

스윙 제어 밸브를 적용한 직접분사식 가솔린 엔진의 희박연소 특성

Lean burn Combustion Characteristics of Direct Injection Gasoline Engine with Swirl Control Valve

이 민 호*, 문 학 훈*, 차 경 옥**
Min-ho Lee, Hak-hoon Moon, Kyung-ok Cha

Abstract

The performance characteristics of lean burn system in gasoline engine are mainly affected by the air-fuel mixture in cylinder, gas exchange process of manifold system, exhaust emission of engine, and the electronic engine control system.

In order to obtain the effect of performance factors on the optimum conditions of lean burn engine, this study deal with the behavior of mixture formation, gas flow characteristics of air, flow and evaporation analysis of spray droplet in cylinder, vaporization and burning characteristics of lean mixture in the engine, and the control performance of electronic engine control system. The optimum flow conditions were investigated with the swirl and tumble flows in the combustion chamber with swirl control valve. The performance characteristics and optimum condition of flow field in intake system were analyzed by the investigation of inlet flow of air and combustion stabilization on cylinder.

주요기술용어 : SCV (Swirl control valve, 스윙제어밸브), Direct injection gasoline engine (직접분사 가솔린 엔진), Swirl & Tumble flow (스윙 및 텀블 유동), Impulse swirl meter (임펄스 스윙 메터), Combustion stability (연소 안정성), TPS (Throttle position sensor), MBT (Max. break torque timing)

1. 서 론

현재 가솔린 엔진에 대한 저연비, 저공해를 위해서 희박연소방식이 적극적으로 채용되고 있으나 촉매기술의 미숙으로 lean DeNOx 촉매에 대한 개선의 여지가 많이 남아 있으며, 냉간 시동시의 연비저감 및 HC 배출저감을 위한 연료분무의 미립화, 점화시기 및 엔진 부하 제

어, 밸브 개폐시기의 능동 제어 등을 통한 희박연소 기술은 아직도 개선해야할 많은 문제를 가지고 있다.

직접분사식 엔진연소기술은 희박연소기술에 기반하며, 유해배기물인 HC, CO, NOx 등의 생성을 억제하기 위한 시스템으로서의 특징을 가지고 있다.^(1,2,3)

또한, 희박연소 기관의 성능을 개선하기 위해서는 혼합기에 대한 흡입 유동 과정 및 연소 과정에서 연소 성능을 향상시킬 수 있는 스윙 및 텀블 등의 효과를 적절히 적용할 수 있는

* 명지대학교 대학원 기계공학과

** 명지대학교 기계공학과

구조의 기관이 필요하다. 특히, 스윙과 텀블 유동은 엔진의 체적효율에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라, 연소실 내에서 연료와 공기의 혼합을 빠른 시간에 촉진시켜줌으로써 엔진성능 향상에 중요한 역할을 한다. 특히 직접분사식 가솔린 엔진에서 실린더 내에 흡입하고 있는 공기의 선회유동은 연소과정에서 상당한 효과를 미치고 있다. 이러한 흡입유동은 흡기계, 흡기포트 및 밸브의 형상에 많은 영향을 받고 있기 때문에 밸브와 밸브시트를 통해서 흡입과정 시 최대한 공기를 실린더 내에 충전시킬 수 있도록 체적효율의 증대에 대한 연구가 필요하다.^(4,5)

본 연구에서는 직접분사식 가솔린 기관에 희박 혼합기 연소 시스템에 관한 연구의 일환으로 기관에 공급되는 공기의 스윙 및 텀블유동을 파악하여 희박 연소 한계 및 연소 특성, 희박 연소 기관의 성능 특성 등을 규명하기 위하여 주안점을 두었다. 먼저 정상상태 조건하에서 흡기에 SCV를 설치함으로써 유동특성을 규명하고자 스윙 임펄스 미터 장치를 흡기에 설치하고, SCV의 작동에 따른 유동형태와 강도, 흡입유량 등을 측정하였다. 이 실험을 통하여 얻은 최적 흡기유동 조건으로 직접분사식 가솔린 엔진을 실험하여 흡기유동 조건에 따른 희박연소 및 엔진 성능 특성을 실험하였다.

SCV는 포트의 일부를 막아 포트내 유동을 변화시키는 방법으로, 종류는 흡기계 유동의 형태에 따라 3가지로 나눌 수 있다. 먼저, 포트의 좌우 일부를 막는 스윙강화형 SCV, 포트의 상하 일부를 막는 텀블강화형 SCV, 그리고 두 가지를 결합한 경사텀블형 SCV로 나눌 수 있다.^(6,7,8)

2. 실험 장치 및 방법

2.1 정상유동 실험 장치

정상상태하의 실린더 내 선회유동을 측정하는 방법에는 패들휠 또는 베인의 회전속도로부터 이들이 놓여진 곳의 접선속도를 측정하는 패들휠형의 스윙미터와 실린더 내에 놓여진 하

니컴에 작용하는 토크 즉, 각운동량 플럭스를 직접 측정하는 허니컴형의 스윙 임펄스 미터가 있다.

본 실험에서는 Fig.1과 같은 스윙 임펄스 미터를 사용하여 실험을 하였다. 이 장치는 흡입된 공기가 흡기밸브를 통과하면서 형성된 스윙이나 텀블의 선회류가 일정한 위치에 설치되어 있는 스윙 임펄스 미터의 허니컴 셀에서 소산됨으로써 허니컴의 중심축에 부착되어 있는 막대에 의해 로드셀로 전달된다. 이 로드셀에서 측정된 토크를 가지고 스윙 및 텀블의 강도를 계산하게 된다. 실험장치는 실린더 헤드의 포트와 밸브양정 조정기구를 갖춘 조합체와 모의 실린더 라이너, 선회 유동을 측정하기 위한 스윙 임펄스 미터, 흡입공기량 측정을 위한 유량측정부 (160 CFM Laminar flow meter), 흡입 공기를 발생시키기 위한 송풍기 (최대 0.7 기압, 4ℓ/min 용량 루츠 블로워) 및 송풍기 구동 모터로 구성되어 있다. 여기서 층류 유량계는 층류 형성을 위한 정류역할을 하도록 하였다. Fig.2는 본 실험에 사용된 SCV를 나타낸다.

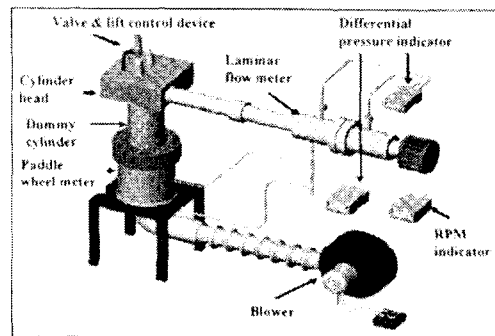


Fig. 1 Experimental apparatus for steady state flow

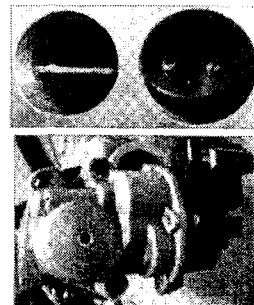


Fig. 2 Swirl control valve for test

2.2 엔진성능 실험 장치

본 연구에 사용된 엔진은 상용 2,000 cc SI 엔진을 DISI 엔진으로 개조하여 사용하였고, 엔진의 전체적인 구성은 Fig. 3에 나타내었으며, 엔진의 제원은 Table 1에 표시하였다. 배기량은 1,975 cc, 4행정 4실린더 DOHC 엔진이다. 압축비는 11.0 : 1이고, 연소실 형상은 펜트루프 타입이다.

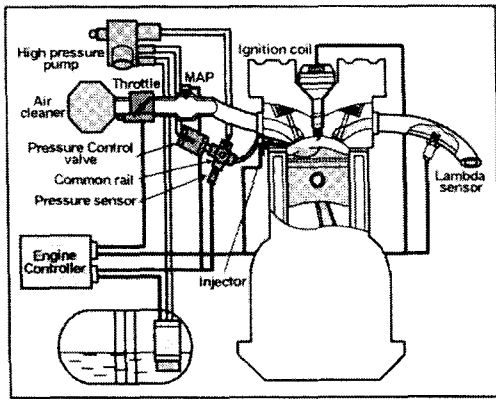


Fig. 3 Schematic diagram of direct injection spark ignition engine

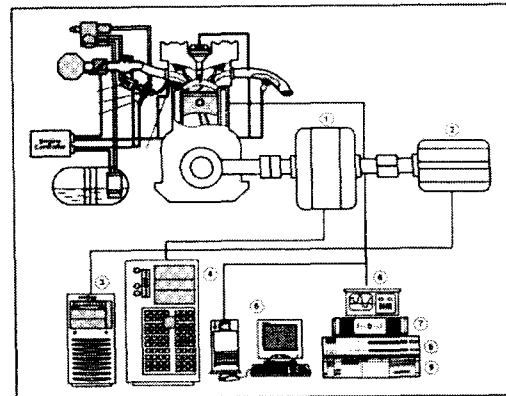
Table 1 Specifications of experimental engine

Engine type	4-Stroke, 4-Cylinder	
Bore * Stroke	82.0 * 93.5 mm	
Displacement	1975 cc	
Valve type	DOHC 4 valve	
Compression ratio	11.0 : 1	
Combustion chamber type	Pent-roof type	
Intake	open	BTDC 18°
	close	ABDC 54°
Exhaust	open	BBDC 47°
	close	ATDC 17°

실험장치의 전체적인 구성 개략도는 Fig. 4와 같다. 엔진 (DI 엔진), 엔진연료공급장치 (고압펌프 (Haskel pump), 압력제어 레귤레이터), 엔진 구동장치 (구동모터 컨트롤러) 및 제어장치, 엔진 연료분사·점화 제어장치 (제어 ECU), 엔진 성능 측정장치 (동력계(130kW Eddy current type) 및 동력계 컨트롤러), 냉각수·엔

진오일 제어장치, 측정 (Lambda meter (ETAS LA4), 배기가스 분석 장치 (Horiba Mexa-554jk), 흡기압력 측정 장치, 연소압력 측정 장치 (Kistler 6117B), 로타리 엔코더 (Omron E6A2-C), 근접센서 (Omron E2EA)) 및 제어 센서 (MAP, TPS, 연료압력, O₂) 등이다.

실험용 DISI 엔진의 크랭크축을 동력계를 직결로 연결하여 부하를 제어하고 토크를 측정하였으며, 반대편의 동력계 축에 제어모터를 장착으로 초기에 엔진을 구동시켜 주게 된다. 스파크 플러그 타입의 압력센서를 이용하여 연소실내 압력을 계측하였으며, 냉각수, TPS, 공기온도 및 유량 센서, 흡기관 절대압력 센서, 광대역 산소센서 등으로 엔진을 제어하기 위하여 설치하고, 엔진 각 부의 상태를 파악하였다. 또한 이러한 센서들로부터 정보를 수집하고 분사시기와 분사량, 점화시기를 조절해 줄 수 있는 컨트롤러를 제작하여 엔진을 제어하였다. 이때 얻어진 데이터는 데이터 취득보드를 통해서 PC에 저장하였다. 한편, 배기관에는 CO, HC, CO₂, O₂ 등의 농도를 측정할 수 있는 배기가스 분석기를 장착하여 배기가스농도를 계측하였다.



① Dynamometer, ② Operating motor, ③ Motor controller, ④ Dynamometer controller, ⑤ Controller & measuring computer, ⑥ Exhaust gas analyzer, ⑦ Lambda meter, ⑧ Intake pressure analyzer, ⑨ Fuel rate measuring device

Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

2.3 실험 방법

먼저 정상상태 조건하에서 유동특성을 규명하고자 스윙 임펄스 미터 장치를 흡기계에 설치하고 SCV의 작동에 따른 유동형태와 강도, 흡입유량 등을 측정하였다.

또한 각각의 엔진 운전조건에 따라 먼저 직접분사식 가솔린 엔진의 기본 엔진 성능 및 운전 특성, 연소 특성, 배출가스 특성을 파악한 후에 SCV의 형상에 따른 엔진 성능의 변화를 비교·분석하였다. 엔진 운전 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental condition for engine test

Engine speed	800 rpm	1000 rpm
Spark timing	MBT - 15°, 20°BTDC	
Injection position	25°BTDC ~ 170°BTDC (10°BTDC 간격)	
Lambda value (Injection rate)	Variable (rich A/F (10.3:1) ~ lean limit A/F)	
Load	1/4 Load	
SCV opening angle	0 / 90°	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔진 흡기계 정상유동

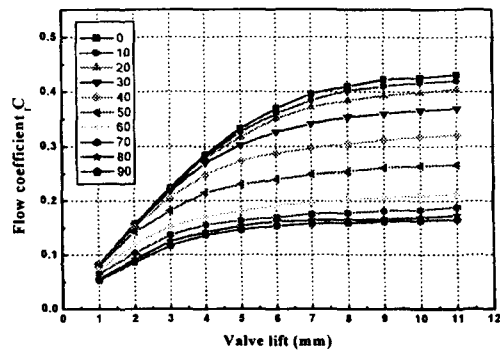
3.1.1 유량 계수 (Flow coefficient)

Fig. 5는 스윙 임펄스 미터를 사용하여 측정 한 유량계수이다. Fig. 5 (a)는 0 ~ 90°의 정방향으로 밸브가 작동하는 것이고, Fig. 5 (b)는 -90 ~ -30°의 역방향으로 밸브가 작동하는 것을 나타낸 것이다.

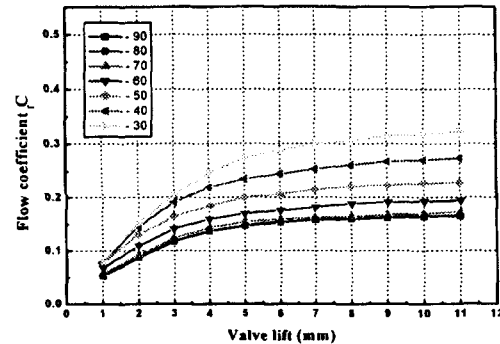
유량계수 값은 0.5 이하의 값을 보여주고 있다. 밸브 양정 11 mm의 경우 SCV 0°와 SCV 90°의 차이비는 약 38.3%이다. 이와 같이 유량계수는 흡기포트 유로의 단면적에 비례하며 이는 또한 공기 유입량과 비례함을 알 수 있다. 나선형 포트의 경우는 나선형의 유로가 유동의 진행방향을 가로막는 역할을 하기 때문에 유량이 감소되고, 동시에 압력손실은 증가하기 때

문에 유량계수 값이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 본 실험에서는 parallel 포트에 SCV를 설치하였기 때문에 유량계수의 차이에 대한 비는 조금더 줄어들었음을 알 수 있다.

그리고 SCV 밸브의 정방향과 역방향에 따른 유량계수의 변화 차이는 거의 없음을 알 수 있다.



(a) + direction (0° ~ 90°)



(b) - direction (-90° ~ -30°)

Fig. 5 Distributions of C_f with valve lift for SCV opening angle variation

3.1.2 스윙 계수 (Swirl coefficient)

Fig. 6은 실험에서 측정한 스윙 계수이다. Fig. 6 (a)는 0 ~ 90°의 정방향으로 밸브가 작동하는 것이고, Fig. 6 (b)는 -90 ~ -30°의 역방향으로 밸브가 작동하는 것을 나타낸 것이다.

(a)의 경우 60°, 70°에서 스윙계수 값이 크게 증가하는데 이러한 이유는 토크의 변화율이 질량유량의 변화율보다 크기 때문이다. 또한, (b)의 경우에는 -40°, -50°에서 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. SCV의 열림에 의한 전체적인 경향은 비슷하지만, 거의 비례적으로 작용

함을 알 수 있다.

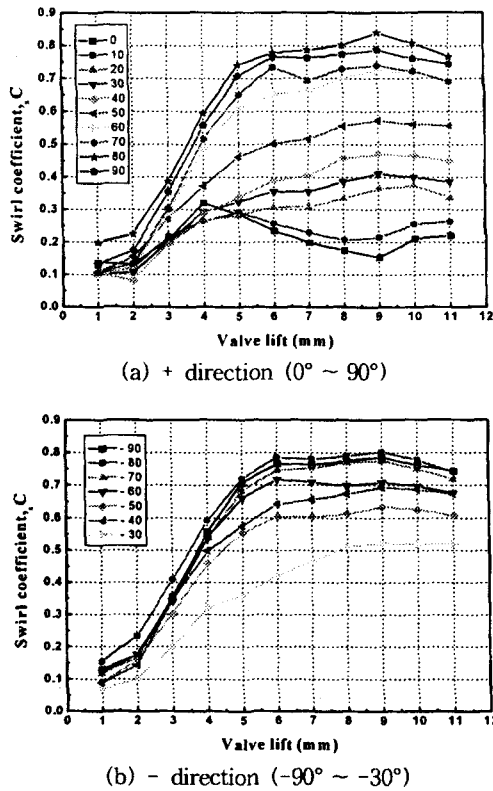


Fig. 6 Distributions of C_s with valve lift for SCV opening angle variation

3.1.3 평균유량계수 (Mean flow coefficient)

평균유량계수는 모든 밸브양정에 대한 유량계수의 평균값이다.

Fig. 7은 실험하였을 때 얻은 평균유량계수이다. x축의 번호는 SCV의 열림각도를 나타내고 있다. 값들을 살펴보면 정방향(+)의 경우가 역방향(-)의 경우보다 큰 값을 가지고 있다. 여기에서 역방향(-)이란 정상유동장치에서 SCV의 개구량을 조절하는 조절판이 SCV의 입구쪽으로부터 포트 높이의 중심보다 낮게되는 비스듬한 형상을 보여줄 때이다.

3.1.4 스월비 (Swirl ratio)

스월비는 흡기포트가 닫힌 순간의 스월, 텀블 생성 능력을 의미하는 변수이다. Fig. 8은 실험에 의해서 얻어진 스월비이다. 평균유량계

수와는 반대의 경향을 가지는데, 정방향(+)의 경우가 역방향(-) 보다 작은 값을 가지게 된다. 평균유량계수와 스월비가 반대의 경향을 가지게 되는 이유는 유량계수가 감소될수록 개구가 막히게 되어 스월이 증가하기 때문으로 사료된다.

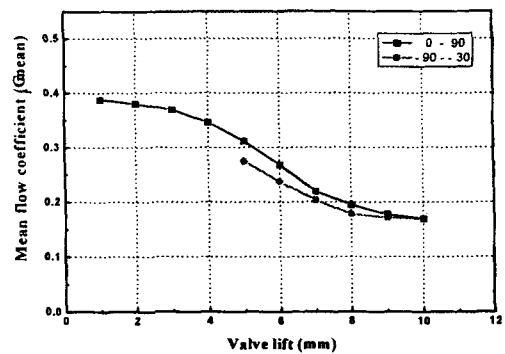


Fig. 7 Distributions of mean C_f with valve lift for SCV opening angle variation

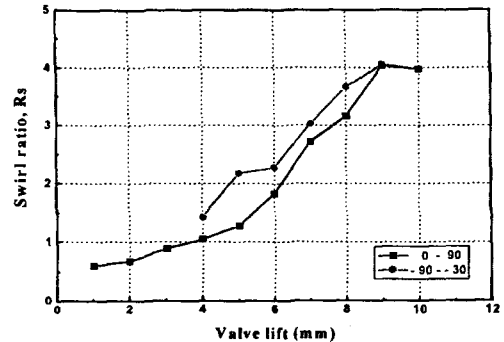
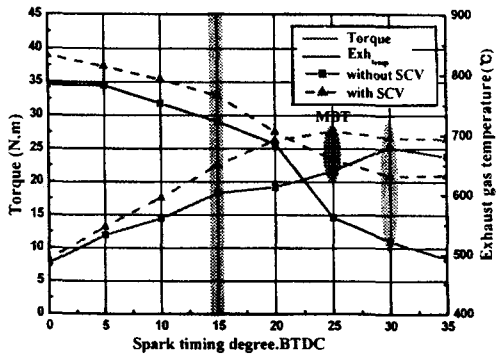


Fig. 8 Distributions of R_s with valve lift for SCV opening angle variation

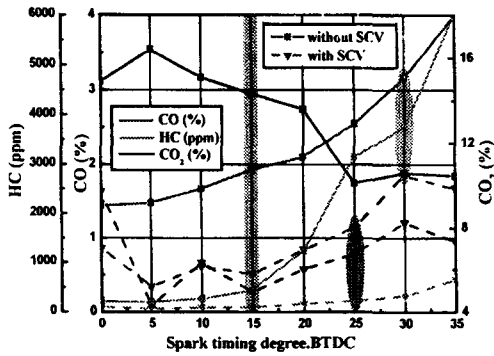
3.2 엔진 성능

Fig. 9는 SCV를 적용하였을 때 점화시기에 따른 DISI 엔진의 토크 및 배기 배출가스, 연소 안정성을 나타내고 있다. 여기서 연료분사 시기는 BTDC 120°이고, 공연비는 이론 공연비 (=14.7), SCV 닫힘각은 0°와 90°로 나누어서 실험을 수행하였다.

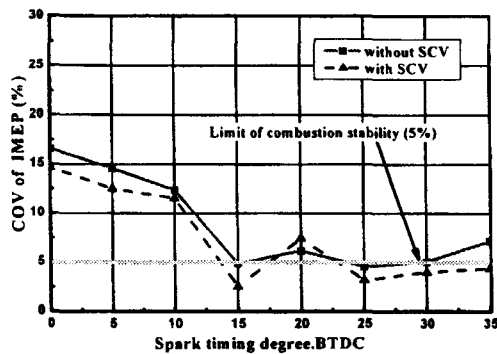
이 실험에서 SCV를 0°로 설정하였을 때 MBT 값은 BTDC 30°이다. 이 값을 SCV를 90°로 설정하였을 때 값보다 5°정도 증가된 값



(a) Torque and exhaust gas temperature



(b) Exhaust emission (CO, HC, CO₂)



(c) Combustion stability

Fig. 9 The effect of spark timing on combustion (SCV application)

을 가지고 있다. 이러한 경향은 공연비의 증가에 따라서 혼합기가 희박해지거나, 강한 스웰 및 텀블의 유동에 의하여 연소 속도가 빨라지기 때문에 MBT 점에 변화가 생기고, 이러한 값을 조절하여 점화시기를 지연시킬 수 있다. 또한, 토크 값을 비교하여 보면, SCV를 90°로 설정하였을 경우가 토크가 증가하였고, 배출가스의 온도도 상승하였다.

그러나, 배출가스를 비교하여 보면 HC, CO, CO₂가 모두 감소되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. SCV 0°일때의 CO₂를 제외하고는 점화시기의 증가에 의하여 배출가스 값들이 급격히 상승으로 나타나고 있다.

연소안정성 면에 있어서 살펴보면 SCV를 90°로 설정함으로써 점화시기 증가에 따라서 전체적인 부분에서 연소안정성이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

이와같이 연소안정성은 만족하는 반면에 BTDC 25°이상에서 배기 배출가스는 더욱 급격히 증가하고 있는 것이다.

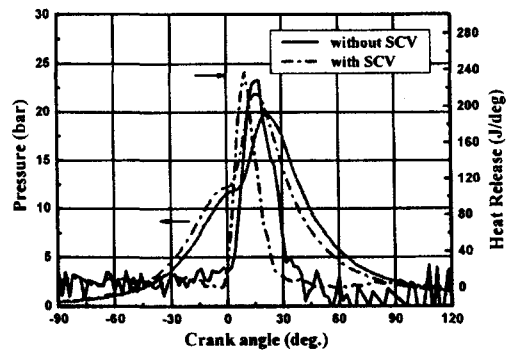


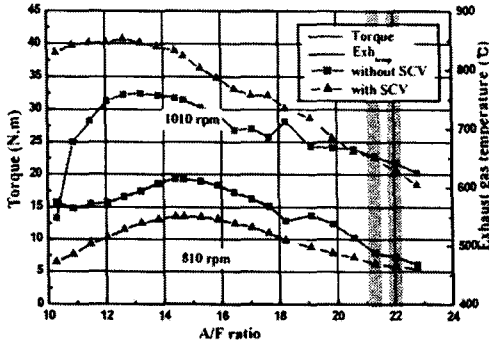
Fig. 10 The pressure history and heat release characteristics according to SCV application

Fig. 10은 SCV 달침각에 따른 연소압력 및 열 발생율을 나타내고 있다. 이 결과는 SCV의 영향을 잘 나타내는 데이터이다. SCV의 달침각을 90°로 설정한 경우가 연소압력 및 열 발생율이 증가하고 있다. 이러한 연소압력 및 열 발생율의 증가는 엔진의 토크 증가와 관련되어 있는 것을 알 수 있다.

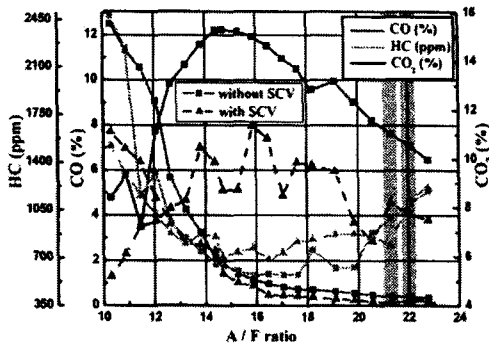
Fig. 11은 SCV 적용하였을 때 엔진의 공연비 변화에 따른 엔진 토크, 배기 배출가스, 연소 안정성을 나타내고 있다. 실험조건은 점화시기가 BTDC 15°이고, 연료분사시기는 BTDC 80°이다. 엔진 공연비는 농후 공연비 (10.32:1)에서 희박한계 공연비까지 실험을 수행하였다.

결과를 보면 연소 안정성에 있어서 희박연소 한계 공연비는 SCV 0°일 때 21.2:1, SCV 90°일 때 22.1:1이다. SCV의 영향으로 희박연소 한계 공연비가 약간 증가하고 있는 것을 알 수

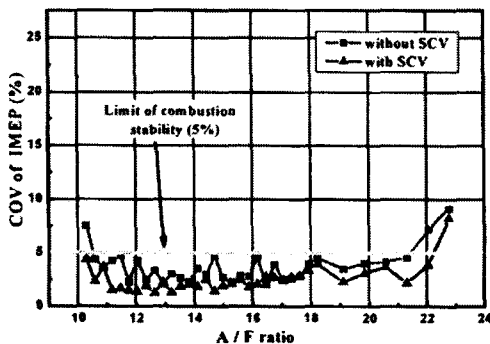
있지만, 전체적인 토크 값도 감소하여 나타나고 있다.



(a) Torque and exhaust gas temperature



(b) Exhaust emission (CO, HC, CO₂)



(c) Combustion stability

Fig. 11 The effect of A/F ratio on combustion (SCV application)

배기 배출가스를 살펴보면, 전체적으로 CO, CO₂는 SCV 단침각을 설정함으로써 감소하고 있는데 반면 HC의 경우는 오히려 증가하고 있다. 이러한 결과는 점화시기 변화에 따른 결과와는 다른 경향이다. CO의 경우 모두 희박영역

으로 갈수록 급격히 감소하고 있다. HC의 경우는 희박연소 공연비가 16 ~ 18까지는 감소하다가 공연비의 증가로 다시 증가하고 있는 것을 알 수 있지만, 이와는 반대로 CO₂의 경우는 14 ~ 16까지는 증가하다가 감소를 하고 있다.

연소 안정성에 있어서는 앞의 경우와 같은 결과를 보이고 있다. SCV 90°를 설정하였을 때가 더욱 안정적이고, 희박한계를 크게 증가시킬 수 있는 반면에 SCV 0°일 때는 희박연소의 한계 공연비가 감소로 나타낸다.

위의 결과에 따르면, SCV에 의한 스윙 및 텀블 유동은 연소실내 연소압력을 증가시키고 있고, 이러한 연소압력은 토크의 증가와 함께 연소 안정성 및 희박연소의 한계 공연비를 증가시키고 있고 있다. 또한 희박연소의 한계 공연비가 증가하므로써 배기 배출물도 상당히 감소시킬 수 있다. 이러한 SCV를 엔진에 적용함으로써 여러 부분에서 좋은 영향을 얻을 수 있다고 생각된다.

4. 결론

본 연구는 직접분사식 가솔린 기관의 희박 혼합기 연소 시스템에 관한 연구의 일환으로 기관에 공급되는 공기의 스윙 및 텀블유동을 파악하여 희박 연소 한계 및 연소 특성, 희박 연소 기관의 성능 특성 등을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) SCV의 방향이 역방향(-)의 경우에 유량계수와 평균유량계수의 값이 다소 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 SCV의 개도를 막는 평판의 기울기가 유동의 저항역할을 하기 때문이다. 또한, 최대밸브 양정에서 스윙 계수 값의 차이가 크게 나타나는 영역이 있는데 이는 토크의 변화율이 질량유량의 변화율보다 크기 때문이다.

(2) 스윙비는 평균유량계수와 반비례 관계를 가지고 있음을 알 수 있는데, 이는 유량계수가 감소될수록 개구가 막히게 되며 그 결과 스윙이 증가하기 때문이다.

(3) SCV 단침각 0°, 90°의 적용에 따라 MBT 점은 BTDC 5°정도의 차이를 보이고 있다. 이

러한 이유는 강한 스윙 및 텀블 유동에 의하여 연소 속도가 빨라지기 때문이고, 이러한 증가 값에 의하여 점화시기를 적절히 지연시킬 수 있을 것이다. 연소 안정성에 있어서 희박연소 한계 공연비는 SCV를 적용함으로써 21.2:1에서 22.1:1로 증가를 하였다.

(4) SCV에 의한 스윙 및 텀블 유동은 연소실 내 연소압력, 토크, 연소 안정성, 희박연소 한계 공연비 등에 많은 영향을 주고 있으며, 배기 배출물에 있어서도 좋은 결과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) C. R. Ferguson, "Internal Combustion Engines", Applied Thermosciences
- 2) Patrick Hupperich et al., "Direct Injection Gasoline Engines-Combustion and Design", SAE 1999-01-0170, 1999
- 3) Ulrich Spicher et al., "Gasoline Direct - injection (GDI) Engines Development Potentialities", SAE 1999-01-2938, 1999
- 4) M. Pontoppidan et al., "Experimental and Numerical Approach to Injection and Ignition Optimization of Lean GDI - ombustion Behavior", SAE 1999-01-0173, 1999
- 5) Toshiaki Kitagawa et al., "Characteristics of combustion in stratified mixture", SAE 2003-01-1808, 2003
- 6) Alain Floch et al., "Comparison of the Effects of Intake - Generated Swirl and Tumble on Turbulence Characteristics in a 4-Valve Engine", SAE 952457, 1995
- 7) Yufeng Li et al., "Effect of the Swirl Control Valve on the In-Cylinder Air Motion in a Four - Valve SI engine, SAE 2000-01-2058, 2000
- 8) Jianwen Yi et al., "Combustion Improvement of a Light Stratified - Charge Direct Injection Engine", SAE 2004-01-0546, 2004

Appendix

1. 유량계수 (Flow coefficient : C_f)

밸브시트 면적 A 를 기준면적으로 하는 유동 저항계수로서 다음과 같이 정의된다.

$$C_f = \frac{Q}{AV_0} \quad (1)$$

2. 평균유량계수

(Mean flow coefficient : $C_{f(mean)}$)

흡기밸브의 유량계수 C_f 는 밸브양정 변화에 따라 각각 다른 값을 가지므로 흡입행정을 대표로 하는 유량계수를 정의할 필요가 있다. 따라서 밸브양정에 따른 C_f 곡선의 평균에 해당하는 값을 평균유량계수 $C_{f(mean)}$ 로 정의하며, 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$C_{f(mean)} = \frac{\int_{a_{IVC}}^{a_{IVC}^{max}} C_f da}{a_{IVC}^{max} - a_{IVC}} = \frac{\int_{a_1}^{a_2} C_f da}{a_2 - a_1} \quad (2)$$

여기서, a_1 은 흡기밸브 열림각을, a_2 는 흡기밸브 닫힘각을 나타내며, $a_2 - a_1$ 은 da 로서 흡기밸브 작동각을 의미한다. 이 평균유량계수는 작동엔진에서 흡입행정 전반에 걸친 포트의 흡입능력을 평가하는데 이용된다.

3. 스윙 계수 (C_s)

정상유동실험에서 얻을 수 있는 스윙 계수는 실린더 내에 형성된 유동장의 접선속도에 대한 축방향 속도의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$C_s = \frac{2 \times \text{tangential velocity}}{\text{velocity head}} = \frac{2rw}{V_0} = \frac{Bw}{V_0} \quad (3)$$

이 식은 베인형 (vane type) 및 패들휠형 (paddle wheel type)의 스윙미터의 결과값을 해석하는데 주로 이용된다. 식 (3)의 접선속도는 실린더 축으로부터 거리 r 만큼 떨어진 곳에 위치하는 베인 또는 패들 휠에 작용하는 평균 접선속도로서 실험적으로 결정된 값이다. 따라서 이러한 접선속도는 이들의 기하학적 형상 및 설치위치에 많은 영향을 받게 된다.

정상유동 실험장치의 실린더 내에서 유동은 일정한 각속도 w 의 정상유동이므로 다음 식과

같이 각운동량 플럭스 (angular momentum flux) G 가 존재한다. 일정한 각속도 w_r 을 갖고 회전유동을 하는 원형 실린더의 각운동량은 Iw_r 이므로 각운동량의 시간변화율 즉, 각운동량 플럭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{d}{dt}(Iw_r) = Iw_t + I\dot{w}_r \quad (4)$$

일정한 각속도를 갖고 정상유동을 하는 경우 w_r 는 일정한 값을 가지므로 w_r 의 시간변화율 $\dot{w}_r=0$ 이고, 강제회전유동을 하는 원형실린더의 관성모멘트는 $I = \frac{mr^2}{2} = \frac{mB^2}{8}$ 이므로 관성모멘트의 시간변화율은 다음과 같다.

$$I = \frac{mB^2}{8} \quad (5)$$

이 식을 식 (4)에 대입하면

$$G = \frac{m w_r B^2}{8} \quad (6)$$

베인형 스윙메터와 임펄스 스윙메터를 이용한 측정결과를 서로 비교하기 위하여 임펄스 스윙메터에 측정된 각운동량 플럭스 즉, 토크 값을 무차원 리그스윙 N ,로 변화하는 것이 편리하다. 따라서 식 (6)을 식 (3)의 분자항으로 정리하면

$$2 \times \text{tangential velocity} = Bw_r = \frac{8G}{mB} \quad (7)$$

이 된다. 식 (7)을 식 (3)의 분자항에 대입하여 정리하면, 정상유동 실험으로부터 얻을 수 있는 스윙 계수를 식 (3)과 함께 나타낼 수 있다.

$$C_s = \frac{Bw_r}{V_o} = \frac{8G}{mBV_o} \quad (8)$$

식 (8)에서 좌변의 w_r 는 베인형 스윙메터로 측정되며, 강제회전유동에 상당하는 상당 각속도 (equivalent angular velocity)이다. 또한 우변의 G 는 스윙 임펄스 메터로부터 측정된 각운동량 플럭스 즉, 스윙 임펄스 메터의 허니콤 (honeycomb)에 작용하는 회전토크를 측정함으로써 직접 계산된다.

4. 스윙비 (Swirl ratio : R_s)

Ricardo에서 개발한 선회비의 계산식은 흡기 밸브가 열리기 시작해서 닫힐때까지 유입되는 흡입공기의 운동량 총합방법 (momentum sum

mation method)으로 계산되며, 실험시 가정조건과 계산과정은 다음과 같다.

① 엔진 및 정상유동실험장치 (steady state flow rig)에서 포트를 통과하는 유동은 비압축성이며, 단열과정이다.

② 포트는 실험장치의 정상유동상태와 엔진이 실제 작동하는 비정상유동상태에서 서로 동일한 유동특성 (C_s 및 N_s)을 갖는다.

③ 엔진 실린더 내 또는 모의 (dummy) 실린더 속에는 강제회전운동 (forced vortex)이 존재한다.

④ 흡입공기가 포트를 지나는 동안의 압력수두 ΔP 는 흡입기간동안 일정하다.

⑤ 각운동량이 보존되므로 포트표면의 마찰 저항은 선회유동에 영향을 미치지 않는다.

⑥ 체적효율은 100%이다.

⑦ 포트유동은 흡기밸브 열림시기 (IVO)와 닫힘시기 (IVC) 사이에서 발생하고, 유량은 밸브양정에 따라 의존된다.

흡입하는 동안 흡입포트에 의하여 발생한 각운동량의 총플럭스 (total flux)에 해당하는 선회비 R_s 는 다음과 같이 정의한다.

$$R_s = \frac{\text{charge angular velocity}}{\text{engine angular velocity}} = \frac{w_c}{w_e} \quad (9)$$