

직접분사식 LPG 엔진의 성층화 연소 및 안정성에 관한 연구

이민호[†] · 김기호 · 하종한
한국석유관리원 석유기술연구소

A Study on the Stratified Combustion and Stability of a Direct Injection LPG Engine

MINHO LEE[†], KIHO KIM, JONGHAN HA

Research Institute of Petroleum Technology, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,
33, Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gun, Chungcheongbuk-do, 28115, Korea

Abstract >> Lean burn engine, classified into port injection and direct injection, is recognized as a promising way to meet better fuel economy. Especially, LPG direct injection engine is becoming increasingly popular due to their potential for improved fuel economy and emissions. Also, LPDi engine has the advantages of higher power output, higher thermal efficiency, higher EGR tolerance due to the operation characteristics of increased volumetric efficiency, compression ratio and ultra-lean combustion scheme. However, LPDi engine has many difficulties to be solved, such as complexity of injection control mode (fuel injection timing, injection rate), fuel injection pressure, spark timing, unburned hydrocarbon and restricted power. This study is investigated to the influence of spark timing, fuel injection position and fuel injection rate on the combustion stability of LPDi engine. Piston shape is constituted the bowl type piston. The characteristics of combustion is analyzed with the variations of spark timing, fuel injection position and fuel injection rate (early injection, late injection) in a LPDi engine.

Key words : LPG direct injection engine(LPDi, LPG 직접분사 엔진), Combustion stability(연소안정성), Minimum spark advance for best torque(MBT, 최적점화시기), COV_{imep}(도시평균유효압력 변동계수), Stratified-charge(층상급기), Homogeneous-charge(균질급기)

1. 서 론

전 세계적으로 에너지 절약 및 환경 문제가 대두되고 있다. 특히, 배기규제, 기후변화협약에 따른 CO₂ 규제 등 자동차에서의 환경 문제는 더욱 중요시되고 있다. 이러한 에너지 및 환경 문제를 줄이기 위하여 초저연비, 초저공해 자동차 기술 개발이 핵심적인 기

술이 되었다. 저연비 저공해 엔진기술로는 직접분사식 불꽃점화(SI, Spark ignition) 엔진 기술, 직접분사식 소형 압축착화(CI, Compression ignition) 엔진 기술, 그리고 대체연료 엔진기술(Alternative fuel)로 크게 구분할 수 있다^{1,2)}.

현재까지 자동차에서 주류를 이루고 있는 연료분사시스템은 포트내 연료 분사시스템(MPI, Multi-point port injection)이었다. 이 분사 시스템은 스로틀 제어에 의한 엔진 제어와 흡기 포트내의 연료 막 생성 등의 문제점을 가지고 있고, 이러한 시스템은 희박연소

[†]Corresponding author : lice92@kpetro.or.kr

Received : 2015.11.9 in revised form : 2015.12.25 Accepted : 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

를 실현하다고 하더라도 더욱 강화되고 있는 배기규제를 만족하기에는 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 보완하고 연비 성능과 출력성능을 충족시키기 위하여 개발되고 있는 엔진이 바로 직접분사식 불꽃점화 엔진(DISI, Direct injection spark ignition engine)이다. 이 엔진은 포트분사 엔진에 비해 연료경제성, 과도 응답성 그리고 배출가스를 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있는 것으로 알려져 있다^{3,4,5)}.

직접 분사식 불꽃점화 엔진의 연료분사방식은 일반적으로 운전조건에 따라 두 가지 방법을 채택하는데, 고부하의 운전 조건에서는 조기분사(Early injection)로 균일한 혼합기를 생성하며, 무부하 또는 저부하의 운전 조건에서는 후기분사(Late injection)로 혼합기의 국부적인 성층화인 층상급기를 생성한다. 전자는 희박연소를 구현하기 위하여 연료분사 시간을 전진시켜 점화 시에는 연소실 전체에서 종전의 가솔린 기관과 같이 균질한 혼합기 구조를 형성하는 반면, 후자인 층상급기는 연료분사 시간을 균질급기의 경우보다 지연시켜서 점화 시에 점화플러그 근처의 공연비는 안정된 점화에 대응하도록 하면서 그 주변에는 공기층을 형성시키고 화염전파에 지장을 주지 않는 범위에서 가능한 희박하도록 하여 연소실 전체적으로 성층화를 이루어 큰 희박 혼합기 이면서 안정된 연소를 실현할 수 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 미연탄화수소(HC)와 미세입자상물질(nano-particulate matter)의 과다 배출, 제한된 운전조건, 성능저하, 점화플러그의 오염 등 해결해야 할 많은 문제점을 안고 있다^{6,7,8)}.

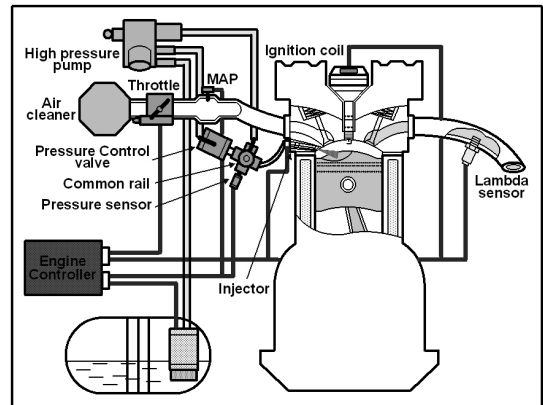
따라서 본 연구에서는 직접분사식 엔진에 LPG 연료를 적용하였을 경우의 문제점을 해석하고, 혼합기 형성에 따른 제어기술을 확보하기 위하여 스월유동방식을 적용하여 직접분사식 LPG 엔진의 점화시기, 연료분사시기 및 연료 분사량이 실린더 내의 연소특성에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 피스톤은 직접분사 엔진용으로 많이 사용되고 있는 보울 형태의

피스톤을 사용하여 실험을 수행하였다. 특히, 각각의 조건에 따라 직접분사식 LPG 엔진의 후기분사에 따른 성층연소 운전조건에서 연소안정성에 미치는 영향을 조사하고, 희박영역의 한계 및 이에 따른 직접분사식 LPG 엔진의 운전조건을 해석하고자 하였다.

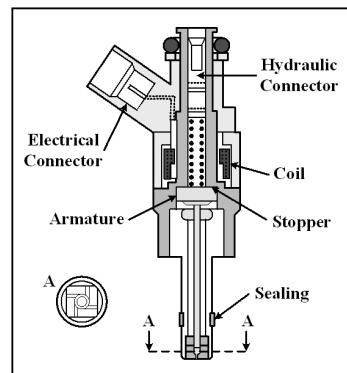
2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 엔진 및 고압스월 인젝터를 나타내고 있다. 실험 장치는 크게 엔진, 엔진 동력계, 엔진구동 모터, 연료공급 장치, 엔진제어 장치, 배기가스 분석 장치, 배기가스 온도 측정 장치, 엔진



(a) Test Engine



(b) High pressure Injector

Fig. 1 Schematic diagram of LPDi engine and LPG high pressure injector using the experiment

냉각수 제어장치, 공연비 측정 장치, 엔진 부압 측정 장치, 연소실 압력 측정 장치 등의 각종 엔진 성능 측정 장비로 구성되어 있다. 엔진 공연비는 광대역 공연비 센서(ETAS Lambda Meter LA4)를 사용하였고, 배출가스 농도를 측정하기 위하여 배출가스 분석기(Horiba, MEXA-554JK)를 사용하였다.

Table 1은 본 실험에 사용된 LPDi 엔진의 사양을 나타내고 있다. 실린더 중앙에 점화플러그가 설치되어 있고 흡기포트 왼쪽에 고압 스월 인젝터가 설치되어 있다. 흡기계는 스월 유동을 일으킬 수 있도록 스월 제어 밸브(SCV)가 장착되어 있는 흡기포트를 사용하였다.

실린더 내 고압 연료분사를 위해서 일정하게 고압 연료를 분사하여 줄 수 있는 연료공급 장치를 제작하였으며, 먼저 연료를 일정하게 압축하여 줄 수 있는 외장형의 고압펌프를 사용하였다. 이것은 최고 1000 kgf/cm² 이상으로 가압할 수 있고 압축공기에 의해 구동되어 진다. 가압된 연료는 연료레일에 공급이 되고 고압 플렉시블 파이프를 통하여 인젝터에 주어지게 된다. 이때 연료레일의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 고압 연료압력 레귤레이터를 설치하여 레일은 항상 50 kgf/cm²로 유지되도록 하였다.

초기 엔진의 구동 및 시운전을 위하여 시동모터 대신에 전기모터를 사용하였다. 주로 낮은 회전수에서 사용되어지고 컨트롤러가 연결되어 있어서 회전수를 조절할 수 있도록 제작하였다. 모터는 다시 동력계와 연결되어 있고 모터의 구동력은 동력계를 거쳐 엔진

의 크랭크축에 전달된다. 이때 엔진의 회전수를 제어하기 위해 130 kW급 EC (Eddy-current) 동력계를 사용하였다. 엔진시동 후 모터에 의한 구동력은 더 이상 필요하지 않게 되므로, 엔진에 의한 회전수가 모터에 의한 회전수보다 빠를 때 모터에 동력을 전달되지 않도록 설계 제작을 하였다. 모터에 의하여 엔진이 구동되면 모터는 제어부에 의해 정지하게 되고, 엔진은 엔진 컨트롤러(MFECU-3208)에 의해 구동하게 된다. 엔진 컨트롤러에 의해 엔진의 점화시기, 연료분사시기 및 연료 분사량이 각각 조절이 되어지고, 각종 센서에서 취득된 데이터에 의해 다시 제어 값들이 조정되어진다.

2.2 실험 방법

실험은 점화시기, 연료분사시기 및 연료 분사량 등에 대하여 직접분사식 LPG 엔진의 성층연소 운전조건인 저속(800, 1000 rpm) 저부하(1/4 load)에서 실시하였으며, 공연비는 희박연소한계까지 실험을 수행하였고, 전체적인 실험조건은 Table 2에 나타내었다. 연료분사 시기는 BTDC 25°~BTDC 125°, 점화 시기는 BTDC 0°~BTDC 45°에서 실험을 수행하였으며, 먼저 MBT 조건의 점화시기를 찾기 위하여 엔진이 가장 안정된 상태에서 연료분사시기와 연료 분사량을 고정시켜놓고 이론 공연비에서 점화시기를 조정하여 실험을 수행하였다. 다음으로 연료분사시기의

Table 1 Specification of the LPDi test engine

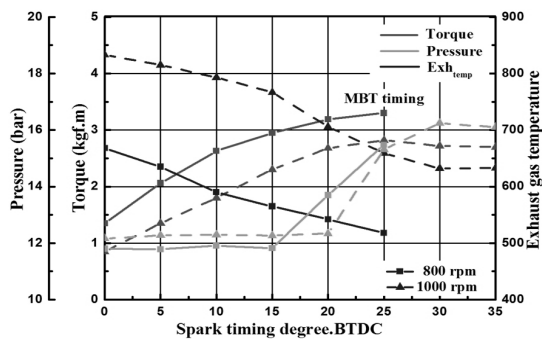
Engine type	4-Stroke, 4-Cylinder
Bore × Stroke	82.0×93.5mm
Displacement	1975cc
Compression ratio	11.0 : 1
Max. Power	141 ps / 6000 rpm
Max. Torque	18.6 kg·m / 4500 rpm
Int. valve open / close	BTDC 18° / ABDC 54°
Exh. valve open / close	BBDC 47° / ATDC 17°

Table 2 Experimental test condition

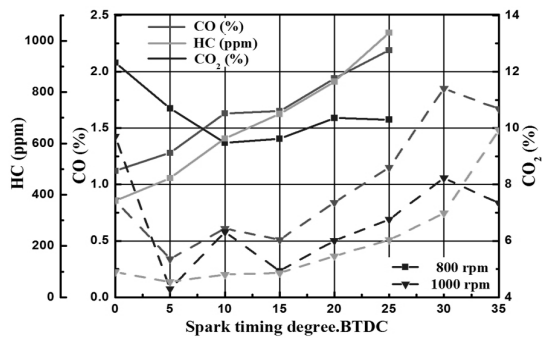
Engine Revolution	800, 1000 rpm
Load	1 / 4 load
A/F ratio	Rich lambda (10.3 : 1)~Lean limit lambda
Injection timing	BTDC 25°~BTDC 125°
Spark timing	BTDC 0°~BTDC 45°
Fuel pressure	50 bar
Coolant temp.	80°C
SCV control	Close
Piston type	Bowl type

영향을 살펴보기 위하여 MBT 실험에서 구한 최적의 점화시기와 이론 공연비에서 연료분사 시기를 변경하여 실험을 수행하였다.

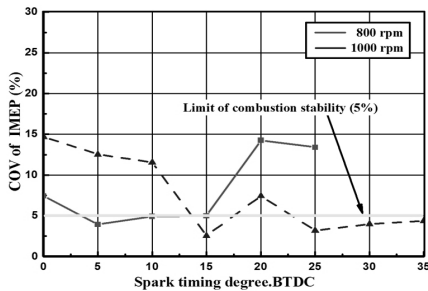
마지막으로 희박연소의 한계를 검토하기 위하여 최적의 점화시기와 연료분사시기를 가지고 실험을 수행하였다. 해석은 희박연소 한계 영역 조건에 따른 연소해석을 통하여 성층 연소 시에 연소안정성과 열발생을 등을 검토하여 희박연소에 필요한 연료 공연비를 측정하였다.



(a) Pressure, Torque and Exhaust gas temperature



(b) Exhaust emissions (HC, CO, CO₂)



(c) Combustion stability

Fig. 2 The effect of spark timing on combustion characteristics (MBT condition)

3. 결과 및 고찰

3.1 점화시기 특성 (MBT 특성)

Fig. 2는 점화시기에 따른 직접분사식 LPG 엔진의 성능 및 배기 배출가스, 연소 안정성을 나타내고 있다. 여기서 연료분사 시기는 BTDC 45°이고, 공연비는 이론 공연비(=14.7)이다.

엔진회전수 1000 rpm의 경우 MBT값은 BTDC 25°이다. 그러나 800 rpm의 경우의 MBT는 엔진의 부조 및 정지로 인하여 BTDC 25°이상의 측정이 불가능하였다. MBT 조건에서 배출가스를 보면 HC, CO, CO₂가 모두 급격히 증가하고 있는 것을 볼 수 있고, 연소 안정성은 800 rpm의 경우는 안정조건 한계를 넘어가 있으나, 1000 rpm에서는 안정조건을 만족하고 있음을 볼 수 있다. 한 가지 특이한 것은 1000 rpm의 경우에 BTDC 25°이상에서도 연소 안정성을 보이는 반면에 배출가스는 더욱 급격히 증가하고 있다는 것이다.

위의 실험에서 800 rpm 및 1000 rpm의 최적의 점화시기는 BTDC 15°이다. 이 점화시기는 출력부분에서도 만족하며, 배출가스 면에서도 어느 정도 감소된 배출을 하고 있고, 연소 안정성에 있어서도 만족하고 있음을 볼 수 있다.

3.2 연료분사 시기 특성

Fig. 3은 연료분사 시기에 따른 엔진 성능, 배기 배출가스, 연소 안정성을 나타내고 있다. 실험조건은 점화시기가 BTDC 15°이고, 공연비는 이론공연비이다. Fig. 4는 연료분사시기, 엔진속도에 따른 압력선도와 열발생율을 나타내고 있다.

최적의 연료분사 시기는 토크, 배기 배출가스, 연소안정성을 고려하여 검토하여 보면 800 rpm의 경우는 BTDC 80°, BTDC 140°이고, 1000 rpm의 경우는 BTDC 90°, BTDC 150°이다. 여기서, BTDC 126° 이전의 값들은 흡기밸브가 닫히기 전에 연료를 분사하는 경우로써 조기 연료분사에 의하여 균일한 혼합기를 생성

하고 점화 시에는 연소실 전체에서 종전의 기술린 기관과 같은 균질연소를 행하는 운전 조건이고, 흡기밸브가 닫힌 후의 경우는 저속 저부하의 경우에 국부적인 성층화 연소를 행하는 후기 연료분사 운전조건이다.

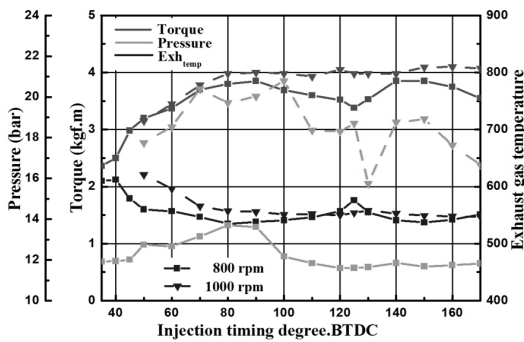
조기 연료분사와 후기 연료분사 두 운전조건을 비교하여 보면 조기 연료분사에 의한 압력이 후기 연료분사에 의한 압력보다 낮으면서도 토크는 비슷한 값을 가지고 있다. 이러한 이유는 Fig. 4에서 보는 것과

같이 각 운전조건에서의 열발생율에 의한 것이다. 열발생율이 같으므로 인하여 엔진 토크는 비슷한 출력을 보이고 있다. 이것은 엔진의 출력이 연소실의 연소 압력과 열발생율에 의하여 변화한다는 것을 알 수 있다.

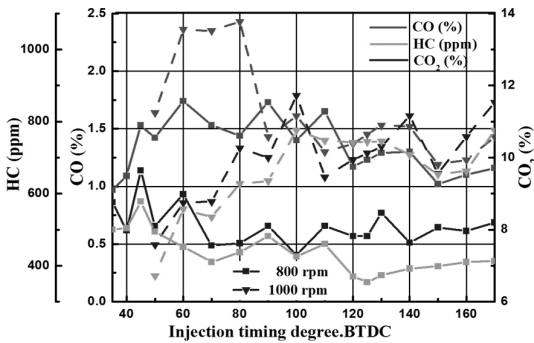
Fig. 3에서 토크를 보면 후기 연료분사의 경우는 엔진의 회전속도에 영향을 거의 받지 않고 있고, 연료분사 시기가 진각 될수록 토크는 엔진 회전속도에 영향을 받고 있음을 볼 수 있다.

연소 안정성을 보면 조기 연료분사에 의한 운전보다 후기 연료분사에 의한 운전이 더 안정성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 후기 연료분사에서 더욱 성층화가 이루어질 수 있고, 높은 희박 혼합기로 엔진을 운전할 수 있음을 알 수 있다. 또한 엔진 회전속도에 의한 연소 안정성을 보면 엔진 회전속도가 1000 rpm의 경우가 더욱 안정적인 것을 볼 수 있다.

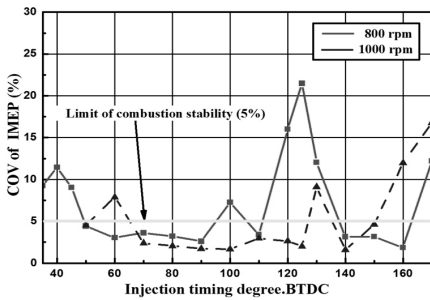
그러나 배출가스 측면에서는 조기 연료분사와 후기 연료분사가 거의 같은 수준의 배출가스를 배출하



(a) Pressure, Torque and Exhaust gas temperature

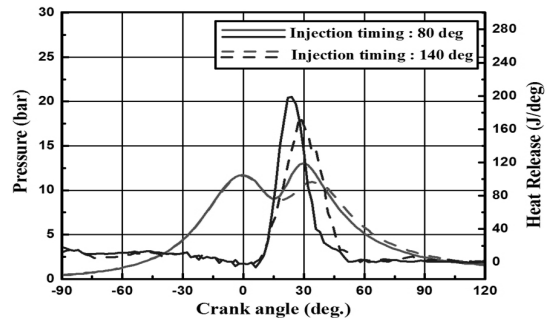


(b) Exhaust emissions (HC, CO, CO₂)

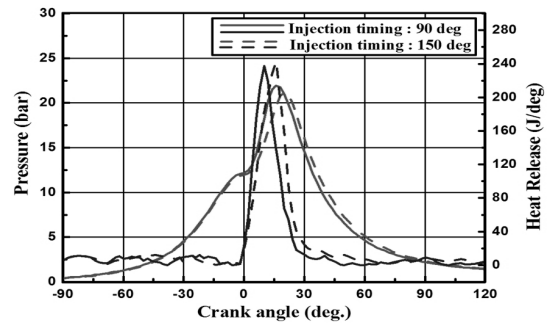


(c) Combustion stability

Fig. 3 The effect of fuel injection timing on combustion characteristics



(a) Engine revolution : 800 rpm



(b) Engine revolution : 1000 rpm

Fig. 4 The pressure history and heat release characteristics according to fuel injection timing

고 있음을 알 수 있고, 후기 연료분사의 분사시기를 더욱 늦출수록 HC는 적게 배출되는 반면에 CO가 급격히 많이 배출되고 있음을 볼 수 있다.

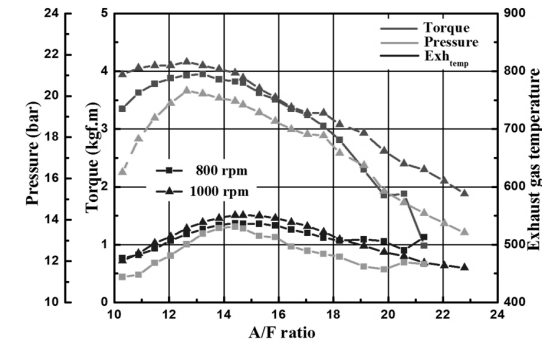
3.3 희박연소 특성

Fig. 5는 희박연소의 특성을 보기위하여, 연료 공연비 변화에 따른 엔진 성능, 배기 배출가스, 연소 안정

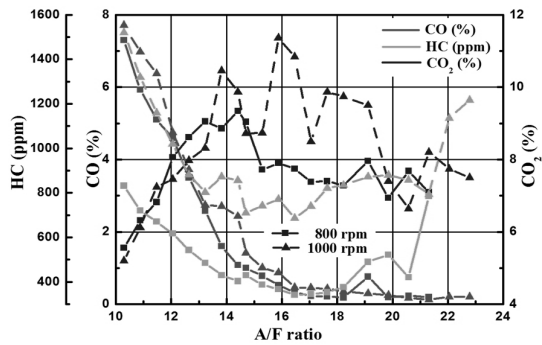
성을 나타낸 것이다. 실험조건은 점화시기가 BTDC 15°이고, 연료분사 시기는 800 rpm의 경우는 BTDC 80°이고, 1000 rpm의 경우는 BTDC 90°이다. 연료 공연비는 10.32~24.0에서 실험을 수행하였다. Fig. 6은 각각의 엔진 회전수에서 연료 공연비에 따른 압력선도와 열발생율을 나타내고 있다.

Fig. 5를 보면 연소 안정성에 있어서 800 rpm의 경우 희박연소 가능 공연비는 16.8이고, 1000 rpm의 경우는 22.1이다. 엔진의 토크는 12~14의 공연비에서 가장 큰 값을 가지나 희박한 영역으로 갈수록 급격히 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 이러한 출력감소는 엔진을 희박영역에서 운전할 경우에 부가적으로 생길 수밖에 없는 문제점이다.

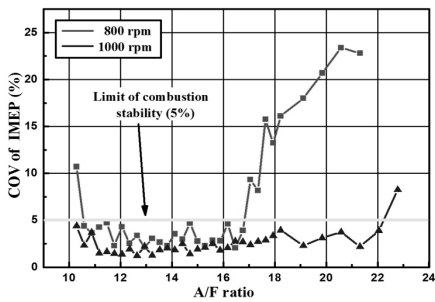
배출가스를 살펴보면, CO의 경우 800 rpm, 1000 rpm 두 경우 모두 희박영역으로 갈수록 감소하고 있다. 그러나 CO₂의 경우 이론 공연비까지는 증가하다가 희박영역으로 갈수록 일정한 값으로 배출되고 있다. 반



(a) Pressure, Torque and Exhaust gas temperature

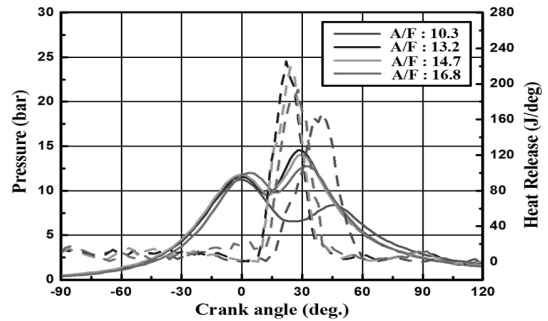


(b) Exhaust emissions (HC, CO, CO₂)

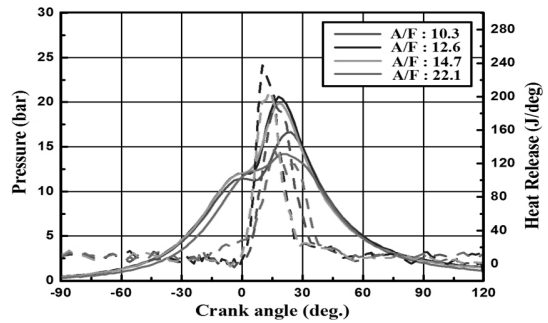


(c) Combustion stability

Fig. 5 The effect of A/F ratio on combustion characteristics (Lean-burn combustion)



(a) Engine revolution : 800 rpm



(b) Engine revolution : 1000 rpm

Fig. 6 The pressure history and heat release characteristics according to A/F ratio and engine revolution

대로 HC의 경우는 이론 공연비까지 감소하다가 희박해질수록 급격히 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 배출가스를 줄이기 위한 연소 희박영역한계는 800 rpm의 경우 공연비 16.8이고, 1000 rpm의 경우는 공연비 21.0 정도이다.

연소 안정성에 있어서는 앞의 경우와 마찬가지로 엔진회전수 1000 rpm의 경우가 더욱 안정적이고, 희박한계를 확장할 수 있다. 연소 압력과 열발생율을 살펴보면, 엔진회전수 800 rpm, 1000 rpm 모두 농후한 공연비에서는 낮은 연소압력과 열발생율을 보이고 있다가, 이론 공연비로 갈수록 증가하고 다시 희박영역으로 갈수록 감소하고 있음을 볼 수 있다. 엔진회전수 800 rpm보다는 1000 rpm에서 연소압력과 열발생율 변동이 적게 나타나고 있는데, 이 결과로부터 1000 rpm의 경우가 더 안정적으로 운전할 수 있음을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 직접분사식 LPG 엔진의 연소특성을 확인하기 위하여 스윙유동 방식을 적용한 직접분사 LPG 엔진에서 점화시기, 연료분사 시기 및 연료 분사량이 실린더 내의 성층화 연소 및 연소 안정성 등에 미치는 영향을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 엔진회전수 1000 rpm의 MBT는 BTDC 25°이고, 이 조건에서 배출가스는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 연소 안정성은 만족하고 있음을 볼 수 있다. 출력, 배기 배출가스, 연소 안정성에 있어서 800 rpm과 1000 rpm의 최적 점화시기는 BTDC 15° 부근이다.
- 2) 최적의 연료분사시기는 엔진회전수 800 rpm의 경우는 BTDC 80°, BTDC 140°이고, 1000 rpm의 경우는 BTDC 90°, BTDC 150°이다. 여기서, BTDC 126°

이전의 값들은 흡기밸브가 닫히기 전에 연료를 분사하는 경우로써 조기 연료분사 운전조건이다. 분사시기 조건을 비교하면 후기 연료분사 운전조건이 더 좋은 배출가스와 출력, 연소 안정성을 보이고 있으므로 더욱 희박한 영역으로 성층화를 시킬 수 있음을 알 수 있다.

- 3) 연소 안정성에 있어서 엔진회전수 800 rpm의 경우 희박연소 가능 공연비는 16.8이고, 1000 rpm의 경우는 22.1이다. 희박영역으로 운전할 경우 출력 면에서는 단점을 가지고 있으나, 배출가스를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있음을 볼 수 있다. 또한 1000 rpm으로 운전할 경우가 연소압력과 열발생율 변동이 적어서 더 안정적으로 연소를 하고 있음을 볼 수 있다.

References

1. S. Iguchi, "Combustion and Current Status of Lean Burn Engine", Lean Burn Gasoline Engine Symposium, Japan, 1992.
2. Tateo Kume, Hiroshi Tanada, Kazumasa Iida, Nobuaki Murakami, Hiromitsu Ando, "Combustion control technologies for Direct Injection Engine", SAE Paper No.9631948, 1996.
3. G. K. Fraid, W. F. Piock, and M. Wirth, "Gasoline Direct Injection : Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE Technical Paper No.960465, 1996.
4. Jackson, N. S., Stokes, J. and Lake, T. H., "Stratified and Homogeneous Charge Operation for the Direct Injection Gasoline Engine - High Power with Low Fuel Consumption and Emissions", SAE Technical Paper No.970543, 1997.
5. R. H. Stanglmaier, M. J. Hall, and R. D. Matthews, "Fuel-Spray / Charge-Motion Interaction within the Cylinder of a Direct-Injected, 4-Valve, SI Engine", SAE Technical Paper No.980155, 1998.
6. Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi

- and H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE Technical Paper No. 970541, 1997.
7. Kichol Noh, Jongtai Lee, "A Fundamental Study on Suppressing the Bubbling in the Injector of LPDi Engine by High Pressurization of Fuel", Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 3, pp.47-53, 2007.
8. Seehyeon Cho, Cheolwoong Park, Seungmook Oh, Junkyu Yoon, "Comparison of Combustion Characteristics with Combustion Strategy and Excess Air Ratio Change in a Lean-burn LPG Direct Injection Engine", Transactions of KSAE, Vol. 22, No. 6, pp.96-103, 2014.