

Two Color PIV 기법을 이용한 마하 2.0 초음속 노즐의 속도분포 측정

안규복* · 임성규* · 윤영빈**

Velocity Distribution Measurements in Mach 2.0 Supersonic Nozzle using Two-Color PIV Method

Kyubok Ahn* · Seongkyu Lim* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

A two-color particle image velocimetry (PIV) has been developed for measuring two dimensional velocity flowfields and applied to a Mach 2.0 supersonic nozzle. This technique is similar to a single-color PIV technique except that two different color laser beams are used to solve the directional ambiguity problem. A green-color laser sheet (532 nm: 2nd harmonic beam of YAG laser) and a red-color laser sheet (619 nm: output beam from YAG pumped Dye laser using Rhodamine 640) are employed to illuminate the seeded particles. A high resolution (3060x2036) digital color CCD camera is used to record the particle positions. This system eliminates the photographic-film processing time and subsequent digitization time as well as the complexities associated with conventional image shifting techniques for solving directional ambiguity problem. The two-color PIV also has the advantage that velocity distributions in high speed flowfields can be measured simply and accurately by varying the time interval between two different laser beams due to its high signal-to-noise ratio and thereby less requirement of particle pair numbers for a velocity vector in one interrogation spot. The velocity distribution in the Mach 2.0 supersonic nozzle has been measured and the over-expanded shock cell structure can be predicted by the strain rate field. These results are compared and analyzed with the schlieren photograph for the velocity distributions and shock location.

초 록

유동장의 2차원 평면 속도 분포를 측정하기 위하여 two-color PIV 기법을 개발하였고, 마하 2.0 초음속 노즐에 적용하여 보았다. 이 기법은 single-color PIV 기법과 유사하나 서로 다른 색의 두 레이저 빔을 사용하여 방향성의 문제를 해결하는 차이점을 갖는다. 녹색의 레이저 평면광 (532 nm)과 적색의

*서울대학교 기계항공공학부 대학원(Seoul National University, Graduate School of Mechanical and Aerospace Eng.)

**서울대학교 기계항공공학부(Seoul National University, School of Mechanical and Aerospace Eng.)

레이저 평면광 (619 nm)이 주입된 입자를 조사하기 위하여 사용되었고, 입자 위치가 고해상도 (3060 × 2036) 디지털 칼라 CCD 카메라에 기록되었다. 이러한 디지털 칼라 CCD 카메라를 이용한 two-color PIV 시스템은 사진 필름 현상 시간과 이에 따른 디지털화하는 시간 그리고 방향성의 문제를 해결하기 위해 사용되는 일반적인 image shifting 기법과 관련된 어려움을 제거해 준다. 또한 고속 유동장에서는 알맞은 입자 밀도의 주입이 어려워지는데, two-color PIV는 높은 신호 대 잡음비로 인하여 속도 벡터를 얻기 위해서 조사영역에 존재해야 하는 벡터쌍의 수가 줄어들게 된다. 따라서 다른 색의 두 레이저 빔의 시간 간격을 조절함으로써 고속 유동장의 속도 분포를 쉽고 정확하게 측정할 수 있게 된다. 마하 2.0 초음속 노즐에서의 속도 분포가 측정되었으며, 속도장으로부터 변형률장을 구하여 파팽창 충격파 구조를 예측해 보았다. Two-color PIV에 의해 얻어진 속도 분포와 충격파의 위치 결과는 schlieren 사진과 비교 분석해 보았다.

기호 설명

SNR	: Signal-to-noise ratio
DVR	: Dynamic velocity range, v_{\max}/v_{\min}
Δt	: Time separation of two laser sheets
P_o	: Stagnation pressure in the chamber
P_a	: Ambient pressure out of the chamber
α	: Shear strain rate (s^{-1})
u	: X-direction velocity (pixel/s or m/s)
v	: Y-direction velocity (pixel/s or m/s)
i	: i-th pixel position in the x-direction
j	: j-th pixel position in the y-direction
h	: Interrogation spot spacing (pixel or m)

1. 서 론

수년간 Particle Image Velocimetry (PIV)는 유동장의 2차원 평면 속도 분포 측정을 위하여 사용되어 왔다. 이러한 PIV 속도 측정 기법을 사용하는데 있어 문제점들 중 하나가 입자쌍의 시간적 순서를 구별할 수 없는데서 발생하는 방향성의 문제이다. 방향성 문제를 해결하기 위한 방법으로 그동안 여러 기법들이 개발되었다. Scanning mirror, rotating mirror, pulse tagging, calcite crystals, polarizing beam splitters 등의 방법들은 두 번의 레이저 펄스 사이에 image

shifting을 줌으로써 방향성의 문제를 해결하였다. Two-color PIV 기법도 이러한 방향성의 문제를 해결하기 위한 방법으로 개발되었다. Two-color PIV는 두 대의 레이저를 사용하여 다른 색의 펄스를 입자에 조사함으로써 이미지의 색 분리를 통하여 방향성의 문제를 해결한다.

PIV 기법 초기에 입자의 이미지는 사진 필름에 기록이 되었다. 하지만 이러한 방법은 필름을 현상하고, 다시 스캐너와 같은 장치를 이용하여 디지털화하여 계산을 해야 하기 때문에 시간이 많이 들게 된다. 더구나 two-color PIV 기법은 다른 색의 입자 이미지를 한 필름에 기록해야 하는데, 색수차 때문에 두 빔의 초점을 정확히 맞추기 위해서는 여러번의 테스트가 필요하게 된다. 이러한 문제점은 digital charge coupled device (CCD) camera를 사용함으로써 해결되었다. 본 실험에서는 35 mm 필름 해상도 수준의 3060x2036 pixels Kodak digital color CCD camera (DCS 460)를 사용하였다.

본 논문에서는 고해상도 digital color CCD camera를 기본으로 한 two-color PIV system을 Mach 2.0 초음속 노즐에 적용하여 초음속 유동에서의 two-color PIV system의 가능성에 대하여 살펴보았다. 그리고 초음속 노즐의 압력비를 조절, 파팽창 조건에서 실험을 수행하여 노즐 후류의 속도 변화를 분석함으로써 수직충격파와 경사충격파의 위치를 측정하였으며 schlieren 이미지와 비교를 해 보았다.

2. Two-Color PIV (Particle Image Velocimetry)

2.1 Two-Color PIV System

PIV 기법은 유동장의 2차원 평면 속도 분포를 정량적이고, 신뢰성 있게 측정할 수 있는 기법으로 사용되고 있지만 방향성 문제를 갖고 있어서 앞에서 설명한 바와 같이 *image shifting* 방법을 통하여 문제를 해결하여 왔다.

그렇지만 *scanning mirror*나 *rotating mirror*를 사용하는 기법은 기계적인 움직임으로 인한 속도 측정의 한계를 갖고 있으며, *pulse tagging*의 방법은 저속에만 적용될 수 있는 한계를 갖고 있다. 그리고 *calcite crystals*은 *shift*의 크기와 방향이 필름에서 변할 수 있다는 단점을 갖고 있는 등 기존의 PIV 방법들은 고속 유동에 적용하기가 힘들다는 단점을 갖고 있었다^[1-3].

Two-color PIV는 이러한 single-color와 관련된 방향성의 문제를 제거하기 위한 방법으로 Adrian^[4]에 의해 제기되었고, Goss et al.^[5]에 의하여 처음으로 수행이 되었다. 이러한 two-color PIV는 방향성의 문제를 입자 이미지의 색분리를 이용하여 해결함으로써 높은 데이터 산출을 얻을 수 있으며, 연소현상의 측정법으로 사용될 수 있다는 장점이 있다. 또한 색분리에 의한 두 이미지의 분리로 cross-correlation이 가능하여 높은 SNR을 얻을 수가 있게 됨으로써 조사영역 안에 존재해야 하는 입자쌍의 수가 적어도 될 뿐 아니라, DVR의 증가가 가능해지고, 두 레이저 펄스의 시간차 Δt 를 μs 이하 단위까지 조절할 수 있게 되어 고속 유동에의 적용이 가능하다는 장점을 갖게 된다.

본 실험에서는 frequency-doubled Nd-Yag 레이저 (Continuum, PL-9050, 50Hz)에서 나오는 초록색 레이저 펄스 (532 nm)와 Nd-Yag (Spectra Physics, GCR-170, 10Hz) pumped dye laser (Lumonics, HyperDYE-300)에서 나오는 붉은색 레이저 펄스 (619 nm)를 dichroic beam splitter를 사용하여 두 펄스를 결합하고, sheet-forming optics을 통과시켜 평면광으로 만들었다. 이러한

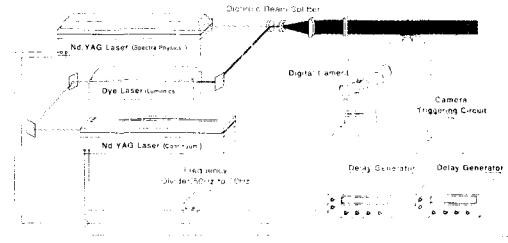


Fig. 1 Schematic of two-color PIV system

평면광의 두께는 시험부 안에서 1 mm가 되도록 하였다. 두 Nd-Yag 레이저의 주파수가 다르기 때문에 50Hz의 신호를 10Hz의 신호로 변조해주는 frequency divider를 사용하여 모든 실험장치를 10Hz로 동기화 하였고, photo-diode와 delay generator (DG535, Stanford Research Systems)를 사용하여 레이저 펄스 사이의 시간 간격을 조절하였다. 그리고 Kodak DCS 460 camera를 동기화 시키기 위하여 circuit을 제작하였고, Kodak DCS 460 camera의 특성을 고려하여 2초에 한번씩 신호를 주도록 다른 한 대의 delay generator를 사용하여 모든 광원 장치 및 실험 장치를 동기화 시켜 자동적으로 이미지를 기록할 수 있게끔 시스템을 설계하였다(Fig. 1).

이렇게 기록된 이미지는 software를 사용하여 decompression 과정을 거치도록 하였고, 얻어진 이미지는 green과 red의 색분리를 통하여 cross-correlation 기법을 이용할 수 있도록 하였다. Red 이미지의 강도 분포 (intensity distribution)를 $r(x, y)$, green 이미지의 강도 분포를 $g(x, y)$ 라고 하고, 그것들의 Fourier transform을 $R(\alpha, \beta)$, $G(\alpha, \beta)$ 라고 하면 2차원의 cross-correlation 함수 $h(x, y)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \int_R \int_R r(\alpha, \beta) g(x+\alpha, y+\beta) d\alpha d\beta \\ &= F^{-1} [F(r(x, y)) F(g^*(x, y))] \quad (1) \\ &= F^{-1} [R(\alpha, \beta) G^*(\alpha, \beta)] \end{aligned}$$

이러한 cross-correlation 함수는 조사영역 안에서 계산이 이루어진다. 조사영역의 크기는 입자

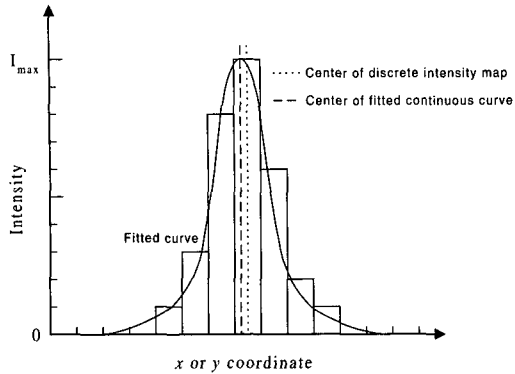


Fig. 2 Intensity-weighted peak searching

밀도, 속도 구배, 입자의 크기 그리고 공간 해상도 등에 따라 정해지는데, 본 실험에서는 입자의 밀도와 공간 해상도 등을 고려하여 64x64와 128x128 pixels를 조사영역으로 잡아 계산을 하였다. 64x64 조사영역의 경우에는 50 % overlapping을 하였고, 128x128 조사영역의 경우에는 50 %와 75 % overlapping을 취하여 해상도를 높게 하였다.

그리고 Fig. 2와 같은 intensity weighted peak searching algorithm (가우스 함수 보간법)을 도입하여 픽셀 이하 단위까지의 정확도로 peak의 위치를 찾도록 하였으며, 후처리 과정에서는 일정량의 불량벡터 (bad vector)를 제거하기 위해 median filter를 사용하였다.

2.2 Kodak Digital CCD Camera

Kodak digital CCD camera는 Fig. 3과 같은 CCD array를 갖는다. 각 array 픽셀에는 그림과 같이 color 필터가 부착되어 있다. 각 픽셀은 기본적으로 빛의 3원색인 red, green, blue 중 한 가지 색 만을 받아들이며, green 색이 인간의 눈에 가장 밝게 보이기 때문에 green 픽셀을 50 % 가 되도록 하였고, 나머지 red와 blue 픽셀은 각 25 % 씩 갖도록 되어 있다. 따라서 완벽한 3060x2036 RGB TIFF image를 얻기 위해서는 red, green, blue 픽셀들이 보간되는 여러번의 단계를 거쳐야 한다. 압축된 6Mbyte CCD image는

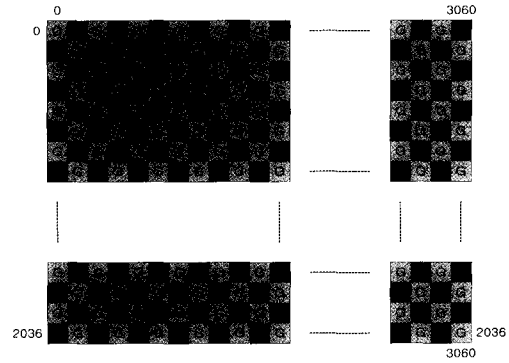


Fig. 3 Color-image pixel grid for Kodak camera

Adobe Photoshop의 plug-in으로 Kodak에서 제공되는 software를 통하여 decompression 되어 18Mbyte color TIFF image로 변환된다. 압축된 8bit 이미지는 gray-scale response curve를 이용하여 12bit의 이미지로 바뀐 후, pixel-to-pixel 민감도의 변화에 따른 보정이 이루어진다.

이러한 과정을 거친 후에 RGB 성분들의 보간이 이루어진다. 먼저 green 성분의 보간이 이루어진다. Red와 blue 픽셀에는 green 성분이 없기 때문에 주위 green 픽셀의 green 성분의 평균값으로 red와 blue 픽셀의 green 성분이 채워지게 된다. 이렇게 전체 이미지에 대한 green 성분이 채워지고 나서, red 성분의 보간이 수행된다. Green과 blue 픽셀에는 red 성분이 없기 때문에 주위 red 픽셀의 red 성분의 평균값으로 green과 blue 픽셀의 red 성분이 채워지게 된다. 그런데 휘도 (luminance)를 유지하기 위하여 green과 blue 픽셀의 green 성분이 red 성분에 더해져서 red 성분을 이루게 된다. 그런 후에 blue 성분의 보간이 red 성분의 보간과 같은 방법으로 이루어지게 된다. 따라서 red 이미지 평면에는 green 성분의 침투가 발생하는데 이러한 이유 때문에 self-correlation이 수행되거나, sub-pixel error가 발생하는 문제가 나타나게 된다. 본 실험에서는 이 문제를 해결하기 위하여 직접 6Mbyte의 CCD image를 18Mbyte color image로 변환시켜 주는 in-house decompression code를 제작하여 사

용하였다.

각 픽셀이 RGB color를 모두 받아들일 수가 없는 이러한 CCD camera의 특성상 픽셀에서 입자의 위치에 따른 uncertainty 문제가 발생하게 되는데, S. Gogineni 등의 연구^[6]에 의하면 green 색의 경우에는 입자의 크기가 4 pixel, red 색의 경우에는 입자의 크기가 6 pixel 이상이면 입자의 위치에 대한 오차는 0.1 pixel 이하의 수준으로 떨어짐을 알 수 있었으며, 실험에서 각 입자의 이미지는 10 pixel 정도로 uncertainty 문제를 고려할 정도는 아니었다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 특성 곡선 해법 (method of characteristic)을 이용하여 노즐 출구에서의 마하수가 2.0이 유지되는 완전팽창 가능한 이상적인 초음속 노즐을 사용하였다. 초음속 노즐은 압축기, 제어판, 공기노즐로 구성되어 있으며, 단속 밸브와 regulator를 사용하여 공기의 유량을 변화시켜 배압비 (P_o/P_a)의 조절을 가능하도록 하였다.

초음속 유동에서 PIV 실험을 하는 경우 가장 큰 문제가 되는 것이 입자 주입 방법인데, 이번 초음속 노즐 실험의 경우 압축기에서 나온 공기를 regulator를 사용하여 유량을 조절한 후, 공기의 흐름을 분리하여 한쪽은 by-pass를 통과하게 하였고, 한쪽은 입자 주입 장치를 통과시키는 방법을 사용하였다. By-pass 라인에는 밸브를 설치하여 입자 주입 밀도를 조절할 수 있도록 하였다. 두 라인은 입자의 고른 주입을 위하여 다시 결합하였고, 다시 두 라인으로 분리하여 momentum 효과를 없애기 위해 대칭 형태로 되어 있는 초음속 노즐 chamber에 연결되었다 (Fig. 4). 주입된 입자로는 산란광도와 유동 추종성을 고려하여 $O(1 \mu m)$ 크기의 SiO_2 를 사용하였다.

Green과 Red 레이저 펄스의 강도는 sheet forming optics 앞에서 20-30 mJ로 유지하였으며,

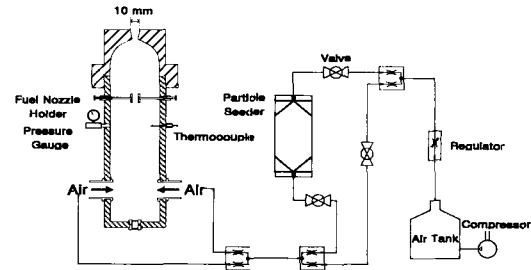


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus

카메라의 f-number는 4, 5.6, 8로 바뀌가며 측정을 하였다. Nd-Yag pumped dye laser에서 나오는 광원의 divergence가 frequency-doubled Nd-Yag 레이저의 광원보다 큰 관계로 sheet forming optics를 통과한 후, green 평면광과 red 평면광의 초점 위치가 다르게 되는데, 이를 맞추기 위해 green 펄스에 렌즈를 추가하여 두 평면광의 초점 위치를 같도록 하였다.

Green 펄스와 red 펄스의 시간차는 photo-diode를 사용하여 oscilloscope로 관찰함으로써 실험조건에 맞도록 사용하였다. 실험조건에 따라 delay generator를 사용하여 시간차를 250 ns에서 500 ns 사이로 바뀌가면서 실험을 하였다.

Kodak CCD camera는 기계적인 셔터 열림 지연 시간이 존재하기 때문에 레이저 펄스 보다 95 ms 전에 신호를 주었고, 레이저의 주파수를 고려하여 노출시간을 20 ms로 고정하였다. 시험부의 크기가 작기 때문에 AF Micro Nikkor 105 mm 렌즈 (Nikon)와 Tele Converter 3X For Nikon을 camera에 부착하여 사용하였다.

4. 결과

Two-color PIV를 이용하여 기록한 Fig. 5(a) 그림을 보면 green 입자와 red 입자가 일정한 간격을 두고 쌍으로 되어 있음을 알 수 있다. 이렇게 기록된 이미지를 cross-correlation을 이용한 FFT 알고리즘으로 구한 속도 성분 결과가 Fig. 5(b)에 나타나 있다(Fig. 5(b)는 120개의 이미지

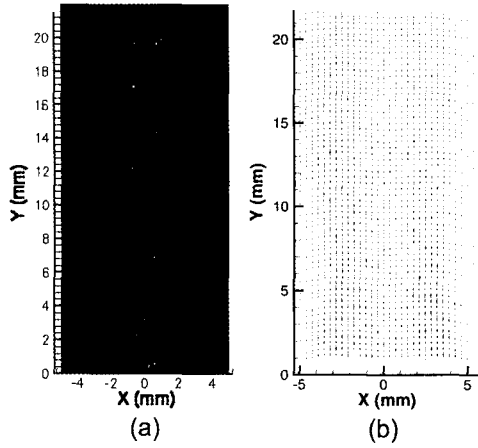


Fig. 5 (a) Raw image and (b) Vector plot of Mach 2.0 supersonic nozzle by two-color PIV

를 평균한 결과이다). Fig. 5(b)에는 1829개의 벡터가 있으며, 조사영역은 64x64 픽셀로 0.5 mm에 해당하는 크기이며, 50 % overlapping을 취하여 벡터 포인트당 공간해상도는 0.36 mm으로 하였다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 Fig. 5(b)에서 벡터를 추출하여 그린 그림이다. 그림에서 수직으로 향하던 속도 벡터들과 유선은 1차 경사충격파를 지나면서 중심방향으로 기울어져 있다가, 2차 경사충격파를 지나면서 다시 수직으로 향하고 있음을 살펴볼 수 있다. 이러한 경향성은 Fig. 7을 통하여 다시 확인할 수 있다. Fig. 7은 축방향으로의 속도 성분 v 와 반경방향으로의 속도 성분 u 를 나타낸 것이다. 축방향 속도 성분을 보면, 수직 충격파의 후류에서는 충격파에서의 속도 감소가 심하여 주위의 경사충격파를 지난 속도 보다 작아짐을 알 수 있으며, 대략적인 수직충격파의 위치를 예측할 수 있다. 그리고 반경방향 속도 성분을 보면, 경사충격파를 지난 후류의 수평 속도 성분의 변화를 알 수 있다.

PIV를 통해 얻은 속도장 분포로 유동의 특성을 파악하기란 쉽지 않다. 따라서 보통 변형률 (shear strain rate), 와도율 (vorticity rate), 팽창률 (dilatation rate) 등의 특성치로 변형하여 유체의 특성을 분석하게 되는데, Fig. 8에서는 변형률

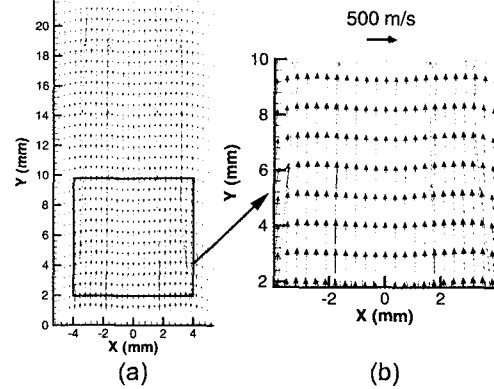


Fig. 6 (a) Extracted vector plot and (b) Cropped vector plot

분포를 구하여 초음속 유동의 특성을 파악해 보았다. 변형률이란 유동의 뒤틀림을 의미하는데 식(2)와 같이 정의되며, 수치계산을 위한 형태는 식(3)과 같다.

$$a = -\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

$$a_{i,j} = \frac{(v_{i+1,j-1} + 2 \times v_{i+1,j} + v_{i+1,j+1})}{8h} - \frac{(v_{i-1,j-1} + 2 \times v_{i-1,j} + v_{i-1,j+1})}{8h} + \frac{(u_{i-1,j+1} + 2 \times u_{i,j+1} + u_{i+1,j+1})}{8h} - \frac{(u_{i-1,j-1} + 2 \times u_{i,j-1} + u_{i+1,j-1})}{8h} \quad (3)$$

Fig. 8에서 보는 바와 같이 유동은 충격파를 지나면서 양의 전단 변형률을 갖고, 팽창파를 지나면서 음의 전단 변형률을 갖게 되는 것을 알 수 있다. 양의 전단 변형률은 국부적인 압축이 있는 곳에서 나타나며, 음의 전단 변형률은 국부적인 팽창이 있는 곳에서 나타나는데, 옆의 schlieren 그림과 비교해보면 결과가 일치한다는 것을 알 수 있다^[7].

Fig. 9는 축방향의 중심선을 따라서 그린 속도분포를 나타낸다. Schlieren 그림에서는 수직 충격파의 위치가 노즐로부터 3.6 mm에 있는 반면, PIV 결과에서는 3 mm에서부터 속도 감소가

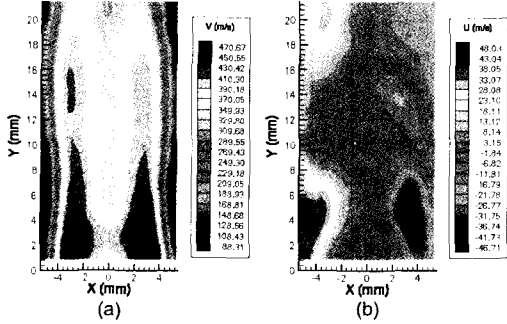


Fig. 7 (a) Axial and (b) Radial velocity components

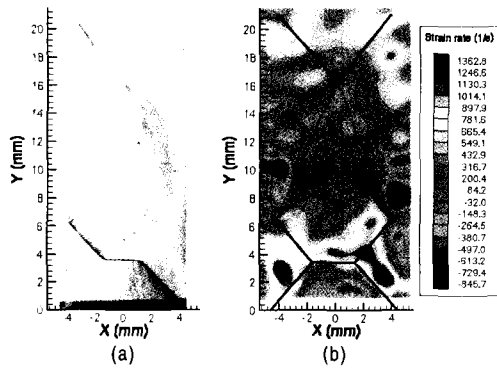


Fig. 8 (a) Schlieren photograph and (b) Strain rate field

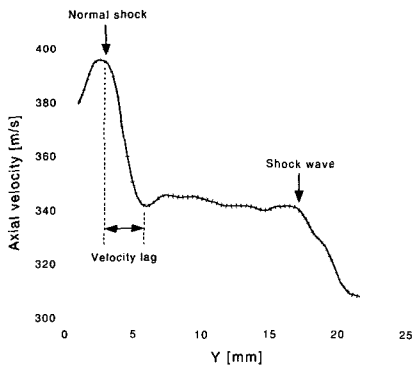


Fig. 9 Axial velocity profile at centerline (X=0)

시작되고 있다. 이의 원인으로서는 먼저 조사영역에서의 속도 결과는 입자 이미지의 평균 이동의 크기를 나타내는데, 조사영역의 일부가 충격파의 위치에서 겹치기 때문에 속도 감소는 조사영역 크기의 반정도 전에 일어날 것이다^[8]. 또한 실험에서 median filter로 제거된 불량벡터에 채워진 값의 원만한 보정을 위하여 한번의 smoothing을 거쳤는데, 이 과정에서 주위의 벡터와 보정이 되면서 벡터 사이의 간격만큼 전에 속도 감소가 일어나게 되어 결과적으로 0.6 mm 정도의 오차가 생기게 되는 것이다.

조사영역의 크기 (~0.7 mm)가 충격파의 두께 (~10⁻³ mm) 보다는 훨씬 크기 때문에 충격파의 크기를 구할 수는 없었다. 그리고 가속도가 존재하는 유동에서는 입자가 유동을 완벽하게 따라가지 못함으로써 발생하는 velocity lag 현상이 나타나게 되는데, 본 실험에서도 주입된 입자가 충격파를 지나면서 급격하게 감속하는 유동을 따라가기 위해서는 3~4 mm 정도의 거리가 필요하다는 것을 알 수 있다^[9].

그리고 충격파 이전에 속도의 증가 현상이 나타나고 있는데, 이는 노즐에서 가까운 벡터들의 경우 노즐에서 산란되는 배경 이미지가 강하여 불량벡터로 처리되는 경우가 많았는데, 이런 이유 등으로 인하여 평균하여 얻어진 속도값이 실제 유동속도 보다 작아져 있음을 알 수 있다^[10].

5. 결론

기존의 PIV 기법으로 적용이 어려웠던 초음속 유동에 대한 실험을 two-color PIV 기법을 이용하여 수행해 보았다. Two-color PIV 기법은 두 대의 레이저를 사용하여 시간차별 O(10 ns) 단위까지 조절할 수 있는 장점으로 인하여 고속 유동장 실험에 적합함을 알 수 있었다. 또한 초음속 유동에서 PIV 실험을 하는 경우 문제점의 하나가 알맞은 입자 주입 밀도를 유지하는 것인데, two-color PIV 실험을 통하여 입자쌍의 개수가 4개 이상만 되면 알맞은 속도 성분을 구할

수 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 single-color PIV를 이용한 실험의 경우 입자쌍의 개수가 10개 정도가 되어야 하는 것에 비하여 입자 주입에 대한 부담을 덜어주는데, 이는 two-color PIV의 높은 SNR에 기인한다고 볼 수 있다.

Two-color PIV를 통하여 얻은 과팽창 초음속 노즐의 속도장, 변형률장은 schlieren 그림과 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며, 변형률장 분포로 과팽창 충격파 유동의 구조를 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 속도 변화로 구한 충격파의 위치는 schlieren 그림과의 비교를 통해 알 수 있듯이 실제 충격파의 위치를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구결과는 1998년 교육부 학술진흥재단 과학기술기초 중점연구지원과제 (과제명: 램제트 엔진 연소기에 관한 기초연구, 과제번호: 1998-018-E00178)에 의해 수행된 것이며, 이에 본 연구가 수행될 수 있도록 많은 도움을 주신 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Gogineni, D. Sutkus, L. Goss and A. Glezer, "Investigation of a jet in a cross flow using PIV", AIAA-95-0790, 1995.
2. Grant, I. and Liu, A., "Directional ambiguity resolution in particle image velocimetry by pulse tagging", Experiments in Fluids, 10 (1990), pp. 71-76.
3. Christopher C. Landreth and Ronald J. Adrian, "Electro-optical image shifting for particle image velocimetry", Appl. Optics, 27 (1988), pp. 4216-4220.
4. Ronald J. Adrian, "Particle Imaging Techniques for experimental fluid mechanics, Ann Rev Fluid Mech", 23 (1991), pp. 261-304.
5. Goss, L. P., Post, M. E., Trump, D. D., and Sarka, B., "Two Color Particle Imaging Velocimetry", J. Laser Applications, 3, pp. 36-42.
6. S. Gogineni, L. Goss, D. Pestian, R. Rivir, "Two-color digital PIV employing a single CCD camera", Experiments in Fluids, 25 (1998), pp. 320-328.
7. 임성규, "대향분출염 연소방식에 의한 NOx 생성 저감에 대한 전단변형률의 영향", 공학 석사논문, 서울대학교 대학원, 2000.
8. Luiz M. Lourenco and A. Krothapalli, "TRUE Resolution PIV: A Mesh-free Second-Order Accurate Algorithm", Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques in Fluid Mechanics, Lisbon, July 2000.
9. A. Melling, "Tracer particles and seeding for particle image velocimetry", Meas. Sci. Technol, 8 (1997), pp. 1406-1416.
10. N. J. Lawson, G. J. Page, N. A. Halliwell, and J. M. Coupland, "Application of Particle Image Velocimetry to a Small-Scale de Laval Nozzle", AIAA journal, Vol. 37, No. 7, July 1999, pp. 798-804.