

엔진 유동장에서 분사시기에 따른 혼합기의 기·액상 농도 분포에 관한 연구

Concentration Distribution of Liquid/Vapor Phases under In-Cylinder Flow Field with Different Injection Timings

김 한 재*, 최 동 석**, 김 덕 줄**
Han-Jea Kim, Dong-Seok Choi, Duck-Jool Kim

ABSTRACT

The present study experimentally investigates the concentration distribution of liquid and vapor phase with different injection timings in the in-cylinder flow field of a optically accessible engine. The conventional MPI, DOHC engine was modified into DI gasoline engine. The images of liquid and vapor phases in the motoring engine were captured by using exciplex fluorescence method. Dopants used in this study were 2% fluorobenzene and 9% DEMA(diethyl-methyl-amine) in 89% solution of hexane by volume respectively. Two dimensional spray fluorescence images of liquid and vapor phases were acquired to analyze spray behaviors and fuel distribution in the in-cylinder flow field. Measurements were carried out for four different injection timings, namely BTDC 270°, 180°, 90°, and 50°. Experimental results indicate that behaviors and distribution of vapor phase were largely affected by in-cylinder tumble flow, and mixture formation process was also greatly affected by in-cylinder flow at early injection mode and by ambient pressure at late injection mode.

주요기술용어 : Spray characteristic(분무특성), Optically accessible engine(가시화엔진), Exciplex fluorescence method(Exciplex 형광법), Fluorescence intensity(형광강도), Injection timing(분사시기)

Nomenclature		Subscripts	
A	: spray area (m ²)	ave	: average
BTDC	: before top dead center	liq	: liquid phase
CA	: crank angle (degree)	vap	: vapor phase
I	: fluorescence intensity	max	: maximum
r	: radial distance (mm)		
t _i	: time after injection start (ms)		
z	: distance from injector tip (mm)		

* 회원, 부산대학교 대학원

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

1. 서론

가솔린 엔진의 고출력 및 고연비화를 위해 최근 연료를 실린더내로 직접 분사하는 DI(direct injection) 가솔린 엔진에 대한 연구가 전세계적으로 이루어지고 있다.

DI 가솔린 엔진의 개발을 위해 정적 분위기 조건뿐만 아니라 실제 엔진 내의 유동조건에서도 연료분무의 거동과 분포를 해석하고 현상을 규명하려는 연구가 여러 가지 실험적 기술을 이용하여 활발히 진행 중에 있다.^{1,2)} 디젤연료를 대상으로 exciplex 형광법을 적용한 분무의 증기·액상 동시 분리 가시화나 농도 분포특성에 관한 연구는 활발하였지만^{3,4)} 가솔린 연료를 대상으로 한 연구는 최근에서야 이루어지고 있으며 다소 미흡한 실정이다.^{5,6)} 특히 엔진 내에서 액상연료의 거동은 많은 연구^{7,8)}가 수행되었지만, 증기상과 액상의 전반적인 거동에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 포트 분사식 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고, 와류형 고압 인젝터를 부착함으로써 중심 분사식 DI 가솔린 엔진으로 개조하였다. 액상과 증기상의 분리가 가능한 exciplex 형광법을 사용하여 분사시기에 따른 분무의 거동 및 혼합기의 공간분포를 파악하기 위하여 액상과 증기상의 가시화, 각 상의 공간분포 및 평균 강도비를 조사하였다. 또한 분사시기에 따른 증기상의 형성과정을 알기 위하여 압축과정에서의 증기상의 거동, 증기상의 공간분포 및 크랭크 각도에 따른 증기상의 농도변화를 구하였다. 이러한 결과를 종합하여 DI 가솔린 엔진의 연소실 설계를 위한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 실린더 내의 분무 유동장을 조사하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 가시화용 엔진, 가시화 엔진

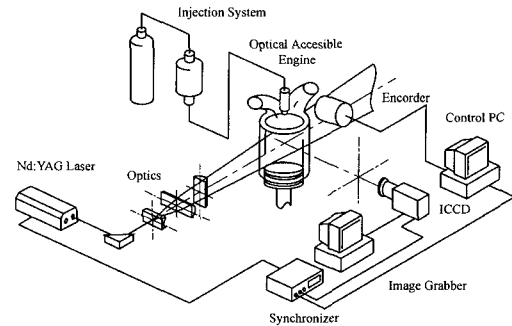


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Engine specifications

Specification	Resources
Cylinder	4
Bore(mm)	86
Stroke(mm)	86
Displacement(cc)	500
Compression ratio	10

구동용 전동장치, 분무유동장의 가시화에 사용되는 광학계, 신호처리계 그리고 GDI 분사계로 구성되어 있다.

가시화용 엔진은 선행연구⁹⁾에서 제작된 엔진을 사용하였다. Table 1은 가시화용 엔진의 사양을 나타낸다. 분사계는 와류형 고압 인젝터, 연료탱크 및 가압용 질소탱크로 구성되어 있다. 분무의 가시화용 광학계는 분무의 형광신호를 받기 위하여 레이저 광원(266nm)에서 나온 빛을 원통형 렌즈와 구형렌즈를 사용하여 평면광을 만들어 연소실 내로 조사하도록 구성하였다. 형광화상은 평면광과 수직하게 ICCD 카메라를 설치하여 취득하였다. 신호 처리계는 자체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로, 분사시기를 광원과 카메라에 동기시키기 위한 인터페이스 보드, 화상취득용 이미지그래버, ICCD카메라 셔터제어기와 펄스발생기, 엔코더로 구성되어 있다. 화상취득장치는 엔코더에서 발생하는 신호와 분사시기를 동기시키기 위하여 엔진의 캠축에 설치된 엔코더의 A 펄스와 Z 펄스를 기준

신호로 사용하였다. 또한 카운터로서 인텔 8253 칩(Timer/Counter chip)이 내장된 인터페이스 보드를 사용하였으며, 카운팅을 위하여 C 언어로 프로그래밍하여 원하는 크랭크 각도에서 분무 화상을 취득하도록 하였다.

2.2 실험방법

Table 2는 본 실험의 조건을 나타낸 것이다. 분위기 기체는 불활성 기체인 질소를 사용하여 화염의 발생을 없애고, 산소에 의한 형광의 소광현상을 제거하였다. 실제 엔진의 운전조건과 유사하게 하기 위해 분위기 기체를 가열하여 온도를 약 100°C로 유지하였다. 분사압력은 최근의 직분식 가솔린 엔진용 인젝터의 분사압력에 근접하는 5.1MPa로 고정하였다. 엔진 속도는 450rpm으로 유지하였으며 분사시기는 BTDC 270°, 180°, 90°, 50°로 하였다.

엔진 내 연료분무의 거동 및 기·액상 분포특성을 분석하기 위하여 exciplex 형광법을 사용하여 분사시기에 따른 분무의 증기상과 액상의 화상을 취득하였다. 기준연료와 첨가제는 선행 연구¹⁰⁾와 같이 헥산에 플로오로벤젠과 DEMA를 첨가하였다.

Table 2 Experimental conditions

Ambient gas	Nitrogen
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Engine speed (rpm)	450
Injection timing (CA)	BTDC 270°, 180°, 90°, 50°

실린더내 가시영역은 인젝터 팁으로부터 축 아래 방향으로 13mm~68mm, 반경방향으로는 실린더 중심축으로부터 좌우로 40mm이다. 배기밸브와 흡기밸브가 위치는 각각 화상의 좌상측과 우상측이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시간의 경과에 따른 분무의 액상과 증기상의 거동

3.1.1 액상과 증기상의 가시화

Fig. 2와 Fig. 3은 exciplex 형광법으로 취득한 액상과 증기상의 형광화상을 분사시기에 따라 컨투어로 나타낸 것이다. 각 화상은 5회 촬영한 화상 중 대표화상을 나타내었다. (a), (b), (c), (d)는 각각 분사시기가 BTDC 270°, 180°, 90°,

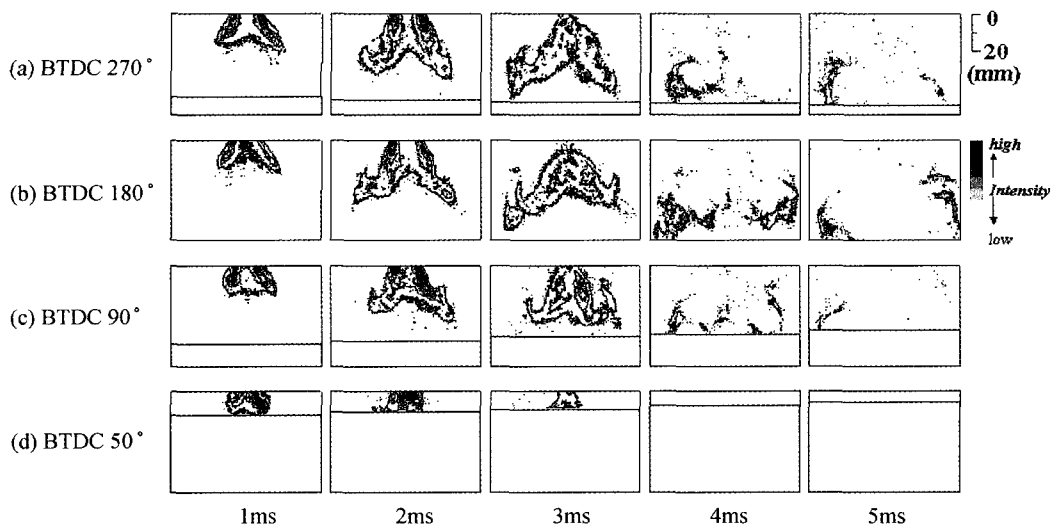


Fig. 2 Temporal evolution of liquid distribution for four different SOI

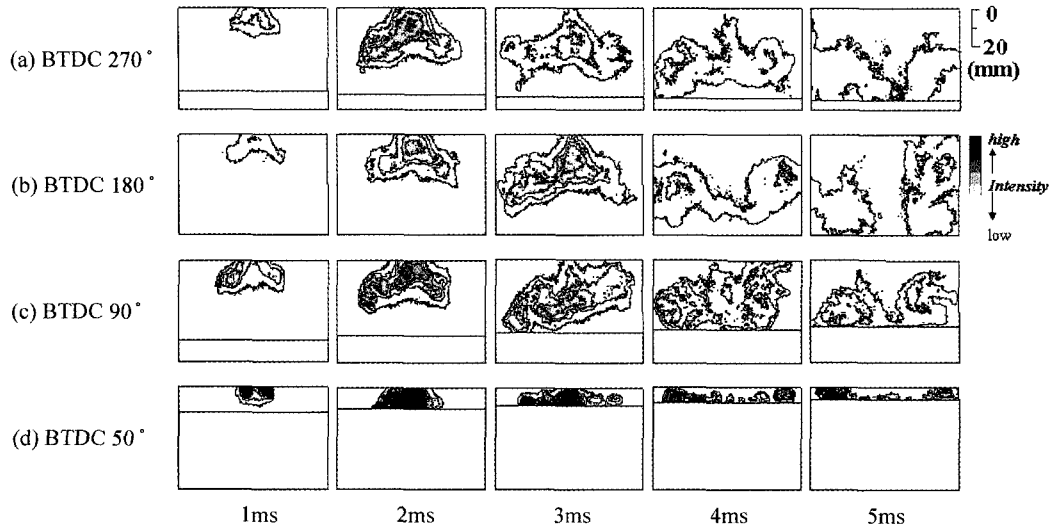


Fig. 3 Temporal evolution of vapor-phase distribution for four different SOI

50°인 경우이다. (a)와 (b)는 조기 분사모드이며, (c)와 (d)는 후기 분사모드이다.

Fig. 2는 액상의 분포를 나타낸 것이다. (a)와 (b)의 조기분사의 경우, 분사기간 중 분무패턴이 흡기 유동에 영향을 크게 받지 않으나, 분사종료 후는 영향을 받아 실린더내에 불 균일하게 분포되어 있다. (c)와 (d)의 후기분사의 경우, 분사기간 중에는 조기분사와 마찬가지로 흡기 유동(팁블)에 영향을 크게 받지 않으나 분위기 압력에 영향을 받아 분무가 조밀해 진다. 분사종료 후에는 조기분사의 경우보다 액상이 빨리 소멸된다.

Fig. 3은 증기상의 분포를 나타낸 것이다. (a)와 (b)의 조기분사의 경우, 증기상은 액상과 같이 분사기간 중에는 흡기 유동에 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 분사종료 후에는 흡기 유동에 영향을 받아 좌우로 갈라져 분포하고 있다. (c)와 (d)의 후기분사의 경우, 분사기간 중에는 분위기 압력에 보다 큰 영향을 받아 증기상의 밀도가 높아진다. 분사종료 후에는 분위기 압력에 의해 분포가 조밀해 지고, 특히 (d)의 경우는 분무가 피스톤에 충돌된 후 증기상이 좌우로 갈라져 분포된다. 또한 Fig. 2(d)와 비교하면 액상은 빨리 소멸되고 증기상의 형광

강도는 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 압축과정 말기로 갈수록 분위기 온도와 압력이 증가하기 때문에 흡기 유동보다는 분위기 온도와 압력에 의한 영향이 크기 때문이다.

3.1.2 액상과 증기상의 상대강도

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 조기분사와 후기분사에 대한 가시영역의 상부로부터 분무 하류방향(z)으로 10mm와 30mm인 지점에서 형광강도의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 증축은 액상과 증기상의 화상에서 각각 최대 형광강도(I_{max})를 구하고 각 화상의 형광강도(I)를 최대 형광강도로 나누어 무차원화(I/I_{max})하였다. 양의 반경방향이 흡기쪽이며, 음의 반경방향은 배기쪽이다.

Fig. 4는 조기분사인 BTDC 270°에서 분사한 경우이다. 분사기간 내에서는 액상인 (a)의 경우, $z=10\text{mm}$ 와 $z=30\text{mm}$ 모두 증공 원추형의 분포를 나타내다가 분사종료 후에는 확산, 증발되어 소멸되는 것을 볼 수 있다. 증기상인 (b)의 경우, $z=10\text{mm}$ 에서 분사기간 직후(3ms)까지 $r=0$ 부근에서 형광강도의 피크를 가지며, 분사종료 후는 다소 배기쪽으로 치우쳐 있음을 볼 수 있다. 반면 $z=30\text{mm}$ 에서는 분사기간 직후까지

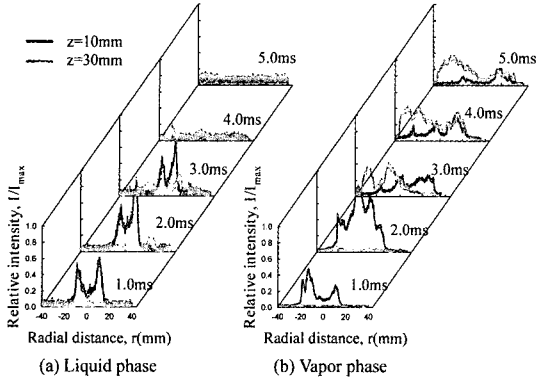


Fig. 4 Profile of fluorescence intensity with radial direction at the injection timing of BTDC 270°

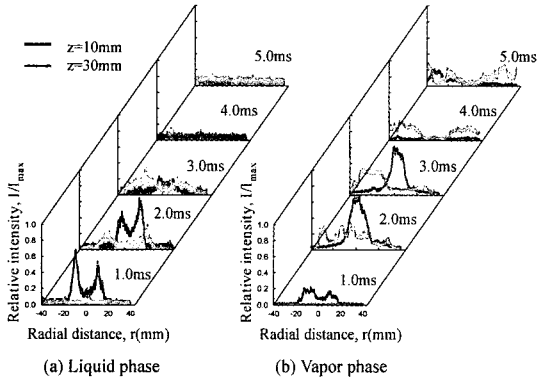


Fig. 5 Profile of fluorescence intensity with radial direction at the injection timing of BTDC 90°

는 배기쪽으로 치우쳐 있는 분포를 나타내다가 분사종료 후에는 배기쪽과 흡기쪽으로 양분되는 분포를 나타내었다. 이것은 흡입과정에서 분사가 되는 조기분사의 경우, 분무가 가진 운동량이 분사기간 중에는 흡기 유동에 크게 영향을 받지 않으나 분사종료 후에는 미립화된 액적과 증기상이 흡기 유동에 영향을 받기 때문이다.

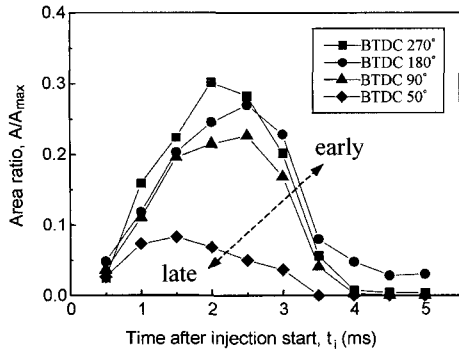
Fig. 5는 후기분사인 BTDC 90°에서 분사한 경우이다. 액상인 (a)의 경우, $z=10\text{mm}$ 에서 Fig. 4(a)와 유사한 경향을 나타내고 있으나, $z=30\text{mm}$ 에서는 분위기 압력의 상승으로 인하여 분무가 수축되어 분사종료 후인 3ms에서 약간의 피크를 나타낼 뿐이다. 증기상인 (b)의 경우, $z=10\text{mm}$

에서 분사기간 내에서는 $r=0$ 부근에서 증기상의 형광강도가 높으나, 분사종료 후에는 다소 흡기쪽으로 치우쳐져 있다. 그러나 $z=30\text{mm}$ 에서는 분사종료 후에 배기쪽으로 치우친 분포를 하고 있다. 이것은 압축과정으로 진행되면서 흡기 유동이 소산되는 과정에서 생성된 작은 와류유동에 의한 영향으로 생각된다.

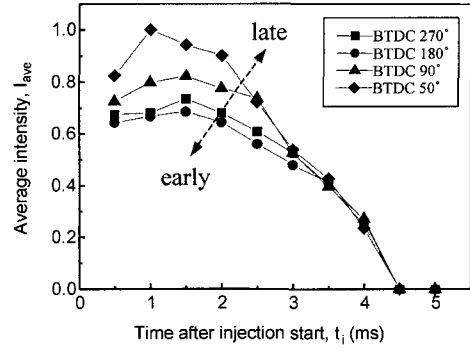
3.1.3 액상과 증기상의 공간분포 및 평균강도비

Fig. 6과 Fig. 7은 분사시기에 따른 분무의 공간분포 비(A/A_{max})와 평균강도(I_{ave})를 분사시작 후 시간에 따라 각각 나타낸 것이다. 공간분포 비는 취득한 분무화상을 화상 처리하여 각 화상의 분무면적(A)을 구한 다음, 최대 분무면적(A_{max})으로 나누어 무차원화 하였다. 화상 처리는 취득한 원시데이터에서 측정영역에서 강도값을 추출해 낸 다음 임계 강도값을 기준으로 C++ 프로그래밍 언어로 만든 프로그램을 사용하여 임계 강도값 이상의 화소를 계산하는 방법을 사용하였다. 평균강도는 각 화소에 대응하는 강도값을 모두 더한 후 분무면적으로 나누어 구하였다. Exciplex 형광법에 의해 취득하는 형광강도는 그 크기가 연료의 농도에 비례한다. 따라서 평균강도는 분무 내 연료의 밀도를 대표하는 값으로 볼 수 있다.

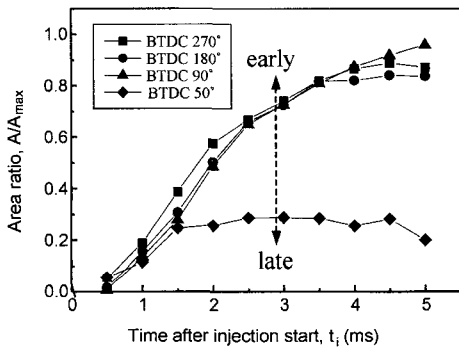
Fig. 6(a)와 (b)에서 액상보다 증기상이 넓은 면적비를 나타내고 있다. 액상은 시간이 경과함에 따라 면적비가 증가하다가 분사 후 1.5~2.5ms에서 최대값을 가진 후 다시 감소하여 소멸한다. 한편 증기상의 경우 면적비가 점차적으로 증가하는데 각 분사시기에 대해 액상의 면적비가 최대값을 가지는 시점을 기준으로 그 이후에는 면적비의 증가가 다소 둔화됨을 알 수 있다. 이것은 증기상의 면적분포가 분사가 진행되는 동안에는 액상의 면적분포에 많은 영향을 받지만 분사종료 이후에는 분위기 기체의 유동 및 분위기 압력에 영향을 받기 때문으로 생각된다. 분사시기가 BTDC 270°, 180°, 90°인 경우는 액상과 증기상 모두 비슷한 경향을 나



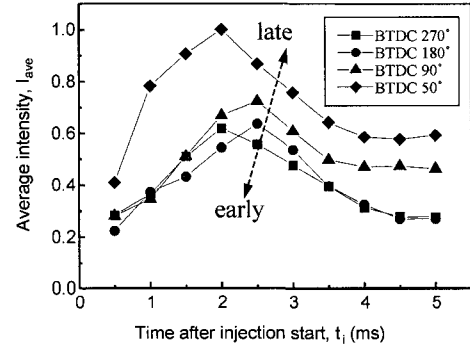
(a) Liquid phase



(a) Liquid phase



(b) Vapor phase



(b) Vapor phase

Fig. 6 Temporal variation of spray area ratio for different injection timings

Fig. 7 Temporal variation of spray averaged intensity for different injection timings

타내는데 반해 BTDC 50°에서 분사를 시작한 경우에는 면적비가 액상과 증기상 모두 다른 조건들에 비해 상당히 작은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 특히 액상의 경우에는 다른 조건들에 비해 빨리 소멸되며, 증기상의 경우에는 분사 후 1.5ms 이후로 거의 일정하여 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 압축과정 후반부로 갈수록 분위기 온도와 압력이 증가하여 액상과 증기상이 좁은 면적분포를 가지며, 그 결과 증기상은 분위기 기체와의 상호작용이 활발하지 못하기 때문으로 생각된다.

Fig. 7(a)와 (b)는 평균강도를 액상과 증기상에 대하여 분사 후 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 액상의 경우, 시간이 경과함에 따라 평균 형광강도가 감소한다. 이것은 분사가 진행되면서 분무가 넓은 분포를 가지며 액적들이

점차적으로 미립화 되기 때문으로 생각된다. 그러나 증기상의 경우에는 시간이 경과함에 따라 증가하다가 최대값을 나타내고 다시 점차적으로 감소한다. BTDC 90°와 BTDC 50°에서 분사한 경우에는 분사 후 3.5ms 이후 일정한 값을 나타낸다. 조기분사모드(BTDC 270°, 180°)의 경우에는 액상과 증기상 모두 비슷한 값을 나타내지만 후기분사모드(BTDC 90°, 50°)에서는 분사시기가 늦어질수록 평균 형광강도가 증가함을 알 수 있다. 특히 BTDC 50°에서 분사한 경우, 증기상의 평균 형광강도가 다른 조건들에 비해 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 압축말기에서는 높은 분위기 압력에 의해 분무는 협소한 면적분포를 가지게 되고 그로 인해 분위기 기체와의 혼합이 원활하지 못하기 때문으로 생각된다.

3.2 분사종료 후의 증기상의 거동

Fig. 8(a), (b), (c), (d)는 각각 분사시기의 변화에 대해 분무의 증기상의 거동을 분사개시부터 압축행정 말기까지 크랭크 각도로 나타낸 것이다. 1°의 크랭크 각도에 해당하는 시간은 약 0.37ms에 해당한다. (a)는 BTDC 270°에서 분사한 경우로서, 분사종료 후 증기상은 큰 와를 형성하며 실린더로 흡입되는 공기의 유동에 의해 분사초기인 크랭크각이 BTDC 250°, 210°에서는 배기 쪽으로 물리는 것을 알 수 있다. 증기상의 흡기쪽 영역은 계속하여 실린더 벽면을 따라 실린더 상부로 이동하는 것을 알 수 있었으며 크랭크각이 BTDC 90°에서 거의 균일해지며 압축과정이 진행됨에 따라 형광강도가 높아지는 것을 알 수 있다. 시간이 차츰 경과한 BTDC 90°이후부터 BTDC 40°까지 균일한 분포를 유지하는 것을 알 수 있다. (b)는 BTDC 180°에서 분사한 경우로서 (a)의 경우와는 달리 분사종료 후 크랭크각이 BTDC 165°에서 보듯이 증기상이 양쪽으로 갈라지다가 BTDC 150°에서 흡기쪽으로 물리는 것을 볼 수 있다. 증기상은

BTDC 90° 이후로 거의 균일해지는 것을 볼 수 있다. (c)는 BTDC 90°분사한 경우로서, 크랭크각이 BTDC 85°에서 분무가 왼쪽으로 기울어져 피스톤에 충돌하여 양쪽으로 나뉘어졌다가 피스톤이 상승함에 따라 흡기쪽으로 물리는 것을 알 수 있다. 그리고, 점차적으로 흡기쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그러나 크랭크각이 BTDC 40°까지는 균일한 분포를 나타내지 못하고 있음을 알 수 있다. (d)는 BTDC 50° 분사한 경우로서 증기상의 분포가 다른 조건들에 비해 협소해지는 것을 알 수 있고, 분무가 피스톤에 충돌하고 난 후에도 실린더 상부로 이동하지 않고 피스톤 면을 따라 실린더 벽면으로 이동하며 넓고 균일한 분포를 나타내지는 못함을 알 수 있다. 그리고 앞선 세 조건들과는 달리 형광강도가 매우 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 (a), (b), (c)는 분사시기를 각각 BTDC 270°, 180°, 90°로 하였을 때 인젝터 팁으로부터 분무 하류방향으로 7mm 떨어진 지점에서 반경 방향에 대한 형광강도의 분포를 무차원화하여 압축행정말기인 크랭크각 BTDC 70°에서 BTDC

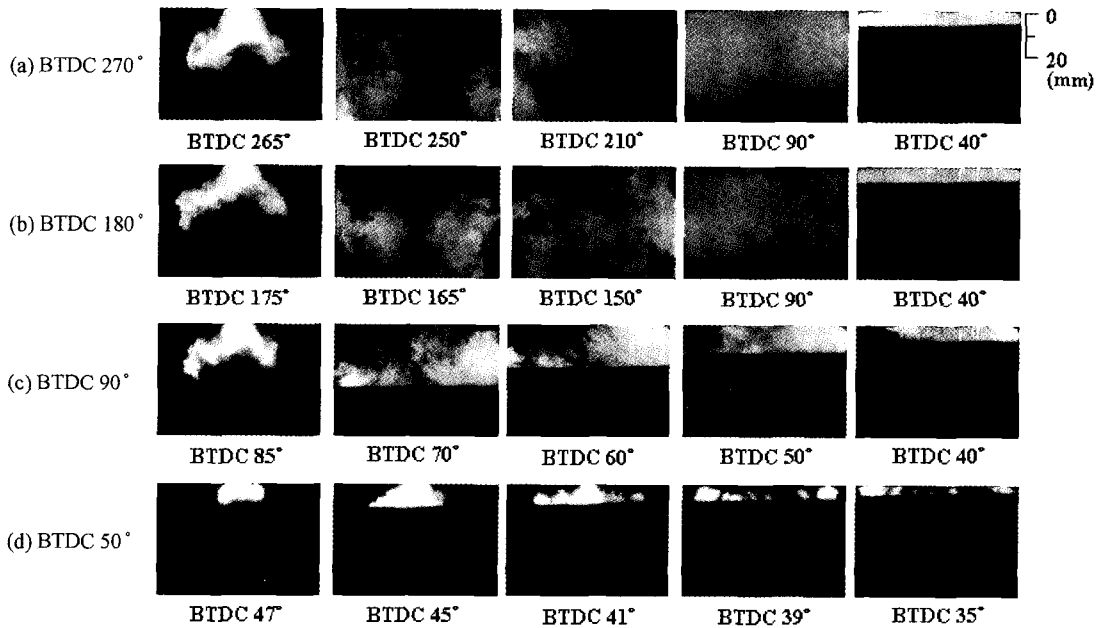


Fig. 8 Spatial distribution of fuel vapor for different injection timings

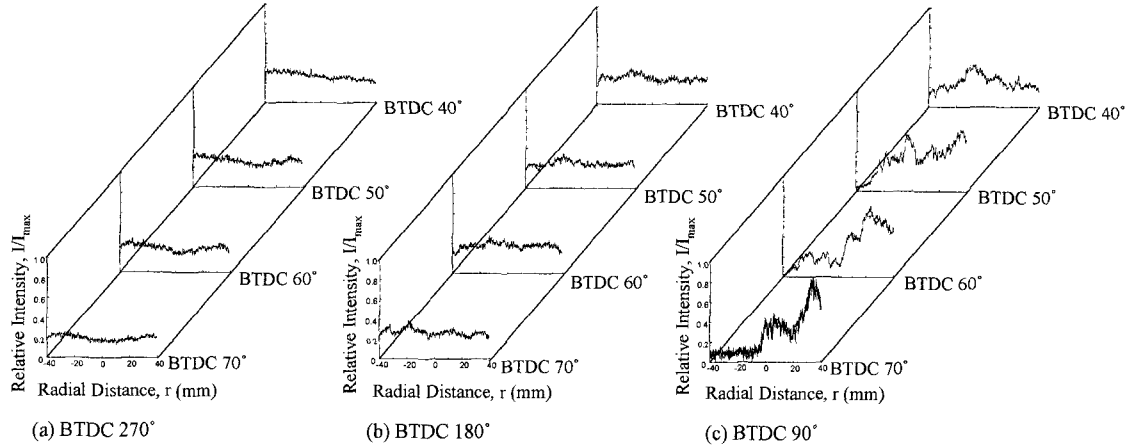


Fig. 9 Radial profiles of vapor-phase relative intensity at compression stroke ($z=7\text{mm}$)

40°까지 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 반경방향에 대해 형광강도비가 균일한 것을 알 수 있으며, 크랭크각이 BTDC 40°까지 균일함이 유지되는 것을 볼 수 있다. 그러나 (c)는 분사시기가 늦어질수록 균일한 분포를 나타내지 못함을 볼 수 있다. (c)의 경우에는 형광강도비가 $r=0\sim 40\text{mm}$ 인 영역, 즉 흡기쪽에 집중되었다가 시간이 흐름에 따라 배기쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 7에서 언급한 바와 같이 증기상의 거동이 텀블유동의 영향을 받고 있다는 것을 뒷받침 해 주고 있다.

4. 결론

Exciplex 형광법을 이용하여 실제 엔진 내 직접분사식 가솔린 인젝터 분무의 거동을 가시화하여 분사시기에 따른 분무의 기·액상 거동특성을 파악하고, 혼합기 형성과정에 대하여 조사한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Exciplex 형광법을 사용하여 유동이 수반되는 실린더 내에서 분무의 액상과 증기상의 거동 조사가 가능하였다.
- 2) 분사시기가 늦을수록 분무의 중심부에 증기상의 농도가 농후해졌으며, 시간이 경과할수록 액상은 소멸하지만 증기상은 넓게 분포하였다.
- 3) 조기분사조건(BTDC 270°)과 후기분사조

건(BTDC 90°) 모두 액상은 거의 대칭적인 구조를 나타내지만, 증기상은 실린더내 유동(텀블)의 영향으로 하류영역($z=37\text{mm}$)이 배기쪽으로 편중되었다.

4) 압축행정말기에서 증기상의 농도는 분사시기가 늦을수록 농후해졌고, 분사시기가 빠를수록 균일해졌다.

참고 문헌

- 1) A. Kakuhou, T. Urushihara, T. Itoh and Y. Takagi, "Characteristics of Mixture Formation in a Direct Injection SI Engine with Optimized In-Cylinder Swirl Air Motion," SAE 1999-01-0505, 1999.
- 2) W. Hentschel, A. Homburg, G. Ohmstede, T. Miler and G. Greefeld, "Investigation of Spray Formation of DI Gasoline Hollow-Cone Injectors Inside a Pressure Chamber and Glass Ring Engine by Multiple Optical Techniques," SAE 1999-01-3660, 1999.
- 3) M. E. A. Bardsley, P. G. Felton and F. V. Bracco, "2-D Visualization of Liquid and Vapor Fuel in an I. C. Engine," SAE 880521, 1988.
- 4) J. Senda, T. Kanda, M. Kobayashi and H. Fujimoto, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method," SAE 970796, 1997.

- 5) A. P. Froba, F. Rabenstein, K.-U. Munch and A. Leipertz, "Mixture of Triethyl amine (TEA) and Benzene as a New Seeding Material for the Quantitative Two-Dimensional Laser-Induced Exciplex Fluorescence Imaging of Vapor and Liquid Fuel Inside SI Engines", *Combustion and Flame*, Vol.112, pp. 199-209, 1998.
- 6) V. Wagner, W. Ipp, M. Wensing and A. Leipertz, "Fuel Distribution and Mixture Formation Inside a Direct Injection SI Engine Investigated by 2D Mie and LIEF Techniques," SAE 1999-01-3659, 1999.
- 7) R. H. Stanglmaier, M. J. Hall and R. D. Matthews, "Fuel-Spray/Charge-Motion Interaction within the Cylinder of a Direct-Injected, 4-Valve, SI Engine," SAE 980155, 1998.
- 8) N. Lee, J. Park and K. Choi, "A Study on Fuel Spray of Spark-Ignited Direct Injection Engine Using Laser Image Technology," *KSME International Journal*, Vol.13, No.3, pp.286-293, 1999.
- 9) 김한재, 류경훈, 최동석, 차건중, 김덕줄, "직접 분사식 가솔린 기관의 실린더 내 분무의 거동," 한국자동차공학회 2000년도 춘계 학술대회 논문집, pp.45-50, 2000.
- 10) 황순철, 최동석, 김덕줄, "GDI 분무의 기액상 분포를 통한 분무의 성장 특성", 한국자동차공학회 논문집, 제9권 제2호, pp.50-58, 2001.