

일본에서의 LPG 엔진의 연구개발

이 대엽 박사 · 일본기계기술연구소 연소공학연구소

일본에서는 자동차, 특히 디젤 차량으로부터의 배출가스에 의한 대기오염이 심각한 상황에 있어 일본 정부는 여러 차례 디젤 차량의 배출가스 저감 대책을 수립하였다. 또한 온실효과 가스의 배출억제의 관점에서 고효율, 저공해 자동차의 도입이 필요하게 되었다. 일본 정부의 보고서에 따르면, 1994년 6월에 디젤대체 LPG자동차를 크린에너지 자동차로써 위상을 정하고, 1998년 6월에는 LPG는 환경부하가 상대적으로 적고 LNG와 함께 크린에너지임을 밝히고 있다.

LPG 자동차는 배출가스의 저공해성 및 엔진의 정숙성, 저진동성에서 우수하여 소형의 상용차에는 점차 보급이 되어가고 있으나, 중형 이상의 상용차에 있어서는 디젤 차량이 주류가 되어 있어 LPG 자동차의 보급이 잘 이루어지지 못하고 있는 것이 현실이다.

최근 도시권의 대기환경 개선을 위해 각종의 디젤 대체의 저공해차의 개발, 도입이 진행되어 왔다. 그러나 이들 저공해차는 적재성, 항속거리, 연료 인프라등의 점에서 디젤차에 비하여 열세의 부분이 있어 보급 확대를 위해서는 아직 과제가 남아있다. <표 1>에 표시한 바와 같이 LPG차는 CNG차와 동등의 저배기성을 갖고 있고, 적재성

및 항속거리, 연료 인프라면에서 CNG차와 비슷하고, 다른 저공해차에 비하여 우수한 점이 많다. LPG 엔진을 방식에 따라 분류하면 <표 2>와 같다. 다음에서는 닛산 디젤이 개발한 중형 트럭용 린번 LPG 엔진과 현재 일본에서 수행 중인 고효율 LPG 엔진 개발 프로젝트에 관하여 간단히 살펴본다.

중형트럭용 린번 LPG엔진

일본에서는 2-3톤 적재(차량 총중량 6톤이하)의 LPG 소형 트럭까지의 보급에 머물러서, 중대형급의 실용화는 이루어지지 않고 있다. 소형 트럭용 엔진은 요구되는 출력이 낮고, 가솔린엔진의 개조로 비교적 용이하게 개발이 가능하다고 볼 수 있으나, 이에 비하여 중대형 차량용 엔진은 요구되는 출력, 토크 및 내구성의 레벨이 높아 CNG와 비교하여 옥탄가가 낮은 LPG의 특성상, 중대형의 큰 보어 엔진을 기술적으로 실현시키기가 어렵고, 실용화가 이루어지지 않고 있었다.

해외에는 자동차용 LPG의 프로판 함유율이 비교적 높아, 노킹 대책상 유리한 점, 연료의 가압이 인정된다는 점(개발 시점에서는 법률이 개정

되지 않았음, 다음 참조)등 중대형 엔진의 개발에 유리한 조건등이 있어, 일본에 비하여 중대형 LPG 엔진의 실용화가 진행되고 있어 대형버스에 사용되고 있는 예도 있다.

그러나 CNG 연료 인프라의 미정비 지역에도 LPG의 보급이 가능하며, CNG에 비하여 저공해성은 같고, 항속거리, 적재성을 크게 향상시킬 수 있다는 점에 주목하여 닛산 디젤은 터보 인터쿨러 기술 및 연료 제어계의 전자제어 기술을 이용하여 중형 트럭에 적합한 LPG 엔진을 개발하였다. 개발 목표로서는, 중형 상용차의 실용성을 만족시키고, 도시권에 있어서 대기환경 개선에 공헌이 가능하도록 하는 관점에서 (1)배출가스는 일본 국내 디젤차량의 규제치에 대하여 충분히 낮게 하고, 특히 NOx는 규제치의 1/2정도로 한다. (2) 기존 디젤차와 동등의 출력 성능, 내구 신뢰성 및 동력성능의 확보등을 설정하였다.

닛산 디젤이 개발한 LPG 엔진은 중형직렬 6기통 디젤엔진을 베이스로하여 LPG화를 실시하였다. LPG화에 따른 주요 변경점은 연료공급계, 흡배기계, 점화계, 연소계로써 다음과 같은 특징을 갖고 있다. (1)내구 신뢰성을 확보하여 연비를 향상시키고 NOx를 저감하기 위하여, 린번 방식을 채용 (2)린번에 의한 출력 저하를 보충하기 위하여, 인터쿨러 부착 터보과급을 채용 (3)연료의 공급 방식은 새로 개발한 전자 제어식 싱글포인트 가스 분사 시스템을 채용등이다.

LPG 탱크에서 나온 연료는 베이퍼라이저에서 기화, 감압된후, 가스 제어밸브에서 유량이 조정되어, 흡기관에 장착된 연료분사 노즐로부터 흡기관내에 분사된다. LPG는 엔진 온도에 의하여 기화가 곤란한 콜드 스타트시는 기체 상태로, 이후에는 액체 상태로 탱크로부터 공급한다. 배출가스는 인터쿨러 부착 터보, 린번과 산화촉매에 의해 일본 국내 디젤차의 규제치에 대하여 NOx는 63%, HC는 80%를 저감하는 것이 가능하다.

가스 엔진의 연료공급 시스템으로써는 믹서가

일반적이지만, 이 경우 벤츨리부의 수 Pa의 압력차를 갖고 연료 유량을 제어하기 때문에 벤츨리부의 압력이 과도 운전시에 수 10kPa씩 변화하는 터보엔진에서는 양호한 과도응답성을 실현하는 것이 어렵다. 따라서 과도응답성을 향상시키기 위해 전자 제어식 싱글 포인트 가스 분사 시스템(SPI) 연료 분사방식을 채용하고 있다. 연료분사 방식으로써는 각기통마다에 연료를 분사하는 멀티포인트(MPI)가 일반적이나, MPI는 높은 연료 압력을 필요로 하는 것에 반해, LPG는 고압가스 보안법의 규정상 가압이 가능하지 않기 때문에 (개발 당시에는 법률이 개정되지 않았음) MPI의 채용은 곤란하였다. 따라서 낮은 연료 압력에서도 사용 가능한 가변 오리피스형 밸브를 사용한 싱글 포인트분사를 선택하였다.

고효율 LPG 엔진의 개발

재단법인 LP가스진흥센터는 통산산업성 자원 에너지청의 수탁을 받아 1999년도부터 고효율 LPG엔진의 개발을 시작하였다. 1999년 9월 30일에 고압가스보안법 및 관계 법률의 일부 개정으로 인해, LPG 차량의 경우 펌프에 의한 가압, 압축을 고압가스보안법의 적용에서 제외함에 따라 실린더내 직접 분사식 LPG 엔진에 의한 고효율을 달성하는 것이 가능하게 됨에 따라 이를 목표로 연구개발이 진행되고 있다.

지금까지의 디젤 차량이 경제성, 운전성이 우수함으로 인해 대체 에너지 자동차의 보급이 진전되지 않은 중형 이상의 상용차를 대상으로 하여, 차량 총중량 8톤급 (최대 적재량 4톤급)의 중형 상용차에 있어서 경제성, 저공해성, 운전성등이 디젤차량과 동등 이상의 성능을 갖도록 LPG 차량의 개발, 실용화를 목표로 하고 있다.

1999년도부터 2002년도까지의 4년간에 희박 연소, 성층연소에 의한 연소효율의 향상에 의한 고효율화와 배출오염 물질의 저감에 의한 저공해

화를 달성하는 LPG엔진의 개발, 이 엔진을 탑재한 중형 상용차의 개발을 수행한다. 그러나 희박연소, 성층연소를 실현하기 위해서는 LPG의 분무과정 및 연소과정에 불분명한 점이 많기 때문에, 요소 연구 및 시뮬레이션 해석에 의하여 엔진 개발의 지원을 병행한다. 이를 위해 각종 요소 기술 개발, 엔진 기초 개발, 엔진 실용화 연구 및 차량 개발을 수행하는 것과 함께, LPG 분무의 발달(분열 및 증발) 과정, 혼합기의 형성 과정 및 연소과정에 관한 연구를 수행한다.

배출가스의 달성 목표치는 NOx 1.4g/kWh, HC 0.2g/kWh, CO 0.01g/kWh이다. 저공해차로써 사용이 가능한 중형 상용차의 엔진은 50-60% 회전 이하, 50% 부하 이하의 저부하영역에서 대부분 사용되고 있음이 조사 결과 밝혀져 이 영역에서의 효율, 연비의 향상이 요구되고 있다.

희박연소에 의하여 저공해화 및 연소 효율의 향상을 꾀하고, 게다가 중저부하 영역에서의 펌핑손실을 가능한 한 저감하여, 스로틀 제어의 엔진에 비하여 중저부하 영역의 효율을 향상시켜 고효율, 저에미션의 LPG 엔진의 개발이 목표로 되고 있다.

직접분사식 LPG 엔진의 최대 과제는 엔진의 모든 운전조건에서 점화 시기에 점화 플러그 주변에 안정된 착화 가능한 혼합기를 형성하는 것이다. 전체적으로는 매우 희박한 혼합기 농도에서도

점화 플러그 주변에는 적절한 혼합기를 형성하여 부분부하에서 성층연소를 수행하기 위해서 연소실 형상 및 연료 분사계의 연구를 수행하고 있다.

분사 압력이 높을수록 적절한 혼합기를 얻기 쉽지만, 이를 위해서는 연료 압력을 높일 필요가 있어 많은 에너지가 필요하다는 문제가 있다. 따라서 가능한 한 낮은 분사압을 유지하고자 분사압을 10MPa로 하여 연구를 하고 있다.

직분 디젤엔진의 경우에는 고압 분사에 의해 연료의 미립화, 연료 분무에 공기 도입의 촉진을 꾀하고 있으나 LPG의 경우, 비등점이 낮아 상온 저압에서는 기체이기 때문에 연료의 미립화에는 분사압을 디젤엔진과 비슷하게 높일 필요는 없다고 고려되고 있다. 또한 필요이상의 고압 분사화는 승압 펌프의 구동손실 증대에 의한 엔진 효율 저하등을 가져오기 때문에 연료 분사압력은 가능한 한 낮게 하도록 하고 있다. 한편, 연료분사량을 정확히 조절하기 위해서는 인젝터부에 연료가 기체와 액체가 혼재하지 않도록 액체상태로 유지할 필요가 있어, 이를 위해서는 인젝터까지는 가스화되지 않을 정도의 고압을 유지할 필요가 있다. 또한 압축행정에서 압력이 상승하고 있는 실린더안에 단시간에 연료를 분사할 필요가 있어, 이를 위해서는 실린더 내압의 2배 이상의 분사압이 필요하게 된다. 이러한 조건을 만족하는 최저의 분사압으로써 우선 10MPa 정도의 분사압이 시험되

<표 1> 디젤 대체 저공해차의 비교 (◎←○←△←▲ 순으로 우수)

	저공해 (NOx, 흑연)	소음	연료 충전소	항속거리	적재량
디젤	△	△	◎	◎	◎
LPG	◎	◎	○	○	○
CNG	◎	◎	△	△	△
LNG	◎	◎	▲	○	○
메탄올	○	◎	▲	○	○
하이브리드	◎	◎	◎	◎	△
전기자동차	◎	◎	△	▲	▲

〈표 2〉 LPG엔진의 방식 비교

분사시스템의 비교		특 징	비 고
1세대	Mixing	Caburation	<ul style="list-style-type: none"> - 일본의 LPG차에 주로 채용되어 있는 방식 - 공기와 함께 LPG의 주입으로 인한 출력 저하 - 전환이 용이 - LPG량을 전자제어하는 경우도 일부 있음
2세대	Mixing	ECU	<ul style="list-style-type: none"> - 정비가 용이하기 때문에 택시등에 채용 - 일본에서는 메이커의 라인 생산이 많다 - 환경규제가 강화(배출가스규제)되면 대응이 곤란해진다 - 구미에서 주로 채용되는 방식
3세대	Electric Fuel Injection (Bi-Fuel type)	Dry gas	<ul style="list-style-type: none"> - 흡기관내에 연료를 분사하기 때문에 출력 향상 - 분사 타이밍을 결정하기 위하여 전자제어가 불가결 - 액체분사에는 가압용펌프가 필요
		Liquid gas	<ul style="list-style-type: none"> - 전환 키트 메이커로써 Vialle, Koltec등이 있다 - 앞으로 환경규제에도 충분히 대응가능 - 앞으로 보급이 예상되는 시스템
4세대	Direct Fuel Injection	Otto	<ul style="list-style-type: none"> - 직접분사로 인하여 EFI보다 효율 향상 - 배출가스는 보다 저감
		Diesel	<ul style="list-style-type: none"> - 미쓰비시의 GDI, 토요타의 D4가 여기에 해당 (현재는 가솔린엔진만) - LPG의 분사에는 가압펌프가 필요

고 있다. LPG는 경유에 비하여 운환성이 낮기 때문에, 디젤엔진과 같은 승압 펌프를 이용하며 플랜저 부분이 소착등의 문제가 예상되기 때문에, 하나의 승압펌프로 연료를 커몬레일에 공급하는 방식의 경우가 보다 유효하다고 고려되고 있다. 각 기통에 공급하는 한 대의 승압 펌프로 연료를 가압하여 커몬레일이라는 연료 분배를 위한 각기 통공용의 연료 축압관에 연료를 충전한다. 이후

전자제어 컨트롤러 유닛에 의해 커몬레일에 축압된 연료가 각 기통마다에 설치된 인젝터로부터 임의의 연료 분사 개시 시기, 분사 기간에 분사되도록 시스템을 구성하고 있다.

〈이대엽 편집위원 : Lee@mgflame.mel.go.jp〉