

라디칼 PLIF계측을 이용한 연소실의 공간적 열발생을 예측

Prediction of Spatial Heat Release Rate of Combustion Chamber by Radicals-PLIF

최 경 민*

G. M. Choi

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the relationships between the local heat release rate and CH concentration have been investigated by numerical simulations of methane-air premixed flames. And simultaneous CH and OH PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) measurement has been also conducted for lean premixed flame as well as for laminar flames. Numerical simulations are conducted for laminar premixed flames and turbulent ones by using PREMIX in CHEMKIN and two dimensional DNS code with GRI mechanism version 2.11, respectively. In the case of laminar premixed flame, the distance between the peak of heat release rate and that of CH concentration is under $91 \mu\text{m}$ for all equivalence ratio calculated in present work. Even for the premixed flame in high intensity turbulence, the distribution of the heat release rate coincides with that of CH mole fraction. For CH PLIF measurements in the laminar premixed flame burner, CH fluorescence intensity as a function of equivalence ratio shows a similar trend with CH mole fraction computed by GRI mechanism. Simultaneous CH and OH PLIF measurement gave us useful information of instantaneous reaction zone. In addition, CH fluorescence can be measured even for lean conditions where CH mole fraction significantly decreases compared with that of stoichiometric condition. It was found that CH PLIF measurements can be applicable to the estimation of the spatial fluctuations of heat release rate in the engine combustion.

주요기술용어 : PLIF (평면레이저유도형광), Heat release rate (열발생율), Laminar premixed flame (층류예혼합화염), fluorescence intensity (형광세기)

1. 서론

회박연소는 화학반응을 이용한 에너지 생성 시스템에 있어서 저공해 및 에너지 절약을 위하여 널리 이용되고 있다. 그러나, 이러한 회박

연소에 의한 연소의 불안정성은 연소소음 및 심한 진동을 유발하는 경우가 있다. 연소 소음은 전단류에서 와류와 화염간의 상호작용에 의해 생성된다고 인식되고 있다. 그래서, 청정 및 고효율엔진연소를 위해서는 진동 연소의 효율적인 제어가 필요하다.

진동연소제어의 이론을 확립하기 위해서는

* 일본항공우주연구소

국소화염구조의 상세한 정보가 선행되어야 한다. 최근의 레이저 계측 기술의 발달과 함께 PIV(Particle Image Velocimetry), PLIF등의 계측법을 이용한 난류화염의 국소화염구조의 조사가 가능하게 되었다. 화염면의 특성을 실험적으로 조사하기 위해서는 화염면의 정확한 위치 결정이 요구된다. 탄화수소계 연료를 이용한 화염의 경우, CH라디칼의 존재는 산화반응 영역을 나타내고, 이는 화염면의 존재를 의미한다. CH 라디칼은 화염면에서 생성되고 반응대를 대표할 정도로 충분히 좁은 영역에서 분포하므로, 화염면의 지표로서 CH PLIF계측법이 사용되어 왔다[1, 2]. 그러므로, 다양한 화염의 반응대의 지표로서 CH 라디칼이 이용되어 왔다^[3-5]. 메탄-질소-공기의 층류화염의 수치계산으로부터 OH몰분율의 피크는 기연가스층에서 분포하고, CH몰분율의 피크는 미연가스층에 분포하는 것으로 나타났다^[6]. 이러한 특성을 이용하여, CH와 OH의 경계영역은 이론공연비의 표시로서 사용되기도 하였다^[3]. CH 농도가 언제나 열발생율과 관련되는 것은 아니고, 특히, 화염면이 불연속일 경우에 열발생율과 정성적으로 다른 특성을 나타낼 수 있다는 보고^[7,8]도 있지만, CH라디칼은 대부분의 반응대와 일치하고, 난류화염의 반응대를 대표한다고 알려져 있다^[9,10]. 이상의 선행연구들의 이유로부터 CH라디칼은 열발생 및 화염면의 지표로서의 역할이 기대된다.

열발생율은 난류 반응성 유동의 소음 생성에 매우 중요한 역할을 하므로^[11], CH PLIF 측정 은 열발생 및 소음 생성의 공간적, 시간적 정보를 제공할 것이다. 그리고, 엔진내부의 연소반응에 있어서의 공간적, 시간적인 변동성분은 난류연소의 제어이론 확립에 매우 중요한 역할을 할 것이다. 일반적으로 난류화염에서는 미연혼합기가 난류의 영향을 받으므로 화염대 주변의 열발생율은 공간적으로 변동한다고 알려져 있다. 화학반응속도는 화학종의 확산에 비해 월등히 빠르지만, 난류화염에 있어서의 유체유동과 화학반응간의 상호작용은 층류화염의 그것과는 다를 것으로 예상된다. 그리고, 실제의 엔진 등은 고압 또는 상압에서 운전되고

있음에도 불구하고, 선행 CH PLIF계측은 주로 확산화염^[2, 3, 5]이나 저압조건에서의 예혼합화염^[12]을 대상으로 이루어졌다. 그러므로, CH PLIF가 희박 예혼합화염의 열발생 예측에 적용되어 검증될 필요가 있다.

본 연구의 최종적인 목적은 희박 난류화염 또는 엔진내부 연소의 열발생율의 공간적인 분포를 측정하는 것이다. 그래서, 국소 열발생율과 CH농도와의 관계를 1차원 예혼합화염과 2차원 강난류 화염의 수치해석을 통하여 조사하였다. 그리고, 층류화염과 공간적으로 변동하는 희박화염의 조건에 대하여 CH와 OH PLIF를 동시계측하였다. CH-OH 라디칼의 경계영역은 순간적인 반응대의 표시로서 유용하므로 CH와 OH 라디칼의 동시계측을 통하여 희박 조건의 순간적인 반응대의 정보를 얻을 수 있을 것이다.

2. 수치계산방법 및 실험 조건

직접수치해석에 있어서, 외력, 소켓효과, 듀포 효과, 압력구배에 의한 확산 및 복사열전달 등을 무시하였다^[13]. 메탄-공기의 화학반응기구로는 279개의 소반응(GRI mechanism)을 사용하였다^[14]. GRI메커니즘은 49종의 화학종으로 구성되어 있으므로, 지배방정식은 48개의 화학종 보존방정식과 연속, 운동량 및 에너지 방정식으로 구성되었다. 화학종의 열수송 물성치는 CHEMKIN FORTRAN 팩키지^[15,16]로부터 계산되었다.

계산영역은 1.48cm X 0.74cm로 설정하였다. 유동방향(x)의 경계 조건으로는 Navier-Stokes Characteristic 경계조건^[17,18]을 사용하였고, 그 직각방향(y)에는 주기 경계조건을 사용하였다. x방향에 있어서의 지배방정식은 4차중심 차분법을, y방향의 지배방정식은 스펙트럴법을 이용하여 그 해를 구하였다. 시간적분에는 2차 Adams-Bashforth법을 이용하였다. 수치계산은 1409 X 512의 격자점에서 이루어졌고, 메탄-공기 예혼합기의 초기 조건은 0.1MPa, 298.15K의 당량비 0.6로 설정하였다. 초기 난류조건은 $u'/S_L = 18.60$, $l/\delta_L = 2.55$ 로 설정하

였다. 여기서, u' 은 난류의 변동속도의 rms치, S_L 은 1차원 예혼합화염의 계산을 통한 층류연소속도, l 은 난류의 적분길이 스케일, δ_L 은 층류화염두께를 나타낸다. 초기경계의 난류는 스펙트럴법을 이용한 2차원 등방성 난류장의 결과로부터 얻었다. 난류의 계산에는 주기 경계조건을 사용하였고, 1.5 eddy turnover시간 경과후의 결과를 사용하였다.

CH와 OH의 동시PLIF계측을 위한 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. CH PLIF계측에는, 390.30nm의 $B^2\Sigma^-X^2\Pi(0,0)$ 밴드 중, $Q_1(7,5)$ 천이를 유기하여, 420-440nm의 A-X(1,1), (0,0)와 B-X(0,1)밴드의 형광 강도를 측정하였다. 많은 연구 그룹들이 이 천이를 이용하여 성공적인 CH PLIF계측을 수행하였다^[10,21]. 레이저 시스템은 XeCl 엑시머레이저(Lambda Physik, LPX 110I, 308nm, 200mJ/pulse)와 색소레이저(Lambda Physik, Scanmate 2)로 구성되어있고, 펄스당 레이저 강도는 23-25mJ/pulse이다. 광학계는 레이저 빔의 직각방향에 위치하였다. 광증폭 CCD카메라(Andor Technology, DH734-25U-03)에 105mm, F4.5의 UV렌즈를 장착하여 이미지를 가시화하였다. 화염으로부터의 배경광을 제거하기 위하여 두께3mm의 광학필터(KV-418 Scott)를 사용하였다.

OH PLIF용 레이저 시스템은 Nd-YAG레이저(Spectra-Physics, Quanta Ray PRO-110, 532nm, 350mJ/pulse)와 색소레이저(Sirah Precisionscan)로 구성되어 있고, 출력 레이저 광의 강도는 5mJ/pulse이다. 306-320nm의

A-X(1,0),(0,0)밴드로부터 형광강도를 수광하였다. 광증폭 CCD카메라(PI-MAX, 512RB-G1)에 105mm/f4.5의 UV-Nikkor렌즈를 장착하여 가시화하였다. OH PLIF용 카메라는 CH용의 반대방향에 위치하고, 배경광의 제거를 위하여 WG305와 UG-11광학 필터를 사용하였다. CH와 OH의 계측시간 간격은 150ns 이내로 하였다. 일반적으로 화학종의 레이트 방정식은 각 픽셀에 수광된 광자수로 표현할 수 있고^[22], 여기용 레이저의 발광시간이 화학종의 형광시간보다 긴 경우에 퀀칭효과는 무시될 수 있다. 이 경우에 센서에 검출된 신호의 강도는 화학종의 수밀도에 비례하게 되어, 정성적인 계측이 가능하게 된다. 본 연구에서의 레이저의 발광시간은 10ns로, CH 리디칼의 형광시간보다 훨씬 긴 시간이므로 측정된 CH PLIF강도는 정성적으로 CH농도에 비례할 것으로 생각된다.

실험 대상의 층류화염은 슬롯버너와 평면화염버너에서 형성되었다. 슬롯버너의 경우, 당량비를 0.8에서 1.2까지 변화시켰으며, 혼합기의 유량은 20.679 l/min이다. 희박 예혼합화염의 CH 및 OH PLIF계측을 위하여 평면화염버너를 이용하였다. 평면화염버너의 경우, 당량비 0.6에서 0.7사이에 조건에 있어서 혼합기의 유량을 50.0 l/min정도로 증가시키면, 화염대가 공간적으로 변동하는 셀형화염이 형성되었다. 각 버너에 있어서 레이저 빔의 두께는 약 8mm 정도이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1 열발생율과 CH농도

국소 열발생율은 비정상 반응성 유동장의 실험적 연구에 있어서 매우 중요한 인자이다. 그러나, 국소 반응을 또는 열발생율의 직접적인 계측법은 아직도 개발되지 않고 있다. 따라서, 국소 열발생율과 CH농도간의 관계를 메탄-공기 예혼합화염의 직접수치계산을 통하여 알아보자. Figure 2는 1차원 층류 메탄-공기 예혼합화염의 수치계산으로부터 구해진 열발생율과 CH농도의 피이크간의 거리를 나타내고 있

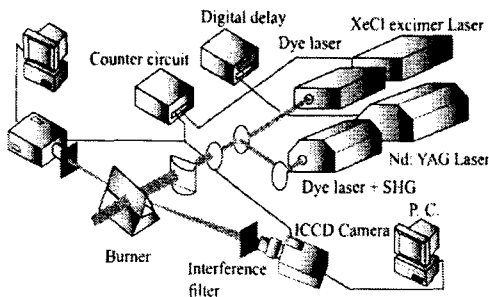


Fig. 1 Schematic diagram of the simultaneous CH and OH PLIF experiment

다. 수치계산에는 CHEMKIN의 PREMIX를 사용하였다. 화학반응기구조는 GRI Mech. 2.11를 사용하였고, 초기 혼합기의 압력과 온도는 0.1MPa과 298.15K으로 설정하였다. $\phi=0.9$ 의 조건에 있어서 열발생율과 CH농도의 피크간의 거리는 $35\mu\text{m}$ 로 나타났고, $\phi < 0.9$ 와 $\phi > 0.9$ 의 조건에서는 그 거리가 증가하여 $\phi = 1.3$ 의 조건에서 $91\mu\text{m}$ 로 최대값을 나타내었다. 이 같은 현상은 연소속도의 감소에 의한 화염대 두께의 증가에 기인한다고 생각된다. 일반적으로 화염대의 두께가 0.1mm인 것을 감안하면, 충분히 작은 값인 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 CH농도가 층류예혼합화염의 공간적인 국소 열발생율을 나타내는 지표로서 충분

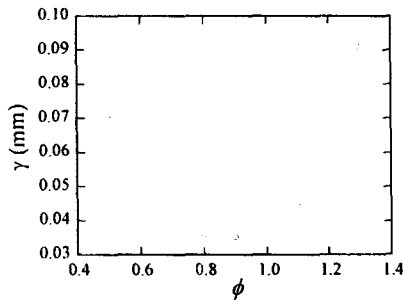


Fig. 2 Distance between peaks of the heat release rate and CH mole fraction (γ) in the laminar methane-air premixed flames

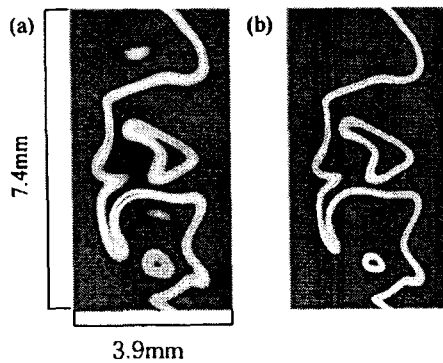


Fig. 3 Distributions of the heat release rate (a) and CH mole fraction (b) in a turbulent methane-air premixed flame.

하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 강난류화염의 CH PLIF측정 결과, 화염의 권칭에 중간생성물과 전체 반응속도간의 관계가 균형을 잃는 경우도 있다는 결과가 보고되어 있다^[8,9,23]. 그러므로, 본 연구에서는 2차원 난류 예혼합화염의 직접수치해석을 통하여 국소 열발생율과 CH농도와의 관계를 상세히 조사하였다. Figure 3(a)(b)에 메탄-공기 난류예혼합화염의 직접수치해석을 통한 국소 열발생율과 CH물분율의 분포를 나타내었다. 강난류의 예혼합화염임에도 불구하고 국소 열발생율의 분포는 CH물분율의 분포와 일치하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 CH농도가 강난류 예혼합화염의 조건에 있어서도 국소 열발생율의 공간적인 분포와 일치함을 알 수 있다.

3-2 CH PLIF계측을 통한 국소 열발생율 예측

Figure 4는 슬롯버너에서 형성된 당량비의 변화에 따른 CH와 OH 동시PLIF의 계측 결과를 나타내고 있다. 각 화상은 동조건을 100번 계측하여 평균한 결과를 나타내고 있다. CH라디칼의 PLIF는 각 화염 조건의 청염영역과 일치한 반면, OH 라디칼의 PLIF는 연료가 희박한 영역에서 강한 강도분포를 나타내었고, OH 라디칼이 CH라디칼보다 넓은 영역에서 관찰되

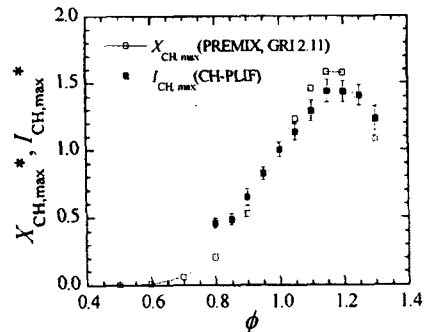


Fig. 4 CH(upper) and OH(lower) fluorescence images for methane-air premixed flames as a function of equivalence ratio in a slot burner

었다. 이는 연소생성물의 넓은 분포와 OH라디칼의 긴 수명에 기인한다고 생각된다. OH 라디칼은 고온의 연소 생성물영역에서 주로 나타나므로 온도 상승의 지표로 사용되어 왔다^[24]. 따라서, OH라디칼은 고온 생성물과 상온 반응물간의 경계 영역을 나타낸다. 그러나, CH PLIF는 화염대의 예열대라고 해석되는 매우 짧은 수명의 중간 생성물의 분포를 나타내고 있다. 본 연구의 실험 조건에 있어서, 당량비의 변화에 따른 CH PLIF의 강도변화가 관찰된다. 본 연구에서 사용한 슬롯버너의 하한가연한계가 $\phi=0.7$ 이므로 실험 조건을 $\phi = 0.8 - 1.2$ 로 하였다. CH와 OH 동시PLIF계측으로부터, CH PLIF는 화염대의 예열대영역을 가시화하고 있는 것을 알 수 있고, 국소 열발생율과 CH PLIF간의 높은 상관관계가 기대된다.

Figure 5에서는 CH PLIF계측에서 얻어진 CH PLIF강도의 최대치와 GRI Mech. 2.11를 이용한 층류화염의 수치계산에서 얻은 CH물분율의 최대치를 비교하였다. 여기서, CH물분율과 CH PLIF강도는 각각의 $\phi=1.0$ 조건에 값으로 무차원화하여, 정성적인 비교를 하였다. CH물분율과 CH PLIF의 강도분포는 전체적으로 잘 일치하지만, 과농한 조건과 희박한 조건에서 정성적인 차이가 관찰되었다.

이러한 정성적인 차이는 화염의 켄칭효과나 화학종의 수밀도에 미치는 온도효과 등에 기인하는 것으로 추측되지만, 현 단계에서는 그 정확한 원인이 밝혀지지 않았다. 이러한 정성적인 불일치에도 불구하고, CH PLIF강도는 당량비 변화에 따른 CH 물분율을 잘 반영하고 있다.

난류화염장에서 CH PLIF계측을 이용한 공간적인 국소 열발생율의 분포를 예측하기 위해서는 CH농도의 공간적인 변동을 짐작하지 않으면 안된다. 특히, CH농도는 희박조건에서 현저하게 감소하므로, 이러한 희박조건에 있어서의 정도높은 CH PLIF계측 기술의 확립이 요구된다.

본 연구에서 사용한 평면화염버너는 희박조건에서 혼합기의 유량을 증가시키면, 공간적으로 반응대의 위치가 변동하게 되어, 셀형 화염구조가 형성된다. 이 때, 화염대의 일부는 버너의 표면에 부착하고, 일부는 부상하므로, 국소 화염대의 두께도 공간적으로 변동하는 화염이 형성된다. 이러한 셀형 화염이 형성되는 $0.6 < \phi < 0.7$ 의 조건을 대상으로 CH와 OH의 동시 PLIF를 계측하였다.

Figure 6은 CH와 OH의 동시PLIF계측의 결과와 직접사진을 나타내고 있다. 직접사진의 내부에 표시한 사각형은 CH와 OH PLIF의 계

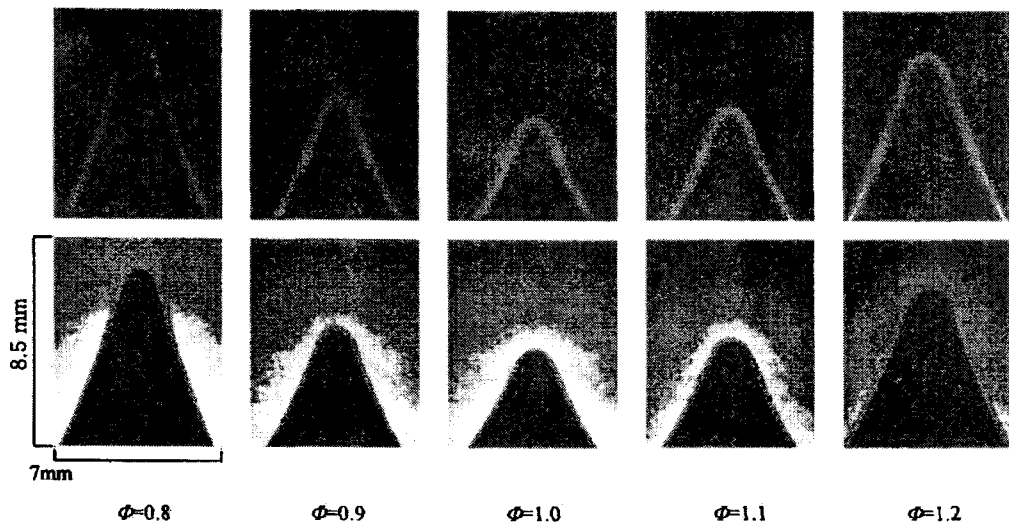


Fig. 5 CH mole fraction obtained by numerical simulations of one-dimensional laminar flame with GRI 2.11 and CH fluorescence intensity by CH-PLIF

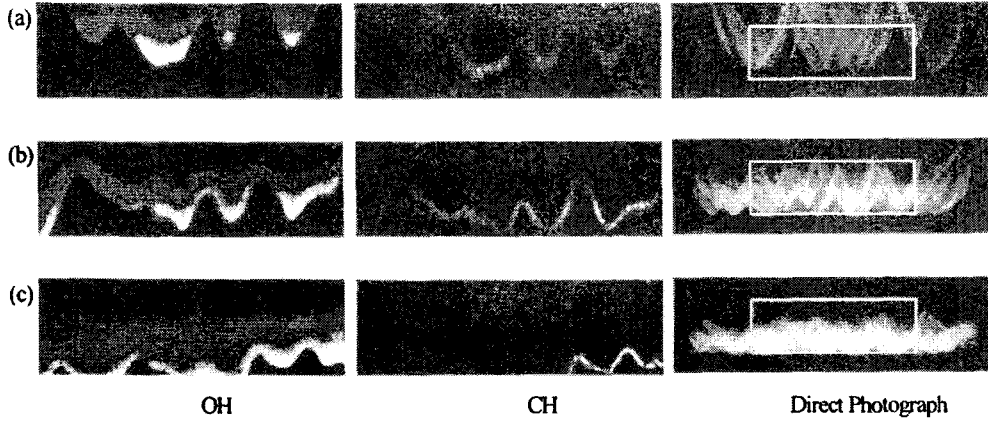


Fig. 6 OH(left hand side) and CH (middle) fluorescence images and direct photographs(right hand side) of the unstable cellular flames on a flat burner. (a) = 0.60, (b) = 0.65, (c) = 0.70, where white boxes (30mm(W)8mm(H)) in the direct photographs indicate the displayed regions in PLIF images)

측영역을 나타내고, 사각형의 높이는 8mm이다. 직접사진으로부터 화염면은 3차원성 구조로 이루어져 있고, 당량비의 저하에 따라서 화염면이 버너표면으로부터 부상함을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 CH와 OH의 동시PLIF계측의 결과로부터도 관찰됨을 알 수 있다. CH PLIF강도분포는 직접사진에서 가시화된 청영역과 잘 일치하고, OH PLIF강도분포는 고온연소생성물과 상온의 반응물간의 경계영역을 나타내고 있다. 본 연구에서는 OH PLIF가 CH PLIF보다 선명하게 가시화되었으나, 이론당량비에 비하여 CH농도가 급격히 감소하는 희박한 조건에 있어서도 CH PLIF계측이 가능함을 알 수 있다. 이러한 결과는 CH PLIF가 난류예혼합화염의 열발생율의 예측에 적용될 수 있음을 설명한다. 그러나, 부분적으로 매우 약한 강도의 CH PLIF영역도 관찰되고 있다. 특히, 이 같은 CH PLIF의 불연속 영역은 희박 조건에서 빈도가 높게 관찰된다. 이 같은 현상은 CH농도의 저하 또는 화염의 켄칭에 기인한 것이라고 예상되나, 그 메커니즘은 밝혀지지 않았다. 따라서, 난류 예혼합화염의 열발생율에 관한 보다 신뢰성 높은 정보를 얻기 위해서는 CH PLIF의 기초적인 연구와 개발이 요구된다.

4. 결론

국소 열발생율과 CH농도간의 관계를 메탄-공기 예혼합화염의 수치계산을 통하여 조사하였다. 그리고, CH와 OH의 동시PLIF계측이 층류화염과 셀형 희박예혼합화염을 대상으로 이루어졌다. 상세화학반응을 포함한 수치계산과 CH PLIF계측결과를 비교하여, 국소 열발생율의 지표로서의 CH PLIF계측의 성능을 평가한 결과, 정성적인 일치가 관찰되었다. 직접수치계산의 결과로부터, 강난류 예혼합화염의 조건에 있어서도 국소 열발생율과 CH 물분율은 잘 일치하였다.

슬롯버너를 대상으로한 CH PLIF계측에서 CH PLIF강도는 당량비 변화에 따른 CH물분율의 변화를 잘 반영하였다. 그리고, 평면화염버너에서 형성된 셀형 희박예혼합화염의 CH PLIF계측에서, CH농도가 이론당량비에 비해 매우 낮음에도 불구하고 화염대의 공간적인 검출이 가능하였다. 이러한 결과로부터, CH PLIF계측이 난류 예혼합화염 내지는 엔진내부 연소의 국소 열발생율 예측에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Dyer, M.J., and Crosley, D.R., Fluorescence imaging for flame chemistry, *Proc. Int. Conf. On Laser84*, (1985), 211-218.
2. Hanson, R.K., Combustion diagnostics: Planar imaging techniques, *Proc. Combust. Inst.*, 21, (1986), 1677-1691.
3. Donbar, J.M., Driscoll, J.F., and Carter, C.D., Reaction zone structure in turbulent nonpremixed jet flames-from CH-OH PLIF images, *Combust. & Flame*, 122, (2000), 1-19.
4. Renfro, M.W., King, G.B., and Laurendeau, M., Scalar time-series measurements in turbulent CH₄/H₂/N₂ nonpremixed flames: CH, *Combust. & Flame*, 122, (2000), 139-150.
5. Starner, S.H., Bilger, R. W., Dibble, R.W., Barlow, R.S., Fourquette, D.C., and Long, M.B., Joint planar CH and OH LIF imaging in piloted turbulent jet diffusion flames near extinction, *Proc. Combust. Inst.*, 24, (1992), 341-349.
6. Smooke, M.D., Xu, Y., Zurn, R.M., Lin, P., Frank, J.H., and Long, M.B., Computational and experimental study of OH and CH radicals in axisymmetric laminar diffusion flames, *Proc. Combust. Inst.*, 24, (1992), 813-821
7. Paul, P.H., and Najm, H.N., Planar laser-induced fluorescence imaging of flame heat release rate, *Proc. Combust. Inst.*, 27, (1998), 43-50.
8. Najm, H.N., Paul, P.H., Mueller, C.J., and Wyckoff, P.S., On the adequacy of certain experimental observables as measurements of flame burning rate, *Combust. & Flame*, 113, (1998), 312-332.
9. Paul, P.H., and Dec, J.E., Imaging of reaction zones in hydrocarbon-air flames by use of planar laser-induced fluorescence of CH, *Opt. Lett.*, 19, (1994), 998-1000.
10. Han, D., and Mungal, M.G., Simultaneous measurement of velocity and CH layer distribution in turbulent non-premixed flames, *Proc. Combust. Inst.*, 28, (2000), 261-267.
11. Thashi, M., Miyauchi, T., and Li, Y., *Smart control of turbulent combustion*, Tokyo, Springer-Verlag, (2001), 28-38.
12. Berg, P.A., Hill, D.A., Noble, A.R., Smith, G.P., Jaffries, J.B., and Crosley, D.R., Absolute CH concentration measurements in low-pressure methane flames: Comparisons with model results, *Combust. & Flame*, 121, (2000), 223-235.
13. Miyauchi, T., Tanahashi, M., Sasaki, K., and Ozeki, T., Vortex-flame interaction in diffusion flames, *Transport Phenomena in Combustion* (Ed. C. H. Chen, Taylor. & Francis, 1996), 1095-1105.
14. http://euler.Berkeley.EDU/gri_mech/
15. Kee, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E., and Miller, J. A., A Fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multicomponent transport properties, *SAND86-8246* (1986).
16. Kee, R. J., Rupley, F. M., and Miller, J. A., Chemkin-II: Fortran chemical kinetics packages for the analysis of gas phase chemical kinetics, *SAND89-8009B* (1989).
17. Poinso, T. J., Lele, S. K., Boundary conditions for direct simulation of compressible viscous flows, *J. Comput. Phys.*, 101, (1992), 104-129.
18. Baum, M., Poinso, T., and Thevenin, D., Accurate boundary conditions for multicomponent reactive flows, *J. Comput. Phys.*, 116, (1994), 247-261.
19. Carter, C. D., Donbar, J. M., and Driscoll, J. F., Simultaneous CH planar laser-induced fluorescence and particle

- imaging velocimetry in turbulent nonpremixed flame, *Appl. Phys.* B66, (1998), 129-132.
20. Garland, N.L., and Crosley, D. R., Energy transfer processes in CH A2 and B2- in an atmospheric pressure flame, *Appl. Optics*, 24, (1985), 4229-4237.
21. Watson, K.A., Lyons, K. M., Donbar, J.M., and Carter, C.D., Simultaneous Rayleigh imaging and CH-PLIF measurements in a lifted jet diffusion flame, *Combust. & Flame*, 123, (2000), 252-265.
22. Chen, Y-C., and Mansour, M. S., Simultaneous Rayleigh scattering and laser-induced CH fluorescence for reaction zone imaging in high-speed premixed hydrocarbon flames, *Appl. Phys.*, B 64, (1997), 599-605.
23. Samaniego, J. M., Egolfopoulos, F. N., and Bowman, C. T., CO2 chemiluminescence in premixed flames, *Combust. Sci. Technol.* 109, (1995), 183-203.
24. Nguyen, Q-V., and Paul, P. H., The time evolution of a vortex-flame interaction observed via planar imaging of CH and OH, *Proc. Combust. Inst.*, 26,(1996), 357-364.