

## 하악골 재건을 위한 가상수술계획 시스템

김한나<sup>1</sup> · 김영준<sup>1\*</sup> · 조현철<sup>1</sup> · 심응준<sup>1</sup> · 이득희<sup>1</sup> · 김래현<sup>1</sup> · 박세형<sup>1</sup> · 이정우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원 의공학연구소 바이오닉스연구단, <sup>2</sup>경희대학교 치과대학 구강악안면외과

### Virtual Surgical Planning System for Mandible Reconstruction

Hannah Kim<sup>1</sup>, Youngjun Kim<sup>1\*</sup>, Hyunchul Cho<sup>1</sup>, Eung June Shim<sup>1</sup>, Deukhee Lee<sup>1</sup>,  
Laehyun Kim<sup>1</sup>, Sehyung Park<sup>1</sup>, and Jung-Woo Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Bionics, Biomedical Research Institute, Korea Institute of Science and Technology (KIST)

<sup>2</sup>Department of Oral & Maxillofacial Surgery, School of Dentistry, Kyung Hee University

Received 12 February 2016; accepted 12 March 2016

#### ABSTRACT

In this paper, we propose a virtual surgical planning system specialized to mandible reconstruction surgery. Mandible reconstruction surgery is one of the most difficult surgeries, even for experienced surgeons. Compared to the traditional surgical procedures, virtual surgical planning can reduce the operation time in operating room while expecting better surgical outcome with optimized planning. However, with existing software systems, it requires much time and manual operations in virtual surgical planning. To reduce preparation time and improve accuracy of virtual surgical planning, we have developed optimized functions for virtual surgical simulation of mandible reconstruction with user-friendly interface. We found that the proposed system shortened the preparation time by half compared to the existing system from the experiments. The proposed system supports surgeons to make accurate plan faster and easier. The virtually planned results are used to make surgical cutting guide by 3D printing, and this will enhance surgical performance in operating room.

**Key Words:** Virtual surgical planning, Mandible reconstruction, Maxillofacial reconstruction

## 1. 서 론

하악골(Mandible)은 상악골(Maxilla)과 교합하여 언어를 구사하거나 음식물을 저작 및 섭취하는 기능을 담당하고 있다. 이 뿐만 아니라, 얼굴의 아래 턱 부분을 구성하고 있어 안면의 인상을 좌우

하기 때문에 사회적, 심미적으로도 중요하다. 하악골 재건수술은 외상, 종양, 감염 등으로 인해 하악골에 결함이 발생한 경우(Fig. 1), 결함 영역을 절제하고 결손 부위에 비골(Fibula)을 이식해 재건하는 수술이다. 이 때, 비골은 하악골을 재구성할 수 있을 만큼 충분히 긴 뼈이며, 비골 보다 두꺼운 경골이 대부분의 체중을 지지하고 있기 때문에, 비골의 일부가 결손되어도 생활에 지장이 없어 골 재건에 보편적으로 쓰이고 있다.

\*Corresponding Author, junekim@kist.re.kr  
©2016 Society of CAD/CAM Engineers

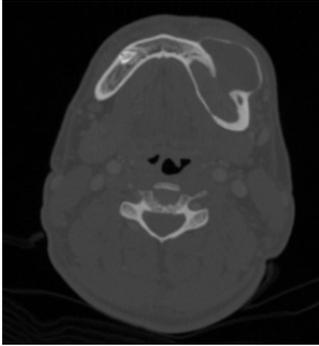


Fig. 1 Mandible with tumor in CT slice image

이와 같은 하악골의 기능적, 심미적 측면을 모두 충족시키기 위해서는 하악골의 본래 형태와 가장 유사하게 재건하는 것이 중요하다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 하악골은 U자 형태를, 비골은 긴 막대 형태를 띄고 있다. 때문에 비골을 하악골의 형태에 맞추기 위해 여러 조각으로 절단 및 접합함으로써 하악골을 재건하게 된다.

하지만 하악골은 해부학적 구조가 복잡하고, 주변의 많은 근육들이 하악골 운동에 연관되어 있으며 비골 피판의 혈관 및 피부 이식을 고려해야 하기 때문에 매우 어려운 수술로 분류되고 있다. 종양과 결손 부위의 위치와 크기 등의 상태에 따라, 비골의 절단면을 결정하고 접합 위치와 각도를 설정하는 것은 숙련된 임상외과에게도 매우 어려운 영역에 해당한다. 기존에는 정확한 수술계획 산출물 없이 임상외과가 구상한 수술계획을 바로 수술에 적용하였고, 이로 인해 수술 중 추가적인 골 절제가 빈번히 일어나 수술 시간이 지연되는 문제가 있었다. 이와 같은 문제를 개선하고자, 가상환경에서 보다 정확한 수술계획을 수립하기 위해 CAD 기능을 포함한 수술계획 소프트웨어들이 사용되어 왔다. 대표적인 시스템으로는 유럽과 미국을 중심으로 개발된 3-matic<sup>[1]</sup>, Proplan CMF<sup>[2]</sup>, VSP Reconstruction<sup>[3]</sup>, SIMPLANT<sup>[4]</sup> 등이 있다. 하지만 이들 시스템들은 하악골 재건수술에 최적화되지 않은 기능들과 복잡한 인터페이스로 인해 많은 시간을 들여 수술계획을 세워야 하는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 하악골 재건수술의 특성을 고려한 가상수술계획 시스템을 제안한다. 제안 시스템에서는 하악골 재건수술의 수술계획 시간을 단축시키고 임상외과가 정확한 수술계획을 세워 수술의 성공률을 향상시킬 수 있도록, 하악골 재

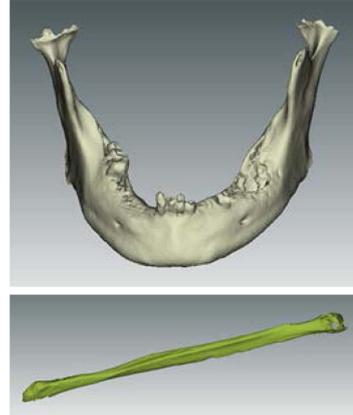


Fig. 2 Segmented 3D bone meshes. Mandible(top) and fibula(bottom)

건 수술의 수술계획 수립 단계에 맞춘 기능들과 사용자 친화적인 인터페이스를 제공한다.

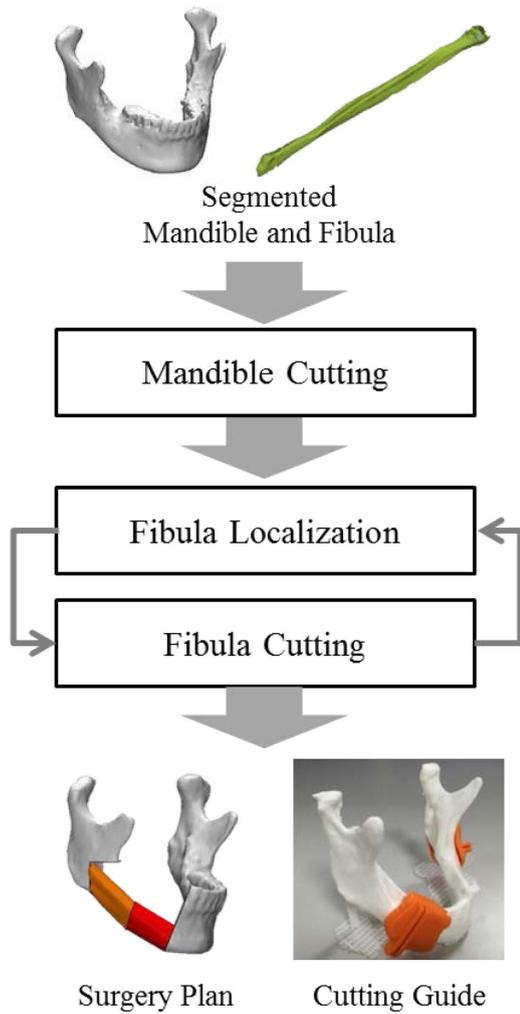
본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는, 하악골 재건수술의 진행 단계에 맞춰, 본 논문에서 제안하는 하악골 재건을 위한 가상수술계획 시스템을 설명할 것이다. 3장에서는 기존에 수술계획 수립을 위해 사용되었던 소프트웨어와 제안 시스템의 수술계획 수립 시간을 비교실험 하고, 그 결과를 분석한다. 끝으로 4장에서는 본 연구의 결론을 도출하고, 향후 연구에 대해 다루고자 한다.

## 2. 하악골 재건을 위한 가상수술계획 시스템

하악골 재건을 위한 가상수술계획 시스템은 Fig. 3에서와 같이, 실제 하악골 재건수술의 수술 진행 단계와 유사한 단계로 진행된다. 먼저 CT 영상 또는 MR 영상과 같은 3차원 의료 영상에서 분할된 3차원 골 모델을 이용하여, 하악골에 존재하는 결함 영역을 절제한다. 이후 비골을 하악골의 형태에 맞추고 절단하는 단계를 반복하여 하악골을 재구성 함으로써 수술계획을 수립한다. 수술계획 결과는 실제 수술 시 골 절제를 위한 절단 가이드의 제작에 사용될 수 있다<sup>[5]</sup>.

### 2.1 하악골의 결함 영역 절제

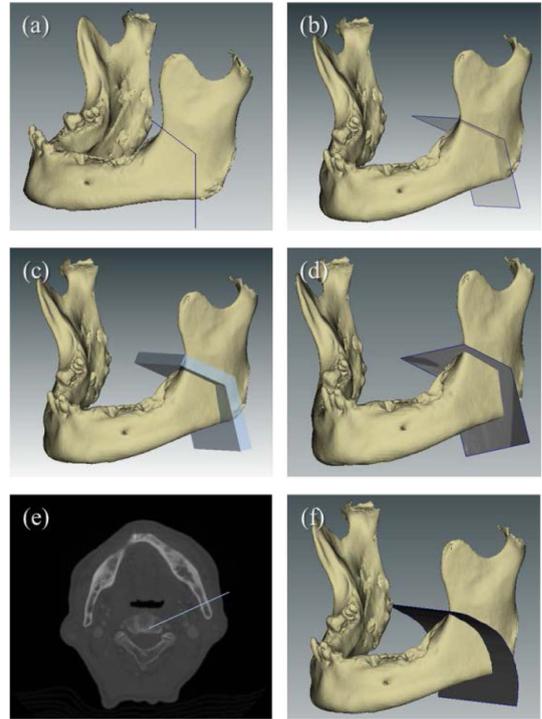
하악골 내에 존재하는 암의 재발을 방지하기 위하여, 암 조직으로부터 일정범위까지 절단함으로써 결함 영역을 절제한다. 3차원 골 모델을 절단



**Fig. 3** Procedures of virtual surgical planning system for mandible reconstruction

하기에 앞서, 모델 내에 존재하는 잘못된 연결성이나 위상을 보정하기 위해 Mesh Healing<sup>6)</sup>을 수행한다.

절제할 영역에 절단평면(Cutting plane)을 생성하여 절단할 면을 설정한다. 기존의 소프트웨어에서는 절단평면을 생성하기 위해 스케치면 설정, 절단평면 생성, 절단평면 구축의 단계를 거쳐야 했다. 하지만 제안 시스템에서는 Fig. 4(a)와 같이 별도의 스케치면을 설정하지 않고, 현재 화면을 기준으로 절단선(Cutting line)을 그릴 수 있도록 한다. 이 때, 절단선을 그림과 동시에, 사용자 시점 방향으로 절단선을 전개시켜 절단평면을 생성한다(Fig. 4(b)). 절단평면은 절단선을 곡선으로 생성



**Fig. 4** Creation of cutting plane. (a) Cutting line, (b) Cutting plane, (c) Cutting plane with thickness, (d) Projected CT slice image on cutting plane, (e) Location of cutting plane (b) on CT slice image, and (f) Curved cutting plane

해 Fig. 4(f)에서 볼 수 있듯이 곡면으로 구성할 수도 있다. 뿐만 아니라, 절단면 주변에 위치한 신경과 혈관 등의 위치를 함께 확인할 수 있도록, 절단평면에 환자의 의료 영상을 투영시켜 제공하고(Fig. 4(d)), Fig. 4(e)에서 보이는 것과 같이 의료영상 상에서의 절단평면의 위치를 표시한다.

절단평면은 실제 수술에서 수술도구를 이용해 골을 절단하는 경로와 같다. 따라서 수술도구에 의해 절제되는 영역만큼 두께가 주어져야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 절단평면을 기준으로 하여, 절단평면의 점들을 전후 점들의 법선 벡터 방향으로, 두께의 절반 만큼씩 확장시킴으로써 두께를 부여한다(Fig. 4(c)). 이 때, 꺾인 지점에 위치한 점의 경우, 전후 점들의 법선 벡터의 합 벡터 방향으로 확장시킨다. 하지만 꺾인 점을 두께의 절반 만큼씩 확장할 경우, 꺾인 부분이 움푹 들어간 형상을 보이게 된다. 따라서 다음의 수식과 같이 꺾인 지점에 위치한 점(P)에서의 확장 두께( $\chi_{thickness}$ )를 별도로 계산하여 적용함으로써, 균일한 두께를

가진 절단평면을 형성한다.

다음의 수식에서  $P_{pre}$ 와  $P_{next}$ 는  $P$ 의 이웃한 점을,  $\vec{N}_{pre}$ 와  $\vec{N}_{next}$ 는  $P_{pre}$ 와  $P_{next}$ 의 법선 벡터를 의미한다.  $\vec{D}_{pre}$ 와  $\vec{D}_{next}$ 는  $P$ 에서부터  $P_{pre}$ ,  $P_{next}$ 로의 방향을 나타내는 벡터이며,  $\vec{V}_{pre}$ 와  $\vec{V}_{next}$ 는  $\vec{N}_{pre}$ 와  $\vec{N}_{next}$ 를 각각  $\vec{D}_{pre}$ 와  $\vec{D}_{next}$ 에 정사영한 벡터이다.  $k$ 는 사용자가 설정한 두께의 1/2을,  $\theta$ 는  $\vec{N}_{pre}$ 와  $\vec{D}_{next}$ 가 이루는 각을 나타낸다.

$$\cos \theta = \frac{\vec{N}_{pre} \cdot \vec{D}_{next}}{|\vec{N}_{pre}| |\vec{D}_{next}|} = \frac{|\vec{V}_{pre}|}{|\vec{N}_{pre}|} \quad (1)$$

이므로,

$$|\vec{V}_{pre}| = \left( \frac{\vec{N}_{pre} \cdot \vec{D}_{next}}{|\vec{N}_{pre}| |\vec{D}_{next}|} \right)^{-1} \times |\vec{N}_{pre}| \quad (2)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이 때,  $\vec{N}_{pre}$ 와  $\vec{D}_{next}$ 은 단위 벡터이므로,

$$|\vec{V}_{pre}| = \frac{1}{\vec{N}_{pre} \cdot \vec{D}_{next}} \quad (3)$$

와 같이 정리되어  $|\vec{V}_{pre}|$ 를 구할 수 있다.  $\vec{V}_{next}$ 도 같은 방법으로 구하여

$$\chi_{thickness} = k |\vec{V}_{pre} + \vec{V}_{next}| \quad (4)$$

를 얻는다.

이와 같이 두께가 부여된 절단평면을 이용하여, 하악골 모델에 이진화 차연산(Boolean operation, subtraction)<sup>7)</sup>을 수행함으로써 하악골의 결합영역을 절제한다(Fig. 5).

비골의 위치화를 위해 2가지 방식의 위치 조절 기능을 제공한다. 먼저, 방향에 제한없는 이동과 트랙볼(Trackball) 타입의 회전을 통해 자유로운 움직임이 가능하게 한다. 또한, Fig. 6과 같이 3차

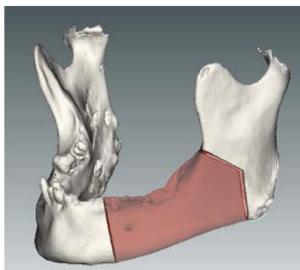


Fig. 5 Cut mandible by subtraction of boolean operation with cutting planes

원 모델의 주축에 맞춘 피벗(Pivot)과 회전 가이드를 통해, 사용자가 선택한 방향으로만 이동 및 회전시킬 수 있도록 제한함으로써 미세한 조정이 가능하게 한다. 이 때, 피벗(Pivot)과 회전 가이드의 위치는 회전 기준점으로 이용되며, 이를 변경시켜 회전의 기준점을 변경할 수도 있다.

가상환경에서의 위치화는 3차원 좌표계를 따라 이뤄지지만, 사용자는 화면을 통해 2차원 좌표계로 투영된 모습을 보게 된다. 이 때문에 깊이 방향(Z-축)을 간과하게 되어, 화면(X-Y평면)상에서 비골을 위치시킨 후 가상공간 전체를 회전시켜 다시 위치시키는 과정을 여러 차례 반복하게 된다. 쉽고 빠른 조작을 돕기 위해 Fig. 7과 같이 메인 뷰(Main view) 뿐만 아니라, Y-축 방향으로 90도 회전시킨 측면 뷰(Side view)와 X-축 방향으로 90도 회전시킨 바닥 뷰(Bottom view)를 제공해 깊이 방향의 움직임도 한 눈에 볼 수 있도록 한다. 또한 메인 뷰의 카메라의 값을 측면 뷰 또는 바닥 뷰의 카메라의 값으로 변경시켜, 보조 뷰를 메인 뷰로 옮겨 조작할 수 있도록 한다.

비골의 위치화는 하악골의 원형을 고려하여 수행되어야 하므로, 하악골, 비골, 그리고 절단평면

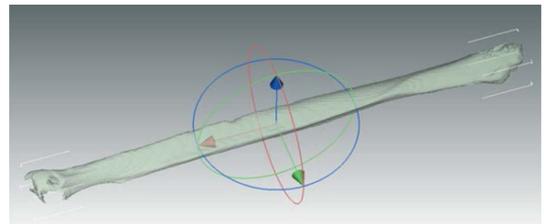


Fig. 6 Pivot and trackball aligned to the principal axis of the femur mesh

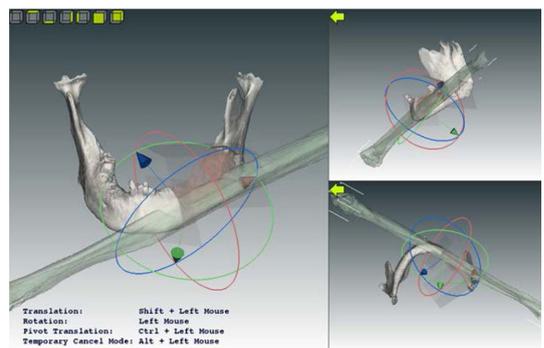


Fig. 7 Multi-view for mesh transformation. Main view (Left), Side view(Right top) and Bottom view (Right bottom)

을 포함한 여러 개의 3차원 모델들이 겹쳐진 상태에서 수행된다. 이 때문에 하악골의 외곽 하단에 비골의 외곽을 맞춰야 함에도 불구하고, Fig. 7과 같이 골 모델의 외곽선을 명확하게 확인하기 어렵다. 이를 개선하기 위해 절단평면과 3차원 골 모델이 만나는 영역을 선으로 표시하여, 해당 절단평면에 대한 하악골과 비골의 외곽선을 제공한다(Fig. 8(a)). 이 때, 절제가 이뤄진 하악골의 절단면과 절단평면은 교집합이 전혀 존재하지 않으므로, 하악골 절제 단계에서 보존한 하악골 원본 모델을 이용해 외곽선을 구한다. 외곽선 표시 기능을 통해, 하악골 절제에 이용된 절단평면에 대한 절단면을 예측해 볼 수 있으며, 하악골의 경계에 맞춰 정교하게 비골을 위치시킬 수 있다.

### 2.3 비골 절단

Fig. 8(a)와 같이, 하악골의 형태에 맞게 위치된 비골을, 하악골 절제에 이용했던 절단평면으로 절단한다. 비골의 절단 또한 하악골 절제와 같이 3차원 골 모델과 절단평면 간의 이진화 차연산(Boolean operation, subtraction)을 통해 수행한다<sup>[3]</sup>. 이 때, 하악골과 마찬가지로 비골도 이진화 차연산 수행에 앞서 Mesh healing<sup>[2]</sup>을 거쳐 3차원 골 모델을 보정한다.

비골이 절단된 이후에는 더 이상 절단평면과 겹치는 영역이 존재하지 않아, 절단평면위에 외곽선을 표시할 수 없다. 하지만 비골 조각끼리 맞춰 접합해야 하는 경우 외곽선 표시 기능이 필요하게 된다. 이를 위해, 차 연산을 수행하기 전에 해당 절단평면위에 형성했던 외곽선을 절단된 비골 조각들에 할당한다. 그래서 Fig. 8(b)의 연두색 비골 조



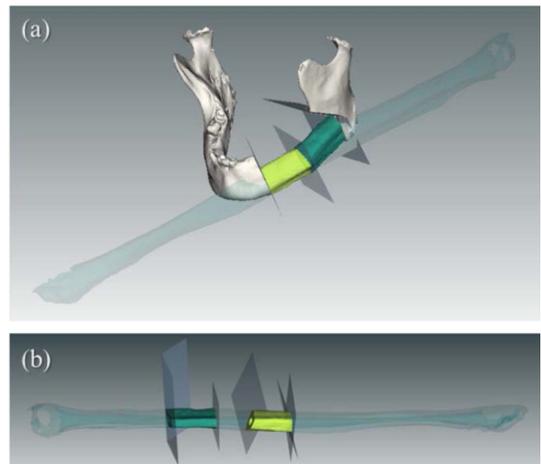
**Fig. 8** Contours of located fibula and mandible (a) Contours of fibula before cutting (dark green line) and (b) Preserved contours of cut fibula segment (light green line) and a new contour of relocated fibula segment (dark green line on cutting plane)

각과 같이 절단평면과의 교점이 없어 외곽선을 생성할 수 없는 경우에도, 절단될 당시의 외곽선을 보존하여 표시한다.

가상수술계획 결과를 토대로 절단 가이드(Cutting guide)를 제작하기 위해서는, 절단된 비골 조각들을 원 위치로 되돌려 전체 비골 모델에서의 위치를 확인할 수 있어야 한다. 또한 비골 절단에 이용된 절단평면도, 형태와 위치가 복구된 비골에 위치될 수 있어야 한다. 하지만 기존의 소프트웨어에서는 이를 돕는 기능을 제공하지 않아 사용자가 직접 비골 조각을 원 형태와 위치로 복구시키고, 절단평면을 위치시켜 절단 가이드를 제작해왔다. 이와 같은 불편함을 개선하고자, 제안 시스템에서는 비골 전용 보조 뷰를 통해 위치 및 회전 변환이 적용되지 않은 비골을 보여준다. 또한 비골을 절단할 때에, 해당 절단평면을 복제해 비골의 변환을 역으로 적용시켜, 비골의 원 위치에서의 절단평면을 나타낼 수 있도록 한다(Fig. 9(b)).

### 2.4 하악골 재건수술계획 수립

하악골의 결손 영역을 비골 조각으로 모두 재건할 때까지, 비골을 하악골의 형태를 따라 위치시키고 절단하는 단계를 반복한다. Fig. 9는 하악골 재건수술계획 수립 결과이다. Fig. 9(a)는 메인 뷰에서의 수술계획 결과를, Fig. 9(b)는 비골 전용 보조 뷰에서의 수술계획 결과를 나타낸다. 수술계획 수립이 완료되면, 하악골과 하악골 절단에 사용된 절단평면을 출력해 하악골 절단 가이드제작에 이



**Fig. 9** Reconstructed mandible with fibula. (a) Planning result in main view and (b) Transformed fibula to original location with cutting planes on sub view

용할 수 있고, 비골 전용 보조 뷰 전체를 출력해 비골 절단 가이드를 제작 할 수 있다.

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 실험 방법 및 실험 데이터

제안 시스템과 기존에 하악골 가상수술계획 수립에 쓰이는 소프트웨어 간의 수술계획 수립시간을 비교한다. 비교 대상 소프트웨어로는 Materialise®사의 3-matic®과 Mimics®를 사용한다.

실험 데이터는 5명의 서로 다른 환자의 CT 영상으로부터 수동 검출한 3차원 골 모델에 Mesh healing을 수행한 데이터이다. 각 데이터는 3차원 하악골 모델과 비골 모델 하나씩 포함하여 하나의 데이터 세트를 이룬다. 모든 데이터 세트의 하악골 모델은 암으로 인한 결함 영역을 포함하고 있다. 이와 같이 구성된 총 5개의 데이터를 사용한다.

실제 임상이가 하악골 재건 수술계획을 수립할 때에는, 비골과 함께 이식할 피부와 혈관의 위치를 고려하여 다양한 수술계획을 수립해 비교한 뒤 최종 수술계획을 결정하게 된다. 이와 같은 결정에는 임상이의 진단이 반영되어 임상평가가 이뤄져야 한다. 하지만 본 논문의 실험에서는 각 데이터 세트 별로 목표 수술계획 결과를 제시하고, 이 목표 계획과 같은 계획을 수립하는데 걸리는 시간을 측정하여 비교하였다.

수술계획 수립 시간의 측정방법은 다음과 같다. 제안 시스템과 비교 소프트웨어에서, 각 실험 데이터마다 주어진 목표 수술계획 결과와 동일한 수술계획을 수립하도록 한다. 시간의 측정은 3차원 모델을 로드하는 단계부터 시작한다. 이후 수술계획을 수립하고, 골 모델의 절단에 사용되었던 절단평면을 원본 골 모델에 위치시키고 절단된 모델을 복원하는 단계까지를 포함한다.

#### 3.2 실험 결과 및 분석

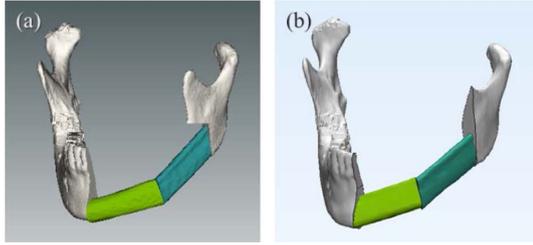
실험 결과, 제안 시스템과 기존 시스템을 통한 가상수술계획 수립 시간은 Table 1과 같이 측정되었다. 제안 시스템의 평균 수술계획 수립 시간은 4분 21초로, 기존 시스템의 경우 9분 48초로 측정되어, 제안 시스템이 평균적으로 2배 이상 더 빠른 것으로 나타났다. 이는 제안 시스템에서 빠르고 정확한 수술계획을 돕기 위해, 하악골 재건수술에 최적화된 기능을 제공하기 때문인 것으로 생각된다. 절단평면 생성의 경우 기존 시스템에서는 3~4번의 단계를 거쳐야 했지만, 제안 시스템에서는 현재 화면상에서 직선을 그림으로써 바로 생성할 수 있도록 하였다. 또한 포인트 매칭 기능, 외곽선 표시 기능, 다중 뷰 기능을 제공함으로써, 기존 시스템에 비해 빠르고 정확하게 골 모델 조각을 접합할 수 있도록 도왔다.

두 시스템 모두에서 2개의 비골 조각을 이용한 경우, 1개를 이용한 경우보다 약 2~3배의 시간이 더 소요되었다. 이는 조각의 수가 증가하면 비골의 위치화와 절단 단계가 그 만큼 반복되기 때문이다. 하지만 비골 조각이 1개에서 2개로 증가함에 따라 제안 시스템은 약 3분의 시간이 더 소요된 반면, 기존 시스템은 약 10분이 더 소요되었다. 이를 통해 기존 시스템은 비골 조각 개수의 증가에 따른 시간의 증가 폭이 제안 시스템에 비해 큰 것을 알 수 있었다.

실제 수술계획의 수립을 위해서는 명확한 하나의 목표 수술계획을 두고 수립하는 것이 아니라, 비골과 연결된 피부와 혈관을 고려하여 여러 개의 수술계획을 수립한 다음, 이를 비교하고 수정 보완하여 최적의 계획을 얻게 된다. 따라서 임상이의 실제 수술계획 수립 과정에서는, 제안 시스템과 기존 시스템 간의 소요 시간 차이가 더 벌어질 것으로 예측된다.

**Table 1** Virtual operative time of proposed system and compared system

실험 데이터		제안 시스템	기존 시스템
1개의 비골 조각으로 재건한 경우	데이터 1	2분 53초	6분 57초
	데이터 2	3분 34초	5분 5초
	데이터 3	2분 59초	5분 33초
2개의 비골 조각으로 재건한 경우	데이터 4	6분 31초	16분 9초
	데이터 5	5분 52초	15분 18초
평균 소요 시간		4분 21초	9분 48초



**Fig. 10** Virtual surgical planning result of proposed system and compared system

수술계획 수립을 마친 후 절단 가이드의 생성을 위해 절단평면과 절단된 골 모델을 복원하는 단계를 거친다. 제안 시스템에서는 비골 전용 보조 뷰를 통해 비골을 절단함과 동시에 자동으로 복원이 진행되어 별도의 작업이 요구되지 않았다. 하지만 기존 시스템의 경우 수술계획을 수립한 이후에 절단평면과 골 모델을 복원하는 과정에서 특히 많은 시간이 소요되었다.

Fig. 10은 실험 데이터 4의 목표 수술계획대로 수술계획을 수립한 결과로, Fig. 10(a)는 제안 시스템에서의 결과를, Fig. 10(b)는 기존 시스템에서의 결과를 보여준다. 제안 시스템을 사용했을 때 수술계획 수립 시간이 약 10분 단축되었음에도 불구하고, 기존 시스템에서의 결과와 유사한 결과물 도출 되었음을 확인할 수 있었다.

제안 시스템을 경험한 임상 의사는, 절단평면 생성 기능과 비골 전용 뷰를 포함한 제안 시스템의 기능들이 수술 시뮬레이션 과정에서 유용하였고, 이로 인해 수술계획 시간을 단축시킬 수 있었다고 평했다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 하악골 재건수술을 위한 가상수술계획 시스템을 제안하였다. 하악골 재건수술의 수술계획 시간을 단축시키고, 정확한 수술계획을 세워 수술의 성공률을 향상시킬 수 있도록, 하악골 재건수술에 최적화된 기능들과 인터페이스를 구현해 제공하였다. 동일한 목표 수술계획에 대해, 기존의 가상수술계획 시스템과 제안 시스템의 수술계획 수립시간을 비교 측정한 결과, 제안 시스템을 이용하였을 때, 약 2배 가량 빠르게 수술

계획을 수립했다. 현재 제안 시스템은 골 모델만을 이용한 수술계획 기능들을 제공하고 있으나, 수술계획의 정확도를 더 높이기 위해 피부와 혈관의 위치를 제공하는 기능이 필요하다. 또한 더 빠른 수술계획 수립을 위해, 비골의 절단 및 위치화 단계를 자동으로 수행하는 자동 수술계획 기능이 요구된다.

제안 시스템을 통해 수술을 사전에 시뮬레이션하고 수술계획을 수립함으로써, 해부학적으로 최대한 유사한 재건을 통해 기능적, 심미적으로 뛰어난 결과를 얻을 수 있다. 또한 수술계획 결과를 이용해 제작한 절단 가이드를 수술에 사용함으로써, 최소한의 하악골 절제가 가능해 수술시간을 단축시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 재건수술의 특성상 재건수술에 대한 교육이 제한적인 실정에서, 술기를 익힐 수 있는 시스템 환경으로도 사용될 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 KIST 미래원천의공학기술사업(2E26210)의 지원을 받아 수행되었음.

#### References

1. 3-matic®, <http://biomedical.materialise.com/3-matic-0>
2. Proplan CMF, <http://cranio-maxillofacial.materialise.com/synthes-proplan-cmf-customized-surgical-solutions>
3. VSP® Reconstruction, <http://www.medicalmodeling.com/>
4. SIMPLANT®, <http://oo.simplant.com/>
5. Wilde, F., *et al.*, 2015, Multicenter Study on the Use of Patient-specific CAD/CAM Reconstruction Plates for Mandibular Reconstruction. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, pp.1-17.
6. MeshFix, <http://meshrepair.org/>
7. Cork, <https://github.com/gilbo/cork>
8. Kim, Y., *et al.*, 2015, Virtual Surgery Planning and Surgical Guide Design Using Automatic Active Contour Segmentation for Maxillofacial Reconstruction Surgery, *Proceedings of International Biomedical Engineering Conference*, Kyungju, Korea, pp.262.



**김 한 나**

2012년 서울여자대학교 멀티미디어 학과 학사  
 2014년 서울여자대학교 컴퓨터학과 석사  
 2015년~현재 한국과학기술연구원 인턴연구원  
 관심분야: 3D Medical Software, Computer Assisted Surgery System



**김 영 준**

2001년 서울대학교 기계항공공학과 학사  
 2003년 서울대학교 기계항공공학과 석사  
 2009년 서울대학교 기계항공공학과 박사  
 2013년 Stanford University, Post-doctoral Scholar  
 2009년~현재 한국과학기술연구원 스타포닥, 선임연구원  
 관심분야: 3D Medical Software, Computer Assisted Surgery



**조 현 철**

2003년 고려대학교 컴퓨터학과 학사  
 2005년 고려대학교 컴퓨터학과 석사  
 2005년~현재 한국과학기술연구원 연구원  
 관심분야: Computer Graphics, Computer Assisted Surgery System



**심 응 준**

2016년 건국대학교 멀티미디어 학사  
 2016년~현재 과학기술연합대학원대학교(한국과학기술연구원) 석사 과정  
 관심분야: Computer Graphics, Virtual Surgery Simulation



**이 득 희**

2000년 한양대학교 정밀기계공학과 학사  
 2003년 서울대학교 기계설계공학과 석사  
 2008년 일본 동경대학교 산업기계공학과 박사  
 2003년~현재 한국과학기술연구원 재직  
 관심분야: 비주얼서보제어, 수술내비게이션



**김 래 현**

1994년 한양대학교 금속공학과 학사  
 1996년 연세대학교 전산학과 석사  
 2003년 University of Southern California, 전산학과 박사  
 2003년~현재 한국과학기술연구원 연구원, 선임연구원, 책임연구원  
 관심분야: 햅틱스(Haptics), 컴퓨터 그래픽스(Computer Graphics), 인간-컴퓨터 인터랙션(Human Computer Interaction), 가상 현실(Virtual Reality)



**박 세 형**

1977년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1984년 Cornell 대학교 기계공학과 석사  
 1992년 KAIST 정밀기계과 박사  
 1980년~현재 한국과학기술연구원 연구원, 선임연구원, 책임연구원  
 관심분야: 형상설계, 인간-컴퓨터 인터랙션, 역설계, NC 프로그래밍



**이 정 우**

1997년 경희대학교 치의학과 학사  
 2004년 경희대학교 치의학과 석사  
 2009년 경희대학교 치의학과 박사  
 2003년~2007년 경희대학교 치과병원 인턴, 레지던트  
 2008년~2011년 청송교도소 공중보건 의사  
 2011년~2013년 서울대학교 치과병원 전임의  
 2013년~현재 경희대학교 치과병원 임상교수, 조교수  
 관심분야: 두개악안면재건(미세수술), 구강암, 악안면 감염, 말초신경재생