

고온 환경에서의 적외선 열화상 측정에 관한 연구

Research on Measurement of Infrared Thermography under High Temperature Condition

이준식^{1*}, 전재욱²

Jun-Sik Lee^{1*}, Jae-Wook Jeon²

〈Abstract〉

This study conducted a measurement method of high temperature conditions using infrared thermography. All objects emit infrared light, and this emissivity has a significant impact on the temperature measurements of infrared thermal imaging (IR) cameras. In order to measure the temperature more accurately with the IR camera, correction equations were derived by measuring the emissivity according to the temperature change of combustible metals in a high-temperature environment. Two combustible metals, Mg and Al, were used to measure emissivity with changing temperature. Each metal was heated, the emissivity was measured by comparing the temperature with IR camera and thermocouples so that the correlation between temperature and emissivity could be analyzed. As a result of the experiment, the emissivity of the metals increases as the temperature increased. This can be interpreted as a result of increased radiation emission as the thermal movement of internal metal molecules increased.

Keywords : Infrared Thermography, Emissivity, Temperature Measurement, Combustible Metals

1* 정회원, 교신저자, 창신대학교 스마트융합공학부

E-mail: mechjun@gmail.com

2 창신대학교 항공기계공학과

E-mail: mjb6262@naver.com

1* Corresponding Author, Smart Convergence Engineering

Department, Changshin University

2 Dept. of Aeronautical & Mechanical Engineering, Changshin

University

1. 서론

적외선 열화상 기술은 열로 주어지는 다양한 정보를 분석 가능하게 하여 기계, 전자, 화학, 우주 등 매우 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 적외선 카메라에 직접적인 영향을 미치는 인자들은 물체의 방사율, 주변온도, 투과율, 열반사, 습도, 대기온도, 풍속 등 여러 가지가 있으나 그 중 측정온도에 영향을 제일 많이 받는 요소가 물체의 방사율(ϵ , Emissivity)이다[1-4]. 방사율은 0과 1 사이의 값을 가지고 숫자가 높을수록 그 물체의 방사율이 높다. 이에 방사율 측정에 관한 연구 중 반구명경을 이용한 스펙트럼 방사율 측정법은 환경 조건에 따라 몇 가지로 제안되어 있고 표준측정법이 내정되어 있지 않아 측정방법에 따른 오차가 있다[5].

특히 IR 카메라를 이용하여 100 °C 이상의 온도 측정 시 온도변화에 따른 방사율을 대부분 고려하지 않고 IR 카메라에 표시되는 온도를 이용한다. 본 연구에서는 내부와 외부의 고온 환경에서 보다 정확한 적외선 열화상 측정법에 대해 실험을 실시하였다. 이에 외부 고온환경의 온도변화에 따른 방사율 변화를 알아보기 위해 가연성 금속을 사용하였다[4, 6-8]. 가연성 금속은 불이 붙거나 가열되면 쉽게 연소되는 성질을 가진 금속으로, 산소와의 반응에 의해 화염을 일으키거나 가열 시 쉽게 불이 붙는 특성을 지니고 있다. 이러한 가연성 금속은 일반적으로 고온 또는 화염 환경에서 산화되거나 증발하여 가스를 생성하며 대표적인 가연성 금속으로는 알루미늄, 마그네슘, 티타늄 등이 있다[9-10].

따라서 본 연구에서는 고온 환경에서의 온도변화에 따른 방사율을 측정하여 보다 정확한 온도를 측정하기 위해 두 가지 가연성 금속인 마그네슘(Mg)과 알루미늄(Al)을 이용되었고, 각각의 금속을

가열하여 적외선 카메라와 열전대 온도를 비교하여 방사율을 측정 후 온도와 방사율의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 고온 환경에서의 2차원 온도 분포 측정을 위해 적외선 열화상법을 이용한 보다 정밀한 측정 방법을 알아보려고 하였다. 고온 환경이 발현할 수 있는 가연성 금속을 이용하여 외부 온도 측정 실험과 IR window 광학 창을 이용한 내부 고온 환경 온도 측정 실험으로 구분하여 진행하였다.

2.1 외부 고온 측정 실험

외부 환경에서 고온의 온도 측정을 위해 FLIR사의 적외선 카메라(FLIR A655sc)와 방사율 측정과 온도 보정을 위해 K-type 열전대가 사용되었으며, Fig. 1과 같이 구성하였다.

고온 환경에서의 온도변화에 따른 방사율 측정을 위해 두 가지 가연성 금속인 마그네슘(Mg)과

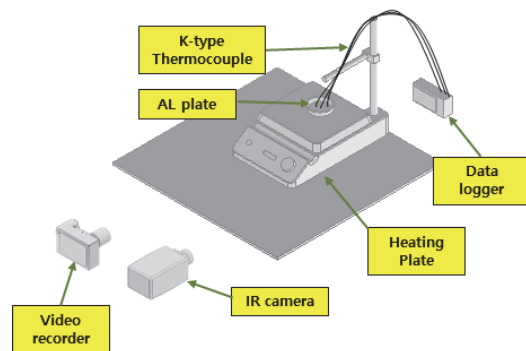


Fig. 1 Schematic diagram of emissivity measurement with temperature change

알루미늄(Al)을 이용하였다. Mg와 Al의 열적 특성은 Table 1과 같으며, 두 종류의 금속 모두 높은 방사율 가지고 있으며, 온도, 표면 거칠기, 입자의 크기에 따른 방사율의 편차가 높은 편이다[11]. 또한 접화 온도는 용융점에 가까운 것으로 간주하지만 특정 형태의 가연성 금속 접화는 용융점 이하의 온도에서 발생할 수 있다. 매우 미세한 분말은 더 낮은 온도에서 발화한다[12-13].

Table 1. Thermal properties of Al and Mg[14]

Combustible metal	Melting point(°C)	Boiling point(°C)	Emissivity
Al	660	2,452	0.1~0.25
Mg	650	1,110	0.3~0.8

가연성 금속의 온도는 히터(heating plate)를 이용하였고, 가열 설정온도에 따른 열전대 온도변화를 데이터로거(data logger)로 수집하였다. 실험 시작 전 사용할 시료는 실험 하루 전에 24시간 동안 건조하기 위해 Desiccator 에 보관된다. 열전대는 시료 표면, 시료 내부와 외부 온도를 정밀하게 감지하기 위해 세 개(T1-T3)를 사용하였고, 열전대와 동일한 위치에 IR 카메라의 초점을 위치시키고 온도를 측정한다. 약 5분 동안 히터를 사용하여, 50° C 간격으로 온도를 수집하고 동시에 데이터로거와 IR 카메라의 온도를 비교하며 이들 간의 데이터 일치여부를 확인한다. 가연성 금속의 온도는 히터를 이용하였고, 가열 설정온도에 따른 열전대 온도 변화를 데이터로거로 수집하였다.

2.2 내부 고온 측정 실험

고온 환경에서 내부의 온도를 측정하기 위해서 먼저 테스트 세션의 한면에 적외선이 투과되는 Infrared Window를 설치한다. 이 Infrared Window

소재로는 사파이어(Sapphire), 게르마늄(Ge), 실리콘(Si), 황화아연(ZnS), 석영(SiO₂)등이 있으나, 본 연구에서는 중파영역의 적외선 투과율이 가장 우수한 사파이어를 IR Window로 사용하였다.

보다 정확한 열화상 온도 이미지를 측정을 위해 Fig. 2와 같이 먼저 방사율이 1인 흑체 보정장치(Blackbody calibration sources)를 이용하여 50~400°C 범위에서 IR 카메라를 보정한다. 이때 실제 실험환경과 동일한 거리에 Sapphire Window를 위치시켜 IR Counts 값에 따른 온도값을 보정한다. 그리고 수동으로 Non-uniformity Correction (NUC) 작업을 실시한다. 여기서 NUC는 온도 측정의 정확도를 개선하기 위해 사용되는 기능으로 자체적으로 교정하고 열적으로 안정된 상태로 복귀할 수 있도록 평평한 기준면 역할을 한다.

Fig. 3의 그림과 같이 NUC 작업을 하기 전 IR 이미지(Fig. 3(a))가 Sapphire Window에 의해 IR의 렌즈가 반사되어 시편의 중앙 부분이 일정하지 않으나, NUC를 실행하면 Fig. 3(c)의 그림과 같이 균일한 표면 온도 이미지를 얻게된다. 다음 표면의 열전대 온도 데이터를 이용하여 in-situ 보정을 통해 최종적으로 IR 온도 이미지를 이용할 수 있게된다. 본 실험에서는 SUS316L의 평균 다공도가 0.2mm 인 다공성 평판(Fig. 3(a))을 이용하여 300~500°C 까지 방사율을 측정하여 정확도를 검증하였다.

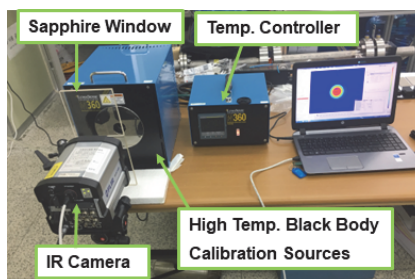


Fig. 2 IR camera calibration set-up with block body

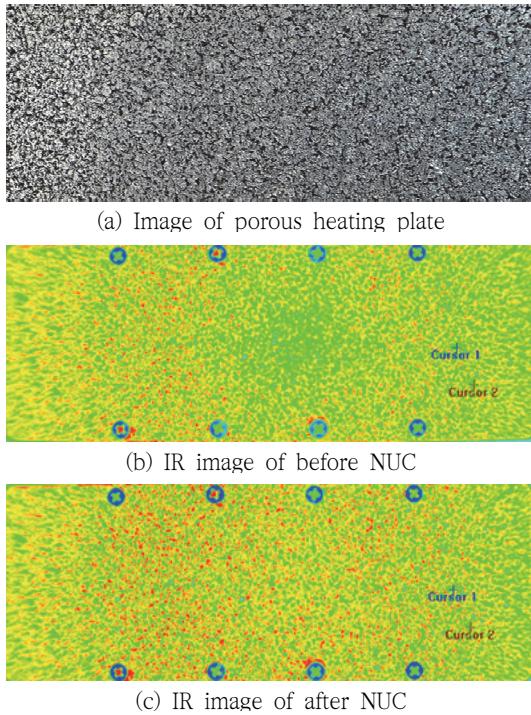
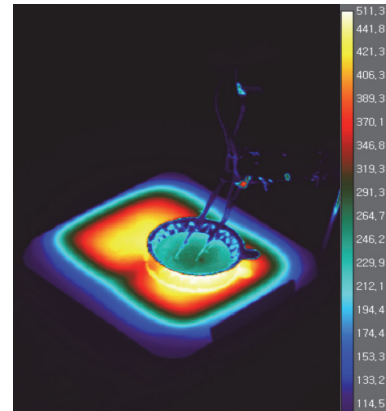


Fig. 3 Non-Uniformity Correction & IR images

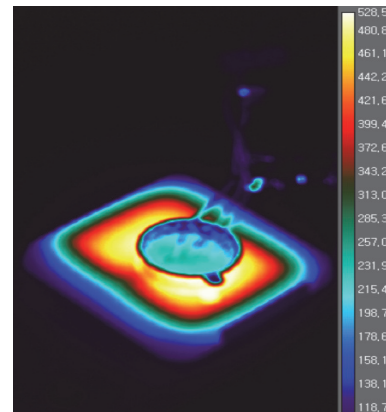
3. 실험결과 및 토의

Fig. 4는 가연성 금속의 온도변화에 따른 방사율을 측정의 열화상 이미지이며, 3개의 K-type 열전대를 각각 바닥면, 시료의 표면과 시료의 내부에 고정시켰다. 시료를 점화한 후, 50°C 간격으로 하여 550°C까지 가열하여 가연성 금속의 온도변화에 따른 방사율의 변화를 열화상 이미지로 시각화한 결과를 나타내고 있다. K-type 열전대의 위치와 시료의 구조적 배치를 고려하여 온도 데이터와 열화상 데이터의 상관관계를 분석하였다.

실험결과 모든 조건에서 가연성 금속의 온도가 상승함에 따라 방사율이 증가하였다. 온도가 T인 물체가 방사하는 최대 방사강도는 Stefan-Boltzmann 법칙에 의하여 보정식은 아래와 같다.



(a) IR images of Al 45µm at 500°C



(b) IR image of Mg 75µm of 500°C

Fig. 4 IR images of combustible metal

$$E = \sigma T^4 (W/m) \tag{1}$$

σ 는 Stefan-Boltzmann상수($\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$), T 는 켈빈으로 절대온도, 절대온도가 T 인 물체가 방사하는 방사강도 E 는 다음과 같다[5].

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 \tag{2}$$

여기서 E_b 는 흑체의 방사강도, ε 는 방사율을 나타낸다.

특히 온도가 상승함에 따라 Al의 반응보다 Mg

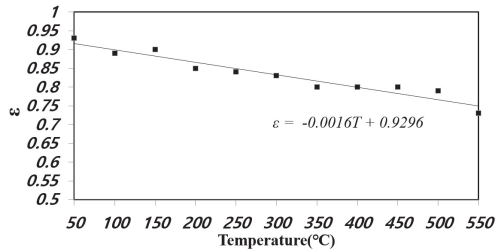


Fig. 5 Emissivity with temperature comparing IR camera with thermocouple for Mg combustion

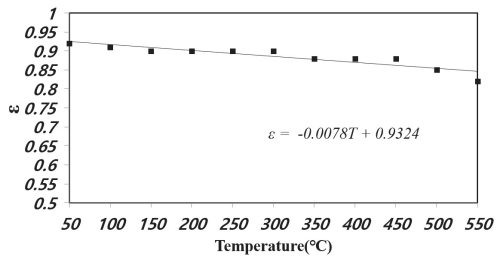


Fig. 6 Emissivity with temperature comparing IR camera with thermocouple for Al combustion

의 방사율이 상대적으로 크며, 각각의 보정식은 아래와 같다. Fig. 5는 IR 카메라와 열전대를 비교하여 Mg 75 μ m의 ε 를 구하였고 보정식의 결과는 다음과 같다.

$$\varepsilon = -0.016T + 0.9296 \quad (3)$$

RMSE(평균 제공근 오차) = 0.884이다.

Fig. 6는 IR 카메라와 열전대를 비교하여 Al 45 μ m의 ε 를 구하였다. 보정식의 결과로는 다음과 같다.

$$\varepsilon = -0.0078T + 0.9324 \quad (4)$$

RMSE(평균 제공근 오차) = 0.8127이다.

위 2개 보정식의 RMSE 값이 다소 낮은 경향이 있는데 이는 각각의 온도 측정 시 온도의 편차가 발생한 것이며, 여러번의 측정 결과를 평균하여 나타낸 것으로 전체적인 온도와 방사율과의 관계에서는 미미한 오차이다.

또한, 가연성 금속마다 온도와 방사율의 상관관계에는 차이가 있고, 이는 각 금속의 물리적 특성과 화학적 구성에 따른 차이로 설명된다. 본 실험을 통해 IR 카메라로 고온의 온도 측정 시 온도에 따른 방사율 변화를 고려해 실제 온도를 도출해야 한다.

실험 결과에서 얻은 온도 데이터의 정확성은 열전대와 IR 카메라의 상호 보완적인 활용에 쓰인다. 열전대는 시료 내부와 외부의 온도를 측정하며, IR 카메라는 비접촉식으로 시료의 온도 분포를 촬영한다. 이 두 가지 데이터의 분석과 보정을 통해 온도 측정의 정밀성과 신뢰성을 높일 수 있다.

4. 결론

본 실험 방법을 바탕으로 고온의 내외부 환경에서의 가연성 금속의 화재 실험을 포함한 다양한 물질의 고온 환경에서 열관리 및 적외선 온도 측정에 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 열전대와 적외선(IR) 카메라로부터 획득한 온도 데이터를 통합하고 분석하여 정확한 온도 측정을 수행하였다. 이 과정에서 온도 간의 차이를 분석하고 보정하는 과정을 거쳐 고온 환경에서의 가연성 금속의 온도변화에 따른 방사율을 신뢰할 수 있는 방식으로 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 방법은 적외선 열화상 기술의 정확성과 활용 가능성을 크게 높이는 중요한 역할을 한다. 이 방법론은 가연성 금속을 포함한

다양한 물질의 온도 변화를 연구하는데 활용될 수 있으며, 향후 산업 분야에서 물질의 안전성 평가, 화재 예방 및 재료 공학 등 다양한 응용 분야에서의 활용 가능성이 기대된다.

사 사

본 논문은 2022년도 창신대학교 교내연구비 (No. 창신-2022-086) 및 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원(No. 2021RF1A1055898)에 의해 연구되었음.

참고문헌

- [1] M. Vollmer, K.P. Möllmann, "Infrared Thermal Imaging, VILEY-VCH, Berlin. (2010).
- [2] D. Höser, R. Wallimann, PR. Von. Rohr, "Uncertainty Analysis for Emissivity Measurement at Elevated Temperatures with an Infrared Camera", Int J Thermophys, Vol. 37, No. 14, (2016).
- [3] S. Marinetti, P.Gi. Cesaratto, "Emissivity estimation for accurate quantitative thermography", NDT&E International, Vol. 51, pp.127-134, (2012).
- [4] M. Nifuku, S. Koyanaka, H. Ohya, C. Barre, M. Hatori, S. Fujiwara, S. Horiguchi, I. Sochet, "Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 20, pp.322-329, (2007).
- [5] K. Oh, S. Bae, "Measurement Method of the Spectral Emissivity by Using Hemospherical Mirror", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 27, No. 6, pp.789-795, (2003).
- [6] Y. Kudo, Y. Kudo, H. Torikai, A. Ito, "Effects of particle size on flame spread over magnesium powder layer", Fire Safety Journal, Vol. 45, pp.122-128, (2010).
- [7] C. Zhu, H. Wang, L. Min, "Ignition Temperature of Magnesium Powder & Pyrotechnic Composition", Journal of Energetic Materials, Vol. 32, pp.219-226, (2014).
- [8] Y. Chunmiaoa, Y. Lifu, L. Chang, L. Gang, Z. Shengjun, "Thermal analysis of magnesium reactions with nitrogen/oxygen gas mixtures", Journal of Hazardous Materials, Vol. 260, pp.707-714, (2013).
- [9] T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotruga, Y. Tuppabung, "Emissivity Measurements on Material and Equipment in Electrical Distribution System", 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, (2011).
- [10] R. Pérez-Sáez, L. Campo, M. Tello, "Analysis of the Accuracy of Methods for the Direct Measurement of Emissivity", Int J Thermophys, Vol. 29, pp.1141-1155, (2008).
- [11] K. Nam, J. Lee, H. Park, "Understanding Combustion Mechanism of Magnesium for Better Safety Measures: An Experimental Study", Safety Vol. 8, No. 1, (2022).
- [12] National Fire Protection Association NFPA 484 Standard for combustible metals, pp.7-126, (2019).
- [13] Korean Fire Protection Association KFS 552 Standard on Fire Protection for Storage of Magnesium. pp.1-12, (1999).
- [14] J. Lim, S. Lee, W. Yoon, "A comparative study of the ignition and burning characteristics of after burning aluminum and magnesium particles", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 28, No. 10, pp.4291-4300, (2014).