직접분사식 가솔린엔진의 기술개발 동향

Development Status of Direct Injection Gasoline Engines

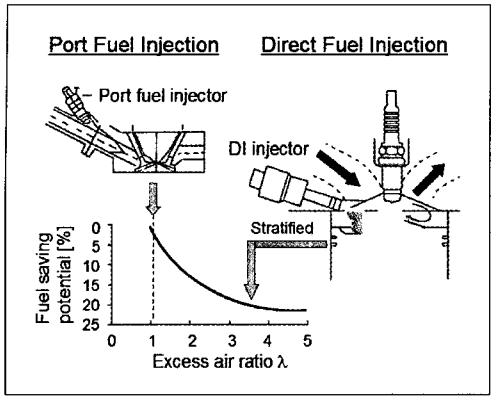
조 남 효 / Nam-Hyo Cho
고등기술연구원 센터장
Institute for Advanced Engineering

머리말

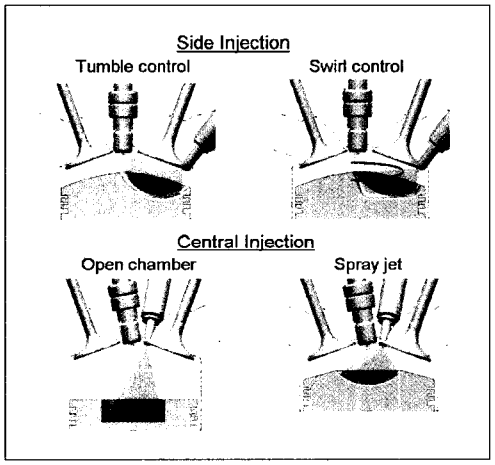
1990년대 후반 전세계 자동차업계는 직접분사식 가솔린엔진(G-DI)의 도래에 큰 기대를 걸었다. 지구 온난화 방지를 위한 1997년 교토 기후협약 전후로 전 세계적으로 에너지소비 절감에 고심했고 유럽 자동차 메이커들은 평균 연비를 2008년까지 1995년 대비 25% 이상 향상키로 결의하였다. 이에 따라 연비 향상에 지대한 관심을 갖게 된 유럽과 일본의 메이커들은 G-DI 엔진에 대한 지대한 관심과 연구개발에의 투자를 시작했다. 그러나 성층화연소에 따른 NOx 증가를 해결하기 위한 새로운 DeNOx 촉매 및 센서 등의 후처리시스템, 고압 연료분사 부품 및 정밀 엔진제어 시스템, 생산가 상승 등으로 차량 가격상승 등의 문제가 컸었고, 결과적으로는 현재의 기술과 여건으로는 최대 10% 정도의 연비향상 밖에 기대하지 못하게 되자 메이커들의 G-DI 엔진의 양산에 대한 관심은 점차 낮아지게 되었다. 한편 유럽에서는 CO_2 배출량의 자율규제에 대응하기 위해 연비 향상 경쟁이 심화되고 있다. 본 소고에서는 현재의 국내외 G-DI 엔진개발 현황과 신기술 동향에 대해 간략하게 소개하였다.

G-DI 엔진의 연소시스템

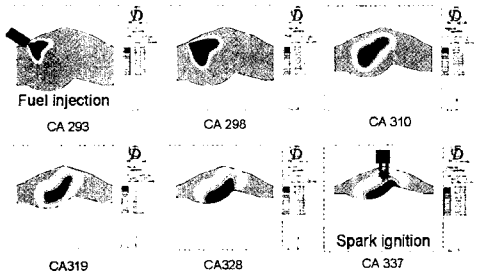
직접분사식 가솔린엔진은 성층화(Stratified) 연소가 가능하여 초희박 공연비 상태에서도 안정된 엔진 운전이 가능하다. 〈그림 1〉은 포트 분사 방식에 비해 어느 정도 연료소모율 향상이 가능한지 개략적으로 보여주는 그림이다. 〈그림 2〉는 다양한 연소시스템의 개념을 보여주는 그림이다. 측면분사는 기존의 포트분사 엔진을 크게 수정하지 않고도 빠른 기간내에 엔진을 개발할 수 있는 장점이 있으나 엔진의 연소특성이 포트 설계와 피스톤 보울의 최적화에 민감하게 된다. 중앙분사는 직접분사식 디젤엔진의 개념과 유사한데 흡



〈그림 1〉 포트분사 방식과 직접분사 방식의 비교



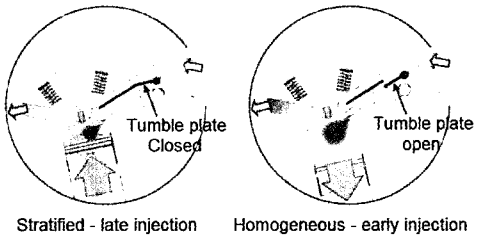
〈그림 2〉 G-DI 연소시스템의 분류



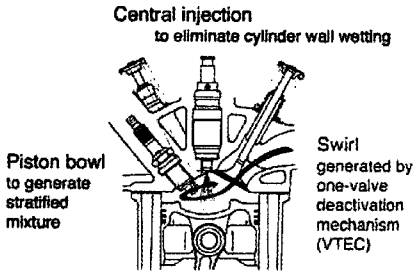
〈그림 3〉 성층화모드에서의 공기-연료혼합 과정의 전산유체 역학 시뮬레이션

기포트 유동에 크게 좌우 받지 않기 때문에 연소시스템의 설계 자유도가 크지만 실린더 헤드를 새롭게 개발해야 되므로 개발비용과 개발기간이 문제가 될 수 있다. 〈그림 3〉은 측면 연료분사의 경우 어떻게 실린더내 연료가 성층화되는지 3차원 전산유체역학 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 연소실내의 유동과 고압 분사된 연료분무 형태가 엔진흡기포트 형상과 피스톤 보울에 의해 결정되는 연소실 형상에 의해 결정되는데, 이와 관련된 설계인자와 연료분사 조건 등을 적절히 최적화하면 초희박 상태에서도 안정적인 연소가 가능한 연소시스템을 개발할 수 있다. 그러나 G-DI 엔진의 많은 경우가 측면분사를 적용하고 있기 때문에 이러한 흡기유동, 연료분무형태, 연소실형상을 최적화하는 과정이 최근의 커몬레일 고속디젤엔진의 연소시스템 개발보다도 어려운 기술적인 난점이 있다.

〈그림 4〉는 현재 양산중인 Volkswagen의 FSI (Fuel Stratified Injection) 연소시스템 개념도를 보여준다. 측면 연료 분사에 흡기포트 상하방향의 텀블 제어판을 끼워 필요에 따라 텀블 유동을 제어하는 방식을 사용하고 있다. 이것은 독일 FEV의 기술을 이용한 기술이며 다수의 유럽 메이커들과 국내 메이커 일부가 적용하고 있다. 이러한 시스템은 높은 엔진회전수와 고부하 영역까지 성층화 운전영역을 넓힐 수 있다는 장점이 있으나 최적 연소실 개발이 어려운 단점도 있다. 이와 다르게 독립 흡기포트 일단에 스월제어



〈그림 4〉 Volkswagen의 FSI 엔진개념 (FEV 특허)



〈그림 5〉 Honda VTEC-DI 엔진 개념

밸브(SCV; Swirl Control Valve)를 설치하여 강한 흡기스월 유동을 이용하여 연소실내 연료분포를 성층화하는 방법도 많이 사용되는데, 연소시스템 개발이 상대적으로 수월한 반면 성층화 운전영역이 좁다는 단점도 있다.

〈그림 5〉는 Honda의 VTEC 개념에 중앙분사를 적용한 G-DI 개념을 보여준다. 피스톤 보울내의 Vortex 유동을 제어함으로써 공기-연료의 혼합 성층화를 제어하고, 전부하에서 분무의 벽충돌을 피함으로써 전개성능을 향상시킬 수 있게 된다. 측면분사보다 공기-연료의 성층화 형성이 크게 유연하여 개발이 용이하며 허용 EGR률의 폭도 높일 수 있는 장점이 있다. 향후 차세대 G-DI 인젝터가 개발되어 초고압 미립화 분무가 가능해지면, 점차 이러한 연소시스템이 지배적으로 적용될 것으로 전망된다.

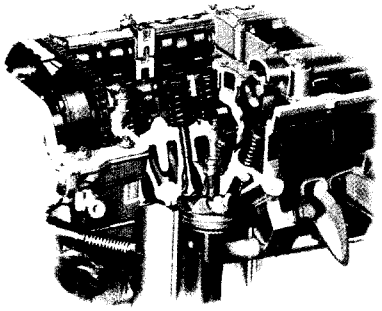
지금까지의 기술개발 동향을 보면 성층화 운전모드에서는 EGR이 없는 경우 중저속 부분부하에서 최대 40:1~50:1의 공연비 운전이 가능하고 연료소모율도 최대 20% 정도는 가능한 것으로 보고 되고 있다. 그러나 성공적인 성층화 G-DI 엔진의 개발을 위해서는 연소시스템뿐만 아니고 후처리 시스템과 연료시스템, 제어시스템의 통합개발이 필수적이다. 특히 EURO4 이상의 배출가스 규제에 대응하기 위해서는 5~10 ppm 이하의 초저황 가솔린의 사용과 DeNOx 촉매 또는 NOx 트랩이 필수적이고, 이에 따른 축적된 NOx와 황성분을 주기적으로 제거하는 등의 효율적인 엔진 제어 기술 등이 필요하다.

국내외 G-DI 엔진개발 현황

최초의 4행정 G-DI 양산엔진으로는 1950대 Mercedes-Benz의 300SL 모델에 적용한 사례가 있으나, 지금과 같은 고난도의 전자제어장치나 연비 개선을 위한 성층화 연소를 이용한 것은 아니었다. 이후 Mitsubishi는 1996년에 처음으로 전자제어 연료시스템과 후처리시스템을 적용한 차세대 GDI 엔진을 양산, 시판한 이후로 전 엔진 사이즈에서 GDI 엔진을 개발하였으며 터보차져의 적용, ASG(Auto Stop & Go) 차량 및 하이브리드 차량 등에도 적용한 바 있다. 이후 현대자동차, PSA Peugeot Citroën, Volvo 등에 기술을 제공한 바 있다. 일본이 활발한 G-DI 엔진개발을 통해 기술력을 과시하던 1990년대 말을 전후하여 Toyota와 Nissan이 양산에 들어가고 Honda, Mazda, Suzuki 등 대부분의 일본 메이커들도 G-DI 엔진 기술을 확보한 상태이나 양산차에의 적용은 그리 활발하지 않은 현실이다.

국내에서는 1990년말부터 수년 동안 현대자동차, 기아자동차, 대우자동차가 연구개발에 참여하였으나, 아직까지는 독자적인 양산 엔진은 출시되지 않고 있다. 현대는 한때 Mitsubishi로부터 4.5L 엔진을 도입하여 에쿠우스 모델에 적용한 바 있으며, 현재는 2L급의 엔진 및 차량을 개발하고 있다. 대우는 1999년부터 3년간 자체기술로 1.6L급 프로토 엔진을 개발하고 델파이사와 공동으로 데모차를 개발한 바 있다. 그러나 최근 GM대우로 변경되면서 당분간 구체적인 적용계획은 없어 보이며 필요에 따라 GM 엔진을 도입 적용할 것으로 보인다.

유럽에서는 1999년말 Renault가 Siemens 연료시스템을 이용한 2.0L Megane 모델을 유럽 최초로 출



〈그림 6〉 Daimler-Chrysler의 Mercedes 200 CGI 엔진

시하면서 기술력을 과시한 바 있다. 포트분사용 엔진처럼 삼원촉매를 사용하기 위해서 성층화 연소를 배제한 균일모드 G-DI 엔진 차량을 선보였지만 여러가지 문제점으로 인해 얼마 안돼 생산을 중단한 상태이다. 유럽에서 가장 적극적으로 G-DI 엔진을 개발하고 있는 메이커는 Volkswagen이다. FSI란 이름으로 Bosch 연료시스템을 적용하여 1.4~5.0L급 모두에서 G-DI 엔진을 적용할 계획이며 2005년까지는 전 차종에 확대한다는 계획을 갖고 있다. GM-Opel은 GM의 L850 Ecotec 엔진을 기본으로 한 G-DI 엔진을 개발해 왔으며 최근 2.2L 엔진을 탑재한 Signum 모델을 출시하였다. Opel은 연비에는 큰 관심이 없고 중대형차를 선호하는 미국시장에서 보다는 유럽시장을 목표로 1.6~3.2L급에서 다양한 G-DI 엔진을 개발하고 있다. Ford Europe은 1.1~2.5L의 중소형 엔진에 G-DI 엔진기술을 적용하고 있으며 2003년 Ford 최초의 G-DI 엔진인 1.8L Duratec SCi 엔진을 장착한 Mondeo 모델을 출시하였다. Daimler-Chrysler는 최근 수퍼차져를 적용한 Mercedes CLK 200 모델에 CGI(stratified Charged Gasoline Injection) 엔진을 탑재하여 출시하였다.

BMW는 2.5~5.0L 엔진 등 다양한 배기량의 엔진

〈표 1〉 유럽에서 시판중인 G-DI 엔진 탑재 승용차 현황 (출처 : 독일 AUTO BILD)

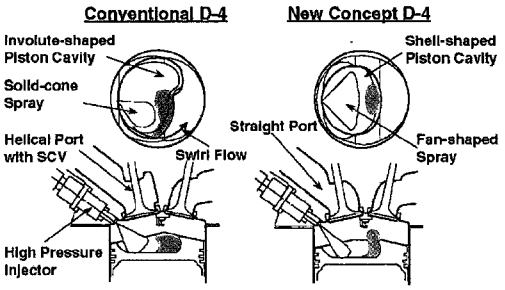
구분	VW	DaimlerChrysler	Ford Europe	GM-Opel
Engine	1.6 FSI	200 CGI Supercharged	1.8 Duratec SCi	2.2 Ecotec-Direct
GDI combustion mode	Side injection Tumble flow	Side injection Swirl flow	Side injection Swirl flow	Side injection Swirl flow
Capacity	1598 cm^3	1796 cm^3	1798 cm^3	2198cm^3
Power kW @RPM	85/6000	125/5500	96/6000	114/5600
Torque Nm @RPM	155/4000	250/3000	175/4250	220/3800
Curb weight	1260 kg	1575 kg	1385 kg	1545 kg
Max. speed	192 km/h	231 km/h	207 km/h	211 km/h
Acceleration 0-100 km/h	10.8 s	9.4 s	10.5 s	9/8 s
Fuel consumption /100km	6.6L	10.0L	7.2L	9.8L
Fuel type, saving	S-plus, 10%	S-plus, 19%	Super, 6~8%	Super, 6%
Vehicle model	Golf 2.0	Mercedes CLK	Mondeo Ghia X	Signum
Transmission	5-step MT	6-step MT	6-step MT	5-step MT
Price (base model) Euro	17,995	36,424	27,275	24,945

에 자사 특허인 Valvetronic 기술과 G-DI 엔진기술을 접목하여 개발하고 있으며 2003년 이후 시판할 것으로 보인다. 고급차종을 목표로 하는 BMW로서는 연비 향상보다는 기술력 과시, 출력 및 운전성 향상에 초점을 두는 경향이 있는 것 같다. 〈표 1〉은 2003년 현재 유럽에서 시판중인 G-DI 탑재 차량을 정리한 것이다.

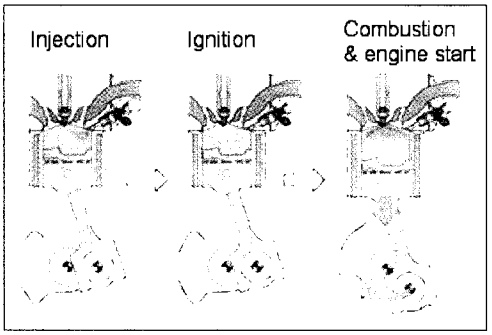
G-DI 엔진의 신기술 동향

G-DI 엔진은 연소시스템의 개발의 기술적인 난제에도 불구하고 궁극적으로는 후처리시스템과 연료시스템의 발전과 함께 EURO4 이상의 배기규제를 만족시키며 20% 이상의 연비 향상 효과를 이룰 수 있을 것으로 보인다. 이것은 기존 엔진 기술의 조합과 신기술의 개발로 가능할 것으로 보이는데 기존 엔진기술로 가장 유망한 것은 수퍼차져를 이용한 엔진배기량 다운사이징, 가변밸브기구(VVT) 등의 조합을 들 수 있다. 신기술은 주로 새로운 연료시스템과 연소제어 기술의 조합으로 이루어 질 것으로 보인다.

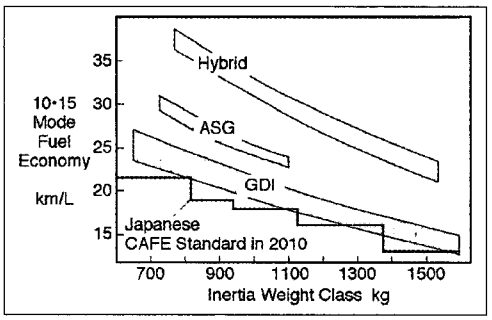
넓은 운전영역에서 안정된 G-DI 성층화 연소를 이루는 연소시스템을 적기에 개발하기 위해서는 흡기유동의 영향을 최소화하고 연료분무 특성을 주요 제어인자로 하는 연소시스템이 필요하다. Toyota는 〈그림 7〉과 같은 Denso의 슬릿 노즐(Slit-nozzle) 인젝터를 사용함으로써 일반적으로 많이 사용되는 스월형 노즐보다 연소실 설계의 자유도를 크게 높이고 분무관통도, 액적확산, 미립화 등에서 우수한 특성을 보여준바 있다. 이보다 더욱 발전한 인젝터로는 직접분사식 커먼레일 인젝터 개념과 유사한 초고압 차세대 다공(multi-hole) 고압 인젝터를 예를 들 수 있다. 〈그림 8〉은 이러한 차세대 G-DI 인젝터를 이용한 Bosch의 Direct start 개념을 보여주는 그림이다. 차량 연비에 크게 영향을 주는 요소는 주행 흐름중 빈번한 정차이다. 일반적으로는 정차시에도 아이들 상태로 엔진이 운전되기 때문에 전체 연비의 10~15% 정도는 이때 소모된다. 따라서 이때의 연료소모를 최소화하기 위한 장치(ASG; Auto Stop & Go)가 많이 소개되고 있다. Bosch의 차세대 인젝터는 Spray Guided Combustion 개념을 도입하여, 고압의 극미세 분무를



〈그림 7〉 Toyota D-4 엔진의 연소시스템



〈그림 8〉 Bosch의 Direct Start 개념



〈그림 9〉 일본 10-15 주행모드에서의 동력시스템에 따른 연비효과 비교

형성하므로 엔진이 아이들 상태가 아닌 완전 정지시에도 시동모터 도움없이 바로 점화하여 엔진시동을 걸 수 있는 인젝터 개념이며 2006년경에는 양산에 들어갈 것으로 보인다. G-DI 시스템은 경소형 ASG 차량에서 특히 효율적인 것으로 보고되고 있다. 〈그림 9〉는 Mitsubishi의 GDI-ASG 개념을 일반 GDI, 하이브리드 차량들과 비교한 그림이다. 일본 10-15 주행모드에서는 주행중 정차 횟수가 상당히 많기 때문에 ASG 개념이 특히 적합하며 유럽 모드에서도 어느정도 효율적일 것으로 보인다.

G-DI 엔진은 연료분사 시기를 다양하게 변경해가면서 연소 및 배기 특성을 제어할 수 있는 장점이 있다. 특히 흡기과정과 팽창과정중 다중연료분사(Multiple Injection) 기술을 잘 활용하면 연소안정성 향상, 연소소음 저감, NOx 저감, 촉매 Light-off 온도 상승 등등의 효과를 이용할 수 있으므로 주요 연소제어 요소로써 활발하게 개발되고 있다.

맺 음 말

현재의 G-DI 엔진 기술은 여러 특장점을 갖고 있지만 대부분의 자동차 메이커들은 적극적인 개발에는 소극적이었다. 이것은 기본적으로는 G-DI 시스템으로 대체하는 것에 대한 차량 가격 상승요인이 차량 연비 개선효과를 초과하는 문제도 있으나, 당분간은 성층화 연소에 따른 NOx 등의 처리를 위한 후처리시스템 기술 개발과 연료의 황성분 품질 문제가 가장 큰 문제점인 것으로 보여 진다. 그러나 대부분의 전문가들은 이러한 문제가 해결될 것으로 기대하는 2010년 이전까지는 G-DI 엔진이 새로운 가솔린엔진 시장의 30% 시장을 차지할 것으로 전망하고 있다. 또한 수퍼차져, 터보차져 등을 이용한 배기량 다운사이징 개념의 엔진이 다양하게 적용되면 운전성과 연비 향상효과가 뚜렷한 차세대 G-DI 엔진은 고객과 메이커들의 새로운 관심을 끄기에 충분할 것이다.

(조남효 센터장 : nhcho@iae.re.kr)

참고문헌

1) Matthew Beecham, A global market review for fuel injection systems, A report form Aroq Ltd., U.K., April 2003 (www.just-auto.com).

2) F. Pischinger and P. Walzer, "Future Engine Technologies for Passenger Cars", AutoTechnology, No. 1, 2003, pp. 92-95.

3) New Engine News, Ricardo Report RD 02/0030, Jan. 2003.

4) Auto Bild, New vehicle test reports 2911, 4616, 4872, 5071 (www.autobild.de).

5) N.H. Cho, H.C. Park, M.R. Kim, "Effect of Boosted Intake Pressure on Stratified Combustion of a Gasoline Direct Injection Engine", Trans. of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, No. 2, 2003, pp. 48-55.

6) K. Takeda, T. Sugimoto, T. Tsuchisa, M. Ogawa, S. Ueda, K. Yoneshie. "Slit Nozzle Injector for A New Concept of Direct Injection SI Gasoline Engine", SAE 2000-01-1902, 2000.

7) K. Ueda, K. Kaihara, K. Kurose, J. Ando, "Idling stop system coupled with quick start features of gasoline direct injection", SAE 2001-01-0545, 2001.