

액적의 속도 측정을 위한 이색 PIV 알고리즘 연구

The Study on Two-color PIV Algorithm for a Measurement of Droplet Velocity

이 기 형*, 이 창 식*, 오 승 익**
K. H. Lee, C. S. Lee, S. I. Oh.

ABSTRACT

It has been known that spray characteristics have an important effect on the mixture formation and directly influence the engine performances and the emissions. Up to now, the measurement of droplet size is well developed such as PDPA and PMAS though the behavior of small droplets during secondary atomization is not clear. Particle image velocimetry(PIV), a planar measuring technique, is a very efficient tool for studying complicated behavior and a fast and reliable method to track numerous droplets during injection.

In this study, two-color scanning PIV is designed to obtain quasi-instantaneous two dimensional velocity data by using Ar-ion laser, rotating mirror and beam splitter. This PIV method which has high temporal and spatial resolution provides the information about the small complex droplet behavior.

주요기술용어 : Mixture formation(혼합기), Secondary atomization(2차 미립화), PIV(입자 영상 속도법), Beam splitter(빔 분리기)

1. 서론

최근 각종 배기 규제와 에너지 문제가 전 세계적 문제로 대두되면서 저연비와 배기 저감을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 자동차용 엔진의 경우 혼합기 형성은 강한 와류와 맥동을 수반하는 유입 공기와 인젝터에서 분사되는 액체 연료가 한정된 공간 내에서 열, 운동량 및 물질 전달과정을 통하여 이루어진다. 이 경우 연료의 미립화가 촉진될수록 혼합기 분포가 균일하게 되어 엔진의 청정연소에 기여한다는 사실이 알려져 있다⁽¹⁾. 미립화를 위한 대표적인 기술로서 공기 가압식 인젝터와 고압 인젝터 등이 있으며, 이러한 인젝터의 분무 특성으로는

액적의 입경 크기도 중요하지만 액적의 거동 또한 매우 중요하다. 따라서 엔진용 인젝터의 분무 거동 특성들에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 진행되고 있는데, Amer⁽²⁾ 등은 대기 중에 연료를 분사하여 분무 액적의 입경 및 속도분포를 PDPA 장비를 이용하여 측정하였고, Zhao⁽³⁾ 등은 직분식 가솔린 엔진용 인젝터의 분무 가시화와 PDPA를 이용한 입경과 속도분포를 측정하였으며, 김덕진⁽⁴⁾ 등은 디젤 노즐의 입경과 속도분포를 PDPA를 사용하여 측정하였다. 또한 최근에는 고가의 PDPA를 사용하는 대신 아주 짧은 광지속 시간과 빠른 반복율을 가진 이중 스파크 광원을 가진 PMAS 장치를 사용하여 입경과 속도분포를 측정하는 기술이 개발되었다.

* 정회원, 한양대학교 기계공학과
** 한양대학교 기계공학과 대학원

이와 같은 계측 기술의 발달로 인하여 인젝터의 미립화 특성은 파악되고 있으나, 기체 유동장내의 마찰에 의하거나 또는 액적의 충돌에 의해 2차 미립화된 작고 복잡한 액적들의 현상 규명 및 거동 해석에는 아직 충분히 적용되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 분무의 2차 미립화 되는 국소적인 부위의 액적 거동 해석에 적용될 수 있는 이색 PIV 알고리즘을 개발하여 그 신뢰성을 검증하였으며, 분무의 속도 측정에 적용하여 보았다.

2. 이색 스캐닝 PIV 알고리즘

2.1 이색 컬러 PIV 알고리즘

기존의 PIV에 의한 입자 속도 측정법은 화상 취득 방법에 따라 단일화상 이중 또는 다중 노출법(single frame and double, multi-exposure)과 이중 또는 다중화상 단일 노출법(double or multi-frame and single exposure)으로 구별되어진다. 그리고 각각의 취득 방법과 획득되어진 화상의 수에 따라 계산 수법 또한 달라진다. 즉 단일화상 다중노출을 이용한 경우에 있어서는 속도 산출을 위해 필요한 통계적 방법으로 자기 상관법이 사용되고 이중화상 단일노출을 이용한 경우에는 상호 상관법을 사용한다.

하지만 이러한 방법들은 유동장의 패턴이 매우 복잡한 경우에는 유동의 방향판별이 어려워

진다는 큰 단점이 지적되고 있다. 이러한 단점에 대한 보완책으로 자기 상관법에서는 회전미러를 이용한 이미지 쉬프팅 기법을 이용하여 역회전이 발생하는 유동에 대해 비교적 정확히 방향을 판별하고 있다.⁽⁵⁾ 상호상관법을 이용한 방법에서는 기본적으로 방향의 판별이 가능하지만, 이 방법 또한 고가의 화상취득 장치가 구비되어야 한다. 따라서 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 기본적으로는 자기상관법을 이용한 단일화상 다중 노출법을 이용하지만 빔분리기와 회전미러를 사용하여 방향성 판별이 용이한 이색 컬러법을 구축하였다.

단일화상 다중노출을 이용한 고분해능 이색 PIV에서 취득되어진 화상은 청색과 녹색의 입자쌍을 포함하며 이색 빔의 주사(scanning)순서에 따라 운동 방향이 결정되므로 청색과 녹색의 상관치를 구하여 속도를 계산하였다. 이 경우 속도의 상관치 계산은 식(1)과 같은 Wiener-Khinchine 정리를 이용하여 2번의 연속된 주리에 변환을 수행함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_{BG}(m,n) &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} B(x,y)G(x+m,y+n) \\ &= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} P_{BG}(x,y) \exp\left[\frac{j2\pi mx}{M} + \frac{j2\pi ny}{N}\right] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $B(x,y)$, $G(x,y)$ 는 녹색, 청색 화상, $\gamma_{BG}(m,n)$ 은 B , G 에 대한 상호 상관함수,

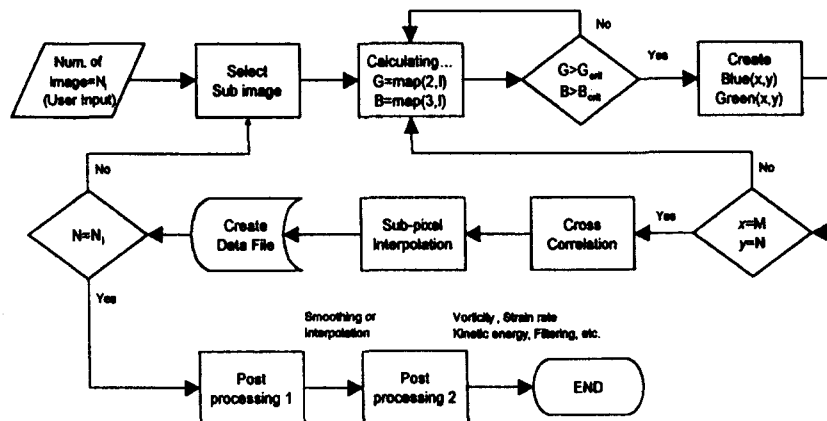


Fig. 1 Flow chart of two-color PIV algorithm

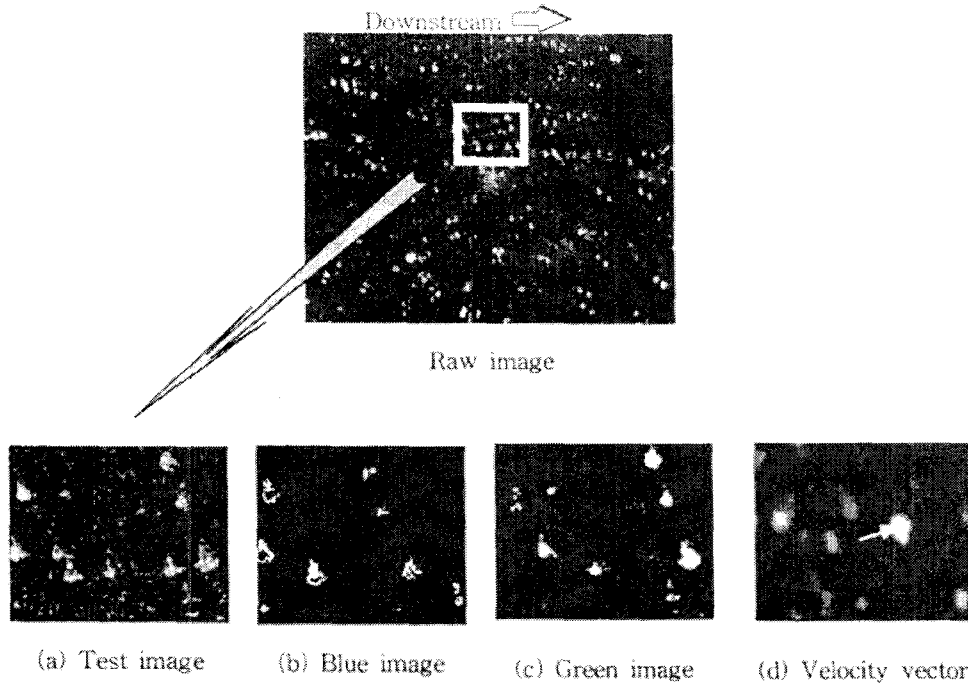


Fig. 2 Color image processing procedure

$P_{BG}(x,y)$ 는 B, G 에 대한 파워 스펙트럼 함수이다. 이와 같은 원리를 이용하여 개발된 컬러 PIV의 알고리즘 흐름도를 Fig.1에 나타내었다.

먼저 필름으로부터 취득된 디지털 이미지를 반전(negate)시키면 Fig.2와 같은 청, 녹색의 원시화상을 얻게된다. 원시화상에서 x, y 좌표상의 픽셀 값을 순서대로 읽어 나가면서 컬러 팔레트 상에서 동일한 픽셀치에 해당하는 R, G, B값을 읽어서 청, 녹색의 기준치와 비교해 가며 컬러 필터링을 수행하였고 필터링 후 각각의 청색, 녹색화상에 대하여 상호 상관치를 계산하였다. 계산되어진 상호 상관 좌표상에서 최대치인 곳의 좌표를 설정하여 설정된 좌표의 전후 좌우 2개의 픽셀에 대해 2차 서브픽셀 보간법을 수행하여 최종의 극대치를 구한 다음 그림의 중심점에서 픽셀 이동 변위 $\Delta x, \Delta y$ 를 각각 구하였다. 여기서 구한 이동 변위는 PIV와는 달리 계산 영역내의 통계적 분포에 대한 평균적 이동 변위를 의미한다.

2.2 이색 PIV 광학계 구성

Fig.3은 본 연구에서 구축한 이색 컬러 PIV를 위한 광학계 시스템을 나타낸다. 먼저 광원으로서 수냉식 멀티라인 5W아르곤 이온 레이저를 이용하였으며 빔 분리기(beam splitter)에 의하여 레이저빔을 청색(488nm)과 녹색(514.8nm) 파장 대역의 빔으로 나눈 뒤, 전 반사미러와 초점렌즈를 사용하여 AC 서보 모터에 의해 구동되는 회전 미러로 집광시키게 되면 빔은 측정영역 내에서 측정시간에 동기되어 1회 회전하게 되므로 일정한 시간 간격을 가진 2mm 두께의 유사(pseudo)레이저 쉬트를 형성하게 되며, 이 레이저 쉬트를 통과하는 액적으로부터 산란되는 빛을 촬영하여 화상을 취득하였다. 또한 National Instrument사의 상용 LabView 프로그램을 사용하여 카메라의 기계적 구동 지연을 충분히 고려한 노출 시간을 가지게 하였고, 빔의 주사 속도가 액적의 최대 속도보다 10배 이상 확보되면 액적은 거의 정지하고 있다고 가정할 수 있기 때문에 회전 미러는 정밀한 서보 모터에 의해 1000~1800rpm 속도로 제어하였다.⁽⁶⁾ 이러한 화상 취득 및 처리 시스템의 사양을 Table 1에 나타내었다.

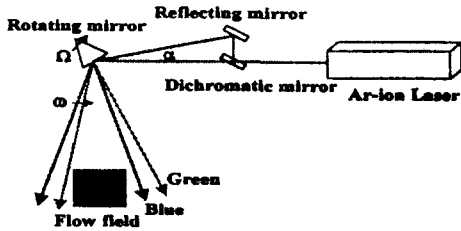


Fig. 3 Beam splitter and two sweeping beams

Table 1. Image acquisition and processing system

Computer	IBC PC 166MHz
Synchronizing board	DAQ PC-TIO-10
Still camera	Nikon F3 with Zoom Lens
Servo motor	YASKAWA SGM and PS-101A
Film scanner	Nikon LS-2000

2.3 피펴 쉬프트(pupil shift)

실제로는 Fig.4에서 보는바와 같이 회전미러가 움직이면서 두 빔의 초점이 이동하게 되는데 이것을 Pupil Shift⁽⁷⁾라고 한다. Pupil Shift의 효과는 두 빔의 사이각의 영향 때문이라고 알려져 있으며, x, y방향의 값은 식(2)와 같이 기하학적으로 구할 수 있다.

$$S_x = S \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{S_1}{S_2} \sin(\pi - 2\pi/N_f - 2\Omega t) \right] \right\} \quad (2-1)$$

$$S_y = S \sin \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{S_1}{S_2} \sin(\pi - 2\pi/N_f - 2\Omega t) \right] \right\} \quad (2-2)$$

여기서, S : Pupil Shift(m)
 N_f : 회전미러 면의 수
 Ω : 회전미러 각속도(rad/s)

또한 입자가 두 빔에 노출되는 시간차(Δt)와 두 빔의 사이각(α)이 충분히 작다고 가정하면 식(4)와 같이 시간차를 구할 수 있으며, 최종적으로 식(5)와 같이 속도를 계산할 수 있다.

$$\Delta x = M \times P_x \quad \Delta y = M \times P_y \quad (3-1)$$

$$L(\omega \Delta t - \alpha) = \Delta X \quad (3-2)$$

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta x - S_x)^2 + (\Delta y - S_y)^2}$$

$$\Delta t = \frac{\alpha L + \Delta X}{\omega L} \quad (4)$$

$$u_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad v_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (5)$$

여기서, M : 확대비(pixel/m)
 L : 미러와 입자간의 거리(m)
 ω : 빔의 각속도(rad/s)
 Δt : 입자 노출 시간차(s)
 α : 두 빔의 사이각(rad)
 Δx : 실제 이동 변위(m)

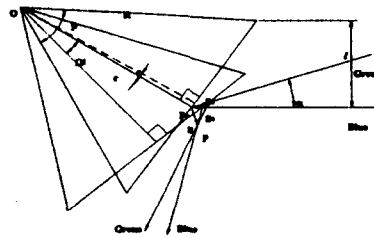


Fig. 4 Pupil shift

3. 이색 PIV 기술의 신뢰성 검증

레이저에 의한 PIV 계측은 추적 역적의 속도를 계측하기 때문에 영상으로 획득한 추적 입자를 앞 절의 PIV 알고리즘에 적용한 값이 실제 유속에 어느 정도 부합하는가를 검증하여야 한다.

식(6)~(8)을 이용한 Patankar와 Acharya의 유한 체적법(finite volume method, FVM)법⁽⁸⁾을 이용하여 PIV법으로 계측한 속도를 검증하였다. 검증용 실험을 위하여 Fig.5와 같이 충분히 긴 사각형 덕트를 설치하여 완전 발달된 난류유동이 발생될 수 있도록 하였다. 일반적으로 완전 발달된 난류 유동은 거리에 관계없이 속도 분포가 일정하기 때문에 여기서는 중심부 쪽의 56×38mm의 측정영역을 설정하여 이색 PIV법으로 속도를 측정하였다.

Table 2. Result of pitot tube and FVM

	ΔP [mmAq]	dP/dz [Pa/m]	Vel.(Pitot)	Vel.(FVM)	Error(%)
POINT 1	0.65	-1.05	3.306(m/s)	3.386(m/s)	2.42
POINT 2	0.66	-1.07	3.331(m/s)	3.421(m/s)	2.70
POINT 3	0.66	-1.06	3.331(m/s)	3.403(m/s)	2.16
Average	0.657	-1.06	3.323(m/s)	3.403(m/s)	2.41

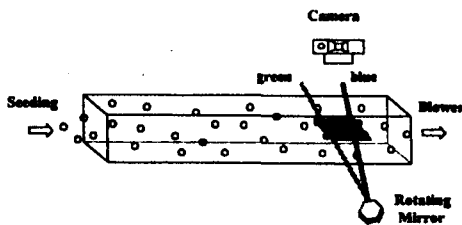


Fig. 5 Schematic diagram of test section for PIV measurement

$$\rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho L^2 \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$L = [L_x^{-m} + L_y^{-m}]^{-1/m} \quad (8)$$

여기서, ρ : 밀도 [kg/m³]
 μ_t : 와점성계수 [m²/sec]
 L : 혼합거리 [m]

PIV법과 동시에 비교적 측정이 용이하고 신뢰성이 어느 정도 검증된 피토 튜브(pitot tube)에 의한 실험도 병행하였다. 3개의 측정점에서 피토 튜브를 사용하여 가장 빠른 중심점에서의 속도를 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 결과로부터 유한 체적법에 의한 결과가 피토 튜브를 이용한 측정값과 3점 모두 3%이내의 오차 안에 존재하므로 계산결과의 신뢰성은 입증되었다. 유한 체적법에서 사용한 물성치는 15°C에서의 값을 사용하였다.

아래의 Fig.6에서 보는 바와 같이 PIV로 측정된 결과 또한 유한 체적법에 의한 계산 속도

와 약 3%이내의 오차 안에 있음을 알 수 있으며, 중심점에서는 피토 튜브의 속도와의 일치함을 볼 수 있다. 이러한 검증 결과로부터 본 실험에 사용되는 PIV법은 5m/s 내외의 속도 범위 내에서 실제 속도와 약 3%이내의 신뢰성을 가지고 있음을 확인하였다.

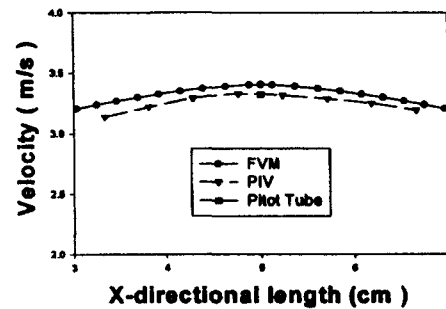


Fig. 6 Comparison of experimental and calculation results

4. 액적 속도 측정의 적용 결과

이색 PIV법을 분무의 액적 속도 측정에 적용시키기 위하여 분무압이 3bar인 편플형 인젝터에 대하여 Fig.7과 같이 2차 미립화가 일어나는 측정영역에서 액적 속도를 측정하였다.

일반적으로 인젝터 팁에서의 초기속도는 10~20m/s로 알려져 있으나 직선거리 x와 중심에서 떨어진 거리 y에 대하여는 민감하게 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서 채택한 측정영역에서의 SMD는 약 100~200 μ m로 빔의 두께보다 작으며, 속도는 최대 5m/s가 넘지 않으므로 빔 주사속도가 약 60m/s가 되도록 회전미러의 속도를 1600rpm으로 설정하여 액적의 동일성을 확보하였다.

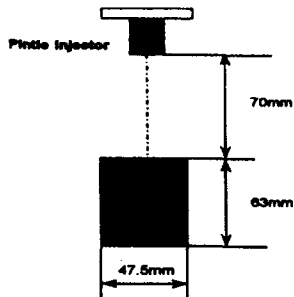


Fig. 7 Test section for injector spray

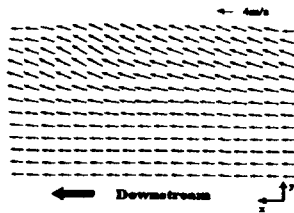


Fig. 8 Velocity field of test section

Fig.8은 측정영역에서 얻은 데이터를 간단한 상호 보간 처리를 행한 벡터선도이다. 분무의 특성상 중심에서 대칭이기 때문에 한쪽만을 나타냈으며 비록 와류 형태는 관찰되지 않았지만 고압 인젝터에서 주로 보이는 주위 공기와의 접촉 부위에 생성되는 와류 형태의 속도 패턴이 관측됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 개발한 이색 PIV 기술의 알고리즘을 분무 액적 속도 측정에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이색 PIV 기술을 사용하면 기존의 자기 상관법에 의한 속도 산출법에서 문제시 되었던 방향성 판별이 용이하였고, 액적의 거동이 복잡한 곳에서도 높은 공간 해상도를 가진 데이터를 획득할 수 있었다.
- (2) PDPA와 같은 점계측 방법이 아니기 때문에 비정상 상태로 비교적 넓은 구역의 액적의 거동을 동시에 확보할 수 있었다.
- (3) 이색 PIV법을 사용하여 5m/s 이하의 속도 측정에 있어서 3%이내의 신뢰성을 확보하였다.
- (4) 핀틀형 인젝터의 하류 영역의 유동 특성은

분무 중심부는 하류 방향의 속도로 진행되지만 분무 외곽부는 주위 공기와의 접촉에 의하여 와류 방향의 속도가 형성됨을 알 수 있었다.

후기

본 논문은 한국 과학 기술 재단의 핵심 연구 과제(981-1005-098-2)연구비에 의해 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. G. Saikalis, R. Byers, T. Nogi, "Study on Air Assist Fuel Injector Atomization and Effects on Exhaust Emission Reduction", SAE 930323, 1993
2. Amer Ahmad and Ming-Chia Lai, "Time-Resolved Measurements in Transient Port Injector Sprays", SAE 950509, 1995
3. Zhao, F. Q., Yoo, J. H., and Lai, M. C., "Spray Dynamics for DI Gasoline Engines", SAE, 961925, 1996
4. 김덕진, 이지근, 강신재, 노병준, "PDPA를 이용한 다공 디젤 노즐의 간헐 분무 특성에 관한 연구", 자동차공학회 No.97380032, 1997
5. Bahram Khalighi and Yong H. Lee, "Particle tracking velocimetry: an automatic image processing algorithm", Applied Optics, Vol. 28, No.20, 1989
6. 金子 誠, 1995, "高分解能 PIVによる筒内亂流の空間的評價", 第12回内燃機関シンポジウム講演論文集 9537367
7. Michael M. Cui and Ronald J. Adrian, "Scanned Two-color Particle Image Velocimetry", ASME, FED-Vol.209, pp.83~90, 1995
8. Suhas V. Patankar, "Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer", pp.327~343, 1991