

# CT절편두께와 RP방식이 3차원 의학모델 정확도에 미치는 영향에 대한 연구

원광대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실, 원광 치의학 연구소  
엄기두 · 이병도

## Influence of slice thickness of computed tomography and type of rapid prototyping on the accuracy of 3-dimensional medical model

Ki-Doo Um, Byung-Do Lee

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, School of Dentistry, Wonkwang University, Wonkwang Dental Research Institute

### ABSTRACT

**Purpose :** This study was to evaluate the influence of slice thickness of computed tomography (CT) and rapid prototyping (RP) type on the accuracy of 3-dimensional medical model.

**Materials and Methods :** Transaxial CT data of human dry skull were taken from multi-detector spiral CT. Slice thickness were 1, 2, 3 and 4 mm respectively. Three-dimensional image model reconstruction using 3-D visualization medical software (V-works™ 3.0) and RP model fabrications were followed. 2-RP models were 3D printing (Z402, Z Corp., Burlington, USA) and Stereolithographic Apparatus model. Linear measurements of anatomical landmarks on dry skull, 3-D image model, and 2-RP models were done and compared according to slice thickness and RP model type.

**Results :** There were relative error percentage in absolute value of 0.97, 1.98, 3.83 between linear measurements of dry skull and image models of 1, 2, 3 mm slice thickness respectively. There was relative error percentage in absolute value of 0.79 between linear measurements of dry skull and SLA model. There was relative error difference in absolute value of 2.52 between linear measurements of dry skull and 3D printing model.

**Conclusion :** These results indicated that 3-dimensional image model of thin slice thickness and stereolithographic RP model showed relative high accuracy. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2004; 34 : 13-8)

**KEY WORDS :** Skull; Tomography; Imaging, Three-Dimensional

## 서 론

최근 3차원 CT 영상의 급속한 발전과 더불어 3차원 영상을 기반으로 한 신속조형 (rapid prototyping, RP) 모델 이용 빈도가 증가하고 있으며 이러한 3차원 의학모델을 이용함으로써 해부학적 구조물의 해석이 용이하고<sup>1-3</sup> 악안면 기형환자나 악교정 환자의 모의수술, 환자에 대한 용이한 설명, 모델상에서의 유지장치 제작 등이 가능하게 되었다.<sup>4</sup>

3차원 의학 모델이 임상에 적용되기 위해서는 실물과 크

기 및 모양이 되도록 일치되는 것이 바람직하며 3차원 의학 모델의 사용증가와 함께 그 정확도에 대한 관심이 고조되고 있다.<sup>5-7</sup> Matteson 등<sup>6</sup>은 건조 두개골에 대한 3차원 영상모델의 정확도에 대해 연구하여 길이 0.19 mm (0.28%), 각도 0.38° (1.39%) 오차를 보고한 바 있고 Hildebolt 등<sup>8</sup>은 2차원 영상 이미지와 2차원 영상에 기반을 둔 3차원 영상 이미지의 계측오차에 대해 연구한 바 있으며 김 등<sup>9</sup>은 하악골 3차원 영상 대부분이 2mm 이내의 오차만을 나타낸다고 보고하였다.

또한 이 등<sup>10</sup>의 연구에 의하면 두개골과 3차원 영상모델 간의 절대오차의 평균값은 0.9 mm을 보인다고 하였으며 RP모델의 경우에는 실물과의 선계측치가 약 0.2%의 오차를 나타낸다고 보고<sup>11</sup>되어 3차원 의학 모델은 비교적 정확한 산물이라고 간주되고 있다.

\*이 논문은 2003년도 원광대학교 교비지원에 의해서 연구됨  
접수일: 2003년 11월 14일; 심사일: 2003년 11월 17일; 채택일: 2003년 12월 29일  
Correspondence to: Prof. Byung-Do Lee  
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Wonkwang University, 344-2, Shinyong dong, Iksan city, Chunbuk, Korea 570-711  
Tel) 82-63-850-1912. Fax) 82-63-857-4002  
E-mail) eebydo@wonkwang.ac.kr

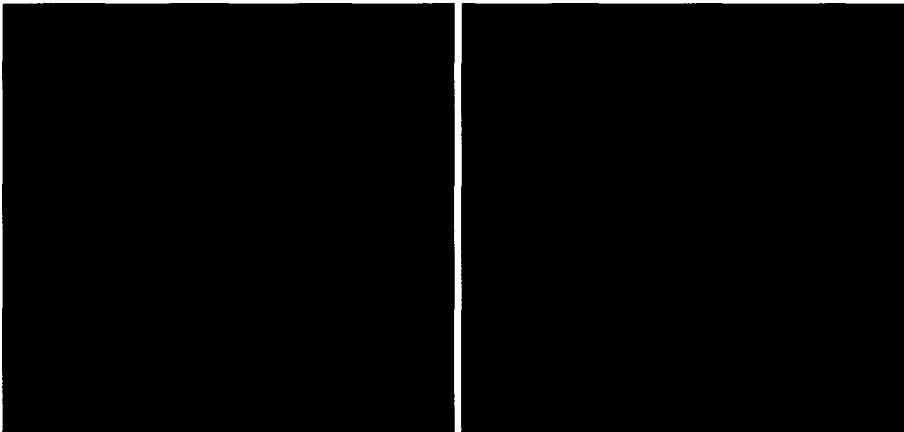
그러나 CT자료 획득(acquisition)과<sup>12</sup> 3차원 영상모델 생성과정, 그리고 신속조형모델 제작과정 등의 과정에서 3차원 의학 모델의 부정확성이 야기될 요인이 다양하게 존재하며 특히 3차원 영상모델 생성과정중의 절편 두께와 임계치가 술자의 임의로 조정되어 모델 정확도에 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있다.<sup>10, 13-15</sup>

RP모델은 다양한 방식으로 제작되고 있으나 치과임상에서는 stereolithography방식(Stereolithographic Apparatus, SLA)으로 제작된 반투명 모델과 적층방식으로 제작된 3D printing 모델(불투명 모델) 등이 주로 사용되고 있으며 이러한 RP모델의 정확성에 대한 연구들도 보고되고 있다. 1994년 Barker 등<sup>16</sup>은 건조 두개골과 SLA모델간에 평균 0.85 mm의 오차를 보인다고 보고하였고 Kragoskov 등<sup>7</sup>은 3차원 영상모델과 SLA 모델간의 0.3-0.8 mm의 오차를 보고한 바 있다. 최근 임상에서의 RP모델 사용빈도가 증가하고 있으며 경제적인 이유 때문에 SLA모델보다는 3D printing 모델이 선호되고 있으나 그 정확성을 비교한 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 연구에서는 3차원 의학모델의 정확성에 영향을 미치는 요인 중 불균등용적평균(partial volume averaging)을 야기시키는 CT절편두께 변화<sup>17-19</sup>가 3차원 영상모델 정확도에 미치는 영향을 연구하고자 하였으며, 또한 임상에서 빈번하게 사용되고 있는 3D printing 모델(Z402)과 stereolithography방식의 모델(SLA)간의 정확도를 비교하여 RP재료 선택이 3차원 의학 모델 정확성에 미치는 영

향에 대해 연구하고자 하였다.

## 재료 및 방법

인간 건조두개골의 상악안면 복합체와 하악골을 대상으로 전산화단층촬영을 하였으며 multi detector system 단층촬영장치(Siemens Somatom Volume Zoom)를 이용하였다. 촬영조건은 140 kVp, 225 mA, Table pitch 1.25의 촬영조건 하에서 reconstruction increment후의 절편두께가 1, 2, 3, 4 mm로 각각 설정되도록 하였으며 건조두개골의 교합평면이 지평면과 수직이 되도록 위치시킨 후 CT 촬영을 하였다. CT실에서 획득된 자료를 compact disc에 담아 운반하였으며 개인용 컴퓨터(Pentium III, 800 MHz, Intel, U.S.A. 256 MB RAM)에 적재된 V-works<sup>TM</sup> 3.0(CyberMed. Inc., Seoul, Korea) 3차원 의학영상 프로그램을 이용하여 3차원 영상모델을 생성시켰으며 영상 모델 Rendering 과정 중의 임계치는 800으로 동일하게 설정하였다(Fig. 1). V-works<sup>TM</sup> 3.0의 자체 프로그램을 이용하여 건조 두개골과 동일한 위치의 해부학적 계측점들을 영상모델 상에서 설정한 후 계측점들간의 선계측을 각각 시행하였다. 이 계측치를 바탕으로 건조두개골에 대한 상대오차율을 구하고 절편두께에 따른 정확도를 평가하였는데 본 연구에서 이용된 해부학적 계측점은 Table 1과 같으며 관찰하기가 비교적 용이하고 악안면 계측시 빈번하게 이용되는 해부학적 구조물을 대상으로 하



**Fig. 1.** Three-dimensional image model of dry skull. Slice thickness 4 mm (right) model showed rougher surface than slice thickness 1 mm model (left).



**Fig. 2.** SLA (Stereolithographic Apparatus, left) and 3D printing (Z402, Z Corp, right) model.

**Table 1.** Anatomical landmarks used in this study

Landmark	Description
Na (nasion)	비골전두골융합선의 최전상방점
ROr (right orbitale)	우측 안와하연의 최하방점
LOr (left orbitale)	좌측 안와하연의 최하방점
ANS (anterior nasal spine)	구개수준에서 상악골의 최전방점
A (subspinale)	상악기저부와 치조골 사이에서 만곡된 골 외연의 최후방점
B (supramentale)	하악골 정중 봉합부 전방연의 최후방점
Pog (pogonion)	하악골 정중 봉합부 외형선상의 최전방점
Me (menton)	하악골 정중 봉합부 외형선상의 최후하외방점
RGo (right gonion)	우측 하악 우각부 외형선상의 최후하외방점
LGo (left gonion)	좌측 하악 우각부 외형선상의 최후하외방점
RPo (right porion)	우측 외이도의 최상방점
LGo (left porion)	좌측 외이도의 최상방점

였다.

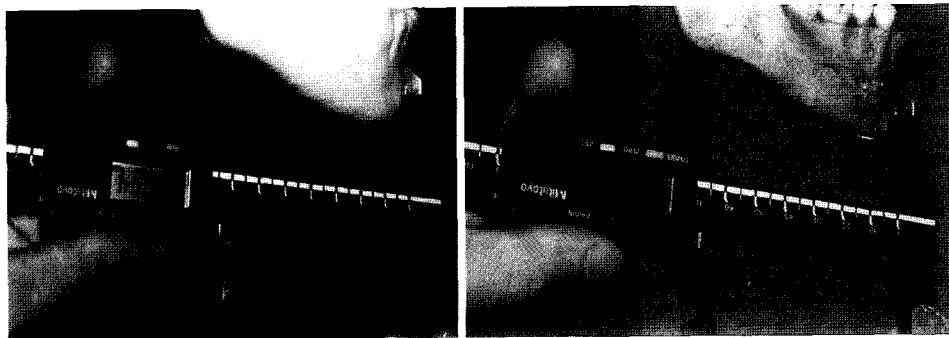
RP재료선택이 3차원 의학모델 정확도에 미치는 영향을 평가하기 위해 영상모델 기반으로 3D printing (Z402, Z Corp., Burlington, USA)모델과 SLA (SLA 3500, 3D system Corp., Valencia, USA)모델을 주문 제작하였다 (Fig. 2). 3D printing모델과 SLA모델상에서 건조두개골과 동일한 해부학적 계측점들을 설정하고 계측점들 간의 선계측을 각각

시행하였으며 선 계측은 디지털 캘리퍼 (Mitutoyo Corp., Utsunomiya, Japan)을 이용하였다 (Fig. 3). 측정된 계측치를 바탕으로 상대오차율을 구하여, 건조두개골을 기준으로 한 3D printing모델과 SLA RP 모델의 정확성을 평가하였다.

선계측을 시행시에는 치과의사 3인이 해부학적 계측점 측정방법에 대해 충분히 상의한 후 각각의 관찰자들이 2주일 간격으로 2회씩 선계측치를 측정한 후 그 평균을 구하여 관찰자간의 재현성을 평가하였다. 또한 위의 3인 중 구강악안면방사선학을 전공한 특정 1인이 2주일 간격으로 2회 선계측치를 측정하여 관찰자내의 재현성을 평가하였으며 SPSS 프로그램의 reliability coefficient를 이용하였다.

### 결 과

절편두께 1, 2, 3 mm 영상모델과 건조두개골간의 상대 오차율의 절대값 평균은 각각 0.97, 1.98, 3.83이었고 절편두께 4 mm 영상모델에서는 해부학적 구조물들이 확실히 관찰되지 않아 선계측 측정이 불가능하였다 (Table 2). SLA모델의 건조두개골에 대한 선계측치 상대오차율은 0.79%인데 비해 3D printing모델의 경우에는 2.52%로 오차율이 훨씬 크게 측정되었으며 평균 크기가 작게 나타나는 경향이 있었다 (Table 3). Intra- observer reliability coefficients 및 Inter-observer reliability coefficients는 0.996-1.0으로 매우 높게 나



**Fig. 3.** Linear measurements of arbitrary 12 anatomical landmarks on RP model and dry skull.

**Table 2.** Relative error percentage of image model according to slice thickness

Landmark	Sku (s)	1 mm	2 mm	3 mm	(1 mm-s)/s (%)	(2 mm-s)/s (%)	(3 mm-s)/s (%)
RPo-ROr	75.56	78.84	80.7	83.8	0.35	2.72	6.67
RPo-Me	79.92	80.38	81.9	78.2	0.57	2.47	2.15
A-B	47.75	47.57	48.34		0.37	1.23	
ANS-Pog	62.06	61.32	60.7		1.19	2.19	
RGo-LGo	96.46	96.71	95.65	95.1	0.25	0.83	1.40
A-LOr	45.41	45.91	45.3		1.10	0.24	
A-RPo	106.43	107.70	108.66		1.19	2.09	
Pog-RPo	129.0	133.47	135.1	135.6	3.46	4.72	5.11
A-RGo	85.56	86.34	85.42		0.25	1.31	
Absolute Mean ± SD					0.97 ± 1.02	1.98 ± 1.31	3.83 ± 2.48

sku: dry skull

1, 2, 3 mm: Three dimensional image model of slice thickness, 1, 2, 3 mm, respectively

**Table 3.** Relative error percentage of SLA and 3D printing model

Landmark	Skull (s)	SLA	3D	$ (SLA-s)/s  (%)$	$ (3D-s)/s  (%)$
RPo-ROr	81.45	80.9	79.18	0.67	2.79
LPo-LOr	78.62	78.46	79.46	0.20	1.07
RPo-Me	79.01	79.50	76.41	0.62	3.29
LPo-Me	79.16	79.0	75.74	0.20	4.32
A-B	46.32	47.89	45.18	3.3	2.46
ANS-Pog	62.34	62.09	58.84	0.40	5.61
RGo-LGo	96.51	95.13	96.28	1.42	0.24
A-LOr	45.24	45.78	45.57	1.19	0.73
B-ROr	79.55	79.91	78.22	0.45	1.67
A-RPo	111.65	110.61	111.53	0.93	0.11
Pog-RPo	136.01	136.37	134.94	0.26	0.79
A-RGo	86.84	86.51	83.44	0.38	3.92
A-LGo	86.59	86.40	81.83	0.21	5.73
Absolute Mean ± SD				0.79 ± 0.85	2.52 ± 1.95

Skull: dry skull

SLA: Stereolithographic Apparatus (SLA 3500, 3D system Corp. Valencia, USA) RP model

3D: 3D printing (Z402, Z Corp. Burlington, USA) RP model

타났다.

### 고 찰

CT촬영 후 rendering과정에 의해 3차원 영상이 생성이 되고 이러한 영상자료를 기반으로 RP모델을 생성하는 것은 잘 알려져 있는 사실이다.<sup>7,13,20</sup> 3차원 CT영상 생성과정 중 rendering과정에 의해 신체 각 조직의 3차원 영상으로의 포함여부가 결정되기 때문에 3차원 영상의 정확도가 영향을 받을 수 있으며<sup>2,10</sup> 또한 CT촬영시의 자료획득조건 (acquisition factor)에<sup>12,17,19</sup> 의해서도 영상모델의 크기나 모양의 정확성이 영향을 받는다. 실제 임상에서는 CT 촬영시 환자의 동요도, 방사선 피폭량을 최소화하기 위한 절편두께의 한계, 환자의 구강내 보철물에 의한 metal artifact 등이 3차원 영상모델의 측정오차를 더욱 크게 할 수 있는 요인이 된다고 알려져 있으며 또한 3차원 모델링과 RP장비와 관련<sup>15</sup>된 3차원 모델의 정확성 저해요인이 존재하고 있어 이에 대한 연구가 필요하다고 본다.

최근에는 나선식 CT를 이용하는 빈도가 증가하고 있는데 나선식 CT사용시 촬영시간이 상대적으로 감소되어 3차원 영상 자료획득이 더욱 유리하여졌으며<sup>12</sup> 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어 발전은 개인용 컴퓨터에서의 3차원 CT영상 생성을 가능하게 하였고 실제로 상업용 프로그램이 탑재된 개인용 컴퓨터에서, 빈번하게 3차원 영상모델을 생성시킴으로써 진단의 효율성을 제고시키고 있다. 디지털 영상의 기본단위는 화소(pixel)이며 이러한 화소는 일정한 크기를 갖게 되기 때문에 불균등용적평균 (partial volume

averaging)현상이 발생하는 것은 불가피하다. CT촬영시 절편 두께가 증가되면 이러한 불균등용적평균이 커지므로 해상도가 저하됨은 물론 계단 현상이 나타날 수 있다.<sup>1,6,18</sup> 본 연구에서 CT 절편두께를 1, 2, 3, 4 mm로 각각 변화시켜 보았으며 절편두께 1 mm 영상모델의 경우 건조두개골에 대한 3차원 영상모델의 상대오차율은 0.97%, 절편두께 2 mm 영상모델의 경우 1.98%로, 1 mm 절편두께에 비해 2 mm 절편두께의 상대오차율이 크게 측정되었으며 절편두께 3 mm 영상모델과 건조두개골간의 비교시에는 3 mm의 영상모델상의 해부학적 구조물들이 선명하지 않게 표현되거나, 위소공 (pseudoforamina) 등을 생성하므로 선측측이 부분적으로만 이루어졌으며 상대오차율은 3.83%로 1, 2 mm 절편두께에 비해 크게 나타났다. 그리고 4 mm 절편 두께의 영상모델의 경우 해부학적 구조물들간의 거리 측정이 불가능할 정도로 화질이 저하되었으며 이로 인해 적절한 3차원 영상을 생성시키기 위해서는 절편두께가 최소화 될수록 유리하다는 것을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 절편두께의 변화에 따른 영상모델의 정확성에 대한 선학들의 연구<sup>12,17,19</sup>와 유사한 결과를 보였으며 실제 임상에서 3차원 영상모델을 생성시키기 위해서는 절편두께 1 mm 혹은 그보다 작은 절편두께를 부여해야 된다고 생각한다. 아울러 절편두께가 증가하면 환자가 받는 방사선 선량이 증가하므로 목적하고자 하는 촬영부위를 정확히 지정하여 피폭량을 최소화할 필요가 있다고 사료된다.

최근에는 신속조형 (rapid prototyping, RP)기술을 이용하여 3차원영상을 합성수지 등으로 복제한 생체 모델 (biomodel) 등이 각종 중례에 응용됨으로써 병소의 진단 뿐 아니라 술전의 모의 수술, 모델상의 보철물이나 매식체 등의 빠른 제작이 가능해지고 있는 추세이다.<sup>7,13,16</sup> 신속조형 (RP)모델이란 3차원 CAD (computer aided design) 또는 CAM (computer aided manufacture) 소프트웨어에서 디자인된 데이터를 이용하여 실물과 동일한 양상으로 생성된 복제품을 말하며 처음에는 공업용으로 제작되었으나 최근에 의학적으로도 응용되고 있다.<sup>7,15</sup> RP기법은 시간과 비용이 많이 든다는 단점이 있으나 해부학적 구조물의 위치관계를 더욱더 잘 이해할 수 있다는 점, 술전에 술식을 모의 실험할 수 있고 악안면 재건술시보다 정확한 보철물의 제작이 가능하다는 점 등과 교육자료의 제공 등의 다양한 장점들이 있다.<sup>4</sup> 이러한 RP모델의 종류에는 SLA, 3D printing방식 외에 열가소성 물질 (polyamide)을 노즐 안에서 녹이면서 적층시키는 방법인 FDM (Fused Deposition Modeling)법, SLA에서의 광경화성 수지 대신에 기능성 고분자 또는 금속분말을 사용하며 레이저 광선을 주사하여 소결시켜 성형하는 원리인 SLS (Selective Laser Sintering)법, 접착제가 칠해져 있는 종이를 원하는 단면으로 레이저 광선을 이용하여 절단하여 한 층씩 적층하는 형태인 LOM (Laminated Object Manufacturing) 등의 방식이 있으며 각기 사용목적에 알맞게 선택되

고 있다. 이 중 SLA (Stereolithographic Apparatus) 모델은 반투명 모델로서 광경화성 수지에 레이저 광선을 주사하면 주사된 부분이 경화되는 원리를 이용한 장치이며 층(layer) 별로 경화가 일어난다. CT촬영 후 비교적 긴 제작기간(약 14일 정도)을 갖지만 비교적 정확한 방법이라고 알려져 있으나 제작비가 매우 비싸다는 단점이 있다.<sup>19</sup> 반면 3D printing 모델은 적층방식으로서 starch, cellulose 등을 재료로써 이용하는 불투명 모델로서 CT촬영 후 약 7일 정도의 제작기간이 소요되며 SLA 모델에 비해 경제적이기 때문에 임상적으로 빈번하게 이용되고 있다. RP 모델의 정확성에 대한 선학들의 연구들을 살펴보면 Lill 등<sup>13</sup>은 RP 모델의 계측치가 실물보다 약간 증가되어 나타나는 경향이 있다고 보고하였으며, 31개 계측항목을 분석한 결과 실물과 1.6%의 오차, 평균 1.5 mm의 오차를 보인다고 하였고 Kragoskov 등<sup>7</sup>은 RP 모델의 계측치 0.2-2% 오차를 보고한 바 있다. Barker 등<sup>16</sup>은 SL 모델의 경우 평균 0.47 mm의 오차와 97.7-99.1%의 정확도를 보인다고 하였으며 D'Urso 등<sup>21</sup>은 영상모델보다는 RP 모델상에서의 계측이 보다 유리하다고 보고한 바 있다.

본 연구에서 SLA 모델의 건조두개골에 대한 선계측치 상대오차율은 0.79%인데 비해 3D printing 모델의 경우에는 2.52%로 오차율이 훨씬 크게 측정되었으며 평균 크기가 작게 나타나는 경향이 있었는데 이는 3D printing 모델의 경화과정 중 수축율과 관계가 있으리라고 사료된다. 이러한 결과를 고려하여 보면 매우 정밀한 작업이 필요한 치료 술식의 경우 SLA 모델의 제작 비용이 훨씬 고가이기는 하나 3D printing (Z402)보다는 정밀한 SLA 모델 사용이 추천된다. 물론 본 실험에서 실험재료로 사용된 SLA 모델의 제작 비용이 고가이었기 때문에 RP 모델을 각각 1개씩만 제작하게 되어 통계적인 의미의 정확성은 확인할 수 없었으나 선학들의 연구<sup>19</sup>에서도 SLA 모델의 정확성은 강조된 바 있다.

RP 모델의 정확성에 대해 영향을 미치는 요인으로는 그 외에 모델삭제 기구의 크기 및 속도, 열에 의한 RP 재료의 잔여 중합, 지지대 생성 및 이의 제거 과정에서 생기는 오차, 재료를 중합 시키는 레이저의 직경, RP 모형적층 두께, fini-shing 단계에서 생기는 오차 등이 거론되고 있다.<sup>15</sup>

악안면 3차원영상모델의 계측시 각 계측점의 인식오차가 발생할 수 있다. 경우에 따라서는 계측점의 인식이 어렵거나, 곡선상에 존재하는 계측점의 경우에는 계측자간 오차가 클 수 있으며 계측기구의 오차한도 등에 의해 3차원 모델의 오차가 생성될 수 있다.<sup>16</sup> 본 연구에서는 특히 Pogonion 과 우측 Porion 간의 거리를 3차원 영상모델상에서 계측시 해부학적 구조물의 인식이 어려워 계측오차 (3.46-5.11%, Table 2)가 크게 나타났다고 사료된다. 그리고 3차원 모델의 정확도 평가시 관찰자내 및 관찰자간의 재현성이 높아야 바람직하다 할 수 있는데 본 연구에서의 Intra 및 Inter-observer reliability coefficients는 0.996-1으로 매우 높게 나

타났으며 이는 계측점 측정에 관해 관찰자들간에 충분한 상의가 있었기 때문이라고 사료된다.

본 연구의 결과 3차원 모델링 절편 두께가 얇을수록 3차원 영상이 높은 정확도를 보였고 SLA 방식을 사용한 RP 모델의 경우 3D printing 모델에 비해 높은 정확도를 보였으며 추후 다양하고 많은 수의 의학모델을 대상으로 그 정확도에 대해 연구하는 것도 흥미 있으리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Alder ME, Deahl ST, Mattesson SR. Clinical usefulness of two-dimensional reformatted and three-dimensionally rendered computerized tomographic images: Literature Review and a Survey of Surgeon's Opinions. *J Oral Maxillofac Surg* 1995; 53 : 375-86.
2. Vannier MW, Marsh JL, Warren JO. Three-dimensional CT reconstruction images for craniofacial surgical planning and evaluation. *Radiology* 1984; 150 : 179-84.
3. Ray CE Jr, Mafee MF, Friedman M, Tahmoressi CN. Applications of three-dimensional CT imaging in head and neck pathology. *Radiol Clin North Am* 1993; 31 : 181-94.
4. Korves B, Klimek L, Klein HM, Mosges R. Image- and model- based surgical planning in otolaryngology. *J Otolaryngol* 1995; 24 : 265-70.
5. Asaumi J, Kawai N, Honda Y, Shigehara H, Wakasa T, Kishi K. Comparison of three-dimensional computed tomography with rapid prototype models in the management of coronoid hyperplasia. *Dentomaxillofac Radiol* 2001; 30 : 330-5.
6. Matteson SR, Bechtold W, Phillips C, Staab EV. A method for three-dimensional image reformation for quantitative cephalometric analysis. *J Oral Maxillofac Surg* 1989; 47 : 1053-61.
7. Kragoskov J, Sindet-Pedersen S, Gyldensted C, Jensen KL. A comparison of three-dimensional computed tomography scans and stereolithographic models for evaluation of craniofacial anomalies. *J Oral Maxillofac Surg* 1996; 54 : 402-11.
8. Hildebolt CF, Vannier MW, Knapp RH. Validation study of skull three-dimensional computerized tomography measurements. *Am J Phys Anthropol* 1990; 82 : 283-94.
9. 김기덕, 김희진, 한승호, 박창서. 3차원영상 전산화단층촬영을 이용한 한국인 아래턱 뼈의 체질 인류학적 연구 3차원 영상의 정확도 평가. *대한체질인류학회지* 1999; 12 : 13-22.
10. 이병도, 이 완. 전산화단층 촬영상의 임계치가 3차원 의학모델 정확도에 미치는 영향에 대한 연구. *대한구강악안면방사선학회지* 2002; 32 : 27-33.
11. Perry M, Banks P, Richards R, Friedman EP, Shaw P. The use of computer-generated three-dimensional models in orbital reconstruction. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1998; 36 : 275-84.
12. Brink JA. Technical aspects of helical (spiral) CT. *Radiol Clin North Am* 1995; 33 : 825-41.
13. Lill W, Solar P, Ulm C, Watzek G, Blahout R, Matejka M. Reproducibility of three-dimensional CT-assisted model production in the maxillofacial area. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1992; 30 : 233-6
14. Covino SW, Mitnick RJ, Shprintzen RJ, Cisneros GJ. The accuracy of measurements of three-dimensional computed tomography reconstructions *J Oral Maxillofac Surg* 1996; 54 : 982-90.
15. Choi JY, Choi IH, Kim NK, Kim Y, Lee IK, Kim MK et al. Analysis of errors in medical rapid prototyping models *Int J Oral Maxillofac Surg* 2002; 31 : 23-32.
16. Barker TM, Earwaker WJ, Lisle DA. Accuracy of stereolithographic

CT절편두께와 RP방식이 3차원 의학모델 정확도에 미치는 영향에 대한 연구

- models of human anatomy. *Australas Radiol* 1994; 38 : 106-11.
17. Berthelet E, Liu M, Truong P, Czaykowski P, Kalach N, Yu C, et al. CT slice index and thickness: impact on organ contouring in radiation treatment planning for prostate cancer. *J Appl Clin Med Phys*. 2003; 4 : 365-73.
18. Hemmy DC, Tessier PL. CT of dry skulls with craniofacial deformities: accuracy of three-dimensional reconstruction. *Radiology*. 1985; 157 : 113-6.
19. Ney DR, Fishman EK, Magid D, Robertson DD, Kawashima A. Three-dimensional volumetric display of CT data: effect of scan parameters upon image quality. *J Comput Assist Tomogr* 1991; 15 : 875-85.
20. Santler G, Karcher H, Ruda C. Indications and limitations of three-dimensional models in cranio-maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 1998; 26 : 11-6.
21. D'Urso PS, Barker TM, Earwaker WJ, Bruce LJ, Atkinson RL, Lanigan MW, et al. Stereolithographic biomodelling in cranio-maxillofacial surgery: a prospective trial. *J Craniomaxillofac Surg*. 1999; 27 : 30-7.