

입자추적법을 이용한 가솔린 기관의 실린더 내 정상유동 해석

Analysis of In-Cylinder Steady Flow for Gasoline Engine Using Particle Tracking Velocimetry

정 구 섭 *, 전 충 환**, 장 영 준**
Kuseob Chung, Chunghwan Jeon, Youngjune Chang

ABSTRACT

Analysis and control of intake charge motion such as swirl and tumble are very important to improve the performance of gasoline engines. In this paper, single frame double exposure PTV(particle tracking velocimetry) is used to investigate intake flow characteristic in a steady flow test rig of gasoline engine with 2-valve and pent-roof combustion chamber. To validate this PTV method, we confirmed reliability of this PTV method using chopper, and coaxial burner experiments. The velocity field of intake flow is measured with the intake valve lift variation. It is shown that maximum flow velocity is increased and tumble flow become stronger than inverse tumble flow as valve lift increase.

주요기술용어 : PTV(입자추적법), Flow visualization(유동가시화), Velocity vector(속도벡터), Steady flow (정상유동), Auto correlation (자기상관관계)

1. 서 론

최근 들어 자동차의 연비절감과 유해배기가스에 의한 환경문제가 사회적 문제로 대두됨에 따라, 저공해기관 또는 초고연비 기관의 관점에서 초회박 기관이나 직분식 가솔린기관에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 경우 주로 연소

실 내 혼합기의 형성을 촉진시킴과 동시에 압축 말기에 난류 강도를 증대시키는 수단으로 텀블(tumble) 및 스월(swirl) 유동 효과가 이용되고 있으므로 실린더 내 유동해석은 엔진 설계에 있어서 매우 중요한 과제가 되고 있다.

현재 많이 사용되고 있는 펜트루프(pent-roof) 형태의 연소실을 갖는 엔진은 기구학적 특성상 스월 유동보다 텀블유동의 생성에 보다 유리하기 때문에 흡입 초기 유동장의 텀블 형성 과정의 공간 속도 분포를 정량적으로 해석하여 이를 흡입 포트 및 연소실 형상설계의 자료로 이용하고, 난류의 생성과정을 해석하여 연소 효율을 증대시키

* 회원, 부산대학교 대학원, 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부
기계기술연구소

려는 시도가 여러 연구자들에 의해서 이루어지고 있다.¹⁻²⁾

일반적으로 실린더 내 유동을 실험적으로 해석하는 방법으로는 열선유속계, LDV 등과 같은 점계측 방법과 유동 가시화기법이나 토크 미터를 이용하여 유동의 각운동량을 산출하는 방법 등이 이용되어져 왔으나, 최근에는 레이저 등의 광학 장비와 컴퓨터를 이용한 디지털 화상처리를 이용하여 유동장의 공간속도 분포를 정량적으로 계측할 수 있는 PIV(particle image velocimetry) 시스템이 개발되고 있다.³⁻⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 흡입 과정시 흡기 포트로부터 형성되는 텀블 형태를 관찰하기 위하여 가솔린기관의 정상유동 실험장치를 제작하고, 흡입유동의 속도장을 측정하기 위한 단일 프레임 이중노출 입자추적법(PTV, particle tracking velocimetry)의 이용과 이를 위한 PTV 알고리즘을 개발하였다. 개발된 PTV 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서 초퍼(chopper)와 동축 분류형 버너의 비연소 이미지에 적용하여 신뢰성을 확인하였으며, 이를 토대로 상용 펜트루프형 SOHC가솔린엔진의 흡기 밸브의 양정에 따른 실린더 내 흡입 유동의 속도장을 계측하였다.

특히, 입자추적 PTV에서 얻어지는 속도벡터는 유동장의 정보를 정량적으로 평가하기 위해서는 격자상 속도값의 보간이 반드시 행하여져야 하는데, 본 논문에서 개발된 PTV 알고리즘 중 삼각형 면적 보간법은 기존의 거리역수보간법에 비해 보간속도가 주위속도성분에 더 민감하게 계산되어진 것으로 나타났다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

가솔린 기관의 정상유동 실험장치를 Fig. 1과 같이 제작하였으며 주요 구성부분으로는 광학장치, 입자공급장치, 화상취득장치, 시퀀스제어장치로 구성된 이미지획득 시스템과 디지털 영상처리와 속도벡터 추출 및 유동장 해석부로 구성된

이미지 해석 시스템으로 구성되어 있다.

실험에 사용한 실린더헤드는 2000cc급 SOHC 펜트루프형을 사용하였고, 1번 실린더에 한 쪽이 개방된 아크릴로 제작한 텀블 어댑터를 부착하여 측정하였다. 텀블 어댑터는 실제 엔진의 실린더 내경과 동일한 86mm이고, 두께는 5mm이다. Fig. 2는 실린더 헤드에 부착한 텀블 어댑터와 시트빔의 투시방향 및 위치, 그리고 화상취득 방향을 나타낸다.

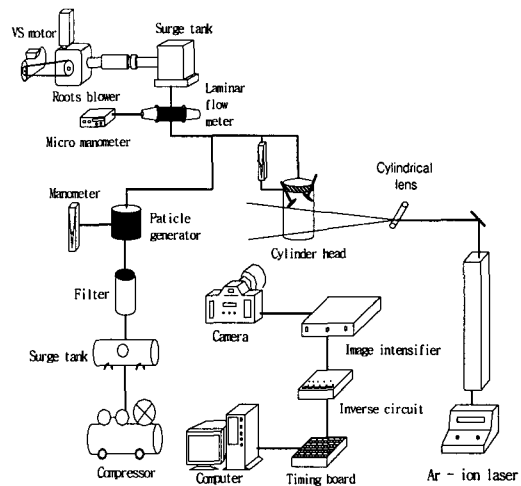


Fig. 1 Experimental apparatus of steady flow in a engine

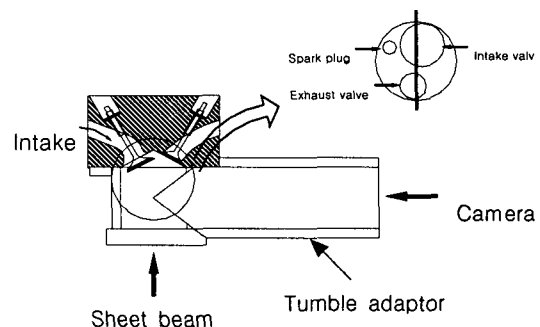


Fig. 2 Schematic diagram of optically accessible cylinder head

실험조건은 Fig. 1의 정상유동 실험장치에서와 같이 흡입공기를 유입하기 위해 최대 1.2기압, 10m³/min용량의 루츠블로워(roots blower)를 사용하였고, 소음과 맥동을 방지하기 위하여 소음기와 서지탱크를 사용하였다. 그리고 흡입유량을 측정하기 위하여 총류 유량계를 설치하여, 전후 차압을 1~1000 mmH₂O 범위의 마이크로 마노미터로 계측하였고, 흡기다기관과 실린더내의 차압이 250mmH₂O로 항상 일정하게 유지하는 일정 차압방식으로 실험을 행하였다. 실험에 사용한 산란입자는 평균직경이 1μm 이하인 Al₂O₃를 이용하였다.

Fig. 3은 화상을 취득하기 위한 측정영역을 나타낸 것으로, 가시화된 텀블 어댑터내에서 획득된 유동 이미지는 행정 체적부분의 80×80 mm 크기이고, 디지털 이미지로 변환되어 512×512 pixel의 해상도로 저장되었다. 단일 프레임 이중노출 PTV에서 운동하는 입자를 단일 프레임에 기록하기 위해서는 미소시간 간격을 가진 두개의 신호가 고속화상 증폭장치에 들어가야 한다. 이를 위해 화상증폭장치(Hamamatsu, C4257, High speed gated image intensifier)가 부착된 시스템을 구성하였고, 이중노출이 가능한 시퀀스 제어를 위해서 3개의 함수 발생기, 3개의 카운터 회로 그리고 역전회로가 사용되었다.

2.2 이중 노출 입자추적법

실제 유속의 정보가 담겨 있는 원시화상으로부터 화상처리에 의하여 실제 속도벡터를 구하기 위한 단일프레임 입자추적법의 과정을 Fig. 4에 나타내었다. 획득된 원시화상은 노이즈나 입자의 불분명한 경계등으로 인한 오차를 포함하고 있으므로 디지털 이미지 프로세싱을 통하여 이미지를 개선한 후, 2회의 FFT를 통하여 구해진 자기상관관계(auto-correlation)로 공간 평균속도 벡터를 계산한다. 또한 유동속도벡터 방향을 결정된 후, 불규칙적으로 분포되어 있는 속도벡터

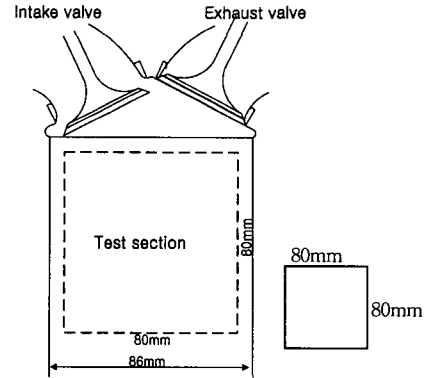


Fig. 3 Schematic diagram of data acquisition area in cylinder

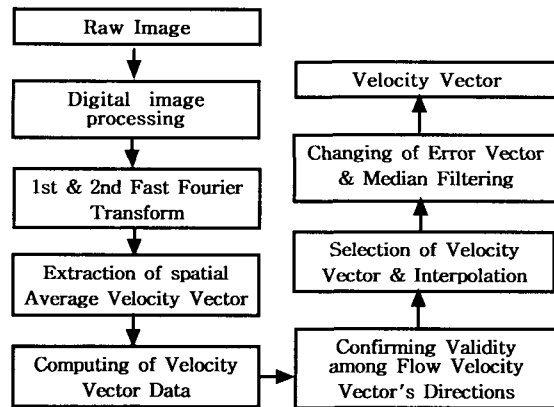
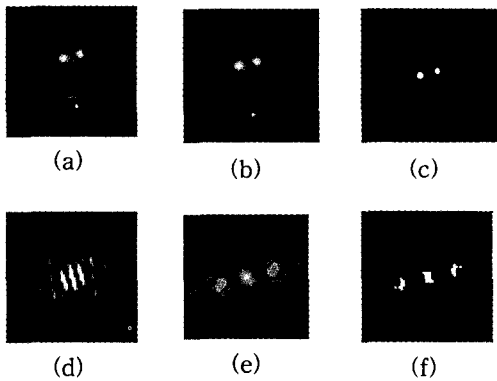


Fig. 4 Flow chart of single flame double exposure PTV

로부터 전체 유동장을 계산하기 위해 전체 격자상의 속도값에 대한 보간을 행한 다음 실제 속도 벡터를 구해낸다.

Fig. 5는 단일프레임 입자추적법 과정 중의 디지털 이미지 처리 결과를 보여주고 있다. 원시화상을 256가지의 그레이 레벨(gray level)을 갖는 이미지 파일로 변환한 후, 불분명한 경계를 Fig. 5(b)와 같이 콘트라스트(contrast)기법을 통하여 명확하게 만들고, 미디언 필터를 통하여 노이즈를 제거한다. 이러한 개선된 이미지는 산

란입자의 광신호와 배경을 구분하기 위하여 그레이 레벨이 255와 0값이 되도록 Fig. 5(c)의 스톱홀딩을 수행한다. 2회의 FFT변환을 통한 자기상관 관계의 계산으로 입자들의 공간 평균속도를 구한다.



(a) raw image, (b)contrast & filtering, (c)thresholding, (d) 1st FFT, (e) 2nd FFT (f) Thresholding

Fig. 5 Images processing results of auto-correlation PTV

2.2.1 속도벡터 검출과 속도장 계산

Fig. 6은 단일 프레임 이중 노출 PTV의 기본 원리이며, 속도 계산 방법은 아래와 같다.

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{\Delta x}{t_2 - t_1}, \quad v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{\Delta y}{t_2 - t_1}$$

여기서 Δx , Δy 는 이중 노출 시간 동안에 입자가 x축, y축으로 각각 이동한 변위이고 t_1 은 이중노출시 첫 번째 노출시간, t_2 는 두번째 시간을 나타낸다. 단일 프레임 이중 노출 PTV 기법은 획득된 이미지를 미소구간으로 나누고 각각의 자기 상관관계를 계산하여 공간 평균속도를 산출한다.⁶⁾

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

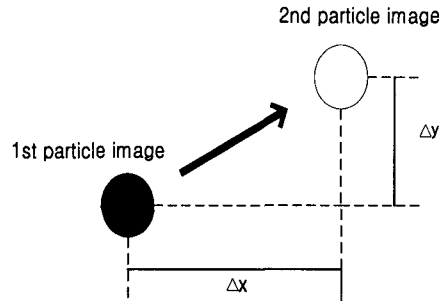


Fig. 6 Basic diagram of single flame double exposure PTV

윗 식은 자기상관을 구하는 방법으로, $I(X)$ 는 미소구간의 위치 벡터 $X(x,y)$ 의 그레이 레벨이고, s 는 입자 이미지의 2차원 변위 벡터이다. 본 실험에서는 자기상관을 구하는 여러 방법 중에서 2차원 자기상관 함수는 직접 계산될 수도 있고 2차원 파워 스펙트럼의 역 변환에 의해서도 구해질 수 있다는 Wiener-Khinchin 정리⁷⁾를 이용하여 Digital FFT에 의한 방법을 적용하였다.

2.2.2 속도벡터 방향 결정 알고리즘

자기 상관 관계에 의한 PTV는 속도의 방향이 이중으로 나타난다. 따라서, 본 실험에서는 속도의 방향을 결정하기 위한 방법으로 유체의 운동학적 특성을 고려하여 유체의 속도 방향은 그 주변의 속도 벡터들과 각도 차를 최소화하는 방향으로 변화한다는 것⁸⁾을 토대로 프로그래밍하여 결정하였다. Fig. 7와 Fig. 8은 이러한 속도 벡터 방향 결정방법의 개략도를 나타낸다. 이것은 예측이 가능한 유동의 속도 벡터와 주위의 근거리의 있는 임의의 속도벡터는 연속적인 방향 또는 최소 각도 차를 보이는 방향으로 속도벡터가 결정되므로, 최초 입구 유동의 속도 벡터가 결정되면 이를 기준으로 근접한 거리의 양방향 벡터 성분 중에서 연속적인 방향을 결정하는 속도 벡터의 방향이 그 지점 속도 벡터의 방향으로 결정된다.

다음은 속도 벡터 방향 결정 알고리즘에 사용

된 수식을 간략히 나타낸 것이다.

$$U_a = \sqrt{(u_i - u_x)^2 + (v_i - v_y)^2}$$

$$U_b = \sqrt{(u_i - u_{-x})^2 + (v_i - v_{-y})^2}$$

여기서, U_a 와 U_b 는 최초 유동의 속도 성분과 중심으로부터 대칭이 되는 속도 성분들과의 계산된 속도값이고 u_i 와 v_i 는 기지의 속도 성분이며 u_x 와 v_y 는 미지의 속도 성분과 u_{-x} 와 v_{-y} 는 이와 대칭되는 속도 성분을 나타낸다. 이러한 계산 결과의 U_a 와 U_b 중 작은 값에 대해서 미소구간의 속도 벡터로 결정한다. 그리고 속도 벡터가 결정된 지점으로부터 다시 근접한 부분의 속도 벡터를 결정하는 방법을 통해서 자기 상관관계로 획득한 전체 데이터에 적용하여 속도장을 구한다

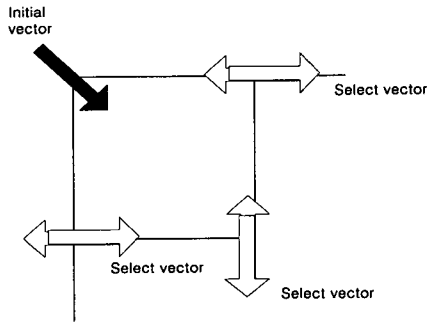


Fig. 7 Selection method of velocity vector direction

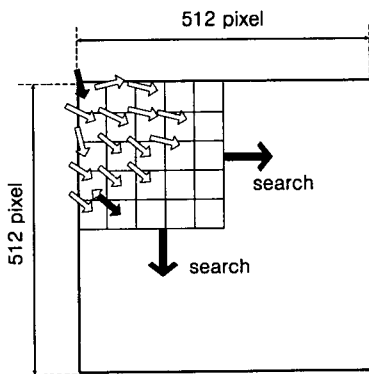


Fig. 8 Diagram searching for flow vector

2.2.3 보간 방법

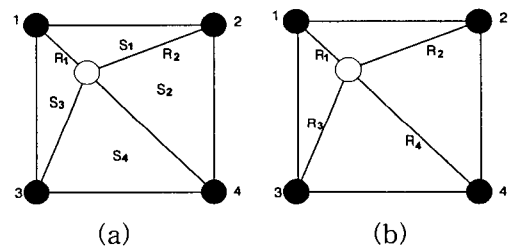
단일프레임 이중 노출 입자추적법은 획득된 유동 화상에서 얻어지는 속도 벡터가 불규칙적으로 분포되어 있기 때문에 이들의 불규칙한 속도값으로부터 전체 격자상 속도값에 대한 보간이 이루어져야 한다.

본 실험에서 사용한 보간법은 전체 유동 형태를 계산하기 위해 속도 성분을 계산해야 할 지점으로부터 근접한 4지점의 속도 벡터의 영향을 고려한 삼각형 면적에 의한 보간을 개발하여 적용하였다. 그리고 이 결과를 주위 속도 벡터 4개의 거리 역수만을 고려한 보간법과 비교하였다. 다음은 삼각형 면적 보간법에 사용된 수식이고,

$$U_P = \frac{(aU_1 + bU_2)S_i}{\sum S_i}$$

$$V_P = \frac{(aV_1 + bV_2)S_i}{\sum S_i}$$

Fig. 9(a)은 개략도를 나타낸 것이다. 여기서, U_p 와 V_p 는 보간 되어야 할 지점의 속도 성분이고, a 와 b 는 두 지점간의 거리비이고, $U_{1,2}$ 는 각 점의 속도 성분이며 S_i 는 삼각형 면적을 나타낸다.



- (a) Interpolation by triangular area ratio
- (b) Interpolation by invert distance

Fig. 9 Interpolation method of single frame PTV

Fig. 9(b)은 거리 역수 보간법을 나타낸 것이고 관련 수식은

$$U_P = \frac{\sum(\frac{U_i}{R_i})}{\sum(\frac{1}{R_i})}, \quad V_P = \frac{\sum(\frac{V_i}{R_i})}{\sum(\frac{1}{R_i})}$$

이고 U_i 와 V_i 는 주위의 속도 벡터 성분이며 R_i 는 각각의 거리에 대한 역수이다.

3. 속도벡터 크기 검증 및 방향성 검증

3.1 속도벡터 크기 검증

단일프레임 이중 노출 입자추적법으로 측정된 속도벡터의 크기가 어느 정도의 오차율을 가지고 있는지의 신뢰성 조사를 하였다. 3000 rpm으로 회전하는 원판형 초퍼위에 임의의 입자를 그려놓고 입자의 회전속도를 이미지로 취득하여 PTV 법으로 속도를 계산하고 이를 실제 원판의 회전속도와 비교하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 PTV로 구한 속도는 실제 속도와의 차이가 거의 없었으며, 원판의 지름이 증가할수록 그 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 실제 속도는 곡선에 대한 속도 결과이지만 PTV 알고리즘에 의한 계산은 곡선 형태의 이동을 직선으로 계산하기 때문에 약간의 오차가 발생한 것이라 사료된다. 따라서 12m/s까지 오차 범위가 5%이내로 나타나 고속유동의 계측에도 적용가능성이 있다고 볼 수 있었다.

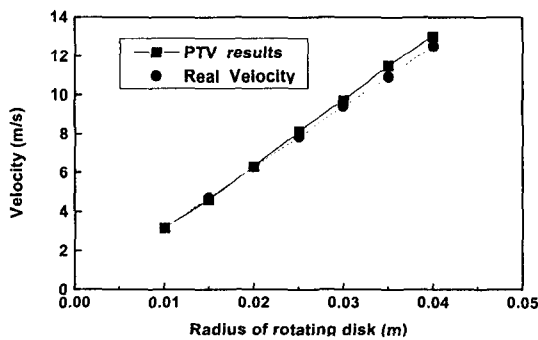


Fig. 10 Comparison of PTV result with real velocity

3.2 속도벡터 방향성 검증

속도벡터 방향 결정 알고리즘의 타당성 검증은 예측이 가능한 유동장에 대한 이미지를 얻어 계산된 속도장의 결과와 비교하여 일치하면 신뢰성이 있다고 판단하였다. 그 일치도를 확인하기 위해서 Fig. 11에서 보는 바와 같이 동축 분류형 버너에 대한 비연소 이미지를 획득하여 속도벡터의 방향을 검증하였다.

화상취득부는 와의 발생 수가 적고 방향성을 충분히 검증할 수 있으며 유동의 운동 모멘텀이 소멸되는 위치로 판단되는 곳인 버너의 노즐 선단부로부터 500mm 수직 상단 지점에 정하여 80×80 mm 크기의 화상을 취득하였다.

Fig. 12(a)은 취득된 버너의 원시화상이고, 화상은 노이즈로 인해 명확하게 나타나지 않기 때문에 화상처리 등의 전처리 과정을 거친 후 이미지를 개선시켰다. Fig. 12(b)는 원시 유동의 속도 벡터를 나타내고 Fig. 12(c), (d)는 이러한 비연소 원시화상에 대한 보간법으로 (c)는 삼각형 면적 보간법의 결과이고, (d)는 거리 역수 보간의 결과이다. 이러한 결과를 통해서 속도 벡터 방향 결정 알고리즘에 의해 측정된 유동장의 방향성이 잘 일치하였으므로 알고리즘의 적용이 타당하다고 판단하였다.

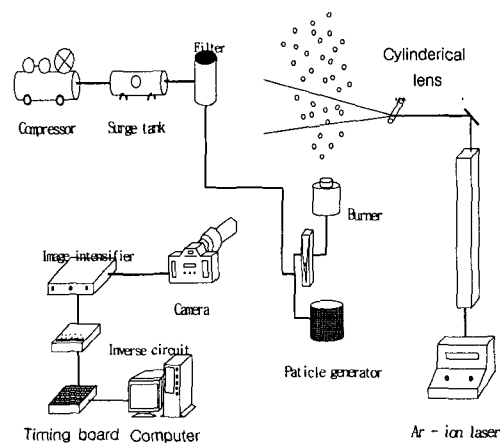


Fig. 11 Experiment apparatus for verification of velocity vector direction

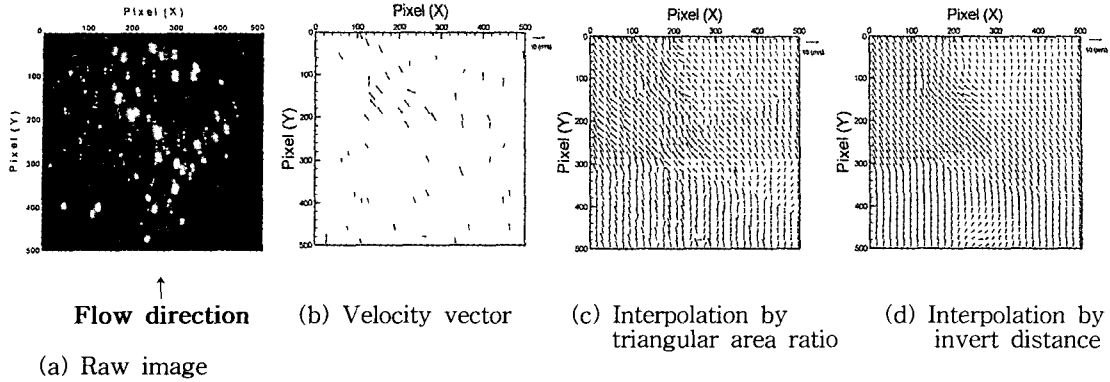


Fig. 12 Raw image and velocity profile, interpolation of PTV result in burner

이러한 검증을 토대로 정상 유동 장치가 설치된 펜트루프형 가솔린엔진에 텀블 어댑터를 부착하여 실린더내 흡입 유동 특성을 흡기 밸브 양정에 따라 계측하였다.

4. 결과 및 고찰

단일 프레임 이중 노출 PTV를 이용하여 밸브 양정 2, 4, 8mm에 따른 실린더내 흡입 유동을 측정하였다.

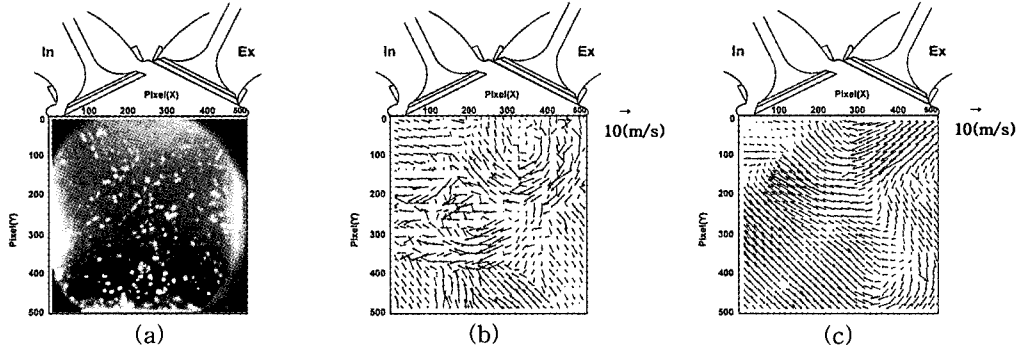
Fig. 13(a)는 밸브 양정 2mm일 경우 실린더내 흡입 유동의 원시화상을 나타내며 Fig. 13(b)는 삼각형 면적 보간법에 의한 PTV 측정 결과이고 Fig. 13(c)는 거리역수 보간법에 의한 결과이다. 가시화 결과에서 알 수 있는 바와 같이 정상류 실험장치에 의한 실린더내의 순간 유동장은 흡기 밸브에서 배기 밸브로의 텀블이 형성되고 있으며 연소실 체적 부분에서 와가 형성하고 있음을 알 수 있다. 또한, 텀블 방향의 유동은 실린더 벽면을 타고 진행되고 피스톤 헤드부에 반사되어 흡기밸브로 다시 되돌아 올라가며 흡기밸브에서의 역텀블은 존재하나 텀블 유동에 비해 약하여 텀블류에 휩쓸려 버림을 알 수 있다. 이상의 결과에서 펜트루프형 SOHC 가솔린기관의 연소실내에서는 특별한 텀블강화 수단을 사용하지 않더라도 텀블유동이 형성되고 있다는 사실

을 확인 할 수 있다.

각 보간에 따른 유동장은 Fig 13(b), 13(c)에서와 같이 주 운동형태와 방향이 유사하게 나타남을 알 수 있고, 속도 분포(profile)들은 적용된 계산에 따라 차이가 있지만 측정된 속도범위는 유사하게 나타났다. 하지만 삼각형 면적보간은 거리역수보간에 비해 유동장 형성이 다소 부드럽지 못함을 볼 수 있다. 이것은 거리비의 역수만을 고려한 거리역수 보간법에 비하여 삼각형 면적보간은 면적비와 거리비를 동시에 고려하여 유동장을 계산하였으므로 각각의 속도벡터에 매우 민감하게 반응한 것으로 사료된다.

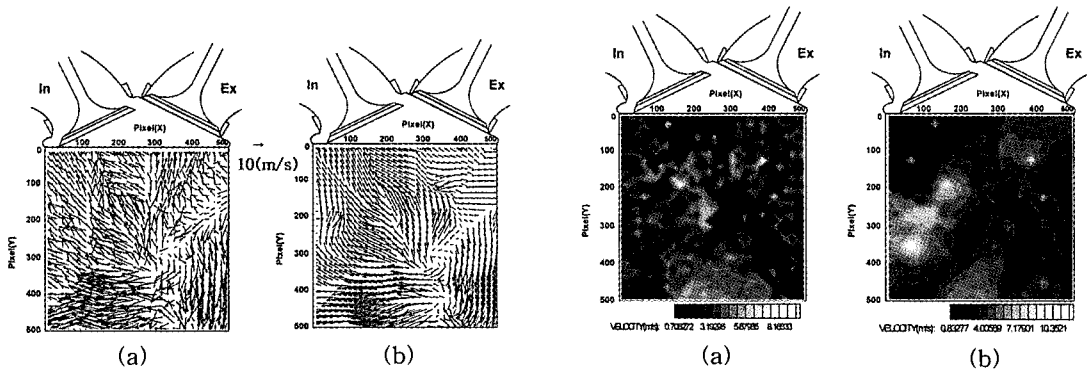
Fig. 14은 밸브 양정 4mm인 경우의 결과를 나타내고 있으며, 텀블 방향의 유량이 증가하면서 유속이 증가되어 실린더 하부에 텀블 유동의 와류가 뚜렷하게 나타나고 있고, 연소실 체적부분에 생성된 와는 2mm일때에 비해서 흡기 밸브 쪽으로 더욱 이동되고 크기도 증가됨을 볼 수 있다.

Fig. 15는 밸브 양정 8mm에서의 가시화 결과인데 텀블방향의 유동은 배기 밸브 쪽에서 흡기밸브 하단부로 대각선 방향의 유동이 지배적이 관측되어졌고, 흡기밸브 하단부에 생긴 와류는 흡기밸브 쪽으로 이동되어 와를 생성시키고, 연소실 체적에서 생성된 와는 소멸된 것으로 사료된다.



(a) Raw image (b) Interpolated velocity profile by triangular area ratio
 (c) Interpolated velocity profile by invert distance

Fig. 13 Raw image and interpolated velocity profile in cylinder (valve lift : 2mm)

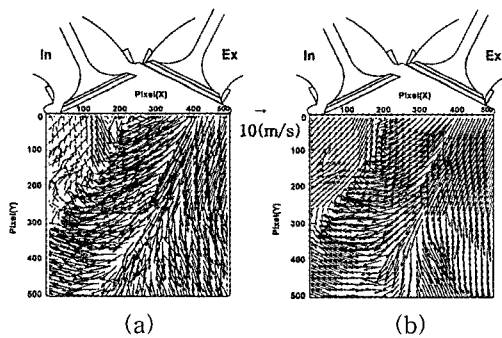


(a) Interpolation by triangular area ratio
 (b) Interpolation by invert distance

Fig. 14 Interpolated velocity profile in cylinder (valve lift : 4mm)

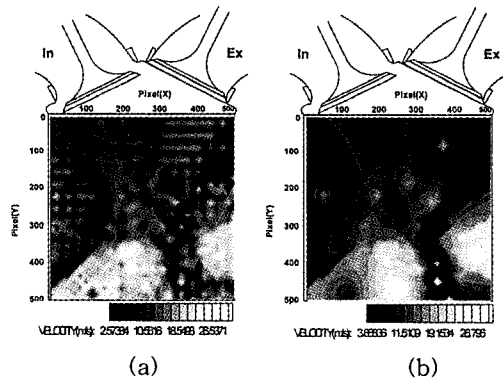
(a) Interpolation by triangular area ratio
 (b) Interpolation by invert distance

Fig. 16 Velocity distribution in cylinder (valve lift : 2mm)



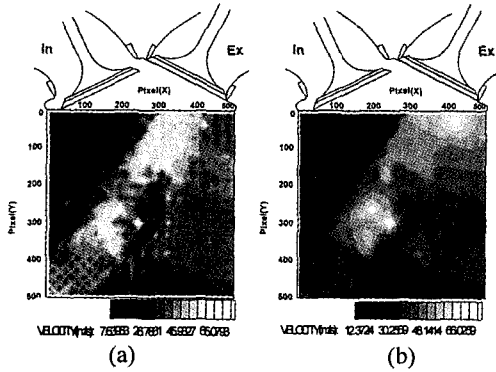
(a) Interpolation by triangular area ratio
 (b) Interpolation by invert distance

Fig. 15 Interpolated velocity profile in cylinder (valve lift : 8mm)



(a) Interpolation by triangular area ratio
 (b) Interpolation by invert distance

Fig. 17 Velocity distribution in cylinder (valve lift : 4mm)



(a) Interpolation by triangular area ratio
 (b) Interpolation by invert distance
 Fig. 18 Velocity distribution in cylinder
 (valve lift : 8mm)

Fig. 16, 17, 18은 2mm, 4mm, 8mm일 때 각각의 속도 분포를 나타낸다. 실린더 내 유동 속도는 밸브 양정이 커짐에 따라서 각 밸브 양정에서의 최대 속도도 증가함 알 수 있다. 밸브 양정이 8mm인 경우는 검증된 속도보다는 오차범위가 클 것으로 예상되지만 검증된 속도를 기준으로 동일 보간법을 적용한 결과 최대속도가 약 60m/s 정도까지 빨라짐을 알 수 있었다.

이러한 실험 결과는 역텀블류가 텀블류에 비해 유동이 약하여 텀블류와 부딪치면서 일부는 휩쓸려 빨려 들어가고 일부는 유도관으로 빠져나가는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 가솔린기관의 정상류 실험장치를 제작하고 단일프레임 이중 노출 입자추적법을 이용하여 속도장을 측정하였다. 개발된 PTV 알고리즘의 타당성 검증을 위하여 초퍼와 동축 분류형 버너의 이미지에 적용하여 확인하였다. 이를 토대로 팬트루프형 2밸브 가솔린엔진의 흡기 밸브의 양정변화에 따른 실린더내 흡입 유동의 속도장을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PTV을 이용한 유동장 측정의 속도벡터 크기 검증에서 12m/s까지 오차의 범위가 5% 이내로 실제속도와 차이의 차이가 거의 없었으며, 밸브 양정이 8mm인 경우는 검증된 속도를 기준으로 동일 보간법을 적용한 결과 최대속도가 약 60m/s 정도까지 빨라짐을 알 수 있었다.
- 2) 유동의 운동 법칙을 고려한 속도벡터 방향 결정 알고리즘은 동축 분류형 버너의 비연소 유동 이미지의 적용 결과 신뢰성이 확인되었다.
- 3) 실린더내 유동장 해석을 위해서 개발된 삼각형 면적 보간법은 거리 역수 보간법과 비교해서 보간속도가 주위 속도성분에 더 민감하게 계산되어진 것으로 사료된다.
- 4) 실린더내 흡입 유동 실험에서 유동속도는 밸브의 양정이 커짐에 따라 최대속도도 증가하였고, 역텀블 유동보다는 텀블 유동이 더 강해짐을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- 1) M. Tabata, M. Katako, Fujimoto and Noh, Y., "In-Cylinder Fuel Distribution Flow field and Combustion Characteristics of a Mixture Injected SI Engine", SAE 950104, pp.33-49, 1995.
- 2) M. Ronnback, et al., "Study of Induction Tumble by Particle Tracking Velocimetry in a 4-Valve Engine", SAE 912376, pp. 25-32, 1991.
- 3) J. H. Lee and P. V. Farrell, "Intake Valve Measurement of an in Engine Using Particle Image Velocimetry", SAE 930480, pp.629-645, 1993.
- 4) 정환수, 최수진, 정구섭, 장영준, "속도보간에 따른 실린더내 유동장 해석", 한국자동차공학회부산·울산·경남지부 춘계학술대회논문집, pp.86-91, 2000.

- 5) 이창식, 이기형, 전문수, 임경수 “단일 프레임 입자 추적법을 이용한 흡입 2밸브 가솔린기관의 실린더내 정상유동해석”, 한국자동차공학회 논문집, pp.650-658, 1997.
- 6) R. J. Adrian, “Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics”, annu. rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp.201-304, 1991.
- 7) W. H. Press, S. A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery, “Numerical Recipes in FORTRAN”, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press, 1992.
- 8) S.J. Beak and S. J. Lee, “Two-Frame PTV and Its Application to a Turbulent Channel Flow”, Advances in Turbulence Research, 1995.