

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0088

가솔린 직접 분사식 엔진의 운전특성에 관한 연구 Engine Operation Characteristics of a Gasoline Direct Injection Engine

조한승*, 박태용*, 박성진*, 조남효*
Han-Seong Cho, Tae-Yong Park, Sung-Jin Park, Nam-Hyo Cho

ABSTRACT

A gasoline direct injection single cylinder engine has been developed to study operational characteristics for highly stratified conditions. Parameters related to design and experiment were also studied to understand the characteristics of combustion and emissions at some part load conditions.

It was found that optimal timings between the end of fuel injection and spark ignition were existed for stable combustion under the stratified modes. In a low engine speed, fuel spray behavior around piston bowl was important for stable combustion. The in-cylinder air motion affecting fuel spray behavior was found to be a dominant factor at higher engine speed as fuel injection timing had to be advanced to secure enough time for fuel evaporation and mixing with surrounding air. As swirl ratio increased, spark timing could be advanced for stable combustion and a higher compression ratio could be used for improved fuel consumption and stable combustion at the stratified mode. It was also observed that electrode geometry and piston bowl shape played an important role for combustion and emission characteristics and some results were shown for comparison.

주요기술용어 : Gasoline Direct Injection Engine (가솔린 직접 분사식 엔진), Fuel Spray (연료 분무), Stratified Mode (성층화 영역), Homogeneous Mode (균질 영역), Piston Bowl (피스톤 보울), Swirl Ratio (스월비)

Nomenclature

EOI : End of Injection
IMEP : Indicated Mean Effective Pressure
ISFC : Indicated Specific Fuel Consumption
ISHC : Indicated Specific Hydrocarbon

ISNO_x : Indicated Specific NO_x
EGR : Exhaust Gas Recirculation

Subscripts

cov : coefficient of variation

* 회원, 고등기술연구원

1. 서론

최근 세계 각국은 자동차 배기가스로 인한 대기오염을 방지하기 위해서 자동차 배기가스 규제치를 강화하고 있다. 특히 가솔린 엔진에서는 CO, HC, NO_x 등의 유해 배출물 뿐만 아니라 지구 온난화의 주원인인 CO₂ 배출량도 문제시되고 있다. 또한 자원 고갈에 대비하여 다양한 연료의 이용 방안 연구와 열효율을 향상시킬 수 있는 새로운 방식을 이용한 내연 기관의 개발이 요구되고 있다. 이를 위한 하나의 방안으로 연소실 내로 연료를 고압 분사하는 직접 분사식 가솔린 엔진이 여러 나라에서 연구 개발되고 있고 일본 및 유럽 자동차 업체에서는 몇 년 전부터 양산하고 있다.^{1,2,3)}

GDI 엔진은 혼합기의 형성 기간이 포트 분사식(Port Fuel Injection, PFI) 보다 매우 짧고 연소실내 유동 특성에 아주 민감하기 때문에 혼합정도가 적절하게 이루어지도록 연료분사 제어의 최적화가 필요하다. 이를 위해 CFD 기법 및 가시화 기술을 이용한 내부 유동과 연료 분무 특성이 많이 연구되고 있다.^{4,5,6,7)} 연료분사의 제어방식에 따라 이론공연비 조건에서 균일혼합기를 형성하여 연소하는 조기분사(early injection) 방식과 회박 공연비 조건에서 층상혼합기를 이용하여 연소하는 후기분사(late injection) 방식으로 나눌 수 있다. 이론공연비를 이용하는 조기분사 방식은 연비향상 측면에서는 초회박 운전이 가능한 후기분사 방식 보다는 불리하지만 냉시동이나 과도상태의 운전시 배기가스 저감 및 승차감 유지를 위해 종종 사용되고 있다.^{2,3,8)} 후기분사 방식은 부분 부하에서의 초회박 운전 및 대량 EGR율이 적용되면서 연비 향상과 NO_x 저감에 큰 효과를 갖는 것으로 알려져 있다.^{2,5,9)}

최근 활발하게 개발되고 있는 GDI 엔진의 연소시스템 개발에서의 주된 관점중의 하나는

후기분사 방식의 성층화 영역에서 연소안정성과 관련된 유동 및 운전 인자를 분석하는 것에 있다.^{9,10)} 특히 유동 특성, 압축비, 점화시기, 연료의 분사시기 등의 여러 인자들이 성층화 영역에서의 연소 특성에 미치는 영향에 대한 자세한 정보가 필요하다.

본 논문은 스웰 유동 특성을 지닌 GDI 연소시스템을 연구하기 위하여 단기통 엔진을 제작하고 실험하여 얻은 결과를 분석한 것이다. 조기분사 방식의 균질 영역에서의 연소 특성과 후기분사 방식의 성층화 영역의 연소 특성을 비교하였으며 엔진의 운전 조건에 대한 영향을 분석하였다. 아울러 스웰비, 압축비, 피스톤 보울의 형상 및 여러 시험 인자들이 성층화 영역에서 연소 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 GDI 단기통 엔진의 제원과 구성을 Table 1과 Figure 1에 나타내었다. 일반적인 DOHC 엔진의 펜트루프(pent roof)형 연소실 중앙에 점화플러그를 설치하였으며 고압분사식 인젝터는 흡기관과 헤드가 연결되는 부분의 하단에 설치하였다. 연료를 후기 분사할 경우 원활한 혼합기 형성을 할 목적으로 텀블 포트중 한 곳에 스웰조절밸브(Swirl Control Valve, SCV)을 설치하여 스웰 유동을 강화하였다.

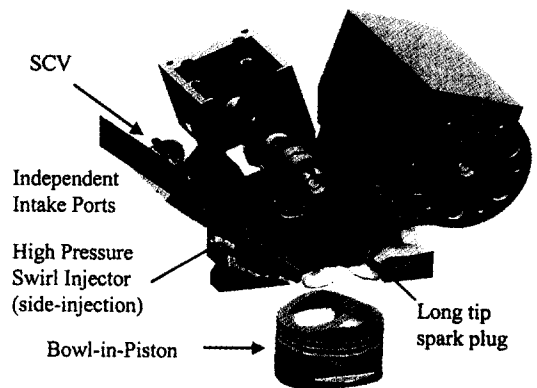


Fig. 1 Schematic diagram of GDI engine

실린더 압력을 측정하기 위해 연소실 내에 플러쉬 마운팅형 압력센서(Kistler, 6051B)를 설치하였으며 플레넘 챔버(plenum chamber)에는 절대압 센서(Kistler, 4075B)를 설치하여 흡기압력을 측정하였다. 연료분사 및 점화시기를 제어하기 위해 캠센서와 엔코더(360 pulse/rev.)를 사용하였으며 엔진 제어장치를 별도로 제작하였다. 연료와 공기의 혼합 정도를 확인하기 위해 UEGO 센서(Horiba, Mexa-110 λ)을 사용하였으며 배기측 헤드면에서 배기관으로 약 200 mm 위치에 센서를 설치하였다. 배기가스 온도는 헤드에서 약 400 mm 떨어진 곳에서 측정하였다. 배기가스 성분 분석은 배기가스 분석장치(Horiba, 8120)을 사용하였고 샘플링 가스는 배기 포트로부터 약 300 mm 위치의 배기관 하류에서 채취하였다. Figure 2는 단기통엔진 실험 장치의 구성을 간략하게 나타낸 것이다.

Table 1 Engine Specifications

	Specifications
Engine Type	Single cyinder, DOHC, 4-valve pent roof type
Bore × Stroke	79.0×81.5 mm
Displacement Volume	399.5 cc
Compression Ratio	11.2 : 1
Injector Installation Angle	31.0 deg.
Ricardo Swirl Ratio	2.63
Valve Timing (deg.)	
IVO(BTDC)/IVC(ABDC)	13/41
EVO(BBDC)/EVC(ATDC)	43/11

GDI 엔진은 운전조건에 따라 약 10 msec 정도의 짧은 시간내에 연료를 연소실내로 분사시켜야 하는 특성 때문에 고압 연료 분사장치가 필요하다. 실험장치에서는 고압의 연료를 분사하기 위해 연

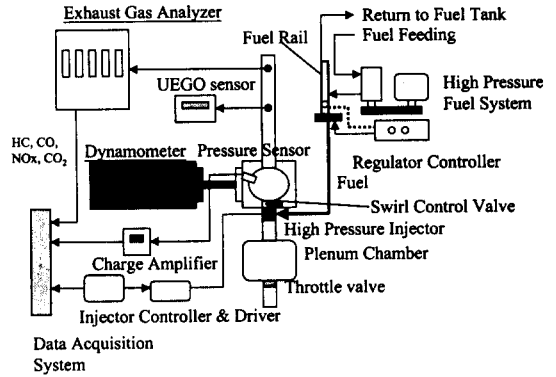


Fig. 2 Diagram of engine test equipment

료공급라인에 일정한 압력을 유지해야 하며 이를 위해 연료라인에 압력 조절기(pressure regulator) 및 압력 센서를 설치하였다. 운전 조건에 따라 연료의 분사압력을 조절할 수 있는 커먼레일(common rail) 형태를 취하였다. 저압 연료펌프로 일차 가압한 후 압력 조절기를 통하여 일정한 압력으로 연소실 내로 분사하였다. 연료 분사 압력은 최고 140 bar까지 제어가 가능하며 연료의 분사량과 분사 시기는 엔진 제어장치에서 조절하였다. 본 연구에서 사용한 고압 인젝터는 N사의 양산 GDI 엔진에 사용하는 것으로 50~100 bar의 연료압력에서 연료 분무각이 52 도 정도에 중공형 스윙유동으로 분사토록 설계된 것이다. 분무 특성에 관한 상세한 내용은 참고문헌¹¹⁾에 수록되어 있다.

단기통엔진 실험에서는 성층화 영역에서 주로 연소시스템을 구성하는 인자들에 대한 영향을 평가하였으며 이를 통해 안정된 연소 상태, 연비 향상, 배출물 저감 등을 위한 설계 변수 및 운전 변수를 고찰하였다. 운전조건은 엔진시험에서 빈번하게 사용하는 구간인 부분부하 조건에서 선택하였으며 엔진의 회전속도는 고정하였다. 연료의 분사 압력은 70 bar로 일정하게 하였다. 관련 인자에 대하여 엔진의 회전 속도와 부하를 일정하게 고정하고 EOI과 점화시기를 변화해가면서 연소안정성, 연료소모율 및 배출물 특성을 분석하

였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 성층화 영역에서의 연소 특성

단기통 엔진 시험에서는 회전 속도를 일정하게 유지하고 균질 영역과 성층화 영역으로 구분하여 각 영역에 대한 연소 특성을 비교하였다. 균질 영역에서는 공연비를 14.7:1로 일정하게 하며 점화 시기는 MBT 조건으로 설정하였다. 흡입 과정중에 연료를 분사하였으며 연료분사의 종료시점을 압축 상사점 기준으로 270 deg. BTDC로 고정하였다. 균질 영역에서는 트로틀 밸브의 개도 정도에 따라서 부하를 조절하였다. 성층화 영역에서는 SCV를 닫고 트로틀 밸브를 완전히 연 상태에서 연료 분사시기와 점화시기를 조절하여 최적 상태에서 운전하였다. 성층화 영역은 공연비가 약 30:1 이상의 조건에서 운전하는 영역으로 선정하였다. 엔진부하는 연료 분사량으로 조절하였으며 EGR은 적용하지 않았다.

Figure 3은 엔진의 회전 속도를 2000 rpm으로 고정하고 부하(IMEP)에 따른 연소특성을 나타낸 것이다. 운전 조건은 균질 영역과 성층화 영역으로 구분하여 연소 특성을 비교하였다. 성층화 영역에서는 압축과정 중에 피스톤 보울 내로 분사된 연료의 충돌과 점화플러그 방향으로의 혼합기의 확산을 유도하여 연소하는 방식을 취하고 있으므로 유동 특성 및 피스톤 보울 위치, 형상, 크기 등에 크게 영향을 받는다.

성층화 영역에서는 균질 영역에 비하여 매 사이클 점화플러그 주위의 혼합기 분포가 변동이 크기 때문에 연소안정성(IMEP_{cov})이 불리하게 나타나고 있다. 전체적인 공연비가 균질 영역에 비하여 2배 이상 희박하지만 점화플러그 주위의 공연비는 상대적으로 주위 연소실내 공연비에 비하여 농후하고 화염전파거리가 짧아 연소속도가 빠르고 연소 압력이 높음을 알 수 있다.¹⁾ 균질 영역의 경우 유입되는 공기량을 조절하여 부하를 제어하기 때문에 성층화 영역의 경우처럼 WOT

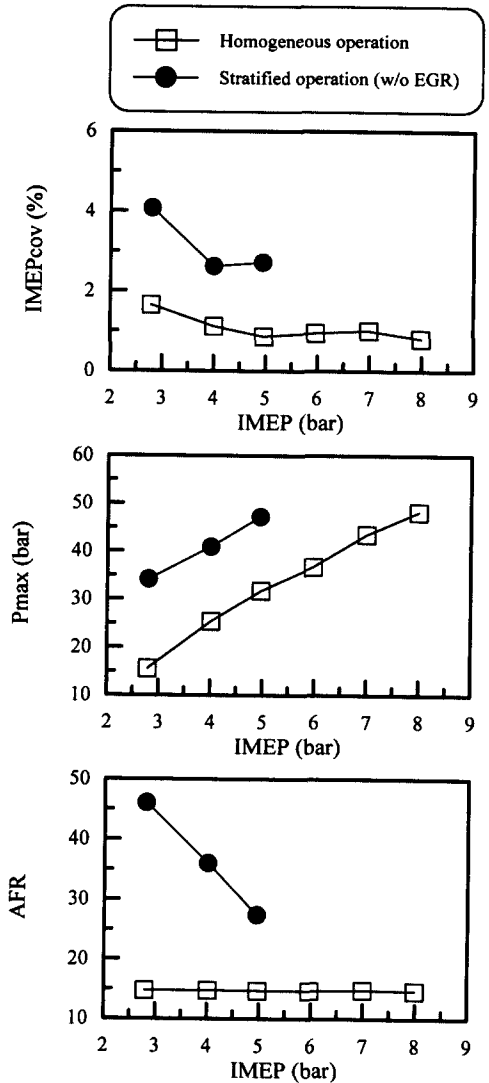


Fig. 3 Combustion characteristics for IMEP variation (2000 rpm, w/o EGR)

상태보다 펌핑 손실(pumping loss)이 크게 된다. Figure 4는 동일한 시험조건에서 부하에 따른 연료소모율과 배기 특성을 나타낸 것이다. IMEP 4~5 bar의 조건에서는 연료소모율(ISFC)의 개선이 크지 않음을 알 수 있으며 부하가 낮아질수록 탄화수소(ISHC)의 배출량이 증가한다. 후기분사에서 미연탄화수소의 배출량은 인젝터의 성능,

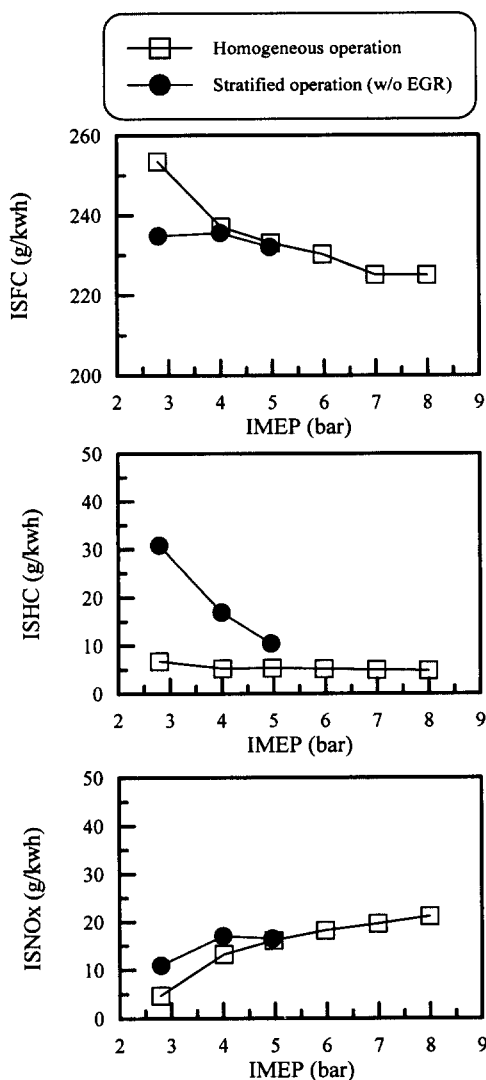


Fig. 4 Emission characteristics for IMEP variation (2000 rpm, w/o EGR)

연료의 분사 각도, 피스톤 보울내에서의 혼합 정도 등의 인자와 관련이 있다. 탄화수소의 배출량이 증가하는 것은 연료 분사 과정에서 피스톤의 보울 외부로 빠져 나오는 일부 혼합기와 피스톤 보울에 묻어있는 연료 성분이 연소되지 않고 배기 과정 중에 그대로 배출되기 때문인 것으로 판단된다.

질소산화물(ISNOx)의 경우 성층화 영역의 측

정값이 높게 나타났으며 연소실내 압력이 상대적으로 높아 연소 최고 온도의 상승으로 인한 영향으로 생각된다.

균질 영역과 성층화 영역에서의 시험 결과 비교는 개발할 대기통 엔진의 부하와 속도에 따른 운전조건을 예측하는데 이용될 수 있다. 현재의 연소시스템에서는 2000 rpm의 경우 성층화 영역은 IMEP 4 bar 이하에서, IMEP 4 bar 이상에서는 희박 영역(lean-homogeneous mode) 또는 균질 영역을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 성층화 영역 시험에서는 압축과정 중 피스톤 보울을 향하여 연료가 분사되기 때문에 연료와 공기의 혼합 정도, 피스톤의 상승 운동에 의한 점화플러그 주위의 공연비 분포, 매 사이클마다의 공연비 변동 등이 연소 안정성에 큰 영향을 미친다. 연료와 공기의 혼합 정도는 연소실내 유동 특성과 피스톤 형상에 크게 좌우되며 연소 측면에서는 혼합기의 확산, 연료 분사의 종료 시점과 점화시기의 간격이 중요한 인자가 된다.

Figure 5와 Figure 6은 2000 rpm, IMEP 2.8 bar에서의 IMEPCov와 ISFC의 분포를 나타낸 것이다. 연소안정성 측면에서는 EOI 50~55 deg. BTDC, 점화시기는 20~25 deg. BTDC 사이에서 가장 안정된 사이클별 연소 변동을 나타내고 있다. 본 연구에서 사용된 엔진에서는 점화시기와 EOI 사이의 간격이 약 30~35 deg. 정도가 최적 연소안정성 조건임을 알 수 있다. 연료소모율 측면에서는 EOI 55~60 deg. BTDC, 점화시기는 20~30 deg. BTDC 사이에서 가장 낮은 소모율을 나타내고 있다.

Figure 5에서 볼 때 점화시기와 EOI 간격이 너무 넓으면 연료의 확산이 커지므로 점화플러그 주위의 공연비가 희박하여 실화가 발생할 가능성이 커진다(A영역). 반면에 간격이 너무 좁으면 점화플러그 주위의 공연비가 농후하여 실화가 발생한다(C영역). 피스톤의 위치에 대하여 상대적으로 EOI와 점화시기가 상사점 부근이거나 조기에 분사하면 연소가 정상적으로 이루어지지 않는다(B영역과 EOI ≤ 45 deg. BTDC 영역).

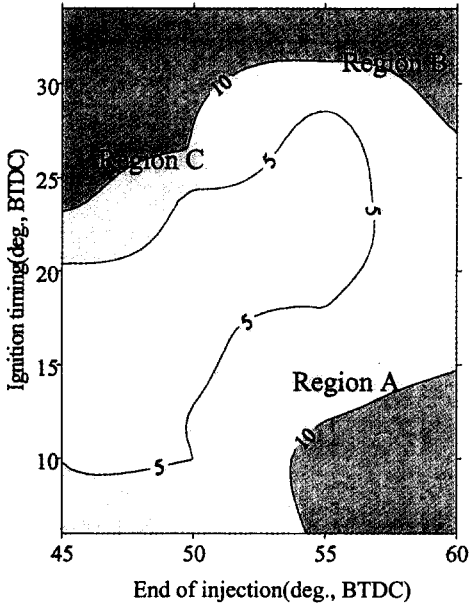


Fig. 5 IMEP_{cov}(%) regarding Injection and ignition timings (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

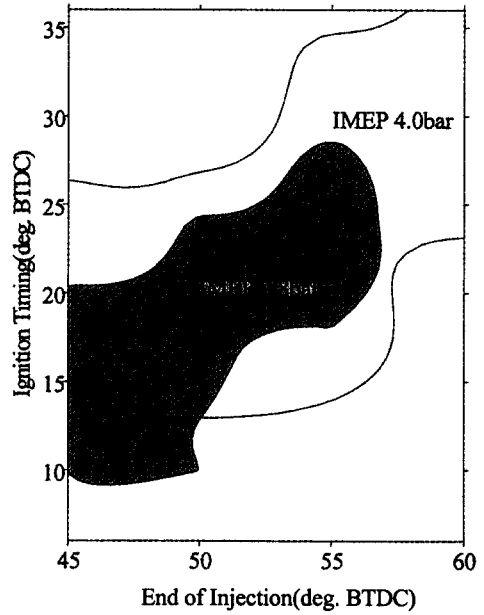


Fig. 7 Injection and ignition timings for stable combustion IMEP_{cov} below 5% (2000 rpm)

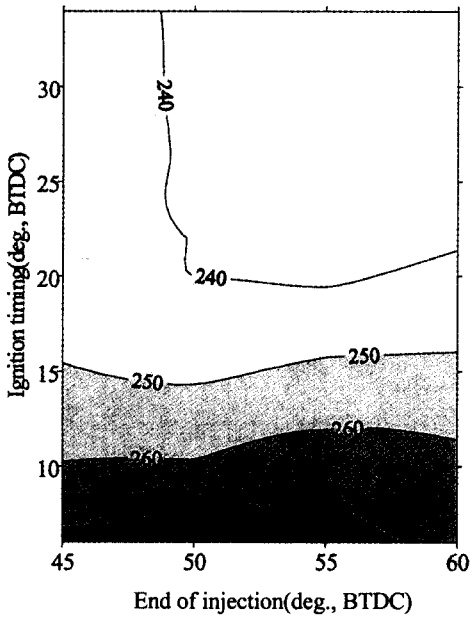


Fig. 6 ISFC(g/kWh) regarding injection and ignition timings (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

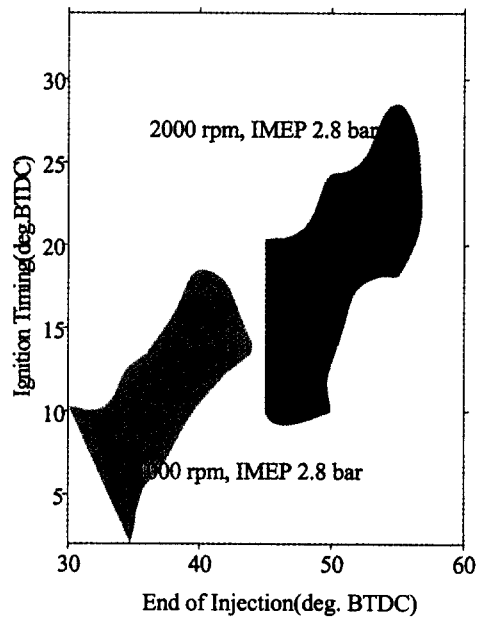


Fig. 8 Injection and ignition timings for stable combustion IMEP_{cov} below 5% (1000 & 2000 rpm)

Figure 7은 2000 rpm, IMEP 2bar와 IMEP 4bar 조건에서 EOI와 점화시기의 변화에 대하여 $IMEP_{cov} \leq 5.0\%$ 영역을 비교한 것이다. 부하가 높은 조건의 연소안정성 영역이 상대적으로 넓음을 알 수 있다. 부하가 높으면 분사되는 연료량이 많기 때문에 낮은 부하 조건에 비하여 상대적으로 점화플러그 주위의 공연비가 농후하게 분포되어 화염의 안정된 성장에 도움을 주는 것으로 판단된다.

Figure 8은 엔진의 부하를 IMEP 2.8 bar로 고정했을 때 회전속도 1000 rpm과 2000 rpm에 대한 $IMEP_{cov} \leq 5\%$ 영역을 비교한 것이다. 1000 rpm의 경우는 EOI 35~45 deg. BTDC, 점화시기 4~20 deg. BTDC에서 수행한 결과이고 2000 rpm의 경우는 EOI 45~55 deg. BTDC, 점화시기 10~30 deg. BTDC에서 수행한 결과이다.

회전속도가 낮은 영역에서는 흡입 공기의 운동 에너지가 낮아져 피스톤 보울면과 충돌 및 점화플러그 주위로 확산과정에 있어서 연료의 분무특성이 중요한 인자가 된다. 회전속도가 높아지면 흡입 공기의 운동에너지는 높지만 분무도달거리 (penetration length)에 소요되는 절대 시간이 짧아지므로 공기와 연료의 충분한 혼합 시간을 확보하기 위해서는 조기 분사를 해 주어야 한다. 그림에서 2000 rpm의 경우, 1000 rpm에 비하여 점화시기와 EOI 사이의 간격이 넓어짐을 알 수 있으며 전반적으로 $IMEP_{cov} \leq 5\%$ 영역이 상사점에서 멀어지는 경향을 보이고 있다.

3.2 유동특성에 대한 영향

성층화 영역에서 연료와 공기의 혼합 정도를 개선하기 위하여 강한 스웰 유동을 발생시키는 흡기 포트를 제작하여 연소 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Figure 9는 정적 유동장치를 이용하여 여러 스웰 포트에 대한 스웰비와 유량 계수의 측정결과를 나타낸 것인데 Head A가 기본 헤드이다.

스웰비 증가에 따라 실화가 발생하는 영역을 나타내는 회박 한계의 개선 여부를 파악하기 위

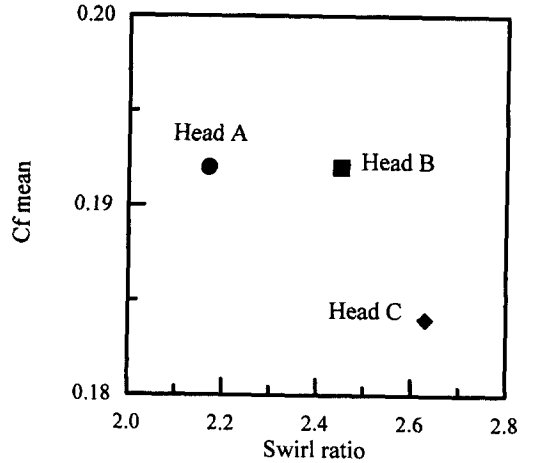


Fig. 9 Steady-state flow characteristics of the three intake ports

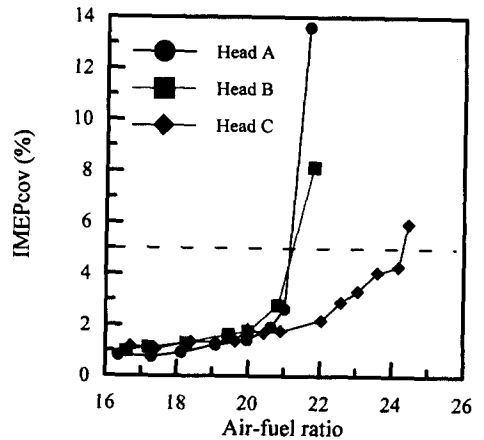


Fig. 10 Effect of port geometry on lean limit

하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 연료 분사시점은 조기분사 조건(EOI : 270 deg. BTDC)으로 하며 분사되는 연료량이 일정한 상태에서 트로틀 밸브를 열어 흡입 공기량을 증가시키면서 실화가 발생하는 공연비를 측정하였다. 이론공연비에서의 부하는 IMEP 6 bar이었으며 점화시기는 MBT 조건으로 제어하였다. 공연비가 회박한 조건에서의 $IMEP_{cov}$ 결과를 Figure 10에 나타내었다. Head B는 Head A보다 스웰비는 증가하였

으나 흡입 유량이 비슷하여 유동 개선 효과가 크지 않는 것으로 판단하며 거의 비슷한 희박한계를 보이고 있다. Head C의 경우 희박 한계의 공연비가 약 24.0 정도임을 보여준다.

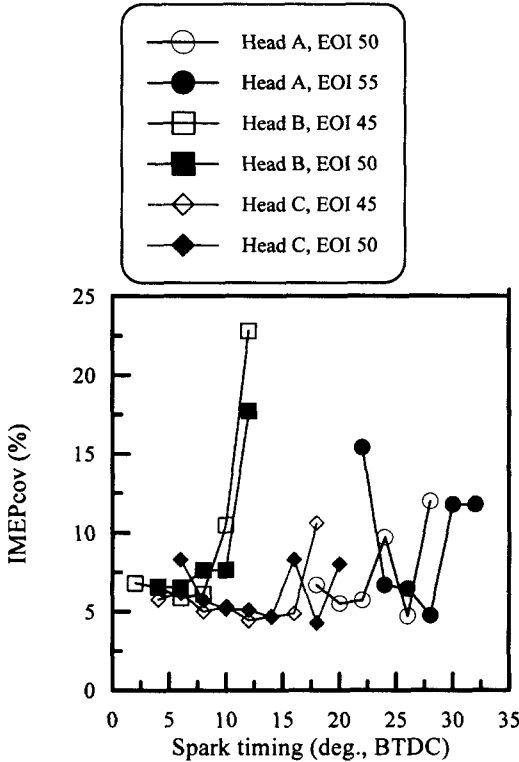


Fig. 11 Effect of port geometry on combustion (2000 rpm, IMEP 3.0 bar)

Figure 11은 성층화 영역에서 스웰비에 따른 연소안정성을 나타낸 것이다. 스웰비가 상대적으로 낮은 Head A의 경우 $IMEP_{cov}$ 가 5% 부근 영역에 대한 점화시기 분포가 상대적으로 좁은 것을 알 수 있다. 반면에 스웰비가 증가한 Head B와 Head C의 경우 점화시기는 후퇴하였지만 점화시기 분포는 넓어짐을 알 수 있다.

3.3 점화플러그 전극 형태의 영향

점화시스템에서 발생된 전기에너지는 점화플러그로 전달되며 전극의 형태에 따라 공기와 연

료의 혼합기로 전달되는 전기에너지의 전달 효율, 방전 특성 그리고 초기 화염의 열손실 등이 변화한다. 초희박 연소용 엔진에서는 좁은 접지 전극을 가진 점화플러그가 많이 사용되는데 초기 화염 성장에 유리하며 희박 한계 확장에 유리하기 때문이다. 좁은 전극을 가진 점화플러그는 전자를 방출하는 캐소드(cathode)의 면적이 작기 때문에 전류 밀도가 높아져 효과적으로 혼합기에 점화에너지가 전달될 수 있으므로 초기 화염 성장에 유리하다.^{12,13)}

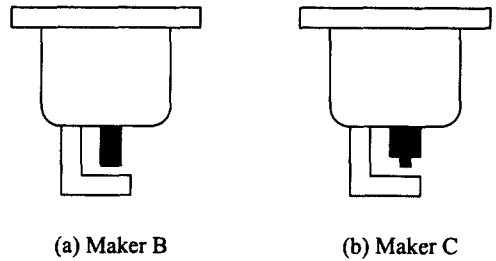


Fig. 12 Schematic diagram of spark plug tips

본 절에서는 초희박 조건인 성층화 영역에서 점화플러그 전극 형태가 연소 특성에 미치는 영향에 대하여 설명하였다. Figure 12는 B사 점화플러그와 본 연구에서 주로 사용한 C사 점화플러그의 전극 형태를 나타낸 것이다. C사 점화플러그의 전극 길이는 약 7mm이고 좁은 접지의 형태로 구성되어 있으며 B사 점화플러그는 전극 길이가 약 8 mm이고 전극이 원통형으로 되어 있다.

Figure 13은 성층화 영역에서 각 점화플러그를 사용하여 얻은 연소특성을 비교한 것이다. 두 점화플러그에 대한 $IMEP_{cov}$ 와 ISFC 결과에서는 유사한 경향을 보이며 점화시기가 진각할 수록 최고압력은 증가하고 ISFC는 감소하는 경향을 보인다. 공연비는 약 50:1의 초희박 영역의 분포를 보이고 있다.

Figure 14는 동일 운전조건에서 각 점화플러그를 사용하여 얻은 배출물 특성을 나타낸 것이다. C사 점화플러그의 경우, B사 점화플러그에 비하

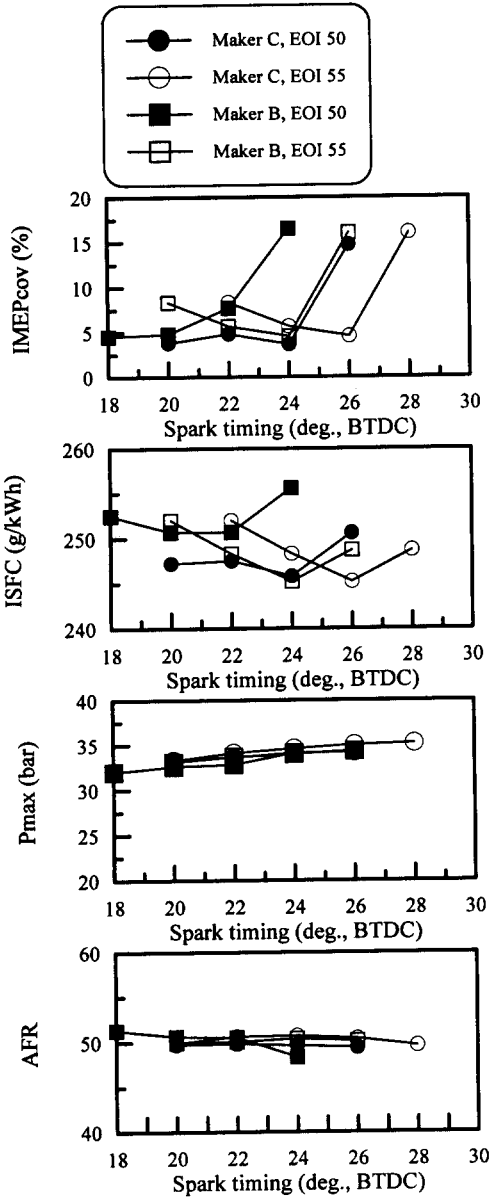


Fig. 13 Effect of spark plugs on combustion (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

여 ISHC는 적게 배출되었으나 ISNOx는 증가하는 경향을 보이고 있다. 점화플러그 전극 형태로 인하여 발생하는 단위 면적당 전류 밀도의 차이

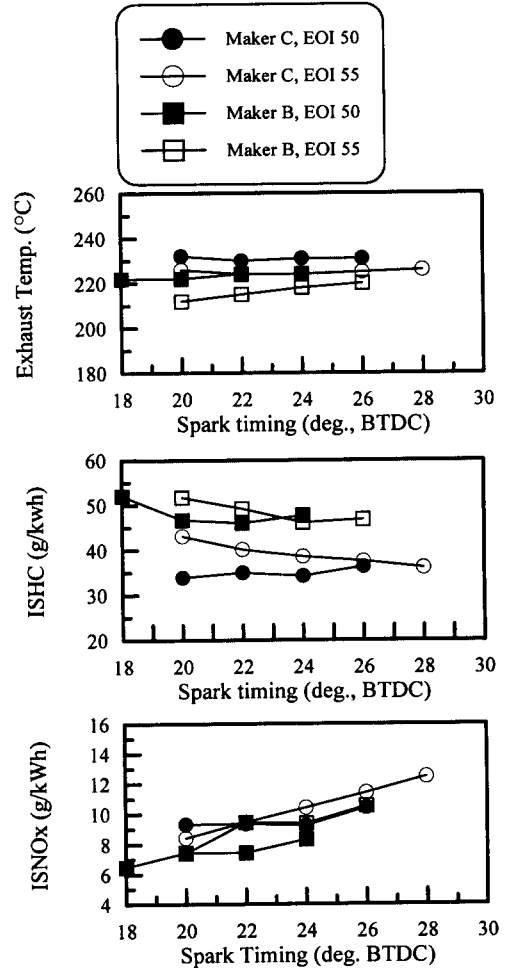


Fig. 14 Effect of spark plugs on exhaust emissions (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

가 화염 성장의 과정과 배기가스 온도 등의 연소 특성의 차이를 나타내고 있으며 배출물에도 영향을 보이고 있음을 알 수 있다.

3.4 압축비 변화에 대한 영향

압축비는 열효율과 밀접한 관계가 있는 인자로서 최고 성능 관점에서 압축비의 상승은 노크(knock)와 같은 이상 연소가 발생할 수 있기 때문에 적절한 수준에서 조정되어야 한다. 본 연구

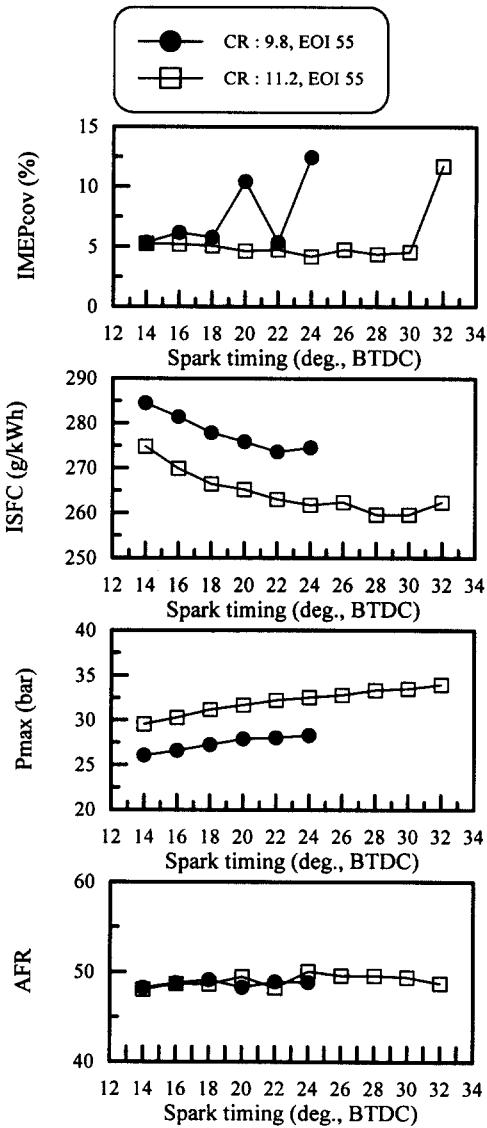


Fig. 15 Effect of compression ratio on combustion (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

에서는 연소실 체적은 고정하고 헤드와 블록 사이에 설치되어 있는 스페이서(spacer)의 두께를 조절하여 압축비를 11.2에서 9.8로 낮추어 성층화 영역에서의 압축비 영향을 고찰하였다. 이 경우에는 인젝터 중심과 피스톤 보울 중심 사이의 거리가 상대적으로 멀어지고 연료 분무 방향이

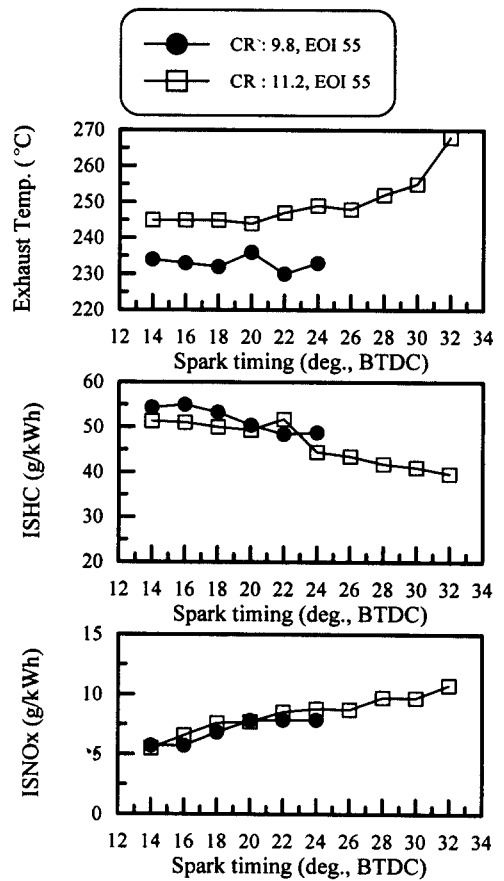


Fig. 16 Effect of compression ratio on exhaust gas emissions (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

피스톤 보울의 배기 밸브측 돌출부 방향으로 향하게 된다.

Figure 15는 2000 rpm, IMEP 2.8 bar에서 수행한 실험결과를 나타낸 것이다. 압축비가 낮은 경우 $IMEP_{cov} \leq 5\%$ 이내의 연소안정성을 나타내는 점화시기의 영역이 좁아짐을 알 수 있으며 연료소모율도 더욱 증가하였다. 압축비가 11.2의 경우 점화시기가 28 deg. BTDC 부근에서 가장 낮은 연료소모율을 나타내고 있으며 점화시기를 더 진각할 경우 다소 증가하는 경향을 보인다.

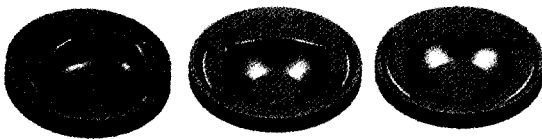
엔진 회전속도가 증가하면 공기와 연료의 혼합시간이 짧아지고 유동 특성의 영향이 상대적으로

커지기 때문에 상사점 부근에서의 피스톤 보울의 상대적인 위치가 점화플러그 주위의 공연비 분포에 영향을 미침을 알 수 있다.

Figure 16은 압축비 변화에 대한 배출물 특성을 나타낸 것이다. ISHC는 점화시기가 진각할수록 ISFC와 비례하게 감소하고 있으나 연소 최고 압력의 상승과 더불어 ISNOx는 증가하는 경향을 보인다. 압축비 11.2의 경우 동일한 부하를 얻기 위하여 소모되는 연료량이 적고 배기 과정에서의 산화로 인하여 압축비 9.8에 비하여 탄화수소는 적게 배출되는 경향을 보이고 있으며 연소 온도의 상승으로 인하여 질소산화물은 증가하는 경향을 보인다.

3.5 피스톤 보울 형상에 대한 영향

GDI 엔진의 피스톤 보울 형상은 연소실 내의 혼합기 거동에 큰 영향을 미치며 연소 특성과 직접적인 관계를 가진다. 성층화 영역에서는 압축 과정에서 연료를 분사하기 때문에 피스톤 보울의 형상은 분사된 연료가 실린더 전체로 퍼지는 것을 방지하고 공기와 혼합된 혼합기를 점화플러그 주위로 유도하는 역할을 한다. GDI 엔진의 피스톤은 유동을 특정 방향으로 유도하는 피스톤 보울 부분과 실린더 내부 유동의 크기 및 압축비 등과 관련이 있는 피스톤 상면 부분의 돌출부분 등을 고려하여 설계하여야 한다.



(a) Piston A (b) Piston B (c) Piston C

Fig. 17 piston bowl shape of GDI engine

본 연구에서는 피스톤 보울내에서의 연료의 층돌 분무 현상을 효과적으로 이용하여 성층화를 실현할 수 있도록 피스톤 보울 형상을 설정하고

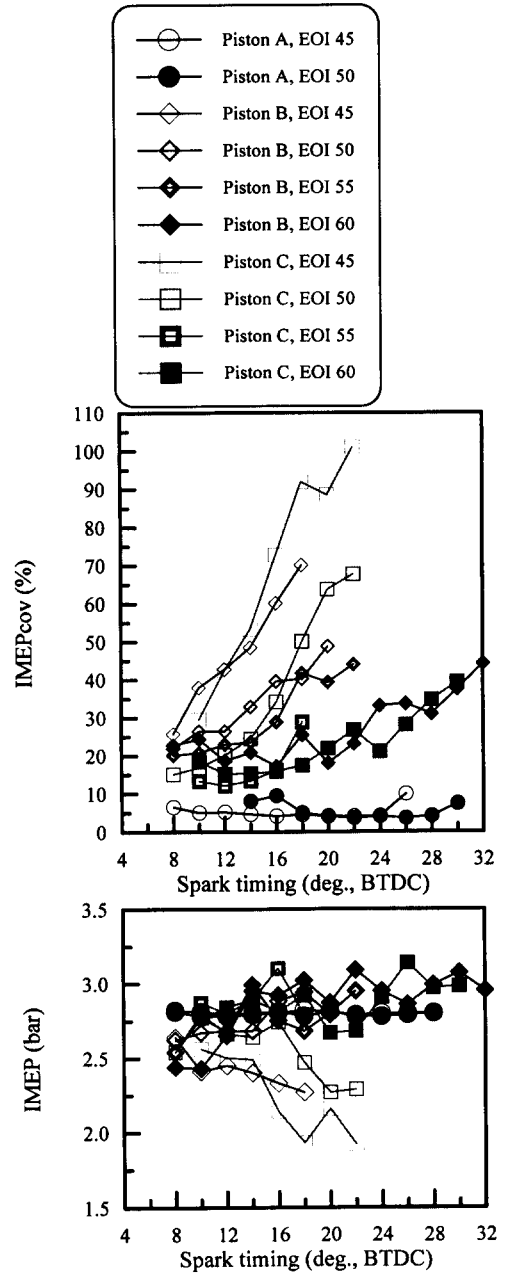


Fig. 18 Effect of piston bowl shape on combustion stability (2000 rpm, IMEP 2.8 bar)

자 하였으며 크게 타원형과 원형의 형상으로 구분하여 영향을 분석하였다. Figure 17은 실험에 사용한 피스톤의 보울 형상을 나타낸 것으로

Piston A는 보울의 형상이 타원형으로 되어있으며 압축비는 11.2:1 이다. Piston B와 Piston C는 원형의 형상으로 설계, 제작하였으며 각각 압축비 12.0:1, 10.1:1 이다. Piston B는 Piston C의 보울에 비하여 전체적인 직경은 작지만 보울의 깊이는 더욱 깊은 형상으로 되어있다.

Figure 18은 2000 rpm, IMEP 2.8 bar 성층화 영역에서 수행한 실험결과 중 연소안정성을 나타낸 것이다. 압축비에 상관없이 Piston A 경우에 비하여 Piston B와 Piston C는 $IMEP_{cov} \geq 10\%$ 의 경향을 보이고 있어 원형의 보울 형상이 실린더 내 유동 및 연료의 분무 특성과 부조화를 이루고 있음을 알 수 있다. 그림에서 나타낸 실험결과에서는 EOI이 상사점에서 멀어질수록 인젝터에서 분사된 연료가 피스톤 보울에 충돌한 후 점화플러그 주위로 확산하여 성층화하는 과정에 유리함을 나타내고 있다.

4. 결론

스웰 유동형태의 GDI 엔진의 연소시스템을 연구하기 위해 단기통 엔진을 구성하고 사용 빈도가 높은 부분부하 조건에서 시험을 수행하였다. 균질 영역과 성층화 영역에서의 연소 및 배출물 특성을 비교하였으며 성층화 영역에서 스웰비, 점화플러그의 전극 형상, 압축비, 피스톤 보울 형상 등의 관련 인자가 GDI 엔진의 연소 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 2000 rpm 회전 속도에서 부하의 변화에 따라서 균질 영역과 성층화 영역으로 구분하여 시험하였으며 IMEP 4 bar 이하의 조건에서는 균질 영역에 비하여 성층화 영역에서 약 10% 정도의 출력당 연료소모율이 향상되었다. 본 연구에 사용된 연소시스템에서는 점화시기와 EOI 사이의 간격이 약 30~35 deg. 정도가 최적 연소안정성 조건임을 알 수 있었으며 성층화 영역은 IMEP 4 bar 이하에서, IMEP 4 bar 이상에서는

회박 영역 또는 균질 영역을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

둘째, 실린더 내의 연료와 공기의 혼합 정도를 개선하기 위해 스웰비를 증가하면서 연소 특성을 고찰하였다. 기존 스웰비 2.2 정도에서 2.7 정도까지 스웰비를 증가함에 따라 $IMEP_{cov} \leq 5\%$ 연소안정성 구간이 확대되었으며, 회박 영역과 성층화 영역 사이의 경계로 판단할 수 있는 회박한계의 공연비가 약 24.0:1 까지 확대되었다.

셋째, 좁은 접지 전극의 점화플러그와 원통형 전극의 점화플러그를 사용하여 시험한 결과, 두 점화플러그에 대한 연소 특성은 유사하였으나 좁은 접지 전극의 점화플러그의 경우 ISHC는 적게 배출되었으며 ISNOx는 증가하는 경향을 보였다. 점화플러그 전극 형태로 인해 발생하는 단위면적당 전류 밀도의 차이가 화염 성장의 과정과 배기가스 온도 등의 연소특성의 차이를 나타내고 있으며 배출물에도 영향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

넷째, 압축비가 상대적으로 낮은 경우 $IMEP_{cov} \leq 5\%$ 이내의 연소안정성을 나타내는 점화시기의 영역이 좁아지며 연료소모율도 더욱 증가하였다. 압축비 변경에 따라 상사점 부근에서의 피스톤 보울의 상대적인 위치 변화가 점화플러그 주위의 공연비 분포에 영향을 미침을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용된 연소시스템에서는 타원형 피스톤 보울 형상이 원형 피스톤 보울 형상보다 실린더 내 유동이 연료 분무 특성과 조화를 이루어 결과적으로는 성층화 연소가 더 안정됨을 보여주었다.

참고 문헌

- 1) J. Harada et al., "Development of Direct Injection Gasoline Engine", SAE Paper 970540, 1997.
- 2) Y. Iwamoto et al., "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE

- Paper, 970541, 1997.
- 3) T. Itoh et al., "Combustion Characteristics of a Direct-Injection Stratified Charge S.I. Engine", JSAE Paper 9834015, 1998.
 - 4) M. Pontoppidan et al., "Improvements of GDI-injector Optimization Tools for Enhanced SI-Engine Combustion Chamber layout", SAE Paper 980494, 1998.
 - 5) H. Yamashita et al., "Mixture Formation of Direct Gasoline Injection Engine; In-Cylinder Gas Sampling using Fast Flame Ionization Detector", JSAE Paper 99300063, 1999.
 - 6) M. Wirth et al., "Gasoline DI Engine: The Complete System Approach by Interaction of Advanced Developments Tools", SAE Paper 980492, 1998.
 - 7) J. Yang and R. W. Anderson, "Fuel Injection Strategies to Increase Full-Load Torque Output of a Direct-Injection SI Engine", SAE Paper 980495, 1998.
 - 8) C. Preussner et al., "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance", SAE Paper 980498, 1998.
 - 9) M. Kano et al., "Analysis of Mixture Formation of Direct Injection Gasoline Engine", SAE Paper 980157, 1998.
 - 10) J. Geiger et al., "Direct Injection Gasoline Engines-Combustion and Design", SAE Paper 1999-01-0170, 1999.
 - 11) 권의용, 조은성, 이성풍, 조남효, "정적 챔버내의 고압 가솔린 인젝터의 연료분무특성", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집 Vol. I, pp. 183~188, 1999.
 - 12) S. Pischinger and J. B. Heywood, "How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI Engine", SAE Paper 900021, 1990.
 - 13) C. F. Daniels and B. M. Scilzo, "The Effect of Electrode Design on Mixture Ignition", SAE 960606, 1996.