creative commons

COMMONS DEED

저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

의학박사 학위논문

오버행잉 어태치먼트가 하악 전치의 교정적인 치체 이동에 미치는 효과에 대한 유한요소 분석

Efficiency of overhanging attachment to induce bodily movement of mandibular incisor in orthodontic treatment using finite element analysis

울 산 대 학 교 대 학 원

의 학 과

홍 경 재

오버행잉 어태치먼트가

하악 전치의 교정적인 치체 이동에 미치는

효과에 대한 유한요소 분석

지 도 교 수　이 부 규

이　논문을　의학박사　학위　논문으로　제출함

2022년 2월

울 산 대 학 교 대 학 원

의 학 과

홍 경 재

홍경재의 의학박사 학위 논문을 인준함

심사위원장 안강민

심사위원 이부규

심사위원 김성훈

심사위원 김봉주

심사위원 김윤지

울산대학교 대학원

2022년 2월

국문요약

1. 서론

투명교정장치를 이용한 치료는 심미적이고, 편안한 장점이 있어 성인교정환자들이 교정치료에서 가장 선호하는 치료법이 되었다. 하지만 투명교정장치는 착탈 방식으로 치아에 힘을 가하기 때문에 치근부위에 강한 회전모멘트를 가하기 어려워 치체이동이나, 치근이동에 한계가 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 치아 표면에 레진 어태치먼트를 사용하고 있지만, 지금까지는 원치 않는 이동이 주로 발생하였다. 이러한 단점을 극복하고자 오버행잉 어태치먼트를 개발하였으며, 다른 어태치먼트에 비하여 치체이동에 더 효과적인지 연구하였다.

2. 연구재료 및 방법

본 연구에서는 투명교정장치를 이용하여 하악 전치를 0.1mm 근심방향으로 치체이동 시킬 때, 어태치먼트를 치관에만 부착시키는 일반적인 경우와 어태치먼트를 치근방향으로 잇몸부위까지 연장하는 오버행잉 어태치먼트를 사용한 경우, 그리고 어태치먼트를 부착하지 않는 경우의 세군으로 나누어 각 군의 치아이동시 회전량을 비교하여 어느 것이 하악 전치의 치체이동에 더 효과적인지 유한요소분석모델을 이용하여 연구하였다. 3D 유한요소분석 모델은 CBCT(Con Beam Computed Tomograph)데이터를 이용하여 진행하였으며, 하악 중절치를 근심으로 0.1mm 치체이동 시키는데, 0.5mm 와 0.75mm 두께의 두가지 투명교정장치를 이용하여 진행하였다.

3. 연구결과

오버행잉 어태치먼트를 사용할 경우 어태치먼트가 없을 때나 일반적인 어태치먼트를 사용할 때 보다 근심경사이동과 치축 회전 이동이 감소하였다.

4. 결론

투명교정 장치를 이용하여 하악 전치를 근원심 방향으로 치체이동 할 때, 오버행잉 어태치먼트가 더 효과적일 것으로 사료된다.

중심단어: 투명교정, 오버행잉 어태치먼트, 유한요소분석, 치체이동, 하악절치

목 차

국문요약 **1**

표 목차 **4**

그림 목차 **5**

서 론 6

연구재료 및 방법 **9**

연구결과 **2 1**

고찰 **2 8**

결론 **3 2**

참고문헌 **3 3**

영 문 요 약 **3 7**

표 목 차

Table 1. Six aligner models..... 1 5

Table 2. Material properties of the linear conponents of the FE model. 1 7

Table 3. Tooth movements measured for 0.5mm-thick aligner models. 2 2

Table 4.Tooth movements measured for 0.75mm-thick aligner models. 2 2

그 림 목 차

Figure 1..... 8

Figure 2..... 1 2

Figure 3..... 1 3

Figure 4..... 1 4

Figure 5..... 1 7

Figure 6..... 2 0

Figure 7..... 2 1

Figure 8..... 2 4

Figure 9..... 2 6

Figure 10..... 2 7

Figure 11..... 2 9

서 론

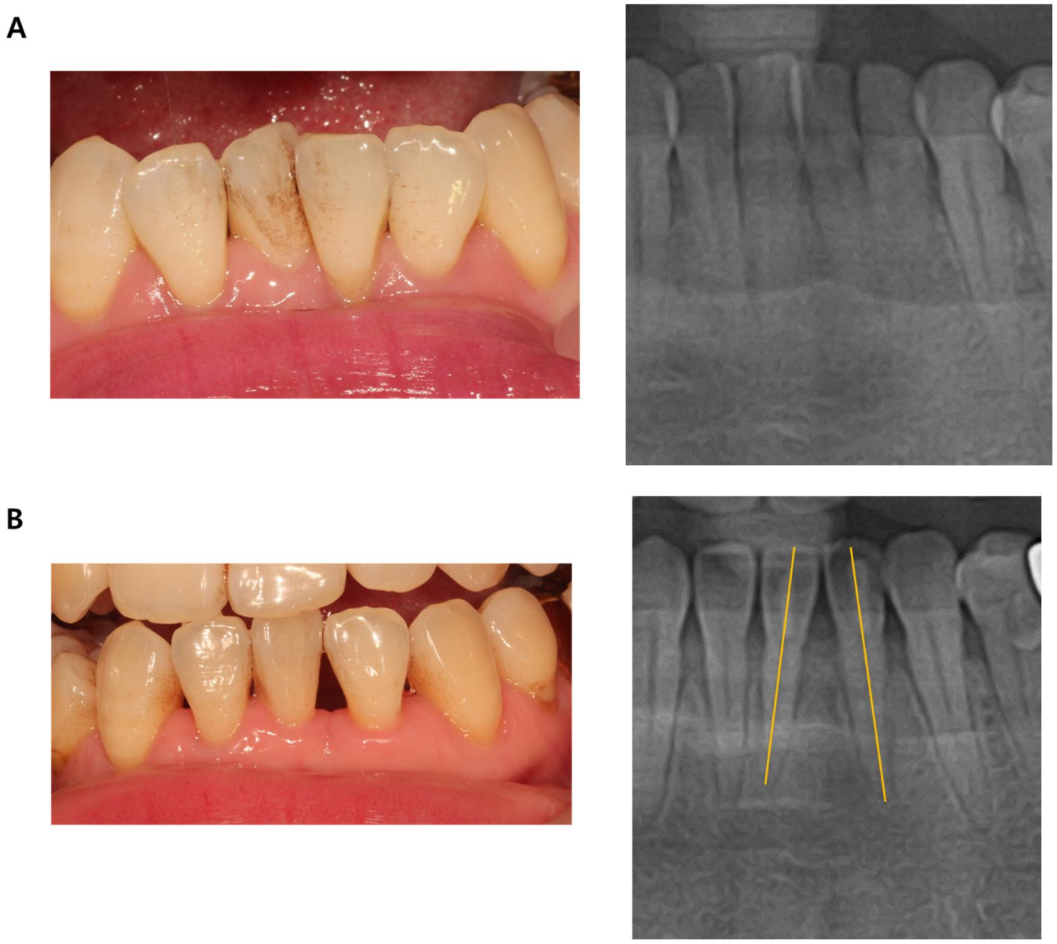
전통적으로 고정성 교정장치가 부정교합의 치료에 사용되어 왔다. 하지만 식사가 불편하고, 칫솔질이 어려워 구강 위생관리에 불리하며, 본딩 시스템에 의한 치면 손상이나, 비 심미적인 이유 등으로 현재는 환자들이 가장 선호하지 않는 치열교정장치가 되고있다[1-5]. 최근에는 이러한 단점을 극복할 수 있는 투명교정장치가 심미적 이유와 편의성 등으로 브라켓과 와이어를 이용한 교정치료보다 점점 더 선호되어지고 있다[6-10]. 투명교정장치는 전통적인 브라켓 교정방식에 비해서 상대적으로 낮은 힘이 치아에 전달되어 편하고, 통증이 적은 것으로 알려져 있다[11]. 아울러 치아 자체에 해가 적고,기타 생물학적 위험이나, 치근흡수 등이 최소화 된다는 것도 알려져 있다[12].

하지만 투명교정장치의 기술이 현재 상당히 발전을 하였지만, 여전히 착탈 방식으로 치아에 힘을 가하기 때문에 여러 가지 한계가 있다. 그중 치아 경사이동이나 회전이동, 치체이동 등은 아직 까지 해결해야 할 투명교정장치의 과제이다[13]. 이에 대한 노력의 일환으로 전치부 총생부위에 레진 어태치먼트를 이용하여 투명교정치료를 진행할 경우 총생이 해결되고, 치체이동을 할 수 있다고 소개되었다[14, 15].

Yokoi [16] 등은 상악 정중 이개 폐쇄를 할 때, 어태치먼트의 효능에 대한 유한요소분석을 통한 연구에서 어태치먼트를 이용할 경우 투명교정장치로도 치체이동이 가능하다고 하였다. 하지만 Goto 등은 어태치먼트가 경사이동이나 인장력에 영향을 주지 않는다고 발표하였다[17]. 투명교정장치에 영향을 주는 어태치먼트의 모양에 대한 연구도 많이 행해졌는데, 여러 연구에서 투명교정기의 두께와 모양이 치아 이동결과에 영향을 미치며, 사각형 모양과 1mm 두께 어태치먼트를 설측과 협측에 놓았을 때, 치아의 정출이나 회전에 효과적이라고 하였다[18-20]. 저자의 선행 연구에서는 하악 견치에서 어떤 모양의 어태치먼트를 어디에 붙이는 것이 정출이나 함입,토크,회전에 더 효과적인지에 대하여 연구를 진행한 바 있고, 그 결과 실린더 모양의

어태치먼트가 협측보다는 설측에 위치시키는 것이 더 효과적이라는 결과를 보고한 바 있다[20].

어태치먼트 덕분에 의도치 않은 경사이동이나 회전 현상이 줄기는 했지만, 어태치먼트의 위치와 치체중심 사이의 거리로 인하여 발생하는 회전모멘트는 여전히 근원심 경사이동이나, 회전이동, 경사이동 등 원치 않는 치아이동을 발생시킬 수 있다[21, 22]. 이러한 이유로 어태치먼트와 치아중심 사이의 거리를 줄일 수 있는 연구가 더 필요하였고, 이에 본 저자는 치아중심과 어태치먼트 사이의 거리를 최소화 할 수 있는 오버행잉 어태치먼트를 개발하여 임상에 적용하였다(Figure 1).



C

Figure 1. Use of overhanging attachment. A:Before extraction of #31, B:Teeth movement with general attachment for 7months, C:Teeth movement with overhanging attachment for 3months . Root of #32 and #41 became parallel.

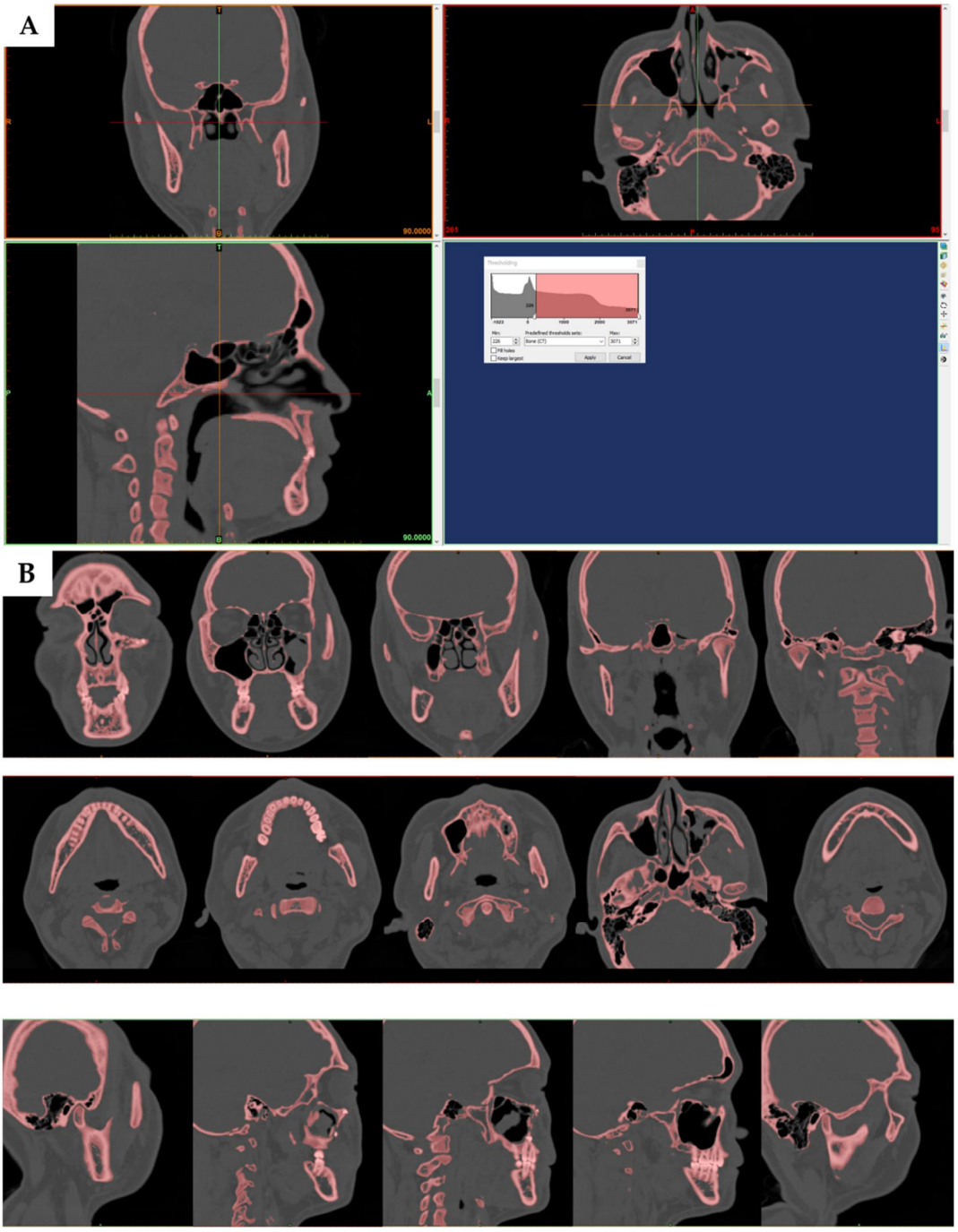
이번 연구의 가설은 오버행잉 어태치먼트를 사용할 경우, 치아에 가해지는 작용점과 저항 중심이 가까워져서 하악 전치 치체 이동에 더 유리할 것으로 가정하였다.

본 연구의 목적은 투명교정기장치를 이용하여 하악 전치를 근심 치체이동 시킬 때 오버행 어태치먼트가 근심경사이동과 치축 회전, 설측 경사이동을 줄여서 치체이동에 더 효과적인지 확인하는 것이다.

연구재료 및 방법

1. 콘빔 컴퓨터 단층촬영 이미지 기반 3차원 유한요소모델 구축

3차원 유한요소모델 구축을 위하여 한국 성인 (남성, 30세)의 3차원 하악골 콘빔 컴퓨터 단층촬영 영상을 2차원 이미지로 0.25 mm 간격으로 추출하여 3차원의 하악골 형상을 전문 소프트웨어 (Mimics Research v19.0, materalise, Leuven, Provincie, Belgium)를 사용하여 기존에 보고된 통법에 따라 제작하였다. [20, 23, 24]. 간략히 설명하면, 추출 된 3차원 CBCT(Cone Beam Computed Tomograph)로부터 골형상 재건을 위하여 스레스홀딩 값을 최소 226에서 최대 3071값으로 설정하여 관상면, 횡단면, 시상면 3가지 평면상의 2차원 이미지를 각 슬라이드 별로 영역 설정을 하여 두개골 전체 형상을 추출하였고 (Figure 2A,B), 두개골 전체 형상에서 상악골과 하악골을 분리하기 위하여 상악골과 하악골에 중첩되는 영역을 관상면, 횡단면, 시상면 3가지 평면상에서 각 슬라이드 별로 제거하였다. 상악골과 하악골의 중첩되는 부분을 모두 제거하고 두개골 전체 형상에서 상악골과 하악골로 분리하였다 (Figure 2C). 본 연구에서는 두개골 전체 형상에서 하악골 형상만 필요하였기 때문에 상악골 형상을 제외한 하악골 형상만 추출하였다 (Figure 2D). 재건 된 3차원 골형상은 미믹스 소프트웨어와 3차원 CAD 소프트웨어인 솔리드웍스 2016 (Solidworks 2016, Dassault systemes Solidworks Corp., Waltham, MA, USA)를 이용하여 치은, 치밀골, 해면골, 치아, 치주인대으로 각각 구분하였으며, 치밀골의 두께는 선행연구를 참고하여 2 mm로 설정하였다 (Figure 2E) [23-26]. 치주인대는 선행 연구를 참고하여 [27] 치아와 치밀골 및 해면골 간의 거리를 고려한 0.2 mm 두께로 구축하였다 (Figure 2E). 또한, 오프셋 기능을 이용하여 치은 부분도 치조골에서 2 mm 두께를 가지도록 모델을 구축하였다 (Figure 2E) [20, 26].


A
B

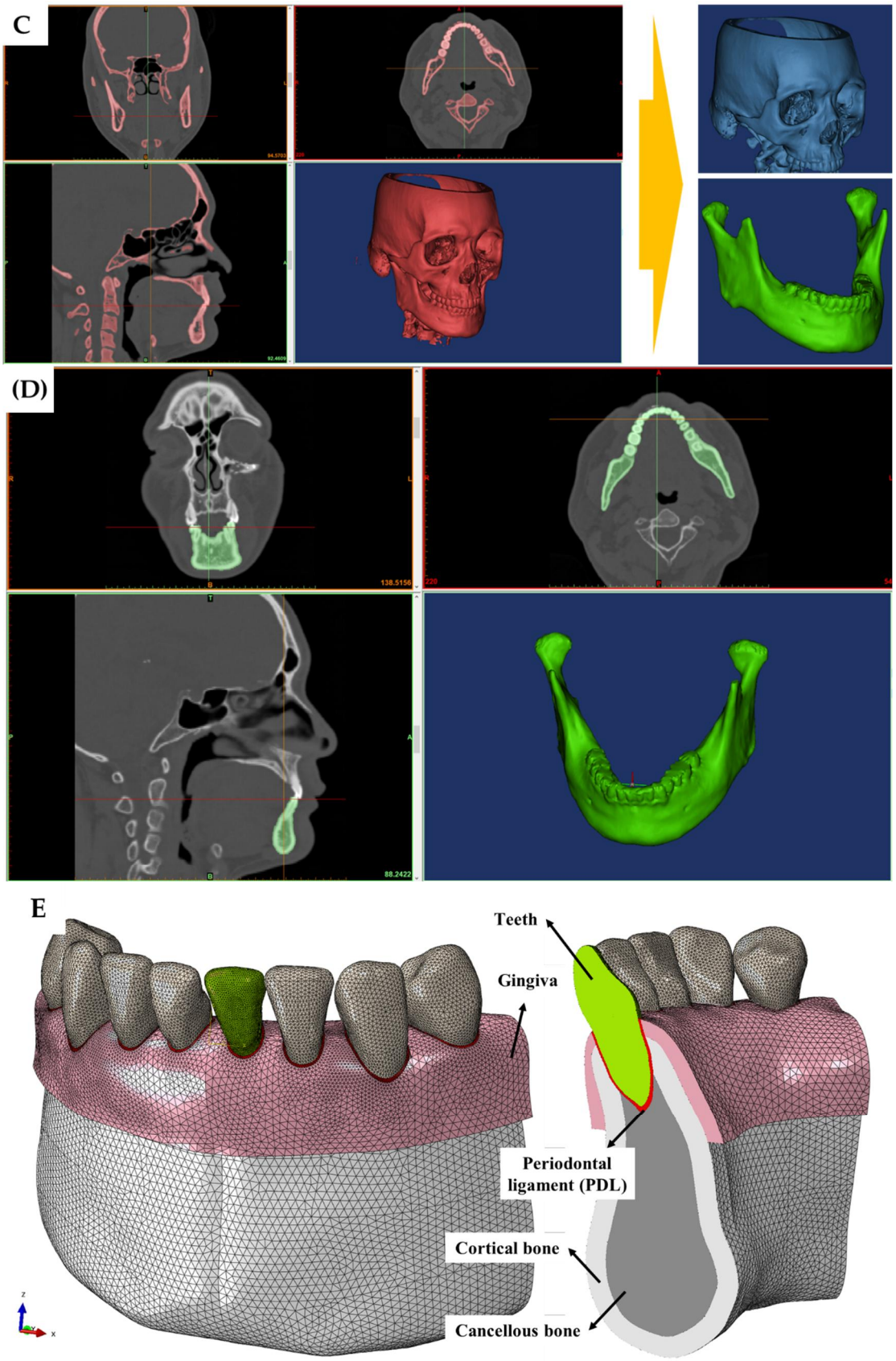

C
(D)
E
Teeth
Gingiva
Periodontal ligament (PDL)
Cortical bone
Cancellous bone

Figure 2. 3-dimensional finite element creation process in the orthodontic treatment situation

A: Application of the thread holding value to display the skull shape inverse on the reconstruction software. B: Indication of the area of each slide in three anatomical planes. C: Reconstruction of 3D skull shape through 2D images using reconstruction software and separate maxillary and mandibular bones. D: The process of deriving 3D mandibular model. E: Definement of the gingiva ,cortical bone, cancellous bone ,and the periodontal ligament(2mm thick of the gingiva, 0.2mm thick of the periodontal ligament)

2. 투명교정장치 및 어태치먼트 3차원 모델 설계 및 구현

투명교정장치는 두께에 따라 용도가 다르기 때문에 본 연구에서는 0.5 mm와 0.75 mm의 2가지 투명교정장치를 사용하였다. 투명교정장치는 솔리드웍스 2106과 아바쿠스 소프트웨어를 이용하여 두 모델 간의 병합, 교차부위 추출, 표면 오프셋 기능을[26] 사용하여 모델을 구축하였다 (figure 3).

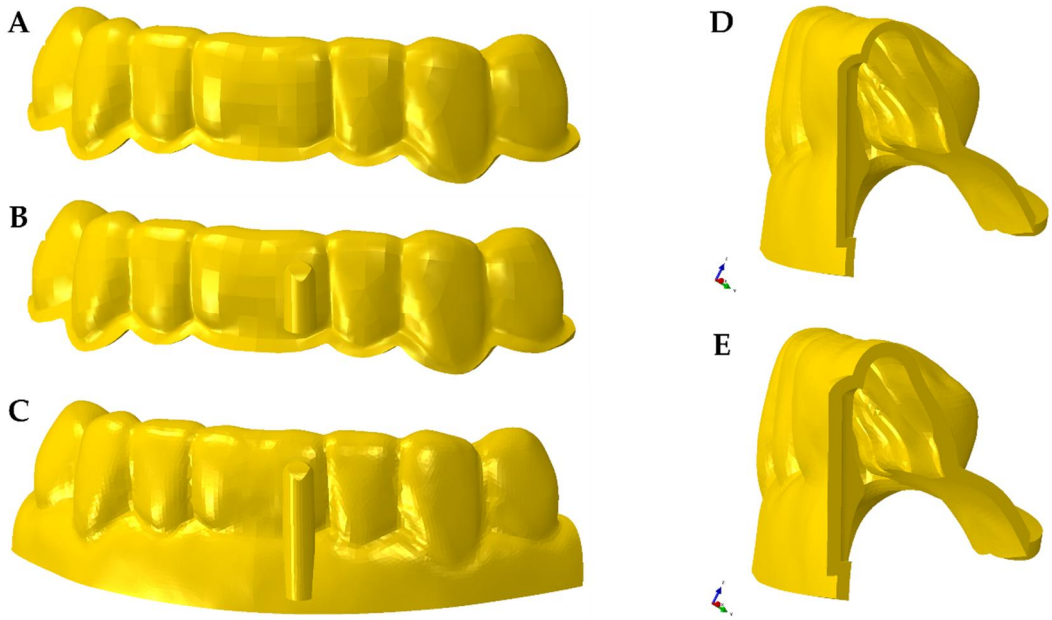


Figure 3. Establishment of FE models that consider the three conditions of attachment and the two thickness of the clear aligner. A:Clear aligner without attachment. B:Clear aligner with general attachment. C:Clear aligner with overhanging attachment. D:0.5mm thickness clear aligner. E: 0.75mm thickness clear aligner.

기존의 치아 상부에 부착되는 일반적인 어태치먼트를 사용한 군에서는 교정의가 의도하지 않은 치아의 움직임이 발생되었다. 따라서, 본 연구에서는 일반적인 어태치먼트 (General Attachment; GA)와 하악 중절치의 협측 중앙에서 치은 쪽으로 장치가 덮을 수 있는 만큼 연장 된 오버행잉 어태치먼트 (Overhanging Attachment; OA)를 구현하였다. 그리고, 어태치먼트의 유무에 따른 치아의 이동 및 응력 분석을 위하여 어태치먼트가 없는 모델 (No Attachment; NA)도 고려하였다 (Figure 4). 오버행잉 어태치먼트는 실제 교정 환경에서 구강 위생 관리를 위하여 잇몸과 어태치먼트가 부착되지 않도록 잇몸 부분은 0.1 mm 이상의 공간이 존재하도록 설계하였으며(figure 4C), 일반적인 어태치먼트는 하악 중절치의 치관 부위에만 붙도록 설계하였다.

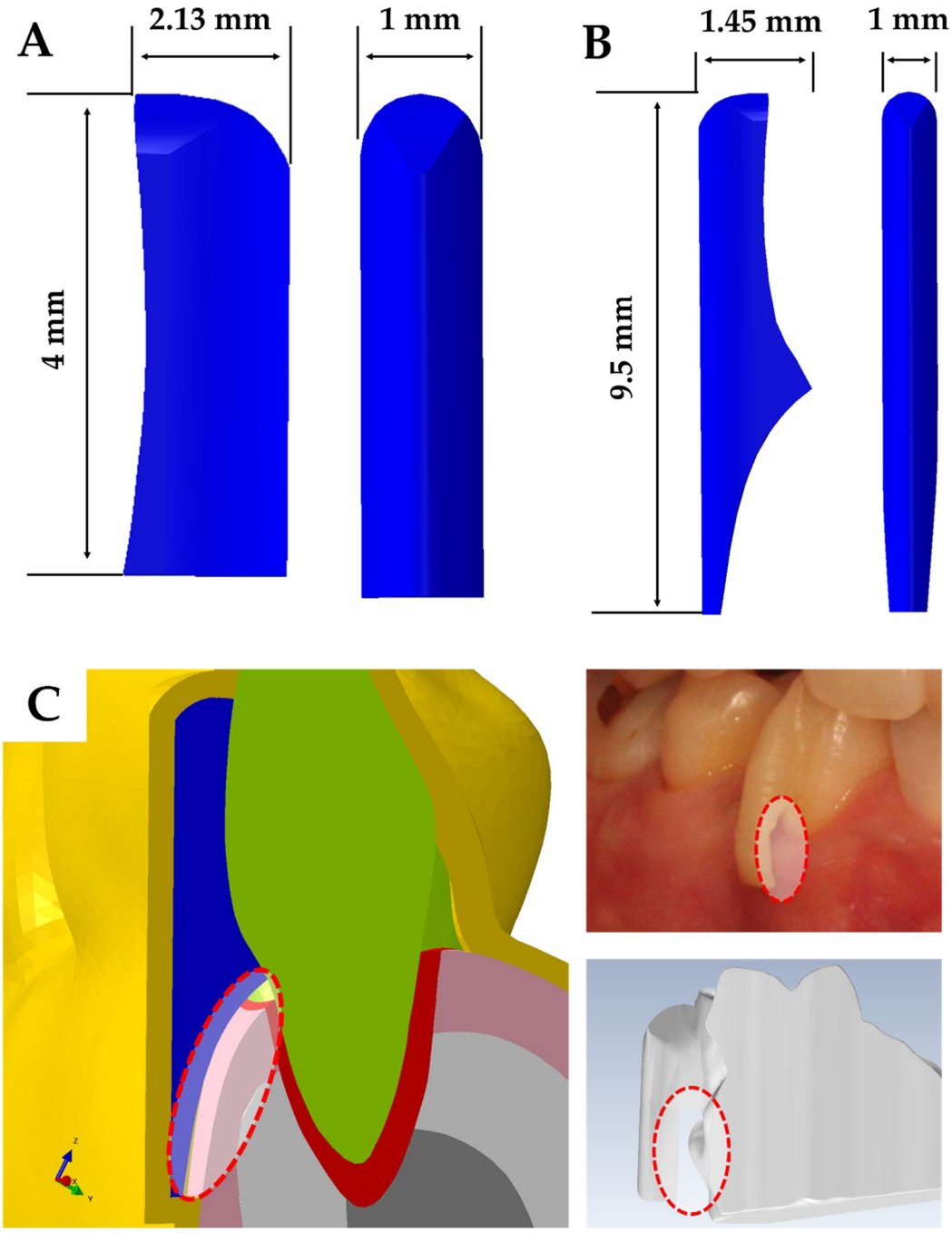


Figure 4. Shape and dimensions of general attachment and overhanging attachment models. A:General attachment. B:Overhanging attachment. C:Overhanging attachment design for oral hygiene management .

2가지 종류의 투명교정장치의 두께와 3가지 조건의 어태치먼트를 고려하여 총 6종류 시술 모

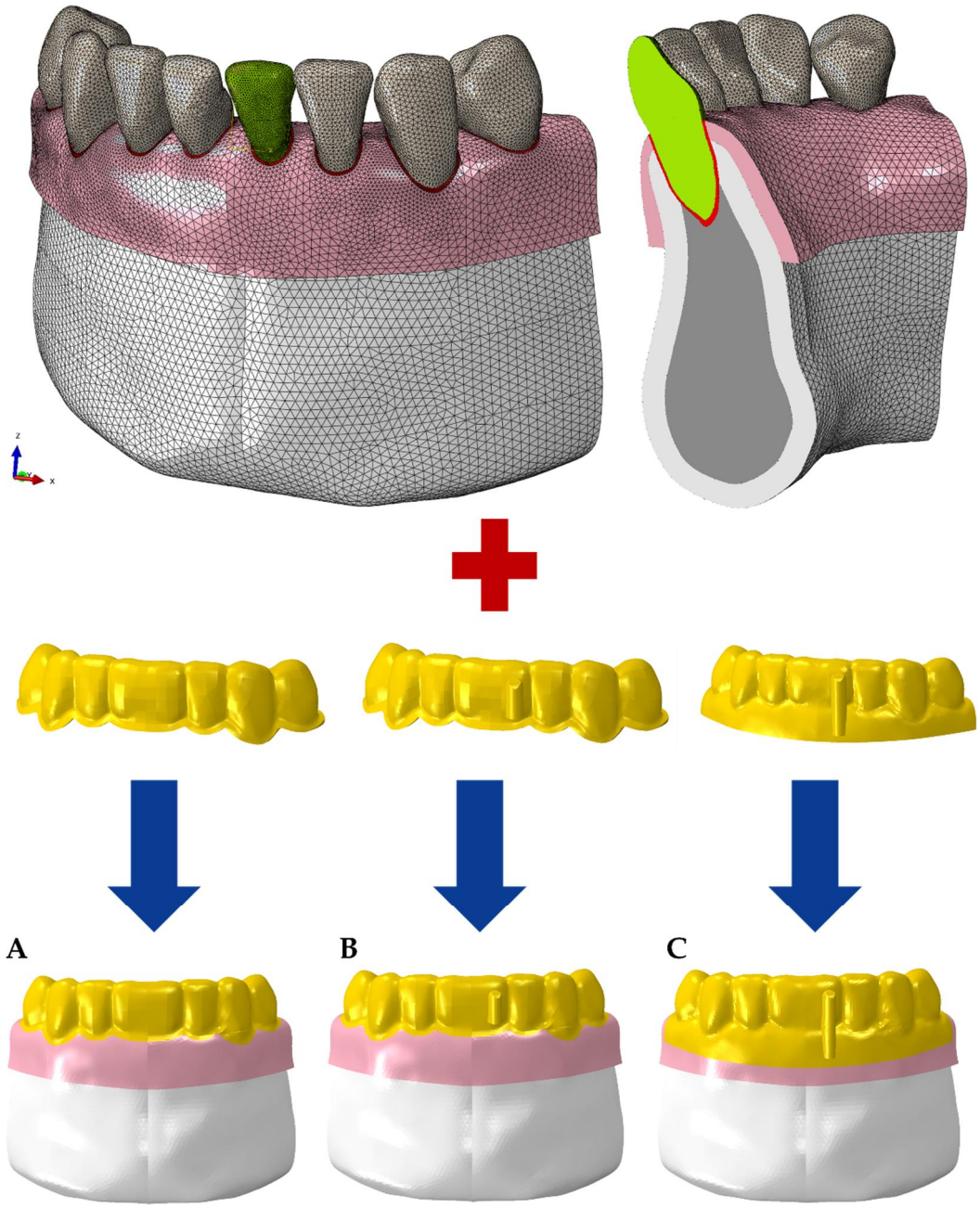
델을 구축하였다(Table 1).

Table 1. Six aligner models

Model	thickness (mm)	attachment
1	0.5	Without attachment
2	0.5	General attachment
3	0.5	Overhanging attachment
4	0.75	Without attachment
5	0.75	General attachment
6	0.75	Overhanging attachment

3. 각 교정상황 별 시술모델 및 메쉬 크기

시술 모델은 투명교정기, 어태치먼트 및 경조직 부분(치밀골, 해면골 및 치아)과 연조직부분(치은 및 치주인대) 구성요소들을 조합하여 구축하였다 (Figure 5). 투명교정장치는 0.5 mm 두께와 0.75 mm 두께 2가지를 고려하였으며 어태치먼트가 없는 경우, 일반적인 어태치먼트, 오버행잉 어태치먼트 3가지를 고려하여 시술 모델을 총 6가지를 고려하여 figure 4A-C와 같이 최종적인 시술모델을 구축하였다. Figure 4A-C는 0.5 mm 두께에서 3가지 어태치먼트 종류에 따른 시술 모델을 구축하였다. 시술 모델을 구축 한 뒤, CAD 기반의 모델을 유한요소해석 수행을 위하여 메쉬 형태로 변경하였다. 각각의 구성요소에 대한 메쉬 변환은 아바쿠스 프로그램(ABAQUS CAE 2016, Dassault systems, Velizy-villacoublay, yvelines, France)을 이용하여 프로그램 상에서 4점 선형 사면체로 균일하게 메쉬를 형성하였다. 메쉬 사이즈는 치밀골, 해면골 및 치은 구조는 0.8, 치아, 어태치먼트 및 투명교정기는 0.2, 치주인대는 0.1로 설정하였다. 각 구성요소의 수학적 수렴 오류를 감소하기 위하여 미믹스 프로그램을 이용하여 구성요소 계면 간의 접촉되는 지점에서 메쉬 점을 매칭하였다.


A
B
C

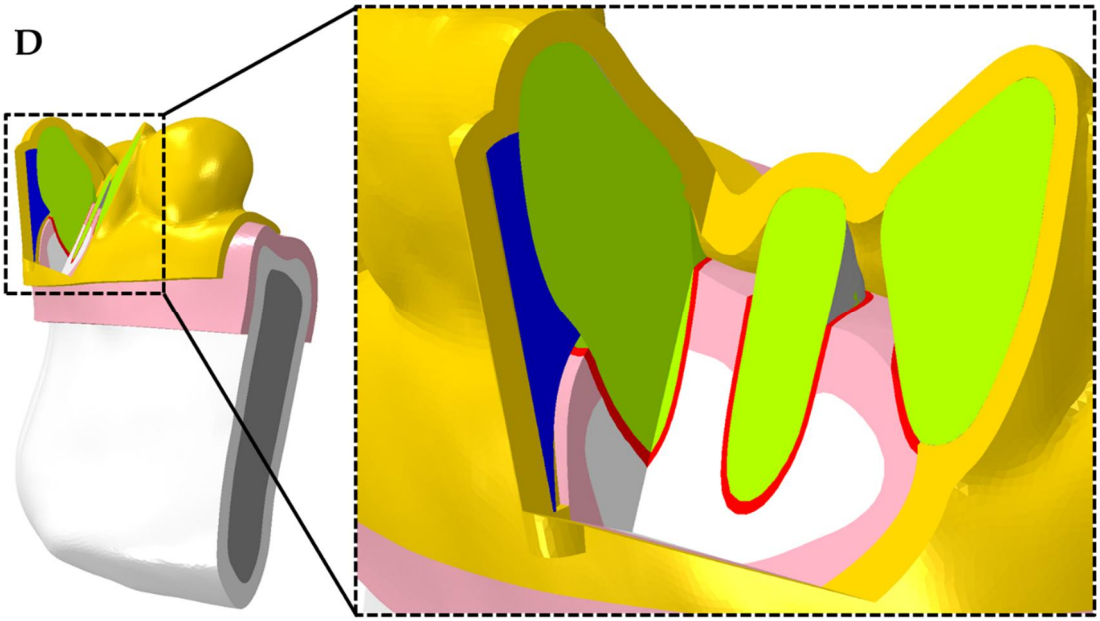


Figure 5. A:3D aligner model design that reflects clear aligners, attachments, hard tissue(cortical bone, spongy bone), gums and periodontal ligament. A:Model without attachment. B:model with general attachment. C: model with overhanging attachment. D:3D model that include all of the component (0.5mm thick clear aligner and overhanging attachment).

4. 재료 물성치 및 접촉 조건

시술 모델에 사용되는 대부분의 구성요소의 재료 물성치는 선행 연구를 참고하여 탄성계수와 포와송비를 적용하였다(Table 2). 치은, 치밀골, 해면골, 치아, 어태치먼트는 탄성계수와 포와송비를 적용하였고 투명교정기는 Seo 등의 연구에서 적용된 기계적 실험 데이터가 반영된 응력-변형률 그래프 결과 값을 적용하였다[11]. 또한, 치주인대의 물성치는 Natali 등의 선행 연구에서 보고된 실험 결과 값을 기반으로 초탄성 물성치를 적용하였다[28].

Table 2. Material properties of the linear conponents of the FE model.

Component	Elastic Modulus(MPa)	Poisson's Ratio	Reference

Cortical bone	13,700	0.3	[20, 25, 29]
Cancellous bone	1,370	0.3	[20, 25, 29]
Gingiva	2.8	0.4	[20, 30, 31]
Attachment	12,500	0.36	[32]
Teeth	19,613	0.15	[26, 33, 34]

실제 임상 환경과 같이 치아와 투명교정장치 사이에는 미끌림 현상을 고려하여 0.2의 마찰계수를 적용하여 접촉 조건을 인가하였으며, 치아-어태치먼트, 치아-치주인대 및 치주인대-골 형상 (치밀골 및 해면골)은 각 구성요소 별로 결합된 상태 및 완전한 접착 상태를 가정하여 완전 접착조건(Tie-Contact)을 적용하였다.

5. 교정 유한요소해석을 위한 경계 및 하중 조건

본 연구에서는 Zou 등의 연구에서 사용된 “The birth and death FE analysis” 방법을 참고하여 하중 및 경계 조건을 적용하였다[35]. 유한요소해석은 2가지 과정으로 수행되었으며, 첫 번째 해석과정에서 투명교정이 필요한 단일 치아와 투명교정장치 2가지 모델만 고려하여 해석과정을 수행하였다. 치아는 단단한 물질로 정의하고 투명교정기는 변형이 가능한 물질로 정의하여 투명교정기에 단일치아를 위치시킨 후 #31 치아를 근심 측으로 0.1mm 치체이동 시켰다(Figure 6). 이 때, 나머지 치아는 그대로 유지하고 투명교정장치는 움직인 치아에 의하여 내부 표면이 변형된다. 내부의 표면이 변형된 투명교정기는 두 번째 해석과정으로 모델을 불러온다. 불러온 투명교정기는 원래의 치아위치와 맞지 않아 2개 모델끼리 접촉면이 중첩되는 현상이 발생된다. 이를 해결하기 위하여 2가지 단계로 해석을 수행하였다. 첫 번째 단계에서는 악궁의 구성요소인 치밀골, 해면골, 잇몸, 치아, 치주인대를 비활성화를 시킨 상태에서 첫 번째 해석에서 사용된 단단한 치아와 변형된 투명교정기를 완전접촉(Tied) 조건을 적용한다. 그리고,

첫 번째 해석과정에서 움직였던 반대 방향으로 #31 치아를 0.1 mm 치체이동 시킨다. 이 과정을 통하여 장치에 힘을 가하게 되고, 장치와 비활성화된 치아 악궁과의 인접면이 중첩되어 불일치 되는 문제를 해결할 수 있다.

두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 비활성화 된 치밀골, 해면골, 잇몸, 치아, 치주인대를 다시 활성화 시키고 첫 번째 단계에서 움직인 단단한 단일치아 모델을 비활성화 시킨다. 이 과정에서 투명교정기에 적용된 응력이 재활성화된 치밀골, 해면골, 잇몸, 치아 및 치주인대에 적용되어 각 구성요소에 응력이 전달되고 움직임이 발생된다.

어태치먼트가 없는 모델, 일반적인 어태치먼트 및 오버행잉 어태치먼트에 대하여 상기의 과정을 동일하게 적용하여 해석을 수행하였으며, 모든 해석모델에서 치밀골 및 해면골의 측면부와 하단부는 모든 방향에 대하여 움직임과 회전이 발생되지 않도록 완전하게 구속하였다.

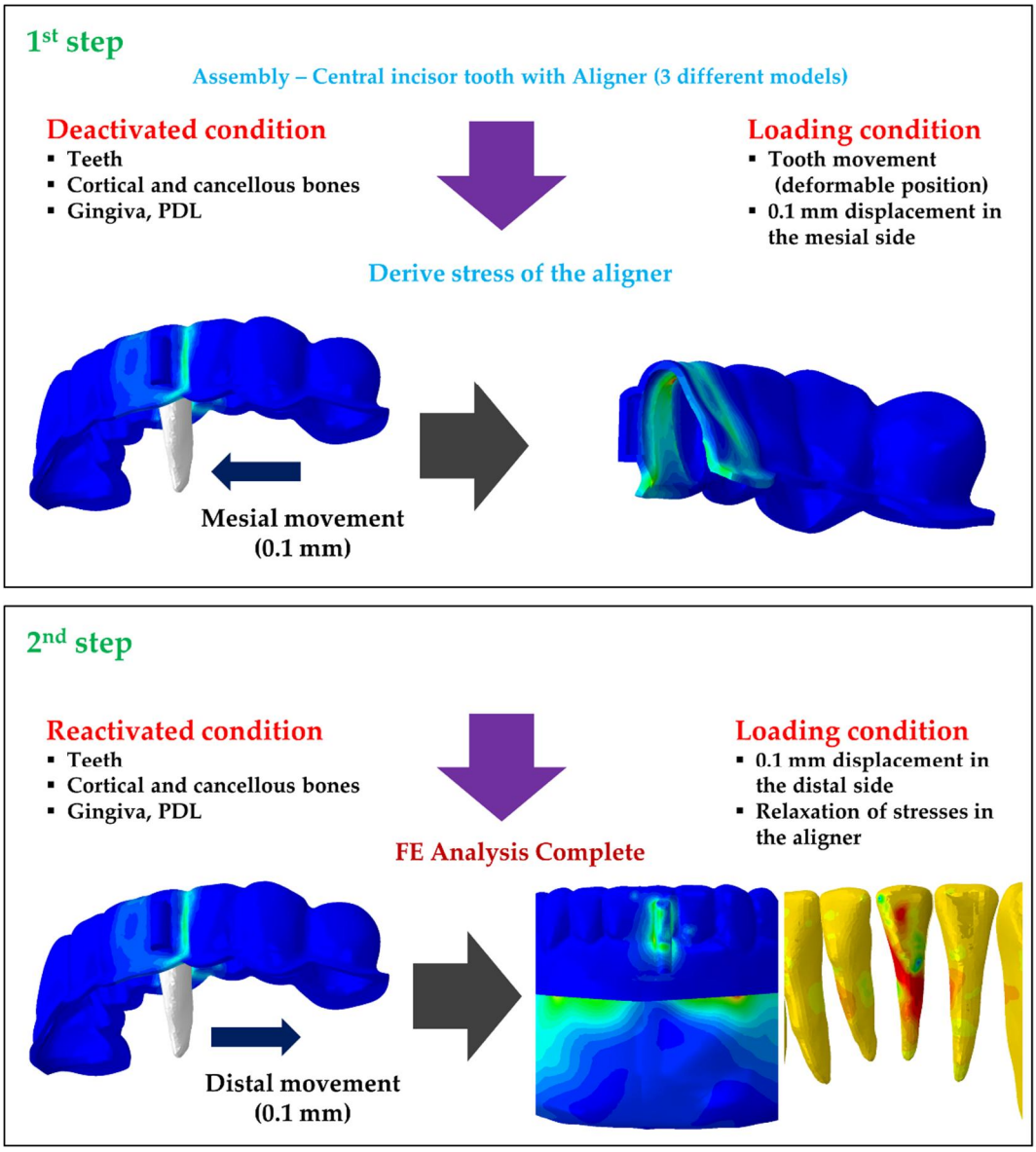


Figure 6.Finite element analysis process of three different orthodontic treatment models(NA,GA,OA)

연구결과

1. 치아이동 분석

본 연구에서 하악 중절치에 다양한 어태치먼트를 붙이고, 투명교정장치를 이용해 근심측으로 0,1mm 이체이동시켰을 때, 결과를 분석하였다. 실제 적용하고 난 뒤, 치관의 근원심 경사이동, 회전이동, 설측 경사이동을 측정하였다(Figure 7).

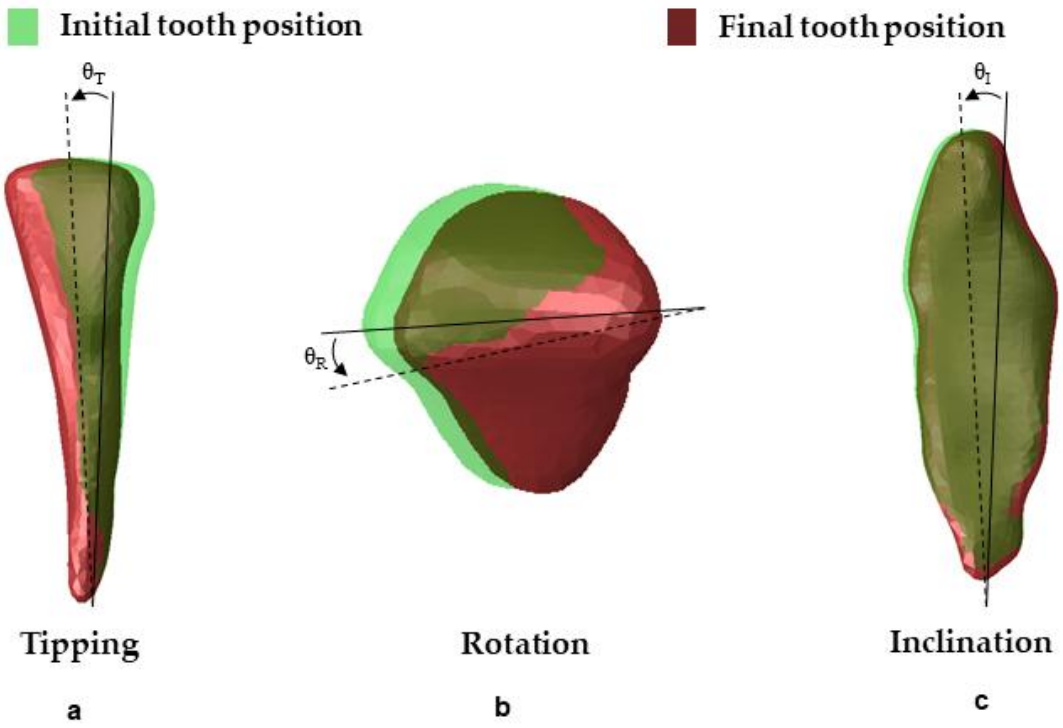


Figure 7. Tooth movements before and after loading conditions. A:Tipping. B:axial rotation. C: buccolingual inclination . Dotted line: before, Solid line: after

근원심 경사이동

0.5mm 두께의 투명교정장치를 어태치먼트 없이 적용하였을 때(NA), 치관의 근원심 경사이동은 0.394° 이었다. 일반적 어태치먼트(GA)는 0.389° 였고, 오버행잉 어태치먼트(OA) 적용시는 0.377° 이다 (Table 3). OA를 적용했을 때 경사이동 값이 NA 보다 3.08%, GA보다 4.31%

상대적으로 적었다. 0.75mm 두께일 경우, GA 적용시 0.391°, NA시 0.39°, OA는 0.38° 로 나왔다 (Table 3,4). OA의 근원심 경사이동 각도는 NA때 보다는 2.81%, GA 사용시 보다는 2.56% 낮게 나왔다. 결과적으로 0.5mm 두께와 0.75mm 두께 모두, OA 사용시 crown tipping 가장 적게 측정되었다.

Table 3. Tooth movements measured for 0.5mm-thick aligner models.

Model	Tipping(θ_T)	Rotation(θ_R)	Inclination(θ_I)
No attachment	0.394	0.035	0.084
General attachment	0.389	0.013	0.084
Overhanging attachment	0.377	0.007	0.084

Table 4.Tooth movements measured for 0.75mm-thick aligner models.

Model	Tipping(θ_T)	Rotation(θ_R)	Inclination(θ_I)
No attachment	0.390	0.034	0.083
General attachment	0.391	0.025	0.085
Overhanging attachment	0.380	0.001	0.083

협설측 경사이동

0.5mm 두께에서는 세가지 모델 모두에서 0.084° 의 설측 경사이동이 발생하였다 (Table 2). 0.75mm 두께에서는 GA에서 가장 높은 값(0.085°)이 측정되었고, NA와 OA는 0.083°으로 같은 값이 측정되었다 (Table 3,4).

치축회전

NA가 0.5mm 와 0.75mm 모델 모두에서 가장 높은 회전값 (각각 0.035°, 0.034°)을 나타내었다. GA는 0.5mm 두께에서 0.13°, 0.75mm 두께에서 0.025°이었다. OA에서 가장 작게 회전하였는데, 0.5mm 두께 장치에서 GA보다 회전양이 80%낮고, NA 보다 46.15% 낮았다 (Table

2). 0.75mm 두께의 장치에서는 OA에서 NA 보다 97.6%, GA보다 96% 낮았다(Table 3,4).

2. Stress distributions

0.5mm 두께장치를 사용할 때, 장치와 어태치먼트에 대한 피크 본미세스(Peak von Mises stress) 값과 분포가 Figure 8에 나와 있으며, 해면골과 치밀골, 치주 인대의 최대 주응력(maximum principal stress)도 함께 나와 있다.

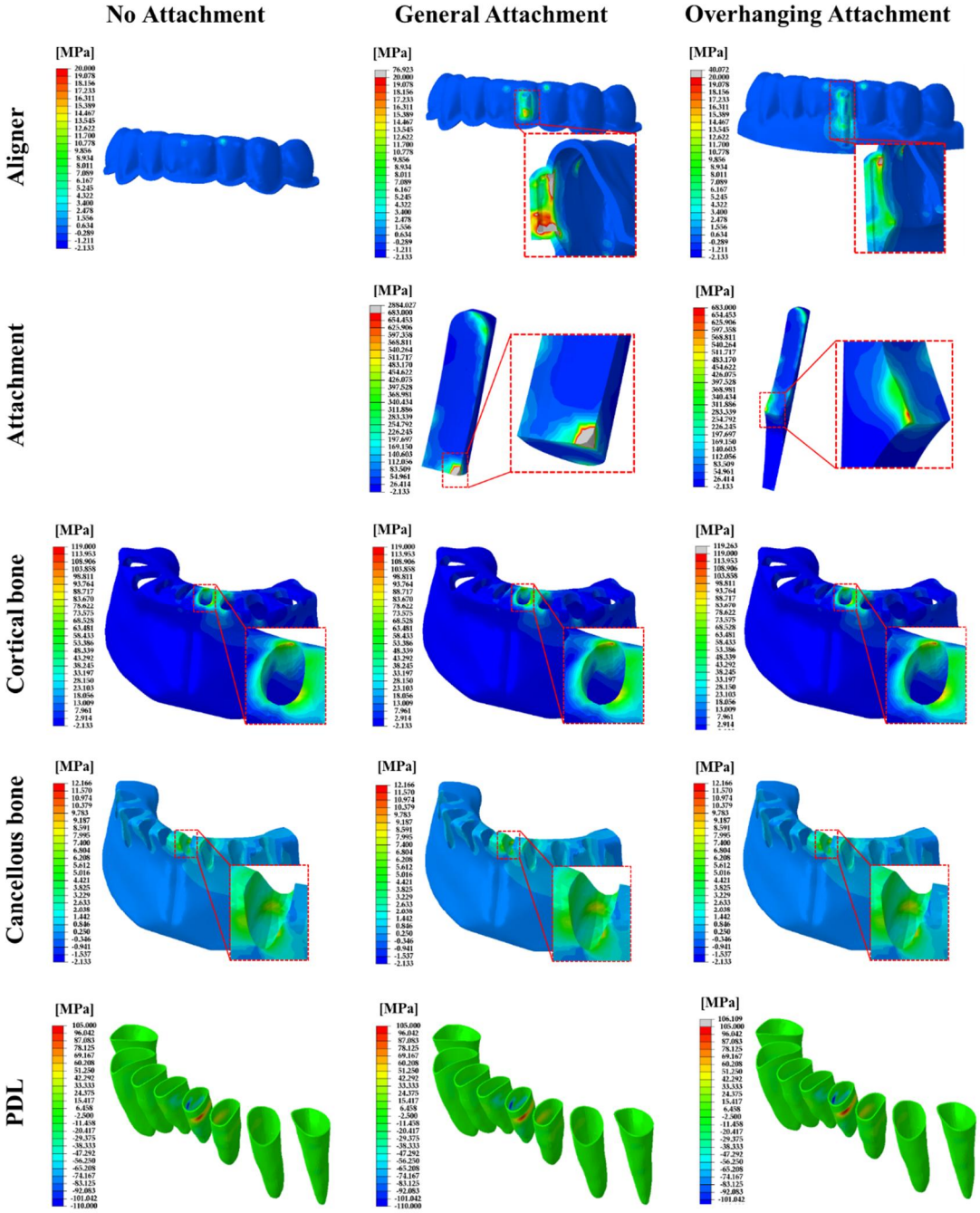


Figure 8. Finite element analysis results of the stress distributions for the components of the orthodontic treatment model in the 0.5mm aligner model. The aligner and attachment were expressed as PVMS values, and the bones(cortical and cancellous) and PDL were expressed as MPS value.

피질골에서 가장 높은 최대 주응력(maximum principal stress) 값이 나타났다. OA 모델은

제외하고, 장치 두께가 두꺼울수록 피질골에서 최대 주응력(maximum principal stress) 값이 높아졌다 (Figure 10c). 비슷하게 수질골이나 치은, 치주인대에서도 장치가 두꺼울수록 stress 값이 커졌다(OA 만 제외, Figure 8, 9, 10, d-f). 0.5mm,0.75mm 두께 모두에서 장치와 어태치먼트가 받는 힘은 GA가 OA보다 더 컸다 (Figure 8, 9, 10a, 10b).모든 모델에서 투명교정 장치와 어태치먼트는 피크 본미세스 (Peak von Mises stress)값으로 치조골과 PDL은 MPS 값으로 나타냄.치주인대에 최대 주응력(Maximum principal stress) 값이 가장 높은 곳은 원심측 중간 부위였다 (Figure 8,9).

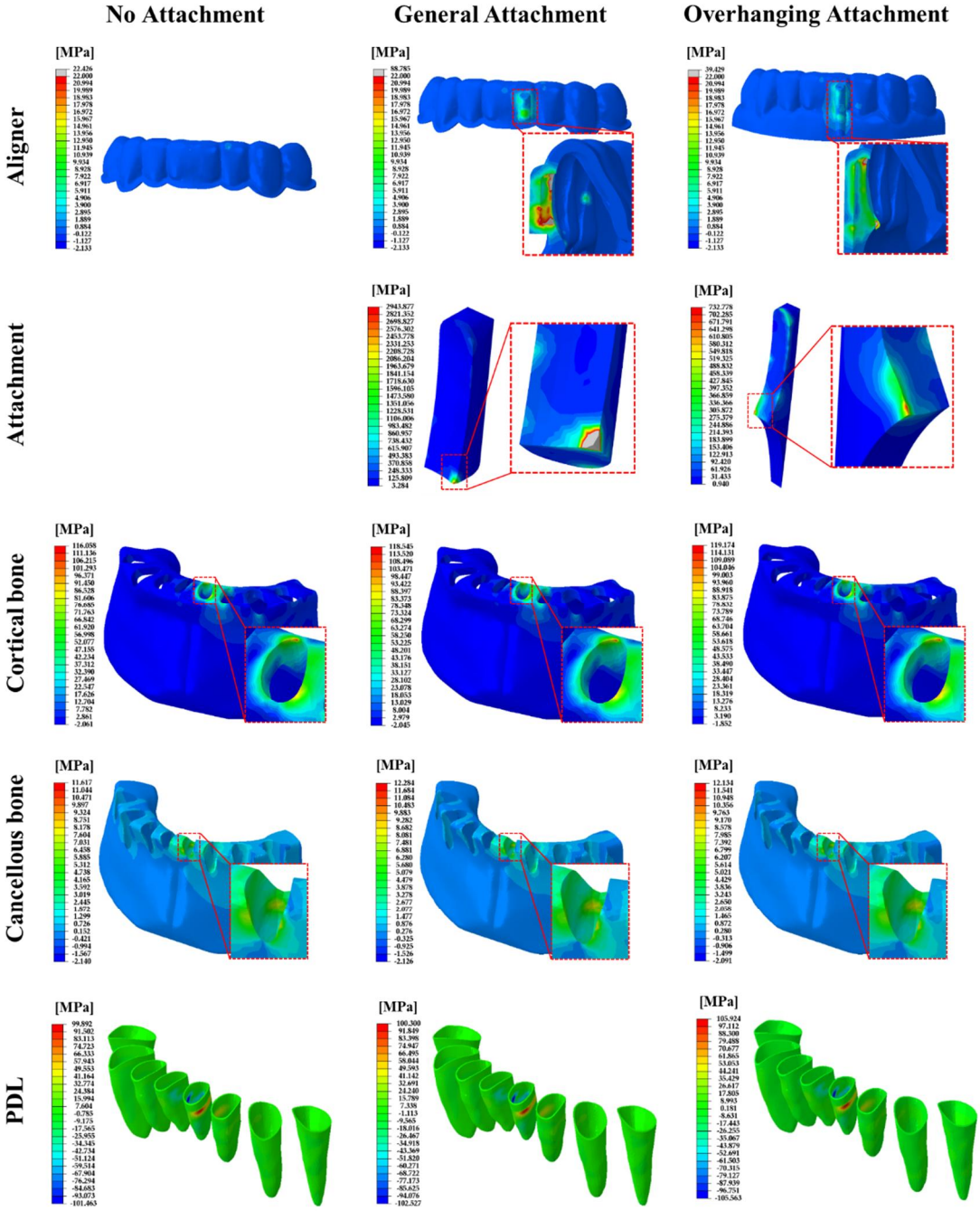


Figure 9. Finite element analysis results of the stress distribution for the component of the orthodontic treatment model in the 0.75mm aligner models. The aligner and attachment were expressed as Peak Von misses values, and the bones (cortical and cancellous) and PDL were expressed as maximum primary stress values.

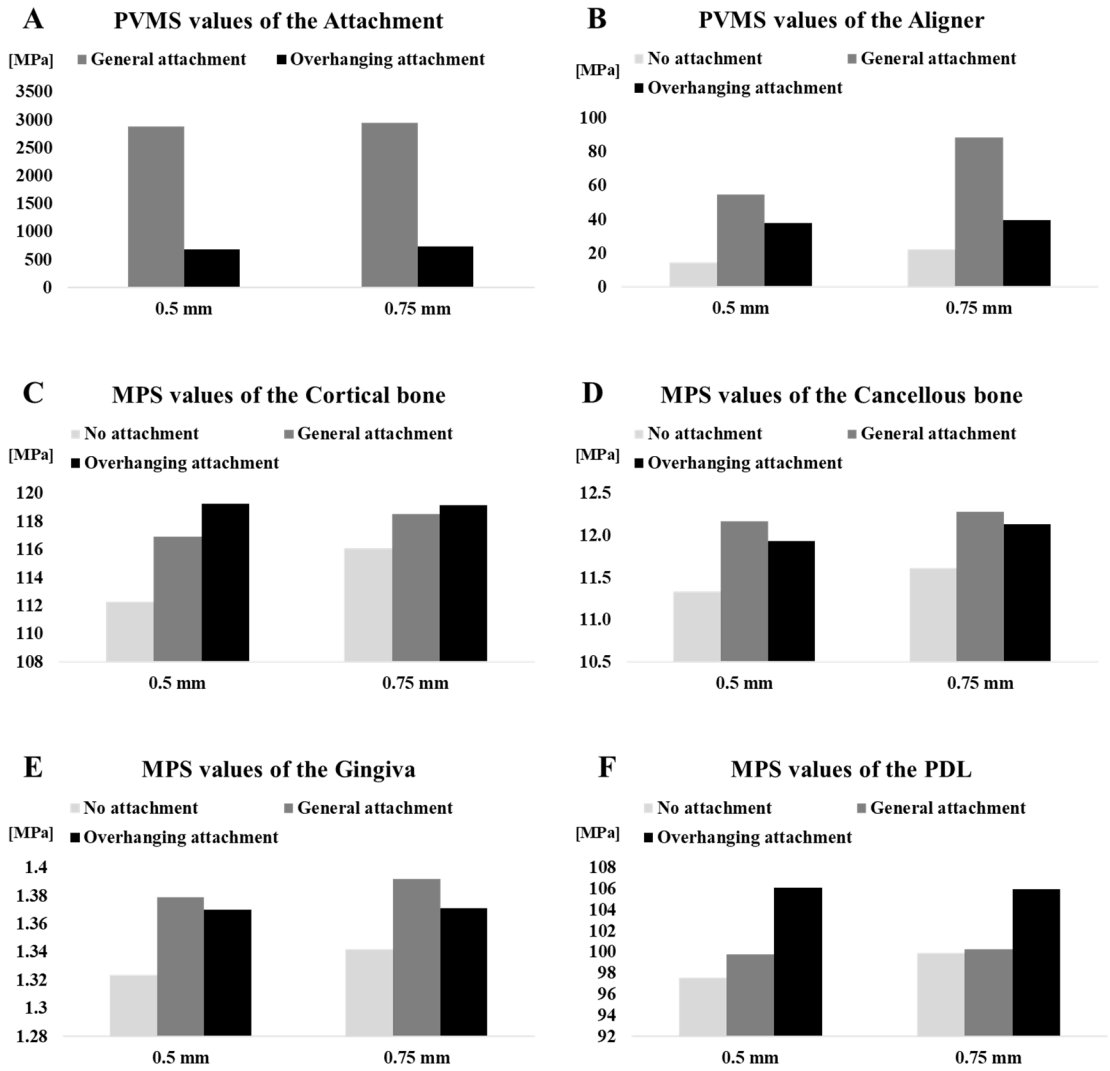


Figure 10. Peak von Mises stress(PVMS) values measured in the aligner and attachment, and MPS values measured in the cortical bone, cancellous bone, gingiva, and PDL for the both 0.5-mm and 0.75-mm-thick models. A:Attachment. B:Aligner. C:cortical bone. D:cancellous bone. E: gingiva. F: PDL .

고찰

세계적으로 투명교정장치를 이용한 치료의 수요가 늘어나고 있지만, 복잡한 치아이동을 위한 투명교정장치의 효율성에 대해서는 여전히 논란이 있는 것이 사실이다. 이것은 투명교정장치의 힘과 회전 모멘트의 메카니즘이 불확실한 것도 한가지 원인이다[36]. 브라켓과 와이어를 이용한 교정치료에 비하여, 투명교정장치는 정확한 힘의 전달 포인트를 찾는 것이 상대적으로 모호하다. 따라서 투명교정기를 이용한 치아이동은 의도치 않은 경사이동에 의한 것이 대부분이며, 앞선 연구들에서도 투명교정기를 이용한 정확한 치아이동의 어려움에 대해서 보고 된 바 있다[37, 38].

최근 치아 표면에 레진어태치먼트를 붙이는 것이 투명교정기의 치아이동에 좀더 도움이 된다는 것이 알려졌다[32, 39, 40] . 아울러 어태치먼트 디자인과 위치가 치아이동에 미치는 영향에 대하여 여러 가지 연구가 시도 되었다[17, 20, 29, 32, 41]. Rossini 등에 의한 체계적 문헌고찰 연구에 의하면 사각형모양이나, 타원형 모양의 어태치먼트가 투명교정장치의 교정적 치아이동 결과에 더 긍정적인 영향을 준다고 하였다[37] .

본 연구자는 투명교정장치를 이용하여 치근이동이나 치체이동을 더 효과적으로 할 수 있는 오버행잉 어태치먼트를 개발하여 수년간 임상에서 적용하여 왔으며 좋은 결과를 얻고 있다 (Figure 11).

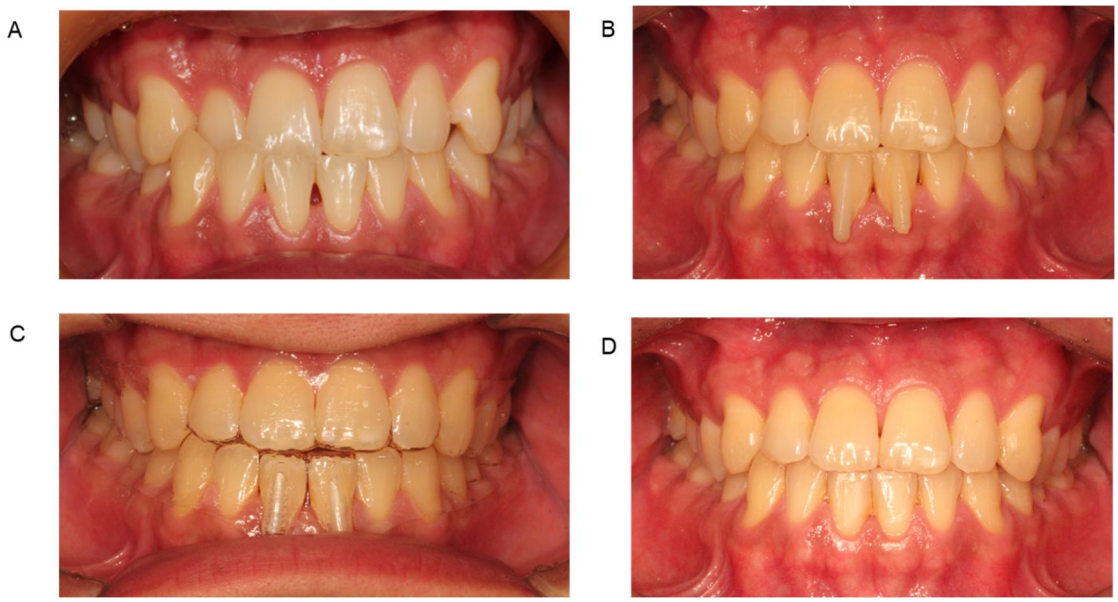


Figure 11. Overhanging attachment case. A: Before correction. B: Application of overhanging attachment. C: Clear aligner with overhanging attachment. D: After correction. Black triangle disappeared.

또한 오버행잉 어태치먼트가 잇몸과 접촉할 경우 잇몸염증이 발생할 수 있어, 잇몸 쪽으로 확장시킨 어태치먼트와 잇몸 사이에 0.5mm 이상의 공간을 확보하여 염증을 방지하였다.

본 연구에서는 투명교정장치를 이용한 교정치료에서 오버행잉 어태치먼트를 사용할 경우 치아이동에 어떻게 도움이 되는지 정확히 알아내기 의하여 3D유한분석모델을 만들었다.

본 실험 결과 재형상화한 #31 치아를 투명교정장치를 이용하여 0.1mm 근심 치체이동 시도할 경우 치관 의 근심 경사이동, 치축회전, 설측 경사이동이 발생한다는 것을 알 수 있었다. 투명교정장치에 의한 힘은 저항중심이 아닌 치관에 주어지기 때문에 의도치 않은 이동이 발생하게 되는 것이다. 따라서 투명교정장치는 교정치료 기간동안 교정과 의사가 원치 않은 치아이동을 초래할 수 있다.

본 실험에서 어태치먼트가 없이 0.5mm 장치 두께를 0.75mm 로 바꿔도 치관의 근심경사이동, 치축회전, 설측경사이동의 발생에는 거의 변화가 없었다. 하지만 GA어태치먼트를 치면에 적용하였을 때, 0.5mm 두께의 장치는 치축 회전을 62.86% 줄였으며, 0.75m 장치는 26.47%

줄여 주었다. 하지만 근심경사이동이나, 설측 경사이동은 변화가 거의 없었다. 이런 결과는 H 등이 보고한 어태치먼트가 경사이동을 막지 못한다는 결과와도 일치한다[42] . 하지만 오버행잉 어태치먼트를 적용할 경우, 치축회전은 0.5mm 와 0.75mm 에서 각각 80%와 97.6% 줄어들었다. 이는 오버행어태치먼트에 의하여 투명교정기로 힘이 가해지는 영역이 치은부위로 늘어나서 치아의 저항중심과 힘의 작용점 사이의 거리가 줄어든 것 때문으로 볼 수 있다. 하지만 설측경사는 변하지 않고 그대로 발생하였다. 따라서 효과적인 어태치먼트라도 근원심 경사이동이나 치축회전이동은 줄일 수 있지만, 설측경사 이동은 줄일 수 없다는 것을 알 수 있다.

피질골이나 해면골,치은,치주인대 모두 응력분포패턴은 비슷하였다. 피질골과 해면골, 치은부위의 MPS (Maximum principal stress) 값은 0.5mm 와 0.75mm 두께 모두에서 유의한 차이가 없었으며, 이는 비슷한 골반응을 보일 것으로 예상되었다. 장치에 남아있는 피크 폰 미세스 응력(Peak von Mises stress)는 일반적 어태치먼트 모델에서 가장 높았다. 오버행잉 어태치먼트 장치는 어태치먼트를 사용하지 않은 군보다 1.7배 높은 PVMS가 남아 있었으며, 일반적 어태치먼트 모델의 PVMS는 어태치먼트를 사용하지 않은 군보다 4배 높았다. 따라서 치아표면에 어태치먼트가 있을 경우, 장치에 더 큰 힘을 가할 수 있고, 이것은 치아이동을 더 많이 할 수 있게 한다.

일반적 어태치먼트에서 매우 높은 PVMS(Peak von Mises stress)값이 측정되었으며, 이는 일반적 어태치먼트가 있는 장치에서 어태치먼트가 탈락될 위험성이 높다는 것을 의미한다. 치주인대에서 최대힘은 원심측의 중앙부위에 집중되어 있었는데, 인장력은 주로 원심측에, 응력은 근심측 중간지점에 관찰되었다. 치주인대에서 응력 값은 인장부위에서 97~106MPa 였으며, 압박 측에서 98-106MPa 였다. 이정도 측정치들은 치조골의 치주인대에 의한 치조골 리모델링을 유도할 수 있는 정도였다[43, 44].

본 연구에서는 단순히 치아 하나를 단순히 한 방향으로 이동시킬 경우에 해당하여 연구를 진행하였다. 실제 치열교정치료에서 치아이동은 치체이동 뿐 아니라, 회전, 함입,정출, 협설측 이동 등 다양한 방향으로 이동이 필요하므로, 투명교정장치를 이용한 이러한 다양한 치아 이동

에 대하여는 추가적인 연구가 필요하다. 특히 오버행잉 어태치먼트의 길이나 잇몸위로 연장되는 길이, 두께와 폭에 따른 영향과, 한번에 이동하는 셋업 양, 그리고 치근이동을 원하거나 치근 쪽으로 더 큰 회전 모멘트를 가하고자 할 경우, 어태치먼트를 치아의 축에 나란히 붙이지 않고, 움직이고자 하는 치근의 반대방향으로 회전시켜서 붙일 경우에 각각 치근단에 가해지는 힘의 분석 등의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 오버행잉 어태치먼트가 있는 경우와 일반적 어태치먼트가 있는 경우, 어태치먼트가 없는 경우에 대하여 투명교정기를 0.1mm 근심 치체 이동시키는 결과에 대하여 유한요소분석법으로 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 오버행잉 어태치먼트가 있는 투명교정장치는 일반 어태치먼트가 있는 것이나 어태치먼트가 없는 것 보다 근원심 경사이동 및 치축 회전이동을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
2. 오버행 어태치먼트는 교정치료중에 어태치먼트와 장치에 힘이 과하게 집중되는 것을 막고 주변으로 분산시켜서 어태치먼트가 탈락되는 위험성을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.
3. 근원심 경사이동 및 치축 회전이동을 줄일 수 있고, 어태치먼트 탈락 위험을 줄일 수 있으므로 오버행잉 어태치먼트가 치체이동에 더 효과적인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Jung, M.H., *Current trends in orthodontic patients in private orthodontic clinics.* Korean Journal of Orthodontics, 2021. 39(1): p. 36-42.
2. Proffit, W., et al., *Contemporary Orthodontics, 6e: South Asia Edition-E-Book.* 2021: p. 653-654
3. Bae, G.S., *Clinical limitations and its solutions of the clear overlay appliance treatment.* The Journal of the Korean dental association, 2016. **54**(7): p. 563-574.
4. D'Amario, M., et al., *Debonding and Clean-Up in Orthodontics: Evaluation of Different Techniques and Micro-Morphological Aspects of the Enamel Surface.* Dentistry Journal, 2020. 8(2): p. 58.
5. Kim, H.m., et al., *A comparative study about bonding strength of customized metal base for lingual orthodontic appliance made by non-precious metal.* 2021.
6. Boyd, R.L., *Esthetic Orthodontic Treatment Using the Invisalign Appliance for Moderate to Complex Malocclusions - Boyd - 2008 - Journal of Dental Education - Wiley Online Library.* 2021.
7. B, M., W. KB, and M. RR, *Invisalign--patient profiling. Analysis of a prospective survey.* Journal of orofacial orthopedics 2003. 64(5).
8. E, K. and M. RJ, *Automated custom-manufacturing technology in orthodontics.* American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 2003. 123(5).
9. ND, K., et al., *How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign.* American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 2009. 135(1).
10. Melsen, B., *Northcroft Lecture: How has the spectrum of orthodontics changed over the past decades?* Sage, 2014.
11. JH, S., et al., *Comparative Analysis of Stress in the Periodontal Ligament and Center of Rotation in the Tooth after Orthodontic Treatment Depending on Clear Aligner Thickness-Finite Element Analysis Study.* Materials (Basel, Switzerland), 2021. 14(2).
12. A, M., et al., *Efficacy of a Copper-Calcium-Hydroxide Solution in Reducing Microbial Plaque on Orthodontic Clear Aligners: A Case Report.* European journal of dentistry, 2019. 13(3).

13. F, E., et al., *A comparative study of two different clear aligner systems.* Progress in orthodontics, 2014. 15(1).
14. E, K., et al., *Invisalign® treatment in the anterior region: were the predicted tooth movements achieved?* Journal of orofacial orthopedics, 2012. 73(5).
15. M, S., et al., *Treatment outcome and efficacy of an aligner technique--regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization.* BMC oral health, 2014. 14.
16. Y, Y., et al., *Effects of Attachment of Plastic Aligner in Closing of Diastema of Maxillary Dentition by Finite Element Method.* Journal of healthcare engineering, 2019. 2019.
17. Goto, M., et al., *A method for evaluation of the effects of attachments in aligner-type orthodontic appliance: Three-dimensional finite element analysis.*, 2019.
18. N, H., et al., *Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign.* American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 2020. 158(3).
19. RL, B., *Surgical-orthodontic treatment of two skeletal Class III patients with Invisalign and fixed appliances.* Journal of clinical orthodontics : JCO, 2005. 39(4).
20. WH, K., et al., *Optimal Position of Attachment for Removable Thermoplastic Aligner on the Lower Canine Using Finite Element Analysis.* Materials (Basel, Switzerland), 2020. 13(15).
21. RJ, S. and B. CJ, *Mechanics of tooth movement.* American journal of orthodontics, 1984. 85(4).
22. Y, C., et al., *Optimization of configuration of attachment in tooth translation with transparent tooth correction by appropriate moment-to-force ratios: Biomechanical analysis.* Bio-medical materials and engineering, 2015. 26 Suppl 1.
23. WH, K., et al., *Finite Element Analysis of Novel Separable Fixture for Easy Retrievement in Case with Peri-Implantitis.* Materials (Basel, Switzerland), 2019. 12(2).
24. WH, K., et al., *Optimized Dental Implant Fixture Design for the Desirable Stress Distribution in the Surrounding Bone Region: A Biomechanical Analysis.* Materials (Basel, Switzerland), 2019. 12(17).
25. C, C., et al., *A novel biomechanical model assessing continuous orthodontic archwire activation.* American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 2013. 143(2).

26. M, Ç. and S. M, *Maxillary posterior intrusion mechanics with mini-implant anchorage evaluated with the finite element method.* American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 2011. 140(5).
27. Y, K. and F. H, *A numerical simulation of tooth movement by wire bending.* American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics, 2006. 130(4).
28. AN, N., et al., *A visco-hyperelastic-damage constitutive model for the analysis of the biomechanical response of the periodontal ligament.* Journal of biomechanical engineering, 2008. 130(3).
29. B, C., et al., *A Three-Dimensional Finite Element Analysis of Upper-Canine Distalization with Clear Aligners, Composite Attachments, and Class II Elastics.* Journal of clinical orthodontics : JCO, 2017. 51(1).
30. X, C., et al., *A three-dimensional finite element analysis of mechanical function for 4 removable partial denture designs with 3 framework materials: CoCr, Ti-6Al-4V alloy and PEEK.* Scientific reports, 2019. 9(1).
31. S, G., D. JJ, and M. PS, *Biomechanical behavior of oral soft tissues.* Journal of periodontology, 2011. 82(8).
32. JP, G., et al., *Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis.* The Angle orthodontist, 2015. 85(3).
33. Fongsamootr, T. and P. Suttakul, *Effect of Periodontal Ligament on Stress Distribution and Displacement of Tooth and Bone Structure Using Finite Element Simulation.*, 2018.
34. R, S., et al., *Biomechanical Effects of Different Auxiliary-Aligner Designs for the Extrusion of an Upper Central Incisor: A Finite Element Analysis.* Journal of healthcare engineering, 2019. 2019.
35. X, Z., et al., *Simulation of orthodontic force of archwire applied to full dentition using virtual bracket displacement method.* International journal for numerical methods in biomedical engineering, 2019. 35(5).
36. T, J., et al., *Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: a 3D finite element study.* Scientific reports, 2020. 10(1).
37. G, R., et al., *Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review.* The Angle orthodontist, 2015. 85(5).
38. XJ, Z., et al., *Integrated three-dimensional digital assessment of accuracy of*

anterior tooth movement using clear aligners. Korean journal of orthodontics, 2015. 45(6).

39. A, C., et al., *Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study.* The Angle orthodontist, 2020. 90(2).
40. S, B., et al., *Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners.* International journal for numerical methods in biomedical engineering, 2017. 33(8).
41. W, H., et al., *Torquing an upper central incisor with aligners--acting forces and biomechanical principles.* European journal of orthodontics, 2010. 32(6).
42. CT, H., et al., *Effects of different aligner materials and attachments on orthodontic behavior.* Journal of dental sciences, 2021. 16(3).
43. Penedo, N.D., et al., *3D simulation of orthodontic tooth movement.* Dental Press Journal of Orthodontics, 2021. 15: p. 98-108.
44. A, K., et al., *Finite element modeling of the periodontal ligament under a realistic kinetic loading of the jaw system.* The Saudi dental journal, 2020. 32(7).

영 문 요 약

Efficiency of overhanging attachment to induce bodily movement of mandibular incisor in orthodontic treatment using finite element analysis

Kyung-Jae, Hong

Department of Dentistry, college of Medicine, University of Ulsan

Orthodontic treatment using clear aligner has become the preferred choice for malocclusions for most adult patients. because of it's esthetic appeal and conveniency. However, limitations exist for aligner teeth movement such as bodily movement or root movement. Composite attachments on the tooth surface are intended to enable active control of tooth movement. However, unintended tooth movement still occur. In this study, we present an effective attachment design of an attachment that can efficiently induce tooth movement by comparing and analyzing the movement and rotation of teeth between a general attachment and an overhanging attachment.

1. Materials and methods

The 3D finite element models were constructed from CBCT data and used to analyze the mesial displacement of the central incisor using 0.5mm and 0.75mm thick aligners without an attachment but with general and overhanging attachments.

2. Results

Our results show that the aligner with the overhanging attachment can effectively reduce crown tipping and prevent axial rotation for an intended mesial displacement of the central incisor.

3. Conclusions

The overhanging attachment is more effective to enable mandibular incisor bodily movement with the clear aligner.

Keywords :clear aligner, overhanging attachment, finite element analysis, bodily movement, mandibular incisor

본 논문은 본연구자가 학술지 Materials 에 2021년 8월 30일 게재한 연구 “ The Efficient Design of a Clear Aligner Attachment to Induce Bodily Tooth Movement in Orthodontic Treatment using Finite Element Analysis " 결과를 인용하였음을 알립니다.