



절삭 및 적층 가공 방법으로 제작된 작업 모형의 정확도 비교

송준기¹, 박광식², 김민수³, 권태엽⁴, 홍민호^{5*}

¹단국대학교 치의학과 및 제이케이덴스 기업부설연구소

²대구보건대학교 치기공과, ³경북대학교 치의학전문대학원 치의과학과

⁴경북대학교 치의학전문대학원 치과생체재료학교실 및 경북대학교 생체재료연구소

⁵경북대학교 치의학전문대학원 생체재료연구소

Accuracy comparison between subtractive and additive methods in fabricating working model

Joon-Ki Song¹, Kwang-Sig Park², Min-Su Kim³, Tae-Yub Kwon⁴, Min-Ho Hong^{5*}

¹Department of Prosthodontics, Graduate School, Dankook University, and JKdens Corporate research center, Korea

²Department of Dental Technology , Daegu Health College, Daegu, Korea

³Department of Dental Science, Graduate School, Kyungpook National University, Daegu, Korea

⁴Department of Dental Biomaterials, School of Dentistry; and Institute for Biomaterials Research & Development; Kyungpook National University, Daegu, Korea

⁵Institute for Biomaterials Research & Development, Kyungpook National University, Daegu, Korea

The purpose of this study was to compare the accuracy of the working models fabricated by the subtractive and additive processing methods based on the 3-dimensional reconstruction model. A total of 20 models were fabricated with subtractive processing method from polymethyl methacrylate (PMMA) blocks using the stereolithography (STL) file of master gypsum model and another 20 models were fabricated with additive processing method using 3D printer with 0.025 mm of a layer thickness. The CAD-reference-model (CRM) and CAD-test-model (CTM) were superimposed by a software for accuracy analysis (Geomagic Qualify 13), where the STL files were transformed to point cloud data and the surface data (CRM and CTM) were subjected to initial alignment and followed by re-aligned according to best-fit superimposition. The distances between surface data and all points, in this process, were converted to the root mean square (RMS) and averaged. In the experimental results, It was shown that the accuracy is higher in work model fabricated by additive processing method compared to one fabricated by subtractive one ($p<0.05$). In addition, it is considered that the working model fabricated by subtractive processing method is to be clinically applicable by improving the improper reproducibility of the tooth surface and depressed area.

Key words : Subtractive and additive manufacturing, Dental CAD/CAM, Accuracy, Working model

* Correspondence: 홍민호 (ORCID ID: 0000-0002-6456-2200)
(41940) 대구시 중구 달구벌대로 2177 경북대학교 치의학전문대학원
생체재료연구소

Tel: +82-53-660-6882, Fax: +82-53-422-9631
E-mail: mhhong@knu.ac.k

Received: Mar. 14, 2018; Revised: Mar. 21, 2018; Accepted: Mar. 21, 2018

서 론

최근, 치과 의료산업은 디지털 기술의 활용을 바탕으로

* 본 연구는 중소벤처기업부의 기술개발사업(CH476343)과 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2017R1A6A3A11036498)의 지원에 의한 연구임

급변화하고 있다. 치과 고정성 보철물(crown, bridge), 총의 치(denture), 맞춤형 지대주(custom abutment), 그리고 치열 교정(orthodontic) 관련 제품은 전통적인 수작업(manual technique)에서 완전한 디지털 제작 공정에 이르기까지 제조 공정에 대한 큰 변화에 직면해 있다(Luthardt 등, 2001; Terry 2002). 이러한, 디지털 제작 공정의 핵심 기술은 쉽게 접근 가능한 치료 계획 및 설계, 소프트웨어와 생산 장비의 쉬운 작동을 포함하는 고도의 자동화된 치과용 캐드캠(computer-aided design/computer-aided manufacture, CAD/CAM) 시스템이다(Christensen, 2009). 치과 보철물 제작 공정의 새로운 대안으로 소개되고 있는 치과용 CAD/CAM 시스템의 활용은 재료, 인력, 그리고 시간 절약을 보완할 수 있다. 또한, 치과용 CAD/CAM 시스템은 복잡한 자유 형태의 표면을 구현할 수 있기 때문에 치과 의료산업에 더욱 유망한 기술로 선정될 수 있으며(Hong 등, 2017), 이 시스템의 활용은 우수한 품질의 보철물 생산을 가능하게 하고 국민 구강 보건 향상에도 기여할 것으로 보고되고 있다(Miyazaki 등, 2009).

통상적으로, 치과 보철물은 환자로부터 채득된 인상을 시작으로 작업 모형을 제작하게 된다. 이후, 완성된 작업 모형은 보철물 제작 시 보철물 설계에 대한 구강 내 정보를 제공한다. 인상채득 후 작업 모형이 만들어지는 모든 과정에서 재료의 수축·팽창에 의한 오차가 발생한다. 또한, 수작업에 의한 작업 모형 제작 시 여러 번 복제하고 다듬는 과정에서도 오류를 수반하게 된다. 제작된 작업 모형의 정확도는 최종 보철물의 정확도에 영향을 미치는 것은 명백하다. 따라서 작업 모형 제작은 술자의 숙련된 기술을 바탕으로 정확한 작업 모형을 제작해야 한다(Christensen, 2009).

작업 모형 제작을 위해 치과용 CAD/CAM을 활용하는 사례가 증가하고 있다. 최근 도입된 CAD/CAM 시스템은 가공 방법에 따라 절삭 가공(subtractive manufacturing)과 적층 가공(additive manufacturing)으로 분류된다(Rekow, 1993). 두 가지 제조 방법은 석고 모형 및 구강 스캔 데이터를 활용하는 방법에서 같다. 하지만 각각 가공 장비의 제조 방법은 다르다. 절삭 가공은 블록(Block)형태의 치과용 소재를 절삭하여 작업 모형을 제작하는 방법으로 치과용 절삭 머신(milling machine)이 소개되고 있다(Miyazaki 등, 2009;

Ender 등, 2003). 이 공정은 절삭 시 불필요한 소재의 소모가 발생하고 장비 사용에 따른 유지 비용이 많이 들며, 생산과정에서 시간적 손실이 크다는 단점이 지적되고 있다. 대조적으로, 적층가공은 액상 또는 분말 형태의 재료를 여러 개의 층으로 쌓아 올려 최종 결과물을 얻어내는 방법으로 대표적인 장비는 치과용 3D-printer가 있다(Choi 등, 2017). 적층 가공 방법은 최소한의 재료로 원하는 작업 모형을 제작할 수 있으며 1회 공정에서 여러 개의 작업 모형을 생성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한, 치과용 CAD/CAM 시스템의 활용은 임상적 작업 효율성을 증대시킨다(Bornemann 등, 2002; Choi 등, 2017).

현재까지 디지털 인상을 이용하여 제작된 보철물과 기존 방식의 인상 채득법으로 제작된 보철물의 변연부 적합도를 비교하는 연구가 많이 진행되고 있다(Kim 등, 2017). 대부분의 연구에서 전통적인 수작업 방식과 비교하였을 때, 치과용 CAD/CAM을 활용한 변연부의 정확도는 보철물 제작 방법에 따라 변연부 정확도에 차이가 발생한다고 보고된다(Kim 등, 2013). 또한, 다양한 스캐너를 활용한 치과 보철물의 변연부 평가에 대한 연구가 있지만(Renne 등, 2012), 보철물 제작과정에서 가장 중요한 작업 모형의 제조 방법에 따른 정확도 및 활용성에 관한 평가 연구는 미비하다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 재구성 모델을 절삭 및 적층 가공을 통해 작업 모형을 제조하고 두 가지 가공 방법에 따른 모형의 정확도를 비교 평가하고자 하였다. 또한, 본 연구는 절삭 가공과 적층 가공으로 제작된 작업 모형간에 정확성의 차이가 없다는 것이었다.

재료 및 방법

1. 모형 준비

본 연구에서는 결손치가 없으며, 학생 교육용으로 제작된 상악의 구강모형(Tooth Model 500, Hanil Dental, Kores)을 표준모델로 사용하였다(Figure 1). 치아의 배열이나 총생이 없는 이상적인 치열이며, 실제 임상환자들의 모형과 다를 수 있으나 스캐닝 과정에서 발생할 수 있는 오차를 최대한

줄이기 위해 선정하였다. 본 연구의 전체적인 실험 설계를 Figure 2에 나타내었다.

2. 석고모형 제작 및 스캐너를 이용한 디지털 모형 채득

합성수지 모형 상태의 주 모델을 치과용 실리콘 인상재 (Degudent GmbH, Hanau-Wolfgang, Germany)를 이용하여 제조사의 지시대로 음형 몰드를 제작한 후 치과용 경석고 (Fujirock EP; GC Europe N.V, Leuven, Belgium)를 실리콘 인상재에 주입하여 10개의 석고 모형을 제작하였다. 연구에 사용된 최종 표준 석고 모형은 표면 손상 및 균열이 없는 1개의 모형을 선택하였다. 선택된 석고모형은 측정을 시행하기 전에 $22\pm2^{\circ}\text{C}$ 의 온도와 $45\pm5\%$ 습도의 항온·항습이 유지되는 곳에서 24시간 보관하였다. 이후, 표준 석고 모형을 3차원 디지털 모형으로 변환하기 위해 비접촉식 방식의 3D dental scanner(Ceramill Map 400, Amann Girrbach GmbH, Pforzheim, Germany)를 이용하여 디지털화 하였다. 디지털화된 모델은 전용 소프트웨어(3DReshaper Model Creator, Technodigit, Genay, France)를 사용하여 추가적인 조정으로 기존 방식에 비해 높은 정밀도를 가지는 data를 얻을 수 있도록 하였다(Figure 3).

3. 절삭 및 적층 가공을 이용한 모형 제작

표준 석고 모형 STL 파일을 이용하여 CAD/CAM(Arum 5X-200, DoowonID Co, Daejeon, Korea) 절삭 방식으로 총 20개의 모형을 PMMA(polymethyl methacrylate) 블록 (YAMAHAUCHI PMMA DISK, YAMAHAUCHI Dental MFG, JAPAN)을 이용해서 제작하였다. 최대 직경 2.5 mm의 bur를 사용하였으며, 최소 직경 1 mm의 bur를 사용하였다. 절삭 시 서로 같은 조건을 위하여 절삭 bur는 한 블록당 1-set의 bur를 사용하였다. 또한, 적층 가공 방식은 3D 프린터 (RSpro800, Uniontech, Shanghai, China)를 이용하여 적층 두께가 0.025 mm로 20개의 모형을 제작하였다. 적용된 소재는 epoxy 계열의 액상 래진(DSM Somos, Somos Next, USA)을 사용하였다. 모형 제작 이후 모형 주변에 형성된 support를 제거하고 잉여 수지를 알코올로 세척하고 모델 당 20분간 UV를 조사하여 후처리를 수행하였다.

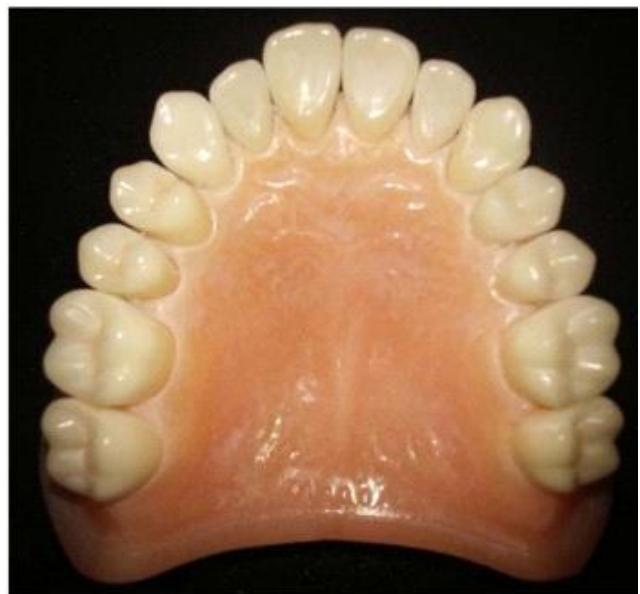


Figure 1. Master model.

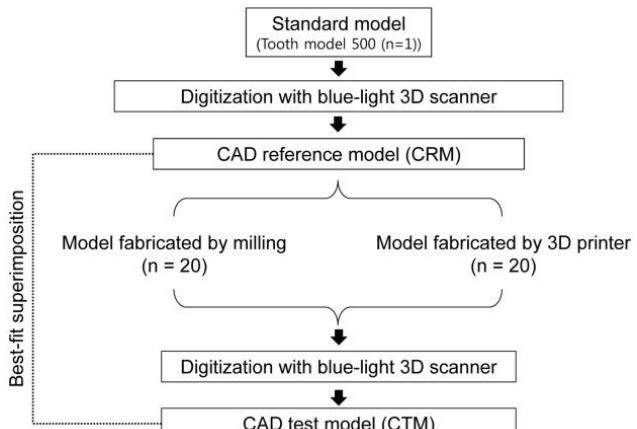


Figure 2. Master



Figure 3. Stone model(left) and digital model(right).

4. 전용 소프트웨어를 이용한 정확도 측정

정량 분석에 앞서 시험 수행자는 소프트웨어 사용법에 대해 교육을 이수 받았다. 정확한 중첩과 동일한 경계를 보장하기 위해 데이터는 분석 범위 이외의 부분(치경선 아래 1-3 mm)을 삭제하였다. 탁상용 스캐너를 이용한 모형 스캔은 1명의 숙련된 치과기공사에 의해 그룹당 20개, 총 40개의 재구성된 모형을 디지털화하였다. 이후, 정확도 분석 소프트웨어(Geomagic Qualify 13)를 사용하여 CAD-reference-model (CRM)과 CAD-test-model (CTM)을 중첩하였다. 중첩방법은 STL 파일을 point cloud date로 변환하여 surface date인 CRM과 CTM을 initial alignment 시킨 후 best-fit superimposition으로 재배열 하였다. 이 과정에서 표면 데이터와 모든 point 간의 거리를 RMS (root mean square) 값으로 환산하여 그 평균을 계산하였다. RMS는 일반적으로 최적의 중첩 후 2개의 N 차원 벡터 세트의 유사도를 측정하는 기준으로써 사용된다. RMS 값의 공식은 다음과 같다(Jeong 등, 2016).

$$RMS = \left| RMS = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2} \right|^2$$

위 식에서는 CRM의 point를 의미하며, $x_{2,i}$ 는 Test STL의 point를 의미한다. 또한, N은 측정 된 모든 point 수에 해당된다.

5. 통계 분석

모형 제조 방법에 따른 스캔 데이터 CAD-test-model (CTM)과 CAD-reference-model(CRM) 간의 RMS 평균값의 차이에 대해서 통계 분석을 수행하였다. 통계 분석 전, 기술 통계 및 Shapiro-Wilk 테스트를 사용하여 데이터의 정규 분포를 평가하였다. 모형 제조 방법에 따른 두 집단 간의 평균 차이를 알아보기 위해 Student's t-test를 실시하였다. 각 데이터의 평균, 표준편차를 제시하였고, 모든 통계 처리와 분석은 IBM SPSS Statistics 20 통계처리 프로그램 (SPSS Inc, USA)을 사용하여 시행하였으며, 유의 수준은 0.05로 설정하였다.

결과

Figure 4는 CRM 모델과 두 가지 방법으로 제조된 작업 모형의 재구성 모델 간의 best-fit superimposition에 관한 대표 이미지를 보여준다. 절삭 가공된 작업 모형은 치간공극 (embrasure) 및 교합면의 함몰 부위에서 상당히 높은 가공 오차가 관찰되었다. 반면에, 적층 가공된 작업 모형은 절삭 가공된 작업 모형 보다 우수한 정확도를 나타내는 색 분포를 보여준다. 하지만, 구치부 교합면 부위에 재료의 수축에 의한 미미한 오류가 관찰되었다.

RMS 결과값은 Table 1과 Figure 5에 나타내었다. CRM 모델과 두 가지 방법으로 제작된 작업 모형 사이의 평균값, 표준 편차, 그리고 평균에 대한 95% 신뢰 구간을 Table 1에 나타내었다. 적층 가공된 작업모형의 경우 $80.94 \pm 9.83 \mu\text{m}$ 의 RMS 값을 나타냈다. 반면에, 절삭 가공된 작업 모형의 RMS 값은 $126.28 \pm 18.69 \mu\text{m}$ 로 적층 가공된 작업 모형의 RMS 값 보다 높게 나타났다. 절삭 가공된 작업 모형과 적층 가공된 작업 모형 그룹 간의 RMS 결과값에 통계학적 유의한 차이가 나타났다($p<0.05$).

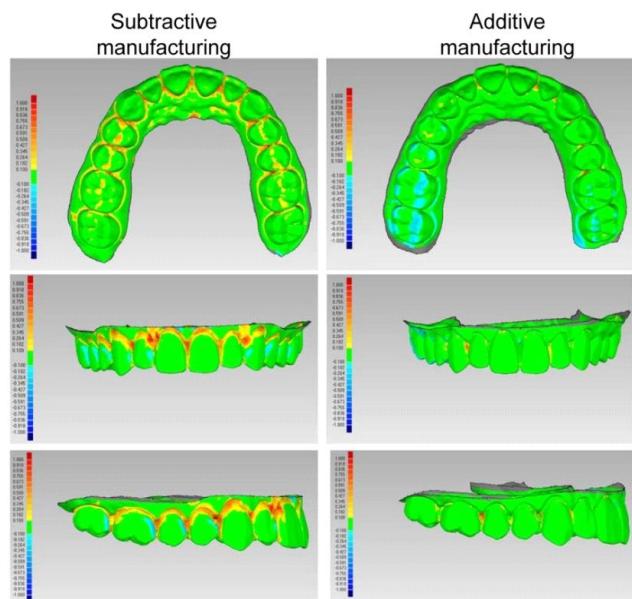


Figure 4. Superposition of CRM and CTM of dental models fabricated by subtractive and additive manufacturing.

Table 1. Descriptive statistics of the mean three-dimensional deviations recorded between CRM model and CTM models(subtractive and additive manufacturing methods, total 2 group, n=20 for each group)

Method of manufacturing	Mean [μm]	Statistic				Std. Error		
		95% Confidence Interval for Mean		Std. Deviation	Min.	Max.		
		Upper Bound	Lower Bound					
Subtractive	126.23	134.97	117.48	18.69	91.71	163.97	72.26	4.179
Additive	80.94	85.54	76.34	9.83	61.52	97.92	36.40	2.198

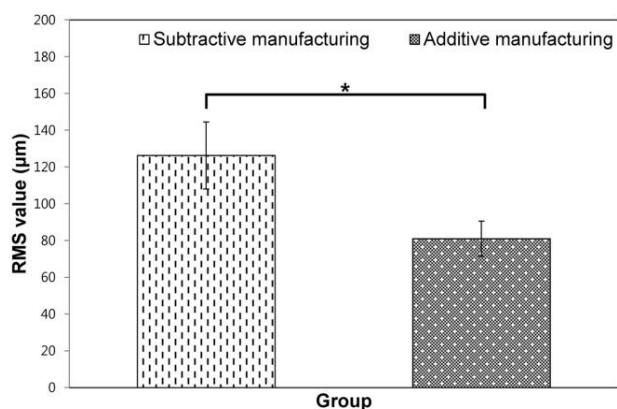


Figure 5. The RMS value of each group according to the best-fit superimposition(* $p<0.05$, n=20 for each group, student t-test).

고찰

본 연구는 치과 보철물 제작을 위한 작업 모형 제작이 전통적인 방식에서 치과용 캐드캠을 활용한 디지털 제작 방식으로 전환되고 있음에 따라 두 가지 작업 모형 제작 방법이 모형의 정확도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구에서 CRM 데이터와 두 가지 제조 공정으로 획득된 CTM 데이터의 중첩 결과는 서로 다른 정확도가 얻어졌으며, 절삭 가공과 절삭 가공 간에 통계적으로 유의미한 차이가 있기 때문에 귀무가설은 거부되었다.

구강 내 스캔 또는 석고 모형 스캐닝 후 물리적인 복제본을 얻으려면 데이터 수집, 데이터 처리, 제조, 그리고 후처리 작업과 같은 몇 가지 단계를 완료해야 한다. 이러한 각 단계에서는 작업자의 오류, 사용되는 장비의 오류, 재료의 오류, 그리고 주변 환경에 따른 오류가 발생할 수 있다 (Voitik, 2002). 4가지 범주의 문제를 통해 재구성된 모델의 정확도에서 어느 정도 편자가 유도될 수 있다. 일반적으로 전문적인 솔루션을 선택하게 되면 재료와 기계로 인한 오류의 가능성을 줄일 수 있지만, 최종 제품의 맞춤형 수준은 여전히 제한적일 수 있다(Voitik, 2002).

환자 보철 수복을 위한 작업 모형은 입체적 구조, 수많은 undercut 존재, 그리고 다양한 곡면 등으로 이루어져 있기 때문에 3차원 재구성 모델을 기초하여 제작되는 작업 모형은 매우 우수한 정밀도가 요구된다(Santoro 등, 2003). 본 연구에서는 비접촉식 스캔 방법을 이용하여 CRM 데이터와 두 가지 제조 방법으로 제작된 모형에서 획득된 CTM 데이터를 중첩하여 모형의 정확도를 평가하였다. 본 연구의 데이터 중첩 과정에서 정밀한 정확도 평가를 위해 Point cloud를 데이터의 표면에 투영하고 최대 샘플링 비율은 100%로 지정 후, 최대 반복지수는 50번으로 설정하였다. 프로그램상에 나타난 중첩 정도를 나타낸 색으로 정밀도를 평가하였으며, 이 과정을 color difference map으로 나타내었다.

절삭 가공으로 제작된 모형의 CTM 데이터와 CRM 데이터의 중첩에서 치간 공극 및 교합면 핵몰 부위에서 붉은색 영역의 범주가 적층 가공된 모형보다 확연히 넓게 나타났다.

이러한 원인은 절삭 가공 시 사용되는 공구의 미세 부위 재현성의 한계라고 생각된다. Hong 등(2017)은 CAD에서 설계한 및출형 지대주의 절삭 가공에서 임의로 지대주에 부여한 곡률 반경 값이 최종 생산품의 정확도에 영향을 미치는 것을 보고하였다. 따라서 환자 구강 내의 곡면은 임의적으로 조정이 불가능하기 때문에 보다 정밀한 절삭가공을 위해서는 절삭 공구의 크기 및 형태 고안이 필요한 것으로 판단된다(Saleh 등, 2015; Hong 등, 2017). 또한, 적층 가공에서 고려할 수 있는 적층 두께, 시간, 그리고 후처리 공정은 최종 생산품의 정확도에 영향을 미친다고 보고되고 있다(Saleh 등, 2015). 본 연구 결과에서 적층 가공 모형의 우수한 정확도 결과는 모형 제작 전에 최적의 공정변수 설정과 후처리 공정의 단계를 완벽히 수행함으로써 얻어진 결과로 사료된다. 적층 가공에서 형성되는 특징 중 하나인 Z 축에서 “계단 형상”的 불규칙한 표면의 해결하기 위해 레이어 높이를 0.1 mm 미만으로 설정하여 표면 품질을 향상할 수 있었다. 하지만 구치부 교합면에서 미미한 재료의 수축에 의한 오차가 나타났다. 이러한 문제점은 앞으로, 적층 시간을 늘리거나 1회 적층 시 모델의 수를 줄이는 방향에 대한 접근성이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구의 한계점은 사용된 두 가지 모형 제작 가공 방식을 대표하기에는 한계가 있으며, CAD/CAM 공정에서 발생할 수 있는 변수 요인을 완벽하게 제어하지 못했다는 점이다. 절삭 가공과 적층 가공에 대한 다양한 공정 변수는 생산품의 품질을 결정하는 결정적 요인이 된다. 따라서, 향후 연구에서는 다양한 CAD/CAM 장비 활용을 바탕으로 작업 모형의 오차를 줄일 수 있는 가이드라인 구축 연구가 필요할 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 3차원 재구성 모델을 절삭 및 적층 가공을 통해 작업 모형을 제조하고 두 가지 가공 방법에 따른 모형의 정확도를 비교 평가하고자 하였다. 그 결과, 적층 가공 방법으로 제작된 작업 모형은 절삭 가공으로 제작된 모형 보다 우수한 정밀도를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 절삭 가공

에 의한 작업 모형 제작은 치아 곡면과 함몰 부위의 부적절한 재현성을 개선해야 임상적으로 적용 가능할 것으로 고려된다.

참고문헌

- Bornemann G, Lemelson S, Luthardt R (2002). Innovative method for the analysis of the internal 3D fitting accuracy of Cerec-3 crowns. *Int J Comput Dent* 5:177–82.
- Choi JW, Choi BC, Kim SC (2017). Marginal fit of the prosthesis fabricated by dental oral scanner and model scanner. *Kor J Dent Mater* 44: 97–86.
- Christensen GJ (2009). Impressions are changing: deciding on conventional, digital or digital plus in-office milling. *J Am Dent Assoc* 140:1301–4.
- Ender A, Mehl A (2003). Accuracy of complete-arch dental impressions a new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent* 109:121–128.
- Hong MH, Choi SM, Kwon TY (2017). Evaluation on machining accuracy according to convergence angle and radius of curvature value used for fabricating custom abutments. *Kor J Dent Mater* 44:329–336.
- Jeong ID, Lee JJ, Jeon JH, Kim JH, Kim HY, Kim WC (2016). Accuracy of complete-arch model using an intraoral video scanner: an in vitro study. *J Prosthet Dent* 115:755–759.
- Kim EH, Lee DH, Kwon SM, Kwon TY (2017). A microcomputed tomography evaluation of the marginal fit of cobalt-chromium alloy copings fabricated by new manufacturing techniques and alloy systems. *J Prosthet Dent* 117: 393–399.
- Kim KB, Kim WC, Kim HY, Kim JH (2013). An evaluation of marginal fit of three-unit fixed dental prostheses fabricated by direct metal laser sintering system. *Dent Mater* 29: e91–e96.

- Luthardt RG, Sandkuhl O, Herold V, Walter MH (2001). Accuracy of mechanical digitizing with a CAD/CAM system for fixed restorations. *Int J Prosthodont* 14:146–151.
- Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y (2009). A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J* 28:44–56.
- Renne W, McGill ST, Forshee KV, DeFee MR, Mennito AS (2012). Predicting marginal fit of CAD/CAM crowns based on the presence or absence of common preparation errors. *J Prosthet Dent* 108:310–315.
- Rekow ED (1993). High-technology innovations and limitations for restorative dentistry. *Dent Clin North Am* 37:513–524.
- Saleh WK, Ariffin E, Sherriff M, Bister D (2015). Accuracy and reproducibility of linear measurements of resin, plaster, digital and printed study-models. *J Orthod* 42:301–306.
- Santoro M, Galkin S, Teredesai M, Nicolay OF, Cangialosi TJ (2003). Comparison of measurements made on digital and plaster models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 124:101–5.
- Terry DA (2002). CAD/CAM Systems, Materials, and Clinical Guidelines for All' Ceramic Crowns and Fixed Partial Dentures. *Compendium* 23:637–652.
- Voitik AJ (2002). CT data and its CAD and CAM utility in implant planning: part I. *J Oral Implantol* 28:302–303.

절삭 및 적층 가공 방법으로 제작된 작업 모형의 정확도 비교

송준기¹, 박광식², 김민수³, 권태엽⁴, 흥민호^{5*}

¹ 단국대학교 치의학과 및 제이케이덴스 기업부설연구소

² 대구보건대학교 치기공과

³ 경북대학교 치의학전문대학원 치의과학과

⁴ 경북대학교 치의학전문대학원 치과생체재료학교실 및 경북대학교 생체재료연구소

⁵ 경북대학교 치의학전문대학원 생체재료연구소

본 연구에서는 3차원 재구성 디지털 모델을 기반으로 절삭 및 적층 가공을 통해 작업 모형을 제조하고 두 가지 가공 방법에 따른 모형의 정확도를 비교 평가하고자 하였다. 표준 석고 모형 STL (Stereolithography) 파일을 이용하여 CAD/CAM 절삭 방식으로 총 20개의 모형을 PMMA (Polymethyl Methacrylate) 블록을 이용해서 제작하였다. 그리고 적층 가공은 3D 프린터를 이용하여 적층 두께가 0.025 mm로 20개의 모형을 제작하였다. 정확도 분석 소프트웨어 (Geomagic Qualify 13)를 사용하여 CAD-reference-model (CRM)과 CAD-test-model (CTM)을 중첩하였다. 중첩방법은 STL 파일을 point cloud data로 변환하여 surface date인 CRM과 CTM을 initial alignment 시킨 후 best-fit superimposition으로 재배열 하였다. 이 과정에서 표면 데이터와 모든 point 간의 거리를 RMS (Root Mean Square) 값으로 환산하여 그 평균을 계산하였다. 적층 가공 방법으로 제작된 작업 모형은 절삭 가공으로 제작된 모형 보다 우수한 정밀도를 가지는 것으로 나타났다($p<0.05$). 또한, 절삭 가공에 의한 작업 모형 제작은 치아 곡면과 함몰 부위의 부족한 재현성을 개선해야 임상적으로 적용 가능할 것으로 고려된다.

색인 단어 : 절삭 및 적층 제조, 치과용 CAD/CAM, 정확도, 작업 모형
