

위상잠금 중파장 적외선 열화상 기법에 의한 결함 계측에서 측정 대상체의 재질에 따른 위상잠금 주파수 연구

박일철*, 김상채*, 이항서*, 김한섭*, 정현철**, 김경석***,#

*조선대학교 일반대학원 기계시스템미래자동차공학과, **조선대학교 산업기술융합대학원
융합자동차공학과, ***조선대학교 기계시스템미래자동차공학부

Determination of Lock-in Frequency in Accordance with Material of Target for Defect Measuring by Lock-in Mid-IR Thermography

Il-Chul Park*, Sang-Chae Kim*, Hang-Seo Lee*, Han-Sub Kim*, Hyun-Chul Jung**,
Kyeong-Suk Kim***,#

*Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering, Graduate School, Chosun Univ.,

**Dept. of Convergence Automotive Engineering, Graduate School of Industry Technology

Convergence, Chosun Univ., ***Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun Univ.

(Received 23 July 2019; received in revised form 27 July 2019; accepted 5 August 2019)

ABSTRACT

Three types of samples with defects were measured by lock-in mid-IR (infrared) thermography with various lock-in frequencies for different materials. The lock-in method can be used to detect defects when an external energy source is applied to the object, the non-uniformity of the incident thermal energy distribution is eliminated, and the camera's measurement cycle is synchronized with the load cycle of the incident energy source. For inspecting samples with defects, results of thermal images are analyzed when three types of materials, i.e., SM45C, STS316L, and AL6061 are tested and three lock-in frequencies, i.e., 0.08, 0.1, and 0.12 Hz are applied. In this study, the optimal lock-in frequencies were determined by comparing the results of each material and lock-in frequency measured using the mid-IR camera.

Key Words : Lock-in Frequency(위상잠금 주파수), IR Thermography(적외선 열화상 기법), Defect Measurement(결함 계측), Mid-infrared(중파장 적외선), Material of Target(측정 대상체 재질)

1. 서 론

적외선 열화상 기술은 지난 20년간 비약적으로 발전하여 산업체와 과학기술계에서 두각을 나타내고 있는 분야로 적외선 열화상 분석은 현재 비파괴

검사, 예측 정비, 상태 진단, 가스 누출 감지, 건축과 공정 분야의 에너지 절감 등 다양한 분야의 산업체 및 연구 개발 분야에 적용되고 있다. 오늘날 현대 산업사회는 다양화되고 첨단화되어짐에 따라 각종 구조물은 급속히 고속화, 고압화, 소형화되는 추세이며, 이 추세에 따라 품질과 안전에 대한 신뢰성 확보가 중요한 문제로 인식되고 있다.

제품의 생산이나 가공에서 생성되는 결함은 판매

Corresponding Author : gsckim@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7282, Fax: +82-62-233-6423

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

자와 구매자에게 큰 영향을 미치게 되므로 재료의 특성에 의해 숨겨진 내부결함이나 겉으로 보이는 미세한 외부결함을 계측하기 위한 비파괴 검사 기술은 매우 중요하다^[1,2].

이러한 요건을 충족시키는 적외선 열화상 검사 기법으로 Lock-in 기술이 있으며, 이 적외선 열화상 기법은 주위 환경에 의한 노이즈를 효과적으로 제거하고 비파괴적인 방법으로 능동 광열원의 위치를 추적 해줄 수 있어 내부결함에 의한 국소적 열원을 찾는 비파괴검사에 많이 활용 된다^[3,4]. 최근 국내에서 적외선 카메라를 이용한 재료별 연구 동향으로 탄소강 재료로 만든 원전 배관의 용접부 결함을 검출하는 연구^[5]와 STS 재료 구조물의 결함 진단^[6], 알루미늄 재료의 이면결함에 대한 검출 연구^[7] 등 재료에 따른 적외선 열화상 검사 기술들이 많이 연구되고 있다.

선행 연구들을 살펴보면 각 재료마다 활용되는 분야와 특성 및 열전도율이 다르고, 정밀계측을 요구하는 추세에 따라 정밀한 계측을 위해 각 재료에 맞는 적외선 열화상 계측 최적화 연구가 필요하다.

본 논문에서는 탄소강, STS, 알루미늄 재료에 각각 결함을 가공하여 Lock-in 기법을 이용한 적외선 열화상 계측 시 Lock-in 주파수와 재질의 변화에 따라 어떤 차이를 보이는지 관찰하였고, 이 결과를 분석하여 적외선 열화상 계측의 최적화 및 재료별 Lock-in 주파수를 이용한 정밀진단의 조건을 제시하였다.

2. Lock-in 기법

능동적인 열화상 검사 기술인 Lock-in 기법은 실험 대상체에 능동열원으로서 연속적으로 변조된 단순조화함수(simple harmonic function)를 조사한다. 이 기법은 조화함수로 입사되는 자극원에 적외선 열화상 카메라의 검출 소자를 동기화시켜 실험 대상체의 응답신호를 획득한다.

식 (1)으로 표현되는 고체 내의 1차원 열전도 방정식에서 외부 자극으로 할로젠램프에 의한 광 열원을 조화함수($T = T_0 \cos(ut)$)로 표면을 가열할 때, 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다.

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \tag{1}$$

여기서 T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, x 는 열유동 방향이다. 흡수된 열은 물체 표면으로부터 열파동(thermal wave)을 만들어낸다. 이 열파동은 물체 속으로 진행되어 들어가고, 물리적 열전달 특성이 변하는 빈 공간이나 갈라진 결함층을 만나면 부분적으로 반사한다. 진행파와 반사파의 간섭은 물체 표면에 조화진동 복사패턴의 변화를 유도하고 이것을 적외선 카메라에 의해 감지하게 된다. 물체 내부의 결함부 표면은 결함이 없는 정상부와 비교하면 다른 위상을 나타낼 수 있다.

Lock-in 기법을 적용한 적외선 열화상 계측 시스템과 소프트웨어는 진폭과 위상의 변화를 계산하여 결함부를 감지할 수 있게 한다. 이러한 기법은 연속적인 대신 동시에 순차적인 측정값을 가지기 때문에 Lock-in 적외선 열화상 기법이라 한다. 즉, 하나의 파동 주기 동안에 많은 점들이 동시에 관측된다. 따라서 장치는 다중 측정을 수행해야하고 이런 열화상 측정은 위치에 따른 열파동의 변화를 위상과 진폭으로 나타낸다. Fig. 1은 Lock-in 열화상 기법의 개념을 나타냈다^[8].

만일 영상기록이 변조 주파수와 동기화되고 한 주기 동안 4개의 영상을 얻는다면, 4개의 신호 값 S_1, S_2, S_3, S_4 가 모든 영상 화소에서 얻어진다. 따라서 매 파동 주기 동안에 각 영상 화소는 위상이

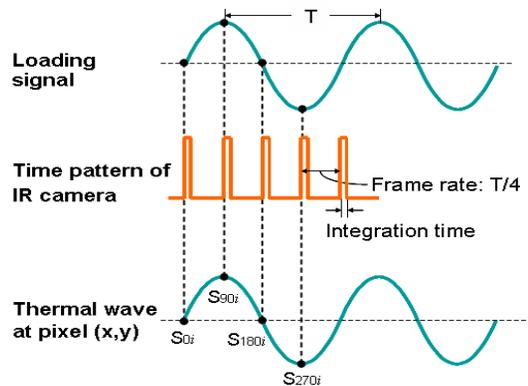


Fig. 1 Signal processing of lock-in IRT

90°차이를 갖는 4배의 자료를 취득하게 된다. 취득된 4개의 자료로부터 특정 화소(x, y)의 변조가 이루어질 수 있다^[9].

$$A(x, y) = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (2)$$

$$\phi(x_1) = \tan^{-1} \left(\frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \right) \quad (3)$$

실제적으로 Lock-in 적외선 열화상 시스템은 온도영상의 진폭과 위상각의 계산을 위해 단 4장의 S_1, S_2, S_3, S_4 의 그림보자 훨씬 많은 영상과 이미지를 획득할 수 있다. 몇 개의 변조 주기에 거쳐 매 주기마다 4장 이상의 영상 이미지의 평균을 구하지만 sin 파형 변조로 인해 모든 영상 이미지는 결국 4개의 기본 영상 S_1, S_2, S_3, S_4 으로 병합된다. 이들 병합영상의 위상각과 진폭 값은 앞의 식 (2), 식 (3)으로부터 얻을 수 있다^[10].

식 (2)와 같이 (S_1 과 S_3) 및 (S_2 와 S_4) 사이의 차이를 계산하여 Lock-in 기법은 불균일한 광열원의 조사, 표면 방사율(emissivity), 그리고 주위 환경 반사 노이즈의 영향을 제거할 수 있게 된다.

3. Lock-in 기법을 이용한 적외선 열화상 측정 실험

3.1. 시험편 제작

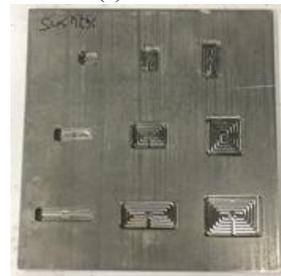
200 mm×200 mm 정사각형의 평판 시험편을 제작하고 그 뒷면에 크기가 다른 9가지의 결함을 가공하였다. 평판 시험편의 재질은 SM45C, STS316L, AL6061 3종류로 제작 하였으며, 시험편의 두께는 5 mm, 결함 깊이는 75 % (3.75 mm)로 제작하였다. 결함의 크기를 각각 다르게 하여 재질에 따른 결함을 검출할 수 있는지 확인할 수 있도록 Fig. 2와 같이 시험편을 제작하였다.

3.2. 실험 방법

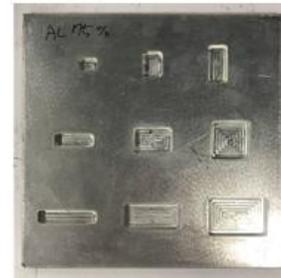
Lock-in 기법은 함수발생기를 통해 출력주파수를 발생시키고, 중과장 적외선 카메라와 가열장치를 동기화하여야 한다.



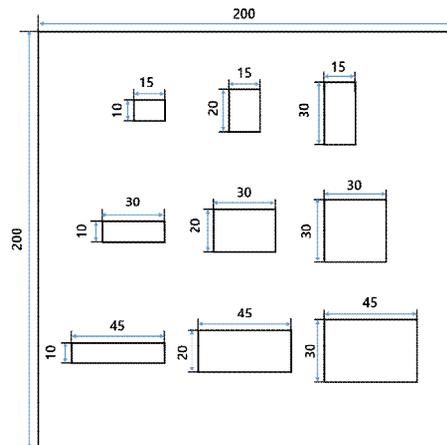
(a) SM45C



(b) STS316L



(c) AL6061



(d) Size of specimen

Fig. 2 Wall thinning defect specimen

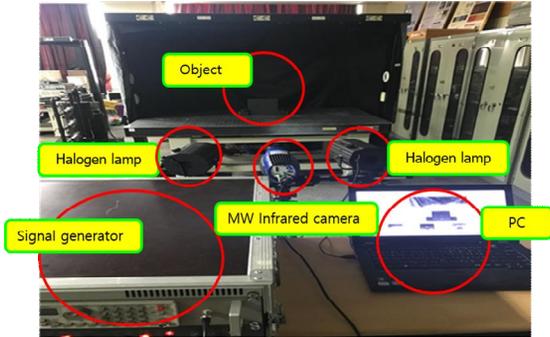


Fig. 3 Experimental configuration with a infrared camera



Fig. 4 Infrared camera

Table 1 Infrared camera specifications

Infrared camera(FLIR. SC5500)	
Detector materials	InSb
Cooling method	Stirling cooler
Spectral response	3.7~5.0 μm
Number of pixels	320*256
Pixel pitch	30 μm
NETD	25 mK@25 $^{\circ}\text{C}$
Temperature measure range	-15~2000 $^{\circ}\text{C}$
Digital full frame rate	383 Hz
Frame rate resolution	1 Hz Step
Waveband	2.5~5.1 μm

Lock-in을 이용하여 재질별 시험편의 결함을 검출하기 위해 Fig. 3과 같이 함수발생기, 할로겐램프, 중파장 적외선 카메라를 이용하여 실험을 구성하였다. Lock-in 기법을 이용하여 시험편의 결함을 검출

하기 위해서는 적절한 거리와 주파수를 사용해야 한다. 본 연구에서 Lock-in 주파수는 시험편의 재질과 결함 크기를 고려하여 0.08, 0.1, 0.12 Hz의 주파수와 2번의 주기를 사용하였고, 시험편과 가열장치의 거리는 1.5 m로 고정 하였다. 그리고 Fig. 4와 같은 중파장 적외선 카메라를 사용하여 재질별, Lock-in 주파수별 결함 측정 실험을 수행하였다.

4. 적외선 열화상 결함 측정 결과

본 실험에서 Lock-in 주파수를 0.1 Hz를 기준으로 ± 0.02 Hz 변경하고 재질별로 중파장 적외선 카메라로 평판 시험편의 결함을 측정하였다. Fig. 5는 중파장 적외선 카메라로 측정한 재질별, Lock-in 주파수별 결과를 그레이 레벨 이미지로 나타내었다. 이미지 상에서 관찰된 결과로 SM45C 재질의 경우 Lock-in 주파수에 따라 결함의 대비가 많이 차이는 것을 확인할 수 있었다. Lock-in 주파수 0.08 Hz, 0.12 Hz에서는 결함을 확인하기 어려웠다.

STS316L 재질의 경우 이미지 상에서 Lock-in 주파수와의 변화와 상관없이 결함을 확인할 수 있었으며 Lock-in 주파수 0.1 Hz에서 가장 뚜렷하게 결

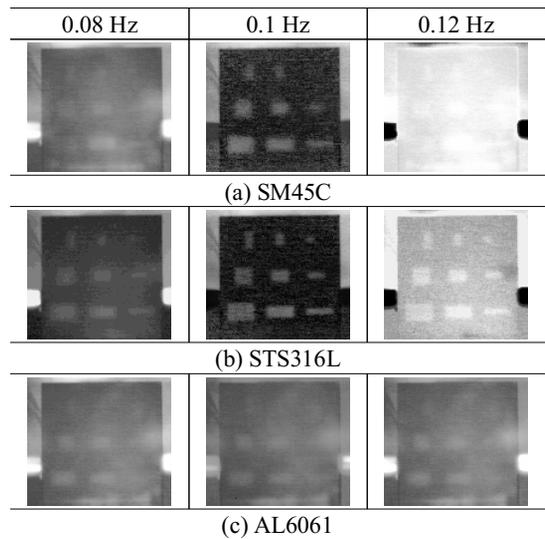


Fig. 5 Image results of specimen using infrared camera (5 mm, 75%)

함을 계측할 수 있었다. AL6061 재질의 경우 이미지 상에서 Lock-in 주파수와 상관없이 결함을 확인하기 어려웠으며, 거의 적외선 열화상 이미지가 비슷한 것을 확인할 수 있었다.

Lock-in 기법을 이용한 평판 시험편의 결함검출 프로파일의 위치는 Fig. 6과 같으며, 측정된 라인프로파일 결과는 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 7은 재질 SM45C, 두께 5 mm, 결함 두께 75%의 평판 시험편을 적외선 카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 Lock-in 주파수로 측정된 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 0.08 Hz, 0.12 Hz의 Lock-in 주파수로 측정하였을 때, 적외선 카메라로 결함을 판별하기 어려웠다. 0.1 Hz의 Lock-in 주파수로 측정하였을 때, 적외선 카메라로 결함을 판별할 수 있었다.

Fig. 8은 재질 STS316L, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 75%의 평판 시험편을 적외선 카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정된 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다.

적외선카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 주파수에서 모두 결함 판별할 수 있었고 대체적으로 위상 잠금 주파수와 상관없이 결함을 판별할 수 있었다.

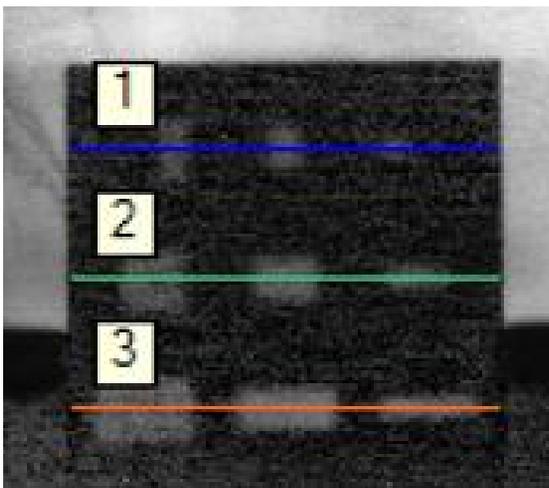
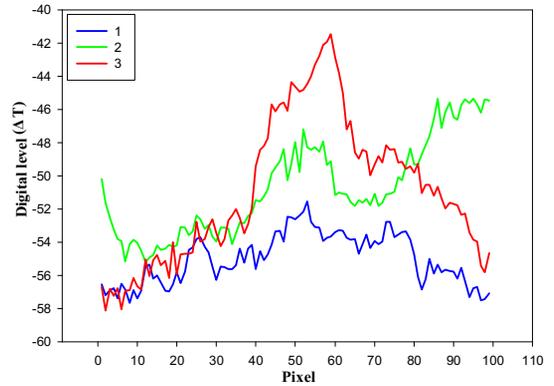
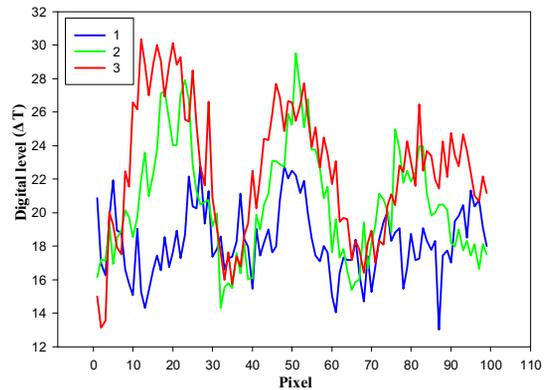


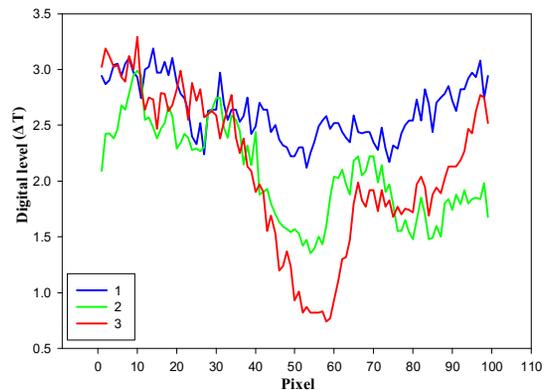
Fig. 6 Line profile position of wall thinning defect specimen



(a) 0.08Hz

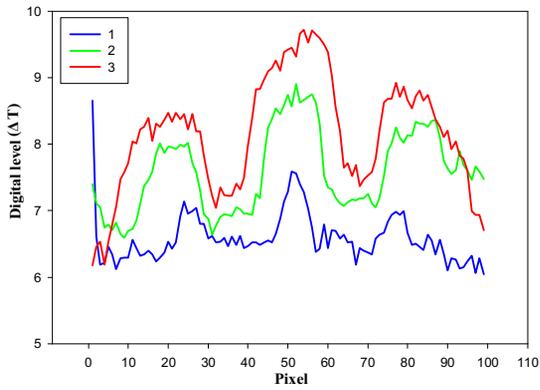


(b) 0.1Hz

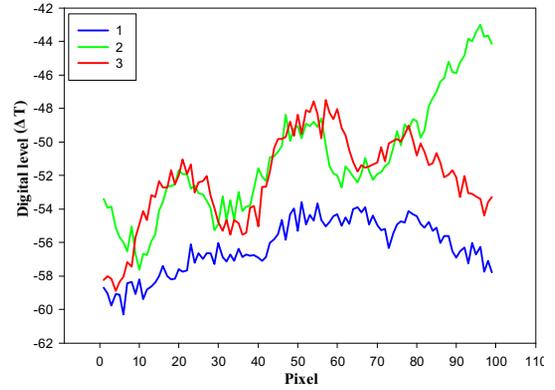


(c) 0.12Hz

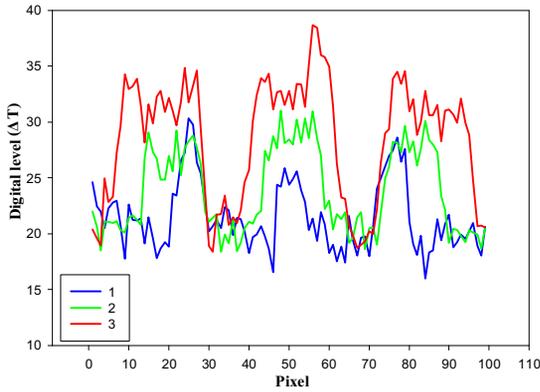
Fig. 7 Line profile results(Material : SM45C, thickness : 5mm, Defect depth : 75%)



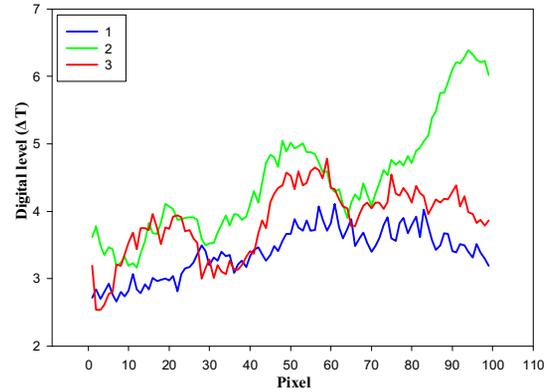
(a) 0.08Hz



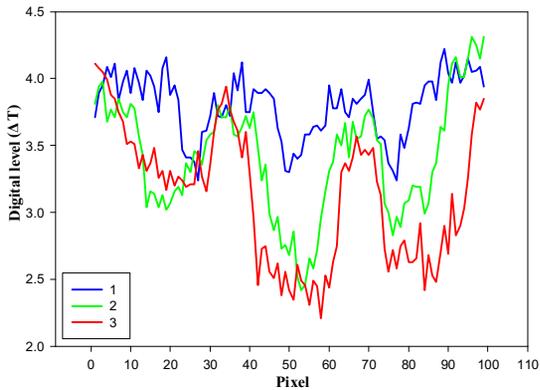
(a) 0.08Hz



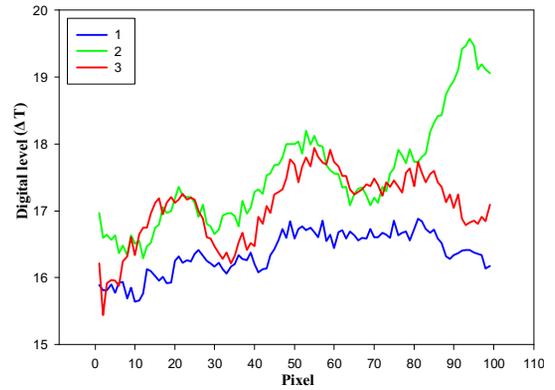
(b) 0.1Hz



(b) 0.1Hz



(c) 0.12Hz



(c) 0.12Hz

Fig. 8 Line profile results(Material : STS316L, thickness : 5mm, Defect depth : 75%)

Fig. 9 Line profile results(Material : AL6061, thickness : 5mm, Defect depth : 75%)

Fig. 9는 재질 AL6061, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 적외선 카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 위상 잠금 주파수로 측정된 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다.

적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 Lock-in 주파수에서 비슷한 경향을 보였으며, 비교적 큰 결함들은 이미지 상에서 확인 가능하였지만 작은 결함들은 확인하기 어려웠다.

본 실험에서 Lock-in 주파수를 변경하며 재질별로 적외선 카메라로 평판 시험편의 결함을 측정해 본 결과 3가지 재질 중 2가지 재질의 결함을 확연하게 판별할 수 있었고 대체적으로 0.1 Hz의 위상 잠금 주파수를 사용하면 뚜렷한 결함을 검출할 수 있었다. AL6061 재질의 경우 결함을 판별하기 어려웠으며, STS316L 재질의 경우 Lock-in 주파수와 상관없이 선명한 결과는 아니지만 어느 정도 결함을 유추해볼 수 있는 결과를 보였다. 평판 시험편의 결함은 STS316L, SM45C, AL6061 재질 순으로 선명한 결함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 첨단 비파괴 검사 분야로써 현재 널리 사용되고 있는 기술 중에 Lock-in 적외선 열화상 기법을 이용하여 재질과 위상 잠금 주파수에 따른 결함 검출 최적의 조건 도출을 위한 실험을 수행하였다. 실험결과 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적외선 열화상 카메라를 이용한 실험에서 평판 시험편의 재질, 결함 크기 및 깊이를 고려한 측정을 통해서 얻어진 SM45C, STS316L 재질의 결함 계측 시 가장 적합한 Lock-in 주파수는 0.1 Hz이었다.
2. 적외선 카메라를 이용한 결함 검출 이미지에서 선명하지 않지만 모든 재질에서 어느 정도 결함이라고 판단할 수 있었다. 라인프로파일로 확인하였을 때, AL6061의 재질은 Lock-in 주파수와 상관없이 비슷한 결과를 보였다. 이는 열전도 때문이라고 판단되며, 알루미늄 소재의 결함을 명확하게 판단하기 위해서는 열전도를 고려한 결

함 계측 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 2017년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.”(This study was supported research fund form chosun university 2017)

REFERENCES

1. Maldague, X. P., “Advances in signal processing for nondestructive evaluation of materials,” Springer Science & Business Media, Vol. 262, 2012.
2. Meola, C., “Infrared thermography recent advances and future trends,” Bentham Science Publishers, pp. 60, 2012.
3. Breitenstein, O., Langenkamp, M., "Lock-in thermography." Basics and Use for Functional Diagnostics of Electronics Components. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-38, 2003.
4. Park, J. H., Choi, M. Y., Kim, W. T., “Shearing phase lock-in infrared thermography for defects evaluation of metallic specimen,” Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 30, No. 2, pp. 91-97, 2010.
5. Kwon, D. J., Jung, N. R., Kim, J. Y., “Defect detection of carbon steel pipe weld area using infrared thermography camera,” The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers, Vol. 30, No. 2, pp. 124-129, 2014.
6. Park, Y. H., Yang, S. M., “STS defect structure diagnosis through the Infrared thermography mechanism and Flex-PDE thermal analysis,” Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 22, No. 4, pp. 20-29, 2014.
7. Chung, Y. J., Kim, W. T., “Detectability study on subsurface defect evaluation of aluminum structures by using Lock-in thermography,”

Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 37, No. 4, pp. 262-268, 2017.

8. Kim, S. C., Kang, S. H., Yun, N. Y., Jung, H. C., Kim, K. S., "A study about detection of defects in the nuclear piping loop system using cooling lock-in infrared thermography," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 35, No. 5, pp. 321-331, 2015.
9. Schmidt, C., Altmann, F., Schlangen, R., Deslandes, H., "Non-destructive defect depth determination at fully packaged and stacked die devices using lock-in thermography," 17th IEEE International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, pp. 1-5, 2010.
10. Schlangen, R., Deslandes, H., Lundquist, T., Schmidt, C., Altmann, F., Yuc, K., Andriasyan, A., Li, S., "Dynamic lock-in thermography for operation mode-dependent thermally active fault localization," Microelectronics Reliability, Vol. 50, pp. 1454-1458, 2010.