

<논 문> SAE NO. 97370105

PIV에 의한 4밸브 가솔린기관의 흡기포트 형상에 따른 정상유동 해석

Characteristics of In-cylinder Steady Flow using PIV for Different Intake Port Geometries in a 4-valve Gasoline Engine

조 규 백*, 전 충 환**, 장 영 준**, 강 건 용***
G. B. Cho, C. H. Jeon, Y. J. Chang, K. Y. Kang

ABSTRACT

Many researchers have developed the measurement technique of in-cylinder flow characteristics and found the effect of intake port geometries on engine performance. The flow characteristics of four-valve cylinder head were examined in a steady flow rig for different intake ports. Tumble intensity of intake configurations with different entry angles were quantified with a tumble meter. The velocity and angular momentum distributions in the tumble adaptor were measured under steady conditions with PIV(Particle Image Velocimetry).

We have obtained the results that flow structure becomes complicated by valve interference at low valve lift. As the valve interferences were reducing and the flow rates of tumble direction were increasing according to valve lift increasing and incylinder flow pattern changed to large vortex structure with tumble direction, intake ports with different entry angles have different tumble centers. Tumble eccentricity of intake port with low entry angle was large, so that the port had relatively much angular momentum compared to others which was expected to improve combustion performance.

주요기술용어 : Tumble Flow(텀블유동), Entry Angle(포트 유입각도), Particle Image Velocimetry (입자영상 유속계), Tumble Center(텀블 중심), Eccentricity Ratio(편심율)

1. 서 론

가솔린엔진의 유해배기 가스에 대한 규제가 점

차 강화됨에 따라 엔진에 대한 연구는 자동차 배출 가스 규제 강화와 엔진의 효율 향상을 동시에 만족시켜야 한다. 이를 위하여 가장 효율적인 방법으로 가솔린엔진의 초회박연소 방식이 도입되고 있으나, 혼합기가 점차 희박해짐에 따라 초기 화염 형성이 불안정해지고 화염 전파 속도가 감소하게 되어 연소의 사이클 변동이 커지는 한편

*한국기계연구원

**정회원, 부산대학교

***정회원, 한국기계연구원

미연 탄화수소(HC)계열의 배출물이 증가한다. 따라서 희박 연소 조건하에서 엔진의 안정성을 확보하기 위해 연소 시간을 단축하고 연소의 사이클 변동을 감소시켜야 할 필요성이 요구된다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 가장 현실적이고 효율적인 접근 방법은 유동의 강화, 특히 난류 강도의 증진을 통한 화염 전파 속도를 증가시킴으로써 연소 시간을 단축시키는 것이다.^{1),2)}

실린더내 유동은 체적 효율을 높이고 기관의 출력을 향상시키기 위하여 4밸브 추세로 나아가고 있으며, 펜트루프 형태의 연소실을 갖는 엔진은 기구학적 특성상 스윙유동보다 텀블유동의 생성에 보다 유리하기 때문에 이에 대한 명확한 해석방법이 요구된다. LDV나 열선유속계 등의 기존연구 방법은 국소지점의 유동장 측정이 정량적으로 가능하지만 보다 근본적인 와류 구조를 파악하거나 전유동장의 유속 분포를 측정하는 데 있어 문제점을 가지는 있는 실정이다. 따라서 이러한 단점을 상호보완하고 복잡한 유동장해석을 위하여 PIV(Particle Image Velocimetry) 측정법을 적용할 필요성이 있다.^{3),4)} PIV는 유동장을 가시화 하면서 동시에 속도 등의 정보를 얻어내므로 실린더내 유동의 흡기포트의 형상 변화에 따른 특성을 알 수 있을 뿐만 아니라 모터링이나 연소상태시 기관내 유동에 대하여 시간 변화에 따른 유동특성을 이해하는데 아주 적절하다. 따라서 본 연구에서는 이 측정법을 이용하여 흡기포트 형상에 따른 실린더내 텀블유동의 구조를 가시화하고 속도분포, 각운동량 분포 및 텀블모멘트를 계산하여 유동에 미치는 영향을 조사하였다.

Table 1 Engine Specification

Type	Gasoline, 4 cycle
Combustion chamber	Pentroof
Valve system	4 Valve DOHC
Displacement	1998cc
Bore × Stroke(mm)	86.0 × 86.0
Compression ratio	9.2 : 1
Valve timing	IVO BTDC 10° IVC ABDC 55° EVO BBDC 55° EVC ATDC 10°

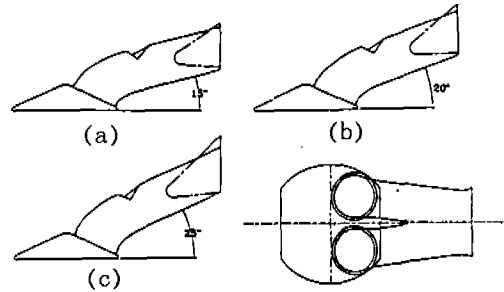


Fig.1 Port Configurations

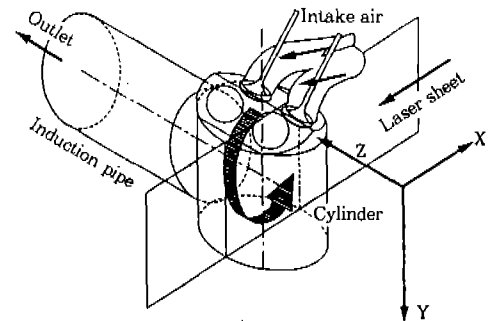


Fig.2 Visualized Test Section

2. 실험장치 및 방법

2.1 정상유동장치

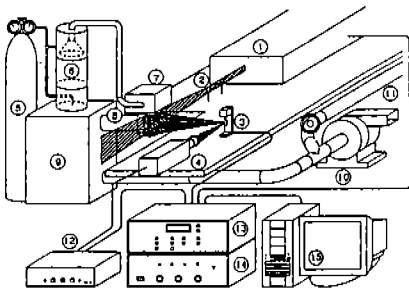
본 실험에서는 서로 다른 유입각도(Entry Angle)를 갖는 흡기포트에 따른 정상유동실험장치내의 유동을 조사하였다. Table 1은 엔진의 주요제원으로 엔진헤드는 펜트루프식 연소실을 가진 DOHC형이다. Fig.1은 유입각도가 15, 20,

25인 3종류의 흡기포트의 형상을 나타낸 것으로 기존의 25를 기준으로 실리콘과 수지를 이용하여 수정, 제작하였다. Fig.2는 흡기포트와 연결된 정상유동장치의 가시화된 공간을 나타내며, 가시화영역은 두 흡기밸브사이의 점화플러그 아랫방향으로 실린더헤드면에서 바닥면까지 84 × 84

mm이다. 이 장치는 실제엔진의 실린더 내경과 행정이 같도록 아크릴로 제작하였고 바닥도 실제엔진의 피스톤 크라운 형상으로 제작하였다. 흡기 포트와 실린더내 차압을 일정하게 유지시키면 포트유동은 밸브양정에 따라 변하므로 양정을 3mm씩 증가시켜가며 영상을 촬영하였다. 영상촬영을 위한 산란입자(Union Carbide BJO-8040, 평균 직경 80 μ m, 밀도 0.23g/cm³)는 3-Way 밸브를 이용하여 입자의 양을 조절할 수 있게 만들었고 수분으로 인한 응착을 방지하기 위하여 건조한 질소가스를 이용하여 부유시켰다.

Table 1 Engine Specification

Type	Gasoline, 4 cycle
Combustion chamber	Pentroof
Valve system	4 Valve DOHC
Displacement	1998cc
Bore×Stroke(mm)	86.0×86.0
Compression ratio	9.2 : 1
Valve timing	IVO BTDC 10° IVC ABDC 55° EVO BBDC 55° EVC ATDC 10°



- | | |
|-----------------------|--------------------------------|
| 1. Nd:YAG laser | 9. Surge tank |
| 2. Cylindrical lens | 10. Blower |
| 3. Rotating mirror | 11. By-pass |
| 4. CCD Camera | 12. Camera controller |
| 5. N ₂ gas | 13. Synchronizer |
| 6. Seeding generator | 14. Rotating mirror controller |
| 7. Port | 15. Host computer |
| 8. Tumble adaptor | |

Fig.3 Schematic Diagram of Experimental Setup

2.2 PIV 시스템

Fig.3은 정상유동실험용 PIV시스템을 보여준다. PIV시스템의 속도 산출 과정은 먼저 유동장에 시간간격이 짧은 2개의 연속된 광 신호를 공급하여 입자쌍들로 이루어진 한장의 영상을 취득한다. 취득된 영상을 다시 적절한 미소조사영역(Interrogation Area)으로 나누고 원하는 격자수를 결정한 후 각 격자의 위치에서 2차원 자기상관법⁵⁾을 이용하여 미소조사영역 내에 존재하는 입자의 평균 이동 변위를 구하여 속도를 산출하는 방법이다. 먼저 광원으로써 Dual Nd : YAG 레이저를 이용하였고 이 레이저 광의 파장은 532nm, 펄스폭은 10ns, 펄스당 에너지는 200mJ이다. 두 레이저광의 광로를 일치시키기 위하여 광합성광학계(Beam Combination Optics)를 이용하였다. 두 레이저 광의 시간차는 200ns에서 0.5s까지 조정 가능하며 최대 측정속도는 1000m/s이다. 유동장 조영으로서 레이저의 평면광(Sheet Beam)은 초점거리 1000mm인 오목렌즈와 초점거리 500mm인 원통형 렌즈를 사용하여 높이 120mm, 두께 0.1mm의 평면광을 만들었다. 영상을 취득하기 위한 CCD카메라(Megaplus 4.2, Kodak)의 화소갯수는 2360×2048이고 화소당 크기는 9 μ m이다. 취득한 영상을 디지털영상으로 변환시키기 위하여 사용된 프레임 그래버(Frame Grabber)는 8비트의 해상도를 가지며 256단계의 계조값(Gray Level)을 얻을 수 있다. 디지털로 변환된 영상은 PC에 저장된 후 처리된다.

2.3 실험방법

정상유동장치 내에서 최대속도를 m/s의 단위로 예측하고 입자쌍이 1×1mm내에 존재하게 하기 위하여 두 레이저 광의 시간차를 20 μ s로 두었다. 실린더내의 유동장은 복잡한 3차원 유동으로 회전하기 때문에 단일영상을 이용한 입자영상 속도법만으로는 유동의 방향성을 결정하기가 어렵다. 따라서 산란된 입자쌍의 방향성 판별을 위하여 첫 번째 입자영상으로부터 두 번째 입자영상을 일정거리 만큼 이동시킬 수 있는 영상이동 거울(Image Shifting Mirror, TSI 610050, 최대

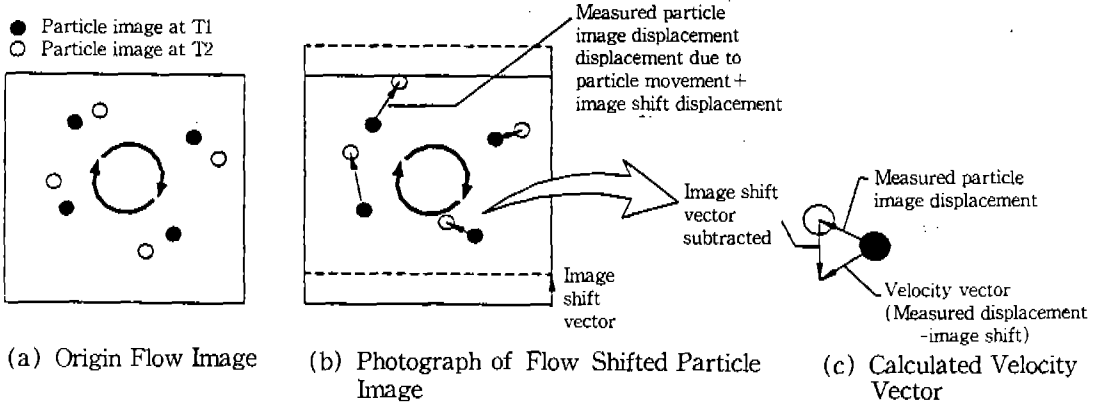


Fig.4 Principle of Image Shifting for Flow Reversal Measurement

회전각도 40, 최대회전을 50rot./s)을 사용하였다. 이때 이동되는 거리는 입자의 역방향 변위보다 크게 하였으며 레이저 조명의 강도와 정확한 이동거리는 정지된 물체(핀과 같은)를 이용하여 결정하였다.

Fig.4는 영상이동장치를 이용하여 회전하는 유동장에서 속도벡터를 계산하는 과정을 보여준다. Fig.4(a)는 유동장에서 단순히 입자의 이동을 보여주며 Fig.4(b)는 영상이동장치를 이용하여 얻은 이미지를 보여준다. 영상이동방향은 윗쪽이며 실선이 이동전의 경계이고 점선이 이동후의 경계이다. 이때 영상에 나타난 입자의 변위는 입자의 운동에 의한 변위와 영상이동장치에 의한 변위가 더해진 결과이다. 여기서 뒤에 얻어진 입자는 처음 입자보다 항상 위에 존재하게 되므로 자기상관법에 의한 계산결과에서 벡터의 방향성을 결정할 때 위쪽 방향의 속도벡터를 선택하게 되므로 일관성있는 계산을 할 수 있다. Fig.4(c)는 계산된 결과 벡터로부터 입자 이동 벡터를 뺀으로써 실제 속도벡터를 구하는 과정을 보여준다.

Fig.5는 가시화된 정상유동장치내의 유동을 보여준다. 이로 부터 자기상관법을 이용하여 구한 벡터분포가 Fig.6(a)에 나타나있다. 벡터의 계산은 128×128 화소크기의 미소조사영역에서 하였으며 70×70개의 격자를 생성하도록 하였다. 속도장의 여러 부분에 벡터가 빠진 공간이 발생하는데 이는 입자쌍의 수가 모자라거나 평면광 수직방향(Z방향)의 속도성분이 너무 크서 입자쌍

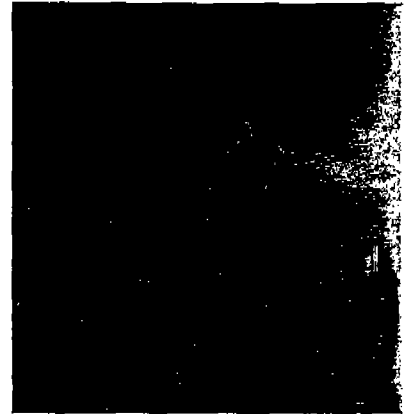


Fig.5 Photograph of Flow in Steady Flow Adapter

중의 하나를 잃어버리기 때문이다. 이런 빈공간을 채우기 위하여 다음과 같은 Multiquadric법을 사용하여 벡터보간을 실시하였다.^(6,7)

$$\vec{V}_i = (u_i, v_i) \tag{1}$$

$$u_i(x, y_i) = \sum_{j=1}^N a_j \sqrt{1 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{2}$$

$$v_i(x, y_i) = \sum_{j=1}^N b_j \sqrt{1 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{3}$$

여기서, \vec{V}_i 는 좌표 (x, y_i) 에서 속도이며, u_i 와

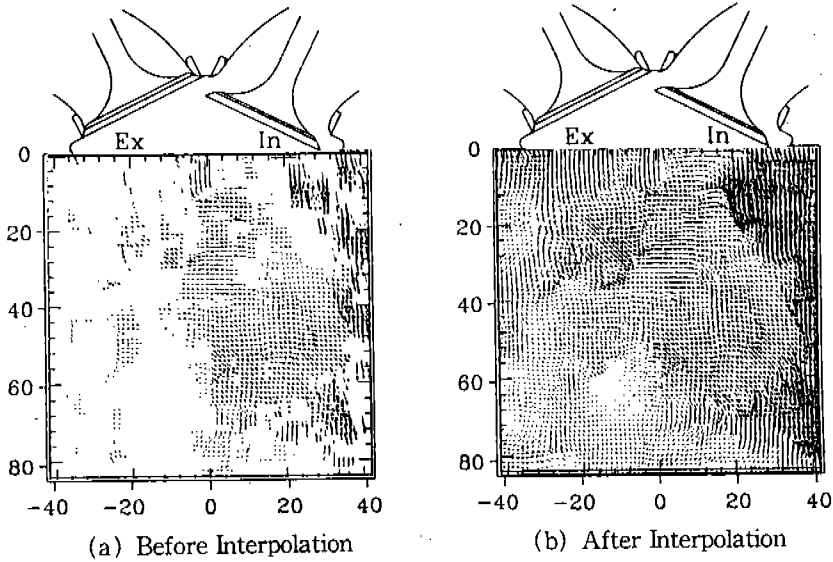


Fig.6 Vector Distribution in Steady Flow

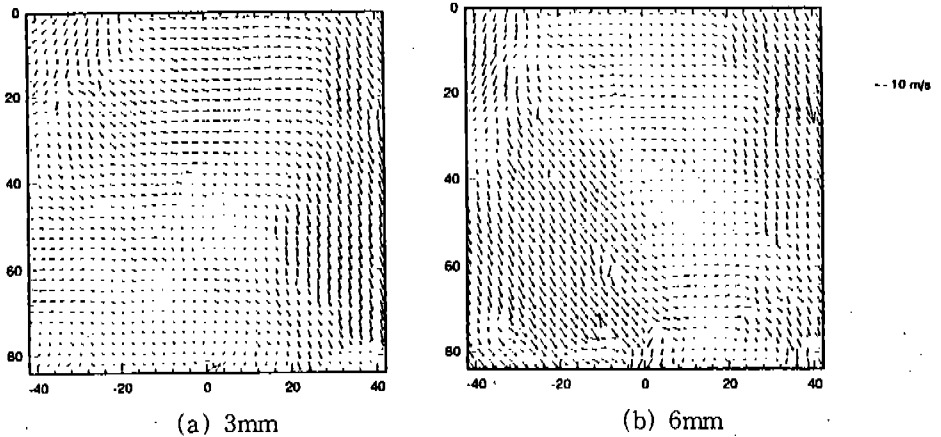


Fig.7 Velocity Distribution at 25° Port for Valve Lifts

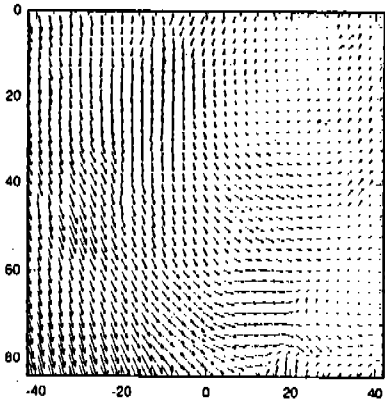
v_x 는 \vec{V} 의 dx , dy 성분이고, N 은 보간에 사용되는 벡터의 수이다. a , b 는 행렬 계산을 이용하여 얻을 수 있는 상수이다. Fig.6(b)에는 (a)의 결과를 이용하여 보간을 실시한 예를 보여준다.

3. 실험결과 및 고찰

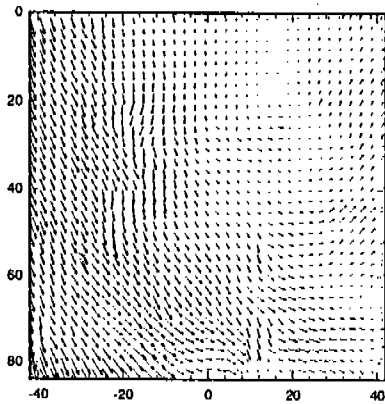
3.1 속도분포

Fig.7(a), (b)와 Fig.8(a)는 25의 포트 각도

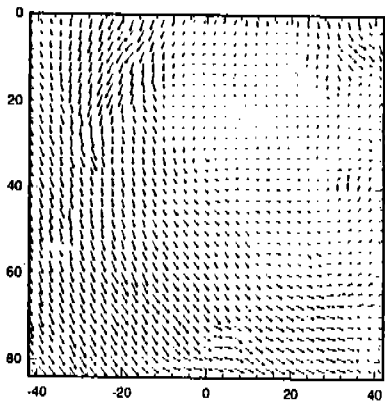
조건에서 밸브 리프트를 각각 3, 6, 9mm로 바꿀 때의 결과를 보여준다. 밸브 리프트가 3mm인 경우를 살펴보면 유속이 텀블 방향에 비해 역텀블 방향이 크며 텀블 방향의 유동은 실린더 벽면에 충돌후 역텀블류에 휩쓸려 버림을 알 수 있다. 유동의 하류에서는 텀블과 역텀블이 뒤섞여 복잡한 유동 형상을 보인다. 다소 밸브 리프트가 커진 6mm인 경우에는 텀블방향의 유량이 증가하면서 유속이 상당히 증가하였으며 역텀블류와의 충



(a) 15°



(b) 20°



(c) 25°

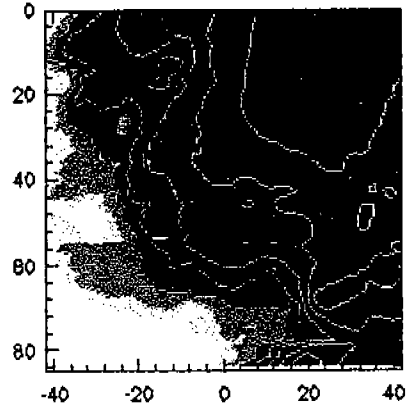
돌위치도 실린더 하부에서 일어나며 뚜렷한 와류의 생성도 관측되지 않는다. 최대 밸브리프트인 9mm에서는 텀블 유동이 주류를 이루면서 역텀블 방향의 유동이 급격히 감소하였으며 이로 인하여 큰 구조의 와류가 생성됨을 관찰 할 수 있다. 나머지 두 포트에 대해서도 다소 차이는 있으나 비슷한 경향이 관찰되었다.

Fig.8(a), (b), (c)는 밸브리프트 9mm에서 15, 20, 25의 포트각도를 갖는 실린더 헤드의 정상유동상태에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 세 가지 경우 모두 대부분의 유동이 텀블방향으로 흐르나 연소실과 흡입포트의 유입각도가 비교적 큰 25의 경우에는 15나 20에 비해 보다 많은 역텀블류가 관찰된다. 이는 25포트의 경우 포트의 각도가 크기 때문에 포트와 밸브 시이트를 잇는 곡률부분의 곡률 반경이 상대적으로 커서 다른 두 경우보다 저항이 감소되기 때문이다. Fig.8(a)의 하류 부분에서 텀블류와 역텀블이 동시에 관찰되고 있으나 역텀블은 회전하는 텀블류와 부딪히면서 휩쓸려버림을 알 수 있다. 이로부터 역텀블류가 상대적으로 텀블류에 비해 약하므로 뺄어나가지 못하고 양쪽으로 분산되면서 일부는 텀블류에 휩쓸려 흘러가고 나머지는 바로 유도관을 통해 빠져나감을 알 수 있다. 이러한 현상은 실제 기관이 아닌 정상상태하의 스윙-텀블변환장치 내이기 때문에 일어난다고 생각된다. 그리고 Fig.8(b), (c)와 비교해보면 포트의 각도가 낮아질수록 이런 경향은 두드러지며 유동의 형태도 상대적으로 안정되게 텀블을 형성함을 알 수 있다. 각도에 따른 특징중의 한가지로서 포트의 각도가 낮아질수록 텀블의 중심이 실린더의 중심에서 멀어짐을 관찰할 수 있다. 이것의 주된 원인은 포트각도가 낮아짐으로써 역텀블 유동이 감소하여 텀블유동의 증가로 와류의 저항이 감소된다. 따라서 헤드면에 가까이 텀블이 생성되는 것으로 판단되며, 이렇게 편심된 중심을 갖는 텀블은 실제 엔진의 압축과정에서 쉽게 난류성분으로 변환될 수 있기 때문에 연소의 초기화염 발달기간 동안에 많은 기여를 할 것으로 예상된다.

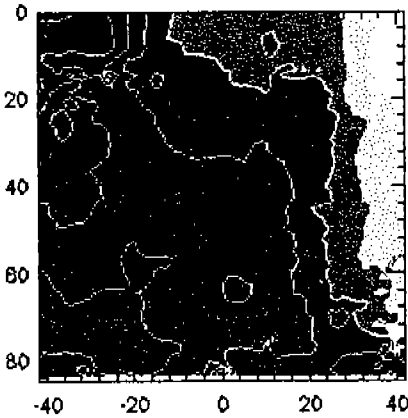
Fig.8 Velocity Distribution at 9mm Valve Lift for Different Port Angles

3.2 각운동량분포

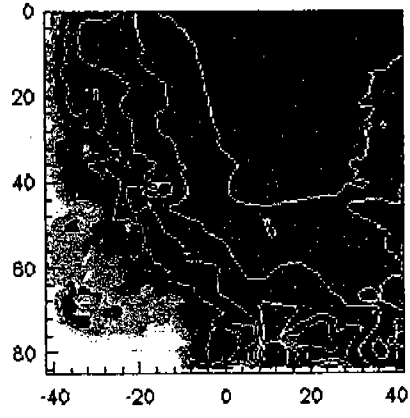
흡입된 공기가 가지는 운동에너지를 구하기 위해 각 흡기포트의 각운동량 분포를 구하였다. 운동에너지는 압축과정중 서서히 난류에너지로 변환되어 연소에 많은 영향을 미치기 때문에 흡입과정중 공기가 가지는 운동량을 해석함으로써 난류의 생성정도를 예측 할 수있다. 각운동량은 각 지점에서의 속도와 유동의 중심에서 체적요소까지의 거리 곱으로 정의할 수 있으며 이로부터 텀블유동이 가지는 운동에너지의 분포 및 크기를 정성적 및 정량적으로 파악할 수 있다.



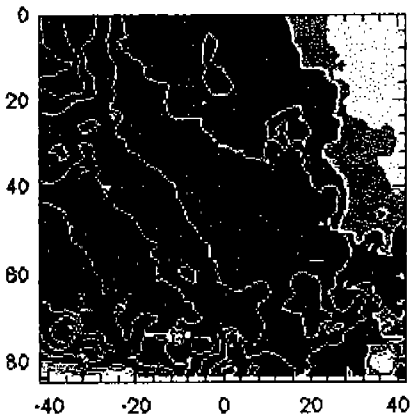
(a) 15°



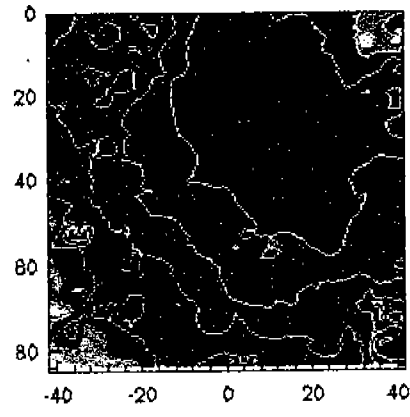
(a) 3mm



(b) 20°



(b) 6mm



(c) 25°

Fig.9 Anglular Momentum Distribution at 25° Port Angle for Different Valve Lifts

Fig.10 Anglular Momentum Distribution at 9mm Valve Lift for Different Port Angles

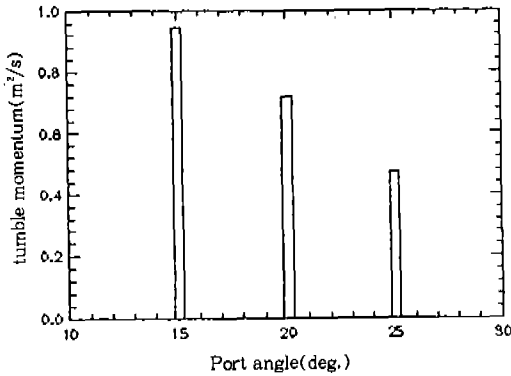


Fig.11 Tumble Moment

Fig.9(a), (b)는 25포트의 밸브양정 3mm, 6mm에 대해 각 운동량 분포를 나타낸 것이며 텀블방향, 즉 반시계방향울 양의 값으로 나타내었다. 두 그림에서 각운동량의 분포는 (-42, 0)과 (42, 84)를 잇는 직선에 거의 대칭으로 나타나며 완전한 형태의 외류를 형성하지 못하고 있다. 3mm의 경우에는 우상변에 시계방향의 강한 각운동량이 존재하며 이 각운동량은 좌측 벽면을 따라 분포함을 알 수 있다. 반면에 좌하변에 반시계방향의 각운동량 분포는 상대적으로 강도가 약함을 알 수 있다. 밸브 양정이 증가된 6mm에서는 시계방향의 각운동량이 존재하지만 3mm에 비해 강도가 약하며 좌하변에 반시계방향의 각운동량이 넓게 분포하여 밸브 양정이 증가함에 따라 텀블방향의 유동이 강화됨을 알 수 있다.

Fig.10(a), (b), (c)는 각 흡기포트에 대한 각 운동량의 분포를 나타낸 것이다. Fig.10(a)에서 높은 각운동량을 갖는 유동의 위치는 실린더의 오른쪽 벽근처에서 텀블어댑터의 바닥면까지 분포되어있다. 이는 흡기포트의 각도가 다른 포트에 비해 낮기 때문에 텀블류가 역텀블류의 방해 를 적게받기 때문이다. 이들 그림의 가운데 부분에서 각운동량이 낮은 것은 유입된 공기가 유도 관을 통해 빠져나가기 때문이다. Fig.10(a)에서는 양쪽 벽근처를 제외하고는 각운동량이 낮은 부분이 넓게 분포되어있음을 알 수 있다.

3.3 텀블모멘트

유체가 가지는 운동에너지를 정량적으로 비교

하기 위해 텀블모멘트를 구하였다. 텀블모멘트는 미소각운동량을 가시화 영역에 걸쳐 적분한 것이다. Fig.11은 밸브 양정 9mm일 때 각 포트에 대해 얻은 결과이며 포트의 각도가 낮아질수록 텀블의 중심이 실린더헤드면 가까이 생성되기 때문에 텀블어댑터의 바닥근처에서 상대적으로 큰 각운동량을 갖는다. 그리고 텀블 스윙 변환장치 내에서 완전히 스윙로 변환이 되지 않고 유도관을 따라 변환되기 때문에 텀블중심이 더 많이 편심된 15포트가 큰 텀블 모멘트를 가진다고 판단 된다.

4. 결 론

흡기포트 형상에 따른 실린더내 텀블유동의 구조를 파악하기 위하여 속도분포, 각운동량 분포 및 텀블모멘트를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유속이 빠르고 복잡한 회전유동 구조를 가지는 가솔린 기관의 실린더내 유동해석에 PIV기술은 신뢰성 있는 결과를 보여주며, 기관설계시 매우 유용한 기술로 활용할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 동일한 포트유입각도일 때 밸브양정에 따른 텀블유동은 저밸브 양정에서는 유동에 대한 밸브의 간섭이 커서 복잡한 형상을 갖지만 밸브 양정이 증가할수록 역텀블 방향의 유동에 비해 텀블방향의 유동이 주류를 이룸을 알 수 있었다.
- 3) 최대 밸브양정에서 포트의 유입각도에 따른 텀블유동은 각도가 작을수록 증가하는 경향을 보이며 텀블유동의 중심도 실린더의 중앙에서 많이 편심됨을 알 수 있었다.
- 4) 포트 유입각도에 따른 각운동량분포는 유입각도가 낮아질수록 텀블의 중심이 실린더 중심에서 멀어지기 때문에 상대적으로 많은 각운동량을 가짐으로써 실제기관의 연소시에 난류강도의 증가와 균일한 혼합기 조성의 촉진으로 희박한계가 확대될 것으로 예상하였다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구 개발사업에 의해 수행된 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. C. Arcomanis, Z. Hu, J. H. Whitelaw, "Steady flow characterization of tumble-generation four-valve cylinder heads", IMechE proc Instn Mech Eng, Vol.207, pp. 1~9, 1993.
2. 강건용, 이진욱, 백제현, "텀블-스웰 변환장치 형상이 흡입텀블 특성화에 미치는 영향", 한국자동차공학회 논문집, 제2권, 제5호, pp.66~73, 1994.
3. D.R Reuss, R. J. Adrian, C. C. Landreth, D. T. French, T. D. Fransler, "Instantaneous Planar Measurements of Velocity and Large-Scale Vorticity and Strain Rate in an Engine Using Particle Image Velocimetry", SAE Paper Series No. 890616, pp.1~126, 1989.
4. Y. A. Hassan, R. E. Canaan, "Full-field bubbly flow velocity measurements using a multiframe particle tracking technique", Experiments in Fluids, Vol.12, pp.49~60, 1991.
5. A. Cenedese, A. Paglialunga, "Digital direct analysis of a multiexposed photograph in PIV", Experiments in Fluids, Vol.8, pp. 273~280, 1990.
6. R. L. Hardy "Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces", J. Geophys. Res. 76, 1971.
7. R. J. Adrian, "Particle-image techniques for experimental fluid mechanics", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261~304. 1991.