

직접분사식 소형 디젤엔진의 실린더내 스윙 유동장에 미치는 흡기포트의 형상에 관한 연구

이 기 형¹⁾ · 한 용 택^{*2)} · 정 해 영²⁾ · 임 영 철²⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 대학원²⁾

A Study on the Effects of Intake Port Geometry on In-Cylinder Swirl Flow Field in a Small D.I. Diesel Engine

Kihyung Lee¹⁾ · Yongtaek Han^{*2)} · Haeyoung Jeong²⁾ · Youngchul Leem²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

²⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 18 May 2004 / Accepted 17 August 2004)

Abstract : This paper studies the effects of intake port configuration on the swirl that is key parameter in the flow field of direct injection diesel engines. In-cylinder flow characteristics is known to have significant effects on fuel air mixing, combustion and emissions. To investigate the swirl flow generated by various intake ports, steady state flow tests were conducted to evaluate the swirl. Helical port geometry, SCV shape and bypass were selected as the design parameters to increase the swirl flow and parametric study was performed to choose the optimal port shape that would generate a high swirl ratio efficiently. The results revealed that a key factor in generating a high swirl ratio was to suitably control the direction of the intake air flow passing through the valve seat. For these purposes, we changed the distance of helical and tangential port as well as installed bypass near the valve seat and the effects of intake port geometry on in-cylinder flow field were visualized by a laser sheet visualization method. From the experimental results, we found that the swirl ratio and mass flow rate had a trade off relation. In addition, the result indicates that the bypass is a effective method to increase the swirl ratio without sacrificing mass flow rate.

Key words : Intake port(흡기 포트), Steady state flow test(정상유동실험), Bypass(바이패스통로), SCV(스윙콘트롤밸브), Swirl ratio(스윙비)

Nomenclature

C_v : flow coefficient

N_s : non dimensional swirl ratio

R_s : swirl ratio

ω : angular velocity [rad/sec]

α : crank angle [rad]

B : cylinder bore [m]

S : engine stroke [m]

n : number of intake valve

D : valve inner seat diameter [m]

L_D : geometry coefficient

$\Delta\alpha$: crank angle interval [rad]

N_R : non dimensional swirl ratio

RM_a : ratio of increase of the actual mass flow rate[%]

*To whom correspondence should be addressed.
rthan102@hanmail.net

1. 서론

최근 전 세계적으로 강화되고 있는 환경 규제는 엔진의 배기성능에 대한 개선을 요구할 뿐만 아니라 자동차의 품질 향상을 위하여는 연료저감과 성능면에서도 우수한 엔진을 요구하고 있는 실정이다. 이러한 요구들은 개선된 엔진 설계로 충족되어질 수 있으며 연소에 중요한 영향을 미치는 실린더의 유동장을 최적화할 수 있는 설계기술이 필요하다. 특히 흡기 포트의 형상은 실린더내 유동을 제어하여 혼합기의 형성뿐만 아니라 연소와 배기 성능을 좌우하는 매우 중요한 설계인자이다. 디젤엔진에서 압축행정 말기까지 존재하는 스윙 유동은 안정된 연소를 얻고 서배기를 실현하는데 필요한 요소로서 흡기포트형상은 스윙 유동에 직접적인 영향을 주는 주된 요인으로 알려져 있다.^{1,2)} 따라서 흡기포트의 설계 변수에 따른 정상 유동 실험을 수행하여 흡입유동과 스윙비에 적합한 설계 인자를 확립하는 것이 저배기 자동차용 연소실 형상 개발을 위하여 반드시 필요하다. 이를 위하여 연소실에서의 공기 유동 형성과 분무된 연료와의 혼합 현상에 영향을 주는 실린더내 유동장의 특성을 여러 가지 흡기포트 형상에 대하여 실험하여 실린더내 유동 특성을 서로 비교함으로써 스윙 유동 생성에 유리한 흡기 포트의 설계인자가 무엇인지를 파악하는 연구가 절실한 실정이다. 최근 흡입유량 확보를 위하여 디젤엔진에도 4밸브화의 추세가 급속도로 진행되고 있지만,³⁾ 4밸브 엔진의 흡입 유동 특성은 종래와 같은 2밸브의 헬리컬 포트의 경우보다 아직 충분히 파악되었다고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 직분식 디젤엔진을 모사할 수 있는 흡기포트 형상을 제작하여 디젤엔진의 연소에 중요한 영향을 미치는 스윙 유동장을 정상 유동 실험을 이용하여 측정하였다. 이러한 실험을 통하여 4밸브형 디젤엔진 연소실내의 유동 특성을 파악하였고, 다양한 유동 제어 방법에 의한 스윙 강도의 변화를 측정함과 동시에 스윙 유동에 미치는 흡기 포트 형상의 영향을 명백히 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 흡기 포트의 형상 및 설계인자

Fig. 1은 본 실험을 위하여 특수 제작된 직분식 디

젤엔진의 흡기 포트의 형상을 나타낸 그림이며 Table 1에 각 실험조건별 제원을 나타내었다. 본 연구에서는 흡입 유동을 제어하는 방법으로 스윙 제어 밸브(SCV), 바이패스 통로, 흡기 밸브 한 쪽 차단 및 두 포트간의 거리를 실험변수로 선정하였다. Type I은 탄젠셜측 흡입 밸브를 닫은 상태에서 바이패스 통로가 있는 상태이며 Type II는 바이패스통로가 없는 상태에서 한 개의 헬리컬 포트만 사용되는 경우이다. SCV 유무에 따른 정상 유동 특성을 파악하기 위하여 탄젠셜 측의 포트에 SCV를 장착한 경우가 Type III이며, Type IV는 두 흡기 포트간의 거리를 최대한 길게 설계한 형상이다. 이러한 흡기 포트 형상을 이용한 실험을 통하여 실제 흡기 포트 설계시 흡입 유량 및 스윙 생성에 유리한 설계 파라미터를 제공하고자 하였다.

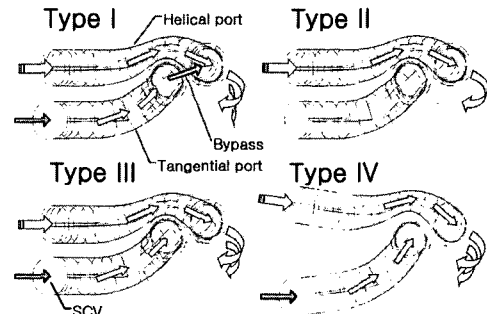


Fig. 1 Varous intake ports configuration used in this experiment

Table 1 The specification of intake port

Parameter Type	SCV	Bypass	Distance [mm]
I	Open	Open	0
II	Close	Close	0
III	Open	Close	37
IV	Open	Close	47

2.2 스윙 및 흡입 유량의 측정 방법

본 연구에서는 흡입 행정중의 스윙을 측정하기 위하여 엔진 상태를 모사할 수 있는 정상유동 실험 장치와 오리피스 유량계를 제작하여 일정차압 300 mmH₂O으로 정상 유동 실험을 수행하였고, Fig. 2에 본 연구에 사용한 실험장치를 도시하였다.

스윙을 측정하는 방법에는 여러 가지 방식이 사

용되고 있으나, 본 연구에서는 ISM(impulse swirl meter)을 이용한 각 운동량 측정법을 이용하였다.⁴⁾

임펄스 스윙 미터에는 벌집 모양의 각 운동량을 100% 흡수 하도록 되어 있다. 흡수되어진 각 운동량은 휘스톤 브릿지 스트레인 게이지 변화기에 의하여 토크량을 검출하고 스윙비를 산출하였다. 스윙 강도를 측정할 때 실린더 헤드의 밑면으로부터 거리가 멀어질수록 실린더 벽면과의 마찰로 인하여 스윙 강도가 감소하므로 실린더 내경의 1.75배 정도의 위치를 스윙 측정 위치로 선정하였다. 이 위치는 흡기 포트에 유입된 흡기의 스윙 유동이 완전히 발달한 형태로 관측이 되는 시점이고 이 위치에 도달하는데 걸리는 시간은 실제 엔진의 흡입 행정 중 최대 밸브 리프트시에 생성된 스윙이 흡입 행정 이후 피스톤이 압축 행정으로 인한 상향 운동으로 연소가 시작되는 상사점 근접 위치까지 도달하는데 걸리는 시간과 거의 일치한다.

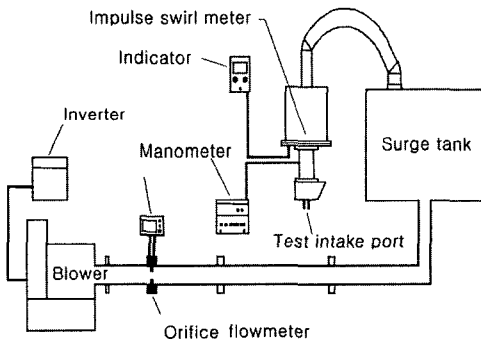


Fig. 2 Experimental apparatus for steady state flow test

각각의 흡기 포트 형상에서 스윙비는 흡입 행정 동안 흡기 포트에 의해서 생겨난 각 운동량 모멘트 플럭스를 합하여 흡입 행정 말기까지의 흡입 유량에 의한 각 모멘트 플럭스를 계산하여 산출하였다. 본 연구에서 사용한 스윙비의 계산식은 식 (1)과 같다.

$$R_s = \frac{\omega_C}{\omega_E} = \frac{BS}{nD^2} \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_v N_R d\alpha}{\left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_v d\alpha \right]^2} = L_D \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_v N_R d\alpha}{\left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_v d\alpha \right]^2}$$

$$= \frac{L_D}{\Delta\alpha} \frac{\sum_{i=1}^{10} (C_{vi} N_{Ri} + C_{v(i-1)} N_{R(i-1)})}{\left[\sum_{i=1}^{10} (C_{vi} + C_{v(i-1)}) \right]^2} \quad (1)$$

Table 2 Effect of weighting function on high valve lifts in 8mm maximum valve lift type

Valve lift [mm]	6	7	8
Weighting function	2	5	8
Effect to object	2C _v , 2N _R	5C _v , 5N _R	8C _v , 8N _R
$\sum_{i=6}^8 (C_{vi} N_{Ri} + C_{v(i-1)} N_{R(i-1)})$	8C _v N _R	50C _v N _R	64C _v N _R
$\left[\sum_{i=6}^8 (C_{vi} + C_{v(i-1)}) \right]$	[4C _v] ²	[10C _v] ²	[8C _v] ²

Table 3 Effect of weighting function on high valve lifts in 10mm maximum valve lift type

Valve lift [mm]	8	9	10
Weighting function	2	5	10
Effect to object	2C _v , 2N _R	5C _v , 5N _R	10C _v , 10N _R
$\sum_{i=8}^{10} (C_{vi} N_{Ri} + C_{v(i-1)} N_{R(i-1)})$	8C _v N _R	50C _v N _R	64C _v N _R
$\left[\sum_{i=8}^{10} (C_{vi} + C_{v(i-1)}) \right]$	[4C _v] ²	[10C _v] ²	[10C _v] ²

스윙비는 엔진 크랭크축의 속도에 대한 흡입 행정 말기의 흡기에 의한 스윙 속도의 비율로 정의하였다. 즉, 유량 계수와 무차원 스윙비를 흡기 밸브가 열리는 시기의 크랭크각에서부터 닫히는 시기의 크랭크각까지 적분한 값의 비율이다. Table 2와 Table 3은 식 (1)을 이용하여 고밸브 리프트영역에서 무차원 스윙비와 유량 계수에 대하여 가중치를 부가하여 캠 프로파일의 효과를 고려하기 위하여 만든 표이다. 고밸브리프트에서 가중치를 준 이유는 크랭크각 간격이 밸브리프트에 따라서 변화하는 위치를 각각의 캠 프로파일로부터 얻을 수 있기 때문이며, 본 실험에서는 최대 밸브 리프트가 10mm타입의 경우 8mm이상에서 가중치를 부가하였으며 최대 밸브리프트가 8mm인 타입은 6mm이상에서 고밸브리프트 효과를 고려하였다. 또한 흡입 행정 동안의 각각의 흡기 포트에 유입되어진 실제 질량유동을 비교하기 위하여 다음과 같은 식 (2)를 이용하여 각각의 밸브 리프트에서 획득한 질량유량을 흡입 행정 말기까지 합한 후, Type II의 흡입유량 값으로 나누어서 각각의 경우에 대한 흡입유량 증가율을 비교하였다.

$$RM_a = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^{10} M_{ai}}{\sum_{i=1}^{10} M_{ai}} \right)_{Type II} - 1 \quad [\%] \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 흡입 2밸브의 SCV 유무에 따른 흡입 유동 특성

Fig. 3은 흡송차압을 $300\text{mmH}_2\text{O}$ 로 고정시킨 상태에서 밸브리프트를 변화시키면서 Type III의 SCV 유무에 따른 유량계수를 비교한 그림이다. SCV가 열린 경우가 모든 밸브 리프트 영역에서 흡입효율이 높음을 알 수가 있다. 이는 실린더내 개구 면적이 동일한 상태에서 SCV가 열려 흡입 유량을 확보했기 때문으로 판단된다.

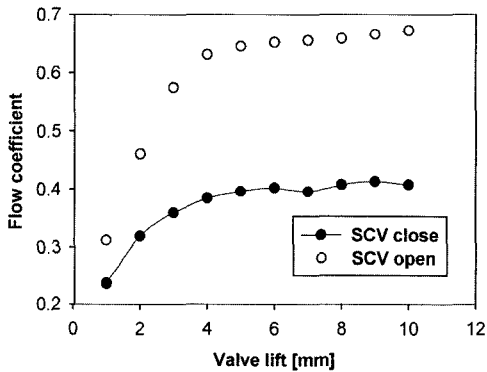


Fig. 3 Comparison of flow coefficient between two cylinder heads with SCV and without SCV

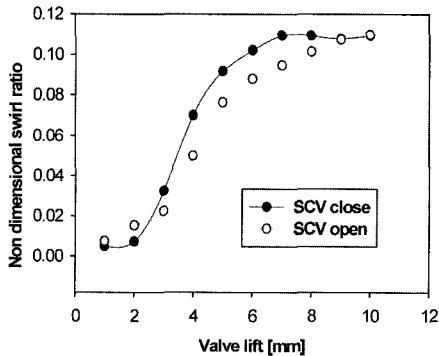


Fig. 4 Comparison of non dimensional swirl ratio between two cylinder heads with SCV and without SCV

Fig. 4는 SCV 장착에 따른 무차원 스월비의 변화를 보여주며 밸브리프트 3mm 이상에서 SCV가 닫힌 경우가 무차원 스월비가 높음을 알 수가 있다. Fig. 5는 동일한 조건에서 실제 흡입유량을 비교한 그림이다. 이러한 결과로부터 흡입 2밸브 디젤 엔진의

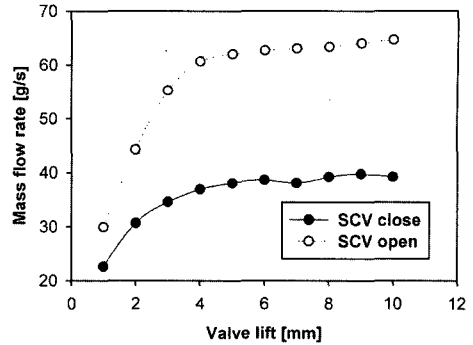


Fig. 5 Comparison of mass flow rate between two cylinder heads with SCV and without SCV

경우 SCV장착에 따라 무차원 스월비는 40% 정도 증가 시킬 수 있으나, 흡입유량이 대폭적으로 감소됨을 알 수 있다.

3.2 흡기 포트 형상에 따른 흡입 유동 특성

Fig. 6은 Table 1에 나타낸 바와 같은 각각의 흡기 포트 형상에 대한 흡입유량을 비교한 그림이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 흡입 2밸브의 탄젠셜 측에 SCV가 열린 경우인 Type III과 Type IV는 4 밸브식이므로 2밸브식인 Type I과 Type II에 비하여 흡입유량이 현저하게 증가되고 있음을 보여주고 있다. 또한 Type III보다 Type IV의 경우가 흡입유량이 증가함을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 흡입 유량 확보를 위하여는 두 흡기 포트간의 거리가 길수록 유리함을 알 수 있다. 따라서 Type III의 경우 Type IV 보다 흡입 유량이 작으므로 저부하 영역에 적합하며 Type IV의 경우 흡입 유량 확보에 유리하

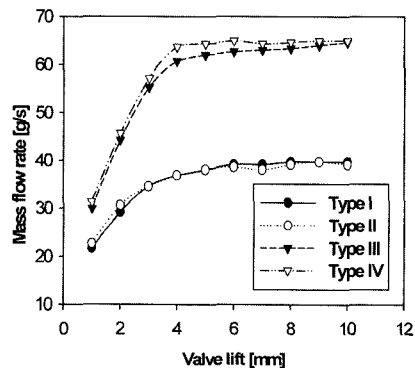


Fig. 6 Mass flow rate of test intake ports with valve lift

며 중 고속영역에서 사용하면 유리하다고 판단된다.

Fig. 7은 식 (1)을 이용하여 계산한 밸브 리프트에 따른 스윙비의 변화를 나타낸 그래프이다. Type III을 제외한 모든 포트 형상은 밸브 리프트가 증가할수록 스윙비가 증가되는 경향을 보이고 있으며, 흡기 1밸브에 해당하는 Type I, II의 경우가 흡기 2밸브 형식인 III, IV의 경우보다 스윙비가 증가됨을 알 수 있다. Table 4와 Table 5는 식 (1)과 (2)를 이용하여 실제 엔진에 해당되는 흡입 행정 말기에서의 스윙비(R_s)와 흡입 유량 증가비 (RM_a)를 구한 값을 나타낸 표이고 비교한 그림은 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 한 개의 헬리컬로 구성된 흡입 1밸브인 Type II의 경우 최대 밸브 리프트를 8mm로 줄이면 스윙비를 증가시킬 수 있지만 흡입 2밸브의 경우 최대 밸브 리프트에 따른 스윙 손실이 거의 없음을 알 수가 있다. Table 6은 각각의 파라미터에 대한 스윙비와 흡입 유량의 증가율을 나타내는 표이다. SCV가 열린 경우는 닫힌 경우에 비하여 스윙비는 43.05%가 감소하고 흡입유량은 61.25% 증가한다. 바이패스가 있는 경우는 없는 경우에 비하여 스윙비는 5.9% 감소하고 흡입 유량은 1.142% 증가하며, Type IV는 Type III에 비하여 스윙비는 3.512% 감소하고 흡입유량은 2.627% 증가한다. 이러한 실험 결과로부터 스윙비 증가와 흡입 유량 감소에 가장 민감한 것은 SCV에 의한 제어임을 알 수가 있으며, Bypass는 스윙비에 대한 영향이 크음을 알 수가 있다. 이와 같이 스윙비와 흡입 유량은 상반 관계(trade off)에 있으므로 두 특성을 동시에 만족시킬 수 있는 포트 형상을 설계하기가 쉽지가 않음을 알 수 있다.

Table 4 Swirl ratio and increase rate of the actual mass flow rate in 10mm maximum valve lift type

	Type I	Type II	Type III	Type IV
R_s	1.7816	1.8386	1.154	1.00
RM_a	0.558[%]	0	61.70[%]	64.55[%]

Table 5 Swirl ratio and increase rate of the actual mass flow rate in 8mm maximum valve lift type

	Type I	Type II	Type III	Type IV
R_s	1.882	200	1.139	1.099
RM_a	1.142[%]	0	61.25[%]	65.49[%]

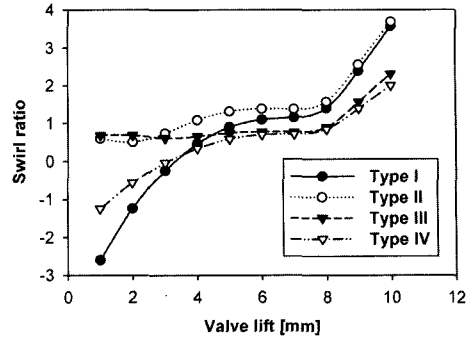
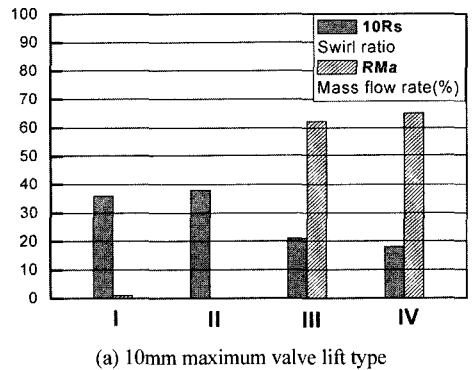
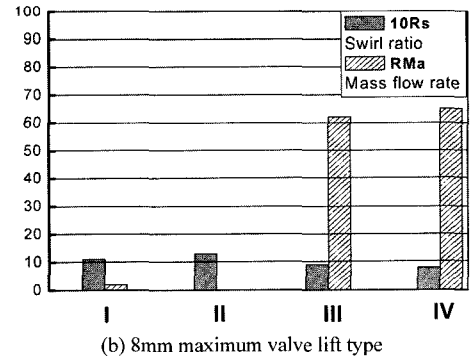


Fig. 7 Swirl ratio of test intake ports with valve lift



(a) 10mm maximum valve lift type



(b) 8mm maximum valve lift type

Fig. 8 Swirl ratio and increase rate of the actual mass flow rate

Table 6 Increase rate of swirl ratio and actual mass flow rate with each parameter in 8mm maximum valve lift type

	SCV	Bypass	Distance
R_s	43.05 [%]	5.9 [%]	3.512 [%]
M_a	61.25 [%]	1.142 [%]	2.627 [%]

3.3 Bypass와 SCV 설치에 따른 스윙 유동의 가시화

Fig. 9는 바이패스 설치에 따른 가시화 실험 영역

의 무차원 스윙비율을 나타내는 그래프이고 가시화 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 저밸브 리프트에서 바이패스에 의한 스윙 유동장의 강화 효과를 Fig. 10의 (a) 결과로부터 확인 할 수가 있다. Fig. 10의 (b)와 Fig. 11에서는 바이패스로 유입된 흡기와 헬리컬로 유입된 흡기의 간섭을 바이패스가 닫힌 경우와 열린 경우에 대하여 서로 비교할 수 있는 영상이다. Fig. 10(b)의 가시화 결과로부터 바이패스가 닫힌 경우의 스윙 강도가 고밸브 리프트에 비하여 낮음을 알 수가 있다. 또한 바이패스가 열린 경우인 왼쪽 영상으로부터는 실린더 둘레를 선회하는 스윙 유동이 바이패스로 유입되는 흡기와 헬리컬로 유입된 흡기의 간섭현상이 일어나고 있음이 관측되었다. Fig. 11의 (c) 결과에서 고밸브 리프트로 증가되면서 바이패스가 닫힌 경우 스윙 유동이 증가되는 모습을 볼 수 있으며 이것은 저밸브 리프트 보다도 스윙강도가 크음을 알 수 있게 한다. 바이패스가 열린 경우의 실린더 둘레를 선회하는 스윙 유동 또한 고밸브 리프트에서 관측이 됨을 알 수 있다. Fig. 11의 (d)는 8mm에서 관측된 영상으로, (c)의 결과와 마찬가지로 고밸브 리프트의 효과를 확인할 수 있다.

이러한 결과로부터 정량적인 스윙 측정 결과와 정성적인 스윙 형성 가시화 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 12는 SCV 장착에 따른 가시화 실험 영역의 무차원 스윙비율을 나타내는 그래프이고 가시화 결과는 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13의 (a)에서

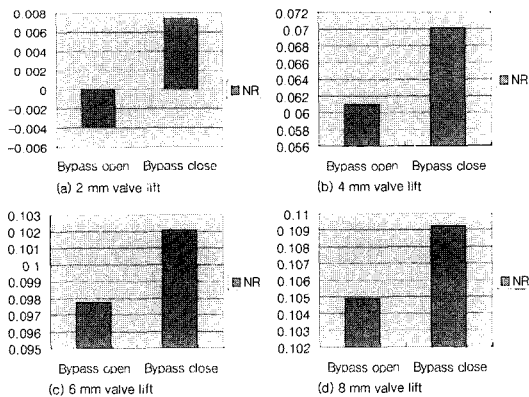
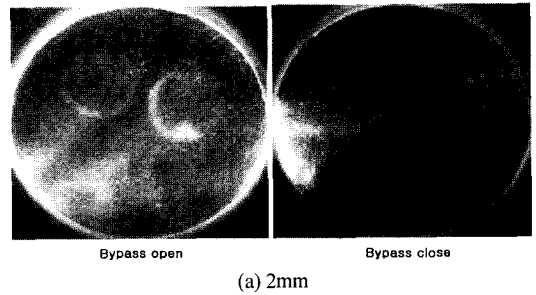
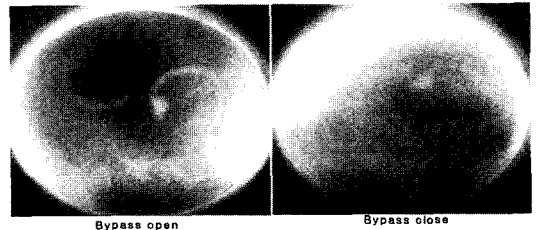


Fig. 9 Comparison of non dimensional swirl ratio with bypass between two intake ports

관측되는 가시화 결과로부터 2mm에서 스윙 유동장을 강화시키기 위해서 SCV밸브를 열어주는 것이 유리하며 4mm에서는 SCV를 닫아주는 것이 유리를 알 수 있다. Fig. 14의 고밸브 리프트 영역에서는 SCV장착에 따라서 흡입 유량 및 스윙 유동의 강화

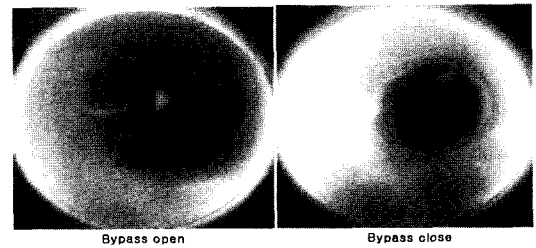


(a) 2mm

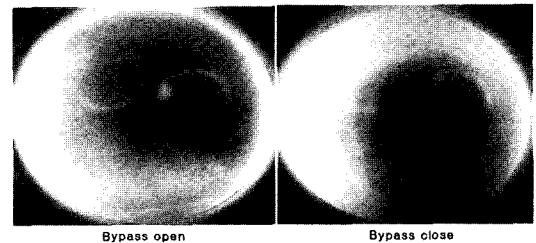


(b) 4mm

Fig. 10 Results of flow visualization with bypass in low valve lift region



(c) 6mm



(d) 8mm

Fig. 11 Results of flow visualization with bypass in high valve lift region

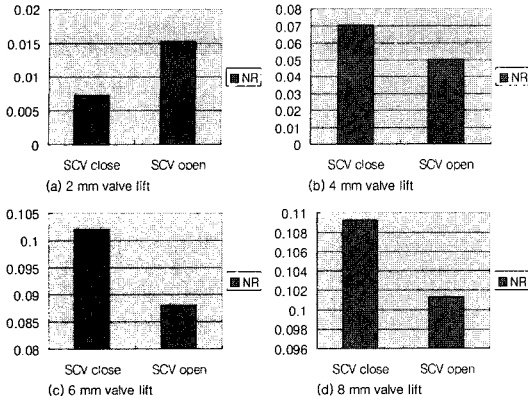


Fig. 12 Comparison of non dimensional swirl ratio with SCV between two intake ports

효과가 나타나고 있음을 영상으로부터 확인할 수가 있다.

4. 결론

이와 같은 다양한 흡기포트 형상에 대한 정상 유동 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 최대 밸브 리프트를 10mm에서 8mm로 줄이면 헬리컬 1밸브만 사용하는 경우 스월비를 증가시킬 수 있지만 탄젠셜 측과 조합되어 사용되는 흡입 2밸브에서는 스월 증가 효과가 미소하다.
- 2) 최대 밸브 리프트 8mm의 경우 SCV의 장착에 의하여 스월비가 1.139에서 2.0으로 75.6%증가 하였지만 흡입유량은 38%정도 감소하였다. 반면 바이패스 통로가 있는 경우는 없는 경우보다 1.142%의 흡입 유량이 증가 하였지만 스월비는 2.0에서 1.182로 5.9%감소하였다.
- 3) SCV를 이용하여 스월비를 강화시킬 경우 큰 흡입 유량 저하를 초래하지만, 바이패스를 설치하면 스월비의 큰 손실없이 유량 증가 효과를 얻을 수 있었다.
- 4) 최대 밸브 리프트 10mm인 경우 Type III는 Type IV와 비교하여 스월은 1에서 1.154정도 증가하고 RM_a 는 64.55%에서 61.70% 정도 감소하였다. 따라서 Type IV는 고속 중부하 영역에서 사용하면 유리하고 Type III는 저속 경부하영역에서 사용하면 유리할 것으로 기대된다.
- 5) 스월 측정 영역의 가시화 결과로부터 바이패스

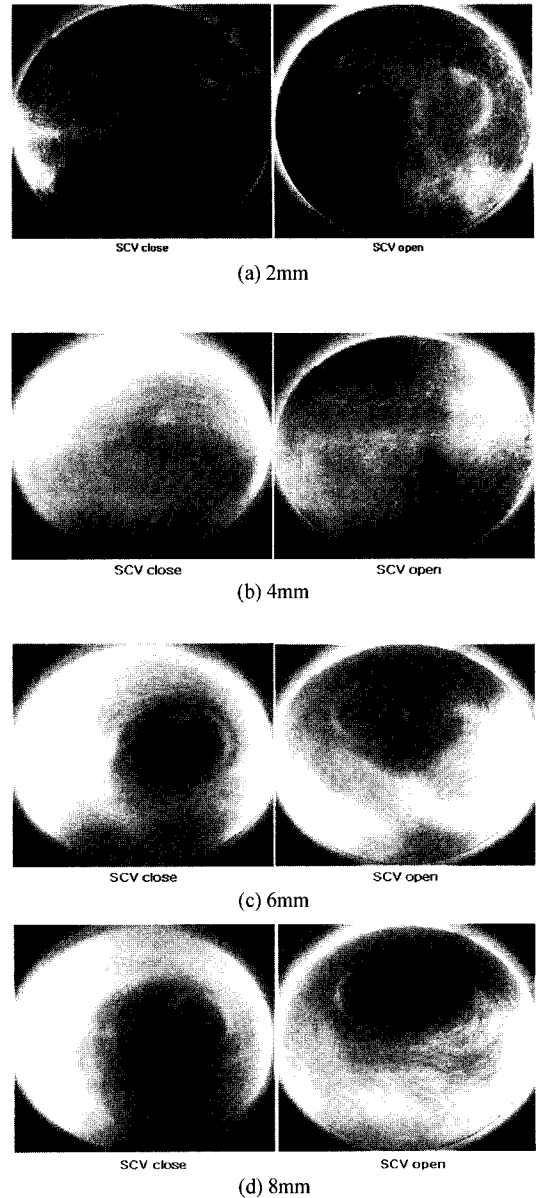


Fig. 13 Results of flow visualization with SCV in high valve lift region

가 열린 경우와 흡기 포트간의 거리가 길수록 저 밸브 및 고밸브 리프트에서의 스월 유동장 관측이 유리하며, 이러한 결과는 각각의 흡기 포트 형상별 스월비 값을 뒷받침해주는 결과로서 스월 유동장의 강화에 효과적임을 의미하며 SCV장착은 분사 조건에 따른 실린더내 스월 유동의 강화에 능동적이며 효과적임을 알 수가 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단에서 시행한 에너지 기술 학술 진흥 사업[2003-E-TR03-P-01-0-000-2003]의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 포함합니다.

References

- 1) K. Y. Kang and R. D. Reitz, "The Effect of Intake Valve Alignment on Swirl Generation in a DI Diesel Engine," *Experimental Thermal and Fluid Science* 20, pp.94-103, 1999.
- 2) K. H. Lee, "Development of Evaluation Method for Intake Flow Characteristics in a Gasoline Engine," *Journal of the Research Institute of Industrial Sciences, Hanyang University*, Vol.40, pp.241-251, 1995.
- 3) K. H. Lee, "Development of Impulse Swirl/Tumble Meter for Analyzing Swirl and Tumble Flow," *Journal of Engineering & Technology, Hanyang University*, Vol.4, No.1, 1995.
- 4) J. I. Kawashima, H. Ogawa and Y. Tsuru, "Research on a Variable Swirl Intake Port for 4valve High-Speed DI Diesel Engines," SAE 982680, 1998.
- 5) P. W. Stepenson, P. J. Claybaker and C. J. Rutland, "Modeling the Effects of Intake Generated Turbulence and Resolved Flow Structures on Combustion in DI Diesel Engines," SAE 960634, 1996.
- 6) I. Y. Ohm, I. S. Jeung and K. S. Jeong, "Fuel Behavior in the Cylinder during the Intake Process," *Transactions of KSAE*, Vol.7, No.4, pp.54-59, 1999.
- 7) J. Y. Lee, B. K. Choi, J. W. Lee, K. Y. Kang and Y. J. Chang, "Flow Field Measurement and Analysis with Swirl Ratio Variation in a D.I.Single Cylinder Diesel Engine," 2000 KSAE Spring Conference, pp.273-278, 2000.