한국자동차공학회논문집 제9권 제1호, pp.57~62

공기 보조 미립화 인젝터의 미립화 메카니즘 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Atomization Mechanism for the Air Shrouded Injector

김 봉 규*, 이 기 형**, 이 창 식**, 서 영 호***
Bonggyu Kim, Kihyung Lee, Changsik Lee, Youngho Seo

ABSTRACT

EFI system has severe problems of heavy HC emission generated by large fuel droplets and non-uniform air-fuel mixture. Therefore, various atomization techniques are being developed in order to reduce HC emission. The one among those techniques is air shrouded injector, which has better atomization ability and demands less power loss than other atomizers. Thus, the development of this air shrouded injector can be major topic to cope with international emission regulation. Nevertheless, there are few domestic and foreign studies which deal with air shrouded injector.

In this study, the spray characteristics and atomization mechanism of the representative air shrouded injector were analyzed using PDPA system. From experimental results, the definite standards of air shrouded injector's spray characteristics were established.

주요기술용어 : Air shrouded injector(공기 보조 미립화 인젝터), Atomizer(미립화기), PDPA (위상 도플러 입경 측정장치), Distribution function(분포함수), Sauter mean diameter(Sauter 평균입경)

Nomenclature

SMD : sauter mean diameter, μm
We : weber number
Re : reynolds number
P : pressure, Pa
μ : viscosity, kg/m · s
σ : surface tension, kg/s^2
ρ ; density, kg/m^3
U : velocity, m/s
d : diameter, m

* 회원, 한양대학교 기계공학부 BK21 연구원
** 회원, 한양대학교 기계공학부
*** 회원, 자동차부품연구원

1. 서 론

최근 전세계적으로 강화되고 있는 각종 배기 규제들을 대처하는 동시에 출력의 응답성을 향상시키기 위하여 실린더내의 유동장 강화와 전자제어 장치의 최적화 및 차량의 경량화등 많은 노력이 수행되고 있으며, 그 중에서 가장 중요한 분야가 최적의 연료 분사 시스템이다. 현재 대부분의 자동차에 적용되고 있는 전자제어 연료분사

시스템(EFI)용 가솔린 엔진용 중·저압 인젝터는 디젤의 고압 인젝터정도의 미립화 수준을 얻을 수가 없으므로 큰 입자상의 연료 액적이 실린더 내에 다량 존재하게 되어 불완전 연소를 유발하며, 더욱이 냉간 운전시에는 그 정도가 심화되어 많은 양의 HC를 배출하게 되어, 높은 배기규제를 극복하는데 커다란 장애가 되고 있는 실정이다.

따라서 완전 연소를 도모하기 위한 균일한 혼합기를 형성할 수 있도록 연료의 미립화를 촉진시킬 수 있는 다양한 미립화 기구들이 개발되고 있으며, 그 중에서 최소한의 동력으로 높은 미립화 효과를 얻을 수 있는 공기 보조 미립화 인젝터(air shrouded injector)가 크게 주목을 받고 있다.[1-3]

본 연구에서는 이러한 공기 보조 미립화 인젝터가 최대한의 미립화 효과를 얻을 수 있는 최적의 미립화기(atomizer) 형상을 설계·제작하고 분무 측정 결과를 크기별로 해석할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 공기 보조 미립화 인젝터의 분무 및 미립화 메카니즘을 분석함으로써 공기 보조 미립화 인젝터에 대한 제반의 특성들에 대해 명확한 지표를 제시하였다.

2. 미립화기의 설계 및 제작

본 연구에서는 DOHC 2000cc 4기통 엔진에서 사용되고 있는 하방 연료 공급(bottom feed)방식의 2hole 2spray 인젝터를 기준 모델로 선정하였으며, 이 인젝터의 선단부에 보조 공기를 도입하여 미립화를 도모할 수 있도록 Fig. 1과 같이 미립화기를 설계·제작하여 실험을 수행하였다.

보조 공기 미립화기내에서 연료와 공기와의 혼합방식이 크게 내부 혼합 방식과 외부 혼합 방식으로 구분되어 지는데 본 연구에서는 공기 이용율이 높고 연료 미립화가 우수할 뿐만 아니라 분무 직진성과 방향성이 양호한 내부 혼합 방식의 어댑터 형상을 대상으로 설계 변수를 선정하였다.

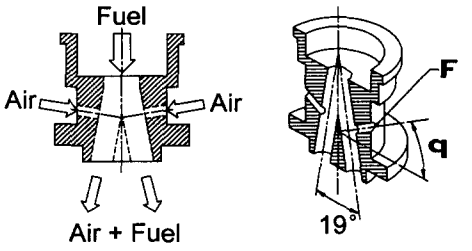

Fig. 1 Shape of air-shrouded atomizer

어댑터의 형상 설계 인자로서 공기 유입구의 각도(θ)와 유입구의 지름(ϕ)등을 변화하여 실험한 결과, 각도는 20° , 지름이 1mm일 때 최소의 공기 도입량으로 최대의 미립화 효과를 발휘하는 사실을 확인한 후 이 제원을 가진 미립화기를 사용하여 미립화 특성을 해석하였다. 이 경우 EFI용 기본 인젝터의 분무 특성을 고려하여 연료와 공기의 혼합 통로의 분리각은 인젝터 고유 분무각인 19° 로 결정하였으며, 연료·공기 혼합 통로의 지름은 보조 공기가 도입되지 않을 때 분사된 연료가 미립화기의 내벽에 충돌하지 않는 최소한의 지름 2mm로 고정하였다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 PDPA를 이용하여 입경 및 속도를 측정하였다. 각 구성품들을 살펴보면, 레이저소스는 5W Ar-ion 레이저를 사용하였고, 신호 처리기는 DANTEC사 제품을 사용하였으며, 인젝터에서 분사된 입자들의 입경과 속도들을 측정할 때 한 측정점에서 데이터 개수를 10000개 이상 취득하여 앙상블 평균값을 구하였다.

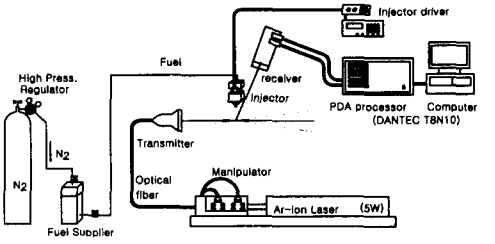

Fig. 2 Schematic diagram of PDPA system

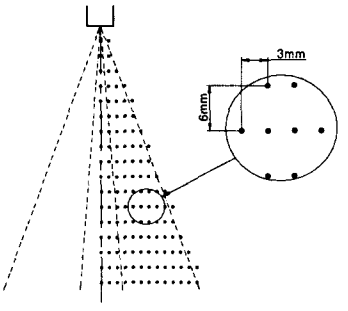

Fig. 3 The positions of measurement points for PDPA

측정점의 위치는 Fig. 3에 나타내었으며, 보조 공기 도입은 디지털 압력계와 레귤레이터를 이용하여 실험을 수행하였고, 보조 공기압(⊿P)에 따른 분무 특성 변화를 관측하기 위해 계기압 0, 10, 30, 50kPa의 네 가지 조건에서 실험을 수행하였다.

연료는 가솔린을 사용하였고, 연료 압력은 300kPa로 일정하게 유지하여, 대기 중에서 분사 실험을 수행하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 미립화기의 유량 특성 및 유동 특성

Fig. 4는 보조 공기의 속도 분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 여기서 공기속도는 분무된 입자들중 5μm이하의 입자들의 유동이 공기의 유동이라 가정하고 그 입자들의 속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공기압이 증가할수록 초기부터 높은 속도를 나타내며, 시간이 지남에 따라 분무 외곽에 정지된 주위 공기와의 마찰과 운동량 수수에 의해 재순환 영역이 형성되고 있음을 알 수 있으며, 이 영역에서는 작은 입자들이 공기 유동에 동반되어 분무각이 확대됨과 동시에 공기와의 혼합도 촉진될 것으로 생각된다.

또한 모든 경우 시간이 경과됨에 따라 속도가 감소하고 있으며, 그 감소량은 공기압이 10kPa일 때 가장 크고 50kPa일 경우에는 평균 속도 분포

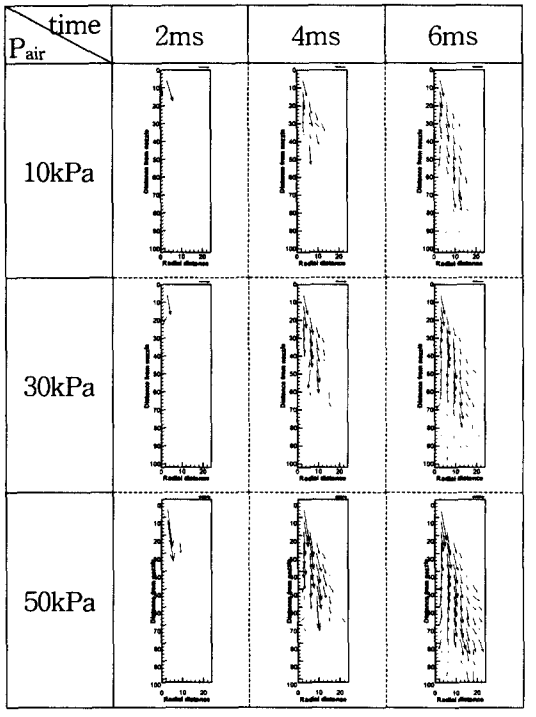

Fig. 4 Shrouding air velocity distribution with elapsed time

가 시간이 지나도 어느 정도 속도를 유지하고 있기 때문에 공기압이 높은 경우에는 액적의 분열이 오랜 시간동안 활발히 이루어짐을 짐작할 수 있다.

4.2 공기 보조 미립화 인젝터의 미립화 메카니즘 해석

위에서 선정한 미립화기를 가지고 어떠한 미립화 메카니즘을 통해 미립화가 이루어지는지를 파악하기 위하여 PDPA실험을 통해 얻은 입경과 속도를 이용하여, SMD, Weber 수, 공기와의 상대속도, 난류에너지등을 구하여 미립화 기구를 분석하였다.

본 연구에서는 미립화가 이루어지는 영역을 해석하기 위하여 미립화 효과를 나타내는 무차원수인 Weber($\frac{\rho \cdot U^2 \cdot D}{\sigma}$) 수를 도입하였다. 본 연구에서는 국소 Weber수를 구하였으므로, U는 상대속도, D는 평균입경을 나타낸다.

We수는 운동에너지에 대한 표면장력의 비로서 1이상이면 분열이 시작되며 그 수에 비례하여 미립화가 촉진되며 시간이 지남에 따라 속도와 입경이 감소하면서 난류 유동장일 경우 그 수가 약 1이 될 때까지 분열이 계속된다고 알려져 있다.

시간과 공기압 변화에 따른 Weber의 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 공기압이 증가할수록 Weber수가 증가하는 것으로 보아 미립화가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 노즐 근방에서는 계속해서 높은 Weber수가 나타나고 있으므로 보조 공기가 도입되는 한 분무 초기부터 높은 미립화 효과를 얻을 수가 있다.

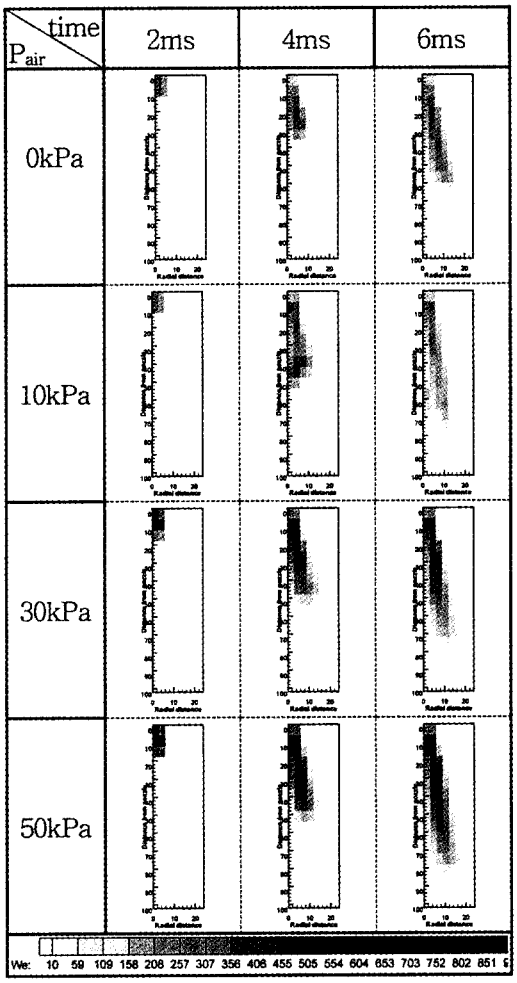

Fig. 5 The distribution of Weber Number

연료의 미립화에 가장 큰 영향을 주는 것은 주위 공기와의 마찰과 난류 효과이다. 이 중에서 미립화에 가장 중요한 역할을 하는 것은 주위 공기와의 마찰이며, 난류효과는 액적의 표면을 거칠게 하여 공기 역학적인 분열과정을 촉진시키는 역할을 하게 된다. 이 두가지 주요한 미립화 조건을 해석하기 위하여 마찰력을 주도하는 공기와의 상대속도를 Fig. 6에, 난류 효과를 나타내는 난동에너지를 Fig. 7에 입자 크기별로 나누어 나타내어 어느 크기의 입자들이 다른 크기의 입자들보다 미립화가 잘 이루어지는지 알아보았다.

먼저 Fig. 6을 보면 모든 크기의 입자들이 분

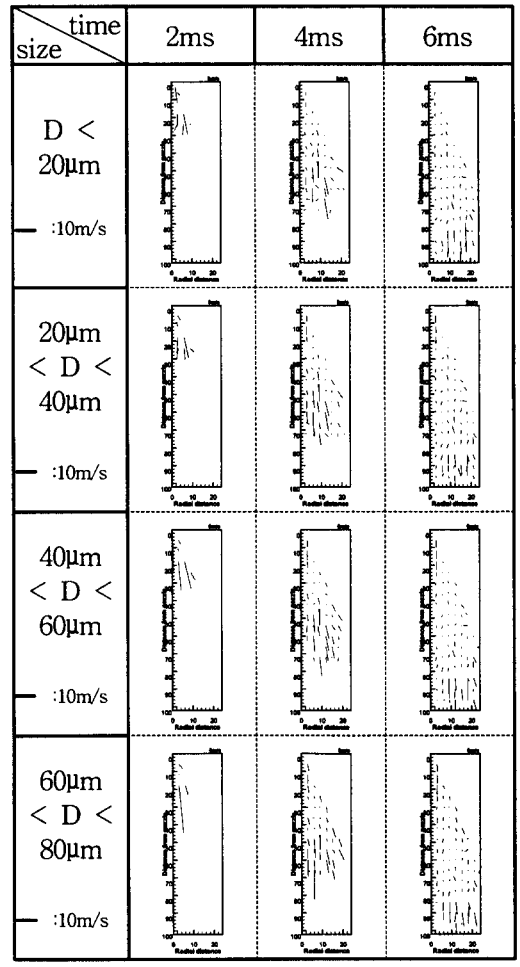

Fig. 6 The distribution of relative velocity between air and droplet (ΔP=0.5bar)

사 초기에는 노즐 근방에서 높은 상대 속도를 보이고 있으며, 시간이 지남에 따라 분무 중심의 입자들이 높은 속도의 공기에 의해 가속되고 있음을 알 수 있다. 한편 운동량을 잃은 공기는 속도가 감속되어 상대속도가 감소하고 있으며, 분무 선단에서의 공기는 속도는 소멸되고 공기로부터 운동량을 받은 연료 입자들은 속도를 유지하고 있기 때문에 이 부분에서는 다시 상대속도가 증가하고 있다. 또한 상대적으로 큰 크기의 입자들은 표면적이 크기 때문에 상대속도의 영향을 많이 받고 있는 것을 알 수 있다.

연료 입자들의 난동에너지를 나타낸 Fig. 7을 살펴보면 마찬가지로 노즐 근방에서 높은 수치를

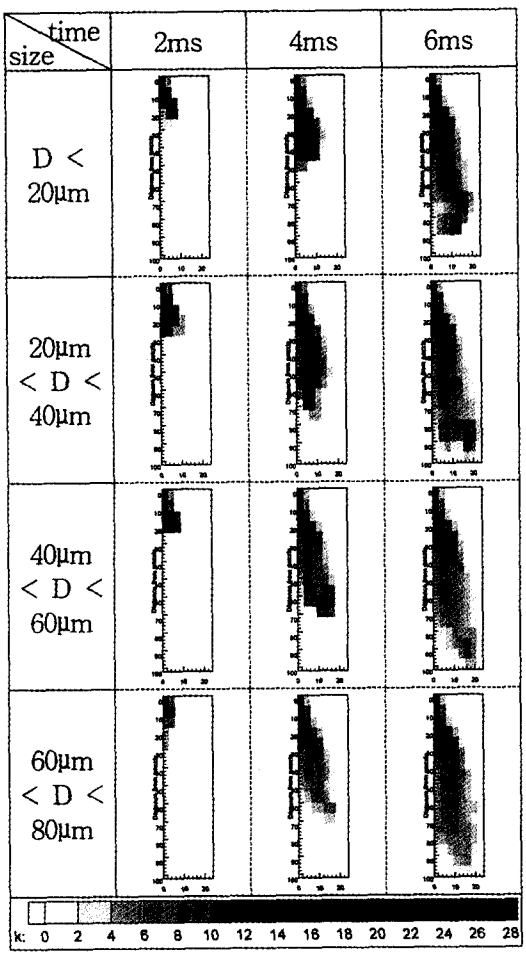

Fig. 7 The distribution of turbulence kinetic energy (ΔP=0.5bar)

보이지만 상대속도 분포와는 달리 크기가 작은 입자일수록 난류 효과가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 분무 하류로 갈수록 난동에너지가 작아지는데 그 이유는 난동에너지를 공급해주는 보조 공기의 운동량을 상류의 입자들에 모두 빼앗긴 이후이므로 더 이상 난류 효과를 내지 못하고 있기 때문으로 판단된다.

4.3 입경 분포 함수

액체 분무는 액적들이 기체내에 존재하는 것으로 정의되므로 넓은 영역의 크기의 입자들이 존재하게 된다. 따라서 이 많은 입자들의 크기를 어떤 함수를 이용하여 분포시키게 되면 임의의 분무에 의한 입경의 분포를 일반화할 수가 있다. 본 연구에서는 분무의 입경 분포에 많이 사용하는 경험적인 분포함수를 도입하여 입경 분포를 일반화하였다.[4)]

먼저 일반적인 미립화기에 적용할 수 있는 식(1)과 식(2)와 같은 분포함수를 적용하였다.

Nukiyama-Tanasawa distribution function :

$$\frac{dn}{dx} = A_n x^{\alpha} \exp(-B_n x^{\beta}) \quad (1)$$

여기서, n은 구간 내에 입자수이고, α, β, An, Bn 은 분포 변수이다. 분포 변수를 구하기 위해 β 값에 대한 분포변수 An, Bn을 선형회귀법으로 구한다. 여기서 구한 분포 변수를 함수에 대입하고 실험치와 비교하여 오차가 최소가 되는 β 값을 유효숫자 세 자리까지 구하였다.

Rosin-Rammler distribution function :

$$1 - v = \exp\{-(x/X)^{\delta}\} \quad (2)$$

v는 체적누적분률, X, δ 는 분포변수이다. 분포변수를 구하기 위해서는 δ 값에 대한 X값을 선형회귀법으로 구한다. 마찬가지로 실험치와 오차가 최소가 되는 δ 값을 유효숫자 세자리까지 구하였다

이 두 분포함수과 측정값들을 Fig. 8에 나타내

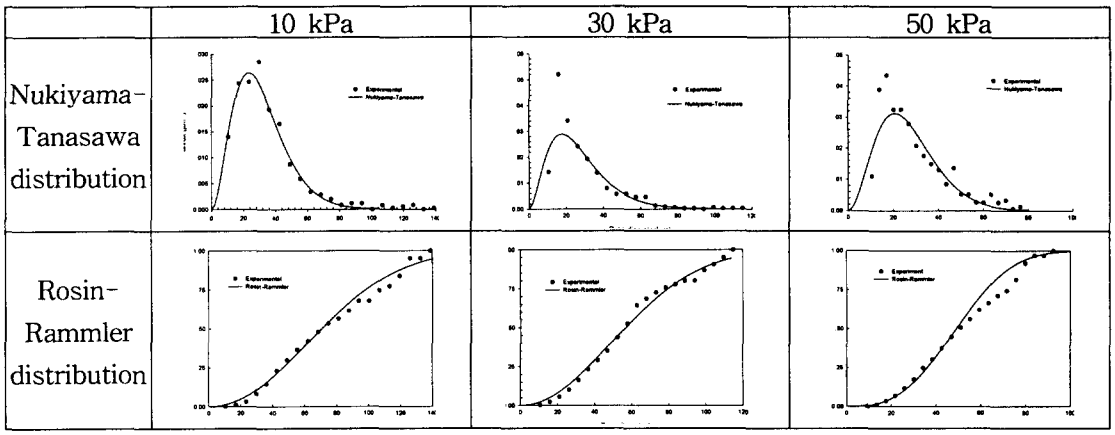

Fig. 8 The Comparison between Nukiyama-Tanasawa and Rosin-Rammler distribution function

었다. Nukiyama-Tanasawa 분포보다는 Rosin-Rammler 분포에서 전 영역에 걸쳐 실험치와 큰 차이를 보이지 않으며, 특히 작은 입경 영역에서 실험치와 유사한 분포를 이루고 있다. 이와 같은 측정 결과는 Rosin-Rammler 분포 함수는 입경과 체적 누적률에 대한 함수이므로 작은 입경의 빈도 분포에 큰 영향을 받지 않는다는데 그 원인이 있다.

5. 결 론

스로틀 밸브의 전후차압을 이용하여 엔진의 동력 손실 없이 효과적인 연료의 미립화를 도모하는 공기 보조 미립화 인젝터를 설계 · 제작하고 입경 크기별 해석 프로그램을 개발하여 공기 보조 인젝터의 미립화 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

1) PDPA를 이용하여 5μm이하의 입자들의 유동을 측정하여 공기 속도를 구한 결과, 보조 공기압이 증가할수록 분무각과 속도가 증가하나, 하류로 갈수록 급격히 속도가 저감되어 보조 공기에 의한 미립화 효과를 기대하기는 어렵다.
2) 각 측정점에서의 Weber수를 측정한 결과 입자 속도가 빠른 노즐 근방에서 높은 수치를 나타나고 있어 이 부분에서 분열이 활발히 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다.
3) 공기와의 상대속도와 난동에너지를 액적의 크기별로 측정한 결과 상대속도는 큰 입자군에서, 난동에너지는 작은 입자군에서 높은 수치를 보이고 있어 액적들은 크기 별로 분열에 주로 영향을 주는 요인이 다르다는 것을 알 수 있다.
4) 측정된 입경들을 여러 가지 분포함수에 적용하여 입경 분포를 비교한 결과 실험치와 분포함수에 의한 계산치가 잘 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1) T. Sugimoto, K. Takeda, H. Yoshizaki, " Toyota Air-Mix Type Two-Hole Injector for 4-Valve Engines", SAE912351, 1991.
2) F. Q. Zhao, M. C. Lai, and D. L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection - A Critical Review", SAE 950506, 1995.
3) K. Harada and R. Shimizu, "Development of Air- Assisted Injector System", SAE 920294, 1992.
4) A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemishere Publishing Co., 1989.