

## 상악골 급속 확장시 상악골의 응력 분산과 변위에 대한 유한요소법적 분석

연세대학교 치과대학 교정학교실

조 봉 제 · 손 병 화

### I. 서 론

부정교합의 치료는 크게 정형력(orthopedic force)에 의한 방법과 교정력(orthodontic force)에 의한 방법으로 대별될 수 있다. 고대로부터 정형력은 인체의 형태를 변형시키는데 이용되어 왔으며, 치과교정학 분야에 정형력을 사용하여 골격의 불균형을 개선하였다는 여러 학자들의 보고가 있었다. 1931년 Broadbent<sup>10)</sup>에 의하여 부정교합의 진단과 성장변화분석에 유용한 두부방사선 계측학이 소개되었으며 이에 의하여, 정형력을 이용한 교정치료의 결과가 파악될 수 있었다. 1960년 Angell<sup>11)</sup>이 협소한 상악궁을 지닌 14세 소녀에게 약 2주간 jackscrew를 사용하여 1/4inch의 악골 확장을 하였다고, 발표한 이래로 Black<sup>8)</sup>, Hawley<sup>23)</sup>, Dewey<sup>17)</sup>, Brown<sup>12)</sup> 등에 의하여 연구가 계속되어 왔다. 그후 Haas<sup>20)</sup>는 상악골 급속 확장 치료 환자의 분석에서 상악골이 전하방으로 변위되었다고 하였으며, 김<sup>4)</sup> 등에 보고도 상악골의 전방 변위를 설명하였으며, Starnbach<sup>37)</sup>씨는 rhesus monkey를 이용한 실험에서 상악골 급속 확장시에 정중구개 봉합선을 중심으로 치아, 치조골, 구개돌기가 모두 하나의 unit로 회전 된다고 하며, 벌어진 정중구개 봉합선 주위에 새로운 골조직의 형성을 관찰하였다. 또한 David<sup>14)</sup>는 방사선사진분석에서 A-point가 전하방으로 변위를 보였으며, SN, 평면과 구개평면(palatalplane)의 각도가 증가되었다고 보고함으로써, Haas의 이론을 뒷받침 하였다. Biederman<sup>6)</sup>은 정중구개 봉합선이 부채꼴 형태

로 이개되는 상악골 급속 확장술의 작용기구에 대한 가설을 제안하였으며, Timms<sup>40)</sup>는 상악골 급속 확장 치료환자의 intermolar width와 interpterygoid width의 변화를 연구하였다. 이상과 같은 급속확장술에 의한 상악골 위치변화에 대한 연구이외에 Isaacson<sup>25)</sup>, Zimring<sup>43)</sup>은 screw에 금속판을 부착하여 생체 물리화적인 연구를 시도하였다. Björk<sup>7)</sup>가 매식 방법으로 구개부의 성장과 대한 연구를한 이래로 Scott<sup>36)</sup>, Burstone<sup>13)</sup>, Persson<sup>33)</sup> 등이 봉합선의 성장에 대하여 연구하였으며, Melson<sup>31)</sup>은 정중구개 봉합선의 성장에 있어서 성별에 따른 차이와 나이 증가에 따른 해부학적 구조의 상이성을 주장하였다. 이에따라 Timms<sup>44)</sup>등은 상악골 급속확장술의 적절한 사용시기에 대하여 언급하였다.

Harberson<sup>18)</sup>은 상악골 급속 확장술을 구치부 반대교합 환자의 치료에 사용하였으며 Laptook<sup>29)</sup>은 전도성난청(전음성난청)환자의 치료에도 효과가 있다는 보고를 하였고 이비인후과 영역에서 상악골 급속 확장술을 사용하여 Nasal Airway의 용적의 증가가 있었다는 보고와 함께 그 사용 영역이 점차 확대되어 감으로써 상악골 급속 확장술을 협소한 상악궁 환자이외에도 제III급 부정교합 환자, 구개파열 환자, 구치부 반대교합 환자, 비강협소증 환자, 전도성난청 환자등 그 사용 영역이 많이 확대되었다. Angell<sup>11)</sup>이래 두부방사선 계측학발달로 그 양상을 확인하고 조직학적으로도 많은 연구가 있었지만, 이에 대한 정량적인 분석은 방사선 사진과 석고 모형에 의한 분석이 주류를 이루어 왔다.

이에 저자는 유한요소법(finite element method)

을 이용하여 상악골 급속 확장에 따른 각 부위의 이개정도와 응력을 정량적으로 분석하여 다소의 지전을 얻었기에 이에 보고하는 바이다.

## II. 연구재료 및 연구방법

본 연구에서는 상악골 급속 확장술로 상악골을 이개한 경우에 상악골에 분포되는 응력과 변위정도를 측정하기 위해 Hellman치령ⅢB 정도인 인간의 전조 두개골을 이용하여 좌우가 동형이라는 가정하에서 편측 상악골에 대한 3차원 유한요소 모델을 만들었다. (사진 1, 사진 2)

유한 요소법 (finite element method)이란 공학에서 구조물의 해석을 위해 약 30년전 부터 연구되어 왔으며, 1960년 Clough<sup>45)</sup>에 의해 유한 요소법이란 이름으로 사용되어 온 것으로 연속체를 유한개의 요소로 나타내고 각 요소에서의 현상은 절점 (nodal point)을 통하여 전달된다고 가정하고 개개요소의 현상을 계산하여 이것을 연속시켜서 전체의 현상을 파악하는 것이다.

본 연구에 있어서는 상악골체를 평판요소 (plate

element), 육면체요소 (8-Node Solid Element)의 2개로 요소를 분할하여 나타내고 각 요소의 분할은 형상의 변화나 재질의 변화에 따라 분할하였다. (Fig.1~4, Table 1)

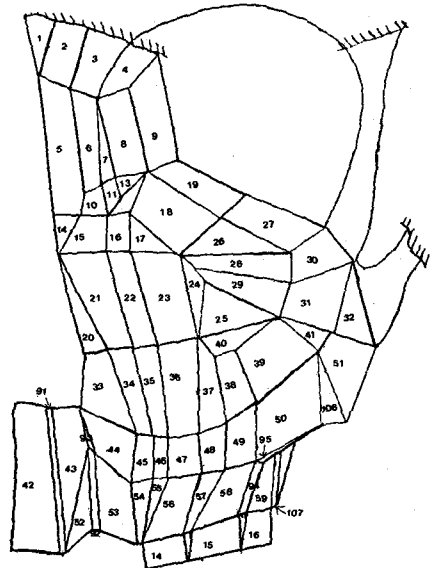


Fig. 1. 안면골의 평판 요소의 분할

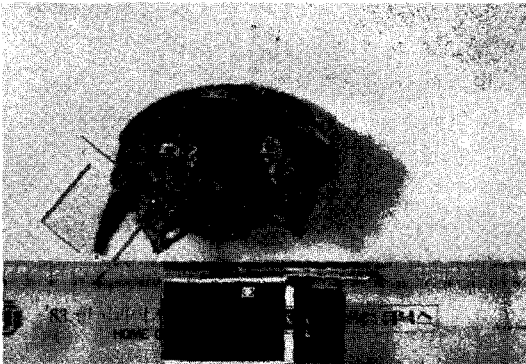


사진 1.

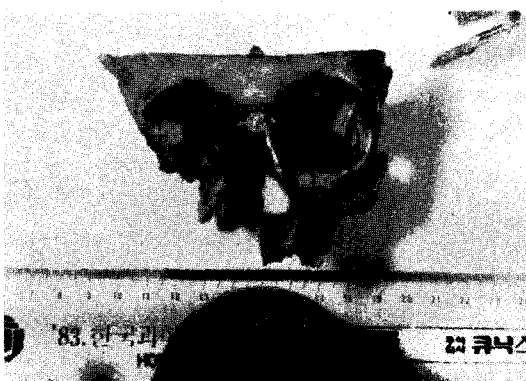
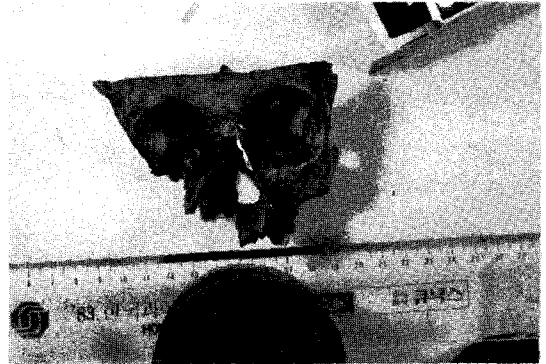
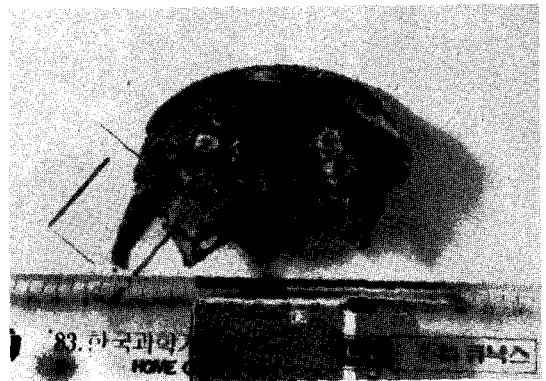


사진 2.



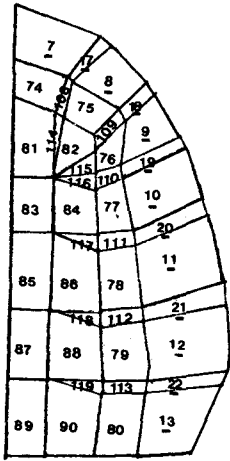


Fig. 2. 구개부의 평판요소와 육면체 요소의 분할  
— : 육면체 요소

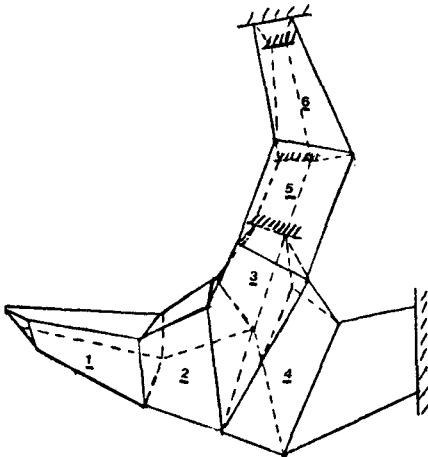


Fig. 3. 협골궁의 육면체요소 분할

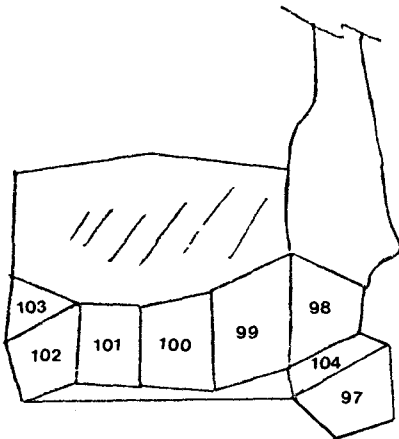


Fig. 4. 정중시상면상에서 본 구개부의 평판요소 분할

Table 1. Number of element

Type	Plate element	Solid element	boundary element
Number of element	119	22	4
Total number of nodal point	232		

상악골 급속 확장시 이개에 따른 변위를 3차원 분석하고 컴퓨터 (cyber 185-835 system)에 입력시키기 위해 3차원 좌표를 구성하여  $x$ 축은 상악 중절치에서 교합평면에 평행하게 하여 전·후방의 변위를,  $y$ 축은  $x$ 축에 수직이 되게 하여 상·하방의 변위를,  $z$ 축은  $x$ 축,  $y$ 축에 수직이 되어 협설방향의 변위를 분석할 수 있게 하였으며 (Fig.5) 각 절점의 좌표값은 두개골을 유한개의 요소로 분할하여 각 방향의 사진을 촬영하여 측정기기를 이용하여 측정하였다.

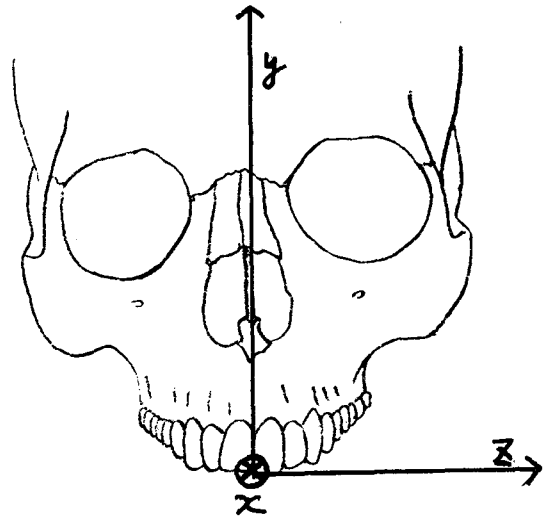


Fig. 5. 3차원 좌표

또한 상악골 급속 확장술의 이개에 따른 변위를 해석하기 위해 상악전두융합부 (Frontomaxillary suture) 전두협골융합부 (Frontozygomatic suture) 협골측두융합부 (zygomaticotemporal suture) 익상악열구 (pterygomaxillary tissue)의 절점은 구속점으로 하였다.

본 연구에 사용된 상악골 급속 확장 장치는 "Has Type"으로 상악 제 1대구치와 제 1소구치를 banding하여 제작하고 1회전에 0.2mm씩 이개되는

Table 2. Mechanical properties of each material

Property Mat.	Young's Modulus (E) g / mm <sup>2</sup>	Poisson's Ratio (ν)
Compact bone	0.12 x 10 <sup>7</sup>	0.33
Dentin	0.14 x 10 <sup>7</sup>	0.28
Enamel	0.49 x 10 <sup>7</sup>	0.30
Cancellous bone	0.18 x 10 <sup>5</sup>	0.45

Table 3. Boundary element

Nodal point	Spring rate (g/mm)
213	0.1 x 10 <sup>21</sup>
214	0.1 x 10 <sup>21</sup>
221	0.1 x 10 <sup>21</sup>
222	0.1 x 10 <sup>21</sup>

screw로 하루 2번씩 15일간을 돌려 6mm를 이개시켜 편측으로 3mm가 이개되는 것으로 가정하였다. 또한 유한요소모델은 협골궁, 치아, 치조골부위는 육면체요소로 상악골, 구개골은 평판요소로 선정하고 이러한 유한요소 모델은 편의상 법랑질, 상아질, 치조골, 해면골로 구성된다고 가정하였다(Fig. 1, 2, 3, 4)

역학적 성질인 Young's Modulus(E)와 Poisson's ratio(ν)는 다음과 같이 하였다. (Table 2)

이상과 같은 재료와 조건하에서 구조물의 해석을 위한 Program(SAP IV)에 각 요소의 번호, 절점의 좌표값을 입력하였다. 그리고 상악제1대구치와 제1소구치가 z축방향으로 3mm가 이동되었다고 가정하여 각 부위의 응력을 계산하기 위해 강탄성계수를 갖는 경계 조건(Boundary Element)을 상악 제1소구치와 제1대구치(절점 213, 214) (221, 222)에 부여하였으며 (Table 3) 이로부터 산출된 변위(displacement)와 단위 면적당 받은 주응력(principal stress)을 비교 분석하였다.

### III. 연구 방법 성적

각 봉합선 부위와 주요 구조물에서의 응력과 변위에 상태를 분석하면 다음과 같다.

1. 먼저 상악골 급속 확장술에 의하여 개방되는 정중 구개 봉합선부위를 보면 전방부가 후방부보다

협설 방향으로 현저하게 더 측방 변위를 일으키며 상, 하 방향으로는 전방부보다 후방부가 더 많은 하방 변위가 일어났으며 전방부보다 후방부에서 더 많은 전방 변위가 이루어 졌음을 알 수 있었다. (Table 4, Fig. 6)

Table 4. Displacement of palate on midpalatal Suture area.

Nodal point	X	Y	Z
115	-0.97(mm)	-2.40(mm)	3.21(mm)
179	-0.96	-2.72	2.20
192	-0.98	-2.77	1.52
196	-1.05	-3.03	0.71
198	-1.05	-3.03	0.34

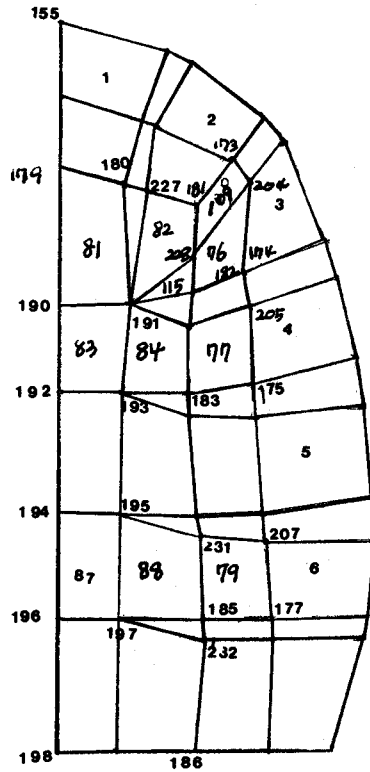


Fig. 6. 구개부위의 요소와 절점

2. 횡구개봉합선 부위에서의 전, 후방 변위를 보면 중앙쪽의 전방 부위가 외측보다 더 많은 전방변위를 보였으며, 측방 변위는 중앙부보다 외측이 더 많이 일어남을 알 수 있었고, 상, 하 방향에 있어서는 중앙쪽이 외측보다 더 많은 하방 변위가 있었다. (Table 5, Fig. 6)

Table 5. Displacement of plate on transverse palatal suture area.

Nodal point	X	Y	Z
196	-0.15(mm)	-3.03(mm)	0.71(mm)
197	-0.83	-2.39	0.71
232	-0.47	-0.46	0.84
186	-0.46	-0.29	0.12

3. 정면에서 볼 때 정중시상면(midsagittal plane) 상에서의 변위 정도는 상부에서보다는 하부에서 더 많은 전방변위, 측방변위, 하방변위가 일어난 것으로 나타났다. (Table 6, Fig.7)

Table 6. Displacement of maxilla on midsagittal plane

Nodal point	X	X	Y
56	-0.02(mm)	-0.01(mm)	0.05(mm)
66	-0.37	-0.53	0.42
78	-0.03	-0.79	0.48
121	-0.80	-0.32	2.07
155	-0.97	-2.40	3.21

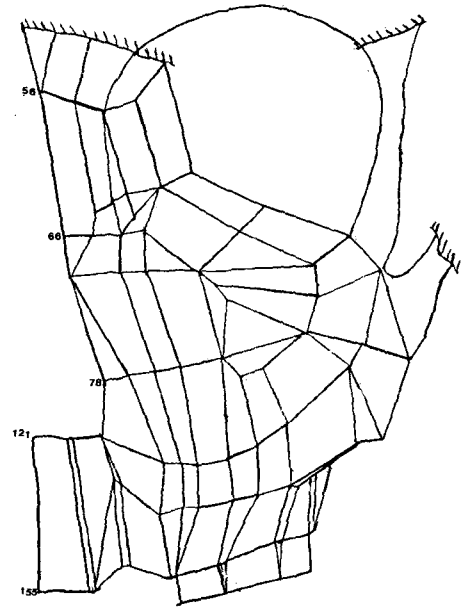


Fig. 7. 정중부상에서의 절점

4. 협상악융합(zygomaticomaxillary suture)부위에서의 변위 정도를 보면 대체적으로 융합선의 각 절점에서 전방변위는 비슷하게 나타났으나 상하변위에서는 중앙부에서 하방변위가 많이 생겼으며 측방부위에서는 상방변위를 나타내며 중앙에서 외측으로 나갈수록 측방변위량은 증가되는 것으로 나타났다. (Table 7, Fig.8)

Table 7. Displacement of Zygomaticomaxillary suture.

Nodal point		X	Y	Z
75	0.1 mm open	$-0.645 \times 10^{-3}(mm)$	$-0.796 \times 10^{-2}(mm)$	$0.509 \times 10^{-3}(mm)$
	3 mm open	-0.02	-0.24	0.02
93	0.1 mm open	$-0.126 \times 10^{-2}$	$-0.743 \times 10^{-2}$	$0.462 \times 10^{-3}$
	3 mm open	-0.04	-0.22	0.01
89	0.1 mm open	$-0.267 \times 10^{-2}$	$-0.227 \times 10^{-2}$	$0.439 \times 10^{-2}$
	3 mm open	-0.08	-0.08	0.13
87	0.1 mm open	$-0.555 \times 10^{-2}$	$0.247 \times 10^{-2}$	$0.125 \times 10^{-1}$
	3 mm open	-0.17	0.07	0.38
131	0.1 mm open	$-0.410 \times 10^{-2}$	$0.630 \times 10^{-2}$	$0.133 \times 10^{-1}$
	3 mm open	-0.13	0.19	0.40
132	0.1 mm open	$-0.170 \times 10^{-2}$	$0.801 \times 10^{-2}$	$0.104 \times 10^{-1}$
	3 mm open	-0.05	0.24	0.31

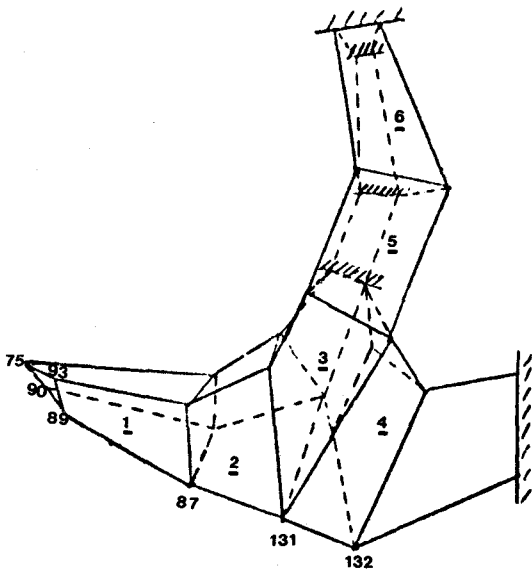


Fig 8. 협골궁에서의 육면체요소 분할과 협상악궁 합부의 절점

Table 8. Principal stress of zygomatic arch

Element	0.1 mm open	3 mm open
1	$5.52 \times 10^4 (g/mm^2)$	$1.66 \times 10^4 (g/mm^2)$
2	$7.56 \times 10^1$	$2.27 \times 10^3$
3	$1.06 \times 10^2$	$3.18 \times 10^3$
4	$-7.93 \times 10^{-1}$	$-2.38 \times 10^3$
5	$1.62 \times 10^2$	$-4.86 \times 10^2$
6	$-1.52 \times 10^2$	$-3.75 \times 10^3$

5. 협골궁(zygomatic arch)에서의 응력을 분석하여 보면 상악골에 인접해 있는 부위에서는 인장 응력이 나타나며 전두골(frontal bone)과 인접한 부위에서는 압축응력을 나타내고 있다. 또한 상악골에 접해있는 육면체요소에서의 응력이 다른 요소의 응력보다 크게 나타나고 있으며 상악 제1대구치 상방에 위치한 요소에서 가장 응력이 크게 나타나고 있다. (Table 8, Fig. 9)

Table 9. 6부위의 절단면에서 본 구개부의 변위 및 응력

요소 번호	절점 번호	X	Y	Z	중립면에서의 응력
87	194	$-0.34 \times 10^{-1}(mm)$	$-0.34 \times 10^{-1}(mm)$	$0.35 \times 10^{-1}(mm)$	$(g/mm^2)$ 15.1
	196	$-0.35 \times 10^{-1}$	$-0.10 \times 10^{-1}$	$0.24 \times 10^{-1}$	
88	195	$-0.26 \times 10^{-1}$	$-0.80 \times 10^{-1}$	$0.36 \times 10^{-1}$	140.0
	197	$-0.28 \times 10^{-1}$	$-0.80 \times 10^{-1}$	$0.24 \times 10^{-1}$	
79	231	$-0.11 \times 10^{-1}$	$-0.34 \times 10^{-1}$	$0.34 \times 10^{-1}$	697.7
	185	$-0.13 \times 10^{-1}$	$-0.20 \times 10^{-1}$	$0.19 \times 10^{-1}$	
	207	$-0.13 \times 10^{-2}$	$-0.26 \times 10^{-1}$	$0.68 \times 10^{-1}$	
	177	$-0.15 \times 10^{-2}$	$-0.18 \times 10^{-1}$	$0.59 \times 10^{-1}$	

Table 10. 4부위의 절단면에서 본 구개부의 변위 및 응력(1/4 회전시)

절점 번호	요소 번호	X	Y	Z	중립면에서의 응력
83	190	$-0.32 \times 10^{-1}(mm)$	$-0.91 \times 10^{-1}(mm)$	$0.67 \times 10^{-1}(mm)$	$(g/mm^2)$ 94.9
	192	$-0.33 \times 10^{-1}$	$-0.92 \times 10^{-1}$	$0.51 \times 10^{-1}$	
84	191	$-0.24 \times 10^{-1}$	$-0.72 \times 10^{-2}$	$0.67 \times 10^{-1}$	83.4
	193	$-0.25 \times 10^{-1}$	$-0.74 \times 10^{-1}$	$0.51 \times 10^{-1}$	
77	229	$-0.16 \times 10^{-1}$	$-0.53 \times 10^{-1}$	$0.65 \times 10^{-1}$	150.5
	183	$-0.13 \times 10^{-1}$	$-0.48 \times 10^{-1}$	$0.52 \times 10^{-2}$	
	205	$-0.96 \times 10^{-2}$	$-0.40 \times 10^{-1}$	$0.69 \times 10^{-1}$	
	175	$-0.11 \times 10^{-1}$	$-0.39 \times 10^{-1}$	$0.74 \times 10^{-1}$	

Table 11. 3부위의 절단면에서 본 구개부의 변위 및 응력

요소번호	절점번호	X	Y	Z	중립면에서의 응력
81	179	$-0.32 \times 10^{-1} (mm)$	$-0.91 \times 10^{-1} (mm)$	$0.73 \times 10^{-1}$	$(g/mm^2)$
	190	$-0.32 \times 10^{-1}$	$-0.91 \times 10^{-1}$	$0.67 \times 10^{-1}$	29.0
114	180	$-0.28 \times 10^{-1}$	$-0.79 \times 10^{-1}$	$0.74 \times 10^{-1}$	27.1
	191	$-0.24 \times 10^{-1}$	$-0.72 \times 10^{-1}$	$0.66 \times 10^{-1}$	
82	227	$-0.25 \times 10^{-1}$	$-0.71 \times 10^{-1}$	$0.74 \times 10^{-1}$	44.0
	181	$-0.19 \times 10^{-1}$	$-0.61 \times 10^{-1}$	$0.65 \times 10^{-1}$	
115	228	$-0.15 \times 10^{-1}$	$-0.51 \times 10^{-1}$	$0.64 \times 10^{-1}$	154.4
	182	$-0.18 \times 10^{-1}$	$-0.57 \times 10^{-1}$	$0.64 \times 10^{-1}$	
109	173	$-0.17 \times 10^{-1}$	$-0.41 \times 10^{-1}$	$0.92 \times 10^{-1}$	3.2
	204	$-0.14 \times 10^{-1}$	$-0.38 \times 10^{-1}$	$0.91 \times 10^{-1}$	
76	204	$-0.14 \times 10^{-1}$	$-0.38 \times 10^{-1}$	$0.91 \times 10^{-1}$	83.9
	174	$-0.13 \times 10^{-1}$	$-0.40 \times 10^{-1}$	$0.87 \times 10^{-1}$	

6. 상악 양쪽의 제 1 대구치를 연결하는 횡단면에서의 구개부의 변위 및 응력을 분석해 보면 정중 구개 봉합선에서 상악 제 1 대구치로 갈수록 전방변위 하방변위는 감소하였으며 측방변위는 치아쪽으로 갈수록 증가하였다. 또한 평판요소 중립면에서의 응력상태는 모두 인장 응력으로 측방부로 갈수록 응력의 증가가 나타나고 있다. (Table 9, Fig.6)

7. 상악 제 1 소구치의 구개부의 절단면에서의 변위와 응력을 비교 분석하여 보면 정중 구개 봉합부위에서 치아쪽으로 갈수록 각 절점들의 전방하방 변위가 감소되며 측방부위에서는 거의 비슷한 변위를 나타내며 중앙부에서의 응력은 모두 인장응력이 나타나며 외측이 더 큰 수치를 나타내고 있다. (Table 10, Fig. 6)

8. 상악 양 견치의 구개부 절단면에서의 변위 및 응력을 보면 정중 구개 봉합선에 가까울수록 전방변위와 하방변위가 더 많이 일어나고 있으며 측방변위에 있어서는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었고 응력 변화에 있어서는 115 요소만을 제외하고는 각 요소들만의 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었다. (Table 11, Fig. 6)

9. 치아에 가해지는 응력은 band를 한 제 1 소구치가 제 1 대구치 보다는 좀더 큰 응력이 나타나며 제 2 소구치가 가장 작은 응력 분포를 나타낸다. 치근 부위에 있어서는 대체적으로 전치부가 구치부 부위보다 큰 응력을 나타내지만 견치에서의 응력이 소구치에서의 응력보다 큰 수치를 나타내며 후구치

Table 12. 치관부위에서의 응력 분포

요소번호	주 응력
14	$5.21 \times 10^2 (g/mm^2)$
15	$1.64 \times 10^2$
16	$4.06 \times 10^2$

Table 13. 치근부위에서의 응력 분포

요소번호	주 응력
7	$4.43 \times 10 (g/mm^2)$
8	$3.81 \times 10^1$
9	$1.77 \times 10^2$
10	$8.71 \times 10^1$
11	$1.11 \times 10^2$
12	$3.28 \times 10^2$
13	$1.31 \times 10^3$

부위에서 가장 크게 나타나고 있다. 또한 치관보다는 치근에서의 응력이 전반적으로 낮게 나타나고 있지만 후구치 부위에서의 응력이 직접 힘이 가해지는 제 1 소구치나 제 1 대구치보다 높은 응력이 나타남을 보여 준다. (Table 12, 13)

#### IV. 총괄 및 고찰

Sassouni<sup>35)</sup> 등은 정형력에 의하여 상악과 하악의

형태, 위치등을 변화시킬 수 있으며 그 결과로 안면의 수직 또는 전·후방의 관계를 수정하는것은 가능하다 하겠다. 따라서 심한 제Ⅲ급 부정교합 환자의 치료를 위하여서는 먼저 정형력에 의해서 골격의 불균형을 개선시킨 후 치아의 배열을 시도하는 것이 요구된다. 현재 심한 제Ⅲ급 부정교합 환자의 치료시 사용되는 정형력으로는 이모장치(chin cap), Head Gear, 상악골 급속 확장술(R. P. E) 등이 있다. 상악골 급속 확장술은 1860년 Angell<sup>1)</sup>에 의해 최초로 시도되었으며 이 기술에 사용되는 장치에는 “기본형 및 Cap Splints와 Pfaff type 의 screw를 쓰는 변형형태 또한 Banded Appliance 등이 있으며 Banded Appliance에는 Derichsweiler 형, Haas형, Isaacson형, Biederman형<sup>40)</sup>” 등이 있다고 하겠다. Screw의 확장은 대개 하루에 1/2회전으로, 1/4turn씩 2번 회전시킴으로써 시행되며 장치는 환자의 연령의 증가에 따라 봉합선 이개의 성공여부가 결정된다. Isaacson<sup>26)</sup>은 정중구개 봉합선 이개의 대부분의 저항은 봉합선 자체가 아니라 상악골에 인접해 있는 주위조직에서의 저항이라고 하였으며, 연령의 증가에 따라 저항은 증가된다고 보고하였다. 상악골 급속 확장술은 정중부 구개 봉합선을 정형력에 의하여 개방시키는 술식이므로 이 봉합선의 성장과 기능이 매우 중요하다고 하겠다.

Scott<sup>26)</sup>은 정중 구개 봉합선의 성장은 1년안에 끝난다고 하였고 Burstone<sup>19)</sup>은 3년안에, Persson<sup>33)</sup>은 13세까지 성장이 계속된다고 하였으며, Björk<sup>7)</sup>은 봉합선의 성장은 13세 이상까지 계속된다고 하였다.

Melsen<sup>21)</sup>은 “경구개(hard palate)의 성장은 횡구개 봉합선의 성장과 구개부 측면에서의 골침착에 의한다고 했으며<sup>21)</sup>, 13세~15세 이후에 봉합선 성장은 중단되나 골침착에 의한 성장은 몇년 더 계속된다고 하였다. 그러므로 상악골 급속 확장술은 유년기에 행하여 지는 것이 이상적이라 하겠다. 1931년 Broadbent<sup>10)</sup>에 의해 두개 방사선 계측학이 치과교정분야의 진단과 치료평가에 도입된 이후, 정형력에 의한 두개골의 전체 변화등에 관한 연구는 매우 활발하였으며 동물 실험을 통한 조직 변화등에 대한 연구도 매우 진전되었다고 하겠다.

Brown<sup>12)</sup>은 정중구개 봉합선을 개방시켜 비중격(nasal septum)이 바로 되고 비강, 인후, 점막비대를 완화시킬 수 있다고 하였으며 Pfaff<sup>24)</sup>는 상악골 급속 확장으로 구개궁(palatal vault)이 낮아지고 nasal air volume이 증가된다고 했으며, Korthaus

는 10mm이상의 상악의 영구 확장을 보고했고<sup>21)</sup> Derichsweiler<sup>16)</sup>는 구개궁이 낮아지고, 비골 폭경(nasal width)이 증가된다고 했으며, Haas<sup>22)</sup>는 상악골 급속 확장술에 의하여 1~11mm의 확장이 생겼다고 하였고, “A”-point의 전·하방 이동을 보고하였다. 그러나 이러한 정형력이 가해지는 조직 각각의 부위에서 어떠한 응력이 분포되며 어떠한 변위를 일으키는가에 대한 연구는 매우 미흡한 것으로 사료된다. 종래 치의학 분야에서 응력과 변위를 측정하는 방법으로는 Strain-Guaze법, Holography법, 광탄성 분석법등이 사용되어 왔다. Strain-Guaze<sup>26)</sup>법은 생체 및 모형에 직접 수압장치를 부착하여 간단히 응력을 측정할 수 있는 장점이 있는 반면 경계 부위에서의 측정이 곤란하고 내부의 응력측정이 불가능하며 조작이 복잡한 단점이 있다. Holography<sup>47)</sup>법은 인체 형상 물체의 전체적인 변형이 한 장의 사진에 나타나며 고정점의 설치문제를 해소할 수 있고 물체의 표면이 조면이 아니어도 측정이 가능한 장점이 있으나 파동 및 공기의 흔들림이 없어야 하며 대출력의 레이저를 방출할 수 있는 장치가 카메라내에 부착이 되어 있어야 하는 문제가 있어 사용이 제한되고 있다. 광탄성 분석법<sup>47)</sup>에 편광기(polariscope)를 사용하여 물체내에 응력분산을 분석하는 방법으로 오래전부터 사용되었으나 모형 절단시 또 다른 응력이 개입될 수 있다는 결점이 있어 이 방법의 사용이 제한되어 왔다. 이에 반하여 유한 요소법(Finite element analysis)은 고정점 설치의 단점이 있으나 모형의 형태 및 크기를 실물과 쉽게 일치시킬 수 있고 구성 재료의 재료정수인 Young's 계수(E)와 Poisson's율( $\nu$ )을 쉽게 일치시킬 수 있고 내부 응력의 정확한 계측과 변위 계측이 가능하다는 장점이 있다. 유한 요소법은 수치 해석의 일종이지만 원칙적으로는 어떠한 형상에서도 취급될 수 있으며 또한 3차원적인 해석이 용이하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 이런 장점이 있는 유한 요소법을 이용하여 상악골 급속 확장시에 치아, 상악골 그 주위의 조직들의 응력과 변위를 측정함으로써 전체적인 상악골 급속 확장술의 영향에 대하여 연구하였다. Haas<sup>20)</sup>는 구개 정중부 봉합선의 개방으로 기대되는 현상으로써 봉합선이 전후방으로 평행이며 상하로는 비강을 정점으로 하여 삼각형의 형태로 개방된다고 하였고 그 후 Wertz<sup>41)</sup>는 두개 방사선 계측과 치아 모형으로써 봉합선의 개방은 전방에서 보면 평행하지 않으며 전두상악봉합선(Fron-



tomaxillary suture)을 정점으로 하방으로 갈수록 더 많이 개방되며 교합면에서 보면 전방부위가 후방부위보다 더 많이 개방된다고 하였다. (Table 4,6 Fig.6) 본 연구에서 정중 구개 봉합선에서의 상악골의 변위를 분석하여 본 결과 전방부위에서 후방부위보다 더 많은 측방변위가 생겼으며 후방부위에서 전방부위로 갈수록 상악골의 전방변위는 감소되었으며 하방변위는 후방부가 전방부보다 더 많이 나타났다. 한편 횡구개봉합부(transverse palatal suture)에서의 변위는 중앙부가 측방부보다 더 많이 전방변위를 일으켰다. 이것은 결국 봉합선이 부채꼴로 벌어진다는 Wertz<sup>10)</sup>의 보고를 입증하는 것이며 왜 전방변위가 더 측방으로 벌어지는가를 잘 설명하여 주는 것으로 사료된다.

한편 정중시상면(midsagittal plane)에서의 상악의 변위를 3차원적으로 분석하여 본 결과 전두상악봉합부(frontomaxillary suture)에서 하방(palatal side)으로 내려 올수록 더 많은 전방, 측방, 하방 변위가 나타났다. 이것은 Wertz<sup>12)</sup>가 "A"-point의 전·하방 이동을 방사선사진 분석 결과 발표한 내용과 일치하며 Haas, Derichsweiler 등의 보고와도 일치된다고 하겠다. Issacson<sup>26)</sup>은 Strain-Guaze 법에 의하여 상악골 급속 확장시에 screw에서 발생하는 힘을 분석하였으며 screw를 3/4 회전시켰을 때 3-10 lb 힘이 발생한다고 했으며 이 힘은 환자의 연령에 증가에 따라 더욱 증가된다고 하였다. 또한 봉합선 개방의 최대의 저항은 봉합선 자체에 있지 않고 상악에 인접해 있는 주위 조직의 강도(rigidity)에 의한 저항이 대부분이라고 하였다.

본 연구에서 screw를 1/4회전했을 때, 3/2회전했을 때 각각 다른 부위에서의 응력과 변위를 측정하여 본 결과 처음 1/4회전 때 보다 3/2회전 때에는 2 곱이 3/4회전 때에는 3 곱의 응력과 변위가 나타났다. 이것은 실험재료 자체가 두개골이었으며 유한요소법에 의한 분석이 수학적인 결과에 의한 것이므로 생체실험을 하지 못한 상황에서는 당연한 결과로 이것은 생체 적용에 있어서의 한계점을 나타내는 것으로 Isaacson<sup>26)</sup>의 연구에서와 같이 1번의 1/4회전으로 보통 3~10lb의 힘이 증가된 후에 곧 수분내로 증가된 힘이 감소되므로 잔류힘(residual force)이 screw를 회전함에 따라 계속 누적되는 것이 아니고 매 회전시 마다 나이나 성별등에 따라 개인적인 차이는 있지만 빠른 회복을 보여 본 연구에서 나타난 바와 같이 30회의 1/4회전에서 나타나는 응력은 생체 적용시에 발생할 수 있는 응력은 아니라

는 생각해 볼 수 있으며, 따라서 1회의 1/4회전시의 응력이 더 의미가 있다고 하겠다.

screw를 회전시킴으로써 생기는 응력을 치관부위와 치근부위에서 측정하여 본 바 치관부위에서는 제1소구치, 제1대구치, 제2소구치의 순서로 응력분포를 나타내었고 치근 부위에서는 후구치부위 제1대구치, 견치, 제2소구치, 제1소구치, 견치부의 순으로 응력이 감소되었다. 이것은 장치 자체가 이 부위에 중점적으로 힘이 가해지도록 제작되었기 때문에 것으로 사료되며 봉사선의 폐쇄과정은 견치부 보다 구치부에서 더 빨리 폐쇄되므로 이 부분의 봉합선의 강도(rigidity)가 증가되어 있으므로 이런 장치제작 방법이 당연한 것으로 사료된다.

한편 상악 제1대구치, 제1소구치, 견치 부위에서 구개부를 횡단하여 보면 하방 변위는 전방부로 갈수록 감소되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 Derichsweiler<sup>16)</sup>가 상악골 급속 확장시 구개궁(palatal vault)이 후방 부위에서 더 하방으로 내려온다는 보고와 일치된다고 하겠다.

협상악 봉합부(zygomaticomaxillary suture)에서의 변위를 보면 중심부에서 외측으로 갈수록 하방 변위가 감소되며, 측방변위는 증가되는 것을 볼 수 있었는데 이것은 횡구개봉합선에서는 중심부에서 외측으로 갈수록 더 전방 하방 변위가 일어난 것과 연관지어 생각할 수 있겠다.

이제까지 상악골 급속 확장에 따른 두개방사선 제측과 동물 실험에 의한 주위 조직의 변화에 대한 연구는 매우 활발했다고 하겠다. 그러나 조직 각 부분 부분에서 어떤 응력을 받으며, 어떤 변위를 일으키며 그것이 어떤 결과를 가져왔는가에 대하여서는 본 유한 요소법에 의한 분석이 매우 유리하다고 하겠다. 다만 본 실험이 두개골상에서 이루어졌으므로 그 결과를 임상에 그대로 적용시키기에는 다소의 문제가 있는 것으로 사료된다.

## V. 결 론

유한요소법을 사용하여 인간의 건조 두개골에서 상악골 급속 확장시 치아, 상악골, 상악골 인접조직에서의 응력분포와 변위를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정중구개봉합선 부위에서의 구개부의 전방 변위는 전방부위 보다 후방 부위에서 더 많이 일어났으며, 하방 변위는 후방부에서 더 많았고, 측방 변위는 전방부가 후방부보다 현저하게 많

이 일어났다.

2. 횡구개봉합선 부위에서는 중앙부가 측방부보다 더 많은 전방·하방 변위가 이루어졌으며 측방 변위는 측방부가 중앙부보다 더 크게 일어났다.
3. 정중시상면상에서의 상악골의 변위는 상부에서 보다는 하부로 갈수록 더 많은 전방 변위, 측방 변위, 하방 변위가 나타났다.
4. 협골중에서의 응력분포는 상악골에 인접해있는 부위에서는 인장 응력을 나타냈고 전두골에 인접부위에서는 압축응력을 나타냈다.
5. 상악골 급속 확장시 치아부위에서 받는 응력의 크기순서는 후구치 부위, 제 1 대구치, 제 1 소구치, 전치부위 등의 순서로 분포되었다.

### 참 고 문 헌

1. Angell, E.C.: Treatment of irregularity of the permanent or adult teeth, *Dent. Cosmos* 1:540-544, 599-601, 1860.
2. Alexander, B.G.: The effect on tooth position and maxillofacial vertical growth during treatment of scoliosis with Milwaukee brace, *Am. J. Orthod* Vol. 52:161-189, 1966.
3. de Alba, J.A., Chaconas, S.J. and Caputo, A.: Orthopeic effects of the extraoral chin cup appliance on the mandible. *Am. J. Orthod.* 69:29-41. 1976.
4. Armstrong, M.M.: Controlling the magnitude, direction, and duration of extra-oral force. *Am. J. Orthod.*, 59:217-243, 1971.
5. Baume, L.T.: Principles of cephalofacial development revealed by experimental biology, *AM. J. Orthod.*, 47:881-901, 1961.
6. Biederman, W.: Rapid correction of Cl III malocclusion by midpalatal expansion, *Am. J. Orthod.*, 63:47-55, 1973.
7. Bjork, A.: Sutural growth of the upper face studied by implant method, *Acta. Odonto.* 2nd 24:109-127, 1966.
8. Black, G.V.: Expansion of the dental arch, *Dent. Rev.* 7:218-224, 1893.
9. Breitner, C.: Bone changes resulting from

experimental orthodontic treatment, *Am. J. Orthod and Oral surg.*, 26:521-547, 1940.

10. Broadbent, B.H.: A new x-ray technique and its application to orthodontia., *Angle, Orthod.*, 1:45-66, 1931.
11. Brodie, A.G.: Treatment of Cl III malocclusion, *Am. J. Orthod*; 2:119-134, 1932.
12. Brown, G.V.: The application of orthodontic principle to the prevention of nasal disease, *Dent. Cosmos* 45:765-775, 1093.
13. Burstone, C.J. and Schafer, W.C.: Sutural expansion by controlled mechanical stress in the rat, *J.D.R.*, 38:534-540, 1959.
14. David, W.M., and Kronman, J.H.: Anatomical changes induced by splitting of the midpalatal suture, *Angle Orthod.* 39:126-131, 1969.
15. Debbane, E.F.: A cephalometric and histologic study of the effect of orthodontic expansion of the midpalatal suture of the cat, *A.J. Orthod.*, 44:187-219, 1958.
16. Derichsweiler, H.: La Disjonction De La Suture Palatine Mediane. *Tr. European Orthodont. Sec.*, 1953, p.257.
17. Dewey, M.: The development of the maxilla with reference to opening the median suture, *Dent. Items. Interest*, 35:189-208, 1913.
18. Epker, B.N., and Frost, H.M.: Corelation of bone resorption and formation with the physical behavior of loaded bone, *J. Dent. Res.*, 44:33-41, 1965.
19. Harberson, V.A.: Midpalatal suture opening during functional posterior cross-bite correction, *Am. J. Orthod*, 74: 1978.
20. Hass, A.J.: Rapid expansion of the maxillary dental arch and nasal cavity by opening the midpalatal suture, *Angle Orthod.*, 31:73-90, 1961.
21. \_\_\_\_\_: Gross reactions to the widening of the maxillary dental arch of the pig by splitting the hard palate, *Am. J. Orthod.*

- 45:868-869, 1959.
22. \_\_\_\_\_ : Palatal expansion, Just the beginning of dentofacial orthopedics. *Am. J. Orthod.* 57:219-255, 1970.
  23. Hawley, C.A.: A study in maxillary movement. *Dental Items of Interest.* 34:426-451, 1912.
  24. Irie, M., and Nakamuna, S.: Orthopedic approach to severe skeletal Cl III malocclusion. *Am. J. Orthod.*, 67:377-392, 1975.
  25. Issacson. R.J. and Murphy, T.D.: Some effects of rapid mxillary expansion in cleft lip and palate patients. *Angle Orthod.*, 34:142-154, 1964.
  26. \_\_\_\_\_ : Forces produced by rapid maxillary expansion, *Angle Orthod.*, 24: 256-267, 1969.
  27. Kragt, G., Puterloo, H.S.,: The initial recation of a macorated human skull caused by orthodontic cervical traction determined by laser netrology *Am. J. Orthod.*, 81:49-59, 1982.
  28. Krebs, A.: Expansion of the midpalatal suture studied by means of metallic implants, *European Orthodontic Society Report*, 34:163-171, 1958.
  29. Laptook, T.: Conductive hearing loss and rapid maxillary expansion, *Am. J. Orthod* Vol. 80, 1981.
  30. Latham, R.A.: The development, structure and growth pattern of the human midpalatal suture, *J. Anat.* 108-31-41, 1971.
  31. Melsen, B.: Palatal growth studied on human autopsy material, 68:42-53, 1975.
  32. Murry, J., and Cleall, J.F.: Early tissue response to rapid maxillary expansion in the midpalatal sutuure of the rhesus monkey, *J. Dent. Res.* 50:165-166, 1971.
  33. Persson, M.: Palatal suture closure in man from 15 to 35 years of age, *Am. J. Orthod.*, 72:42-52, 1977.
  34. Pfaff, W.: Stenosis of the nasal cavity caused by contraction of the palatal arch and abnormal position of the maxilla, *Dent. Cosmos.* 47:570-573, 1905.
  35. Saussouni, V., and Nanda, S.: Analysis of dentofacial vertical proportions, *Am. J. Orthod* 50:801-822, 1964.
  36. Scott, J.H.: Growth at facial sutures, *Am. J. Orthod*, 42:381-387, 1956.
  37. Starnbach. H.: Facioskeletal and dental changes resulting from rapid maxillary expansion, *Am. J. Orthod*, 36, 1966.
  38. Storey, Z.: Bone changes associated with tooth movement: A histological study of the effect of age and sex in the rabbit and guinea pig, *Aust. J. Dent.* 59:210-224, 1955.
  39. Subtelny, J.D. and Brodie. A.G.: An Analysis of orthodontic expansion in unilateral cleft lip and cleft palate patients, *Am. J. Ortho.*, 40:686-697, 1954.
  40. Timms, D.J.: Some medical aspects of rapid maxillary expansion, *Br. J. Orthod.* 1:127-132, 1974.
  41. Wertz, R.A.: Changes in nasal air flow incident to rapid maxillary expansion, *Angle Orthod.*, 38:1-9, 1968.
  42. Wertz, R.A.: Skeletal and dental changes accompanying rapid midpalatal suture opening: a normative study, *Am. J. Orthod.*, 71:367-381, 1977.
  43. Zimring, J.F., and Issacson, R.J.: Forces produced by rapid mixillary expansion, *Angle Orthod.* 35:178-186, 1965.
  44. 김광호: 성견과 유견에 있어서 정중 구개 봉합선의 급속 확장에 따른 상악골 인접 봉합선 부위의 육안적 비교 관찰에 관한 연구. *대한치과교정학회지*, Vol. 12 : 109-116, 1982.
  45. 이중홍: 유한요소법. *대한기계학회지*, 13 : 203-208, 299-302, 1973.
  46. 이병해: 유한요소법의 기초. *한국공학사 발간.*
  47. 조호구: 정형력에 대한 하악공내의 응력분석과 변위에 관한 유한요소법적 분석. *대한치과교정학회지*, Vol. 14 : 75-90, 1984.
  48. 한무현: 유한요소법에 의한 Telescopic crown 과 지대치 및 지지조직의 역학적 반응에 관한 연구. *경희치대논문집*, 4 : 241-258, 1982.

— ABSTRACT —

## A FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE STRESS DISTRIBUTION AND DISPLACEMENT IN HUMAN MAXILLA TO RAPID PALATAL EXPANSION

Bong Jea Joe, Byung Hwa Sohn

*Department of Orthodontics, College of Dentistry, Yonsei University.*

Recently, rapid palatal expansion technique is widely used for the correction of the skeletal imbalance in Cl III malocclusion patients. There were many studies about the cephalometric changes to rapid palatal expansion but quantitative analysis were small. The purpose of this study was to analysis the stresses and displacement of the maxilla in human dry skull to rapid palatal expansion.

The results were as follows:

1. The anterior portion of palate show more lateral and inferior displacement than the posterior portion.  
But the posterior portion show more anterior displacement.
2. In transpalatal suture area, the medial portion show more anterior and inferior displacement than the lateral portion. But the lateral portion show more lateral displacement than the medial portion.
3. In mid-sagittal plane, the lower portion (palatal area) of maxilla show more anterior, lateral, inferior displacement than the upper portion (frontamaxillary stuture area).
4. In zygomatic arch, the adjacent area to maxilla show tensile stresses and the adjacent area to frontal bone show compressive stresses.
5. The sequence of stress bearing area to R.P.E. is upper retromolar area, upper 1st molar, 1st premolar, 2nd premolar, anterior segment of teeth.