

QLF-D와 OCT를 이용한 초기 인공우식병소의 변화 탐지

구혜민^{1,2,3}, 김보라^{1,2,3}, 강시묵^{1,2,3}, 정중호⁴, 권호근¹, 김백일^{1,2,3}¹연세대학교 치과대학 예방치과학교실, ²BK21 플러스 통합구강생명과학 사업단, ³구강과학연구소, ⁴LG전자 미래 IT 융합연구소

Detection of early changes in caries lesion using QLF-D and OCT

Hye-Min Ku^{1,2,3}, Bo-Ra Kim^{1,2,3}, Si-Mook Kang^{1,2,3}, Jung-Ho Chung⁴, Ho-Keun Kwon¹, Baek-Il Kim^{1,2,3}¹Department of Preventive Dentistry & Public Oral Health, ²BK21 PLUS Project, ³Oral Science Research Center, Yonsei University College of Dentistry, ⁴Future IT R&D Laboratory, LG Electronics, Seoul, KoreaReceived: March 19, 2014
Revised: March 19, 2014
Accepted: March 26, 2014**Corresponding Author:** Baek-Il Kim
Department of Preventive Dentistry &
Public Oral Health, Yonsei University
College of Dentistry, 50 Yonsei-ro,
Seodaemun-gu, Seoul 120-752, Korea
Tel: +82-2-2228-3070
Fax: +82-2-392-2926
E-mail: drkbi@yuhs.ac
*이 연구는 LG 전자의 지원을 받아 수행
되었음 (No. C2013014770).**Objectives:** We aimed to compare the differences in caries lesion changes when measured by QLF-D as fluorescence loss and by SS-OCT as lesion depth with respect to demineralized time, during formation of artificial early caries lesion. We also demonstrated that QLF-D and SS-OCT can be used effectively in monitoring the longitudinal progression of simulated caries lesions.**Methods:** Ten bovine incisors were sectioned (5×4 mm) and embedded in epoxy resin. An acid-resistant nail varnish was applied to a part of the tooth surfaces to protect sound enamel (2×4 mm). To generate lesions, each specimen was immersed in 40 ml of a demineralizing gel for 20 days at 37°C. To measure mineral loss of the demineralized specimens, fluorescence loss (ΔF, %) was measured by QLF-D and lesion depth (μm) was determined by SS-OCT from the captured cross-sectional image. All the specimens were analyzed daily by QLF-D image analysis software and SS-OCT image analysis program for 20 days. The repeated measures analysis of ΔF and lesion depth was used. The paired t-test was used to assess differences between each day. The correlation between ΔF and lesion depth was determined using the Pearson's correlation coefficient.**Results:** On the 5th, 10th, and 15th day, compared to baseline values, ΔF decreased in 12.7%, 25.0%, and 33.6% of the specimens, respectively, and the lesion depth increased in 9.9%, 16.0%, and 22.6% of the specimens, respectively. However, after 15 days, there was no change in the ΔF and lesion depth. High significant correlation was identified between the resultant values of ΔF obtained by QLF-D and those of lesion depth obtained by SS-OCT ($r = -0.811, P < 0.0001$).**Conclusions:** The QLF-D and SS-OCT could detect subtle changes in mineral loss and lesion depth with respect to demineralized time. Furthermore, these devices were useful for monitoring changes in mineral amount and lesion depth.**Key Words:** Early dental caries, Longitudinal study, Optical coherence tomography, Quantitative light-induced fluorescence-digital

서론

우리나라는 국민의 DMFT 지수 감소, 소득 수준 증가 및 Dental IQ 상승 등 다양한 요인에 따라 예방적 치과 치료에 대한

환자의 요구가 증가하기 시작했다. 일반적인 만성질환과 마찬가지로 치아우식증의 성공적인 예방을 위해서는 초기의 미세한 변화를 탐지하여 적절한 치료를 제공하는 것이 중요하다¹⁾.

X-ray는 시진과 함께 현재 가장 널리 쓰이고 있는 우식 탐지

방법으로 현재 대다수 임상가는 방사선 사진상에서 나타난 우식의 진행 정도로 개인의 치아우식증을 진단하고 있다²⁾. 그러나 방사선 사진은 법랑질의 1/2 이상 우식이 진행되어야 비로소 확인이 가능하므로 민감도가 낮고 실제 병소의 깊이보다 과소평가 될 가능성이 높아 초기 단계의 우식을 탐지하기에는 많은 제한점이 있다고 알려져 있다³⁾. 이처럼 기존의 우식 탐지 방법은 주로 진행된 우식 병소 탐지에 초점이 맞춰져 있으므로 초기 우식 병소를 탐지하기가 매우 어렵다⁴⁾.

최근 몇 년간 새로운 우식 탐지 장비에 대한 관심이 증가하여 초기에 탈회된 치아의 미세한 변화를 측정할 수 있는 우식 탐지 기기들이 새롭게 개발되고 있다. 새로운 우식 탐지 장비는 주로 X-ray, 빛, 전류, 초음파 및 표면의 거칠기 등의 다양한 물리적 성질을 대리변수로 이용하며 치아 구조의 미세변화를 이들 대리변수의 변화로 반영하여 나타내고 있다⁵⁾. 이처럼 물리적 성질을 이용하는 탐지 장비는 우식이 진행된 상태와 정상 상태를 비교하여 미세한 변화를 탐지할 수 있고 임상가의 진단에 유용한 정보를 제공할 수 있다⁵⁾.

치아에서 발생하는 초기 무기질 변화를 탐지하는 장비로 잘 알려진 Quantitative light-induced fluorescence (QLF)는 405 nm 파장의 푸른색 가시광선에 의해 유도되는 치아의 자가 형광성을 이용하여 탈회가 발생한 부위의 형광소실도를 정량적으로 분석이 가능한 소프트웨어가 탑재된 구내 카메라 장비로 처음 소개되었다. 초기 우식 진단 장비에 대한 체계적 문헌고찰을 통해 다른 우식 진단 기기와 비교했을 때 QLF는 민감도 0.83, 특이도 0.92로 초기 우식을 탐지하는 데 효과적임이 보고된 바 있다⁶⁻¹⁰⁾. 또한 많은 선행연구를 통하여 비침습적인 이 장비가 장기간 초기 우식증의 변화 양상 추적에 유용함이 밝혀졌다^{7,11)}. QLF는 최근에 전악 촬영이 가능한 디지털카메라와 특수필터를 사용한 새로운 형태인 Quantitative light-induced fluorescence-digital (QLF-D)로 발전되었다(Fig. 1). QLF-D는 기존의 QLF와 같이 우식의

진행 정도를 형광소실의 변화로 분석하는 원리는 동일하지만 필터를 개선하여 치아 본연의 색에 보다 가깝게 보인다는 장점이 있어 임상에서 유용하게 활용될 수 있다⁷⁾.

한편 비파괴적으로 인체조직의 단층 영상을 얻을 수 있는 광결맞음 영상장치(Optical coherence tomography, OCT)라는 새로운 기술이 개발되었고 현재 치의학 분야에서 초기우식증의 진단 장비로서의 활용 가능성이 연구되고 있다¹²⁻¹⁵⁾. OCT는 안과 영역의 망막검사에 활발히 이용되고 있던 기술로 근적외선 영역 파장대(1260-1360 nm)의 광원을 사용하여 생체조직에 산란현상이 적게 일어나고 깊은 투과 깊이를 얻을 수 있다. 최근에는 치의학 분야에서 이러한 OCT의 원리를 이용하여 치아 조직 표면에 빛을 조사함으로써 횡단면의 영상을 비침습적으로 얻고자 노력하고 있다. 선행연구 결과에 따르면 OCT의 횡단면 영상을 이용했을 때 치아의 평활면 우식 진행 단계를 평가하기에 시진보다 높은 민감도와 특이도를 나타냈으며 숙련된 검사자 간 일치도가 0.78로 높게 보고된 바 있다¹⁶⁾. 이에 따라 OCT는 치아우식증의 진행 정도를 결정하는 또 하나의 탐지 도구로써 활용 가능성이 높을 것으로 예상된다.

현재 사용되고 있는 OCT는 물체의 스캐닝 방법에 따라 시간영역의 OCT (time domain OCT)와 스펙트럼 영역의 OCT (spectral domain OCT)로 나눌 수 있다. 스펙트럼 영역의 OCT는 시간영역의 OCT보다 조직의 횡단면 이미지를 획득하는 데 있어서 측정시간이 짧을 뿐만 아니라 신호 대 잡음 비가 높은 장점을 가지고 있다^{17,18)}. 또한 스펙트럼 영역 OCT는 스캐닝 방법에 따라 분광형 광결맞음 영상장치(spectral domain OCT, SD-OCT)와 이것이 변형된 고속의 파장변환 광원을 이용한 파장변환 광결맞음 영상장치(swept-source OCT, SS-OCT, Fig. 2)로 분류될 수 있다. 법랑질의 무기질 소실량을 OCT로 측정한 대부분의 연구들은 시간영역 스캐닝 방식인 OCT (time domain OCT)나 SD-OCT 연구에 국한되어 있고 SS-OCT를 이용한 우식 병소 변

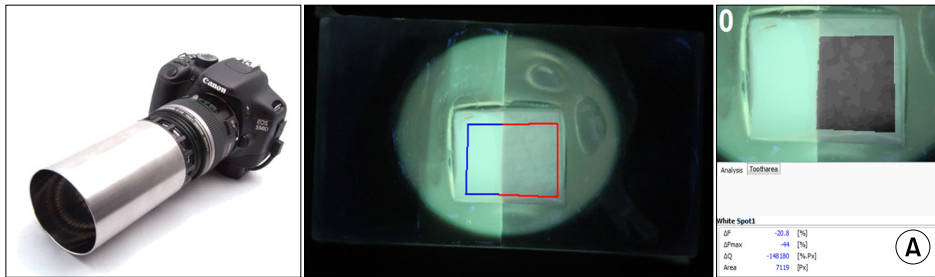


Fig. 1. An image showing analysis of specimen and QLF-D device a (A).

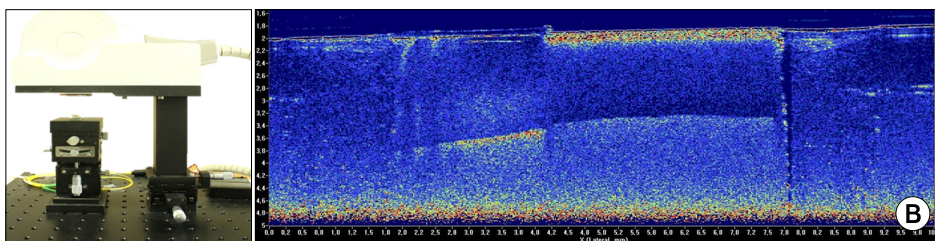


Fig. 2. An image showing scanned specimen and SS-OCT device a (B).

화 추적에 대한 연구는 거의 없다¹⁹⁾. 따라서 시간에 따른 초기 우식 병소의 변화 양상을 비파괴적 진단 장비인 SS-OCT로 탐지하고 이를 추적할 수 있는지 확인하는 것이 필요하다. 이를 통해, 우식외동의 형성 전 단계인 초기 우식 병소의 발생과 미세한 변화과정을 탐지할 수 있는지 여부를 확인한다면 예방적 치료 계획 수립의 근거를 마련하는 데 도움이 될 것이다.

이에 본 연구에서는 탈회시간에 따른 우식병소의 미세변화를 형광소실량의 변화로 나타내는 QLF-D와 광 간섭 변화를 영상화할 수 있는 SS-OCT의 비교를 통해 비파괴적으로 우식 병소의 탐지 및 추적이 가능한지 확인하고자 하였다.

연구대상 및 방법

1. 시편준비 및 인공우식병소 형성

건전한 우전치 법랑질 순면을 5×4 mm 크기로 다이아몬드 디스크(Superflex 358; NTI-Kahla GmbH, Kahla, Germany)가 장착된 저속 핸드피스(Lasungmedice, Seoul, South Korea)를 이용하여 절단하였다. 10개의 절단된 우치를 법랑질 표면이 노출되도록 20×11×7 mm 크기의 아크릴 몰드에 레진(Jet™ Tooth Shade; Lang Dental MFG. Inc., Wheeling, IL, USA)으로 매몰한 후 P800, P1500, P2400의 연마지(Sic sand paper; R&B Inc., South Korea)를 이용하여 단계적으로 편평하게 연마하였다. 연마된 법랑질 시편 표면의 2×4 mm 면적에 내산성의 바니쉬를 도포하여 정상 법랑질을 보호하였고, 나머지 3×4 mm는 탈회용액에 노출하여 인공우식병소가 형성되도록 준비하였다. 인공우식병소 형성을 위해 1 M lactic acid에 Carbopol 2050 (Carbopol® ETD 2050 polymer; Noveon, Ohio, USA)이 1% 포함된 pH 4.8의 탈회용액을 제조한 후, 각 시편 1개당 40 ml의 탈회용액에 개별로 침적시켜 37°C에서 20일 동안 탈회시켰다.

2. 인공우식병소의 형광 소실량 및 병소 깊이 평가

2.1. QLF-D를 이용한 탈회 병소의 형광 소실량 측정

본 연구에서는 Digital full-sensor SLR camera (Model 550D, Canon, Tokyo, Japan)에 청색광과 백색광의 LED가 카메라 본체 앞에 장착된 QLF-D system (Biluminator™, Inspektor research systems BV, Amsterdam, The Netherlands)을 사용하였다. 촬영조건은 shutter speed 1/20 s, aperture value 7.1, ISO speed 1600으로 고정하여 'Live view' 방식으로 20일 동안 탈회된 시편 표면의 형광 사진을 매일 반복 촬영하였다. 탈회된 시편의 형광 소실량은 청색광원에서 촬영한 형광이미지에서 건전치면 대비 형광 소실량을 나타내는 ΔF(%)를 QLF-D 전용 분석프로그램(QA2 v 1.23; Inspektor research systems BV, The Netherlands)을 이용하여 측정하였다.

2.2. SS-OCT를 이용한 탈회 병소의 깊이 측정

우식 병소의 깊이를 측정하기 위하여 중앙파장 1310 nm, 대역폭 100 nm, 파장 변환 속도 50-kHz의 광원을 이용한 SS-OCT

(Prototype, LG electronics, Seoul, South Korea)를 사용하여 20일 동안 매일 횡단면의 이미지를 스캐닝한 후 사진을 촬영하였다. 병소의 깊이는 SS-OCT로 스캔한 횡단면 이미지를 이미지 분석 프로그램(Image Pro-Plus 6.0; Media cybernetics, Washington, D.C., USA)을 이용하여 탈회로 인해 빛이 산란되어 건전 치질과 다른 색을 나타내는 부분을 우식 병소로 제한하여 병소의 깊이(μm)를 측정하였다.

QLF-D와 OCT를 이용하여 이미지를 촬영 및 분석하는 것은 한 명의 검사자가 실행하였으며, 한 시편의 탈회 부위에서 세 부위의 깊이를 측정하였다.

3. 통계분석

시간에 따른 병소의 변화 양상의 유의성은 반복측정 분산분석으로 검정하였고, 각 탈회 시간에 따른 형광 소실량과 병소 깊이가 나타내는 전후 차이는 대응표본 t-검정으로 분석하였다. 우식 병소의 변화를 탐지하는 QLF-D와 SS-OCT 간의 관련성은 피어슨 상관분석(Pearson correlation coefficient)으로 확인하였다. 모든 통계분석은 PASW 18.0 통계 패키지 프로그램(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하여 유의수준 0.05에서 수행하였다.

연구성적

1. QLF-D를 이용한 인공우식병소의 형광 소실량 변화 평가

QLF를 이용하여 인공우식병소의 형광 소실량(ΔF)을 20일 동안 추적 관찰한 결과, ΔF은 1일 차인 -0.5%부터 20일 차인 -33.6%까지 감소함을 나타내었다($P < 0.0001$, Table 1). ΔF는 탈회 2일 차에 9.2%로 가장 큰 감소율을 나타내었다. 또한, 1일 차 측정값과 비교하면 5일, 10일, 15일, 20일 차 형광 소실률은 각각 12.3%, 48.2%, 60.0%, 65.0%로 점차 증가하였다($P < 0.0001$). 전체적으로 탈회 시간이 증가함에 따라 우식 병소에서 ΔF가 감소하는 변화 양상을 볼 수 있었으나, 15일 이후부터 ΔF값이 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있었으며 형광 이미지 상에서 크게 변화되지 않음을 보였다(Fig. 3).

2. SS-OCT를 이용한 인공우식병소의 깊이 변화 평가

탈회 시간이 증가함에 따라 우식 병소 깊이는 1일 차부터 20일 차까지 65.7 μm에서 289.1 μm로 점차 증가하였다($P < 0.0001$, Table 1). 1일 차 측정값보다 5일, 10일, 15일, 20일 차 병소 깊이는 각각 2.5배, 3.5배, 4.4배, 4.4배 증가하는 것으로 나타났다($P < 0.0001$). 인공탈회병소의 깊이는 탈회용액에 침적시킨 후 1일 차에 65.7%로 가장 큰 변화를 나타냈고 탈회 15일 차까지는 증가하는 양상을 보이다가, 16일 이후에는 불규칙적인 변화를 나타냈으며 횡단면 이미지에서도 병소 깊이의 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다(Fig. 4).

Table 1. Changes in fluorescence and lesion depth by demineralization time

Days	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th	10 th	11 th	12 th	13 th	14 th	15 th	16 th	17 th	18 th	19 th	20 th	P-value*
LD	65.7 (17.2)	97.0 (17.9)	117.8 (21.0)	139.0 (17.4)	164.9 (25.3)	181.2 (29.3)	203.0 (27.4)	202.9 (23.0)	239.9 (15.5)	232.4 (23.8)	241.0 (15.4)	250.0 (23.9)	268.7 (11.1)	263.7 (11.1)	291.2 (22.4)	311.3 (29.2)	300.6 (23.8)	295.2 (23.5)	288.2 (22.4)	289.1 (23.1)	<0.0001
P-value [†]		0.001	0.006	0.002	<0.001	0.019	<0.001	0.992	0.003	0.501	0.200	0.201	0.040	0.685	0.001	0.036	0.268	0.493	0.288	0.923	
ΔF	-0.5 (1.6)	-5.2 (1.9)	-7.4 (1.4)	-10.1 (2.5)	-12.8 (2.3)	-16.7 (3.3)	-21.0 (4.4)	-22.6 (4.4)	-23.7 (4.6)	-25.1 (5.2)	-26.8 (4.0)	-28.3 (4.6)	-29.7 (5.0)	-30.7 (4.6)	-31.1 (4.5)	-29.9 (4.2)	-31.6 (4.4)	-31.6 (6.6)	-32.6 (4.6)	-33.6 (4.5)	<0.0001
P-value [†]		<0.001	0.003	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.007	0.004	<0.001	0.025	0.198	0.009	0.001	0.983	0.277	0.008	

All values are the mean (standard deviation).

ΔF means the loss of fluorescence in demineralized enamel part compared to sound part (%).

LD means the lesion depth measured in images taken by SS-OCT (mm).

* P-values denote statistically significant differences within rows by repeated measures analysis.

† P-values denote statistically significant differences by paired t-test.

3. QLF-D로 측정된 형광 소실량과 SS-OCT로 측정된 병소 깊이와의 관련성

20일 탈회시키는 동안 시간에 따른 인공우식병소의 변화를 SS-OCT로 측정된 병소 깊이와 QLF-D로 측정된 형광 소실량은 높은 음의 상관성을 나타냈고 이는 통계적으로 유의미하였다($r = -0.811, P < 0.0001$).

고 안

본 연구에서는 QLF-D와 SS-OCT를 이용하여 인공우식병소를 형성하는 과정 중에 탈회 시간에 따라 치아에서 나타나는 미세한 변화를 탐지 및 추적할 수 있는지를 평가하고자 하였다. 본 연구에서 QLF-D로 관찰한 탈회 병소의 ΔF 값은 14일 차까지 통계적으로 유의하게 감소하였고, 푸른 광원 하에 촬영한 이미지를 육안으로 보아도 인공우식병소를 형성한 시간에 따라 형광이 소실된 정도가 증가함을 확인할 수 있었다($P < 0.0001$, Table 1, Fig. 3). 반면 SS-OCT로 측정된 병소 깊이는 전체적으로는 20일까지는 증가하는 추세를 보였으나, 탈회 9일 차까지만 매일 약 21.8% 씩 통계적으로 유의하게 증가하는 양상을 보였고 그 이후에는 증가율이 점차 감소하였으며 통계적으로도 유의하지 않았다(Table 1). 이 결과에 따르면 SS-OCT를 이용한 병소 깊이 변화만으로 초기 병소의 진행 정도를 판단하는데 어느 정도의 한계가 있으며, 이 대신 병소에서 발생한 무기질의 변화를 QLF-D를 이용하여 형광 소실 정도로 측정하는 것이 조금 더 민감하게 병소의 변화를 탐지하고 추적해 낼 수 있는 것으로 사료된다. 다만, 15일 이후에 형성된 인공우식병소에서 QLF-D에 의한 형광 소실량과 SS-OCT에 의한 병소 깊이가 모두 크게 변화하지 않았다. 이는 탈회 20일까지 제한된 용량의 탈회용액을 사용하여 지속적으로 범랑질을 탈회시켰기 때문에 범랑질과 탈회용액 간의 산 이온의 움직임이 더 이상 진행되지 않고 포화되어 더 이상 탈회가 진행되지 않아 두 장비 모두에서 변화를 탐지하기 어려웠던 것으로 사료된다.

본 연구에서 사용한 QLF-D는 기존의 QLF와 형광을 이용하는 기본 원리는 동일하다. QLF는 파괴적인 방법으로 치질의 무기질 변화를 평가하는 대신에 비파괴적인 평가 방법인 형광 소실량으로 치질의 미세변화를 나타내는 탐지 능력에 대한 민감도는 0.98, 특이도 0.95으로 타당성이 우수한 장비임은 이미 입증되었다²⁰. QLF를 이용하여 우식 병소 진행 과정을 장기적으로 추적한 선행연구 결과들은 QLF가 탐지 장비로서 타당하지 증명하기 위해 파괴적으로 절단하여 무기질 소실량을 정량적으로 측정하는 transverse microradiography (TMR)와 비교하였고 그 결과 0.8 이상으로 높은 상관성을 나타내었다^{6,21}. 그러나 본 연구에서는 동일한 시편을 TMR로 측정하지 않았기 때문에 QLF-D의 형광소실량과 직접적으로 비교할 수는 없었지만, QLF와 동일한 원리이므로 실제 무기질 소실량을 유사하게 반영했을 것으로 예상된다. 이에 따라 QLF-D도 초기 미세한 변화를 민감하게 탐지할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 QLF의 타당성이 입증되면서 초기 교환면 우식 병소의 ΔF 값에 따라 적절한 치료 방법을 분류한 선행 연

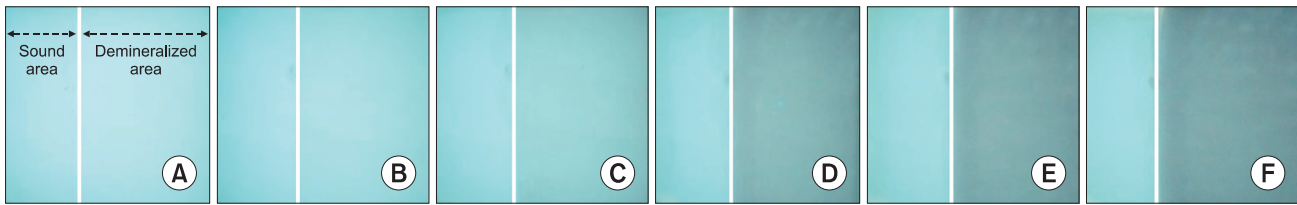


Fig. 3. Images taken by blue light of QLF-D over demineralization time. (A) base line, (B) day 1, (C) day 5, (D) day 10, (E) day 15, and (F) day 20. In the image, a left arrow indicates the sound area and a right arrow shows the demineralized area of the photographed specimen.

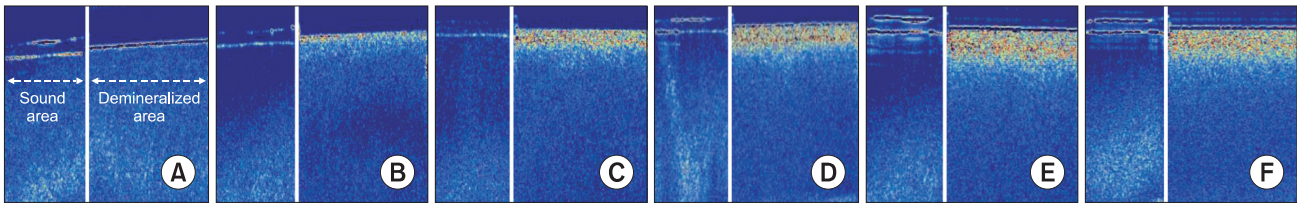


Fig. 4. Images taken by SS-OCT over demineralization time. (A) base line, (B) day 1, (C) day 5, (D) day 10, (E) day 15, and (F) day 20. In the image, a left arrow indicates the sound area and a right arrow shows the demineralized area of the scanned specimen.

구결과에 따르면 임상가가 수복치료를 행하기 모호한 환자의 우식을 진단할 경우 정상적인 수치인 ΔF 값을 제시할 수 있다²²⁾. 이를 통해 진단 과정에 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라 환자를 위한 최소한의 침습적인 처치를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, QLF-D는 장기적으로 초기의 탈회를 정량화하고 추적할 수 있어 환자가 정기적으로 치과에 내원했을 때 육안으로 보이지 않고 증상이 없는 초기 우식 치아의 변화 양상을 QLF-D로 촬영하여 환자에게 보여줄 수 있다. 따라서 초기우식증 환자에서 형광이 소실되어 밝기가 감소된 치아의 사진과 분석을 통해 우식 진단도에 따른 예방적 처치를 받아 더는 우식이 진행되지 않도록 관리할 수 있을 것이다.

한편 본 연구에서는 SS-OCT를 이용하여 건전부분에 대비한 상대적인 병소 깊이의 변화를 측정하였다. SS-OCT는 반사되거나 투과된 광자와 산란된 광자의 차이를 이용하여 조직 내부구조의 횡단면 이미지를 획득할 수 있다. 선행연구에 따르면 SS-OCT는 광원의 특성상 투과 깊이에 제한을 받기 때문에 깊은 생체조직의 영상을 획득할 수 없다는 단점이 있다고 보고되었다²³⁾. 이와 유사하게 본 연구에서도 9일 이상 탈회된 병소의 경우 무기질 소실에 따른 변화를 민감하게 확인할 수 없었다. 하지만 치아 조직의 Dentine-enamel junction (DEJ)까지는 확인이 가능하였고 상아질의 일부분도 탐지가 가능하기 때문에 수복치료의 상태 확인에도 이용 가능할 것으로 예상된다.

SS-OCT를 이용하여 촬영한 이미지를 정확하게 분석하기 위해서는 치아 경조직의 광학적 특성을 이해할 필요가 있다^{16,23)}. 선행연구에 따르면 QLF-D와 SS-OCT는 빛을 이용하여 치아 구조의 변화를 탐지하는 장비이기 때문에 탈회된 조직 내에 남아있는 타액으로 인하여 굴절률이 증가할 경우 건전 법랑질과 탈회 법랑질간의 경계가 모호해질 수 있다고 보고된 바 있다²⁴⁾. 공기의 굴절률이 1.00일 때 물은 1.33, 건전 법랑질의 굴절률은 1.63이지만

탈회로 인한 병소 본체의 무기질 소실 때문에 법랑질 조직 내에 2개의 다른 굴절 지수가 나타날 수 있다. 이를 통해 탈회된 무기질 결정체와 pore 내 액체 간의 미세계면에서 높은 반사가 나타날 가능성이 크다²⁴⁾. 따라서 건전 치면과 탈회된 치면을 QLF-D와 SS-OCT로 촬영했을 때 이미지의 밝기 강도가 다르게 나타난다. 그러나 실제 구강 내 환경은 항상 타액에 젖어있는 상태이므로 치아를 완전하게 건조시키지 않는다면 정확한 탐지가 어려울 수 있다. 그러므로 임상 현장에서 두 탐지 기기를 이용해 정확한 진단을 하기 위해서는 치아를 완전히 건조시킨 후 촬영해야 할 것으로 예상된다.

SS-OCT로 측정된 병소 깊이는 1일 차 탈회 이미지에서 밝기가 확연히 다르게 나타나는 부분을 볼 수 있었으며 이 때의 병소 깊이는 $65.7 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 본 연구와 동일한 방법으로 인공우식병소를 형성한 선행연구에 따르면 1일 동안 탈회된 병소를 절단하여 편광현미경으로 측정된 실제 병소의 깊이는 약 $40 \mu\text{m}$ 를 나타낸 것으로 보고되었다²⁵⁾. 이와 비교하였을 때 본 연구에서 SS-OCT로 측정된 병소 깊이는 실제 깊이보다 과대 측정된 것으로 보인다. 조직의 굴절지수에 관한 OCT 연구에 따르면 OCT의 단층영상은 표면과 조직을 통과하는 광학거리에 영향을 받기 때문에 화면상의 OCT 이미지에서 보이는 치아의 깊이는 실제 깊이보다 1.63배 확대되어 보인다고 보고된 바 있다²³⁾. 따라서 본 연구에서도 1일 차에 상대적 탈회 깊이 측정 시 실제보다 확대되어 보였던 것으로 사료된다. 이렇게 확대되어 보여지는 SS-OCT 이미지를 해석할 때 검사자의 주관적인 기준점이 크게 영향을 미칠 수 있으므로 과대평가하지 않도록 주의할 필요가 있다. 한편 일반적으로 편광 현미경이나 공초점 레이저 현미경을 이용한 병소의 깊이 측정 시, 한 명의 검사자가 병소의 변화 부위를 확인하고 동일한 기준으로 병소 깊이를 측정한다²⁵⁾. 또한 측정상의 오차를 최소화하기 위해 임의로 세 지점 이상을 측정하여 이들의 평균값을

병소 깊이로 제시한다. 이에 따라 본 연구에서도 OCT로 촬영한 이미지 내에서 색이 변화된 지점을 정하였고 한 시편 당 세 부위의 깊이를 측정하였다. 그러나 SS-OCT를 이용하여 관찰하는 상은 물질의 굴절률에 따라 변할 수 있기 때문에 병소의 정확한 깊이를 반영하지 못하는 한계가 있으므로 무기질 소실에 따른 굴절률을 고려해야 한다. 따라서 추후 연구를 통해 인공우식병소를 형성하는 시간에 따라 매번 시편을 절단하여 병소의 실제 깊이를 측정하고 이와 SS-OCT로 측정된 상의 깊이와의 관련성을 파악할 필요가 있다. 이와 더불어 본 연구에서 이용한 SS-OCT는 아직 상품화되지 않은 시제품(prototype)이므로 치질의 미세한 변화를 정확히 탐지하는 것에 대한 여부는 다시 검증해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 SS-OCT로 획득한 횡단면 이미지를 치아의 무기질이 소실된 부위와 건전 부위를 비교함으로써 상대적인 병소 깊이를 측정하고 변화 양상을 확인할 수 있었다. 따라서 SS-OCT를 통해 탈회 초기의 미세한 변화를 실시간으로 탐지 및 추적할 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 통해 두 탐지 장비가 초기의 미세한 변화를 탐지할 수 있고 이를 정량적으로 수치화할 수 있다는 점은 객관적인 근거 중심에 기반을 둔 진단과정이라고 말할 수 있다. 향후 임상현장에서 탐지도구로서 사용할 QLF-D와 SS-OCT는 실시간으로 촬영이 가능하므로 임상에서 초기 우식 병소를 탐지하고 지속적으로 추적 관찰하는 데 유용할 것이다.

결론

탈회시간에 따른 인공우식병소 형성을 QLF-D와 SS-OCT를 이용하여 탐지 및 추적할 수 있는지 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. QLF-D로 측정된 탈회 병소의 ΔF 값은 14일 차까지 감소하였고($P < 0.0001$), 푸른 광원 하에 촬영한 이미지를 육안으로 보아도 인공우식병소를 형성한 시간에 따라 형광이 소실된 정도가 증가함을 확인할 수 있었다.

2. SS-OCT로 측정된 병소 깊이는 전체적으로 20일까지는 증가하는 추세를 보였으나, 탈회 9일 차까지만 매일 약 21.8%씩 통계적으로 유의하게 증가하였다. 또한 SS-OCT로 촬영한 이미지를 육안으로 보아도 시간에 따른 변화양상이 점차 증가함을 확인할 수 있었다.

QLF-D를 통한 형광 소실량과 SS-OCT를 이용한 병소 깊이 모두 인공우식병소 형성 초기에 법랑질의 미세한 변화를 측정할 수 있었다.

참고문헌

- Kim CS, Han SY, Kim CW. The relationship between regional socioeconomic position and oral health behavior: A multilevel approach analysis. *J Korean Acad Oral Health* 2013; 37:208-215.
- Ricketts DN, Kidd EA, Smith BG, Wilson RF. Clinical and radiographic diagnosis of occlusal caries: a study in vitro. *J Oral Rehabil* 1995;22:15-20.

- Haak R, Wicht MJ, Hellmich M, Gossmann A, Noack MJ. The validity of proximal caries detection using magnifying visual aids. *Caries Res* 2002;36:249-255.
- Bader JD, Shugars DA, Bonito AJ. Systematic reviews of selected dental caries diagnostic and management methods. *J Dent Educ* 2001;65:960-968.
- Pretty IA. Caries detection and diagnosis: novel technologies. *J Dent* 2006;34:727-739.
- Gmur R, Giertsen E, van der Veen MH, de Josselin de Jong E, ten Cate JM, Guggenheim B. In vitro quantitative light-induced fluorescence to measure changes in enamel mineralization. *Clin Oral Investig* 2006;10:187-195.
- Stookey GK. Quantitative light fluorescence: a technology for early monitoring of the caries process. *Dent Clin North Am* 2005;49:753-770, vi.
- Pretty IA, Pender N, Edgar WM, Higham SM. The in vitro detection of early enamel de- and re-mineralization adjacent to bonded orthodontic cleats using quantitative light-induced fluorescence. *Eur J Orthod* 2003;25:217-223.
- Ando M, Hall AF, Eckert GJ, Schemehorn BR, Analoui M, Stookey GK. Relative ability of laser fluorescence techniques to quantitate early mineral loss in vitro. *Caries Res* 1997;31:125-131.
- Gomez J, Tellez M, Pretty I, Ellwood R, Ismail A. Non-cavitated carious lesions detection methods: a systematic review. *Community Dent Oral Epidemiol* 2013;41:55-66.
- Chew HP, Zakian CM, Pretty IA, Ellwood RP. Measuring initial enamel erosion with quantitative light-induced fluorescence and optical coherence tomography: an in vitro validation study. *Caries Res* 2014;48:254-262.
- Natsume Y, Nakashima S, Sadr A, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Estimation of lesion progress in artificial root caries by swept source optical coherence tomography in comparison to transverse microradiography. *J Biomed Opt* 2011;16:071408.
- Amaechi BT, Podoleanu A, Higham SM, Jackson DA. Correlation of quantitative light-induced fluorescence and optical coherence tomography applied for detection and quantification of early dental caries. *J Biomed Opt* 2003;8:642-647.
- Jones RS, Darling CL, Featherstone JD, Fried D. Imaging artificial caries on the occlusal surfaces with polarization-sensitive optical coherence tomography. *Caries Res* 2006;40:81-89.
- Shimada Y, Sadr A, Burrow MF, Tagami J, Ozawa N, Sumi Y. Validation of swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) for the diagnosis of occlusal caries. *J Dent* 2010;38:655-665.
- Nakagawa H, Sadr A, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Validation of swept source optical coherence tomography (SS-OCT) for the diagnosis of smooth surface caries in vitro. *J Dent* 2013;41:80-89.
- Lim H, de Boer JF, Park BH, Lee EC, Yelin R, Yun SH. Optical frequency domain imaging with a rapidly swept laser in the 815-870 nm range. *Opt Express* 2006;14:5937-5944.
- Chinn SR, Swanson EA, Fujimoto JG. Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source. *Opt Lett* 1997;22:340-342.
- Fried D, Xie J, Shafi S, Featherstone JD, Breunig TM, Le C. Imaging caries lesions and lesion progression with polarization sensitive optical coherence tomography. *J Biomed Opt* 2002;7:618-627.
- Gomez J, Zakian C, Salsone S, Pinto SC, Taylor A, Pretty IA, et al. In vitro performance of different methods in detecting occlusal caries lesions. *J Dent* 2013;41:180-186.
- Pretty IA, Ingram GS, Agalamanyi EA, Edgar WM, Higham SM. The use of fluorescein-enhanced quantitative light-induced fluorescence to monitor de- and re-mineralization of in vitro root caries. *J Oral Rehabil* 2003;30:1151-1156.

22. Alammari MR, Smith PW, de Josselin de Jong E, Higham SM. Quantitative light-induced fluorescence (QLF): a tool for early occlusal dental caries detection and supporting decision making in vivo. *J Dent* 2013;41:127-132.
23. Hariri I, Sadr A, Shimada Y, Tagami J, Sumi Y. Effects of structural orientation of enamel and dentine on light attenuation and local refractive index: an optical coherence tomography study. *J Dent* 2012;40:387-396.
24. Stamnes JJ, Sithambaranathan GS. Reflection and refraction of an arbitrary electromagnetic wave at a plane interface separating an isotropic and a biaxial medium. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 2001;18:3119-3129.
25. Kim HE, Kwon HK, Kim BI. Recovery percentage of remineralization according to severity of early caries. *Am J Dent* 2013;26:132-136.