

상아질 접착제의 두께가 치아와 복합레진 경계의 응력발생에 미치는 영향에 관한 유한요소법 연구

박상일 · 김예미 · 노병덕*

연세대학교 치과대학 보존학교실

ABSTRACT

THE EFFECTS OF DENTIN BONDING AGENT THICKNESS ON STRESS DISTRIBUTION OF COMPOSITE-TOOTH INTERFACE : FINITE ELEMENT METHOD

Sang-Il Park, Yemi Kim, Byoung-Duk Roh

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University

The aim of this study was to examine that thick dentin bonding agent application or low modulus composite restoration could reduce stresses on dentin bonding agent layer.

A mandibular first premolar with abfraction lesion was modeled by finite element method. The lesion was restored by different composite resins with variable dentin bonding agent thickness ($50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$). 170N of occlusal loading was applied buccally or lingually. Von Mises stress on dentin bonding agent layer were measured.

When thickness of dentin bonding agent was increased von Mises stresses at dentin bonding agent were decreased in both composites. Lower elastic modulus composite restoration showed decreased von Mises stresses. On root dentin margin more stresses were generated than enamel margin.

For occlusal stress relief at dentin bonding agent layer to applicate thick dentin bonding agent or to choose low elastic modulus composite is recommended. [J Kor Acad Cons Dent 34(5):442-449, 2009]

Key Word: Class V cavity, composite resin, dentin bonding agent, stress-distribution, finite element method

-Received 2009.7.24., revised 2009.8.15., accepted 2009.8.22.-

I. 서 론

5급 와동 병소(Class V cavity lesion)를 가진 치아는 심미적인 이유와 복합레진의 물성의 발달로 인하여 상아질 접착제(Dentin adhesive)를 이용한 복합레진으로 수복하는 것이 일반적이다. 5급 와동 병소는 치아 우식증에 의해 발생할 수 있고 비우식성 원인들에 의해서도 발생할 수 있다. 비우식성 원인들에 대하여 여러 가지 가설들이 발표되고 있으

며 그 중 하나인 abfraction은 저작 하중에 의해 발생하는 치아의 굽힘 현상이 치경부에 응력을 집중시켜 치경부 치질의 손실을 일으키는데 가장 큰 영향을 준다는 생체 역학적 가설이다¹⁾. 이 가설에 의하면 치아가 휘어질 때 응력이 치아의 치경부에 집중되고 hydroxyapatite crystal의 결합이 파괴된다. 그 결과 법랑질과 하방의 상아질에 균열이 생기고 결국 날카로운 췌기 모양의 치질 손실이 발생하게 된다.

Abfraction 병소를 상아질 접착제를 이용한 복합레진으로 수복할 경우 마모 등 다른 원인의 5급 와동을 수복할 때에 비해서 저작 하중에 의해 치아가 심하게 휘어지게 되어 치아와 복합레진 사이의 계면, 즉 상아질 접착제에 응력이 발생되며 이 때문에 치아와 상아질 접착제 사이의 결합이 깨지거나 복합레진에 과도한 응력이 집중될 수 있다. 그러므로 수복물의 탈락이나 파절을 방지하기 위하여 이러한 응력

* Corresponding author : **Byoung-Duk Roh**
Department of Conservative Dentistry,
College of Dentistry, Yonsei University
134 Shinchon-Dong, Seodamun-Ku, Seoul, 120-752, Korea
Tel : 82-2-2228-3146 Fax : 82-2-313-7575
E-mail : operatys16@yuhs.ac

을 줄이는 것은 성공적인 수복을 위한 필수 요소이다. Heymman²⁾은 수복물의 탄성율을 낮춘다면 치경부의 굽힘 시 치질과의 결합이 파괴되기보다 오히려 수복물이 굽힘에 맞게 변형되어 계면에 발생하는 응력이 줄어 복합레진의 수명을 연장시킬 수 있다고 하여 기존의 개념과 달리 탄성율이 낮은 수복물의 사용을 추천하였다. 이에 본 연구에서는 수복물의 탄성율을 낮추기 위하여 상아질 접착제를 비교적 두껍게 도포하거나 낮은 탄성계수(low elastic modulus)를 가진 복합레진을 선택하는 방법을 택하여 수복물의 탄성율의 차이에 따른 치아와 복합레진 경계에서 발생하는 응력의 차이를 알아보려고 하였다.

치아 내부에 발생하는 응력 상태를 분석하기 위하여 여러 가지 실험적 응력분석법들이 시도되어 왔다. 대표적인 것으로는 strain gauge 등을 이용한 기계적 응력 분석^{3,4,5,6)}과 광탄성 응력 분석^{7,8,9)} 등이 사용되어 왔으나 이 방법들은 실험 형태의 모형 설정에 어려움이 있고, 장치 조작의 복잡성, 시편의 단순성 등으로 인해 정확한 분석이라고 보기에는 문제점이 있어 왔다. 기계적 응력 분석법은 치아의 실패를 불러오는 최대 하중은 제시 할 수 있으나 실패의 기전에 대한 만족스러운 설명은 할 수 없는 단점이 있으며, 광탄성 분석법은 상아질, 근관 등과 같은 복잡한 주위 구조물을 동시에 표현할 수 없는 단점이 있고 대상간의 응력 수치에 대한 상대적인 비교 또한 거의 불가능하다¹⁰⁾. Turner 등¹¹⁾에 의해 제안된 유한요소법은 수십 년간 많은 공학적 설계에 성공적으로 응용되어왔고 근래에 와서 치의학 분야에도 많이 응용되고 있다^{12,13,14)}. 최근에는 컴퓨터 및 모델 제작방법의 급속한 향상으로 인하여 유한요소법이 더욱 정확하고 신뢰할 만한 방법으로 대두되고 있다. 유한요소법은 모형의 형태를 표준화 할 수 있고 구성 재료의 물리적 성질을 일치시킬 수 있어 내부 응력의 정확한 예측이 가능하고 변위의 관찰도 용이하며 응력 발생의 물리적인 기전도 설명할 수 있게 된다.

이 실험에서는 abfraction 병소를 재현한 2차원 치아 치조골 모델에서 협측 교두에 가해진 저작 하중에 대하여 상아질 접착제의 두께와 복합레진의 탄성계수 차이가 수복부 위에서 어떠한 응력의 변화를 가져오는지를 유한요소법을 이용하여 살펴보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 표본 제작 및 micro-CT 스캔

하악 제 1 소구치가 있는 하악골을 사체로부터 협설방향으로 10mm 간격이 되도록 diamond saw (Isomet, Buehler Co., Lake Bluff, Illinois, U.S.A)를 이용하여 절단하였다. 절편은 micro-CT (Skyscan-1072, SKY-SCAN, Antwerpen, Belgium)을 이용하여 횡단면으로 스

캔하였다. Micro-CT를 스캔하는 과정에서 절편의 높이가 field of view (FOV)보다 컸기 때문에 하악 제 1소구치의 치관은 분리하여 스캔하였다.

2. 2차원 micro-FE 모델의 제작 및 실험군의 설정

스캔 자료를 computer program (BIONIX software package, CANTIBio, Inc, Kyonggi, Korea)을 이용하여 하악 제 1소구치와 주변 구조물들의 축방향 협설측 2차원 단면을 얻었다. 이 단면을 Altair HyperMesh 5.0 (Altair Engineering, Michigan, USA)를 이용하여 2차원 micro-FE 모델을 생성하였다.

Pilot study를 시행한 결과 2차원 FE 모델에서 치수를 재현하지 않았을 경우에 실제 상황과 더 비슷한 응력 전달을 나타내었기에 2차원 FE 모델을 제작 시 치수를 제거하였다¹⁵⁾.

모델에서 abfraction 병소는 Grippo¹⁾의 정의에 따라 시멘트법랑경계 (Cemento-Enamel Junction) 상방의 법랑질에서부터 시작하여 시멘트법랑경계의 하방인 치근까지 연장된 예각의 날카로운 켜기 모양으로 재현하였다.

수복재로 쓰이는 복합레진은 물성에 따라 2가지로 나누어 Hybrid type으로 상대적으로 높은 탄성계수를 가진 Z100 (3M Dental Products, St. Paul, USA)과 이에 비해 낮은 탄성계수를 가진 flowable 복합레진인 Tetric Flow (Ivoclar Vivadent, FL-9494-Schaan, Liechtenstein)를 사용하였고 이 두 개의 복합레진에 Optibond FL (Kerr, Orange, CA, USA)을 상아질 접착제로 선택하여 두께를 50 μ m, 100 μ m, 150 μ m으로 다르게 적용하여 6개의 모델을 재현하였다 (Figure 1, Table. 1).

3. 하중 조건과 2차원 micro-FE 분석

하중 조건은 abfraction이 발생하는 상황에서 치아와 수복물의 응력분포를 분석하기 위하여 협측 교두점에서 협측으로 0.3mm 떨어진 면에서부터 1mm에 걸친 경사면을 따라 이 면에 수직 방향으로 170N의 하중을 가하였다 (Figure 1, 검은 화살표). 또한 실제로 한 치아에는 한 가지 방향으로만 저작 하중이 가해지는 것은 아닐 수 있기 때문에 반대 방향을 재현하기 위하여 이번에는 협측 교두점에서 설측으로 0.3mm 떨어진 면에서부터 1mm에 걸친 경사면을 따라 이 면에 수직 방향으로 170N의 하중을 가하였다 (Figure 1, 하얀 화살표). 하중은 협측 교두의 협측이나 설측 경사면 1mm 범위 안에 있는 4개의 node에 동등하게 나누어지도록 가하였다. 두 가지 방향의 저작 하중을 가했을 경우 각각의 모델마다 상아질 접착제와 치아 사이에서 발생하는 von Mises 응력을 MSC.Nastran FEM Package

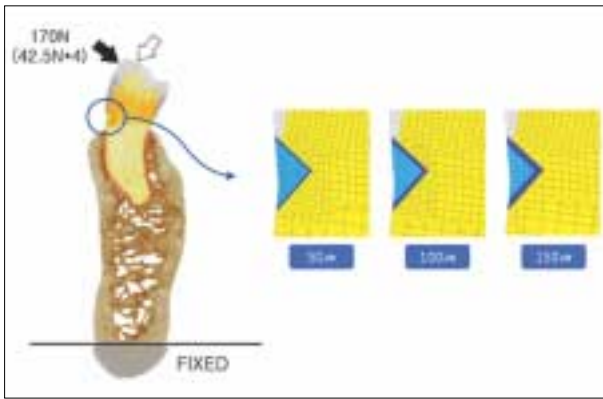


Figure 1. 2-D finite element model simulated in this study.

Table 1. Experimental models used in this study

Model	Material properties	
	Composite resin	Optibond FL ^c thickness(µm)
A	Z100 ^a	50
B	Z100	100
C	Z100	150
D	Tetric Flow ^b	50
E	Tetric Flow	100
F	Tetric Flow	150

^a 3M Dental Products, St. Paul, USA

^b Ivoclar Vivadent, FL-9494-Schaan, Liechtenstein

^c Kerr, Orange, CA, USA

Table 2. Mechanical properties of the materials used in the study

Materials		Elastic modulus, E[GPa]	Poisson's ratio, ν
Composite	Z100 ^a	15.2	0.28
	Tetric Flow ^a	5.3	0.28
Adhesive	Optibond FL ^b	1	0.3
	Enamel ^c	48	0.23
Tooth	Dentin ^c	18	0.2
	Periodontal ligament ^c	0.05	0.49
	Cortical bone ^d	13	0.3
	Cancellous bone ^d	0.3	0.3

^a Yaman 등¹⁴⁾

^b Ausiello 등¹²⁾

^c 전 등¹⁵⁾

^d 엄 등¹⁰⁾

(MSC software, Santa Ana, CA, USA)를 이용하여 분석하였다. 경계 조건은 하악골의 하단부를 x, y 방향으로 모두 구속하였다. 이 연구에 이용된 재료들의 물리적 성질은 Table 2에 있다.

III. 결 과

1. 협측에서 저작 하중을 가했을 때 치아와 상아질 접착제 사이의 접착면에서 발생한 von Mises 응력의 분석

Abfraction을 발생시키는 상황을 재현하기 위하여 하악 제 1소구치의 협측 교두에 협측에서 170N의 저작 하중을 가한 후 치아와 상아질 접착제 사이의 접착면에서 발생한 von Mises 응력을 측정하였다. Figure 2과 Figure 3에서 X축은 법랑질 경계에서부터 시작하여 치근 경계까지 이르는 접착면에서의 위치를 나타내며 Y축은 발생한 von Mises 응력의 크기를 MPa 단위로 나타낸 것이다. Von Mises 응력의 크기는 법랑질 경계에서 심부로 갈수록 줄어들어 병소의 꼭지점에서 가장 작고 다시 심부에서 치근 경계로 갈수록 커지는 경향을 보였다. Z100과 Tetric Flow에서 모두 상아질 접착제의 두께가 두꺼울수록 von Mises 응력이 적게 발생한 것을 알 수 있다. 또한 같은 상아질 접착제의 두께에서는 Z100의 경우가 Tetric Flow에 비하여 전반적으로 높은 von Mises 응력을 나타냈다. 그러나 상아질 접착제의 두께가 증가하면서 얻을 수 있는 응력 감소의 폭은 Z100의 경우가 Tetric Flow에 비하여 더 많았다.

2. 설측에서 저작 하중을 가했을 때 치아와 상아질 접착제 사이의 접착면에서 발생한 von Mises 응력의 분석

170N의 저작 하중을 협측 교두의 설측에서 가한 후 발생한 von Mises 응력을 Figure 4, Figure 5에 나타냈다. 이 경우 협측에서 저작 하중을 가했을 때와는 달리 상아질 접착제에는 압축 응력이 주로 발생하게 된다. 그러나 설측에서 저작 하중을 가한 경우에도 협측에서 저작 하중을 가한 경우와 아주 유사한 양상을 보여 법랑질 경계에서 심부로 갈수록 응력은 줄어들면서 심부에서 가장 작고 다시 치근 경계로 갈수록 응력은 커졌다. 또한 상아질 접착제의 두께가 두꺼워지면서 응력도 적게 발생하는 것을 알 수 있고 Z100이 Tetric Flow에 비하여 응력이 더 크게 발생한 것을 알 수 있었다.

3. 협측 및 설측에서 저작 하중을 가했을 때 상아질 접착제에 발생하는 응력의 벡터 분석

협측 및 설측에서 저작 하중을 가했을 때 상아질 접착제에

발생하는 응력의 방향에 대하여 분석하고자 주응력 (principal stress)을 구하여 벡터량 (vector)으로 나타내었다 (Figure 6, Figure 7). 화살표의 방향은 주응력의 방향이며 길이는 주응력의 크기가 된다. 험측에서 저작 하중을 가했을 때 상아질 접착제에서 발생하는 응력은 전체적으로 인장력으로 생각할 수 있는 수직 방향의 응력이 전단력으로

생각할 수 있는 수평 방향의 응력보다 크게 발생하는 경향을 보였고 설측에서 저작 하중을 가했을 때는 압축력으로 생각할 수 있는 수직 방향의 응력이 주로 발생하였다. 두 가지 경우 모두 치근쪽 접착 면에서는 법랑질 쪽 접착면과 비교했을 때 수직 방향의 응력뿐 아니라 수평 방향의 응력도 발생하였다.

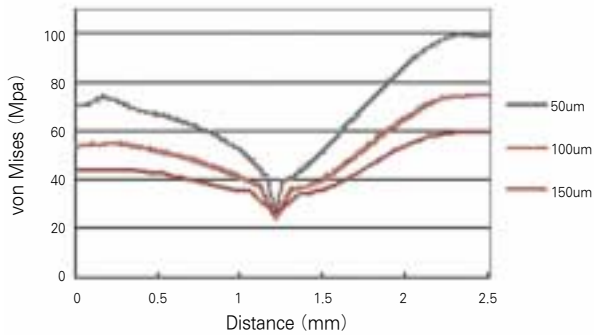


Figure 2. von Mises stress at Z100 when buccal loading applied

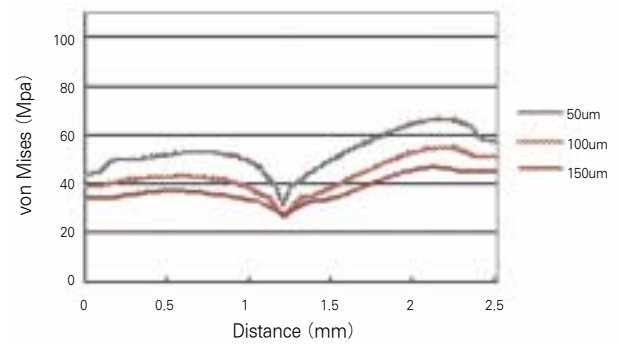


Figure 3. von Mises stress at Tetric Flow when buccal loading applied

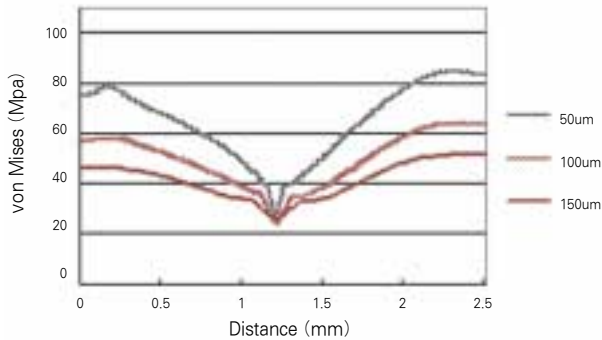


Figure 4. von Mises stress at Z100 when lingual loading applied

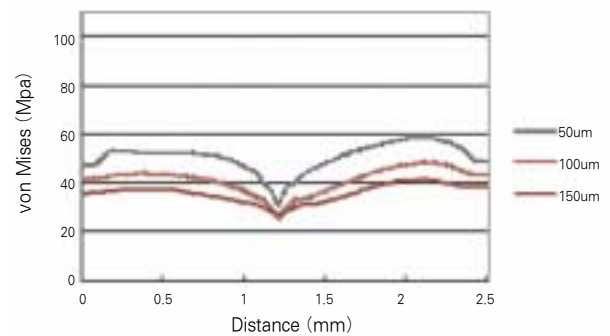


Figure 5. von Mises stress at Tetric Flow when lingual loading applied

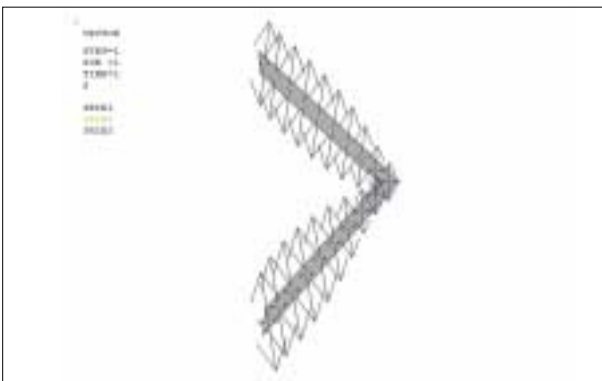


Figure 6. Principal stress vectors on adhesive when buccal loading applied

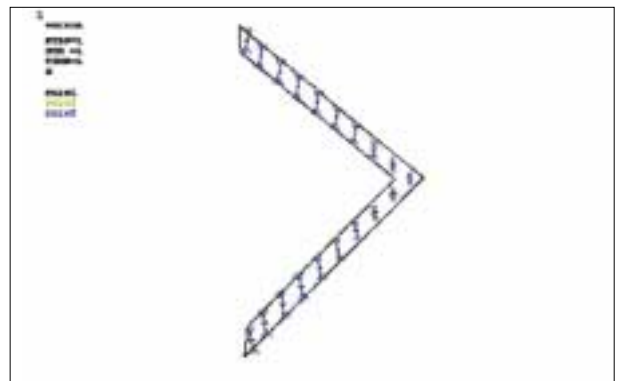


Figure 7. Principal stress vectors on adhesive when lingual loading applied

IV. 고 찰

수복된 치아의 경우 저작 하중에 의하여 다양한 크기와 방향의 응력을 받게 되며 이 때 수복물의 수명은 이러한 응력에 많은 영향을 받게 된다. 복합레진을 이용한 치아의 수복도 마찬가지라고 할 수 있다. 그러나 복합레진의 경우 치아와 복합레진 사이에 상아질 접착제라는 중간 매개가 있어 저작 하중에 의해 발생하는 응력의 분포나 응력의 영향은 중간 매개가 없는 수복물과는 다르다¹²⁾. 따라서 복합레진과 더불어 상아질 접착제의 물성의 차이에 따른 수복 후의 응력 분석을 연구하는 것도 의미가 크다고 할 수 있겠다. 이번 연구에서는 상아질 접착제와 복합레진의 탄성을 차이가 수복부위에서 어떠한 응력의 변화를 가져오는지를 살펴보고자 하며 저작 하중에 의한 수복물의 영향을 보다 효과적으로 알아보고자 5급 와동 병소 중에서 abfraction 병소가 있는 치아를 재현하였다. Abfraction 병소가 있을 때 이 병소 부위는 치아의 휘어짐으로 인한 심한 응력이 발생하고 있는 상태라는 것을 알 수 있으며¹³⁾ 이를 복합레진으로 수복하는 경우에는 다른 5급 와동 병소를 수복할 때보다도 많은 응력이 상아질 접착제나 복합레진에 가해지는 상황이므로 수복이 성공할 가능성이 낮다.

복합레진을 이용한 수복 시 비교적 두꺼운 두께의 상아질 접착제를 사용하여 탄성율을 낮추는 것은 중합수축의 보상을 위해 처음으로 소개되었다¹⁶⁾. 중합수축이 일어나 치아가 휘어질 때 상아질 접착제가 대신 변형이 일어나면서 치질과의 결합이 파괴되는 것을 막을 수 있으며 상아질 접착제의 두께가 충분히 두꺼울수록 이러한 보상을 더 많이 기대할 수 있다는 것이 보고되어 왔으며^{17,18)} 본 실험에서는 저작 하중에 의해 치아가 휘어질 때도 마찬가지로 상아질 접착제의 두께가 두꺼운 것이 상아질 접착제에 발생하는 응력을 감소시켜 치질과의 결합에 이득이 되는 지를 알아보고자 하였다. 그 결과 협측 교두의 협측에서 저작 하중을 적용했을 때, 상아질 접착제의 두께가 두꺼울수록 상아질 접착제에 발생하는 응력이 줄어드는 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있었다 (Figure 2, 3). 따라서 abfraction처럼 저작 하중으로 인한 치경부에 응력이 심하게 발생하는 상황에서는 상아질 접착제를 비교적 두껍게 도포하는 것이 성공적인 수복을 위한 한 방법이다. 또한 상아질 접착의 두께가 두꺼워짐으로 얻을 수 있는 응력 감소의 정도는 Tetric Flow보다 Z100에서 더 큼을 알 수 있었다. 이는 탄성계수 값이 큰 복합레진을 사용하는 경우 특히 상아질 접착제의 두께를 두껍게 해주는 것이 유리하다는 것을 의미한다.

Moon 등¹⁷⁾은 2차원 유한요소법을 이용한 5급 와동의 복합레진 수복에 상아질 접착제의 두께가 미치는 영향을 연구한 결과 상아질 접착제가 두꺼울수록 접착제 내에 발생할 수 있는 응력도 줄어드는 것을 관찰하였다. 그들은 상아질

접착제의 두께가 0 μ m, 125 μ m, 250 μ m, 500 μ m인 네 가지 경우를 비교하여 500 μ m 일 때 가장 적은 응력이 발생하는 것을 알 수 있었으나 125 μ m를 적절한 두께로 추천하였다. 왜냐하면 125 μ m일 때 두께 대비로 얻을 수 있는 응력의 감소의 폭이 가장 컸기 때문이었다. 한편 Choi 등¹⁸⁾은 실제 치아에서 tensilometer를 이용해서 상아질 접착제의 두께에 따라 발생하는 응력을 분석한 결과 100 μ m 이상일 경우 효과적인 응력 감소를 기대할 수 있다고 하였다.

이번 실험에서는 상아질 접착제의 두께를 50 μ m, 100 μ m, 150 μ m으로 다르게 하였는데 50 μ m를 최저 두께로 설정한 것은 그 이하로 설정하였을 때 제작된 유한요소모델의 크기에 비하여 너무 작은 요소 값을 가져 일관성 없는 결과를 나타냈기 때문이었다. 실험 결과는 위의 연구자들과 일치하는 경향을 보여주었다. 상아질 접착제의 두께가 두꺼울수록 응력이 적게 발생하여 150 μ m 일 때 가장 적은 응력이 발생하는 것을 관찰할 수 있었으나 두꺼울수록 응력 감소의 폭은 줄어드는 경향을 보여 응력 감소의 효율 면에서는 두꺼운 두께가 바람직하지는 않다는 것을 알 수 있었다. 한편 임상적으로 도포할 수 있는 상아질 접착제의 두께에 대하여 Peter 등¹⁹⁾은 제품마다 달라서 1회 도포 시 3~48 μ m 정도라고 하였으며 Choi 등¹⁸⁾은 실험에서 100 μ m의 두께로 도포하기 위하여 2회의 도포를 시행했다고 하였다.

또한 탄성율을 낮출 수 있는 또 다른 방법으로는 낮은 탄성계수를 가진 상아질 접착제를 사용하는 것도 고려해 볼 수 있으나 이번 연구에서는 재현하지 않았다. 왜냐하면 이번 연구의 유한요소분석 모델 상에서는 상아질 접착제의 탄성계수 값이 치아나 복합레진의 탄성계수 값에 비하여 너무 작은 값을 가져 실험 결과에 영향을 줄 정도의 차이만큼 실제 상아질 접착제 간의 탄성계수가 다르지는 않기 때문이다.

Van Meerbeek¹⁶⁾은 상아질 접착제가 두꺼워짐으로 얻을 수 있는 추가적인 장점으로 온도 차이나 수분 흡수 등에 의해 일어날 수 있는 응력에 대한 보상 작용을 들었다. 그러나 수복부위가 Class I, II cavity인 경우에 저작 하중을 직접 받을 수 있는 경계(margin)에 상아질 접착제를 두껍게 도포하는 것은 그 부분의 마모 저항성을 낮출 수 있으므로 이러한 술식은 교합력이 직접 적용되지 않는 부위의 수복에 사용하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 또한 상아질 접착제가 방사선 투과성일 경우 방사선 사진을 판독할 때 잘못된 해석을 할 가능성도 주의해야 할 사항으로 간주된다.

비교적 낮은 탄성계수를 가진 복합레진을 사용해서 수복물의 탄성율을 낮추는 것도 또 다른 응력 해소의 방법이 될 수 있다. 일반적으로 hybrid type의 복합레진에 비하여 microfilled type의 복합레진이 낮은 탄성계수를 갖는다. 이번 연구에서는 탄성율의 차이를 보다 많이 비교하기 위하여 15.3 GPa의 탄성계수를 갖는 Z100과 5.3 GPa의 탄성계수를 갖는 Tetric Flow를 이용하였다. 그 결과 같은 두께

의 상아질 접착제에서는 Tetric Flow를 사용한 경우가 Z100을 사용할 때 보다 적은 응력이 발생함이 관찰되었다. 또한 발생된 응력의 크기를 비교해 보면 (Figure 2~5) 상아질 접착제의 두께차이에 의한 응력 해소 폭보다 복합레진의 탄성계수 차이에 의한 응력 해소 폭에 더 큰 경향을 관찰할 수 있었다. 따라서 이 실험 결과에 의하면 상아질 접착제를 두껍게 바르는 것보다 낮은 탄성계수를 가진 복합레진을 선택하는 것이 더 효과적이며 임상적으로는 이것이 더 편한 방법이 될 수 있겠다.

그러나 Yaman 등¹⁴⁾은 유한요소법을 이용하여 5급 와동 병소를 재현한 상악 중절치의 모델에서 다양한 탄성계수를 갖는 복합 레진의 수복 시 저작 하중에 대한 응력 분석을 시행한 그 결과 탄성계수가 클수록 복합 레진에 가해지는 von Mises 응력은 작아지는 것을 보고하였다. 이것은 이번 연구 결과와는 반대의 결과로 이렇게 서로 다른 결과가 도출된 점에 대하여 다양한 원인을 고려해 볼 수 있다. 일반적으로 유한요소법으로 치아 및 수복물의 응력을 분석하는 연구에서 비슷한 실험 방법을 설계했음에도 불구하고 결과가 다르게 나타날 수 있게 하는 원인으로는 재현한 실험모델의 차이나 하중의 조건 및 해석 방법의 차이 등을 들 수 있겠다.

Yaman의 연구에서 저작 하중의 방향은 치아 장축에 26도의 각도로 상악 중절치의 구개측에 전달되었고 상아질 접착제를 재현하지 않았다. 또한 모델 상에서 치조골에 치아를 움직이지 않도록 고정하였으며 치아 및 복합레진을 모두 변위를 허용하지 않는 견고한 물질로 재현하였다. 따라서 저작 하중이 치아를 통해 어떠한 응력 감소의 여지없이 압축 응력의 형태로 복합레진에 도달되는 설정이었다. 그렇기 때문에 탄성율이 높은 복합레진 즉 단단한 복합레진이 더 파절에 강하다는 결과가 나온 것으로 생각된다. 한편 이번 연구에서는 저작 하중이 하악 제 1소구치의 협측 교두의 협측으로 가해졌다. 이 방향으로 저작 하중이 가해질 때 하악 제 1소구치의 협측 치경부에 전단 혹은 인장 응력이 주로 발생하여 치질의 손실이 발생할 수 있기 때문이다. 또한 이번 연구에서는 모델 상의 치조골을 하단부만 구속하고 치조골, 치아 및 복합레진, 상아질 접착제의 변위를 허용하여 실제 구강 내의 상황과 비슷하게 재현하고 저작 하중의 응력 감소 과정을 분석하려고 하였다. 그 결과 탄성율이 낮은 복합레진이 변위가 일어나며 응력 감소가 일어나 적은 von Mises 응력을 나타냈다고 생각된다. 그러므로 Yaman의 연구 결과는 5급 와동 병소의 복합레진 수복 시 특히 abfraction처럼 치아나 수복물의 변위가 많을 것으로 예상되는 경우에 적용하기보다 1급이나 2급 와동 병소를 가진 치아를 수복할 때처럼 저작 하중에 의해 수복물에는 압축 응력이 주로 작용하며 변위도 심하지 않아 응력 감소가 거의 없을 것으로 예상되는 경우의 복합레진 수복에 적용하는 것이 더 나을 것으로 생각된다.

환자의 구강 내에서 하악 제 1소구치에는 협측 교두의 협측으로만 저작 하중이 전달되는 것은 아니기 때문에 저작 하중을 설측에서 가한 후 복합레진과 상아질 접착제 사이에서 발생하는 응력을 분석해 보았다 (Figure 4, 5). 이 때도 역시 협측에서 저작 하중을 가했을 때의 결과와 거의 일치하는 결과를 보여주었다.

유한요소법을 이용한 abfraction의 연구 시 저작 하중의 크기에 대하여 많은 연구자마다 각기 다른 크기의 하중을 사용해왔으며^{13,20)} Rees²¹⁾는 정상 저작 하중에서도 abfraction이 일어날 수 있음을 보여주었다. 또한 저작 운동에 따른 상아질 접착제의 접착 파괴는 상아질 접착제의 탄성 한계를 넘어 파단 강도에 이르러 발생하는 파괴라기보다는 탄성한계 내에서 저작 운동에 따른 반복 하중에 의한 파괴 현상으로 볼 수 있으므로 이번 연구에서는 정상 하중을 치아에 적용하고자 하였다. Widmalm과 Ericsson²²⁾의 보고에 의하면 소구치 부위의 최대저작하중은 47.5Kg에 해당된다고 하였고, Gibbs 등²³⁾은 정상적인 저작 하중은 최대저작압의 36.2%에 해당한다고 하여 본 연구에서는 170N의 저작 하중을 가하였다.

이번 연구에서 관찰한 von Mises 응력은 유한요소법을 이용하여 응력을 분석할 때 가장 많이 이용되는 응력이다. Von Mises 응력은 구조물의 탄성한계와 관계가 있는 응력의 대표값으로 이 값이 클수록 구조물의 파절가능성이 크다고 할 수 있다. 그러나 von Mises 응력은 스칼라량(scalar)으로 계산되기 때문에 발생하는 응력의 크기는 알 수 있으나 응력의 방향은 알 수 없게 된다. 응력의 방향을 알아보기 위하여 결과를 벡터량(vector)으로 나타낼 수 있는 주응력(principal stress)을 관찰하였다. 주응력이란 모델을 구성하는 임의의 요소에서 발생하는 수직 응력과 수평 응력 즉, 각각의 축방향으로 물체에 가해질 수 있는 최대 응력을 의미한다. 따라서 이번 연구에서는 상아질 접착제의 임의의 위치에서의 측정된 주응력을 벡터량으로 나타내어 분석해 보았다 (Figure 6, 7). 협측에서 저작 하중을 전달했을 경우 인장방향의 응력이 가장 많이 발생하고 표면에서 심부로 갈수록 상대적으로 인장방향의 응력은 크기가 줄어들고 전단방향의 응력은 크기가 늘어나는 것을 확인할 수 있었다. 설측에서 저작 하중을 전달했을 경우에는 압축방향의 응력이 전반적으로 고르게 발생하였고 전단방향의 응력은 병소의 심부에서 치근쪽 경계에 이르는 부위에만 약하게 나타났다. 특히 저작 하중을 가했을 때 치근쪽 경계의 상아질 접착제에서는 von Mises 응력과 주응력이 모두 다른 부위에 비하여 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 더구나 치근 경계는 상아질과 결합하므로 상아질 접착제의 접착력도 법랑질에 비해 약하기 때문에 응력에 더 취약한 부분이라고 할 수 있다. 그러므로 발생하는 응력의 크기나 접착력을 고려했을 때 치근 경계에서 더 많은 접착의 실패가 있을 것이라고 예

상된다.

이번 연구로 abfraction 병소를 수복할 경우 낮은 탄성계수를 가진 복합레진을 선택하거나 두꺼운 두께의 상아질 접착제를 도포하여 수복재의 탄성율을 낮추어주는 것이 치아와 상아질 접착제의 접착면에 발생하는 응력을 감소시키는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이를 임상에서 적용 시 성공적인 복합레진 수복에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결 론

유한요소법을 이용하여 abfraction을 재현한 하악 제1소구치 협측 치경부에 상아질 접착제를 이용한 복합 레진을 수복하여 협측 및 설측에서 저작 하중을 가하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상아질 접착제의 두께가 두꺼울수록 치아와의 접착면에 작용하는 응력은 감소하는 경향이 관찰되었다.
2. 낮은 탄성계수 값을 가진 복합레진에서 치아와 상아질 접착제 사이의 접착면에 작용하는 응력이 감소하였다.
3. 상아질 접착제의 치근쪽 접착 면에서 법랑질쪽 접착 면보다 더 큰 응력이 발생하였다.
4. 저작 하중을 협측에서 전달 시 상아질 접착제에는 전달 방향의 응력이 설측에서 전달 시 압축방향의 응력이 우세하게 나타났다.

이상의 결론을 통하여 5급 와동 병소 특히 abfraction 같은 심한 응력이 가해지는 것이 예상되는 부위의 수복 시에는 저작 하중에 의해 발생할 수 있는 응력을 감소하기 위하여 비교적 두꺼운 두께의 상아질 접착제의 사용과 낮은 탄성계수 값을 가진 복합 레진을 이용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. Grippo JO: Abfractions : a new classification of hard tissue lesions of teeth. *J Esthet Dent* 3: 14-19, 1991.
2. Heymann HO: Examining tooth flexure effects: *JADA* 122: 41-47, 1991.
3. Lee WC, Eakle WS: Possible role of tensile stress in the etiology of cervical erosive lesions of teeth. *J Prosthet Dent* 52: 374-380, 1984.
4. Stewart GP, Balda BA, Norman RD: The effects of mechanical loading on marginal integrity of composite restorations. *Dent Mater* 2: 151-152, 1986.
5. Sturdevant JR, Lundeen TF, Sluder TB, Leinfelder KF: Three-year study of two light-cured posterior composite resins. *Dent Mater* 2: 263-268, 1986.

6. McCoy RB, Anderson MH, Lepe X, Jonson GH: Clinical success of class V composite resin restorations without mechanical retention. *JADA* 129: 593-599, 1998.
7. Gordon D, Mattison: Photoelastic stress analysis of cast gold endodontic posts. *J Prosthet Dent* 48: 407-411, 1982.
8. David A, Eyal O, Barry L, Marshak, Israel Aviv: Photoelastic analysis of stress transfer by endodontically treated teeth to the supporting structures using different restorative technique. *J Prosthet Dent* 61: 535-543, 1989.
9. Kuroe T, Itoh H, Caputo AA, Konuma M: Biomechanics of cervical tooth structure lesions and their restoration. *Quintessence Int* 31: 267-274, 2000.
10. 임정문, 권혁춘, 손호현, 조병훈, 임영일. 5급 와동의 복합레진 충전에 관한 유한요소법적 응력분석. *대한치과보존학회지* 24: 67-74, 1999.
11. Turner MJ, Clough RW, Martin HC, Topp LJ: Stiffness and deflection analysis of complex structure. *J Aero Sci* 23: 805-823, 1956.
12. Ausiello P, Apicella A, Davidson CL: Effect of adhesive layer properties on stress distribution in composite restorations-a 3D finite element analysis. *Dent Mater* 18: 295-303, 2002.
13. Rees JS: The effect of variation in occlusal loading on the development of abfraction lesions : a finite element study. *J Oral Rehabil* 29: 188-193, 2002.
14. Yaman SD, Sahin M, Aydin C: Finite element analysis of strength characteristics of various resin based restorative materials in class V cavities. *J Oral Rehabil* 30: 630-641, 2003.
15. 전창수, 김한성, 심준성, 김영호. 소구치 치주인대의 탄성계수에 대한 유한요소해석. *한국정밀공학회지* 22: 10-14, 2005.
16. Van Meerbeek, Willems G, Celis JP, Roos JR, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G: Assessment by nano-indentation of the hardness and elasticity of the resin-dentin bonding area. *J Dent Res* 72: 1434-1442, 1993.
17. Moon PC, Chang YH: Effect of DBA layer thickness on composite resin shrinkage stress. *J Dent Res* 71: 275-283, 1992.
18. Choi KK, Cordon JR, Ferracane JL: The effects of adhesive thickness on polymerization contraction stress of composite. *J Dent Res* 79: 812-817, 2000.
19. Peter A, Paul SJ, Luthy H, Scharer P: Film thickness of various dentin bonding agents. *J Oral Rehabil* 24: 568-573, 1997.
20. 조병훈, 유현미, 김동호. 5급 복합레진 충전된 치아에 있어서의 계면조건과 유지구의 영향에 대한 2차원유한요소법적 연구. *대한치과보존학회지* 23: 639-646, 1998.
21. Rees JS: Abfraction lesion formation in maxillary incisors, canines and premolars: A finite element study. *Eur J Oral Sci* 111: 149-154, 2003.
22. Widmalm SE, Ericsson SG: Maximal bite force with centric and eccentric load. *J Oral Rehabil* 9: 445-450, 1982.
23. Gibbs CH, Mahan PE, Lundeen HC, Brehnan K, Walsh EK, Holbrook WB: Occlusal force during chewing and swallowing as measured by sound transmission. *J Prosthet Dent* 46: 443-449, 1981.

국문초록

상아질 접착제의 두께가 치아와 복합레진 경계의 응력발생에 미치는 영향에 관한 유한요소법 연구

박상일 · 김예미 · 노병덕*

연세대학교 치과대학 보존학교실

이 연구의 목적은 5급 와동의 복합레진 수복에서 상아질 접착제를 비교적 두껍게 도포하거나 낮은 탄성계수(low elastic modulus)를 가진 복합레진을 선택하는 방법을 택하여 수복물의 탄성율의 차이에 따른 치아와 복합레진 경계에서 발생하는 응력의 차이를 알아보는 것이었다.

abfraction 병소가 있는 하악 제 1소구치를 유한요소법을 이용하여 모델로 만들었다. 병소는 상아질 접착제의 두께 (50 μ m, 100 μ m, 150 μ m) 및 복합레진의 종류를 달리하며 수복되었다. 170N의 교합압을 협측 또는 설측에서 가하여 상아질 접착제와 치아면에서의 Von Mises stress를 측정하였다.

상아질 접착제의 두께가 두꺼울수록 상아질 접착제면에 가해지는 Von Mises stress는 감소하였다. 낮은 탄성계수 값을 가진 복합레진에서 Von Mises stress가 더 작았다. 치근상아질 경계(margin)가 법랑질 경계에서보다 더 큰 응력이 발생하였다.

상아질 접착제면에 작용하는 교합압의 영향을 감소시키기 위해 상아질 접착제를 두껍게 바르거나 낮은 탄성계수 값을 가진 복합레진을 사용하는 것이 추천된다.

주요단어 : 5급 와동, 복합레진, 상아질 접착제, 응력 분포, 유한요소법