Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, No. 3, pp.7-12 (2003)

PLIF를 이용한 희박연소엔진에서의 연료 성층화에 관한 연구

정 경 석*

한국기술교육대학교 기계공학부*

Fuel Stratification Process in a Lean Burn Internal Combustion Engine by Using Planar Laser Induced Fluorescence

Kyung-Seok Jeong*

*School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungnam 330-708, Korea

(Received 2 November 2002 / Accepted 18 March 2003)

Abstract : Mixture formation in the cylinder of a lean burn engine has been observed by Laser Induced Fluorescence technique. XeCl laser (308nm) was used to produce a laser sheet. 3-pentanone has been added to iso-octane fuel to produce fluorescence, the intensity of which is proportional to the concentration of the fuel. The laser sheet was introduced through the piston window and the fuel distribution in the vertical plane was observed through a side window. Comparison has been made for the cases of selected fuel injection timing as 0, 360, 405, and 450 CA. For the cases of 0 and 360 CA injection, uniform fuel distribution in the combustion chamber has been obtained at the ignition time, which is favorable for the high load mode. And the late injection cases, 405 and 450 CA, revealed the stratified formation of rich mixture around the spark plug. That extends the lean misfire limit and reduces cyclic variation in the low load mode.

Key words : Mixture formation(혼합기 형성), Lean burn engine(희박연소 엔진), Laser Induced Fluorescence (LIF, 레이저 유도형광), Fuel stratification(연료 성층화), Lean misfire limit(희박 가연한계)

1. 서 론

자동차보급의 증가에 따른 유해물질 배출의 증가로 인하여 인류의 생존자체가 위협을 받는 심각한 상황에까지 이르게 되자 전세계적으로 자동차로부터의 유해물질의 배출을 억제하기 위한 규제가 점차 강화되어 가고 있는 추세이다. 특히, 북미지역에서 적용되기 시작하는 저 배출차량(LEV) 및 초저 배출차량(ULEV)의 배기가스 규제기준이나 지구온난화의 주요한 원인으로 간주되는 CO_2 배출을 저감하기 위한 기업평균연비 (CAFE) 규제는 현존의 자동차 기술로 달성하기 어려운 기술적인 도전을 요구하고 있다. 이에 따라 각 자동차 제조업체는 연비는 향상시키면서 동시에 유해물질의 생성은 저감할 수 있는 방법으로 연료를 매니폴드 내에 분사하거나[1-4] 또는 실린더 내에 직접 분사하는 희박연소 개념의 엔진의 연구와 개발에 관심을 집중하고 있다.[5-9]

스파크 점화엔진을 공연비 16이하의 연료희박 상태로 운전하면 연료효율이 상당히 증가할 뿐만 아니라 NOx 생성이 저감된다. 공연비를 20이상으로 희박하게 할수록 이러한 이득은 증가될 수 있다.[4] 그러나, 연료희박 조건에서는 초기 화염핵 생성이 불안정하고 화염전파속도가 낮기 때문에 사이

*To whom correspondence should be addressed.
jks@kut.ac.kr

클변동이 증가하며 경우에 따라서는 실화(misfire)가 발생하여 오히려 미연 탄화수소의 발생이 증가하거나 연비가 악화되는 등의 문제를 가지고 있다.[10] 그러므로 연소의 개선을 통해 확실한 점화성능을 확보하고, 화염전파속도를 증가시켜 연소시간을 단축함과 아울러 실린더내부에 안정된 유동을 유도함으로써 점화초기 화염의 불안정성으로 인한 사이클변동을 감소시키는 방안을 마련하는 것은 희박연소 개념의 엔진의 성패를 좌우하는 중요한 문제이다.

본 연구자를 포함하여 희박연소방식의 엔진운전 실험을 수행한 여러 연구를 통하여, 실린더내부 유동특성과 연료분사시기를 조합하여 점화시기의 혼합기 조성의 변화를 유도함으로써 희박연소 엔진의 안정된 운전영역인 희박가연한계를 변화시킬 수 있음이 제시되었다.[4,11,12] Fig. 1은 본 연구자에 의해 단기통 엔진에서 수행된 실험의 결과로 엔진의 사이클 변동 감소와 희박 가연한계 확장의 가능성을 보여 준다.[11] 이는 성층화 특성의 변화에 따른 것으로 받아들여지고 있지만 구체적이고 직접적인 입증을 필요로 한다. 희박운전 조건에서 안정된 연소특성을 확보하기 위해서는 연료 성층화 현상에 대한 이해가 필요하며, 이는 실린더내부의 시간적, 공간적 농도변화의 측정을 통해 가능하다.

본 연구에서는 레이저 유도형광법 (PLIF; Planar Laser Induced Fluorescence)을 이용하여 실린더 내부의 연료농도 분포의 변화를 측정하고자 한다. 이를 통해 실린더 내 연료의 성층화 과정을 이해하고, 엔진의 사이클 변동과 국부적인 연료농도간의 상관관계를 규명함으로써 희박 운전조건에서 엔진의 사이클변동 감소와 아울러 미연탄화수소의 배출을 억제하는 방안을 제시하고자 한다.

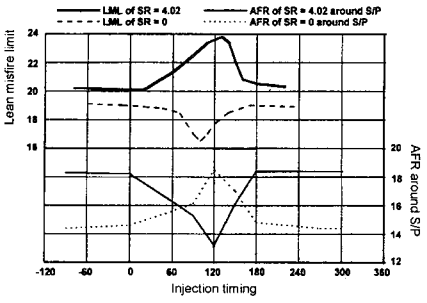

Fig. 1 LML and AFR around spark plug under stratified condition

2. 실험장치 및 방법

2.1 엔진

실험에는 광학접근을 위한 창이 있는 혼다 V- EC 단기통 엔진이 이용되었다. 이 엔진은 양산엔진의 특성을 유지하면서 광학적 접근이 용이하도록 설계된 것으로 상세한 모습은 Fig. 2에 나타나 있고, 사양은 Table 1과 같다. 이 엔진의 확장 피스톤은 실린더헤드 가스켓과 간섭을 피하기 위하여 피스톤 링을 낮은 곳에 설치하여야 했는데, 이에 따른 극간 체적의 증가로 인하여 압축비는 9.1에서 7.6으로 변화하였다.

이 엔진의 특징은 혼다 SOHC VTEC-E 밸브 무능

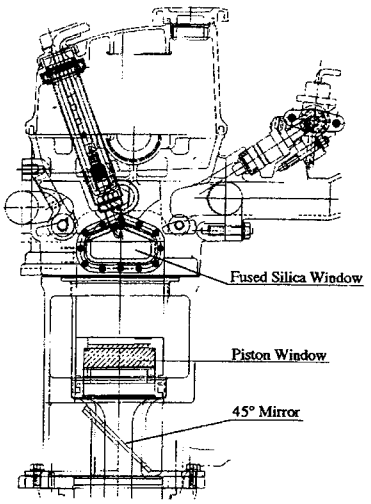

Fig. 2 Optical access to single cylinder research engine

Table 1 Specification of the engine

	Optical engine	Production engine
Number of cylinders	1	4
Displacement (cm^3)	360	1493
Bore x Stroke (mm)	75×81.5	75×84.5
Compression ratio	7.6	9.3
Valve mechanism	SOHC VTEC-E	SOHC VTEC-E
Number of valves	4	4
Valve diameter Inlet (mm) Exhaust(mm)	 27.5 23.5	 27.5 23.5

화 기구를 가지는 밸브트레인이 있는 것이다. 실린더 헤드는 펜트루프 형상으로 실린더 당 4개의 밸브가 있다. 2개의 흡입밸브는 강한 스월을 유도하는 1차 흡입밸브와 스월을 발생하지 않는 2차 흡입밸브로 되어 있으며, 밸브의 배치와 형상은 Fig. 3과 같다.

VTEC-E 모드로 지칭되는 경제 운전영역에서는 1차 흡입밸브만이 최대 양정 8mm로 개방되어 안정적인 희박연소에 필요한 강한 실린더내 스월이 유도되도록 한다. 이 때 2차 흡입밸브는 VTEC-E 기구에 의해 0.65mm만 개방되는데, 밸브가 완전히 폐쇄되지 않도록 하는 것은 2차 포트에 잔류할 수도 있는 연료가 실린더 내로 흘러들어 갈 수 있도록 하기 위한 것이다.

양산용 엔진의 경우 흡입효율을 높이기 위하여 부하에 따라 엔진 회전수 2500이나 3200rpm 이상에서 2차 흡입밸브도 최대 양정 8mm까지 개방된다. 본 연구에서는 희박 연소모드에서의 혼합기 형성을 관찰하기 위하여 엔진 회전수 1500rpm으로 VTEC-E 모드로 운전하였다. Fig. 4는 VTEC-E 모드로 운전하는 경우의 제 1차 및 제 2차 밸브의 개폐시기 선도이다. 이 운전조건에서 유동을 강체 회전운동 형태로 간주한 각속도를 크랭크 각속도 2 πN으로 나눈 스월비는 약 2.1이고, 텀블비는 1.9이다.[14]

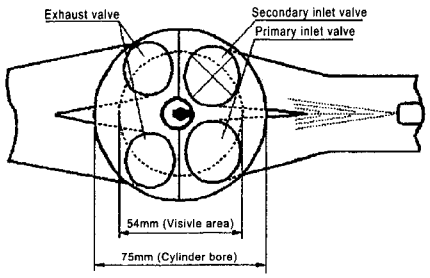

Fig. 3 Planar view of valve layout and visible area of the combustion chamber

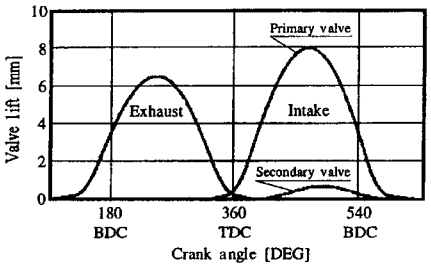

Fig. 4 Valve lift in the VTEC-E mode for the exhaust, primary and secondary inlet valves

2.2 LIF 시스템

형광을 유도하기 위한 광원으로 XeCl 엑시머 레이저 (Lambda Physic EMG 150 MSC)를 이용하였다. 이 레이저는 파장 308nm, 펄스 폭 17ns, 펄스 당 에너지 150 mJ 의 레이저광을 외부나 내부 동기 신호에 따라 최고 80Hz 까지 발생할 수 있다. 레이저광을 초점거리 1000mm 의 구면렌즈와 각각 초점거리 -75mm, 150mm인 실린더 렌즈를 갈릴레이 망원경 형태로 이용하여 두께 약 0.5mm, 폭 50mm의 평면광을 만들었다.

형광신호는 gated image intensifier가 있는 12-bit CCD 카메라 (Princeton Instruments)를 이용하여 기록하였다. 동기신호에 따라 동작하는 image intensifier는 약 200ns 동안 노광되도록 하여 주변 빛의 영향을 최소화하였다.

연료로는 가솔린의 성질을 대표하여 나타낼 수 있는 iso-octane을 사용하였다. iso-octane은 308nm 광에 의하여 여기되어 형광을 발생하지 않으므로, 적절한 형광특성을 가진 물질을 선택하여 첨가하여야 한다. 본 연구에서는 형광유도물질로 iso-octane과 물리, 화학적 성질이 유사하며 iso-octane에 용해될 수 있는 3-pentanone을 선택하여 체적비 5%의 비율로 혼합하여 사용하였다.[13,15]

3. 결과 및 검토

Fig. 5(a)는 연료분사 시기가 변화하는 경우 실린더 내부 혼합기의 형성과정을 관찰하기 위하여 분사개시 시기를 각각 크랭크각 0, 360, 405 및 450도로 하였을 때 크랭크각의 변화에 따른 연료의 거동을 보인 것이다. 그림과 같이 흡입밸브가 열리기 전 연료를 분사한 경우 흡입포트에 분사되며 기화되거나 액체상태로 흡입밸브 후면에 충돌한 연료는 주위의 공기와 혼합되어 밸브가 열림과 동시에 실린더 내부로 유입된다. 유입된 혼합기는 피스톤의 하향 운동을 따라 실린더의 아래 부분으로 이

동하여 점화플러그 주위에서는 관찰되지 않는다. 압축행정이 시작되어 크랭크 각 40도 경과한 580도부터 연소실에 혼합기가 관찰되기 시작하는데 혼합에 필요한 충분한 시간이 경과하였으므로 균일한 혼합기 상태인 것을 볼 수 있다. 이 후 압축행정이 더 진행되면 압력의 증가로 인하여 혼합기의 밀도가 증가함에 형광의 강도가 증가하여 점화시기인 680도에 실린더 내부에 혼합기가 균일하게 분포한다.

Fig. 5(b)는 흡입행정의 초기인 360도에 연료를 분사한 경우이다. 흡입밸브가 열려 공기가 유입되고 있는 상태에 연료가 분사되므로 연료와 공기가 균일하게 혼합되어 유입되지는 않지만, 유입된 연료는 피스톤의 하향운동을 따라 실린더의 아래방향으로 이동한다. 0도 분사의 경우와 마찬가지로 비교적 균일한 혼합기가 형성되고 점화시기에는 연소실 내부에 균일 강도의 혼합기가 분포하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5(c)는 크랭크각 405도에 연료를 분사한 것으로 분사개시 약 30도 후에 연료가 액체상태로 유입되는 것이 관찰된다. 액체상태로 유입된 연료는 실린더 내에서 증발하며 공기와 혼합되지만 흡입행정이 시작되기 전에 분사가 된 경우와는 달리 실린더 내에 혼합기의 분포는 균일하지 않지만 점화플러그 주위에 연료농도의 혼합기가 분포된다.

Fig. 5(d)는 연료분사 개시시기가 450도인 경우이다. 흡입행정의 후반부에 연료가 분사되었으므로 대부분의 연료는 액체상태로 실린더 내부로 유입된다. 이미 실린더 내부에 많은 공기가 유입된 상태이고 피스톤의 하강속도가 감소하는 시기이므로 유입된 연료는 실린더의 아래 부분으로 이동하지 못하고 연소실 주위에 머문다. 압축행정이 시작되어 피스톤이 상승하는 동안 주위의 공기와 혼합되며 혼합기를 형성하지만 불균일한 분포를 보인다. 이 경우에도 점화시기에는 점화플러그 주위에 높은 농도의 혼합기가 분포한다.

Fig. 6은 실린더 내 연료 농도 분포를 정량적으로 나타내기 위하여, 균일 혼합기를 공급하며 각각의 측정 크랭크 각에서 획득된 균일 농도 영상을 이용하여

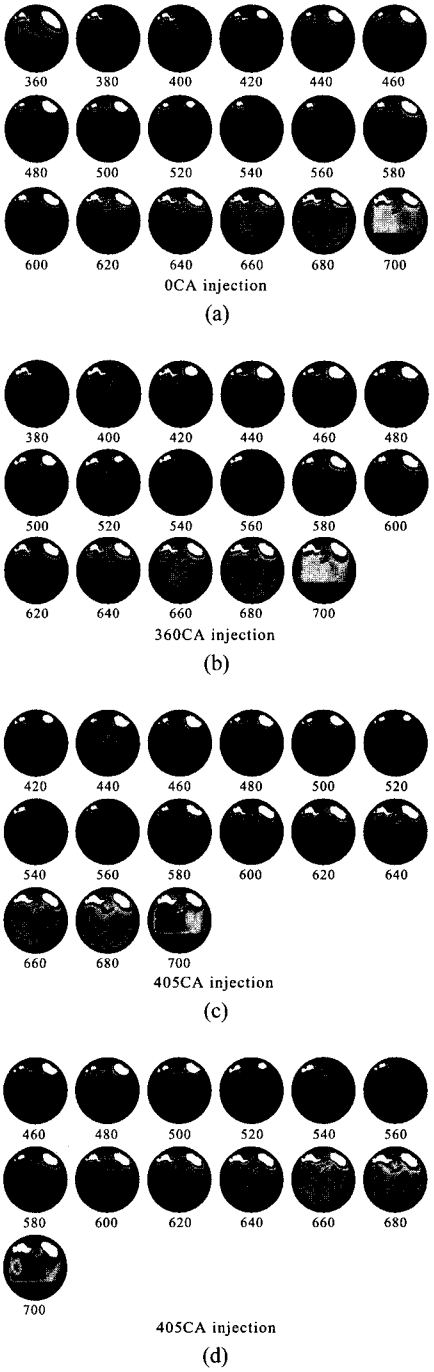

Fig. 5 Fuel distribution in the vertical plane in the cylinder

대응하는 크랭크 각에서의 LIF 영상을 표준화하여 나타낸 것이다. 흡입행정 개시 이전에 연료를 분사하는 경우, 분사된 연료의 기화와 혼합을 위한 충분

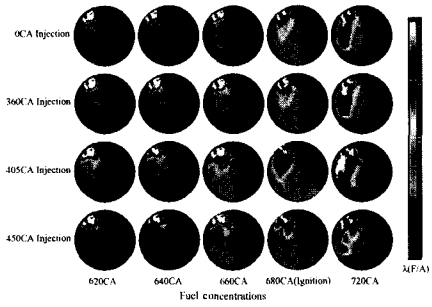

Fig. 6 Normalized fuel concentration distribution

한 시간이 있으므로 압축행정의 말기인 점화시기에 실린더 내 혼합기가 비교적 균일하게 분포된다.

흡입행정이 시작된 이후에 연료를 분사하는 경우 전체 실린더 내 연료의 분포는 균일하지 않지만 점화시기에 점화플러그 주위의 연료 농도가 높아 점화에 유리한 환경이 형성된다.

이상의 관찰을 통해 희박 연소방식 엔진의 경우 많은 양의 연료를 분사하여 연소하여야 하는 고 출력 모드에서는 흡입행정의 개시 이전에 연료를 분사하여 균일한 연소가 진행되도록 하고, 연료의 소비를 감소하기 위한 저 출력 모드에서는 흡입행정의 후반부에 연료를 분사함으로써 연료의 분포는 균일하지 않지만 점화플러그 주변에 높은 농도의 혼합기가 형성되도록 할 수 있다. 이렇게 실화의 가능성을 배제함으로써 전체 혼합기의 희박가연 한계를 확장하는 것이 가능할 뿐만 사이클 변동을 감소하여 희박연소엔진의 안정 운전영역을 확장할 수 있게 된다.

4. 결 론

희박연소 방식의 단기통 광학측정용 엔진을 대상으로, 연료분사시기를 변화하였을 때 실린더 내부의 연료농도의 변화를 레이저 유도형광을 이용하여 측정하는 실험을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 흡입행정이 시작되기 전에 연료를 분사하는 경우, 분사된 연료는 흡입밸브가 열리는 순간부터 실린더 내부로 흡입되어 피스톤의 운동을 따라 실린더의 아래 부분까지 이동하며 공기와 혼합되어 점화시기에는 실린더 내에는 혼합기가 고르게 분포된다. 이러한 분사시기는 고출력이 요구되는 운전 모드에 적합하다.

2) 흡입행정의 후반부에 분사된 연료는 상당부분이 액체상태로 실린더 내부로 유입되며 연소실의 상부에 남아있는 상태로 공기와 혼합되어 성층화된 혼합기가 형성된다.

3) 연료분사시기의 조절에 의하여 점화시기에 점화플러그 주변에 농후한 혼합기가 분포하도록 하여 희박 가연한계를 확장하고, 사이클간 변동을 줄이는 것이 가능한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.

References

1) C. S. Lee, Y. H. Seo, H. M. Cho, H. J. Kim, "A Study on the Mixture Formation and Combustion Characteristics in Lean Burn Engine," Transactions of KSAE, Vol.4, No.4, pp.80-86, 1996.

2) I. Y. Ohm, H.-S. Ahn, W.-J. Lee, W.-T. Kim, S.-S. Park, D.-U. Lee, "Development of HMC Axially Stratified Lean Combustion Engine," SAE 930879, 1993.

3) T. Inoue, S. Matsushita, K. Nakanishi, "Toyota Lean Combustion System - 3rd Generation System," SAE 930873, 1993.

4) S. Matsushita, T. Inoue, K. Nakanishi, K. Kato, N. Kobayashi, "Development of the Toyota Lean Burn Combustion System," SAE 850044, 1985.

5) T. Tomoda , S. Sasaki, D. Sawada, A. Saito, H. Sami, "Development of Direct Injection Gasoline Engine - Study of Stratified Mixture Formation," SAE 970539, 1997.

6) G. Karl, R. Kemmler, M. Bargende, J. Abthoff, "Analysis of a DI Gasoline Engine," SAE 970624, 1997.

7) J. Meyer, K. Kiefer, J. Thiemann, F. von Issendorf, M. Schreiber, M. Haug, "Sparay Visualization of Air-Assisted Fuel Injection Nozzles for Direct Injection SI Engines," SAE

970623, 1997.
8) J. Miok, K. Y. Huh, S. H. Noh, "Numerical Prediction of Charge Distribution in a Direct-Injection SI Engine Comprared with Experimental Results," SAE 970626, 1997.
9) Z. Han, R. D. Reitz, J. Yang, R. W. Anderson, "Effects of Fuel Injection Timing on Air-Fuel Mixing in a Direct-Injection Spark Ignition Engine," SAE 970625, 1997.
10) G. T. Kalghatgi, "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines," SAE 870163, 1987.
11) I. Y. Ohm, K. S. Jeong, I. S. Jeung, "Effects of Injection Timing on the Lean Misfire Limit in an SI Engine," SAE 970028, 1997.
12) A. A. Quader, "The Axially-Stratified-Charge Engine," SAE 820131, 1982.
13) M. BerkMuller, N. P. Tait, D. A. Greenhalgh, "The Influence of Local Fuel Concentration on Cyclic Variability of a Lean Burn Stratified-Charge Engine," SAE 970826, 1997.
14) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill Book Company, pp.343-345, 1988.
15) N. P. Tait, "Development of Planar Laser Diagnostic Techniques for Fuel and Soot Imaging in Combustion Application," Ph. D. Thesis, Cranfield University, 1994.