

레이저 유도 형광법을 이용한 가솔린 엔진의 실린더 벽면에 존재하는 연료액막 가시화

조 훈* · 민경덕*

Measurement of Liquid Fuel Film on the Cylinder Liner in an SI Engine Using an LIF Technique

Hoon Cho and Kyoungdoug Min

Key Words: liquid fuel film(연료액막), hydrocarbon emissions(미연탄화수소), SI engines(전기 점화 엔진), visualization(가시화), LIF(레이저 유도 형광), quantify(정량화)

Abstract

The liquid fuel film on the cylinder liner is believed to be a major source of engine-out hydrocarbon emissions in SI engines, especially during cold start and warm-up period. Quantifying the liquid fuel film on the cylinder liner is essential to understand the engine-out hydrocarbon emissions formation in SI engines. In this research, two-dimensional visualization was carried out to quantify liquid fuel film on the quartz liner in an SI engine test rig. The visualization was based on laser-induced fluorescence and total reflection. Using a quartz liner and a special lens, only the liquid fuel on the liner was visualized. The calibration technique was developed to quantify the fluorescence signal with the thickness gage and the calibration device. The fluorescence intensity increases linearly with increase in the fuel film thickness on the quartz liner. Using this technique, the distribution of the fuel film thickness on the cylinder liner was measured quantitatively for different valve lifts and injected fuel mass in the test rig.

1. 서 론

최근 심각해져 가는 대기 환경 오염에 대응하기 위하여 가솔린 자동차 배출물에 대한 규제가 점점 강화되고 있다. 특히 가솔린 자동차에서 발생되는 미연탄화수소는 대기중의 직접적인 오염원으로 인식되고 있다.

미연탄화수소에 대한 FTP(Federal Test Procedure) 75 시험 결과에 의하면 엔진 시동 시나 예열기간 시 발생하는 미연탄화수소의 발생량이 전체 시험 기간 중 발생하는 미연탄화수소 양의 약 75%를

차지한다[1~3]. 이는 초기의 낮은 삼원촉매장치의 효율, 그리고 흡기포트와 실린더 라이너에 생성되는 연료액막에 기인한다.

시동 초기, 분사된 연료는 충분히 기화되지 못하고 증기, 액적, 그리고 액체연료 상태로 실린더 내로 유입되어 실린더 라이너와 충돌하고, 연료액막을 형성한다. 이러한 액막을 형성하는 연료들은 불완전 연소되어 배기과정 중 엔진에서 배출되는 미연탄화수소의 주된 원인이 된다. Saito 등은 실험용 엔진을 이용하여 시동 초기 분사된 연료의 일부분이 실린더 벽면에 연료액막을 형성함을 측정하였고, 또한 엔진이 완전히 예열된 후에도 연소 후 실린더 벽면에 연료액막이 존재함을 나타내었다[4].

그러므로 미연탄화수소 형성 과정의 이해와 저감대책을 위해서는 실린더 라이너에 존재하는 연

* 서울대학교 기계·항공공학부

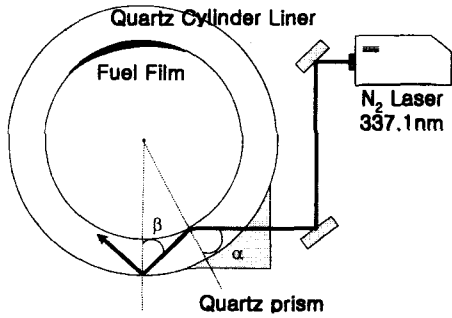


Fig. 1 Principle of fuel film visualization

료액막의 거동에 대한 연구가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 시동 초기의 미연탄화수소의 주된 원인인 실린더 벽면에 존재하는 연료액막의 거동을 정량적으로 분석하기 위하여, 가시화 엔진으로의 적용을 위한 기초 실험 단계로서 테스트 리그에서 연료액막을 레이저 유도 형광법을 이용하여 정량화 하였다.

2. 가시화

2.1 가시화 원리

실린더 라이너의 연료액막을 가시화하기 위한 레이저빔의 전달은 실린더 내에 존재하는 기상이나 액적의 여기에 의한 형광신호와 구별하기 위하여 실린더 벽면의 연료만을 여기시키기 위한 것으로 제한되어야 한다. 이러한 제한조건을 위하여 Quartz 실린더 라이너에서의 레이저빔의 전달현상은 optical fiber에서의 빛의 전달현상을 이

용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 이용한 가시화 원리에 나타낸 그림이다. 스넬의 법칙에 의하면 입사되는 광원의 입사각이 전반사각 보다 크다면 입사된 광원은 모두 다시 반사된다. 즉, Quartz 실린더 라이너에 입사되는 레이저빔의 각도를 전반사 조건이 되게 조절하여 입사시키면 Quartz 실린더 라이너 내부에만 레이저빔이 계속적으로 순환하게 되고 레이저빔이 실린더 내로 입사되지 않아 실린더 내에 있는 기상상태 연료나 액적에 의한 형광신호 방출을 제한할 수 있다.

Kull 등은 Quartz와 무연가솔린의 굴절률이 비슷함을 보였다[5]. 연료액막과 Quartz 실린더 라이너의 비슷한 굴절률 때문에 레이저빔은 Quartz 실린더 라이너에 형성된 연료액막으로 투과되고, 투과된 레이저빔은 다시 공기층과 만난다. 연료액막과 공기와의 서로 다른 굴절률 때문에 레이저빔은 공기/연료 경계층에서 다시 전반사되어 Quartz 실린더 라이너 쪽으로 입사되게 되어 Quartz 실린더 라이너 안에서만 레이저빔이 존재한다.

이러한 원리를 이용하여 실린더 내부에 존재하는 액적이나 기상상태 연료의 형광신호를 배제하고, 벽면에 형성하는 연료액막만을 가시화 할 수 있다.

3. 실험 및 형광신호 보정

3.2 실험장치

실린더 라이너의 연료액막을 가시화 하기 위하

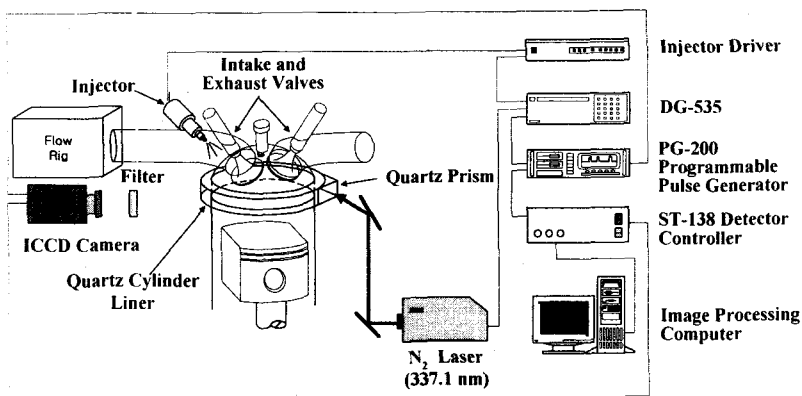


Fig. 2 Schematic diagram of the test rig

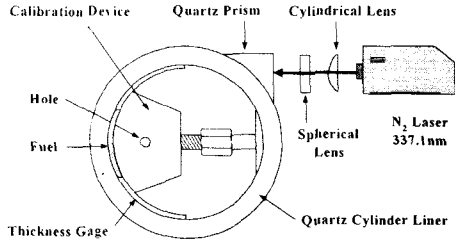


Fig. 3 Schematic diagram of the calibration setup

여 실린더 라이너 형상을 가진 Quartz 실린더 라이너와 레이저를 입사시킬 수 있는 Quartz 프리즘으로 가시화 장을 구현하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 테스트 리그의 개략도이다. Quartz 실린더 라이너와 프리즘의 높이는 각각 23 mm 이고, Quartz 라이너의 내경과 외경은 각각 82 mm와 112 mm이다. 연료의 형광물질을 여기시키기 위하여 파장이 337.1 nm인 저압력 질소 레이저 (pulse energy of 0.4 mJ, a pulse width of 5 ns) 를 사용하였고, 형광신호의 강도를 인식하기 위하여, ICCD camera(resolution 576×384)

Table 1 Specifications of DOHC engine head

Displacement volume	2.0 L
Bore	82 mm
Maximum valve lift	8 mm
Intake valve diameter	32 mm

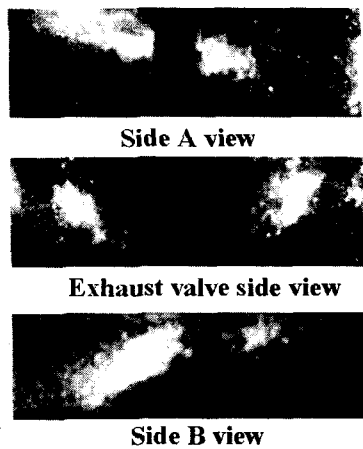


Fig. 5 Typical imaged of wall fuel film on the cylinder liner at 25 ms ASOI (after the start of injection) : injection duration 10 ms, valve lift 8mm

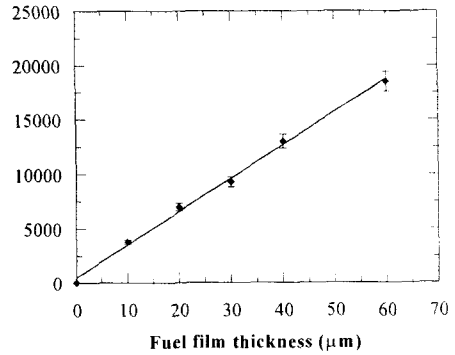
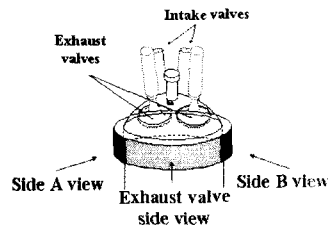


Fig. 4 Fluorescence signal vs. fuel film thickness

를 사용하였다. 연료분사장치와 레이저, 그리고 ICCD camera의 신호동기를 위하여 지연/펄스 발생기를 이용하였다. Table 1은 리그 테스트에서 사용한 상용 DOHC 엔진 헤드의 사양이다.

3.2 형광신호 보정 및 리그 실험

Fig. 3은 형광신호 보정을 위한 개략도이다. 보정을 위한 두께 게이지는 Quartz 실린더 라이너와 보정장치(Calibration device) 사이에 위치한다. 보정장치의 반경은 Quartz 실린더 라이너의 내경과 동일하게 가공하였다. 보정 실험 중 무연가솔린의 증발에 의한 형광신호의 변화를 방지하기 위하여 구멍을 통하여 주사기로 연료를 계속



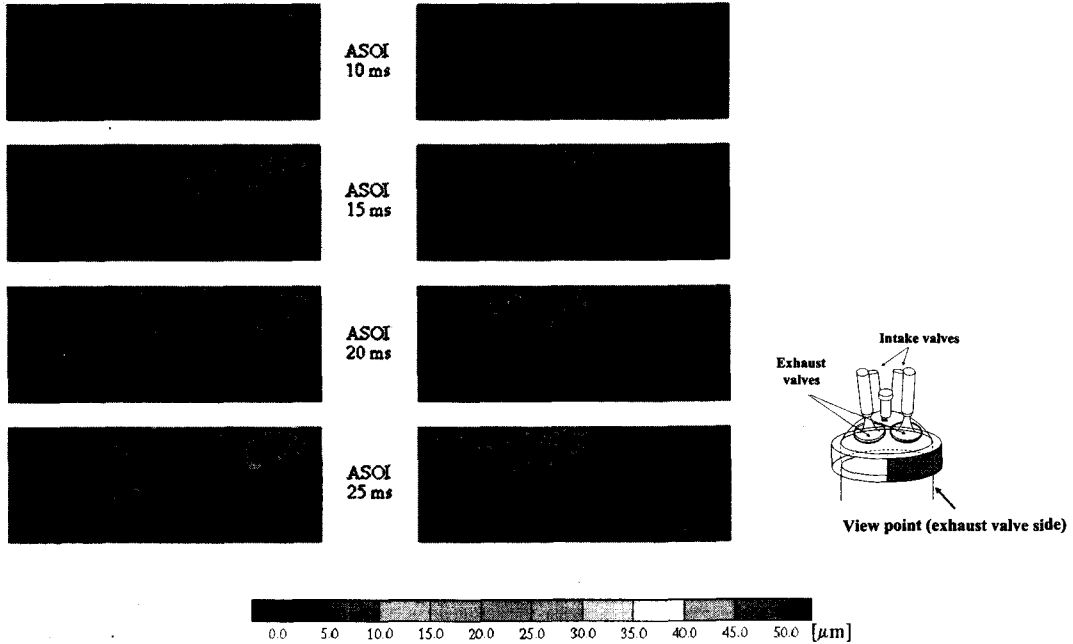


Fig. 6 Distribution of wall fuel film thickness as a function of ASOI : injection duration 10 ms

주입하였다.

가시화 엔진에 적용을 위한 기초 단계로서 리그 장치에서 형광신호 세기를 연료액막 두께로 보정하였다. 두께 계이저를 10 μm ~ 60 μm 까지 변화시키면서 각각 단발 레이저광을 입사한 후 이미지를 획득하였다. 배경신호를 제외하고 10회 반복하여 공간 평균을 내었다. Fig. 4는 형광신호의 세기와 연료액막두께와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두 변수와의 관계가 선형성을 잘 나타내고 있다.

리그 실험을 위하여 송풍기를 이용하여 흡기포트에서의 공기 유속을 14 %로 유지하게 하였고, 피스톤의 위치는 엔진 헤드 하단 24 mm에 위치시켰다. 흡기밸브 리프트 2 mm와 8 mm 그리고, 연료 분사시간은 각각 5 ms, 10 ms로 나누어 리그 실험을 수행하였다. 모든 실험은 상온 대기압에서 실시하였다.

3. 결과 및 검토

실린더 벽면에 존재하는 전형적인 연료액막의 가시화 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 연료 분사기

간은 10 ms, 밸브리프트는 8 mm 이고, 분사 시작 후 25 ms에 해당되는 사진이다. 사진에서 보듯이 open valve injection의 경우, 분사된 연료의 상당 부분이 배기밸브 쪽 Quartz 실린더 라이너에 연료액막을 형성함을 알 수 있다, 그러나 관찰 결과, 흡기밸브 근처의 Quartz 실린더 라이너에는 연료액막이 거의 형성되지 않았다. 실제 엔진에서도 open valve injection의 경우 배기밸브 쪽 실린더 라이너에 상당량의 연료액막이 형성되어, 불완전 연소에 의해 배기과정 중 엔진으로부터 미연탄화수소가 발생할 수 있다고 추정된다.

Fig. 6은 Fig. 4의 형광신호와 연료액막두께와의 관계를 이용하여 연료액막두께 분포를 시간 순서에 대하여 나타낸 것이다. 밸브리프트 8 mm 인 경우, 분사시작 10 ms 후에 실린더 라이너에 연료액막을 형성하기 시작하였고, 시간이 지남에 따라 연료액막이 점차 커짐을 발견할 수 있다. 또한 인젝터와 실린더 라이너의 거리를 고려할 때 리그 실험에서는 분사된 연료 액적의 속도는 약 20 %가 됨을 추정할 수 있다. 밸브 리프트 2 mm와 8mm 때의 연료액막 형태도 차이가 분명함을

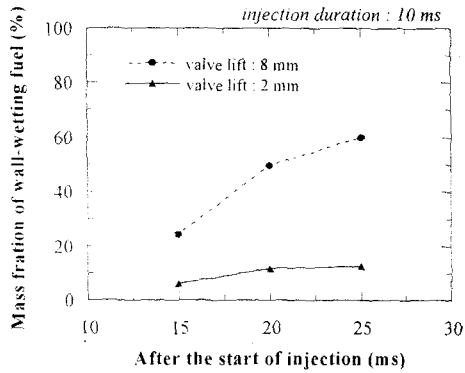


Fig. 7 Mass fraction of wall-wetting fuel as a function of ASOI

발견할 수 있다. 밸브 리프트 8 mm인 경우 분사된 연료의 스프레이가 흡기밸브스텝과 충돌하여 이등분되고, 이등분된 연료 스프레이가 실린더 라이너와 충돌하여 두 부분으로 연료액막을 형성한다. 밸브 리프트 2 mm인 경우는 분사된 연료의 대부분이 흡기밸브와 충돌하고, 충돌된 연료들은 흡입공기의 흐름 따라 실린더 내로 유입되어 Quartz 실린더 라이너에 연료액막을 형성함을 알 수 있다. 밸브리프트 8 mm의 경우 연료액막의 최대두께는 약 45 μm 이다. 이러한 사실로부터 실제 엔진에서의 실린더 라이너에 형성되는 연료액막의 두께는 흡입되는 빠른 공기유속과 높은 실린더 벽면의 온도에 의한 보다 빠른 기화 때문에 45 μm 이하가 될 것으로 추정된다.

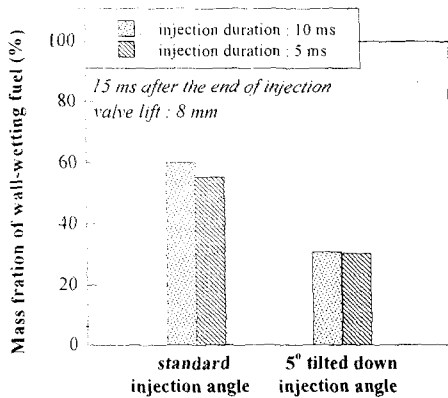


Fig. 9 Mass fraction of wall-wetting fuel with injection angle

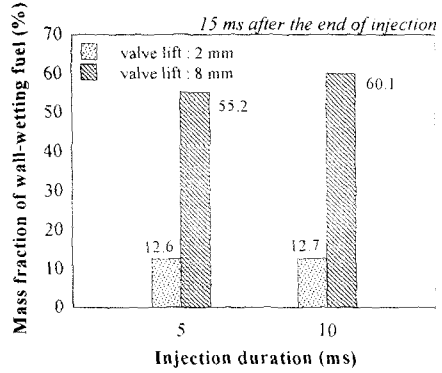


Fig. 8 Mass fraction of wall-wetting fuel with injection duration

분사시간이 10 ms인 경우, 분사 후 시간순서에 따른 연료액막 형성 비율을 Fig. 7에 나타내었다. 실험 결과는 5회 반복 실험 후 평균을 내어 그래프에 나타낸 것이다. 시간이 지남에 따라 연료액막 형성 정도가 점차로 커짐을 알 수 있다. 밸브 리프트 2 mm인 경우 분사된 연료의 대부분이 흡기밸브와 충돌 후, 흡기밸브에 연료액막을 형성한다. 형성된 연료액막은 유입되는 공기의 흐름에 따라 액막으로부터 분리되고, 실린더 내로 유입된다. 분리된 연료액막 중 일부분이 실린더 라이너에 연료액막을 형성한다. 따라서 연료액막의 형성 시간이 밸브리프트 8 mm의 경우에 비해 보다 느리고 또한 형성되는 연료액막의 양도 적은 것으로 생각된다. 연료액막 형성 시점인 분사 후 10ms의 평균값은 초기 형성의 임의성에 의한 변화가 심하여 배제하였다.

Fig. 8은 분사량의 변화에 따른 분사 종료 후 15 ms 때의 연료액막 형성 비율을 나타낸 것이다. 밸브리프트 8 mm인 경우 분사된 연료량의 상당 부분은 배기밸브 쪽의 실린더 라이너에 연료액막을 형성함을 알 수 있다. 분사시간 5 ms, 10 ms인 경우 각각 분사된 연료량의 55.2 %, 60.1 %가 Quartz 실린더 라이너에 연료액막을 형성하였다. 밸브리프트 2 mm인 경우 분사시간에 관계없이 분사된 연료량의 약 13 %가 연료액막을 형성하였다. 이는 분사된 연료의 대부분이 흡기밸브와 충돌한 후 일정량이 흡기밸브에 연료액막을 형성하였기 때문이라 생각된다.

분사각도에 따른 Quartz 실린더 라이너에 형성되는 연료액막을 관찰하기 위하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 밸브리프트 8 mm에서 원상태의 분사각도와 5° 기울인 분사각도로 실험을 수행하였다. Open valve injection인 경우, 분사각도를 5° 기울인 경우의 Quartz 실린더 라이너의 연료액막 형성 비율이 원상태의 분사각도의 연료액막 형성 비율에 비해 45% 감소하였다. 이러한 현상은 분사된 연료가 흡기밸브의 하단부와 충돌하고, 실린더 중심부로 유입되어 Quartz 실린더 라이너에 적은 양의 연료가 액막을 형성하기 때문이다. 본 연구에서 사용한 엔진은 냉시동시 분사각도 5° 기울인 open valve injection인 경우 실린더 벽면의 연료액막에 의한 미연탄화수소 발생이 감소될 것으로 추정된다.

4. 결론

Quartz 실린더 라이너에 형성되는 연료액막에 대한 2차원 가시화와, 연료액막두께에 대한 형광 신호 보정을 수행하였다. 이를 이용하여 리그 실험장치에서 Quartz 실린더 라이너에 형성되는 연료액막의 두께분포를 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연료액막의 형광신호는 연료액막의 두께와 선형적인 관계가 있고, 이러한 선형성을 이용하여 형광신호를 보정하였다.
- (2) Open valve injection의 경우, 분사된 연료의 대부분이 배기밸브 쪽의 Quartz 실린더 라이너에 연료액막을 형성한다.
- (3) 밸브리프트 8 mm, 분사시간 10 ms, 5 ms인 경우, 각각 분사된 연료량의 60.1 %, 55.2 %가 Quartz 실린더 라이너에 연료액막을 형성한다.
- (4) 밸브리프트 2 mm, 분사시간 10 ms, 5 ms인 경우, 각각 분사된 연료량의 약 13 %가 Quartz 실린더 라이너에 연료액막을 형성한다.
- (5) 밸브리프트 8 mm, 분사각도를 5° 기울인 경우, 연료액막 형성율은 45 % 감소한다.

후기

본 연구는 2001 년도 산업자원부 G-7 프로젝트 의하여 수행된 일부 결과이며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Taketa K., Yaegashi T., Sekiguchi K., Saito K., and Imatake N., "Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-valve Engine with Port Fuel Injection During Cold Starting and Warm-up", SAE paper 950074, 1995
- (2) Heywood J., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988
- (3) Cheng W., Harmin D., Heywood J., Hochgreb S., Min K. D., and Norris M., "Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark Ignition Engines", SAE transactions, Vol. 102 p. 1207~1220, 1993
- (4) Saito K., Sekiguchi K., Imatake N., Taketa K., and Yaegashi T., "A New Method of Analyze Fuel Behavior in a Spark Ignition Engine", SAE paper 950044, 1995
- (5) Kull E., Wiltafsky G., Stolz W., Min K. D., and Holder E., "Two-dimensional visualization of liquid layers on transparent walls", OPTICS LETTERS, Vol 22, No. 9, 1997