

가솔린 엔진에서 연료분사시기와 포트특성에 따른 실린더 내 연료거동 : Part III - 고와류의 경우

In-Cylinder Fuel Behavior According to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part III-With High Swirl

엄인용*, 조용석**
Inyong Ohm, Yongseok Cho

ABSTRACT

This paper is the third 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.

In high swirl port, the most fuel remains at combustion chamber and upper cylinder region without being affected by injection timing. The macro-distributed state is not changed but the difference of the amount of fuel around the spark plug varies according to injection timing, which determines LML.

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

1. 서론

축상 성층 방식의 회박연소엔진은 포트의 와류 유동과 분사시기를 적절히 조화시켜 엔진 실린더 내에서 연료의 불균일 분포를 연소에 유리하게

즉 점화 플러그 주변의 공연비가 농후하게 공연비 분포를 유도하여 안정된 연소특성을 얻는다.¹⁻⁶⁾

이러한 축상 성층화 방식을 채용하여 회박연소엔진을 구현하거나 또는 엔진의 안정성을 높인 예는 많이 찾아볼 수 있으나 정확히 실린더 내에서 어떤 과정을 거쳐 분사시기와 와류가 엔진의 성층화를 유도하는지 그 명확한 기구는 거의 구

* 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

** 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

명되지 않았다. 이 이전의 논문에서 와류가 없을 때와 저/중와류에서 연료의 성층화 과정을 규명한 것에 이어 본 논문에서는 실제로 상용영역에서 많이 사용하는 고와류 포트에서의 성층화 기구를 조사하고자 한다.

고와류에서 성층화 기구는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 설명되고 있다. 즉 흡기 말기에 연료가 연소실 상부에 도달하면 실린더 내의 강한 와류에 의해 이 분포구조가 점화직전까지 유지되고, 결과적으로 점화 플러그 주변의 공연비가 농후하여 희박연소 한계를 확장시킨다는 것이다. 본 논문에서는 이 부분을 실험적으로 검증하고자 한다.

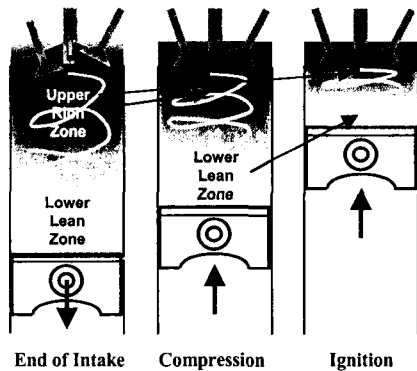


Fig. 1 Existing model of axial stratification

이전의 연구에서는 와류와 분사시기가 희박연소한계 (LML : Lean Misfire Limit)에 미치는 영향을 파악하는 연구를 수행하여 희박연소한계의 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 정

상유동 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 Type 3, 4 포트에서 한쪽 포트만 사용하여 고와류(RS=3.07, 3.47)를 구현하였다. 와류값의 정의는 리카도 와류값 (Ricardo Swirl Number: RS)을 사용하였다.¹¹⁾

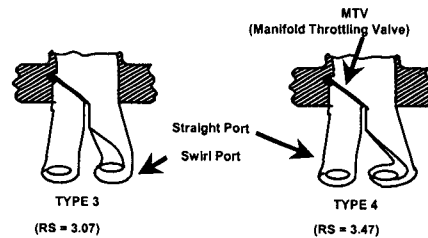


Fig. 2 Port shapes

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 제거하고 이 잡음이 제거된 화상으로부터 동일한 측정 크랭크 각에서 실린더의 위치별로 연료농도의 등고선을 구하여 이를 그때의 피스톤 위치와 함께 3차원으로 표현하는 과정은 본 논문의 Part I에 나타나 있다.

3. 실험 결과

3.1 포트의 유동특성

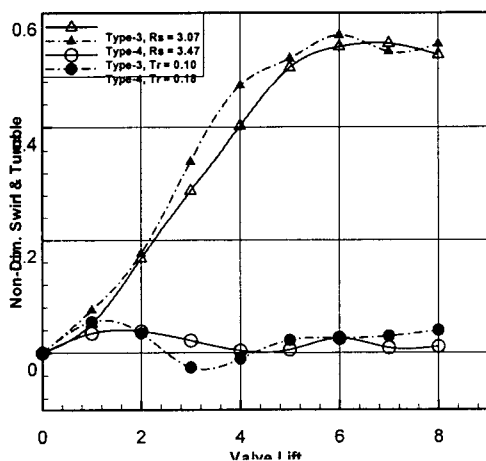


Fig. 3 Port characteristics

Fig. 3은 정상유동장치에서 LDV로 측정된 이

포트의 유동 특성이다.

그림에서와 같이 고와류의 포트에서는 와류값이 밸브 양정에 따라 거의 직선적으로 증가하다가 6mm 이후에는 포화되어 거의 같은 값을 나타내고 있다. 결국 와류값의 차이는 저 밸브양정에서 와류값에 따라 좌우됨을 알 수 있다. 텀블 성분은 3mm를 넘어서면서 와류에 비해 거의 무시할 수 있는 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 저양정만 제외하고 이 포트에서 텀블은 무시할 수 있다.

3.2 정상유동장치에서 연료거동

Fig. 4(a), 4(b), 4(c)는 고와류(RS=3.07) 포트에 대해 정상유동장치에서 레일레이 산란기법으로 각 밸브 양정에서 연료 농도를 측정된 결과 중 2, 4, 7 mm의 경우에 대한 것으로 시간은 분사 개시 후 경과시간이다.^{8,9)} 각 측정 단면은 헤드 하면으로부터 각각 3, 23, 43, 63, 83 mm에 위치한다.

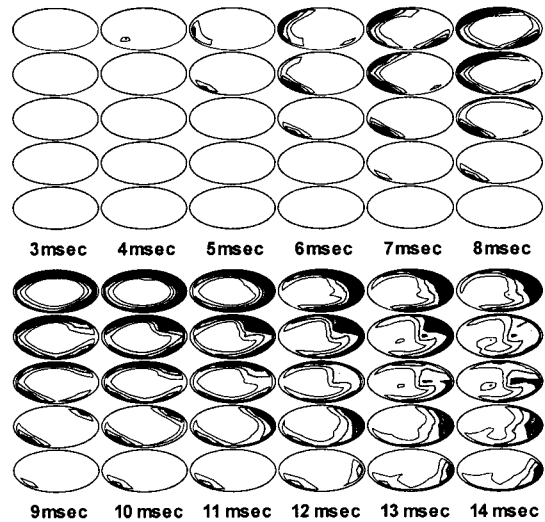


Fig. 4 (a) Fuel distribution at 2 mm lift

밸브 양정에 따라 다소의 차이는 있으나 분사된 연료는 3 -4 msec부터 실린더에서 관측되기 시작한다. 연료는 분사 초기에 흡기 밸브 측(실린더 평면의 아래 쪽)에서 먼저 나타나나 시간 경

과에 따라 흡기 반대쪽의 실린더에서 많이 관찰된다.

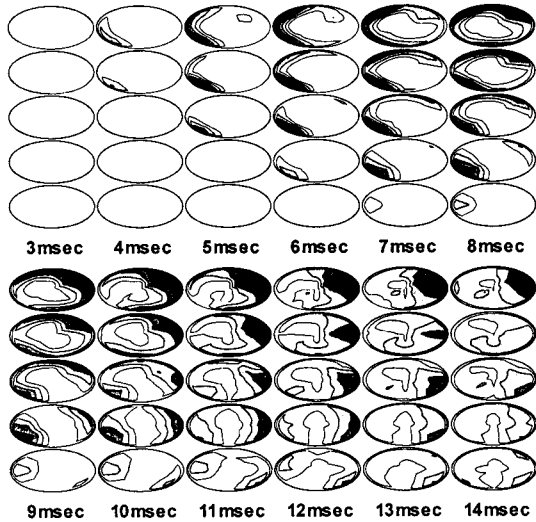


Fig. 4 (b) Fuel distribution at 4 mm lift

연료 분포의 형태는 밸브 양정에 무관하게 전형적인 와류 유동의 형태를 지니면서 실린더 내

에서 진행하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 실린더의 중앙 특히 흡기 측에는 연료가 분포되지 않은 채 진행함을 알 수 있다.

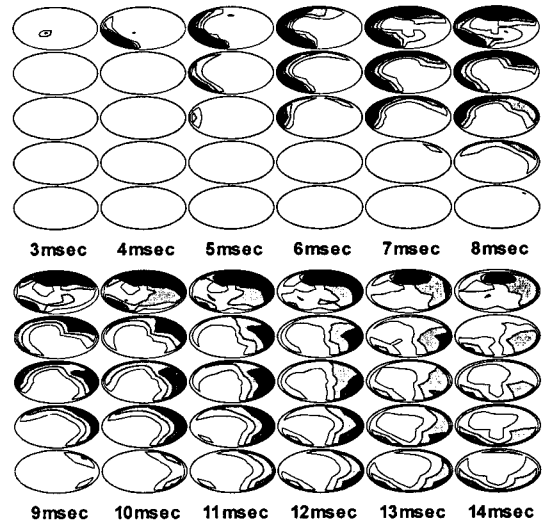


Fig. 4 (c) Fuel distribution at 7 mm lift

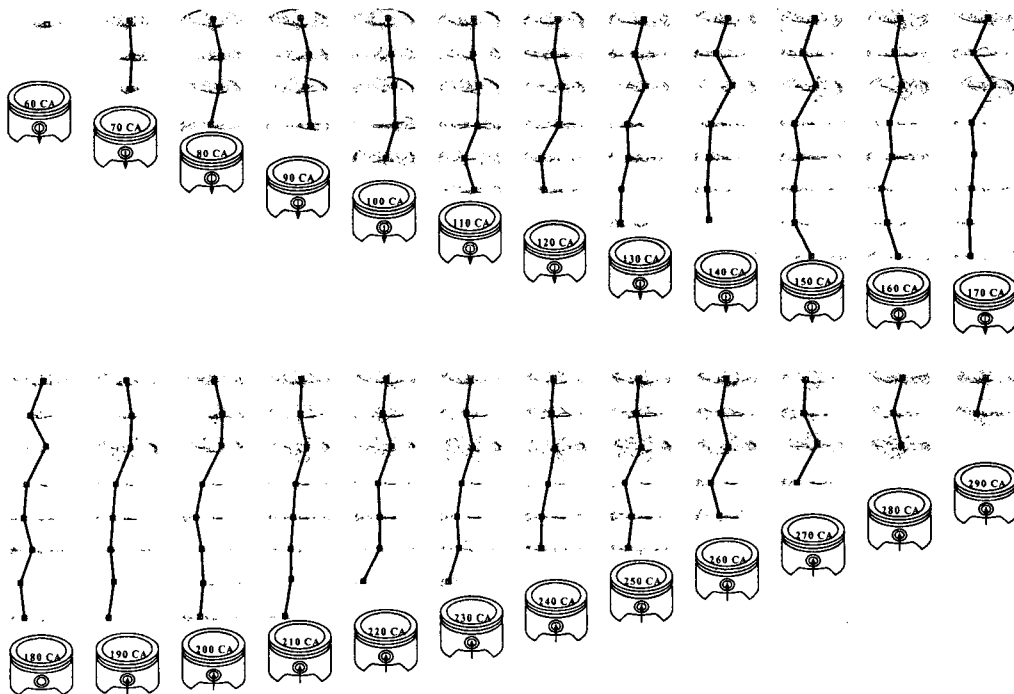


Fig. 5 (a) Fuel charging motion at ATDC 60 CA injection (RS=3.07)

특이한 것은 상당히 시간이 경과하여도 실린더의 최상단에 가장 많은 연료가 분포하고 있다. 이는 기본적으로 이러한 고와류 포트에서는 연료의 침투 거리가 상당히 짧다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

3.3 실물엔진에서 연료거동

Fig. 5(a)은 RS=3.07의 고와류 포트의 강제 구동 엔진에서 연료의 분사종점이 흡입 ATDC 60 CA일 때 실린더 내 연료거동을 가시화하여 화상을 얻고 이를 Fig. 3와 같은 과정을 통해 얻어진 결과와 이를 연료량에 비례하는 빛의 강도로 가중하여 구한 연료 거동의 중심점을 함께 나타낸 것이다.

도입초기에 연료는 실린더의 중심에서 약간 좌측으로 치우쳐 발견되나 곧 흡기 반대측의 벽에 도달한다. 흡입이 진행됨에 따라 연료는 실린더의 중심부로 이동하는데 이는 피스톤 하강에 의해 유동의 축방향 속도가 증가하기 때문인 것으

로 판단된다. 분사시기가 비교적 빠름에도 불구하고 연료의 대부분은 실린더의 상층부에 위치하고 일부 연료가 실린더의 최하단까지 도달하기는 하나 그 양은 많지 않음을 볼 수 있다. 연료는 25mm 평면 위에 주로 분포하며 이 상태가 압축 말기까지 지속된다. 이는 정상유동 장치에서의 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

실린더 상부의 연료분포는 거의 일정한 형태를 보여주나 25 mm이하에서는 연료가 띠 형태로 존재하고 있고 커다란 텀블 유동의 경향을 보여 준다.

110 CA 분사의 경우(Fig. 5(b)) 연료의 침투 길이는 60 CA에 비해 훨씬 짧아지고 있다. 분포 형태는 60 CA와 비슷하고 역시 실린더의 하부에서 텀블 유동을 관찰할 수 있다.

150 CA(Fig. 5(c))에 분사한 경우 연료의 침투 길이는 더욱 짧아져서 주로 35mm 이상의 평면에서만 연료가 관찰된다. 이로 인해 분사된 연료는 주로 연소실과 실린더 상층부에만 집중적으

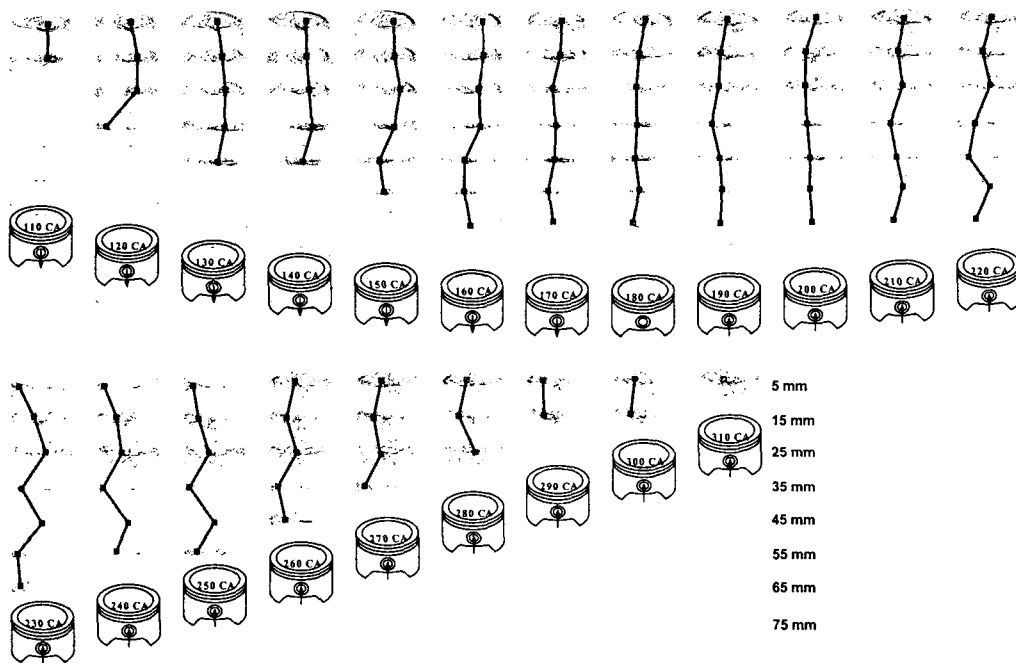


Fig. 5 (b) Fuel charging motion at ATDC 110 CA injection (RS=3.07)

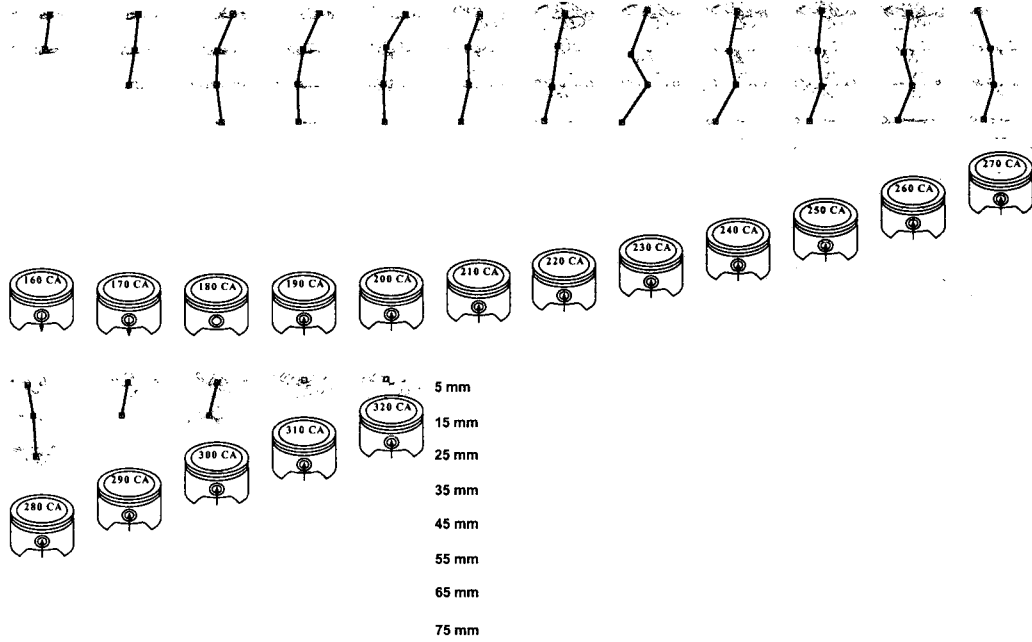


Fig. 5 (c) Fuel charging motion at ATDC 150 CA injection (RS=3.07)

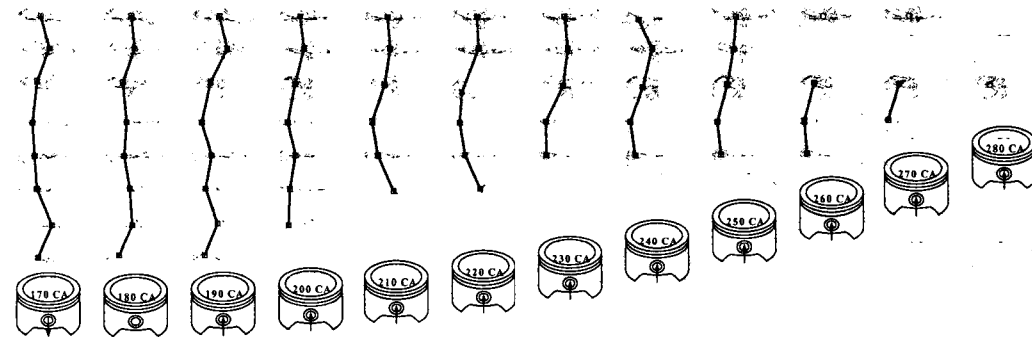


Fig. 6 (a) Fuel charging motion at ATDC 90 CA injection (RS=3.47)

로 분포한다는 사실을 유추할 수 있다. 따라서 이 시기에 연료를 분사하면 연료는 다른 분사시기보다 연소실 및 실린더 상부에 더 많이 분포하여 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 희박연소한계(LML : Lean Misfire Limit : 1% 이상의 실화 또는 3% 이상의 BMEP COV로 정의)가 가장 높게 측정된 것으로 판단된다.

Fig. 6(a), (b), (c)는 RS=3.47 포트에서의 결

과로 압축과정만 도시된 것이다. 이 경우도 RS=3.07의 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

대체로 분사시기가 늦어질수록 고와류 포트에서는 큰 와류보다는 작은 에디 등이 많이 발견되고 있는데 이것은 텀블도 어느 정도 존재하고 와류가 작고 소멸될 때 연료가 도입되었기 때문으로 판단된다. 따라서 이 때 들어온 연료들은 하방

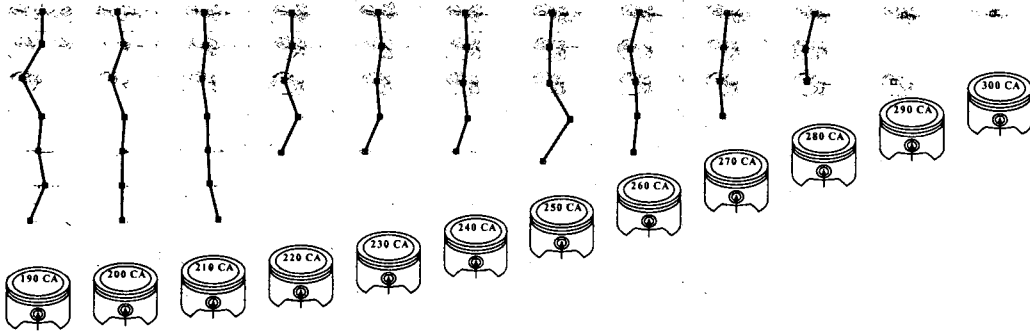


Fig. 6 (b) Fuel charging motion at ATDC 130 CA injection (RS=3.47)

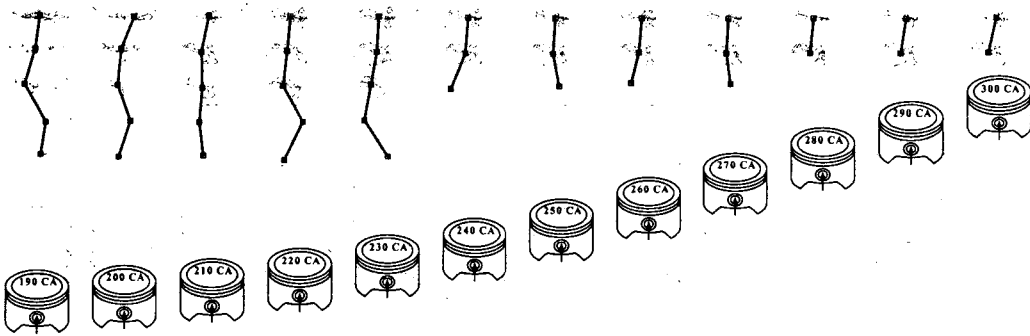


Fig. 6(c) Fuel charging motion at ATDC 150 CA injection (RS=3.47)

으로 진행하지 못하고 상층부에 정체되어 강한 성층화를 유발시켰다고 판단된다.

실린더의 중간에서는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 강한 와류가 존재함을 PIV 실험을 통해 확인되었다. 또한 고와류 포트임에도 불구하고 연료가 텀블 유동의 형태를 보여주고 있는데 이러한 텀블 유동 역시 고와류 포트에서 관찰되었다.(Fig. 9) 그러나 이 텀블 유동은 실린더의 하방에서 형성되어 성층화에는 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

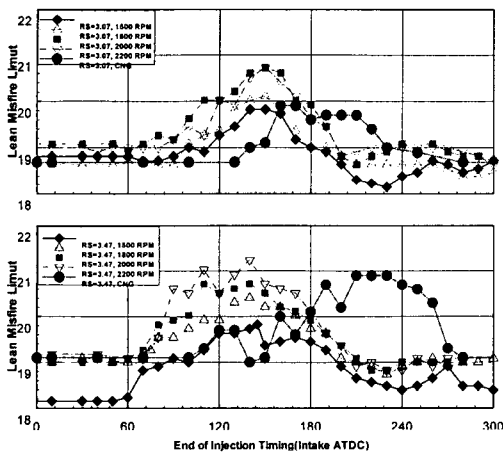


Fig. 7 LML according to swirl and injection timing

압축과정 중에는 연료가 있는 실린더의 상부에서 강한 와류나 텀블이 발견되지 않았다. 그러나

결과적으로 고와류 포트에서 대부분의 연료는 연소실과 실린더의 상층부에 머물고 이러한 분포 형태는 분사시기에 영향을 받지 않는다. 따라서 고와류 포트에서는 다른 포트에 비해 대체로 LML이 높게 관찰된다. 그러나 실제 엔진 실험에서 LML은 분사시기에 따라 달라지는데 이는 거시적 분포 형태는 달라지지 않으나 연소실 상부의 연료의 양이 분사시기에 따라 변하고 이에 의해 LML의 고저가 결정된다고 판단된다.

이상을 종합해 볼 때 연료의 분포 형태는 분사

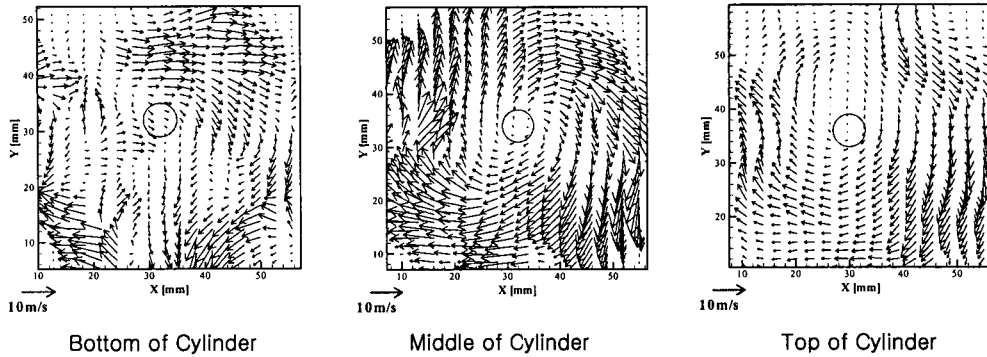


Fig.8 Swirl motion during compression in high swirl port (RS=3.47)

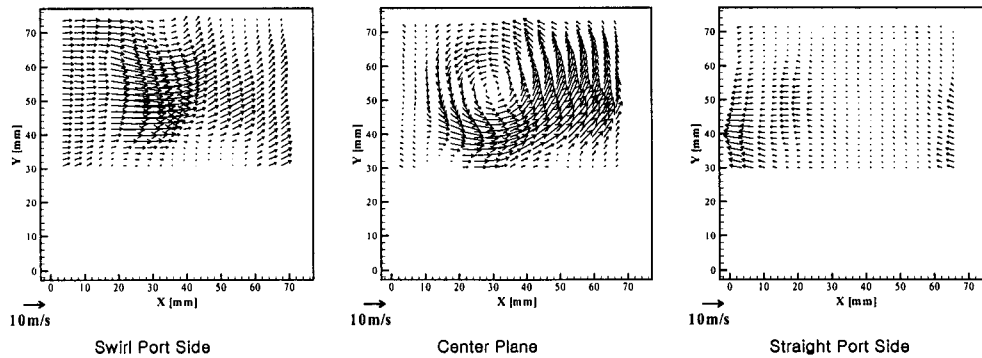


Fig. 9 Tumble motion during compression in high swirl port at ATDC 270 CA (RS=3.47)

시기에 따라 Fig. 10에 나타낸 상태가 된다고 판단된다. 또한 기존 축상 성층화 모델은 와류에 의해 성층화 상태가 유지된다는 측면에서 대체로 타당성을 갖는다고 볼 수 있다. 다만 고와류 포트에서는 분사시기에 무관하게 연료의 침투거리가 대체로 짧고 이것에 의해 연소실 상층부의 연료량이 변하여 LML이 변하는 것으로 판단된다.

Final Fuel Distribution State of RS=3.07 & 3.47

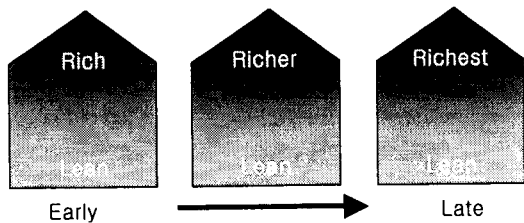


Fig. 10 Final fuel distribution state of RS=3.07 & 3.47

4. 결론

고와류 포트에서 연료거동을 가시화하는 실험과 이를 다른 와류값을 같은 포트와의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정상유동 장치는 실물엔진의 흡입과정을 비교적 잘 모사한다. 특히 와류가 있는 경우에는 압축행정의 일부까지 모사할 수 있다.
- 2) 와류값이 큰 경우 현존하는 축상 성층화 모델은 타당성이 있다.
- 3) 고와류 포트에서 축상 성층화는 짧은 연료 침투거리와 실린더 중앙의 강한 와류에 의해 유지된다. 연료의 분포 형태는 분사시기에 무관하고 연소실 상층부의 연료량은 분사시기에 따라 변화한다.

4) 고와류 포트에서도 텀블이 존재하며 연료가 거시적으로 이 유동을 추종한다.

5) 와류값에 따라 축상 성층화는 그 기구를 달리한다. 와류가 없는 경우 축상 성층화는 텀블에 의해 지배되고 고와류에서는 짧은 연료침투거리와 실린더 중앙의 강한 와류에 의해 성층화가 발생한다.

6) 저/중와류의 포트에서는 두가지 성층화 기구가 혼재하는데 분사시기가 이른 경우 텀블이 성층화에 중요한 역할을 하고, 늦은 분사시기의 경우 짧은 연료 침투거리와 와류에 의해 지배된다. 즉 분사시기에 따라 와류가 없을 때와 같은 텀블 지배 모델과, 고와류에서의 연료침투거리와 와류에 의한 지배 모델을 동시에 갖는다.

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 추계학술대회 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.