

중앙 분사방식의 직분식 가솔린 기관에서 연료 혼합기 형성에 미치는 분사시기와 캐비티 형상의 영향

김 태 안¹⁾ · 강 정 중²⁾ · 김 덕 줄³⁾

부산대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계기술연구소²⁾ · 부산대학교 기계공학부³⁾

The Effect of Injection Timing and Cavity Geometry on Fuel Mixture Formation in a Central Injected DI Gasoline Engine

Tae-an Kim¹⁾ · Jeongjung Kang²⁾ · Duckjool Kim³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-435, Korea

²⁾Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Busan 609-435, Korea

³⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-435, Korea

(Received 7 November 2003 / Accepted 28 January 2004)

Abstract : This study was performed to investigate the behavior of liquid and vapor phase of fuel mixtures with different piston cavity diameters in a optically accessible engine. The conventional engine was modified as Central Injected DI gasoline engine with swirl motion. Two dimensional spray fluorescence images of liquid and vapor phase were acquired to analyze spray behavior and fuel distribution inside of cylinder using exciplex fluorescence method. Piston cavity geometries were set by Type S, M and L. The results obtained are as follows. In the spray formation after SOI, the cone angle and width of the spray were decreased at late injection timing. With a fuel injection timing of BTDC 180°, fuel was not greatly affected in a piston cavity but generally distributed as homogeneous mixture in the cylinder. With a fuel injection timings of BTDC 90° and 60°, fuel mixture was widely distributed in near the cavity center. As a injection timing was late in the compression stroke, residual width of fuel mixture was narrow in proportion to piston cavity.

Key words : Optically accessible engine(가시화 엔진), Exciplex fluorescence method(Exciplex 형광법), DI gasoline engine(직분식 가솔린 엔진), Swirl flow(선회유동), Homogeneous mixture(균일혼합)

Nomenclature

- A : fuel area of vapor phase
- I : intensity of image
- Z : distance from nozzle tip
- D : bore distance (mm)
- d : cavity distance (mm)

1. 서론

전 세계적으로 각종 에너지 및 환경문제가 대두되면서 저공해 특성을 실현하면서 연비향상, 고출력을 이루고자 하는 많은 연구와 노력이 이루어지고 있다. 전기자동차와 기존의 가솔린 엔진의 접목을 통하여 저속 저부하에서 연비향상을 도모한 하이브리드 엔진, 운전영역에 따라서 기존의 포트 분사 엔진의 밸브타이밍을 변화시키는 가변 밸브 타이밍 시스템, 그리고 기존 실제 자동차 엔진의 주류를 이루고 있는 가솔린 엔진과 디젤엔진의 장점을

*To whom correspondence should be addressed.
djkim@hyowon.puasn.ac.kr

동시에 구현한 이상적이고 획기적인 기술로서 직분식 가솔린 엔진 기술이 많은 관심을 받고 있다. 특히, 직분식 가솔린 엔진에 대한 연구는 세계적으로 활발하게 연구가 수행되어 왔으며, 고부하 영역에서는 기존의 엔진과 비슷한 출력, 저부하 영역에서는 저연비를 구현하고 있다.¹⁾ 하지만, 아직 국내의 경우에는 그 연구가 기초적인 부분에 머물러 있으며, 보다 많은 연구가 절실하게 요구되고 있다. 그리고 중앙 분사방식의 직분식 가솔린 엔진에서 캐비티의 반경에 따른 연료의 농도 장 및 거동에 대한 연구는 거의 부족하다.

선행연구 결과에 따르면 압축말기에 텀블유동보다 선회유동은 오랫동안 존재하게 되고 스쿼시와 결합하여 강도가 더욱 강화되는 것으로 나타나 있다.^{2,4)} 또한, 캐비티를 가진 피스톤은 성층화를 이루는데 좋은 결과를 가지고 있고, 희박한계를 증가시킨다고 나타나 있다.^{5,6)} 따라서, 본 연구에서는 직분식 가솔린 엔진에서 피스톤 캐비티와 분사시기를 변화하여 실린더 내의 연료분포를 가시화함으로써 실린더 내 연료 혼합기 형성과 성층화 과정에 대한 정보를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

기존의 포트분사식 DOHC 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고, 실린더 중심에 와류형 고압 스웰 인젝터를 부착함으로써 중앙 분사방식의 DI 가솔린 엔진으로 개조 하였으며, 기존의 흡기포트를 자체 제작한 스웰러로서 선회유동을 발생시켰고, 캐비티 직경은 분무폭을 고려하여 $d/D=0.35$ (이하 Type S), $d/D=0.40$ (이하 Type M), $d/D=0.45$ (이하 Type L)의 3가지의 형태를 이용하였으며, 캐비티의 깊이는 10mm로 고정하였다. 그리고 연료의 화상을 취득하기 위해 exciplex 형광법을 사용하였으며, 피스톤 캐비티 반경과 각 분사시기 별 실린더 내 연료의 거동 및 혼합기의 공간분포를 분석하기 위하여 연료분포의 가시화, 크랭크 각에 따른 연료의 공간분포에 관한 내용을 조사하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 실린더 내의 연료분포를 조사하기 위한 실험장치로서 가시화 엔진, 구동용

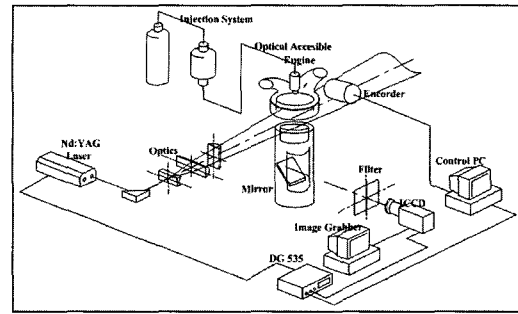


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

전동장치, 화상의 가시화를 위한 광학계, 신호처리계, 그리고 실린더 내부에 연료를 직접분사 할 수 있는 분사계로 구성되어 있다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저의 4차 조화파(266nm, 최대출력 60mJ/pulse, 발광반치폭 7ns)를 여기광원으로 사용하였고, 분무 화상은 ICCD 카메라로 취득하였다. 사용된 인젝터는 와류형 고압 인젝터로 가압용 질소 탱크와 연료 탱크에 연결되어 있다. 신호 처리계는 자체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로, 분사시기를 광원과 카메라의 동기를 위한 인터페이스 보드, 화상취득용 이미지 그래버, ICCD 카메라 셔터제어기와 펄스 발생기, 엔코더 등으로 구성되어 있다.

Table 1은 가시화용 엔진의 제원에 대해서 나타내었다. 가시화용 엔진의 흡기포트를 자체 제작한 스웰러로서 선회유동을 발생시켰다.

Table 2는 실험에 적용된 운전조건 및 분사시기를 나타낸 실험조건이다. 피스톤 캐비티 반경을 변화하여 각 분사시기 별 기·액상의 실린더 내 거동 및 공간분포, 농도장 등에 대한 정보를 얻고자 한다.

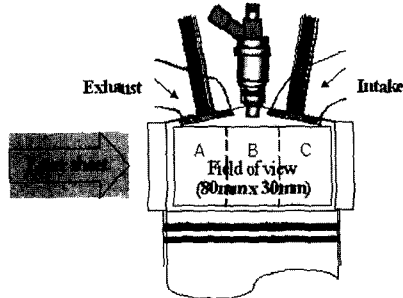
Fig. 2는 사용된 피스톤의 캐비티의 형상과 취득할 화상의 가시영역을 나타낸 것으로 분무폭을

Table 1 Engine specifications

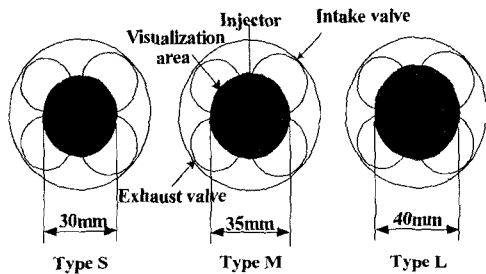
Specification	Resource	
Engine type	4-stroke,4-valves/cylinderS.I. Engine	
Displacement(cc)	1998	
Bore×Stroke(mm)	86×86	
Combustion chamber	Pentroof	
Compression ratio	Type S	9.0:1
	Type M	8.7:1
	Type L	8.3:1

Table 2 Experimental conditions

Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Engine speed (rpm)	450
Injection timing, SOI (bTDC)	60°, 90°, 180°



(a) Side view



(b) Bottom view

Fig. 2 Visualization region

고려하여 피스톤 캐비티 반경에 따라 3가지로서 실험을 행하였다. 본 연구에서는 기존의 포트분사식 DOHC 가솔린 엔진에 가시창을 설치하고 고압 스웰 인젝터를 설치함으로써 중심 분사방식의 DI가솔린 엔진으로 개조하였다.

측방측정일 때의 가시영역은 80×30 (mm)이며, 배기 측에서 흡기 측으로 좌측영역(A), 중심영역(B), 우측영역(C)을 등 간격으로 나누었다. 또한, 하방의 경우에는 실린더 직경에 따라 30mm, 35mm, 40mm로 가시화 하였다.

2.2 실험방법

인젝터의 특성을 분석하기 위해 자유분무상태에서 산란광으로 분무폭, 분무거리, 분무각을 측정하였고, 정상유동 실험을 통해 실험에 있어서 가장 적

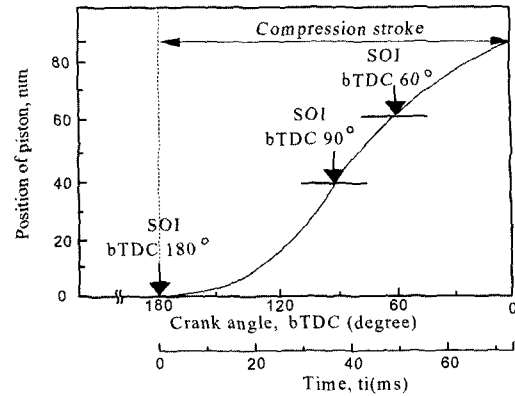


Fig. 3 Relationship between position of piston and injection timing

절한 스웰비를 찾았다. 또한, 실제 엔진의 운전조건과 유사하게 하기 위하여 분위기 기체인 질소를 가열하여 온도를 약 100°C로 유지하였다.

분사압력은 본 연구에서 사용된 직분식 가솔린 엔진용 인젝터의 제원에 따라 5.1MPa로 고정하였다. 실린더 내의 기·액상연료의 거동 및 분포특성을 분석하기 위하여 exciplex 형광법을 이용하여 각 분사시기 별, 피스톤 형상 별, 그리고 텀블유동이 발생하는 기존의 흡기 포트를 자체 제작한 스월러로서 선회유동을 발생시켜 분무화상을 취득하였다. 기준연료와 첨가제는 선행연구에서 사용되었던 것과 같이 핵산을 기준 연료를 사용하였고, exciplex 기법을 적용하기 위하여 플로오르 벤젠과 DEMA를 첨가하였다.

Fig. 3은 크랭크 각과 피스톤의 위치에 따른 분사시기를 나타낸 것이다. 캐비티 직경에 대한 각각의 분사시기에서 조기분사는 BTDC 180°, 후기 분사는 BTDC 90°와 60°에서 연료를 분사하여 취득한 분무화상을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액상연료의 공간분포

Fig. 4는 분사시기와 캐비티의 형태에 따라 분무초기의 액상을 측방과 하방을 나타낸 것이며, 하방의 경우에는 노즐 팁으로부터 25mm인 지점(Z=25mm)에서 나타낸 것이다.

분사시기가 bTDC 180°와 bTDC 90°인 경우에는

L-type에 비해 S-type의 경우에서 형광강도가 높게 나타났다. 이것은 S-type의 경우가 상대적으로 압축비가 높아 분위기 압력이 높기 때문인 것으로 사료된다. 분사시기 별로 비교해 보면, 분사시기가 늦을수록 분무각과 분무폭이 작아지는 것으로 나타났다. 이것은 분사시기가 늦어질수록 분위기 압력이 증가하여 분무로 유입되는 공기의 양이 증가하게 되고, 내·외부의 압력차이가 증가한다. 이것이 분무각과 분무폭이 줄어드는 원인인 것으로 사료된다. 전체 화상이 배기 측에 연료농도가 많이 분포하고 있는데, 이것은 레이저의 광원을 배기 측에서 조사하고 있기 때문에 흡기 측보다는 배기 측으로 형광강도가 높게 나타났다.

3.2 기상연료의 공간분포

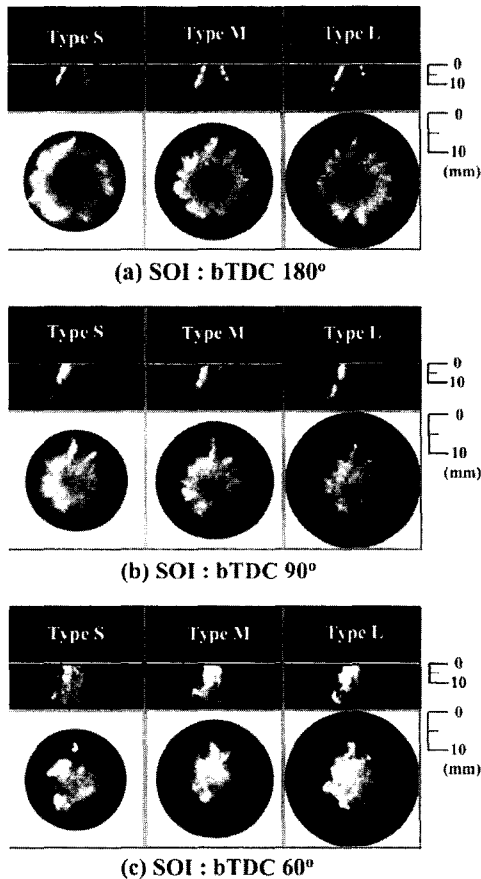


Fig. 4 Spray fluorescence images of liquid phase(side and bottom view, 1.4ms after SOI)

3.2.1 분사시기 bTDC 180°에서의 공간분포

Fig. 5는 분사시기 bTDC 180°일 때 압축말기에서 나타난 증기상을 측방과 하방으로 밝은 부분이 농후한 혼합기를 나타내고 있다. 그리고 하방의 경우에는 노즐 팁으로부터 15mm인 지점(Z=15mm)에서 화상을 취득하였다. 크랭크 각도 bTDC 60°일 때, S-type의 경우에는 농후한 혼합기가 흡기 측에 많이 분포되어 있지만, L-type의 경우에는 비교적 연료가 넓게 분포되어 있다. 크랭크 각도 bTDC 30°에서는 다른 조건에 비해 M-type에서 연료가 균일하게 나타났다.

Fig. 6은 분사시기 bTDC 180°에서 취득한 가시화상을 크랭크 각도에 따라서 세 영역(A영역, B영역, C영역)을 등 간격으로 나누어 나타난 증기상의

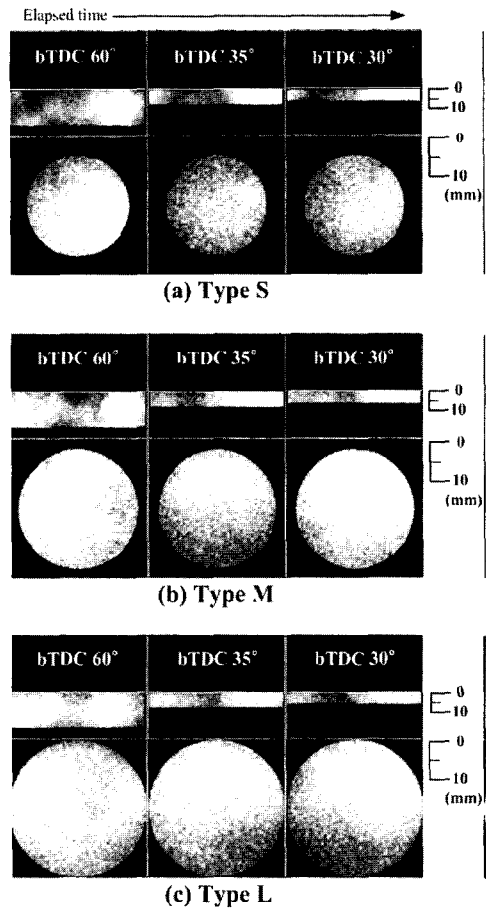


Fig. 5 Spray fluorescence images of vapor phase during the late compression(SOI :bTDC 180°, side and bottom view)

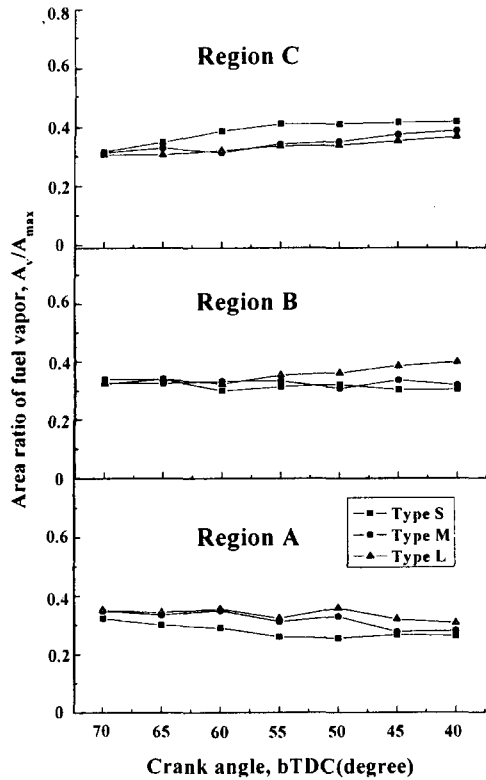


Fig. 6 Area ratio of vapor phase with each region and crank angle(SOI : bTDC 180°, side view)

면적비이다. A영역에서 S-type의 경우에는 압축행정이 진행되면서 크랭크 각도 bTDC 45°까지는 감소하다가 이후에는 거의 균일한 연료면적을 차지하고 있다. 그러나 크랭크 각도 bTDC 45°까지의 면적 감소 폭이 7.7%이하로서 비교적 증기상의 면적이 균일하게 분포하고 있다. 그리고 M-type의 경우에도 연료증기상의 면적 변동 폭이 7.3%이하로서 거의 일정하게 분포하고 있다. 그리고 C 영역에서는 압축 말기로 진행되면서 모든 조건이 증가하고 있는데, 다른 조건에 비해 S-type의 연료증기상의 면적 변동 폭이 10.1%로 다소 많이 나타났고, 상대적으로 L-type의 경우에는 낮은 변동 폭을 나타내었다. 특히, L-type의 경우에는 전체 증기상의 면적 변동 폭이 5%이하로서 다른 조건에 비해 더욱 더 균일하게 연료면적이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

3.2.2 분사시기 bTDC 90°에서의 공간분포

Fig. 7은 분사시기 bTDC 90°일 때 압축말기에

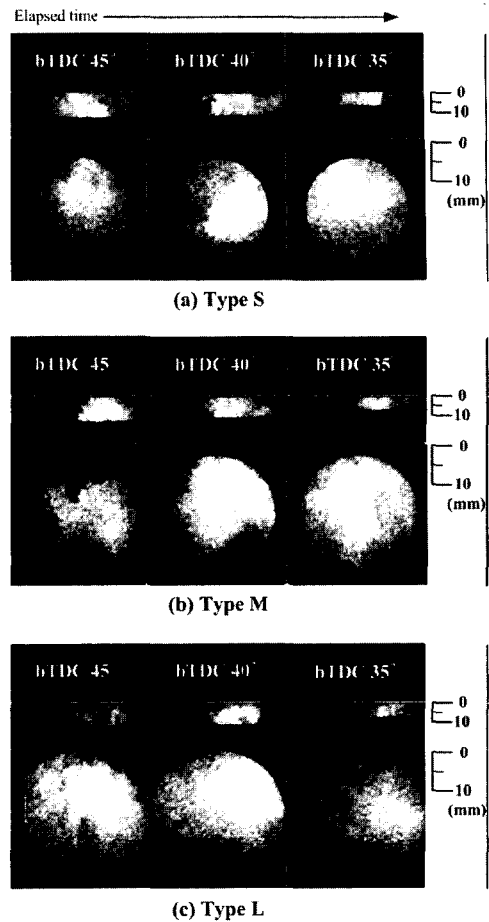


Fig. 7 Spray fluorescence images of vapor phase during the late compression(SOI :bTDC 90°, side and bottom view)

서의 형광화상을 측방과 하방으로 밝은 부분이 농후한 혼합기를 나타내고 있다. 하방의 경우, 노즐 팁으로부터 15mm인 지점(Z=15mm)에서 화상을 취득하였다. 분사시기 bTDC 90°인 경우에는 압축말기로 진행되면서 L-type의 경우에는 농후한 혼합기가 B영역에서 C영역으로 이동하고 있다. S-type의 경우에는 크랭크 각도 bTDC 35°에서 다른 조건에 비해 상대적으로 농후한 혼합기가 B영역에 분포하고 있다.

Fig. 8은 분사시기 bTDC 90°일 때 압축말기에서 증기상의 면적비를 캐비티의 조건에 따라 나타낸 것이다. 크랭크 각도 bTDC 35°에서는 다른 조건에 비해 S-type이 B영역에 연료 증기상의 면적이 집

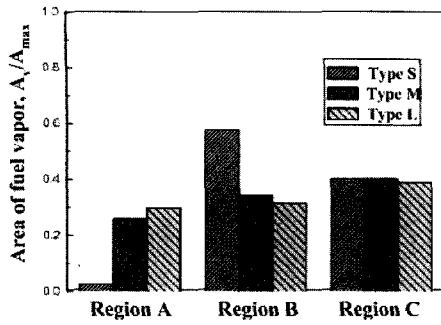


Fig. 8 Area ratio of vapor phase at the late compression stroke(SOI : bTDC 90°, Side view)

증되었다. 선행연구에 따르면, 캐비티의 직경이 작으면 작을수록 선화유동 속도 및 난류강도 등이 증가하게 된다. 따라서 S-type이 경우에는 압축말기에, 다른 조건에 비해 상대적으로 많은 연료가 B영역에 분포하고 있는 것이 캐비티의 영향으로 사료된다.

3.2.3 분사시기 bTDC 60°에서의 공간분포

Fig. 9는 분사시기 bTDC 60°에서 압축말기의 형광화상을 측방과 하방에서 가시화하였다. 하방의 경우, 노즐 팁으로부터 15mm인 지점(Z=15mm)에서 화상을 취득하였다. 분사시기 bTDC 60°는 피스톤의 위치가 거의 상사점에 도달하게 됨으로서 분사된 연료가 캐비티와 충돌이 일어난다. 따라서 대체적으로 농후한 혼합기가 실린더의 중앙영역인 B영역에 분포해있다. 특히, 하방으로 취득한 화상으로 보아 다른 조건에 비해 L-type의 경우에는 캐비티 영역에 많은 연료가 존재하고 있다.

Fig. 10는 크랭크 각도와 캐비티 직경에 대한 연료형광강도를 노즐 팁으로부터 15mm 지점(Z=15mm)에서 나타낸 것이다. 농후한 혼합기가 B영역과 C영역에서 동시에 존재하고 있다. L-type의 경우에는 농후한 혼합기가 초기에는 양분화 되었다가 압축말기에는 농후한 혼합기의 연료가 B영역에서 존재하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 분사시기 bTDC 60°일 때 압축말기에서 측방으로 취득한 화상을 노즐 팁으로부터 15mm 지점(Z=15mm)에서 측정한 화상강도 분포폭이다. 압축말기에는 캐비티 직경이 큰 것이 농후한 혼합기의 분포폭이 넓게 나타났다. 이것은 피스톤이 상사점으로 진행되면서 캐비티 내에 많은 연료가 분

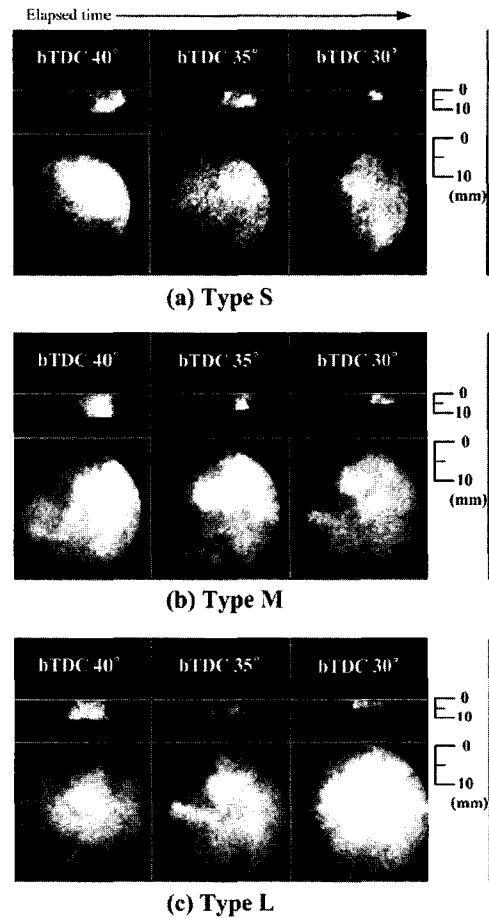


Fig. 9 Spray fluorescence images of vapor phase during the late compression(SOI : bTDC 60°, side and bottom view)

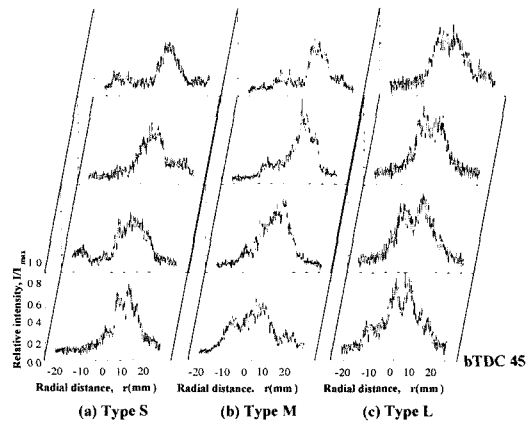


Fig. 10 Fluorescence intensity ratio profile according to crank angle(SOI : bTDC 60°, Z=15mm)

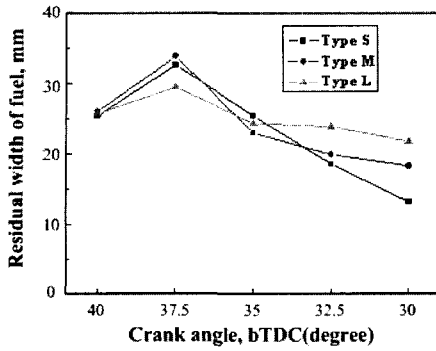


Fig. 11 Residual width of fuel during the late compression (SOI : bTDC60°, Z=15mm)

포 되는 것으로 사료된다.

4. 결론

중앙 분사방식의 직분식 가솔린 엔진에서 캐비티의 형상과 분사시기에 따른 실린더 내부의 혼합기 형성과정을 Exciplex 형광법을 이용하여 가시화하였고, 이에 대한 연료의 액·증기상에 대한 공간분포와 농도분포를 조사해 본 결론은 다음과 같았다.

- 1) 액상연료의 공간분포에서, 분사시기가 늦을수록 형광강도가 강하게 나타났으며, 공간분포는 좁은 영역에서 존재하였다. L-type의 캐비티에 비해 S-type의 경우가, 그리고 분사시기 별로는 후기분사인 bTDC 60°에서 형광강도가 높게 나타났다.
- 2) 증기상에서 분사시기 인 180°인 경우에는 연료 증기상의 공간분포가 실린더 내에서 균일하였고, 분사시기 bTDC 90°인 경우에는 압축말기에 연료가 B영역과 C영역에서 대부분 존재하였으며, 분사시기 bTDC 60°인 경우에는 대체로 B영역에 연료가 집중되었다.

- 3) 후기분사의 경우, 압축말기로 갈수록 연료혼합기의 분포폭은 캐비티 직경의 영향을 크게 받았다. 측방과 하방에서 관찰한 화상을 분석하였을 때, L-type이 가장 컸다.

References

- 1) U. Spicher, J. Reissing, J. M. Kech, J. Gindele, "Gasoline Direct Injection(GDI) Engine-Development Potentialities," SAE 1999-01-2938, 1999.
- 2) G. K. Fraidl, W. F. Piock, M. Wirth, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends, Future Strategies for Injection and Combustion System," SAE 960465, 1996.
- 3) Y. Fukano, H. Hisaki, S. Kida, "Two-Dimension In-Cylinder Flow Field in a Natural Gas Fueled Spark Ignition Engine Probed by Particle Tracking Velocimetry and Its Dependence on Engine Specifications," SAE 1999-01-1534, 1999.
- 4) J. J. Kang, D. J. Kim, "The Effects of Tumble and Swirl Flow on the Behavior of Liquid/Vapor Phases in a DI Gasoline Engine," Transactions of KSAE, Vol.10 No.2, pp.23-30, 2002.
- 5) M. Ekenberg, B. Johansson, "Fuel Distribution in an Air Assist Direct Injected Spark Ignition Engine with Central Injection and Spark Plug Measured with Laser Induced Fluorescence," SAE 2000-01-1898, 2000.
- 6) P. S. Hwang, J. J. Kang, D. J. Kim, "The Effect of Piston Bowl Shape on Behavior of Vapor Phase in a GDI Engine, KSME, Vol.26, No.4, pp.614-621, 2002.