5급 복합레진충전된 치아에 있어서의 계면조건과 유지구의 영향에 대한 2차원유한요소법적 연구

서울대학교 치과대학 치과보존학교실
삼성의료원* 생산기술연구원 산업기술교육센터**

조병훈 · 유현미* · 김동호**

ABSTRACT

TWO-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS ON THE EFFECT OF INTERFACE CONDITION AND RETENTION GROOVE IN CLASS V COMPOSITE RESIN RESTORATION

Byeong-Hoon Cho, Hyeon-Mee Yoo*, Dong-Ho Kim**

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Seoul National University
*Dept. of Conservative Dentistry, The Institute of Oral Health Science, Samsung Medical Center**
*Industrial Technology Training Center, Korea Academy of Industrial Technology***

To evaluate the effect of interface conditions and retention grooves in the Class V composite resin restoration of the maxillary first premolar, the distribution of the values of stress and displacement was analyzed with the two-dimensional finite element method.

The results were obtained as follows :

1. Boundary elements and Stiffness values could be used as the interface parameters in the finite element method.
2. The amount of restriction of the displacement at the cervical margin by placing a retention groove at the cervical wall was about three times as high as that by placing a retention groove at the occlusal wall.
3. Because of the relative amount of tensile components of the stress values in the buco-lingual direction, the possibility of dislocation of the restoration was much higher at the cervical margin than at the occlusal margin.
4. It might be recommended that both occlusal and cervical retention grooves be used rou-

tinely, but if one, it be placed at the cervical wall.

Key words : Finite element method, Interface parameter, Retention groove, Stress, Displacement

I. 서 론

최근에는 치경부의 5급와동에 있어서는 심미적인 이유 때문에 상아질접착제를 이용한 복합레진충전이 일반화되고 있다. 특히 법랑질에 와동변연이 위치할 경우에는 유지구(retention groove)를 부여하지 않고 대부분의 충전물에 대한 유지력을 산부식에 의한 치질과의 결합에서 얻고 있다. 그러나 치아는 교합력에 의해 측방 또는 장축방향의 굴곡(tooth flexure)을 일으키고, 굴곡에 의한 변형률(strain)은 치경부에서 최대로 나타난다. 이는 국소적인 인장 또는 압축응력으로 해소되는데, 이러한 현상으로 인하여 유지구를 부여하지 않은 5급와동의 복합레진충전물이 탈락하는 원인이 될 수 있다. 또한 굴곡에 의한 치경부의 압축 또는 인장변형률은 치경부치질의 미세파절(micro-fracture)를 일으킬 수 있다는 가설도 있다[1,2].

이처럼 치아내부에 발생되는 응력상태를 이해하기 위해 여러가지 실험적 응력분석법들이 이용되어 왔으나, 최근에는 컴퓨터의 발달에 힘입어 공학적 수치해석법인 유한요소법이 널리 이용되고 있다. 그러나 유한요소법은 가정에 의한 수치해석법이므로 입력하는 물성치나 부여되는 조건에 따라 상이한 결과가 유도될 수 있기 때문에 보다 실제에 근접한 결과를 산출하기 위해서는 이러한 물성치나 조건에 대한 정확한 자료들이 요구된다. 이를위해 조[3,4,5]는 정적인 상태에서의 3차원유한요소모델에서 응력의 분포를 관찰한 바 있고, 또한 하중외에 온도분포 또는 계면조건을 부여한 2차원유한요소모델에서의 응력분포를 비교한 바 있다.

계면조건에 관하여 Peters[6]는 2차원유한요소모델에서 치아와 아말감 사이의 계면변수(interface parameter)를 변화시켰을 때 주응력 및 등가응력, 변위에 상당한 차이가 있음을 보고하고, play의 가능성을 부여하기 위해서 계면조건(interface condition)에 대한 더 많은 자료가 요구된다고 하였다. 그러나 gap요소를 포함하는 치아의 3차원유한요소모델의 제작은 복잡한 치아의 구조와 부여되는 경계조건이나 접착계면을 형성하는 혼합층(hybrid layer)의 물성치에 대한 정확한 자료의 부족 등으로 실현가능성이 낮다. 따라서 조[5]도 모델의 제작이 간편하고, 변수의 적용이 용이한 2차원유한요소모델에서 충전재인 아말감과 치질사이에 gap요소를 부여하여 계면조건으로 해석하였다.

따라서 본 실험에서는 복합레진으로 충전된 치아모델에서 치질과 복합레진충전물 사이의 계면조건에 대한 보다 정확한 자료를 얻기 위해서 치질과 복합레진 사이에 상아질접착제(dentin adhesive)에 해당되는 요소를 부여하여 gap요소외에 경계요소(boundary element)를 설정하고 이들 요소들에 의한 응력의 분포를 비교한 후, 5급와동에 있어서의 응력분포에 대한 유지구의 영향을 해석하여 보고하는 바이다.

II. 연구재료 및 방법

본 실험에서는 치경부의 5급 복합레진충전시의 계면조건에 대한 자료를 얻고, 유지구의 유무에 따른 응력의 분포를 비교하기 위하여 상악제1소구치의 협측치경부에 V자 형태의 5급 와동을 형성하고 치질과 협측치경부의 5급 복합레진충전물 사이에 접착제(adhesive)에 해당되는 gap요소와 유지구를 추가한 모델을 만들어 분석하였다. 이때 교합면측 유지구는 상아질-법랑질경계(dentino-enamel junction)에서 0.2 mm 내측에, 치경부측 유지구는 와동의 치은변연에서 0.5 mm 내측에 부여하였다. gap요소의 폭은 접착제의 두께를 가정하여 10 ㎛으로 부여하고 경계조건의 가정에 따라 다음과 같은 모델을 제작하여 비교하였다. 즉 협측 치경부의 5급 복합레진충전에 있어

1. Model BC5 : 충전물과 치질이 완전결합된 것으로 가정된 모델
2. Model 2GC5 : gap을 가정하여 인장력은 차단하고 압축력은 전달하는 'ICODE2'와 Stiffness값을 부여한 모델로서 와동의 정점부위에 고정경계조건을 부여
3. Model 3GC5 : gap을 가정하여 인장력은 전달하고 압축력은 차단하는 'ICODE3'과 Stiffness값을 부여한 모델로서 고정경계조건은 부여하지 않음
4. Model SC5 : 계면변수를 경계요소로 가정하여 Stiffness값을 와동벽면에 평행되게 적용한 모델
5. Model SC5-t : 계면변수를 경계요소로 가정하여 Stiffness값을 와동벽면에 수직되게 적용한 모델
6. Model RC5 : 분리를 가정하여 와동의 내부를 빈공간으로 처리한 모델

로 구분하여 계면변수에 따른 응력을 비교하였다.

또 이들 각 모델에 대하여 각각

Model *** : 유지구를 부여하지 않은 경우

Model ***m1 : 치경부측 유지구만 부여한 경우

Model ***m2 : 치경부와 교합면측 유지구를 모두 부여한 경우

Model ***m3 : 교합면측 유지구만 부여한 경우

로 구분하여 V자 형태의 5급와동에 있어서의 변위와 응력분포에 대한 유지구의 영향을 비교하였다.

재질의 종류에 따라 법랑질, 상아질, 복합레진 및 접착레진의 4개의 집단(group)으로 나누어 각각의 요소를 정의하고 표1과 같이 물성치를 부여하였고 치수강은 빈공간으로 처리하였으며, 모델의 치경부에서 가장 하방에 위치하는 절점들은 변위를 방지하기 위해 모든 방향에 대해 고정된 것으로 간주하였다.

계면변수에 사용된 Stiffness값은 실험적 결과로 보고되어 있는 탄성계수값 (접착레진의 E = 2.1×10^3 N/mm^2)[10]으로부터

$$k = \frac{A \cdot E}{L}$$

Table 1.

	탄성계수(E : MPa)	포아송비 (v)
법랑질	8.41×10^4 [a]	0.30 [a]
상아질	1.86×10^4 [a]	0.31 [b]
복합레진	2.1×10^4 [c]	0.24 [d]
접착레진	2.1×10^3 [d]	0.30 [d]

a : Craig RG : Restorative Dental Materials, 8th ed. 1989[7].

b : Morin et al : Dent Mater 4:77-84, 1988[8].

c : Caycik S & Jagger RG : Dent Mater 8:153-157, 1992[9].

d : Versluis A, et al : J Dent Res 76(6):1298-1307, 1997[10].

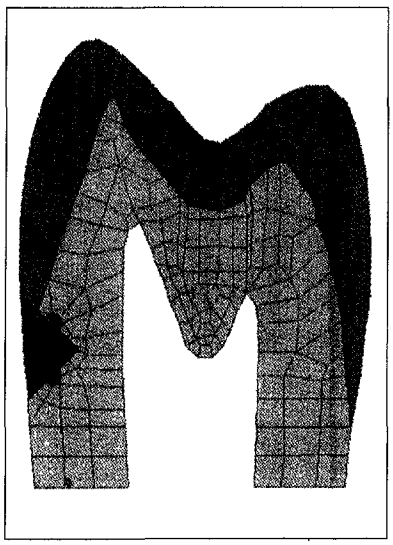

Fig. 1. Model

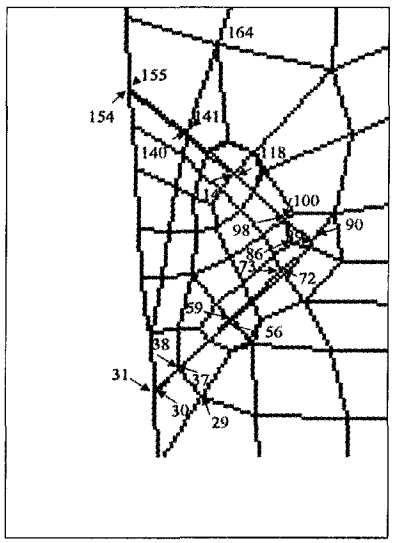

Fig. 2. Node Numbers

E : 탄성계수, A : gap요소의 평균면적, L : gap요소의 길이

의 식으로 계산하여 k = 4.73 x 10^5 N/mm를 얻어서 사용하였다.

Widmalm과 Ericsson[11]의 보고에 의하면 소구치 부위의 최대교합압은 47.5Kg에 해당된다고 하였고, Gibbs등[12]은 정상적인 저작압은 최대교합압의 36.2%에 해당된다고 하였다. 따라서 정상적인 저작압이 가해졌을 때의 응력의 분포를 관찰하기 위하여 하중은 170N을 점하중으로 협측교두 설측 경사면의 중앙에 수직으로 가하였다. 본 실험에서는 유한요소해석을 위하여 개인용 컴퓨터에서 사용이 편리한 Super SAP 프로그램(Algor Interactive System, Inc., Pittsburgh, PA, USA)을 사용하여 변위와 응력을 분석하였다.

III. 실험성적

응력과 변위를 관찰하기 위하여 상악제1소구치의 2차원유한요소모델을 제작하였다(Fig. 1). 응력과 변위를 관찰하기 위한 절점의 번호와 위치는 Fig. 2와 같다.

전체적인 응력의 분포를 관찰하기 위하여 먼저 유지구를 부여하지 않은 5급 와동의 복합레진충전물 주위에서 각각 다른 계면변수의 적용하에서 최대주응력의 분포를 관찰하였다(Fig. 3, 4).

치질과 복합레진 충전물의 접착계면을 따라서 교합면쪽 변연으로부터 치경부쪽 변연까지 치아측 접촉점(#155~30)과 충전물측 접촉점(#154~31) 및 주위의 치질(#164, 29)과 충전물 내부(#86, 51)에서의 최대주응력과 X-축방향의 일축응력의 분포는 그래프와 같다(Fig. 3, 4, 5, 6). gap요소를 부여

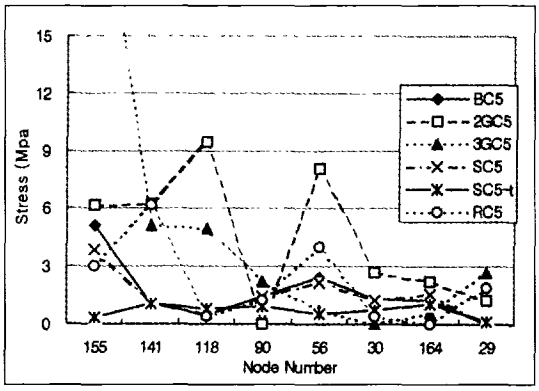

Fig. 3. Max Principal Stress Values of Nodes along the Tooth side of the Interface of six Models.

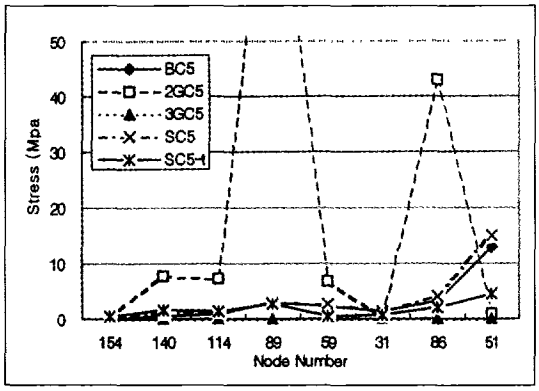

Fig. 4. Max Principal Stress Values of Nodes along the Composite resin side of the Interface of five Models.

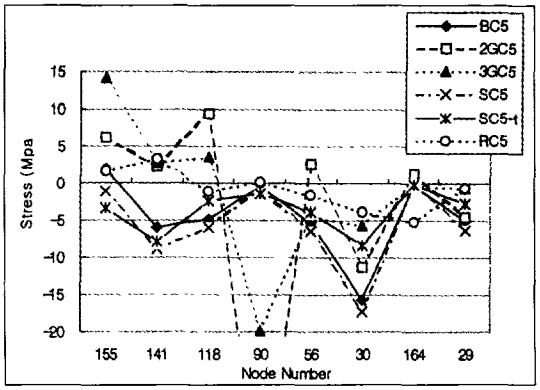

Fig. 5. Stress Values in the X-direction of Nodes along the Tooth side of the Interface of six Models.

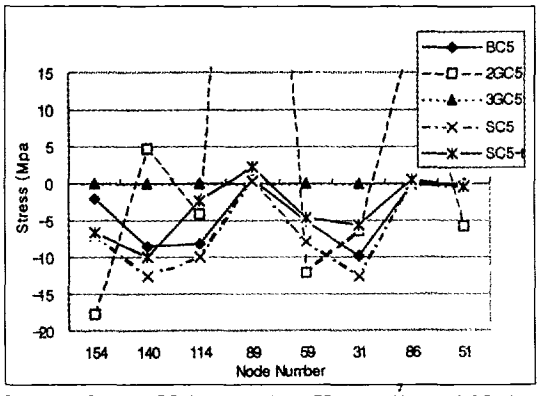

Fig. 6. Stress Values in the X-direction of Nodes along the Composite resin side of the Interface of five Models.

한 경우에는 프로그램의 사양에서 응력의 전달방법을 압축 또는 인장중 한 종류만 전달가능하여 두 경우 모두에서 고정경계조건을 부여하지 않은 경우에는 충전물에 응력이 전달되지 못하고 충전물 전체가 변이되어 3GC5모델에서 처럼 충전물내에 전혀 응력이 발생되지 않았다(Fig. 4, 6). 또한 쇄기형태의 정점에 고정경계조건을 부여한 2GC5모델의 경우에는 대부분의 절점에서 완전히 분리된 계면을 가정한 RC5모델보다도 더 큰 응력이 발생하고, 경계조건으로 부여한 고정점에서의 응력값의 변이가 심하여 Super SAP 프로그램에서 계면조건을 gap요소로 적용하는 것은 문제가 있다. 반면에 Stiffness값을 계면에 평행되게 부여한 SC5모델과 수직되게 부여한 SC5-t모델의 경우는 완전결합을 가정한 BC5모델과 거의 비슷한 응력의 분포양상을 보여 계면변수에 경계요소를 부여하는 방법이 계면조건으로 사용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. SC5-t모델에서는 교합면측 변연과 치경부측 변연에서 BC5모델에서의 응력분포 양상과 달라 전체적으로 SC5-t모델보다는 SC5모델의 경우가 계면조건으로 사용될 수 있는 가능성이 더 크다고 하겠다. 따라서 유지구에 의한 응력의 분포에 관한 해석은 SC5모델을 기준으로 SC5m1, SC5m2, SC5m3모델을 비교하였다.

2차원 평면에서의 변위는 교합면측과 치경부측 와동벽에 모두 유지구를 부여한 모델(SC5m2모델)에서 가장 작고, 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1모델)의 경우에서 교합면측에 부여한 경우(SC5m3모델)보다 충전물의 교합면측 가장자리와 치경부측 가장자리에서 모두 변위가 적게 나타났다. 그러나 충전물이 탈락되는 방향인 협설방향의 변위는 유지구를 부여한 위치에 가까운 쪽의 변위가 적었다. 즉 치경부측에 유지구를 부여한 경우(SC5m1모델)는 치경부 변연에서의 탈락의 가능성이 줄어들고, 교합면측에 유지구를 부여한 경우(SC5m3모델)는 교합면 변연에서의 탈락의 가능성이 줄어들고 치경부 변연에서의 탈락 가능성이 증가되었다. 반면에 협설방향의 변위는 교합면측 변연에서 치경부측 변연에 비해 절대값이 약 7배에 해당되고, 유지구를 부여하지 않은 모델(SC5모델)에 비해 변위를 억제하는 정도가 충전물의 교합면측 가장자리(#154)에서는 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1모델)과 교합면측에 부여한 모델(SC5m3모델)에서 각각 -1.5×10^{-4}mm과 -1.9×10^{-4}mm로 큰 차이가 없었으나, 충전물의 치경부측 가장자리(#31)에서는 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1모델)에서 교합면측에 부여한 모델(SC5m3모델)에 비해 각각 -1.5×10^{-4}mm과 -0.5×10^{-4}mm로 약 3배정도의 변위억제효과가 있었다(Fig. 7, 8).

응력의 분포에 있어서는 최대주응력은 교합면측 변연에서 최대로 크게 나타나고 치경부 와동벽에도 다른 부위에 비해 상대적으로 큰 응력이 나타난다. 또 교합면측 와동벽에는 유지구가 부여되었

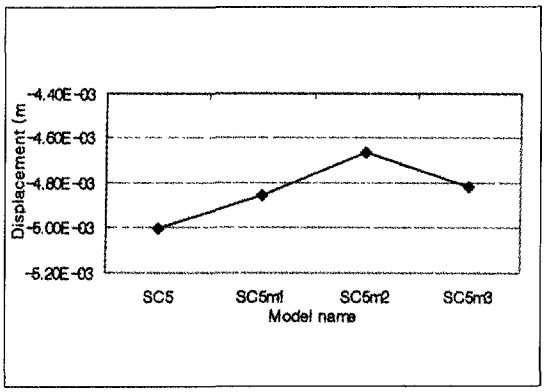

Fig. 7. Displacement Values of the occlusal end(#154) of the restoration in the buccolingual direction.

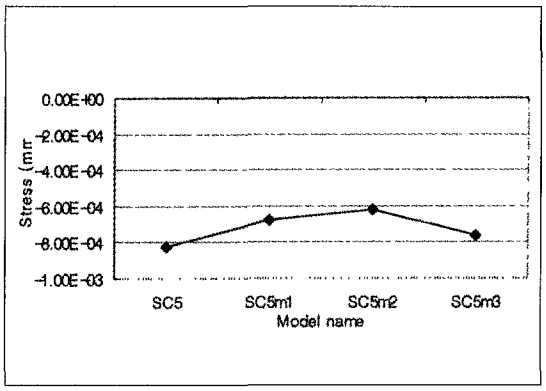

Fig. 8. Displacement Values of the cervical end(#31) of the restoration in the buccolingusl direction.

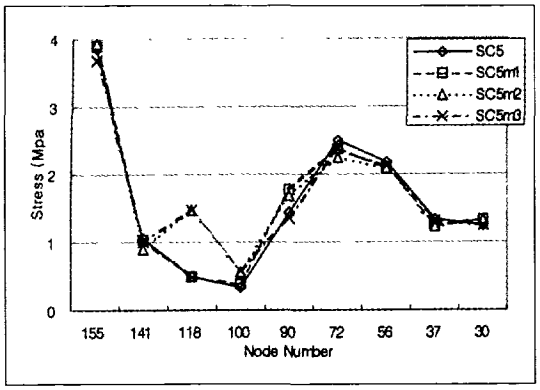

Fig. 9. Max Principal Stress Values along the Tooth side of the Interface for four Retention Variables

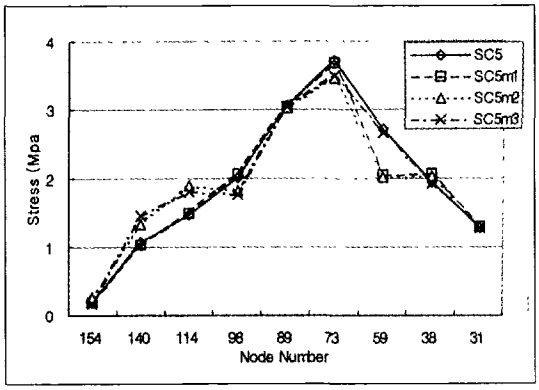

Fig. 10. Max Principal Stress Values along the Composite resin side of the Interface for four Retention Variables

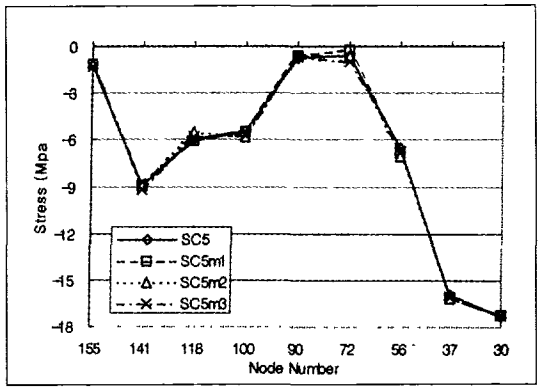

Fig. 11. Stress Values in the X-direction along the Tooth side of the Interface for four Retention Variables

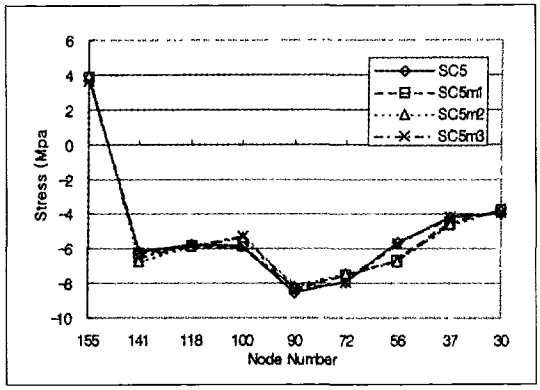

Fig. 12. Stress Values in the Y-direction along the Tooth side of the Interface for four Retention Variables

을 때 응력이 많이 생기고 변위가 억제되었다. 그러나 유지구가 없을 때는 응력의 발생이 적고 변위가 많이 일어났다(Fig. 9). 반면에 충전물 내부에서는 교합면측에 유지구가 부여되었을 때 인접한 충전물 내부에 응력이 증가되었고 치경부측에서는 이 부위에 유지구가 부여 되었을 때 재료내의 응력이 감소되었다(Fig. 10).

교합면측 변연에서의 응력값은 협설방향의 인장응력과 치아장축방향의 압축응력이 비슷하게 나타나고, 치경부 변연에서는 협설방향의 압축응력이 치아장축방향의 압축응력에 비해 약 4배 정도 크게 나타난다(Fig. 11, 12). 그러므로 치경부 변연에서 협설방향의 응력이 상대적으로 크므로 탈락의 가능성이 높다고 할 수 있다.

IV. 총괄 및 고안

Sturdevant[13]등은 치경부의 V자 형태의 마모증에 있어서는 'Modified Class V cavity preparation'으로 수복할 수 있다고 하였다. 이러한 형태의 와동형성법에서는 특별한 와동형성이 필요하지 않고, 다만 와동내면을 거칠게한 후, 법랑질변연에 변연경사면을 부여하고 법랑질이 없는 부위에는 유지구를 부여함으로써 간단하게 와동형성을 대체할 수 있다고 하였다. 또 간혹 유지구를 부여하지 않은 경우에도 임상적인 성공률을 보고하고 있으나 유지구를 부여함으로써 유지력을 증가시키고 중합수축과 교합력에 의한 치아의 굴곡현상에 저항할 수 있어 변연누출을 감소시킬 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 치경부의 V자 형태의 마모

증에 있어서 유지구의 형성이 치아내 응력의 분포와 충전물의 변이에 주는 영향을 유한요소법을 이용하여 비교하였다.

치아내의 복합레진 충전물은 아말감 충전물과 달리 치질과 화학적 및 미세기계적 결합을 형성하므로 치질과 충전물사이에 존재하는 접착계면은 수복된 치아내의 응력분포에 영향을 미친다. 따라서 유한요소모델의 형성과정에서는 접촉면에 존재하는 계면변수에 대한 고려가 필요하다. 이와같은 노력의 일환으로 Peters[6]는 play의 가능성을 설정하기 위해서 압축력은 전달되나 인장력은 배제되는 아말감-치질의 계면을 구성하였으나 계면의 결합특성에 대한 자료가 부족함을 지적한 바 있다. 조[5]는 계면조건으로 적용될 수 있는 변수로서 gap요소의 크기와 Stiffness값, 힘의 전달방법을 지정하여 아말감수복시의 응력분포에 대한 영향을 분석하였으나, Peters가 보고한 것 처럼 gap모델에서의 응력의 크기가 완전결합을 가정한 모델의 응력값에 접근하지 못하고, 반대로 분리를 가정한 모델의 결과에 더 가까워져서 gap요소를 부여하면 분리된 경우와 별 차이가 없는 것으로 해석하였다. 따라서 와동내를 결합(bonding)이 되지 않는 재료로 충전하는 것은 와동의 Outline form에서 interlocking되는 형태를 부여하지 않는 한 응력의 집중현상을 감소시키는데 도움이 되지 못한다고 하였다.

그러나 gap요소를 적용한 경우에는 다른 모델과 달리 'ICODE3'을 부여한 모델(3GC5모델)에서는 치질의 와동변연에 과도한 응력이 집중되어 있고 반면에 충전물 내부로는 압축응력이 전달되지 못하였다(Fig. 4, 6). 이러한 오류를 방지하기 위하여 'ICODE2'를 부여한 모델(2GC5모델)에서는 경계조건으로 부여한 고정점(#89, #90)에서 과도한 응력이 발생되어 해석에서 제외되어야 되고, 응력분포의 양상이 완전결합을 가정한 모델(BC5모델)과 비교하여 충전물과 치질내에서 크게 상이하게 나타나므로 이 프로그램에서의 gap요소의 적용은 문제가 있었다. 반면에 계면변수를 경계요소로 가정하여 Stiffness값을 와동벽면에 평행되게 부여한 모델(SC5모델)과 수직되게 부여한 모델(SC5-t모델)의 경우는 완전결합을 가정한 모델(BC5모델)과 거의 비슷한 응력의 분포를 보여 계면변수로 경계요소를 부여하는 방법이 계면조건으로 사용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 또 SC5-t모델에서는 교합면측 변연과 치경부측 변연에서 BC5모델에서의 응력분포 양상과 달라 상대적으로 SC5-t모델보다는 SC5모델의 경우가 계면조건으로 사용될 수 있는 가능성이 더 크다고 하겠다. 따라서 본 실험에서 유지구에 의한 변위와 응력의 분포에 관한 해석은 SC5모델을 기준으로 SC5m1, SC5m2, SC5m3모델을 비교하였다.

2차원 평면에서의 변위는 교합면측과 치경부측 와동벽에 모두 유지구를 부여한 모델(SC5m2)에서 가장 작고, 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1)의 경우에서 교합면측에 부여한 경우(SC5m3)보다 충전물의 교합면측 가장자리와 치경부측 가장자리에서 모두 변위가 적게 나타났으며, 충전물이 탈락되는 방향인 협설방향의 변위에 대한 억제효과는 충전물의 치경부측 가장자리(#31)에서 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1)의 경우가 유지구를 교합면측에 부여한 모델(SC5m3)에 비해 약 3배정도 크게 나타났다.

응력의 분포에 있어서는 최대주응력은 교합면측 변연에서 최대로 크게 나타나고 치경부 와동벽에도 다른 부위에 비해 상대적으로 큰 응력이 나타났다. 그러나 교합면측 변연에서의 응력값은 협설방향의 인장응력과 치아장축방향의 압축응력이 비슷하게 나타나고, 치경부 변연에서는 협설방향의 압축응력이 치아장축방향의 압축응력에 비해 약 4배 정도 크게 나타난다. 즉 치경부 변연에서 협설방향의 응력이 상대적으로 크므로 탈락의 가능성이 높다고 할 수 있다. 그러므로 변위의 억제효과가 치경부에서 큰 점과 협설방향의 압축응력이 치경부에서 많이 나타나는 점으로 미루어 유지구는 한군데에 부여할 경우에는 치경부에 부여하여야 하겠고, 유지구를 치경부와 교합면측에 모두 부여한 경우에 교합면측 변연과 치경부측 변연에서 변위가 가장 적으므로 두 부위에 모두 유지구를 부여하는 것이 가장 바람직한 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 실험에서는 치경부의 5급 복합레진충전시의 계면조건에 대한 자료를 얻고, 유지구의 유무에 따

른 응력의 분포를 비교하기 위하여 상악제1소구치의 협측치경부에 V자 형태의 5급 와동을 형성하고 치질과 복합레진충전물 사이에 계면변수와 유지구를 부여하여 변위와 응력의 분포에 대한 영향을 2차원유한요소법으로 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 계면변수로서 경계요소와 Stiffness값을 부여하는 방법이 계면조건으로 사용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.
2. 변위를 억제하는 정도는 충전물의 교합면측 가장자리에서는 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1모델)과 교합면측에 부여한 모델(SC5m3모델)에서 큰 차이가 없었으나, 충전물의 치경부측 가장자리에서는 유지구를 치경부측에 부여한 모델(SC5m1모델)에서 교합면측에 부여한 모델(SC5m3모델)에 비해 약 3배정도의 변위억제효과가 있었다.
3. 교합면측 변연에서는 치아장축방향과 협설방향의 압축응력이 비슷한 크기로 나타나고, 치경부 변연에서는 치아장축방향에 비해 협설방향의 압축응력이 4배 정도 크게 나타나므로 치경부 변연에서의 탈락의 가능성이 높다.
4. 유지구는 치경부와 교합면측에 모두 부여하는 것이 가장 바람직하고, 한군데에 부여할 경우에는 치경부에 부여하여야 한다.

참 고 문 헌

1. Heymann HO, Sturdevant JR, Bayne S, Wilder AD, Sluder TB and Brunson WD : Tooth flexure effects on cervical restorations: a two-year study. J Am Dent Assoc 122:41-47, 1991.
2. Lee WC and Eakle WS : Possible role of tensile stress in the etiology of cervical erosive lesions of teeth. J Prosthet Dent 52:374-380, 1984.
3. 조병훈과 엄정문 : 치아파절에 관한 3차원 유한요소법적 연구. 대한치과보존학회지 18(2) : 291-316, 1993.
4. 조병훈 : 2차원유한요소법에 있어서의 치아내 응력분포에 미치는 온도의 영향에 관한 연구. 치과연구 37(1):55-71, 1995.
5. 조병훈. 2차원유한요소법에 있어서의 치아내 응력분포에 미치는 계면조건의 영향에 관한 연구, 치과연구 37(2):51-60, 1995.
6. Peters MCRB and Poort HW : Biomechanical Stress Analysis of the Amalgam-tooth Interface. J Dent Res 62:358-362, 1983.
7. Craig RG : Restorative Dental Materials, 8th ed. St. Louis, Missouri, C.V. Mosby Co., 1989.
8. Morin DL, Cross M, Voller VR, Douglas WH, and DeLong R : Biophysical Stress Analysis of Restored Teeth: Modelling and Analysis. Dent Mater 4:77-84, 1988.
9. Caycik S and Jagger RG : The effect of cross-linking chain length on mechanical properties of a dough-molded poly(methylmethacrylate) resin. Dent Mater 8:153-157, 1992.
10. Versluis A, Tantbirojn D, and Douglas WH : Why do shear bond tests pull out dentin? J Dent Res 76(6):1298-1307, 1997.
11. Widmalm SE and Ericsson SG : Maximal Bite Force with Centric and Eccentric Load. J Oral Rehab 9:445-450, 1982.
12. Gibbs CH, Mahan PE, Lundeen HC, Brehnan K, Walsh EK, and Holbrook WB : Occlusal forces during chewing and swallowing as measured by sound transmission. J Prosthet Dent 46(4):443-449, 1981.
13. Sturdevant CM, Roberson TM, Heymann HO, and Sturdevant JR : The art and science of Operative Dentistry. 3rd ed. St. Louis: Mosby, p570, 1995

주요단어 : 유한요소법, 계면변수, 유지구, 응력, 변위