

컴퓨터-보조 임플란트 수술에 대한 고찰: 네비게이션 수술 시스템 vs. 컴퓨터가이드 임플란트 템플릿 vs. 수술 로봇

박지만^{1*}, 김종엽², 심준성¹

¹연세대학교 치과대학 보철과학교실

²보스톤스마트치과의원

Review of Computer-assisted Implant Surgeries: Navigation Surgery System vs. Computer-guided Implant Template vs. Robot

Ji-Man Park^{1*}, Jongyub Kim², June-Sung Shim¹

¹Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Yonsei University, Seoul, Korea

²Boston SMart Dental Clinic, Seoul, Korea

*Corresponding author: Ji-Man Park, jimam@yuhs.ac

Abstract

In addition to the computer-guided implant template popularized in Korea recently, the navigation system and early-stage robot are becoming the new trend in the field of computer-assisted implant surgery. The navigation surgery system tracks the position of patient and handpiece and displays them in real-time on CT data with pre-implant planning. The purpose of this article is to describe the operation principle and method, the advantages and disadvantages, and the accuracy studies of the navigation system.

Keywords: Dental implant, Computer-assisted surgery, Navigation surgery, Computer-guided implant template, Robot

I. 서론

최근 사회적으로 대두되고 있는 키워드는 4차 산업혁명이며, 이는 인공지능, 빅데이터, 사물 인터넷, 로봇기술, 3D프린팅 등이 주도하는 정보통신기술(ICT, Information and Communications Technologies)의 융합으로 이루어지는 차세대 산업혁명이다. 실제공간과 가상공간이 통합되는 가상 물리 시스템의 구축을 특징으로 하며, 이를 통해 산업의 변화를 기대하고 있다. 이는 초연결(hyperconnectivity)과 초지능(superintelligence)을 속성으로 하므로 더 빠른 속도로 사회에 영향을 미치고 우리의 실생활에 다가오고 있다.

OPEN ACCESS

pISSN : 1229-5418
Implantology 2018; 22(1): 50-58
<https://doi.org/10.12972/implantology.20180005>

Received: March 23, 2018
Revised: March 27, 2018
Accepted: March 31, 2018

Copyright © 2018. The Korean Academy of Oral & Maxillofacial Implantology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

치과계는 이러한 움직임이 다른 산업계보다 빠르게 적용되고 있다. 인상채득을 인상재 없이 3차원 스캔으로 영상을 획득하며, CAD 과정에 인공지능과 빅데이터 기술이 점차 깊게 관여하고 데이터를 전세계 어디에 있든지 상관없이 치과의사와 기공사 간 연결이 가능하게 되었다. 효율적인 의사소통 후에 디자인이 완성되면 이를 진료실 내이거나 기공소에서 밀링 혹은 3D프린팅 기술을 통해 수복물을 환자 맞춤형으로 장착하는 디지털 작업흐름(digital workflow)이 이제는 일반적인 진료실 풍경이 되었다.

임플란트 치료 또한 종전의 CT 영상을 단순히 참고만 하는 수준이 아닌, 적극적으로 데이터를 컴퓨터에서 분석하고, 가상공간에서 임플란트 위치와 상부 보철물을 계획하며, 이를 절삭 혹은 프린팅으로 실체화 하여 환자에 적용하고 있다. 2000년도 초반에 Simplant와 Nobel Guide 등의 임플란트 수술용 가이드가 소개되어왔으나 제작 비용, 준비 과정의 번거로움, 정확성에 대한 의심 등으로 널리 활용되지 않았으나, 최근 국내에서 대부분의 임플란트 회사들이 Implant Studio (3shape, Denmark) 등의 발전된 형태의 소프트웨어와 3D 프린트 보급화 등의 추세를 따라 회사 단위에서 임플란트 수술용 가이드를 공급하고 있으며, 이제는 가이드 수술이 보편화 단계에 접어들었다고 판단할 수 있는 수준에 이르렀다.

II. 현황

최근 세계치과박람회(IDS, International Dental Show)와 시카고 미드윈터 미팅, 미국임플란트학회(AO, Academy of Osseointegration) 등의 전시장에서 네비게이션 수술 장비들이 점차 많이 소개되고 있다. 가장 관심을 끈 것은 Neocis, Inc.사의 YOMI Robot-Assisted Dental Surgery 시스템으로서 3축 로봇암이 환자의 위치를 실시간 추적하며 계획된 임플란트 위치에 기반한 가상의 벽을 형성하는 일종의 진동 유도인 햅틱 가이드를 해주는 장비이었다(Fig. 1). 이로써 제조사에서는 위치, 각도, 깊이를 로봇암의 도움으로 정확하게 맞추어 임플란트를 식립한다고 소개하고 있다. 현재 미국에서만 FDA 승인이



Fig. 1. YOMI Robot-assisted dental surgery system from Neocis, Inc.

Ji-Man Park et al. : Review of Computer-assisted Implant Surgeries: Navigation Surgery System vs. Computer-guided Implant Template vs. Robot. Implantology 2018

나 있는 상태이며, 미국에서만 수술이 가능하며, 로봇 가격이 2백만달러(이하 권장소비자가 기준, RRP)에 달해서 장비 자체의 가격은 매우 고가에 속한다. 현재는 로봇 가이드 시스템이라는 개념으로 활용되는 단계이지만 작년 7월 중국 시안에서 로봇 치과의사가 자율수술을 0.2 mm의 오차로 정확하게 수행했다고 한 소식이 있듯이 머지 않은 시점에는 치과의사의 감독 하에 로봇이 임플란트를 식립하는 로봇 수술이 불가능하지는 않을 것으로 생각된다. 다음으로 네비게이션 수술 장비들도 많이 소개되었는데, ClaroNav사의 Navident는 CT 촬영을 위한 NaviStent로 영상을 획득하고, 시스템 내에 내장되어 있는 소프트웨어로 계획한 후 캘리브레이션을 거친 장비로 환자에 고정되는 'Jaw tag'와 핸드피스에 연결되는 'Drill tag' 사이의 관계를 스테레오 카메라와 광원으로 실시간 추적하며 임플란트를 식립하는 네비게이션 시스템이다(Fig. 2). 미국 FDA에서 허가를 받았고, 2만 5천 달러에 판매 중이며, 접이식으로 수

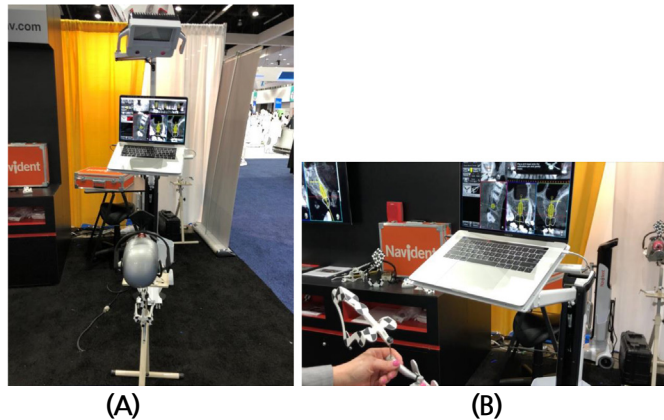


Fig. 2. Navident system from ClaroNav. (A) System overview, (B) Handpiece tracking array is shown on the left side and patient tracking array is mounted at the manikin head on the right side.

Ji-Man Park et al. : Review of Computer-assisted Implant Surgeries: Navigation Surgery System vs. Computer-guided Implant Template vs. Robot. Implantology 2018

술하지 않을 때 보관이 용이하다. X-Nav Technologies, LLC 사에서 소개한 X-GUIDETM도 역시 미국 FDA 승인을 받아서 임상에서 사용되고 있는 장비이다(Fig. 3). X-CLIP이라는 방사선불투과성 마커를 사용하는데, 크기가 작아 수술 중에 시야 방해가 적으며 열가소성이라서 뜨거운 물에 담궈 연화시킨 후 구강 내에 압접시켜 고정한다. 장비는 2만 9천 달러, 마커는 1회용으로 150달러에 판매되고 있으며, Nobel Biocare에서 OEM으로 공급하고 있다. 2개의 큰 카메라 사이의 간격이 넓고 고성능 PC를 사용하여 현재 소개된 장비들 중에서 가장 빠른 반응속도를 보이며, 술자가 움직이는 대로 쉽게 반응하는 것을 확인할 수 있었다. Navigate Surgical Technologies, Inc. 사의 inliant®는 카메라와 추적표지자(tracking array)가 작은 특징을 보이고 2만 7천 달러에 판매가 예정되어 있으나 아직 FDA 허가 전이라고 보고되어 있다(Fig. 4).

본 종설논문에서는 다양한 컴퓨터 보조 임플란트 수술 시스템들에 대해서 알아보고, 이들의 특성과 문헌들에 보고된 정확도 등을 비교분석하고자 한다.

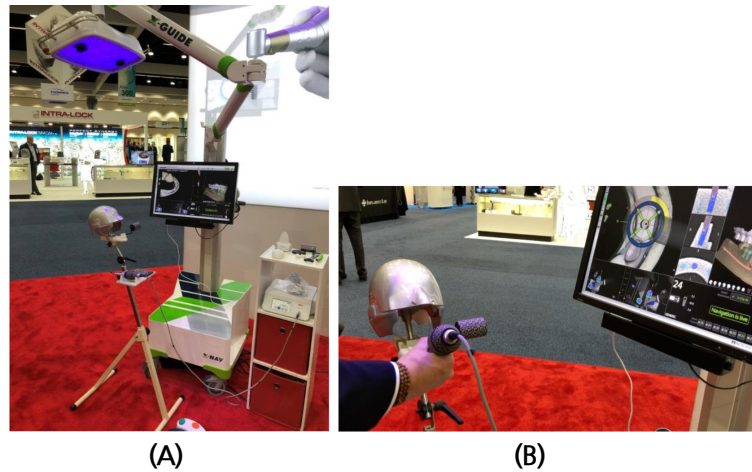


Fig. 3. X-GUIDE™ system from X-Nav Technologies, LLC. (A) System overview, (B) This navigation system uses tracking components that have hundreds of distinct tracking points.

Ji-Man Park et al. : Review of Computer-assisted Implant Surgeries: Navigation Surgery System vs. Computer-guided Implant Template vs. Robot. Implantology 2018

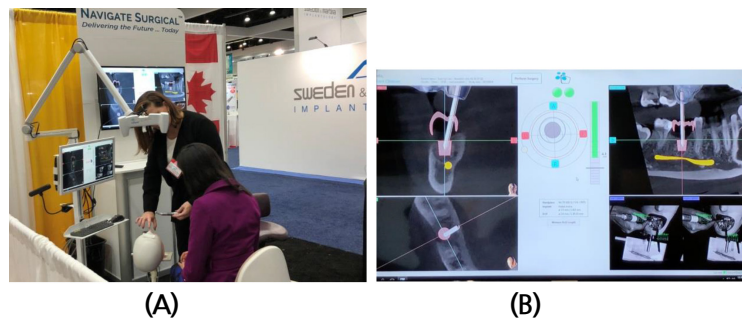


Fig. 4. Inliant® system from Navigate Surgical Technologies, Inc. A: System overview, B: Screen of operating software during navigation surgery.

Ji-Man Park et al. : Review of Computer-assisted Implant Surgeries: Navigation Surgery System vs. Computer-guided Implant Template vs. Robot. Implantology 2018

III. CAS (Computer-assisted Surgery) 임플란트 식립 시스템의 분류

1. 컴퓨터 개입 정도에 따른 분류

- ① Static CAS systems: CAD/CAM 기반으로 환자 영상에서 제작된 가이드를 사용하는 방식
- ② Dynamic CAS systems: 환자와 수술기구 간의 위치를 추적(tracking)하여 컴퓨터 화면에 실시간 위치를 네비게이션으로 보여주며, 피드백 함으로써 가이드를 제공하는 방식
- ③ Robotic CAS systems: 네비게이션 시스템과 실시간 추적은 동일하게 하지만, 로봇에 의해 계획된 임플란트 위치로 드릴링이 되는 완전 자동 방식

이 분류는 컴퓨터 입장에서 수동형(네비게이션), 반자동형(가이드), 능동형(로봇수술)로 구분할 수도 있음!

2. 술자의 자유도에 따른 분류

- ① Freehand implant placement: 보조적인 기구 없이 술자의 의지에 전적으로 따라 임플란트를 식립하는 방법. CT 영상을 참고하거나 하지 않을 수 있으며 단지 주위 해부학적 구조물의 형태와 위치를 미리 파악한 후 술자의 경험과 감각에 의존하여 진행됨
- ② Pilot drill-only CAS guidance: CT 데이터를 바탕으로 임플란트의 위치를 계획하고 이에 따라 임플란트 드릴링의 시작점과 방향을 알려주는 장치를 석고 모형 상에서 제작하는 방식. 임플란트 수술용 드릴과 가이드 상의 드릴 구멍 크기 간의 공차가 커서 컴퓨터 상에서 계획한 위치를 정확하게 옮기는 것에는 한계가 있음
- ③ Partially guided CAS: 골삭제는 이루어지나 임플란트를 정해진 깊이까지 식립하는 단계는 가이드를 제거하고 손으로 하는 수술
- ④ Fully guided CAS: 임플란트를 계획된 위치까지 정확하게 식립하며, 미리 준비한 임시 수복물을 장착할 수 있는 수준까지 지원하는 방식

IV. Dynamic navigation 시스템의 원리 및 특성

동적(dynamic) 네비게이션 시스템은 장비의 복잡성 및 가격이 높아서 그동안 임상 적용에 제한적이었다. 최근까지도 이러한 종류의 시스템은 2004년에 이스라엘의 DenX Advanced Dental Systems 사에서 소개된 IGI navigation system 외에는 상업화된 장비가 거의 없었다. iCAT® conebeam CT 기술진들이 X-Nav Technologies 사에서 개발한 X-GUIDE™ 시스템이 2015년 International College of Oral Implantologists (ICOI) 동계심포지엄과 Academy of Osseointegration (AO) 학술대회에서 소개되었고, 2016년도부터 판매되고 있다. 그 동안 치과용 임플란트를 위한 네비게이션 시스템에 대한 연구 논문이 없었다가 이 장비를 기반으로 한 문헌이 나오기 시작하였다²⁻⁸. 이 시스템 또한 IGI 시스템과 마찬가지로 환자와 핸드피스를 광학 기술로 위치를 추적하는 원리를 기반으로 하고 있다. CT 영상을 촬영할 때 위치표지자(fiducial marker)를 환자 악골에 단단히 부착한다. 술 전 촬영 CT에 나타난 공간을 ‘스캔 볼륨’이라고 부르며 이 안의 점들은 xyz 좌표를 가지게 된다. 또한 위치 추적이 이루어지는 수술영역의 공간을 ‘수술영역 볼륨’이라고 한다. 위치표지자는 CT 데이터의 환자와 ‘수술영역 볼륨’을 인식시키는 역할을 한다. 환자의 위치를 추적하는 부분을 ‘동적 레퍼런스 프레임’이라고 하는데, 이것이 모든 위치의 참고점 역할을 하고, ‘수술영역 볼륨’과 ‘CT스캔 볼륨’의 xyz 좌표계가 정렬되게 된다.

정적이든 동적이든 컴퓨터 보조 수술은 최적화된 임플란트 위치에 있으며, 맨손으로 하는 수술에 비해 정확도가 향상된다는 문헌 보고들은 많이 나와 있다^{9, 10}. 그중 네비게이션 수술은 가이드 수술 대비 몇 가지 장점이 존재한다. 환자의 CT 데이터를 취득한 당일에 임플란트 수술을 진행할 수 있으며 기공물을 미리 제작할 필요가 없다. 잇몸 절개를 최소화할 수 있으며, 수술 상황에 따라 수술 도중에 계획을

변경할 수 있다. 또한 가이드와는 달리 주변 치아를 가리지 않아서 수술 필드 전체를 보면서 수술할 수 있으며, 개구가 제한된 환자에서도 상대적으로 접근이 쉽다. 그리고 임플란트를 식립하기 위해서 몸을 굽힐 필요 없이 모니터를 보면서 수술하게 되므로 집도의의 자세가 편안하다. 마지막으로 드릴링 정확도를 실시간으로 계속적으로 확인할 수 있다¹¹.

V. X-GUIDE™ 시스템을 중심으로 알아본 CAS의 운영 방법 및 특징

IGI system 등 이전까지 소개된 장비들은 추적점(tracking point)이 12개로 제한적이었으나, X-GUIDE 시스템은 수백개의 특징적인 추적점들이 있는 추적용 부품을 사용한다고 보고되고 있다¹². 또한 열가소성 재료를 통해 치아에 고정되며 세 점의 금속마커가 내장된 위치표지자(X-Clip, X-Nav Technologies, LLC., Lansdale, PA)를 CT 촬영 시와 수술 도중에 구강에 장착한다. 이 시스템은 무치악 증례에서도 사용할 수 있는데, 골고정용 나사로 환자-추적 표지자 판(E-Clip, X-Nav Technologies, LLC.)을 환자 악골에 고정하여 CT 데이터를 획득하고, 촬영 당일 수술 시 표지자 판이 추적암 통해 환자 추적용 실린더를 매달게 된다. 수술 후에 판은 제거한다.

위치표지자를 구강 내에 고정한 다음 CT를 촬영하여 DICOM 데이터를 얻고, 무치악 공간에 가상 치아배열 등의 CAD 작업이 필요하다면 구강스캔이나 인상 후 모형스캔하여 .stl 파일을 획득하고 네비게이션 수술 시스템에 설치되어 있는 임플란트 계획 소프트웨어로 불러들여 수술 계획을 한다. 소개된 모든 동적 네비게이션 시스템은 계획 소프트웨어가 포함되어 있다. 임플란트의 위치 선정은 기본적으로 환자 CT 상에서 인접 치아 및 피해야 할 해부학적 구조물을 고려하여 하게 되며, 스캔 데이터가 있다면 진단 왁스업에 해당하는 치아 디자인을 함께 하면서 탑다운 방식의 최종 보철을 고려한 계획을 세울 수 있다.

컴퓨터 보조 수술을 시작하기 전에 핸드피스와 환자의 보정(calibration)을 거친다. 핸드피스 보정은 핸드피스 추적부의 형태와 드릴 축 사이의 관계를 확인하며, 환자 보정은 CT 위치표지자와 환자 추적부 사이의 관계를 확인함으로써 술 전 계획의 좌표계와 수술 중에 위치 추적할 좌표계를 연결하게 된다. 이러한 두 가지 보정을 통해 술 전 CT 좌표계에 수술하는 치과 의사가 조작하는 드릴 몸체와 끝 단의 위치가 실시간으로 이어져 보이게 되는 것이다. 임플란트 삽입 시를 포함하여 드릴을 교체할 때마다 보정 판에 드릴의 끝을 갖다 댄으로써 드릴의 길이를 확인하는 과정 또한 거친다. 동시에 두 개의 라이브 비디오 창을 통해 위치 추적이 정확히 이루어지는지 확인할 수 있다. 이 시스템은 임플란트를 최종 삽입하는 단계까지 추적하도록 되어 있어 fully guided CAS에 해당한다.

동적 네비게이션이 실제 임상에서 가능하려면 반응속도가 빨라야 한다. 초당 20-25프레임 이상이 되어야 술자가 답답하지 않게 수술 시 사용할 수 있는 수준이라고 할 수 있으며, 제조사에서 이 시스템이 초당 25프레임으로 디스플레이 가능하도록 컴퓨터 사양을 맞추었다고 하고 있다. 실제 사용하여 보면

핸드피스의 움직임에 따라 모니터상에서 나타나는 반응은 즉각적이었고, 몇 번의 연습만으로 계획된 위치에 드릴링을 밀리미터 수준으로 할 수 있었다. Block 등은 세 명의 집도의가 X-GUIDE 시스템을 반복학습 하였을 때의 변화를 연구하였고, 20회 이상의 경험 후에는 세 명의 수술 의사 간에 정확성 차이는 없어졌다고 보고하면서, 이 시스템으로 수술하는 의사는 자신이 한 술 전 계획과 네비게이션 시스템을 신뢰하는 연습을 하는 등의 새로운 인지적 접근을 해야 할 것이라고 하였다¹¹.

VI. CAS의 정확도 비교

정적인 컴퓨터 보조 수술인 가이드를 이용한 임플란트 식립에 대한 연구는 오래 전부터 다양하게 이루어져 왔다. Eggers 등은 레고블럭을 이용한 med3D 사의 implant3D 시스템의 in vitro 연구를 보고하였는데, 드릴 침단의 오차가 0.5 ± 0.04 mm에 달했다고 하였다¹³. Van Assche 등은 4구의 사체에서 Nobel Guide 시스템 정확도를 분석하여 침단에서의 오차 최대치를 2.4 mm로 보고하였다¹⁴. Fortin 등은 Keystone dental의 초기 제품인, CADImplant를 이용하여 20명의 환자에게 94개의 임플란트를 식립하여 평가한 결과, 계획한 임플란트와 실제 심어진 임플란트 사이의 편차가 큰 변화가 없었으며, 신뢰할 만한 방법이라고 결론지었다¹⁵. Valente 등도 Simplant 사의 SurgiGuide로 환자 대상 89개의 임플란트를 식립하고 술 전, 술 후 영상을 비교한 결과 침단에서 1.6 mm, 각도차가 7.9°이었다고 보고하였다¹⁶. 그는 이러한 편차가 발생한 것에 대해 가능한 오차들에 대해 언급을 하였다. CT 촬영과 이미지 재구성 과정에서 0.5 mm 미만의 오차가 발생할 수 있으며, 템플릿 제작하는 과정에서 0.1-0.2 mm의 오차가, 그리고 환자에서 템플릿을 장착할 때와 이를 대고 드릴링할 때에 시스템에 따라 다양한 크기의 오차가 발생할 수 있다. 임플란트 드릴이 부싱 내부에서 상하로 부드럽게 움직여야 하므로 시스템마다 고유의 공차를 부여한다. SurgiGuide의 경우, 부싱 또는 실린더의 높이가 5 mm이고, 부싱의 내경이 드릴보다 0.15-0.2mm 넓기 때문에 이론적으로 부싱 안에서 2.29도 정도의 각도로 움직일 수 있으며, 실린더에서 20mm 떨어진 위치에서는 측방편차가 1 mm 정도가 된다. 그리고 가이드 템플릿 시스템의 드릴이 보통 긴 편이라서 개구량이 적은 사람에서 안 들어가는 경우가 생길 수 있으며, 실제로 최후방 구치부에는 템플릿을 뺀 채로 식립하는 경우가 많다. 마지막으로 bur stop을 다른 것으로 잘못 낀 경우에 발생하는 human error 등이 생길 수 있다.

Ruppin 등은 정적 CAS인 SurgiGuide와 동적 네비게이션 시스템인 Artma Virtual Patient와 RoboDent 이렇게 셋을 비교하였는데, 가이드와 네비게이션 시스템 사이에 유의한 차이를 보이지 않았다. 하지만 최대값을 비교하면 Artma 시스템에서 3.1 mm에 달하는 편차를 보여, 물리적으로 구속되는 가이드에 비해 술자의 의지에 많이 좌우되는 네비게이션 시스템에서는 술자의 손떨림 및 중대한 실수 등이 반영되는 특징이 있다고 결론지었다¹⁷. Casap 등이 치과 전용으로 개발한 IGI 시스템과 신경외과를 비롯한 medical에서 범용으로 사용되는 LandmarkX 시스템을 비교 분석하였는데, IGI 시스템이 마커 위

치를 정확하게 반영하는 반면 LandmarkX 시스템은 수술 부위가 skull에 한정되지 않고, 움직이는 하악 골을 대상으로 하는 경우에는 정확하게 적용하기에 무리가 있다고 하였다¹⁸. Emery 등은 X-GUIDE를 한 명의 수술의가 유치악, 무치악 증례의 덴티폼을 대상으로 in vitro 연구를 보고하였다. 임플란트를 식립하고 술 후 CBCT를 촬영하여 X-GUIDE 계획 소프트웨어에서 불러들여 임플란트 계획과 식립된 임플란트의 편차를 분석하였는데, 각도는 유치악 0.89°, 무치악 1.26° 침단 위치편차는 유치악 0.37 mm, 무치악 0.54 mm로서 이전 연구들에서 Robodent, IGI, NaviDent 시스템에 비해 높은 정확도를 가졌다고 보고하였다¹².

Block 등이 실제 환자를 대상으로 X-GUIDE 시스템에서 실시한 세 명의 반복숙달에 대한 러닝커브 연구에서는 각도 3.62°, 침단 1.56 mm의 편차를 보였고, 총 30회 학습 과정 중 1-10회차 평균 3.94°, 1.78 mm에서 21-30회차 평균 3.15°, 1.31 mm로서, 이 장비의 러닝커브 숙달 단계는 20회로 보고하였다¹¹.

VII. 고찰 및 결론

정확도 연구들을 종합해 보면 정적 CAS가 드릴을 물리적으로 구속하므로 가이드의 적합도가 담보된다는 전제하에 동적 CAS인 내비게이션 시스템에 비해 좀 더 정확한 결과를 보이고 있지만, CT 촬영 당일에 별다른 준비 없이 컴퓨터 보조 수술을 할 수 있으며, 임플란트 계획을 수술 도중에도 상황에 맞게 수정할 수 있는 유연성에서의 장점이 있다. 따라서 두 가지 방식의 장단점을 비교하여 각 진료 환경에 맞는 시스템을 취사선택하여 적용하는 것이 바람직할 것이다.

내비게이션 임플란트 수술 시스템은 위치 추적을 위한 센서와 통신 기술, 수술 계획 단계에서의 인공지능, 그리고 향후 로봇기술이 보다 정밀화된다면 로봇자율수술까지도 활용될 수 있는 4차 산업혁명의 기술들이 집약되어 있는 분야라고 생각된다. 2004년 전후로 이스라엘에서 처음으로 개념과 실 사용이 가능한 장비가 소개되었기 때문에 새로운 기술은 아니지만, 급격하게 발전하고 있는 하드웨어와 소프트웨어 기술을 기반으로 치과 임상에 보다 가깝게 다가오고 있다. 최신 장비를 소개하는 각종 전시장에서 여러 회사들이 각자의 특징적인 내비게이션 수술 장비들을 적극적으로 소개를 하고 있으며, 앞으로 임플란트 수술의 트렌드가 점차 이쪽으로 변화할 가능성이 높다. 따라서 이에 대한 관심과 이해를 가지고 반전을 이루어 간다면 4차 산업혁명의 시대에 치과계가 의료산업과 학문 발전을 견인하는 선도적인 역할을 할 수 있을 것으로 생각한다.

Acknowledgement

This work was supported by the Industrial Technology Innovation Program funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (10053907).

References

1. Fortin T, Champleboux G, Bianchi S, Buatois H, Coudert JL. Precision of transfer of preoperative planning for oral implants based on cone-beam CT-scan images through a robotic drilling machine. *Clin Oral Implants Res.* 2002; 13: 651-656.
2. Azarmehr I, Stokbro K, Bell RB, Thygesen T. Surgical Navigation: A Systematic Review of Indications, Treatments, and Outcomes in Oral and Maxillofacial Surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 2017; 75: 1987-2005.
3. Block MS, Emery RW. Static or Dynamic Navigation for Implant Placement-Choosing the Method of Guidance. *J Oral Maxillofac Surg.* 2016; 74: 269-277.
4. Casap N, Nadel S, Tarazi E, Weiss EI. Evaluation of a navigation system for dental implantation as a tool to train novice dental practitioners. *J Oral Maxillofac Surg.* 2011; 69: 2548-2556.
5. Collyer J. Stereotactic navigation in oral and maxillofacial surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2010; 48: 79-83.
6. Wexler A, Tzadok S, Casap N. Computerized navigation surgery for the safe placement of palatal implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007;131:S100-105.
7. Casap N, Tarazi E, Wexler A, Sonnenfeld U, Lustmann J. Intraoperative computerized navigation for flapless implant surgery and immediate loading in the edentulous mandible. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2005;20:92-98.
8. Casap N, Wexler A, Persky N, Schneider A, Lustmann J. Navigation surgery for dental implants: assessment of accuracy of the image guided implantology system. *J Oral Maxillofac Surg.* 2004; 62: 116-119.
9. Farley NE, Kennedy K, McGlumphy EA, Clelland NL. Split-mouth comparison of the accuracy of computer-generated and conventional surgical guides. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2013; 28: 563-572.
10. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2003; 18: 571-577.
11. Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2017; 32: 92-99.
12. Emery RW, Merritt SA, Lank K, Gibbs JD. Accuracy of Dynamic Navigation for Dental Implant Placement-Model-Based Evaluation. *J Oral Implantol.* 2016; 42: 399-405.
13. Eggers G, Patellis E, Muhling J. Accuracy of template-based dental implant placement. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2009; 24: 447-454.
14. Van Assche N, van Steenberghe D, Guerrero ME, Hirsch E, Schutyser F, Quirynen M, et al. Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three-dimensional cone-beam images: a pilot study. *J Clin Periodontol.* 2007; 34: 816-821.
15. Fortin T, Bosson JL, Coudert JL, Isidori M. Reliability of preoperative planning of an image-guided system for oral implant placement based on 3-dimensional images: an in vivo study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2003; 18: 886-893.
16. Valente F, Schirotti G, Sbrenna A. Accuracy of computer-aided oral implant surgery: a clinical and radiographic study. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2009; 24: 234-242.
17. Ruppin J, Popovic A, Strauss M, Spuntrup E, Steiner A, Stoll C. Evaluation of the accuracy of three different computer-aided surgery systems in dental implantology: optical tracking vs. stereolithographic splint systems. *Clin Oral Implants Res.* 2008; 19: 709-716.
18. Casap N, Wexler A, Eliashar R. Computerized navigation for surgery of the lower jaw: comparison of 2 navigation systems. *J Oral Maxillofac Surg.* 2008; 66: 1467-1475.