

PTV를 이용한 실린더내 유동장 해석에 관한 연구

정환수* · 최수진 · 전충환** · 장영준***

A Study on the analysis of in-cylinder flow fields using PTV

Hwan-Su Jeong, Su-Jin Choi, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

Key Words: Velocity Field(속도장), PTV(Particle Tracking Velocimetry), Flow Visualization(유동가시화), Auto Correlation Coefficient(자기상관계수),

Abstract

In Particle Tracking Velocimetry, the analysis of double-exposed photographic plate can be carried out either by means of Young's fringe analysis or by a digital image processing technique. In this study, we used digital image processing to two images in one frame for analyzing in-cylinder flow fields, and compared PTV with PSV(Particle Streak Velocimetry). Additionally, this technique was verified by two different calibration method. One is interpolation by invert distance, the other is interpolation by area ratio. Finally, the results between two interpolation methods were similar in whole flow fields.

1. 서 론

유체의 유동 해석은 자연 현상에 대한 규명뿐만 아니라 이를 응용한 공학 및 산업 분야에서 매우 중요한 연구 대상이다. 최근에는 컴퓨터 및 광학 장비를 가시화에 적용하여 정성적인 순간 유동 측정뿐만 아니라 우수한 공간 분해능을 갖는 정량적인 속도 정보의 추출이 가능하게 되었는데, 입자 영상 속도계(Particle Image Velocimetry)나 입자 추적 속도계(Particle Tracking Velocimetry)등의 측정 기법들이 사용되고 있다.

본 연구에서는 입자가 부유된 유동에 평행광을 조사하고 이중 노출에 의한 방법으로 획득한 유동 화상의 유동장을 해석하는 PTV 방법을 이용하여, 2-valve 실린더 헤드의 공기 흡입 시 실린

더 내의 유동장 측정이 가능한 알고리즘 개발과 이를 실제에 적용 시 갖는 오차의 확인에 중점을 두었다. 속도 분포에 관한 실험 결과의 타당성을 검증하기 위하여 초퍼(chopper)와 동축 분류형 연소기에서의 비연소 이미지에 적용하여 오차 범위를 확인하였고, 실린더 내의 속도 측정에 대한 검증을 위해서 PSV(Particle Streak Velocimetry) 방법을 이용하였다.

2. PTV 시스템

2.1 실험장치 및 방법

2.2.1 실험장치

본 연구의 실험 장치는 Fig.1과 같고, 이미지 획득 및 해석 시스템으로 구성된다. 광원으로는 Ar-ion 레이저(Coherent사, INNOVA-70, 5W)인 연속 레이저를 사용하였고, 레이저에서 나온 광은 450nm의 초점 거리를 갖는 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 통과하여 평행광을 만들고, Fig.2에 나타난 검출부에 sheet 형태로 투과된다.

* 부산대학교 대학원
** 정희원, 부산대학교 기계기술연구소
*** 정희원, 부산대학교 기계공학과

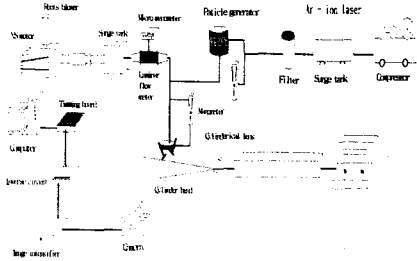


Fig.1 Experimental Apparatus

공기 도입부는 일반적인 정상유동 실험 장치를 사용하였고⁽¹⁾, 본 실험에 사용된 입자는 산란광의 강도가 크고 관측창에 부착 성질이 작으며 작동 유체와 크기와 밀도가 비슷한 지름이 약 $1\mu\text{m}$ 인 흰 고체 입자인 Al_2O_3 를 사용하였다.

화상 취득은 High-speed gated image intensifier(Hamamatsu)가 부착된 스틸 카메라(Nikon, FM2)를 사용하였고 I.I.는 timer board를 이용하여 이중 노출이 가능하도록 실험을 행하였다.

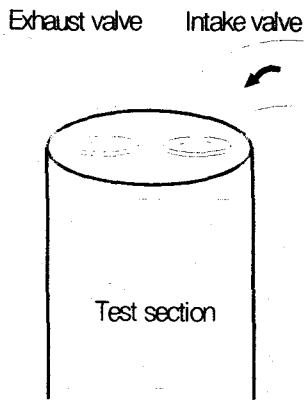


Fig.2 Schematic diagram of the test section in cylinder

실린더 내로 투과되는 sheet의 폭은 2mm이고, 화상 취득 범위는 SOHC 엔진의 압축 행정시 상사점으로부터 5mm 떨어진 지점으로부터 $80 \times 80\text{mm}$ 크기의 유동 화상 취득이 가능하도록 텀블 어댑터를 설치하여 측정하였다.

획득된 유동 화상은 노이즈나 입자의 불분명한 경계등으로 오차가 발생시킬 수 있는데 이를 filtering과 contrast기법으로 명확한 이미지를 만들고 이러한 이미지를 여러 개의 미소조사구간으로 나누어 경계값 처리를 한 후 자기 상관 함수를 이용해서 자기상관계수가 높은 것을 선정하여 미소조사구간내의 공간 평균속도(spatial average velocity)를 구한다.

미소조사구간내의 입자 이미지는 구분 할 수 없을 정도의 입자 쌍이 존재하는데 다음과 같은 자기상관함수를 이용해서 공간 평균 속도를 계산한다.

$$R(s) = \int I_1(X) I_2(X+s) dX \quad (1)$$

여기에서 $I(X)$ 는 미소조사구간의 위치 벡터 $X(x,y)$ 의 grey level이고, s 는 입자 이미지의 2차원 변위 벡터이다. 현재는 수치적으로 직접 구하는 방법보다 광학적으로 푸리에 변환하는 방법과 Digital FFT에 의한 방법 등이 있다. 본 실험에서는 Digital FFT에 의한 방법을 사용하였다.

모호한 방향을 결정하기 위해서 본 실험에서는 유체의 속도 방향은 그 주변의 속도 벡터들과 각도 차를 최소화하는 방향으로 변화한다⁽²⁾는 특성을 토대로 근거리 속도 벡터 추적에 의해서 최초 입구 유동의 속도 벡터와 방향을 알고 있으면 이를 기준으로 근접한 지점의 속도 벡터를 결정하고 다시 이 두 지점의 속도 정보로부터 근접한 부분의 방향을 결정하는 방법을 반복하여 미소조사구간 각각의 대표 속도와 방향을 결정하였다.

Fig.3은 본 실험에 사용된 보간법으로 유동 화상에서 획득되는 속도 정보는 전체 유동장에 균일한 분포로 얻어지지 못하고 대체로 불규칙적으로 분포되어 있는데, 전체 속도 분포를 정량적으로 평가하기 위해서는 보간 방법이 필요하다. 본 실험에서는 가까운 지점의 속도 벡터 4개를 고려한 거리 역수 보간과 각 지점의 면적에 따른 비례 관계를 적용한 면적 보간을 실시하였다. 식 (3)과 (4)는 거리 역수 보간과 면적 보간을 식으로 간략히 표현한 것이며, U_p 와 V_p 는 측정 위치의 변위이고 $R_{1,2,3,4}$ 는 각각의 거리, $S_{1,2,3,4}$ 는 각 지점의 면적이다.

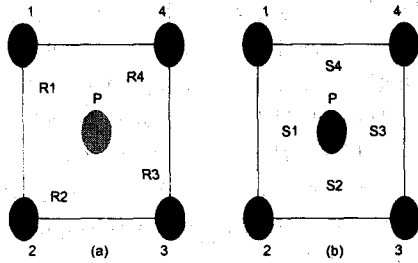


Fig.3 (a) Interpolation of invert distance, (b) Interpolation of area ratio

$$U_b = \frac{\sum \frac{U_i}{R_i}}{\sum \frac{1}{R_i}}, \quad V_b = \frac{\sum \frac{V_i}{R_i}}{\sum \frac{1}{R_i}} \quad (2)$$

$$U_b = \frac{\sum U_i \times S_i}{S_i}, \quad V_b = \frac{\sum V_i \times S_i}{S_i} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

속도 벡터의 크기에 대한 오차를 검증하기 위해서 속도 조절이 가능한 장치에 적용하여 오차를 확인하였다. 컨트롤러에 의해 회전 속도를 조절할 수 있는 초퍼를 이용하여 스트로보스코프로 속도를 확인한 후 임의의 지점에서 이미지를 획득하여 속도를 측정 후 실제 속도와 비교해 보았다. Fig.4는 초퍼를 이용한 경우 실제 속도와 계산 속도의 차이를 나타내었다. 실제 속도와 계산 속도의 차이는 곡률 반경에 의한 오차로써 초퍼에서는 호의 경로로 이동하지만 계산상으로는 Pixel간 이동인 현의 이동으로 인한 오차라고 할 수 있다.

속도의 방향 결정 알고리즘에 대한 검증은 예측 가능한 유동장에 대한 이미지를 얻어 계산된 결과 및 유동장의 형성이 일치하면 신뢰성이 있는 것으로 판단하였다. 그 일치도를 확인하기 위해서 동축 분류형 연소기의 비연소 이미지를 획득하여 속도 벡터의 방향을 검증하였다.

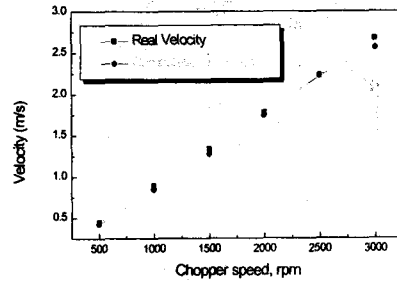


Fig.4 Comparison of real velocity with PTV

SOHC 엔진 실린더 내의 흡입 유동은 복잡한 3차원 구조이며 변화가 많은 유동장이므로 측정 결과를 검증하기 위해서 PSV 방법을 이용하여 측정된 유동장과 비교를 하였다.

Fig.5는 밸브 양정 2mm일 경우 PSV에 사용되기 위해 획득된 유동 화상이고 Fig.6과 Fig.7은 화상으로부터 두 가지 보간에 의해 계산된 유동장을 나타낸다. 그리고, Fig.8과 Fig.9는 유동장에 분포된 속도 profile이다.

유동장 및 속도 분포를 비교할 경우, 거리 역수 보간과 면적 보간에 의해 계산된 유동장은 상호 비슷한 경향을 보였고 면적 보간은 유동장 형성이 부드럽지 못함을 알 수 있다. 그리고, 속도 profile은 유동장 형태와 비슷하며 전체적인 속도 범위는 두 가지의 보간법이 유사하다는 것을 알 수 있다.

Fig.10은 PTV에 사용되기 위해서 얻은 유동 화상이며, Fig.11과 Fig.12는 보간법 적용 후의 전체 유동장을 나타내고 Fig.13과 Fig.14는 각각의 보간법에 의한 속도 profile을 나타내고 있다. PTV를 이용한 유동 구조 해석은 PSV의 유동장 형성 및 속도 분포와 유사함을 토대로 속도 벡터 방향 결정 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 또한, 보간법에 따른 차이를 확인하여 두 가지 보간법을 적용할 경우에도 PSV와 유사한 유동장과 속도 분포를 얻어 PTV에 의한 유동 구조 해석은 가능하다고 판단하였다.

또한, 실린더 내 유속이 조금 빠른 밸브 양정

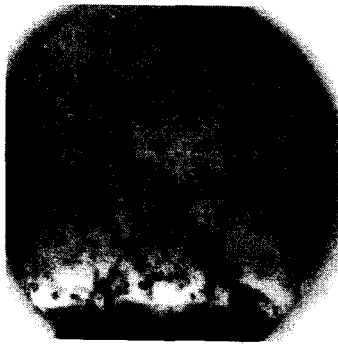


Fig.5 Binary image of experimental data

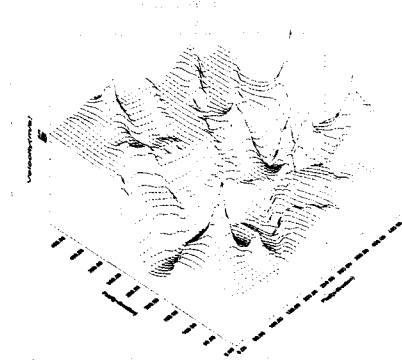


Fig.8 Velocity profile of interpolation by invert distance

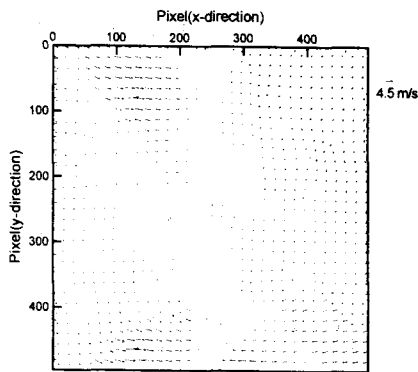


Fig.6 PSV result after interpolation by invert distance

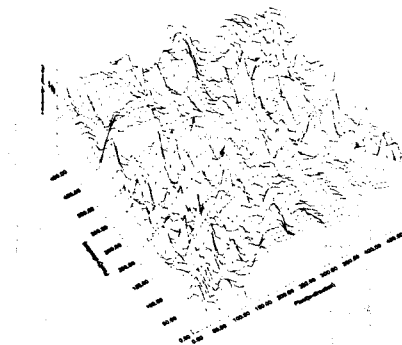


Fig.9 Velocity profile of interpolation by area ratio

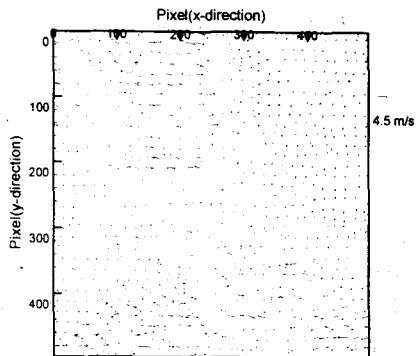


Fig.7 PSV result after interpolation by area ratio

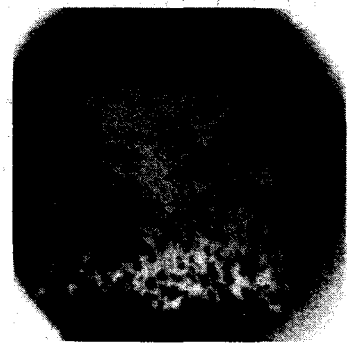


Fig.10 Binary image of experimental data

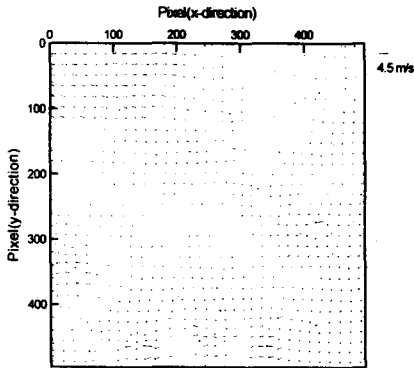


Fig.11 PTV result of interpolation by invert distance

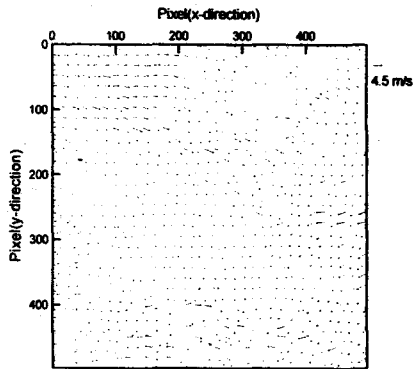


Fig.12 PTV result of interpolation by area ratio

3mm일 경우를 대상으로 다시 검토를 하였다.

Fig.15와 Fig.16은 PSV에 의한 속도장상을 나타내며, Fig.17과 Fig.18은 PTV에 의한 결과를 나타내었다. 벨브 양정 3mm일 경우도 매우 유사함을 알 수 있었다.

위 결과를 토대로 PTV를 이용하여 공기의 엔진 실린더 내 흡입시 3차원적인 복잡한 유동 구조를 계측이 가능하다고 판단된다.

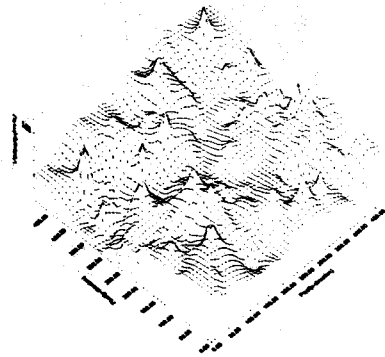


Fig.13 Velocity profile of interpolation by invert distance

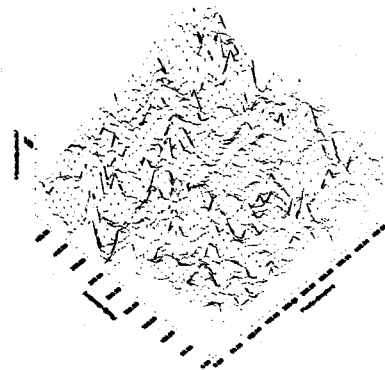


Fig.14 Velocity profile of interpolation by area ratio

4. 결론

PTV를 이용한 실린더 내 유동장 계측을 통해서 다음과 같은 결론을 얻는다.

- 1) PTV 계측시 고려 사항을 실험을 통해 정립하였고, SOHC 엔진의 실린더 내 복잡한 흡입 유동을 PTV계측 방법으로 가능함을 확인하였다.
- 2) PTV의 벡터 방향 결정 알고리즘은 유동의

특성을 이용하여 소프트웨어적으로 구현한 것으로 실험적인 방법에 의해서 검증으로 오차 한계에 대한 확인이 필요하다.

- 3) 보간법에 따라서 같은 유동 화상에 대한 유동장 구현과 속도 분포의 계산이 달라지므로 유동 구조의 해석을 위해서 적당한 보간법이 사용 되어야하고 정확한 보간법의 개발이 필요하다고 본다.

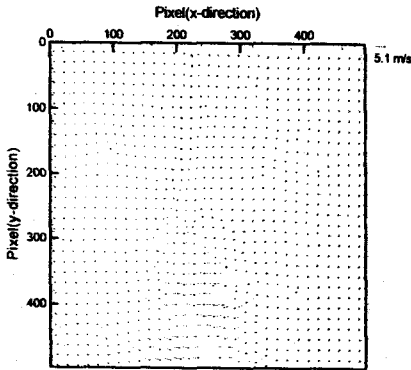


Fig.15 PSV result of interpolation by invert distance in valve lift 3mm

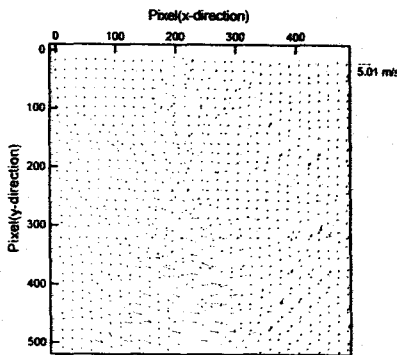


Fig.16 PSV result of interpolation by area ratio in valve lift 3mm

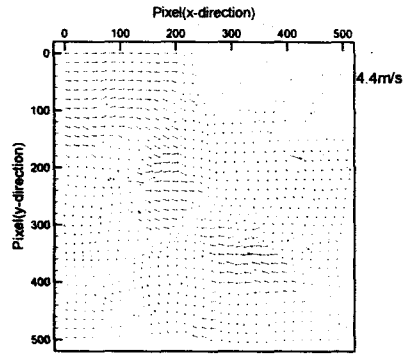


Fig.17 PTV result of interpolation by invert distance in valve lift 3mm

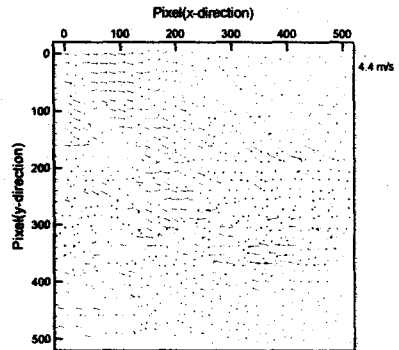


Fig.18 PTV result of interpolation by area ratio in valve lift 3mm

참고문헌

- (1) 조동현, 구영곤, "엔진 흡기 Swirl의 측정에 대하여", 자동차 공학회지 Vol.15 No.3, 1993, pp.1~9
- (2) S. J. Beak and S. J. Lee, "Two-Frame PTV and Its Application to a Turbulent Channel Flow," Advances in Turbulence Research, 1995