

〈論 文〉

# 연소중 미분탄입자의 발광 스펙트럼 분석에 의한 온도와 겉보기 방사율 측정

최 상 민\*

(1990년 3월 15일 접수)

## Temperature and Apparent Emissivity by Spectrum Analysis of Light from Burning Pulverized Coal Particles

Sangmin Choi

**Key Words :** Coal Combustion(석탄연소), Spectroscopy of Flames(화염의 스펙트로스코피), Temperature Measurement(온도측정), Apparent Emissivity(겉보기 방사율)

### Abstract

Pulverized coal particles are seen with bright luminosity during the early stages of combustion when devolatilization and combustion take place simultaneously. The spectral signals from these coal particles in a nearly single particle environment have been observed over the visible and near infrared region using an optical multichannel analyzer. The system response has been checked against a tungsten strip calibration lamp after spectral calibration using a mercury lamp. Two major atomic lines of sodium and potassium are observed on top of the broad band spectrum which implies the thermal radiation at the equivalent particle temperature. The spectral response curves are reasonably matched to the Plank's distribution of blackbody emission, which indicates that the global radiating medium around the coal particle can be modeled as a gray body for the limited wavelength region of interest. The gradient-fitted pyrometric temperatures are determined at different particle residence times for typical gas flow conditions. The measured radiation temperatures are generally higher than the corresponding gas temperatures.

### 1. 서 론

석탄연소에서 가장 커다란 관심대상은 버너에서의 화염형성 여부와 미연분의 화염이탈로 발생하는 회분 중 잔류탄소의 존재여부이다. 그러나 이들 현상은 여러가지 영향인자들이 복합적으로 관련되는 종합 결과로 나타나며 각각의 변수에 대한 반응결과를 독립적으로 파악하는 것이 용이하지 않다. 한

편 석탄의 연소성향은 연소조건하에서 판정하여야 하는데 반하여 현재까지 활용하고 있는 특성분석은 연소조건과는 매우 상이한 조건에서 이루어지고 있다. 주로 사용되는 분석방법은 개략분석(proximate analysis)(ASTM D 3172-73, KS E 3705), 원소분석(ultimate analysis)(ASTM D3176-84, KS E 3712), 입자표면분석(reflectance measurement)(ASTM D 2798-85, KS E 3713) 발열량 측정(calorific value measurement)(ASTM D3286-85, KS E 3707), 회분분석(ash analysis)(ASTM D 2795-84, KS E 3716), 부풀음 지수측

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

정 (swelling index measurement) (ASTMD 720-83, KS E 3710) 등이 있다. 이들 분석방법의 샘플은 최소한 1 mg 단위로서 입자의 갯수로 환산하면 수백 이상이 좁은 용기안에 놓여 있으며 온도는 높은 경우 1250 K 정도까지 상승하게 된다. 이같은 밀폐된 용기안의 불균일한 환경조건하에서 나타내는 현상을 바탕으로 실제 연소기기에서의 성능을 유추하려는 것이 매우 어렵다는 것은 자명하다. 따라서 가능한 한 연소기기에서와 유사한 연소환경을 조성하고 여기에서 실제 입자가 경험하는 것과 유사한 온도, 농도 및 유체역학적 경로를 따라갈 수 있는 연소장치가 필요하며, 이러한 방법으로 이루어진 입자연소 실험이 실제 연소조건에서의 상태를 모사하여 나타내는 것으로 생각할 수 있다. 즉 미분탄 입자가 2000 K 전후의 연소가능 환경에 놓여 있으며 시간적으로 수 msec 이내에 휘발분 방출과 화염형성이 관측되고 있는 상황에서 단일입자(single particle)가 나타내는 거동을 파악하여 대형 연소기기 버너에서의 미분탄 확산화염거동을 예측할 수 있는 진단방법을 개발하는 것이 매우 중요한 과제이다.

본 연구에서는 소형 연소로에서 단일입자 석탄화염을 형성하고 스펙트럼 분석기를 통하여 순간적으로 입자 발광스펙트럼을 획득하고 이를 컴퓨터에서 분석하는 장치를 구성하였다. 입자로부터의 발광신호(luminous signature)를 측정하여 연소과정에서의 복사거동을 파악하여 이로부터 광학적 온도측정을 하는 방법을 보고하다. 본 논문에서는 미분탄 입자 화염의 in-situ 측정에 의한 스펙트로스코피 방법을 보고하는데에 중점이 있으므로 전형적인 화염의 스펙트럼에 의한 자료분석 방법을 제시하였고 화염조건에 따른 결과치의 변화상황은 별도로 보고한다.

## 2. 실험장치와 실험방법

연소환경에서 석탄입자의 거동을 관측하기 위한 시험로(test reactor)로서 층류 유동관 반응로를 제작하였다<sup>(1)</sup>. 이 장치로 대기압 상태에서 고온의 연소환경(온도 범위 1000~2200 K, 산소물분율 0~4%, 유동속도 0.5~2.5 m/sec)을 구성하고 미분탄 입자를 유입시킨다. 이 연소로에서는 미분탄 입자들이 서로 충분히 멀리 떨어져 있어 상호영향을 거의 미치지 못하는 단일입자 연소환경을 모사한다. 냉각수에 의하여 냉각되는 버너 케이싱안에 가득 채워진 강구를 통과한 연료공기 혼합가스는 두

께 10 mm 지름 45 mm의 다공질판을 통과하면서 화염을 형성한다. 버너의 화염표면은 다공판의 약 5 mm 후류(downstream) 위치에 생성되며 균일한 온도, 산소농도 및 유속을 나타내는 유동이 밀지름 45 mm 높이 100 mm까지 유지되는 안정된 고온의 연소 가능 환경을 구성한다. 장치의 특성과악을 위한 초기 실험으로부터  $\pm 3\%$  이내의 온도변화를 보이는 균일온도유동이 가시영역에서 열은 푸른 빛을 발하는 화염형상을 이루며 나타나고, 후류로 진행할수록 주위공기와 혼합되어 체트 형상의 혼합층(mixing layer)을 만드는 것을 확인하였다. 석탄입자가 유동에서 밝게 빛을 내면서 진행되는 궤적이 거의 직선임을 관찰할 때 층류 화염 후류조건을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

미분탄 연소실험에서는 균일한 주위조건에서 입자의 시간에 따른 연소상황 진행을 관측하는 것이 필요하다. 이를 위하여 미분탄을 이송공기(carrier gas)에 부유시켜서 입자와 입자가 서로 가까이 놓이지 않고 개별적으로 놓이도록 매우 희박한 농도로 공급을 시킨다. 이들 입자는 예혼합 화염을 따라 가면서 입자-기체간의 미끄러짐이 없이 진행하기 때문에 화염 경계면으로 부터의 거리와 평균 유체운동 속도에 기준하여 시간에 따라 변화하는 과정을 공간상 위치 차이로 관측할 수 있다(정상 상태 유동관 반응로에서 입구로 부터의 거리는 반응이 시작된 시간으로 부터의 체체 시간으로 환산이 가능하다).

이같은 입자가 고온의 연소환경에 유입된 후 시간에 따라 진행되는 과정에서 입자의 상태를 관찰하는 방법으로 입자의 발광강도(luminous intensity) 및 발광원의 크기, 입자의 형상변화(용융된 뒤 분출되는 연화물질(softened material) 포함), 채집된 입자의 외양 및 단면 조직 검사, 기체상태 생성물 농도의 시간적 변화등을 고려할 수 있다. 연소중 입자 가시화와 채집 입자의 현미경적 관찰은 이미 발표되어 있으므로<sup>(1~3)</sup> 입자발광원의 스펙트럼 분석에 관하여만 세부적으로 기술한다. 이하에서 실험장치와 실험방법 및 대표적 연소조건에서의 실험결과 그리고 이의 분석 및 평가 등에 관하여 기술한다.

화염의 분광학적 분석은 많은 연구가 이미 수행되었음에도 불구하고 아직도 여지가 많은 것으로 알려져 있다. 특별히 가스 또는 기화된 액체 연료가 아닌 액체액적 또는 고체입자의 연소에서는 알

려진 바가 많지 않은 것이 실정이다. 본 실험에서는 미분탄 입자의 연소시 발생하는 밝은 발광원의 분석에 초점을 맞추고 있다. 분광분석에서 필요한 실험설비는 크게 발광원(또는 흡수원)인 실험대상과 빛의 분광장치인 스펙트럼분광기(spectrograph) 그리고 검출장치인 검출기와 데이터 처리를 용이하게 하는 전용 컴퓨터의 성격인 OMA(광학 다채널 분석기, optical multichannel analyzer)로 구분될 수 있다(Fig. 1 참조). 본 실험에서는 미분탄 입자가 약  $100\ \mu\text{m}$  정도의 실제 크기를 갖고 있으며 연소과정을 통하여 다양한 변화를 거치면서 빛을 발하고 있는 그 자체를 발광원으로 한다. 스펙트럼분광기로는 McPherson 500 mm 단색분광기(monochromator)의 본체를 사용하고 입구측에는  $200\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$ 의 슬릿을 장착한다. 검출기는 S-21의 반응 특성을 갖는 PMT(photo multiplier tube)로 구성된 Vidicon 2차원 검출기로서 image intensifier에 의하여 일차 증폭된 후 PMT측에 도달된다 OMA는 Spektronik사의 Spectracomp WP4형으로 IBM-PC/AT 호환기종에 접속이 가능하다.

분광기 및 검출기 전체 시스템의 스펙트럼 반응도(spectral response)를 절대적으로 보정하기 위해서는 텅스텐 스트립램프를 사용한다. OSRAM사의 Wi 17/G 텅스텐램프는 제작자의 사양으로 2000 K에서  $\pm 2\ \text{K}$ 의 정확도를 표시하고 있다. 스펙트럼분광기의 격자(grating)는 고도의 분광이 가능토록 매우 많은 수의 굴곡이 패여져 있다(흔히  $600\sim 1200\ \text{grooves/mm}$ ). 이것은 분광의 정밀도는 높아지나 관찰이 가능한 전체 스펙트럼 범위가 줄어든다는 것을 뜻한다. 본 실험에서는 가능한한 전

체 가시광선 영역과 가까운 자외선 및 적외선을 한꺼번에 관찰하고자 하는 목적으로 특별히  $20\ \text{grooves/mm}$ 의 격자를 제작하여 사용하였다. 검출기 예서는 약  $100\sim 1250\ \text{nm}$  범위의 파장을 관측할 수 있으나 PMT와 image intensifier의 양자효율(quantum efficiency)이 적외선 부분에서 급격히 낮아지는 관계로 감응도(sensitivity)에 문제가 없는 영역은  $350\sim 850\ \text{nm}$ 로 판단되었다.

화염에서의 분광분석을 통하여 검출 신호의 파장을 보정할 수 있다. 화염으로부터 일반적인 흑체복사와 함께 매우 강한 스펙트럼 라인들이 확인되고 있다. 특별히 OH, CH,  $\text{C}_2$  등의 분자 스펙트럼과 Na 및 K의 원자스펙트럼이 매우 강한 라인을 형성한다(Table 1 참조). 한편 수은램프를 이용하면 정확한 라인보정(line calibration)에 훨씬 도움이 된다.

2차원 Vidicon 카메라를 이용하면 1차원같이 방향의 발광원에 대하여 스펙트럼을 관찰할 수 있다. 그러나 스펙트럼분광기 거울의 astigmatic aberration을 보상하기 위하여 입구측의 광학렬(optical train)을 매우 신중하게 정렬하여야 한다. 분광사진기의 정확한 f# 및 초점거리를 확인하기가 어려우므로 이 작업은 상당부분 시행착오(trial-and-error)에 의존할 수 밖에 없다. 본 실험에서는 30 cm 초점의 구면 오목거울을 통하여 발광원을 스펙트럼분광기 입구 슬릿에 조사시키며 이때 거울축과 스펙트럼분광기축을 스큐우(skew)시킴으로서 가능하였다. 공간상에서 움직이는 미소입자로 부터의 발광신호를 순간적으로 취득하여 분광분석을 하기 위하여는 OMA의 적분시간을 매우 낮게 조정하여야 한다. 또한 이때의 시그널이 진정 입자로 부터 나온 것인가를 확인하기 위하여 가시화 장치와 연동하여 관찰할 수 있다(이를 위하여 trigger generator와 image capture device의 signal을 연결시키고 delay generator를 통하여 이로부터 일

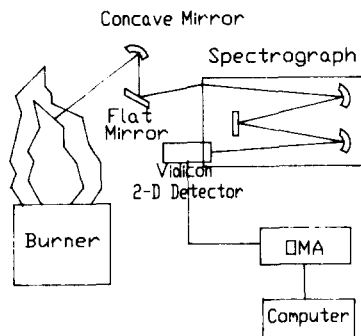


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for spectroscopic measurements

Table 1 Most strong molecular and atomic lines

Wavelength (nm)	Source identification
306.4	OH
431.5	CH
561.5	$\text{C}_2$
589.0/589.6	Na
766.5/766.9	K

정시간의 delay 후에 OMA의 signal trigger을 작동시키는 등의 조작이 필요하다).

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험에 들어가기 전에 스펙트럼분광기의 파장을 보정하기 위하여 수은 전등을 이용하여 스펙트럼을 검색하였다. Fig 2.에 보여주는 바와 같이 여러개의 선 스펙트럼이 파장별로 나타나 있다. 격자 분광기의 특성상 파장은 선형적으로 분광되게 되어 있으므로 검출기 열(detector array)의 번호와 연관지어서 각 검출기 요소의 중심 파장수를 정할 수 있다. 이 방법으로 계산된 파장은 검출소자 번호 1번에서 129.8 mm로부터 500번에서 118.8 nm까지 각각의 화소(pixel) 사이의 간격이 2.386 nm가 되도록 결정되었다. 종축으로 나타낸 검출기의 출력은 빛의 강도에 따른 선형도(linearity)는 확인되었으나 감응도 등을 고려하지 않은 값으로 상대적 크기만이 의미가 있는 상태이므로 임의의 단위(arbitrary unit)라고 표기하였다. 또한 석탄입자가 없는 순수 메탄 공기 예혼합화염으로부터도 발광 스펙트럼을 관측할 수 있다. OH, CH, C<sub>2</sub>의 대표적 선 스펙트럼이 관측되었으며 이들의 강도는 각각 분자의 농도에 비례하기 때문에 화염상태의 변동에 따른 상대적 농도를 비교할 수 있다. C<sub>2</sub> 및 CH는 화염의 연료 공기 당량비(equivalence ratio)가 연료과잉 쪽으로 진행할 수록 높은 농도를 나타내며 OH는 온도 상승에 따라 높은 값을 나타내게 되므로 당량비가 1근처에서 가장 강하게

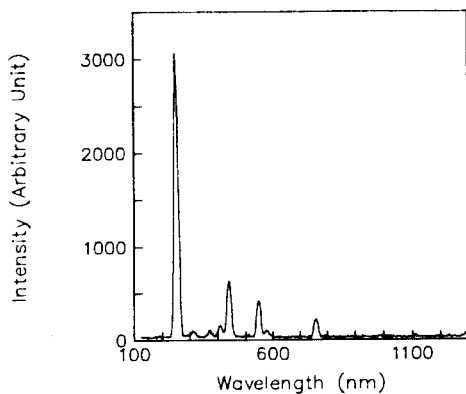


Fig. 2 Spectrum of mercury lines. Note the wide dispersion of lines due to the poor wavelength characteristic of the spectrograph system

나타나게 된다. 이와같은 상대농도 변화를 통하여 화염의 특성과 스펙트럼분광기 및 검출기의 특성을 파악할 수 있었다.

스펙트럼분광기와 검출기의 파장별 응답 특성을 알기 위하여 텅스텐 리본 전등을 이용하여 보정을 하였다. 텅스텐 리본 백열등에 일정전류를 통과시키면 이때 나타나는 빛의 밝기가 정해진 온도에서의 Plank의 복사분포에 파장별·온도별 방사율을 고려한 스펙트럼 형태로 나오게 된다. 그러나 검출시스템의 파장별 응답특성이 균일하지 않기 때문에 검출기의 결과는 두 특성의 곱의 형태로 나타난다. Fig. 3은 백열 텅스텐 램프의 밝기온도(brightness temperature)가 2586 K일 때의 검출기 출력 결과이다(이 온도에서 램프제작자의 밝기가 보증된다). 여기에서 보는 바와 같이 약 300 nm에서부터 900 nm까지 신호가 검출된 것을 알 수 있다. 이것은 300 nm이하의 자외선 부분에서는 상당 온도에서의 스펙트럼이 광도가 매우 낮아서 검출되지 않은 것이고 또한 900 nm이상의 영역에서는 검출기의 양자효율(quantum efficiency)이 적외선 영역에서 매우 낮아서 높은 광량에도 불구하고 검출신호를 보여주지 않기 때문이다. 이 스펙트럼으로부터 상당 온도의 흑체복사 방정식과 비교하여 검출기 시스템 전체의 결보기전체이득(apparent overall gain)을 계산할 수 있으며 이 값(실제로는 각각의 화소(pixel)에 따른 이득을 나타내는 1×500의 행렬표)을 갖고 차후의 정량적 환산과정에서 사용하게 된다.

석탄 입자가 보급되는 화염조건에서 관측된 원시

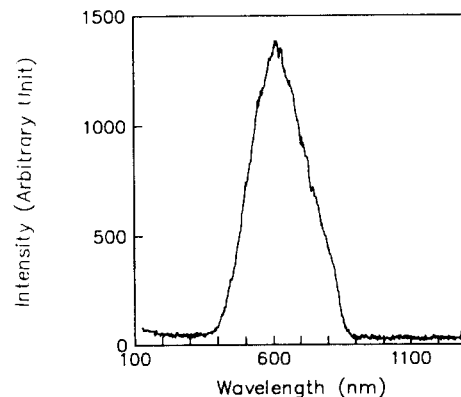
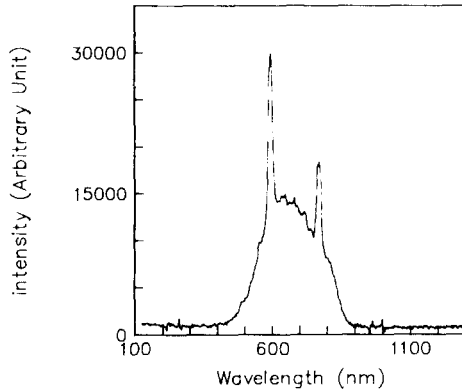


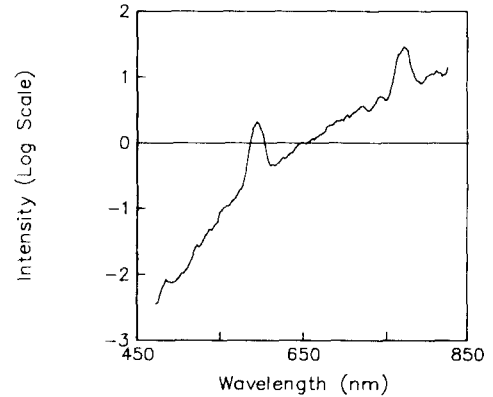
Fig. 3 Spectrum of tungsten lamp at the brightness temperature of 2586 K



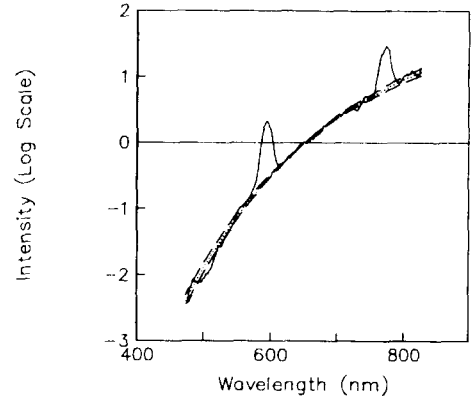
**Fig. 4** Typical spectrum of pulverized coal particle flame. This particular spectrogram was obtained from the gas environment of 4% O<sub>2</sub> and nominally 1800 K

스펙트럼의 전형적인 예를 Fig. 4에 도식적으로 보여주고 있다. 여기에서 입자가 없는 경우에는 상대적으로 OH, CH, C<sub>2</sub> 등 분자라인들이 매우 선명하게 나타났었으며 미분탄 입자가 존재하는 경우에는 훨씬 높은 수준의 전반적 복사(broad band radiation) 신호가 나타나며 특별히 Na가 K의 원자 스펙트럼 라인이 매우 선명하고 높은 강도로 보여지고 있다. 이는 석탄입자에 약 0.1~0.5% 정도의 Na과 K가 회분의 형태로 포함되어 있다는 것을 상기할 때 자명한 일로 받아들여진다. 단지 전체 파장을 관찰하기 위해서 스펙트럼 파장의 분해도가 낮아졌기 때문에 확실한 double-peak를 볼 수 없는 것을 기억할 필요가 있다(Na과 K의 원자선 발광은 Table 1과 같이 2개의 정점을 갖고 있다).

앞에서 거론한 바와 같이 원시 스펙트럼은 검출기의 감응도 이득이 곱해진 결과이므로 절대적인 광량의 비교를 하기 위해서는 화소별(파장별) 이득을 고려하여 환산하여야 한다. 이같이 환산된 스펙트럼을 유효감응도 파장영역인 450nm로부터 850nm까지의 범위에서 반-로그 그래프로 나타낸 그림이 Fig. 5이다. 횡축은 스펙트럼의 650nm에서의 값을 기준으로 정상화(normalize)하여 밝기 비교 강도값이 영이 되도록 조정하였다. 검출기 이득이 고려되어 환산된 절대 강도는 가시영역 파장내에서 만도 지수 기준으로 3배까지 변화하는 것을 볼 수 있다. Na과 K의 선(line) 스펙트럼이 관측되고 있으나 로그 그래프의 특성 때문에 Fig. 4에서와 비교할 때 상대적으로 낮은 변화를 나타내는 것도 흥



**Fig. 5** Gain corrected intensity curve. The spectrum of Fig. 4 was corrected in accordance with the spectral gain of the system



**Fig. 6** The measured spectrum and the spectra of a gray body at the temperatures of 2070-50, 2070, 2070+50 K

미롭게 관측된다.

이와 같은 광역(broad band)스펙트럼은 열복사를 나타내는 것이므로 이를 통하여 상당(equivalent)온도를 계산하고 연소중간생성물의 존재여부를 진단할 수 있다<sup>(4~13)</sup>. 흔히 사용되는 이색광온도(two color pyrometric temperature)는 대상물체를 회색 방사체로 가정하며 또한 그점에서의 강도만을 비교하기 때문에 무작위오차(random error)에 따라서 심각한 측정오차를 나타내는 등의 단점이 있다. 이들 단점을 보완하기 위하여 기울기 맞춤 복사온도법(gradient fitted pyrometric method) 및 최소자승 맞춤온도법(least-square-fitted pyrometric method)을 적용하여<sup>(17)</sup>온도를 계산하였으며 이때의 결과를 Fig. 6에서 보여주고 있

다. 그림에서는 Fig. 5에서 보여주었던 스펙트럼으로부터 650 nm를 기준으로 하여 각각의 온도에 따라 기울기가 변화하는 스펙트럼을 끼워 맞추므로 가장 완벽하게 일치하는 온도를 계산하는 것으로 이해할 수 있다. 점선으로 나타내어진 것이 계산된 광온도(이 경우 2070.6 K로 계산되었으며 불확실성을 고려하여 유효숫자를 2070 K와 같이 제한하는 것이 적절한 것으로 판단됨)에서의 회색 발광곡선이다. 또한 채선으로 표시된 것은 2070.6 K를 기준으로  $\pm 50$  K의 값에서의 회색체 스펙트럼으로서 측정 스펙트럼으로부터 계산된 온도의 오차범위를 관찰하기 위하여 표시하였다. 여기에서 측정결과와 계산된 회색체 스펙트럼이 매우 만족스럽게 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 보는바와 같이 국부적으로는 오차가 있으나 450~850 nm의 파장영역에서 측정된 스펙트럼이 주어진 온도에서 파장에 따른 Plank 분포곡선으로 나타내지는 계산결과와 비교되고 있음을 알 수 있다. 이로써 전체 가시광선 영역에서 발광체가 회색체(또는 흑체)와 같이 거동하고 있는 것으로 오차를 무시한 채 개괄적으로 판단할 수 있다.

Fig. 6에서의 관찰을 통하여 발광체가 전반적으로 회색체의 특성을 갖고 있음을 보았으나 세부적으로 관찰하면 측정치와 완벽하게 일치하지는 않는 것도 또한 알 수 있다. 여기에서 나타나는 차이를 겉보기 표면 방사율로 정의하여 나타낼 수 있다. Fig. 7에서 650 nm의 방사율을 1이라고 가정하였을 때 각 파장에서 겉보기 표면 방사율을 나타내어 주고 있다. 겉보기 방사율의 값은 파장에 따라서 변

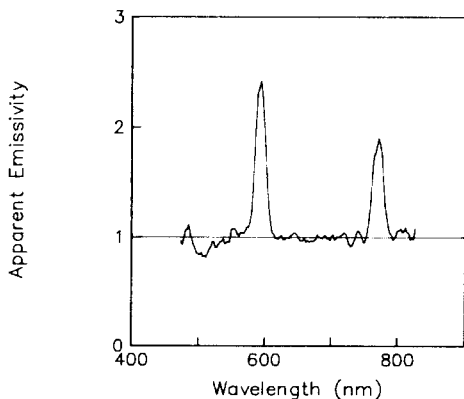


Fig. 7 Apparent emissivity curve as a function of wavelength

화하며 전반적 검사 파장 영역에서(Na과 K선 방사를 제외하) 1에서 크게 벗어나지 않으나 국부적으로는 일정하지 않음을 관찰할 수 있다. Na와 K의 원자 선스펙트럼 부분은 파장영역에서 볼 때 매우 좁은 영역에서만 나타나야 하지만 앞에서 지적한 바와 같이 스펙트럼분광기 시스템의 파장분해능력이 열등한 관계로 넓게 퍼져 있는 것으로 (dispersed) 보인다. 여기에서 나타나 있는 표면 방사율을 검토하면서 입자화염의 분석시에 복사 성능을 파악할 수 있다. 전반적으로 가시영역과 근적외선 부근에서 선 스펙트럼을 제외하곤 겉보기 방사율이 거의 일정하다는 것은 화염특성연구에 중대한 의미를 부여하는 것으로 판단된다. 또한 반복적인 실험의 체계적 분석을 통하여 평균 방사율을 구하는 작업도 중요하다. 한편 이전까지의 미시적 계산모형 연구에서 입자와 입자외곽의 휘발분 화염의 복사성능 등이 거론되었던 적이 있으나 (예를 들어 참고문헌(2) 등) 실증적 자료는 보고된 바가 없다. 그러나 본 연구에서의 결과만으로 미시적 복사열전달 모형에서 필요로 하는 모든 특성인자들의 완전한 규명이 가능하지 않으며 상당수준 진전되어 있는 수학적 모형을 현실적으로 활용하기 위하여는 앞으로 이 부분의 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

연소중 미분탄 입자의 발광 스펙트럼 분석을 통하여 온도 예측이 가능 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입자 발광스펙트럼에는 Na과 K의 원자 선 발광이 매우 강렬하게 나타나고 있다. 특별히 Na선이 가시영역에서 강하게 나타나는 결과로 입자가 노란색으로 밝게 빛나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이들 선 방사(line emission)와 함께 전가시영역 파장에 걸쳐서 열복사(thermal radiation)에 의한 방사가 나타나고 있다. 열복사의 스펙트럼은 일반적으로 회색체의 성격을 띄고 있으나 국부적으로는 오차가 상당히 클 수 있다.

(2) 발광원의 파장별 강도로부터 상응하는 복사 온도를 계산하였다. 증폭기의 이득을 고려하여 계산한 참 복사강도의 로그 그래프로 부터 일정 파장에서의 기울기를 계산하여 온도를 예측하는 기울기 맞춤 복사온도측정법이 적용되었으며 이의 효과적

인 응용예가 됨을 보여 주었다.

(3) 측정된 복사온도는 주위 기체의 온도보다 일반적으로 높게 나타났다. 연소환경에 주입된 입자가 가열된 후 휘발과 연소가 동시에 일어나는 초기 과정에서 발광원 분석으로 구해진 온도가 기체 온도보다 높다는 것은 복사 열전달의 관점에서 매우 중요하다.

(4) 미분탄 화염의 발광스펙트럼으로 부터 구한 상당 결보기 방사율을 기준 파장에 대한 비율로서 표시하였으며 가시영역 파장내에서는 전반적으로 회색체의 성향을 보이지만 구체적인 수치값은 매우 큰 변이를 보였다. 반복적인 실험의 체계적 분석을 통하여 평균 방사율을 구할 수 있을 것으로 보이며 이 부문은 계속적인 실험이 진행중에 있다.

(5) 발광원의 정확한 근원을 확인하기 위하여는 더 많은 연구가 진행되어야만 한다.

## 후 기

본 연구 및 후속과제의 진행에는 (주)한국전력공사 기술연구원(발전연구실)으로 부터의 재정적 지원이 많은 도움이 되고 있으며 관계자 여러분에게 사의를 표합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 한재현, 최상민, 1989, "연소중 미분탄의 단면관측", 대한기계학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 717~725.
- (2) Choi, S and Kruger, C. H. 1985, Modeling Coal Particle Behavior under Simultaneous Devolatilization and Combustion, Combustion and Flame, 61, 11~144.
- (3) Choi, S., 1989 "A Scenario of Volatile Cloud Formation during the Simultaneous Devolatilization and Combustion Stage", A Paper Presented at the 6th Korea-USA Joint Workshop on Coal Utilization Technology, Seoul, Korea.
- (4) Altenkirch, R.A., Mackowski, D.W. and Tong, T. W. 1984, "Effects of Soot on Pyrometer Measured Temperatures in Pulverized-Coal Flames," Combustion Science and Technology, Vol. 41, pp. 327~335.
- (5) Best, P.E., Carangelo, R.M. and Solomon, P.R. 1984, "FT-IR Determination of Coal and Soot Particle Temperature during Pyrolysis", Americal Chemical Society, Div. of Fuel Chemistry, Preprints, Vol. 24.
- (6) Chen, M-R, Fan, L.S. and Essenhigh, R. H. 1984, Prediction and Measurement of Ignition Temperature of Coal Particle, 20th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1513~1521.
- (7) Gat, N., Cohen, L.M. Witte, A.B. and Denison, R.M. 1984, "Ash Loss and the Seeded-Tracer Technique for the Determination of Mass Balance in Rapid Heating Coal Pyrolysis Experiments", Combustion and Flame, 57, 255~263.
- (8) Gururajan, V.S., Wall, T.E. and Truelove, J.S. 1988, "The Combustion of Evolved Volatile Matter in the Vicinity of a Coal Particle-An Evaluation of the Diffusion Limited Model," Combustion and Flame, 72, 1~12.
- (9) Mclean, W.J., Hardesty, D.R., Pohl, J.H. 1980, "Direct Observation of Devolatilizing Pulverized Coal Particles in a Combustion Environment", 18th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1239~1246.
- (10) Saggau, B., 1984, "Temperature Profile Measurements at Head-on Quenched Flame Fronts in Confined CH<sub>4</sub>/Air and CH<sub>3</sub>OH/Air Mixtures, 20th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1291~1297.
- (11) Seeker, W.R., Samuelson, G.S., Heap, M.P., and Trolinger, J.D., 1980, "The Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles," 18th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1213~1216.
- (12) Tichenor, D.A., Michell, R.E. Hencken, K.R. and Niksa, S. 1983, "Simultaneous In-situ Measurement of the Size, Temperature, and Velocity of Particle in a Combustion Environment." 20th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1231~1221.
- (13) Timothy, L.D., Sarofim, A.F. and Beer, J.M. 1982, Characteristics of Single Coal Combustion, 19th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1123~1130.
- (14) Choi, S., 1990, Evaluation of Temperature Measurement Techniques from the Broad Band Thermal Radiation, in Preparation.