

금속재료 시편의 결함평가에 대한 전단위상 Lock-in 적외선열화상 연구

Shearing Phase Lock-in Infrared Thermography for Defects Evaluation of Metallic Materials Specimen

박정학*, 최만용*, 김원태**†

Jeonghak Park*, Manyong Choi* and Wontae Kim**†

초 록 본 연구는 전단위상 위상잠금 적외선열화상기술을 이용한 금속재료 시편의 내부결함을 평가하는 방법에 대한 연구 결과이다. 특히, STS304와 Cu-Zn 시편에 대한 비파괴시험 및 평가는 종래에는 적절한 실험 조건하에서 주로 시행됨에 따라 결함의 형태나 존재를 알 수 없는 상황에서는 최적실험조건을 찾는 일은 오랜 시간이 걸리는 단점이 있었다. 본 연구에서는 위상잠금방법과 전단위상검출방법을 활용하여 60 MHz 신호로 설정된 가열 조건에서 결함의 위치 및 크기를 평가하였다. 전단위상분포는 시편 내부결함의 크기와 위치를 정량적으로 결정하기 위하여 최대, 최소, 영점을 이용하는 방법이다. 연구 결과로써 인공결함을 갖는 STS 304와 Cu7-Zn3 시험편에 대하여 제안된 기법의 적용을 검증하였으며, 결함평가에 영향을 주는 인자를 추출하고 그 영향을 분석하였다.

주요용어: 위상잠금, 적외선열화상, 결함평가, 이면위치, 전단위상기법

Abstract This paper proposes method to evaluate the location and size of the internal defects of metallic specimens by the shearing phase lock-in infrared thermography. Until now, infrared thermography test for metal specimen of STS304 and Cu-Zn were conducted to find the best test conditions. However, In unspecified situation of the form and existence of defects, there was a disadvantage to takes a long time for finding the optimal experimental conditions. The defect detection and evaluation was performed at 60 MHz signal using lock-in and shearing-phase method under limited heating conditions. By shearing-phase distribution method, Defects for the maximum, minimum and zero points were quantitatively detected at the size and location of the subsurface. As results, application of the proposed technique was verified for STS304 and Cu7-Zn3 with artificial defect and factors affected defect evaluation were searched and analyzed.

Keywords: Shearing Phase, Infrared Thermography, Defects Evaluation, Subsurface Location, Lock-in Technique

1. 서 론

최근 신종플루로 인한 발열 검진에 사용되어 그 효용가치가 새롭게 인식되고 있는 적외선열화상기술은 대상체의 표면 복사에너지를 검출하고 이를

온도로 환산하여 실시간으로 영상을 제공함으로써 재료의 열적특성평가, 전력시설물 열화진단, 복합재료 결함검사, 건축물 단열평가, 체열측정을 통한 의료진단 등의 분야에 활용되고 있다[1]. 실제 우리가 활용하고 있는 적외선열화상에 의한 비파괴

검사는 크게 두 가지 검사 방법으로 분류할 수 있는데, 첫 번째로는 대상체 자체에서 발산하는 복사 에너지를 검출하여 건전성을 평가하는 수동형 검사 방법(passive technique)과 두 번째로는 외부에서 대상체를 광(photo), 진동(vibro-), 초음파(ultrasound), 와전류(eddy current) 등으로 자극하고 그 응답특성을 평가하는 능동형 기법(active technique)이 있다. 흔히 TV를 통하여 볼 수 있는 공항, 항만의 출입국시의 발열검사는 수동형 검사 기법으로 최근에는 이러한 기술을 주로 사용하며 결함 검출능을 개선하고 있다[2]. 일반적으로 적외선 열화상 기술에 의한 비파괴검사는 결함부와 건전부의 온도차 즉, 2차원 이미지로 제공되는 열화상에서 온도장의 변화를 관찰함으로써 결함의 유무를 판별한다.

한편, 열확산계수가 큰 금속과 같이 온도 확산이 빠르거나 표면방사율에 따른 문제 등에 의한 검출이 난해한 부분을 해결하기 위한 기술로 적외선 열화상 기술의 결함 검출능은 위상잠금(lock-in) 기법을 적용함으로써 획기적으로 개선되었다. 위상잠금 적외선 열화상(lock-in infrared thermography: lock-in IRT)의 원리는 대상체를 자극하는 열원을 조화함수로 변조하여 입사하고 이 조화함수에 검출소자를 동기화시켜 조화함수의 위상변화를 복조하는 것이다. 위상잠금을 사용하여 위상변화를 추출함으로써 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있으며, 불균일한 표면방사율의 영향을 적게 받게 된다[3,4].

기존의 영상처리에서 사용하는 미분에 의한 경계선추출기법은 CCD 카메라에 비하여 S/N비와 공간분해능이 낮은 적외선 열화상 데이터에 적용하는 데에는 필터링 등의 데이터 처리가 필요하며 이는 데이터 손실 등의 문제가 있다. 위상잠금 열화상 검사법을 이용하여 시험에 사용된 STS304와 Cu-Zn 시편에 일정한 광원을 조사하여 두 재료의 특성에 따른 결함 검출을 위하여 전단위상기법을 활용하여 비교하였다.

2. 전단위상 Lock-in 적외선 열화상 기법

이 기법에서는 열화상으로 측정된 위상 분포를 전단시켜 이들의 전단위상분포를 구하였다. 또한, STS304와 Cu-Zn의 인공결함시편을 제작하고 전단

위상 분포로부터 결함의 크기와 위치를 정량적으로 평가하여 고정주파수 내에서 위상량의 변화에 따른 재료의 검출 성능을 파악하였다.

본 연구에서는 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 따라서 결함 검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수($T = T_0 \cos \omega t$)로 입사되는 열원(heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다.

$$T(x, t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (1)$$

여기에서, T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열, x 는 열유동 방향으로의 거리.

침투깊이(thermal diffusion length), $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$, 열확산계수(thermal diffusivity), $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 이다. 위상잠금

기법에서는 식(1)에서 측정 결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화할 수 있다. 식(1)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기시켜 자극원의 $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호를 획득하고, 식(3)을 사용하여 추출할 수 있다[5,6].

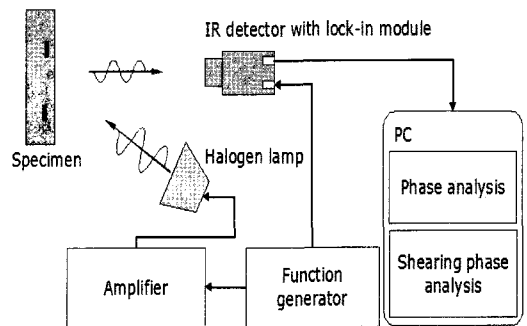


Fig. 1 Schematic of lock-In opto-infrared thermography

$$I_1 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (2)$$

$$I_2 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2)$$

$$I_3 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi)$$

$$I_4 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (3)$$

일정한 공간주파수를 갖는 위상이미지에서 전단 위상을 검출하여 전단위상의 최대값과 최소값의 사이를 결함의 크기로 정량적으로 평가하기 위한 전단위상기법으로부터, 기울기 변화점을 효과적으로 추출하기 위해 전단위상기법이 사용되며, 식(4)와 같이 처리한다.

$$\phi_{sp}(i, j) = \phi(i + \delta s, j) - \phi(i, j) \quad (4)$$

여기에서, $\phi_{sp}(i, j)$ 는 픽셀(i, j)에서 전단위상 (shearing phase), $\phi(i, j)$ 는 식(4)를 이용하여 구한 검출위상(phase), $\phi(i + \delta s, j)$ 는 δs 만큼 떨어진 점에서 검출위상, δs 는 전단량이다. 식(4)는 원 위상분포와 전단량 δs 만큼 전단이동(shearing)시킨 위상분포 간의 감산처리한 결과이며, 그 결과인 전단위상 분포에는 전단위상의 최대점, 최소점, "zero" 위치 점들이 존재한다. 이 분포에서 결함의 크기는 전단위상의 최대점과 최소점 사이로 결정하였으며, 결함의 위치는 전단위상이 "zero"가 되는 위치로 결정하였다. 본 고에서는 전단위상기법을 적용하여 낮은 노이즈 민감도에서 최대기울기 점을 보다 용이하게 추출할 수 있으며, 전단량의 크기는 민감도를 조절할 수 있다.

3. 시험편 및 장치 구성

시험편은 스테인레스강(STS304)과 황동(Cu7-Zn3)으로 열적 물성값은 Table 1에 나타내었다. 시험편의 표면은 흑색 무광 방사페인트로 도색하여 표면 방사율을 흑체에 가까운 0.95로 유지하였다. 결함은 후면에서 드릴로 가공하여 깊이와 크기가 각각 다르게 제작하였으며, 시험편의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 적외선검출기는 프랑스 Cedis사의 Silver 480이며 함수발생기(function generator)에 의해 할로젠 램프의 주파수를 동기화하며 조절하여 적외선 검출소자로부터 위상이미지(phase map)를 제공하

여준다. 본 연구에서는 위상이미지에 전단위상기법을 적용하여 결함의 크기 및 위치를 평가한다.

Table 1 Thermophysical properties of STS304 and Cu7-Zn3

Property	Conductivity (k) W/m-K	density (ρ) kg/m ³	Specific heat capacity (c) J/kg-K	Thermal expansion coefficient (α) $\times 10^6$ m ² /s
Material				
STS304	14.9	7900	477	3.95
Cu7:Zn3	110	8530	380	33.90

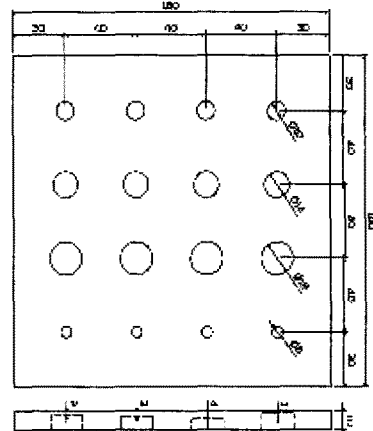


Fig. 2 Artificial specimen with back-drilled-bottom-plate defects (unit: mm)

4. 시험 결과

4.1. 검출한계주파수 추출

식(1)로부터 낮은 주파수에서는 재료 내부 깊은 곳까지 침투가 가능하고, 높은 주파수에서는 수 μm 의 깊이만을 침투하게 된다. 즉, 입사되는 열원의 주파수에 따라 검출 가능한 깊이가 제한되어 있으며, 역으로 특정깊이의 결함을 검출할 수 없는 검출한계주파수(blind frequency), f_b 가 존재하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 시험에서는 주파수를 증가하면서 결함이 검출되지 않는 검출한계주파수를 구하고 이 주파수로부터 침투깊이를 예측하여 결함의 깊이로 평가하므로, 재료의 불균일성, 외부

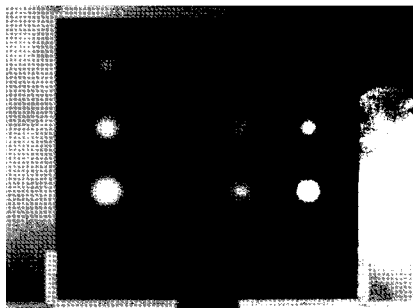
환경 등의 영향으로 상관계수 C 를 고려하여 식(5)과 같이 결함의 깊이를 예측할 수 있다[7].

$$d = C \cdot \mu_b = C \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad (5)$$

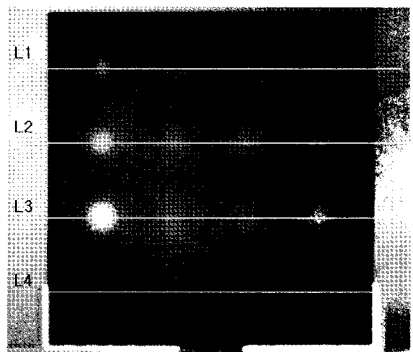
기존 연구는 공식에 따른 C 상수를 구하기 위하여 검출 가능 주파수를 추출하여 사용하였으나 본 실험에서는 주파수를 60 MHz로 고정하여 실험하였다. 시험으로부터 가열주파수가 60 MHz일 때 결함부와 건전부의 위상차가 최대가 되는 것을 알 수 있었으며, 이 가열주파수를 결함 크기 및 위치평가를 위한 최적주파수로 결정하였으며 Fig. 3은 이로부터 검출한 영상이다.

4.2. 위상이미지에 따른 전단위상 평가

Fig. 3은 고정 검출주파수인 60 MHz에서의 위상 이미지이며 각각의 결함 측정을 위하여 L1~L4의 선을 그어 데이터를 수집하였다. 실제 열화상 이미지의 경우 그 단위가 픽셀(pixel)로 검출되며 이는



(a) STS304



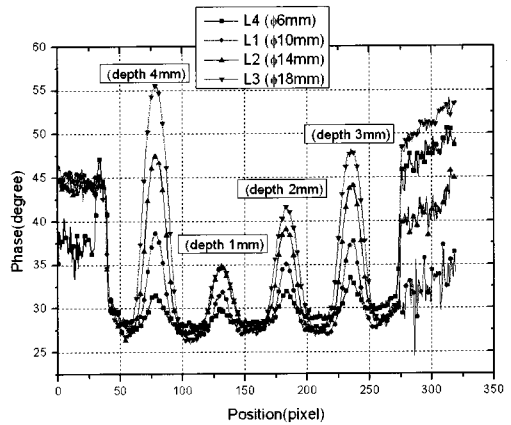
(b) Cu-Zn

Fig. 3 Thermal phase image compared at 60 MHz

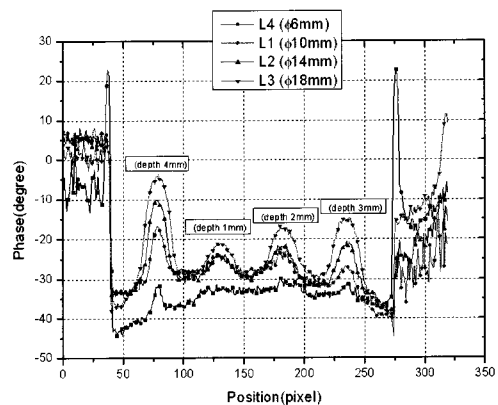
실제 검사체의 크기를 측정하는데 활용한다. 길이를 정확히 알고 있는 2차원 평면 대상체를 측정하고 그 길이에 해당하는 화소수로 나누게 되면 1개의 픽셀이 몇 mm에 해당하는지를 측정할 수 있다.

본 실험의 경우 대상체의 전체 크기를 픽셀 단위로 구한 후 결함 영상에 대입하여 크기를 검출하게 되는데 L1~L4까지의 라인의 위상이미지를 활용하였다. Fig. 3(a)는 STS304의 위상분포도를, Fig. 3(b)는 Cu-Zn의 위상분포도를 나타내고 있다. 이 위상분포도의 경우 결함에 대한 정성적인 판단은 가능하나 정량적인 검출에는 어려움이 따른다. 이러한 정량적인 결함 크기 검출을 위해 전단위상을 구하여 문제를 해결할 수 있다.

Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 L3와 L4의 L3과 L4에서의 STS304와 Cu-Zn의 전단위상분포를 나타낸다. 전단위상분포에서 각 결함은 최대, 최소 전단위상



(a) STS304 thermal phase



(b) Cu-Zn thermal phase

Fig. 4 Distribution of thermal phase on L1, L2, L3, L4

분포에서 각 결함은 최대, 최소전단위상 점과 zero 위상점을 가지게 되며, 결함의 크기는 최대점과 최소점의 사이의 거리로 결정한다. 전단위상기법을 적용하는데 있어서 전단량은 결함 크기 예측에 영향을 준다. 본 고에서는, 상대 위상에 의한 최대기울기 뿐만 아니라, 오차율은 상기의 전단량을 포함한 시험편의 열적 상태량, 결함의 형상이나 깊이 등과 복합적 관계를 가지므로 이를 고려한 연구를 수행하였다. 따라서, 전단량 변화에 따른 측정 결과의 상대 오차율이 달라지게 되는데 최적전단량은 열화상이미지의 공간분해능과 관련하므로 특정 상수값이 될 수 없다. Table 2와 Table 3은 각각 전단량에 따른 측정된 결함의 크기를 나타내고 있다.

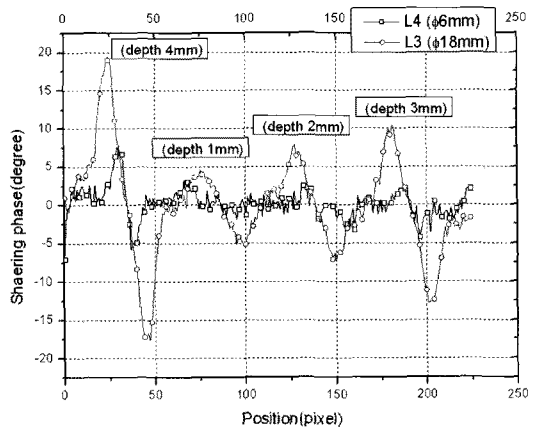
결함의 크기와 무관하게 STS304에서는 전단량이 6.2 mm에서 가장 작은 오차를 보이고, Cu-Zn에서는 4.6 mm 가장 작은 오차를 보였다. 따라서 4.6 mm와 6.2 mm로 전단량을 결함 검출에 있어서 최적전단량으로 결정하였다. 기존 실험으로부터 3.9~6.9 mm 사이의 전단량이 최적으로 평가되었다. Table 2와 3의 각각의 값은 깊이를 고려하지 않은 값의 평균값으로 STS304의 경우 전단량 6.2 mm를 이용하였을 때 전체적인 오차율이 8.7%였고, Cu-Zn의 오차율은 4.2%에 그쳤다.

Table 2 Detected size according to each shearing amounts (STS 304)

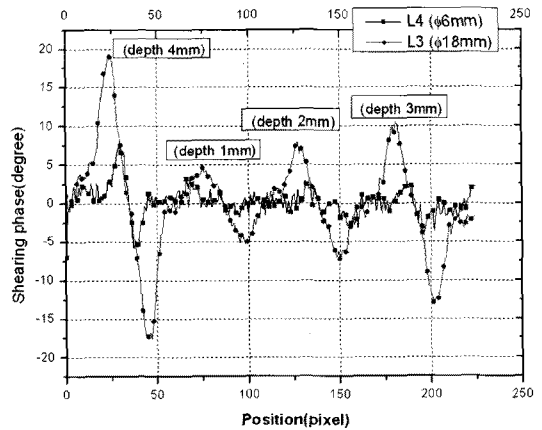
Actual size(mm) \ δs (mm)	3.9	4.6	5.4	6.2	6.9
$\varnothing 6$	5.4	6.2	7.0	6.5	6.4
$\varnothing 10$	11.2	10.0	10.6	10.4	9.8
$\varnothing 14$	12.7	12.7	13.7	13.7	13.3
$\varnothing 18$	18.3	18.1	16.7	16.7	15.8

Table 3 Detected size according to each shearing amounts (Cu-Zn)

Actual size(mm) \ δs (mm)	3.9	4.6	5.4	6.2	6.9
$\varnothing 6$	8.5	8.5	8.7	7.6	8.7
$\varnothing 10$	9.4	9.4	10.0	10.4	10.6
$\varnothing 14$	12.1	11.9	12.7	12.9	13.1
$\varnothing 18$	15.8	16.0	15.8	16.2	16.0



(a) STS304 thermal shearing phase



(b) Cu-Zn thermal shearing phase

Fig. 5 Distribution of thermal shearing phase on L3, L4

4.3. 전단위상분포에 따른 결함 깊이 평가

Fig. 5의 그래프를 통하여 결함 깊이가 깊을(측정 표면에서부터 결함이 가까울)수록 측정 데이터가 명확히 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 4에서도 파악할 수 있다. 특히 결함 깊이가 낮고 결함 직경이 작을수록 결함의 유무 판단이 쉽지 않았다. 전단위상분포를 나타낸 Fig. 5(b)의 L4에서도 이와 같은 전단위상분포 결과가 확인되는데, 결함 깊이 4mm(측정면으로부터 결함의 두께 1mm)와 결함깊이 3mm(측정면으로부터 결함 두께 2mm)의 경우는 전단위상분포가 명확하게 나타났으나 그 외의 부분에서는 전단위상분포를 통하여 결함을 파악하는데 어려움이 있다.

Table 4 Estimated defect size at each defect depth (STS304)

Depth(mm)	Actual size(mm)			
	Ø6	Ø10	Ø14	Ø18
1 mm	6.2	10.0	11.5	16.9
4 mm	7.7	8.5	12.3	19.2

Table 5 Estimated defect size at each defect depth (Cu-Zn)

Depth(mm)	Actual size(mm)			
	Ø6	Ø10	Ø14	Ø18
1mm	8.5	11.5	13.8	16.9
4mm	8.5	10.0	12.3	15.4

실제로 Fig. 5의 그래프 상에서 깊이 1 mm의 경우 전단위상의 최대점과 최소점의 위치가 2 mm 이상의 전단위상분포와 달리 서로 비례적이지 않게 어긋나 있음을 알 수 있다. 이 결과는 실제 데이터를 분석할 때 최대점과 최소점을 파악하는데 오차가 발생할 수 있음을 나타낸다 하겠다. Table 2-3의 경우 Ø6 mm의 경우 최대점을 먼저 찾고 최소점을 찾을 때 기울기가 가장 긴 첫 피크점을 기준으로 하여 측정된 결과 양호한 값을 얻었으나 실제 결함을 알고 있는 시편에서는 적용 가능하나 결함을 알지 못하는 경우에는 상당히 적용이 난해 하리라 판단된다. Table 4-5로부터 깊이에 따른 가장 직경이 큰 결함과 가장 작은 직경의 결함을 검출했을 때 STS304에서는 42%의 오차를 보였고, Cu-Zn에서는 28%의 오차를 보였다. 이러한 결과는 직경이 가장 작은 Ø6 mm 결함크기에 비해 검출 정확도에 따른 오차비율이 높아짐도 원인이라 하겠다.

4.4. 결함의 위치 최적화

전단위상기법에서는 전단위상분포로 예측된 결함 위치(zero location)는 전단량의 영향에 따른 오차는 식(6)에 의하여 보정할 수 있으며, 보정된 결함의 위치(defect location)를 계산하였다. 보정량은 전단량의 1/2이 되며, 보정된 결함의 위치는 높은 정확도로 실제 결함의 위치를 추정할 수 있다[8].

Table 6 Estimation of defect location

Actual position(mm)	30.0	70.0	110.0	150.0
Zero location (mm)	27.7	67.7	108.4	148.4
Defect location STS 304(mm)	30.8	70.8	111.3	151.5
Defect location Cu-Zn (mm)	30.0	30.0	110.7	150.7

두 재료의 전단위상분포의 값에서 위치값이 동일한 점에 위치하여 실험에 따른 오차가 최소화되었음을 확인할 수 있었으며, STS 304의 경우는 전단량 6.2 mm의 1/2로 Cu-Zn의 경우는 4.6 mm의 1/2로 계산하여 보정된 값을 Table 6에 나타내었다.

$$DL = ZL + \frac{\delta s}{2} \quad (6)$$

여기에서, ZL 은 전단위상의 zero 위치(zero location)이고 DL 은 보정된 결함의 위치(defect location)이다. 보정값이 전단위상분포에서 얻은 위치값보다 실제 결함 위치에 더 가까운 값을 보였으며 특히 Cu-Zn의 보정결과가 실제 결함 위치와 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 위상잠금 광-적외선열화상기술을 이용한 STS304와 Cu7-Zn3 시편의 내부결함의 위치 및 크기를 평가하는 방법을 검증하였으며, 인공결함 시험편을 60 MHz의 고정주파수로 열원을 조사하였을 때 인공결함의 크기와 위치는 다음과 같다.

- 1) 전단위상 lock-in 적외선열화상기술을 통하여 60 MHz로 고정하여 광원을 조사하였을 경우에도 STS304와 Cu7-Zn3 재료의 인공결함시험편의 결함을 평균 10%이내의 오차로 검출이 가능했다.
- 2) 전단위상분포도를 통하여 위상검출시 정성적 결함크기 판단을 정량적으로 할 수 있었다.
- 3) STS304에서는 6.2 mm의 전단량을 Cu-Zn에서는 4.6 mm의 전단량으로 하였을 때 결함 측정 오차를 줄일 수 있었으며, 깊이를 고려하지 않은 결함 측정에서 Cu-Zn 재료의 결함 검출 오차율이 4.7%로 STS304의 8.4%보다 낮게 나타났다.

참고문헌

- [1] G. Gaussorgurs, *Infrared Thermography*, Translated by S. Chomet, pp. 414-452, Chapman & Hall, London (1994)
- [2] T. Sakagami and S. Kubo, "Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations," *Infrared Physics & Technology* 43, pp. 211-218 (2002)
- [3] 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)
- [4] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," *Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed.)*, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 54-86 (2001)
- [5] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703 (1998)
- [6] D. P. Almond, and S. K. Lau, "Defect sizing by transient thermography I: An analytical treatment," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 27, pp. 1063-1069 (1994)
- [7] G. Busse and A. Rosencwaig, "Subsurface imaging with photoacoustics," *Appl. Phys. Lett.*, Vol 36, No. 10, pp. 815-816 (1980)
- [8] M. Y. Choi, K. S. Kang, J. H. Park, W. T. Kim and K. S. Kim, "Defect sizing and location by lock-in photo-infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 4, pp. 321-327 (2007)