

한국아동의 악안면 성장에 관한 유한요소법적 연구

연세대학교 대학원 치의학과

(지도 박 영 철 교수)

탁 선 근

I. 서 론

두개안면골에 대한 연구는 인류학자나 교정의 사들에게 보다 진보된 분석방법을 필요로 해왔다. 인간의 두개안면골 성장을 연구한 첫번째 시도는 18, 19세기 유럽의 한 동굴에서 발견된 Neanderthal 인과 Cro-Magnon 인의 두개골을 가지고 직접계측한 두개계측법 (craniometry) 이었으며, 이후 생체에서 계측을 시도한 두형측정법 (cephalometry) 등의 방법을 거쳐 현대 교정학에서 성장의 연구와 교정환자의 임상적 평가도 가능케 한 두부방사선계측법이 Broadbent⁷⁾에 의해 소개되어 널리 사용되고 있다.

오늘날 교정학분야에서 많이 응용되고 있는 두부방사선 계측법은 계측된 점과 선을 이용하여 두개안면부형태 (craniofacial morphology)를 정형화하여 사용하고 있으며 이는 두개안면부의 성장연구 및 정상군에서 벗어난 개인의 변이에 대한 진단을 바탕으로 교정치료계획의 수립, 진행 및 결과를 판독하는데 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 이 계측법이 많은 장점을 갖고 있음에도 임상적으로나 이론적으로 타당치 못한 점이 지적되고 있다.^{26,31)} 이들중 흔하게 지적되는 단점은 첫째, 선택된 point와 reference plane에 대한 상대적 성장 평가만이 가능하며 둘째, 각 선상의 수많은 점들의 변화를 설명하는 해석력이 부족하고 셋째, 3차원의 형체를 2차원 평면으로 형상화시킴으로써 두개골의 위치를 정확히 설정하고 촬영했다 하더라도 모든 측정

이 가능치 않다는 것이다. 이런 미비점들을 극복하기 위하여 성장분석을 논리적인 방법으로 접근하려는 시도가 많이 연구되어 왔는데 수학적 개념을 복합적인 두개안면부형태분석에 사용하려는 경향이 점차 많아지고 있다.^{5,6,27,38)} 이와 같은 연구는 Bookstein^{5,6)}이 두개안면골의 성장변화를 2차원에서 작도적분석방법으로 해석하여 기하학적인 계측개념을 분석에 도입하였으며 Skalak³⁸⁾은 3차원에서 현재 사용하고 있는 분석방법들에 대해 수학적의미를 부여하였다. 또한 Moss와 Skalak²⁷⁾ 등은 두개안면부의 성장과 형태를 정형화된 기하학적 model의 개념으로 나타내어 일점 (unique center)을 기준으로 설명하는 allometric centered model의 분석법과 이것의 한계점을 보완하고 비슷한 원리의 분석방법인 allometric network model을 이용한 분석법을 발표하였다.

이와같이 해부학자나 인류학자, 임상가들은 두개안면부의 성장과 형태를 여러가지 방법으로 연구, 분석하려 하였다. Moss²⁹⁾, Inoue²⁰⁾, Motoyoshi³⁰⁾ 등은 유한요소법 (finite element method)을 이용하여 두개안면골의 성장을 연구하려는 시도를 하였는데, 이는 두개골격의 국소적성장 (local growth)분석에 적합한 수학적 수법으로 본래는 구조해석의 필요성에 의해서 Turner⁴²⁾가 제창한 것이지만 그 응용범위가 넓어 근년에는 치의학분야의 역학적해석^{12,16,17,20,24,55)}에도 많이 이용되어지고 있다. tensor의 개념⁵⁰⁾에 근거한 이 분석법은 유한요소법에서 뿐만 아

나라 Bookstein⁵⁾의 biorthogonal analysis를 이용한 7단계의 작도적방법에 의해서도 비슷한 결과를 얻을 수 있는데 이 방법에 의해서 얻어진 결과는 유한요소법과 같이 최대신장을 및 주성장방향에 대한 평가를 할 수 있다. 이러한 유한요소법은 strain gauge 법⁴³⁾, holography 법²¹⁾, 광탄성분석법¹¹⁾과 함께 응력과 변위를 측정하기 위한 계측방법으로 최근에는 컴퓨터의 이용으로 구조역학, 유체역학등에서 뿐만 아니라 생체역학에서도 많이 응용되어지고 있다.

치의학분야에 유한요소법을 이용한 연구로는 Tanne⁴⁰⁾가 교정력에 따른 치아이동시 치주염류분포에 대한 연구를, Moss²⁹⁾ 등이 rat의 두개골 성장에 관한 유한요소법 연구를, Inoue²⁰⁾와 Motoyoshi³⁰⁾ 등이 인간의 두개골 성장에 따른 역학적 분석을 하였으며, 이외에도 Kito⁵⁵⁾, Hakim¹⁷⁾, Farah¹⁶⁾ Kragt 와 Duterloo²²⁾, Cheverud¹²⁾ 등의 생체역학에 응용한 연구가 있고 국내에서는 허⁵³⁾, 한⁵⁴⁾이 보철물과 지대치 및 지지조직에 관한 역학반응에 대해서 연구를 하였고, 교정학분야에서 상악골 및 안면골에 정형력을 가했을 때의 응력분포에 대한 연구로는 조⁵¹⁾, 김⁴⁶⁾, 이⁴⁹⁾, 김⁴⁷⁾ 등이 있으며 하악골에 대한 유한요소법 연구는 조⁵²⁾의 발표가 있다. 이외 김⁴⁵⁾의 치아이동시 치아와 지지조직의 응력분포에 관한 연구가 있다.

저자는 악안면두개는 많은 골격요소에 의해서 구성 되어져있고 성장은 각 구성요소의 형태변화에 기인한 것이므로 복합골격인 이 부분의 성장형태를 분석하기 위해서는 성장변화에 따른 새로운 정형적 측정이 필요하다고 생각하고 남녀 각각 15명에 대한 7년간의 누년적 연구를 유

한요소법을 응용한 성장분석을 하여 지견을 얻었기에 보고하는 바이다.

II. 연구대상 및 방법

가. 연구대상

본 연구의 대상은 연세대학교 치과대학 교정학 교실에 소장된 6세부터 12세까지의 매년 촬영된 누년적 두부방사선 계측사진중에서 전신질환이 없고 발육상태가 양호하며 교합상태가 정상인 남자 15명, 여자 15명의 총 210매 사진을 분석에 사용하였다. 연구대상의 평균연령 및 계측사진수는 다음과 같다(표 1).

나. 연구방법

1. 촬영방법

연세대학교 치과대학 방사선과에 설치된 J. MORITA 제품 PANEX EC X-ray 기기에 이중 증감지가 들어있는 cassette 와 8×10" 크기의 Fuji film을 사용하였다. 촬영조건은 피검자의 안이평면(Frankfort horizontal plane)과 지평면을 평행하게하며 시상면(midsagittal plane)이 지평면과 수직이 되도록 고정하고 안정교합위에서 조사하였다. 모든 두부방사선 계측사진은 003" acetate 지상에 투사하였다.

2. 계측점

총 31개의 계측점을 사용하였으며 이중 연조직을 분석하기 위하여 계측점 23-31까지는 8세 이상에서만 사용하였다. 각 계측점은 다음과 같다(그림 1).

표 1. 남·녀아동의 평균연령 및 계측사진수

년수 성별	1	2	3	4	5	6	7	합계
남	6년 7개월	7년 7개월	8년 7개월	9년 7개월	10년 7개월	11년 7개월	12년 7개월	105
여	6년 7개월	7년 7개월	8년 7개월	9년 7개월	10년 7개월	11년 7개월	12년 7개월	105
계	30	30	30	30	30	30	30	210

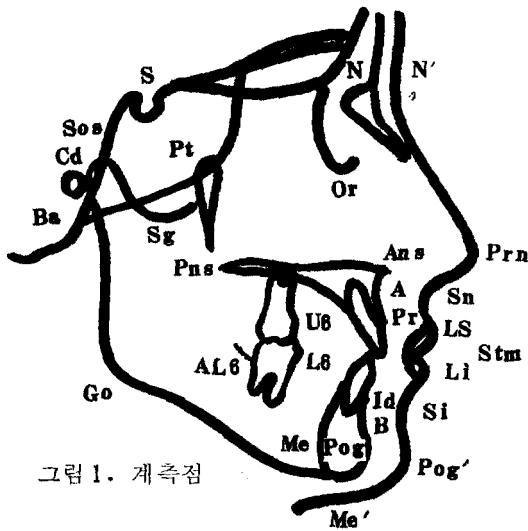


그림 1. 계측점

- N (Nasion)
- S (Sella turcica)
- Sos (Spheno-occipital synchondrosis)
- Pt (Pterygoid point)
- Ba (Basion)
- Or (Orbitale)
- Cd (Condylion)
- Sg (Sigmoid notch)
- Go (Gonion)
- Ans (Anterior nasal spine)
- Pns (Posterior nasal spine)
- A point
- Pr (Prosthion)
- U1 (tip of upper incisor)
- L1 (tip of lower incisor)
- Id (Infradentale)
- B point
- Pog (Pogonion)
- Me (Menton)
- U6 (Mesio-buccal cusp tip of upper 1st molar)
- L6 (Mesio-buccal cusp tip of lower 1st molar)
- AL6 (Contact point: distal surface of lower 1st molar and alveolar bone)
- N' (soft tissue nasion)
- Prn (Pronasale)
- Sn (Subnasale)
- Ls (Labrale superius)
- Stm (Stomion)
- Li (Labrale inferius)
- Si (Sulcus inferius)
- Pog' (Soft tissue Pogonion)
- Me' (Soft tissue Menton)

3. 요소분할방법

분할방법은 2차원 영역의 형태를 나타내는 2차원요소중에서 삼각형요소를 사용하였고 이때 사용된 계측점은 절점 (node) 이라 하며 계측선을 절선 (nodal line) 이라 한다. 7세까지는 22개의 절점에 19개의 삼각형 분할요소를 사용하였으며 8세부터는 31개의 절점에 23개의 삼각형 분할을 사용하였다 (그림 2, 표 2). 전·후두개저부, 인두상부, 중앙면부, 상악골을 11개의 삼각형 요소로 분할하고 하악골은 8개의 삼각형 요소로 연조직은 4개의 삼각형 요소로 분할하였다 (그림 3, 4, 5). 또한 남·녀 모두 6세때의 요소분할도를 기준으로 삼았다 (그림 6, 7).

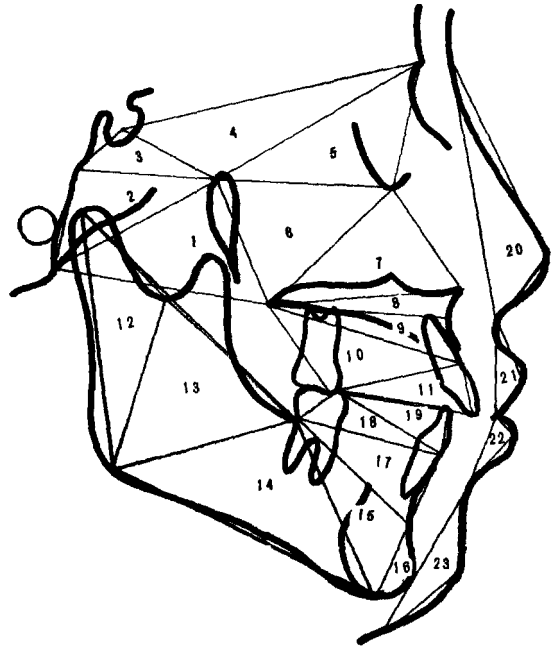


그림 2. 요소분할도

표 2. 각 요소의 구성

element	1	Ba - Pt - Pns	element	13	Go - Sg - AL6
	2	Ba - Pt - Sos		14	Go - AL6 - Me
	3	Pt - Sos - S		15	AL6 - Me - B point
	4	Pt - S - N		16	Me - Pog - B point
	5	Pt - N - Or		17	AL6 - Id - B point
	6	Pt - Or - Pns		18	AL6 - L6 - Id
	7	Or - Ans - Pns		19	L6 - L1 - Id
	8	Ans - Pns - A point		20	N' - Prn - Sn
	9	Pns - Pr - A point		21	Sn - Ls - Stm
	10	Pns - U6 - Pr		22	Stm - Li - Si
	11	Pr - U6 - U1		23	Si - Pog' Me'
	12	Cd - Go - Sg			

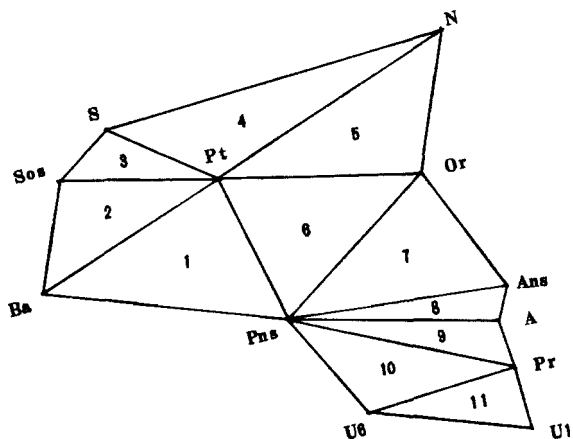


그림 3. 두개저, 인두상부, 중안면부, 상악골 분할도

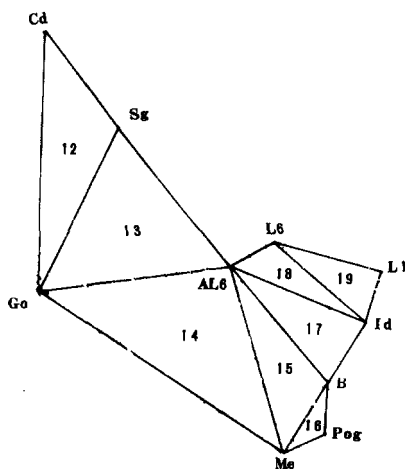


그림 4. 하악골 분할도

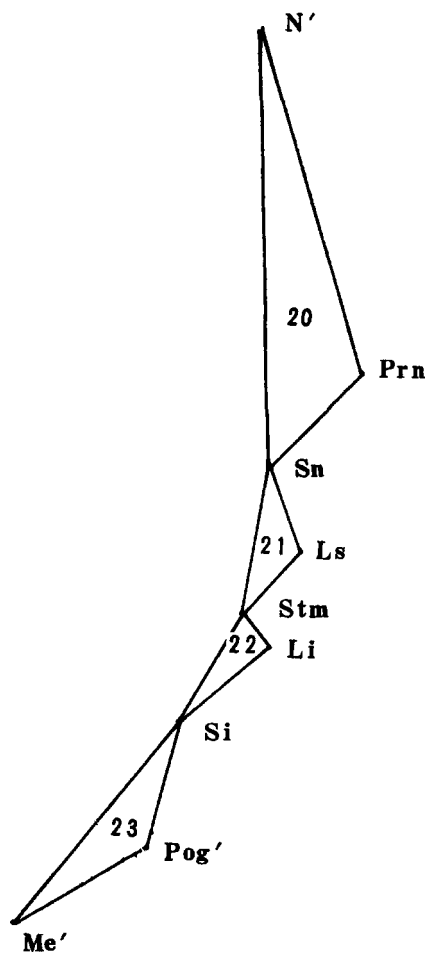


그림 5. 연조직 분할도

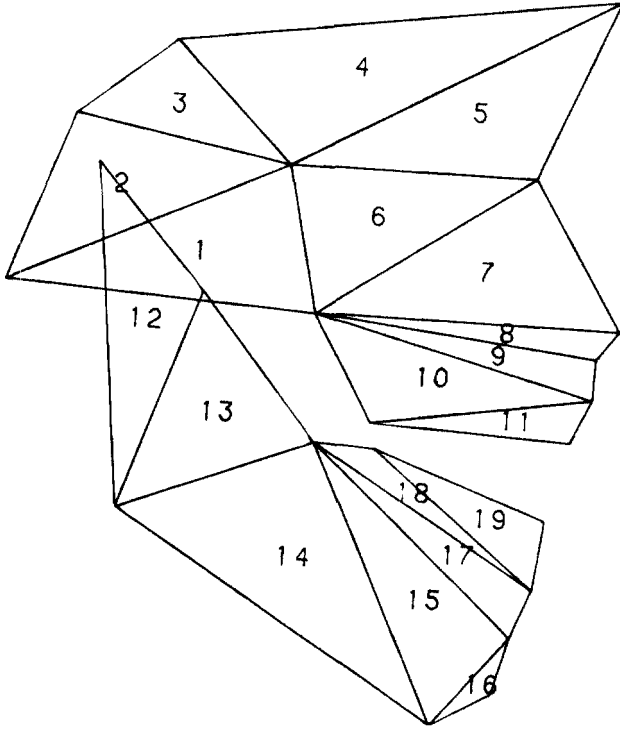


그림 6. 남자 6세기 형태 및 요소분할도

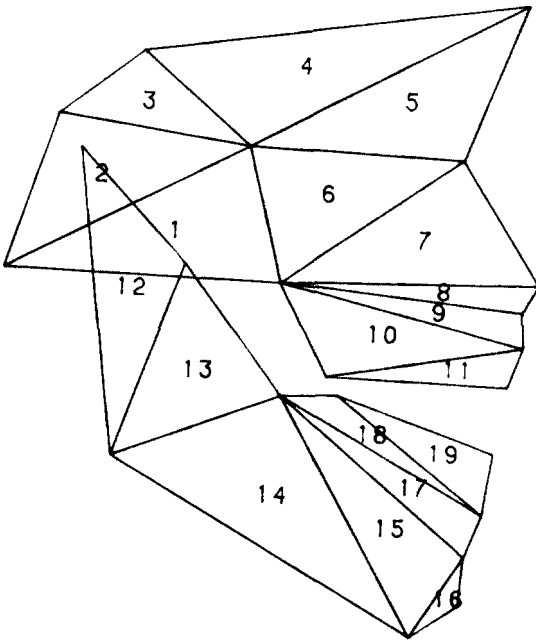


그림 7. 여자 6세기 형태 및 요소분할도

4. 계산항목

- X strain (E_{xx}) : X축 방향의 성장 strain
- Y strain (E_{yy}) : Y축 방향의 성장 strain
- XY strain (E_{xy}) : XY축 방향의 성장 strain
- maximum strain (E_1) : 최대성장치
- minimum strain (E_2) : 최소성장치
- maximum extension ratio (최대신장율, λ_1) : 최대성장치가 있는 방향에서의 처음과 마지막 길이의 비
- minimum extension ratio (최소신장율, λ_2) : 최소성장치가 있는 방향에서의 처음과 마지막 길이의 비
- 최대성장치와 최대신장율을 연령별로 남·녀 유의성 검정을 하였다.
- X strain (E_{xx}), Y strain (E_{yy}), XY strain (E_{xy})과 연령간의 회귀방정식을 작성하였다.
- direction of principle axis (θ) : 최대신장율이 FH평면과 이루는 각 (그림 8).

① clockwise θ 값은 “-”

② counter-clockwise θ 값은 “+”

이상의 계산에 사용된 computer의 기종은 DEC (Digital Equipment Company)의 VAX 11-750 system이며 사용된 유한요소 program은 임의 작성하였다.

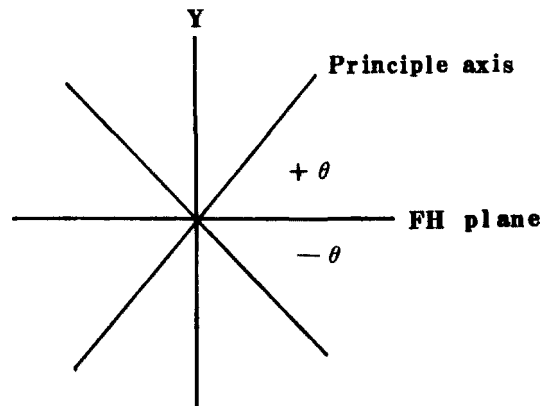


그림 8. 주축의 방향

Ⅲ. 연구성적

가. 두개저, 인두상부, 중안면부, 상악골, 치조골 및 치성부에 대한 결과(요소 1~11)

(그림 9~16, 표 3~14)

인두상부(요소 1)에서 12세시 남자의 최대신장율은 1.290, 여자는 1.247로 남자가 약간 큰 신장율을 보이며 남·녀 모두 FH평면과 Nasion-Sella에 비교적 직각에 가까운 방향성을 갖는다. 최대성장치(E_1), 최대신장율(λ_1) 값은 남녀간 유의의 차가 있었다. 또한 7세 여자에서 X strain 값이 “-”가 나온 것은 요소의 회전에서 기인한 것으로 사료된다.

후두개저(요소 2)에서 12세시 남자의 최대신장율은 1.121, 여자는 1.155로 여자가 9세부터 남자에 비해 다소 큰 신장율을 갖고 있으며 남·녀 모두 비교적 일정한 최대신장율의 증가를 보인다. 성장방향은 누년적으로 종속성이 있으며 Sella-Basion 방향을 나타냈다.

후두개저 상부(요소 3)에서는 남·녀의 최대신장율이 비교적 증가하는 경향이 있으며 성장방향은 Sella-Basion과 평행이지만 여자기 남자보다 누년적으로 FH평면에 직각에 가까운 형태이다. 최대성장치(E_1)와 최대신장율(λ_1) 값은 남·녀간 유의차가 있었다.

전두개저(요소 4, 5)는 남·녀에서 최대와 최소신장율의 차이가 작다. 12세 남자의 요소 4의 최대신장율은 1.122, 최소신장율은 1.051이며 남자는 FH평면에 8, 9, 10, 11세에 평균 67°의 각을 갖고 Nasion-Orbitale 방향에 평행하게 보이지만 전체적으로는 남·녀 모두에서 최대신장율과 최소신장율이 비슷하이 수성장방향이 없었다. 요소 5는 12세 남자의 최대신장율 1.078, 최소신장율 1.051이며 12세 여자는 최대신장율 1.098, 최소신장율 1.050로 요소 4와 마찬가지로 최대신장율과 최소신장율의 차가 작고, 성장방향은 남·녀 모두에서 일정치 않았다.

중안면중앙부(요소 6)는 12세에 최대신장율의 방향이 후두개저와 인두상부의 최대신장율이 가리키는 방향의 중간적인 방향이며 FH평면에 대해

남자는 85.8°, 여자는 79.0°의 값을 나타낸다. 누년적인 방향성은 Sella-Basion 방향이며 최대성장치(E_1), 최대신장율(λ_1) 값은 남·녀간 유의의 차가 있었다.

중안면전방부(요소 7)에서는 남·녀에서 최대신장율과 최소신장율이 다같이 크게 증가하는 추세를 보이며 7, 8, 9세에서는 최대신장율의 방향이 일정치 않으나 10세부터는 FH평면에 대해 마이너스(-)값을 갖고 Nasion-ANS 방향의 누년적 종속성을 나타낸다.

요소 8은 요소 7과는 FH평면에 대한 값이 반대 부호를 가지며 수직성장량이 수평성장량보다 크게 나타나며 7세에는 남·녀에서 작하방의 최대신장율을 보이다가 8세 이후에는 ANS-A point 방향에 누년적 종속성을 보인다. 남자는 7세에 87.9°에서 12세에 76.7°, 여자는 7세에 88.1°에서 12세에 68.4°의 값을 갖는다.

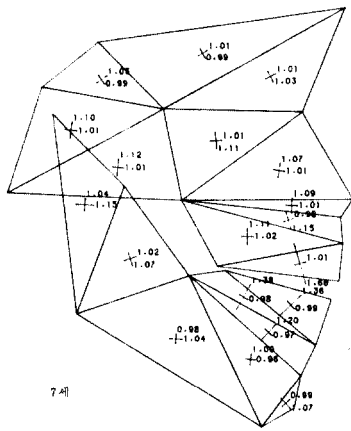
치조골 및 치성요소(요소 9, 10, 11)는 최대신장율의 방향이 “-” 값을 보이면서 수직성장량이 많고, 수평성장량은 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 요소 10은 상악제 1대구치를 포함하는 요소이며 요소 11은 상악전치를 포함한다. 전치를 포함하는 요소 11의 수직성장량이 요소 10 보다 크게 나타났다.

나. 하악골, 치조골 및 치성부에 대한 결과

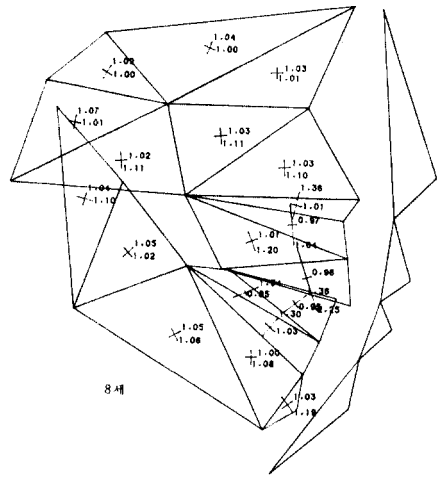
(요소 12~19)(그림 9~16, 표 3~14)

하악지부(요소 12, 13)에서 남녀 모두 최대신장율은 증가하며 요소 12에서는 성장방향이 남·녀에서 일정치 않고 최대성장치(E_1), 최대신장율(λ_1) 값은 남녀간 유의의 차가 있었다. 요소 13에서 남자의 최대신장율은 7세에 1.066에서 12세에 1.511이며 여자의 경우 7세 1.079에서 12세 1.591로 여자가 큰 값을 갖으며 최대신장율의 방향이 AL 6 내각을 2등분한다. 이것은 심상하면서 내각이 점차 줄어드는 결과를 가져오게 된다. 성장방향은 mandibular plane에 평행으로 누년적 종속성을 갖는다.

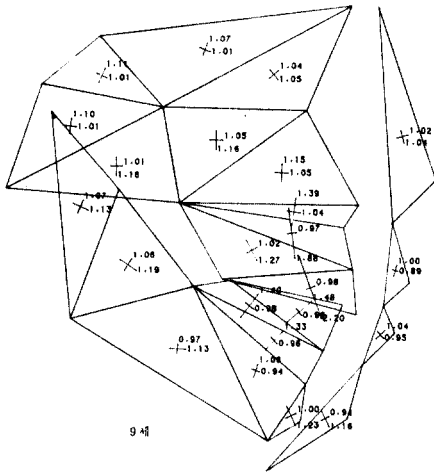
하악체부(요소 14)는 남·녀 모두에서 최대신장율이 요소 13보다 작은 값을 가지며 성장방향



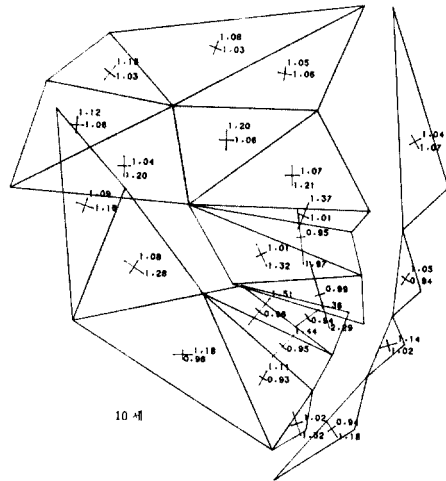
7세



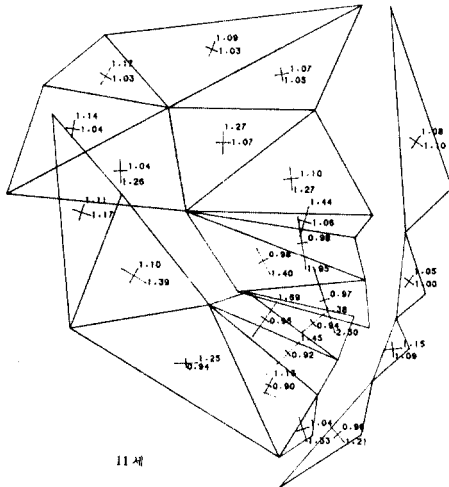
8세



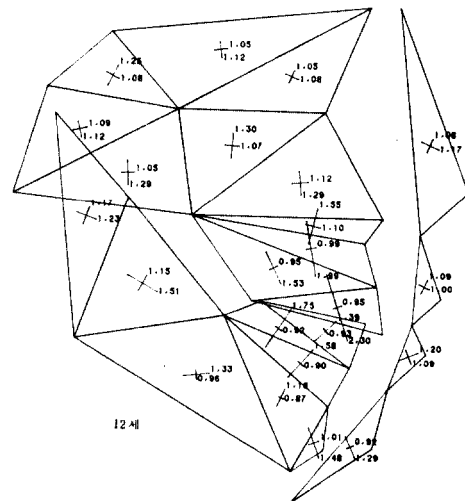
9세



10세



11세



12세

그림 9. 두개저, 인두상부, 중안면부, 상악골, 하악골, 연조직의 연령에 따른 성장변화(남자)

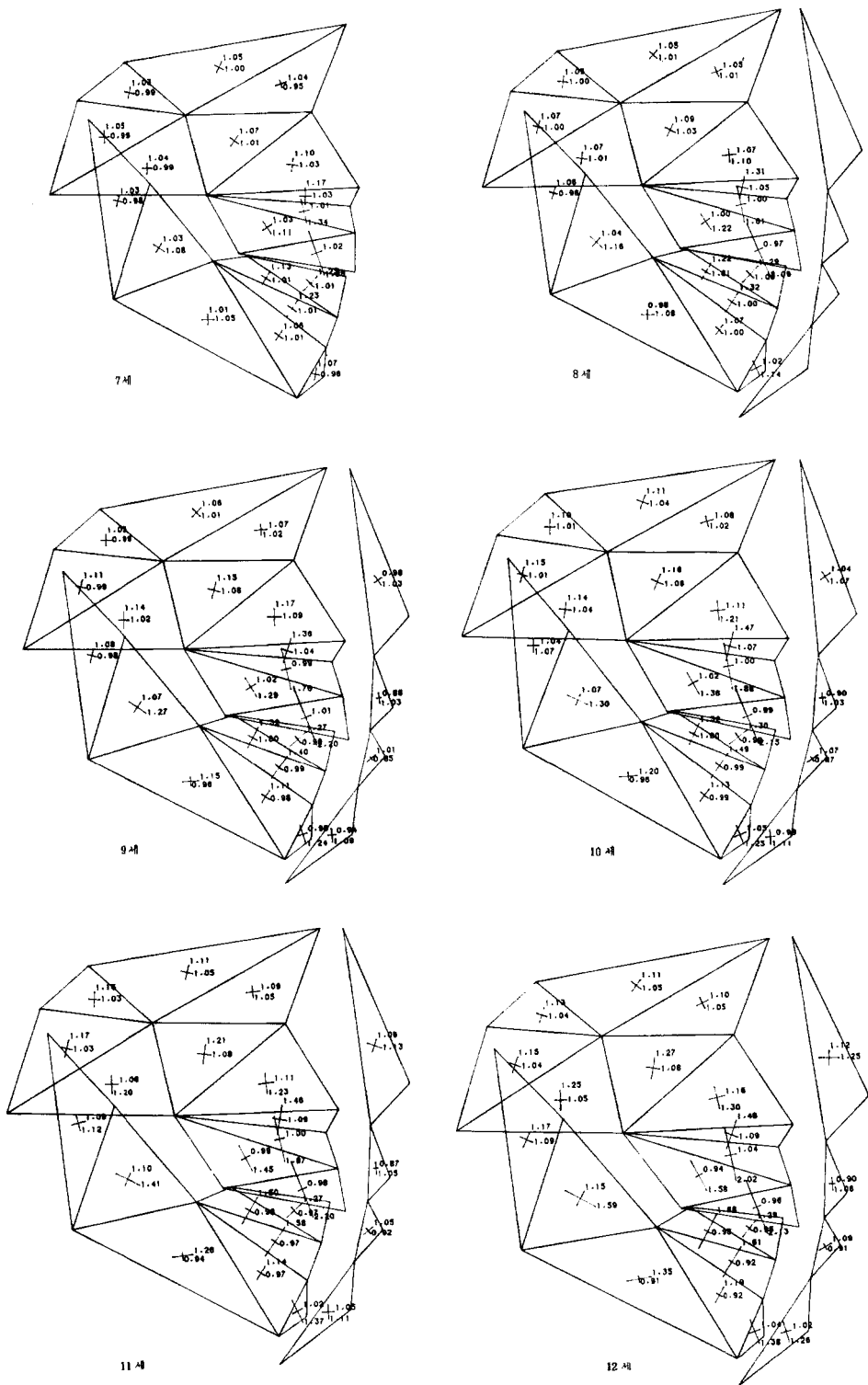


그림 10. 두개저, 인두상부, 중간면부, 상악골, 하악골, 연조직의 연령에 따른 성장변화(여자)

	7세	8세	9세	10세	11세	12세
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	+
3	x	x	x	x	x	x
4	x	x	x	x	x	+
5	x	+	x	+	+	x
6	+	+	+	+	+	+
7	+	+	+	+	+	+
8	+	+	+	x	x	x
9	+	+	+	+	+	+
10	+	+	+	+	+	+
11	+	+	+	+	+	+

	7세	8세	9세	10세	11세	12세
1	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	+	+
3	+	+	+	+	+	+
4	x	x	x	x	+	x
5	+	+	+	+	+	x
6	x	x	+	x	+	+
7	+	+	+	+	+	+
8	+	+	x	+	+	x
9	+	+	+	+	+	+
10	x	x	x	x	+	x
11	+	+	+	+	+	+

그림 11. 남자의 최대신장과 최소신장을 방향의 누년적변화 (두개저, 인두상부, 중안면부, 상악골)

그림 12. 여자의 최대신장과 최소신장을 방향의 누년적변화 (두개저, 인두상부, 중안면부, 상악골)

	7세	8세	9세	10세	11세	12세
12	+	+	+	+	+	+
13	+	x	x	x	x	x
14	+	x	+	+	+	+
15	+	+	+	x	x	x
16	x	x	x	+	+	+
17	x	x	x	+	+	+
18	+	+	+	+	+	+
19	+	+	+	+	+	+

	7세	8세	9세	10세	11세	12세
12	+	+	+	+	+	+
13	x	x	x	+	+	+
14	+	+	+	+	+	+
15	x	x	x	x	x	x
16	+	+	+	+	+	+
17	x	x	x	+	+	+
18	x	+	+	+	+	+
19	+	+	+	+	+	+

그림 13. 남자의 최대신장과 최소신장을 방향의 누년적변화 (하악골, 치조골, 치성부)

그림 14. 여자의 최대신장과 최소신장을 방향의 누년적변화 (하악골, 치조골, 치성부)

	7 세	8 세	9 세	10 세	11 세	12 세
20			+	×	×	+
21			+	×	×	×
22			×	+	+	+
23			×	×	×	+

그림 15. 남자의 최대신장율과 최소신장율방향의 년적변화 (비부, 상하순부, 이부)

	7 세	8 세	9 세	10 세	11 세	12 세
20			×	×	+	+
21			+	+	+	+
22			×	×	×	×
23			+	+	+	+

그림 16. 여자의 최대신장율과 최소신장율방향의 년적변화 (비부, 상하순부, 이부)

은 FH plane 에 평행으로 년적 증속성을 나타낸다.

요소 15는 남·녀에서 최대신장율이 연령에 따라 다소 증가하며 성장방향은 B point-Me 방향에 평행이면서 AL 6-B point 방향에는 수직방향을 나타낸다.

Chin 을 나타내는 요소 16은 성장방향이 남·녀에서 AL 6-Me 방향의 년적 증속성을 가지며 요소 15, 17, 18, 19와는 달리 “-” 값의 성장방향을 갖는다.

요소 17에서는 최대, 최소신장율이 일정한 증가를 하면서 성장방향의 각도가 전 연령에서 거의 일정하다. 최대신장율 방향은 mandibular plane 과 직각이면서 Id-Me 방향에 평행이며 최소신장율 방향은 AL 6의 각을 이등분한다.

요소 18에서도 최대, 최소신장율의 성장방향이 전 연령에서 거의 일정하며 Id-Me 방향에 평행하다. 최소신장율 방향이 Id 내각을 2 등분한다. 최대성장치 (E_1), 최대신장율 (λ_1) 값이 99% 신뢰구간에서 남·녀간 유의차가 있었다. 요소 18은 하악제 1대구치를 포함하며 상악제 1대구치를 포함하는 요소 10보다 최대신장율의 값이 큰값을 가진다.

요소 19는 하악전치를 포함하는 치성요소인데 상악전치를 포함하는 요소 11보다 최대신장율의 값이 작으며 요소 19와 요소 11은 성장 방향이 반대여서 Steiner 씨의 cheveron 을 연상케 한다. 치성요소 19는 치조골요소 17, 18보다 성장방향의 각도가 작다.

다. 비부, 상하순부, 이부에 대한 결과

(요소 20~23) (그림 9~16, 표 3~14)

연조직 비부 (요소 20)는 성장방향이 Or-ANS 와 비교적 평행한 관계를 갖지만 “-” 값이 점차 작아지기 시작하여 12세 남자는 -22.8° , 여자는 -2.11° 의 값을 보인다.

상순부 (요소 21)는 최대, 최소신장율의 증가가 작으며 남자는 ANS-A point의 방향을 보이며 여자는 비교적 직각에 가깝다.

하순부 (요소 22)의 최대신장율방향은 남·녀 모두에서 하악의 치조골·치성방향과 유사하다. 최대성장치 (E_1)와 최대신장율 (λ_1) 값은 95% 신뢰구간에서 남·녀간 유의차의 차가 있었다.

이부 (요소 23)는 요소 16의 최대신장율 방향과 비슷하며 최대신장율 (λ_1) 값이 남·녀간 99% 신뢰구간에서 유의차의 차가 있었다.

IV. 총괄 및 고찰

Todd⁴¹⁾는 성장은 크기의 증가이며, 발육은 성숙을 향해서 진행되어가는 과정이라 하였다. 인간의 성장은 크기의 증가뿐만이 아니라 방향성을 갖고 있기 때문에 한 부분의 성장을 생각할 때 방향성과 크기의 변화를 동시에 고려하여야 한다. 전통적인 두부방사선 측정법을 이용한 년적 연구는 많은 학자들의 연구대상이 되어왔다. 하지만 현재까지의 연구는 측정점이나 측정선들의 변화가 서로 상대적인 관계에 의존하기 때문에 성장의 복합성을 나타내기에는 한계성이 있다. 즉, 생물학

표 3. 연령별 남녀의 X Strain (E_{xx})

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	0.012	-0.006	0.020	0.012	0.012	0.021	0.044	0.047	0.044	0.066	0.049	0.054
2	0.015	-0.009	0.012	0.005	0.013	0.002	0.058	0.021	0.048	0.038	0.094	0.053
3	0.021	-0.006	0.024	0.001	0.024	-0.005	0.080	0.013	0.066	0.032	0.122	0.050
4	0.004	0.008	0.007	0.030	0.019	0.036	0.033	0.051	0.039	0.059	0.054	0.074
5	0.012	0.032	0.028	0.047	0.049	0.069	0.058	0.082	0.072	0.088	0.077	0.094
6	0.012	0.032	0.028	0.047	0.049	0.070	0.058	0.083	0.072	0.089	0.077	0.095
7	0.009	0.035	0.026	0.070	0.053	0.094	0.067	0.116	0.102	0.120	0.133	0.180
8	0.009	0.035	0.027	0.065	0.054	0.085	0.068	0.107	0.103	0.113	0.134	0.166
9	-0.004	0.021	-0.018	0.029	-0.006	0.029	-0.018	0.046	0.019	0.054	0.038	0.091
10	0.025	0.053	0.037	0.071	0.086	0.096	0.082	0.116	0.089	0.104	0.089	0.107
11	0.083	0.138	0.173	0.214	0.215	0.226	0.198	0.254	0.192	0.215	0.175	0.169
12	0.165	-0.013	0.105	-0.028	0.127	-0.010	0.171	0.045	0.179	0.091	0.246	0.108
13	0.030	0.064	0.036	0.109	0.163	0.223	0.252	0.295	0.375	0.408	0.530	0.615
14	0.036	0.050	0.052	0.079	0.136	0.158	0.196	0.222	0.279	0.288	0.377	0.407
15	-0.038	0.029	-0.004	0.034	0.044	0.024	-0.027	0.045	-0.044	0.021	-0.069	-0.007
16	0.024	-0.033	0.099	0.045	0.048	-0.001	0.060	0.081	0.073	0.094	0.079	0.083
17	0.086	0.095	0.158	0.127	0.162	0.172	0.219	0.197	0.233	0.237	0.262	0.198
18	0.097	0.054	0.316	0.073	0.155	0.091	0.215	0.069	0.261	0.150	0.249	0.171
19	0.221	0.148	0.242	0.172	0.326	0.177	0.237	0.209	0.233	0.159	0.213	0.111
20					0.021	-0.003	0.053	0.049	0.100	0.126	0.170	0.279
21					-0.099	-0.114	-0.022	-0.091	0.019	-0.124	0.018	-0.093
22					0.000	-0.043	0.132	0.014	0.155	0.000	0.206	0.056
23					-0.012	-0.055	0.033	-0.020	0.082	0.055	-0.007	0.038

표 4. 연령별 남녀의 Y Strain (E_{yy})

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	0.129	0.036	0.119	0.075	0.178	0.150	0.220	0.144	0.298	0.217	0.332	0.277
2	0.107	0.052	0.068	0.067	0.104	0.108	0.131	0.147	0.152	0.176	0.126	0.151
3	0.006	0.028	0.074	0.029	0.097	0.035	0.114	0.110	0.144	0.133	0.244	0.127
4	-0.004	0.039	0.033	0.033	0.061	0.034	0.172	0.105	0.084	0.108	0.128	0.087
5	0.026	-0.046	0.008	0.017	0.050	0.018	0.053	0.021	0.051	0.054	0.157	0.060
6	0.121	0.050	0.119	0.078	0.178	0.157	0.223	0.156	0.304	0.227	0.344	0.293
7	0.072	0.100	0.106	0.106	0.157	0.181	0.227	0.231	0.307	0.261	0.333	0.336
8	0.095	0.187	0.402	0.338	0.461	0.384	0.391	0.549	0.505	0.548	0.671	0.527
9	0.144	0.384	0.839	0.773	1.245	1.018	1.405	1.224	1.361	1.195	1.433	1.488
10	0.117	0.092	0.187	0.176	0.242	0.251	0.302	0.327	0.376	0.438	0.536	0.593
11	0.836	1.158	1.819	1.436	1.685	1.697	1.919	1.539	1.926	1.693	1.935	1.567
12	0.044	0.028	0.049	0.057	0.079	0.078	0.106	0.074	0.125	0.122	0.188	0.166
13	0.063	0.045	0.032	0.104	0.103	0.145	0.152	0.115	0.195	0.185	0.276	0.309
14	-0.024	0.007	0.062	-0.019	-0.031	-0.036	-0.038	-0.041	-0.059	-0.051	-0.036	-0.073
15	-0.001	0.041	0.080	0.038	0.048	0.071	0.080	0.080	0.094	0.092	0.125	0.131
16	0.032	0.063	0.148	0.132	0.206	0.249	0.324	0.246	0.347	0.360	0.520	0.404
17	0.103	0.180	0.216	0.252	0.189	0.294	0.262	0.407	0.231	0.484	0.387	0.515
18	0.339	0.104	-0.052	0.182	0.304	0.282	0.396	0.305	0.626	0.456	0.709	0.677
19	0.199	0.137	0.137	0.166	0.227	0.117	0.124	0.122	0.161	0.120	0.181	0.165
20					0.038	0.019	0.069	0.059	0.089	0.074	0.098	0.124
21					-0.006	0.028	0.021	0.027	0.038	0.052	0.075	0.065
22					-0.007	0.084	0.282	-0.061	0.100	-0.025	0.122	-0.039
23					0.121	0.097	0.109	0.117	0.113	0.118	0.262	0.279

표 5. 연령별 남녀의 XY Strain (Exy)

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	0.010	0.002	-0.010	0.011	-0.005	0.007	-0.004	0.013	-0.015	-0.001	-0.011	0.006
2	0.012	0.001	0.010	0.021	0.011	0.035	0.003	0.035	0.017	0.036	-0.008	0.042
3	0.020	0.009	0.041	0.004	0.039	0.002	0.061	0.002	0.066	0.007	0.081	0.031
4	0.006	0.022	0.012	0.023	0.019	0.027	0.016	0.022	0.023	0.014	-0.011	0.030
5	-0.009	0.026	0.001	0.013	-0.004	0.002	-0.001	0.019	0.004	0.004	-0.010	0.020
6	-0.009	0.032	-0.010	0.023	0.001	0.027	0.002	0.039	0.002	0.020	0.020	0.040
7	0.011	0.011	-0.004	-0.003	0.004	0.002	-0.006	-0.011	-0.021	-0.013	-0.017	-0.034
8	0.003	0.005	0.087	0.069	0.057	0.127	0.142	0.122	0.126	0.087	0.135	0.170
9	-0.052	-0.076	-0.094	-0.140	-0.176	-0.201	-0.204	-0.227	-0.217	-0.253	-0.266	-0.256
10	0.001	-0.038	-0.069	-0.113	-0.124	-0.137	-0.150	-0.173	-0.206	-0.228	-0.281	-0.324
11	-0.236	-0.361	-0.622	-0.601	-0.640	-0.612	-0.640	-0.642	-0.651	-0.635	-0.659	-0.580
12	-0.007	0.012	-0.017	0.031	-0.025	0.029	-0.023	-0.001	-0.019	-0.009	-0.024	0.036
13	-0.013	-0.026	0.019	-0.064	-0.068	-0.110	-0.106	-0.102	-0.157	-0.156	-0.203	-0.263
14	-0.004	-0.001	-0.007	-0.002	-0.007	0.008	0.003	0.020	0.014	0.040	0.051	0.071
15	0.004	0.021	-0.002	0.032	0.033	0.059	0.074	0.070	0.097	0.082	0.113	0.122
16	-0.041	0.022	-0.085	-0.048	-0.102	-0.080	-0.112	-0.078	-0.107	-0.161	-0.190	-0.130
17	0.119	0.118	0.149	0.177	0.211	0.240	0.293	0.297	0.313	0.374	0.415	0.404
18	0.199	0.060	0.200	0.108	0.240	0.162	0.330	0.150	0.456	0.286	0.502	0.422
19	0.220	0.134	0.230	0.167	0.315	0.156	0.234	0.173	0.251	0.164	0.266	0.189
20					-0.006	-0.024	-0.014	-0.014	-0.014	-0.021	-0.037	-0.006
21					0.028	-0.016	0.052	-0.011	0.026	-0.013	0.036	-0.004
22					0.041	0.074	0.037	0.089	0.006	0.059	0.048	0.076
23					-0.096	-0.011	-0.122	-0.011	-0.131	-0.003	-0.154	-0.067

표 6. 연령별 남녀의 최대성 장치 (E₁)

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	0.130	0.037	0.120	0.076	0.178	0.150	0.221	0.146	0.298	0.217	0.333	0.277
2	0.109	0.052	0.070	0.073	0.106	0.119	0.131	0.157	0.154	0.185	0.128	0.167
3	0.035	0.030	0.097	0.030	0.113	0.035	0.160	0.110	0.182	0.133	0.285	0.138
4	0.008	0.051	0.038	0.054	0.068	0.062	0.078	0.113	0.094	0.112	0.130	0.111
5	0.030	0.039	0.028	0.051	0.054	0.069	0.059	0.087	0.073	0.089	0.081	0.103
6	0.121	0.074	0.120	0.090	0.178	0.165	0.223	0.173	0.304	0.230	0.346	0.301
7	0.074	0.102	0.107	0.106	0.157	0.181	0.227	0.232	0.310	0.262	0.334	0.343
8	0.095	0.187	0.422	0.354	0.469	0.431	0.445	0.581	0.542	0.565	0.703	0.594
9	0.161	0.399	0.849	0.799	1.269	1.057	1.434	1.266	1.395	1.249	1.482	1.534
10	0.117	0.115	0.214	0.248	0.310	0.331	0.377	0.424	0.484	0.553	0.671	0.755
11	0.904	1.272	2.028	1.682	1.924	1.919	2.131	1.805	2.144	1.929	2.154	1.776
12	0.165	0.031	0.110	0.066	0.138	0.087	0.178	0.074	0.185	0.124	0.255	0.183
13	0.068	0.082	0.053	0.170	0.207	0.301	0.319	0.341	0.465	0.488	0.642	0.766
14	0.036	0.050	0.066	0.079	0.137	0.158	0.196	0.223	0.280	0.293	0.383	0.418
15	0.001	0.057	0.080	0.068	0.059	0.111	0.118	0.135	0.144	0.146	0.177	0.202
16	0.069	0.067	0.212	0.153	0.256	0.272	0.365	0.277	0.384	0.435	0.590	0.450
17	0.214	0.262	0.339	0.377	0.387	0.480	0.534	0.617	0.545	0.754	0.744	0.791
18	0.451	0.144	0.404	0.249	0.480	0.375	0.647	0.378	0.935	0.627	1.031	0.916
19	0.429	0.277	0.426	0.336	0.595	0.306	0.421	0.344	0.451	0.305	0.463	0.328
20					0.040	0.035	0.077	0.069	0.109	0.134	0.185	0.279
21					0.001	0.030	0.056	0.028	0.056	0.053	0.093	0.065
22					0.038	0.014	0.144	0.073	0.156	0.048	0.226	0.098
23					0.171	0.098	0.199	0.117	0.230	0.118	0.332	0.297

표 7. 연령별 남녀의 최소성장치 (E_2)

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	0.011	-0.006	0.019	0.010	0.012	0.020	0.044	0.045	0.043	0.066	0.049	0.054
2	0.014	-0.009	0.011	-0.002	0.012	-0.009	0.058	0.011	0.045	0.029	0.092	0.037
3	-0.008	-0.008	0.001	0.001	0.007	-0.005	0.034	0.013	0.028	0.031	0.082	0.039
4	-0.007	-0.003	0.002	0.008	0.012	0.008	0.027	0.043	0.029	0.056	0.053	0.051
5	0.008	-0.053	0.007	0.012	0.045	0.018	0.053	0.015	0.050	0.053	0.053	0.051
6	0.112	0.008	0.027	0.035	0.049	0.062	0.058	0.066	0.072	0.086	0.075	0.087
7	0.007	0.033	0.026	0.070	0.053	0.094	0.067	0.115	0.100	0.118	0.131	0.173
8	0.008	0.035	0.007	0.048	0.046	0.039	0.015	0.075	0.067	0.096	0.102	0.099
9	-0.021	0.006	-0.028	0.003	-0.030	-0.011	-0.047	0.004	-0.015	0.001	-0.011	0.046
10	0.025	0.030	0.010	-0.001	0.018	0.016	0.006	0.019	-0.019	-0.012	-0.046	-0.055
11	0.015	0.023	-0.036	-0.033	-0.024	0.005	-0.014	-0.012	-0.025	-0.020	-0.044	-0.040
12	0.044	-0.016	0.044	-0.037	0.068	-0.019	0.099	0.045	0.119	0.089	0.180	0.091
13	0.025	0.027	0.015	0.043	0.059	0.068	0.085	0.069	0.104	0.105	0.164	0.158
14	-0.025	0.007	0.048	-0.019	-0.031	-0.036	-0.038	-0.043	-0.060	-0.055	-0.043	-0.084
15	-0.038	0.013	-0.004	0.003	-0.055	-0.016	-0.065	-0.010	-0.094	-0.033	-0.121	-0.078
16	-0.013	-0.038	0.035	0.023	-0.002	-0.024	0.019	0.050	0.037	0.018	0.008	0.037
17	-0.025	0.012	0.035	0.002	-0.036	-0.015	-0.053	-0.012	-0.081	-0.033	-0.095	-0.077
18	-0.015	0.014	-0.140	0.007	-0.022	-0.001	-0.037	-0.004	-0.047	-0.021	-0.073	-0.068
19	-0.010	0.008	-0.046	0.002	-0.042	-0.012	0.061	-0.013	-0.056	-0.026	-0.070	-0.053
20					0.019	-0.018	0.044	0.039	0.080	0.067	0.082	0.124
21					-0.106	-0.116	-0.057	-0.092	0.001	-0.125	0.001	-0.093
22					-0.045	-0.141	0.016	-0.120	0.099	-0.073	0.092	-0.081
23					-0.062	-0.056	-0.057	-0.021	-0.035	0.055	-0.078	0.021

표 8. 연령별 남녀의 최대신장율 (λ_1)

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1.	1.122	1.036	1.114	1.074	1.164	1.140	1.201	1.137	1.264	1.197	1.290	1.247
2	1.103	1.051	1.067	1.071	1.101	1.113	1.123	1.146	1.144	1.170	1.121	1.155
3	1.035	1.030	1.093	1.029	1.108	1.035	1.149	1.105	1.168	1.125	1.253	1.129
4	1.008	1.050	1.037	1.053	1.066	1.060	1.075	1.107	1.090	1.107	1.122	1.105
5	1.030	1.039	1.028	1.050	1.053	1.067	1.057	1.083	1.070	1.085	1.078	1.098
6	1.115	1.071	1.114	1.086	1.165	1.153	1.202	1.160	1.268	1.208	1.301	1.265
7	1.072	1.097	1.102	1.101	1.147	1.167	1.206	1.210	1.273	1.235	1.292	1.299
8	1.091	1.172	1.358	1.307	1.392	1.365	1.375	1.470	1.444	1.459	1.551	1.479
9	1.149	1.341	1.643	1.612	1.881	1.765	1.967	1.880	1.947	1.870	1.991	2.017
10	1.111	1.109	1.195	1.223	1.273	1.289	1.325	1.359	1.403	1.451	1.531	1.584
11	1.676	1.883	2.249	2.089	2.202	2.200	2.294	2.147	2.299	2.204	2.304	2.133
12	1.534	1.031	1.104	1.064	1.129	1.084	1.165	1.072	1.170	1.117	1.228	1.169
13	1.066	1.079	1.052	1.158	1.189	1.265	1.280	1.297	1.390	1.406	1.511	1.591
14	1.036	1.049	1.064	1.076	1.128	1.147	1.180	1.203	1.249	1.259	1.329	1.355
15	1.000	1.055	1.077	1.066	1.057	1.105	1.111	1.127	1.135	1.137	1.163	1.185
16	1.067	1.065	1.193	1.143	1.230	1.243	1.316	1.247	1.330	1.368	1.477	1.379
17	1.195	1.235	1.296	1.325	1.332	1.400	1.438	1.495	1.446	1.583	1.577	1.607
18	1.379	1.135	1.345	1.224	1.400	1.323	1.515	1.325	1.694	1.501	1.750	1.683
19	1.363	1.247	1.361	1.293	1.480	1.270	1.357	1.299	1.379	1.269	1.388	1.287
20					1.039	1.034	1.074	1.066	1.104	1.126	1.171	1.248
21					1.001	1.029	1.054	1.028	1.055	1.052	1.089	1.063
22					1.037	1.014	1.135	1.070	1.145	1.047	1.205	1.093
23					1.159	1.093	1.182	1.111	1.208	1.111	1.290	1.262

표 9. 연령별 남녀의 최소신장율 (λ_2)

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	1.011	0.994	1.019	1.010	1.012	1.020	1.043	1.044	1.043	1.064	1.048	1.052
2	1.014	0.991	1.011	0.998	1.012	0.991	1.056	1.011	1.044	1.029	1.088	1.037
3	0.993	0.992	1.001	1.000	1.007	0.995	1.033	1.013	1.028	1.031	1.079	1.038
4	0.993	0.997	1.002	1.008	1.012	1.008	1.027	1.042	1.029	1.054	1.051	1.049
5	1.007	0.945	1.007	1.012	1.044	1.018	1.052	1.015	1.049	1.052	1.051	1.050
6	1.012	1.008	1.027	1.035	1.048	1.060	1.057	1.064	1.069	1.083	1.073	1.083
7	1.007	1.032	1.026	1.068	1.052	1.090	1.065	1.109	1.095	1.112	1.124	1.160
8	1.008	1.034	1.007	1.047	1.045	1.038	1.015	1.073	1.065	1.092	1.097	1.094
9	0.979	1.006	0.972	1.003	0.970	0.989	0.952	1.004	0.984	1.000	0.989	1.045
10	1.025	1.029	1.010	0.999	1.018	1.016	1.006	1.019	0.981	0.988	0.953	0.943
11	1.015	1.023	0.964	0.967	0.976	1.005	0.986	0.988	0.975	0.980	0.955	0.960
12	1.043	0.984	1.043	0.962	1.066	0.981	1.094	1.044	1.112	1.085	1.166	1.087
13	1.025	1.026	1.015	1.042	1.058	1.066	1.082	1.066	1.099	1.100	1.152	1.147
14	0.975	1.007	1.047	0.981	0.968	0.963	0.961	0.957	0.938	0.943	0.957	0.913
15	0.961	1.013	0.996	1.003	0.944	0.984	0.933	0.990	0.901	0.967	0.871	0.919
16	0.987	0.961	1.034	1.023	0.998	0.975	1.019	1.049	1.036	1.018	1.008	1.036
17	0.975	1.012	1.034	1.002	0.964	0.985	0.945	0.988	0.915	0.966	0.900	0.919
18	0.985	1.014	0.849	1.007	0.978	0.999	0.963	0.996	0.952	0.979	0.924	0.929
19	0.990	1.008	0.953	1.002	0.957	0.988	0.938	0.987	0.942	0.974	0.927	0.946
20					1.019	0.982	1.043	1.038	1.077	1.065	1.079	1.117
21					0.888	0.876	0.941	0.903	1.001	0.866	1.001	0.903
22					0.954	0.848	1.016	0.872	1.095	0.924	1.088	0.915
23					0.936	0.943	0.942	0.978	0.965	1.053	0.919	1.021

표 10. 연령별 남녀의 최대신장율 방향 (θ)

나이 성별 요소	7 세		8 세		9 세		10 세		11 세		12 세	
	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여	남	여
1	85.20	87.08	-84.12	79.95	-88.18	86.77	-88.61	82.74	-86.73	-89.76	-87.80	88.45
2	82.68	89.44	80.41	73.41	83.30	73.10	88.01	75.41	80.99	76.24	-76.74	69.72
3	34.56	76.54	60.67	81.45	66.61	86.66	52.79	89.05	60.27	85.87	63.46	70.32
4	29.82	62.35	67.90	46.66	68.97	43.71	69.97	70.14	67.14	75.17	-81.97	51.12
5	-62.65	16.76	2.831	20.35	-48.74	2.378	-7.701	15.61	10.16	5.813	-22.66	24.80
6	85.38	52.88	83.71	62.38	89.99	74.02	89.32	66.59	89.51	81.94	85.79	78.99
7	80.85	80.40	-86.87	-84.93	87.74	88.63	-87.83	-84.62	-84.18	-84.61	-85.23	-78.36
8	87.86	88.11	77.25	76.54	82.20	69.87	69.33	75.58	73.93	79.08	76.66	68.39
9	-72.46	-78.67	-83.84	-79.72	-82.16	-78.95	-82.00	-79.45	-81.03	-78.06	-79.55	-79.92
10	89.31	-58.86	-68.59	-57.48	-61.06	-59.74	-63.17	-60.66	-62.45	-63.16	-64.27	-63.46
11	-73.95	-72.35	-71.45	-67.74	-69.48	-70.12	-71.68	-67.51	-71.54	-69.68	-71.60	-70.16
12	-3.27	75.06	-15.50	71.98	-22.89	73.28	-17.51	-89.62	-17.78	-75.43	-19.62	64.43
13	-70.72	-34.98	42.03	-44.05	-33.03	-35.23	-32.37	-24.27	-30.07	-27.18	-29.00	-29.91
14	-3.443	-1.329	-61.81	-1.235	-2.452	2.331	0.790	4.313	2.359	6.697	6.903	8.245
15	83.86	52.60	-88.91	46.93	72.36	55.90	62.95	52.01	62.69	56.71	65.26	59.83
16	-47.64	77.67	-53.14	-65.00	-63.94	-73.68	-69.86	-68.45	-71.03	-64.84	-69.61	-70.52
17	46.95	54.92	50.52	54.71	46.84	52.14	47.08	54.73	44.93	54.15	49.27	55.73
18	60.64	56.28	23.66	58.36	53.61	60.31	52.67	64.06	55.92	59.09	57.30	60.46
19	43.56	43.85	38.57	44.51	40.52	39.57	38.18	37.96	40.94	41.68	43.29	49.05
20					-73.70	-57.00	-59.71	-55.60	-33.53	-19.24	-22.81	-2.111
21					74.62	-83.70	56.18	-84.71	55.02	-85.74	64.08	-88.72
22					42.51	37.17	17.86	33.64	6.368	38.86	22.85	28.95
23					-62.45	-85.81	-53.75	-85.28	-48.37	-87.69	-65.56	-75.43

표 11. 각 연령별 최대성장치와 최대신장율의 남녀간 유의성 검정

요소	maximum strain (E_1)	maximum extension ratio (λ_1)
1	**	**
2		
3	**	*
4		
5		
6	**	**
7		
8		
9		
10		
11		
12	*	**
13		
14		
15		
16		
17		
18	**	**
19	**	**
20		
21		
22	*	*
23	**	**

* P < 0.05 ** P < 0.01

적 성장인 두개안면골격의 성장은 이방성 (anisotropic)이며 비직선적 (nonlinear)인 양상을 나타낸다. 즉 크기와 형태의 변화가 작지않기 때문에 이방성과 비직선적이다. 그러므로 종래 계측법의 단점을 수학적 model 을 이용해서 보완하려는 시도가 Moss 와 Skalak^(27,28) 등의 allometric centered model 과 allometric network model 의 연구를 가능케했다. 전자는 성장이 최소로 일어나는 지점, 특별한 기능이나 성장의 평형에 기여하는 점 혹은 기하학적 작도에 의한 중심점을 기준으로 해서 분석을 하며, 후자는 상기와 비슷한 원리지만 allometric centered model 분석 방법

이 회전같은 커다란 변이가 있을 시에 성장의 운동성 (kinematics of growth)을 나타낼 수 없고 오차의 범위가 넓어 Moss⁽²⁸⁾ 등이 이의 단점을 최소화하여 allometric network model 을 도입하였다. 그러나 이 방법도 network 상의 선들이 항상 allometric growth 를 하는것이 아니므로 성장율의 양이나 방향을 결정할 수가 없다. 이에 종래 구조해석이나 역학분석에 사용하던 유한요소법 (finite element method)이 성장의 운동성을 설명하는데 타당한 방법으로 연구되기 시작했다.^(20,29,30) 유한요소법에서는 전체영역을 절점 (node) 과 절선 (nodal line) 을 사용해서 나누고 유한개의 요소로 구성하여 요소내에서만 주어진 조건을 만족하는 근사함수를 선정한다. 넓은 의미에서 유한요소법은 원의 넓이와 원주의 크기를 구하려는 이집트인들의 시도에서 시작되었다고 할 수가 있으며 1956년 Turner⁽⁴²⁾ 등이 항공기 구조해석에 관한 논문 발표 이래 Argyris⁽¹⁾ 가 일반화하여 컴퓨터 이용을 쉽게한 후 이를 토대로 Clough⁽¹³⁾ 가 유한요소법이라 정의하였다.

유한요소법을 성장에 이용할 경우 종래의 계측 방법과의 차이점을 보면 종래의 방법은 결과를 산출하기 위하여 vector 를 사용한 반면 유한요소법은 성장 tensor⁽⁵⁰⁾ 를 계산한다. 즉 두 방법의 차이점은 성장의 표현 (descriptor) 을 어느 관점에서 보느냐 하는데 근본성이 있다. 이전의 방법은 시간에 따른 점 (point) 의 이동이나 변위 (movement or displacement) 로써 결과를 나타내는 반면, 연속체 개념을 가진 유한요소법은 성장시 국소적인 성장, 즉 성장 strain 이 점 (point) 들의 주변에 영향을 미치는 것으로 생각한다. 이들 성장 strain 은 성장하는 생체내에 퍼져있고 이는 각 점에서의 growth tensor⁽²⁹⁾ 로 표현된다. 정확히 말하면 성장 tensor 는 위치변화에 따른 변위 (displacement) 의 파생어라 볼 수 있다. 일반적으로 tensor 는 쉽게 형상화 시킬 수 없는 추상적인 수학적 실체이다. 유한요소법은 요소내의 변화를 수치로 나타내어 표현하고 있기 때문에 요소가 작을수록 즉 분할되는 요소의 수가 많

표 12. 남·녀의 직선회귀계산 (X축: 나이, Y축: $\overline{E_{xx}}$)

성별 요소	남		여	
	회귀 방정식 ($Y = a + bX$)	r	회귀 방정식 ($Y = a + bX$)	r
1	$Y = -0.058 + (8.432 \times 10^{-3}) X$	0.93	$Y = -0.093 + 0.012 X$	0.94
2	$Y = -0.105 + 0.014 X$	0.90	$Y = -0.08 + (9.575 \times 10^{-3}) X$	0.92
3	$Y = -0.134 + 0.018 X$	0.92	$Y = -0.073 + (8.525 \times 10^{-3}) X$	0.86
4	$Y = -0.07 + (9.246 \times 10^{-3}) X$	0.98	$Y = -0.086 + 0.012 X$	0.99
5	$Y = -0.093 + 0.014 X$	0.99	$Y = -0.095 + 0.015 X$	0.97
6	$Y = -0.093 + 0.014 X$	0.99	$Y = -0.096 + 0.015 X$	0.97
7	$Y = -0.168 + 0.022 X$	0.99	$Y = -0.182 + 0.026 X$	0.98
8	$Y = -0.169 + 0.023 X$	0.99	$Y = -0.167 + 0.025 X$	0.98
9	$Y = -0.055 + (5.682 \times 10^{-3}) X$	0.60	$Y = -0.089 + 0.013 X$	0.95
10	$Y = -0.099 + 0.016 X$	0.92	$Y = -0.089 + 0.017 X$	0.88
11	$Y = -0.126 + 0.027 X$	0.76	$Y = -0.077 + 0.025 X$	0.63
12	$Y = -0.155 + 0.03 X$	0.84	$Y = -0.188 + 0.022 X$	0.86
13	$Y = -0.693 + 0.089 X$	0.96	$Y = -0.256 + 0.043 X$	0.65
14	$Y = -0.475 - 0.063 X$	0.98	$Y = -0.486 + 0.066 X$	0.96
15	$Y = -0.055 - (8.686 \times 10^{-3}) X$	0.77	$Y = 0.03 - (9.571 \times 10^{-4}) X$	0.11
16	$Y = -0.051 + 0.011 X$	0.68	$Y = -0.154 + 0.019 X$	0.83
17	$Y = -0.247 + 0.041 X$	0.96	$Y = -0.191 + 0.034 X$	0.91
18	$Y = -0.164 + 0.035 X$	0.69	$Y = -0.163 + 0.025 X$	0.93
19	$Y = -0.025 + 0.024 X$	0.51	$Y = -3.643 X 10^{-4} + 0.014 X$	0.44
20	$Y = -0.392 + 0.042 X$	0.97	$Y = -0.665 + 0.069 X$	0.92
21	$Y = -0.186 + 0.015 X$	0.50	$Y = 0.13 - 0.019 X$	0.63
22	$Y = -0.524 + 0.57 X$	0.95	$Y = -0.165 + 0.015 X$	0.69
23	$Y = -0.068 + (7.93 \times 10^{-3}) X$	0.32	$Y = -0.2 + 0.018 X$	0.67
	n = 7	95 %유의 = 0.707	n = 5	95 %유의 = 0.811
	d. f. = 6	99 %유의 = 0.834	d. f. = 4	99 %유의 = 0.917

을수록 오차가 감소하며 세부적인 변화량을 깊이 판독하는 것이 가능하다. 그러나 요소의 수를 많이 하는 분할법을 두부방사선계측사진에서 사용할 경우 많은 계측점들을 필요로 하게되며 이들이 정확히 설정될 필요가 있고, 임상에서 흔히 사용하지 않는 계측점을 선정할 경우 결과의 이해에 문제가 있게되므로 이들 관계의 적절한 선에서 선택하여 올바른 분석 결과가 나오도록 주의하여야 한다.

두개안면골의 성장은 많은 학자들에 의하여 해부학적, 조직학적 및 두부방사선계측사진을 통하여 연구되어 왔다. Brodie⁹⁾는 안면골의 성장곡선을 도시하여 체성장곡선과 일치한다 하였고 Nanda³²⁾와 Bambha²⁾는 Sella-Nasin의 성장은 neural 과 general body growth의 복합형태를 나타낸다 하였다. 성⁴⁸⁾은 신장 및 체중과 전두개저(S-N)는 전 연령에서 성장에 상관성이 없

표 13. 남·녀의 직선헤귀계산 (X축 : 나이, Y축 : Eyy)

성별 요소	남		여	
	회귀 방정식 (Y = a + bX)	r	회귀 방정식 (Y = a + bX)	r
1	Y = -0.33 + 0.051 X	0.98	Y = -0.323 + 0.045 X	0.99
2	Y = -0.091 + 0.019 X	0.81	Y = -0.179 + 0.028 X	0.95
3	Y = -0.277 + 0.037 X	0.96	Y = -0.178 + 0.024 X	0.94
4	Y = -0.16 + 0.021 X	0.98	Y = -0.11 + 0.017 X	0.87
5	Y = -0.06 + (9.518 x 10 ⁻³) X	0.87	Y = -0.119 + 0.014 X	0.84
6	Y = -0.353 + 0.054 X	0.98	Y = -0.331 + 0.047 X	0.99
7	Y = -0.396 + 0.057 X	0.99	Y = -0.346 + 0.052 X	0.99
8	Y = -0.648 + 0.1 X	0.93	Y = -0.536 + 0.09 X	0.93
9	Y = -1.687 + 0.261 X	0.92	Y = -1.466 + 0.233 X	0.97
10	Y = -0.549 + 0.08 X	0.99	Y = -0.668 + 0.094 X	0.99
11	Y = -1.442 + 0.289 X	0.83	Y = -0.8 + 0.21 X	0.75
12	Y = -0.195 + 0.028 X	0.98	Y = -0.176 + 0.025 X	0.97
13	Y = -0.315 + 0.043 X	0.96	Y = -0.306 + 0.043 X	0.94
14	Y = 0.082 - (9.968 X 10 ⁻³) X	0.55	Y = 0.098 - 0.014 X	0.97
15	Y = -0.139 + 0.02X	0.91	Y = -0.128 + 0.019 X	0.97
16	Y = -0.62 + 0.085 X	0.99	Y = -0.479 + 0.069 X	0.99
17	Y = -0.324 + 0.052 X	0.92	Y = 0.52 + 0.082 X	0.98
18	Y = -0.794 + 0.113 X	0.83	Y = -0.733 + 0.102 X	0.97
19	Y = -0.015 + 0.016 X	0.47	Y = -0.03 + 0.015 X	0.57
20	Y = -0.212 + 0.025 X	0.97	Y = -0.279 + 0.03 X	0.98
21	Y = -0.189 + 0.02 X	0.94	Y = -0.134 + 0.015 X	0.97
22	Y = -0.318 + 0.033 X	0.94	Y = -0.02 - (1.98 x 10 ⁻³) X	0.1
23	Y = -0.446 + 0.052 X	0.87	Y = -0.515 + 0.058 X	0.91
n = 7	95 % 유의 = 0.707		n = 5	95 % 유의 = 0.811
d.f. = 6	99 % 유의 = 0.834		d.f. = 4	99 % 유의 = 0.917

는 것으로 보고했는데 이는 전두개저의 성장이 안면골의 성장과는 다르다는 것을 의미한다. 저자의 연구에서는 요소 4 와 이에 영향을 받는 요소 5의 전두개저에서 남녀 모두 성장방향이 다른 안면골 요소와는 달리 일정치 않은것은 이 부분의 성장이 다른 안면골의 성장과는 같지 않다는 것을 나타낸다. 연구결과 전두개저의 성장량이 후두개저의 성장량보다 적었는데 이는 Ricketts³⁵⁾의 연구와

일치하지 않았고, 이것은 한국아동에서 안면골 상부와 전방부의 성장이 백인에 비해서 작기 때문이라 사료되며 Koski²¹⁾는 Sphenooccipital synchondrosis가 brain 성장과 인두상부의 기능에 보조를 맞추기 위해서 늦게까지 남아있는 것이 후두개저의 성장을 계속시킨다는 이유가 될수 있다고 하였다.

일반적으로 상악골의 성장은 두개저의 성장에

표 14. 남·녀의 직선회귀계산 (X축 : 나이, Y축 : Exy)

성별 요소	남		여	
	회귀방정식 (Y = a + bX)	r	회귀방정식 (Y = a + bX)	r
1	Y = 0.022 -- (2.693 x 10 ⁻³) X	0.71	Y = 5.214 x 10 ⁻⁴ + (5.036 x 10 ⁻⁴) X	0.21
2	Y = 0.14 -- (7.75 x 10 ⁻⁴) X	0.2	Y = -0.051 -- (7.575 x 10 ⁻³) X	0.93
3	Y = -0.098 + 0.014X	0.97	Y = -0.024 + (3.15 x 10 ⁻³) X	0.63
4	Y = 7.486 x 10 ⁻³ + (1.1 x 10 ⁻⁴) X	0.04	Y = -5.714 x 10 ⁻³ + (2.54 x 10 ⁻⁴) X	0.55
5	Y = -8.714 x 10 ⁻⁴ -- (1.929 x 10 ⁻⁴) X	0.08	Y = 4.286 x 10 ⁻³ + (7.5 x 10 ⁻⁴) X	0.16
6	Y = -0.033 + (3.321 x 10 ⁻³) X	0.73	Y = -0.015 + (4.043 x 10 ⁻³) X	0.64
7	Y = 0.037 -- (4.143 x 10 ⁻³) X	0.79	Y = 0.05 -- (5.657 x 10 ⁻³) X	0.85
8	Y = -0.517 + 0.025X	0.9	Y = -0.176 + 0.026 X	0.88
9	Y = 0.299 -- 0.044 X	0.98	Y = 0.268 -- 0.043 X	0.96
10	Y = 0.359 -- 0.048 X	0.99	Y = 0.359 -- 0.05 X	0.99
11	Y = 0.516 -- 0.101 X	0.82	Y = -0.163 -- 0.172 X	0.12
12	Y = 0.02 -- (3.614 x 10 ⁻³) X	0.83	Y = 1.086 x 10 ⁻³ + (1.3 x 10 ⁻³) X	0.158
13	Y = 0.02 -- (3.632 x 10 ⁻³) X	0.83	Y = 0.285 -- 0.038 X	0.95
14	Y = 0.289 -- 0.036 X	0.94	Y = -0.094 + 0.011 X	0.90
15	Y = -0.064 -- 0.027 X	0.74	Y = -0.13 + 0.019 X	0.99
16	Y = 0.179 -- 0.027 X	0.95	Y = 0.197 -- 0.026 X	0.8
17	Y = -0.42 + 0.063 X	0.99	Y = -0.428 + 0.066 X	0.99
18	Y = -0.492 + 0.077 X	0.97	Y = -0.461 + 0.063 X	0.95
19	Y = -0.093 + 0.031 X	0.66	Y = -0.085 + 0.023 X	0.76
20	Y = 0.076 -- (8.18 x 10 ⁻³) X	0.92	Y = -4.1 x 10 ⁻³ -- (8.0 x 10 ⁻⁴) X	0.13
21	Y = -0.05 + (7.11 x 10 ⁻³) X	0.59	Y = -3.99 x 10 ⁻³ -- (4.3 x 10 ⁻⁴) X	0.1
22	Y = -0.04 + (6.06 x 10 ⁻³) X	0.44	Y = -0.09 + 0.014 X	0.62
23	Y = 0.278 -- 0.013 X	0.91	Y = 0.12 -- 0.013 X	0.72

n = 7 95 % 유의 = 0.707
d.f. = 6 99 % 유의 = 0.834

n = 5 95 % 유의 = 0.811
d.f. = 4 99 % 유의 = 0.917

영향을 받는다.¹⁵⁾ Enlow-Hunter¹⁵⁾는 성장균형이론 (growth-equivalent theory)에서 전두개저 길이의 증가는 nasomaxillary complex의 성장을 유도함과 동시에 전방변위를 가져오며, sphenooccipital region의 길이의 증가로 인해 인두부 (pharyngeal region)의 성장이 여기에 균형을 맞추어 일어나며 하부의 하악지 (ramus) 폭정도 증가하게 된다고 하였고, nasomaxillary

complex의 전방이동시 하악골도 여기에 상응하는 위치이동을 필요로 하게되며 상악결절은 sphenooccipital synchondrosis의 성장에 맞는 성장을하고, nasomaxillary complex의 수직성장에 맞게 ramus에서의 수직성장도 일어난다고 하였다. Coben¹⁴⁾도 안면부와 두개부 성장에 대한 연구를 통해서 두개부는 전상방으로 성장하며 안면부는 전하방으로 성장한다 하였다. Proffit³⁰⁾는

nasomaxillary complex의 성장은 두개저의 성장으로 상악골이 전방이동하는 수동적 변위(passive displacement)와 상악골 자체의 성장으로 인한 능동적성장(active growth)을 하는 두 측면을 보이는데 상악골의 수동적 변위는 유치열기에서는 성장에 많은 영향을 미치나 이후 neural growth가 완성되는 7세때 두개저의 연골융합부의 성장이 느려지므로 중요치 않다 하였고, 상악이동의 1/3이 수동적 변위에 의해서 일어나고 나머지 2/3는 자체 성장에 의해서 일어난다고 하였다. 본 연구에서는 후두개저(요소 2, 요소 3), 인두상부(요소 1), 중앙면 중앙부(요소 6)에서 최대신장율의 방향이 Sella-Basion과 유사한 방향을 갖고 상호관련성 있는 변화를 한다고 보여지며 또한 중앙면전방부(요소 7)도 비슷한 방향의 신장율을 나타내는 것을 볼 때 두개저의 성장은 중앙면중앙부, 전방부, 인두상부의 성장에 많은 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이는 상기의 확설에 이론적 뒷받침이 될수 있으며 중앙면전방부(요소 7)는 두개저로 부터 다소 멀리 떨어져 있고 비강지와 구개부를 포함하여 비교적 다른 부분에 비해서 두개저의 영향과 함께 구개면이나 치조골의 성장영향을 받아서 10세 이후부터는 전하방의 성장 방향을 갖게 된다.

Moss²⁵⁾는 상하악 성장을 설정하는 인자로서 비강과 구강을 중요시 하였는데 이들의 기능적 필요에 의하여 성장을 한다고 보고 하였다(functional matrix theory). 본 연구결과와 비교시 두개저의 성장은 연골융합부의 성장과 골의 위치이동(bone replacement)에 의해서 일어나며 또한 뇌의 성장에 영향을 받는다고 할 수 있다. 이러한 두개저의 성장은 인두공간을 포함하는 요소 1에 영향을 미쳐서 후두개저부(요소 2)의 최대신장율과 방향성이 비슷하게 생각할 수 있지만 후두개저의 연골성융합부는 인두공간의 기능에 의하여 2차적인 보상적 성장변화라고 생각할 수도 있다. 더우기 중앙면중앙부(요소 6)에서는 인두상부에 가까운 공간을 많이 포함하고 있으며 인두공간에서의 영향을 받아 최대신장율의 방향이나 성장율이 비슷하게 나타난다. 즉 Moss가 언급한 기능적 필요(functional need)에 의해서 성장

을 한다고 볼수가 있는 것이다. 또한 상악의 요소 9, 요소 10, 요소 11 하악의 요소 17, 요소 18, 요소 19에서도 구강의 기능적 필요에 의해 이들의 성장이 유도되었다고 볼수가 있다. 이는 이들 상하악 치조골과 치성요소가 각기 최대신장율의 방향이 같은 경향을 보이는 것은 이곳에 동시에 영향을 미치는 어떤 국소적변화에 기인한것이라 사료되기 때문이다. 예를들어 Milwaukee brace를 사용한 경우 치조골, 치아 및 구개면 위치와 형태를 변화시키고 하악골에도 큰변형이 생긴다. 이상은 Björk³⁾가 안면골중에서 치조골이 다른 어느 부위 보다도 근육의 힘에 빨리 그리고 많이 반응을 한다는 보고와도 일치한다.

Ricketts³⁶⁾는 상악제 1대구치 근심교두 위치는 facial axis (Pt-Gn) 상에 놓이며 위치는 성장을 해도 변하지 않는다고 하였고 Brodie⁸⁾는 상악제 1대구치의 맹출방향이 Sella-chin point를 따른다고 하였다. 저자의 연구에서도 상악제 1대구치를 포함하는 치성요소 10의 최대신장율의 방향이 facial axis나 Sella-chin point와 유사한 평행관계를 유지하는 것을 볼 수 있다.

상악중절치는 상악골의 전하방성장과 함께 전방으로 맹출이동하게 되는데 본 연구에서 7세에 최대신장율이 여자가 남자보다 더 크고 그후에 남자가 더 큰값을 갖는것은 남자가 여자보다 치아맹출이 약간 늦은것에 기인한다. Merow²³⁾는 상악중절치는 후방에 맹출하는 구치를 수용하기 위하여 A point보다 수평이동량이 3배정도가 많은 것을 보고하였는데 저자의 연구에서는 A point를 포함하는 요소 8, 요소 9에서는 최대신장율의 방향이 서로 반대가 되어 상악중절치를 포함하는 요소 11의 전방이동보다는 작은것으로 나타났다.

Enlow¹⁵⁾는 상악골이 전하방으로 떨어지면서 전방부는 흡수가 일어나면서 nasal floor의 골흡수와 roof of mouth에서 골침가가 일어나 palatal plane이 하방으로 translation된다 하였고 Brodie⁸⁾는 N-S line을 중복시킬때 비강저(nasal floor)가 거의 평행으로 하방위를 취하는것을 기술하고 있다. 저자의 결과에서도 palatal plane을 포함한 요소 7, 요소 8, 요소 9에서 수직방향의 성장이 일어나는 것을 알 수 있

다. 치성 및 치조골 부분에서는 Ross³⁷⁾의 보고처럼 후방부 상악결절부위의 골침가와 전방부에서의 약간의 골침가가 있다고 생각된다. 이것은 요소 8에서 요소 11까지의 방향성에서 이같은 현상을 알 수 있다.

Proffit³³⁾는 하악골이 전하방으로 translation되면서 동시에 후상방으로 크기의 증가가 일어나서 성장을 한다고 하였는데 저자의 결과에서도 누년적으로 종속성은 없었지만 요소 12, 요소 13의 성장이 요소 14의 성장에 비해서 상방의 증가가 많이 일어나는 것을 볼 수 있으며 요소 16의 chin 부분이 전하방의 성장경향을 갖는다. 또한 골조직 translation시에 chin의 연조직부분도 같이 전하방으로 translation이 일어난다고 하였는데 본 연구에서도 요소 16과 요소 23의 성장방향이 같은 것으로 설명되어 질수가 있겠다. Enlow¹⁵⁾는 하악골이 ramus 후연에서의 골침가와 동시에 전면에서의 골흡수가 일어나면서 커진다고 하였다. 이는 chin과 ramus가 점점 거리가 멀어지는 것을 나타내며 본 연구에서 요소 14의 하악체 성장이 수평방향의 성장을 갖는 것은 위의 학설에 이론적으로 설명이 되겠다. Björk⁴⁾는 성장분석시에 하악하연을 reference plane으로 사용하는 것은 부적당하다고 기술하고 있는데 저자의 연구에서도 요소 14의 최대신장율의 방향은 수평방향이고 요소 15의 방향은 누년적으로 Id-Me의 방향을 나타내며 또한 요소 16의 방향성이 다른것으로 보아 하악하연은 reference plane으로 적당치 않은 것으로 나타났다.

Chin의 돌출은 예전에는 골조직의 첨가에 의한 것이라 생각했으나 사실은 치조돌기와 chin사이 부분이 흡수되기 때문이다. 즉 하악골의 한부분으로서 chin은 translation하며 chin 상부에 골조직 흡수가 되어 요소 16과 같은 성장방향을 갖는다 생각할 수 있다.

Subtelny³⁹⁾는 경조직과 연조직의 성장에 관한 누년적 연구를 시행하여 들사이의 성장관계는 부위에 따라 긴밀한 상관성이 있기도하고 서로 독립적이기도 하다라고 하였다. 저자의 결과에서는 요소 20의 코성장은 9, 10세까지는 주로 하방성장의 경향을 갖는데 이는 전두개저 요소와는 관계가 없고, 요소 7이 계속 전하방성장을 하는 방향

성과 관계가 있는것 같았다. Rain³⁴⁾은 연조직이 복합적인 관계에 의해서 결정된다고 하였는데 경조직의 구조, 치열, 구강주위연조직이 상호관련성을 가지면서 변화한다고 하였다. Burstone¹⁰⁾, Hershey¹⁸⁾ 등은 상하순이 독자적인 관계를 갖는다고 하였다. 저자의 연구결과에서는 상순의 성장은 남자에서는 치열, 치조골의 최대신장율의 방향과는 비교적 관계가 있었고 여자는 수직에 가까운 방향을 보였다. Burstone이나 Hershey 등의 연구결과와는 반대로 하순의 변화는 치성, 치조골의 성장방향과 같았다. 또한 이부를 나타내는 요소 16 요소 23은 상호 관련성이 있는 성장방향을 나타내면서 전하방의 성장을 하였다. 이와 같은 관계는 유한요소법을 경조직과 연조직관계에 대한 분석을 시행하여 발전시켜 연구대상으로 삼아야할 문제라고 생각된다.

이상의 유한요소법 분석은 종래의 계측분석법과 달리 국소적성장을 중요시 하였으며 세부적인 분석이 이루어져 방법상의 오차를 줄이려 했다. 또한 각요소의 시간에 따른 변화를 일정한 방법으로 표현하였으며 좌표계에 상관없는 tensor의 개념을 이용했다. 이 방법은 요소내의 모든 점(point)들의 양태가 동인시하게 취급되어지는데 실제로는 조직학적 구조나 성장과정이 각기 다르므로 이러한 결점을 극복하기 위해서는 절점의 수를 판독할 수 있는 범위내에서 늘리고 같은 분석방법을 적용하여야 한다. 그러나 보다 세밀한 요소분할을 시행할 경우 계측점의 정확성과 해석상의 난이점이 나타나게 된다. 이러한 단점이 성장분석에 유한요소법을 응용하는 것의 한계점이 될수도 있으나 tensor의 개념을 분석에 응용한것은 타당하다고 하겠다. 앞으로의 연구는 두개안면골 실체를 3차원에서 분석하며, 본 연구에서 구한 회귀방정식을 바탕으로 성장예측의 연구를 시행할 수 있겠다. 즉, 연령을 독립변수로 하고 각 strain값을 종속변수로 하는 방정식에서 유한요소법의 역산(feedback)에 의하여 각 개인의 연령에 맞는 좌표점을 구할 수 있으며 이 좌표에 따라 해당연령의 성장형태를 예측할 수가 있겠다. 이는 종래의 Ricketts의 V.T.O(Visual Treatment Object)보다 객관성있는 방법이라 사료되며 각 개인의 성

장양상이나 교정환자의 임상적평가에 응용될 수 있으리라 생각된다.

V. 결 론

본 연구는 연세대학교 치과대학 교정학교실에 소장된 6세부터 12세까지 아동(남자 15명, 여자 15명)의 누년적 두부방사선 계측사진 210 매로 악안면 성장을 유한요소법적으로 연구하기 위하여 두개안면골 및 연조직을 총 23개의 2차원 삼각형요소로 분할하여 누년적으로 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두개안면골 및 연조직을 유한요소법적으로 분석하여 국소적 성장에 대한 독립적인 평가를 할 수가 있었다.
2. 두개안면골 및 연조직을 유한요소법적으로 분석하여 산출된 각 strain 값은 연령을 독립변수로 하는 회귀방정식을 유도할 수 있었으며 이는 성장예측에 이용될 수가 있겠다.
3. 전두개저의 성장은 다른 안면골의 성장과는 다른 양상을 보였다.
4. 후두개저의 성장은 인두상부, 중안면부, 상악골, 하악골후방 성장에 영향을 미쳤다.
5. 상악골은 수평성장량 보다는 수직성장량이 많았다.
6. 하악골 각 요소의 성장은 하악지부, 하악체, 치조골부분에서 각기 다른 성장양상을 보였다.
7. 경조직과 연조직관계에 대한 유한요소법적 해석은 변이가 많았다.

참 고 문 헌

1. Argyris, J.H.: Energy theorems and structural analysis, *Aircraft Eng.*, 26:383, 1956.
2. Bambha, J.K.: Longitudinal cephalometric roentgenographic study of face and cranium in relation to body height, *J.A.D.A.*, 63:776-779, 1961.
3. Björk, A.: Cranial base developments, *Am. J. Orthod.*, 41:196-225, 1955.

4. _____: Variations in the growth pattern of human mandible: Longitudinal radiographic study by the implant method., *J. Dent. Res.*, 42:400-411, 1963.
5. Bookstein, F.L.: Geometry of craniofacial growth invariants, *Am. J. Orthod.*, 83:221-234, 1983.
6. _____: On the cephalometrics of skeletal change, *Am. J. Orthod.*, 82:177-198, 1982.
7. Broadbent, B.H.: A new X-ray technique and its application to orthodontia, *Angle Orthod.*, 1:45-66, 1931.
8. Brodie, A.G.: On the growth pattern of the human head from third month to the 8th year of life, *Am. J. Anat.*, 68:209-261, 1941.
9. _____: Facial pattern: A theme on variation, *Angle Orthod.*, 16:75, 1946.
10. Burstone, C.T.: Lip posture and its significance in the treatment planning, *Am. J. Orthod.*, 53:262-284, 1967.
11. Chaconas, S.J., Caputo, A.A., and Davis, J.C.: The effect of orthopedic forces on the craniofacial complex utilizing cervical head gear appliances, *Am. J. Orthod.*, 69:527-539, 1976.
12. Cheverud, L., and et al.: The measurement of form and variation in form: An application of three-dimensional quantitative morphology by finite element methods, *Am. J. Phys. Anthropol.*, 62:151-165, 1983.
13. Clough, R.W.: The finite element method in plane stress analysis, *J. Struct. Div. Asce, Proc. 2nd Conf. Electronic Computation*: 345, 1960.
14. Coben, S.E.: Growth and Class II treatment, *Am. J. Orthod.*, 52: 5-26, 1966.
15. Enlow, D.H., and Hunter, W.S.: The growth

- of the face in relation to the cranial base, *Trans. Europ. Soc. Orth.*, 321-335, 1968.
16. Farah, J.W., Hood, J.A.A., and Craig, R.G.: Effects of cement bases on the stresses in amalgam restorations, *J. Dent. Res.*, 54: 10-15, 1975.
 17. Hakim, N.S., and King, A.I.: A three dimensional responsive analysis of a vertebra with experimental verification, *J. Biomechanics.*, 12:277-292, 1979.
 18. Hershey, H.G.: Incisor tooth retraction and subsequent profile change in postadolescent female patients, *Am. J. Orthod.*, 61: 45-54, 1972.
 19. Heubner, K.H.: The finite element method for engineering, John Wiley and Sons., 1957.
 20. Inoue, K., and et al.: A study of the application of the finite element method to cranial growth analysis, *J. Jap. Orthod. Soc.*, 46:345-359, 1987.
 21. Koski, K.: Some aspects of growth of the cranial base and the upper face, *Odont. Trans.*, 68:344-358, 1960.
 22. Kragt, G., and Duterloo, H.S.: The initial effects of orthodontic forces: a study of alterations in the craniofacial complex of a macerated skull owing to high-pull headgear traction, *Am. J. Orthod.*, 81:57-64, 1982.
 23. Merow, W.W.: A cephalometric statistical appraisal of dentofacial growth, *Angle Orthod.*, 32:205-213, 1962.
 24. Moon, Y.: A dynamic study on the tooth movement by finite element method, *J. Jap. Orthod. Soc.*, 45:411-430, 1986.
 25. Moss, M.L., and Salentijn, L.: The primary role of functional matrices in facial growth, *Am. J. Orthod.*, 55:571, 1969.
 26. Moss, M.L., and et al.: Space time and space-time in craniofacial growth, *Am. J. Orthod.*, 77:591-612, 1980.
 27. _____: Statistical testing of an allometric centered model of craniofacial growth, *Am. J. Orthod.*, 83:5-18, 1983.
 28. _____: An allometric network model of craniofacial growth, *Am. J. Orthod.*, 85:316-332, 1984.
 29. _____: Finite element method modeling of craniofacial growth, *Am. J. Orthod.*, 87:453-472, 1985.
 30. Motoyoshi, M., and et al.: A study on the application of the finite element method to craniofacial growth analysis, *J. Jap. Orthod. Soc.*, 46:360-369, 1987.
 31. Moyers, R.E., and Bookstein, F.L.: The inappropriateness of conventional cephalometrics, *Am. J. Orthod.*, 75:599-617, 1979.
 32. Nanda, R.S.: The rate of growth of several facial components measured from serial cephalometric roentgenograms, *Am. J. Orthod.*, 41:658-673, 1955.
 33. Proffit, W.R., and et al.: Contemporary orthodontics, The C.V. Mosby company, 1986.
 34. Rain, M.D., and Nanda, R.: Soft tissue changes associated with maxillary incisor retraction, *Am. J. Orthod.*, 82:481-488, 1982.
 35. Ricketts, R.M.: The influence of orthodontic treatment on facial growth and development, *Angle Orthod.*, 30:103-131, 1960.
 36. _____: Bioprogressive therapy, Rocky Mountain Company., 8-14, 1983.]
 37. Ross, R.B., and Johnson, M.C.: Cleft lip and palate, Williams and Wilkins Co., 99-113, 1972.
 38. Skalak, R.; Growth in finite displacement field. In Carlson D., Shield, R.T. (editors): IUTAM symposium on finite elements,

- Den the Hoge Martinus Nijhoff Publisher., 347-355, 1981. (cited from Moss, M.L., and et al.; Finite element method modeling of craniofacial growth, Am. J. Orthod., 87:453-472, 1985).
39. Subtelny, J.D.: A longitudinal study of soft tissue facial structures and their profile characteristics, defined in relation to underlying skeletal structure, Am. J. Ort nod., 45:481-507, 1959.
 40. Tanne, K.: Stress induced in the periodontal tissue at the initial phase of the palication of various types of orthodontic force: the dimensional analysis by finite element, J. Oska Univ., 28:210-261, 1983.
 41. Todd, T.W.: Differential skeletal maturation in relation to sex, race variability, and disease, Child Develop., 2:49-65, 1931.
 42. Turner, M.J., and et al.: Stiffness and defection analysis of complex structure, J. Aero. Soci., 23: 805-823, 1956.
 43. Weijs, W.A., and Dejongh, H.T.; Strain in mandibular alveolar bone during mastication in the rabbit, Arch. Oral. Biol., 22: 667-675, 1977.
 44. Wright, K.W.J., and Yettram, A.L.: Finite element stress analysis of a Class I amalgam restoration subjected to setting and thermal expansion, J. Dent. Res., 57:715-723, 1978.
 45. 김영원 : 견치원심이동시의 초기변화에 관한 유한요소법적 연구, 대한치과교정학회지., 18:25-53, 1988.
 46. 김주영 : Reverse headgear 가 상악골체에 미치는 영향에 관한 유한요소법적연구, 대한치과교정학회지., 14:7-22, 1985.
 47. 김현순 : 두부고정 headgear 사용시 안면두개골의 변위에 관한 장력계측법 및 유한요소법적연구, 대한치과교정학회지., 17:185-198, 1987.
 48. 성재현 : 혼합치열기 아동에서 신장 및 체중과 두개안면부 사이의 상호관계에 관한 연구, 대한치과교정학회지., 10:81-92, 1980.
 49. 이인수 : Headgear 가 상악골에 미치는 영향에 관한 유한요소법적분석, 대한치과교정학회지., 15:211-227, 1985.
 50. 임상전, 광병만, 이주성 : 유한요소법 입문, 동명사.
 51. 조봉제 : 상악골 급속확장시 상악골의 응력분산과 변위에 대한 유한요소법적분석, 대한치과교정학회지., 14:43-54, 1985.
 52. 조호구 : 정형력에 대한 하악골내의 응력분석과 변위에 관한 유한요소법적분석, 대한치과교정학회지., 14:75-90, 1984.
 53. 하주태 : 유한요소법에 의한 cantilever bridge 의 지대치 및 지지조직의 역학적반응에 관한 연구, 대한치과보철학회지., 21:41-57, 1983.
 54. 한무현 : 유한요소법에 의한 Telescopic crown 과 지대치 및 지지조직의 역학적반응에 관한 연구, 경희치대논문집., 4:241-258, 1982.
 55. 鬼頭政勝, 伊藤博夫, 水上深 : 咬合力の齒槽窩壁つの分布に關する三次元齒根膜モデルによる研究, 日本補綴齒科學會雜誌., 19:419-425, 1975.

ABSTRACT

A STUDY ON CRANIOFACIAL GROWTH ANALYSIS OF KOREAN CHILDREN BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Seon-Gun Tahk

Department of Dental Science, Graduate School,

Yonsei University

(Directed by Prof. Young-Chel Park, D.D.S., M.S.D., Ph.D.)

Craniofacial complex is influenced by numerical skeletal elements. Though the analysis of growth change has been done by various analytical methods, it was dependent on any method of registration and superimposition, based on reference plane and reference point. However, the craniofacial growth is composed of a number of local growth elements. Therefore, it will be necessary to use a clinically useful method for estimating craniofacial skeletal growth independently.

The author analysed longitudinal cephalometric roentgenogram of 15 Korean males and 15 Korean females aged from 6 to 12 years by the finite element method and results were as follows:

1. The finite element method for craniofacial skeletal complex and soft tissue made it possible to analyze the independent local growth.
2. Regression equations from the value of each strain will make it possible to predict the craniofacial growth.
3. The growth of anterior cranial base was different from that of other facial bone.
4. The growth of posterior cranial base influenced the growth of upper pharyngeal region, mid-facial region, maxilla and posterior region of mandible.
5. The growth of maxillary complex was vertical rather than horizontal.
6. The growth direction of ramus, mandibular body, alveolar bone was various.
7. The relation between hard tissue and soft tissue by finite element method was variant.