

구강외과 수술용 스텐트 기반 영상유도 수술 시스템의 개발

서울대학교 의과대학 협동과정 방사선응용생명과학 전공, 치학연구소 및 BK21

*서울대학교 치의학대학원 구강악안면방사선학교실, 치학연구소 및 BK21

**서울대학교 치의학대학원 구강악안면외과학교실, 치학연구소

이우진 · 김대승 · 이원진* · 이삼선* · 최순철* · 허민석* · 허경희* · 김명진** · 이지호**

Development and application of stent-based image guided navigation system for oral and maxillofacial surgery

Woo-Jin Lee, Dae-Seung Kim, Won-Jin Yi*, Sam-Sun Lee*, Soon-Chul Choi*, Min-Suk Heo*, Kyung-Hoe Huh*, Myung-Jin Kim**, Jee-Ho Lee**

Interdisciplinary Program in Radiation Applied Life Science, Dental Research Institute and BK21, College of Medicine, Seoul National University

**Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Dental Research Institute and BK21, School of Dentistry, Seoul National University*

***Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University*

ABSTRACT

Purpose : The purpose of this study was to develop a stent-based image guided surgery system and to apply it to oral and maxillofacial surgeries for anatomically complex sites.

Materials and Methods : We devised a patient-specific stent for patient-to-image registration and navigation. Three-dimensional positions of the reference probe and the tool probe were tracked by an optical camera system and the relative position of the handpiece drill tip to the reference probe was monitored continuously on the monitor of a PC. Using 8 landmarks for measuring accuracy, the spatial discrepancy between CT image coordinate and physical coordinate was calculated for testing the normality.

Results : The accuracy over 8 anatomical landmarks showed an overall mean of 0.56 ± 0.16 mm. The developed system was applied to a surgery for a vertical alveolar bone augmentation in right mandibular posterior area and possible interior alveolar nerve injury case of an impacted third molar. The developed system provided continuous monitoring of invisible anatomical structures during operation and 3D information for operation sites. The clinical challenge showed sufficient accuracy and availability of anatomically complex operation sites.

Conclusion : The developed system showed sufficient accuracy and availability in oral and maxillofacial surgeries for anatomically complex sites. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol 2009; 39 : 149-56*)

KEY WORDS : Image Guided Navigation Surgery; Stent; Optical tracking system; Image guided implant; Oral and maxillofacial surgery

서 론

국내에서 임플란트는 매년 수만 개 이상 시술되고 있으

*This study was supported by a grant of the Korea Healthcare technology R & D Project, Ministry for Health, Welfare & Family Affairs, Republic of Korea (A08-4491-AL2023-08N1-00030B).

접수일 (2009년 7월 14일), 수정일 (1차 : 2009년 7월 31일, 2차 : 2009년 8월 17일), 채택일 (2009년 8월 20일)

Correspondence to : Prof. Won-Jin Yi
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Seoul National University
Tel) 82-2-2072-3049, Fax) 82-2-744-3919, E-mail) wjyi@snu.ac.kr

며, 앞으로 경제수준의 향상 및 노인층의 증가로 인해 임플란트 시술의 수요는 지속적으로 높아질 것으로 예상된다. 치과 임플란트 시술의 중요한 요소는 치조골에 삽입되는 임플란트의 3차원적 위치, 각도 및 깊이로써 치과 보철물의 장기적 예후를 결정하며 환자의 심미적, 음성학적 및 저작 기능적 측면에 영향을 끼친다. 임플란트를 성공적으로 시술하기 위해서는 악골 주위의 중요한 해부학적 구조물을 정확히 인지하면서, 술전에 미리 계획된 식립 위치, 각도 및 깊이를 수술 시 정확히 재현하여 악골 내에 식립

해야 한다. 인지해야 할 중요한 해부학적 구조물은 하악관(mandibular canal), 이공(mental foramen), 절치공(incisive foramen), 상악동(maxillary sinus), 악하선와(submandibular fossa) 등이 있으며, 치아 결손부 주위의 치아와 잔존골의 두께와 형태에 대해서도 유념하여 시술해야 한다.¹ 치과 임플란트 식립 시술 시, 이러한 악골 내 및 주위의 삼차원적인 구조물에 대한 실시간적인 모니터링을 할 수 없기 때문에, 고난이도의 식립술 시 시술의 성공도는 대부분 의사의 수기 능력에 따라 좌우되고 있는 실정이다.^{2,3} 따라서 시술의 성공률을 높이고 임상에서 쉽게 활용될 수 있는 3차원 영상을 이용한 여러 가지 시술 보조방법이 개발되고 있다.

삼차원 영상가이드(three-dimensional image guide)를 이용한 임플란트 시술법은 기본적으로 판막 수술이 없는(flapless) 치료법이다. 이는 임플란트 시술 후 치은 형태의 변형을 피할 수 있으며, 혈류 공급을 유지함으로써 즉시 부하 임플란트(immediately loaded implant)의 경우에 성공률을 높일 수 있고, 골제거 부위에 골절단기(osteotome)를 사용하여 넓힐 경우, 골막(periosteum)은 순측 골판(labial plate)을 지지하는 역할을 할 수 있다. 또한 시술 시간을 줄일 수 있으며 술 후 환자의 불편을 최소화 할 수 있다.⁴ 환자에게 계획된 정보를 전달하는 방법은 드릴 가이드 스텐트(drill guide stent)를 이용하는 방법, 영상항법 유도 시술법(image guided navigational surgery)을 이용하는 방법 등이 있다. 계획된 임플란트 정보를 환자에게 전달하기 위한 방법 중 하나인 드릴 가이드 스텐트(drill guide stent)를 이용한 방법은 Rapid prototyping (RP) 시스템^{5,6}이나 드릴을 사용하여⁷ 스텐트(stent, template, sprint)에 계획된 위치, 각도에 따른 가이드 홀을 제작한 후 이를 시술 보조로 이용한다. 시술 시 스텐트를 환자에 구강 내에 장착하고 미리 뚫린 구멍이 유도하는 방향으로 임플란트 소켓을 시술하는 방법이다. 이는 핸드피스 드릴 하부에 위치한 구조물에 대한 정보를 줄 수 없으며 시술 중에 위치 및 각도에 대한 실시간적이고 상호작용적인 제어가 불가능하다. 즉 시술 중에 조작이 불가능하여 계획된 방향을 확인하거나, 수정하는 것이 불가능하다. 따라서 수술 중 보완의 여지없이 미리 제작된 스텐트를 그대로 사용해야 한다. 또한 계획된 위치 정보를 스텐트에 이전하는 과정에서 재현성이 떨어질 수 있으며 이로 인해 전반적으로 정확도가 떨어질 수 있다. 스텐트는 육안으로 관찰되는 악골 표면의 구조를 바탕으로 제작되므로 실제 수술 시 부정확한 가이드가 되는 경우가 있고, 제작과정의 번거로움에 비해 임상에서의 활용도가 높지 않다.

삼차원 영상유도 수술법(image guided navigational surgery)이 소개된 이후, 두경부 영역에서 이를 활용한 다양한 진보된 수술법들이 개발되었다. 신경외과적 수술에서는 프레임 없는 정위 수술(frameless stereotactic surgery)법으로

활용되고 있으며, 영상유도 수술법을 적용하여, 두개 부위에 발생한 종양 제거 수술에서 시야 확보를 용이하게 하고 합병증을 최소화하고 있다.^{9,10} 이 수술법은 위성 위치확인 시스템(GPS, Global Positioning System)이 차량의 현재 위치를 전자 지도상에 표시해주는 것과 같은 원리이다. 수술 중 수술 도구의 위치를 컴퓨터 모니터 상에 환자의 3차원 해부학적 영상에 겹쳐서 표시해줌으로써, 의사에게 해부학적 구조물에 대한 수술도구의 정확한 상대적인 위치정보를 제공한다.⁸ 즉 의사의 수술도구가 환자의 3차원 해부학적 영상 지도 위에서의 항해(navigation)를 가능하게 한다. 이는 수술 중 침습적 과정을 줄이고 병소의 국소 위치측정 및 적중 능력을 향상시킨다. 치과 임플란트 시술의 경우에는, 의사는 환자의 3차원적 해부학적 영상에 겹쳐서 나타난 핸드피스 드릴 팁의 현재 위치, 각도 및 깊이를 실시간적으로 확인할 수 있다.

구강악안면 영역에서는 수술 부위의 해부학적 복잡성과 임플란트, 악교정 수술 및 골 신장술 등에서 서브 밀리미터 단위의 정확도가 요구되기 때문에, 높은 정확도를 제공하는 영상유도 수술은 일찍이 임상적인 응용에 있어서 관심의 대상이 되어 왔다. 임플란트, 측두하악관절 부위의 재건술, 악교정 수술, 골 신장술, 종양 수술, foreign body의 제거 및 해부학적으로 심부에 위치한 병소의 최소 침습 생검 등에 영상유도 수술법이 시도되었다.¹¹⁻¹⁶ 그러나 현재 영상유도 수술 시스템 자체의 복잡성, 오차 문제 및 다양한 수술 환경에 대한 적응 등이 아직 해결돼야 할 과제로 남아있다. 본 연구에서는 구강악안면 영역의 수술에서 간편하게 활용할 수 있고 높은 정확도를 제공하는 스텐트 기반의 영상유도 수술 시스템을 개발하고 이를 구강외과 수술에 이용하였다.

재료 및 방법

광학적 위치추적(optical position tracking)에 기반한 전체 시스템은 크게 적외선 위치추적 카메라, 핸드피스 위치를 추적하기 위한 툴 프루브(tool probe), 환자위치를 등록하고 추적하기 위한 기준 프루브(reference probe)가 부착된 환자 스텐트, 그리고 시술계획 및 위치추적에 사용되는 모니터와 컴퓨터로 구성된다. 영상유도(image guided navigation) 임플란트 시스템을 이용한 전체적인 시술 절차는 다음과 같다. 우선 환자에 스텐트를 장착하고 CT영상을 획득한다. 3차원적으로 재구성된 CT영상을 이용하여 환자의 물리적 공간과 CT영상 공간 간의 등록(registration)을 수행한다. 등록이 끝나면 환자의 물리적 공간은 3차원 영상공간과 자동적으로 연관되며, 환자의 움직임에 상관없이 핸드피스 드릴 팁의 위치가 3차원 영상공간에서 실시간으로 추적되어 모니터 상에 표시된다. CT영상은 MDCT(SOMATOM Sensation 10, Siemens AG, Munich, Germany)를 이용하여

120 kVp, 80 mAs 및 절편 두께 0.75 mm의 촬영조건으로 획득하였다.

스텐트는 치과에서 일반적으로 사용하는 바이트 인상 획득 방법을 통하여 제작되었다(Fig. 1). 이 스텐트는 환자에 장착되어 수술 전에 환자의 위치를 3차원 영상과의 등록 시 또는 수술 중에 환자의 위치변경을 추적하는 기준체(reference body)로 사용되었다. 영상유도 임플란트 수술법은 우선적으로 환자와 3차원 영상과 연관시키기 위한

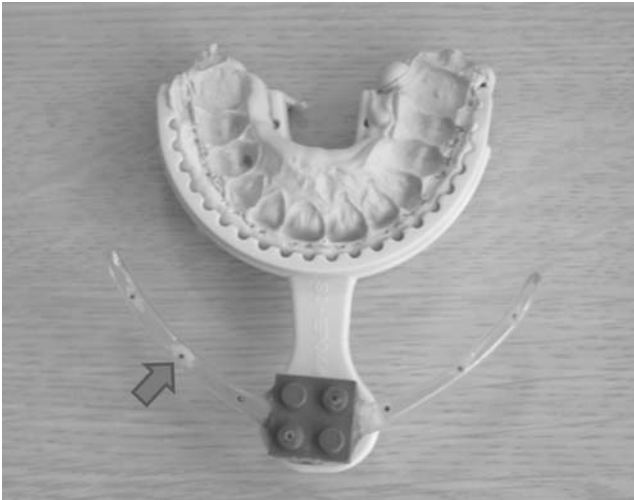


Fig. 1. Patient-specific splint with registration body attached. The arrow indicates an iron sphere contained in the body.

등록과정을 필요로 한다. 이는 환자 스텐트에 설치된 영상 등록용 표지자(fiducial marker, 지름 1 mm 쇠구슬)의 물리적 위치와 3차원 CT영상에 나타나는 표지자의 위치를 일대일로 대응시킴으로써, 환자의 초기위치를 등록하는 과정이다. 영상 등록은 영상유도시술에 있어서 가장 중요한 단계 중의 하나이다.^{17,18} 이때 발생하는 오차가 영상유도 수술의 전 과정의 정확도에 결정적인 영향을 미치게 된다. CT공간 상에서 표지자 위치의 중심좌표는 영상인식 알고리즘을 적용하여 자동적으로 추출하였다.¹⁹ 표지자의 물리적 위치는 광학적 위치추적 카메라(Polaris vica, Northern Digital, Inc., Canada)가 제공한다. 이 과정은 술자가 아닌 보조원에 의해 시술 전에 수행될 수 있다. 이때 스텐트에 부착되는 프루브를 기준체로 사용하기 때문에 환자의 움직임이 발생해도 이것에 의한 오차는 발생하지 않는다. 영상등록이 끝난 후 영상등록용 표지자는 제거가 가능하기 때문에, 수술 부위에 대한 핸드피스 동선의 방해할 수 최소화할 수 있었다. 등록을 통하여 최종적으로 물리적 공간과 영상공간을 매핑하는 변환(M_{reg})이 결정된다.

수술 중에는, 스텐트에 부착된 프루브를 통하여 환자 턱의 움직임과 핸드피스에 부착된 프루브를 통하여 드릴 팁의 위치가 동시에 추적된다. 이를 통하여, 드릴 팁의 위치는 환자 스텐트와의 상대적인 위치 좌표로써 자동적으로 계산된다. 따라서 환자의 움직임과 상관없이, 술자는 현재의 핸드피스 드릴의 3차원적 위치를 모니터 상에서 환자의 영상과 관계하여 확인할 수 있다. 즉 수술 중에도 환자



Fig. 2. Developed PC program for the image guided navigation system for oral and maxillofacial surgery providing information for position, angle and depth.

의 움직임에 의한 위치 추적 오차는 발생하지 않는다. 핸드피스 드릴 팁의 위치를 결정하는 수식은 다음과 같다(식 1).

$$T = M_{reg} M_{ref}^{-1} M_{probe} M_{cal} \quad (1)$$

T: 핸드피스 드릴 팁의 3차원 영상에서의 위치, M_{ref} : 기준 프루브 변환, M_{probe} : 툴 프루브 변환, M_{cal} : 핸드피스의 툴 프루브에 대한 offset, M_{reg} : 영상등록을 통해 얻어진 변환 행렬

임플란트 시술 중 드릴의 종류가 바뀌면, 핸드피스의 툴 프루브에 대한 offset이 바뀌게 된다. 이를 자동적으로 측정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 offset이 알려진 프루브1을 사용하여 기준 프루브로부터 특정 기준점(landmark)의 좌표를 얻는다. 이어 offset을 측정하고자 하는 수술도구를 다시 기준점에 위치시킨 후 위치를 측정한다. 새로운 offset은 다음의 수식에 의해 결정된다(식 2).

$$M_{offset} = M_{probe}^{-1} M_{ref} P_{landmark} \quad (2)$$

M_{offset} : 새로운 offset, M_{ref} : 기준 프루브의 변환, M_{probe} : 새로

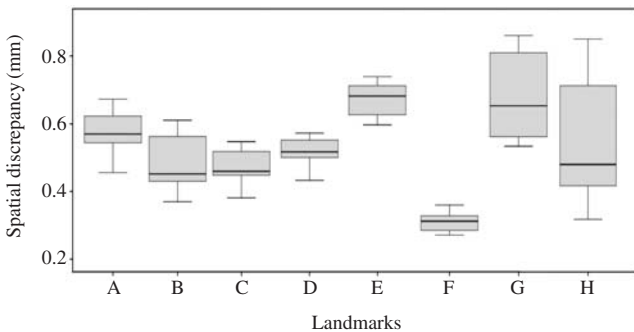


Fig. 3. Spatial discrepancy between actual measurements and probe positions.



Fig. 4. A case for needing vertical ridge augmentation with autogenous bone graft due to the alveolar bone atrophy of right mandible.

운 프루브의 변환, $P_{landmark}$: 기준점의 좌표

시스템 정확도를 검증하기 위해 8개의 영상등록용 표지자의 오차 값을 각각 10회씩 측정하였다. 오차는 CT영상에서의 해부학적 구조물의 3차원적 위치와 실제 수술도구의 추적 결과값의 차이를 오차 값으로 계산하였으며 수식은 다음과 같다(식 3).

$$\sigma^2 = |y_i - (Rx_i + T)|^2 \quad (3)$$

x_i : 표지자의 물리좌표계 상에서의 위치, y_i : CT 영상좌표계에서의 위치, R: 회전행렬, T: 이동행렬

측정된 값의 정규성을 Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilks 통계량 분석을 통해 나타내었으며 각각의 기준점에서의 오차값의 표준편차와 95% 신뢰구간에서 평가되었다.

결 과

개발된 프로그램에서 시술계획 및 위치추적이 가능하였으며(Fig. 2), 이는 광학적 위치추적(optical position tracking) 카메라와 결합하여 20 Hz의 속도로 실시간 영상추적이 가능하게 되었다. 추적 오차를 측정하기 위해 사용된 8개의 기준점에서 개발된 시스템의 평균 오차값은 0.56 ± 0.16 mm이었으며 0.271 mm에서 0.886 mm까지의 분포를 나타냈다(Fig. 3). 모든 항목에서 p-value > 0.05로 수집된 모든 데이터는 정규분포의 가정을 만족하였다.

구강악안면외과 영역에서 구강내 소수술로 야기되는 합병증 중 가장 흔한 것 중 하나인 하치조 신경 손상의 위험성을 줄이기 위하여, 개발된 3차원 영상유도 수술법을 이용하였다. 첫 번째는, 심하게 퇴축된 하악 구치부의 치조골 증대술을 위해 하악지 상행부의 자가골 채취술을 시행해야 하는 환자에 적용한 증례이다. 57세 환자가 심한 치주질환으로 인한 하악 부분 무치악을 주소로 내원하였다.

내원시 하악 양측 구치부 치아는 결손된 상태였고 잔존 치아는 하악 우측 제1소구치와 제1대구치이었다. 추가로 잔존치아를 발치 후 완전히 치유되기를 기다려서 임플란트 식립 계획하에 진단을 위한 CT를 촬영하였다. 촬영 결과 하치조신경 상방에 존재하는 유용한 골의 높이가 평균 7.3 mm 각각 계획된 부위는 6.6, 7.4, 7.8, 8.0 mm로 구치부에는 추가적인 치조골 증대술없이 임플란트 식립이 불가능한 상태였다. 이에 우측 하악지 상행부에서 블록 형태의 자가골을 채취하고 무치악 부위의 치조골 증대술에 이용

하기로 계획하였다. 발치 8주 후에 치유를 확인하고 파노라마 및 CT 촬영을 시행하였다(Fig. 4). 3차원 CT 상에서 부족한 치조골의 양을 고려하여 하악 우측 상행지부의 골 채취량을 미리 결정하고 수술시 기준으로 사용하기 위해 범위와 해당 좌표를 저장해 두었다. 골 채취 전 미리 제작한 스텐트를 구강 내에 장착시키고 스텐트에 기준 프루브를 장착시켜 카메라에서 인식되도록 하였다. 핸드피스용 프루브를 이용하여 실제 환자의 해부학적 구조물과 CT영상 상의 구조물이 연동이 되는지 확인한 후, 수술 기구에 프루브를 부착하여 사용하였다(Fig. 5). 술전 미리 설정한 채취골의 절단선과 좌표를 기준으로 계획된 정도의 블록 형태의 자가골을 하악 우측 상행지 부위에서 채취할 수 있었다. 하악 전치부위에 3개의 임플란트를 식립하고 우측 구치부에는 채취된 자가골을 이용하여 치조골 증대술을 시행하였다. 실시간으로 하치조 신경관과 수술기구와의 위치관계를 확인하면서 시술할 수 있어서 신경손상의 위험성을 줄일 수 있었다(Fig. 6).

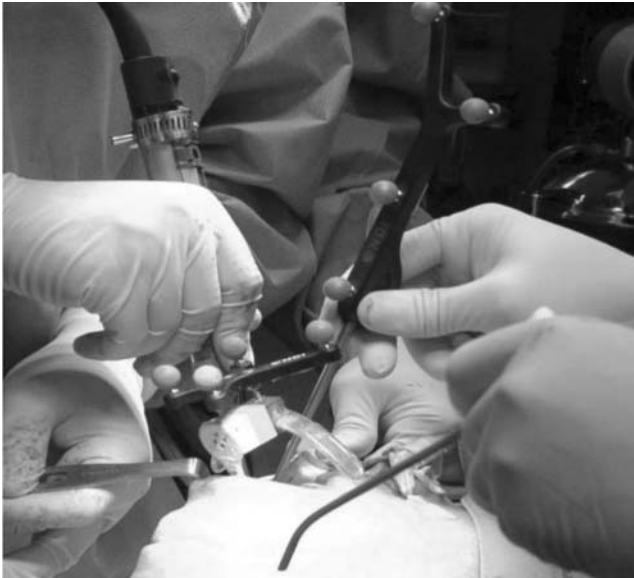


Fig. 5. Autogenous bone graft by developed image guided navigation system.

두 번째는, 매복치가 하치조 신경에 근접하여 외과적 발거술 시행시 신경손상이 우려되는 수술에 적용한 증례이다. 22세 남자 환자가 하악 우측 제3대구치 부위의 부종과 동통을 주소로 내원하였으며 파노라마 사진 초진 시 매복치와 하치조 신경이 인접하여 외과적 발거시 신경손상이 우려되었다(Fig. 7). 환자 동의 후 영상유도 시술 시스템을 이용하여 발거술을 시행하기 위해 술전 3차원 CT를 촬영하였으며 하치조 신경에서 1 mm 이상 떨어져 있는 영역에서 매복치가 주변에 기준점들을 설정하고 각 점들의 좌표를 저장하였다. 영상등록과정을 마친 후 외과적 발거를 위한 치아 및 골 삭제를 시행하면서 수술도구의 위치가 하

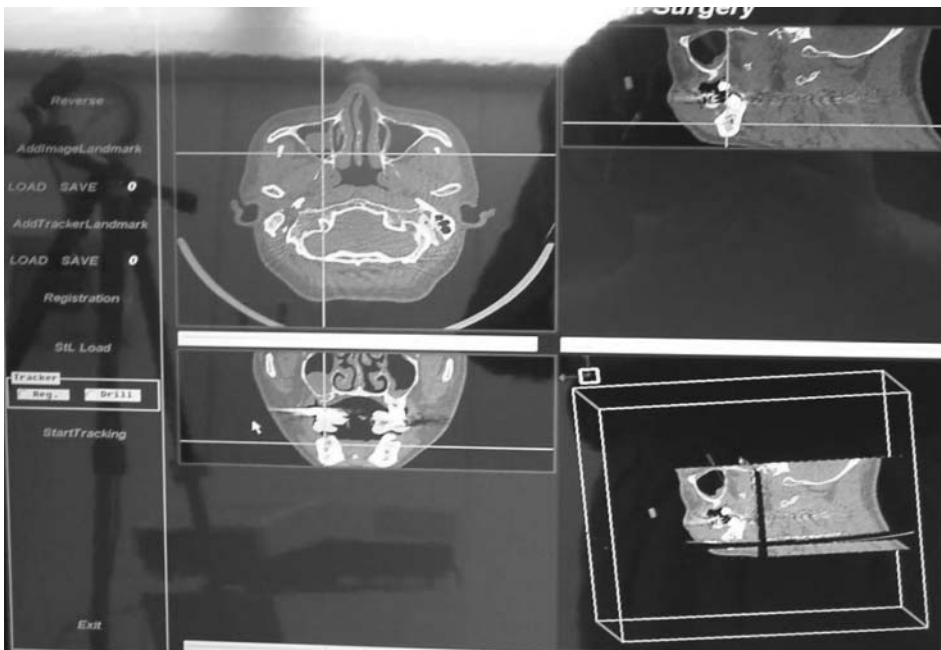


Fig. 6. Real-time tracking of 3D position of surgery tool tip.



Fig. 7. A case for possible injury to the inferior alveolar nerve during extraction of the impacted third molar.

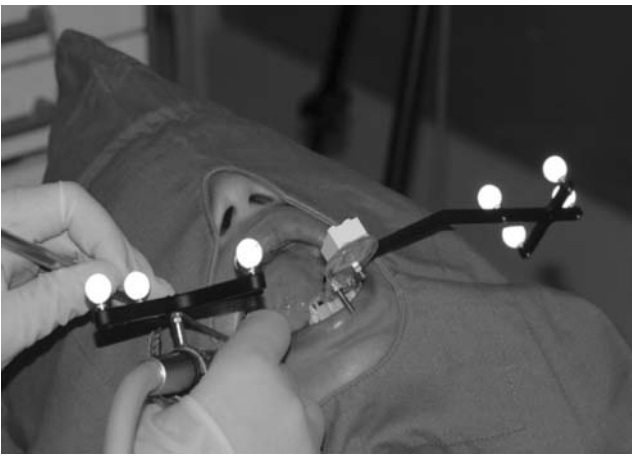


Fig. 8. Performed surgery keeping safe distance from the inferior alveolar nerve.

치조 신경에 대하여 어느 위치에 있는지 확인할 수 있었으며 미리 설정한 기준점을 참고로 수술도구를 시술 중 신경에서 충분히 안전한 거리에 두고 시술할 수 있었다(Fig. 8).

고 찰

3차원 CT영상을 기반으로 한 영상유도 수술법이 처음으로 이용된 것은 1979년 신경외과 영역이었으며, 해부학적으로 중요한 구조물들이 접근하기에 불리한 위치에 위치한 두개 내 수술에서 대뇌 피질 부위의 손상을 최소화하는데 이용되었다.¹⁰ 3차원 영상유도 수술법은 CT영상을 재구성한 3D 영상에서 해부학적으로 중요한 구조물과 수술도구의 위치 관계를 화면상에서 실시간으로 확인하면서 수술이 가능하기 때문에, 육안 관찰이 불가능한 부위의 수술에서 중요한 해부학적 구조물의 손상 위험성을 최소화

하고, 술전 수립된 계획을 보다 정확하게 구현할 수 있다. 최근 영상장비 및 컴퓨터 시스템의 발달로 영상유도 수술법은 더욱 빠른 처리 속도와 정확성을 갖추게 되어 임상적 유용성을 갖게 되었다.

구강악안면 영역에서도 영상유도 수술을 임상에 응용하려는 시도가 임플란트, 종양 제거 수술, 측두하악관절 성형술 등에서 다양하게 이루어져 왔다. 임플란트 수술의 경우 하악골의 경우 발치 후 심한 치조골 흡수로 인한 식립 도중 하치조신경의 손상을 야기할 수 있는 위험성, 상악의 경우 상악동 천공으로 인한 임플란트 실패, 감염 등 여러 가지 합병증이 발생할 가능성이 상존하고 있다. 최근의 발표를 보면, 실시간 영상유도 임플란트 식립법이 시술의 정확도와 정밀도를 높이고, 해부학적으로 접근이 어려운 부위에 즉 고난이도의 식립시 복잡성을 최소화하고 시술의 성공률을 높인다고 보고되고 있다.²⁰ 즉 심하게 흡수된 하악골에서 하치조신경(inferior alveolar nerve)을 피하기 위한 의도적인 절충 술식, 좁은 상악 치아 사이 공간(narrow span)의 인접한 치근(adjacent roots)을 피하기 위한 술식, 한 곳으로 수렴하는 하악 치아의 치근(converging roots)을 피하기 위한 술식, 상악동 거상술(sinus lift) 동시 임플란트 식립술 및 상악동 천공(perforation)을 방지하기 위한 술식 등에서 육안으로 관찰되지 않는 중요한 해부학적 구조물에 대한 의원성 손상의 위험을 줄인다.²⁰

3차원 영상유도 수술법은 관심 있는 해부학적 구조물을 다각도로 볼 수 있기 때문에, 주변 조직을 견인하기가 용이하지 않거나 직접적인 시야 확보가 곤란한 부위의 시각적 정보를 제공해 줄 수 있다. Matthias 등은 총상 환자의 두경부 영역에 남아 있는 파편, 수술 기구, 임플란트, 치아 등을 영상유도 수술 시스템을 이용하여 성공적으로 제거하였다고 보고하였다.¹⁵ 외상 환자의 경우 악골에 고정된 plate와 screw 등을 최소한의 절개선을 통해 수술 기구만 삽입하여 영상유도 수술을 통해 주어진 영상정보만으로

제거하는 것이 가능하며, 측두하악관절의 골성 강직증에서 두개저 손상의 위험을 최소화 하면서 하악골을 분리할 때도 유용하게 사용되고 있다.²¹⁻²³

정확도는 영상유도 수술에서 가장 중요한 요소이다. 정확도가 낮아지면, 실시간 가이드 동안 주변 해부학적 구조물을 손상 시킬 위험성이 증가하고, 수술 계획을 정확하게 재현하는 것도 어려워진다. 임상적 정확도는 위치추적 하드웨어의 정확도, 영상등록과 관련된 알고리즘 및 표지자의 정확도 등에 영향을 받을 수 있다. 또한 술자의 수기능력 및 핸드피스 볼 베어링의 정밀도에도 영향을 받을 수 있다. Casap (2004) 등의 연구에 의하면, 세라믹 구가 삽입된 악골 모델을 CT로 촬영한 후 이 세라믹 구의 위치를 광학적 영상유도 방법으로 측정하여 CT영상에서 측정된 값과 비교하였을 때, 전체적으로 0.35 ± 0.14 mm의 오차를 나타냈다.²⁴ Kramer (2005) 등에 의하면, 상악동 석고모델에 기존의 방법과 영상유도 방법을 이용하여 임플란트를 식립하고 위치, 각도 및 깊이에 대한 분산을 측정하였을 때, 광학적 위치 추적을 이용한 영상유도 식립방법이 위치, 각도 및 깊이에 있어서 통계적으로 유의하게 작은 분산을 보였다.²⁵ 또한 식립된 임플란트들 사이의 위치, 각도 및 깊이의 최대 차이도 역시 영상유도에 의한 방법이 더 작은 값을 나타냈다.²⁵ 본 연구에서 사용한 CT영상은 절편 두께가 0.75 mm로써, 측정을 위하여 기준점의 좌표를 추출하는데 있어서, 전체 시스템의 정확도에 영향을 미쳤을 것이라 생각된다. 실제로 광학적 위치추적 센서와 프루브 간의 RMS 오차는 0.25 mm였고 영상등록 과정에 생긴 TRE (Target point registration error)^{26,27} 0.39 mm가 누적되어 실제 물리적 구조물과 CT영상에 표시된 위치와의 오차는 최소 0.271 mm에서 최대 0.886 mm까지 존재하는 것을 확인하였다.

현재 영상 가이드를 이용한 치과수술 방법이 임상에서 활용도가 낮은 이유 중 하나는 3차원 영상을 획득하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 즉 3차원 영상을 얻기 위해서는 일반적으로 CT가 필요하나 이는 대부분 대형 병원에 주로 설치되어 있어서 일반 치과의원에서는 환자 의뢰를 통해 영상을 얻어야 하며 이로 인해 전체적인 치료과정 및 치료비용이 증가하게 된다. 그런데 최근에 일반적인 CT를 대체할 수 있는 콘빔 (Cone beam) CT가 개발되었으며 이는 기존의 CT에 비해 환자의 방사선 조사량 감소 및 설치공간과 비용의 효과적인 감소로 인해 일반 치과의원에도 활발히 보급되고 있는 추세이다. 기존의 CT는 영상 디텍터가 전체 볼륨에 해당하는 영역을 다수의 회전을 통해 각각의 슬라이스 데이터를 획득하는 반면에, 콘빔 CT는 한 번의 회전으로 전체 볼륨 데이터를 획득한다. 따라서 콘빔 CT는 영상획득 과정이 기존의 CT에 비해 간편할 뿐만 아니라 더 높은 해상도의 3차원 영상을 제공한다.²⁸ 콘빔 CT를 이용한 3차원 영상유도 구강외과 수술은 3차원

영상의 획득, 계획 및 수술이 일괄적으로 수행될 수 있으므로 전체적인 치료과정을 단축시킬 수 있으며 시간적, 경제적 측면에서 환자의 부담을 경감시킬 수 있다.

실시간 영상유도 수술법은 시술부위의 종합적인 영상과 시술도구의 유도를 통해 술자를 보조하기 때문에, 술자를 가이드 하거나 또는 상황에 맞게 임의대로 계획을 변경할 수 있는 자율성을 보장한다. 그러나 영상유도 수술법을 사용한다고 해서 이 시스템이 술자의 판단이나 행위를 모두 대체하는 것은 아니다. 결론적으로, 영상유도 임플란트 시술 방법은 수술도구의 계속적인 영상화를 통하여, 수술과정의 연속적인 모니터링을 제공하며, 시술 중 육안으로 관찰이 불가능한 부위에 대한 3차원적인 정보를 제공한다. 따라서 술자는 미리 계획된 수술정보를 환자에게 상호작용적으로 적용할 수 있으며, 임상 응용에 충분한 정확도를 제공하기 때문에 구강외과 수술의 안정성과 효율성을 증가시킨다.

참 고 문 헌

1. Lee SS, Choi SC. Radiographic examination for successful dental implant. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2005; 35 : 63-8.
2. Becker CM, Kaiser DA. Surgical guide for dental implant placement. *J Prosthet Dent* 2000; 83 : 248-51.
3. Cucchiara R, Franchini F, Lamma A, Lamma E, Sansoni T, Sarti E. Enhancing implant surgery planning via computerized image processing. *Int J Comput Dent* 2001; 4 : 9-24.
4. 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 : 886-93.
5. Azari A, Nikzad S. Flapless implant surgery: review of the literature and report of 2 cases with computer-guided surgical approach. *J Oral Maxillofac Surg* 2008; 66 : 1015-21.
6. Rosenfeld AL, Mandelaris GA, Tardieu PB. Prosthetically directed implant placement using computer software to ensure precise placement and predictable prosthetic outcomes. Part 3: stereolithographic drilling guides that do not require bone exposure and the immediate delivery of teeth. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2006; 26 : 493-9.
7. Fortin T, Champlébois 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 : 651-6.
8. Casap N, Wexler A, Lustmann J. Image-guided navigation system for placing dental implants. *Compend Contin Educ Dent* 2004; 25 : 783-4, 786, 788 passim; quiz 794-5.
9. Carrau RL, Snyderman CH, Curtin HD, Janecka IP, Stechison M, Weisman JL. Computer-assisted intraoperative navigation during skull base surgery. *Am J Otolaryngol* 1996; 17 : 95-101.
10. Schultes G, Kärcher H, Gaggi A, Santler G. Computer assisted tumour resection of the skull base: case report. *J Craniomaxillofac Surg* 2001; 29 : 326-31.
11. Siessegger M, Schneider BT, Mischkowski RA, Lazar F, Krug B, Klesper B, et al. Use of an image-guided navigation system in dental

- implant surgery in anatomically complex operation sites. *J Cranio-maxillofac Surg* 2001; 29 : 276-81.
12. Nijmeh AD, Goodger NM, Hawkes D, Edwards PJ, McGurk M. Image-guided navigation in oral and maxillofacial surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2005; 43 : 294-302.
 13. Reijnders K, Coppes MH, van Hulzen AL, Gravendeel JP, van Ginkel RJ, Hoekstra HJ. Image guided surgery: new technology for surgery of soft tissue and bone sarcomas. *Eur J Surg Oncol* 2007; 33 : 390-8.
 14. Mauro SC, Mair EA. Endoscopic image-guided removal of metallic intravascular foreign body of the skull base. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2007; 136 : 128-9.
 15. Siessegger M, Mischkowski RA, Schneider BT, Krug B, Klesper B, Zöllner JE. Image guided surgical navigation for removal of foreign bodies in the head and neck. *J Craniomaxillofac Surg* 2001; 29 : 321-5.
 16. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res* 2005; 16 : 495-501.
 17. Wang M, Song Z. Improving target registration accuracy in image-guided neurosurgery by optimizing the distribution of fiducial points. *Int J Med Robot* 2009; 5 : 26-31.
 18. Luebbbers HT, Messmer P, Obwegeser JA, Zwahlen RA, Kikinis R, Graetz KW, et al. Comparison of different registration methods for surgical navigation in cranio-maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 2008; 36 : 109-16.
 19. Mao W, Riaz N, Lee L, Wiersma R, Xing L. A fiducial detection algorithm for real-time image guided IMRT based on simultaneous MV and kV imaging. *Med Phys* 2008; 35 : 3554-64.
 20. Ng FC, Ho KH, Wexler A. Computer-assisted navigational surgery enhances safety in dental implantology. *Ann Acad Med Singapore* 2005; 34 : 383-8.
 21. Schultes G, Zimmermann V, Feichtinger M, Gaggl A, Kärcher H. Removal of osteosynthesis material by minimally invasive surgery based on 3-dimensional computed tomography-guided navigation. *J Oral Maxillofac Surg* 2003; 61 : 401-5.
 22. Schmelzeisen R, Gellrich NC, Schramm A, Schön R, Otten JE. Navigation-guided resection of temporomandibular joint ankylosis promotes safety in skull base surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 2002; 60 : 1275-83.
 23. Malis DD, Xia JJ, Gateno J, Donovan DT, Teichgraber JF. New protocol for 1-stage treatment of temporomandibular joint ankylosis using surgical navigation. *J Oral Maxillofac Surg* 2007; 65 : 1843-8.
 24. 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(9 Suppl 2) : 116-9.
 25. Kramer FJ, Baethge C, Swennen G, Rosahl S. Navigated vs. conventional implant insertion for maxillary single tooth replacement. *Clin Oral Implants Res* 2005; 16 : 60-8.
 26. Strauss G, Hofer M, Korb W, Trantakis C, Winkler D, Burgert O, et al. Accuracy and precision in the evaluation of computer assisted surgical systems. A definition. *HNO* 2006; 54 : 78-84.
 27. Fitzpatrick JM, West JB, Maurer CR Jr. Predicting error in rigid-body point-based registration. *IEEE Trans Med Imaging* 1998; 17 : 694-702.
 28. Danforth RA, Dus I, Mah J. 3-D volume imaging for dentistry: a new dimension. *J Calif Dent Assoc* 2003; 31 : 817-23.