LPG액상분사엔진의 분사특성이 성능에 미치는 영향

Effect of Injection Characteristics on Performance in a LPLi Engine

김 창 기*, 이 진 욱*, 강 건 용*
Changgi Kim, Jinwook Lee, Kernyong Kang

ABSTRACT

An LPG engine (KL6i) for heavy duty vehicle has been developed using liquid phase LPG injection (LPLi) system, which has regarded as one of next generation LPG fuel supply systems. For the KL6i engine, lean burn technology was introduced to minimize the thermal loading and NOx emissions due to an increase of the engine power.

In this work, injection timing and piston bowl shape were investigated for the stabilization of lean burn characteristics. Experimental results reveals that fuel stratification induced by these parameters is most effective strategy to extend lean combustion limit in the LPLi system.

주요기술용어 : LPG(액화석유가스), Liquid fuel(액상연료), Injection timing(분사시기), Stratification(성층화), Lean burn(희박연소), Piston shape(피스톤 형상)

1. 서론

LPG 연료공급 시스템에서 제3세대로 분류되는 LPG 액상분사방식(LPLi)은 기존 믹서타입이 가지고 있는 저출력의 단점을 극복하게 하였을 뿐만 아니라 유해배기가스의 배출량도 함께 줄일 수 있게 하였다. 그 외 역화, 타르 침전, 그리고 겨울철 시동 불량 등 LPG 엔진이 가지고 있는 여러 가지 고질적인 문제점을 해결하는데도 많은 기여를 하였다[1-3].

믹서방식에 대비해 LPG 액상분사를 통해 얻을 수 있는 출력향상은 약 10-20% 정도로써 가솔린엔진과 거의 동등한 출력성능과 가속성능을 보유한다[4]. 액상연료의 기화잠열 효과에 의한 출력향상 현상은 가솔린연료와 천연가스 연료에서는 찾아볼 수 없는 LPG 액상분사방식의 특징 중의 하나이다. 유해배기가스 배출량은 MPI 방식을 통해 정밀한 연료량 제어, 빠른 응답성, 그리고 고급 로직 구현이 가능하기 때문에 믹서방식에 비해 월등한 저감 능력을 가지고 있다. 한편 가솔린 연료와 비교하자면, 비록 액상 연료의 흡기포트 분사 면에서는 동일하지만 LPG 연료가 기화성이 훨씬 우수하고 wall wetting 되는 양이 작아 냉간 시동성이 우수할 뿐만 아니라 냉간 시동에서의 THC 저감에도 높은 포텐셜을 가지고 있다.

이러한 장점에도 불구하고 LPG 액상분사방식은 연료자체의 특성과 시스템이 가지고 있는 구조적인 문제에 의하여 아직 개선되어야 할 사항들이 존재하는 것 또한 사실이다. 열간 시동(hot start), 결빙 현상(icing formation), 연료 누기(fuel leakage), 펌프 소음(pump noise) 등으로 대표되는 문제점들은 많은 연구들을 통해서 지금까지 상당한 개선이 이루어지기도 했지만 앞으로 계속해서 해결하여야 할 과제이기도 하다[3,5].

* 한국기계연구원 (KIMM)

본 논문에서는 이와 같은 특성을 가지는 LPLi 시스템을 적용하여 개발한 대형 LPG 엔진(KL6i)과 LPG 액상연료 분사에 따른 희박연소현상에 대해서 기술하였다. 이를 통해, 대형 LPG 엔진에 적용된 LPLi 시스템의 구성과 특성, 그리고 LPLi 분사시스템의 제어 및 피스톤 형상에 따른 희박연소특성과 연료 성층화에 대한 영향 등을 검토하였다.

2. 연료시스템

일반적으로 LPG 액상분사 시스템은 Fig. 1에서와 같이 크게 탱크, 펌프, 연료라인, 인젝터, 레귤레이터, 압력센서로 구성되어 있다. 여기서 핵심을 이루는 부품은 펌프로서 포화증기압 상태에 있는 탱크내의 연료를 레귤레이터에서 조절하는 일정압력(ΔP) 이상으로 승압 이송시켜 항상 액상의 LPG 연료를 인젝터에 공급해 주는 역할을 한다. LPG 액상 펌프는 엔진에서 필요로 하는 양의 연료를 엔진에 공급할 수 있는 능력을 기본적으로 갖추어야 하며, 저발열성, 저소음성, 안전성, 내구성 등을 동시에 만족시켜야 한다.

연료라인은 합성수지 재질의 고압호스가 사용되어 외부의 열을 최대한 차단한 상태로 연료를 공급 및 회수하도록 되어 있다. 외부의 열에 의해 연료의 온도가 상승하면 탱크내 압력이 상승할 뿐만 아니라 연료가 이송되는 동안 기상으로 변화되는 문제가 발생할 수도 있기 때문이다. Fig. 1에서 공급라인은 포화증기압력 상태인 탱크압력 P_{tank}에 비해 ΔP 만큼 높은 압력을 유지하고 있으며, 레귤레이터 이후의 회수라인은 탱크압력 P_{tank} 수준을 유지한다.

액상으로 공급된 LPG 연료는 각 실린더마다 장착된 인젝터를 통해 흡기포트로 분사되는데 이때 분사기 주위가 결빙되는 것을 방지하기 위해 아이싱방지 팁이 인젝터 앞쪽에 장착된다. 아이싱방지 팁은 또한 액상 LPG 연료의 분사되는 방향을 결정하는 노즐기능도 함께 하기 때문에 적용되는 차종과 장착되는 위치에 따라 아이싱방지 팁을 통해 분사방향을 최적화 시켜야한다. 연료분사에 사용되는 인젝터는 LPG 연료의 특성이 감안된 전용 부품(DEKA-II)이며 인젝터 내에 기포가 발생될 때 이의 제거가 용이하고 인젝터 코일로부터의 열전달이 상대적으로 작은 bottom feed 방식으로 되어있다.

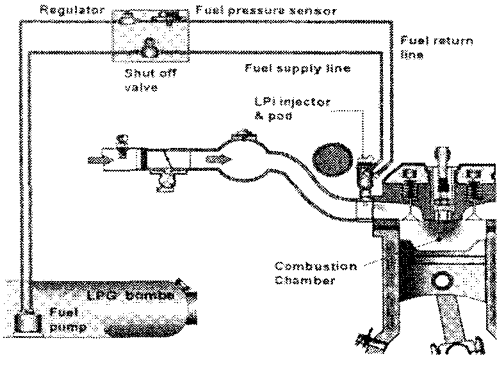


Fig. 1 Schematics of LPLi fuel system

레귤레이터는 인젝터에 공급되는 LPG 연료가 항상 액상으로 유지될 수 있도록 탱크압력에 비해 ΔP 정도 높게 공급연료압력을 유지하는 기능을 한다. 액상을 유지하기 위해서는 탱크압력보다 높기만 하면 되지만 연료 이송 중의 열전달, 압력강하 등을 고려하여 ΔP는 약 5bar 정도로 설정된다. 일반 가솔린 연료시스템이 연료공급압력과 흡기 매니폴드 압력의 차이를 일정하게 유지하는 것과는 달리 LPG 액상분사시스템은 흡기 매니폴드 압력과는 상관없이 온도에 따라 연료공급압력이 변화하는 시스템이다. 따라서 압력센서를 통하여 항상 공급연료압력에 대한 연료분사량 보정을 해주어야 한다.

LPG 액상분사 연료시스템의 용량은 연료공급 능력, 특히 펌프의 연료공급 용량에 의해 결정되며, 엔진 최대출력에 필요한 연료공급량을 어느 정도 여유있게 만족시켜야 한다. 현재까지는 수요의 한정에 의해 연료시스템 용량이 다양화되어 있지는 않으며 중대형(3000cc, 200마력 이하) 승용차에 맞추어져 작년부터 국내에서 양산 적용되고 있다. 이 연료시스템은 본 KL6i 엔진 개발과정 중 국내기업에 의해 함께 개발된 것이지만 굳이 대형 상용엔진인 KL6i 엔진(11000cc, 290마력)에 적합하게 1개의 대형

연료시스템으로 개발하지는 않았으며 2개의 소형 연료시스템을 적용하는 방법으로 연료공급 문제를 해결하였다. 1개의 엔진에 2개의 연료시스템을 적용하더라도 적절한 구성과 운영이 이루어질 경우 1개의 연료시스템을 사용하는 것과 기능과 성능에 있어 큰 차이를 보이지는 않는다. 단지, 2개의 연료탱크가 사용됨에 따라 각 탱크의 연료압력 차이가 연료공급압력 차이로 나타나기 때문에 두 탱크간의 압력을 동일하게 해 줄 필요가 있다. 그 외, 연료공급압력에 영향을 줄 수 있는 레귤레이터, 밸브류 등의 부품편차는 크지 않은 것으로 나타났다.

2개의 연료시스템을 사용함으로써 시스템이 복잡해지고 부품의 고장 확률이 높아지는 단점을 가지고는 있지만 연료시스템에 대한 진단과 비상운전에 대한 장점도 아울러 가지고 있다. ECU는 항상 두 시스템에 대하여 모니터링을 하도록 되어있어 한 시스템이 고장날 경우 진단이 매우 용이하며, 고장이 나더라도 하나의 시스템으로 충분히 비상운전이 가능하다. 또한 각 연료시스템이 3기통씩 연료를 따로 공급함에 따라 연료레일에서 입구와 출구의 압력차이가 크지 않고 또한 레일내 맥동에 의한 간섭이 거의 없는 장점도 가지고 있다.

3. 엔진

KL6i 엔진은 초기에는 저공해성을 위하여 이론공연비 연소의 자연흡기(NA, Natural aspiration)방식이 개발되었으나 열적 내구성과 출력 향상의 필요성이 대두됨에 따라 희박연소의 과급냉각(TCI, Turbo Charger Inter-cooler) 방식으로 최종 개발되었다[6]. Table 1에 개발된 KL6i 엔진의 제원과 성능을 나타내었다. KL6i 엔진의 출력성능은 이론공연비의 NA 엔진에 비해 10% 이상 높은 반면 배기가스온도는 120℃ 이상 더 낮아 실용적 차원에서 유리하다. 이와 아울러 엔진 헤드내 냉각수 흐름을 개선하고, 흡배기 밸브 및 밸브 시트의 재질 또한 고열에 적합한 재질로 변경함으로써 열적 내구측면을 많이 보강하였다.

베이스 디젤엔진이 LPG 액상분사 엔진으로 변경되면서 엔진헤드, 피스톤, 스로틀바디, 흡기 메니폴드, 냉각수 파이프 등 여러 부품들이 수정 또는 신설되었다. 그리고 기존의 가솔린엔진과 동등한 전자제어를 구현하기 위하여 센서 및 ECU가 추가되었으며, 액상분사 연료시스템의 제어, 과급기 제어, 희박공연비 제어 등을 위하여 ECU의 하드웨어 및 소프트웨어의 변경이 개발과정 중 이루어졌다[6].

여기서 LPLi 시스템의 엔진적용을 위해서 변경된 부분은 흡기메니폴드와 냉각수 파이프로서 인젝터, 아이싱 팁 등이 포함된 연료레일의 안정적 장착이 주목적이었으며, 가능한 한 연료레일을 흡기밸브에 가깝게 설치하여 빠른 응답성 확보와 연료성층화 기법을 구현할 수 있도록 하였다. 희박 연소안정성 확보를 위해 변경된 부분은 흡기포트와 피스톤 형상이며 다양한 실험을 통해 최적화 과정을 거쳤다.

이상의 과정을 통해 개발된 KL6i 엔진의 성능은 Table 1에서와 같이 베이스 디젤엔진에 비해 동일 내지는 우수한 출력성능을 나타내며 배기가스 배출량에 있어서는 월등한 저감능력을 보이고 있음을 알 수 있다. KL6i 엔진의 배기배출 성능은 희박가연한계의 확장을 통한 연소 안정성에 바탕을 두고 있으며 본 연구의 초점 또한 희박연소의 안정성에 대부분 맞추어졌다. 희박연소특성에 가장 큰 영향을 미쳤던 인자는 연료분사시기와 피스톤 형상으로서 그 영향을 다음 절에 자세히 기술하였다.

Table 2 Specifications of KL6i engine

	KL6i	베이스디젤
엔진형식	LPG I-6	Diesel I-6
배기량 (ℓ)	11.1	←
Bore (mm)	130	←
압축비	9.3	16.5
연료분사제어	전자제어(ECU)	기계식제어(FIP)
밸브기구	2밸브, 로커암	←
흡기방식	TCI	←
연소방식	희박연소 SI	디젤분사 CI
최대토크(kgf-m)	110	110
최대출력 (PS)	290	285
CO (g/kWh)	0.06	0.9
THC (g/kWh)	0.29	0.5
NOx (g/kWh)	2.6	5.7
PM (g/kWh)	-	0.1

4. 연료분사시기

KL6i 엔진은 전 운전영역에 대해 희박연소 운전방식을 취하고 있기 때문에 개발에 있어서 가장 핵심적으로 다루어야 할 사항은 희박연소 한계의 확장을 통한 저배기성과 안정적 운전성의 확보에 있다. LPLI 시스템을 채택한 개발 엔진에서 희박연소 한계에 가장 큰 영향을 미치는 것은 연료분사시기(SOI, Start Of Injection, -360 흡기 TDC)의 조절을 통한 연료 성층화이며 이것은 믹서방식의 예혼합 방식에서는 접근할 수 없는 방법이기도 하다.

연료분사시기를 open valve injection으로 적절히 조절할 경우, 많은 부분의 연료를 점화플러그가 존재하는 연소실의 상층에 존재시킬 수 있으며 이를 통해 연료 성층화를 이룰 수 있다. 희박연소의 경우 연료성층화는 초기화염핵의 안정적 성장에 매우 유리한 환경을 제공한다. 일반적으로 가솔린 연료에서는 open valve injection을 통해 성층화를 시키게 되면 wall wetting 등에 의해 HC emission 및 soot가 대량 발생하지만 LPG 연료는 기화성이 우수해 emission에 대한 문제점은 없다.

Fig. 2는 분사시기 조절에 의한 성층화 영향으로 엔진의 희박연소 한계가 확장되는 경향을 보여주고 있다. 실험조건은 가장 많이 사용되는 운전조건 중의 하나인 중속, 중부하(1200 rpm, 50 kgf-m) 조건이며 점화시기는 각 조건에서의 MBT 시기이다. 결과에서 보는 바와 같이 이론공연비 영역과 과잉공기가 많이 들어가지 않은 영역, 즉 λ= 1.0 ~ 1.4 까지는 완전 closed valve injection을 제외하고 SOI의 영향이 크게 나타나지는 않는다. 그러나 λ=1.45가 되면 closed valve injection에 가까운 SOI -300은 연소가 극히 불안정해져 COV_{imep}가 5%를 넘음으로써 희박한계에 다다르게 된다. λ=1.5에서는 SOI -320, -340 조건도 연소안정성을 확보할 수 없게 되며 SOI -360 이상이 되어야 운전이 가능하다.

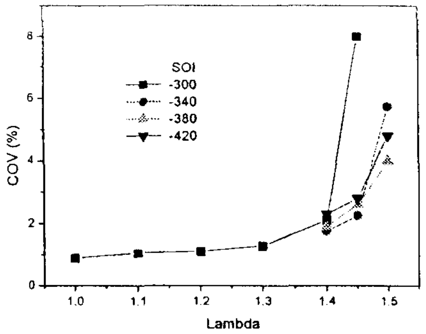


Fig. 2 Effect of SOI on the lean combustion limit (1200rpm, 50kgf-m)

이와 같이 SOI가 지각되어야만 희박한계를 확장시킬 수 있지만 그 최적시기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 존재한다. SOI가 -380을 넘어서 -400이 되면 COV_{imep}가 다시 증가하기 시작하고 SOI -420에 이르러서는 더욱 나빠진다. 이러한 SOI의 최적시기는 운전조건마다 달라지는데 고속 고부하로 갈수록 점차 진각되는 경향이 있다.

비록, SOI가 -380을 넘어서면서 COV_{imep}가 다시 증가하지만 함께 나타낸 MBT 점화시기를 살펴보면 SOI가 open valve 쪽으로 가면서 계속 지각되는 것을 알 수 있다. 이것은 그만큼 연소속도가 빨라졌다는 것을 의미하는데, 연소실내에서 혼합기의 성층화 정도가 open valve 쪽으로 가면서 심화되는 것으로 보이며 COV_{imep}의 증가는 성층화의 variation에 의한 것으로 추측된다.

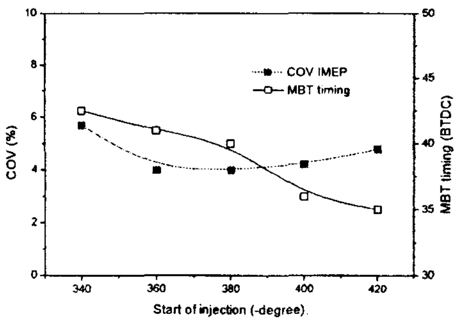


Fig. 3 Effect of SOI on the lean burn characteristics (1200rpm, 50kgf-m, λ=1.5)

배출가스 관점에서의 SOI 최적치는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 COV_{imep} 관점과는 다르다. NOx 배출가스는 SOI -400에서 최저치를 보이는 반면 THC 배출가스는 open valve 쪽으로 가면서 계속해서 줄어든다.

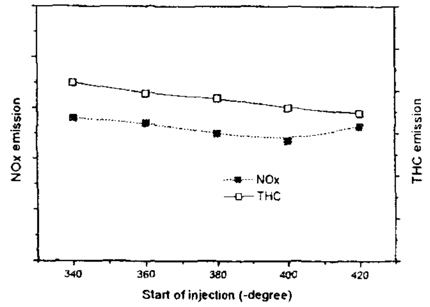


Fig. 4 Effect of SOI on the exhaust emissions (1200rpm, 50kgf-m, λ=1.5)

이상의 예에서 나타낸 바와 같이 한 조건 (one speed and one load condition)에서 최적 운전조건을 찾기 위해서는 λ의 변화와 더불어 SOI의 변화에 대한 엔진 성능, emission, 그리고 기타 엔진특성 등을 파악하여야만 가능하다. 제어변수들의 최적조건은 각 운전조건마다 다르기 때문에 실험을 통해 모두 확인하여야 하며 이를 토대로 trade-off 하여 ECU에 최적 제어값들이 최종 매핑되어 진다.

5. 피스톤 형상

희박연소 특성은 연소실 형상, 특히 연소실을 이루고 있는 피스톤의 형상에 많은 영향을 받기 때문에 희박연소 안정화를 위해서는 피스톤 설계가 매우 중요하다. KL6i 엔진에 초기에 적용된 피스톤(Base)의 bowl 형상은 특별히 희박연소를 위해 설계된 피스톤은 아니며, 압축비 조절을 위한 기본적인 dog-dish 형상이다.

희박한계의 확대를 위한 피스톤 형상의 최적화는 단기통 엔진을 통한 희박연소특성 실험을 여러 가지 피스톤 형상을 대상으로 실시함으로서 KL6i 엔진개발과 별도로 진행되었다. 그 결과 두 가지 피스톤에서 희박연소 특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 이를 KL6i 엔진에 적용하여 최종 평가를 하였다.

5.1 Piston L02의 성능

단기통 실험을 통해 희박연소 특성이 증명된 Piston L02는 bowl의 형상이 Base 피스톤에 비해 매우 상이하다. Piston L02는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 스퀴시 유동을 강화하기 위하여 피스톤 크라운 상면의 면적을 최대한 크게 하고 bowl의 깊이를 깊게 한 것이 특징이다. 이러한 형상의 피스톤이 희박연소 엔진에 적용되어 그 효과가 입증된 예는 많이 있다. 스퀴시 면적이 클 경우 흡입 및 압축 초기에 형성되었던 스월 유동이 압축말기에 강한 스퀴 유동으로 인해 깨지며 이때 난류강도가 증가하여 점화 및 화염전파가 안정적으로 이루어지는 것으로 알려져 있다[7,8].

Piston L02의 설계에 있어서 함께 고려되어야 하는 것은 피스톤 강도이다. 피스톤의 측면 두께와 아래쪽 bottom deck의 두께에 대해 최소한의 안전 치수를 확보하고자 할 경우, 오일 갤러리 때문에 스퀴시 면적을 증가시키는 것은 한계가 있다. 따라서 스퀴시 면적을 최대한 크게 하기 위해서 Piston L02의 경우 오일 갤러리를 폐지하였으며, 대신 피스톤 냉각 방법을 언더크라운 냉각 방식으로 바꾸었다.

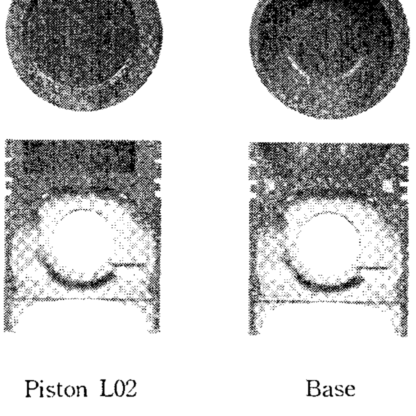


Fig. 5 Piston shapes of L02 and Base

Piston L02를 개발엔진에 적용한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Base piston에 비해 다소 우수한 희박연소특성을 보인다고도 할 수 있지만 단기통엔진 결과에서 나타나 것과 같이 확연한 개선점은 보이지 않으며 점화시기에 있어서도 큰 차이를 보이지 않았다.

이와 같이 Piston L02의 희박연소특성이 예상에 미치지 못하는 것은 연료분사시기 조절로 형성된 연료성층화가 스퀴시 유동에 의해 어느 정도 파괴되어 난류강도 증가에 의한 연소개선 증가분을 상쇄시킨 것으로 판단된다. 따라서 연료분사시기 제어를 통해 연료성층화를 구현하였다면 연소실 내에서의 유동은 단순히 난류강도를 증가시키는 것으로 희박연소를 개선시킬 수 없으며 형성된 연료성층화가 점화시기까지 최대한 유지될 수 있도록 해주는 것이 더 중요함을 알 수 있다.

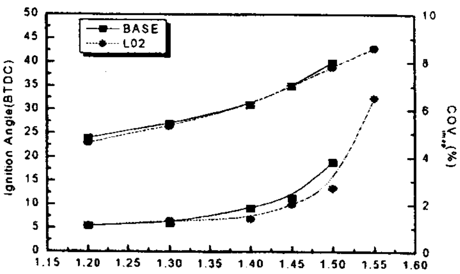
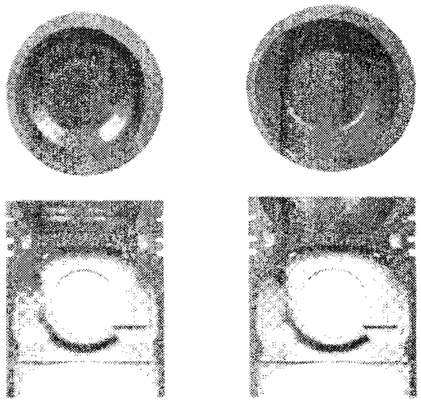


Fig. 6 Lean burn characteristics of Piston L02 (1200rpm, 50kgf-m)

5.2 Piston Y14의 성능

희박연소 특성의 개선과 내구성을 동시에 만족시킬 수 있는 피스톤 사양으로 Piston L02 다음으로 제시된 것은 Fig. 7에 나타낸 Piston Y14이다. Piston Y14는 그 모양이 Base 피스톤과 Piston L02의 중간 형태를 띠고 있으며 스퀴시 면적은 Base에 가깝다. 단지 기존의 피스톤과 큰 차이를 보이는 점은 top land의 높이가 약 2mm 낮게 설계되어 있어 top clearance가 큰 편이다. 이와 같이 top clearance가 클 경우에는 피스톤에 의한 스퀴시 유동의 강도가 약화되어 초기에 형성된 스월 유동의 패턴을 가능한 한 높게 유지하게 된다.



Piston Y14 Base

Fig. 7 Piston shapes of Y14 and Base

Piston Y14의 엔진적용 결과를 나타낸 Fig. 8을 살펴보면 희박연소 특성이 기존의 Base에 비해 우수할 뿐만 아니라 Piston L02보다도 더 좋은 결과를 보임을 알 수 있다. 희박연소한계는 Base 피스톤에 비해 약 0.05 정도 더 넓어졌으며 더욱이 MBT 점화시기가 5° 이상 지각되어 상당히 급속연소를 이룸을 알 수 있다. 이와 같은 Piston Y14의 희박연소 안정성과 급속연소 현상은 bowl 내의 난류강도의 영향도 있겠으나 스퀴시 유동을 줄임으로써 연료성층화의 보존이 점화시기까지 잘 이루어진 것이 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

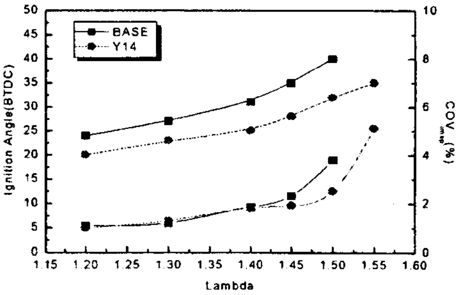


Fig. 8 Lean burn characteristics of Piston Y14 (1200rpm, 50kgf-m)

KL6i 엔진의 경우 희박연소영역을 확장하는데 있어서 가장 초점을 두고 있는 것은 연료의 성층화에 있다. 따라서 연료분사시기의 조절을

통하여 조성된 연료성층화를 연소실 유동을 통하여 점화시기까지 보존하는 것은 매우 중요하다. Piston L02의 경우 스퀴시 유동을 강화하여 스월 유동을 깨면서 난류강도를 강화시키는 것이 주목적이었지만 성층화는 다소 불리해질 수 있다. 반면, Piston Y14는 스퀴시 유동을 줄이고 스월 유동을 유지시켜 연소실 상층에 존재하는 연료 성층부를 점화시기까지 유지시키는 것이 희박연소 확장에 유효한 것으로 보인다.

6. 결론

LPG 액상분사방식인 LPLi 시스템을 대형엔진에 적용하여 희박연소의 안정성을 확보하고자 하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 대형 LPG 엔진의 경우 순간 연료소비량이 큼에 따라 2개의 LPLi 시스템을 사용하였으며 단점으로 복잡성을, 그리고 장점으로 진단 및 비상운행의 용이성을 가지고 있다.

(2) LPLi 시스템의 희박연소 적용을 통해 기존의 디젤엔진과 동등 내지 우수한 출력을 확보할 수 있었으며 배기가스 배출량을 1/2이하로 줄일 수 있었다.

(3) LPLi 시스템을 사용하여 희박연소의 안정성을 확보하기 위해서는 액상연료의 open valve injection를 통해 연료성층화를 구현하는 것이 가장 효과적이다.

(4) 피스톤 형상은 연료분사시기 제어를 통해 형성된 연료성층화를 점화시기까지 최대한 유지시켜줄 수 있는 구조가 희박연소 확장에 유리하다.

(5) 대형 LPLi 엔진에서 연료성층화를 유지시켜주기 위해서는 스퀴시유동을 억제하고 스월유동을 유지시키는 것이 효과적이다.

후 기

본 연구는 과기부의 NRL 사업의 지원 아래 이루어졌습니다. 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. World LP Gas Association, "Automotive LP Gas - Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow" 3rd edition, 1998
2. B. Hollemans, L. Conti and P. de Kok "Propane the 'Clean' Fuel as the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles", TNO-Paper VM9504, 1995
3. 이우직, 김인탁, 양승욱 "현대자동차 LPG 액상분사 시스템 개발", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp.159-167, 2004
4. K. Kang, D. Lee, S. Oh and C. Kim, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine", COMODIA conference, 2001
5. C. Kim, D. Lee, S. Oh and K. Kang, "Investigation of Icing Phenomenon in Liquid hase LPG Injection System for HD Engine", ILASS-Asia, 2001
6. K. Kang, C. Kim, and J. Lee, "Performance and Emissions of an 11L MPI Engine for City Buses", SAE 2002-01-0448, 2002
7. B. Johansson and K. Olsson, "Combustion Chamber for NG SI Engines Part I: Fluid Flow and Combustion", SAE 95069, 1995
8. C. Kim, D. Lee S. Oh and K. Kang "Enhancing Performance and Combustion of an LPG MPI Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE 2002-01-0449, 2002