CH-OH PLIF와 Stereoscopic PIV동시계측에 의한 난류예혼합화염의 관찰

최 경 민*† · Mamoru Tanahashi** · Toshio Miyauchi**

Simultaneous Measurements of CH-OH PLIF and Stereoscopic PIV in Turbulent Premixed Flames

Gyung-Min Choi, Mamoru Tanahashi and Toshio Miyauchi

ABSTRACT

Simultaneous CH and OH planar laser induced fluorescence(PLIF) and stereoscopic particle image velocimetry (PIV) measurements have been developed to investigate the local flame structure of turbulent premixed flames. The developed simultaneous two radical concentrations and three component velocity measurements on a two-dimensional plane was applied for relatively high Reynolds number turbulent premixed flames in a swirl stabilized combustor. All measurements were conducted for methane-air premixed flames in the corrugated flamelets regime. Strong three-dimensional fluctuation implies that misunderstanding of the flame/turbulent interactions would be caused by the analysis of two-component velocity distribution in a cross section. Furthermore, comparisons of CH-OH PLIF and three-component velocity field show that the burned gases not always have high-speed velocity in relatively high Reynolds number turbulent premixed flame. The Reynolds number dependence of the flame front was clearly captured by the simultaneous CH-OH PLIF and stereoscopic PIV measurements.

Key Words : Simultaneous Measurement, CH-OH PLIF, Stereoscopic PIV, Turbulent Premixed Flames

1. 서 론

희박예혼합연소는 희박예혼합연소는 NOx배출량의 저감이 가능한 연소기법으로서 가스터어빈 등의 실용연소기에 이용되고 있다. 그러나 희박예혼합연소에서는 화염의 불안정성과 진동연소가 문제로 대두되어[1], 이용가능한 운전범위가 한정되어 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 연소기 주변의 연소상태를 계측하여, 국소화염구조에 관한 상세한 정보를 얻는 것이 매우 중요하다. 난류화염에 있어서 화염구조를 계측하는 기법으로서 OH 또는 CH 라디칼의 평면 레이저 유기형광법(PLIF)이 널리 이용되어 왔다[2-5]. OH라디칼은 기연 가스 측에서 고농도를 나타내는 특징이 있고, CH라디칼은 화염면 근방에서만 존재하며, 화염면에 있어서 예리한 피크를 나타내는 특성을 갖는다. 이러한 CH와 OH라디칼의 특성을 동시에 계측함으로써[6,7] 난류화염의 국소화염구조에 관한 유익한 정보를 얻을 수 있다.

한편, 난류연소장의 난류특성을 계측하는 방법으로서 입자화상유속계가 빈번히 사용되어 왔다. 대부분은 2차원계측이었으나, 복잡한 3차원구조를 갖는 연소기내의 유동장을 해석하기 위해서는 3차원계측이 가능한 Stereoscopic PIV법이 유효하다. 이와 같은 계측을 통하여 화학종에 관한

* 부산대학교 기계공학부
† 최 경 민, choigm@pusan.ac.kr
** 동경공업대학, 기계우주시스템

정보와 함께 3차원 속도장을 동시에 계측함으로써 난류예혼합화염의 국소화염구조를 상세히 조사하는 것이 가능해진다.

따라서 본 연구에서는 CH-OH PLIF와 Stereoscopic PIV의 동시계측법을 확립하여, 난류예혼합화염에 적용함으로써 난류예혼합화염의 국소화염구조를 해명하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험 방법

2.1 계측 방법

2.1.1 CH-OH PLIF

본 연구에서 사용된 CH라디칼 및 OH라디칼의 PLIF 및 Stereoscopic PIV동시계측 시스템의 개략을 Fig. 1에 나타내었다. CH의 PLIF계측에는 여기밴드로서 390.30nm부근의 $B^2\Sigma^-$ - $X^2\Pi$ (0,0)진동밴드의 $Q_1(7,5)$흡수선을 검출밴드로는 420-440nm의 A-X(1,1),(0,0)밴드와 B-X(0,1)밴드를 사용하였다. 레이저 시스템은 XeCl액시머레이저(Lambda Phisik, LPX110I, 308nm, 200mJ/pulse)와 색소레이저(Lambda Phisik, Scanmate2)로 구성되어, 약 23-25mJ/pulse의 펄스광을 발진한다. 형광은 필터(KV418)을 이용하여 배경광을 제거한 후, ICCD카메라(Andor Technology, DH734-25U-03)으로 계측하였다. OH의 PLIF계측시스템은 Nd-YAG레이저(Spectra-Phisics, Quanta Ray PRO-110, 532nm, 350mJ/pulse)와 색소레이저(Sirah Precisionscan)으로 구성되어, 282.93nm로 5mJ/pulse의 펄스광을 발진한다. A-X(1,0),(0,0)밴드(λ=306-320nm)로부터의 OH형광을 필터(WG-305, UG-11)를 이용하여 배경광을 제거한 후, ICCD카메라(PI-MAX, 512RB-G1)로 촬영하였다. CH PLIF용과 OH PLIF용 ICCD카메라의 광축은 각각 레이저 시트광에 직교하고, 연소기를 중심으로 대향하도록 설치하였다.

2.1.2 Stereoscopic PIV

Stereoscopic PIV의 계측시스템은 더블펄스 Nd:YAG 레이저(New Wave Research, 532nm, 100mJ/6ns), 2대의 CMOS카메라(Vision Research, Phantom V5.0) 및 광학계로 구성된다. 더블펄스 Nd:YAG레이저는 약 12mJ/pulse의 펄스광을 발진한다. 입자는 평균직경 0.18㎛의 Al2O3를 사용하였고, 입자의 산란광을 광학필터(중심파장 532.9nm, 반치폭 2.1nm)를 이용하여 배경광을 제거한후, 2대의 CMOS카메라에 의해 계측되었다. CMOS카메라는 레이저 빔시트에 직교하는 방향에 대하여 OH라디칼의 PLIF계측에 사용되는 ICCD카메라의 좌우 18°의 각도로 배치하였다.

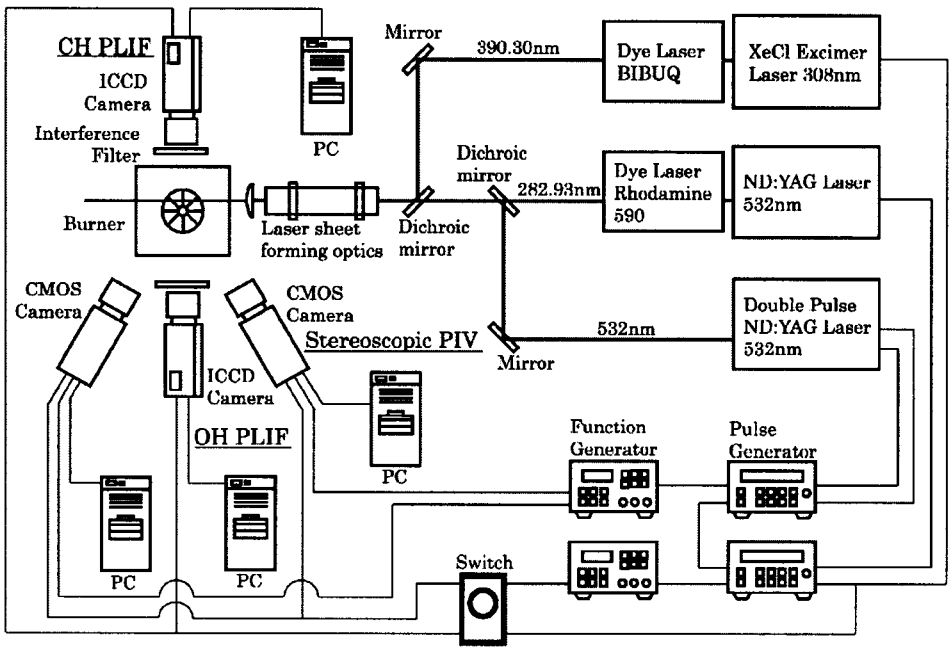

Fig. 1 Schematic of simultaneous CH-OH PLIF and stereoscopic PIV measurements

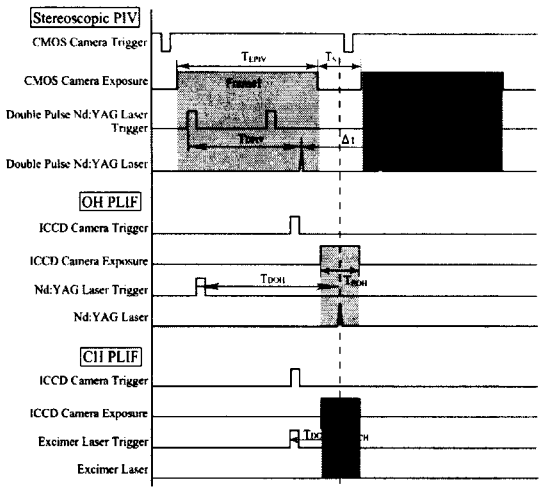

Fig. 2 Timing diagram of the simultaneous CH-OH PLIF and stereoscopic PIV

CH와 OH라디칼의 PLIF계측 및 Stereoscopic PIV계측의 동기제어에는 펄스생성기(SRS, DG535)와 신호발생기(Sony, AFG320)을 각각 2대 사용하였다. Fig. 2는 카메라의 노광과 레이저 발진의 시간관계를 나타내고 있다. 동기 및 발진 시간간격 등을 결정하기 위하여 각각의 레이저에 대하여 입력트리거에 대한 레이저 발진의 지연 T_D를 사전에 검토하였다. 그리고 ICCD카메라의 노광과 레이저 발진의 동기조정에는 정상화염에 있어서의 CH라디칼과 OH라디칼의 형광강도 분포화상을 이용하였고, CMOS카메라의 노광과 레이저 발진의 동기조정에는 비연소장에 있어서 입자 화상을 각각 이용하였다.

CH와 OH라디칼의 PLIF계측은 연속하는 입자화상의 시간간격 Δt에 대하여, 첫 번째 입자화상의 Δt/2후에 실시하였다. 계측대상의 난류특성으로부터 Δt를 15μs로, CMOS카메라의 노광시간을 302μs, ICCD카메라의 노광시간을 30ns로 각각 설정하였다. Stereoscopic PIV에 대해서 PLIF계측의 동기오차는 약 100ns이하로, CH와 OH라디칼의 PLIF계측 동기오차는 10ns이하로 제한하였다.

2.2 연소기와 실험 조건

Fig .3은 연소시스템을 나타내고 있다. 적절한 압력으로 조절된 메탄과 공기는 질량유량조절기에 의해 유량이 제어되고, 입자와 함께 혼합실에서 충분히 혼합된다. 혼합기는 스월노즐을 통해 연소실로 공급되고 스월러 상부에 안정된 예혼합 화염이 형성된다. 실험은 유량 200-300 *l*/m, 이론 당량비 조건에서 이루어졌다. 본 연구에 있어서 레이저 빔시트의 횡방향을 x방향, 종방향을 y방향으로 하고, 법선방향을 z방향으로 설정하였다. 각각의 레이저 빔시트의 두께는 약 200㎛이다. 미연혼합기의 난류특성을 조사하기 위하여 열선풍속계를 이용한 속도계측을 수행하였고, CH-OH PLIF와 Stereoscopic PIV계측은 난류강도가 최대로 나타난 영역에서 이루어졌다.

Fig. 4는 형성된 화염의 직접사진과 CH-OH PLIF와 Stereoscopic PIV의 측정영역을 나타내고 있다. 여기서 실선은 CH-OH PLIF의 측정영역을 점선은 Stereoscopic PIV의 측정영역을 나타낸다.

Fig. 5는 최대난류강도 영역에 있어서 y방향의 에너지 스펙트럼을 나타낸다. 여기서 에너지 스펙트럼은 콜모고로브 스케일(η)와 동점성계수(ν)로 무차원화하였다. 에너지 스펙트럼이 관성 아영역에서 -5/3승을 나타내고 있으므로 충분히 발달한 난류임을 알 수 있다. 열선 풍속계를 이용하여 얻어진 난류특성을 Table 1에 나타내었다. 여기서, l은 적분길이 스케일, Re_l은 적분길이와 u'_{rms}에 기초한 레이놀즈 수, Re_λ는 테일러 마이크로 스케일과 u'_{rms}에 기초한 레이놀즈 수, δ_F는 층류 화염대 두께, S_L은 층류 연소 속도를 나

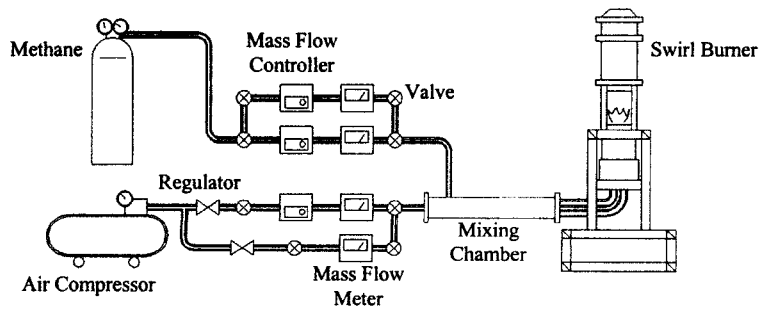

Fig. 3 Swirl stabilized burner system

Fig. 4 Direct photography

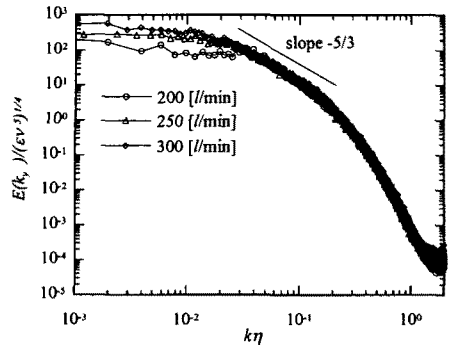

Fig. 5 Energy spectrum of streamwise velocity component in the inert flow

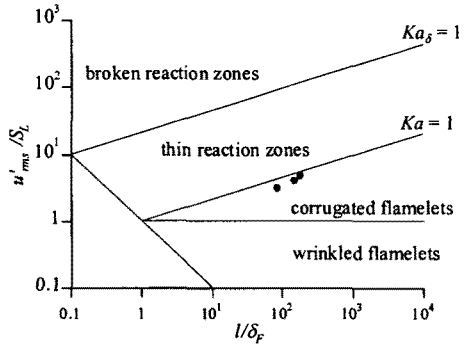

Fig. 6 Tublent combustion diagram

Table. 1 Turbulent characteristics of mixture

Q[l/m]	Re_λ	u'_{rms}[m/s]	l [mm]	λ[mm]	η[mm]	l/δ_F	u'_{rms}/S_L
200	63.1	1.24	3.42	0.812	0.0575	82.9	3.20
250	95.0	1.59	6.02	0.950	0.0548	146.0	4.12
300	115.0	1.92	7.27	0.949	0.0498	176.6	4.99

타낸다. 미연혼합기의 유량증가와 함께 Re_λ는 증가하여 63.1-115정도의 값을 나타낸다.

Fig. 6은 본 연구의 실험조건을 Peters가 제안한 난류연소로 분류한 것이다. 모든 조건이 Corrugated flamelets영역에 해당함을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 난류예혼합화염의 미세구조

Fig. 7은 Reλ=115(Q=300 l/min) 조건에 있어서 얻어진 CH와 OH PLIF 이미지의 예를 나타내고 있다. CH와 OH라디칼은 매우 복잡한 구조를 나타내고 있다. OH라디칼의 경계에서의 농도는 CH영역과 잘 일치하고 있다. 화염면은 적분길이 스케일정도의 큰 주름으로부터 테일러 마이크로 스케일보다 더 작은 주름까지 다양한 크기의 주름이 관찰된다. CH와 OH라디칼 분포를 비교해 보면, 미연 혼합기속의 기연 가스괴(circle A)와 기연 가스 속에 고립된 미연 가스괴(circle B)가 모두 관찰된다. 고립된 미연 혼합물의 존재는 Chen 등[8], Tanahashi 등[9], Saito[10] 등의 2차원 직접수치해석으로부터 관찰되었다. Choi 등[11]에 의한 3차원 직접수치해석의 결과는 고립된 미연 혼합물이 3차원 화염구조의 특성을 반영하고 있음을 보았고, 이를 Handgrip 구조라고 하

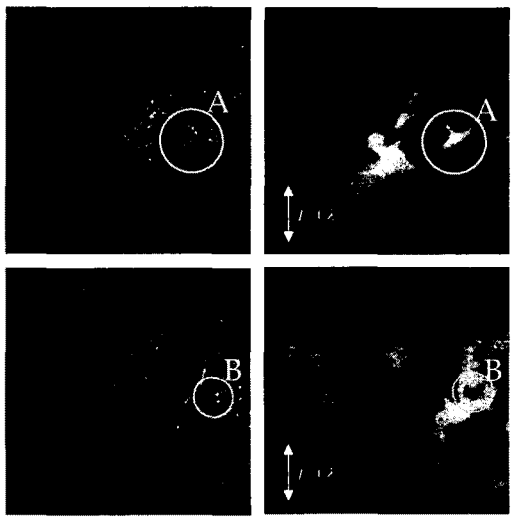

Fig. 7 Simultaneous fluorescence images of CH(left) and OH(right) for Re_λ=115.0. Visualized domain size is 31mm×31mm

였다. 한편, 미연 혼합기중의 기연 가스괴도 수소-공기 예혼합화염과 메탄-공기 예혼합화염[9, 10]의 직접수치해석에서 관찰되고 있다. 이러한 결과들은 고레이놀즈수의 화염구조를 이해하기 위해 단일 라디칼의 PLIF계측만으로는 어려우며, CH와 OH라디칼의 동시계측이 매우 중요함을 설명하고 있다.

Fig. 8은 레이놀즈수가 화염구조에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각각의 유량조건에서 계측한 CH와 OH라디칼 형광이미지를 각 레이놀즈수에 대해 두 가지의 다른 예로 나타내고 있다. 이 이미지들은 레이놀즈수의 영향을 잘 표현하고 있다. 모든 레이놀즈수의 조건에 있어서, 화염면의 주름과 돌출이 관찰되고 있으며, 레이놀즈수가 커질수록 화염구조가 복잡해지는 것을 알 수 있다.

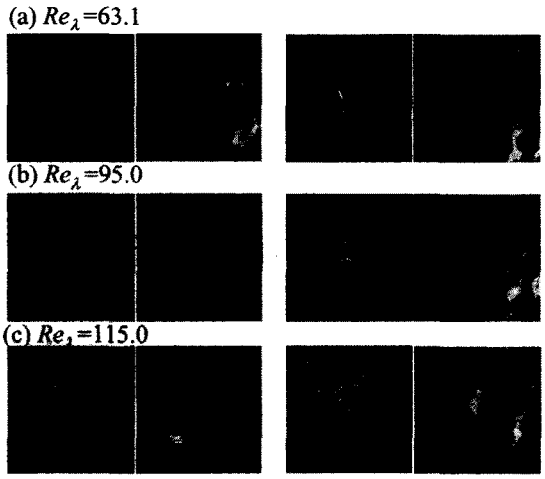

Fig. 8 Simultaneous fluorescence images of CH(left) and OH(right) for different Reynolds number. Visualized domain size is 31mm×31mm.

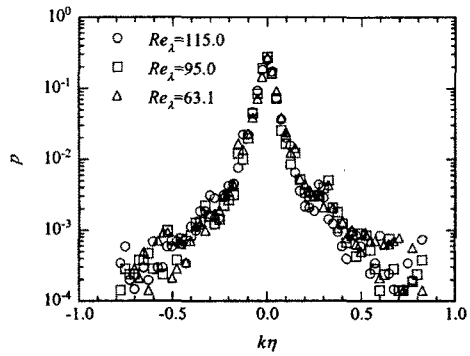

Fig. 9 Probability density fuctions of the curvature of flame front

Fig. 9는 화염면 곡률의 확률밀도함수를 나타내고 있다. 여기서 곡률은 기연가스방향으로 오목한 화염면에 대해 양의 값으로 정의하였고, 콜모고로브 스케일로 무차원화하였다. 확률밀도함수에는 150-170매의 CH와 OH PLIF 이미지 데이터가 사용되었다. 곡률은 콜모고로브 스케일의 역수보다 작게 나타났고, 모든 조건에 있어서 최소 곡률은 콜모고로브 스케일 정도에 해당함을 알 수 있다. 이러한 결과는 직접수치해석의 결과와 일치한다[9-11].

Fig. 10은 각 레이놀즈수의 조건에 있어서 CH와 OH PLIF이미지와 3성분 속도를 나타내고 있다. CH와 OH PLIF이미지 내부의 백색 사각은 stereoscopic PIV의 계측크기를 나타낸다. x, y방향의 속도크기는 벡터로 표현하고, z방향 속도는칼러로 표현하였다. 속도장은 매우 강한 3차원 변동성분을 포함하므로 u, v속도 성분만으로 화염면의 특성을 설명하기는 어렵다. 고레이놀즈수 연소장의 CH-OH PLIF와 3성분 속도분포로부터, 기연가스가 언제나 높은 속도를 가지지는 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 스월러 주위의 큰 재순환영역에 화염면이 복잡하게 포개진 상태로 존재하기 때문이라 사료된다. 비연소장의 속도분포에서는 음의 w성분은 좀처럼

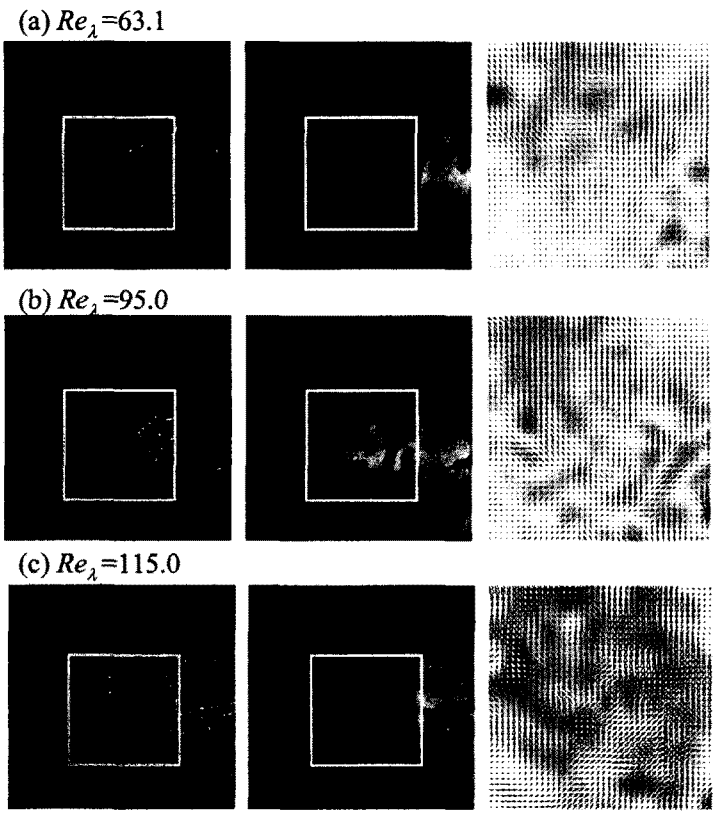

Fig. 10 Simultaneous fluorescence images of CH(left), OH(center) and velocity distribution(right) for different Reynolds number. Visualized domain size of PLIF and PIV is 31mm×31mm and 16.2mm×16.2mm, respectively.

관찰할 수 없었으나, 연소장에서 쉽게 관찰할 수 있다. 이는 속도장이 화염면의 영향을 크게 받기 때문이라 사료된다. 레이놀즈수의 증가와 함께 같은 계측크기에 있어서 화염면 주름과 돌출의 존재가 증가하고 화염구조는 복잡해짐을 관찰할 수 있다.

4. 결 론

난류예혼합화염을 대상으로 개발한 CH-OH PLIF와 Stereoscopic PIV의 동시계측 시스템을 적용하여 미세 화염구조를 조사하였다. CH와 OH라디칼의 동시계측 결과는 직접수치해석에서 보여졌던 미연혼합기중의 기연 가스괴와 기연가스중의 미연혼합물의 존재를 확인시켰다. 본 연구의 실험조건에서 최소 곡률반경은 미연혼합기의 콜모고로브 스케일에 해당하였다. 강난류화염의 구조를 해명함에 있어 2성분 속도정보만으로는 화염면 구조를 설명할 수 없다. 고레이놀즈수 연소장에서는 언제나 기연가스가 높은 속도를 가지지는 아니다. 화염면의 레이놀즈수 의존도가 본 연구에서 시도한 CH-OH PLIF와 Stereoscopic PIV 동시계측으로 명확히 관찰되었다.

참고문헌

[1] Shih, W. P., Lee, J. and Santanvicca, D. A., Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor, Proc. Combust. Inst. 26:2771-2778, 1996.

[2] Hanson, R.K., Combustion diagnostics; Planar imaging techniques, Proc. Combust. Inst., 21, (1986),1677-169

[3] 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), 139-15

[4] Starner, S.H., Bilger, R. W., Dibble, R.W., Barlow, R.S., Fourguette, 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.

[5] Smooke, M.D., Xu, Y., Zurn, R.M., Lin, P., Frank, J,H., andLong, M.B., Computational and experimental study of OH and CH radicals in axisymmetric laminar diffusion flames, Proc. Combust. Inst., 24, (1992), 813-821

[6] 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.

[7] Tsukinari, S., Saito, T., Tanahashi, M., Miyauchi, T., Choi, G-M., Estimations of the heat release rate in methane-air premixed flames by CH-PLIF, Proc. of 6th ASME-JSME Thermal Eng. (2003), 132

[8] Chen, J., Echekki, T., Kollomann, W., The mechanism of two-dimensional pocket formation in lean premixed methane-air flames with implications to turbulent combustion, Combustion and Flame, 116, (1999), 15-48.

[9]Tanahashi, M., Ito, Y., Yu, Y., Miyauchi, T., The structure of hydrogen-air premixed flames in high-intensity and small-scale turbulence, Proc. 3rd Asia-Pacific Conf. Combust. (2001), 75-79.

[10] Saito, T., Tanahashi, M., Miyauchi, T., Journal of Combustion Society of Japan, 44, (2002), 243-252.

[11] Choi, G.-M., Tanahashi, M., Nada, Y., Tsukinari, S., Saito, T., Miyauchi, T., Local flame structure of turbulent premixed flames-DNS and CH/OH PLIF-, Proc of 4th sym. on Smart Control of Turbulence, (2003),81-91.