



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](#)

2023년 8월

박사학위 논문

마커리스 증강현실과 수술  
가이드를 활용한 임플란트 수술  
시뮬레이션의 정확도 비교

조선대학교 대학원

치 의 학 과

김 효 준

마커리스 증강현실과 수술  
가이드를 활용한 임플란트 수술  
시뮬레이션의 정확도 비교

Comparison of Accuracy in Implant Surgery  
Simulation using Markerless AR and Surgical  
Guide

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원

치 의 학 과

김 효 준

# 마커리스 증강현실과 수술 가이드를 활용한 임플란트 수술 시뮬레이션의 정확도 비교

지도교수 문성용

이 논문을 치의학 박사학위신청 논문으로 제출함.

2023년 4월

조선대학교 대학원

치 의 학 과

김 효 준

# 김효준의 박사학위 논문을 인준함

위원장 전남대학교 교수 국 민 석



위 원 조선대학교 교수 최 우 열



위 원 조선대학교 교수 문 성 용



위 원 조선대학교 교수 오 지 수



위 원 조선대학교 교수 유 재 식



2023년 6월

조선대학교 대학원

## 목 차

표 목 차 .....	ii
도 목 차 .....	iii
영문초록 .....	v
I. 서론 .....	1
II. 연구 재료 및 방법 .....	3
III. 연구 결과 .....	13
IV. 고찰 .....	20
V. 결론 .....	24
참고 문헌 .....	25

## 표 목 차

표 1. 각 그룹 별 오차 및 분석 .....	13
표 2. Group 1의 위치별 오차 및 일원배치 분산분석 .....	14
표 3. Group 2의 위치별 오차 및 일원배치 분산분석 .....	17

## 도 목 차

그림1	수술 모델의 3D이미지화 및 가상 수술 계획의 생성 .....	4
그림2	마커리스 증강현실 프로그램의 제작.....	5
그림3	Webcam에 인식된 캐스트 상에 수술 계획이 증강된 화면 .....	6
그림4	수술 가이드의 제작.....	7
그림5	제작된 수술 가이드.....	8
그림6	마커리스 증강현실을 이용하여 드릴링을 시행하는 모습 .....	9
그림7	수술 가이드를 이용하여 드릴링을 시행하는 모습.....	10
그림8	가이드 핀을 삽입한 실험 모델.....	11
그림9	오차의 측정 .....	12
그림10	Group 1 - 위치별 Entry point 오차.....	15
그림11	Group 1 - 위치별 Apex point 오차.....	15
그림12	Group 1 - 위치별 각 오차.....	16
그림13	Group 2 - 위치별 Entry point 오차.....	18



그림14 Group 2 - 위치별 Apex point 오차..... 18

그림15 Group 2 - 위치별 각 오차..... 19

## ABSTRACT

### Comparison of Accuracy in Implant Surgery Simulation using Markerless AR and Surgical Guide

Kim, Hyo Joon

Advisor: Prof. Moon Seong-yong, D.D.S., Ph.D

Department of Dentistry

Graduate School of Chosun University

**Objectives:** This paper aims to implement a Markerless AR for implant surgery that performs registration and tracking without additional markers using teeth and hard tissues. Furthermore, it evaluates the applicability of the system by comparing its accuracy with a Surgical Guide in a laboratory environment.

**Materials and Methods:** The dental cast was scanned and converted into a 3D model, and the placement of five implant was planned on the model. A Markerless AR application was created using Unity 3D and Vuforia SDK. And Surgical Guide was created using Materialise 3-Matic and DLP 3D printer. Implant drilling was performed on a total of 20 replicated casts using the AR app(Group1) and Surgical Guide(Group2). The replicated cast with the implant hole was scanned and converted into a 3D model, and then the error from the implantation plan was measured for the entry point, apex point(below 10 mm), and angle. and statistical verification was performed.

**Results:** For group1, the entry point error showed an average of  $0.80 \pm 0.41$ mm with a minimum value of 0.15 mm and a maximum value of 1.65 mm. In the apex point, the minimum value was 0.1 mm and the

maximum value was 2.88 mm, showing  $0.97 \pm 0.61$  mm. The measured value of angular error showed  $3.28 \pm 2.15^\circ$  with a minimum of  $0.43^\circ$  and a maximum of  $11.47^\circ$ . For group2, the entry point error showed an average of  $0.38 \pm 0.18$  mm with a minimum value of 0.01 mm and a maximum value of 1.02 mm. In the apex point, the minimum value was 0.05 mm and the maximum value was 1.68mm, showing  $0.98 \pm 0.40$  mm. The measured value of angular error showed  $3.78 \pm 1.62^\circ$  with a minimum of  $0.88^\circ$  and a maximum of  $6.59^\circ$ . In the comparison of error between the two groups, a statistically significant difference was shown in the entry point error, but no significant difference was found in the angular error and apex point error.

**Conclusion:** In the accuracy comparison of the Markerless AR app produced in this study, the entry point error showed a statistically significantly larger value than the Surgical Guide. The error of the Apex point and the angular error did not show a statistically significant difference when compared with the error of the Surgical Guide. Therefore, it has the potential to be a promising tool that can increase the accuracy of actual implant surgery, but it is important to apply it to the actual clinical environment and identify its effect. This study will further prove the effectiveness of the AR app and contribute to improving the results of implant surgery.

---

**Key words:** Markerless, AR, Dental Implant

## I. 서론

디지털 시대의 영향은 인간 활동의 모든 영역에 걸쳐 반향을 일으키고 있으며 치의학 분야도 예외는 아니다. 특히 치의학 분야는 이 디지털 시대의 영향을 가장 많이 받는 분야 중 하나라고 할 수 있다. 이미 임플란트와 보철 분야에서는 “디지털 치의학”이라고 불리는 새로운 변화가 개원가 및 치과병원의 치료 프로토콜을 변화시키고 있다.

“디지털 치의학”은 치과 기술의 정확성, 효율성 및 결과를 개선하기 위해 디지털 기술을 활용하는 것을 의미한다. 치과의 보철과 관련된 영역에서는 디지털 이미징 장치를 이용한 3d 스캔으로 기존의 인상채득을 대신하는 것부터 시작하여, CAD/CAM (Computer-Aided Design and Manufacturing)과 3D 프린팅을 이용한 보철물의 제작이 보편화 되었다.[1]

“디지털 치의학”은 임플란트 수술에도 변화를 일으키고 있다. 전통적인 임플란트 수술은 종종 외과의의 기술, 경험 및 정적 2D 이미지의 해석에 달려 있어 정밀도와 관련하여 제한이 있을 수 있었다. 하지만 임플란트 수술에 디지털 기술을 통합하면서 동적 탐색이 용이해지고 공간 이해가 향상되며 수술 정확도가 향상될 수 있다. 이는 컴퓨터를 통한 의료영상 이미지의 분석 및 3D 시뮬레이션을 통하여 달성할 수 있다. 또한 자를 대고 선을 그리고 점을 찍듯이 컴퓨터 상에서 시뮬레이션 한 위치와 방향대로 수술기구가 접근할 수 있도록 환자 맞춤형 수술용 가이드를 3D 프린터로 출력하여 사용하는 수술 가이드는 컴퓨터로 계획한 대로 외과의의 기술과 경험에 구애받지 않고 실제 환자에게 정확한 수술을 진행할 수 있게 도와준다.[2]

이러한 수술 가이드를 이용한 수술적 접근은 수술 정확도를 향상시킬 수 있지만, 수술 가이드의 제작으로 인한 비용과 시간이 소모되며, 수술시의 여러 가지 변수들로 인하여 수술 계획을 바꾸어야 할 경우 대처하기 힘들다는 단점이 있다.[3, 4] 이러한 부분 때문에 수술 가이드를 이용한 수술방법을 Static Navigation Surgery 라고 칭하기도 한다. 이러한 Static Navigation System을 보완할 수 있는 것이 바로 Dynamic Navigation System이다.[5, 6]

Dynamic Navigation System은 실제 환자의 수술부위 및 수술 도구의 위치를 컴퓨터상의 3D모델, 또는 CT등의 의료 데이터에 맞추어 보여주는 역할을 한다.[7] 이때 수술 부위 및 수술 도구의 위치를 정확하게 추적해야 하며, 이를 위

해서 다양한 마커를 사용하고, 해당 마커를 인식하기 위한 특수한 카메라를 사용하여 정확도를 높인다.[8, 9] 이러한 Dynamic Navigation System은 수술계획과 실제 환자의 해부학적 구조물 모두를 실시간으로 수술시에 파악할 수 있으며, 수술상황의 변화에 유연하게 대처할 수 있는 장점이 있다.[10-12]

하지만 이러한 마커를 이용한 Dynamic Navigation System에서는 마커와 실제 기구, 또는 해부학적 구조 사이의 정렬 과정이 반드시 필요하며 정확한 정렬 과정이 전체 Navigation System의 오차를 좌우한다. 또한 수술부위 와 수술도구의 위치 추적을 위해 마커를 통하여 최소 네부위 이상의 좌표를 알아내야 하기 때문에 수술부위 및 수술 기구의 마커가 부피를 차지하게 되며 이는 수술위치가 상악 및 하악으로 제한되며, 술자와 보조자 최소 두명 이상이 진행하게 되는 치과의 수술에서 좁은 수술 필드의 범위를 더 제한하게 된다.[13]

Computer assisted surgery에서 치과의 임플란트 수술이 다른 의과적 수술에 비해서 가질 수 있는 장점은 바로 치아 및 치조골의 존재이다. 수술 가이드를 이용하는 Static Navigation System과 마커를 이용하는 Dynamic Navigation System 모두 치아 및 치조골을 기반으로 해부학적 구조물의 위치를 파악하며, 수술 계획의 위치를 술자에게 전달하게 된다. 따라서 이러한 치아 및 경조직을 dynamic navigation의 마커로 직접 활용하게 된다면 위의 단점을 보완할 수 있다.[14-17] 본 논문에서는 이러한 치아 및 경조직을 활용하여 추가적인 마커 없이 정합 및 추적을 시행하는 마커리스 증강현실을 구현하여 보고 이에 대한 정확도 평가를 실험실 환경에서 통상의 수술 가이드와 비교하여 시행하여 활용가능성을 평가해보았다.

## II. 연구 재료 및 방법

### A. 실험 설계

하나의 모델 상에서 최대한 다양한 환경의 식립 계획을 만들고, 만들어진 하나의 식립 계획에 맞추어 두 개의 그룹에서 각각 열 개의 복제된 석고 캐스트에 대하여 수술 시뮬레이션을 시행하였다.

첫 번째 그룹은 마커리스 증강현실 프로그램을 제작하여 이를 이용하여 식립 위치 및 방향을 보조하였으며, 두 번째 그룹은 수술 가이드를 제작하여 식립위치 및 방향을 보조하였다.

이후의 오차 측정은 실험에 사용된 복제된 석고 캐스트를 3d 스캔을 통하여 디지털 이미지화 한 뒤 컴퓨터 상에서 측정을 진행하였고 통계 분석을 하였다.

## B. 모델 설정 및 식립 계획의 생성

임플란트 수술 연습용으로 제작된 모형 (Osstem, Seoul, Korea)을 모델로 하였다. 연습용 모형을 Artec Spider scanner (Artec 3D, Luxembourg City, Luxembourg)를 이용하여 스캔하였다. 스캔된 3D 모델의 데이터를 STL파일로 변환하였으며, Materialise 3-Matic (Materialise, Haasrode, Belgium)을 이용하여 식립할 임플란트의 계획을 작성하였다. 임플란트 식립 계획은 전치부 및 구치부의 #31, #35, #36, #45, #47 총 다섯 곳에 계획하였다. 식립 위치를 지름 1 mm의 구 형태의 마커로 표시하였으며, 식립 방향의 지름 2 mm 원기둥 형태의 마커로 표현하였다. 각 상대좌표 정보를 가지고 있는 원본 모델 및 구형태의 마커, 원기둥 형태의 마커를 각각 OBJ 및 STL형식의 파일로 저장하였다.

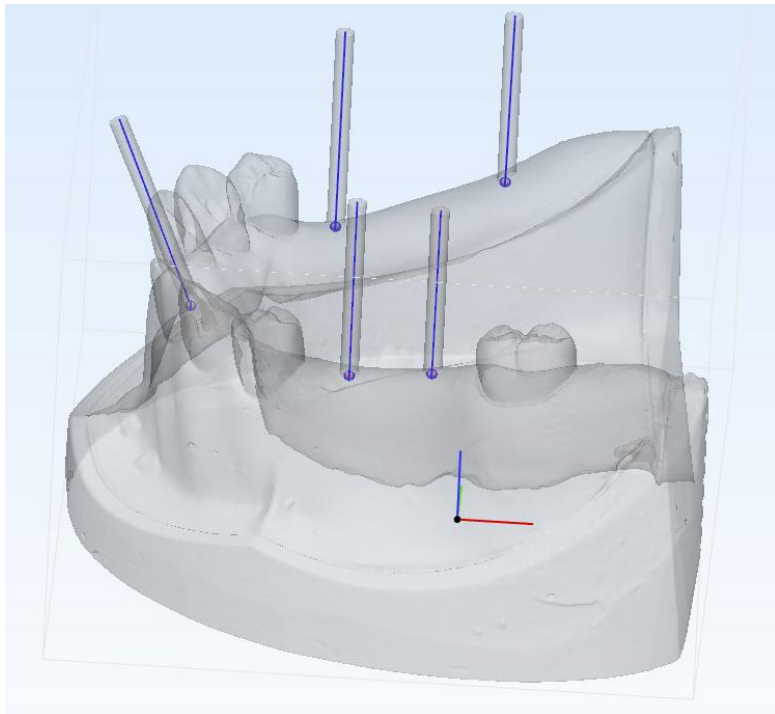


그림 1 수술 모델의 3D이미지화 및 가상 수술 계획의 생성

### C. 마커리스 증강현실 프로그램의 제작 (Group1)

Unity 3D software (Unity Technologies, San Francisco, CA, USA)와 Vuforia SDK(Vuforia, PTC, Inc., Boston, MA, USA).를 이용하여 구현하였다. 마커리스 증강현실의 인식은 Vuforia Model target function을 이용하였다. 3D 스캔된 원본 모델을 Vuforia model target generator를 이용하여 인식하였으며 360° Dome 형태의 시야에서 인식할 수 있도록 Machine Learning을 이용한 training을 진행하였다. 이를 통하여 학습된 인식 알고리즘을 Unity 3D에서 import하였다.

Unity 3D에서 구 형태의 마커 및 원기둥 형태의 마커를 import 하여 증강현실 알고리즘이 원본 모델을 인식할 때 각 마커들을 반투명하게 표시하도록 하였다.

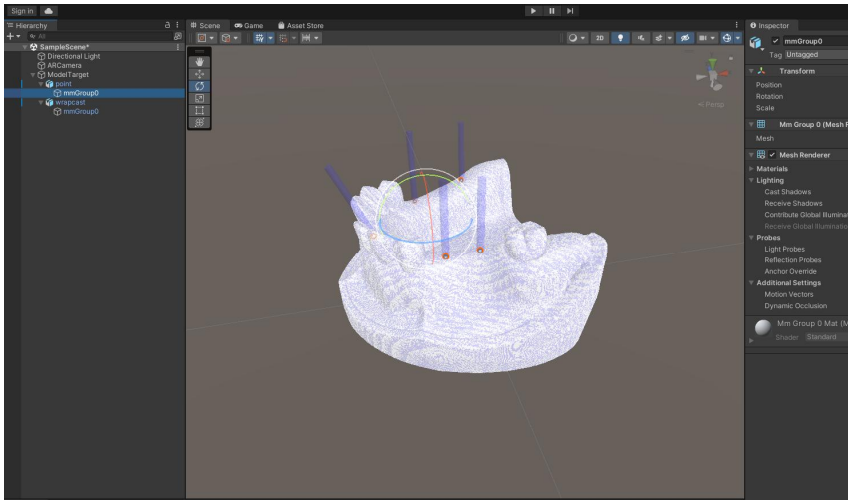


그림 2 마커리스 증강현실 프로그램의 제작



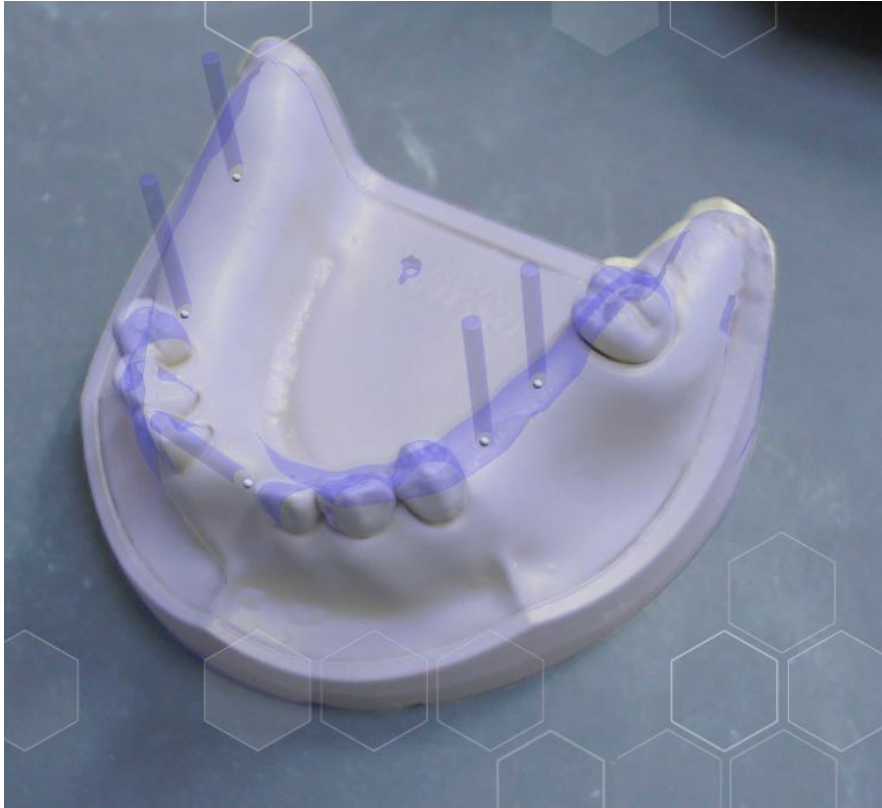


그림 3 Webcam에 인식된 캐스트 상에 수술 계획이 증강된 화면

#### D. 수술 가이드의 제작 (Group2)

Materialise 3-Matic software를 이용하여 수술 가이드를 제작하였다. 수술 가이드는 우측 후방 구치부, 좌측 후방 구치부, 전치부로 나누어 총 세 개를 각각 디자인 하였다. 3D 모델을 0.1 mm gap closing 및 0.1 mm resulting offset을 설정하여 wrap function을 적용하였으며, 모델의 표면에서 3 mm의 offset을 설정하여 가이드의 외형 및 두께를 부여하였다. 오차를 최소화 하기 위하여 임플란트 식립 방향으로 수술 가이드가 착탈 될 수 있도록 치아부위의 undercut을 제거하였으며 외경 3 mm, 내경 2.3 mm 길이 8 mm의 금속 슬리브를 장착할 수 있도록 식립구를 디자인하였다.

수술 가이드 디자인을 STL파일로 변환하였으며, digital light processing (DLP) 3D printer (Carima Inc., Seoul, Korea)를 이용하여 출력하였다. 출력된 Surgical Guide를 다듬고 금속 슬리브를 장착한 뒤 경화 처리를 진행하였다.

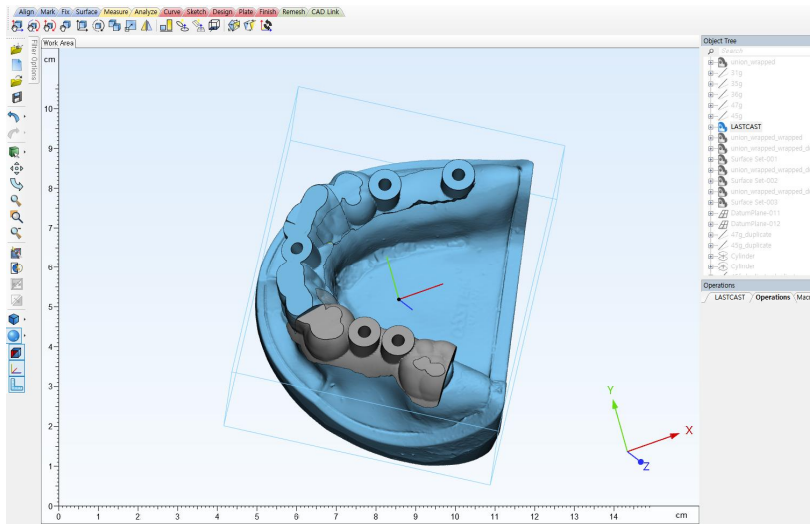


그림 4 수술 가이드의 제작



그림 5 제작된 수술 가이드

#### D. 실험의 시행

모델이 된 임플란트 실습용 모형을 yellow stone으로 복제하여 총 20개의 석고 캐스트를 준비하였다. 이중 10개는 마커리스 증강현실을 이용하여 드릴링을 시행하였으며(Group1), 나머지 10개는 수술가이드를 이용하여 드릴링을 시행하였다.(Group2) 드릴링은 실제 임플란트 식립 시의 pilot 드릴과 비슷한 환경을 구현하고자 하였다. bur는 lowspeed용 직경 2.2 mm bur를 이용하였다.

증강현실을 이용한 드릴링의 경우 1080p의 화질을 지원하는 Webcam (Streamcam., Logitech, Switzerland) 화면에 증강된 점 형태의 마커와 원기둥 형태의 마커를 이용하여 위치 및 방향을 설정하였다. 해당 위치와 방향으로 한번에 10 mm 깊이로 드릴링을 시행하였다.

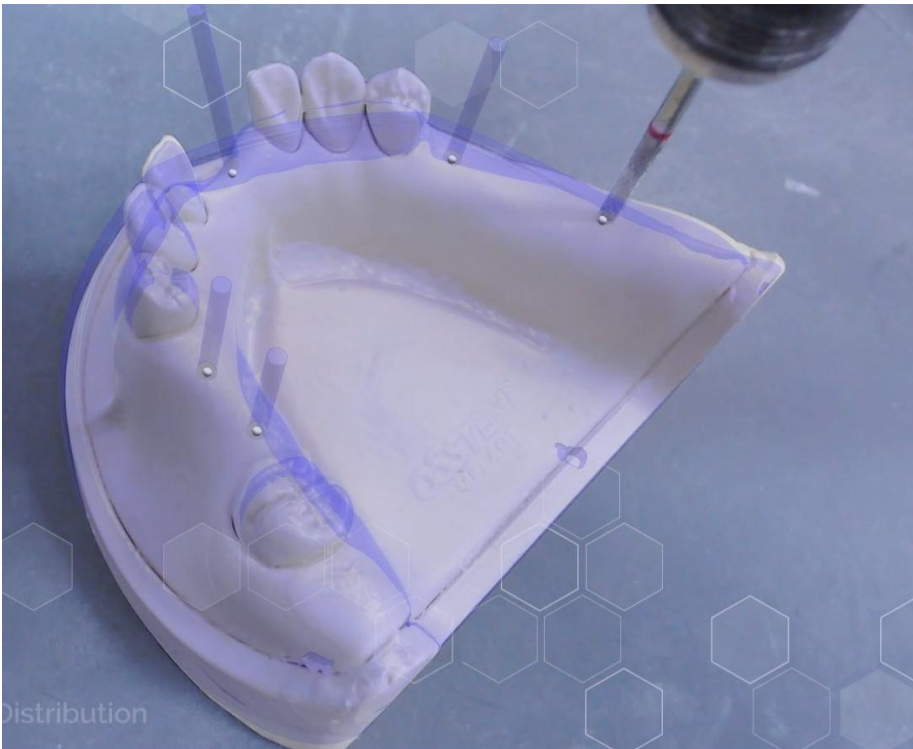


그림 6 마커리스 증강현실을 이용하여 드릴링을 시행하는 모습

수술 가이드를 이용한 드릴링의 경우 수술 가이드의 적합 후에 금속 슬리브에 맞추어 bur의 방향을 확인 후, 한번에 10 mm 깊이로 시행하였다.

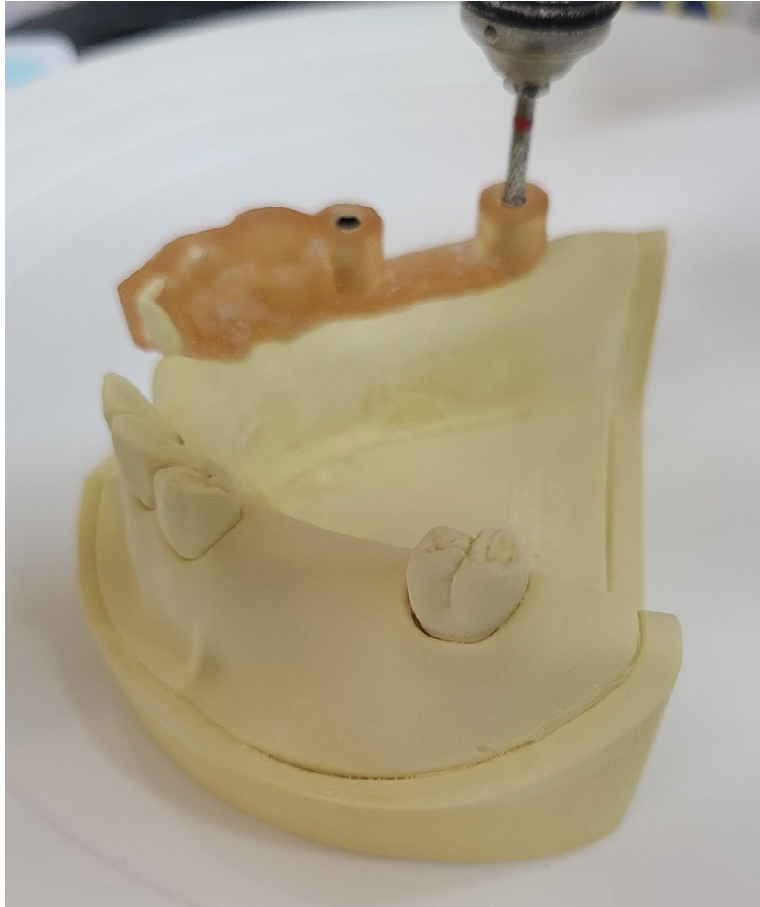


그림 7 수술 가이드를 이용하여 드릴링을 시행하는 모습

#### E. 실험 모델의 3d 이미지화

실험에 사용된 석고 캐스트의 드릴링 위치 및 방향을 확인하기 위해서 직경 2.1 mm의 원통형 목재 기둥을 가이드 핀으로 삽입하였다, 가이드 핀이 삽입된 상태로 Artec Spider scanner를 이용하여 스캔을 진행하였다. 스캔된 실험 모델을 STL 파일로 변환하였다.



그림 8 가이드 핀을 삽입한 실험 모델

### E. 오차의 측정 및 분석

Materialise 3-Matic 프로그램을 이용하여 원본 모델 및 수술 계획과, 실험 모델에 대하여 정합을 시행하였다. 정합된 모델 상에서 임플란트 수술 계획과 실제 결과 사이의 오차를 측정하였다.

캐스트 상방의 가이드 핀 부분을 추출하여 그 축을 직선으로 변환하였다. 이 직선이 원본 3D model과 만나는 부분을 Entry point로 설정하였으며, Entry point에서 가이드 핀의 축을 따라서 10mm 하방으로 연장한 점을 Apex point로 정하였다.

오차는 Entry point와 Apex point에서 선형 오차를 측정하였으며, 식립 축의 각도 오차를 측정하였다. 또한 각 값의 정규성과 등분산성을 확인 한 뒤, 실험 방법 별로 평균 및 표준편차를 계산하였다. 또한 R Studio software(RStudio 2023.06.0+421, Inc., Boston, MA, USA)을 사용하여 통계분석을 시행하였다. 두 그룹의 측정값의 등분산성을 Leven 검정을 통하여 확인한 뒤 이에 맞추어 T-test를 실시하였다. 또한 각 그룹내의 위치별 오차의 차이를 Shapiro-wilk 검정과 Leven 검정을 통해 확인한 뒤, 일원분산분석 및 Kruskal-Wallis 검정을 시행하였다.

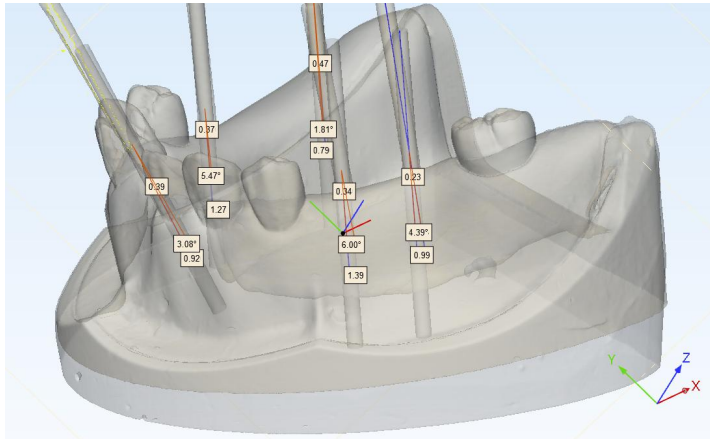


그림 9 오차의 측정

### III. 연구 결과

#### 1. 각 그룹 별 오차

각 그룹별 50개의 측정 값으로 총 100개의 측정값에 대하여 통계분석을 시행하였다. 마커리스 증강현실을 사용한 Group1의 오차는 Entry point에서 최소값 0.15 mm, 최대값 1.65 mm로 평균  $0.79 \pm 0.41$  mm를 나타내었다. 10 mm 하방의 Apex point에서는 최소값 0.1 mm, 최대값 2.88 mm로  $0.97 \pm 0.61$  mm를 나타내었다. 각오차의 측정값에서는 최소  $0.43^\circ$  최대  $11.47^\circ$ 로  $3.28 \pm 2.15^\circ$ 를 나타내었다.

수술 가이드를 사용한 Group2의 오차는 Entry point에서 최소값 0.01mm, 최대값 1.02 mm로 평균  $0.38 \pm 0.18$  mm를 나타내었다. 10 mm 하방의 Apex point에서는 최소값 0.05 mm, 최대값 1.68 mm로  $0.98 \pm 0.40$  mm를 나타내었다. 각오차의 측정값에서는 최소  $0.88^\circ$  최대  $6.59^\circ$ 로  $3.77 \pm 1.62^\circ$ 를 나타내었다.

T-test를 통하여 각 그룹간 오차의 통계적 유의성을 검증한 결과 Entry point 에서는 수술 가이드를 사용한 Group2에서 통계적으로 유의미하게 작은 오차를 나타내었으며, Apex point error 및 Angular error에서는 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않았다.

표 1. 각 그룹 별 오차 및 분석

\*p<0.05

	Group1	Group2	
	AR app	Surgical Guide	p value
	Mean±SD	Mean±SD	
Entry point error (mm)	$0.79 \pm 0.41$	$0.38 \pm 0.18$	0.0000*
Apex point error (mm)	$0.97 \pm 0.61$	$0.98 \pm 0.40$	0.9247
Angular error (°)	$3.28 \pm 2.15$	$3.77 \pm 1.62$	0.1987



2. 식립 위치별 오차 - Group 1

마커리스 증강현실을 사용한 Group1에서 #31, #35, #36, #45, #47의 총 다섯 부위에 대하여 개별 오차의 평균값 및 표준편차를 정리하였으며 box\_plot으로 나타내었다. 일원배치 분산분석을 통해 위치별 오차의 통계적 유의성을 검증하였다. Entry point의 경우 각 값이 유의미한 차이를 나타내었으며(p=0.0106) Tukey검정을 통한 사후분석 결과 #45의 오차 값이 #31,#36 부위의 오차 값에 비하여 통계적으로 유의미하게 작은 값을 나타내었다.(p=0.0162,0.0397) Apex point의 오차에서도 각 값이 유의미한 차이를 나타내었으며(p=0.0083) Tukey검정을 통한 사후분석 결과 #45 위치의 오차 값이 #31,#36 위치에 비하여 통계적으로 유의미하게 작은 값을 나타내었다.(p=0.0294, 0.0113) 각오차 값에서는 위치별 오차가 통계적으로 유의미한 차이는 나타나지 않았다.(p=0.0934)

표 2. Group 1의 위치별 오차 및 일원배치 분산분석 \*p<0.05

	Entry point error (mm)	Apex point error (mm)	Angular error (°)
#31	1.04±0.42	1.25±0.76	4.2±2.95
#35	0.66±0.29	0.97±0.42	4.37±2.13
#36	0.98±0.45	1.34±0.55	2.88±1.34
#45	0.5±0.28	0.5±0.37	2.25±1.59
#47	0.77±0.36	0.78±0.55	2.72±1.88
p value	0.0106*	0.0083*	0.0934

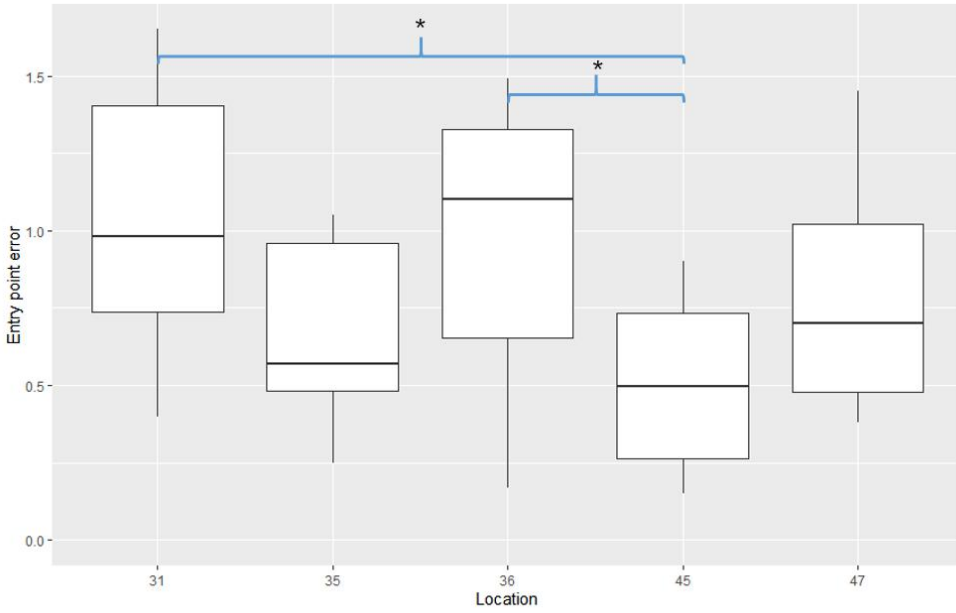


그림 10 Group1 - 위치별 Entry point 오차

\*  $p < 0.05$

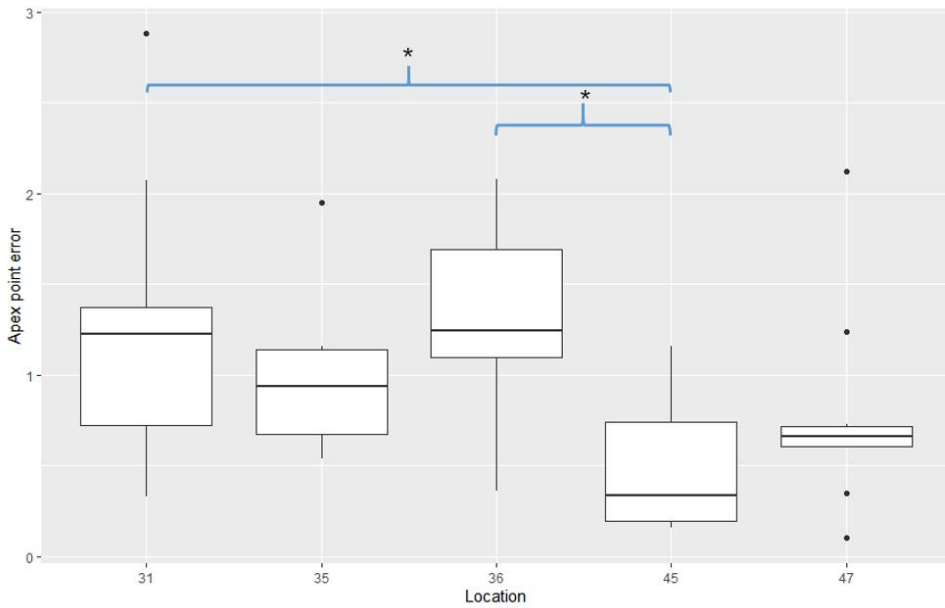


그림 11 Group1 - 위치별 Apex point 오차

\*  $p < 0.05$

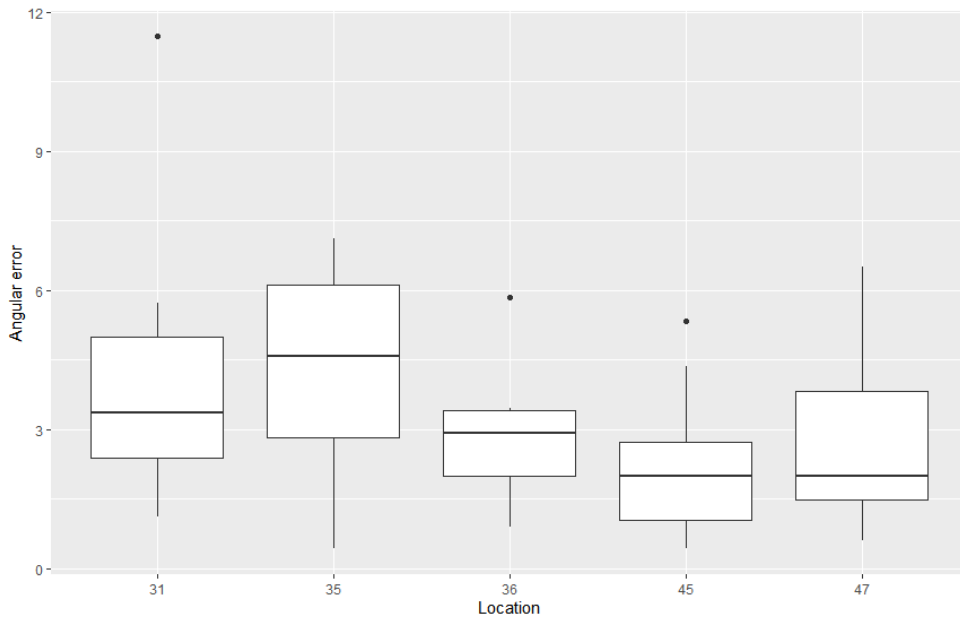


그림 12 Group1 - 위치별 각 오차

3. 식립 위치별 오차 - Group 2

수술 가이드를 사용한 Group2에서 #31, #35, #36, #45, #47의 총 다섯 부위에 대하여 개별 오차의 평균값 및 표준편차를 box\_plot으로 나타내었으며 일원배치 분산분석을 통해 위치별 오차의 통계적 유의성을 검증하였다. Entry point의 경우 각 값이 유의미한 차이를 나타내었으며(p=0.0005) Tukey검정을 통한 사후분석 결과 #47의 오차 값이 #31, #35 부위의 오차 값에 비하여 통계적으로 유의미하게 큰 값을 나타내었다.(p=0.0003, 0.0138) Apex point의 오차에서는 각 값이 유의미한 차이를 나타내었으며(p=0.0223) Tukey검정을 통한 사후분석 결과 #35 위치의 오차 값이 #31 위치에 비하여 통계적으로 유의미하게 큰 값을 나타내었다.(p=0.0215) 각오차 값에서는 각 값이 유의미한 차이를 나타내었으며(p=0.0164) Tukey검정을 통한 사후분석 결과 #31의 오차 값이 #35 부위의 오차 값에 비하여 통계적으로 유의미하게 작은 값을 나타내었다.(p=0.006)

표 3. Group 2의 위치별 오차 및 일원배치 분산분석 \*p<0.05

	Entry point error (mm)	Apex point error (mm)	Angular error (°)
#31	0.26±0.12	0.68±0.31	2.6±1.11
#35	0.34±0.16	1.2±0.34	4.99±1.29
#36	0.32±0.15	0.92±0.48	4.05±1.65
#45	0.39±0.09	0.94±0.41	3.68±1.79
#47	0.57±0.21	1.14±0.28	3.56±1.47
p value	0.0005*	0.0223*	0.0164*

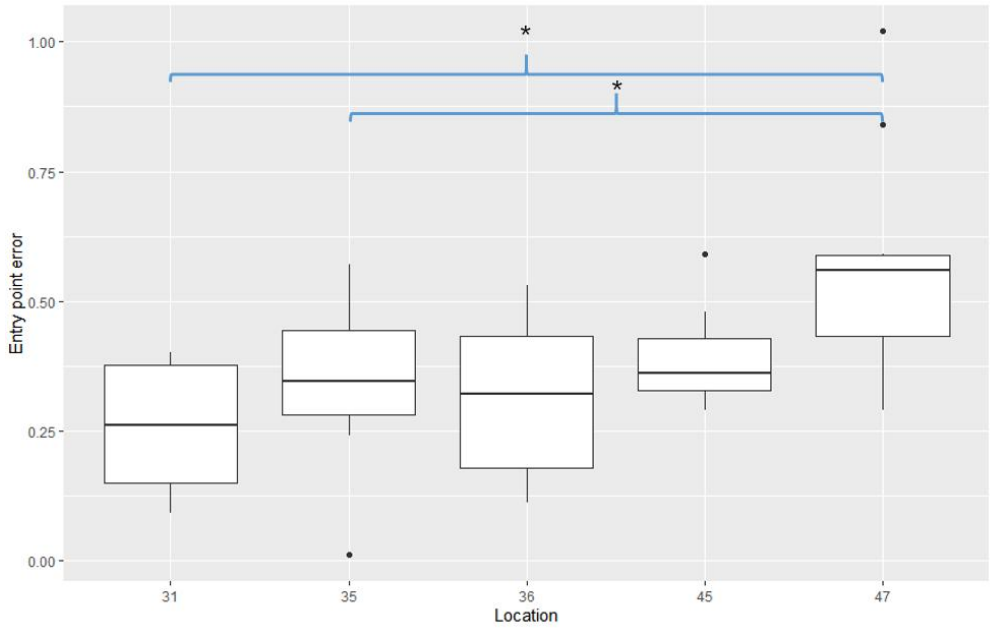


그림 13 Group2 - 위치별 Entry point 오차

\*  $p < 0.05$

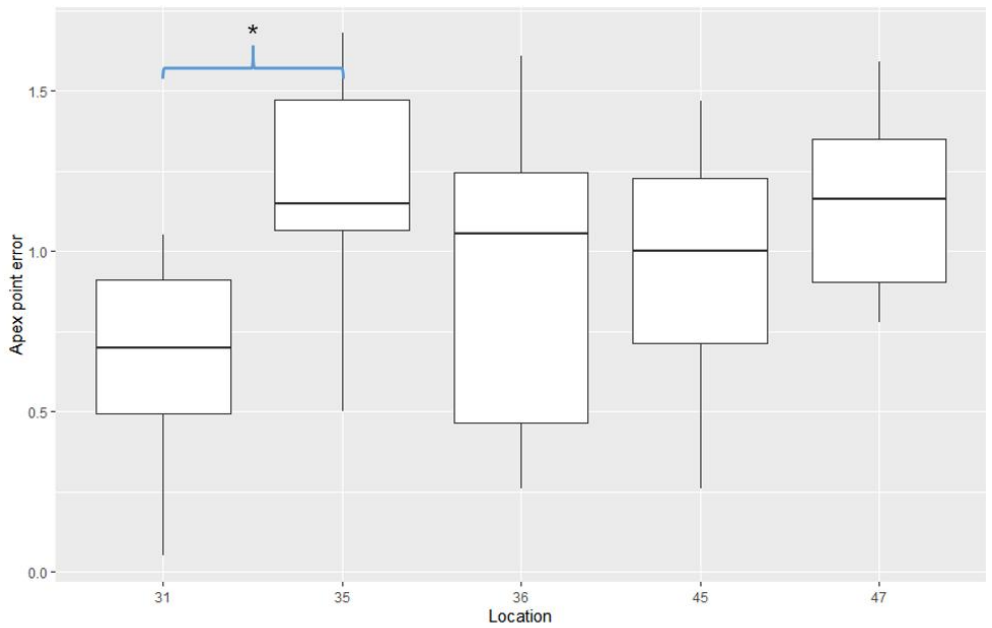


그림 14 Group2 - 위치별 Apex point 오차

\*  $p < 0.05$

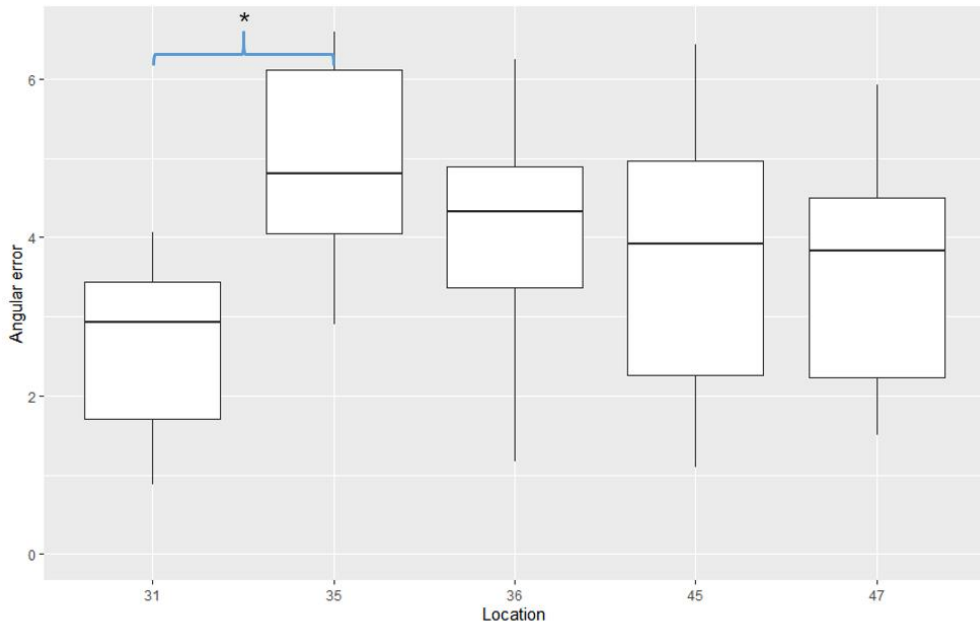


그림 15 Group2 - 위치별 각 오차

\*  $p < 0.05$

## IV. 고찰

AR, 즉 증강현실 기술의 특징 중 하나는 물리적 환경 위에 가상의 정보를 추가하여 사용자의 실시간 인식과 상호작용을 강화하는 것이다. 특히 의과 및 치과 영역에서의 증강현실 기술의 활용은 환자의 실제 해부학적 구조물과 병소, 수술계획등을 직접 눈으로 보면서 수술할 수 있게 해준다. 이러한 수술분야에서의 증강현실 기술 활용에서 가장 중요한 부분은 실제 이미지와 3D 이미지의 정합 정확도이다.[18-20]

본 논문에서는 마커리스 증강현실 및 수술 가이드를 활용하여 임플란트 식립을 위한 드릴링을 실험실 환경에서 시뮬레이션 하였다. 그 결과는 Entry point에서는 마커리스 증강현실 보다 수술 가이드의 오차가 통계적으로 유의미하게 더 작았으나, Apex point의 오차와 각 오차에 있어서는 마커리스 증강현실을 이용한 오차와 수술 가이드를 이용한 실험의 오차가 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않았다.

Tahmaseb 등은 Static computer-aided implant surgery의 정확도와 관련된 메타 분석을 시행하였으며 1.2 mm의 진입점 오차, 1.4 mm의 끝점 오차, 그리고 3.5°의 각 오차를 얻었다.[21] Wei등은 Dynamic navigation implant surgery와 관련된 메타 분석에서 1.02 mm의 진입점 오차, 1.33 mm의 끝점 오차, 3.59°의 각 오차를 얻었다.[22] 이러한 임플란트 시스템의 오차와 비교하였을 때 본 실험에서 수술 가이드를 이용했을 때 보다 큰 오차를 보인 마커리스 증강현실의 Entry point 의 오차는  $0.79 \pm 0.41$  mm로 허용 가능한 수준으로 생각된다.

치과 영역에서 치아를 활용한 마커리스 증강현실 시스템의 개발은 그동안 많은 연구가 이루어져 오고 있다. Suenaga등은 stereo vision camera를 이용하여 치아의 측정점을 추출하고 dicom data와 정합하여 1 mm 미만의 오차를 얻어내었다.[23] wang 등은 환자의 구강구조를 intraoral scanner로 스캔 한 뒤 stereo vision camera를 이용하여 치아의 형태를 정합하였으며, 0.5 mm 미만의 오차와 0.5초 미만의 연산시간을 얻어내었다.

또한 임상적 타당성을 확인하기 위해 자원자에 대한 시험도 실시하였다.[24, 25] Li 등은 stereo vision camera를 이용하여 전치부의 형태를 마커 없이 정합하고, hydra-marker를 사용하여 수술도구의 위치를 정합하여 dynamic navigation system을 만들었으며 0.74 mm의 평균 오차를 확인하였다.[26]

마커리스 시스템을 사용하는 경우에도 대부분의 연구들이 스테레오 카메라를 이용하였는데 이는 두 vision 카메라에서 얻는 상의 차이를 이용하여 자연스럽게 좌표를 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 보다 정확한 정합을 할 수 있기 때문이다. 하지만 임플란트 등의 수술은 수술범위가 좁고, 움직임이 크지 않으며, 술자와 보조자등 최소 2명 이상이 수술에 참여하기 때문에 stereo vision camera로 얻을 수 있는 상이 제한되게 된다. 또한 스스로 좌표계를 생성하는 stereo vision camera의 특성상 따로 고정된 위치에 있어야 하기 때문에 술자의 시야에서 정합하는 것이 불가능하다.

본 연구에서는 stereo vision camera가 아닌 하나의 Webcam을 이용하여 실험을 진행하였다. 이로인하여 정합 정확도가 떨어질 수는 있지만 보다 높은 화질의 상을 얻을 수 있으며, 위치가 자유롭기 때문에 술자의 시야에서 상을 정합하는 것이 가능하다. 실제로 본 연구에서 Unity 3D로 개발한 앱을 홀로렌즈로 포팅하게 된다면 실제 시야에서 AR 정합을 구현할 수 있다. Cercenelli 등은 Unity 3D와 Vuforia model target engine을 이용하여 홀로렌즈와 3D-printed leg phantom을 이용하여 AR fibula flap reconstruction을 시뮬레이션 하였다.[27]

본 연구에서는 모델상의 임플란트 식립 위치별 정확도의 차이를 확인하였으며, 통계적 유의성이 있는지 검증하였다. 실험에서 사용한 모델이 전치 및 구치, 최후방 대구치의 유무 등 다양한 환경을 가지고 있었으며, 이에 따른 정확도의 차이가 있을것이라 예상했다. 실험 결과 마커리스 증강현실을 이용한 실험에서는 #45 부위의 Entry point 및 Apex point의 오차가 타 부위에 비하여 통계적으로 유의미하게 작았으며 각오차의 경우는 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않았다. 이는 증강현실 프로그램에서 인식하는 특징점들의 분포에 따라서 오차의 폭이 달라질 수 있다고 해석할 수 있으며 이는 마커리스 증강현실의 한계가 될 수 있다.



수술 가이드를 이용한 실험에서도 각 위치별 오차의 차이가 존재하였다. 특히 Entry point에서의 오차는 #47 에서 타부위에 비하여 통계적으로 유의미하게 큰 값을 나타내었는데, 이는 치아의 형태에서 유지 및 고정을 얻는 수술 가이드의 특성상 최후방 구치가 없는 환경에서 가장 멀리 떨어져 있는 #47 의 오차가 더 커진 것이라고 생각한다.

증강현실 이 수술 가이드와 비교했을 때 가지는 한계점은 분명히 존재한다. 그것은 바로 보여주기만 한다는 점이다. 실제 수술 상황에서는 피질골과 해면골이 가지는 골밀도의 차이, 발치와 등 골이 없는 곳의 밀도차이 등으로 인해서 계획한 곳으로 드릴링이 안되는 경우가 많다. 본 연구는 모든 곳의 밀도가 거의 균질한 석고 캐스트를 이용하였기 때문에 이런 부분이 반영이 되지 않았지만, 실제 환자에서는 이러한 이유로 인한 오차 또한 존재할 것이다.

본 연구는 실험실 조건에서 실험을 진행하였기 때문에 실제 임상적인 환경과는 많은 차이를 가지고 있다. 첫 번째는 덴탈 캐스트 자체를 특징점으로 인식하였다는 점이다. 실제 환자에서는 정확한 정합을 위해서는 치아부분만을 특징점으로 학습하여야 할 것이며 이에 따른 인식률의 차이와 정합오차의 차이가 나타날 수 있다. 두 번째는 덴탈 캐스트를 인식할 때까지 다양한 각도로 확인이 가능하였다는 점이다. 실제 환자에서는 입술, 볼, 혀 등 시야를 제한하는 다양한 구조물들 때문에 시야 및 각도가 제한되게 된다. 이에 따른 인식에 대한 평가가 필요하다. 또한 침과 혈액등으로 인한 치아구조의 오인식 등이 문제가 될 수 있으며 이러한 요인들이 이 연구에서의 결과가 실제 임플란트 수술에서도 이어질 수 있을 지는 불확실하며, 이에 따른 후속 연구가 필요할 것이라 생각된다.

광학 기술의 발달과 디지털 기술의 발달은 우리가 모두 가지고 있는 스마트폰 카메라의 성능 또한 향상시켰으며 그 수준은 microscope를 이용하여 시행하는 미세혈관문합수술의 연습을 스마트폰을 이용하여 할 수 있는 수준까지 이르렀다. Ghibi 등은 스마트폰의 확대 수준이 microscope를 대체하여 미세혈관 문합수술을 할 수 있는 수준까지는 부족하지만, 기초적인 연습은 가능하다고 하였으며.[28] Jianmongkol 등은 non-living model을

이용한 연습에서는 microscope에 비하여 시간이 더 오래 걸리기는 하지만 충분히 가능한 수준이라 결론지었다[29]. 이와 같이 지금은 실험실 환경에서의 결과값이기는 하지만, 좀 더 나은 화질과, 좀더 나은 정합 알고리즘 등을 이용한다면 마커리스 증강을 이용한 Dynamic navigation system 또한 근시일 내에 가능할 것이라 생각되며, 이를 위한 연구가 필요하다.

## V. 결론

본 연구에서 제작한 마커리스 증강현실 프로그램은 수술 가이드와의 정확도 비교에서 Entry point 오차는 Surgical Guide에 비하여 통계적으로 유의미하게 큰 값을 나타내었으며, 그 값은  $0.79 \pm 0.41$  mm였다. Apex point의 오차는  $0.97 \pm 0.61$  mm, 각오차는  $3.28 \pm 2.15^\circ$ 이었으며 이 값은 Surgical Guide의 오차와 비교하였을 때 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않았다.

## 참고 문헌

1. Alhossaini SJ, Neena AF, Issa NO, Abouelkheir HM, Gaweesh YY. Accuracy of markerless registration methods of DICOM and STL files used for computerized surgical guides in mandibles with metal restorations: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2022.
2. Arisan V, Karabuda ZC, Özdemir T. Accuracy of two stereolithographic guide systems for computer aided implant placement: a computed tomography based clinical comparative study. *Journal of periodontology*. 2010;81(1):43-51.
3. Block MS. Static and dynamic navigation for dental implant placement. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2016;74(2):231-3.
4. Block MS, Emery RW. Static or dynamic navigation for implant placement—choosing the method of guidance. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2016;74(2):269-77.
5. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant placement is more accurate using dynamic navigation. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2017;75(7):1377-86.
6. Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 2017;32(1).
7. Kivovics M, Takács A, Péntzes D, Németh O, Mijiritsky E. Accuracy of dental implant placement using augmented reality-based navigation, static computer assisted implant surgery, and the free-hand method: an in vitro study. *Journal of Dentistry*. 2022;119:104070.
8. Lan K, Tao B, Wang F, Wu Y. Accuracy evaluation of 3D-printed noninvasive adhesive marker for dynamic navigation implant surgery in a maxillary edentulous model: An in vitro study. *Medical Engineering & Physics*. 2022;103:103783.
9. Ma F, Sun F, Wei T, Ma Y. Comparison of the accuracy of two

- different dynamic navigation system registration methods for dental implant placement: A retrospective study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*. 2022;24(3):352-60.
10. Bun San Chong B, Manpreet Dhesi B, Makdissi J, RCR D. Computer-aided dynamic navigation: a novel method for guided endodontics. *Quintessence International*. 2019;50(3):196-202.
  11. Mandelaris GA, Stefanelli LV, DeGroot BS. Dynamic navigation for surgical implant placement: overview of technology, key concepts, and a case report. *Compendium of continuing education in dentistry (Jamesburg, NJ: 1995)*. 2018;39(9):614-21; quiz 22.
  12. Mediavilla Guzmán A, Riad Deglow E, Zubizarreta-Macho Á, Agustín-Panadero R, Hernández Montero S. Accuracy of computer-aided dynamic navigation compared to computer-aided static navigation for dental implant placement: an in vitro study. *Journal of clinical medicine*. 2019;8(12):2123.
  13. Ma Q, Kobayashi E, Suenaga H, Hara K, Wang J, Nakagawa K, et al. Autonomous surgical robot with camera-based markerless navigation for oral and maxillofacial surgery. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2020;25(2):1084-94.
  14. Panchal N, Mahmood L, Retana A, Emery R. Dynamic navigation for dental implant surgery. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics*. 2019;31(4):539-47.
  15. Pellegrino G, Bellini P, Cavallini PF, Ferri A, Zacchino A, Taraschi V, et al. Dynamic navigation in dental implantology: The influence of surgical experience on implant placement accuracy and operating time. An in vitro study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(6):2153.
  16. Pellegrino G, Ferri A, Del Fabbro M, Prati C, Giovanna Gandolfi M, Marchetti C. Dynamic Navigation in Implant Dentistry: A Systematic Review and Meta-analysis. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 2021;36(5).

17. Stefanelli LV, Mandelaris GA, DeGroot BS, Gambarini G, De Angelis F, Di Carlo S. Accuracy of a Novel Trace-Registration Method for Dynamic Navigation Surgery. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*. 2020;40(3).
18. Chen C-K, Yuh D-Y, Huang R-Y, Fu E, Tsai C-F, Chiang C-Y. Accuracy of Implant Placement with a Navigation System, a Laboratory Guide, and Freehand Drilling. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*. 2018;33(6).
19. Chen X, Xu L, Sun Y, Politis C. A review of computer-aided oral and maxillofacial surgery: planning, simulation and navigation. *Expert review of medical devices*. 2016;13(11):1043-51.
20. Emery RW, Merritt SA, Lank K, Gibbs JD. Accuracy of dynamic navigation for dental implant placement - model-based evaluation. *Journal of Oral Implantology*. 2016;42(5):399-405.
21. Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D, Coucke W, Evans C. The accuracy of static computer aided implant surgery: A systematic review and meta analysis. *Clinical Oral Implants Research*. 2018;29:416-35.
22. Wei SM, Zhu Y, Wei JX, Zhang CN, Shi JY, Lai HC. Accuracy of dynamic navigation in implant surgery: A systematic review and meta analysis. *Clinical Oral Implants Research*. 2021;32(4):383-93.
23. Suenaga H, Tran HH, Liao H, Masamune K, Dohi T, Hoshi K, et al. Vision-based markerless registration using stereo vision and an augmented reality surgical navigation system: a pilot study. *BMC medical imaging*. 2015;15(1):1-11.
24. Wang F, Wang Q, Zhang J. Role of dynamic navigation systems in enhancing the accuracy of implant placement: a systematic review and meta-analysis of clinical studies. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2021;79(10):2061-70.
25. Wang J, Shen Y, Yang S. A practical marker-less image registration method for augmented reality oral and maxillofacial surgery.

- International journal of computer assisted radiology and surgery. 2019;14:763-73.
26. Li D, Zhu M, Wang S, Hu Y, Yuan F, Yu J. A Vision-Based Navigation System With Markerless Image Registration and Position-Sensing Localization for Oral and Maxillofacial Surgery. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023;72:1-11.
27. Cercenelli L, Babini F, Badiali G, Battaglia S, Tarsitano A, Marchetti C, et al. Augmented reality to assist skin paddle harvesting in osteomyocutaneous fibular flap reconstructive surgery: a pilot evaluation on a 3D-printed leg phantom. *Frontiers in Oncology*. 2022;11:5572.
28. Ghabi A, Amar S, Harion M, Legagneux J, Vignes J-L, Mathieu L. Microvascular anastomosis using loupes and smartphone magnification: experimental study for application to limited-resource environments. *Hand Surgery and Rehabilitation*. 2020;39(2):92-5.
29. Jianmongkol S, Vinitpairot C, Thitiworakarn N, Wattanakamolchai S. A comparison of using a smartphone versus a surgical microscope for microsurgical anastomosis in a non-living model. *Archives of Plastic Surgery*. 2022;49(01):121-6.