

과급 LPLi 엔진의 공연비 변화에 따른 출력성능 및 배기특성에 관한 연구

The Study of Engine Output and Emission Characteristics according to Air Fuel Ratio for a Supercharged LPLi Engine

류재덕*, 윤용원*, 이기형**, 이창식**
Jeaduk Ryu, Yongwon Yoon, Kihyung Lee, Changsik Lee

ABSTRACT

For the purpose of obtaining a fundamental data which is needed to develop the port injection type charged LPLi engine system, we manufactured intake port injection system of liquid charging LPG and modified heavy duty single cylinder LPLi engine from heavy duty diesel engine. Engine output and emission characteristics were analyzed under variable air/fuel ratio and charging pressure. Since LPG is consisted of propane and butane, we investigated combustion characteristics using this two kinds of fuel.

From the result of charging engine performance test, engine torque increase about 30% ~ 40% with 0.3bar charging pressure. In low speed condition, as charging pressure increase, combustion stability improve in lean burn condition, but, in high speed condition, combustion stability make worse in lean burn condition. We know that engine output decreased rapidly from the condition of air excess ratio 1.3. In addition, we measured emission characteristics under the lean burn and charging condition. From this experiment, we found that CO emission is out of the question in the range from stiochiometric to lean burn and charging condition, but charging pressure has influence on HC emission.

주요기술용어 : LPLi(액화 석유 액상 분사), MAP(흡기관 절대 압력), Charging(과급), MBT(최적 점화 시기), Lean burn(희박 연소)

1. 서론

최근 지구 온난화 현상과 더불어 자동차의 배기가스에 의한 환경오염이 사회적인 문제로 심각하게 대두됨에 따라 환경친화성 연료를 사용하는 엔진개발에 관한 관심이 고조되고 있다. 대

도시의 대기 환경 오염원의 주된 원인으로 자동차의 배기가스가 부각되고 있으며, 특히, 디젤 엔진이 가솔린 엔진에 비하여 상대적으로 높은 열효율을 가지고 있음에도 불구하고, 고온의 연소 온도 및 확산화염의 특성상 운행시 배출되는 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM) 등의 유해배기가스 배출이 문제가 되고 있으므로, 유해배기가스 문제를 해결하기 위하여 디젤 입자상 물질

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학과

필터(DPF) 및 디젤 산화 촉매(DOC) 등과 같이 후처리 방식¹⁾ 과, EGR 및 예혼합 압축 착화(HCCI)와 같이 연소방식을 개선하는 두가지 방향으로 연구가 진행되고 있으나, 실용화 단계까지는 아직 도달하지 못한 상태에 있다.

또, 다른 연구방향으로는 LPG, CNG, LNG, DME(dimethyl-ether) 등과 같은 대체연료를 사용하는 연구가 수행되고 있다. CNG, LNG 연료는 주성분이 메탄(CH₄)으로 저탄소 연료이지만, 액화온도가 -162℃이므로 연료탱크내에 액상으로 유지시키기 위하여는 약 200bar의 고압으로 저장하여야 하는 어려운 점이 있다. DME는 자발화온도가 235℃로 낮으므로 디젤엔진과 같이 압축 착화가 가능한 연료이나, 점도가 낮으므로 노즐 분무를 위한 연료공급시스템 제작에 문제점을 가지고 있다.²⁾

LPG의 경우는 CNG, LNG와 같은 천연 가스에 비하여 낮은 압력에서 액화가 가능하여 적재성과 항속거리가 우수하며, 가연범위가 넓어서 희박연소가 가능하고, 연료공급을 위한 인프라 구축이 많이 이루어져 있는 실정이다.

LPG를 연료로 사용하는 엔진은 크게 3 단계로 구분된다. 1 세대는 믹서 타입 LPG 엔진으로 기상으로 연료공급이 이루어지므로 각 실린더별 정확한 공연비 제어가 이루어지기 어려우며, 유해 배기가스 배출과 충전 효율의 저감에 따른 출력 감소 및 연비 악화가 단점으로 지적되어왔다. 현재까지 국내에 가장 많이 보급된 형태이다.³⁾ 2 세대는 흡기포트 인젝터 타입으로 액상의 상태로 연료를 공급하는 방식이다. 본 시스템은 정확한 연료량 제어가 가능하고 충전효율 감소현상을 보완할 수 있어서 배기가스의 저감효과와 연비 향상을 이룰 수 있다.⁴⁾ 3 세대는 가솔린 GDI 엔진과 같이 열효율 증대 및 희박 연소가 가능한 시스템으로 연소실내로 직접 LPG 분사 방식으로 현재 연구는 초보적인 단계이다.

본 연구에서는 1 세대의 믹서 타입 LPG 엔진의 단점을 개선할 수 있는 2 세대 방식인 액상 흡기 포트 분사방식인 LPLi(Liquefied Petroleum Li-

quid injection) 엔진을 제작하여 출력성능 및 배기가스 성능을 측정하였다.

이와 같은 LPLi 엔진은 고압의 액상 분사가 가능하므로 전자제어를 통한 정확한 공연비 제어가 가능하게 되어 연비와 출력 저하 문제를 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 유해 배기가스 배출도 저감시킬 수 있다. 이러한 장점을 가진 액상의 LPG 연료 공급을 원활히 수행하기 위해서는 연료가 공급되는 과정에서 LPG가 기화되는 것을 방지하기 위하여, 열전달 및 압력손실이 발생되지 않도록 설계하여야 한다.⁵⁾

본 연구에서는 단기통 LPLi 엔진 시스템을 이용하여, 운전 영역의 변경에 따른 기본적인 최적점화시기(MBT)를 설정하였고, 희박연소 및 과급이 LPLi 엔진의 출력 및 배기 성능에 미치는 영향을 파악하여, 린번 및 과급 LPG 엔진의 상용화 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

2.1.1 연료 공급 장치

LPG는 프로판(C₃H₈)과 부탄(C₄H₁₀)으로 구성되어 있으며, 프로판과 부탄의 경우 Table 1과 같이 증기압과 비점이 서로 다르며, 저온에서 쉽게 기화되는 특성을 가지므로 LPG 엔진의 연료공급 시스템을 구성시에 연료 탱크에서 인젝터까지 액상상태로 유지시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 LP 가스연료를 액상으로 엔진에 공급하기 위하여 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 연료공급 시스템을 구성하였다. LPG 탱크를 기상밸브를 사용하여 불활성 질소가스로 연결하여 LPG 탱크 압력을 20bar 정도로 유지시켜서 상온에서도 기화가 되는 것을 방지하였으며, 액

Table 1 Propane & butane fuel characteristics

Gas	Saturation Press.	Saturation Temp.
Propane(C ₃ H ₈)	7 kg/cm ²	-42.1℃
Butan(C ₄ H ₁₀)	1 kg/cm ²	-0.5℃

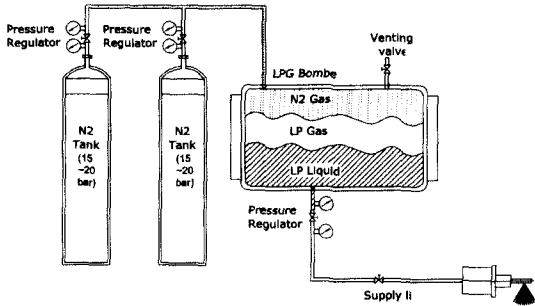


Fig. 1 LPLi fuel supply systems

상밸브를 통하여 액상의 LP가스를 엔진에 공급하였다.

2.1.2 엔진 및 제어장치

본 실험에서 사용한 엔진은 배기량 11 l 급 6기통의 디젤엔진을 과급 단기통 LPG 엔진으로 개조하여 사용하였고, 동력성능 실험을 위하여 와전류식(eddy current type) 동력계를 사용하였다. 엔진의 주요제원은 Table 2에 나타내었고, Fig. 2에 과급 LPLi 엔진 시스템의 개략도를 표시하였다.

디젤 엔진을 LPG SI 엔진으로 개조하기 위하여 LP 연료공급 시스템은 SIEMENS사의 LPLi용

Table 2 Test engine specifications

Bore × Stroke	130 × 140(mm)
Conrod length	260 (mm)
Compression ratio	10 : 1
Swept volume	1858.2 (cc)

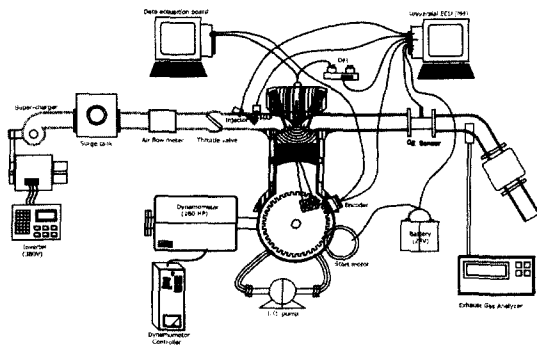


Fig. 2 Supercharging LPLi engine systems

인젝터를 엔진의 흡기포트에 부착하였고, 점화코일 및 점화 플러그 및 스톱바디를 부착하였다. 엔진 제어는 범용 ECU를 사용하여 연료 분사량을 조절하였고, 배기부에 광역 O₂ 센서를 사용하여 공연비 제어를 하였으며, 점화시기는 무과급인 경우는 MBT(Minimum spark advance for Best Torque)로 제어하였고, 과급엔진의 경우는 점화시기를 제어하여 노킹이 발생되지 않도록 운전 영역을 제어하였다. 운전 흡입공기는 엔진 흡입부에 과급기 및 인버터를 설치하여 실험조건에 맞는 과급압력을 제어하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 엔진 연소 및 배기 특성실험

과급 단기통 LPLi 엔진의 실험변수는 연료 조성비, 공연비 및 과급 압력을 사용하였다. LPG 조성은 부탄 100%와 부탄 40%와 프로판 60%의 두가지를 사용하였고, 공연비의 영향을 평가하기 위하여 이론공연비부터 희박영역까지 변화시켰으며, 과급의 영향을 고려하기 위하여 무과급인 경우와 1.8bar 까지 과급을 수행한 경우를 비교하였다. 엔진 점화시기는 MBT로 고정하였고, 엔진 회전수는 900, 1200, 1500, 1800rpm으로 변화시켰으며, 부하조건은 부분부하에서 전부하(WOT) 까지 실험을 수행하였다. 단기통 LPLi 엔진의 연소특성을 파악하기 위하여 실험에 의해 측정된 연소실 압력을 사용하여 도시평균 유효압력, 열발생율, 연소율을 계산하여 연소 성능을 평가하였고, 평균유효압력의 변동율을 측정하여 희박연소의 연소 불안정성을 판별하였다. 배기성능을 평가하기 위해 배기가스중의 유해 성분인 CO, CO₂, HC, NO_x를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 엔진 성능특성

3.1.1 운전조건별 점화시기 특성

Fig. 3은 운전조건에 따른 MBT를 선정하기 위

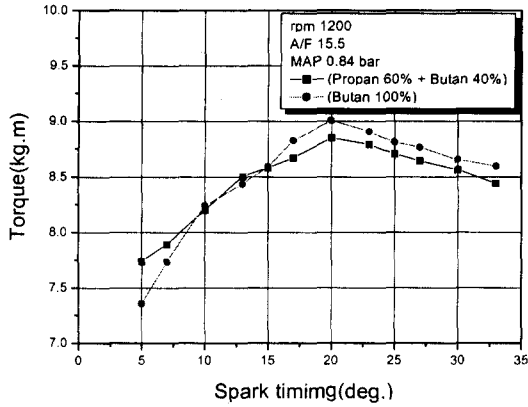


Fig. 3 Torque variation according to spark timing

하여 일정 회전수, 일정 부하(M.A.P.)조건에서 점화시기를 변경해가면서 최대 토크값이 나타나는 지점을 MBT로 선정하였다. 운전조건은 회전수 1200rpm, 부하 0.84bar이며, 이론공연비로 고정시켰다. 연료는 부탄 100%와 부탄 40%+프로판 60%인 혼합연료를 사용하였다. 두 경우 모두 상사점전(BTDC) 20° 전후에서 최대 토크를 나타내었으며, 점화시기가 상사점전 30° 이상 진각되는 경우는 두 가지 연료에서 노킹으로 인하여 정상적인 운전이 불가능하였다. 부탄 100% 연료의 경우가 고부하 영역에서 노킹이 더욱 빨리 발생하는 것으로 나타났으며, 각 운전조건에서 측정된 토크 값은 연료 조성의 차이에는 영향이 적은 결과를 나타내었다.

3.1.2 엔진 출력 특성

Fig. 4는 과급 압력변화에 따른 충전효율 변화를 나타낸 그림이다. 흡입 공기량의 지표로 사용한 충전효율은 과급 압력이 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 과급압력을 0.5bar로 하였을 경우, 과급하지 않은 상태 일 때의 값인 약 40%에서 85% 까지 2배까지 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 5는 이론공연비, MBT, WOT(Wide Open Throttle) 조건에서 무과급과 0.3과 0.5bar로 과급시키면서 과급에 따른 엔진출력 변화를 보여주

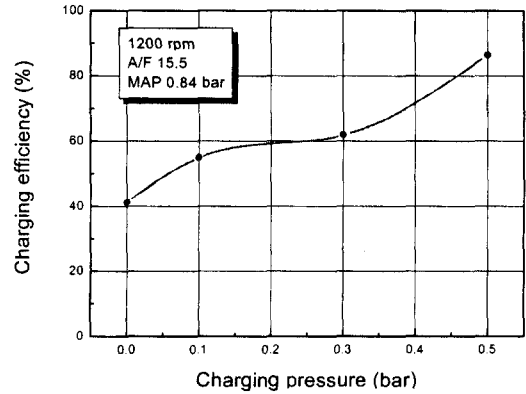


Fig. 4 Engine charging efficiency according to the charging press

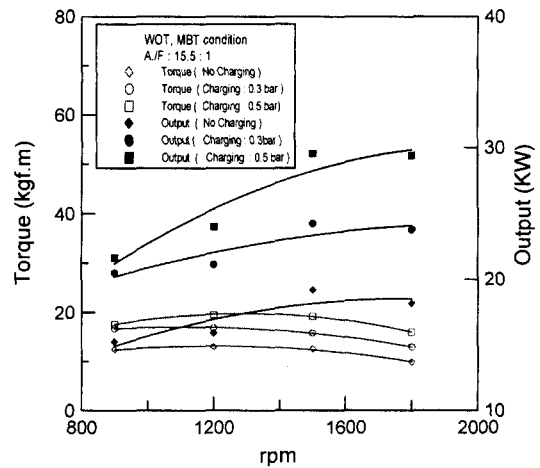


Fig. 5 Engine output according to the charging press

고 있다. 최대 토크는 과급 및 무과급인 경우 1200rpm에서 나타났으며, 900부터 1500rpm까지는 토크값이 거의 일정하게 나타났고, 1500rpm 이상에서는 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 전운전영역에서 과급압력이 상승함에 따라 토크곡선이 전체적으로 상승하는 경향을 나타냈으며, 과급 압력이 0.3bar 상승시는 토크가 약 30~40% 증가하였고, 0.5bar 상승시 1200rpm에서 최대 토크가 15kgf·m에서 24kgf·m으로 거의 60% 정도 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과로부터 LPLi 엔진의 출력증가에는 과급

압력의 영향이 매우 크다는 사실을 실험적으로 입증하였다. 엔진 출력은 엔진 회전수가 증가함에 따라 거의 비례적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 과급압 0.3bar 증가시키지는 거의 선형적으로 증가하였으나, 과급압 0.5bar에서는 1200rpm 이하의 저 회전수 영역에서 출력 상승 정도가 미비한 것으로 나타났다. 이와 같은 엔진 출력의 상승은 과급에 의한 흡입 공기량 증가 및 과급 압력에 의한 실압축비 증가의 두 가지 원인에 의한 것으로 판단된다.

3.1.3 희박 연소 특성

Fig. 6은 무과급조건에서 각각의 엔진 회전수에 대한 희박연소에 따른 출력변화를 나타낸 그림이다. 농후한 공연비 영역은 이론공연비 영역과 차이가 거의 나타나지 않았으나, 공기과잉율 1.2까지는 토크가 전 운전영역에서 약 20% 정도로 동일하게 감소하는 경향을 보였으나, 공기과잉율이 1.3 이상의 희박연소 영역에서는 최대토크가 약 1500rpm에서 나타났고, 최대 토크가 발생하는 회전영역 보다 회전수가 크거나, 작은 영역에서는 토크가 급격히 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보아 공기 과잉율이 1.3 이상의 희박연소 영역에서는 엔진 출력의 감소로 운전 영역이 좁아지는 사실을 알 수 있다.

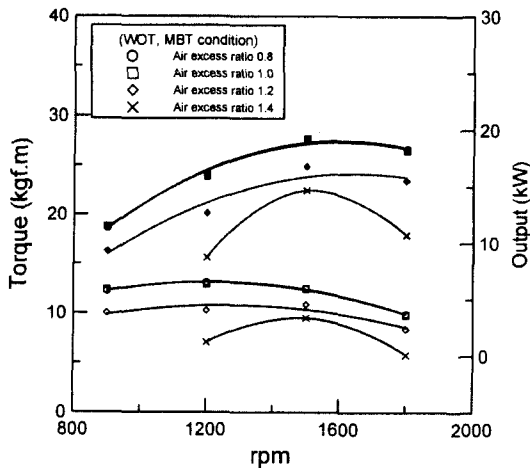


Fig. 6 Engine output according to the air excess ratio

Fig. 7은 각각의 운전영역에서 공연비에 따른 연소기간을 비교한 그림이다. 무과급인 경우는 1500rpm에서 주연소기간(10%~90%) 및 초기연소기간(0%~10%) 모두 최소값을 가지며, 초기연소기간은 공연비에 따라 큰 차이를 보이는 반면, 주연소기간은 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나, 0.3bar로 과급한 경우는 초기연소기간은 공연비별로 큰 차이가 없으나, 주연소기간은 차이를 보이고 있다. 또한 과급의 경우 엔진 회전수에 따른 연소기간의 차이는 적은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 공연비 변화에 따른 도시평균 유효압력의 사이클 변동율을 과급압력 별로 비교한 그림이다. 저회전 영역(1200rpm)에서는 과급 압력을 증가시킬수록 희박 영역에서의 연소 안정성이 향상되는 경향을 보이고 있으나, 엔진 회전수가 증가됨에 따라 희박 영역에서 연소 안정성에 과급이 악영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 고회전 영역으로 희박운전을 할 경우 과급 압력은 낮추는 것이 연소에 유리하다는 사실을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 단기통 LPLi 엔진은 공기 과잉율 1.2 영역까지는 모든 과급과 운전조건에서 안정된 연소 상태를 얻을 수 있으나, 공기 과잉율 1.2 이상의 희박 영역부터 연소 안정성이 악화되고 있다. 연소 변동 허용 한계인 도시평균 유효압력 변동율 5%를 기준으로 할 경우 공기과잉율 1.4에서 과급압이 1.5bar일 때 1500rpm과 1800rpm에서는 운전이 불안정한 것으로 나타났

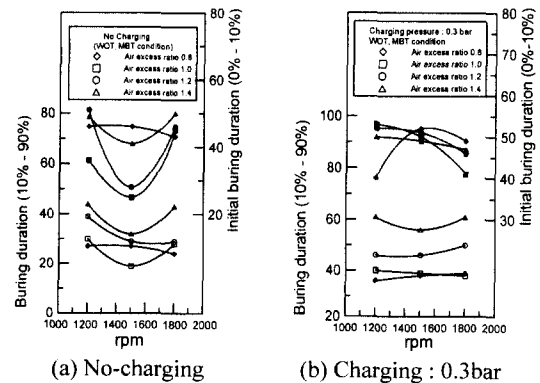


Fig. 7 Burning duration according to the air excess ratio

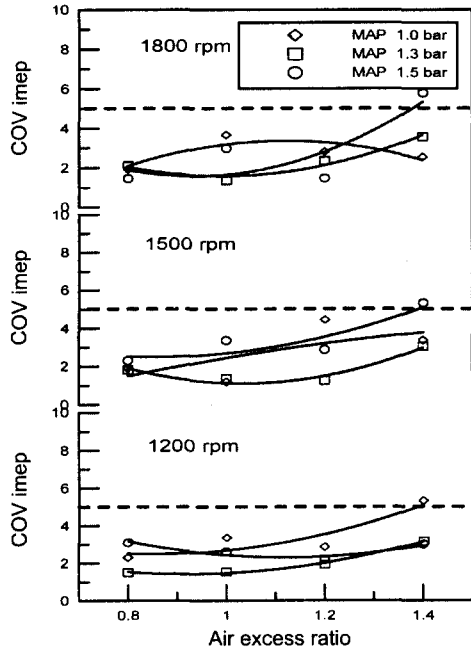


Fig. 8 C.O.V.imep according to the air excess ratio

으며, 이는 과급압이 높을 경우 연소기간이 지연되어 연소가 불안정하게 되었기 때문으로 판단된다. 또한, 공기 과잉율 1.4의 경우는 앞의 출력 선도에서 나타났듯이 출력이 급격히 감소하는 것으로 보아 실화 사이클이 상당수 존재할 것으로 예상된다. 희박연소영역으로 갈수록 연소최고 압력변동에 대한 과급의 효과가 큰 것으로 나타났다.

3.1.4 배기 가스 특성

Fig. 9는 배기가스 온도에 따른 HC, CO, NOx와 CO₂의 농도를 측정된 결과이다. 배기가스 온도가 증가됨에 따라 CO₂와 NOx 농도는 증가하였고, CO는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, HC 배출은 배기가스 온도와 비교적 상관관계가 적은 결과를 보이고 있다. 이론 공연비 영역에서 배기 가스 온도는 가장 높은 온도인 600~630℃이므로 이론 공연비에서 NOx 및 CO₂ 배출은 많음을 알 수 있다.

Fig. 10은 공연비의 변화에 따른 배기가스 농

도변화를 보여주고 있다. CO₂ 배출의 경우는 이론공연비 영역이 완전연소에 가까우므로 가장 많은 발생량을 나타내고, NOx의 경우는 배출가스 온도가 가장 높은 영역(공기과잉율 1.0~1.2)에서 가장 크게 나타나고 있으며, 이것보다 희박하거나, 농후한 경우에 감소하는 경향을 보여주고 있다. HC는 이론공연비 영역을 기준으로 희박, 또는 농후할수록 배출량이 많아진다. CO의 경우 농후한 영역에서 과다 배출되다가 이론공연비에서 희박영역으로 이동할수록 급격히 감소하는 경향으로 CO₂ 배출과는 상반되는 관계를 나타내고 있다.

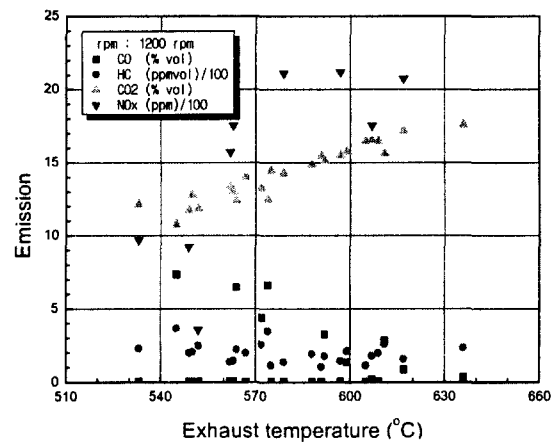


Fig. 9 Effect of emission on the exhaust temperature

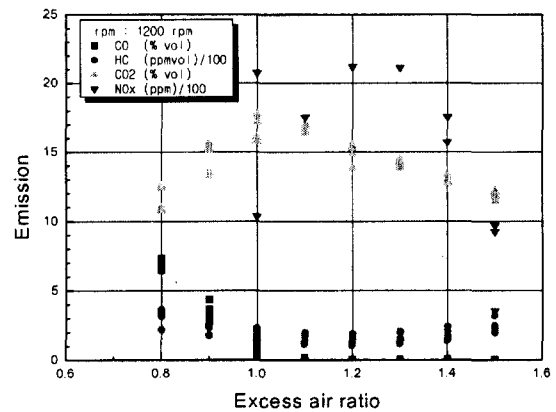


Fig. 10 Effect of emission on the excess air ratio

Fig. 11과 12는 과급 압력과 공연비가 엔진 배기가스 성능에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. CO 배출량은 과급 압력에는 큰 영향을 받지 않고, 공연비에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 CO 배출량은 과급에는 큰 문제가 없고, 이론 공연비, 희박영역 모두에서 큰 문제가 없다는 사실을 알 수 있다. HC 배출량은 과급 압력이 증가할수록, 또한 공연비가 희박할수록 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이러한 경향에서 과급 압력이 증가함에 따라 연료의 기화를 촉진시키므로 연료의 완전연소가 촉진되어 미연가스의 양이 감소된 것으로 판단된다.

또한, 과급 압력이 낮은 영역은 공연비가 HC 배출량에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으나 과급 압력이 커짐에 따라 공연비의 영향보다는 과급압력에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다. 이

러한 현상은 과급 압력이 연소 성능에 영향을 주는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 과급 LPLi 엔진의 출력 및 배기 특성을 연구하기 위하여 단기통 엔진을 제작하여 실험적인 연구를 수행하였다. 본 연구를 수행한 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) LPLi 엔진의 0.3bar 과급시 토크는 약 30%~40% 증가하는 경향이 나타났으며, 엔진 출력은 전반적으로 과급 압력에 따라 상승하였으나, 1200rpm 이하의 영역에서는 과급 압력이 증가할수록 상승폭이 줄어드는 경향을 나타냈다.
- 2) 저회전 영역에서는 과급 압력이 증가할수록 희박연소 영역에서 연소 안정성이 향상되며,

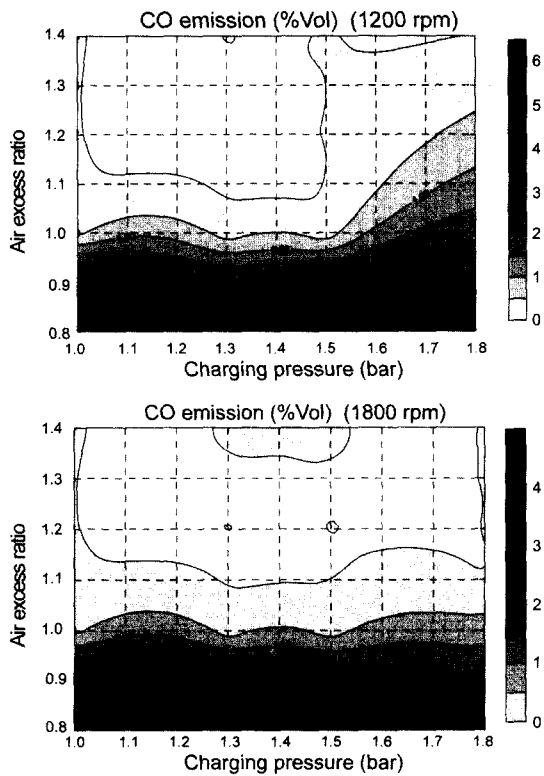


Fig. 11 Emission(CO) concentration according to charging pressure and air excess ratio

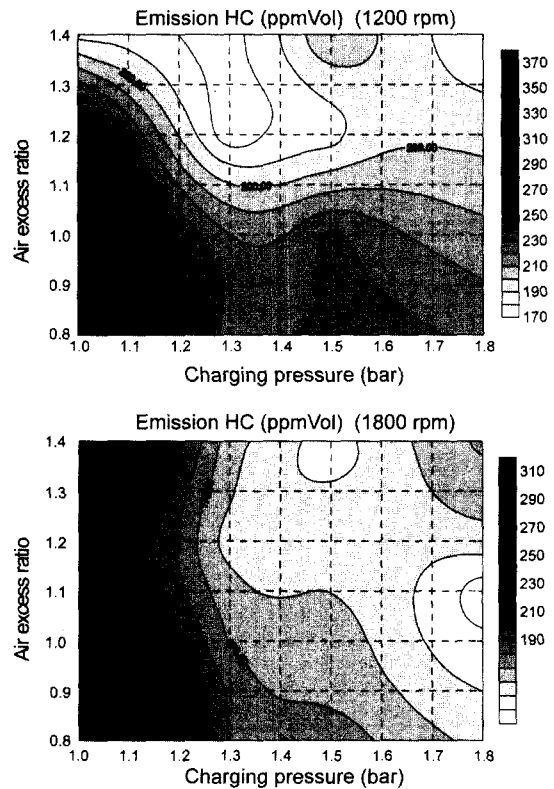


Fig. 12 Emission(HC) concentration according to charging pressure and air excess ratio

고회전 영역에서는 과급 압력이 증가 될수록 연소 안정성이 악화되므로, 고회전 영역에서는 과급압력을 낮추는 것이 연소에 유리하다는 것을 알 수 있다.

3) 과급시 희박연소가 엔진출력에 미치는 영향은 공기 과잉율이 1.2까지는 출력의 감소가 크게 나타나지 않으나, 1.3 이상에서는 토크 및 출력이 급격히 감소하는 경향이 나타나므로, 공기과잉율 1.3 이상은 정상적인 운전이 어려운 것으로 판단된다.

4) CO 배출량은 과급 압력에는 큰 영향을 받지 않고, 공연비에 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 이러한 결과로부터 CO 배출량은 과급에는 큰 문제가 없고, 이론 공연비, 희박영역 모두에서 큰 문제가 없는 것을 알 수 있다. HC 배출량은 과급 압력이 커짐에 따라 공연비의 영향보다는 과급 압력에 따른 영향이 큰 것으로 나타나고 있는 것은 과급 압력이 연소를 촉진시키므로 완전 연소에 가깝게 되도록 도와주는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원(KIMM) LP가스 사

업단의 위탁연구에 의해 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 김병수, 나병철, "HSDI 디젤엔진의 배출가스 후처리기술," 자동차공학회지, 제23권 제1호, pp.20-26, 2001.
- 2) Y. Sato, Y. Goto, "Research Trends in Power Systems using Alternative Fuels," IWPS2000, Tokyo, Japan, 2000.
- 3) 김우석, 이종화, 장창현, "흡기포트 분사식 LPG 엔진의 연료량 제어 및 연소 특성에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제8권 제6호, pp.31-39, 2000.
- 4) 강건용, "저공해 LPG 엔진 개발", LPG 자동차 세미나, pp.1-12, 2001.
- 5) B. R. Lute, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, R. Wicker, "The Effects of Fuel Composition, System Design, and Operating Conditions on In-system Vaporization and Hot Start of Liquid-phase LPG Injection System", SAE 981388, 1998.