

〈논 문〉 SAE NO. 98370006

MPI 엔진용 공기 보조 인젝터의 분무 미립화 및 연소 특성에 관한 연구

A Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Air-assisted Injector in MPI Engine

서 영 호*, 이 창 식**
Y. H. Seo, C. S. Lee

ABSTRACT

The spray characteristics of air-assisted fuel injection and its effects on the engine combustion was investigated in this study. The atomization characteristics of a Bosch fuel injector inserted into the air-assist adapter were measured using particle motion analysis system. Droplet size decreased with air supplied and fine spray with below $60\mu\text{m}$ of SMD was acquired under the conditions of air-assist pressure over 0.5bar. The lean combustion performance of a 1.8L DOHC engine equipped with air-assist adapters was tested on the dynamometer. When the assistant air pressure is 1.0bar, lean limit recorded the highest value, and CO, HC emissions were decreased at the pressure over 1.0bar.

주요기술용어 : Air-Assisted Fuel Injection(공기보조연료분사), Sauter Mean Diameter(SMD : Sauter평균입경), Lean Combustion(희박연소), Coefficient of Variance(COV : 변동계수)

1. 서 론

자동차산업의 급속적인 발달과 더불어 세계 각국에서는 환경 및 대기 오염 문제가 심각하게 대두되고 있다. 그로부터 유해 배출 가스에 대한 규제가 한층 강화되고 있으며, 석유 자원의 고갈에 대한 우려도 커져서 연비 향상을 위한 노력이

더욱 필요한 실정이다.

이러한 요구들에 대응하기 위하여 관련 산업체 및 연구기관에서는 유해 가스 배출 및 연료 소모의 주 원인이 되고 있는 내연 기관에 대하여 완전 연소와 공연비 제어를 위한 장치 등과 아울러 전자 제어 엔진 개발, 희박 연소, 촉매 장치 개발, 대체 연료 연소, 아이들 및 과도 운전의 최적 제어를 위한 연구 등이 활발히 진행되어 왔다.^{1)~3)}

그중 대표적인 예의 하나가 희박 연소로서, 유

* 정회원, 자동차부품연구원

** 정회원, 한양대학교 기계공학과

해배기가스의 주요 물질인 CO, HC, NO_x를 상당히 줄일 수 있고 연료소비를 획기적으로 저감시킬 수 있어서 많은 관심을 끌고 있다.⁴⁾ 한편 연료와 공기의 혼합기 형성에 관한 연구도 최근의 광계측 기술의 발달에 힘입어 활발하게 이루어지고 있으며, 이로부터 연소실 형상의 개선, 흡기포트의 최적설계 등에 적극 활용되고 있다.⁵⁾

본 연구에서는 4행정 사이클 가솔린 엔진의 연료 분무 특성을 분석하고, 연소 성능에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 인젝터의 연료분사에 대하여 2-유체 분무에 의한 미립화를 촉진시킴으로써 균일 혼합기를 형성할 수 있도록 하여 엔진의 연소 성능을 향상시키고자 하였다.

우선 기존의 가솔린 엔진에 적용 가능한 2가지 형태의 공기보조 어댑터를 설계·제작하고, 이를 MPI엔진용 인젝터에 장착한 후 입자운동 해석장치(PMAS)를 사용하여 화상 처리함으로써 분무 거동과 평균 입경 등을 관찰하였다.

또한 이러한 연료무화 촉진장치를 실제 엔진에 장착하고 부분부하 상태에서의 배기가스, 사이클 변동 등을 계측함으로써 공연비 변화에 따른 연소 성능을 해석하였다.

2. 연료의 분무 특성 해석

2.1 분무의 미립화 해석

실제 분무유동 현상에서 평균 입경을 사용하는 것이 그 유동을 간단히 해석하는데 편리한 경우가 많다. 특히 기관의 연료 분사 등과 같이 질량 전달이나 화학반응이 수반되는 경우에는 액적의 표면적에 대한 체적의 비로서 Sauter 평균 입경(Sauter Mean Diameter; SMD)을 이용하며, 다음 식과 같이 정의된다.⁶⁾

$$SMD = D_{32} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \quad (1)$$

Sauter 평균입경은 액적군의 총체적에 대한 총표면적의 역수에 비례하므로 결국 분사된 액체가 주위기체와 표면을 통해 접촉하기 위하여 얼마나 잘 미립화하였는가를 보여주는 유용한 척도

가 된다. 따라서 본 연구에서는 인젝터에서 분사되는 연료의 무화 정도를 입자운동 해석장치로 계측하고 Sauter 평균입경을 적용하여 무화특성을 해석하고 평가하도록 하였다.

2.2 연료의 미립화를 위한 장치

기존의 인젝터 분무에 대하여 연료의 미립화를 촉진시키기 위한 방법으로서 2-유체 무화 방식을 적용한 외부 혼합형 보조공기 공급장치(Air-Assist Spray Adapter)를 제작하였다.

이 장치는 Fig.1과 같이 MPI용 보쉬(Bosch) 인젝터를 삽입할 수 있도록 하였으며, 특히 실제 엔진의 흡기포트 및 매니폴드 부위에 장착이 편리하고 가공이 용이하도록 일체형으로 설계하였다.

보조 공기는 외부로부터 인젝터 몸체와 어댑터 사이의 원통형의 공간에 공급된 다음 인젝터 선단부의 좁은 홈을 통하여 노즐 출구에 분사된다. 분사된 연료와 보조공기가 원활하게 혼합되도록 노즐 출구 통로를 테이퍼 가공하여 인젝터 팁으로부터 약 5mm 지점에서 연료와 공기가 충돌할 수 있도록 하였다.

인젝터 선단부에 있는 보조공기를 공급하기 위한 좁은 홈의 방향에 따라 두가지 형태의 보조공기 공급장치를 제작하였다. 하나는 보조공기가 6개의 직선형의 홈을 따라 분사방향과 나란하게 공급되게 한 것이고, 다른 하나는 직선형 홈의

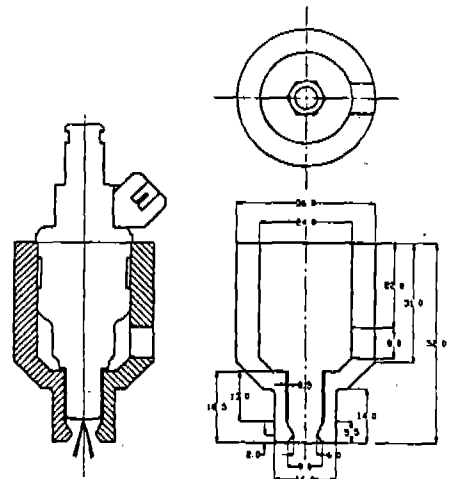


Fig.1 Drawing of Air-Assist Injection Adapter

끝부분에 1/2회전의 피치를 가지는 나선형 홈을 가공함으로써 분출되는 보조공기가 와류를 형성할 수 있도록 한 것이다.

2.3 분무 특성 시험 장치 및 방법

분무된 액적의 미립화 특성을 해석하기 위한 입자 운동 해석 장치(PMAS)는 광원, 렌즈, 필터, CCD카메라, 실시간 제어장치와 프레임그래버 및 제어보드가 내장된 컴퓨터 등으로 이루어져 있으며, Fig.2와 같이 구성된다.

컴퓨터에 내장되어 있는 4채널 제어보드는 인젝터의 솔레노이드 밸브와 광원장치, 그리고 화상 취득 장치를 실시간 동시 제어하게 된다.

분무 특성 시험 방법으로는 연료를 5.0ms동안 분사하면서 예비실험을 통하여 SMD와 측정입자수가 일정해지는 지점을 확인한 후 이로부터 분사개시로부터 6.5ms 지연 후의 CCD카메라에 맺혀진 실시간의 화상을 프레임 그래버를 통해 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 인젝터의 분무 영역에 대한 측정 위치는 3축 이송장치를 사용하여 공기보조 어댑터의 선단에서 인젝터 중심축을 따라 45mm 떨어진 지점을 관찰하였다.

105mm 렌즈를 장착한 CCD카메라의 관찰 영역은 4.5×4.5mm이며, 확대비를 계산하고 심도수정을 위한 보정데이터를 구하여 8~300μm 이내의 입경을 측정할 수 있도록 하였다.

압력조절기 및 연료유량조절밸브에 의하여 연료의 분사압력을 2.8bar로 일정하게 유지되도록

하였고, 연료펌프로부터 공급되는 과잉의 연료는 리턴 호스를 통하여 연료탱크로 귀환되도록 하였다. 아울러 압축기로부터 공기유량 조절밸브를 통하여 어댑터로 공급되는 보조공기 압력을 0~1.5bar까지 0.25bar간격으로 변화시켜 보았다.

한편 동일한 연료 분사 실험조건에 따른 분무형상 및 분무각 등의 거동을 관측하기 위하여 분무의 거시촬영을 실시하였다. 실험 장치는 앞에서 설명한 입자운동해석장치와 유사하며, 다만 CCD카메라와 프레임 그래버 대신 초점거리 50mm 렌즈를 가진 스틸 카메라(Nikon, FM-II)를 장착한 것이 특징이다. 렌즈 전면에는 ND 필터를 장착하여 광량을 조절하였고, 이 때 콜리메이터 렌즈를 통과한 화상은 직경 4.5cm의 원형 가시영역을 형성하는데 이를 필름으로 현상하였다.

3. 엔진의 연소 성능 해석

3.1 엔진의 성능 및 사이클 변동 해석

엔진의 정상 운전조건에 대한 연소의 불안정 정도를 표시하기 위하여 각 사이클 평균에 대한 변동의 분포를 사용하는데 이는 각각의 물리량에 대한 변동계수(COV)로 정의하며, 다음의 계산에 의하여 주어진다.⁷⁾

N 을 측정데이터(사이클) 수, \bar{x} 를 산술 평균, σ_x 를 표준편차라 하면

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \tag{2}$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \tag{3}$$

이 되고, 이로부터 변동계수는

$$COV(x) = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \times 100\% \tag{4}$$

로 표현된다. 이 식은 측정 물리량의 사이클 평

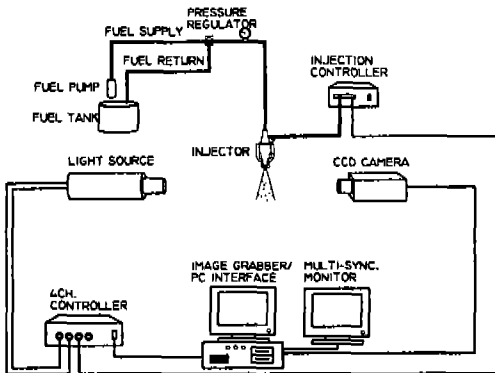


Fig.2 Schematic Diagram of PMAS

균에 대한 표준편차의 의미를 지니며, 여기서 물리량으로는 평균유효압력(bmep), 연소최고압력(p_{max}) 등이 적용된다.

3.2 엔진의 성능 실험 장치 및 방법

1.8L DOHC 엔진의 희박연소 성능실험을 위한 동력계로는 와전류식 전기동력계를 사용하였다. Table 1은 엔진의 제원을 나타낸 것이며, 성능 실험을 위한 장치 구성의 개략도는 Fig.3과 같다.

엔진의 1번 실린더 및 크랭크축에 압력변환기와 로터리 엔코더를 각각 설치하고, 이들로부터 측정되는 실린더압력 및 크랭크각 신호를 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 저장하였으며, 각각의 사이클에 따른 압력신호로부터 연소성능을 해석

하였다. 이들 압력변환기와 로터리 엔코더 및 A/D변환기의 제원은 Table 2와 같다.

희박영역에 대한 연소실험의 주요 인자가 되는 공연비를 변화시키기 위하여 흡기 매니폴드의 플레넘 챔버에서 브레이크부스터로 연결되는 호스에 공압 조절기를 장착하여 부압에 의한 추가공기를 공급하도록 하였다. 아울러 공연비 변화에 따른 연소배출가스의 성분을 분석하기 위하여 장착한 배기가스분석기로부터 CO, CO₂, HC 및 O₂의 배출량을 측정하였다.

실험 조건으로는 먼저 실험에 적용하고자 하는 엔진의 기본 출력 성능 실험 결과를 바탕으로 토크가 최대 출력의 1/4 부하상태인 30Nm이 되도록 유지하였으며, 엔진의 회전속도는 2,000rpm로 설정하였다. 또한 냉각수온은 $80 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

희박 연소한계(lean limit)의 판정은 200사이클에 대한 연소해석을 바탕으로 평균유효압력의 변동계수가 6%미만이 될 때까지의 희박 공연비를 희박한계로 설정하기로 하였다.

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Engine type	Water-cooled MPI Gasoline Engine
Displacement Volume	1,836cc
Bore × Stroke	82 × 88mm
No. of Cylinder	4
Compression Ratio	9.2
No. of Valves	4(DOHC)

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연료 분무의 미립화 특성

Fig.4는 본 연구에서 기존의 가솔린엔진용 인젝터의 연료 미립화 촉진을 위하여 제작한 보조

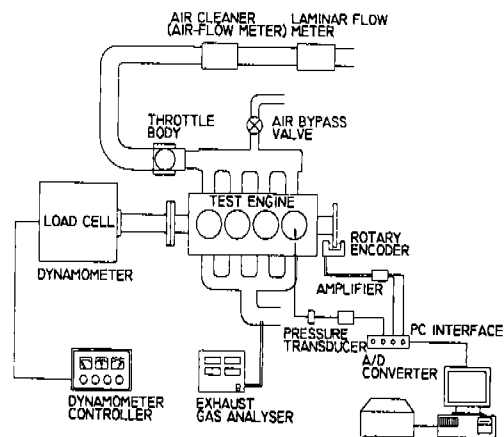


Fig.3 Schematic Diagram of Engine Bench Test Apparatus

Table 2 Specifications of combustion analyzer

Apparatus	Item	Specification
Pressure Transducer	Maker(Model)	Kistler(6051A)
	Type	Piezo-electric
	Pressure Range	0~200bar
Rotary Encoder	Linearity	0.1%
	Maker	Ono Sokki
	Type	Light Detective(A,B,Z)
A/D Converter	Output	0-5V, 360pulse/rev
	Maker(Model)	Keithley(DAS-58)
	No. of Channel	8
Frequency	Range(Resolution)	$\pm 10\text{V}$ (12bits)
		1ms/sample/sec

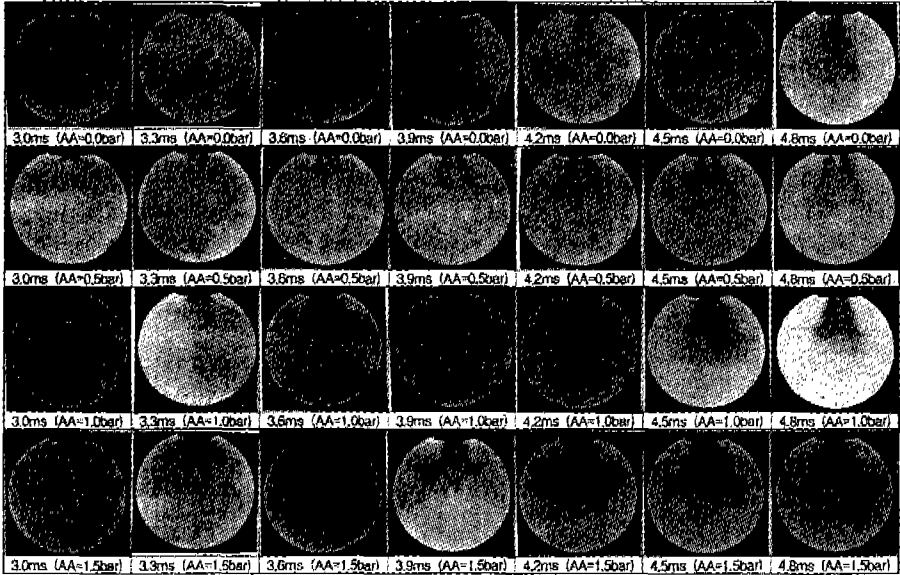


Fig.4 Macroscopic Visualizations of Air-Assisted Injection

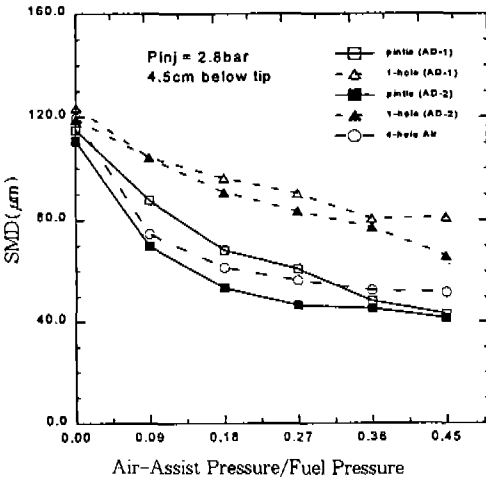


Fig.5 SMD Variations vs. Assisted Air Pressure

공기 공급장치를 장착하여 무화특성을 거시적으로 관측한 사진이다. 여기서 보조공기는 직선형으로 분사되고, 인젝터는 핀돌형을 적용하였다.

사진에서 보는 바와 같이 공기보조 분사의 경우 분무액적군이 상당히 미세하게 무화되는 것을 알 수 있으며, 특히 1.5bar의 경우 액적군의 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 첫 번째

열의 3ms에서의 사진을 살펴보면 보조공기의 압력이 높아질수록 액적의 분출속도도 빨라짐을 보게 된다. 한편 보조공기의 압력이 1.0bar를 넘을 경우 분사각이 지나치게 커지고 있어 실제 엔진에 적용할 경우 포트벽면에서의 벽류량이 많아질 것으로 예상된다. 이로부터 보조공기 분사에 의한 미립화효과를 거시적으로 확인할 수 있었으며, 실제 응용에 대하여는 분무각과 분무액적의 크기 및 분무도달거리 등의 영향을 종합하여 보조공기의 압력을 조절할 필요가 있음을 알 수 있다.

CCD카메라의 화상을 동일 위치, 동일 조건에서 여러 번 취득함으로써 그로부터 화상처리 장치에 의하여 각 입자들에 대한 평균 입경을 계측한 결과를 Fig.5에 나타내었다. 여기서는 본 연구를 위하여 제작한 두가지 종류의 어댑터에 핀돌형과 1-홀형 인젝터를 장착한 것과 기존에 실용화되고 있는 4-홀형 공기보조 인젝터를 적용하여 측정하였다. 그림에서 AD-1은 직선형으로 보조 공기가 분출되는 것이고, AD-2는 보조공기가 노즐에서 나선형으로 분출되도록 설계된 것이다. 아울러 보조공기 압력은 인젝터의 연료압력과 상대적인 비교를 위하여 보조공기압력과

연료분사압력의 비로서 정의되는 무차원수로 표시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 핀틀형 인젝터에 대하여 직선형 공기보조의 경우 압력이 0.75bar ($p_{air}/p_{inj}=0.27$) 정도에서 SMD가 $60\mu m$ 이하로 되지만 나선형의 경우 0.5bar($p_{air}/p_{inj}=0.18$)에서 이미 그 정도의 작은 입경이 얻어지고 있다. 또한 보조공기의 압력이 1.0bar($p_{air}/p_{inj}=0.36$) 정도가 되면 $40\mu m$ 가량의 액적이 얻어지며 이는 기존의 4-홀형 공기보조 인젝터에 비하여 보다 나은 미립화 효과를 보여준다.

1-홀형 인젝터의 경우 보조공기의 압력이 높아짐에 따라 핀틀형에 비하여 상당히 큰 입경을 나타내고 있는데, 이는 크게 두가지로 해석된다. 첫째는 1-홀형의 경우 분사각이 상당히 좁고 이에 비해 보조공기의 분출방향 및 압력이 적절하지 않다는 점이고, 둘째는 충분히 무화하기 위한 시간적 여유와 도달 거리가 필요한데 비하여 측정점이 너무 가까웠다는 점이다.

본 실험의 공기보조 어댑터를 적용한 인젝터 분무의 SMD를 측정 한 결과 1-홀형 인젝터보다는 핀틀형 인젝터에 적합하며, 나선형 공기보조의 경우가 직선형 공기보조의 경우보다 다소 낮은 압력에서 충분한 무화를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 특히 이때의 보조공기의 압력이 실제 엔진의 부분부하운전에 대하여는 부담만으로도 공급이 가능하므로 희박연소 운전시와 같은 부분부하에서 적용할 경우 별도의 압축공기 공급장치가 필요 없을 것으로 생각된다.

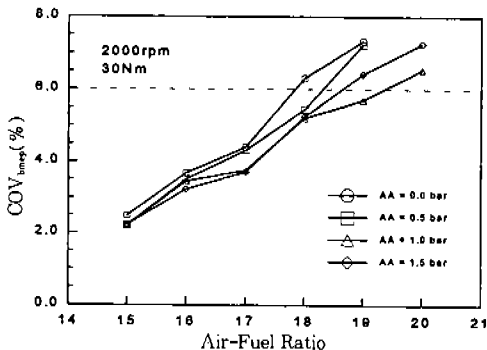


Fig.6 COV of I_{mep} with Air-Assist Pressure Variations

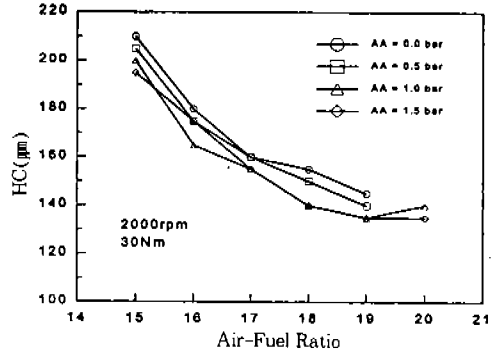


Fig.7 HC Emission with Air-Assist Pressure Variations

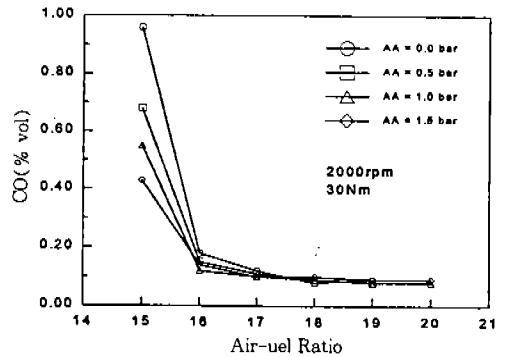


Fig.8 CO Emission with Air-Assist Pressure Variations

4.2 엔진의 희박연소 성능실험

직선형으로 보조공기가 분출되는 보조공기 공급장치(AD-1)를 엔진의 각 인젝터에 장착하고 흡기관내의 부압과 보조공기 공급관내의 압력과 차압을 0.0, 0.5, 1.0, 1.5bar로 변화시켜가면서 엔진의 연소 성능 시험을 통하여 희박 연소 영역에서의 연소안정성, 배기가스 배출량 등을 측정하였다. 특히 보조공기 공급관에는 공압 조절기를 장착하여 압축기로부터 공급되는 보조공기의 압력이 일정한 조건으로 유지될 수 있도록 하였다.

Fig.6은 희박한계를 판단할 수 있는 척도가 되는 평균유효압력의 변동계수(COV)를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 보조공기의 압력이 0.0bar에서는 A/F=18, 0.5bar와 1.5bar 일

때에는 $A/F=19$, 1.0bar일 때에는 $A/F=20$ 인 점에서 한계를 넘고 있어 보조공기의 압력이 1.0bar인 경우가 가장 희박연소가 안정됨을 알 수 있다. 특히 예상과는 달리 1.5bar에 대하여 희박한계가 낮아지는 것은 분무각이 지나치게 커짐으로써 흡기포트에서의 벽류량이 증가하고 이로부터 오히려 연소불안정 효과를 가져오게 된 것으로 판단된다.

Fig.7는 보조공기압력의 변화에 따른 배기가스 중의 HC의 배출량을 공연비의 변화에 대하여 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 보조공기의 압력이 1.0 및 1.5bar일 때 HC가 가장 적게 배출되고 있다.

Fig.8은 배기가스 중의 CO의 배출량을 측정 한 것으로서 HC의 배출량과 유사한 결과를 나타내고 있어서 보조공기 압력이 증가할수록 연료의 무화에 의한 연소 성능의 향상 효과가 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

기존의 4행정 사이클 가솔린 엔진의 연료 분무의 미립화를 촉진하고, 연소성능을 향상시키기 위한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가솔린엔진용 인젝터에 장착하기 위한 보조공기 공급장치를 설계·제작하였으며, 이를 입자운동 해석장치를 사용하여 분무 특성을 해석한 결과 보조공기 압력이 0.5bar ($p_{air}/p_{inj}=0.18$) 이상에서 SMD가 $60\mu m$ 이하의 분무를 얻음으로써 연료의 미립화 촉진 효과와 함께 혼합기 형성을 촉진시키는 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) MPI DOHC형 엔진에 보조공기 공급장치를 장착하고 부분부하에서의 희박 연소 실험을 통하여 연소특성과 함께 연소변동계수(COV)를 측정해 본 결과 보조공기 공급압력이 1.0bar 정도에서 안정된 연소 성

능을 나타내었다.

- 3) 보조공기 공급압력의 변화에 따른 배출가스 농도는 보조공기의 압력이 1.0bar 이상이 될 때 탄화수소 및 일산화탄소 배출량이 가장 적게 배출되는 것을 확인할 수 있었으며, 이로부터 보조공기 압력이 증가함에 따라 연료의 무화에 의한 연소 성능의 향상 효과가 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. H. Manger, "LH-Jetronic : A New Gasoline Injection System with a Hot Wire Air Mass Meter and μ -processor Controlled ECU", IMechE C180/81, pp. 137~141, 1981.
2. C. S. Weaver, "Natural Gas Vehicle-A Review of the State of the Art", SAE Paper No. 892133, 1989.
3. 兩角岳彦, "MF 図解特集 : Lean Burn Engine", MotorFan, 11月, pp. 84~96, 1991.
4. Aparicio J. Gomez and Paul E. Reinke, "Lean Burn : A Review of Incentives, Methods, and Tradeoffs", SAE Paper No. 880291, 1988.
5. Ming-Chia Lai, Fu-Quan Zhao, Amer Ahmad Amer, and Tsan-Hai Chue, "An Experimental and Analytical Investigation of the Spray Structure from Automotive Port Injectors", SAE Paper No. 941873, 1994.
6. A. H. Lefebvere, "Atomization and Sprays", pp. 1~243, Hemisphere Publishing Co., 1989.
7. D. R. Lancaster, R. B. Krieger, J. H. Lienesch, "Measurement Analysis of Engine Pressure Data", SAE paper No. 750026, 1975.