

## 적외선열화상을 이용한 원자력발전소 감육 배관의 결함 검출

### Defect Detection of the Wall Thinning Pipe of the Nuclear Power Plant Using Infrared Thermography

김경석\*, 장호섭\*\*, 홍동표\*\*\*, 박찬주\*\*\*\*, 나성원\*\*\*\*, 김경수\*\*\*\*, 정현철\*†

Kyeongsuk Kim\*, Hosub Chang\*\*, Dongpyo Hong\*\*\*, Chanjoo Park\*\*\*\*, Sungwon Na\*\*\*\*,  
 Kyungsu Kim\*\*\*\* and Hyunchul Jung\*†

초 록 절대온도(0K) 이상의 온도를 가지고 물체는 표면온도에 대응하는 적외선 파장대역에서 적외선 에너지를 방출하게 된다. 적외선열화상은 적외선 파장대역에 반응하는 검출기를 이용하여 검출된 적외선 량을 온도로 변환하고 사용자에게 적외선영상을 실시간으로 제공하는 비파괴검사 방법이다. 원자력발전소의 배관은 부식, 피로 등으로 인해 두께가 얇아져 큰 사고로 이어질 수 있는 결함이 발생하므로 이를 위한 효율적인 비파괴검사 시스템이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 적외선열화상 카메라로 측정된 온도와 배관의 결함 깊이 및 크기와의 상관관계를 알아보고 이를 원자력발전소 배관에 적용하여 결함을 검출하는 연구를 수행하였다.

주요용어: 적외선열화상, 열확산 길이, 결함 검출, 감육 배관

**Abstract** The infrared energy is emitted in the infrared wavelength range that corresponds to the surface temperature of a object which has temperature that is over the absolute temperature(0K). The infrared thermography (IRT) is a non-destructive testing method that provides thermal video for the user in real-time by converting the infrared quantity that is detected by the infrared detector into temperature. The pipes of nuclear power plant(NPP) could be thinned by the corrosion and fatigue and the defect could lead to a big accident. For this reason, the effective non-destructive testing method is necessary. In this study, the relationship between the measured temperature and the defect depth or size of NPP pipes were recognized and that was applied to detect the wall thinning defects of NPP pipes.

**Keywords:** Infrared Thermography, Thermal Diffusion Length, Defect Detection, Wall Thinning Pipe

#### 1. 서론

요즘 발전소의 발전설비 가동 횟수가 증가하여 노후화됨에 따라 정비기간 중 비교적 안전하면서 빠르고 쉽게 할 수 있는 비파괴검사의 요구가 증대되고 있다. 특히, 원자력발전소 배관의 경우 오랫동안

안 사용함으로 인한 피로, 부식 등으로 인해 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있는데, 그 중 유동가속부식(flow accelerated corrosion)에 의해 발생하는 배관의 두께 감소 현상 즉, 감육결함(wall thinning defect) 현상이 배관의 건전성을 저하시키는 주요 원인 중 하나로 알려져 있다[1,2].

따라서 노후화된 원자력발전소 배관의 안전성 확보 측면에서 배관계통에서 발생하는 감육결함을 미리 예방하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 기술의 중요성이 점차 증가하고 있다. 이러한 감육결함을 빠르고 간편하게 찾아낼 수 있는 방법 중 하나는 적외선열화상기술을 이용한 비파괴검사이다. 이 기술은 적외선열화상 카메라를 이용하여 사용자가 실시간으로 물체의 온도 및 결함을 쉽게 확인할 수 있도록 해준다. 1960년대에는 단순 온도 측정으로만 활용되던 적외선열화상 기술은 열화진단, 비파괴검사, 공정감시, 화재감시, 공항검역, 두께측정, 응력해석, 의료진단, 결합검사 등으로 점차 확대되고 있다[3,4].

본 연구에서는 원자력발전소 배관과 같은 재질의 평판시험편에 두께별, 크기별로 결함을 제작하였다. 적외선열화상기술을 이용하여 시험편의 결함 검출 여부 및 측정 온도와 결함의 두께 또는 크기와의 상관관계를 알아보았고 이를 같은 재질로 제작한 원통형 직관에 적용함으로써 원자력 배관 정기검사시 기초자료로 사용할 수 있도록 할 것이다.

## 2. 이론

### 2.1. 키르히호프의 열복사에 관한 법칙

물체에 복사에너지가 입사되면 빛의 성질에 의해 물체의 종류 및 표면상태 등에 따라 반사, 흡수, 투과되는 3가지 성분의 형태로 나타난다. 이러한 성분들은 키르히호프 복사법칙에 의해 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$1 = \varepsilon + \tau + \beta (\varepsilon \leq 1) \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 흡수율(absorptivity),  $\tau$ 는 투과율(transmissivity),  $\beta$ 는 반사율(reflectivity)이다. 식(1)에서 흡수율 즉, 방사율(emissivity)이 높고 투과율 및 반사율이 낮아야 적외선 카메라로 측정 시 정확한 값을 얻을 수 있다. 방사율이 낮은 금속물질의 경우 흑체에 가까운 무광택 스프레이를 도포하여 방사율을 0.95로 유지시킬 수 있다.

### 2.2. 열확산 길이

금속재료 물질들의 특성 중의 하나인 열확산 길

이는 결합 검출 시 매우 중요한 요소로 작용한다. 열확산 길이는 물체의 표면에 입사되는 광원이 물체 내부로 침투해 들어갈 수 있는 깊이로 볼 수 있으며 식(2)와 같이 밀도와 열확산계수의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{\pi f}} \times \alpha \quad (2)$$

여기서,  $\mu$ 는 열확산 길이(thermal diffusion length),  $f$ 는 검출 한계 주파수(frequency of detect limitation)이며  $\alpha$ 는 열확산계수(thermal diffusivity)

로써  $\frac{k}{c\rho}$ 와 같으며  $k$ 는 열전도율(thermal conductivity),  $c$ 는 비열(specific heat),  $\rho$ 는 밀도(density)를 나타낸다. 본 연구에서는 식(2)를 활용하여 평판의 모든 결함을 찾을 수 있는 최적 주파수를 알아내어 실험에 적용하였다[6,7].

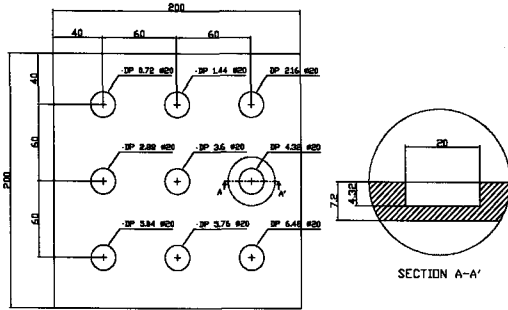
### 2.3. 결함의 크기

금속재료의 결함 검출 시 재료의 깊이 방향의 결함과 더불어 결함 크기에 의한 영향이 있다. 열전달은 금속의 결함 깊이 방향뿐만 아니라 3차원적 형태의 공간상으로도 진행이 되기 때문이다. 결함 검출 시 결함 크기를 고려해야 한다[8].

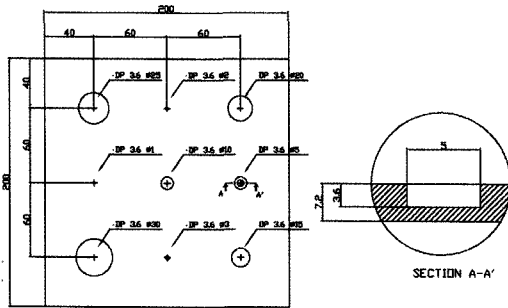
## 3. 시험편 및 실험 방법

### 3.1. 시험편

본 연구를 수행하기 위하여 실제 원자력발전소 배관과 같은 두께로 ASTM A106 Gr.B(SM20C) 재질의 평판시험편을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 결함의 두께와 온도와의 상관관계를 알아보기 위해 평판시험편의 후면에 결함 깊이를 시험편 전체 두께의 10%에서 90%까지 9단계로 나누어 제작하였다. 또한 결함 크기와 온도와의 관계를 알아보기 위해 결함 크기를  $\emptyset 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30$ 과 같이 제작하였다. 또한, Fig. 2와 같이 인공결함이 있는 원형직관을 제작하여 평판을 통하여 얻은 온도와 결함 깊이의 상관관계로부터 얻은 값과 실제 측정된 값을 비교를 통해 알아보았다. 원형직관의 종류에 따른 치수는 Table 2에 나타내었다.



(a) Specimen I

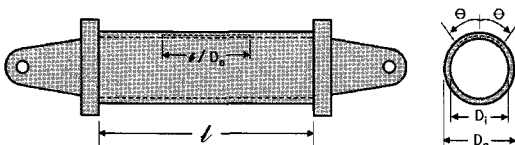


(b) Specimen II

Fig. 1 Schematic of artificial specimens with defects (unit: mm)

Table 1 Thermophysical property

Thermal conductivity (k)	51.9 (W/m.k)
Density ( $\rho$ )	7870 (kg/m <sup>3</sup> )
Specific heat (c)	486 (J/kg.k)
Thermal diffusion coefficient ( $\alpha$ )	$1.357 \times 10^{-5}$ (m <sup>2</sup> /s)



- \* Length of straight pipe( $l$ ) = 342 (mm)
- \* Outside diameter( $D_o$ ) = 113.4 (mm)
- \* Inside diameter( $D_i$ ) = 99.0 (mm)
- \* Defect length( $l/D_o$ ) = 1.00
- \* Defect width( $2\theta$ ) = 90 °

Fig. 2 Shape and dimension of straight pipe specimen

Table 2 Type of cylindrical pipe

	Defect length( $l/D_o$ )	Minimum thickness( $t_m$ )
Pipe A	113.4 mm	1.8 mm
Pipe B	113.4 mm	3.6 mm

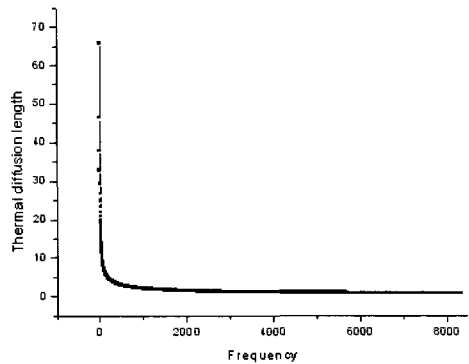


Fig. 3 Penetration depth by frequency

이론적으로 ASTM A106 Gr.B(SM20C) 시험편의 경우 식(2)에 의해 시험편의 결함 깊이에 맞는 검출 가능한 주파수를 추정할 수 있으며 이를 Fig. 3에 나타내었다.

3.2. 실험 방법

시험편에 방사페인트(KRYLON 1602 Ultra Flat Black)를 도포하여 평판시험편 및 원통형 직관의 방사율을 0.95로 유지시켰다. Fig. 4와 같이 실험 시스템은 IR camera, halogen lamp, function generator로 구성하였다. 실험은 밀폐된 공간에서 이루어졌으며, 실험장치 주변의 온도( $25 \pm 0.5$  °C) 및 습도는 에어컨을 이용하여 일정하게 유지하였다.

할로겐램프를 함수발생기로 제어하여 시험편을 자극하는 열원을 조화함수의 형태로 대상체에 입사시키도록 하였다. 이렇게 시험편을 온도가 더 이상 올라가지 않을 때까지 가열하여 결함깊이가 각각 다른 부분의 온도를 측정하여 결함 깊이와 측정 온도와의 상관관계를 알아보았다. 이때 함수발생기의 주파수는 식(2)로부터 모든 결함이 검출 가능한 100 mHz, 세기는 15 VPP로 하였다. 이를 통해 얻은 상관관계로부터 원형직관의 결함을 추정하여 실제로 측정된 값과의 비교를 통해 검증하였다.

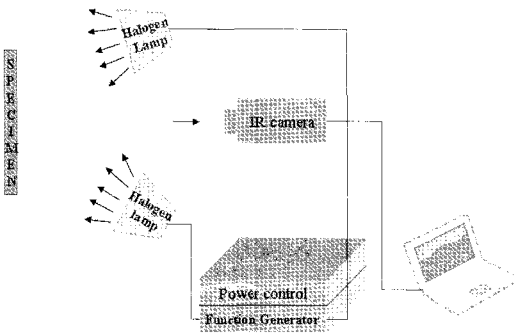


Fig. 4 Experimental setup for detecting defects

4. 결과

할로겐램프로 시험편을 일정시간 가열하면 Fig. 5와 같이 온도가 올라가다가 일정시간이 지나면 온도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이때, 적외선열화상 카메라를 이용하여 측정한 평판 시험편 1과 2의 열화상 이미지를 Fig. 6에 나타내었다. 평판시험편 1에서는 2.88 ~ 6.48 mm 결함 깊이를 가지고 있는 부분만 검출이 되었으며 평판시

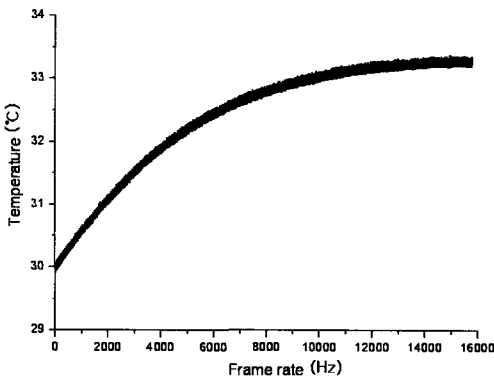
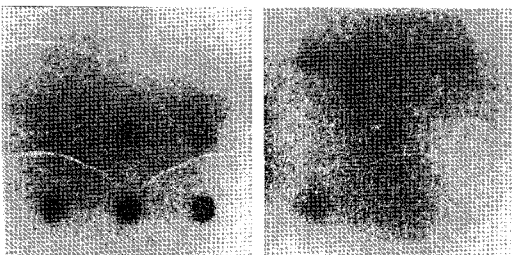


Fig. 5 Temperature change by frame rate



(a) Specimen 1 (b) Specimen 2

Fig. 6 Infrared thermography images of specimens according to the defects thickness and width

험편 2에서는 결함 크기가 Ø15, 20, 25, 30인 결함들만 검출됨을 확인할 수 있었다. 결함이 검출되지 않은 부분은 검출기의 샘플링 한계, 외부환경 등의 요인 때문으로 추정된다. 따라서 시험편 1과 2에서 결함이 검출된 부분의 온도와 결함 깊이 및 결함 크기와의 상관관계를 살펴보았다.

평판시험편 1에서 결함 검출이 가능한 5개의 결함의 중심에 점을 찍어 온도를 확인하였더니 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있었고 이를 바탕으로 실험식(3)을 도출하였다.

$$y = -0.35 \cdot \ln(x) + (T_b + 2) \tag{3}$$

$y$ : Temperature (°C),  $x$ : Defect depth (mm)

$T_b$ : Base temperature of the specimen (°C)

결함 크기별로 제작한 평판시험편 2에서는 Fig. 5(b)에서 확인할 수 있듯이 Ø 15, Ø 20, Ø 25, Ø 30의 결함만 검출되었고 Ø 15 미만의 결함은 검출되지 않았다. 전체 시험편의 50%의 결함 두께에 결함을 크기별로 제작하였으나 검출기의 샘플링 한계 및 외부환경 때문에 검출된 부분에서 뚜렷한 온도 차이는 보이지 않았다.

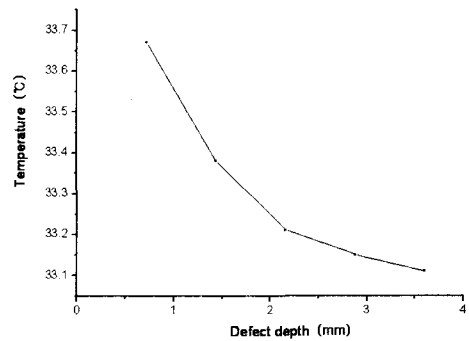
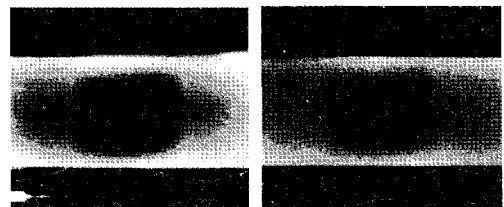


Fig. 7 Peak value of temperature at each point



(a) Straight pipe A (1.8mm) (b) Straight pipe B (3.6mm)

Fig. 8 Infrared thermography images of straight pipes

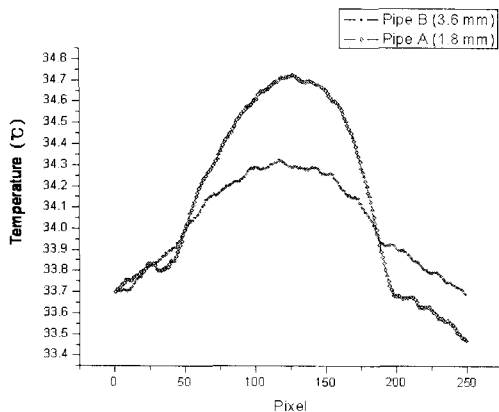


Fig. 9 Temperature distribution of the profiles of two pipes

감육결함이 있는 직관시험편도 평판시험편과 같은 방법으로 가열하여 적외선열화상 카메라를 이용하여 결함 부위를 측정하였다. 이 때 측정된 열화상 이미지를 Fig. 8에 나타내었고 측정된 결함의 중심부에 프로파일을 그어 온도 분포를 살펴보았더니 Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

평판시험편 1에서 얻은 실험식(1)에 의해 추정된 1.8 mm 와 3.6 mm 결함 두께의 온도는 각각 33.23 °C 와 33.11 °C로 추정되었다. 이는 Fig. 9와 같이 감육결함이 있는 실제 원형직관을 IR camera로 측정한 온도인 34.72 °C 와 34.32 °C와 약 5%의 오차가 발생하였다. 이는 시험편의 형상 및 결함의 크기 등의 요인으로 파악된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소의 중요한 발전설비 중의 하나인 배관에 감육현상으로 인한 결함이 발생함에 따라 생기는 결함의 깊이를 검출하기 위해 원자력발전소 배관과 재질이 같은 평판시험편 및 직관을 제작하여 열화상카메라로 측정하여 결함 검출 및 온도와 결함 깊이와의 상관관계식인 실험식(1)을 도출하였다. 이를 실제 감육결함이 있는 원자력발전소 배관에 적용하여 측정값과 비교한 결과 오차가 5%정도 발생하였고 이것은 시험편의 형상이 다르고 결함의 크기가 달랐기 때문인 것으로 추정된다.

또한, 시험편 두께의 10% ~ 90%의 결함 깊이를 가지고 있는 평판시험편 1을 통해 50% 이상의 결

함 깊이를 가지고 있는 시험편의 경우는 단시간 검사를 통해 쉽게 발견되는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 전체 두께 대비 50% 이상의 큰 결함을 가지고 있는 금속을 빠르게 선별할 필요가 있을 경우 이러한 결함 검출 방법이 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 결함 크기와 온도와의 관계를 규명함에 있어 열확산계수가 큰 재질의 경우 차후 추가적인 연구가 필요할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] Y. M. Jung, "Experimental evidence and analysis of a mode conversion of guided wave using magnetostrictive strip transducer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 2, pp. 93-97 (2009)
- [2] M. Y. Choi, "The utilization of nondestructive testing and defects diagnosis using infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531 (2004)
- [3] K. J. Lee, H. S. Jang, H. C. Jung and K. S. Kim, "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. 36-42 (2006)
- [4] X. P. V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, John Wiley & Sons, New York (2001)
- [5] X. P. V. Maldague, *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection*, P. K. Rastogi, D. Inaudi, Editors Elsevier Science, Switzerland (2000)
- [6] G. M. Carlomagno and P. G. Berardi, "Unsteady thermotography in nondestructive testing," C. Warren, *Proceedings of the 3*

- Infrared Information Exchange, pp. 33-40 (1976)
- [7] 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)
- [8] K. S. Kim, S. P. Yang, S. S. Kim, K. S. Kang, H. M. Kim and M. K. Kim, "Defect detection of Al specimen of using lock-in photo-infrared thermography technique," 17th World Conference on Nondestructive Testing, pp. 150 (2008)