

반구면경을 이용한 스펙트럼 방사율 측정법 연구

오기수* · 배신철**

A Study on the Measurement Method of the Spectral Emissivity by Using Hemispherical Mirror

K. S. Oh and S. C. Bae

Key Words: Spectral Emissivity(스펙트럼 방사율), Hemispherical Mirror(반구면경), Effective Reflectivity(실효반사율).

Abstract

The measurement method of the spectral emissivity by using hemispherical mirror which has an inclined observation hole is studied. This method is useful in measuring the spectral emissivity of the solid material both conductor and non-conductor. In this study, the effective reflectivity of the hemispherical mirror is also measured for calculating the spectral emissivity of materials. The effective reflectivity measured is 0.9

기호설명

- E_b Emission power of blackbody
- E Emission power of specimen only
- E_e Emission power of multiple reflection between specimen and hemispherical mirror
- E_o Emission power of surroundings
- α Absorption ratio
- α_e False absorption ratio
- ϵ Emissivity
- ϵ_e False emissivity

물질과 상호작용하여 흡수, 산란, 반사 등을 한다.

열방사는 절대적 물리량(방사강도 등)과 비례적 물리량(방사율)으로 정량화시킬 수있으며, 이 중 방사율은 재료의 열방사 특성의 표현에, 방사휘도는 물체의 열적 상태의 표현에 주로 사용된다.

- 절대적 물리량 : 방사강도($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)
- 비례적 물리량 : 방사율(무차원)

열방사를 이용한 온도계측에서는 방사율에 의하여 측정온도의 정밀도가 결정되며, 열적 상태의 최적설계에서는 열확산계수, 열전도계수, 비열과 함께 방사율이 재료선택을 위한 필수적인 검색자료가 된다. 이와같이 열방사 응용분야에서 방사율이 중요한 의미를 가지고 있음에도 불구하고 다음과 같은 몇가지 문제점으로 인하여 그 응용은 아직까지 미흡한 실정이다.

첫째, 열방사율은 물질의 고유한 특성임과 동시에 동일한 물질에 대해서도 기하학적, 화학적 상태에 따라 다른 값을 나타내는 상태의존적 물성이다.

둘째, 안정된 환경조건에서의 측정방법은 몇가지 제안되어 있지만 표준측정법이 제정되어 있지

1. 서 론

열방사란 “열적으로 여기된 물질의 구성입자들이 열에너지를 전자에너지로 전환하여 출사하는 방사”라고 정의한다. 열방사는 전자파의 일종으로서 적당한 매질을 통해 빛의 속도로 전파되며,

* 단국대학교 기계공학과 대학원

** 단국대학교 기계공학과

않으며, 현장측정이 곤란하다.

셋째, 데이터베이스 구축이 미흡하며, 순수물질에 대한 표준상태에서의 몇가지 자료만이 응용가능하다.

방사율은 임의온도의 물체로부터 출사되는 열방사와 동일온도의 흑체로부터 출사되는 열방사의 크기의 비율로 정의된다. 따라서 측정법과 장치에 관한 기술적 사항중 흑체의 구현이 가장 중요한 의미를 가지며, 정확도 유지를 위해서는 다음과 같은 측정조건이 만족되어야 한다.

첫째, 피측정물과 흑체는 충분한 정도의 등온조건을 만족하여야 한다. 등온조건을 구현하는 방법으로는 시편에 가상흑체를 내장시키는 방법, 시편과 가상흑체의 온도를 열전대 등으로 측정하여 실시간 제어하는 방법등이 있다.

둘째, 흑체는 실제로 자연세계에 존재하지 않는 가상물체이다. 가상흑체의 열방사는 측정값의 기준이 되므로 방사율이 가능한 1에 근사한 값이거나, 1보다 현저히 작은 경우에는 그 방사율의 정확한 값이 제시되어야 한다.

셋째, 시료주위의 물체로부터 출사된 열방사가 시료표면에 입사되어 그 반사성분이 검출기(방사계)에 혼입되지 않도록 시료의 방사만을 측정하는 방법을 고려하거나, 또는 이의 보정법이 마련되어야 한다.

현재까지 알려진 방사율 측정법은 크게 방사측정법, 반사측정법 및 열량측정법의 3가지로 분류할 수 있으며, 이들에 대한 요약은 다음과 같다.

방사측정법(Radiometric Emmissivity Method)은 시편자체가 출사하는 열방사를 방사검출기로 검출하고 같은 온도의 흑체방사와 비교하는 측정법이다. 반사측정법(Reflectivity Measurement Method)은 다른 방사원으로부터의 열방사를 시료표면에 입사시켜 시료에 의해 반사된 방사의 강도를 방사검출기로 검출하고, 시료의 방사율로부터 방사율을 구한다. 열량측정법(Calorimetric Method)은 시료표면으로부터 시료주위로 손실된 열량을 계측하고 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann)법칙을 이용하여 반구전방사율을 구하는 방법이다.

본 논문에서는 방사측정법의 일종으로 왕복회전운동하는 반구면경을 이용한 반구전방사율 측정법을 연구하고, 고온안정성 그래파이트의 분광방사율을 측정하였다. 이 측정법은 시료의 온도를 정확히 측정할 필요가 없으며 시료의 자체방

사, 반구면경과의 다중반사에 의한 방사 및 주위 방사의 크기로 결정되므로 앞에 제시된 측정조건에 크게 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있으므로 향후 각종 산업용 고체재료의 스펙트럼 방사율 측정에 광범위하게 사용될 것이다.

2. 이론해석

2.1 방사이론

방사율은 임의의 온도로부터 출사되는 열방사와, 동일한 온도의 흑체로부터 출사되는 열방사와의 크기의 비를 말한다. 온도가 T 인 물체는 그 온도에 상응한 열방사를 출사하며 또 그 물체에 입사되는 방사를 흡수한다. 온도가 T 인 흑체(blackbody)가 방사하는 최대 방사강도(emission power)는 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann) 법칙에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (W/m^2) \quad (1)$$

여기서 σ 는 스테판-볼츠만상수($\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$), T 는 켈빈으로 주어지는 물체의 절대온도(K), E_b 는 흑체의 방사강도이다. 이상적인 방사체 또는 흑체만이 식(1)에 따른 방사강도를 출사할 수 있다. 그러므로 절대온도가 T 인 물체가 출사하는 방사강도 E 는 다음과 같다.

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

여기서 ϵ 는 방사율(emissivity)로서 0과 1사이의 값을 가지며 실제 임의의 물체의 방사율은 항상 1보다 작다.

2.2 스펙트럼 방사율의 측정원리

본 연구에서 사용한 반구면경법은 Fig.1에 나타낸 것과 같이 시편의 전면에 반구면경을 설치하고, 반구면경은 내면의 정점을 회전중심으로 하여 좌우로 8° 씩 왕복회전하도록 하여 시편표면으로부터의 열방사를 정점부에 위치한 측정구를 통하여 관찰하게 되므로, Fig.2의 (a)에 나타낸 것과 같이 반구면경이 시편의 정면에서 비껴있을 때에는 시편표면의 직접방사만이 관측되며, (b)처럼 반구면경이 시편의 정면에 위치할 때에는 시편과 반구면경 사이의 무한한 다중반사에 의하여

흑체에 가까운 방사가 관측된다.

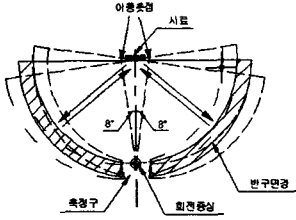


Fig.1 Diagram of hemispherical mirror

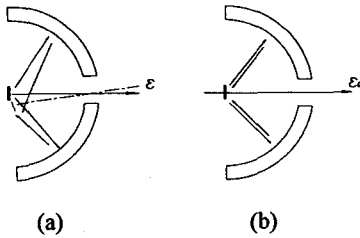


Fig.2 Principle of spectral emissivity measurement

시편의 표면이 완전 확산면이라고 가정하는 경우에는, 시편표면의 스펙트럼 방사율 및 스펙트럼 흡수율을 각각 ϵ_λ 및 α_λ , 시편표면과 반구면경 사이의 다중반사가 있을 때의 겉보기 방사율 및 흡수율을 각각 ϵ_e 및 α_e , 반구면경의 유효 방사율을 ρ_m 이라고 하며, 이들 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \epsilon_e &= \epsilon_\lambda + \epsilon_\lambda(1-\alpha_\lambda)\rho_m + \epsilon_\lambda(1-\alpha_\lambda)^2 \rho_m^2 \\ &+ \epsilon_\lambda(1-\alpha_\lambda)^3 \rho_m^3 \cdot \cdot \cdot \quad (3) \\ &= \epsilon_\lambda / 1 - (1-\alpha_\lambda)\rho_m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_e &= \alpha_\lambda + \alpha_\lambda(1-\epsilon_\lambda)\rho_m + \alpha_\lambda(1-\epsilon_\lambda)^2 \rho_m^2 \\ &+ \alpha_\lambda(1-\epsilon_\lambda)^3 \rho_m^3 \cdot \cdot \cdot \quad (4) \\ &= \alpha_\lambda / 1 - (1-\epsilon_\lambda)\rho_m \end{aligned}$$

식 (3)을 α_λ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha_\lambda = 1 - (1 - \epsilon_\lambda / \epsilon_e) \rho_m \quad (5)$$

열방사 성질에 관한 키르호프의 법칙 $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$ 에 따르면 불투명 재료의 경우 스펙트럼 방사율과 스펙트럼 흡수율은 같으며, 이를 위 식에 적용하면 스펙트럼 방사율 ϵ_λ 를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_\lambda = 1 - (1 - \epsilon_\lambda / \epsilon_e) \rho_m \quad (6)$$

반구면경의 후방에 설치되어 있는 스펙트럼 방사계로부터 측정된 주위의 스펙트럼 방사강도를 E_o , 시료단독의 스펙트럼 방사강도를 E_λ , 시편표면과 반구면경 사이의 다중반사에 의한 겉보기 스펙트럼 방사강도를 E_e 라 하면, 이들 사이에는 다음의 관계식 (7), (8), (9)가 성립한다.

주위로부터의 방사는 반구면경의 초점에 시편이 놓여있는 것으로 가정할 경우, 무한대의 반사율이 한 점의 시편에 작용하는 것으로 고려할 수 있다. 따라서 시편에 들어오는 입사(irradiation)는 반구면경 표면온도인 흑체로부터의 방사와 동일한 값으로 고려할 수 있으므로 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$E_o = E_{\lambda,b}(\lambda, T_o) \quad (7)$$

시편표면으로부터 출사되는 모든 복사에너지를 방사계가 검출한다. 즉 시편으로부터의 모든 출사복사는 라디오엑티비티(radiactivity)이다. 또 면을 확산표면으로 가정한다면 스펙트럼 라디오엑티비티와 스펙트럼 방사강도 E_λ 는 서로 동일하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_\lambda = \epsilon_\lambda E_{\lambda,b}(\lambda, T) \quad (8)$$

$$+ (1-\alpha_\lambda) E_{\lambda,b}(\lambda, T_o)$$

또 모든 방사계는 흑체에서 방사되는 방사력을 측정하도록 만들어져있기 때문에 실제로 측정된 값은 겉보기 값이다. 따라서 이 값을 실제면에 적용하려면 보정하여야 한다. 그러나 방사계에 들어오는 스펙트럼 방사강도 E_e 는 물체에서 출사하는 스펙트럼 방사강도와 서로 동일한 값이다.

$$E_e = \epsilon_e E_{\lambda,b}(\lambda, T) \quad (9)$$

$$+ (1-\alpha_e) E_{\lambda,b}(\lambda, T_o)$$

여기에서 T 는 시료의 온도, T_o 는 주위 및 반구면경의 온도, $E_{\lambda,b}(\lambda, T)$ 는 온도가 T 인 흑체의 파장 λ 에 있어서의 스펙트럼 방사강도이며,

Plank's Distribution Law에 의해 주어진다. 위의 식 (3), (6)과 (7), (9)의 관계로부터 스펙트럼 방사율 ϵ_λ , ϵ_e 와 스펙트럼 방사강도 E_λ , E_o 및 E_e 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\epsilon_\lambda/\epsilon_e = (E_\lambda - E_o)/(E_e - E_o) \quad (10)$$

식(10)에서 E_λ , E_o 및 E_e 는 스펙트럼 방사계로부터 실측되므로 방사율의 비 $\epsilon_\lambda/\epsilon_e$ 를 얻을 수 있으며, 반구면경의 유효반사율 ρ_m 를 알 경우 식(6)으로부터 스펙트럼 방사율 ϵ_λ 를 구할 수 있다.

3. 측정실험

3.1 반구면경의 유효반사율 측정

반구면경을 계속 사용할 경우 방사율이 저하되므로 반구면경의 유효반사율을 직접 측정할 수 있는 방법을 강구하였다. Fig.3은 반구면경의 실효반사율을 측정하기 위하여 고안한 2개의 공동을 가진 방사체로서 온도분포를 균일화하기 위하여 본체재료는 열전도계수가 큰 동을 사용하였고 옆면은 방사손실을 줄이기 위하여 얇은 알루미늄 박판을 부착하였다. 방사체의 상부표면과 공동은 산화시키거나 도료를 도포함으로써 요구되는 스펙트럼 방사율을 갖도록 할 수 있다.

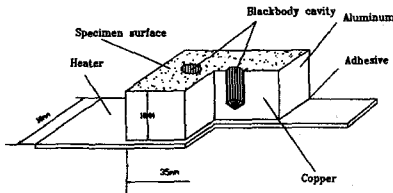


Fig.3 Specimen and isothermal blackbody cavity for measurement of hemispherical mirror's reflectivity

측정은 먼저 방사체를 반구면경의 전방에 상하 길이방향으로 설치한 후 상하방향으로 위치를 조정하면서 방사체표면과 공동에 대한 각각의 스펙트럼 방사율의 비(ϵ/ϵ_o)를 측정한 다음 반구면경을 제거시키고 주위의 스펙트럼 방사강도를 기준으로 하는 방사체 표면의 스펙트럼 방사강도와

공동의 분광 방사강도의 비를 측정하여 이들 측정데이터의 관계로부터 반구면경의 유효반사율을 구하였다. 우선 방사체 표면의 스펙트럼 방사율을 ϵ_L , 다중반사에 의한 겉보기 스펙트럼 방사율을 $\epsilon_{L'}$, 공동의 스펙트럼 방사율을 ϵ_H , 겉보기 스펙트럼 방사율을 $\epsilon_{H'}$, 방사체 표면의 스펙트럼 방사강도를 E_L , 공동의 스펙트럼 방사강도를 E_H 라고 하면 이들 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\epsilon_L = 1 - (1 - \epsilon_L/\epsilon_{L'})/\rho_m \quad (11)$$

$$\epsilon_H = 1 - (1 - \epsilon_H/\epsilon_{H'})/\rho_m \quad (12)$$

$$\epsilon_L/\epsilon_H = (E_L - E_o)/(E_H - E_o) \quad (13)$$

식(11)과 식(12)로부터 다음과 같은 ρ_m 에 대한 관계식이 얻어진다.

$$\rho_m = 1 - \{(\epsilon_L/\epsilon_{L'}) - (\epsilon_L/\epsilon_H)(\epsilon_H/\epsilon_{H'})\} / \{1 - (\epsilon_L/\epsilon_H)\} \quad (14)$$

식(11), (12) 및 (14)의 우변 각 항은 실험에 의하여 모두 구해지므로 이들의 값을 식(14)에 대입하여 반구면경의 유효반사율 ρ_m 을 산출하게 된다.

식(14)로부터 (ϵ_L/ϵ_H) 의 측정오차가 유효반사율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 다음의 식을 유도하였다.

$$\Delta\rho_m/\rho_m = \epsilon_L \cdot \Delta(\epsilon_L/\epsilon_H) / \{1 - \epsilon_L/\epsilon_H\}(\epsilon_L/\epsilon_H) \quad (15)$$

Fig.4는 식(15)의 결과를 나타내고 있으며 반구면경의 유효반사율을 정확하게 측정하기 위해서는 방사체 표면과 공동의 온도분포를 균일화하여 ϵ_L/ϵ_H 의 오차를 작게 함과 동시에 ϵ_L 을 작게 하고 방사체 표면과 공동의 스펙트럼 방사율의 비(ϵ_L/ϵ_H)를 0.5에 접근시키는 것이 좋다. 그러나 현실적으로는 ϵ_L 을 0.3이하로 하는 것은 경면반사가 우려되기 때문에 무리이며 ϵ_L/ϵ_H 의 값 또한 0.5에 접근시키는 것은 방사체의 구성상 용이하지 않다. 따라서 ϵ_L/ϵ_H 의 값을 0.3~0.7의 범위에 있도록 하여 반구면경의 유효반사율 측정 오차를 $\pm 1\%$ 이내로 하는 것이 중요하다. 방사체

의 온도를 400K에서 700K까지 변화시키면서 실제로 ρ_m 을 측정 한 결과 0.901을 나타내었다.

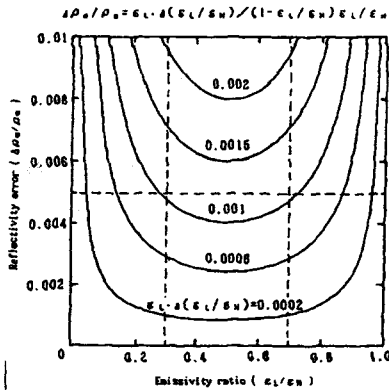


Fig.4 Variation of the mirror's reflectivity error versus sample's emissivity ratio

4. 결론

왕복회전운동을 하는 반구면경을 이용하여 고체재료의 스펙트럼 방사율을 측정하는 방법에 대하여 연구한 결과 시료와 반구면경사이에서 일어나는 무한반사강도 E_c 와 시료만의 단독방사강도 E_s , 주변방사강도 E_o 및 반구면경의 실효반사율 ρ_m 을 구하면 이 값들의 비로부터 간단히 방사율을 산출해낼 수 있었으며, 반구면경의 실효반사율은 제작당시에 이론적으로 설계된 값이 실제로 사용하면서 값이 떨어지게 되므로 이로 인한 스펙트럼 방사율의 측정오차를 줄일 수 있는 실효반사율 측정방법을 고안하였고, 실효반사율을 실측한 결과 0.901로 측정되어 제작당시의 값 0.93보다 0.029만큼 반사율이 저하된 것으로 나타났다. 향후 스펙트럼 방사율의 측정 정밀도를 높이기 위하여 방사량 검출기의 특성과 표면거칠기의 영향 등 몇가지 오차요인들에 대한 연구가 계속되어야 하겠다.

참고문헌

- (1) 일본기계학회, "열물성치 측정법", (주)양현당, 1991. pp. 91-99.
- (2) John A. Wiebelt, Engineering Radiation Heat Transfer, 1966, pp.22-55.

- (3) W. L. Wolf, G. J. Zissis, "The Infrared Handbook", 1978
- (4) J. Hong, T. Baba, A. Ono, "A Measurement Method of Spectral Emissivity Using a Swinging Hemispherical Mirror", 일본계량연구소 보고 제39권 제4호, 1990
- (5) A. Ono, "Calculation of Directional Emissivity of Cavities by the Monte Carlo Method", J. Opt. Soc. Am., 1980, pp.547