

<논문> SAE NO. 953711

가솔린 기관용 인젝터의 분무 구조에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Spray Structure of a Gasoline Engine Injector

조 병 옥,* 이 창 식,** 임 경 수***
B. O. Cho, C. S. Lee, K. S. Im

ABSTRACT

Fuel spray in a gasoline engine is a significant factor for the decision of engine power, pollutant emission and the design of intake manifold system. Three kinds of fuel which has other physical properties are chosen in this study, and it is observed using an image processing method that the mechanism and structure of free fuel spray with a throttle type gasoline injector, and the detailed characteristics of droplet size and velocity distributions are obtained by macro and micro-scopic measuring method respectively.

It is verified that the initial breakup behaviors are depended on We like the result of Reitz's study, and also observed that the spray of octane and solvent with Re of 210~330 and 270~330 respectively are better than ethanol which has relatively high density and viscosity.

주요기술용어 : Breakup(분열), Spray Penetration(분무 관통도), Spray Angle(분무각), SMD(Sauter 평균 입경), Droplet Velocity(액적 속도), Image Processing Method(화상처리법)

기 호 설 명

D : Sauter mean diameter(D_{32} , m)
 d_0 : Nozzle diameter(m)
 Re : Reynolds number
 V_r : Relative mean velocity(m/s)
 We : Weber number
 ΔP : Pressure difference(Pa)
 θ : Spray angle(deg.)
 μ : Viscosity(Pa S)

ν : Kinetic viscosity(m^2/s)
 ρ : Density(kg/m^3)

 a : Air
 cr : Critical condition
 D : Droplet
 f : Fuel
 l : Liquid

<첨 자>

* 정회원, 한양대학교 대학원
** 정회원, 한양대학교 기계공학과
*** (주)브이텍 광계측 기술연구소

1. 서 론

연료 분사식 기관에서의 연소 상황은 연료 제트의 분열 과정과 제한된 시간과 공간 내에서의 산화 과정에 의하여 결정되고, 기관의 출력과 공해 물질 배출에 영향을 미친다. 분무는 수 ms의 짧은 시간내에 연소실에 고른 분포로 도달되고, 공기와의 혼합 과정과 연료 증기로의 증발과정이 잘 이루어 지도록 적절한 입자 크기와 분포도가 요구되며, 작동유체로 사용되는 연료의 점도, 비중, 표면장력 등의 물성값과 인젝터 노즐의 형상 및 분사 특성, 분사 압력과 유량, 그리고 분위기의 온도와 압력 등 분사 기구와 조건에 따라서 다양한 구조를 갖는다. 최근에는 불꽃점화 기관에서도 컴퓨터 기술을 이용한 전자제어식 연료 분사방식이 활발히 개발되고, 저연비 고출력화를 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.^{1, 2, 3)}

분무의 구조는 팁 선단으로부터 일정 구간 포텐셜 코어를 형성한 후 충분히 발달된 영역으로 진행하면서 미립자로 분열하는 거동을 보인다. 흡기 다기관 중에 직접 분사하는 MPI 기관의 경우 인젝터로부터 연소실까지 공간적 제한이 있어 대부분 비정상 상태의 제트에서 분열 생성되는 분무가 이용되기 때문에 기본적으로 분무의 구조에 대한 정확한 이해가 필요하다.

분무에 관한 연구는 크게 수치해석을 통한 이론적 연구와 계측 장치와 분사 기구를 이용한 실험적 연구가 수행되고 있으며, 고압 분사식 디젤 분무의 구조에 관한 연구 결과가 비교적 많이 발표되고 있다.^{4, 5)} Konishi 등⁶⁾은 디젤 분무의 구조에 관하여 분열길이, 분무각, 관통도, 입도 분포도를 루비레이저(Ruby laser)를 이용하여 실험적으 연구하였고, Reitz와 Diwakar⁷⁾는 연료 분무의 구조를 수치해석으로 모델링하고 실험 결과와 비교하였는데, 연료 제트의 분열거동과 관통도, 그리고 액적의 크기가 비교적 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서는 가솔린 기관용 스토클형 MPI 인젝터에 의한 자유분무의 구조와 거동을 물성이 각각 다른 세가지 작동유에 대하여 실험적으로 관찰하고, 그 물성이 분무에 미치는 영향을 고찰하였다.

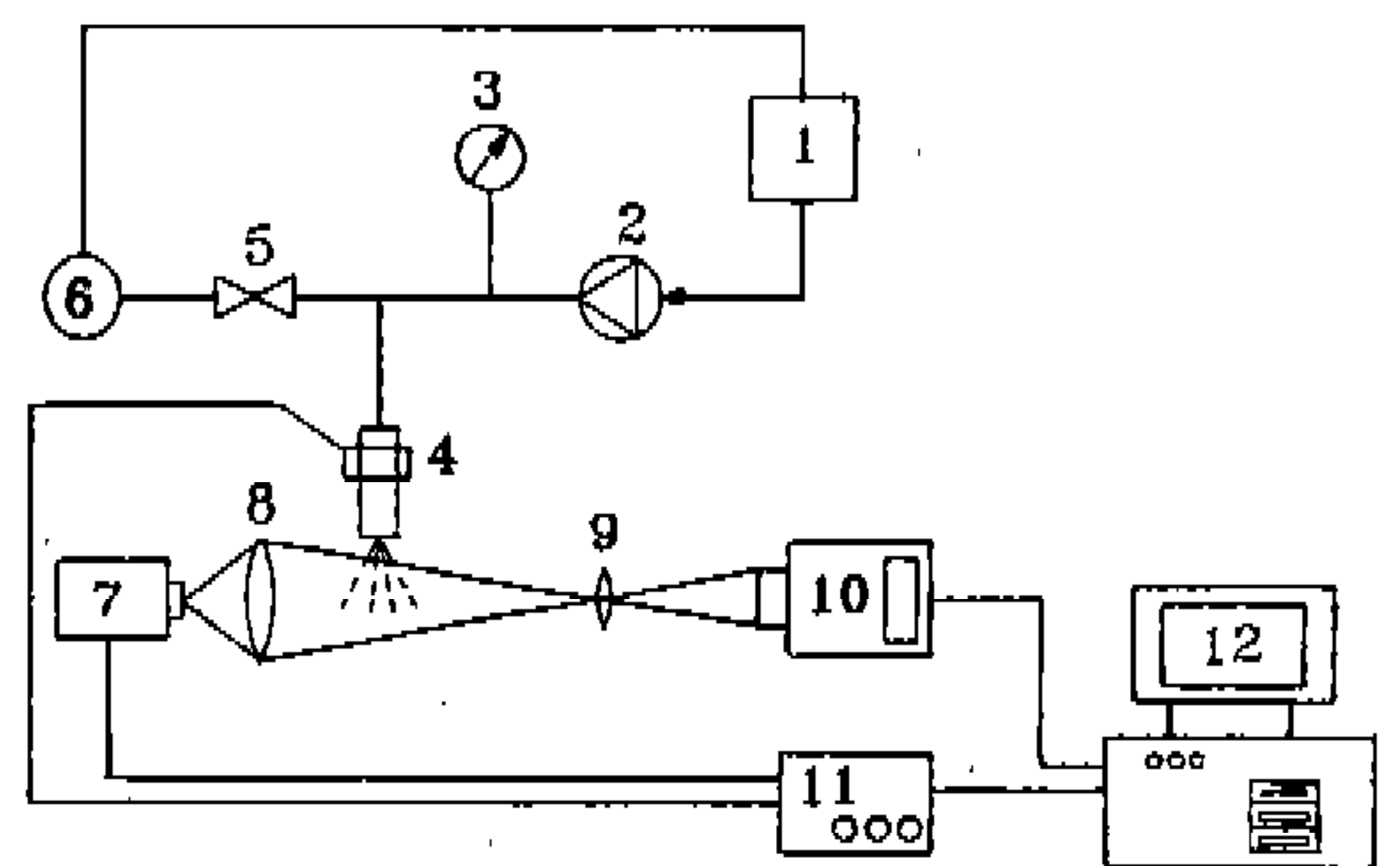
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 크게 연료 공급계와 광계측계로 구분되며 전체적으로는 Fig.1과 같이 구성하였다.

연료 탱크의 연료는 펌프에 의하여 여과기를 거쳐 공급 라인에 보내지고, 솔레노이드 밸브로 작동되는 인젝트에 항상 일정한 압력이 유지되도록 압력 조정기를 설치하였다.

인젝터에 공급되는 연료의 압력은 압력 게이지에 의해 확인되고 압력 조절기로부터 되돌려지는 연료는 전량 연료 탱크로 재순환 되도록 하였다. 분무 액적의 크기와 운동 속도를 측정하기 위하여 구성한 광계측 장치의 개략도는 Fig.1의 하단부와 같다. 광 지속시간이 50ns인 이중방전광원(dual-spark light source), CCD 카메라(pixel수 : 682×492), 렌즈(FL : 75mm), 필터(interference : 682.8nm), 화상을 기록하기 위한 Frame Grabber(resolution : 512×480), 4-채널 콘트롤 보드, PC 등으로 구성하였다. CCD 카메라와 이중방전광원, 그리고 인젝터의 솔레노이드밸브는 4-채널 콘트롤 보드에 의해 조절되며, 각각의 분해능은 1μs 이고 최대 65.5ms까지 조절이 가능하다.



- | | |
|----------------------|---|
| 1. Fuel tank | 8. Condenser lens |
| 2. Pump | 9. Microscopic lens |
| 3. Pressure gauge | 10. CCD camera |
| 4. Injector | 11. High voltage power supply & trigger amplifier |
| 5. Valve | 12. PC/386 |
| 6. Regulator | |
| 7. Dual light source | |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

분무각과 분무도달거리 그리고 초기 분열과정 등의 거시적 거동을 관찰하기 위하여 54mm achromatic lens와 35mm 스틸 카메라(Nikon, FM-2)를 사용하고, 액적의 크기와 운동 속도 등의 미시적 거동을 측정하기 위하여 CCD 카메라를 사용하였으며, 분무의 공간적인 위치를 광축과 카메라가 선택적으로 포착하도록 0.1mm 단위로 조절이 가능한 3축 이동 장치를 사용하였다.

2.2 실험방법

연료 펌프를 가동시켜 인젝터와 연결되는 공급관 내의 압력을 3.9bar로 일정하게 유지하였다. 콘트롤 보오드를 통해 인젝터의 솔레노이드를 구동시키고 정해진 시간만큼 지연 후에 광원에서 스파크 라이트가 동작된다. 라이트가 동작됨과 동시에 관찰 영역내의 상황이 카메라에 의해 촬영되고, 프레임 그래버를 통하여 한 프레임의 이미지가 컴퓨터에 기록된다. 각 시간대 별로 분사된 분무에 관한 데이터는 원하는 시간 간격으로 기록이 가능하며 저장된 이미지는 화상처리를 통하여 해석하였다.

이 연구에서는 분사 기간을 13ms로 일정하게 유지하고, 분사 초기 부터 3.5ms까지는 0.1ms 단위로, 그 이후는 0.5ms 단위로 촬영하였다. 초기 분열거동과 분무도달거리, 분무각 등의 측정은 35mm 스틸 카메라에서 얻어진 화상이 갖는 화

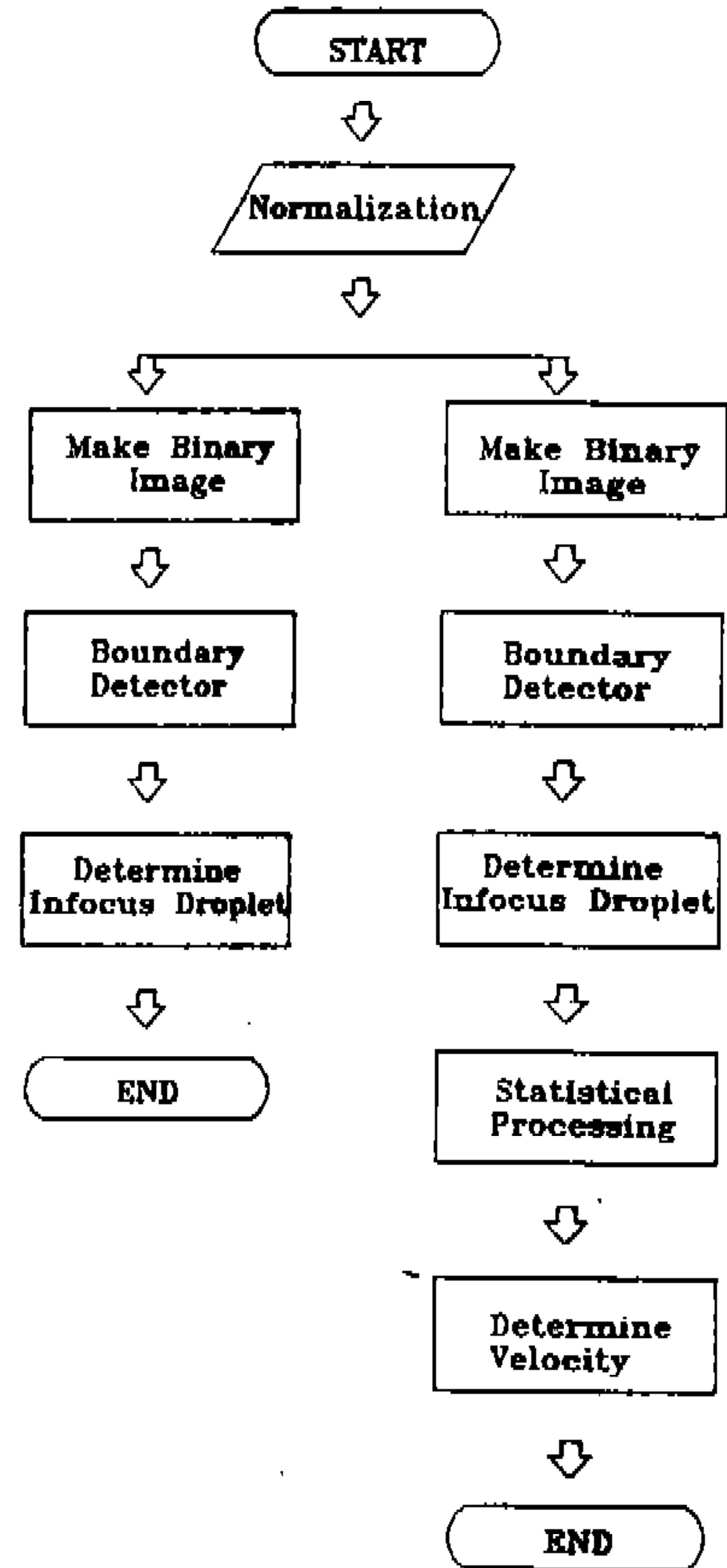


Fig.2 Algorithm for measuring of droplet size and velocity

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(x10 ⁻⁶ m ² /s)	1.253	1.210	1.508
Surface Tension (x10 ⁻⁶ kg/s ²)	2.653	2.901	2.270

Table 2 Specification and flowrate of the used injector

Hole Diameter(mm)	Pintle Diameter(mm)	Pintle Notch Angle(deg.)	Flowrate(ml/s)		
			Octane	Solvent	Ethanol
0.896	0.798	34	4.27	4.17	3.61

소수에 렌즈의 배율을 곱한 값을 수정하여 해석하였다. 본 실험에 사용된 광학계의 가로 확대비는 세로 확대비의 1.03446배의 값을 갖는다. 액적의 크기와 운동 속도를 구하기 위하여 CCD 카메라로부터 얻어진 화상은 Fig2와 같은 알고리즘을 이용하여 해석하였다. 관찰 영역 2.32mm(H)×2.84mm(V) 에서 조밀한 분무(dense spray)와 성김분무(dilute spray) 모두 측정이 가능하였는데, 내부 트래킹 모드와 원시화상(raw image)에서의 액적을 수적으로 비교한 결과 80% 이상의 획득력이 있었으며, 액적수가 상대적으로 많은 조밀한 분무에서 신뢰도가 큰 것으로 나타났다. Table 1과 Table 2는 각각 실험에 사용된 작동 유체의 물성값과 인젝터의 주요제원 및 유량특성을 나타낸다.

Photo.1은 입의 측정 위치에서 얻은 원시화상으로부터 액적의 크기와 운동속도를 처리하는 과정과 출력형식을 도식적으로 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분열 구조와 액적 크기

분무 입자의 분열은 입자에 작용하는 내력 또는 외력에 의한 교란이 표면장력에 의한 결합력을 파괴할 때 일어나며, 공기 역학적인 힘은 입자의 기하학적 형상을 변형시키는 역할을 한다. 대표적인 분열 모델로는 Bag Breakup 모델과 Boundary Layer Stripping 모델의 두가지가 있다.

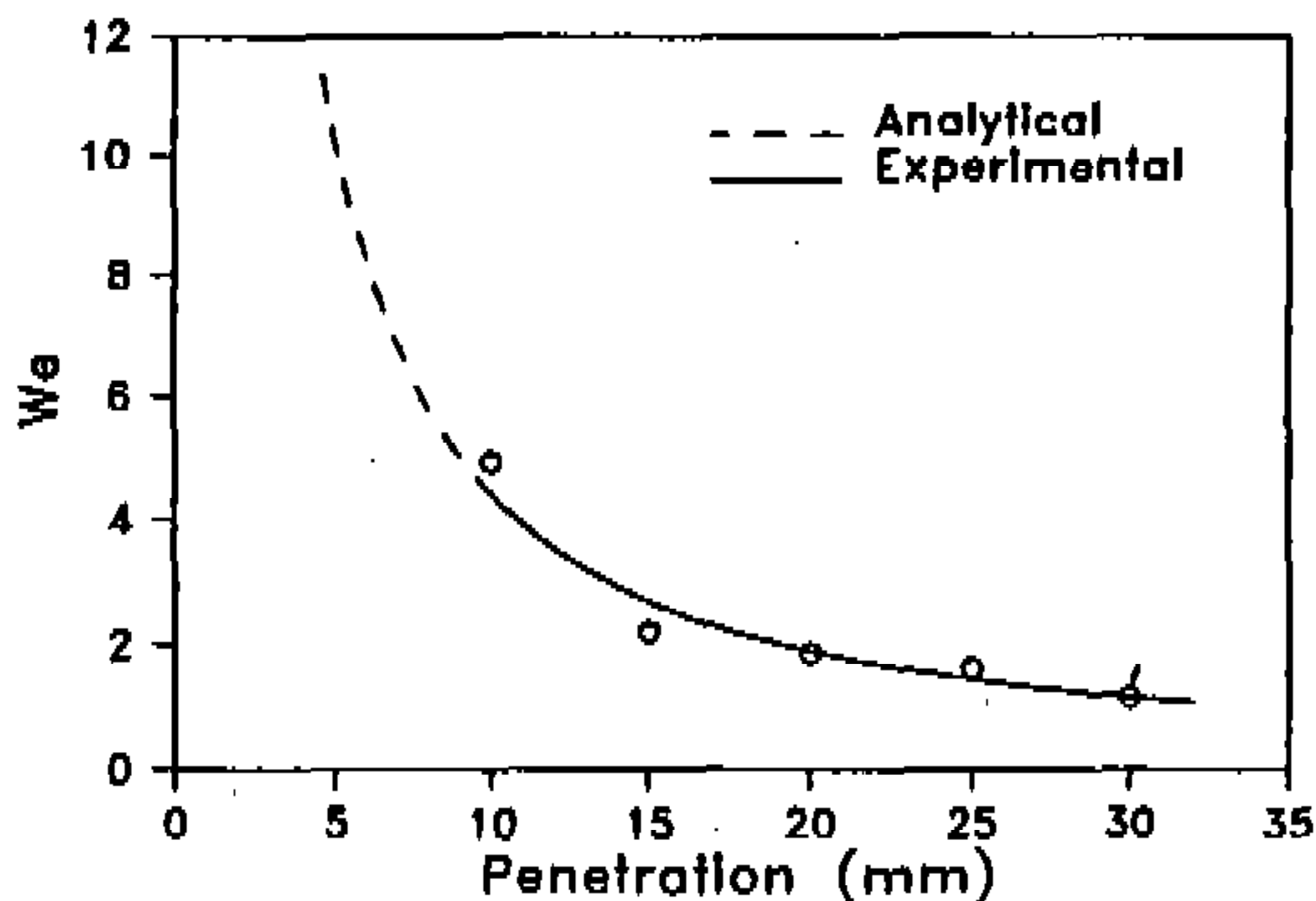


Fig.3 Relation of We and penetration to adopt breakup model

Bag Breakup Model

$$We_{cr} \geq 12 \quad (We = \frac{\rho_a V^2 D}{\sigma}) \quad (1)$$

Boundary Layer Stripping Model

$$\frac{We}{Re_D^{1/2}} \geq 0.5 \quad (Re_D = \frac{V_r D}{\nu}) \quad (2)$$

Bag Breakup 모델의 기준이 되는 임계 We 수를 Reitz의 조건으로 판단할 때, 분사후 0.2ms대에서 각 유체의 분열이 일어나고, Fig3에서 보면 이때의 분열길이는 유체에 따라 다소 차이는 있으나 5.5~6.3mm로 관찰되었다. 분사후 시간과 분무 길이가 임계 시간과 임계 길이를 각각 초과한 경우에는 0.43~2.45의 We 수를 가지는데, 이미 We 수가 임계범위 내의 값으로 안정된 분무구조로 발달되어 이 영역에서의 분열은 더 이상 일어나지 않음을 의미한다.

액적의 크기는 분무의 대칭 구조라고 가정하고 분무 중심선(C)과 분무선(S), 그리고 분무 중심선과 분무선 사이의 중간지점(M)에 대하여 인젝터 선단으로부터 수직 하향으로 80mm까지를 10mm의 간격으로 실험한 결과, Fig4에서와 같이 솔벤트의 Sauter 평균입경(SMD)은 다소 불규칙한 결과를 보이나, 분무 길이 50mm 이전에는 분무 중심부의 액적 크기가 분무선 쪽보다 작은 크기를 가지며, 그 이후에는 분무 중심선 근처의

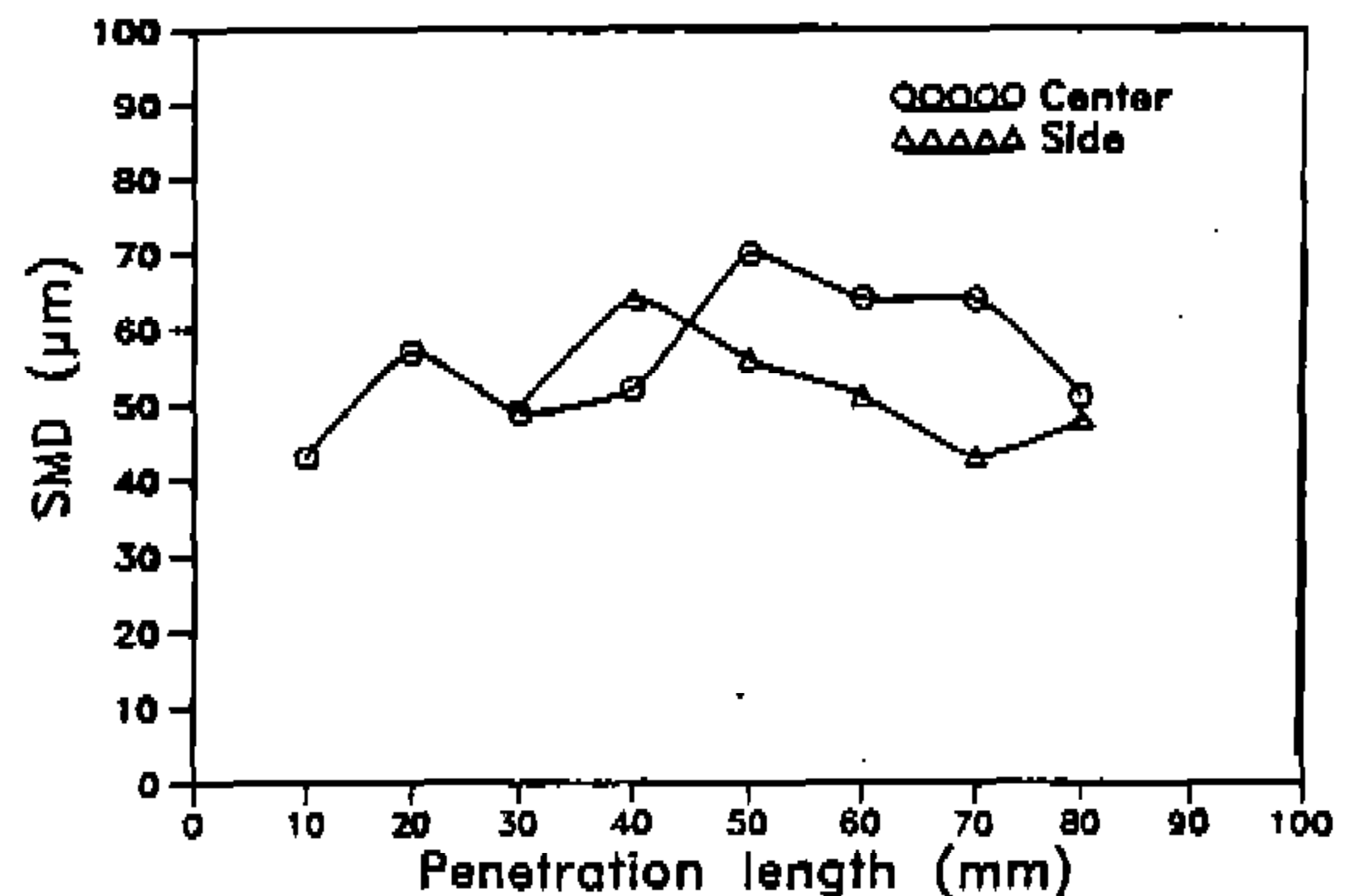
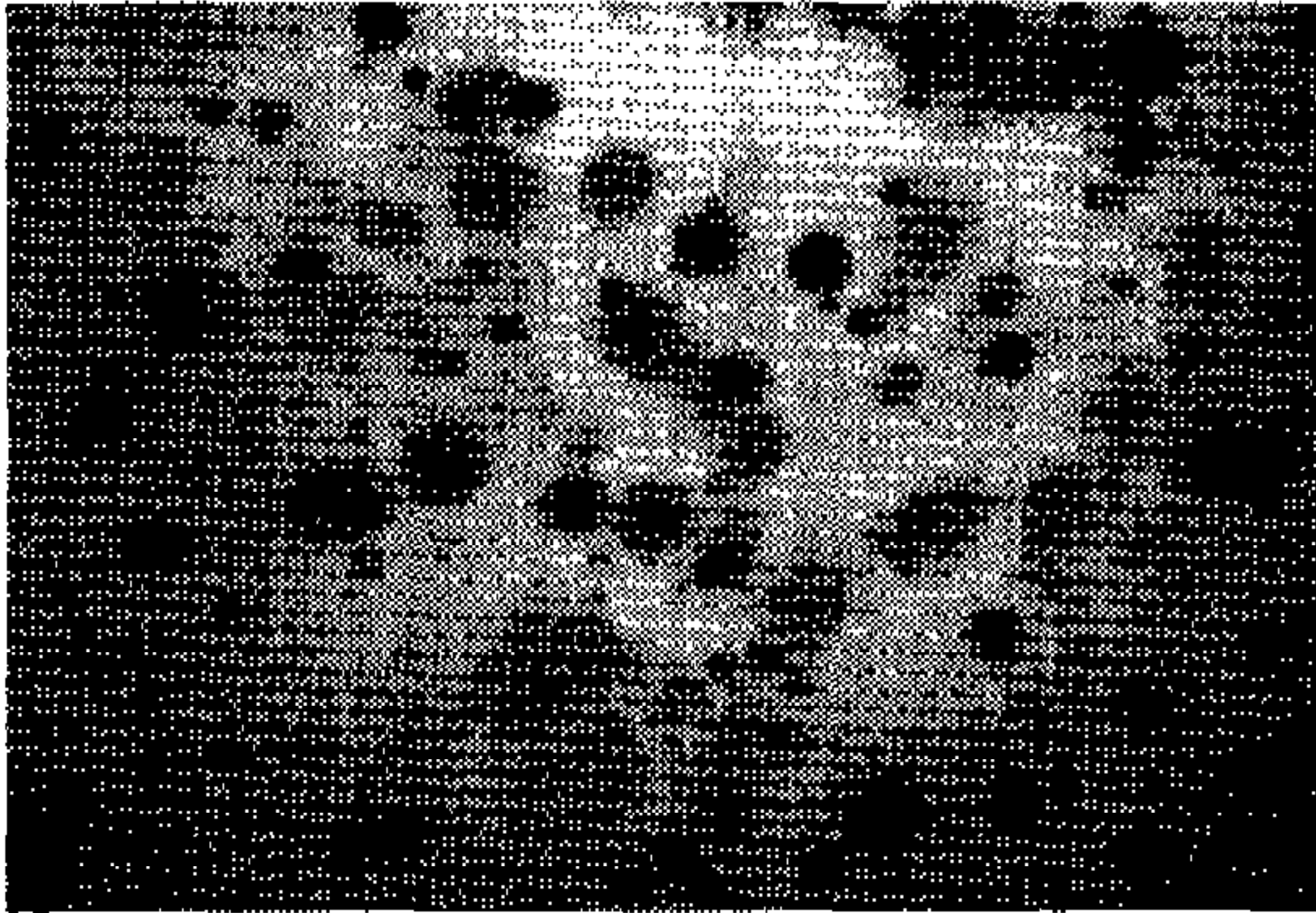
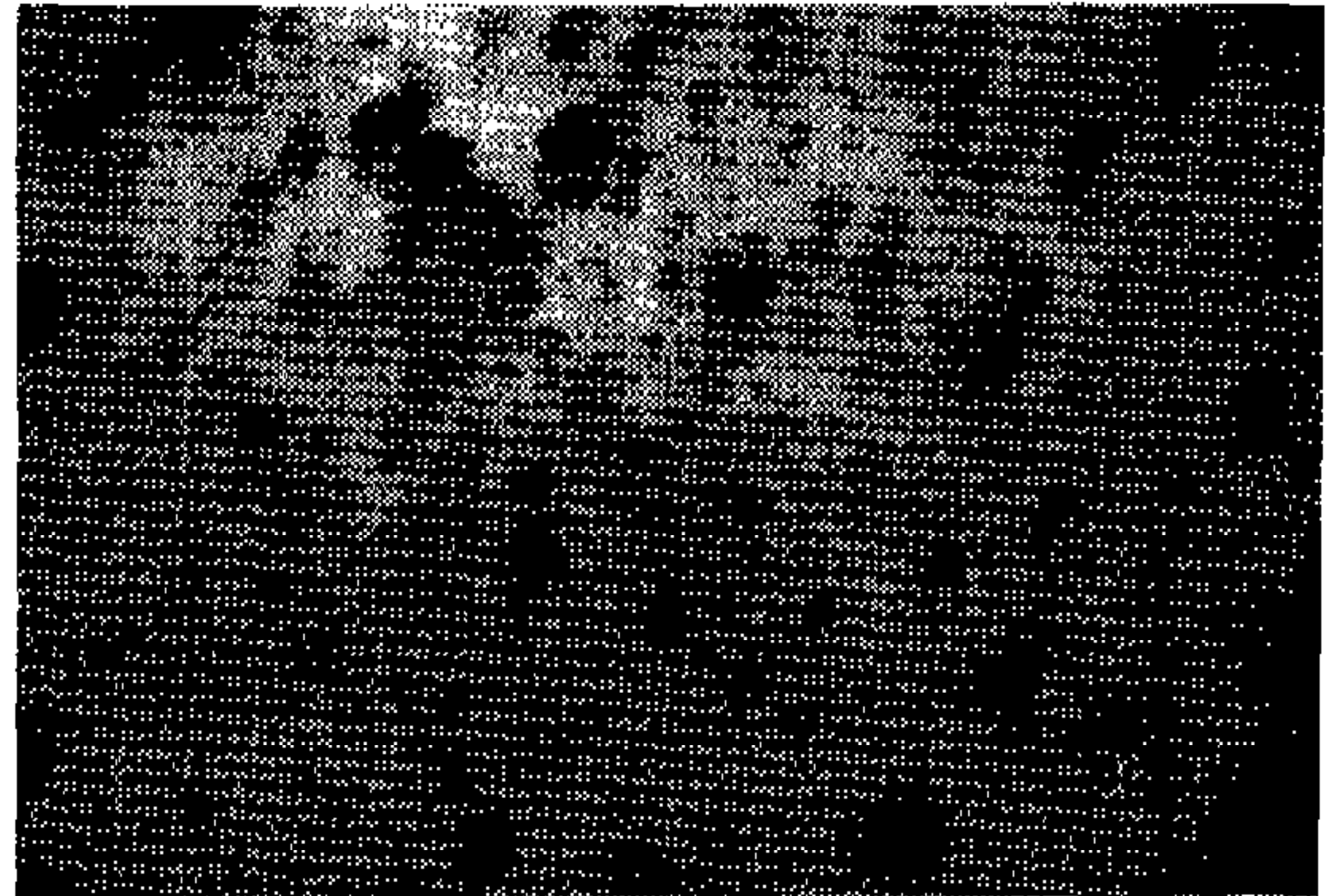


Fig.4 Droplet size distribution of the solvent spray



Original image droplet sizing



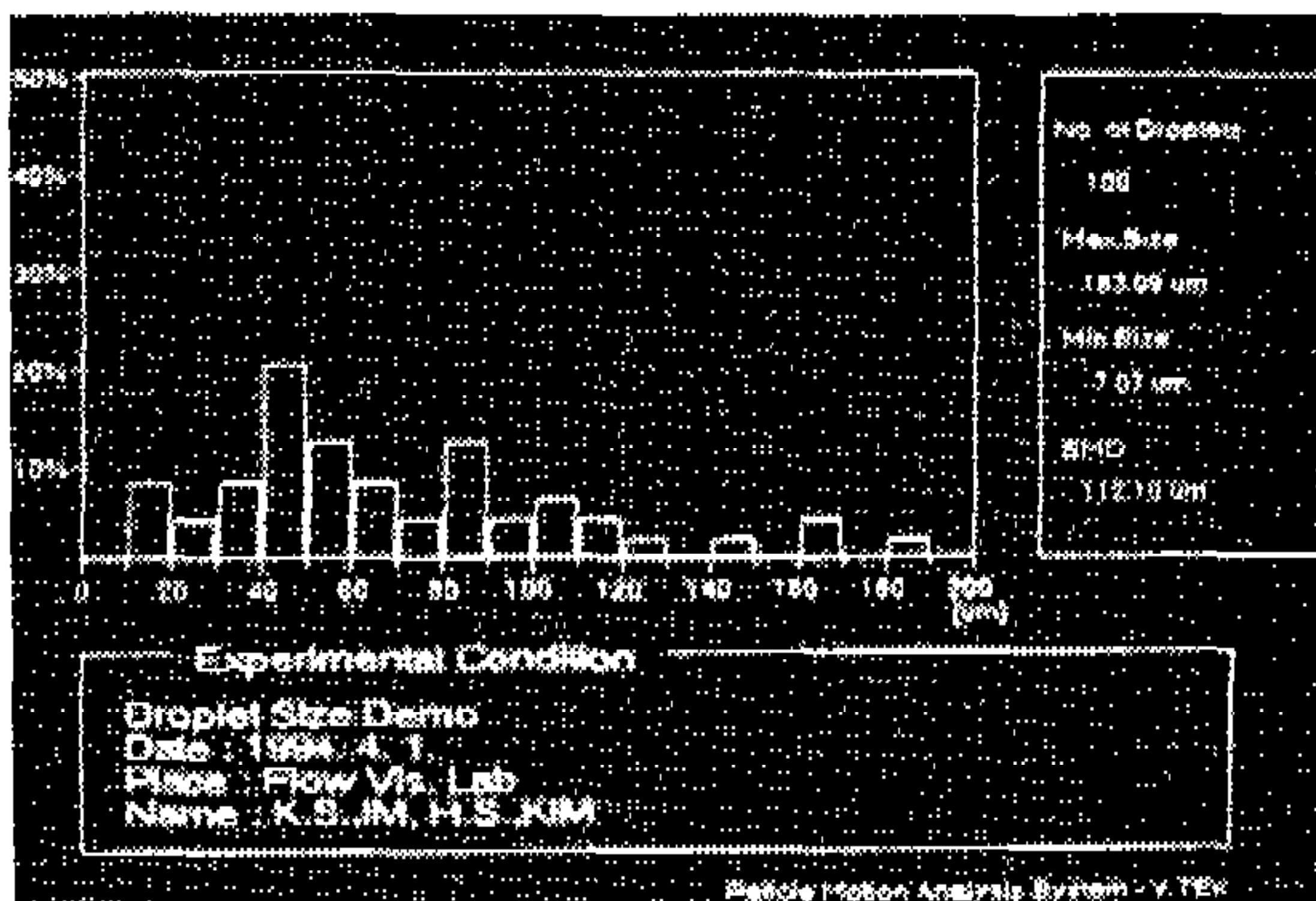
Original image droplet velocity



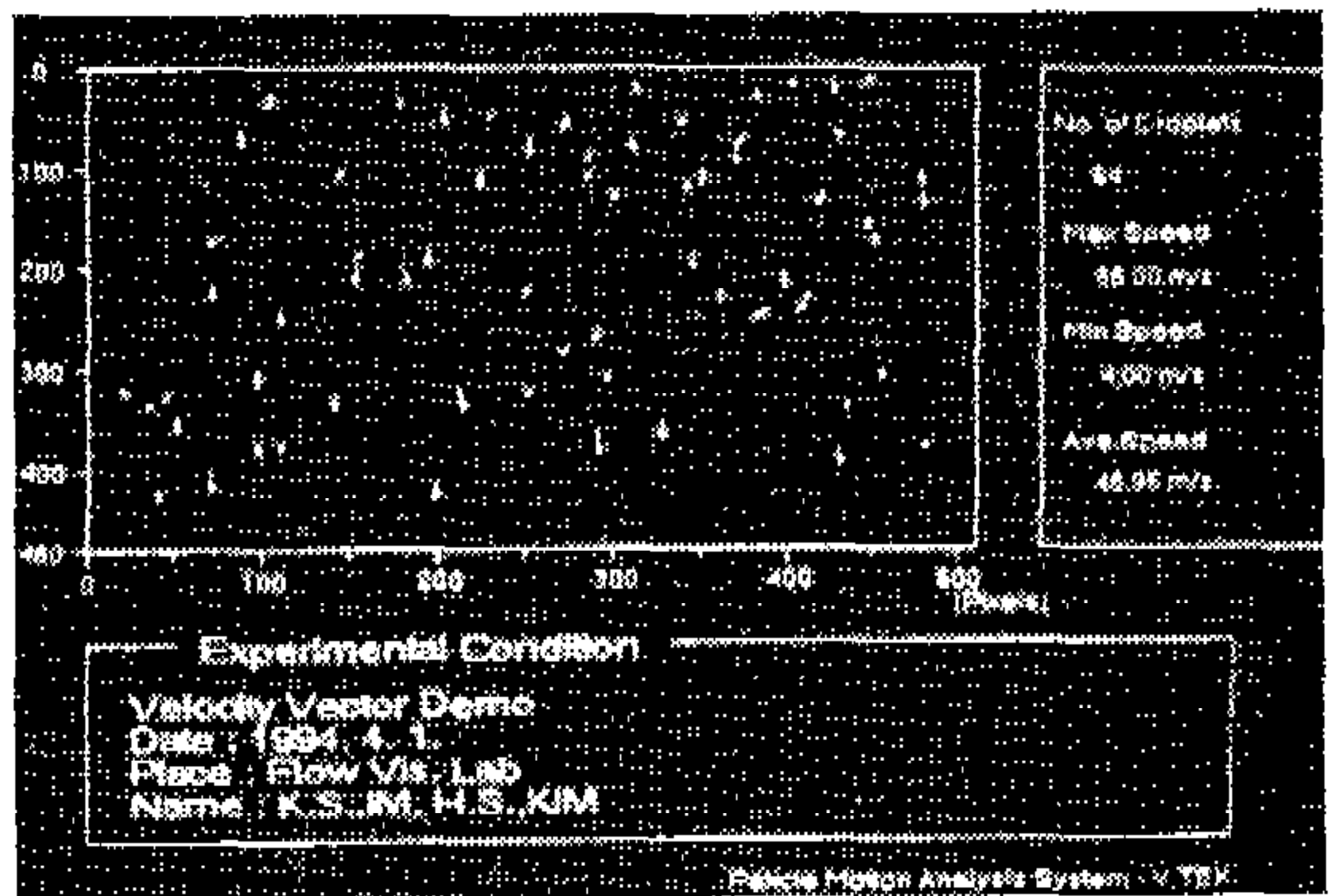
Edge detect on the monitor



Tracking image on the monitor



Output of droplet histogram



Output of droplet vector

Photo.1 Image processing procedure for sizing and velocity of the spray

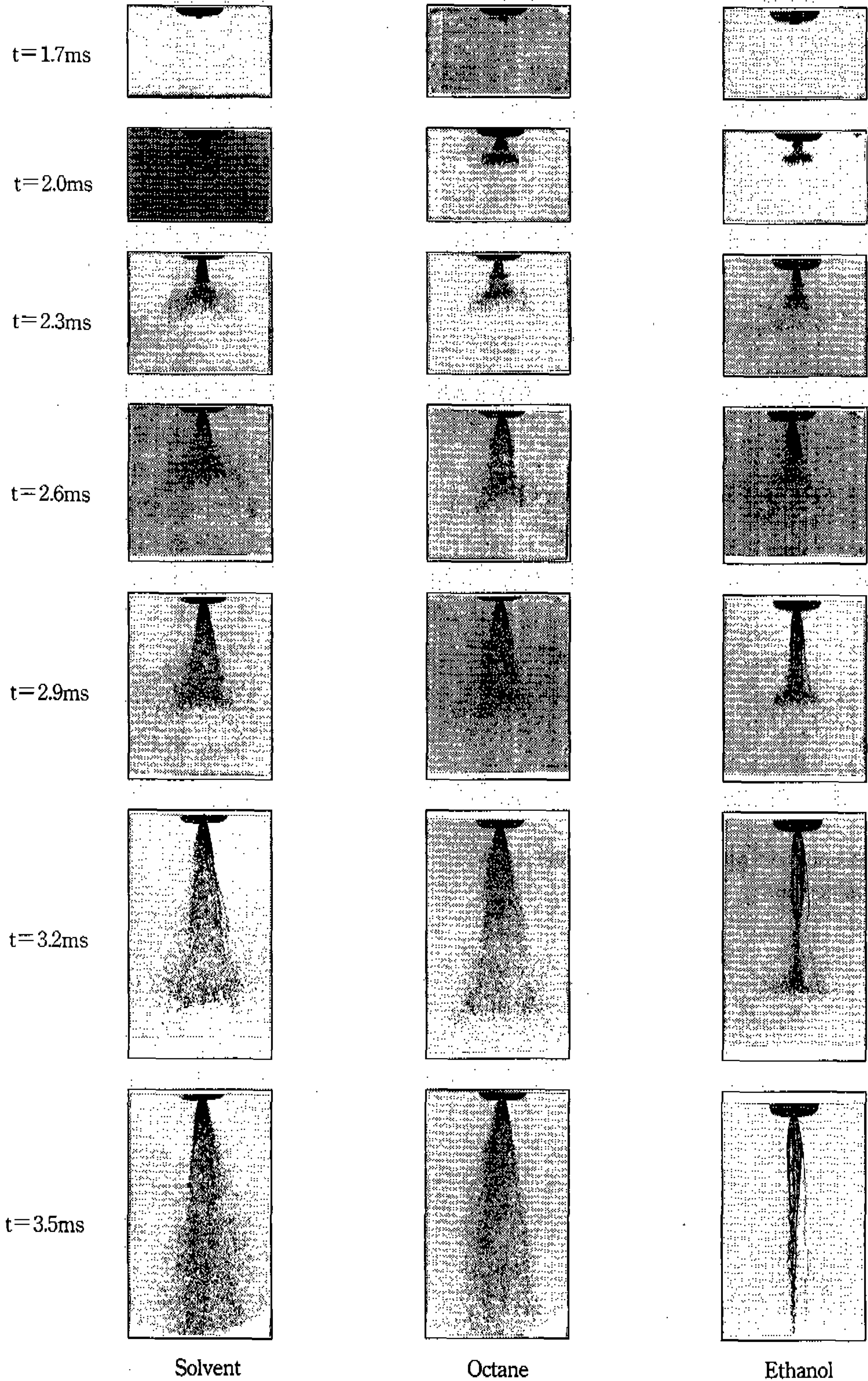


Photo.2 Progress of fuel spray on each lapsed time after injection

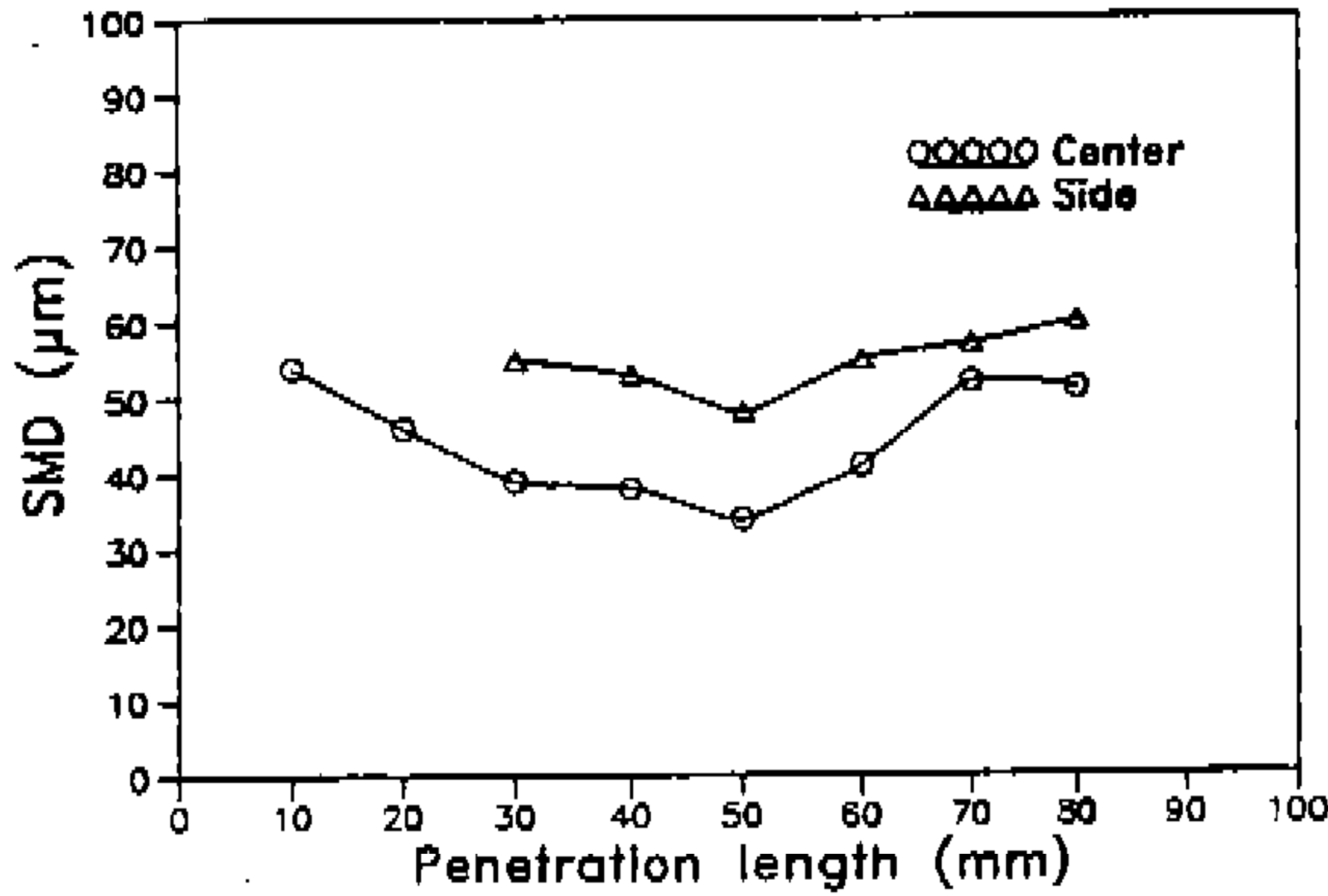


Fig.5 Droplet size distribution of the octane spray

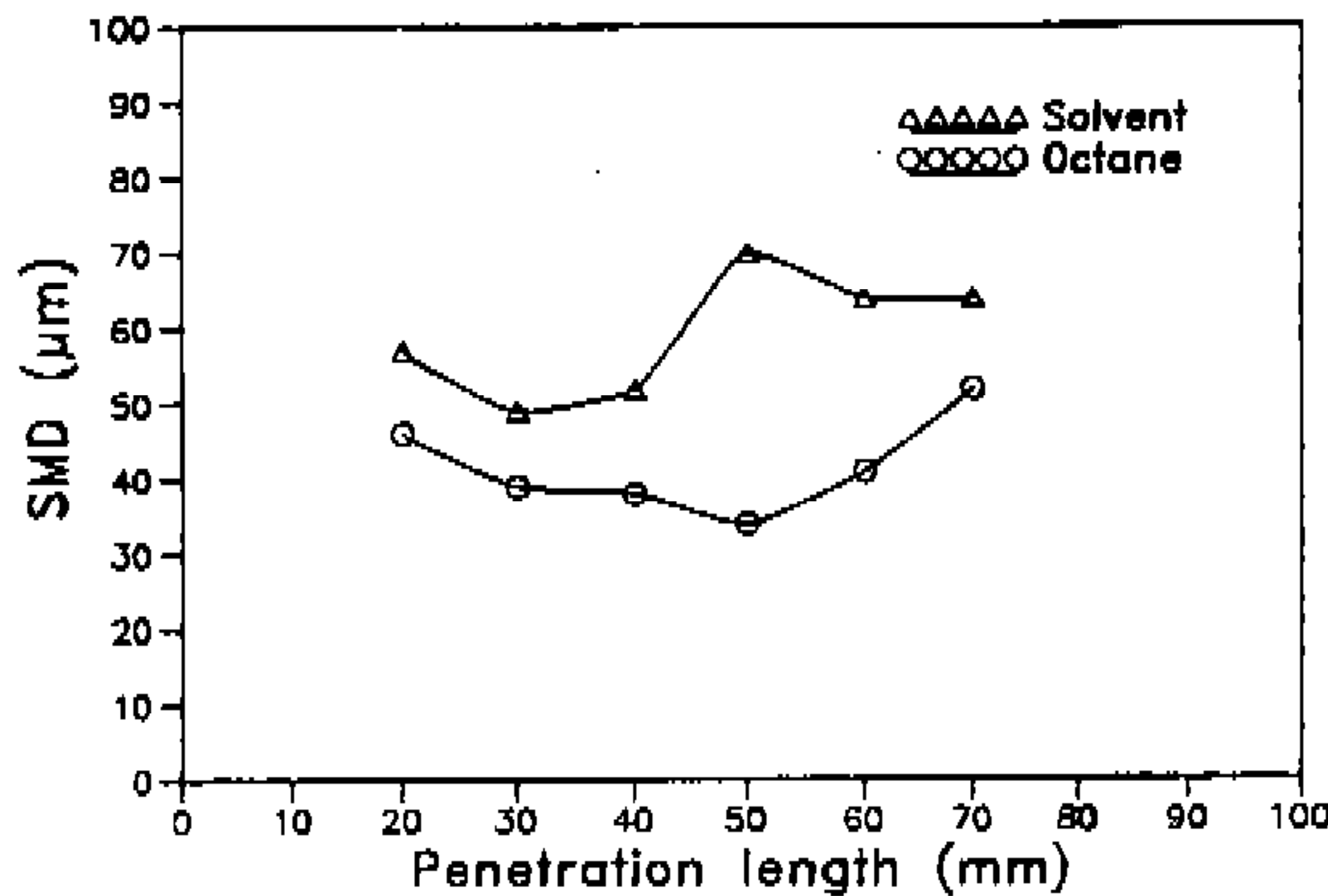


Fig.6 Distribution of droplet size at the spray centerline

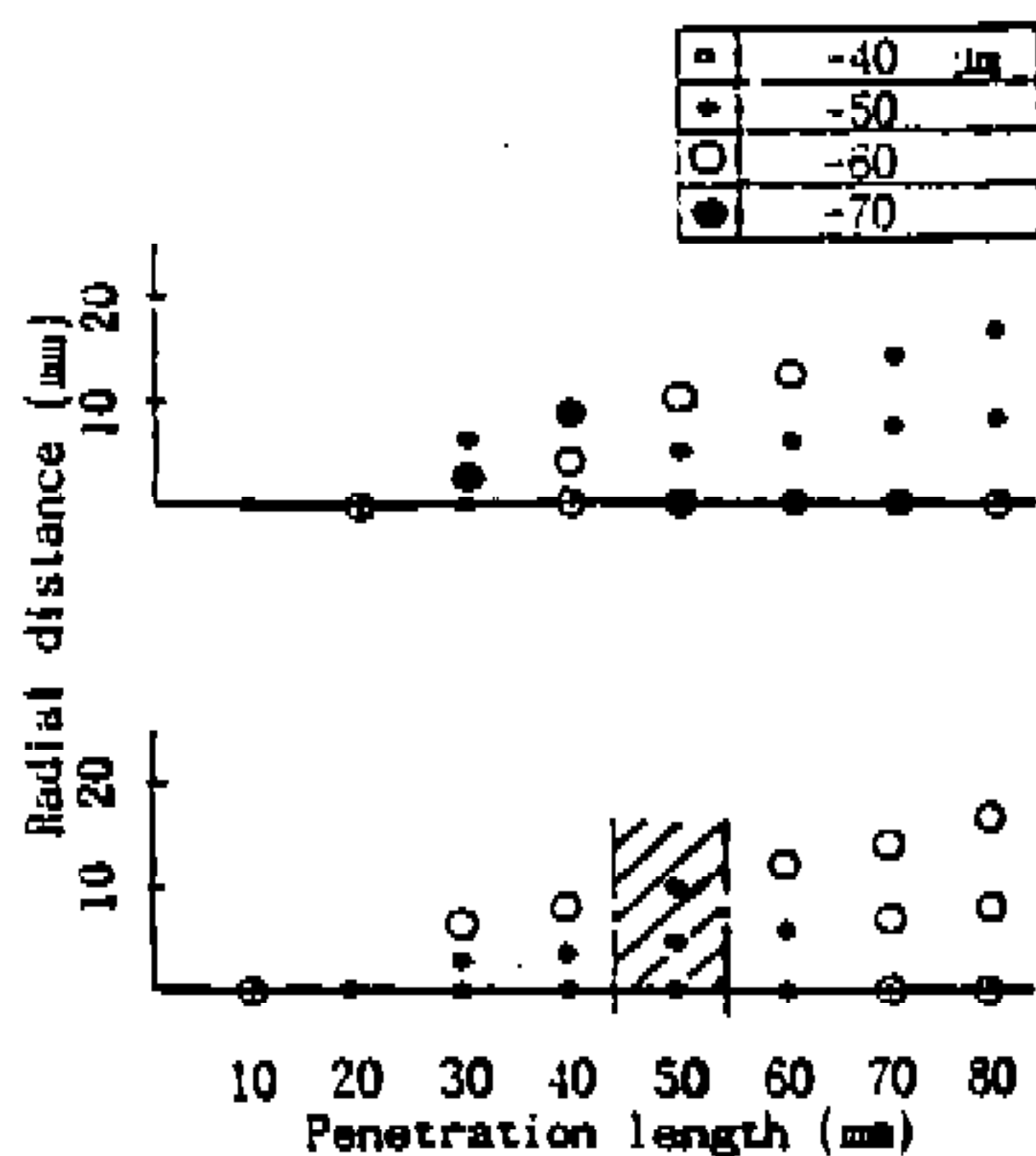


Fig.7 Spatial distribution of droplet size in the spray

액적 크기가 분무선 근처보다 더 크게 나타났다. 옥탄을 사용하였을 때에는 분무축 중심부에서 분무선 근처로 가면서 액적의 크기가 커지는 분포를 보이며, 분무 길이를 따라서 50mm까지는 전반적으로 작아지다가, 그 이후에 다시 커지는 규칙성 있는 경향을 나타냈다. Fig.5는 옥탄 분무의 액적 크기를 나타낸 것이고, 이것을 다시 액적 밀도가 높은 분무 중심선 근처에서의 두 작동유체의 액적분포를 비교하면 Fig.6과 같다. 분무 길이 전반에 걸쳐 솔벤트의 분무보다 비중과 표면장력이 상대적으로 작은 옥탄의 분무가 더 작은 크기의 액적을 고른 분포로 갖는다.

입경분포를 각 측정 위치에 따라 크기 급간별로 나타내면 Fig.7과 같다. 그림의 횡축은 대칭구조 분무의 대칭축이고, 종축은 분무의 퍼짐 원주 반경이다. 분무 관통 길이에 대한 입경분포를 관찰하면 인젝터 팁 근처에서 발생된 비교적 큰 액막이 점차 얇은 액적운을 형성하며 분열되어 수직하향 45~55mm 근처에서 가장 작은 크기의 평균 입경으로 되는 것을 알 수 있다.

옥탄의 경우 초기 무화과정을 관찰하기 위해 인젝터 선단에서 15mm까지의 공간에서 35mm 카메라로 50μs 단위로 촬영한 결과, 분사후 1.75ms에서 1개, 1.95ms에서 3개, 2.1ms에서 4개, 2.2ms에서 5개, 그리고 2.3ms에서 6개의 액막 모양의 액적운이 관찰되었는데, 액막의 진행은 규칙성 있는 주기로, 시간의 경과에 따라 그 진폭이 증가하는 경향을 가진다. 이것은 분무가 단번에 완성되지 않고 파동성을 가지며 성장하다 분열과 교란의 과정을 거치면서 분무 선단부터 작은 크기의 액적으로 무화되는 것을 나타낸다.⁹⁾ 솔벤트의 경우에는 성장속도가 다소 둔하나 그 경향은 비슷하게 나타났다. 분무축 방향으로 50mm 이후에는 다시 평균입경이 증가하고 분무 중심축보다는 분무선 근처로 가면서 더 큰 크기의 평균입경을 갖는 것으로 나타났다. 액적크기가 클수록 운동량도 커지기 때문에 이와 같은 분포를 갖는 것으로 생각된다. 솔벤트인 경우 옥탄에 비해 분무축 50mm까지는 평균입경이 10~13μm 정도 더 큰 크기 분포를 갖고 50mm 이후의 분무선 근처에서의 오히려 그 크기가 2~10μm 정도

더 작은 크기를 갖는 것으로 나타났다. 에탄올의 경우에는 분무축 방향으로 액주상이 발달되어 무화가 충분히 일어나지 않는 제트의 형상을 보였다. 이와같은 현상은 작동유체로서 에탄올이 갖는 비중과 점도가 크므로 분열과 교란 보다는 응집력이 더 지배적인 영향을 주기 때문인 것으로 판단되었다. 분무길이 가 클수록(50mm 이상), 분무선으로 갈수록 관찰 영역에서 관찰된 액적의 수가 크게 감소되었으며, 이 때에는 몇개의 액적이 그 영역을 대표하는 크기로 계산되었다.

3.2 분무 도달 거리와 분무각

솔레노이드 밸브가 작동하여 최초의 분무가 나타나기까지 지연된 시간은 솔벤트와 옥탄이 1.7 ms, 에탄올이 1.75ms로 관찰되었다. 분무는 중심 추 분무(solid cone spray)의 구조를 가지며, 2.5ms 이내의 초기에는 세 유체의 분무가 비슷한 구조를 가진다. 옥탄과 솔벤트의 경우 3.5ms까지에서는 시간이 경과하면서 분무의 퍼짐폭이 분무 도달 거리에 따라 비례적으로 증가하고, 3.5ms 이후에는 거의 일정한 구조로 무화가 발달하는 구조를 보였다. Photo2는 각 유체의 분무가 시간에 따라 진행되는 과정을 35mm 카메라로 촬영한 것으로, 이것을 화상처리하여 분무도달거리와 분무각을 정량적으로 구할 수 있다.

분무의 도달 거리는 분사후 시간 경과에 따른 분무 선단의 직하 거리를 각 시간별로 촬영한 화상으로부터 유효화소수를 구하여 측정하였다. Fig8은 분사후 2.5ms 동안의 도달거리를 각 유체에 대하여 나타낸 것으로, 이 기간 중에는 도달거리가 시간에 따라 선형적으로 증가함을 보인다. 이 시간 내에서는 전체적으로 옥탄, 솔벤트 그리고 에탄올의 순서로 도달거리가 짧아졌다. 특히 2.0ms 이전의 분사 초기에는 그 순서가 명확히 구분되나, 2.0ms 이후에는 도달길이의 차이가 좁아져서 세 유체가 거의 비슷한 거리를 갖는 것으로 나타났다. 2.0ms 이전에는 점도가 상대적으로 낮은 옥탄과 솔벤트가 에탄올보다 유체 운동저항을 적게 받아 인젝터로부터 큰 운동 속도로 분사되고, 2.0ms 이후에는 비중값이 큰 에탄올의 운동 에너지가 증가되어 결국 세 유체의 도달거리가 비슷한 대의 값을 가지는 것으로 판

단되었다. 즉 인젝터에서 분리될 때의 운동에서는 작동유체의 점도가, 인젝터로부터 분사된 후의 분무 유동에서의 작동유체의 밀도가 더 지배적인 영향을 미침을 알 수 있다.

3.5ms까지는 시간의 경과에 따라 분무각이 증가하는 경향을 보이다 3.5ms 이후에 약간의 과도기를 거쳐 충분히 발달된 구조로써 거의 일정한 각을 유지한다. 분사후 2.5ms와 3.0ms에서 옥탄은 13.04°와 19.60°, 솔벤트는 6.64°와 18.52°의 값을 각각 보였다. 에탄올의 경우에는 분무선 근처에서 난동이 심하고 분무축 전반에 걸쳐 액주상의 제트 형상을 가지므로 분무각을 측정할 수 없었다. 수치적으로 분위기에 대한 작동유체의 밀도비와 Re수의 함수, 또는 기·액간의 밀도비로 나타낼 수 있는데, Hiroyasu는 자유 분무에 대한 분무각을 실험적으로 관찰하여 다음과 같은 경험식을 얻었다.⁹⁾

$$\theta = C \left(\frac{d_0^2 \rho_a \Delta p}{\mu_a^2} \right)^{1/4} \quad (3)$$

디젤유를 사용하여 고압 분사를 시키는 경우의 실험에서 상수 C의 값을 0.05로 추천하였으나, 본 실험에서의 0.11의 값일 때, 잘 일치하는 것으로 밝혀졌다. 작동유체의 물성이 고려된 Huaug 등의 경험식을 사용하면 분무 주류가 이루는 중심 각(core angle)과 분무선이 이루는 표면각(mantle angle)은 각각 다음과 같다.¹⁰⁾

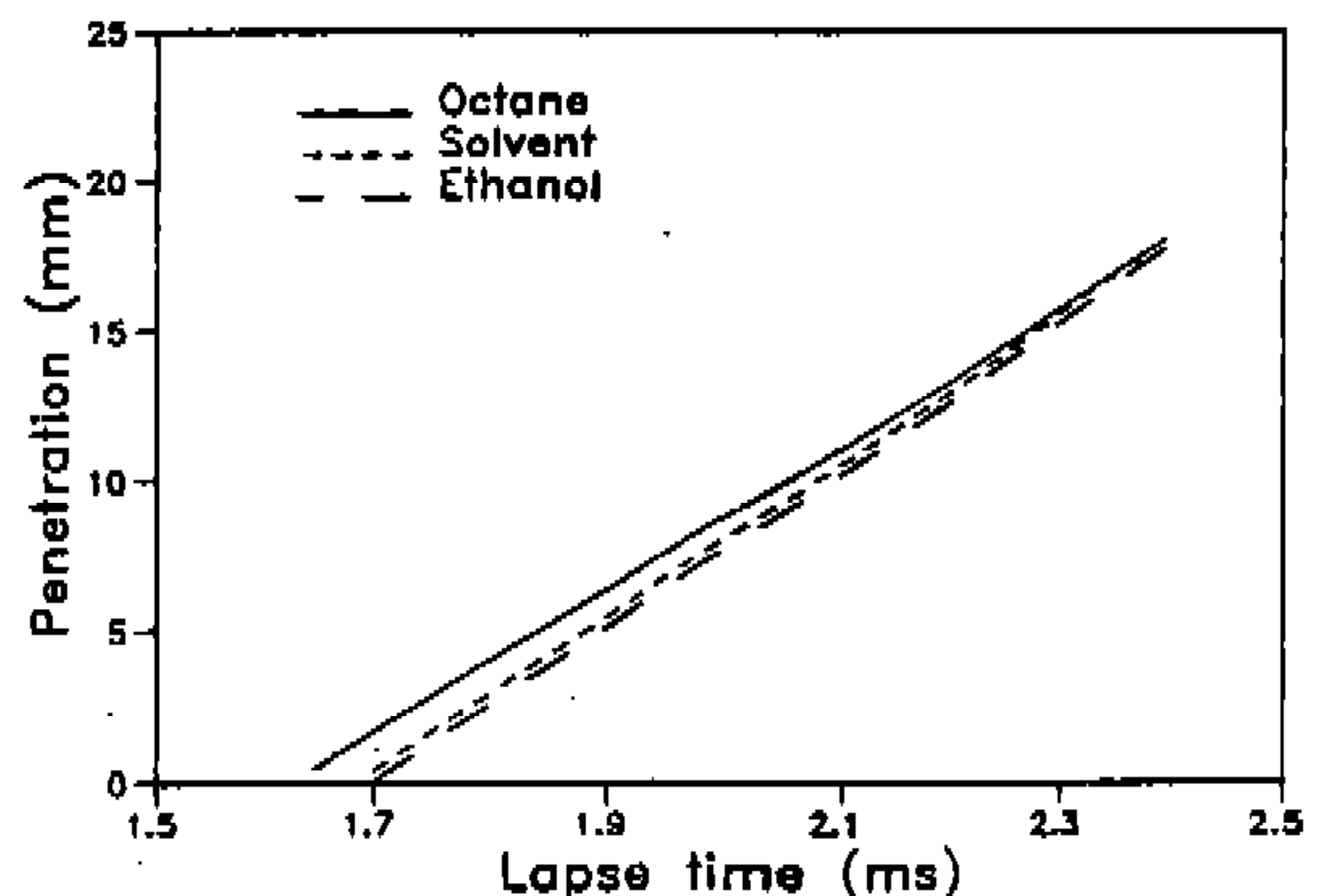


Fig.8 Spray penetration with the lapse of injection time

$$\tan\theta_1 = 0.822 \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.35} \quad (4)$$

$$\tan\theta_2 = 1.14 \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{1/4} \quad (5)$$

작동유체가 솔벤트일때 θ_1 과 θ_2 는 각각 9.77° 와 13.53° , 옥탄일 때는 10.24° 와 14.16° 로 계산되는데, 이 경우에는 Hiroyasu의 식으로 계산한 결과와 같이 실험값이 다소 큰 값으로 나타났다. 이와 같은 결과는 분위기 압력이 있는 고압 분사의 경우에서 얻은 식이기 때문에 본 연구에 적용하기 위해서는 적절한 보정이 필요한 것으로 판단되었다.

3.3 액적 운동 속도

액적 운동 속도는 이중광원법으로 입자 운동

상황에 맞추어 5~20 μ s의 시간 간격을 두고 광원을 발광시켜, 이때 포착된 액적 쌍(pair)사이의 거리로 부터 계산하였다. Fig.9와 Fig.10은 각각 솔벤트와 옥탄을 작동유체로 사용하였을 때의 입자속도 분포를 나타낸 것으로, 여기서 속도값은 관찰영역 2.32mm(H) \times 2.84mm(V) 내에 존재하는 전체 입자의 평균 운동 속도를 의미한다. 평균 액적 속도는 솔벤트의 경우 4.2~11.3m/s로 솔벤트가 옥탄보다 더 규칙성 있는 분포를 보였다. 솔벤트를 사용하였을 때의 운동속도는 인젝터 출구 근처에서 가장 큰값을 갖고, 분사후 분무축 방향으로 50mm까지는 그 속도가 점차 감소하다 50mm 근처에서 가장 낮은 속도 분포를 보였다. 분무 중심선에서의 액적 운동 속도를 작동유체에 따라 비교하면 Fig.11과 같이 나타나는데, 액적 크기가 크고 비중값이 높은 솔벤트의 경우 운동

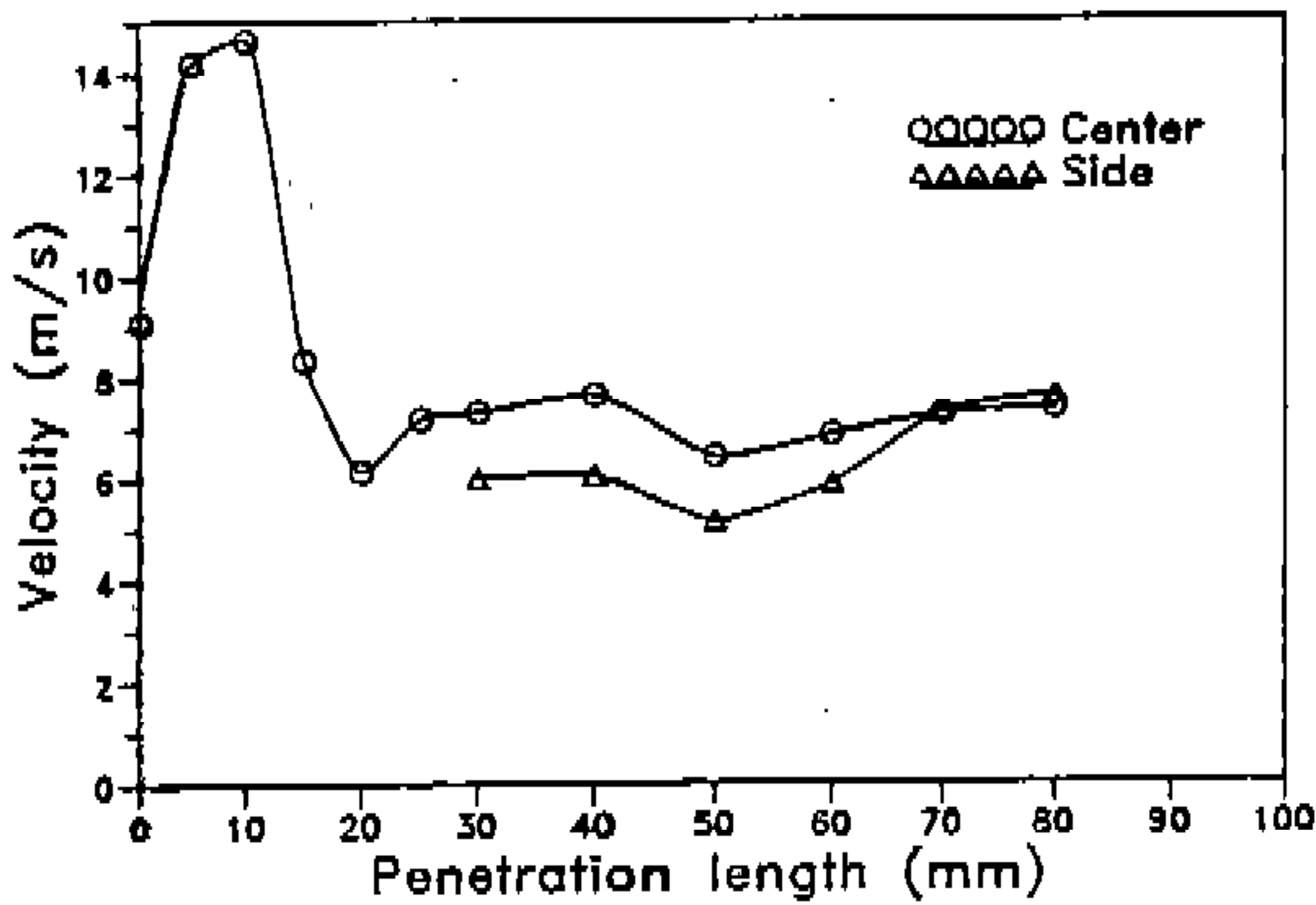


Fig.9 Droplet velocity distribution of the solvent spray

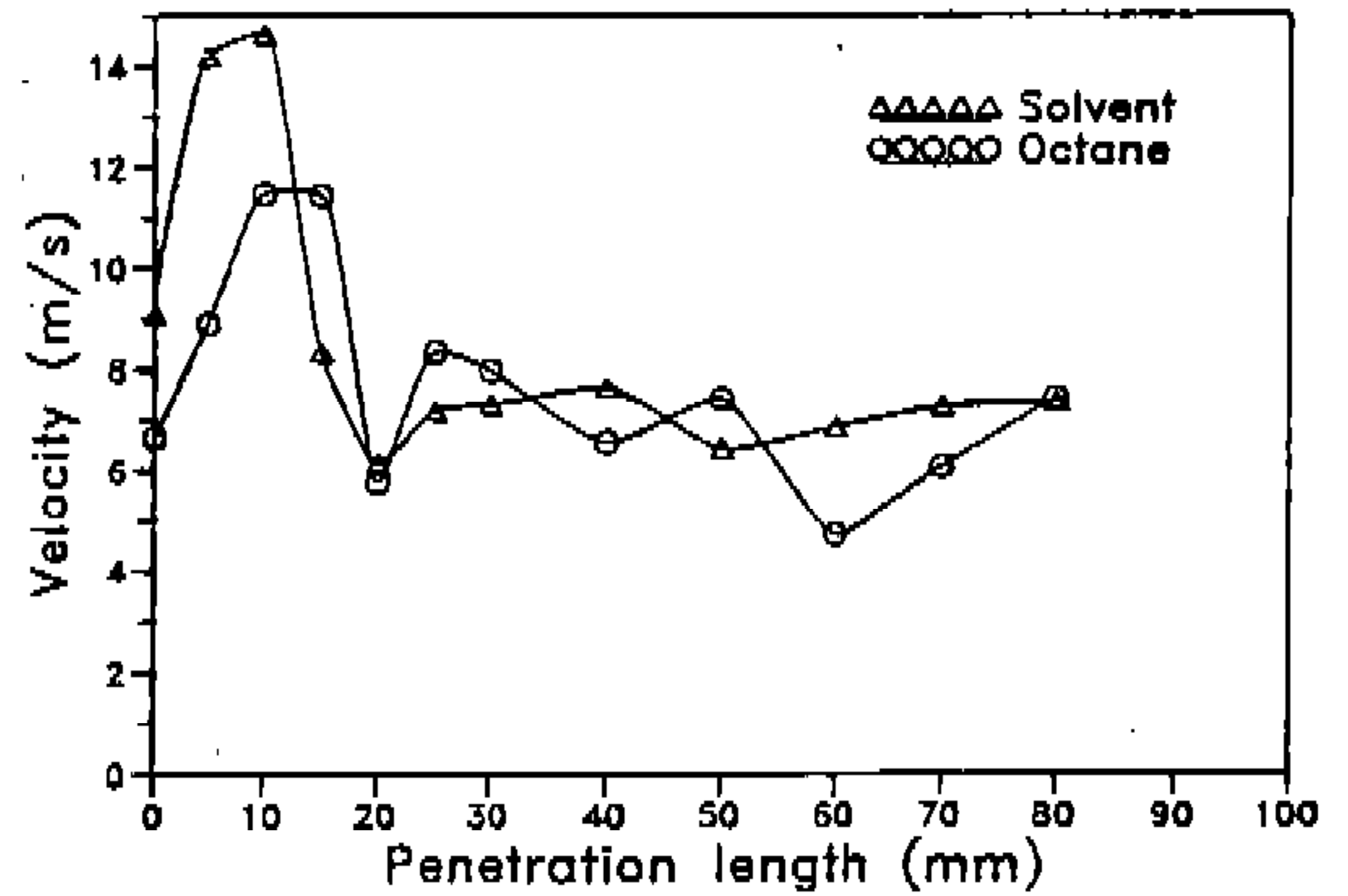


Fig.11 Distribution of velocity at the spray centerline

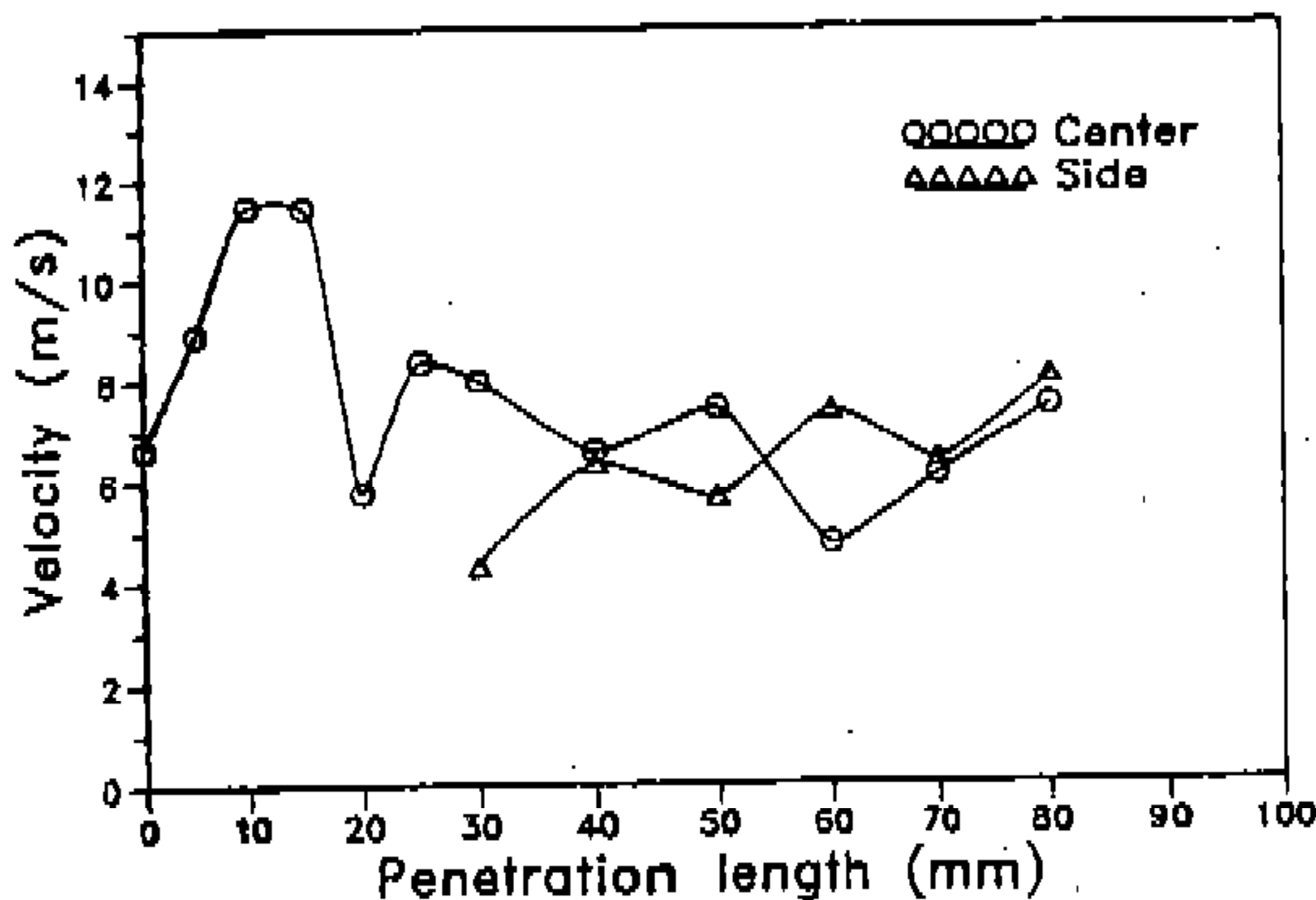


Fig.10 Droplet velocity distribution of the octane spray

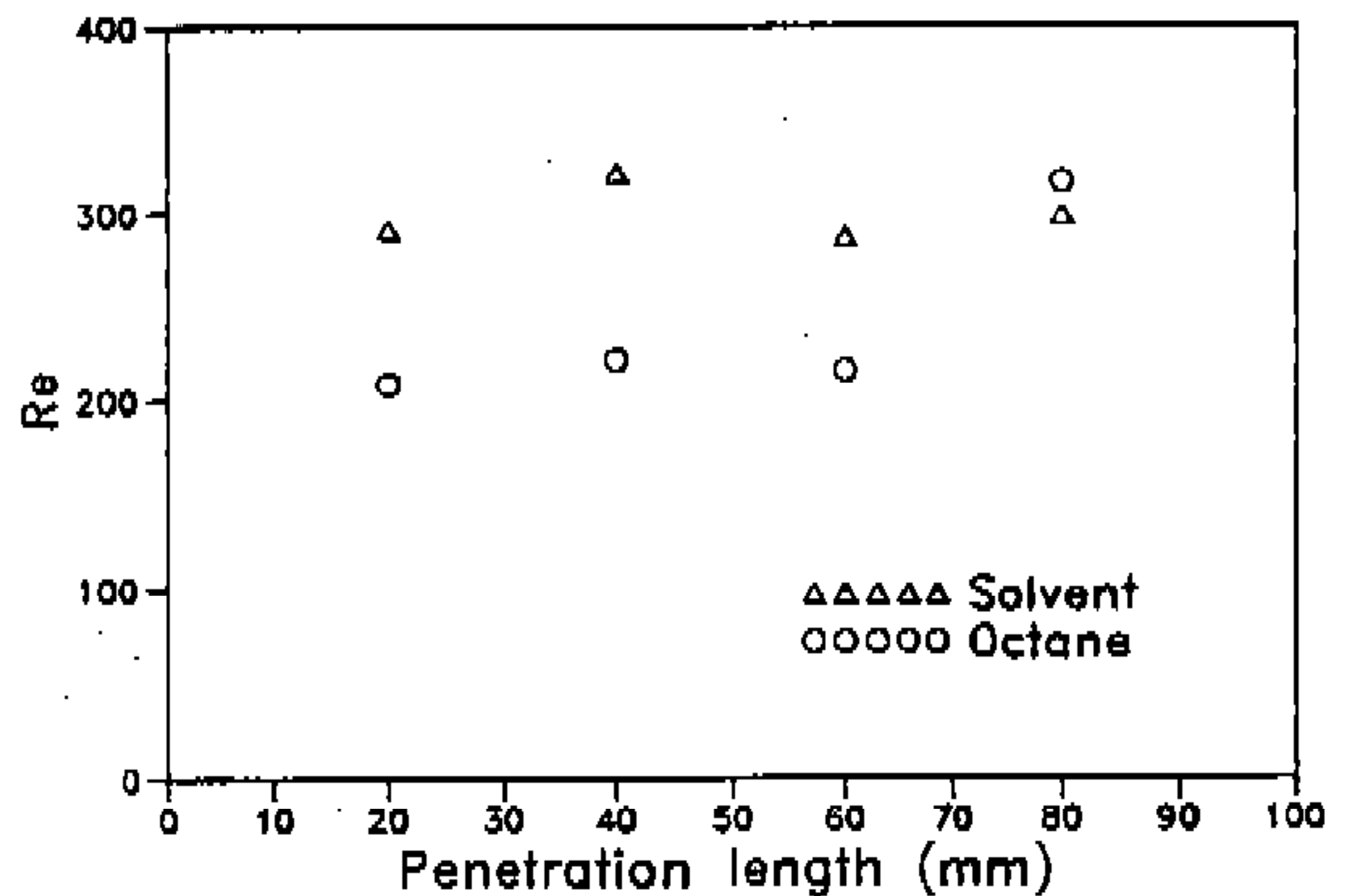


Fig.12 Distribution of Re to the penetration length

에너지가 크기 때문에 액적 운동속도도 빠른 것으로 나타나고, 특히 이러한 경향은 분사 압력의 영향을 가장 많이 받은 분무길이 20mm 이내의 분사 초기에 두드러지게 나타났다.

50mm 이후에는 다시 증가하는 거동을 보였는데, 옥탄의 분무에서는 솔벤트의 경우보다 다소 앞서 30~40mm 거리에서 최저 속도 분포를 보이고, 50mm 이후에서는 두 유체 모두 분무 중심보다는 분무선 근처에서 더 큰 속도 분포를 보였다. 액적 개개의 운동에 대한 레이놀즈 수를 식(2)를 이용하여 비교하면, Fig.12에서와 같이 210~330의 값을 갖는다. 레이놀즈 수 분포는 액적이 갖는 크기와 속도로 운동량을 나타내며 솔벤트가 옥탄보다 50~80 정도 더 높게 나타났다.

4. 결 론

가솔린 기관용 인젝터에 의한 분무의 구조와 거동을 유체 성질이 각각 다른 옥탄, 솔벤트, 에탄올에 대하여 실험적으로 고찰한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 분무의 초기 분열 길이는 분사후 약 0.2ms에서 5.5~6.3mm로 나타나고, 옥탄과 솔벤트의 경우 규칙적인 주기로 액막이 성장하여 양질의 무화를 보였으나, 에탄올의 경우에는 비중과 점도가 상대적으로 높아 무화되지 않고 액주상이 발달하는 구조를 보였다.
- 2) 액적의 크기는 옥탄이 솔벤트 보다 더 규칙성 있는 분포를 보이고, 옥탄의 경우 분무길이 50mm 근처에서, 솔벤트의 경우에는 70mm 근처에서 40 μ m 대의 작은 크기를 가지며, 분무중심부에서 바깥 쪽으로 갈수록 그 크기가 커지는 경향을 보였다.
- 3) 분사 초기의 분무각은 시간의 경과에 따라 증가하고, 정상 분무에 도달하면 일정한 크기의 각을 갖는 경향이 있는데, 3.5ms 이전에는 옥탄이 19.6°~22.3°, 솔벤트가 18.5°~21.8°의 값을, 그 이후에서는 21°~23°의 거의 일정한 값을 보였으며, 분무 도달거

리는 시간에 선형적으로 비례하고, 분사후 2.5ms까지는 옥탄, 솔벤트, 에탄올 순으로 빠르게 도달하는 것으로 나타났다.

- 4) 액적 운동속도는 분사 초기에 가장 빠르고, 비교적 작은 크기의 액적 분포를 갖는 분무길이 50mm 근처에서 가장 느린 속도로 운동하였으며, 옥탄이 210~330, 솔벤트가 270~330의 레이놀즈 수를 갖는 것으로 계산되었다.

참 고 문 헌

1. J. Senda, M. Yamaguchi, T. Wakashiro, T. Tsukamoto, K. Hojyo and H. Fujimoto, "Spray Characteristics of Pintle Type Injector under Low-Pressure Field", Proceedings of the 5th IC-LASS, Gaithersburg, MD, USA, pp.857-864, 1991.
2. M.M. Schechter, and M.B. Levin, "Air-Forced Fuel Injection System for 2-Stroke D.I. Gasoline Engine", SAE Paper 910064, 1991.
3. C.H. Daniels, L.W. Evers and Z. Han, "Evaluating the Influence of Fuel Preparation on the Performance of Spark-Ignited Engine", Proceedings of the 5th ICLASS, Gaithersburg, MD, USA, pp.813-820, 1991.
4. N.A. Henein, B. Jawad and E. Gulari, "Effects of Physical Properties of Fuels on Diesel Injection", Trans. of the ASME, Vol.112, pp.308-316, 1990.
5. F.V. Bracco, "Modelling of Engine Sprays", SAE Paper 850394, 1985.
6. K. Konishi, J. Sato, H. Okada, "Droplet Size Distribution of Diesel Fuel Spray", Trans. of the JSME, Vol.56, No.523, pp.874-879, 1989.
7. R.D. Reitz and R. Diwakar, "Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays", SAE Paper 860469, 1986.
8. S.P. Lin and Z.W. Lian, "Mechanisms of the Breakup of Liquid Jets", Journal of AIAA, Vol. 28, No.1, pp.120-126, 1989.

9. H. Hiroyasu, "Experimental and Theoretical Studies on the Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines", Proceedings of the 5th ICLASS, Gaithersburg, MD, USA, pp.17-31, 1991.
10. Z. Huang, L.F. Zhang and B.Z. Li, "The Laser Holographic Study on Fuel Atomization of Diesel Spray", International Symposium COMO-DIA 90, pp.303-308, 1990.

〈논 문〉 SAE NO. 953712

内燃機關에 있어서 熱發生率의 算出方法에 관한 研究

A Study on the Computation Method of Simple Heat Release Rate in Internal Combustion Engine

탁 영 조,* 하 총 료**
Y. J. Tak, J. Y. Ha

ABSTRACT

This study aims to compare the heat release calculated using the ensemble average of pressure data with the heat release calculated using the least squares method for pressure data. This paper propose a heat release computation method that can analyze the most correct, straight and simple method to analyse combustion phenomenon.

In conclusion, we found that the least squares method of third-order was the best computational method for heat release calculation.

주요기술용어 : Heat Release Rate(열발생률), Ensemble Average(앙상블평균), Smoothing(평탄화), The Least Squares Method(최소자승법)

1. 서 론

최근 들어 급격한 자동차의 증가로 인해 유해 배출가스에 의한 대기오염문제는 심각하며, 특히 디젤기관으로부터 배출되는 연소가스중의 NOx 와 미립자상의 배출물이 대기를 오염시키는 주요인 중의 하나다. 이와 같은 환경오염의 문제의 근원적인 해결책으로서는 연소실내에서의 연소 개선이 필요하고 이를위해서는 P-θ 선도를 이용한 정확한 연소해석이 요구된다. 따라서, 지금까지 일반 연구자가 수행해온 방법^{1, 2, 3, 4, 5)}과는

달리 연구자의 주관에 개입되지 않아도 해석이 가능할 정도의 충분한 양과 정도를 얻을 수 있는 측정장치와 연소해석 기술이 필요하다.

내연기관의 연소에 관한 정보는 압력 측정장치에 의해서 얻은 P-θ 선도에서 연소 최고 압력, 착화와 연소끝시기, 착화 지연, 압력 상승률, 압력 변화과정, 노크의 발생 유무, 열발생률등을 알 수 있다. 이 중에서 열발생률은 기관 출력 특성 및 배출 가스 특성에 관한 중요한 정보를 제공한다.

본 연구에서는 주어진 구동 조건에서 얻어진 P-θ 선도, 즉 압력데이터를 기존의 방법인 앙

* 정회원, 동아대학원

** 정회원, 동아대학교

상블 평균(20회)한 결과로써 구한 열발생률과 최소자승법에 있어서도 2, 3, 4차(次)의 경우와, 3차에서 3, 5, 7점으로 변화시킨 경우의 각 결과를 비교하여, 연소현상을 가장 현실에 가깝고 간단하게 해석할 수 있는 열발생률 계산법을 제안하는데 그 목적이 있다.

2. 연소해석을 위한 기초식

2.1 앙상블 평균

N번 채취한 각 사이클의 압력경과선도에서 크랭크각 θ 인 때의 평균 압력 $P(\theta)$ 를 앙상블 평균법(ensemble average technique)⁸⁾을 이용하여 다음 식으로 구하였다.

$$P(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(\theta) \quad (1)$$

2.2 열발생률

연소과정 중의 미소각도 $d\theta$ 에 대한 실린더내 연소가스의 유효 열발생률은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(V \frac{dP}{d\theta} + \kappa \cdot P \frac{dV}{d\theta} \right) \quad (2)$$

여기서,

P : 실린더내 가스압력[kgf/cm²]

V : 실린더내 가스체적[cm³]

κ : 비열비

A : 일의 열당량(1/42.68)[cal/kgf · cm]

본 연구에서는 비열비 $\kappa=1.3$ 으로 일정하다고 가정하였다.⁹⁾

2.3 최소자승법을 이용한 평탄화

각각의 분점(자료점) 즉, $x_i(i=0, 1, \dots, n)$ 에서 어떤 함수 $f(x)$ 에 대해서 근사함수 $p(x)$ 를 가정하면 함수 $f(x_i)$ 와 근사함수 $p(x_i)$ 는 각각의 분점 x_i 에서

$$\delta_i = f(X_i) - p(X_i); i=0, 1, \dots, n$$

의 차이를 갖게 된다. 그러므로 최소자승법이란 이 차이의 제곱의 합 즉,

$$E = \sum_{i=0}^n \delta_i^2 = \sum_{i=0}^n \{f(X_i) - p(X_i)\}^2 \quad (3)$$

이 최소가 되게 하는 근사함수 $p(x)$ 를 찾는 방법을 말한다. 또 본 연구에서 최소자승법의 근사함수 형으로서는 각각 2차, 3차, 4차 대수 방정식을 사용했다. 그리고 각각의 차수와 점수에 따른 근사함수 $p(x)$ 를 구하고 이 근사함수 $p(x)$ 를 사용해 함수 $f(x)$ 를 구하였다. 마지막으로 구한 함수 $f(x)$ 를 사용해 압력 데이터의 평탄화 작업을 행하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험기관 및 압력측정장치

실험장치는 실험기관, 기관 동력계, 연소 해석 장치 및 연소기간 측정장치 등으로 구성되며 Fig.1은 실험장치의 개요도이다.

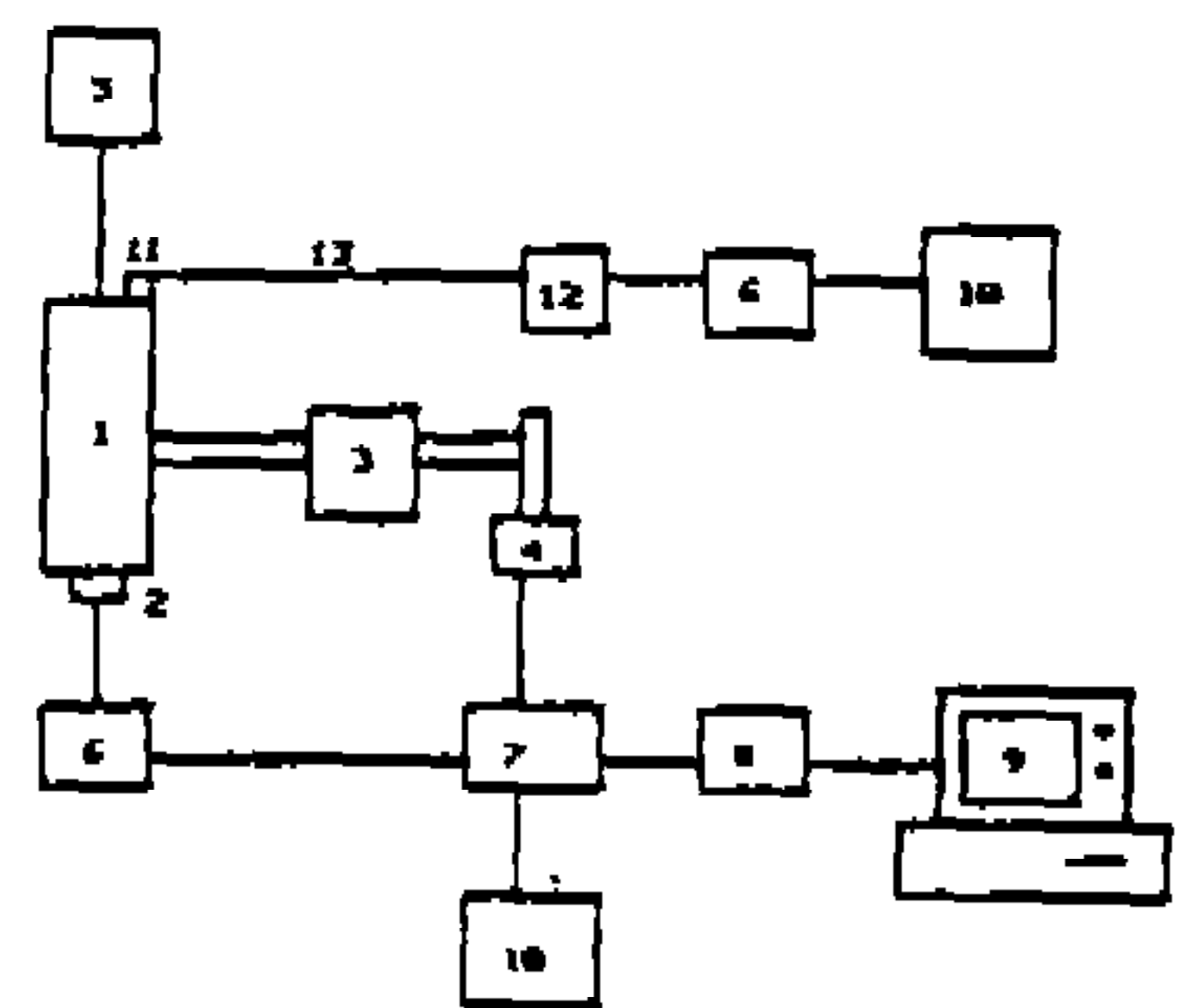


Fig.1 The schematic diagram of experimental apparatus

- ① Test engine
- ② Pressure transducer
- ③ Dynamometer
- ④ Crank angle detector and TDC pulse detector
- ⑤ Surging tank
- ⑥ Amplifier
- ⑦ Analog switch
- ⑧ A/D converter
- ⑨ Computer
- ⑩ Oscilloscope
- ⑪ Quartz glass adaptor
- ⑫ Photo TR
- ⑬ Quartz Fiber