

퓨리에 변환 적외선 분광기를 이용한 수직 분광 복사율 측정 장치의 제작과 측정

전상호 · 유남준 · 조재홍

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
Ⓞ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

박철웅 · 박승남 · 이근우[†]

한국표준과학연구원 온도광도센터
Ⓞ 305-340 대전광역시 유성구 가정로 209 (도룡동)

(2008년 11월 10일 받음, 2008년 12월 14일 수정본 받음, 2008년 12월 16일 게재 확정)

퓨리에 변환 적외선 분광기(FT-IR)를 이용한 물질의 적외선 분광 복사율 측정 장치를 구축하고 이 장치의 성능을 평가하였다. 본 장치는 기준 흑체, 시료 가열로, 광학계, FT-IR로 구성되어 있으며, 측정 온도 및 파장 영역은 200°C ~ 500°C와 3.5 μm ~ 20 μm 이다. 기준 흑체의 유효 복사율은 0.9993 이상으로 거의 1에 가까운 값을 나타내고 있었으며, 흑체의 분광 복사율에 대한 합성 상대 불확도는 0.69% 이하이다. 300°C에서 불투명한 알루미늄, 흑연, 양극 처리된 알루미늄 시료의 수직 분광 복사율과, 금속(IMS200)의 표면 거칠기에 따른 복사율을 측정하였다. 금속(IMS200)의 표면 거칠기에 따른 복사율 변화는 거칠기가 증가할수록 증가하였다.

주제어: Blackbody, Calibration, Emissivity, FT-IR, Radiation, Infrared

I 서 론

복사는 대류 및 전도와 함께 열전달의 중요한 방식이다. 물질의 복사율은 흑체의 열복사량에 대한 물질의 열복사량의 비로써 정의된다.^[1] 복사율은 접촉식 온도 측정이 어려운 환경, 즉, 고온, 고전압 또는 고전류 환경 하에서 물체의 온도를 측정하는 경우에 그 정확한 측정값을 요구하는 중요한 물리량이다. 또한 날로 증가하는 적외선 건강보조 및 의료 기기 분야, 첨단산업인 반도체 분야, 복사에 의해서만 열전달이 이루어지는 우주환경에서의 실험 등, 많은 분야에서 물질의 정확한 복사율은 요구되고 있으며, 이에 대한 인식은 날로 증가하고 있다.^[2]

이러한 중요성에도 불구하고 정확한 복사율을 측정하는 것은 여전히 많은 어려움을 안고 있다. 예를 들면, 저온 환경에서는 대기 복사를 포함한 외부 복사의 영향이 크게 작용하고, 또한 고온 환경에서는 대류와 전도에 의한 열손실로 인해서 물질의 정확한 온도 측정에 어려움이 있다. 또한 동일 물질이라 하더라도 표면의 산화된 정도나 거칠기에 따라 복사율은 다르게 측정되며,^[3,4] 측정에 필요한 여러 장치들에 의한 위상차,^[5,6] 검출기의 비 선형성,^[7] 대기 복사의 영향, 그리고 물질과 흑체간의 동일한 환경적 배경 제공의 어려움 등은 물질의 복사율 측정에 있어 중요한 불확도 요인으로 작용한다. 이러한 어려움은 국제적인 표준 뿐 아니라 국내의 표준 정립에도 큰 장애물이 되어왔다. 특히 국내의 표준 확보의 어려움으로 원적외선 제품의 질에 대한 신뢰성도 확보되지

않았으므로, 정확한 복사율 측정은 학문적인 분야 뿐 아니라 산업적인 측면에서도 절실히 필요하며, 이에 대한 표준 확보는 시급한 실정이다.

복사율을 측정하는 방법에는 크게 calorimetric 방법^[8]과 radiometric 방법이 있으며, radiometric 방법에는 direct 방법^[9]과 indirect 방법^[10]이 있다. 최근에는 분광 복사율 측정을 위하여 퓨리에 변환 적외선 분광기(FT-IR)를 이용한 direct 방법^[1-6,11]이 주로 사용되고 있으며, 그 중 실험 장치의 교정과 대기 복사의 보정에 효과적인 two-temperature 방법^[5,6,11]이 물질의 분광 복사율을 측정에 주로 이용되고 있다.

본 논문에서는 퓨리에 변환 적외선 분광기(FT-IR)를 이용한 적외선 분광 복사율 측정 장치를 기술하고, 물질의 수직 분광 복사율 및 표면 상태에 따른 복사율 변화를 측정하였다. 측정된 파장 영역은 3.5 μm ~ 20 μm까지의 넓은 영역이고 온도 영역은 200°C ~ 500°C까지이다. 실험결과를 바탕으로, 300°C에서 측정된 알루미늄(Al₂O₃), 흑연(Graphite), 양극 처리된 알루미늄(Anodized Aluminium)의 수직 분광 복사율의 합성 상대 불확도는 3.52% 이하이다.

II. 분광 복사율 측정 장치

2.1. 퓨리에 변환 적외선 분광기(FT-IR Spectrometer)

본 연구에서 사용된 실험 장치는 퓨리에 변환 적외선 분광기를 바탕으로 광학계, 기준 흑체, 시료 가열로(sample chamber)로 구성되어 있다(그림 1).

그림 1에서 보는 것처럼 시료 가열로 내의 물질이나 흑체에서 나온 복사신호는 광학계를 지나 퓨리에 변환 적외선 분

[†]E-mail: gwlee@kriss.re.kr

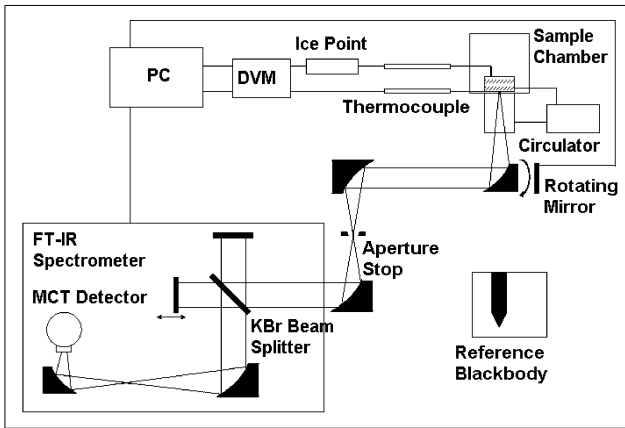


그림 1. 분광 복사율 측정 장치의 구조도.

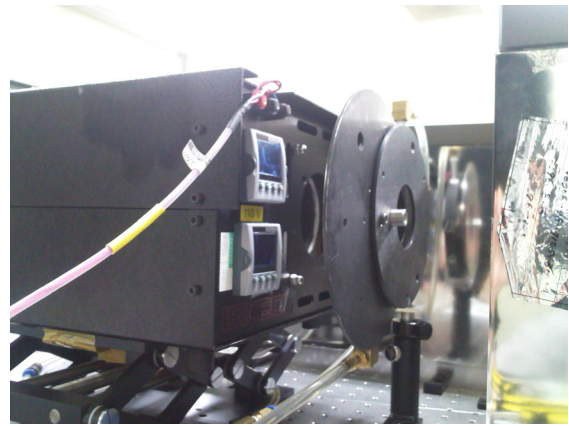


그림 2. 기준 흑체와 유효 직경 크기를 결정하는 조리개.

광기(Thermo Science, Nicolet 6700)로 입사한다. 광학계는 파장 의존성이 없고 반사율이 좋은 금으로 코팅되어 있는 3 개의 비축 포물경 거울(off-axis parabolic mirror)을 사용하였으며, 첫 번째 회전 거울에는 측정 대상을 결정할 수 있도록 회전 모터가 장착되어 있다. 회전 모터의 각 분해능은 최소 0.0024° 이상으로 회전 모터에 의한 광 경로의 차이는 무시할 정도이다. 두 번째와 세 번째 거울 사이에는 조리개가 설치되어 있어서 측정할 대상의 유효 직경을 결정할 수 있다. 이 조리개는 복사 신호의 size of source effect(SSE)^[12-15]를 결정하기 위한 것으로, 본 연구에서는 복사 신호를 관측하는 유효 직경의 최소 크기가 20 mm 이상에서는 SSE 효과가 없음을 확인하였다. 사용한 조리개의 크기는 12 mm이고 그에 따른 측정할 대상의 유효 직경 크기는 약 25 mm이다. 광학계에 의해서 퓨리에 변환 적외선 분광기로 입사한 복사 신호는 분광기 내부의 KBr beam splitter를 갖는 마이켈슨 간섭계를 지나서 MCT 검출기(Mercury Cadmium Telluride detector)에 도달하게 된다. 마이켈슨 간섭계는 입사한 전자기파(복사 신호)를 정지된 거울과 움직이는 거울에 의해 경로차를 발생시켜 간섭 신호를 만든다. 간섭 신호는 실공간(거리)에 대한 함수이며, 여러 주파수를 가진 파동들의 정보를 가지고 있다. 따라서 실공간(혹은 시간)의 신호는 퓨리에 변환을 통해 파장의 역수인 파수(wavenumber)함수로 변환되며, 파수에 따른 복사량을 얻게 된다.^[1] 신호는 액화질소로 냉각된 MCT 검출기를 통해 읽어 들이며, 측정가능 영역은 $4000\text{ cm}^{-1} \sim 400\text{ cm}^{-1}$ 이고, 최대 분광 분해능은 0.09 cm^{-1} 이다. 검출 신호는 총 64번 반복 측정되어 평균값으로 나타난다.

2.2 가열로

가열로는 기준 흑체와 시료 가열로로 구성되어 있다. 기준 흑체(ISOTECH, Gemini Model 976)는 직경과 깊이가 각각 65 mm, 160 mm이며 끝은 원뿔형태의 conical 형태이다. 또한 유효 복사율은 0.995 이상이며, $200^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 의 온도 영역대에서 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 안정성을 보인다. 흑체의 온도는 Platinum Resistance Thermometer(PRT)로 측정하였다. 흑체의 전면

는 외부 신호를 제어하고 size of source effect(SSE)와 관련된 불확도를 측정하기 위해 조리개를 설치하였다. SSE란 측정할 시료의 표면적과 검출기의 면적의 차이로 발생하는 것으로, 안정적인 측정이 가능한 유효 직경을 결정하여야 측정의 정확도를 높일 수 있다.^[14,15] SSE를 알아보기 위하여 광학계 안에 놓여진 조리개를 제거하고 흑체의 전면엔 조리개를 설치한 후, 조리개의 크기를 바꿔가며 복사율을 측정하였다(그림 2). 그리고 다시 흑체 앞에 조리개를 제거하고 광학계 사이에 조리개를 설치한 후, 조리개의 크기를 조절하여 흑체의 유효 직경 크기를 결정하였다. 조리개에 의한 잡음 신호를 최소화하기 위하여 조리개 내부에는 일정한 온도의 물을 순환시켜 상온으로 유지하였다. 두 가지 방법으로 결정된 흑체의 유효 직경 크기는 동일하며, 각각의 실험에 따른 분광 복사율은 거의 같은 값을 나타내었고, 흑체의 유효 직경 크기가 20 mm 이상일 때 안정적인 복사율 측정이 가능함을 확인하였다.

그림 3은 시료 가열로의 구조도이다. 시료의 산화 방지 및 산화 과정에 따른 복사율 측정이 가능하도록 진공과 대기 모두에서 측정이 가능하며, 진공도는 10^{-6} torr까지 조절 가능하다. 시료 고정대에는 회전 모터가 달려있어서 각도에 따른 복사율 측정이 가능하다. 시료 표면과 히터에는 각각 K형과

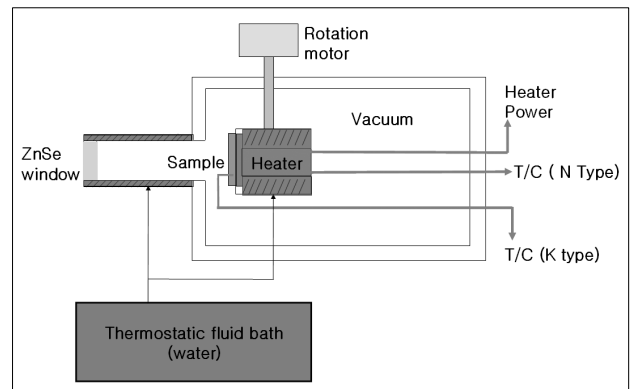


그림 3. 시료 가열로의 구조도.

N형의 열전대가 부착되어 있다. 히터의 전면에 장착된 시료의 온도는 K형 열전대로 측정하며, proportional-integral-derivative (PID) device(CHINO, DB1000)에 의한 전류 출력을 조절함으로써 시료를 지정 온도에 유지시킨다. 온도의 조절은 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 내에서 안정하였다. 시료 표면의 열전대는 측정할 영역의 외곽에 장착하였으며, 열전대 장착에 따른 열 손실을 최소화하기 위해 125 μm 두께를 가진 얇은 열전대를 사용하였다.

열전대 부근과 시료의 중심부의 온도 편차는 350°C 에서 약 0.4°C 로써, 측정시에는 이 온도 편차를 보정하여 측정하였다. 장치 입구에는 주변 복사를 조절하기 위한 원통이 설치되어 있고, 원통 전면에는 적외선 투과율이 좋은 ZnSe 창이 부착되어 있다. 원통의 내벽에는 주변 온도를 제어하기 위해 thermostatic fluid bath(Thermo, Haake phonenix 2 P1)를 사용하여 일정한 온도의 물을 순환시켰으며, 시료 표면에서 나오는 복사의 반사를 최소화 하기위해 pyromark 사의 series 2500페인트($\varepsilon > 0.95$)로 도색하였다. Thermostatic fluid bath의 물의 온도는 $10^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 까지 조절 가능하다. 따라서 주변 복사와 관련된 시료의 복사율 변화 역시 측정이 가능하며, 본 실험에서는 실험실 온도와 같은 23°C 를 유지하였다.

III. 분광 복사율 보정

일정한 온도 T 로 유지되는 불투명한 물질 표면으로부터 측정된 복사 신호는 온도와 주파수의 함수로써 식 (1)과 같이 표현된다.^[5,6,11,12]

$$S_s(\nu, T) = R(\nu)[L_s(\nu, T) + L_o(\nu) + r_s L_{sur}(\nu)] \quad (1)$$

여기서 $S_s(\nu, T)$ 는 측정된 간섭 신호로부터 푸리에 변환된 복사 신호(분광 스펙트럼)이며, $R(\nu)$ 은 검출 장치의 분광 응답 함수로, 검출기의 특성, 광학계와 실험 장치의 특성, 그리고 대기투과의 특성 등을 모두 고려한 실험 장치의 파장에 따른 응답 특성이다. 그리고 $L_s(\nu, T)$ 는 물질 표면이 복사하는 분광 복사량이며, $L_o(\nu)$ 는 물질 표면에서 복사하는 분광 복사량 이외에 측정된 분광 복사량으로써, 실험장치의 자체 복사, 대기 복사, 간섭계에 의해 역방향으로 진행되는 복사 등과 같이, 예상할 수 없는 인자들에 의해 계산된 분광 복사량이다. 마지막 항은 물질 표면에서 반사되는 대기 복사량이며, r_s 는 불투명한 물질의 반사율이다. 물질의 분광 복사율 구하기 위해서는 먼저 $R(\nu)$ 과 $L_o(\nu)$ 를 구해야 하며, 이는 기준 흑체의 분광 신호로부터 계산한다. 이때 기준 흑체는 완전한 복사체로 가정한다.

$$\begin{aligned} S_h(\nu, T_h) &= R(\nu)[L_h(\nu, T_h) + L_o(\nu)] \\ S_c(\nu, T_c) &= R(\nu)[L_c(\nu, T_c) + L_o(\nu)] \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는 two-temperature 방법이라고 하며, S_h 와 S_c 는 각각 서로 다른 두 온도 T_h 와 T_c ($T_h > T_c$)로 부터 구해진 기준 흑체의 분광 신호이다. 두 식으로부터 $R(\nu)$ 과 $L_o(\nu)$ 을 유도할 수 있으며, 두 함수는 온도에 의한 의존성이 없고 오직 파장의 함수이다.

$$\begin{aligned} R(\nu) &= \frac{S_h(\nu, T_h) - S_c(\nu, T_c)}{L_h(\nu, T_h) - L_c(\nu, T_c)} = \frac{S_c(\nu, T_c) - S_h(\nu, T_h)}{L_c(\nu, T_c) - L_h(\nu, T_h)} \\ L_o(\nu) &= \frac{S_h(\nu, T_h)}{R(\nu)} - L_h(\nu, T_h) = \frac{S_c(\nu, T_c)}{R(\nu)} - L_c(\nu, T_c) \end{aligned} \quad (3)$$

한편 식 (1)은 복사율의 정의로부터 다음과 같이 바꿔 표현할 수 있다.

$$S_s(\nu, T) = R(\nu)[\varepsilon_s L_b(\nu, T) + L_o(\nu) + (1 - \varepsilon_s) L_{sur}(\nu)] \quad (4)$$

여기서 $L_b(\nu, T)$ 는 흑체의 분광 복사량이다. 식 (3)에서 구한 $R(\nu)$ 과 $L_o(\nu)$ 을 식 (4)에 대입하면 물질의 분광 복사율 ε_s 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(\nu, T) &= \left[\frac{S_s(\nu, T) - S_c(\nu, T_c)}{S_h(\nu, T_h) - S_c(\nu, T_c)} \right] \frac{L_h(\nu, T_h) - L_c(\nu, T_c)}{L_b(\nu, T) - L_{sur}(\nu)} \\ &\quad + \frac{L_c(\nu, T_c) - L_{sur}(\nu)}{L_b(\nu, T) - L_{sur}(\nu)} \end{aligned} \quad (5)$$

그러나, 이상적인 경우를 제외하고는 증첩되는 복사 신호의 광 경로차가 0인 ZPD (zero path different)을 중심으로 간섭 신호는 비대칭으로 나타난다. 이는 주변 복사, 장치의 자체 복사, 간섭계, 광학계 등 예상할 수 없는 여러 요소들에 의해 발생하는 위상 변화에 기인한다. 따라서 간섭 신호를 푸리에 변환 할 경우 실수와 허수 모두 발생하며, 앞의 식들은 다음과 같이 표현된다.

$$S_s(\nu, T) = R(\nu)[\varepsilon_s L_b(\nu, T) + L_o(\nu) e^{i\phi_o(\nu)} + (1 - \varepsilon_s) L_{sur}(\nu)] e^{i\phi(\nu)} \quad (6)$$

여기서 $\phi_o(\nu)$ 는 비정상적인 신호의 유입에 의한 위상 변화이고, $\phi(\nu)$ 는 실험 장치와 환경에 관련된 고유의 위상이다. 비정상적인 신호의 유입이 없다고 가정하면, 결과적으로 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_s &= Re \left[\frac{S_s(\nu, T) - S_c(\nu, T_c)}{S_h(\nu, T_h) - S_c(\nu, T_c)} \right] \frac{L_h(\nu, T_h) - L_c(\nu, T_c)}{L_b(\nu, T) - L_{sur}(\nu)} \\ &\quad + \frac{L_c(\nu, T_c) - L_{sur}(\nu)}{L_b(\nu, T) - L_{sur}(\nu)} \end{aligned} \quad (7)$$

IV. 실험 결과

4.1. 기준 흑체의 복사율 측정

물질의 복사율 측정을 위해서는, 모든 물질의 복사율 측정에 기준이 되는 기준 흑체의 복사량을 정확히 측정해야 하며, 흑체의 복사율은 측정한 기준 흑체 복사량을 플랑크 복사 이론과 비교하여 구할 수 있다. 기준 흑체의 복사량을 구하기 위해서는 실험 장치의 분광 응답 함수와 배경 복사량을 먼저 구해야 한다.

그림 4는 기준 흑체의 분광 신호로부터 계산된 분광 응답 함수이다. 250°C ~ 350°C의 온도 영역에서 50°C 간격으로 측정하였다. 그림 4에서도 볼 수 있듯이 4.2 μm 부근, 5 μm ~ 7.5 μm 그리고 15 μm 부근의 파장 영역에서 잡음이 발생하였는데, 이는 대기의 H₂O와 CO₂의 흡수에 의한 결과이다. 이를 막기 위해서는 진공이나 질소 환경에서 실험이 이루어져야 되나, 본 연구에서는 대기에서 실험이 이루어졌으며, 대기 흡수에 따른 잡음은 특별한 보정없이 나타내었다. 또한 16 μm 이상의 파장 영역에서 잡음은 10 μm 이상에서 급격히 감소하는 복사량 때문에 상대적으로 신호 대 잡음비가 작아짐으로써 발생된 것으로 생각된다.

본 연구에서, 측정한 분광 응답 함수의 온도에 따른 편차는 300°C를 기준으로 4 μm와 10 μm 파장 영역에서 0.41% 이하, 그리고 17 μm 파장 영역에서 0.37%로써 실험 장치의 온도에 따른 응답 함수의 선형성은 매우 양호하다.

그림 5는 배경 신호의 분광 복사량을 나타내었다. 분광 응답 함수와 마찬가지로 250°C ~ 350°C의 온도 영역에서 50°C 간격으로 측정하였다. 배경 복사량은 식 (3)에서 정의한 것으로 구하였다. 일반적으로 배경 복사량은 음의 값으로 나타난다.^[3,11] 이것은 흑체에서 나온 복사 신호가 검출기까지 도달하는 동안 여러 외부 신호들에 의해서 위상 반전되어 모두 검출기로 입사하지 않는다는 것을 의미하는 것으로, 역방향으로 진행되는 실험 장치의 복사, 그리고 간섭계에 의해서 역방향으로 진행되는 흑체의 복사 신호 등이 주요 원인이다.^[3,11]

그림 5에서도 볼 수 있듯이 배경 복사 신호는 온도에 따라

거의 변하지 않고 있으며, 이것으로 외부 신호를 포함한 실험 장치의 온도에 따른 선형성은 아주 양호한 것을 알 수 있다. 그러므로 실험 장치의 선형성과 관련된 흑체의 복사율 측정 불확도는 매우 적다고 판단된다. 따라서 위 결과를 토대로 기준 흑체의 분광 복사량을 구하였다.

그림 6(a)는 기준 흑체의 분광 복사량과 이론값을 비교하여 나타내었고, 그림 6(b)는 측정된 분광 복사량을 플랑크 법

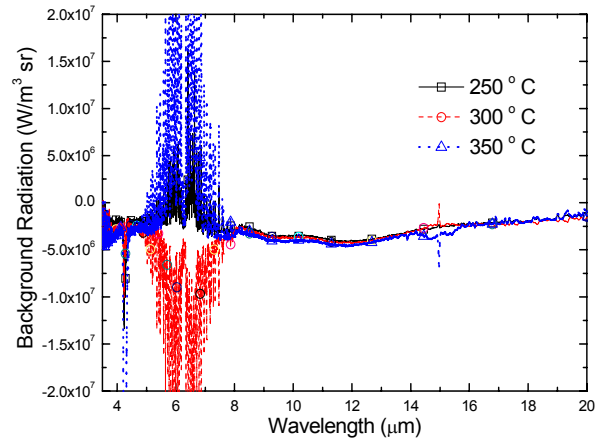


그림 5. 기준 흑체의 온도에 따른 실험 장치의 배경 복사량 $I_b(\nu)$.

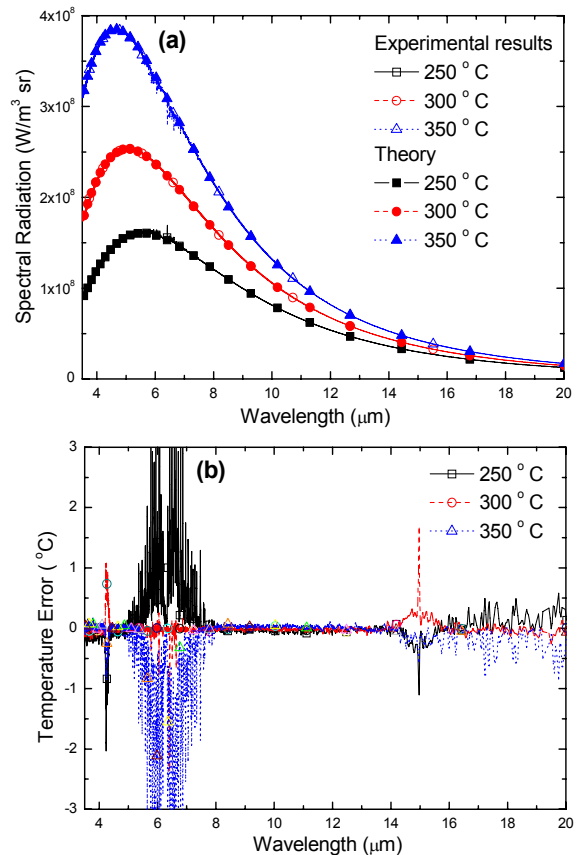


그림 6. (a) 기준 흑체의 분광 복사량과 이론값의 비교. (b) 분광 복사량으로부터 계산된 온도와 이론값의 차이.

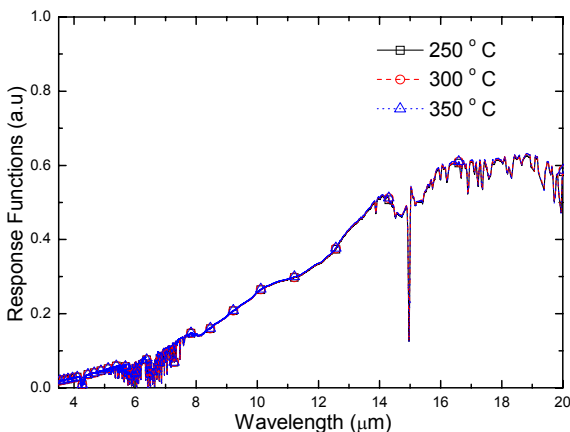


그림 4. 기준 흑체의 온도에 따른 실험 장치의 분광 응답 함수 $R(\nu)$.

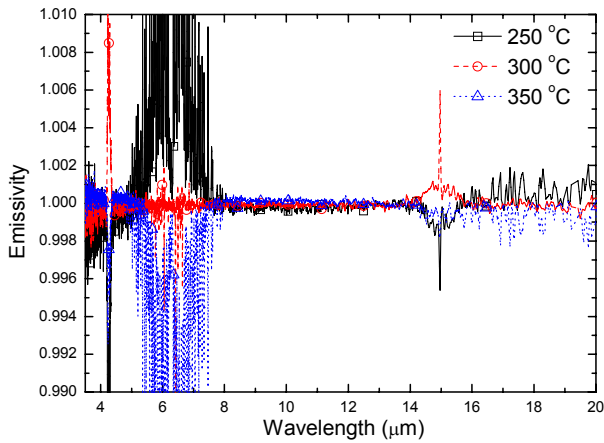


그림 7. 기준 흑체의 온도에 따른 수직 분광 복사율.

칙에 의해 온도로 계산한 값으로써, 이론값과의 차를 표시한 것이다. 대기 흡수와 신호 대 잡음비가 작아지는 파장 영역을 제외하고 온도 차이는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로써 아주 정확한 값을 나타내고 있다. 이 결과들을 토대로 기준 흑체의 분광 복사율을 그림 7에 제시하였다.

잡음 영역을 제외한 8~14 μm 파장 영역에서 기준 흑체의 유효 복사율은 0.9993 이상으로 흑체 제조사에서 제시한 0.995 이상을 잘 만족한다. 복사율의 불확도 요인은 시료와 흑체의 온도와 온도 조절의 안정성, 측정 장치의 선형성, size of source effect, 흑체와 시료의 복사량 측정상의 오차 등 여러요인이 있다. 이러한 요인을 고려하여 300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 측정한 흑체의 분광 복사율의 합성 상대 불확도는 4 μm 와 7 μm 에서 0.69% 이하이며, 17 μm 에서 0.15% 이하이다.

4.2. 시료의 수직 분광 복사율 측정

비 접촉식에 의한 물질의 온도를 측정하기 위해서는 온도와 파장에 따른 물질의 복사율을 알아야 한다. 이를 위해서 본 절에서는 산업현장에 많이 쓰이는 알루미늄 세라믹(Al_2O_3), 흑연(Graphite), 양극 처리된 알루미늄(Anodized Aluminum)의 수직 분광 복사율을 측정하였다.

측정한 시료의 직경과 두께는 각각 2 inch, 2 mm이며, 측정된 유효 직경의 크기는 약 25 mm이다. 유효 직경 크기에 기인하는 SSE에 의한 측정 불확도는 무시할 만한 값을 확인하였다.

그림 8은 측정된 물질의 분광 복사율을 기존 연구들과 비교한 것이다. 알루미늄의 경우 11 μm 의 파장 영역을 제외하고 기존연구^[12]와 거의 일치하는 값을 보였으나 양극 처리된 알루미늄은 3.5 μm ~ 7.5 μm 의 단파장 영역과 11 μm 이상의 장파장 영역에서 기존 연구^[4]와 다른 값을 나타내었다. 양극 처리된 알루미늄과 알루미늄 시료가 가장 높은 복사율 나타내는 파장 영역대에서 물질의 복사율은 문헌과 비교하여 0.8% 이내로 일치한다. 하지만 단파장 영역에서 기존 연구보다 낮은 값을 나타내었다. 일반적으로 단파장 영역은 고온의 물질이 복사하는 신호의 영향을 받는다. 따라서 측정할 영역

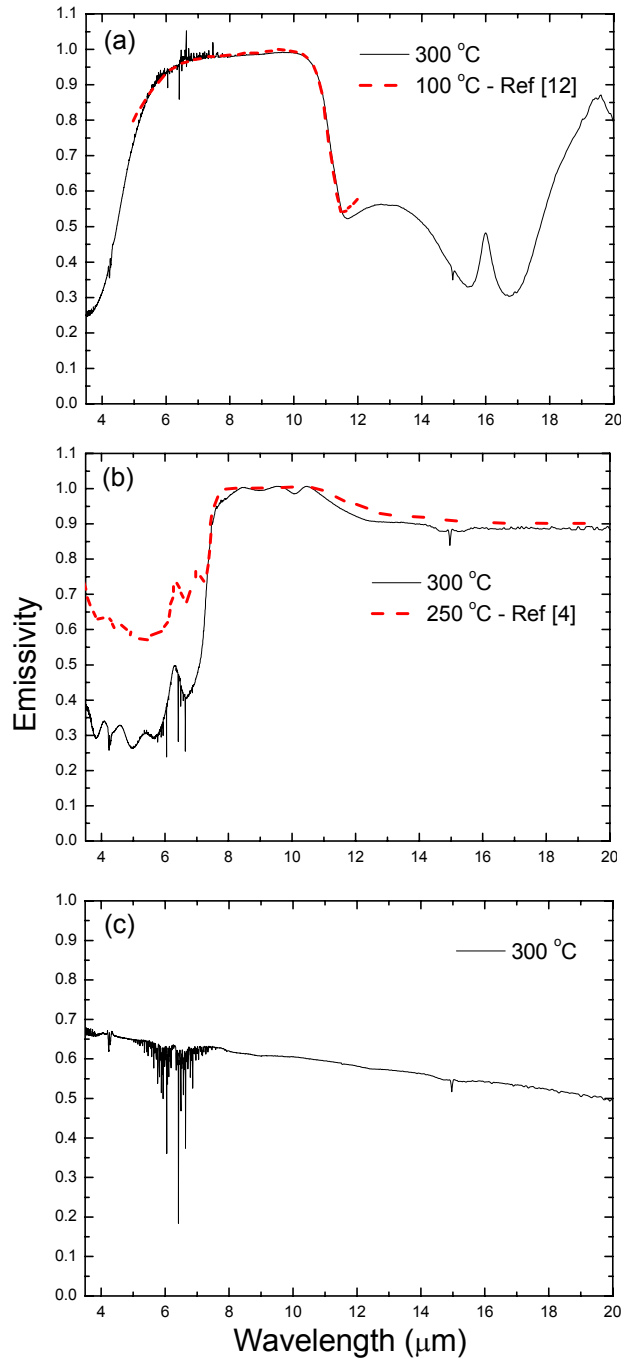


그림 8. 물질의 수직 분광 복사율.

(a) 알루미늄 세라믹, (b) 양극 처리된 알루미늄, (c) 흑연.

이외에서 나오는 고온의 신호의 영향으로 단파장 영역대의 복사율이 높게 측정될 수 있다. 본 실험의 시료 가열로는 시료의 복사가 외부 물체에 반사되어 다시 시료에 입사하여 검출기에 입사하는 것을 방지하도록 설계하였으므로, 부가적인 신호는 없다. 따라서 단파장에서 복사율 차이는 시료 가열로의 설계 차이, 또는 시료의 순도나 표면 상태에 따른 차이로 생긴 것으로 추정된다. 그리고 10 μm 이상의 장파장 영역에서는 복사량이 급격히 줄어들기 때문에 대기 복사의 영

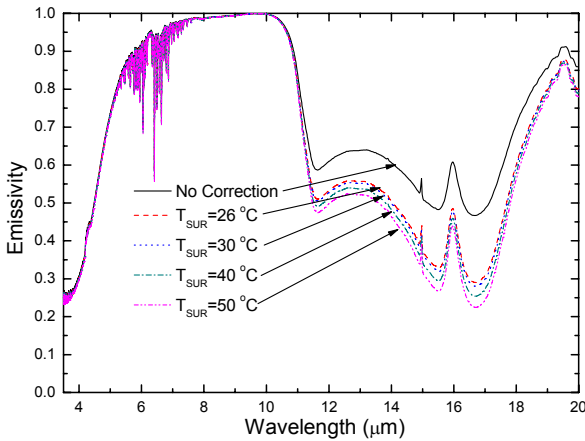


그림 9. 주변 대기의 온도에 따른 시료의 분광 복사율 변화.

향을 많이 받는다. 다시 말해서 시료의 표면에서 반사되어 검출기 안으로 들어오는 주변 신호가 측정 결과에 영향을 많이 미치게 된다. 따라서 대기 및 주변의 온도를 결정하는 것 역시 중요하다. 기준 흑체의 경우는 복사율 1로 가정하기 때문에 반사를 고려하지 않는다.

그림 9은 대기의 온도에 따른 시료의 분광 복사율의 변화를 나타내었다. 대기 복사가 장파장 영역의 복사율 측정에 있어서 중요한 요소인 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 실험실내의 온도보다는 FT-IR 내의 광 경로에서의 온도를 대기의 온도로 결정하였고, 온도는 26°C이다. 이때 대기는 흑체로 간주하여 시료 표면에서 반사되는 대기 복사량을 결정하였다. 그림 9의 결과로부터 저온 영역에서는 시료의 반사에 의한 효과가 물질의 복사율 측정에 심각하게 영향을 미칠 수 있으므로, 이에 따른 대기의 온도 측정과 대기 복사의 교정은 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

본 실험결과를 바탕으로, 300°C에서 측정할 수직 분광 복사율의 합성 상대 불확도는 알루미늄(Al_2O_3)의 경우는 4 μm , 10 μm , 17 μm 의 파장 영역에서 각각 3.0%(4 μm), 0.41%(10 μm), 3.52%(17 μm)이고, 흑연(Graphite)은 1.56%, 0.72%, 2.11%, 양극 처리된 알루미늄(Anodized Aluminium)은 3.42%, 0.53%, 1.28%이다.

4.3. 시료의 표면 상태에 따른 복사율 측정

일반적으로 물질의 복사율은 표면의 거칠기의 함수임이 잘 알려져 있다.^[3,4] 같은 매질이라 할지라도 거친 면이 낮은 반사율을 가지므로 물질의 복사율은 높아진다. 따라서 동일 매질이라고 하더라도 그 용도나 쓰임에 따라 면을 가공하는 경우가 많기 때문에 그에 따른 복사율 측정이 필요하다.

동일 시료의 표면에 따른 복사율 변화를 알아보기 위해 금속(IMS200) 표면을 입도가 각각 320, 2000인 사포와 알루미늄나 파우더(0.25 μm)로 방향을 고려하지 않고 무작위로 면 처리 하였으며, 그 표면을 광학 현미경으로 12배 확대하여 그림 10에 나타내었다. 표면의 거칠기는 국제 표준 규격(ISO)인 중심선 평균 거칠기(arithmetical average roughness: R_a)로

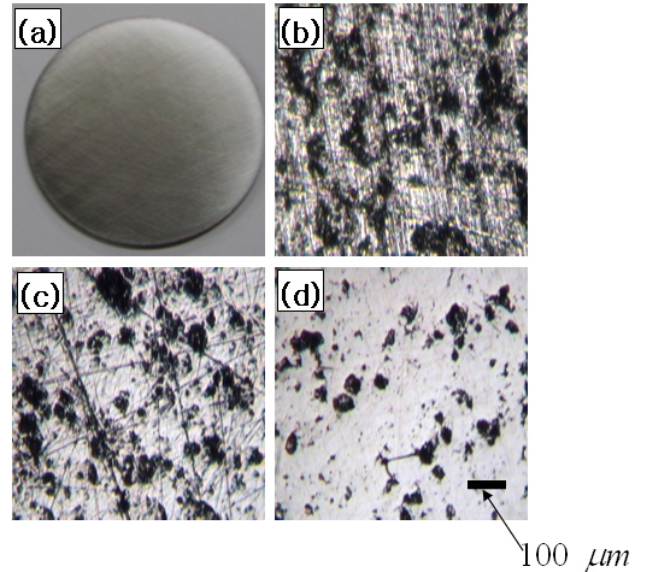


그림 10. 금속(IMS200) 시료와 표면 처리 후 확대된 사진.

[(b) 320 사포로 처리, (c) 2000 사포로 처리, (d) 0.25 μm 알루미늄나 파우더로 처리]

표 1. 각 시료의 표면처리에 따른 표면 거칠기

시료	표면 처리	표면 거칠기 $R_a(\mu m)$
그림 10(b)	사포(#320)	0.29 \pm 0.042
그림 10(c)	사포(#2000)	0.262 \pm 0.032
그림 10(d)	알루미늄나 파우더(0.25 μm)	0.157 \pm 0.071

정량화 하였다(표 1).

실험은 대기 상태에서 이루어졌으며 시료는 각각 250°C에서 25분 동안 노출하였고, 산화된 상태에서 측정을 하였다. 금속의 경우 시간에 따라 산화되는 정도가 다르기 때문에 산화에 따른 복사율 차이를 최소화 하기 위해서 세 시료의 측정시간은 ± 1 초 이내로 맞추었다. 그림 11은 산화된 금속의 분광 복사량과 분광 복사율을 측정한 결과이다. 산화된 금속의 분광 복사율은 시간에 따라 일정하였으며, 거칠기 정도에 따라 다른 값을 나타내었는데, 5 μm 파장 영역에서 부드러운 면일수록 각각 13.7% 그리고 27.8% 정도 복사량이 감소함을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 물질의 적외선 분광 복사율 측정을 위하여 퓨리에 변환 적외선 분광기를 이용한 수직 분광 복사율 측정 장치를 구축하였다. 장치는 기준 흑체와 시료 가열로로 구성되어 있으며, 안정적인 측정이 가능한 온도와 파장 영역은 각각 200°C ~ 500°C와 3.5 μm ~ 20 μm 이다. 시료 가열로는 시료가 산화의 정도에 따른 복사율 측정이 가능하도록 진공과 대기에서 모두 측정하도록 제작하였다.

기준 흑체의 복사율 측정과 더불어 직경 2 inch 두께 2

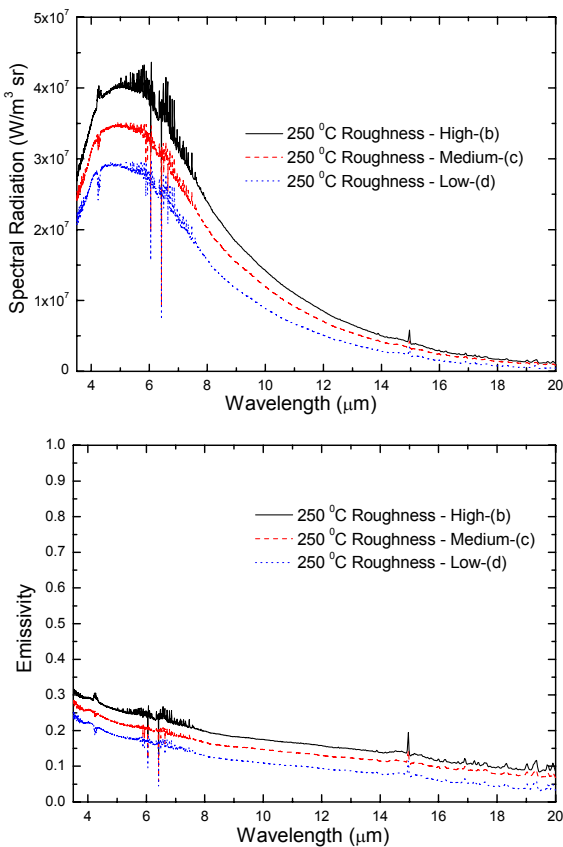


그림 11. 금속시료의 면 처리에 따른 분광 복사량과 분광 복사율.

mm인 불투명한 알루미늄, 흑연, 양극 처리된 알루미늄 시료의 수직 분광 복사율과, 금속(IMS200)의 표면 거칠기에 따른 복사율을 측정하였다. 기준 흑체의 유효 복사율은 대기 흡수 영역과 잡음 영역을 제외한 파장 영역에서 0.9993 이상으로 거의 1에 가까운 값을 나타내고 있으며, 흑체의 분광 복사율에 대한 합성 상대 불확도는 0.69% 이하로써 물질의 분광 복사율 측정을 위한 기준 복사체의 요건을 잘 만족한다. 300°C에서 측정된 알루미늄(Al_2O_3), 흑연(Graphite), 양극 처리된 알루미늄(Anodized Aluminium)의 수직 분광 복사율의 불확도는 4 μm , 10 μm , 17 μm 의 파장대역에서 각각 3.42%, 0.72%, 3.52% 이하이다. 그리고 금속(IMS200)의 표면 거칠기에 따른 복사율 변화는 거칠기가 증가할수록 증가하였다. 향후, 저온용 복사율 측정 장치에 대한 연구와 각도에 따른 물질의 복사율 변화에 대한 실험이 수행될 것이다.

참고문헌

[1] Dipl.-Ing. Lila Raj Koirala, FTIR-Spectroscopic Measurement of Directional Spectral Emissivities of Microstructured Surfaces (Helmut-Schmidt University, Hamburg, 2004), Chapter 1, 7.
 [2] Laurent Ibos, Mario Marchetti, Abderrahim Boudenne, Stefan Datcu, Yves Candau, and Jean Live, "Infrared emis-

sivity measurement device: Principle and Application," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 11, pp. 2950-2112, 2006.
 [3] Leire del Campo, Radul B. Perez-Saez, Xabier Esquisabel, Ignacio Fernandez, and Manuel J. Tello, "New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, no. 11, pp. 113111-113111-8, 2006.
 [4] Sonnik Clausen, "Spectral Emissivity of Surface Blackbody Calibrators," *Int. J. Thermophys.*, vol. 28, no. 6, pp. 2145-2154, 2007.
 [5] Akio Shimota, Hirokazu, and Shinji Kadokura, "Radiometric calibration for the airborne interferometric monitor for greenhouse gases simulator," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 3, pp. 571-576, 1999.
 [6] Henry E. Revercomb, H. Buijs, Hugh B. Howell, D. D. LaPorte, William L. Smith, and L. A. Stromovsky, "Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder," *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 15, pp. 3210-3218, 1988.
 [7] Evangelos Theocharous, Juntaro Ishii, and Nigel P. Fox, "Absolute Linearity measurements on HgCdTe detectors in the infrared region," *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 21, pp. 4182-4188, 2004.
 [8] Kola B. O., Mulwa B., and Mate P., "A transient technique for determination of thermophysical properties in an absorption calorimeter," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 7, pp. 888-892, 1995.
 [9] Siegel R. and Howell J. R, Thermal radiation heat transfer 2nd Edition (Mc Graw Hill, New York, 1981), pp. 107-151.
 [10] Stierwalt D. L., Bernstein J. B., and Kirk D. D. "Measurement of the infrared spectral absorptance of optical materials," *Appl. Opt.*, vol. 2, no. 11, pp. 1169-1173, 1963.
 [11] Raul B. Perez-Saez, Leire del Campo, and Manuel J. Tello, "Analysis of the Accuracy of methods for the Direct Measurement of Emissivity," *Int. J. Thermophys.*, vol. 29, no. 3, pp. 1141-1155, 2008.
 [12] J. Ishii and A. Ono, "Uncertainty estimation for emissivity measurements near room temperature with a Fourier transform spectrometer," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 12, pp. 2103-2112, 2001.
 [13] Leonard Hanssen, Sergey Mekhontsev, and Vladimir Khromchenko, "Infrared Spectral Emissivity Characterization Facility at NIST," *Proc. SPIE*, vol. 5405, no. 1, pp. 1-12, 2004.
 [14] Howard W Yoon, David W Allen, and Robert D Saunders, "Methods to reduce the size-of source effect in radiometers," *Metrologia*, vol. 42, no. 2, pp. 89-96, 2005.
 [15] Igor Pusnik, Goran Grgic, and Janko Drnovsek, "System for the determination of the size-of-source effect of radiation thermometers with the direct reading of temperature," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 1330-1336, 2006.

Construction and Measurement of Normal Spectral Emissivity Device using Fourier Transform Infrared Spectrometer

Sangho Jeon, Nam Joon Yoo, and Jae Heung Jo

Dept. of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

Chul Woung Park, Seung-Nam Park, and Geun Woo Lee[†]

Heat and Light Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340, Korea

[†]*E-mail: gwlee@kriss.re.kr*

(Received November 10, 2008; Revised manuscript December 14, 2008; Accepted December 16, 2008)

An Instrument to measure normal spectral emissivity is built using a Fourier Transform-Infrared (FT-IR) spectrometer. The instrument is composed of four main parts, reference blackbody, sample furnace, optics system, and FT-IR spectrometer. Measurement ranges of temperature and wavelength are 200°C ~ 500°C and 3.5 μm ~ 20 μm, respectively. Measured emissivity of the reference blackbody is greater than 0.9993 with combined relative uncertainty less than 0.69%, which can be considered an ideal blackbody. We studied the emissivity of opaque alumina, graphite, anodized aluminum, and steel (IMS 200). It is shown that emissivity increases with the roughness of the steel (IMS 200) surface.

OCIS codes: (120.5630) Radiometry; (300.6340) Spectroscopy, infrared; (300.2140) Emission.