

# 가솔린 엔진에서 연료분사시기와 포트특성에 따른 실린더 내 연료거동 : Part I-와류가 없는 경우

## In-Cylinder Fuel Behavior According to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part I-Without Swirl

엄인용\*, 조용석\*\*  
Inyong Ohm, Yongseok Cho

### ABSTRACT

This paper is the first of 3 companion papers which investigate axial stratification process. In-cylinder fuel behavior has been investigated in the port injected SI engine by visualization for the purpose of understanding stratification. Planar laser light sheet from an Nd:YAG laser has been illuminated through the transparent quartz cylinder of the single cylinder optical engine and the Mie scattered light has been captured through the quartz window in the piston head with an ICCD camera. Fuel has been replaced with an air-ethanol mixture to utilize atomized fuel spray for the visualization purposes. This results have been compared with steady flow concentration measurement.

For no swirl port, the axial penetration depends on the fuel injection timing. The fuel tends to remain in the upper region of the cylinder far from the spark plug and the distribution is not affected by the injection timing except 90 ATDC.

주요기술용어 : Stratification(성층화), Swirl(와류), Injection timing(분사시기), Visualization(가시화), Mie scattering(미 산란)

### 1. 서론

회박연소 방식은 공기과잉상태에서 안정된 연소를 구현하는 것이 주안점인데, 이 때 초기 화염핵 형성이 불안정하고 화염전파속도가 감소하여 사이클변동이 커진다는 문제점이 있다.<sup>1)</sup> 과거 난

류강도의 증진을 통해 화염전파속도를 증가시키려는 노력이 있어왔으나 증가된 난류의 강도로 인해 점화직후 초기 화염핵 성장에 변동을 일으키고 이로 인한 점화성능의 변동이 발생하여서 엔진의 안정성을 저하시키는 결과를 보여주어 성층화 방식의 회박연소엔진의 공연비인 26~28보다 낮은 20~22 정도의 공연비를 갖는다.<sup>2-7)</sup>

한편 다점 분사방식 엔진의 경우, 엔진 내 혼합기의 분포가 불균일해지는 성층화 현상을 피할

\* 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

\*\* 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

수 없고 축상 성층 방식의 희박연소엔진은 포트의 유동과 분사시기를 적절히 조화시켜 이러한 불균일 분포를 연소에 유리하게 즉 점화 플러그 주변의 공연비가 농후하게 공연비 분포를 유도하여 안정된 연소특성을 얻는 것이다.<sup>1-2, 5-6)</sup> 최근에 와서는 비단 희박연소엔진 뿐만 아니라 일반엔진에서도 강화된 배기 규제에 만족을 위하여 특히 냉시동 직후 엔진의 안정성이 큰 문제로 대두되고 있는 바, 축상 성층화 희박연소의 개념을 도입하여 엔진의 안정성을 달성하고자 하는 노력이 많아지고 있다. 따라서 성층화 과정은 희박연소 구현뿐만 아니라 엔진 안정성을 도모하기 위해 반드시 이해해야될 부분이기도 하다.

이전의 연구에서는 와류와 분사시기 및 분사방법이 희박연소엔진의 성능에 미치는 영향을 파악하는 연구를 수행하여 희박연소한계의 변화 등을 파악하였으며,<sup>6,7)</sup> 이에 관련된 일반적인 현상을 이해하기 위하여 실린더 내 연료거동을 파악함으로써 성층화기구를 이해하는 것이 요구되었다. 이를 위해 정상유동장치를 이용하여 레이저 Rayleigh 산란을 측정하여 실린더 내 연료의 거동을 측정하는 연구를 수행하였다.<sup>8-10)</sup> 정상유동장치를 이용한 실험을 통해 분사직후 연료의 거동에 대한 정보를 제공하기는 하지만, 흡입과정의 일부만을 모사하기 때문에 압축과정에서의 현상을 이해하기 위해서는 엔진운전 조건에서의 실험을 필요로 한다. 본 연구에서는 엔진을 강제구동하며 레이저 Mie 산란을 이용하여 가시화 하는 방법으로 와류가 없는 포트에서 실린더 내 연료의 거동을 조사하고 이를 정상유동 장치의 결과와 비교하여 연료 성층화 기구를 이해하고자 한다.

## 2. 실험장치

### 2.1 포트형상과 실험엔진

흡기행정에 엔진 내로 유입되는 유동의 특성과 분사시기의 변화에 따른 실린더 내 연료의 불균일한 분포, 즉 성층화 현상(stratification)을 규

명하기 위해 상용의 다점 분사식 4기통 DOHC 가솔린 엔진을 연구용 단기통으로 개조하고 이 단기통 엔진의 헤드에 4개의 서로 다른 유동특성을 갖는 흡입포트를 적용하였다. Fig. 1은 단기통 헤드에 적용한 흡입포트 형상이고 이중 Type 1 포트가 본 연구의 대상이다. Fig. 2는 실험에 사용한 엔진의 연소실 형상의 개략도이다. 연소실은 흡기 측 포트에 스퀴시 영역이 있는 반 썸기형(semi-wedge type)이다.

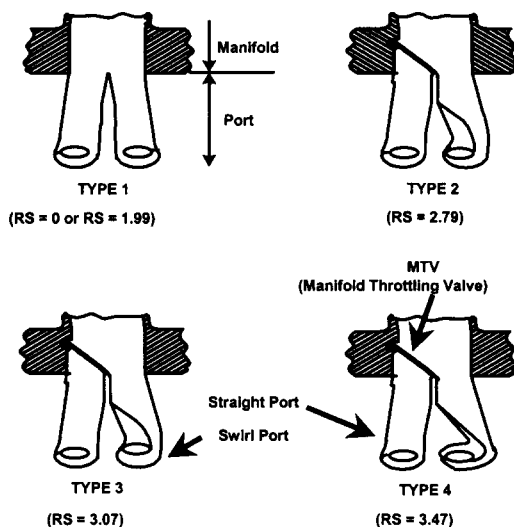


Fig. 1 Port shapes

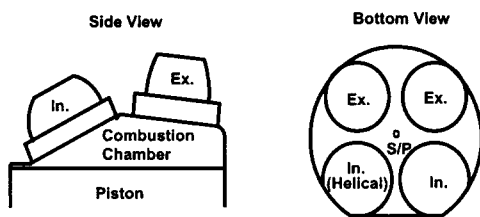


Fig. 2 Combustion chamber

각 포트의 유동 특성은 유동의 총 운동량에 대한 와류 운동량의 비를 밸브 양정에 따라 적분한 값 즉 리카도 스윙 값 (RS: ricardo swirl number)으로 정의하였다.<sup>11)</sup>

### 2.2 연료거동 가시화 실험장치

실린더 내 연료거동을 조사하기 위해 Fig. 3과 같이 직류전기모터로 구동되는 엔진 강제구동장치(motoring rig)를 이용하여 연소과정 없이 엔진을 구동시킨다. 실린더 내부에서 일어나는 현상을 용이하게 관측할 수 있도록 일차 피스톤, 연장 투명 피스톤, 연장 블록, 투명 석영관으로 구성된 가시화 변환기를 사용하였으며 실제 엔진 실험에 사용된 헤드를 개조하지 않고 그대로 강제구동장치에 장착하였다. 이렇게 구성된 가시화 엔진의 석영관 아래에 반사경을 45°의 각도로 장착시켜 피스톤에 설치된 석영창을 통하여 실린더 내부를 관측할 수 있게 하였다.

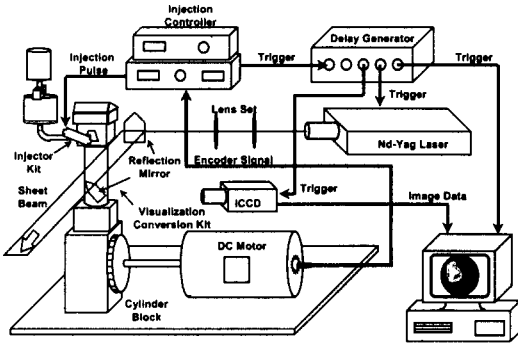


Fig. 3 Motoring rig

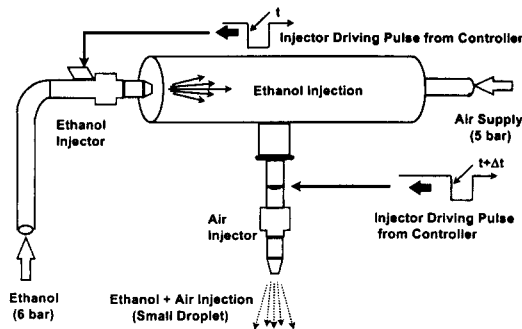


Fig. 4 Schematics of fuel injector

연료거동을 가시화 하기 위해 미립화된 액체를 연료대신 사용하였는데 Fig. 4에 본 실험에 사용한 액체 미립화 장치가 나타나 있다. 이 액체 미

립화 장치는 일종의 공기보조 인젝터(air assist injector)로 에탄올 인젝터와 공기 인젝터 그리고 연료관으로 구성되어 있다. 사용된 인젝터는 모두 CNG용 인젝터이다.

먼저 에탄올을 연료관내에 6 bar의 압력으로 분사한 후 일정시간이 경과하면 공기 인젝터를 작동시켜 공기와 에탄올이 혼합되어 분사되도록 한다. 분사하는 공기의 압력은 약 5 bar로 공기 보조방식으로 분사된 에탄올 액적의 SMD (Saute Mean Diameter)는 약 20 $\mu$ m로 미립화되어 흡입유동에 실려 엔진 내로 유입되어 공기 유동을 추종하며 연료 거동을 나타낼 수 있다.

### 2.3 가시화 화상의 처리

엔진을 강제로 구동시켜 일정속도(본 실험에서는 1500 RPM)에 도달하게 한다. 엔진이 미리 설정된 속도에 도달하면 분사시기를 변화하며 연료를 분사하고 이 분사시기에 동기되어 Nd:YAG 레이저와 ICCD 카메라가 작동되도록 한다. 관측은 헤드 밀면으로부터 5mm 떨어진 면과 그로부터 10 mm 간격으로 떨어진 모두 8개의 단면에서 이루어 졌다. 각 측정 단면에서 특정 크랭크 각에 분사된 미립화 액적들의 입사 평면 레이저 광에 의한 Mie 산란을 ICCD 카메라를 이용하여 화상을 얻는다. 동일 조건에서 5~10개의 화상 데이터를 획득하였다.

이러한 방법으로 얻어진 화상 데이터에 포함된 잡음 신호를 제거하기 위해 연료를 분사하지 않은 상태에서의 화상과 비교하는 방법으로 바탕 배경 잡음을 각 화소별로 제거하였다. 이렇게 얻어진 화상의 각 화소에 광도 값을 256단계로 나타낼 수 있도록 재배치하였다. 또한 사이클 변동의 영향을 고려하여 잡음이 제거된 화상을 각 화소별로 평균하였고 경계치(threshold)를 설정하여 그 이상의 값을 가지는 부분만을 택하여 잡음 신호를 줄였다. 마지막으로 이 잡음이 제거된 화상으로부터 동일한 측정 크랭크 각에서 실린더의 위치별로 연료농도의 등고선을 구하고 이를 그때

의 피스톤 위치와 함께 3차원으로 표현하였다. 이 과정은 그림으로 Fig. 5에 나타내었다.

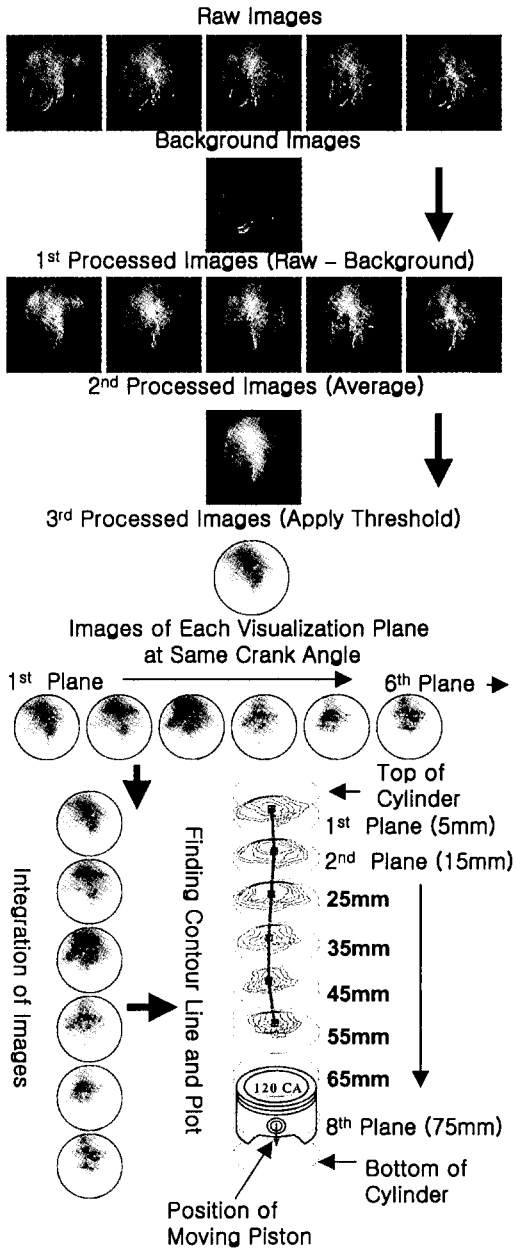


Fig. 5 Image data processing

### 3. 실험 결과

#### 3.1 포트의 유동특성

Fig. 6은 정상유동장치에서 충격식 와류측정기 (Impulse Swirl meter)로 측정한 이 포트의 유동 특성이다.

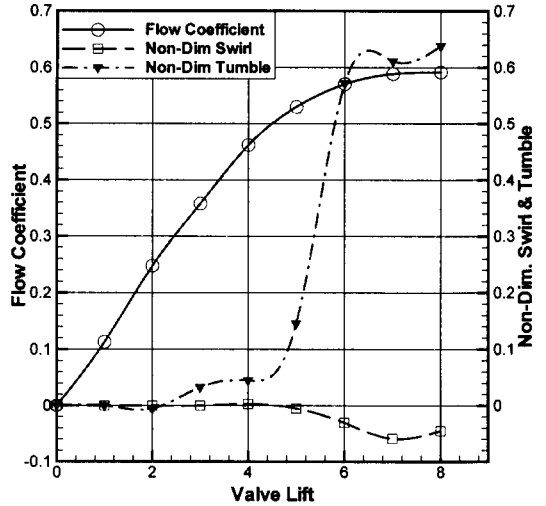


Fig. 6 Flow characteristics

그림에서와 같이 와류는 거의 발생하지 않다가 높은 밸브양정에서 조금 발생함을 알 수 있다. 이는 양쪽 포트의 사소한 불균형에 의해 발생하는 것으로 추정된다. 텀블은 와류보다 낮은 밸브양정에서 발달하기 시작하여 밸브 양정 5mm 부근에서 급속히 증가하는 양상을 보여준다. 따라서 이 포트는 낮은 밸브양정에서는 지배적인 유동이 없다가 양정이 높아질수록 텀블이 주유동이 됨을 알 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이 밸브 양정에 따라 유동 특성은 지배적 유동이 없는 저 밸브 양정 구간, 텀블이 발달하는 중간 양정 그리고 강한 텀블이 존재하는 고양정 구간으로 대별할 수 있다.

#### 3.2 정상유동장치에서 연료거동

Fig. 7(a), 7(b), 7(c)는 정상유동장치에서 레이 레이 산란기법으로 각 밸브 양정에서 연료 농도를 측정한 결과이다.<sup>9,10)</sup> 이 결과 중 위에서 언급한 각 유동 특성을 대표할 수 있는 2, 4, 7 mm 밸브 양정에서 분사 개시 후 시간 경과에 따른

실린더 내 연료 분포 측정의 결과이다. 각 측정 단면은 헤드 하면으로부터 각각 3, 23, 43, 63, 83 mm에 위치한다.

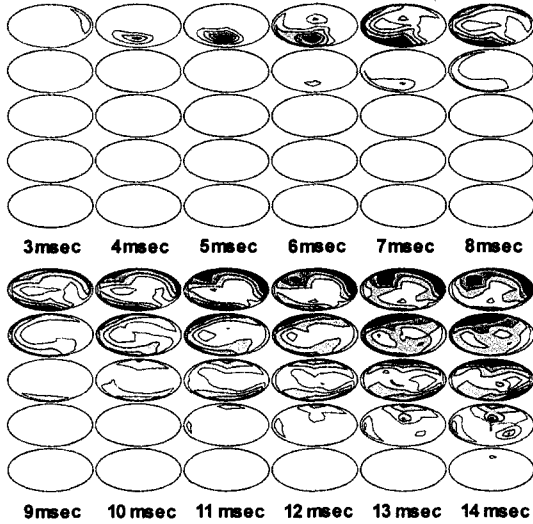


Fig. 7(a) Fuel distribution at 2 mm lift

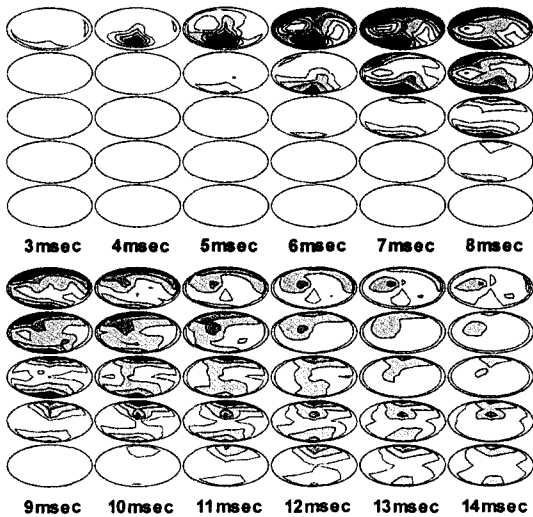


Fig. 7(b) Fuel distribution at 4 mm lift

분사된 연료는 분사 개시 후 3 msec부터 실린더에서 관측되기 시작하고 이후 실린더의 하방을 향해 진행하는데 초반에는 흡기 밸브가 위치한 쪽에서 먼저 연료가 나타나나 이후 시간 경과에

따라 흡기 밸브 반대쪽(그림에서 각 측정단면의 아래쪽이 흡기밸브 위치)의 실린더에서 더 많은 연료가 관측된다. 분사된 연료가 가스 상태이므로 흡입 연료의 분포는 흡입 유동 상태를 나타낸다고 볼 때 정상 유동상태에서 주유동은 주로 흡기밸브의 상부 즉 연소실 중심 쪽과 하부 즉 흡기밸브 측 실린더 벽 쪽으로 생성됨을 알 수 있다.

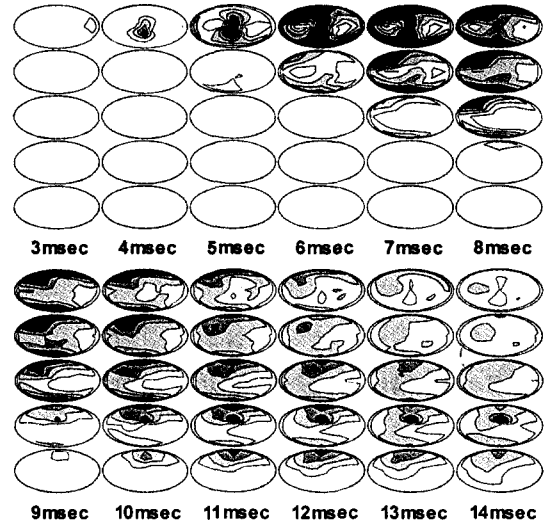


Fig. 7(c) Fuel distribution at 7 mm lift

밸브 양정이 낮은 경우 이렇게 두 방향으로 유입된 연료는 계속해서 실린더 벽에 밀착되어 진행되는 양상을 보여준다. 그리고 시간 경과에 따라 점차 실린더의 중심으로 연료의 확산이 진행된다.

반면 유량이 많은 고양정에서는 연료가 비교적 광범위하게 분포하고 있으며 연료도 초기를 제외하고는 흡기 반대측에서 많이 관찰된다. 특히 7mm의 경우 10 msec가 경과될 무렵부터 실린더의 하부에 실린더의 단면을 가로지르는 유동이 형성됨을 볼 수 있는데 이는 Fig. 6에 나타낸 고양정에서 텀블이 지배적인 유동 특성과 일치하고 있다. 따라서 실린더의 하부가 피스톤으로 막혀 있는 실물 엔진이라면 이 유동은 규모가 큰 텀블 유동으로 발달할 가능성이 농후하다.

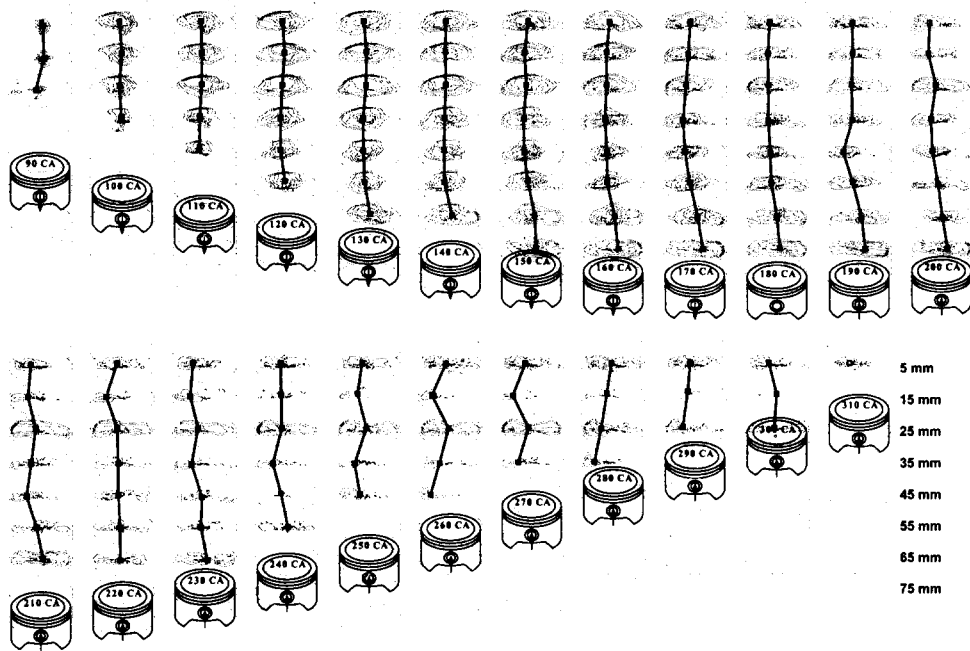


Fig. 8(a) Fuel charging motion at ATDC 90 CA injection

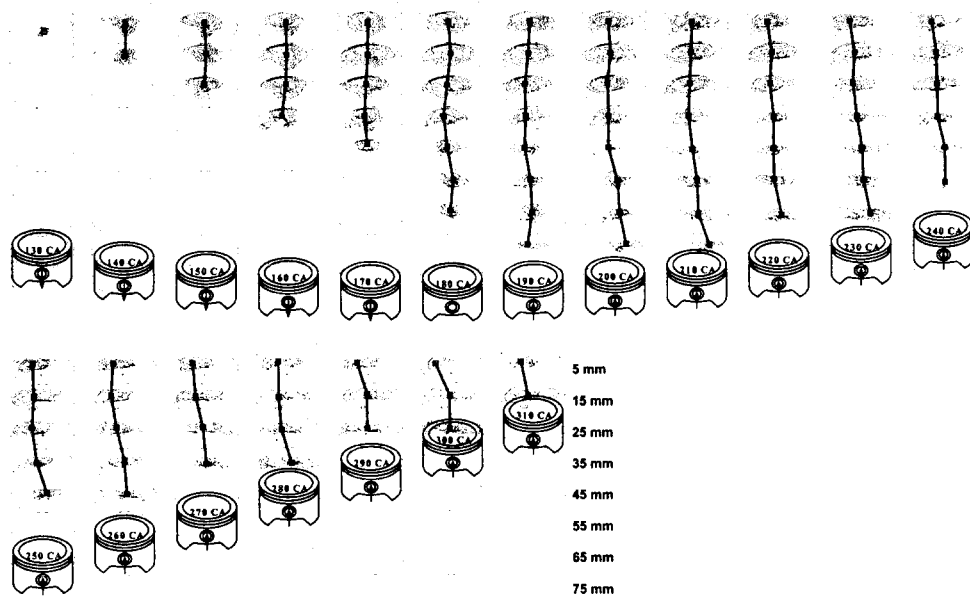


Fig. 8(b) Fuel charging motion at ATDC 130 CA injection

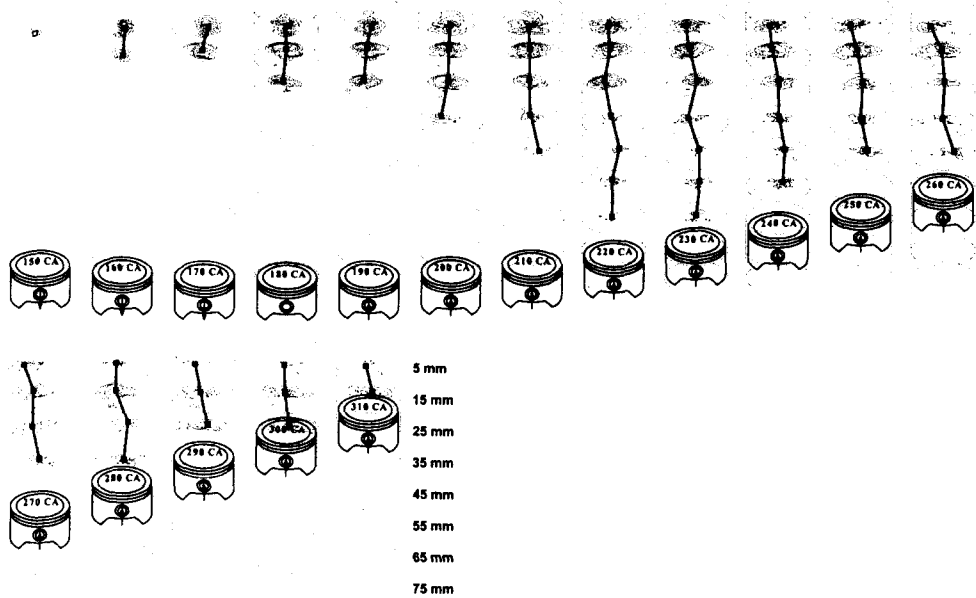


Fig. 8(c) Fuel charging motion at ATDC 150 CA injection

### 3.3 실물엔진에서 연료거동

Fig. 8 (a)은 강제 구동 엔진에서 연료의 분사 중심점이 흡입 ATDC 90 CA일 때 실린더 내 연료거동을 가시화하여 화상을 얻고 이를 Fig. 5와 같은 과정을 통해 얻어진 결과와 이를 연료량에 레하는 빛의 강도로 가중하여 구한 연료 거동의 중심점을 함께 나타낸 것이다.

연료는 실린더의 중앙부근에서 관측되기 시작하여 흡기 포트의 반대쪽으로 실린더 벽면까지 진행한 후 벽면을 타고 아래로 이동한다. ATDC 150 CA 근방에 이르면 연료는 거의 실린더의 최하단까지 진행함을 볼 수 있다. 흡기 행정 중 정상 유동장치와는 달리 흡기 밸브의 아래쪽 즉 실린더 벽면 쪽으로부터의 연료유입은 관찰되지 않으며 주로 실린더의 중심 쪽으로 유입된다. 또한 연료의 분포도 정상유동장치보다 확산이 덜 된 뭉쳐진 형태로 진행한다. 이는 하향하는 피스톤과 밸브양정의 변화에 따라 가감속을 하는 비정

상 흡기유동 효과에 기인하여 주유동의 방향이 흡기 밸브의 상면 즉 연소실 중심부 쪽으로 형성되었기 때문으로 사료된다. 그 외의 흡입형태는 실린더의 좌측에서 약간 더 많은 연료가 분포하는 것을 포함하여 대체로 정상 유동장치와 비슷한 경향을 보여 준다.

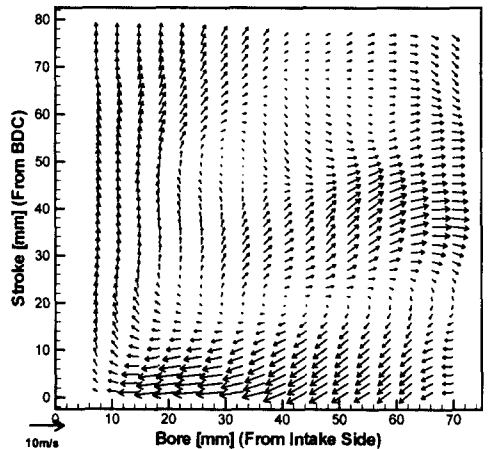


Fig. 9 Tumble motion at 180 CA

압축이 진행되면 15 mm 평면과 45 mm 평면의 연료가 사라지기 시작하는데 이는 실린더 내에 두 개의 텀블 유동이 존재하기 때문으로 판단된다. 즉 상부에 작은 규모의 텀블과 하부에 큰 규모의 텀블이 존재하는데 하부의 큰 텀블은 유동 특성에서 보았듯이 고양정에서 생기는 텀블 유동에 기인한 것으로 판단되고 작은 텀블은 일종의 재순환(recirculation) 유동으로 판단된다.

이 두 텀블유동은 PIV (Particle Image Velocimetry) 시험을 통해 그 존재가 확인되었고 그 일부를 Fig. 9에 나타내었는데 그림에서 좌측이 흡기포트가 위치한 곳이다. 상부의 2차 텀블에 의해 연료의 일부가 연소실 내로(즉 스파크 플러그 주변으로) 이동하게 되고, 회박연소한계(LML : Lean Misfire Limit : 1% 이상의 실화 또는 3% 이상의 BMEP COV로 정의)는 플러그 주변의 공연비에 지배를 받으므로<sup>7)</sup> 이 부근의 LML이 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 다른 흡입 행정에 비해 비교적 높게 나타났다고 판단된다.

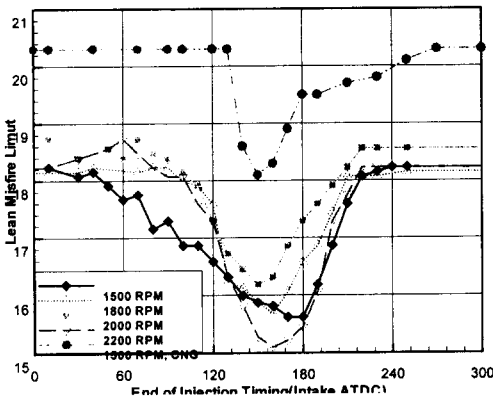


Fig. 10 LML according to injection timing

Fig. 10에서 보듯이 가스연료인 압축천연가스(CNG)도 가솔린과 동일한 LML 양상을 보여주고 있는데, 이를 통해 성층화는 2상 유동(2 phase flow)의 효과는 무시할 수 있고 순수한 실린더 내부 유동의 결과라고 결론 지을 수 있다.

Fig. 8(b)는 130 CA 분사의 결과로 90 CA

분사와는 달리 실린더의 최하방까지 진출하는 연료가 적고 주로 65 mm 평면 위에 존재한다. 이는 분사 직후 피스톤의 상향운동이 시작되기 때문으로 판단된다. 이 경우 상부의 작은 텀블 유동은 90 CA 분사에 비해 뚜렷이 나타나지 않는다. 이는 대부분의 연료가 실린더 상부에 머물고 연소실까지 진출하지 못함을 의미한다. 따라서 이 시기에 분사한 연료는 90 CA보다 낮은 LML 수준을 보여주었다.

Fig. 8(c)는 150 CA 분사의 결과이다. 이 시기에 분사를 하면 연료는 실린더의 바닥까지 내려갈 충분한 시간이 없기 때문에 분사된 연료가 모두 그 해당 사이클에 실린더 내로 진입하지 못한다. 연료는 주로 15-25 mm 평면 사이에 머물러 있으면서 연소실 쪽으로 진행하지 못하고 있다. 이에 따라 이 시기에는 연소실 상층부 스파크 주변의 연료가 적어 가장 낮은 LML을 보여준 것으로 판단된다.

이러한 관찰을 기초로 하여 불 때 실린더 내 축방향 연료진행 거리는 분사시기에 좌우된다. 그리고 흡입 행정 중 분사를 하면 실린더 내로 도입된 연료는 주로 실린더 상부에 머물고 연소실로는 진입하지 않아 낮은 LML을 야기한 것으로 판단된다. 다만 비교적 분사시기가 빠르면(90 CA 이전) 2차 텀블에 의해 연료가 이동하여 연소실 상부가 다른 분사시기보다 상대적으로 농후하여 LML이 높은 것으로 판단된다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 11과 같은 상태로 추정된다.

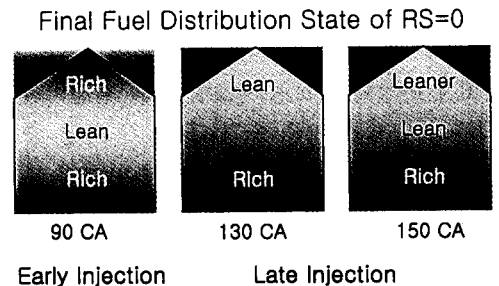


Fig. 11 Final distribution state of RS=0

위의 그림과 같이 최종적인 연료의 분포는 분



사시기에 따라 그 상태를 달리하게 되고 이에 의해 스파크 플러그 주변의 공연비가 영향을 받아 Fig. 10과 같은 엔진의 시험 결과가 나온 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

연료거동을 가시화하는 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정상유동 장치는 실물엔진의 흡기 과정을 비교적 잘 모사한다.
- 2) 와류가 없는 상태에서도 성층화 기구는 거시적 실린더 내부 유동에 의해 지배된다.
- 3) 와류가 없어도 연료 분포상태는 분사시기에 영향을 받는다.
- 4) 와류가 없는 경우, 흡입 행정 중 분사된 연료는 주로 실린더 상부에 머물고 연소실로는 진입하지 않아 낮은 LML을 야기한다.
- 5) 비교적 분사시기가 빠르면(90 CA) 2차 텀블에 의해 연료가 이동하여 연소실 상부가 다른 분사시기보다 상대적으로 농후하여 LML이 높아진다.

#### 참 고 문 헌

- 1) G. T. Kalghatgi, "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines", SAE 870163, 1987.
- 2) S. Matsusita, "Development of the Toyota Lean Combustion System", SAE 850044, 1985.
- 3) H. Ando, K. Akishino, "Concept of Lean Combustion by Barrel-Stratification", SAE

- 912207, 1997.
- 4) J. Harada, "Development of a New Generation Lean Burn Engine", SAE 924068, 1992.
- 5) A. A. Quader, "The Axially - Stratified - Charge Engine", SAE 820131, 1982.
- 6) 엄인용, 정경석, 정인석, "가솔린 엔진의 연료분사시기가 회박연소한계에 미치는 영향에 관한 연구", 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술대회 논문집, pp.231-238, 1996.
- 7) I. Y. Ohm, K. S. Jeong, "Effect of Injection Timing on the Lean Misfire Limit in an SI Engine", SAE 970028, 1997 SAE Transaction, 1998.
- 8) Y. J. Rho, I. Y. Ohm, K. S. Jeong, and I. S. Jeung, "Fuel Stratification Measurements in a Steady Flow Rig Using Laser Rayleigh Scattering", ASPACC 97, Osaka, Japan, 1997.
- 9) 노영준, 엄인용, 정경석, 정인석, "레이저 Rayleigh 산란을 이용한 연료성층화에 관한 연구", 한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회 논문집, pp.57-62, 1996.
- 10) 엄인용, 정경석, 정인석, "흡입행정에서의 실린더내 혼합기 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집 제 7권 제 4호, pp.54-59, 1999.
- 11) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, pp. 343-345, 1988.