

치근 부착 스트레인 게이지를 이용한 응력 분포 분석

김 상 철¹⁾ · 박 규 찬²⁾

바람직한 교정치료는 최적의 교정력을 치아에 가하여 정확하게 치아이동을 조절하고 예측함에 따라 가능해진다. 치관에 힘과 모멘트가 동시에 적용될 때 그 비율(M/F ratio)에 따라 치주인대에 나타나는 응력 분포가 변화하게 되고 이에 따른 회전중심의 위치가 변하게 되는데 이런 양상을 파악함으로써 정확한 치아이동을 조절하고 예측할 수 있다.

본 연구에서는 교정력에 따른 치주인대 및 치조골 부위에서의 응력 분포를 알아보기 위하여 상악 중절치 치근 8부위에 스트레인 게이지를 부착한 인공 치아를 광탄성 레진에 매식한 4mm 정중이개 증례의 상악 전치부 실험모형을 제작하여 응력 분포를 조사하였다. 폐쇄 방법으로 다음과 같은 3가지 방법을 적용하였다. 1. 금속 호선의 삽입 없이 100g의 힘을 발휘하는 elastomeric chain만 사용한 경우, 2. .016" 금속호선을 삽입하고 elastomeric chain을 사용한 경우, 3. .016" × .022" 금속호선을 삽입하고 elastomeric chain을 사용한 경우. 각각의 경우에서 치근의 근심면, 원심면 및 순면, 설면에 나타나는 응력을 계측하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 치근 부착 스트레인 게이지를 이용한 응력 분포 조사 방법으로 치아이동시 치근의 근·원심면 및 순·설면에서의 응력 분포를 파악할 수 있었으며 이에 따른 모멘트 팔의 형성을 추정함으로써 치아의 회전양상을 알 수 있었다.
2. 호선없이 교정력을 적용한 경우 정출 및 경사이동이 컸으며 호선 적용에 따라 압하 및 치체이동 양상을 보이는 것을 응력 분포 파악을 통해 확인할 수 있었다.

(주요 단어 : 스트레인 게이지, 응력, 회전중심)

I. 서 론

교정력에 의한 치아이동을 통하여 바람직한 치료 결과를 얻으려면 교정력에 따른 치아와 치아 주위 조직에서의 생물학적 변화와 이때 발생하는 응력에 관한 역학적인 분석과 이해가 필요하다. 즉 치아이동과 치주인대 내 반응의 상세한 기록뿐만 아니라 치아에 작용하는 힘과 모멘트의 철저한 이해가 요구된다.¹⁻⁹⁾

1954년에 Mühlemann^{10,11)}이 치관 부위에 작용된 힘이 주위조직에 일으키는 생체반응을 조직학적으로 연구한 이후, Davidian¹²⁾은 컴퓨터를 이용한 상악 중절치의 회전중심과 저항중심에 대해 연구하였으며, Caputo등¹³⁾은 치체이동을 일으키는 Moment/ Force (M/F) ratio 및 힘의 크기와 gable bend 각각의 상호 관계에 대하여 광탄성 섬유를 이용하여 연구하였다. 또한 Burstone,^{14,15)} Christiansen과 Burstone,²⁾ Nikolai,¹⁶⁾ Burstone과 Pryputniewicz^{1,17,18)}는 치관에서의 다양한 M/F ratio에 따라 치아의 회전중심이 결정된다고 하였으며, 정량화된 M/F ratio의 기준치를 제시하였다. Kusy와 Tulloch³⁾도 평형 M/F ratio에 대해 연구했으며, Tanne등⁵⁾은 3차원적인 모델을 이용해 M/F ratio와 회전중심간의 관계에 대해 연구하였다. 박¹⁹⁾은 부적절한 모멘트와 힘이 가해졌을 경우 치아

¹⁾ 원광대학교 치과대학 치과교정학교실, 교수.

²⁾ 원광대학교 치과대학 치과교정학교실, 대학원생

* 이 논문은 2000년도 원광대학교의 교비지원에 의하여 수행됨.

교신저자: 김상철

전북 익산시 신용동 344-2

원광대학교 치과대학 / 063-850-1960

sangkim@wonkwang.ac.kr

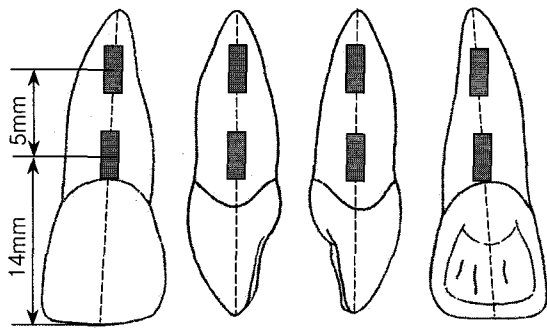


Fig. 1. Position of linear strain gauges on the tooth surface

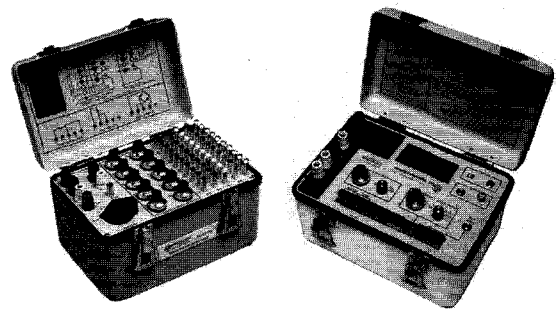


Fig. 2. Strain indicator(P-3500) and balance unit(SB-10)

가 지나치게 경사되거나 회전되고, 구치부 고정원의 상실과 치근 흡수 등의 부작용이 유발된다고 하였다.

교정력에 의한 치주인대 및 치조골에서의 응력 분포를 분석하고 치아 이동 양상을 연구하는 방법으로 레이저 Holography를 이용한 방법,^{8,9,20,21)} 스트레인 게이지를 이용한 방법,²³⁻²⁷⁾ 유한요소법^{1,28-35)}과 광탄성법^{17,36-40)} 등이 제시되었으나 응력 평가 방법이나 실험 기술의 복잡성으로 인해 많은 정보를 얻기는 어려웠다. 그 중 스트레인 게이지를 이용한 방법은 생체나 모형에서 스트레인 게이지가 부착된 표면 부위에 대한 응력과 변위를 동시에 가장 정확히 계측할 수 있고 응력의 방향성과 수치화가 가능하여 치과의 여러 분야에서 이 방법을 이용한 연구가 많았으나 교정학 분야에서는 Pedersen^{24,25)} 및 김²³⁾ 등이 사용했을 뿐이며 이 또한 치주인대 및 치조골 부위에서의 응력 분포를 정확히 파악하지는 못했다.

이에 본 연구에서는 치근에 스트레인 게이지를 부착하여 광탄성 레진에 매식한 실험 치열 모형을 제작하여 교정력에 따른 치주인대 및 치조골에서의 응력 분포를 계측하여 분석해 봄으로써 치근 부착 스트레인 게이지를 이용한 응력 분포 조사 방법의 유용성을 알아보고자 하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 실험 모형 설정과 치근 부착 스트레인 게이지

상악 정중이개 폐쇄를 위해 교정력을 적용했을 때의 응력 분포를 알아보려고 정중이개 증례의 상악 6 전치의 실험 모형을 설정하였으며, 본 연구에 사용된 스트레인 게이지는 일축의 linear strain gauge(EA-00-015DJ-120, Measurement Group, USA)로서, 접

착제(M-Bond 200, Measurement Group, USA)를 이용하여 상악 좌우 중절치의 근·원심 및 순·설면 치근의 치경부 부위(incisal edge 하방 14mm)와 치근단 부위(incisal edge 하방 19mm)에 각각 8개를 치아 장축을 따라 부착하였다.(Fig. 1) 스트레인 게이지의 도선은 strain balance unit(SB-10, Measurement Group, USA)와 strain indicator(P-3500, Measurement Group, USA)에 연결하였다.(Fig. 2)

2. 실험 치열 모형 제작

파라핀 왁스를 이용하여 정상적인 상악의 악궁 형태를 축조하고, Wheeler⁴¹⁾가 제시한 것과 크기와 형태가 거의 유사한 시판용 기성 경질레진 치아를 이용하여 상악 좌우 중절치 사이에 4mm의 정중이개가 생기도록 치아를 배열하였다. 상악 중절치의 근원심 및 순설측 경사는 Andrews⁴²⁾에 의한 데이터에 근거하였다. 실리콘 인상제(Zerosil, Drevedentamid gmbh, Germany)를 이용하여 음형을 제작하고, 스트레인 게이지(EA-00-015DJ-120, Measurement Group, USA)를 치근의 근·원심 및 순·설면에 부착시킨 다음 음형 내에 스트레인 게이지가 부착된 레진 치아를 역으로 식립 하였다. 치조골에 해당되는 부위는 교정력과 같은 약한 하중에도 응력 양상을 비교적 잘 나타내는 광탄성 레진(PL-2, Measurement Group, USA)을 사용하였다. 제조업체의 지시에 따라 PL-2 레진과 경화제를 1:1로 계량한 후 음형과 함께 전기로에서 90°F까지 예열 하였다. 레진과 경화제를 혼합하여, 중합 반응이 일어나면서 125°F에 도달했을 때 음형에 기포가 생기지 않도록 서서히 주입하고 상온에서 24시간 경화시킨 후 음형에서 제거하여 입체 모형을 완성하였다

Table 1. Average strain distribution in no arch wire ($\mu \epsilon$, tensional strain.)

		upper right central incisor				upper left central incisor			
		labial surface	lingual surface	mesial surface	distal surface	labial surface	lingual surface	mesial surface	distal surface
apical	Mean	247	233	186	316	237	226	188	329
	SD	11	12	9	11	12	11	9	11
cervical	Mean	378	353	284	405	370	363	270	420
	SD	12	12	11	15	13	12	12	14

3. 실험군의 설정 및 응력 측정

실험 모형의 치관에 .018"×.025" standard edge-wise bracket(Tomy Co. Japan)을 브라켓 슬롯이 일직선이 되도록 치관의 중심부(incisal edge 하방 5mm)에 통상적인 방법으로 부착하였다. 공간폐쇄시 일정한 힘이 가해지도록 하기 위해 100g의 힘을 발휘하는 elastomeric chain(406-612, 3M, Unitek)을 공간 폐쇄시 사용했으며, 다음과 같은 실험군을 설정하였다.

1. 금속 호선의 삽입 없이 elastomeric chain으로 공간 폐쇄
2. .016" 원형 금속 호선(A.J.Willcock, TP Orthodontics, Inc. USA)을 삽입하고 elastomeric chain으로 공간 폐쇄
3. .016"×.022" 각형 금속 호선(Hi-Ti Rectangular wire, 3M, Unitek, USA)을 삽입하고 elastomeric chain으로 공간 폐쇄

응력의 측정은 영점 조정 후 elastomeric chain을 삽입하여 응력 값이 최고에 도달했을 때 측정하였다. 금속 호선의 삽입의 경우에는 1시간이 지난 후의 상태를 영점으로 조정하였다. 응력 측정 횟수는 각 5회로 하였으며, 측정간격은 응력 회복을 고려하여 20분간격으로 하였다.

III. 연구성적

1. 금속 호선의 삽입 없이 elastomeric chain으로 공간 폐쇄 (Table 1)

상악 좌우 중절치근의 근·원심면 및 순·설면 모

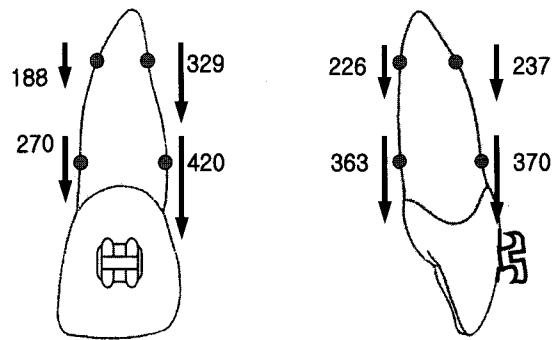


Fig. 3. Diagrammatic representation of average strain distribution in no arch wire ($\mu \epsilon$).

두에서 큰 인장응력을 보였으나 근심보다는 원심에서 큰 인장응력을 보였다. 또한 치근단보다는 치경부에서 큰 인장응력을 보여주었으나 순면과 설면은 거의 동일한 인장응력을 보였다.(Fig. 3)

2. .016" 금속 호선을 삽입하고 elastomeric chain으로 공간 폐쇄 (Table 2)

상악 좌우 중절치근의 근심면에서는 치경부 및 치근단 부위에서 균일하고 약한 압축응력을, 원심면에서는 치경부 및 치근단 부위에서 균일하고 미약한 인장응력을 보였으나 근원심간의 차이나 치경부와 치근단의 차이는 뚜렷하지 않았다. 또한 순·설면 치경부 부위에서 모두 균일하고 미약한 인장응력을 보였으며, 치근단 부위에서는 균일하고 미약한 압축응력을 보였다.(Fig. 4)

Table 2. Average strain distribution in .016" round steel wire ($\mu \epsilon$)

		upper right central incisor				upper left central incisor			
		labial surface	lingual surface	mesial surface	distal surface	labial surface	lingual surface	mesial surface	distal surface
apical	Mean	-32	-32	-33	-2	-37	-28	-35	-3
	SD	2	2	2	3	3	2	3	3
cervical	Mean	15	30	-37	35	18	25	-43	38
	SD	3	2	2	3	3	3	3	3

(+ : tensional strain, - : compressional strain)

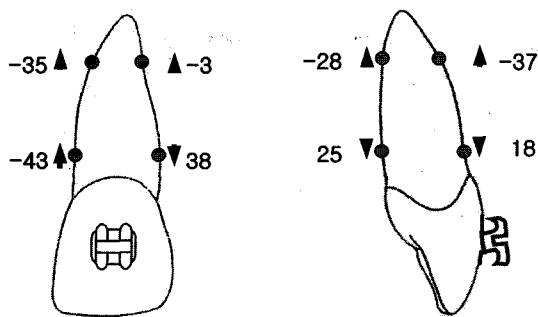


Fig. 4. Diagrammatic representation of average strain distribution in .016" round steel wire ($\mu \epsilon$).

3. .016"×.022" 금속 호선을 삽입하고 elastic chain으로 공간 폐쇄 (Table 3)

상악 좌우 중절치근의 근원심 모두 균일하고 약한 압축응력을 보이며, 근원심간의 차이나 치경부와 치근단간의 응력 차이는 뚜렷하지 않았다. 또한 순설면간의 응력 차이는 뚜렷하지 않았으나 치경부 보다는 치근단 부위에서 다소 압축응력이 크게 나타났다.(Fig. 5)

IV. 총괄 및 고찰

치아이동은 교정력에 대한 생물학적 반응이며, 교정장치에 의해서 치아에 가해지는 기계적인 자극으로 골의 흡수나 침착이 발생하는 생리적 반응이다. 치아에 가해지는 교정력에 의하여 치주조직에 stress가 발생한다. 치주조직에 가해지는 stress에 의해 세포,

섬유 등의 구조에 strain이 발생된다.

교정장치에 의해 발생하는 교정력과 치아 이동간의 관계를 올바르게 평가하기 위해 치아에 작용하는 힘 체계뿐만 아니라 교정력에 의해 발생하는 치주조직내 응력분포와 변위를 규정하고 정량화 하려는 연구가 진행되어 왔다.

교정에 의한 치아이동을 분석하기 위한 방법은 유한요소법(Finite Element Method)과 레이저 holography법, 응력계측법(Electrical resistance strain gauge method), 광탄성법(Photoelasticity method) 등이 있다.

유한요소법은 형상이 복잡하고 균일하지 않은 구조물에 발생하는 응력을 분석하는 경우에 매우 유용하게 사용되며 전반적인 영역에 걸친 응력의 분포와 측정이 가능하고 변위 전후의 상태를 동시에 비교하여 볼 수가 있는 반면, 치아 및 주위 구조물에 대한 수학적 모형으로부터 이론적으로 계산한 것이기에 그에 따른 한계점을 가지며, 치근막과 치조골을 등방 등질의 탄성체로 생각하는 단점을 가진다^{1,28-35}).

레이저 holography를 이용한 방법은 단색광이면서 같은 방향의 고주파 광원의 간섭현상을 이용하는 것으로 미세한 움직임도 알 수 있고 모든 면을 관찰하는 특징을 가지고 있는 반면, 실험조건이 까다롭고 두 부고정이 어렵기 때문에 생체에 적용하기가 복잡하며, 물체 표면에서 만의 응력을 분석할 수 있으며 내적 효과를 예견할 수 없다는 단점을 가진다^{8,9,20,21}).

광탄성법은 제작된 광탄성 모형에 하중을 가했을 때 물체의 전 표면에서의 응력 분포를 계측 할 수 있고 모형 전체에 퍼지는 응력을 관찰하여 응력이 집중되는 부분의 위치 및 양을 결정하기 쉽다. 그러나 가정에 의해 균일하게 만들어진 모형을 이용해야 하고

Table 3. Average strain distribution in .016" × .022" rectangular steel wire ($\mu \epsilon$, compressional strain)

		upper right central incisor				upper left central incisor			
		labial surface	lingual surface	mesial surface	distal surface	labial surface	lingual surface	mesial surface	distal surface
apical	Mean	-78	-92	-57	-50	-70	-96	-63	-46
	SD	3	4	3	2	4	4	2	3
cervical	Mean	-36	-62	-67	-46	-32	-65	-73	-52
	SD	3	3	3	3	3	4	2	3

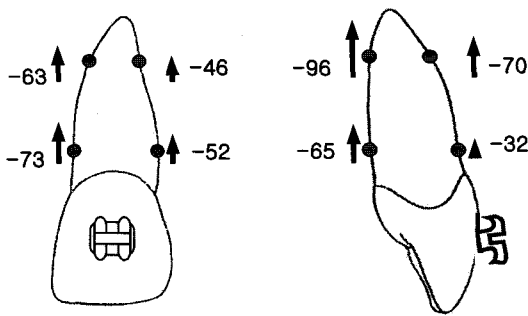


Fig. 5. Diagrammatic representation of average strain distribution in .016" × .022" rectangular steel wire ($\mu \epsilon$).

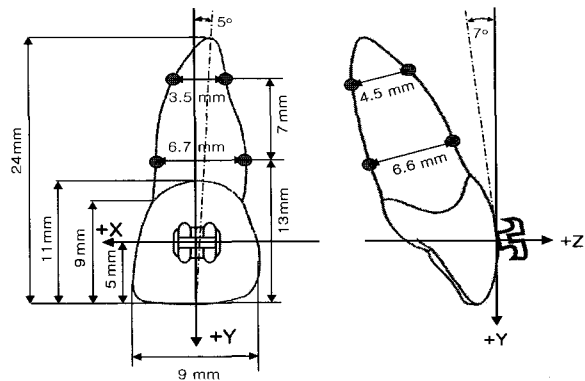


Fig. 6. Schematic representation of geometry and coordinate system for the upper left central incisor

절대적인 응력의 크기보다는 인접부위와의 상대적인 응력 차이만이 관찰되고, 모형 제작 및 실험 조건이 쉽지 않다는 단점이 있다^{17,36-40}.

스트레인 게이지를 이용한 방법은 생체나 모형의 어느 곳이나 스트레인 게이지가 부착된 표면의 한 부위에 대한 응력과 변위를 동시에 가장 정확히 측정할 수 있고 응력의 종류와 수치화가 가능하다. 그러나 장치가 부착되지 않은 부위의 응력 분석은 불가능하며 장치의 크기 때문에 미세한 부분에는 부착이 곤란하고 내부 응력 측정이 불가능하며 복잡한 단점이 있다²³⁻²⁷.

본 연구에서 스트레인 게이지를 이용한 응력 측정법의 응력-변형률 관계는 Hook의 법칙에 의하여 설명된다. 하중에 따른 전기저항의 변화를 이용한 응력 측정법은 하중을 가한 후에 gauge wire의 길이 변화를 측정하고 이와 비례관계에 있는 변형률을 알아낸다.

$$\epsilon (\text{장력}) = \frac{\Delta l}{l} \quad (l : \text{원래의 gauge wire의 길이})$$

$$(\Delta l : \text{변화된 gauge wire의 길이})$$

물체의 탄성한계 범위 내에서는 Hook의 법칙에 따르면, $\sigma (\text{응력}) = E \cdot \epsilon$ 에서 보는 바와 같이 물체의 특정계수인 Young율(E)을 알고 있으면 응력을 계산해 낼 수 있으며, 반대로 변형률이 측정되면 응력 또한 계산해 낼 수 있다.

본 실험에서는 치근부착 스트레인 게이지를 이용하여 응력을 측정하고 부착위치에 따른 상대적인 응력 값을 비교 분석하여 치아 이동 방법에 따른 응력 분포 양상을 알아보았다. 실험모델의 해석을 용이하게 하기 위하여 상악좌측 중절치의 치관을 중심으로 하여 근원심 방향의 수평축을 X축, 수평축에 직각인 수직축을 Y축, XY평면에 수직적인 순설면 방향의 수평축을 Z로 설정하였다.(Fig. 6)

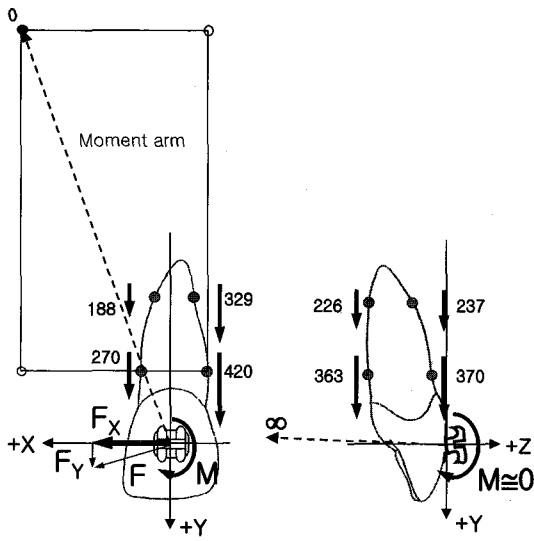


Fig. 7. Schematic representation of moment arm in no arch wire

실험에 의해 도출된 응력값의 분포를 근거로 정중이개 폐쇄시의 힘의 체계 및 치아의 회전이동 양상을 유추해 볼 수 있다. 스트레인 게이지 부착위치에 따른 응력 분포를 파악하여 응력 값이 "0"이 되는 지점을 유추할 수 있고 이 점과 힘의 적용점을 연결하면 모멘트 팔(moment arm)이 형성된다. 결과적으로 브라켓에 적용되는 모멘트는 모멘트 팔에 90° 방향으로 작용한다. 공간 폐쇄 교정력(F_x)에 따른 치아의 정출력($+F_y$)과 압축력($-F_y$), 순측 치관경사($+F_z$)와 설측 치관경사($-F_z$)의 힘을 유추해 볼 수 있다.

본 연구에서 금속 호선없이 elastomeric chain만을 사용하여 상악정중이개 폐쇄시 치근의 근심보다는 원심면이, 치근단 부위보다는 치경부 부위가 인장응력이 큰 것으로 나타나며, 이것은 공간 폐쇄시 근심경사와 함께 정출력이 유발되는 것으로 사료된다. 힘과 모멘트의 관점에서 보면 이는 elastomeric chain에 의한 공간폐쇄력, F_x 로 인해 상악좌측 중절치의 인장응력, F_y 가 다소 크게 발생되었다. 또한 미약한 설측치관경사($-F_z$)를 보였으나 F_x 와 F_y 에 비해 큰 의미가 없었다.(Fig. 7)

.016 금속 호선삽입과 .016×.022 금속 호선 삽입 후 elastomeric chain으로 공간폐쇄시 치근의 근·원심면의 치경부 및 치근단부위 모두 약하고 균일한 압축을 보였으며, 이는 상악정중이개 폐쇄시 치아가 치체 이동이 이루어지고 있는 것으로 사료된다. 치체 이동

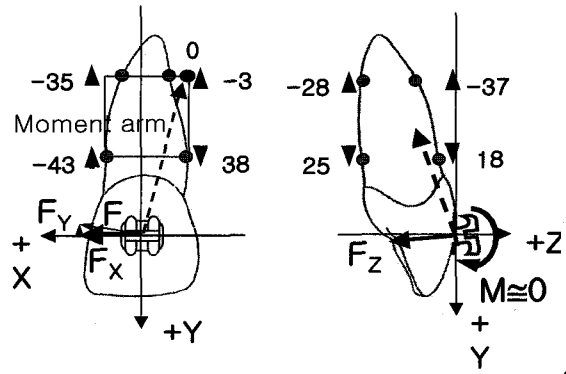


Fig. 8. Schematic representation of moment arm in .016 arch wire

일어나기 위해선 크기는 같고 방향은 반대인 모멘트가 필요하며 elastomeric chain이 직선의 금속 호선을 통해 수평력, F_x 를 생기게 한다. 즉, .016 금속 호선과 .016×.022 금속 호선을 삽입 후 공간폐쇄력을 가한 경우 브라켓 슬롯의 대각선 방향에 있는 모서리가 호선에 접촉할 때까지 브라켓은 경사지며 변형된 금속 호선은 치아를 직립하고자 하는 짝힘(couple)에 의해 $-M_y$ 를 발생시킨다. 두 금속 호선간의 stiffness와 브라켓 슬롯간의 clearness에 의해 .016×.022 금속 호선을 사용했을 때 더욱 균일한 strain 분포를 보였으며, .016 금속 호선보다 .016×.022 금속 호선의 사용시 더 큰 $-M_y$ 를 보여주었다. 스트레인 게이지의 민감도를 고려해볼 때 두 금속 호선간의 응력 값의 차이는 큰 의미가 없지만 .016×.022 금속 호선의 사용시 치체이동에 가까웠다. 또한 공간폐쇄력은 금속 호선과 브라켓간의 마찰로 인해 상당히 감소된 것으로 생각되며 M/F ratio에도 영향을 준 것으로 사료된다. .016 금속 호선은 미약한 설측치관경사($-F_z$)를 .016×.022 금속 호선은 미약한 순측치관경사($+F_z$)를 보였으나 F_x 와 F_y 에 비해 큰 의미가 없었다.(Fig. 8, 9)

회전중심(center of rotation)은 어떤 물체가 이동하면서 어느 점을 중심으로 회전할 때 이 점을 회전중심이라고 한다^{1,12)}. 반면 치아가 이동할 때 생기는 가장 큰 저항점을 저항중심(center of resistance)이라고 하는데 힘이 치아의 저항 중심을 통해 가해지면 치체 이동 즉, translation이 일어나고 저항중심을 통과하지 않은 힘은 치아에 모멘트가 발생하여 회전이 일어난다. 치아의 이동양상을 알아내기 위해서는 회전중심과 저항중심을 연구하는 것은 중요하다. 적용된 힘과 모멘트의 비율에 따라 치아이동 형태 혹은 회전중

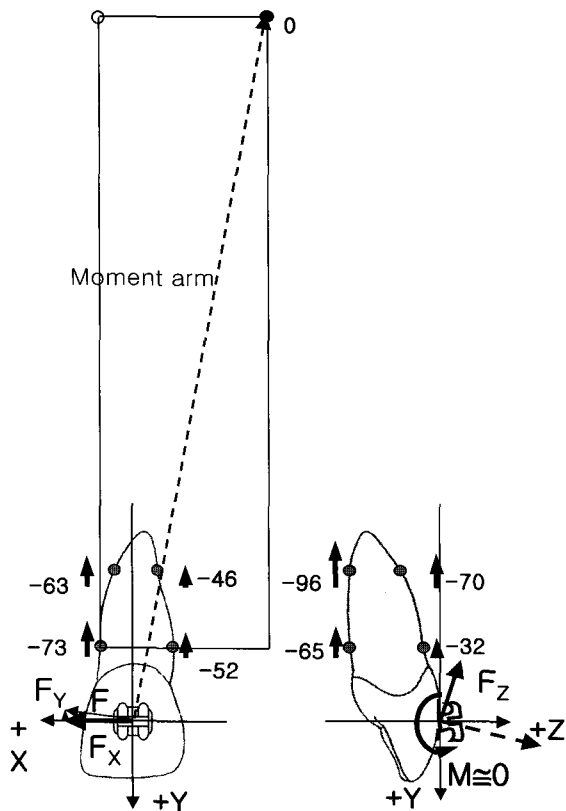


Fig. 9. Schematic representation of moment arm in .016" x .022" arch wire

심이 결정되며, 치아는 비조절성 경사이동, 조절성 경사이동, 치체이동, 치근이동 양상이 나타난다¹⁻⁹⁾.

본 연구에서는 스트레인 게이지를 이용하여 응력 값을 측정하고 부착위치에 따른 상대적인 응력 값을 비교 분석하여 치아 이동 방법에 따른 응력 분포양상을 알아보기 위한 실험이었다. 본 실험의 결과 스트레인 게이지를 이용한 방법은 치아의 초기 이동의 연구에 이용될 수 있는 매우 정확하고 신뢰할 수 있는 방법으로서 향후 스트레인 게이지의 세분화와 다양한 적용과 분석 및 조직반응에 관한 연구 등을 종합하여 응용한다면 치아이동의 mechanism을 규명하는데 보다 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

V. 결 론

교정력에 따른 치주인대 및 치조골 부위에서의 응력 분포를 알아보기 위하여 상악 중절치 치근 8부위에 스트레인 게이지를 부착한 인공 치아를 광탄성 레

진에 매식한 4mm 정중이개 증례의 상악 전치부 실험 모형을 제작하여 응력 분포를 조사하였다. 폐쇄 방법으로는 금속 호선의 사용 유무에 따라, 금속 호선의 종류에 따라 3가지 방법을 적용하였다. 각각의 경우에서 치아의 근심면, 원심면 및 순면, 설면에 나타나는 응력을 계측하여 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 치근 부착 스트레인 게이지를 이용한 응력 분포 조사 방법으로 치아이동시 치근의 근·원심면 및 순·설면에서의 응력 분포를 파악할 수 있었으며 이에 따른 모멘트 팔의 형성을 추정함으로써 치아의 회전양상을 알 수 있었다.
2. 호선 없이 교정력을 적용한 경우 정출 및 경사이동이 컸으며 호선 적용에 따라 압하 및 치체이동 양상을 보이는 것을 응력 분포 파악을 통해 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Burstone CJ, Pryputniewicz RJ. Holographic determination of center of rotation produced by orthodontic forces. Am J Orthod 1980 : 77 : 396-409.
2. Christiansen RL, Burstone CJ. Centers of rotation within the periodontal space. Am J Orthod 1969 : 55 : 351-69.
3. Kusy RP, Camilla Tulloch JF. Analysis of moment/force ratios in the mechanics of tooth movement. Am J Orthod Dentofac Orthop 1986 : 90 : 127-31.
4. Smith RJ, Burstone CJ. Mechanics of tooth movement. Am J Orthod 1984 : 85 : 294-307.
5. Tanne K, Koening HA, Burstone CJ. Moment to force ratios and the center of rotation. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1988 : 94 : 426-31.
6. Tanne K, Nagataki T, Inoue Y, Sakuda M, Burstone CJ. Patterns of initial tooth displacements associated with various root lengths and alveolar bone heights. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1991 : 100 : 66-71.
7. Tanne K, Sakuda M, Burstone CJ. Three - dimensional finite element analysis for stress in the periodontal tissue by orthodontic forces. Am J Orthod Dentofac Orthop 1987 : 92 : 499-505.
8. Vanden Bulcke MM, Burstone CJ, Sachdeva RC, Dermaut LR. Location of centers of resistance for anterior teeth during retraction using the laser reflection technique. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1987 : 91 : 375-84.
9. Vanden Bulcke MM, Dermaut LR, Sachdeva RC, Burstone CJ. The center of resistance of anterior teeth during intrusion using the laser reflection technique and holographic interferometry. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1986 : 90 : 211-20.
10. Muhlemann, H.R. A method for measuring tooth mobility, Oral Surg 1951 : 4 : 1220-33.
11. Muhlemann, H.R. The mobility. The measuring method initial and secondary tooth mobility, J. Periodont 1954 : 25 : 22-9.
12. Davidian EJ. Use of a computer model study the force distribution on

the root of maxillary central incisor. *Am J Orthod* 1971 : 59 : 581-88.

13. Caputo AA, Chaconas SJ, Hayashi RK. Photoelastic visualization of orthodontic Forces during canine retraction. *Am J Orthod* 1974 : 65 : 250-59.
14. Burstone,C.J.The application of continuous force to orthodontics, *Angle Orthod* 1961 : 31 : 1-14.
15. Burstone,C.J. Mechanism of the segmented arch technique, *Angle Orthod* 1966 : 36 : 99-120.
16. Nikolai RJ. Periodontal ligament reaction and displacements of a maxillary central incisor subjected to transverse crown loading. *J Biomech* 1974 : 7 : 93-9.
17. Pryputniewicz RJ, Burstone CJ, Bowley WW. Determination of arbitrary tooth displacements. *J Dent Res* 1978 : 57 : 663-74.
18. Burstone CJ. The biomechanics of tooth movement. In Kraus BS, Reidel RA, eds. *Vistas in orthodontics*. Philadelphia : Lea & Febiger 1962 : 197-213.
19. 박영철 : Segmented Arch technique 에 의한 꺾신교정법 : III.치근의 이동방법, *대한치과외과학회지* 1986 : 24 : 698-702.
20. 민상홍, 윤영주, 김광원. space closing loop에 의해 야기되는 상악 절치부 이동양상에 관한 역학적 연구, *대치교정지* 1995 : 25 : 143-52.
21. 박기호, 손병화. Laser 반사측정법을 이용한 상악전치부 합입시 저항중심의 수평적 위치에 관한 연구, *대치교정지* 1993 : 23 : 619-631.
22. 우재영,박영철.Laser 반사측정법을 이용한 상악전치부의 후방견인시 저항중심의 수직적 위치에 관한 실험적연구,*대치교정지* 1993 : 23 : 375-89.
23. 김현순, 남동석.경부고정 headgear 사용시 안면두개골의 변위에 관한 장력계측법 및 유한요소법적 연구, *대치교정지* 1987 : 17 : 185-99.
24. Pedersen E, Andersen K, Gjessing PE. Electronic determination of centers of rotation produced by Orthodontic force systems. *Eur J Orthod* 1990 : 12 : 272-80.
25. Pedersen E, Andersen K, Melsen B. Tooth displacement analysed on human autopsy material by means of a strain gauge technique. *Eur J Orthod* 1991 : 13 : 65-74.
26. Gjessing P : Biomechanical design and clinical evaluation of a new canine retraction spring.*Am.J.Orthod* 1985 : 87 : 353-62.
27. Weijjs, W.A., and Dejongh , H.T. : Strain in mandibular alveolar bone during mastication in the rabbit arch, *Oral Bio* 1977 : 22 : 667-75.
28. Tanne K, Hiraga J, Sakuda M. Biomechanical effect of anteriorly directed extraoral forces on the craniofacial complex: a study using the finite element method. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1989 : 95 : 200-7.
29. 천옥진, 김태우, 서정훈. 상악 4절치의 후방견인시 나타나는 현상에 관한 유한요소법적 분석. *대치교정지* 1995 : 25 : 525-41.
30. 박춘근, 양원식. 상악전치 intrusion시 저항중심 위치에 대한 3차원 유한요소법적 연구. *대치교정지* 1997 : 27 : 259-72.
31. 황치일, 서정훈. 상악호선에 torque 부여시 나타나는 상반 작용에 관한 유한요소법적 연구. *대치교정지* 1994 : 24 : 479-508.
32. 신수정, 장영일. 상악치열의 치군후방 이동에 관한 3차원 유한 요소법적 연구, *대치교정지* 1998 : 28 : 563-79.
33. Cobo J, Sicilia A, Arguelles J, Suarez D, Vijande M. Initial stress induced in periodontal tissue with diverse degree of bone loss by an orthodontic force : Tridimensional analysis by means of the finite element method. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1993 : 104 : 448-54.
34. McGuinness NJP, Wilson AN, Jones ML, Middleton J. Stress induced by edgewise appliances in the periodontal ligament - a finite element study. *Angle Orthod* 1992 : 62 : 15-21.
35. McGuinness NJP, Wilson AN, Jones ML, Middleton J. A stress analysis of the periodontal ligament under various orthodontic loading. *Europ J Orthod* 1991 : 13 : 231-42.
36. 엄정배, 이병태. Multiloop Edgewise Arch wire가 야기하는 응력분포에 관한 광탄성학적 연구. *대치교정지* 1990 : 20 : 357-72.
37. Brodsky JF, Caputo AA, Furstman LL, Root tipping : A photoelastic-histopathologic correlation. *Am J Orthod* 1975 : 67 : 1-10.
38. Chaconas SJ, Caputo AA, Davis JC. The effect of orthopedic forces on the craniofacial complex utilizing cervical and headgear appliances. *Am J Orthod* 1976 : 69 : 527-39.
39. De Alba JA, Chaconas SJ, Caputo AA. Orthopedic effect of the extraoral chin cup appliance on the mandible. *Am J Orthod* 1976 : 69 : 29-41.
40. Perez CA, De Alba JA, Caputo AA, Chaconas SJ. Canine retraction with J-hook headgear. *Am J Orthod* 1980 : 78 : 538-47.
41. Wheeler RC. *Dental anatomy, physiology and occlusion*. 5th ed. Philadelphia, 1974.
42. Andrews LF. The six keys to normal occlusion. *Am J, Orthod* 1972 : 62 : 296.

- ABSTRACT -

An Analytical Study on Strain Distribution Using Strain Gauge Attached On Root Surface

Sang-Cheol Kim, Kyu-Chan Park

Department of Orthodontics, College of Dentistry, Wonkwang University

Optimal orthodontic treatment could be possible when a orthodontist can predict and control tooth movement by applying a planned force system to the dentition.

The moment to force(M/F) ratio at the bracket, has been shown to be a primary determinate of the pattern of tooth movement. As various M/F ratios are applied to the bracket on the tooth crown, strain distribution in periodontium can be changed, and the center of rotation in tooth movement can be determined. It is, therefore, so important in clinical orthodontics to know the strain distribution in a force system of a M/F ratio.

The purpose of this study was to analyze the strain distribution in orthodontic force system by strain gauge attached to tooth root, and to evaluate the usage of the method. For this study, an experimental upper anterior arch model was constructed, where upper central incisors, on the root surface of which, 8 strain gauges were attached, were implanted in the photoelastic resin, as in the case of 4mm midline diastema. Three types of closing of upper midline diastema closure were compared : 1. with elastomeric chain(100g force) in no arch wire, 2. elastomeric chain in .016" round steel wire, 3. elastomeric chain in .016" × .022" rectangular steel wire.

The results were as follows.

1. Strain distributions on labial, lingual, mesial and distal root surface of tooth were able to be evaluated with the strain gauge method, and the patterns of tooth rotation were understood by presuming the location of moment arm.
2. Extrusion and tipping movement of tooth was seen in closing in no arch wire, and intrusion and bodily movement was seen with steel arch wire inserted.

KOREA. J. ORTHOD. 2001 : 31(3) : 325-33

※ Key words : Strain, Center of rotation, Strain gauge