

직접분사식 가솔린 엔진에서 분사시기와 흡입유동이 실린더 내 연료의 거동에 미치는 영향

이 정 훈¹⁾ · 강 정 중¹⁾ · 김 덕 줄²⁾

부산대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾

Effects of Injection Timing and Intake Flow on In-Cylinder Fuel Behavior in a GDI Engine

Jeong-hoon Lee¹⁾ · Jeong-jung Kang¹⁾ · Duck-jool Kim^{*2)}

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

^{*2)}Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 27 June 2003 / Accepted 9 September 2003)

Abstract : The purpose of this study is to investigate the effect of the in-cylinder flows and different injection timings on fuel behavior in the cylinder of a GDI engine. Three different flows types induced by using masked port, unmasked port, and port deactivation were tumble, swirl&tumble, and high swirl respectively. LIEF technique was applied to investigate the mixture formation and fuel distribution at ignition time in the transparent engine with optical access through the piston top and upper part of cylinder liner. Injection timings of 180, 90, and 60 degrees before TDC were examined.

It was found that tumble flow was more effective on the homogeneous mixture formation than other flow and swirl flow transported more fuel vapor to the exhaust side at early injection mode, and swirl and swirl & tumble flow made fuel vapor concentrate around the cylinder center at late injection mode.

Key words : GDI engine(가솔린 직접분사 기관), Swirl(선회 유동), Tumble(덤블 유동), LIEF(레이저 유도 엑시플렉스 형광법), Injection timing(분사시기), Homogeneous mixture(균일혼합)

Nomenclature

BTDC : before top dead center
CA : crank angle (degree)
I : fluorescence intensity
r : radial distance (mm)

1. 서 론

기존의 포트 분사(PFI)방식에 비해 실린더 내로

직접 연료를 분사하는 직접분사식 엔진은 연료의 정확한 제어가 가능해 연비의 향상과 배출물의 감소를 실현할 수 있어 최근 수 년 동안 가솔린 직접 분사식 기관에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

가솔린 직접 분사식 기관은 고부하 모드에서는 흡입행정 시에 연료를 분사하여 연료의 증발 잠열에 의한 흡기공기의 냉각 효과로 충전 효율의 증가와 균일혼합을 통해 엔진 출력을 향상하고 부분부하 모드에서는 압축행정 시에 연료를 분사하여 잘 제어된 성층 연소를 통해 초회박 연소의 실현과 펌

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

평로스의 저감으로 저공해, 저연비를 이룰 수 있다.^{1,2)}

하지만, 후기 분사모드에서 연료의 피스톤 충돌과 벽면 젖음에 의한 미연탄화 수소의 증가와 혼합기의 희박으로 인한 불완전 연소나 실화에 의한 엔진의 성능저하와 오염물질 배출의 증가가 문제로 되고 있다.^{3,4)}

안정된 연소의 실현을 위해 연료분사시기, 피스톤 크라운의 형상 그리고 흡기 포트 형상을 파라미터로 한 많은 연구가 수행되고 있으며 각각의 조건에 따라 분무 특성이 다르게 나타났다.⁵⁻⁷⁾ 특히 흡기 유동의 변화에 따른 연료의 거동과 연소특성에 관한 실험적 연구와 수치해석적 연구가 많은 부분에서 수행되었으며 흡기 유동이 연소특성에 많은 영향을 미친다고 하였다.⁸⁻¹¹⁾

따라서 본 연구에서는 흡입유동이 실린더 내 연료의 거동과 혼합기의 공간분포에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 LIEF 기법을 이용하여 실린더 내 연료의 기·액상을 가시화 하였다. 이 화상으로부터 특정 영역에서 형광강도의 변화를 분석함으로써 흡기 유동과 연료의 분사시기가 혼합기의 형성 과정에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험에서 혼합기의 기·액상 거동을 가시화하기 위해 사용한 실험장치의 개략도이다.

실험장치는 크게 가시화용 엔진, 분무 및 혼합기의 가시화에 사용되는 광학계, 화상 취득을 위한 카메라와 필터 등으로 구성된 화상취득계, 신호처리계 그리고 GDI 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. Fig. 2는 각 방향에서 측정되는 가시영역을 나타내고 있다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저의 4차 조화파(266nm, 최대출력 60mJ/pulse, 발광반치폭 7ns)를 여기광원으로 사용하였고, 분무화상은 ICCD 카메라로 취득하였다. 신호처리계는 자

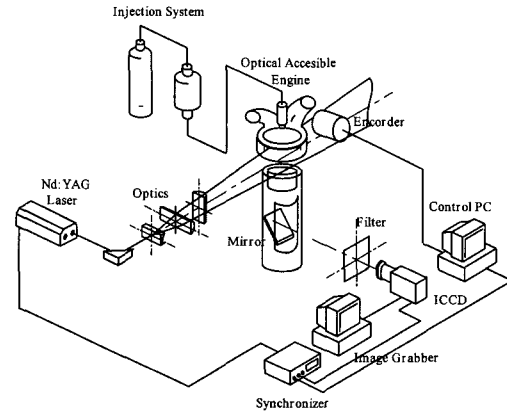


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

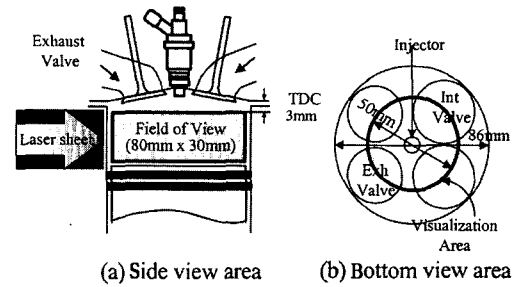


Fig. 2 Visualization area

Table 1 Engine specification

Specification	Resource	
Engine type	4-stroke,4-valves/cylinder S.I. Engine	
Bore×Stroke	86×86 (mm)	
Displacement	500 (cc)	
Combustion chamber	Pentroof	
Compression ratio	10	
Valve timing	I.V.O	BTDC 0°
	I.V.C	ABDC 60°
	E.V.O	BTDC 45°
	E.V.C	ATDC 0°

체 제작한 인젝터 솔레노이드 제어회로, 분사시기를 광원과 카메라에 동기시키기 위한 인터페이스 보드, 화상취득용 이미지그래버, 펄스 발생기, 엔코더 등으로 구성되어 있다. 분사계는 와류형 고압 인젝, 연료탱크 및 가압용 질소탱크로 구성되어 있다. 실험에 사용된 인젝터는 직접 분사식 고압스웰 인젝터로서 분공의 직경이 930um, 분무각은 60°이며 분무의 구조는 중공원추형이다.

Table 2 Swirl and tumble ratio

Ratio \ Flow type	Swirl	Swirl/ Tumble	Tumble
Swirl	3.6	1.4	0
Tumble	2.1	1.6	1.2

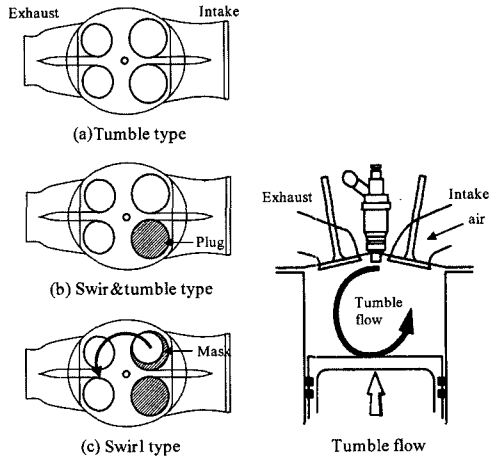


Fig. 3 Schematic of intake port shapes

Fig. 3은 실험에 사용된 흡기 포트 형상을 나타낸 그림이다. (a)는 기존의 포트 분사 방식 엔진에서 사용된 실린더 헤드로서 텀블형으로 사용하였다. (b)의 경우는 흡기포트의 한쪽에 플러그를 설치하여 다른 하나로만 흡기가 가능하도록 한 형상으로 스월 텀블 혼합형으로 사용하였고, (c)의 경우는 스월 텀블 혼합형 포트에 마스크를 부착하여 스월 강화형 포트로서 사용하였다. 각각의 포트에 대한 유동 특성을 정성적으로 파악하기 위해 정상유동 조건하에서 패들 휠 방식을 이용하여 스월비와 텀블비를 구하였다. Table 2에 그 각각의 값을 나타내었다.

2.2 실험 방법

Table 3는 본 실험의 조건을 나타낸 것이다. 분위기 기체를 불활성 기체인 질소를 사용하여 화염의 발생을 없애고 산소에 의한 형광의 소광을 줄였다. 실제 엔진의 운전조건과 유사하게 하기위해 분위기 기체를 가열하여 온도를 100°C로 유지하였다. 분사압력은 최근의 직분식 가솔린 엔진용 인젝터의 분사압력에 근접하는 5.1Mpa로 고정하였다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 직분식 스월 인젝터의 분사량을

Table 3 Experimental conditions

Injection time (BTDC)	Early	180°
	Late	90°, 60°
Injection pressure (MPa)		5.1
Injection duration (ms)		2
Engine speed (rpm)		450

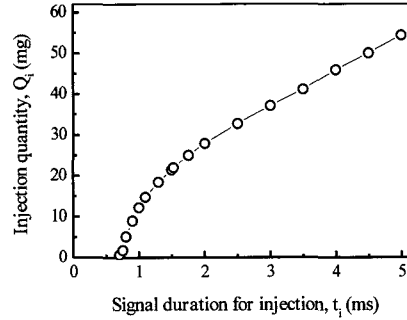


Fig. 4 Fuel delivery characteristic of injector with injection signal duration

나타낸 그림으로 자체 제작된 인젝터 구동회로의 응답성과 연료의 Exciplex 형광 강도를 고려하여 분사시간은 2ms로 두었으며 엔진 속도는 450rpm으로 유지하였다.

측방 측정(Side view)의 경우 광원은 수직광으로 배기측에서 흡기측으로 실린더 중심을 향해 조사하였고, 하방 측정(Bottom view)의 경우 광은 수평광으로 실린더 헤드 가스켓으로부터 하방 15mm에서 조사하였다.

분사시기는 조기분사 모드에서는 BTDC 180°CA를 후기분사 모드에서는 BTDC 90°, 60°CA에 대해 조사하였다.

실린더 내 혼합기의 거동 및 분포특성을 분석하기 위해 Exciplex 형광법을 이용하여 각각의 분사시기에 대해 유동을 변화시켜가며 연료 증기상의 화상을 취득하였다. 기준 연료와 첨가제는 헥산에 플로오르 벤젠과 DEMA를 각각 체적비 89%, 2%와 9%로 혼합하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 조기 분사모드에서 흡기유동의 영향

Fig. 5는 조기 분사 모드인 BTDC 180°CA에서 각

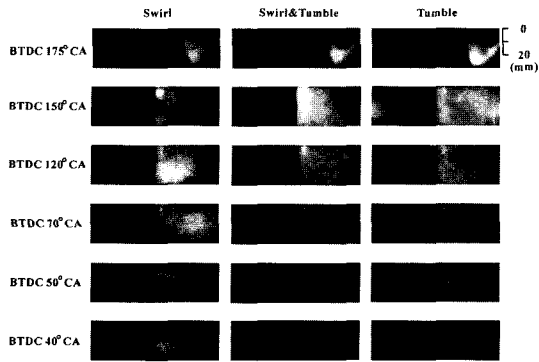


Fig. 5 Spray fluorescence image according to crank angle (SOI: BTDC 180°, Side view)

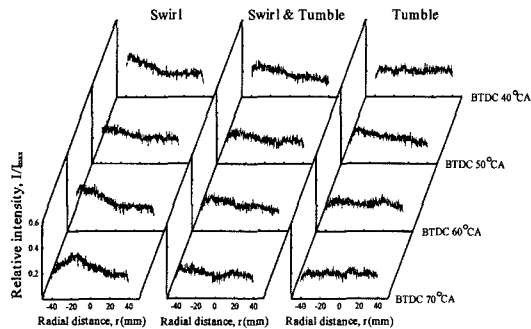


Fig. 6 Fluorescence intensity ratio profiles according to crank angle(SOI:BTDC 180°, z=15mm)

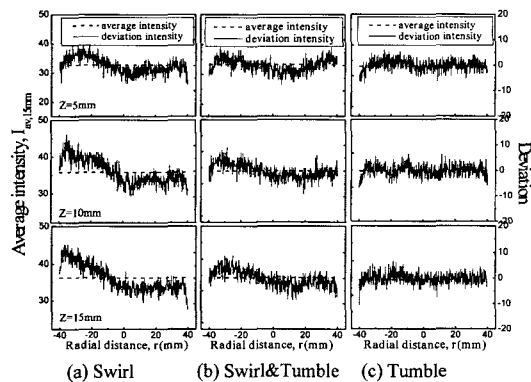


Fig. 7 Fluorescence intensity fluctuation at BTDC 40°CA (SOI:BTDC 180°, z=5, 10, 15mm)

각의 유동에 대한 연료 증기상의 거동을 분사개시부터 압축행정 말기까지 크랭크 각에 대하여 나타낸 것이다.

분사가 종료된 BTDC 175°CA 에서 연료증기상의 형상은 각각의 흡기유동의 영향에 의해 상이한 거

동을 보이고 있다. 스월 유동의 경우는 연료증기상이 스월축인 실린더 중심으로 분포하고 있으며, 스월텀블 혼합형과 텀블 유동 경우는 연료증기상이 흡기에 의해 배기측으로 향하고 있다. 하지만, 서로 다른 거동을 보이던 연료증기상은 압축이 진행되면서 실린더 배기측에서 실린더 전체로 퍼져나가 압축말기에는 연소실 전체에 분포하였다.

Fig. 6은 압축행정 말기인 BTDC 70°CA에서 BTDC 40°CA까지 실린더 헤드로부터 하방 15mm에서의 실린더 반경방향으로의 형광강도 분포를 나타낸 것이다.

스월 유동의 경우, BTDC 70°CA에서 연료증기상은 배기측에서 농후한 분포를 하고 있으며 압축이 진행되는 동안에도 이 현상을 유지해 BTDC 40°CA에서도 흡기측에 비해 배기측에서 더 농후한 분포를 보였다. 스월 텀블 혼합형의 경우, BTDC 70°CA에서 큰 차이를 보이지 않던 연료증기상의 분포는 압축이 진행되면서 혼합기가 배기측으로 이동하여 압축말기인 BTDC 40°CA에서 배기측이 흡기측에 비해 약간 농후한 분포를 하고 있다. 텀블 유동의 경우는 다른 두 유동에 비해 연료 증기상이 압축과정 동안 실린더 내에 균일하게 분포하고 있다.

Fig. 7은 BTDC 40°에서 실린더 헤드로부터 하방으로 5, 10, 15mm 위치에서 평균형광강도와 그 편차를 나타낸 것이다. 스월 유동의 경우는 배기측이 흡기측에 비해 높은 값을 보이며 또한 연소실의 윗부분보다 아랫부분에서 연료 증기상의 분포가 불균일한 반면 텀블 유동의 경우는 각각의 위치에서 균일한 분포를 보이고 있다.

Fig. 8은 피스톤에 부착된 가시창을 통해 취득한 각각의 유동에 대한 형광강도를 Contour로 표현한 것이다. 형광화상은 실린더 헤드로부터 15mm 아래 위치에서 혼합기의 분포를 나타낸다.

하방에서 관측된 Contour 이미지에서도 텀블유동이 다른 두 유동에 비해 압축 말기에서 연소실 전체에 균일한 혼합기 분포를 보이고 있다.

본 연구에서는 텀블 유동의 경우가 다른 두 유동에 비해 균일 혼합에 적절한 것으로 나타났으며, 이는 실린더 내 텀블 유동이 스월 유동에 비해 압축과정 중에 큰 스케일의 난류성분이 작은 스케일의 난

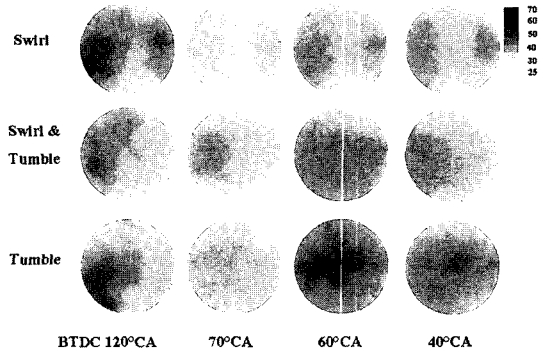


Fig. 8 Vapor-phase distributions for different flows (SOI: BTDC 180°, Bottom view, z=15mm)

류성분으로 변화하면서 균일한 혼합기 형성을 촉진시키는 것으로 사료된다.

3.2 후기 분사 모드에서 흡기 유동의 영향

3.2.1 BTDC 90°CA 분사

Fig. 9는 후기 분사모드인 분사시기 BTDC 90°CA에서 각각의 유동에 대한 연료증기상의 가시화상을 크랭크 각도 변화에 대해 나타낸 것이다.

후기 분사의 경우에는 압축이 진행되는 동안 흡기유동이 약해져 분사가 종료된 BTDC 85°CA에서 연료 증기상의 거동에 큰 영향을 미치지 못했다. 다만 스웰 유동이 연료가 반경방향으로 퍼지는 것을 막아 스웰유동의 경우가 분무폭이 가장 작았고 텀블 유동의 경우가 가장 넓게 나타났다. BTDC 70°CA 이후 실린더 양측으로 나뉘어진 연료는 압축이 진행되는 동안 실린더 벽을 따라 상승하였으며 압축 말에는 스웰과 스웰 텀블 혼합형의 경우 연료 증기상이 실린더 중심으로 향하는 거동을 보였으나 텀블 유동의 경우는 그 경향이 약하게 나타났다.

Fig. 10은 하방측정을 통해 취득한 연료 증기상의 형광강도 분포를 Contour로 나타낸 것이다.

스웰과 텀블 혼합형의 경우 BTDC 70°CA에서 실린더 벽쪽에 위치하고 있던 연료 증기상이 압축이 진행되면서 실린더 중심부를 향해 이동하는 반면, 텀블 유동의 경우는 압축 말기에도 연료 증기상의 분포가 실린더 중심은 희박하고 주변부가 농후한 상태를 보이고 있다.

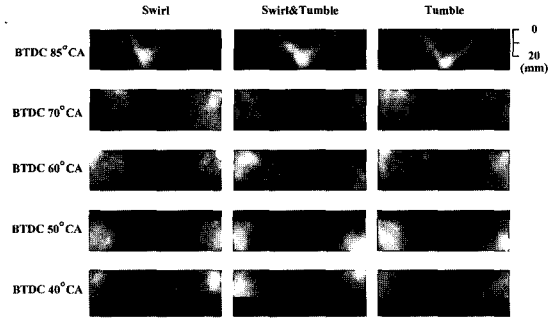


Fig. 9 Spray fluorescence image according to crank angle (SOI: BTDC 90°, Side view)

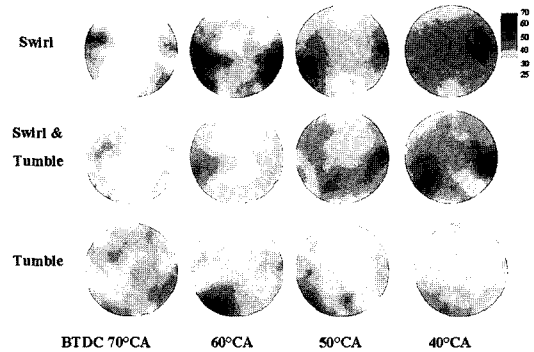


Fig. 10 Vapor-phase distributions for different flows (SOI: BTDC 90°, Bottom view, z=15mm)

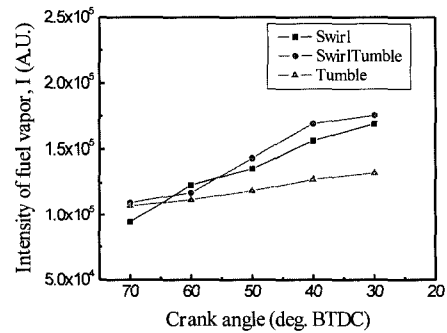


Fig. 11 Change of intensity of vapor at spark region for different flows (SOI: BTDC 90°, z=15mm)

Fig. 11은 각 유동에 대해 실린더 헤드로부터 15mm 아래 위치에서 압축이 진행되는 동안 실린더 중심부 부근의 혼합기의 농도분포 변화를 나타낸 것이다.

세 유동 모두 유사한 경향을 보이고 있으며 압축이 진행될수록 스웰과 스웰텀블 혼합형의 경우는

실린더 중심부 부근의 혼합기 농도가 농후해지는 반면, 텀블유동의 경우는 혼합기를 연소실 내에 균일하게 분포하게 하며 상대적으로 실린더 중심 주변부가 희박한 상태를 보이는 것으로 사료된다.

성층연소를 목적으로 하는 후기분사 모드에서는 텀블 유동보다는 알맞은 스월비를 갖는 흡기유동이 더 적절할 것으로 사료된다.

3.2.2 BTDC 60°CA 분사

Fig. 12과 13은 후기 분사모드인 분사시기 BTDC 60°CA에서 각각의 유동에 대한 연료증기상의 가시화상과 하방측정을 통해 취득한 연료 증기상의 형광강도 분포를 Contour로 각각 나타낸 것이다.

압축말기인 BTDC 60°CA 분사에서는 유동이 연료 증기상의 거동에 미치는 영향은 미약하였으며, BTDC 55°CA에서 연료는 피스톤에 충돌하였다. 충돌 후에도 연료는 상부로 이동하지 않고 피스톤면

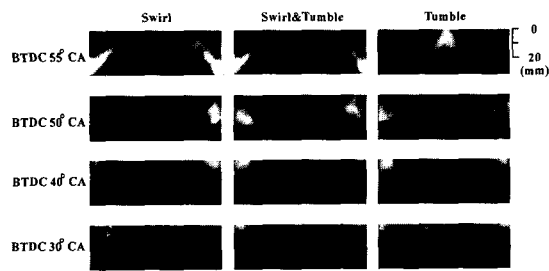


Fig. 12 Spray fluorescence image according to crank angle (SOI: BTDC 60°, Side view)

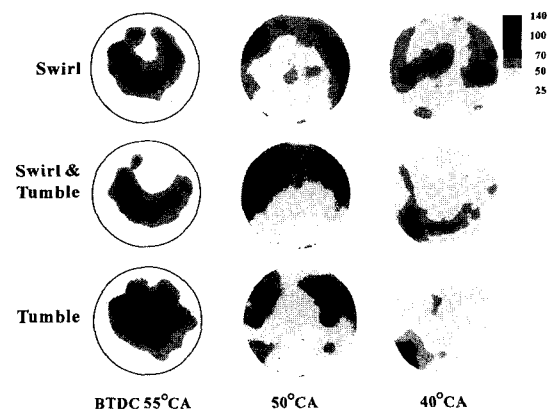


Fig. 13 Vapor-phase distributions for different flows (SOI: BTDC 60°, Bottom view, z=15mm)

을 따라 실린더 벽면으로 이동하며 넓고 불균일하게 분포하였다. 또한 하방측정의 경우 BTDC 40°CA에서 실린더 벽으로 이동한 연료는 가시영역 바깥으로 위치하고 있어 가시화상에서 연료증기상은 희박한 분포를 보였다.

4. 결론

흡기 유동의 변화와 분사시기에 따른 실린더 내 혼합기의 거동과 공간분포에 대한 가시화 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 측방과 하방측정이 가능한 가시화 엔진과 LIEF 기법을 이용하여 직접분사식 가솔린엔진의 실린더 내 연료증기상의 거동과 공간분포의 관측이 가능하였다.
- 2) 조기분사 모드인 BTDC 180°CA 분사에서는 분사 후 점화시기까지 연료의 증발시간이 충분하여 혼합기가 연소실 전체에 분포하였으며, 텀블 유동이 다른 두 유동에 비해 압축말기에 연소실 내 균일혼합을 형성하는데 유리하였다. 반면, 스월 유동의 경우는 배기측에 농후한 연료 증기상을 분포시켰다.
- 3) 후기분사 모드인 BTDC 90°CA 분사에서는 텀블 유동에 비해 스월 유동과 스월·텀블 혼합형의 경우 압축말기에 실린더 중심에 더 농후한 혼합기 분포를 형성하였다.
- 4) 압축 말기 분사인 BTDC 60°CA에서는 유동의 영향은 매우 미약했으며 연료가 피스톤에 충돌하였다. 충돌한 연료 증기상은 피스톤 면에 넓고 불균일하게 분포하였다.
- 5) 연료 증기상의 거동에 미치는 흡기유동의 영향은 조기분사했을 경우가 압축말기 분사시보다 크게 나타났다. 특히, 압축말기 분사의 경우, 적절한 피스톤 형상이 필요하다는 것을 알았다.

References

- 1) Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi, H. Ando, "Development of Gasoline Direct Injection Engine," SAE 970541, 1997.
- 2) F. Zhao, M. C. Lai, D. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-Injection Gasoline

- Engine,” *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol.25, No.5, 1999.
- 3) R. Stanglmaier, J. Li, R. Matthews, “The Effect of In-cylinder Wall Wetting Location on the HC Emissions from SI Engines,” SAE 1999-01-0502, 1999.
 - 4) M. Maricq, D. Podsiadlik, D. Brehob, M. Haghooie, “Particulate Emissions from a Direct-Injection Spark Ignition(DISI) Engine,” SAE 1999-01-1530, 1999.
 - 5) H. J. Kim, D. S. Choi, D. J. Kim, “Concentration Distribution of Liquid/Vapor Phases under In-Cylinder Flow Field with Different Injection Timings,” *Transactions of KSAE*, Vol.9, No.5, pp.96-104, 2001.
 - 6) J. J. Kang, D. S. Choi, 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.
 - 7) P. S. Hwang, J. J. Kang, D. J. Kim, “The Effect of Piston Bowl Shape on Behavior of Vapor Phase in a GDI Engine,” *Journal of KSAE*, Vol.26, No.4, 2002.
 - 8) Y. Moriyoshi, H. Nomura, Y. Saisyu, “Evaluation of a Concept for DI Gasoline Combustion Using Enhanced Gas Motion,” SAE 980152, 1998.
 - 9) S. Lee, K. Tong, B. D. Quay, J. V. Zello, D. A. Santavicca, “Effects of Swirl and Tumble on Mixture Preparation During Cold Start of a Gasoline Direct-Injection Engine,” SAE 2000-01-1900, 2000.
 - 10) T. Alger, M. Hall, D. Matthews, “Effects of Swirl and Tumble on In-Cylinder Fuel Distribution in a Central Injected DISI Engine,” SAE 2000-01-0533, 2000.
 - 11) Y. J. Kim, S. H. Lee, N. H. Cho, “Effect of Air Motion on Fuel Spray Characteristics in a Gasoline Direct Injection Engine,” SAE 1999-01-0177, 1999.