대체천연가스 화염 이미지 역변환에서 전처리 효과

Effect of a Preprocessing Method on Inverting Chemiluminescence Images of Flames Burning Substitute Natural Gas

안광호(Kwangho Ahn)¹, 송원준(Wonjoon Song)², 차동진(Dongjin Cha)^{3†}

1한밭대학교 설비공학과 대학원, 2한밭대학교 생산융합기술연구소, 3한밭대학교 설비공학과

¹Dept. of Building & Plant Engineering, Graduate School, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Institute for Fusion Technology for Production, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

 3 Dept. of Building and Plant Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

(Received June 14, 2015; revision received October 17, 2015; Accepted: October 19, 2015)

Abstract A preprocessing scheme utilizing multi-division of the ROI (region of interest) in a chemiluminescence image during inversion is proposed. The resulting inverted image shows the flame's structure, which can be useful for studying combustion instability. The flame structure is often quantitatively visualized with PLIF (planar laser-induced fluorescence) images as well. The chemiluminescence image, which is a line-integral of the flame, needs to be preprocessed before inversion, mainly due to the inherent noise and the assumption of axisymmetry during the inversion. The feasibility of the multi-division preprocessing technique has been tested with experimentally-obtained OH PLIF and OH^{*} chemiluminescence images of jet and swirl-stabilized flames burning substitute natural gas (SNG). It turns out that the technique outperforms two conventional methods, specifically, the technique without preprocessing and the one with uni-division, reconstructing the SNG flame structures much better than its two counterparts when compared using corresponding OH PLIF images. The characteristics of the optimum degree of polynomials to be applied for curve-fitting of the flame region data for the multi-division method involving two flames has also been investigated.

Key words Flame structure(화염구조), OH* chemiluminescence(OH* 자발광), Digital image preprocessing(디지탈 영상 전처리), Abel inversion(아벨 역변환), Substitute natural gas(SNG; 대체천연가스)

* Corresponding author, E-mail: djcha@hanbat.ac.kr

기호설명	8	하첨자
СОМ	: 질량 중심	b : 경계
LNG	: 액화천연가스	r : 행
е	: 오차	
i, j	: 인덱스	1. 서 론
L	:거리 [m]	
MIP	: 최대 신호점	친거티 매자라에 즈근 기이커서 겨거디느 그기이 해
N	: 상수	한성관 배상당에 구도 기반아역 실정되는 고가의 즉 취취성과 A (LNO 1: C 1 + 1 -)로 ⁽¹⁾ 데레린과
ОН [°]	: 수산기	와전언가스(LNG, liquefied petroleum gas)를 내세야기
PLIF	:평면 레이저 유도형광	위해 상대적으로 매상량이 풍무한 석탄으로부터 비교적
r, z	: 좌표 [m]	저렴한 가격으로 생산 가능한 석탄가스(coal derived gas)
ROI	: 관심영역	화공 플랜트에서의 부생가스 등 대체천연가스(SNG
SNG	: 대체천연가스	substitute natural gas)를 발전용 연료로 사용하기 위한
SS	: 선회 안정화	노력이 기울여지고 있다. 이러한 연료 유연성(fuel flex-
		ibility)을 ⁽²⁾ 비롯한 저 공해물질 배출 가스터빈 ⁽³⁾ 등의 주
그리스	문자	제에서, 연소불안정(combustion instability)은 ⁽⁴⁾ 상당히
θ	: 사잇각 [deg.]	오랜 기간 연구되었음에도 불구하고 아직 연구가 필요

한 분야이다.

연소불안정은 열음향학(thermo-acoustics) 관점에서 보 면 연소실 내 음향파에 의한 속도 또는 당량비 변동이 연소 열방출율의 변동을 야기하여 이로 인한 피드백에 의해 불안정 진폭이 증가하며 발생하고, 지배적인 비 선형 효과에 의해 한계사이클이 형성된다.⁽⁵⁾ 대부분의 이론적인 접근법은 선형적인 해석법을 토대로 하며 비 선형적인 화염 역학(flame dynamics) 모델링이 요구된다. 이를 위해 연료의 화학 조성 및 운전조건의 변화에 대 한 열방출율 정보가 필요하고,^(6,7) 이 때 화염 형상(구조) 정보도 유용하게 된다. 일반적으로 화염 형상을 파악 하기 위해 2차원적인 분포 측정이 가능한 PLIF(planar laser-induced fluorescence)이 사용된다. Lee and Santavicca⁽⁸⁾는 예혼합 화염에 대해 OH PLIF 기법으로 화염 표면을 추정할 수 있는 순시적(instantaneous)인 화염면 위치를 정확히 제공할 수 있음을 보고하였다.⁽⁸⁾ 또한 이 기법을 활용하여 연소 열방출의 비선형적인 응답이 대 규모 와류 구조와 관련됨도 입증된 바 있다.^(6,9) 그러나 PLIF 기법은 펌프 및 염료 레이저 등 다수의 레이저의 사용과 복잡하고 정교한 광학시스템 및 측정을 요구하 여 사용이 제한적이고, 2차원 화염에 적용되는 한계를 갖고 있다.

반면, 자발광(chemiluminescence) 기법은 별도의 광원 이 필요하지 않아 경제적이고 편리하다. 다만 기록된 이 미지가 선적분된 결과이어서 측정하고자 하는 화염성 상의 분포를 재현하기 위해서는 이미지 데이터(투영 데 이터)를 역변환하게 되며, 이 경우 아벨역변환을 일반 적으로 많이 사용한다.⁽¹⁰⁾ 자발광 기법은 최근 토모그래 피 기법을 도입하여 3차원적인 화염 역학 연구에 활용 이 시도되고도 있으나,⁽¹¹⁾ 일반적으로 하나의 ICCD 카메 라를 이용한 한 단면에서의 화염 이미지를 획득하고 있 으므로 재현되는 화염성상의 분포가 축대칭임을 가정 하여야 한다는 한계가 있다.

그러므로 역변환 전에 화염성상 분포의 대칭축에 대하여 양측의 이미지를 평균하여 축대칭 이미지를 얻 는 전처리가 필요하다. 이 때 화염 이미지에 수반되어 있는 잡영(noisy image)을 제거/저감하기 위해 유연화 (smoothing)를 동시에 하게 된다. 유연화는 대개 관심영 역(ROI, region of interest)의 전 구간을 고차 다항식을 이용하여 곡선 접합(curve-fitting)을 하게 된다.

최근 발전용 가스터빈의 선회 안정화(SS, swirl-stabilized) 화염 구조를 보다 정확히 가시화하기 위해 자발 광 이미지를 여러 구간으로 전처리하여 역변환한 연구 가 보고되었다.⁽¹²⁾ 이 선행 연구에 이어서 제트 화염의 순시 OH^{*} 자발광 이미지에 대해 시간 평균된(time-averaged) 각 화염의 구조를 다구간 전처리법을 활용하여 보다 정확히 재현함을 보고하고자 한다.

Fig. 1(a)는 제트 화염 실험에 사용한 동축 노즐의 개



Fig. 1 Schematic of a SNG jet nozzle : (a) its configuration and dimension and (b) field of view(FOV) for OH PLIF.⁽¹³⁾



Fig. 2 Schematic of a SS model gas turbine combustor burning SNG showing FOV.⁽¹⁴⁾

략도로 연료와 산화용 공기가 별도로 공급되어 확산화 염이 생성됨을 알 수 있고, Fig. 1(b)는 동 화염의 관측 영역(FOV, field of view)의 크기를 나타낸다.⁽¹³⁾ 이에 앞 서 선행 연구⁽¹²⁾에서 사용한 Fig. 2의 SS 화염⁽¹⁴⁾을 활 용하여 보다 체계적인 다구간 전처리 기법의 특성, 예 를 들어, 화염영역에 적용되는 다항식 곡선접합의 최 적차수 효과 등도 논의하고자 한다. 이를 위해 자발광 이미지와 동시에 기록된 OH PLIF 결과와 비교하여 제 안된 다구간 전처리 기법의 성능을 평가한다. Fig. 2는 실험에 사용한 예혼합기와 석영 연소기의 단면도로 연 료와 산화용 공기가 선회기에 의해 부분 예혼합(partially premixed)되어 생성된 화염을 예시하고 관측영역 도 나타낸다.

2. 전처리 및 아벨 역변환

2.1 기존 단일구간 전처리된 아벨 역변환

기존의 아벨 역변환법은 Dasch 알고리즘을⁽¹⁰⁾ 토대로 이미 선행 연구를⁽¹⁵⁾ 통해 매트랩 스크립트가 개발되었 다. Fig. 3은 해당 흐름도이다.



Fig. 3 Flowchart of an Abel inversion matlab script.⁽¹⁵⁾

우선 순시 또는 평균 자발광 이미지를 tiff 포맷으로 받아들인다. 다음으로 유동방향(수직 또는 수평), 대칭 축과 같은 유동장 영역(ROI)에 관한 정보 등을 입력받 고, 투영 데이터를 전처리 한다. 우선 대칭축에 대하여 양측 이미지를 평균하여 보다 축대칭인 이미지를 얻 고, 투영 데이터는 대개 잡음이 수반되므로(noisy) 유연 화한다. 유연화는 다항식(종래에는 최대 8차)을 이용하 여 ROI 전 구간을 대상으로 각 행별로 곡선 접합하였 다. 선정된 ROI에 대하여 아벨 역변환 알고리즘에⁽¹⁰⁾ 따라 3점 아벨 재귀연산자(three-point Abel decomposition operator)를 계산하고 유동장인 OH^{*} 분포장을 결정 한다.

마지막으로 결과 분포장을 후처리한다. 예를 들면, 라인 프로파일링, 화염 중심으로 평가할 수 있는 COM (center of mass) 또는 MIP(maximum intensity point) 결 정, *tiff* 포맷의 결과 출력 등이다. 아벨 역변환 알고리 즘의 흐름도에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌 15 를 참고하기 바란다.

Fig. 4에서는 입열량이 다른 두 SS 화염(Flames I 및 II의 입열량은 각각 40 및 50 kW)⁽¹²⁾과 제트 화염의 OH^{*} 자발광 이미지를 기존의 단일구간 8차 다항식 전 처리법을 이용하여 전처리를 한 후 역변환한 이미지와 OH PLIF 이미지를 비교하였다. 논의를 위해 전처리를 하지 않은 역변환 이미지도 수록하였다. 그림에 수록된 모든 이미지는 각 이미지의 최대값으로 정규화된 이미 지(매트랩의 *imagesc* 명령어⁽¹⁶⁾ 사용)이고, 이후 논의될 전처리 및 역변환 이미지도 동일하게 처리되었다.





Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)의 SS 화염에서 공히 나타나는 좌측의 강한 신호는 석영 연소기 벽면에서의 광산란에 주로 기인하는 것으로 판단한다. 전처리를 하지 않은 역 변환 결과는 화염의 구조(형상)을 분명하게 재현하지 못함을 볼 수 있다. 원 자발광 이미지의 잡음 성분이 역변환 과정에서 증폭되어 비정상적인 이상치(outlier) 가 발생하게 되고 이에 따라 상대적으로 정상적인 신 호들이 작게 나타나게 된 때문으로 추정한다. 단일구간 다항식으로 전처리한 역변환 결과는 잡음 제거의 영향 으로 역변환된 신호 크기가 상대적으로 고르게 되어 화염의 구조 파악은 용이하나, 화염의 형상을 OH PLIF 에 비해 크고 타원형 형태로 왜곡된 결과를 나타냄을 볼 수 있다. 또한 비화염 영역에서 인위적 왜곡(artifact) 을 발생시킨다.

Fig. 4(c)의 제트화염의 경우에도 유연화를 하지 않 은 역변환 결과에서 화염의 구조(형상)가 OH PLIF에 비해 좁고 희미하게 나타나는 것을 알 수 있다. 단일 구간 다항식으로 전처리한 역변환 결과는 OH PLIF에 비해 화염의 형상이 커지고, 인위적인 왜곡이 나타나는 등 SS 화염과 비슷한 양상을 보이고 있다.

정리하면, 전처리를 하지 않은 역변환 결과는 내재된 잡영의 영향으로 재현된 이미지가 작고 희미하여 화염 구조를 제대로 가시화하지 못하고, 단일구간 다항식으 로 전처리한 역변환 결과는 화염 이미지를 과장하거나 왜곡시키는 현상이 발생하는 문제점을 가지고 있다.

2.2 다구간 전처리법

단일구간 전처리법의 문제점을 개선하기 위해 자발 광 이미지를 화염 영역과 비화염 영역으로 나눠 서로 다른 곡선접합 기법을 적용하는 다구간 전처리법이 보 고되었다.⁽¹²⁾

이 방법은 (i) 화염 영역에서는 다항식을, 비화염 영 역에서는 이동 평균을 곡선접합 기법으로 적용하며, (ii) 영역간의 경계는 디지털 영상기법으로⁽¹⁶⁾ 결정하며 조 사한 기법 중에서는 Canny 기법이 대부분의 경우 적절 함을 확인하고, (iii) 다항식 곡선접합 구간(화염 영역) 에서의 최적 차수는 공간 분해능을 높이는 점과 인접 구간과의 경계에서 불연속성을 줄여야 하는 점을 고려 하여 결정하며 이를 위해 Fig. 5과 같이 오차 *e*를 정의 한 후 오차 절대값의 합을 최소화하는 식(1)으로 결정 되는 다항식 차수를 최적값으로 선택하였다. 여기서 오차는 자발광 이미지의 각 행에 대해 인접 구간의 경 계에서 곡선접합 라인의 차이를 의미하며, 그 단위는 자발광 신호의 크기를 의미하는 임의 단위(arbitrary unit, a.u.)이다.

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_b} |e| \end{pmatrix}_{\min}$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_b} |e| \end{pmatrix}_{\min}$$

$$(1)$$

$$\left(\sum_{i=1}^{j}\sum_{j=1}^{s}e^{2}\right)_{\min}$$
(2)

여기서, N,는 관심영역 이미지의 높이에 해당하는 행의 수, N_b는 화염영역과 비화염 영역이 구분되는 경 계의 총수이다.

본 연구에서는 (i) 및 (ii)항은 그대로 유지하되 (iii) 항과 관련하여 오차 제곱의 합을 최소화(최소자승)하 는 식(2)로 최적 다항식 차수를 결정하여 화염 구간에 적용하였다. Fig. 6은 본 논문에서 제안한 다구간 전처







Fig. 6 Flow chart for multi-division preprocessing algorithm.

리 기법을 매트랩으로 구현할 때 사용한 흐름도이다. 전술한 바와 같이, 역변환할 자발광 이미지를 경계 검 출 알고리즘을 활용하여 여러 구간으로 나누고, 식(2) 에 따라 화염 영역에 적용할 최적 다항식 차수를 결정 한 후, 비화염 영역에서는 이동평균으로, 화염 영역에 서는 다항식으로 곡선 접합하여 전처리한다. 참고로 이 절차는 전체 흐름도를 나타낸 Fig. 3의 세 번째 블 록의 작업을 대신한다.

3. 대체천연가스 화염 구조

SS 화염은 H₂/CO/CH₄ SNG에 대해 모델 가스터빈 연 소기 내의 부분 예혼합 SS 화염에 대한 실험 연구에서⁽¹⁴⁾ 얻어진 OH^{*} 자발광 및 OH PLIF 결과를 활용하였다. 해당 참고문헌에는 방대한 실험결과가 수록되어 있으 나, 본 연구에서는 비교적 뚜렷한 화염구조 특징을 갖는 Fig. 7의 SS 화염 I 및 II의 결과만을 차용하였다.

Fig. 2에서 보듯이 관측영역(FOV)은 연소기 덤프면 중 앙 130×130 mm² 영역이고, 이미지 크기는 1024×1024 픽셀(pixel)이다. OH PLIF 기록 시 레이저 광원 인텐시 티(intensity)의 공간적 불균일성이 실험적으로 보정되지 않아, 대칭축에 수직방향으로 정규분포를 가정하여 보 정한 후 활용하였다. 역변환에 사용된 자발광 이미지는 Fig. 8에 보인 바와 같이 좌측의 반쪽만을 ROI로 설정 하였다. OH PLIF 이미지는 광계측 장치 구성에 의해



Fig. 7 OH PLIF and raw OH chemiluminescence images.



Fig. 8 Half raw OH chemiluminescence images to be inverted, superimposed with lines (in white) of the maximum signal row.



Table 1 Optimum degrees of polynomials for flame region, based on Eq. (1) and Eq. (2) for the three flames

the three	flames						
Maximum degree of polynomials	5	8	11	15			
Using Eq. (1)							
SS Flame I	5	7	11	11			
SS Flame II	5	7	11	11			
Jet flame	5	7	10	10			
Using Eq. (2)							
SS Flame I	5	8	11	14			
SS Flame II	5	8	11	11			
Jet flame	5	8	9	9			

화제로 사용한 Fig. 7 및 Fig. 8의 연소실험의 이미지를 사용하였다.⁽¹³⁾ Fig. 1에 나타난 바와 같이, OH PLIF은 14.5×14.5 mm²(OH^{*} 자발광은 12.1×12.1 mm²)의 영역에 서 측정되었다. 두 이미지 모두 512×512픽셀이다. 제 트화염 역시 레이저 광원 인텐시티의 공간적 불균일성 을 정규분포를 가정하여 보정하였으나, SS 화염과 다 르게 대칭축의 수평방향으로 보정하여 사용하였다.

3.1 전처리 된 자발광 이미지

다구간 전처리법의 상대적인 우수성을 보고한 선행 연구에⁽¹²⁾ 이어, 전술한 바와 같이 화염영역에 적용하 는 최적 다항식 차수를 결정하는 식의 효과 등을 SS 화 염을 대상으로 우선 살펴보기로 한다. 이어서 제트화 염에 대해 동일하게 전처리법을 적용하여 단일구간 전 처리법보다 우수한 다구간 전처리법의 성능을 재확인 하고자 한다.

3.1.1 최적 다항식 차수

Table 1은 식(1) 및 식(2)의 다항식 차수 결정식에 따 라 허용 최대차수를 5, 8, 11, 그리고 15로 증가시켰을 때 결정된 각 화염에서의 최적 다항식 차수의 결과를 정리한 표이다. 표에서 보는 바와 같이, SS 화염의 경 우 식(1) 보다 최소자승 개념인 식(2)를 사용하였을 때 다항식의 최적 차수가 같거나 다소 큰 값으로 결정되 는 경향을 보였다. 반면 제트화염의 경우 그 반대의 경 향도 보이고 있다. 이는 화염별로 자발광 이미지의 투영 데이터 추이가 각기 다르기 때문으로 이해된다.

조사한 범위 내에서는 허용 최대차수가 증가되면 최 적차수도 대개 증가하지만 11차인 최대 차수에서 포화 되는 경향을 보였다. 반면 식(2)를 사용한 SS 화염 I의 경우를 보면, 다항식 구간의 차수가 점차 증가하여 14



Fig. 9 Preprocessed images and data profiles along the maximum signal row with different degree of polynomials for flame region in SS flames.

Table 2 Comparison of values of Eq. (2) with different degree of polynomials for flame region in a.u.

			(×10)
Degree of polynomials (optimum/maximum)	5/5	8/8	11/11
SS Flame I	13.1	3.1	1.5
SS Flame II	42.2	17.4	11.7

차에 이르는 것을 확인 할 수 있다.

이상의 결과를 토대로 앞으로의 논의는 식(2)를 이 용하고 지면 관계상 특이 사항이 없는 한 허용 최대차 수는 11차까지로 한정한다.

3.1.2 SS 화염

앞에서 결정된 최적 다항식차수를 SS 화염 자발광 이미지의 화염 영역에 적용하였을 때 전처리 결과를 비교한 결과가 Fig. 9이다. 그림에서 보는 바와 같이, 다항식의 차수가 증가함에 따라 화염영역의 크기가 작 아짐을 알 수 있다.

최대 투영 데이터 발생 행(row)에서의 전처리 된 인 텐시티 분포로 비교를 해보면, 두 화염 모두에서 다항 식의 차수가 증가할수록 화염의 공간 분해능이 향상되 고, 비화염 영역과 화염 영역의 경계에서 불연속성이 개선됨을 알 수 있다. 이는 Table 2에 정리 된 결과와 같이, 다항식 차수가 증가할수록 식(2)의 값이 급격하 게 감소함을 통해 확인할 수 있다. 참고로 SS 화염 I의 14차 결과의 경계 오차는 더욱 더 작은 값을 보였다.

3.1.3 제트 화염

Fig. 4와 관련하여 논의하였듯이, 제트 화염의 자발광 이미지의 역변환 과정에서도 전처리를 하지 않거나 기 존의 단일구간 전처리된 역변환 이미지의 문제점이 존 재한다.

SS 화염에 대해 다구간 전처리법의 우수성을 보고 한 선행연구⁽¹²⁾에서와 같이 제트 화염에 대해서도 다 구간 전처리법의 비화염 구간 내 부분(piecewise) 곡선 접합들(이동평균, 2차원 컨볼루션, 및 스플라인)의 특성, 그리고 영역 경계 검출 알고리즘들(Sobel, Canny, Pre Witt, Robert, 및 Log)의⁽¹⁶⁾ 특성도 조사하였으나 SS 화 염에 대하여 기 보고한 내용(또는 제 2.2절 내용)과 크게 다르지 않아 관련 내용의 논의는 생략하고 그 결과를 그대로 채택하였다. 즉 화염 영역에서는 다항식을, 비 화염 영역에서는 이동 평균을 곡선접합 기법으로 적용 하였다. 영역간의 경계는 Canny 방법으로 결정하였다.

Table 1에 정리된 바와 같이 허용 최대 차수에 대해 결정된 최적 차수의 변화에 따른 제트 화염의 전처리 결과를 Fig. 10에 비교해 보았다. 그림에서 볼 수 있듯 이, 제트 화염의 전처리 결과는 SS 화염과는 달리 다 항식 차수의 변화에 따른 영향이 적게 나타난다. 이 경 향은 최대 투영 데이터 행에서의 인텐시티 분포를 비교 해 보아도 확인된다. 제트화염이 SS 화염의 결과에 비 해 큰 차이가 없는 이유는, 화염 영역에서 투영 데이터 가 SS 화염에 비해 상대적으로 좁은 영역에 비교적 단 순한 형태로 분포하기 때문이라 판단된다.

다항식 차수 효과에 이어, 전처리법의 특성을 살펴보 기 위해 Fig. 11과 같이 제트 화염 OH^{*} 자발광 이미지



Fig. 10 Preprocessed images and data profiles along the maximum signal row with different degree of polynomials for flame region in jet flame.



Fig. 11 Comparison of (a) preprocessed images and (b) data profiles along the maximum signal row without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division preprocess of jet flame.

를 전처리하지 않은, 단일구간 전처리한(이 두 결과는 Fig. 4(c)의 역변환 결과에 활용되었음), 및 다구간 전 처리한 세 결과를 비교하였다. 단일구간 전처리 및 다 구간 전처리 기법(화염 영역)의 다항식 차수는 각각 8 차 및 9차를 적용하였다.

우선 Fig. 11(a)에 의하면 단일구간 전처리한 이미지 는 전처리하지 않은 이미지 및 다구간 이미지와 비교 할 때, 화염 영역이 넓게 나타나고 비화염 영역에서 왜곡현상이 많이 발생함을 알 수 있다. 보다 상세한 비 교를 위해 Fig. 11(b)에서와 같이 최대 투영 데이터 행 에서의 인텐시티 분포를 살펴보면, 단일 구간 전처리 결과는 비화염 영역의 낮은 신호 영역에서 왜곡을 발 생시킴을 볼 수 있다. 반면 다구간 전처리 기법은 전 처리하지 않은 결과에서 나타나는 잡영을 다소 완화시 키며 비화염 및 화염 영역의 경계에서 연속적이고 전 체적으로 왜곡현상을 거의 발생시키지 않음을 확인할 수 있다.

3.2 역변환 이미지

Fig. 9 및 Fig. 10에 각각 나타낸 SS 화염과 제트 화 염의 전처리된 자발광 투영 데이터를 토대로 역변환한 결과가 Fig. 12이다. 역변환결과의 수월성을 판단하기 위해 OH PLIF 결과와 비교하였으며, (1) 전체적인 화 염 구조의 유사성, (2) 왜곡현상의 발생 정도, 그리고 (3) 화염 중심(MIP)의⁽¹⁷⁾ 좌표를 비교하였다.

3.2.1 SS 화염

다구간 전처리기법의 우수성을 보고한 선행 연구에 서는 Table 1에 나타난 바와 같이 다항식 차수 결정식 식(1)을 사용하고 허용 최대 차수를 8차로 고정하였기 때문에 최적 차수가 모두 7차인 결과이었다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 식(2)에 의한 최적 다항식 차 수들의 효과를 조사하였고, 이들에 의한 역변환 결과 는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12(a) 및 Fig. 12(b)의 SS 화염에 대해서는 다항 식 차수 증가에 따라 화염 내부 구조를 더 잘 묘사하는 반면, 화염 두께를 보다 얇게 재현하는 경향을 보인다. 또한 OH PLIP과 비교하였을 때 8차 다항식에 의해 재 현된 화염구조가 11차 다항식 재현 결과에 비해 보다 유사함을 알 수 있다. 최대 행에서의 인텐시티 분포을 보면, 차수가 증가할수록 비화염 및 화염 영역의 경계 에서의 불연속성이 줄어들고 왜곡도 상대적으로 적은 것으로 판단된다. Fig. 13(a) 및 Fig. 13(b)의 MIP 조사 결과, 두 SS 화염에 대해 공통적으로 8차 이상의 차수 에서 거의 동일함을 알 수 있다.

따라서 조사한 SS 화염에 대해서는 외견상 전체 화 염구조는 8차 다항식 결과가 가장 적합한 것처럼 보이



Fig. 12 Comparison of inverted images with different degree of polynomials for flame region in (a) SS Flame I, (b) SS Flames II, and (c) jet flame.

나 공간 분해능, 왜곡 현상, 경계의 연속성 등의 측면 에서는 9차 이상의 고차 다항식으로 곡선 접합하는 것 이 유리함을 알 수 있다.

3.2.2 제트 화염

SS 화염과 마찬가지로 우선 최적 다항식 차수에 대 한 영향을 Fig. 12(c)와 같이 살펴보고자 한다. 그림에 서 보는 바와 같이 8차 이상의 충분히 큰 차수의 경우 다항식 차수에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 13(c)의 MIP 조사 결과, 조사한 모든 다항식 차수에 대 해 육안으로 차수 변화의 영향을 확인하기는 어렵다. 보다 정량적인 비교를 위해 MIP의 좌표 (r, z)와 좌표 원점으로부터의 거리와 사잇각 (L, θ)를 평가하여 Table



Fig. 13 Comparison of MIPs of OH PLIF and inverted images with different degree of polynomials for flame region in (a) SS Flame I, (b) SS Flames II, and (c) jet flame.

3에 표시하고 OH PLIF의 최대점 값과 비교하였다. Table 3에서 볼 수 있듯이 조사한 모든 다항식 차수에 대해 주목할 만한 차이는 볼 수 없다. 정리하면, 조사 한 제트화염에 대해서는 8차 이상의 다항식으로 유연 화함이 필요한 것으로 판단된다.

다음으로 다구간 전처리 기법의 효과를 살펴보고자 한다. Fig. 11의 세 가지 전처리 결과를 활용하여 아벨 역변환한 후 OH PLIF 결과와 비교하여 Fig. 14에 나타 내었다(참고로 이미 Fig. 4에서 전처리하지 않은 경우 와 단일구간 다항식 전처리한 역변환 이미지에 대해 논의하였으며, 특히 단일구간 전처리된 결과의 문제점 은 분명해 보였다). Fig. 14(a)에서 보는 바와 같이, 전 처리하지 않거나 다구간 전처리한 역변환 결과가 OH

Table 3	Comparison	of MIP	coordinates	of various
	images			

			Jet flame			
Image			r	Z	L	θ
			(mm)	(mm)	(mm)	(°)
OH PLIF			1.25	0.17	1.26	82.4
	Optimum verted degree of polynomials	5	1.17	0.00	1.17	90.0
Inverted		8	1.17	0.00	1.17	90.0
		11	1.20	0.02	1.20	88.9



Fig. 14 Comparison of (a) preprocessed images and (b) data profiles along the maximum signal row without smoothing, with uni-division preprocess, with multi-division preprocess in jet flame.

PLIF 결과에 비해 모두 다소 얇게 화염 구조를 재현하고 있어 보인다. 또한, 외견 상 두 역변환 결과는 전체 적으로 큰 차이를 보이지 않는 듯하나, 최대 열방출점 근처에서 다구간 전처리된 역변환 결과가 다소 강한 (보다 붉은) 신호를 보이는 것으로 관찰된다.

이 현상은 Fig. 14(b)의 최대 투영 데이터 행에서의 인텐시티 분포를 비교해 보아도 확인할 수 있다. 즉 최대 인텐시티 값은 두 경우에서 거의 같으나, 인텐시 티 분포 곡선의 폭을 비교하면 전처리하지 않은 역변 환 결과의 폭이 다구간 전처리한 역변환 결과의 폭에 비해 좁은 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 다구간 전 처리한 역변환 이미지에서 인텐시티가 높은 영역이 상 대적으로 넓게 나타난다. 따라서 다구간 전처리한 역 변환 결과가 전처리하지 않은 결과에 비해 보다 정확 히 화염 구조를 재현하고 있다고 판단된다.

Fig. 15의 OH PLIP과 세 역변환 결과의 MIP를 조사 한 결과, 세 역변환 결과의 차이를 육안으로 식별하기 는 불가능하며, Table 4의 결과와 같은 좌표로 표시했 을 때 단일구간 전처리한 결과가 다소 OH PLIF 결과 에 벗어나는 것을 알 수 있고, 우연히도 전처리하지 않은 결과와 다구간 전처리한 결과는 같은 값을 보이



• : OH PLIF, \approx : w/o preprocess, \Leftrightarrow : w/uni-div., * : w/multi-div.

Fig. 15 Comparison of MIPs of OH PLIF and several inverted images of jet flame.

Table 4 Comparison of MIP coordinates of various images

		Jet flame				
I	mage	r	Z	L	θ	
		(mm)	(mm)	(mm)	(°)	
OH PLIF		1.25	0.17	1.26	82.4	
	w/o preprocess	1.20	0.02	1.20	88.9	
Inverted	w/ uni-division	1.05	0.02	1.05	88.7	
	w/ multi-div.	1.20	0.02	1.20	88.9	

고 있음을 알 수 있다.

정리하면, 제트화염의 경우에도 전체적인 화염구조, 왜곡 정도, 그리고 MIP 정확도 측면에서 본 연구에서 제안한 다구간 전처리법을 적용하는 것이 화염 구조를 재현하는데 유리한 것을 확인할 수 있다. 비록 전처리 하지 않은 결과가 일부 관점에서 대등한 결과를 보였 으나, 자발광 이미지에 내재된 잡영 성분을 제거하기 위해서도 다구간 전처리를 하는 것이 합리적이라 판단 된다.

4. 결 론

기존의 단일 구간/다항식 곡선접합의 전처리법과 달 리, 전 구간을 비화염 및 화염의 여러 구간으로 나누어, 비화염 영역에서는 이동 평균으로 대표되는 부분 곡선 접합을, 화염 영역에서는 다항식 곡선접합을 병용하는 다구간 전처리법을 제안하였다. 또한, 다구간 전처리 기법의 두 곡선이 접하는 지점에서 오차를 계산하여 최 적의 다항식 차수를 결정하는 두 결정식의 결과를 비 교하였고 최적 다항식 차수에 따른 역변환 결과의 차 이를 OH PLIF 결과와 비교하여 다항식 차수의 효과를 비교하였다. 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 선행 연구에서⁽¹²⁾ 사용한 오차 절대값을 최소화하는 결정식 식(1) 보다 오차의 제곱을 최소화(최소 자승)하는 결정식 식(2)이 보다 더 높은 다항식 차 수를 결정하는 것을 확인하였다.
- (2) 다항식 차수에 따른 역변환 이미지에 미치는 영향 을 보면, 다항식 차수가 높아짐에 따라 일반적으로 화염 구조의 복잡성을 재현하는 효과는 뛰어났고, 왜곡 현상도 완화시켜줌을 알 수 있었다. 특히 비 화염 및 화염 영역의 경계에서 불연속성 개선 효과 가 우수하였다. 조사한 다항식 차수 범위(허용 최대 차수 : 15)에서는 SS 화염의 경우 11차 이상의 고 차 다항식이 유리한 반면, 제트 화염에서는 8차 이 상에서는 동등한 결과를 보였다.
- (3) 제트화염에 다구간 전처리 기법을 적용 결과, SS 화 염에 적용한 선행연구 결과와 동일하게 단일구간 전 처리 기법에 비해서는 월등하게 우수함을 알 수 있 었다. 전처리하지 않은 경우에 비해서도 다소 개선 된 역변환 결과를 보였다. 자발광 이미지에 내재된 잡영 성분을 감안하면 (다구간) 전처리 과정이 필수 적인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2013년도 한밭대학교 교내연구비 지원을 받아 수행하였다. 실험 데이터를 제공해준 서울대학교 이민철박사 및 황정재박사께 감사드리고, 데이터를 정 리해준 어진선 학생 및 인병구 학생에게도 감사한다.

References

- International Energy Agency, World Energy Outlook 2012 : Executive Summary : IEA; 2012, Available from : http://www.worldenergyoutlook.org/publicatio ns/weo-2012/.
- 2. Klassen, M., 2005, White paper on natural gas interchangeability and non-combustion end use : C.3 Power Generation NGC+ Interchangeability Work Group.
- Döbbeling, K., Koch, H., and Hellat, J., 2005, 25 Years of BBC/ABB/Alstom lean premix combustion technologies, J. Eng. Gas Turbine Power, Vol. 129, No. 1, pp. 2-12.
- 4. Lieuwen, T. C. and Yang, V., 2005, Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines : Operational Experience, Fundamental Mechanisms and Modeling, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA.
- Zinn, B. T. and Lieuwen, T. C., 2005, Combustion instability : basic concepts, *Eds.* Lieuwen, T. C. and Yang, V., Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines : Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA.
- Balachandran, R., Ayoola, B. O., Kaminski, C. F., Dowling, A. P., and Mastorakos, E., 2005, Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations, Combust. Flame, Vol. 143, pp. 37-55.
- Palies, P., Durox, D., Schuller, T., and Candel, S., 2010, The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames, Combust. Flame, Vol. 157, pp. 1698-1717.
- Lee, J. G. and Santavicca, D. A., 2003, Experimental diagnostics for the study of combustion instabilities in lean premixed combustors, J. Propul. Power, Vol. 19, pp. 735-750.
- Thumuluru, S. K. and Lieuwen, T., 2009, Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics, Proc. Combust. Inst., Vol. 32, pp. 2893-2900.
- Dasch, C. J., 1992, One-dimensional tomography : a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods, Applied Optics, Vol. 31, No. 8, pp. 1146-1152.
- 11. Worth, N. A. and Dawson, J. R., 2013, Tomographic

reconstruction of OH^{*} chemiluminescence in two interacting turbulent flames, Meas. Sci. Technol., Vol. 24, 024013.

- 12. Ahn, K. H., Song, W. J., and Cha, D. J., 2015, Effect of a preprocessing method on the inversion of OH^{*} chemiluminescence images acquired for visualizing SNG swirl-stabilized flame structure, J. Korean Soc. Combust. Vol. 20, No. 1, pp. 25-31.
- Hwang, J., 2014, NO_x Scaling and Stability Characteristics of Turbulent Non-premixed Jet Flames of H₂/CO Syngas, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.
- 14. Lee, M. C., 2014, An Experimental Study on Combustion Instability and NO_x Emission Characteristics

of H₂/CO/CH₄ Syngas in a Gas Turbine Combustor, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.

- Cha, D. J., Song, W. J., Gutmark, E., Gomez, R. V., and Chukwueloka, O. U., 2009, Deconvolution of chemiluminescence images from a high-pressure gas turbine combustion facility, Proceedings of KSME conference 09EP003, pp. 11-16.
- 16. http://www.mathworks.com.
- Kim, K. T., Lee, J. G., Lee, B. D., Quay, B. D., and Santavicca, D. A., 2010, 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, 041502.