

직접분사식 LPG엔진에서 연료분사압력이 연소/배기특성에 미치는 영향 연구

이석환* · 조준호** · 오승묵†

Effects of Injection Pressures on Combustion and Emissions in a Direct Injection LPG Spark Ignition Engine

Seokwhan Lee, Junho Cho and Seungmook Oh

Key Words: Direct injection engine(직접분사엔진), High pressure injection(고압분사), LPG(석유액화가스), Swirl injector(선회형 연료분사기), Nano particle(나노입자)

Abstract

High pressure LPG fuel spray with a conventional swirl injector was visualized and the impact of the injection pressure was also investigated using a DISI (direct injection spark ignition) LPG single cylinder engine. Engine performance and emission characteristics were evaluated over three different injection pressure and engine loads at an engine speed of 1500 rpm. The fuel spray pattern appeared to notably have longer penetration length and narrower spray angle than those of gasoline due to its lower angular momentum and rapid vaporization. Fuel injection pressure did not affect combustion behaviors but for high injection pressure and low load condition ($P_{inj}=120$ bar and 2 bar IMEP), which was expected weak flow field configuration and low pressure inside the cylinder. In terms of nano particle formation the positions of peak values in particle size distributions were not also changed regardless of the injection pressure, and its number densities were dramatically reduced compared to those of gasoline.

1. 서 론

연소실 직접분사방식이 가솔린을 연료로 사용하는 내연기관의 열효율 및 배기저감을 위한 새로운 대안으로 떠오른 이후 주요 완성차 메이커의 주력 엔진에 적용되고 있다. 직접분사방식과 과급을 통한 엔진다운사이징 기술은 자동차 연비를 향상시켜 CO₂ 발생을 큰 폭으로 줄일 수 있으므로 주요 선진국에서 규제화하고 있는 수송분야 온실가스규제 대응에 매우 유용하다^(1,2).

연소실 직접분사방식은 혼합기의 온도를 낮추어 노킹 현상을 줄일 수 있고 포트분사방식보다 연료분사시기 제어의 자유도가 높아짐에 따라 여러 가지 이점을 가지게 된다. 특히, 후분사를 통한 촉매가열시간단축, 소기(scavenging)에 의한 터보랙 감소는 직접분사방식의 적용으로 구현할 수 있는 대표적 기능이다. 초기 도입 때와 달리 현재 직접분사방식의 가솔린엔진은 대부분 이론공연비 연소를 적용하고 있다^(3,4). 희박연소는 이론공연비연소보다 열효율을 증가시킬 수 있으나 배기후처리 기술의 어려움으로 제한된 범위에서 사용되고 있는 실정이다.

국내 수송분야에서 많이 사용되고 있는 석유액화연료(liquefied petroleum gas, 이하 LPG) 또한 전기점화방식의 내연기관에 이용되고 있으므로 직접분사를 적용할 경우 가솔린 연료와 같은 효과를 거둘 수 있다. 더욱이

(2010년 10월 11일 접수 ~ 2011년 3월 17일 심사완료, 2011년 3월 23일 게재확정)

* 한국기계연구원 그린동력연구실

** 명지대학교 기계공학과 대학원

† 책임저자, 한국기계연구원 그린동력연구실

E-mail : mook@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7382 FAX : (042)868-7305

LPG 연료는 증발온도가 낮은 가스연료이므로 벽면적심(wall wetting)이 줄어들고 혼합기 형성에 유리할 것으로 예상할 수 있다.

지금까지 LPG 직접분사방식에 관한 연구는 디젤엔진을 개조한 압축착화가 대부분이었으며 전기점화기관에 관한 연구는 매우 제한적이었다^(5,6). 따라서, 본 연구에서는 LPG 전기점화 직접분사방식의 선행연구를 목적으로 연료분사압력에 따른 LPG 고압분사시 연료의 분무 거동과 실엔진에서의 연소메기에 관련된 주요 특성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 분무가시화 실험

가솔린 및 LPG 연료의 분무특성을 비교하기 위하여 분무이미지 측정장치를 구성하였다. Fig. 1은 LPG 고압 분무가시화를 위한 장치 구성을 보여주는 그림으로 광원과 2개의 거울로 구성된 쉐리렌(Schlieren) 시스템과 영상취득을 위한 ICCD 카메라로 구성하였다. 가솔린의 경우 연료고압화를 위한 장치만 달라지고 동일한 시스템을 사용하였다. ICCD(intensified charge coupled device) 카메라는 연속 촬영이 불가능하므로 분사시작이후 시간 대별 분무이미지를 한번의 분무를 통해 얻을 수 가 없

다. 따라서, 동일 조건에서의 분무형태는 유사하다는 가정 하에 시간동기화를 통하여 각각 다른 분무에서 시간 대별 분무형상을 ICCD 카메라로 측정하였다.

2.2 단기통 엔진 실험

본 연구에 사용된 엔진은 상용 2리터급 가솔린 직접 분사방식의 엔진을 기본으로 제작된 단기통 엔진이다. Table 1에 정리된 바와 같이 보여와 스트로크는 각각 83, 92 mm, 배기량은 498 cc이며 최고 120기압까지 연료분사가 가능한 솔레노이드형의 선회형 분사기(swirl injector)를 장착하여 사용하였다. 사용된 연료분사기는 가솔린연료 전용으로 LPG연료를 사용했을 경우에 누설의 우려가 있으므로 이에 대한 검증을 수행하였다. 연료 분사기에 LPG 연료를 150기압으로 가압한 후 소형 버블유량계(bubble flowmeter)를 사용하여 연료 누설이 없음을 확인하였다. 가솔린 연료의 공급은 고압연료펌프를 사용하였으나 LPG의 경우는 공압용 펌프(pneumatic pump)와 축압기(accumulator)를 사용하여 Fig. 2와 같이 구성하였다. 연소실 압력측정은 압전형 압력센서(Kistler, 6117B)를 사용하였으며, 얻어진 연소압력데이터를 가지고 열방출량해석(heat release analysis)을 통해 연소 특성을 분석하였다⁽⁷⁾.

공연비 측정을 위해 배기관에 산소센서를 설치하였고, 흡기 쪽 레저버(reservoir)에 층류 유량계를 설치하여 흡

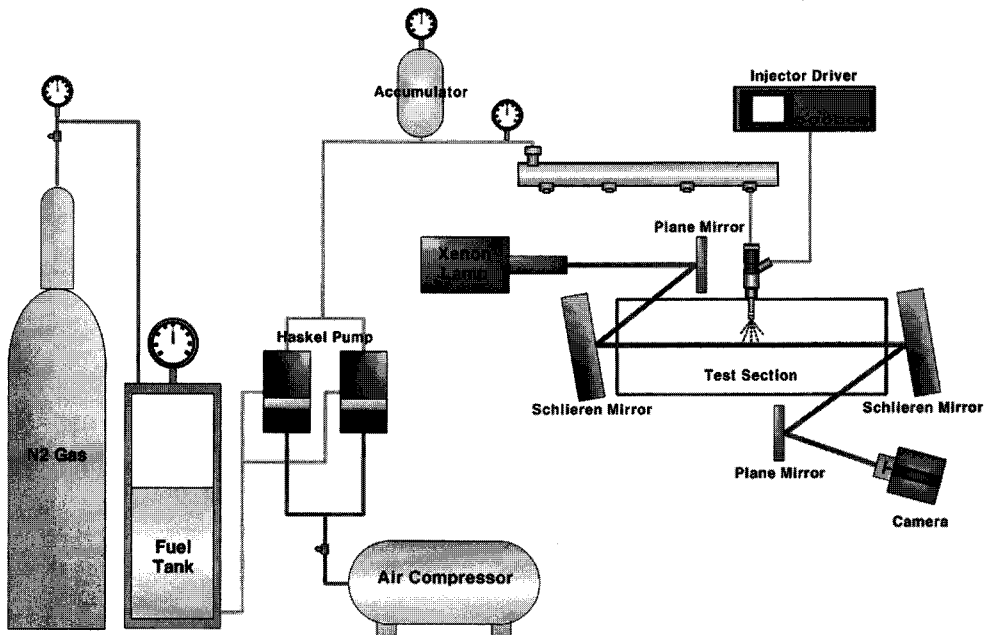


Fig. 1 Experimental setup for LPG spray imaging

Table 1. Engine specifications

Engine type	DOHC 4V/V
Displacement	498 cc
Bore × Stroke	83 × 92 mm
Compression Ratio	10.5:1
Fuel injection pressure	Up to 120 bar
Fuel injector type	Solenoid

입공기량을 측정하였다. 질소산화물, 미연탄화수소, 일산화탄소와 같은 가스상 배기배출물은 배출가스 분석장치(Horiba, MEXA8120)를 통하여 측정하였으며, 배출극미세입자의 입경별 개수 농도를 측정하기 위해 DMA(dynamic mobility analyzer)와 응축 입자 계수기(CPC; condensation particle counter)로 구성된 Grimm사의 SMPS(scanning mobility particle sizer)를 이용하였다.

3. 실험조건

전체 실험을 통하여 엔진회전수는 1500 rpm으로 고정하였으며 Table 2와 같이 실험조건을 결정하였다. 엔진의 부하조건은 정미도시평균유효압력(net indicated

Table 2. Test conditions

Engine speed	1500 rpm
Engine load	IMEP 2, 6, 10 bar
Fuel injection pressure	60, 90, 120 bar
Fuel injection timing	BTDC 300 CAD

mean effective pressure, IMEP) 기준으로 2-10 bar 범위에서 연료분사압은 60, 90, 120 bar로 변화시켰다. 연료분사 시기는 BTDC 300 CAD로 고정하여 조기분사(early injection)로 균질혼합기(homogeneous mixture) 형성을 통해 이론공연비 영역에서만 작동하는 엔진 운전조건을 선택하였다. 실험에 사용된 LPG연료는 물 기준으로 부탄 90%, 프로판 10%의 하절기용 LPG 연료 조성을 사용하였다. 연소실 압력센서를 통하여 측정된 500 사이클 평균 연소압력으로부터 연소안정성, 연소기간을 비교하였다.

4. 실험결과

4.1 분무가시화

LPG 연료의 시간에 따른 분무이미지를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서는 가솔린 연료의 경우와 비교하기 위

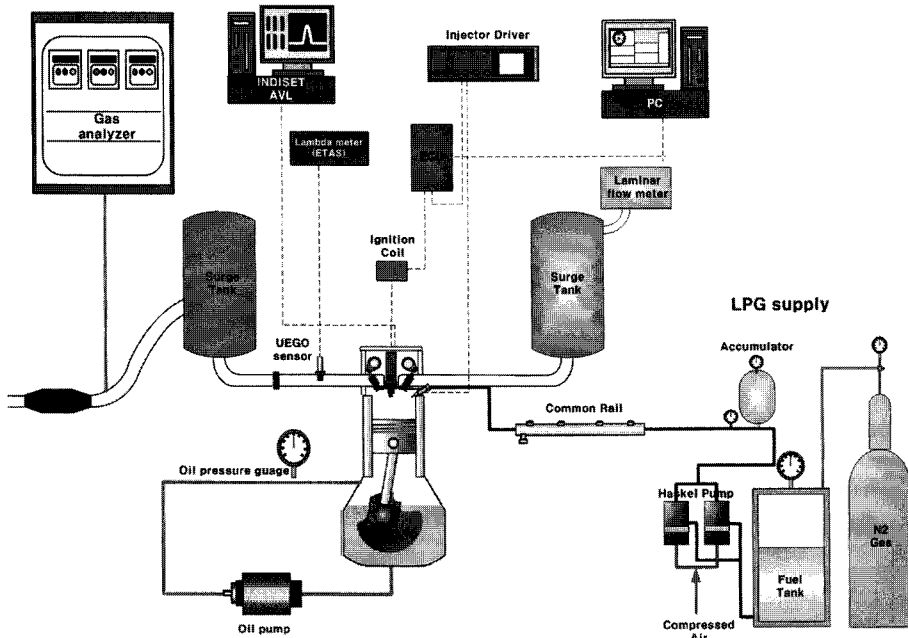


Fig. 2 Experimental setup for single cylinder engine tests

하여 함께 동일 시간대 얻은 가솔린 분무형상도 같이 보여주고 있다. 각 분사조건별 연료유량은 LPG와 가솔린의 저위발열량을 고려하여 동일한 에너지가 공급되는 것을 가정하여 동일 발열량을 기준으로 분사량을 결정하였다. 따라서, 단위질량당 발열량은 LPG 연료가 높으므로 가솔린은 24 mg, LPG는 22 mg으로 결정하였다. 이 분사량은 엔진운전 영역 중 고부하에 해당하는 분사량이다. 분사시간은 분사를 위한 트리거 신호를 보내는 시간 즉, SOC(start of command)를 기준으로 나타내었다.

먼저 가솔린의 경우를 살펴보면 전형적인 스웰 인젝

터의 분사패턴을 보여주고 있다. 연료분사 노즐로부터 시작된 분무(분사기의 중심에서 오프셋)는 분무 끝단에서 와류가 형성되어 중공원형(hollow cone) 형태의 분무 형상을 유지하다가 분무가 종료되는 시점에서 더욱 발달된 와류와 분무내외부의 압력차이로 인하여 분사된 연료는 구름처럼 둥글게 뭉친 형태를 유지하게 된다. 그러나 후적분무(sac spray)와 수직방향의 운동량으로 인하여 분무는 공기와의 혼합이 일어나면서 아래 방향으로 계속 진행되게 된다. 분사압이 높아질수록 수직방향으로 분포하는 연료의 양이 많아짐으로 벽면에 충돌하

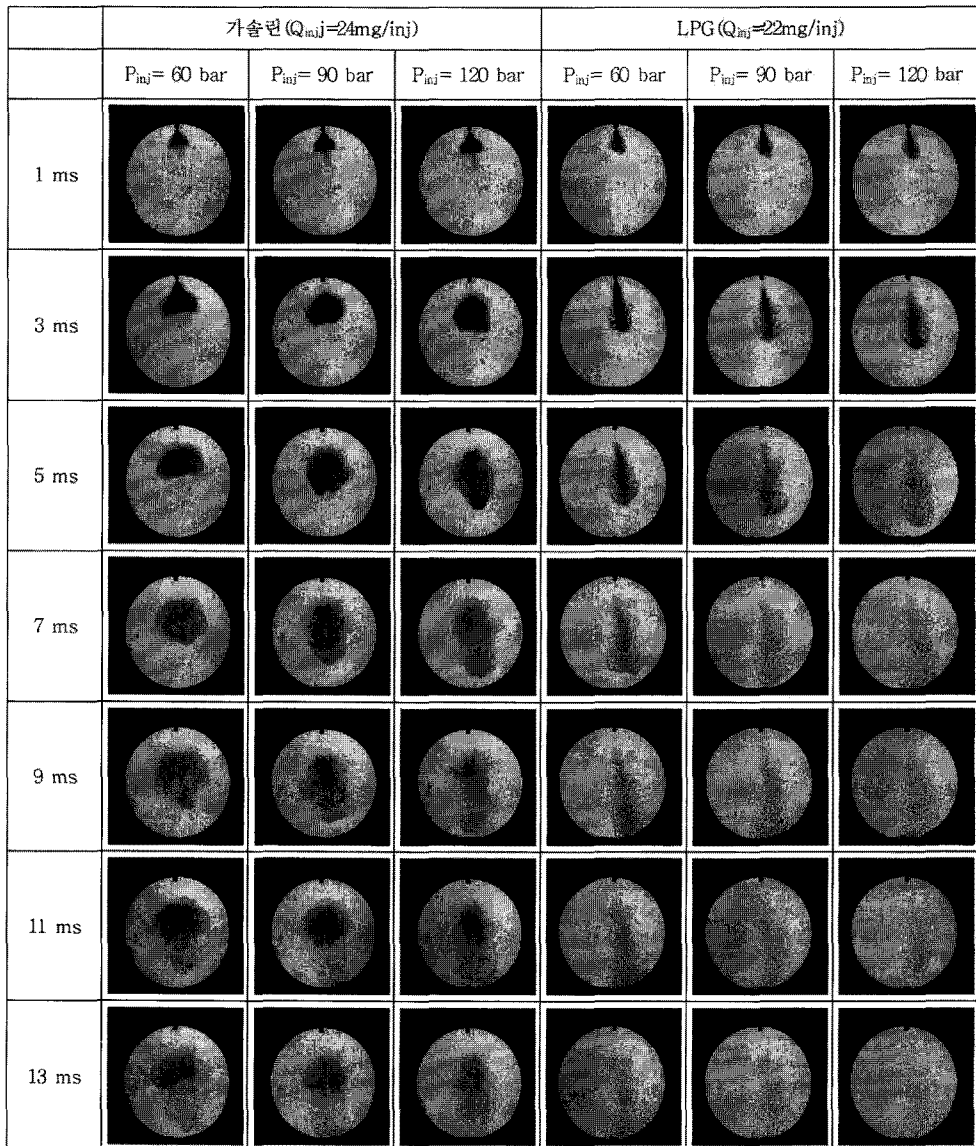


Fig. 3 Spray images for LPG and gasoline according to different injection pressures

는 연료량도 많아 질 수 있음을 관찰할 수 있다. 이에 비해 LPG 분무형태는 가솔린연료와는 달리 분무의 선단거리가 길고 분무각은 매우 좁게 나타나고 있다. 이것은 두 가지 원인에 의한 것으로 설명될 수 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 첫째, LPG 연료는 비등점이 가솔린에 비해 낮기 때문에 분무경계면에서 빠르게 연료가 증발하여 전체 분무각이 좁게 나타나 보이는 원인을 들 수 있다. 분무바깥쪽에 플래쉬 비등이 발생하면서 공기와의 혼합이 빠르게 진행되어 연료의 액상범위가 작게 나타나는 것이다. 둘째, LPG는 가솔린보다 점도 및 밀도가 작기 때문에 선회운동량이 작아 선회반경이 작으며 분무 내외부의 압력차이에 의한 영향을 더 크게 받으므로 인해 분무각이 감소하는 것으로 보인다. 따라서, 그림에서 보이는 바와 같이 분무는 회전방향보다는 직선방향으로 계속 발달하여 마치 다공노즐 분사기의 분무형태와 유사하게 나타나고 있다.

연료분사기 내부에서 스윌을 유도하는 설계구조가 낮은 점도의 유체에 대해서는 충분히 접선방향의 운동량을 발생시키지 못하는 것으로 판단된다. 따라서, LPG 연료에 스윌형 연료분사기를 적용하기 위해서는 기존의 설계를 개선할 필요성이 제기될 수 있지만 고압분사의 목적이 연료/공기의 혼합을 촉진하는데 있다면 LPG 연료의 높은 증발성을 고려할 때 크게 문제가 되지 않을 수도 있다.

4.2. 연소특성

직접분사식 LPG엔진의 연소특성을 살펴보기 위하여 연소안정성(COV_{IMEP}), 연소기간(burn duration), 열효율(thermal efficiency)을 연료분사압력에 따라 비교하여 보았다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 COV_{IMEP}의 경우 LPG

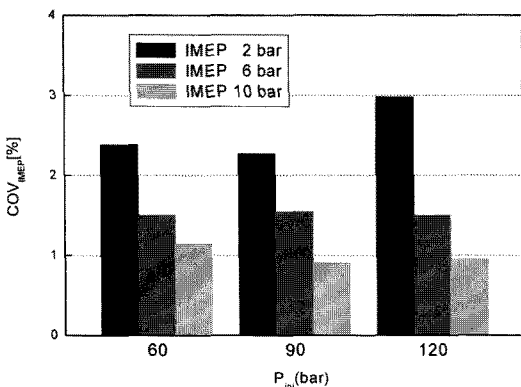


Fig. 4 COV_{IMEP} variations at different injection pressure and engine load

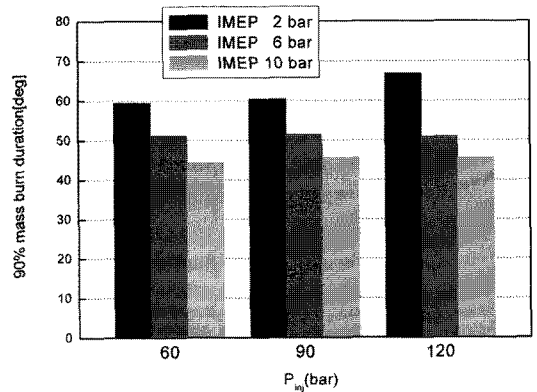


Fig. 5 90% Mass burn durations at different injection pressure and engine load

연료는 분사압력에 무관하게 모든 부하조건에서 4%이하의 안정된 연소특성을 보여 주고 있다. 부하가 증가하면서 연소안정성 또한 증가하는 일반적 경향이 나타나고 있다. 전체적으로 분사압력 간의 특이할 만한 차이는 없지만 P_{inj}=120 bar, 2 bar IMEP에서 상대적으로 COV_{IMEP}가 높게 나타났다. 분사압력이 증가하면 연료의 비등 및 무화 정도가 우수할 것으로 예상되지만 위의 분무결과에서도 나타난 바와 같이 분사압력의 증가로 분무의 관통길이가 길어지고 특히, 저부하에서는 내부 유동의 세기가 상대적으로 약해서 벽면충돌(wall impingement)의 가능성이 높아지기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5의 90% 연소기간 비교에서도 COV_{IMEP}와 같은 결과가 나타났는데 P_{inj}=120 bar, 2 bar IMEP 조건이 긴 연소기간을 보여주고 있다. 부하증가에 따라 연소기간은 선형적으로 감소하고 있으며 분사압력에 따른 차이는 거의 없

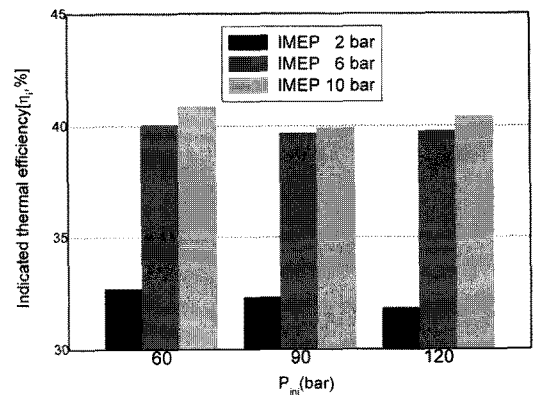


Fig. 6 Indicated thermal efficiency(η_i) at different injection pressure and engine load

는 것으로 나타났다.

또한, LPG가 옥탄가가 높기 때문에 고부하에서도 노킹 특성이 우수하여 이상연소에 의한 연소기간의 비정상적인 변화는 없었다.

분사압력이 도시열효율에 미치는 영향을 살펴보면 Fig. 6에서와 같이 분사압력에 따라 도시열효율의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. LPG의 증발특성이 우수하기 때문에 낮은 분사압력에서도 연료의 미립화 및 혼합기 형성에는 문제가 없으며 분사압력이 높을 경우에 분무의 관통거리가 길어져 발생할 수 있는 벽면충돌 문제 또한 효율측면에 크게 영향을 주지 않는 것으로 추측된다.

4.3 배기특성

LPG 직접분사식 전기점화엔진에서 미연탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx) 측정 결과를 Fig. 7-9에 나타내었다. THC의 발생특성을 살펴보면 부하가 증가하면서 THC는 증가하며 높은 연료분사조건 ($P_{inj}=120$ bar)에서 부하에 따른 발생량 차이가 크지 않다. $P_{inj}=60, 90$ bar에서 10 bar IMEP 조건이 THC의 발생이 크게 나타나고 있고, $P_{inj}=120$ bar에서는 저부하(2 bar IMEP)에서 THC의 발생이 다소 높은 것을 알 수 있다. 따라서, LPG 연료의 증발성은 우수하지만 높은 부하에서 THC 발생을 줄이기 위해서는 고압분사가 필요한 것으로 판단된다. CO의 경우 $P_{inj}=120$ bar 조건에서 부하에 따른 발생량 차이가 작은 것은 THC와 동일하나 동일 압력에서 부하에 따른 변화는 반대 경향을 보여 주고 있다. CO의 생성은 공연비에 크게 좌우되므로 부하가 증가하면 낮은 분사압력($P_{inj}=60, 90$ bar)에서 부분

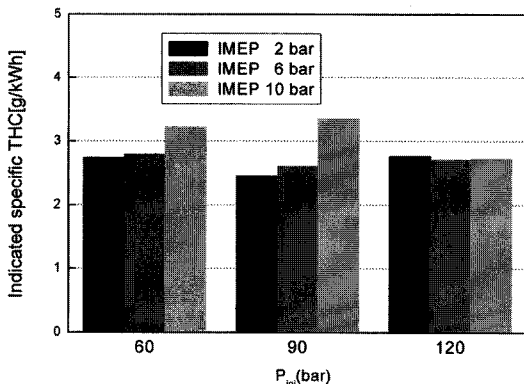


Fig. 7 Indicated specific THC at different injection pressure and engine load

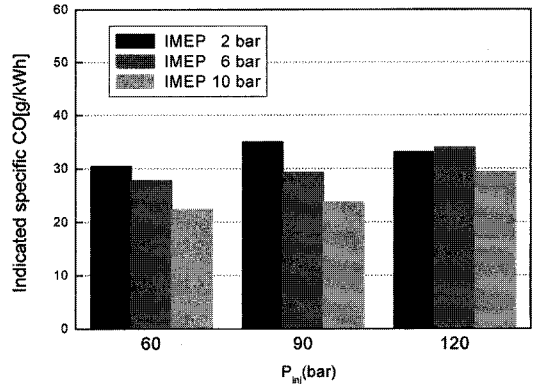


Fig. 8 Indicated specific CO at different injection pressure and engine load

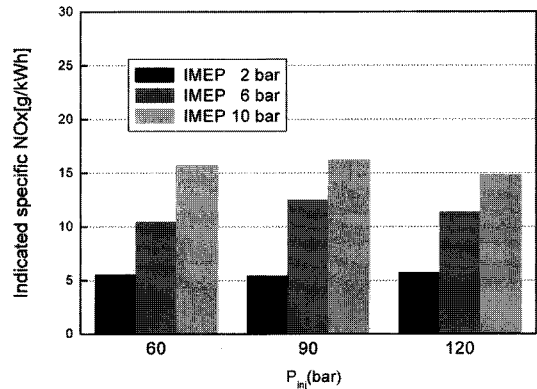


Fig. 9 Indicated specific NOx at different injection pressure and engine load

적으로 비균질 혼합기가 형성되기 때문인 것으로 보인다. NOx의 경우 부하에 따라 증가하는 일반적인 경향 이외에 연료분사압력 변화에 따른 특이점은 발견되지 않았다.

Fig 10-11은 LPG 직접분사식 전기점화기관으로부터 발생하는 입자상물질 배출특성을 보여주고 있다. 부하 증가에 따라 입자수는 큰 폭으로 증가하고 있으나 연료 분사압력에 따른 차이는 크게 나타나지 않았다. 또한, IMEP 10 bar 조건에서 가솔린 연료와 비교해서 1/100 수준으로 낮게 나타났다. LPG의 높은 증발특성이 입자상물질의 생성을 억제하여, 긴 관통거리를 갖는 분무특성이 입자상 물질의 생성에 크게 영향을 주지 않고 있음을 예측할 수 있다. 그러나, Fig. 11에 나타난 바와 같이 LPG 연료의 최대 입자수를 갖는 입경이 가솔린보다 작기 때문에 나노입자의 생성비율이 높으며 입자 개수의 경우처럼 입자분포 또한 분사압력에 의한 영향이 거

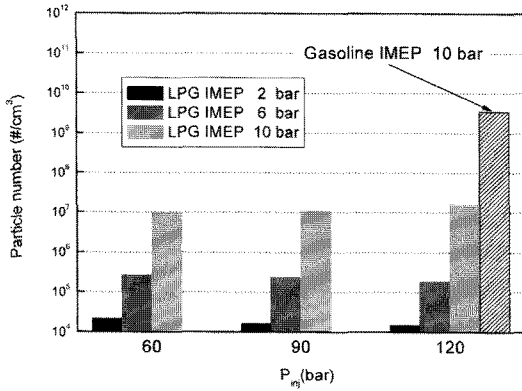


Fig. 10 Particle number concentration at different injection pressure and engine load

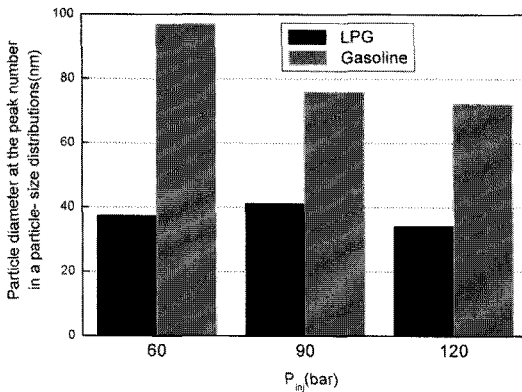


Fig. 11 Particle diameter at the peak value in a particle-size distribution according to different injection pressure (IMEP 10 bar)

의 없음을 알 수 있다.

4. 결 론

직접분사식 LPG 전기점화기관에서 연료분사압력에 따른 분무/연소/배기 특성에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 스웰인젝터에서 LPG 연료의 고압분사는 낮은 운동량과 높은 증발특성으로 인하여 분무각의 크기는 작고 분무관통거리는 증가하는 경향을 보였다.
- 연소특성을 살펴본 결과 저부하/고압분사($P_{inj}=120$ bar, 2 bar IMEP) 조건에서 낮은 연소실 유동장 세기와 긴 분무거리로 인하여 연소안정성(COV_{IMEP})이 떨어지고 연소기간도 상대적으로 길어지는 것을 제외하고는

연료분사압의 변화에 크게 영향을 받지 않았으며 도시 열효율의 경우에도 분사압력의 영향은 미미하였다.

3) 배기특성의 경우 대부분의 조건에서 연료분사압력 보다는 부하변동에 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났지만 고부하 조건(10 bar IMEP)에서 THC는 고압분사 ($P_{inj}=120$ bar)를 통하여 감소할 수 있음을 확인하였다.

4) LPG 연료의 나노입자수는 동일조건 가솔린연료의 1/100 수준으로 낮게 나타났으나 입자분포특성은 작은 크기의 입자수가 증가하는 경향을 보였다.

5) LPG연료는 긴 분무관통거리에도 불구하고 높은 증발특성으로 인하여 전체적으로 연소 및 배기특성이 분사압력에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났으므로 균일예혼합/이론공연비 운전조건에서는 낮은 분사압력으로도 직접분사방식을 적용할 수 있을 것으로 판단 된다.

참고문헌

- G. Schmidt, D. Kapp, A. Schamel, B. Hinds and C. Weaver, "Ford's New 3.5 l V6 Gasoline Engine-Downsizing with "EcoBoost" ", MTZ Worldwide, No. 3, Vol. 70, 2009, pp.4-9.
- J. Helbig, "The New 1.8 l Four Cylinder T-FSI Engine by Audi Part 2: Construction Ancillary Components and Thermodynamics", MTZ Worldwide, Vol. 67, No. 11, 2006, pp. 25-27.
- E. Olofsson, P. Alvestig, L. Bergsten, M. Ekenberg, A. Gawell, A. Larsén and R. Reinmann, "A High Dilution Stoichiometric Combustion Concept Using a Wide Variable Spark Gap and In-cylinder Air Injection in Order to Meet Future CO₂ Requirements and Worldwide Emission Regulations", SAE Technical Paper 2001-01-0246, 2001.
- P. Dugdale, R. Rademacher, B. Price, J. Subheder and R. Duguay, "Ecotec 2.4L VVT: A Variant of General Motors Corporation's Global 4-Cylinder Engine", SAE Technical Paper 2005-01-1941, 2005.
- S. Kajitani, C. Chen, M. Oguma, M. Alam and K. Rhee, "Direct-injection Diesel Engine Operated with Propane-DME Blended Fuel", SAE Technical Paper 982536, 1998.
- M. Kajiwara, K. Sugiyama, M. Sagara, M. Mori, S. Goto and M. Alam, "Performance and Emissions Characteristics of an LPG Direct Injection Diesel

- Engines”, SAE Technical Paper 2002-01-0869, 2002.
- (7) J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, p.383, McGraw-Hill, Inc., NewYork, 1988.
- (8) B. A. VanDerWege and S. Hochgreb, “Effects of fuel volatility and operating conditions on fuel sprays in DISI engines: (1) Imaging investigation”, SAE Paper No.2000-01-0535, 2000.
- (9) S. Moon, J. Choi, E. Abo-Serie and C. Bae, “The effects of injector temperature on spray and combustion characteristics in a single cylinder DISI engine”, SAE Paper No.2005-01-0101, 2005.
- (10) I. Schmitz, W. Ipp and A. Leipertz, “Flash boiling effects on the development of gasoline direct-injection engine sprays”, SAE Paper No.2002-01-2661, 2002.