따른 온도 변화에 의존하는 간단한 함수로 얻어진다.

4) 열전도에 의한 Poisson's ratio의 변화 해석

중합에 따른 Poisson's ratio의 변화의 계산은 탄성계수의 변화 계산 방법과 마찬가지로 열전도의 온도에 따라 아래의 식으로 계산하였다. ν_{pre} 는 0.45, ν_{post} 는 0.38이므로 수식은 아래와 같다.

$$\nu(\Delta T(t)) = \nu_{pre} + \Delta T(t) \times (\nu_{post} - \nu_{pre}) / 100$$

$$\nu(\Delta T(t)) = 0.45 + (\Delta T(t) \times -0.0007)$$

즉 시간에 따른 온도 변화에 의존하는 간단한 함수로 얻어진다.

각각의 와동에서 Box형태의 와동과 마찬가지로 방법으로 각 절점의 열전도 해석에 의한 수축 속도와 물성의 변화 속도 자료를 얻었다.

3. 응력 해석

와동 형태에 따른 표면 변연의 응력을 비교하기 위하여 모든 와동 절단 변연(incisal margin)과 치은 변연(gingival margin)의 중앙부 절점(middle node)과 우각부 절점(corner node)에서 시간에 따른 응력을 측정하였다. 내면의 응력을 비교하기 위해 box형태 와동은 절단치수선각(incisopulpal line angle)과 치은치수선각(gingivopulpal line angle)의 중앙부 절점과 우각부 절점에서

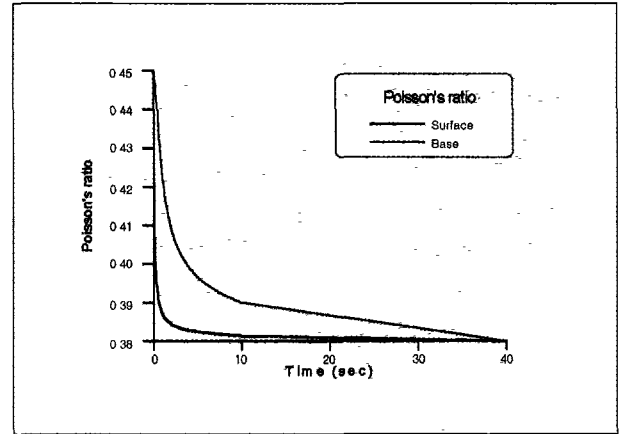


Fig. 4. Temperature dependent Poisson's ratio in box shape cavity.

서 시간에 따른 응력을 측정하였다. V형태 와동은 절단치수선각(incisogingival line angle)의 중앙부 절점과 우각부 절점에서 시간에 따른 응력을 측정하였으며, 접시형태의 와동에서는 반원형 와동벽(axial wall)의 가장 깊은 곳의 중앙부 절점과 우각부 절점에서 시간에 따른 응력을 측정하였다.

- 1) 한 번에 충전하는 방법에서 와동 형태에 따른 중합 수축 Von Mises Stress

Box 형태 와동 (Fig. 5)

치은 변연의 중앙부 절점에서 가장 높은 응력을 나타냈으며, 절단 변연의 중앙부 절점과 우각부 절점은 치은 변연의 우각부 절점보다 비교적 높은 응력을 나타냈다. 와동의 내면에서는 적은 응력을 나타냈지만 절단치수선각의 중앙부 절점 부위가 내면의 다른 절점보다 비교적 높은 응력을 나타냈다.

V 형태 와동 (Fig. 6)

치은 변연의 중앙 절점에서 다른 표면보다 높은 응력을 나타냈으며, 절단 변연의 중앙부 절점, 우각부 절점, 그리고 치은 변연의 우각부 절점은 다른 와동에 비하여 높은 응력을 나타냈다. 즉 응력이 표면의 다른 부위로 고르게 분산되어 나타났다. 와동의 내면 경계에서는 절단치수선각의 우각부 절점이 정중부보다 높은 응력을 나타냈다.

접시 형태 와동 (Fig. 7)

치은 변연의 중앙 절점에서 높은 응력을 나타냈으며, 치은 변연의 우각부 절점, 절단 변연의 중앙부 절점과 우각부 절점에서의 응력은 큰 차이가 없었다. 와동의 내면에서는 치

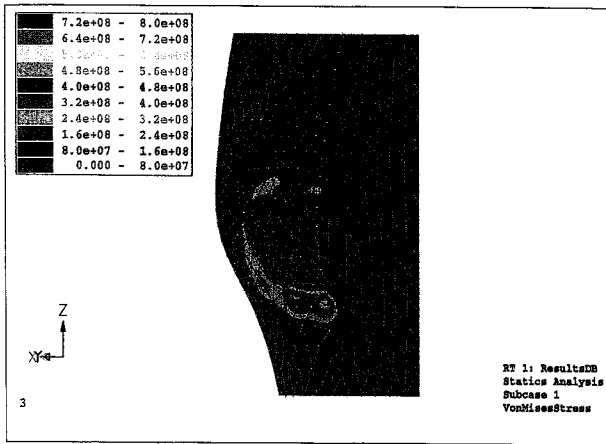


Fig. 5. Von Mises Stress in box cavity.

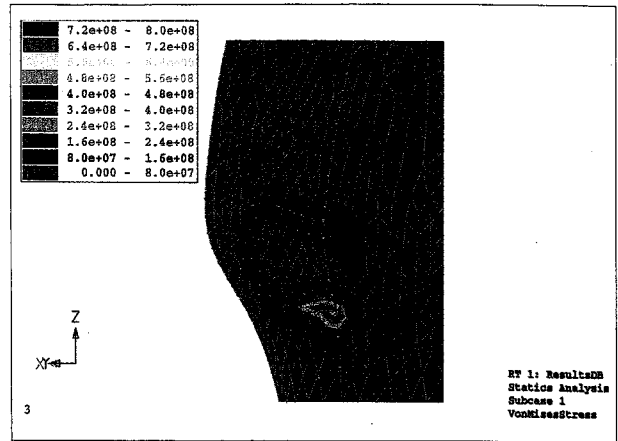


Fig. 6. Von Mises Stress in V shape cavity.

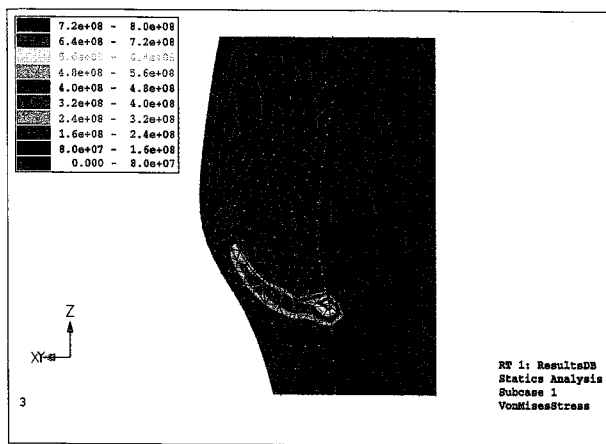


Fig. 7. Von Mises Stress in Saucer cavity.

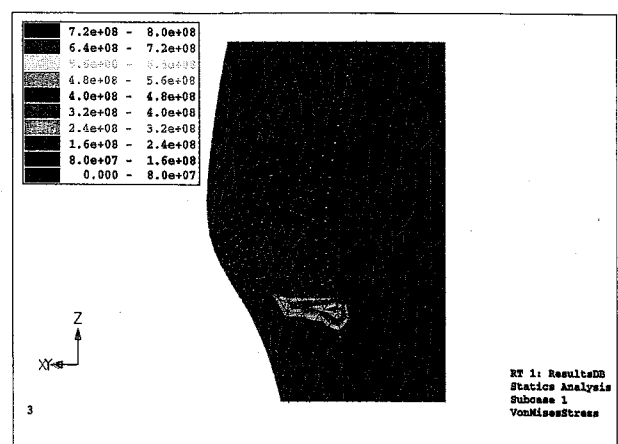


Fig. 8. Von Mises Stress in Box cavity with bevel.

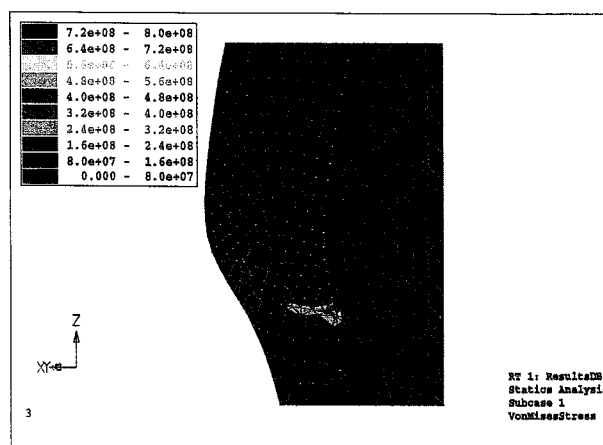


Fig. 9. Von Mises Stress in V shape cavity with bevel.

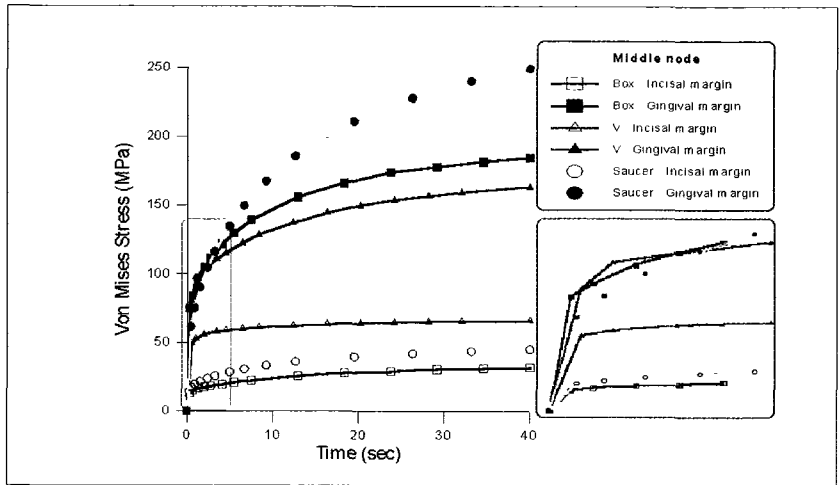


Fig. 10-1. Von Mises stress at the middle nodes of gingival margin and incisal margin of box cavity, V shape cavity, and saucer cavity.

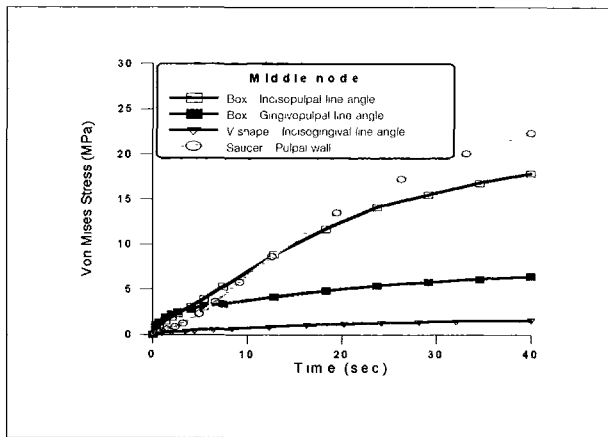


Fig. 10-2. Von Mises stress at middle nodes of axial wall of box cavity, V shape cavity, and saucer cavity.

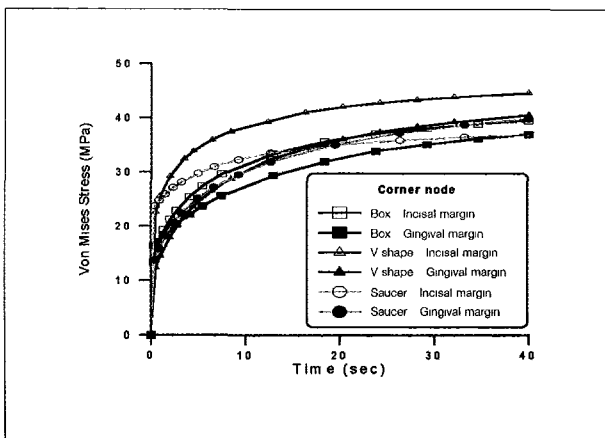


Fig. 10-3. Von Mises Stress at the corner nodes of gingival margin and incisal margin of box cavity, V. shape cavity, and saucer cavity.

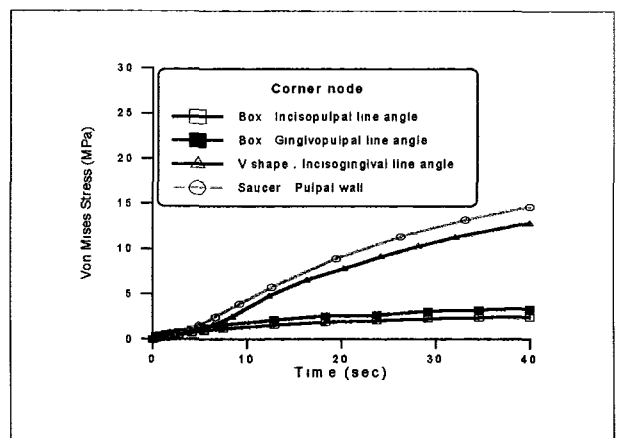


Fig. 10-4. Von Mises Stress at the corner nodes of axial wall of box cavity, V shape cavity, and saucer cavity.

수벽의 가장 깊은 중앙부 절점의 응력이 우각부의 절점보다 높은 응력을 나타냈으며, 다른 와동에 비하여 높은 응력을 나타냈다.

Box형태 와동의 절단면에 bevel을 형성한 와동 (Fig. 8)

Box형태의 와동에 비하여 치은 변연의 중앙부 절점에서 더 큰 응력을 나타냈으며, 치은 변연의 우각부까지 모든 부위에서 높은 응력을 나타냈다. 절단 변연의 우각부 절점에서 표면의 변연 중 가장 적은 응력을 나타냈으며, 와동의 내면에서는 box형태의 와동과 달리 치은치수선각의 절점에서 절단치수선각의 절점보다 높은 응력을 나타냈다.

V 형태 와동의 절단면에 bevel을 형성한 와동 (Fig. 9)

치은 변연의 중앙 절점에서 높은 응력을 나타냈지만 절단 변연의 중앙 절점과 우각부 절점, 그리고 치은 변연의 우각부 절점은 비교적 적은 응력을 나타냈으며, 응력이 분산되어 나타났다. 와동의 내면에서는 절단치수선각의 정중부 절점은 아주 적은 응력을 나타냈으며, 우각부 절점은 정중부의 선각보다 높은 응력을 나타냈다.

2) 와동 형태에 따른 중합 수축 응력 비교

Box형태 와동과 V형태 와동 그리고 접시형태 와동의 응력

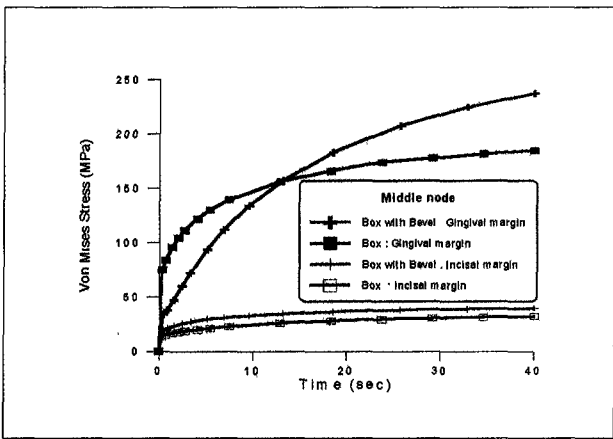


Fig. 11-1. Von Mises stress at the middle nodes of gingival margin and incisal margin of box cavity and box cavity with bevel.

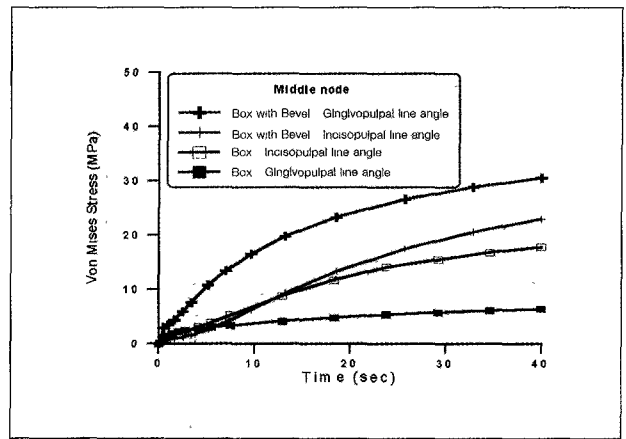


Fig. 11-2. Von Mises stress at the middle nodes of axial wall of box cavity and box cavity with bevel.

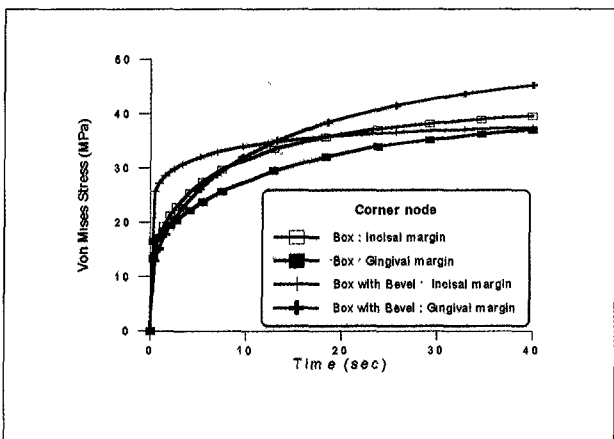


Fig. 11-3. Von Mises stress at the corner nodes of incisal margin and gingival margin of box cavity and box cavity with bevel.

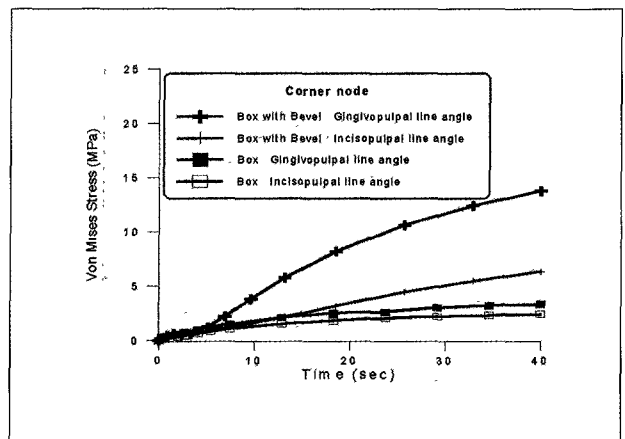


Fig. 11-4. Von Mises stress at the corner nodes of axial wall of box cavity and box cavity with bevel.

세 형태의 와동 모두에서 치은 변연의 정중부 절점에서의 응력이 다른 부위의 응력보다 뚜렷하게 높았다. 치은 변연의 정중부 절점에서의 최종 응력은 접시형태 > Box형태 > V형태의 순서로 크게 나타났으며, 중합 초기 수초 안에 빠르게 응력이 증가하며, 이후에 서서히 응력이 증가하였다. 그러나 접시형태의 와동은 다른 와동에 비하여 중합초기 응력 증가 속도가 완만했다. 절단 변연의 중앙부 절점에서의 최종 응력은 V형태 > 접시형태 > Box형태의 순서로 크게 나타났으며, 치은 변연에서와 마찬가지로 중합 초기에 빠르게 증가하며, 이후에 서서히 증가했다(Fig. 10-1). 와동의 내면 선각의 중앙부 절점에서의 최종 응력은 접시형태 > Box형태 > V형태의 순서로 크게 나타났으며, V형태의 와

동은 아주 적은 응력을 나타냈다(Fig. 10-2). 와동의 표면 우각부에서는 절단 변연에서 치은 변연에서보다 큰 응력을 나타냈으며, V형태의 와동이 비교적 큰 응력을 나타냈다(Fig. 10-3). 와동의 내면 우각부에서는 Box형태의 와동이 가장 적은 응력을 나타냈다(Fig. 10-4).

Box형태 와동과 이에 bevel을 부여한 와동의 응력

Box형태 와동의 치은 변연 정중부 절점에서 중합 수축 응력은 중합 초기에 급격하게 증가한 후에 증가 속도가 뚜렷이 완만해지는 것에 비해 bevel을 부여한 와동의 중합 초기 응력은 완만하게 증가하여 적은 응력을 나타냈지만 뚜렷이 완만해지는 부위가 없이 계속 증가하여 결국 box형태 와동

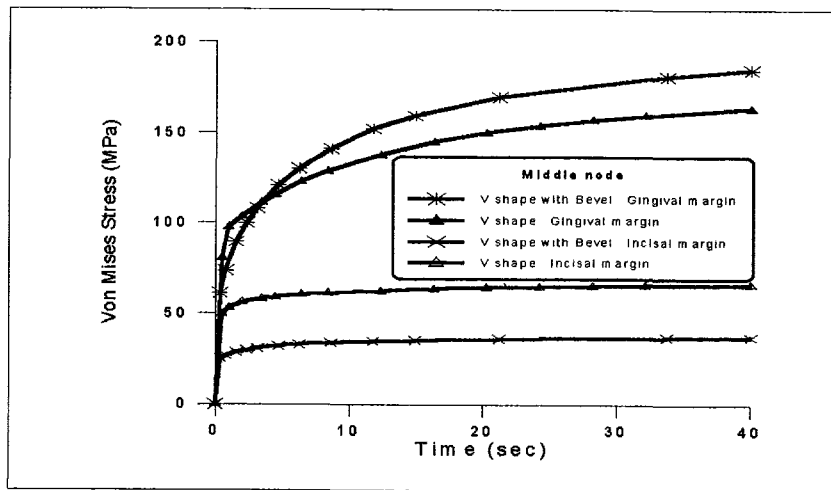


Fig. 12-1. Von Mises stress at the middle nodes of incisal margin and gingival margin of V shape cavity and V shape cavity with bevel.

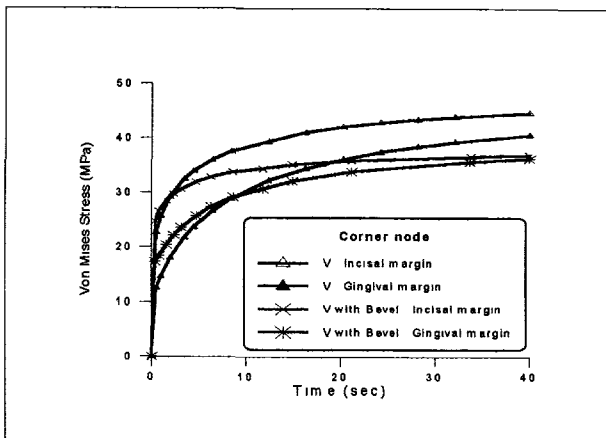


Fig. 12-2 Von Mises stress at the corner nodes of incisal margin and gingival margin of V shape cavity and V shape cavity with bevel.

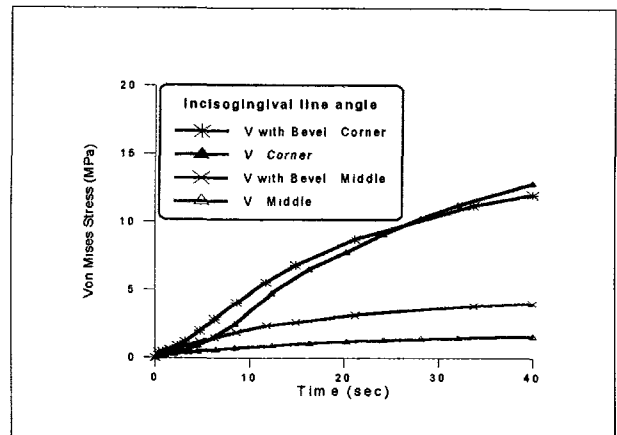


Fig. 12-3 Von Mises Stress at the nodes of incisogingival line angle of V shape cavity and V shape cavity with bevel.

보다 높은 응력을 나타냈다. 절단 변연의 중앙부 절점에서는 두 와동 사이에 큰 차이가 없었다(Fig. 11-1). 치은치수선각 중앙부 절점에서 bevel을 부여한 와동은 높은 응력을 나타냈으며, 절단치수선각의 중앙부 절점에서는 큰 차이가 없었다(Fig. 11-2). 치은 변연 우각부 절점에서 bevel을 부여한 와동은 bevel을 부여하지 않은 와동보다 큰 응력을 나타냈지만 절단 변연의 우각부 절점에서 bevel을 부여한 와동은 bevel을 부여하지 않은 와동보다 중합초기 높은 응력을 나타내지만 최종 중합 후에는 적은 응력을 나타냈다(Fig. 11-3). 와동의 우각부 치은치수선각과 절단치수선각 절점에서도 bevel을 부여한 와동은 비교적 높은 응력을 나타냈다(Fig. 11-4).

변연 정중부 절점에서 중합 초기 수축 응력은 완만한 속도로 응력이 증가하여 bevel을 부여하지 않은 와동의 치은 변연 정중부 절점에서는보다 적은 응력을 나타냈지만 최종 중합 후에는 높은 응력을 나타냈다. 그러나 절단 변연의 중앙부 절점에서는 bevel을 형성한 와동이 적은 응력을 나타냈다(Fig. 12-1). 와동의 표면 우각부 절점에서도 bevel을 부여한 와동이 적은 응력을 나타냈으며(Fig. 12-2), 와동의 내면 절단치은선각의 중앙부 절점에서는 bevel을 부여한 와동이 큰 응력을 나타냈으며, 절단치은선각의 우각부에서는 bevel을 부여한 와동이 적은 응력을 나타냈다(Fig. 12-3).

V형태 와동과 이에 bevel을 부여한 와동의 응력
V형태 와동의 절단 변연에 bevel을 부여한 와동의 치은

3) 충전방법에 따른 응력 비교

Box형태 와동에서 한번에 충전 중합하는 방법과 분할충전법의 응력

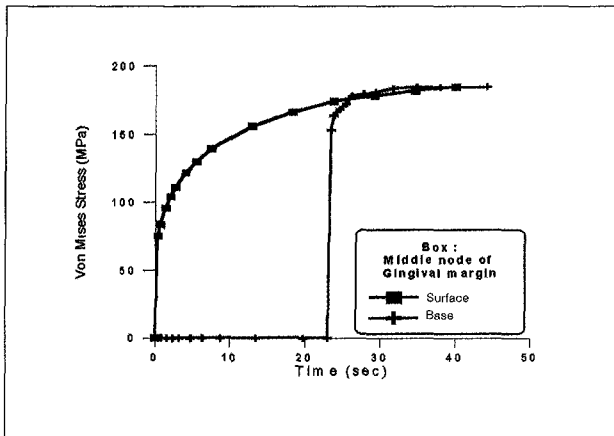


Fig. 13-1. Von Mises stress at the middle nodes of gingival margin of box cavity.

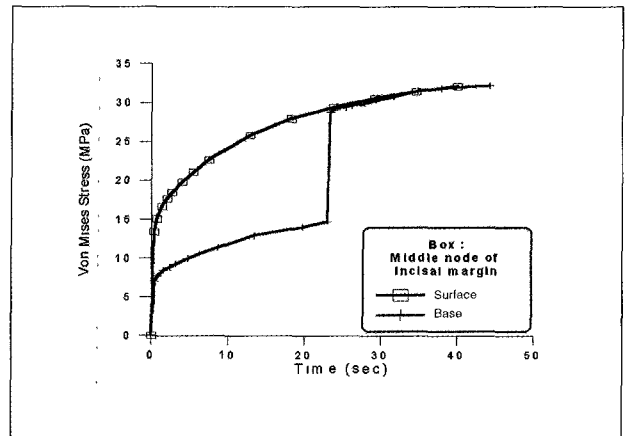


Fig. 13-2. Von Mises stress at the middle nodes of incisal margin of box cavity.

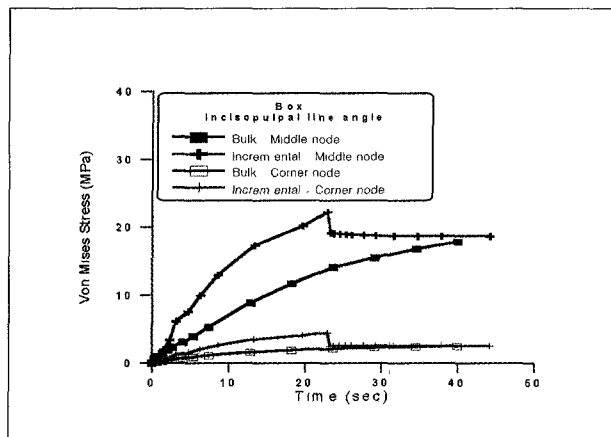


Fig. 13-3. Von Mises stress at the nodes of incisopulpal line angle of box cavity.

분할충전법에서 치은 변연 정중부 절점의 응력은 첫 분할층 중합동안 거의 나타나지 않았으나 두 번째 중합 초기에 급격하게 증가하였으며, 최종 응력은 한 번에 중합하는 방법과 동일했다(Fig. 13-1). 절단 변연 중앙부 절점에서의 응력은 첫 분할층 중합 초기에 급격히 증가했으나 한 번에 충전하는 방법보다 작았다. 그러나 응력은 두 번째 분할층 중합 초기에 급격하게 증가했으며, 최종 중합 후 응력은 한 번에 충전 중합하는 방법과 동일했다(Fig. 13-2). 절단치수 선각에서 응력은 첫 번째 중합동안 한번에 중합하는 방법보다 급격하게 증가했으며, 두 번째 중합에 의하여 오히려 응력이 줄어들었다(Fig. 13-3).

V형태 와동에서 한번에 충전 중합하는 방법과 분할충전법의 응력

분할충전법에서 치은 변연 중앙부 절점에서 응력은 두 번째 중합 초기에 급격하게 증가했으나 최종 응력은 한 번에 충전하는 방법과 동일했다(Fig. 14-1). 절단 변연의 정중부 절점에서 응력은 첫 분할층 중합 초기에 급격하게 증가했으나 한 번에 충전하는 방법보다 작았다. 그러나 응력은 두 번째 분할층 중합 초기에 다시 급격하게 증가했으며, 최종 중합 후에는 한 번에 충전하는 방법과 동일했다(Fig. 14-2). 분할충전법의 첫 번째 중합 초기에 와동 절단치은선각의 중앙부 절점에서 응력은 급격하게 증가하여 한 번에 중합하는 방법보다 높았으나 첫 번째 중합 후반에는 낮은 응력을 나타냈다. 그러나 두 번째 중합 초기에 응력은 급격하게 증가하여 한 번에 중합하는 방법보다 높았으나 최종 중합 후에는 동일했다(Fig. 14-3). 그러나 절단치은선각의 우각부에서는 첫 번째 중합에 의하여 한번에 중합한 방법보다 매우

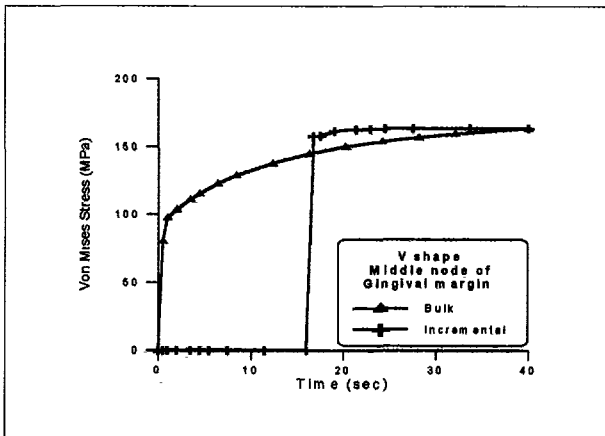


Fig. 14-1. Von Mises stress at the middle nodes of gingival margin of V shape cavity.

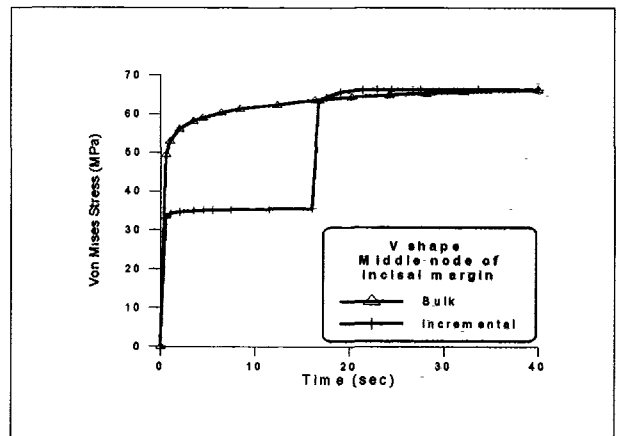


Fig. 14-2. Von Mises stress at the middle nodes of incisal margin of V shape cavity.

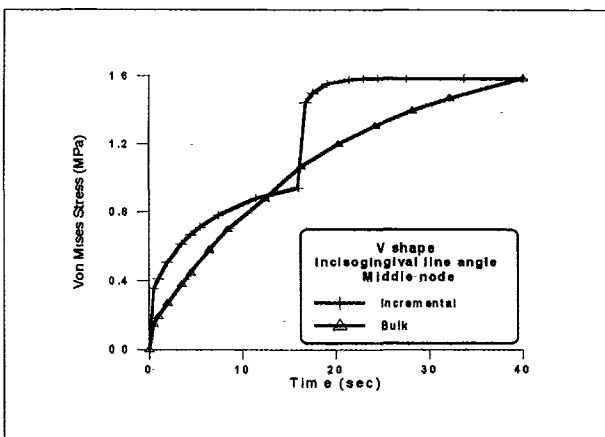


Fig. 14-3. Von Mises stress at the middle nodes of incisogingival line angle of V shape cavity.

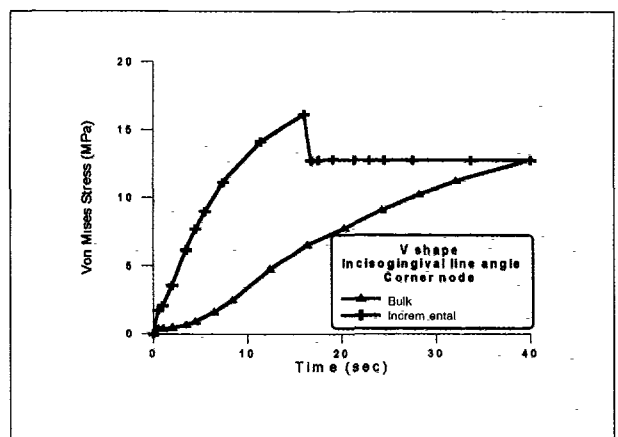


Fig. 14-4. Von Mises stress at the corner nodes of incisogingival line angle of V shape cavity.

높은 응력을 나타냈으며, 두 번째 중합 후에 응력은 줄어들어 결국 한번에 중합한 방법과 동일했다(Fig. 14-4).

IV. 총괄 및 고안

복합 레진의 중합 수축에 의한 응력은 외동의 기하학적 구조, 재료의 특성, 그리고 레진의 경계 조건 등의 영향을 받는다. 임상에서 이들 요소들은 매우 복잡하게 작용하며, 치아의 형태와 병소의 위치, 수복물의 형태와 크기 그리고 충전 방법에 따라 잔류 수축 응력은 다양하게 나타난다. Sakaguchi 등^{36,37)}은 strain gauge를 사용하여 중합 수축 응력을 측정할 바 있으나, 복합 레진을 충전한 외동 변연 각 부위에서 응력은 strain gauge를 사용하는 방법으로 측정하기 어렵다. 따라서 변연의 미세 누출을 실험하거나 변연의 gap을 측정하여 간접적인 방법으로 평가를 한다. 유한요소분석법은 복잡한 요소가 복합되어 해석하기 어려운 수복물의 거동특성을 연구하기 위해 많이 사용되어 왔으며, 응력과 변위의 발생과 진행의 질적인 평가를 하는데 도움을 준다. 복합 레진의 유한요소모델은 중합 수축에 의한 flow와 변위 등의 복잡한 현상을 설명하는데 이용되어 왔다.

광중합 레진의 중합 수축 응력은 광조사의 방향, 강도(intensity), 국소적 중합 속도와 중합율에 따라 같은 외동이라도 다르게 발생한다. 광원과 가까운 부위의 중합 속도는 빠르며, 광원과 멀어질수록 느려진다. 이에 근거하여 레진은 광원의 방향으로 수축한다고 하였으며^{38,39)}, 변연 적합에 유리하도록 수축 방향을 만들기 위한 광중합 방법이 추천되었다²⁸⁾. 그러나 Unterbrink 등⁴⁰⁾은 광원 방향으로 수축한다는 이론에 의문을 제기한 바 있으며, Uno 등⁴¹⁾은 낮은 강도의 광조사는 중합 속도를 느리게 하여 수축 응력을 감소시킨다 하였으며, Hansen 등⁴²⁾은 중합 속도가 느린 부위의 flow에 의하여 수축 응력이 감소된다고 하였다. 광중합시 국소적 중합 속도, 국소적인 수축 속도의 분포, 물성의 변화 속도 등에 관하여 밝혀지지 않은 부분이 많으며, 또한 광원에 의한 중합을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소법은 아직 보고된 바 없다. 그러나 유한요소법은 열에 의한 어떤 물질의 수축과 팽창에 의한 응력을 분석할 수 있으며, 중합 수축 응력 분석은 열 응력 분석법(thermal stress analogy)을 응용할 수 있다. 유한요소법을 이용한 복합 레진의 중합 수축 응력 분석을 위해 Katona 등³²⁾과 Winkler 등³³⁾, 그리고 Versluis 등^{34,35)}은 열 응력 분석법을 이용하였다. Katona 등³²⁾이 중합 수축의 시뮬레이션을 위해 사용한 열 응력 분석법은 임의의 열팽창 계수를 복합 레진에 부여하여 임의의 온도 변화에 의해 수축하도록 하였으며, 수축과 함께 중합 전의 물성에서 완전 중합 후의 물성으로 바뀌도록 하는 방법이다. 중합 과정은 표면부터 기저부까지 여러 층으로 나누었으며, 표층이 완전 중합된 후 인접한 하층이 중합되도록 하는 거의 정적인 과정(quasi-static process)으

로 시뮬레이션하였다. Winkler 등³³⁾은 Katona 등³²⁾의 방법과 동일한 방법으로 유한요소법을 이용하여 분할충전법의 응력에 대하여 연구하였다. 그러나 이들이 사용한 중합과정 시뮬레이션은 중합 전의 물성에서 중합 후의 물성까지의 진행 과정이 없으며, 표면이 완전 중합되는 동안 인접한 하층은 전혀 중합이 되지 않은 상태가 된다. 이는 실제 광중합 과정에서는 발생하지 않으며, 중합되지 않은 부위와 중합이 진행중인 부위의 flow를 고려하지 않았다. Versluis 등³⁴⁾은 Katona 등³²⁾과 Winkler 등³³⁾의 방법과 달리 시간에 따른 중합 수축과 탄성 계수의 변화를 응력 분석을 위해 입력했으나 모든 부위가 동일한 속도로 중합하도록 시뮬레이션하였다. 그러나 실제의 중합 과정은 모든 부위가 같은 속도로 중합되지는 않을 것이다. 또한 중합된 복합 레진의 Poisson's ratio를 사용하였으며, 이는 응력 결과에 영향을 줄 것이다. Versluis 등³⁵⁾은 유한요소모델의 각 절점에 시간에 따른 탄성 계수와 수축 속도의 변화를 입력하여 중합 수축에 의한 복합 레진의 수축 방향성을 연구하였다. 그는 중합된 원통형의 복합 레진 시편에서 후경에 따른 광원의 투과도와 광원의 강도에 따른 미세 경도를 측정하였으며, 이를 광원의 투과도에 따른 탄성 계수의 변화로 가정하여 중합 과정 시뮬레이션을 위하여 입력하였다. 그러나 Versluis 등³⁵⁾이 원통형의 중합된 레진 시편에서 0.5mm 간격으로 측정된 광원 투과도 자료는 다양한 외동 형태에 적용할 수 없다. 본 유한요소모델에서는 외동 형태에 따라 광중합 과정 중 복합 레진의 표면에서부터 기저부까지 각 절점의 중합 속도가 다르며, 이에 따라 국소적 수축 속도, 탄성 계수와 Poisson's ratio의 변화 속도가 다르다는 것을 유한 요소 모델에 입력하기 위하여 다섯 형태의 외동에서 각각 열전도 해석을 하였으며, 분할충전법에서는 각각의 분할층에서 열전도 해석을 하였으며, 이를 이용하여 응력 해석을 하였다.

본 분석에서 표면 변연에서의 응력은 중합초기 급격하게 증가하며, 이후에 응력 증가 속도는 완만해졌다. 최종 중합 후 치은 변연 정중부 절점의 응력은 다른 부위에 비하여 월등히 높게 나타났다(Fig. 10-1). 치은 변연 정중부 절점에서 V형태 외동은 box형태 외동보다 적은 응력을 나타냈으며, 접시형태 외동이 가장 큰 응력을 나타냈다(Fig. 10-1). Davidson 등⁴³⁾에 의하면 광중합 복합 레진은 상아질에 대한 최대 접촉 강도에 도달하기 전인 중합 초기에 빠르게 수축하여 비교적 큰 응력이 발생한다고 하였다. Hallar⁴⁴⁾의 보고에 의하면 비록 최근의 상아질 접착제의 접착 강도가 높지만, 이는 C-factor가 낮은 평평한 상아질에서 접착 후 24시간 이후에 측정된 결과이며, 3차원 외동에서 초기 접착 강도를 측정한다면 훨씬 낮은 접착 강도를 나타낸다고 하였다. Feilzer¹⁶⁾의 보고에 의하면 광조사기에 가까운 부위의 복합 레진은 중합 속도가 빠르므로 수축 응력이 급격하게 증가하지만 광조사기에서 멀리 떨어진 복합 레진의 flow에 의하여 어느 정도 경감된다고 하였다. 본 실험에서 사용한 열전도 해석을 통한 중합과정 시뮬레

이선에 의하면 열원과 가까운 표면은 빠른 중합 수축 속도를 나타내며, 와동의 기저부는 느린 중합 수축 속도를 나타냈다(Fig. 2). Feilzer 등이 제시한 광원과 멀리 떨어진 복합 레진의 flow에 의한 응력 경감을 본 유한요소 분석에서는 시뮬레이션 할 수 있었다. 본 분석에서 치은 변연 정중부 절점에서 V형태 와동, Box형태 와동은 중합 초기에 급격한 응력 증가 후에 응력 증가 속도가 명확히 완만해지는 것에 비해 접시형태 와동은 중합 초기 다른 두 형태의 와동에 비해 완만한 응력 증가를 나타냈지만 명확히 완만해지는 부분이 없고 꾸준히 증가하여 중합 완료 후에는 결국 가장 큰 응력을 나타냈다(Fig. 10-1). V형태 와동의 치은 변연 정중부 절점에서 응력은 다른 와동보다 낮지만 절단 변연의 정중부 절점과 와동의 우각부에서의 응력은 다른 와동보다 높았다(Fig. 10-1, 10-3, 10-4). 즉 다른 와동과 비교해 응력이 모든 변연으로 분산되어 나타나는 특성이 있었다(Fig. 6). Asmussen 등¹²⁾에 의하면 Class V 와동에서 V형태 와동은 Box형태 와동보다 접착면에 대한 복합 레진의 체적의 비율이 크며, 이에 의해 Box형태 와동보다 중합 수축에 의한 변연의 gap이 좁게 나타난다고 하였다. 본 연구에서도 V형태 와동은 치은 변연 정중부 절점에서 다른 와동보다 적은 응력을 나타냈으며, 절단 변연 정중부 절점이나 우각부 변연으로 응력이 분산되어 나타났다. 또한 절단 변연에 bevel을 부여하는 것에 의하여 절단 변연 정중부 절점과 와동 우각부 절점에서 응력은 감소하였으며, 치은 변연 정중부 절점에서 초기의 응력 증가 속도를 감소시켰다(Fig. 12-1). 접시형태 와동은 C-factor와 접착면에 대한 체적 비율이 V형태 와동과 box형태 와동의 중간이지만 치은 변연 정중부 절점에서 가장 높은 응력을 나타냈다(Fig. 10-1). Feilzer 등¹³⁾은 얇은 깊이의 Class V 와동의 경우 C-factor가 1보다 작기 때문에 인위적으로 Box형태 와동을 형성하지 않는 것이 좋다고 하였다. 본 실험에서 접시형태 와동은 깊이와 폭을 다른 와동과 동일하게 설계하였다. 임상에서 일반적으로 접시형태 와동의 깊이는 얇으며, 따라서 C-factor가 1이하인 경우가 대부분이다. 또한 변연의 위치도 대부분 법랑질에 국한되는 경우가 많다. 접시형태 와동은 치은 변연의 정중부 절점에서 다른 와동과 달리 중합 초기 응력 증가 속도가 완만하며, 이는 V형태 와동과 Box형태 와동에 bevel을 형성한 것과 유사한 응력 증가 형태이다(Fig. 11-1, 12-1). 중합 초기 응력 증가 속도가 완만한 것은 접착면의 내구성에 긍정적인 역할을 할 것으로 사료된다. 접시형태 와동에서 깊이 그리고 변연의 위치가 수축 응력에 미치는 영향에 대한 앞으로의 연구가 있어야 할 것이다.

Bevel을 부여하지 않은 와동은 중합 초기 치은 변연 정중부 절점에서 급격한 응력 증가를 나타냈지만 bevel을 절단 변연에 45°로 형성한 와동은 중합 초기 완만한 응력 증가를 나타냈다(Fig. 11-1, 12-1). V형태 와동의 경우 bevel에 의하여 절단 변연 정중부 절점과 와동 우각부 절점에서 응력이 감소

했다(Fig. 12-1, 12-2). Box형태 와동은 bevel을 부여하는 것에 의하여 치은 변연 정중부 절점에서 중합 초기 완만한 응력 증가를 나타냈으나 최종 중합 후 응력은 bevel에 의하여 증가했다(Fig. 11-1). Bevel을 와동 절단면에 부여하는 것에 의하여 와동의 체적은 증가한다. 그러나 C-factor는 감소하며, 접착면에 대한 체적의 비율도 증가된다. 복합레진 충전을 위한 와동에서 변연에 bevel을 형성하는 목적은 산부식에 유리한 범랑질 표면을 형성하며, 접착 강도가 강한 범랑질의 접착면을 늘리기 위함이다. Hansen¹⁴⁾은 범랑질 변연에 부여하는 bevel의 각도를 증가시킬수록 중합 수축에 의한 변연의 gap이 많이 감소한다고 하였다. 본 유한요소모델에서 bevel은 Box형태 와동과, V형태 와동을 제작한 후에 각각의 상아-법랑 경계에서 절단벽과 45°를 이루도록 부여했다. 결국 V형태 와동의 경우 와연각이 대략 160°로 box형태 와동의 135°와연각보다 크다. V형태 와동에 bevel을 부여하는 것은 절단 변연의 와연각을 크게 증가시키며, 결국 절단 변연 bevel부위에는 아주 적은 체적의 레진이 중합된다. 이에 의해 절단 변연에서 bevel을 부여하지 않은 와동보다 적은 응력이 나타나는 것으로 사료된다. V형태 와동에서 bevel은 와동 체적을 6% 증가시키지만 치은 변연에서 중합 초기 응력 증가 속도를 완화시키며, 절단 변연에서 응력을 줄이는 효과가 있었다.

깊은 와동에서 광중합 복합 레진의 중합을 충분하게 하기 위해서 여러 층으로 나누어 충전 중합하는 것이 필요하며⁴⁶⁾, 이런 분할충전법(incremental curing)은 각각의 분할층에서 C-factor를 줄일 뿐 아니라 한번에 중합되는 체적을 줄여 수축 응력을 줄일 것이라는 견해가 일반적이다. Davidson⁴³⁾에 의하면 Class V 와동에서 분할충전법은 한번에 충전 중합하는 방법(bulk curing)보다 중합 수축에 의한 gap이 적다고 하였으며, Hansen⁴²⁾에 의하면 수평 분할충전법(horizontal incremental curing)은 변연의 gap을 줄이는데 기여하지 못하지만 사면 분할충전법(oblique incremental curing)은 변연의 gap을 25%정도 줄일 수 있다고 하였다. Torstenson 등⁴⁷⁾에 의하면 Class V 와동에서 절단 변연쪽 사면을 먼저 분할 충전하고 치은 변연쪽 사면을 나중에 충전하는 방법(incisal first oblique incremental curing)이 한번에 충전 중합하는 방법이나 수평 분할충전법보다 치은 변연에서 적은 gap을 나타낸다고 보고하였다. Crim³⁰⁾은 절단 변연쪽 사면을 먼저 충전하는 방법은 절단 변연쪽 법랑질에 복합 레진이 강한 접착이 먼저 이루어진 후 적은 체적의 복합 레진이 치은 변연의 상아질 또는 백악질에 접착이 되어 결국 치은 변연에 적은 수축 응력이 전해진다고 하였으며, 또한 절단 변연쪽 사면에 분할 충전된 레진 표면에 있는 산소에 의한 중합 방해층(oxygen inhibiting layer)은 치은 변연쪽에 충전하는 분할충 레진의 flow에 도움을 주어 결국 적은 수축 응력이 치은 변연에 전해진다고 하였다. 그러나 두 방법의 미세 누출이 큰 차이가 없다는 보고도 있다^{18,48)}. Zidan 등⁴⁹⁾에 의하면 분할 충전에 의해 복합 레

진의 체적을 줄여도 상아질 접착제의 접착 강도가 수축 응력을 견디지 못한다고 보고하였다. 미세 누출이나 변연의 gap을 측정 한 실험 외에 교두의 변위를 측정 한 보고도 있다. McCullock 등⁴⁹⁾에 의하면 사면 분할충전법은 C-factor를 1 이하로 줄여 결국 한번에 충전 중합하는 방법보다 수축에 의한 교두의 변위를 적게 한다고 보고하였다. Lutz 등⁷⁾은 자가 중합 복합 레진 충전에 의한 교두의 변위는 완만한 속도도 진행되며, 광중합 레진을 한번에 충전 중합하는 방법에 의한 교두의 변위는 광중합 초기에 급격히 이루어진다고 하였다. 또한 2단계 분할충전법(two layer incremental curing)은 한번에 충전 중합하는 방법보다 교두가 변위 되는 속도를 둔화시키지만 교두 변위의 양은 더 크다고 하였다. 3단계 분할충전법(three layer incremental curing)은 2단계 분할충전법보다 교두의 변위 속도가 더 완만하며, 복합 레진 인레이법이 가장 적은 교두의 변위를 나타낸다고 하였다. Suliman⁶⁾에 의하면 와동이 깊을수록 복합 레진 충전에 의하여 교두의 변위가 증가하지만 수분 흡수에 의하여 중합 수축에 의한 교두의 변위는 회복된다고 하였다. Versluis 등³⁴⁾은 복합 레진의 중합 수축에 의한 교두의 변위를 유한요소법을 이용하여 분석하였으며, 분할충전법에 의한 교두의 변위는 한번에 충전 중합하는 방법에 의한 교두의 변위보다 크다고 보고하였다.

본 유한요소모델에서 분할충전법은 절단 변연 사면을 먼저 충전한 후 치은 변연 사면을 나중에 충전하는 방법으로 시뮬레이션했다. 절단 변연에서 한번에 충전 중합하는 방법은 중합 초기에 급격한 응력 증가를 나타낸 후 완만한 응력 증가를 나타내며, 분할충전법도 첫 번째 분할층 충전에 의하여 급격히 응력이 증가하였다. 그러나 한번에 충전 중합하는 방법보다 적은 응력을 나타냈으며, 두 번째 분할층 충전 중합에 의하여 다시 응력이 급격히 증가하여 결국 한번에 충전 중합하는 방법과 동일한 응력을 나타냈다. 각각의 분할층에서 한번에 중합되는 체적을 줄여 수축 응력을 줄이는 효과가 있었다. 그러나 첫 번째 중합층의 수축 응력이 두 번째 분할층에 합쳐지며, 최종 중합 후의 응력은 한번에 충전 중합하는 방법과 동일했다(Fig. 13-2, 14-2). 분할충전법에 의한 치은 변연에서의 응력은 두 번째 충전 중합 초기에 급격하게 증가하여 최대 응력에 도달했으며, 절단 변연과 마찬가지로 중합 완료 후에 한번에 충전 중합하는 방법과 동일했다(Fig. 13-1, 14-1). 분할충전법은 각각의 분할층에서 체적이 줄어 적은 응력을 나타냈지만, 응력의 증가 속도는 한번에 충전 중합하는 방법보다 빨랐다. 이는 한번에 충전하는 방법과 동일한 광중합 강도로 적은 체적의 분할층 레진이 중합되므로 각 분할층은 중합 속도가 빠르며, 이에 의해 응력 증가 속도가 빠른 것으로 사료된다. 본 유한요소분석에서 분할충전법의 중합 과정은 한번에 충전 중합하는 방법과 동일한 열 전도 조건으로 시뮬레이션하였으며, 열 전도 해석 결과 한번에 충전 중합하는 방법보다 열전도 속도가 빨랐다. 각각의 분할층 표면의 중합 속도는 한번에 충

전하는 방법과 유사하지만 각 분할층 기저부로 갈수록 중합 속도가 한번에 충전 중합하는 방법에 비하여 빨라지며, 결국 적은 체적의 복합 레진이 빠른 속도로 중합되어 한번에 충전 중합하는 방법보다 flow가 제한된다. 이런 제한된 flow 때문에 와동의 기저부에서 첫 번째 분할층 충전동안 한번에 충전 중합하는 방법보다 높은 응력을 나타내기도 하였으며, 두 번째 분할층 충전에 의하여 응력이 감소하였다(Fig. 13-3, 14-4). 분할충전법에 의하여 C-factor를 낮게 만들어 수축 응력을 줄일 수 있다는 견해는 본 실험을 통해서도 확인 할 수 없었다. Feilzer 등¹³⁾이 제시한 C-factor의 개념은 자가중합 레진을 이용하여 원통형의 모형에서 와동벽 전체의 중합 수축 응력을 측정하여 얻은 결과이며, 본 유한요소법을 통한 광중합 복합 레진의 수축 응력 분석 결과는 변연의 한 질점에서 응력을 비교 하였으므로 C-factor의 개념을 유한요소법을 통한 응력 분석의 결과와 단순 비교할 수는 없을 것으로 사료된다. 유한요소 분석에 의하면 한번에 충전 중합하는 방법과 달리 분할충전법은 중합 완료 전에 최대 응력이 나타나며, 이 수치는 한번에 충전 중합하는 방법보다 크다고 하였다. 그의 해석에 따르면 일반적으로 동일한 체적이라면 길이가 길어질수록 큰 응력을 나타내며, 사면 분할충전법은 복합 레진의 표면 길이를 증가시켜 경계면에 일시적으로 더 높은 응력이 나타나지만 최종 중합 후에는 동일한 체적의 물질이 되므로 한번에 충전 중합하는 방법과 동일한 응력을 나타낸다고 하였다. Winkler 등³³⁾의 중합과정 시뮬레이션은 앞에서 언급한 바와 같이 표면이 완전 중합되는 동안 그와 인접한 하층은 전혀 중합이 되지 않은 상태다. 이런 시뮬레이션에서는 레진 표면의 길이와 와동과 접촉되는 면적이 응력에 큰 영향을 준다. 분할충전법에 의한 응력이 한번에 충전 중합하는 방법의 응력보다 높게 나타난 것은 Winkler 등³³⁾의 중합과정 시뮬레이션방법이 결과에 영향을 준 것으로 사료된다. 본 유한요소분석에서 중합 과정은 표면의 수축 응력을 기저부 레진의 flow에 의해 경감시킬 수 있도록 하였으나 분할충전법의 중합 속도가 빨라 중합이 진행되는 부위나 중합이 덜된 부위의 flow에 의한 응력 경감이 극도로 제한된 것으로 사료된다. 본 유한요소모델에서 복합 레진은 상아질과 법랑질 모두에 완전 결합된 조건이며, 첫 번째 중합층과 두 번째 중합층도 완전 결합된 조건이다. 결국 첫 번째 중합 표면의 산소에 의한 중합 방해층에 의해 두 번째 충전된 레진의 수축 응력이 경감되는 것을 시뮬레이션할 수 없으며, 결국 첫 번째 분할층의 중합 수축 응력은 두 번째 분할층 수축 응력에 합해진다. Lutz⁷⁾의 보고에 의하면 한번에 충전 중합하는 방법에 의한 교두의 변위는 급격히 일어나지만 분할충전법에 의한 교두의 변위는 서서히 일어난다고 하였다. 그러나 최종 중합 후에는 한번에 충전 중합하는 방법보다 분할충전법에 의한 교두 변위양은 더 크다고 하였다. 분할충전법에서와 같이 교두의 변위가 서서히 일어나면 상아-법랑 경계부의 구조적 변화가 일어나며, 이런 변화에 의해 잔류 응력을 해소시킬

수 있다고 하였다. 그러나 한번에 중합하는 방법에서와 같이 교두 변위의 속도가 빠르면 치질의 구조적 변화에 의한 응력의 흡수는 일어날 수 없으며, 복합 레진의 변연에 집중된 수축 잔류 응력은 접착면의 내구성에 부정적 영향을 준다고 하였다. 본 분석에서 절단 변연의 응력은 각각의 분할층 충전동안 적은 응력을 나타냈지만 각각의 분할층의 중합 수축 속도가 빠르며, 이에 의해 급격한 응력 증가가 일어난다. 또한 치은 변연에서의 응력은 두 번째 분할층 중합 초기에 급격하게 증가했다. 분할층전법의 유한요소법을 통한 시뮬레이션은 한계가 있다. 첫째로 첫 분할층 충전 후에 표면의 산소에 의한 중합 방해층을 시뮬레이션할 수 없었으며, 첫 분할층과 두 번째 분할층이 중합 후에는 동일물질로 인식되어 첫 분할층 충전 후의 모든 수축 응력이 두 번째 분할층 충전 후에 표면의 변연에 발생하는 응력에 합쳐진다. 앞으로 분할층전법의 유한요소법을 통한 시뮬레이션방법이 개발 되어야 할 것이다. 임상에서 분할 충전법으로 복합 레진을 충전하여도 미세 변연 누출을 완벽히 막을 수는 없다. Tajima 등⁵⁰⁾에 의하면 복합 레진의 수축이 감소하지 않은 상태에서 상아질 접착제의 접착력이 증가하면 결국 변연에 잔류 응력은 증가한다고 하였다. 분할층전법은 각각의 분할층에서 체적을 줄여 수축 응력을 경감시키며, 따라서 변연의 gap은 감소한다. 그러나 복합 레진의 수축 자체가 감소하지 않은 상태에서 변연의 gap이 줄어들며, 또한 최근의 상아질 접착제의 접착 강도가 증가하여 결국 교두의 변위를 증가시킨다. Kemp-Scholte 등²⁶⁾은 Class V 와동 치은 변연에서 변연 적합도와 충전 재료의 탄성계수는 직접적 관련성이 있으며, 분할충전법만으로는 만족할 만한 변연 적합도를 얻을 수 없으며, 사용하는 충전 재료의 물리적 성질이 더 중요하다고 하였다.

광중합 레진의 중합 수축 응력을 유한요소법으로 시뮬레이션하는데는 많은 난점이 있다. 복합 레진 중합 과정의 동적 변화에는 많은 요소들이 영향을 주며, 이런 요소들은 명확히 밝혀지지 않은 부분이 많다. 중합 수축에 의한 응력은 와동의 형태와 충전 중합 방법, 그리고 광중합의 강도, 복합 레진의 조성과 그리고 물리적 성질에 따라 매우 다양하게 나타나며, 이런 복잡한 중합 과정을 유한요소법에 모두 반영하여 입력하는 것은 한계가 있다. 본 유한요소분석에서 사용한 열전도해석을 통한 중합 속도, 중합 수축 속도, 탄성 계수 및 Poisson's ratio의 변화 속도 계산은 다른 방법에 비하여 다양한 와동의 형태에 적용할 수 있는 장점이 있다. 중합율과 중합 수축 속도, 물성의 변화 속도가 어떤 관계에 있는지에 대하여는 명확히 밝혀져야 할 것이며, 복합 레진의 중합과정에 대한 실험적 연구가 있어야 할 것이다. 이를 토대로 유한요소모델은 이런 중합의 동적 과정을 보다 정확하게 시뮬레이션해야 할 것이다. 본 연구에 의하면 V형태, 접시형태의 치경부 병소를 복합 레진을 이용하여 충전할 때 Box형태의 와동을 형성하는 것은 수축 응력이라는 관점에서는 장점이 없으며, V형태 와동의 절단 변연

에 bevel을 형성하는 것은 치은 변연 정중부에서 중합 초기 응력 증가 속도를 완화시키는 효과가 있으며, 그 외의 다른 변연에서는 응력을 경감시키는 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 본 분석에서 접시형태 와동은 중합 초기 응력 증가 속도가 완만하지만 최종 중합 후에는 큰 응력을 나타냈다. 그러나 접시형태 와동의 치은 변연은 대부분 범랑질로 이루어지며, 와동의 깊이가 얇은 경우가 대부분이므로 이에 대해서 더 많은 연구가 있어야 할 것이다. 또한 box형태 와동의 재치료를 할 때 절단 변연에 bevel을 형성하는 것은 치은 변연의 정중부에서 중합 초기 응력증가 속도를 경감시키지만 다른 부위에서는 응력을 증가시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서 분할충전법의 각각의 분할층은 중합 속도가 빠르며, 이에 의해 급격한 응력 증가를 나타냈다. 분할충전법의 분할층은 한 번에 충전할 때보다 체적이 적으므로 중합 속도를 느리게 하여 중합 초기 응력 증가 속도를 완만하게 하는 방법이 필요할 것으로 사료된다.

V. 결 론

복합 레진 충전을 위한 Class V 와동에서 5가지 와동 형태(Box형태, V형태, 접시형태, Box형태의 절단면에 Bevel을 부여한 와동, 그리고 V형태의 절단면에 Bevel을 부여한 와동)와 두 가지 충전 방법(한번에 충전 중합하는 방법, 분할충전법)의 중합 수축 응력을 분석하기 위해 각각의 와동과 충전 방법에서 열전도 해석을 하였으며, 이를 이용하여 중합 속도, 중합 수축 속도, 물성의 변화 속도를 유한요소법의 열 응력 해석에 입력하여 수축 응력을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 5가지 형태의 Class V 와동 모두에서 중합 수축에 의한 응력은 치은 변연의 정중부 절점에서 가장 높았다.
2. 치은 변연의 정중부 절점에서 Box형태의 와동과 V형태의 와동, 그리고 접시형태의 와동의 중합 수축에 의한 응력은 접시형태의 와동이 가장 높았으며, Box형태의 와동은 중간 정도의 응력을 나타냈으며, V형태의 와동이 가장 낮은 응력을 나타냈다.
3. Bevel을 형성하지 않은 와동의 치은 변연 정중부 절점에서 응력은 중합 초기에 급격하게 증가 했지만, 절단 변연에 bevel을 형성한 와동의 응력은 중합 초기에 완만하게 증가했다.
4. V형태 와동의 절단 변연에 bevel을 형성한 와동은 bevel을 형성하지 않은 와동보다 치은 변연 정중부 절점에서 약간의 응력이 증가했으나, 절단 변연의 정중부에서는 낮은 응력을 나타냈다.
5. 절단 변연에서 한번에 충전 중합하는 방법은 중합 초기에 급격한 응력 증가가 나타나며, 분할 충전법은 첫 번째 분할층 충전에서 적은 응력이 나타나며, 두 번째 중합 후에는 동일한 응력을 나타냈다.

6. 치은 변연에서 분할충전법은 두 번째 충전 중합 초기에 급격한 응력 증가를 나타내지만 중합 완료 후에는 한번에 충전 중합하는 방법과 동일한 응력을 나타냈다.

참 고 문 헌

1. Ferracane J.L. : Current trends in dental composites. *Development of Assessment Criteria Transaction of the Academy of Dental Materials*, 6(4), 302-318, 1995.
2. De Gee A.J., Feilzer A.J. and Davidson C.L. : True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dental Materials*, 9, 11-14, 1993.
3. Davidson C.L. and Feilzer A.J. : Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer based restoratives. *Journal of Dentistry*, 25, 435-440, 1997.
4. Qvist V., Qvist J. and Mj r I.A. : Placement and longevity of tooth-colored restorations in Denmark. *Acta Odontologica Scandinavica*, 48, 305-311, 1990.
5. Sheth J.J., Fuller J.L. and Jensen M.E. : Cuspal deformation and fracture resistance of teeth with dentin adhesives and composites. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 60, 560-569, 1988.
6. Suliman A.A., Boyer D.B. and Lakes R.S. : Cusp movement in premolars resulting from composite polymerization shrinkage. *Dental Materials*, 9, 6-10, 1993.
7. Lutz F., Krejci I. and Barbakow F. : Quality and durability of marginal adaptation in bonded composite restorations. *Dental Materials*, 7, 107-113, 1991.
8. Lai J.H. and Johnson A.E. : Measuring polymerization shrinkage of photo-activated restorative materials by a water-filled dilatometer. *Dental Materials*, 9, 139-143, 1993.
9. Sakaguchi R.L., Peters M.C.R.B., Nelson S.R., Douglas W.H. and Poort H.W. : Effects of polymerization contraction in composite restorations. *Journal of Dentistry*, 20, 178-182, 1992.
10. Feilzer A.J., de Gee A.J. and Davidson C.L. : Curing contraction of composites and glass-ionomer cements. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 59, 297-300, 1988.
11. Walls A.M.G., McCabe J.F. and Murray J.J. : The polymerization contraction of visible light activated composite resins. *Journal of Dentistry*, 16, 177-181, 1988.
12. Asmussen E. and Munksgaard E.C. : Bonding of restorative resins to dentine: status of dentine adhesives and impact on cavity design and filling techniques. *International Dental Journal*, 38, 97-104, 1988.
13. Feilzer A.J., de Gee A.J. and Davidson C.L. : Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *Journal of Dental Research*, 66, 1636-1639, 1987.
14. Davidson C.L., De Gee A.J. and Feilzer A.J. : The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *Journal of Dental Research*, 63, 1396-1399, 1984.
15. Davidson C.L. and de Gee A.J. : Relaxation of polymerization contraction stresses by flow in dental composites. *Journal of Dental Research*, 63(2), 146-148, 1984.
16. Feilzer A.J., de Gee A.J. and Davidson C.L. : Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations. *Dental Materials*, 6, 167-171, 1990.
17. Sognaes R.F., Wolcott R.B. and Xhong F.A. : Dental erosion like patterns occurring in association with other dental conditions. *Journal of American Dental Association*, 84, 571-576, 1972.
18. Crim G.A. and Chapman K.W. : Effect of placement techniques on microleakage of dentin bonded composite resin. *Quintessence International*, 17, 21-24, 1986.
19. Kanka J. : The effect on microleakage of four dentin-enamel bonding systems. *Quintessence International*, 20, 359-361, 1989.
20. Reeves G.W., Fitchie J.G., Hembree J.H.Jr., Swift E.J.Jr. and Quiroz L. : In vitro microleakage of 10 dentinal bonding systems. *General Dentistry*, 36, 503-505, 1988.
21. Gordon M., Plasschaert A.J.M. and Stark M.M. : Microleakage of several tooth-colored restorative materials in cervical cavities. *Dental Materials*, 2, 228-231, 1986.
22. Pintado M.R. and Douglas W.H. : The comparison between two different dentin bonding resin systems. *Quintessence International*, 19, 905-907, 1988.
23. Prati C. and Montanari G. : Comparative microleakage study between the sandwich and conventional three-increment techniques. *Quintessence International*, 20, 587-594, 1989.
24. Prati C. : Early marginal microleakage in Class II resin composite restorations. *Dental Materials*, 5, 392-398, 1989.
25. Eakle W.S. and Nakamoto D.K. : Microleakage in MOD resin composite with three dentin bonding agents. *Dental Materials*, 5, 361-364, 1989.
26. Kemp-Scholte C.M. and Davidson C.L. : Complete marginal seal of class V resin composite restorations effected by increased flexibility. *Journal of Dental Research*, 69, 1240-1243, 1990.
27. Van Meerbeek B., Willems G., Celis J.P., Roos J.R., Braem M., Lambrechts P. and Vanherle G. : Assessment by nano-indentation of the hardness and elasticity of the resin-dentin bonding area. *Journal of Dental Research*, 72, 1434-1442, 1993.
28. Lutz F., Krejci I. and Oldenburg T.R. : Elimination of polymerization stresses at the margins of posterior composite resin restorations: a new restorative technique. *Quintessence International*, 17, 777-784, 1986.
29. Koenigsberg S., Fuks A. and Grajower R. : The effect of three filling techniques on marginal leakage around Class II composite resin restorations in vitro. *Quintessence International*, 20, 117-121, 1989.
30. Crim G.A. : Microleakage of three resin placement technique. *American Journal of Dentistry*, 4, 69-72, 1991.
31. Pearson G.J. and Hegarty S.M. : Cusp movement in molar teeth using dentine adhesives and composite filling materials. *Biomaterials*, 8, 473-476, 1987.
32. Katona T.R. and Winkler M.M. : Stress analysis of a bulk-filled Class V light-cured composite restoration. *Journal of Dental Research*, 73(8), 1470-1477, 1994.
33. Winkler M.M., Katona T.R. and Paydar N.H. : Finite element stress analysis of three filling techniques for class V light-cured composite restorations. *Journal of Dental Research*, 75(7), 1477-1483, 1996.
34. Versluis A., Douglas W.H., Cross M. and Sakaguchi R.L. : Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses?. *Journal of Dental Research*, 75(3), 871-878, 1996.
35. Versluis A., Tantbirojn D. and Douglas W.H. : Do dental composites always shrink toward the light?. *Journal of Dental Research*, 77(6), 1435-1445, 1998.
36. Sakaguchi R.L., Sasik C.T., Bunczak M.A. and Douglas W.H. : Strain gauge method for measuring polymerization contraction of composite restoratives. *Journal of Dentistry*, 19, 312-316, 1991.
37. Sakaguchi R.L., Brust E.W., Cross M., DeLong R. and Douglas W.H. : Independent movement of cusps during occlusal loading. *Dental Materials*, 7, 186-190, 1991.
38. Hansen E.K. and Asmussen E. : Comparative study of dentin adhesives. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 93, 280-287, 1985.

39. Hansen E.K. : Effect of three dentin adhesives on marginal adaptation of two light cured composites. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 94, 82-86, 1986.
40. Unterbrink G.L. and Muessner R. : Influence of light intensity on two restorative systems. *Journal of Dentistry*, 23, 183-189, 1995.
41. Uno S. and Asmussen E. : Marginal adaptation of restorative resin polymerized at reduced rate. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 99, 440-444, 1991.
42. Hansen E.K. : Effect of cavity depth and application technique on marginal adaptation of resins in dentin cavities. *Journal of Dental Research*, 65(11), 1319-1321, 1986.
43. Davidson C.L. Conflicting interests with posterior use of composite materials. *Posterior Composite Resin Dental Restorative Materials*, 61-65, 1985.
44. Haller B, Klaiber B., Betz T. and Dobersch S. : Shear bond strength to dentin by simulation of three dimensional class V cavity configuration. *Dental Materials*, 7, 206-210, 1991.
45. Hansen E.K. : Effect of Scotchbond dependent on cavity cleaning, cavity diameter and cavosurface angle. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 92, 544-548, 1984.
46. Leinfelder K.F. : Using composite resin as a posterior restorative material. *Journal of American Dental Association*, 122, 49-54, 1991.
47. Torstenson B. and Od n A. : Effects of bonding agent types and incremental techniques on minimizing contraction gaps around resin composites. *Dental Materials*, 5, 218-223, 1989.
48. Zidan O., Gomez-Marín O. and Tsuchiya T. : A comparative study of the effects of dentinal bonding agents and application techniques on marginal gaps in Class V cavities. *Journal of Dental Research*, 66, 716-721, 1987.
49. McCulloch A.J. and Smith B.G.N. : In vitro studies of cuspal movement produced by adhesive restorative materials. *British Dental Journal*, 161, 405-409, 1986.
50. Tajima K., Chen K., Terashita M., Kozono Y., Oshida Y. and Moore B.K. : Occurrence of marginal enamel cracking in composite resin restored teeth(abstract). *Journal of Dental Research*, 72(Spec Iss), 136, 1993.