

## 열 방사율 측정시 표면거칠기의 영향

오기수\*·배신철\*

\*단국대학교 공과대학 기계공학과

### The Effect of Surface Roughness on Measuring Thermal Emissivity

Ki-Soo Oh\* and Shin-Chul Bae\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

#### Abstract

Thermal emissivity is generally affected by surface situation of material such as roughness. In this study, the effect of surface roughness on measuring thermal emissivity is experimented. And emissivity measurement method and equipment using hemispherical mirror is also reviewed. As the result of this research, thermal emissivity increased as long as increasing surface roughness. So, surface roughness is a essential check point when we measure the emissivity.

\* Corresponding author : bruceoh@ats.go.kr

(Received October 6, 2003)

Key Words : Surface roughness, Thermal emissivity, Hemispherical mirror, Black body

#### 1. 서 론

“열”은 열역학적으로 물체를 이루고 있는 입자의 운동 에너지의 평균값으로 정의하고 있다<sup>1)</sup>. 물체가 기체이면 기체분자의, 고체라면 결정을 이루고 있는 원자가 진동하는 에너지가 클수록 열에너지는 크고, 물체의 온도는 높게 나타날 것이다. 열에너지를 갖는 물체에 의해 물체의 외부에 나타나는 현상으로 열의 전도와 열의 방사 현상을 들 수 있다. 열 방사의 경우에는 그 기준으로 흑체 방사를 사용한다. 이상적인 완전 방사체인 흑체의 방사를 1로 할 때, 이에 대한 방사 휘도의 비율로서 임의 물체의 열 방사 정도를 표현하며, 이를 열 방사율이라 한다. 이러한 열 방사는 전자파의 한 형태로서 공간에서 광속으로 전달되며 물질과 상호 작용하여 흡수, 반사, 산란 등의 현상을 일으킨다. 이제까지 열 방사는 열역학의 중심적인 과제의 하나였으며 양자론의 탄생에 있어 중요한 역할을 담당하였다. 열 방사는 주로 다음과 같은 측면에서 활용되고 있다. 첫째로는 열 방사가 갖는 에너지 측면으로서 열 설계, 열 제어 등 열공학에서 광범위하게 응용되고 있으며, 둘째로는 열 방사가

갖는 정보의 측면으로서 물체가 출사하는 열 방사의 강도로부터 물체의 온도에 관한 정보를 얻을 수 있기 때문에 온도 계측의 분야에도 널리 이용된다. 따라서, 비접촉식 온도 측정만이 가능한 현장의 경우에 정확한 열 방사율 값을 알아야만 정확한 온도 측정이 가능할 뿐 아니라 측정된 온도 데이터를 바탕으로 열 설계를 할 수 있을 것이다.

이와 같이, 열 방사 또는 방사율의 중요성을 인식하면서도 그의 응용이 활발하지 못한 것은 다음의 몇 가지 문제점에 기인한다고 생각한다. 우선 측정기술의 문제이다. 여러 가지 재료에 대한 측정기술과 환경조건 등이 방사율의 측정에 적합하도록 개발되어야 하며, 이것은 실험실에서는 물론 생산현장과 기타 적용분야에서 성공적으로 재현되어야 하나 이의 실현이 용이하지 않다. 특히, 열전대의 접촉이 용이하지 않은 용접공정 등의 경우에도 정확한 온도 측정을 위하여 방사율 측정이 응용되며, 용접공정에서의 정확한 온도 측정이 이루어지면 용접의 품질과 온도와의 상관관계를 규명할 수 있을 것으로 생각되고, 향후 용접 재료의 열 방사율 측정을 통하여 데이터가 축적되면 용접부위의 사용 환경에 따른 내구성 유추 등 용접제품의 열적 설계에 유용하게

이용될 수 있을 것이다.

다음은 재료의 특성에 있다. 방사율은 재료의 물성과 관련이 있지만 표면상태에 따라서도 민감하게 영향을 받기 때문에, 측정대상물체의 표면상태를 특정하게(예를 들어 표면 거칠기나 산화상터 등) 한정하지 않으면 측정된 데이터의 보편성을 잃게 된다. 이러한 이유로 인하여 일정한 재료의 방사율을 표준 데이터화하는데 어려움이 있다. 마지막으로 기본 자료의 미비이다. 위의 두 번째 문제점에도 불구하고 기본적으로 제시된 자료의 수가 많지 않으며, 측정조건(측정파장, 온도 등)에 대한 설명이 부족한 것이 대부분이다.

그 동안의 열 방사율에 관한 연구는 측정장치와 측정방법의 개발에 관한 연구가 주로 행해졌으며<sup>3)</sup>, 표면거칠기가 열 방사율 측정에 오차요인으로 작용한다고 하는 보편적인 생각을 뒷받침할 수 있는 차원의 연구는 수행되지 않아, 본 논문에서는 몇 가지 산업용 재료를 선택하여 표면거칠기가 다른 값을 갖도록 시편을 가공하여 반구면경을 이용한 열 방사율 측정법으로 열 방사율을 측정할 경우에, 표면거칠기에 따른 열 방사율의 변화정도에 대하여 고찰해 보았다.

## 2. 측정이론

### 2.1 분광 방사율의 측정원리<sup>4)</sup>

방사율은 임의의 온도로부터 출사되는 열방사와, 동일한 온도의 흑체로부터 출사되는 열방사와의 크기의 비를 말한다. 여기서 열방사란 물질을 구성하는 입자(원자, 분자, 이온, 전자 등)가 열적으로 여기(격자운동, 전자운동 등)되어 출사하는 일종의 전자파이다. 온도가  $T$ 인 물체는 그 온도에 상응한 열방사를 출사하며 또 그 물체에 입사되는 방사를 흡수한다. 온도가  $T$ 인 흑체(black body)가 방사하는 최대 방사강도(emission power)는 Stefan-Boltzmann 법칙에 의하여 다음과 같이 주어진다.

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

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

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

여기서  $\epsilon$ 은 방사율(emissivity)로서 0과 1사이의 값을 가지며 실제 임의의 물체의 방사율은 항상 1보다 작다<sup>2)</sup>.

방사율의 측정의 정확도를 유지하기 위해서는 다음과 같은 측정조건이 만족되어야 한다. 첫째는 등온조건으로서, 피 측정물과 흑체는 충분한 정도의 등온조건을 만족하여야 한다. 둘째는 흑체조건으로서, 흑체는 실제로 자연세계에 존재하지 않는 가상물체로서 가상 흑체의 열 방사는 측정값의 기준이 되므로 방사율이 가능한 1에 근사한 값이어야 한다. 셋째는 시편의 고립조건으로서, 시편 주위의 물체로부터 출사된 열방사가 시편 표면에 입사되어 그 반사성분이 검출기(방사계)에 혼입되지 않도록 시편의 방사만을 측정하는 방법을 고려하거나, 또는 이의 보정법이 마련되어야 한다.

본 연구에서 사용한 반구면경법은 위의 제한조건에 큰 영향을 받지 않는 개선된 방법으로서 Fig. 1에 나타난 것과 같이 시편의 전면에 반구면경을 설치하고, 반구면경은 내면의 정점을 회전중심으로하여 좌우로  $8^\circ$  씩 왕복회전하도록 하여 시편표면으로부터의 열방사를 정점부에 위치한 측정구를 통하여 관찰하게 되므로, 반구면경이 시편의 정면에서 비켜있을 때에는 시편표면의 직접방사만이 관측되며, 반구면경이 시편의 정면에 위치할 때에는 시편과 반구면경 사이의 무한한 다중반사에 의하여 흑체에 가까운 방사가 관측된다(Fig. 2).

시편표면의 분광 방사율 및 분광 흡수율을 각각  $\epsilon_\lambda$

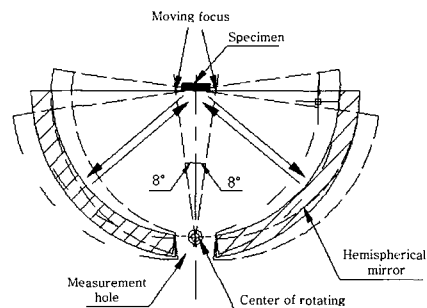


Fig. 1 Description of hemispherical mirror

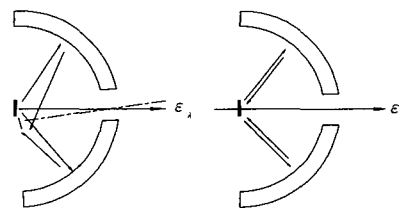


Fig. 2 Principle of reflection

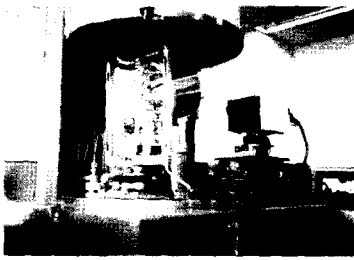


Fig. 4 Specimen holder and IR thermometer

및  $\alpha_\lambda$ , 시편표면과 반구면경 사이의 다중반사가 있을 때의 겉보기 방사율 및 흡수율을 각각  $\epsilon_e$  및  $\alpha_e$  반구면경의 실효 방사율을  $\rho_m$  이라고 하며, 이들 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

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

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

식 (3)을  $\alpha_\lambda$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

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

열방사 성질에 관한 가장 기본적인 관계식  $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$  인 Kirchhoff의 법칙에 따르면 불투명 재료의 경우 분광방사율과 분광흡수율은 같으며, 이를 위 식에 적용하면 분광방사율  $\epsilon_\lambda$  를 얻을 수 있다.

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

반구면경의 후방에 설치되어 있는 분광 방사계로부터 측정된 주위의 방사강도를  $E_o$ , 시편단독의 분광 방사강도를  $E_\lambda$ , 시편표면과 반구면경 사이의 다중반사에 의한 겉보기 방사강도를  $E_e$ 라 하면, 이들 사이의 관계식은 다음과 같이 유도되어 진다. 먼저, 주위로부터의 방사는 반구면경의 초점에 시편이 놓여있는 것으로 가정할 경우, 무한대의 반사들이 한 점의 시편에 작용하는 것으로 고려할 수 있다. 따라서 시편에 들어오는 입사(irradiation)는 반구면경 표면온도인 흑체로부터의 방사와 동일한 값으로 고려할 수 있다. 따라서 다음과

같은 식으로 쓸 수 있다.

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

시편표면으로부터 출사되는 모든 복사에너지를 방사계가 검출한다. 즉 시편표면으로부터의 모든 출사복사는 래디오시티(radiosity)이다. 또 면이 확산표면으로 가정한다면 분광 래디오시티와 분광 방사력  $E_\lambda$  는 서로 동일하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_\lambda = \epsilon_\lambda E_{\lambda,b}(\lambda, T) + (1 - \alpha_\lambda) E_{\lambda,b}(\lambda, T_o) \quad (8)$$

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

$$E_e = \epsilon_e E_{\lambda,b}(\lambda, T) + (1 - \alpha_e) E_{\lambda,b}(\lambda, T_o) \quad (9)$$

여기에서  $T$ 는 시편의 온도,  $T_o$ 는 주위 및 반구면경의 온도,  $E_{\lambda,b}(\lambda, T)$ 는 온도가  $T$ 인 흑체의 파장  $\lambda$ 에 있어서의 분광 방사강도이며, Plank's Distribution Law에 의해 주어진다. 위의 식 (3), (6)과 (7), (9)의 관계로부터 분광 방사율  $\epsilon_\lambda$ ,  $\epsilon_e$ 와 분광방사강도  $E_\lambda$ ,  $E_o$  및  $E_e$  사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

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

식(10)에서  $E_\lambda$ ,  $E_o$  및  $E_e$  는 분광방사계로부터 실측되므로 방사율의 비  $\epsilon_\lambda / \epsilon_e$ 를 얻을 수 있으며, 이를  $\epsilon_\lambda = 1 - (1 - \epsilon_\lambda / \epsilon_e)\rho_m$ 인 식(6)에 대입하면 분광 방사율  $\epsilon_\lambda$  를 구할 수 있다.

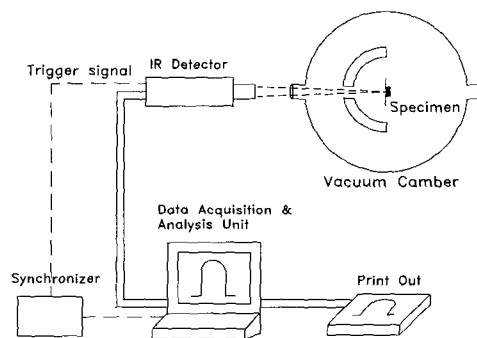


Fig. 3 Diagram of emissivity measurement system

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 반구면경식 측정장치의 구성도이다. 본 측정장치는 크게 나누어 시편지지 및 조정장치부, 반구면경 및 회전기구부, 수냉식 진공조 및 적외선 방사 측정 시스템으로 구성되어 있다. Fig. 4는 시편지지대를 장착한 조정장치이다. 전후 좌우의 이동거리의 조정 및 측정은 0.01mm까지 가능하며 시편 지지대는 길이 100-110mm, 폭 10-12mm의 리본형의 가열판을 수직으로부터 20° 경사지게 설치하였고, 하부의 가열판 지지부는 고정시키지 않고 상하로 미끄러지게 하여 가열판의 가열에 따른 팽창이 일어날 경우 하부의 지지부가 자체의 무게에 의하여 자연스럽게 아래로 이동함으로써 가열판의 열변형을 방지할 수 있게 하였다. 또한 시편표면을 반구면경의 곡률중심과 일치시키기 위하여 시편지지부가 정밀 회전할 수 있는 회전 스테이지를 설치하였으며, 전후 좌우의 정밀조정을 위하여 마이크로미터가 부착된 X-Y슬라이더를 설치하였다.

반구면경은 Fig. 5와 같이 내부반경을 80mm로 하여 시편의 폭을 10mm이상으로 함으로써 시편표면의 균일 온도구간을 넓혔다. 반구면경의 재질은 석영유리로 하였고 내면은 실효반사율을 높이기 위하여 알루미늄을 증착시킨 후 SiO<sub>2</sub> 보호막 처리를 하였다. 가공의 용이성과 측면의 이상반사를 고려하여 반구의 끝단을 10mm제거하여 완전반구보다 작게 제작하였으며 반구면경의 중심으로부터 20° 경사진 위치에 시편표면의 방사상태를 관측하기 위한 직경 30mm의 측정구를 설치하였다.

진공조내의 반구면경은 진공조 밑면에 설치된 회전축의 중심이 반구면경의 측정구 내면의 정점을 통과하는 접선과 일치하도록 하여 진공조 외부의 모터에 의한 회전운동이 반구면경에 전달되어 제한 회전하게 하였다.

모터의 1회전에 대응하여 반구면경은 1왕복을 하게 되며 반구면경의 속도가 회전계에 의하여 지시된다.

반구면경의 곡률중심에 위치한 시편은 수직으로부터

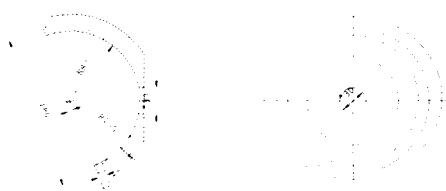
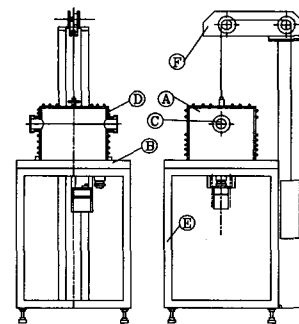


Fig. 5 Hemispherical mirror

20° 경사진 상태로 설치되기 때문에 진공상태로 하지 않으면 자연대류에 의한 시편의 상하 온도차가 생기며 고온에서는 대상물이 산화되는 등의 문제가 발생하여 정밀측정이 불가능하게 된다. 따라서 시편과 반구면경이 위치하는 부분은 로터리펌프를 이용하여 10<sup>-3</sup> Torr의 진공상태를 유지할 수 있도록 하였다. Fig. 6은 진공조의 외부 모양이다. 가열판으로 부터의 열방사를 흡수시키기 위하여 진공조의 내벽에는 흑색도료인 Dry Graphite Film을 도포하고 수냉식 벽으로 하였다.

시편표면의 방사상태를 측정하기 위한 기구는 적외선 방사계, 열화상 처리장치 및 데이터 분석용 컴퓨터로 구성되어 있다. 적외선방사계의 감지부는 HgCdTe로 측정온도의 범위는 -20~1500℃, 정밀도는 0.1℃이며 측정 파장의 범위는 8~12μm, 화상처리 속도는 30 frames/s, Line Scan 8,000 lines/s, 공간분해능은 측정거리 50cm에서 φ0.3mm이다. 적외선방사계에 의하여 관측된 시편표면의 방사상태는 열화상처리장치에 의하여 2차원 분포의 실상이 모니터에 나타난다. Fig. 7은 모니터에 나타난 측정 방사상태의 화면이다.

모니터에 나타난 2차원 분포상태는 비디오 시스템에 의하여 기록 저장된다. 비디오 시스템에 저장된 데이터로부터 E, E<sub>c</sub>, E<sub>o</sub>를 구하여 방사율을 계산할 수 있게 된다.



(A, D):vacuum chamber (B):upper plate (C):window (E):frame (F):vacuum chamber moving unit )

Fig. 6 Schematic diagram of vacuum chamber

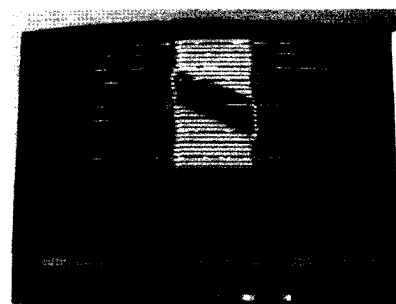


Fig. 7 Photograph of two dimensional emission power

### 4. 실험결과 및 고찰

표면거칠기는 대상물의 표면으로부터 임의로 채취한 각 부분에서의 표면거칠기를 나타내는 파라미터인 산술 평균 거칠기(Ra), 최대높이(Ry), 요철의 평균간격(Sm), 국부 산봉우리의 평균간격(S) 및 부하 길이울(tp)의 각각의 산술평균값으로 정의되어지는데(KS B 0161 ; 표면거칠기 정의 및 표시) 본 연구에서는 Ra값을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 표면거칠기 시험기는 영국 테일러홀슨사의 디지털 접촉식 측정기로 측정정밀도가 0.1 μm이다. 임의의 조도 조건을 맞추기 위하여 샌드페이퍼로 표면을 마모시켜 표면거칠기를 다르게 제작한 그라파이트, 연강 및 황동 각각 4개의 시편에 대하여 방사율 측정실험을 303K에서 373K까지의 온도영역에서 실시하였다. 측정자의 오차와 측정시의 오차를 줄이기 위하여 시편 1개당 10회 이상의 측정실험을 하여 상, 하한값을 제외하고 나머지 측정 데이터를 산술 평균하여 Table 1~3에 나타내었다.

Fig. 8~10은 각각 그라파이트, 연강 및 황동에 대하여 303K~373K까지 10K마다 방사율을 측정된 결과를 나타낸 그래프이다. 세가지 재료 모두 표면거칠기가 증가할수록 방사율이 점차 증가하고 있는데 이는 표면거칠기가 크면 열을 방사하는 표면적이 커져 방사강도가 커지는 것으로 판단된다. 또한 온도의 변화에 따른 방사율의 편차는 표면거칠기의 변화에 따른 방사율

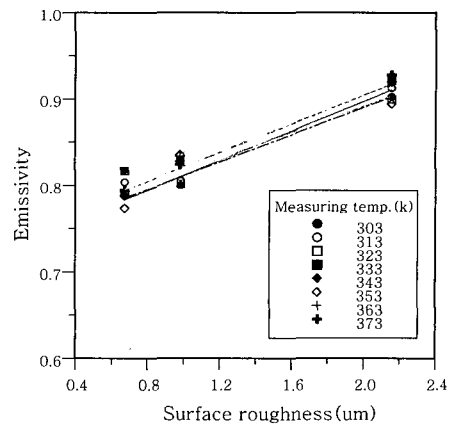


Fig. 8 Graph of the measured emissivity for graphite

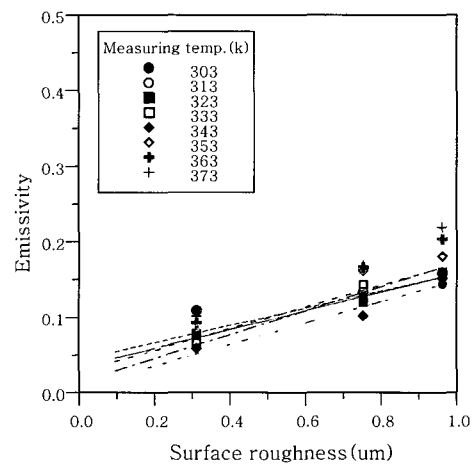


Fig. 9 Graph of the measured emissivity for mild steel

Table 1 Test result of graphite with different surface roughness

temp.(K) \ roughness(μm)	303K	313K	323K	333K	343K	353K	363K	373K
0.7	0.78906	0.8036	0.79025	0.8167	0.78748	0.77327	0.78855	0.79438
1.0	0.8001	0.80527	0.8017	0.82862	0.82774	0.83464	0.83352	0.82379
2.2	0.90191	0.91202	0.89917	0.92091	0.92666	0.89377	0.9193	0.92735

Table 2 Test result of mild steel with different surface roughness

temp.(K) \ roughness(μm)	303K	313K	323K	333K	343K	353K	363K	373K
0.3	0.10993	0.10845	0.07804	0.06534	0.05805	0.10804	0.09204	0.10101
0.8	0.12777	0.13297	0.11964	0.14309	0.10161	0.16144	0.16568	0.16792
1.0	0.14332	0.15808	0.16011	0.1572	0.15055	0.18032	0.20329	0.21932

Table 3 Test result of brass with different surface roughness

temp.(K) \ roughness(μm)	303K	313K	323K	333K	343K	353K	363K	373K
0.2	0.05061	0.036	0.11812	0.03636	0.04171	0.12859	0.06812	0.03189
0.5	0.06911	0.13538	0.10614	0.06269	0.07748	0.06341	0.06103	0.0646
1.2	0.19517	0.22183	0.14978	0.15228	0.13673	0.21755	0.19869	0.179

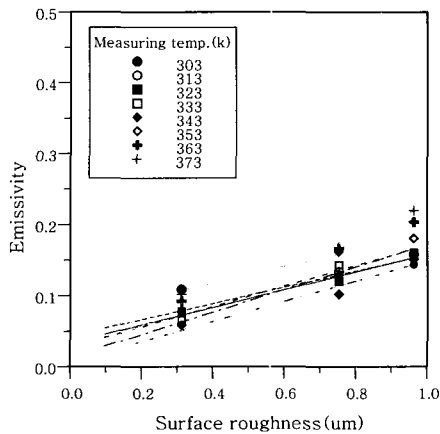


Fig. 10 Graph of the measured emissivity for brass

의 편차에 비하여 비교적 작게 나타나 재료의 표면상태가 측정온도보다 방사율에 미치는 영향이 큰 인자임을 알 수 있다. 동일온도에서 표면거칠기의 변화에 따른 그래파이트, 연강 및 황동의 방사율 변화의 정도를 비교해 본 결과 세가지 재료 모두 표면거칠기의 증가에 따라 방사율이 선형적으로 변하는 경향을 나타내며 고방사율 재료보다 저방사율 재료가 표면상태의 변화에 비교적 큰 영향을 받는 것으로 생각된다. 따라서 방사율의 정밀 측정에는 반드시 시편의 표면거칠기를 고려하여 측정온도와 표면거칠기를 측정데이터에 포함시켜야 할 것으로 판단되며, 향후 저방사율 재료에 대한 시험데이터의 정밀도 향상방법과 고온영역에서의 방사율 측정실험을 통하여 온도와 표면거칠기가 방사율에 미치는 영향에 대한 연구가 계속되어야 하겠다.

## 5. 결 론

본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 재료의 표면거칠기가 큰 값을 나타낼수록 열 방사율이 커지는 경향이 있다는 것이다. 표면거칠기의 영향은 고방사율 재료인 그래파이트의 경우에 저방사율 재료인 황동보다 더욱 크게 나타났으나, 또 다른 저방사율 재료인 연강의 경

우에는 비슷한 것으로 나타나 고방사율 재료와 저방사율 재료에 대한 표면거칠기의 영향에 대한 고찰은 좀 더 많은 재료의 측정 데이터를 근거로 추론하여야 할 것으로 생각되었다. 한편, 온도에 따른 방사율의 변화보다 표면거칠기에 따른 방사율의 변화가 더 큰 것으로 나타나 열 방사율 측정시 재료의 표면거칠기는 고려해야 할 중요한 인자로서, 열 방사율 측정조건에 반드시 재료의 표면거칠기를 제시하도록 하는 것이 재현성 있는 실험을 가능하게 할 것으로 보여진다.

## 후 기

본 연구는 2003년도 단국대학교 대학연구비의 지원에 의하여 진행되었음

## 참 고 문 헌

1. Robert Siegel and John R.Howell : Thermal Radiation Heat Transfer, John Wiley and Sons, N. Y.(1992), 11-45
2. J. C. Richmond : Measurement of Thermal Radiation Properties of Material, Compendium of Thermophysical Properties Measurement Methods, Survey of Measurement Techniques 1(1984), 37-42
3. A. Ono : A Hemispherical Mirror Method for the Measurement of Directional Spectral Emissivity of Diffuse Opaque Surface, Proc. 8th Symposium on Thermophysical Properties, 2(1982), 133~137
4. A. Ono : Evaluation of the Effective Emissivity of Reference Source for the Radiation Emissivity Measurement, Int. J. Thermophysics, 7(1986), 443~453