

도재 라미네이트와 복합레진 수복 시 치간이개 양에 따른 접착계면의 응력분포에 관한 3차원 유한요소법적 연구

홍준배¹ · 탁승민² · 백승호¹ · 조병훈^{1*}

¹서울대학교 치의학대학원 치과보존학교실, ²경상대학교 공과대학 기계항공학과

ABSTRACT

THE EFFECT OF THE AMOUNT OF INTERDENTAL SPACING ON THE STRESS DISTRIBUTION IN MAXILLARY CENTRAL INCISORS RESTORED WITH PORCELAIN LAMINATE VENEER AND COMPOSITE RESIN: A 3D-FINITE ELEMENT ANALYSIS

Junbae Hong¹, Seung-Min Tak², Seung-Ho Baek¹, Byeong-Hoon Cho^{1*}

¹Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea,

²Mechanical Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

This study evaluated the influence of the type of restoration and the amount of interdental spacing on the stress distribution in maxillary central incisors restored by means of porcelain laminate veneers and direct composite resin restorations.

Three-dimensional finite element models were fabricated to represent different types of restorations. Four clinical situations were considered. Type I, closing diastema using composite resin. Labial border of composite resin was extended just enough to cover the interdental space; Type II, closing diastema using composite resin without reduction of labial surface. Labial border of composite resin was extended distally to cover the half of the total labial surface; Type III, closing diastema using composite resin with reduction of labial surface. Labial border of the preparation and restored composite resin was extended distally two-thirds of the total labial surface; Type IV, closing diastema using porcelain laminate veneer with a feathered-edge preparation technique. Four different interdental spaces (1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm) were applied for each type of restorations.

For all types of restoration, adding the width of free extension of the porcelain laminate veneer and composite resin increased the stress occurred at the bonding layer. The maximum stress values observed at the bonding layer of Type IV were higher than that of Type I, II and III. However, the increasing rate of maximum stress value of Type IV was lower than that of Type I, II and III. (J Kor Acad Cons Dent 35(1):30-39, 2010)

Key words: Three dimensional-finite element analysis, Interdental space, Porcelain laminate veneer, Composite resin, Bonding layer, Stress distribution

-Received 2009.12.30., revised 2010.1.4., accepted 2010.1.4.-

I. 서 론

*Corresponding Author: **Byeong-Hoon Cho**
Department of Conservative Dentistry, School of
Dentistry, Seoul National University
275-1 Yeongeong-Dong, Jongno-Gu, Seoul, 110-768, Korea
Tel: 82-2-2072-3514 Fax: 82-2-2072-3859
E-mail: chobh@snu.ac.kr

전치부 치간이개(혹은 치간공극)는 많은 환자에게 심미적인 문제를 일으킬 수 있다. 치간이개는 어떠한 연령대에서도 발생할 수 있으며, 다양한 원인과 치료법이 알려져 있다. 치간이개의 원인, 정도 및 치아의 배열 상태에 따라 그 치료 방법이 달라지겠지만, 복합레진(composite resin)^{1,2)}을 이

용한 직접수복, 도재 라미네이트(porcelain laminate veneer),^{3,4)} 도재전장관(all-ceramic crown) 혹은 금속도재전장관(porcelain-fused to metal crown)⁵⁾을 이용한 간접수복, 그리고 교정치료(orthodontic treatment)⁶⁾를 통한 치열의 재배열 등을 통해 해결이 가능하다.

치간이개의 치료 목적은 치아 사이 공간을 폐쇄함으로써 심미회복과 더불어 발음 교정 및 조화롭지 못한 치아의 형태로 인해 야기된 환자의 정신적 장애를 해소하는데 있지만, 그 목적을 달성하기 위해서는 구강 내에서 기능력(functional loading)을 받을 때 탈락되지 않고 유지될 수 있어야 한다. 구강 내에서의 기능 시 발생하는 응력으로 인해 취약한 부분은 파절이 일어나고, 그로 인해 수복물의 실패가 발생한다. 일반적으로 도재 라미네이트 수복물의 성공률은 53-91%⁷⁻¹¹⁾로 다양하게 보고되고 있다.

치의학 영역에서 주로 사용되었던 구조물의 계면 및 내부의 응력 분포 양상을 알아볼 수 있는 방법에는 광탄성응력 분석법(photoelastic stress analysis),^{12,13)} 변형계이지 측정법(strain gauge measurement),^{14,15)} three-dimensional deformation analysis,¹⁶⁾ 유한요소분석법(finite element analysis) 등 여러 가지가 있지만, 컴퓨터 발달에 힘입어 내부 응력의 분포양상을 분석하기 편리하고 하중에 취약한 부위를 결정하는데 있어서 다른 방법에 비해 장점을 지니고 있어^{15,17,18)} 유한요소분석법을 이용한 연구가 많아지고 있다. 유한요소분석법은 전체 구조(structure)를 모델링(modeling)과 격자형성(meshing)을 통해 개개의 요소(element)로 나눈 다음, 일련의 컴퓨터 연산 과정을 통해 각 요소와 전체 구조의 응력(stress)과 변형(strain)을 계산해 내는 방법으로, 일종의 컴퓨터 시뮬레이션(simulation) 기법이라 할 수 있다. 이러한 구조 분석은 압력과 열 변화 등을 비롯한 외부 자극에 의한 변화, 자기장 분포 영역, 유체 유동 등 기타 다른 여러 방법으로 접근할 수 없는 연속적인 영역의 문제들을 관찰할 수 있게 하며, *in vivo* 혹은 *in vitro* 측정이 불가능한 생체재료(biomaterial)나 인체 조직(human tissue)의 기계적 특성을 이해하는데 이용될 수 있다.¹⁹⁾ 치의학에서는 치아²⁰⁻²²⁾ 및 악골^{23,24)} 그리고 치과재료²⁵⁻²⁷⁾의 응력 분포 분석에 널리 이용되고 있으며, 1990년대 이후로 유한요소법을 이용한 연구 경향은 점점 늘어나고 있는 추세이다. 유한요소법을 구강내 전치부에 적용한 여러 연구의 경우, 수복된 치아 및 수복물의 계면에서 발생하는 응력 분포(stress distribution)를 분석한 사례가 많았으며, 주로 도재 라미네이트의 내부 및 접착계면에서의 응력분포가 치아 삭제 형태(tooth preparation design),²⁸⁻³¹⁾ 변연 디자인(margin design),³²⁾ 하중의 방향(load angle)³³⁾ 그리고 사용된 재료³⁴⁾에 따라 어떻게 바뀌는지에 관해서 연구가 이루어졌다.

전치부 치간이개 부위를 복합레진 혹은 세라믹으로 수복

할 경우에는, 치아의 인접면에서부터 수복물의 최종 인접면까지 추가된 연장부위(free extension)가 필연적으로 생길 수 밖에 없는데, 복합레진 및 세라믹의 취약한 인장강도와 치질과의 접착계면으로 인해 이 부위에서의 수복물의 파절 또는 접착계면에서의 탈락을 쉽게 일으킬 수 있다.³⁵⁾ 접착계면에서의 응력 분석을 위해 Zarone 등,²⁹⁾ Seymour 등,³⁰⁾ Troedson 등³¹⁾이 유한요소분석법을 이용하여 도재 라미네이트의 변연 디자인 및 치아 삭제 형태에 따른 도재 라미네이트 하방의 접착계면에서 발생하는 응력 분포에 관해 연구한 바 있으며, 2009년에 Chander 등³³⁾은 전치부 치간이개를 도재 라미네이트로 수복한 경우에 연장부위가 커지거나, 하중의 크기 및 적용각도가 커지면 응력이 증가함을 유한요소법을 통해 관찰한 바 있다.

임상적인 상황에서, 부적절한 치아의 배열 상태 및 변색 등의 다른 문제가 없는 경우 전치부 치간이개 부위는 대개 치간이개 양에 따라 치료방법이 결정되는 경향이 있다. 간격이 좁은 경우에는 치질의 보존, 인접 치아와의 자연스러운 색조화 및 모양 형성의 용이성^{36,37)}으로 인해 일반적으로 복합레진으로 수복하는 경우가 많으며, 간격이 넓어질 경우에는 시술 시간이 길어지고, 구강 내에서의 직접 수복으로 조화로운 모양을 형성하기 다소 어려운 측면뿐 아니라, 탈락을 방지하기 위한 유지력을 얻고 보다 넓은 접착면적을 확보하기 위해서 도재 라미네이트 혹은 도재전장관 등의 간접수복을 시행하는 경향이 있다. 특히, 도재 라미네이트의 경우에는 치질의 삭제량이 적으며, 색조 안정성이 뛰어나고, 표면 처리 후 치질과의 접착성이 뛰어나기 때문에³⁸⁾ 1980년대 초반에 소개된 이후³⁹⁾ 전치부 간접수복에 많이 쓰이고 있다. 그러나 이러한 수복 기준 또한 치간이개 양에 따른 수복 방법의 용이성에 의한 분류이며, 현재까지 치간이개 양에 따른 응력의 차이에 근거한 수복재료의 선택이나, 외동의 형태를 포함한 수복방법의 기준에 관한 연구는 부족하다.

이에, 본 연구에서는 복합레진 및 도재 라미네이트로 전치부 치간이개를 수복할 때, 치간이개의 간격과 수복방법이 수복물의 접착계면에서의 응력분포에 미치는 영향을 비교하고, 치간이개의 양에 따른 수복방법의 기준을 제시하고자 삼차원 유한요소분석법(3D-FEM three dimensional-finite element analysis)을 이용하여 이를 평가하였다.

II. 연구 재료 및 방법

1. 구조 및 기하학적 형상의 정의(Definition of structure and geometric conditions)

균열이나 치아우식이 없는 사람의 발치된 상악중절치를 micro CT (SkyScan 1072, SkyScan N.V., Belgium)를

이용하여 스캔한 다음, 획득된 디지털 영상을 3D image software (V-works 4.0, Cybermed Inc., Korea)를 이용하여 3차원으로 재구성하였다. 서로 다른 형태의 수복상황을 재현하기 위해 HyperView Player v9.0 (Hyperwork, Altair, Korea)을 이용하여 추가적인 형태를 부여하여 복합레진 혹은 도재 라미네이트로 수복된 모습의 solid model을 형성하였다(Figure 1). 모든 수복물의 치경부쪽 경계는 백악법랑경계(cemento-enamel junction) 상방 1 mm까지 설정하였으며, 치아의 순면 삭제가 필요한 경우는 0.5 mm로 균일한 삭제가 이루어지게 하였다. 레진 시멘트와 bonding layer의 두께는 각각 100 μm ,³⁰⁾ 20 μm 를 부여하였다. 수복형태는 다음과 같이 크게 네 가지 범주를 고려하였으며, 유한요소 모델의 대칭성으로 인해 편측 수복형태만을 재연하는 것으로 가정하였다(Table 1).

Type I. 인접면을 최소한으로 수복하는 경우: 순면은 치간이개를 폐쇄할 수 있을 정도로만 최소한으로 피개하며, 구개면은 설측융기(lingual ridge) 직전까지 연장하였다.

Type II. 순면의 절반까지 수복하는 경우: 순면은 치간이

개를 폐쇄하고 원심측으로 더 연장하여 전체 순면 면적의 절반까지 피개하며, 구개면은 설측융기 직전까지 연장하였다.

Type III. 치아 삭제 후 순면의 2/3까지 수복하는 경우: 복합레진으로 피개될 최종 형태에 해당하는 순면을 근심으로부터 원심측으로 2/3까지 0.5 mm 삭제한 다음, 치간이개 부위를 포함하여 순면의 2/3까지 피개하였다. 구개면은 설측융기 직전까지 연장하였다.

Type IV. 도재 라미네이트로 수복하는 경우: feathered-edge preparation technique으로 0.5 mm 가량 순면을 삭제하여 지대치 형성 후, 도재 라미네이트로 치간이개 부위를 포함하여 삭제된 순면을 피개하였다.

2. 격자 형성 및 사용된 재료의 물성 (Mesh generation and material properties)

형성된 모든 solid model은 HyperView Player v9.0을 통해 격자형성(mesh generation) 과정을 거쳐 최종 유한

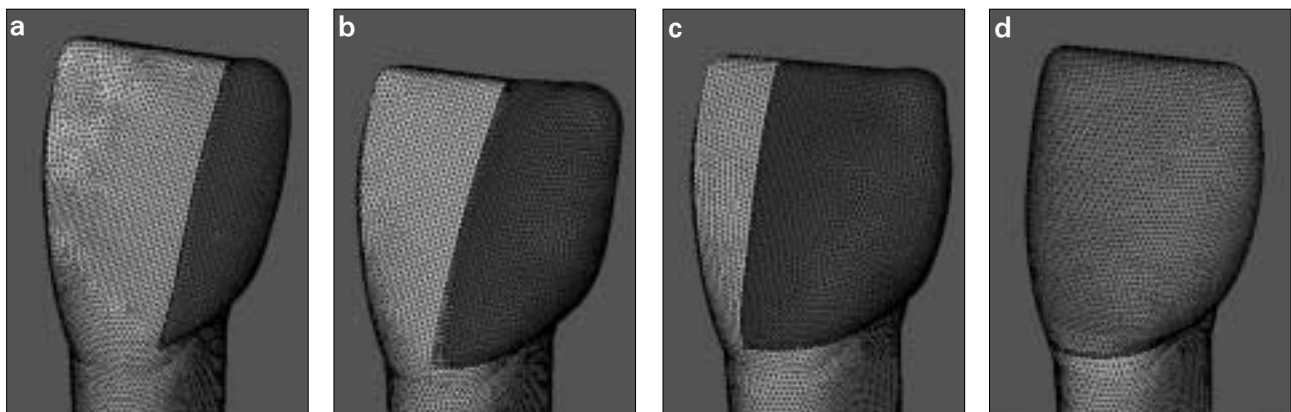


Figure 1. Finite element models of each type of restorations. a. Type I, b. Type II, c. Type III, d. Type IV.

Table 1. Three-dimensional finite element models simulating composite resin and porcelain laminate veneer restorations, with or without tooth preparation, for restoring the interdental spaces ranging from 1 mm to 4 mm

| Amount of Interdental Space | Composite Resin* | | | Porcelain Laminate* |
|-----------------------------|------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | Minimal | Up to labial 1/2 | Up to labial 2/3 with tooth reduction | |
| 1 mm | Type I-1 | Type II-1 | Type III-1 | Type IV-1 |
| 2 mm | Type I-2 | Type II-2 | Type III-2 | Type IV-2 |
| 3 mm | Type I-3 | Type II-3 | Type III-3 | Type IV-3 |
| 4 mm | Type I-4 | Type II-4 | Type III-4 | Type IV-4 |

*The tooth model was reduced by 0.5 mm up to 2/3 of labial surface for type III model and up to distal surface for type IV model.

Each finite element model was designed as restoring half the space of the amount of interdental space (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm) because opposite tooth model was under symmetrical condition.

Table 2. Mechanical properties of materials used

| Materials | Elastic modulus (GPa) | Poisson's Ratio |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Enamel | 84.1 ⁴³⁾ | 0.30 ⁴⁴⁾ |
| Dentin | 18.6 ⁴⁵⁾ | 0.32 ⁴⁶⁾ |
| Pulp | 0.002 ⁵²⁾ | 0.45 ⁵²⁾ |
| Periodontal ligament | 0.05 ⁴⁹⁾ | 0.45 ⁴⁹⁾ |
| Composite Resin (Z100) | 20 ⁴⁷⁾ | 0.24 ⁴⁴⁾ |
| Bonding layer (adhesive) | 2.1 ⁴⁴⁾ | 0.30 ⁴⁴⁾ |
| Resin-based Cement (Variolink II) | 8.3 ⁴⁸⁾ | 0.35 ⁴⁸⁾ |
| Porcelain (IPS Empress) | 65 ⁵⁰⁾ | 0.19 ⁵⁰⁾ |
| Cortical bone | 13.7 ⁵¹⁾ | 0.30 ⁵¹⁾ |
| Trabecular bone | 1.37 ⁵¹⁾ | 0.30 ⁵¹⁾ |

요소모델로 변환되었다. 각 유한요소모델은 사면체요소(tetrahedral solid element)로 구성되었다. 이용된 모든 재료는 균질하며(homogeneous), 선형 탄성 거동을 보이고(linearly elastic), 등방성의(isotropic) 성질을 가지며, 재료들 간의 결합은 완전결합(complete bonding)을 하는 것으로 가정하였다.²⁹⁾ 각 재료들의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

3. 경계조건, 하중조건 및 데이터 처리(Boundary conditions, loading, and data processing)

Overbite와 Overjet의 평균값⁴⁰⁾ 및 전치부의 생리적 교합력을 고려하여 50 N²⁸⁾의 힘을 Figure 2와 같이 적용하였다. 찢김력(tearing force)을 재연하기 위해 상악치아의 장축에 125°에 해당하는 방향으로 힘을 가하였다.²⁹⁾ 치근은 치주인대, lamina dura, 피질골, 해면골로 구성된 악골에 고정시켜 생리적 동요도를 허용하였다.

데이터의 후처리(postprocessing)는 ABAQUS 6.9 (ABAQUS Inc., Providence, RI)를 통해 시행하였으며, 결과는 접착계면에서의 응력분포 패턴으로 표시하였다. 응력값으로 von Mises stress를 이용하여 응력분포를 분석하였으며, 결과는 numerical value 혹은 color coding으로 나타내었다.

III. 결 과

치간이개의 크기 및 수복 형태에 따른 접착계면에서의 응력분포는 Figure 3에 나타난 바와 같다. von Mises stress에 따른 전체적인 응력분포 양상(pattern of stress distri-

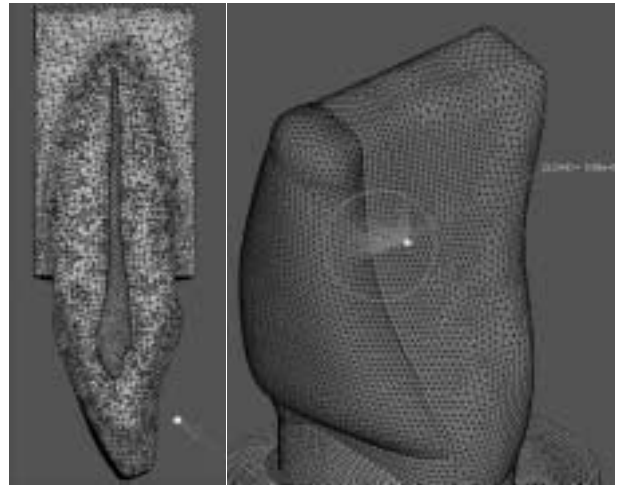


Figure 2. Load angulation. 50 N of load was applied at 125° angles (tearing force) with the tooth's longitudinal axis at the palatal surface of the crown.

Table 3. Maximum von Mises stress within each model with varying interdental spaces (Unit: MPa)

| Amount of Interdental space | Type I | Type II | Type III | Type IV |
|-----------------------------------|--------|---------|----------|---------|
| 1 mm | 2.95 | 2.55 | 2.79 | 4.31 |
| 2 mm | 3.50 | 3.80 | 3.08 | 5.17 |
| 3 mm | 4.15 | 5.08 | 5.14 | 5.93 |
| 4 mm | 5.69 | 6.80 | 6.55 | 6.98 |

The maximum values were obtained at the cervical area near the line angle between the labial surface and mesial surface.

bution)은 모든 수복형태(type of restoration)에 대해 유사한 분포를 보였다. 적용된 힘의 방향과 동일한 방향으로 접착계면을 따라 분산되어 낮은 값으로 응력이 전달된 후 치경부에서 다시 집중되어 높게 나타났다. 각각의 수복형태 및 치간이개 간격에 대해 치경부에서 관찰되는 Maximum von Mises stress 값을 Table 3에 정리하였으며, Figure 4에 그래프로 나타내었다. 모든 수복형태에서 최대응력값은 치경부 변연을 따라 인접면과 순면이 이행되는 선각 부위에서 관찰되었다.

동일한 수복형태 내에서는 치간이개 간격이 넓어질수록 최대응력값이 증가하였다. Type I의 경우 치간이개량이 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm로 증가함에 따라 치경부 최대응력은 각각 2.95, 3.50, 4.15, 5.69 MPa를 보였으며, Type II의 경우 각각 2.55, 3.80, 5.08, 6.80 MPa를 나타내었다. 치간이개량이 1.0 mm 일 경우는 Type II가 Type I에

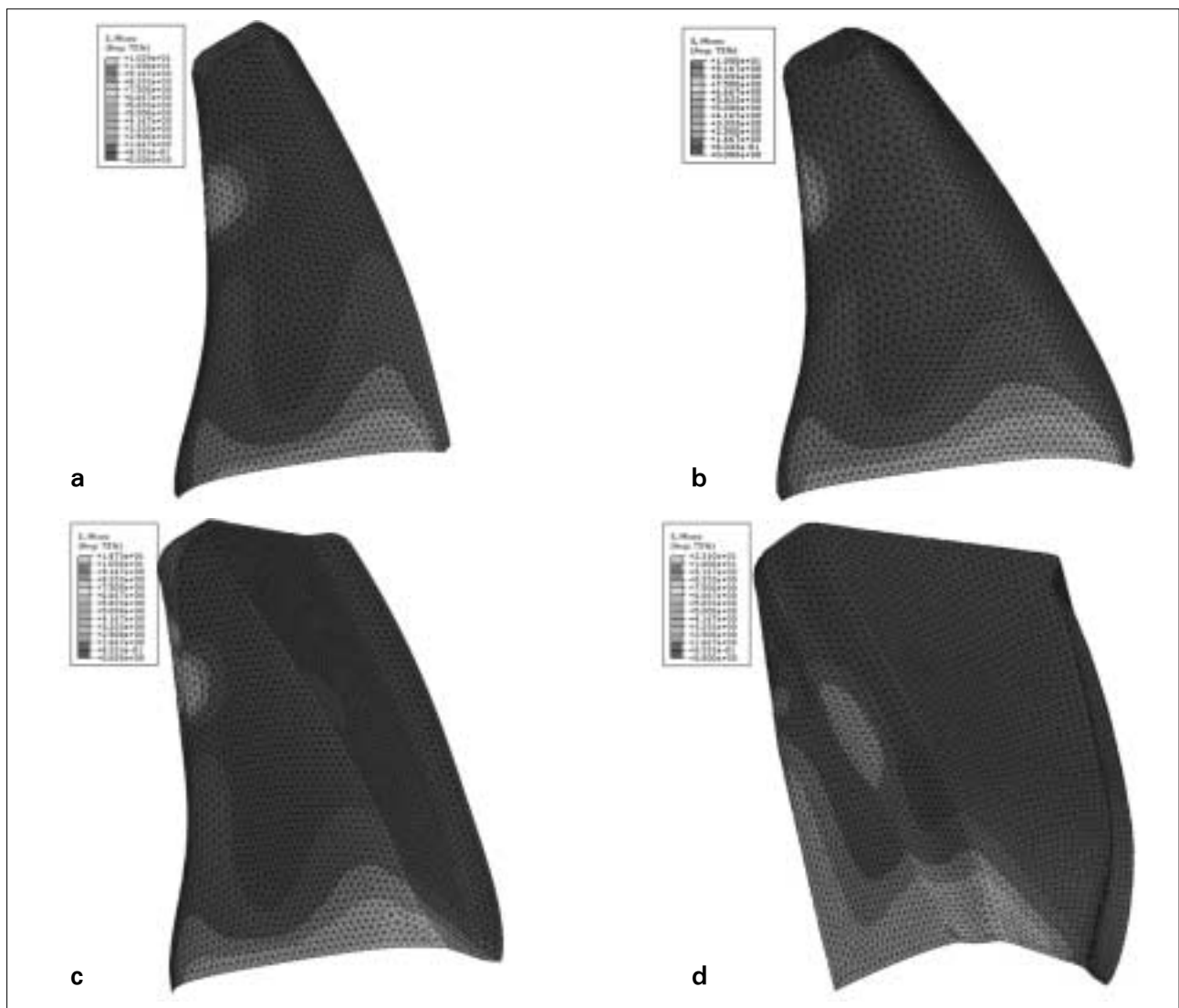


Figure 3. von Mises stress distribution patterns of each type of restoration. These figures represent stress distribution at the tooth side of bonding layer. a. Type I with interfacial space of 2.0 mm. b. Type II with interfacial space of 2.0 mm. c. Type III with interfacial space of 2.0 mm. d. Type IV with interfacial space of 2.0 mm.

비해 낮은 최대응력값을 보이지만, 그 외 간격에 대해서는 Type II가 Type I보다 높은 최대응력값을 나타내었다. Type III와 Type IV의 경우에도 치경부 최대응력값은 각각 2.79, 3.08, 5.14, 6.55 MPa 및 4.31, 5.17, 5.93, 6.98 MPa를 보여 치간이개량이 증가함에 따라 치경부 최대응력값이 증가하는 경향을 보였다. Type III는 치간이개량이 1.0, 2.0 mm일 때 Type I보다 낮은 최대응력값을 보였으나 치간이개량이 3.0, 4.0 mm일 때는 Type I보다 높은 최대응력값을 보였다.

Type IV의 경우, 치간이개량에 관계없이 Type I, II, III보다 항상 높은 최대응력값을 보였으나, 치간이개 간격의 증가에 따른 응력값의 증가율은 Type I, II, III보다 낮게

관찰되었다(Figure 4). Type I, III의 경우 각각 치간이개 간격 3.0, 2.0 mm 이후로 최대응력값이 크게 증가하였으며, Type II는 모든 치간이개 간격에 대해 최대응력값이 지속적으로 높게 증가하였다.

IV. 총괄 및 고찰

본 연구에서는 복합레진 및 도재 라미네이트로 전치부 치간이개를 수복할 때 수복물의 접착계면에서 발생하는 응력 분포 차이를 분석하고, 치간이개의 양에 따른 수복방법의 기준을 제시하고자 삼차원 유한요소분석법을 이용하여 이를 알아보았다. 유한요소분석법은 정확한 해석결과를 위해

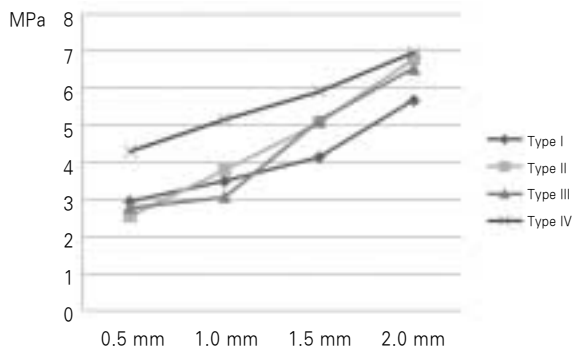


Figure 4. Line graphs of maximum von Mises stress values at the cervical area of the tooth side of bonding layer. Horizontal axis means interdentary space. Vertical axis means von Mises stress values (MPa).

형성된 모델이 실제와 유사해야 하며, 이용된 재료의 정확한 물리적 성질 및 발생 가능한 모든 경계조건을 모델에 부여할 수 있어야 한다. 그러나 치아와 같은 생체조직은 해부학적 형태가 다양하고, 구강 내에서 적용되는 경계조건들을 유한하게 한정 짓는 것이 불가능하기 때문에 결과를 해석하는 데 있어서 유한요소분석법이 가지는 한계를 고려해야 한다. 다양한 인체조직의 물성에 대한 이용 가능한 자료의 한계로 인하여 모든 재료는 균질이고, 선형 탄성 거동을 보이며, 등방성인 것으로 가정하였고, 재료들 간에는 완전결합된 것으로 가정하였다.²⁹⁾ 또한 일반적으로 격자의 형성은 육면체요소를 사용하나 본 연구에서는 치아 및 수복형태를 재연하는데 사면체요소(tetrahedral solid element)가 사용되었다. 사면체요소는 변위에 대해서는 비교적 정확하나 응력의 측면에서는 정확성이 떨어지기 때문에 정확한 해석결과가 필요한 부위에서는 사용을 피하고 격자의 크기를 변화시키고자 하는 경우에 육면체요소간의 연결을 위해 주로 사용된다.¹⁹⁾ 그러나 치아의 해부학적 형태가 주로 곡면으로 이루어져 있기 때문에 사면체요소가 형태의 재연에 더 적합하였으며, 사면체와 육면체의 두 가지 요소를 혼재하여 사용하는 것은 해석결과의 정확성을 더 떨어뜨리기 때문에 본 연구에서는 사면체요소를 선택하였다. 하중조건에서는, 응력분포를 평가하기 위해 연장부위의 특정 질점에 선택적으로 힘을 적용하는 것이 충분할 것으로 생각되었으나, 이 경우 힘이 적용되는 부위에만 국부적으로 응력이 발생하여 그 분포를 평가할 수 없었으며, 과도한 응력으로 격자가 파괴되어 나타나는 결과를 보였다. 선형으로 넓게 힘을 분산시켜 치아 및 수복물에 전체적으로 힘이 적용되도록 한 경우 적절한 응력분포를 관찰할 수 있었고, 또한 이 경우가 실제 임상과 유사한 형태로 하중을 적용할 수 있을 것으로 생각

되어 본 연구에서는 다소 넓은 범위에 걸쳐 하중을 부여하였다.

치간이개는 그 정도 및 치아의 배열 상태에 따라 치료법이 달라지겠지만, 교정치료⁶⁾를 통한 치아의 재배열을 제외한다면, 일반적으로 복합레진^{1,2)} 혹은 도재 라미네이트^{3,4)}를 이용하여 공간을 수복함으로써 해결이 가능하다. 복합레진을 사용하는 경우는 대개 치아를 삭제하지 않고 치간이개 부위에 직접 복합레진을 접착하여 수복하거나, 혹은 레진으로 피개될 부위의 외형 변화가 필요한 경우에는 순면을 삭제하여 수복하기도 한다.³⁶⁾ 본 연구에서는 치아를 삭제하지 않고 복합레진으로 수복하는 경우를 재연하기 위해 치아 삭제 없이 인접면만 최소한으로 피개하는 경우(Type I)와, 기계적인 결합력을 증진시키기 위해 치아 삭제 없이 원심측으로 순면의 절반까지 복합레진을 연장하여 피개하는 경우(Type II)를 포함하였다. 또한 복합레진으로 수복하되 치질이 손실된 경우를 재연하기 위해 치아 순면의 원심 2/3까지 0.5 mm를 삭제 후 수복하는 경우(Type III)를 가정하였다. 치아삭제 형태에 따른 도재 라미네이트의 파절강도에 관해서는 다양한 견해가 있으나 상하악의 전치부에 가해지는 약한 교합력을 고려할 때 치아삭제 형태에 관계없이 임상적인 사용에 큰 차이가 없으며,^{14,41)} feathered-edge preparation technique이 치질의 손실이 적고, 심미적이어서 도재 라미네이트의 경우(Type IV)는 feathered-edge preparation technique을 이용하여 치아를 수복하였다.

평가 응력의 선정은 압축응력, 인장응력 등의 주응력(principal stress)으로 표현하거나 혹은 주응력간의 차이에 대한 root mean square값인 von Mises stress로 나타낼 수 있는데, von Mises stress의 경우 응력분포 패턴을 주응력의 종류 및 크기에 관계없이 종합적으로 한눈에 알아보기 편리하며, 손상이 발생할 수 있는 부위를 나타내는 지표로서 현재 널리 쓰이고 있다.^{29,42)} 이에 본 연구에서는 von Mises stress를 이용하여 접착계면의 응력분포를 평가하고자 하였다.

결과 해석에 의한 응력분포 패턴은 수복형태에 관계없이 유사한 양상으로 나타났는데, 하중의 방향과 동일한 방향으로 접착계면을 따라 응력이 전달된 다음 치경부에서 다시 집중되어 높게 나타났다. 접착계면을 따라 응력이 전파되는 방향은 적용된 하중의 방향과 연관이 있는 것으로 보이며, 치경부에서 응력값이 높아지는 것은 레진의 두께가 줄어들면서 응력이 분산될 수 있는 매질(media)이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

치간이개의 간격이 넓어질수록 모든 수복형태에서 최대응력값이 증가하는 현상을 관찰할 수 있었는데, 이는 Chander 등³³⁾에 의한 이전 연구 결과와도 일치하였다. 최대응력값은 인접면과 순면이 이행되는 선각 부위에서 관찰되었다. Type I과 Type II를 비교해 보면 치간이개 간격이

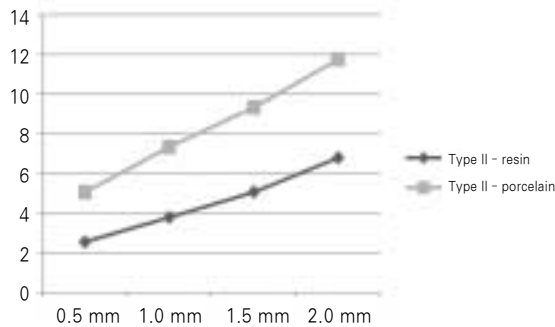


Figure 5. Maximum von Mises stress values in Type II restoration which was restored with porcelain laminate veneer instead of composite resin.

증가하면서 Type II가 Type I에 비해 높은 최대응력값을 보였음을 알 수 있다. Type II에서 복합레진의 순면 피개 정도를 원심부로 연장함으로써 기계적인 결합 면적이 늘어난 것과 더불어 하중에 대해 응력이 분산될 접착계면이 증가하여 최대응력값이 감소될 것으로 기대하였으나 오히려 최대응력값은 증가하였다. 2중 지렛대의 원리를 적용하더라도 작용점(치경부 최대응력부위)과 받침점(레진으로 피개된 순면의 최원심부위)의 거리가 늘어나면서 동일한 하중에 대해 작용점에 가해지는 응력값이 줄어들 것으로 기대되었다. 그러나 본 실험에서는 찢김력 재연을 위해 상악치아 장축에 125°로 하중을 적용하였을 뿐이고, 임상 상황에서는 구강내에서 작용하는 힘이 보다 다양한 방향으로 적용될 수 있다. 하중에 대한 조건이 바뀔 경우, 효율적으로 응력분산에 참여하는 접착계면 영역이 달라질 수 있으며, 이 경우 응력분포 양상 및 응력값의 차이가 발생할 수 있을 것으로 보인다. 하중의 적용 위치 및 적용 방향 등을 바꾸어 실험한 추가적인 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

Type IV는 모든 치간이개 간격에 대해 Type I, II, III보다 항상 높은 최대응력값을 나타냈다. 수복 재료의 차이가 접착 계면에서의 응력분포에 미치는 영향을 비교하기 위해 Type II의 복합레진을 도재의 물성으로 대체하여 동일한 해석을 시행하였다(Figure 5). 도재로 바꾼 경우 최대응력값이 더 크게 관찰되었다. 본 실험에 사용되었던 복합레진과 도재의 탄성계수 값은 각각 20 GPa,⁴⁷⁾ 65 GPa⁵⁰⁾로서 약 3 배 정도의 차이를 보이는데, 도재의 경우 복합레진에 비해 높은 탄성계수로 인해 전달된 하중이 수복재료 자체에 의해 흡수, 분산되지 못하고 하부의 접착계면에 더 큰 응력을 발생시킨 것으로 생각된다. 이는 Type IV가 Type I, II, III에 비해 더 큰 최대응력값을 보인 이유로 설명될 수 있다.

그러나 치간이개 간격의 증가에 따른 응력값의 증가율은 Type IV가 Type I, II, III보다 낮게 관찰되었는데, Type I, II, III의 경우 치간이개 간격이 증가하면서 응력값의 증가율이 높아지는 경향을 보인 반면, Type IV는 그래프에서 비교적 완만한 기울기를 보였다(Figure 4). Type IV의 경우, 전체 접착계면의 면적 및 하중에 대한 유효 응력 분포 영역이 Type I, II, III에 비해 넓기 때문에 하중을 보다 잘 분산시켜서 응력값이 낮게 증가하였을 것으로 생각해 볼 수 있다. 또한 Type IV는 다른 수복형태와는 달리 순면의 원심측 연장부위 경계가 순면의 일부에서 끝나는 것이 아니라 반대측으로 연장되어 모든 순면을 덮어주어 순면 치아를 감싸는 형태였는데, 이러한 구조적 차이로 인해 원심측에서 다소의 응력 분산이 발생하여 응력을 보다 효율적으로 분산시킬 수 있었던 것으로 생각된다. 이와 더불어 도재 라미네이트 하방의 레진 시멘트 층의 낮은 탄성계수로 인해 다소의 응력 분산이 레진 시멘트 층에서 발생한 점도 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 이러한 결과를 통해 예측해보면, Type IV가 Type I, II, III에 비해 하중의 분산에 있어서는 보다 효율적임을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해 보면, 치간이개 간격이 좁을 경우에는 복합레진으로 수복하는 것이 응력 분포의 측면에서 효율적이며, 내원 횟수 감소 및 치질의 보존 등을 비롯한 임상적 측면에서도 유리할 것으로 생각된다. 그러나 치간이개 간격이 넓어지면 도재 라미네이트와 복합레진의 접착계면에 분포되는 최대응력값의 격차가 줄어들고, 또한 최대응력값의 증가율이 도재 라미네이트의 경우가 복합레진보다 낮기 때문에, 넓은 부위의 치간이개 부위를 수복할 경우에는 도재 라미네이트를 이용하는 것이 응력분포의 측면에서 유리할 것으로 생각된다.

V. 결 론

이번 연구에서는 3차원 유한요소분석법을 이용하여 치간이개의 간격과 수복방법이 수복물 접착계면에서의 응력분포에 미치는 영향을 평가하였다. 이 실험의 한계 내에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 모든 수복 형태에 대해, 치간이개 간격이 넓어질수록 접착계면에서 발생하는 최대응력값은 증가한다.
2. 도재 라미네이트로 치간이개 부위를 수복할 경우 (Type IV), 복합레진으로 수복하는 경우 (Type I, II, III)에 비해 높은 최대응력값을 나타낸다.
3. 치간이개 간격이 넓어질수록 도재 라미네이트와 복합레진에서 발생하는 최대응력값의 차이는 감소하며, 치간이개 간격의 증가에 따른 최대응력값의 증가율은 도재 라미네이트가 복합레진으로 수복하는 경우보다 낮다.

참고문헌

- Heymann HO, Hershey HG. Use of composite resin for restorative and orthodontic correction of anterior interdental spacing. *J Prosthet Dent* 53(6):766-771, 1985.
- Lenhard M. Closing diastemas with resin composite restorations. *Eur J Esthet Dent* 3(3):258-268, 2008.
- Pensler AV. Multiple-diastema porcelain laminate veneers: a case study. *Compendium* 14(11):1470-1478, 1993.
- Nash RW. Closing a large central diastema using a pressed ceramic. *Dent Today* 22(11):62-65, 2003.
- Aherne T. Treatment of maxillary anterior diastema using resin-bonded porcelain crown restorations. *Pract Proced Aesthet Dent* 13(6):443-445, 2001.
- Tanaka OM, Furquim BD, Pascotto RC, Ribeiro GL, B?sio JA, Maruo H. The dilemma of the open gingival embrasure between maxillary central incisors. *J Contemp Dent Pract* 9(6):92-98, 2008.
- Dumfahrt H, Schaffer H. Porcelain laminate veneers. A retrospective evaluation after 1 to 10 years of service. Part II. Clinical results. *Int J Prosthodont* 13:9-18, 2000.
- Peumans M, De Munck J, Fieuws S, Lambrechts P, Vanherle G, Van Meerbeek B. A prospective ten-year clinical trial of porcelain veneers. *J Adhesive Dent* 6:65-76, 2004.
- Burke FJ, Lucarotti PS. Ten-year outcome of porcelain laminate veneers placed within the general dental services in England and Wales. *J Dent* 37:31-38, 2009.
- Shaini FJ, Shortall AC, Marquis PM. Clinical performance of porcelain laminate veneers. A retrospective evaluation over a period of 6·5 years. *J Oral Rehabil* 24:553-559, 1997.
- Dunne SM, Millar BJ. A longitudinal study of the clinical performance of porcelain veneers. *Br Dent J* 175:317-321, 1993.
- Hui KK, Williams B, Davis EH, Holt RD. A comparative assessment on the strengths of porcelain veneers for incisor teeth dependent on their design characteristics. *Br Dent J* 171:51-55, 1991.
- Highton R, Caputo AA, Mátyás J. A photoelastic study of stresses on porcelain laminate preparations. *J Prosthet Dent* 58:157-161, 1987.
- Hahn P, Gustav M, Hellwig E. An *in vitro* assessment of the strength of porcelain veneers dependent on tooth preparation. *J Oral Rehabil* 27:1024-1029, 2000.
- Morin DL, Douglas WH, Cross M, DeLong R. Biophysical stress analysis of restored teeth: experimental strain measurement. *Dent Mater* 4:41-48, 1988.
- Karl M, Dickinson A, Holst S, Holst A. Biomechanical methods applied in dentistry: a comparative overview of photoelastic examinations, strain gauge measurements, finite element analysis and three-dimensional deformation analysis. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 17(2):50-57, 2009.
- Roeh ES, Ross GK. Tooth stiffness with composite veneers: a strain gauge and finite element evaluation. *Dent Mater* 10:247-252, 1994.
- Morin DL, Cross M, Voller VR, Douglas WH, DeLong R. Biophysical stress analysis of restored teeth: modeling and analysis. *Dent Mater* 4:77-84, 1988.
- Hutton DV. 정현조 외 공역. 유한요소 해석의 기초(fundamentals of finite element analysis). 도서출판 인터비전, 2006.
- Cattaneo PM, Dalstra M, Melsen B. The finite element method: a tool to study orthodontic tooth movement. *J Dent Res* 84:428-433, 2005.
- Magne P, Belser UC. Rationalization of shape and related stress distribution in posterior teeth: a finite element study using nonlinear contact analysis. *Int J Periodont Res Dent* 22:425-433, 2002.
- Dejak B, Mlotkowski A, Romanowicz M. Finite element analysis of mechanism of cervical lesion formation in simulated molars during mastication and parafunction. *J Prosthet Dent* 94:520-29, 2005.
- Boccaccio A, Lamberti L, Pappalettere C, Cozzani M, Siciliani G. Comparison of different orthodontic devices for mandibular symphyseal distraction osteogenesis: A finite element study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 134:260-269, 2008.
- Ona M, Wakabayashi N. Influence of alveolar support on stress in periodontal structures. *J Dent Res* 85:1087-1091, 2006.
- Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH. Do dental composite always shrink toward the light. *J Dent Res* 77(6):1435-1445, 1998.
- Chun HJ, Shin HS, Han CH, Lee SH. Influence of implant abutment type on stress distribution in bone under various loading conditions using finite element analysis. *Int J Oral Maxillofac Implants* 21:195-202, 2006.
- H?bsch PF, Middleton J, Knox J. A finite element analysis of the stress at the restoration-tooth interface, comparing inlays and bulk fillings. *Biomaterials* 21:1015-1019, 2000.
- Magne P, Douglas WH. Design optimization and evolution of bonded ceramics for the anterior dentition: A finite-element analysis. *Quintessence Int* 30:661-672, 1999.
- Zarone F, Apicella D, Sorrentino R, Ferro V, Aversa R, Apicella A. Influence of tooth preparation design on the stress distribution in maxillary central incisors restored by means of alumina porcelain veneers: A 3D-finite element analysis. *Dent Mater* 21:1178-1188, 2005.
- Seymour KG, Cherukara GP, Samarawickrama DY. Stress within porcelain veneers and the composite lute using different preparation designs. *J Prosthodont* 10:16-21, 2001.
- Troedson M, Derand T. Shear stresses in the adhesive layer under porcelain veneers. A finite element method study. *Acta Odontol Scand* 56:257-262, 1998.
- Troedson M, Derand T. Effect of margin design, cement polymerization, and angle of loading on stress in porcelain veneers. *J Prosthet Dent* 82:518-524, 1999.
- Chander NG, Padmanabhan TV. Finite element stress analysis of diastema closure with ceramic laminate veneers. *J Prosthodont* 18(7):577-581, 2009.
- Dejak B, Mlotkowski A. Three-dimensional finite element analysis of strength and adhesion of composite resin versus ceramic inlays in molars. *J Prosthet Dent* 99(2):131-140, 2008.
- Anusavice K. Phillips' Science of Dental Materials. 10th ed., Philadelphia. Saunders, p590-595, 1996.
- Baratieri LN. 신동훈 역. 전치부심미학(Direct adhesive restoration on fractured anterior teeth). 나래출판사,

- p265-312, 2000.
37. Baratieri LN. Composite Restorations in Anterior Teeth: Fundamentals and Possibilities. Quintessence books., Sao Paulo, 2005.
38. Aschheim KW, Dale BG. Esthetic dentistry: a clinical approach to techniques and materials. 2nd ed., Mosby Inc., St. Louis, p151-55, 2001.
39. Jordan RE, Suzuki M, Senda A. A clinical evaluation of porcelain laminate veneers: a four year recall report. *J Esthet Dent* 1:126-137, 1989.
40. Graber TM. Normal occlusion. In Orthodontics, principles and practice. 3rd ed., WB Saunders Co., 1972.
41. Carlsson GE. Bite force and chewing efficiency. *Front Oral Physiol* 1:265-292, 1974.
42. Ausiello P, Rengo S, Davidson CL, Watts DC. Stress distributions in adhesively cemented ceramic and resin-composite Class II inlay restorations: a 3D-FEA study. *Dent Mater* 20:862-872, 2004.
43. Craig RG. Compressive Properties of Enamel, Dental Cements, and Gold. *J Dent Res* 40:936-945, 1961.
44. Craig RG. Restorative dental materials. MO: The C.V. Mosby Co., St. Louis., 1985.
45. Sano H, Ciucchi B, Matthews WG, Pashley DH. Tensile properties of mineralized and demineralized human and bovine dentin. *J Dent Res* 73:1205-1211, 1994.
46. Farah JW, Craig RG, Meroueh KA. Finite element analysis of three- and four-unit bridges. *J Oral Rehabil* 16:603-611, 1989.
47. Lin CP. Structure-property-function relationships in the dentin-enamel complex and tooth-restoration interface(dissertation). Minneapolis, MN: University of Minnesota. 1993.
48. Magne P, Perakis N, Belser UC, Krejci I. Stress distribution of inlay-anchored adhesive fixed partial dentures: a finite element analysis of influence of restorative materials and abutment preparation design. *J Prosthet Dent* 87:516-527, 2002.
49. Rees JS. Elastic modulus of the periodontal ligament. *Biomaterials* 18:995-999, 1997.
50. Albakry M. Biaxial flexural strength, elastic moduli, and x-ray diffraction characterization of three pressable all-ceramic materials. *J Prosthet Dent* 89:374-380, 2003.
51. Pegoretti A. Finite element analysis of a glass fibre reinforced composite endodontic post. *Biomaterials* 23:2667-2682, 2002.
52. Farah JW, Graig RG. Finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar. *J Dent Res* 53:859-866, 1974.

국문초록

도재 라미네이트와 복합레진 수복 시 치간이개 양에 따른 접착계면의 응력분포에 관한 3차원 유한요소법적 연구

홍준배¹ · 탁승민² · 백승호¹ · 조병훈^{1*}

¹서울대학교 치의학대학원 치과보존학교실, ²경상대학교 공과대학 기계항공학과

본 연구에서는, 삼차원 유한요소분석법을 이용하여 복합레진 및 도재 라미네이트로 전치부 치간이개를 폐쇄할 때, 치간이개의 간격과 수복방법이 수복물의 접착계면에서의 응력분포에 미치는 영향을 비교하였다.

복합레진 혹은 도재 라미네이트로 수복된 모습의 유한요소모델을 형성하여 접착계면에서의 von Mises stress 분포 양태를 분석하였다. 수복형태는 크게 네 가지 범주를 고려하였다. Type I, 복합레진으로 인접면을 최소한으로 수복하는 경우; Type II, 치아 삭제 없이 복합레진으로 순면의 절반까지 수복하는 경우; Type III, 치아 삭제 후 복합레진으로 순면의 2/3까지 수복하는 경우; Type IV, 도재 라미네이트로 수복하는 경우

이 실험의 한계 내에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 모든 수복형태에 대해 치간이개 간격이 넓어질수록 접착계면에서 발생하는 최대응력값은 증가하였으며, 도재 라미네이트로 치간이개 부위를 수복한 경우(Type IV)가 복합레진으로 수복한 경우(Type I, II, III)에 비해 높은 최대응력값을 나타내었다. 그러나 치간이개 간격이 넓어질수록 도재 라미네이트와 복합레진에서 발생하는 최대응력값의 차이는 감소하였으며, 치간이개 간격의 증가에 따른 최대응력값의 증가는 도재 라미네이트가 복합레진으로 수복하는 경우보다 낮았다.

주요단어: 3차원 유한요소분석법, 치간이개, 도재 라미네이트, 복합레진, 접착계면, 응력분포