

〈論 文〉

연료분사장치의 혼합기 형성에 관한 연구

이창식* · 이기형* · 조병옥** · 서영호**

(1995년 4월 11일 접수)

A Study on the Mixture Formation in a Fuel Injection System

C. S. Lee, K. H. Lee, B. O. Cho and Y. H. Seo

Key Words : Valve Loss Coefficient(밸브 손실계수), Droplet Number Density(액적수 밀도), SMD(Sauter Mean Diameter), Image Processing(화상처리)

Abstract

Fuel atomization and mixture formation in an gasoline engine has influence on the engine performance and pollutant emission. The throttle valve installed in an intake system plays a greater role in control of mixture quantity in accordance with engine drive condition. In this study, the characteristics of secondary atomization developed at the downstream of the valves were observed using an image processing method. Two major kinds of valves, solid and perforated ones, are chosen in order to compare the valve performance with the experimental parameters of air flow rate, valve opening angle, and valve shapes. For the perforated valve, we can obtain the relatively small sized droplets, and nearly uniformed and dense distributed sprays with low loss coefficient than for the solid valve.

1. 서 론

연료분사식 가솔린기관에서 연료의 분무액적과 흡입공기와의 혼합과정 및 연료입자의 무화과정은 실린더내로 흡입되는 혼합기의 연소성능과 밀접한 연관성을 가지고 있으며, 이것은 기관의 출력과 유해가스의 배출에 지배적인 영향을 미친다. 연료의 미립화를 촉진시키고 무화를 개선시키기 위하여 기존의 연료분사장치에 대하여 공기 보조식분사기(air-assisted injector), 초음파분무기(ultrasonic atomizer) 등의 장치를 부착하거나, 인젝터 자체에 대하여도 다공식, 가열노즐식, 충돌무화식 등의 분사장치가 적용되는 등 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이들 연료분사기들은 분무각, 관

통거리, 무화정도 등으로 그 특성을 대표할 수 있는데, 실제 기관에서의 부착위치, 분사압력, 흡기관관의 구조 및 흡입밸브의 개폐시기 등에 따라서 각각의 특성이 달라지고 있다.

또한 연료와 공기의 균일한 혼합을 위한 연구중 대표적인 것으로는 나선형 흡기포트에 의하여 스웰을 촉진시키는 방법, 흡입밸브 형상의 변화에 의한 방법 등이 있으며, 그 외에도 실린더내의 유동의 영향을 고려하여 텀블, 스퀴시 등을 이용하는 연구도 많이 수행되고 있다.^(4,5) Eom⁽⁶⁾은 공조의 유량 조절용 버티플라이 밸브를 다공성으로 제작함으로써 덕트내 유동의 차압손실을 감소시키면서 유량조절이 가능함을 실험을 통하여 확인하였다. 한편 이러한 연구들에 의한 연료의 무화촉진 및 균일 혼합기 형성의 효과를 확인하기 위하여는 기존의 기관 성능 해석으로는 한계가 있으므로, 실제로 연료분사기의 분무거동, 흡기관 및 실린더 내의 유동, 나

*정회원, 한양대학교 기계공학과

**한양대학교 대학원 기계공학과

아가서는 연소과정을 직접 측정하는 기술도 필수적으로 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 스톱 보드에 상당하는 원관형 덕트 내에 핀틀형 인젝터를 설치하고, 그 후류에 유량조절용 버터플라이 밸브를 부착, 이를 통과하는 공기 및 연료액적 무화정도와 혼합기 형성거동을 실험적으로 관찰하였다. 그리고 실험에서 사용된 무공밸브(solid valve)와 미세한 구멍이 가공된 다공 밸브(perforated valve)가 그 후류에서 연료 입자의 무화와 균일 혼합기 형성에 미치는 영향을 비교하였다.

우선 원관 내에 여러가지 종류의 밸브를 장착하고, 그 밸브를 통과하는 일정 유량에 대한 밸브 전후의 차압을 측정하여 밸브손실계수를 계산하였다. 가솔린 기관용 인젝터를 이용하는 연료분사장치를 구성하고 원관에 스톱 밸브에 상당하는 다공 밸브를 장착한 후, 밸브직후의 공기실(plenum chamber) 내에서의 연료입자의 분무거동을 방전 광원과 CCD 카메라 및 화상취득장치(image grabber) 등으로 구성된 입자측정 분석장치를 사용하여 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 다공 밸브의 제작

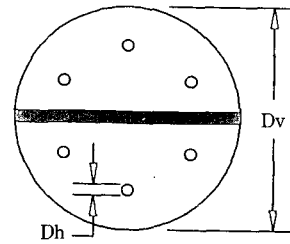
본 연구에서는 다공 밸브를 설치하였을 경우 밸브 전후의 압력손실과 분사된 연료입자의 미립화 정도 및 혼합특성을 확인하기 위하여 두께 2mm의 알루미늄 판재로 Fig. 1과 같은 여러가지 형상의 밸브를 제작하였다. 여기서 개폐비(blockage ratio, BR)는 덕트 유로의 단면적(A_d)에 대한 스톱 밸브의 면적(A_v)의 비(A_v/A_d)이고, 구멍비(perforated ratio, PR)는 스톱 밸브의 면적(A_v)에 대한 다공 구멍의 면적(A_p)의 비(A_p/A_d)를 나타낸다.

2.2 연료분무 및 유동장치

액적의 미립화 특성을 나타내는 지표로서 액적 크기를 Sauter 평균 입경(SMD)으로 나타내면 다음 식으로 표시된다.

$$SMD = \frac{\sum x_i^3 \Delta n_i}{\sum x_i^2 \Delta n_i} \quad (1)$$

여기서, x_i 는 평균화하기 전의 액적지름, Δn_i 는



	Dv (mm)	Dh (mm)	BR (%)	PR (%)
Valve 1	33.0	-	94.2	-
Valve 2	33.0	1.3	94.2	0.93
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

Fig. 1 Valve geometry and dimension

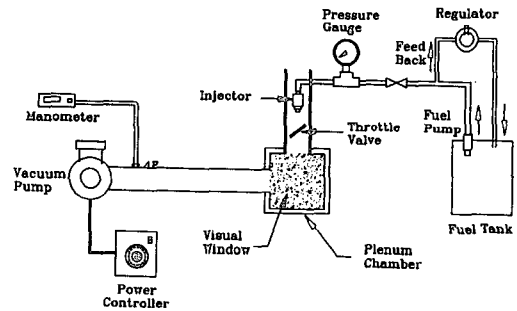


Fig. 2 Configurations of injection and air flow system

액적의 입자수이다.

또한 SMD의 크기를 갖는 입자수를 n_{32} 라 하면

$$n_{32} = \frac{(\sum x_i^2 \Delta n_i)^2}{(\sum x_i^3 \Delta n_i)^2} \quad (2)$$

로 표시된다.

한편 스톱밸브에 따른 밸브손실계수 K_v 는 다음 식으로 표시된다.

$$K_v = \frac{2\Delta P}{\rho_a v^2} \quad (3)$$

여기서, ΔP 는 밸브 전후의 압력차, ρ_a 는 공기의 밀도, v 는 관내의 평균 유속이다.

스톱밸브 후류에서의 분무특성, 즉 분무액적의 입자크기(SMD) 및 분포를 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 연료 펌프에서

인젝터로 공급되는 연료는 압력조정기에 의해 일정한 압력(3.8bar)으로 유지되고, 이 때의 분무특정용 연료는 비중과 점도가 각각 0.772, $1.21 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 인 드라이 솔벤트 2호유를 사용하였다. 또한 흡기관 부압에 상응하는 공기유량을 진공펌프를 이용하여 흡입하였으며 디지털 마노미터를 사용하여 그 압력을 확인하였다. 인젝터의 분사유량은 240 cc/min이며, 분사시간은 8 ms로 일정하게 유지시켰다.

공기실은 5 cm×6 cm×12 cm의 아크릴 판으로 제작하고, 광원측과 카메라측의 관찰창은 Pyrex 재료를 사용하였다. 관찰창의 위치를 선별적으로 포착하기 위하여 2축 이송장치를 사용하였다.

2.3 광계측장치

Fig. 3은 분무머림의 입자지름 및 액적수를 측정하기 위한 광계측장치의 개략적인 구성도이다. 분무측정장치는 V-TEK사의 PMAS MX-II 기종을 사용하였고, C-마운트식의 105 mm 렌즈를 장착한 CCD 카메라의 관찰영역은 4.5 mm×4.5 mm이며 관찰깊이는 2 mm로 하였다.

우선 실제 입자의 크기와 CCD에서 관측한 이미지상의 입자크기를 동일화시키기 위하여 사용한 렌즈와 초점거리에 대한 확대비를 계산하고, 심도 수정을 위한 보정데이터를 구하여 10~200 μm 이내의 입경을 측정가능토록 하였다. 데이터 취득은 1개 측정위치에 대하여 액적이 많은 지점을 기준으로 1000개 정도의 액적수가 누적될 때까지 포착하여 SMD의 오차를 최소화 하도록 하였다.

화상해석을 위한 조건으로 경계처리계수(thresholding factor)와 확대계수(magnification factor)는 0.9로 하고, 보정계수를 0.5로 하였다. 측정점의 촬영조건은 일정한 시간대의 값을 비교하기 위하

여, 분사개시로부터 8 ms 지연 후 광원이 방전됨과 동시에 CCD 카메라에 맺혀진 실시간의 화상 정보(image)가 프레임 그라버를 통해 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

2.4 실험방법과 조건

실험은 크게 원관내의 차압을 측정하기 위한 장치와 분무특성 관찰을 위한 장치로 구분하여 시행하였다.

스스로틀 밸브(무공, 다공 밸브) 전후의 압력손실을 측정하기 위한 실험으로는 개폐비(BR) 및 구멍비(PR)가 서로 다른 6가지 종류의 밸브에 대하여, 유량을 100~600 l/min 범위 내에서 일정한 간격으로 조절하면서, 원관의 내경 D=34 mm에 대하여 수력구배가 밸브에 의하여 영향을 받지 않게 하기 위하여 유동방향의 전방 2D, 후방 4D 지점에서의 차압을 디지털마노미터로 측정하였으며⁶⁾, 이 때의 밸브개도는 0~90°사이를 10°간격으로 변화시켰다.

한편 관내의 평균유속은 덕트 입구에 층류 유량계를 설치하여 체적유량을 구하고, 이것으로부터 유속을 계산하였다.

인젝터의 분무에 대한 밸브의 영향을 확인하기 위한 실험에서는 BR 및 PR이 서로 다른 4가지 종류의 밸브에 대하여, 개도를 20°및 35°두 가지로 변화시키면서 관찰창 내의 측정점에서의 입경 분포를 관찰하였다. 또한 이 때의 흡입 부압은 진공 펌프 입구의 절대압력을 230, 350 mmH₂O 두 가지로 변화시켜 보았다.

Fig. 4은 관찰창 내의 측정점들의 위치이다. 인접한 관찰점 사이의 간격은 가로 세로 공히 10 mm로 일정하게 설정하였다. 관찰 평면은 공기실 내의 좌우대칭이 되는 중심위치로 하였으며 이는 유동입

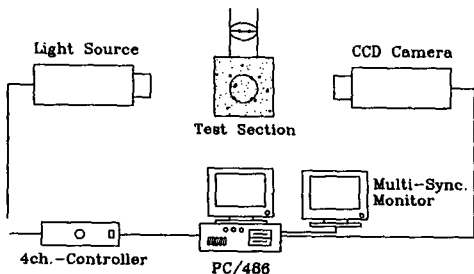


Fig. 3 Schematic diagram of optical measurement system

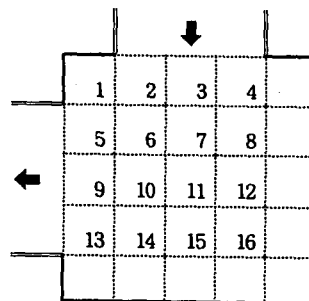


Fig. 4 Measuring points of test section

출구의 중심과도 일치한다. 공기실 출구 쪽의 조건은 기관 연소실의 입구 조건에 밀접한 영향을 주므로 밸브 후류(1, 2, 3, 4)와 공기실 출구(1, 5, 9, 13)를 중점적으로 관찰하고, 다공 밸브의 경우에는 공기실 우측 하단(8, 14, 16)까지도 관찰 위치로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 밸브의 손실계수

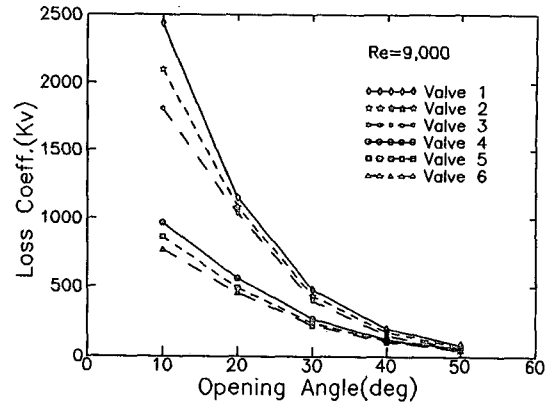
6가지 종류의 밸브에 대하여 스톱클레드도에 따른 밸브손실계수를 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

밸브손실계수는 밸브개도가 작을수록 증가하고, 개폐비가 클수록 큰 값을 나타내었다. 또한 같은 개폐비에 대해서도 무공 스톱클레드 밸브의 경우가 다공 스톱클레드 밸브인 경우보다 더 큰 손실계수를 갖는다. 그러나 동일한 밸브에 대하여는 유량이 손실계수의 변화에 그다지 큰 영향을 주지않는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 문헌⁽⁶⁾의 결과와 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 한편 밸브 열림각이 큰 경우에는 Re수의 영향을 그다지 받지 않으나, 밸브 열림각이 30°이내로 비교적 작은 경우에는 Re수의 증가에 따라 손실계수가 감소되는 경향을 보였다. 이것은 관 내에 설치된 밸브에 의한 압축성 효과에 기인하기 때문이며, 유동장 특성을 해석하는데 중요한 의미를 갖는다.

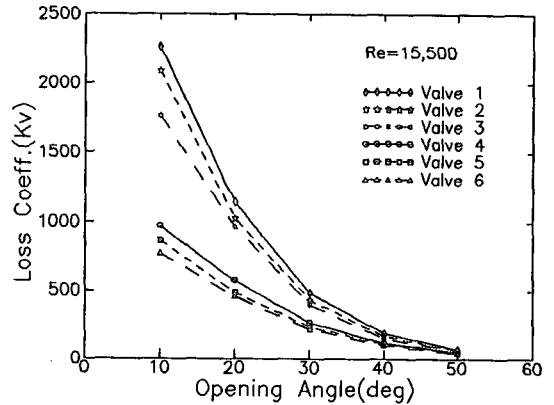
3.2 액적의 미립화

관찰창 내의 측정위치별 액적크기를 관측한 결과 유량(차압)이 클수록, 그리고 밸브개도가 작을수록 미립화가 비교적 잘 이루어지고 있으며, 무공 스톱클레드 밸브의 경우보다 다공 스톱클레드 밸브의 경우에서 약 10 μm정도 작은 크기의 액적 분포를 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 공기실의 출구측 영역에서 뚜렷이 나타났으며, 특히 BR이 클수록 현저한 경향을 보였다. Fig. 6은 이들 결과를 도시한 것이다.

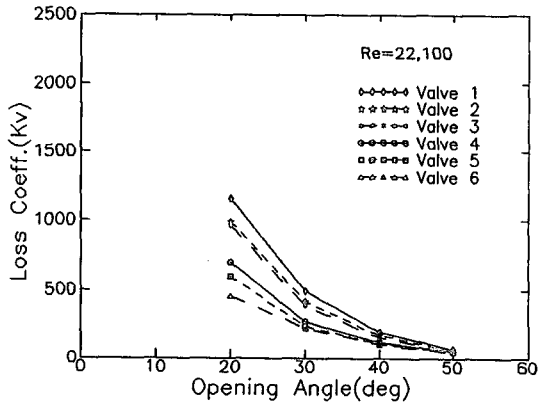
무공 스톱클레드 밸브의 경우, 액적의 분포는 공기실 출구측(1, 5, 9, 13)에서 주로 관찰되고, 그 외의 측정점에서는 액적이 존재하지 않거나 있더라도 데이터로 처리할 수 있을 만큼 충분하지 않았다. 그러나 다공 스톱클레드 밸브의 경우에는 밸브 후류측 전반에 걸쳐 액적이 상당수 존재하는 것으로 나타났



(a) Re=9,000



(b) Re=15,500



(c) Re=22,100

Fig. 5 Variations of loss coefficient vs. valve opening angle

다. 이러한 현상은 관벽에 부착되었던 액막이 밸브의 여러 개의 구멍으로부터 분출되는 공기제트의 영향으로 탈착하면서 분열되어 2차적인 무화를 일

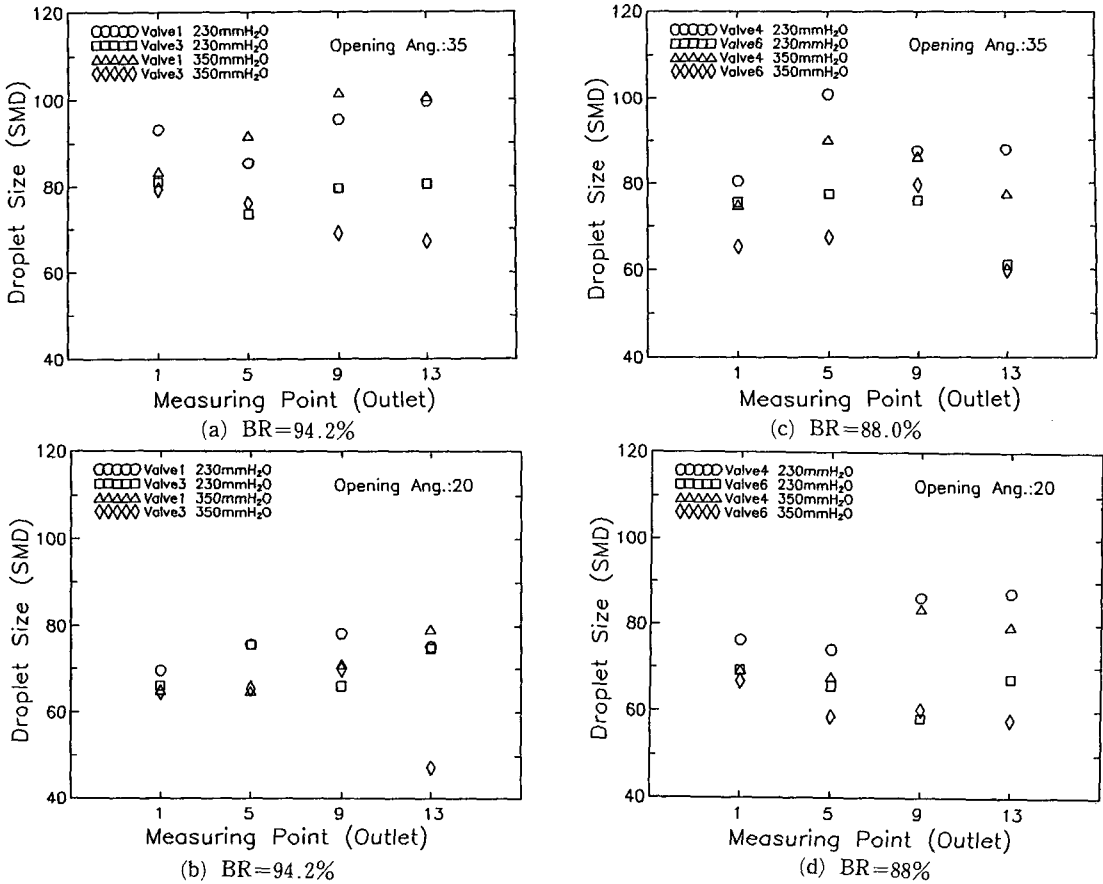


Fig. 6 Comparison of SMD at the outlet side (Point 1, 5, 9 and 13)

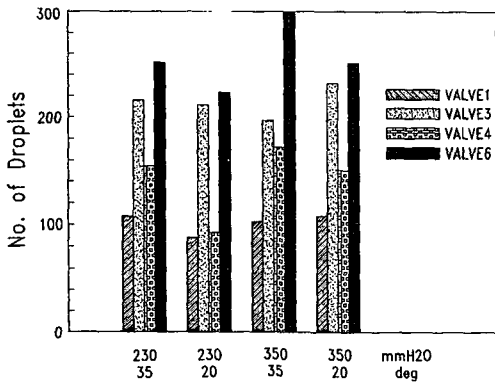


Fig. 7 Comparison of total droplet number

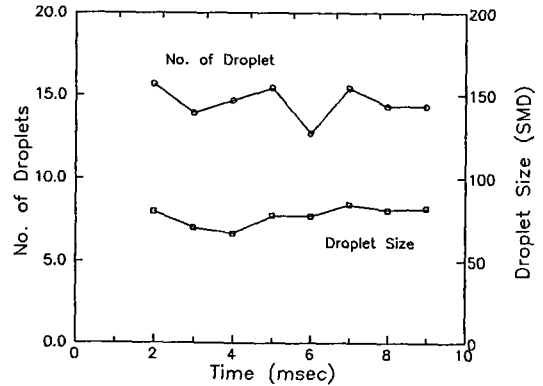


Fig. 8 Variations of droplet number and size vs. time at point 11

오키고, 밸브 개구부와 구멍에서의 서로 다른 유속에 기인하는 복잡한 와류가 형성되어 혼합과정이 촉진되기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 액적의 분포

풍기실 내에 입자가 관찰되는 점(Fig. 4의 1, 2,

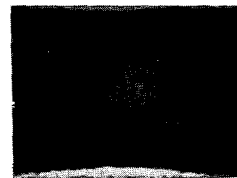


Fig. 9 Monitor view of calibration reticle

Table 1 Distributions of droplet number density

30.9	-	-	2.7	25.3	19.4	28.1	30.6
24.2	-	-		22.9	17.0	20.9	22.9
24.2	4.6			15.3	10.0		
21.2				17.1	19.0		29.9
Valve 1	35°	230mmH ₂ O		Valve 3	35°	230mmH ₂ O	
39.6	-	-	2.0	23.3	16.7	28.1	27.4
22.8	2.0	-		27.9	11.1	20.8	19.8
15.9	3.8			14.0	7.4		
19.1				19.8	10.6		20.8
Valve 1	35°	350mmH ₂ O		Valve 3	35°	350mmH ₂ O	
25.6	2.2	-	-	28.1	21.0	58.8	51.6
13.4	15.3	-		5.1	4.0	30.0	22.6
9.7	11.9			4.6	6.5		
10.6				1.8	2.7		20.7
Valve 1	20°	230mmH ₂ O		Valve 3	20°	230mmH ₂ O	
28.5	2.4	-	-	25.0	14.9	67.7	53.6
24.9	6.6	-		9.3	8.3	40.5	25.1
17.3	10.0			5.0	5.7		
18.1				2.0	3.3		19.5
Valve 1	20°	350mmH ₂ O		Valve 3	20°	350mmH ₂ O	
59.5	3.6	-	1.8	61.0	16.7	33.0	26.0
24.0	10.9	3.3		35.9	21.0	21.0	
23.0	12.6			26.6	11.0		
15.9				11.0			8.9
Valve 4	35°	230mmH ₂ O		Valve 6	35°	230mmH ₂ O	
59.4	2.8	1.0	1.4	74.6	15.9	26.2	27.1
31.4	14.4	3.8		50.5	15.8	27.2	
29.2	13.3			25.1	23.0		
15.6				14.5			8.1
Valve 4	35°	350mmH ₂ O		Valve 6	35°	350mmH ₂ O	
20.6	1.5	-	1.8	26.5	10.9	40.8	45.6
23.3	13.3	1.4		18.0	11.7	38.6	
8.5	19.1			18.1	6.1		
5.3				7.4			10.1
Valve 4	20°	230mmH ₂ O		Valve 6	20°	230mmH ₂ O	
37.8	5.3	-	3.8	31.1	15.1	45.0	43.4
31.4	23.8	-		27.0	12.2	35.7	
18.4	21.8			23.0	10.0		
8.3				9.0			5.6
Valve 4	20°	350mmH ₂ O		Valve 6	20°	350mmH ₂ O	

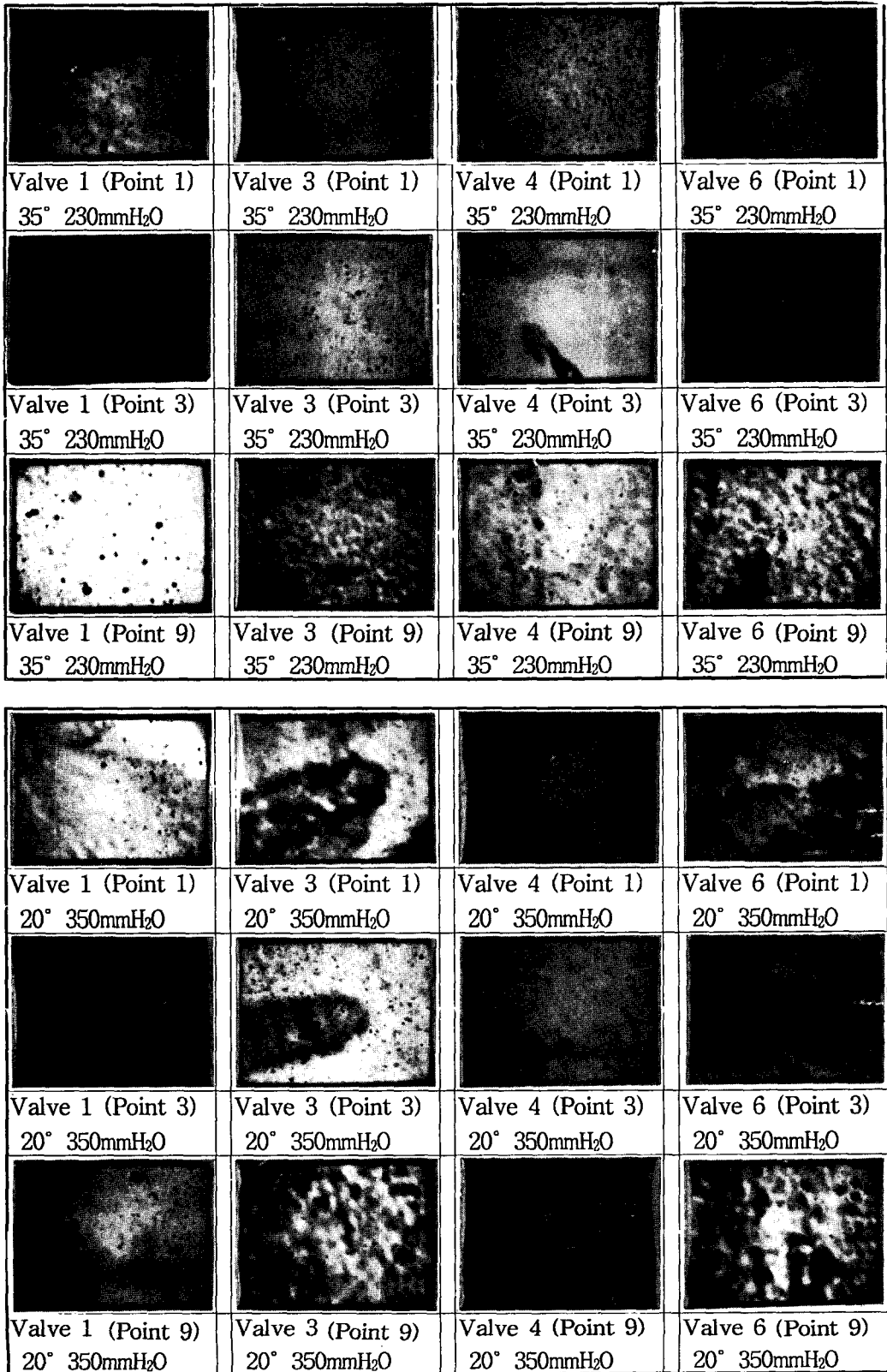


Fig. 10 Monitor view of droplet distribution

3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 13)에서 포집한 액적수를 합산하여 나타내면 Fig. 7과 같다. 또한 Table 1은 관찰창 내의 각각의 측정점에 대한 평균 액적수 밀도를 위치별로 기록한 것이다. 일반적으로 같은 유량에 대하여 무공 스토틀 밸브의 경우보다도 다공 스토틀 밸브의 경우가 2배 가량 더 많은 액적수를 얻을 수 있었다. 이와 같은 분포는 밸브 후류측(2, 3, 4, 6, 7, 10)과 우측 하단(8, 14, 16점)에서 두드러지게 나타났으며 밸브개도가 바뀌어도 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히 유동의 입구측(1, 2, 3, 4)과 출구측(1, 5, 9, 13)에 대하여 비교해 보면 다공 스토틀 밸브를 사용한 경우 출구측은 별로 변화가 없거나 약간 감소한 반면 입구측은 상당수 증가하였음을 알 수 있다. 이것은 다공 구멍을 통과하는 공기유량과 더불어 액적의 수가 증가하면서 전체 유동에 대하여 균일한 혼합기를 형성할 수 있음을 시사한다.

한편 다공 스토틀 밸브를 사용한 경우에 나타나는 액적수 밀도의 증가는 공기실내의 2차 유동과는 관계가 적은 것으로 판단되었다. 실제로 이 경우의 액적수 밀도의 증가에 대하여 분무개시후 측정시간에 따른 관찰영역내의 입자수의 변화를 확인하기 위하여, 인젝터 구동기간(8 ms)동안 분무 개시후 2 ms부터 9 ms까지 1 ms간격으로 관찰 영역의 중심부에 해당하는 점 11의 액적수 밀도를 측정된 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 각 시간대에 따른 액적수 밀도의 변화는 10% 이내로 거의 일정한 분포를 보이고 있다. 이것은 분무와 더불어 공기실내로 유입된 액적군이 시간이 경과하더라도 공기실의 재순환 유동장 내에 누적됨이 없이 출구측으로 유출됨을 의미한다. 따라서 상부측에서 유입한 액적은 연속적으로 출구측으로 유출되어 분무 연료의 시간지연에 따른 A/F의 변화요인이 없으며 아울러 관찰창 전영역에서의 총 액적수의 증가는 앞에서 설명한 베틀 액막에 대한 2차 무화와 균일 혼합기 형성에 기인하는 것으로 추정된다.

Fig. 9는 광학장치로부터 얻은 화상내에 존재하는 액적의 크기를 보정하기 위한 레티클(reticle)이다. 원판의 크기는 10 μm 부터 200 μm 까지의 다양한 크기를 가지며, 이것은 동일한 배율로 촬영된 액적의 크기를 계산하는 기준이 된다.

Fig. 10은 각 측정점에서 조건에 따른 분무 액적의 크기와 분포도를 얻기위한 원시 화상(raw image)을 모니터로 부터 직접촬영한 것이다. 사진

에서와 같이 개략적인 액적분포와 거동을 비교할 수 있다.

5. 결 론

스토틀 밸브 전방에서 인젝터로부터 분사된 연료 액적이 밸브에 충돌된 후의 후류에서의 거동을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개폐비가 클수록, 밸브개도가 작아질수록 밸브 전후의 차압이 크므로 밸브손실계수도 증가되었다. 그러나 다공 밸브를 사용하는 경우, 밸브손실계수가 감소하여 다공 밸브의 구멍의 크기와 수, 밸브형상 등에 따라 밸브손실계수를 저하시키면서 유량 조절이 가능하다.

(2) 액적의 크기는 밸브개도, 공기유량, 밸브 개폐비와 구멍비, 공기실의 측정위치에 따라 크게 영향을 받는다. 같은 조건에서 구멍이 있는 밸브가 특히 출구영역에서 비교적 더 작은 크기의 액적을 발생시키고, 개폐비가 큰 경우에서 더 작은 크기의 액적을 얻을 수 있었다.

(3) 액적의 분포는 무공 밸브의 경우에는 공기실의 출구측에 편중되어 나타나나, 다공 밸브의 경우에는 구멍으로부터의 공기제트가 밸브 후류에서 활발한 와류를 형성하여, 유동공기와 연료의 분무 액적의 혼합이 촉진되므로 비교적 개선된 분포를 나타내었다.

이와 같은 결과로부터 다공 밸브가 적은 압력손실로서 잘 미립화된 액적을 얻을 수 있고, 또한 균일 혼합기 형성을 증진시킬 수 있는 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 연구비 지원의 일부로 이루어진 것으로서 연구를 지원하여 주신 관계 제위에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Harada, K., Shimizu, R., Kurita, K., Muramatsu, M., Makimura, T. and Ohashi, M., 1992, "Development of Air-Assisted Injector System," SAE 920294.
- (2) Namiyama, K., Nakamura, H., Kokubo, K

- and Hosokai, D., 1989, "Development of Ultrasonic Atomizer and its Applications to S. I. Engines," *SAE 890430*.
- (3) Noki, T., Ohyama, Y. and Fujieda, M., 1992, "Study on the Intermittent Impinging Atomization of Fuel Injector for Gasoline Engine," *JSME Trans.*, Vol. 58, No. 552, pp. 2607~2611.
- (4) Tindal, M. J. Williams, T. J. and Aldoory, M., 1982, "The Effect of Inlet Port Design on Cylinder Gas Motion in Direct Injection Diesel Engines," *Flows in I. C. Engines ASME*, pp. 101~111.
- (5) Kent, J. C., Mikulec, A., Rimai, L., A. Adamczyk, A. and Mueller S. R., 1989, "Observations on the Effects of Intake-Generated Swirl and Tumble on Combustion Duration," *SAE 892096*.
- (6) Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," *ASME Trans., Journal of Fluids Engineering*, March, Vol. 110, pp. 16~19.