

<논 문> SAE NO. 97370096

가솔린 엔진의 연료분사시기가 희박가연한계에 미치는 영향에 관한 연구

Effects of Injection Timing on the Lean Misfire Limit in a SI Engine

엄인용*, 정경석**, 정인석***
I. Y. Ohm, K. S. Jeong, I. S. Jeung

ABSTRACT

Effects of fuel injection timing on the lean misfire limit of a sequential MPI SI engine has been investigated. To investigate the interaction of injection timing and intake flow characteristics, so called axial stratification phenomena, 4 kinds of different intake swirl port of the same combustion chamber geometry have been tested in a single cylinder engine test bench. And 2 kinds of fuel, gasoline and compressed natural gas(CNG), were used to see the effect of liquid fuel vaporization. Result shows that combination of port swirl and injection timing governs the lean misfire limit and lean misfire limit envelopes remain almost the same for a given swirl ratio regardless of engine speed. It is also found that two phase flow has some effects on lean misfire limit.

주요기술용어 : Axial Stratification(축상 성층화), Injection Timing(분사 시기), Lean Misfire Limit(희박가연한계), Multi Point Sequential Injection(다점순차분사), Swirl Ratio(와류비)

1. 서 론

저연비 및 고효율의 압축연소기관이 지니는 장점을 가솔린 기관에서 구현하려는 노력의 일환으로 희박연소(Lean Burn) 방식의 개발이 이루어지고 있는데, 이는 연비개선과 미연탄화수소 그리고 이산화탄소 배출문제에 대한 매우 효과적인 대응방법이 될 수 있을 것이다.¹⁾ 그러나 희박연

소 연소방식을 채택하는 경우 초기 화염핵 형성의 불안정성과 화염전파속도의 감소로 인해서 사이클 변동이 증가하며, 경우에 따라서는 연비가 나빠지기도 한다.²⁾ 이러한 희박연소방식의 개발에서는 동일한 연료량에 대해 이론공연비보다 공기가 과도하게 공급된 공기과잉상태(Excess Air)에서 안정된 점화와 연소를 구현하는 것이 가장 중요하게 된다.

희박 공연비 상태에서 안정된 연소성능을 얻기 위해 난류강도의 증진을 통하여 화염전파속도를 증가시킴으로써 연소시간을 단축시켜 희박연소를 실현하고자 하는 노력이 진행되어 왔으나,³⁾ 기본

*현대자동차(주) 중앙연구소

**정회원, 한국기술교육대학교

***정회원, 서울대학교

적으로 난류의 강도는 엔진의 회전수에 주로 지배를 받기 때문에 포트의 형상 변경이나 텀블유 동동을 이용해 난류유동을 강화시키려는 시도는 거의 성공을 거두지 못하였다. 또한 어느 정도의 난류 강도를 증가시키는 성과를 얻었다라도 증가된 난류강도는 오히려 점화직후 초기 화염핵 성장에 변동을 발생시키고 이로 인해 심한 사이클 변동을 초래하여 엔진의 안정성을 저하시키는 결과를 보여주기도 하였으며, 난류의 강도를 증가시킨 급속연소방식으로 실험가능한 희박연소한계는 가장 효과적인 성층화 방식의 공연비 26~28 보다 훨씬 낮은 20~22 였다.^{4)~10)}

연료를 성층화하여 점화플러그 근처의 공연비가 가장 농후해지도록 할 때 희박연소한계가 높고 안정된 운전이 가능하다는 것이 실험적으로 밝혀졌으며, 이는 안정된 점화와 강력한 초기 화염핵 형성이 희박연소에 가장 중요한 인자인 것을 보여준다. 따라서 분사시기를 달리하면 최종적인 연소실내 공연비 분포가 달라지므로 유동특성의 조사뿐만 아니라 그 유동에 가장 잘 부합되는 연료분사시기를 선택하는 것도 매우 중요한 일이다. 특히 흡입유동중 와류 유동은 정상유동장치를 이용하여 측정된 와류비를 실엔진에서의 변수로 이용할 수 있을 만큼 분사시기와의 상호관련도 매우 양호하게 나타난다. 성층화의 메카니즘이 현재까지 명확하게 규명되지 않은 상태이지만 압축말기까지 강하게 남아 있는 와류로 인해 흡입공기와 연료의 혼합이 잘 이루어지지 않는 것으로 받아들여지고 있으나, 혼합기의 최종 분포상태에 따른 화염의 전파특성에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다. 따라서 포트의 유동과 분사시기 변화에 따른 혼합기 분포상태와 이로 인한 화염전파특성의 상관관계가 파악된다면 엔진 개발시 배기와 연비 특성을 좌우하는 부분부하 성능특성의 예측이 가능하게 되어 엔진의 최적화를 도모하기 위한 포트 설계의 근거자료를 제공할 수 있으므로 이에 대한 연구의 필요성은 매우 높다.

본 연구에서는 분사시기와 와류유동에 의해 결정되는 최종적인 성층화 상태를 측정하고 연료의 거시적 거동을 추적하는 실험에 앞서 실엔진을

운전하며 성층화 효과를 확인하고, 분사시기와 와류유동의 상호작용을 이해하고자 한다.

2. 실험엔진과 장치

본 실험에서는 와류비가 서로 다른 4종류의 헤드를 이용하였는데, 각각의 엔진은 엔진블럭을 공유하고 연소실 형상은 동일하다. 와류비는 두 개의 흡입포트중 나선형으로 된 후측포트의 형상이 다르거나, 두 흡입포트중 하나만을 사용하면 달라지게 진다. 와류비와 유량계수는 정상유동장치에서 LDA를 이용한 유동속도 측정으로 구하였으며 Table 1에는 각 포트의 유량계수 및 와류비가 나타나있으며, Fig.1은 각 포트의 개략적인 모습들이다.

Table 1 각 포트의 유량계수와 와류비

	Type-I	Type-II	Type-III	Type-IV
와류비	1.99(0)	2.79	3.07	3.47
유량계수	0.39	0.34	0.35	0.31

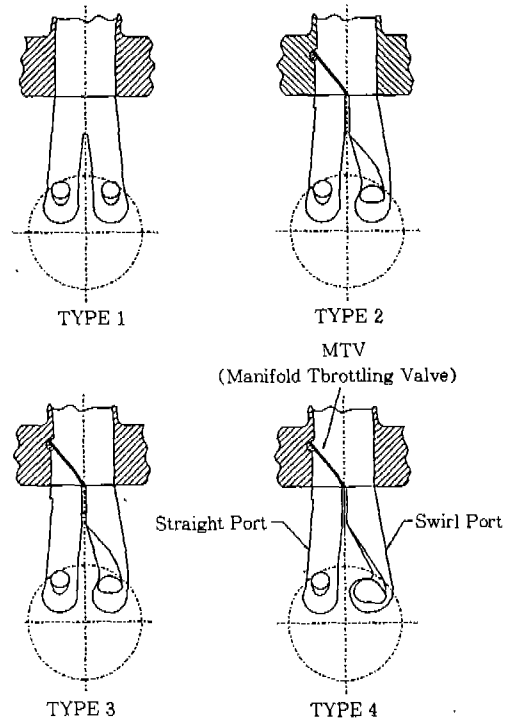


Fig.1 Schematics of Intake Ports

실험은 각 실린더 헤드를 단기통용 엔진 블럭 (Engine Block)에 조립하여 단기통 엔진을 구성하고 이 엔진을 엔진 동력계(Dynamometer)에 연결하여 속도와 부하를 제어하며 측정을 수행한다.

본 실험에서 동력계는 엔진의 속도를 일정하게 유지하고, 부하는 스로틀(Throttle)을 이용한 흡입 공기량에 의하여 조절하였다. Table 2에는 실험에 사용된 엔진의 주요 제원이 나타나 있다. 엔진의 속도와 부하조절을 위해 EC 동력계 (극 동기전사, 130kW)를 이용하였고, 연료분사는 분사제어장치(Intelligent Control사, IC 5160)에 의하여 점화시기는 점화시기제어장치(Intelligent Control사, IC 6200)를 이용하여 제어하였다. 공연비는 산소센서(NGK사, 공연비 9-30)에 의하여 측정되었다.

엔진실험시 먼저 엔진을 충분한 시간동안 운전하여 냉각수와 윤활유의 온도가 일정온도(65℃) 이상에 도달하게 한다. 엔진이 충분히 난기되면 엔진을 실험하고자 하는 속도로 운전하며, 부하를 이론공연비로 연료를 공급할 때 최적점화시기(MBT: Minimum Spark Advance for Best Torque)에서 제동평균유효압력(BMEP: Brake Specipic Mean Effective Pressure)이 250 kPa가 되도록 스로틀의 개도를 조정한다. 엔진의 희박연소특성 또는 희박연소한계(LML: Lean Misfire Limit)는 흡기밸브가 열린 시기에 연료를 분사하는 경우에만 변화하기 때문에 밸브 개방시기를 중심으로 분사시기를 변경하며 실험한다.

Table 2 실험엔진의 제원

Number of Cylinder		1
Number of Valve	In.	2
	Ex.	2
Valve Timing		5/35 43/5
Combustion Chamber		Pent Roof
Bore		75.5mm
Stroke		83.5mm
Maximun Valve Lift		8 mm

이 때 스로틀은 고정시켜 엔진에 흡입되는 공기의 체적유량을 일정하게 유지한 채 연료의 양을 서서히 줄여나간다. 연료량을 줄여 LML 근방에 도달하면 연소불안에 의한 엔진의 사이클 변동과 부분연소의 영향으로 엔진의 속도에 변화가 생기기 시작하는데 속도의 변화가 $\pm 10RPM$ 이상이 될 때의 공연비를 LML로 정의하였다. $\pm 10RPM$ 은 실험이 이루어진 회전수의 1% 이하의 변동에 해당하는데, LML에 도달하지 않았을 때는 점화의 실패나 부분연소 등에 기인한 작은 교란에 의하여 $\pm 10RPM$ 이상의 회전수 변화가 발생하여도 곧 설정 속도를 회복하고 비교적 안정된 운전이 가능하다. 그러나 LML에 이르면 $\pm 10RPM$ 이상의 속도변화는 설정속도로의 회복이 불가능할 만큼 큰 값이 된다. 이러한 방법에 의한 측정결과는 다른 측정법과 비교하여도 절대값에 약간의 차이가 있을 뿐 경향은 정확히 일치하는 것이 확인되었다.

LML은 분사시기를 고정하고 연료량을 줄여가며 회전수의 변화를 측정하여 위의 방법으로 측정한 후, 인접 분사시기에 대해 동일한 방법으로 진행하였다. 분사시기의 변화범위는 흡입상사점(Intake Top Dead Center)를 기준으로 BTDC (Before Top Dead Center) 120°부터 ATDC (After Top Dead Center) 360°까지로 약 10°간격으로 하였다. 분사시기의 기준은 분사종료시점으로 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

Fig.2는 두개의 흡입포트를 모두 개방하여 와류비가 0인 경우이며, Fig.3은 후측 포트만을 사용하여 와류비가 1.99인 경우의 분사시기에 따른 희박연소한계의 변화를 나타낸 것이다.

두 경우 모두 희박연소한계의 변화경향은 와류비가 동일하면 엔진속도에 관계없이 거의 일정하며, 최고점과 최소점이 나타나는 분사시기도 거의 동일함을 확인할 수 있는데, 이것은 성층화가 엔진의 흡입유동의 절대속도보다 축방향 속도와 와류 속도와의 비인 와류비에 의해 지배됨을 보여준다. 이는 또 정상유동장치를 이용하여 측정

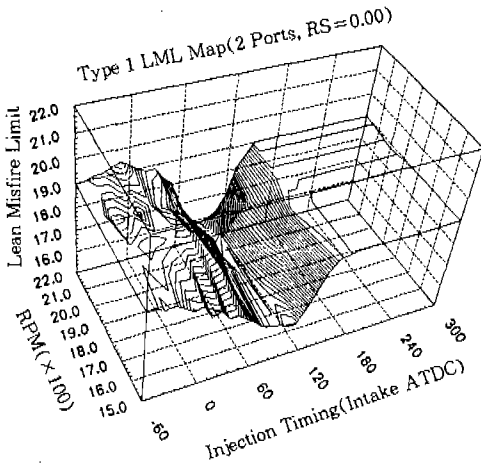


Fig.2 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(RS=0)

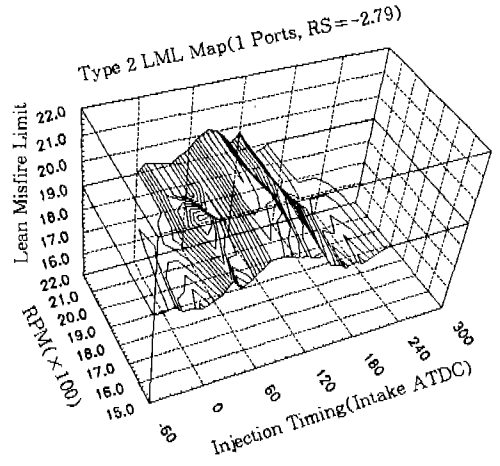


Fig.4 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(RS=2.79)

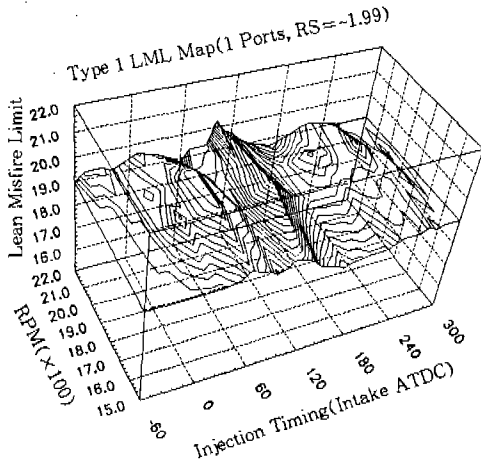


Fig.3 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(RS=1.99)

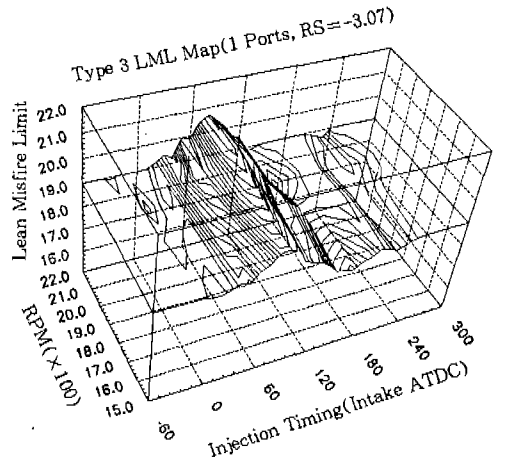


Fig.5 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(RS=3.07)

한 와류비가 비정상유동이 지배하는 실엔진에서의 비교를 위한 변수로 이용될 수 있음을 의미하기도 한다.

흡입행정중에 분사가 이루어지면 와류가 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 차이가 있는 것을 볼 수 있는데, 와류가 존재하지 않는 경우에는 통상적인 엔진에서 얻을 수 있는 희박연소 한계 18정도 보다 낮은 15~16까지 낮아지고, 와류가 존재하는 경우에는 흡입행정중에 분사하

는 것이 타행정중에 분사하는 것보다 희박연소에 유리한 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.3에서 보듯 와류비 1.99의 약한 와류를 이용할 경우 희박연소 한계가 크게 개선되지 않음을 알 수 있다.

지난 연구¹⁰⁾에서 조사된 바와 같이 분사시기에 따른 희박연소 한계의 변화 경향이 점화직전의 점화플러그 주변의 공연비의 변화와 일치하므로, 흡기행정중의 분사에 의해 와류가 없는 경우에는 플러그 주변의 공연비가 희박하게, 또 와류가 있

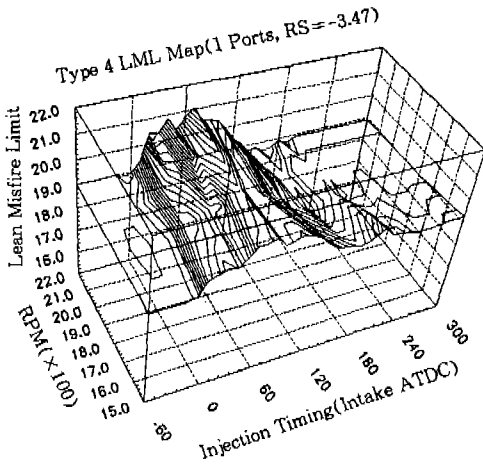


Fig.6 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(RS=3.47)

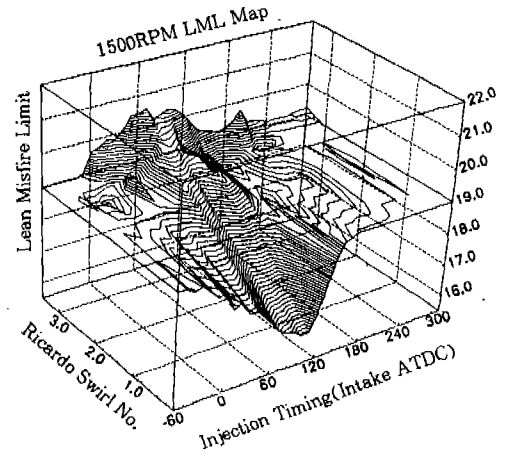


Fig.7 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation (1500rpm)

는 경우에는 농후하게 분포되는 성층화를 유발하는 것으로 볼 수 있다.

Fig.4, 5, 6은 각각 Type II, III, IV 포트의 실험 결과를 나타낸 것이다.

Type II 포트의 와류비인 2.8보다 커지면 흡입행정중의 분사에 의하여 희박연소한계가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 Type II 포트의 경우 대체로 흡입 ATDC 70~80CA(Crank Angle)에서 LML이 최고로 된다. 그러나, 희박연소한계가 국부적으로 최소가 되는 시기는 엔진 속도에 따라 달라서 ATDC 30~50CA 그리고 140~150CA 근방에서 나타난다. Type III, IV의 경우에도 이러한 국부최소점이 나타나는 크랭크 각은 거의 일치하며, 단지 그 감소 경향은 줄어든다. Type I 을 제외하고 최고의 희박연소한계가 관찰되는 분사시기는 70~80CA 정도의 비슷한 시기에 나타나며, 단지 그 변화경향은 와류비에 따라 조금씩 변화한다. Type III의 와류비(3.07)를 기준으로 볼 때 Type IV(와류비 3.47)는 최적분사시기 부근에서의 변화가 상당히 심하게 나타나며, Type I(와류비 1.99), II(와류비 2.79)는 최적 분사시기에서 멀리 떨어진 곳에서 심한 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 단지 와류비가 달라서 성층화의 강도가 달라진 것으로만 볼 수는 없다. 성층화는 단순히 와류와

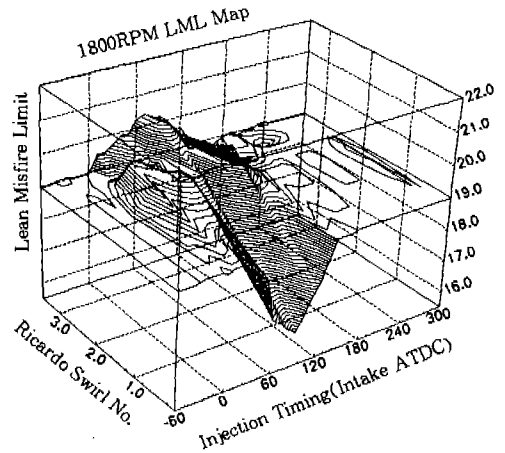


Fig.8 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(1800rpm)

분사시기에 의해 결정되는 것이 아니고, 더욱 복잡한 메카니즘인 것을 의미한다. 그 중의 하나로 후술하겠지만 액체연료를 분사하는 경우 포트와 엔진 실린더 내에서 액체와 기체의 상호작용 그리고 액적의 거동 등 2상(2Phase) 유동의 효과도 클 것으로 예상된다.

Fig.7부터 Fig.10은 엔진의 속도에 따른 희박가연한계의 변화를 나타낸 것이다. 엔진 속도변화에 의한 영향을 와류비에 의한 영향과 비교해보면, 엔진속도로 나타내지는 흡입유동의 절대속

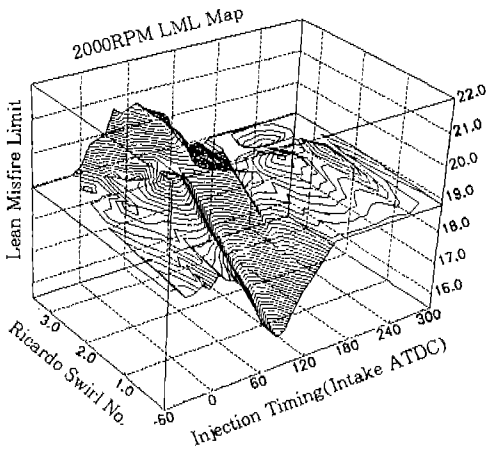


Fig.9 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(2000rpm)

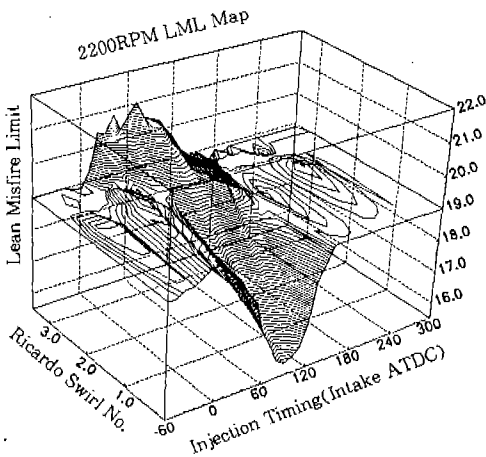


Fig.10 Injection Timing Effects on Lean Mixture Limit Variation(2200rpm)

도는 와류비 만큼 지배적인 영향을 미치지 못할 수 있다. 와류비가 동일하면 변화의 양상 및 최고·최소가 되는 분사시기가 비교적 엔진 속도에 무관하게 나타나고 있다. 이것은 위에서 언급된 바와 같이 흡입유동의 속도보다는 축방향과 속도와 와류 속도의 비 또는 운동량의 비가 성층화에 더 지배적 역할을 한다는 것을 보여주는 증거인 것으로 판단되며, 와류비와 와류의 강도 그리고 와류비와 분사시기의 조합에 의한 거시적인 연소실내 공연비 분포 등의 거시적 유동이 엔진

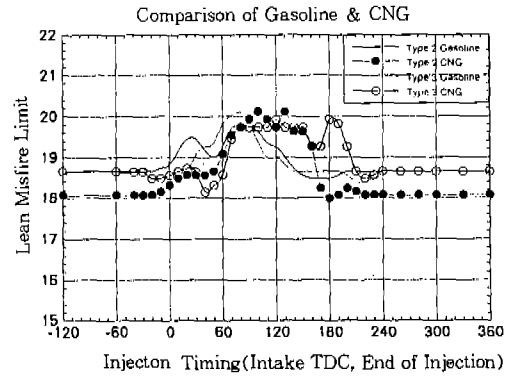


Fig.11 Lean Mixture Limit Variation for Liquid and Gaseous Fuel

내부의 연소현상에 지배적인 역할을 하는 것으로 볼 수 있다.

축상성층화에 액체연료 사용으로 인한 2상유동이나 액적의 거동 등의 영향을 조사하기 위하여 와류비 2.79 및 3.07인 포트에 CNG인젝터를 장착하여 가스연료를 공급하며 실험하여 그 결과를 Fig.11에 보였다. 이때 CNG인젝터는 가솔린인젝터와 동일한 분사지속시간 동안 액체연료와 동일한 연료/공기 당량비가 되도록 연료를 공급할 수 있게 설계된 것이다. 실험결과는 연료의 상에 구분없이 흡입행정중의 분사에 의하여 희박연소 한계가 확장되는 것을 보여준다. 다만 CNG연료의 경우 희박연소한계가 높은 분사시기가 흡입행정의 말기까지 계속되어 가솔린연료분사의 경우에 비하여 넓게 나타나고 있다. 이는 연료의 성층화에 흡입유동 뿐만 아니라 액적의 거동 또는 2상유동이 상당한 영향을 미친다는 것을 보여준다. 더 상세한 성층화기구는 추후 진행될 실험을 통하여 규명될 것이지만, 현재까지의 결과로부터 예상할 수 있는 것은 액체연료 분사직후 관성이 큰 액적이 공기보다 더 빠르게 이동하며 연료가 좁은 범위에 밀집되어 있거나, 일부 입경이 큰 연료입자가 관성에 의하여 흡입유동을 추종하지 않고 다른 경로로 이동하거나 또는 이러한 액적이 포트나 실린더내에서 증발하여 다시 공기유동을 추종하는 등의 가능성이다. 그 외에도 포트벽면에 부착된 후 포트를 거쳐 밸브로 흐르거나 흐

르는 도중에 증발하여 다시 공기유동을 추종하는 경우도 고려될 수 있다.

4. 결 론

서로 다른 와류비의 4종류의 포트를 대상으로 순차 다점분사방식 SI엔진을 모사한 단기통 엔진에서 연료분사시기를 변화하였을 때의 회박연소한계를 조사하는 실험을 통해 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 촉상 성층화를 이용하여 회박가연한계를 확장하기 위해서는 적절한 강도의 와류뿐만 아니라 연료분사시기의 선택이 필요하다.
- 2) 와류가 없는 경우에도 연료분사시기는 엔진의 회박연소한계 및 운전안정성에 큰 영향을 미친다.
- 3) 연료분사시기를 흡입행정중으로 하여 엔진의 회박연소한계를 확장시키는 것이 가능하다.
- 4) 회박연소한계는 엔진회전수로 나타내지는 흡입유동의 절대속도보다 와류비에 의해 지배된다.
- 5) 가스연료를 이용하는 경우 흡입행정중에 연료를 분사하면 회박가연한계의 변화 경향은 액체연료와 유사하게 나타난다. 단, 흡입행정의 말기부근에 분사가 이루어지면 약간의 차이를 나타내어 연료의 성층화에는 흡기유동 뿐만 아니라 2상유체 등의 영향이 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. G. T. Kalghatgi, "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines", SAE Paper 870163, 1987.
2. F. Saito, "Mazda Advanced Lean Burn Engine with New Three-Way Catalyst", SAE Paper 945006, 1994.
3. C. Arcoumanis and J. H. Whitelaw, "Fluid

Mechanics of Internal Combustion Engines : A Review", Proc. I. Mech. E., Vol 210, No C1, 1987.

3. C. M. Pieper And C. J. Rutland, "Intake And Cylinder Flow Modelling with a Dual Valve Port", SAE Paper 930069, 1993.
4. F. Ntone And R. Zehr, "Multidimensional Fluid Flow Calculations in Diesel Engine Exhaust Valve And Ports", SAE Paper 930073, 1993.
5. L. S. Kastner, T. J. Williams And J. B. White, "Poppet Inlet Valve Characteristics and Their Influence on the Induction Process", Proc. I. Mech. E., Vol 178, No 955, 1963.
6. I. Fukutani and E. Watnabe, "Air Flow Through Poppet Inlet Valves-Analysis of Static and Dynamic Flow Coefficients", SAE Paper 820154, 1982.
7. A. F. Bicen, C. Valfidis and J. H. Whitelaw, "Steady and Unsteady Airflow through the Intake Valve of a Reciprocating Engine", J. Of Fluids Eng., Vol 107, 1985.
8. 배충식, 정경석, "실린더헤드 형상에 따른 정상유동특성", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, 1995.
9. C. Arcoumanis and J. H. Whitelaw, "Are Steady Flow Inlet Boundary Conditions Valid for Engine Cylinder Calculations?", Proc. Congress On 'Modelling Of Internal Combustion Engines', Valencia, Spain, 1987.
10. In-Young Ohm, Hee-Seok Ahn, Woo-Jik Lee, Woo-Tae Kim, Sim-Soo Park, and Dae-Un Lee, "Development of HMC Axially Stratified Lean Combustion Engine", SAE Paper 930879, 1993 SAE Transaction.