

## 직접 분사식 연료 분무에서의 기·액상 분리 계측에 관한 연구

### An Experimental Study on the Analysis of Liquid/Vapor Phase in GDI Spray

장 석 형\* · 김 정 호\* · 박 경 석\* · 진 성 호\*\* · 김 경 수\*\*  
S. H. Jang, J. H. Kim, K. S. Park, S. H. Jin and G. S. Kim

#### ABSTRACT

For this research an extension of the LIF technique that the LIEF(Laser Induced Exciplex Fluorescence) technique has been used. LIEF technique is the unique method to allows the visualization of fuel vapor phase and liquid phase individually by capturing each signals of them.

In this work, performed that the basic procedure for advanced LIEF technique using TEA and benzene as dopants and high power KrF excimer laser to excite the dopants. Iso-octane is used as the fuel because it does not absorb light at the laser wavelength. The boiling point of benzene and TEA are 81°C and 89°C, respectively, in comparison to 99°C for iso-octane.

It is observed that the behavior and distribution of high pressed fuel injection from various test condition. The injection pressure is set as 3MPa and 5MPa. And the ambient pressure of test chamber is atmospheric pressure and 1MPa, the ambient temperature of chamber is room temperature, 300°C and 500°C to imitate the condition of GDI engine cylinder.

주요기술용어 : 레이저 유도 여기 형광법(Laser Induced Exciplex Fluorescence:LIEF), 가솔린 직접 분사(Gasoline Direct Injection:GDI), 액상(liquid Phase), 기상(vapor phase)

#### 1. 서 론

기존의 기화기(carburettor)식 엔진은 물론이고, 흡기 포트 분사식(port fuel injection) 가솔린 엔진의 연료 공급은 흡기 밸브 주위에 분사하여 밸브 주위의 환상 간극을 통해 흡입되도록 하는 방식이므로, 인젝터로부터 연소실까지의 이송 거리가 길어서 분사된 연료의 일부가 이송 도중 흡기 포트나 흡기 밸브 주변에 부착되어 수송 지연이 생기게 되고, 냉간 시동 시

또는 과도 운전 시 생기는 실린더 벽면의 젖음(wall wetting)현상 및 흡기 포트의 벽면을 따라 흐르는 액막류의 형성으로 정확한 공연비의 제어가 어렵게 되어 미연탄화수소(UHC)의 배출이 증가하고 출력의 변동도 심하게 된다. 이에 반해 GDI 엔진의 경우에는 원하는 시기에 실린더의 적합한 위치로 연료를 직접 분사하게 되므로 연료의 수송 지연이 생기지 않으며, 벽면의 젖음(wall wetting)현상도 현저히 감소하게 된다<sup>(1)-(4)</sup>.

또한, 연료를 연소실 내로 직접 분사하게 되므로 점화가 일어나기까지의 연료와 공기의 혼합 시간이 아주 짧게 된다. 특히, 25~40:1의 희박한 연소를 위한 성층 급기를 위해 압축 행

\* 정회원, 경희대학교 기계산업시스템공학부

\*\* 정회원, 한국생산기술연구원

정 말기에 연료를 분사하게 되는 late injection 기간에는 연료와 공기의 혼합 시간이 극소화되는 장점이 있다.

액체 상태 그대로 급속히 산화반응을 일으켜 연소하는 액체 연료는 존재하지 않고 액적의 표면에서 증발한 연료 증기가 산소와 만나서 확산 연소를 하든가, 증발기에서 만들어진 연료 증기가 공기와 혼합해서 예혼합 연소를 한다는 액체 연료 연소의 기본 이론에 입각해 볼 때, GDI 엔진에서는 이 짧은 시간 동안에 연료의 미립화가 이루어지고, 또한 액적이 빠른 시간 안에 증발하여 가연 상태로 상 변화하여야 원활한 연소가 이루어질 수 있다<sup>(5)</sup>. 연소실 내에서 연료의 증기상과 액상의 분포는 점화, 화염전파, 연소 및 유해 배출물의 생성에까지 직접적으로 영향을 끼치게 된다<sup>(6)</sup>. 따라서, GDI 엔진에서 고온, 고압의 상태인 연소실내로 고압 분사된 연료의 액적 증발 과정 및 공기와의 혼합과정, 증기상과 액상의 공간적 분포에 대한 해석이 상당히 중요하다.

본 연구에서는 GDI 엔진을 모사한 고온 고압의 분위기 조건에 분사된 가솔린 연료의 기상과 액상의 거동 및 공간적 분포의 해석을 위하여 exciplex(excited state complex) 기법을 적용하였다<sup>(7),(8)</sup>. exciplex 기법의 적용을 위해서 필수적으로 요구되는 레이저와 형광 화상 취득 시스템 등을 이용하여 고온 고압의 챔버 내에 분사된 연료의 기상과 액상의 분포를 가시화하여 분석하였다. 본 연구에서는 연료의 분사 형상과 기상과 액상의 생성 및 분포에 있어 분위기 온도, 분위기 압력 및 연료 분사 압력을 주된 인자로 설정하고 각각의 조건들을 유기적으로 변화시키면서 기상과 액상의 분리 가시화 실험을 수행하여 각 조건에서의 분포 경향을 분석하였고, 분무 축 방향 및 분무 반경 방향의 농도 분포를 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험 장치의 전체적인 개략도이다. 실험 장치는 크게 KrF 엑시머 레이저를 비롯한 광학 시스템, 형광 화상

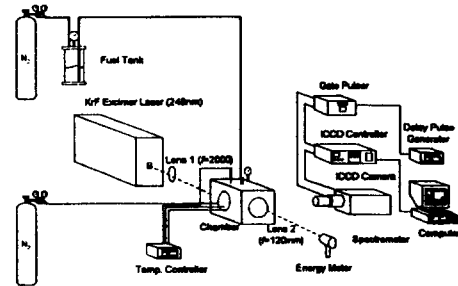


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

취득 장치, 고압 연료 분사 장치, 그리고 고온 고압용 챔버이다.

고압 연료 분사 장치는 7MPa의 고압까지 연료를 공급할 수 있도록 고압 질소 가스와 가압용 연료 탱크로 구성되어 있고, 고온 고압용 챔버는 steel을 재료로 하여 전체는 250mm×250mm×250mm의 크기를 가지고 있다. 또한, 350℃의 온도와 약 2MPa의 분위기 온도를 유지할 수 있도록 고안되었고 100mm의 직경으로 4방향의 개구부가 존재하여 챔버 내부에 분무공간이 조성된다. 2방향으로는 Laser Sheet Beam이 통과하고, 1방향으로는 형광 이미지를 취득할 수 있도록 4방향의 개구부 중 3방향에 투시창을 설치하였다. KrF 엑시머 레이저, ICCD camera 그리고 고압 연료 인젝터 사이의 작동 지연을 고려하여 각 장치를 동기시켜 주기 위해 program이 가능한 pulse generator를 이용하였으며, 특히 ICCD camera는 전용 controller를 이용하여 정밀히 제어하였다.

연료 분사 장치는 고압 스월 인젝터 및 인젝터 구동 회로와 고압 연료를 공급해 주는 고압 연료 탱크로 구성되어 있다.

GDI 엔진과 같은 회박 연소용 엔진에는 작은 액적들로 넓은 분무각을 형성하는 고압 스월 인젝터가 주로 사용된다. 본 실험에 사용된 인젝터는 ZEXEL사에서 제조한 GDI 엔진용 제품을 사용하였으며 5MPa의 분사 압력으로 연료 분사 시 분무각  $\theta$ 는  $60^\circ \pm 5^\circ$ 이다. 5MPa의 압력을 견디면서도 동시에 연료 공급 탱크와 인젝터를 연결해 주기 위해 인젝터용 adaptor를 별도 제작하여 실험용 챔버에 고정하였다.

챔버 내의 고온 분위기 조성을 위해 2.5kW의

heater를 설치하였으며 온도를 일정 범위로 유지하기 위해 챔버 내부의 온도에 따라 전원의 공급과 차단을 반복하는 온도 감응형 relay를 이용하여 설정한 온도의  $\pm 10^\circ\text{C}$ 정도로 일정하게 온도를 유지하였다.

Table 1에 본 실험의 각 조건들을 나타내었다. 본 실험에 있어 고온 고압의 실린더 내부에서의 공기/연료 혼합기 형성 과정이나 분무에서의 증발 과정 및 기상과 액상의 분포를 분석하기 위해서 실험용 챔버 내의 분위기 압력 및 온도를 GDI 엔진에서의 실린더의 조건에 근사하게 설정하는데 역점을 두었다.

exciplex의 형성을 위해 기준연료로는 가솔린의 주성분인 iso-octane을 사용하였고 첨가제는 플루오르벤젠과 TEA(triethylamine)을 사용하였다.

분위기 기체로는 연료와 반응하지 않으며, 형광 강도에 영향을 주지 않는 질소 기체를 사용하였으며, 온도는 엔진 실린더 내부의 조건을 고려하여  $150^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  그리고 다양한 비교를 위해 상온에서도 실험을 실시하였으며 분위기 압력은 대기압과, 엔진 실린더 내에서 압축 말기에 해당하는 분위기 압력인 1MPa에서 기상과 액상의 형광 이미지를 취득하였다. 연료의 분사 압력은 GDI 엔진의 분사압에 해당하는 5MPa로 설정하였으며 분사시간  $t_{inj}$ 은 3ms이다.

잔류 가스의 영향을 완전히 배제하기 위해 매 분무 실험 후, 분무실 내부의 가스를 진공 펌프로 완전히 뽑아낸 후 질소 가스를 채우고 실험을 반복해서 진행하였다.

형광 화상의 취득은 크게 나누어 앞서 언급한 각 조건들에 대하여 연료 분무의 성장 과정, 분무 성장 후의 기상과 액상의 분포에 역점을 두었다.

연료 분무의 성장 과정은 상온, 대기압 하에서 5MPa의 분사 압력으로 분사했을 경우에 대해 기상과 액상을 분리하여 형광 화상을 취득함으로써 동 조건에서 분무의 성장 과정에 따른 기상과 액상의 분포를 살펴보았다.

분무 성장 후의 형광 화상은 상온에서 대기압과 1MPa의 분위기 압력에 대해 5MPa의 압력으로 분사했을 경우의 결과를 취득하였으며, 분

Table 1 Experimental conditions

Ambient temp. $T_{amb}$	Room temp., 150, 300 $^\circ\text{C}$
Ambient Press.	Atmospheric, 1MPa
$P_{inj}$	5MPa
$T_{inj}$	3ms
Ambient gas	$\text{N}_2$ gas

위기 온도  $150^\circ\text{C}$ (423K)와  $300^\circ\text{C}$ (573K)에 대해서도 동일한 실험을 실시하여 비교, 분석하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 분무의 성장

Fig. 2는 본 실험에서 구하여진 분사 후의 단계별 형광 이미지 결과이다. 상온에서 대기압과 같은 압력의 질소로 채워진 챔버 내에 5MPa의 분사 압력으로 분사된 연료의 기상과 액상의 형광 이미지를 각각 나타내고 있다. 기초 실험에 의거하여 동 조건으로 분사했을 경우 분사 초기에는 경과시간에 따른 분무 형상의 성장 및 변화가 심하게 나타났으나 1.0ms 이후부터는 완전히 성장된 원추형의 분무형상을 유지하여 분사 종료까지 원추형을 유지하였다. 이에 의해 세로방향으로 배열된 각 형광 이미지는 분무형상의 성장 단계에 따라 관찰하기 위해 분사 후 경과시간에 따라 0.2ms 또는 0.4ms의 간격으로 나열하였다.

스웰 인젝터의 니들이 열리는 순간 고압으로 밀폐되어 있던 연료가 분출하기 시작하여 인젝터의 분무 중심 부분으로 연료가 분사되기 시작한다. 다음 단계로서 중심부분으로 분사되는 연료는 서서히 감소하고 원추 모양의 분무형상이 성장하기 시작한다. 이 즈음에서 시작된 원추형상이 점진적으로 성장하여 스웰 인젝터의 고유 분무형상인 원추형 분무를 선도하게 된다. 이는 연료가 분사되는 시점인 니들이 열리기 시작할 때 분사되기 시작한 유체의 유동 속도가 느리기 때문에 액체의 운동 에너지가 작아서 액적을 무화 시키기에 충분한 에너지를 갖지 못하게 되기 때문이다. 그 이후 분사가 계속되면 유체의 속도는 급속히 증가하여 액적

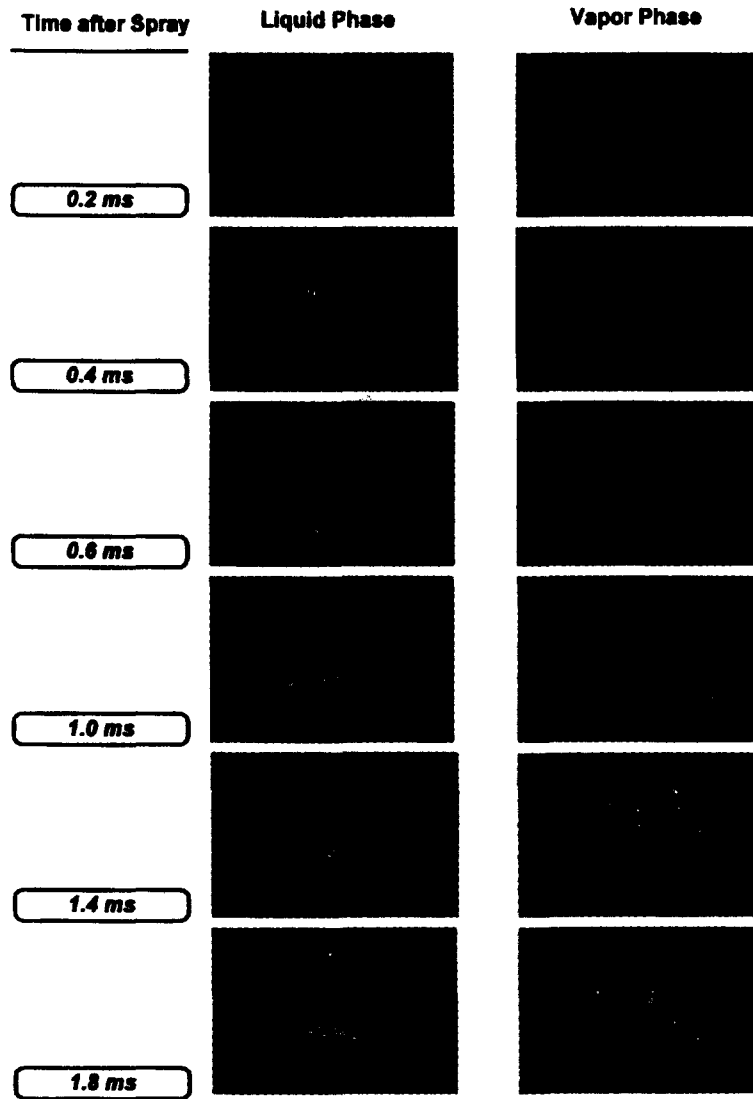


Fig. 2 Process of spray growth (room temp.,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : \text{atmospheric pressure}$ )

의 모멘텀이 커지므로 액적 무화에 필요한 에너지를 충분히 공급하게 되므로 분사된 연료는 더욱더 미세하게 분열하여 완전한 분무 형태를 갖추게 된다.

이러한 분무의 원론적인 고찰에서 더 나아가 연료의 기·액상 생성 및 거동의 과정을 가시화 한 결과를 Fig. 2를 통해 보여 주고 있다.

Fig. 2에서 살펴보면 좌측에 나열된 액상의 분무 성장과정은 고압 스웰 인젝터의 고유의 분무 형상에 가깝게 나타나고 있다. 이는 상온에서 분무된 연료의 액상 형광 이미지는 분무

그 자체의 형태와 대부분 일치함을 보여 주고 있다. 이에 반해 우측에 나열되어 있는 기상의 형광 이미지의 경우 분사 후 0.6ms가 되어서야 분무의 형태가 나타나기 시작한다. 이는 상온에서의 연료 분무에서는 대부분 액상의 형태로 존재함을 나타내어 주고 있다. 또한 우측의 기상 이미지를 살펴보면 원추형의 이미지에서 우측 부분이 강하게 나타나는 경향이 있는데 이는 불 균일한 기상의 분포 결과이기 보다는 그림상의 우측 방향에서 레이저 빔이 조사됨에 따라 우측에서 좌측으로 투과하면서

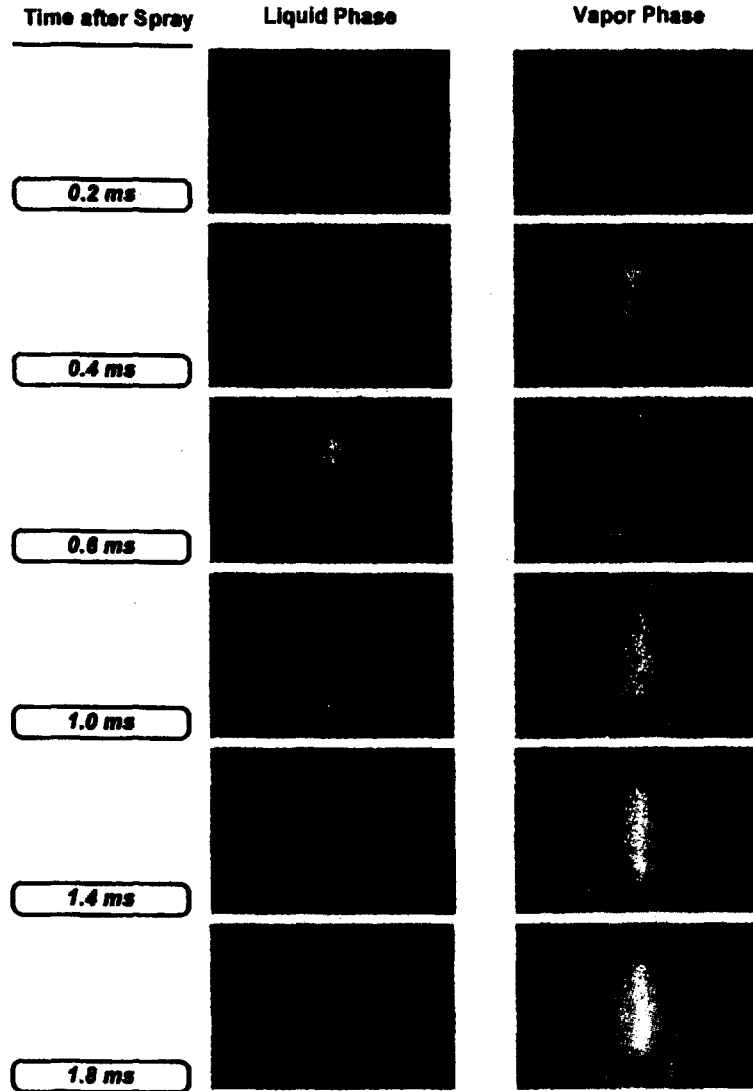


Fig. 3 Process of spray growth (300°C,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : \text{atmospheric pressure}$ )

여기 에너지 흡수에 의한 형광 불균일의 결과인 것으로 사료된다. 물론, 에너지의 흡수는 당연한 결과이지만 좌측열의 강한 액상 형광 이미지에서는 이러한 경향을 전혀 찾아 볼 수 없는 것으로 미루어 기상의 형광 신호가 상대적으로 약하기 때문에 이러한 결과로 나타나는 것이라 할 수 있다.

Fig. 3에는 300°C의 고온에서 대기압과 같은 압력의 질소로 채워진 챔버 내에 5MPa의 분사 압력으로 분사된 연료의 기상과 액상의 형광 이미지를 각각 분사 후 시간에 따른 단계별로

나타내고 있다. 상온에서 행하여진 Fig. 2와는 완전히 상이한 결과를 보여주고 있다. 분사 후 0.2ms인 분무 초기에는 기상의 형광 신호가 미약하게 나타났으나 분무가 진행될수록 급격한 기상 분포의 증가를 보여주고 있다. 이와는 반대로 액상의 경우 분사 후 0.6ms까지는 다소 증가하는 추세를 보이다가 그 이후부터는 급격히 감소함을 알 수 있다. 분사 초기에는 연료가 액적이라기 보다는 연료 덩어리에 가까운 형태로 분출되므로 비록 고온의 분위기이지만 연료가 즉시 증발하기는 어려운 상태이고, 그

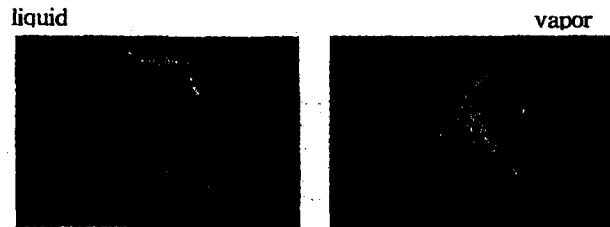


Fig. 4 Fluorescence image of spray (room temp.,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : \text{atmospheric pressure}$ )

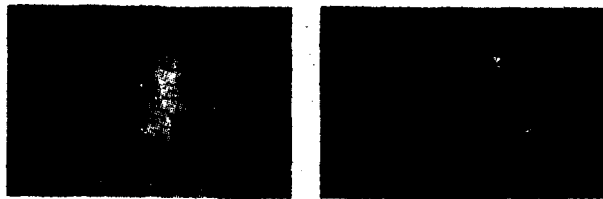


Fig. 5 Fluorescence image of spray (room temp.,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : 1\text{MPa}$ )



Fig. 6 Fluorescence image of spray ( $150^\circ\text{C}$ ,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : \text{atmospheric pressure}$ )

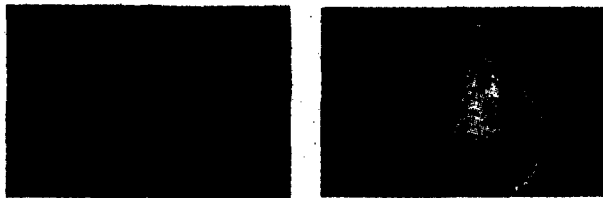


Fig. 7 Fluorescence image of spray ( $150^\circ\text{C}$ ,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : 1\text{MPa}$ )



Fig. 8 Fluorescence image of spray ( $300^\circ\text{C}$ ,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : \text{atmospheric pressure}$ )



Fig. 9 Fluorescence image of spray ( $300^\circ\text{C}$ ,  $P_{inj} : 5\text{MPa}$ ,  $P_{amb} : 1\text{MPa}$ )

후 분무의 본격적인 진행과 함께 미세하게 분  
열된 연료 액적들이 고온의 분위기에서 급격히  
증발하는 것으로 생각된다. 이에 따라 기상의  
형광 신호는 시간의 경과에 따라 점점 증가하

는 것을 잘 보여주고 있다.

액상은 분사 초기에 약간 증가하는 경향을 보이다가 고온의 분위기에 의해 증발하여 연료 액적들이 기상으로 전환하므로 그 만큼 액상의 형광 세기는 줄어들고 기상의 형광이 증가하는 결과를 보여주고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3을 비교해 볼 때, 분위기 압력에는 변화가 없으나 단지 분위기 온도의 상승에 따라 액상의 원추형 분무 형태는 그 모양을 잃어간다. 여기서 액상의 분무 형상이 모양을 잃어간다고 해서 그것이 원칙적인 분무의 형상이 달라진 것이 아니라는 점을 한번 더 유의해야 한다. 단지 분무된 연료의 액상의 분포 위치가 변경되거나 기상으로의 전환으로 인하여 액상의 분포 위치 및 경향이 바뀌는 것이다.

연료 분사 압력과 분위기 압력은 일정하므로 압력의 영향에 의해 분무 형상이 방해를 받는 것은 아니라는 관점에서 볼 때 이 결과는 고온의 분위기 온도에서의 분무 외곽 즉, 표면선단 부근의 연료가 증발하여 기상으로 전환되는 것이라 사료된다.

### 3.2 연료의 기/액상 농도 분포

앞 절에서는 기본적인 분무 과정을 알아보았고, 5MPa의 분사 압력, 대기압의 분위기 압력에서 분위기 온도를 상온 및 300°C로 변화시키면서, 각 분무 과정에 따른 기상과 액상의 분포 경향, 그리고 분위기 온도에 따른 기상과 액상의 분포 경향을 살펴보았다.

본 절에서는 연료 분무가 완전히 성장한 후에 분위기 온도, 분위기 압력을 변수로 적용시키면서 기상과 액상의 분포 특성을 밝혀내었다. 이 때 각 형광 이미지의 취득은 인젝터의 duration을 3ms, 연료 분사 후 2ms인 시점에서 실시하였다.

Fig. 4는 상온에서, 5MPa의 분사 압력 그리고 대기압의 분위기 압력에서의 기상과 액상의 형광 이미지를 보여주고 있다. Fig. 5는 상온, 5MPa의 분사 압력 그리고 1MPa의 분위기 압력에서의 이미지를 각각 나타내고 있다. 상온 대기압

조건에서는 액상의 형광 이미지가 월등하게 강한 것으로 나타났으며 그 형상은 대기압의 분위기 조건에서는 원추형을 보이고 있으나 1MPa의 분위기에서는 분무의 형상이 원추형으로 펼쳐지기 이전 단계의 형상으로 유지되는 것이 관찰되었다. 이는 5MPa의 일정한 분사 압력에 분위기 압력이 1MPa로 올라감에 따라 분사압력과 분위기 압력의 차  $\Delta P$ 가 감소함으로써 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 3과 동일 조건에 분위기 온도만 150°C로 상승한 경우의 형광 이미지 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 상온에서는 상대적으로 강하게 나타났던 액상의 형광이 현격히 감소하고 기상의 형광 신호가 분무 형상 전체에 걸쳐 증가한 것을 알 수 있다. 액상의 경우 원추형의 분무 주류를 따라 강하게 나타나 역V자 형태의 분포를 보였다. 이는 원추형의 분무 주류를 따라 많은 양의 연료가 존재하고 있어서 이 두꺼운 연료층의 중심부에는 여전히 많은 양의 액상 연료가 존재하고 있음을 나타낸다.

Fig. 8은 동일한 조건에서 분위기 온도가 300°C일 때의 형광 이미지를 나타내고 있다. 여전히 미약하게나마 원추형의 형태가 액상의 형광 이미지에는 남아 있으나 상온, 150°C의 경우와 관련지어 고찰했을 때, 온도 상승에 따라 점차적으로 액상의 형광이 약해지는 것을 알 수 있다. 반대로 기상의 경우 온도 상승에 따라 급격한 형광 신호의 증가가 있음을 확인할 수 있다.

온도가 증가함에 따라 분무의 형상도 선명한 원추형에서 점점 그 형태를 잃어 가는 것을 알 수 있다.

분위기 압력이 1MPa인 경우 온도에 따른 기상과 액상의 분포 특성은 Fig. 5, Fig. 7, Fig. 9에 연속적으로 잘 나타나 있다. 먼저 분위기 압력이 1MPa로 유지될 경우, 대기압의 분위기에 비해 완전한 원추형의 분무 형태를 띠지는 못하고 있다. 그러나 온도의 상승에 따라 액상의 분포는 점점 감소하고 기상의 분포는 점점 그 분포 영역 및 분포량이 많아지는 결과를 보이고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 7 그리고 Fig. 8과 Fig. 9의 비교는 동일한 조건에서 분위기 압력의 상승에 따른 기상과 액상의 연료 분포를 상대적으로 잘 비교해 주고 있다. 분위기 압력의 증가에 따라 분무 형상의 변화가 두드러지게 나타나고 있다. 분위기 압력의 증가로 인해 원추형으로 존재하던 액상의 분포가 분무 축을 중심으로 원추형 내부로 이동하여 중심 부분에서 강한 분포를 보이고 있으며, 오히려 기상의 분포가 외부로 성장하려는 경향이 두드러지게 나타나고 있다. 이는 온도의 상승에 따라 점점 위축되던 액상의 분포가 분위기 압력의 증가로 분무 형상도 내부로 위축되는 결과가 중첩되어 나타난다고 사료된다. 즉, 온도의 상승과 함께 분위기 압력의 증가도 액상의 분포를 위축시키는 인자로 작용하는 것이라고 사료된다.

#### 4. 결론

직접 분사식 연료 분무에서의 기상과 액상의 농도 분포를 조사하기 위해, 가솔린을 대체하는 연료로 iso-octane을 선정하고 플루오르벤젠(fluorebenzene)과 TEA(triethylamine)를 첨가하여 exciplex 기법을 적용함으로써 GDI 엔진의 실린더 내부를 모사하기 위한 주요 인자인 실린더 내의 분위기 압력과 분위기를 온도 변화시키면서 분포 특성을 정성적으로 분석하였으며 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1. iso-octane과 플루오르벤젠(fluorebenzene), TEA(triethylamine)혼합물을 연료로 하고, KrF 엑시머 레이저를 여기 광원으로 이용하여 exciplex 기법을 적용하고 기상과 액상의 분리 투과를 위한 적절한 bandpass filter를 이용함으로써 가솔린을 모사하여 연료의 기·액상 분포를 가시화 하여 분석할 수 있었다.
2. 상온 대기압 조건에서 5MPa의 분사 압력으로 분사된 연료의 액상 분포는 분무의 형태와 거의 일치하는 형태로 강하게 분포하였으나,

기상의 경우는 거의 분포하지 않았다.

3. 300℃ 대기압 조건에서 5MPa의 분사 압력으로 분사된 연료의 액상 분포는 상온의 경우와 대조적으로 분무 후, 0.6ms를 정점으로 하여 점점 감소하여 분무 말기로 가면서 거의 없어지는 반면, 기상의 경우는 분무 초기부터 급격히 증가하여 분무 말기에서도 넓은 범위에 걸쳐 많은 양이 존재하였다.
4. 분위기 온도가 분무 내에서의 기상과 액상의 분포에 영향을 미치는 주요 인자로 작용하여, 온도가 증가할수록 액상의 분포 영역 및 상대적 농도는 감소하고, 기상의 분포 영역 및 상대적 농도는 급격히 증가함을 알 수 있다.
5. 분위기 압력은 연료의 기상과 액상의 분포 특성에 직접적인 영향을 끼치지 못했으며 압력의 증가에 따라서 분무 형상을 위축시킴으로써 기상과 액상의 전체적인 분포를 분무 중심으로 이동시키는 결과를 보였다.

#### 참고문헌

- (1) M. Ohsuga, J. Yamaguchi, R. Kawabe, M. Momono, "In-Cylinder Air-Fuel Ratio and Combustion Control for Spark Ignition Engine", SAE Paper 950076, 1995.
- (2) J. Gaultieri, C. A. Sawyer, "Toyota, Mitsubishi DI Gas Engine Debut", Automotive Industries, pp. 30, Aug. 1995.
- (3) 채제우, 이상만, 조민수, 노정용, 정영식 "성충급기 직접분사식 가솔린 기관의 개발에 관한 연구(II)" 한국자동차공학회 1997 춘계학술대회 논문집 97380021, 1997.
- (4) 조진호, "내연기관공학", pp.299-304, 학연사, 1999.
- (5) 최병윤, 이도형, "연소공학", pp.35-36, 동명사, 1998.
- (6) J. B. Heywood. "Internal Combustion Engine Fundamentals", pp.37-40,



McGraw Hill International Editions, 1988.

- (7) A. C. Eckreth, "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species", 2nd Ed., Gordon and Breach Publishers, 1996.
- (8) L. A. Melton, "Spectrally Separated Fluorescence Emission for Diesel Fuel Droplets and Vapor", Appl. Opt. 22, 1983.