

치과용 스캐너로 채득한 디지털 모형의 반복성 및 재현성에 관한 3차원적 평가

이 경 탁, 김 재 흥, 김 응 철, 김 지 환
고려대학교 대학원 보건과학과 치의기공전공

Three-dimensional evaluation on the repeatability and reproducibility of dental scanner-based digital models

Gyeong-Tak Lee, Jae-Hong Kim, Woong-Chul Kim, Ji-Hwan Kim

Department of Health Science Specialized in Dental Lab. Science & Engineering, Graduate School, Korea University

[Abstract]

Purpose: The aim of this study was to determine the repeatability and reproducibility of two dental scanners.

Methods: The master die and the stone replicas(Kavo, Germany) were digitized in touch-probe scanner(Incise, Renishaw, UK), white light scanner(Identica, Medit, Korea) to create 3-dimensional surface-models. The number of points in the point clouds from each reading were calculated and used as the CAD reference model(CRM). Discrepancies between the points in the 3-dimensional surface models and the corresponding CRM were measured by a matching-software(Power-Inspect R2, Delcam Plc, UK). The t-student test for one samples were used for statistical analysis.

Results: The reproducibility of both scanner was within $3\ \mu\text{m}$, based on mean value. The mean value between measurements made directly on the touch probe scanner digital models and those made on the white light scanner digital models was $2.20\text{-}2.90\ \mu\text{m}$, and was statistically significant($P<0.05$).

Conclusion: With respect to adequate data acquisition, the reproducibility of dental scanner differs. Three-dimensional analysis can be applied to differential quality analysis of the manufacturing process as well as to evaluation of different analysis methods.

● **Key words :** CRM(CAD Reference Model), dental scanner, digital model, point cloud, repeatability, reproducibility

교신저자	성명	김 지 환	전화	02-940-2843	E-mail	kjh2804@korea.ac.kr	
	주소	서울시 성북구 정릉3동 산1번지 고려대학교 보건과학대학					
접수일	2012. 7. 19		수정일	2012. 9. 7		확정일	2012. 9. 21

I. 서 론

치과 보철 치료에 있어서 치과의사와 치과기공사의 협업으로 인해 높은 질의 치과수복물이 제작되는 것에는 의심할 여지가 없지만, 치과기공 작업과 치과 병, 의원 내의 인상채득 과정은 여전히 노동집약적이며 경험 의존적이다(Miyazaki et al, 2009). 보철물 제작을 위한 인상 채득 방법은 수년간 큰 변화가 없었다. 트레이에 반유동성 재료를 넣고, 그것이 경화됨으로써 이루어지는 전통적인 인상채득 과정은 환자들이 불편함을 감수해야 하고, 인상 채득후의 정밀도는 술자의 숙련도와 기술에 많은 영향을 받게된다(Christensen, 2005).

1971년 Francois Duret에 의해 처음으로 컴퓨터를 이용한 치과 수복물 제작을 시작으로, 지난 20여 년간 디지털 기술의 발전과 CAD/CAM(Computer-aided design/Computer-aided manufacture) 시스템의 도입은 구강 인상채득 후 수작업을 행하는 전통적인 아날로그 제작방식에 많은 변화를 가져오게 했다(Christensen, 2009).

치과영역에 도입되어 이용하고 있는 CAD/CAM 시스템은 환자의 인상을 3차원적으로 입력하는 디지털 인상과 정교 수복물의 설계 및 재료가공으로 그 체계를 나눌 수 있다(Rekow, 1993). 환자의 구강 정보를 3차원으로 재구성하여 입력하기 위한 방법으로는 구강 내 스캐너(intra-oral scanner)를 이용하여 구강 내를 직접 촬영하는 방법과 석고모형으로 제작하고 이를 입력하는 간접적인 방법이 있다. 치과 병, 의원 내에서는 주로 직접적인 방법을 통해 치아나 주위 경조직, 연조직의 이미지의 데이터를 획득한 뒤 하나의 이미지로 합성함으로써 보철물 제작에 필요한 작업모형을 형성한다. 치과기공소에서는 치과 병, 의원에서 채득된 음형의 인상재에 치과용 석고를 부어 양형으로 전환하고 보철물 제작을 위한 데이터를 치과용 스캐너를 통해 획득한다. 현재 시판되고 있는 치과용 스캐너의 스캐닝 방식은 크게 접촉식과 비접촉식으로 두 가지가 존재한다. 그리고 비접촉식 스캐닝 방식 안에서 레이저 방식과 백색광 방식으로 분류할 수 있다.

우선 첫 번째로, 접촉식(touch probe) 스캐닝 시스템에 기반을 둔 dental 스캐너는 Procera System(Nobel

biocare, Sweden)이 유일하다. 이 시스템은 측정하고자 하는 물체에 직접 볼을 닿게 하여 기계적으로 선(line-by-line)들을 인식하고 볼이 주는 위치 값과 3축에서 주는 좌표 값을 환산하여 정보를 획득함으로써 3차원 구조를 측정하는 방식이다(May et al, 1993). 두 번째로는 비접촉식 방법으로 최초로 사용된 레이저 스캐닝 시스템은 광원을 이용하여 구하고자 하는 치수를 삼각측량법을 통해 3차원 형상에 닿은 레이저빔이 측정 파라미터인 CCD(Charge Coupled Device) Array의 눈금에 닿아 레이저와 렌즈 초점의 길이와 거리를 알 수 있게 된다. 그리고 동시에 레이저 투영 줄무늬(laser projecting stripes)를 이용하여 물체의 정확한 면적을 측정하는 방식이다(Kuroda et al, 1996). 마지막으로, 백색광 스캐닝 시스템은 특정 패턴을 물체에 투영하고 그 패턴의 변형 형태를 파악해 3차원 정보를 얻어낸다. 처음에는 큰 폭의 격자를 사용하고, 다음에는 폭을 1/2씩 줄여가면서 여러 차례에 걸쳐 빛을 영사하게 된다. 여러 방향에서 얻어진 원근의 이미지를 합하여 최종 3-D 데이터를 완성하는 방식으로 3차원 이미지 데이터를 채득한다(Beuer et al, 2008).

접촉식 스캔 방법은 정밀도가 우수한 반면 측정 범위가 좁고 시간이 오래 걸리는 단점이 있어, 최근에는 비접촉식 방법이 도입되고 있다. 비접촉식 스캔 방법에 의하면 주로 레이저 광원을 사용함으로써 접촉식 스캔방법의 문제점을 해소하여 왔으나, 최근에는 레이저 광원보다 빠르고 정확한 3차원 이미지 데이터를 얻을 수 있는 백색광 광원이 주목을 받기 시작했다. 현재 치과용 스캐너는 초기 도입 단계이지만 점차 치과 임상분야에서 사용빈도가 높아짐에 따라 해당 분야와 관련된 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히 touch probe와 레이저 광원을 이용한 연구들은 여러 선행연구를 통해 다양하게 검증되어 스캐너 작동 원리에 따른 장점과 그 한계점을 알게 되었다. 반면, 백색광 광원에 대한 연구는 아직 전무한 실정이다(Motohashi et al, 1999).

Dental CAD/CAM system에 의하여 제작된 보철물은 채득된 인상체로부터 제작되므로 스캐닝 된 디지털 인상이나 모형의 정확성은 제작된 보철물의 정확도에 절대적인 영향을 끼칠 것임은 분명하다(김재홍 등, 2011). 현재

까지 디지털 모형의 정확성과 재현성의 평가는 디지털 인상을 이용하여 제작된 치과 보철물과 기존의 인상 방식을 통해 제작된 보철물의 적합도를 비교하는 방법으로 이루어 졌다. 선행연구에서는 디지털 모형의 정확성과 재현성이 임상적으로 적절하다는 결론을 제시하였다.(Bindl et al, 2003). 하지만 이와 같이 보철물의 특정 일부분을 2차원적으로 평가하는 방법은 보철물 제작과정 중 발생할 수 있는 오류의 요인을 구분할 수 없는 방법이기때문에, 이는 디지털 모형의 실질적인 정확성 및 재현성에 대한 평가와는 거리가 있다고 생각된다. 최근 치과용 스캐너와 CAD 프로그램의 발달로 3차원 디지털 모형을 자유자재로 조작할 수 있게 되었으며, 치아의 불규칙하고 기하학적인 형태를 비교 및 분석하는 방법들이 소개되어지고 있다. Persson 등(2006)은 치과용 접촉식 스캐너와 비접촉식 레이저 스캐너를 사용하여 각각의 지대치를 반복 측정한 3차원 디지털 모형을 CopyCAD(Delcam Co, UK) 소프트웨어 프로그램을 이용하여 서로 겹치게 함으로써 각 스캐너의 정밀성과 안정성을 비교하는 연구를 하였는데, 두 스캐너 모두 10 μ m 이내의 작은 오차만이 관측되었고, 접촉식 스캐너가 레이저 스캐너 보다 조금 더 정밀하고 안정적인 것으로 나타났다. Persson 등(2008)의 또 다른 연구에서는 접촉식 스캐너를 가지고 master die와 stone replica die를 각각 스캔하여 두 형상이 얼마나 차이가 나는지 조사함으로써 치과용 스캐너가 치과보철물 제작에 영향을 끼칠 수 있는지를 간접적으로 보여주었다.

이에 본 연구의 목적은 치과 임상 분야에서 사용되고 있는 접촉 방식의 스캐너와 비접촉 방식의 백색광 스캐너의 반복성 및 재현성의 차이를 비교하여 스캔 방식에 따른 디지털 모형의 정확성을 검증하는 것이다. 그리고 임상에서 치과용 스캐너를 이용한 Dental CAD/CAM system 보철물을 제작할 때 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 실험 재료

1) 지대치 모형 준비

지대치 모형은 상악 우측 중절치를 대상으로 하였다. 즉

합성수지로 제작된 표준형태(AG-3, Frasaco, GmbH, Germany)의 상악 중절치를 선택한 후, 지대치 삭제를 하고 이를 밀링 작업을 통해 티타늄 지대치를 복제함으로써, 티타늄 지대치 모형을 얻게 되었다. 1mm offset과 incisal 방향에서 1.2mm 삭제하고 축벽의 각도는 5도로 설정하였으며, margine design은 chamfer type으로 설정하여 지대치를 완성하였다. 완성된 지대치를 이용하여 티타늄 지대치 모형을 완성하였다. 이 티타늄 지대치 모형은 접촉식 스캐너를 사용하여 스캐닝 할 때 지대치의 표면마모를 최소화하고 정확한 데이터를 얻기 위하여 제작하였다(Fig. 1). 백색광 스캐너의 난반사 효과를 막기 위해 티타늄 지대치 모형을 실리콘 몰드로 복제한 뒤, 그 음형에 치과용 경석고(Kavo, Germany)를 부어 넣음으로써, 상악 우측 중절치 지대치 석고 모형을 제작하였다 (Fig. 2).



Fig. 1. Titanium abutment model



Fig. 2. Stone abutment model

2) 스캐너와 분석 소프트웨어

지대치 모형을 스캔 할 때 사용된 스캐너는 접촉식 스캐너로 Incise[®] dental scanner(Renishaw, UK)가 사용되었고 백색광 스캐너로는 Identica[®](Medit, Korea)가 사

용되었다. 각 스캐너의 스캔 데이터를 점군 데이터로 변환시키고, 3차원 surface 형상에 투영시킬 때 사용된 소프트웨어는 PowerInspect 2011 R2(Delcam plc., UK)가 사용되었다(Fig. 3, Table 1).



Fig. 3. White light scanner(left), Touch probe scanner(right)

Table 1. Materials used in the study

brand	scanning source	precision	range	output	manufacture
Identica	White light (non-contact)	Inner 10 μ m	100 * 100 * 75mm	STL file	Medit, Korea
Incise	touch probe (contact)	0.5 μ m	90 * 90 * 50mm	STL file	Renishaw, UK

2. 실험 방법

1) 디지털 모형 데이터 채득

접촉식 스캐너는 반지름 0.5mm의 루비 볼이 스캐너의 수직 받침대에 고정되어 있는 모형의 아래 부분에서 부터 표면에 접촉한 상태로 회전한다. 그 동시에 루비 볼은 나선형 곡선을 그리며 각 회전 당 200 μ m로 수직 상승을 함으로써 모형의 전체표면을 스캔한다. 스캔된 모형의 3차원 형상 데이터는 STL file로 환산되어 출력된다. 백색광 스캐너는 백색광이 비춰지는 안쪽에 테이블이 있고 그 위에 모형을 올려놓아 고정시킬 수 있다. 모형이 고정된 테이블이 각도를 바꾸어 조금씩 회전할 때마다 백색광이 영사된다. 그리고 각각의 다양한 각도에서 얻어진 데이터가 합쳐지고 다시 재배열 되면서 3차원 형상 데이터(STL

file)가 획득된다.

2) 전용 소프트웨어를 이용한 분석 방법

각 스캐너마다 지대치 모형을 11번 반복적으로 스캔하고, 첫 번째 스캔한 데이터를 CAD reference model(CRM)로 대조군으로 삼는다. CRM으로 지정한 STL 파일을 제외한 각 스캐너의 10개 데이터, 총 20개의 스캔 데이터는 대조군과 비교할 실험군으로써, 모두 CopyCAD(Delcam, UK)를 사용하여 point cloud-ASC file로 변환시킨다. 그리고 PowerInspect(Delcam, UK)을 실행시켜 삼각 격자 모양으로 이루어진 CRM 데이터와 수많은 점으로 이루어진 point cloud 데이터를 서로 재배열 한 뒤, point cloud를 삼각 격자 데이터의 표면에

투영을 시킨다(Fig. 4). 총 point의 개수는 약 1,400개이고, 서로 겹쳐진 삼각 격자 모양의 surface data와 모든 point 간의 거리를 RMS(root mean square) 값으로 환산하여 그 평균을 구한다. 그리고 모든 스캔 데이터는 연구의 원활하고 빠른 작업 진행을 위해서 획득된 상악 우측 중절치 지대치 모형의 3차원 형상 데이터에서 불필요한 margin 아래쪽 부분은 삭제했다.

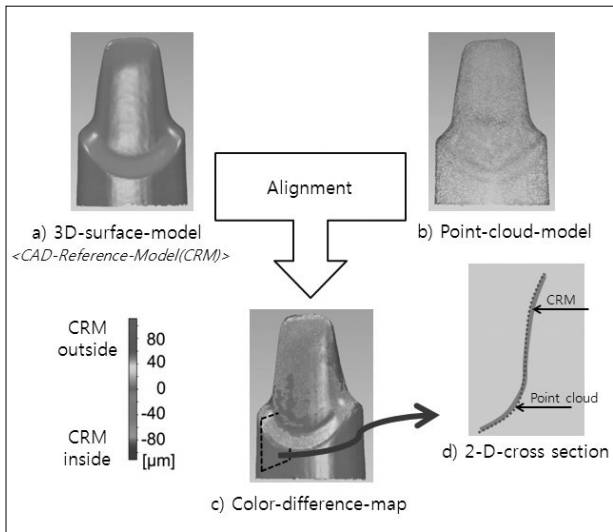


Fig. 4. Example of experimental flowchart of 2 different readings

3. 통계 처리

접촉 방식 치과용 스캐너로 채득된 데이터와 비접촉 방식 치과용 스캐너를 이용하여 채득된 데이터 간의 평균값이 유의한 차이가 있는지 알아보기 위하여 모수 검정인 일표본 t-검정을 실시하였다. 각 데이터의 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등의 기술적 통계량을 제시하였고, 모든 통계 처리와 분석은 SPSS 12.0 통계처리 프로그램 (SPSS Inc, USA)을 사용하여 시행하였으며, 제 1종 오류의 수준은 0.05로 설정하였다.

III. 결 과

접촉 방식의 스캐너와 백색광 방식의 스캐너의 접촉 방식의 반복적인 측정에 있어서 백색광 방식의 스캐너가 보다 더 일률적이고 안정적인 값을 나타내었다(Table 2). 접

촉 방식의 스캐너로 채득된 디지털 모형의 데이터 평균(표준편차)은 2.90(1.04) μm 의 값을 보였으며, 백색광 방식의 스캐너는 보다 작은 범위를 보였는데 평균(표준편차) 2.20(0.40) μm 값을 나타내었다. 각 실험군 중에서 접촉식 스캐너는 5.00 μm 의 최대값을 보여, 백색광 방식의 스캐너에 비해 높은 값의 결과를 내었다(Table 3). 두 가지 스캐너를 통해 채득된 3차원 디지털 모형 간에 유의성 여부를 검증하게 위해 수행된 일표본 t-검정에서는 유의한 차이를 보였기에, 서로 다른 방식의 스캐너로 채득된 3차원 디지털 모형간의 재현성은 차이가 있는 것으로 판명되었다($p < 0.05$).

Table 2. Comparison of repeatability touch probe and white light scanner from repeated measurement

Repeated measurement No.	Touch probe value(μm)	White light scanner value(μm)
1	2.0	2.0
2	5.0	2.0
3	2.0	2.0
4	1.0	2.0
5	3.0	2.0
6	3.0	2.0
7	3.0	3.0
8	3.0	2.0
9	3.0	2.0
10	4.0	2.0

Table 3. Comparison on dental scanner-based digital models of the between touch probe dental scanner(TP) and white light dental scanner(WL)

group	mean (μm)	sd (μm)	Min (μm)	Max (μm)	p-value
TP	2.90	1.04	1.00	5.00	0.001
WL	2.20	0.40	2.00	3.00	

IV. 고찰

3차원 디지털 모형은 일반 석고 모형에 비해 저장이 간단하고, 데이터베이스의 구축이 가능하며, 검색이 용이한 특징이 있다. 특히 자료를 복사하거나 전자우편 등을 통해 전송이 가능하고 여러 사람과 공유가 가능하며, 자료의 파절이나 분실을 막을 수 있는 장점이 있다(Delong et al, 2003). 비록 이러한 장점을 있더라도 3차원 디지털 모형의 해상도나 정밀도, 재현성이 떨어진다면 사용에 많은 제약이 따를 것으로 생각된다. 치과에서 사용되는 3차원 디지털 모형은 산업용으로 사용되는 것 보다 상대적으로 크기가 작고 기하학적인 형상의 치아모형을 대상으로 하기 때문에 3차원 재구성이 더욱 어렵다. 또한 디지털 모형은 환자에게 적용할 보철물을 제작하는 바탕이 되므로 더욱이 정밀도와 재현성이 요구된다는 특성이 있다. 때문에, 외국의 경우에는 이들 디지털 모형에 대한 다각적인 검증이 활발히 이루어지고 있으나 국내에서는 아직 구체적인 검증이 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서 수행한 치과용 디지털 모형의 반복성 및 재현성을 3차원적으로 평가한 것은 의미가 있다.

접촉식 3차원 스캐너는 탐촉자로 불리는 touch probe를 이용한다. 공업용으로는 CMM(Coordinate Measuring Machine)이 대표적인 방식으로 대부분의 제조업에 오래 전부터 이 방식이 활용되어 왔다. 접촉식 스캐너의 큰 장점은 직접 물체에 접촉하여 모든 측정점을 획득하기 때문에 정확도가 우수하다는 것이다. 그러나 대상물의 표면에 접촉을 해야 하므로, 물체에 변형이나 손상을 줄 수 있고, 둥근 touch probe 때문에 예리한 첨각을 측정하는데 한계가 있다. 한편 백색광 방식 스캐너는 특정 패턴을 물체에 투영하고 그 패턴의 변형 형태를 파악해 3차원 정보를 얻어낸다. 여기에 사용되는 방식은 공간부호화법, 모아레법, PMP법 등 여러 가지가 있는데, 치과용 스캐너에서는 공간부호화법이 널리 대중화 되어 있다. 한 번에 한 점씩 스캔하는 것이 아니라, 전체 촬상영역(Field of View, FOV) 전반에 걸쳐 있는 모든 피사체의 3차원 좌표를 한 번에 얻어 낼 수 있다. 이 점 때문에 모션장치의 진동에 의한 정확도 손실을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 매우 신속하게 스캔 할 수 있다. 하지만 외부의 공간

섭과 측정물 표면의 난반사 영향을 받기 때문에 주의를 기울여야 한다.

본 연구는 각기 다른 작동 방식의 치과용 스캐너로 채득된 두 3차원 디지털 모형을 중첩시켜서 각 실험군의 평균값을 토대로 그 재현성을 평가하였다. 접촉 방식(TP)이 비접촉 방식(WL)에 비해 높은 수치를 보였기에 비교적 접촉방식으로 채득된 데이터의 재현성이 낮음을 알 수 있었다. 또한 표준편차의 값도 접촉방식에서 1.04 μ m으로 나타나, 백색광 스캐너의 0.40 μ m을 보인 접촉방식이 비접촉 방식에 비해 반복성도 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 접촉 방식 스캐너로 데이터 채득 시 탐촉자가 나선형 모양으로 회전하면서 규칙적인 수직 상승을 하기 때문에 표면 경사각의 영향에 따라 스캔되는 point cloud의 밀도 차이가 발생하는 것에 기인한다고 본다. 뿐만 아니라 probe ball 특성상 chamfer 변연처럼 오목한 부위는 선으로 닿게 되고, 지대치 중앙처럼 볼록한 부위는 점으로 닿게 되기 때문에 chamfer 변연부위의 point cloud의 분포가 다른 부분 보다 비교적 낮음으로 스캔 오차가 발생 된다고 사료된다. 또한 접촉식 스캐너의 출력강도와 probe ball의 크기에 따라 스캐닝이 틀려질 수도 있다(Persson et al, 2009). 백색광 스캐너는 접촉식이 아니라 비접촉식 스캐너이기 때문에 지대치의 표면 형태에 영향을 덜 받게 될 뿐만 아니라, 스캔 소프트웨어 상에서 3차원 형상으로 변환될 때 자동적으로 point cloud의 분포와 수가 삼차원 형상에 맞추어 고르게 분포되기 때문에 반복측정의 결과가 비슷하게 나왔다고 생각된다. 그렇기 때문에 비접촉식 백색광 스캐너가 접촉식 스캐너 보다는 깊은 fossa나 pit, 날카로운 margin이나 incisal tip 부위를 상대적으로 더 잘 재현할 수 있고, 접촉식 스캐너는 평평하거나 볼록한 표면을 효과적으로 재현할 수 있다고 생각된다.

또한 본 실험에서 사용된 중첩 소프트웨어의 원리는 두 형상 전체의 오차가 가장 적은 값(best-fit)이 되도록 겹치게 하는 것이다. 이러한 이유 때문에 어느 한쪽 면을 정확히 중첩 시킨다면 그에 따른 보상으로 다른 한쪽의 형상 오차가 발생 할 수 있다. 따라서 중첩 소프트웨어는 3D 형상의 전체적이고 상대적인 중첩은 가능해도 절대적인 각 부분별 정확도는 모른다 할 수 있다(Persson et al,

2008). 그러므로 이 중첩 소프트웨어는 각 스캐너의 반복 재현성과 안정성만 알 수 있을 뿐 스캐너의 정확도는 알 수 없으며, 따라서 본 실험결과의 일반화에는 일정 정도의 한계를 내포하게 된다. 각 스캐너의 정확도를 평가하기 위해서는 CMM(Coordinate Measuring Machine)으로부터 획득한 참값(gold standard)의 데이터가 필요하며(Kamegawa et al, 2010), CMM으로 채득된 데이터와의 비교하는 방법만이 각 스캐너의 정확성을 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 실제 임상에서 사용하고 있는 디지털 모형의 재현성이나 적합성에 대한 연구도 뒷받침 되어야 할 것으로 생각된다. 향후 추가적으로 CMM 데이터와의 비교를 통한 정확도 연구가 뒷받침 되어야 할 것으로 생각되며, 실제 임상에서 사용되는 모형을 통한 평가도 이루어져야 한다고 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 접촉 방식을 채택한 치과용 스캐너와 비접촉 방식의 백색광 치과용 스캐너를 이용하여 주 모형과 복제된 석고모형을 3차원 디지털 모형으로 전환시켜 3차원 데이터의 비교를 통하여 각 스캐너의 반복성 및 재현성을 분석하였다. 그 결과, 각기 방식이 다른 스캐너 간의 재현성에 있어서는 측정된 평균값이 통계적으로 유의한 차이가 있었다($P < 0.05$). 또한 접촉 방식의 스캐너는 비접촉 방식의 스캐너에 비해 표준편차가 크게 나타나 반복 측정 시 오차의 범위가 커짐을 알 수 있었다. 결론적으로 비접촉 방식의 백색광 스캐너가 접촉방식의 스캐너 보다 디지털 모형을 구현하는데 스캔을 통한 반복성 및 재현성에 있어서 안정적인 방식이라고 판단된다.

참 고 문 헌

김재홍, 김지환, 김혜영. 디지털 인상 채득 시 흔히 발생하는 오류에 관한 연구(CEREC AC의 사례 중심으로). 대한치과기공학회지, 33(3), 211-218, 2011.

- Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J*, 204(9), 505-511, 2008.
- Bindl A, Mörmann WH. Clinical and SEM evaluation of all-ceramic chair-side CAD/CAM generated partial crowns. *Eur J Oral Sci*, 111(2), 163-169, 2003.
- Christensen GJ. The state of fixed prosthodontics impressions: room for improvement. *J Am Dent Assoc*, 136(1), 343-346, 2005.
- Christensen GJ. Impressions are changing: deciding on conventional, digital or digital plus in-office milling. *J Am Dent Assoc*, 140(2), 1301-1304, 2009.
- Delong R, Heinzen M, Hodges JS, Ko CC, Douglas WH. Accuracy of a system for creating 3D computer models of dental arches. *J Dent Res*, 90(1), 434-440, 2003.
- Kamegawa M, Nakamura M, Fukui Y, Tsutsumi S, Hojo M. Direct 3-D morphological measurements of silicone rubber impression using micro-focus X-ray CT. *Dent Mater J*, 29(1), 68-74, 2010.
- Kuroda T, Motohashi N, Tominaga R, Iwata K. Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning. *Am J Orthod*, 110(1), 365-369, 1996.
- May KB, Russell MM, Razzoog ME, Lang BR. Precision of fit: the Procera AllCeram crown. *J Prosthet Dent*, 80(2), 394-404, 1993.
- Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J*, 28(1), 44-56, 2009.
- Motohashi N, Kuroda T. A 3D computer-aided design system applied to diagnosis and

treatment planning in orthodontics and orthognathic surgery. *European J Orthod*, 21 (3), 263-274, 1999.

Persson A. A three-dimensional evaluation of a laser scanner and a touch-probe scanner. *J Prosthet Dent*, 95(1), 194-200, 2006.

Persson A. Computer aided analysis of digitized dental stone replicas by dental CAD/CAM technology. *Dent mater*, 24(2), 1123-1130, 2008.

Persson A, Oden A, Andersson M, Sandborgh-Englund G. Digitization of simulated clinical dental impressions: Virtual three-dimensional analysis of exactness. *Dent mater*, 25(3), 929-936, 2009.

Rekow ED. High-technology innovations and limitations for restorative dentistry. *Dent Clin North Am*, 37(2), 513-524, 1993.