

직분식 가솔린기관 내에서 피스톤 형상이 연료혼합기 거동에 미치는 영향

황필수* · 강정중* · 김덕줄*

(2001년 10월 24일 접수, 2002년 1월 7일 심사완료)

The Effect of Piston Bowl Shape on Behavior of Vapor Phase in a GDI Engine

Pil-Su Hwang, Jeong-Jung Kang and Duck-Jool Kim

Key Words: GDI(가솔린 직접 분사), Tumble Flow(툼블유동), Swirl Flow(선회유동), Exciplex Fluorescence Method(Exciplex 형광법)

Abstract

This study was performed to investigate the behavior of vapor phase of fuel mixtures with different piston bowl shapes(F, B and R-type) in a optically accessible engine. The images of liquid and vapor phases were captured in the motoring engine using exciplex fluorescence method. Fuel was injected into atmospheric nitrogen to prevent quenching phenomenon by oxygen. Injection pressure was 5.1MPa. Two dimensional spray fluorescence image of vapor phase was acquired to analyze spray behaviors and fuel distribution inside of cylinder. Four injection timings were set at BTDC 90°, 80°, 70°, and 60°. With a fuel injection timing of BTDC 90°, fuel-rich mixture level in the center region was highest in a B-type piston. With a fuel injection timing of BTDC 60°, R-type piston was best. R-type piston shape was suitable under enhanced swirl ratio and late injection condition and B-type piston shape was right in a weak swirl ratio. It was found that the piston bowl shape affected the mixture stratification inside of cylinder.

기호설명

- A* : 면적
CA : 크랭크 각도
DEMA : N,N-diethymethylamine
I : 형광 강도
r : 형광강도를 측정할 반경방향 거리

1. 서론

각종 환경 및 에너지 문제가 대두되면서 저연비, 고효율, 저공해 특성을 실현하고자 하는 많은 연구와 노력이 이루어지고 있다. 전기 자동차와 기존의 가솔린 엔진의 접목을 통하여 저속 저부하에서 연비 향상을 도모한 하이브리드 엔진, 운전 영역에 따라서 기존의 포트 분사 엔진의 밸브 타이밍을 변화시키는 가변 밸브 타이밍 시스템 그리고, 기존 실제 자동차 엔진의 주류를 이루고 있는 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 장점을 동시에 구현한 이상적이고 획기적인 기술로서 직분식 가솔린 엔진(Gasoline Direct Injection Engine, GDI) 기술이 많은 관심을 받고 있다. 특히, GDI 엔진에 대한 연구는 근래 세계적으로 많은 연구

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : djkim@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

* 부산대학교 기계공학과

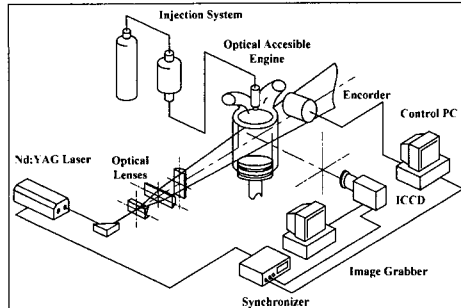


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

가 활발하게 수행되어 왔으며,⁽¹⁻³⁾ 최근 그 가시적인 성과가 보여지고 있다. 하지만 아직 국내의 경우에는 그 연구⁽⁴⁾가 기초적인 부분에 머물러 있으며, 보다 많은 연구가 절실하게 요구되고 있다.

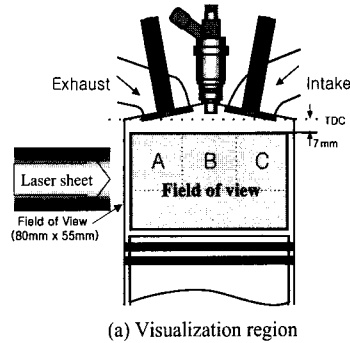
여러 피스톤 형상에 따른 연료 증기상의 농도 분포 특성과 분무의 가시화에 관한 연구⁽⁵⁾와 3D 모델링⁽⁶⁻⁷⁾은 디젤 연료를 대상으로 많이 이루어졌으며 최근에는 가솔린 연료를 대상으로 연구되고 있다. 특히 직접 분사식 가솔린 엔진에서 측면 분사 방식에서의 가시화는 많은 연구⁽⁸⁾가 수행되었지만, 중앙 분사 방식에서의 피스톤 형상에 따른 연료의 농도장 및 거동에 대한 연구⁽⁹⁾는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 GDI 엔진에서의 피스톤 형상에 따른 실린더 내에 분사된 연료 증기상의 거동 및 농도장 분포를 가시화함으로써 GDI 엔진에서의 실린더 내 연료 혼합과 성층화 과정에 대한 정보를 얻고자한다.

본 연구에서는 기존의 포트 분사식 DOHC 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고, 와류형 고압 인젝터를 부착함으로써 중심 분사식 GDI 엔진으로 개조하였으며, 흡기포터를 가공하여 선회유동을 발생시켰고, 3종류의 피스톤을 사용하였다. 연료의 증기상 화상의 취득을 위해 exciplex 형광법을 사용하였으며, 피스톤 형상에 따른 각 분사시기별 실린더 내 분무의 거동 및 혼합기의 공간분포를 파악하기 위하여 증기상의 가시화, 크랭크 각에 따른 연료의 공간분포에 관한 면적비 및 형광 강도비를 조사하였다.

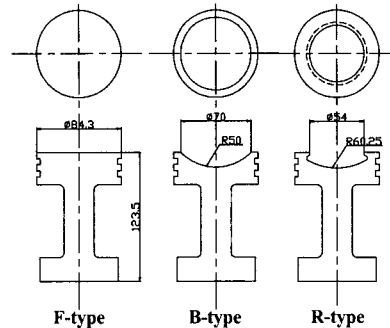
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

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



(a) Visualization region



(b) Piston type

Fig. 2 Visualization region and configurations of designed piston shape

치, 가시화를 위한 광학계, 신호처리계 그리고 GDI 분사계로 구성되어 있다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저의 4차 조화파(266nm, 최대출력 60mJ/pulse, 발광반치폭 7ns)를 여기광원으로 사용하였고, 분무화상은 ICCD 카메라로 취득하였다. 사용된 인젝터는 와류형 고압 인젝터로 가압용 질소탱크와 연료탱크에 연결되어 있다. 신호처리계는 자체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로, 분사시기를 광원과 카메라의 동기를 위한 인터페이스보드, 화상취득용 이미지그래버, ICCD 카메라 셔터제어기와 펄스발생기, 엔코더등으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 실험에서 취득된 화상의 가시영역과 사용된 피스톤의 형상을 나타낸 것이다. 피스톤은 F형, B형, R형의 3가지로 실험을 행하였고, 가시영역은 실린더의 가로방향으로 배기측에서 흡기측으로 좌측영역(A), 가운데 영역(B), 우측영역(C)으로 나누었다. 실린더 내 가시영역은 인젝터 팁으로부터 축아래 방향으로 13mm~68mm, 반경방향으로는

Table 1 Engine specifications

Specification	Resource	
Engine type	4-stroke, 4-valves/cylinder, S.I. Engine	
Displacement(cc)	1998	
Bore × stroke(mm)	86 × 86	
Combustion chamber	Pentroof	
Compression ratio	F-type	10:1
	B-type	9:1
	R-type	9:1

Table 2 Experimental conditions

Swirl ratio	3.6
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Engine speed (rpm)	450
Injection timing, SOI (BTDC)	90°, 80°, 70°, 60°

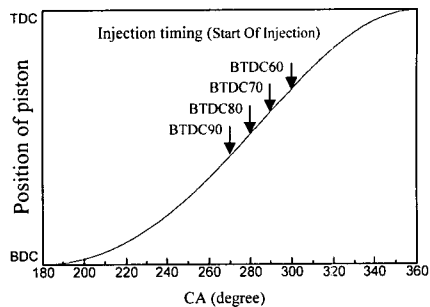


Fig. 3 Relationship between positions of piston and crank angles

실린더 중심축으로부터 좌우로 40mm이다. 배기 밸브와 흡기밸브가 위치는 각각 화상의 좌상측과 우상측이다.

Table 1은 가시화용 엔진의 제원에 대해서 나타내었다. 가시화용 엔진은 선행연구⁽¹⁰⁾에서 제작된 DOHC 엔진을 사용하였고, 기존의 흡기포터를 가공하여 선회유동을 발생시켰다. Table 2는 AVL사 기준의 정상 유동 실험을 통하여 나타난 스웰비와 본 실험의 조건에 대해 나타낸 것이다.

2.2 실험방법

엔진 구동 가시화 실험방법은 분위기 기체를

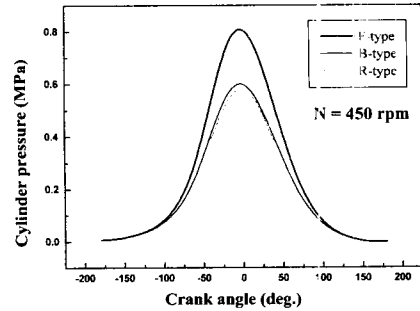


Fig. 4 Cylinder pressure at the test condition

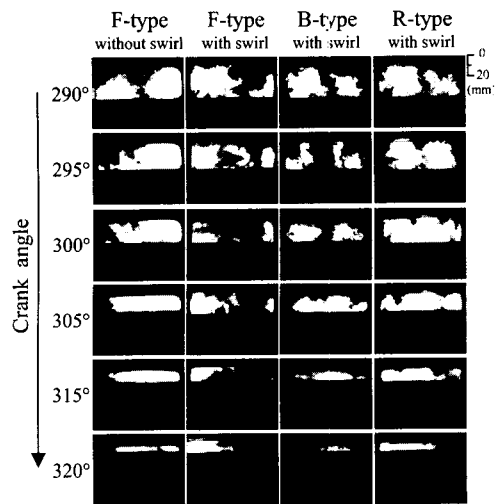


Fig. 5 Spray fluorescence images according to crank angle (SOI : BTDC 90°)

불활성 기체인 질소로 사용하여 화염의 발생을 없애고, 또한 산소에 의한 형광의 소광현상을 줄였다. 실제 엔진의 운전조건과 유사하게 하기 위해 분위기 기체를 가열하여 온도를 약 100℃로 유지하였다. 분사압력은 최근의 직분식 가솔린 엔진용 인젝터의 분사압력에 근접하는 5.1MPa로 고정하였다. 엔진 속도는 실험장치의 한계로 450rpm으로 유지하였다. Fig. 3은 크랭크 각에 따른 피스톤의 위치와 분사 개시 시각을 나타낸 것이다. 피스톤 형상에 따른 분사시기는 각각 BTDC 90°, 80°, 70° 및 60°로 하였다. Fig. 4는 각 형태의 피스톤에서의 모터링시 실린더내의 압력변화를 나타낸 것이다. 기존의 F형 피스톤을 기

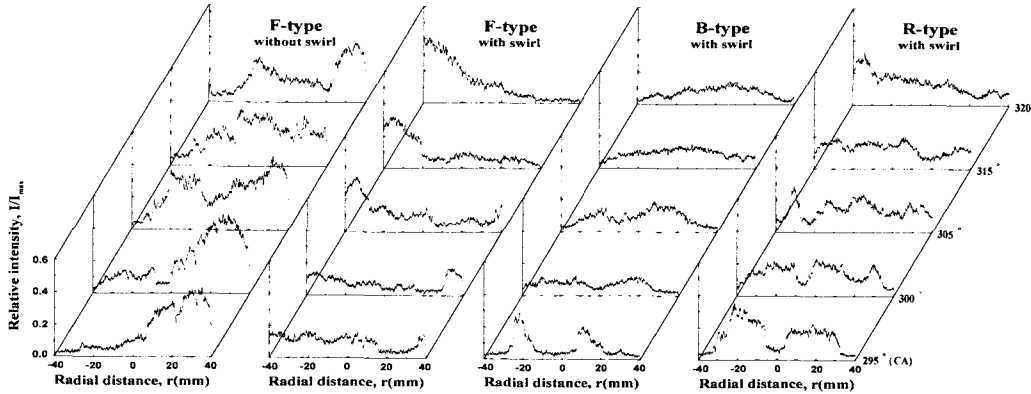


Fig. 6 Fluorescence intensity ratio profiles according to crank angle ($z=15\text{mm}$, SOI : BTDC 90°)

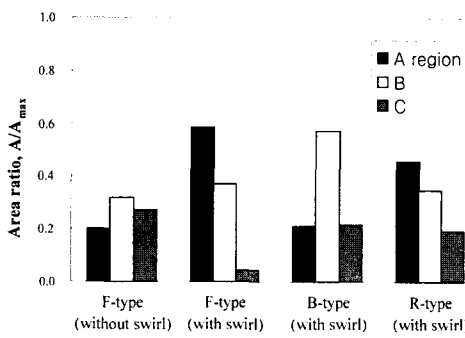


Fig. 7 Area ratio at crank angle, 320° (SOI : BTDC 90°)

준으로 보울 형상을 설계하였기 때문에 나머지 두 가지 피스톤은 실린더 체적의 증가로 압축 압력이 다소 낮게 나타났다. 하지만, F형 피스톤의 경우, 실험결과시 압축비의 차이가 크지 않을 경우, 비슷한 경향을 나타내었기에 이 부분을 고려하지 않았다. 엔진 내 기상연료의 거동 및 분포특성을 분석하기 위하여 exciplex 형광법을 사용하여 각분사시기별, 피스톤 형상별, 그리고 텀블유동이 일어나는 기존의 흡기포트와 이를 가공하여 선회유동을 발생시키는 포트에 따라서 분무의 증기상의 화상을 취득하였다. 기준연료와 첨가제는 선행연구⁽¹¹⁾와 같이 헥산에 플로오로벤젠과 DEMA를 첨가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

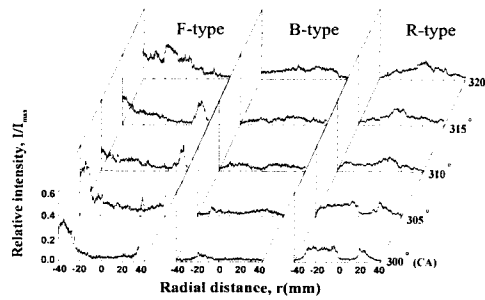


Fig. 8 Fluorescence intensity ratio profiles according to crank angle ($z=15\text{mm}$, SOI : BTDC 80°)

3.1 Conventional type과의 비교

Fig. 5는 exciplex 형광법으로 취득한 연료 증기상의 형광화상을 피스톤의 형상과 크랭크 각도에 대하여 나타낸 것이다. 이 화상은 각 조건에서 5회 촬영한 화상중 대표화상을 선택하였다. 기존의 흡기 포트에 의해 발생하는 텀블유동을 가진 F형 피스톤의 경우, 분사 후 크랭크각에 따라서 흡기측으로 연료 증기상이 집중되는 것을 볼 수 있다. 그에 반해서 스윙 유동을 가진 F형 피스톤과 R형 피스톤의 경우에는 흡기 스윙의 영향으로 연료 증기상이 배기측으로 집중되는 것을 볼 수 있다. R형 피스톤의 경우 충분히 발달한 연료 분무가 보울에 충돌하기 전에 스윙의 영향을 많이 받기 때문에 배기측으로 집중된다. B형 피스톤의 경우 상대적으로 보울 직경이 크기 때문에 스윙의 영향을 받은 뒤에도 피스톤 보울속에 다 들어가게 되고 압축말에 스퀴시의 영향 등으로 중앙에 집중된

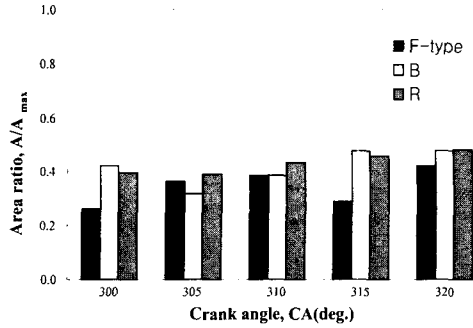


Fig. 9 Area ratio according to crank angle (SOI : BTDC 80°)

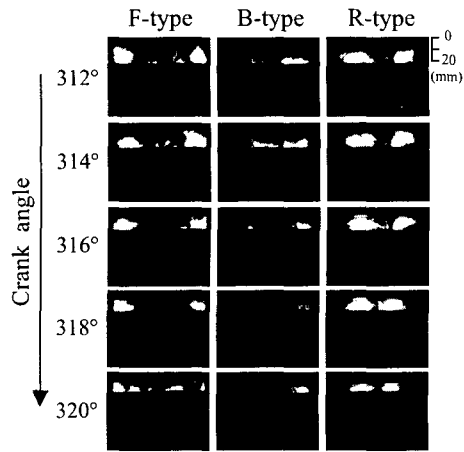


Fig. 10 Spray fluorescence images according to crank angle (SOI : BTDC 60°)

것으로 사료된다.

Fig. 6은 가시영역 상부로부터 15mm에서의 반경방향으로의 형광강도의 변화를 분사개시후 크랭크각에 따라 나타낸 것이다. 두 개의 F형 피스톤의 경우 앞서 나타난 분무화상에서와 같이 흡기와 배기측에서 강한 형광강도를 나타내고 있으며, B형 피스톤은 실린더내의 흡기와 배기측에서 뚜렷하게 양분된 강한 형광강도를 가졌으나, 시간이 지남에 따라 실린더 중앙에서 다소 높고, 전체적으로 균등한 형광강도를 보이고 있다.

Fig. 7은 분사후 320°의 크랭크각에서 기상의 면적비를 나타낸 것으로 연료 증기상 면적 중에서 최대면적으로 나눈것이다. 배기쪽의 A영역, 중앙의 B영역, 흡기쪽의 C영역으로 나누었으며, 3영역의 면적은 동일하다. 분사시기 BTDC 90°에서는

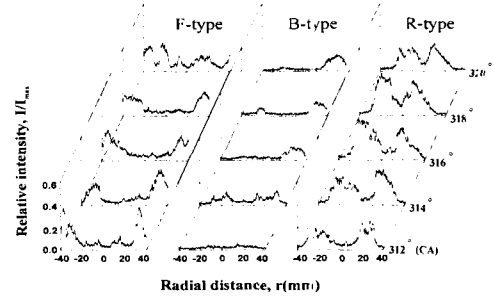


Fig. 11 Fluorescence intensity ratio profiles according to crank angle(z=15mm, SOI : BTDC 60°)

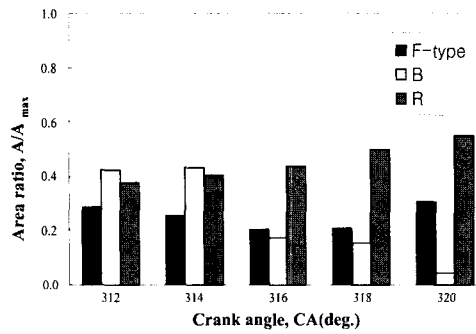


Fig. 12 Area ratio according to crank angle (SOI : BTDC 60°)

위 4가지 조건중에서 B형의 피스톤이 실린더 상부의 중앙에 가장 농후한 연료 증기상을 집중시켰다.

3.2 Enhanced swirl type에서의 연료 증기상의 거동

Fig. 8은 분사시기 BTDC 80°에서 반경방향으로의 형광강도의 변화를 피스톤 형상과 크랭크각에 따라 나타낸 것이다. F형 피스톤은 크랭크각이 300°에서는 흡기와 배기측으로 강한 형광강도가 양분되었다가 320°에서 배기측으로 강도가 집중되는 것을 볼 수 있다. 반면에 B형과 R형의 경우 상대적으로 연료의 증기상이 F형 보다는 중심에 집중되어 있다. 그러나, 강도에 있어서는 R형이 더 크게 나타나고 있다. 이것은 R형이 B형보다 보울 반경이 작고, 내부 유동이 더욱 활발하며 Reentrance의 영향으로 증기상이 더 빨리 보울밖으로 나오고, 또 중앙에 모이기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 9는 B영역(실린더 중앙영역)에서 연료 증기상의 면적비를 크랭크각에 따라서 나타낸

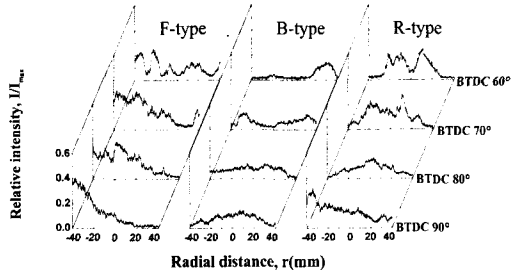


Fig. 13 Fluorescence intensity ratio profiles with different injection timings at crank angle, 320°(z=15mm)

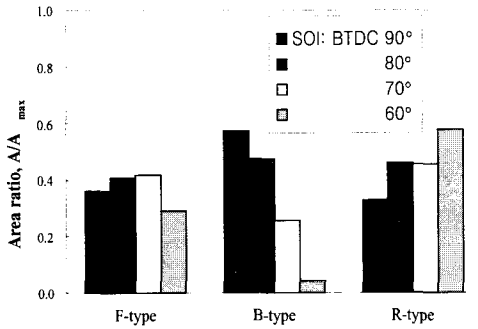


Fig. 14 Area ratio at crank angle, 320° in the B region

것이다. 3개의 피스톤이 큰 차이를 보이지는 않지만 압축말에서 B형과 R형의 피스톤이 약간 큰 면적비를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 BTDC 60°의 분사시기에서의 스웰유동을 가진 3종류의 피스톤의 기상화상이다. F형 피스톤은 분무가 피스톤에 충돌한 후에 실린더 상부로 이동하지 않고 피스톤 면을 따라 실린더 양쪽 벽면으로 이동한 것을 볼 수 있다. 이것은 협소한 연소실과 높은 분위기압으로 인한 것으로 사료된다. B형은 분사후 보울내 분무의 잔류시간이 길기 때문에 크랭크각이 BTDC 40°에서는 많이 나타나지 않고 있다. R형은 이 분사시기에서 가장 이상적으로 분무의 증기상을 중앙에 집중시키고 있다. 이것은 분무가 다른 분사시기에서와는 달리 R형의 보울속으로 다 들어가게 되어서 들어가지 못하고 잔류된 연료증기상의 실린더 벽면쪽으로의 이동이 없기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 11은 반경방향으로의 형광강도의 변화를

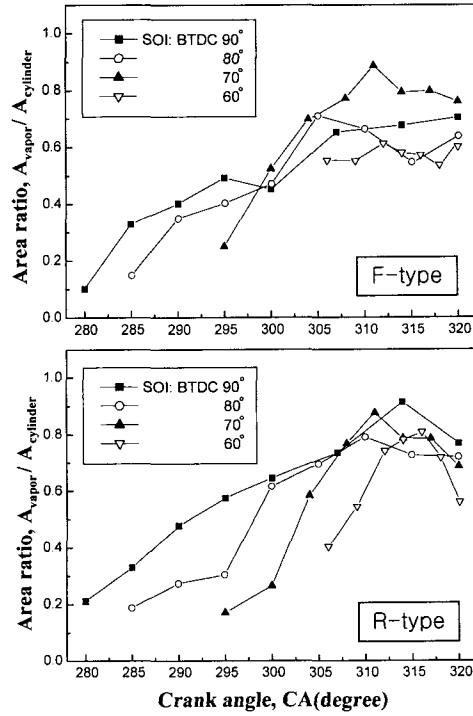


Fig. 15 Area ratio according to crank angle with different SOIs

크랭크각에 따라서 나타낸 것이다. F형 피스톤은 실린더의 양측 벽면에서 아주 강한 형광강도를 보이고 있고, B형의 경우는 넓은 직경과 내부 유동이 약하기 때문에 연료 증기상이 보울 외부로 아직 나오지 못하고 있는 것을 보여주고 있다. 따라서 320°의 크랭크각까지 전체적으로 약한 형광강도를 보이고 있다. R형은 압축말로 크랭크각이 변함에 따라 실린더 벽면쪽에서 중앙으로 형광강도가 커져감을 알 수 있다.

Fig. 12는 BTDC 60°의 분사시기에서의 피스톤 형상에 따른 B영역의 면적비를 나타낸 것이다. 압축말기에 R형 피스톤이 가장 면적비가 높고, B형 피스톤이 가장 적게 나타나고 있다. 이것은 보울 직경이 커질수록 스쿠시 유동이 약해지므로 R형 피스톤에 비해 B형 피스톤의 면적비가 현저히 낮은 것으로 사료된다.

3.3 분사시기에 따른 압축말기에서의 연료 증기상의 거동

Fig. 13은 전체 분사시기에 따른 반경방향으로

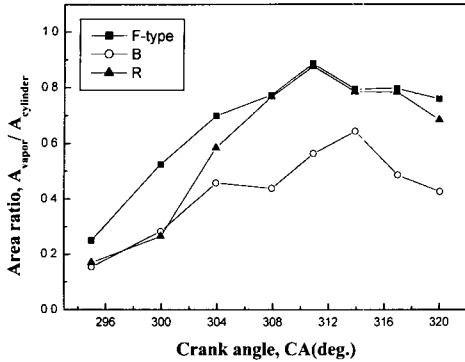


Fig. 16 Area ratio according to crank angle(SOI : BTDC 70°)

의 형광강도의 변화를 크랭크각에 따라서 나타낸 것이다. F형의 경우, BTDC 60°의 분사시기를 제외한 전 분사시기에 있어서 배기측으로 강한 형광강도는 나타낸다. BTDC 60°의 분사시기에서는 흡기와 배기측 양쪽으로 강한 형광강도를 보이고 있다. B형의 경우 상대적으로 빠른 분사시기인 BTDC 90°에서 실린더 중앙영역으로 높은 형광강도를 나타냈지만, 그외의 분사시기에 있어서는 압축말에 보울밖으로 연료의 증기상이 충분히 나오지 못하기 때문에 전체적으로 약한 형광강도를 보이고 있다. R형의 경우, 분사시기가 늦어질수록 실린더 중앙영역으로 강한 형광강도를 나타내고 있으나, 전체적으로도 분사시기에 크게 영향을 받지 않고 실린더 중앙영역으로 연료의 증기상이 집중되었다.

Fig. 14는 전체 분사시기에서의 B영역(실린더 중앙영역)의 면적비를 320°의 크랭크각에서 나타낸 것이다. F형의 면적비는 전 분사시기에서 균일하나 상대적으로 낮다. B형은 BTDC 90°의 분사시기에서 가장 큰 값을 나타내고 있으며, R형은 역시 BTDC 60°의 분사시기에서 면적비가 가장 크다.

Fig. 15는 전체 분사시기에서 각각의 크랭크각에 대하여 연료 증기상의 면적을 실린더 전체의 면적으로 나눈 것을 F와 R형에 대해서 나타낸 것이다. BTDC 60°의 분사시기를 제외하고 F와 R형 모두 분사시기가 늦어질수록 기울기가 커진다. 이것은 분사후 실린더내에서의 연료의 증발율의 차이 때문인 것으로 사료된다. 따라서 BTDC 70°의 분사시기가 가장 증발율이 크게 나타난다. BTDC 60°의 분사시기에서는 F와 R형이

큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 F형의 경우, 연료가 피스톤에 충돌하면서 생긴 연료의 액막의 증발이 원활하지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 이에 반해 R형의 경우, 피스톤 보울내의 액막이 내부의 강한 유동에 의해 상대적으로 활발하게 증발하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig 16은 BTDC 70°의 분사시기에서 각각의 크랭크각에 대하여 연료 증기상의 면적을 실린더 전체의 면적으로 나눈 것을 모든 피스톤에 대해 나타낸 것이다. 3가지 피스톤 중에서 R형 피스톤이 가장 연료 증발율이 높게 나타난다.

4. 결론

피스톤 형상변화, 분사시기 및 크랭크 각도에 따른 실린더 내 연료 증기상의 공간분포와 거동에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) B형 피스톤의 경우, 상대적으로 큰 보울 직경으로 인해 내부유동이 크지 못했다. 따라서 연료분무가 충분히 발달한 후에 보울에 충돌할 수 있는 BTDC 90°의 분사시기에서 다른 피스톤 형상에 비해 크랭크 각도가 증가할수록 연료의 증기상이 실린더 중앙에 잘 집중되었다.

(2) BTDC 80°의 분사시기에 있어서는, B형 피스톤과 R형 피스톤 모두 비슷한 정도로 실린더 중앙으로 연료 증기상이 집중되었지만, R형 피스톤에서의 증기상이 다소 빠르고, 강하게 집중되었다.

(3) R형의 경우, 상대적으로 작은 보울 직경으로 인해 내부유동이 커져, 늦은 분사시기인 BTDC 60°에서 연료 증기상을 실린더 중앙에 가장 잘 집중시켰다.

(4) 압축 말기에서는 R형 피스톤이 분사시기에 크게 영향을 받지 않고 실린더의 중앙영역에 연료의 증기상이 집중되었다.

(5) 강한 스윙과 늦은 분사시기에 있어서는 B형보다는 R형이 더 적합하고, 약한 스윙의 경우에 B형이 적합할 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Fu-Quan Zhao, Ming-Chia Lai and David L. Harrington, 1997, "A Review of Mixture

- Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engine," SAE paper No.970627.
- (2) F. Zhao, M.-C. Lai and D.L. Harrington, 1999, "Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, No. 5.
- (3) Michael H. SHelby, Brad A. VanDerWege and Simone Hochgreb, 1998, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," SAE paper No.980160.
- (4) 강정중, 최동석, 김덕줄, 2001, "GDI 엔진 내 유동장 변화에 따른 혼합기의 기.액상 거동," 한국자동차공학회 2001년도 춘계학술대회, pp. 191~197.
- (5) Rahman M. Montajir, H. Tsunemoto, H. Ishitani and T. Minami, 2000, "Fuel Spray Behavior in a Small DI Diesel Engine: Effect of combustion Chamber Geometry," SAE paper No.2000-01-0946.
- (6) M. Zolver, C. Griard and S. Henriot, 1997, "3D Modeling Applied to the Development of a DI Diesel Engine: Effect of Piston Bowl Shape," SAE paper No.971599.
- (7) Beard, P., Mokaddem, K. and Baritaud, T., 1998, "Measurement and Modeling of the Flow-Field in a DI Diesel Engine: Effects of Piston Bowl Shape and Engine Speed," SAE paper No.982587.
- (8) Hiroshi Tatsuta, Motohiro Matsumura, Jyunichi Yajima, Hiroto Nishide, 1998, "Mixture Formation and Combustion Performance in a New Direct-Injection SI V-6 Engine," SAE paper No.981435.
- (9) Martin Ekenberg and Bengt Johansson, 2000, "Fuel Distribution in an Air Assist Direct Injected Spark Ignition Engine with Central Injection and Spark Plug Measured with Laser Induced Fluorescence," SAE paper No.2000-01-1898.
- (10) 김한재, 최동석, 김덕줄, 2001, "엔진 유동장에서 분사시기에 따른 혼합기의 기.액상 농도 분포에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제9권 제5호, 9월호
- (11) 최동석, 황순철, 김덕줄, "가솔린 와류형 고압 분무의 증발거동에 관한 연구," 부산대학교 생산기술연구소 논문집, 제65집, pp. 323~329.
- (12) Yasuo Moriyoshi and Takumi Muroki, 1995, "Proposition of a Stratified Charge System by Using In-Cylinder Gas Motion," SAE paper No. 952455.
- (13) Yoshiyuki Kidoguchi, Changlin Yang and Kei Miwa, 1999, "Effect of High Squish Combustion Chamber on Simultaneous Reduction of NOx and Particulate from a Direct-Injection Diesel Engine," SAE paper No.1999-01-1502.
- (14) Yasuo Moriyoshi, Hitoshi Nomura and Youhei Saisyu, 1998, "Evaluation of a Concept for DI Gasoline Combustion Using Enhanced Gas Motion," SAE paper No.980152.