

## 위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가

### Defect Sizing and Location by Lock-in Photo-Infrared Thermography

최만용\*, 강기수\*<sup>†</sup>, 박정학\*, 김원태\*\*, 김경석\*\*\*

Manyong Choi\*, Kisoo Kang\*<sup>†</sup>, Jeonghak Park\*, Wontae Kim\*\* and Koungsuk Kim\*\*\*

**초 록** 위상잠금 적외선 열화상기법은 넓은 면적을 동시에 검사할 수 있으며, 결함부와 건전부 사이의 위상 차로부터 결함의 유무를 판단할 수 있다. 지금까지 결함의 크기는 검사자의 주관적 판단으로 평가되어 왔으며, 재현성과 정확성이 부족하였다. 본 논문에서는 결함의 크기와 위치 평가에 있어 정확성과 재현성을 개선하기 위해서 진단위상기법을 제안하였다. 시험에서는 인공결함을 갖는 시험편으로 제안된 기법을 검증하였으며, 결함평가에 영향을 주는 인자를 추출하여 그 영향을 분석하였다.

**주요용어:** 위상잠금 적외선 열화상, 결함크기, 결함위치, 진단위상기법

**Abstract** In lock-in thermography, a phase difference between the defect area and the healthy area indicates the qualitative location and size of the defect. To accurately estimate these parameters, the shearing-phase technique has been employed which gives the shearing-phase distribution. The shearing-phase distribution has maximum, minimum, and zero points that help determine quantitatively the size and location of the subsurface defect. In experiment, the proposed technique is verified with artificial specimen and these related factors are analyzed.

**Keywords:** Lock-In Infrared Thermography, Defect Sizing, Defect Location, Shearing Phase Technique

#### 1. 서론

적외선 열화상기술은 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]. 적외선 열화상에 의한 비파괴 검사는 대상체 자체에서 발산하는 복사에너지를 검출하여 건전성을 평가하는 수동형 검사기법(passive technique)과 외부에서 대상체를 광(photo), 진동, 초음파, 와전류 등으로 자극하고 그 응답특성을 평

가하는 능동형 검사기법(active technique)으로 나누어 질 수 있으며, 최근 연구에서는 수동형 검사기법을 주로 사용하여 결함 검출능을 개선하고 있다[2]. 일반적으로 적외선 열화상기술에 의한 비파괴 검사는 결함부와 건전부의 온도차 즉, 2차원 이미지로 제공되는 열화상에서 온도장의 왜곡을 관찰함으로써 결함의 유무를 판별한다. 그러나 열확산계수가 큰 금속과 같은 재료의 경우에, 표면 깊은 곳의 결함에 의해 발생하는 온도 왜곡 정보가 표면에 도달하자마자 확산되므로 현재 검출소자의 샘플링 한계로는 표면의 온도장 왜곡을 직접적으로 식별하기 어렵다. 따라서 열확산계수가 큰 재료

의 검사에 있어서 기존 열화상기술은 표면에 근접한 내부결합만을 검출한다는 단점이 있었으며, 또한 대상체 표면 방사율의 불균일성이 검사 결과에 영향을 미치게 된다. 적외선 열화상 기술의 결합 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[2-4]. 이러한 비파괴 검사의 궁극적인 목표는 검사대상체의 수명을 정확히 예측하는 것이며, 대상체에 존재하는 결함의 위치, 크기, 깊이 등의 정량적 데이터는 수명예측에 있어 중요한 정보이다. 적외선 열화상 기술을 이용한 결함의 정량 평가는 상대적으로 어렵게 여겨지는 결함 깊이가 평가분야에서는 많은 진보가 있었으나, 결함의 크기와 위치 평가에 있어서는 검사결과를 2차원 화상으로 제공한다는 장점에도 불구하고 정량평가 연구가 부족하다. 크기평가에 있어서 Almond and Saintey[5,6]는 결함부에서 최대 온도의 1/2지점에서 폭(full width at half-maximum: FWHM)을 결함의 크기로 제안하였으나, 비대칭 결함, 결함부에서 진폭이 큰 경우 등에 있어서 정확한 크기를 제공하지 못한다는 단점이 있다. 또한, 영상처리에서 사용하는 미분에 의한 경계선추출 기법은 CCD 카메라에 비하여 S/N비와 공간분해능이 낮은 적외선 열화상 데이터에 적용하는 데에는 필터링 등의 데이터 처리가 필요하며 이는 데이터 손실 등의 문제가 있다. 본 논문에서는 위상잠금 광-적외선 열화상을 이용하여 내부결함의 크기와 위치평가를 위해 전단위상기법을 제안하였다. 이 기법에서는 측정된 위상 분포(phase profile)를 전단(lateral shearing)시켜 이들의 전단위상분포(shearing phase profile)를 구하고, 전단위상 분포로부터 결함의 크기와 위치를 정량적으로 평가한다. 시험결과에서는 결함의 크기와 깊이가 다르게 제작된 인공결함 시험편에 적용하여 제안기법의 유효성을 검증하였으며, 검사 결과에 영향을 주는 인자를 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 위상잠금 광-적외선 열화상

위상잠금 적외선 열화상 기법은 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. 본 논문에서는 결합 검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수로 입사되는 열원(heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 식 (1)로 표현되는 고체 내의 1차원 열전도방정식에서 외부 자극원으로서 광(할로겐 램프)을 사용하여 대상체에 조화함수( $T = T_0 \cos \omega t$ )로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다[7].

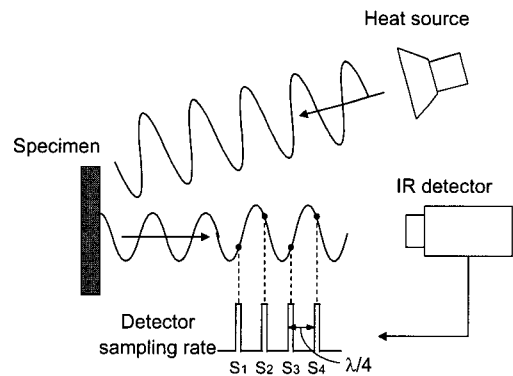


Fig. 1 Signal processing of lock-In infrared thermography

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기에서  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $k$ 는 열전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 비열,  $x$ 는 열유동 방향으로의 거리이다. 조화함수로 가열된 식 (1)의 해는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서 침투깊이(thermal diffusion length),  $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$ , 열확산계수(thermal diffusivity),  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 이다. 위상잠금 기법에서는 식 (2)에서 측정결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결합검출 오류를 최소화할 수 있다. 식 (2)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기시켜 자극원의  $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호  $I_1, I_2, I_3, I_4$ 를 식 (3)과 같이 획득하고, 식 (4)를 사용하여 추출할 수 있다[4,8].

$$\begin{aligned} I_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\ I_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\ I_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\ I_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (4)$$

### 2.2. 전단위상기법 (Shearing Phase Technique)

본 연구에서 제안하는 전단위상기법의 기본개념은 일정한 공간주파수를 갖는 위상이미지에서 전단위상을 검출하여 전단위상의 최대값과 최소값의 사이를 결합의 크기로 평가하고, 전단위상이 "zero"인 곳을 결합의 위치로 평가하는 것이다. 즉, 결합의 경계조건의 변화는 위상분포의 기울기변화로 나타나게 되며, 기울기변화점을 추출함으로써 결합의 크기와 위치를 정량적으로 평가할 수 있다. 기울기 변화점을 효과적으로 추출하기 위해 전단위상기법이 사용되며, 식 (5)와 같이 처리한다.

$$\phi_{sp}(i, j) = \phi(i + \delta s, j) - \phi(i, j) \quad (5)$$

여기에서  $\phi_{sp}(i, j)$ 는 픽셀( $i, j$ )에서 전단위상 (shearing phase),  $\phi(i, j)$ 는 식 (4)를 이용하여 구한 검출 위상(phase),  $\phi(i + \delta s, j)$ 는  $\delta s$ 만큼 떨어진 점에서 검출 위상,  $\delta s$ 는 전단량이다. 식 (5)은 원 위상 분포와 전단량  $\delta s$ 만큼 전단 이동(shearing)시킨 위상분포 간의 감산처리한 결과이며, 그 결과인 전단 위상 분포에는 전단위상의 최대점, 최소점, "zero" 위치 점들이 존재한다. 이 분포에서 결합의 크기는 전단위상의 최대점과 최소점 사이로 결정하였으며, 결합의 위치는 전단위상이 "zero"가 되는 위치로 결

정하였다. 이 기법은 미분에 의한 최대기울기를 구하는 기법과 유사하나, Fig. 2의 비교에서 알 수 있듯이 시험결과에 의해 구한 위상분포에 수치미분 (lagrange interpolation)을 적용하는 경우 노이즈에 대한 민감도가 높아 최대기울기점을 구하기가 어려우나 전단위상기법의 경우 노이즈 민감도가 낮아 최대기울기점을 보다 용이하게 추출할 수 있다. 또한, 전단량의 크기는 민감도를 조절할 수 있는 기능을 하게 되는데, 작은 값일수록 노이즈의 영향을 많이 받으며 큰 전단량은 노이즈에 둔감하나 결합의 크기와 위치평가에 있어서 큰 오차를 포함한다.

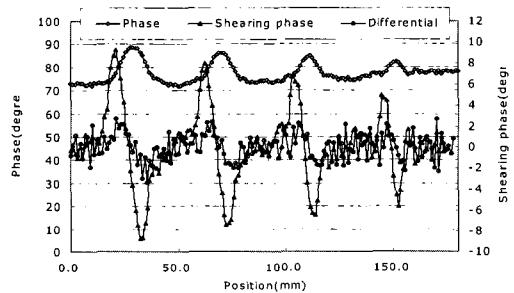


Fig. 2 Comparison between shearing phase technique and differentiation

### 3. 시험편 및 장치구성

시험편은 스테인레스강 (STS304)으로 열적 물성 값을 Table 1에 나타내었다. 결합은 후면에서 드릴로 가공하여 깊이와 크기가 각각 다르게 제작하였으며, 시험편의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 시험편의 표면은 흑색 방사페인트로 도색하여 표면 방사율을 0.95로 유지하였다. 위상잠금 적외선 열화상 시스템은 Fig. 4와 같이 구성되어 있으며, 프랑스 Cedit사의 Silver 480 상용제품을 사용하였다. 이 시스템에서는 함수발생기에 의해 할로젠 램프의 주파수를 조절하고 이와 동기화하여 적외선 검출소자로부터 위상이미지(phase map)를 사용자에게 제공한다. 본 연구에서는 위상이미지에 전단위상 기법을 적용하여 결합의 크기 및 위치를 평가한다.

Table 1 Thermophysical properties of STS304 (AISI304)

열전달계수(k)	밀도( $\rho$ )	비열(c)	열확산계수(a)
16,2 W/m-K	8000 kg/m <sup>3</sup>	500 J/kg-K	4,05×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

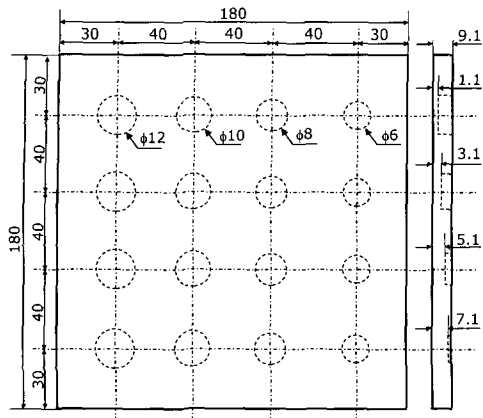


Fig. 3 Artificial specimen with back-drilled-bottom-plate defects (unit: mm)

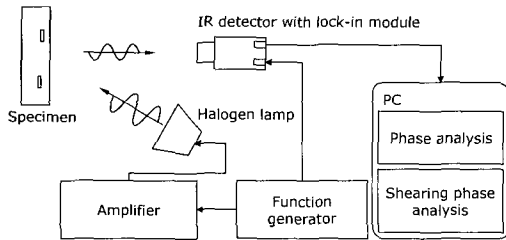


Fig. 4 Schematic of lock-in photo-infrared thermography

## 4. 시험 결과

### 4.1. 최적 검출주파수의 결정

결합의 깊이는 식 (2)에서 침투깊이  $\mu$ 로부터 예

측할 수 있다. 침투깊이  $\mu$ 는 입사되는 광원이 대상체 내부로 침투해 들어갈 수 있는 깊이로서 입사되는 열원(자극원)의 주파수와 관련 있다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 낮은 주파수에서는 재료내부 깊은 곳까지 침투가 가능하고, 높은 주파수에서는 수  $\mu\text{m}$ 의 깊이만을 침투하게 된다. 즉, 입사되는 열원의 주파수에 따라 검출 가능한 깊이가 제한되어 있으며, 역으로 특정깊이의 결함을 검출할 수 없는 검출한계 주파수(blind frequency),  $f_b$ 가 존재하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 시험에서는 주파수를 증가하면서 결함이 검출되지 않는 검출한계 주파수를 구하고 이 주파수로부터 침투깊이를 예측하여 결합의 깊이를 평가한다. 실제 시험에서는 재료의 불균일성, 외부 환경 등의 영향으로 상관계수  $C$ 를 고려하여 식 (6)과 같이 결합의 깊이를 예측한다[9].

$$d = C \cdot \mu_b = C \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad (6)$$

본 논문에서는 검출한계 주파수를 이용하여 구한 침투깊이,  $\mu_b$ 와 알고 있는 결합깊이,  $d$ 를 이용하여 상관계수,  $C$ 를 추정하였다. Fig. 5의 주파수 변화에 따른 위상이미지를 살펴보면, 표면으로부터 5.1 mm 깊이의 결합은 70 mHz 이상에서 검출되지 않으며, 3.1 mm 깊이의 결합은 200 mHz 이상에서 검출되지 않았다. 즉, 5.1 mm와 3.1 mm 깊이의 결합에 대해 검출한계 주파수가 각각 200 mHz와 70 mHz이며, 이로부터 상관계수를 1.2로 추정할 수 있다.

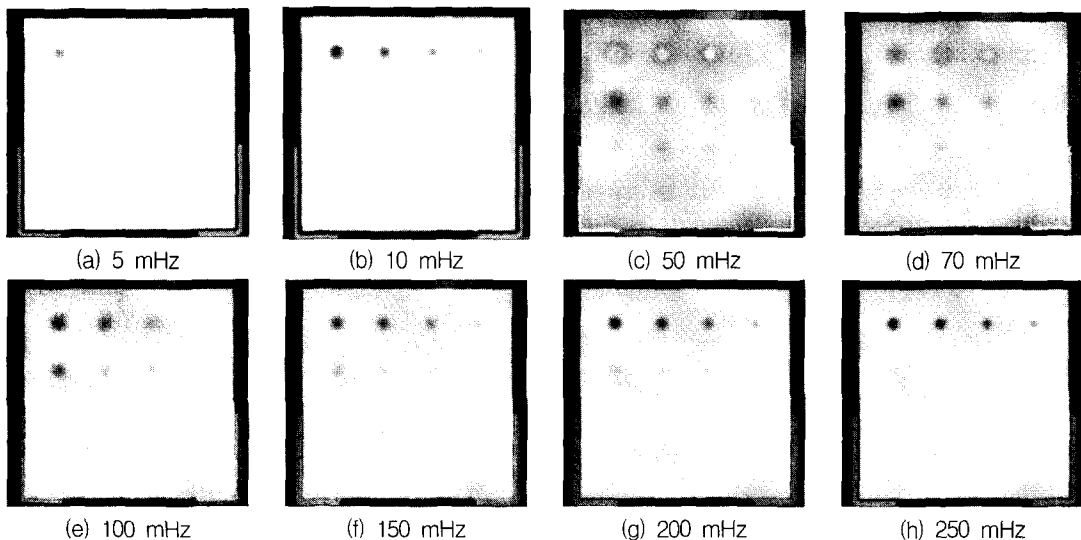


Fig. 5 Thermal phase images at each induced frequency

시험으로부터 구한 상관계수를 이용하여 열원의 주파수 변화에 따른 결함의 예측깊이는 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 이 그래프에서 주파수가 70 mHz 인 경우 검출 가능한 결함의 최대 깊이는 5.2 mm 로 예측할 수 있다. 역으로 70 mHz이하의 주파수에서 검출되었던 결함이 70 mHz 이상에서는 검출되지 않는다면, 이 결함은 표면으로부터 5.2 mm 아래에 결함이 존재하는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 식 (7)은 1차원으로 전파하는 열원의 모델로부터 추정된 방정식으로 실제의 열전달은 3축으로 일어나므로 검출 가능한 결함의 깊이는 무한대가 될 수 없으며 제한적이다. 본 연구에서 사용된 시험편(STS304)의 경우 표면으로부터 최대 6 mm의 결함까지 검출 가능한 것으로 사전 연구를 통하여 확인하였으며[10], 이 깊이를 고려하면 Fig. 6에서 가열 주파수 50 mHz 이하의 주파수에서는 위상의 크기에만 차이가 있을 뿐, 검출 가능한 결함 깊이는 더 이상 증가하지 않게 된다. 또한, 10 mHz 이하의 가열 주파수에서는 검사시간이 길어져 검사의 효율성이 떨어지게 된다. 시험으로부터 가열 주파수가 10 mHz일 때 결함부와 건전부의 위상차가 최대가 되는 것을 알 수 있었으며, 이 가열 주파수를 결함 크기 및 위치평가를 위한 최적 주파수로 결정하였다.

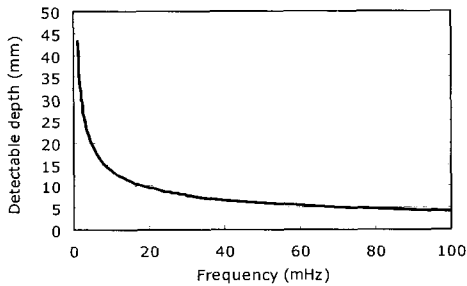


Fig. 6 Estimation of defect depth at induced frequency ( $C=1.2$ )

4.2. 결함 크기 평가 및 전단량의 영향

Fig. 7은 최적 검출주파수(10 mHz)에서 위상 이미지며, 결함 크기를 표면으로부터 깊이가 다른 L1과 L2에서 평가하였다. Fig. 8은 Fig. 7의 L1(깊이 1.1 mm)에서 위상 분포와 전단량( $\delta_s$ ) 5.3 mm를 적용하여 구한 전단위상분포를 보여주고 있다. 위상분포로부터 4개의 결함을 정성적으로 유추할 수 있으며, 전단위상분포로부터 결함의 크기와 위치를 결정할 수 있다. 전단위상분포에서 각 결함은 최대, 최소 전단위상점과 zero 위상점을 가지게 되며, 결함의 크기는 최대점과 최소점 사이의 거리로 결정한다. 전단위상기법을 적용하는데 있어서 전단량

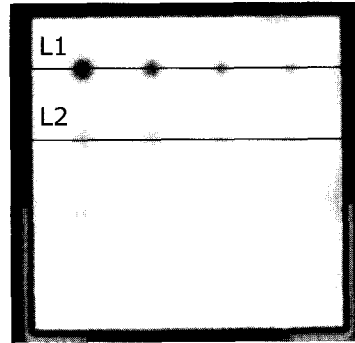


Fig. 7 Thermal phase image of 10 mHz

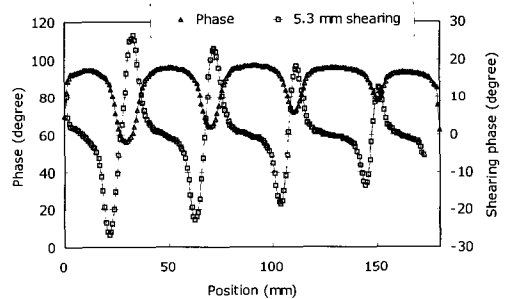


Fig. 8 Distribution of phase and shearing phase on L1 of Fig. 7

Table 2 Detected sizes according to each shearing amounts (unit: mm)

Actual size(mm) \ $\delta_s$ (mm)	1.5	3.8	5.3	6.1	8.4	10.7	11.4	12.2
$\phi$ 12.0	10.7	11.4	11.4	10.7	11.4	13.0	13.0	13.7
$\phi$ 10.0	9.2	9.2	9.2	8.4	10.7	11.4	12.2	13.0
$\phi$ 8.0	6.9	7.6	7.6	7.6	8.4	10.7	11.4	13.0
$\phi$ 6.0	4.6	5.3	6.1	6.9	8.4	10.7	11.4	12.2

은 결함 크기에측에 영향을 주게 되며, 전단량에 따른 측정된 결함의 크기를 Table 2에 나타내었다. 또한, 전단량 변화에 따른 측정결과의 상대 오차율을 Fig. 9에 나타내었다. 전단량이 1.5 ~ 5.3 mm인 구간에서는 상대 오차율이 감소하며, 전단량이 5.3 mm 이상부터는 상대 오차율이 증가하여 작은 결함일수록 큰 오차율을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 결함의 크기와 무관하게 5.3 mm 전단량에서 가장 작은 오차를 보이고 있으며, 이 전단량을 결함검출에 있어서 최적 전단량으로 결정하였다. 그러나 이 최적 전단량은 열화상 이미지의 공간분해능과 관련 있으므로 특정 상수 값이 될 수 없으며, 시험 경험치로 부터 5~6 mm 사이의 전단량이 최적으로 평가되었다. 결함의 깊이에 따른 적용가능성을 평가하기 위해, Fig. 10은 Fig. 7의 L2 (깊이 3.1 mm)에서 위상분포와 5.3 mm 전단량을 적용한 전단위상분포를 나타내었으며, Table 3에는 결함의 깊이에 따른 측정결과를 나타내었다. 시험결과에서 크기 6 mm, 깊이 3.1 mm의 결함에서 27 %의 오차를 보이고 있는데, 이는 결함크기가 작고 깊은 결함에서 건전부와 결함부의 위상차가 작아 전단위상기법 적용이 어려웠기 때문이다. 또한, Fig. 7의 깊이 5.1 mm의 결함들은 시각적으로는 인지 가능

하나, 건전부와 결함부의 위상차가 작아 전단위상기법을 적용할 수가 없었다.

Table 3 Estimated defect size at each defect depth

Depth (mm)	Actual size(mm)			
	φ 12.0	φ 10.0	φ 8.0	φ 6.0
1.1 mm	φ 11.4	φ 9.2	φ 7.6	φ 6.1
3.1 mm	φ 12.2	φ 9.9	φ 8.4	φ 7.6

Table 4 Estimation of defect location

Actual position(mm)	30.0	70.0	110.0	150.0
Zero location (mm)	27.1	67.1	107.5	148.3
Defect location (mm)	29.8	69.8	110.2	151.0

### 4.3. 결함의 위치 평가

본 연구에서 제안한 전단위상기법에 의하면 결함의 위치는 Fig. 8의 전단위상분포에서 전단위상이 "zero"가되는 지점으로 예측한다. 그러나 Table 4의 실제위치와 비교에서 예측된 결함 위치(zero location)는 전단량의 영향으로 인하여 오차를 갖는다. 이 오차는 식 (7)에 의하여 보정할 수 있으며, 보정된 결함의 위치(defect location)를 Table 4에 나타내었다. 보정량은 전단량의 1/2이 되며, 보정된 결함의 위치는 높은 정확도로 실제 결함의 위치를 추정하고 있다.

$$DL = ZL + \frac{\delta s}{2} \tag{7}$$

여기에서 ZL은 전단위상의 zero 위치(zero location)이고 DL은 보정된 결함의 위치(defect location)이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 위상잠금 광-적외선 열화상기법에서 검출된 결함 크기를 평가하기 위해 전단위상기법을 제안하고 인공으로 가공된 결함에 대해 적용가능성을 검증하였다. 적용시험에서는 결함의 크기, 깊이에 따른 검사결과를 비교하여 최적 전단량을 제시하고 최적 전단량에서 높은 정확도로 결함의 크기를 평가할 수 있었다. 또한 전단위상기법을 적

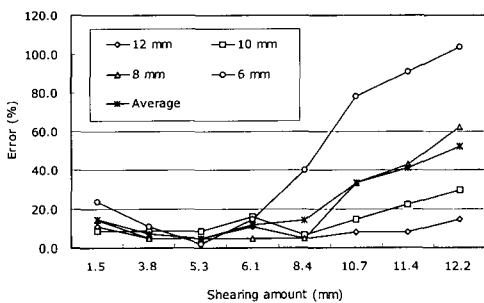


Fig. 9 Relative error ratio vs shearing amount

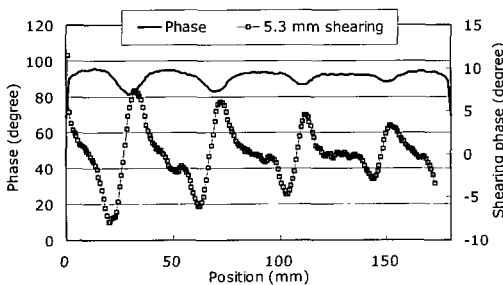


Fig. 10 Distribution of thermal phase and shearing phase on L2 of Fig. 7

용하여 예측한 결함의 위치는 오차를 포함하게 되는데, 이 오차를 보정하기 위한 방법을 제시하여 결함 위치 검출에서도 높은 정확도를 가지고 있음을 보였다. 그러나 본 연구에서 적용한 결함의 형상은 경계조건(knife-edge)이 명확한 원통형 결함으로 전단위상기법 적용이 용이하였으며, 향후 보다 복잡한 형상의 결함에 대해 적용 가능성을 평가할 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] G. Gaussorgurs, "Infrared thermography," Translated by S. Chomet, pp. 414-452, Chapman & Hall, London, (1994)
- [2] X. P. V. Maldague, "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Rastogi P.K., Inaudi D, editors, pp. 591-633, Elsevier Science, Switzerland, (2000)
- [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] D. Wu, and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," Rev. Gen. Therm., Vol. 37, pp. 693-703, (1998)
- [5] 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)
- [6] M. B. Saintey and D. P. Almond, "An artificial neural network interpreter for transient thermography image data", NDT&E International, Vol. 30, No. 5, pp. 291-295, (1997)
- [7] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed), X. P. V. Maldague, P.O. Moore Ed., pp. 54-86, ASNT, Columbus, USA, (2001)
- [8] G. Busse, "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed), X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., pp. 318-328, ASNT, Columbus, USA, (2001)
- [9] G. Busse and A. Rosencwaig, "Subsurface imaging with photoacoustics," Appl. Phys. Lett., Vol 36, No. 10, pp. 815-816, (1980)
- [10] K. S. Kang, M. Y. Choi, J. H. Park, W. T. Kim, K. S. Kim, and S. M. Yang, "Determining size and location of subsurface defects of steel plate by lock-in thermography," 12th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Test, pp. 49, (2006)