

직분식 가솔린엔진에서 피스톤 형상이 연료 혼합기의 형성과 거동에 미치는 영향

김 동욱¹⁾ · 강 정 중¹⁾ · 최 경 민²⁾ · 김 덕 줄^{*2)}

부산대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 부산대학교 기계공학과²⁾

Effect of Piston Cavity Geometry on Formation and Behavior of Fuel Mixture in a DI Gasoline Engine

Dongwook Kim¹⁾ · Jeongjung Kang¹⁾ · Gyungmin Choi²⁾ · Duckjool Kim^{*2)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735 Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735 Korea

(Received 11 March 2005 / Accepted 2 July 2005)

Abstract : This study was performed to investigate the behavior and spatial distribution of fuel mixtures with different wall angle and diameter of piston cavity in a DI gasoline engine. The spatial distribution of fuel mixtures after impingement of the spray against a piston cavity is one of the most important factors for the stratification of fuel mixture. Thus, it is informative to understand in detail the behavior and spatial distribution of fuel mixtures after impingement in the cavity. Two dimensional spray fluorescence images of liquid and vapor phase were acquired to analyze the behavior and distribution of fuel mixtures inside cylinder by exciplex fluorescence method. The exciplex system of fluorobenzene / DEMA in non-fluorescing base fuel of hexane was employed. Cavity wall angle was defined as an exterior angle of piston cavity. Wall angles of the piston cavity were set to 30, 60 and 90 degrees, respectively. The spray impinges on the cavity and diffuses along the cavity wall by its momentum. In the case of 30 degrees, the rolling-up moved from the impinging location to the round and fuel-rich mixture distributed at periphery of cylinder. In the case of 60 and 90 degrees, the rolling-up recirculated in the cavity and fuel mixtures concentrated at center region. High concentrated fuel vapor phase was observed in the cavity with 90 degrees. From present study, it was found that the desirable cavity wall angle with cavity diameter for stratification in a DI gasoline engine was demonstrated.

Key words : DI gasoline engine(직접분사식 가솔린 엔진), Piston cavity(피스톤 캐비티), Exciplex fluorescence method(Exciplex 형광법), Stratification(성층화), Fuel mixture(연료 혼합기)

Nomenclature

A : fuel area of vapor phase
A_{tot} : total fuel area of vapor phase
D : cavity diameter, mm
Θ : cavity wall angle, degree

I : intensity of image
I_a : average intensity of image
SOI : start of injection

1. 서론

최근 전 세계적으로 연료 절감과 환경오염 문제에 대한 관심이 높아지고 배기가스 규제가 갈수록

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

강화됨에 따라 연비향상과 고효율 및 배기가스 저감에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 요구를 만족하기 위해 하이브리드, 가변 밸브 타이밍 시스템, 연료전지, 대체연료에 대한 연구가 진행되고 있으며, 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 장점을 동시에 구현한 이상적이고 획기적인 기술로서 연료를 직접 연소실내에 분사하는 직접분사식 가솔린 엔진도 많은 관심을 받고 있다. 특히, DISI(Direct Injection Spark Ignition) 엔진은 성층 연소를 이용한 초희박 연소를 구현하여 연비향상과 배출물 저감 등의 효과를 얻을 수 있다.^{1,2)} DISI 엔진의 연소시스템은 고압연료 분사장치, 흡기시스템, 그리고 연소실 형상 등이 적절하게 설계되었을 때 효과적인 성능을 발휘하게 되며 피스톤 캐비티 형상과 관련하여 분사된 연료의 벽면 충돌은 분무의 구조에 영향을 주게 된다.³⁾ 또한, 피스톤 캐비티 근방에서의 분무의 분산 형태가 연료 혼합기의 성층화에 큰 영향을 미치게 된다.⁴⁾

직접 분사 가솔린엔진의 구조적 특징은 희박연소를 위한 성층혼합기를 형성하기 위해 점화 플러그 주위에 농후한 혼합기를 분포시키는 것이 필요하며, 일반적인 방식으로 피스톤 캐비티 내로 연료를 분사한 후 피스톤 형상을 이용하여 성층혼합기를 형성하는 방법이 있다. 특히, 측면 분사 방식에서 피스톤 형상에 따른 연료 증기상의 농도분포 특성과 분무의 가시화에 관한 연구^{5,6)}가 많이 수행되었다. 하지만, 측면 분사보다 공기-연료의 성층화 형성이 크게 유연하여 개발이 용이한 장점을 가지고 있는 중앙 분사 방식^{7,8)}에서의 피스톤 형상에 따른 연료의 농도장 및 거동에 대한 연구^{8,9)}는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 중앙 분사 방식에서 피스톤 캐비티 벽면 형상에 따른 실린더 내 증기상의 거동 및 농도장 분포를 가시화함으로써 DISI 엔진에서의 실린더 내 연료 혼합기 형성과 성층화 과정에 대한 정보를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

기존의 DOHC 엔진을 개조하여 실린더 내에 직접 분사가 가능하도록 하였으며, 인젝터의 위치는 헤드 중앙에 위치하도록 하였다. 본 실험에서 혼합기

의 기·액상 거동을 가시화하기 위해 사용한 실험 장치는 크게 가시화용 엔진, 분무 및 혼합기의 가시화에 사용되는 광학계, 화상 취득을 위한 ICCD 카메라와 필터 등으로 구성된 화상취득계, 자체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로로 구성된 신호처리계, 실린더 내에 연료를 직접 분사할 수 있는 고압 연료 분사장치인 분사계로 구성되어 있다.

Table 1은 본 실험에 사용된 가시화 엔진의 제원에 대해 나타내었다. 가시화 엔진은 실린더 상부의 석영 라이너와 피스톤 상단에 설치된 석영창과 UV 거울을 통해 각 방향에서 실린더 내부를 관찰할 수 있게 설계하였다.

Table 2는 본 실험의 실험조건을 나타낸 것이다. 분사압력은 5.1 MPa로 고정하였다. 인젝터 구동회로의 응답성과 연료의 Exciplex 형광 강도를 고려하여 분사기간은 2ms로 하였고, 실린더 형상이 혼합기 형성과 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실제 운전조건보다 다소 저속 조건(450rpm)을 대상으로 실험을 수행하였다. 분사시기는 bTDC 90°와 bTDC 60°로 하였다.

Table 1 Engine specification

Specifications	Resources
Engine type	4-stroke, 4valve/cylinder, SI engine
Bore × Stroke	86 × 86
Displacement (cc)	1,998
Combustion chamber	Pentroof
Compression ratio	7 ~ 10

Table 2 Experimental conditions

Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Engine speed (rpm)	450
Injection timing, SOI(bTDC)	90°, 60°
Cavity diameter (mm)	30, 40
Cavity wall angle (degree)	30, 60, 90

Fig. 1은 측방과 하방에서 측정되는 가시영역과 레이저의 조사방향을 나타내고 있다. Fig. 1(a)는 측방 측정(Side view)의 경우이고 가시영역은 80mm×30mm이다. 배기측에서 흡기측으로 좌측영역(A),

중심영역(B), 우측영역(C)을 등간격으로 나누었다. 광원은 수직광으로 배기 측에서 흡기 측으로 실린더 중심을 향해 조사하였다. Fig. 1(b)는 하방 측정(Bottom view)의 경우이고 캐비티 직경에 따라 30mm, 40mm로 가시화 하였다. 광원은 수평광으로 실린더 헤드 가스켓으로부터 하방 15mm에서 조사하였다. 연료의 화상을 취득하기 위해 광원으로는 Nd:YAG 레이저의 4차 조화파(266nm, 최대출력 60mJ/pulse, 발광반치폭 7ns)를 여기광원으로 사용하였고, 분무화상은 ICCD 카메라로 취득하였다. 분사시기를 광원과 카메라에 동기시키기 위한 인터페이스보드, 화상취득용 이미지 그래버, 펄스 발생기, 엔코더 등을 사용하였다.

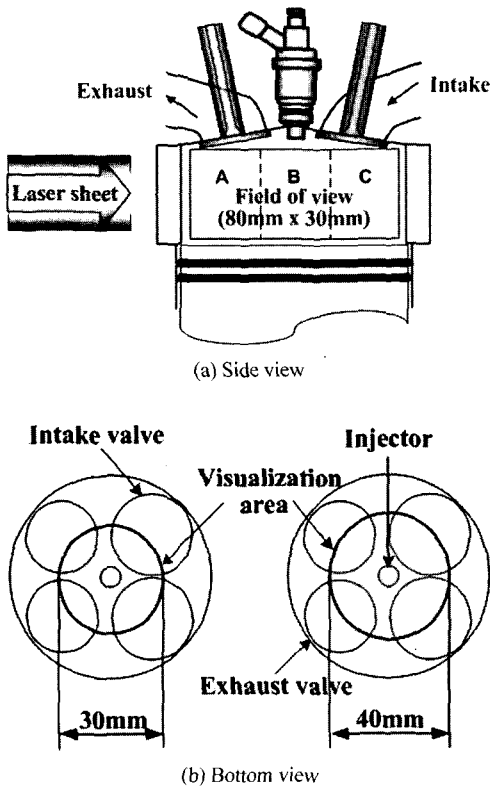


Fig. 1 Visualization region

Fig. 2는 피스톤 캐비티 형상을 정의하고있다. 캐비티 바닥면의 직경을 캐비티 직경(D)으로 정의하였고, 분사시기 bTDC 60° 조건에서 분무폭이 약 29mm 정도이므로 이를 고려하여 캐비티 직경을

30mm와 40mm로 하였다. 캐비티 외각을 캐비티 벽면각(θ)으로 정의 하였으며 벽면각은 30°, 60°, 90°로 각각 실험하였다. 피스톤 캐비티의 깊이는 10mm로 고정하였다.

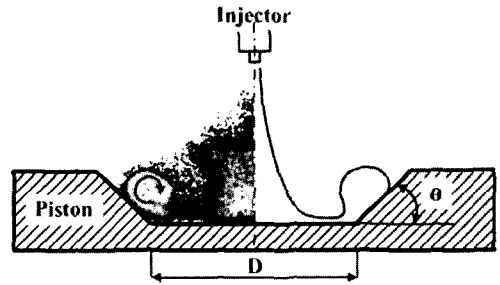


Fig. 2 Piston cavity geometry configuration

2.2 실험방법

분위기 기체는 산소에 의한 quenching 현상을 막기 위해 질소가스를 사용하였고 실제 엔진의 운전 조건과 유사하게 하기 위해 분위기 기체의 온도를 100°C로 유지하였다. 피스톤 캐비티 형상과 분사시기에 따른 실린더 내의 기·액상 연료의 거동 및 분포특성을 분석하기 위하여 exciplex 형광법¹⁰⁾을 이용하였다. 기상과 액상의 이미지를 분리하여 취득하기 위해 특정 파장만을 투과 시키는 대역필터를 ICCD 카메라 앞에 부착하였다. 기상화상의 취득시에는 중심파장이 295nm인 대역필터를 사용하였고 액상 화상의 경우는 중심파장이 400nm인 대역필터를 사용하였다. 또한 여기광의 산란에 의한 잡음을 제거하기 위하여 280nm 이상으로 통과시키는 필터를 사용하였다. 기준연료와 첨가제는 hexan을 기준연료로 사용하였고 exciplex기법을 적용하기 위하여 플로오르벤젠과 DEMA를 각각 체적비 2%와 9%로 첨가하였다.

Fig. 3은 피스톤 캐비티 직경에 따라 실린더 내의 압력변화를 나타낸 것이다. 피스톤 캐비티 형상에 따라 간극 체적의 변화로 압축압력이 다소 차이가 나타나지만, 충돌시기 bTDC 55°까지의 실린더 내 압력의 차이가 크지 않아 혼합기 형성과 거동의 정성적 비교가 가능할 것으로 사료되어 체적변화에 따른 영향은 고려하지 않았다.

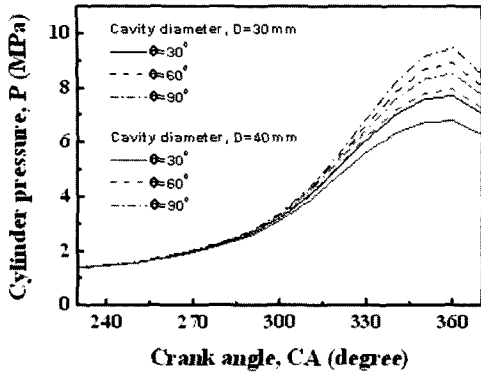
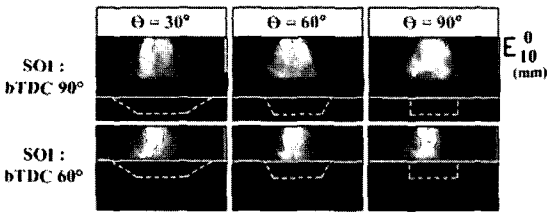


Fig. 3 Cylinder pressure at the test condition

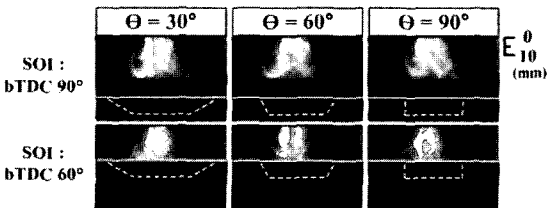
3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료 액상의 분무특성

Fig. 4(a)는 피스톤 캐비티 직경이 30mm에서 분사시기와 캐비티 벽면각 변화에 따른 분무 초기의 액상의 형광화상을 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 캐비티 직경이 40mm에서 분사시기와 캐비티 벽면각 변화에 따른 분무 초기의 액상의 형광화상을 나타낸 것이다. 본 실험에서 사용한 와류형 인젝터의 경우는 분위기 압력에 의해 분무 성장에 영향을 받게 된다. 따라서, 분사시기 bTDC 60°인 경우는 실린더내에 분위기 압력이 분사시기 bTDC 90°인 경우보다 높기 때문에 분무의 수밀도가 높고 분무폭이 좁게 나타났다.



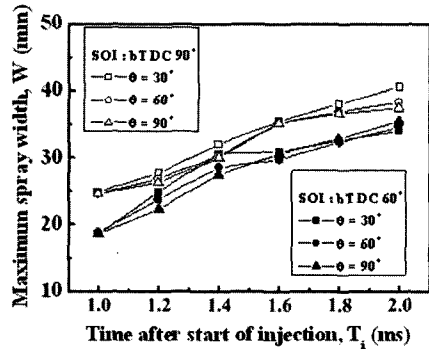
(a) Cavity diameter, D=30mm



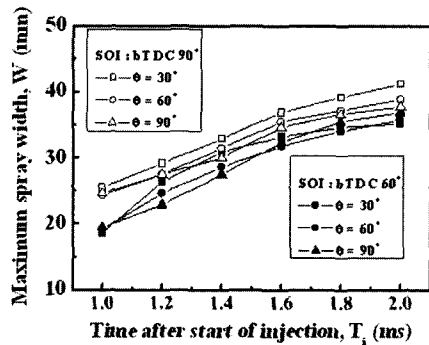
(b) Cavity diameter, D=40mm

Fig. 4 Spray fluorescence images of liquid ($T_i = 1.8\text{ms}$)

Fig. 5는 엔진의 가시영역에서 최대 분무폭(W)의 변화를 분사 후 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 최대 분무폭은 분무 중심축에서부터 반경방향으로 분무의 경계까지의 거리로 정의하였다. Fig. 5(a)에서 분사시기 bTDC 90°인 경우는 분사후 2.0ms에서 최대 분무폭이 약 40mm 정도 되었다. 최대 분무폭의 성장을 고려해 보면 벽면각이 60°와 90°에서 분무의 선단부가 캐비티 외부에 충돌하는 것을 예상할 수 있었다. Fig. 5(b)는 캐비티 직경이 40mm이므로 최대 분무폭의 성장을 고려해 보면 분무가 캐비티 내에 충돌하는 것을 예상할 수 있었다. 분사후 시간이 경과할수록 최대 분무폭은 증가하였으며, 분사시기 bTDC 60°가 분사시기 bTDC 90°에 비해 최대 분무폭이 좁게 나타났다. 캐비티 벽면각에 의한 영향은 분사시기에 대한 영향보다 적었으며, 벽면각이 작을수록 분무폭은 넓게 나타났다. 이것은 캐비티 체적의 변화로 발생한 분위기 압력의 차이에 기인한다.



(a) Cavity diameter, D=30mm



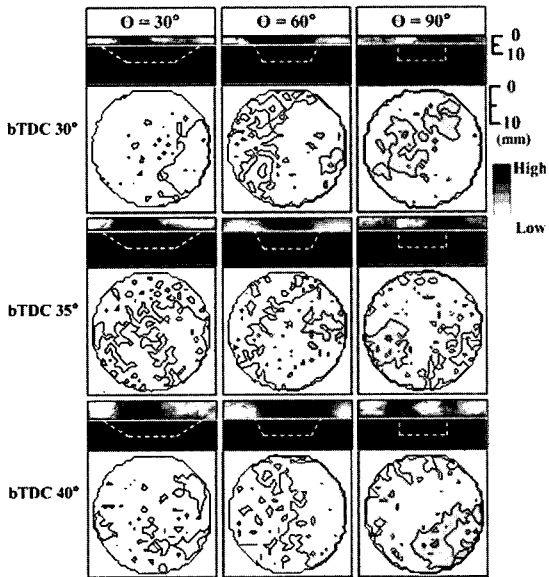
(b) Cavity diameter, D=40mm

Fig. 5 Spray width with elapsed time after SOI

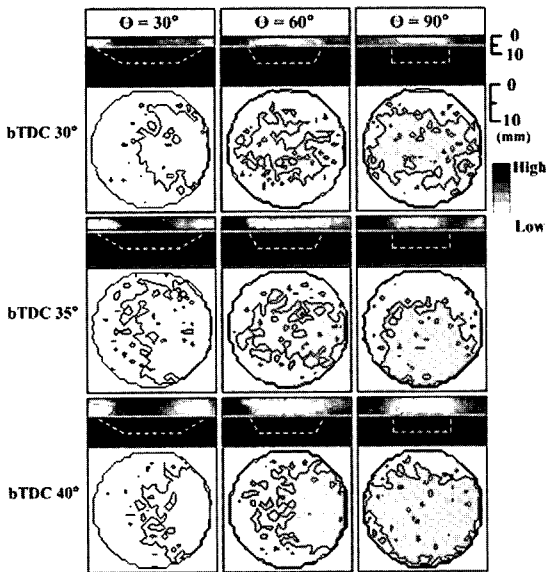
3.2 연료 기상의 분무특성

3.2.1 분사시기 bTDC 90°에서의 공간분포

Fig. 6은 압축말기에서 캐비티 직경과 벽면각에 따른 이미지를 측방과 하방에 대하여 형광화상과 contour 이미지로 각각 나타내었다. 하방의 경우에



(a) Cavity diameter, D=30mm



(b) Cavity diameter, D=40mm

Fig. 6 Spray fluorescence images of vapor phase and vapor phase distribution for wall angles (SOI : bTDC 90°)

는 인젝터 팁으로부터 15mm인 지점(z=15mm)에서 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 캐비티 벽면각 30°에서는 연료의 증기상이 실린더 벽면으로 퍼져나가 실린더 벽면에서 높은 공간분포를 보였다. 벽면각이 60°와 90°에서는 분무가 캐비티 외부에 충돌하여 연료 증기상이 실린더 벽면에 분포하였다. Fig. 6(b)는 캐비티 벽면각이 30°에서는 직경이 30mm인 경우와 유사한 경향을 보였다. 벽면각이 60°와 90°에서는 분무가 캐비티 내에 충돌한 후 캐비티 주위에 잔존하게 되어 연료의 증기상은 캐비티 상부영역에 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 캐비티 벽면각이 클수록 연료증기상이 실린더 중심영역에 집중되었다.

Fig. 7(a)는 인젝터 팁으로부터 15mm인 지점(z=15mm)에서 크랭크각 변화에 따른 연료 증기상의 평균강도(I_a)에 대한 B영역의 강도(I)를 비(I/I_a)로 나타낸 것이다. Fig. 7(b)는 크랭크각에 따른 연료 증기상의 전체면적(A_{tot})에 대한 B영역의 연료 증기면적(A)을 비(A/A_{tot})로 나타낸 것이다. 캐비티 직경이 30mm인 경우는 캐비티 벽면각이 90°에서 압축말기에 B영역의 상대강도가 평균강도보다 조금 높게 나타났다. 하지만, 대부분의 연료 혼합기가 실린더 벽면에 분포하기 때문에 B영역에서 상대강도가 평균강도보다 낮게 나타났다. 직경이 40mm인 경우는 벽면각이 30°에서는 직경이 30mm인 경우와 유사한 경향을 보였다. 벽면각이 60°와 90°에서는 B영역의 상대강도가 평균강도보다 높게 나타났으며, 농후한 혼합기는 중심영역에 분포하였다. 압축말기 B영역에서 연료 증기상의 공간분포는 직경이 40mm, 벽면각이 90°인 캐비티가 높게 나타났다. 하지만, 대부분 B영역에서의 공간분포가 상대적으로 높지 않게 나타났다. 이것은 연료증기상이 실린더 내에 넓게 분포하기 때문으로 사료된다. 특히, 직경이 40mm이고 벽면각이 60°와 90°인 경우는 B영역에서 면적비는 높지 않으나 상대강도가 강하였다. 따라서 농후한 혼합기가 실린더 중심영역에 집중되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2.2 분사시기 bTDC 60°에서의 공간분포

Fig. 8은 압축말기에서 캐비티 직경과 벽면각에

직분식 가솔린엔진에서 피스톤 형상이 연료 혼합기의 형성과 거동에 미치는 영향

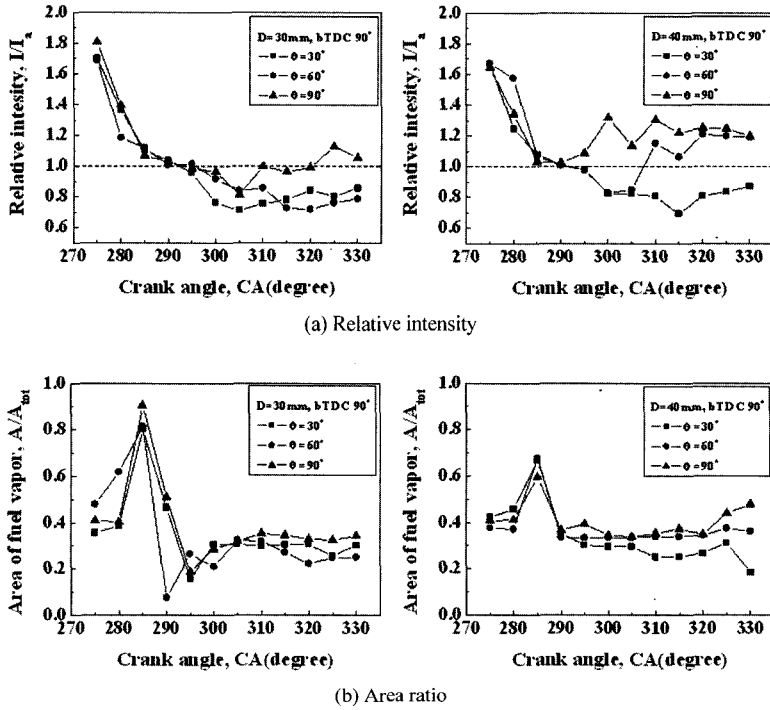


Fig. 7 Relative intensity and area ratio of vapor phase as crank angle

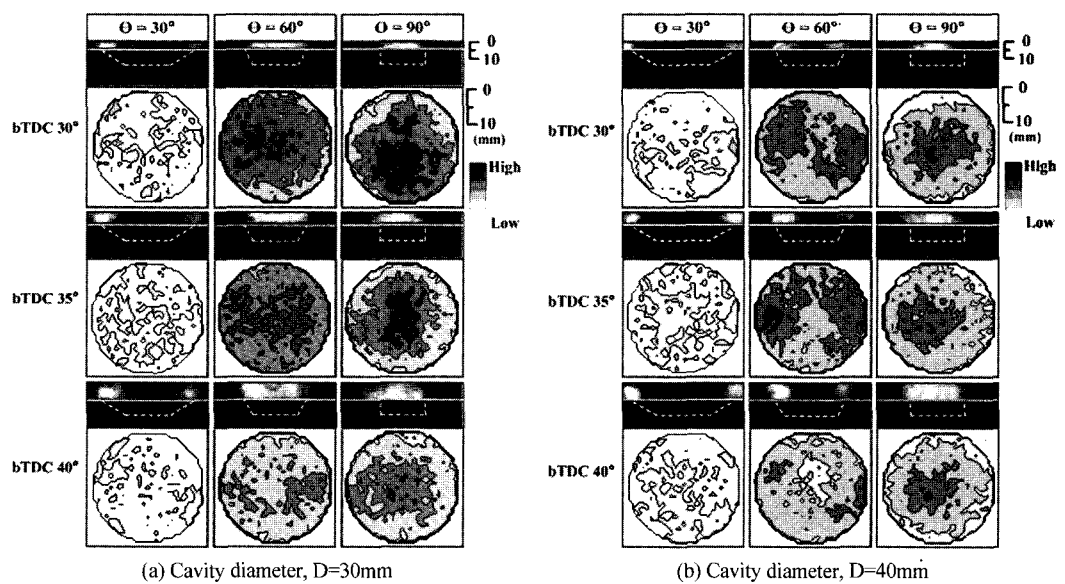


Fig. 8 Spray fluorescence images of vapor phase and vapor phase distribution for wall angles (SOI : bTDC 60°)

다른 이미지를 측방과 하방에 대하여 형광화상과 contour 이미지로 각각 나타내었다. 하방의 경우에는 인젝터 팁으로부터 15mm인 지점(z=15mm)에서

나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 벽면각이 30°는 연료 혼합기가 캐비티 벽면을 따라 실린더 벽면쪽으로 퍼져나가 실린더 벽면에 분포하였다. 벽면각이 60°와

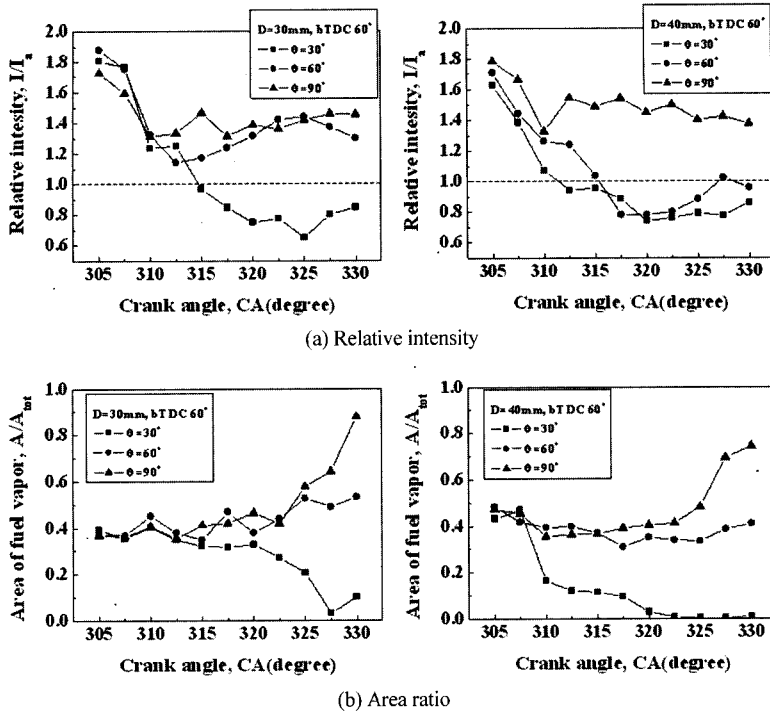


Fig. 9 Relative intensity and area ratio of vapor phase with crank angle

90°에서 연료 혼합기의 채유입에 의해 압축말기 실린더 중심영역에 연료의 증기상의 분포가 집중되었다. Fig. 8(b)는 직경이 30mm인 경우와 비슷한 경향을 보였다. 하지만, 벽면각이 60°일 때는 연료 혼합기가 실린더 중심까지 완전하게 채유입되지 못하여 실린더 중심부분에 연료 혼합기가 다소 희박하게 분포하는 것을 측방과 하방을 통해 확인할 수 있었다. 캐비티 벽면각이 클수록 연료증기상이 실린더 중심영역에 집중되었다.

Fig. 9(a)는 인젝터 팁으로부터 15mm인 지점 ($z=15\text{mm}$)에서 크랭크각 변화에 따른 연료 증기상의 평균강도(I_a)에 대한 B영역의 강도(I)를 비(I/I_a)로 나타낸 것이다. Fig. 9(b)는 크랭크각에 따른 연료 증기상의 전체면적(A_{tot})에 대한 B영역의 연료 증기면적(A)을 비(A/A_{tot})로 나타낸 것이다. 캐비티 직경이 30mm인 경우는 캐비티 벽면각이 30°는 압축말기로 갈수록 중심영역에서 연료 증기상의 상대강도와 공간분포가 감소하였다. 벽면각이 60°와 90°는 연료 혼합기의 공간분포와 상대강도가 높게 나타났다. 직경이 40mm인 경우는 캐비티 벽면각이 30°는 직

경 30mm인 경우와 유사한 경향을 보였다. 벽면각이 60°에서는 연료 혼합기가 중심영역까지 완전히 채유입되지 못하여 중심영역에 연료 증기상의 공간분포가 다소 낮게 나타났다. 벽면각이 90°는 압축말기까지 연료 공간분포와 상대강도가 높게 나타났다. 벽면각이 60°와 90°의 경우는 연료 혼합기가 캐비티 벽면각의 영향으로 분무의 재순환영역이 잘 발달하여 실린더 중심으로 연료 혼합기가 채유입되어 실린더 중심영역에 농후한 혼합기가 집중되었다. 벽면각이 30°인 캐비티의 경우는 재순환영역이 발달하면서 캐비티 벽면을 따라 실린더 벽면으로 퍼져나가기 때문에 중심영역으로 채유입되지 못하고 실린더 벽면에 연료 증기상이 분포하여 B영역에서 연료 증기상의 상대강도와 공간분포가 감소하였다.

4. 결론

직분식 가솔린 엔진의 피스톤 캐비티 직경과 벽면각 변화에 따른 실린더 내의 연료 혼합기의 거동과 공간분포에 대하여 가시화 실험을 통하여 비교적 저속운전조건에서 조사한 결과 다음과 같은 결

론을 얻었다.

- 1) 분사시기 bTDC 90°일 때, 캐비티 직경이 30mm 이고 벽면각이 60°와 90°인 경우는 분무의 선단 부가 캐비티 외부에 충돌하여 중심영역에 혼합기의 공간분포가 낮게 나타났다. 직경이 40mm 이고 벽면각이 60°와 90°인 경우는 연료 증기상이 중심영역에 넓게 분포하였다.
- 2) 분사시기 bTDC 60°일 때, 캐비티 직경이 30mm 이고 벽면각이 60°와 90°인 경우는 실린더 중심으로 연료 증기상이 재유입되어 실린더 중심영역에 농후한 혼합기가 집중되었다. 직경이 40mm이고 벽면각이 60°와 90°인 경우는 증기상이 중심영역까지 완전히 재유입되지 못하여 직경이 30mm인 경우보다 캐비티 중심영역에 다소 희박한 혼합기가 분포하였다.
- 3) 캐비티 벽면각이 30°인 경우는 분사시기와 직경에 관계없이 연료 증기상이 실린더 벽면에 분포하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) T. Kume, Y. Iwamoto, K. Iida, M. Murakami, K. Akishino and H. Ando, "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine," SAE 960600, 1996.
- 2) Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi and H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine," SAE 970541, 1997.
- 3) M. H. Davy, P. A. Williams and R. W. Anderson, "Effect of Injection Timing on Liquid-Phase Fuel Distributions in a Cyclically-Injected four-Valve Direct-Injection Spark-Ignition Engine," SAE 982699, 1998.
- 4) M. Ekenberg and 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.
- 5) M. Tabata, M. Kataoka, T. Tanaka and M. Yamakawa, "Measurement of Fuel Distribution in the Piston Cavity of Direct Injection SI Engine by Using LIF," SAE 2000-01-0240, 2000.
- 6) D. P. Sczomak and G. J. Patterson, "Overview of Central-Injection Air-Assisted SIDI Technology Emissions and Fuel Consumption," SAE 2003-01-0545, 2003.
- 7) S. Hochgreb, "Fuel Distribution and Combustion Characteristics in a Direct-Injection, Spark-Ignition (DISI) Engine Under Stratified Operation," SAE 2001-01-3645, 2001.
- 8) T. A. Kim, J. J. Kang and D. J. Kim, "The Effect of Injection Timing and Cavity Geometry on Fuel Mixture Formation in a Central Injected DI Gasoline Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.2, pp.32-38, 2004.
- 9) P. S. Hang, J. J. Kang and 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.
- 10) W. Ipp, V. Wagner, H. Krämer, M. Wensing and A. Leipertz, "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques," SAE 1999-01-0498, 1999.