

다공 스톱 밸브에서의 액체 연료의 2차 미립화 특성에 관한 연구

A Study on the Secondary Atomization Characteristics of Liquid Fuel in the Perforated Throttle Valve

이 창 식,* 이 기 형,* 조 병 욱,** 오 군 섭***

C. S. Lee, K. H. Lee, B. O. Cho, K. S. Oh.

ABSTRACT

In a fuel injection engine, atomization of liquid fuel and mixture formation process has influenced(or affected) directly on the engine performance and pollutant emission. In this study, the characteristics of fuel spray and the behaviors of secondary atomization developed at the downstream of the valves were investigated using an image processing method. Solid and perforated valves are chosen in order to evaluate the valve performance in terms of air flow rate, valve opening angle and valve shape. Experimental results clearly indicate that the spray atomization quality can be improved by increasing the perforated ratio and the blockage ratio in the perforated valve.

The characteristics of spray atomization is improved by using the perforated valve with high perforated ratio and blockage ratio.

주요기술용어 : Fuel Spray(연료 분무), Perforated Valve(다공 밸브), Perforate Ratio(구멍 비), Valve Loss Coefficient(밸브손실계수), Sauter Mean Diameter(Sauter 평균 입경)

1. 서 론

최근 가솔린 기관의 개발 및 연구의 핵심적 과제는 고성능, 고출력화, 그리고 저연비 및 공해 물질 배출 저감화에 두고 있으며, 이를 실현하기 위한 노력이 다각적으로 모색되고 있다. 연료 분사식 가솔린 기관에서 분무 액적의 미립화는 흡기관을 통하여 유입되는 공기와 함께 혼합기를 형성하는데 중요한 인자가 되며, 연소 효율과 기관 성능의 결정 및 유해 가스의 배출에 지배적인 영향을 미친다.

연료 액적의 증발 속도 정수는 액적 지름의 제곱에 비례하므로 실린더로 흡입된 액적이 짧은 연소 기간 동안 증기 연료화 되어 완전한 연소를 도모하기 위해서는 충분히 미립화된 액적이 우선적으로 요구된다.

입경(SMD), 분무각, 분무 도달 거리 및 액적수 밀도 등의 분무 특성은 연료유로 사용되는 작동유체의 물성, 인젝터의 구조와 형상, 분사 압력, 분사 기구 등에 따라서 결정된다.

최근에는 보다 적극적인 방법으로 무화도를 개선시키기 위하여 2유체 무화 방식과 같

* 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 한국기계연구원

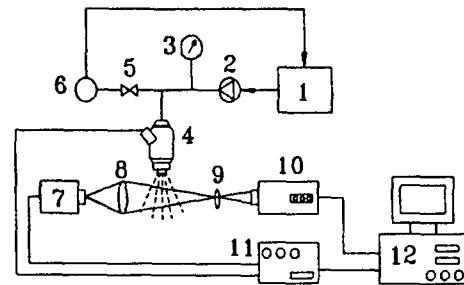
은 공기 보조식 분사기(air-assisted injector), 초음파 분무기(ultrasonic atomizer) 등의 장치를 부착하거나, 충돌 무화(impinging spray)방식 등을 적용하여 2차 무화를 얻는 연구가 활발하게 진행되고 있다 (1)-(3).

또한, 연료와 공기의 균일한 혼합을 위하여도 많은 연구가 발표되고 있는데, 그 중 대표적인 것으로서 나선형 흡기포트에 의하여 스윙을 촉진시키는 방법, 흡입 밸브 형상의 변화에 의한 방법 등이 있으며, 이 외에도 실린더 내의 유동의 영향을 고려하여 텀블, 스위시 등을 이용하는 방법 등의 연구도 다수 수행되고 있다. (4), (5) 분무에 관한 연구는 수치 해석을 통한 이론적 연구와 각종 계측 장치를 이용한 실험적 연구가 수행되고 있으며 최근에는 전자 및 광학 장치의 발달로 분무 현상 및 거동의 관찰 뿐만 아니고, 화학 반응이 수반되는 경우에 이르기까지 관찰과 예측이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 가솔린 인젝터를 이용하여 물성이 각각 다른 옥탄, 솔벤트, 에탄올 등 세 가지 연료에 대한 자유 분무의 구조와 특성을 입자 운동 해석 장치(PMAS)를 통하여 화상처리법으로 관찰하였다. 그리고 유동이 있는 스톱 보디에 상당하는 원관형 덕트 내에 인젝터를 설치하고, 그 후류에 유량 조절용 스톱 밸브를 부착, 이를 통과하는 연료의 2차 무화 정도와 공기와의 혼합기 형성 거동을 관찰하였다. 이 때, 흡기관의 봉로에 설치된 스톱 밸브는 기존의 무공 밸브와 여기에 1% 내외의 미세한 크기의 구멍이 가공된 여러 가지의 다공 밸브를 사용하였으며, 그 후류에서 형성되는 2차 미립화 정도와 특성을 비교 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 자유 분무 실험



1. Fuel tank 2. Pump 3. Pressure gauge 4. Fuel injector 5. Valve 6. Regulator 7. Light source 8. Condenser lens 9. Microscopic lens 10. CCD camera 11. Power and trigger amplifier 12. PC/486 set

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

기관에서는 대부분 액적의 분열과 연속 제트의 분열에 의한 결과로서 발생된 분무를 이용하고 있다. 연료 액적 및 제트의 미립화는 단순한 독립된 과정으로 생성되지 않고, 연료의 밀도, 점도, 표면장력 등의 물성치와 분사계의 압력, 인젝터 분공의 구조와 형상, 그리고 분위기의 조건 등에 따라 상당히 복잡한 과정으로 이루어진다.

먼저, 자유 분무의 분열 과정과 분무 액적의 크기, 액적수 밀도, 입자 운동 속도 등의 미시적 특성과 분무각, 분무 도달 거리 등의 거시적 거동을 관찰하기 위하여 Fig.1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 계측 장치는 광원, 렌즈, 필터, 카메라, 이미지 보드와 제어 보드가 내장된 컴퓨터 등으로 구성된다. 광원은 충분한 광량을 가져야 하고 입자의 형상 변형을 최소화 하고 입자 추적이 신속하도록 짧은 광 지속 기간과 빠른 반복율의 것이 요구된다. 대개는 이와 같은 요구에 맞추어 방전식 광원(spark light source)이 이용되고 있으며, 본

연구에서는 광 지속 시간이 50ns 이고 방전 간격이 μs 단위로 조절되는 이중 방전 광원을 사용하였다. 화상 획득 장치(image frame grabber)의 분해능은 512(H) \times 480(V) pixel 이고 8 bit로 gray level 을 분류하며, 트리거 장치와 동기하여 원하는 순간의 이미지를 얻을 수 있다. 수광용 렌즈는 초점거리 75mm 의 렌즈를 사용하고, 렌즈 전면에는 장파장 광을 차단하기 위하여 간섭거리가 682.8nm 인 필터를 부착하였다. 컴퓨터에 내장되어 있는 4-채널 컨트롤 보드는 인젝터의 솔레노이드 밸브와 광원 장치, 그리고 화상 획득 장치를 제어한다. 분무각과 분무 도달 거리, 그리고 초기 분열 과정 등의 거시적 거동을 관찰하기 위하여 54mm 렌즈와 35mm 카메라를 사용하고, 분무의 공간적인 위치를 광축과 카메라가 선택적으로 포착하도록 0.1mm 단위로 조절이 가능한 3축 트래버스를 사용하였다. 작동 유체는 비중과 점도 등의 물성이 각각 다른 옥탄, 솔벤트, 에탄올을 사용하였으며, 주요 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of working fluid

| Property | Octane | Solvent | Ethanol |
|---|--------|---------|---------|
| Specific Gravity | 0.692 | 0.772 | 0.789 |
| Density(kg/m ³) | 690 | 770 | 787 |
| Viscosity($\times 10^{-6}m^2/s$) | 1.253 | 1.210 | 1.508 |
| Surface Tension ($\times 10^{-4}kg/s^2$) | 2.653 | 2.901 | 2.270 |

인젝터는 MPI 기관용 단공 핀플형이고, 분사 시간을 13ms 로 일정하게 유지하였으며, 분사 초기부터 3.5ms 까지는 0.1ms 단위로, 이후는 0.5ms 단위로 촬영하였다. Table 2는 실험에 사용된 인젝터의 주요 제원과 유량 특성을 나타낸다.

Table 2 Specification and flow rate characteristics of injector(used in experiment)

| | | |
|--------------------|---------|-------------------------|
| Hole diameter | | 0.896 mm |
| Pintle diameter | | 0.798 mm |
| Pintle notch angle | | 34° |
| Flow Rate | Octane | 4.27 cm ³ /s |
| | Solvent | 4.17 cm ³ /s |
| | Ethanol | 3.61 cm ³ /s |

실험에서 얻은 화상 처리시에는 입경과 초점 여부에 따른 영향이 고려된 threshold gray level 을 정해야 하는데, 50% threshold gray level(D₅₀) 적용시 실제 입자 크기(D_t)와는 D₅₀=0.98D_t+0.85 의 선형적 함수 관계가 있으며, 이로부터 이미지에서 얻은 D₅₀을 실제 크기로 환산한다.

2.2 다공 밸브에 의한 미립화 실험

기관에서 혼합기의 양을 조절하는 스톱밸브는 간편한 조작으로 개도를 변화시키며, 흡기시의 부압과 흡기관 내의 맥동으로 인한 압력을 동시에 받는다. Eom⁽⁶⁾은 유량 조절용 버터플라이 밸브를 다공성으로 제작함으로써 덕트 내 유동의 차압 손실을 감소시키면서 유량 조절이 가능함을 실험을 통하여 확인하였다. 본 연구에서는 다공 스톱밸브가 연료 입자의 미립화와 역적수 밀도, 그리고 공간 분포도 등에 미치는 영향을 관찰하고, 기존의 무공 스톱밸브에 의한 결과와 비교하고자 Fig.2와 같이 실험 장치를 구성하였다. 작동 유는 드라이솔벤트 2 호유이고, 인젝터의 분사 유량은 약 250cc/min 이며, 분사 시간은 8ms 로 일정하게 유지시켰다.

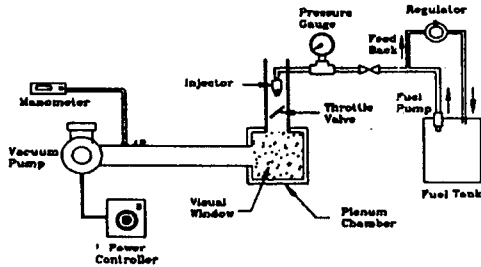


Fig.2 Configuration of injection and air flow system

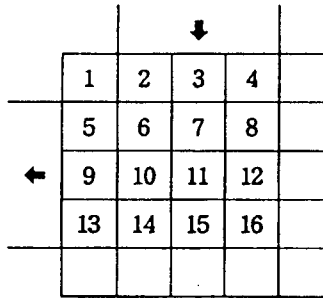


Fig.3 Measuring points in test section

스스로 밸브 바로 아래에 설치되어 있는 공기실의 크기는 50mm × 50mm × 120mm 이고, 공기실의 정면 50mm × 50mm 부를 관찰창으로 하였다. 105mm 렌즈를 장착한 CCD 카메라의 관찰 영역은 4.5mm × 4.5mm 이며, 관찰 깊이는 2mm 이다. 관찰창에는 Fig.3 과 같이 관찰점을 설정하였다. 점간 거리는 가로, 세로 공히 10mm 로 하여, 관찰창 전 영역이 관찰 대상에 포함될 수 있도록 하였다.

기존의 무공 스스로 밸브와의 비교를 전제로 두께 2mm 의 알루미늄 판재로 여러 가지 형상의 다공 밸브를 제작하였다. 밸브의 크기와 여기에 가공된 구멍에 따라 다공 밸브의 종류를 구분할 수 있다. 여기서, 개폐비(blockage ratio, BR)를 덕트 유로의 단면적(A_d)에 대한 스스로 밸브의 면적(A_v)의 비 A_v/A_d 로 하고, 구멍비(perforate ratio, PR)를 스스로 밸브

의 면적(A_v)에 대한 다공 구멍의 면적(A_p)의 비 A_p/A_v 로 정의하면, D와 d를 각각 밸브의 지름과 다공 구멍의 지름이라 하고, 구멍수를 n 이라고 할 때, PR 은 $(d/D)^2 n$ 으로 표시할 수 있다.

실험에 사용된 밸브와 밸브 크기에 따른 개폐비 및 구멍에 의해 결정되는 구멍비의 관계를 나타내면 Table 3 과 같다.

Table 3 Blockage and perforate ratio of valves

| Valve | D(mm) | d(mm) | BR(%) | PR(%) |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| Valve 1 | 33.0 | - | 94.2 | - |
| Valve 2 | 33.0 | 1.3 | 94.2 | 0.95 |
| Valve 3 | 33.0 | 1.7 | 94.2 | 1.60 |
| Valve 4 | 31.9 | - | 88.0 | - |
| Valve 5 | 31.9 | 1.3 | 88.0 | 1.00 |
| Valve 6 | 31.9 | 1.7 | 88.0 | 1.70 |

3. 결과 및 고찰

3.1 자유 분무의 특성

3.1.1 분열 구조와 분무 도달 거리

분무의 외형적 구조는 옥탄과 솔벤트의 경우에는 충분히 발달된 분무의 상상을 보이는 반면에 에탄올의 경우에는 미립화가 잘 이루어지지 않았다⁷⁾. 인젝터의 솔레노이드 밸브에 트리거 신호가 보내진 후, 어느 정도의 시간이 경과한 다음 연료 제트가 출현하는데, 본 실험에서는 Fig.4 에서 보는 바와 같이 그 지연 시간이 옥탄, 솔벤트, 에탄올의 순서로 길어지고, 그 시간은 대략 1.7ms 전후인 것으로 나타났다. 이것은 인젝터 내에서 연료유가 받는 저항이 작을수록 분출 시간도 빠르게 되므로 연료유의 점도와 비중이 작은 연료유가 먼

저 분출되기 때문이다.

작동유의 물성을 고려하여 분열 길이와 분열 시간을 나타내면 다음과 같이 표시된다.

$$l_b = \alpha(\rho_l / \rho_a)^{1/2} d_0 \quad (1)$$

$$t_b = \frac{\alpha \rho_l d_0}{(2\beta^2 \rho_a \Delta P)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 α 와 β 는 실험에서 주어지는 상수이고, d_0 는 인젝터의 오리피스 지름이다.

분사 초기의 제트 속도는 유체에 따라 6.2 ~ 9.2m/s, 초기 분열 길이는 12 ~ 16mm, 그리고 이 때의 분열 시간은 1.995ms로 예측되었다. 식 (1)과 (2)의 상수는 Hiroyasu의 연구에서는 α 와 β 가 각각 15.8과 0.39였으나, 본 연구에서는 13.141과 0.2539로 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

분무 선단의 도달 거리는 식 (3)와 같이 표시되며, ϕ 는 $S=l_b$ 와 $t=t_b$ 의 조건으로부터 구해지는 계수로 식 (4)과 같이 되는데, 본 연구에서는 상수 ϕ 가 0.2728로 계산되었다.

$$S = \phi t^{0.5} \quad (3)$$

$$\phi = 2^{1/4} (\alpha \beta d_0)^{1/2} (\Delta P / \rho_a)^{1/4} \quad (4)$$

이것을 시간의 함수로 나타내면 Fig.5와 같다

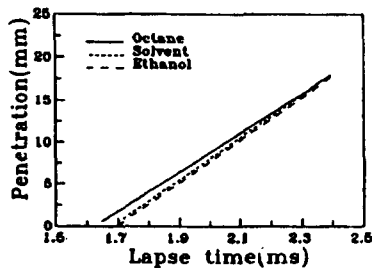


Fig. 4 Spray penetration with the lapse of injection time

3.1.2 평균 입경과 분무각

Fig.6에서 보는 바와 같이 솔벤트 분무의 SMD

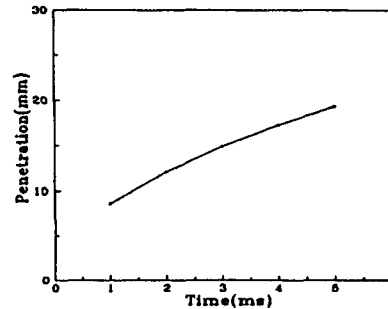


Fig.5 Spray tip penetration

는 다소 불규칙한 경향은 있으나, 분무 길이 50mm 이전에는 분무 중심부의 액적 크기가 분무선 쪽보다 작은 크기를 가지며, 그 이후에는 분무 중심선 근처의 액적 크기가 분무선 근처보다 더 크게 나타났다. Fig.7은 옥탄 분무의 SMD 분포로 분무 길이 방향으로 50mm까지는 전반적으로 작아지다가 그 이후에 다시 커지는 경향을 나타냈다. 분무 길이 전반에 걸쳐 솔벤트의 분무보다 비중과 표면장력이 상대적으로 작은 옥탄의 분무가 더 작은 크기의 액적을 고른 분포로 갖는다. 실제로 가솔린 기관에서 저온 시동시보다 충분히 예열된 경우에 기관 출력이 더 높게 나타나는 것은 기관에서 발생된 열의 일부가 연료 공급계에 전열되어 연료의 비중과 점도를 저하시키므로써 미립화 향상 효과와 증발촉진 기능이 부여되는 영향도 있기 때문인 것으로 여겨진다.

한편, 옥탄과 솔벤트의 경우 3.5ms까지는 시간의 경과에 따라 분무의 퍼짐이 증가하다 3.5ms 이후에 약간의 과도기를 거쳐 충분히 발달된 구조로 거의 일정한 분무각을 유지한다. 분사후 2.5ms와 3.0ms에서 옥탄은 13.04°와 19.60°, 솔벤트는 6.64°와 18.52°의 값을 각각 보였다. 그러나 상대적으로 비중과 점도가 큰 액탄유는 분무선 근처에서 난동이 심하고 분무축 전반에 걸쳐 액주상의 제트 형상을 가지므로 분무각을 측정할 수 없었다.

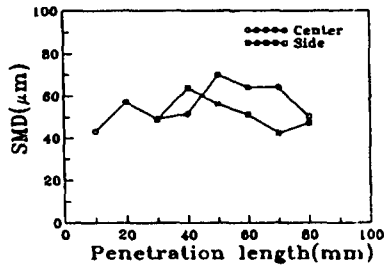


Fig. 6 Droplet size distribution of solvent spray

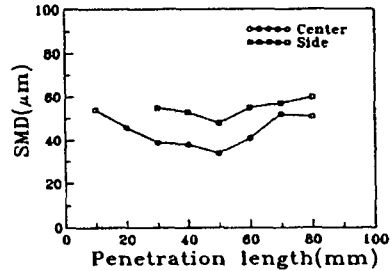


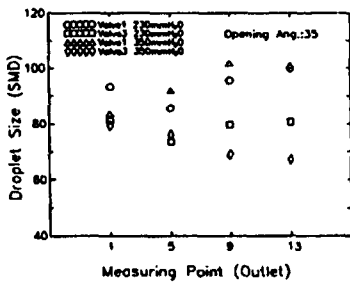
Fig. 7 Droplet size distribution of octane spray

3.2 다공 밸브에 의한 2차 미립화 특성

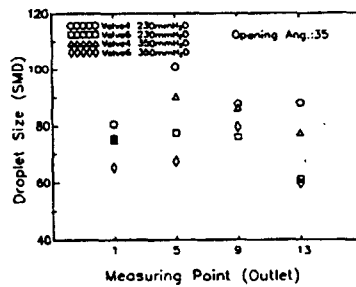
3.2.1 밸브 손실 계수와 미립도

밸브 손실 계수는 밸브 개도가 작을수록 증가하고, 개폐비가 클수록 큰 값을 나타내었다. 또한 같은 개폐비에 대해서도 무공 스토폴 밸브의 경우가 다공 스토폴 밸브인 경우보다 더 큰 손실 계수를 갖는다. 그러나 동일한 밸

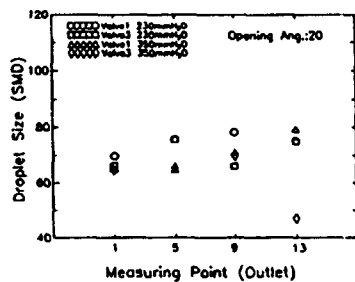
브에 대하여는 유량이 손실 계수의 변화에 그다지 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이것은 다공 밸브가 손실 저항을 줄이며 혼합기의 유량 조절에 이용될 수 있음을 의미하며, 이와 같은 결과는 Eom의 연구 결과와 잘 일치하고 있다. 한편, 밸브 개도각이 큰 경우에는 Re 수의 영향을 그다지 받지 않으나, 밸브 개도각이 30° 이내로 비교적 작은 경우에는 Re 수의 증가에 따라 손실 계수가 감소되는 경향



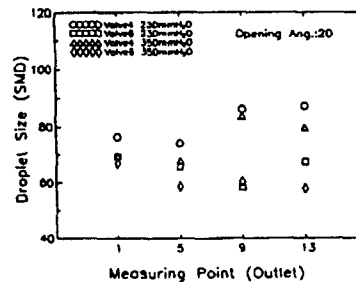
(a) BR = 94.2%, 35° open



(c) BR = 88.0%, 35° open



(b) BR = 94.2%, 20° open



(d) BR = 88.0%, 20° open

Fig. 8 Comparison of SMD at the outlet side (Point 1, 3, 9, 13)

을 보였다. 이것은 관 내에 설치된 밸브에 의한 압축성 효과에 기인하기 때문인 것으로 생각되며, 유동장 특성을 해석하는데 중요한 의미를 갖는다.

다공 스토폴 밸브에 의한 미립화 특성을 알아보기 위하여 먼저 관찰창 내의 측정 위치별 액적 크기를 측정한 결과 유량과 차압이 클수록, 그리고 밸브 개도가 작을수록 미립화가 비교적 잘 이루어지고 있으며, 무공 스토폴 밸브의 경우보다 다공 스토폴 밸브의 경우에 약 10 μm 정도 더 작은 크기의 액적을 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 공기실의 출구측 영역에서 뚜렷이 나타났으며, Fig.8에 도시한 바와 같이 차폐율과 공극율이 클수록 두드러지는 경향을 보였다.

다공 스토폴 밸브의 무화 촉진 기능은 밸브 주위를 통과하는 공기 유속과 밸브에 뚫어진 구멍을 관통하는 유속의 차로 생긴 전단력이 입자를 더 작게 분열시키는 결과이거나, 또는 무공 스토폴 밸브의 경우에는 밸브면에 도포된 연료가 지속적으로 정체되어 있으나 다공 스토폴 밸브의 경우에는 이 연료가 구멍을 관통하는 공기에 편승하여 분열되므로써 더 작은 크기의 액적을 생성시킬 수 있는 것으로 사료된다⁽⁸⁾.

3.2.2 액적 분포

공기실 내의 각 관찰점에서 포집한 액적수를 합산하여 나타내면 Fig.9와 같다. 일반적으로 같은 유량에 대하여 무공 밸브의 경우보다도 다공 경우에 2배 가량 더 많은 액적수를 얻을 수 있었다. 이와 같은 분포는 밸브 후류측(2,3,4,6,7,10)과 우측 하단(8,14,16)에서 두드러지게 나타났으며, 밸브 개도가 바뀌어도 유사한 경향을 갖는 것으로 나타났다.

특히 공기실 입구측(1,2,3,4)과 출구측(1,5,9,13)에 대하여 비교해 보면 다공 스토폴

밸브를 사용한 경우 출구측은 큰 변화가 없거나 약간 감소한 반면에 입구측은 상당수 증가하였다. 이것은 다공 구멍을 통과하는 공기 유량과 더불어 액적의 수가 증가하면서 전체 유동에 대하여 균질한 혼합기를 형성할 수 있음을 시사한다. 액적수 밀도는 무공 밸브의 경우, 액적들이 공기실 출구측(1,5,9,13)에서 주로 관찰되고, 그 외의 측정점에서는 액적이 존재하지 않거나 있더라도 데이터로 처리할 만큼 충분하지 않았다. 그러나 다공 밸브의 경우에는 밸브 후류측 전반에 걸쳐 액적이 상당수 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 관벽에 부착되었던 액막이 밸브에 가공된 구멍으로부터 분출되는 공기 제트의 영향으로 탈착, 분열되므로써 2차 무화를 일으키고, 밸브 후류에 형성되는 재순환 영역이 줄어들어는 만큼 혼합 구역이 넓어져서 혼합이 촉진되며, 벽면 부착 유량의 감소로 비행 연료 입자와 연료 증기의 전달 비중이 증가하였기 때문인 것으로 생각된다.

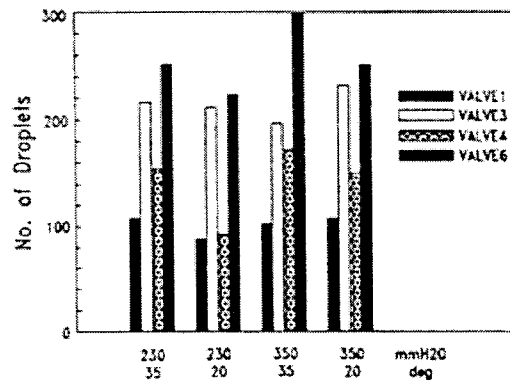


Fig.9 Comparison of total droplet number

4. 결 론

(1) 인젝터에 의한 자유 분무에 대하여, 연료 제트의 초기 분열 길이는 비중이 작은 옥탄이 상대적으로 큰 비중을 갖는 솔벤트보다

짧게 나타나고, 옥탄 분무의 평균 입경(SMD)은 솔벤트의 경우보다 $10\mu\text{m}$ 이상 더 작은 크기로 나타났다. 그러나, 시험연료중 가장 밀도와 점도가 큰 에탄올은 액적으로 분열이 거의 일어나지 않고 액주상의 형태로 발달하였다.

(2) 다공 밸브는 밸브 손실 계수가 줄이면서 유량 조절용으로 이용이 가능하며, 다공 밸브에 의한 2차 미립화 효과는 개폐비와 구멍비, 밸브 개도, 공기 유량 등에 따라 크게 영향을 받는다. 같은 조건에서 다공 밸브는 특히 출구측에서 비교적 더 작은 크기의 액적을 발생시키고, 구멍비와 개폐비가 큰 것일수록 더 미립화가 잘 되는 것으로 나타났다.

(3) 무공 밸브의 경우, 액적의 분포가 공기실의 출구측에 편중되어 나타나나, 다공 밸브의 경우에는 벽면 부착 유량을 탈착, 재분열시키는 효과가 있고, 공기 제트에 의해 밸브 후류에서 형성되는 활발한 와류가 유동공기와 분무 액적의 혼합을 촉진시키므로 비교적 개선된 분포를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Harada K., Shimizu R., Kurita K., Muramatsu M., Makimura T., and Ohashi M., "Development of Air-Assisted Injector System". SAE920294, 1992.
2. Namiyama K., Nakamura H., Kokubo K., and Hosokai D., "Development of Ultrasonic Atomizer and its Applications to S.I. Engines", SAE890430, 1989.
3. Noki T., Ohyama Y., and Fujieda M., "Study on the Intermittent Impinging Atomization of Fuel Injector for Gasoline Engine", JSME Trans., Vol.58, No.552, pp.2607-2611, 1992.
4. Tindal M., Williams T., and Aldoory M., "The Effect of Inlet Port Design on Cylinder Gas Motion in Direct Injection Diesel Engines", Flows in I.C. Engines, pp.101-111, ASME, 1982.
5. Kent J., Mikulec A., Rimai L., Adamczyk A., and Mueller S., "Observations on the Effects of Intake-Generated Swirl and Tumble on Combustion Duration" SAE892096, 1989.
6. Eom K., "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller", ASME Trans., Journal of Fluids Engineering, Vol.110, pp.16-19, March, 1988.
7. 이창식, 조병욱, 임경수, "가솔린 기관용 인젝터의 분무 구조에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제1호, p. 126, 1995.
8. 이창식, 이기형, 조병욱, 서영호, "연료 분사 장치의 혼합기 형성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제11호, pp. 2690-2698, 1995.