

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.11.878

미산란 기법에 의한 고압 6공 연료분사기의 분무형상에 대한 실험적 연구

김 성 수[†]

(2008년 8월 4일 접수, 2008년 8월 22일 수정, 2008년 8월 27일 심사완료)

Experimental Study on Spray Structure of a High Pressure 6-Hole Injector by Mie Scattering Technique

Seong Soo Kim

Key Words: Swirl Flow(선회유동), Tumble Flow(텀블유동), 6-Hole Injector(6공 연료분사기), Direct Injection Spark Ignition(직접분사식 전기점화), Spray Structure(분무형상), Mie Scattering Technique(미산란 기법)

Abstract

The spray characteristics of a high pressure 6-hole injector were examined in a single cylinder optical direct injection spark ignition (DISI) engine. The effects of injection timing, in-cylinder charge motion, fuel injection pressure and coolant temperature were investigated using the 2-dimensional Mie scattering technique. It was confirmed that the in-cylinder charge motion played a major role in the fuel spray distribution during the induction stroke while the propagation of fuel spray was restrained during the compression stroke by the increasing pressure and the upward moving piston. In additions, it was confirmed that the liquid fuel droplets existing at the sprays edges were vaporized by the increase of the coolant temperature.

1. 서 론

직접분사식 가솔린 기관은 유해배출가스 저감과 연료소비율 향상의 동시에 만족할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 제 1세대 분사 시스템인 연소실 벽면 유도방식은 성층 연소방식으로 연료소비율을 20%까지 향상시켰으나 유해배출가스인 HC와 NOx 등의 저감효과는 그리 크지 않았다.^(1,2) 최근 분무유도(Spray guided) 방식의 제 2세대 연료분사 시스템을 적용한 직접분사식 가솔린 기관에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽³⁾ 특히 연료분사 시스템의 핵심부품인 고압다

공 연료분사기와 외부개방형 피에조(Outward open piezo) 연료분사기는 안정적인 분사패턴과 분사연료의 공간분포성이 우수하여 성층연소의 가연범위를 개선하고 균질혼합의 경우에도 기존의 방식에 비해 매우 뛰어나 제 1세대 시스템의 단점을 보완할 수 있는 대책이 되어 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 직접분사식 가솔린 기관의 연소실 내에 요구되는 공기연료 혼합기를 공급하는 것은 성공적인 연소성능을 확보하는데 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 흡입유동, 연료분사시기 및 냉각수 온도에 따른 고압 6공 연료분사기의 분무형상을 가시화하여 각 조건에 따른 분무특성을 관찰하였다.

2. 실험장치 및 가시화 기법

2.1 실험장치

본 연구에 사용한 단기통 가시화 직접분사식

[†] 회원, 신라대학교 공과대학 자동차기계공학과
E-mail : sskim@silla.ac.kr
TEL : (051)999-5712 FAX : (051)999-5652

가솔린 기관의 사양은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 분무유도 방식의 직접분사식 가시화 기관은 펜트 루프형 4밸브 실린더 헤드로 구성되어 있다. 흡기유동을 형성하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 2개의 흡기포트 중 한 개의 끝단에 선회조절 밸브를 설치하였다. 선회유동은 선회조절 밸브를 닫을 때 유도되고 선회조절 밸브를 열면 텀블유동이 형성된다. 또한 펜트 루프형 연소실을 가시화하기 위해 Fig. 1(b)와 (c)와 같이 2개의 펜트 루프형 수정 창과 측면을 가시화 할 수 있도록 수정 라이너를 설치하였다. 점화플러그와 고압 6공 연료분사기는 Fig. 1(d)와 같이 실린더 헤드의 중앙에 일렬로 설치되어 있다. 모든 실험은 모터링 조건에서 수행하였으며 데이터 측정은 배기 측의 캠축에 설치한 옵티칼 픽업 장치와 0.25°CA당 펄스가 생성되는 크랭크 축에 설치한 엔코더(Muirhead vacetric)로 각도를 측정하였다. 연료분사압력은 커먼레일형 연료공급 장치를 사용하여 70bar와 120bar로 조정하였고 냉각수 온도는 냉각수 온도 조절 장치를 이용하여 40°C와 90°C로 조절하였다.

2.2 미산란 이미지측정 장치

Fig. 2는 실린더 내의 연료분무 형상의 미산란 이미지 측정 장치의 구성을 나타내고 있다. 미산란 이미지를 측정하기 위해서 가시화 기관에서 분사된 연료의 분무형상을 제논 플래시램프를 이용하여 분무산란을 유도하였고 산란된 분무 이미지는 Nikkor 망원렌즈를 부착한 비증폭 12비트 CCD PCO SensiCam 카메라를 이용하여 촬영하였다. 이미지 획득시간은 시간조절 카드(NI PCI-6602)가 장착된 엔진 컨트롤 장치의 다목적용 트리거 신호를 이용하여 조정하였다. 제논 램프의 충전시간을 고려하여 엔진 회전수 1000 rpm에서 각 조건에서의 미산란 분무 이미지는 15초당 1개씩, 총 3개를 획득하였다. 실험에 사용한 고압 6공 연료분사기의 노즐부 형상과 획득이미지의 형상을 Fig. 3에 표시하였다. 미산란 이미지는 A-A 면과 B-B 면 이미지를 측정하였고 전체적인 유동특성에 따른 이미지는 B-B 면에서 측정하였으며, 냉각수 온도상승에 따른 기화영역 추출을 위해서는 A-A면의 이미지를 이용하였다. 미산란 이미지 측정을 위한 실험조건은 Table 2에

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	Spray guided pentroof DISI DOHC
Bore x Stroke (mm)	92x95
Compression ratio	10.5
Displacement volume (cc)	498
Intake ports	Swirl/Tumble
Angle between valves	45°
Valve timing	
I VO (BTDC)/I VC(ABDC)	6 °CA / 50 °CA
E VO (BBDC)/E VC(ATDC)	50 °CA / 6 °CA

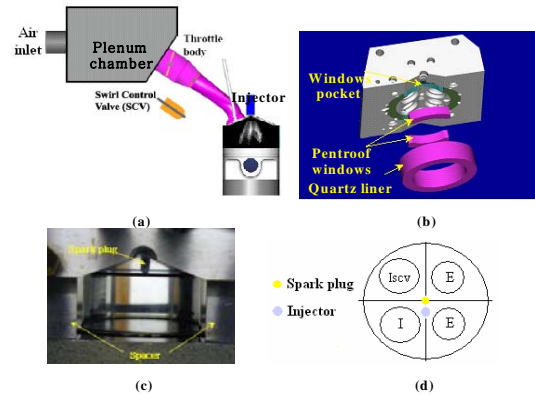


Fig. 1 Engine set up: (a) Schematic of engine set-up (b) Optical access arrangement (c) Front view optical access (d) Cylinder head configuration

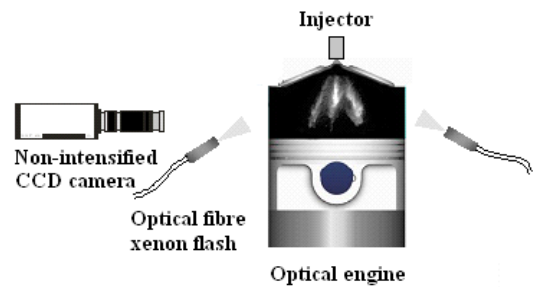


Fig. 2 Mie scattering apparatus set-up

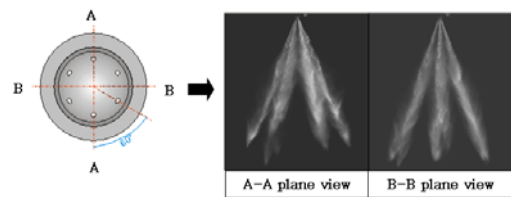


Fig. 3 Nozzle of injector and fuel spray

Table 2 Experimental conditions

Description	Specification
Injection duration	1ms
Inlet air temperature	20°C
Coolant temperature	40/90°C
Fuel injection pressure	70/120bar
Fuel	Iso-octane
Start of injection	
Homogeneous charge mode	60, 90, 120°C ATDC
Stratified charge mode	270, 285, 300°C ATDC

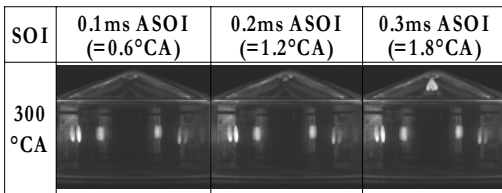


Fig. 4 Mie spray images by elapsed time

나타내었다. 연료의 분사기간은 1ms이고 연료분사 시작시기(SOI, Start Of Injection)는 균질혼합 모드인 경우에는 흡기과정인 ATDC 70°C A, 90°C A, 120°C A, 성층혼합모드인 경우에는 압축과정인 ATDC 280°C A, 300°C A, 320°C A로 하였다. 연료분사시작 시기는 연료분사 시스템 제어장치의 제어신호로 임의 크랭크 각도에서의 분무 이미지를 획득할 수 있다. Fig. 4는 엔진 회전수 1000 rpm, 냉각수 온도 40°C, 연료 분사압력 70bar 조건에서 ATDC 300°C A에서 연료를 분사했을 때 경과시간에 따른 분무 이미지를 나타낸 것이다. 이 그림에서 분무지연 시간이 약 0.2ms임을 알 수 있다. 따라서 각 조건에서의 분무형상은 분무시작 후 (ASOI, After Start Of Injection) 0.3ms부터 0.1ms간격으로 1.1ms까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균질혼합기 공급모드에서의 분무형상

고압 6공 연료분사기는 기관의 전 영역에서 매우 안정된 분무구조 특성을 가지고 있다. 특히 연소실의 압력, 연료분사 시기 등에 관계없이 거의 설계사양의 연료 분무각도와 넓은 공간 분포성의 장점을 가지고 있다. 직접분사식 가솔린 기관에서 균질혼합기를 공급해야 할 경우, 흡기과정에서 연소실 내에 연료를 분사하여 공기연료의 혼합기가 연소실 공간 전체에 고루 분포되도록

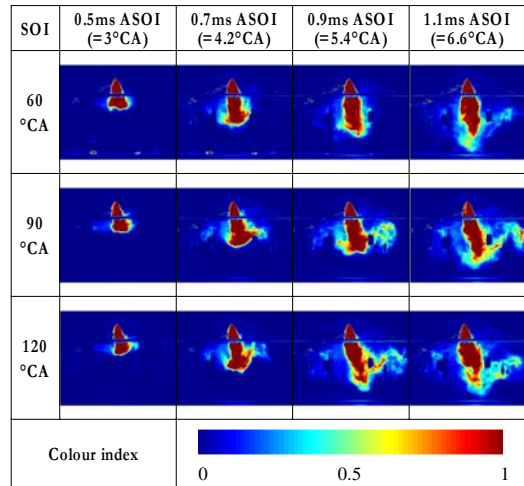


Fig. 5 Mie images during the induction stroke with swirl flow

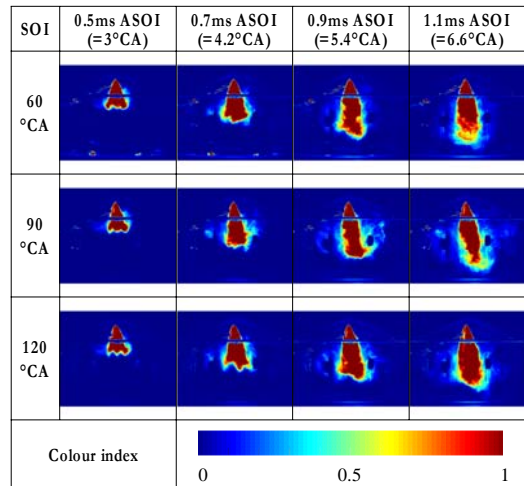


Fig. 6 Mie images during the induction stroke with tumble flow

해야 한다. 이를 위해서는 연소실의 흡입유동 특성에 따라 최적의 연료분사 시기를 결정하여야 하는데 본 연구에서는 흡입과정의 ATDC 60°C A, 90°C A, 120°C A의 세 가지 연료분사 시기를 적용하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 엔진회전수 1000 rpm, 냉각수 온도 40°C, 연료 분사 압력 70bar일 때 흡입유동에 따라 분사 후 경과시간 0.5~1.1ms에서 측정된 미산란 분무 이미지를 나타낸 것이다. Fig. 5는 선회유동일 때의 미산란 분무 이미지인데 전체적으로 두 가지의 특징을 나타내고 있다. 첫째는 분사된 연료분무가 흡입밸브를 통해 유입되는 흡입유동의 강한 영향으로 6공 노즐에서 분사된 제

트가 개별 분사경로를 유지하지 못하고 흡입선회 유동방향으로 경로가 변경되어 서로 혼합되어 개별 제트를 구별할 수 없다. 또한 전체적인 분무의 축이 유동방향으로 경사지는 것을 확인할 수 있으며 이의 영향은 분사 후 0.7ms 이후부터 더욱 뚜렷하게 나타난다. 둘째로 분무 끝단에서 분무연료의 일부가 유동방향으로 분리되는 현상을 나타낸다. 이러한 현상은 분사 시기가 ATDC 90°CA, 120°CA인 경우가 ATDC 60°CA인 경우보다 더욱 강하게 나타난다. 이로써 흡입과정에서 연료를 분사하는 균질혼합기 공급모드에서 흡입선회유동은 고압 6공 연료분사기에서 분사된 연료가 연소실 내에 분포하는 데 큰 작용을 한다. Fig. 6은 텀블유동일 때의 미산란 분무 이미지이다. 선회유동 때와 유사하게 흡입밸브를 통해 유입된 흡입 텀블유동이 분무형상에 영향을 주어 6공노즐의 개별 제트가 서로 혼합하는 특성을 보인다. 그러나 분무 축의 경사도는 선회유동의 경우보다 크지 않으며, 분무연료의 끝단에서의 연료분무의 분리현상이 일어나지 않는다. 따라서 균질혼합기 공급모드에서 흡입 선회유동이 흡입 텀블유동보다 분사된 연료를 연소실 내에 고루 분포시키는데 크게 작용함을 알 수 있다.

3.2 성층혼합기 공급모드에서의 분무형상

직접분사식 가솔린 기관에서 성층혼합기를 공급할 경우, 점화시기에 최적의 연소 가능한 혼합기가 점화플러그 부근에 공급되어야 한다. 이 농후한 혼합기는 국부적으로 좁은 지역에 존재하며 나머지 부분은 거의 공기로 구성된다. 따라서 전체적인 공연비는 매우 희박하여 공연비가 거의 30~50의 영역을 유지한다. 직접분사식 가솔린 기관에서 성층혼합기를 공급하는 방법은 압축과정에서 적정량의 연료를 분사하는 것이다. 본 연구에서는 성층혼합기를 공급하기 위하여 압축과정의 ATDC 270°CA, 285°CA, 300°CA의 세 가지 연료분사 시기를 적용하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 엔진회전수 1000 rpm, 냉각수 온도 40°C, 연료 분사 압력 70bar일 때 흡입유동 조건에 따라 분사 후 경과시간 0.5~1.1ms에서 측정된 미산란 분무 이미지이다. Fig. 7은 선회유동일 때의 미산란 분무 이미지이다. 분무형상은 흡입과정에서 측정된 것과는 달리 6공 노즐에서 분사된 개별제트가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

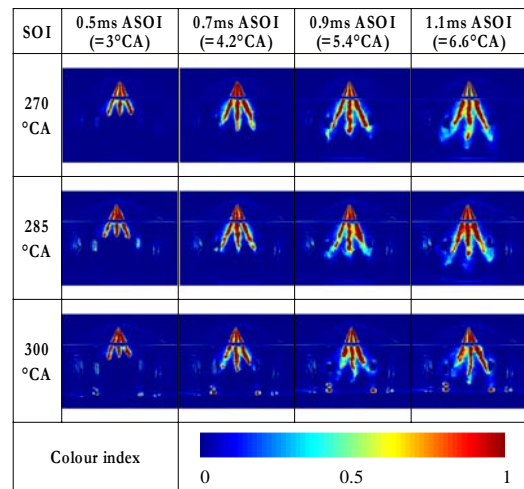


Fig. 7 Mie images during the compression stroke with swirl flow

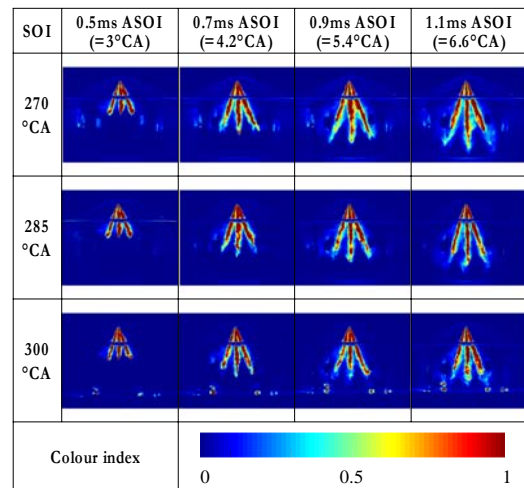


Fig. 8 Mie images during the compression stroke with tumble flow

이는 압축과정이 되면서 흡입유동의 선회 주유동의 세기가 약해져 개별 노즐에서 분사된 분무의 경로에 영향을 줄 정도로 크지 않게 때문이다. 압축과정에서는 실린더 헤드 방향으로 상승하는 피스톤으로 인하여 연소실의 압력이 상승하여 분무연료가 전파되는 형상이 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히 분사시기가 ATDC 300°CA인 경우 분사 후 0.5ms부터 상승하는 피스톤의 영향을 받아 다른 분사 시기의 경우보다 도달 거리가 다소 줄어드는 경향을 나타낸다. Fig. 8은 텀블유동일 때의 미산란 분무 이미지이다. 분무형상은 선회유동의 경우와 같이 6공 노즐에서 분사된 개별제트가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 분사시기

가 ATDC 300°CA인 경우 분사 후 0.5ms부터 피스톤의 영향을 받아 다른 분사시기의 경우보다 도달 거리가 다소 줄어드는 경향을 보인다. 이로써 성층혼합기를 공급하기 위해 압축과정에서 연료를 분사하는 경우에는 흡입 선회유동과 텀블유동은 흡입과정에서 형성된 주유동이 압축과정에서 그 주 유동의 세기가 점차 약해져 흡입과정의 경우와는 달리 개별제트의 분무에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있으며 이와 동시에 상승하는 피스톤의 영향으로 분무성장이 다소 억제되는 것을 알 수 있다.

3.3 연료 분사압력에 따른 분무형상

연료 분사압력에 따른 분무형상을 관찰하기 위하여 엔진회전수 1000 rpm, 냉각수 온도 90°C, 연료공급 압력 70bar와 120bar인 조건에서 압축과정인 ATDC 300°CA에서 연료를 분사하였다. Fig. 9는 분사 후 경과시간 0.5~1.1ms에서 측정된 미산란 분무 이미지이다. 연료 분사압력을 70bar에서 120bar로 증가시킬 경우 분사 후 0.5ms에서는 분무성장이 서로 큰 차이가 없다가 0.7ms에서 부터는 120bar인 경우의 분무성장이 70bar의 경우보다 증가함을 알 수 있다. 이것은 고압 6공 연료 분사기의 기계적인 구조로 인하여 120bar에서 분사지연기간이 커서 초기 분사가 늦게 이루어지고 이후 고압으로 인한 분무의 운동량이 커 0.7ms부터 분무의 성장이 70bar의 경우보다 커짐을 알 수 있다. 또한 분사 후 1.1ms인 경우에 120bar에서 분사한 연료의 분무가 피스톤 크라운부와 접촉하는 현상을 보이고 있다. 이로 인해 크라운부에 연료의 액막이 형성될 경우 배출가스 중 HC성분이 많이 생성되므로 성층혼합기를 공급할 때 특별히 주의해야 할 조건이 된다.

3.4 분무형상에서의 기화영역 추출

미산란 기법은 기화되지 않은 액적에 의해 산란되는 빛을 이용하는 것이다. 특히 성층혼합기 공급모드에서는 냉각수 온도가 상승하고 압축과정에서 상승한 연소실의 압력에 의해 연소실 내의 공기온도가 상승하게 되면 고압 6공 연료분사기에 의해 연소실에 분사된 연료는 기화하게 된다. 분사된 연료분무의 기화는 연료액적의 크기를 작게 하여 연소에 좋은 영향을 줄 수 있다. 따라서 분사연료의 기화정도를 측정할 수 있다면

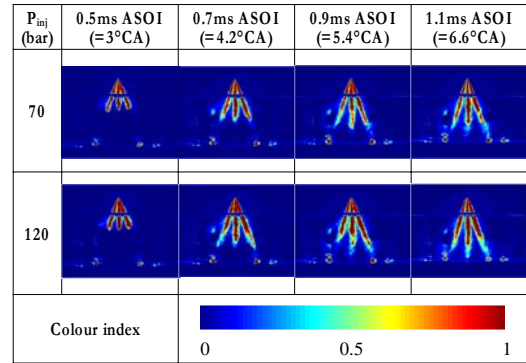


Fig. 9 Mie images during the compression stroke with tumble flow

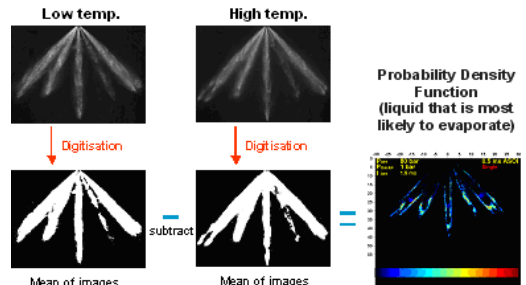


Fig. 10 Mie image processing for vaporizing region

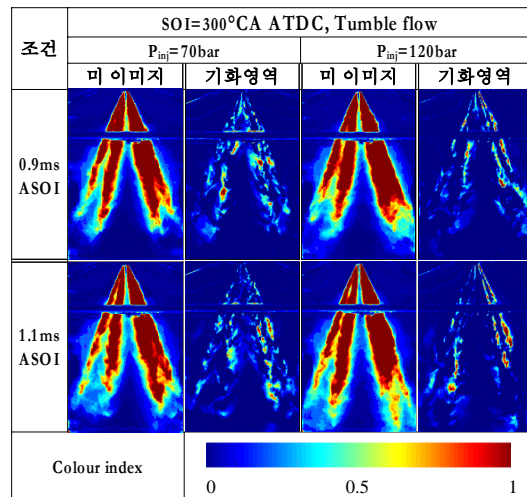


Fig. 11 Vaporizing region of fuel spray by the increased coolant temperature

성층연소를 최적화하는데 상당한 도움이 될 수 있다. 레이저형광 법을 이용하여 분사된 연료의 액상과 기상을 구분하여 분무연료의 기화정도를 측정할 수 있으나 그 방법이 매우 복잡하고 연료에 형광첨가제를 첨가하여 실제 연료의 기화특성

을 완벽하게 분석하는 것은 다소 어려운 실정이다. 그러나 정성적이지만 냉각수 온도 상승에 따라 촬영된 미산란 분무 이미지를 Fig. 10과 같은 이미지 처리방법을 적용할 경우 분무연료의 기화영역을 추출할 수 기법이 Mitroglou 등에 의해 개발되었다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 엔진회전수 1000 rpm, 텀블유동 조건, 연료분사압력 70bar와 120bar, 냉각수 온도 40°C와 90°C에서 측정된 미산란 이미지를 이용하여 기화영역을 추출하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 대체적으로 냉각수 온도가 40°C에서 90°C로 상승함에 따라 분사된 액체연료의 일부가 개별제트의 가장자리에서 기화되는 것을 알 수 있다. 이는 분사연료인 이소옥탄의 끓는점이 1bar에서 102~105°C이므로 90°C로 상승한 냉각수 온도는 분사된 연료의 무화에 좋은 영향을 준다고 할 수 있다. 냉각수 온도를 끓는점 이상으로 하여 실험을 할 경우 보다 많은 연료가 기화될 것으로 기대되지만 본 실험의 결과는 냉각수 온도가 40°C에서 90°C로 상승할 경우 연료분사 기간 동안 개별제트분무의 가장자리에 존재하는 일부의 액체연료가 기화하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

미산란 기법을 이용하여 제 2세대 직접분사식 가솔린 기관에서 흡입유동에 따른 고압 6공 연료 분사기의 분무형상의 특성을 관찰하였다. 균질혼합기 공급모드에서는 흡입 선회유동이 분무형상에 큰 영향을 주어 연료의 공간 분포특성이 흡입 텀블유동보다 우수하였다. 성층혼합기 공급모드에서는 흡입과정동안 생성되었던 주유동이 압축과정이 됨에 따라 그 세기가 약해져 연료의 분무형상에 큰 영향을 주지 못하였으며 압축과정동안 상승하는 피스톤과 이로 인해 상승하는 압력의 영향으로 분무성장이 억제되었다. 또한 냉각수 온도가 상승함에 따라 6공 노즐에서 분사된 연료는 개별 제트의 가장자리에서 액체연료가 부분적으로 기화되는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구를 수행할 수 있도록 도움을 주신 영국 시티대학교의 Prof. C. Arcoumanis, Dr. J. M. Nouri, Dr. Y. Yan, Dr. N. Mitroglou와 Mr. T. Flemming, Mr. J. Ford께 깊이 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Nouri, J. M. and Whitelaw, J. H., 2002, "Effect of Chamber Pressure on the Spray Structure from a Swirl Pressure Atomiser for Direct Injection Gasoline Engines," *Proc. of the 1st Int. Conference on Optical Diagnostics*, ICOLAD, 1, pp. 121~129.
- (2) Wirth, M., Piock, W. F., Fraidl, G. K. K., Schoeggi, P., and Winklhofer, E., 1998, "Gasoline DI Engines: the Complete System Approach by Interaction of Advanced Development Tools," *SAE 980492*.
- (3) Fraidl, G. K., Piock, W. F., and Wirth, M., 1996, "Gasoline Direct Injection: Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems," *SAE 960465*.
- (4) Wirth, M., Zimmermann, D., Friedfeldt, R., Caine, J., Schamel, A., Davies, M., Peirce, G., Storch, A., Ries-Mueller, K., Gansert, K.P., Pilgram, G., Ortmann, R., Wuerfel, G. and Gerhardt, J., 2004, "A Cost Optimised Gasoline Spray Guided Direct Injection System for Improved Fuel Economy," *Seminar on Fuel Economy and Engine Downsizing*, Institution of Mechanical Engineers, One Birdcage Walk, London.
- (5) Nouri, J. M. and Whitelaw, J. H., 2006, "Impingement of Gasoline Sprays on Angled Plates," *Int. Journal of Atomization and Sprays*, Vol. 16, No. 6, pp. 705~726.
- (6) Li, T., Nishida K. and Hiroyasu, H., 2004, "Characterization of Initial Spray from a D.I. Gasoline Injector by Holography and Laser Diffraction Method," *Int. Journal of Atomization and Sprays*, Vol. 14, pp. 477~494.
- (7) Mitroglou, N., 2005, "Multi-Hole Injectors for Direct-Injection Gasoline Engines," *PhD Thesis*, The City University.