

PIV/OH PLIF 동시 측정을 이용한 동축공기 수소확산화염의 실험적 연구

김문기* · 김승한** · 윤영빈***

Simultaneous PIV/OH PLIF Measurements in Hydrogen Nonpremixed Flames with Coaxial Air

Munki Kim, Seunghan Kim and Youngbin Yoon

ABSTRACT

Simultaneous measurements of velocity and OH distribution were made using particle image velocimetry(PIV) and planar laser-induced fluorescence(PLIF) of OH radical in turbulent hydrogen nonpremixed flames with coaxial air. The OH radical was used as an approximate indicator of chemical reaction zone. The OH layer was correlated well with the stoichiometric velocity, U_s , instantaneously and on average. In addition, high strain-rate regions almost coincide with the OH distribution. The residence time in flame surface, calculated from the root-mean-square value of the radial velocity, is proportional to $(x/d_f)^{0.7}$. It is found that the mean value of principal strain rate on the OH layer can be scaled with $(x/d_f)^{-0.7}$ and therefore, the product of the residence time and the mean strain rate remains constant over all axial positions.

Key Words : PIV, OH PLIF, residence time, strain rate

1. 서론

정지 상태의 유체나 주위류(coflow)에 분사되는 난류 제트의 본질적인 특징은 실험적, 이론적 연구 결과에 의해 확립되어 왔다[1]. 이런 단순한 제트의 유동 특징은 매우 잘 알려져 있는 반면, 둘 이상의 난류 제트가 상호 작용하여 발생하는 복잡한 유동장에 대해서는 아직까지 명확하게 규명되지 않았다. 많은 실제 연소 시스템에서는 혼합 특성이 높고 형상이 간단하고 안전하기 때문에 동축 제트를 주로 사용한다. 또한, 연료와 공기를 동축으로 배열하면 공기와 산화제를 균일하게 혼합시킬 수 있고, 특히, 질소산화물(NOx) 발생에 관련된 특성 시간을 줄일 수 있어 동축 공

기가 없는 단순 화염에 비해 NOx 발생량을 크게 줄일 수 있는 이점이 있다[2-4].

최근, 난류 비예혼합 화염에서 변형률, 와도, 팽창률과 같은 물성치와 화학반응 영역 사이의 상관 관계를 정량적으로 평가하기 위해, PIV (Particle Image Velocimetry)와 PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence)를 동시에 측정하는 기법이 여러 연구자에 의해 개발되어 왔다[5-8]. Rehm 등[5]은 수소확산화염에서 OH PLIF/PIV 동시 측정을 수행하였으며, OH 농도가 높은 영역과 변형률이 높은 영역 사이에 상대적인 일치성이 보임을 밝혔다. Donbar 등[6]은 CH PLIF/PIV 동시 측정 기법을 적용하여 CH 층에서의 총 변형률의 평균값이 축방향 위치에 따라 거의 변하지 않는 사실을 확인하였다. Kothnur 등[7]은 동시에 CH/OH/PIV 영상을 획득, 화염의 기저 부분에서의 주변형률 축이 유동 방향에 대해 45° 정도 기울어져 있는 것을 보고하였다. Han 등[8]은 CH PLIF/PIV 동시 측정 기법을 주

* 서울대학교, 기계항공공학부 대학원

† 김문기, kimun77@snu.ac.kr

** 항공우주연구소

*** 서울대학교, 기계항공공학부

위류가 있는 난류 제트 화염에 적용하였으며, 그 결과, CH 분포가 화학양론적(stoichiometric) 속도인 U_s 의 위치와 평균적으로나, 순간적으로 매우 일치하는 사실을 확인하였다. 또한, CH에 의해 표시되는 화염면에서의 체류시간은 축방향에 따라 거의 일정하게 유지되는 반면, 압축성 주변형률의 평균값은 축방향을 따라 감소하는 사실을 관찰하였다.

화염면의 유동 물성치를 실험적으로 연구하기 위해서는 화염면의 위치를 정확하게 결정해야 한다. CH와 OH 자유기(radical)는 종종 화염면의 표식자(marker)로 사용되며, CH 자유기는 two-body 반응에 의해 빨리 없어지기 때문에 OH 자유기보다 반응 영역을 정확히 나타내는 것으로 여겨진다[9]. Watson 등[10]은 메탄 부상화염의 최근 결과에서 CH는 반응 영역의 연료 과농 영역을 나타내며 OH 분포의 안쪽 가장자리에 분포한다고 제안하였다. 또한, OH 분포는 CH보다 세 배 이상 두꺼운 사실을 보였다.

본 연구는 동축공기가 존재하는 난류 수소화산 화염에서 PIV와 OH PLIF를 동시에 측정하여, OH 층에서의 변형률, 화염체류시간 등의 물성치에 대하여 살펴보고자 한다. 특히, 다양한 동축공기 조건 하에서 화염체류시간과 주변형률 사이의 상관관계를 전체적인(global) 관점과 국부적인(local) 관점으로 접근하여 살펴보고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 연소기 및 실험 조건

실험 장치는 그림 1에 나타난 바와 같이 연료노즐, 동축공기 노즐, 주위공기 등으로 구성되는 유동 공급부와 가시화 창으로 구성된 시험부, 연소 후 생성된 가스를 배출하는 배기부로 구성되어 있다. 연료는 수소이며, 주위공기량을 조절함으로써 당량비를 0.5로 일정하게 유지하였다. 연료 노즐과 동축공기의 직경은 각각 3.0 mm, 15.0 mm

이다. 연료 유동은 긴 파이프를 통해 분사되어 노즐 출구에서 완전 발달하게 된다. 주위공기 속도는 화염 특성에 영향을 끼치지 않도록 매우 작게 유지하였다(<0.1 m/s).

동축공기가 있는 본 연구의 실험조건은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 표 1에 정리하였다. Case I의 경우에는 연료유속을 고정시킨 상태에서 동축공기 유속을 증가시켜 실험을 수행한 반면, case II는 동축공기 유속을 고정시킨 상태에서 연료 유속을 증가시킨 경우이다. PIV와 OH PLIF를 측정하기 위해 축방향 위치, x/d_f 를 8, 24, 40, 56로 올라가면서 측정하였다.

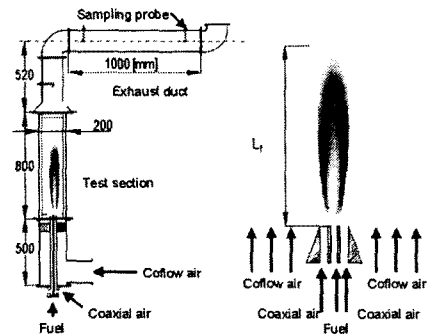


그림 1. 실험 장치 개략도 및 노즐 형상

2.1.2 OH PLIF/PIV 동시 측정

그림 2는 PIV와 OH PLIF 측정을 위한 실험 장치 개략도를 나타낸다. 속도장과 OH 자유기 농도는 시험부로부터 동시에 측정하게 된다. 동시 측정을 위해서는 두 대의 Nd:YAG 레이저와 1 대의 dye 레이저를 사용한다.

PIV 실험을 위해서 532 nm 파장의 두 레이저 광을 사용한다. 두 번째 레이저광의 출력은 beam splitter를 통해 둘로 나뉘는데, 30%는 PIV 측정용으로 사용하고 70%는 OH PLIF용 dye 레이저

표 1. Experimental condition of coaxial air flames

	Case I			Case II		
	5,000	5,000	5,000	5,000	7,000	9,000
Fuel Reynolds number, Re	5,000	5,000	5,000	5,000	7,000	9,000
Fuel velocity, U_f [m/s]	175	175	175	175	244	314
Coaxial air velocity, U_A [m/s]	0	10	20	10	10	10
Stoichiometric mixture fraction, Z_s	0.0282	0.0282	0.0282	0.0282	0.0282	0.0282
Stoichiometric velocity, U_s [m/s]						
at $x/d_f = 8$	5.45	15.1	24.8	15.1	17.2	19.3
at $x/d_f = 24$	5.45	14.7	24.0	14.7	16.7	19.0
at $x/d_f = 40$	5.45	12.4	19.4	12.4	14.5	16.6
at $x/d_f = 56$	5.45	-	-	-	12.6	14.7
Visible flame length, L_f [m]	0.457	0.372	0.3	0.372	0.428	0.484

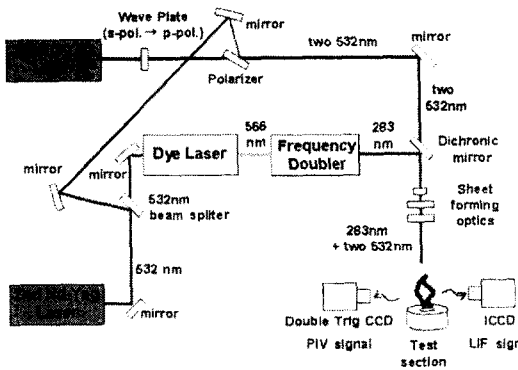


그림 2. PIV/PLIF 동시 측정 시스템 개략도

의 펌핑광(pumping beam)으로 사용한다. 두 레이저광은 서로 편광이 다르며, 편광기를 통해 하나로 합쳐지게 된다. 합쳐진 광은 원통형 렌즈의 조합을 이용하여 평면광으로 만든다. 레이저 출력은 100 mJ/pulse이며, pulse duration은 8 ns 이내이다. 두 레이저광 사이의 시간 간격은 delay generator를 사용하여 조절하며, 실험 조건에 따라 2~15 ms로 달라진다. 추적 입자는 약 1 μm의 SiO₂이며, 연료 유동과 동축공기 유동에 주입한다. 입자의 산란신호는 1008×1018 픽셀 해상도를 갖는 Kodak ES1.0 CCD 카메라로 획득한다.

OH PLIF 측정 실험에서는 PIV용 532 nm 레이저광이 dye 레이저를 통과한 후 567 nm 파장으로 바뀌고, 다시 frequency doubler에 의해 283.5 nm 파장으로 맞춰진다. 미세 조절을 통해 OH 자유기를 여기할 수 있는 파장인 282.93 nm로 조절하면, 306~320 nm 파장대의 형광 신호를 얻을 수 있다. 형광 신호는 640×480 픽셀의 해상도를 갖는 ICCD 카메라를 사용하여 획득한다. 산란 신호와 화염 광을 막기 위해서 WG-305와 UG-11 필터를 카메라에 장착한다.

PIV와 PLIF 이미지의 FOV(Field of View)는 대략 4.76cm×4.81cm이다. PIV에서 조사영역은 32×32 픽셀이고 50% 중복을 허용하는데, 이는 0.76mm×0.76mm의 공간 분해능에 해당한다. 반면, OH PLIF의 분해능은 100 μm이기 때문에 본 연구의 실험 분해능은 PIV 시스템의 분해능에 의해 제한된다. 실험의 분해능은 물리적인 공간에서 존재하는 가장 작은 길이 척도를 분별할 수 있는 능력을 의미한다. Tennekes 등[11]은 Taylor scale, λ_T를 λ_T=u'(15ν/ε)^{1/2}로 정의하였는데, u'은 속도 섭동의 RMS(root mean square), ν는 동점성계수, ε는 운동에너지 소산률을 의미한다. 반면, Kolmogorov scale, λ_K은 λ_K=(ν³/ε)^{1/4}로 정의할 수 있다. 또한,

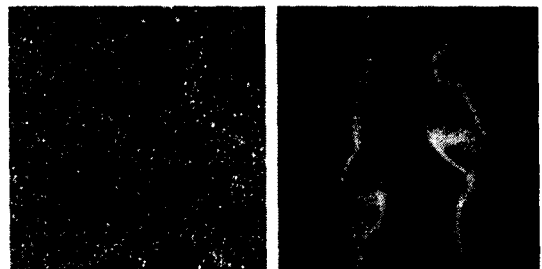
Tennekes 등[11]은 소산률 ε를 (u')³/l로 근사할 수 있다고 제안하였는데, 여기서 l은 적분 길이로써, 일반적으로 속도장의 FWHM(full width at half maximum)을 사용한다. 본 연구에서는 공기의 온도를 2,000K라 가정했을 경우 점성계수는 ν=3.96×10⁻⁴ m²/s이며, 이때 λ_T는 1.5~3.0 mm이고 λ_K는 약 0.1 mm로 계산되었다. 따라서, 본 연구에서 수행한 실험을 통해서는 Taylor scale은 분별할 수 있는 반면, Kolmogorov scale은 분별할 수 없다.

3. 실험 결과 및 토의

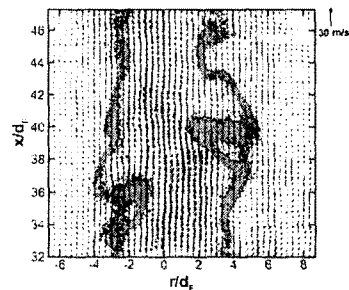
3.1 OH 층에서의 순간 속도장 및 순간 변형률 분포

OH에 의해 표시되는 반응 영역과 속도장을 함께 분석하기 위해서는 동시에 측정한 PIV와 OH PLIF 이미지를 정확하게 중첩해야 한다. 그림 3은 동시 측정에서 획득한 PIV와 OH PLIF의 순간 이미지와, 두 이미지를 이미지 처리 기법을 통해 분석한 속도장과 OH 분포를 겹친 결과를 나타내고 있다.

동축공기가 화염 특성에 끼치는 영향을 살펴보기 위해서 OH 층에서의 속도장과 변형률의 순간 이미지를 그림 4에 도시하였다. 실험 조건은 case I의 경우로써, 연료 Re 수는 5,000이고 동축



(a) PIV raw image (b) PLIF raw image



(c) 처리된 이미지 결과

그림 3. PIV와 PLIF의 이미지 및 처리된 결과

공기 속도는 각각 0, 10, 20 m/s로 증가시킨 경우이다. 측정 위치는 $x/d_f = 24, 40$ 이다. 속도장에서 윤곽선은 OH 분포를 나타내며, 검은 점선은 화학양론적 속도 U_S 를 의미한다.

Donbar 등[6]은 비예혼합 화염에서 CH 분포와 속도장을 측정된 결과, 화염면에서의 축방향 속도가 화학양론적 혼합분율, Z_S 와 노즐 출구 속도, U_0 의 곱에 가까운 사실을 밝혔다. 또한, Han 등[8]은 주위류가 있는 제트 화염에서 위의 개념에 대해 자세히 다루었으며, 그 결과 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$U_S = Z_S U_0 + (1 - Z_S) U_{CF} \quad \text{식 (1)}$$

U_0 는 운동량 평균 속도이며, U_{CF} 는 주위류의 유속을 의미한다. 식 1은 화염면에서의 속도는 실험 조건이 결정되면 이론적으로 구할 수 있는 특성 속도임을 의미하고 있다. 하지만, 식 1은 주위류가 있는 화염에만 한정된 식으로써, 본 연구에는 적용할 수 없다. 그 이유는 주위류는 하류에서도 감소하지 않고 일정한 반면, 동축공기는 제트이므로 하류로 갈수록 감소하기 때문이다. 제트의 중심속도는 x^{-1} 에 비례하여 감소하는 것으로 알려져 있다[12]. 따라서, 동축공기의 감소 현상을 보정하여 식 1을 다시 표현하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$U_S = Z_S U_0 + (1 - Z_S) U_A(x) \quad \text{식 (2)}$$

식 2에서 $U_A(x)$ 는 동축공기의 유속을 의미하며, 속도가 일정하지 않고 축방향 거리 x 에 대한 함수로 표현되는 것을 의미한다. 따라서, 식 2를 사용하여 화학양론적 속도, U_S 를 계산하면 표 1의 값과 같으며, 실험 조건과 측정 위치에 따라 다른 것을 알 수 있다.

그림 4에서 U_S 의 위치는 OH의 안쪽 윤곽선과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, OH 분포의 안쪽 윤곽선은 화학 반응이 일어나는 영역으로 생각할 수 있기 때문에 화염면에서의 속도가 U_S 와 일치한다는 결론을 얻을 수 있다. 하지만, OH 분포가 끊어지는 부분에서는 일치하지 않는 경향을 보이는데, 이는 유입되는 공기에 의해 화염이 국부적으로 끊어지기 때문이다.

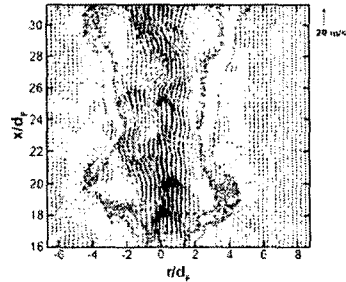
속도장에서부터 계산된 전단 변형률의 분포 역시 그림 4에 도시되어 있으며, OH 분포도 함께 표시되어 있다. 전단 변형률, S_{rx} 은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{rx} = S_{rx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial r} + \frac{\partial U_r}{\partial x} \right) \quad \text{식 (3)}$$

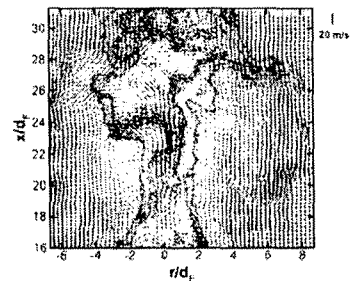
모든 실험 조건에서 변형률이 높은 영역이 OH 분포와 대체로 일치하는 것을 확인하였으며, 이는 Rehm 등[5]의 결과와 매우 유사하다. 특히, OH 농도가 강하거나 두께가 상대적으로 얇은 영역에서 이러한 경향성이 뚜렷한 것을 볼 수 있다. 이는 화염면에서의 변형률이 높아지면, 주위공기가 연료 쪽으로 유입되어 반응이 활발히 이루어지기 때문이다.

그림 5는 Re 수가 5,000이고, 동축공기 유속이 각각 0, 20 m/s인 조건에서 측정된 순간 속도장에 U_S 를 뺀 속도장을 보여주고 있다. 그림 5를 통해서 상대적인 속도장을 살펴볼 수 있는데, OH 분포가 끊기는 곳을 통해 유동이 흘러 나가는 현상을 관찰할 수 있다. 또한, 동축공기가 20 m/s의 경우에서 eddy의 vortical motion이 활발히 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 난류 강도가 동축공기에 의해 강화되기 때문으로 생각된다.

그림 6은 그림 5와 같은 조건에서 OH 안쪽 윤곽선, 즉, 화염면을 따라 얻은 전단 변형률을 표시한 그림이다. 화염면 양쪽의 결과를 같이 나타내었는데, 동축공기의 유속이 큰 경우에서 변형률의 최고값이 컸으며, 화염면을 따라 변형률의 변화가 매우 심한 것을 확인하였다. 이는 동축공기에 의해 유동의 난류 강도가 증가하여 화염면에 가해지는 변형률 역시 커지기 때문이다.

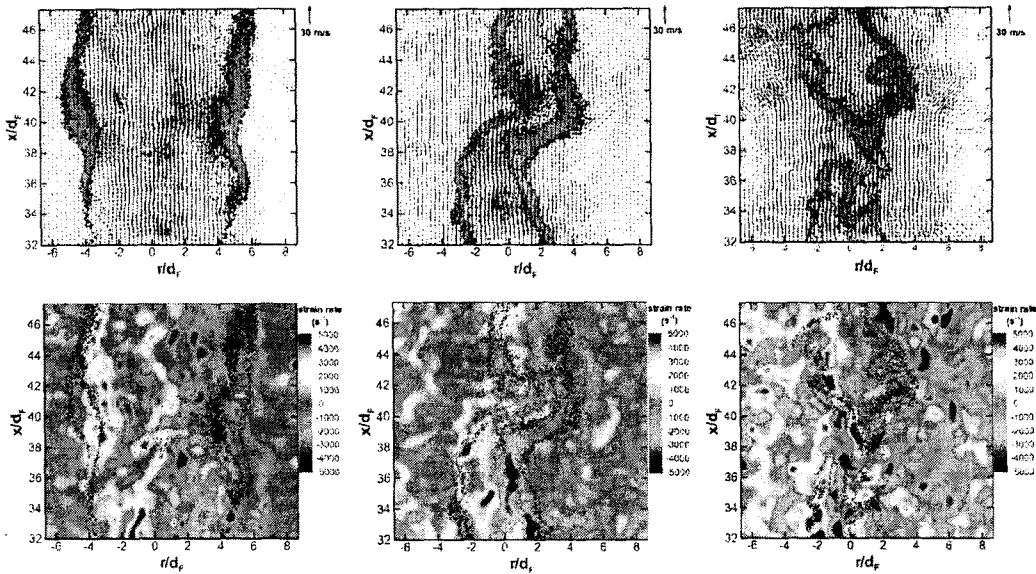


(a) Re=5,000 & $U_A=0$ m/s



(b) Re=5,000 & $U_A=20$ m/s

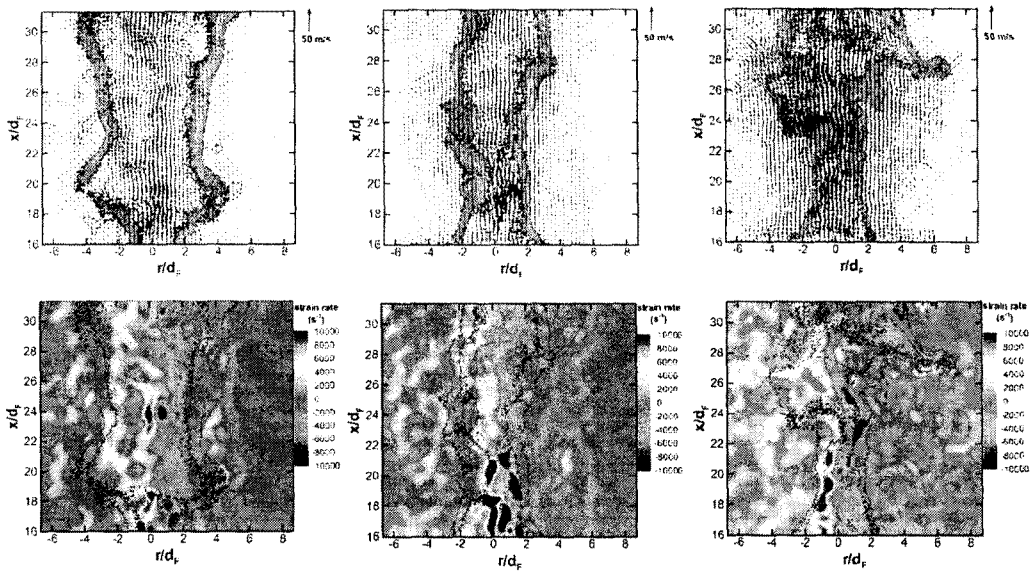
그림 5 실제 속도에서 U_S 를 뺀 상대적인 속도장



(a-2) $x/d_f=40$

(b-2) $x/d_f=40$

(c-2) $x/d_f=40$

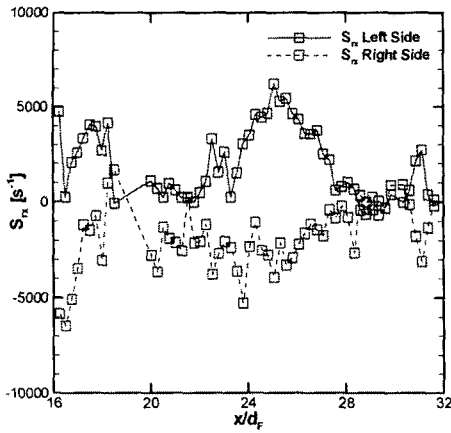


(a-1) $x/d_f=24$

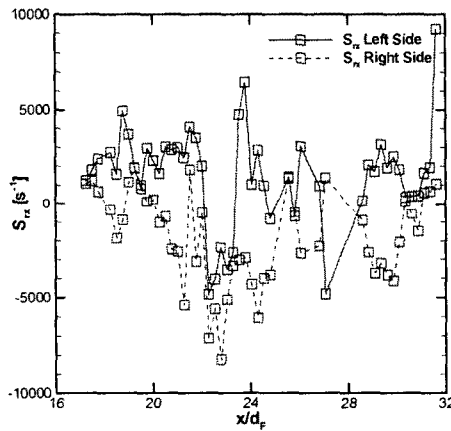
(b-1) $x/d_f=24$

(c-1) $x/d_f=24$

(a) $Re=5,000$ & $U_A=0$ m/s (b) $Re=5,000$ & $U_A=10$ m/s (c) $Re=5,000$ & $U_A=20$ m/s
 그림 4 Case I에서의 순간 속도장과 순간 변형률 분포. 속도장에서 검은 점선은 U_s 를 의미함



(a) Re=5,000 & U_A=0 m/s



(b) Re=5,000 & U_A=20 m/s

그림 6 OH 층을 따라 측정된 전단 변형률 변화

3.2 OH 층에서의 평균 속도 및 평균 변형률

PIV와 PLIF의 순간 이미지 180 장을 평균하여 OH 층에서의 속도와 변형률의 평균값을 구함으로써, 화염면에서의 속도와 변형률을 분석하였다. OH 층에서 구한 축방향 평균 속도, U_{Flame}를 이론식에 의해 구한 U_S와 비교하였으며, 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 앞의 그림 4의 결과에서는 U_S의 위치가 OH 층의 안쪽 윤곽선과 일치함을 확인하였다. 마찬가지로, 그림 7을 살펴보면 U_{Flame}/U_S의 비율이 거의 0.8~1.0 사이의 값으로 일정한 사실을 알 수 있다. 이는 이론적으로 예

측한 특성 속도가 화염면의 축방향 속도를 정확히 예측하고 있음을 의미한다.

OH 층에서의 반경방향의 평균 속도 U_r은 화염면으로 유입되는 유동의 속도를 의미하는데, 제트 축을 중심으로 좌, 우 화염면의 반경방향 속도는 서로 다른 부호를 가지게 된다. 따라서, 반경방향 속도는 RMS(root mean square) 값인 (U_r²)^{1/2}으로 계산하였으며, 모든 실험 조건에 대한 결과가 그림 8에 도시되어 있다. 반경방향 속도의 RMS 값은 축방향에 따라 감소하며, 연료 유량이 많을수록 커지는 경향성을 보이고 있다. 또한, 동축공기의 유속이 빠른 화염에서는 반경방향 속도가 더 큰 값을 보이는데, 이는 동축공기에 의해 부분 예혼합 효과가 발생하여 주위 공기가 보다 활발히 유입되기 때문으로 생각한다.

반경방향 속도의 RMS 값을 사용하여 다음과 같은 식을 이용하면 화염면에서의 체류시간을 계산할 수 있다.

$$\tau_R = \frac{\delta_R}{(U_r^2)^{1/2}} \quad \text{식 (4)}$$

여기서, δ_R은 화염면의 두께를 의미한다. 즉, 화학반응이 일어나는 영역의 두께를 의미하며, 앞에서 언급한 바와 같이 CH 층의 두께와 비슷한 두께를 가지고 있다. 본 연구에서는 수소를 사용하기 때문에 OH 만을 측정할 수 있으며, 축방향을 따라 측정된 OH 층의 두께의 평균값은 대략 2.5~3.0 mm로, 일정하다. 화염면의 두께가 CH 층의 두께와 거의 비슷하며 OH 층 두께의 1/3 정도라고 가정하여 식 4를 이용하여 계산하면 화염면에서의 화염체류시간, τ_R을 구할 수 있다 [10]. τ_R을 층 변형률인 (U_F-U_A)/d_F 값으로 무차원화하여 도시하면 그림 9와 같이 모든 실험 데이터가 하나의 곡선으로 모이는 것을 알 수 있다. 최소자승법을 이용하여 곡선의 방정식을 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d_F/(U_F - U_A)}{\tau_R} = 0.146(x/d_F)^{-0.7} \quad \text{식 (5)}$$

식 5를 통해 화염면의 체류시간이 축방향에 따라 -0.7 승에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있다. 이런 결과는 CH 층에서의 체류시간이 축방향에 따라 일정하다고 보고한 Han 등의 연구 결과와 다른 경향을 보여주고 있다. 그 이유는 Han 등 [8]의 연구에서는 화염의 하류로 가더라도 CH 층에서의 반경방향 속도가 변하지 않는 반면에, 본 실험에서는 반경방향 속도가 축방향에 따라 감소하는 사실에 기인한다.

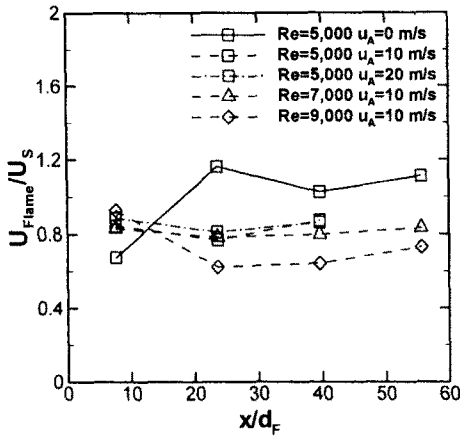


그림 7 OH 층에서의 축방향 속도와 U_S 의 비율

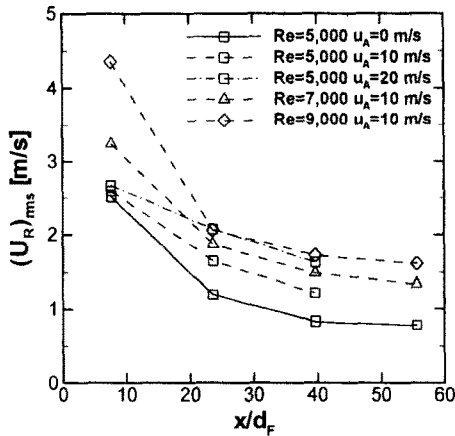


그림 8 OH 층에서의 반경방향 속도의 RMS 값

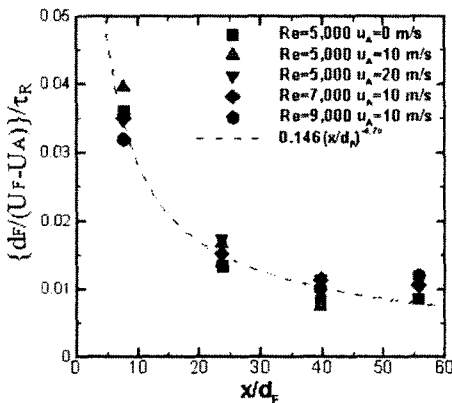


그림 9 층 변형률로 무차원화한 화염체류시간의 변화

PIV 기법에 의해 측정된 2차원 속도장을 통해 계산된 변형률은 식 3과 같은 전단 변형률과 다음과 같은 수직 변형률이 있다.

$$S_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x}, \quad S_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r} \quad \text{식 (6)}$$

이와 같이 세 가지 변형률으로부터 전단 변형률이 없어지는 조건인 주변형률 S_1 과 S_2 를 계산할 수 있다. 일반적으로, S_1 은 팽창성(stretching) 변형률을 의미하며 양의 부호인 반면, S_2 는 압축성(compressive) 변형률을 나타내며 음의 부호를 갖는다. 화염면에 가해지는 변형률은 압축성 변형률인 S_2 이므로, OH 층에서의 S_2 의 평균값을 구하였다. 그림 10은 OH 층에서의 $-S_2$ 의 평균값을 축방향에 따라 모든 실험 조건에 대해 나타낸 그림이다. $-S_2$ 의 평균값은 축방향의 위치가 커질수록 줄어들며, 연료 유속이 증가할수록 커지는 것을 확인할 수 있다.

$-S_2$ 의 평균값을 층 변형률로 무차원화하면 모든 데이터가 하나의 곡선을 따라가는 것을 그림 11을 통해 확인할 수 있다. 마찬가지로 최소자승법을 이용하여 축방향 거리에 대한 곡선의 함수를 구하면 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{-\bar{S}_2}{(U_F - U_A)/d_F} = 0.35(x/d_F)^{-0.7} \quad \text{식 (7)}$$

식 7을 통해 $-S_2$ 의 평균값은 $(x/d_F)^{-0.7}$ 에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 Han 등[8]의 연구 결과와 일치한다.

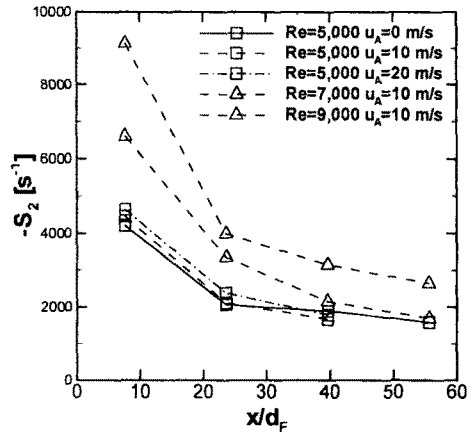


그림 10 OH 층에서의 $-S_2$ 의 평균값 변화

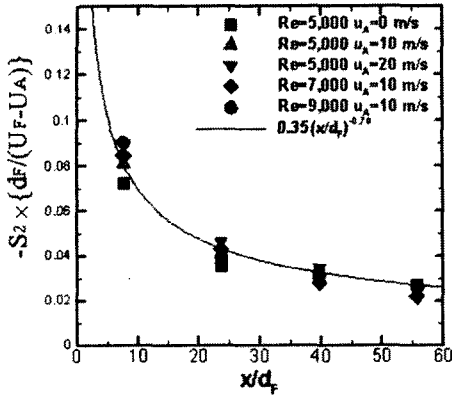


그림 11 총 변형률로 무차원화한 $-S_2$ 의 변화

3.3 화염체류시간과 변형률 사이의 관계

화염체류시간과 변형률은 관점의 차이에 따라 전체적인 관점과 국부적인 관점에서 접근할 수 있다. 본 연구에서는 화염면을 따라 가면서 체류시간과 변형률의 변화를 살펴보았기 때문에 국부적인 관점에서 접근한 연구이다. 국부적인 관점으로 접근하는 경우, 화염면에서의 체류시간은 식 5에 의해 $(x/d_F)^{0.7}$ 에 비례하여 증가하는 반면, 주변형률은 식 7에서 나타나듯이 $(x/d_F)^{-0.7}$ 에 비례하여 감소하는 경향을 보였다. 따라서, 식 7을 식 5로 나누면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\tau_R \{ -\overline{S_2} \} \approx 2.4 = Const. \quad \text{식 (8)}$$

즉, 동축공기의 유무에 상관없이 모든 축방향 위치에서 화염체류시간과 변형률의 곱은 항상 일정하며, 이는 화염체류시간이 변형률의 역수로 표현할 수 있음을 의미한다.

하지만, 전체적인 관점으로 접근하는 경우에는 위의 결과와 다른 결과를 보여준다. Kim 등[3]의 연구에 따르면, 동축공기가 없는 단순수소 확산 화염의 경우 총 화염체류시간은 다음과 같이 총 변형률의 역수에 비례하게 된다.

$$\begin{aligned} (\tau_R)_{Global} &\propto \frac{V_F}{d_F^2 U_F} \propto \frac{L_F^3}{d_F^2 U_F} \quad \text{식 (9)} \\ &\propto \frac{L_F}{U_F} \propto \frac{d_F}{U_F} = S_{Global}^{-1} \end{aligned}$$

여기서, V_F 는 화염의 체적을 의미한다. 단순수소 확산 화염의 경우, 자기상사성(self-similarity)이

유지된다고 가정하면 $V_F \sim L_F^3$ 이 만족되며, 화염의 길이 또한 연료 유량에 상관없이 일정하게 유지되므로 $L_F \sim d_F$ 의 관계가 성립한다[2, 3]. 따라서 총 체류시간과 총 변형률은 식 9에 의해 역수 관계가 성립한다. 이는 식 8의 국부적인 관점의 결과와 일치하게 되는데, 이는 국부적으로 화염면의 두께가 축방향에 따라 거의 일정한 값을 가지고 있기 때문에 가능하다.

하지만, 동축공기가 존재하는 경우에는 더 이상 식 9의 관계가 성립하지 않는다. 그 이유는 동축공기에 의한 예혼합 효과가 발생하여 화염의 길이가 일정하지 않고, 동축공기 유량에 따라 변하기 때문이다[3]. 즉, $V_F \sim L_F^3$ 의 가정이 동축공기가 있는 조건에서는 맞지 않는다. 따라서, 동축공기가 있는 화염에서 식 9를 만족하기 위해서는 동축공기의 영향을 고려한 변수를 이용하여 다시 scaling을 수행해야 할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구는 동축공기가 존재하는 수소 확산 화염에서 PIV와 OH PLIF를 동시에 측정하는 기법을 사용하여 화염면에서의 순간 속도장과 순간 변형률 분포뿐만 아니라 평균 속도 및 평균 변형률에 대하여 자세히 살펴보았다. 우선, 화학양론적 속도 U_S 는 OH 층의 안쪽 윤곽선과 일치하였으며, 화염면의 축방향 평균 속도와 거의 같음을 확인하였다. 또한, 순간 변형률이 큰 영역은 OH 층과 같은 위치에 있었다.

OH 층에서의 반경방향 속도의 RMS 값을 계산하여 국부적인 화염체류시간을 구하였으며, 그 결과 화염체류시간은 $(x/d_F)^{0.7}$ 에 비례하는 것을 확인하였다. 반면, OH 층에서 주변형률의 평균값을 계산한 결과 $(x/d_F)^{0.7}$ 에 비례하여 감소하였다. 따라서, 국부적으로 화염면을 따라감에 따라 화염체류시간과 주변형률은 서로 역수관계에 있음을 실험적으로 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. O. Hinze, "Turbulence," McGraw-Hill, 1950
- [2] R. H. Chen, J. F. Driscoll, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames: Effect of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, 1990, pp. 281-288
- [3] S. H. Kim, Y. Yoon, I. S. Jeung, "Nitrogen Oxides Emissions in Turbulent Hydrogen Jet Nonpremixed Flames: Effects of Coaxial Air

and Flame Radiation," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 28, 2000, pp. 463-471

[4] S. H. Kim, M. Kim, Y. Yoon, I. S. Jeung, "The Effect of Flame Radiation on the Scaling of Nitrogen Oxide Emissions in Turbulent Hydrogen Nonpremixed Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 1951-1956

[5] J. E. Rehm, N. T. Clemens, "The Relationship between Vorticity/Strain and Reaction Zone Structure in Turbulent Nonpremixed Jet Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 27, 1998, pp. 1113-1120

[6] J. M. Donbar, J. F. Driscoll, C. D. Carter, "Strain Rates Measured along the Wrinkled Flame Contour within Turbulent Nonpremixed Jet Flames," *Combustion and Flame* 125, 2001, pp. 1239-1257

[7] P. S. Kothnur, M. S. Rsurikov, N. T. Clemens, J. M. Donbar, C. D. Carter, "Planar Imaging of CH, OH, and Velocity in Turbulent Nonpremixed Jet Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, 2002, pp. 1921-1927

[8] D. H. Han, M. G. Mungal, "Simultaneous Measurements of Velocity and CH Distributions. Part I: Jet Flames with Co-flow," *Combustion and Flame* 132, 2003, pp. 565-590

[9] P. H. Paul, J. E. Dec, "Imaging of Reaction Zones in Hydrocarbon-Air Flames by use of Planar Laser-Induced Fluorescence of CH," *Optics Letter* 19, 1994, pp.998-1000

[10] K. A. Watson, K. M. Lyons, J. M. Donbar, C. D. Carter, "Scalar and Velocity Field Measurements in a Lifted CH₄-Air Diffusion Flame," *Combustion and Flame* 117, 1999, pp. 257-271

[11] H. Tennekes, J. L. Lumley, "A First Course in Turbulence," *The MIT Press*, 1972

[12] T. G. Malmstrom, A. T. Kirkpatrick, B. Christensen, K. D. Knappmiller, "Centerline Velocity Decay Measurements in Low-Velocity Axisymmetric Jets," *Journal of Fluid Mechanics* 346, 1997, pp. 363-377