

식립 보조도구를 이용한 3D 치아 임플란트 시술 시뮬레이션

박형욱*, 김명수*, 박형준**

3D Simulation of Dental Implant Surgery Using Surgical Guide Stents

Hyung-Wook Park*, Myong-Soo Kim* and Hyungjun Park**

ABSTRACT

Surgeon dentists usually rely on their experiential judgments from patients' oral plaster casts and medical images to determine the positional and directional information of implant fixtures and to perform drilling tasks during dental implant surgical operations. This approach, however, may cause some errors and deteriorate the quality of dental implants. Computer-aided methods have been introduced as supportive tools to alleviate the shortcomings of the conventional approach. In this paper, we present an approach of 3D dental implant simulation which can provide the realistic and immersive experience of dental implant information. The dental implant information is primarily composed of several kinds of 3D mesh models obtained as follows. Firstly, we construct 3D mesh models of jawbones, teeth and nerve curves from the patient's dental images using software MimicsTM. Secondly, we construct 3D mesh models of gingival regions from the patient's oral impression using a reverse engineering technique. Thirdly, we select suitable types of implant fixtures from fixture database and determine the positions and directions of the fixtures by using the 3D mesh models and the dental images with software SimplantTM. Fourthly, from the geometric and/or directional information of the jawbones, the gingival regions, the teeth and the fixtures, we construct the 3D models of surgical guide stents which are crucial to perform the drilling operations with ease and accuracy. In the application phase, the dental implant information is combined with the tangible interface device to accomplish 3D dental implant simulation. The user can see and touch the 3D models related with dental implant surgery. Furthermore, the user can experience drilling paths to make holes where fixtures are implanted. A preliminary user study shows that the presented approach can be used to provide dental students with good educational contents. With future work, we expect that it can be utilized for clinical studies of dental implant surgery.

Key words : 3D simulation, 3D models, Dental implant surgery, Drilling information, Haptic device, Surgical guide stents

1. 서 론

치아 임플란트 산업은 국내외적으로 의료기기 산업을 이끌어가는 차세대 의료기술로 촉망 받고 있으며, 미적 기준 및 시술후의 사용편의성 증대로 인하여 임플란트 시술이 지속적으로 증가되고 있는 추세이다. 치아 임플란트 시술을 위해서는 턱뼈 부위에 일정한

깊이와 직경에 해당하는 드릴링 작업이 요구되므로 무엇보다도 시술 부위의 해부학 및 병리학적 상태를 고려하는 것이 중요하다.

일반적으로 환자 치악 부위의 파노라마 사진과 함께 인상재(oral impression)를 활용한 구강 식고모델을 이용하며 환자의 구강구조를 파악하고, 치아 골 정보 분류를 위한 ASCII(Anatomical Site Classification for Implant Insertion) 시스템 등을 이용하여 치아 임플란트 시술 계획을 수립한다¹⁾. 그러나, 이와 같은 방식은 문서상의 자료와 육안 식별을 바탕으로 시술 계획이 세워지므로 공간 정보에 대한 정확성이 결여되어 있으며, 시술자 간의 시술 편차가 발생할 수 있다.

*조선대학교 치과대학 치의생명공학과

**교신저자, 종신회원, 조선대학교 공과대학 산업공학과
- 논문투고일: 2010. 10. 27
- 논문수정일: 2011. 03. 17
- 심사완료일: 2011. 04. 07

또한 환자에게 시술 계획을 알기 쉽게 설명해주지 못한다는 단점을 지니고 있다.

최근 의료영상 처리 기술 및 CAD기술을 바탕으로 한 3차원 시뮬레이션 기법들은 이용하여 보다 체계적이고 정확한 치아 임플란트 시술 방안에 대한 연구 및 사례가 지속적으로 보고되고 있다. 1990년대에는 James 등^[2]에 의해 환자의 석고모델을 측정하여 디지털 모델로 패턴화하는 시스템이 개발되었다. 하지만 이러한 방식은 디지털 데이터로 읽어 들이는 측정장비가 필요하며, 이를 위해 치과기공소로 환자의 석고 모델을 이동시켜야 한다는 문제점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 Fig. 1(a)에서와 같이 DentaScanTM software package(GE medical system, USA), ToothpixTM(Picker International, USA) 등의 CT 데이터를 이용한 치과전용 영상 재구성 프로그램들이 개발되었지만 이들은 특징 CT 촬영기기에 옵션형태로 판매되며 고가의 워크스테이션에서만 작동하므로 일반 치과 의사들이 개인용 컴퓨터에서 활용하기 어려운 문제점이 있다^[3].

최근 치아 임플란트 시술상의 드릴링 오류 및 문제점을 극복하기 위한 방안으로 임플란트 식립 보조도구(surgical guide stents)를 이용하는 방법이 대두되고 있다^[4]. Fig. 1(b)에서와 같이 식립 보조도구는 시술부위 구강구조에 일치하는 틀인데 시술도구를 이동시키는 가이드 면들을 포함하고 있어 계획과 일치하는 시술이 되도록 도와줄 수 있으며, 전세계적으로 이러한 식립 보조도구를 이용한 치아 임플란트 시술의 유용성에 대한 실증 사례들도 많이 발표되고 있다^[5]. 하지만 관련 기술들이 소수 외국기업들에 의해 배타적·독점적으로 사용되고 있으며, 국내에서 식립 보조도구를 자체 제작하기 위해서는 제약이 있는 실정이다.

일본의 Osaka 대학에서는 가상환경에서 상용 햅틱(haptic) 장치를 이용하여 식립 위치 및 자세를 선정하고, 이를 바탕으로 식립 보조도구를 생성하는 방안이 제안되었으나^[6], 상용 햅틱 장치의 기능적 한계로 인해 식립 자세 및 위치 선정의 정확성 확보가 어려운

실정이어서 추가적인 보완 및 개선이 요구되고 있다.

의료영상(CT/MRI)을 포함한 3차원 측정 데이터 처리 기술을 통하여 잇몸, 턱뼈, 치아, 신경관에 대한 3D 형상 모델 생성이 가능케 되었으며, 이러한 3D 형상 모델 정보를 3D 가상환경에서 적절하게 활용함으로써 시술 부위에 대한 정확한 해부학적 기하학적 분석이 가능하며, 이를 통해 효과적인 임플란트 시술 계획을 수립하는 시도가 이루어지고 있다^[7,8].

이러한 3D 가상환경은 시술 경험이 부족한 수련의 사나 교육과정에 있는 학생들을 대상으로 한 치아 임플란트 시술 훈련용 콘텐츠로 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구에서는 식립 보조도구를 이용한 치아 임플란트 시술 시뮬레이션을 위한 3D 가상환경 구축 방안을 제시하며, 구축된 3D 가상환경이 전통적인 치아 임플란트 시술 교육 환경을 보완할 수 있는 효율적인 교육용 콘텐츠 역할을 수행할 수 있음을 보인다. 직관적인 3D 시뮬레이션을 실현하기 위해 햅틱 장치를 가상환경에 도입하였으며, 치아 임플란트 시술용 식립 보조도구를 제작할 수 있는 체계적인 방안을 제시한다.

2장에서는 치아 임플란트 시술 절차를 간략히 언급하고, 3장에서는 치아 임플란트 시술 시뮬레이션을 위한 3D 가상환경 구축 방안에 대해 설명한다. 의료영상으로부터 3D 모델 획득, 치아 임플란트 시술용 드릴링 정보 생성, 그리고 3D 모델을 이용한 식립 보조도구 정보 생성에 대하여 설명한다. 또한 시술 정보에 대한 시각화 시스템에 대해 설명하고, 감각형 인터페이스 장치인 햅틱 장치의 적용 방안에 대하여 언급한다. 4장에서는 치과대학 학생들을 대상으로 수행한 3D 가상환경에 대한 사용성 평가에 대해 설명한다. 마지막으로, 5장에서는 추후연구 방향을 언급하고 결론을 맺는다.

2. 기존 치아 임플란트 시술 방식

일반적으로 치아 임플란트 시술은 Fig. 2와 같은 절차를 통하여 이루어진다^[9].

첫 번째, 환자의 구강구조 및 턱뼈의 형태, 신경관의 위치를 파악한다. 보편적으로 육안 및 파노라마 사진을 이용하여 확인하지만, 최근 CT 사진을 분석하는 방법이 대두되어 상악(maxillary)의 경우 천공 확인, 하악(mandibular)의 경우 하치조(lower alveolar) 신경의 위치를 보다 쉽게 파악하는데 사용되고 있다. 아울러 환자의 구강 석고모델이 활용된다. 이를 토대로 임플란트 fixture 선정, 드릴링 자세 및 깊이 계산 등의 임플란트 시술 계획을 수립한다. 이러한 계획수립과

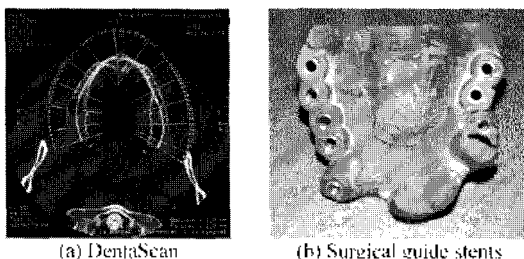


Fig. 1. Established implant surgery system.

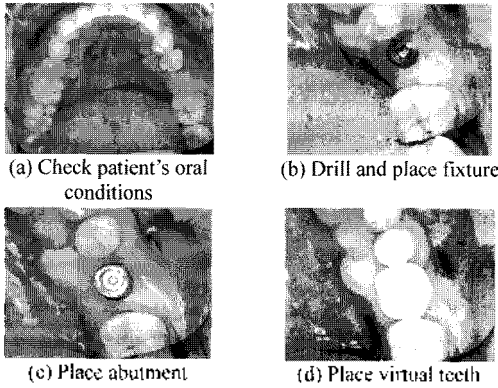


Fig. 2. Procedure of implant surgery.

정은 시술자의 경험적 판단에 크게 의존되며, 시술자 간의 편차가 상대적으로 높다. 두 번째, 드릴링 및 fixture 식립 작업이 어려워진다. 시술 과정은 환자 구강에 직접적인 드릴링 작업이 이루어지므로 시술자의 경험 및 역량에 따라 시술 계획과 차이가 생길 가능성이 매우 높다. 드릴링 작업에서의 오류는 임플란트 시술 품질에 큰 영향을 미치며, 자칫 의료사고로 이어지기가 쉽다. 세 번째, fixture 유형에 맞는 abutment를 연결시켜 인공치아가 고정될 위치를 결정한다. 이 과정에서도 임플란트 식립 작업을 위한 드릴링 작업이 필요한데, 필요 이상의 힘으로 드릴링하는 경우 fixture가 파손될 수 있으며, 필요 이상의 깊이로 드릴링하는 경우 하차초 신경에 압박을 줄 수 있으므로 매우 세심한 주의가 요구된다. 최근에는 드릴링 하는 힘이 자동으로 계산되어 필요 이상의 힘이 주어질 경우 경고를 주는 implant motor system 이 개발되어 적용되고 있다. 마지막으로, 환자 상태에 따라 각각 시술 방식이 다르지만 일반적으로 3~6개월 가량의 골유착기간을 가진다. 그런 다음, 구강 구조 및 치아 색이 고려된 인공치아의 고정과정을 거쳐 치아 임플란트 시술이 완료된다.

기존 임플란트 시술 과정에서는 공간 정보에 대한 정확성이 결여된 상태에서 시술자의 육안 식별과 경험에 의거하여 시술계획이 세워지므로 자칫 오류를 범하기 쉽고, 시술자 간의 시술 편차가 발생할 수 있다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해 최근에는 3D 가상 환경에서 치아 구조 및 턱뼈 형태를 파악하고, 시술 부위(잇몸, 턱뼈, 치아, 신경관)에 대한 정확한 해부학적·기하학적 정보를 생성하여 이를 토대로 시술 계획을 수립하는 방안이 연구되고 있으며, 더 나아가서는 식립 보조장치를 제작하여 임플란트 시술 도구의 이동 경로를 안내하는 방식이 연구되고 있다.

3. 치아 임플란트 시술 시뮬레이션

3.1 3D 가상환경 구축 방안

Fig. 3은 치아 임플란트 시술 시뮬레이션을 위한 3D 가상환경 구축 방안을 나타낸다. 의료영상으로 부터 치아, 턱뼈, 신경관(nerve curve)에 대한 3D 모델을 획득하는 과정, 환자의 상태에 알맞은 임플란트의 유형 및 치수를 선택한 후 임플란트 fixture 데이터베이스로부터 fixture 모델을 획득하는 과정, 구강 석고 모델을 제작하여 측정 후 얻어지는 3D gingival 모델 획득 과정 등을 거친다. 이 후 식립 시술 계획에 필요한 드릴링 위치/자세/깊이에 대한 정보를 획득한 후, 확보된 시술 정보를 토대로 CAD tool을 이용한 치아 임플란트 식립 보조도구를 생성한다. 생성된 모든 3D 정보를 가상환경에서 시각화하고, 햅틱 장치를 통해 촉감을 제공하는 치아 임플란트 시술 시뮬레이션 환경을 구현한다.

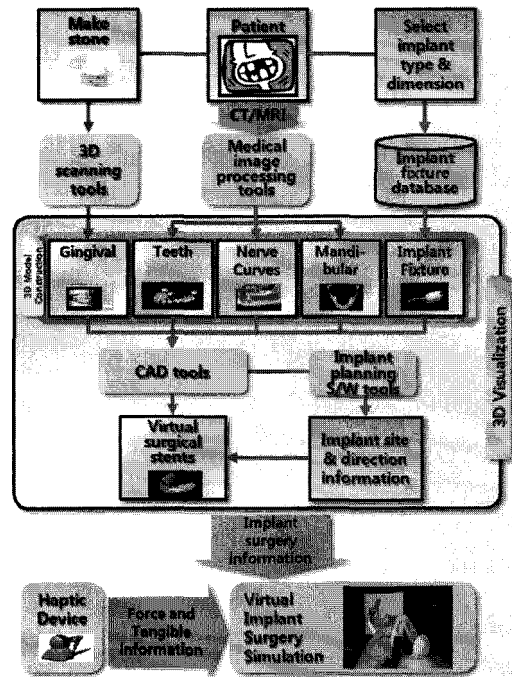


Fig. 3. 3D simulation of dental implant surgery.

본 논문에서는 사용되는 턱뼈/치아/신경관등의 3D 모델 획득을 위해서 의료영상처리용 상용 S/W 인 Mimics™(Materialise, Belgium)™를 이용하였으며, 구성된 3D 모델의 수정/조립 및 시술용보조도구의 제작 등을 위해서 Rapidform XOR(INUS Technology,

Korea)⁸⁾을 이용하였다. 또한 임플란트 식립계획에 대한 좌표를 획득하기 위해 SimplantTM(Materialise, Belgium)⁹⁾를 이용하였다.

3.2 의료영상으로부터 CAD 모델 획득

3.2.1 턱뼈 3D 모델 획득

의료영상으로부터 3D 모델 획득을 위해 MimicsTM를 이용하였다. Dicom 파일 형식으로 변환된 환자 의료영상 데이터(예: CT, MRI)를 import한 후, 각 의료영상에서 경계검출(boundary detection)을 통해 턱뼈 영역을 추출(segmentation)한다. 이후 필요한 부분에서 잡음 제거, 영역확장 등을 이용한 부분 수정(local editing)을 수행하며, 의료영상 처리 과정이 완료되면 marching cube 기법에 의거하여 턱뼈 부위에 대한 3D 메쉬 모델을 생성된다¹⁰⁾. 3D 메쉬 모델에 대하여 보완 수정과정을 거쳐 얻어진 3D 모델은 STL 파일 형태로 저장된다(Fig. 4 참조).

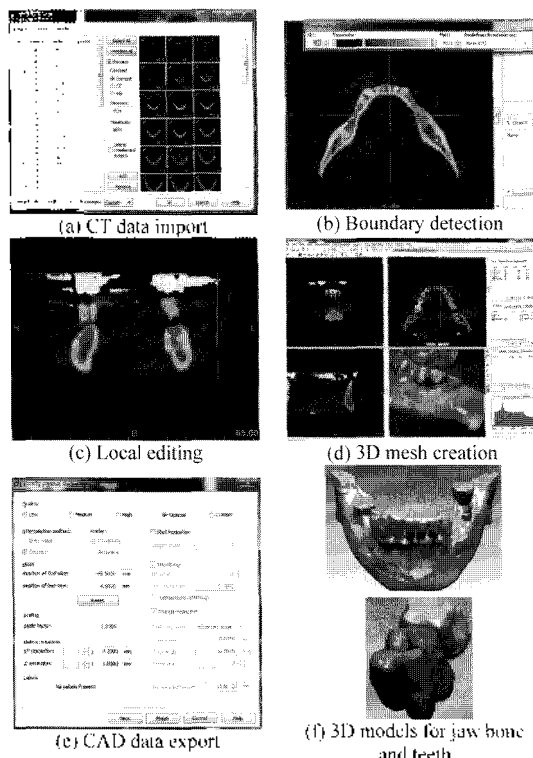


Fig. 4. Generation of 3D model of jawbones and teeth.

3.2.2 치아 3D 모델 획득

인체 구강 내의 각자는 0.25 mm 크기까지 감지할 수 있을 정도로 매우 예민하다¹¹⁾, 따라서 치아 3D 모델에 대한 기하 정보는 매우 정확해야 하므로 세심한

모델링 작업이 필요하며, 턱뼈 모델과 마찬가지로 marching cube 기법에 의거하여 치아 3D 메쉬 모델을 제작하였다. 보통 치아들은 밀집되어 있는데, 본 연구에서는 접치는 않은 개별적인 치아 3D 모델 생성을 위해 세가지 수직방향에서 의료영상을 동시에 살펴 보면서 치아 부위 경계를 선정하여 치아 영역을 추출하였다(Fig. 4 참조).

3.2.3 신경관 3D 모델 획득

치아 임플란트 시술 중 가장 빈번히 일어나는 의료 사고 중 하나는 하악 구치부에 임플란트 식립시 하악 골 속을 관통하고 있는 하치조 신경(inferior alveolar nerve)에 압박이 주어지 발생하는 지각 둔화 증상이다. 하치조 신경은 매우 얇은 신경 다발로 단순히 건드리는 것만으로 일시적인 감각 둔화를 일으키며, 심할 경우 신경 마비까지도 이를 수 있기에 시술 시 가장 주의하는 부분이다¹²⁾. 이를 위해서는 턱뼈를 지나가는 신경관의 위치를 파악하는 것이 매우 중요하므로 세심한 의료영상 분석이 필요하다. 일반적으로 CT 및 MRI 촬영 사진을 통해 위치를 파악하는데 Fig. 5(a)의 첫 번째와 세 번째 그림에서와 같이 턱뼈 내부의 타원형 구멍에 해당하는 것이 신경관을 나타낸다. 각 의료영상에서 신경관 부위를 타원형으로 근사하고, 연속한 의료영상들에서 획득된 타원형들의 중심을 자유곡선으로 근사한 다음, 이러한 근사 자유곡선을 따라 평균적인 신경관 지름인 0.35 mm의 원을 sweep하여 얻어지는 메쉬 모델을 신경관에 대한 3D 메쉬 모델로 한다(Fig. 5 참조).

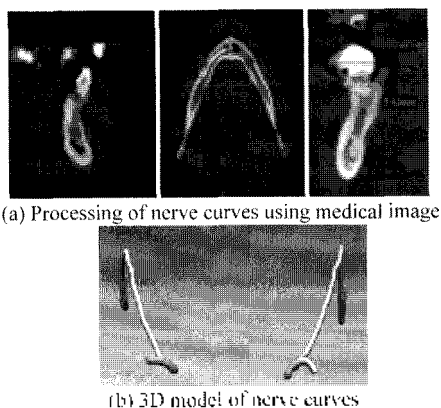


Fig. 5. Generation of 3D model of nerve curves.

3.3 임플란트 3D 모델 획득

유비문 임플란트 시술을 위해서는 환자의 시술 부

위에 알맞은 임플란트 형태 및 길이, 두께를 선정하는 것이 요구된다. 임플란트 fixture 선정을 위해 성별, 연령, 보철물 장착 여부, 임플란트 보철 계획 등이 함께 고려된다. 우선적으로 환자의 악골 절단면의 수직적, 수평적 측정치에 의거한 주위 조직의 응력분포에 따라 임플란트 종류 및 길이가 선정되어야 한다. 일반적으로 임플란트 최소길이는 10 mm로써 더 짧은 길이의 임플란트는 더 높은 실패율을 나타내므로, 해부학적 구조물이 허용하는 범위에서 길이가 긴 임플란트 fixture가 선호되며 길이가 충분하지 않은 경우에는 직경이 큰 임플란트 fixture가 일반적으로 선택되고 있다. 알려진 역학조사에 기초하면 무치악 segment의 평균 임플란트 site dimension은 3.8 mm(여성 상악 구치부)에서 26.8 mm(남성, 하악 전치부) 사이의 분포에 있으며, 최소 5 mm의 site dimension이 요구된다¹³⁾. 임플란트 fixture에 대한 3D 모델들은 해당 제조업체 또는 공급업체들로부터 제공받아 STL 포맷형태의 데이터베이스를 구축하였다(Fig. 6, 7 참조).

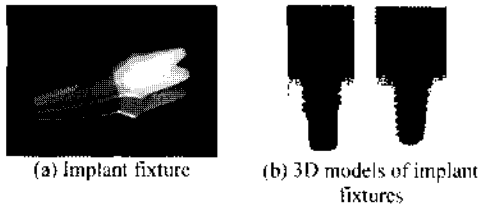


Fig. 6. 3D implant fixture models.

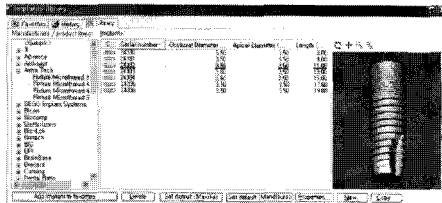
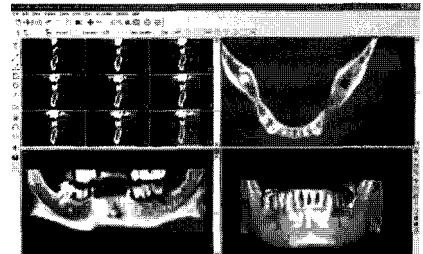


Fig. 7. Implant fixture database.

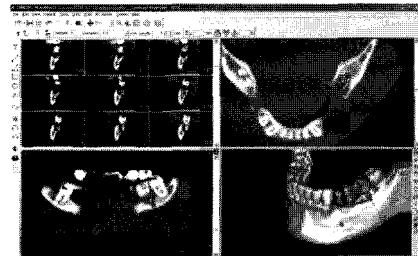
3.4 임플란트 식립 자세 및 위치 선정

확보된 시술부위의 의료영상과 치아/턱뼈/신경관의 3D 모델 정보를 기초로 Simplant™를 이용하여 임플란트 식립을 위한 위치 및 자세를 결정하였다. 치아/턱뼈 정보를 고려하여 시술 부위에서 신경관과 원통형 임플란트 근사모델 간의 충돌이 발생하지 않도록 임플란트 근사모델의 위치와 자세를 결정하였다. 그런 다음, 턱뼈가 정의된 좌표계 상에서 원통형 임플란트 근사모델의 top면의 중심점 좌표와 bottom 면의 중심점 좌표를 토대로 임플란트 식립 위치 및 자세 정

보를 획득한다. 가상으로 식립되는 임플란트 fixture 3D 모델은 실제 식립될 임플란트 fixture 길이 및 두께와 일치하여야 한다(Fig. 8 참조).



(a) Import of medical images and 3D mesh models



(b) Placement simulation of a selected implant fixture using Simplant™



(c) Extraction of top and bottom points of the implant fixture

Fig. 8. Determination of positions and directions for implant fixture placements.

3.5 시술용 식립 보조도구 3D 모델 획득

임플란트 시술에 따른 각종 부작용이 발생할 수 있으며, 이는 부정교합이나 보철물 탈락 등 2차 부작용으로 이어질 수 있다. 임플란트 시술 후 발생하는 부작용으로는 보철문제가 전체의 31%, 이식실패가 24%였으며 감각이상 경험도 20%나 됐다¹⁴⁾. 이런 부작용들 시술전의 계획과 실제 드릴링 작업과의 차이 때문에 일어나는 현상이 대부분이며, 최근 이를 보완하기 위해 임플란트 식립 보조도구에 대하여 지속적으로 연구되고 있다¹⁵⁾. 치아 임플란트 식립 보조도구는 임플란트 식립을 위한 정확한 안내를 제공함으로써 시술자가 스트레스를 덜 받을 수 있으며, 보조도구를 사

용하는 것이 사용하지 않는 것보다 좀 더 정확한 위치에 식립할 수 있다¹⁾. 시술용 보조도구는 Fig. 9에서와 같이 stents를 고정하는 방식에 따라 3가지로 나뉘어진다¹⁾.



Fig. 9. Types of surgical guide stents.

Bone-supported 유형은 식립 부위의 치은(잇몸)을 절개한 후 환자의 뼈에 stents를 고정시키는 방식으로 주로 StraumannTM 등의 틀릿을 사용하는 방식에서 주로 사용된다. 최소한의 절개를 추구하는 현대 임플란트 시술에서는 골 밀도가 매우 좋지 않은 경우를 제외하고는 사용되어지지 않는다. Mucosa-supported 유형은 미니 임플란트 등을 이용하여 주변 치은에 stents를 고정시키는 방식으로 다양한 환자에게 사용 가능하며, 최소한의 자상을 통해 절개가 불필요하다는 장점을 가지고 있다. Tooth-supported 유형은 식립 부위 주변 치아에 stents를 고정시키는 방식으로 절개가 불필요하고 가장 정확한 방식이나 식립부위 주변에 치아가 존재하지 않거나 무치악 환자의 경우 사용하지 못한다는 단점을 가지고 있다.

3.5.1 석고모델을 이용한 치은 3D 모델 획득

본 연구에서는 mucosa-supported 유형 및 tooth-supported 유형을 병행하여 식립 보조도구를 제작한다. 이를 위해 환자의 치은에 대한 3D 모델이 기본적으로 사용된다. 따라서, Fig. 10에서와 같이 환자의 인상재를 이용하여 구강 석고모델을 제작한 후, 3차원 측정기를 통해 환자의 치은에 대한 3D 모델을 측정 획득하였다.

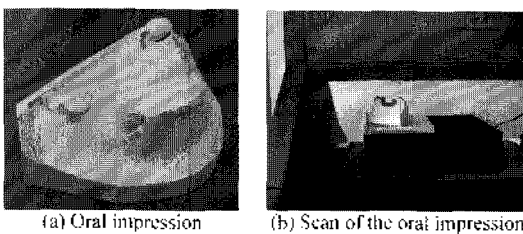


Fig. 10. Generation of 3D gingival model from oral impression.

3.5.2 식립 보조도구 3D 생성

본 논문에서 제시하는 3D 보조도구의 제작 방안은 Fig. 11과 같다. 의료영상으로부터 얻어진 3D 모델은 치은의 형태를 파악하기 어려운데 환자가 금속보철물을 장착한 경우 radiography의 특성 상 불안정한 정보가 전달되어 더욱 어려워진다. 반면, 석고모델을 측정 한 치은 모델의 경우 뼈의 형태를 정확하게 파악하기 어려우며, 하악의 경우 하치조신경, 상악의 경우 천공의 위치를 파악하기 어렵다. 이로 인해 본 연구에서는 의료영상으로부터 생성된 치아/턱뼈/신경관에 대한 3D 모델과 구강 석고모델로부터 생성된 3D 치은 모델은 함께 이용한다.

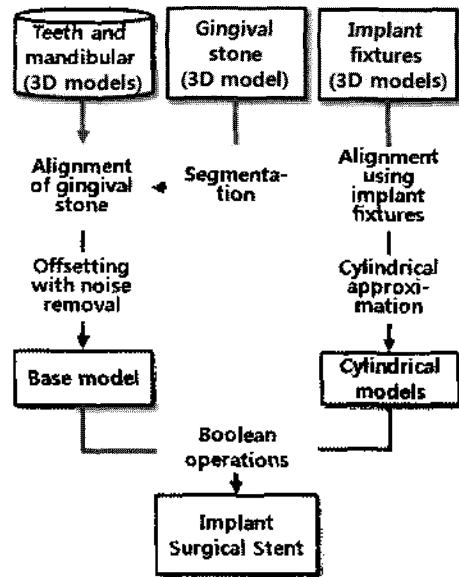


Fig. 11. Procedure for generating 3D model of surgical guide stents.

본 논문에서는 3D 모델의 수정/조립 및 시술용 보조도구의 제작을 위해 Rapidform XOR을 이용하였다. 우선 3D 치은 모델에 대해 적절한 분리 및 절단 작업을 거치고, 3D 구강 모델 좌표를 기준으로 3D 치은 모델을 정합(align)한다. 3D 치은 모델과 3D 구강 모델에는 공통적으로 3D 치아 모델이 존재하므로 3D 치아모델을 근거로 정합을 수행한다. 그런 다음, 일정한 두께에 대한 오프셋(offset) 작업을 수행하여 보조도구용 베이스 모델을 생성한다.

한편, 식립할 임플란트 fixture를 정해진 식립 위치와 자세에 놓이도록 이동시킨 다음, 3D fixture 모델을 실린더 모델로 근사화 한다. 실린더 길이는 fixture

길이의 2배가 되도록 설정하고, 실린더 지름은 임플란트 fixture 지름보다 여유치 만큼 크게 설정한다.

마지막으로, 베이스 모델과 실린더 모델들과의 불리안(boolean) 작업을 수행한 다음, 불필요한 영역을 제거함으로써 임플란트 시술용 식립 보조도구의 3D 모델을 생성한다(Fig. 12 참고). 이러한 식립 보조도구를 통해 드릴링 작업 시 드릴링 도구를 실린더의 중심축과 나란한 방향으로 이동하게 함으로써 임플란트 fixture가 계획된 위치와 자세에서 놓이게 한다.

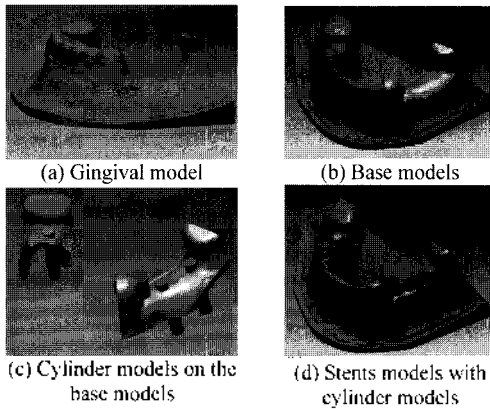


Fig. 12. Generation of 3D models of surgical guide stents.

3.6 임플란트 시술용 3D 모델 시각화

앞 절에서 언급된 치아, 턱뼈, 신경관, 치은, 임플란트 fixture, 시술용 식립 보조도구 등에 대한 3D 모델과 임플란트 식립 위치 및 자세 정보를 시각화하는 3D 가상환경을 구축하였다(Fig. 13 참조). C 언어를 이용하여 Windows 기반 PC 상에서 구현하였으며 시

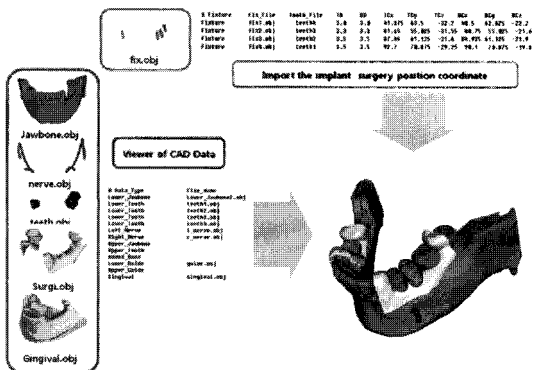


Fig. 13. Visualization of 3D models for dental implant surgery.

각화를 위하여 그래픽 라이브러리 Open GL과 GLUT를 이용하였다¹⁴⁾. 또한 확보된 3D 모델의 질감 정보를 나타내기 위하여 공개된 OBJ 파일 입출력 기능을 이용하였다.

치아 임플란트 시술 정보 시각화 프로그램은 3D 모델의 이동/회전/zoom 기능, material 변경 기능을 제공하였으며, 임플란트 식립 계획에 대한 fixture의 종류 및 자세 수정의 원활을 위하여 text 파일로의 수정을 통한 이용한 좌표 및 두께에 대한 변형이 가능하도록 하여 임플란트 식립 위치 및 자세 정보 파악이 용이하도록 하였다. 또한 원하는 3D 모델에 대한 선별적 시각화 기능을 통하여 각각 모델들의 형태를 파악할 수 있으며, 각각 3D 모델들의 집합을 통하여 실제 임플란트 식립에 대한 내용을 보다 알기 쉽도록 구현하였다.

3.7 감각형 인터페이스 장치의 응용

본 연구에서는 가상공간에서 장치의 움직임 및 위치를 감지하여 3D 모델의 특정 부위에서의 촉감 및 힘을 사용자에게 출력해 주는 감각형 인터페이스 장치로서 Phantom Omni(Sensable, USA) 햅틱 장치를 사용하여 치아 임플란트 시뮬레이션 방안에 적용하였다¹⁵⁾. Fig. 14는 가상 임플란트 시술 시뮬레이션 예를 나타낸다.

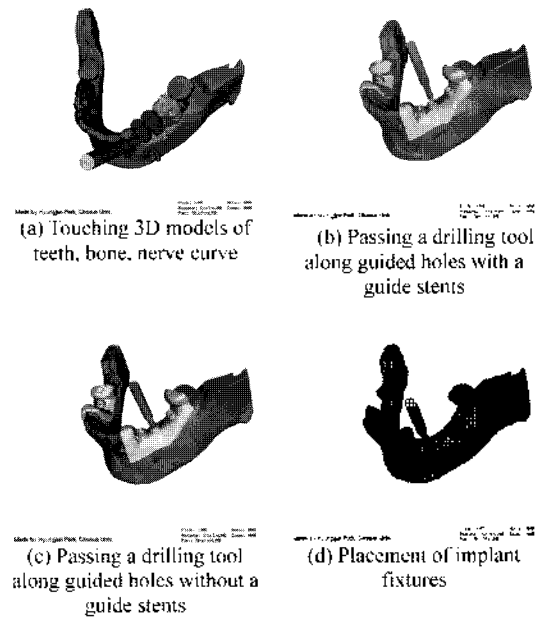


Fig. 14. Example of 3D simulation of dental implant surgery.

Phantom Omni에서 제공되는 open haptic toolkit을 사용하여 햅틱 장치의 움직임에 따라 proxy 좌표가 생성되며, 이는 Open GL 환경에서의 좌표와 일치되어 구현된 충돌 감지(collision detection) 알고리즘을 통해 3D 캐쉬 및 폴리곤에 대한 촉각 및 힘을 느낄 수 있도록 하였다¹⁸⁾. 또한 치아 드릴링 자세 및 식립 깊이에 대한 정보를 체계화 하기 위하여 임플란트 기술용 drill의 이동경로가 포함된 3D 턱뼈 모델을 생성하여 감각형 인터페이스 장치에 접목시켰다. 여기서 임플란트 기술용 drill은 임플란트 fixture의 두께와 길이를 바탕으로 생성된 원기둥과 원주가 조합된 3D 모델로 표현된다. 기술자는 3D보조도구 및 3D 턱뼈 모델에 포함된 이동경로를 따라 감각형 인터페이스 장치를 움직임으로써 임플란트 fixture(또는 drill)의 위치 및 자세를 확인할 수 있으며, 식립 깊이에 대한 정보를 체험할 수 있다.

4. 시스템 적용

4.1 시스템 사용성 평가

본 논문에서 제시한 식립 보조도구를 이용한 치아 임플란트 기술 시뮬레이션을 위한 3D 가상환경이 전통적인 치아 임플란트 사술 교육 환경을 보완할 수 있는 효율적인 교육용 콘텐츠 역할을 수행할 수 있음을 검증하기 위해 치과 학생들을 대상으로 한 실험 및 설문조사를 통하여 정량적, 정성적 사용성 평가를 수행하였다. 실험 환경은 C와 C-1을 이용하여 Windows 기반 PC 상에서 구현하였으며, 햅틱 장치의 움직임과 임플란트 기술용 drill이 동일하게 움직일 수 있도록 좌표를 일치시켰다.

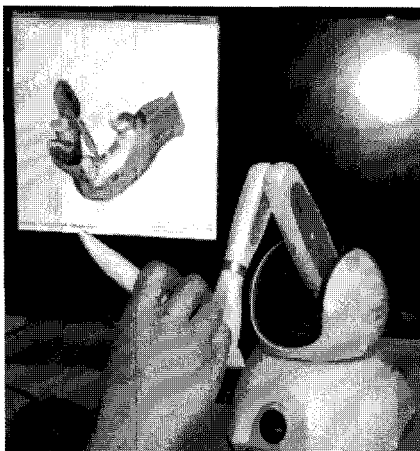


Fig. 15. 3D virtual environment.

Fig. 15는 실험에 이용된 3D 가상환경을 나타낸다. 실험에 참여한 피실험자는 전통적인 기존 임플란트 교육을 받은 치과대학 학생 20명을 대상으로 하였으며, 대부분 가상환경에 대한 경험이 없는 학생들을 대상으로 하였다. 우선, 피실험자에게 5분 동안 가상환경에 관하여 익숙해지도록 설명한 후, Table 1과 같은 간단한 작업을 수행하게 하는 정량적 사용성 평가를 실시하였다. 그런 다음, 기존 임플란트 교육과 3D 가상환경 기반의 교육을 비교하는 설문 형태를 작성하게 하였다. 작성할 설문지의 항목들은 5단계로 평가되었으며, 1은 가장 낮은 단계를 나타내고, 5는 가장 높은 단계의 값을 나타낸다. 설문지에 질문 항목들은 Table 2와 같다.

Table 1. Tasks used in the user study

	내 용	1차	2차
1	1. 턱뼈 모델의 360° 회전 2. 모델 Zoom In 3. 기술용 보조도구 선택 후 시각화		
2	1. 기술용 보조도구 선택 후 시각화 2. Fix 1의 위치에 사술장비 삽입 3. Fix 2의 위치에 기술장의 삽입		

Table 2. Questionnaires used in the user study

NO.	설문 내용
1	임플란트 기술법을 이해할 수 있는가?
2	실제 사술하는 것과 같이 적절히 치아, 턱뼈, 치은, 신경관, 기술용 보조도구가 배치되어 있는가?
3	가상 환경에서 치아, 턱뼈, 치은, 신경관을 통해 실제 구강 형태를 파악할 수 있는가?
4	드릴의 위치를 정확히 파악할 수 있는가?
5	시뮬레이션 경험이 흥미로운가?
6	가상 시뮬레이션이 실제 임플란트 기술을 위해 충분한 정보를 제공하는가?

4.2 실험 결과 및 분석

Fig. 16은 각각 평가한 내용의 task별 평균과 표준편차를 나타낸다. Task 1은 가상 환경에 대한 경험이 없는 치과대학 학생들을 대상으로 실험을 진행하였기에 가상환경 시스템에 대한 이해도와 관련된 작업으로 구성되었다. 또한, 가상환경에서 특정 3D모델에 대한 선택적 시각화 작업을 포함시켰다. Task 1의 1차 시기의 평균 소요시간은 10.4초이며, 2차 시기의 평균 소요시간은 6초로 가상현실에 대한 경험이 없는 치과대학 학생들이 시스템을 사용하는 데에도 큰 문제가 없었으며, 제안된 시스템이 임플란트 기술정보의 시

각화를 위해 알맞은 것으로 판단된다. Task 2는 감각형 인터페이스 장치를 이용한 임플란트 시술 정보 체험 작업으로 구성되었다. Task2의 1차 시기의 평균 소요시간은 41.84초이며, 2차 시기의 평균 소요시간은 25.42초에 해당하였다. 감각형 인터페이스 장치 조작 미숙에 따른 시술도구 위치를 정확히 파악하지 못하는 경우가 자주 발생하여 작업 완료를 위해 예상보다 오랜 시간이 소요되었으며, 시스템 적응 정도에 따른 소요시간의 차이가 매우 크다는 문제점이 발견되었다.

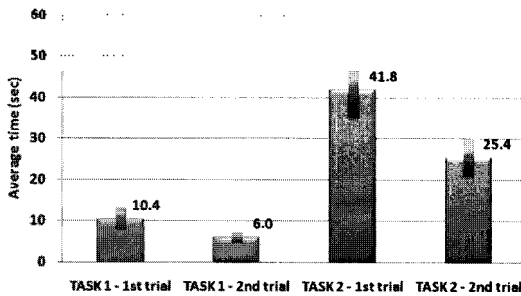


Fig. 16. Quantitative results of the user study.

Fig. 17은 각각 평가한 내용의 정성적 사용성 평가의 내용을 나타낸다. 1, 3, 5, 6 항목은 기존 치과대학 학생이 받고 있는 임플란트 교육 환경에 비하여 좋은 점수를 받았다. 기존 이론적 교육환경 시스템에 비해 가상환경 시뮬레이션 시스템에서는 학생들이 직접 치아 임플란트 시술을 체험할 수 있기 때문에 높은 점수를 얻은 것으로 파악된다. 또한 CT 및 MRI를 통해 얻어진 3D 모델을 가상환경에서 직접 조작할 수 있는 시각화 기능도 흥미로운 장점으로 파악되었다.

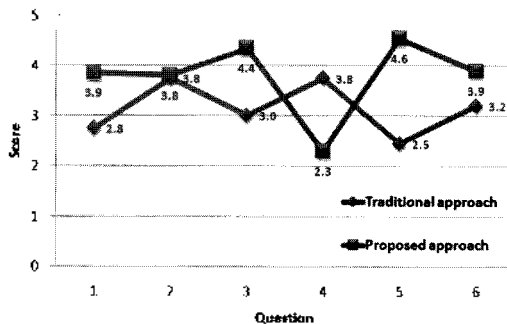


Fig. 17. Qualitative result of the user study.

2번 항목인 가상 치아, 턱뼈, 치은, 신경관, 시술용 보조도구 모델들이 실제 시술환경과 비슷하게 배치되어 있는가에 관한 질의에 대해서는 비슷한 점수가 나

왔다. 이는 현재 개발된 가상환경에서 정해진 위치와 자세로만 3D 모델들이 시각화 되어 다소 단조로운 느낌을 준다는 점에 기인한다. 문제 해결을 위해 3D 모델들에 대한 위치 이동 및 자세 변환 기능의 추가, 증강현실 기법 도입 등 통한 상호작용 증진 및 사용자 관심 촉진이 필요하리라 사료된다.

4번 항목인 드릴의 위치파악에 관한 질의에 대해서는 가상시뮬레이션 시스템이 더 낮은 점수를 받았다. 이는 가상환경을 경험하지 못한 학생들을 대상으로 실험하였고, 대다수 감각형 인터페이스 장치의 조작에 미숙하다는 점에 기인할 수 있다. 사용자에게 감각형 인터페이스 장치 조작에 대한 충분한 학습 기회를 제공함으로써 문제를 완화시킬 수 있다. 궁극적으로는 보다 자연스럽고 용이한 감각형 인터페이스 장치 조작 방안에 대한 개발이 요구된다.

6번 항목인 임플란트 시술에 관한 정보 제공 여부에 관한 질의에 대해서는 예상외로 가상시뮬레이션 시스템이 우월하지 않았다. 이는 haptic 장치의 감도(또는 감지 해상도) 제약으로 인해 상대적으로 작은 직경으로 정의된 이동경로를 따라 임플란트 drill를 이동시킬 때 충동 감지가 되지 않아 원활한 접촉 정보를 느끼지 못하는 경우가 발생하기 때문이며, 가상시뮬레이션 시스템이 치아 임플란트 시술에 대한 절차 및 사례 등 이론적인 내용을 제공하지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 이를 위해 haptic 장치의 감도 향상 방안에 대한 개발이 요구되며, 가상환경에서 치아 임플란트 시술을 위한 이론적인 내용을 쉽게 참조할 수 있도록 시스템 개선이 요구된다.

5. 결 론

임플란트에 대한 신규 구매시장은 2007년, 미화 2천 5백만불을 넘어서고 있으며, 최근 임플란트 시술은 소비자의 미적 기준의 향상 및 사용 편의성으로 인하여 지속적으로 발전되고 있는 추세이다¹⁹⁾. 치아 임플란트 시술의 성공률은 90% 정도로 알려져 있으며, 이러한 오류의 원인으로는 식립 계획의 오류로 인한 임플란트 식립 자세의 부적절한 선정 및 드릴링 작업 불량에 거의 대부분을 차지한다²⁰⁾.

본 연구에서는 식립 보조도구를 이용한 치아 임플란트 시술 시뮬레이션용 위한 3D 가상환경 구축 방안을 제시하였으며, 구축된 3D 가상환경이 전통적인 치아 임플란트 시술 교육 환경을 보완할 수 있는 효율적인 교육용 콘텐츠 역할을 수행할 수 있음을 보였다.

제시된 방안을 통해 시술자는 석고 모델 및 파노라

마 사진이 아닌 가상 환경상에서 환자의 구강 구조를 파악할 수 있어 보다 정확한 임플란트 fixture의 선정 및 식립 자세에 대한 결정이 가능하며, 치아 임플란트 시술 정보를 직접 시각화 할 수 있어 보다 간단하고 사실적인 식립계획 수립에 도움을 줄 수 있을 것이라 기대된다. 또한, 제시된 시술용 보조도구 제작 방안을 통해 시술자가 보다 정확한 드릴링 각업 정보를 확보할 수 있어 시술 성공률 향상에 도움이 되리라 기대된다. 아울러 피사술자인 환자들에게는 임플란트 시술 과정 및 계획에 대한 시각화 정보를 직접 제공하므로 시술의 신뢰감을 높일 수 있을 것이라 기대된다. 또한, 임플란트 시술을 배우는 학생들에게는 감각형 인터페이스 장치 접목을 통한 환자 구강 구조 및 시술 과정의 가상 체험을 제공하므로 동물의 뼈에 직접 드릴링을 해보는 치아 임플란트 시술 교육 시스템을 보완하는 좋은 교육용 콘텐츠로서 활용될 수 있으리라 기대된다.

추후 연구로서 메쉬 변형 기법을 접목한 실시간 드릴링 시뮬레이션 방안, 햅틱 장치의 감도 향상을 통한 사실적인 치아 임플란트 시술 시뮬레이션 방안에 대한 연구를 하고자 한다. 그리고, 궁극적으로는 개발된 시스템을 실제 치아 임플란트 시술 과정에 적용해 봄으로써 시스템의 유용성을 입증하고자 한다.

참고문헌

1. Jeong, S. M., Chung, C. H. and Engelke, W., "Anatomical Site Classification for Implant Insertion: ASCII," *Journal of Korean Academy of Prosthodontics*, Vol. 38, No. 3, pp. 321-327, 2000.
2. Xia, J., Ip, H. H. S., Samman, N., Wang, D., Kot, C. S. B., Yeung, R. W. K. and Tideman, H., "Computer-assisted Three-dimensional Surgical Planning and Simulation: 3D Virtual Osteotomy," *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Vol. 29, No. 1, pp. 11-17, 2000.
3. 이삼기, 안창현, 최항문, "임플란트 전산화 단층 사진에서 하악의 위치와 gantry각의 변화가 임플란트 매식로 평가에 미치는 영향에 관한 연구," 대한구강악안면방사선학회지, Vol. 35, No. 9, 2002.
4. Yardieu, P. B., Vrielinck, L., Escolano, E., Henne, M. and Tardieu, A. L., "Computer-assisted Implant Placement: Scan Template, SimPlant, SurgiGuide, and SAFE System", *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, Vol. 27, No. 2, pp. 141-149, 2007.
5. Nikzad, S. and Azari, A., "A Novel Stereolitho-

- graphic Surgical Guide Template for Planning Treatment Involving a Mandibular Dental Implant." *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Vol. 66, No. 7, pp. 1446-1454, 2008.
6. Kusumoto, N., Sohmura, T., Yamada, S., Wakabayashi, K., Nakamura, T. and Yatani, H., "Application of Virtual Reality Force Feedback Haptic Device for Oral Implant Surgery," *Clinical Oral Implants Research*, Vol. 17, No. 6, pp. 708-713, 2006.
7. Mimics, <http://www.materialise.com/mimics>
8. Rapidform XOR, <http://www.rapidform.com>
9. Simplant, www.materialise.com/Dental
10. Lorensen, W. E. and Cline, H. E., "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
11. Capra, N. E., "Mechanisms of Oral Sensation," *Dysphagia*, Vol. 10, pp. 235-247, 1995.
12. Sammartino, G., Marenzi, G., Citarella, R., Ciccarelli, R. and Wang, H. L., "Analysis of the Occlusal Stress Transmitted to the Inferior Alveolar Nerve by an Osseointegrated Threaded Fixture," *Journal of Periodontology*, Vol. 79, No. 9, pp. 1735-1744, 2008.
13. Quek, H. C., Tan, K. B. and Nicholls, J. L., "Load Fatigue Performance of Four Implant-abutment Interface Designs: Effect of Torque Level and Implant System," *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, Vol. 23, No. 2, pp. 253-262, 2008.
14. Chuang, S. K., Wei, L. J., Douglass, C. W. and Dodson, T. B., "Risk Factors for Dental Implant Failure: A Strategy for the Analysis of Clustered Failure-time Observations," *Journal of Dental Research*, Vol. 81, No. 8, pp. 572-577, 2002.
15. Oh, T. J., Shotwell, J. L., Billy, E. J. and Wang, H. L., "Effect of Flapless Implant Surgery on Soft Tissue Profile: A Randomized Controlled Clinical Trial," *Journal of Periodontology*, Vol. 77, No. 5, pp. 874-882, 2006.
16. Open GI and GLUT, <http://www.opengl.org>
17. Phantom Omni, www.sensable.com/haptic-phantom-omni
18. OpenHapticToolkit, www.sensable.com/phantom_ghost/OpenHapticToolkit
19. 보건 복지부, "치과의료산업 현황분석 및 전전화 전략 연구," 2007.
20. Jung, R. E., Pjetursson, B. E., Glauser, R., Zembic, A., Zwahlen, M. and Lang, N. P., "A Systematic Review of the 5-year Survival and Complication Rates of Implant-supported Single Crowns," *Clinical Oral Implants Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 119-130, 2008.



박형욱

2007년 조선대학교 산업공학과 학사
 2009년 조선대학교 산업공학과 석사
 2009년~현재 조선대학교 치과대학 치
 의생명공학과 박사과정
 관심분야: 치의공학, BME(Bio-Medical
 Engineering), Dental CAD/
 CAM, Virtual Reality



김명수

1985년 서울대학교 치과대학 졸업
 1991년~1993년 UCLA 치과대학 연구원
 1994년 서울대학교 치과대학 치의학 박사
 1999년~2000년 University of Iowa, 의
 과대학 방문교수
 1995년~현재 조선대학교 치과대학 치
 의학과 교수
 관심분야: 분자약리학, 구강생물학,
 Dental CAD/CAM, 치의공학



박형준

1991년 포항공대(POSTECH) 산업
 공학과 학사
 1993년 포항공대(POSTECH) 산업
 공학과 석사
 1996년 포항공대(POSTECH) 산업
 공학과 박사
 1996년~2001년 삼성전자 중앙연구소
 책임연구원
 2008년~2010년 UCLA 전산학과 방문
 교수
 2001년~현재 조선대학교 산업공학과
 부교수
 관심분야: Geometric Modeling and
 Processing, Virtual Prototyping of
 Engineered Products, 3D Shape
 Reconstruction and Understand-
 ing, Dental Engineering Applica-
 tions, CAD/CAM/CG Applications