LPG 연료를 사용하는 초저공해 자동차의 핵심적 기술

Core Technologies for KULEV in LPG Vehicles

서 승 우 / 르노삼성자동차
Sungwoo Suh / Renault Samsung Motors

LPG(Liquefied Petroleum Gas)가 국내에서 자동차 연료로 사용되기 시작한 것은 1960년대부터 이고 외국에서는 이미 60년이 넘게 사용되어 왔다. 이는 LPG 엔진이 엔진출력 및 연비 측면에서 가솔린엔진에 비하여 불리하지만 가솔린 대비 LPG 가격이 저렴하다는 경제적인 장점이 있기 때문이었다. 그러나 베이퍼라이져와 믹서를 사용하는 기존 LPG 연료공급 시스템에서는 연료제어의 한계성 때문에 LPG가 청정연료이면서도 가솔린에 비하여 유해 배기가스를 더 많이 배출해 왔다.

산성비, 오존층 파괴, 지구온난화에 따른 기후변화 등 대기환경오염으로 인한 사회적 문제가 증가하는 것에 대응하기 위해 선진국을 비롯한 세계 여러 나라에서는 자동차 배출가스 규제를 점차 더 강화하고 있는 추세이고, 이런 배기규제 강화 움직임은 기존의 믹서시스템으로는 LPG를 더 이상 자동차 연료로 사용할 수 없는 환경을 만들고 있다. 그러나 최근 국내외적으로 개발 중에 있는 차세대 LPG 연료 제어기술은 강화되고 있는 배기규제에 대응할 수 있는 하나의 대안으로 제시되고 있다.

즉 믹서방식으로는 KTLEV 배기규제 이상을 맞추기에는 기술적 한계가 있으므로 KULEV 이상의 초저공해 자동차개발을 위한 인젝터를 이용한 LPG 연료분사시스템 개발이 활발하게 진행되고 있다. LPG 연료 분사시스템에는 가스상 LPG 연료 분사시스템과 액상 LPG 연료 분사시스템(LPLi : Liquid Phase LPG Injection)이 개발 중에 있으나, 여기서는 LPLi 시스템 차량개발에 있어서의 핵심적인 기술에 대하여 기술하고자 한다.

LPLi시스템 압력 및 연료제어

〈그림 1〉은 일반적인 LPLi시스템 연료공급방식을 나타낸 것이다. 가솔린과 LPG 연료의 차이는 표준대기 조건에서 연료의 상(Phase)이 가솔린의 경우 액상이지만 LPG의 경우 기상으로 존재한다는 것이다. 이와 같은 LPG 연료 특성은 LPG 연료 분사시스템 차량에서의 시동성을 나쁘게 하는 요인이 되고 있다. 따라서 통상 차량운전조건에서 LPLi시스템 연료레일 내부의 LPG가 항상 액상으로 유지되게 하기 위한 시스템의 압력 설계가 중요하다. 이 시스템 압력은 고온재시동성, 아이들 안정성, 인젝터 연료누설, 연료펌프

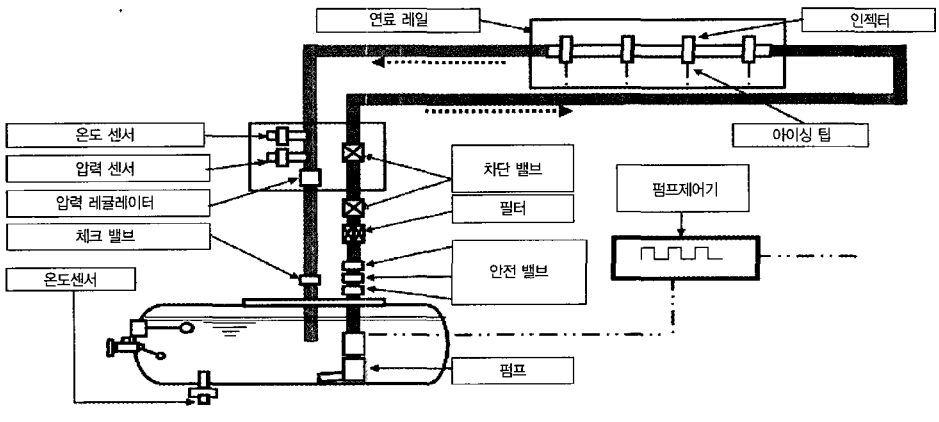
소음 및 내구성 등과 관련이 있으므로 그 설정에 세심한 주의가 필요하다. 가솔린의 경우 연료레일 내부의 압력이 보통 3bar 정도로 레귤레이터에서 조절되지만, LPG의 경우에는 연료레일 내부의 연료를 항상 액상으로 유지하기 위하여 레일 내부의 압력을 가능한 높게 유지하는 것이 유리하다. 그러나 시스템 구성 부품들의 기밀성, 내구성, 시동성 및 아이들 안정성 등을 고려하여 통상 연료탱크(봄베) 대비 4~5bar정도로 조절되게 설계하고 있다. 인젝터의 연료누설과 연료펌프 내구성 측면에서는 4bar가 유리하나 시동성과 아이들 안정성을 고려할 때는 5bar가 더 유리할 수 있다. 선택은 어느 것이 차량 양산개발에 더 적합한가를 고려하여 결정할 필요가 있다.

LPLi시스템에서의 연료량 제어를 위해서는 외부환경 변화에 따른 LPG 연료상태 변화를 고려해야 한다. 즉 LPG 연료봄베 내부의 압력이 외기 온도에 따라 연중 최대 약 5bar 정도 변화하고, LPG 조성도 계절에 따라 여름에는 100% 부탄 겨울철에는 최대 프로판 30%에 부탄 70%가 혼합되어 사용되며, 액상 LPG의 열팽창률도 가솔린에 비하여 커서 연료 온도에 따른 밀도 변화도 크기 때문이다. 이러한 온도, 압력, 연료조성 변화에 따른 LPG 연료의 상태변화에도 불구하고 어떤 차량운전조건에서도 정확한 연료량 제어를 위해서는 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 연료라인이나 봄베에 설치된 압력 센서와 온도 센서를 이용한 연료레일 내부의 연료상태를 예측할 수 있는 연료모델링 개발이 필요하다.

연료펌프

LPLi시스템 연료펌프는 차량운전조건에 따라서는 봄베압 보다 최대 7~8bar 높은 압력으로 가압해야 하며, 엔진이 난기 된 후 80~90℃이상의 엔진 룸 온도에서도 연료레일 내의 연료를 액상 상태로 유지하면서 연소에 필요한 충분한 양의 연료를 공급할 수 있도록 용량과 성능을 갖추어야 한다. 또한 LPG 연료펌프는 봄베 내장형이기 때문에 펌프의 연료필터가 막히거나 펌프 내구성에 문제가 생기면 가솔린의 경우와는 달리 봄베 전체를 교환해야 하는 문제점이 있다. 따라서 신뢰성과 내구성이 확보된 펌프개발이 LPLi시스템 개발에 있어 중요한 사항 중의 하나이다.

LPLi시스템 적용 차량의 개발에 있어 난제 중의 하



〈그림 1〉 일반적인 LPLi 연료 공급 시스템

나로 알려져 있는 것은 봄베에서 발생하는 소음을 어떻게 적절하게 줄이느냐 하는 것이다. 이 소음 중에는 펌프와 봄베가 공명하여 발생하는 소음과 리턴연료에서 발생하는 소음이 있다. 이들 소음을 개선하기 위해서는 펌프 자체의 소음저감 설계, 봄베 내 펌프 위치 최적설계 및 차량운전 조건에 따른 최적의 펌프속도 조절 등의 방법이 있다. 만약 이들 방법으로 완벽하게 소음차단이 되지 않을 경우에는 봄베 주위의 구조물 강성을 높이거나 차음제로 소음을 외부적으로 차폐하는 방법을 병행할 필요도 있다.

일반적으로 LPLi시스템 연료펌프를 구동하는 모터로는 브러쉬 모터와 BLDC(Brushless Direct Current) 모터가 있다. 모터의 속도 제어는 제어 방식에 따라 저항 방식, PWM(Pulse Width Modulation) 방식, D/A(Digital to Analog) 방식 등이 있다. 저항 방식의 경우에는 온도에 따라 유량 변화가 크고 제어의 정도가 낮은 반면, 일정한 전압 공급이 가능하고 내구성이 우수하다. PWM 제어 방식은 가격이 저렴하고 유량 보정 등 유연한 제어가 가능한 반면 전압의 변동에 의해 모터 소음이 증가하고 내구성이 떨어진다. 마지막으로 D/A 방식의 경우 정밀하고 안정된 제어가 가능한 반면 가격이 비싼 단점이 있다. 한편, 액상 상태의 LPG는 가솔린 보다 점도가 낮기 때문에 베어링 설계 시 캐비테이션을 고려한 설계가 반드시 이루어져야 한다.

연료재충진성

LPLi시스템 연료탱크 내부의 LPG연료는 가솔린의 경우와는 달리 연료펌프에서의 발열, 엔진 및 외부열에 의한 인젝터 및 연료레일에서의 흡열, 연료튜브에서의 흡열 등으로 쉽게 온도와 압력이 상승하여 봄베의 연료 재충진이 불가능하게 되는 경우가 발생할 수 있다. 이 문제에 대한 대응으로 연료펌프에서의 발열을 최소화하기 위한 펌프전류 최소화 및 시스템 압력 최적설계, 차량운전조건에 따른 최적의 펌프운전조건 설정 등이 필요하다. 인젝터 및 연료레일에서의 흡열을 차단하기 위해서는 연료레일을 단열이 우수한 재질로 개발하는 것과 엔진으로부터의 열이 전달되는 것을 최대한 방지할 수 있는 연료레일 설계가 필요하다. 또한 연료튜브를 기존의 LPG 차량에서 사용된 동파이프를 사용할 경우 연료순환 중 외부로부터 열을 흡수하기에 용이하며, LPG와 동파이프의 반응으로 생긴 부식 잔존물이 인젝터의 마모를 촉진시킬 우려가 있으므로 고압, 부식 및 단열에 유리한 구조와 재질로 개발하는 것이 필요하다.

인젝터 아이싱(Icing)

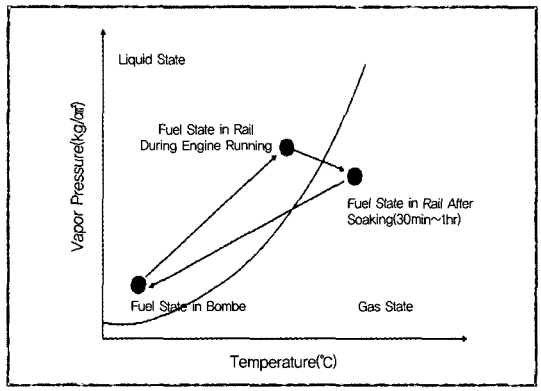
인젝터 말단에서 직접 흡기 포트로 연료가 분사 되는 가솔린과는 달리, LPLi시스템의 경우 아이싱 방지를 위하여 아이싱 팁을 인젝터 선단에 장착한다. 인젝터 아이싱이란 분사된 연료가 기화하면서 주위의 열을 흡수, 연료 분사구 주변에 수분 및 연료가 얼어 붙는 현상이다. 이 아이싱은 엔진 운전 중에 발생, 성장, 탈락의 과정을 반복하며, 이 아이싱이 떨어져 나가 엔진으로 들어갈 때 HC 스파이크가 발생하고, 심한 경우 실화가 일어나 엔진이 불안정하게 될 수도 있다. LPG 연료의 특성상 이 아이싱 발생 현상 자체를 없애는 것은 불가능하나, 인젝터 아이싱 팁 및 흡기매니폴드의 최적 튜닝에 의하여 엔진 성능 및 배기에 영향이 없는 범위 내에서 성장을 억제하는데 초점을 맞추고 있다.

이를 위해 적용된 기술을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 연료 분사구 주변으로의 공기 유동을 차단하는 구조를 갖도록 하여 공기중의 수분이 응결하는 것을 막아 아이싱의 성장을 방지하는 것이다. 둘째, 연료 분사구 주위를 서로 다른 응착력을 가지는 이종의 물질로 결합해서 두물질의 응착력의 차이로 인해 아이싱이 성장하기 전에 탈락시키는 방법이다. 셋째, 난기

된 엔진의 열을 이용해서, 발생된 아이싱을 그때 그때 녹여 성장을 억제하는 방법 등이 있다. 이 경우 내부 튜브는 테프론 같은 재질로 연료와의 반응과 마찰을 최대한 억제하고 외부에는 열전달이 큰 금속을 사용하여 엔진으로부터 열을 흡수하여 아이싱의 성장을 억제킨다. 이때 내부와 외부 사이에 단열층을 두어 외부의 열이 분사 연료로 전달되어 연료 분사 중에 아이싱 팁 내에서 연료가 기화 되는 일이 없도록 해야 한다. 대개의 경우 아이싱의 방지를 위해 세가지 방법을 동시에 사용하고 있다.

고온재시동성

LPLi시스템 차량은 고온 재시동성능이 가솔린에 비하여 열악하므로 차량상품성 차원에서 많은 연구개발이 필요하다. 이는 〈그림 2〉에서와 같이 차량 주행 전 냉시동 상태 및 주행 중에는 연료레일 내의 LPG가 액상이지만 차량 주행 후 시동을 끈 상태에서 30분 내지 1시간 정도 경과 할 때까지 엔진 룸 내의 온도가 80~90℃ 정도의 고온으로 유지되기 때문에 이 열이 연료레일 내의 연료로 전달된다. 이로 인해 연료레일 내의 연료는 기상으로 변하고 고압의 기상연료는 주로 레귤레이터를 거쳐 봄베로 가거나, 인젝터를 통해 외부로 누설되게 된다. 따라서 연료레일 내부가 기체 상태를 유지하고 있는 이 기간 중 시동을 했을 때, 펌프로부터 액상의 연료공급이 이루어 질 때까지는 기상의 연료가 분사되어 일시적인 연료 부족으로 인해 시동성이 나쁘거나, 시동 후 엔진부조가 발생할 경우도 있다. 이를 해결하기 위해서는 시동 시 연료레일 내부에 항상 액상의 LPG 연료가 존재하도록 제어하는 것이 필요하다. 그 방법으로는 LPLi시스템 압력을 10bar 이상으로 설계하거나, 시동 전 연료레일 내부의 가스상 연료를 가능한 빠른 시간 내에 액상의 연료로 바꾸는 것이 필요하다. 그 방법으로는 연료펌프를 시동 전에 고속으로 작동함으로써 연료레일 내부의 가스상 연료를 가능한 빨리 퍼지(Purge)시키는 것이다.



〈그림 2〉 LPLi 시스템 운전 중 연료상태 변화

이들 두 방법 중 시스템 압력을 올리는 방법은 펌프의 내구성, 소음 및 시스템 기밀유지 차원에서 바람직하지 않다. 그러나 연료펌프를 고속으로 작동하여 연료레일을 가능한 빨리 퍼지(Purge)시키는 방법은 시동 전에만 펌프를 최고속도로 제어하는 것으로 시스템 압력을 올리는 방법과 같은 역효과 없이 기대하는 효과를 얻을 수 있기 때문에 이 방법을 우선적으로 적용할 필요가 있다. 또한 상기의 펌프 최고속도 운전과 더불어 열전달율이 낮고 열용량이 적은 연료레일의 설계, Bottom Feed 방식 인젝터를 사용하는 등의 방법을 병행하여 설계할 필요가 있다.

인젝터 연료누설

위에서 언급한 LPLi 차량의 고유한 문제점들 이외에 KULEV 이상의 초저공해 자동차 개발 가능성 여부를 좌우할 수 있는 가장 핵심적 기술 중의 하나가 인젝터의 연료누설 저감기술이다. 현재까지 사용 가능한 LPG 인젝터의 연료 누설량은 KTLEV를 맞출 수 있는 정도이며, 그 이상의 초저공해 자동차 개발에 필요한 수준의 연료누설 인젝터 개발 기술까지는 아

직 도달하지 못하였다.

LPLi시스템에서 발생하는 연료의 누설은 연료레일 내부의 연료를 항상 액상으로 유지하기 위하여 시스템 압력을 높게 유지하는 것과 LPG 연료 특성상 고온 상태에서 쉽게 증발하여 고압의 기상을 유지하기 때문에 발생한다. 상기 이외의 인젝터 누설을 촉진시키는 인자로는 시중에 사용되고 있는 연료의 정제 정도, 연료유통과정 중 품질관리, 인젝터 제조기술 등 여러 가지가 있을 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 크게 인젝터 자체의 누설량을 줄이는 방법, 인젝터로부터 누설된 연료를 부가장치를 사용하여 엔진 시동 전에 해결하는 방법 또는 HC(Hydro Carbon) 트랩이라는 배기 후처리 장치를 사용해서 엔진시동 후 초기 미연소 연료를 처리하는 등의 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적으로 엔진시동 시 연료를 보상하는 방법 등도 있다.

연료의 누설에 의한 배기가스 문제를 해결하는 가장 확실한 방법은 무엇보다도 누설이 없는 고품질의 인젝터를 개발하는 것이다. 하지만 가솔린 엔진과 비교하여 상대적으로 적은 양을 생산하고 있는 LPG 엔진을 위해 고유의 인젝터를 개발한다거나 새로운 생산 라인을 증설하는 것은 현재의 물량으로는 매우 어렵다. 결국 현재 인젝터의 연료 누설을 줄이는 방법은 인젝터에 대해 보다 철저한 품질 관리를 하거나, 누설을 줄일 수 있는 조건으로 차량을 유지시키는 것이다. 예를 들면, 연료 누설량은 연료레일 내부의 압력과 대기압과의 차이에 비례하므로, 운행 후 정지상태에서 연료레일의 압력을 연료봄베의 압력 수준으로 낮게 유지 시키는 방법 등이 그것이다.

인젝터의 연료 누설은 초기 누설도 있지만 장기간 사용에 의한 마모, LPG의 올레핀류에 의한 연료계 내부 고무류와의 반응에 의해 생기는 이물질 및 운전 중 생기는 이물질 등에 의한 인젝터 운동부의 이상 마모가 원인이 될 수 있다. 이와 같이 인젝터 연료누설은 인젝터 자체의 누설요인 뿐만 아니라 외부환경에 의한 누설 요인으로도 발생할 수 있다. 따라서 현재로서는 인젝터의 누설을 일정량 인정하고, 누설된 연료에 의해 발생되는 유해한 배기 가스를 줄이는데 더욱 초점을 맞출 수 밖에 없다.

엔진 시동 전 부가 장치를 사용하는 방법은 연료의 비중 또는 저장된 부압 등을 이용하여, 시동 전 누설된 연료를 가솔린 엔진에서의 캐니스터와 같은 장치로 흡수 하고 있다가 시동 후 정상 운전 조건에서 이를 연소 시키는 것이다. 아직 엔진 룸의 공간적인 제약 문제, 부압유지 방법, 흡수 물질 등에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

마지막으로 배기 후처리 장치를 이용하는 방법은 기존의 삼원촉매제에 Al-Si 같은 촉매제를 이중으로 코팅하여 촉매가 활성화 되기 이전에 HC를 흡수하고 촉매가 활성 온도에 도달한 후 흡수한 HC를 방출하는 것이다. 이러한 HC 트랩을 LPG에 적용하는데 가장 큰 문제점은 이전의 촉매보다 열화가 빨리 진행된다는 것이다. 특히 주로 택시로 사용되는 LPG 엔진은 일반 가솔린 보다 내구성이 훨씬 우수해야 하기 때문에 HC 트랩으로 인한 내구성 저하 문제는 심각히 검토되어야 할 문제이다. 또한 현재까지의 HC 트랩의 경우 탄소수가 5 이상인 HC에 잘 반응한다. 따라서 탄소수가 3 또는 4로 구성된 LPG 연료에 이를 직접 적용하기 위해서는 많은 연구가 필요한 실정이다.

상기에 기술한 LPLi시스템 개발 난제들은 자동차 및 부품 메이커와 관련 기관들에서의 연구개발로 많은 진전을 보이고 있다. 그러나 아직까지 인젝터의 연료누설 문제는 KULEV나 KSULEV와 같은 초저공해 자동차를 개발하는 데 큰 걸림돌이 되고 있다. 정부의 지속적인 관심과 지원, 자동차 업체의 문제 해결을 위한 확고한 의지와 노력, 국내 연구기관 및 부품업체간의 적극적인 연구개발로 LPLi용 인젝터의 연료누설 문제가 시급히 해결되기를 기대한다.

(서승우 과장 : sungwoo.suh@renaultsamsungM.com)