

# 위상잠금 열화상기법을 이용한 치과용 복합레진 수복재의 내부 홀 결함에 대한 비파괴평가

## NDE of the Internal Hole Defect of Dental Composite Restoration Using Infrared Lock-In Thermography

구자욱\*, 최낙삼\*\*†

Ja-Uk Gu\* and Nak-Sam Choi\*\*†

**초 록** 위상잠금 적외선열화상기법을 이용하여 치과용 복합레진 수복재의 내부 홀 결함 크기에 따른 검출 가능성을 연구하였다. 위상잠금 주파수 조건을 다르게 하며 진폭과 위상영상을 분석하였다. 진폭 이미지 분석을 통해 직경 2 mm 이상의 결함 검출이 가능함을 알았으며 0.05 Hz 부근에서 결함부의 구별이 뚜렷하고 선명한 이미지를 획득할 수 있었다. 진폭 대비차는 결함부의 직경 크기에 비례하였다. 위상 이미지 분석 결과 0.3-0.5 Hz 부근에서 최적의 대조 영상을 보였으며 0.006 Hz 에서는 반대 명암의 뚜렷한 이미지를 얻을 수 있었다. 진폭 분석보다 위상 분석에서 결함부 크기가 작은 시편의 검출 가능성이 더 높았다.

**주요용어:** 위상잠금 적외선열화상, 치과용 복합레진, 박리, 진폭 이미지, 위상 이미지

**Abstract** The purpose of this study was to detect the pin hole defect of dental composite restoration using lock-in thermography method. Amplitude and phase images of the composite resin specimens were analyzed according to the lock-in frequency and the diameter of defect area. Through the amplitude image analysis, at lock-in frequency of 0.05 Hz, defect diameters 2-5 mm exhibited the highest amplitude contrast value between defective area and sound area. The lock-in frequency range of 0.3-0.5 Hz provided good phase angle contrast for the defect area. At lock-in frequency range of 0.5 Hz, defect diameter of 5 mm exhibited the highest phase contrast value. It is concluded that the infrared lock-in thermography method verified the effectiveness for detecting the pin hole defect of dental composite restoration.

**Keywords:** Lock-In Thermography Method, Dental Composite, Delamination, Amplitude Image, Phase Image

### 1. 서 론

치과용 복합레진(dental composite resin)은 충치를 치료하고 손상된 치아를 회복시키는 수복재(restorative materials)로서, 조각이 용이하고 심미성이 우수하여 아말감(amalgam), 금 인레이(gold inlay) 수복재의 대체물로 사용이 증가하고 있다. 특히 인체에 무해하며 작업성이 탁월한 가시광선을 이용하여 복합레진을 경화시키는 광중합형 복합레진이 주로 사용되며 이러한 광중합형 복합레

진 수복재는 캄포퀴논(camphorquinone)과 같은 광개시제에 의한 중합반응으로부터 선 수축 및 부피 수축이 일어나게 된다. 따라서 치아와 복합레진의 결합 강도가 불충분할 경우에는 치아의 법랑질(enamel) 또는 상아질(dentin)과 수복용 레진 사이에 미세과절로 인한 micro gap 형성과 시술 후 환자의 지각과민증을 야기하며, 타액 등의 이물질이 수복물과 치질 사이로 침투하여 이차우식(secondary caries)을 유발시키거나 박테리아 등의 자극으로 인해 치수에 염증반응을 일으킬 수

[접수일: 2012. 12. 7, 수정일: 2013. 1. 31, 게재확정일: 2013. 2. 5] \*한양대학교 대학원 기계공학과, \*\*한양대학교 기계공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan-si 426-791, Korea (E-mail: nschoi@hanyang.ac.kr)

있다[1-3]. 따라서 레진 수복재와 치질과의 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 비파괴검사법이다. 이 방법은 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있어서 작은 위상변화에서 결함 검출이 가능하고, phase 처리 결과는 대상체 표면 방사율의 불균일성에 의한 오차가 적은 장점이 있다[4,5]. 기존의 치아/수복재 계면 평가법으로 사용된 SEM(scanning electron microscopy) 관찰법[6]과 염료침투법(dye penetration)[7]은 접합부가 드러난 표면의 결함만 측정 가능하였으며, 내부의 결함을 관찰하기 위해서는 시편을 절단해야 했다. 위상잠금 열화상기법은 시편의 절단 없이, 임상학적으로 중요한 수복재 아랫면의 박리 평가를 기대할 수 있다.

저자는 선행연구에서 위상잠금 열화상기법을 이용하여 복합레진 수복재의 충전 깊이에 따른 치아/복합레진 박리부 검출 가능성을 연구한 바 있다[8]. 본 연구에서는 복합레진으로 수복된 치

아의 박리부를 모사한 내부 홀 결함(pin hole defect) 시편을 제작하고 위상잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여, 결함부 크기에 따른 열화상 검출 결과를 비교 검토한다. 이로부터 치과 관련 분야에서 위상잠금 적외선 열화상 기법에 대해서 결함 진단 기술로의 적용 가능성을 보고자 한다.

## 2. Lock-in Correlation Method

본 연구에서 사용한 위상잠금 열화상 기법은 두 신호간의 상관관계를 이용하여 변조 적외선 신호의 크기와 위상을 추출하는 방법이다[9]. 적외선 신호에서 가장 지배적인 정보를 포함하는 기본 조화 성분만을 추출하고 그 외 고조파 성분들은 제거하는 기법으로서 기준이 되는 조화신호와 측정 신호간의 상관도를 계산하여 수행한다.

위상잠금 적외선열화상의 원리 및 개념을 Fig. 1(a)에 나타내었으며 기준 함수로부터 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 프레임의 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, 기준 함수인 사인함수  $K_j^0$ 와 코사인함수  $K_j^{90}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

식(1) - (3)으로부터 amplitude, A와 phase,  $\Phi$ 의 계산이 가능하다 (Fig. 1 (b)).

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

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

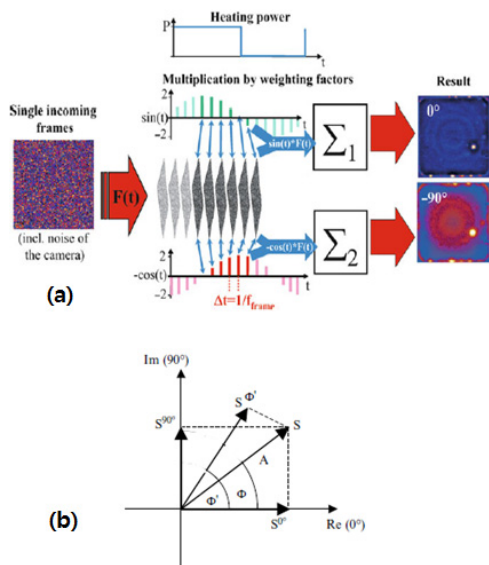


Fig. 1 Principle of the digital lock-in correlation procedure (a) and complex vector representation of the amplitude and phase relations in the two channel lock-in process (b) [9]

### 3. 실험 재료 및 방법

#### 3.1. 시편 제작

치아 수복용 복합레진의 내부 홀 결함부를 열화상 이미지로 검출하기 위한 시편 형상과 제작 방법을 Fig. 2 에 나타내었다. 복합레진 수복재가 치아로부터 탈락된 상태를 모사하기 위해 내경 6 mm, 외경 8 mm, 높이 3 mm의 아크릴 링 내부에 복합레진 (Clearfil AP-X, Kuraray, Japan)을 채우고 LED 광경화 (Pencure, Morita, 파장 420-480 nm, 강도 1000 mW/cm<sup>2</sup>)를 20초간 시킨 뒤, 초경 엔드밀(YG/3S MILLS)로 후면을 가공하였다. 결함의 크기에 따른 열화상 이미지 차이를 보기 위하여 홀 직경 (hole diameter,  $\phi_h$ )을 1, 2, 3 mm로 만들었으며, 남아있는 복합레진의 두께는 모두 0.5 mm로 동일하게 하였다. 직경 5 mm 결함을 모사한 시편은 내경 10 mm, 외경 12 mm, 높이 3 mm의 아크릴에 위와 동일한 과정으로 제작하였다. 총 4 종류의 홀 직경을 가진 시편을 제작하고 이들 시편을 한 개의 몰드에 배치하여 molding 후, 표면은 흑색 무광 스프레이로 도색하여 방사율 (emissivity)을 흑체에 가까운 0.95로 유지하였다.

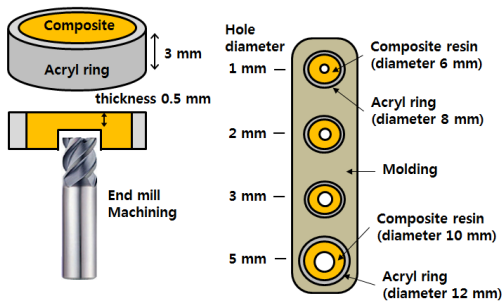


Fig. 2 Schematic of the specimen replicated restoration delamination with various defective areas

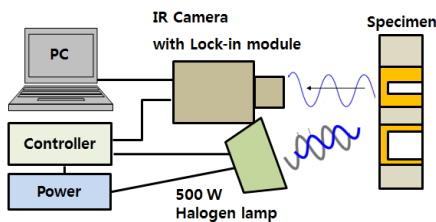


Fig. 3 Schematic of experimental set-up for lock-in infrared thermography

#### 3.2. 실험 방법

위상잠금 열화상시험 장치 구성은 Fig. 3과 같다. 500 W 할로겐램프 1개를 열원으로 하였으며, 적외선 열화상 카메라 (Vario cam, JENOPTIK, Germany)로 640x480 pixel 이미지를 획득하였다. 열화상 카메라의 스펙트럼 레인지는 7.5-14  $\mu\text{m}$ , 측정 정확도  $\pm 1.5$  K, 분해능 0.05 K이다. PC는 열화상 카메라, controller와 연결되어 있으며, PC 내 소프트웨어 (IRBIS 3 plus)로 할로겐램프의 주파수를 동기화하고 열화상 카메라의 작동을 제어하며, 열화상 카메라가 획득한 데이터를 변환하여 열화상 이미지를 제공한다. Lock-in frequency ( $f_{lockin}$ ) 0.006-2 Hz (0.006, 0.01, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1, 2 Hz) 조건에서 실험을 실시하였다. 할로겐램프의 pulse-duty factor 는 50%, lock-in period는 5회이며 카메라의 frame rate는 12 Hz로 하였다. 모든 실험은 실험실 온도 23 $^{\circ}\text{C}$ 에서 동일하게 시작하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. Amplitude 분석

위상잠금 열화상시험법은 할로겐램프의 열원을 이용하므로 복합레진의 두께가 얇은 결함부가 두꺼운 건전부에 비해 표면 온도가 높게 된다 (Fig. 4). 이러한 표면 온도 차이에 의해 열화상 영상에서 amplitude 대비가 생기게 된다.  $\phi_h = 3$  mm, 5 mm 시편의 amplitude 영상에서 보는 바와 같이  $f_{lockin}$  와 결함부 크기에 따라 검출의 차이가 있었으며,  $f_{lockin} = 0.05$  Hz의 실험 결과는 뚜렷한 명암 차이를 나타내어 결함부의 확인이 용이하게 하였다 (Fig. 5). 열화상 소프트웨어를 통해 보여진 영상들은 실험자가 디지털 레벨 값의 변경으로 밝기를 조절하여 결함을 뚜렷이 나타낼 수 있고, 관찰자의 주관에 의한 결함 유무의 판별이 달라질 수 있으므로 영상의 각 pixel들의 정보를 객관적인 값으로 보여줄 필요가 있다. 시편의 건전부와 박리부의 대비차 (contrast ratio, C)를 정량적으로 구하는 방법은 식(6)과 같다.

$$C = \frac{A_d - A_s}{A_s} \quad (6)$$

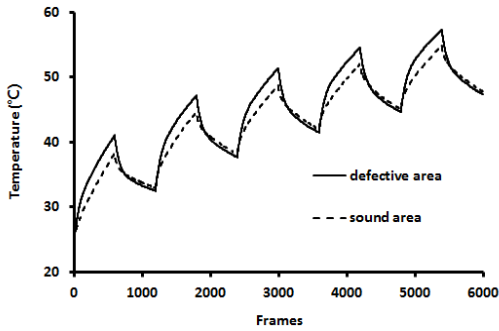


Fig. 4 Surface temperature of the test sample ( $\phi_h = 5$  mm,  $f_{lockin} = 0.01$  Hz)

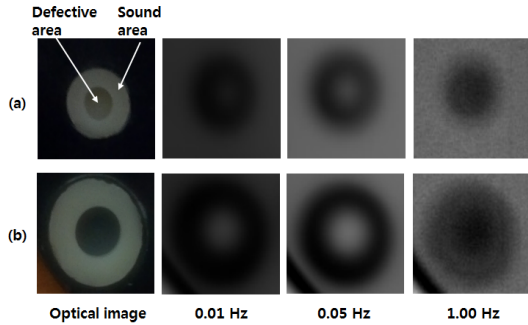


Fig. 5 Optical photo and the corresponding amplitude images of a specimen according to various frequency conditions (a)  $\phi_h = 3$  mm, (b)  $\phi_h = 5$  mm

여기서  $A_d$ 는 결함부의 amplitude 평균값으로, 결함부 경계에 있는 픽셀의 데이터 값을 포함하여 계산하였다.  $A_s$ 는 건전부 amplitude 평균값으로, 건전부 바깥쪽 경계가 닿은 모든 픽셀에서 결함부 픽셀 데이터들을 제외한 계산 결과이다. Fig. 6은  $f_{lockin}$ 의 함수로써 amplitude 대비차를 나타낸 그래프이다. 영상을 통해 육안으로 결함부의 구별이 가능한  $f_{lockin}$ 의 범위는 0.01-0.3 Hz 이었는데, 결함부의 직경이 가장 큰 시편(5 mm)의 대비는  $f_{lockin} = 0.05$  Hz에서 가장 크게 나타났다. 결함부 직경 2 mm와 3 mm 시편도  $f_{lockin} = 0.05$  Hz 부근에서 큰 대비차를 보였으나 직경 5 mm 시편보다 작은 값을 보였다. 0.006 Hz에서는 시편에 조사되는 열량이 많아 시편의 표면이 포화되어 amplitude의 대비차가 낮아지고, 0.3 Hz 이상에서는 시편에 충분한 열이 공급되지 않아 열전도에 따른 온도 차이가 작아서 결함부와 건

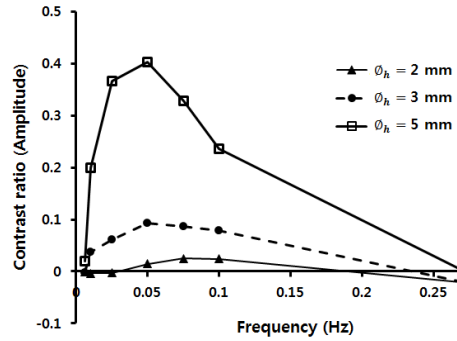


Fig. 6 Amplitude contrast ratio as a function of lock-in frequency

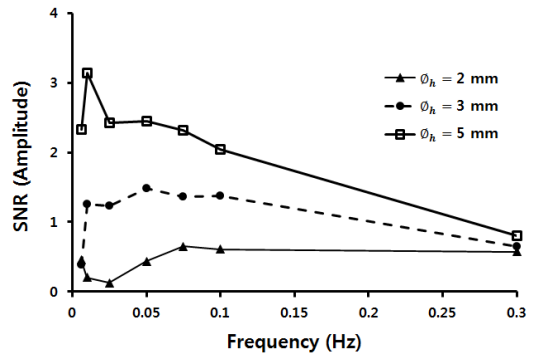


Fig. 7 SNR of an amplitude results as a function of lock-in frequency

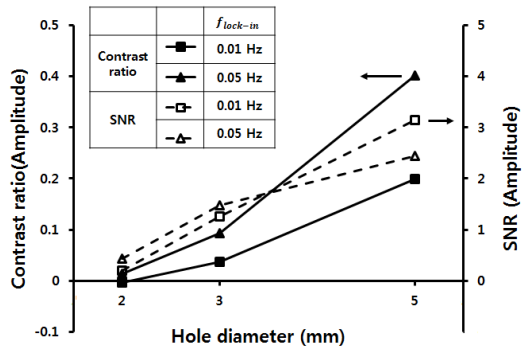


Fig. 8 Contrast ratio and SNR results of amplitude analysis according to the delamination hole diameter  $\phi_h$

전부의 구분이 어려웠다. 결함부 직경 1 mm 시편은 본 연구의 lock-in frequency 조건하에서 검출이 불가능 하였다.

식(7)은 검출한 열화상 이미지의 품질을 정량화로나타내는 Signal-to-Noise Ratio(SNR) 식이다[10].

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

결합부의 amplitude 평균값과 건전부의 amplitude 평균값 차이의 절대값을 건전부 amplitude의 표준편차( $\sigma_s$ )로 나눈 값으로 SNR을 정의한다. Fig 7에서 보는 바와 같이 세 시편 모두 contrast ratio 계산값이 높게 나왔던 0.05 Hz 부근에서 비교적 높은 SNR 값을 가졌다.

Amplitude 영상에서 박리부의 관찰이 가능한  $f_{lockin} = 0.01$  Hz, 0.05 Hz 시험조건에서는 결합부 직경이 클수록 contrast ratio와 SNR 값이 증가하였다. SNR보다 contrast ratio이 더 급격히 증가하였으며  $f_{lockin}$  따른 차이가 점점 커짐을 보였다 (Fig. 8). 복합레진의 두께가 얇은 결합부에 할로겐램프의 열원이 들어옴에 따라 높아진 온도는 주변으로의 열전도로 낮아지게 되는데, 결합부가 클수록 열전도 되는 건전부의 면적이 작아져 contrast ratio의 값이 커진 것으로 사료된다.

#### 4.2. Phase 분석

Fig. 9는  $\phi_h = 3$  mm, 5 mm 시편의 phase 영상들이다. Amplitude 해석 결과보다 낮은  $f_{lockin} = 0.01$  Hz와 높은 0.5 Hz에서 건전부와 결합부의 대비가 뚜렷함을 알 수 있으며, 1 Hz에서는 심한 노이즈로 인해 구분이 거의 불가능하였다.

Contrast ratio 계산 결과, 결합부의 직경이 가장 큰 시편( $\phi_h = 5$  mm)의 대비는  $f_{lockin} = 0.006$  Hz, 0.5 Hz에서 큰 값을 보였으며 (Fig. 10),  $\phi_h = 2$  mm, 3 mm 시편은  $f_{lockin} = 0.3$  Hz에서 phase 대비차가 가장 크게 나타났다.  $f_{lockin}$  가 작아질수록 시편 표면의 열량 포화로 인해 amplitude 차이는 줄어드는 경향을 보였으나, phase 차이는 임계주파수보다 낮아지면 (-) 값으로 커지는 경향을 볼 수 있었다. 반대로, 충분한 열량이 시편에 들어가지 못하여 amplitude에서는  $f_{lockin} = 0.1$  Hz보다 높은 구간에서 결합 검출이 불가능하였으나 phase 시험에서는 0.8 Hz까지도 결합부의 검출이 가능하였다.

SNR 계산 결과,  $\phi_h = 5$  mm 시편은 0.006 Hz에서 가장 큰 값을 가졌으며, 대비차가 거의 나지 않은 0.05 Hz를 제외한 모든 영역에서 높은 SNR 값을 가졌다. 또한 모든  $f_{lockin}$  조건에서 다른 크기의 시편들보다 고품질의 열화상 이미지를

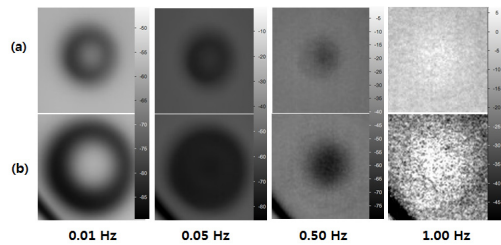


Fig. 9 Infrared phase images of a specimen according to the frequency condition at  $\phi_h =$  (a) 3 mm, (b) 5 mm

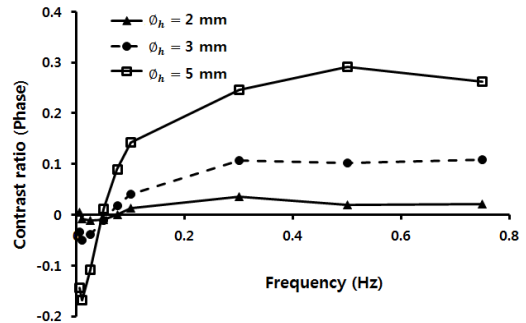


Fig. 10 Phase contrast ratio as a function of lock-in frequency

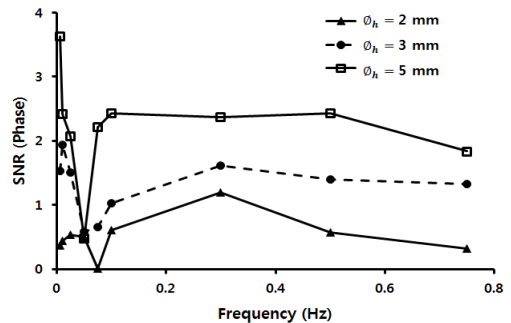


Fig. 11 SNR of a phase results as a function of lock-in frequency

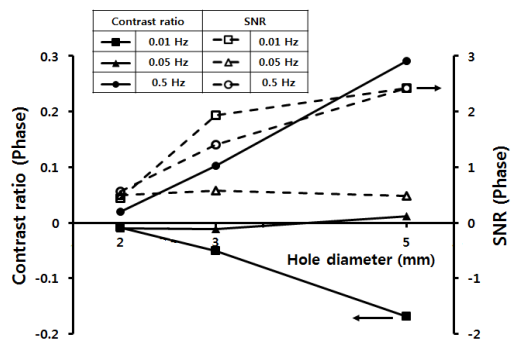


Fig. 12 Contrast ratio and SNR results of phase analysis according to the delamination hole diameter  $\phi_h$

보여준다고 할 수 있었다. 결합부 직경 2 mm와 3 mm 시편에서도 contrast ratio가 높았던 0.3 Hz에서 높은 SNR 값을 보였다(Fig. 11).

Amplitude 분석과 다르게  $f_{lockin} = 0.05$  Hz에서는 결합부 직경에 따른 phase 대비차 및 SNR의 증가를 보이지 않았다.  $f_{lockin} = 0.01$  Hz 0.5 Hz 시험조건에서는 결합부 직경이 클수록 contrast ratio와 SNR 값이 증가하였는데, SNR보다 contrast ratio이 더 급격히 증가하여 결합부 직경 5 mm 시편에서 phase 차이가 가장 뚜렷한 영향을 얻을 수 있었다(Fig. 12).

## 5. 결론

본 연구에서는 치아에서 박리된 복합레진 수복물을 모사한 내부 홀 결합 시편을 제작하고 결합부의 검출을 위해 위상잠금 적외선열화상기법을 이용하였다. amplitude 데이터를 통해 직경 2 mm 이상의 결합부 검출이 가능함을 알았으며 0.05 Hz 부근에서 결합부의 구별이 뚜렷하고 선명한 이미지를 획득할 수 있었다. Amplitude 대비차는 결합부의 직경 크기에 비례하였다.

Phase 데이터를 이용한 결과 0.3-0.5 Hz 부근에서 최적의 대비영상을 보였으며 0.006 Hz에서는 명암 부위가 바뀐 이미지가 보였다. 결합부 크기가 작은 시편의 검출 가능성은 amplitude 분석보다 phase 분석에서 약간 더 높았다.

이상의 연구 결과로부터 치아 우식을 치료함에 있어 치아 수복재의 미세박리를 탐지하기 위해 위상잠금 열화상기술을 적용한 비파괴평가가 유효하며 이 경우 최적의 시험 조건을 도출할 필요가 있음을 알 수 있다.

## 후 기

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

## 참고문헌

[1] J. R. Bausch, K. de Lange and C. L. Davidson, "Clinical significance of polymeri-

- zation shrinkage of composite resins," *J. Prosthet Dent*, Vol. 48, issue 1, pp. 59-67 (1982)
- [2] C. J. Kleverlaan and A. J. Feilzer, "Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites," *Dent Mater*, Vol. 21, issue 12, pp. 1150-1157 (2005).
- [3] N. Ilie, K. H. Kunzelmann and R. Hickel, "Evaluation of micro-tensile bond strengths of composite materials in comparison to their polymerization shrinkage," *Dent Mater*, Vol. 22, issue 7, pp. 593-601 (2006)
- [4] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)
- [5] J. Rantala, D. Wu and G. Busse, "Amplitude modulated lock-in vibrothermography for NDE of polymers and composites," *Research in Nondestructive Evaluation*. Vol. 7(4), pp. 215-228 (1996)
- [6] I. Krejci, M. Besek and F. Lutz, "Clinical and SEM study of Tetric resin composite in posterior teeth: 12-month results," *American Journal of Dentistry*, Vol. 7, No. 1, pp. 27-30 (1999)
- [7] A. K. Bedran de Castro, L. A. Pimenta, C. M. Amaral and G. M. Ambrosano, "Evaluation of microleakage in cervical margins of various posterior restorative systems," *Journal of Esthetic And Restorative Dentistry*, Vol. 14, pp. 107-114 (2002)
- [8] J. U. Gu and N. S. Choi, "Evaluation of delamination of dental composite restoration using infrared lock-in thermography," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25(6), pp. 236-240 (2012)
- [9] B. Otwin, W. Wilhelm and L. Martin, "Lock-in Thermography," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 14-26 (2010)
- [10] X. Maldague, "Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing," John Wiley & Sons, Inc., New York (2001)