

## SNG 선회 안정화 화염구조 가시화를 위한 OH\* 자발광 이미지 역변환에서 전처리 효과

안광호\* · 송원준\*\* · 차동진\*\*\*\*

\*한밭대학교 설비공학과 대학원 · \*\*한밭대학교 생산융합기술연구소 · \*\*\*한밭대학교 설비공학과

### Effect of a Preprocessing Method on the Inversion of OH\* Chemiluminescence Images Acquired for Visualizing SNG Swirl-stabilized Flame Structure

Kwang Ho Ahn\*, Won Joon Song\*\* and Dong Jin Cha\*\*\*\*

\*Graduate School, Department of Building and Plant Engineering, Hanbat National University

\*\*Institute for Fusion Technology for Production, Hanbat National University

\*\*\*Department of Building and Plant Engineering, Hanbat National University

(Received 31 December 2014, Received in revised form 2 February 2015, Accepted 2 February 2015)

#### ABSTRACT

Flame structure, which contains a useful information for studying combustion instability of the flame, is often quantitatively visualized with PLIF (planar laser-induced fluorescence) and/or chemiluminescence images. The latter, a line-integral of a flame property, needs to be preprocessed before being inverted, mainly due to its inherent noise and the axisymmetry assumption of the inversion. A preprocessing scheme utilizing multi-division of ROI (region of interest) of the chemiluminescence image is proposed. Its feasibility has been tested with OH PLIF and OH\* chemiluminescence images of SNG (synthetic natural gas) swirl-stabilized flames taken from a model gas turbine combustor. It turns out that the multi-division technique outperforms two conventional ones: those are, one without preprocessing and the other with uni-division preprocessing, re-constructing the SNG flame structure much better than its two counterparts, when compared with the corresponding OH PLIF images. It is also found that the Canny edge detection algorithm used for detecting edges in the multi-division method works better than the Sobel algorithm does.

**Key Words** : Flame structure, OH\* chemiluminescence, Digital image preprocessing, Abel inversion, SNG

#### 1. 서론

최근 셰일가스의 상업적인 개발과 이에 대응하는 산유국의 원유 생산량 정책, 전세계적인 경기 침체 등으로 에너지 가격은 상당히 하락하고 있다. 그러나 중장기적으로는 한정된 화석연료 매장량으로 인해 화석 에너지 가격은 다시 상승할 것으로 예상된다. 높은 가격의 액화천연가스(LNG, liquified natural

gas)를 대체하기 위해 상대적으로 매장량이 풍부한 석탄으로부터 비교적 저렴한 가격으로 생산 가능한 석탄가스 등 합성천연가스(SNG, synthetic natural gas)를 발전용 연료로 사용하기 위한 노력이 기울여지고 있다. 이러한 연료 유연성(fuel flexibility), 저 공해물질 배출 가스터빈 등의 주제에서, 연소불안정(combustion instability)은 여전히 관심있는 주제이다.

이 현상은 연소실 내 음향파에 의한 속도 또는 당량비 변동이 연소 열방출률의 변동을 야기하고 이로 인한 피드백에 의해 불안정 진폭이 증가하며 발생하고, 지배적인 비선형 효과에 의해 한계사이클이 형성된다. 대부분의 이론적인 접근법은 선형적인 해석법을 토대로 하며 비선형적인 화염 역학(flame dynamics) 모델링이 요구된다. 여기서 화염 응답(flame res-

† Corresponding Author, [djcha@hanbat.ac.kr](mailto:djcha@hanbat.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ponse)은 대표적으로 화염전달함수(FTF, flame transfer function)[1] 또는 화염묘사함수(FDF, flame describing function)를[2] 이용하여 표현된다. FTF는 가진된 주파수 및 진폭의 속도 또는 당량비 섭동에 대한 연소 열방출률의 변동으로 정의된다[1]. 연소 열방출률 값으로  $CH^*$  또는  $OH^*$  자발광(chemiluminescence)을 측정하여 비선형적인 응답을 평가한다. FDF는 다양한 입력변수 값과 주파수 범위에 대한 FTF의 세트(set)로 표현된다[2].

보다 정확히 화염 역학을 이해하기 위해 2차원적인 분포 측정이 가능한 PLIF(planar laser-induced fluorescence)이 사용되기도 한다. Lee 및 Santavicca(2003)는 예혼합 화염에 대해 OH PLIF 기법으로 순시적인 화염면 위치를 정확히 제공할 수 있음을 보고하였다[3]. 또한 이 기법을 활용하여 연소 열방출의 비선형적인 응답이 대규모 와류 구조와 관련됨도 입증한 바 있다[1,4]. 그러나 PLIF 기법은 펌프 및 염료 레이저 등 다수의 레이저의 사용과 복잡하고 정교한 광학시스템 및 측정을 요구하여 사용이 제한적이고, 2차원 화염에 적용되는 한계를 갖고 있다.

반면, 자발광 기법은 별도의 광원이 필요하지 않아 경제적이고 편리하다. 다만 기록된 이미지가 선적분된 결과이어서 측정하고자 하는 화염성상의 분포를 재현하기 위해서는 축대칭임을 가정하여야 한다는 제약이 있다. 역변환은 아벨 알고리즘을 일반적으로 많이 사용한다[5]. 최근 토모그래피 기법을 도입하여 3차원적인 화염 역학 연구에 활용이 시도되고 있다[6].

화염에 따라 신호/잡음 비(S/N ratio)가 큰 화염은 축대칭 이미지를 얻기 위해 대칭축을 중심으로 좌우 또는 상하 반 이미지를 평균하는 전처리만을 하게 되나[7,8], 잡음이 많은 화염 이미지는 평균화 작업이외에 곡선적합 등을 통하여 유연화(smoothing) 작업을 하게 된다[8]. 역변환 후에도 잡음이 많은 경우 3점 유연화기법[9,10] 등을 통해 이미지를 개선하기도 한다.

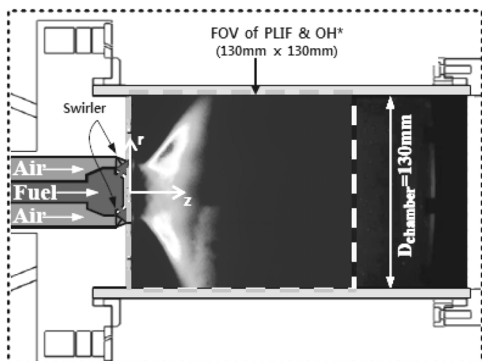


Fig. 1. Schematic of a test rig at which experimental images was acquired[11].

본 연구에서는 SNG 가스터빈 연소불안정 연구[11]에서 기록된(Fig. 1) 선회 안정화(SS, swirl-stabilized) 화염의 순시  $OH^*$  자발광 이미지를 이용하여 시간 평균된(time-averaged) 각 화염의 구조를 재현함에 있어 잡음을 제거하기 위한 전처리 기법의 특성을 조사한다. 이를 위해 자발광 이미지와 동시에 기록된 OH PLIF 결과와 비교하여 제안된 전처리 기법의 성능을 평가한다.

## 2. 아벨 역변환 및 전처리

### 2.1. 기존 단일구간 전처리법

기존의 아벨 역변환법은 Dasch 알고리즘을[5] 토대로 하며, 선행 연구를[12] 통해 매트랩 스크립트가 개발되었다. Fig. 2는 해당 흐름도이다.

우선 스크립트는 순시 또는 평균 자발광 이미지를 tiff 포맷으로 받아들인다. 다수의 순시이미지로부터 평균 이미지를 얻을 수 있다. 다음으로 유동방향(수직 또는 수평), 대칭축과 같은 유동장 영역(ROI, region of interest)에 관한 정보 등을 입력하여, 투영데이터를 전처리한다. 투영데이터는 대개 잡음이 수반되므로(noisy) 유연화가 필요하고, 유연화는 다항식(본 연구에서는 최대 8차)을 이용하여 ROI 전 구간에 대해 각 행별로 곡선적합(curve-fitting)하였다. 선정된 ROI에 대하여 아벨 역변환 알고리즘[5]에 따라 3점 아벨 재귀연산자(deconvolution operator)를 계산하고 유동장인  $OH^*$  분포장을 결정한다.

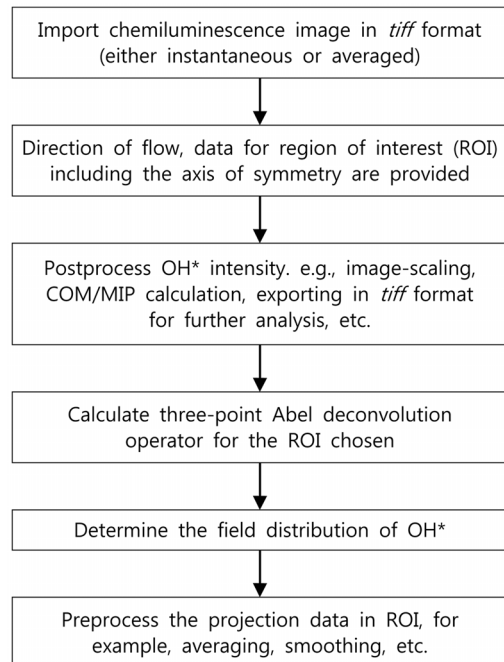
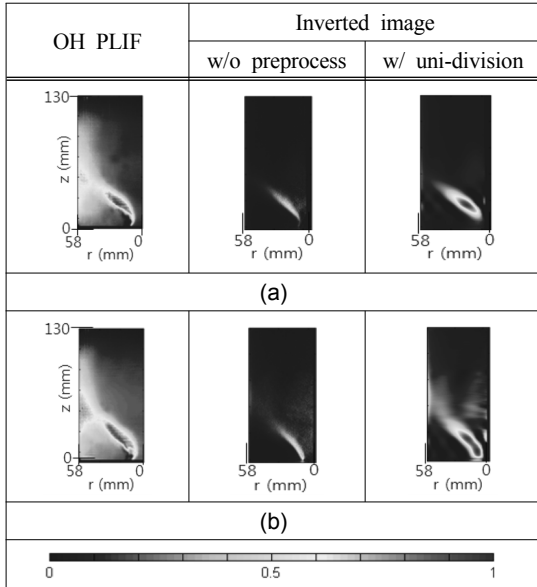


Fig. 2. Flowchart of an Abel inversion matlab script[12].



**Fig. 3.** Comparison of OH PLIF, inverted without preprocessing, and inverted with uni-division preprocessing images of (a) Flame I and (b) Flame II.

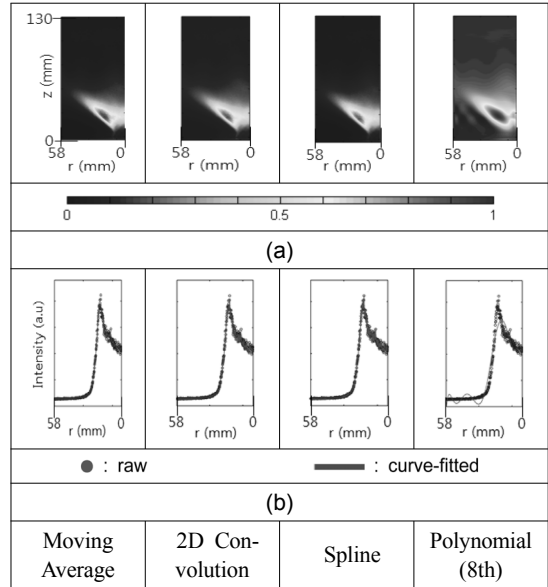
마지막으로 매트랩 기능을 이용하여 결과 분포장을 후처리하게 된다. 예를 들면, 이미지 스케일링, 라인 프로파일링, 화염 중심으로 평가할 수 있는 COM (center of mass) 또는 MIP(maximum intensity point) 결정, 최소/최대값 결정, tiff 포맷의 이미지 출력(export) 등이다. 보다 상세한 내용은 참고문헌 12를 참고하기 바란다.

Fig. 3에서는 임의의 두 SS 화염(Flames I 및 II)의 OH\* 자발광 이미지를 기존과 같이 단일구간 8차 다항식으로 전처리한 후 역변환한 이미지와 OH PLIF 이미지를 비교하였다. 또한 논의를 위해 전처리하지 않은 역변환 이미지도 수록하였다.

두 자발광 이미지는 다음 장에서 논의될 실험 결과의 일부로 Flame II의 입열량이 Flame I에 비해 다소 큰 차이가 있다. 그림에 수록된 모든 이미지는 각 이미지의 최대값으로 정규화된 이미지(매트랩의 *imagesc* 명령어 사용)이고, 이후 논의될 전처리 및 역변환 이미지도 동일하게 처리되었다.

Fig. 3(a) 및 (b)에서 공히 나타나는 좌측의 강한 신호는 석영 연소기 벽면에서의 광산란에 주로 기인하는 것으로 판단한다. 전처리를 하지 않은 역변환 결과는 화염의 구조(형상)를 분명하게 재현하지 못함을 볼 수 있다. 원 자발광 이미지의 잡음 성분이 역변환 과정에서 증폭되어 비정상적인 outlier가 발생하게 되고 이에 따라 상대적으로 정상적인 신호들이 작게 나타나게 된 때문으로 추정한다.

단일구간 다항식으로 전처리한 역변환 결과는 잡



**Fig. 4.** Preprocessed (a) image & (b) data profile along the maximum signal row by various schemes.

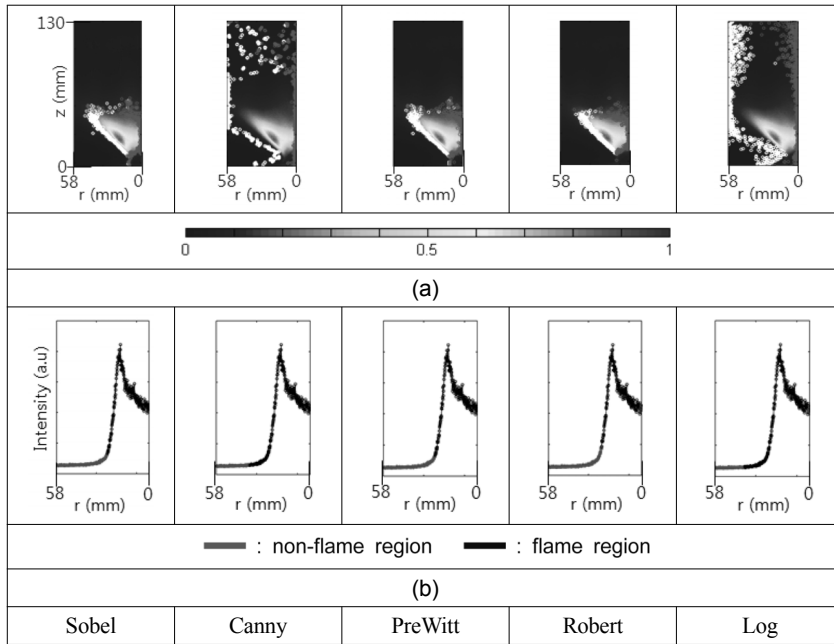
음 제거(유연화)의 영향으로 역변환된 신호 크기가 상대적으로 고르게 되어 화염의 구조 파악은 용이하나, 화염의 형상을 OH PLIF에 비해 크고 타원형 형태로 왜곡된 결과를 나타냄을 볼 수 있다. 또한 비화염 영역에서 인위적인 왜곡현상(artifact)을 발생시킨다. 정리하면, 전처리를 하지 않은 역변환 결과는 내재된 잡음의 영향으로 화염의 구조를 잘 재현하지 못하고, 단일구간 다항식으로 전처리한 역변환 결과는 화염 이미지를 왜곡시키는 문제점을 가지고 있다.

곡선적합 기법에 따른 유연화 정도를 비교해 보았다. Fig. 4는 Flame I의 자발광 이미지에 이동평균, 2차원 컨볼루션, 스플라인, 및 다항식 기법으로 유연화 된 (a) 이미지 및 (b) 최대 신호 행에서의 투영 데이터 프로파일이다. 그림에서 보는 바와 같이, 이동평균, 2차원 컨볼루션, 스플라인의 잡음 제거 효과는 미비하다. 반면, 다항식 기법은 잡음 제거 효과는 크나, 원 데이터의 신호가 낮은 곳에서 왜곡현상을 발생시킴을 알 수 있다.

## 2.2. 다구간 전처리법

단일구간 전처리법의 문제점을 개선하기 위해 자발광 이미지를 화염 영역과 비 화염 영역으로 나눠 서로 다른 곡선적합 기법을 적용하여 보았다. 우선 두 영역의 경계는 디지털 영상처리기법을[9] 이용하여 검출하였다.

Fig. 5(a)는 Flame I의 자발광 이미지에 Sobel(매트랩의 기본 선택사항), Canny, PreWitt, Robert, 및 Log



**Fig. 5.** Various edge detection results; (a) on a sample OH\* image (white: the 1st edge; gray: the 2nd edge) and (b) along the maximum signal row.

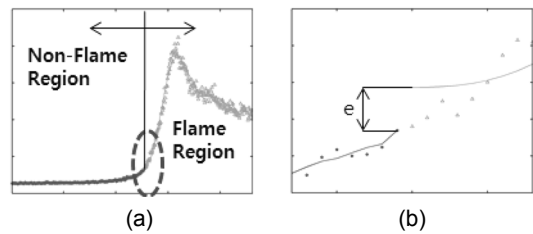
(Laplacian) 기법을 적용하여 화염 및 비 화염 영역의 경계를 검출한 결과(하얀 점은 1차 경계, 회색 점은 2차 경계를 의미)이고, (b)는 최대 신호 행에서의 투영 데이터 프로파일을 다 구간으로 나누어 표기한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, Sobel, PreWitt, Robert는 화염 영역을 좁게, Canny와 Log는 상대적으로 넓게 검출하였다. 이러한 특성을 고려하여 Sobel과 Canny를 대표 옵션으로 선택하여 후술한다.

참고로 Sobel 기법은 윤곽선 검출의 가장 대표적인 방법으로, 2차 미분 연산자를 사용하여 x축, y축 방향으로 각각 한 번씩 미분하여 윤곽선을 검출하는 방법이다. Canny 옵션은 윤곽선 검출 전 가우시안 필터(Gaussian filter)를 사용하여 잡음을 제거한 후, 윤곽선을 검출해주는 특성이 있다.

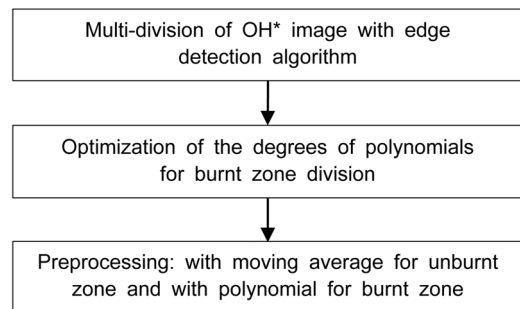
상기 조사 결과를 토대로, 비 화염영역에서는 이동평균으로 대표되는 부분 곡선접합기법(piecewise curve-fitting)을, 화염영역에서는 다항식을 이용하여 유연화 하였다.

제안된 다구간 전처리 기법은 화염영역인 다항식 곡선접합 구간의 최적 다항식 차수를 결정해야 한다. 화염 구조의 복잡성을 충분히 표현하기 위해서는 공간 분해능이 높은 고차 다항식을 선택하는 것이 합당하겠지만, 비화염 구간과의 경계에서 발생할 수 있는 불연속성을 줄여야 하는 점도 다항식 차수 결정에 고려하였다.

이를 위해 Fig. 6과 같이 오차  $e$ 를 정의하였고, 식



**Fig. 6.** Definition of error for optimizing the degree of polynomial fitting; (a) interface and (b) definition.



**Fig. 7.** Flow chart for multi-division preprocessing algorithm.

(1)과 같이 오차의 합이 최소가 되는 다항식 차수를 최적값으로 선택하여 화염 구간에 적용하였다.

$$\left( \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_b} |e| \right)_{\min} \quad (1)$$

여기서,  $M_n$ 는 전체 행의 수,  $M_b$ 는 한 행에서의 전체 경계의 수이다.

Fig. 7은 제안한 다구간 전처리 기법을 매트랩으로 구현하였을 때 사용한 흐름도이다.

### 3. SNG 선회 안정화 화염구조

#### 3.1. 전처리된 자발광 이미지

$H_2/CO/CH_4$  SNG에 대해 모델 가스터빈 연소기 내의 부분 예혼합 선회안정화 화염(Fig. 1)에 대한 실험 연구[11]에서 얻어진  $OH^*$  자발광 및 PLIF 결과를 활용하였다. 참고문헌에는 방대한 실험결과가 수록되어 있으나, 본 연구에서는 비교적 뚜렷한 화염구조 특징을 갖는 일부 케이스의 결과만을 차용하였다(Table 1).

Table 1의 조건에서의 실험 결과를 정리하여 Fig. 8에 수록하였다. 관측영역(field of view)은 연소기 덤พ์면 중앙으로부터  $130 \times 130 \text{ mm}^2$ 이고, 이미지 크기는  $1024 \times 1024$  픽셀(pixel)이다.  $OH$  PLIF 기록 시 레이저 광원 인텐시티(intensity)의 공간적 불균일성이 실험적으로 보정되지 않아, 대칭축에 수직방향으로 정규분포를 가정하여 보정한 후 활용하였다. 역변환에 사용된 자발광 이미지는 좌측의 반쪽만을 ROI로 설정하였다.  $OH$  PLIF 이미지는 광계측 장치 구성에 의해 우측의 반쪽을 비교에 사용하였다. 보다 상세한

**Table 1.** Specification of SNG tested

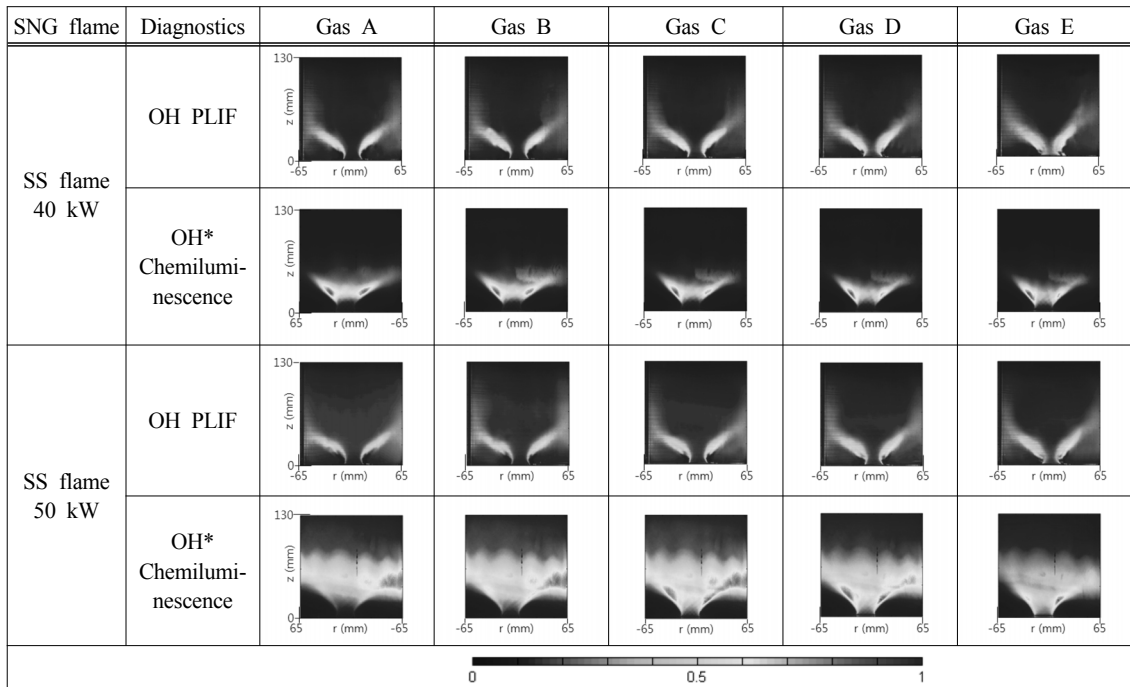
Chemical composition	SNG				
	Gas A	Gas B	Gas C	Gas D	Gas E
$CH_4$ [mol %]	87.5	75.0	62.5	50.0	37.5
$CO$ [mol %]	0.0	12.5	25.0	37.5	50.0
$H_2$ [mol %]	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Total [mol %]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
HHV [kJ/kg]	57,249	46,995	38,516	31,388	25,312
LHV [kJ/kg]	51,449	42,445	34,999	28,740	23,404

Note : Heat input of 40 kW and 50 kW

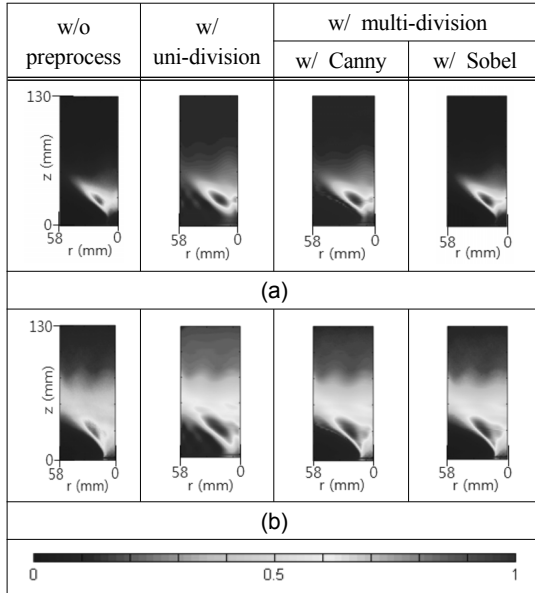
실험 조건은 참고문헌 11을 참고하기 바란다.

다구간 전처리 기법에 의한 두  $OH^*$  자발광 이미지의 전처리 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 경계 검출 알고리즘의 효과를 비교하기 위해 Sobel과 Canny의 결과를 동시에 수록하였다. 또한, 참고로 전처리되지 않은 결과와 전 구간을 8차 다항식으로 전처리한 결과도 포함되었다(이들 결과는 Fig. 3의 역변환 결과에 활용되었음). 우선 단일 구간/다항식으로 전처리한 결과는 전처리하지 않은 결과와 비교할 때, 화염 영역이 크게 나타나고 왜곡현상이 많이 발생함을 알 수 있다. 또한 전술한 바와 같이, Sobel 결과가 화염 크기를 좁게, Canny 결과가 상대적으로 넓게 전처리하였음을 알 수 있다.

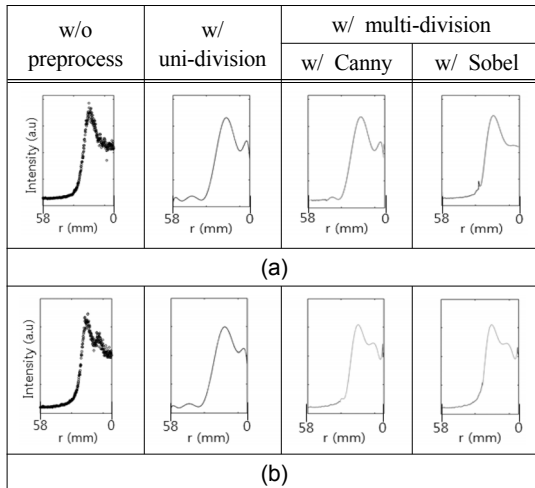
보다 상세한 비교를 위해, 최대 투영데이터 점에



**Fig. 8.**  $OH$  PLIF and  $OH^*$  chemiluminescence images of SNG SS flames being studied.

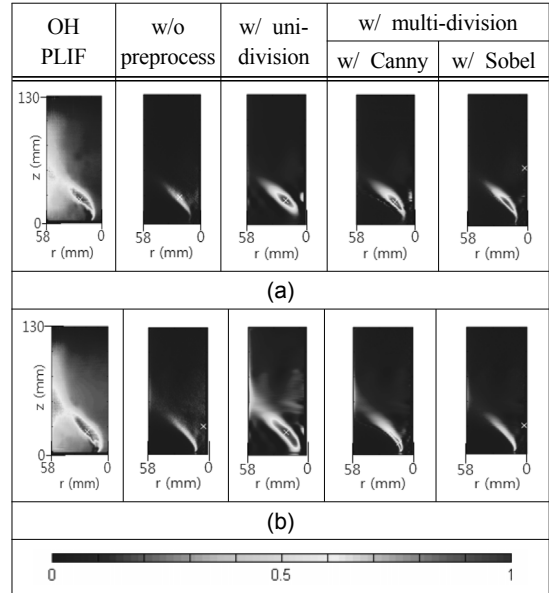


**Fig. 9.** Comparison of preprocessed images without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division & Canny edge detection, and with multi-division & Sobel edge detection of (a) SS flame of 40 kW and (b) SS flame of 50 kW.



**Fig. 10.** Comparison of preprocessed data profile along the maximum signal row without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division & Canny edge detection, and with multi-division & Sobel edge detection of (a) SS flame of 40 kW and (b) SS flame of 50 kW.

서 프로파일을 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 단일 구간 전처리 기법은 비화염 영역의 낮은 신호 대역에서 왜곡을 발생시킴을 볼 수 있다. 또한 원 신호 데이터의 신호 크기를 작게 처리하는 경향을 보인다.



**Fig. 11.** Comparison of inverted images without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division & Canny edge detection, and with multi-division & Sobel edge detection of (a) SS flame of 40 kW and (b) SS flame of 50 kW.

그에 반해 다구간 전처리 기법은 왜곡현상을 거의 발생시키지 않음을 확인할 수 있다.

다구간 전처리 경계 검출 옵션 간의 차이는 전술한 바와 같이, Canny 옵션이 신호가 크게 변하는 지점을 경계로 검출하고, 또한 보다 더 큰 화염 영역을 제시하였음을 알 수 있다.

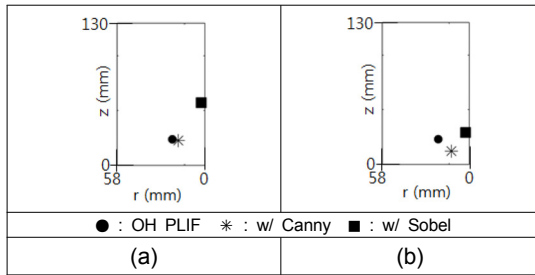
### 3.2. 역변환 이미지

Fig. 9의 전처리된 자발광 투영데이터를 토대로 역변환한 결과가 Fig. 11이다. 역변환 결과의 수월성을 판단하기 위해 OH PLIF 결과와 비교하였으며, (1) 전체적인 화염 구조의 유사성, (2) 왜곡현상의 발생 정도, 그리고 (3) 화염 중심(MIP, maximum intensity point)[14]의 좌표를 비교하였다.

그림에서 전처리하지 않은 역변환 결과와 단일구간 다항식으로 전처리한 역변환 결과는 이미 전장에서 논의한 바와 같은 문제점을 안고 있다. 본 연구에서 제안한 다구간 전처리 후 역변환한 결과가 보다 우수함을 쉽게 확인할 수 있다.

다구간 전처리 기법의 경계 검출 알고리즘 효과를 살펴보면, Canny 결과가 Sobel 결과에 비해 전체적인 화염 구조를 보다 유사하게 재현하고 있다고 판단된다. 다만 왜곡현상 발생 측면에서는 Sobel 결과가 비교적 낮게 나타나 보인다.

화염 중심(MIP)을 역변환 결과에 “X”로 표기하였



**Fig. 12.** Comparison of MIPs of OH PLIF image, inverted image with multi-division & Canny edge detection, and inverted image with multi-division & Sobel edge detection of (a) SS flame of 40 kW and (b) SS flame of 50 kW.

**Table 2.** Comparison of MIP coordinates of various images

SNG flame	SS flame 40 kW		SS flame 50 kW	
	L (mm)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	L (mm)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )
OH PLIF	33.9	45.3	32.7	45.0
w/o preprocess	34.4	38.3	15.2	53.5
w/ uni-division	31.3	39.6	14.6	49.9
w/ Canny	30.1	40.9	13.1	64.2
w/ Sobel	57.2	2.7	13.7	61.8

으나, 육안으로 식별하기는 용이하지 않다. Fig. 12는 화염 중심(MIP)의 좌표를 효과적으로 비교하기 위해 Fig. 11에서 역변환한 화염 이미지는 배제하고 MIP만 표시한 결과이다. 비교 목적상 OH PLIF과 다구간 전처리 결과(Canny 및 Sobel)만을 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 선회 화염에서 Canny MIP 결과가 Sobel 결과에 비해 OH PLIF 결과에 근접함을 확인할 수 있다.

보다 정량적인 비교를 위해 덤프면 중앙(Fig. 12의 우측 하단 코너)을 좌표 원점으로 하여 MIP까지의 길이를 화염길이(L)로, 중심축과의 사잇각을 화염각( $\theta$ )으로 정의하였을 때 각각의 값은 Table 2와 같다. Canny 옵션사용이 Sobel 옵션에 비해 전반적으로 OH PLIF 결과에 근접함을 알 수 있다. Canny 옵션을 사용한 다구간 전처리법의 결과와 기존의 단일구간 전처리법 결과 및 전처리하지 않은 결과를 비교하면, 뚜렷한 상대적인 수월성을 보기 어렵다.

#### 4. 결론

기존의 단일 구간/다항식 곡선접합의 전처리법과 달리, 전 구간을 비화염 영역과 화염 영역으로 구분하여 이동 평균 곡선접합과 다항식 곡선접합을 병용하는 다구간 전처리법을 제안하였다. 구간을 구분할 때 디지털 영상 처리기법의 경계 검출 알고리즘에

따른 아벨 역변환 결과의 변화를 조사하였다. 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 본 연구에서 제안한 다구간 전처리 기법은 OH PLIF 이미지와 비교하였을 때, 기존의 단일 구간 전처리 기법에 의한 결과에 비해 전체적인 화염 구조와 왜곡현상 발생 관점에서 우수한 결과를 제공함을 확인하였다. 또한 전처리하지 않은 결과와 비교하였을 때도 분명한 개선 효과를 보였다.

2) 다구간 전처리 기법에서 사용하는 구간 경계를 찾는 경계 검출 알고리즘에 관해서는 Canny 옵션이 화염 형상과 MIP 좌표 면에서 OH PLIF 결과에 보다 근접한 결과를 보였으나, 왜곡현상 면에서는 Sobel 옵션이 보다 나은 결과를 보였다.

이상의 결론을 종합하여 평가하면, 기존의 단일 구간 전처리 기법의 결과에 비해 본 연구에서 제안한 다구간 전처리 기법이 보다 나은 역변환 결과를 보여주었다. 또한 경계 검출 알고리즘인 Canny와 Sobel을 비교한 결과에서는 Canny 옵션이 기본 옵션이 Sobel 보다 다소 더 나은 역변환 결과를 보여주는 것으로 판단되었다.

#### 후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이다(No. 2011951010001C). 실험데이터를 제공해준 서울대학교 이민철박사께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] R. Balachandran, B. O. Ayoola, C. F. Kaminski, A. P. Dowling, and E. Mastorakos, "Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations", *Combust. Flame*, Vol. 143, 2005, pp. 37-55.
- [2] P. Palies, D. Durox, T. Schuller, and S. Candel, "Nonlinear combustion instability analysis based on the flame describing function applied to turbulent premixed swirling flames", *Combust. Flame*, Vol. 158, 2011, pp. 1980-1991.
- [3] J. G. Lee and D. A. Santavicca, "Experimental diagnostics for the study of combustion instabilities in lean premixed combustors", *J. Propul. Power*, Vol. 19, 2003, pp. 735-750.
- [4] S. K. Thumuluru and T. Lieuwen, "Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32, 2009, pp. 2893-2900.

- [5] C. J. Dasch, "One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered back-projection methods", *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, 1992, pp. 1146-1152.
- [6] N. A. Worth and J. R. Dawson, "Tomographic reconstruction of OH\* chemiluminescence in two interacting turbulent flames", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24, 2013, 024013(11 pp).
- [7] K. T. Walsh, J. Fielding, and M. B. Long, "Effect of light-collection geometry on reconstruction errors in Abel inversions", *Optics Letters*, Vol. 25, No. 7, 2000, pp. 457-459.
- [8] J. G. Lee and D. A. Santavicca, "Experimental diagnostics of combustion instabilities", (in e/d) T. C. Lieuwen and V. Yang, *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experiences, Fundamental Mechanisms, and Modeling*, Vol. 210, AIAA, 2005, pp. 481-529.
- [9] G. P. Smith, J. Luque, C. Park, J. B. Jeffries, and D. R. Crosley, "Low pressure flame determinations of rate constants for OH(A) and CH(A) chemiluminescence", *Combust. Flame*, Vol. 131, 2002, pp. 59-69.
- [10] G. F. Moon, J. H. Lee, C. H. Jeon, and Y. J. Chang, "Experimental study on heat release in a lean pre-mixed dump combustor using OH chemiluminescence images", *J. of KSME(B)*, Vol. 28, No. 11, 2004, pp. 1368-1375.
- [11] M. C. Lee, 2014, An experimental study on combustion instability and NOx emission characteristics of H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> syngas in a gas turbine combustor, Ph.D. thesis, Seoul National University.
- [12] D. J. Cha, W. J. Song, E. Gutmark, R. V. Gomez, and O. U. Chukwueloka, "Deconvolution of chemiluminescence images from a high-pressure gas turbine combustion facility", *Proceedings of KSME conference 09EP003*, 2009, pp. 11-16.
- [13] <http://www.mathworks.com>.
- [14] K. T. Kim, J. G. Lee, B. D. Lee, B. D. Quay, D. A. and Santavicca, "Characterization of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean-premixed flames in a gas turbine combustor", *J. of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, No. 4, 2010, 041502.