

[Research Paper]

## 이색법을 이용한 액적 확산 화염의 온도 측정에 관한 연구

이종원 · 김연규 · 박설현\*<sup>†</sup>

한국항공우주연구원 항공우주응용재료팀, \*조선대학교 기계시스템·미래자동차 공학부

### A Study on Temperature Measurements of Droplet Diffusion Flame using a Two Color Method

Jong-Won Lee · Youn-Kyu Kim · Seul-Hyun Park\*<sup>†</sup>

Aerospace Application and Materials Research Team, Korea Aerospace Research Institute (KARI)

\*School of Mechanical System and Automotive Engineering, Chosun University

(Received April 10, 2017; Revised June 10, 2017; Accepted July 10, 2017)

#### 요 약

본 연구에서는 화염 내에 생성된 그을음 입자가 방사하는 복사 강도 분포를 측정하고, 이를 바탕으로 Jet A1 액적 확산 화염의 온도 분포를 예측하였다. 이를 위해서 700 nm와 900 nm 각각의 파장에 대해서 화염 내 그을음 입자가 방사하는 복사 강도를 CCD 카메라로 측정하였고 Abel 변환을 통해 얻어진 국소 복사 강도 분포를 이색법(Two Color Method)에 적용하여 최종 화염의 온도 분포를 계산하였다. 그 결과 이색법에 의한 측정은 그을음의 복사 강도와 투영된 시각선의 간격에 따라서 약 2% 정도 이내의 deconvolution 오차가 발생할 수 있으며, 본 연구 결과에서 제시한 측정 방법을 통해 2000 K 기준 약 18 K 오차 범위 이내에서 화염온도 예측이 가능함을 확인하였다.

#### ABSTRACT

In the present study, the temperature distribution of droplet diffusion flames was predicted from the measurements of radiative emissions of soot particles formed. In order to predict the temperature distributions, the radiative emissions from soot particles filtered at both 700 nm and 900 nm were measured using CCD cameras and local emission distributions within the flame deconvoluted with Abel transformation were plugged into a two color method. The experimental results obtained from the present study demonstrate that the two color method as tool for temperature measurements is feasible but can introduce approximately 2% maturement errors in a deconvolution process depending on intervals for the line of sight. The estimated error in temperature measurements was found to be within 18 K at 2000 K.

**Keywords :** Two Color Method, Flame Temperature, Abel Transformation, Deconvolution, Droplet Flame

### 1. 서 론

액체연료는 저장이 편리하고 수송이 용이하여 전 세계적으로 생산량과 소비량이 꾸준히 증가하고 있다.<sup>(1)</sup> 액체연료의 소비는 발전, 난방, 수송 등 다양한 분야에서 연소를 통해 이루어지며, 연소기에 주입되는 액체연료는 대부분 노즐을 통해 액적(Droplet)의 형태로 공급된다. 특히, 다양한 분야에 적용될 수 있는 효율적인 연소기를 제작하기 위해서는 직·간접적으로 화염 온도를 정확히 측정하여 매연을 비롯한 각종 오염 물질의 생성과 산화 메커니즘을 분석하는 것이 매우 중요하다. 연소기 내부의 화염 온도를 정확히 측정하기 위한 가장 대표적인 방법으로는 Coherent anti-Stokes Raman

Spectroscopy (CARS), 열전대, 복사 온도계 기법 등이 사용되고 있다. CARS의 경우 비접촉식으로 고온에서 정확도와 신뢰도가 우수하나 고가의 측정 장비와 신호해석의 어려움이 있어 보편적으로 사용하기 힘든 단점이 있다.<sup>(2)</sup> 열전대는 접촉식으로 비용이 적고 사용방법이 간편하지만 사용 환경에 따라 복사 열손실, 전도 열손실 등을 통해 여러 가지 측정 오차가 발생하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서, 접촉식 열전대 온도 측정의 대안으로 열적 내구성이 강한 Silicon Carbide (SiC) 섬유를 화염에 삽입하고 섬유에서 발생하는 복사광을 측정하여 플랑크 법칙(Planck's law)을 바탕으로 온도를 측정하는 방법이 널리 사용되고 있다.<sup>(3,4)</sup> 하지만 이 방식 역시 보정 기법에 따라 측정 오차의

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: isaac@chosun.ac.kr, TEL: +82-62-230-7174, FAX: +82-62-230-7171

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

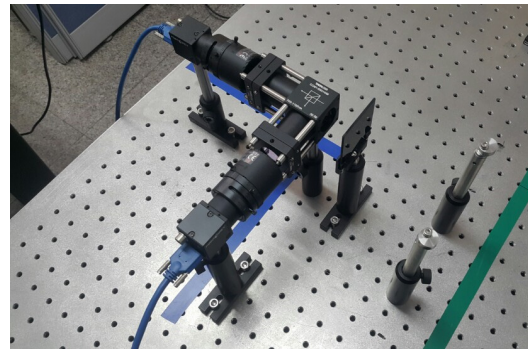
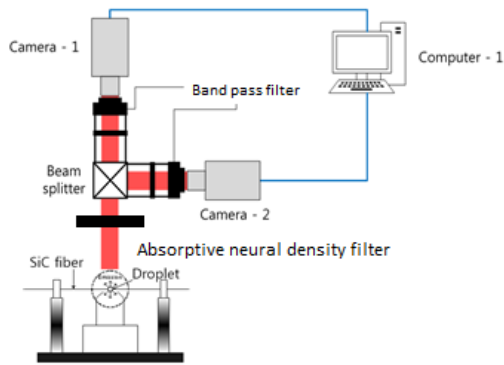


Figure 1. Experimental configuration for droplet flame temperature measurements.

편차가 크고, 화염 내부에 매연이 발생하는 경우 사용이 제한되는 단점이 있다.<sup>(5)</sup> 복사 온도계는 매연 입자의 복사광을 이용하여 화염온도를 측정할 수 있지만 매연 입자의 방사율을 알아야 하고 공간 분해능이 없는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 서로 다른 파장에서 방사되는 매연 입자의 복사광을 동시에 측정하고 플랑크 법칙에 적용함으로써 방사율에 독립적인 방식으로 화염의 온도를 예측할 수 있는 비접촉식 온도 측정법인 이색법(Two color method)에 관한 연구를 수행하였다. 특히, 복사광을 측정하는 CCD 카메라에 투영된 강도를 Deconvolution하여 화염 내 국소 온도 분포를 계산하였으며, 이와 관련된 측정 오차를 분석해 보고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 측정 방법

액적 화염에서 발생하는 복사 강도를 측정하기 위해 Figure 1에 도시되어 있는 것과 같은 광학계를 구성하였다. 복사 강도를 측정하기 위해서는 최대 프레임 획득 수가 120 fps인 CCD 카메라 2대가 그림에서와 같이 서로 직각을 이루도록 설치하였다. 카메라의 선단에는 중심 파장이 각각 700 nm와 900 nm인 대역 필터(Band pass filter)가 설치되어 있으며, 그 앞 쪽에는 빔 스플리터(Beam splitter)를 장착하여 각각의 카메라로 화염의 이미지가 전달되도록 하였다. 아울러, 카메라를 통해 PC에 저장되는 액적 화염의 이미지가 적절한 휘도 값을 유지할 수 있도록 흡수식 중립필터(Absorptive neural density filter)를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 액체연료는 Jet A1이며 2개의 포트 사이에 걸쳐 있는 SiC 섬유에 액적 형태로 맺히도록 하였다. Jet A1 액적이 맺힌 SiC 섬유의 직경은 15 μm로 매우 작아 점화 직후 발생된 화염과 섬유 간의 열전도를 통한 열손실은 무시할 수 있다.<sup>(6)</sup>

흑체의 복사 강도는 플랑크 법칙에 의해 식(1)으로 표현할 수 있다.<sup>(2,5)</sup>

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = 2hc_0^2 \lambda^{-5} (\exp(hc_0/\lambda kT) - 1) \quad (1)$$

식(1)에서 각각 λ는 파장, T는 온도, h는 플랑크 상수, k는 볼츠만 (Boltzmann) 상수 이고, c<sub>0</sub>는 진공에서 빛의 속도 (2.998 × 10<sup>8</sup> m/s)이다. 특정한 온도(T < 2500 K)에 대해서 플랑크 법칙은 Wien의 법칙으로 근사화할 수 있고, 비 흑체의 복사 강도를 식(2)와 같이 표현 할 수 있다.<sup>(2,5)</sup>

$$I(\lambda, T) = \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (2)$$

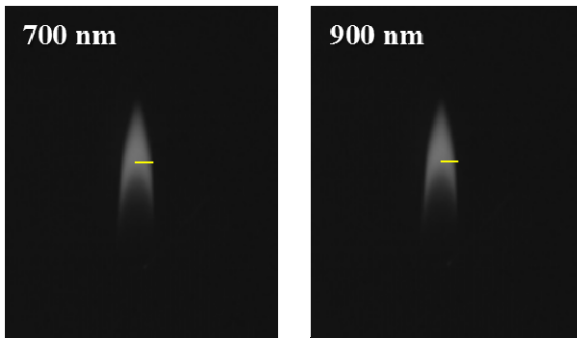
식(2)에서 ε<sub>λ</sub>는 방사율이며, C<sub>1</sub> = 2πhc<sub>0</sub><sup>2</sup> = 3.742 × 10<sup>8</sup> Wμm<sup>4</sup>/m<sup>2</sup>, C<sub>2</sub> = (hc<sub>0</sub>/k) = 1.439 × 10<sup>4</sup> μmK이다. 따라서 식(2)를 사용하여 동일 방사율에 대해서 Figure 1의 두 개의 파장 700, 900 nm 각각의 CCD 카메라로 측정된 복사 강도의 비로 나타낸 후 온도에 관해 정리하면 최종적으로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{C_2 \left[ \frac{1}{\lambda_{700}} - \frac{1}{\lambda_{900}} \right]}{\ln \left[ \left( \frac{I_{900}}{I_{700}} \right) \left( \frac{\lambda_{900}}{\lambda_{700}} \right)^5 \right]} \quad (3)$$

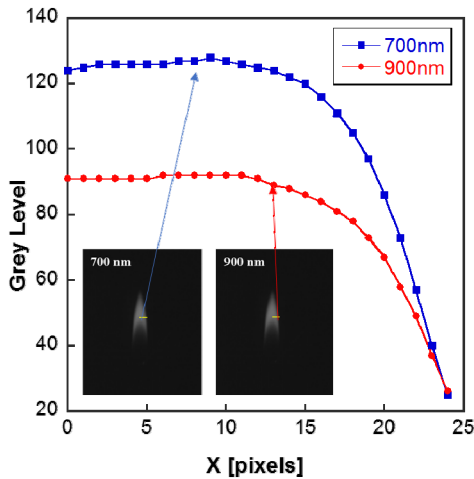
## 3. 측정 결과 및 고찰

Figure 2a는 700 nm와 900 nm의 대역 필터를 통해서 전달된 화염의 이미지를 CCD 카메라를 통해 저장한 결과이다. 각각의 CCD 카메라를 통해 획득된 화염의 이미지는 바로 PC에 저장되고 디지털 이미지 프로세싱 기법을 이용하여 해당 파장대역에서 화염의 복사 강도를 측정하였다. 화염 복사 강도, I(λ, T)는 Figure 2a에 표시되어 있는 선을 따라 동일한 높이에서 화염의 중심을 기준으로 반경 방향의 회색 밝기 단계로 측정하였고, 그 결과를 Figure 2b에 도시하였다. 그림에 도시된 결과는 화염을 투과하는 시각선(line-of-sight) 경로 상에서 투영된 밝기 정보로, 동일한 카메라 설정에서 700 nm와 900 nm 모두 화염 면에 가까워질수록 투영된 밝기는 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 측정하고자 하는 액적 화염의 복사는 흑체



a) Filtered flame images at 700 nm and 900 nm



b) Digitized flame intensities filtered at 700 nm and 900 nm

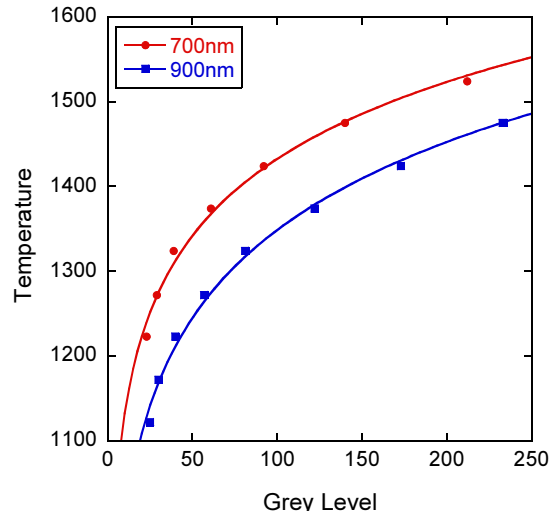
**Figure 2.** Droplet flame images and digitized flame intensities filtered at 700 nm and 900 nm.

( $\epsilon=1$ )로 볼 수 없기 때문에 보정이 필요하다. 본 연구에서는 흑체로의 온도를 1100 °C에서 1600 °C까지 일정한 간격으로 증가시켜가며 광학계를 보정하였으며 온도별로 측정된 복사 강도를 디지털 이미지 프로세싱을 통해 회색 밝기 단계로 계산(Figure 3a)한 뒤 이를 다시 플랑크 법칙에 적용하여 회색 밝기 정보를 흑체 방사에 해당되는 강도 값(Figure 3b)으로 변환하였다.

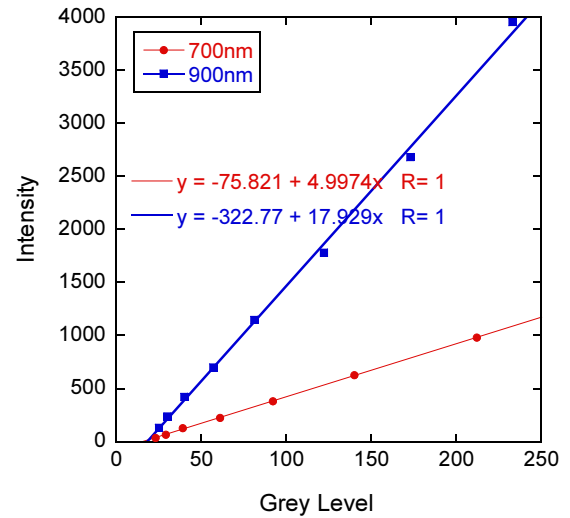
Figure 4는 흑체로 보정을 통해 얻어진 선형 관계식을 이용하여 Figure 2b에 제시된 화염의 복사 강도를 교정한 결과이다. 하지만 화염의 원형 단면을 투과하여 CCD 카메라를 통해 측정된 복사 강도는 Figure 5에서 볼 수 있는 바와 같이 시각선을 따라 투영된 결과로 투영된 값  $P(x)$ 는  $I(r)$ 의 미소 광의 합으로 이루어져 있으며 이러한 관계는 식(4)를 통해 표현할 수 있다.<sup>(7,8)</sup>

$$P(x) = 2 \int_0^\infty I[(x^2 + y^2)^{1/2}] dy = 2 \int_r^\infty \frac{r I'(r)}{(r'^2 - r^2)^{1/2}} dr \quad (4)$$

투영 데이터,  $P(x)$ 로부터 화염 내부의 국소 복사강도,  $I'(r)$ 를 분해적 추정방식으로는 Onion-peeling과 Abel 변환과



a) Gray values corresponding to black body temperature



b) Radiative intensities vs. measured gray values

**Figure 3.** Black body calibration for droplet flame emissions.

같은 Deconvolution 기법이 주로 사용된다. 본 연구에서는 Abel 변환 기법<sup>(7)</sup>을 이용하여 화염 내부의 복사강도 분포함수  $I'(r)$ 을 계산하였고 그 결과를 Figure 6에 도시하였다.

Figure 6에서 볼 수 있는 바와 같이 Abel 변환이 이루어진 화염 내부의 국소 복사강도는 화염 중심방향에서 화염면 쪽으로 가까워질수록 증가하여 최대값에 도달한 후 감소한다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 CCD 카메라로 측정된 복사강도는 화염 내부의 국소 복사강도가 시각선을 따라 투영된 값을 반영하기 때문에 Figure 4에 제시된 투영 복사강도를 시각선을 따라 적분한 결과를 반영하고 있기 때문이다. 다만 화염 중앙부( $x < 10$ )의 결과는 화염면에 비해 상대적으로 낮은 온도로 인해 화염의 복사강도를 결정짓는 매연입자의 농도가 낮고 국소 복사 강도가 약해 Abel 변환 결과를 신뢰하기 힘든 것으로 판단된다.

그림에 제시된 화염 내부의 국소 복사강도 분포,  $I'(r)$ 를

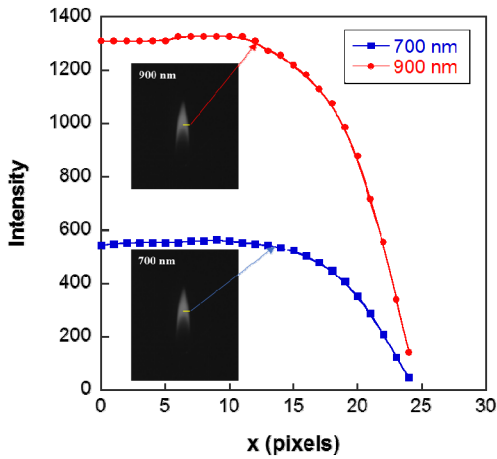


Figure 4. Calibrated distribution of emission intensities for 700 nm and 900 nm.

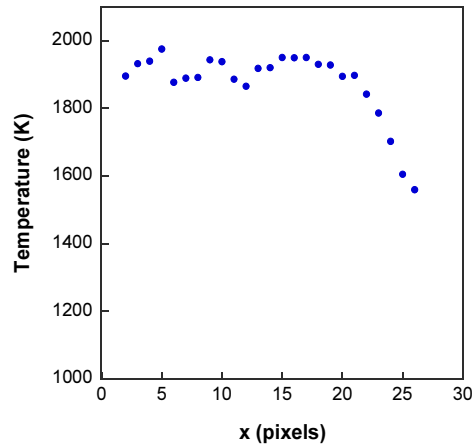


Figure 7. Two color method temperature measurements using emission distribution.

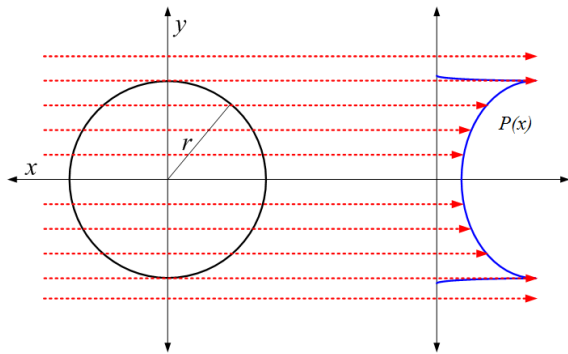


Figure 5. Schematics of light-of sight projection distribution.

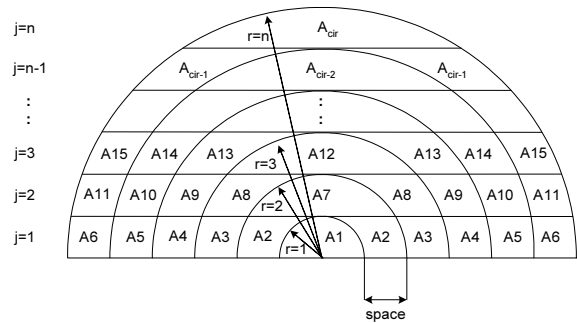


Figure 8. Schematic of the concentric semi-circular sections in a flame.

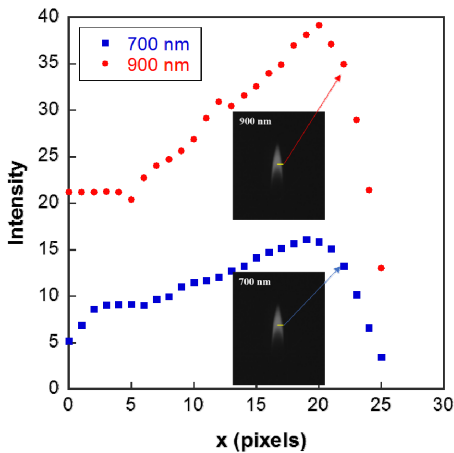


Figure 6. Deconvoluted Intensity Distributions for 700 nm and 900 nm.

이용하여 식(3)을 정리하면 식(5)으로 다시 나타낼 수 있으며 식(5)을 이용하여 최종 계산한 화염 내부의 온도분포는 Figure 7에 도시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 화염 중앙부의 온도 분포는 화염 복사에 관여하는 매연 입자의 농도

가 낮아 온도측정의 신뢰도가 떨어지지만, 그 밖의 영역에서 측정된 온도는 문헌<sup>(9)</sup>에서 보고된 Jet A1 확산화염에서 측정된 온도와 유사한 범위를 보여주고 있다.

$$T_{700,900} = \frac{C_2 (1/\lambda_{700} - 1/\lambda_{900})}{\ln(I'_{900}/I'_{700}) + 5 \ln(\lambda_{900}/\lambda_{700})} \quad (5)$$

본 연구에서 국소 복사 강도 분포를 계산하기 위해 적용된 Abel 변환의 측정 오차는 Deconvolution 기법에 의존하며, 대부분이 식(6)에 주어진 시각선을 분할하는 간격,  $\Delta r$ 에 크게 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다.<sup>(7)</sup>

$$I' = \frac{1}{\Delta r} \sum_{i=0}^{\infty} D_{ij} I(r) \quad (6)$$

국소 복사강도 분포,  $I'(r)$ 는  $\Delta r$ 의 주위에서의 선형적 가중치,  $D_{ij}$ 와 투영된 복사강도분포,  $I(r)$ 의 상관관계 의해서 결정된다. CCD 카메라가 측정한 투영된 복사 강도 분포,  $I(r)$ 은 원형 단면을 갖는 화염의 해당 필드의 면적, A와 복사 강도, I를 곱하여 모두 더한 값으로 표시 될 수 있다. 가

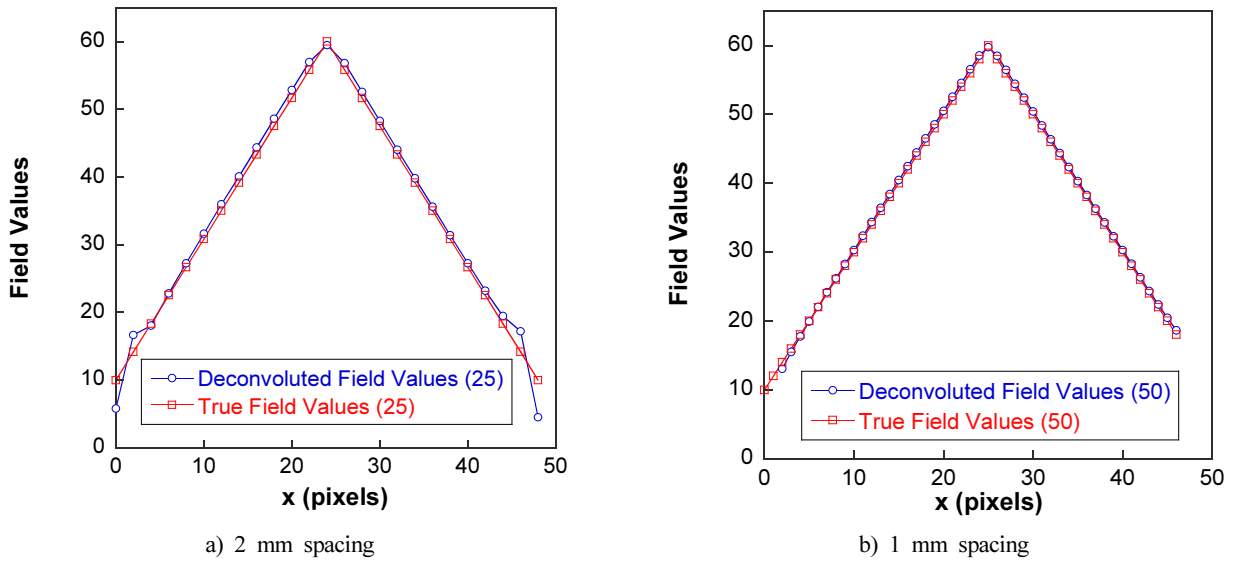


Figure 9. Distribution of the true field values, deconvoluted values using 50 concentric circles.

령 Figure 8의  $j=1$  열의 투영 복사 강도는 식(6)로 나타낼 수 있다.

$$I(r) = 2A_6I_6 + 2A_5I_5 + 2A_4I_4 + 2A_3I_3 + 2A_2I_2 + 2A_1I_1 \quad (7)$$

본 연구에서는 시각선을 분할하는 간격,  $\Delta r$ 이 국소 화염 복사 강도 Deconvolution 과정에서 발생시킬 수 있는 오차를 정량해 보기 위해 식(7)으로 계산된 투영 복사 강도 함수를 Abel 변환하여 미리 설정한 국소 복사 강도 함수(True filed value)에 얼마나 근접하는 지를 평가해 보았다.

Figure 9는 식(6)에 의해 계산된 투영 복사 강도 함수를 Abel 변환을 통해 계산한 국소 복사 강도(Deconvoluted field value)와 계산 전 임의로 설정한 실제 국소 강도 복사 강도(True filed value)를 비교한 결과이다. 그림에서 계산 전 미리 임의로 설정한 국소 복사 강도(True filed value)는 기울기가 서로 다른 2개의 1차 선형 함수를 이용하여 화염의 중앙에서 최대 국소 강도값을 갖도록 설정하였다. 그림에 제시되어있는 것처럼 직경이 50 mm인 반원을  $\Delta r=2$  mm (Figure 9a)와  $\Delta r=1$  mm (Figure 9a)로 나누어 Deconvolution 한 국소 복사 강도와 미리 설정한 국소 복사 강도를 비교해 보면 1 mm 간격 인 경우가 2 mm 간격인 경우에 비해 미리 설정한 국소 복사 강도 분포에 근접하는 것을 알 수 있다.  $\Delta r=1$  mm인 경우 약 2% 정도 이내의 Deconvolution 오차가 발생할 수 있으며, 본 연구 결과에서 제시한 측정 방법을 통해 2000 K 기준 약 18 K 오차 범위 이내에서 화염온도 예측이 가능함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Jet A1 액적 확산화염의 비접촉식 온도

측정을 위해 이색법을 적용하였다. 각각 700 nm와 900 nm 파장에서 화염에서 방출되는 복사 강도를 CCD 카메라로 측정하여 Abel 변환을 통해 액적 확산 화염의 온도분포를 계산하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) Jet A1 액적 확산 화염에서 방사되는 복사 강도를 700 nm와 900 nm 대역필터가 장착된 카메라를 이용하여 측정하고 deconvolution을 수행한 뒤 플랑크 법칙을 적용하면 문헌에 보고된 Jet A1 확산 화염 온도와 유사한 수준으로 온도 예측이 가능하며, 2000 K 기준 약 18 K 오차 범위 이내로 측정가능 하다.

2) 화염 온도측정을 위하여 이색법을 적용한 경우 화염 내부에 형성되는 그늘을 입자의 복사 강도가 중요한 변수이며, 화염 중앙부와 같이 상대적으로 온도가 낮은 영역에서는 미약한 복사 강도로 인해 화염 온도 예측에 오차가 발생할 수 있다.

3) 이색법을 사용하면 확산 화염의 공간 온도 분포를 예측할 수 있지만 시각선을 따라 투영되는 복사강도의 deconvolution 기법에 따라 오차가 발생할 수 있으며, 시각선을 분할하는 간격을 줄임으로써 발생하는 오차를 최소화시킬 수 있다.

#### References

1. Short-term Energy Outlook, U.S. Energy Information (2016).
2. W. N. Lee, Y. D. Na, B. M. Lee and S. N. Park, "Temperature Distribution in Ethylene Diffusion Flames Based on Measurement Techniques - Comparison of Thermocouple and Tow-Color Pyrometry", KOSCO Symposium, pp. 175-182 (2000).
3. V. Vilimpc and L. P. Goss, "SiC-based Thin-filament

- Pyrometry: Theory and Thermal Properties”, International Symposium on Combustion, Vol. 22, No. 1, pp. 1907- 1914 (1989).
4. M. Bundy, A. Hamins and K. Y. Lee, “Suppression Limits of Low Strain Rate Non-premixed Methane Flames”, Combustion and Flame, Vol. 133, No. 3, pp. 299-310 (2003).
  5. J. C. Moreno “Measurement of Soot Temperature In a Diffusion Flame Using a Digital Camera”, Master Thesis, Maryland University (2012).
  6. S. H. Park, S. C. Choi, M. Y. Choi and A. Yozgatligil, “New Observations of Isolated Ethanol Droplet Flames in Microgravity Conditions”, Combustion Science and Technology, Vol. 180, No. 4, pp. 631-651 (2008).
  7. C. J. Dasch, “One-dimensional Tomography: A Comparison of Abel, Onion-peeling, and Filtered Backprojection Methods”, Appl. Optics, Vol. 31, No. 8, pp. 1146-1152 (1992).
  8. K. O. Lee and M. Y. Choi, “Observations on the Sooting Behavior of Microgravity Droplet Flames under Reduced Pressures”, Int’l J. Micrograv. Sci. Technol., X/2, pp. 86-94 (1997).
  9. M. Saffaripour, “Experimental and Numerical Studies for Soot Formation in Laminar Coflow Diffusion Flames of Jet A-1 and Synthetic Jet Fuels”. Ph.D. Thesis, University of Toronto (2013).