

가솔린 및 LPG 연료를 사용하는 직접분사식 불꽃점화엔진에서 배출되는 극미세입자 배출 특성에 관한 연구

이 석 환^{*1)} · 오 승 목¹⁾ · 강 건 용¹⁾ · 조 준 호²⁾ · 차 경 옥²⁾

한국기계연구원 그린동력실¹⁾ · 명지대학교 기계공학과²⁾

Particulate Emissions from a Direct Injection Spark-ignition Engine Fuelled with Gasoline and LPG

Seokhwan Lee^{*1)} · Seungmook Oh¹⁾ · Kernyong Kang¹⁾ · Junho Cho²⁾ · Kyoungok Cha²⁾

¹⁾Engine R&D Team, KIMM, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-338, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

(Received 27 May 2010 / Accepted 28 November 2010)

Abstract : In this study, the numbers, sizes of particles from a single cylinder direct injection spark-ignition (DISI) engine fuelled with gasoline and LPG are examined over a wide range of engine operating conditions. Tests are conducted with various engine loads (2~10bar of IMEP) and fuel injection pressures (60, 90, and 120 bar) at the engine speed of 1,500 rpm. Particles are sampled directly from the exhaust pipe using rotating disk thermodiluter. The size distributions are measured using a scanning mobility particle sizer (SMPS) and the particle number concentrations are measured using a condensation particle counter (CPC). The results show that maximum brake torque (MBT) timing for LPG fuel is less sensitive to engine load and its combustion stability is also better than that for gasoline fuel. The total particle number concentration for LPG was lower by a factor of 100 compared to the results of gasoline emission due to the good vaporization characteristic of LPG. Test result presents that LPG for direct injection spark ignition engine help the particle emission level to reduce.

Key words : LPG(액화석유가스), Direct injection spark ignition engine(직접분사식 불꽃점화엔진), Single cylinder engine(단기통 엔진), High pressure fuel injection(고압 연료 분사), Particle(입자)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 지구 온난화와 환경문제가 대두되면서, 지구온난화의 주범인 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출규제가 강화되고 있다. 교토 의정서 제 3조에 따르면 2008년부터 2012년까지 전체 선진국의 온실가스 배출량을 1990년 수준보다 적어도 5.2%이하로 감축할 것을 목표로 설정하였다. 이렇게 배출가스 규제가 강화됨에 따라 수송부문에서도 자동차의 연비향상을 통한 CO₂ 저감을 위해 하

이브리드자동차 및 연료전지 차량의 연구·개발, DME(Dimethylether) 및 바이오디젤과 같은 신재생 에너지, LPG, CNG 등의 청정연료의 엔진 적용에 관한 연구들이 활발히 이루어지고 있다.

이와 관련하여 불꽃점화엔진 관련 연구 분야의 하나로 연소실에 연료를 직접 분사(Direct injection) 하는 방식의 연구가 주목받고 있다. 이는 실린더 내에 연료를 직접 분사시키는 방식으로 연료가 기화될 때 발생하는 증발잠열이 흡입공기를 냉각시켜 엔진의 체적 효율이 증가한다. 이때, 부하에 맞는 연료의 분사량과 분사시기를 조정하여 균일혼합과 성

*Corresponding author, E-mail: shlee@kimm.re.kr

층혼합 연소가 이루어지며, 이를 통해 초회박 연소를 이룰 수 있고, 펌핑 손실을 저감하여 저공해, 저연비를 이룰 수 있다.¹⁻³⁾ 하지만 성층혼합 연소 시, 압축행정기간에 연료를 분사하면 피스톤 면과 실린더 벽면에 적심(Wetting)현상이 발생하여 미연탄화수소와 같은 오염물질 배출이 증가하고, 회박연소에 따른 불완전한 연소로 인해 성능이 떨어지는 문제가 있다.⁴⁾

현재 LPG 연료는 액상 연료 분사(LPi; Liquid Phase injection)를 통해 액상 LPG 연료의 증발잠열을 이용하여 흡입체적효율을 상승시키고 출력을 향상시키는 방식이 적용되고 있지만 아직까지 연소실에 LPG를 직접 분사하는 방식이 적용된 예는 극히 적다. LPG 연료는 포화 증기압이 높아 대기압에서도 쉽게 기화하므로 공기유동이 적더라도 혼합기 형성이 유리하고, 미연탄화수소의 발생 원인이 되는 벽면적심현상을 줄일 수 있다. 또한, 가솔린 연료보다 동일발열량 대비 CO₂ 발생이 상대적으로 적어 저탄소 연료로서의 장점도 가지고 있다.

연비 및 CO₂ 배출에 장점이 있는 직접분사식 불꽃점화 엔진의 장점을 최대화하기 위해서는 점점강화되는 배기규제를 만족시켜야 하며 향후 새로운 규제대상으로 떠오르고 있는 극미세입자 및 미세먼지 배출량도 관리되어야 한다.^{5,6)} 현재까지 엔진에서 배출되는 미세입자에 대한 연구는 디젤엔진에서 광범위하게 이루어지고 있으며 직접분사식 불꽃점화 엔진에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 가솔린 및 LPG 연료를 사용하는 직접분사방식 불꽃점화 엔진에서 배출되는 미세입자의 수농도 및 입경분포를 파악함으로써 향후 규제 대상으로 떠오르는 미세입자의 배출특성에 관한 기초 데이터를 얻고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 엔진 시스템은 연소실 내 연료를 직접 분사하는 방식의 연구용 단기통 엔진으로, 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었으며, 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 2리터급 상용 승

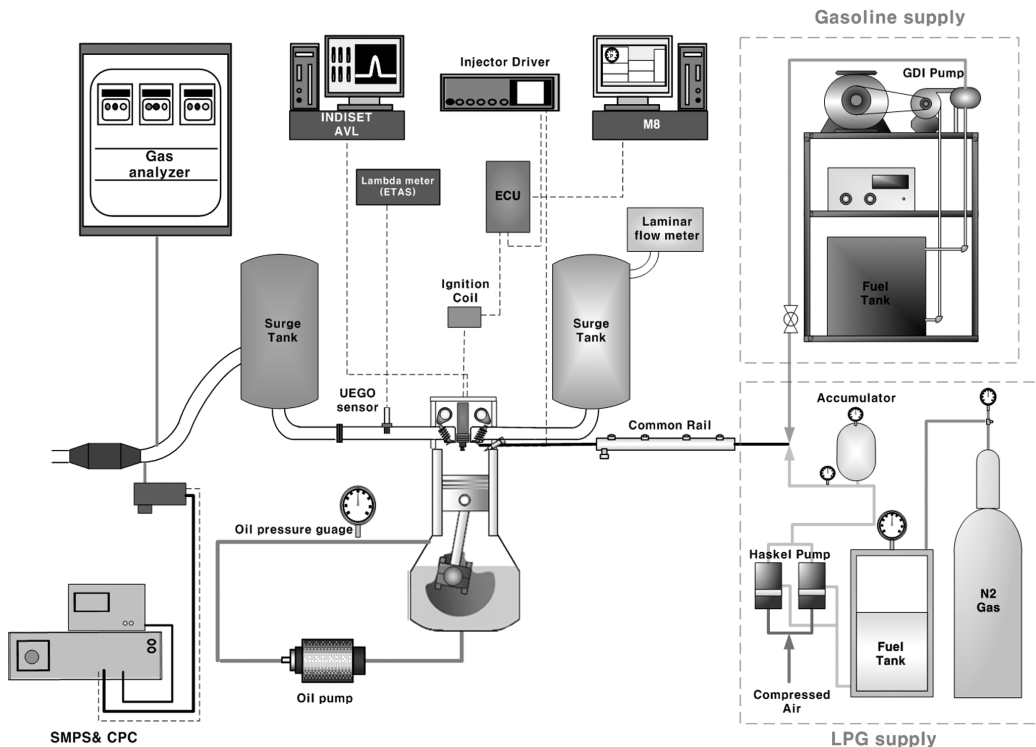


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Engine specifications

Items	Specifications
Displacement volume	498 cc
Bore × Stroke	83 mm × 92 mm
Connecting rod length	145.8 mm
Compression ratio	10.5:1
Fuel injection pressure	Up to 120 bar
Camshaft adjustment	Intake only (42° CA)
Intake type	Natural aspiration

용 가솔린 직접분사엔진을 바탕으로 제작하였으며, 이는 기존 엔진의 구조 및 형태를 따르고 있다. 행정 체적은 498 cc, 압축비는 10.5이고 연료분사 시스템은 커먼레일 방식으로 연소실 측면에서 연료를 분사하는 형태이다. 솔레노이드 방식의 연료분사기는 약 50~120 bar의 압력으로 분사할 수 있도록 설계되어졌으며, 엔진제어 시스템(MOTEC, M8)을 통해 받은 분사 신호를 통해 분사시기를 결정하고 연료분사기 구동장치(TEMS, TDA-3200H)에 의하여 통전 시간을 조절하여 분사량을 조절하였다. 가솔린 연료의 가압은 기존 직접분사방식 가솔린엔진에 사용되는 플런저 펌프를 이용하여 커먼레일을 통해 공급하였고, 가압이 어려운 LPG 연료의 경우 에어구동형의 가스부스터 펌프를 이용하여 가압한 연료를 커먼레일을 통해 공급하였다. 연소실 압력측정은 압전형 압력센서(Kistler, 6117B)를 사용하였으며, 연소해석기(AVL, 619 Indimeter)를 이용하여 연소 특성을 분석하였다. 공연비 측정을 위해 배기관에 산소센서를 설치하였고, 흡기 쪽 레저버(Reservoir)에 증류 유량계를 설치하여 흡입공기량을 측정하였다. 질소산화물, 미연탄화수소, 일산화탄소와 같은 가스 상 배기배출물은 배출가스 분석장치(Horiba, MEXA8120)를 통하여 측정하였으며, 배출 극미세입자의 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.

본 실험을 통하여 실시된 엔진운전조건은 Table 2와 같다. 전 실험을 통하여 엔진회전수는 1500 rpm으로 일정하게 하였으며, 엔진부하는 도시평균유효압력(IMEP; Indicated Mean Effective Pressure)을 기준

Table 2 Test conditions

Test fuel	Gasoline, LPG
Engine speed	1500 rpm
Engine load	2, 4, 6, 8, 10 bar (IMEP)
Fuel injection pressure	60, 90, 120 bar
Fuel injection timing	BTDC 300, 240, 180, 120°CA
Excess air ratio(λ)	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2
Ignition timing	MBT

Table 3 Characteristics of test fuels

Chemical name	n-Butane	Gasoline
Chemical structure	C ₄ H ₁₀	C ₈ H ₁₅
Liquid density (kg/m ³)	579	750
Molecular weight (g/mol)	58.12	98
Stoichiometric A/F ratio	15.46	14.6
Boiling point (°C)	-0.5	30/190
Low heating value (MJ/kg)	45.31	44.12
Research octane number	91.8	98

으로 2~10 bar까지 변화시켰다. 모든 엔진 운전 조건에서 공기과잉율(λ)은 1.0으로 고정하였다. 실험에 사용된 LPG 연료는 부탄과 프로판의 비율이 약 9대 1인 하계절용 LPG 연료를 사용하였으며 연료 조성은 Table 3에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 LPG 및 가솔린 연료를 사용하는 경우 최적점화시기(MBT) 및 연소안정성

최적의 조건에서 엔진이 구동되기 위해서는 최대 제동토크가 발생하는 최적 점화시기(MBT; Maximum Brake Torque)를 찾아야 한다. 각각의 연료 및 분사압 조건에서 엔진의 부하에 따른 최적점화시기를 Fig. 2에 나타내었다. 두 연료 모두 부하가 증가함에 따라 최대 제동토크가 발생하는 최적점화시기가 지각되었다. 분사압력이 높은 경우(120 bar), 두 연료의 최적점화시기의 차이는 크지 않지만 분사압력이 낮은 경우에는 최적점화시기 차이가 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다. LPG의 경우 화염전파속도가 가솔린에 비해서 빠르므로 최적점화시기가 가솔린에 비해서 지각되어 있는데 IMEP 8 bar이상의 조건에서는 가솔린의 최적점화시기가 LPG연료 보다 더욱 지각되는 것을 볼 수 있다. 이는 고부하 운전조건에

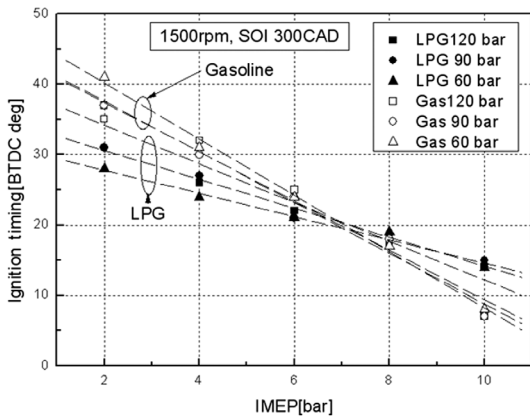


Fig. 2 Comparison of MBT timing with various engine loads for LPG and gasoline

서 노킹(Knocking) 발생지점을 피해 최적점화시기를 결정하기 위하여 ECU에서 점화시기를 인위적으로 지각시켰기 때문이다. 또한, 가솔린 연료가 안티노크성을 나타내는 척도인 옥탄가(ROK)가 LPG에 비해서 높지만 같은 고부하조건에서 점화시기가 더욱 지각되는 것은 기화성이 우수한 LPG 연료가 가솔린 연료에 비해 균일 혼합기(Homogeneous mixture)를 생성하는 특성이 좋아 점화시기를 진각시켜도 노킹이 발생하지 않기 때문이다. 이 결과로부터 LPG 연료의 경우가 부하에 따른 최적점화시기의 변화가 적고, 저부하조건에서 상사점(TDC; Top Dead Center)에 가까운 값을 가지므로 전체적으로 안정된 연소를 보일 것으로 판단된다.

두 연료의 연소안정성을 비교하기 위하여 Fig. 3에 부하별로 도시평균 유효압력 변동계수(COV_{imep}, Coefficient of variation of indicated mean effective pressure)를 비교한 결과를 나타내었다. 이때 각각의 연료 분사시기는 BTDC 300°C로 고정하였다. 본 연구의 가장 낮은 부하조건인 IMEP 2 bar 조건에서 두 연료 모두 다른 부하조건에 비해 2% 이상 높은 COV_{imep} 값을 나타내고 있지만 4bar 이상의 대부분의 부하영역에서 COV_{imep}가 2% 이하로 안정된 연소 상태를 보여주고 있다.

최적점화 시기 결과와 동일하게 가솔린 연료는 저부하조건에서 분사압력이 높은 경우 연소안정성이 상대적으로 낮았다. 이는 가솔린 연료의 고압분사가 공기유동 운동에너지가 작고 분위기 압력이 대

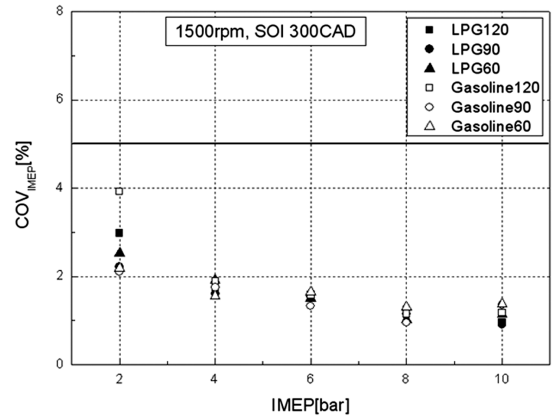


Fig. 3 Comparison of COV_{imep} with various engine loads for LPG and gasoline

기압과 비슷한 조건에서 이루어지게 되면, 분무 관통거리(Penetration length)가 길어져 모든 운전조건에서 균일혼합연소를 목표로 하는 본 연구용 엔진에서 보다 균일한 혼합기가 형성되지 않아 COV_{imep}가 높은 것으로 판단된다. 이에 반해 LPG 연료의 경우에는 공기 유동 운동 에너지가 작더라도 포화증기압이 충분히 높아 기화가 용이하기 때문에 분사압력이 증가하여도 벽면적침(Wall wetting)이 적고 보다 균일한 혼합기가 형성되어 연소안정성이 가솔린 연료에 비해 좋은 것으로 판단된다.

3.2 운전 조건에 따른 입자의 수농도

Fig. 4에서는 가솔린 및 LPG 연료를 사용하는 직접분사식 불꽃점화 엔진에서 배출되는 입자의 수농도를 분사압력별로 나타내고 있다. 동일한 엔진 운전 조건에서 300개의 수농도 데이터를 받아서 평균 값을 나타내고 있다. 입자의 수농도는 엔진의 부하가 증가함에 따라 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 엔진의 부하가 IMEP 2 bar에서 6 bar로 증가하는 경우 두 연료 모두 입자의 수농도는 10배 정도 증가하게 된다. 부하가 IMEP 10 bar로 증가하면 입자의 수농도는 기하급수적으로 증가하여 가솔린 연료의 경우 약 500배, LPG 연료의 경우 약 100배 정도 증가한다. 엔진의 부하가 증가하게 되면 실린더 내에 많은 연료가 공급되고 이 경우 흡입공기가 냉각되어 연료의 휘발성이 떨어지게 된다. 이 결과로 연료에서 발생하는 입자들이 실린더 내에 많이 잔류하

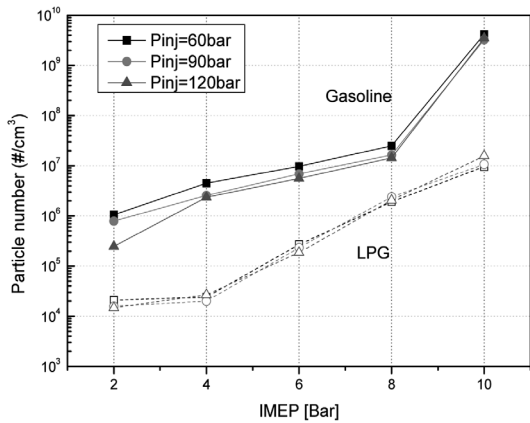


Fig. 4 Particle number concentration from DISI engine according to fuel type at various fuel injection pressure

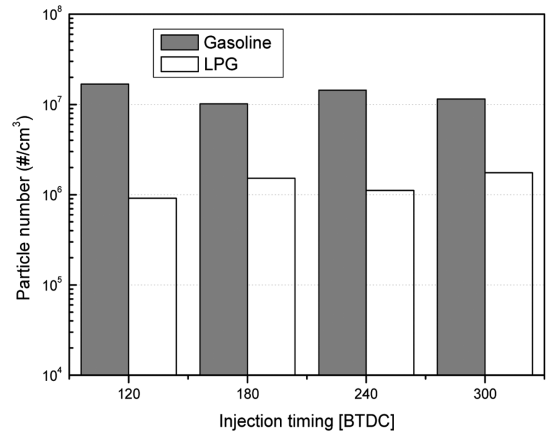


Fig. 6 Particle number concentration according to fuel injection timing (Injection pressure 90 bar, IMEP 8 bar, MBT)

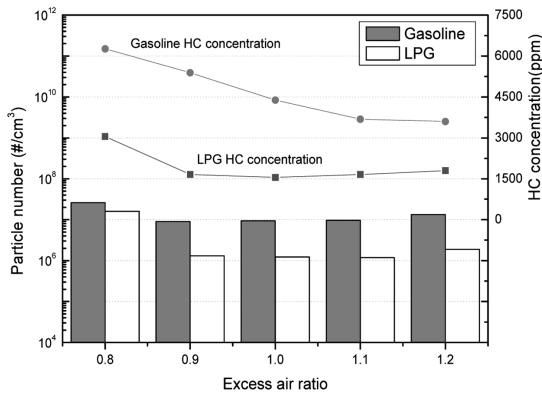


Fig. 5 Particle number concentration and HC concentration according to lambda value (Injection pressure 90 bar, IMEP 8 bar, MBT)

게 되고 결국 입자상 물질들이 많이 배출되게 된다.

가솔린 연료를 사용하는 경우 연료의 분사압이 고압으로 갈수록 실린더에 분사되는 연료의 미립화 특성이 향상되므로 엔진에서 배출되는 입자의 수농도는 감소하였다. 하지만 LPG 연료의 경우는 연료가 실린더내로 분사될 때 빠르게 증발하여 기체 상태로 존재하게 되므로 연료의 분사압은 입자의 수농도에 별 영향을 미치지 않았다. LPG의 빠른 증발 특성으로 인하여 가솔린을 사용하는 경우에 비해서 입자의 수농도는 100배 정도 낮았다.

Fig. 5에서는 연료분사압 90 bar, 엔진부하 IMEP 8 bar의 조건에서 엔진의 공연비 변화에 따른 입자의 수농도를 나타내었다. 가솔린이나 LPG 연료로 구

동하는 경우 공연비 0.8로 운전하는 경우를 제외하고는 공연비 변화에 따른 입자의 수농도는 거의 동일하였다. LPG를 사용하는 경우 공연비가 0.8인 농후한 엔진 운전조건에서 배출되는 입자의 수농도는 타 조건에 비해서 10배 정도 증가하였으며 미연탄화수소의 배출량도 2배 정도 높다. 입자의 수농도에 가장 큰 영향을 미치는 50 nm 이하의 핵생성 모드 (Nuclei mode) 입자는 휘발성이 강하며 보통 미연탄화수소나 황산화물에서 생성되는데 공연비가 농후한 경우 미연탄화수소의 배출량이 높으므로 미세입자의 발생량도 높아진다.⁶⁾

직접분사식 불꽃점화 엔진의 경우 균일혼합 (Homogeneous charge) 모드와 성층혼합 (Stratified charge) 모드의 2가지 모드로 운전될 수 있는데 본 연구에서는 연료 공급 시스템의 한계 상 모든 실험은 균일 혼합 모드에서만 진행되었다. Fig. 6에서는 연료분사압 90 bar, 엔진부하 IMEP 8 bar의 조건에서 BTDC 300~120°CA로 연료의 분사시기를 변화시키면서 엔진에서 배출되는 입자의 수농도를 측정된 결과를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 균일 혼합 모드의 경우 연료의 분사시기는 엔진에서 배출되는 입자의 수농도에 별다른 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

3.3 분사압력에 따른 입자의 입경분포

Fig. 7과 8에서는 가솔린과 LPG 연료로 운전하는

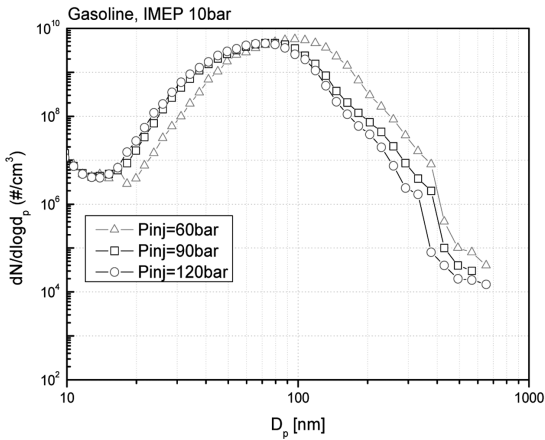


Fig. 7 Dependence on particle size distribution on gasoline fuel injection pressure (IMEP 10bar, MBT)

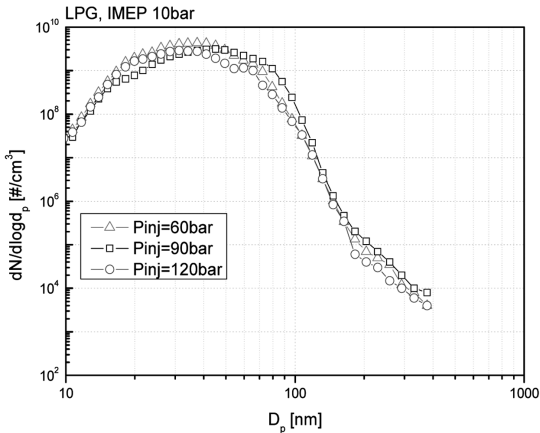


Fig. 8 Dependence on particle size distribution on LPG fuel injection pressure (IMEP 10bar, MBT)

경우 연료의 분사압에 따른 입자의 입경분포를 나타내었다. 가솔린을 사용하는 경우에는 연료의 분사압이 낮을 때 미립화 특성이 좋지 않으므로 입경분포 그래프에서 입경의 분포값들이 큰 입경을 가지는 영역에 존재하고 있다. 또한 50~1000 nm의 입경분포를 가지는 축적 모드(Accumulation mode)에 많은 입자들이 존재하고 있다. LPG 연료를 사용하는 경우에는 연료의 분사압에 상관없이 입경분포는 거의 동일하며 대부분의 입자들은 50 nm 이하의 입경크기를 가지는 핵생성 모드(Nuclei mode)의 영역에 존재하고 있다. 가스 연료를 사용하는 엔진에서 배출되는 극미세입자(Nano particle)의 농도는 디젤

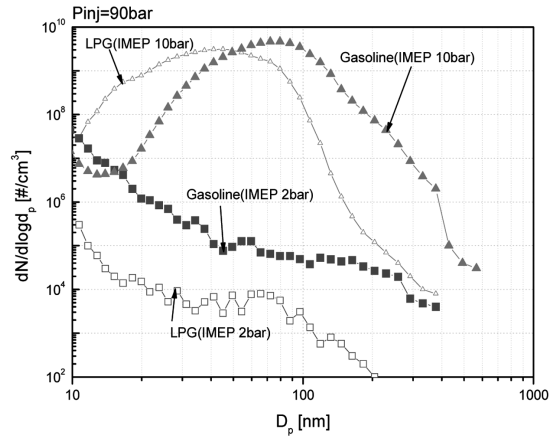


Fig. 9 Particle size distribution for gasoline and LPG combustion at low & high loads

엔진과 비슷하다고 알려져 있다.⁷⁾

Fig. 9에서는 연료분사압이 90 bar인 조건에서 저부하 조건인 IMEP 2 bar와 고부하 조건인 IMEP 10 bar 조건에서 측정된 미세입자들의 입경분포 곡선을 나타내고 있다. 엔진 부하의 변화에 따라서 입경분포 곡선의 큰 변화가 생긴다. 저부하 조건에서는 입경분포가 매우 넓게 퍼져 있으며 연료의 종류에 상관없이 핵생성 모드 영역에 많은 입자들이 분포해 있다. 부하가 증가하게 되면 입경분포 곡선은 대수정규분포(Lognormal distribution) 형태를 가지게 되며 피크값은 LPG의 경우 핵생성 모드 영역인 40 nm, 가솔린의 경우 축적 모드 영역인 80 nm에 존재한다. 고부하 조건에서 대부분의 입자들은 LPG의 경우 핵생성 모드, 가솔린의 경우 축적 모드 영역에 존재한다. LPG 연료를 사용하는 경우 엔진에서 배출되는 대부분의 입자들이 핵생성 모드 영역에 존재하므로 매연(Soot)은 거의 검출되지 않지만 극미세입자들의 배출로 인하여 인체 위해성에 영향을 미칠 수 있다.

3.4 직접분사방식과 포트분사방식에 따른 미세입자 배출특성

Fig. 10에서는 LPG 및 가솔린 연료를 90 bar의 분사압력으로 엔진에 직접 분사하는 경우와 포트 분사하는 경우에 엔진에서 배출되는 미세입자의 수농도를 나타내었다. LPG의 경우 포트 분사 시 예상연

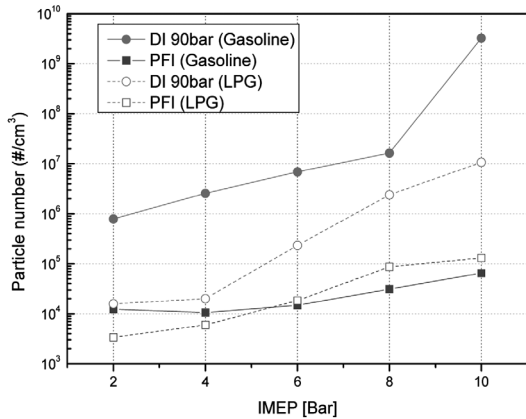


Fig. 10 Particle number concentration according to direct injection and port fuel injection (IMEP 10bar, MBT)

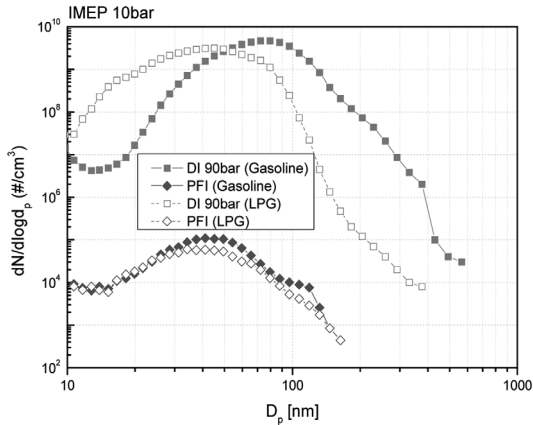


Fig. 11 Dependence on particle size distribution on DI and PFI fuel injection (IMEP 10bar, MBT)

료를 흡기포트에 분사하는 제 3세대 방식인 액상분사방식(LPi)을 채택하였다.

포트분사를 하는 경우에는 두 가지 연료 모두 미세입자의 배출량이 직접분사를 하는 경우보다 매우 적었으며 연료에 따른 미세입자 배출량의 차이도 크지 않았다. 포트분사 방식의 경우 직접분사방식에 비해 가솔린의 경우 미세입자가 최대 30,000배 저감되었으며 LPG의 경우는 최대 100배 저감되었다. 포트 분사식 엔진의 경우 흡기포트에서 이미 균일하게 혼합된 혼합기가 실린더 내에 흡입되므로 실린더 내부에서 국부적으로 농후하거나 희박한 혼합기가 존재할 확률이 줄어들기 때문에 미세입자의 발생량이 적어진다.

IMEP 10 bar의 고부하 조건에서 연료분사 방식에 따른 미세입자의 입경분포 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 포트분사 방식을 채택한 엔진에서 배출되는 미세입자는 모든 영역에서 직접분사 방식을 채택한 경우에 비해서 입자의 농도값이 낮게 측정이 되었다. 연료의 종류에 따른 입경분포도 별다른 차이가 없었으며 매우 적은 양의 미세입자들이 배출되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연비개선 및 CO₂ 규제에 대응하기 위한 방안으로 주목받고 있는 직접분사식 불꽃점화엔진에서 배출되는 미세입자의 수농도 및 입경분포를 살펴보았으며 이를 통하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 1) LPG를 연료로 사용하는 경우 연료의 빠른 증발 특성으로 인하여 가솔린을 사용하는 경우보다 100배 정도 미세입자가 적게 배출된다.
- 2) 엔진 운전 조건이 농후한 영역에서는 휘발성 가스인 미연탄화수소가 많이 배출되어 미세입자의 배출량도 증가한다.
- 3) 균일혼합 모드로 엔진이 운전되는 경우에는 연료의 분사시기는 미세입자의 배출량에 별다른 영향을 미치지 않는다.
- 4) 엔진의 부하에 따라서 미세입자의 입경분포 모양의 큰 변화가 생긴다. 저부하의 경우 분포 곡선은 넓게 퍼져 있으며 연료의 종류에 상관없이 작은 입경영역에 분포해있다. 고부하에서는 대부분의 입자들은 LPG의 경우 핵생성 모드, 가솔린의 경우 축적 모드에 존재하고 있다.
- 5) 포트분사 방식의 경우 직접분사 방식에 비해서 미세입자의 배출량이 극히 적었으며 연료종류에 따른 배출특성은 별다른 차이가 없었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 일반사업인 “미활용 에너지 청정 고밀도화 기계기술 기반구축”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) U. Spicher, J. Reissing, J. M. Kech and J. Gindele, "Gasoline Direct Injection (GDI) Engine-development Potentialities," SAE 1999-01-2938, 1999.
- 2) Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Ya-mauchi and H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine," SAE 970541, 1977.
- 3) F. Zhao and M. C. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-injection Gasoline Engines," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.25, No.5, pp.437-562, 1999.
- 4) Y. J. Kim, S. H. Lee and N. H. Cho, "Effect of Air Motion on Fuel Spray Characteristics in a Gasoline Direct Injection Engine," SAE 1999-01-0177, 1999.
- 5) M. Maricq, D. Podsiadlik, D. Brehob and D. Haghhoie, "Particulate Emissions from a Direct Injection Spark Ignition(DISI) Engine," SAE 1999-01-1530, 1999.
- 6) K. Choi, A. Ko, I. G. Hwang, C. L. Myung, S. Kwon and S. Park, "Nano-particle Characteristics of Turbo-charged GDI Vehicle," KSAE 2009 Annual Conference, pp.166-169, 2009.
- 7) Diesel Exhaust Particle Size, DieselNet Technology Guide, www.DieselNet.com, 2002.