유한요소법을 이용한 전부주조관의 교합점 위치와 하중방향이 시멘트층 내 응력에 미치는 영향

경북대학교 치과대학 치과보철학교실

이정훈·이규복·이청희·조광헌

이 논문의 목적은 전부주조관에서 교합점의 위치와 교합력의 방향이 합착용 시멘트층 내의 응력에 미치는 영향에 대해서 알아보는 것이다. 하악 제 1대구치상에서 서로 다른 9 개의 교합점과 3가지 교합력 방향을 가진 27가지 조합의 유한요소 모델을 상정하였다. 금관의 소재는 제 3형 금합금이고, 변연의 형태는 chamfer이다. 합착용 시멘트로는 전 층에서 균일하게 70 μm의 두께를 가지는 글라스 아이오노머 시멘트가 사용되었다. 금관에는 100N의 하중을 적용하였다. 협측과 설측 변연의 근접도에 따라서 시멘트층 내 응력은 다른 양상을 나타내었다. 협측은 변연으로부터 약 0.5 mm, 설측은 변연으로부터 약 1 mm 내측에서 최대 응력 값을 가졌다. 하중 방향이 치축에 대해 경사가 클수록, 하중점이 교두첨에 근접해 있을수록 더 큰 응력이 발생하였다.

주요단어: 유한요소분석, 하중방향, 시멘트, 교합접촉점, 응력

(대한치과턱관절기능교합학회지 2008:24(4):317-324)

서 론

치과 치료에서 적절한 교합은 중요하다. 비정상적인 교합은 치아 자체에 국소적인 응력집중과 굽힘을 초래하여 치경부의 법랑질과 상아질이 손상되는 굴곡파절(abfraction)의 원인이 된다[1-3]. 그리고 이갈이 등의 이상기능이나 교합외상 등은 과도한 응력을 치아와 치주에 유발하여 치주조직의 병적 변화를 초래하거나[4,5] 병적인 치아이동을 일으킬 수 있고, 또한 턱관절에 위해한 요인으로 작용할 수도 있다[6,7]. 그러므로 치과치료 시 정상적인 교합 형성은 치아와 치주조직을 포함한 구강 악안면부의 건강을 보존하는 기본 조건이다.

부분금관이나 완전금관으로 수복된 치아의 경우에도 교합문제는 중요하다. 교합조정이 제대로 시행되지 않아서 정상적인 교합 회복에 실패하면 치아, 치주와 턱관절 등에 비정상적인 응력이 초래될 것이며 특히 주조관의 경우 치경부에 높은 응력이 유도될 수 있다. 치경부 응력은 금

교신저자 : 조광헌
경북대학교 치의학전문대학원 치과보철학교실
대구 광역시 중구 삼덕동 2가 188-1번지, 700-412, 대한민국
FAX: 053-427-0778
E-mail: khjo@knu.ac.kr
원고접수일: 2008년 9월 11일, 원고수정일: 2008년 11월 20일, 원고채택일: 2008년12월 25일

관 변연 부위에 응력을 더욱 집중시켜 금관 합착용 시멘트의 파괴를 초래할 가능성이 있고, 이는 수복치아의 수명 단축을 야기할 수 있다. 금관 합착용 시멘트층에, 특히 변연부에, 과도한 응력이 장기적으로 반복되면 재질 내에 미세균열[8,9]과 미세누출[10,11]이 야기되어 생역학적으로 불리한 환경이 형성되고 결과적으로 그 부위에서 이차우식이 진행될 수도 있다. 금관 변연부에서 시멘트층이 파괴되면 금관 변연부와 치질사이에 절흔(notch)이 형성되어 부가적인 응력집중을 초래하게 되므로 역학적으로 불리해지는 악순환이 반복된다. 교합압에 의한 응력과 구강 내 화학적 원인이 중첩되어 응력부식환경이 조성되면 시멘트층의 파괴가 더욱 빠르게 진행될 수도 있으므로 교합 조정은 금관수복물의 수명에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

이에 본 연구에서는 완전금관의 교합 조정 시 형성되는 교합점의 위치에 따라 시멘트층 내에 분포되는 응력의 경향에 대해 조사하였다. 금관으로는 중등도의 탄성계수를 갖는 제 3형 금합금이, 시멘트로는 탄성계수가 비교적 낮은 글라스 아이오노머 시멘트(Glass Ionomer Cement)가 조합된 조건에 대하여, 교합평면상 교합점의 위치와 하중의 방향이 시멘트 변연부의 응력에 미치는 영향에 대해서 2차원 유한요소해석을 이용하여 분석하였다.

연구재료 및 방법

연구대상으로 전부주조관은 시술 빈도가 높은 하악 제 1대구치 중 우측치아를 선정하였다. 금관의 소재로 사용된 제 3형 금합금과 합착용 시멘트로 사용된 글라스 아이오노머 시멘트(Glass ionomer cement: GIC) 등의 재료물성을 Table I에 나타내었다[12].

치아의 기하학적 형상은 치아 해부학 교본을 참조하였다[13]. 교합면에서는 교합평면과 1~2 mm 간격이 되도록, 축면은 적절한 유지를 위해 6°의 수렴각이 되도록 삭제하였다. 전부주조관 외형은 수복 전 자연치의 법랑질 외형과 동일하도록 하였다. 자연치의 백악-법랑 경계에서 chamfer 변연을 부여하였으며, 모든 표면은 돌출부분이 생기지 않도록 예각으로 설계하였다. 시멘트층 두께는, 글라스 아이오노머 시멘트 전층에서 균일하게 70 μm가 되도록 모델링하였다. Fig. 1은 이상의 조건으로 삭제된 치아와 금관에 대해 mesh 작업이 실행되어진 2차원 유한요소 모델이다.

교합점은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 3개의 사면, 즉 기능교두의 협측 및 설측사면 그리고 비기능교두의 협측 사면에 각각 3개씩 모두 9점을 설정하였다. 하중조건으로 (1) 기능교두의 협측사면 상의 교합점 3점(Fig. 1의 A, B, C점)에서 설측 방향으로 치축과 각각 30°, 45°, 60°의 각을 이루며 100 N의 하중이 작용하는 경우, (2) 기능교두의 설측 사면 상의 교합점 3점(Fig. 1의 D, E, F점)에서 협측 방향으로 치축과 각각 30°, 45°, 60°의 각을 이루며 100 N의 하중이 작용하는 경우, (3) 비기능교두 협측 사면의 3점(Fig. 1의 G, H, I 점)에서 설측 방향으로 치축과 각각 30°, 45°, 60°의 각을 이루며 100 N의 하중이 작용하는 경우 등 모두 27가지 경우를 상정하였다.

Table I. Material properties

Material	Young Modulus (GPa)	Poisson ratio	Ultimate Strength (MPa)
Dentin	18.6	0.31	
Type III Gold	91	0.32	
GIC	7.6	0.35	9 -12

치아형상이나 금관 및 시멘트 소재의 물성, 두께, 변연부 설계 등의 다양한 변수가 응력분포에 영향을 미치므로 이러한 변수들의 조합을 포괄적으로 해석하기 위해서는 2D 모델링이 유리하다. 하악 제 1대구치는 협설측보다 근원심 길이가 길어 이를 2차원으로 모델링 하는 경우 평면응력(plane stress) 조건보다는 평면변형률(plane strain) 조건의 적용이 타당할 것으로 사료된다.

모든 모델링과 해석에서는 PC용으로 출시된 EMRC사의 상용 software인 NISA II/Display III를 사용하였다[14]. 모델은 NKTP type 2형 solid 요소(plane strain quadrilateral 요소, 요소당 절점수 8개)를 사용하였다. 수치해석의 오차를 감소시키기 위한 방안으로 대부분의 요소에 대해 종횡비(aspect ratio)는 5.0 이내로, 또 요소의 corner각을 45˜135° 범위로 제한하였으나 응력치가 금관 변형 등 기하학적 변화가 심한 부위에서는 일부 이를 만족하지 못하였다. 직경변화에 따라 차이가 있으나 대체로 각각의 mesh모델에는 1,600개 내외의 요소, 약 6,000개의 절점이 사용되었다.

시멘트층 내 응력의 상호 비교를 용이하게 하기 위해서 Fig. 1과 같이 협측 및 설측 변연부에서 각각 6개와 5개, 총 11군데의 응력관찰점을 설정하여 응력크기 변화의 추이를 조사하였다. 응력관찰점은 시멘트층의 중심면상에 있는 절점으로, 협측 변연으로부터 각각 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 mm 떨어진 점과 설측 변연으로부터 각각 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 mm 떨어진 점이다.

결 과

모두 9가지의 교합점 위치와 하중방향 조건에 대하여 응력해석을 수행하였다. 금관과 시멘트 및 치질에서의 응력분포 도시를 위해 그 전형적인 응력해석 결과, 각 사면에 작용하는 하중조건 중 시멘트층 내 응력이 가장 크게 산출된 조건 3가지를 선정하여 von Mises 등가응력 분포를 출력하였으며 이를 Fig. 2에서 Fig. 4에 나타내었다. 시멘트층 응력은 교합력 방향이 치축과 큰 각을 이루며 작용할 때와 교합점 위치가 교두첨에 가까울 때 큰 값을 나타냈다. Fig. 2에서 Fig. 4는 각각 점 C에서 하중방향 60° 조건, Fig. 3은 점 D에서 하중방향 60° 조건, 그리고 Fig. 4는 점 I에서 하중방향 60° 조건에 대한 응력해석 결과이다.

Fig. 5에서 Fig. 7은 금관 변연부의 시멘트층 내 응력관찰점에서 산출된 von Mises 응력값을 비교한 것이다. 각각 9개의 하중점에 30°(Fig. 5), 45°(Fig. 6), 60°(Fig. 7) 방향으로 하중 부하가 이루어졌을 때의 결과이다.

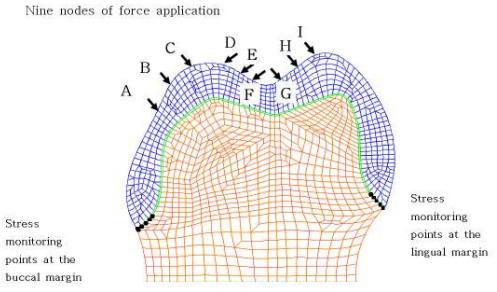

Fig. 1. Plain strain (2D) finite element mesh of the bucco-lingual section of the mandibular first molar including full veneer crown.

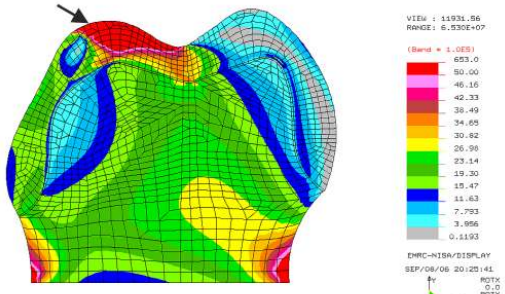

Fig. 2. The von Mises stress distribution when a load of 100 N was applied to point C at an angle of 60 deg. with respect to the tooth axis.

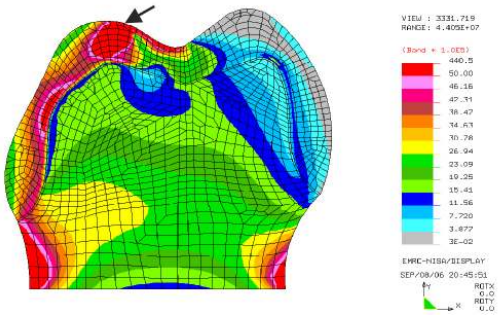

Fig. 3. The von Mises stress distribution when a load of 100 N was applied to point D at an angle of 60 deg. with respect to the tooth axis.

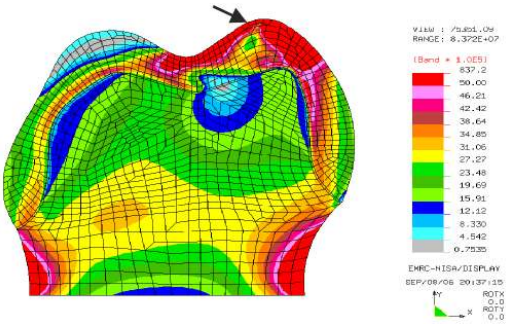

Fig. 4. The von Mises stress distribution when a load of 100 N was applied to point I at an angle of 60 deg. with respect to the tooth axis.

총괄 및 고찰

제 3형 금합금과 글라스 아이오노머 시멘트로 수복된 하악 제 1대구치를 모델로, 교합력에 의해 발생되는 시멘트층 내 응력분포에 대해 교합점 위치와 교합력의 방향이 미치는 영향을 조사하였다. 모두 27가지의 교합점 위치와 하중작용 방향의 조합에 대하여 해석하였다.

시멘트층의 응력은 금관 소재와 시멘트의 물

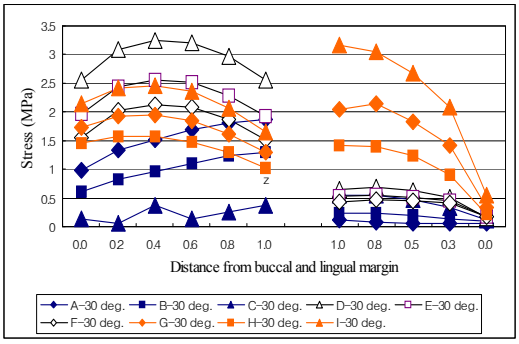

Fig. 5. The von Mises stress distribution in the cement layer near the margin of full veneer crown subject to 100 N load at each of the nine points at an angle of 30 deg. with respect to the tooth axis.

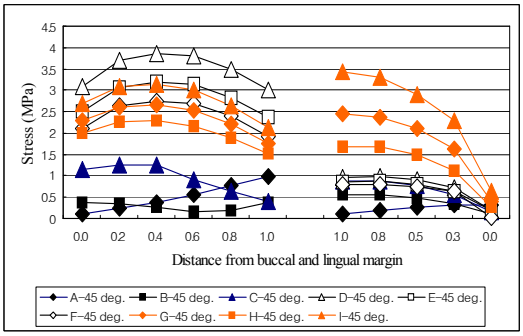

Fig. 6. The von Mises stress distribution in the cement layer near the margin of full veneer crown subject to 100 N load at each of the nine points at an angle of 45 deg. with respect to the tooth axis.

성[15] 및 그 두께에 영향을 받는다. 특히 시멘트층 내의 응력을 정량적으로 비교하기 위해서는 시멘트층의 두께를 일정하게 관리하는 것이 필요하다. Tuntiprawon 등[16]과 Sugita 등[17]에 의하면 시멘트층 두께가 70 μm 이상이 되면 시멘트층의 파손가능성이 커지게 된다고 하였으며, 본 연구

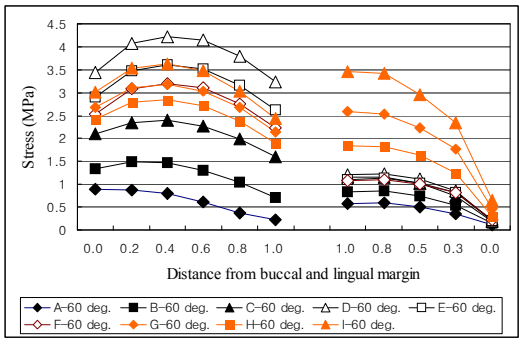

Fig. 7. The von Mises stress distribution in the cement layer near the margin of full veneer crown subject to 100 N load at each of the nine points at an angle of 30 deg. with respect to the tooth axis.

에서는 이를 참조하여 시멘트층을 전 치면에 걸쳐 70 μm으로 일정하게 하였다.

Fig. 2에서 Fig. 4에 나타나 있는 하중 방향별 금관 변연부의 시멘트층 내 응력 분포는, 시멘트층 내 응력이 변연부의 최외방 면에서보다 일정 거리 떨어진 내부 위치에서 최대가 된다는 것을 알 수 있다. 협측은 변연에서 약 0.5 mm, 설측은 변연에서 약 1 mm 내부에서 von Mises 응력이 최대치에 이르게 되며 그 보다 더 내측에서는 응력이 감소되고 있다. 이는 시멘트층의 파괴가 바로 변연에서 보다는 그 내부에서 먼저 일어날 가능성이 큼을 나타낸다. 임상적으로는 변연부 시멘트의 파괴가 관찰되면 이미 그 내부로 파괴부위가 더 깊이 연장되어 있을 것임을 암시한다. 이 같은 시멘트층 내 응력분포는 이[15]의 연구 결과와 일치한다.

하중 작용점 위치에 따라 시멘트층 응력의 분포에 큰 차이를 보였다. 전반적으로 기능교두의 협측 사면에 하중이 작용하는 경우가 시멘트층 내 응력이 가장 작았다. 이와 같은 경향은 세 가지 하중방향 조건 모두에서 동일하게 관찰되었다. 하중작용점의 위치에 따라서도 시멘트층 내 응력 분포에 큰 차이를 보였다. Fig. 5에서 Fig. 7처럼 하중이 협측 교두에 작용하는 경우 협측 시멘트층에, 설측 교두에 작용하는 경우 설측 시멘트층에 높은 응력이 발생하였다.

이[15]는 치관(금관)면에 작용하는 하중의 방향과 협설측 위치에 따라 치관 및 시멘트층 내에 매우 다른 응력 분포가 생기는 것을 보고하였다. 이의 연구에서는, 금관이나 시멘트 재질에 무관하게 기능교두의 설측 사면에 힘이 작용하는 경우 치관 및 시멘트층에 가장 불리한 응력분포 상태가 형성되었고, 이에 따라 하악 구치부의 금관 수복 시 설측 사면보다는 가급적 협측 사면에 교합점을 형성하는 것이 응력측면에서 유리할 것이라 하였다. 본 연구의 결과도 이를 지지하고 있다. Fig. 5에서 Fig. 7은 협측 변연부 시멘트층의 응력이 하중 작용위치에 따라 달라짐을 보이는데, 협측 변연부 시멘트층 응력은 하중점 위치가 기능교두의 내측 사면에 있을 때 가장 컸고, 비기능교두의 내측 사면, 기능교두의 협측 사면의 순서로 응력이 작아졌다. 반면 설측 변연부 시멘트층에서는 비기능교두의 내측 사면에 하중이 작용할 때 응력이 가장 컸으며, 기능교두의 내측 사면, 기능교두의 협측 사면의 순서로 응력이 작아졌다. 기능교두의 협측 사면에 하중점이 있을 때 시멘트층 내 응력이 가장 작게 발생하였다. 이러한 응력 분포 추이는 하중 방향에 무관하게 세 가지 하중방향 조건 모두에서 동일하게 관찰되었다.

시멘트층 내 응력은 하중점의 상하방(occluso-gingival) 위치에 의해 영향을 받았다. Fig. 5에서 Fig. 7에 나타난 바와 같이, 하중점이 교두첨 쪽으로 치우쳐 위치할수록 시멘트층 응력이 더 크게 발생하였다. 특히 하중 방향의 치축에 대한 경사가 클 때 응력은 더욱 증가하였다. 이는 금관의 교합조정에 대한 지침이 될 것으로 사료된다. 협측 변연부의 시멘트층의 응력을 최대로 생기게 하는 조건인, 하악의 비기능 활주 시 기능교두 내측 사면의 교두첨 부위에 형성되는 교합점은 시멘트층 응력을 감소시키기

위해 제거하는 것이 바람직해 보인다. 마찬가지로, 시멘트층 내 응력의 관점에서 하악의 기능활주 시 설측교두 내사면의 교두첨 부위에 생기는 교합점은 제거하는 것이 바람직하다.

Table 1에서 제시된 바와 같이, 글라스 아이오노머 시멘트의 인장강도는 9~12 MPa이며 이는 수직하중이므로 본 연구에서 제시된 von Mises 응력과 산술적으로 직접 비교할 수는 없다. 그러나 본 연구에서 관찰한 시멘트층 내의 최대 응력은 기능교두 내사면의 교두첨 근처에서 협측으로 60°의 하중이 작용할 때 생긴 4.2 MPa이였으며, 이것은 재질의 극한 강도와 안전여유(safety margin)가 있는 것으로 사료된다. 다만 시멘트층 내 응력이 반복 작용할 경우 재질의 파절은 피로특성을 따르게 되므로, 이 경우 강도가 Table I의 수준보다 큰 폭으로 감소할 것이다. 또한 구강내의 화학적 환경이 응력부식을 발생시키면 허용응력은 더욱 낮아질 것이므로 이에 대한 유의가 요구된다.

결 론

전부주조관으로 수복된 치아의 합착용 시멘트층의 응력에 대해 교합점의 위치 및 교합력의 방향이 미치는 영향을 조사하였다. 하악 제 1대구치상에서 제 3형 금합금과 글라스 아이오노머 시멘트 재질로 이루어지는 수복물에 대하여 9개의 교합점 위치에서 100 N의 하중이 30°, 45°, 60°의 3가지 방향으로 작용하는 모두 27개의 조합에 대해 시멘트층 내의 응력 분포를 분석하였다. 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 교합점 위치와 하중 방향에 따라 응력분포가 현저히 달라지며, 설측 교두에 하중이 작용하는 경우는 설측 변연부 시멘트층에서, 협측 교두에 하중이 작용하는 경우는 협측 변연부 시멘트층에서 더 큰 응력이 발생하였다. 시멘트층 내 응력은 변연에서 보다는 내부로 일정 거리 떨어진 위치, 즉 협측에서는 변연에서 약 0.5 mm, 설측에서는 변연에서 약 1 mm 내측에서 최대값을 가졌다.
2. 협측 변연부의 시멘트층 응력은 하중점 위치가 기능교두의 내측 사면에 있을 때 가장 컸고, 비기능교두의 내측 사면, 기능교두의 협측 사면의 순서로 작아졌다. 반면 설측 변연부 시멘트층에서는 비기능교두의 내측 사면에 하중이 작용할 때 응력이 가장 컸으며, 기능교두의 내측 사면, 기능교두의 협측 사면의 순서로 응력이 작아졌다.
3. 하중점이 교두첨 쪽으로 치우쳐 위치할수록 시멘트층 응력이 더 크게 발생하였고, 하중 방향이 치축에 대한 경사가 클 때 응력은 더욱 증가하였다. 결과적으로 교두첨 부위에서 치축과 60° 경사각을 가지고 힘이 작용하는 경우 가장 큰 응력이 시멘트층 내에 형성되었다.

참 고 문 헌

1. Litonjua LA, Bush PJ, Andreana S, et al. Effects of occlusal load on cervical lesions. *J Oral Rehabil* 2004, 31:225-232.
2. Tanaka M, Naito T, Yokota M, Kohno M. Finite element analysis of the possible mechanism of cervical lesion formation by occlusal force. *J Oral Rehabil* 2003, 30:60-67.
3. Rees JS, Jagger DC. Abfraction lesions: myth or reality?. *J Esthet Restor Dent* 2003, 15:263-271.
4. Clark GT, Tsukiyama Y, Baba K, Watanabe T. Sixty-eight years of experimental occlusal interference studies: what have we learned?. *J Prosthet Dent* 1999, 82:704-713.
5. Bernhardt O, Gesch D, Look JO, et al. The influence of dynamic occlusal interferences on probing depth and attachment level: results of the Study of Health in Pomerania (SHIP). *J Periodontol* 2006, 77:506-516.
6. Gher ME. Changing concepts. The effects of occlusion on periodontitis. *Dent Clin North Am* 1998, 42:285-299.

7. Hagag G, Yoshida K, Miura H. Occlusion, prosthodontic treatment, and temporomandibular disorders: a review. *J Med Dent Sci* 2000, 47:61-66.
8. Kamposiora P, Papavasilious G, Bayne SC, Felton DA. Finite element analysis estimates of cement microfracture under complete veneer crowns. *J Prosthet Dent* 1994, 71(5):435-441.
9. Kamposiora P, Papavasiliou G, Bayne SC, Felton DA. Predictions of cement microfracture under crowns using 3D-FEA. *J Prosthodont* 2000, 9(4): 201-209.
10. Baldissara P, Comin G, Martone F, Scotti R. Comparative study of the marginal microleakage of six cements in fixed provisional crowns. *J Prosthet Dent* 1998, 80(4):417-422.
11. Yilmaz Y, Dalmis A, Gurbuz T, Simsek S. Retentive force and microleakage of stainless steel crowns cemented with three different luting agents. *Dent Mater J* 2004, 23(4):577-584.
12. Wiskott HWA, Krebs C, Scherrer SS, at al. Compressive and Tensile Zones in the Cement Interface of Full Crowns: A Technical Note on the Concept of Resistance. *J Prosthodont* 1999, 8(2):80-91.
13. Major MA Jr., Nelson SJ. Wheeler's Dental Anatomy, Physiology and Occlusion. 6th Edition, W.B. Saunders Co., 1984, p.254.
14. NISA II / DISPLAY III User's Manual, Mechanics Research Corporation (EMRC).
15. Lee JY. Characterization of the stresses in the luting cement layer influenced by material properties of full veneer crown. MD thesis Department of Dentistry, Kyungpook Nat Univ 2006.
16. Tuntiprawon M, Wilson PR. The effect of cement thickness on the fracture strength of all-ceramic crowns. *Aust Dent J 1995,* 40(1):17-21.
17. Sugita T, Takakuda K, Miyairi H. Mechanical behavior of the cement layer of a cast crown - effect of the mechanical properties of casting alloy. *Kokubyo Gakkai Zasshi* 2000, 67(1):52-57.

Characterization of the Stresses in the Luting Cement Layer Affected by Location of the Occlusal Points and Loading Direction on a Full Veneer Crown*

Jung-Hoon Lee, Kyu-Bok Lee, Cheong-Hee Lee, Kwang-Hun Jo

Department of Prosthodontics, School of Dentistry, Kyungpook National University

The objective of this study was to test effects of (1) where the occlusal contact points locate on a full veneer crown, and (2) which direction the contact forces are directed to, on the stresses within the luting cement layer that might suffer microfracture. A total of 27 finite element models were created for a mandibular first molar, combining 9 different locations of the occlusal contact points and 3 different loading directions. Type 3 gold alloy was used for crown material with a chamfer margin, and the luting cement material was glass ionomer cements in uniform thickness of 75 μm. Modeled crowns were loaded at 100 N.

Different patterns in the cement stress were observed in the vicinity of the buccal and lingual margins. Whereas, the peak stress in buccal margin occurred approximately 0.5 mm away from the external surface, the highest stress in lingual margin was observed at approximately 1 mm. Significantly different distribution of stresses was recorded as a function either of the location of the occlusal contact points or of the loading direction. Higher stresses were produced by more obliquely acting load, and when the loaded point was in the vicinity of the cusp tip.

Key words : finite element, loading direction, luting cement, occlusal contact point, stress

Correspondence to : Kwang-Hun Jo, D.D.S, M.S.D, Ph.D.
Department of Prosthodontics, School of Dentistry, Kyungpook National University, 2-188-1 Samduk-dong, Jung-gu, Daegu, 700-412, South Korea
Fax: +82 53 427 0778
E-mail: khjo@knu.ac.kr
Received: September 11, 2008, Last Revision: November 20, 2008, Accepted: December 25, 2008