상악 제1 및 제2소구치의 발치공간 폐쇄기전에 대한 3차원 유한요소 해석의 비교 연구

고신애[a] · 임원희[b] · 박선형[c] · 전윤식[d]

교정 치료에서 발치공간 폐쇄는 치열을 이루는 모든 치아의 연속적인 이동으로 이루어지므로 그 기전은 복잡하다. 특히 전치부 치축을 적절히 유지하면서 구치부 고정원을 조절하는 과정은 정교함을 요하기 때문에 입체적 분석을 통한 치아이동 양상에 대한 이해가 필요하다. 지금까지의 유한요소 분석은 초기 응력분포를 관찰하여 치아 이동 양상을 예측해 보는데 그쳤지만 이러한 양상만으로 정확한 치아이동 결과를 추정하는 데에는 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 3차원 유한요소 모델을 이용하여 상악 제1소구치 및 제2소구치 발치공간 폐쇄 시 전치부와 구치부의 입체적인 이동 양상을 단계별로 비교하여 그 기전을 규명하고자 하였다. 자연치의 크기 및 형태를 갖는 상악 치아들과 브라켓, 교정용 호선 및 치조골부를 3차원 레이저 스캐너로 스캐닝한 후 사면체 요소의 유한요소 모델을 제작하였다. 0.017" × 0.025" 스테인레스 강 호선에 제작된 bull 루프 후방에 10°의 gable bend를 부여하고 한 번에 2 mm씩 12회 활성화시켜 발치공간을 폐쇄시켰다. 그 결과 제1소구치를 발치한 경우 제2소구치 발치에 비해 전치부의 후방 이동량이 많았으며 구치부의 전방 이동량은 더 적게 나타났다. 전치부에서는 제1, 2소구치 발치 모두 비슷한 미약한 정출을 동반하였고 치축의 변화량은 제1소구치 발치에서 더 크게 나타났다. 또한 제2소구치 발치 시 고정원의 협측 이동량이 더 크게 나타났다. (**대치교정지** 2007;37(6):407-20)

주요 단어: 유한요소 분석, 소구치 발치, 발치공간 폐쇄, 회전이동

서론

교정치료에 있어서 심미적인 안모와 기능적인 교합 및 장기적인 안정성을 얻기 위해서 적절한 발치가 요구되어 왔으며, 제1, 2소구치가 주로 발치 되어 왔다.[1-4] 제1, 2소구치 발치 후 전치의 후방견인 양상과 구치의 전방이동 양상에 대해 많은 선학들의 연구가 있었다.[5-8] Castro[5]는 제2소구치를 발치한 경우 하악 전치의 각도가 유지되고 주로 구치의 전방이동으로 발치공간이 폐쇄된다고 하였다. Williams와 Hosila[6]는 상악 제1소구치와 하악 제1소구치의 발치 시 전치부의 후방 이동량은 발치와의 약 66.5%를 차지하며, 상악 제1소구치와 하악 제2소구치를 발치한 경우의 전치부 이동량은 단지 56.3%에 그친다고 하였다. Creekmore[7]의 연구에 의하면 제1소구치 발치 시 발치공간의 ⅓은 구치의 전방 이동으로, 나머지 ⅔의 공간은 치아 밀집의 해소와 전치의 후방이동에 사용된다고 하였으며, 제2소구치를 발치한 경우 전치와 구치의 발치공간으로의 이동량은 동일하다고 하였다. Ong와 Woods[8]의 연구에서는 상악 제2소구치 발치 시 평균 구치간 폭경이 더 많이 감소하였으며 전치부 후방 이동량은 제1소구치를 발치한 경우가 더 크다고 하였다. 또한 어떠한 소구치를 발치하더라도 전후방적인 악궁의 크기 감소는 비슷하게 나타났기 때문에 전치의 후방 견인량 또는 구치의 전방 이동량을 조절하기 위해 특별한 치아만을 발치하여야만 한다고 확실하게 말할 수 없다고 하였고, 치아이동에 대한 개인별 편차가 크기 때문에 치료계획 수립 시 이 점을 고려해야만 한다고 하였다.

발치공간 폐쇄 시의 치아이동 양상의 연구에 있어서 기존에는 석고모형[9]이나 측모 두부계측방사선사

[a]개업의, [b]조교수, 서울대학교 치과대학 교정학교실.
[c]조교수, [d]교수 이화여자대학교 의학전문대학원 치과학교실 교정과.
교신저자: 전윤식.
서울시 양천구 목동 911-1 이화여자대학교 의과대학 치과학교실 교정과. 02-2650-5112; e-mail, yschun@ewha.ac.kr.
원고접수일: 2007년 6월 7일 / 원고최종수정일: 2007년 11월 24일 / 원고채택일: 2007년 11월 26일.

진[7,10]을 이용하였으나, 두부계측방사선 사진의 중첩만으로는 교합평면상의 치아이동을 정확히 알 수 없으며, 석고모형에 의한 occlusogram 역시 촬영 및 중첩의 오류를 피할 수 없었다.[11] 따라서 공학적인 측면에서 교정력에 의한 치아의 이동을 치아와 그 주위 지지조직에 대한 구조물의 해석으로 볼 수 있다면, 하중(force)에 반응하는 구조물(치아와 그 주위조직)의 해석에 대한 방법으로 calorific machine[12](치아이동상태 측정용 더미 장치)이나 유한요소법(finite element analysis)을 이용할 수 있다.[13]

최근 3차원적 치아이동 양상에 대한 관심이 커짐에 따라 김 등[14]은 calorific machine을 이용하여 상악 소구치 발치 후 공간폐쇄 양상을 3차원적으로 분석하였고, 정 등[11]은 3차원 영상 소프트웨어를 이용하여 발치공간 폐쇄 후 상악 구치의 회전양상을 보고하였다. 또한 Kojima 등[15]은 3차원 유한요소법을 이용하여 상악 소구치 발치 후 활주역학(sliding mechanics)을 이용한 견치 견인을 하였을 때의 양상을 보고하였다.

유한요소법은 복잡하고 불규칙한 물체에서의 응력분석에 특히 유용하고 어떤 부위에서도 3차원 영상을 얻을 수 있으며 변위 전후의 상태를 동시에 비교하여 볼 수 있다는 장점이 있다. 특히 결과를 명암처리, 단면처리, 색상에 의한 표현, 활동영상 처리 등 다양한 가시적 기법으로 명확하게 나타낼 수 있어 치아이동의 가상화와 교정역학의 최적화의 수단으로 치과영역에서 효과적으로 사용되어 왔다. 유한요소 해석은 일반적인 공학 해석과 마찬가지로 모델링(modeling), 해석(analysis), 평가(evaluation)의 과정을 거치게 되며, 다른 실험 방법들 즉 광탄성 분석, strain gauge 분석, laser holographic 분석 등과는 달리 모델 내부의 특정 부위를 다양한 단면과 각도에서 살펴볼 수 있다는 장점이 있다.[16,17]

그러나 기존의 유한요소[18-21] 분석에서 초기 응력이 아닌 치아이동의 전체적인 면을 단계적으로 보는 연구는 미비했다. 또한 발치공간 폐쇄형태를 분석하기 위한 일련의 연구들이 측모 두부계측방사선사진을 이용한 2차원적 분석으로 이루어져서 구치부 회전에 대한 평가가 어려웠고, 구치부 회전 발생 시 전방 이동량의 평가는 한계가 있었다. Calorific machine을 이용하여 3차원적 평가[14]를 하거나 3차원 영상을 이용한 회전양상의 평가를 하는 연구[11]는 있었으나, 발치 공간 폐쇄 시 상악 구치부 회전양상에 대한 3차원적 평가를 시행한 연구는 거의 보고된 바 없었다.

이에 본 연구에서는 상악 제1, 2소구치를 발치한 치열궁의 3차원 유한요소 모델을 제작한 후 bull 루프에 의한 발치공간 폐쇄 시 단계별 치아이동 양상을 비교 및 평가하고자 하였다.

연구방법

유한요소모델(FEM, Finite Element Analysis Model)의 제작

상악 좌우의 중절치에서 제2대구치까지 각 치아와 그 주위 조직을 컴퓨터상에서 10절점의 4면체로 분할하여 3차원 유한요소 모델을 구성하였다. 인공치아의 크기와 형태는 Wheeler[22]의 수치를 참고로 하였고 치아 모델은 인공치아모형(Nissin, Kyoto, Japan)을 3D laser scanner[23] (Orapix KCI, Seoul, Korea)로 스캔하여 제작하였다. 레이저 스캔으로 얻어진 각 치아 표면은 0.2-0.3 mm 간격의 3차원 좌표와 이들로 구성된 평면으로 구성되었다. 그러나 이는 비교적 규칙적인 크기와 형태를 요하는 유한요소 모델에 직접 사용하기는 적절하지 않으므로 스캔된 데이터를 각각 와이어프레임 모델(wire frame model)과 곡면 모델(surface model)로 구성하였다. 와이어프레임 및 곡면 모델의 구성에는 3차원 기계 설계 소프트웨어인 Solid Works (3D CAD, SolidWorks, MA, USA)를 사용하였다.

유한요소모델 치아의 3차원적인 치축 및 치열궁 형태는 한국성인정상교합자의 석고모형계측연구를 참고하였다.[24] 연구 모델을 제작하기 위하여 상악 곡면 모델의 상악 전치를 모델 기저부에 대해 110°로 변형시킨 후 상악 제1소구치 또는 제2소구치를 제거하고 요소분할 기법을 통해 유한요소 모델을 제작하였다. 유한요소 분할은 전용 소프트웨어인 Hyper Mesh (finite element mesh software, Altair, MI, USA)를 사용했다.

상악 유한요소 모델의 크기는 구치간 폭경(intermolar width) 52.7 mm, 견치간 폭경(intercanine width) 40.2 mm, 악궁의 길이(arch length) 40.2 mm이었다. 교합면상에서 제2대구치의 원심면을 연결한 선을 X축, 치열의 중심시상선(midsagittal line)을 Y축, 그리고 상하 방향을 Z축으로 설정하였다 (원심방향: +X, 순측 방향: +Y, 치근 방향: +Z)(Fig 1). 분석에 적용된 유한요소 모델의 치아 주변은 구강의

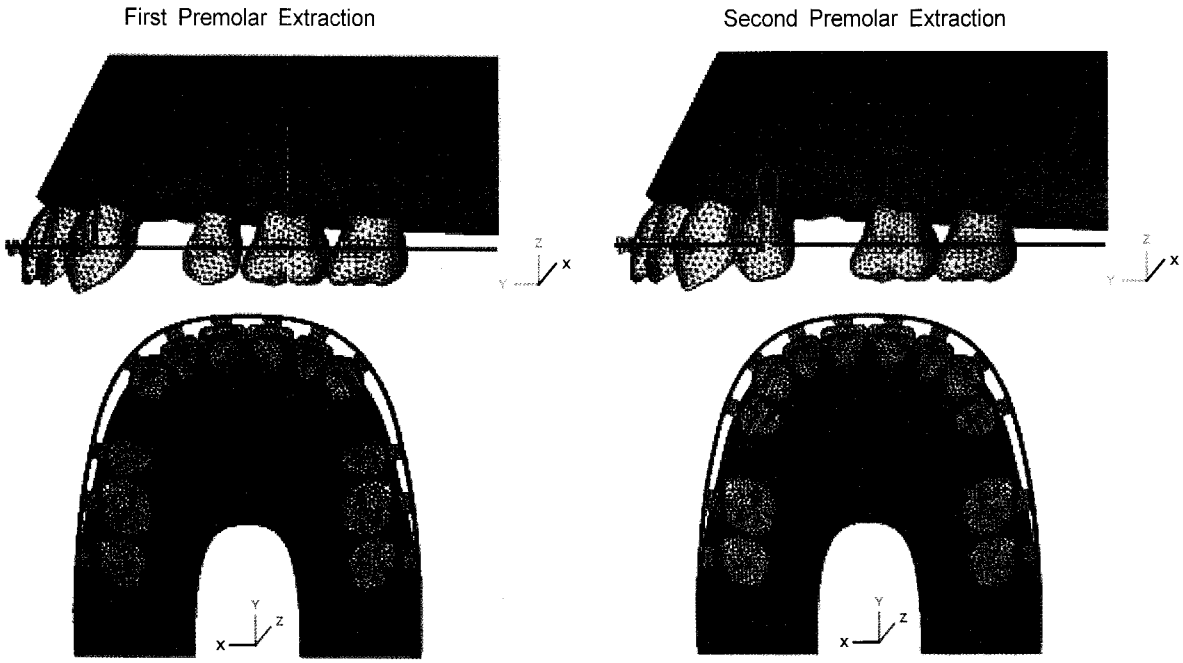

Fig 1. Standardization in X, Y, Z axis and 3D FEM with bull looped archwire activated by 2 mm in length. X-axis is the line connecting the distal surface of the second molars, Y-axis is the mid-sagittal line of the dental arch on the occlusal plane, and Z-axis is the perpendicular line to the occlusal plane. *Left*, First premolar extraction model; *right*, second premolar extraction model.

Table 1. Mechanical properties of materials for FEM

	Young's Modulus (g/mm^2)	Poisson's Ratio
Tooth	2.6×10^6	0.30
Resin	2.6×10^3	0.40
Paraffin (solid zone)	5.0×10	0.01
Paraffin (melted zone)	1.0×10	0.01
Stainless steel	1.9×10^7	0.30

물리적 상태를 채택하였다. 상악골의 상부가 두개골에 부착되어 있다고 가정하여 상악골 모형의 상부 변위량은 "0"으로 설정하였으며, 컴퓨터 프로그램을 이용하여 구강 형태와 치아의 3D 배열을 재현하였다.

본 연구에서는 유한요소 모델의 치주인대와 치조골이 등방 등질의 선형 탄성재라고 가정하였으며, 초기 응력 변화를 극대화하기 위하여 치조골의 물리적 성질은 파라핀(paraffin)과 동일하다고 가정하였다. 또한 치아주변의 치조골의 물리적 성질은 연화된 파라핀 상태의 물질 상수를 사용하였으며, 연화된 파라핀의 물질 상수 값은 calorific machine[12]의 실험 결과에서 인용하였다. 본 연구에서 사용한 치아와 파라핀, 선재의 물리적 특성은 Table 1[25]에 기술하였다.

실험조건

본 연구의 유한요소 모델의 치아 순면에 각각 고정식 교정 장치를 위치시켰다. 브라켓은 0.018" Mini

Table 2. The number of nodes and elements for FEM

	1st premolar extraction		2nd premolar extraction	
	Nodes	Elements	Nodes	Elements
Artificial bone	21,300	90,060	21,300	90,060
Artificial tooth	20,044	79,606	20,595	79,706
Bracket	872	3,598	786	3,154
Wire	554	553	432	431
Total	42,216	173,817	43,113	173,351

Diamond Roth prescription (Ormco, Orange, Glendora, CA, USA)을 요소로 제작하였고, 호선은 bull 루프를 가진 0.017" × 0.025" 스테인레스 강 호선을 3차원 beam 요소로 제작하였다. Bull 루프는 견치와 제1소구치 브라켓 직후방에 각각 위치시켰으며, 10°의 gable bend[14,26]를 부여하였다.

본 연구에서 활성화는 bull 루프의 2 mm 이개로 정의하고 활성화에 의한 치아와 치조골의 이동양상을 형상화하였다. 활성화에 의하여 전치부의 치축이 조절된 경사이동으로 구치의 치축과 평행을 이루게 되면 그 다음 단계에서는 bull 루프의 2 mm 후방견인과 gable bend로 활성화하여 치아와 치조골의 이동양상을 형상화하였다. 각 활성화 단계마다 호선의 형상을 재생성하여 전 단계에서 누적되는 호선의 변형으로 인한 오차를 최소화하였다. 유한요소 모델상에서의 활성화는 제2대구치의 원심면의 호선이 약 2 mm 미리 움직인 것으로 형상화하였으며, 이것은 임상에서의 cinch-back 또는 tie-back과 유사한 효과를 가진다. 활성화는 발치공간이 폐쇄될 때까지 반복 시행하였다.

호선 및 브라켓은 전후방, 수직적으로는 같은 좌표로 일치시키고 호선방향으로 미끄러짐을 가능하게 하였고 이를 표현하기 위하여 절점연성(Node-coupling)기법을 적용하였다. 이때 마찰계수에 의한 영향은 무시하였다.

유한요소 해석과 결과 분석 방법

활성화에 따른 치아의 이동양상을 비교하기 위하여 시상면에서는 각 치아의 치관첨(crown tip)과 치근단(root tip)에 위치한 절점을, 교합면상에서 악궁형태의 변화를 보기위해 치아 근심점과 원심점에 위치하는 절점의 변위량을 25,000배로 확대하여 그래프를 작성하였다.

유한요소 모델상의 치아 이동량은 각 치아의 치근단(root tip), 치관첨(crown tip), 근심점(mesial), 원심점(distal) 위치의 변위량으로 해석하였다. 전치에서는 치근단, 구치부에서는 저항중심과 가장 가까운 구개 치근을 치근단으로 정하였으며, 치관첨은 전치부에서는 절단면(crown tip), 구치부에서는 교합면의 중심와(central pit)로 정했다. 근심점은 치면의 근심면의 최대 풍융부로 하였으며, 원심점은 원심면의 최대 풍융부로 하였다. 이동 양상의 기준을 설정하기 위하여 각 점에 x, y, z축에 대한 값을 부여하였다. x축의 양/음(+/-)값은 악궁중심선(midline)에서의 순측/내측이동을 나타낸다. y축의 양/음 (+/-)값은 전/후방 이동을 나타낸다. 수직이동은 z축으로 설명하였고, 양/음(+/-)값은 치아의 함입/정출을 의미한다. 치아의 회전양상은 시계방향은 양(+)의 값으로, 반시계방향은 음(-)의 값으로 정의했다. Contour plot[27] 상에서 청색은 전치부의 견인을 나타내고, 적색은 구치부의 고정원 상실을 의미한다.

본 연구에서 사용한 유한요소 모델의 총 절점의 수와 요소의 수는 Table 2에 기술하였다. 유한요소모델을 분석하기 위해서 Ansys version 11 (ANSYS, Canonsburg, PA, USA)과 Pentium IV 3.0 GHz 컴퓨터를 사용하였다.

연구성적

제1소구치 발치 시 네번째 활성(4th activation)후 중절치, 측절치 및 견치가 2.1 mm, 2.3 mm, 2.9 mm 후방으로 이동하였고 0.9°, 0.9°, 0.9°의 조절성 경사이동을 보였다. 이때 제2소구치, 제1대구치 및 제2대구치는 1.5°, 1.1°, 4.8°의 근심회전을 보였다. 마지막 활성(12th activation) 후 중절치, 측절치, 견치의 후방

Table 3. Comparison of tooth movement after first premolar extraction

Tooth	Position	Displacement									Rotation					
		4th activation			8th activation			12th activation			4th activation		8th activation		12th activation	
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	Sagittal	Occlusal	Sagittal	Occlusal	Sagittal	Occlusal
Central incisor	root tip	0.1	-0.7	0.7	0.3	-1.1	1.1	0.5	-2.0	1.3	0.9	-0.2	-7.4	0.8	-9.6	0.6
	crown tip	-0.1	-2.1	-0.2	-0.1	-3.9	-0.3	-0.1	-5.7	-0.3						
	mesial	0.0	-2.1	-0.1	0.0	-3.8	0.0	0.0	-5.5	0.0						
	distal	-0.1	-2.1	-0.2	-0.1	-3.9	-0.3	-0.1	-5.6	-0.3						
Lateral incisor	root tip	0.0	-0.7	0.6	0.0	-1.2	1.0	0.0	-1.9	1.3	0.9	-0.3	-8.0	0.2	-10.6	0.2
	crown tip	-0.1	-2.3	-0.2	-0.1	-4.3	-0.3	-0.1	-6.1	-0.3						
	mesial	-0.1	-2.1	-0.2	-0.1	-3.9	-0.3	-0.1	-5.9	-0.3						
	distal	-0.1	-2.1	-0.1	-0.1	-3.9	0.0	-0.1	-5.6	0.0						
Canine	root tip	0.0	-1.0	0.6	0.0	-2.0	0.9	0.0	-3.4	1.0	0.9	-0.8	-7.3	-0.3	-8.4	-0.3
	crown tip	0.2	-2.9	-0.2	0.3	-5.0	-0.3	0.4	-6.8	-0.3						
	mesial	0.2	-2.5	-0.4	0.2	-4.4	-0.5	0.3	-6.1	-0.6						
	distal	0.2	-2.5	0.2	0.2	-4.4	0.4	0.3	-6.0	0.5						
2nd premolar	root tip	-0.1	0.2	-0.1	-0.4	0.5	-0.2	-0.9	1.1	-0.3	1.0	-1.0	1.3	-3.1	2.0	-6.7
	crown tip	-1.0	0.5	-0.2	-1.8	1.0	-0.3	-2.8	1.8	-0.3						
	mesial	-1.0	0.4	-0.1	-1.8	0.8	-0.1	-3.0	1.4	0.0						
	distal	-0.8	0.4	-0.3	-1.4	0.9	-0.4	-2.1	1.6	-0.6						
1st molar	root tip	-0.5	0.4	-0.3	-0.9	0.8	-0.4	-1.4	1.5	-0.4	1.0	-1.0	-0.5	-2.7	-1.0	-5.0
	crown tip	-0.7	0.3	-0.3	-1.2	0.7	-0.5	-1.7	1.3	-0.4						
	mesial	-0.8	0.4	-0.3	-1.4	0.8	-0.3	-2.2	1.4	-0.6						
	distal	-0.6	0.3	-0.2	-0.9	0.6	-0.3	-1.2	1.2	-0.3						
2nd molar	root tip	0.1	0.3	-0.2	0.3	0.8	-0.2	0.8	1.5	-0.2	1.0	-1.0	-0.5	-9.0	-0.5	-11.7
	crown tip	-0.1	0.3	-0.2	-0.1	0.6	-0.2	-0.2	1.3	-0.2						
	mesial	-0.5	0.3	-0.2	-0.7	0.6	-0.3	1.0	1.2	-0.3						
	distal	0.3	0.4	-0.2	0.8	0.8	-0.2	0.9	1.7	-0.2						

Mesial, the convex point of the mesial surface of tooth; distal, the convex point of the distal surface of tooth; +x, distal/buccal movement; -x, mesial/palatal movement; +y, forward movement; -y, backward movement; +z, intrusion; -z, extrusion; +value in rotation, clockwise (mesial-out) rotation; -value in rotation, counterclockwise (mesial-in) rotation.

이동량은 5.7 mm, 6.1 mm, 6.8 mm인데 비해 제2소구치, 제1, 2대구치의 전방이동은 1.8 mm, 1.3 mm, 1.3 mm이었다. 중절치의 치관이 5.7 mm 후방이동 시 치근첨은 2.0 mm 후방이동 되어 9.6°의 조절성 경사이동을 보였다. 제2소구치, 제1, 2대구치는 6.7°, 5.0°, 11.7°의 협측 근심경사를 보여주었다. 특히 제2대구치 치관의 근심점은 1.2 mm 근심으로 1.0 mm 구개측으로 이동하였고 원심점은 1.7 mm 근심으로 0.9 mm 협측으로 이동하여 교합면에서 관찰 시 협측 근심회전 이동을 보였다 (Tables 3 and 5, Figs 2 - 5).

제2소구치 발치 시 네 번째 활성(4th activation)후 중절치, 측절치, 견치 및 제1소구치가 1.2 mm, 1.2 mm, 1.5 mm, 1.5 mm로 후방이동 하였고, 4.2°, 2.9°, 2.4°, 1.4°의 조절성 경사 이동을 보였다. 이때 제1, 2

Table 4. Comparison of tooth movement after second premolar extraction

Tooth	Position	Displacement									Rotation					
		4th activation			8th activation			12th activation			4th activation		8th activation		12th activation	
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	Sagittal	Occlusal	Sagittal	occlusal	Sagittal	Occlusal
Central incisor	root tip	0.1	-0.1	1.1	0.5	-0.4	0.6	0.5	-0.8	1.7	-4.2	1.6	-6.6	2.3	-7.8	2.2
	crown tip	-0.1	-1.2	-0.4	-0.1	-2.3	-0.6	-0.1	-3.2	-0.7						
	mesial	0.0	-0.8	-0.2	0.0	-1.7	-0.3	0.0	-2.5	-0.4						
	distal	-0.1	-1.1	-0.3	-0.1	-2.1	-0.5	-0.1	-2.9	-0.5						
Lateral incisor	root tip	0.0	-0.2	0.4	0.0	-0.5	0.8	0.0	-0.8	1.0	-2.9	0.4	-5.4	0.2	-7.1	0.1
	crown tip	0.1	-1.2	-0.4	0.1	-2.4	-0.6	0.2	-3.3	-0.7						
	mesial	0.1	-1.0	-0.4	0.1	-2.0	-0.6	0.2	-2.8	-0.7						
	distal	0.1	-1.0	-0.2	0.1	-2.0	-0.3	0.1	-2.8	-0.3						
Canine	root tip	0.0	-0.5	0.0	0.0	-1.1	-0.1	0.0	-1.6	-0.1	-2.4	0.1	-3.5	0.3	-4.4	0.3
	crown tip	0.6	-1.5	-0.4	0.9	-2.5	-0.6	1.0	-3.5	-0.7						
	mesial	0.5	-1.3	-0.5	0.8	-2.2	-0.8	0.9	-3.1	-1.0						
	distal	0.5	-1.3	-0.1	0.7	-2.2	-0.2	0.8	-3.1	-0.2						
2nd premolar	root tip	-0.2	-1.0	-0.4	-0.6	-2.1	-0.8	-1.2	-3.1	-0.9	-1.4	0.7	-0.9	0.1	-0.9	2.5
	crown tip	0.5	-1.5	-0.4	1.0	-2.4	-0.6	1.3	-3.5	-0.5						
	mesial	0.5	-1.4	-0.5	0.8	-2.4	-0.7	1.0	-3.4	-0.6						
	distal	0.4	-1.4	-0.3	0.7	-2.4	-0.5	0.7	-3.7	-0.7						
1st molar	root tip	-0.7	0.8	-0.3	-1.1	2.0	-0.4	-1.6	3.7	-0.4	1.5	-1.4	1.8	-3.5	1.9	-4.5
	crown tip	-0.1	1.1	-0.3	-0.2	2.4	-0.5	-0.4	4.1	-0.5						
	mesial	-0.3	1.2	-0.1	-0.6	2.5	-0.2	-0.9	4.2	-0.2						
	distal	0.0	1.1	-0.5	0.1	2.3	-0.8	-0.1	4.0	-0.8						
2nd molar	root tip	0.1	0.7	-0.5	0.2	1.8	-0.8	0.8	3.3	-0.9	1.7	-3.6	2.7	-5.9	3.5	-8.5
	crown tip	0.3	1.2	-0.5	0.7	2.5	-0.7	0.8	4.2	-0.8						
	mesial	0.0	1.1	-0.6	0.1	2.3	-0.6	0.0	4.0	-0.6						
	distal	0.6	1.1	-0.6	1.1	2.4	-0.9	1.5	4.2	-1.0						

Mesial, the convex point of the mesial surface of tooth; distal, the convex point of the distal surface of tooth; +x, distal/buccal movement; -x, mesial/palatal movement; +y, forward movement; -y, backward movement; +z, intrusion; -z, extrusion; +value in rotation, clockwise(mesial-out) rotation; -value in rotation, counterclockwise(mesial-in) rotation.

대구치가 1.1 mm, 1.2 mm 전방이동 하였고, 특히 교합면상에서 제2대구치가 3.6° 협측 근심회전을 나타냈다. 마지막 재활성(12th activation) 후 중절치, 측절치, 견치 및 제1소구치는 각각 3.2 mm, 3.3 mm 3.5 mm, 3.5 mm씩 후방이동 하였고, 7.8°, 7.1°, 4.4°, 0.9°의 조절성 경사이동을 보였다. 제1, 2대구치는 4.1 mm, 4.2 mm 전방이동을 하였고, 4.3°, 8.5°의 협측 근심회전 이동을 보였다 (Tables 4 and 5, Figs 2 - 5).

시상면에서 치아이동 양상의 비교 (Tables 3 - 5, Figs 2 and 3)

중절치, 측절치, 견치의 후방 이동량은 제1소구치

Table 5. Comparison of tooth movement after first and second premolar extractions

Tooth	Position	Displacement						Rotation			
		1st premolar ext			2nd premolar ext			1st premolar ext		2nd premolar ext	
		x	y	z	x	y	z	Sagittal	Occlusal	Sagittal	Occlusal
Central incisor	root tip	0.5	-2.0	1.3	0.5	-0.8	1.7	-9.6	0.6	-7.8	2.2
	crown tip	-0.1	-5.7	-0.3	-0.1	-3.2	-0.7				
	mesial	0.0	-5.5	0.0	0.0	-2.5	-0.4				
	distal	-0.1	-5.6	-0.3	-0.1	-2.9	-0.5				
Lateral incisor	root tip	0.0	-1.9	1.3	0.0	-0.8	1.0	-10.6	0.2	-7.1	0.1
	crown tip	-0.1	-6.1	-0.3	0.2	-3.3	-0.7				
	mesial	-0.1	-5.6	-0.3	0.2	-2.8	-0.7				
	distal	-0.1	-5.6	0.0	0.1	-2.8	-0.3				
Canine	root tip	0.0	-3.4	1.0	0.0	-1.6	-0.1	-8.4	-0.3	-4.4	0.3
	crown tip	0.4	-6.8	-0.3	1.0	-3.5	-0.7				
	mesial	0.3	-6.1	-0.6	0.9	-3.1	-1.0				
	distal	0.3	-6.0	-0.5	0.8	-3.1	-0.2				
1st or 2nd premolar	root tip	-0.9	1.1	-0.3	-1.2	-3.1	-0.9	2.0	-6.7	-0.9	2.5
	crown tip	-2.8	1.8	-0.3	1.3	-3.5	-0.5				
	mesial	-3.0	1.4	0.0	1.0	-3.4	-0.6				
	distal	-2.1	1.6	-0.6	0.7	-3.5	-0.5				
1st molar	root tip	-1.4	1.5	-0.4	-1.6	3.7	-0.4	-1.0	-5.0	1.9	-4.5
	crown tip	-1.7	1.4	-0.4	-0.4	4.1	-0.5				
	mesial	-2.2	1.3	-0.6	-0.9	4.2	-0.2				
	distal	-1.2	1.2	-0.3	-0.1	4.0	-0.8				
2nd molar	root tip	0.8	1.5	-0.2	0.2	3.3	-0.9	-0.5	-11.7	3.5	-8.5
	crown tip	0.2	1.3	-0.2	0.8	4.2	-0.8				
	mesial	-1.0	1.2	-0.3	0.0	4.0	-0.6				
	distal	0.9	1.7	-0.2	1.5	4.2	-1.0				

Mesial, the convex point of the mesial surface of tooth; distal, the convex point of the distal surface of tooth; +x, distal/buccal movement; -x mesial/palatal movement; +y, forward movement; -y, backward movement; +z, intrusion; -z, extrusion; +value in rotation, clockwise (mesial-out) rotation; -value in rotation, counterclockwise (mesial-in) rotation.

발치 시 5.7 mm, 6.1 mm, 6.8 mm이었고 제2소구치를 발치한 경우는 3.2 mm, 3.3 mm, 3.5 mm를 보였다. 또한 두 경우에서 각각 0.3 mm, 0.7 mm 전치의 미약한 정출을 보였다. 제1소구치 발치 시 제1, 2대구치는 1.3 mm의 전방이동을 보였고 제2소구치 발치에서는 4.1 mm, 4.2 mm로 많이 전방이동 되었다. 또한 두 경우에서 구치부의 미미한 정출을 보였다. 전치의 이동량이 많은 제1소구치 발치에서 치축의 변화량이 더 많이 나타났다. 제1소구치 발치의 경우에서 제1, 2대구치는 치관의 원심경사를 보였고, 제2소구치 발치에서는 반대로 제1, 2대구치 치관의 근심경사를 나타내었다.

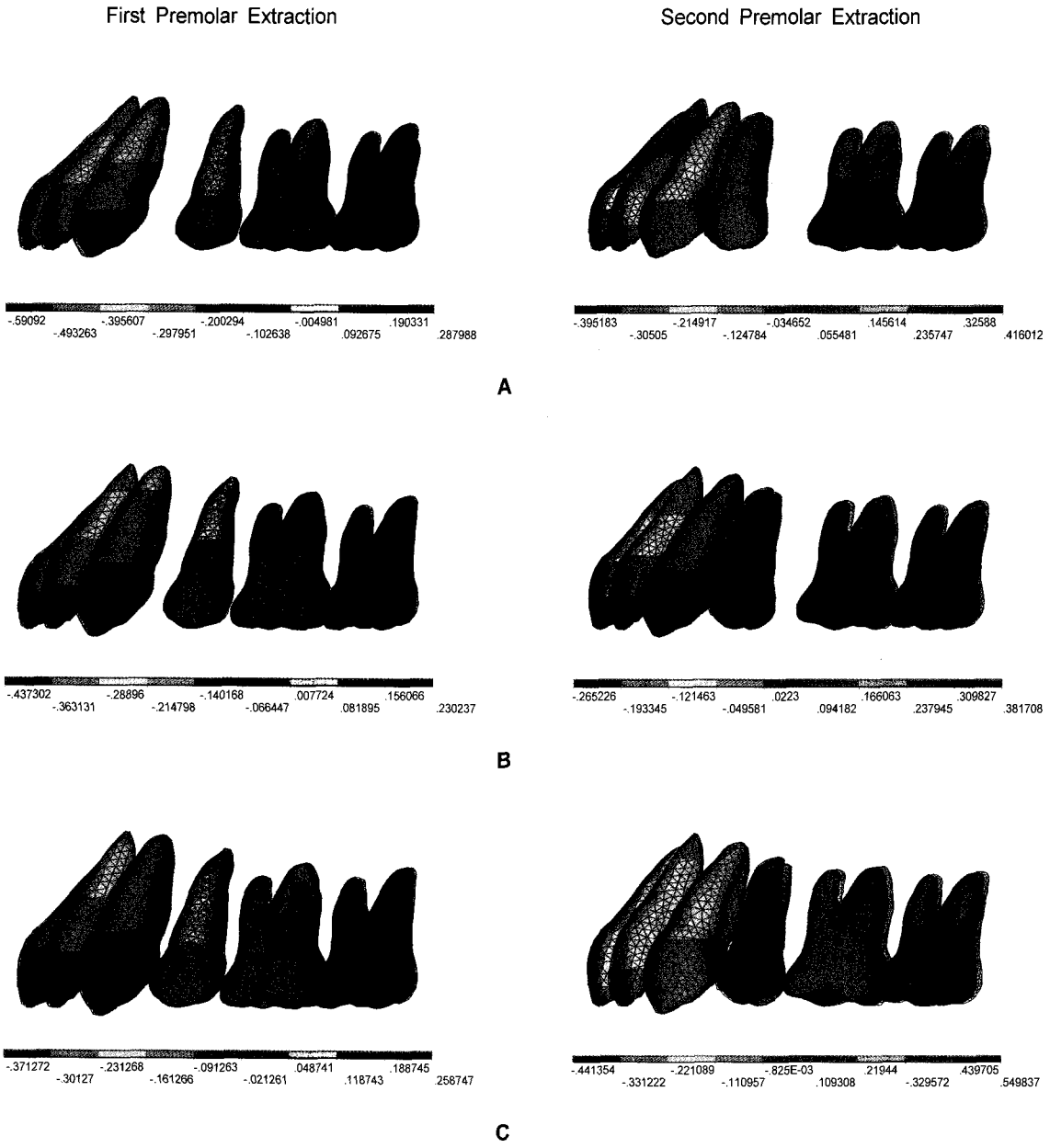

Fig 2. Tooth movement on the sagittal plane by FEM for upper 1st and 2nd premolar extraction models. The images were obtained before and after activation. Each step was equilibrated for application. +, Forward tooth movement; -, backward tooth movement. The amount of tooth movement is displayed by various colors, and color bar scales were different for each step; **A,** 4th activation; **B,** 8th activation; **C,** 12th activation.

교합면에서 치아 이동 양상의 비교 (Tables 3 - 5, Figs 4 and 5)

중절치, 측절치, 견치는 제1, 2소구치 발치에서 비슷하게 미미한 회전을 보였다. 제1, 2대구치의 회전 양상은 제1소구치 발치 시 5.0°, 11.7°의 근심회전을 보였고 제2소구치 발치 시는 4.3°, 8.5°의 근심회전을 보였다. 또한 제2소구치 발치 시 제2대구치가 근심회전과 더불어 0.8 mm 협측으로 이동되었다.

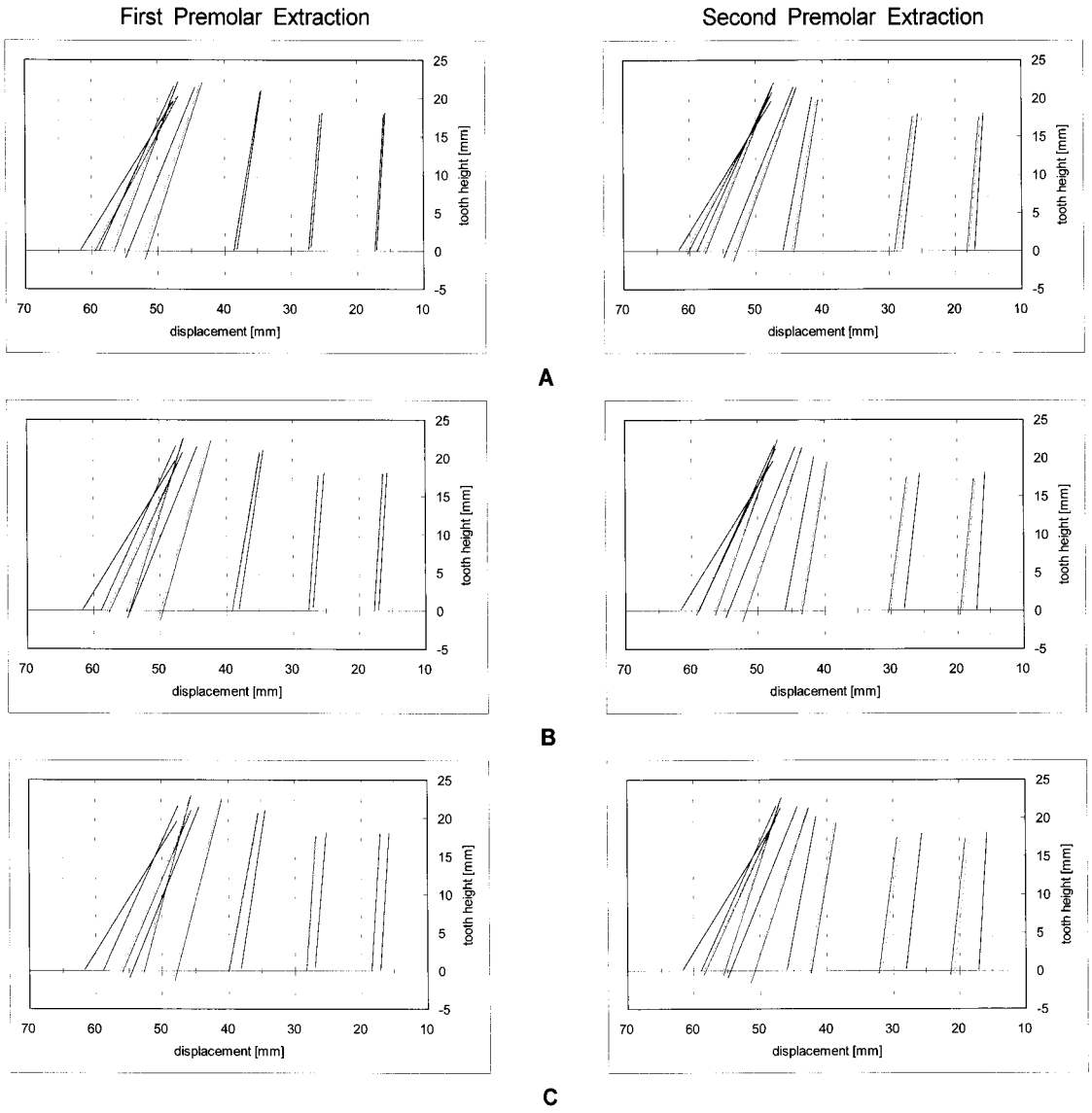

Fig 3. Changes of long axis of tooth on the sagittal plane for upper 1st and 2nd premolar extraction models. The long axis (line between root tip and crown tip) of tooth was obtained before and after activation. Green, Before activation; red, after activation; blue, initial state; **A,** 4th activation; **B,** 8th activation; **C,** 12th activation.

고찰

교정 치료에서 발치의 역사는 오래되었고 가장 흔히 발치되는 치아는 소구치였다. 소구치 발치 후의 발치공간 폐쇄는 치열을 이루는 모든 치아의 연속적인 이동으로 이루어지기 때문에 그 기전은 복잡하다. 특히 전치부 치축을 적절히 유지하면서 구치부 고정원을 조절하는 과정은 정교함을 요하기 때문에 입체적 분석을 통한 치아이동 양상에 대한 이해가 필요하다.

제1, 2소구치 발치 후 공간폐쇄양상에 대한 기존의 분석은 환자의 밀집 정도, 전치부 치축 각도, 구치부 관계, 골격 패턴 등 다양한 요인을 포함한다. 본 실험에서는 밀집이 없고 전치부가 돌출된 동일한 조건하에서 단지 발치되는 치아만 다르게 한 후 치아이동 양상을 비교하였다.

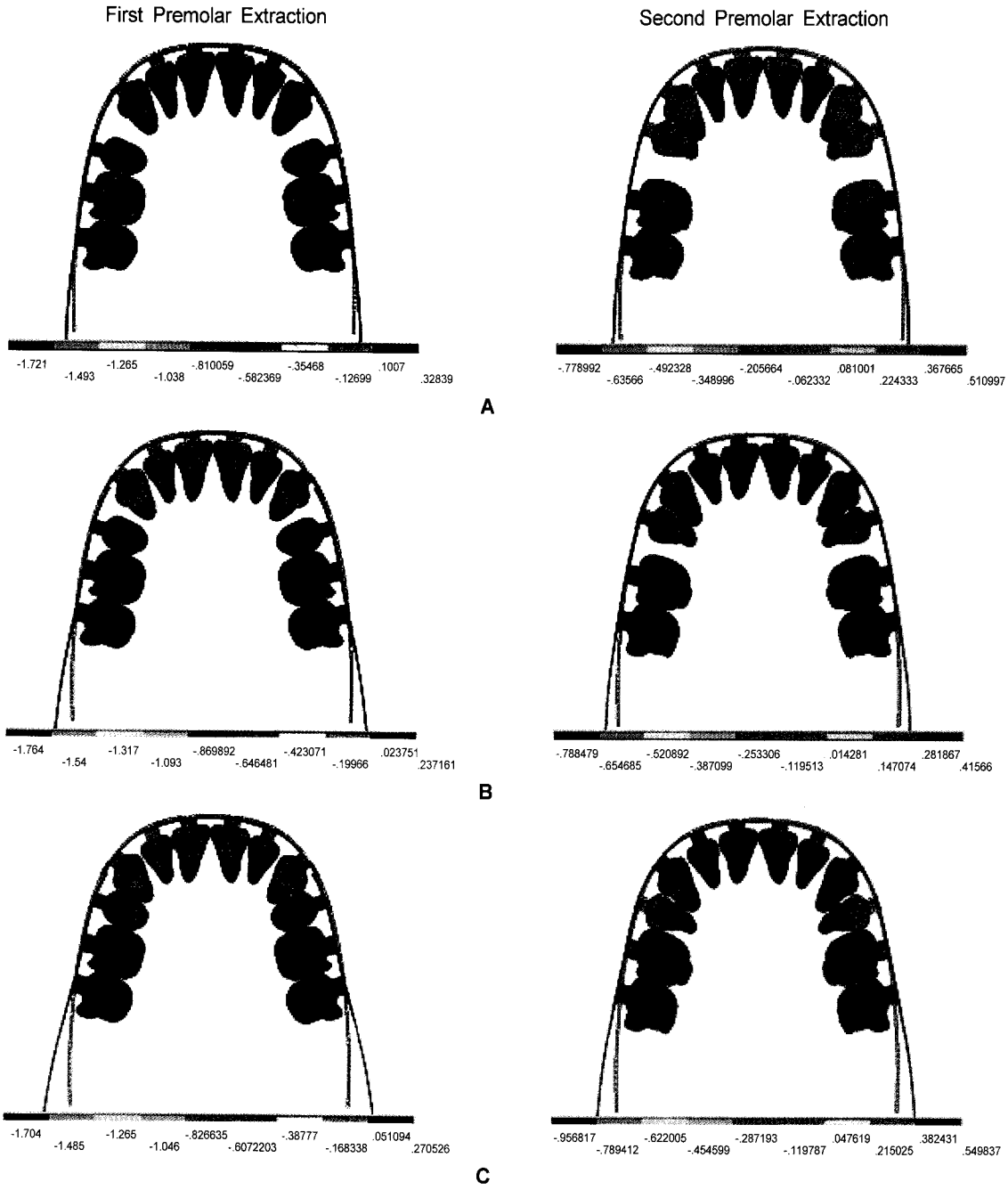

Fig 4. Tooth movement along the occlusal plane by FEA for upper 1st and 2nd premolar extraction models. The images were obtained before and after activation. Each step was equilibrated for application. +, Forward tooth movement; -, backward tooth movement. The amount of tooth movement is displayed by various colors, and color bar scales were different in each step; **A,** 4th activation; **B,** 8th activation; **C,** 12th activation.

제1소구치 발치 시 중절치, 측절치, 견치는 5.7 mm, 6.1 mm, 6.8 mm 후방 이동하였고 구치부는 1.3 mm씩 전방 이동하였다. 제2소구치 발치 시는 전치부의 이동량이 3.2 mm, 3.3 mm, 3.5 mm이었고 구치부는 4.1 mm, 4.2 mm로 Creekmore[7]의 값과 유사하게 나타났다. 또한 두 실험 모두에서 10°의 gable bend을

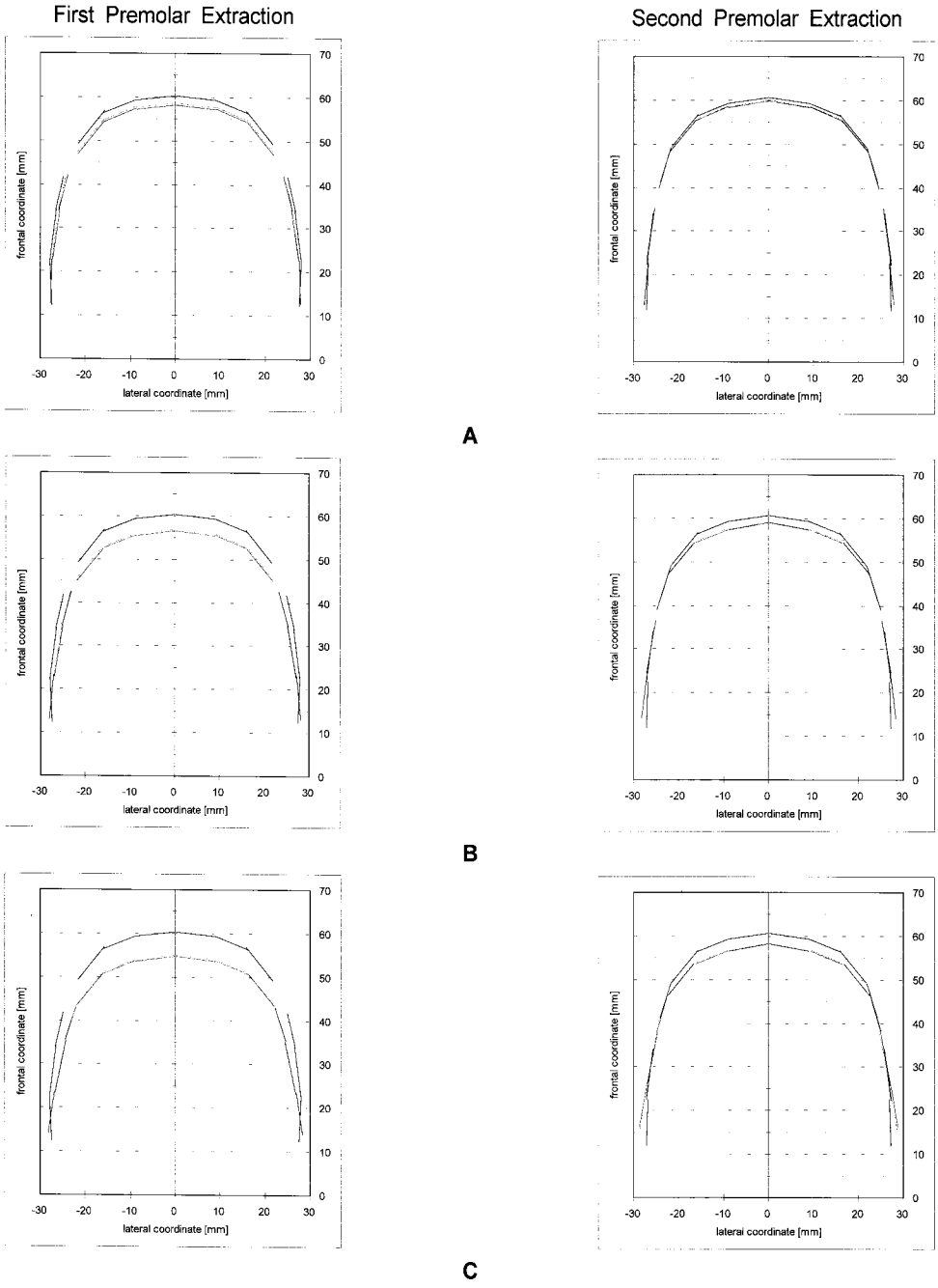

Fig 5. Change of the antero-posterior and rotational movement on the occlusal plane for upper 1st and 2nd premolar extraction models. The line between mesial and distal points of the tooth was obtained before and after activation, and the distal-in rotation of canine and the mesial-in rotation of anchorage teeth were observed. Green, Before activation; red, after activation; blue, initial state; **A,** 4th activation; **B,** 8th activation; **C,** 12th activation.

부여하였음에도 불구하고 전치의 후방이동과 구치의 전방이동 시 약간의 정출을 보여주었다. Gable bend의 양에 따른 전치부와 구치부의 이동양상을 보여준 전 등[28]의 연구를 기초로 하여 치아의 정출을 방지하기 위하여 보다 많은 gable bend양이 요구되었다. Gable bend[26]는 견인루프에 적절한 모멘트/힘

(M/F)비율을 부여함으로써 치아의 회전 중심을 조절하여 전치부와 구치부의 정출을 방지하고 교합 평면을 유지한다. 또한 gable bend에 의해 제1소구치 발치 시 구치부 치관은 원심경사(1.0°, 0.5°)를 나타냈으나, 제2소구치 발치 시에는 구치부 치관이 근심경사(1.9°, 3.5°)를 나타내어 후자의 경우 더 많은 gable bend의 양이 요구되었다.

교합면에서 관찰하면 제1소구치를 발치한 경우 전치는 후방견인 시 구개중심을 따라 미미한 원심회전을 동반하며 제2소구치와 제1, 2대구치는 6.7°, 5.0°, 11.7°의 근심회전을 나타냈다. 제2대구치의 경우에는 후방으로 와이어가 연결되지 않으므로 힘이 가해졌을 경우 치아의 원심점이 협측으로 나가면서 근심회전량은 더욱 증가하게 되었다. 제2소구치 발치 시 전치는 미미한 원심회전을 보이며 제1소구치는 접촉되는 제1대구치와 연속성을 유지하기 위해 1.3 mm 협측으로 이동하면서 2.5°의 원심회전을 보였다. 또한 제1대구치는 0.4 mm 구개측으로 이동하면서 4.3°의 근심회전을 보였다. 이는 발치공간 폐쇄 시 치열궁의 연속성을 유지하기 위하여 인접치아의 전후방적인 이동뿐만 아니라 회전이동이 동반되어야 함을 보여주고 있다. 따라서 구치의 전방이동을 허용치 않는 절대적 고정원(absolute anchorage)의 경우라 할지라도 구치의 근심회전이 최소한 요구됨을 이 실험에서 알 수 있다. 상악 제1대구치가 근심 회전하는 경우 측모 두부계측방사선사진상의 구치의 근심 접촉점은 실제보다 더욱 전방에 위치한 것으로 해석하기 쉬우며, 원심 접촉점은 실제보다 더욱 원심에 위치하는 것으로 해석하기 쉽다. 본 연구결과는 3차원 모델상에서 중첩하여 평가한 것으로 구치의 회전이동을 고려한다면 전후방 구치의 이동량은 측모 두부계측방사선사진의 중첩을 통한 결과보다 더욱 정확하다고 할 수 있다.

제1소구치 발치의 경우 구치 간 폭경이 3.4 mm 감소되었으나 제2소구치 발치의 경우에는 0.8 mm만 감소되어 제2소구치 발치 시 구치 간 폭경이 더 많이 감소된다는 Ong과 Woods[8], 김 등[14]의 연구결과와 다르게 나타났다. 유한요소 분석에 있어 치아의 이동은 결국 호선의 형상과 그 궤적을 같이 하게 된다. 즉 소구치 발치를 시행한 경우에 있어 치아 이동이 이루어진 후 제1대구치는 상대적으로 호선의 전방부, 즉 호선의 폭이 좁은 지점에 위치하게 됨으로서 제1대구치간 폭경이 감소하게 된다. 이와 같은 결과가 나타나기 위해서는 호선의 횡방향 강성이 균일하여 교합면에서 관찰 시 호선의 형상에 불연속이 발생하지 않아야 하나 루프가 위치한 부분은 루프가 없는 부분에 비해 호선의 횡방향 강성이 매우 작다. 루프에 횡방향의 하중이 작용하게 되면 루프가 없는 호선의 궁형과는 달리 루프 부분에서 궁형의 불연속이 발생하여 루프의 전후방에 위치한 치아는 일반적인 호선의 궤적을 따라 이동하지 못하는 현상이 발생한다. 제1소구치 발치의 경우 제1대구치는 전후방의 치아에 부착된 브라켓에 의해 호선의 궁형을 유지할 수 있으므로 호선의 궁형을 따라 이동할 수 있다. 그러나 제2소구치 발치의 경우 제1대구치의 전방에는 루프가 위치하기 때문에 제1대구치가 전방으로 이동 시 루프의 횡방향 강성에 직접적인 영향을 받는다. 즉, 제1대구치가 전방으로 이동하면서 폭경이 따라서 감소하기 위해서는 호선의 궁형을 그대로 유지시켜야 하는데, 루프 부분은 다른 부분에 비해 호선의 횡방향 강성이 현저히 감소하므로, 제1대구치와 치조골 간의 저항을 효과적으로 극복하지 못하고 루프에서 횡방향의 불연속이 발생하여 결과적으로 제1대구치의 폭경 감소가 작게 발생한 것으로 보인다. 따라서 다음 실험에서는 이러한 문제점을 극복할 수 있도록 루프 대신 슬라이딩기전으로 발치공간폐쇄기전을 관찰하는 것이 필요하다.

제1소구치 발치공간 폐쇄 시 견치의 이동양상을 유한요소로 분석한 Kojima 등[15]의 실험에서 견치는 4.5 mm후방이동하고 3.4°의 경사이동을 나타내었고 본 실험에서는 6.8 mm후방이동과 8.4°의 경사이동을 보였다. 이는 전자의 경우 마찰력을 고려하였고 이에 따른 이동량의 감소로 본 실험에서보다 견치의 치체이동을 보여주었다.

지금까지 연구되어 왔던 유한요소 분석은 초기 응력분포를 관찰하여 치아이동 양상을 예측해 보는데 그쳤지만 이러한 양상만으로 정확한 치아이동 결과를 추정하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 bull 루프를 이용하여 2 mm씩 활성화시켰고 이러한 방법은 cinch-back 또는 tie-back과 같이 실제 임상과 유사하므로 연속되는 치아이동 과정을 총체적인 단계로 고찰 할 수 있었다. 치조골과 치주 인대의 물성치를 이용한 실험은 발치 공간폐쇄 시 많은 단계가 필요하므로 본 연구에서는 치조골과 치주막 인대의 물성치 대신 calorific machine을 이용하여 연화된 파라핀 왁스의 물성치를 구하여 사용했다. 하지만 본 연구는 유한요소 분석의 요인 중 시간, 저작압, 나이, 성별 또는 골밀도와 같은 사항이 고려되지 못

하였으므로 다음 연구에서는 실제 임상결과를 더욱 정확하게 예측 할 수 있도록 시간 및 저작압을 고려한 실험이 필요 할 것으로 생각된다.

결론

본 연구에서는 제1소구치 및 제2소구치를 발치한 상악 유한요소 모델에서 Bull 루프를 이용하여 단계별로 폐쇄되는 발치공간의 변화 양상을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제1소구치 발치 시 단계별 공간폐쇄는 구치부의 전방이동(1.3 mm)보다 전치부의 후방이동(5.7 mm)에 의해 이루어졌으며, 전치부는 미약한 정출(0.3 mm)을 동반한 원심 경사이동 양상을 보였고 구치부도 적은 양의 원심 경사이동 양상을 보였다.
2. 제2소구치 발치 시 단계별 공간폐쇄는 제1소구치 발치 시에 비해 전치부의 후방 이동량(3.2 mm)이 적었으며 구치부의 전방 이동량(4.1 mm)은 더 크게 나타났다. 또한 전치부에서는 미약한 정출(0.7 mm)을 동반한 원심 경사이동 양상을 보였고 구치부에서는 근심 경사이동 양상을 보였다.
3. 제2소구치 발치 시 고정원의 협측 이동량(0.8 mm)이 더 크게 나타났다.

참고문헌

1. Proffit WR. Forty-year review of extraction frequencies at a university orthodontic clinic. Angle Orthod. 1994;64:407-14.
2. Gottlieb EL, Nelson AH, Vogels DS. 1986 JCO study of orthodontic diagnosis and treatment procedures. Part 1 - Overall results. J Clin Orthod. 1986;20:612-25.
3. Gottlieb EL, Nelson AH, Vogels DS. 1996 JCO study of orthodontic diagnosis and treatment procedures. Part 1 - Results and trends. J Clin Orthod. 1996;30:615-29.
4. Crossman IG, Reed RT. Long term results of premolar extractions in orthodontic treatment. Br J Orthod. 1978;5:61-6.
5. De Castro N. Second-premolar extraction in clinical practice. Am J Orthod. 1974;65:115-37.
6. Williams R, Hosila FJ. The effect of different extraction sites upon incisor retraction. Am J Orthod. 1976;69:388-410.
7. Creekmore TD. Where teeth should be positioned in the face and jaws and how to get them there. J Clin Orthod. 1997;31:586-608.
8. Ong HB, Woods MG. An occlusal and cephalometric analysis of maxillary first and second premolar extraction effects. Angle Orthod. 2001;71:90-102.
9. Lee RT. Arch width and form: a review. Am J Orthod Dentofac Orthop. 1999;115:305-13.
10. Saelens NA, De Smit AA. Therapeutic changes in extraction versus non-extraction orthodontic treatment. Eur J Orthod. 1998;20:225-36.
11. Chong DY, Jang YJ, Chun YS, Jung SH, Lee SK. The evaluation of rotational movements of maxillary posterior teeth using three dimensional images in cases of extraction of maxillary first premolar. Kor J Orthod. 2005;35:451-8.
12. Yang SJ, Jung SG, Row J, Chun YS. An experimental study on the dynamic teeth movement of 3 types of the insertion method of Precision-TPA for rotating the posterior teeth. Kor J Orthod. 1999; 29:425-33.
13. Kunavisarut C, Lang LA, Stoner BR, Felton DA. Finite element analysis on dental implant-supported prostheses without passive fit. J Prosthodont. 2002;11:30-40.
14. Kim HJ, Chun YS, Jung SH. Spatial changes of the upper dentition following en-masse space closure: A comparison between first and second premolar extraction. Kor J Orthod. 2005;35:371-80.
15. Kojima Y, Fukui H. Numerical simulation of canine retraction by sliding mechanics. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2005;127:542-51.
16. Choi JK, FEA for CAE engeener. Paju: Cheong Moon Gak; 2004. p. 120-128.
17. Park HJ, FEA using ANSYS. Seoul: Wangmoonkag; 2001. p. 50-61.
18. Toms SR, Dakin GJ, Lemons JE, Eberthardt AW. Quasi-linear viscoelastic behavior of the human periodontal ligament. J Biomech. 2002;35:1411-5.
19. Sung SJ, Baik HS, Moon YS, Yu HS, Cho YS. A comparative evaluation of different compensating curves in the lingual and labial techniques using 3D FEM. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2003;123:441-50.
20. Toms SR, Eberhardt AW. A nonlinear finite element analysis of the periodontal ligament under orthodontic tooth loading. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2003;123:657-65.
21. Toms SR, Lemons JE, Bartolucci AA, Eberhardt AW. Nonlinear stress-strain behavior of periodontal ligament under orthodontic loading. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2002;122:174-9.
22. Wheeler RC. Dental anatomy, physiology and occlusion. 5th Ed. Philadelphia: Saunder; 1974.
23. Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2002;122: 342-8.
24. Korean association of orthodontics. Dental model analysis of Korean adult with normal occlusion. Seoul, Korea; 2000.
25. Cobo J, Arguelles J, Puente M, Vijande M. Dentoalveolar stress from bodily tooth movement at different levels of bone loss. Am J Orthod Dentofac Orthop. 1996;110:256-62.
26. Braun S, Garcia JL. The Gable bend revisited. Am J Orthod Dentofac Orthop. 2002; 122:523-7.
27. Burstone CJ. Applications of Bioengineering to Clinical Orthodontics. In: Graber TM editor. Current Orthodontic Concepts and Techniques I, 2nd Edition. St Louis: Mosby; 1975. p. 230-58.
28. Chun YS, Row J, Jung SH, Kim HJ. A study on the effect of the magnitude of the gable bends on the tooth movement pattern during en-masse space closure in the maxillary dentition. Kor J Orthod. 2004;34:33-45.

Comparison of finite element analysis of the closing patterns between first and second premolar extraction spaces

Shin-Ae Koh, DDS, MSD, PhD,[a] **Won-Hee Im,** DDS, MSD, PhD,[b]
Sun-Hyung Park, DDS, MSD, PhD,[c] **Youn-Sic Chun,** DDS, MSD, PhD[d]

Objective: The aim of this study was to compare the differences in closing extraction spaces between maxillary first premolar and second premolar extractions using 3-dimensional finite element analysis (FEA). **Methods:** Maxillary artificial teeth were selected according to Wheeler's dental anatomy. The size and shape of each tooth, bracket and archwire were made from captured real images by a 3D laser scanner and FEA was performed with a 10-noded tetrahedron. A 10° gable bend was placed behind the bull loop on a 0.017" x 0.025" archwire. The extraction space was then closed through 12 repeated activating processes for each 2 mm of space. **Results and Conclusions:** The study demonstrated that the retraction of anterior teeth was less for the second premolar extraction than for the first premolar extraction. The anterior teeth showed a controlled tipping movement with slight extrusion, and the posterior teeth showed a mesial-in rotational movement. For the second premolar extraction, buccal movement of posterior teeth was highly increased. **(Korean J Orthod 2007;37(6): 407-20)**

Key words: FEA, Premolar extraction, Space closure, Rotation

[a]Private Practice, [b]Assistant Professor, Department of Orthodontics, School of Dentistry and Dental Research Institute, Seoul National University.
[c]Assistant Professor, [d]Professor, Department of Dentistry, Graduate School of Medicine, Ewha Woman University.
Corresponding author: Youn-Sic Chun.
Division of Orthodontics, Department of Dentistry, Ewha Woman University, Mokdong Hospital, 911-1 Mok-Dong, Yangcheon-Gu, Seoul 158-710, Korea.
+82 2 2650 5112; e-mail, yschun@ewha.ac.kr.
Received June 7, 2007; Last Revision November 24, 2007; Accepted November 26, 2007.