

가솔린 엔진에서 연료분사시기와 포트특성에 따른 실린더 내 연료거동 : Part II - 저/중 와류의 경우

In-Cylinder Fuel Behavior According to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part II-With Low/Medium Swirl

엄인용*, 조용석**
Inyong Ohm, Yongseok Cho

ABSTRACT

This paper is the second of 3 companion papers which investigate axial stratification process. In-cylinder fuel behavior has been investigated in the port injected SI engine by visualizing 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 low/medium swirl port, the early injection makes such a fuel distribution state that is upper-rich, middle-lean and lower-rich along the combustion chamber and cylinder by tumbling motion. On the other hand, the late injection induces upper-rich, middle-lean and lower-rich state due to the short fuel penetration.

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

1. 서론

가솔린 엔진에서 연료의 공급수단으로 인젝터를 채용함에 따라, 정도의 차이만 있을 뿐 엔진 내 혼합기의 분포가 불균일해지는 성층화 현상을

피할 수 없다. 축상 성층 방식의 회박연소엔진은 포트의 유동과 분사시기를 적절히 조화시켜 이러한 불균일 분포를 연소에 유리하게 즉 점화 플러그 주변의 공연비가 농후하게 공연비 분포를 유도하여 안정된 연소특성을 얻는 것이다.¹⁻⁶⁾

축상 성층방식의 회박 연소엔진에서 와류값의 설정은 매우 예민한 문제이다. 고와류의 포트를 사용하면 일단 안정된 회박연소 특성을 얻을 수

* 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

** 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

있으나 포트 유량 저하에 의한 전부하 성능의 저하를 초래하고, 때로는 지나친 고와류 포트는 웰팅(wetting)의 증가로 배기, 연비 성능 저하뿐만 아니라 회박 연소 한계도 낮추기도 한다. 저/중와류의 경우 어느 정도 성층화 효과를 보여주는 하나 회박 연소에 이용할 만큼 충분한 회박연소 한계(LML : Lean Misfire Limit)의 확보에 문제가 있다. 따라서 적정 와류값의 선정을 통해 회박연소 안정성과 전부하 성능 사이의 최적화가 필요하다.

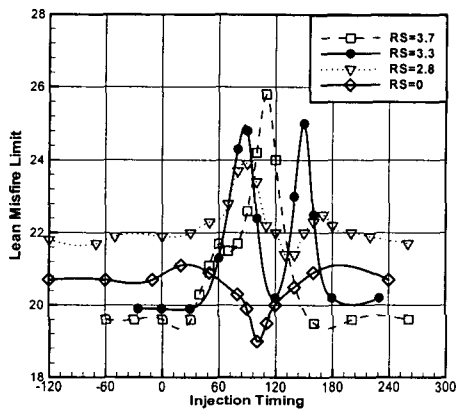


Fig. 1 LML according to swirl

한편 저/중 와류의 경우 분사시기에 따른 회박연소 한계의 변화 양상은 고와류와 비교할 때 매우 큰 차이를 보여 주는데 이 중 한 예를 Fig. 1에 나타내었다.⁶⁾ 이와 같은 결과가 나타나는 이유는 와류가 있더라도 와류값에 따라 성층화 기구가 달라지기 때문으로 판단된다. 따라서 저/중와류에서 성층화 기구의 파악은 포트 설계 최적화를 위해 상당히 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 두 개의 LML 최적점이 나타나는 저/중와류 포트를 대상으로 연료 거동의 추적을 통해 저/중와류에서 성층화 기구에 대한 고찰을 시도하고자 한다.

이전의 연구에서는 와류와 분사시기가 LML에 미치는 영향을 파악하는 연구를 수행하여 회박연소한계의 변화 등을 파악하였으며,^{5,6)} 이에

관련된 일반적인 현상을 이해하기 위하여 정상유동장치를 이용하여 레이저 Rayleigh 산란을 측정하여 실린더 내 연료의 거동을 측정하는 연구를 수행하였다.^{7,8,10)} 정상유동장치는 흡입과정의 일부만을 모사하기 때문에 실제로 성층화가 진행되는 압축과정에서의 현상을 이해하기 위해서, 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

상용의 다점 분사식 4기통 DOHC 가솔린 엔진을 연구용 단기통으로 개조하고 이 단기통 엔진의 헤드에 2개의 서로 다른 유동특성을 갖는 흡입포트를 적용하였다. Fig. 2은 단기통 헤드에 적용한 흡입포트 형상이고 이중 Type 1 포트에서 한쪽 포트만 사용하여 저와류(RS=1.99)를 구현하였고 Type 2는 중와류(RS=2.79)의 포트이 두 포트가 본 연구의 대상이다. 와류값의 정의는 리카도 와류값(Ricardo Swirl Number:RS)을 사용하였다.¹¹⁾

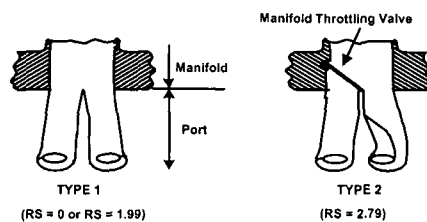


Fig. 2 Port shapes

2.2 연료거동 가시화 실험장치

실린더 내 연료거동을 조사하기 위해 직류전기 모터로 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. 연료거동을 가시화하기 위해 미립화된 액체를 연료대신 사용하였는데 이 액체 미립화 장치는 일종의 공기보조 인젝터(air assist injector)이다.

엔진 강제구동 장치와 액체 미립화 장치의 그림과 이전의 발표 논문⁹⁾과 이 논문의 Part I에 나타나 있다.

2.3 가시화 화상의 처리

엔진을 강제로 일정속도(1500 RPM)로 구동하면서 분사시기를 변경하고 이 분사시기에 동기되어 Nd:YAG 레이저와 ICCD 카메라가 작동되도록 한다. 관측은 헤드 밑면으로부터 5mm 떨어진 면과 그로부터 10 mm 간격으로 떨어진 모두 8개의 단면에서 이루어 졌다. 각 측정 단면에서 특정 크랭크 각에 분사된 미립화 액적들의 입사 평면 레이저광에 의한 Mie 산란을 ICCD 카메라를 이용하여 화상을 얻는다. 동일 조건에서 5~10개의 화상데이터를 획득하였다.

이렇게 얻어진 화상 데이터에 포함된 잡음 신호를 제거하기 위해 연료를 분사하지 않은 상태에서의 화상과 비교하는 방법으로 바탕 배경 잡음을 각 화소별로 제거하였다. 다음으로 화상의 각 화소에 광도 값을 256단계로 나타낼 수 있도록 재배치하고, 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 그때의 피스톤 위치와

함께 3차원으로 표현하였다. 이 과정은 본 논문의 Part I에 나타나 있다.

3. 실험 결과

3.1 포트의 유동특성

Fig. 3는 정상유동장치에서 LDV로 측정된 이 포트의 유동 특성이다.

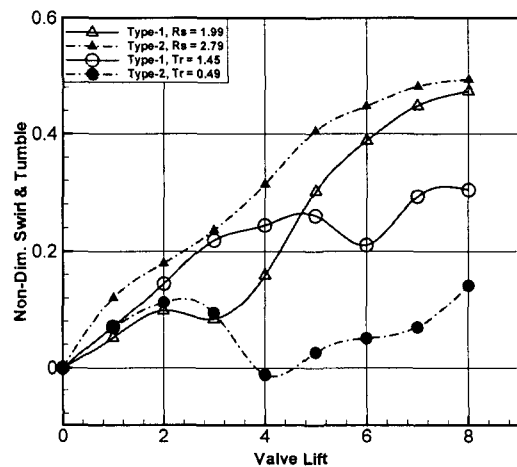


Fig. 3 Flow characteristics

그림에서와 같이 저와류와 중와류의 차이는 낮은 밸브 양정에서 나타난다. 저와류는 밸브 양정이 낮을 때 와류 성분이 크게 발달하지 못하다가 5mm를 넘어서면서 발달하기 시작하여 그 이후 중와류의 경우와 비슷한 수준이 되고, 8 mm에서는 거의 근접한 수준에 이른다. 또한 와류값이 작을 때 상대적으로 텀블은 큰 값을 보이고 있으며 와류가 강해지면서 텀블은 더 이상 증가하지 않고 일정 수준을 유지한다.

반면 중와류의 경우 낮은 밸브양정에서부터 와류가 발달하여 양정의 증가에 따라 거의 직선적으로 와류값이 증가한다. 텀블은 3mm 근방까지 발달하다 이후 와류에 비해 아주 낮은 값을 보여 주고 있다. 따라서 저/중와류 포트는 크게 밸브 양정에 따라 와류와 텀블이 동시에 발달하는 저양정 구간 그리고 와류가 증가하고 텀블이 억제되는 고양정 구간으로 대별될 수 있다. 그러나 저

/중와류의 경우 전 밸브 양정에 걸쳐 텀블은 와류에 비해 무시 못할 값을 가지고 있다.

3.2 정상유동장치에서 연료거동

Fig. 4(a), 4(b), 4(c)는 저와류(RS=1.99) 포트에 대해 정상유동장치에서 레일레이 산란기법으로 각 밸브 양정에서 연료 농도를 측정 한 결과 중 2, 4, 7 mm의 경우에 대한 것으로

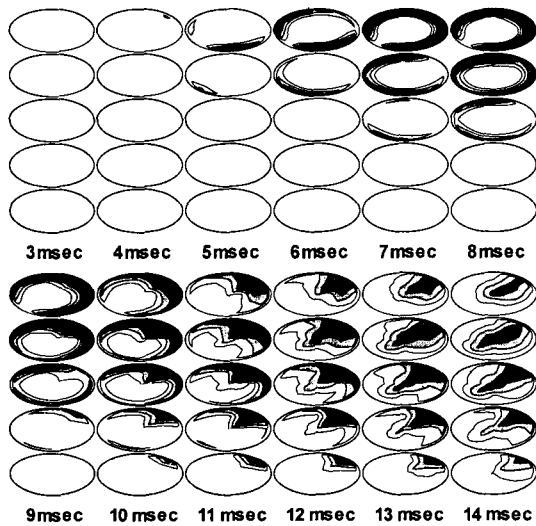


Fig. 4 (a) Fuel distribution at 2 mm lift

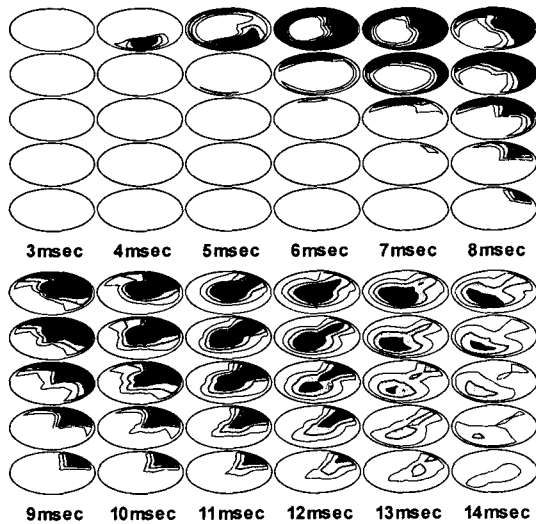


Fig. 4 (b) Fuel distribution at 4 mm lift

시간은 분사 개시후 경과시간이다.^{7,8)} 각 측정 단면은 헤드 하면으로부터 각각 3, 23, 43, 63, 83 mm에 위치한다. 밸브 양정에 따라 다소의 차이는 있으나 분사된 연료는 3 -4 msec부터 실린더에서 관측되기 시작한다. 연료는 저양정에서는 분사 초기에 흡기 밸브측(실린더 평면의 아래쪽)에서 먼저 나타나나 고양정으로 갈수록 흡기 반대 쪽의 실린더에서 많이 관찰된다. 2-4 mm의 경우 실린더 상부에서는 실린더의 벽 주위를 따라 연료가 분포하는 전형적인 와류 유동의 형태를 보여주다가 시간 경과에 따라 약 10 msec 이후부터 실린더를 가로지르는 뚜렷한 텀블유동이 관찰되는데 이는 정상유동 장치에서 밸브 양정 4-5 mm까지 텀블 유동이 지배적인 것과 매우 잘 일치한다.

고양정에서는 저양정과 달리 연료가 도입될 때부터 띠 모양으로 존재하지 않고 비교적 넓게 분포하며 흡기 반대쪽에서 먼저 나타난다. 또한 텀블 유동으로 생각되는 유동은 관찰되지 않으며 대체로 규모가 큰 와류의 형태를 지닌 채 진행되는 모습을 보여준다.

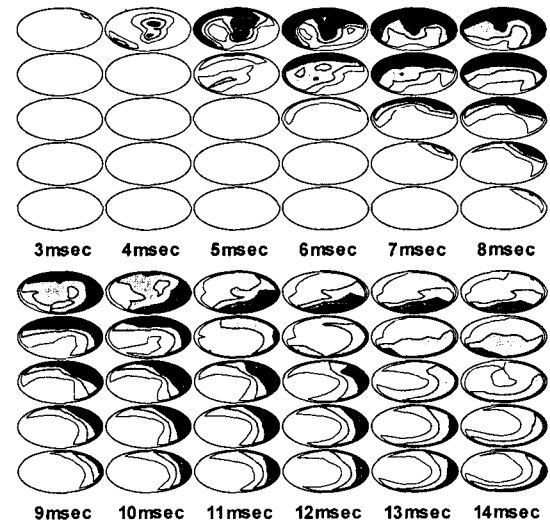


Fig. 4 (c) Fuel distribution at 7 mm lift

3.3 실물엔진에서 연료거동

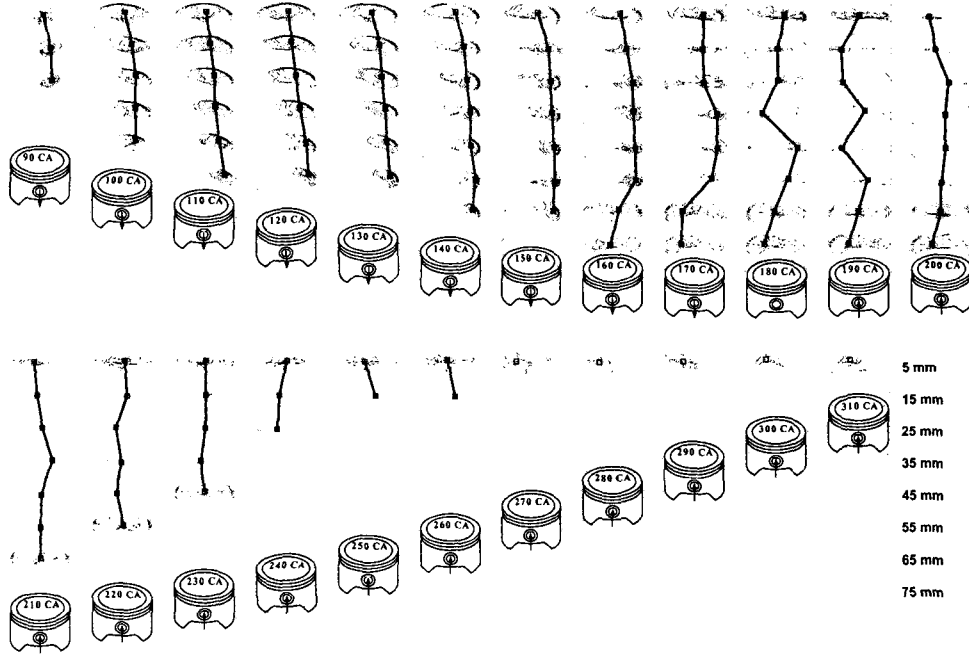


Fig. 5 (a) Fuel charging motion at ATDC 90 CA injection (RS=1.99)

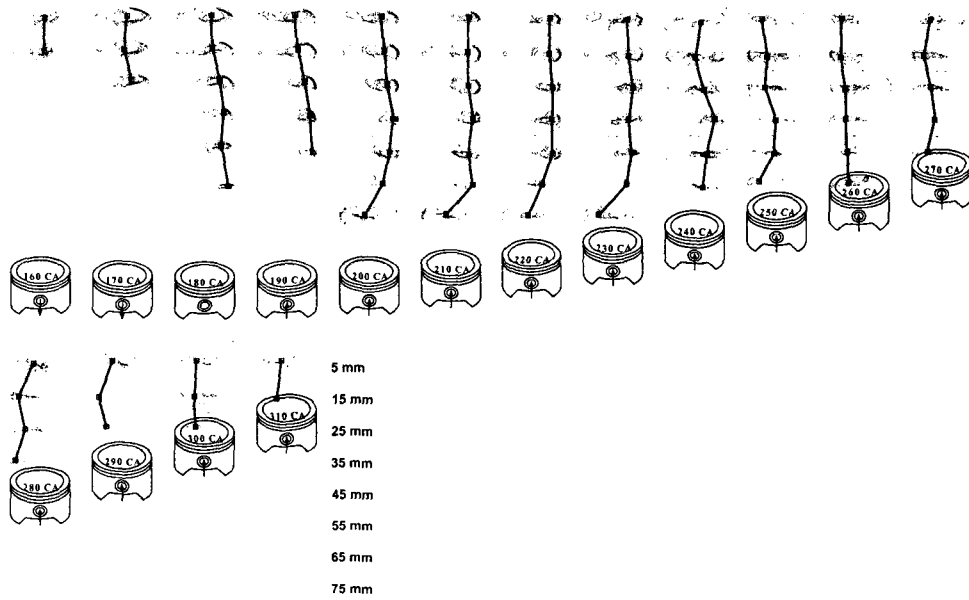


Fig. 5 (b) Fuel charging motion at ATDC 150 CA injection (RS=1.99)

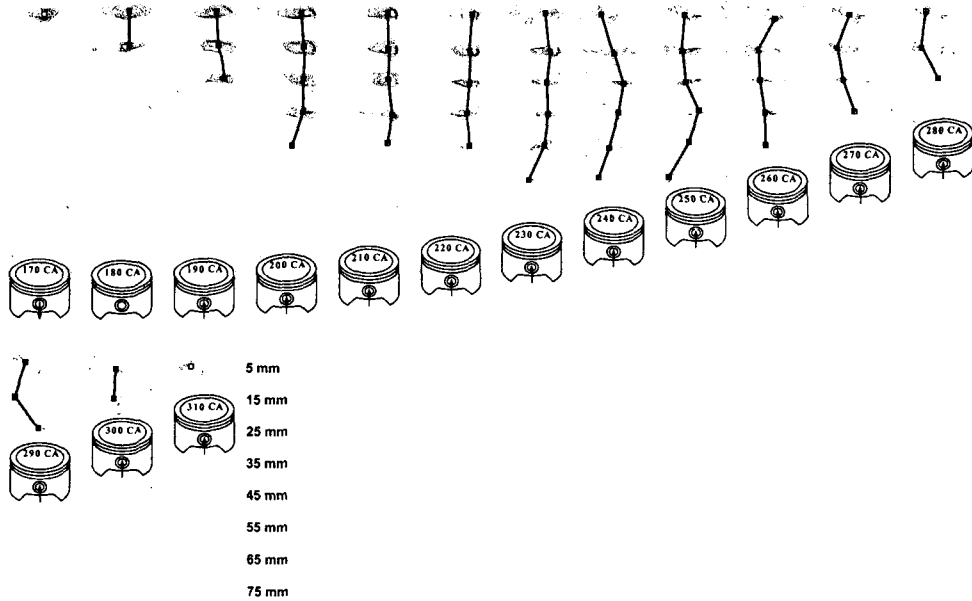


Fig. 5 (c) Fuel charging motion at ATDC 165 CA injection (RS=1.99)

Fig. 5 (a)은 강제 구동 엔진에서 연료의 분사 중심점이 흡입 ATDC 90 CA일 때 실린더 내 연료거동을 가시화하여 화상을 얻고 이를 처리하여 얻어진 결과와 연료 거동의 중심점을 함께 나타낸 것이다.

연료는 실린더의 중앙부근에서 관측되기 시작하여 흡기 포트의 반대쪽으로 실린더 벽면까지 진행된 후 벽을 따라 약한 와류의 형태로 이동한다. ATDC 160 CA 근방에 이르면 연료는 거의 실린더의 바닥에 도달하고 이 바닥에서 커다란 텀블 유동을 보여 주듯이 다른 평면보다 넓게 분포한다. 압축이 시작되면 실린더의 상부와 하부에서만 연료가 관찰되고 15-55 mm 사이의 평면에서는 거의 연료가 발견되지 않는데 이는 실린더 내에 두 유동이 존재하기 때문으로 판단된다. 즉 상부의 2차 텀블과 하부의 큰 규모의 텀블에 의해 연료의 일부가 상부로 이동하여 공백상태가 되고 하부의 연료는 피스톤에 부착된 채 이동한다.

Fig. 5(b)에 나타낸 150 CA 분사의 경우 흡기시 형태는 90 CA와 거의 유사하지만 연료의 침투 길이는 90 CA에 비해 짧아 최하단까지 도달하는 연료는 거의 없다. 또한 90 CA 분사시 보였던 상부의 텀블 유동은 명확하게 관찰되지 않고 하나의 커다란 텀블만 나타난다. 압축이 시작되면서 연료는 커다란 텀블 유동의 형태를 나타내고 흡기 때와는 달리 반대쪽 실린더 벽으로 연료가 이동함을 볼 수 있고 이후 이 상태가 압축 말기까지 유지된다. 이는 정상유동 장치에서 관찰한 텀블이 나타나는 것과 매우 잘 일치한다.

Fig. 5(c)의 165 CA의 경우 연료의 침투 길이는 더욱 짧아지고 있다. 이는 분사된 일부 연료는 해당 사이클에 진입하지 못하고 또한 도입된 연료의 일부는 연소실과 실린더의 상층부에 존재하고 있음을 나타낸다. 흡기 형태는 다른 분사시기와 유사하며 텀블에 의해 연료가 반대쪽의 벽으로 이동하는 모습을 볼 수 있다. 이 시기의 연료 거동은 대체로 150 CA와 유사하나 실린더 내에

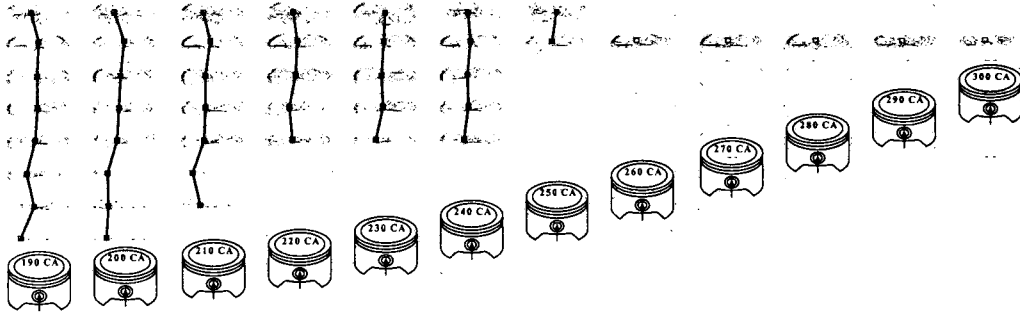


Fig. 6 (a) Fuel charging motion at ATDC 90 CA injection (RS=2.79)

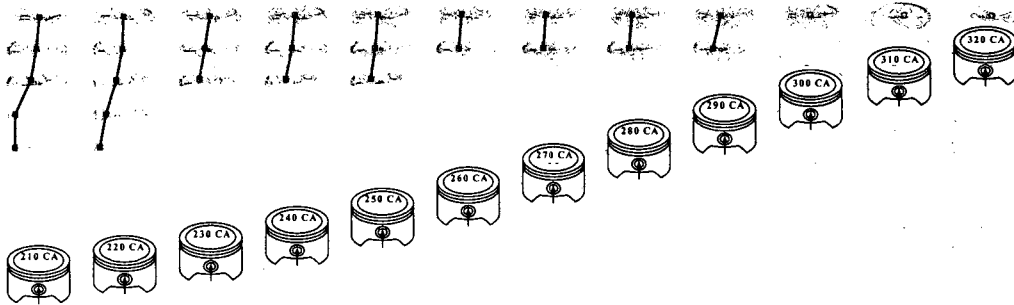


Fig. 6 (b) Fuel charging motion at ATDC 130 CA injection (RS=2.79)

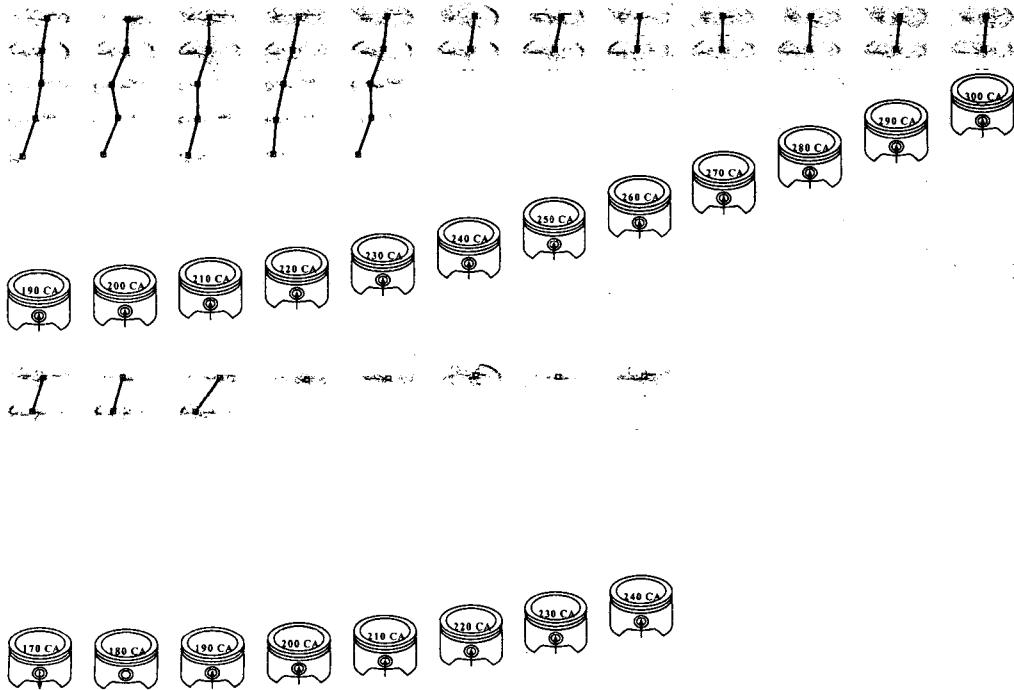


Fig. 6 (c) Fuel charging motion at ATDC 150 & 170 CA injection (RS=2.79)

서 관찰되는 연료의 양이 훨씬 줄어들음을 알 수 있다.

그림 6(a), (b), (c)는 중와류의 경우를 나타내고 있다. 이 경우 흡기 행정시의 연료 진입 형태는 저와류의 경우와 유사하여 도시하지 않았다. 대체로 연료의 거시적 분포형태는 저와류의 경우와 유사한 경향을 보여주고 있다. 그러나 전체적으로 저와류보다 실린더의 상부에서 많은 연료가 관찰되고 있으며 90 CA 분사의 경우는 저와류의 150 CA 분사의 경우와 매우 유사하다.

이상의 관찰에서 볼 때 대체로 분사시기가 늦어질수록 연료의 침투깊이는 짧아지고 더 많은 연료가 실린더의 상층부와 연소실에 남게 되는 것으로 판단된다. 따라서 중와류의 경우 대체로 저와류보다 Fig. 7에 도시한 바와 같이 희박연소 한계(LML : Lean Misfire Limit : 1% 이상의 실화 또는 3% 이상의 BMEP COV로 정의)가 높게 나타난 것으로 판단된다.

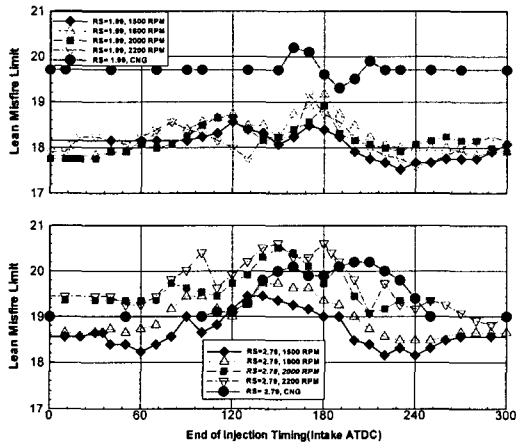


Fig. 7 LML according to swirl and injection timing

최종적으로 저/중와류의 포트에서 분사시기가 이른 경우 연료의 성층화는 텀블에 의해 지배되고 늦은 경우에는 짧은 침투거리와 실린더 하부의 와류에 의해 연료가 하방으로 진행하지 못하고 상부에 정체되어 성층화가 이루어진다고 판단된다. 따라서 위의 그림과 같이 최종적인 연료의

분포는 분사시기에 따라 그 상태를 달리하게 되고 이에 의해 스파크 플러그 주변의 공연비가 영향을 받아 Fig. 8과 같은 연료의 분포가 이루어진다고 판단되며 이에 따라 Fig. 7과 같은 엔진의 시험 결과가 나온 것으로 사료된다.

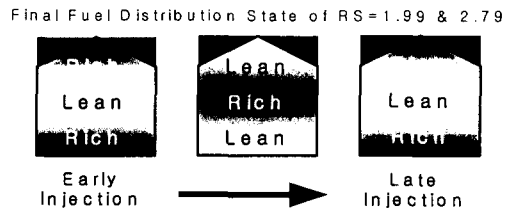


Fig. 8 Final fuel distribution state of RS=1.99 & 2.79

4. 결론

저/중와류 포트에서 연료거동을 가시화하는 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 와류가 없는 경우 정상유동 장치에서 유동 모사는 흡기행정을 잘 추종하는 반면 저/중와류 포트에서는 초반에는 흡기행정을 그리고 후반에는 압축행정을 비교적 잘 모사한다.

2) 와류가 없는 경우 성층화는 텀블유동에 의해 이루어지는 반면 저/중와류에서 성층화 기구는 실린더 내부의 거시적 유동과 연료 침투거리에 의해 지배된다.

3) 저/중와류의 포트에서 분사시기가 이른 경우 연료의 성층화는 텀블에 의해 지배되며 이때 2차 텀블에 의해 연료가 이동하여 연소실 상부가 다른 분사시기보다 상대적으로 농후하여 LML이 높아진다.

4) 저/중와류의 포트에서 분사시기가 늦은 경우에는 짧은 연료 침투거리와 실린더 하부의 와류에 의한 연료의 정체에 의해 성층화가 이루어진다.

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) J. Harada, "Development of a New Generation Lean Burn Engine", SAE 924068, 1992.
- 4) A. A. Quader, "The Axially - Stratified - Charge Engine", SAE 820131, 1982.
- 5) 엄인용, 정경석, 정인석, "가솔린 엔진의 연료분사시기가 희박연소한계에 미치는 영향에 관한 연구", 한국자동차공학회 1996년도 춘계학술대회 논문집, pp.231-238, 1996.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 노영준, 엄인용, 정경석, 정인석, "레이저 Rayleigh 산란을 이용한 연료성층화에 관한 연구", 한국자동차공학회 1996년도 추계학술대회 논문집, pp.57-62, 1996.
- 9) 엄인용, 정경석, "축상 성층화 엔진 실린더 내에서의 연료 성층화 과정", 한국자동차공학회 1997년도 추계학술대회 논문집, 1997.
- 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.