

광학추적항법장치를 이용한 르포씨 제1형 골절단 가상 수술의 정확성에 대한 연구

부연지¹ · 김성민^{1,2,3} · 김지연² · 박정민³ · 명 훈^{1,2,3} · 이종호^{1,2,3} · 김명진^{1,2,3}

서울대학교 ¹치의학대학원 치의학과, ²치의학대학원 구강악안면외과학교실, ³치학연구소

Abstract (J Korean Assoc Oral Maxillofac Surg 2011;37:114-21)

Accuracy of simulation surgery of Le Fort I osteotomy using optoelectronic tracking navigation system

Yeon-Ji Bu¹, Soung-Min Kim^{1,2,3}, Ji-Youn Kim², Jung-Min Park³, Hoon Myoung^{1,2,3}, Jong-Ho Lee^{1,2,3}, Myung-Jin Kim^{1,2,3}

¹Division of Dentistry, ²Department of Oral & Maxillofacial Surgery, School of Dentistry, ³Dental Research Institute, Seoul National University, Seoul, Korea

Introduction: The aim of this study was to demonstrate that the simulation surgery on rapid prototype (RP) model, which is based on the 3-dimensional computed tomography (3D CT) data taken before surgery, has the same accuracy as traditional orthognathic surgery with an intermediate splint, using an optoelectronic tracking navigation system.

Materials and Methods: Simulation surgery with the same treatment plan as the Le Fort I osteotomy on the patient was done on a RP model based on the 3D CT data of 12 patients who had undergone a Le Fort I osteotomy in the department of oral and maxillofacial surgery, Seoul National University Dental Hospital. The 12 distances between 4 points on the skull, such as both infraorbital foramen and both supraorbital foramen, and 3 points on maxilla, such as the contact point of both maxillary central incisors and mesiobuccal cuspal tip of both maxillary first molars, were tracked using an optoelectronic tracking navigation system. The distances before surgery were compared to evaluate the accuracy of the RP model and the distance changes of 3D CT image after surgery were compared with those of the RP model after simulation surgery.

Results: A paired t-test revealed a significant difference between the distances in the 3D CT image and RP model before surgery. ($P<0.0001$) On the other hand, Pearson's correlation coefficient, 0.995, revealed a significant positive correlation between the distances. ($P<0.0001$) There was a significant difference between the change in the distance of the 3D CT image and RP model in before and after surgery. ($P<0.05$) The Pearson's correlation coefficient was 0.13844, indicating positive correlation. ($P<0.1$)

Conclusion: These results suggest that the simulation surgery of a Le Fort I osteotomy using an optoelectronic tracking navigation system is relatively accurate in comparing the pre-, and post-operative 3D CT data. Furthermore, the application of an optoelectronic tracking navigation system may be a predictable and efficient method in Le Fort I orthognathic surgery.

Key words: Optoelectronic tracking navigation system, Le Fort I osteotomy, Simulation surgery, Rapid prototype (RP) model

[paper submitted 2010. 12. 9 / revised 2011. 3. 14 / accepted 2011. 4. 11]

I. 서 론

구강악안면외과 영역의 악교정 수술에서 사용되는 고전적 방법은 반조절성 교합기에 인기된 모형 상에서 미리 계획된 치료계획에 따라 모형 수술을 시행한 후, 이를 바탕으로 제작된 중간 교합상(intermediate splint)을 이용한다. 실

김명진

110-768 서울특별시 종로구 창경궁로 62-1
서울대학교 치과병원 구강악안면외과학교실

Myung-Jin Kim

Department of Oral and Maxillofacial Surgery,
Seoul National University Dental Hospital
62-1, Changgyeonggungno, Jongno-gu, Seoul, 110-768, Korea
TEL: +82-2-2072-2632 FAX: +82-2-766-4948
E mail: myungkim@snu.ac.kr

제 수술에서는 환자에서 하악의 움직임이 최소한이라는 가정 하에 중간 교합상을 사용하여 두개골에서 분리된 상악골을 원하는 위치에 고정하는 것이다. 최근 사용되는 컴퓨터 기반의 광학추적항법장치 시스템을 사용한 악교정 수술은 미리 획득한 삼차원 컴퓨터 단층촬영(3-dimensional computed tomography, 3D CT) 영상자료를 이용하여, 상악의 기준점들의 위치 변화를 미리 시뮬레이션한 후 실제 수술에서 참고로 하여 상악골을 원하는 위치에 고정하는 방법이다^{1,2}. 그 동안의 많은 연구와 임상적 경험으로 두 가지 방법은 모두 높은 정확도로 이상적인 상악골의 위치 변화를 얻을 수 있다는 사실이 증명되었다². 하지만 기존의 광학추적항법장치 시스템은 고가의 장비와 실제 수술에서 사용의 불편함과 어려움 등의 단점으로 악교정 수술에서

*This work was financially supported by the grant from the Industrial technology development program (10032004-2009-12) of the Ministry of Knowledge Economy (MKE) of Korea.

아직 보편적으로 사용되지는 못하고 있다.

기존의 모형 수술은 반조절성 교합기에 환자의 상, 하악 석고 모형을 중심위 교합 관계로 장착한 후, 하악을 기준으로 상악의 수술계획에 따라 상악의 상하좌우 및 회전 이동 후 고정하여 중간 교합상을 제작하는 방식이었다³. 그러나 교합기는 두개골과 상악골의 관계를 정확하게 재현하지 못하여 그에 기인한 오차가 존재할 수밖에 없다. 대신 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상 자료를 바탕으로 제작한 급속 조형 모델(rapid prototyping model, RP model)은 상악골을 포함한 두개골을 높은 해상도로 재현할 수 있어 급속 조형 모델 상에 모형 수술을 시행할 경우, 보다 높은 정확도를 기대할 수 있지만, 교합면의 재현에 있어서 컴퓨터 단층촬영 영상 해상도의 한계와 금속에 의한 허상(artifact) 발생 가능성 등의 현실적인 한계가 있다는 단점이 있다^{4,5}.

이에 실제 임상에서 사용하기 편리한 광학추적항법장치 시스템 개발 과정의 일환으로서, 광학추적항법장치를 이용한 급속 조형 모델 상에서 가상 수술을 통해 위 술식의 정확도를 평가하고, 컴퓨터 기반의 광학추적항법장치 시스템의 새로운 방향을 모색해보는 것은 의미가 있는 작업이라고 할 수 있다. 특히 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상 기반의 가상 수술 프로그램이 개발되고 있는 시점에서 한 발자국 물러나 급속 조형 모델의 가상 수술이라는 좀 더 물리적이고 구체적인 방법을 시행해보고 고찰한다면 프로그램 상의 가상 수술에 대한 제언도 가능할 것이다^{6,7}.

본 연구에서는 르포씨 제 1형 골절단술(Le Fort I osteotomy)이 시행된 환자들에서 수술 전 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상을 바탕으로 제작된 급속 조형 모델에 가상 수술한 결과, 수술 전후 실제 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상 자료를 실제 혹은 가상 악교정 수술 시행 전후 두개골 상의 참고점과 상악골의 기준점 사이의 거리를 측정하고 비교하였기에, 이에 대한 결과를 보고하고자 한다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 대상

본 연구는 2004년부터 2009년까지 서울대학교 치과병원 구강악안면외과에서 르포씨 제1형 골절단술을 시행 받은 환자 중 수술 전, 후로 삼차원 컴퓨터 단층촬영을 시행한 18 - 26세의 12명의 환자(남자 4명, 여자 8명)를 대상으로 이루어졌다.

2. 연구 방법

1) 수술 전 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상과 급속 조형 모델 수술 전 촬영된 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상에서 두개골 상의 4개의 참고점으로 우측 안와상공(right supraorbital foramen, RSF), 좌측 안와상공(left supraorbital foramen,

LSF), 우측 안와하공(right infraorbital foramen, RIF), 좌측 안와하공(left infraorbital foramen, LIF)을 정하였다. 또한, 상악골 위에 3개의 기준점으로 우측 상악 제1대구치 근심 협축교두정(right mesiobuccal cuspal tip, RMBC), 좌측 상악 제1대구치 근심 협축교두정(left mesiobuccal cuspal tip, LMBC), 상악 중절치간 최하방 접촉점(interincisal contact point, ICP)을 정하여 이들간의 거리인 12개의 값을 측정하였다.(Fig. 1) 그리고 수술 전 촬영된 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상 자료를 기반으로 제작된 급속 조형 모델 상에서도 마찬가지로 12개의 값을 측정하였다. 측정은 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상 기반 프로그램인 In2Vision (CyberMed Co., Seoul, Korea)과 Polaris Vicra (Northern Digital Inc Co., Ontario, Canada)를 사용한 광학추적항법장치 시스템을 사용하였다.(Fig. 2) 총 12명의 환자에서 얻은 144쌍의 데이터는 통계프로그램인 SAS Ver. 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 사용하여 Paired t-Test로 통계적 차이를 분석하고 Pearson 상관관계와 회귀분석을 통해 술전 3D CT 영상에서 측정한 거리와 급속 조형 모델 상에서 얻은 거리 간의 상관관계를 알아보았다. 회귀분석은 측정값 전부를 변수로 하여 다중분석을 시행하였고 독립변수로 선형회귀분석을 선택하였다.

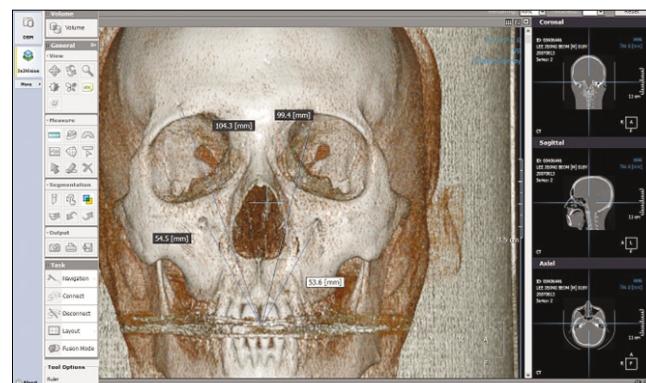


Fig. 1. Measuring the distance between 4 reference points and contact point of maxillary central incisors on a In2Vision 3-dimensional surgical navigation system.

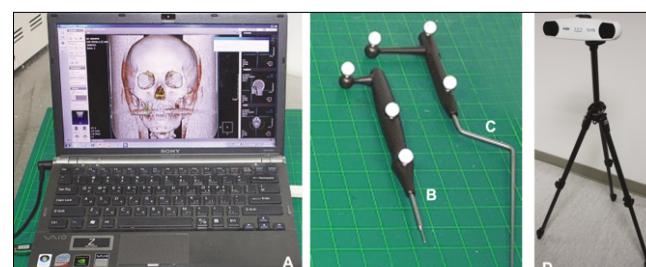


Fig. 2. Used tools in this study. A was the computer system displaying In2Vision system, B was the registration probe, C was the navigation probe, D was the infrared VICRA Polaris camera.

2) 수술 전 후 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상과 급속 조형 모델의 변화

환자의 급속 조형 모델에 실제 환자에 시행된 상악 악교정 수술 기록표를 바탕으로 가상 수술을 시행하였다. 모의 수술은 악교정 수술을 위한 중간 교합상 제작 시의 기공 과정을 참고로 하여 급속 조형 모델의 두개골 상의 세 점인 비근점(nasion)과 양측 안와상공의 점을 기준하고, 상악골 상의 세 점인 양측 상악 중절치 사이 접촉점과 양측 상악 제1대구치의 근심협축교두정부 사이의 세 개의 수직거리인 비근점 - 상악 중절치 접촉점과 양측 안와상공 - 상악 제1대구치 근심협축교두정 의 거리를 기준으로 하였다. 즉, 수술 계획에 기록된 상악 절치부 정중선 수정량, 상악골의 수평적 전, 후방이동 정도, 상악골 회전량과 방향, 상악골의 양측 구치부에서의 수직적 길이 신장 혹은 축소 등을 바탕으로 3개의 수직 거리의 변화를 예측하고, 3개의 수직거리가 동시에 실제 수술과 일치할 때 금속판과 골나사를 사용하여 상악골 급속 조형 모델을 고정하였다.(Fig. 3) 따라서, 가상수술 중 여러 번의 수직거리 측정이 필요하므로 6 개의 점에 골내고정원(skeletal anchoring system, SAS)을 식립하여 항상 같은 위치에서 거리를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 상악골 삭제시 삭제량과 이동량을 쉽게 확인할 수 있도록 양측 상악 제1대구치과 견치 상방에 가로 10 mm, 세로 10 mm 길이로 1 mm 간격의 눈금을 그려 넣고 버니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다.(Fig. 4)

앞에서 설정했던 두개골의 4점과 상악골의 3개의 기준점 사이의 거리인 12개의 값을 수술기록내용과 동일한 계획 하에 가상 수술 후 소형 금속판으로 상악골이 고정된 급속 조형 모델 상에서도 측정하였다. 또한, 수술 후 환자가 촬영한 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상 상에서도 12개의 거리를 측정하였다.(Fig. 5) 이렇게 얻은 데이터와 앞에서 얻은 데이터를 사용하여 술 전과 술후 12개의 거리값의 차이를 계산하였다. 위에서 계산된 변화량을 통해, 실제 환자의 수술결과와 급속 조형 모델 상에서 실행한 가상 수술 결과를



Fig. 4. Tracking the points by using of In2Vision 3 dimensional surgical navigation system and Polaris Vicra tracking device.

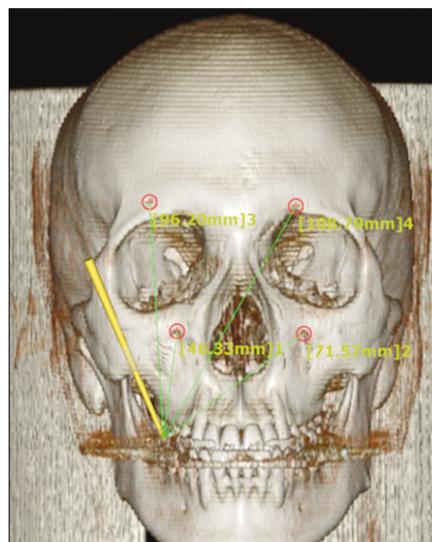


Fig. 5. Measuring the distance between 4 reference points on skull and ICP after simulation surgery on RP model (ICP: interincisal contact point, RP: rapid prototyping)



Fig. 3. Preparation and measurement of rapid prototype model in this study. A. Microscrews were implanted in nasion, both supraorbital foramen, contact point of maxillary central incisors for the reproducible measurement. B. Gradation was drawn over the maxillary canine and first molar and SAS was implanted in mesiobuccal cusp tip of maxillary first molar. C. Measuring the vertical distance between left supraorbital foramen and mesiobuccal cusp tip of left maxillary first molar. (SAS: skeletal anchoring system)

각 환자별로 비교하였다. 통계분석은 SAS Version 9.2의 Paired-t test로 변화량 사이의 차이를 분석하고 Pearson 상관계수와 회귀분석을 통해 2가지 경우의 변화량의 상관관계를 확인하였다. 이들 상관관계는 모두 root mean square error (RMSE)로 평가하였으며 대부분의 값이 일관되지 않고 유연하게 공차를 지니는 것으로 판단되어 다중선행 회귀분석을 시행하였다.

III. 결 과

1. 수술 전 촬영한 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상과 급속 조형 모델의 비교

수술 전 촬영한 환자의 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상에서 측정한 기준점 사이의 거리에서 급속 조형 모델 상에서 실제로 측정한 거리를 뺀 값은 -7.01 mm에서 -4.91 mm의 변이를 보였으며 평균 -1.07 mm로 통계적으로 유의한 차이를 보였다.(Tables 1 - 3, $P<0.05$) 그러나, 컴퓨터 단층촬영

영상 자료와 급속 조형 모델의 측정값 사이에 Pearson 상관계수가 0.995로 매우 높은 양의 상관관계를 보임을 알 수 있었다.(Fig. 6. $P<0.0001$)

2. 수술 전 후 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상과 급속 조형 모델의 변화

같은 환자에 대해 실제 악교정 수술을 한 후 촬영한 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상에서 측정한 기준점 간 거리의 변화량에서 급속 조형 모델 상에서 같은 수술계획을 가지고 가상 수술을 시행한 후 모델 상에서 측정한 변화량을 뺀 값은 -9.66 mm에서 -7.43 mm의 다양함을 보였으며 평균 1.33 mm로서 두 변화량 사이에는 유의한 차이를 보였다.(Tables 4 - 6, $P<0.05$) 실제 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상상에서 측정한 변화량과 급속 조형 모델에서 측정한 변화량 사이에는 Pearson 상관계수가 0.13844으로 약한 양의 상관관계를 보였다.(Fig. 7, $P<0.1$)

Table 1. The distance between 4 points on skull and 3 points on maxilla from 3D CT image before Le Fort I osteotomy (mm)

No. of patients	RIF			LIF			RSF			LSF		
	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC
1	44.6	54.5	68.9	70.2	53.6	41.6	93.9	104.3	112	107.4	99.4	90.3
2	41.8	53	68	66.2	51.7	41.6	82.3	91.3	98	96.8	91.8	84
3	53.7	62.8	75.1	76.7	60.2	46.8	101	106.6	110.1	114.1	105.3	95.6
4	41	50.7	65.5	67.1	53.4	43.7	92.6	99	106	105	99.7	93.3
5	47.3	58.8	72.3	73.7	59.5	48.8	96.8	105.3	110.8	112.1	107.1	100.4
6	41.6	52.4	65.9	65.5	50.5	38.2	90.3	96.9	100.6	104.7	99.5	90.2
7	44.3	52.2	67	63.5	48.2	42.1	86.8	92.2	101.1	100.1	91.2	86.6
8	42.7	51.5	69.3	68.6	51.3	43	91.4	97.4	107.8	109.5	100.4	95.1
9	44.9	52.3	67.5	69.6	53.5	44	94.5	96.8	105.1	108.6	98.5	93.5
10	49.2	56.4	73.6	71.2	55.4	47.4	97.4	102.5	111	110.9	102.2	96.5
11	41.7	52.6	70.4	67	50.3	41.5	88.1	92.5	100.2	100.6	92.3	87.4
12	43.9	49.1	68.2	63.7	48.9	41.2	88.4	90.7	101.1	101.1	90.4	85.2

(3D CT: 3 dimensional computed tomography, RIF: right infraorbital foramen, LIF: left infraorbital foramen, RSF: right supraorbital foramen, LSF: left supraorbital foramen, RMBC: right mesiobuccal cuspal tip, ICP: interincisal contact point, LMBC: left mesiobuccal cuspal tip)

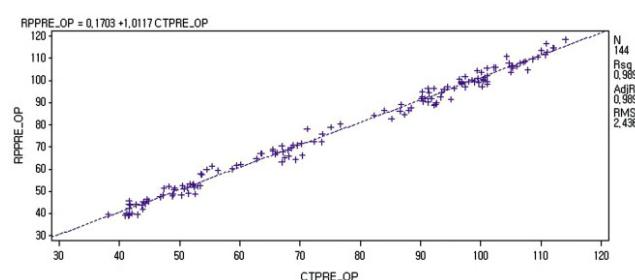


Fig. 6. RMSE analysis graph of measured distances between 3D CT image in X axis and RP model in Y axis before surgery.(mm)
(RMSE: root mean square error, 3D CT: 3 dimensional computed tomography, RP: rapid prototyping)

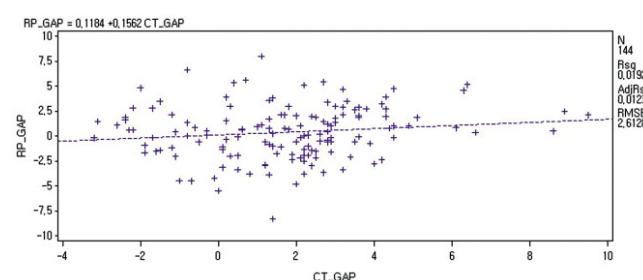


Fig. 7. RMSE analysis graph showing changes between before and after surgery in measured distances of 3D CT image in X axis and RP model in Y axis.(mm)
(RMSE: root mean square error, 3D CT: 3 dimensional computed tomography, RP: rapid prototyping)

Table 2. The distance between 4 points on skull and 3 points on maxilla from rapid prototyping (RP) model before simulation surgery (mm)

No. of patients	RIF			LIF			RSF			LSF		
	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC
1	46.33	59.93	70.83	71.57	57.94	42.21	96.2	110.91	114.72	108.7	104.52	92.52
2	43.89	52.48	68.74	67.59	53.38	44.22	84.39	90.23	99.53	99.05	91.88	86.53
3	57.54	64.69	78.99	80.4	62.13	47.61	105.76	108.03	113.51	118.5	106.75	96.45
4	39.21	51.08	68.9	67.65	52.47	43.7	89.93	99.35	106.49	103.74	99.06	92.49
5	48.33	60.09	72.44	75.98	61.89	47.84	99.49	105.72	111.68	114.85	108.29	100.6
6	45.69	51.83	66.79	68.05	52.63	39.51	94.74	98.39	100.25	108.04	100.97	92.03
7	44.44	53.03	63.23	67.23	52.26	40.07	89.16	96.47	99.42	103.78	96.43	86.24
8	44.01	48.99	64.39	69.58	51.79	39.54	94.5	97.18	104.67	110.6	100.01	91.59
9	45.66	53.26	65.12	70.87	57.89	45.23	97.07	98.82	106.42	109.7	100.27	94.55
10	51.46	59.37	72.22	78.21	61.48	51.33	101.9	105.93	112.98	116.68	105.84	100.49
11	39.44	48.83	66.15	70.48	48.19	39.12	86.64	89.2	97.26	101.22	88.9	84.69
12	41.92	50.74	65.84	67.09	48.65	40.13	87.57	91.84	98.5	102.02	90.7	82.81

(RIF: right infraorbital foramen, LIF: left infraorbital foramen, RSF: right supraorbital foramen, LSF: left supraorbital foramen, RMBC: right mesiobuccal cuspal tip, ICP: interincisal contact point, LMBC: left mesiobuccal cuspal tip)

Table 3. The difference of measured 12 distances between 3D CT image and RP model before surgery (mm)

No. of patients	RIF			LIF			RSF			LSF		
	RMBC	ICP	LMBC									
1	0.8	3.2	2.9	0.5	2.8	3	-0.1	3.3	2.3	1.3	3.6	2.7
2	-0.6	-1.5	1.3	2.4	-1.2	1.6	0.1	0.2	2.9	0.3	-0.8	1.3
3	9.5	4.3	-0.6	6.6	3.4	1.9	8.9	4.4	-1.1	8.6	4	1.2
4	2.3	1	1.3	2.2	1.2	4.3	2.2	1.7	3.6	2.8	2.8	5.1
5	-1.2	2.2	2	1.8	3.5	1.9	-0.3	4.2	2.2	2.4	4.9	4.5
6	0.1	2.2	0.5	-1	0	-1.1	1.2	1.5	-0.7	2.2	1.4	-0.8
7	3.9	1.6	3.2	0.2	-1.9	2.5	2.8	0.6	3.6	2.9	-0.5	2.9
8	-1.7	-2.3	-0.3	0.5	-1.6	2	-1.7	-2.4	1.7	0.1	-1.5	2.6
9	3.2	-3.2	-2.2	2.2	-2.6	1.1	4.5	-3.1	0.7	4.3	-2.2	2.7
10	6.1	1.4	3.8	2	0.3	0.2	4.5	3.2	3.5	3	1.3	0.4
11	2.3	2.7	3.6	0.6	1.4	1.4	2.4	2.6	3	2.1	2.5	2.1
12	6.3	-2	1.1	2.8	-1.9	1.8	6.4	-0.8	2.5	4.2	-2.4	2.1

(3D CT: 3 dimensional computed tomography, RIF: right infraorbital foramen, LIF: left infraorbital foramen, RSF: right supraorbital foramen, LSF: left supraorbital foramen, RMBC: right mesiobuccal cuspal tip, ICP: interincisal contact point, LMBC: left mesiobuccal cuspal tip)

Table 4. The distance between 4 points on skull and 3 points on maxilla from 3D CT image after Le Fort I osteotomy (mm)

No. of patients	RIF			LIF			RSF			LSF		
	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC
1	43.8	51.3	66	69.7	50.8	38.6	94	101	109.7	106.1	95.8	87.6
2	42.4	54.5	66.7	63.8	52.9	40	82.2	91.1	95.1	96.5	92.6	82.7
3	44.2	58.5	75.7	70.1	56.8	44.9	92.1	102.2	111.2	105.5	101.3	94.4
4	38.7	49.7	64.2	64.9	52.2	39.4	90.4	97.3	102.4	102.2	96.9	88.2
5	48.5	56.6	70.3	71.9	56	46.9	97.1	101.1	108.6	109.7	102.2	95.9
6	41.5	50.2	65.4	66.5	50.5	39.3	89.1	95.4	101.3	102.5	98.1	91
7	40.4	50.6	63.8	63.3	50.1	39.6	84	91.6	97.5	97.2	91.7	83.7
8	44.4	53.8	69.6	68.1	52.9	41	93.1	99.8	106.1	109.4	101.9	92.5
9	41.7	55.5	69.7	67.4	56.1	42.9	90	99.9	104.4	104.3	100.7	90.8
10	43.1	55	69.8	69.2	55.1	47.2	92.9	99.3	107.5	107.9	100.9	96.1
11	39.4	49.9	66.8	66.4	48.9	40.1	85.7	89.9	97.2	98.5	89.8	85.3
12	37.6	51.1	67.1	60.9	50.8	39.4	82	91.5	98.6	96.9	92.8	83.1

(3D CT: 3 dimensional computed tomography, RIF: right infraorbital foramen, LIF: left infraorbital foramen, RSF: right supraorbital foramen, LSF: left supraorbital foramen, RMBC: right mesiobuccal cuspal tip, ICP: interincisal contact point, LMBC: left mesiobuccal cuspal tip)

* Comparison with parameters in Table 1, $P<0.05$

Table 5. The distance between 4 points on skull and 3 points on maxilla from RP model after simulation surgery of Le Fort I osteotomy (mm)

No. of patients	RIF			LIF			RSF			LSF		
	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC	RMBC	ICP	LMBC
1	50.09	57.01	70.97	73.54	57.49	40.43	100.38	107.38	114.63	112.55	101.65	91.05
2	43.05	49.01	67.99	69.05	51.21	42.06	85.49	88.69	100.09	101.06	90.54	87.33
3	55.42	62.73	78.1	80.04	64.2	49.48	103.26	107.24	113.1	117.99	109.52	99.29
4	40.25	50.15	65.32	67.63	53.08	41.01	91.89	98.56	104.59	104.16	97.83	90.62
5	49.49	63.87	77.22	75.3	62.46	50.2	99.43	108.08	114.18	112.88	107.24	100.72
6	48.81	53.16	66.89	72.5	58.1	41.56	97.67	100.15	104.73	109.99	101.98	92
7	45.16	54.11	66.6	67.59	53.92	41.58	89.77	95.86	99.48	102.77	97.03	87.82
8	44.15	48.36	63.83	72.95	53.31	40.11	91.69	95.57	102.56	111.98	101.4	92.11
9	40.97	53.45	62.29	65.74	56.78	37.23	92.32	97.36	100.8	105.78	99.63	89.11
10	50.61	55.57	69.47	76.19	58.48	47.45	100.9	103.78	110.35	113.67	104.1	95.16
11	41.36	52.46	64.08	69.81	56.45	38.87	89.62	89.01	95.92	103.42	91.06	84.83
12	37.35	45.9	64.72	63.69	49.59	37.16	82.39	85.21	96.59	98.82	88.8	81.74

(RIF: right infraorbital foramen, LIF: left infraorbital foramen, RSF: right supraorbital foramen, LSF: left supraorbital foramen, RMBC: right mesiobuccal cuspal tip, ICP: interincisal contact point, LMBC: left mesiobuccal cuspal tip)

* Comparison with parameters in Table 2, $P<0.05$

Table 6. The difference of change in measured 12 distances of 3D CT image and RP model before and after surgery (mm)

No. of patients	RIF			LIF			RSF			LSF		
	RMBC	ICP	LMBC									
1	4.56	0.28	3.04	2.47	2.35	1.22	4.08	-0.23	2.21	5.15	0.73	1.23
2	-1.44	-4.97	0.55	3.86	-3.37	-0.56	1.2	-1.34	3.46	2.31	-2.14	2.1
3	7.38	2.34	-1.49	6.24	5.47	3.77	6.4	3.61	-1.51	8.09	6.77	4.04
4	3.34	0.07	-2.28	2.18	1.81	1.61	4.16	0.91	1.7	3.22	1.57	3.23
5	-0.04	5.98	6.78	1.12	4.07	4.26	-0.36	6.56	4.7	0.43	3.85	4.62
6	3.22	3.53	0.6	3.45	5.47	0.95	4.13	3.26	3.78	4.15	2.41	-0.83
7	4.62	2.68	6.57	0.56	-0.24	4.01	3.41	-0.01	3.66	1.89	0.1	4.48
8	-1.56	-2.93	-0.86	3.87	-0.08	2.57	-4.51	-4.01	-0.41	1.48	-0.11	3.12
9	-1.49	-3.01	-5.03	-2.93	-3.71	-6.9	-0.25	-4.56	-4.92	0.38	-2.84	-2.74
10	5.25	-2.4	1.05	-0.02	-2.7	-3.68	3.5	1.05	0.87	-0.01	-0.44	-4.93
11	4.22	6.33	1.53	-0.07	9.66	1.15	5.38	2.41	1.66	4.3	4.66	2.24
12	1.73	-6.84	-0.02	-0.6	-0.96	-1.17	1.22	-7.43	0.59	1	-4.3	1.03

(3D CT: 3 dimensional computed tomography, RIF: right infraorbital foramen, LIF: left infraorbital foramen, RSF: right supraorbital foramen, LSF: left supraorbital foramen, RMBC: right mesiobuccal cuspal tip, ICP: interincisal contact point, LMBC: left mesiobuccal cuspal tip)

* Comparison with parameters in Table 3, $P<0.05$

IV. 총괄 및 고찰

3차원 추적시스템(tracking system)은 위치 검출 방식으로 도 설명되며 크게 기계적 추적시스템(mechanical system), 초음파 시스템(ultrasound system), 관성이용 방식, 광전자 추적시스템(optoelectronic tracking system), 및 전자기 추적시스템(electromagnetic tracking system) 등과 같이 5종류로 나누어 생각할 수 있으며, 이 중 광전자 추적시스템이 정확성과 안전성인 측면에서 주로 이용되어 왔다⁸⁻¹¹. 이중 광전

자 추적시스템은 광학추적방식으로 알려져 있으며 수술용 probe에 2개 이상의 light-emitting diode(LED)를 부착하고 주위에 카메라를 설치하여 3차원적인 위치를 검출하는 방식으로 LED가 소형이므로 각종 수술기구에 작게 부착하는 것이 가능하고 수술시 행동 반경의 확보가 용이한 장점이 있으나, LED와 카메라간의 시야를 확보해야 하는 단점이 있다. 현재 이러한 광학추적 방식은 컴퓨터보조 외과수술을 위한 장비들 중에서 대부분 채택되는 방법으로 적외선을 이용하는 경우 기구에는 적외선 방출을 위한 LED 또

는 반사를 위한 reflector가 부착되며, localizer는 이 광원들을 추적함으로써 환자에 대한 기구의 위치를 파악하게 된다. 따라서 적외선을 방출하는 기구와 받아들이는 localizer 사이에는 광원이 진행하는 데 장애가 될 만한 것이 존재해서는 안되는 기본적인 단점이 있게 된다. 광학추적 방식은 능동적(active)인 방법과 수동적(pассив)인 추적 방식과 같이 크게 두 가지로 나뉘는데, 능동적인 방식은 수술기구에 광원인 LED가 부착되는 방식이며, 수동적인 방식은 적외선 flash의 빛을 반사할 수 있는 reflector가 달려 있는 방식을 의미한다. 두 방식은 각각의 장단점을 지니며 능동적인 방식은 직접 빛을 발광하기 때문에 외부 환경의 영향이 덜하고 정확도가 비교적 높은 반면에, 수동적인 방식은 기구에 광원을 부착하지 않아도 되기 때문에 기구의 무게가 가볍고 전선이 불필요하여 사용하기 간편하다는 장점을 지닌다. 그러나, 외부 광원에 의한 간섭을 받을 수 있는 본질적인 단점은 남아있게 된다⁸⁻¹¹.

최근 많이 사용되는 ProReflex Motion Capture MCU240 장치 (Qualisys medical AB, Goteborg, Sweden), Polaris Vicra (NDI Northern Digital Inc., Ontario, Canada), FlashPoint 5000 3D Localizer 장치(Image Guided Technologies Inc., Boulder Co., USA) 등이 이러한 광전자 추적시스템에 해당된다¹²⁻¹⁴. 이 중 본 연구에서는 비록 고가이나 가장 많이 국내에 수입되어 판매되고 있는 Polaris Vicra를 사용하였다.

수술 전 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상에서 측정한 점간 거리와 급속조형 모델에서 측정한 거리의 차이는 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, 그 상관 정도가 매우 높고 유의한 것으로 나타났다. 이는 급속조형 모델이 환자의 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상을 기반으로 제작되었으므로 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상의 해상도와 급속 조형 모델의 해상도에 차이가 있음에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상의 기준 해상도에서 동일한 비율로 해상도를 낮춰 급속 조형 모델을 제작하기 때문에 같은 점 간 거리에서 일정한 비율의 차이가 나타나는 것이다^{15,16}. 구강악안면외과 영역에서의 악교정 수술시 동일한 치료 계획을 가지고 최종목표가 같은 한 환자에서 어떤 방법으로 수술을 시행하든지 거의 동일한 결과를 보여야 하는 것이 당연하다고 생각할 수 있다. 하지만 급속조형 모델의 해상도에 따른 차이는 논외로 하더라도, 예상과 달리 상악 악교정 수술을 받은 실제 환자와 가상 수술을 시행한 급속 조형 모델에서 동일한 점 간 거리가 유의한 차이를 보이는 것은 르포씨 제1형 골절단술에서 볼 수 있는 여러 가지 상황에서 기인하는 것으로 보인다. 첫째, 두개골에서 분리된 상악골은 치료 계획에 따라 원하는 위치에 고정되기 위하여 일부를 삭제하거나 수평 또는 수직으로 회전시키게 된다. 이 과정에서 두개골과 상악골 사이에 공간이 생길 수 있는데, 이 공간으로 인해 상악골을 두개골에 고정시키는 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 둘째, 악교정 수술 시 술자의 순간적 판단과 상황변화, 삭제 순서 등에 따라 공간의

크기가 달라질 수 있어서 같은 치료계획과 목표를 설정하더라도 매번 차이를 보이는 것이다. 한 환자에게 동일한 수술을 시행하더라도 차이를 보일 것인데, 실제 수술 시에는 중간 교합상을 사용하여 하악골 기준으로 상악을 고정하였고, 급속 조형 모델에서는 교합상 제작 시의 모형 수술방법과 유사한 두개골 상의 기준점과 상악골 상의 기준점 사이의 수직거리를 측정하면서 상악을 고정하는 다른 방법을 시행하여 더 많은 차이가 나타나는 것이다.셋째, 르포씨 제1형 골절단술식 과정 상 분리된 상악골을 적정위치에 한 번에 고정하는 것이 아니라 한 부위씩 플레이트와 골내고정원으로 고정하여 최종 고정하므로 각 고정단계별로 오차가 누적될 수 있는데 이 오차가 매번 달라질 수 있기 때문이다.

실제 악교정 수술을 한 후 촬영한 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상에서 측정한 기준점 간 거리의 변화량에서 급속조형 모델상에서 같은 수술계획을 가지고 가상수술을 시행한 후 모델상에서 측정한 변화량을 뺀 값 사이에 유의한 차이가 나타나는 현상은 이 두 군간의 통계적 유의성을 설명해주고 있으며, 이들간의 상관 요소를 밝혀낼 수 있으면, 이의 실제 임상에서의 적용이 가능할 것이다. 본 연구에서는 이러한 연관 요소(correlation factor)를 변환식 또는 일련 공식으로 재구성하지는 못하였으나, 일관된 회귀분석에서의 형태를 보임을 확인할 수 있었으며, 따라서, 광학추적 방식의 시술전후의 계측은 실제 수술할 때 충분히 적용 가능한 실시간 계측 기구로서 사용할 수 있으리라는 중요한 의미를 시사한다고 하겠다.

현재 구강악안면외과 영역의 악교정 수술에서 르포씨 제1형 골절단술은 모형 수술을 통해 제작하는 중간 교합상이 아주 중요한 역할을 담당한다. 하지만 치아모형을 반조절성 교합기에 부착하여 행하는 모형 수술은 교합기의 두개골과 상악골의 관계를 정확히 재현하지 못하는 근본적인 오차를 가지기 때문에 악교정 수술 중에 술자의 경험과 술 중 환자 계측점의 측정을 통해 보완할 수밖에 없는 것이 현실이다. 또한 술 중에도 분리된 상악골을 적절한 위치에 한번에 고정시키는 것이 아니라 공중에 떠있는 상악골을 한 부위씩 플레이트와 나사로 두개골에 고정시키면서 최종적으로 원하는 위치에 고정되도록 하는 방법은 매 고정 시마다 발생하는 오차가 누적될 가능성을 가지고 있고, 같은 치료계획이라도 술자의 경험도에 따라 다른 결과를 가지고 올 수 있는 상황을 낳는다.

이러한 문제점은 삼차원 컴퓨터 단층촬영 영상을 사용한 광학추적 항법장치를 사용하여, 프로그램 상의 이미지를 이용한 가상수술이나 높은 해상도를 가진 급속 조형 모델상에 가상 수술을 시행한 후 얻은 술 후 기준점들에 대한 위치 영상 자료를 이용하여 모형 수술이나 교합상을 사용하지 않고 악교정 수술을 시행하고, 상악골 고정 전에 상악골의 위치를 일정하게 유지시키면서 원하는 위치로 자유롭게 이동시킬 수 있는 장치나 방법을 개발한다면 술자나

수술 환경에 무관하게 원래 계획했던 치료 목표를 매번 동일한 정확도로 얻을 수 있을 것이다¹⁰.

References

- Ewers R, Schicho K, Undt G, Wanschitz F, Truppe M, Seemann R, et al. Basic research and 12 years of clinical experience in computer-assisted navigation technology: a review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2005;34:1-8.
- Klug C, Schicho K, Ploder O, Yerit K, Watzinger F, Ewers R, et al. Point-to-point computer-assisted navigation for precise transfer of planned zygoma osteotomies from the stereolithographic model into reality. *J Oral Maxillofac Surg* 2006;64:550-9.
- Ellis E, 3rd. Accuracy of model surgery: evaluation of an old technique and introduction of a new one. *J Oral Maxillofac Surg* 1990;48:1161-7.
- Nizam A, Gopal RN, Naing L, Hakim AB, Samsudin AR. Dimensional Accuracy of the Skull Models Produced by Rapid Prototyping Technology Using Stereolithography Apparatus. *Arch Orofac Sci* 2006;1:60-6.
- Choi JY, Choi JH, Kim NK, Kim Y, Lee JK, Kim MK, et al. Analysis of errors in medical rapid prototyping models. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2002;31:23-32.
- Hassfeld S, Muhling J, Zoller J. Intraoperative navigation in oral and maxillofacial surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1995; 24:111-9.
- Hassfeld S, Muhling J. Computer assisted oral and maxillofacial surgery-a review and an assessment of technology. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2001;30:2-13.
- Wagner A, Ploder O, Enislidis G, Truppe M, Ewers R. Image-guided surgery, *Int J Oral Maxillofac Surg* 1996;25:147-51.
- Wagner A, Ploder O, Enislidis G, Truppe M, Ewers R. Virtual image guided navigation in tumor surgery-technical innovation, *J Craniomaxillofac Surg* 1995;23:271-3.
- Wagner A, Rasse M, Millesi W, et al., Virtual reality for orthognathic surgery: The augmented reality environment concept, *J Oral Maxillofac Surg*, 55, 456 (1997).
- Watzinger F, Birkfellner W, Wanschitz F, Ziya F, Wagner A, Kremser J, et al. Placement of endosteal implants in the zygoma after maxillectomy: a Cadaver study using surgical navigation. *Plast Reconstr Surg* 2001;107:659-67.
- Ewers R, Schicho K, Wagner A, Undt G, Seemann R, Figl M, et al. Seven years of clinical experience with teleconsultation in craniomaxillofacial surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 2005;63: 1447-54.
- Wagner A, Millesi W, Watzinger F, Truppe M, Rasse M, Enislidis G, et al. Clinical experience with interactive teleconsultation and teleassistance in craniomaxillofacial surgical procedures. *J Oral Maxillofac Surg*, 1999;57:1413-8.
- Eliashar R, Sichel JY, Gross M, Hocwald E, Dano I, Biron A, et al. Image of guided navigation system-a new technology for complex endoscopic endonasal surgery, *Postgrad Med J* 2003; 79:686-90.
- Schicho K, Figl M, Seemann R, Ewers R, Lambrecht JT, Wagner A, et al. Accuracy of treatment planning based on stereolithography in computer assisted surgery. *Med Phys* 2006;33:3408-17.
- Jones RM, Khambay BS, McHugh S, Ayoub AF. The validity of a computer-assisted simulation system for orthognathic surgery (CASSOS) for planning the surgical correction of class III skeletal deformities: single-jaw versus bimaxillary surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2007;36:900-8.