

論文

열화상 기술을 이용한 치아/복합레진 수복부의 박리 평가

구자욱*, 최낙삼***

Evaluation of Delamination of Dental Composite Restoration using Infrared Lock-in Thermography

Ja-Uk Gu*, Nak-Sam Choi***

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the feasibility on the detection of dental composite delamination using a lock-in thermography method. Amplitude and phase images of detected thermal signals were analyzed according to the lock-in frequencies. At a lock-in frequency of 0.05 Hz, the ligament thickness of 0.5 mm in the specimen exhibited the highest amplitude contrast between defective area and sound area. For ligament thicknesses of 1 mm and 1.5 mm, delamination detection was possible at 0.025 Hz and 0.01 Hz through the amplitude differences. At lock-in frequencies of 0.006 Hz and 0.01 Hz, ligament thickness 0.5 mm exhibited the highest phase contrast. For ligament thicknesses of 1 mm and 1.5 mm, the phase contrast exhibited possible detection of delamination at 0.006-0.1 Hz.

초 록

치과용 복합레진 수복재가 치아로부터 박리된 상태를 모사한 시편을 제작하고 위상잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여 박리의 검출 가능성을 조사하였다. 내부 박리의 깊이와 가열 조건에 따른 검출 신호의 Amplitude와 Phase 이미지를 분석하였다. 내부 박리의 위치가 표면으로부터 0.5 mm 인 시편은 lock-in frequency = 0.05 Hz에서 건전부와 박리부의 Amplitude 차이가 가장 컸으며 1 mm와 1.5 mm 시편은 0.025 Hz와 0.01 Hz에서 Amplitude 차이로 박리부 검출이 가능하였다. Phase 변환 결과로부터 0.5 mm 시편은 0.006 Hz와 0.5 Hz 에서 뚜렷한 박리부의 이미지를 얻을 수 있었으며, 1 mm와 1.5 mm 시편은 0.006-0.1 Hz에서 박리부의 검출이 가능하였다.

Key Words : 위상잠금 열화상(lock-in thermography), 치과용 복합레진 수복(dental composite restoration), 비파괴 검사(non-destructive inspection), 내부 박리(internal delamination)

1. 서론

손상된 치아의 복원에 사용되는 복합레진 수복물(composite restoration)은 아말감, 금인레이 수복에 비해 심미적이며 치아의 삭제를 최소화할 수 있다. 또한 접착에 의존하므로 기계적 유지 형태가 필요 없고 와동(cavity) 형성이 덜 복잡하

며, 거의 모든 경우의 수복에 사용되고 있다. 그러나 복합레진의 광조사 과정에서 중합수축(polymerization shrinkage)은 접착 계면부의 틈새 형성 및 치아의 미세 변형을 유발할 수 있는 단점이 있다. 접착의 실패나 상아질(dentin) 내부의 미세 파절로 인한 미세 갭(micro gap) 형성은 시술 후 환자에게 지각과민증을 나타나게 하며, 타액 등의 이물질이 수복물

접수: 2012년 12월 05일, 수정: 2012년 12월 18일, 게재승인: 2012년 12월 18일

* 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 한양대학교 기계공학과, Corresponding author(E-mail:nschoi@hanyang.ac.kr)

과 치질 사이로 침투하여 이차우식(secondary caries)을 유발 시키거나 박테리아 등의 자극으로 인해 치수에 염증반응을 일으킬 수 있다[1-3]. 따라서 레진 수복재와 치아질과의 완전한 접착과 이에 대한 평가는 임상적으로 매우 중요하다.

위상잠금 적외선 열화상 기법(Lock-in infrared thermography method)은 대상체에 램프의 점멸등에 따라 변동하는 열류를 형성시키고, 침투된 열원의 위상지연을 측정하여 재료 내부의 결함의 유무를 판별하는 비파괴 검사법으로서 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있어서 작은 위상 변화에서 결함 검출이 가능하고 위상 처리 결과는 대상체 표면 방사율의 불균일성에 의한 오차가 적은 장점이 있다[4,5]. 본 연구에서는 위상잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여, 수복된 복합레진과 치아의 계면부 박리를 검출하고자 한다. 이를 위해 치아에 수복된 복합레진을 모사한 시편을 제작하고 박리부의 크기와 깊이에 따른 열화상 검출 결과를 비교 검토한다. 이로부터 치과 관련 분야에서 위상잠금 적외선 열화상 기법을 결함 진단기술로의 적용 가능성을 보고자 한다.

2. 위상잠금 적외선 열화상 기법

본 연구에서 사용한 위상잠금 열화상 기법은 두 신호간의 상관관계를 이용하여 변조 적외선 신호의 크기와 위상을 추출하는 방법(digital lock-in correlation method)이다[6]. 적외선 신호에서 가장 지배적인 정보를 포함하는 기본 조화 성분만을 추출하고 그 외 고조파(harmonics) 성분들은 제거하는 기법으로서 기준이 되는 조화신호와 측정 신호간의 상관도를 계산하여 수행한다.

위상잠금 적외선 열화상의 원리 및 개념을 Fig. 1에 나타내었으며 기준함수로부터 검출되는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n K_j F_{i,j} \tag{1}$$

여기서 $F_{i,j}$ 는 i 번째 lock-in period에서 j 번째 프레임(frame)의 온도 값이다.

동시에 두 개의 채널을 통해 한 채널에서는 사인함수와 동기되는 신호 성분을 계산하고 다른 채널에서는 코사인 함수와 동기되는 성분들을 계산하여 변조 적외선 이산신호의 크기와 위상을 결정할 수 있는데, 기준함수인 사인함수 k_j^0 와 코사인 함수 k_j^{90} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_j^{0^\circ} = 2\sin\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \tag{2}$$

$$K_j^{90^\circ} = 2\cos\left(\frac{2\pi(j-1)}{n}\right) \tag{3}$$

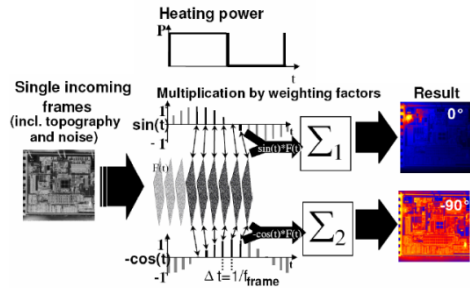


Fig. 1 Principle of the digital lock-in thermography method[6].

식 (1) - (3)으로부터 각각의 화소에서 검출되는 신호의 진폭(amplitude, A)과 위상(phase, Φ)의 계산이 가능하다.

$$A = \sqrt{(S^{0^\circ})^2 + (S^{90^\circ})^2} \tag{4}$$

$$\Phi = \arctan\left(\frac{S^{90^\circ}}{S^{0^\circ}}\right) \tag{5}$$

3. 실험 재료 및 방법

3.1 시편 제작

수복된 치과용 복합레진의 박리부를 열화상 이미지로 검출하기 위한 시편 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 복합레진 수복재가 치아로부터 탈락된 상태를 모사하기 위해 내경 10 mm, 외경 12 mm, 높이 3 mm의 아크릴 링 내부에 복합레진(Clearfil AP-X, Kuraray, Japan)을 채우고 광경화(LED pencure, Morita, 파장 420-480 nm, 강도 1000 mW/cm²) 시킨 뒤, 초경 엔드밀(YG/3S MILLS, diameter 5 mm)로 후면을 가공하였다. 복합레진의 광 투과 거리를 고려하여 1- 2.5 mm 깊이로 엔드밀 가공하여, 남아있는 복합레진의 두께가 4 종류($t_d = 0.5, 1, 1.5, 2$ mm)인 시편을 제작하였다. 각 시편을 모아 molding 후, 표면은 흑색 무광 스프레이로 도색하여 방사율(emissivity)을 흑체에 가까운 0.95로 유지하였다.

3.2 실험방법

열화상 위상잠금 시험 장치의 구성은 Fig. 3과 같다. 500 W 할로겐 램프 1개를 열원으로 하였으며, 적외선 열화상 카메라(Vario cam, JENOPTIK, Germany)로 640 × 480 pixel 이미지를 획득하였다. PC는 열화상 카메라, 컨트롤러와 연결되어 있으며, PC 내 software(IRBIS3 plus)로 할로겐 램프의 주파수를 동기화하고 열화상 카메라의 작동을 제어하며, 열화상 카메라가 획득한 데이터를 변환하여 열화상 이미지를 제공한다. 위상잠금 주파수(lock-in frequency, $f_{lock-in}$) 0.006-2 Hz 범위에서

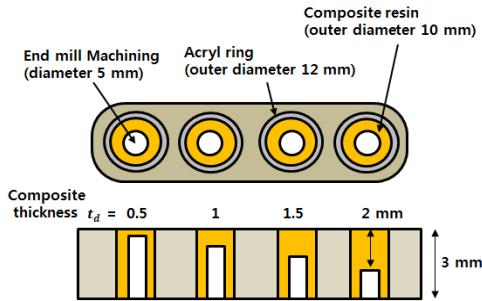


Fig. 2 Schematic of the specimen preparation.

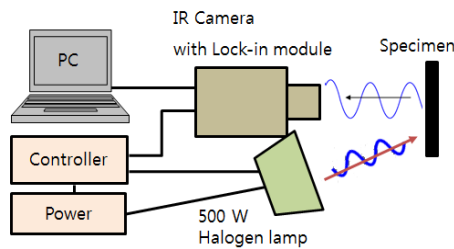


Fig. 3 Experimental set-up for lock-in infrared thermography.

실험을 실시하였다. 할로겐 램프의 pulse-dutyfactor는 50%, lock-in period는 5회이며 카메라의 프레임률(frame rate)은 12 Hz로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 진폭 비교

열화상 lock-in 시험법은 할로겐 램프의 열원을 이용하므로 복합레진의 두께가 얇은 결함부가 두꺼운 건전부에 비해 표면 온도가 높게 된다(Fig. 4). 이러한 표면 온도 차이에 의해 열화상 이미지의 진폭 대비가 생기게 된다. 두께 $t_d = 0.5$ mm 시편의 진폭 이미지에서 보는 바와 같이 $f_{lock-in}$ 에 따라 이미지상 결함의 검출에 차이가 있었으며, $f_{lock-in} = 0.05$ Hz에서 건전부와 결함부의 대비가 가장 뚜렷하여 이미지상에서 결함부의 확인이 용이하였다.

시편의 건전부와 결함부의 대비차(contrast ratio, C)를 정량적으로 구하는 방법은 식 (6)과 같다.

$$Contrast\ ratio, C = \frac{A_{def} - A_s}{A_s} \quad (6)$$

여기서 A_{def} 는 결함부 화소에서 진폭의 평균값이며, A_s 는 건전부 화소에서 진폭의 평균값이다.

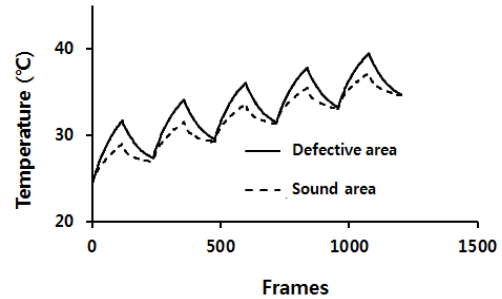


Fig. 4 Surface temperature of the test sample($t_d = 0.5$ mm, 0.01 Hz).

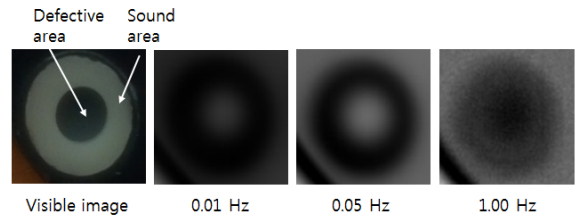


Fig. 5 Visible photo and the corresponding amplitude images of a specimen according to frequency conditions($t_d = 0.5$ mm).

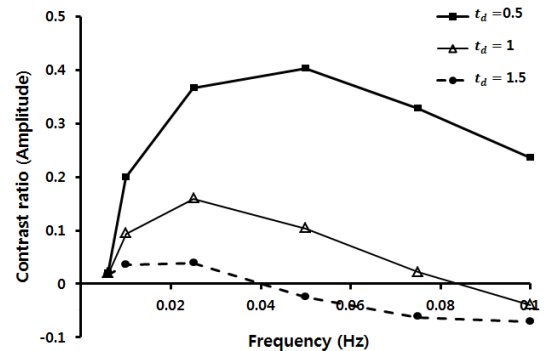


Fig. 6 Amplitude contrast ratio as a function of lock-in frequency.

Fig. 6은 위상잠금 주파수 $f_{lock-in}$ 에 따른 진폭의 대비차를 나타낸 그래프이다. 이미지상 육안으로 결함부의 위치가 확인 가능한 $f_{lock-in}$ 범위는 0.01-0.1 Hz 이었는데, 건전부와 결함부의 두께 차이가 가장 큰 시편(결함부 두께 0.5 mm)의 대비는 $f_{lock-in} = 0.05$ Hz에서 가장 크게 나타났다. 결함부 두께 1 mm와 1.5 mm 시편은 $f_{lock-in} = 0.025$ Hz에서 대비차가 가장 컸다. 0.006 Hz에서는 시편에 조사되는 열량이 많아 시편 표면이 포화되어 진폭의 대비차가 낮아지고 결함부의 검출이 어려웠다. 두께 2 mm 시편은 본 연구의 $f_{lock-in}$ 조건 하에서 검출이 불가능 하였다.

식 (7)은 검출한 열화상 이미지의 품질을 정량화로 나타내는 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 식이다[7].

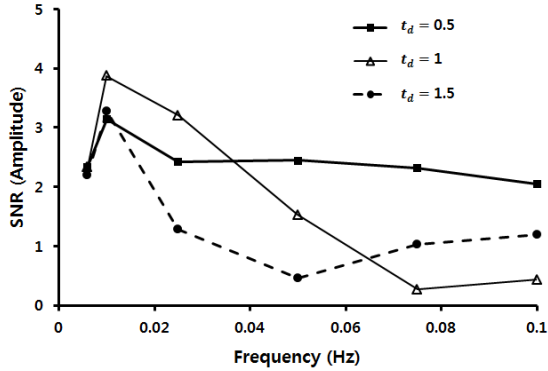


Fig. 7 SNR of amplitude results as a function of lock-in frequency.

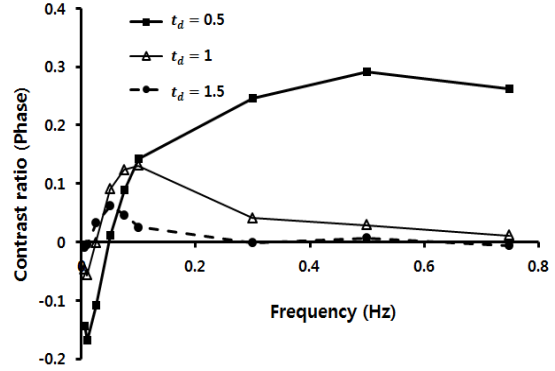


Fig. 9 Phase contrast ratio as a function of lock-in frequency.

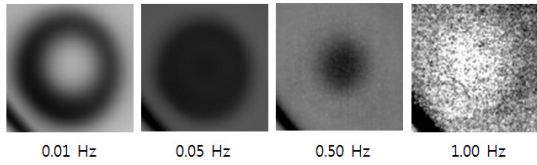


Fig. 8 Phase images according to frequency conditions($t_d = 0.5$ mm).

$$SNR = \frac{|A_{def} - A_s|}{\sigma_s} \quad (7)$$

결합부의 진폭 평균값과 건전부의 진폭 평균값 차이의 절대값을 건전부 진폭의 표준편차(σ_s)로 나눈 값으로 SNR을 정의한다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 세 시편 모두 0.01 Hz에서 SNR 값이 가장 높게 나왔다. 0.5 mm 시편은 대비 값이 가장 컸던 0.05 Hz에서도 높은 SNR 값을 유지하고 있음을 볼 수 있다.

4.2 위상 비교

Fig. 8은 박리부 두께 0.5 mm 시편의 위상 이미지들이다. 진폭 이미지보다 낮은 $f_{lock-in} = 0.01$ Hz와 높은 0.5 Hz에서 시편의 건전부와 박리부의 이미지상 대비가 뚜렷함을 알 수 있다.

Contrast ratio 계산 결과, 건전부와 박리부의 두께 차이가 가장 큰 시편(박리부 두께 0.5 mm)의 대비는 $f_{lock-in} = 0.006$ Hz, 0.5 Hz에서 가장 크게 나타났으며(Fig. 9), 이때 SNR 값도 크게 나타났다(Fig. 10). 박리부 두께 1 mm 시편은 $f_{lock-in} = 0.1$ Hz에서 위상 대비차가 가장 컸으며 박리부 두께 1.5 mm 시편은 $f_{lock-in} = 0.05$ Hz에서 위상 대비차가 가장 크게 나타났다. $f_{lock-in}$ 가 작아질수록 시편 표면의 열량 포화로 인해 진폭 차이가 줄어드는 경향을 보였으나, 위상 차이는 임계 주파수보다 낮아지면 (-) 값으로 커지는 경향을 볼 수 있었다.

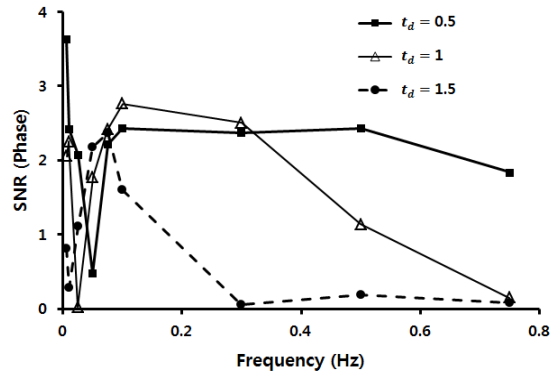


Fig. 10 SNR of phase results as a function of lock-in frequency.

5. 결론

본 연구에서는 치아에서 박리된 복합레진 수복물을 모사한 시편을 제작하고 박리부의 검출을 위해 위상잠금 적외선 열화상 기법을 이용하였다. 진폭 데이터를 통해 두께 0.5-1.5 mm 복합레진의 박리 검출이 가능함을 알았으며, 박리부 두께 0.5 mm 시편은 $f_{lock-in} = 0.05$ Hz에서 최적의 대조 영상을 보였고 두께 1 mm, 1.5 mm 시편은 0.025 Hz에서 최적의 영상을 보였다.

위상 데이터를 이용한 결과, 박리부 두께 0.5 mm 시편은 0.006 Hz, 0.5 Hz에서 최적의 대조 영상을 보였고 두께 1 mm 시편은 0.1 Hz, 1.5 mm 시편은 0.05 Hz에서 최적의 영상을 보였다. SNR 데이터로부터 위상 이미지는 낮은 $f_{lock-in}$ 에서 좋은 품질의 영상을 얻을 수 있음을 확인하였다. 레진의 두께가 두꺼운 시편의 박리 검출 가능성은 진폭 분석보다 위상 분석에서 더 높았다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012R1A2A2A02010147)

참고문헌

- 1) Bausch, J.R., de Lange, K., and Davidson, C.L., "Clinical significance of polymerization shrinkage of composite resins," *Journal of Prosthet Dent*, Vol. 48, No. 1, 1982, pp. 59-67.
- 2) Kleverlaan, C.J., and Feilzer, A.J., "Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites," *Dent Mater*, Vol. 21, No. 12, 2005, pp. 1150-1157.
- 3) Ilie, N., Kunzelmann, K.H., and Hickel, R., "Evaluation of micro-tensile bond strengths of composite materials in comparison to their polymerization shrinkage," *Dent Mater*, Vol. 22, No. 7, 2006, pp. 593-601.
- 4) Busse, G., Wu, D., and Karpen, W., "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 8, 1992, pp. 3962-3965.
- 5) Rantala, J., Wu, D., and Busse, G., "Amplitude Modulated Lock- In Vibrothermography for NDE of Polymers and Composites," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 7, No. 4, 1996, pp. 215-228.
- 6) Otwin, B., Wilhelm, W., and Martin, L., *Lock-in Thermography*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- 7) Maldague, X., *Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive testing*, John Wiley & Sons, Inc., Newyork, 2001.