

적외선 열화상 기술을 이용한 원자력 배관의 온도측정과 보정에 관한 연구

A Study on Measuring the Temperature and Revising the Result When Measuring the Temperature of NPP Pipes Using Infrared Thermography

김경석*, 정현철*, 박찬주***, 김동수****, 정덕운****, 장호섭**†

Kyeongsuk Kim*, Hyunchul Jung*, Chanjoo Pack***, Dongsoo Kim****,
 Dukwoon Jung**** and Hosub Chang**†

초 록 열화상 카메라와 대상물의 측정 위치에 따른 방사각도에 따라 방사율은 달라지게 된다. 이로 인해 열화상 시스템을 이용한 온도 측정시 나타나는 온도 분포는 절대적 온도로 볼 수 없다. 대상체의 실제 표면 온도가 일정하더라도 열화상 카메라로 측정된 온도는 방사율 값에 따라 오차를 가지게 된다. 본 논문에서는 동일 온도로 가열된 원통 형태를 가지는 대상체와 평면 형태를 가지는 대상체의 온도를 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. 측정된 표면 온도값을 통하여 화각에 의한 방사율 보정표와 방사각도의 영향에 의한 방사율 보정식을 구하였으며 이를 바탕으로 측정 온도의 오차보정을 수행하였다. 그리고 방사 각도와 화각에 따른 온도 영향을 원자력 배관의 결함 검출에 적용하여 더욱 신뢰성 있는 표면 온도값을 획득하였다.

주요용어: 적외선 열화상 기술, 열화상, 방사율 보정, 원자력발전소 배관

Abstract The emissivity is different because the emitted angle changes according to the position of the infrared thermography camera and object. Because of this, the temperature distribution expressed when measuring the temperature by using the infrared thermography system is not the accuracy temperature. Although the real surface temperature is constant, the temperature measured by using infrared thermography camera have error in accordance with the value of emissivity. In this paper, the temperatures of the round cylindrical object and the flat square object that heated to the equal temperature were measured by infrared thermography camera. The emissivity calibration formula and correction table are made with the affect of the view angle and emission angle form the surface temperature value. The error of measured temperature values are corrected by using the emissivity calibration formula and correction table, and apply to defect detection of the nuclear power plant pipe. From the calibration method, reliability surface temperature values were obtained.

Keywords: Infrared Thermography, Thermal Imaging, Emissivity Calibration, Nuclear Power Plant Pipe

1. 서 론

적외선 열화상기술(infrared thermography: IRT)

은 이 방출된 에너지양을 측정하여 검출 에너지양과 온도의 상관관계로부터 물체의 온도화상을 제공한다. 일반적으로 적외선 열화상기술에 의한 비파

과 검사는 적외선영상 또는 열영상으로 나타내고 이를 통해 보여지는 결합부와 건전부의 온도차 즉, 2차원 이미지로 제공되는 열화상에서 온도장의 왜곡을 관찰함으로써 결합의 유무를 판별한다[1]. 방사율(ϵ)값이란 물체가 외부 적외선 에너지를 흡수, 투과 및 반사하는 비율을 말하며 이론적으로 외부 에너지를 흡수만하고 반사하지 않는 물체를 "흑체(blackbody)"라 하며, 이때의 방사율(ϵ) 값은 "1"로 규정된다. 일반적인 물체들은 표면 상태(광택, 거칠기, 산화)에 따라서 흡수, 반사하는 에너지양이 변하게 된다. 하지만 표면 상태뿐 아니라 열화상 카메라와 대상물의 측정 위치에 따른 방사각도와 측정영역의 크기에 따라서도 방사율은 달라지게 되며 이로 인해 열화상 시스템을 이용한 온도 측정시 나타나는 온도 분포는 절대적 온도로 볼 수 없다. 방사율 값의 차이에 따라서 온도가 측정 되는 것이다. 즉 대상체의 실제 표면 온도가 일정하더라도 열화상 카메라로 측정된 온도는 방사각도와 측정영역의 크기로 인해 낮아진 방사율 만큼의 오차를 가지게 된다.

원자력발전소의 배관은 내부에 흐르는 유체에 의한 침식과 부식에 의해 배관벽 두께가 얇아지는 현상(배관감육)이 발생한다. 이러한 배관내 감육결함의 검출시 열화상기술의 적용은 기존의 비파괴 검사기법의 제약을 해소해 줄 수 있어 산업현장에서의 활용도가 높을 것으로 예상된다. 하지만 열화상 기술을 이용한 원자력발전소 배관의 결함검출기법의 적용은 배관표면의 정확한 온도의 계측이 선행되어야 한다. 따라서 열화상기술을 이용한 원자력발전소 배관의 결함검출기법의 정밀도를 높이기 위하여 배관의 형상에 따른 표면온도의 오차 보정을 통한 정확한 온도 계측이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 동일 온도로 가열된 원통 형태를 가지는 대상체와 평면 형태를 가지는 대상체의 온도를 열화상 카메라를 이용하여 측정하였으며, 열전대(thermocouple)를 이용한 표면 온도 측정값과의 비교를 통하여 방사 각도와 측정영역에 따른 측정 온도의 오차보정을 수행 하였다. 또 적외선 열화상 기술을 이용한 원자력발전소 배관(NPP)의 결함 검출에 온도 오차 보정을 적용하였다.

2. 이론

모든 물체는 절대영도(absolute zero, $^0\text{K} = -273.15\text{ }^\circ\text{C}$)

이상의 온도를 가지며 그 온도에 대응하는 복사에너지를 방출하게 된다.

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{\{hc/\lambda kT\}} - 1} \quad (1)$$

Planck's constant $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Boltzmann's constant $k = 1.380546 \times 10^{-23}$

Speed of light $c = 2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

위의 식 (1)은 Plank의 흑체복사이론으로 흑체복사의 성질(에너지의 크기, 파장)과 흑체의 온도사이에 간단한 관계가 성립하고, 흑체복사체에서 단위 시간에 방출되는 파장의 복사량은 온도에 의해서만 결정된다는 흑체복사의 성질로부터 흑체의 온도를 구할 수 있다[2]. 열화상기술은 방출된 에너지양을 측정하여 검출 에너지양과 온도의 상관관계를 이용하여 온도영상을 제공하게 된다.

$$\int_0^\lambda \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \quad R_t = \sigma T^4 \quad (2)$$

Steffan-Boltzmann's constant

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 - \text{K}^2)$$

식 (2)는 Stefan-Boltzmann's law로 흑체의 단위 표면적으로부터 단위시간에 방사되는 전체 방사 에너지는 절대온도 T의 4승에 비례한다는 이론이다. 여기서 T는 켈빈으로 주어지는 물체의 절대온도(K), R_t 는 흑체의 방사 강도이다. 위에서 서술한 식 (1) Planck's law와 식 (2) Stefan-Boltzmann's law를 이용하여 열화상 카메라를 통한 온도 측정이 가능하게 된다[3].

흑체로부터 방사된 에너지는 R_b 이고 이상적인 흑체 방사체는 실제 존재하지 않으며 실제 물체가 방사하는 에너지는 R_a 이면, 같은 온도의 물체와 흑체면과의 방사도의 비율 ϵ 은 식 (3)으로 나타난다. 여기서 $\epsilon=1$ 일 물체를 흑체라고 한다.

$$\epsilon = \frac{R_a}{R_b} : \text{emissivity} \quad (3)$$

R_b : Blackbody emissivity

R_a : Actual emissivity

3. 시험장치 및 방법

3.1. 시험편

본 연구에 사용한 시험편은 동일한 표면 온도를 가지는 3차원 물체의 위치에 따른 온도 추이를 측정하기 위하여 직경과 재질이 일정한 원통형 시험편과 비교를 위한 직육면체 시험편을 사용하였다. 시험편은 산업현장에 많이 사용되는 스테인리스 강(STS304)이며, 형상은 Fig. 1과 같으며 시험편의 물성은 Table 1에 나타내었다. 시험편은 물성과 표면 조도가 같으며 시험편의 폭을 동일하게 제작하여 측정 위치의 비교를 용이 하게 하였다. 원자력 배관 시험편은 ASTM A106 Gr.B 재질로 내부에 감속 결합을 갖는 직관을 제작하였다. Fig. 2와 Table 2는 원자력발전소 배관 시험편의 형상과 결합 크기를 나타낸다.

Table 1 Thermophysical properties of STS304

heat transfer coefficient(k)	density(ρ)	specific heat(c)	coefficient of thermal diffusion(α)
16.2 <i>W/m-K</i>	8000 <i>kg/m³</i>	500 <i>J/kg-K</i>	4.05×10^{-6} <i>m²/s</i>

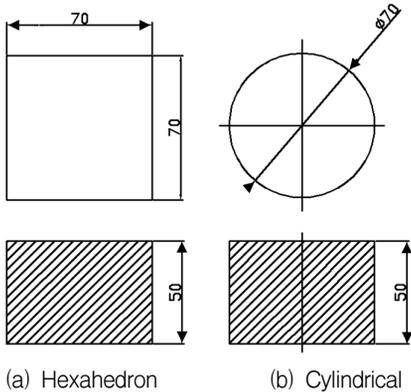
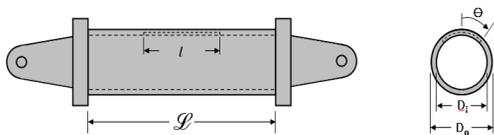


Fig. 1 Schematic of specimen



- Length of pipe (L) : 342.0 mm
- Outside diameter (D_o) : 113.4 mm
- Inside diameter (D_i) : 99.0 mm

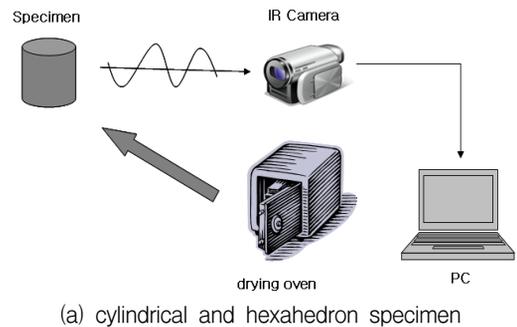
Fig. 2 Shape and dimension of pipe

Table 2 Type of inside defect

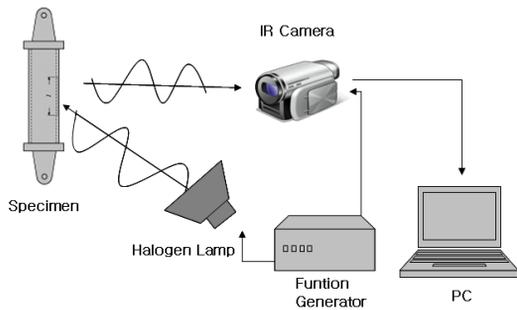
ID No.	Defect Length (mm)	Defect Width (2 θ)	Minimum Thickness t _p (mm)
SP-0A	113.40	0°	7.2
SP-2H	113.40	90°	1.8
SP-2L	113.40	135°	1.8
SP-2P	113.40	180°	1.8

3.2. 실험방법

진공 압력 챔버를 이용하여 시험편의 전영역이 동일한 온도(51 °C)가 되도록 가열한 후 서서히 냉각 하였으며 그에 대한 온도 추이를 적외선 열화상 장비(infrared thermography equipment)를 이용하여 측정하였다. 적외선 열화상 장치는 Silver 480(FLIR Co.) 상용 제품을 사용 하였으며, 분해능은 0.02 °C이다. 실험시 시험편과 카메라의 거리는 600 mm로 일정하게 유지하였으며 외부 환경에 의한 영향을 줄이기 위하여 진공 압력 챔버내에서 서서히 냉각시켰다. 물체를 일정온도까지 가열시키는 장치인 진공가열챔버 (제작: Samheung Instrument)는 250 °C 까지 가열 가능하며 일정 온도(51 °C)로 장시간 유지하여 대상물의 전체 표면 온도가 일정



(a) cylindrical and hexahedron specimen



(b) NPP pipe specimen

Fig. 3 Configuration of experiment using IRC

하게 제작하였다. 시험편의 표면은 방사율을 1에 가깝게 유지하기 위하여 흑색 방사페인트(방사율: 0.95)를 도포 하였다. 온도 측정은 시험편의 중앙부를 기준으로 동일 가로축 선상의 온도를 측정 하였다. Fig. 3 (a)에 원통형 시험편과 직육면체 시험편의 온도측정 방법을 계략적으로 나타내었다. 원자력발전소 배관 시험편의 결함 측정은 함수발생기를 통하여 대상체에 광원을 입사하고 대상체의 온도 변화를 열화상 카메라를 이용하여 측정하였고 이를 Fig. 3(b)에 나타내었다.

4. 시험결과 해석

4.1. 적외선 열화상 카메라를 이용한 온도측정

실험을 통하여 원통 형태 시험편과 육면체 형태 시험편의 열화상 이미지를 Fig. 4와 같이 얻을 수 있었으며, Fig. 5와 Fig. 6은 각각 Fig. 4를 통해 얻은 원통형 시험편과 육면체 시험편의 중심 가로축 선상의 온도 선도이다. 원통형 시험편과 직육면체 시험편 둘 다 중앙과 양측면부 사이에서 온도 차이가 낮음을 확인하였으며 특히 원통형 시험편의 측면 온도가 크게 차이를 확인하였다. 이 결과를 통해 IR 카메라를 통해 측정된 원통형 시험편과 직육면체 시험편의 표면온도가 실제와 다르게 측정됨을 확인할 수 있었으며 두 시험편의 위치에 따른 온도 변화 선도의 차이를 확인하였다. 오차 수정은 평면과 곡면을 각각 고려하여야 함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 원자력발전소 배관 시험편의 내부 감속 결함의 열화상 이미지를 나타내며 Fig. 8은 원자력 배관 시험편의 원주방향 중앙부의 온도 선도를 나타낸다. 원자력 배관의 감속 결함부위는 무결함 부위보다 입사된 광원에 의하여 더욱 빨리 온도 변화를 일으키며 열화상 카메라를 이용하여 측정하였을 때 결함부와 건전부의 온도 차이를 확인할 수 있다. 하지만 결함 부위가 커질수록 화각의 영향이 커지고 배관의 곡률에 의한 방사각이 커져 측정 온도의 오차 또한 커지게 된다. Fig. 7의 이미지를 보면 결함이 커짐에 따라 결함 모서리의 경계가 흐려진 것을 확인할 수 있다. 방사율에 따른 측정 온도의 오차로 인하여 열화상 기술을 이용한 결함부의 두께 측정시 오류를 범할 수 있다. Fig. 8의 온도는 오차 측정값임을 알 수 있다.

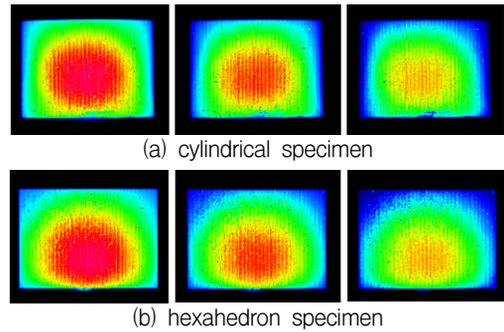


Fig. 4 Infrared thermography image of each specimen

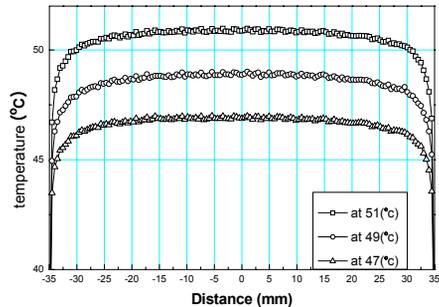


Fig. 5 Infrared thermography graph of cylindrical specimen

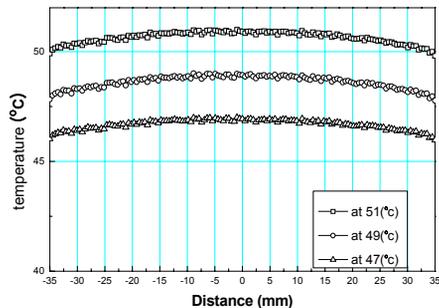


Fig. 6 Infrared thermography graph of hexadron specimen

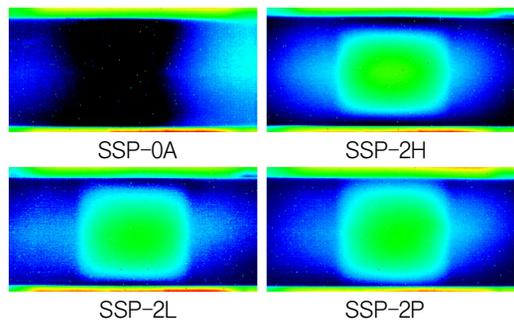


Fig. 7 Infrared thermography image of each pipe specimen

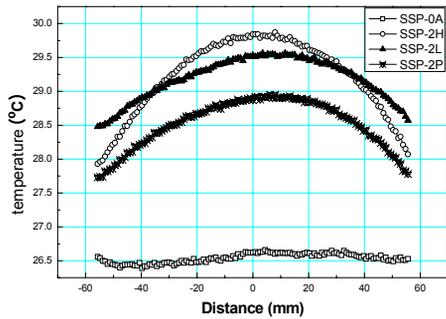


Fig. 8 Infrared thermography graph of pipe

4.2. 측정 온도 오차 보정

시험편의 전영역을 동일 온도로 가열하였으나 열화상 카메라를 이용하여 표면 온도를 측정하였을 때 위치에 따른 온도차를 확인하였다. 본 연구에서는 측정거리와(distance) 측정영역의 상관관계에 의한 방사율의 감소와 측정면의 방사 방향과 측정센서가 이루는 각도에 의한 방사율의 감소를 보정하여 참값에 가까운 온도를 구하였다. 식 (4)와 (5)는 열화상 카메라를 통하여 얻은 측정 온도(T_I)와 실제방사율(ϵ_a) 그리고 보정방사율(ϵ_c)의 관계에 의한 실제 온도(T_A)의 관계를 나타낸다. 즉 보정방사율(ϵ_c)값을 구함으로써 오차값이 수정된 실제 온도를 구할 수 있게 된다. 실험적 방법에 의하여 화각에 의한 보정방사율(ϵ_{ca})를 구하는 표를 Fig. 9에 나타내었다. 화각에 의한 보정 방사율은 원통형상의 시험편의 표면 온도를 반복 측정하여 측정 온도와 실제 온도의 관계를 센서와 측정점이 이루는 각도에 관하여 일정비를 찾아 화각 방사율 선도표로 나타 내었다. 방사각도에 따른 보정방사율(ϵ_{cp})은 곡률에 의한 표면 방사 각도의 영향이 중심(90°)을 기준으로 20°까지는 영향이 적었으나 20°이후에서 오차가 심해졌다. 따라서 20°이후의 방사각을 가지는 영역에 대하여 추가 보정율을 구하는 식을 반복 측정을 통하여 일정 식을 얻었으며 식 (6)에 나타 내었다. 온도 보정은 Fig. 9를 이용하여 얻은 화각 보정값을 적용하였으며 식 (6)을 이용하여 2차 방사각 보정을 수행하였다. Fig. 10~12은 직육면체, 원통, 원자력 배관의 측정 온도와 실제 온도를 비교한 선도이다.

$$T_A = T_I / (\epsilon_g \times \epsilon_a) \tag{4}$$

$$\epsilon_a = 1 + \epsilon_c \tag{5}$$

T_A : actual temperayure

T_I : infrared thermography

ϵ_a : actual emissivity

ϵ_g : GrayBody1 emissivity(0.95)

ϵ_c : correction emissivity

$$\epsilon_{cp} = \frac{1}{4} e^{-0.13x} \tag{6}$$

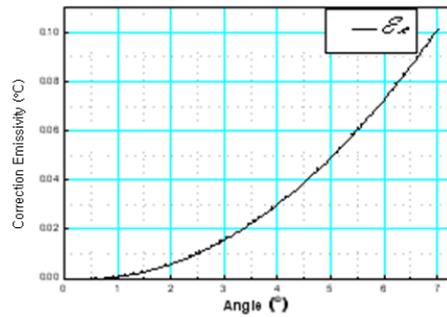


Fig. 9 Graph of correction emissivity

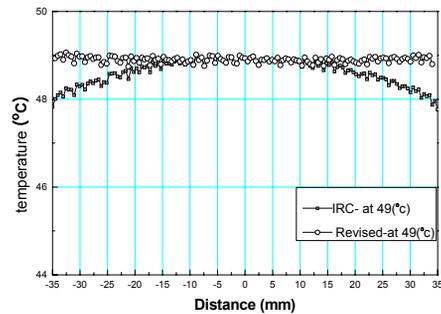


Fig. 10 Revised graph of hexadron specimen

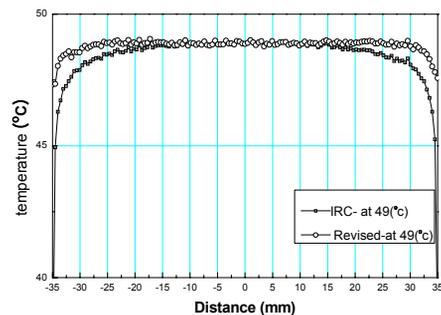


Fig. 11 Revised graph of cylindrical specimen

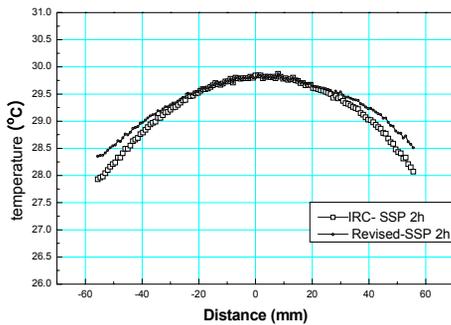


Fig. 12 Revised graph of SSP-2h specimen

5. 결론

본 논문에서는 열화상 카메라를 이용하여 원통시험편과 육면체 시험편의 표면 온도 측정 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 물체의 온도 측정시 검출소자와 측정점이 이루는 화각의 영향이 오차의 주된 영향임을 확인하였다.
- 2) 방사 각도의 영향은 중심(90°)을 기준으로 20°이후에서 영향만을 고려하고 20°이전의 영향은 무시해도 무방함을 확인하였다.
- 3) 검출소자와 측정점 사이의 화각과 방사각에 의한 측정온도의 영향을 분석하여 수정된 방사율을 측정온도에 고려하여 측정값 오차를 보정하는 기법을 제시하였다.
- 4) 원자력발전소 배관시험편의 내부 결함을 측정하였으며 본 연구에서 제시한 오차 보정 기법을 이용하여 측정된 온도의 보정을 수행하여 보다 신뢰성 있는 온도값을 획득하였다.

본 연구에서 제시한 방사율을 고려한 측정값 오

차 보정기법을 이용하여 열화상 카메라를 이용한 원자력발전소 배관결함 검출기법이 현장에서 유용하게 활용될 것으로 예상된다.

후기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력연구기반확충사업으로 지원받았습니다. (연구과제 관리코드 : 2009-0082786)

참고문헌

- [1] X. P. V. Maldague, "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Rastogi P. K., Inaudi D, Editors, Elsevier Science, Switzerland (2000)
- [2] M. Planck, "Ueber Eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung," Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2, pp. 163-180 (1900)
- [3] Walter Bich, "Newton's laws, Planck's principle, and metrology in chemistry," Accreditation and Quality Assurance, Vol. 11, No. 12, pp. 638-639 (1993)
- [4] 김원태, 최만용, 박해원, 한용기 "내부결함을 갖는 블록의 열화상 패턴 및 온도 프로파일 해석", 국비과과검사학회 춘계학술대회 논문집 pp. 164-169 (2004)
- [5] 김태환, 김순걸, 김원태 "열영상 적외선 방사율 보정 알고리즘에 따른 온도계측 연구", 한국비과과검사학회 춘계학술대회 논문집 pp. 86-89 (2009)