

4밸브 직분식 디젤엔진의 SCV 개구율에 따른 흡입유동특성

Intake Flow Characteristics with SCV Open Ratio in a 4-Valve Direct Diesel Engine

최승환*, 전충환**, 장영준**, 이진욱***
S. H. Choi, C. H. Jeon, Y. J. Chang, J. W. Lee

ABSTRACT

Many researchers have developed the measurement technique of in-cylinder flow. Recently, there are lots of studies on steady flow with different SCV geometries. In this study the flow characteristics of four-valve cylinder head were examined in a steady test rig for different SCV open ratios. Each swirl ratio of several SCV angle was quantified by swirl impulse meter and 2D-LDV measurement. The results showed that the swirl ratio was controlled between 2.3 and 3.8 based on SCV angles. The velocity distributions of in-cylinder flow field were measured by 2-D LDV test and visualized swirl and tumble flow pattern at different positions. In this engine, we found out that the swirl was dominant flow.

주요기술용어 : SCV Angle(SCV 각도), Open Ratio(개구율), Swirl Ratio(스월비), Tumble Ratio(텀블비), Steady Flow Rig(정상유동장치), 2D-LDV(2차원 레이저 유속계)

1. 서론

최근의 엔진개발에 있어서 유해배기가스 서감과 에너지 자원의 효율적인 이용에 관한 기술이 중심주제가 되고 있다. 특히 지

구 온난화 방지를 위해 향후 발효될 자동차 CO₂규제에 대비하기 위해서는 HC, CO, NO_x, PM등의 배출가스 저감과 동시에 연료소비율이 적은 엔진개발이 요구되고 있다. 이에 따라 세계주요 선진기술국 및 주요자동차 업체에서는 가장 적합한 대상기술로 소형직분식 디젤엔진과 관련된 기술을 선정하였으며, 또 이에 대한 많은 연구가

* 성회원, 부산대학교 대학원
** 성회원, 부산대학교 기계공학부,
부산대학교 기계기술연구소
*** 성회원, 한라기계연구원

진행되고 있다⁽¹⁾. 실제로 유럽에서는 3리터의 연료로 100km를 주행하고자 하는 3리터 car 개발 프로젝트가 진행되고 있으며 폭스바겐, 벤츠, 오펠 등에서도 배기량 1.2~2.0리터급의 중소형 디젤엔진을 직분식으로 실현하여 연비와 배기가스 수준을 Euro III에 만족시키려는 목표를 가지고 있다⁽²⁾. 현재까지 대형엔진에서 대부분 사용되고 있는 직분식 디젤엔진은 실린더 벽면까지의 분무도달거리가 길고, 연소에 허용되는 시간도 길기 때문에 공기와 충분히 혼합 될 수 있었다. 그러나 중소형 엔진에서는 소형의 연소실에 연료를 직접분사하는 경우로서, 분사된 연료가 공기와 충분히 혼합되어야만 양호한 엔진성능을 얻을 수 있으므로 적절한 연소실내 공기유동현상과 분무현상에 대한 이해가 요구되고 있다. 이들 중 연소실내 공기유동 현상에 대해서는 LDV, PIV 등의 유동 측정장비 및 각종 CFD code를 이용한 방법들이 많이 나와 있지만 아직까지도 엔진 연소실 설계시에는 실린더내 와류강도에 크게 의존하고 있다⁽³⁾. 따라서 본 연구에서는 스월조절밸브(Swirl Control Valve, SCV)를 이용한^{(4),(5)} 정상유동 실험으로 스월비 등의 유동관련 파라미터들을 구하고^{(6),(7)}, 이를 바탕으로 2차원 레이저 유속계로 스월비 및 텀블비에 따른 유동장의 형태를 관찰해 보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 엔진은 현재 시판중인 4-밸브 직분식 디젤엔진으로 주요 제원은 표 1과 같다.

Table 1 Engine specification

Type	Diesel, 4 cycle	
Cylinder arrangement and number	In-line, 4 cylinders	
Combustion chamber	Re-entrant	
Valve system	4 Valve DOHC	
Displacement (cc)	2902	
Bore × Stroke (mm)	97.1 × 98	
Compression ratio	19.3	
Valve timing	IVO, α_1	BTDC 26°
	IVC, α_2	ABDC 50°
	EVO	BBDC 50°
	EVC	ATDC 29°

2.1 SCV 형상 및 실험조건

본 실험에서는 유동을 강화하기 위해 SCV를 장착하였다. 일반적으로 포트의 일부를 막아 포트 내 유동을 변화시키는 방법으로는 강화하려는 유동의 종류에 따라 3가지 형태로 나눌 수 있다. 스월강화형 SCV⁽⁸⁾, 텀블강화형 SCV, 그리고 두 가지를 결합한 경사텀블형 SCV로 나눌 수 있다. 통상적으로 스월을 이용한 충전운동은 오픈 챔버, 실린더리컬, 리엔트런트 보울(Re-entrant bowl) 연소실 등에 사용되며 팬트 루프 모양의 연소실에는 텀블(주로 역텀블)을 이용한다. 본 실험에서 사용된 엔진의 흡기포트는 tangential 포트와 helical 포트 구성되어 있으므로 흡기와류비의 효과를 높이기 위해 tangential 포트의 흡입부에 SCV를 장착하여 흡기와류비의 변화를 살펴 보았다.

그림 1은 본 실험에서 사용된 SCV의 모양과 회전각도의 정의이다. 제작된 SCV는 10° 간격으로 제어되어 유입되는 공기량을 조절할 수 있게 된다. 완전히 개도가 열린

경우를 SCV 0° 로 정의하고 ±10° 씩 각도를 조절하여 한 쪽이 완전히 막힌 SCV ±90° 의 경우까지 총 19개의 조건과 SCV 0° 일 때와 비교하기 위해 SCV가 없는 상용엔진 원래의 상태를 Base로 정의하여 총 20개의 조건에 대해 실험을 수행하였다. 이때 흡입밸브양정은 1.5mm 간격으로 9mm 까지 6가지로 변화시켜보았다. 이상의 실험 조건은 표 2와 같다.

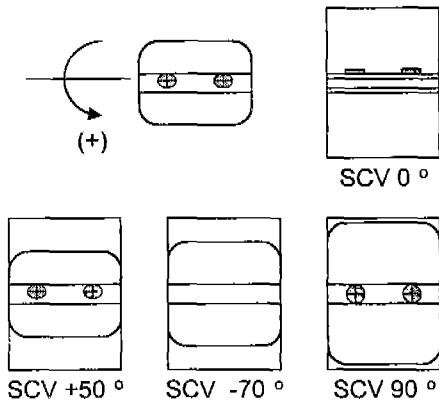


Fig. 1 Definition of SCV angle and schematic diagram

Table 2 Experimental condition

Condition	SCV angle[°]	Valve lift[mm]
Swirl	Base	1.5
	0, ±10	3.0
	±20, ±30	4.5
	±40, ±50	6.0
Tumble	±60, ±70	7.5
	±80, ±90	9.0

2.2 정상유동실험장치

그림 2는 포트의 유동특성을 파악하기 위해 구성된 정상상태 유동측정 실험장치도이다. 흡입공기를 발생시키기 위해 520 l/min 용량의 컴프레서 2대와 맥동을 방지하기 위한 330 l 용량의 서지탱크, 그리고 160 CFM 용량인 층류유량계를 이용하여 흡입 공기량을 측정하였다. 스윙각도를 측정하기 위해 사용된 임펄스미터는 흡입공기가 가진 각운동량이 완전히 파괴될 수 있는 필요조건인 길이 대 직경비가 10:1이 될 수 있도록 벌집형태의 격자를 제작하였다.

흡입 공기의 유동 특성을 조사하기 위해 임펄스미터에서 측정된 토크(τ)는 흡입공기의 총 각운동량의 시간 변화율이 되며 이를 바탕으로 유량계수(C_f), 무차원 스윙값(NRs)과 텀블값(NRt), 평균유량계수(\overline{C}_f) 등을 다음 식을 이용하여 구할 수 있다. 이때 평균유량계수는 각각의 실험조건별로 구해진 유량계수를 캠 각도 0.5° 간격으로 얻어진 밸브양정값을 이용하여 최대밸브양정까지 적분하여 구하였다⁽³⁾.

$$C_f = \frac{\dot{Q}}{(A V_0)} \quad (1)$$

$$NR_{s,t} = \frac{8\tau}{(\dot{m} B V_0)} \quad (2)$$

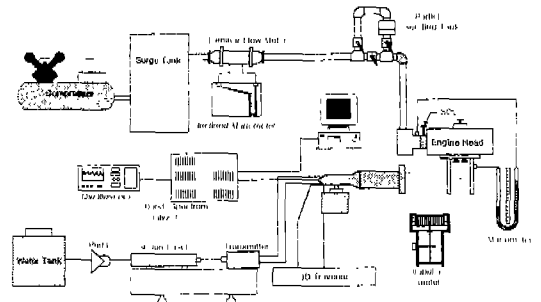


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

$$\bar{C}_f = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (3)$$

밸브양정에 따라 계산된 이들 값들은 다음과 같이 대표값인 스윙비(Rs) 및 텀블비(Rt)로 정의된다. 이러한 스윙비 및 텀블비는 흡기포트가 열려서 닫힐 때까지의 전체 양정에서 발생될 수 있는 스윙 및 텀블 생성능력을 나타내는 파라미터이다.

$$R_{s,t} = \frac{L_D \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f NR_{s,t} d\alpha}{\left\{ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha \right\}^2} \quad (4)$$

$$L_D = \frac{BS}{N_v d_v^2} \quad (\text{형상계수}) \quad (5)$$

Q : Volume flow rate [m³/s]

A : Diameter of intake port

V_o : Maximum velocity through the intake port [m/s]

ṁ : Mass flow rate [kg/s]

B : Bore diameter [mm]

S : Stroke [mm]

N_v : Number of valve

d_v : Minimum valve diameter [mm]

2.3 2D LDV 장치

앞의 그림 2는 실험 장치 중 2차원 유속 측정시스템의 개략도를 나타낸 것으로 크게 흡입유동공급장치, LDV 시스템, 입자부유장치, 데이터 취득장치부로 구성된다.

본 실험에 사용된 LDV 시스템(Dantec Co.)은 수냉식 5와트 아르곤-이온 레이저와 광섬유전송기, 3차원 이송장치, 그리고 신호처리기인 BSA(Burst Spectrum Analyzer)로 구성된다. 레이저 빔이 광섬유 전송기를

통과할 때 레이저빔의 강도는 약 1/10로 약해지지만 실험장치에 대한 레이저빔의 접근이 자유롭기 때문에 많이 사용되고 있다. 측정은 후방산란 모드를 이용하였으며 이때 초점거리는 310mm의 렌즈를 사용하였다. 사용된 레이저 유속계장치의 주요제원은 표 3과 같다.

산란입자로부터 속도를 측정하기 위해서는 입자의 유체유동에 대한 추종성, 입자 공급 및 산란광에 관한 성질을 잘 파악해야 한다. 입자의 크기 및 양은 추종성과 입자산란양, 그리고 도플러 신호획득률에 따라 적절히 선정되어야 한다. 왜냐하면 선정된 입자의 크기 및 공급량에 따라 속도변동의 근사정도가 조금씩 달라지므로 이상적인 입자량은 측정 체적 내에 1개의 입자가 존재할 경우이다. 본 실험에서 사용된 산란입자는 평균입경 1μm의 산화알루미늄을 사용하였다. 데이터 취득장치는 BSA와 데이터 처리용 PC로 구성된다. BSA의 기본원리는 광증배관에서 감지된 산란광이 전기적 형태로 변환되어 BSA의 입력신호로 공급되면

Table 3 LDV optics specification

	Units	Blue	Green
Wave length	nm	514.5	488
Focal length	mm	310	310
Beam separation	mm	72	72
Fringe spacing	μm	2.23	2.12
Number of fringe		35	35
Probe volume dimensions	Delta x mm	0.171	0.162
	Delta y mm	0.170	0.161
	Delta z mm	1.470	1.394

BSA는 시간 영역의 함수인 신호를 주파수 영역의 함수로 변환하여 그 함수의 파워스펙트럼을 계산한 후 유효한 값에 해당되는 주파수를 도플러 주파수로 간주하여 그것에 해당되는 속도를 선형적인 관계로 구하는 것이다.

2.4 실험방법

스윙강도를 측정하는 방법은 흡기밸브 전후의 압력차를 일정하게 유지시켜주는 일정차압 방식이다. 차압측정은 실린더 헤드면으로부터 49mm 떨어진 위치에서 행하였으며, 이때 250 mmH₂O의 차압을 주고 실험을 실시하였다. 스윙유도관을 직경 98mm 아크릴로 가공하여 보어 사이즈의 1.75배인 위치에 스윙 임펄스 미터를 설치하여 측정하였다⁽³⁾.

텀블강도는 텀블유동을 스윙유동으로 변환시키는 L형의 텀블 유도관을 이용하여 측정하였다. 텀블 유도관 역시 직경 98mm 아크릴로 제작하였다. 그리고 텀블유동을 스윙유동으로 변환시키는 유도관의 길이는 텀블유동이 충분히 스윙유동으로 변환될 수 있게 하였고, 실험은 실린더 내경의 3배인 위치에서 실시하였다.

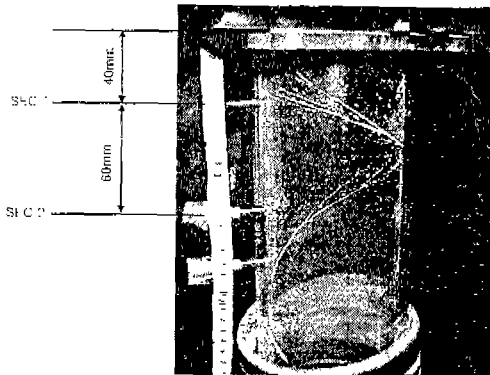


Fig. 3 Path-line of particle for swirl flow and measurement section

2D LDV에 의한 스윙유동해석을 위해서 SCV 각도 0°, 50°, -70°, 90°를 선정하여 실험을 수행하였다. 그림 3은 정상유동 장치내 전반적인 스윙유동의 거동을 확인하기 위해 촬영한 파이렉스 글래스 내면에 부착되는 입자의 궤적을 나타내고 있다. 2D LDV로 엔진 실린더 헤드면을 기준으로 해서 40mm 하단면과 100mm 하단면 두 단면을 선정하여 실험하였다. 측정점은 횡단면의 중심을 기준으로 10mm 간격으로 동심원을 만들면서 이동하여 측정하였으며 한 단면에 대해 57 포인트를 측정하였다. 이때 하나의 포인트에 대해 12000개의 데이터를 취득하였다.

2D LDV에 의한 텀블유동해석을 위해서는 SCV 각도 0°, -50°, 90°를 선정하여 실험을 수행하였다. 측정단면은 실린더 중심을 기준으로 L자형 유도관내 실린더 내경의 1.5배인 위치에서 측정하였다. 측정점은 측정단면의 중심을 기준으로 역시 10mm 간격으로 이동하여 측정하였으며 한 단면에 대해 45 포인트를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상유동

3.1.1 스윙 특성

그림 4는 스윙유도관을 이용하여 실험했을 때의 유량계수로 베이스, SCV 0°, 50°, -70°, 90°의 결과를 나타낸 것이다. 유량계수는 모두 0.5이하의 값을 보여주고 있다. 밸브양정 9mm의 경우 가장 유량계수가 큰 베이스와 SCV 0°에서의 유량계수의 차이는 약 4%이며, 베이스와 SCV 90°의 경우에는 48% 정도의 차이를 보이고 있다. 유량계수는 흡기밸브가 열림에 따라 흡기포

트 유로의 단면적에 비례하며 이는 공기유입량과 비례함을 알 수 있다. 특히 helical 포트의 경우 나선형의 유로가 유동의 진행 방향을 가로막는 역할을 하기 때문에 유량이 감소하며, 동시에 압력손실이 증가하기 때문에 유량계수는 감소하는 경향을 보이는 것으로 사료된다.

실험으로부터 구해진 결과를 밸브양정과 함께 평가하기 위해서는 무차원 스윙/텀블값을 구하였으며 이는 각 엔진의 서로 다른 기하학적 제원에 따른 유동의 효과를 비교·판단하기 위한 것이다.

그림 5는 무차원 스윙값에 대한 결과이다. 밸브양정 4.5mm 이하에서는 개구율이 큰 베이스와 SCV 0° 인 경우 상대적인 차이를 보이지 않다가 밸브양정 6mm 이후부터는 큰 차를 보이게 되는데 이는 베이스와 SCV 0° 인 경우 밸브양정 4.5mm 이전에는 흡입 공기유량에 비해 스윙의 형성이 잘 이루어지지 않음을 의미한다.

그림 6은 스윙유도판을 사용하여 실험하였을 때 구한 평균유량계수와 스윙비의 상관관계를 SCV의 모든 조건에 대해 나타낸 것이다. 가로축은 밸브양정에 대한 유량계수의 평균값인 평균유량계수를 나타낸 것으로 상용인 Base 포트의 경우가 SCV 0° 에 비해 3% 정도 평균유량계수가 크다. 세로축은 흡기밸브가 닫힌 순간 흡입과정에서 발생하는 스윙 생성능력을 나타내는 스윙비로 이는 유량계수와 무차원 스윙수에 의해 결정된다. 전체적으로 SCV 각도가 클수록 큰 값의 스윙비를 갖으며 2.3~3.8 사이의 범위 내에서 제어되어짐을 관찰할 수 있다. T. Sato 등의 연구결과에 따르면 일반적으로 높은 엔진회전수에서 안정된 성능을 얻기 위한 스윙 임펄스미터로 측정된 스윙비

의 범위는 3~4라고 보고하고 있는데⁽⁹⁾, 본 실험의 경우 스윙비는 SCV 60° 이상에서 이를 만족함을 알 수 있다.

평균유량계수와 스윙비의 상관관계를 살펴보면 서로 반비례함을 알 수 있는데 이는 SCV 개구량이 작아 질수록 흡입유량은 감소되지만 스윙생성능력은 증가함을 의미하고 있다. 스윙비와 평균유량계수는 trade-off 관계임을 확인할 수 있었다.

3.1.2 텀블 특성

그림 7은 텀블유도판을 이용했을 때의 유량계수이다. 밸브양정 9mm에서 베이스와 SCV 0° 는 1%의 차이를, 베이스와 SCV 90° 인 경우에는 50% 정도의 차이를 보임을 알 수 있다.

그림 8은 무차원 텀블값을 계산할 결과이다. 스윙값과 비교할 때 대부분 10⁻¹이하의 아주 낮은 값을 갖는다. 그러나 밸브양정 4.5mm의 경우 베이스와 SCV 0° 의 경우 다소 절대값이 큰 무차원텀블값을 갖게 되는데 이는 그림 5에서 보는 바와 같이 밸브양정 4.5mm에서는 무차원 스윙값이 상대적으로 작기 때문에 흡입공기중 일정부분이 스윙유동에 모멘트를 더하지 않고 텀블유동을 생성하기 때문인 것으로 생각된다. 본 실험에서 사용된 엔진의 흡기포트가 텀블강화형이 아닌 스윙강화형 포트이고 또, SCV를 통해 스윙 성분이 더 강화되기 때문에 무차원 텀블값이 약화된 것으로 생각된다.

그림 9는 평균유량계수와 텀블비의 상관관계이다. 가로축은 평균유량계수를 나타내는데 스윙 경우와 같이 Base의 경우가 가장 큰 값을 나타내며 SCV 각도의 2부호에 대해서는 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 또, 세로축은 텀블비를 나타내는데 스윙

비에 비해 1/10 정도의 값을 가지며 SCV 30° 를 전후하여 텀블 회전방향이 변동하여 유동이 불안정하게 존재함을 알 수 있다.

다시 말해 이 엔진은 텀블형 포트가 아닌 SCV의 부착을 통해 스웰강화형 포트로서 사용할 수 있다고 생각된다. .

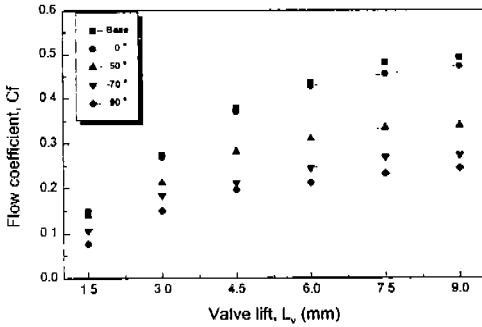


Fig. 4 Flow coefficient, C_f , of swirl

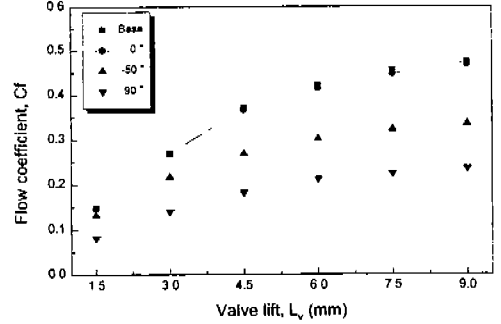


Fig. 7 Flow coefficient, C_f , of tumble

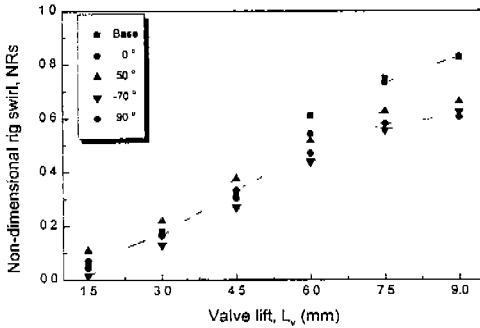


Fig. 5 Non-dimensional rig swirl, NRs

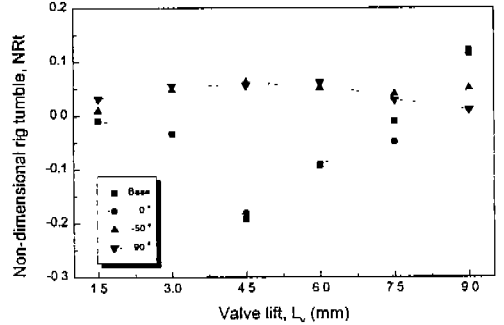


Fig. 8 Non-dimensional rig tumble, NRt

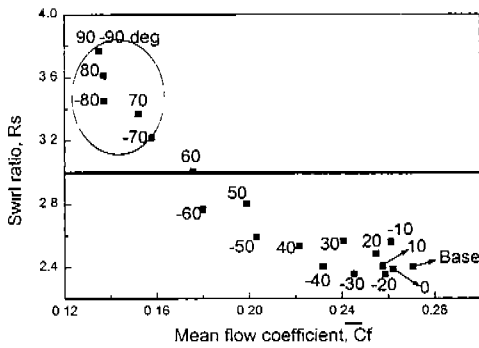


Fig. 6 Correlation between mean flow coefficient and swirl ratio

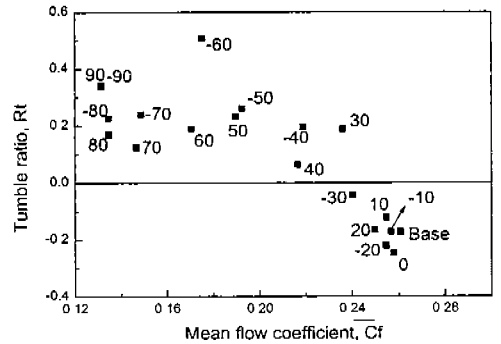
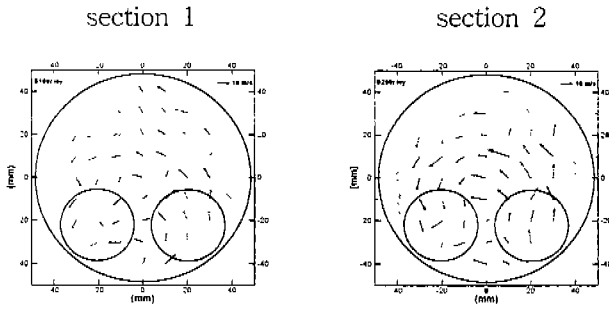
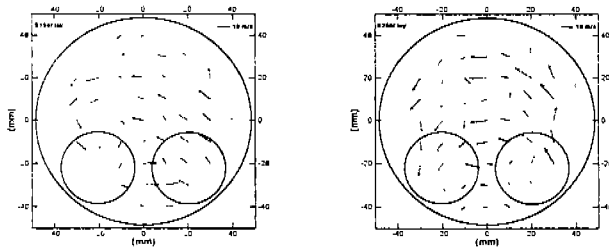


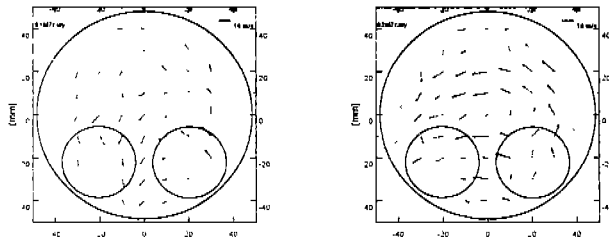
Fig. 9 Correlation between mean flow coefficient and tumble ratio



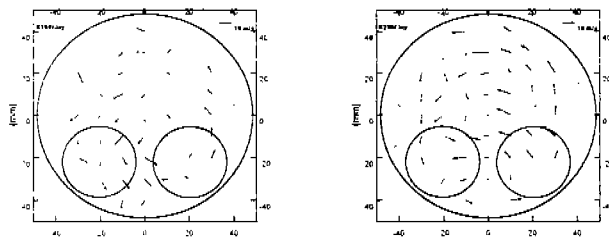
(a) SCV 0°



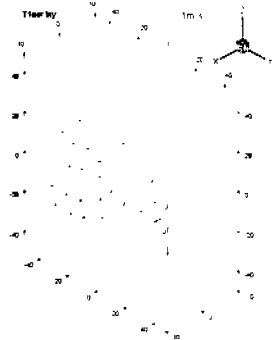
(b) SCV 50°



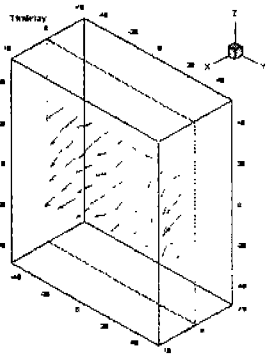
(c) SCV -70°



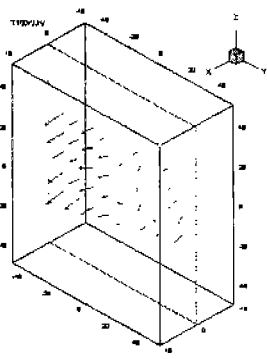
(d) SCV 90°



(a) SCV 0°



(b) SCV -50°



(c) SCV 90°

Fig. 10 Swirl flow patterns for different SCV angles

Fig. 11 Tumble flow patterns for different SCV angles

3.2 2D-LDV 특성

3.2.1 스웰 특성

그림 10은 스웰비가 2.4인 SCV 0°, 2.8인 SCV 50°, 3.2인 SCV -70°, 그리고 스웰비가 3.8인 SCV 90°의 4가지의 단면 유동장을 2D LDV에 의해 재측한 속도 벡터이다. 실린더 중심을 원점으로 하여 나타내었고 기준 속도는 10m/s이다. 그림 10의 (c)와(d)는 스웰비가 3이상인 SCV -70°와 SCV 90°의 경우인데 실린더 헤드면에서 40mm 떨어진 단면 1의 경우 초기에는 스웰의 모습이 잘 보이지 않지만 100mm 떨어진 단면 2에서는 완전한 스웰의 형태를 보임을 볼 수 있다. 특히 SCV 90°인 경우, 단면 2에서 스웰유동의 중심은 거의 실린더중앙에 위치함을 볼 수 있다.

상대적으로 유량계수가 큰 SCV 0°와 SCV 50°의 경우는 단면 1에서 이미 뚜렷한 스웰유동이 형성은 되지만, 더 이상 발달되지는 않음을 알 수 있다. 이 경우에는 스웰비는 상대적으로 작지만 유량계수가 크기 때문에 각각의 측정점에서의 속도값은 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 정상유동의 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

이러한 스웰유동은 그림 3과 같이 강제회전에 가깝고 회전축이 피스톤 중심축과 거의 일치하기 때문에 폭발과정 후기까지 난류생성원이 된다고 생각된다⁽¹⁰⁾.

3.2.2 텀블 특성

그림 11은 텀블비가 -0.25인 SCV 0°, 0.27인 SCV -50°, 0.35인 SCV 90°의 3가지 SCV에 대한 단면 텀블 유동패턴을 나타

낸 것이다. 이 경우 피스톤은 X축을 따라서 움직인다. SCV 0°인 경우에는 약하지만 어느 정도 텀블의 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 SCV -50°와 SCV 90°의 경우에는 오히려 텀블유동이라기 보다는 스웰유동에 가까운 거동을 보이고 있음을 관찰할 수 있다. SCV 0°의 경우 텀블비의 절대값이 가장 작지만 오히려 텀블비가 높은 SCV 각도의 경우보다 더 많은 텀블 거동을 보여주고 있는데 이는 SCV 0°의 경우 스웰비에 대한 텀블비의 상대비율이 SCV -50°인 경우와 SCV 90°인 경우에 비해 크기 때문이다. 그러나 텀블유동에 가장 근접한 SCV 0°인 경우에도 스웰의 영향과 비교할 때는 무시할 만큼 작다는 사실을 알 수 있으며 이는 텀블유동의 불안정성을 의미하며 전체 유동은 강한 스웰유동의 영향에 지배되고 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 직분식 디젤엔진의 흡기포트에 장착한 SCV의 개도변화에 따른 정상유동특성을 조사하였다. 2차원 LDV 실험을 통해 유동장의 속도 분포를 가시화하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 사용된 4밸브 직분식 디젤엔진은 기본적으로 스웰유동이 지배적임을 알았고, SCV를 장착하여 실험한 결과에 의하면 SCV의 개도율이 감소할수록 스웰비는 증가하였으며, 이러한 스웰비는 2.3~3.8까지 제어가 가능하였다. 이에 비해 텀블 유동은 스웰값의 1/10의 아주 작은 값의 범위에서만 제어되었다.

2) 스윙유동의 경우에는 -70° 와 90° 의 경우 초기에는 스윙의 모습이 잘 보이지 않다가 하단으로 이동하면서는 완전한 스윙의 형태를 나타내고 있음을 관찰할 수 있었다. 상대적으로 스윙비가 작은 0° 와 50° 의 경우는 상단면에서 이미 뚜렷한 스윙유동이 형성은 되지만 더 이상 발달되지는 않았다.

3) 텀블유동의 경우에는 텀블비의 절대값이 가장 작은 경우에 오히려 텀블 유동을 관측할 수 있었고, 상대적으로 텀블비가 큰 경우에는 텀블보다는 스윙의 형태를 나타내고 있는데 이는 스윙강화형 포트에서 나타나는 불안정한 텀블유동의 특성이라고 사료된다.

참 고 문 헌

- Hikosaka, N, "A View of the Future of Automotive Diesel Engines", SAE paper 972682., 1997.
- Robert Q. Riley, "Alternative Cars in the 21st Century", SAE Press, 1996
- 소동현, 구영근, "엔진 흡기 Swirl의 측정에 대하여", 자동차공학회지 Vol.15, No.3. 1993.
- K. Lee, T. Urushihara, "Analysis of Gas Flow Fields Generated by Butterfly type Swirl Control Valve", JSAE paper 9304365, 1993.
- S. Furuno, S. Iguchi, "The Effects of 'Inclination Angle of Swirl Axis' on Turbulence Characteristics in a 4Valve Lean-Burn Engine with SCV ", SAE paper 902139., 1990.
- 김재용, 최영돈, "선회류 생성 DOHC 흡기포트 형상의 실험적 최적화에 관한 연구", 자동차 공학회 추계학술대회, 1995.
- T. Urushihara, T. Murayama, Y. Takagi, K. Lee, et al., "Turbulence and Cycle-by-Cycle Variation of Mean Velocity Generated by Swirl and Tumble Flow and Their Effects on Combustion", SAE paper 950813, 1995.
- J. C. Kent, "Observations on the Effects of Intake Generated Swirl and Tumble on Combustion Duration", SAE paper 892096. 1989.
- Y. Mase, J. Kawashima, T. Sato, M. Eguchi, "Nissan's New Multivalve DI Diesel Engine Series", SAE paper 981039, 1998.
- 강건용, 이진욱, 백제현, "텀블-스윙 변환장치 형상이 흡입텀블 특성화에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집 제 2 권 제 5호. PP 66~73. KSAE No. 943756, 1994.