

## 반사법에 의한 재료표면의 적외선 방사율 측정에 관한 연구

### A Study on Infrared Emissivity Measurement of Material Surface by Reflection Method

강병철\*<sup>†</sup>, 김상명\*, 최정윤\*, 김군옥\*\*

Byung-Chul Kang\*<sup>†</sup>, Sang-Myoung Kim\*, Joung-Yoon Choi\* and Gun-Ok Kim\*\*

**초 록** 적외선 열화상 카메라를 이용하여 온도를 측정할 때는 측정 대상물질의 적외선 방사율이 중요하다. 적외선 방사율은 흑체와 물체의 적외선 방사 강도비로 구할 수 있으나, 상온에서는 배경의 영향으로 인해 측정하는 것은 용이하지 않다. 따라서 FT-IR를 이용하여 반사법에 의해 강판 및 강판에 코팅된 도료의 적외선 방사율을 측정하고 적외선 방사율을 구하였다. 연마된 강판은 0.06 ~ 0.10의 적외선 방사율을 나타내고 있으며, 비연마 강판은 표면조도에 의해 광학적 특성의 변화로 인한 적외선 방사율 측정에 오차가 발생하였다. 강판에 코팅된 투명도료는 적외선 흡수로 인해 방사율은 0.50 ~ 0.84 정도로 높아졌으며, 도료의 적외선 흡수 밴드에 의해 파장에 따라 방사율도 변한다. 이 실험을 통해 재료표면의 재질, 두께, 조도 등 표면 상태에 따라 적외선의 광학적 특성이 변하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반사법은 금속 및 금속에 코팅된 도료의 적외선 방사율 측정에 유용한 것으로 판단되며, 측정된 적외선 방사율을 적외선 열화상에 제공함으로써 측정온도의 오차를 줄일 수 있다.

**주요용어:** 적외선 열화상, 적외선 방사율, 반사법, FT-IR, 강판, 투명도료

**Abstract** Infrared emissivity is one of the most important factors for the temperature measurement by infrared thermography. Although the infrared emissivity of an object can be measured from the ratio of blackbody and the object, at room temperature it is practically difficult to measure the value due to the background effects. Hence, quantitative reflectance of bare steel plate and the surface of coating was measured by FT-IR spectroscopy and emissivity was calculated from this. The emissivity of polished bare steel surface was from 0.06 to 0.10 and the value for the unpolished bare steel can not be achieved because optical characteristics changes of surface roughness induces erroneous results. Emissivity of transparent paint coated steel was from 0.50 to 0.84. Depends on the IR absorption regions, which is a characteristic value of the coating, emissivity changes. This study suggests surface condition of material, thickness, roughness et cetra are important factor for IR optical characteristics. Emissivity measurement by reflection method is useful technique to be applied for metal and it with coating applied on the surface. The range of experimental errors of temperature can be narrowed by the application of infrared thermography from the measured thermal emissivity.

**Keywords:** Infrared Thermography, Infrared Emissivity, Reflection Method, FT-IR Steel Plate, Transparent Paint

#### 1. 서론

최근 적외선 열화상 카메라를 이용하여 비접촉식

에 의한 물질 표면의 온도측정이 폭 넓게 사용되어  
 지고 있으며, 온도측정에서 대상물질 표면의 적외선  
 방사율을 정확히 알아야 측정온도의 오차를 줄일

수 있다. 적외선 방사율은 물질의 열복사 특성을 표현하는 중요한 파라미터이며 적외선 열화상과 물체 사이에서 복사 열전달의 분석에 의해 온도측정에 중요한 역할을 한다. 즉 물질표면에서 적외선의 방사나 흡수 효율을 나타내는 것으로서 물체의 표면 상태, 형상, 파장이나 온도에 따라 다르며, 파장에 의해 적외선 방사율이 변하는 것은 적외선 열화상 카메라의 대역파장에 따라 적외선 방사율이 다르게 되는 것을 의미하므로 정확한 표면온도를 측정하기 위해서는 적외선 방사율의 보정이 필요하다.

적외선 방사율은 동일온도와 같은 방향조건 하에서 흑체의 적외선 강도와 물체의 적외선 강도비로서 정의되며, 동일온도로 가열된 흑체와 물체표면에서 방사되는 적외선 방사강도를 측정하여 비율로서 적외선 방사율을 측정하는 직접법이 있다. 그러나 여러 범위의 온도에서 적외선 방사광을 지배하는 물질의 표면온도를 제어하는 것은 많은 노력을 필요로 하며 또한 주변의 온도, 습도, 광입사 등의 영향을 고려해야 하고 상온 및 그 온도 이하의 물질에서 방사되는 적외선 방사광은 강도가 약해서 신호대 잡음비(S/N비)로 인해 직접법에 의해 적외선 방사율을 측정하는 것은 용이하지 않다[1].

따라서 본 연구에서는 실온 부근에서 물질표면의 적외선 방사율을 측정할 수 있는 방법으로서, 어느 온도에서 열평형에 있는 물질의 적외선 흡수율과 적외선 방사율은 동일하다는 키르히호프(Kirchhoff) 법칙[2]에 근거를 두고, 강판 및 투명도료가 코팅된 강판을 이용하여 물질표면에서 방사되는 적외선광의 적외선 방사율을 측정하고 적외선 방사율을 계산하는 반사법을 통해 적외선의 광학적 특성은 물질의 재질 및 표면상태에 의존하고 있는지를 확인하고자 하였다. 또한 반사법에 의한 금속 및 금속에 코팅된 도료의 적외선 방사율 측정에 대한 유용성 여부를 판단하고, 측정된 적외선 방사율을 적외선 열화상에 제공함으로써 측정온도의 오차를 줄이는데 기여할 것으로 판단된다.

## 2. 측정이론

적외선 방사율 측정은 동일조건에서 적외선 방사율을 알고 있는 기준시료 및 측정시료의 적외선 방사광을 측정하여 양자의 비를 가지고 방사율을 구할 수 있다. 복사에너지가 어느 물체에 입사되었을 때 에너지보존 법칙에 의해 식(1)과 같다.

$$\rho_{\lambda}(T) + \alpha_{\lambda}(T) + \tau_{\lambda}(T) = 1 \quad (1)$$

여기서  $\rho$  은 방사율,  $\alpha$ 은 흡수율,  $\tau$ 는 투과율이다. 불투명 물체표면에서는

열복사에 대해  $\tau=0$ 이므로

$$\rho_{\lambda}(T) + \alpha_{\lambda}(T) = 1 \quad (2)$$

이 된다. 즉 물체표면에서 반사된 나머지는 물체 내부로 모두 흡수된다. 키르히호프(Kirchhoff)[2]에 의하면 어떤 물체의 분광방사율( $\epsilon$ )과 분광흡수율의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon_{\lambda}(T) = \alpha_{\lambda}(T) \quad (3)$$

따라서 물질표면에서 적외선 방사율을 알면 식(2)와 식(3)에 의해 방사율을 구할 수 있다.

적외선 방사율 측정은 기준시료의 반사에너지 강도  $E_{r,\lambda}$ 을 측정하고, 측정시료의 반사에너지 강도  $E_{s,\lambda}$ 을 측정하여 식(4)에 의해 방사율을 계산한다.

$$\rho_s(\lambda, T) = \frac{E_s(\lambda, T)}{E_r(\lambda, T)} \quad (4)$$

반사 기준물질의 반사에너지는 식(5)의 플랑크의 복사법칙(Plank's law)에 의해 구해진다[3].

$$E_r(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1] \quad (5)$$

여기서  $C_1 = 3.742 \times 10^8 [W \cdot \mu m^4 / m^2]$ ,  $C_2 = 1.439 \times 10^4 [\mu m \cdot K]$ 이다.

## 3. 시료 및 실험방법

본 연구에 사용한 시료는 시판되는 냉간강판 SS400을 사용했으며 크기는  $100 \times 200$  mm 이며 코팅도료는 아크릴 우레탄계 투명도료를 사용했다. 강판시료는 표면 연마 및 전처리 후에 바코터를 이용하여 투명도료를 코팅하였으며, 바코터 번호에 따라 도막두께를 조절하여 도포하고  $60^\circ C$ 에서 30분간 건조하여 시험편을 제작하였다. 투명도료의 적외선 흡수스펙트럼은 FT-IR(Thermo Nicolet, AVATAR 360, USA)를 사용하여 확인하였으며 도막두께는 와류식 도막두께 측정기(FISCHER, Grundeinheit MMS 3AM, Germany)를 사용하여 측정하였다.

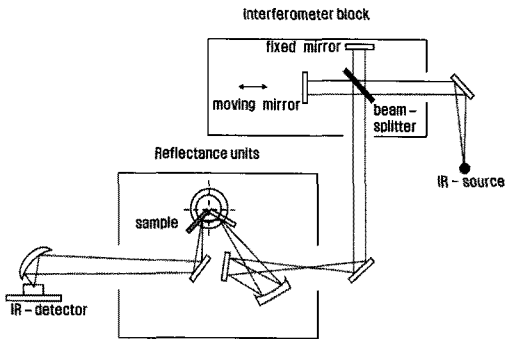


Fig. 1 Schematic diagram for the measuring system of the infrared emissivity by reflection method

적외선 반사측정은 Fig. 1에 나타난 장치를 이용하였으며, 장치는 FT-IR(Thermo Nicolet, AVATAR 360, USA)에 15°~65°까지 입사각을 조절할 수 있는 반사장치를 추가하여 구성하였다. 반사장치는 FT-IR의 sample compartment에 위치하여 SiC 광원의 적외광과 검지기 사이의 광로에 일직선으로 놓인다. 측정은 기준시료와 측정시료를 반사장치에 장착하고 SiC 광원의 적외광에 대한 반사광을 각각 측정하여 식(4)에 의해 반사율을 구하였다[4]. 이때 기준물질은 유리에 코팅된 금을 사용하였고 입사각도는 30°로 하여 3~15 μm 파장범위에서 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 강판의 적외선 방사율

강판에 대한 적외선 반사율의 측정결과를 Fig. 2에 나타내고 있다. 표면을 연마한 강판들은 7.5 ~ 13 μm 파장범위에서 0.90 ~ 0.94의 적외선 반사율을 나타내고 있지만 연마를 하지 않은 강판은 0.44의 적외선 반사율을 보이고 있다. 이같이 연마하지 않은 강판의 적외선 반사율이 낮은 이유는 강판표면에 조도가 있어 반사광 측정 시 표면에 입사된 적외선 광은 정반사가 일어나지 않고 표면에서 반사광의 분산에 의해 검지기로 수광되지 않아 상대적으로 낮은 적외선 반사율을 나타내고 있다. 그리고 표면을 연마한 강판들도 연마 정도에 따라 반사율이 약간씩 차이가 발생함을 알 수 있다.

적외선 반사에너지는 유리에 코팅된 금을 비교하였으며 식(5)을 이용하여 파장에 따른 반사에너지

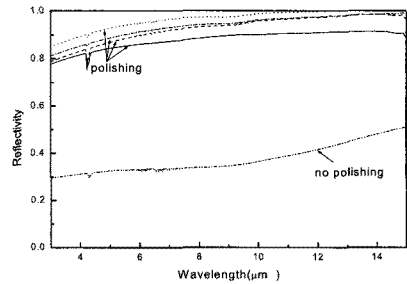


Fig. 2 I.R. reflectivity of steel surface by reflection method

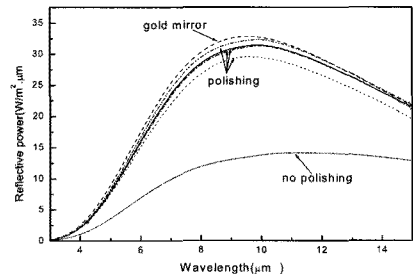


Fig. 3 I.R. reflective power of steel surface by reflection method

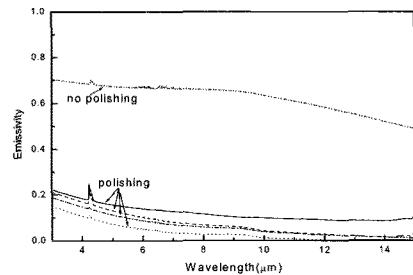


Fig. 4 I.R. emissivity of steel surface by reflection method

분포를 각 시료별로 Fig. 3에 나타내고 있다. 연마한 강판들은 152 ~ 167 W/m<sup>2</sup>의 적외선 반사에너지 값을 나타내지만 비연마 강판은 74 W/m<sup>2</sup>의 낮은 적외선 반사에너지 분포를 보이고 있다. Fig. 4는 측정된 반사율을 가지고 식 (2)에 의해 적외선 방사율로 변환한 스펙트럼을 보여주고 있다. 연마한 강판들의 적외선 방사율은 0.06 ~ 0.10 정도가 되는 것을 알 수 있다. 이 같이 강판의 적외선 방사율이 낮은 이유는, 일반적으로 금속은 표면에 적외선이 조사가 되면 흡수대가 없고 또한 불투명체로서 투과도 없기 때문에 적외선 파장 이상의 낮은

에너지 영역에서는 반사하는 것으로 알려져 있다 [5]. 그러나 금속의 표면상태 즉 표면 조도, 표면에 생성된 산화물 등에 따라 적외선 반사율도 변하며 반사법에 의해 적외선 방사율을 측정하는 경우에는 시편의 표면조도에 의해 오차가 발생할 있음을 알 수 있다.

4.2. 투명도료의 적외선 흡수스펙트럼

투명도료의 분자진동에 의한 적외선 흡수가 어느 파장에서 발생하는지를 알아보기 위해 4000~400 cm<sup>-1</sup> 적외선 영역에서 흡수특성을 분석하였으며, Fig. 5에 투명도료의 적외선 흡수 스펙트럼 분석결과를 보여주고 있다. 주로 2959 cm<sup>-1</sup>에서는 C-H, 1737 cm<sup>-1</sup>에서는 C=O, 1242 cm<sup>-1</sup>에서는 C-O의 적외선 흡수밴드 외에 다른 파장에서 적외선 흡수대가 나타나고 있다. 따라서 키호히호프법칙[2]에 따라 적외선 흡수 파장대에서 적외선 방사가 일어날 것으로 사료된다. 즉, 0°K 이상의 온도에 있는 물체에서 분자는 전체적으로 회전운동을 하고 분자를 구성하는 원자간에는 상호간 신축진동이나 변각진동을 하고 있으며, 이같은 고유 진동수는 적외선의 진동영역 내에 있기 때문에 물질에 적외선이 조사되면 물질분자의 고유진동수와 일치하는 적외선이 공명흡수되어 분자의 진동은 상위의 에너지 준위로 여기되고 진폭이 커지면서 발열이 되며, 이때 분자가 여기상태에서 원래 상태로 되돌아 올 때 열을 적외선으로 방출한다[6]. 따라서 투명도료를 구성하고 있는 각각의 분자들은 회전운동, 분자진동, 격자진동에 의한 쌍극자능률이 변하여 적외선 영역에서의 전자파가 방사되어 고유의 방사율 값을 갖게 될 것으로 사료된다.

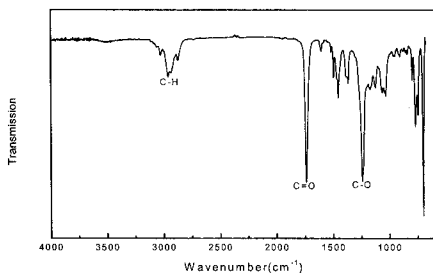


Fig. 5 FT-IR absorption spectrum of transparent paint

4.3. 강판에 코팅된 투명도료의 적외선 방사율

강판에 투명도료를 코팅 한 후 도막에 따른 방사율의 변화를 알아보기 위해 코팅강판의 도막두께 및 적외선 광학특성을 분석하였다. 강판에 코팅된 도막두께 측정결과 1번 시료는 3 μm, 2번 시료는 8 μm, 3번 시료는 12 μm, 4번 시료는 15 μm 였으며, Fig. 6에 도막두께에 따른 적외선 반사스펙트럼을 나타내고 있다. 파장에 따른 적외선 흡수파장대는 모든 시료에서 같지만 적외선 반사강도에서는 차이가 나고 있으며, 7.5~13 μm 파장범위에서 1번 시료의 적외선 반사율은 0.50이고 도막두께가 15 μm 인 4번 시료는 적외선 반사율이 0.16으로서 도막의 두께가 두꺼수록 반사율은 저하되는 경향이 있다. 또한 파장에 따라 반사율에서 많은 차이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 입사된 적외선 광이 도막층에서 적외선 흡수밴드에 의한 흡수 또는 산란 분산되면서 도막내부로 흡수되기 때문으로 판단된다. 따라서 0.90 ~ 0.96의 반사율 값을 나타낸 강판들은 투명도료의 도막 형성으로 인해 도막의 적외선 광 흡수에 의해 적외선 반사율이 낮아지고 있으며, 특히 흡수밴드가 있는 파장에서는 0.1 이하의 적외선 반사율을 보이고 있다.

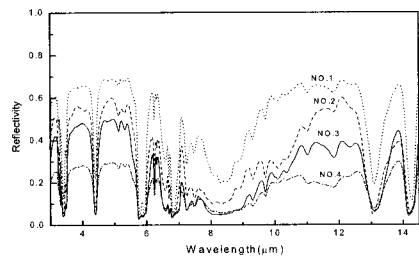


Fig. 6 I.R reflectivity of steel surface coated transparent paint with different thickness

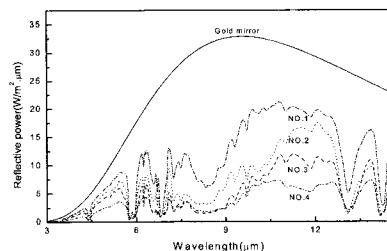


Fig. 7 I.R reflectivity power of steel surface coated transparent paint with different thickness

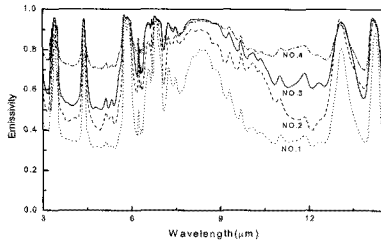


Fig. 8 I.R. emissivity of steel surface coated transparent paint with different thickness

Table 1 I.R. reflection properties for steel surface coated transparent paint with different thickness

Sample	Paint thickness ( $\mu\text{m}$ )	Reflectivity	Reflective power ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	Emissivity
NO.1	3	0.50	85	0.50
NO.2	8	0.41	70	0.59
NO.3	12	0.23	38	0.77
NO.4	15	0.16	26	0.84

Fig. 7은 각 시료에서의 반사된 적외선광의 파장에 따른 에너지 분포를 나타내는 것으로서 주로 적외선 흡수대가 없는 9~13  $\mu\text{m}$  파장범위에서 반사 에너지가 높게 나타나고 있다.

각 시료에 대해 측정된 적외선 반사율을 가지고 식(2)에 의해 적외선 방사율로 변환한 스펙트럼을 Fig. 8에 보여주고 있다. 투명도료가 코팅된 시료들의 적외선 방사율은 0.50~0.84 정도의 값을 나타내고 있으며 키르히호프 법칙[2]에 따라 적외선 흡수율이 높을수록 적외선 방사율이 높게 된다. Table 1에 투명도료가 코팅된 강판들의 도막 두께에 따른 적외선 반사율, 적외선 반사에너지, 적외선 방사율 값을 정리하였다. 따라서 표면의 재질, 두께 등 표면 상태에 따라 적외선 방사율이 변하는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 적외선 열화상에 의한 온도 측정 시 중요한 인자인 재료의 방사율을 FT-IR 기기를 이용하여 측정하고 재료의 표면 상태에 따른 적외선의 광학적 특성을 고찰하였다.

적외선 흡수가 없는 강판의 연마면 상태에서는 0.90~0.94의 적외선 반사율을 나타내고 있으며 적외선 방사율은 0.06~0.10로 계산되었고, 표면의 비

연마 상태에서는 표면의 조도에 의해 적외선 반사율은 낮으며 상대적으로 적외선 방사율은 0.56 정도로 높게 나타내어 0.46 정도의 오차가 발생하였다.

강판표면에 코팅된 도료는 적외선 흡수로 인해 도료의 두께가 두꺼울수록 적외선 반사율은 낮아지고 적외선 방사율은 0.50 ~ 0.84 정도로 높아졌다. 즉 적외선 흡수율이 높아짐에 따라 적외선 방사율도 커지는 것을 확인하였다. 또한 도료의 적외선 흡수밴드에 의한 적외선 흡수 및 방사과장이 다르기 때문에 과장에 따라 적외선 방사율도 변하는 것을 알 수 있으며 적외선 열화상 카메라의 과장대역에 따라 방사율 값을 달리 적용해야 한다.

이상의 결과를 통해 재료표면의 재질, 두께, 조도 등 표면 상태에 따라 적외선 방사율이 변하는 것을 알 수 있으며, 적외선 열화상에 의한 표면온도 측정 시 대상물질의 표면 상태에 따른 적외선의 광학적 특성을 알아내고 적외선 방사율을 제공하여야 측정온도의 오차를 줄일 수 있다. 또한 반사법에 의한 적외선 방사율 측정방법은 금속재료 및 금속에 코팅된 도료의 막에 대한 여러 가지 표면상태에 따른 적외선 방사율을 정량적으로 측정하는데 유용한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] Y. G. Oh, Y. G. Kim, S. M. park and B. C. Kang, "Standardization of measuring method for spectral emissivity of far-infrared rays," Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, pp. 29-39 (2003)
- [2] D. A. Kouichi, E. G. Yohinobu and S. A. Hisao, "Far Infrared Ray," pp. 192, Ningentorekishisha, Tokyo, Japan (1999)
- [3] E. M. Sparrow and R. D. Cess, "Radiation heat transfer," pp. 40, Belmont, California, USA (1996)
- [4] KS L 2514, Testing method on transmittance and emittance of flat glasses and evaluation of sola heat gain coefficient, Korea Agency for Technology and Standards, pp. 3 (2009)
- [5] K. Kawamoto, Eletro-Heat, Vol. 22, pp. 14 (1985)
- [6] 한충수, 박완서, "원적외선 가열의 이론과 실제", 한국원적외선응용연구소, pp. 22 (1995)