

## 직접분사식 가솔린 엔진에서 연료 온도에 따른 팬형 분무 및 연소 특성의 변화

문석수\* · Essam Abo-Serie · 배충식

한국과학기술원 기계공학과

## The Effects of Fuel Temperature on the Spray and Combustion Characteristics of a DISI Engine

Seoksu Moon\* · Essam Abo-Serie · Choongsik Bae

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea  
(Received 29 September 2005 / Accepted 17 November 2005)

**Abstract** : The spray behavior of direct-injection spark-ignition (DISI) engines is crucial for obtaining the required mixture distribution for optimal engine combustion. The spray characteristics of DISI engines are affected by many factors such as piston bowl shape, air flow, ambient temperature, injection pressure and fuel temperature. In this study, the effect of fuel temperature on the spray and combustion characteristics was partially investigated for the wall-guided system. The effect of fuel temperature on the fan spray characteristics was investigated in a steady flow rig embodied in a wind tunnel. The shadowgraphy and direct imaging methods were employed to visualize the spray development at different fuel temperatures. The microscopic characteristics of spray were investigated by the particle size measurements using a phase Doppler anemometry (PDA). The effect of injector temperature on the engine combustion characteristics during cold start and warming-up operating conditions was also investigated. Optical single cylinder DISI engine was used for the test, and the successive flame images captured by high speed camera, engine-out emissions and performance data have been analyzed. This could give the way of forming the stable mixture near the spark plug to achieve the stable combustion of DISI engine.

**Key words** : DISI engine(직접분사식 가솔린엔진), Fan spray(팬형 분무), Fuel temperature(연료 온도)

### Nomenclature

DISI : direct-injection spark-ignition  
IMEP : indicated mean effective pressure  
MBT : minimum advance for best torque  
NOx : nitrogen oxidize  
THC : total hydrocarbon  
UBHC : unburned hydrocarbon

### 1. 서론

지구 온난화 방지를 위한 교토 기후협약 전후로 전 세계적으로 CO<sub>2</sub> 배출량저감에 대한 요구가 대폭 증대되었으며, 가솔린 엔진에서 이를 구현하는 방법으로 직접분사식 가솔린 엔진(DISI engine : direct injection spark ignition engine)이 대두되어 왔다.

직접분사식 가솔린 엔진이 가지는 가장 큰 장점인 연료경제성의 향상은 부분부하시의 성층 희박 연소를 통해서 구현되므로 연료경제성의 향상을 극

\*Corresponding author. E-mail: moon03@kaist.ac.kr

대화하기 위해서는 성층 희박 연소구간을 최대화시키는 것이 중요하다 할 수 있다.<sup>1)</sup> 성층 희박 연소를 위해서는 점화플러그 주변에 안정된 연소를 구현할 수 있는 혼합기를 형성시켜 주어야 하며, 이러한 혼합기 분포는 벽면유도 방식(wall-guided system)의 경우 분무 자체의 형상 뿐만 아니라, 피스톤 보울(bowl)의 형태, 흡기유동에 의해서도 영향을 받게 된다.<sup>1)</sup> 지금까지 선행된 연구들에서는 연소의 최적화를 위하여 각각의 분무 형태에 맞는 피스톤 보울 및 유동의 형태 결정에 연구의 초점이 맞추어져 있었다.<sup>1-4)</sup> 그러나 초기 시동 시부터 안정된 연소에 이르는 기간, 또한 연소열에 의해 시시각각 변하는 엔진 및 냉각수의 온도 변화에 따른 연료온도의 변화 및 이에 의해 발생하는 분무 형태 및 연소 특성의 변화에 대한 고려는 현재까지 크게 이루어 지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 엔진 운전 조건에 따라 발생하는 연료 온도의 변화가 팬형 분무의 거시적, 미시적 형태에 미치는 영향을 살펴보고, 이에 의하여 실제 엔진의 연소 특성에 어떠한 변화가 발생하는지 살펴보고자 하였다. 또한 각각의 운전 조건에서 연료 온도를 변화시켜 봄으로써 어떤 연료 온도가 안정된 연소를 위해 유리한지 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 연료 온도에 따른 분무 형상의 변화를 살펴보기 위한 풍동 실험 장치를 보여주고 있다. 분사기 어댑터에 물이 순환할 수 있는 장치를 설치한 후 물의 온도를 통해 분사기 온도를 조절하였으며, 분사기 내에 열전대를 삽입하여 연료의 온도가 분사기 온도와 동일화 되는 시점에서 실험을 수행하였다. 실제 엔진에서 발생하는 역토크를 모사하기 위해 풍동을 통해서 10m/s의 횡방향 유속을 좌측에서 우측으로 생성시켜 실험하였다. Ar-ion 레이저를 이용하여 shadowgraphy 기법을 적용하였으며, 점화광원을 통해 이미지를 직접 취득하였다. 또한 PDA 방법을 이용하여 분광된 2개의 광선의 교차에 의해 생성된 지점을 지나는 입자의 크기를 측정하였다.

Fig. 2는 연료 온도에 따른 연소특성의 변화를 살

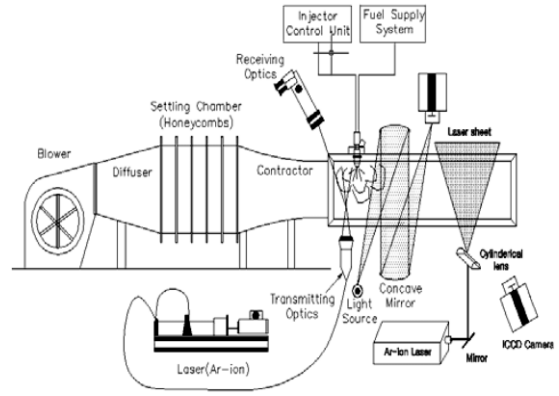


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel setup

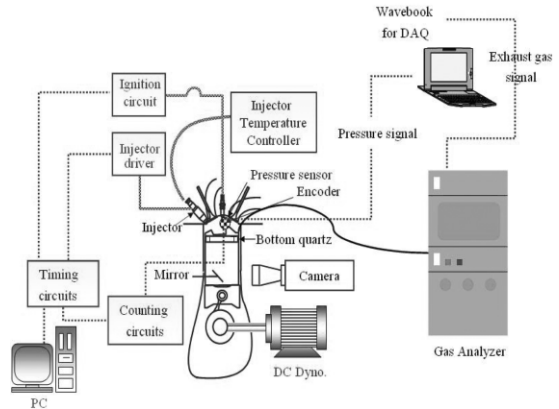


Fig. 2 Schematic diagram of engine setup

Table 1 Specifications of the engine

Engine Type	Wall-guided type 4Stroke, 4Valve
Bore × Stroke (mm)	85 × 88
Displacement vol.(cc)	499
Combustion chamber	Pent-roof
Compression ratio	9.8
Valve timing	IVO : 6° BTDC
	IVC : 46° ABDC
	EVO : 130° BBDC
	EVC : 10° ATDC

펴보기 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 엔진은 가시화가 가능한 단기통 가시화 엔진을 적용하였으며 이의 제원은 Table 1에 나타나 있다. 분사기는 슬릿 분사기(slits Injector)를 사용하였으며, 슬릿 분사기의 팬형 분사 특성을 고려해 셸형태(shell type)의 피스톤 보울을 사용하였다.<sup>5)</sup> 성층화

방식은 벽면유도방식을 사용하였으며, 이를 위해 수직 흡기포트를 통해 발생하는 역턴블을 이용하였다. 엔코더(360 pulse/rev.)를 이용하여 분사 및 점화 시기를 파악하였으며 고압 질소가스를 이용하여 연료를 90bar로 가압하였다. 실린더 내부 압력을 측정하기 위해 피에조 타입(piezo electric type)의 압력센서(Kistler 6052B)를 사용하였고, 배기특성을 살펴보기 위해 배기가스 분석기(HORIBA MEXA-1500D)를 이용하였다. 화염의 전파특성을 살펴보기 위해 고속카메라(High speed camera)와 45도 거울, 하방가시화 석영(quartz)창을 이용하였으며, 10000 (frame/s)의 속도와 512\*384의 해상도로 이미지를 촬영하였다.

### 2.2 실험 조건

Table 2는 연료 온도의 변화에 따른 분무 및 연소 특성을 살펴보기 위한 실험 조건을 보여주고 있다. 연료의 온도는 사용 연료의 증류곡선을 통해서 0%, 10%, 50% 증류점인 25°C, 55°C, 85°C로 설정하였다. 엔진실험 시 회전수는 다른 인자에 의한 영향을 고정하기 위하여 800rpm으로 고정하였다. 실험은 균일혼합 연소를 적용하는 고부하조건과 성층혼합 연소를 적용하는 부분부하 조건 모두에서 이루어졌으며, 이 경우 공연비는 각각 이론공연비 14.7과 25로 설정하였다. 적용된 엔진의 운전 조건은 냉시동시와 워밍업 기간으로 설정하였다. 냉시동시는 엔진의 온도가 상온이며 연료의 온도도 상온인 조건으로써 이 조건에서 연료의 온도를 변화시켰을 시 연소에 어떠한 변화가 살펴보고자 하였다. 워밍업 기간은 엔진 시동 시부터 엔진의 냉각수 온도가 정상

Table 2 Test conditions

Engine speed	800rpm
Air-fuel ratio	Homogeneous charge : 14.7 Stratified charge : 25
Fuel temperature	25°C, 55°C, 85°C
Applied engine conditions	Cold-start condition Warming-up condition
Injection timing Ignition timing	MBT
Injector	Slit injector [Fan spray]
Fuel	Gasoline

화되기까지의 상태로써, 이 경우에는 연료의 온도가 냉각수 온도와 동일한 상태이다. 이 조건은 실제 엔진 운전에서 연료의 온도변화를 가장 심하게 초래하는 영역이라 할 수 있다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 팬형 분무의 발달 과정 및 정의

Fig. 3은 직접분사식 가솔린 엔진용 팬형 분사기의 하방 및 측방에서 촬영한 분무의 발달 과정을 보여 주고 있다. 하방에서 본 이미지를 통해서 분무가 하류로 갈수록 점차 부채꼴 모양으로 넓게 퍼져나가는 것을 관찰할 수 있으며, 측방에서 본 이미지를 통해서 분무가 미립화 과정을 거치면서 얇은 막의 형태로 분무되는 것을 관찰할 수 있다. 팬형 분무의 경우는 선회 분무와는 달리 선회 운동을 가지고 있지 않으며, 초기 분사 시 직선방향의 운동량만을 가지고 분사되는 특징을 가지고 있다.<sup>5)</sup> Fig. 4는 팬형 분사기 분무형태를 해석하기 위해 정의된 여러 가지 거리 인자에 대한 정의를 보여 주고 있다. 분사기는 이미지에 수직인 방향으로 장착되어 있고, 15° 각도로 하류쪽을 향하여 분사되고 있다. 노즐로부터 유동 방향에 수직인 방향으로의 도달거리를 수직방향 도달거리(vertical penetration)라고 정의하였고, 이는 노즐 출구로부터 분무의 가장 끝부분까지의 거리로 정의하였다. 이는 분무가 가진 운동량을

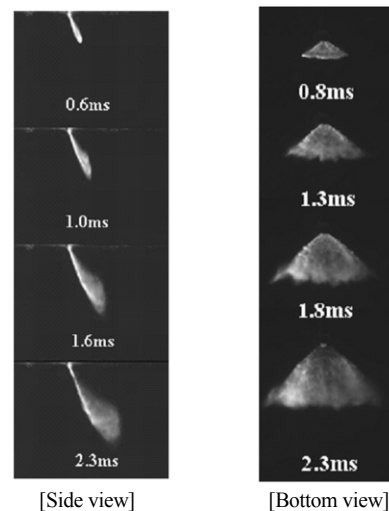
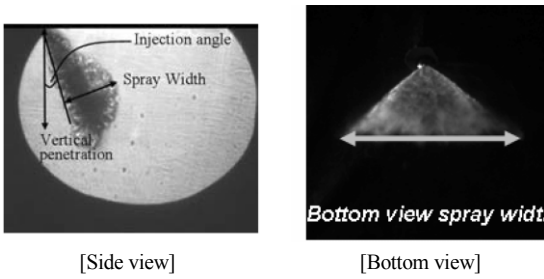


Fig. 3 Development of fan spray with time

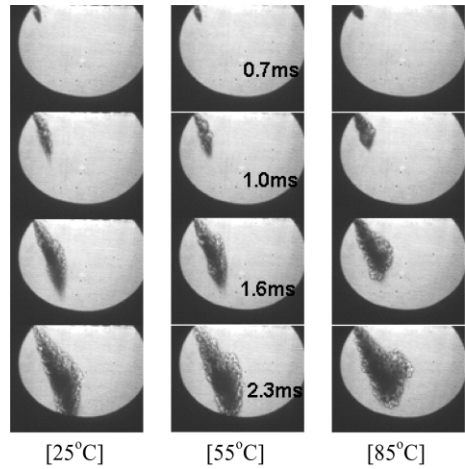


[Side view] [Bottom view]  
Fig. 4 Definition of parameters for the analysis of spray geometry

하류 부분에서 얼마나 지속되는가를 보여 주는 인자라고 할 수 있다. 또한 15°로 분사되는 각도를 분사각(injection angle)이라 정의한다면, 분무폭(spray width)은 15°의 분사각을 이루는 직선과 분무 사이의 수직 방향 최대 거리로 정의하였다. 분무폭은 분무가 초기 가진 직선 방향 운동량을 잃고 유동에 의해서 얼마나 영향을 받게 되는가를 보여주는 인자라고 할 수 있다. 하방 이미지의 경우는 부채 형태로 발달하던 분무 입자들이 초기의 운동량을 얼마나 쉽게 잃는가를 판단하기 위하여 하방 분무폭(bottom spray width)를 정의하였으며, 이는 분무의 경계지점을 연결하는 선 중에서 그 길이가 가장 긴 것을 취하였다.

### 3.2 연료 온도에 따른 거시적 분무 형태의 변화

Fig. 5는 측면에서 촬영된 팬형 분무의 연료 온도 변화에 따른 변화를 shadowgraphy 이미지를 통해서 보여 주고 있다. 결과를 통해서 연료의 온도가 증가할수록 액상의 수직분무도달거리가 줄어들며, 분무폭이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 연료 온도의 증가에 의해 입자의 증발이 촉진되며, 또한 점성력 및 표면장력의 감소에 의해 입자의 미립화가 잘 이루어졌기 때문이라 판단된다.<sup>6-8)</sup> 입자의 크기가 작아지면서 초기 분사압에 의해 생성된 직선 방향의 운동량이 점차 감소하게 되고, 풍동을 통해서 생성시킨 횡방향 유동에 더 큰 영향을 받게 되어 전체적인 분무폭이 증가하고 분무도달거리가 감소하는 결과를 가져왔다고 여겨진다. 또한 입자의 크기가 감소하고 분무 입자의 개수가 증가함으로써 주변 공기와 접촉하는 표면적이 개수가 적고 입자가 큰 경



[25°C] [55°C] [85°C]  
Fig. 5 Fan spray development at different fuel temperatures [Side view images]

우에 비해 증가하게 되어 전체적인 마찰 저항이 증가했기 때문에 수직분무도달거리가 연료 온도의 증가에 따라서 점차 감소하는 결과를 초래하였다고 여겨진다. 이러한 연료 온도의 증가에 따른 입자 개수의 증가는 PDA 실험 데이터를 통해서 확인할 수 있었다. Fig. 6은 Fig. 4에서 정의된 요소를 기준으로 이미지들을 정량화한 데이터를 보여주고 있다. 신뢰도를 높이기 위하여 모든 길이 인자에 대한 정량적 데이터는 Matlab의 이미지 처리기법을 통하여 얻어졌다. 데이터를 통해서 살펴볼 때, 수직분무도달거리는 연료 온도가 증가할수록 감소함을 확인할 수 있으며, 분무폭은 연료 온도의 상승에 따라 증가하였음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 연료 온도의 변화에 따라서 하방에서 촬영된 팬형 분무를 보여 주고 있다. 측방 이미지의 경

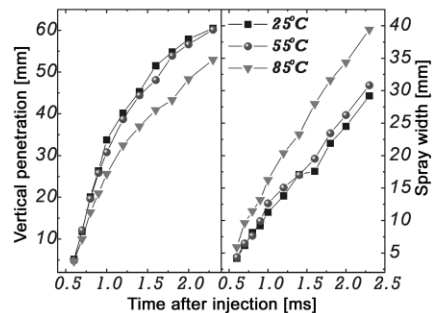


Fig. 6 Vertical penetration and spray width at different fuel temperatures

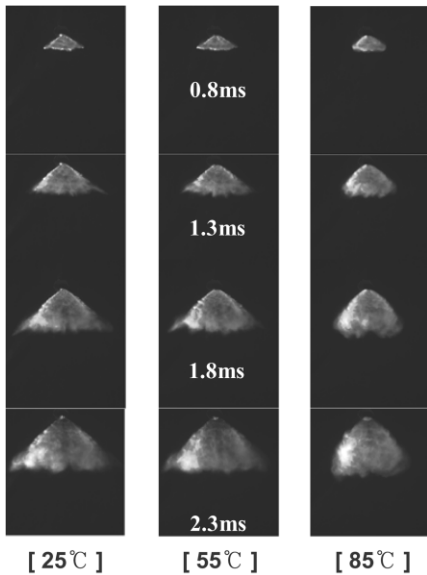


Fig. 7 Fan spray development at different fuel temperatures [Bottom view images]

향성과 마찬가지로 연료 온도의 증가에 따라서 입자의 크기가 감소하게 되며 이로 인해 입자가 운동량을 쉽게 잃게 되어 횡방향 유동에 쉽게 반응하였음을 알 수 있다. 이로 인해, 하방 분무폭(bottom spray width)는 연료 온도의 증가에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다.

### 3.3 연료 온도에 따른 미시적 분무 형태의 변화

Fig. 8은 PDA 기법을 통해 입자를 측정하기 위한 측정 지점을 나타내고 있다. 입자가 농후한 지역에서는 PDA의 측정 영역에 두 개 이상의 입자가 분포하여 입자의 측정이 불가능하기 때문에 분사기 노즐로부터 오른쪽 수평방향으로 2cm 떨어진 지점에서부터 수직 방향으로 1cm씩 이동하면서 입자크기를 측정하였다. Fig. 9의 (a)는 측정된 모든 지점에서의 모든 측정 시간에서 취득된 입자들을 연료 온도 조건에 따라서 평균한 값을 보여주고 있다. 그래프를 통해 연료 온도가 증가할수록 SMD값은 상당히 감소함을 알 수 있으며, D10 값은 작은 폭의 감소를 보이고 있다. 연료 온도의 증가에 따라 어떤 입자가 어느 정도 분포를 가지고 있는지를 살펴보기 위해 일반화된 확률밀도함수(PDF; probability density

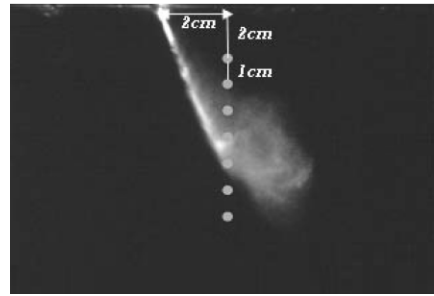
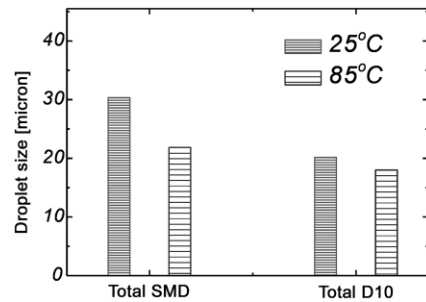
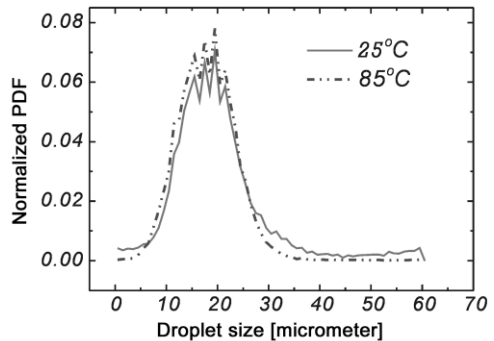


Fig. 8 Test points for the droplet size measurement



(a) Mean droplet sizes



(b) Probability density function

Fig. 9 Droplet size distribution at different fuel temperatures

function)를 Fig. 9의 (b)에 나타내었다. 그래프를 통해 연료의 온도가 증가할수록 그 크기가 30 $\mu\text{m}$ 보다 큰 입자의 분포가 감소하고 중간 크기의 입자 분포가 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 입자의 크기가 감소하는 원인은 온도의 증가에 의해 노즐을 통과하는 연료 내부에 기포핵이 형성되고 연료의 증발 및 공기와의 마찰 증가에 의해 분열길이(break-up length)가 짧아지기 때문이다.<sup>8)</sup> 또한 입자가 가진 표면장력 및 점성이 점차 감소하는 것도 입자의 미립화를 촉진시키는 한 원인이라 생각된다.

이러한 입자 크기 및 SMD의 감소는 앞에서 설명한 입자의 수직 방향 운동량 감소의 근거가 되며, 점화 플러그 주변의 연료 분포의 변화를 야기하여 전체적인 연소 상황을 변화시키는 중요한 요인이 되리라 여겨진다.

### 3.4 연료 온도에 따른 연소특성의 변화

#### 3.4.1 균일혼합 연소 특성의 변화

Fig. 10은 냉시동시와 과도 운전 영역에서의 균일 혼합기 연소의 안정화 특성을 보여 주고 있다. 그래프의 가로축은 처음 연소가 일어난 후의 초기 25사이클을 나타내고 있으며, 세로축은 25사이클 동안의 도시평균유효압력(IMEP; indicated mean effective pressure)의 변화값을 보여 주고 있다. 일반적으로 직접분사식 가솔린 엔진의 냉시동 시 연소 안정화 특성은 포트분사식 가솔린 엔진에 비해서 우월한 것으로 알려져 있으며, 이는 직접 분사에 의한 연료의 성층화에 의해 점화플러그 주변의 점화 가능한 연료 분포 형성이 가능하기 때문이며 또한 벽면적 심현상의 감소와 체적효율의 증가에 기인한다. 그러나 여전히 초기 여러 사이클 동안은 연소의 안정화가 이루어지지 않기 때문에 이 부분에 대한 개선이 여전히 요구된다 할 수 있다. Fig. 10의 (a)를 통해서 살펴볼 수 있듯이, 냉시동 시 연료의 온도가 증가할수록 연소가 빨리 안정화됨을 알 수 있다. 이러한 현상을 나타내는 원인은 연료 온도의 증가에 따라 입자의 미립화 정도가 증가함에 따라 연료의 혼합도가 증가하게 되며 국부적으로 농후한 영역이 감소하게 되었기 때문이라 판단된다.<sup>9-11)</sup> 이러한 경향성은 워밍업 조건에서도 나타남을 Fig. 10의 (b)를 통해서 확인할 수 있다. 워밍업 조건에서 나타나는 차이점은 연료온도가 높은 조건에서 연소의 안정화 정도가 냉시동 시보다 더 향상되었다는 점이다. 이것은 뒷절에 나오는 평균유효압력의 표준편차 데이터를 통해서 확인할 수 있다. 이러한 현상이 발생한 원인은 실린더 벽면과 피스톤 보울로부터의 열전달에 의해 연료의 미립화가 냉시동 시에 비해서 증가했기 때문이다.

Fig. 11은 초기 200사이클 동안 냉시동 시와 과도 운전영역에서 발생한 엔진 출력의 변화 및 배기배

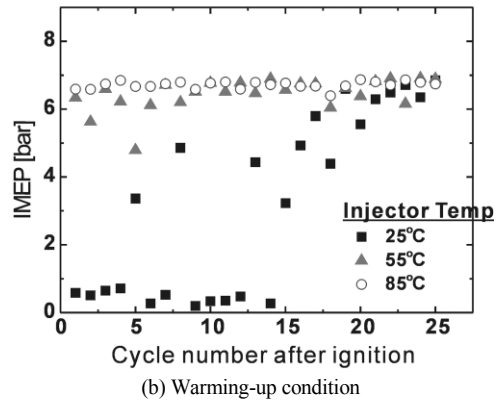
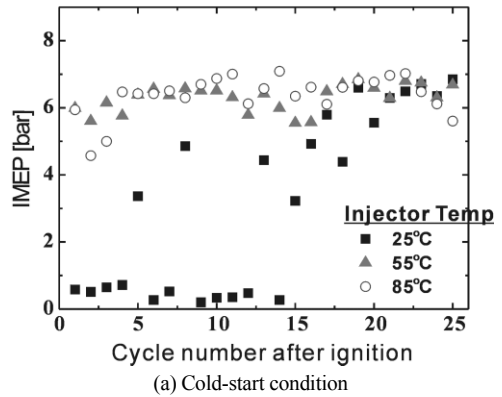
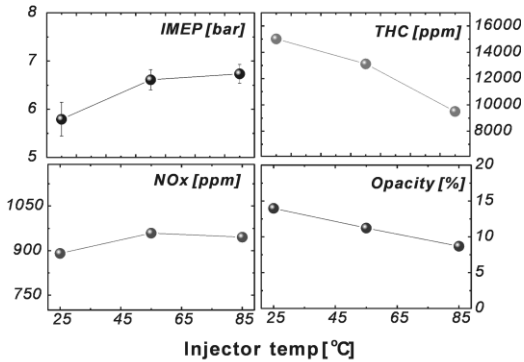


Fig. 10 IMEP distribution of initial 25 cycles at different fuel temperatures [Homogeneous charge]

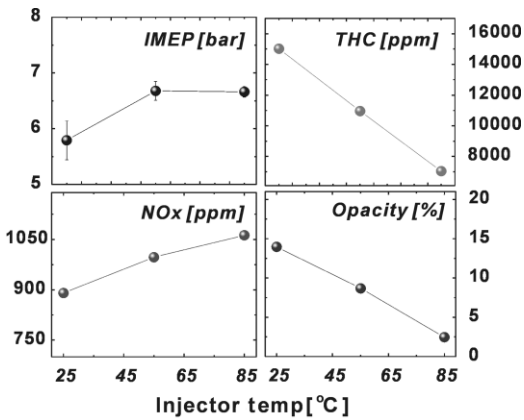
출량의 변화를 나타내고 있다. 그래프를 결과는 냉시동시와 워밍업 조건 모두에서 연료 온도의 증가에 따라 엔진의 출력 및 질소산화물(NOx)의 배출량은 증가하고, 탄화수소(THC; total hydrocarbon)의 배출량과 도시평균유효압력의 표준편차 값은 감소하는 것을 보여주고 있다. 이는 앞 절에서 이미 설명한 바와 같이 연료의 증발에 따른 미립화 정도의 증가에 기인한다고 볼 수 있다. 냉시동시의 결과를 보여주는 Fig. 11의 (a)와 워밍업 조건의 결과를 보여주는 (b)에서 확인할 수 있듯이 출력 및 질소산화물의 증가 정도와 탄화수소 및 도시평균유효압력 표준편차 값의 감소 정도는 워밍업 시 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 엔진의 온도 역시 동시에 상승됨으로써 연료의 증발 및 미립화 정도가 더 향상되었기 때문이라 판단할 수 있다.

위의 결과들을 살펴보았을 때, 연료 온도의 증가

직접분사식 가솔린 엔진에서 연료 온도에 따른 편형 분무 및 연소 특성의 변화



(a) Cold-start condition



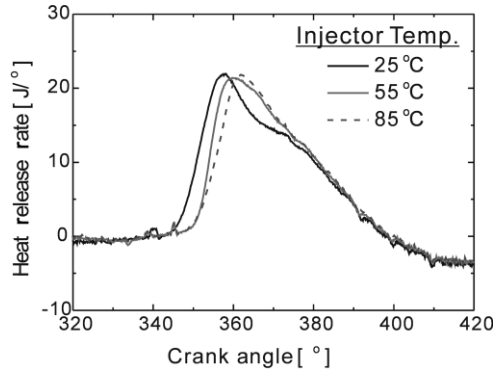
(b) Warming-up condition

Fig. 11 Performance and engine-out emissions at different fuel temperatures [Homogeneous charge]

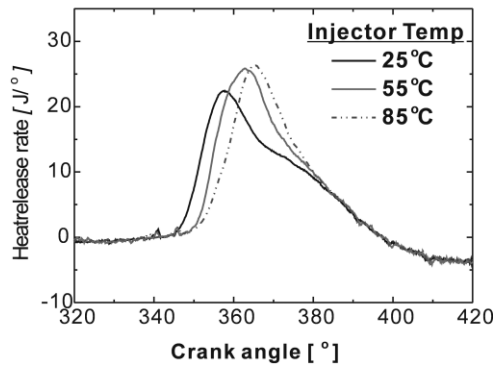
는 질소산화물 배출량을 제외한 모든 연소의 안정성 및 출력, 배기 배출량에서 유리한 특성을 보여줄 수 있다. 따라서, 엔진의 온도가 평형 상태에 도달하기 전까지는 분사기 온도나 연료의 온도를 제어해 줌으로써 미립화 정도를 높여주는 것이 한기의 초기 시동 특성 향상이나 과도한 탄화수소 배출물 감소에 기여할 수 있다고 판단된다.

3.4.2 성층혼합 연소 특성의 변화

Fig. 12는 냉시동시와 워밍업 조건에서의 연료 온도에 따른 열방출률의 변화를 보여주고 있다. 그래프의 기울기는 연소속도를 의미하고 있으며, 냉시동시와 워밍업 조건 모두에서 85°C 보다는 55°C에서 빠른 연소속도를 보여줌을 확인할 수 있다. 이 현상의 원인을 살펴보기 위해서, 성층 연소에 영향을 미치는 두 가지 중요 요소를 고려해 보았다. 첫번



(a) Cold-start condition



(b) Warming-up condition

Fig. 12 Heatrelease rate diagrams at different fuel temperature [Stratified charge]

째는 입자의 미립화도인데, 입자의 미립화도는 공기와 연료와의 혼합 정도를 결정해 주고, 또한 국부적인 농후 지역을 감소시켜 주는 역할을 하는 중요한 인자로서 미립화도가 클수록 엔진에 유리하다 할 수 있다. 연료의 온도가 증가할수록 미립화도가 향상된다는 것을 앞에서 이미 확인한 바가 있다. 다음으로는 연료의 성층화 정도이다. 연료가 아무리 공기와 잘 혼합되어 있다 할지라도, 압축 말기에 연료 분사를 하는 성층 연소의 특성상 점화 플러그 주변에 가연영역의 연료가 분포하지 않는다면 불완전한 연소가 일어나게 된다. 결론적으로 점화플러그 주변에 연료와 공기와 잘 혼합되어 있고 이혼공연비 영역의 연료 분포가 이루어져야 최적의 연소 조건이 이루어진다고 할 수 있다. 위의 성층 연소 결과를 살펴볼 때, 연료의 온도가 증가할수록 입자의 미립화도는 향상되었으나, 성층화 정도는 연료의 온도

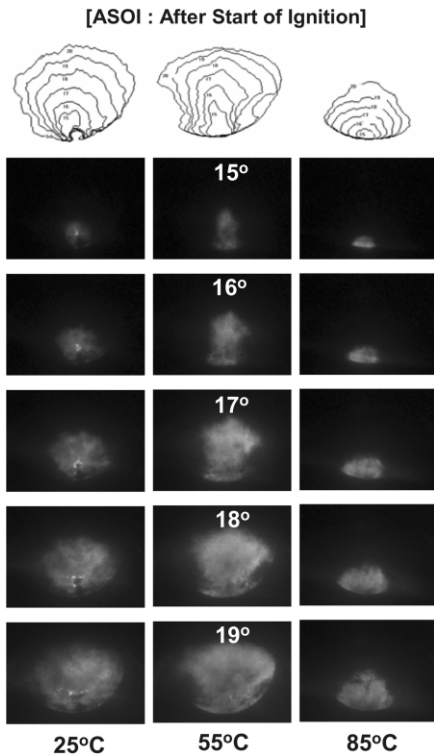


Fig. 13 Flame propagation at different fuel temperature [Stratified charge]

가 크게 증가하면 오히려 감소되는 것으로 판단할 수 있다. 입자의 크기가 작아지게 되면, 초기 입자가

가진 운동량이 소실되어서 주변 유동이나 압력에 의해 연소실 내로 확산되어 버리거나 이의 영향을 받지 않는다면 피스톤 보울 내에 정체되게 된다. 따라서 위의 결과는 연료온도의 증가에 의해 증발된 입자들이 초기 운동량을 유지하여 피스톤 볼과 상호작용을 함으로써 점화플러그 주변에 혼합기를 형성하는 대신, 연소실 주위로 많이 확산되어 점화플러그 주변에 상대적으로 희박한 영역을 형성하였다고 판단할 수 있다. Fig. 13은 각 연료온도의 MBT (minimum advance for best torque) 지점에서 촬영한 화염전파이미지를 나타내고 있다. 이미지를 통해서 85°C의 경우 화염전파속도가 다른 온도에 비해 현저히 느림을 알 수 있으며 이는 위의 설명을 반증한다 할 수 있다.

Fig. 14는 연료 온도의 변화에 따른 성층 혼합 연소, 위밍업 조건에서의 배기배출물 변화량을 보여 주고 있다. 연료의 온도가 증가하게 됨으로써 NO<sub>x</sub>를 제외한 모든 배기배출물의 값이 상당량 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 연료의 미립화특성이 향상됨으로써 공기와의 혼합정도가 향상되었기 때문이라 판단된다. 그러나 엔진의 출력을 보여주는 IMEP값은 55°C에서 최적의 값을 보여 주고 있으며, 이는 앞서 설명한 열방출률과 화염전파 이미지를 통해서 설명할 수 있다. 초기 화염전파 속도가 크

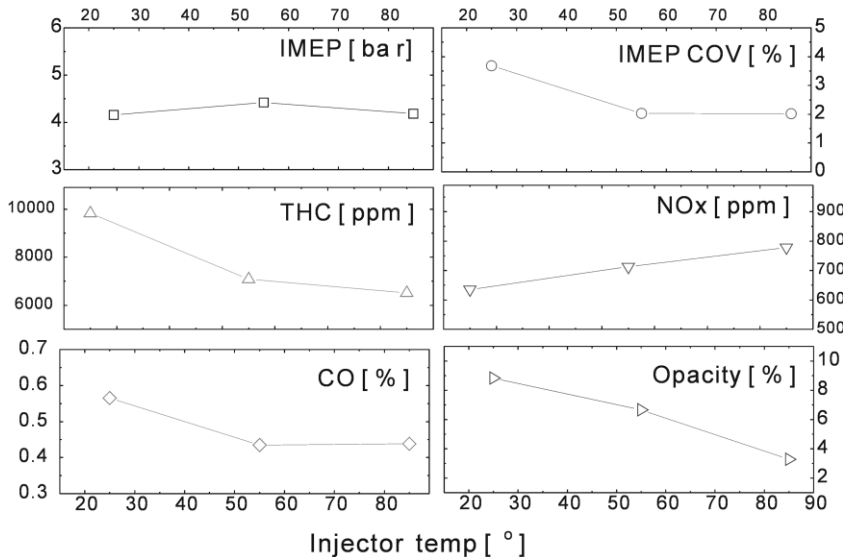


Fig. 14 Performance and engine-out emissions at different fuel temperatures [Stratified charge]



다 함은 TDC 근처에서의 열방출률이 큼을 의미하며, 이는 피스톤이 상사점에 위치했을 때 양의 일을 공급하여 주게 되어 전체적인 엔진 출력 향상을 가져왔다고 판단된다. 따라서 위의 결과를 종합해 볼 때, 연료의 온도를 상승시키는 것은 미립화 정도 및 공기와의 혼합특성을 향상시킴으로써 배기배출물 저감에 효과를 나타내나, 연료의 증발 정도가 증가하면 스파크 플러그 주변에 혼합기를 희박하게 함으로써 초기 화염전파속도를 늦추고 출력의 저감을 가져올 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 출력을 고려한다면 연료의 온도도 최적화를 이루어야 하는 하나의 중요 변수가 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

엔진 연소 시 변화하는 연료온도에 따른 팬형 분무의 거시적, 미시적 형태 변화 및 이에 의해 발생하는 연소 특성의 변화를 살펴보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 팬형 분무는 연료 온도의 증가에 따라 분무의 형태 자체에는 큰 변화가 없었으나, 횡방향 유동의 영향에 의해 수직분무도달거리가 감소하고 분무 폭이 증가하는 경향성을 보였다.
- 2) 팬형 분무에서 연료 온도의 증가에 따라 상대적으로 큰 입자의 분포가 감소하고 작은 입자의 분포가 증가하는 경향성을 보였다.
- 3) 균일 혼합 연소의 경우, 연료 온도의 증가에 따른 입자 미립화 특성의 향상으로 인해 연소의 안정성 및 배기 배출 특성이 향상되었다.
- 4) 성층 혼합 연소의 경우, 연료온도의 증가는 입자 미립화 특성의 향상으로 인해 불완전 연소에 의해 형성되는 탄화수소, 일산화탄소, 수트 등의 저감에 효과를 나타내었으나, 입자의 운동량 감소로 인한 연료의 확산에 의해 점화플러그 주변을 상대적으로 희박하게 함으로써 일정 온도 이상에서는 출력을 감소시켰다.

#### 후 기

본 연구는 과학재단의 우수연구센터(ERC) 및 국가 지정 연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) F. Zhao, D. L. Harrington and M.-C. Lai, "Automotive Spark-ignited Direct-injection Gasoline Engines," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.25, pp.437-562, 1999.
- 2) Y. Tanaka, T. Takano, H. Sami, K. Sakai and N. Osumi, "Analysis on Behaviors of Swirl Nozzle Spray and Slit Nozzle Spray in Relation to DI Gasoline Combustion," SAE 2003-01-0058, 2003.
- 3) J. J. Choi, S. H. Lee and C. S. Bae, "Spray and Flow-Field Interaction of Gasoline Direct Injection," Atomization and Sprays, Vol.14, No.2, 2004.
- 4) Y. H. Won and S. K. Kang, "Visualization and Numerical Analysis of Non-evaporating Spray with a Swirl-Type GDI Injector," Transactions of KSAE, Vol.4, No.11, pp.22-28, 2003.
- 5) F. (Frank) Zhao, D. L. Harrington, M.-C. Lai, Automotive Gasoline Direct-Injection Engines, SAE, pp.88, 295-299, 2002.
- 6) B. A. VanDerWege and S. Hochgreb, "Effects of Fuel Volatility and Operating on Fuel Sprays in DISI Engine : (1) Imaging Investigation," SAE 2000-01-0535, 2000.
- 7) B. A. VanDerWege and S. Hochgreb, "Effects of Fuel Volatility and Operating on Fuel Sprays in DISI Engine : (2) PDPA Investigation," SAE 2000-01-0536, 2000.
- 8) I. Schmitz, W. Ipp and A. Leipertz, "Flash Boiling Effects on the Development of Gasoline Direct-Injection Engine Sprays," SAE 2002-01-2661, 2002.
- 9) H. Sandquist, I. Denbratt, A. Ingemarsson and J. Olsson, "Influence of Fuel Volatility on Emission and Combustion in a Direct Injection Spark Ignition Engine," SAE 982701, 1998.
- 10) Y. Huang, T. Alger, R. Matthews and J. Ellzey, "The Effects of Fuel Volatility and Structure on HC Emissions from Piston Wetting in DISI Engines," SAE 2001-01-1205, 2001.
- 11) K. Tong, B. D. Quay, J. V. Zello and D. A. Santavicca, "Fuel Volatility Effects on Mixture Preparation and Performance in a GDI Engine During Cold Start," SAE 2001-01-3650, 2001.