

# 스월비 변화가 직접분사식 디젤기관의 연소특성에 미치는 영향

## Effects of Swirl Ratio on Combustion Characteristics in DI Diesel Engine

권순익\*  
Soon-Ik Kwon

### <Abstract>

Besides the fuel spray behavior and combustion chamber shape, an air motion has a key role on exhaust gas emission and performance in a DI diesel engine. A swirl ratio represents the ratio of the intake swirl velocity to the engine speed. The main purpose in this work is to investigate the effects of the swirl ratio to the combustion characteristics. A shroud valve machined to change the swirl ratio. Test was carry out by changing the engine speed, nozzle diameter and swirl ratio in a single cylinder diesel engine. From this study, the optimized combustion was found at swirl ratio 2.7. And it was also found that the increasing the maximum cylinder pressure with an increasing swirl ratio lead to decrease a smoke and to increase NOx.

**Key words** : *Swirl ratio, Shroud valve, Ignition delay*  
*Diesel combustion characteristics,*

### 1. 서론

직접분사식 디젤기관의 실린더 내의 공기유동은 연료분무의 거동 및 연소실 형상과 함께 연소상태를 지배하는 중요한 인자이다. 그 중 실린더 내의 공기유동은 보다 효율적이며 청정한 연소를 실현시키기 위한 중요한 요소로서 흡기포트 및 연소실 형상 등에 영향을 받으며, 분무거동을 결정하는 중요한 인자로서 연소특성에 영향을 주고 있다.

실린더 내에서의 흡기 스월 선회속도와 엔진

회전속도의 비로서 표시되는 스월비는 흡기포트의 형상에 의해 결정되며 엔진회전 속도에 관계없이 일정한 값으로 정의된다<sup>(1)-(4)</sup>. 따라서 실제 엔진의 기관성능, 배기배출물 및 소음 등 연소최적화를 진행시켜 나가는 과정에서 최적 스월비를 선정하기 위해서는 특별히 설계된 각종 흡기 포트의 형상이 필요하게 되나, 이러한 포트의 제작에는 많은 시간과 노력이 요구되므로 간단히 이를 최적화 할 방법이 필요하게 되었다.

\* 정회원, 두원공과대학 기계과 부교수, 工博  
일본 Hiroshima 대학 졸업  
456-890, 경기도 안성시 죽산면 장원리 678

\* Associator Professor, Dept.of Mechanical Engineering  
Doowon Technical Engineering  
E-mail : sikwon@doowon.ac.kr



이에 본 연구는 흡기밸브의 윗면(흡기 포트 쪽)에 공기유동의 흐름을 바꿀 수 있는 장치(슈라우드)를 붙여 이 슈라우드의 각도 변경에 의해 보다 쉽게 흡입공기의 스월비를 변경시킬 수 있는 슈라우드 밸브를 제작하였다. 이 슈라우드 밸브를 사용하여 직접분사식 단기통 엔진에서 스월비를 변화시켜, 이때에 스월비가 기관의 성능 및 연소특성에 미치는 영향을 조사함과 동시에 최적 연소를 위한 최적 흡입 스월비를 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 슈라우드 밸브

흡입 스월비 변경에 사용된 슈라우드 밸브는 Fig.1과 같이 두께 1.5mm, 원주각 100°의 주철제로 흡기밸브 윗면에 부착하였으며 슈라우드의 위치각( $\theta$ )을 변화시키기에 따라 밸브 주위의 공기 흐름을 한쪽 방향으로 편중시키게 하여 강한 와류를 생성시켜 흡입공기의 흐름강도(스월비)가 변화되도록 하였다.

### 2.2 스월비 측정

흡입 스월비는 Fig.2에 나타난 정상류를 이용한 와류측정기로서 측정하였다<sup>(5)(6)</sup>. 이는 실제의 슈라우드가 장착된 흡입 포트 즉 실린더 헤드에 와류측정기에 장착하여 일정 밸브의 높이에서 일정한 유량을 흐르게 하여 그 때의 회전 날개의 회전수를 측정하여 실제 기관의 평균 흡입 공기량에 대응한 회전 날개의 회전수를 실제 측정값으로 예측하고 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{평균스월비} = \frac{\text{흡입 행정 중의 와류 회전수}}{\text{엔진 회전수}}$$

### 2.3 단기통 엔진

실험에 사용된 엔진은 직경 104mm, 스트로크 105mm의 직접분사식 단기통 디젤엔진으로 압축비는 17.5이며, 주요 제원은 Table 1과 같다. 이 엔진에는 연소실내의 연소 압력 계측을 위한 피에조식 압력 센서(AVL제)와 연료 분사 시간의 측정을 위해 분사노즐에 갭 센서식의 니들 리프트 센서가 설치되어 있어 항상 연속

적인 연소압력과 연료의 분사시기 및 분사기간을 기록할 수 있도록 되어 있다. 또한 연소실내의 압력은 연소 프로그램을 이용하여 각 크랭크 각도 당 열발생율을 계산하였다.

### 2.4 실험방법 및 변경 인자

실험은 엔진회전수 1400, 2200, 3400rpm 하에서 스월비를 0.5에서 3.1까지 변경시켰으며, 분사제와의 매칭 상태를 파악하기 위해 3종류의 분공경 및 분공수가 다른 노즐을 사용하여 흡입 스월비 변화가 연소에 미치는 영향을 실험과 연소해석 및 배기 가스 분석을 통해 조사하였다. 자세한 변경 인자는 Table 2와 같다.

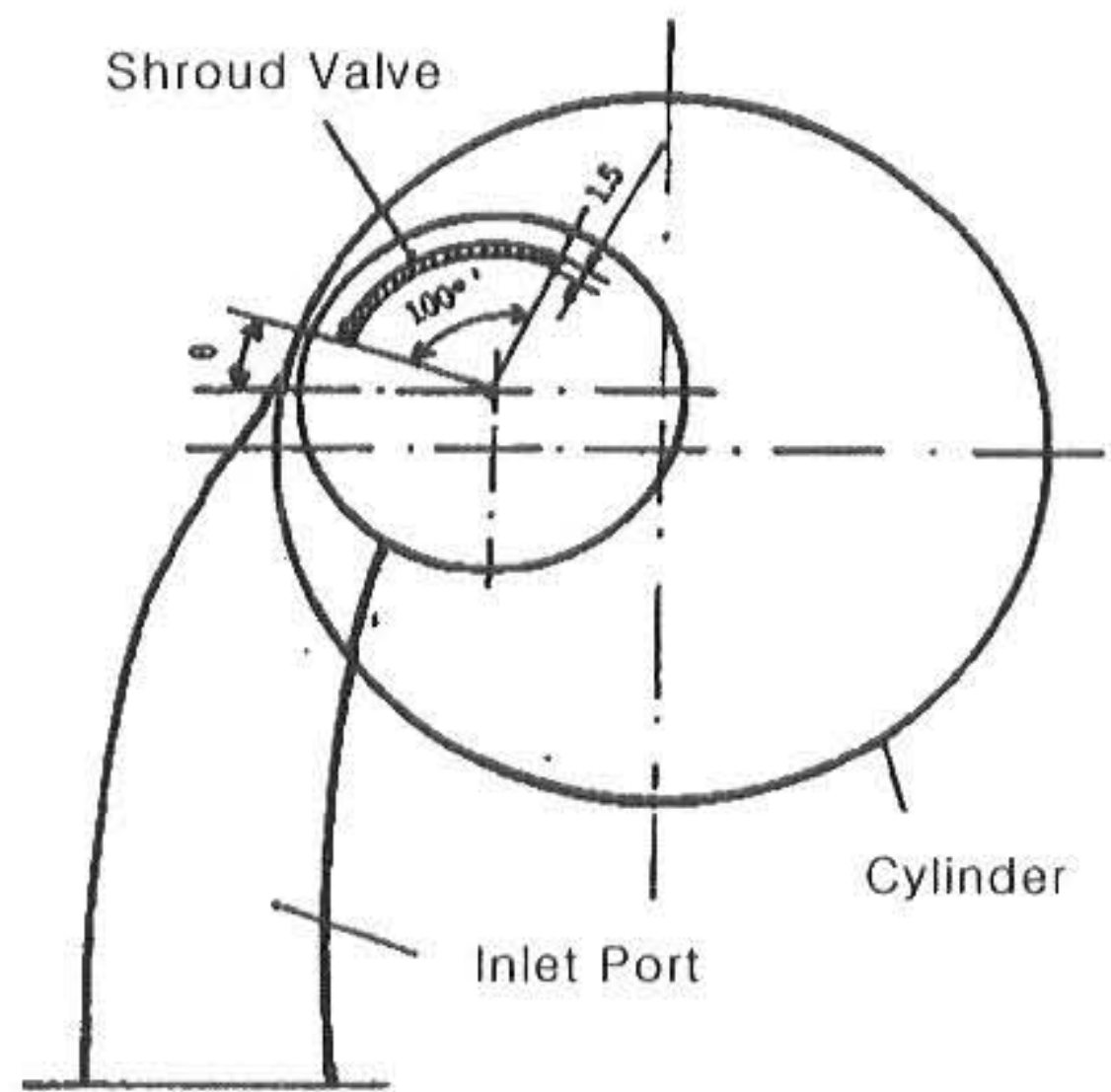


Fig.1 Shroud valve and attached position

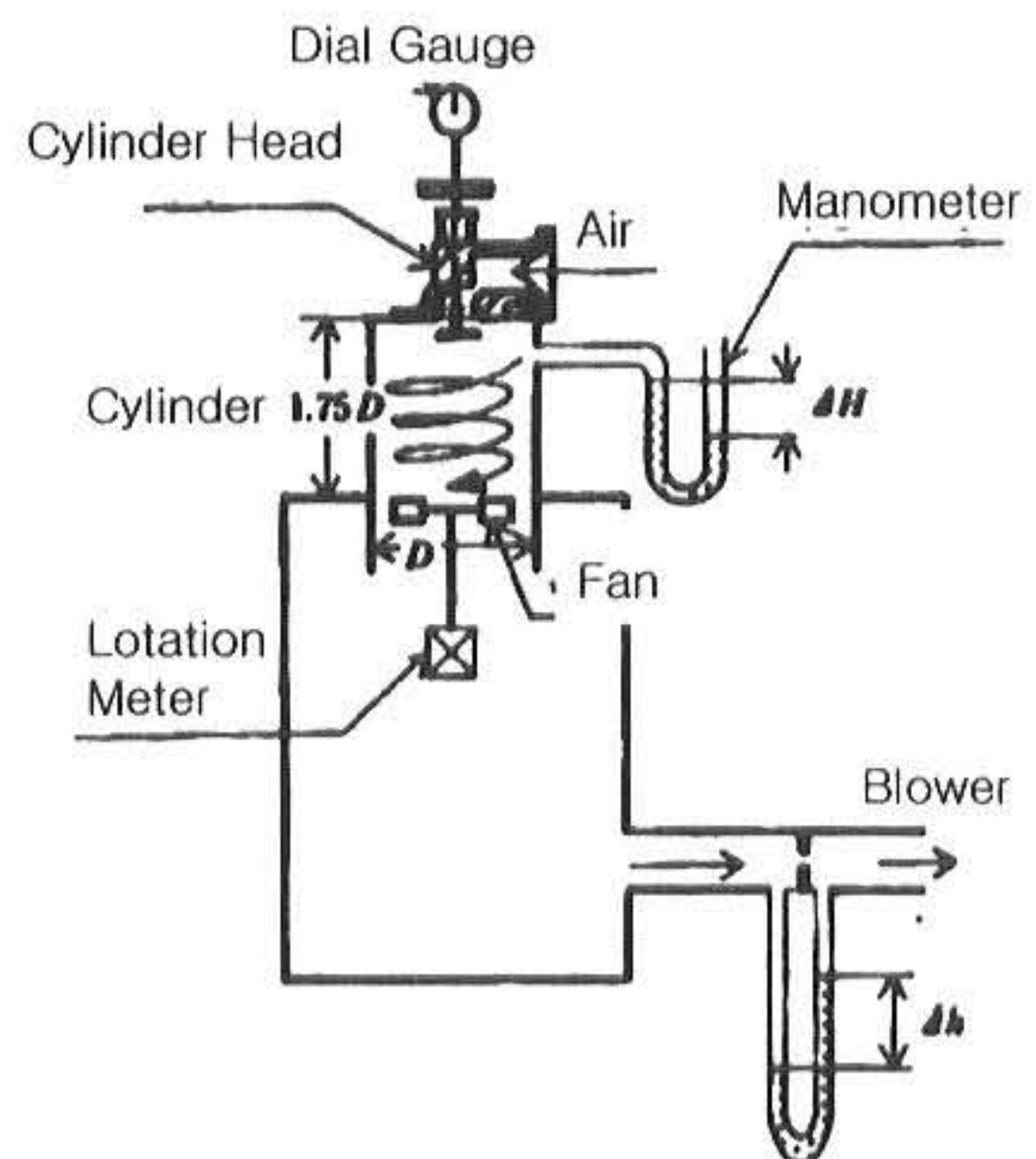


Fig.2 Intake swirl equipment of steady flow



Table 1. Specification of Test Engine

Item	Specification
Bore × Stroke	104 × 105mm
Cylinder Number	1
Swept Volume	892cm <sup>3</sup>
Compression Ratio	17.5
Combustion Chamber	Toroidal type
Valve Timing	I.V.O 17° BTDC I.V.C 47° ABDC E.V.O 53° BBDC E.V.C 11° ATDC
Injection Pump	Type A type Plunger Dia. φ9.5mm
Nozzle Opening Pressure	21.6MPa

Table 2. Values of Used Parameters

Item	Specification
Engine Revolution	1400, 2200, 3400rpm
Inlet Port	Herical Port
Swirl Ratio	0.5, 1.3, 1.6, 2.3, 2.7, 3.1
Nozzle (Hole Dia. × Hole No.)	0.285×5, 0.3×5, 0.275×6

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 스월비와 공기 흡입 유량계수의 관계

슈라우드 밸브의 각도를 변경시켜 구한 스월비 변화에 대해 실제 흡기 포트를 이용하여 구한 흡입유량계수 값을 Fig.3에 나타내었다. 슈라우드 밸브는 반 시계방향의 공기의 흐름을 억제시켜 시계방향의 공기흐름의 강도를 변화시키는 역할을 함으로써 스월의 강도를 변화시킨다. 일반적으로 슈라우드 밸브의 경우 흡입유로 저항의 증가로 유량계수가 감소하는 경향이 있는데 본 실험에서도 Fig.3에서 보는 바와 같이 같은 결과가 나타나고 있다. 전반적으로 유량계수의 값이 저하한 상태에서 스월비 2 부근에서 유량계수가 가장 높고 그 전후로 스월비를 증감시키면 유량계수가 감소하고 있다.

스월비 감소에 의해 유량계수가 저하하는 것은 흡입 포트 형상에 의해 형성된 스월이 슈라우드 설치 각도에 의해 저항을 받아 감소한 것으로 볼 수 있다. 그러나 헬리컬 포트를 사용한 본 실험에서는 스월비 변화에 따른 유량계수의 변화 폭이 접선포트에 비해 상당히 미소한 것

으로 나타나 실제로 성능 실험 시에는 유량계수가 그다지 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

#### 3.2 연소특성

각 일정 엔진 회전수 하에서의 스월비 변경에 따른 연소특성을 Fig.4에 상대적인 값으로 나타내었다. 연료가 분사되어 증발, 혼합과정을 거쳐 착화하기까지의 착화지연 기간은 엔진회전수에 관계없이 스월비 변화와는 상관관계가 없는 것으로 보여지며, 연소기간은 각 엔진회전수 모두 스월비 증가에 반비례하고 있어 스월이 공기유동 및 혼합기 형성에 커다란 기여를 하고 있는 것으로 보여진다. 또한 연료 착화 후부터 최고 압력에 도달 할 때까지의 압력상승률은 2200rpm, 3400rpm 하에서 스월비 증가와 더불어 압력상승률도 증가하고 있으나 저속인 1400rpm 에서는 스월비 2.3에서 가장 낮고

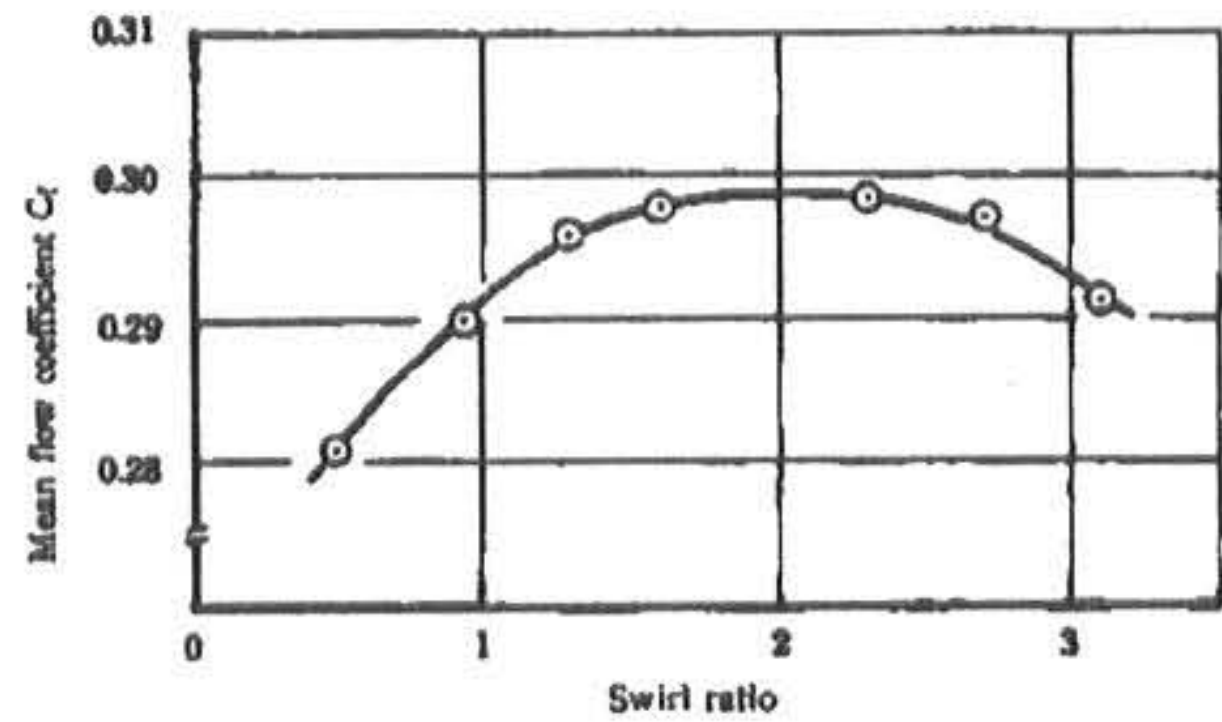


Fig.3 Relationship between swirl ratio and mean flow coefficient

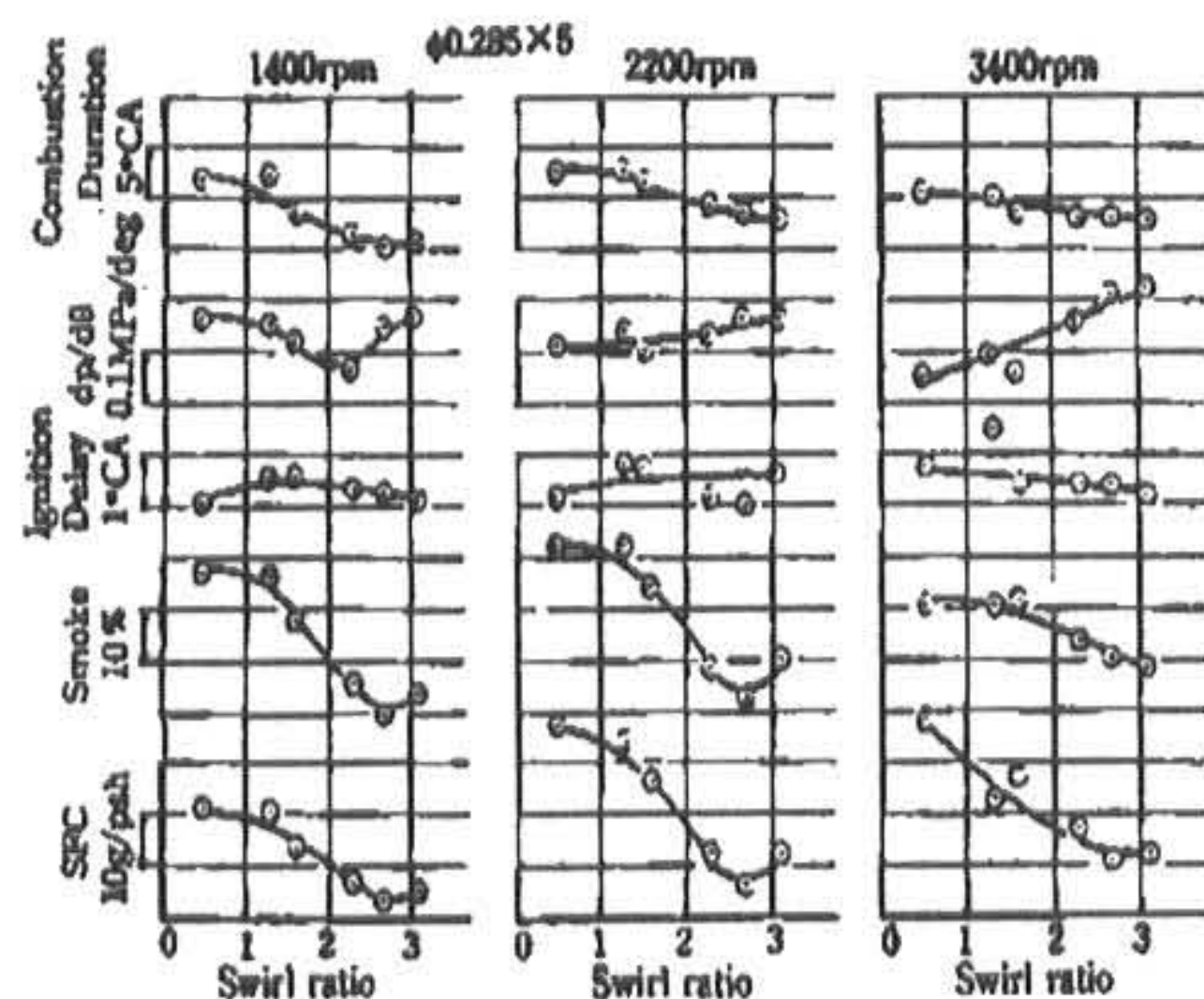


Fig.4 Relationship between swirl ratio and combustion characteristics



그 이외의 스월비에서는 보다 높은 압력상승률을 나타내고 있다.

매연은 스월비 증가에 반비례하여 감소하고 있다. 매연은 배출가스 연소 도중 연료의 탈수소, 산화과정에서의 산소 농도에 따라 생성되는 탄소의 양과 확산과정 중 연소되는 탄소량에 좌우되므로 스월비 증가로 인한 매연의 저감 특성은 예 혼합기간 동안 연료와 공기의 혼합 시간 즉 착화 지연 기간이 일정한 것으로 보아 매연 생성시의 산소 농도보다는 연소 진행 중의 혼합효과 증대 즉 분무 내로의 공기도입율이 증가하여 착화 직후의 열발생율이 급격히 상승함에 따라 Fig.5의 연소 압력곡선과 열 발생곡선에서 보는 바와 같이 연소후기의 열발생 기간이 단축됨으로써 초기 연소에 의한 고온의 체류기간이 길어져 확산연소 기간 중의 연소기간 감소로 매연이 감소된 것으로 사료된다.

Figure 6은 스월비 변경에 대한 6-Mode 배기 분석 방법의 결과를 나타낸 것이다. 스월비 증가에 따라 NOx는 증가하나 CO는 감소하는 경향을 나타내고 있다. CO는 매연처럼 연료가 공기와의 혼합이 불충분한 상태에서 발생되며 스월 증가 시에 연료와 공기의 혼합이 향상되어 저감된 것으로 보인다. 그러나 스월이 가장 큰 3.1의 경우 지나친 공기 유동에 의해 연료가 공기와 완전히 혼합하지 않고 연료의 일부분이 불완전하게 혼합되어 그 부분에서 연소 시에 CO가 발생되어 전반적으로 약간 증가한 모양을 나타내고 있다.

THC는 연료가 미 연소 된 경우나 저속 저부하 때의 온도가 낮은 연소실 벽면에 접촉하였을 때 연소반응이 정지되어 연료가 그대로 HC로 배출되는데 스월비를 변경한 본 실험에서는 거의 동일한 값을 나타내고 있어 스월비 변경에 따른 실린더 벽면의 온도 변화는 거의 없는 것으로 보여진다. NOx는 일반적으로 매연과 상반된 특징을 가지고 있는데 Fig4에서 보는 바와 같이 전 연소기간의 단축에 따른 초기 연소량의 증가로 실린더 내의 온도가 높아졌기 때문에 NOx값도 증가하고 있다.

일반적으로 최적 스월비는 고속 영역에서는 스월비가 낮은 쪽에서, 저속 영역에서는 스월비가 높은 쪽에서 최적의 연소 매칭이 이루어지나, 본 실험에서는 전 영역에 걸쳐 스월비 2.7 부근에서 최적 연소 상태를 나타내고 있다. 이

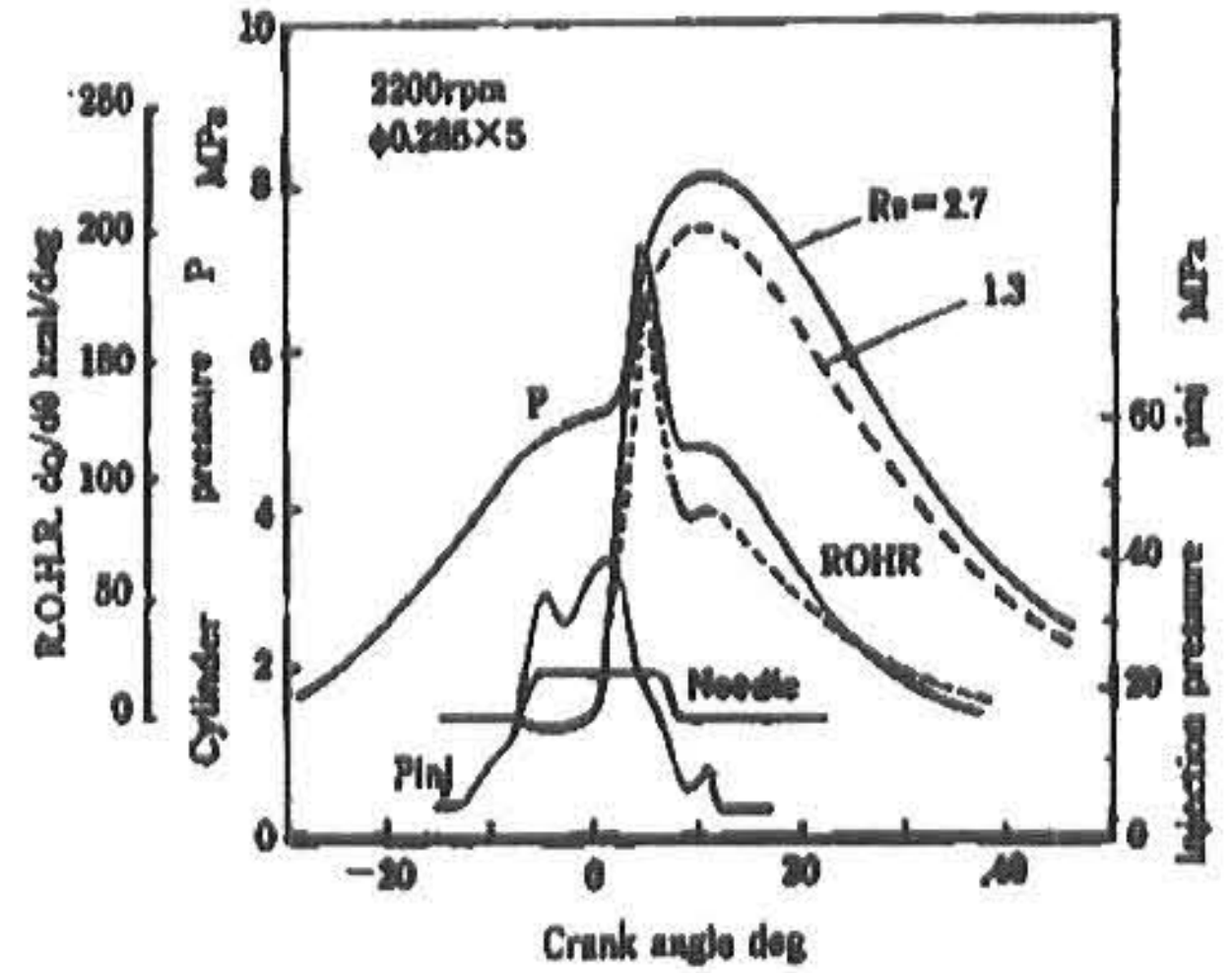


Fig.5 Combustion characteristics curve at nozzle  $\phi$  0.285 x 5

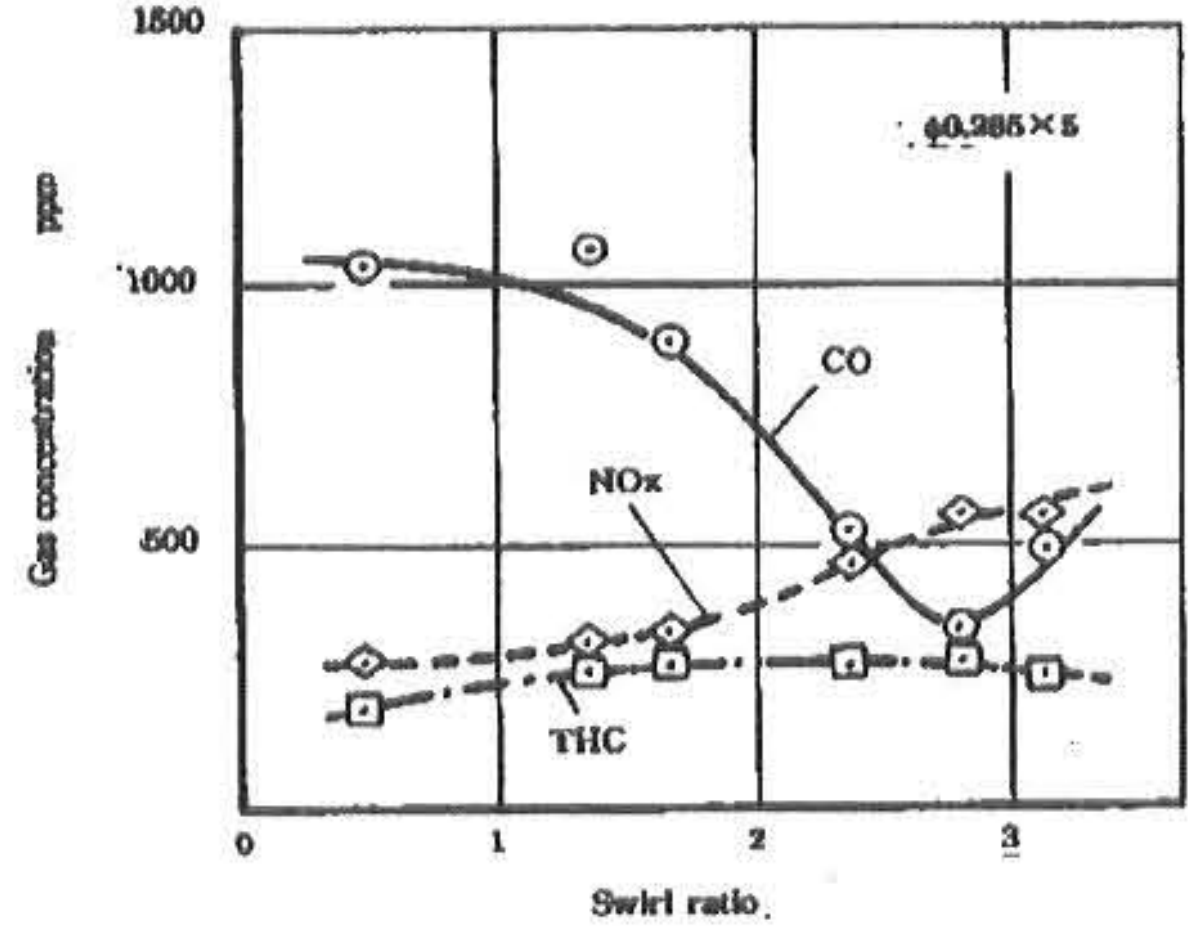


Fig.6 Emission characteristics by 6-mode

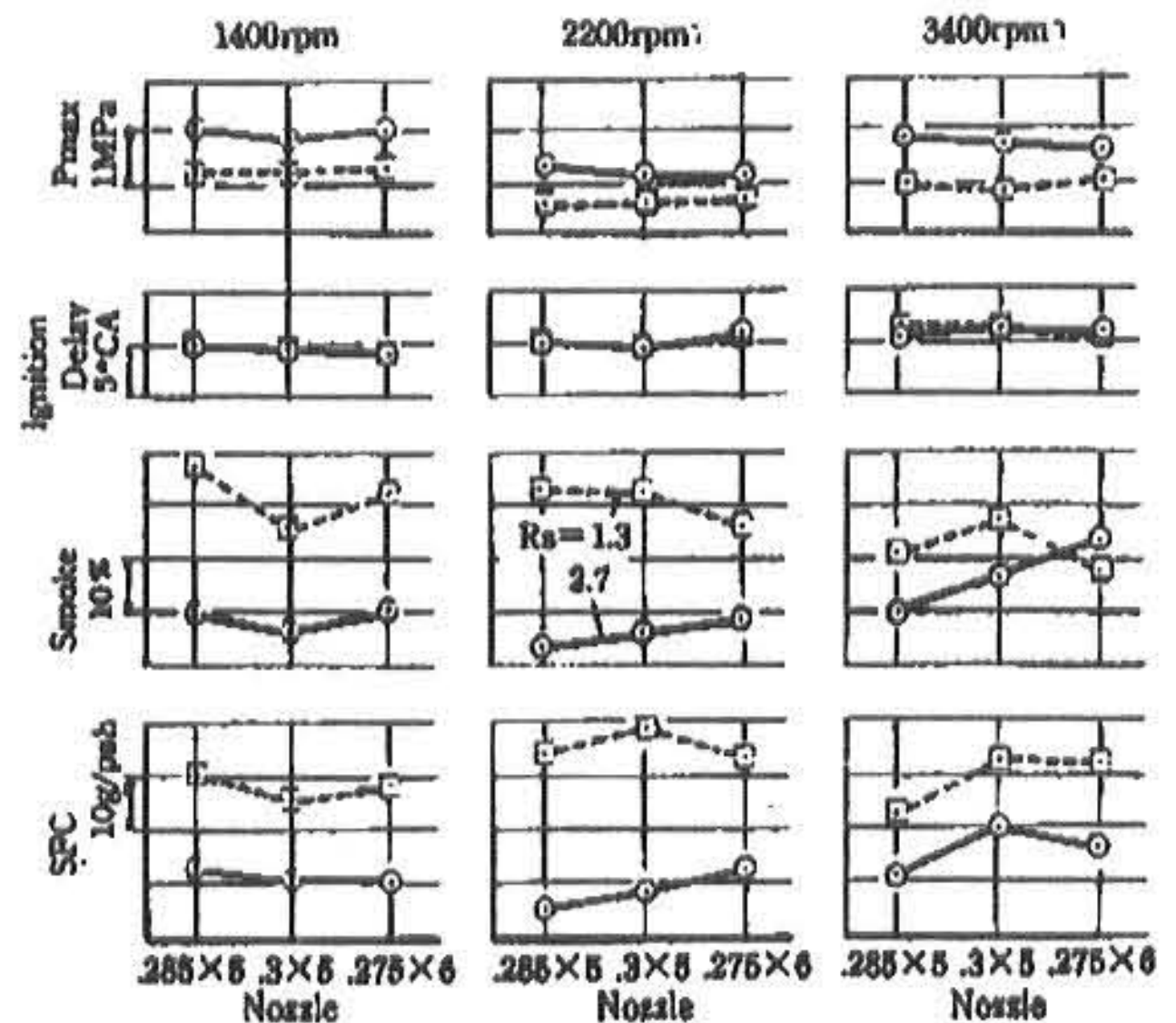


Fig.7 Relationship between nozzle and combustion characteristics



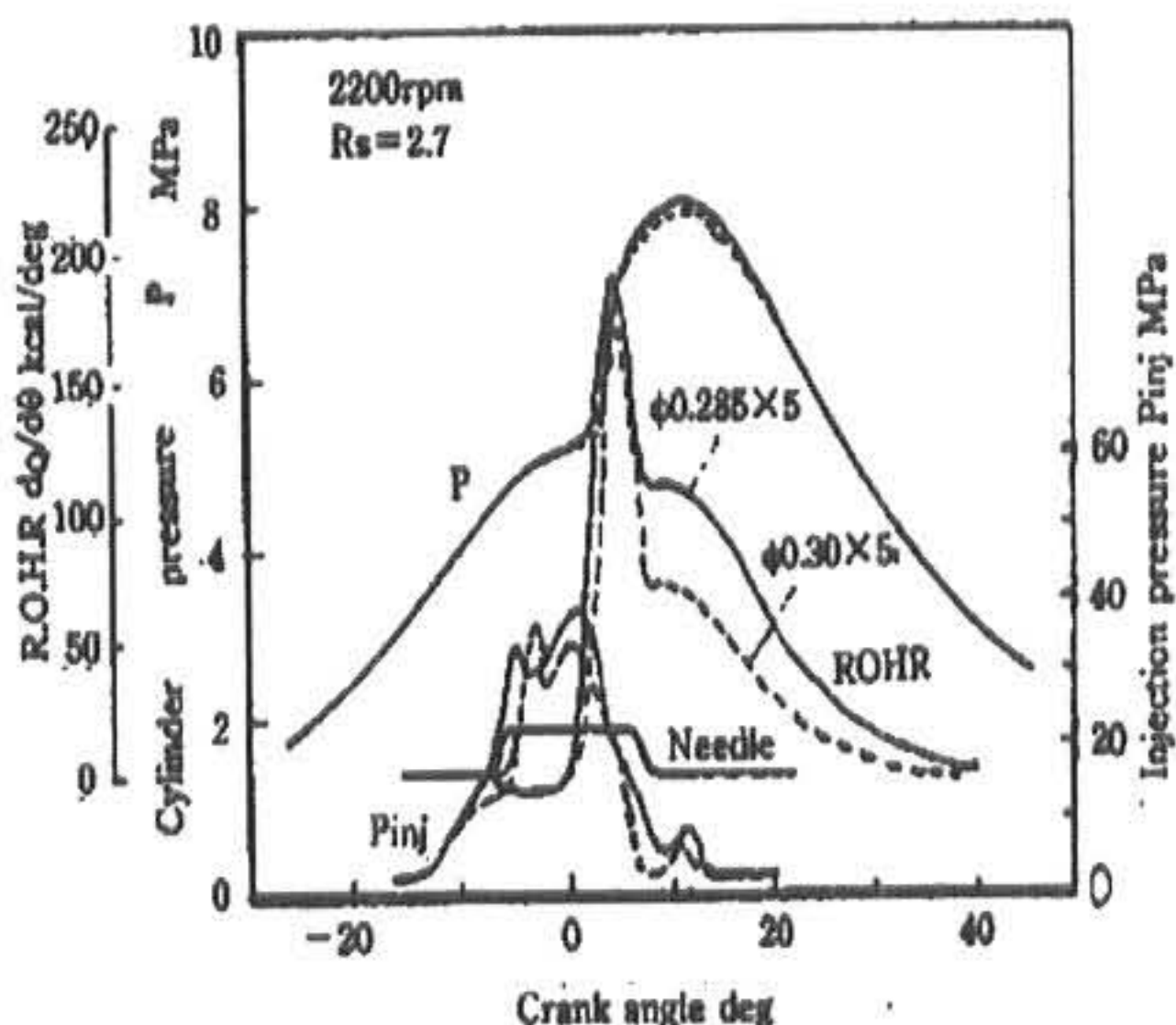


Fig.8 Combustion characteristics curve at swirl ratio 2.7

는 Fig.6의 스월비와 6-Mode 배기 분석 방법의 상관관계에서 스월비 증가와 함께 NOx가 증가하고 CO가 감소하여 Fig.4의 연소 성능 데이터와 일치하는 결과를 나타냄에 따라 스월비의 변화폭이 최적 상태를 중심으로 해서 낮은 스월비 영역에서 실험된 것으로 생각할 수 있다.

### 3.3 분사노즐의 영향

Fig.7은 스월비 1.3과 2.7 하에서 분공경이 다른 3종류의 노즐을 이용하여 연소특성을 비교한 것이다. 저속영역인 1400rpm에서 0.3×5 노즐이 매연과 연료소비율 측면에서 가장 우수하며, 중 고속 영역에서는 0.285×5 노즐이 가장 우수함을 알 수 있다. 또 전 엔진회전수 영역에서 앞의 설명과 마찬가지로 스월비 2.7이 1.3보다 양호한 연소특성을 나타내고 있다. 이는 Fig.8의 연소곡선에서 알 수 있는 바와 같이 스월비 2.7이 초기 연료 분사압의 증가로 초기 열 발생을 상승에 따라 연소 최고 압력이 증대되어 연료소비율 측면에서 좋아졌으며 최고압력의 상승에 따라 실린더 내 가스온도도 상승되어 매연이 저감되고 연비도 좋아지는 효과를 가져 왔다고 사료된다. 또한 3종류의 노즐 모두 동일한 착화 지연 시간을 가짐에도 불구하고 스월비에 따라 연소 최고 압력이 변화하는 것은 스월이 노즐의 분공경에 상관없이 착화 후의 초기 연소기간에 크게 영향을 미친다고 생각할 수 있다.

## 4. 결론

직접분사식 단기통 엔진에서 슈라우드 밸브를 사용하여 스월비를 변화시켜, 이때에 스월비가 기관의 성능 및 연소특성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진 운전 전 영역 하에서 스월비 2.7 부근이 매연과 연비 측면에서 최적의 연소특성을 보여주고 있다.
- 2) 고속 구간에서 스월비 증가와 함께 연소 압력 상승률이 증가되어 실린더 내 최고 연소 압력도 증가한다.
- 3) 스월비 증가에 따라 NOx는 증가하고 CO는 감소한다.
- 4) 전반적으로 흡입저항의 증가로 유량계수 값은 약간 저하하나 슈라우드 밸브를 사용한 스월비 변경 실험이 가능함을 알 수 있다.

## 참고문헌

- 1) Ikegami, M. : Combustion and NOx in a Diesel Engine Combustion and Emission of the Automotive Engine, Sangaido, pp 101-108, (1973)
- 2) Thien, G. : Development Work on Valve Ports of Four Cycle Diesel Engines, Graz, AVL, (1979)
- 3) Partington, G. D. : Port Blowing Rig - Working Method, Ricardo, Dp. 83/687, (1983)
- 4) Shigemori, M., Tsuruoka, S. and Shimada, M. : Development of a Combustion System for a Light Duty D.I. Diesel Engine, SAE Paper 831296, (1983)
- 5) Horlock, J. H. and Winterbone, D. E. : The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engine, (1986)
- 6) Murayama, T. : Engineering of Automobile Engine", Sankaido, pp.99-129, (1997)

(2003us 3월 9일 접수, 2003년 5월 25일 채택)