

# Point-based surface best fit 알고리즘을 이용한 디지털 치아 모형과 3차원 CT 영상의 중첩 정확도

김봉철<sup>1</sup> · 이채은<sup>3</sup> · 박원서<sup>4</sup> · 강정완<sup>2</sup> · 이충국<sup>2</sup> · 이상휘<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>육군 제6 보병사단 의무근무대, 연세대학교 치과대학 <sup>2</sup>구강악안면외과학교실, <sup>3</sup>구강과학연구소, 및 <sup>4</sup>통합진료과

**Abstract** (J. Kor. Oral Maxillofac. Surg. 2008;34:555-561)

## IMAGE FUSION ACCURACY FOR THE INTEGRATION OF DIGITAL DENTAL MODEL AND 3D CT IMAGES BY THE POINT-BASED SURFACE BEST FIT ALGORITHM

Bong-Chul Kim<sup>1</sup>, Chae-Eun Lee<sup>3</sup>, Won-Se Park<sup>4</sup>, Jeong-Wan Kang<sup>2</sup>,  
Choong-Kook Yi<sup>2</sup>, Sang-Hwy Lee<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Medical battalion, The 6th infantry division, ROK Army,

<sup>2</sup>Department of Oral & Maxillofacial Surgery, <sup>3</sup>Oral Science Research Center, and

<sup>4</sup>General Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University

**Purpose:** The goal of this study was to develop a technique for creating a computerized composite maxillofacial-dental model, based on point-based surface best fit algorithm and to test its accuracy. The computerized composite maxillofacial-dental model was made by the three dimensional combination of a 3-dimensional (3D) computed tomography (CT) bone model with digital dental model.

**Materials and Methods:** This integration procedure mainly consists of following steps : 1) a reconstruction of a virtual skull and digital dental model from CT and laser scanned dental model ; 2) an incorporation of dental model into virtual maxillofacial-dental model by point-based surface best fit algorithm; 3) an assessment of the accuracy of incorporation. To test this system, CTs and dental models from 3 volunteers with cranio-maxillofacial deformities were obtained. And the registration accuracy was determined by the root mean squared distance between the corresponding reference points in a set of 2 images.

**Results and Conclusions:** Fusion error for the maxillofacial 3D CT model with the digital dental model ranged between 0.1 and 0.3 mm with mean of 0.2 mm. The range of errors were similar to those reported elsewhere with the fiducial markers. So this study confirmed the feasibility and accuracy of combining digital dental model and 3D CT maxillofacial model. And this technique seemed to be easier for us that its clinical applicability can good in the field of digital cranio-maxillofacial surgery.

**Key words:** Computed tomography, Image fusion, Optical 3D imaging, Error, Accuracy

## Ⅰ. 서 론

부정교합과 얼굴의 기능-형태 부조화가 특징인 얼굴 기형을 진단, 치료하기 위해서는 환자의 교합과 악골 영상을 정확하게 분석하는 작업이 꼭 필요하다. 인상재로 채득해 만든 모형을 face-bow를 이용해 교합기에 mounting한 치아 석고 모형은 환자의 치열, 교합 및 치아-악골의 관계를 현재 시점에서 가장

정확히 재현할 수 있는 수단이다. 마찬가지로 두부 계측 방사선 사진(cephalometric radiography)도 현재로서는 표준화된 악골 영상을 통해 치아와 악골의 위치, 형태를 분석할 수 있게 해주는 가장 보편적인 진단 영상 자료이다.

그러나 두부 계측 방사선 사진의 영상은 복잡한 3차원 두개 안면 구조물을 2차원 평면에서 재현하기 때문에 해부학적 구조물의 중첩이나 크기의 왜곡 등 많은 한계를 가지고 있다. 이에 대하여 악골 형태의 정확한 재현과 3차원 형태 정보의 제공이 가능한 Computed Tomography (CT)는 두부 계측 방사선 사진을 대체할 수 있는 새 기준으로 주목을 받아왔다<sup>1,2</sup>. 그러나 CT 영상의 개선된 해상도로도 교합이나 치아의 상태를 정확히 표현할 수 없는 한계는 두부 계측 방사선 사진에서와 마찬가지로이다<sup>3</sup>. 더구나 교정용 금속 브래킷이나 금속성 치아 수복물이 있는 경우 방사선의 산란에 의해 발생하는 CT 영상의 금속성

### 이 상 휘

120-752 서울특별시 서대문구 성산로 250

연세대학교 치과대학 구강악안면외과학교실 및 구강과학연구소

Sang-Hwy Lee

Dept. of OMFS and Oral science research center, College of Dentistry, Yonsei Univ.

#250 Seongsanno, Seodaemun-gu, Seoul, 120-752, Korea

Tel: +82-2-2228-8743(clinic) Fax: +82-2-364-0992

E-mail: sanghwy@yuhs.ac

This work was supported by grant No.R01-2006-000-10203 from the Basic Research Program of the Korea Science & Engineering foundation for S.-H. Lee.

허상 (metallic artifact)은 치아 형태의 재현을 더욱 어렵게 하고 있다<sup>4)</sup>.

따라서 두개안면 구조를 3차원적으로 표현하는 CT 영상에 치아와 교합을 가장 잘 표현하는 치아 석고 모형을 합칠 수 있다면 기존 영상과 모형의 단점을 모두 해결할 수 있을 것이다. CT 영상과의 결합이 가능한 디지털 치아 모형은 석고 모형을 레이저 스캐너 등으로 스캔하여 얻을 수 있다<sup>5)</sup>. 이제까지 디지털 치아 모형과 3차원 CT의 두개안면 모형을 정확하게 결합시키기 위한 연구는 이미 있었지만, 주로 외부 기준점을 사용하였기 때문에 과정, 조작 등이 복잡해 임상적으로 사용하기 어려운 점 등의 단점이 있었다<sup>6,8)</sup>. 따라서 저자들은 정확성을 확보하면서도 임상에서 쉽게 사용할 수 있는 CT 영상 디지털 치아 모형의 결합 방법을 모색하여 왔고, 이 연구에서는 point-based surface best fit 알고리즘을 이용한 디지털 치아 모형과 3차원 CT 영상의 중첩을 시도하고 발생 오차를 확인하여 임상에서의 사용 가능성을 판단하는데 도움을 받고자 하였다.

## II. 연구 방법 및 재료

디지털 치아 모형과 3차원 CT 영상의 결합을 시행하고 정확도를 확인하기 위해, 얼굴 기형의 진단 및 치료가 필요한 환자 3명의 데이터를 연구 대상으로 하였다. 3명 모두 술전 교정 치료를 진행하지 않은 상태로 구강 내에 교정용 강선 및 브라켓 미부착 상태였으나 다수의 치아 수복물은 존재하였다. 또 측정 기준점이 위치할 중절치와 좌, 우측 견치 및 제 1대구치의 결손은 전혀 없는 상태였다 (Fig. 1)

이번 연구는 간편한 임상 적용을 전제로 한 삼차원 디지털 치아 모형-CT 영상의 중첩 정확성을 확인하기 위해 아래와 같이 다섯 단계로 진행되었다.

1. CT 영상을 이용한 3차원 두개안면 모델 제작
2. 치아 석고 모형 제작
3. 석고 모형을 laser scan 하여 디지털 치아 모형을 제작
4. 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델의 결합

5. 결합된 복합 치아-두개안면 모형의 정확도 평가

각 단계의 세부 사항은 다음과 같다.

1단계: CT 영상으로부터 3차원 두개안면 모델의 제작

모든 환자들은 CT 방사선 사진을 촬영하였다. 사용된 CT는 High-speed Advantage CT (GE Medical System, Milwaukee, U.S.A.) 이었으며 사용된 조건은 High resolution bone algorithm, 200mA, 120kV, scanning time 1 second, 1mm thickness, reconstruction matrix는 512 × 512 pixel로 하였다. 촬영된 단층 촬영 영상 정보는 DICOM(digital imaging and communications in medicine) 2.0 방식의 데이터 파일로 저장되었다. 영상 조작을 위해 사용된 컴퓨터는 Windows XP 기반의 Pentium 4 CPU 1.6GHz, 512MB RAM을 가진 개인용 PC이었다. DICOM 영상 데이터는 stereolithography (.STL) 포맷으로 재구성한 뒤 3차원 두개안면 모델로 재구성되었다. (Fig. 2)

2단계: 치아 석고 모형 제작

치아 석고 모형은 알지네이트 인상재(Alginoplast; Heraeus, Germany)를 이용한 통상적인 방법으로 상악 및 하악 치아, 악궁의 인상 채득을 시행한 후 치과용 석고를 이용하여 제작하였다.

3단계: 디지털 치아 모형 제작

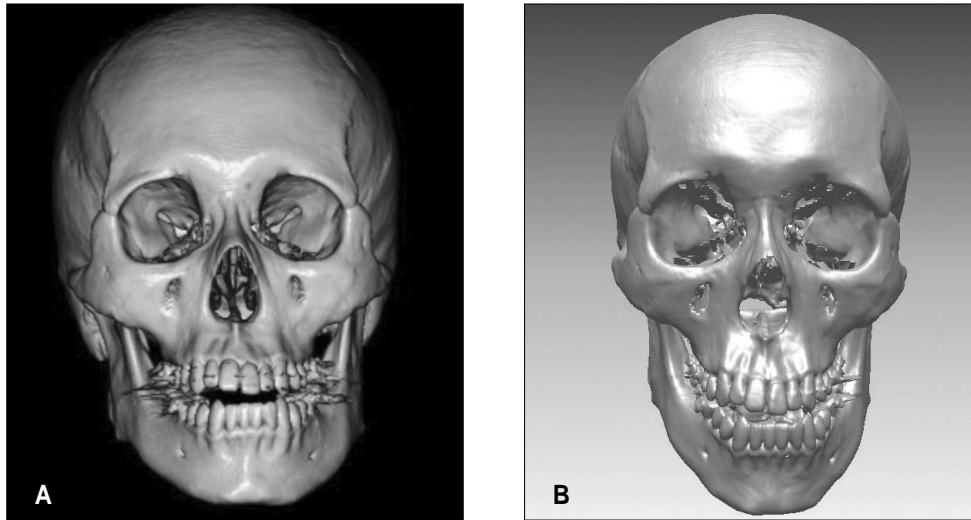
제작된 치아 석고 모형을 Vivid 9i(Konica minolta, Japan; 정확도는 ±50 μm) 스캐너를 이용해 스캔하여 영상을 획득하였다. 데이터는 Rapidform 2006®(주) 아이너스, Seoul, Korea)을 이용하여 3차원 재구성된 디지털 치아 모형으로 변환하였다. (Fig. 3)

4단계: 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델의 결합

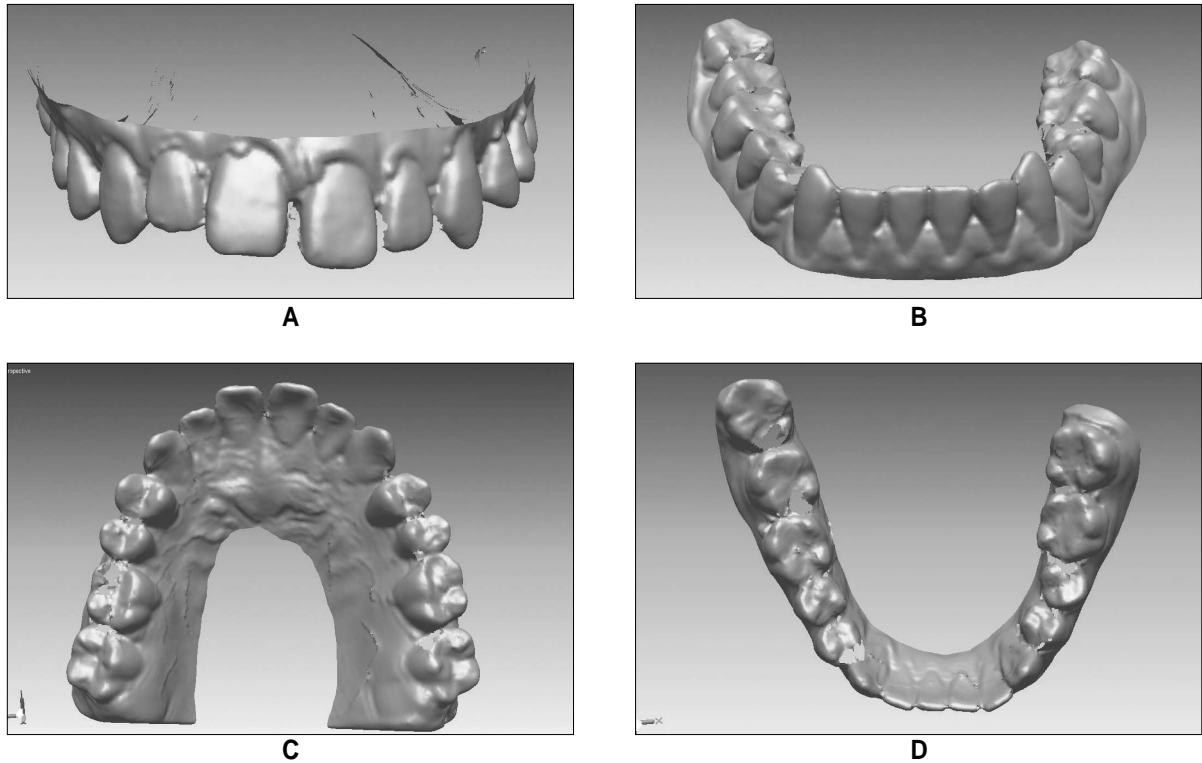
Rapidform 2006®을 이용하여 디지털 치아 모형을 3차원 두개안면 모델에 결합시켰다. 결합은 2단계로 시행하였는데, 첫 번째 단계에서는 우선 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델



Fig. 1. A, Profile photograph of one patient involved in this study. B, Oral photograph showing the occlusal relationship. C, The maxillary dental arch with some restorations by gold and amalgam.



**Fig. 2.** A, a 3D reconstructed CT mode from raw CT data of a patient showing in Fig 1. ; B, The reconstructed 3D craniofacial model by the conversion of DICOM based 2D CT data for the preparation of the fusion with digital dental model.



**Fig. 3.** Digital dental models created by a laser scanner. A and C, Maxilla. ; B and D, Mandible.

의 치아 중 기준으로 삼을 수 있는 최소 5개 치아의 절단면이나 교두, 혹은 중심구에 각각 기준점을 설정하였다. (Fig. 4) 그리고 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델에서 서로 대응하는 기준점들이 최대한 가까워져서 최소한의 거리가 되는 위치에서 두 모형을 예비 결합시켰다. 두 번째 단계에서는 기준 치아들을 포함하는 상, 하악 치아의 표면을 선택하고 대응하는 각각 영역이 최대한 일치하도록 최적 위치를 찾아 결합시켜서

최종적인 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델의 3차원 복합 치아-두개안면 모형을 제작하였다. (Fig. 5) 모든 결합의 과정은 Rapidform 2006®을 이용하여 한 사람의 연구자에 의해 시행되었다.

5단계: 결합된 모형의 정확도 평가

디지털 치아 및 CT 두개안면 모델의 결합 정확도를 계산하

여 색상으로 표현하였는데, 각 영역에서 두 모형의 오차가 작을수록 파란색에, 커질수록 빨간색에 가깝게 나타나도록 표시하였다. 그리고 두 모형의 오차를 정량적으로 평가하기 위해 상, 하악 양측 중절치의 절단면 (incisal edge), 견치의 교두 및 제 1 대구치의 근심협측 교두에서 디지털 치아 모형과 두개안면 모델 간의 거리를 측정하였다.

또 이번 연구에서의 방법 오차, 즉 레이저 스캔-중첩 과정에서의 오차를 확인하기 위해 하나의 치아 석고 모형을 두 번 레이저 스캔하고 각각에서 디지털 치아 모형을 얻었다. 이를 point-based surface best fit 알고리즘을 이용하여 중첩한 후 위 설명과 같은 방법으로 각 기준점에서 거리를 측정하고 이를 방법 오차(method of error)로 계산하였다. 한편 측정 오차를 최소화하기 위하여 모든 측정은 한 사람의 연구자에 의해 시행되었다.

### Ⅲ. 결 과

각각의 3차원 디지털 치아 모형과 두개안면 모델을 일차로 치아 상의 기준점, 이차로 표면 정보를 이용해 결합시켜 3차원 복합 치아-두개안면 모형을 예상대로 완성시킬 수 있었다. 중첩시킨 치아와 골격을 모두 표현한 복합 모형의 그림이 Fig. 6에 나타나 있고, 중첩된 치아 모형과 골격의 영상을 각각 제거하여 최종적으로 완성된 3차원 복합 치아-두개안면 모형의 예시는 Fig. 7에 표시하였다.

또 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델의 중첩 정확도를 평가하기 위하여 각 치아 기준점에서 발생한 치아 모형-두개안면 영상 간의 거리를 파란색 0mm에서 빨간색 1.7mm까지의 색단계로 표시한 결과는 Fig. 8에 표시되었다. 산란이 특히

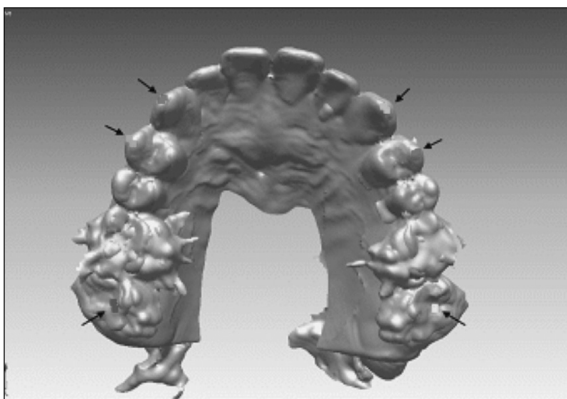
많이 발생하여 금속성 허상을 보였던 상, 하악 좌측 제1대구치 부위와 각 치아의 치경부를 제외하고는 거의 대부분 파란색으로 표시되어 상당히 정확한 것을 확인할 수 있었다.

치아 모형과 두개안면 모델의 차이를 정량적으로 표시하기 위해 각 기준점에서 두 모형 간의 거리를 측정한 결과는 Table 1에 표시하였으며 전체 평균 오차는  $0.2 \pm 0.0(\text{mm})$  이었다. 이들 각 치아 기준점에서 오차의 평균은 0.1~0.3 mm의 범위에 있었고 오차 총합의 평균은 0.2 mm로 나타났다.

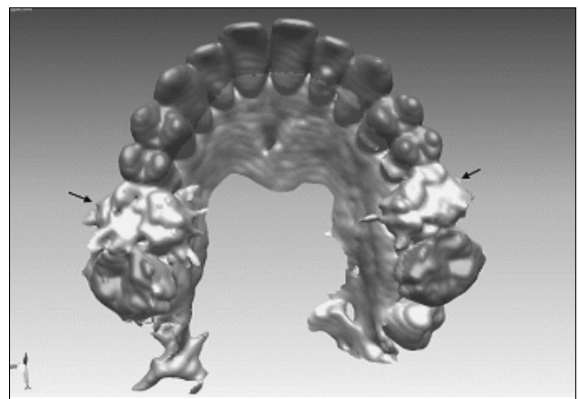
한편 본 연구에서 이용된 중첩 방법의 오차를 확인하기 위하여 동일한 치아 모형에서 스캔된 두개의 디지털 치아 모형을 point-based surface best fit 알고리즘으로 중첩시켰을 때 기준점들 간의 차이 즉, 방법 오차는  $0.0 \pm 0.0(\text{mm})$  이었다. 각 치아 기준점에서 발생한 치아 모형-두개안면 영상 간의 거리를 파란색 0.000mm에서 빨간색 0.001mm까지의 색단계로 표시한 결과는 Fig. 9에 제시되었다.

### Ⅳ. 고 찰

얼굴 기형의 진단과 치료 계획에는 악골의 3차원적 형태 정보가 필수적이다. 이런 형태 정보를 가장 쉽게 얻을 수 있는 CT는 이제 얼굴 기형 치료에서 아주 유용한 진단 도구로 이용되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 CT는 해상도나 상층 두께의 한계로 인한 영상의 불량과 금속성 허상 등으로 인한 영상의 왜곡 등을 가지고 있어 얼굴 기형 치료에 꼭 필요한 교합과 치아 상태를 정확히 표현할 수 없는 한계를 가지고 있다<sup>2)</sup>. 치아와 교합 정보가 모두 포함된 악골의 정보를 이용할 수 있다면, 사이버 공간에서의 가상 수술이나 디지털 치아 석고 모형 수술<sup>3)</sup>이 가능해지고 수술 시의 주변 골조직 움직임을 예측할 수 있을 것으로 기



**Fig. 4.** The first registration step by the point based fusion between digital dental model (in blue color) and 3D skull model (in gray). Various colored points (indicated by arrows) were set on the cusp tip or central groove of each dental and craniofacial models.

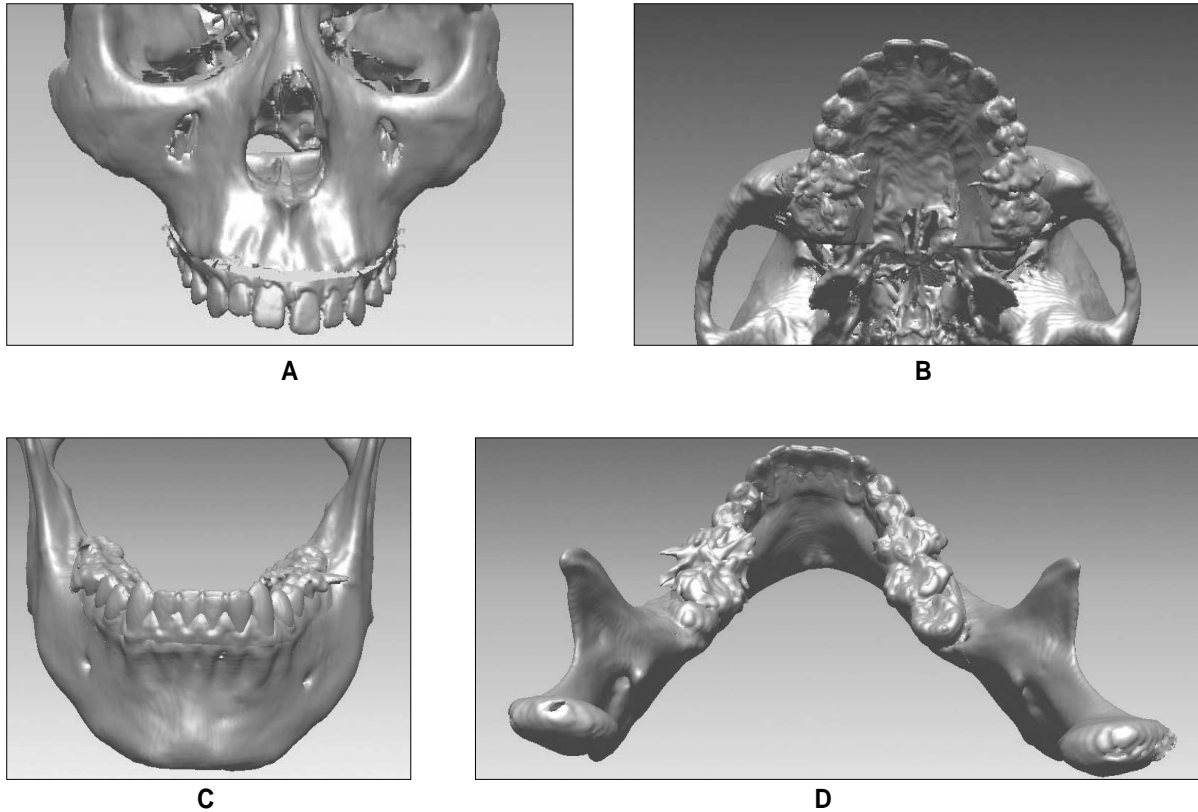


**Fig. 5.** The second registration step by the surface based fusion of digital dental model and 3D skull model. The blue colored teeth image came from the digital dental model and other remaining gray structure from 3D craniofacial model. Most of occlusal surfaces of teeth were colored blue except the right and left first molar (indicated by arrows), which had big distorted CT images of metallic artifacts.

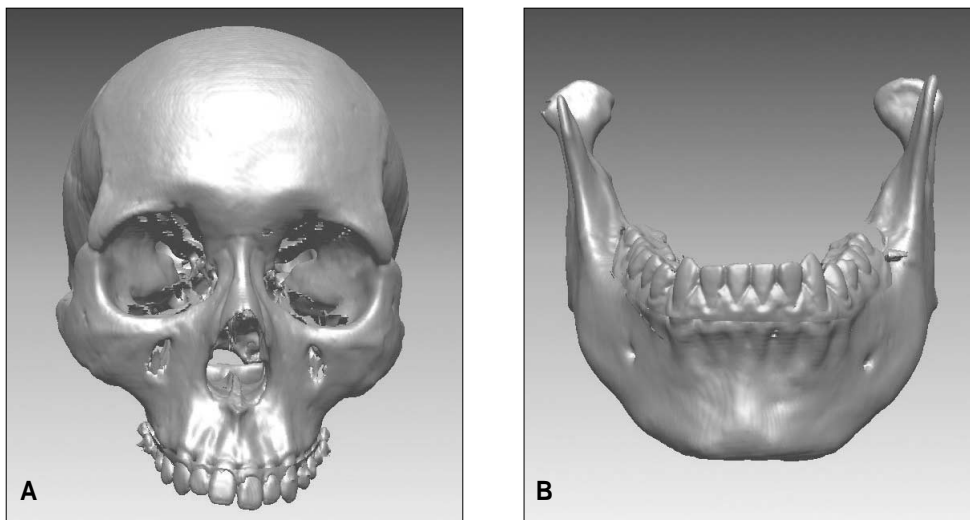
대된다.

이렇게 CT 영상의 한계를 해결하면서 효과적으로 얼굴 기형 치료에 이용하기 위해서는 3차원 CT 두개안면 모델과 치아 모형이 일체화된 복합 치아-두개안면 모형이 유용할 것이라는 점에는 모두 동의하고 있다<sup>4,6,8)</sup>. 디지털 치아 모형과 3차원 두

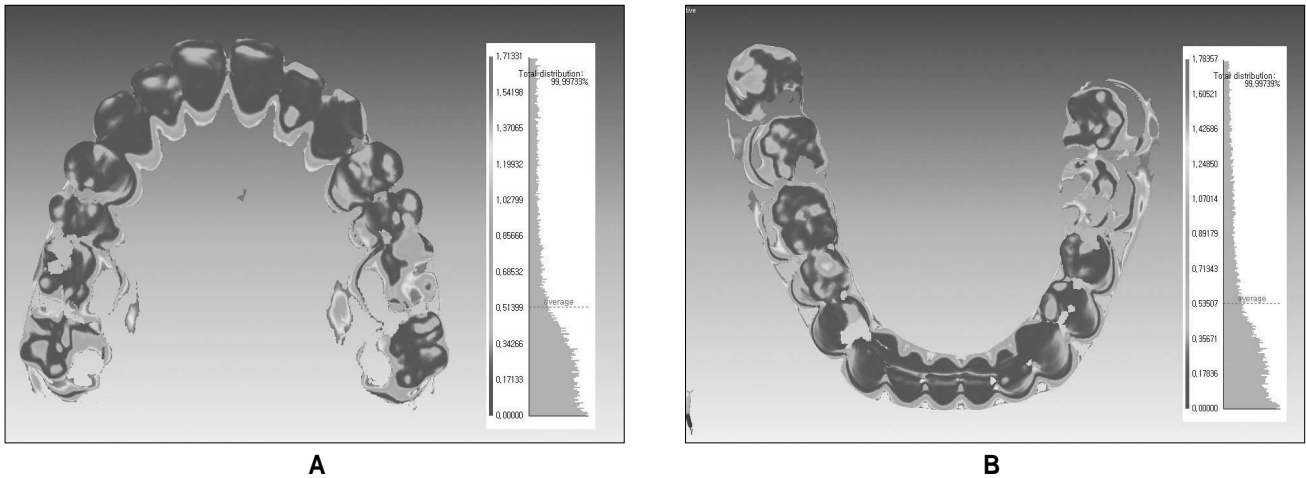
개안면 모델의 결합 방법은 이미 다른 연구 논문에서 발표되었으며<sup>6,8)</sup>, 실용화된 소프트웨어를 이용해 구현 가능한 수준까지 와 있다<sup>9)</sup>. 치아와 골격의 3차원적인 결합을 위해 이 연구들에서는 외부 기준점(fiducial marker)이 이용되었다. 이 방법으로 정확한 3차원 복합 치아-두개안면 모형을 제작하는데 성공하



**Fig. 6.** The composite views of CT based skull dentition with the incorporated dental model. The structures in blue color were came from dental model and other gray colored were from 3D skull data. A and B. Maxilla. ; C and D. Mandible.



**Fig. 7.** The final composite images by the fusion process of the digital dental model and 3D skull model. A. Maxilla. ; B. Mandible.



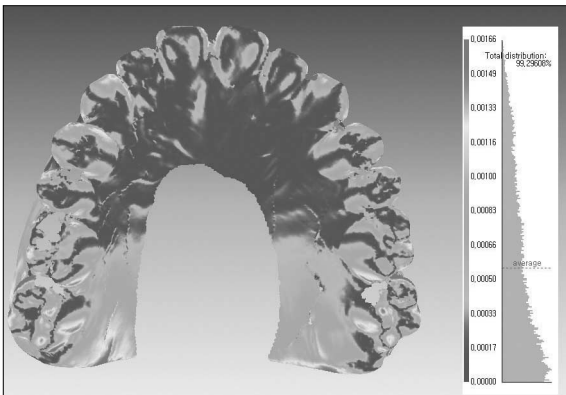
**Fig. 8.** An assessment of superimposition accuracy during the fusion of digital dental model and 3D skull model. The color-coded visualization charts show the amount of differences between 3D skull model and scanned dental model data after the registration procedure. A. Mx. ; B. Mn.

**Table 1.** Mean difference between craniofacial and dental models at some reference tooth points.

Tooth	#16	#13	#11	#21	#23	#26
Difference	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2
Tooth	#46	#43	#41	#31	#33	#36
Difference	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
Mean ± SD	0.2 ± 0.0					

(scale; mm, N=36)

cf) #11, 13, 16, 21, 23, 26, 31, 33, 36, 41, 43, 46 : F.D.I tooth numbering system



**Fig. 9.** An assessment chart of discrepancy for the two same digital dental model for the evaluation of the method of error done by the point-based surface best fit algorithm.

기는 하였으나, 임상 환경에서 직접 환자 치료에 이용되기에는 다단계 작업으로 인한 복잡함 등의 이유로 실용적이지 못했다<sup>9)</sup>. 더구나 결합의 단계가 늘어날수록 영상 데이터의 중첩 처리에 따른 결합 오차가 발생할 가능성도 가지고 있다.

저자들은 개인차나 숙련도에 영향을 덜 받고 임상에서 쉽게

이용될 수 있으면서 기존 방법과 마찬가지로 정확한 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모델의 결합 방법을 연구하였다. 본 연구에서는 치아에 설정한 기준점을 바탕으로 하여 일차 중첩을 시도하고 그 다음 해부학적 표면 형태를 이용하여 최적의 위치로 결합하는 방법을 이용하였고 그 결과물의 정확도를 평가하였다.

외부 기준점을 이용한 치아와 골격의 3차원적 결합에 관한 기존 연구에서는 Gateno 등<sup>6)</sup>이 4개의 4.0mm titanium spheres를, Swennen 등<sup>7)</sup>은 12개의 spherical gutta percha를, Uechi 등<sup>8)</sup>은 3개의 9/32 inch ceramic balls을 사용하였다. 그리고 이 과정에서의 결합 오차는 최소 0.1, 최대 0.4mm의 범주에 있었다. 한편 Nkenke<sup>9)</sup> 등은 3차원적 결합에 있어 치아 수복물로 인한 금속성 허상이 미치는 영향을 조사하여 이들의 결합 오차는 허상이 없을 때 0.1mm, 허상이 있을 때 0.3mm 범주에 있다고 하였다.

이번 연구에서는 중절치에서 구치까지 각 치아 기준점에서 발생한 치아 모형-골격 영상 간의 거리, 중첩 과정의 오차를 계산하였을 때 Fig. 8에 제시된 대로 대부분 오차 0mm에 가까운 푸른색으로 표시되었다. 또 평균 오차도 0.2±0.0(mm)로 계산되어서 상당히 정확하게 두 모형이 중첩되었음을 확인할 수 있었다. 그렇지만 인상 채득으로 얻은 치아 모형에서는 치은이나 구개 점막과 같은 연조직의 두께가 그대로 표현되므로,

중첩 시 이 부위에서는 CT 영상 모형의 골 조직 부위보다 더 두껍게 표현되었고 차이는 대부분 연두색의 색상 단계로 비교 표시되어 약간의 오차가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

그러나 두 모형의 차이가 다른 이유에 의해서 발생하기도 하였는데, CT 영상에서 산란에 의해 금속성 허상을 보였던 상, 하악 좌측 제1대구치 부위는 연두색, 빨간색 등으로 표시되어서 두 모형의 차이가 가장 크게 발생하는 부위가 되었다. 또 치아의 최대 풍융부 하방에 위치한 부위에서는 인상재의 변형이, 또 구개부에서는 구개점막의 두께 및 눌림이 부가적인 오차를 발생시킬 수 있는데 이 부위에서도 역시 두 모형의 중첩 오차가 다른 부위에 비해 크게 발생하였다. 따라서 이 부위들은 기준점 선정 시 제외되어야 할 것이며 오차 검정 등의 평가 과정에서도 고려가 필요하다.

이러한 결과들을 정리해 보았을 때, point-based surface best fit 알고리즘을 이용한 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모형의 결합은 성공적으로 이루어졌다. 또 두 모형 간의 오차는 평균 0.2mm (0.1~0.3 mm의 범위) 이었으므로 두 모형의 3차원 결합은 안정적으로 이루어졌다고 생각되었다. 더구나 본 연구의 재료로 사용된 CT 및 치아 모형들은 임상에서와 같은 조건 하에서 얻어졌으며, 구강 내에는 다양한 치아 수복물이 있어서 금속성 허상 등도 발생하였으므로 임상적 응용도 비슷한 정확도를 가지고 시행될 수 있을 것으로 예상된다.

결론적으로 point-based surface best fit 알고리즘을 이용한 복합 치아-CT 두개안면 모형은 이제까지 보고되었던, 외부 기준점을 이용한 중첩 방법과 마찬가지로 얼굴 기형 치료 등 임상적 환경에서 충분히 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

## V. 결 론

3차원 디지털 치아 모형과 CT 두개안면 모형의 중첩 정확성은 얼굴 기형의 진단과 치료에 중요한 도구가 될 수 있다. 쉽고 정확한 3차원 복합 치아-두개안면 모형의 제작 가능성을 확인하기 위하여 1단계의 치아 기준점, 2단계의 표면 형태 기준의 최적 중첩을 단계적으로 시행하는 point-based surface best fit 알고리즘을 적용하였다. 중첩 정확도를 평가하기 위하여 디지털 치아 모형과 3차원 CT 영상을 중첩시킨 뒤 두 영상 간의 편차를 계산하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 치아에 설정한 기준점과 치아의 해부학적 표면 형태를 최적의 위치에서 결합하는 방법을 이용하여 외부 기준점 없이 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모형이 결합된 3차

원 복합 두개안면 모형을 제작하였다.

2. 디지털 치아 모형과 3차원 두개안면 모형의 결합 오차는 0.1~0.3 mm (평균  $0.2 \pm 0.0\text{mm}$ )의 범위에 있어 복합 두개안면 모형이 비교적 정확하게 제작될 수 있음을 확인하였다.

따라서 point-based surface best fit 알고리즘을 이용한 중첩 방법을 이용하면 치아와 CT 영상이 정확하게 중첩되어 정확성이 높은 두개안면 모형을 만들 수 있었다. 기존에 발표되었던 외부 기준점을 이용하는 방법에 비해 쉽고 배우기 용이하면서 개인차나 숙련도에도 영향을 덜 받을 것으로 예상되므로 임상에서 사용할 수 있는 장점을 가진 것으로 판단되었다. 앞으로 임상 환경에서 적용될 수 있는 준비 작업과 함께 병행된다면 좋은 3차원 복합 치아-두개안면 모형의 제작 방법이 될 수 있을 것으로 기대되었다.

## 참고문헌

1. Xia J, Ip HH, Samman N, Wang D, Kot CS, Yeung RW, et al: Computer-assisted surgical planning and simulation: 3D virtual osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2000;29:11-17.
2. Xia J, Samman N, Yeung RW, Shen SG, Wang D, Ip HH, et al: Three-dimensional virtual reality surgical planning and simulation workbench for orthognathic surgery. *Int J Adult Orthod Orthognath Surg* 2000;14:265-282.
3. Santler G, Karcher H, Ruda C: Indications and limitations of three-dimensional models in craniomaxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 1998;26:11-16.
4. Nkenke E, Zachow S, Benz M, Maier T, Veit K, Kramer M, et al: Fusion of computed tomography data and optical 3D images of the dentition for streak artefact correction in the simulation of orthognathic surgery. *Dentomaxillofac Radio* 2004;33:226-232.
5. 김봉철, 박원서, 강연희, 이충국, 유형석, 강석진 등: 악교정 수술을 위한 디지털 모형 수술의 정확성 평가. *대한악안면성형재건외과학회지* 2007;29:520-526.
6. Gateno J, Xia J, Teichgraeber J, Rosen A: A new technique for the creation of a computerized composite skull model. *J Oral Maxillofac Surg* 2003;61:222-227.
7. Swennen G, Barth E, Eulzer C, Schutyser F: The use of a new 3D splint and double CT scan procedure to obtain an accurate anatomic virtual augmented model of the skull. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2007;36:146-152.
8. Uechi J, Okayama M, Shibata T, Muguruma T, Hayashi K, Endo K et al: A novel method for the 3-dimensional simulation of orthognathic surgery by using a multimodal image-fusion technique. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006;130:786-798.
9. Xia J, Gateno J, Teichgraeber J: Three-dimensional computer-aided surgical simulation for maxillofacial surgery. *Atlas Oral Maxillofacial Surg Clin N Am* 2005;13:25-39.