



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

상악 중절치의 설측 치체 이동량에 따른  
투명교정 장치의 6축 힘체계 변화

연세대학교 대학원

치의학산업학과

이 경 우

상악 중절치의 설측 치체 이동량에 따른  
투명교정 장치의 6 축 힘체계 변화

지도교수 이 기 준

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2025 년 6 월

연세대학교 대학원

치의학산업학과

이 경 우

상악 중절치의 설측 치체 이동량에 따른  
투명교정 장치의 6 축 힘체계 변화  
이경우의 석사 학위논문으로 인준함

심사위원장 \_\_\_\_\_ 유 형 석 (서명)

심사위원 \_\_\_\_\_ 이 기 준 (서명)

심사위원 \_\_\_\_\_ 차 정 열 (서명)

연세대학교 대학원  
치의학산업학과

2025 년 6 월

## 감사의 글

이 논문이 완성되기까지 도움을 주신 모든 분들께 깊이 감사드립니다.

가장 먼저 부족한 저에게 아낌없는 조언과 전문적인 지도로 이끌어 주신 이기준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 제 연구에 관심을 가져 주시고 아낌없이 조언을 해주셨던 유형석 교수님과 차정열 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

대학원 과정동안 회사 업무와 학업을 함께 병행하며 든든한 학우이자 전우로서 힘이 되어준 동기 허경선생과 이은주 선생에게도 감사의 마음을 전합니다.

아울러 회사 업무와 대학원 과정을 병행할 수 있도록 배려해 주신 서진우 연구소장님과 바쁜 상황에서도 항상 맡은 업무를 원활하게 수행하며 짐을 덜어주었던 팀원들에게도 감사의 마음을 전합니다.

끝으로, 언제나 저를 믿고 응원해 주신 양가 부모님께 깊은 감사를 드리며, 늘 든든한 힘이 되어준 아내 유진이와 밝은 웃음으로 힘이 되어준 은성이에게 깊은 사랑과 감사를 전합니다.

2025 년 6 월

이경우

## 차 례

그림 차례.....	ii
표 차례.....	iii
국문 요약.....	iv
제 1 장 서론.....	1
1.1. 연구목적 및 필요성.....	1
제 2 장 연구재료 및 방법.....	3
2.1. 연구 재료.....	3
2.1.1. 치아 이동량 계획.....	3
2.1.2. Sheet 의 종류.....	3
2.1.3. Power ridge 의 활용 여부.....	4
2.1.4. 실험군 그룹화.....	6
2.2. 연구 장비 구성.....	7
2.3. 측정 절차.....	10
2.4. 분석 방법.....	10
제 3 장 연구 결과.....	11
3.1. 치아 이동량 계획 0.2 mm 에서 각 그룹의 6 축 힘체계 변화 .....	11
3.2. 치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 각 그룹의 6 축 힘체계 변화 .....	16
3.3. 치아 이동량 계획 0.2 mm 에서 각 그룹의 M/F ratio 변화.....	21
3.4. 치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 각 그룹의 M/F ratio 변화.....	22
제 4 장 고찰.....	23
제 5 장 결론.....	26
참고문헌.....	27
영문 요약.....	30

## 그림 차례

<Figure 1> Power ridge applied image .....	5
<Figure 2> Force/Torque measuring equipment with Miniature 6 Axis F/T Sensor .....	7
<Figure 3> Definition of force/torque direction in the measurement system of the maxillary right incisor .....	8
<Figure 4> Dental CAD software OnyxCeph working image used in the study.....	9
<Figure 5> Fx at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week.....	15
<Figure 6> Ty at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week.....	15
<Figure 7> Fx at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week.....	20
<Figure 8> Ty at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week.....	20
<Figure 9> M/F ratio at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week.....	21
<Figure 10> M/F ratio at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week .....	22

## 표 차례

<Table 1> Classification of tooth displacement plan used for experiment .....	3
<Table 2> Classification of sheet used for experiment.....	4
<Table 3> Classification of power ridge applied for experiment.....	5
<Table 4 > Classification of experiment group .....	6
<Table 5> Definition of force/torque direction in the measurement system of the maxillary right incisor.....	8
<Table 6> F/T of CA Foil at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week .....	12
<Table 7> F/T of CA Pro+ at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week....	13
<Table 8> F/T of MagicFoil at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week ..	14
<Table 9> Retention rate of $R^2$ at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week .....	15
<Table 10> F/T of CA Foil at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week....	17
<Table 11> F/T of CA Pro+ at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week .	18
<Table 12> F/T of MagicFoil at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week	19
<Table 13> Retention rate of $R^2$ at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week .....	20
<Table 14> M/F ratio at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week.....	21
<Table 15> M/F ratio at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week.....	22



## 국 문 요 약

### 상악 중절치의 설측 치체 이동량에 따른 투명교정 장치의 6 축 힘체계 분석

디지털 기술이 지속적으로 발전함에 따라 최근에는 브라켓과 와이어를 사용하는 전통적인 치료 방식과 함께 구강스캐너, 치과용 CAD/CAM 소프트웨어, 고분자 플라스틱으로 만든 sheet 를 사용하여 제작되는 투명교정 장치를 사용하는 치료 방식이 널리 사용되고 있다. 투명교정 장치를 사용하는 치료의 성공은 투명교정 장치를 장착하는 기간 동안 치아에 교정력을 지속적으로 인가하는 것이 가장 중요하다. 교정력의 지속적인 인가는 치아 이동량 계획, Sheet 의 종류, 부가장치인 power ridge 의 활용에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 상악 중절치의 설측 치체 이동 상황에서 치아 이동량 계획과 지속적인 교정력 인가의 관계에 대하여 확인하였으며, 추가적으로 sheet 의 종류 및 power ridge 의 활용과의 상관관계를 확인하였다.

우선 투명교정 장치를 장착하는 기간인 일주일 동안의 교정력( $F_x$ ,  $T_y$ ) 변화를 측정하기 위해 상악 중절치의 치축을 고려하여 임상환경을 모사한 측정 장비를 제작하였으며 6 축 Force 와 Torque 의 측정은 0/1/2/3/5/7 일차에 실시하였다. 측정을 실시하지 않는 동안은 임상환경을 모사한 초기 구강 모델에 실험군을 장착하여 보관하였다. 실험군의 구성은 치아 이동량 계획 / Sheet 의 종류 / Power ridge 의 활용 여부를 조합하여 총 12 개의 그룹으로 구분하여 측정을 실시하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 모든 측정값은 시간의 흐름에 따라 0에 수렴하는 방향으로 감소했으며 3일차부터 소성변형이 시작되는 것을 알 수 있었다. 또한 치아 이동량 계획 0.4 mm에서는 모든 그룹의 M/F ratio가 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있었으며 0.2 mm에서는 상대적으로 높은 M/F ratio가 확인되었다. Power ridge의 활용 또한 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 또한 각 그룹과  $F_x$ ,  $T_y$ 의 상관관계를 분석한 결과, 다음과

같은 결론을 얻을 수 있었다.

치아 이동량 계획의 경우, Fx 에는 유의한 차이가 있었으며( $p = .037$ ) Ty 에서는 유의한 차이를 확인할 수 없었다. ( $p = .289$ ) Sheet 의 종류의 경우에는 Fx 에서는 유의한 차이를 확인할 수 없었으며( $p = .135$ ) Ty 에서는 유의한 차이를 확인할 수 있었다. ( $p = .048$ ) 마지막으로 power ridge 의 활용의 경우, Fx 에서는 유의미한 차이를 확인할 수 없었으나( $p = .220$ ) Ty 에서는 유의미한 차이를 확인할 수 있었다. ( $p = .023$ )

일주일 동안 상악 중절치의 설측 치체 이동 상황에서 치아가 lingualversion 되지 않도록 하기 위해서는 Fx 보다는 Ty 를 효과적으로 조절하는 것이 중요하다는 점을 기반으로 본 연구의 결과를 살펴보면 치아 이동량 계획을 0.2 mm 수준으로 정밀하게 수립하고 power ridge 를 활용하며 적절한 M/F ration 가 발생할 수 있는 CA Foil 과 MagicFoil 을 활용하는 것이 가장 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

이 연구를 바탕으로 상악 중절치의 다른 방향으로의 치아 이동 상황을 고려한 요소들의 검증이 필요할 것으로 보이며 더 나아가서 다양한 형상의 다른 치아들에 대한 검증을 실시할 필요가 있을 것으로 보인다. 마지막으로 환자 맞춤형 의료기기인 투명교정 장치의 임상적인 유효성을 검증하기 위해 구강환경을 모사한 측정 장비에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

---

핵심 되는 말: 투명교정 장치, 교정력, 유지율, 측정 장비, 치체 이동, 투명교정 장치 소재, 치아 이동량 계획, Power ridge

# 1. 서론

## 1.1. 연구 목적 및 필요성

부정교합환자를 정상교합으로 치료하는 교정치료에 활용되는 의료기기는 기존의 브라켓과 와이어를 사용한 전통적인 방식에서 최신 디지털 기술을 기반으로 발전하고 있는 구강스캐너, 3D 프린터, 치과용 CAD/CAM 소프트웨어를 활용한 투명교정 장치로 발전하고 있다(Gawali et al., 2024; Spagnuolo & Sorrentino, 2020; Zhang et al., 2025). 디지털 기술을 활용하여 환자의 투명교정치료 계획을 수립하고 시각적인 도움을 주고 치료 결과를 예측하며 환자에게 심미성과 편리함을 제공하는 투명교정 장치 활용 범위는 지속적으로 확장되고 있으며 그 규모 또한 증가하고 있는 추세이다(Baxmann et al., 2022; Best et al., 2017; Kau et al., 2023; Tamer et al., 2019).

투명교정 장치를 통하여 원하는 치아의 이동을 달성하기 위해서는 투명교정 장치가 치아에 지속적인 교정력을 가할 수 있어야 한다. 그러나 투명교정 장치의 소재인 sheet 는 고분자 플라스틱으로 만들어져 교정용 와이어에 비해 탄성이 낮고 착용 후, 투명교정 장치의 일반적인 권장 착용 기간인 일주일 내에 장치의 응력완화가 크게 발생하는 단점이 존재하며 이로 인해 교정치료에 오랜 기간이 걸리게 되며 투명교정 장치를 활용한 교정치료의 예측도가 낮아지는 문제가 발생한다(Keller et al., 2020; Liu & Cha, 2024).

이에 따라 투명교정 장치의 교정치료 예측도를 높이기 위해 지속적인 교정력을 가할 수 있도록 치과 산업계의 다양한 업체에서 sheet 의 물리적 특성/치아 이동량 계획/부가장치인 power ridge 의 활용에 대한 연구가 활발하게 실시하고 있다. 먼저 sheet 의 물리적 특성을 강화하기 위해 PETG, TPU 등의 다양한 원재료를 연구하고 있으며, Sheet 의 구조를 단층과 다층구조로 다양화하고 있다(Ercoli et al., 2014; Golkhani et al., 2022; Jia et al., 2022; Park et al., 2023). 또한 적절한 교정력의

착용 기간동안 지속될 수 있도록 각 단계의 치아 이동량 계획을 치아의 형상과 이동 양상 및 방향을 고려하여 최적화하는 연구가 진행되고 있으며, 이동 대상 치아에 효과적으로 교정력을 가하기 위해 투명교정 장치에 Attachment 와 같은 추가 부착물이나 power ridge 와 같은 형상과 적용 위치에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다(Dai et al., 2019; Karras et al., 2021).

본 연구의 목적은 투명교정 장치를 사용한 상악 중절치의 설측 치체 이동 상황에서 치아 이동량 계획, Sheet 의 종류, power ridge 의 활용이 일주일간의 교정력 유지율에 미치는 영향도를 통계 분석하여 유의성을 찾아내고 더 나아가 최적의 요소를 제안하는 것이다.

## 2. 연구 재료 및 방법

### 2.1. 연구 재료

#### 2.1.1. 치아 이동량 계획

본 연구에서는 투명교정 장치의 일반적인 권장 착용 기간인 일주일 동안의 교정력을 측정하고 평가하기 위해 치아 이동량 계획을 주요 인자로 설정하였으며 치아 이동량 계획을 2 가지로 구분하였다. 먼저 치아 이동량 0.2 mm 는 최근의 투명교정 소재 및 장치의 개발에 적합하게 설정된 수준이며 치아 이동량 0.4 mm 는 투명교정 치료의 초기부터 일반적으로 적용되어진 수준이다. (Table 1)

일반적으로 이동 대상 치아를 원하는 위치로 이동하기 위해서 탄성을 가진 투명교정 장치가 변형되어 장착되기 때문에 투명교정 장치가 치아에 가하는 교정력은 각 단계 별로 설정된 치아 이동량 계획에 의해 큰 영향을 받는다고 할 수 있다.

Table 1. Classification of tooth displacement plan used for experiment

Tooth displacement plan (mm)	Code
0.2	02
0.4	04

#### 2.1.2. Sheet 의 종류

본 연구에서는 투명교정 장치의 일반적인 권장 착용 기간인 일주일 동안의 교정력을 측정하고 평가하기 위해 치아 이동량 계획과 함께 sheet 의 종류를 주요 인자로 설정하였으며 sheet 의 종류를 원재료와 구조에 따라 구분하였다. 원재료는 가장 일반적으로 많이 사용되고 있는 PETG 와 TPU 로 구분하였으며 일반적으로 TPU 가 PETG 에 비해 탄성이 높은 것으로 보고되고 있다. 다음은 구조에 따라 단층과 다층으로 구분하였다. 본 연구에서 사용할 최종 sheet 의 선정은 원재료와

구조의 조합을 고려하여 국내 및 해외 투명교정에서 보편적으로 사용되는 제품으로 실시하였으며, 국내에서 인허가를 취득한 제품으로 제한하였다. (Table 2)

일반적으로 치아를 이동시키는 힘은 투명교정 장치의 탄성과 내구성에 의해 발생되고 유지되기 때문에 투명교정 장치가 치아에 가하는 교정력은 sheet 가 가진 물성에 의해 영향을 받는다고 할 수 있다. 이러한 sheet 의 종류는 sheet 제작에 사용되는 원재료와 구조의 조합에 의해 결정되어진다.

Table 2. Classification of sheet used for experiment

Name	Material	Type	Code	Manufacturer
CA Foil Hard	PETG	단층	CF	Scheu-Dental, Iserlohn, Germany
CA Pro+	PETG, TPU	다층	CP	Scheu-Dental, Iserlohn, Germany
MagicFoil	TPU	다층	MF	OSSTEM, Seoul, Korea

### 2.1.3. Power ridge 의 활용 여부

본 연구에서는 투명교정 장치의 일반적인 권장 착용 기간인 일주일 동안의 교정력을 측정하고 평가하기 위해 상기 두가지 인자를 포함하여 power ridge 의 활용 여부도 주요 인자로 설정하였으며 power ridge 의 활용여부에 따라서 구분을 실시하였다. (Table 3)

일반적으로 치아를 설측으로 치체 이동시키는 과정에서 치근과 치아 이동양상이 다르게 구현되어 치아가 설측으로 쓰러지는 Lingualversion 되는 현상이 나타날 수 있으며 이를 방지하기 위해 투명교정 치료에서는 치아의 순측 치경부와 설측 절단연 부위에 음각의 형상을 적용하여 치아가 Lingualversion 되는 반대 방향의 회전을 발생시키는 power ridge 를 활용한다. (Fig 1)

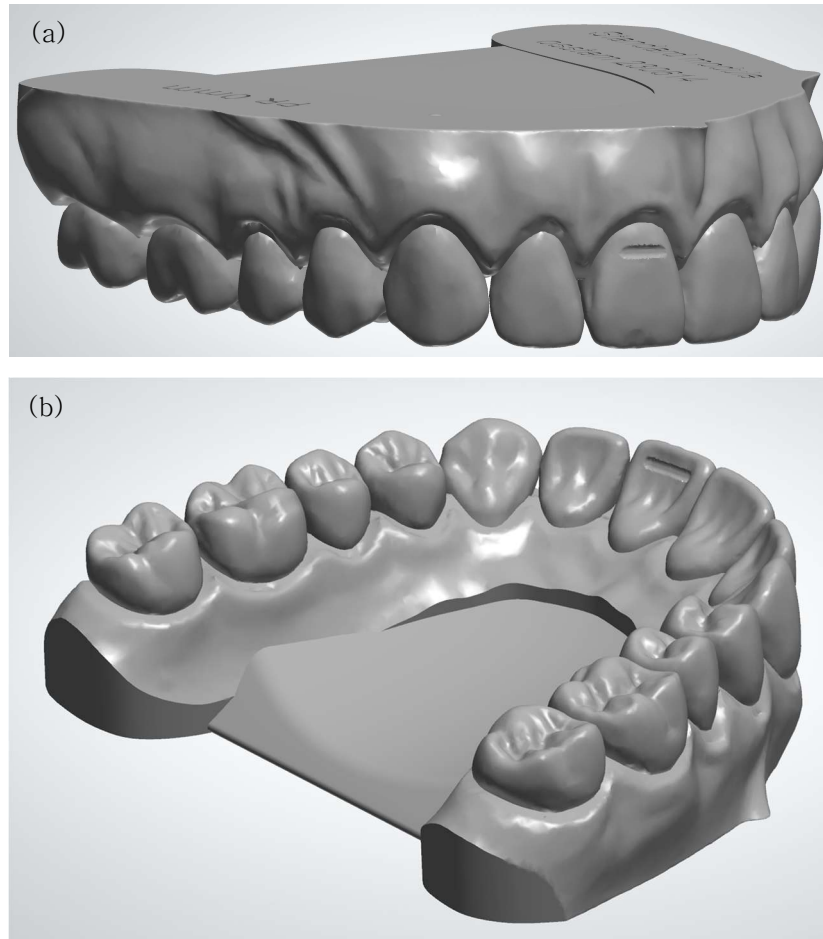


Fig 1. Power ridge applied image. (a) Cervical third of the labial surface of the #11; (b) Incisal edge region of the lingual surface of the #11

Table 3. Classification of power ridge applied for experiment

Power ridge	Code
Without	-
With	+

#### 2.1.4. 실험군 그룹화

본 연구에서는 Sheet 의 종류 / 치아 이동량 계획 / Power ridge 의 활용 여부를 조합하여 실험군의 그룹을 구분하였다. (Table 4)

Table 4. Classification of experiment group

Sheet 의 종류	치아 이동량 계획 (mm)	Power ridge	Code	Group
CA Foil	0.2	–	CA02–	Group 1
	0.4	–	CA04–	Group 2
	0.2	+	CA02+	Group 3
	0.4	+	CA04+	Group 4
CA Pro+	0.2	–	CP02–	Group 5
	0.4	–	CP04–	Group 6
	0.2	+	CP02+	Group 7
	0.4	+	CP04+	Group 8
MagicFoil	0.2	–	MF02–	Group 9
	0.4	–	MF04–	Group 10
	0.2	+	MF02+	Group 11
	0.4	+	MF04+	Group 12



## 2.2. 연구 장비 구성

본 연구에서는 투명교정 장치를 장착하는 기간인 일주일 동안의 교정력 변화를 측정하기 위해 임상환경을 모사한 측정 장비를 제작하였으며 정밀한 측정을 위해 6 축의 Force 와 Torque 를 감지할 수 있는 소형센서를 사용하였다. (Fig 2)

측정 대상 치아를 제외한 부위는 장비의 베이스에 고정되어 있으며 측정 대상 치아인 상악 우측 중절치만 별도로 분리되어 6 축 소형 F/T 센서(Aidin Robotics, Anyang, Korea)에 고정되어 있다.



Fig 2. Force/Torque measuring equipment with Miniature 6 Axis F/T Sensor

상악 우측 중절치의 치축을 기준으로 각 축에 대한 Force 와 Torque 를 정의하였으며 측정값은 일반적인 치아 교정력의 단위인 gf 와 gf · mm 로

표현하였다. 본 연구에서는 상악 우측 중절치의 설측 치체 이동 상황에 대한 변화를 중점으로 관찰하고 있으며 중요한 측정 항목은 Fx 값과 Ty 값이다. (Table 5, Fig 3)

Table 5. Definition of force/torque direction in the measurement system of the maxillary right incisor

Component	+	-
Fx	Labial	Lingual
Fy	Mesial	Distal
Fz	Extrusion	Intrusion
Tx	Mesial Crown Torque	Distal Crown Torque
Ty	Labial Crown Torque	Lingual Crown Torque
Tz	Mesial Rotation	Distal Rotation

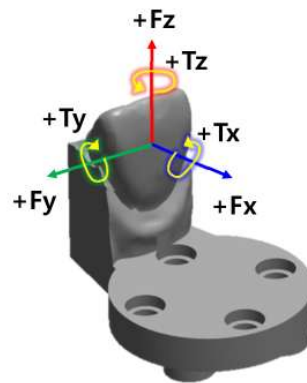


Fig 3. Definition of force/torque direction in the measurement system of the maxillary right incisor

장비에 장착된 상악 구강 모델은 치과용 CAD 소프트웨어(OnyxCeph, Chemnitz, Germany)를 활용하여 디자인하였으며 치아 이동이 필요한 실제 임상

환경을 모사하기 위해 정상교합 모델을 기준으로 상악 우측 중절치를 Labial 방향으로 0.4 mm 치체 이동 되어 있는 형상을 적용한 뒤 Initial 상태로 정의하였다. (Fig 4)

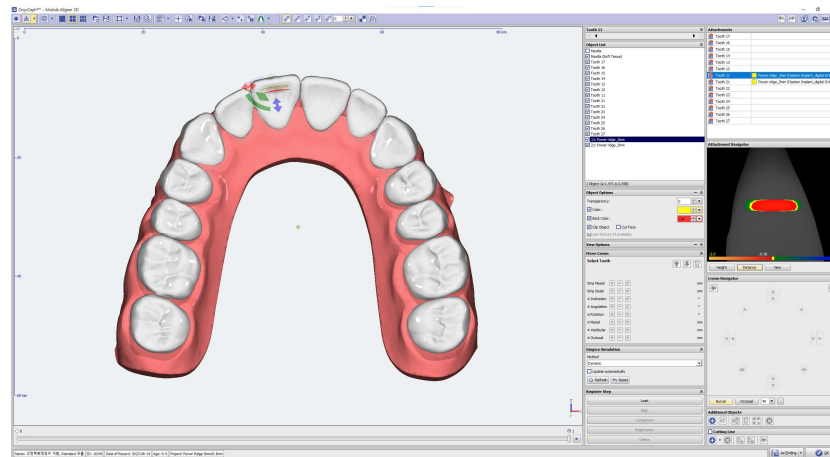


Fig 4. Dental CAD software OnyxCeph working image used in the study

Force 와 Torque 의 측정은 치아 이동량 계획이 반영되어 있는 투명교정 장치가 치아 이동이 반영되지 않은 측정 장비의 구강 모델에 탄성을 활용하여 장착되는 과정에서 상악 우측 중절치와 결합되어 있는 소형 F/T Sensor 에 외력을 가하는 과정에서 발생한다.

## 2.3. 측정 절차

본 연구에서는 투명교정 장치가 치아에 가하는 Force 와 Torque 를 측정하기 위한 장비를 제작하였으며 투명교정 장치를 장착하는 기간인 일주일 동안의 변화를 확인하기 위해 0/1/2/3/5/7 일차에 측정을 실시하였다.

측정 시료의 제작에 사용된 구강 모델은 치아 이동량 계획과 power ridge 를 반영하여 출력하였으며 각 실험군의 시료는 10 개로 설정하였다. 제작된 시료인 투명교정 장치를 측정 장비에 장착한 후, 15 초 동안 발생하는 모든 값을 기록하였으며 장착 과정에서 발생하는 충격에 의한 오차를 제거하기 위해 최초 5 초 동안의 값은 제외한 뒤, 나머지 10 초 동안 측정된 값의 평균을 활용하였다. 각 실험군의 시료는 10 개씩 제작하여 측정하였다.

또한 측정 시점을 제외한 기간 동안에는 각 시료를 측정 장비에 장착된 구강 모델과 동일한 Initial 상태의 출력 모델에 장착하여 보관하며 실제 임상환경을 모사하여 투명교정 장치가 소성 변형되는 것을 모사하였다. 마지막으로 측정 과정에서 실험실의 온도와 습도 변화에 의한 영향을 차단하기 위해 실험실의 환경을 온도는 25 °C, 습도는 50 %로 유지하였다.

## 2.4. 분석 방법

본 연구에서 시행된 시험결과들의 모든 측정값은 정규 분포 형태를 보였으며 평균과 표준편차로 표현하였다. 중요한 측정값의 경우, 측정 일자와 측정값의 회귀 분석을 통해 결정계수(R<sup>2</sup>)의 값을 도출하였다. 이 값이 1 에 가까울수록 데이터가 분산되지 않고 변수가 잘 통제되었음을 의미하며 예측 가능한 치아 움직임이 발생된다고 판단하였다.

또한 ANOVA 분석을 통하여 각 그룹 간의 통계적 상관관계를 확인하였으며  $p$ -Value 가 0.05 보다 작을 경우는 통계적으로 유의미한 것으로 판단하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1. 치아 이동량 계획 0.2 mm 에서 각 그룹의 6 축 힘체계 변화

치아 이동량 계획 0.2 mm 에서 각 그룹의 측정일자 별 6 축 힘체계의 변화를 확인한 결과, 시간의 흐름에 따라 Force 와 Torque 의 크기는 0 에 수렴하는 방향으로 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 각 sheet 마다 발생하는 Force 와 Torque 의 크기와 감소하는 추세가 상이하게 나타났다. (Table 6, 7, 8)

본 연구에서는 보고자 하는 설측 치체 이동 상황에서는 Fx 값과 Ty 값과 측정일자 별 그래프의 회귀 분석을 통해 결정계수( $R^2$ )의 값을 도출한 결과, Fx 에서는 모든 그룹이 0.80 이상으로 확인되어 높은 설명력을 가지는 것을 확인하였으며 Ty 에서는 일부 그룹에서 0.70 미만의 결정계수가 확인되어 다소 낮은 설명력을 가지는 것을 확인할 수 있었다. (Fig 5, 6, Table 9)

Table 6. F/T of CA Foil at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

Day	0	1	2	3	5	7
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
<b>Group 1</b>						
Fx (gf)	-612.7±10.1	-365.7±8.6	-287.5±7.1	-207.4±9.8	-214.1±6.3	-205.1±5.8
Fy (gf)	96.6±3.1	-57.8±3.8	29±4.6	-28.9±4.3	16±3.9	13.8±3.3
Fz (gf)	343.3±18.8	162±10.3	204.1±7.9	108.9±6.1	130.2±4.4	122.5±3.7
Tx (gf-mm)	-1299.2±53.1	-963.9±32.7	-763.9±21.6	-580.3±35.2	-506.8±17.9	-445.1±18.2
Ty (gf-mm)	1124.9±67.6	828.3±33.8	457.6±21	497.2±25.3	400.7±20.1	385.2±22.7
Tz (gf-mm)	-245.3±50.9	-346.4±17.7	-196.8±19.8	-95.3±12.2	-87.2±11.9	-69.7±9.3
<b>Group 3</b>						
Fx (gf)	-467.1±10.6	-257.9±10.2	-171.7±11.3	-157.9±7.4	-118.1±6.4	-103.7±5.5
Fy (gf)	122.4±15.3	-20.4±4.8	63.8±7.1	-0.9±6.4	41.7±6.7	45.6±6
Fz (gf)	43.6±18.8	70.7±16	69±16.3	51.4±11.1	44.6±12.2	26.5±11.3
Tx (gf-mm)	1606.9±109.1	1021.8±39.5	-830.7±67.6	-898.1±41	-698.2±47.5	-626.6±37.2
Ty (gf-mm)	1488.8±92.5	1019.9±88.4	677.8±64.2	856.5±58.7	704.1±61.2	672.4±61.6
Tz (gf-mm)	-1096.1±53.8	-639.7±52.1	-793.8±65	-618.9±29.7	-624.3±43.3	-586.1±46.5

Table 7. F/T of CA Pro+ at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

Day	0	1	2	3	5	7
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
<b>Group 5</b>						
Fx (gf)	-121.5±11	-87.8±8	-91.8±6.8	-76.6±7.1	-26.3±7.1	-19.6±4.6
Fy (gf)	25.1±4.6	-6.6±5.7	-29.1±5.3	-24.2±5	-2.8±3	8.6±2.2
Fz (gf)	34.5±3.1	27.4±3.8	26.7±3.2	20±3.8	10±3.3	8.4±2.1
Tx (gf·mm)	-276.4±47.6	-282.6±32	-355.5±33.4	-301.6±35.4	-102.1±30.1	-20.2±13.3
Ty (gf·mm)	-94.8±23.3	22.9±32.4	91.1±27.1	86.7±22.7	33.1±17.8	5.7±13.6
Tz (gf·mm)	-78.3±21.3	-76.8±9.7	-119.4±14	-119.3±12.3	-24.6±10.6	15.8±7.8
<b>Group 7</b>						
Fx (gf)	-129.4±14.3	-90.7±13.1	-92.1±12.5	-64.4±12.6	-26.6±4.5	-12.8±2.7
Fy (gf)	27.5±3.3	-25.2±12	-31.5±12.4	-21.3±11.6	-7.1±5.9	8.8±3.1
Fz (gf)	26±5.2	6.7±3.9	12±3.1	10.1±2.4	9.6±2.8	9.6±2.3
Tx (gf·mm)	-295.8±51.9	-371.5±93.5	-376.6±99.1	296.8±105.6	-184.4±72	-81.8±47.3
Ty (gf·mm)	41.5±46.3	210.4±97	191±88.6	161.7±84.9	216±82.9	137.8±75.9
Tz (gf·mm)	-148.3±39.2	-194.4±60.7	-154.4±44.2	-125.8±52.6	-139±61.8	-121.1±67.7

Table 8. F/T of CA Pro+ at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

Day	0	1	2	3	5	7
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
<b>Group 9</b>						
Fx (gf)	-348.6±17.4	-234.4±8.3	-172.7±7.1	-178.8±9	-137.4±11	-96.1±4.3
Fy (gf)	27.5±2.3	-41.1±8.6	-51±5.6	-57.7±7.7	-19.2±9.5	-7.2±7.1
Fz (gf)	156.6±15.2	114.9±11.4	76.8±15.2	112.4±3.5	88.2±12.2	81.7±6.3
Tx (gf-mm)	-719±35	-597.6±24.7	-541.8±26.7	-597.7±42.2	-410.9±31.7	-293.6±32.3
Ty (gf-mm)	815.4±45.9	557±54	408.8±43.6	497.4±24.3	304.1±42.7	227.4±13
Tz (gf-mm)	-133.6±20.5	-215.1±30.3	-171.4±20.4	-153.7±16.4	-98.9±18.3	-44.5±13.8
<b>Group 11</b>						
Fx (gf)	-351.5±14	-202.1±9.4	-167.2±13	-136.4±10	-99.2±7	-68.3±6.1
Fy (gf)	80.4±10.2	-15.9±10.3	-27±8.8	-24.1±5.6	-22.2±5.4	11.9±4.7
Fz (gf)	162.3±11.7	113.3±7.8	94.6±11.1	81.5±7.7	73.2±5.3	71.2±5
Tx (gf-mm)	-663.4±71.3	-598.4±52.9	-531.5±53.8	-503.5±34.7	-387±41.6	-218.4±35.4
Ty (gf-mm)	1079.1±90	785.9±79.2	676.2±84.8	639.8±51	592.7±65.1	433.6±60.8
Tz (gf-mm)	-83.9±27.8	-143.5±21.9	-151.2±19.9	-143.9±16.8	-83.3±19.8	-75.6±16.5



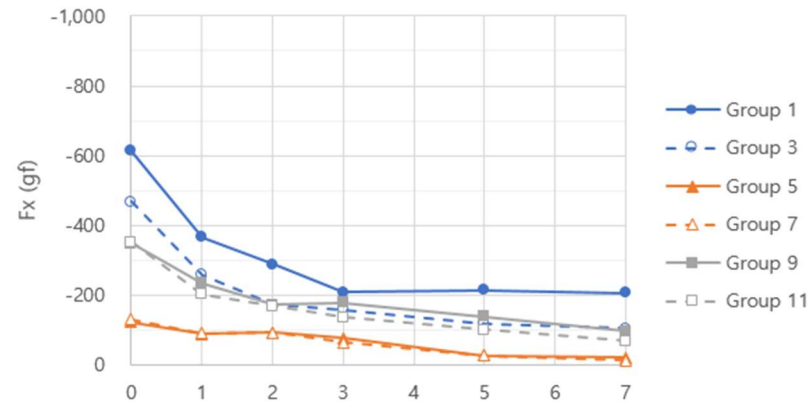


Fig 5. Fx at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

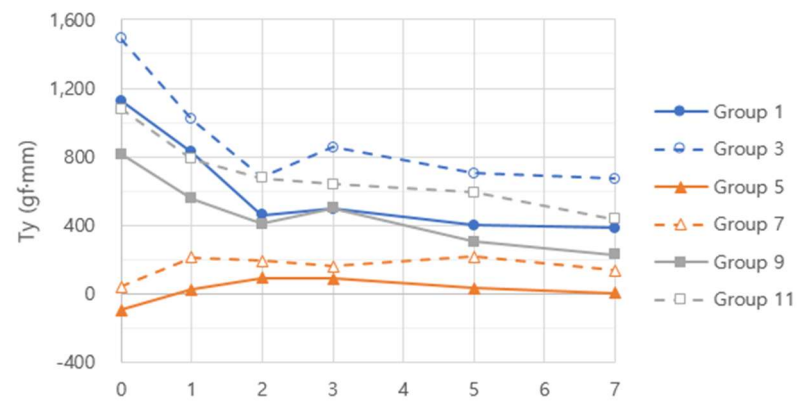


Fig 6. Ty at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

Table 9. Retention rate of  $R^2$  at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

	CA Foil		CA Pro+		MagicFoil	
	Group 1	Group 3	Group 5	Group 7	Group 9	Group 11
Fx	0.93	0.92	0.94	0.97	0.92	0.93
Ty	0.93	0.82	0.79	0.59	0.89	0.90

### 3.2. 치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 각 그룹의 6 축 힘체계 변화

치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 각 그룹의 측정일자 별 6 축 힘체계의 변화를 확인한 결과, 시간의 흐름에 따라 Force 와 Torque 의 크기는 0 에 수렴하는 방향으로 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 각 sheet 마다 발생하는 Force 와 Torque 의 크기와 감소하는 추세가 상이하게 나타났다. (Table 10, 11, 12)

본 연구에서는 보고자 하는 설측 치체 이동 상황에서는  $F_x$  값과  $T_y$  값과 측정일자 별 그래프의 회귀 분석을 통해 결정계수( $R^2$ )의 값을 도출한 결과,  $F_x$ 에서는 모든 그룹이 0.80 이상으로 확인되어 높은 설명력을 가지는 것을 확인하였으며  $T_y$ 에서는 일부 그룹에서 0.70 미만의 결정계수가 확인되어 다소 낮은 설명력을 가지는 것을 확인할 수 있었다. (Fig 7, 8, Table 13)

Table 10. F/T of CA Foil at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

Day	0	1	2	3	5	7
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
<b>Group 2</b>						
Fx (gf)	-816.7±24.9	-495.2±17.7	-407.1±13.4	-342.3±15	-338.8±16	-326.6±16.9
Fy (gf)	163.3±5.7	0.9±3.5	95.2±3.7	47±3	86.9±5	82.7±3.4
Fz (gf)	349.9±29.8	203.3±21.9	158.5±16.9	132.4±15.6	123.5±17.6	112.3±18.9
Tx (gf·mm)	1732.2±87.7	1231.2±65.6	1051.4±72.7	-905.9±47.8	-801.9±58.5	-731.4±58
Ty (gf·mm)	352.1±110.1	315.1±60.9	-66.3±38.9	70.1±46	-52.7±37.4	-77.7±45.7
Tz (gf·mm)	-159.2±71.9	-438.2±30.8	-478.9±20.8	-364.8±24	-364.7±20.9	-350.1±24.8
<b>Group 4</b>						
Fx (gf)	-797.2±8.9	-490.2±9.5	-388.1±10.7	-350.8±11.3	-307.2±10.2	-297±9.9
Fy (gf)	152.2±9.8	-20.5±7.6	56.2±8.2	1.5±6.2	37.8±7.1	33.5±7.3
Fz (gf)	266.8±15.9	133.3±15.2	143±10.7	104±8.9	97.2±7.7	91.2±6.7
Tx (gf·mm)	2073.4±58.6	1132.5±75.6	-1236±44.7	1080.4±43.4	-918.8±46.5	-875.4±32.9
Ty (gf·mm)	1092.8±108.3	828.4±91.6	294.2±76.8	434.9±93.3	261.7±58.5	277.4±67
Tz (gf·mm)	-453.6±83.9	-349.3±32.4	-376.1±27.1	-306.1±30.5	-274.5±18.4	-269.5±16.8

Table 11. F/T of CA Pro+ at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

Day	0	1	2	3	5	7
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
<b>Group 6</b>						
Fx (gf)	-364.3±24.8	-251.5±23.3	-198.9±25.5	-178.2±25.6	-128.5±19.9	-122.6±17.7
Fy (gf)	38.1±7.9	-10.5±7.9	-18±9.8	-8±11.6	0.3±4.6	18.6±2.9
Fz (gf)	74.3±17.8	70.9±13.5	46.1±7.2	52.1±10.6	43.1±10.2	49.5±10.4
Tx (gf-mm)	-932.9±85.9	-826.5±90.1	-626.2±85.1	582.4±113.2	-393.1±78.2	-318±66.7
Ty (gf-mm)	284.3±116.8	-41.5±56.4	75.2±62.7	-4.5±58.5	13.3±36.5	2.2±32.2
Tz (gf-mm)	-358±68.8	-309±25.3	-224.6±30.9	-188.7±35.2	-125.6±28.2	-85.7±27.9
<b>Group 8</b>						
Fx (gf)	-435.8±24	-249.9±18.8	-226.9±17.2	-218.6±16	-142.8±16.7	-114±11.4
Fy (gf)	38.8±12.5	-29.4±9.7	-31.4±10.9	-50.1±8.2	-7.3±5.8	15±3.2
Fz (gf)	67.5±7.7	46.9±4.8	41.5±9.1	50.3±4.7	32±6.4	20.5±4.4
Tx (gf-mm)	1060.2±79.7	-737.1±57.6	-710.1±62.2	-738.4±52.9	-459.2±80.2	-286±48.5
Ty (gf-mm)	29.4±91	189.1±64.7	179.2±44.1	213.6±45.1	151.9±51.3	75±37.2
Tz (gf-mm)	-445.9±56.7	-343.1±42.2	-311.3±63.5	-324.5±35.1	-218.1±57.2	-135.4±38.9

Table 12. F/T of CA Pro+ at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

Day	0	1	2	3	5	7
	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD	Mean±SD
<b>Group 10</b>						
Fx (gf)	-518.4±5.7	-297.6±8	-266.3±6.7	-254.1±12.9	-199±6.7	-169.1±5.8
Fy (gf)	98.3±9.3	-1.9±6.6	-34.1±4.9	-5.8±3.4	-14.6±4.6	14.4±3.2
Fz (gf)	201.4±8.1	115.2±16.1	98.4±19	124.8±12.1	96±9.7	87.9±8.9
Tx (gf·mm)	-917±19.3	-597.1±27.7	-620.4±37.9	-601.1±37.2	-511.9±32.4	-374.3±32.3
Ty (gf·mm)	431.9±88.8	191.2±74	286.5±51.8	168.3±54.2	212.9±40.9	100.8±42.4
Tz (gf·mm)	-245±72.4	-306±45.7	-251.8±34.6	-267.7±26.8	-187.3±24.2	-155.3±23.6
<b>Group 12</b>						
Fx (gf)	-550.1±11.4	-344.9±8.9	-304.4±9.9	-236.6±8.9	-238.6±7.1	-226.5±6.8
Fy (gf)	72.4±12.1	15±14	2.9±13.9	18.6±9.6	-0.8±12.3	12.9±9.6
Fz (gf)	219.1±12.6	163.1±6.9	158.3±8.5	125.8±7.5	129±7.2	113.6±13.1
Tx (gf·mm)	1145.4±36.6	-802.4±35.1	-775.2±31.8	-586.6±44.6	-587.1±32.5	-531.2±32.5
Ty (gf·mm)	946.2±63.8	530.7±42.7	475.5±48.8	340.3±22.7	414.9±25.9	387.8±22.6
Tz (gf·mm)	-105.1±12.4	-174.2±14.9	-195.7±17.4	-143.3±19.4	-104.3±13.4	-108.9±12

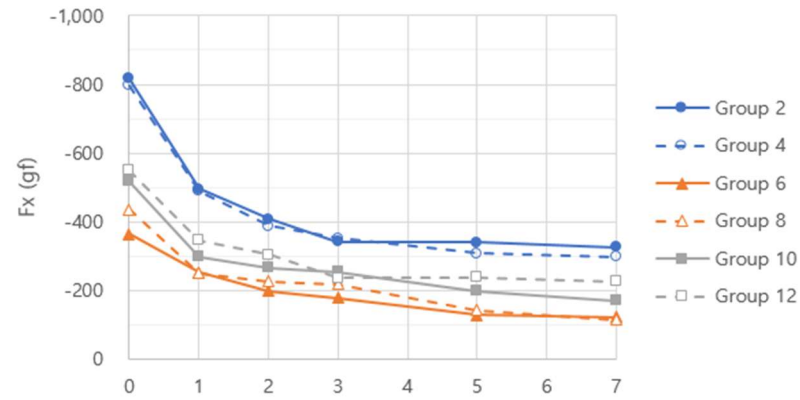


Fig 7. Fx at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

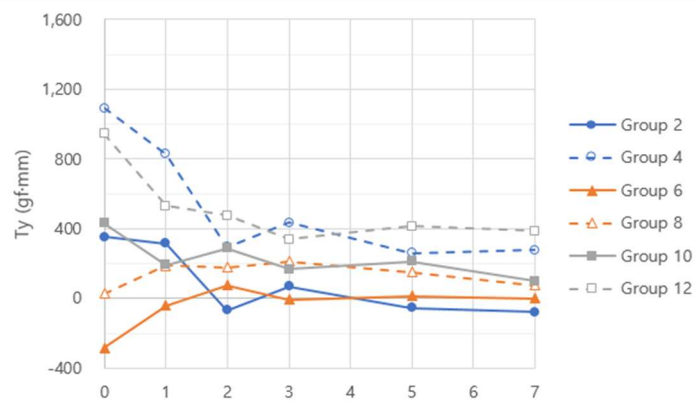


Fig 8. Ty at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

Table 13. Retention rate of  $R^2$  at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

	CA Foil		CA Pro+		MagicFoil	
	Group 1	Group 3	Group 5	Group 7	Group 9	Group 11
Fx	0.90	0.92	0.97	0.89	0.87	0.91
Ty	0.78	0.88	0.72	0.80	0.63	0.85

### 3.3. 치아 이동량 계획 0.2 mm 에서 각 그룹의 M/F ratio 변화

치아 이동량 계획 0.2 mm 에서 각 그룹에서 측정한 Fx 와 Ty 값을 활용하여 측정일자 별 M/F ratio 의 변화를 확인한 결과, Power ridge 를 사용하지 않은 그룹은 초기에 발생한 M/F ratio 가 일주일동안 유지되며 power ridge 를 사용한 그룹은 시간의 흐름에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었다. (Table 14, Fig 9)

Table 14. M/F ratio at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

	CA Foil		CA Pro+		MagicFoil	
	Group 1	Group 3	Group 5	Group 7	Group 9	Group 11
0	-1.8	-3.2	0.8	-0.3	-2.3	-3.1
1	-2.3	-4.0	-0.3	-2.3	-2.4	-3.9
2	-1.6	-3.9	-1.0	-2.1	-2.4	-4.0
3	-2.4	-5.4	-1.1	-2.5	-2.8	-4.7
5	-1.9	-6.0	-1.3	-8.1	-2.2	-6.0
7	-1.9	-6.5	-0.3	-10.8	-2.4	-6.4

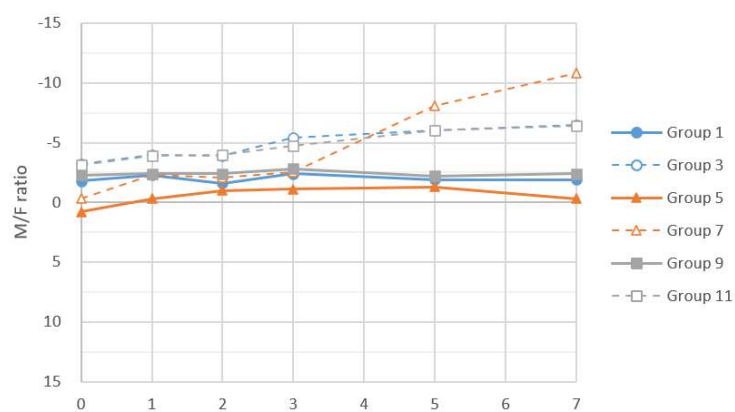


Fig 9. M/F ratio at tooth displacement plan of 0.2 mm for a week

### 3.4. 치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 각 그룹의 M/F ratio 변화

치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 각 그룹에서 측정한 Fx 와 Ty 값을 활용하여 측정일자 별 M/F ratio 의 변화를 확인한 결과, 모든 그룹에서 초기에 발생한 M/F ratio 가 변하지 않고 일주일동안 유지되는 것을 확인할 수 있었다. (Table 15, Fig 10)

Table 15. M/F ratio at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week

	CA Foil		CA Pro+		MagicFoil	
	Group 2	Group 4	Group 6	Group 8	Group 10	Group 12
0	-0.4	-1.4	0.8	-0.1	-0.8	-1.7
1	-0.6	-1.7	0.2	-0.8	-0.6	-1.5
2	0.2	-0.8	-0.4	-0.8	-1.1	-1.6
3	-0.2	-1.2	0.0	-1.0	-0.7	-1.4
5	0.2	-0.9	-0.1	-1.1	-1.1	-1.7
7	0.2	-0.9	0.0	-0.7	-0.6	-1.7

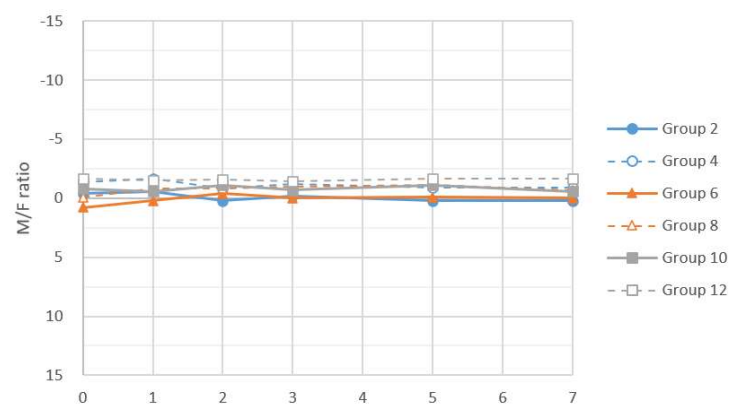


Fig 10. M/F ratio at tooth displacement plan of 0.4 mm for a week



## 4. 고찰

투명교정 장치는 착용기간 동안 술자가 의도한 방향으로 지속적인 교정력을 치아에 가하는 것이 중요하며 이를 위해 치아 이동량 계획, Sheet 의 종류, Power ridge 의 활용에 대한 다양한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나(Alam et al., 2023; Drake et al., 2012) 대부분의 연구에서 한계점이 발견되고 있다. 투명교정 장치 제작 후, 발생하는 초기의 Force 와 Torque 에 대한 연구에서는 최근 투명교정 장치의 착용기간이 고려되지 않아 장착기간 동안 발생하는 투명교정 장치의 응력 완화가 고려되지 않은 한계점이 있으며(Al-Nadawi et al., 2021; Haouili et al., 2020; Kravitz et al., 2009) sheet 를 시편 형상으로 성형하여 진행한 Stress relaxation 에 대한 연구에서는 구강의 형태가 반영된 3 차원적인 투명교정 장치 형상에 대한 적용이 실시되지 않았으며 열성형 과정에서 발생하는 두께 변화와 물성에 대한 변화가 고려되지 않고 있다(Albertini et al., 2022; Cui et al., 2025).

본 연구에서는 투명교정 장치의 착용기간과 구강의 형태를 적용한 투명교정 장치를 제작하여 치아 이동량 계획에 따른 상악 중절치의 설측 치체 이동 상황에서 발생하는 6 축 힘체계 변화를 측정하였다. 모든 측정값은 시간의 흐름에 따라 점차 0 으로 수렴하는 추세를 나타냈으며 설측 치체 이동에서 중요한 측정값인 Fx 값과 Ty 값의 측정일자 별 결정계수를 확인한 결과, CA Foil 에서는 평균 0.89, CA Pro+에서는 평균 0.83, MagicFoil 에서는 0.86 으로 나타났으며 CA Pro+에서 낮은 결정계수가 나타난 이유를 확인한 결과 Fx 값은 다른 sheet 대비 10% 이상 낮게 나타났으며 Ty 값은 다른 sheet 와 반대 방향으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 해당 소재가 착용과정에서의 우수한 착용감을 확보하기 위해 의도적으로 낮은 물성으로 개발되었으며 이로 인해 성형 정밀도가 낮아 접촉되는 부위가 다른 sheet 와 다르게 발생했기 때문으로 보인다.

세부 분석을 위해 그룹 간 Fx 값과 Ty 통계적 상관관계를 분석한 결과, 치아 이동량 계획에 따라 Fx 값에 유의한 차이가 있었으나 ( $p=.037$ ) Ty 값에는 유의한 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다. ( $p=.289$ ). 이와 관련하여 기존의 연구에서는 치아 이동량 계획의 증가에 따라 발생하는 Force 가 증가한다고 보고하였다(Hertan

et al., 2022). 이는 투명교정 장치가 치아에 가하는 Force 와 Torque 는 치관 주위에서 작용하며 치관을 감싸고 있는 형상으로 인해 치아에 균일하게 분포시키며 회전력이 아닌 직선 이동력 위주로 전달되기 때문에 직선적으로 발생하는 Force 는 치아가 이동하는 방향으로 누적되고 Torque 는 투명교정 장치가 치관을 감싸면서 접촉하는 모든 부위에서 치아의 회전 중심을 기준으로 발생하면서 서로 상쇄되기 때문이라고 볼 수 있다.

Sheet 의 종류에 따라 Fx 값에는 유의한 차이가 없었으나 ( $p=.135$ ) Ty 값에는 유의한 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. ( $p=.048$ ) 이에 대하여 기존 연구에서도 동일한 치아 이동량 계획에서 Force 에는 유의한 차이가 없으며 Torque 에는 유의한 차이가 있다고 보고하였다. 이는 sheet 에 사용되는 원소재의 물리적 특성에 영향을 받으며 Fx 값에 유의한 차이가 없는 것은 Hooke's law 에 따른 선형 복원력으로 설명할 수 있다. Hooke's law 에 따르면 치아 이동량 계획은 0.4 mm 이하로 매우 작은 변형량이며 이때 모든 sheet 는 선형 탄성 구간에 해당하므로 각 소재의 탄성계수가 서로 다르더라도 Force 는 거의 동일하게 나타날 수 있다.

Power ridge 의 활용 여부에 따라 Fx 값에는 유의한 차이가 없으며 ( $p=.220$ ) Ty 값에는 유의한 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. ( $p=.023$ ) 기존 연구에 따르면 power ridge 의 활용은 Torque 를 조절하는데 큰 영향을 줄 수 있으며 이를 바탕으로 치체 이동을 유도할 수 있다고 하였다(Cheng et al., 2022). 이는 power ridge 가 치아의 순측 치경부와 설측 절단면 부위에 성형되면서 투명교정 장치에 비대칭 형상을 구현하고 이로 인해 치아에 추가적인 회전력이 발생시키기 때문에 Torque 에는 유의미한 차이를 발생시킬 수 있으며 이때 재료의 탄성과 치아 이동량 계획에는 변화가 없으므로 Force 에는 유의한 차이는 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

치아의 설측 치체 이동의 유효성을 확인하기 위해 Fx 값과 Ty 값을 활용하여 측정일자 별 M/F ratio 를 확인한 결과, 치아 이동량 계획 0.2 mm 에서는 power ridge 를 활용한 그룹의 M/F ratio 는 시간의 흐름에 따라 증가하고 활용하지 않은 그룹은 초기에 발생한 M/F ratio 가 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 효과적인 설측 치체 이동을 위해 power ridge 를 활용하는 것이 유효하게 작용하는

것으로 볼 수 있다. 치아 이동량 계획 0.4 mm 에서는 모든 그룹이 0 에 가까운 M/F ratio 를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 이는 치아 이동량 0.4 mm 가 설측 치체 이동에서는 효과적이지 않다고 해석할 수 있다. 다만 M/F ratio 는 치아 이동 양상을 평가하기 위해 이론적으로 사용되는 비율상의 수치이며 M/F ratio 의 절대값이 실제 임상적으로 유효성을 나타내지 않는다. 따라서 실제로 측정된  $F_x$  와  $T_y$  값의 임상적으로 유효한 수준인지에 대한 검증이 추가적으로 필요하다고 판단되며 기존의 연구에서도 M/F ratio 에 활용된 Force 와 Torque 가 생리학적 범위에 있는지를 확인하는 것이 중요하다고 보고되었다(Wu et al., 2018).

In vitro 실험의 특성상, 본 연구는 일부 임상적 조건을 완전히 반영하지 못하였으며 다음과 같은 한계점에 대한 보완이 필요하다. 먼저 측정 장비와 관련하여 치주 인대, 치조골 등의 구강의 해부학적 모사와 함께 구강내 온도와 습도 등의 구강 환경을 모사에 대한 보완이 필요하며 투명교정 장치의 제작 과정에서 발생할 수 있는 구강 모델의 출력 공차와 열성형 장비에 의한 오차를 통제하는 것이 필요하며 마지막으로 본 연구에서 실험실 기반으로 측정된 결과가 실제 임상 환경에서 치아의 이동에 효과적으로 작용하는지에 대한 추가적인 후속 연구와 임상 검증과 함께 다른 방향 및 다른 치아들에 대한 후속 연구 또한 필요하다고 보인다.

## 5. 결론

본 연구의 결과를 통해 최근의 투명교정 장치의 권장 착용 기간인 일주일 동안의 상악 우측 중절치의 설측 치체 이동 상황에서 치아 이동량 계획에 따른  $F_x$  와  $T_y$  의 변화에 대하여 확인할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 투명교정 장치의 Force 와 Torque 는 시간의 흐름에 따라 탄성이 줄어들어 0 으로 수렴하는 방향으로 감소하며 측정 3 일차부터 소성변형이 발생하여 측정값이 유지되는 추세를 보였다.
2. 치아 이동량 계획에 따른  $F_x$  의 결정계수와 일주일간 평균 감소율은 치아 이동량 계획 0.2 mm 인 그룹에서 0.94 와 30%, 치아 이동량 계획 0.4 mm 에서 0.91 과 26%로 나타났으며 측정값에는 유의한 차이가 있었다. ( $p=.037$ )
3. Sheet 의 종류에 따른  $T_y$  의 결정계수와 일주일간 평균 감소율은 CA Foil 그룹에서 0.85 와 21%, MagicFoil 그룹에서 0.82 와 33%로 나타났으며 CA Pro+ 그룹에서 결정계수는 0.73 으로 나타났으나 평균 감소율이 138%로 나타나며 해석이 불가능한 양상이 확인되었으며 측정값에는 유의미한 차이가 있었다. ( $p=.048$ )
4. Power ridge 의 활용에 따른  $T_y$  의 결정계수와 일주일간 평균 감소율은 해석이 불가능한 CA Pro+ 그룹을 제외한 결과 power ridge 를 활용한 그룹에서 0.81 과 38%, 활용하지 않은 그룹에서 0.79 와 16% 로 나타났으며 측정값에는 유의미한 차이가 있었다. ( $p=.023$ )

이상을 종합하여 투명교정 장치의 설측 치체 이동 상황에서 원활한 치아 이동이 발생하는  $F_x$  와  $T_y$  를 얻기 위해 치아 이동량 계획은 0.2 mm 로 정밀하게 설정하고 sheet 는 적절한 M/F ratio 가 발생할 수 있는 CA Foil 과 MagicFoil 을 사용하며 power ridge 를 적극적으로 활용하는 것이 추천된다.

## 참고 문헌

- Al-Nadawi, M., Kravitz, N. D., Hansa, I., Makki, L., Ferguson, D. J., & Vaid, N. R. (2021). Effect of clear aligner wear protocol on the efficacy of tooth movement. *Angle Orthod*, 91(2), 157–163.
- Alam, M. K., Kanwal, B., Shqaidef, A., Alswairki, H. J., Alfawzan, A. A., Alabdullatif, A. I., Aalmunif, A. N., Aljirewey, S. H., Alothman, T. A., Shrivastava, D., & Srivastava, K. C. (2023). A Systematic Review and Network Meta-Analysis on the Impact of Various Aligner Materials and Attachments on Orthodontic Tooth Movement. *J Funct Biomater*, 14(4).
- Albertini, P., Mazzanti, V., Mollica, F., Pellitteri, F., Palone, M., & Lombardo, L. (2022). Stress Relaxation Properties of Five Orthodontic Aligner Materials: A 14-Day In-Vitro Study. *Bioengineering (Basel)*, 9(8).
- Baxmann, M., Timm, L. H., & Schwendicke, F. (2022). Who Seeks Clear Aligner Therapy? A European Cross-National Real-World Data Analysis. *Life (Basel)*, 13(1).
- Best, A. D., Shroff, B., Carrico, C. K., & Lindauer, S. J. (2017). Treatment management between orthodontists and general practitioners performing clear aligner therapy. *Angle Orthod*, 87(3), 432–439.
- Cheng, Y., Liu, X., Chen, X., Li, X., Fang, S., Wang, W., Ma, Y., & Jin, Z. (2022). The three-dimensional displacement tendency of teeth depending on incisor torque compensation with clear aligners of different thicknesses in cases of extraction: a finite element study. *BMC Oral Health*, 22(1), 499.
- Cui, X., Li, F., & Jiang, J. (2025). Effects of simulated intraoral temperatures and wet environments on the stress relaxation properties of thermoplastic aligner materials. *Head Face Med*, 21(1), 23.
- Dai, F. F., Xu, T. M., & Shu, G. (2019). Comparison of achieved and predicted tooth movement of maxillary first molars and central incisors: First premolar extraction treatment with Invisalign. *Angle Orthod*, 89(5), 679–687.
- Drake, C. T., McGorray, S. P., Dolce, C., Nair, M., & Wheeler, T. T. (2012). Orthodontic tooth movement with clear aligners. *ISRN Dent*, 2012, 657973.

- Ercoli, F., Tepedino, M., Parziale, V., & Luzi, C. (2014). A comparative study of two different clear aligner systems. *Prog Orthod*, 15(1), 31.
- Gawali, N., Shah, P. P., Gowdar, I. M., Bhavsar, K. A., Giri, D., & Laddha, R. (2024). The Evolution of Digital Dentistry: A Comprehensive Review. *J Pharm Bioallied Sci*, 16(Suppl 3), S1920–S1922.
- Golkhani, B., Weber, A., Keilig, L., Reimann, S., & Bourauel, C. (2022). Variation of the modulus of elasticity of aligner foil sheet materials due to thermoforming. *J Orofac Orthop*, 83(4), 233–243.
- Haouili, N., Kravitz, N. D., Vaid, N. R., Ferguson, D. J., & Makki, L. (2020). Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 158(3), 420–425.
- Hertan, E., McCray, J., Bankhead, B., & Kim, K. B. (2022). Force profile assessment of direct-printed aligners versus thermoformed aligners and the effects of non-engaged surface patterns. *Prog Orthod*, 23(1), 49.
- Jia, L., Wang, C., Wang, C., Song, J., & Fan, Y. (2022). Efficacy of various multi-layers of orthodontic clear aligners: a simulated study. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 25(15), 1710–1721.
- Karras, T., Singh, M., Karkazis, E., Liu, D., Nimeri, G., & Ahuja, B. (2021). Efficacy of Invisalign attachments: A retrospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 160(2), 250–258.
- Kau, C. H., Soh, J., Christou, T., & Mangal, A. (2023). Orthodontic Aligners: Current Perspectives for the Modern Orthodontic Office. *Medicina (Kaunas)*, 59(10).
- Keller, K., Giannini, P., Gregory, M., & Oakley, G. (2020). Stress Relaxation in Orthodontic Aligner Plastics; An In Vitro Comparison Study. In.
- Kravitz, N. D., Kusnoto, B., BeGole, E., Obrez, A., & Agran, B. (2009). How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 135(1), 27–35.
- Liu, J., & Cha, J. Y. (2024). Mechanical and biological properties of current materials of clear aligner. *J Korean Dent Assoc*, 62(5), 302–316.
- Park, S. Y., Choi, S. H., Yu, H. S., Kim, S. J., Kim, H., Kim, K. B., & Cha, J. Y. (2023). Comparison of translucency, thickness, and gap width of thermoformed and 3D-

- printed clear aligners using micro-CT and spectrophotometer. *Sci Rep*, 13(1), 10921.
- Spagnuolo, G., & Sorrentino, R. (2020). The Role of Digital Devices in Dentistry: Clinical Trends and Scientific Evidences. *J Clin Med*, 9(6).
- Tamer, I., Oztas, E., & Marsan, G. (2019). Orthodontic Treatment with Clear Aligners and The Scientific Reality Behind Their Marketing: A Literature Review. *Turk J Orthod*, 32(4), 241–246.
- Wu, J. L., Liu, Y. F., Peng, W., Dong, H. Y., & Zhang, J. X. (2018). A biomechanical case study on the optimal orthodontic force on the maxillary canine tooth based on finite element analysis. *J Zhejiang Univ Sci B*, 19(7), 535–546.
- Zhang, Y., Zhang, H., Meng, M., & Gao, J. (2025). Overcoming three-dimensional challenges through objective decomposition and virtual-digital design: A multidisciplinary case on hypodontia treatment. *J World Fed Orthod*, 14(3), 176–184.

## ABSTRACT

### **Changes in 6-Axis of Force system of Clear Aligner in the lingual bodily displacement of Maxillary central incisor**

As digital technologies in dentistry continue to advance, clear aligner therapy, which is based on the use of intraoral scanners, dental CAD/CAM software, and thermoplastic sheets, has become widely adopted alongside traditional orthodontic treatments involving brackets and wires. The success of clear aligner therapy largely depends on the continuous application of orthodontic forces to the teeth throughout the period the aligners are worn. The continuous application of orthodontic forces is influenced by factors such as the tooth displacement plan, the type of sheet, and the use of attachment such as power ridges. Therefore, this study investigated the relationship between the tooth displacement plan and the continuous application of orthodontic forces during lingual bodily movement of the maxillary central incisor. In addition, the study examined the correlation of this relationship with the type of sheet and the use of power ridges.

To evaluate changes in orthodontic force( $F_x$ ,  $T_y$ ) over the one-week period during which the clear aligner is worn, a measurement device simulating the clinical environment was developed, taking into consideration the long axis of the maxillary central incisor. 6-axis force and torque were measured on days 0, 1, 2, 3, 5, and 7. During periods when measurements were not conducted, the experimental groups were stored by mounting them on an initial oral model that simulated the clinical environment. The experimental groups were categorized into a total of 12 groups based on combinations of tooth displacement plan, type of sheet, and presence or absence of power ridges. Measurements were conducted accordingly, and the following results were obtained.

In general, all measured values showed a decreasing trend toward zero over time, and signs of plastic deformation were observed beginning on day 3. Additionally, in the 0.4 mm planned tooth movement groups, the M/F ratio of all groups tended to converge toward zero, whereas relatively higher M/F ratios were observed in the 0.2 mm movement groups. The use of power ridges was also



found to be effective. Furthermore, analysis of the correlation between each variable and the orthodontic force( $F_x$ ,  $T_y$ ) led to the following conclusions.

In the case of tooth displacement plan, a statistically significant difference was observed in  $F_x$  ( $p = .037$ ), whereas no significant difference was found in  $T_y$  ( $p = .0289$ ). In the case of the type of sheet, no significant difference was observed in  $F_x$  ( $p = .135$ ), while a statistically significant difference was found in  $T_y$  ( $p = .048$ ). Lastly, for the use of power ridge, no significant difference was observed in  $F_x$  ( $p = .220$ ), but a significant difference was found in  $T_y$  ( $p = .023$ ).

Based on the importance of controlling  $T_y$  rather than horizontal  $F_x$  to prevent lingual tipping during lingual bodily movement of the maxillary central incisors over a one-week period, the findings of this study indicate that the most effective approach involves establishing a precise tooth displacement plan of 0.2 mm, utilizing power ridges, and employing CA Foil and MagicFoil sheets that can generate an appropriate M/F ratio.

Based on the findings of this study, further validation of the contributing factors should be conducted under different directions of tooth movement in the maxillary central incisor. Moreover, it is necessary to expand the investigation to include teeth of various shapes. Lastly, to verify the clinical effectiveness of clear aligners as patient-specific medical devices, additional research on measurement devices that simulate the intraoral environment is warranted.

---

**Key words:** Clear aligner, Orthodontic force, Retention rate, Measurement device, Bodily movement, Sheet, Tooth displacement plan, Power ridge