

# 정적챔버에서 GDI용 연료분사기의 가솔린, M85, E85 및 LPG 분무 계측 The Spray Measurements of Gasoline, M85, E85, and LPG by a GDI Injector in a Constant Volume Chamber

김 성 수\*†  
S. S. Kim\*†

(접수일 : 2012년 09월 19일, 수정일 : 2012년 10월 04일, 채택확정 : 2012년 10월 11일)

**Key Words** : Mie Scattering(미산란), Spray Measurements(분무계측), Fuel Injection(연료분사), Constant Volume Chamber(정적챔버), GDI(가솔린직접분사), Spray Penetration Length(분무도달거리)

**Abstract** : Spray structures and penetration lengths of Gasoline, M85, E85, and LPG by a GDI 6-hole fuel injector were examined in a constant volume chamber. The chamber pressure was controlled at 0.1 MPa and 0.9 MPa. The effects of fuel injection pressure and chamber pressure on the spray structures and penetration lengths were investigated using the 2-dimensional Mie scattering technique. It was found that the sprays developed linearly till ASOI 1.7ms after start of injection and vortices were happened around jets on the way of spray development. And the high chamber pressure, 0.9 MPa kept the fuel sprays development down and the penetration length was reduced to about 55% compared with that of 0.1 MPa. In additions high pressure of fuel injection, 12 MPa increased the spray penetration length more about 7~10% than that of 7 MPa.

## 1. 서 론

가솔린기관에서 연료를 연소실에 직접 분사하는 방식은 종래의 포트분사 방식의 가솔린기관에서 연료소비율을 개선할 수 있는 주요 기술 중의 하나로 여겨지고 있다. 직접분사식 가솔린기관의 이점은 연료소비율 향상 외에도 정확한 공연비 조정과 과도구간에서의 신속한 응답성 등도 포함된다. 연소실 벽면 유도방식을 기본으로 한 제 1세대 직접분사식 가솔린기관은 고압선회 연료분사기를 적용하였으나<sup>1,2)</sup> 압축과정 말기에 연료를 분사하는 성층급기 조건에서는 연소실에 형성된 높은 배압(back pressure)으로 인하여 선회 연료분사기의 분무구조를 안정적으로 형성하지 못하게 하는 단점이 있다.<sup>3,4)</sup> 이를 개선하기 위하여 연소실의 중심 혹은 측면 연료분사방식의 분무유도(spray guided) 방식의 제 3세대 직접분사식 가솔린기관에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>5)</sup> 특히 고압다공(high pressure multi-hole) 연료분사

기는 안정적인 분사패턴과 분사연료의 공간분포특성이 우수하여 성층연소의 가연범위를 개선하고 균질급기 조건의 경우에도 제 1세대 시스템의 단점을 보완할 수 있는 대책으로 간주되어 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>6~8)</sup> 직접분사식 가솔린기관의 연소실 내에 요구되는 공기-연료 혼합기를 공급하는 것은 성공적인 연소성능을 확보하는데 매우 중요하다. 뿐만 아니라 최근에는 직접분사식 가솔린기관의 유해배출물 저감을 위한 대체연료의 적용에 대한 관심이 증가하고 있는 상황이나<sup>9,10)</sup> 제 1세대 직접분사식 가솔린기관의 단점을 보완한 제 3세대 직접분사식 고압다공 가솔린 연료분사기를 적용한 직접분사식 가솔린 기관의 대체연료 적용가능성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 정적챔버에서 제 3세대 직접분사식 고압다공 가솔린 연료분사기를 이용하여 균질급기 및 성층급기 분위기압력 조건에서 가솔린 및 M85(가솔린 15% + 메탄올 85%), E85(가솔린 15% + 에탄올 85%), LPG의 연료분사압력 변

\*† 김성수(교신저자) : 신라대학교 자동차기계공학과  
E-mail : sskim@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5712

\*† S. S. Kim(corresponding author) : Department of Automotive and Mechanical Engineering, Silla University.  
E-mail : sskim@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5712

화에 따른 연료분무의 형상을 미산란(Mie scattering) 기법으로 촬영하였으며 연료별 분무도달거리를 측정하였다.

## 2. 실험장치

이 연구에 사용한 가시화 정적챔버 및 인젝터의 사양은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용한 정적챔버는 Fig. 1과 같이 제작하였다. 가시화 창의 지름은 130 mm이고 챔버의 길이는 130 mm이다. 가시화 창은 지름 150 mm, 두께 15mm인 강화유리를 사용하였다. 챔버의 측면에는 60 x 60 mm의 가시화 창을 제작하여 좌측 및 우측면에서 Mie scattering을 위한 광을 입사할 수 있도록 하였다. 실험에 사용한 GDI용 6공 인젝터는 Fig. 2와 같으며 챔버의 상부에 수직으로 설치하여 연료분사기에서 연료가 챔버의 상부에서 하부로 분사되도록 하여 가시화 창을 통하여 수직으로 분사되는 연료분무를 관찰할 수 있었다. 챔버 하부에 열전대와 압력센서를 설치하여 챔버 내 공기의 온도와 압력을 측정할 수 있게 하였다. 공기의 흡입 및 혼합기의 배출이 가능하도록 흡입구 및 배기구를 제작하였으며 공기공급 및 배기 라인에 고압솔레노이드 밸브를 설치하여 흡기와 배기를 조절할 수 있게 하였다. GDI용 6공 연료분사기에 7 MPa 혹은 12 MPa의 연료를 공급하기 위하여 별도로 제



Fig. 2 GDI injector shape

작한 약 350 cc의 연료통에 약 300 cc의 연료를 채우고 연료통 상부의 빈 공간에 고압 질소가스를 채웠다. 연료통의 상부에 채워진 질소는 해당압력으로 연료를 가압함으로써 연료통의 하부와 연결된 연료분사기의 연료공급라인의 압력을 안정적으로 형성하였다. 정적챔버 내에 균질급기와 성층급기 조건에서의 연료분무형상을 관찰하기 위하여 챔버의 흡입구로 질소가스를 공급하여 챔버압력을 0.1 MPa 및 0.9 MPa로 형성하였다. 각 조건에서 분무의 정지된 미산란 이미지를 측정하기 위하여 1280 (H) x 1024 (V) pixels의 12 bit CCD 카메라로 200 $\mu$ s의 노출시간동안 18ns의 나노라이트를 조사하여 분무이미지를 촬영하였다. 이미지 획득시간은 컨트롤 장치의 다목적용 트리거 신호를 이용하여 조정하여 각 조건에서 3개의 미산란 분무 이미지를 취득하였다. 분사펄스 기간을 1.5ms로 입력하였을 때 분사시작 시기는 분사펄스 입력 후 0.3ms로 확인하였고 분사종료 시기는 분사펄스 입력 후 2.1ms로 확인하였다.

Table 1 Specifications of the test chamber and test conditions

Items	Specifications
Injector type	6-hole GDI injector
Chamber dimension (mm)	130(Dia.) x 130(Length)
Injection pressure (MPa)	7, 12
Injection pulse duration (ms)	1.5
Chamber pressure (MPa)	0.1, 0.9
Air temperature (°C)	20
Fuels	Gasoline, M85, E85, LPG

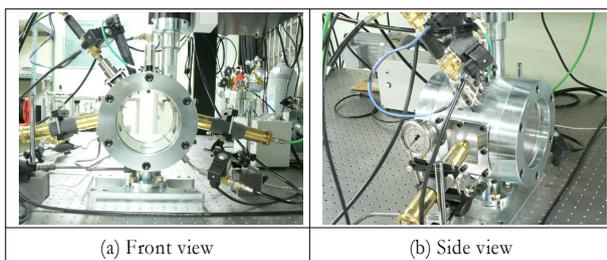


Fig. 1 Mie scattering apparatus set-up

## 3. 결과 및 고찰

이 연구에서는 GDI 엔진의 균질급기 및 성층급기의 분위기압력 조건을 상사하여 정적챔버 내의 압력 0.1 MPa와 0.9 MPa 조건에서 7 MPa, 12 MPa의 연료분사압력에 따라 가솔린, M85, E85 및 LPG 연료의 분무형상과 분무도달거리를 측정하였다.

### 3.1 균질급기 분위기압력 조건에서의 분무형상

Fig. 3은 균질급기 분위기압력 조건에서 연료분사압력 7 MPa로 1.5ms동안 연료를 분사했을 때 연료분사시작 이후의 시간에 따라 측정한 연료분무의 Mie 이미지를 나타낸다. Fig. 3에서 ASOI 0.5ms 일 때 연료종류에 관계없이 분무의 형태가 발달하기 시작하여 부채꼴 형태의 일체형 분무형상을 나타내고 있다. ASOI 0.9ms 일 때 개별제트의 형상이 명확하게 나타나고 있으며 챔버내부에는 선회 혹은 텀블유

동장이 형성되어 있지 않으므로 개별제트는 직선적으로 성장하고 있다. ASOI 1.3ms 일 때 가솔린, M85와 E85연료의 경우 개별제트가 계속하여 직선적으로 성장하고 있지만 LPG의 분무는 다른 연료의 분무와는 달리 개별제트 주위에 연료의 액적이 분산되어 개별제트의 영역이 구분하기 어려운 형상을 나타내고 있다. 또한 가장자리 2개의 분무는 선단부가 바깥쪽으로 휘어져 보인다. 이는 LPG가 타 연료에 비해 기화점이 낮아 타 연료에 비해 일찍 분무의 선단부에서 연료액적의 기화가 일어날 뿐만 아니라 특히 공기와의 접촉이 많은 분무의 가장자리에서 기화가 촉진되기 때문이다. 또한 연료분사기에서 분사시 형성된 액적의 모멘텀이 시간이 경과함에 따라 약화되고 액적의 기화현상이 크게 작용하기 때문에 판단된다. ASOI 1.7ms 일 때는 가솔린, M85와 E85연료의 경우 개별제트는 직선적으로 성장함과 동시에 개별제트의 선단부에서는 기화가 일어나고 있음을 알 수 있다. LPG 분무의 경우에는 ASOI 1.3ms의 경우보다 분무 선단부에서 연료액적의 분산영역이 확장되고 있으며 이로 인하여 가장자리 2개의 제트는 바깥쪽으로 더욱 휘어져 보인다. ASOI 2.1ms 일 때 연료분사기가 닫히는 시기임을 알 수 있다. 또한 기분사된 분무의 선단부에서의 기화영역이 더욱 증가함을 알 수 있다. ASOI 2.5ms 일 때 모든 연료의 분무에서 기화가 일어나고 있으며 특히 LPG의 경우는 타 연료에 비해 최외각 제트의 변형이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 연료분사기에서 연료분사가 끝나는 시점에 기계적인 바운싱이 발생함을 알 수 있다. 특히 가솔린과 LPG의 경우에는 2회의 바운싱에 의한 연료의 액적흩림현상이 나타나고 있으며 M85와 E85의 경우에는 1회의 바운싱에 의한 액적흩림현상이 나타나고 있다.

Fig. 4는 균질급기 분위기압력 조건에서 연료분사압력 12 MPa로 1.5ms동안 연료를 분사했을 때 연료분사시작 이후의 시간에 따라 측정된 연료분무의 Mie 이미지를 나타낸다. Fig. 4에서 ASOI 0.5ms 일 때 LPG를 제외한 세 연료의 경우에는 분무도달거리가 약 17mm정도 되며 LPG의 경우에는 분무도달거리가 약 12mm로 타 연료에 비해 짧다. 분무의 형태는 Fig. 3의 연료분사압력이 7 MPa인 경우와 비슷하다. ASOI 0.9ms 일 때 연료에 관계없이 개별제트는 직선적으로 성장하고 있다. ASOI 1.3ms 일 때 분무의 최외각 제트의 가장 자리에서 와류에 의한 액적의 분산이 나타났다. 이는 연료분사압력이 7 MPa에

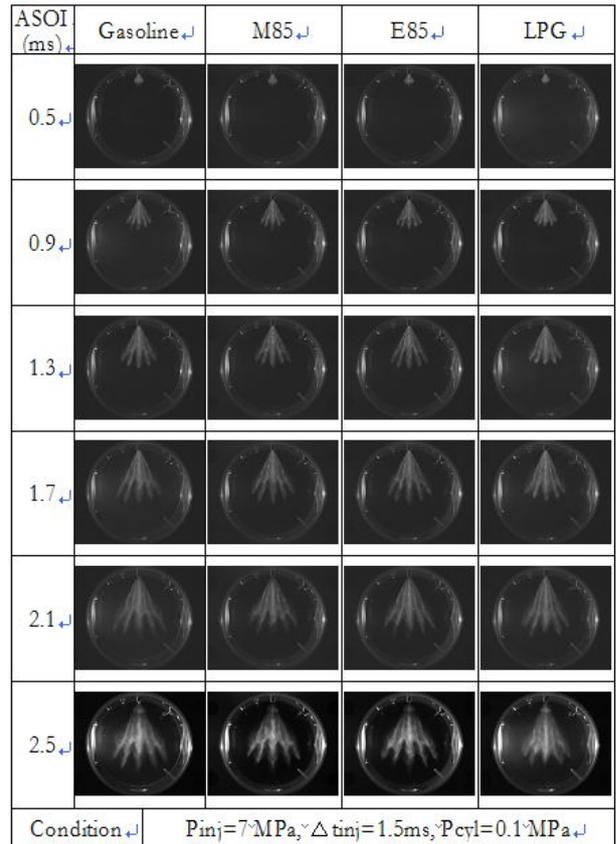


Fig. 3 Mie images of the injected fuels

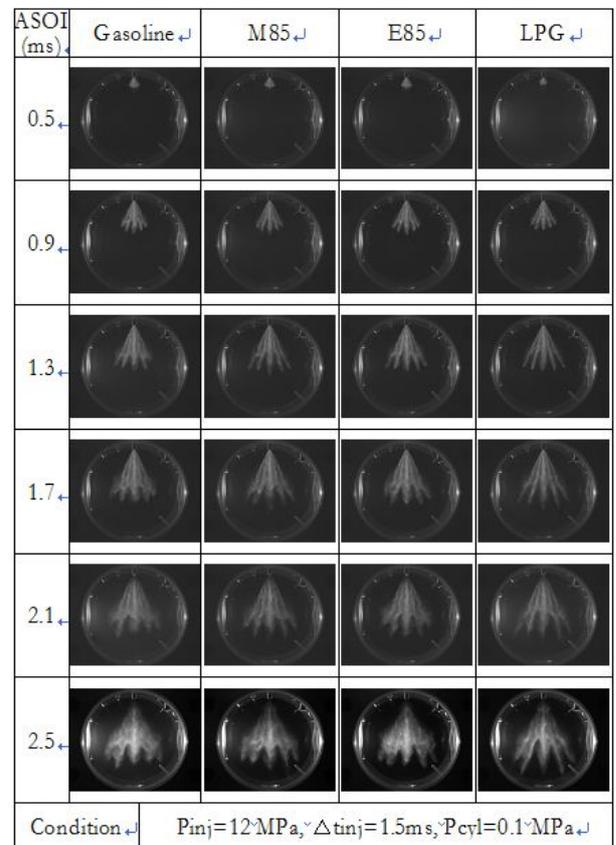


Fig. 4 Mie images of the injected fuels

서 12 MPa로 증가함에 따라 분무의 속도가 증가하여 제트의 가장자리 자유경계면에서 스트레인 비율이 증가하게 되며 이로 인한 항력의 증가로 와류현상이 발생하고 있다.<sup>11)</sup> 특히 타 연료에 비해 가솔린의 경우 액적의 분산정도가 크게 나타나고 있다. ASOI 1.7ms 일 때 연료에 관계없이 개별제트는 직선적으로 성장하고 있지만 개별제트의 선단부 가장자리에서 발생하는 와류현상에 의해 최외각 제트의 가장자리 주위에 액적이 널리 분포함을 알 수 있다. 그러나 LPG의 경우에는 와류에 의한 연료 액적의 분산정도가 타 연료에 비해 약하게 나타나고 있음을 알 수 있다. ASOI 2.1ms 일 때 연료분사기가 닫히는 시기임을 알 수 있으며 각 연료의 분무 선단부에서는 액적의 분산영역이 ASOI 1.7ms의 경우보다 확대되고 있는데 이는 와류에 의한 액적의 분산 및 개별제트에서 발생하는 기화현상에 의해 액적분산이 활발하게 일어나기 때문이다. ASOI 2.5ms 일 때 연료에 구분 없이 연료분사기에서 1회의 기계적인 바운싱이 있음을 알 수 있으며 와류 및 기화현상에 의해 액적의 분산이 촉진되어 개별제트의 구분이 어려운 분무형상이 되었다.

### 3.2 성층급기 분위기압력 조건에서의 분무형상

Fig. 5는 성층급기 분위기압력 조건을 상사하여 정적챔버압력을 0.9 MPa로 조정된 상태에서 연료분사압력 7 MPa로 1.5ms동안 연료를 분사했을 때 연료분사시작 이후의 시간에 따라 측정된 연료분무의 Mie 이미지를 나타낸다. ASOI 0.5ms 일 때 분무형상은 연료종류에 관계없이 일정각도의 부채꼴 형태를 나타내고 있다. ASOI 0.9ms 일 때 개별제트는 직선적으로 성장하고 있으나 균질급기 조건과는 달리 0.9 MPa의 챔버압력으로 인해 분무도달거리가 짧아졌으며 분무의 선단부만 제외하고 전체적으로 개별제트의 구분이 되지 않는 일체형의 분무형상을 나타내고 있다. ASOI 1.3ms 일 때 ASOI 0.9ms의 경우와 거의 유사한 형상을 보이고 있다. 특히 가솔린의 경우 최외각 제트의 가장자리에서 와류현상에 의한 액적의 분산을 확인할 수 있으며 타 연료에 비해 가솔린의 경우 액적의 분산정도가 크게 나타나고 있다. ASOI 1.7ms 일 때 분무의 형상은 ASOI 1.3ms의 경우와 비슷하나 와류현상에 의한 액적의 분산영역이 확대되고 있음을 알 수 있다. ASOI 2.1ms 일 때 연료분사가 거의 끝나는 시기이며 분무의 선단부

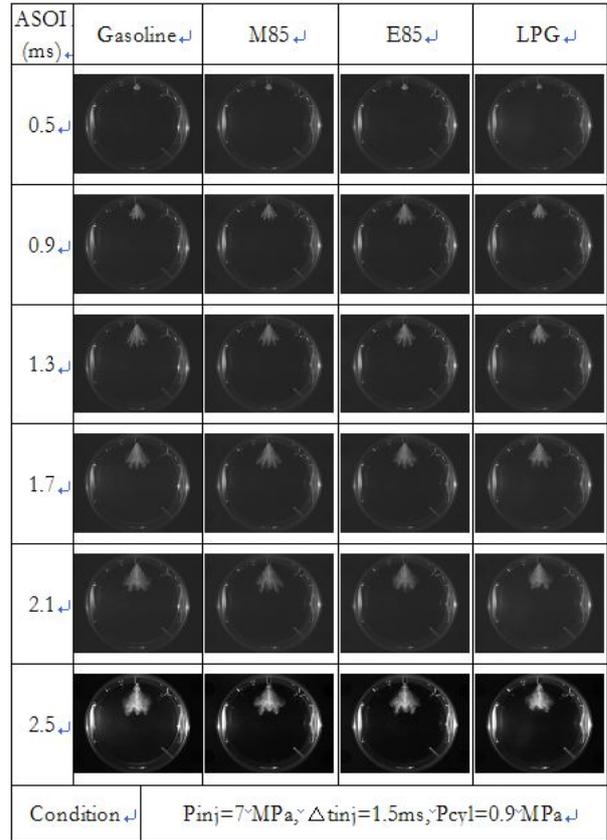


Fig. 5 Mie images of the injected fuels

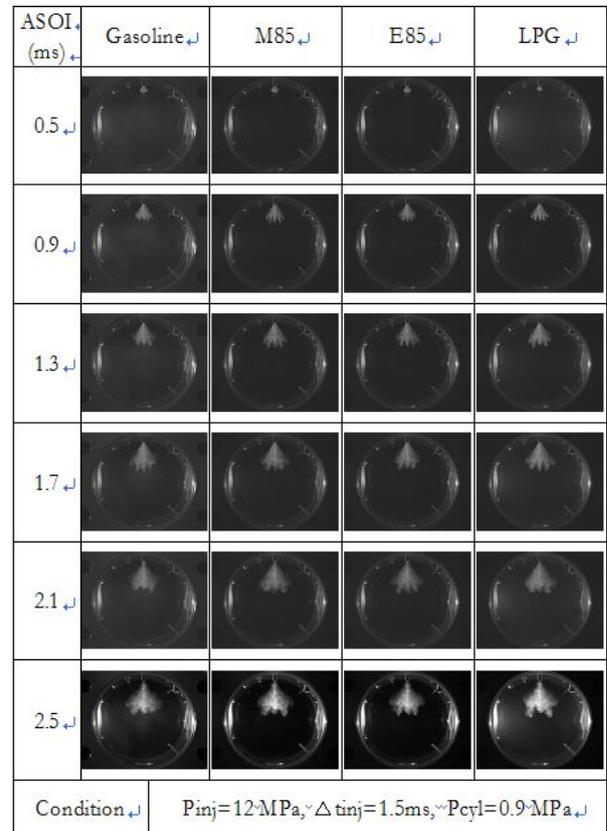


Fig. 6 Mie images of the injected fuels

에서 와류 및 기화현상에 의해 액적의 분산영역이 확대됨을 알 수 있다. ASOI 2.5ms 일 때 연료의 종류에 관계없이 챔버압력의 영향으로 개별제트가 서로 결합이 되어 분무의 형상이 거의 일체형으로 나타나고 있으며 연료분사기에서의 기계적인 바운싱도 일어나고 있다.

Fig. 6은 연료분사압력을 12 MPa로 하여 1.5 ms 동안 연료를 분사했을 때 연료분사시작 이후의 시간에 따라 측정된 연료분무의 Mie 이미지를 나타낸다. ASOI 0.5ms 일 때 분무형상은 Fig. 5의 경우와 거의 유사하다. ASOI 0.9ms 일 때 분무의 가장자리에서 와류현상에 의한 액적의 분산이 보이기 시작한다. 이는 연료분사압력이 7 MPa인 경우보다 일찍 발생하고 있는데 이는 연료분사압력이 12 MPa로 증가함에 따라 분무의 속도가 증가함에 따라 분무의 가장자리에서 와류가 일찍 발생하기 때문이다. ASOI 1.3ms 일 때 ASOI 0.9ms의 경우보다 분무의 가장자리에서 와류현상에 의한 액적의 분산이 증가함을 확인할 수 있다. ASOI 1.7ms 일 때도 분무의 형상이 ASOI 1.3ms의 경우와 크게 다르지 않으나 와류현상에 의한 액적의 분산영역이 확대되고 있음을 알 수 있다. ASOI 2.1ms 일 때 연료분사가 끝나는 시기이며 1회의 바운싱이 발생함을 알 수 있으며 분무의 선단부에서 와류 및 기화현상에 의해 액적의 분산영역이 확대되고 있다. ASOI 2.5ms 일 때 연료의 종류에 관계없이 챔버압력의 영향으로 분무형상은 개별제트가 구분되지 않는 거의 일체형으로 나타나고 있다.

### 3.3 챔버압력 변화에 따른 분무도달거리

균질급기 및 성층급기 분위기압력 조건을 상사한 챔버에서 연료분사압력 7 MPa과 12MPa 일 때 촬영한 각 경과시간별 3개의 Mie 이미지로부터 측정된 연료분무도달거리의 평균치를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 연료분사압력이 7 MPa 조건인 Fig. 7에서 챔버압력이 0.1 MPa인 경우 연료가 분사되고 ASOI 0.3~1.3ms까지 분무는 거의 직선적으로 성장하고 있으며 연료별 차이는 크지 않다. 이때 평균분무도달거리는 2.5~60mm 정도가 된다. ASOI 1.5ms부터는 분무의 성장이 약간 둔화되고 있는데 이는 분무의 가장자리의 자유경계면에서 스트레인 비율증가로 인한 와류의 형성 때문이다. 또한 ASOI 1.9ms이후 분무의 성장이 더 둔화되는 특성을 나타낸다. 이는 연료분사가 거의 끝나는 시기이며 연료분사초기에 분무의 액적이 가진 모멘텀이 시간에 경과함에 따라

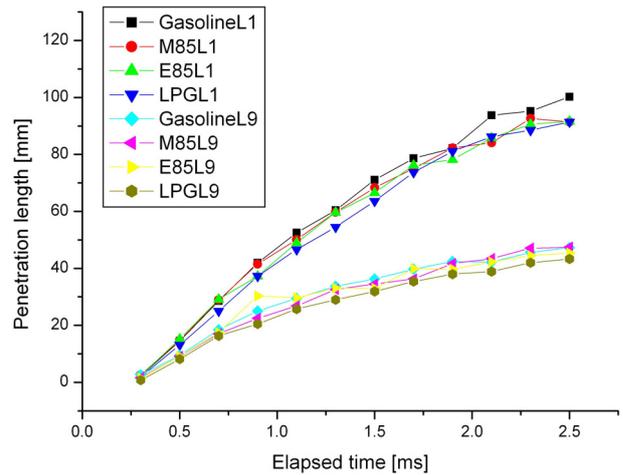


Fig. 7 Penetration length at Pinj=7 MPa

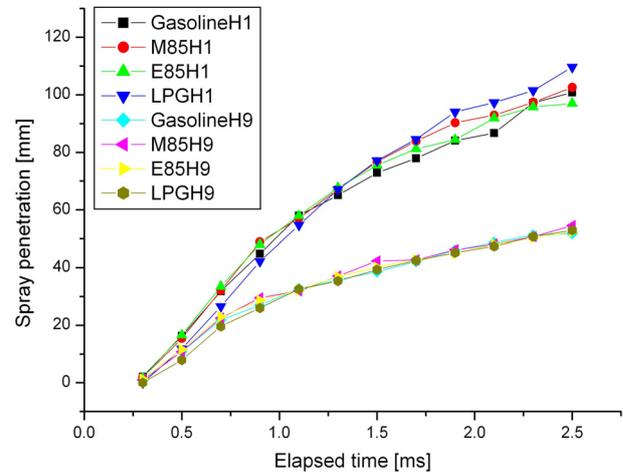


Fig. 8 Penetration length at Pinj=12 MPa

감소할 뿐 아니라 분 무주위에 형성되는 와류의 영향 때문이다. ASOI 1.5~2.5ms 일 때 평균분무도달거리는 68.5~96.6mm이다. 챔버압력이 0.9 MPa의 경우에는 챔버압력의 영향으로 분무도달거리는 챔버압력이 0.1 MPa의 경우보다 짧으나 그 성장형태는 거의 유사하다. ASOI 0.3~2.5 ms일 때 평균분무도달거리는 1.8~47.3mm이며 챔버압력이 1 MPa일 때의 평균분무도달거리에 비해 약 55%가 된다. 연료분사압력이 12 MPa 조건인 Fig. 8에서 보면 챔버압력이 0.1 MPa의 경우 연료가 분사되고 ASOI 0.3~1.3 ms 동안 분무도달거리는 거의 직선적으로 성장하며 평균분무도달거리는 1.5~69.3mm가 된다. ASOI 1.3ms부터 분무의 성장이 약간 둔화되기 시작하여 ASOI 1.9ms이후 성장이 더 둔화되고 있다. ASOI 1.5~2.5ms 일 때 평균분무도달거리는 77.3~106.2mm이다. 챔버압력이 0.9 MPa의 경우에는 Fig. 7의 경우와 같이 챔버압력의 영향으로 분무도달거리가 챔버압력

이 0.1 MPa 의 경우보다 짧다. ASOI 0.3~2.5 ms일 때 평균분무도달거리는 0.8~55.2mm이며 챔버압력이 0.1 MPa일 때의 평균분무도달거리와 비교해 볼 때 평균 약 55%가 된다. 또한 연료분사압력이 12 MPa일 때 평균분무도달거리는 연료분사압력이 7 MPa 인 경우에 비해 균질급기 조건에서 약 7%, 성층급기 조건에서 약 10% 정도 더 크게 나타났다.

#### 4. 결 론

미산란 기법을 이용하여 균질급기 및 성층급기 분위기압력 조건을 상사한 정적챔버에서 GDI용 연료분사기를 이용하여 연료분사압력 변화에 따른 가솔린, M85, E85 및 LPG의 연료분무형상 및 분무도달거리를 관찰하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 균질급기 및 성층급기 분위기압력 조건에서 분무형상은 ASOI 0.5~1.7 ms동안 개별제트가 거의 직선적으로 증가하다 ASOI 2.1 ms부터 분무 선단부에서 와류현상에 의한 액적의 분산에 의해 제트가 서로 결합되는 분무형상을 보였다.
2. 연료분사압력이 12 MPa인 경우는 7MPa인 경우보다 분무가장자리에서 와류현상이 일찍 발생하고 평균분무도달거리는 균질급기조건에서 약 7%, 성층급기조건에서 약 10% 정도 더 크게 나타났다.
3. 성층급기 조건의 경우에는 챔버압력이 분무의 성장을 억제하여 평균분무도달거리가 균질급기 조건에서의 평균분무도달거리의 약 55%가 되었다.

#### 후 기

이 연구는 2010년도 교육과학기술부의 기초연구사업 일반연구자지원사업(과제번호 2010-0013688)에 의해 수행된 결과이며 지원에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. J. M. Nouri and J. H. Whitelaw, 2002, "Effect of Chamber Pressure on the Spray Structure from a Swirl Pressure Atomiser for Direct Injection Gasoline Engines", 1st Int. Conference on Optical Diagnostics, ICOLAD, 1, pp. 121-129.
2. M. Wirth, W. F. Piock, G. K. K. Fraidl, P.

- Schoeggi and E. Winklhofer, 1998, "Gasoline DI Engines: the Complete System Approach by Interaction of Advanced Development Tools", SAE 980492.
3. G. K. Fraidl, W. F. Piock and M. Wirth, 1996, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems", SAE 960465.
4. J. M. Nouri and J. H. Whitelaw, 2002, "Effect of Chamber Pressure on the Spray Structure from a Swirl Pressure Atomiser for Direct Injection Gasoline Engines", 1st Int. Conference on Optical Diagnostics, ICOLAD, 1, pp. 121-129.
5. N. Mitroglou, 2005, "Multi-hole Injectors for Direct-Injection Gasoline Engines", PhD Thesis, The City University, pp. 187-248.
6. S. S. Kim, 2008, "Study on the Fuel Vapor Distribution of the Stratified Charge in a DISI Engine by PLIF Technique", KSPSE, Vol. 12, No. 6, pp. 64-69.
7. S. S. Kim, 2011, "Study on the Fuel Vapor Distribution of Homogeneous Charge in a DISI Engine with 6-Hole High Pressure Fuel Injector", KSPSE, Vol. 15, No. 1, pp. 5-10.
8. S. Kim, J. M. Nouri, Y. Yan and C. Arcoumanis, 2009, "Effects of Intake Flow on the Spray Structure of a Multihole Injector in a DISI Engine", IJAT, Vol. 10, No. 3, pp. 277-284.
9. H. Oh, H. Wang, C. Oh, J. Park and C. Bae, 2009, "Spray and Combustion Characteristics of Ethanol Blended Gasoline for DISI Engine", KSAE09-A0032, KSAE 2009 Annual Conference, pp. 180-185.
10. Y. Kim, M. Kim, H. Jeon and C. Lee, 2004, "A Study on the Characteristics of Spray in a LPG Direct Injection Engine", KSAE04-S0028, KSAE 2004 Annual Conference, pp. 174-179.
11. S. Lee, J. Choi, S. Kim, S. Lee and C. Bae, 2001, "Fuel-Spray Characteristics of High Pressure Gasoline Injection in Cross Flow", KSAE, Vol. 9, No. 6, pp. 30-39.