

보빈 치아 균열의 적외선 열화상 검사 가능성에 관한 실험적 연구

Feasibility Study on Detection of Crack in Bovine Incisor Using Active Thermography

김우재*, 양승용**, 김노유***†

Woojae Kim*, Seungyong Yang** and Nohyu Kim***†

초 록 보빈 치아 균열을 능동형 적외선 열화상 기술을 이용하여 가시화 하였다. 보빈 치아에 인공 크랙을 발생시킨 후, 외부에서 사인파 형태의 열을 가하면서 보빈 치아에서 방사되는 적외선을 적외선 카메라로 측정하여 이미지화 하였다. 열원의 조화주기와 동기시켜 순차적으로 측정된 보빈 치아의 이미지로부터 열원과의 위상정보를 추출한 후 이를 다시 영상화 하여 위상 이미지를 생성하였다. 실험 결과로부터 육안이나 종래의 수동형 적외선 이미지에서는 검출하기 어려웠던 치아 크랙이 본 연구와 같은 능동적 적외선 검사방법을 통하여 보다 효과적으로 검사 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

주요용어: 보빈 치아, 균열, 능동형 적외선 열화상, 비접촉 검사, 치과 진단

Abstract Bovine incisor was investigated using active infrared thermography(IRT) to visualize crack on bovine teeth. An artificial crack was carefully created in bovine incisor sample by compression load of universal tensile machine. While applying a sinusoidal heat wave to the cracked bovine incisor through halogen lamp, consecutive digital infrared images was captured from the sample surface at a frequency synchronized with heat excitation. Phase information of thermal image was calculated by four-point correlation method and processed to produce the phase image of bovine incisor. This phase image showed clearly the crack on the incisor, which was hardly detected in traditional passive thermography.

Keywords: Bovine Teeth, Crack, Active Thermography, Non-Contact Inspection, Dental Diagnosis

1. 서 론

치아는 음식을 분쇄하는 과정에서 발생하는 과도한 접촉 하중으로 인해 취성 파손을 유발하기 쉽다. 치아 파손의 형태는 음식물의 종류에 따라 달라지며 습식관과 생물학적 진화과정에 대한 정보를 제공하기도 한다. 치아의 구조는 Fig. 1에서와 같이 유리(glass)보다 매우 취성이 강하고 강도가 높은 에나멜 층(enamel)이 인성이 높

고 탄성이 있는 상아질(dentin)을 감싸고 있다. 에나멜의 미세구조는 미네랄 성분의 프리즘 다발들이 단백질과 수분이 서로 결합된 형태여서 균열의 성장이 용이한 구조이다. 그러나 구조적 문제에도 불구하고 포유동물의 에나멜 층은 이러한 프리즘 구조의 다발이 서로 교차하면서 마치 농구 바스켓의 그물구조를 가지고 있기 때문에 균열의 전파를 억제하고 균열 주변에서는 프리즘 다발사이의 단백질이 용해되어 나오면서 응력을

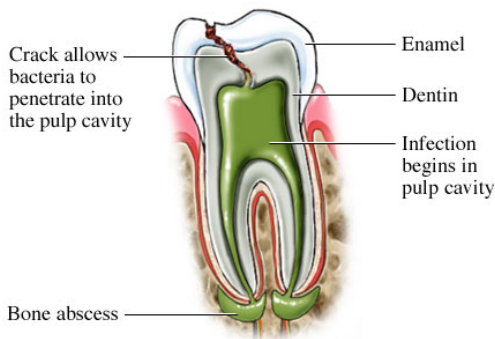


Fig. 1 Sectional view of mammal tooth

흡수하여 균열진전을 차단한다. 또한 치아는 고유한 기하학적 특성, 즉 외부 하중은 에나멜 층이 지지하면서 내부의 상아질은 크랙의 전파를 흡수하는 파손에 매우 강한 특징을 가지고 있어 평생 동안의 하중(특히 압축)에 매우 효과적이다. 그럼에도 불구하고 치아가 지지할 수 있는 하중의 한계가 존재한다. 치아 균열의 문제점은 치아 파손의 직접적인 원인을 제공하는 것 뿐 만 아니라 Fig. 1에서 보는 바와 같이 균열 틈새를 통해 내부의 신경조직으로 세균이 침투하여 염증을 발생시키는 2차 감염의 통로를 제공하는데 있다. 그러므로 치아의 균열은 구강건강에 치명적인 영향을 줄 수 있으며 이를 효과적으로 검사하는 진단기술이 매우 필요하다고 하겠다.

가장 일반적으로 치아에서 발견되는 파손형태는 치아 세로(길이) 방향의 종균열(longitudinal cracking)이다[1]. 날카로운 접촉이나 충격에 의한 국부적인 깨짐이 있으나 임상에서는 장기간에 걸쳐 압축하중을 받으면서 발생하는 균열이 보편적이다. 종 균열은 접촉이 일어나는 치아 윗면(crown)에서 시작하여 치아의 측면으로 진전하는 형태를 보이는데 대표적인 균열을 Fig. 2에서 나타내고 있다[2,3].

포유동물의 치아는 생물 형태학적으로 서로 매우 유사하기 때문에 인간의 치아 연구에 흔히 사용되어왔다. 특히 소의 보빈치아는 재료의 치의학적 특성이 잘 일치하여 치과 연구에서 인간의 치아를 대신하고 있다. 또한 인간의 치아보다 크기가 크고 용이하게 입수할 수 있는 장점이 있어 본 논문에서도 보빈치아를 사용하였다.

한편 능동형 적외선 열화상 기술은(infrared thermo graphy: IRT)은 전통적인 적외선 기술과는

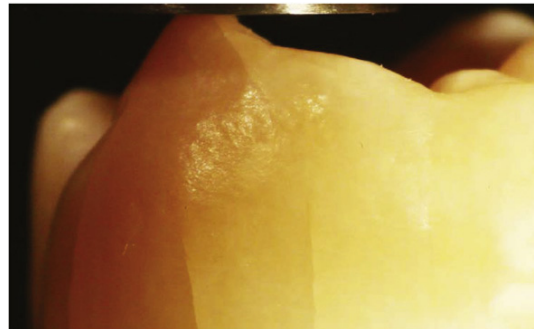


Fig. 2 Longitudinal cracks in human molar

달리 능동적으로 외부에서 열원의 에너지를 제어하며 입사파와 대상체의 복사에너지를 동시에 측정함으로써 이 두신호의 상관관계로부터 대상 물체의 결함을 검사한다. 이러한 열화상 기술은 물체 표면의 열 패턴을 2차원 이미지로 손쉽게 생성할 수 있으며 이를 해석하여 원하는 손상부의 형상이나 위치를 영상으로 만들어 낼 수 있어서 그동안 검사가 용이하지 않았던 미소 결함이나 크랙 등의 측정에 적용이 확대되고 있다[4,5].

본 연구에서는 보빈 치아에 인공적으로 균열을 발생시키고 이를 능동적인 적외선 열화상 기술을 이용하여 영상화 하였다. LabVIEW를 기반으로 컴퓨터에서 할로겐램프와 열화상 카메라를 컴퓨터로 동시에 제어하는 능동형 적외선 열화상 장치를 사용하여 연마된 보빈 치아의 균열을 검출하였다.

2. 인공 균열의 제작

2.1. 보빈 치아 시편

인간의 치아는 통상 완전한 형태로 구하기가 어려우며 크기가 작아 실험이 용이하지 않아 소의 치아를 대신하여 사용하였다. 소는 초식동물로서 되새김질을 하는 특징 때문에 어금니(molar)가 매우 발달되고 그 구조 또한 매우 날카로운 톱니처럼 표면이 만들어져 있어 사람의 치아와 많이 다르기 때문에 사람의 치아와 형태가 비슷한 보빈 앞니(incisor)를 대상으로 하였다.

Fig. 3은 본 실험에서 사용된 보빈 치아(incisor, 앞니)로서 잇몸에 삽입되어 통상 관찰되는 부분이 전체 길이의 약 1/3에 지나지 않으며 또한 형



Fig. 3 Bovine incisor samples

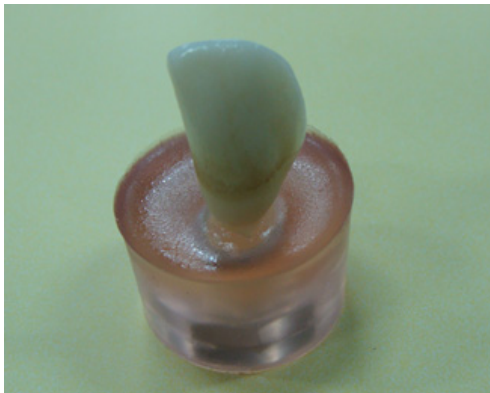


Fig. 4 Bovine incisor mounted in epoxy resin

상도 단순하지 않아 표면에 돌출된 치아에 크랙을 만들기 곤란하다. 이러한 치아에 하중을 부가하고 적외선 이미지 촬영이 용이하도록 준비된 보빈치아를 에폭시 수지에 고정하여 Fig. 4와 같은 시편을 준비하였다. 보빈 치아는 실제 턱뼈에 삽입된 부분에 해당하는 만큼을 에폭시에 고정하여 Fig. 4에서 에폭시 수지위로 돌출된 부분이 대략적으로 실제와 동일하도록 주의하였다.

2.2. 보빈 치아의 파단 시험

치아에 발생하는 크랙의 전형적인 형태는 앞서 기술한 바와 같이 하중을 받는 윗 표면에서 시작하여 측면으로 전파하는 특징을 가지고 있다. 즉, 치아의 위 표면에서 파단된 에나멜 층의 크랙이 하중방향과 평행한 방향으로 크랙을 진전시킨다. 그러므로 본 실험에서도 치아의 상부에서부터 세로방향으로 균열을 생성하였다.

Fig. 4에서 준비된 치아 시편에 크랙을 생성하기 위해 만능인장시험기를 이용하여 압축하중을 정밀하게 증가시키면서 치아의 변형과 하중을 측정과 함께 파단을 유도하였다. 그런데 초기 실험에서는 실험에 사용된 앞니(incisor)는 어금니(molar)와는 달리 치아 윗면의 면적이 거의 없는 날카로운 형상을 하고 있기 때문에 접촉면에서의 높은 압력으로 인해 크랙이 전파되지 못하고 치아 윗면이 부분적으로 부스러져서 치아 종방향으로 진행되는 크랙을 발생하는데 실패하였다. 즉, 어금니(molar)에서는 압축하중을 통해 주로 모드 I 파단을 상부로부터 자연스럽게 만들 수 있었는데 반해 앞니(incisor)는 구조상 그것이 가능하지 않았다(Fig. 5, 6 참조). 더구나 크랙이 생성되었다 하더라도 다수의 미세크랙과 함께 어느 부분에 발생되었는지를 확인하는데 어려움이 많아 크랙생성과 위치를 인위적으로 발생시키기 위

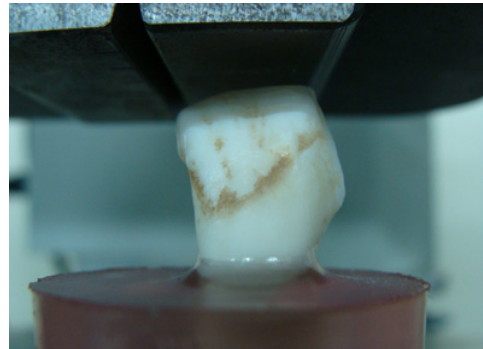


Fig. 5 Creation of crack in bovine incisor by UTM

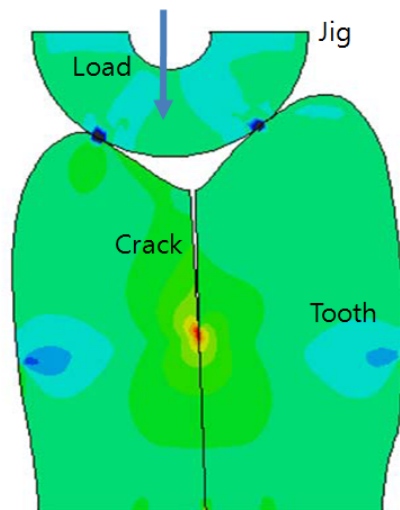


Fig. 6 Mode I-type fracture in molar

한 방법을 강구하였다. 이를 위해 본 연구에서는 앞니의 윗면에 조그마한 노치를 우선 가공한 후 이 노치중앙에 칼날과 같은 매우 날카로운 강제 지그를 노치부분에서 압축하여 크랙이 상부에서 하부로 전파하여 발생하도록 유도하였다. 치아는 매우 취성이 강한 재료이기 때문에 노치로부터 일정크기의 크랙을 생성하기 위해서는 치아에 가해지는 하중의 추이를 매우 정밀하게 제어하면서 크랙 전파의 추이를 관측하여야 한다, 그렇지 않을 경우 크랙 전파가 너무 작아 관찰 할 수 없거나 혹은 전파가 너무 많이 진행되어 치아 전체가 두 개로 절단될 수 있다.

만능인장시험기(Shimazu A20)에 미리 노치가 만들어진 시편을 장착한 후 노치부분에 집중하중을 zero에서부터 매우 미세하게 증가시키면서 인장시험기의 변위에 따른 하중의 변화를 실시간 측정하였다. 변위를 증가시키면서 하중의 변화를 보면 하중이 일정하게 증가하다가 치아에 크랙이 발생되면 하중변화가 급속히 감소하게 되고, 더 나아가 크랙이 내부로 급속히 진행하게 되면 하중은 거의 zero로 급변하게 되는데 바로 이 시점에서 실험을 멈추어 치아 내에 충분히 크랙이 생성된 것을 간접적으로 확인할 수 있었다. Fig. 7은 이러한 파단 실험과정을 그래프로 표시한 것으로서 하중의 변화가 큰 지점이 크게 두 군데가 있는데 첫 번째 지점에서는 치아 표면의 에나멜층이 파괴되면서 발생하는 것이며, 두 번째 단계에서의 변화는 내부 상아질(덴틴, dentin)이 파괴되면서 발생하는 현상이다. 이 그래프에서 마지막 단계에서는 크랙이 크게 진행되면서 하중 지지력이 없어지는데 이 지점에서 실험이 정지되었다. 이렇게 발생한 크랙은 여전히 눈으로는 확인하기 쉽지 않았으나 현미경을 이용하여 하나의 크랙이 노치부분에서 시작하여 치아의 하부 상아질(dentin, 에나멜층 하부, Fig. 9 참조)부분으로 잘 발생되었음을 확인할 수 있었다.

2.3. 적외선 시험편 제작

에나멜 층에서부터 덴틴 내부 깊숙이까지 크랙이 만들어진 보빈 치아는 위상잠금 적외선 열화상 이미지를 촬영하기 위해 Fig. 8과 같이 치아의 여러 면 중에서 평면에 가까운 부분을 약 1 mm 정도 깊이로 연마하여 평면 형태로 가공하였다.

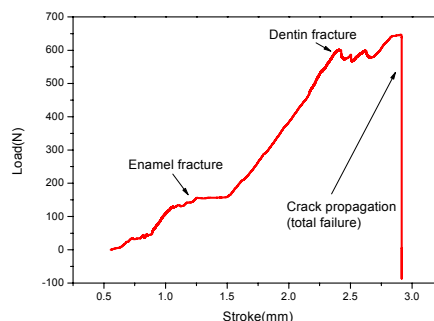


Fig. 7 Fracture test in bovine incisor

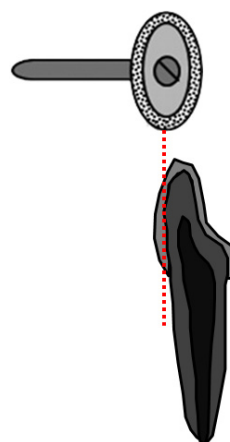


Fig. 8 Surface grinding of bovine incisor

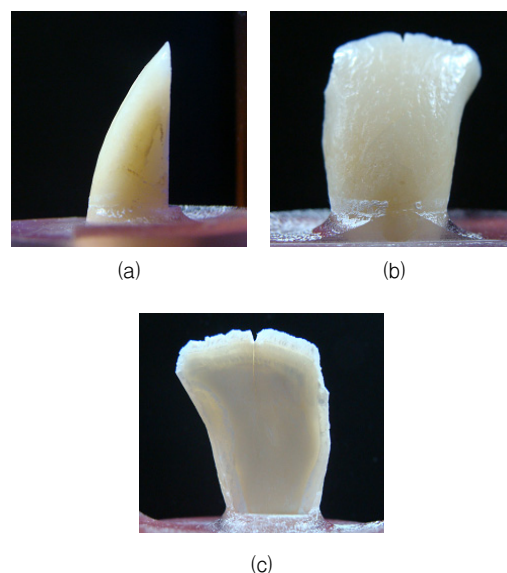


Fig. 9 Bovine incisor specimen after machining, (a) Side view, (b) Front view, (c) Rear view

그 이유는 실제 치아는 3차원 평면이고 표면에 미세한 굴곡이 많아 적외선 방출계수가 심하게 변하여 기하학적 조건을 일정하게 해주기 위해서이다. 가공 후에 관찰한 치아 표면은 노치부분 근방을 제외하고는 크랙의 존재를 쉽게 알기 어려웠는데 실험에서 사용된 연삭과정과 가공후의 보빈 치아를 Fig. 8과 Fig. 9에서 보여주고 있다.

3. 보빈 치아의 적외선 열화상 시험

3.1. 적외선 열화상 이론

적외선열화상검사 기술(infrared thermography : IRT)은 물체 표면의 온도에 따라 달라지는 적외선 방사 에너지량을 측정하여 결함을 측정하는 기술이다. 이러한 열화상 기술은 물체 표면의 열 패턴을 2차원 이미지로 손쉽게 생성할 수 있으며 근래에는 대상체의 자체 발열을 수동적으로 측정(passive method)하는 방법과 더불어, 이를 보다 발전시켜 능동적으로 열원의 에너지를 제어하여 결함의 온도 왜곡현상을 검출하는 능동형 적외선 열화상 기술(active infrared thermography)이 사용되고 있다. 이 기술은 그동안 검사가 용이하지 않았던 미소 결함 등의 측정이 가능하며, 특히 X-ray나 레이저 측정기술과는 달리 인체에 무해하며 특별한 보호장치가 필요없기 때문에 의료용으로 저렴하면서도 안전하게 적용할 있으며, 실시간으로 상태나 결함을 진단할 수 있고, 대상체의 면적이 크더라도 영상 가시화가 용이하기 때문에 적용범위가 확대되고 있다[6].

능동형 기법 중에서도 본 논문에서 사용하는 위상잠금 열화상 기술은 변동 주기를 가지는 열 부하를 대상체에 가하면서 입사 열 부하에 의한 대상체의 복사에너지의 변화를 기준신호와 함께 측정하는데, Fig. 10의 열원(heat source)이 시간 t 에 따라 $T = T_0[1 + \epsilon \cos(\omega t)]$ 의 조화함수로 대상체를 가진 할 때($\epsilon < 1$) 위치 x 의 대상체로부터의 방사에너지 $I(x, t)$ 는 열전달 방정식과 스테판-볼츠만 법칙으로부터 다음과 같이 주어진다[7,8].

$$I(x, t) = \frac{8\epsilon\pi^5 f^4 T_0^4}{15c^2 h^3} e^{-\frac{x}{\mu}} \cos(\omega t - \frac{x}{\mu}) \quad (1)$$

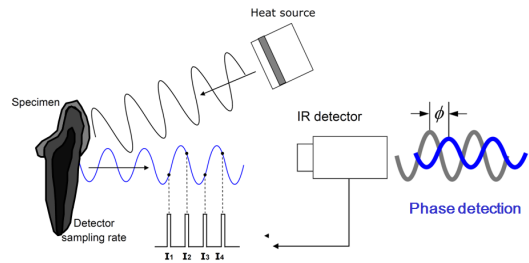


Fig. 10 Active thermography(lock-in mode)

식(1)에서 k 는 열전달 계수, C_p 는 비열, f 는 주파수, h 는 플랑크 상수, c 는 광속, ω 는 각속도,

$\mu = \sqrt{\frac{1}{2\pi f} \frac{k}{\rho C_p}}$ 는 열 침투깊이를 나타낸다.

이제 식(1)로부터 특정위치 x 에서의 에너지 $I(x, t)$ 는 열침투 깊이 μ 에 의해서 결정되므로, 만약 균열과 같은 결함이 있는 부위라면 이 값의 변화로부터 방사 에너지가 달라지게 되고 이 변화를 측정하면 결함을 검출할 수 있다. 식(1)에서 μ 의 변화를 측정하는 방법으로서 본 연구에서는 한 주기 동안에 측정된 일정간격의 연속된 4개의 이미지로부터 계산된 위상 이미지를 사용하였다.

3.2. 적외선 열화상 장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 Fig. 11에 나타난 것과 같이 크게 다섯 부분으로 나뉜다. 첫째는 대상으로부터 방사하는 열에너지를 감지하는 장치인 적외선 열화상 카메라(FLIR A20, 7.5-13 μm)이며 둘째는 대상체에 열원을 가하는 할로겐램프, 세 번째는 할로겐램프의 교류 전력을 증폭/제어하는 사이리스터, 네 번째는 할로겐램프와 카메라를 제어하고 데이터를 수집하는 인터페이스 장치, 그리고 마지막으로 열화상 이미지 신호로부터 위상신호를 추출하고 이로부터 균열 결함에 대한 위상 이미지를 생성하는 계산부로 나누어진다. 이 다섯 부분은 전체적으로 LabVIEW에서 통제되고 운영되는데 IEEE-1394를 통하여 할로겐램프의 열가진 주기를 조절함과 동시에 적외선 카메라의 화상인식 타이밍을 동기시켜 대상으로부터의 신호를 수집함으로써 신호의 위상차를 영상화하였다.

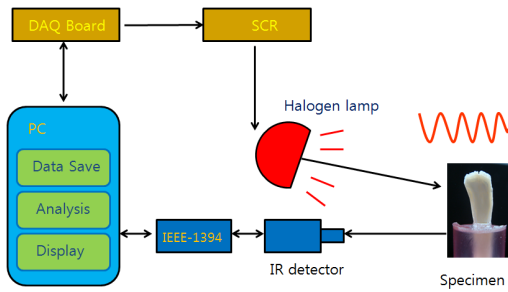


Fig. 11 Configuration of active IR thermography for bovine incisor

시험 방법은 열원(할로겐램프)을 조화함수의 형태로 보빈 치아 시편에 입사하고 이 조화함수에 동기화된 복사에너지의 위상변화를 이미지화하였고 이 조화함수는 LabVIEW에서 클락(clock) 주기 신호를 생성하여 사용하였다. 이 클락 신호는 정현파 주기함수로서 원하는 주파수로 생성한 후 이를 D/A 변환기에서 출력 신호로 출력하여 할로겐램프를 이 신호 주기에 따라 전력제어가 되도록 컨트롤 하였다. 본 실험에서는 LabVIEW에서 클락 펄스를 0.5 Hz로 생성한 후 이 신호를 기본으로 할로겐램프를 같은 주파수, 또는 그 정배수로 제어하였다.

4. 적외선 열화상 시험 결과

본 연구에서 사용된 적외선 카메라의 공간 해상도(IFOV)가 2.7 mrad이고 최소 초점거리가 30 cm이기 때문에 이 거리에서 측정가능한 치아 표면에서의 공간 해상도는 이론적으로 0.81 mm이며 이와 같은 정밀도를 가지고 보빈 치아와 같은 작은 대상체에 발생한 크랙을 정확히 검출하기는 한계가 있었다. 우선 30 cm 거리에서 평면으로 가공된 보빈 시편(Fig. 9(c) 참조)에 대해 수동적인 열화상을 촬영하였는데 그 이미지가 Fig. 12에 나타나 있다. 보빈 치아 상부에 만들어진 노치부를 통해 크랙이 만들어진 위치를 미리 알고 있으나 Fig. 12로부터 노치 부분만을 확인할 수 있을 뿐 크랙을 볼 수 없었다. 다음으로 같은 보빈 치아 시편에 대해 위상잠금 적외선 열화상 시험을 수행하여 Fig. 13에 나타내었는데 화상의 정밀도가 떨어지기는 하나 노치부에서 수직으로 만들어진 크랙을 확인할 수 있었다. 또한 개략적

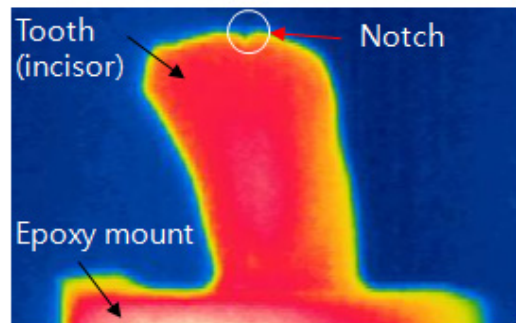


Fig. 12 Passive thermography image of bovine tooth

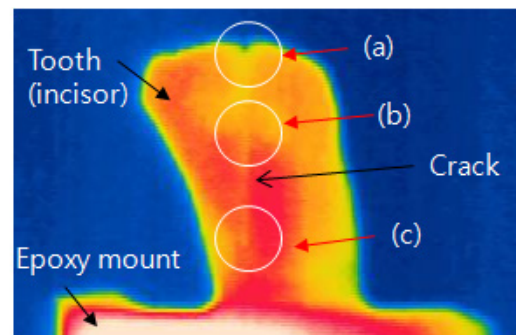


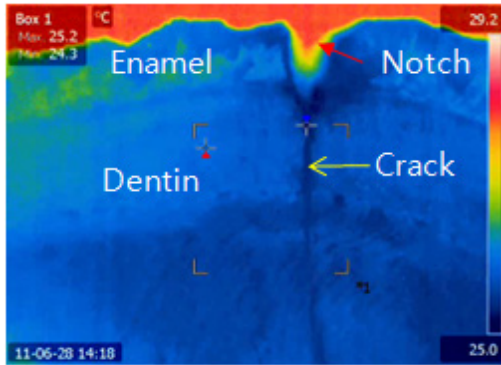
Fig. 13 Lock-in thermography image of bovine tooth

이나마 크랙의 길이도 측정 가능하였는데 거의 치아 높이에 해당할 정도로 깊게 만들어졌으며 그 길이는 대략 15 mm로 관찰되었다. 이로부터 위상잠금 기법이 수동적인 적외선 기법에 비해 크랙에서의 온도변화를 민감하게 검출해 낼 수 있음을 확인 할 수 있었다.

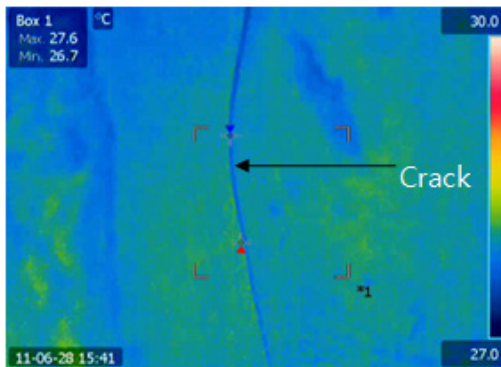
이 결과를 기초로 세부적인 크랙의 모습을 확인하기 위하여 게르마늄 근접렌즈(픽셀당 25 μm의 해상도)를 사용해 좀더 확대된 크랙의 모습을 영상화하였다.

Fig. 14(a)는 크랙이 시작되는 노치부 주변의 이미지로서 Fig. 13의 노치에서 크랙이 시작되어 깊이 방향으로 파단되어 나가는 것을 잘 보여주고 있다. 그림에서 에나멜층 과 상아질 층이 비교적 잘 구분되어 보여주고 있는데 상아질 층도 다시 두 부분으로 나뉘어 있음을 볼 수 있다. Fig. 14(b)는 크랙의 중간부분을 촬영한 것으로서 크랙이 선명하게 나타남을 볼 수 있다. 이 부분은 육안으로도 주의 깊게 볼 경우 그 존재를 알 수 있는 부분이었으며, 이 그림에서는 크랙 좌측에 다시 상아질 층이 보이고 있는데 실제 시편에

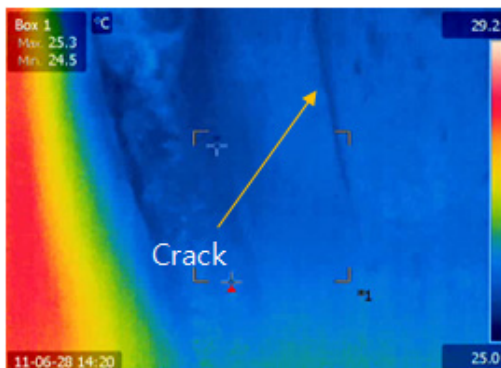
서의 상황과 잘 일치한다. Fig. 14(c)는 크랙 끝(tip) 부분을 촬영한 것으로서 이 부분은 육안으로 확인이 어려운 부분이지만 위상잠금 이미지에서는 비교적 이 부분도 잘 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 14 Magnified thermography image of bovine incisor, (a) Notch area, (b) Middle of crack, (c) Crack tip

그러나 표면을 연삭한 치아 면과는 달리 가공하지 않은 치아의 표면부분(즉 Fig. 9(b) 참조)에 발생한 크랙의 대한 적외선 시험에서는 크랙을 검출하지 못하였다. 광학현미경을 통해 본 표면은 연마한 뒷면과 동일하게 수직방향의 크랙이 동일한 위치에 발생되어 있었지만 종방향으로 발생된 균열은 측정하기가 곤란하였다. 궁극적으로는 향후 추가적인 연구와 장비개선을 통해 이러한 에나멜 층의 크랙의 검출을 가능할 수 있다면 치과 영상진단에 획기적인 기술이 될 것이라고 기대한다.

5. 결론

보빈 치아(incisor)에 인공크랙을 발생시킨 후 위상잠금 열화상 이미지로부터 크랙을 검출하였다. 보빈 치아의 상부에 노치를 만들고 이 노치 위에 지그를 통해 압축하중을 가하여 Mode-I 타입의 수직 균열을 만들었다. 균열은 치아 상부에서 깊이 방향으로 약 15 mm 정도 발생하였으며 이 보빈 시편을 적외선 시험을 위해 한쪽 면을 약 1 mm 정도의 깊이로 연마하여 평면으로 만들어서 이 면에 할로겐램프(1 kW)를 0.5 Hz의 주기로 가진하면서 보빈 시편의 적외선 방사에너지의 위상 이미지를 측정하였다. 적외선 위상 이미지는 수동형 적외선 이미지에서는 보기 어려웠던 균열 이미지를 검출하였다. 근접렌즈와 광학 이미지를 이용하여 크랙의 형태를 보다 자세하게 측정 비교하여, 위상잠금 열화상 이미지의 결과가 타당함을 확인하였다. 초점거리가 30 cm로서 비교적 멀고 공간 해상도가 2.7 mrad인 것을 감안할 때 위상잠금 적외선 이미지가 보빈 치아내의 균열을 효과적으로 검사할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 다만 곡면을 가진 치아 면에 대해서는 표면이 매우 굴곡이 많아 외부 열원으로부터의 가진 조건이 지점마다 다르며 카메라의 초점거리가 길러 크랙 이미지를 얻지는 못하였다. 이것은 향후 곡면을 고려한 열원 가진 방법과 곡면 치아의 방사를 보정, 그리고 보다 정밀도가 높은 적외선 센서의 개발을 통해 개선될 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 한국기술교육대학교(능력개발교육원, HRD)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. Li, J. Li, Z. Zou and A. S.-L. Fok, "Fracture simulation of restored teeth using a continuum damage mechanics failure model," *Dental Materials*, Vol. 27 pp. e125-5-e133 (2011)
- [2] A. Barani, A. J. Keown, M. B. Bush, J. J. W. Lee, H. Chai and B. R. Lawn, "Mechanics of longitudinal cracks in tooth enamel," *Acta Biomaterialia*, Vol. 7, pp. 2285-292 (2011)
- [3] R. B. Fonseca, F. Haiter-Neto, H. L. Carlo, C. J. Soares, M. A. C. Sinhoreti, R. M. Puppim-Rontani and B. L. Correr-Sobrinho, "Radiodensity and hardness of enamel and dentin of human and bovine teeth, varying bovine teeth age," *Archives of oral biology*, Vol. 5, pp. 1023-1029 (2008)
- [4] S. Huth, O. Breitenstein, A. Huber, D. Dantz, U. Lambert and F. Altmann, "Lock-in IR-thermography-A novel tool for material and device characterization," *Solid State Phenomena*, Vol. 82-84, pp. 741-746 (2002)
- [5] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in Thermography: Basics and Use for Functional Diagnostics of Electric Components," Springer, ISBN 3-540-43439-9, pp. 18-23 (2003)
- [6] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, "위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 27, No. 4, pp. 322-327 (2007)
- [7] 나형철, 민태훈, 김노유, "위상잠금 열화상 장치 제어용 랩뷰 프로그램 개발", *비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 2, pp. 120-126 (2011)
- [8] 김노유, "위상잠금 적외선 열화상에서의 위상추출 기술", *비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 2, pp. 189-192 (2011)