

A review on the accuracy assessment methods of 3-dimensional digital dental models

Ji-Su Park¹, Young-Jun Lim^{1*}, Jungwon Lee², Bongju Kim³

¹Department of Prosthodontics and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

²Department of Periodontics, One-Stop Specialty Center, Seoul National University, Dental Hospital, Seoul, Republic of Korea

³Clinical Translational Research Center for Dental Science, Seoul National University Dental Hospital, Seoul, Republic of Korea

The aim of this article was to review various methods used to evaluate the accuracy of digital dental models. When evaluating the accuracy of digital models, the errors can be reduced by educating examiners and using artificial landmarks. The accuracy evaluation methods of digital dental models are divided into linear measurement, 2-dimensional cross-sectional analysis, and 3-dimensional best fit measurement. As the technology of scanners develops, many studies have been conducted to compare the accuracy of digital impression and conventional impression. According to improvement of scan technologies and development of 3-dimensional model analysis software, the ability to evaluate the accuracy of digital models is becoming more efficient. In this article, we describe the methods for evaluating the accuracy of a digital model and investigate effective accuracy analysis methods for each situation. (*J Dent Rehabil Appl Sci* 2019;35(2):55-63)

Key words: intraoral scanner; digital accuracy; linear measurement; cross-sectional analysis; best-fit algorithm

서론

디지털 기술의 발전으로 대두한 Computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) 기술은 치과영역에서 보철물 제작시스템에 큰 영향을 주고 있다. 이러한 디지털 기술의 도입은 전통적인 방법이 가지고 있는 수작업으로 인한 개인의 기술 차이로 보철물의 질적 차이가 발생하는 등의 단점들을 보완하고, 석고 모형의 제작을 위한 비용, 인력 및 시간 절약의 효율성 뿐만 아니라 보다 계획적이고 정확하게 보철물을 제작할 수 있는 대안으로 부각되고 있다.¹

디지털 CAD/CAM 시스템을 이용한 치과보철물 제작은 3차원 스캐너가 치과계에 도입되면서 시작되었으며, 모델스캐너(model scanner)를 사용하여 구강 외에서

석고모형의 스캔을 통해 디지털인상을 획득하는 간접법과 구강스캐너(intraoral scanner)를 사용하여 구강 내에서 직접 스캐닝하여 디지털 인상을 획득하는 직접법이 보편적으로 사용되고 있다. 임상 적용 범위 또한 단일치아 수복 뿐만 아니라, 임플란트 보철 및 의치 제작까지 가능하게 되었다.^{2,3} CAD/CAM 기술을 임상에 적용함에 있어서 우리는 다음과 같은 의문점과 마주하게 된다. 디지털 인상 기술은 전통적 인상법에 비해 얼마나 정확한가? 이 디지털 과정(digital work-flow)을 통해 제작되는 수복물의 적합도는 얼마나 정확한가? 이러한 의문점을 해결하기 위해 많은 연구 들에서 디지털 모형의 정확도(accuracy)를 비교하기 위해 노력하고 있다.⁴⁻⁶

디지털 모형의 비교를 위해서는 먼저 STL (Standard Tessellation Language)에 관한 이해가 필요하다. 3D프

*Correspondence to: Young-Jun Lim

Professor, Department of Prosthodontics and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, 101, Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul, 03080, Republic of Korea

Tel: +82-2-2072-2940, Fax: +82-2-2072-3860, E-mail: limdds@snu.ac.kr

Received: April 24, 2019/Last Revision: May 3, 2019/Accepted: May 17, 2019

린팅에 사용되는 STL 파일은 3D SYSTEMS사가 1988년 지정한 인터페이스 표준파일 포맷이다. 여기에서 Tessellation이란 도형을 이용해 평면 또는 공간을 완전히 채우는 것을 말한다. 즉, STL 파일이란 입체물을 전송 가능한 3차원 데이터로 만들기 위해 삼각형으로 표면을 채우고, 삼각형을 이루는 각각의 점에 대한 위치정보가 기록된 격자 자료(mesh data)이다. 격자(grid)의 크기를 조절함으로써 보다 실체에 가깝도록 해상도 조절이 가능하지만, 미세할 수록 데이터의 양은 급격히 증가한다. 서로 다른 제조사의 구강스캐너로부터 획득한 스캔 데이터를 비교하기 위해서 각각의 데이터를 같은 확장자를 가지는 STL 파일로의 변환하는 것이 필수적이라고 할 수 있다.

2007년 Menditto 등⁷은 정확도(accuracy), 진도(true-ness), 정밀도(precision)의 명확한 정의에 대해 정리하였다. 측정값을 평가하기 위해 기본적으로 사용되는 정확도, 진도, 정밀도의 의미는 가끔 혼동되곤 한다. 정밀도는 규정되어 있는 조건에서 얻어진 독립적인 실험의 결과들 간의 근접한 정도이며, 진도는 용인된 기준값과 다수의 실험 결과들에서 얻어진 평균값 간의 근접한 정도이다. 정확도는 측정량의 참값과 측정값 간의 근접한 정도로 정의된다. Menditto 등⁷이 비유하기로, “사과”와 “오렌지”를 포함하는 “과일”이라는 일반적인 용어와 같이 정확도가 진도와 정밀도를 포함하는 용어라고 설명하고 있다.

또한, 측정 시 장비 결함 혹은 잘못된 측정방법에서 기

인하는 계통 오차(systematic error)와 예측할 수 없는 랜덤한 현상에 대한 우연 오차(random error)는 각각 진도와 정밀도에 영향을 준다. 이러한 오차를 양적으로 표현한 것이 각각 측정값에 대한 편향(bias)과 표준편차(standard deviation)이며 이들을 포함하는 것이 측정의 불확실성(uncertainty)이다(Fig. 1).

전통적 인상법으로 얻어진 모형의 정확도를 비교하기 위해서는 대개 지정된 점들 사이의 거리를 측정해왔다. 그러나 디지털 모형의 정확성 평가를 위해서는 더욱 정교한 분석법이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 디지털 모형의 정확도에 영향을 주는 요소들과 정확도를 평가하는 방법들에 대해 소개하고, 효과적인 정확도 분석법에 대해 알아보하고자 한다.

문헌고찰

디지털 측정법의 정확도

2017년 Mai 등⁸은 보철물의 부적합도를 측정하는 방법 중 디지털 측정법이 시험자 간의 편차를 줄일 수 있는 가장 유용한 방법이라고 하였다. 또한 시험자 교육을 통해 측정 점들 간의 오차를 최소화할 수 있다고 하였다. 2017년 Kim 등⁹은 구내스캐너로 긴 무치악부를 스캔할 때, 인공적 지표(artificial landmark)를 사용함으로써 개선된 진도와 정밀도를 얻을 수 있다고 하였다.

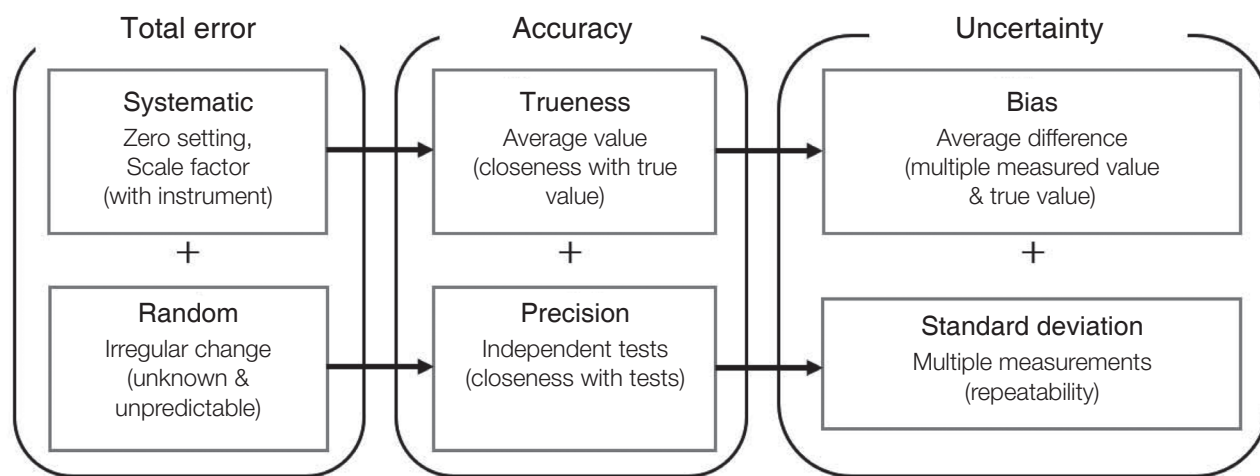


Fig. 1. Accuracy, which includes Trueness and Precision, is represented by the bias and standard deviation of the Total error.

유치악 디지털 모형의 정확도를 평가하는 방법

선형 측정법(Linear measurement)은 유치악 모형에서 두 개의 참고점(reference point)을 정하여 그 사이 거리를 측정하는 방법으로 실제 모형 비교 시에도 흔히 사용되었던 방법이다. 계측용 소프트웨어를 이용하면 디지털 모형에서 원하는 두 점을 설정하여 그 사이의 거리를 쉽게 측정할 수 있다. 참고점은 경우에 따라 다양하게 정할 수 있지만 측정 오차를 줄이기 위해서는 그 위치가 명확하고 재현성이 있어야 한다. 2016년 Jiang 등¹⁰은 Rapid-formTM 2006 (Inus, Seoul, Korea) 소프트웨어를 이용하여 3가지 선형 측정을 시행하였다. 전후방 거리(상악 중절치 사이의 정중선에서 상악 우측 제1대구치의 근심협측 교두정까지의 거리), 좌우 폭(상악 양측 제1대구치의 근심협측 교두정 사이의 거리), 수직 고경(상악 우측 중절치의 정중선에서 절단면부터 치은면까지의 거리)을 측정하여 비교하였다(Fig. 2). 2015년 Joo 등¹¹은 Geomagic

ControlTM (3D systems, Cary, USA) 소프트웨어를 이용하여 6가지 선형 측정을 시행하였다. 상악과 하악에서 견치의 절단, 제1대구치의 근심협측 교두정과 제2대구치 원심협측 교두정과 좌우측 중절치의 사이에 참고점을 설정하고 거리를 측정하였다(Fig. 3). 디지털 모형에서 선형 측정법은 실제 모형에 수동으로 계측하는 방법보다 정확한 값을 얻을 수 있고, 쉽고 간편하다. 반면, 참고점을 설정하는 데에 있어서 계측자 간에 오차가 있을 가능성이 있고, 소프트웨어에서 계측한 값과 실측한 값 간에는 적은 양의 오차가 존재한다. 이를 보완하고 일관적인 데이터를 측정하기 위해 한 명의 실험자가 참고점을 설정하고 측정하는 것이 추천되면 재설정(re-marked)과 재측정(re-measured) 단계를 거치는 intra-examiner test가 동반되어야 한다. 또한, 정확성에 있어서 소프트웨어의 종류보다는 이를 운용하는 사용자의 숙련도와 지식이 정확성을 결정하는 데 더욱 크게 기여한다.¹²

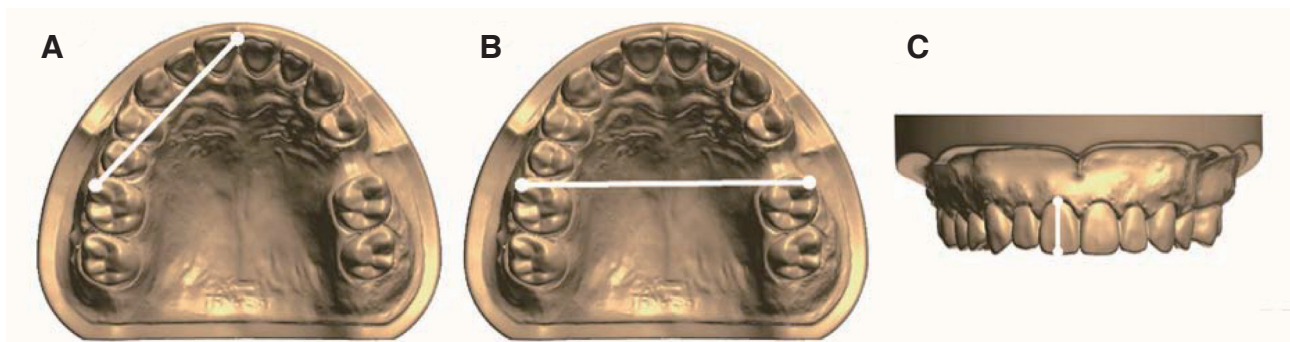


Fig. 2. Linear measurements made on each digital model. (A) Incisor to molar, (B) Intermolar width, (C) Incisor height.

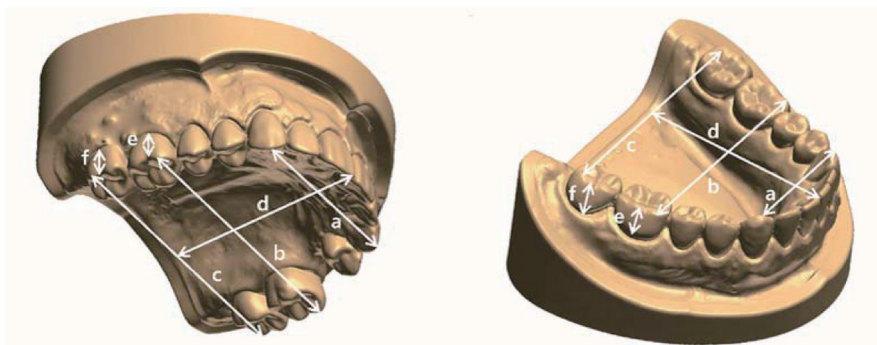


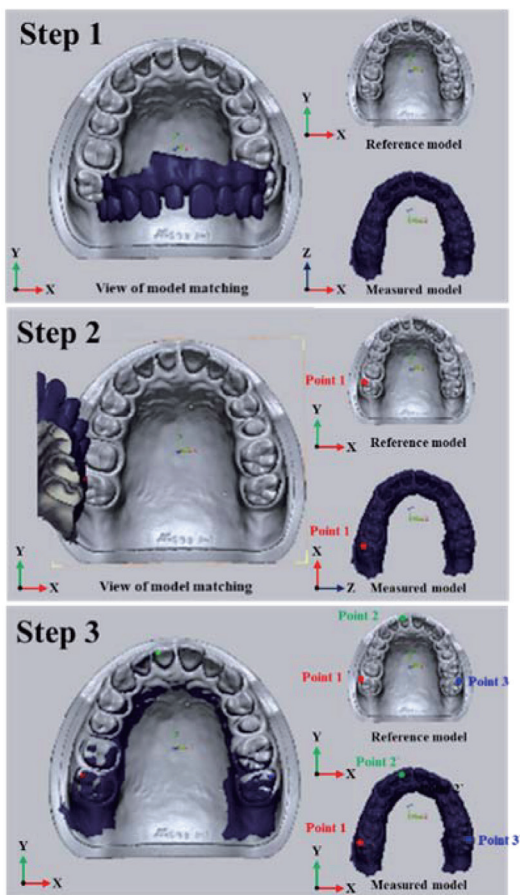
Fig. 3. Linear measurements at reference point of 3D model. a: inter-canine distance; b: inter-first molar distance; c: inter-second molar distance; d: arch length; e: first molar height; f: second molar height.

현재 대부분의 구강스캐너의 정밀도 분석에 사용되는 3차원 최적합 분석법(3-Dimensional best fit analysis)은 기준 모델과 실험 모델들 간의 x, y, z축에서의 거리 차를 계산하여 그 차이가 최소가 되도록 중첩하며 그 차이를 색상 지도로 표현해 부위별 오차를 한 눈에 가늠할 수 있도록 한다.¹³⁻¹⁵

Fig. 4와 같이 모델간 오차를 측정하기 위하여 계측용 소프트웨어를 이용하여 기준 모델과 실험 모델을 절대 좌표계 상으로 불러온 뒤(Step 1), 같은 좌표계로 정렬하기 위하여 기준 모델의 임의의 지점(point1)을 지정한 후 실험 모델의 비슷한 부위의 표면점(surface point, point1)을 지정한다(Step 2). 동일한 방법으로 point2, 3을 지정하게 되면 최적합 알고리즘을 이용하여 거리차가 최소가 되도록 자동 중첩을 하게 되며, 그 결과를 계산한다. 이 때, 실험 모델의 표면이 참조 모델의 표면 안으로 들어갔을 때 측정된 거리는 음의 오차값이며, 바깥으로 나왔을 때 측정된 거리는 양의 오차값으로 나타난다. 이 때, 디지털 모형의 STL 해상도에 따라서 하나의 중첩당

5000 - 25000개의 거리를 계산한다.¹⁶ 각 모델 간의 중첩 결과로 최소오차값(minimum), 최대오차값(maximum), 전체오차의 평균(average), 전체오차의 제곱평균제곱근(root mean square), 전체 오차의 표준편차(standard deviation), 전체오차의 분산(variance), 양의 오차의 평균, 음의 오차의 평균의 값이 도출되며, 허용 오차범위의 설정으로 공차범위가 자동 계산이 되어 분포도 그래프로 표시되어진다.

이 분석법에서는 스캔시 획득한 전체데이터에서 불필요한 부분을 제거(trimming)하고, 분석에 필요한 범위만으로 국한하여 데이터 용량을 가능한 한 축소하여 중첩(superimposition)하여야만 정확한 분석을 할 수 있다. 이러한 3차원 최적합 분석법은 디지털 모형을 비교하기 위한 방법 중 가장 흔하게 사용되고, 정확한 방법으로 알려져 있으나 비교하고자 하는 디지털 모형들의 표면 해상도가 다른 경우, 잘못된 변위량이 도출될 수 있으므로 주의가 필요하다.¹⁶



“Best fit” algorithm

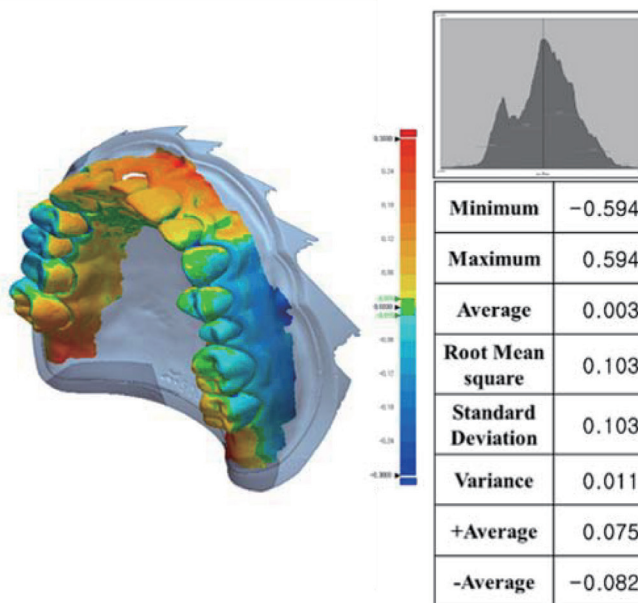


Fig. 4. Deviations after superimposition of scan datasets displayed in a color-coded using Best-Fit Alignment function in Geomagic Control X™ (3D systems, RockHill, USA).

2차원 단면 분석법 (2-Dimensional Cross-sectional analysis)은 계측용 소프트웨어를 이용하여 비교하고자 하는 두 가지 디지털 모형을 3차원으로 중첩 시킨 후, 단면에 따라 2차원적 변위 차이를 분석하는 방법이다. 2019년 Maeng 등¹⁷은 단일치아 지대주에서 획득한 디지털 모형을 협설측 절단면(buccal-lingual section) 근원심 절단면(mesial-distal section)과 횡단 상부면(transverse high section), 횡단 중앙면(transverse middle section) 횡단 하부면(transverse low section)의 5개 디지털 평면으로 절단하여 분석하였다(Fig. 5). 이 방법은 3차원적 비교 시 정밀도의 측정을 필요로 하는 지대치나 치아의 스캔 시, 주변조직이 포함되기 때문에 불필요한 부위의 데이터가 비교대상에 포함 되어, 수집되는 데이터 양이 상대적으로 많아지기 때문에, 중첩 과정에서 오차가 보정되는 경향이 있어 정확한 정확도의 분석이 가능하지 않다는 점에서 고안되었다. 따라서 단면 분석법은 단일 지대주 자체의 비교에 있어서 유리할 수 있다. 그러나, 변형량이 상대적으로 적게 나타나는 단면을 고를 경우 3차원적 분석법에 비해 오차가 생길 가능성이 있다.

무치악 디지털 모형의 정확도를 평가하는 방법

무치악 부위에는 명확한 참고점이 없기 때문에 무치악 디지털 모형은 선형분석법이나 단면 분석법으로 비교하기 어렵다. 따라서 최적합 알고리즘을 기본으로, 임의의 참고점을 정하여 중첩을 용의하게하는 방법으로 비교하고 있다. 2013년 Patzelt 등¹⁸은 완전무치악 디지털 모형을 3D 분석 소프트웨어의 최적합 알고리즘(best fit algorithm)을 이용하여 데이터를 중첩하였고 소프트웨어 내에서 자동으로 x, y, z축 좌표에 따른 3차원적 비교가 실행되었다(Fig. 6). 2016년 Goodacre 등¹⁹은 3개의 금속구(metal ball)를 포함하는 상악 완전무치악 모형을 제작하였다. 이러한 금속구는 모형을 스캔한 뒤 의치상과 중첩시키는 위치를 확실하게 하기 위한 인공적인 지표로 사용되었다. 이 연구 역시 3D 분석 소프트웨어를 이용하여 각 의치의 STL 파일을 주모형의 STL 파일과 중첩하였다. 각 의치마다 60개의 점을 기준 삼아 60개의 거리 차이를 측정하였다. 2018년 Norvell 등²⁰은 비침습적이고 해부학적인 지표를 기준으로 의치상의 디지털 데이터를 비교하였다. 의치의 연마면에는 모든 구치의 근심설측 교두정에

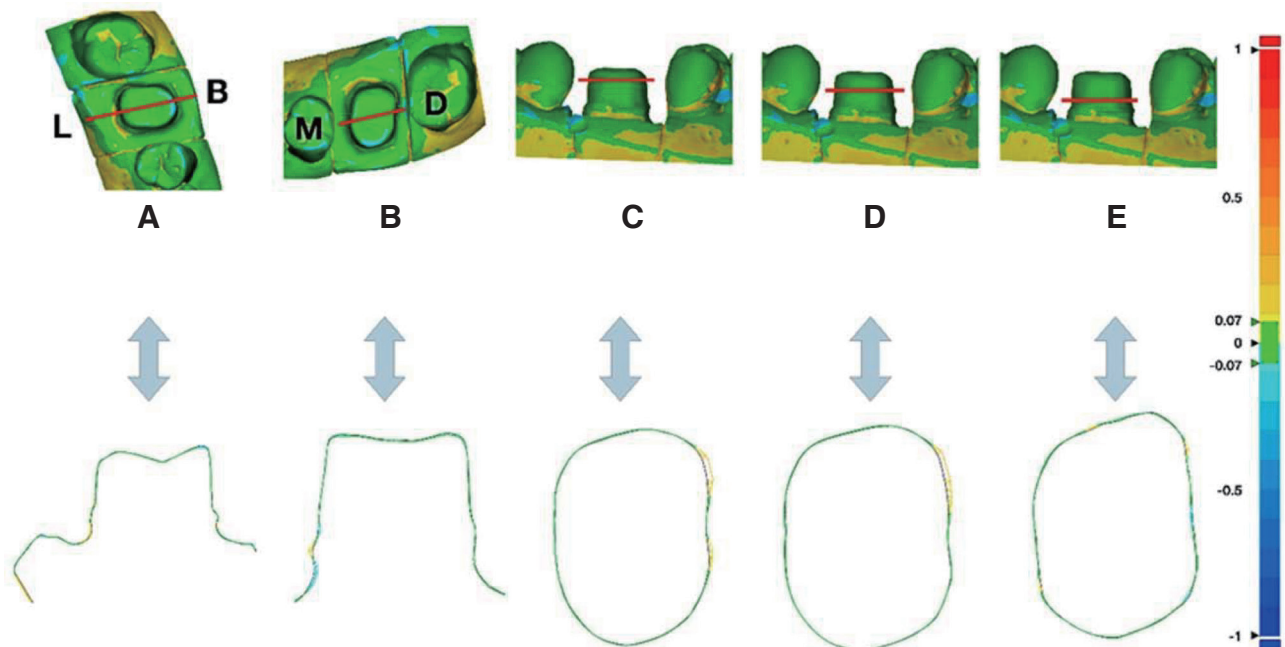


Fig. 5. 2-dimensional cross-sectional analysis of abutment tooth. (A) Buccal-Lingual section, (B) Mesial-Distal section, (C) Transverse High section, (D) Transverse Middle section, (E) Transverse Low section. B: buccal; L: lingual; M: mesial; D: distal.¹⁷

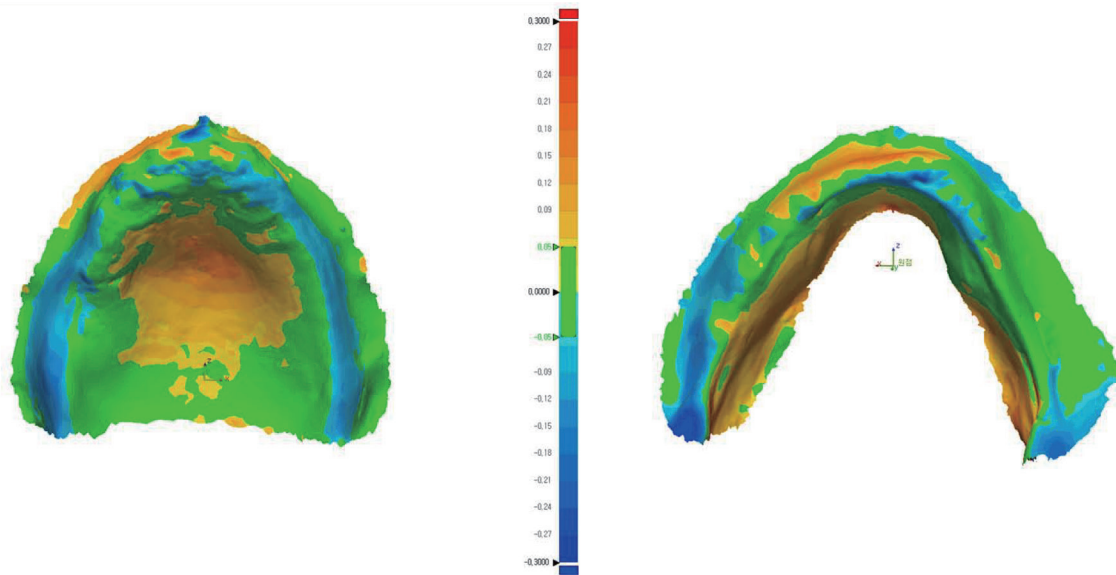


Fig. 6. Deviations after superimposition of edentulous scan datasets displayed in a color-coded difference image.

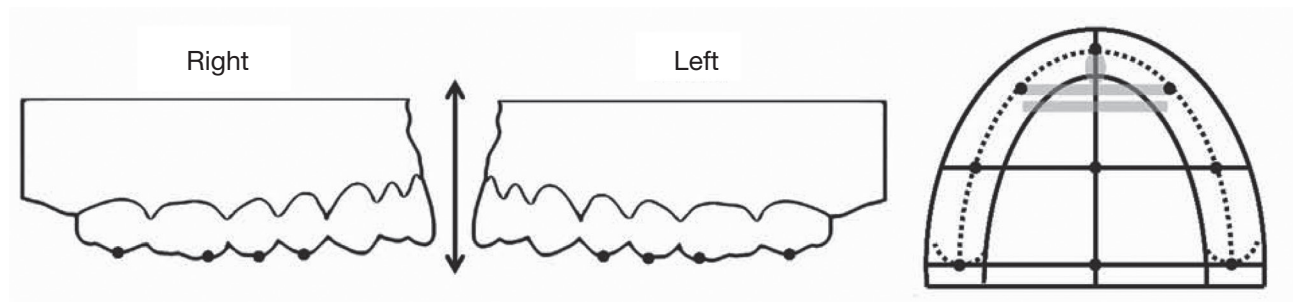


Fig. 7. Anatomical landmarks on a polished surface and a denture base surface.

점을 찍어 8개의 지표를 설정하고, 의치상면에는 절치유두, 구개추벽, 익돌상악 절흔, 정중구개면, 치조제 등 9개의 지표를 설정하였다(Fig. 7). 각 스캔데이터를 3D 분석 소프트웨어를 이용하여 중첩하였고, 초기 정렬 시 앞의 지표들을 최적합 알고리즘에 적용하여 위치시켰다. 무치악 디지털 모형의 비교 시에는 3차원 최적합 분석법을 사용함과 동시에, 해부학적 지표 혹은 비침습적인 지표를 이용하여 디지털 표면을 정렬하는 것이 비교의 정확도를 높일 수 있는 방법이다.

결론

본 논문에서는 디지털 모형의 정확도를 평가하는 방법으로 크게 선형 측정법, 2차원 단면 분석법, 3차원 최적합 분석법으로 나누어 비교해 보았다. 디지털 모형의 정확도 평가 시, 시험자 교육과 인공적 지표의 사용을 통해 오차를 줄일 수 있다. 선형 측정법은 디지털 모형상에서 길이를 측정하여 비교하는 방법이며, 단면 분석법은 디지털 모형을 디지털 평면으로 절단하여 그 단면들 간의 적합

도를 비교한다. 3차원 최적합 분석법은 최적합 알고리즘에 의해 데이터를 정렬하여 중첩하며, 그 차이를 색상 지도로 표현해 부위별 오차를 확인할 수 있다. 디지털 무치악 모형의 정확도를 평가하는 방법으로는 최적합 알고리즘을 이용하는 방법만이 제시되고 있다.

스캐너의 기술이 발전함에 따라 디지털 인상 기술과 전통적 인상법의 정확도를 비교하는 많은 연구들이 이루어지고 있다. 본 논문에서 정리한 다양한 방법들을 이용하여 디지털 모형의 정확도를 평가할 수 있으며, 스캐너의 기술 향상 및 3차원 모형 분석 소프트웨어의 개발에 따라 더욱 효과적인 정확도 평가 방법이 제시될 것으로 기대된다. 또한, 현재 사용되고 있는 정확도 평가 방법들을 잘 숙지하고 이해한다면 디지털 모형의 정확도를 높여, 보다 정밀한 보철물 제작이 가능할 것이라 생각된다.

Acknowledgements

This work was supported by the World Class 300 Project (R&D)(S2318267) funded by the Ministry of SMBA (Korea).

ORCID

Ji-Su Park <https://orcid.org/0000-0003-1469-5897>
Young-Jun Lim <https://orcid.org/0000-0003-2504-9671>
Jungwon Lee <https://orcid.org/0000-0002-5508-442X>
Bongju Kim <https://orcid.org/0000-0001-7309-5977>

References

1. Seelbach P, Brueckel C, Wöstmann B. Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clin Oral Investig* 2013;17:1759-64.
2. Ender A, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. *J Prosthet Dent* 2016;115:313-20.
3. Kim JH, Kim KB, Kim WC, Kim JH, Kim HY. Accuracy and precision of polyurethane dental arch models fabricated using a three-dimensional subtractive rapid prototyping method with an intraoral scanning technique. *Korean J Orthod* 2014;44:69-76.
4. Jemt T, Hjalmarsson L. In vitro measurements of precision of fit of implant-supported frameworks. A comparison between “virtual” and “physical” assessments of fit using two different techniques of measurements. *Clin Implant Dent Relat Res* 2012;14 Suppl 1:e175-82.
5. González de Villambrosia P, Martínez-Rus F, García-Orejas A, Salido MP, Pradies G. In vitro comparison of the accuracy (trueness and precision) of six extraoral dental scanners with different scanning technologies. *J Prosthet Dent* 2016;116:543-50.
6. Quimby ML, Vig KW, Rashid RG, Firestone AR. The accuracy and reliability of measurements made on computer-based digital models. *Angle Orthod* 2004;74:298-303.
7. Menditto A, Patriarca M, Magnusson B. Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision. *Accredit Qual Assur* 2006;12:45-7.
8. Mai HN, Lee KE, Ha JH, Lee DH. Effects of image and education on the precision of the measurement method for evaluating prosthesis misfit. *J Prosthet Dent* 2018;119:600-5.
9. Kim JE, Amelya A, Shin Y, Shim JS. Accuracy of intraoral digital impressions using an artificial landmark. *J Prosthet Dent* 2017;117:755-61.
10. Jiang T, Lee SM, Hou Y, Chang X, Hwang HS. Evaluation of digital dental models obtained from dental cone-beam computed tomography scan of alginate impressions. *Korean J Orthod* 2016;46:129-36.
11. Joo YH, Lee JH. Three dimensional accuracy analysis of dental stone casts fabricated using irreversible hydrocolloid impressions. *J Dent Rehabil Appl Sci* 2015;31:316-28.
12. Lee JH, Paik KS, Chang MS, Lee SP. An evaluation of validity of measurements using digital caliper and three-dimensional virtual dental models. *Korean J Anat* 2004;37:209-18.
13. Güth JF, Keul C, Stimmelmayer M, Beuer F, Edelhoff D. Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing. *Clin Oral Investig* 2013;17:1201-8.
14. Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent* 2013;109:121-8.

15. Renne W, Ludlow M, Fryml J, Schurch Z, Mennito A, Kessler R, Lauer A. Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners: an in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons. *J Prosthet Dent* 2017;118:36-42.
16. Ender A, Zimmermann M, Attin T, Mehl A. In vivo precision of conventional and digital methods for obtaining quadrant dental impressions. *Clin Oral Investig* 2016;20:1495-504.
17. Maeng J, Lim YJ, Kim B, Kim MJ, Kwon HB. A new approach to accuracy evaluation of single-tooth abutment using two-dimensional analysis in two intraoral scanners. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16. pii. E1021.
18. Patzelt SB, Vonau S, Stampf S, Att W. Assessing the feasibility and accuracy of digitizing edentulous jaws. *J Am Dent Assoc* 2013;144:914-20.
19. Goodacre BJ, Goodacre CJ, Baba NZ, Kattadiyil MT. Comparison of denture base adaptation between CAD-CAM and conventional fabrication techniques. *J Prosthet Dent* 2016;116:249-56.
20. Norvell NG, Koriath TV, Cagna DR, Versluis A. Comparison of digital surface displacements of maxillary dentures based on noninvasive anatomic landmarks. *J Prosthet Dent* 2018;120:123-31.

디지털 치과모형의 정확도 평가 방법에 대한 고찰

박지수¹, 임영준^{1*}, 이정원², 김봉주³

¹서울대학교 치의학대학원 치과보철학과

²서울대학교 치과병원 원스톱진료센터 치주과

³서울대학교 치과병원 치의생명과학연구원

본 논문은 기존에 선행되었던 연구들을 바탕으로 디지털 모형의 정확도를 평가하는 여러 가지 방법에 관하여 정리하였다. 디지털 모형의 정확도 평가 시, 시험자 교육과 인공적 지표의 사용을 통해 오차를 줄일 수 있다. 디지털 치아 모형의 정확도 평가법은 크게 선형 측정법, 2차원 단면 분석법, 3차원 최적합 분석법으로 분류할 수 있다. 스캐너의 기술이 발전함에 따라 디지털 인상 기술과 전통적 인상법의 정확도를 비교하는 많은 연구들이 이루어지고 있다. 다양한 방법을 이용하여 디지털 모형의 정확도를 평가할 수 있으며, 앞으로 스캐너의 기술 향상 및 3차원 모형 분석 소프트웨어의 개발에 따라 디지털 모형의 정확도 평가 방법이 더욱 효과적으로 변화할 것이라 생각된다. 이 논문에서는 디지털 모형의 정확도를 평가하는 방법들에 대해 소개하고, 각각의 상황에 따른 효과적인 정확도 분석법에 대해 알아보고자 한다.

(구강회복응용과학지 2019;35(2):55-63)

주요어: 구내스캐너; 디지털정확도; 선형 측정법; 단면 분석법; 최적합 분석법

*교신저자: 임영준

(03080) 서울시 종로구 대학로 101 서울대학교 치의학대학원 치과보철학과

Tel: 02-2072-2940 | Fax: 02-2072-3860 | E-mail: limdds@snu.ac.kr

접수일: 2019년 4월 24일 | 수정일: 2019년 5월 3일 | 채택일: 2019년 5월 17일