가솔린 직분식 엔진의 저속 저부하 영역의 연소특성

Characteristics of Combustion for Gasoline Direct Injection Engine at Low Load and Speed

김 용 태 / Yong-Tae Kim
자동차부품연구원
Korea Automotive Technology Institute

김 병 수 / Byoung-Soo Kim
자동차부품연구원 실장
Korea Automotive Technology Institute

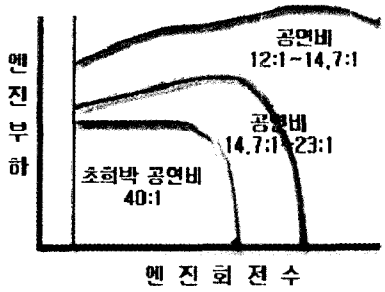
머리말

전 세계적으로 환경오염의 심각성이 대두되면서 세계 여러 나라는 매연가스 감소, 특히 CO_2 억제를 위해서 연소효율의 향상과 연료소비율의 저감에 심혈을 기울이고 있다. 제한된 자원을 효율적으로 사용하고, 최소의 연료로 최대의 출력을 얻기 위해서 가솔린엔진의 소형이지만 큰 출력과 디젤엔진의 높은 열효율로 연료소비가 적은 것에 착안해서 두개 엔진타입의 장점만을 모은 엔진을 만들고자 노력했다. 기존의 가솔린엔진으로는 한계가 있어 고 정밀도의 연소제어가 가능하며 매우 희박한 혼합기에서도 연소가 가능한 차세대 엔진으로 직접분사식 가솔린엔진에 대한 연구가 진행되고 있다.

GDI 엔진이 연비를 크게 향상시킬 수 있는 이유는 저부하 영역에서 발생하는 흡기 행정 중의 펌핑 손실을 대폭 저감시킬 수 있기 때문이다. 초희박 상태에서 연소되기 때문에 연소온도가 낮아져 냉각손실이 크게 줄어든다는 장점도 있다. 즉 실린더로 직접 분사된 가솔린은 흡기 및 실린더를 냉각시켜 충진효율이 향상되고 압축비를 높이는 것이 가능해 진다. 이러한 실린더 내 고압직접분사와 성층 연소기술이 GDI엔진의 핵심이다. 따라서 본 연구실에서 G7과제로 수행한 내용 중 성층연소에 관련된 부분을 소개하고자 한다.

성층연소

〈그림 1〉에서와 같이 성층연소는 엔진의 전체성능 맵 상에서 회전속도가 중 · 저속, 중 · 저부하 영역에서 실현된다. 이 때에는 SCV가 닫히고 한쪽 흡기관으로만 공기가 유입되면서 흡기행정 때 스월이 발생하고, 압축행정 말기에 연료가 분사되면 스월류와 함께 압축되어 피스톤의 볼부에 농후한 혼합기가 모아지게 된다. 스월류에 편승되는 농후혼합기를 점화플러그 부근으로 가져오게 하고, 모아진 혼합기가 확산되기 전에 점화한다. 점화된 혼합기는 스월에 편승하여 피스톤



〈그림 1〉 혼합비 전체성능맵

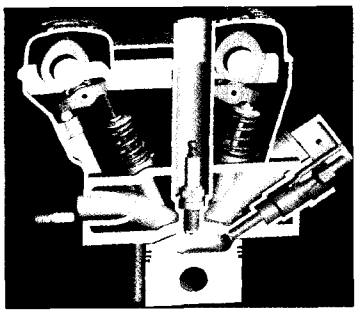
Bowl을 넘어 이동되어 화염전파 함으로써 연소가 완료된다.

여기서는 고압 스월 분사기를 채용한 가솔린 직분식 엔진의 저속 저부하 조건에서의 시험을 통해 나타난 결과를 소개한다.

엔진 · 인젝터 · 연료펌프

시험에 사용된 엔진은 배기량 1.97리터, 압축비 10.7인 DOHC 엔진이다. 〈그림 2〉와 같이 Side Ports Side Injection 방식의 엔진으로 점화플러그는 연소실 중앙에 위치하며, 연료는 연소실 측면에서 분사되어 스월류를 타고 피스톤 바울로 이동하여 점화플러그 주변에 농후한 혼합기를 형성하도록 설계되었다.

연료펌프는 3 실린더 타입으로 펌핑 최대압력이 120bar이다. 본 시험에서는 커먼레일의 압력을

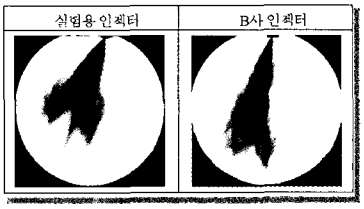


〈그림 2〉 Side Ports Side Injector Type

〈표 1〉 엔진 제원

엔 진 제 원	
배기량	1.97리터
밸브수	DOHC
압축비	10.7
연소실	Pent-Roof(Open Squish)
연료펌프	3 cyl. type
연료펌프 최고압력	120 bar
피스톤 형상	Lipped Bowl

100bar로 유지하도록 PCV를 제어하여 시험하였다. 또한 시험에 사용된 고압 스월 인젝터의 분무 특성은 그림 3과 같으며 양산품과 성능 비교를 위해서 연료분사각이 20°의 옵셋 (양산품 17°)을 갖는다.



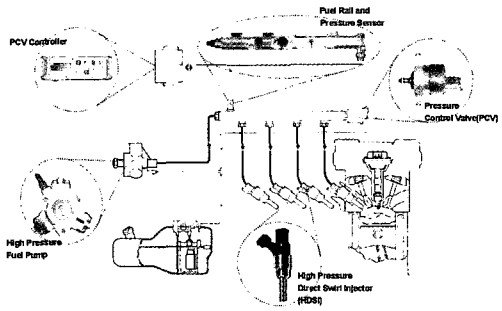
〈그림 3〉 연료분무 특성

시험 방법 및 시험 장치

저속 저부하 영역(성층연소 영역)의 성능을 평가하기 위해서 엔진 회전속도를 1800 rpm으로 고정하고 연료분사 압력을 100 bar, A/F=35:1, bmep=2.0 bar로 일정하게 하여 연료분사시기와 점화시기를 이동(swing)하면서 엔진성능을 양산품과 시험용 인젝터에 대하여 시험하였다. 또한 시험용 인젝터의 연소퇴적물 누적과 엔진성능변화를 관찰하였다.

〈그림 4〉에 가솔린 직접분사식 엔진에 적용되는 연료공급시스템의 핵심부품인 고압연료펌프, 커먼레일, PCV와 PCV 제어기 그리고 고압스월인젝터의 구성을 보여준다.

본 시험에 사용된 고압연료분사 시스템은 고압스월



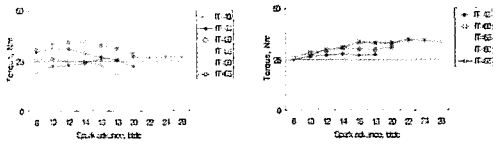
〈그림 4〉 GDI의 연료공급시스템 및 핵심 부품

인젝터, 고압연료분사펌프, 커먼레일, PCV 그리고 PCV 드라이버를 시험용으로 제작하여 양산품과 동등한 조건으로 시험을 수행하였다.

출력 특성

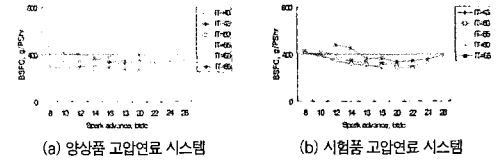
상기의 시험조건 하에서 양산품 연료공급시스템과 시험용 시스템에 대해서 비교시험을 하였다.

〈그림 5〉와 〈그림 6〉에 나타난 것처럼 시험용 시스템의 출력특성 및 연료소비량이 양산품에 거의 근접한 결과를 나타냈으며, 연료분사시기 변화에 따라 출력 및 연료소비량의 변동 폭이 양산품 시스템이 더 큰 것으로 나타났다. GDI 엔진의 경우, 특히 성층연소 구간에서는 연료분사 후 점화시간까지의 기간에 매우 짧기 때문에 연료분사와 점화시기는 안정된 연소의 중요한



(a) 양상품 고압연료 시스템 (b) 시험품 고압연료 시스템

〈그림 5〉 연료분사시기와 점화시기의 변화에 대한 출력특성



(a) 양상품 고압연료 시스템 (b) 시험품 고압연료 시스템

〈그림 6〉 연료분사시기와 점화시기의 변화에 연료소비율 특성

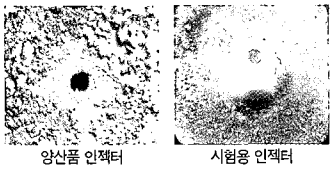
요인이 된다. 그러나 두 시스템의 경우 같은 연료분사시기에 대해서 점화시시변화에 대한 출력의 변화는 크지 않게 나타났고, 같은 점화시기에 있어서 분사시기의 변화에 대해서는 다소 차이를 나타냈다. 양산품 시스템의 경우 연료분사시기에 따라 출력의 차이가 크게 나타났으며, 이는 연료분사시기가 혼합기 성층화에 크게 기여하는 것으로 사료된다. 그러나 시험용 연료분사시스템은 그 차이가 상대적으로 적게 나타났다.

연소퇴적물

연소퇴적물은 연료와 공기가 혼합된 혼합가스가 연소하면서 공기중의 부유물 등과 연소산화물이 연소실 벽면이나 피스톤, 밸브 등에 부착되어 고착하는 것으로, 특히 직접분사식 엔진의 연료분사기의 경우는 연소퇴적물이 연료분사량 및 분사 패턴을 변화시켜 엔진 성능과 배출가스 특성에 직접적으로 영향을 미치게 된다. Deposit은 운전 중이던 엔진을 멈췄을 때 연소실 내의 고온과 미연소 연료, 부유물 등이 고착되어 재시동 상황에서도 잘 떨어져 나가지 않는다.

〈그림 7〉은 본 시험에 사용된 양산품 인젝터와 시험용 인젝터의 분사구 주변의 연소퇴적물 누적 현상을 보여주는 사진이다. 양산품 인젝터 팁의 경우 평평한 면에 연료분사구가 설치된 형상으로 인젝터 표면에 연소 찌꺼기가 쌓이면서 연료분사구 쪽으로 누적이 진행되어가는 것을 보여주고 있으며, 이러한 현상이 계속 지속되면 결국 인젝터의 연료분사구가 막혀 제 기능을 발휘하지 못하게 될 것이다.

한편 시험용 인젝터는 연료분사구 주변을 반구형으로 돌출하게 제작하여 연소퇴적물 누적을 방지하고자



양산품 인젝터 시험용 인젝터

〈그림 7〉 양산품과 시험용 인젝터 팁의 연소퇴적물 누적 현상

하였다. 그 결과 사진에서와 같이 연료분사구 주변의 반구형으로 돌출한 부분은 연소퇴적물이 쌓이지 않고 평평한 표면에만 연소퇴적물이 누적되는 것을 보여주고 있다.

연료분사압력

연료분사압력을 PCV Driver를 이용하여 50~100 bar 까지 10 bar씩 증가시키면서 엔진 성능 및 연소 특성을 분석해 보았다.

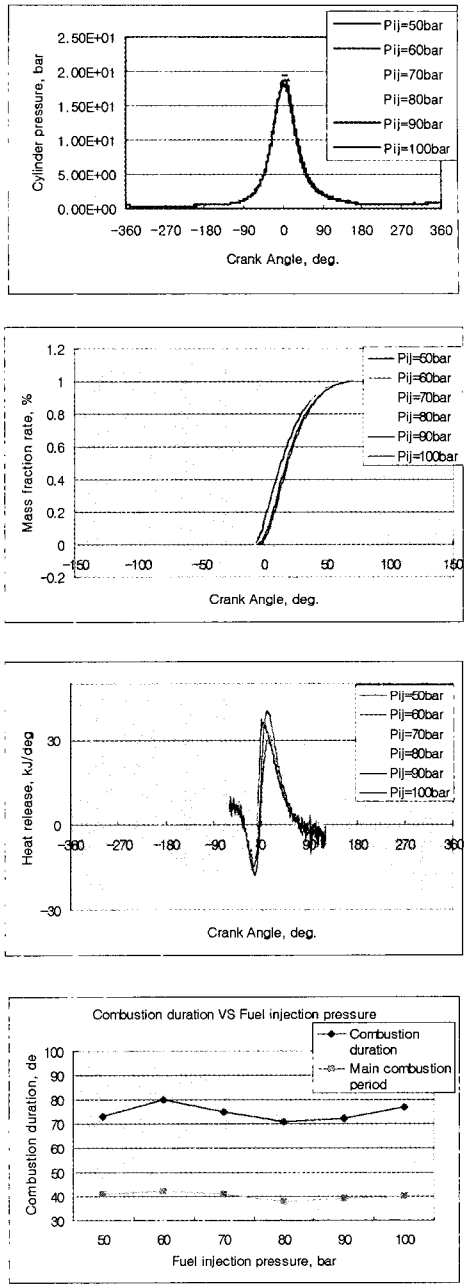
〈그림 8〉에서 연료분사압력 변화에 대한 연소최고압력은 거의 대등하게 나타냈으며, 열발생율은 약간의 차이는 있으나 전반적으로 엔진 성능 및 연소 특성은 큰 변화를 보이지 않는다. 또한 전연소기간과 주연소기간에서도 연료분사압력이 연소기간에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났으며, 연료분사압력이 80~100 bar에서 가장 짧게 나타났다. 이로 인하여 〈그림 9〉에 보여주는 것과 같이 토오크의 증가와 연료소비율이 향상되는 것을 보여주며, THC의 배출도 현저하게 감소하였으나 NOx의 배출은 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 연료분사 압력이 높아짐에 따라 연료의 미립화에 영향을 미쳐 연소 속도의 증가와 연소 성능 향상에 도움을 주는 것으로 생각된다.

맺음말

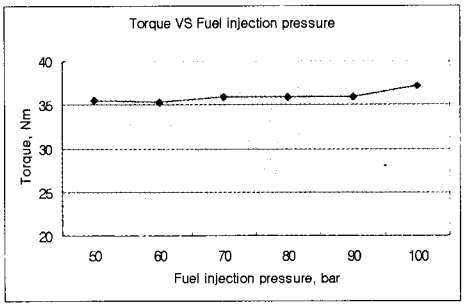
이상과 같은 시험 결과에서 시험용 고압연료분사 시스템의 각 구성 부품 특히 인젝터와 고압연료펌프의 구성 부품에 대한 내구 성능은 아직 구체적으로 확인되지 않았으나, 시스템의 성능은 기존 양산품에 비해서 그 성능이 필적하다 할 수 있다.

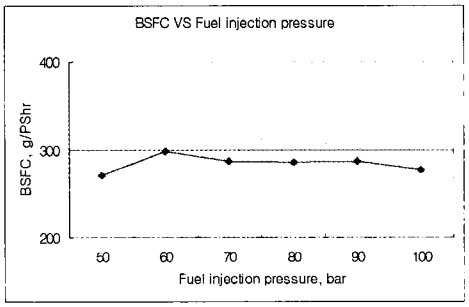
한편, GDI 엔진 개발에 있어서 성층화 연소에 따른 NOx 등의 처리를 위한 후처리시스템 기술 개발과 연료의 황성분이 가장 큰 문제점으로 나타나고 있다. 또한 연소퇴적물 누적에 의한 인젝터 Fouling이 실용화 기술에 걸림돌이 되고 있다. 그러나 이러한 문제는 기술적인 면에서 곧 해결될 것으로 기대된다.

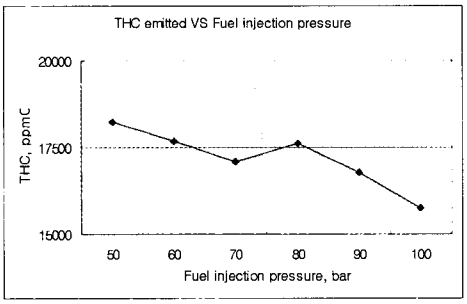
(김병수 편집위원 : bskim@katech.re.kr)

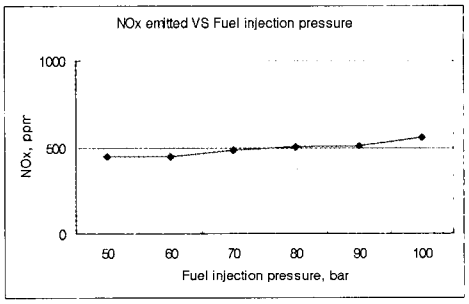


〈그림 8〉 연료분사압력과 연소특성









〈그림 9〉 연료분사압력과 엔진/배기특성

참고문헌

(1) H. A. Spikes, D. P. Wei and S. Koreck, 1997, The Lubrication Properties of Gasoline Fuel, Technische Akademie Esslingen (1st International Colloquium), pp. 259-266

(2) D. P. Wei, S. Koreck and H. Spikes, 1996, Comparison of the Lubricity of Gasoline and Diesel Fuels, SAE Technical Paper 962010, pp. 51 - 59

(3) 1986, Seals and Sealing HANDBOOK 2nd Edition. Trade & Technical Press Limited

(4) B. C. Na, K. J. Chun, D.-C. Han, 1997, Design Characteristics of Non-Contact Type Seal for High Speed Spindle. Journal of Korea Society of Precision Engineering, Vol. 14, No 4, pp. 56-63

(5) H. Stoff, 1980, Incompressible Flow in a Labyrinth Seal, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 100, pp. 817-829

(6) Rhode, D. L., Demko, J. A., Traegner, U. K., Morrison, G. L., and Sobolik, S. R. 1986, The Prediction of Incompressible Flow in Labyrinth Seals, ASME Journal of Fluids Engineering Vol. 108, pp. 19-25

(7) 1990, PHOENICS Training Course Notes CHAM TR/300. CHAM Limited,

(8) Partankar, 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Spalding.

(9) A. Kijima, 1997, "Environment - Friendly GDI Engine", 97 Tokyo Motor show Seminar

(10) 조진호, "직접분사 가솔린 엔진의 개발", 자동차공학회지 제20권 제3호, pp. 1-10, 1998

(11) "Mitsubishi New Technologies Digital Contents Package", Mitsubishi Motors Corporation, 1997

(12) PHOENICS Training Course Notes CHAM TR/300. CHAM Limited, 1990

(13) Allen A. Aradi, Bill Imoehl, "The effect of composition and engine operating parameters on injector deposit in a high-pressure direct injection gasoline(DIG) research engine" SAE technical paper 1999-01-3690.

(14) David C. Arters and Malcolm J. Macduff, "The effect on vehicle performance of injector deposits in a direct injection gasoline engine" SAE technical paper 2000-01-2021

(15) Masao Kinoshita and Akinori Saito, "A method for suppressing formation of deposits on fuel injector for direct injection gasoline engine" SAE technical paper 1999-01-3656.

(16) Paul W. Guthrie, "A review of fuel, intake and combustion system deposit issues relevant to 4-stroke gasoline direct fuel injection engines" SAE technical paper 2001-01-1202.