

# 위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 감육결함이 있는 직관시험편의 결함 검출

김경석<sup>†</sup>·장수옥\*·박종현\*·송재근\*\*·정현철\*\*\*

## Defect detection of wall thinning defect in pipes using Lock-in photo-infrared thermography technique

Kyoung-Suk Kim, Su-Ok Jang, Jong-Hyun Park, Tae-Ho Choi, Hyun-Chul Jung

**Key Words:** Infrared thermography(적외선 열화상), Lock-in(위상잠금), Defect detection(결함검출), Wall thinning defect(감육결함)

### Abstract

Piping in the Nuclear Power plants (NPP) are mostly consisted of carbon steel pipe. The wall thinning defect is mainly occurred by the affect of the flow accelerated corrosion (FAC) of fluid which flows in carbon steel pipes. This type of defect becomes the cause of damage or destruction of piping. Therefore, it is very important to measure defect which is existed not only on the welding part but also on the whole field of pipe. Over the years, Infrared thermography (IRT) has been used as a non destructive testing methods of the various kinds of materials. This technique has many merits and applied to the industrial field but has limitation to the materials. Therefore, this method was combined with lock-in technique. So IRT detection resolution has been progressively improved using lock-in technique. In this paper, the quantitative analysis results of the location and the size of wall thinning defect that is artificially processed inside the carbon steel pipe by using IRT are obtained.

### 1. 서 론

적외선 열화상 기술은 대상체의 표면 복사에너지를 검출하고 이를 온도로 환산하여 실시간으로 영상을 제공하는 기술이다. 이 기술은 물체의 표면 온도 변화를 비접촉, 비파괴, 실시간 측정이 가능하여 재료의 열적특성평가, 열화진단, 결함검사, 체열측정을 통한 의료진단등의 분야에 활용

되고 있다. 금속결함 검출에 적용되는 경우, 열확산계수가 큰 금속 재료일수록 검출소자의 샘플링 한계로 인하여 결함을 찾는 데 어려움이 있다. 이러한 문제는 위상잠금(Lock-in) 기법을 적용함으로써 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 표면 방사율의 영향을 적게 받게 된다.<sup>(1-2)</sup> 이러한 비파괴 검사의 궁극적인 목표는 검사대상체의 수명을 정확히 예측하는 것이며, 대상체에 존재하는 결함의 위치, 크기, 깊이 등의 정량적 데이터는 수명예측에 있어 중요한 정보이다. 현재 발전소등의 생산설비에 사용되는 배관

† 책임저자, 회원, 조선대학교 기계설계공학과  
E-mail : gsckim@chosun.ac.kr  
TEL : (062)230-7004 FAX : (062)230-7838

\* 조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과

\*\* 조선대학교 레이저응용 신기술개발 연구센터

\*\*\* 조선대학교 기계설계공학과

은 생산설비의 성능이나 안전성 유지에 있어서 매우 중요한 설비의 일부이다. 배관은 사용기간의 증가에 따라 피로, 부식 등 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있는데, 그 중 하나가 배관 내부를 흐르는 유체에 의한 침식과 부식에 의해 발생하는 감속결함(wall thinning defect)이다. 이러한 감속결함으로 인한 국부적인 응력 집중으로 배관이 파손되는 사례가 국내외에서 발생하였다.<sup>(3)</sup> 따라서 본 논문에서는 위상잠금 적외선 열화상(lock-in infrared thermography: lock-in IRT)을 이용한 비파괴적인 방법을 이용하여 탄소강 배관 내부에 존재하는 감속결함부의 결함을 검출하고자 한다.

## 2. 이론

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 결함검출을 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 열전도 방정식에서 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.<sup>(4)</sup>

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

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.

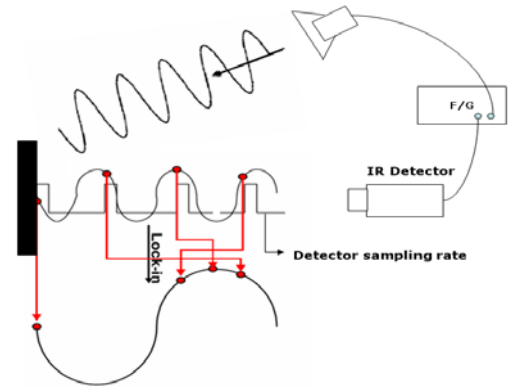


Fig. 1 Signal processing of lock-in infrared thermography

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

여기서 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 추출함으로서 검출 민감도를 향상시킬수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 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.<sup>(5,6)</sup>

$$I_1 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (3)$$

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

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

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

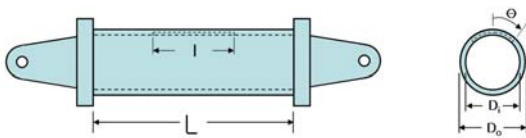
$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (4)$$

## 3. 실험

### 3.1 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 시험편의 형상 및 치수를

Fig. 2에 나타내었다. 시험편의 재질은 ASTM A106 GrB로써 항복강도는 240MPa, 인장강도는 415MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. Table 1은 각 조건별 시험편의 종류를 나타낸 것이다. 다음 Fig. 3은 위상잠금 적외선 열화상 시스템의 구성을 나타내고 있으며, 프랑스 Cedip사의 Silver 480 사용제품을 사용하였다. 이 시스템에서는 함수발생기에 의해 할로겐 램프의 주파수를 조절하고 이와 동기화하여 적외선 검출소자로부터 위상이미지(Phase map)를 사용자에게 제공한다.



\*직관의 길이(L)=342.00mm  
\*외경(Do)=113.40mm \*내경(Di)=99.00mm

Fig. 2 Shape and dimension of pipe specimen

Table 1 Type of specimen

1. Specimen with no defect

ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-0A	0.00	0°	7.2

2. Defect thickness related type

ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-2G	113.40	90°	3.6
SSP-2H	113.40	90°	1.8

3. Defect length related type

ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-4H	226.80	90°	1.8

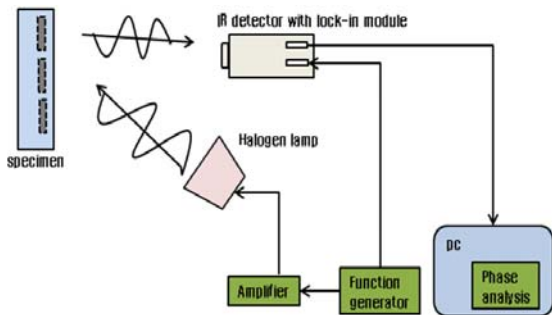


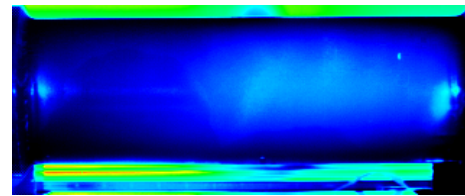
Fig. 3 Schematic of lock-in photo-infrared thermography

시험편의 표면에 방사페인트를 도포하여 방사율을 0.95로 유지하였고, 위상잠금기법을 이용하여 열원과 검출소자를 동기화 시켜 주파수(50 mHz)를 주어 위상이미지(Phase map)를 신호처리를 통하여 결함검출을 행하였다.

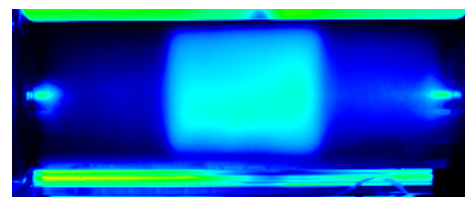
본 연구에서는 결함의 유무에 따른 측정결과를 비교하기 위하여 먼저 결함을 가공하지 않는 직관의 실험을 수행하였고, 이 결과를 기준으로 하여 두께와 길이별 실험을 실시하였다.

3.2 실험결과

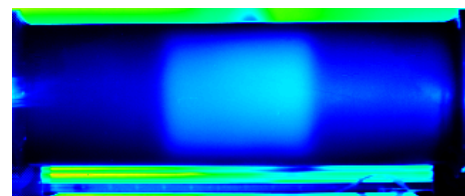
감옥결함이 있는 직관시험편의 결함을 측정하기 위하여 주변의 온도(20±0.5℃)를 일정하게 유지하고, 방사된 에너지를 적외선열화상(IRT)을 이용하여 온도를 검출하였다. 결함의 최소두께별 열에너지의 발생빈도가 다르고 결함의 길이에 따라 측정되는 길이가 다를 것이라는 가정 하에 실험을 진행하였다. 각 조건에 따른 적외선열화상 이미지를 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었으며, 실험결과 는 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.



(a) non-defect



(b) SSP-2H



(c) SSP-2G

Fig. 4 Infrared thermography images according to the defect thickness

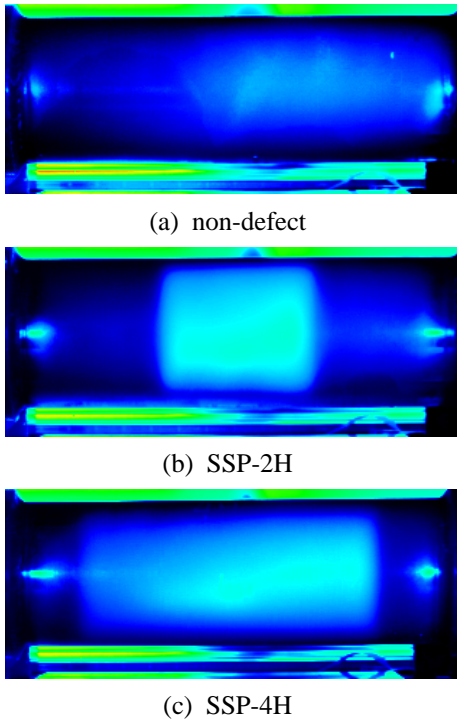


Fig. 5 Infrared thermography images according to the defect length

Fig. 6은 적외선 열화상을 통해 얻은 결함의 최소두께에 따른 온도변화를 나타내었다. 결함의 최소두께에 따라 온도가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 결함의 길이에 따른 온도분포를 나타낸 것이며 측정된 결함의 길이와 인공결함의 길이와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

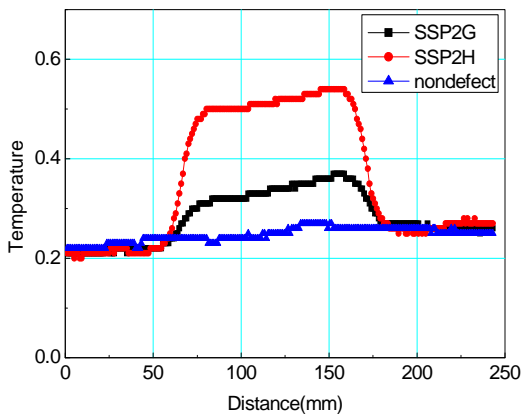


Fig. 6 Data comparison by defect thickness

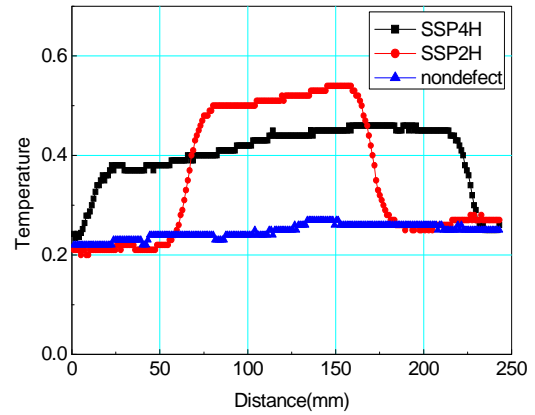


Fig. 7 Data comparison by defect length

#### 4. 결 론

본 논문에서는 위상잠금 광-적외선 열화상기법을 이용하여 여러 가지 조건으로 가공된 내부 감속결함을 갖는 시험편의 결함 크기, 위치를 측정하였으며, 시험편의 최소두께에 따른 온도변화를 측정하였다. 실험결과 무결함 시험편을 기준으로 최소두께별로 비교하였을 때 온도변화가 약 2배씩 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 결함길이별 시험편의 측정결과 SSP-2H는 약 120mm, SSP-4H는 약 230mm로 인공 결함길이와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 두 조건 모두 시험편의 방사페인트 도포의 불균일성에 따른 시험상의 오차등과 같은 오차가 발생했지만 대체적으로 정확한 결함길이(측방향 결함크기), 위치를 측정할 수 있었다. 본 연구를 통해 위상잠금 광-적외선 열화상기법을 이용하여 인공으로 가공된 결함에 대한 적용가능성을 검증하였다. 향후 높은 정확도를 가질 수 있도록 오차를 보정하기 위한 방법에 대하여 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 원자력연구개발사업으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) G. Gaussorgurs, 1994, "Infrared thermography", Translated by S. Chomet, pp. 414~452, Champman & Hall, London
- (2). Kang, K. S., Choi, M. Y., Park, J. H., Kim, K. S., and Yang, S. M., 2006, "Determining size and location of subsurface defects of steel plate by lock-in thermography", 12th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Test, 48
- (3) Lee, K. J., Chang, H. S., Jung, H. C., Kim, K. S., 2006, "Quantitative out-of-plane deformation measurement of pressure vessel with the defect using shearography," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, No. 10, pp. 36-43.
- (4) V. P. Vavilov., 2001, "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.
- (5) D. Wu, and G. Busse, 1998, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703.
- (6) G. Busse, 2001, "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed), X. P. V. Maldague, P.O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 318-328.