

가시화를 이용한 가솔린 엔진의 실린더 벽면에서의 연료액막 거동 분석

조 훈[†] · 황승환^{*} · 이종화^{**} · 민경덕^{***}
(2003년 1월 20일 접수, 2003년 8월 11일 심사완료)

Investigation of the Liquid Fuel Film Behavior on the Cylinder Liner in an SI Engine

Hoon Cho, Seunghwan Hwang, Jonghwa Lee and Kyoungdoug Min

Key Words: Liquid Fuel Film(연료액막), SI Optical Engine(가솔린 가시화 엔진), Visualization(가시화), Laser-Induced Fluorescence(레이저 유도 형광법)

Abstract

The investigation of liquid fuel film on the cylinder liner is an essential to understand the engine-out hydrocarbon emissions formation in SI engines. In this research, two-dimensional visualization was carried out to investigate the liquid fuel film on the quartz liner in the optical engine. For this, the optical engine with hydraulic system was designed based on the commercial SI engine. The visualization was based on the laser-induced fluorescence with total reflection technique. Using a quartz liner and a special lens, only the liquid fuel film on the liner was visualized. With using this technique, the distribution of the fuel film on the cylinder liner was measured for different engine conditions and injection timing in the optical engine.

1. 서론

가솔린 엔진에서 시동 초기나 예열기간 동안 실린더 벽면에 존재하는 연료액막은 미연탄화수소 발생에 중요한 영향을 미친다. 실린더 벽면에 형성되는 연료액막의 메카니즘은 다음과 같이 분류된다. 흡기과정 초기 역류에 의해 흡기포트의 연료액막으로부터 분산된 크기가 큰 액적의 유입, 흡기과정 중 흡기포트 연료액막이 직접 유입되어 실린더 벽면에 연료액막을 형성하는 경우, 그리고 흡기과정 말기 흡기밸브 주위에 있는 연료액막은 흡기밸브에 의해 스퀴징(squeezing)된 후 실린더 내로 유입된다.^(1,2) 스퀴징 된 연료들은 피스톤 상단에 연료액막을 형성하는 것으로 알려

져 있다.⁽³⁾ 또한 흡기밸브가 열려있는 동안 분사되는 연료는 실린더 벽면과 직접 충돌하여 배기밸브 아래의 실린더 벽면에 상당량의 연료액막을 형성한다.

실린더 벽면의 연료액막은 압축과정 동안 피스톤 링에 의해 탑 랜드 크레비스로 유입되어 연소과정 동안 연소되지 않고, 팽창·배기 과정동안 산화되거나 기화되어 방출된다. 이러한 현상은 미연탄화수소 발생에 직접적인 영향을 끼친다.⁽⁴⁾ 그러나 피스톤 표면에 생성된 연료액막은 크레비스 볼륨과 같이 화염이 미치지 못하는 장소로의 이동이 거의 불가능하므로 실린더 벽면에 형성된 연료액막에 비해 연소되거나 후-화염 산화과정(post flame oxidation) 동안 산화될 확률이 더 커서 미연탄화수소 발생에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 알려져 있다. 이에 많은 연구자들이 실린더 벽면의 연료액막에 대한 연구를 수행하였다. Alkidas⁽⁵⁾ 등은 프로판과 가솔린을 이용한 엔진실험을 통하여 실린더 내의 연료액막이 미연탄화수소 발생에 미치는 영향을 간접적으로 추정하였다. 그는 프로판과 가솔린에 대한 크레비스 효과가 동일하다고 가정하고 가솔린에 의한 연료액

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : choon@plaza1.snu.ac.kr

TEL : (02)880-8363 FAX : (02)874-2001

* 회원, 국민대학교 자동차대학원

** 회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

막 효과에 의한 미연탄화수소 발생 영향을 연구하였다. Stanglmaier⁽⁶⁾ 등은 스파크 플러그 일체형 프로브를 이용하여 실린더 벽면의 연료액막이 미연탄화수소 발생에 미치는 영향을 연구하였다. 그는 LPG 가스를 이용하여 엔진을 운전하면서 프로브를 이용하여 가솔린을 인위적으로 실린더 벽면에 직접 분사하여 연료액막을 형성시키는 방법을 사용하여 연료액막에 대한 연구를 수행하였다. 그는 실린더 벽면의 연료액막 위치에 따른 미연탄화수소 발생 경향을 연구하였으며, 연구결과 배기밸브 하단의 실린더 벽면에 형성되는 연료액막이 미연탄화수소 발생에 가장 큰 영향을 미친다고 제시하였다.

미연탄화수소 발생에 미치는 연료액막에 대한 간접적인 연구는 활발히 이루어져 왔으나 연료액막의 형태나 분포위치 등 직접적인 측정에 대한 연구는 미진하였다. 최근 가시화 방법과 장비의 발달로 연료액막 측정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Dawson⁽⁷⁾ 등은 평면 레이저 유도 형광법(PLIF)을 이용하여 실린더로 유입되는 연료액막의 분포를 크랭크 각도 단위로 분석하였다. 여러 장의 가시화 결과를 종합하여 연료액막 유동 분포를 시간적으로 분석하였다. Satio⁽⁴⁾ 등은 적외선 램프와 형광 물질을 섞은 연료를 이용하여 실린더 벽면의 연료액막의 존재를 규명하였다. 그는 가시화 방법으로 레이저 유도 형광법과 백-라이트 방법을 혼합하여 가시화 실험을 수행하였다. 가시화를 통해 연료액막이 미연탄화수소 발생에 미치는 과정을 설명하였으며, 가스 샘플링을 이용하여 실린더 내의 연료액막을 간접적으로 정량화 하였다. Stanglmaier⁽⁸⁾ 등은 스트로브를 사용한 백-라이트 기법을 이용하여 모터링 조건에서 실린더 벽면의 연료액막을 가시화 하였다. 그는 실린더 반대편에서 빛을 입사시키고 그 빛에 의한 그림자 효과로 연료액막을 가시화 하였다.

보다 정확한 연료액막 분포에 대한 정보는 흡기 시스템이나 분사 시스템 설계 시 중요한 요소로서 미연탄화수소 저감 대책의 기본이 된다. 이에 본 연구에서는 조⁽⁹⁾ 등이 발표한 가시화 방법을 바탕으로 모터링 조건과 연소 조건에서 분사 시기에 대한 실린더 벽면의 연료액막을 가시화 하였고, 또한 이러한 가시화 기법으로 흡기포트의 연료액막을 규명하였다.

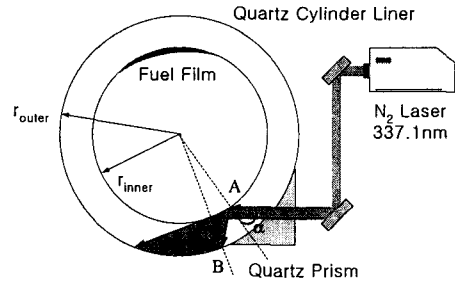


Fig. 1 Principle of visualization

2. 가시화원리

2.1 가시화원리

가시화 엔진으로의 적용을 위하여, 실린더 라이너의 상단 25 mm에 해당되는 부분을 석영(Quartz)으로 가공하고, 이 석영 실린더를 이용하는 가시화 방법을 제시하였다.⁽⁹⁾

엔진의 흡입 또는 압축과정 중 실린더 벽면에 존재하는 연료액막을 가시화하기 위하여 벽면의 연료액막으로부터 발생하는 형광신호는 연소실 내부에 존재하는 연료·공기 혼합기로부터 발생하는 형광신호와 구별되어야 한다. 이를 위하여 석영 실린더로 입사된 레이저빔의 전달은 석영 실린더 내부의 연료 여기를 배제하고 벽면의 연료액막만을 여기 시키기 위하여 석영 실린더 몸체로 제한되어야 한다. 이에 본 연구에서는 광섬유(optical fiber)에서의 빛의 전달 특징인 전반사 조건을 석영 실린더에 적용하였다.

서로 다른 굴절률을 가진 매질의 경계면에 특정 입사각으로 레이저빔이 투과하게 되면 빔의 전달방향은 Snell의 법칙에 따른다. Snell의 법칙에 의하면 굴절률이 다른 매질로 임계 입사각 보다 큰 입사각을 가진 레이저빔이 진행된다면, 입사된 레이저빔은 투과되지 않고 전반사 된다. 이러한 원리를 이용하여 실린더 벽면의 연료액막을 가시화 하였다. Fig. 1은 실린더 벽면의 연료액막을 가시화하기 위한 원리를 개략적으로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 이러한 원리와 레이저 유도 형광법을 바탕으로 가시화 엔진에서 실린더 내부의 연료에 의한 형광신호를 배제하고 실린더 벽면의 연료액막만을 위한 가시화 하였다.

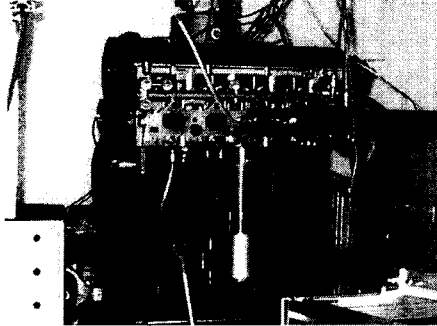


Fig. 2 Optical engine

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

3.1.1 가시화 엔진

상용 4-실린더 1.8 L DOHC 엔진을 기본으로 3번 실린더를 개조하여 가시화 엔진을 제작하였다. 일반적으로 가시화 엔진 실험의 가장 큰 단점은 청소를 위한 광학창의 탈·부착에 걸리는 시간이다. 이에 본 연구에서는 이러한 단점을 제거하고 실험을 용이하게 하기 위하여 유압장치를 가시화 엔진에 적용하였다. Fig. 2는 유압장치를 이용한 가시화 엔진의 사진이다. 본 연구에 사용된 가시화 엔진의 가장 큰 장점은 유압장치를 이용하여 광학창의 탈·부착 시간이 수분정도면 가능하다는 것이다.

3.1.2 실험장치

실린더 벽면의 연료액막 가시화를 위한 가시화 엔진의 실험 장치 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 동력계는 모터링 운전이 가능한 15 kW AC 동력계를 사용하였다. 연소실의 압력을 측정하기 위하여 3번 실린더에 압전형 압력센서(Kistler, 6051A)를 플러쉬 마운트 방법으로 장착하였으며, 압력신호 측정은 엔코더를 설치하여 이로부터 발생하는 상사점 신호와 크랭크 각도 신호를 트리거 신호로 사용하였다. 냉각수 온도를 조절하기 위하여 냉각수 컨트롤러를 사용하였으며, 흡기압과 냉각수 온도 등을 측정하였고, 연료 분사시기, 연료분사량, 점화시기 등을 조절하기 위하여 PC-based ECU를 설치하였다.

광학 실험 장치(optical setup)로는 337.1 nm의 저압력 질소 레이저, 평면빔을 위한 광학계, 형광

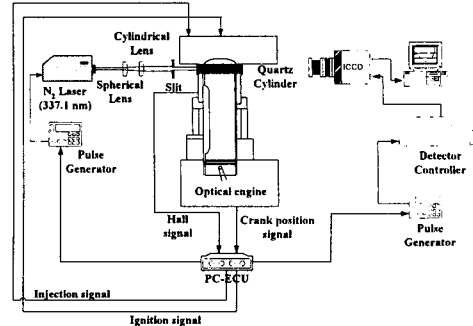


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for visualization of liquid fuel film on the cylinder liner

신호 측정을 위한 ICCD 카메라 시스템, 그리고 시간 동기(synchronization)를 위한 동기 시스템을 구성하여 사용하였다.

미연탄화수소를 측정하기 위하여 배기포트에 샘플링 장치를 구성하였고, 호리바사의 MEXA-9100 배기분석장치를 이용하여 미연탄화수소를 측정하였다.

3.2 실험방법

일반적으로 레이저를 이용한 광학 실험에서 기본적으로 요구되는 사항은 레이저의 반복 안정성이다. 본 연구에서 사용한 저압력 질소 레이저의 경우 10 Hz 일 때 가장 좋은 안정성을 나타낸다. 그러므로 레이저의 안정성을 확보하기 위하여 가시화 엔진의 엔진 속도를 1,200 rpm으로 결정하여 모든 실험을 수행하였다.

광학 실험 장치와 가시화 엔진의 신호 동기를 위하여 엔진에 장착된 위상 센서(hall sensor)의 신호를 기준 신호로 선택하였다. 이 신호를 기준으로 PC-ECU에서 나오는 1번 실린더의 연료 분사 신호를 펄스/지연 발생기를 이용하여 레이저의 동기 신호로 선택하였으며, 지연 신호에 따라 매 사이클 당 원하는 크랭크 각도에 레이저가 가시화 엔진으로 입사되게 하였다. 본 연구에서 사용한 ICCD 카메라의 scan rate은 1장 당 약 2.2 초로 한정되어 있으므로 1,200 rpm 기준으로 22 사이클 당 1회 촬영이 가능하다. 그러므로 PC-ECU에서 나오는 2번 실린더의 연료 분사 신호를 8253 카운터를 이용하여 22 사이클 당 1회 신호가 나오도록 회로를 구성하였고 펄스/지연 발생기를 이용하여 원하는 크랭크 각도에 촬영이

Table 1 Experimental conditions

	Open valve injection	Closed valve injection
Engine speed	1,200 rpm	1,200 rpm
Intake pressure	0.4 bar	0.4 bar
Coolant temperature	20 °C	20 °C
Injection timing	20° aTDC	5° bBDC
Injection duration	5 ms, 20° aTDC~56° aTDC	5 ms, 5° bBDC~31° aBDC
Image capture timing	120° aTDC	120° aTDC
Intake valve timing (open/close)	6° bTDC/46° aBDC	6° bTDC/46° aBDC

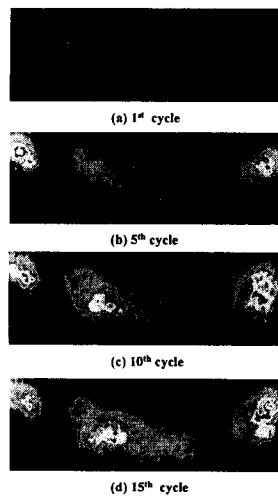


Fig. 4 Images of liquid fuel film on the cylinder liner as a function of cycle at 1,200 rpm, intake pressure of 0.43 bar : open valve injection, image capture timing : 120° aTDC

가능하도록 하였다.

연소 조건에서의 연료액막을 가시화 하기 위하여 엔진 실험을 수행하였고 분사 시간에 대한 연료액막 분포를 비교하기 위하여 흡기밸브가 열릴 경우(open valve injection)와 흡기밸브가 닫혀 있는 경우(closed valve injection), 연료를 분사하는 실험을 수행하였다. 또한 흡기포트에 형성되어 있는 연료액막을 규명하기 위하여 엔진 운전 중에 분사·점화 신호를 차단하는 실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

4. 결과 및 검토

실린더 벽면의 연료액막 거동을 분석하기 위하여 가시화 엔진 실험을 수행하였다. 분사 시간

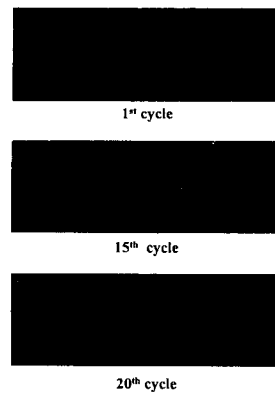


Fig. 5 Images of liquid fuel film on the cylinder liner as a function of cycle at 1,200 rpm, intake pressure of 0.43 bar : closed valve injection, image capture timing : 120° aTDC

에 대한 연료액막 거동을 분석하였고, 실린더 벽면에 형성되는 연료액막으로부터 흡기포트의 연료액막을 규명하였다.

4.1 실린더 벽면의 연료액막 가시화

실린더 벽면의 연료액막 가시화를 위하여 엔진 속도 1,200 rpm, 흡기압 0.43 bar로 가시화 실험을 수행하였다. 초기 시동 시를 모사하기 위하여 냉각수 조절 장치를 이용하여 흡기포트 온도와 냉각수 온도를 20 °C로 유지하며 실험을 수행하였다. 흡기밸브가 열려 있는 동안 연료를 분사하는 경우와 흡기밸브가 닫혀 있는 동안 연료를 분사하는 경우로 나누어 실험을 수행하였고, 연료 분사시간은 5 ms로 고정하여 실험을 수행하였다.

Stanglmaier⁽⁸⁾ 등은 배기밸브 하단의 실린더 벽면에 형성되는 연료액막이 미연탄화수소 발생에 가장 큰 영향을 미친다고 제시하였다. 이에 본 연구에서는 배기밸브 하단의 실린더 벽면의 연료

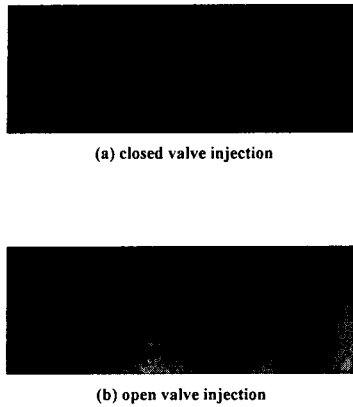


Fig. 6 Images of liquid fuel film on the cylinder liner at 100 cycle after the start of injection at 1,200 rpm, intake pressure of 0.43 bar : image capture timing : 120° aTDC

액막만을 가시화 하였다.

분사시간에 따른 연료액막 형성의 차이를 관찰하기 위하여 실험을 수행하였다. 모터링 운전 중 특정 사이클을 정하여 PC-based ECU로 점화 신호와 연료분사 신호를 연결하여 실험을 수행하였고, 사이클 별로 가시화 한 결과를 각각 Fig. 4 과 Fig. 5에 나타내었다. 실험 조건은 엔진 속도 1,200 rpm, 흡기압 0.4 bar, 냉각수 온도는 20 °C 이고, 촬영시간은 120° aTDC 이다. 결과에 나타난 사이클 별 가시화 이미지는 카메라의 성능 한 계로 인하여 연속촬영을 수행한 것은 아니다.

Fig. 4은 흡기밸브가 열려 있는 동안에 연료를 분사한 경우, 실린더 벽면에 형성되는 연료액막을 나타낸 것이다. 흡기밸브가 열려 있는 동안 분사한 경우는 분사한 첫 사이클부터 실린더 벽면에 연료액막을 형성하는 것을 관찰할 수 있다. 흡기밸브가 열려 있는 동안 분사된 연료는 흡기밸브 스템과 충돌하여 이등분되고 실린더로 유입된다. 이렇게 유입된 연료들은 실린더 벽면과 직접 충돌하고 실린더 벽면에 연료액막을 형성한다. 15 사이클 후에도 실린더 벽면에 상당량의 누적된 연료액막을 관찰할 수 있다. 즉 시동 초기 몇 사이클이 지난 후에도 실린더 벽면에 상당량의 연료액막이 존재한다. 이는 시동 초기 많은 양의 연료액막이 연소가 되지 않고 누적되며, 또한 실린더 벽면의 온도가 낮아 연료의 증발율이 작기 때문이다. 그러므로 초기 시동 시 배기가스

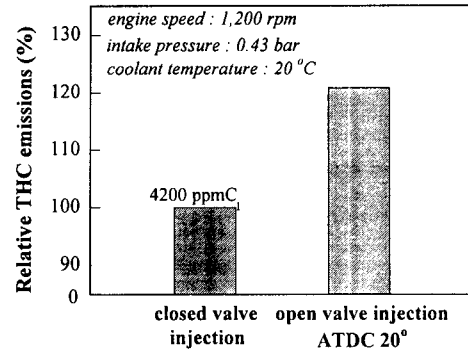


Fig. 7 Relative engine-out HC emissions normalized by the engine-out HC emissions with closed valve injection

와 함께 배출되는 미연탄화수소의 양이 많을 것으로 판단된다.

흡기밸브가 닫혀 있는 동안에 연료를 분사하는 경우, 실린더 벽면에 형성되는 연료액막을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 분사 후 약 20 사이클까지도 흡기밸브가 열려 있는 동안 분사하는 경우에 비하여 실린더 벽면에 연료액막을 거의 형성하지 않는다. 이는 분사된 연료의 대부분이 흡기포트에 연료액막을 형성하고 실린더 내로 유입되지 않았기 때문으로 추정된다. 초기에 분사된 연료의 상당량이 실린더로 유입되지 않고 흡기포트에 연료액막을 형성하여 분사된 연료의 대부분은 흡기포트와 흡기밸브 표면에 일정량의 연료두께가 될 때까지 연료액막을 형성한다. 이로 인하여 실제 실린더 내로 유입되는 총 연료량은 분사된 연료량보다 적게된다. 이는 실화의 원인이 되며, 초기 미연탄화수소 발생에 큰 영향을 미치게 된다. 연료 분사 시작 후 100 사이클일 경우의 연료액막 이미지를 Fig. 6에 나타내었다. 흡기밸브가 닫혀 있는 동안 연료를 분사하는 경우, 분사 시작 후 20 사이클 때의 경우보다 많은 양의 연료액막이 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 사이클이 진행될수록 일정량의 연료가 흡기포트에 연료액막을 형성하여 흡기과정 중 실린더 내로 유입되는 연료량이 증가되기 때문으로 추정된다. 또한 흡기밸브와 흡기포트에 형성된 연료액막의 일부가 역류 현상에 의하여 액적으로 분산되고 이러한 액적들이 공기유동에 의해 실린더 내로 유입되어, 실린더 벽면과 충돌하여 연료액막을 형성하는 것으로 추정된다. 흡

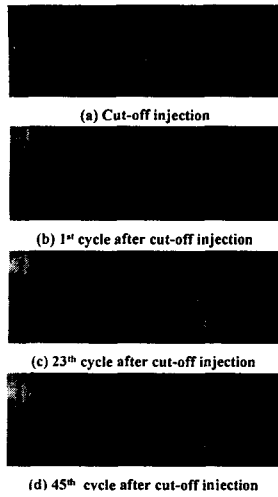


Fig. 8 Images of liquid fuel film on the cylinder liner after cut-off injection at 1,200 rpm, intake pressure of 0.43 bar : closed valve injection, image capture timing : 120° aTDC

기밸브가 열려 있는 동안 연료를 분사하는 경우, 분사 시작 후 20 사이클의 경우보다 연료액막이 감소된 것을 관찰할 수 있다. 이는 연소가 진행될수록 실린더 벽면의 온도가 상승하여 충돌하는 연료액적의 증발을 촉진시켜 분사 시작 후 20 사이클에 비해 적은 양의 연료액막이 형성되기 때문으로 추정된다.

실린더 벽면의 연료액막과 미연탄화수소 발생 경향을 비교하기 위하여 미연탄화수소를 측정하였고, 3회 측정하여 평균값을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 흡기밸브가 열릴 동안 분사하는 경우 미연탄화수소 발생이 약 22 % 증가하였다. 이는 Fig. 6에 나타난 가시화 이미지로부터 open valve injection의 경우 실린더 벽면에 많은 양의 연료액막이 형성되었기 때문이라 추정된다.

4.2 흡기포트의 연료액막 규명

실린더 벽면의 연료액막 가시화를 이용하여 흡기포트에 형성되는 연료액막의 존재를 규명하기 위한 실험을 수행하였다. PC-based ECU를 이용하여 흡기밸브가 닫혀있는 동안 연료를 분사시킨 후 특정 사이클부터 점화와 분사 신호를 모두 차단하고 계속적으로 연료액막을 가시화 하였다. Fig. 7은 분사 차단 후 실린더 벽면의 연료액막 가시화 결과를 나타낸 것이다. 본 그림은 카메라

의 성능 한계인 22 사이클 당 1장의 사진을 연속적으로 촬영한 이미지이다. 그림에서 보듯이 연료 분사를 차단한 후에도 계속적으로 실린더 벽면의 연료액막이 증가함을 볼 수 있다. 또한 전 사이클에 형성된 연료액막은 연소실 내의 유동에 의해 퍼지는 현상을 관찰할 수 있다. Fig. 8에 나타난 연료액막 가시화 결과로부터 흡기포트와 흡기밸브에 상당량의 연료가 연료액막을 형성하고 있음을 추정할 수 있다.

5. 결론

레이저 유도 형광법과 전반사조건을 이용하여 실린더 벽면의 연료액막을 가시화 하였다. 이를 적용하기 위하여 유압장치를 이용한 가시화 엔진을 제작하였으며, 가시화 실험을 통하여 연료액막의 거동 분석을 수행하였다.

- (1) 밸브가 열릴 동안 분사하는 경우 배기밸브 쪽 실린더 벽면에 더 많은 연료액막이 형성되었다.
- (2) 가시화 엔진 실험 결과, 분사 시작 후 100 사이클에서도 실린더 내로 유입된 연료는 실린더 벽면에 연료액막을 형성하였다.
- (3) 분사 신호를 차단 후에도 실린더 벽면에 계속적으로 연료액막이 형성되었으며, 이로 인하여 흡기포트에 형성된 연료액막을 가시화 방법을 이용하여 규명하였다.
- (4) 실린더 벽면의 연료액막의 분포위치를 파악하였으며, 이러한 기술은 미연탄화수소 저감을 위한 흡기 시스템 및 분사 시스템 설계 시 이용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2002년 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

참고문헌

- (1) Shin Y., Cheng W. K., and Heywood J. B., 1994, "Liquid Gasoline Behavior in the Engine Cylinder of a SI Engine," SAE paper 941872.
- (2) Meyer R., and Heywood J. B., 1997, "Liquid Fuel Transport Mechanism into the Cylinder of a Firing Port Injected SI Engine During Start Up," SAE

- paper 970865.
- (3) Kelly-Zion P. L., Styron J. P., Lee C. F., Lucht R. P., Peters J. E., and White R. A., 1997, "In-Cylinder Measurements of Liquid Fuel During the Intake Stroke of a Port-Injected Spark Ignition Engine," SAE paper 972945.
- (4) Saito K., Sekiguchi K., Imatake N., Takeda K., and Yaegashi T., 1995, "A New Method to Analyze Fuel Behavior in a Spark Ignition Engine," SAE paper 950044.
- (5) Alkidas A. C., and Drews R. J., 1996, "Effects of Mixture Preparation on HC emissions of a SI Engine Operating Under Steady-State Cold Conditions," SAE paper 961958.
- (6) Stanglmaier R. H., Li J., and Matthews R. D., 1999, "The Effect of In-Cylinder Wall Wetting Location on the HC Emissions from SI Engines," SAE paper 1999-01-0502.
- (7) Dawson M., and Hochreb S., 1988, "Liquid Fuel Visualization Using Laser-Induced Fluorescence During Cold Start," SAE paper 982466.
- (8) Stanglmaier R. H., Hall M. J., and Matthews R. D., 1997, "In-Cylinder Fuel Transport During the First Cranking Cycles in a Port Injected 4-Valve Engine," SAE paper 970043.
- (9) Cho H., Kim M., and Min. K., 2001, "The Effect of Liquid Fuel on the Cylinder Liner on Engine-Out Hydrocarbon Emissions in SI Engines," 2001 SAE Transactions, Vol. 110, Journal of Fuels & Lubricants, Section 4, pages 1600-1607.