한국자동차공학회논문집 제 10 권 제 2 호, pp.31-39

SCV에 의한 스월 유동이 직분식 디젤 엔진의 연소에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of Swirl Flow Generated by SCV on the Combustion Characteristics of the D.I. Diesel Engine

정 재 우*, 이 기 형**, 이 창 식**
Jaewoo Chung, Kihyung Lee, Changsik Lee

ABSTRACT

Recently, many researches have been performed to improve the performance of the combustion and emission in a D.I.Diesel engine. One of the main factors effect on the characteristics of combustion is the characteristic of air-fuel mixing. Thus, swirl flow has been used widely to improve the air-fuel mixing in a D.I.Diesel engine. Since this swirl flow has interaction with other factors, in this study, the characteristics of the combustion and the flame effected by the swirl flow generated by SCV was investigated. From this experiment, the interactions of the swirl flow and the injection timing made clear. In addition, the effects of swirl and injection timing on the diffusion flame were clarified.

주요기술용어 : D.I. Diesel engine(직분식 디젤 엔진), Swirl control valve(스월제어밸브), Visualization (가시화), Squish(스퀴시)

1. 서 론

최근 자동차용 내연기관에 의한 대기 오염의 심각성과 화석 연료의 점차적인 고갈에 따라서 고효율 저배기의 자동차용 엔진에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위한 방안으로 열효율이 높은 직분식 디젤 엔진이 주목을 받고 있는 실정이다.[1)]

이와 같은 직분식 디젤 엔진의 구체적 개발 방향은 전자제어화, 소형, 경량화 및 출력의 증가를 위한 고속화에 있으며, 엔진의 경량화는 직분디젤 엔진의 소형 승용 차량의 탑재 가능성의 확보면에서 뿐만 아니라, 디젤 엔진의 연비 향상에도 크게 기여할 것으로 기대되어진다.

그러나, 소형화와 고속화에 따른 연료와 공기의 혼합시간의 단축은 연료 공기 혼합의 중요성을 더욱 증대시키고 있다. 이러한 배경하에 스월 유동의 적용을 통하여 연소 및 배기 성능을 향상시키고자 하는 연구가 진행 중에 있으며, 연소실 내의 유동을 생성하는 방법으로 소형디젤 엔진에 있어서 스월 제어밸브(swirl control valve, 이하 SCV)를 사용하는 기술이 적용되고 있다.

이 기술은 원하는 운전 영역에서 원하는 유동장을 효율적으로 제어 할 수 있다는 장점이 있다.

* 회원, 한양대학교 BK21 사업단 Post-doc.
** 회원, 한양대학교 기계공학과

SCV는 직분식 디젤엔진의 4밸브화[2]와 함께 가변 스월에 의한 연소 성능의 향상과 출력의 증가를 도모할 수 있으며, AVL사는 SCV를 사용하여 중저속 · 중저부하 영역에서 soot와 NOx의 저감 효과를 가져올 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다.[3]

실제 설계자나 연구자의 입장에서 디젤 엔진의 성능을 개선하기 위하여는 스월의 특성을 좀 더 구체적으로 인식하는 것은 다른 운전 조건, 즉 분사시기 및 분사계의 설계에 있어서도 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가시화용 단기통 직분식 디젤 엔진에 SCV를 부착하여 강제적으로 스월을 발생시키고, 이때의 연소압력 및 화염 이미지를 취득하여 연소 및 화염에 미치는 스월의 특성을 파악하고자하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치와 방법

2.1 가시화 엔진시스템 및 가시화 실험 방법

본 연구에서는 엔진 내부의 동적 연소 현상을 직접 관찰할 수 있도록 단기통형의 디젤 가시화 엔진을 사용하였으며, 전자 제어가 가능한 직분식 연료 분사 시스템(COPEC system, ZEXEL)을 장착하여 분사시기를 조정하였다. 본 연구에서 사용한 가시화 엔진의 주요 제원을 Table 1에 나타내었으며, Fig. 1에는 가시화 엔진의 관측창 구조를 나타내었다. 연소실의 형상은 bowl-in-piston형으로써, 가시화 영역은 bowl의 내부이며,

Table 1 Specifications of the visualization engine

Engine type	D.I. diesel single cylinder	Displacement volume	673cc
Combustion chamber	Bowl-in-piston	Compression ratio	17
Bore × Stroke	95 × 95(mm)	No. of Intake valve	1
Nozzle hole number	5	Fuel line pressure	160(bar)

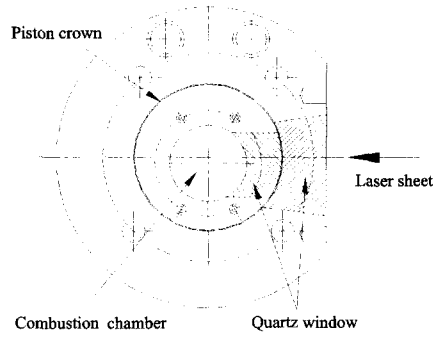
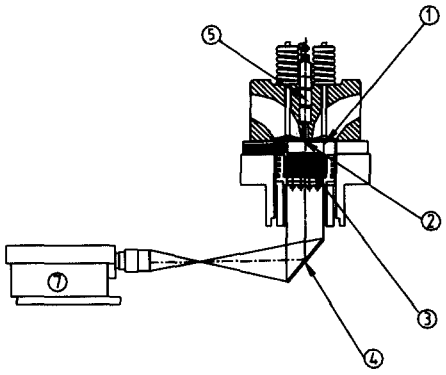
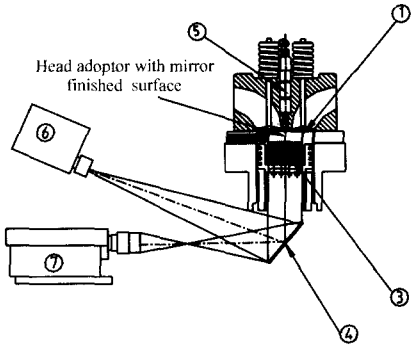


Fig. 1 Shape of the optical window



(a) Flame visualization



(b) Spray visualization

① Valve ② Head adoptor ③ Quartz window
④ Reflection mirror ⑤ Nozzle ⑥ Xenon lamp
⑦ High speed camera

Fig. 2 Optical systems for flame and spray

지름은 52mm, 그리고 bowl의 높이는 21mm이다. Fig. 2는 엔진의 단면도와 연소 가시화 방법을 보여주고 있다.

가시화는 분무 및 자발 화염광에 대하여 수행하였으며, 분무 촬영시 헤드 밑면에 거울면처럼 가공된 어뎁터를 장착하여 쉐도우(shadow) 기법으로 촬영하였다. 촬영 장치로서 디지털 고속카메라(4540MX, KODAK)와 필름카메라(E-10, Crown)를 사용하였으며, 자발화염광은 4500fps 그리고 연소실내 분무는 9000fps의 촬영속도로 실험을 수행하였다. 분무거동의 촬영시, 제논 램프(Xenon lamp, 80000Lux, 300W)를 조명광으로 사용하였다.

2.2 SCV 형상 및 압력 측정 방법

본 연구에서 제작한 SCV는 원형으로, 흡기관내 유동을 관로 중의 한쪽으로 편중시켜 스월 유동을 생성시키도록 장착되었다

다음 Fig. 3은 SCV가 연소실 입구에 부착되어 있는 형상을 실린더 헤드 밑면으로부터 관측한 그림이며, 동시에 SCV에 의하여 생성되는 유동의 방향을 나타내고 있다. 그림 중의 빗금친 부분은 스퀴시 영역을 나타내며, 본 연구에 사용된 연소실은 스퀴시 영역의 면적이 불균일하므로 압축시 스퀴시 유동의 유속 분포가 불균일한 특성을 가지고 있다.

SCV를 부착한 경우, 스월 유동의 생성을 확인하기 위하여 정상유동실험[4]을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과 SCV를 부착하는 경우에 흡입 유량의 저감 현상이 있음을 확인하였으며, SCV를 부착하지 않은 경우의 무차원 스월비의 변동이 저밸브리프트에서 나타나고 있으나, 이는 매우 적은 흡입 유량과 적은 스월량에 의한 변동으로 생각되며, 모든 밸브리프트에서 SCV를 부착시 무차원 스월비가 크게 나타나는 결과로부터 스월 유동이 강화되고 있음을 확인할 수 있었다.

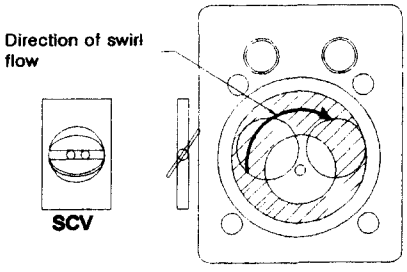
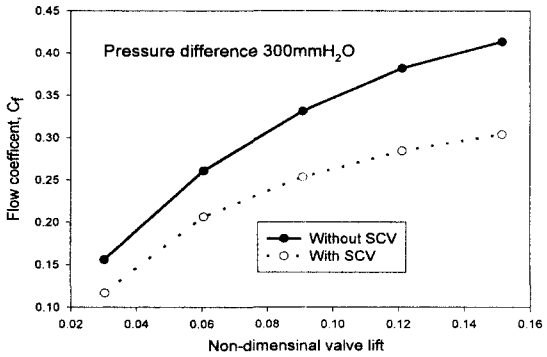
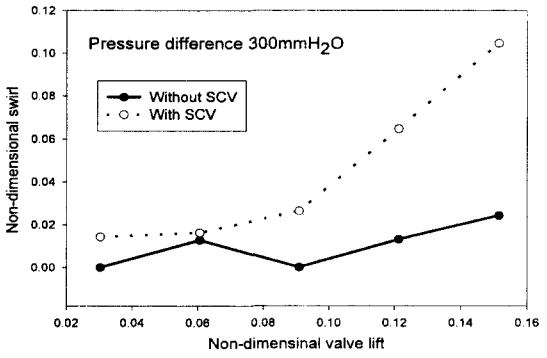


Fig. 3 Schematic of SCV and direction of the flow



(a) Flow coefficients



(b) Non-dimensional swirl

Fig. 4 Results of steady flow test

한편 연소 실험시 SCV의 장착으로 인하여 흡입 공기량이 저감되어 연소가 불안정하게 될 가능성이 있으므로, 본 실험에서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 블로워를 설치하여 실험시 실시간으로 압축 공기를 공급함으로써, 스월 제어밸브가 없는 경우와 있는 경우에서 같은 압축압력을 유지하도록 조절하였다.

서어지 탱크내에는 열선을 설치하여 실험시 흡기관내로 유입되는 공기의 온도를 40°C로 유지시켰다. 본 연구의 모든 실험시 회전속도는 실험장치의 안정성을 고려하여 400rpm으로 하였으며, 기존의 연구결과에서는 250rpm과 1000rpm의 영역 사이에서 스월 유속을 평균 피스톤 속도로 나누어준 특성속도는 거의 일정하다는 실험 결

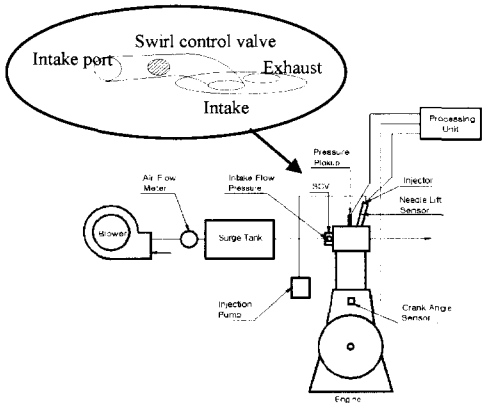


Fig. 5 Schematic of engine combustion analyzing system with the SCV

과가 제공되었다.[5] 공연비는 20과 48의 두 가지 경우를 사용하였다.

실험에 사용된 센서류로는 연소실내 압력 측정을 위하여 피에조(piezo)식 압력 변환기(6052A1, Kistler)를 실린더 헤드에 직접 설치하여 사용하였으며, 반도체식 압력센서(4045A5, Kistler)를 흡기관에 장착하여 연소압력의 절대압 보정에 사용하였다. 또한 분사 조건을 확인하기 위하여 연료관 압력 센서(4064A2000, Kistler) 및 노즐의 니들 리프트 측정 센서(nozzle lift sensor, Wolff, analog type)를 부착하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 스월이 분무 형상에 미치는 영향

다음의 Fig. 6에는 SCV 유무에 따른 분무 형상의 가시화 결과를 나타내었다.

실험시 분사시기는 8°BTDC로 하였으며, 이러한 분사시기는 압축으로 인한 bowl 영역내의 스월 운동에너지의 상승 및 관성모멘트의 저감으로 인하여 스월 유속이 급격히 증가되는 유동 특성을 가진다.[5,6]

실험 결과 SCV 부착시 분사 후 5°가 경과된 분무 초기(-3.21°)에서부터 스월 유동의 영향을 받아서 화살표 방향으로 분무가 휘어지는 경향이 나타나고 있으며, 분사후반의 분무가 상대적으로 많이 휘어지는 특징을 볼 수 있다.

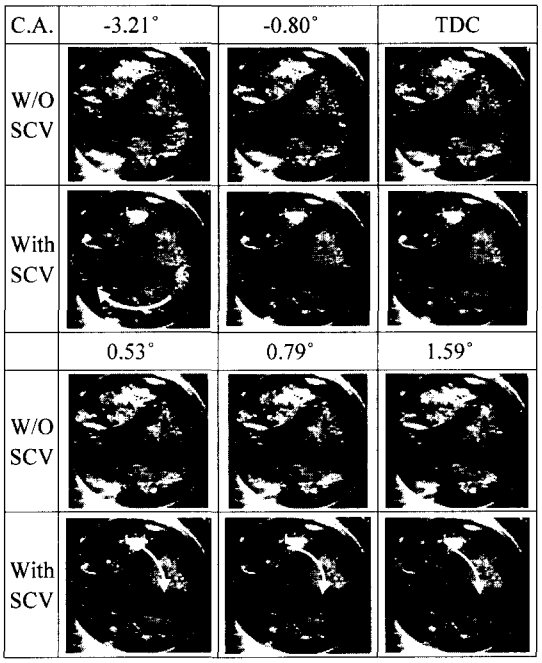


Fig. 6 Comparisons of spray pattern with swirl

또한 노즐 분공간의 분사 특성의 차이로 인하여 각 분공으로부터 분사되는 분무에 대한 스월의 영향이 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 분무와 스월의 상호 작용에 영향을 미치는 가장 큰 인자가 분무와 스월 유동의 운동량 특성[6]인 것을 고려하면, 분사 후 시간이 경과함에 따라 상대적으로 운동량이 저감되는 분사후반에 상대적으로 스월의 영향이 클 것으로 여겨지며, 강체와류(rigid vortex)의 유속 분포 특성상 유속이 큰 영역인 bowl 벽 근방의 분무 또한 스월의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

3.2 연소율에 미치는 스월의 영향

Fig. 7에는 A/F가 48과 20인 경우에 대하여 스월 변화시의 연소율 특성을 3가지 분사시기 변화에 따라 비교하였다.

실험 결과 스월은 분사시기 변화에 따라 서로 다른 연소율 특성을 나타내는 사실을 알 수 있었

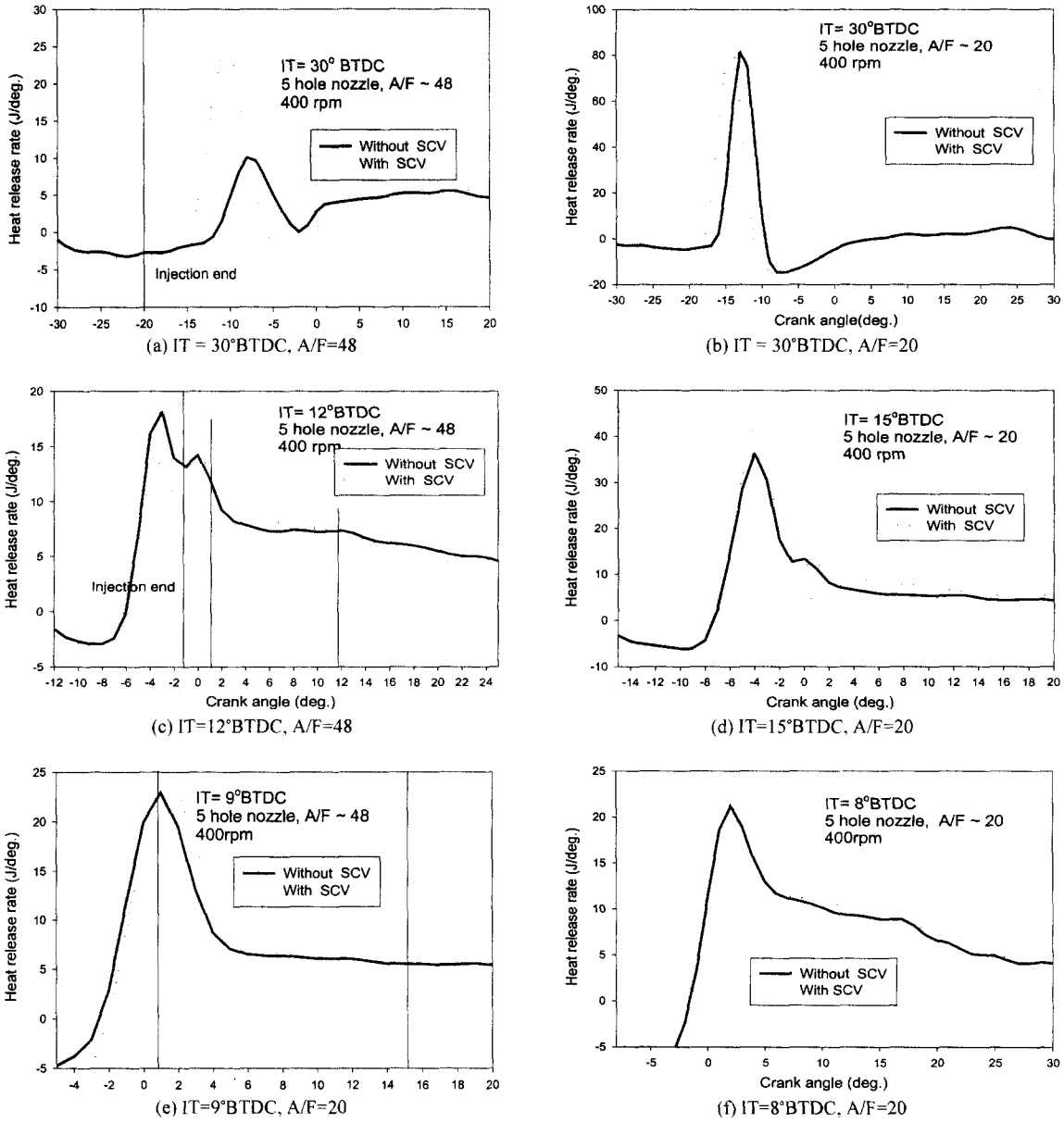


Fig. 7 Comparison of heat release rate with swirl

다. 이는 분사압력과 분사 조건이 동일하다고 하더라도 피스톤의 위치에 따라 연소실내의 스월 유동 상태가 서로 다르기 때문이라고 생각된다.

첫 번째로 Fig. 7의 (a)와 (b)로부터 분사시기가 상대적으로 빠른 상사점 전 30°분사의 경우 스월은 연소과정을 촉진시키는 결과를 초래한다. 이러한 빠른 분사시기는 상대적으로 분위기 압력과 온도가 낮기 때문에 혼합과 기화 촉진에 대한 스월 유동의 영향이 상대적으로 크다고 생각된다.

두 번째로 분사시기가 지연된 Fig. 7의 (c), (d), (e), (f)의 경우, SCV 부착에 의한 스월의 영향은 대략적으로 일정한 크랭크 각도 구간, 즉 TDC 후

0°에서 15°구간의 열발생률을 발달시키는 역할을 하고 있는 특성을 보여주고 있다. 그러나 초기 열발생률의 상승을 앞당기는 효과는 없는 것으로 나타났다.

이 실험 결과로부터 착화지연과 확산연소에 대한 스월 유동의 영향은 분사시기에 따라서 다르게 나타난다는 사실을 알 수 있었다.

특히 상사점 전 12°분사의 경우는 최고 열발생율에 대한 스월의 영향이 공연비에 따라서 서로 상반된 결과를 보이고 있다. 희박한 경우(A/F=48)는 SCV 부착시 최대 열발생률이 SCV가 없는 경우보다 오히려 저하되고 있는 경향을 나타냈다. 이 구간은 연소실내에 가장 빠른 스월 유속이 형성되고 있다는 점을 고려한다면, 스월에 의한 혼합은 연료량이 상대적으로 작은 A/F가 48인 경우(Fig. 7의 (c))는 오히려 연료 공기 혼합기의 국부적인 희박화를 초래하여 열발생률이 저하되고 있으며, 반대로 연료량이 상대적으로 농후한 A/F가 20인 경우(Fig. 7의 (d))에는 스월이 연소의 향상을 도모하기 때문에 열발생률이 증가된다고 생각되며, 이러한 현상들은 기존의 연구 결과들과도 비교적 잘 일치하고 있다.[7]

근원적으로 이러한 현상의 원인은 연료의 운동량에 기인하는 것으로 생각되며, 연료량이 많은 경우 연료 분사의 운동량이 커지며 상대적으로 큰 운동량의 분무는 좀더 많은 양의 스월을 저감시키는 저항체의 역할을 수행하게 된다. 그러나 연료량의 저감으로 운동량이 매우 적은 경우에는 스월에 의하여 휩쓸리는 정도가 심화되어 연료의 농도 분포가 전체적으로 매우 희박화될 가능성이 매우 커지는 것으로 생각된다.

3.3 화염형태에 미치는 스월의 영향

앞절에서 스월의 특성이 분사시기에 따라 다르게 나타나는 것을 열발생율의 특성으로부터 확인하였으며, 이러한 원인을 규명하기 위하여 가시화 실험을 수행하였다. 이 가시화 실험은 매우 진각된 분사시기(26°BTDC), 표준 분사시기(8° BTDC, 9°BTDC)로 구분하여 고찰하였다.

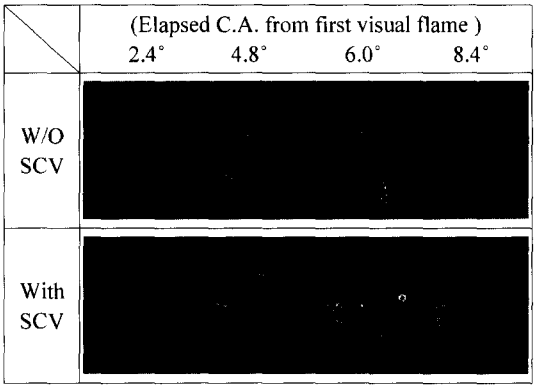


Fig. 8 Comparison of flame with swirl(A/F=48, IT=26° BTDC)

3.3.1 과도 진각 분사시기

연소율 특성의 해석에서 비교적 빠른 분사시기에는 스월에 의한 초기 연료의 혼합 촉진 효과가 있음을 관측하였다. 다음의 Fig. 8은 분사시기가 26°BTDC인 경우의 가시화 결과이며, 이와 같은 분사시기에 있어서는 낮은 압축 압력 및 분위기 온도로 인하여 착화지연 기간은 상대적으로 매우 길다고 할 수 있다.

두 경우의 화염 특성을 비교해 보면 SCV가 없는 경우는 연소실 벽면 부근에서 주로 확산화염이 관측되는데 비하여 SCV를 부착한 경우는 연소실내의 분무 위치 부근에서 확산연소가 발생되고 있음을 알 수 있다.

이러한 현상의 원인으로는 이 분사시기는 주위압력이 비교적 낮기 때문에 분사된 연료가 연소실 벽면에 충돌하여 충돌된 연료 부근에서 화염이 발생되고 있으나, SCV 장착의 경우는 스월 유동에 의하여 공기와의 혼합을 촉진함과 동시에 벽면에 충돌하는 연료량을 저감시켰기 때문인 것으로 판단된다.

3.3.2 표준 분사시기

다음의 Fig. 9는 A/F=48, 분사시기 9°BTDC에서의 화염가시화 결과이다. 이러한 화염가시화 결과로부터 스월이 존재하는 경우 가시화염 발생 후 1.6° 시기인 초기 화염면적은 상대적으로 작

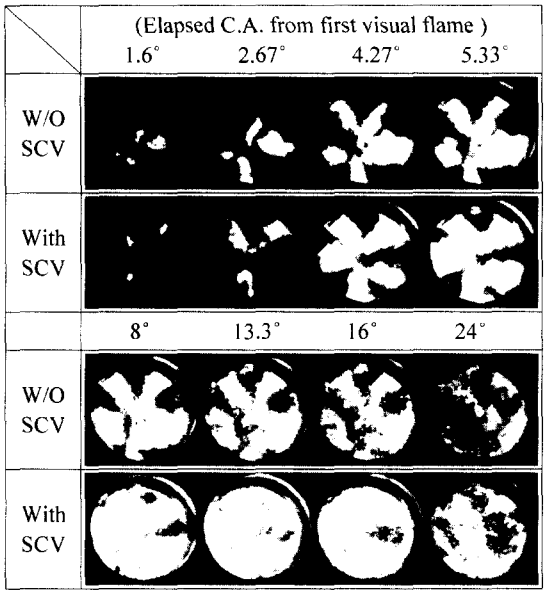


Fig. 9 Comparison of flame with swirl(A/F=48, IT=8°BTDC)

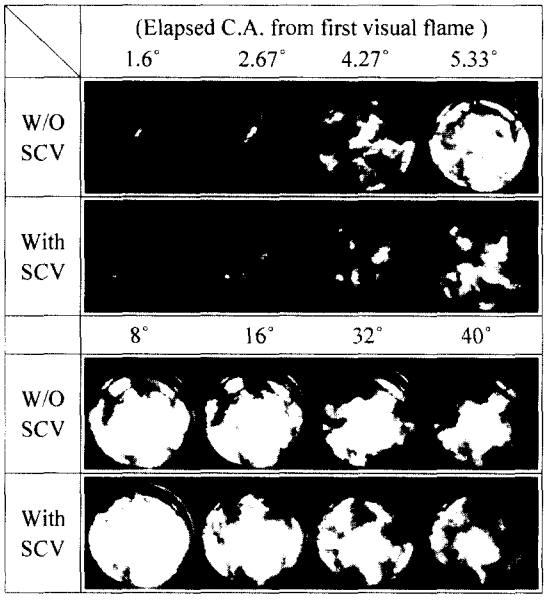
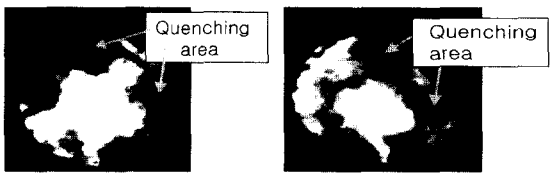


Fig. 10 Comparison of flame with swirl(A/F=20, IT=8°BTDC)

게 나타났으나, 그 이후는 SCV가 없는 경우보다 화염 성장이 빨라지고 있으며, 크랭크각도 16°까지 스월에 의한 회전과 함께 지속적으로 발달되어지는 현상을 보여주고 있다. 이러한 분사시기는 착화지연기간이 매우 단축되는 시기임을 알 수 있으며, 이 시기중의 SCV에 의한 유동장은 착화지연 감소와 같은 효과보다는 연소 중의 화염 성장에 영향을 더욱 크게 미치는 것을 볼 수 있다. 상사점전 26° 분사와 마찬가지로 스월에 의한 혼합의 촉진이 국부적으로 희박화를 초래하지만 연소시작 후 연소 자체를 촉진시키는 것으로 생각된다. 다음의 Fig. 10은 A/F가 20, 분사시기는 8°BTDC 분사시의 화염가시화 결과를 나타낸다. 이러한 가시화 결과에서 주목되는 부분은 소염층의 형성이다.

가시화 엔진에서의 소염층은 온도가 낮은 피스톤에 설치한 관측창과 화염이 만나면서 발생되고 있으며, 화염발생 후 8°에서 40°구간에서 검은 소염층의 형성이 두드러지게 나타나고 있다. 이와 함께 SCV를 부착한 경우에 소염층은 상대적으로 빠르게 형성되며, Fig. 11에서 보이듯이 거의 도너츠 모양의 형태를 가지게 되는 것을 알



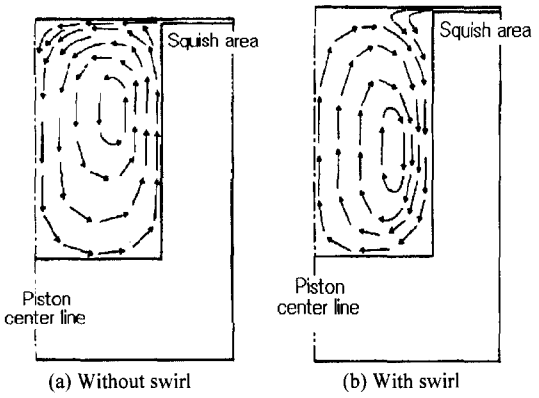
(a) Without SCV (b) With SCV

Fig. 11 Effect of swirl and squish flow on quenchig (A/F=20, IT=8°BTDC)

수 있다.

이러한 현상은 스월과 스퀴시 유동의 상호작용에 기인한 연소실 종방향의 유동장의 차이점에 의하여 발생되는 것으로 고려되며, 기존의 연구자들은 실험을 통하여 스월이 존재하는 경우 TDC와 매우 인접한 구간에서는 스월의 원심력으로 인하여 연소실내의 종방향의 유동장이 역전되는 현상이 발생됨을 확인하였으며 이의 그림을 Fig. 12에 나타내었다. 이때 피스톤의 형상은 본 연구의 경우와 마찬가지로 직각으로 되어 있다.[8]

따라서 이러한 소염층은 스월과 스퀴시의 상호작용에 기인한 화염의 연소실 중심부로의 몰입에서 비롯된 현상이며, 이러한 현상은 연소실



(a) Without swirl (b) With swirl

Fig. 12 Effect of the interaction between swirl and squish flow on the vertical flow

벽면으로의 열전달 특성에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다.

지금까지의 실험결과 분석을 기초로 하여 스월의 영향을 10°BTDC 전후 분사시의 연소를 모델화하여 Fig. 13에 나타내었으며, 분사시기 변화시의 열발생률에 미치는 스월의 영향을 Fig. 14에 나타내었다.

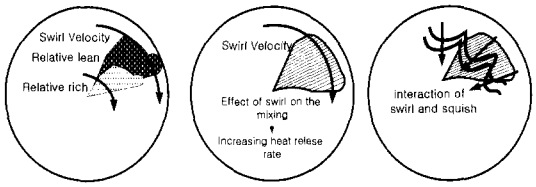


Fig. 13 Schematic of effects of swirl on the flame pattern

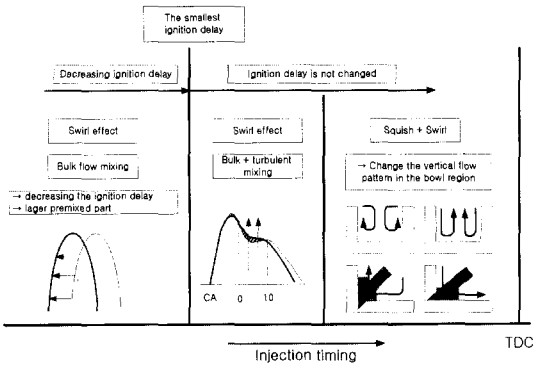


Fig. 14 Swirl effects on the diesel combustion according to injection timing

4. 결 론

이상과 같은 실험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) SCV를 부착하여 직분식 디젤 엔진내의 스월 유동을 제공할 수 있었으며, 연소 및 화염 특성에 대한 스월의 영향을 분사시기별로 분석하였다.

2) 비교적 빠른 분사(상사점전 26° 이전)시기에서의 스월은 연소를 촉진시키는 작용을 하였다.

3) 상사점전 12° 근방에서의 분사시 압축으로 인한 강력한 스월의 생성은 연료량이 많은 경우는 최대 열발생률의 상승, 그리고 적은 연료량에서는 최대 열발생률을 저감시키는 역할을 수행하였다.

4) 본 연구의 화염 가시화 결과에서 스월과 스퀴시의 상호 작용을 확인할 수 있었으며, 불균일한 스퀴시 면적은 스월 중심점의 이동을 유발하는 것으로 생각되며, 스월과 스퀴시의 상호작용에 따른 연소실내 종방향 유동장의 역전은 소염영역에 변화를 초래하였다.

5) 스월이 존재하는 경우 연소실 중앙부의 화염의 존재 경향이 뚜렷함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구 사업(R01-2000-00303)과 고등인력 양성사업(BK21)의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1) 이창식, "디젤엔진의 저공해 연소시스템 설계," 자동차공학회지, 제21권 제3호, p.2, 1999.

2) C. Arcoumanis, S. T. Cho, M. Gavaises, H. S. Yi, "Spray and Combustion Development in a Four-Valve Optical DI Diesel Engine, SAE 2000-01-1183, 2000.

3) J. Bierbaumer, R. Cichocki, W. Ospelt, "CO_2 Emission Reduction - The Contribution of Modern HSDI Engines, Fifth Engine Workshop on CO_2

Reduction Technologies in Reciprocating Engines," KSAE, 1998.
4) 정재우, 이기형, 김우태, "흡기 3밸브 실린더 헤드의 흡입 정상유동 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제24권 제6호, pp.880-885, 2000.
5) A. Murakami, M. Arai, H. Hiriyasu, "Swirl Measurements and Modeling in Direct Injection Diesel Engines," SAE 880385, 1988.
6) W. J. Smith, "Estimation of Air Motion Kinetic Energy Dissipation Rates in a D.I. Diesel Combustion System," SAE 960876, 1996.
7) D. L. Abata, B. J. Stroia, N. J. Beck, A. R. Roach, "Diesel Engine Flame Photographs with High Pressure Injection," SAE 880298, 1988.
8) C. Arcoumanis, A. F. Bicen, J. H. Whitelaw, "Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines," Transaction of ASME, Vol.105, pp.105-112, 1983.