

SCV 가솔린 엔진의 운전조건에 따른 희박연소 특성

최수진* · 전충환** · 장영준**
(1999년 2월 13일 접수)

Lean Combustion Characteristics in a S.I Engine with SCV by Operating Conditions

Su-Jin Choi, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

Key Words: Lean Combustion(희박연소), Swirl Control Valve(스윙 제어밸브), Fuel Injection Timing (연료분사시기), Spark Timing(점화시기)

Abstract

Lean combustion in a SI engine is one of the best solution for the improvement of fuel economy and reduction of pollutant emission. In order to access a lean combustion engine, stable combustion at lean A/F ratio is needed. In this paper, the effect of fuel injection timing on lean misfire limit has been investigated in an MPI engine. To investigate the interaction of injection timing and intake flow characteristics, three different swirl generating SCV(swirl control valve) configurations were considered, and investigated their effects on lean misfire limit and torque at full load operation. Also the effects of spark timing on lean combustion has been investigated. Lean combustion has been examined and the results are reported in this paper. SCV B has been developed to satisfy the requirements of sufficient swirl generation to improve lean combustion and stable performance. It is found that injection timing, spark timing and intake air motion govern the stable lean combustion.

1. 서론

최근 자동차용 가솔린 엔진에 관한 연구는 고효율, 고출력의 달성과 연료경제성 측면에서의 저연비 실현과 환경문제에 대처하기 위한 유해 배출물 저감에 많은 노력을 기울이고 있다. 더구나 강화된 배기가스규제와 더불어 에너지 효율성을 높이기 위한 연비규제가 도입되고 있어 배기가스를 감소시키면서 연비를 증가시키는 연구가 집중되고 있다.^(1~3)

가솔린엔진에서의 희박연소는 배기가스 저감과 연료 경제성을 증대시키는 가장 좋은 방법이나 연소의 불안정으로 인해 엔진 작동이 매우 어렵고 연소속도가 느려져 연료소비가 오히려 증가하

기 쉽고, 연소의 사이클간 변동이 심해져 토크의 변동을 유발하는 등의 문제점이 있다.

Matsushita 등⁽⁴⁾은 희박연소 시스템에서 높은 스윙(swirl)을 얻기 위해 스윙제어밸브(swirl control valve, 이하 SCV라 표기함)를 부착한 헬리컬 포트(helical port)를 이용하고, 연료분사시기와의 관계를 파악하여 연료의 동시분사와 순차분사의 영향을 연구하였으며, 또한 NOx를 분석하여 배기배출물의 상관관계도 조사하였다. 조규상 등⁽⁵⁾은 가솔린기관의 연료분사 시기가 기관성능에 미치는 영향에 관해 연구하였다. 연료를 흡입행정중에 분사를 할 경우에는 출력이 떨어지고 실린더내 최고압력값도 낮아지고 유해 배기배출량도 증가한다는 결론을 내렸다. 그러나, 임인용 등^(6,7)은 단기통 엔진에서 몇가지의 포트 형상을 바꾸어가며 연료분사시기와 희박연소한계와의 관계를 규명한 결과, 성층화를 통해 희박한계를 넓히기 위해서는 와류뿐만 아니라 적절한 연료분사시기의 조절이 필요하다는 것과 연료분사는 흡입

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : changyj@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

행정중에 실시되어야 엔진의 회박연소한계에 영향을 줄 수 있다는 결론을 내렸다.

이상으로부터 본 연구에서는 회박연소의 문제점을 해결하기 위하여 정상유동실험장치를 이용하여 SCV를 장착한 경우 실린더 내 유동특성을 파악하고, 흡입유동 특성과 연료분사시기 및 점화시기의 변화에 따른 회박한계와 출력과의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 유량 및 텀블강도(tumble intensity)와 스월강도(swirl intensity) 등 정상상태 유동 특성을 측정하기 위한 실험장치의 구성도이다. 흡입공기를 도입하기 위하여 최대 1.2기압, 10 m³/min의 루츠 블로워(roots blower)를 사용하였고, 소음과 맥동을 방지하기 위하여 소음기(silencer)와 서지 탱크(surge tank)를 사용하였다. 그리고 흡입공기량을 측정하기 위하여 층류 유량계(laminar flow meter)를 설치하여, 압력값을 1-1000 mmH₂O 범위의 마이크로 마노미터(micro manometer)로 측정하였다. 본 논문은 포트 전후에 일정한 압력차를 유지하는 일정차압방식을 이용하여 실험하였다.

패들휠(paddle wheel)의 베인(vane)은 AVL사의 기준에 의해 계산하여 제작하였고, 베인의 재질은 알루미늄을 사용하였다.⁽⁶⁾ 그리고 유동강도를 측정하기 위하여 스트로보스코프(stroboscope)를 이용하여 패들휠의 회전수를 측정하였다.

실험에 사용된 SCV는 흡기매니폴드에 장착하였으며, 그 위치와 형상을 Fig. 2에 보이고 있고, SCV A, B, C 각각의 개구율은 90, 80, 75%이다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 엔진성능 테스트를 위한 실험장치의 구성도이다. 실험에 사용된 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

상용 SI엔진의 크랭크축에 동력계(eddy current type)를 직결하여 부하를 제어하고, 토크를 측정하였으며 압력센서(model C21265-SP, OPTRAND)를 통해 연소실내 압력을 취득하였고, 광역산소센서(wide band O₂ sensor, Bosch)를 이용하여 공연비를 측정하였다. 또한, 냉각수, 스톱포지션 센서, 공기온도 및 유량, 흡기관 절대압력 등을 측정하기 위한 각종 센서들을 부착하여 엔진 각 부의 상태를 파악하였다. 이러한 센서들로부터 정

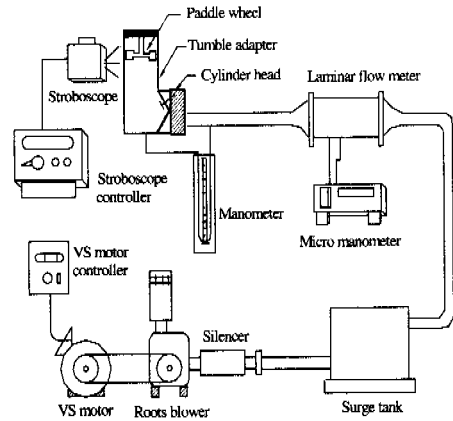


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

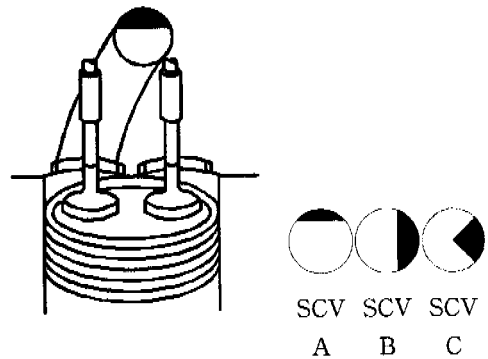


Fig. 2 Locations and configurations of SCV

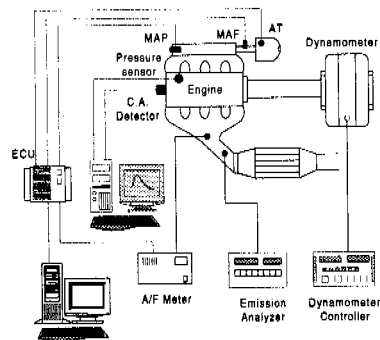


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of experimental engine

Engine type	In-line 4 cylinder, SOHC(2-valve)		
Bore×Stroke (mm)	80.60×88.00		
Displacement (cc)	1796		
Compression ratio	8.9		
Firing order	1-3-4-2		
Valve timing (C.A.)	Intake	Open	BTDC 19°
		Close	ABDC 57°
	Exhaust	Open	BFDC 57°
		Close	ATDC 19°
Idle speed (rpm)	750±100		
Fuel injection type	MPI		

보를 수집하고 분사시기, 점화시기와 분사량을 조절해 줄 수 있는 프로그램 가능한 전자제어장치(M8, MOTEC)를 사용하여 엔진을 제어하였다. 취득한 데이터는 데이터 취득 보드(DT2821)를 통해 PC에 저장된다.

실험은 운전조건에 따라 기준엔진과 SCV를 부착한 경우의 성능을 파악하였고, SCV의 형상을 변화시켰을 때, 엔진 성능의 변화를 비교·분석하였다.

2.2 실험방법

실험은 전부하, 정속모드 상태에서 실시하여 부하의 변동을 관찰하였다. 엔진을 충분히 예열시켜 냉각수온이 일정온도(79±1℃)가 되었을 때, 전 사이클에 걸쳐 연료 분사시기를 변화시키며 성능 인자들의 변화를 측정하였다. 본 연구에서의 분사시기는 분사시작 시점을 기준으로 하였다. 흡입되는 공기유량을 고정시키고, 각각의 분사시기에 대해 연료의 양을 서서히 줄여나가면서 희박연소한계 부근에 도달하면 연소불안정에 의한 엔진의 사이클 변동과 부분연소의 영향으로 엔진의 토크에 변화가 생긴다. 본 연구에서는 토크의 변동이 ±3% 이상이 될 때의 공연비를 희박연소한계로 정의하였다. 이 희박한계 이상이 될 경우에는 점화의 실패나 부분연소 등과 같은 현상이 엔진에 교란을 주어 사이클변동이 심하게 되어 엔진이 불안정한 상태로 운전되기 때문이다. 연소실내의 연소압력은 압력센서를 1번 실린

Table 2 Experimental conditions

Engine type	Conv.	SCV A	SCV B	SCV C
Open ratio (%)	100	90	80	75
Engine speed	2500 rpm			
Injection timing	Variable			
Spark timing	bTDC 23° MBT			
A/F ratio	Variable			
LOAD	Full load			

더에 장착하여 50사이클분의 압력을 취득하고, PC에 저장하여 압력 사이클변동과 평균압력을 구하였다.

Table 2는 본 연구에서 설정한 실험조건을 나타내고 있다. 실험은 모두 2500rpm, 전부하 조건에서 행하였고, SCV형상에 따라 분사시기 및 점화시기를 변화시켜가면서 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 SCV형상에 따른 정상유동 특성

먼저 각 SCV에 대하여 정상유동장치^(8,9)에서 행한 정상유동실험 결과를 나타내고 있다. Fig. 4는 밸브리프트(valve lift)에 따른 유량계수(flow coefficient)를 보이고 있다. SCV A는 상용엔진에 비해 크게 유량계수가 감소하지 않고 있지만, SCV B, C는 밸브리프트 7, 8 부근에서 크게 떨어지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5와 6은 각각 무차원 스월(non-dimensional rig swirl, NRS)과 무차원 텀블(non-dimensional rig tumble, NRT)의 강도를 나타낸 것이다. 무차원 스월의 절대값은 SCV를 장착함으로써 전체적으로 강하게 나오고 있고, 특히 SCV B와 C에서 상당히 강하게 나오고 있음을 알 수 있다. 무차원 텀블의 경우 SCV장착에 따라 전반적으로 감소하고 있으며 A, B, C의 순서로 무차원 텀블값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이상의 무차원스월과 텀블값을 이용하여 유동각도(flow angle, θ_F)를 구한 것을 Fig. 7에 나타내었다. 유동각도는 무차원텀블과 무차원스월의 비로써 아래의 식으로 정의된다.

$$\theta_F = \tan^{-1} \left(\frac{NRT}{NRS} \right) \quad (1)$$

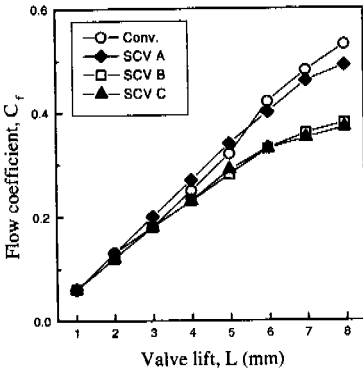


Fig. 4 Effects of SCV configuration on flow coefficient

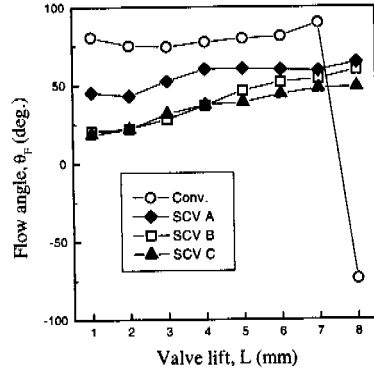


Fig. 7 Effects of SCV configuration on flow angle

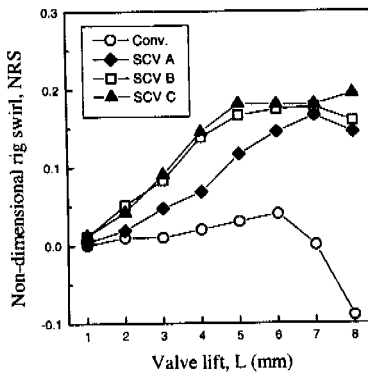


Fig. 5 Effects of SCV configuration on non-dimensional rig swirl

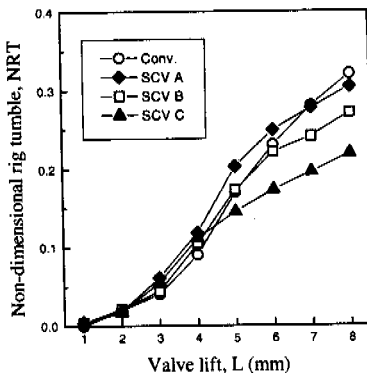


Fig. 6 Effects of SCV configuration on non-dimensional rig tumble

본 정상유동 실험 결과 SCV를 장착하지 않은 기관에서 유동각도가 약 80° 부근에 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나, SCV를 장착한 경우 스웰강도가 강해짐으로써 유동각도가 점점 줄어들어 밸브리프트에 따라 20~65° 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다.

3.2 회박한계와 출력 특성

Fig. 8은 각각의 SCV 형상에 따른 회박한계를 분사시기 변화에 따라 나타낸 그림이다. 점화시기를 23° bTDC로 고정된 상태로 회박한계를 조사하였다. SCV B의 회박한계가 전반적으로 다른 SCV형상에 비해 높게 나타났다. SCV B와 SCV C는 개구율과 스웰비가 비슷하나 SCV C는 분사된 연료가 SCV의 중양에 충돌함으로써 벽면부착과 함께 충돌에 의한 무화 등에 의해 성층화보다는 어느 정도 균일한 회박혼합기가 형성되지만 유동강화효과에 의해 기준엔진보다는 회박한계가 늘어난 것으로 생각한다. 그리고 SCV A는 개구율이 다른 형상들에 비해 커서 유량계수는 기준엔진보다 떨어지지 않으나 스웰 강도가 다른 형상들에 비해 낮아 유동강화의 효과가 약해 SCV B에 비해 회박한계가 낮게 나타나고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 점화시기가 23° bTDC인 경우 각각의 SCV 형상에 따른 회박한계점에서의 출력을 나타내었다. SCV A는 SCV B에 비해 상대적으로 공연비가 농후한 조건이므로 SCV B에 비해 출력이

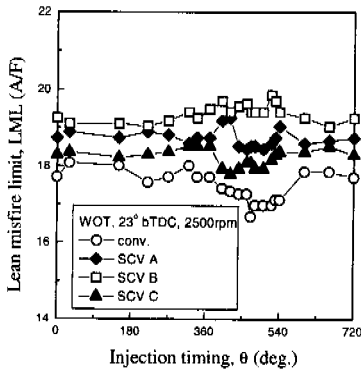


Fig. 8 Effects of SCV configuration on lean misfire limit

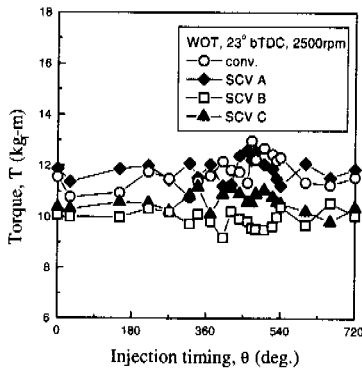


Fig. 9 Effects of SCV configuration on torque at LML conditions

높게 나타났고, 가장 희박한계가 큰 SCV B 형상의 출력이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 10은 점화시기를 MBT로 한 상태에서 각각의 SCV 형상에 따른 희박한계를 분사시기 변화에 따라 나타내었다. SCV B의 희박한계가 점화시기를 고정했을 때 뿐만 아니라 점화시기를 MBT로 한 때에도 가장 높은 값을 나타내고 있다. 여기서 점화시기를 23° bTDC로 한 경우와 같이 흡입행정초기와 말기부분에 연료를 분사한 경우 희박한계가 기준엔진에 비해 49% 증가한 공연비 21.9로 가장 높게 나타나고 있다. 이는 흡입행정초기와 말기에 분사된 연료가 공기유동을 따라 움직이다 농후한 혼합기가 점화플러그 근처에 존재할 때 점화가 이루어져 희박한계가 다른

행정보다도 높아진 것으로 생각된다. 또한, SCV C에서는 점화시기가 고정되었을 경우에는 희박한계가 가장 낮게 나타났으나 점화시기를 변화시켰을 때에는 희박한계가 상당히 늘어나 SCV A보다 희박한계가 더 높게 나타나고 있다. 또한, 흡입행정을 제외한 부분에 있어서 희박한계가 SCV B와 유사한 값을 가지는 것으로부터 SCV에 의한 유동강화효과와 적절한 점화시기의 선택에 의한 희박연소한계의 증가로 생각되어진다. 그러나, SCV B와는 다르게 흡입행정 중에 연료를 분사한 경우에는 희박한계가 크게 증가되지 않는 결과를 보이고 있다. 이상의 실험결과, 흡입유동에 맞는 점화시기를 선택함으로써 희박한계를 더 높게 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 점화시기 MBT, 전부하 조건에서 각각의 SCV 형상에 따른 희박한계점에서의 출력을 나타내었다. 기준엔진의 경우는 다른 SCV형상과 비교하면 공연비가 상대적으로 농후하므로 출력이 높게 나타난다. 특히 SCV B는 SCV C보다 흡입행정에서 희박한계가 크지만 출력은 유사하게 나타나고 있는데 이는 SCV B에서는 성층화 효과에 의해 SCV C에 비해 상대적으로 희박한 공연비에서 운전이 되지만 출력은 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 12는 점화시기 23° bTDC에서, 각 SCV 형상에 대해 공연비에 따른 비토크를 보이고 있다. 여기서, 비토크는 이론공연비, MBT조건에서의 최대출력을 1로 했을 경우, 각각의 출력을 비율로 표시한 것이다. 공연비가 동일한 경우, SCV를 장착하고 흡입행정 중에 연료를 분사했을 때 더 높은 비토크값이 나온다. 비토크가 0.6으로 동일할 때 희박한계가 SCV B에서는 기준 엔진 보다 공연비로 약 1.65정도 높게 나타나고 있다.

Fig. 13은 MBT 조건에서 각 SCV 형상에 대해 공연비에 따른 비토크를 나타낸 그림이다. 비토크가 0.6일 때 점화시기가 23° bTDC 일 때 보다 희박한 공연비 조건을 보이고 있다. 특히, SCV C의 비토크가 점화시기가 변화함에 따라 상당히 향상되어지고 있음을 알 수 있다. 이는 점화시기 변화에 따라 비토크값이 크게 영향을 받고 있으며, 또한 유동의 변화에 따른 최적의 점화시기가 존재함을 알 수 있다. 이 조건에서도 SCV B가 높은 공연비에서도 출력값이 다른 SCV보다 상대적으로 높게 나타나고 있다.

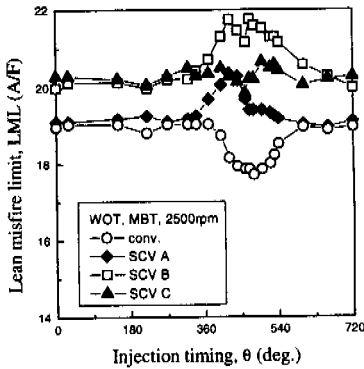


Fig. 10 Effects of SCV configuration on LML at MBT condition

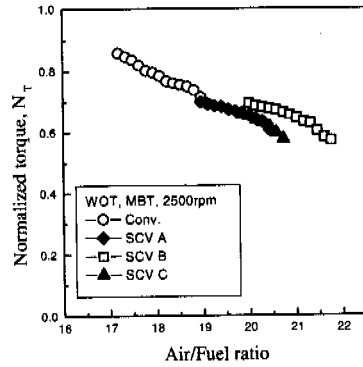


Fig. 13 Effects of SCV configuration on normalized torque at MBT condition

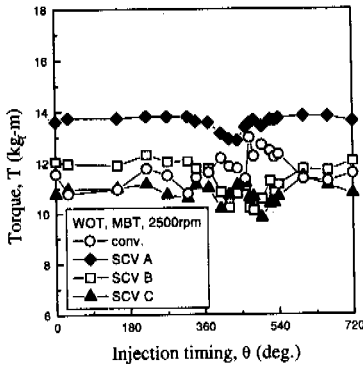


Fig. 11 Effects of SCV configuration on torque at LML conditions

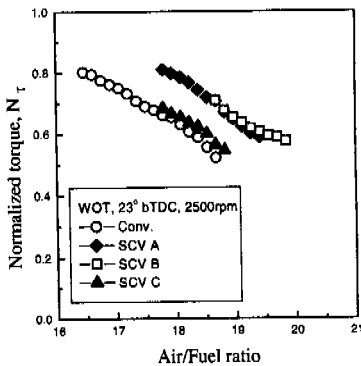


Fig. 12 Effects of SCV configuration on normalized torque

Fig. 14는 각각의 SCV 형상에서 분사시기 변화에 따른 실린더내의 최고압력값을 나타낸 것이다. 흡입행정중에 연료를 분사한 경우 SCV A가 최고압력이 가장 낮게 나타나고, SCV B의 최고압이 가장 높게 나타났다. SCV A는 흡입행정초기, SCV B는 흡입행정 말기, SCV C는 흡입행정초기와 흡입행정 말기에 분사될 때 연소최고압이 높게 나타나고 있다.

Fig. 15는 각 SCV에 대해 분사시기에 따른 열 발생 해석을 통하여 10%의 질량이 연소될 때까지의 크랭크 각도인 화염발달기간과 10%에서 90%까지 질량연소를 나타내는 급속연소기간을 나타낸 것이다. 먼저 각 SCV의 형상에 따른 화염발달기간은 SCV의 형상이나 연료분사시기에 크게 영향을 받지 않고 있다. 이는 일반적으로 스웰유동은 난류성분의 깨짐 효과가 적어 화염의 초기발달보다는 화염의 성장에 지속적인 에너지 원으로 작용하기 때문에 본 연구에서 장착한 SCV는 초기연소에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 그리고, 각 SCV 형상에 대한 급속연소기간은 SCV B와 C가 A를 장착한 경우에 비해 상당히 단축되고 있다. 이는 SCV A에 비해 다른 SCV의 스웰유동이 강하여 급속연소기간에 영향을 미친 결과라 생각된다. 또한, SCV A와 B에서 흡입 행정 중에 연료를 분사한 경우는 급속연소기간이 다른 행정에 비해 짧아지고 있다. 이는 혼합기의 성층화에 의하여 연소속도가 향상되어 연소기간이 줄었음을 보인 결과라 생각된다.

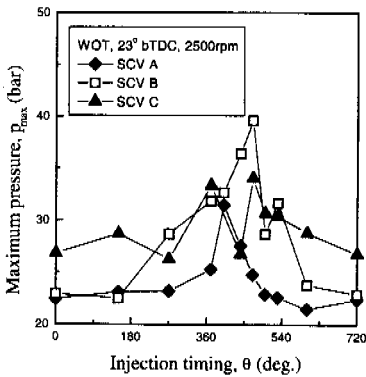


Fig. 14 Maximum pressure as a function of injection timing

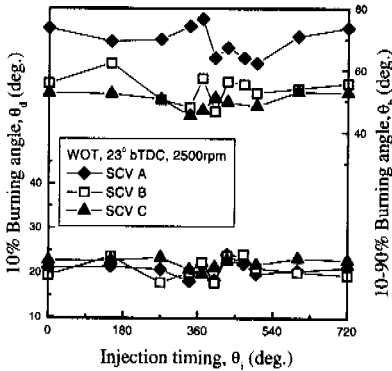


Fig. 15 Flame development angle & rapid burning angle for injection timing

그렇지만, SCV C의 경우는 전 행정에 대해 급속 연소기간이 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이로 미루어 성층화에 의한 연소속도의 향상이라기 보다는 스웰 유동강화에 의한 결과라 보여진다.

4. 결론

본 연구에서는 정속운전시 SCV가 부착된 엔진과 상용엔진을 운전조건에 따라 성능을 비교·분석하고, SCV 형상변화에 따른 흡입유동과 연료의 분사시기, 점화시기가 희박한계에 미치는 영향에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 엔진은 흡입행정중에 연료가 분사되면 다른 행정에 비해 희박한계가 떨어지고 연소안정

화도 이루어지지 않는다. 그러나, SCV를 부착한 경우, 흡입행정 중에 연료가 분사되면 희박연소 한계는 약 49% 증가한 21.9까지 늘어났다.

(2) 비토크가 동일할 때, SCV를 장착한 경우가 공연비의 희박한계가 향상되었고, 점화시기 23° bTDC에서 희박한계가 약 1.65정도 높게 나타났다.

(3) SCV 형상에 따라 그 형상에 적합한 분사시기와 점화시기가 존재하고 최적점화시기일 경우 희박한계, 엔진출력, 연소안정, 연료경제성이 향상된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 기성회 재원 학술연구조성비와 국책사업단 재원 연구비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kaoru Horie, Kazutoshi Nishizawa, Toro Ogawa, Shusuke Akazaki, and Keiji Miura, 1992, "The Development of a High Fuel Economy and High Performance Four-Valve Lean Burn Engine," *SAE* 920455.
- (2) Yoshiro Kimbara, Kazuo Shinoda, Hiroshi Koide, Nobuyuki Kobayashi, 1985, "NOx Reduction is Compatible with Fuel Economy Through Toyota's Lean Combustion System," *SAE* 851210.
- (3) Leo A. Mikulic, Friedrich Quissek, Gunter K. Fraidl, 1990, "Development of Low Emission High Performance Four Valve Engine," *SAE* 900227.
- (4) Souich Matsushita, Tokuta Inoue, Kiyoshi Nakanishi, Kenji Katc, Nobuyuki Kobayash, 1985, "Development of the Toyota Lean Combustion System," *SAE* 850044.
- (5) 조규상, 정연종, 김원배, 1996, "가솔린 기관의 연료분사시기가 기관성능에 미치는 영향," 한국자동차공학회 논문집 4권 제16호, pp. 144~152
- (6) 엄인용, 정경석, 정인석, 1996, "가솔린 엔진의 연료분사시기가 희박연소한계에 미치는 영향에 관한 연구," 한국자동차 공학회 1996년 춘계학술대회논문집, pp. 231~237.
- (7) In-Young Ohm, Hee-Seok Ahn, Woo-Jik Lee,

Woo-Tae Kim, Sim-Soo Park, Dae-Un Lee, 1993, "Development of HMC Axially Stratified Lean Combustion Engine," SAE 930879.

- (8) 이종호, 최수진, 전충환, 장영준, 1998, "스윙 강화밸브의 형상에 따른 실린더내 정상유동 특성," 한국자동차 공학회 1998년 춘계학술대회논문집, pp. 24~27.
- (9) 최수진, 류기현, 전충환, 장영준, "유동강화형 밸브 형상에 따른 정상유동 특성," 대한기계학회논문집(B), 23권 2호, pp. 166~174.