

CCD 디지털 방사선사진촬영법의 초기 치아우식증의 진단능 평가에 대한 연구

원광대학교 치과대학 구강악안면방사선학교실, 원광치의학 연구소
이 완 · 이병도

Evaluation of diagnostic ability of CCD digital radiography in the detection of incipient dental caries

Wan Lee, Byung-Do Lee

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

ABSTRACT

Purpose : The purpose of this experiment was to evaluate the diagnostic ability of a CCD-based digital system (CDX-2000HQ) in the detection of incipient dental caries.

Materials and Methods : 93 extracted human teeth with sound proximal surfaces and interproximal artificial cavities were radiographed using 4 imaging methods. Automatically processed No. 2 Insight film (Eastman Kodak Co., U.S.A.) was used for conventional radiography, scanned images of conventional radiograms for indirect digital radiography were used. For the direct digital radiography, the CDX-2000HQ CCD system (Biomedisys Co. Korea) was used. The subtraction images were made from two direct digital images by Sunny program in the CDX-2000HQ system. Two radiologists and three endodontists examined the presence of lesions using a five-point confidence scale and compared the diagnostic ability by ROC (Receiver Operating Characteristic) analysis and one way ANOVA test.

Results : The mean ROC areas of conventional radiography, indirect digital radiography, direct digital radiography, and digital subtraction radiography were 0.9093, 0.9102, 0.9184, and 0.9056, respectively. The diagnostic ability of direct digital radiography was better than the other imaging modalities, but there were no statistical differences among these imaging modalities ($p > 0.05$).

Conclusion : These results indicate that new CCD-based digital systems (CDX-2000HQ) have the potential to serve as an alternative to conventional radiography in the detection of incipient dental caries. (*Korean J Oral Maxillofac Radiol* 2003; 33 : 27-33)

Key words : radiography, dental, digital; ROC curve

서 론

CCD 디지털 방사선사진촬영법은 기존의 구내 필름 대신 구내 Charge-Coupled Device (CCD) 센서를 구강 내에 위치시켜 X선 촬영하고 컴퓨터 모니터 상에 그 영상이 즉시 나타나는 직접 디지털 방사선사진촬영법이다. 1989년

RadioVisioGraphy가 직접 디지털 방사선사진촬영법으로 최초로 소개된 이래, 이러한 디지털 방사선사진촬영법과 구내필름을 이용한 구내 표준 방사선사진촬영법의 진단능을 서로 비교 평가한 연구들이 많이 보고되었다.^{1,2}

Dagenais와 Clark 등^{3,4}은 직접 디지털 방사선사진촬영법이 구내 표준 방사선사진촬영법에 비해 더 높은 진단능을 보인다고 하였고, Wenzel 등⁵과 Hintze 등⁶은 우식증 진단능 차이는 없다고 하였으며, 강 등^{7,8}은 직접 디지털 방사선사진촬영법이 오히려 낮은 분별력을 보인다고 보고하였다. 또한 김과 정,⁹ 권 등¹⁰이 간접 디지털 방사선사진촬영법과 구내 표준 방사선사진촬영법을 비교 연구하였고,

접수일 : 2002년 11월 5일; 심사일 : 2002년 11월 8일; 채택일 : 2002년 12월 12일
Correspondence to : Prof. Byeong-Do Lee.
Department of Oral and Maxillofacial Radiology, College of Dentistry, Wonkwang University, 344-2, Shinyong dong, Iksan city, Chonbuk, 570-711, Korea
Tel) 82-63-850-1912. Fax) 82-63-857-4002
E-mail) eebydo@wonkwang.ac.kr

Stassinakis 등¹¹은 직접 디지털 방사선사진촬영법과 그 공제영상을 비교한 결과 공제영상이 높은 진단능을 보였음을 보고하였다.

조 등¹²은 구내 표준 방사선사진촬영법과 간접 및 직접 디지털 방사선사진촬영법의 치근단 병소의 판독능을 피질 골과 해면골로 구분하여 연구한 바 있다. 이와 같이 디지털 방사선사진촬영법과 그 공제상 그리고 구내 표준 방사선사진촬영법의 진단능을 비교 연구한 결과는 매우 다양하며 치아우식증 혹은 치근단 병소를 관심대상으로 한 연구가 많이 진행되었다.

직접 디지털 방사선사진촬영법은 디지털 형태로 영상이 획득, 저장되기 때문에 영상의 흑화도와 대조도의 조절이 가능하고 원격전송도 가능하다. 또한 50-95%까지 환자의 X선 노출을 감소시킬 수 있고 현상과정과 암실이 필요 없기 때문에 환자의 진료 시간을 감소시킬 수 있다. 이러한 여러 가지 장점들로 인하여 비교적 고가의 설치비에도 불구하고 그 사용빈도가 증가하고 있다.¹³⁻¹⁶

이에 저자는 국내에서 개발, 시판되고 있는 CCD 기초의 CDX-2000HQ[®] 시스템의 초기 인접면 우식증 진단능을 구내 표준 방사선사진촬영법 및 간접 디지털 방사선사진촬영법과 비교 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구재료

인접면이 건전한 총 93개의 소구치, 대구치를 실험 대상으로 하였다. 70 kVp, 8 mA, 0.7×0.7 mm 초점크기의 Trophy 구내촬영기(Trophy Radiology S.A., France)로, 구내 필름인 No. 2 Insight[®] film (Eastman Kodak Co., U.S.A.)을 PRO-200[®](Young Han Co., LTD, Korea) 자동 현상기로 현상하였다. 직접 디지털 방사선사진촬영법은 CDX-2000HQ[®] 시스템(Biomedisys Co., Korea), CCD 센서, 컴퓨터 시스템(Pentium III, 800 MHz, 256 MRAM)과 17 inch 모니터(TG7701G, LG, 1024×768 pixels)를 이용하였고 CDX-2000HQ[®] 시스템의 Sunny program을 디지털 공제술에 이용하였다. 간접 디지털 방사선사진촬영법은 촬영된 방사선 사진의 입력을 위해 최대 2400 dpi를 지원하는 transparency unit를 장착한 EPSON GT-9600[®] 스캐너(Seiko EPSON Co., Japan)를 이용하였다.

2. 연구방법

발거와 재식립을 용이하게 하기 위해 모든 치아에 베이스 플레이트 왁스를 이용해 치근을 감쌌다. 무작위로 3개의 치아들을 선택하여 중앙부가 일직선이 되며 인접면이 접촉되도록 위치시킨 다음 석고 블록에 매식하였으며 Exaflex[®] 인상재를 이용하여 규격화된 석고 블록으로 31개

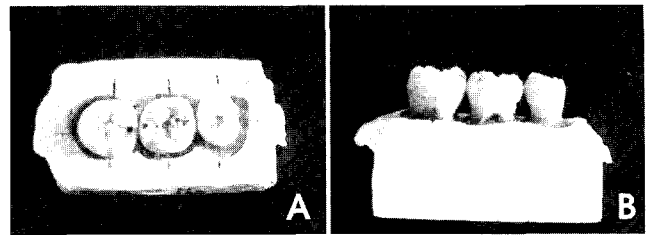


Fig. 1. Human teeth block used in this experiment.

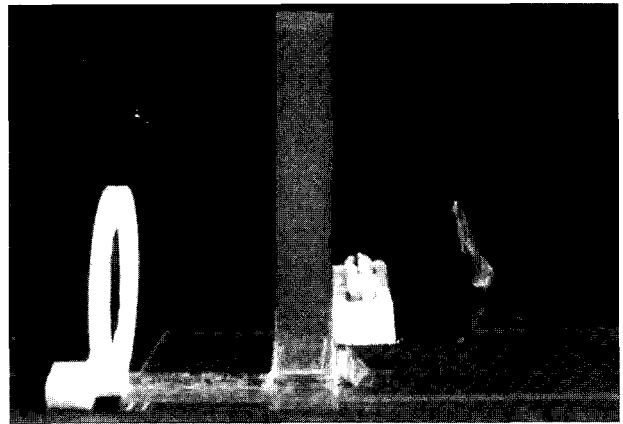


Fig. 2. Geometrically standardized experimental design. 2 cm thick acrylic block simulating the soft tissue.

의 치아군을 형성하였다(Fig. 1A). 위치 이동없이 재식립을 용이하게 하기 위해 치아의 협설, 근원심에 일직선으로 치아와 석고 블록에 선을 그었다(Fig. 1B). 인공 치아 우식증 형성 전에 특별히 제작된 평행촬영 기구에 CCD 센서(32 mm×24 mm)를 장착하여 초점과 센서와의 거리를 32 cm으로 유지하고 연조직 효과를 얻기 위해 20 mm의 아크릴릭판을 위치시키고 노출시간 0.7초로 설정하여 치아 우식증 형성 전 직접 디지털 영상을 얻었다(Fig. 2).

총 186개의 인접면 중 93면에 무작위로 #1/2과 #1 치과용 바를 이용해 접촉점을 교합지로 확인한 후 접촉점 직하방에 인접면 우식증을 형성하였고 나머지 93면에는 병소를 형성하지 않았다. 병소를 형성한 와동에 60% perchloric acid를 12시간 동안 부식시켜 우식증의 변연부위가 되도록, 미반성으로 형성되게 하였으며 치아를 재위치 시킨 다음, 전과 동일한 방법으로 CCD 센서를 이용하여 우식증 형성 후 직접 디지털 영상을 얻었다(Fig. 3A).

인공 치아우식증 형성 후 CCD 센서 대신 Insight[®] 필름을 사용하여 XCP[®](Rinn Co. Japan)의 평행촬영기구를 이용하여 노출시간 1.0초의 조건으로 영상을 획득하고 자동 현상하였다(Fig. 3B). 또한 이 현상된 방사선사진을 GT-9600[®] 스캐너로 스캔하여 간접 디지털 영상을 획득하였으며 직접 디지털 영상 크기(830×600, 8 bit, 480 Mbyte)와

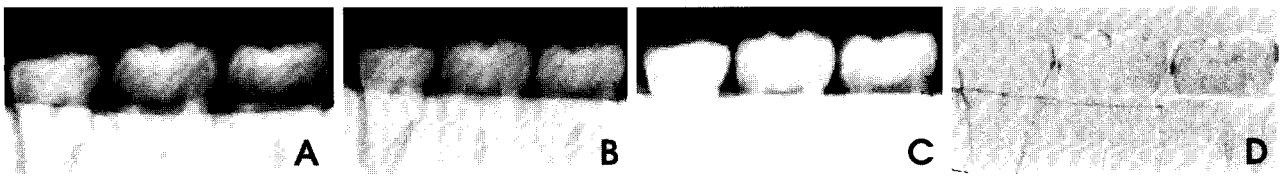


Fig. 3. Each image of same teeth having artificial cavities in direct digital image (CDX2000HQ®) (A), conventional intraoral film image (B), indirect digital image (C), digital subtraction image (D).

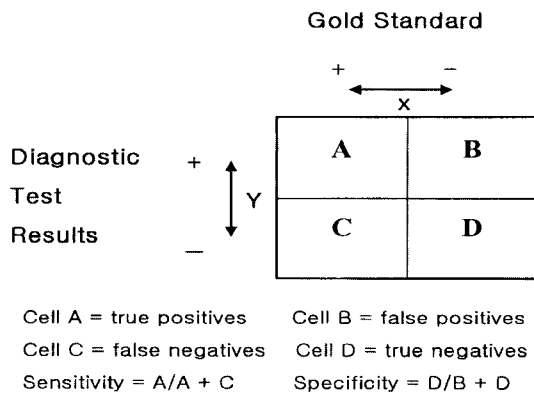


Fig. 4. Contingency table for interpretation of diagnostic tests.

되도록 비슷하게 하고 파일 형식 (BMP file format)을 같게 하였다 (Fig. 3C). 공제상은 Sunny program을 이용하여 4개의 참고점 (reference point)으로 우식증 형성 전 직접 디지털 영상과 우식증 형성 후 직접 디지털 영상을 기하학적으로 보정하여 획득하였다 (Fig. 3D).

3. 판독 및 통계처리

빛이 차단된 실내에서 구내 표준 방사선 사진은 판독대 (view box)에서, 간접 및 직접 디지털 영상, 디지털 공제영상은 컴퓨터 모니터 상에서 ACDSSee v3.0 Software (ACD systemsTM, U.S.A)를 통하여 구내 표준 방사선사진촬영법의 약 7배 확대상을 구강악안면 방사선과 전공의 2명과 보존과 전공의 3명이 우식병소의 유무를 판독하였다. 구내 표준 방사선사진촬영법, 직접 및 간접 디지털 방사선사진촬영법과 디지털 공제술에 대한 판독자들의 판독 결과를 실제 상태 (gold standard)와 비교하여 5회 판독의 평균값으로 민감도 (sensitivity)와 특이도 (specificity)를 구하였다 (Fig. 4). 판독방법은 각 인접면에 대해 우식병소의 유무를 등급에 따라 숫자로서 판독하도록 하였으며 등급은 1. 분명히 있다, 2. 있는 것 같다, 3. 확실히 않다, 4. 없는 것 같다, 5. 분명히 없다의 5등급으로 나누어 186면에 대해 평가하였으며 2주일 간격으로 동일한 조건에서 5회 판독을 하여 그 평균값을 취하였다 (Table 1).

ROC 곡선의 형태와 ROC 곡선 하방 면적 (Az)을 ROCKIT

Table 1. Five point confidence scale

1 = definitely present
2 = probably present
3 = unsure
4 = probably not present
5 = definitely not present

Table 2. The mean values of sensitivity, specificity and area under ROC curve (Az) according to imaging modalities

	Sensitivity	Specificity	Az
Conventional radiography	0.79	0.95	0.9093
Indirect digital radiography	0.85	0.97	0.9102
Direct digital radiography	0.85	0.97	0.9184
Digital subtraction radiography	0.81	0.93	0.9056

Table 3. ANOVA test result of mean diagnostic abilities

	Significance (P)
CON vs IND	0.443
CON vs DIR	0.540
CON vs SUB	0.970
IND vs DIR	0.999
IND vs SUB	0.688
DIR vs SUB	0.782

CON : conventional radiography, IND : indirect digital radiography
 DIR : direct digital radiography, SUB : digital subtraction radiography

software (0.9B, βversion, The University of Chicago)를 이용하여 구하였고 영상법 간의 진단능 차이를 ANOVA로 검증하였다.

결 과

각 촬영방법의 우식 병소 판독등급에 대한 민감도 평균값은 직접 디지털 방사선사진촬영법 0.85, 간접 디지털 방사선사진촬영법 0.85, 디지털 공제술 0.81, 구내 표준 방사선사진촬영법은 0.79이었고 특이도 평균값은 직접 디지털 방사선사진촬영법 0.97, 간접 디지털 방사선사진촬영법 0.97, 구내 표준 방사선사진촬영법 0.95, 디지털 공제술은 0.93이었다 (Table 2).

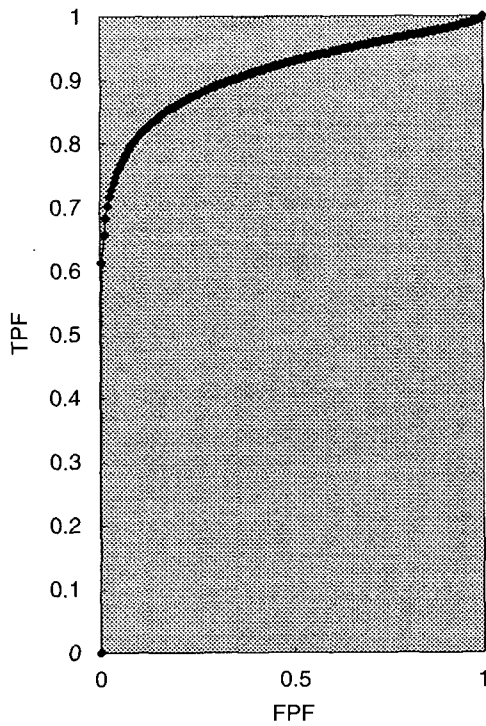


Fig. 5. ROC result of conventional radiography.

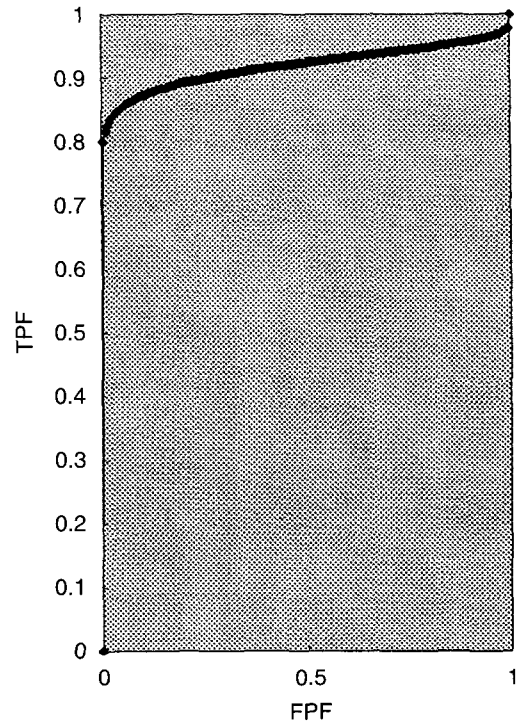


Fig. 7. ROC result of direct digital radiography.

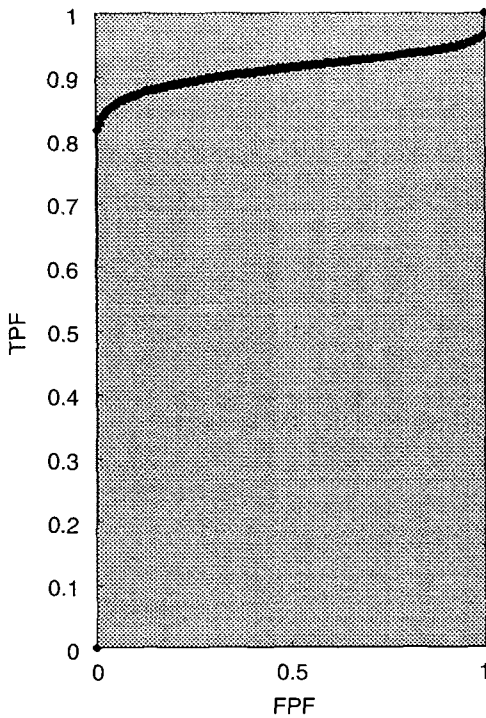


Fig. 6. ROC result of indirect digital radiography.

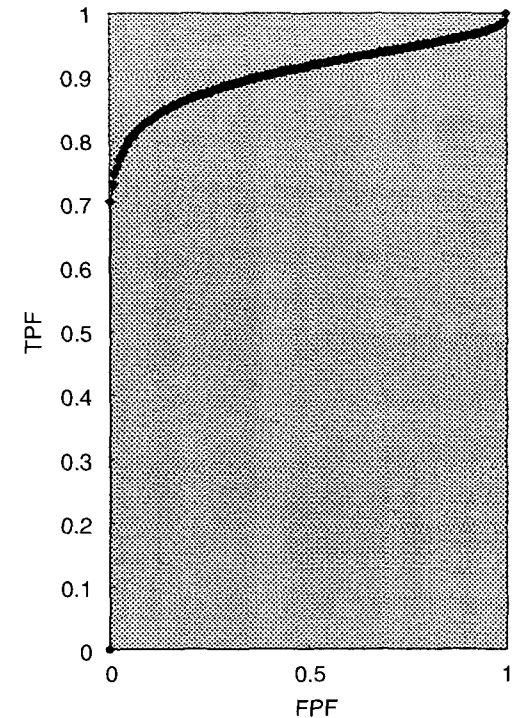


Fig. 8. ROC result of digital subtraction radiography.

Maximum likelihood법에 따라 각 영상법에 대한 ROC 면적을 구하였을 때 직접 디지털 방사선사진촬영법은 0.9184, 간접 디지털 방사선사진촬영법은 0.9102, 구내 표

준 방사선사진은 0.9093, 디지털 공제술은 0.9056 순으로 직접디지털 방사선사진촬영법의 면적이 가장 높게 나타났으나(Figs. 5-8)(Table 2) 각 촬영법 간의 통계적 유의한 차

이는 없었다 ($p > 0.05$) (Table 3).

고 찰

X선 필름대신 CCD 센서를 이용하는 직접 디지털 방사선사진촬영법은 Radio-VisioGraphy (Trophy Radiology S.A., France), Sens-A-Ray (Regam Medical Systems AB, Sweden), Flashdent (Villa Sistemi Medicali srl, Italy), Visualix (Gendex Dental Systems, Italy), Sidexis (Siemens, Germany) 등이 개발, 시판되어 왔다.^{17,18} 기본적으로 이들 시스템은 두 군으로 구분될 수 있는데, 구내 CCD 센서가 희토류 증감지 (rare earth intensifying screen)에서 나오는 빛에 반응하는 것과 본 실험에서와 같이 센서가 X선에 직접 반응하는 것으로 구분된다. 전자 (RVG나 Flashdent)는 X선을 빛으로 변환시키기 위해 희토류 증감지를 이용하며, 광학기구를 이용하여 빛을 CCD로 전달한다.

본 연구에서 구내 표준 방사선사진촬영법과 디지털 방사선사진촬영법의 진단능을 비교하기 위해 이용된 ROC 분석법은 진단용 영상의 진단능을 객관적으로 평가하는 방법으로 질환 판독시의 진단능, 혹은 진단의 효용성을 알아보기 위한 효과적인 방법으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 질환의 유무를 등급에 따라 판독하여 그 결과를 분석하는 rating법¹⁹과 ROC 평면상의 점을 가상의 곡선으로 연결하여 얻어진 곡선 하방의 면적을 구하여 분석하는 maximum likelihood법²⁰을 이용하였다.

치아우식 진단능에 대한 ROC 면적을 구한 결과 직접 디지털 방사선사진촬영법은 0.9184, 간접 디지털 방사선사진촬영법은 0.9102, 구내 표준 방사선사진촬영법은 0.9093, 디지털 공제술은 0.9056 순으로 직접 디지털 방사선사진촬영법의 진단능이 높게 나타났다. 이것은 디지털 영상을 형성하는 여러 장치의 발달, 특히 센서의 발전에 기인한다고 생각할 수 있다. 직접 디지털 영상의 해상도는 주로 센서의 화소단위 (pixel) 크기에 의하여 결정적인 영향을 받으며^{21,22} 화소의 크기가 작을수록 해상력이 높으며 화소 크기가 0.2 mm 정도이면 구내 표준 방사선사진과 거의 같은 효과를 가지는 상으로 나타난다고 보고되고 있다.²³ 본 연구에서 사용된 CCD 센서는 0.22 mm 크기의 화소단위와 256단계의 회색조를 가지므로 비교적 높은 치아우식 진단능을 보이는 것으로 사료된다. 최근에는 Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)에 기초한 Active Pixel Sensor (APS)와 Thin-Film Transistor (TFT) 등이 직접 디지털 영상의 검출기로 소개되고 있으며, CCD sensor에 비해 CMOS-APS의 장점으로는 영상조작의 향상, 영상 생성시 적은 전력을 소모하며 가격이 싸고 내구성이 크다는 점이며, 앞으로 CCD 센서를 대신하여 사용이 증가할 것으로 보인다.^{24,25}

한편 본 연구에서 ROC 분석을 이용한 치아우식증 진단

능이 선학들의 결과보다 높은 값을 나타내었는데 이는 자연 우식증 병소가 아닌 치과용 바(bur)로 인공 우식증 병소를 형성하였으므로 방사선사진상에서 상대적으로 명확한 병소 변연을 보였기 때문이라고 생각한다.^{6,26-28}

본 연구에서는 CDX-2000HQ® 시스템의 Sunny program을 이용하여 디지털 공제술을 시행하였다. 일반방사선 사진에서는 30-50%의 골무기질 소실이 발생해야 병변 인지가 가능한 반면 공제영상에서는 약 5%의 골밀도 변화만 일어나도 병소의 판별이 가능하다고 보고되고 있으며 이러한 디지털 공제술은 미세한 골변화를 보이는 치주질환, 치아우식증, 임플란트, 악관절의 골변화 및 위치변화 등의 진단과 골의 정량 분석 등에 효과적으로 사용될 수 있다고 보고되고 있다.²⁹⁻³⁹ Grondahl 등⁴⁰은 디지털공제술이 초기 인접면 치아우식증을 조기발견할 수 있다고 하였고, Nimmikoski 등³¹은 디지털 공제술이 재발 치아우식증을 발견하는데 구내 표준 방사선 사진보다 우수하다고 보고하였다.

허 등⁴¹의 연구에서 디지털 공제술이 치근단 흡수양상에 대해 가장 높은 진단능을 보여, 본 연구에서도 동일한 결과를 기대하였으나 기대만큼 진단능이 높지는 않았다. 이는 치아를 석고 블록에서 발거하여 우식증 형성 후 재위치 시킬 때, 베이스 플레이트 왁스의 변형과 정확한 위치로의 식립이 어려워, 재현성이 저하된 것이 낮은 진단능의 원인요소였을 거라고 생각된다.

기하학적 표준화가 선행되지 않은 디지털 공제술은 실제 골변화와 촬영시의 위치변화에 의한 구조 잔상이 구별되지 않아 정확한 진단이 불가능하다.⁴²⁻⁴⁶ 두 영상을 중첩할 때 사용된 Sunny 프로그램은 비교하려는 두 개의 영상에 4개의 참고점 (reference point)을 설정하고 이 점들의 위치를 수학적인 관계식을 통하여 일치시킨 후에 디지털 공제영상을 얻는데, 4개의 참고점을 설정할 때 정확한 대응점을 찾기가 쉽지 않았다. 그리고 전압의 가변성, 노출시간의 부정확성 등의 원인으로 방사선 조사량의 변화가 공제전, 후 영상의 대조도를 일치시키지 못한 점도 적절한 공제상을 얻지 못한 또 다른 원인으로 생각한다.

일반 방사선사진을 디지털 영상 처리하는 간접 디지털 방사선사진촬영법은 이차적으로 생성된 상이기 때문에 영상정보의 손실이 야기될 수 있으므로 적절한 해상도로 디지털화하는 것이 필요하며 아날로그 자료를 디지털화하는 입력장치의 선택이 중요하다. 통상적인 입력장치는 TV용 카메라 (CCD 카메라), 레이저 스캐너, 드럼스캐너 등이 이용된다. 본 연구에서는 GT-9600® 스캐너가 사용되었는데 최대 해상도 2400 dpi를 지원하므로 간접 디지털 영상을 나타내는데 비교적 적절한 입력장치라고 생각하며, 본 실험에서 직접 디지털 방사선사진촬영법에 비해 낮지만 만족할만한 진단능을 보였다.

본 연구에서는 병소의 유무만을 고려했을 때 진단능을

민감도와 특이도로 평가할 수 있는데 구내 표준 방사선사진촬영법, 간접 디지털 방사선사진촬영법, 직접 디지털 방사선사진촬영법 및 디지털 공제술에서 민감도가 특이도보다 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 작은 방사선투과성을 나타내는 초기 인접면 치아우식증의 경우 적절한 흑화도로 조절하여 촬영하면서 인접면에서 소환(burn-out)현상이 나타나 위음성(false negative)이 많이 발생했기 때문이라고 생각한다.

판독자가 관찰하는 현상된 필름이나 모니터의 크기도 진단능에 영향을 주었을 것이라고 생각한다. 구내 표준 방사선사진촬영법에서 이용된 필름은 No. 2 필름으로 3×4 cm 크기였으며 디지털 영상은 17인치 컴퓨터 모니터 상에서 구내필름의 약 7배 확대 상에서 판독되었으므로 구내 표준 방사선사진에서는 작아서 관찰할 수 없는 병소도 컴퓨터 모니터 상에서는 판독하기가 보다 용이하였다고 생각하며 디지털 방사선사진촬영법의 민감도가 구내 표준 방사선사진촬영법 보다 높게 나타났는데 이는 상의 확대와 관련이 있을 것으로 생각된다. 한편 Svanaes 등⁴⁷은 디지털 영상의 확대는 진단능을 향상시킨다고 보고하였으나 Moystad 등⁴⁸은 일정 크기이상의 확대에서는 오히려 진단능이 감소된다고 보고하였다.

본 연구의 결과 현재의 CCD 기초의 구내 직접 디지털 방사선사진촬영법인 CDX-2000HQ[®] 시스템은 초기 치아우식증 진단시 구내 표준 방사선사진상과 거의 대등한 진단능을 보임으로써 적정 흑화도와 대조도를 가진 구내 표준 방사선사진촬영법을 대신할 수 있는 영상시스템으로 생각되며 Sunny 프로그램을 이용한 디지털 공제술은 좀더 조절된 실험환경에서 연구가 필요하다고 생각된다. 이번 연구는 실험적 연구에 불과하므로 CDX-2000HQ[®] 시스템을 이용한 실제환자를 대상으로 한 임상적 평가가 이루어져야 하며, 다른 영역인 치근단 병변, 치주질환, 치아 매식술이나 근관치료시 CDX-2000HQ[®] 시스템의 활용도에 대한 연구가 지속적으로 이루어지는 것이 바람직하다고 생각된다.

참 고 문 헌

- Mouyen F, Benz C, Sonnabend E, Lodter JP. Presentation and physical evaluation of RadioVisioGraphy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1989; 68: 238-42.
- Horner K, Shearer AC, Walker A, Wilson NH. Radiovisiography: an initial evaluation. *Br Dent J* 1990; 168: 244-8.
- Dagenais ME, Clark BG. Receiver operating characteristics of RadioVisioGraphy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1995; 79: 238-45.
- 도정주, 김은경. 직접 디지털 방사선 촬영시스템과 Ektaspeed 및 Ektaspeed plus 필름을 이용한 방사선 사진용 디지털 영상시스템과의 연구. *대한구강악안면방사선학회지* 1995; 25: 51-70.
- Wenzel A, Hintze H, Mikkelsen L, Mouyen F. Radiographic detection of occlusal caries in noncavitated teeth. A comparison of conventional film radiographs, digitized film radiographs, and RadioVisioGraphy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1991; 72: 621-6.
- Hintze H, Wenzel A, Jones C. In vitro comparison of D- and E-speed film radiography, RVG, and visualix digital radiography for the detection of enamel approximal and dentinal occlusal caries lesions. *Caries Res* 1994; 28: 363-7.
- Kang BC, Farman AG, Scarfe WC, Goldsmith LJ. Observer differentiation of proximal enamel mechanical defects versus natural proximal dental caries with computed dental radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996; 82: 459-65.
- Price C, Ergul N. A comparison of a film-based and a direct digital dental radiographic system using a proximal caries model. *Dentomaxillofac Radiol* 1997; 26: 45-52.
- 김 현, 정현대. 모의 인접면 치아우식 병소의 진단을 위한 구내 표준방사선사진과 그 디지털 영상의 비교. *대한구강악안면방사선학회지* 1994; 24: 279-90.
- 권기정, 황의환, 이상래. 디지털 방사선촬영술을 이용한 인접면 치아우식증 진단에 관한 실험적 연구. *대한구강악안면방사선학회지* 1994; 24: 85-94.
- Stassinakis A, Bragger U, Stojanovic M, Burgin W, Lussi A, Lang NP. Accuracy in detecting bone lesions in vitro with conventional and subtracted direct digital imaging. *Dentomaxillofac Radiol* 1995; 24: 232-7.
- 조봉혜, 나경수, 이희주. Ektaspeed plus 방사선사진, 간접디지털 영상 및 Digora 영상의 치근단 병소의 판독능 비교. *대한구강악안면방사선학회지* 1998; 28: 461-70.
- Scarfe WC, Farman AG, Kelly MS. Flash Dent: an alternative charge-coupled device/scintillator-based direct digital intraoral radiographic system. *Dentomaxillofac Radiol* 1994; 23: 11-7.
- Farman AG, Scarfe WC, Schick DB, Rumack PM. Computed dental radiography: evaluation of a new charge-coupled device-based intraoral radiographic system. *Quintessence Int* 1995; 26: 399-404.
- White SC, Yoon DC. Comparative performance of digital and conventional images for detecting proximal surface caries. *Dentomaxillofac Radiol* 1997; 26: 32-8.
- Wenzel A. Effect of image enhancement for detectability of bone lesions in digitized intraoral radiographs. *Scand J Dent Res* 1988; 96: 149-60.
- Nelvig P, Wing K, Welander U. Sens-A-Ray. A new system for direct digital intraoral radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992; 74: 818-23.
- Molteni R. Direct digital dental x-ray imaging with visualix/VIXA. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1993; 76: 235-43.
- Douglass CW, McNeil BJ. Clinical decision analysis methods applied to diagnostic tests in dentistry. *J Dent Educ* 1983; 47: 708-14.
- Metz CE, Goodenough DJ, Rossmann K. Evaluation of receiver operating characteristic curve data in terms of information theory, with applications in radiography. *Radiology* 1973; 109: 297-303.
- Ohki M, Okano T, Nakamura T. Factors determining the diagnostic accuracy of digitized conventional intraoral radiographs. *Dentomaxillofac Radiol* 1994; 23: 77-82.
- Fujita M, Kodera Y, Ogawa M, Wada T, Doi K. Digital image processing of periapical radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1988; 65: 490-4.
- Kassebaum DK, McDavid WD, Dove SB, Waggenger RG. Spatial resolution requirements for digitizing dental radiographs. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1989; 67: 760-9.
- 대한구강악안면방사선학교수협의회. *구강악안면방사선학*. 제3판.

- 서울: 나래출판사; 2001. p. 166-70.
25. Paurazas SB, Geist JR, Pink FE, Hoen MM, Steiman HR. Comparison of diagnostic accuracy of digital imaging by using CCD and CMOS-APS sensors with E-speed film in the detection of periapical bony lesions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000; 89: 356-62.
 26. Wenzel A, Borg E, Hintze H, Grondahl HG. Accuracy of caries diagnosis in digital images from charge-coupled device and storage phosphor systems: an in vitro study. *Dentomaxillofac Radiol* 1995; 24: 250-4.
 27. Svanaes DB, Moystad A, Risnes S, Larheim TA, Grondahl HG. Intraoral storage phosphor radiography for approximal caries detection and effect of image magnification: comparison with conventional radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996; 82: 94-100.
 28. Moystad A, Svanaes DB, Risnes S, Larheim TA, Grondahl HG. Detection of approximal caries with a storage phosphor system. A comparison of enhanced digital images with dental x-ray film. *Dentomaxillofac Radiol* 1996; 25: 202-6.
 29. van der Stelt PF. Experimentally produced bone lesions. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1985; 59: 306-12.
 30. Hausmann E, Christersson L, Dunford R, Wikesjo U, Phyo J, Genco RJ. Usefulness of subtraction radiography in the evaluation of periodontal therapy. *J Periodontol* 1985; 56: 4-7.
 31. Nummikoski PV, Martinez TS, Matteson SR, McDavid WD, Dove SB. Digital subtraction radiography in artificial recurrent caries detection. *Dentomaxillofac Radiol* 1992; 21: 59-64.
 32. Braegger U, Pasquali L, Weber H, Kornman KS. Computer-assisted densitometric image analysis (CADIA) for the assessment of alveolar bone density changes in furcations. *J Clin Periodontol* 1989; 16: 46-52.
 33. Engelke W, Ruttimann UE, Tsuchimochi M, Bacher JD. An experimental study of new diagnostic methods for the examination of osseous lesions in the temporomandibular joint. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992; 73: 348-59.
 34. Ludlow JB, Soltmann R, Tyndall D, Grady JJ. Accuracy of quantification of mandibular condyle displacement in digitally subtracted linear tomograms. *Dentomaxillofac Radiol* 1992; 21: 83-7.
 35. Ludlow JB, Soltmann R, Tyndall D, Grady JJ. Digitally subtracted linear tomograms: three techniques for measuring condylar displacement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1991; 72: 614-20.
 36. Ruttimann UE, Webber RL. Volumetry of localized bone lesions by subtraction radiography. *J Periodontal Res* 1987; 22: 215-6.
 37. 조형희, 김은경. 방사선사진용 디지털영상시스템의 정량적 평가에 관한 실험적연구. *대한구강악안면방사선학회지* 1994; 137-50.
 38. Walker A, Horner K, Czajka J, Shearer AC, Wilson NH. Quantitative assessment of a new dental imaging system. *Br J Radiol* 1991; 64: 529-36.
 39. Webber RL, Ruttimann UE, Heaven TJ. Calibration errors in digital subtraction radiography. *J Periodontal Res* 1990; 25: 268-75.
 40. Grondahl HG, Grondahl K, Okano T, Webber RL. Statistical contrast enhancement of subtraction images for radiographic caries diagnosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982; 53: 219-23.
 41. 허민석, 이삼선, 이경희, 최항문, 최순철, 박태원. 디지털공제방사선 촬영술을 이용한 치근단 흡수의 평가. *대한구강악안면방사선학회지* 2001; 31: 51-5.
 42. Webber RL, Ruttimann UE, Groenhuis RA. Computer correction of projective distortions in dental radiographs. *J Dent Res* 1984; 63: 1032-6.
 43. Wenzel A. Effect of manual compared with reference point superimposition on image quality in digital subtraction radiography. *Dentomaxillofac Radiol* 1989; 18: 145-50.
 44. van der Stelt PF, Webber RL, Ruttimann UE, Groenhuis RA. A procedure for reconstruction and enhancement of tomosynthetic images. *Dentomaxillofac Radiol* 1986; 15: 11-8.
 45. Jeffcoat MK. Radiographic methods for the detection of progressive alveolar bone loss. *J Periodontol* 1992; 63: 367-72.
 46. Webber RL, Ruttimann UE, Grondahl HG. X-ray image subtraction as a basis for assessment of periodontal changes. *J Periodontal Res* 1982; 17: 509-11.
 47. Svanaes DB, Moystad A, Risnes S, Larheim TA, Grondahl HG. Intraoral storage phosphor radiography for approximal caries detection and effect of image magnification: comparison with conventional radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996; 82: 94-100.
 48. Moystad A, Svanaes DB, Larheim TA, Grondahl HG. Effect of image magnification of digitized bitewing radiographs on approximal caries detection: an in vitro study. *Dentomaxillofac Radiol* 1995; 24: 255-9.