

연소 유동장의 PIV 가시화 측정과 제반 문제들

김영한* · 윤영빈** · 정인석***
(1999년 5월 6일 접수)

Combustion Fluid Field Visualization Using PIV and Related Problems

Younghan Kim, Youngbin Yoon and In-Seuk Jeung

Key Words: PIV(Particle Image Velocimetry), Image Processing(영상처리), Diffusion Flame(확산화염), Image Shifting(영상이동)

Abstract

PIV(Particle Image Velocimetry) is a recently developed technique for visualizing the fluid velocity fields. Because it has several advantages over the LDV(Laser Doppler Velocimetry), it became one of the most popular diagnostic tools in spite of its short history. However, its application to combustion is restricted by some problems such as flame illumination, scattered light refraction, particle density variation due to heat release, the combined effect of abrupt change in particle density and fluid velocity on flame contour, and thermophoresis which is particle lagging due to temperature gradient. These problems are expected to be originated from the non-continuous characteristics of flames and the limitations of particle dynamics. In the present study, these problems were considered for the visualization of the instantaneous coaxial hydrogen diffusion flame. And the instantaneous flame contour was detected using particle density difference. The visualized diffusion flame velocity field shows its turbulent and meandering nature. It was also observed that the flame is located inside the outer shear layer and flame geometry is largely influenced by the vorticity.

1. 서론

유동현상에서 물리량의 정보를 얻기 위한 유동 가시화 기법은 20세기 들어서 개발된 레이저의 발달에 힘입어 급속한 발달을 이루었으며 현대의 유체 및 연소 분야의 연구에 광범위하게 이용되고 있다.⁽¹⁾ 기존의 유속측정법 중에서는 일반적으로 LDV(Laser Doppler Velocimetry)가 표준적인

기법으로 인식되고 있는데 시간 응답성이 우수하고 정확도가 뛰어나지만 점측정 방식이라는 공간 차원에서의 근본적인 한계점을 지니고 있다.

PIV(Particle Image Velocimetry)⁽²⁾는 이러한 점측정 방식에서 진보한 평면측정 방식을 기본으로 하고 있어서, 비정상류 및 난류의 정량적인 순간 유속장 정보를 2차원적으로 얻는 것이 가능하게 되었다. 또한 초기에는 저밀도 형식의 PTV(Particle Tracking Velocimetry)⁽³⁾가 주로 이용되었으나 디지털 이미징과 영상처리를 위한 장비의 발달로 현재에는 주로 고밀도 형식의 PIV가 주로 이용되고 있는데, 속도장을 직교 격자 시스템 형식으로 얻어내므로 수치미분을 통해 와류장(vorticity field)과 변형률장(strain-rate field) 정보로 쉽게 변환할 수 있다. 이러한 장점으로 PIV는 현

* 회원, 한국항공우주연구소

E-mail : yhkim@viva.kari.re.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)887-2662

** 회원, 서울대학교 항공우주공학과

*** 회원, 서울대학교 항공우주공학과

재 유체 분야의 연구에 활발히 이용되고 있으며⁽⁴⁻⁶⁾ SPIV(Stereoscopic PIV),⁽⁷⁾ HPIV(Holographic PIV)⁽⁸⁾ 등의 형식으로 발전해 그 차원을 높여가고 있다.

연소 현상은 대부분 난류, 비정상 특성을 가지며 화염을 전후하여 물리적인 특성이 크게 변하기 때문에 화염을 동반한 반응 유동장의 이해를 위해서는 순간 유동장을 가시화할 수 있는 PIV 기법이 필요하다. 또한 와류장과 변형률장의 정보는 난류 화염 및 화염-난류 상호작용 분야의 연구에 있어서 기본적인 정보로 인식되고 있어서 PIV 기법의 필요성은 연소분야의 연구에 있어서 더욱 크다고 할 수 있다.

그러나 연소 현상에서는 화염에 의해서 유체 및 입자 밀도 변화, 열영동효과(thermophoresis), 화염 발광 등의 여러 가지 문제가 발생된다. 이러한 문제점들로 인해 PIV 기법의 필요성에 비해 그 이용은 더디게 진행되어 왔다. 본 연구실에서는 PIV 시스템을 구성하고 비반응 체트류에서 LDV와의 결과비교를 통해 PIV 시스템의 정확도를 검증하였으며 다양한 비반응 유동을 가시화하여 성능을 살펴본 바가 있다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 PIV 기법을 연소현상에 적용하기 위하여 화염에 의해 발생하는 PIV 기법의 적용 난점을 확인하고 이들을 해결하여 동축 수소 확산 화염의 순간 유동장을 해석하고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 PIV 기법

단일 프레임/이중 노출 형식의 PIV 개념을 설명하는 그림이 Fig. 1에 주어져 있다. PIV에서는 고밀도의 입자를 유동에 주입하며 이를 유동의 추적자(tracer)로 이용하여 이 입자를 영상으로 기록하고 분석함으로써 유속을 측정한다. 레이저는 평면광으로 만들어져서 유동장에 조사되는데 시간 $t=t_1$ 과 $t=t_2$ 에 대하여 두 번 조사됨으로써 시간간격 $dt=t_2-t_1$ 사이의 입자들의 위치를 하나의 프레임에 모두 기록하게 된다.

이렇게 기록된 원영상(raw image)에는 보통 수천~수만개 정도의 격자가 존재하도록 격자 시스템을 구성하는데 Fig. 1에서는 그 중 일부 격자를 확대하여 표시하였다. 그림에서 흰색의 입자 영상은 $t=t_1$ 에서 기록된 것이며 회색의 입자 영

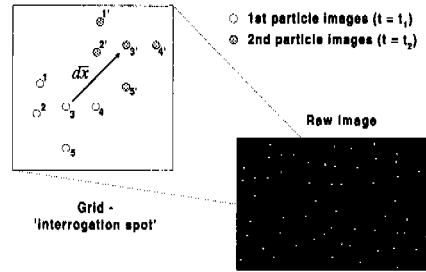


Fig. 1 Particle images exposed by double pulsed laser sheet

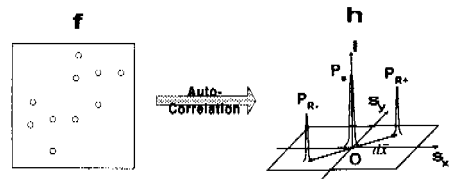


Fig. 2 Autocorrelation

상은 $t=t_2$ 에서 기록된 것인데, 이러한 입자들의 평균 이동 변위는 그림에서 \vec{dx} 이다.

결국 이 조사영역내의 평균 유속은 광학적인 매울 M 과 시간간격 dt 을 고려하여 아래의 식 (1)과 같이 구할 수 있게 되며, 이러한 작업을 전체의 조사영역에 대하여 순차적으로 수행함으로써 격자 시스템으로 구성된 속도장을 구한다.

$$\vec{v} = \frac{\vec{dx}}{M dt} \quad (1)$$

단일 프레임/이중 노출 형식에서는 조사영역내의 입자들의 평균거리를 구하기 위해 자기상관 (autocorrelation) 기법이 동원된다. Fig. 2에서는 자기상관법을 설명하고 있는데 자기상관 함수 h 에는 정점이 세 개가 존재하게 된다. 여기서 P_s 는 항상 원점에 존재하여 입자 이동 변위 정보를 담고 있지 않고 P_{R+} 또는 P_{R-} 가 이러한 입자 이동 변위 정보를 담고 있는데 이들은 원점에 대하여 대칭을 이루게 된다.

P_{R+} 와 P_{R-} 둘 중에서 어느 것이 실제 입자 이동 변위를 반영하는지 알 수 없으며, 이렇게 입자의 이동 거리는 알 수 있으나 방향을 판단할 수 없는 문제를 벡터의 방향 판단 문제(directional ambiguity)라 하며 자기상관 방식 PIV 측정의 고유한 특성이다. 이를 해결하기 위해 사용되는 대표적인 방법으로는 2색 이미징(2 color imaging)⁽⁵⁾

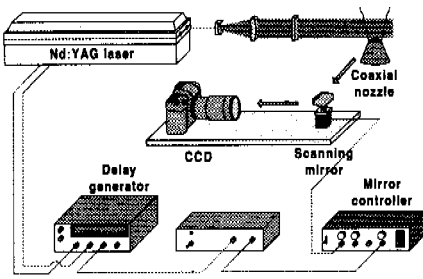


Fig. 3 Experimental setup

과 영상이동(image shifting)⁽¹⁰⁾이 있는데 본 연구에서는 저속영역($\sim 30\text{m/s}$)에서 주로 쓰이는 스캐닝 미러(scanning mirror)를 이용한 영상이동 기법을 이용하였다.

2.2 실험장치

2.2.1 PIV 시스템

PIV 시스템은 레이저와 렌즈를 포함한 광원 시스템, 영상이동을 위한 스캐닝 미러 시스템, 입자 영상기록장치, 전체 시스템의 작동을 위한 동기화 장치, 시험부(test section)와 획득한 영상의 처리를 위한 소프트웨어로 구성되어 있으며 Fig. 3에서 이들을 보여주고 있다.

광원으로는 double pulsed Nd:YAG laser (GCR-170, Spectra Physics)가 쓰였으며 두 펄스의 시간간격 dt 은 $30\mu\text{s}$ 로 설정하였다. 레이저에서 나온 빔은 렌즈들을 거쳐 평면광이 되는데 높이 약 10cm, 두께 1mm 미만의 크기를 가지며 동축 노즐(coaxial nozzle)의 중심부를 지나게 되어있다.

영상처리 장치는 3060×2036 pixels 해상도를 가진 디지털 컬러 CCD(DCS460, Kodak)와 bellows, 180mm 렌즈(Nikon)로 구성되어 있고 그림에서 보는 바와 같이 스캐닝 미러를 통하여 들어온 입자의 산란광을 기록한다. 촬영시 $\#$ 는 8로, 노출 시간은 1/13초로 고정하여 사용하였다.

전체 장비의 시간 조절은 딜레이 제너레이터(DG535, Stanford Research)에서 나오는 10Hz의 TTL 신호를 마스터(master clock)로 하여 레이저와 스캐닝 미러 제어기(CX-660, General Scanning Inc.)를 구동하는데, 스캐닝 미러를 먼저 구동하여 적절한 각속도를 얻었을 때 두 레이저빔이 같은 강도를 가지고 방출되도록 시간을 조절하였다. 스캐닝 미러 구동을 위한 신호는 파형변환기를

거쳐 스캐닝 미러 제어기에 입력되며 이 신호에 따라 스캐닝 미러(G325DT, General Scanning Inc.)를 작동한다. 영상이동 속도 \vec{v}_s 는 정지 유동에 PIV 기법을 적용함으로써 얻을 수 있는데 본 연구에서는 입자를 입힌 유리판을 시험부로 하여 이 속도값을 얻을 수 있었으며 유동의 속도보다 현저하게 큰 값을 사용하여 방향 판단 문제를 해결할 수 있도록 하였다.

일반적으로 스캐닝 미러의 각속도를 크게 할수록 영상이동량의 안정성이 떨어지는 경향이 있다. 시험결과 제어전압이 2V 이하인 경우 영상이동량의 표준편차가 1화소(pixel) 미만으로 충분히 감소되는 것으로 확인되어 제어전압을 2V로 설정하였다.

분석 소프트웨어는 Matlab 프로그래밍을 통하여 구현하였다. 조사영역의 크기는 64×64 화소의 크기를 사용하였는데 물리적 영역에서 $1.4 \times 1.4\text{mm}^2$ 에 해당한다. 프로그램의 주요과정은 FFT를 통해 푸리에변환을 하고 자기상관 함수를 얻어내며 가우스근사를 통해 정점의 중심을 구하도록 되어있다. 이 과정을 통해 얻어진 속도장은 후처리를 거치게 되는데 3×3 미디언 필터를 통해 불량벡터(bad vector)의 제거와 내삽(interpolation)을 수행하여 최종 속도장을 얻어낸다.

2.2.2 시험부

시험부(test section)는 동축 노즐을 갖춘 연소기로 노즐의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 가운데의 노즐은 연료 노즐로 수소 연료 유동(fuel)을 통과시키며 바깥쪽 노즐은 동축 노즐로 공기 동축류(coaxial flow)를 통과시킨다. 그리고 바깥쪽의 주위류(coflow)는 본 실험에서 사용되지 않았다. 사용된 연료 노즐의 직경 D_p 는 3mm, 동축 노즐의 직경 D_{coax} 는 15mm로 되어있다.

이러한 형식의 동축 화염을 가시화하기 위해서 연료유동과 동축류 각각의 입자 주입기(particle seeding device)를 따로 갖추었다. 입자 주입기는 회전류방식(cyclone type)이 사용되었는데 수 μm 크기를 갖는 SiO_2 또는 Zeosphere (Zeeland Industries) 입자를 유동에 주입하도록 되어있고, 입자 주입기 입구와 마이패스의 압력조절을 통해 주입 입자량의 조절이 가능하도록 하였다.

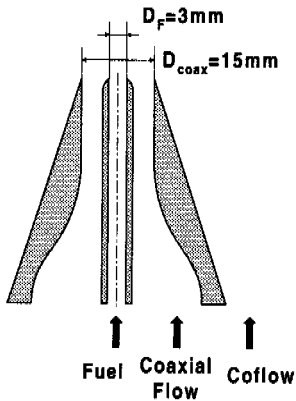


Fig. 4 Schematics of coaxial nozzle

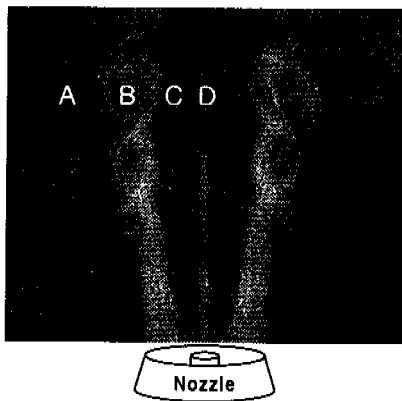


Fig. 5 Raw image of instantaneous diffusion flame

3. 실험결과 및 고찰

연료유동의 속도 $v_f = 8.43\text{ms}$, 동축류의 속도 $v_{coax} = 8.48\text{ms}$ 인 조건에서 얻어진 원영상을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 입자의 밀도에 따라 4가지 영역이 뚜렷이 구분됨을 알 수 있는데 D 영역은 연료유동의 입자 영상, A 영역은 주위류의 입자 영상을 보여주고 있다. 여기서 A 영역은 속도가 0에 가까우며 입자를 직접 주입시키지 않았으나 동축류에 의해 간접적으로 입자가 주입되고 있다. B와 C 영역은 모두 동축류의 입자 영상이나 뚜렷한 밀도차에 의해 따로 나뉘어 보이는데 이는 화염의 효과에 의한 것이다. 화염의 열방출 효과는 이렇게 입자 밀도를 크게 변화시키며, B와 C 영역을 나누는 경계면이 바로 화염면에 해당한다.

3.1 화염면 포착(flame contour detection)

PIV 기법에서 화염면을 구하는 방법은 대체로 네 가지가 알려져 있다. Mungal 등⁽¹¹⁾은 동축류에 가연성 입자들을 주입하는 방법을 이용하였으며 Schefer 등⁽¹²⁾은 입자의 밀도차를 이용하여 직접 구하였고 Mueller 등⁽¹³⁾에 의한 팽창률($\nabla \cdot \vec{u}$)을 이용하여 구하였다. LIF(Laser Induced Fluorescence) 기법을 동시에 이용하여 화염면을 구하는 방법도 있는데 정확도면에서 가장 뛰어나지만 실험이 까다롭다는 단점이 있다.

본 연구에서는 간편하면서도 충분한 정확도를 얻을 수 있는, 밀도차를 이용하는 방법을 선택하였다. 앞서 언급한 바와 같이 Fig. 5에서 B와 C 영역을 나누는 면이 화염면인데, 화염면을 경계로 급격한 영상 강도의 차이를 보이고 있다. 이러한 특성을 이용하여 영상처리를 수행함으로써 화염면을 구하였다.

스캐닝 미러를 이용하는 단일 프레임/이중 노출 형식의 PIV 기법에서는 전후 영상이 중복되어 나타나게되어 화염면을 구하기가 어렵게 된다. 이러한 이유로 이전의 연구자들은 모두 이중 프레임/단일 노출 형식을 이용하여 화염면을 구하였는데, 본 연구에서는 동축류 화염의 특성과 수평 영상이동의 특성을 이용하여 단일 프레임/이중 노출 형식에서도 화염면을 구할 수 있었다.

우선 원영상 전체에 저주파통과 필터연산(lowpass filtering)을 수행하여 흐린영상(blurred image)을 얻었다. 소벨 연산자(Sobel operator) 등을 이용하여 경계검출(edge detection) 작업을 할 수도 있겠으나, 적절한 값을 이용해서 문턱값처리(thresholding)를 하는 방법이 보다 간단하면서도 효과적이었다. 여기서 영상처리에 사용하는 필터의 크기는 화염면 탐지결과에 영향을 끼치게 된다. 필터의 크기가 필요이상으로 크면 화염면의 곡률이 실제보다 작아지는 효과가 있고, 지나치게 작으면 저주파통과 이후의 작업에서 화염면을 구하는 기준을 마련하기가 어려워진다. 본 연구에서는 조사영역의 것과 동일한 크기의 필터를 사용하였으며 원영상에 증첩하여보았을 때 화염면을 정확히 탐지하였음을 확인하였다.

Fig. 6(a)는 영상이동 방법이 이용될 경우 화염면이 중복되는 현상을 설명하고 있다. 본 연구에서 영상이동은 수평 방향(x)으로만 이루어졌는데 영상이동 변위는 \vec{d}_x 로 그림에 표시되어 있다.

그림에서 실선으로 표시된 화염면 ③, ④는 $t=t_1$ 에서 기록된 화염면이며 점선으로 표시된 화염면 ①, ②는 $t=t_2$ 에서 기록된 것이다.

여기서 화염면 ③, ④를 구해야 하는데 화염면 ③을 구하는 것은 문제가 되지 않으나 화염면 ④의 경우 화염면 ②와 중복되어 있어서 영상의 강도차가 크지 않으며 따라서 화염면 ④를 구하기가 어려워진다. 본 연구에서는 포착하기보다 쉬운 화염면 ②를 구해서 $-\vec{d}_x$ 만큼 화염면을 이동하는 방법을 이용하여 화염면 ④를 구하였으며 그 결과가 Fig. 6(b)에 주어져 있다. 시간간격 30 μs 동안 화염면의 기하학적 변화는 원영상에 계산된 화염면을 중첩하는 방법으로 조사하였는데, 화염면 ②와 ④의 모양은 시간간격동안 거의 변하지 않아서 일치함을 확인하였다.

3.2 화염에 의한 제반 문제들

화염은 두께가 얇으면서 자신을 중심으로 물리적 특성을 크게 변화시키는 불연속면의 일종으로

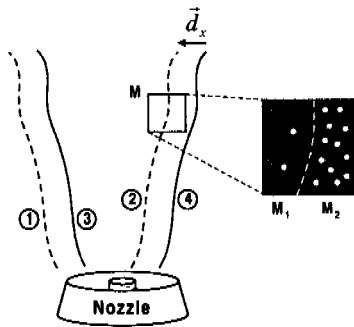


Fig. 6(a) Flame contour overlap due to image shifting

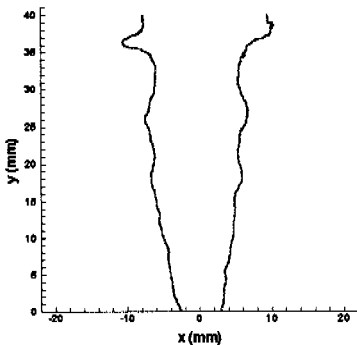


Fig. 6(b) Detected flame contour

생각할 수 있다. 연소 유동을 PIV를 이용하여 가시화할 경우에는 여러 가지 문제점이 생기는데 그 주요원인은 화염의 불연속적 특성과 입자 역학(particle dynamics)의 한계로 귀결될 수 있겠다.

3.2.1 화염광

입자의 산란신호를 기초 정보로 이용하는 PIV 기법에 있어서 화염광과 같은 잡신호는 정확도에 영향을 주며 신호 대 잡음비를 떨어뜨리게 된다. 따라서 화염광을 기록단계에서 광학필터를 통해 차단하거나 이후의 처리를 통해 화염광에 의한 신호를 제거해야 한다. 본 연구에서는 스캐닝미러의 사용으로 화염광의 효과를 일단 낮추었고 이후의 강도가 낮은 붉은색 계통의 잡신호들을 영상의 채널 분리를 통해 효과적으로 제거할 수 있었다.

3.2.2 유체 밀도변화에 의한 산란광의 굴절

화염을 전후하여 유체 밀도는 급격히 변하게 되는데, 빛이 이렇게 유체 밀도가 다양한 영역을 지날 때는 굴절률이 변하게 되며 이는 새도우그래프(shadowgraph), 셸리엔(Schlieren) 등 실험기법의 근거가 된다. PIV 측정에서 이러한 현상에 의해 산란광의 굴절이 심할 경우 속도측정에 오차를 일으키는 한 원인이 될 수 있다.

일반적으로는 이러한 화염에 의한 산란광의 굴절 효과가 크지 않다고 가정하는데, 본 연구에서도 특별한 보정을 하지는 않았고 단지 굴절효과를 최소화하도록 시험부와 CCD의 거리를 최소한으로 유지하였다.

3.2.3 입자 밀도변화에 의한 불량벡터의 증가

앞서 언급한 바와 같이 화염면을 통하여 입자의 밀도가 크게 변하는 현상은 화염면을 포착할 수 있는 근거가 된다. 그러나 이러한 현상은 화염에 PIV를 적용하는데 있어서 많은 문제를 야기하여 불량벡터의 비율을 증가시키는 주요 원인으로 작용한다. PIV에 있어서 조사영역내의 입자의 수는 정확도에 지대한 영향을 끼치게 되는데 Keane 등⁽¹⁴⁾은 수치해석을 통해 조사영역내의 입자의 수가 10~20 이상이 되어야한다고 제안한 바 있다. 또한 입자수가 지나치게 많을 경우에는 영상의 배경과 입자 영상의 강도차(contrast)를 약화시켜 상관함수의 질을 떨어뜨리게 된다. 따라서 전영역에 걸쳐 입자가 균일하게 분포하고 조사영역내의 입자수는 특정 범위를 벗어나서는 안 된다.

그러나 Fig. 5에서 보듯이 화염에 의해 입자의 밀도는 현격한 변화를 나타내며 입자의 적정 밀도수를 전영역에 걸쳐 유지하는 것이 매우 어려워진다. 입자의 밀도가 균일하지 못한 부분이 발생하게 되고 이러한 조사영역들에서 불량벡터가 발생하여 전체적인 불량벡터 비율을 증가시킴과 동시에 정확도를 떨어뜨리게 된다. 본 실험에서는 Fig. 5의 C와 D영역의 입자밀도가 문제되었다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 우선 연료부분과 동축류부분에 입자 주입기를 따로 설치하고 연료부분의 입자크기를 동축류부분의 것보다 1.5배 큰 것을 사용하였으며, 비연소의 경우보다 동축류부분의 입자밀도를 증가시킴으로써 불량벡터율을 낮출 수 있었다.

3.2.4 입자 밀도와 유속의 불연속적 변화

화염면을 통한 입자 밀도의 급격한 변화는 또 다른 문제를 야기한다. Fig. 6(a)을 다시 참조해보면 화염면에 걸쳐있는 조사영역 M과 오른쪽의 그 확대그림을 볼 수 있는데 점선으로 된 화염면을 경계로 화염내의 M₁ 부분과 화염밖의 M₂ 부분의 입자 밀도가 크게 다른 것을 볼 수 있다. 또한 화염면을 통해서 열방출효과에 의해 유속이 불연속적으로 증가하는 효과가 있음을 고려하면 입자 밀도가 낮은 M₁부분의 유속이 입자 밀도가 높은 M₂부분의 유속보다 더 높음을 유추할 수 있다.

조사영역의 정의상 조사영역 M의 속도는 영역 내의 평균속도를 반영해야하나 상관함수의 특성상 입자의 수가 더 많은 M₂ 부분의 속도가 크게 반영되게 된다. 따라서 화염면 주위에서 측정된 속도벡터들의 오차 수준이 높아지게 되며 이러한 현상을 제거하기 위해서는 화염면을 먼저 포착하고 화염면에 따라 그림에서와 같은 M₁, M₂ 영역으로 분리하고 각각에 대해 따로 상관을 수행해야 한다.⁽¹⁵⁾

본 연구에서는 단일 프레임/이중 노출 형식이어서 입자영상이 겹쳐지게 되어 상관을 따로 수행하는 것이 불가능하고, 화염 주위의 유속 정보가 크게 중요하지 않으므로 이렇게 영역을 분리하여 상관을 수행하지는 않았다. 그러나, 조사영역의 중첩률을 늘리고 후처리 과정에서 연화작업(smoothing)의 횟수를 비연소 시험의 경우보다 1~2회 줄여 화염면을 경계로 하는 유속의 불연속적 특성이 지나치게 감소되지 않도록 하였다.

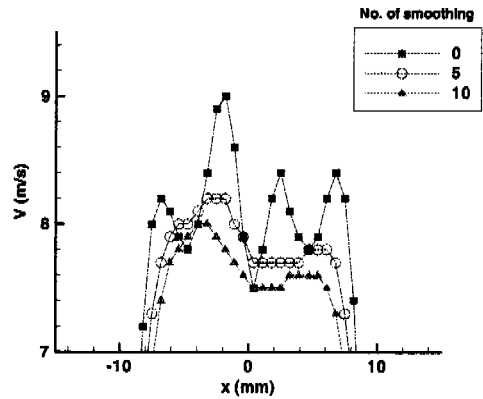


Fig. 7 Velocity profile variation at $y=20\text{mm}$ with increasing number of smoothing

연화작업에 따른 유동장 결과의 양상을 살펴보았는데, Fig. 7은 연화 과정에 따른 속도단면의 변화를 개념적으로 보여주고 있다. 속도단면은 동축류의 전형적인 모양을 보여주고 있으며, 연소현상에 의해 비연소의 경우보다 복잡한 형태를 띠고 있다. 그래프를 통해 연화작업의 영향을 확인할 수 있는데 연화작업의 횟수가 증가할수록 속도단면의 굴곡이 약해진다.

여기서 기준속도 v_{ref} 를 $x=0, y=20\text{mm}$ 에서 연화작업전 축방향 속도로하였을 때, 오차율(deviation ratio)을 아래의 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$R_D = \frac{v - v_{ref}}{v_f} \quad (2)$$

연화작업 수에 따른 오차율의 경향을 Fig. 8에 나타내었는데 예상한 바와 같이 비례하는 경향을 보여주고 있다. 주목할 것은 연화작업 횟수가 1~5 정도로 작은 영역에서 오차율의 증가 경향이 크다는 점인데 일반적인 연화작업 횟수에 해당한다. 이는 연화작업을 추가할수록 오차율을 크게 증가시킬 수 있음을 의미한다.

비연소 유동장과는 달리 화염이 동반된 연소 유동장에서는 유동의 양태가 복잡해지기가 쉬우며 연화작업의 영향도 비연소 유동장의 경우보다 크게 받을 수가 있다. 원래 연화작업은 와류장 또는 변형률장으로 변환시 수치미분에 의한 오차를 줄이는데 그 목적이 있는 것이므로, 이를 감안하여 연화작업의 수를 선택해야 할 필요가 있다.

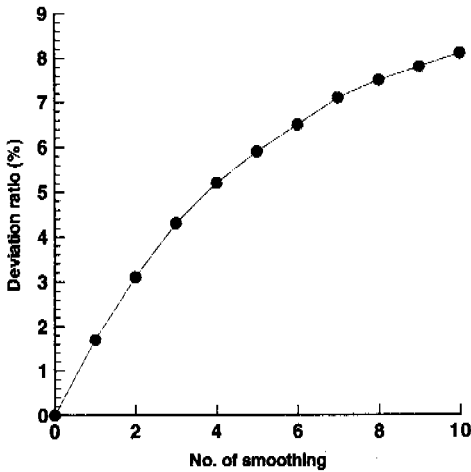


Fig. 8 Deviation ratio with respect to number of smoothing (at $x=0$, $y=20\text{mm}$)

3.2.5 열영동효과

입자가 온도구배가 큰 영역을 지날 때는 열영동력(thermophoretic force)의 영향을 받게 되어서 입자의 속도와 유동의 속도가 차이나는 현상이 발생하며 이를 열영동효과(Thermophoresis)⁽¹⁶⁾라 한다. 화염면에서는 온도구배가 매우 크므로, 연소 유동을 LDV나 PIV와 같은 입자를 사용하는 유동가시화 기법을 이용하여 측정할 때는 이 효과를 고려해야 한다.

이러한 열영동효과에 의한 오차는 그 값이 클 경우 수%에 달하는 것으로 알려져 있는데, Sung 등⁽¹⁵⁾이 이에 대해 수치해석적 방법을 동원하여 LDV결과를 보정한 바가 있다. 그러나 온도장 정보가 없는 이상 특별한 해결책이 없으므로 일반적으로 무시하고 있는 상황이다.⁽¹⁶⁾

본 연구에서도 유속이 일반적으로 이 값에 비해 매우 크고, 조사영역의 크기가 충분히 크기 때문에 이러한 열영동효과의 영향이 작다고 가정하고 무시하였다.

3.3 수소 확산 화염의 가시화 결과

Fig. 9에서는 Fig. 5의 원영상을 처리한 속도장, 와류장, 화염면을 보여주고 있다. 전체 유동장은 난류 특성을 띠고 있으며 화염에 의한 열방출 효과로 하류영역에서도 유속이 크게 감소하지 않음을 볼 수 있다.⁽¹⁷⁾

고와류선(high vorticity line)이 네 개 형성되었

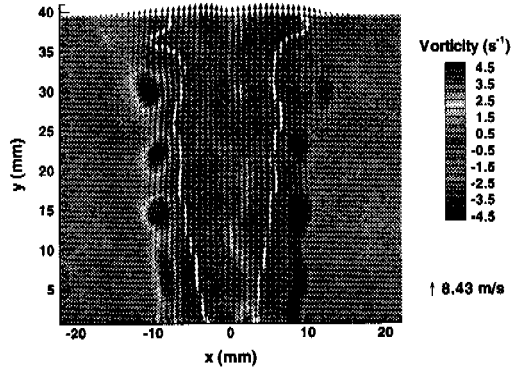


Fig. 9 Instantaneous velocity, vorticity field and flame contour of H_2 diffusion flame

$$(v_f = 8.43\text{m/s}, v_{\text{coax}} = 8.48\text{m/s})$$

는데 노즐축 바깥쪽의 것들은 동축류와 정지유동과의 전단에 의해, 노즐축 안쪽 약하게 형성된 것들은 동축류와 연료유동과의 전단에 의해 형성된 전단면(shear layer)들이다. 바깥쪽의 고와류선은 하류로 가면서 점과 같은 개체로 분리되는데 원영상 Fig. 5를 참조해보면 이는 바로 유체의 응집구조(coherent structure)에 해당한다.

화염과 와류분포를 통해서 화염이 바깥쪽 고와류선의 안쪽에 존재함을 확인할 수 있다. 또한 화염면과 와류선의 굴곡형상이 비슷하며 강한 와도 영역과 화염굴곡이 심한 영역이 일치함을 통해 화염의 기하학적 구조가 와도에 의해 크게 영향받을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연소 유동을 PIV 기법으로 가시화하기 위한 실험적 접근이 이루어졌다.

(1) 원영상에서의 화염면을 통한 입자 밀도차를 이용하여 순간 화염면을 구할 수 있었으며 저주파통과 필터연산, 문턱값처리, 경계검출 등의 영상처리작업이 이용되었다.

(2) 화염에 의해 발생하는 PIV 기법의 적용 난점-화염광, 유체 밀도변화에 의한 산란광의 굴절, 입자 밀도변화에 의한 불량벡터의 증가, 입자밀도와 유속의 불연속적 변화-들을 확인하였고 이 문제들을 단일 프레임/이중 노출 형식의 테두리

내에서 다루었다. 이러한 난점들은 근본적으로 화염의 불연속적 특성과 입자역학의 한계에 기인한 것으로 보인다.

(3) 단일 프레임/이중 노출 형식의 PIV기법에서도 물리적 특성과 영상이동을 적절히 이용하여 화염면을 탐지할 수 있었음을 보였다.

(4) 가시화한 수소 확산 화염에서 화염은 바깥쪽 전단면의 안쪽에 근접하여 위치하며 그 기하학적구조는 와류의 영향을 강하게 받는다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Lauterborn, W., and Vogel, A., 1984, "Modern Optical Techniques in Fluid Mechanics," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 16, pp. 223~244.
- (2) Adrian, R. J., 1991, "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 261~304.
- (3) 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, 1996, "화상 처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정 기법 개발," 대한기계학회논문집(B) 제20권 제10호, pp. 3334~3343.
- (4) Wernet, M. P., "Demonstration of PIV in a Transonic Compressor," NASA Technical Memorandum 113164.
- (5) Seal, C. V., Smith, C. R., Akin, O., and Rockwell, D., 1995, "Quantitative Characteristics of a Laminar, Unsteady Necklace Vortex System at a Rectangular Block-Flat Plate Juncture," *J. Fluid Mech.*, Vol. 286, pp. 117~135.
- (6) Molezzi, M. J., and Dutton, J. C., 1993, "Application of Particle Image Velocimetry in High-Speed Separated Flows," *J. of AIAA*, Vol. 31, No. 3, pp. 438~446.
- (7) Prasad, A. K., and Adrian, R. J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry, Applied to Liquid Flows," *Exp. in Fluids*, Vol. 15, pp. 49~60.
- (8) Barnhart, D. H., Adrian, R. J., and Papen, G. C., 1994, "Phase-Conjugate Holographic System for High-Resolution Particle-Image Velocimetry," *Appl. Opt.*, Vol. 33, No. 30, pp. 7159~7170.
- (9) 김영한, 김승한, 윤영빈, 정인석, 1998, "PIV를 이용한 확산 화염의 특성에 관한 연구," 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, pp. 163~167.
- (10) Adrian, R. J., 1986, "Image Shifting Technique to Resolve Directional Ambiguity in Double-Pulsed Velocimetry," *Appl. Opt.*, Vol. 25, No. 21, pp. 3855~3858.
- (11) Muniz, L., and Mungal, M. G., 1997, "Instantaneous Flame-Stabilization Velocities in Lifted-Jet Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 111, pp. 16~31.
- (12) Schefer, R. W., and Goix, P. J., 1998, "Mechanism of Flame Stabilization in Turbulent, Lifted-Jet Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 559~574.
- (13) Mueller, C. J., Driscoll, J. F., Reuss, D. L., Drake, M. C., and Rosalik, M. E., 1998, "Vorticity Generation and Attenuation as Vortices Convect Through a Premixed Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 112, pp. 342~358.
- (14) Keane, R., and Adrian, R. J., 1990, "Optimization of Particle Image Velocimeters. Part I: Double Pulsed Systems," *Meas. Sci. Technol.*, pp. 1202~1215.
- (15) Sung, C. J., Kistler, J. S., Nishioka, M., and Law, C. K., 1996, "Further Studies on Effects of Thermophoresis on Seeding Particles in LDV Measurements of Strained Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 105, pp. 189~201.
- (16) Stevens, E. J., Bray, K. N. C., and Lecordier, B., 1998, "Velocity and Scalar Statistics for Premixed Turbulent Stagnation Flames Using PIV," *27th International Symposium on Combustion*.
- (17) Takagi, T., Shin, H. -D., and Ishio, A., 1981, "Properties of Turbulence in Turbulent Diffusion Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 40, pp. 121~140.