

## 직분식 엔진에서 실린더 내 연료의 액·기상 거동에 미치는 텀블과 스월의 영향

### The Effects of Tumble and Swirl Flow on the Behavior of Liquid/Vapor Phases in a DI Gasoline Engine

강정중\*, 최동석\*\*, 김덕줄\*\*  
Jeong-Jung Kang, Dong-Seok Choi, Duck-Jool Kim

#### ABSTRACT

This present study experimentally investigates the behavior of liquid and vapor phase of fuel mixtures with changing the in-cylinder air motion in an optically accessible engine. The conventional MPI/DOHC engine was modified to gasoline direct injection engine with swirl motion. The images of liquid and vapor phases were captured in the motoring operation condition using exciplex fluorescence method. Two dimensional spray fluorescence images of liquid and vapor phases were acquired to analyze spray behaviors and fuel distribution inside of cylinder respectively. In early injection timings (BTDC 270°, 180°), tumble flow transported most of vapor phase to the lower region and the both sides of cylinder, so vapor phase didn't become uniform distribution up to the half of the compression stroke. In the case of swirl flow, the fuel mixture was confined near the swirl origin in upper region of cylinder. In late injection timings (BTDC 90°), tumble flow transported vapor phase to the intake valve and swirl flow to the exhaust valve.

주요기술용어 : Optically accessible engine(가시화엔진), Exciplex fluorescence method (Exciplex 형광법), Injection timing(분사시기), Tumble flow(텀블유동), Swirl flow(선회유동)

#### 1. 서론

최근 PFI(Port Fuel Injection) 가솔린 기관의 한계를 극복하고 연비저감과 고출력을 위해 연료를 실린더 내로 직접 분사하는 DI(Direct Injection) 가솔린 엔진에 대한 연구가 전세계적으로 이루어지고 있다.<sup>1)</sup>

이미 정적 분위기 조건에서는 많은 연구가 이

루어졌으며 실제 엔진 내의 유동 조건에서도 연료의 분무 거동과 분포를 해석하고 이를 규명하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>2-5)</sup> exciplex 형광법을 적용한 분무의 증기·액상 동시 분리 가시화나 농도 분포특성에 관한 연구가 디젤 연료를 대상으로 많이 이루어졌으며 최근에는 가솔린 연료를 대상으로 연구되고 있다. 특히 엔진 내에서 액상연료의 거동은 많은 연구가 수행되었지만, 증기상과 액상의 전반적인 거동에 대한 연구<sup>6)</sup>와 유동장 변화에 따른 실린더 내 연료의

\* 회원, 부산대학교 대학원

\*\* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

농도장 분포 및 거동에 대한 연구<sup>7-9)</sup>는 미흡한 실정이다. DI 가솔린기관에서 분사된 연료의 농도 분포 및 거동은 연소의 안정화 및 배기가스와 밀접한 연관을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 DI 가솔린 기관의 실린더 내 유동 변화에 따른 연료의 증발과정, 실린더 내 증기상의 거동 및 농도장 분포를 가시화함으로써 DI가솔린 엔진에서의 실린더 내 연료 혼합과정에 대한 정보를 얻고자 한다.

본 연구에서는 기존의 포트 분사식 DOHC 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고, 와류형 고압 인젝터를 부착함으로써 중심 분사식 DI 가솔린 엔진으로 개조하였으며, 흡기포터를 가공하여 선회유동을 발생시켰다. 따라서 흡기 유동 변화에 따른 실린더 내 연료의 액상과 증기상의 거동 및 공간분포를 가시화 하였다. 이를 위해 액상과 증기상의 분리가 가능한 exciplex 형광법을 사용하였으며, 텀블과 스웰의 유동장 변화에 따른 각 분사시기별 실린더 내 분무의 거동 및 혼합기의 공간분포를 파악하기 위하여 액상과 증기상의 가시화, 크랭크 각에 따른 연료의 공간분포에 관한 면적비 및 평균 강도비를 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 정상유동실험을 통한 흡기유동 특성과악과 실제 DI 엔진 내에서의 연료의 농도장 및 거동분포를 분석하기 위한 두 장치로 크게 나눌 수 있다. 정상유동 실험은 AVL의 기준으로 제작하여 실험하였으며, 텀블유동을 이용한 실험은 기존의 엔진 흡기포터를 그대로 사용하였으나, 스웰유동은 기존 흡기포터의 한 쪽은 폐쇄하고 다른 한 쪽에 Mask를 설치하여 실험하였다.

Fig. 1은 실험에서 취득된 화상의 가시영역과 와류를 발생시키기 위해 개조된 흡기포터의 mask를 나타낸 그림이다. 가시영역은 실린더의 세로방향으로 Upper 영역(A), Middle 영역(B), Lower 영역(C)로 나누었으며, 가로방향으로 배기측에서

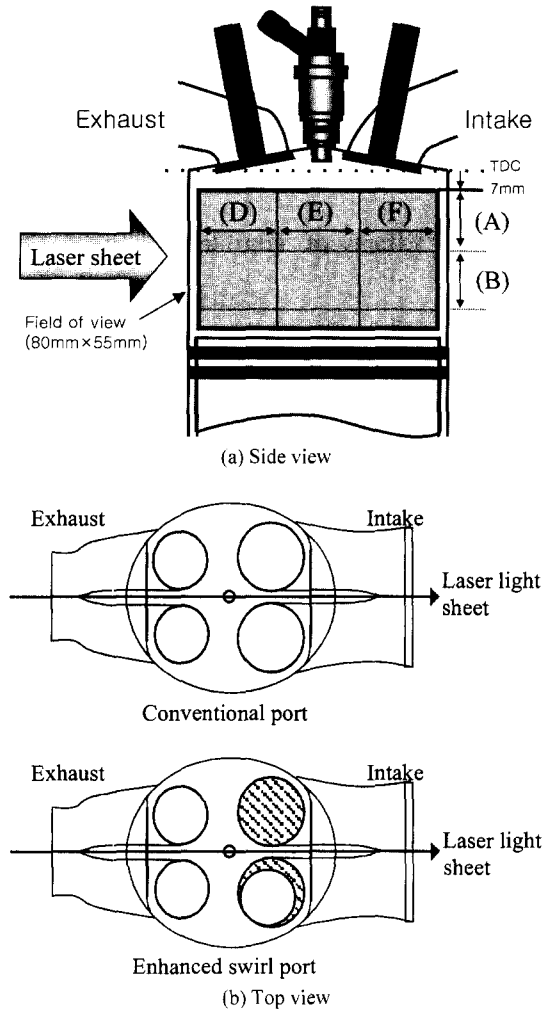


Fig. 1 Laser sheet formation and visualization region

흡기측으로 좌측영역(D), 가운데 영역(E), 우측영역(F)으로 나누었다. 취득된 가시화 영역 중에 Lower 영역(C)은 제외되었다. 실린더 내 가시영역은 인젝터 팁으로부터 축아래 방향으로 13mm ~ 68mm, 반경방향으로는 실린더 중심축으로부터 좌우로 40mm이다. 배기밸브와 흡기밸브가 위치는 각각 화상의 좌상측과 우상측이다.

엔진 구동 가시화 실험 장치도는 Fig. 2에 나타내었으며 가시화용 엔진은 본 연구실의 선행연구<sup>10)</sup>에서 제작된 엔진을 사용하였다. Table 1은 가시화용 엔진의 사양을 나타낸 것이다.

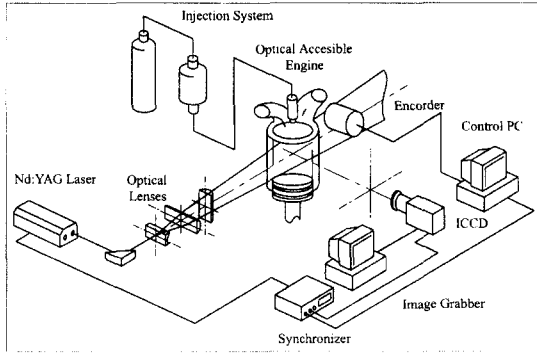


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Engine specifications

Specification	Resource
Engine type	4-stroke, 4valve/cylinder S.I. ERengine
Displacement(cc)	1998
Bore × Stroke(mm)	86 × 86
Combustion chamber	Pent roof
Compression ration	10:1

### 2.2 실험방법

정상유동 실험은 AVL사의 기준으로 각 조건에 대해 스월비와 텀블비를 나타냈다. Table 2는 정상 유동 실험을 통하여 나타난 텀블유동과 스월유동의 특성을 나타낸 것이다.

엔진 구동 가시화 실험방법은 다음과 같다. 분위기 기체는 불활성 기체인 질소를 사용하여 산소에 의한 형광의 소광현상을 제거하였다. 흡기 온도는 약 100°C로 유지하였으며 분사압력은 5.1

Table 2 Experimental conditions

Item	Flow type	
	Tumble type	Swirl type
Tumble ratio	1.2	2.1
Swirl ratio	0	3.6
Injection time (BTDC)	Early	270°, 180°
	Late	90°, 50°
Engine speed(rpm)	450	

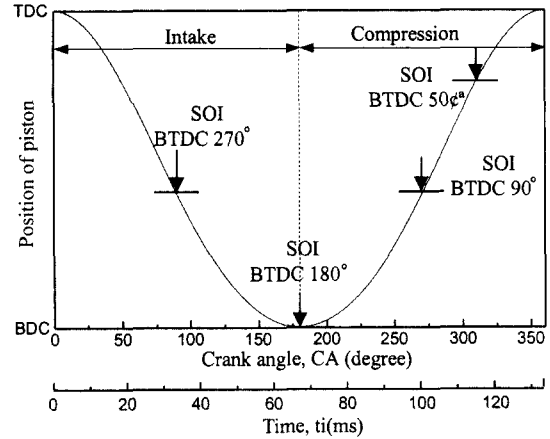


Fig. 3 Relationship between positions of piston and crank angle

MPa로 고정하였다. 엔진 속도는 450rpm으로 유지하였다.

Fig. 3은 크랭크 각에 따른 피스톤의 위치와 분사후 시간을 나타낸 것이다. 유동장 변화에 대한 각각의 분사시기는 BTDC 270°, 180°, 90°, 50°로 하였다.

엔진 내 연료분무의 거동 및 기·액상 분포특성을 분석하기 위하여 exciplex 형광법을 사용하여 각 분사시기별로 유동장 변화에 따른 분무의 증기상과 액상의 화상을 취득하였다. 기준연료와 첨가제는 헥산에 플로오로벤젠과 DEMA를 첨가하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분사후 액상의 거동

Fig. 4는 exciplex 형광법으로 취득한 분무의 액상 형광화상을 텀블및 스월 유동과 분사시기에 대하여 나타낸 것이다. 이 화상은 각 조건에서 5회 촬영한 화상중 대표화상을 선택하였다. 텀블 유동의 경우, 분사 초기에 인젝트를 가로지르는 흡기유동에 의해 액상이 크게 성장하지 못하고 있다. 한편, 스월 유동인 경우, 액상의 분무가 다소 크게 나타나고 있다. 이것은 스월 유동이 텀블 유동과는 달리 흡기포트에 설치된 마스크에 의

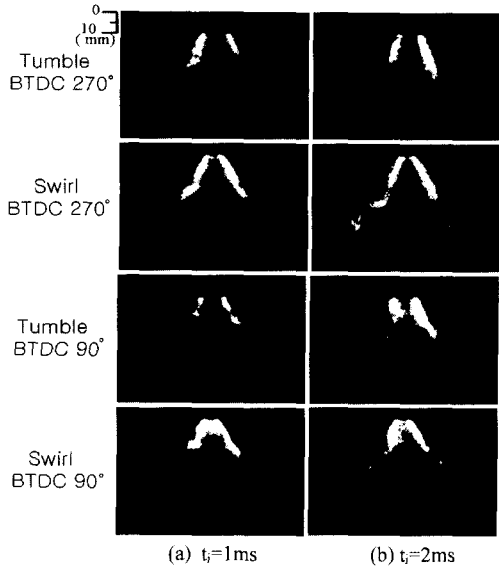


Fig. 4 Spray fluorescence images of liquid formation process

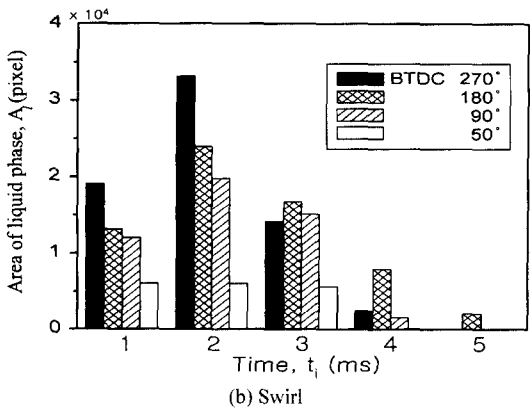
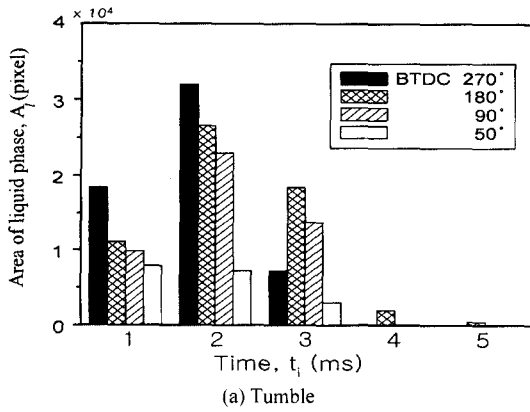


Fig. 5 Temporal change in area of liquid phase

해 흡기가 실린더 벽면을 선회하므로 액상 분무의 형태를 그대로 유지하기 때문이다.

Fig. 5는 텀블과 스월의 유동에 대하여 분무 후 액상의 면적을 나타낸 것이다. 분사개시 2ms 이후, BTDC 270°의 경우, 액상의 증발과정에서 텀블유동이 스월유동보다 연료를 빨리 증발시킴을 알 수 있었다.

Fig. 6은 분사된 액상의 관통도와 분무폭을 분사개시 후 시간에 따라 나타낸 것이다. 전반적으로 조기분사 조건에서 스월유동의 경우가 텀블유동보다 분무 초기에 액상의 관통도와 분무폭이 크게 나타난다. 조기분사의 경우 BTDC 270°보다 BTDC 180°의 경우가 관통도와 분무폭이

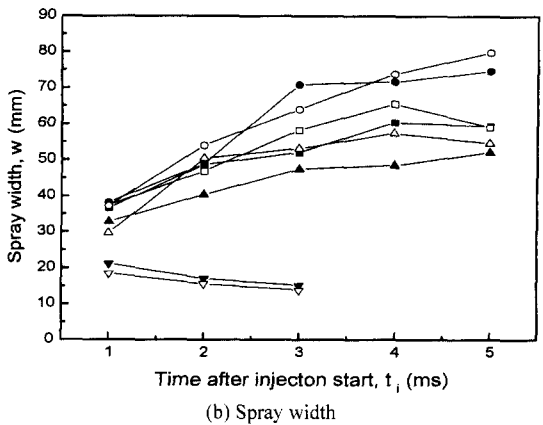
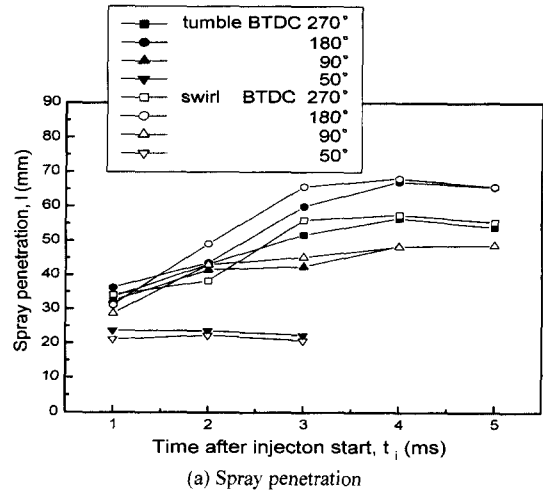


Fig. 6 Spray penetration and dispersion in engine

더 넓게 나타나고 있다. 이것은 흡기유동의 영향 때문으로 사료된다. 후기분사인 BTDC 50°에서는 텀블과 스월의 영향이 거의 없다.

### 3.2 분사 종료 후 크랭크 각에 따른 증기상의 거동

#### 3.2.1 조기분사시의 거동

Fig. 7은 조기분사조건에서 유동장 및 분사시기의 변화에 따른 증기상의 거동을 시간에 대하여 나타낸 것이다. 분사시기가 BTDC 270°와 180°에 대하여 텀블유동인 경우, 실린더 내 텀블 유동에 의해 분부된 증기상이 대부분 실린더 양측 벽면쪽으로 분산되는 것을 볼 수 있다. 또한 크랭크 각이 BTDC 80°인 압축행정에서도 실린더의 중심부분보다는 형광강도의 세기가 실린더 벽면 쪽에서 다소 강하게 나타나고 있다. 반면에 스월 유동인 경우, 실린더 내 증기상의 공간 분포는 실린더의 상부에 남아 있으며 시간이 경과함에 따

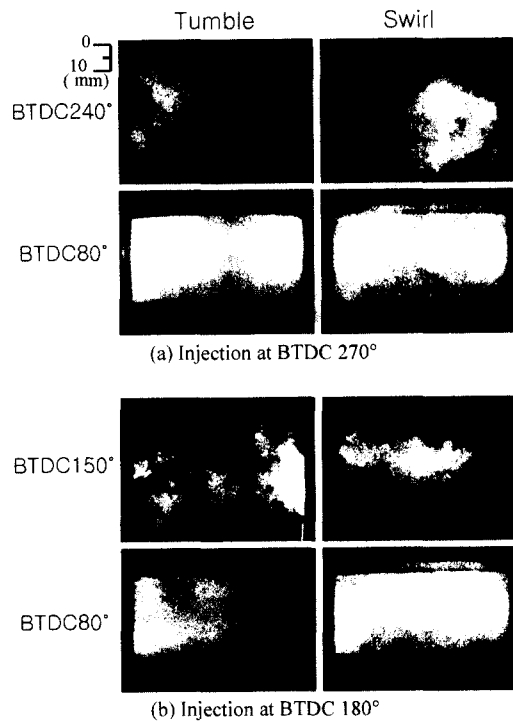


Fig. 7 Spray fluorescence images according to crank angle at early injection

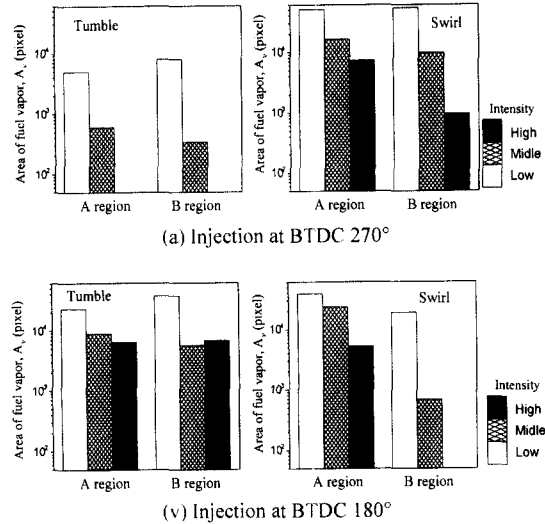


Fig. 8 Area of vapor phase with injection timings and each region

라 공기와 혼합되어 점차 균일화 되어간다.

Fig. 8은 취득한 가시화상을 분사 후 크랭크각이 30°가 지난 시간에 연료의 증기상의 면적을 pixel 단위로 나타낸 것이며, 실린더 영역을 축방향으로 상부(A)와 중간부(B)로 나누었다. 조기분사(BTDC 270°와 180°)시 스월 유동의 경우가 텀블 유동에 비해 실린더 상부에 농후한 증기상

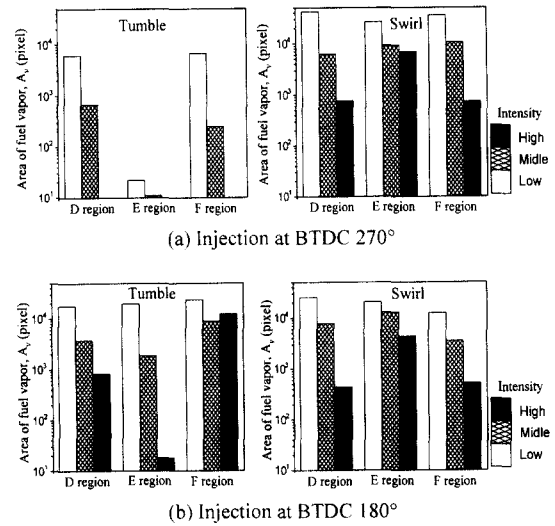
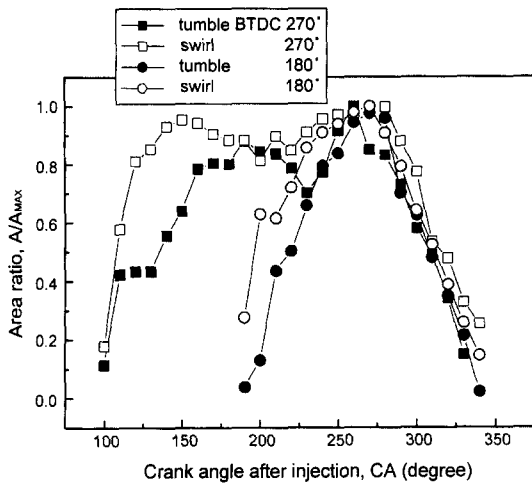


Fig. 9 Area of vapor phase with injection timings and each region

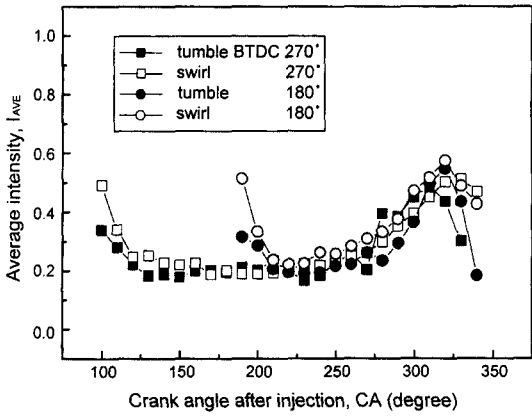
이 많이 나타났다.

Fig. 9는 각 영역을 흡기측에서 배기측으로 세로로 3등분하여 영역별 연료 증기상의 면적을 나타낸 그림이다. 분사시기가 BTDC 270°와 180°의 텀블 유동인 경우, 실린더 좌우 영역인 흡기측(F영역)과 배기측(D영역)에서 연료의 증기상이 중간영역(E영역)에 비하여 상대적으로 크게 나타나고 있는 반면, 스월 유동의 경우, 고강도의 연료 증기상이 실린더 중심에 많이 나타나고 있다.

Fig. 10은 조기분사조건(BTDC 270°와 180°)시 텀블유동과 스월유동의 영향을 크랭크 각도에



(a) Area ratio



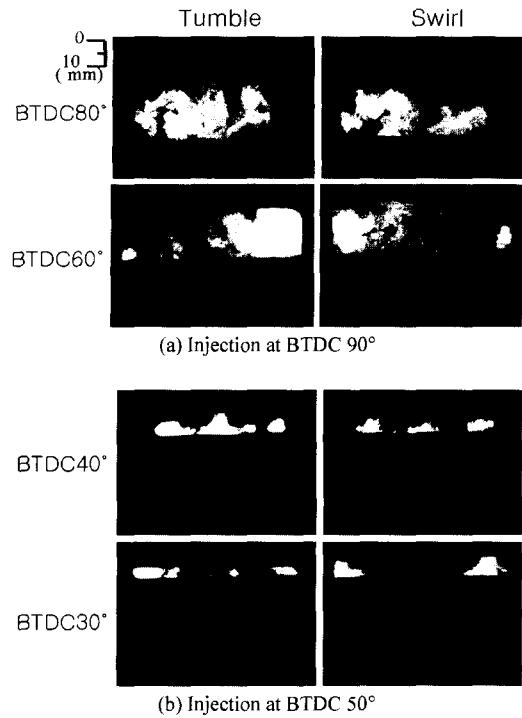
(b) Average intensity

Fig. 10 Area ratio and average intensity according to crank angle at early injection

따라 연료 증기상의 면적비와 평균강도비를 나타낸 것이다. 스월유동의 경우, 면적비와 평균강도는 상대적으로 텀블유동보다 크게 나타나고 있으며, 평균강도보다 면적비에서 크게 나타났다. 특히, 텀블 유동의 경우는 실린더 내 연료 증기상의 면적비 변화가 스월 유동에 비해 다소 크게 나타나고 있다.

### 3.2.1 후기분사시의 거동

Fig. 11은 후기분사조건에서 유동장의 변화와 분사시기에 따른 증기상의 화상을 나타내었다. 분사시기가 BTDC 90°에서 텀블유동의 경우 크랭크각이 BTDC 80°에서 분무장의 중심축이 배기쪽으로 기울어지고 있으며, 스월유동의 경우는 그와 반대 방향으로 기울고 있다. 크랭크각이 BTDC 60°에서는 텀블유동은 흡기쪽으로 증기상이 밀집되어있으며, 스월유동은 이와 반대로 배기쪽으로 집중되어 있음을 알 수 있다.



(b) Injection at BTDC 50°

Fig. 11 Spray fluorescence images according to crank angle at late injection

분사시기가 BTDC 50°에서는 스월과 텀블유동 모두 분무된 연료가 피스톤에 충돌하여 증기상이 실린더 벽면으로 물리고 있으며, 좁은 분포면적을 가지고 높은 형광광도를 가지고 있다. 이것은 높은 분위기 압력과 협소한 연소실 공간으로 인하여 분위기 기체와의 혼합이 원활하지 못하기 때문으로 사료된다.

Fig. 12에서 분사시기가 BTDC 90°의 텀블 유동인 경우, 흡기측(F영역)에서 고강도의 연료 증기상이 집중되었다. 반면, 스월 유동의 경우 배기측(D영역)에서 고강도의 연료 증기상이 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 흡기유동이 연료의 이동에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 나타낸다. 분사시기가 BTDC 50°의 텀블 유동과 스월 유동은 거의 비슷한 연료증기상의 거동을 나타내고 있으며, 스월 유동의 경우 실린더 중심부에 연료가 상대적으로 작게 분포하였다.

Fig. 13은 후기 분사(BTDC 90°과 50°)시의 증기상의 공간분포를 면적비와 평균강도로 나타낸 것이다. 가시화된 화상에 나타난 증기상의 면적은 텀블유동보다 스월유동이 좁게 나타나고 있으며, 평균강도도 스월유동이 낮게 나타난다.

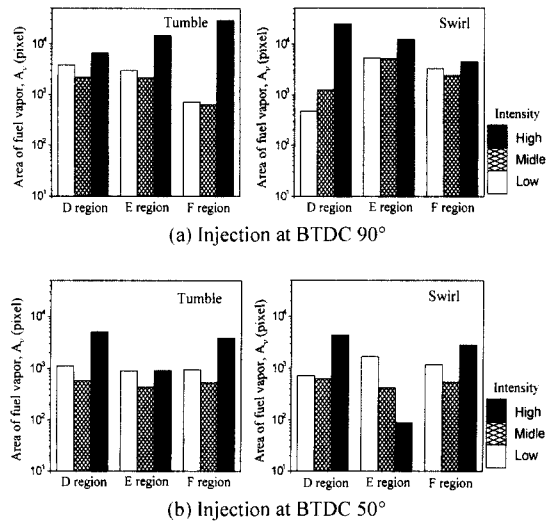


Fig. 12 Area of vapor phase with injection timings and each region

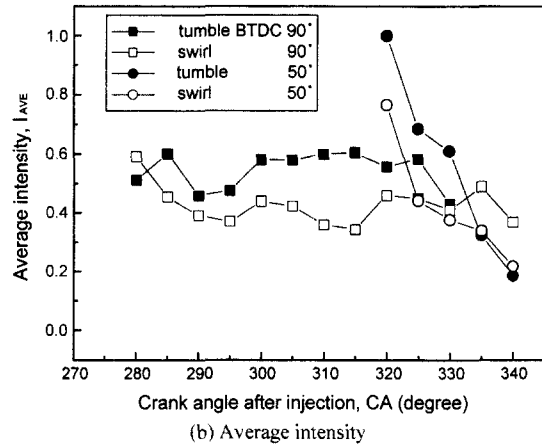
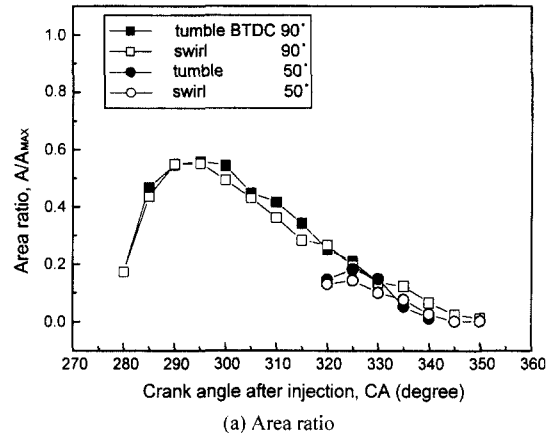


Fig. 13 Area ratio and average intensity according to crank angle at late injection

#### 4. 결론

유동장의 변화와 분사시기에 따른 실린더 내 연료의 액·증기상의 공간분포와 거동에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무된 액상의 관통거리와 분무폭은 스월 유동이 후기분사인 BTDC 50°를 제외하고는 텀블유동보다 다소 크게 나타났으며, 분사 후 액상의 증발은 텀블유동에서 더 빨리 일어났다.
- 2) 조기 분사시(BTDC 270°, 180°), 텀블유동의 경우는 증기상이 실린더 전반에 걸쳐 분포하며, 스월유동의 경우, 증기상의 분포가 선회하는 흡기유동에 의해 실린더 상부에 머물렀다.

3) 후기 분사중에서, BTDC 90°인 경우 텀블유동은 피스톤에 충돌된 증기상이 흡기 밸브 쪽으로 거동하고, 스웰유동인 경우는 증기상이 배기 쪽으로 거동하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) F.-Q. Zhao, M.-C. Lai, D. L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engine," SAE 970627, 1997.
- 2) V. Wagner, W. Ipp, M. Wensing, 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.
- 3) Dong-suk Choi, Duck-jul Kim, Sun-chul Whang, "Development Behavior Vaporizing Sprays from a High-Pressure Swirl Injector using Exciplex Fluorescence Method," KSME Vol.14, No.10, pp. 1143-1150, 2000.
- 4) 최동석, 박형오, 김덕줄, "Exciplex 형광법에 의한 가솔린 직접분무의 기상과 액상분포 및 농도측정," 대한기계학회 B권, 제23권 제4호, pp.531-539, 1999.
- 5) 황순철, 최동석, 김덕줄, "GDI 분무의 기·액상 분포를 통한 분무의 성장 특성," 한국자동차공학회 논문집, 제9권 제2호, pp.50-58, 2001.
- 6) J. Senda, T. Kanda, M. Kobayashi, H. Fujimoto, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method," SAE 970796, 1997.
- 7) A. Kakuhou, T. Urushihara, T. Itoh, Y. Takagi, "Characteristics of Mixture Formation in a Direct Injection SI Engine with Optimized In-Cylinder Swirl Air Motion," SAE 1999-01-0505, 1999.
- 8) M. Ohsuga, T. Shiraishi, T. Nogi, Y. Nakayama, Y. Sukegawa, "Mixture Preparation for Direct-Injection SI Engines," SAE 970542, 1997.
- 9) M. Kano, K. Saito, M. Basaki, "Analysis of Mixture Formation of Direct Injection Gasoline Engine," SAE 980157, 1998.
- 10) 김한재, 류경훈, 최동석, 차건중, 김덕줄, "직접 분사식 가솔린 기관의 실린더 내 분무의 거동," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp.45-50, 2000.