

<논 문> SAE NO. 943741

디젤분무의 벽면충돌거동 및 분무입경측정

Wall Impingement Behavior and Droplet Size Measurement in Diesel Spray

이 장 회,* 김 태 권,* 최 인 수**
J. H. Lee, T. K. Kim, I. S. Choi

ABSTRACT

An experimental investigation was undertaken in a diesel spray to evaluate wall impingement behavior and droplet size distribution. Emphasis is placed on the possibility of the application for new combustion type which is based on OSKA-D type. Visualization were employed using optical scheme which was a spark shadowgraphy to observe the behavior of wall impingement caused by diesel spray vertically injected at the center of the combustion chamber. Droplet size measurements using Malvern system were made to quantify the visual observations with the surface diameter of impingement. The effects of the surface dia. variation on the droplet size during injection with the wall impingement spray are discussed. It was found that for the wall impingement spray the droplet size becomes greatly small rather than the spray without the wall impingement and the droplet deposition rate of the injection fuel is decreased as the surface area of impingement becomes small.

주요기술용어 : Diesel Spray(디젤분무), Wall Impingement(벽면충돌), Droplet Size(입경), Sauter Mean Diameter(SMD)

1. 서 론

고온 고압의 공기중에 연료를 분사시켜 연소가 일어나는 디젤엔진의 경우에 연료의 미립화 및 연료와 공기의 혼합과정은 연소현상을 이해하는데 가장 중요한 인자이다. 따라서, 어떻게 하면 디젤분무액적의 직경을 작게 하여 연료의 증발을 촉진시키고, 증발된 연료와 공기의 혼합을 잘 되게하여 연소시간을 짧게 하고 완전연소시킬 수

있으며 유해배출물을 저감시킬 수 있는가에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다.⁽¹⁻⁷⁾

그 하나의 연구방향이 고압분사방식이다. 고압분사는 연료의 미립화를 돕고 공기와 연료의 혼합을 촉진시켜 NO_x와 Soot를 동시에 저감시키는 매우 유의한 방법이다. 그러나, 고압분사에 동력이 크게 소모되기 때문에 기계효율 감소에 의한 출력의 감소현상이 나타나기도 하며, 고압관의 캐비테이션 침식(Cavitation erosion)문제 및

* 대전 KIMM 내연기관연구소, 정회원

** The University of New South Wasles Australia

고압 발생장치의 누설(Leakage) 등 아직 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다.⁽⁶⁾

최근에 와서는 분무의 미립화 및 공기와의 혼합을 촉진시키는 방법으로서 연료분무를 연소실 벽면에 충돌시키는 새로운 연소방식이 소개되고 있다. 이에 의하면 벽면에 충돌된 분무는 360° 전방향으로 확산되므로 공기와 연료의 혼합이 잘 될뿐 아니라 와류(Swirl)가 없어도 되므로 흡기 쪽에 흡입체적효율을 감소시키는 헬리컬 포트(Helical port) 등을 사용하지 않아도 된다. 따라서 흡입체적효율 상승에 의한 출력의 증가를 꾀할 수 있고 충돌된 분무입자는 미립화가 촉진되어 연소기간이 짧아질 뿐 아니라 완전연소가 이루어져 고압분사시와 같은 효과를 얻을 수 있다.⁽⁹⁾

10)

따라서 본 연구에서는 상온 상압에서 분사된 디젤분무와 연소실 중앙에 설치된 벽면에 충돌시킨 분무에 대해서 분무거동 및 입경을 조사하여 비교함으로써 벽면충돌에 의한 새로운 연소방식으로서의 가능성에 대하여 검토해보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 단발분사장치

실제의 디젤기관에서의 매 싸이클마다 연속적인 디젤분사가 이루어지고 있지만 제한된 공간 내에 연속적으로 분사되는 디젤분무는 주위면에 충돌되어 반사되거나 공기중에 산란되어 정확한 분무거동 및 액적측정이 어렵다. 따라서, 분무거동촬영 및 분무입경측정을 위해서는 실험장치 내의 압력실로 단발분사시킬 필요가 있다. 또 실험결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 실험시의 단발분사과정은 연속적인 분사과정과 근사하게 이루어져야만 한다.⁽¹²⁾

Fig.1(a)는 처음 시도되었던 단발분사장치로서 솔레노이드(Solenoid)를 하나 사용한 경우인데 솔레노이드가 장착된 노즐홀더 1의 분사압력을 60kg/cm²로 조정하고 노즐홀더 2의 분사압력을 120kg/cm²로 조정하였다. 솔레노이드를 작동시키지 않은 상태에서 캠축을 회전시키면 노즐홀더 1로만 분사가 이루어지다가 측정시간신호에 의

해서 솔레노이드를 순간적으로 작동시키면 솔레노이드가 노즐의 니들을 누르게 되어 순간적으로 노즐홀더 1의 분사압력이 증가하므로 노즐홀더 2로만 분사가 이루어지게 된다. 이 경우에 분사압력이 60kg/cm²에서 120kg/cm²으로 급격히 변함에 따라 고압관내 잔류압력의 차이로 인하여 단발분사과정이 연속적인 분사과정에 비해 분사율 및 분사기간 등에서 상당한 차이가 나타나게 된다.

따라서 잔류압력변화에 의한 분사과정의 차이를 최소화하기 위하여 Fig.1(b)와 같이 2개의 솔레노이드를 사용한 단발분사장치를 제작 사용하였다. 노즐홀더 1과 노즐홀더 2의 분사압력을 120kg/cm²로 조정한 후 노즐홀더 1에 부착된 솔레노이드 1을 해제시키고 노즐홀더 2에 부착된 솔레노이드 2를 작동시킨 상태에서 캠축을 회전시키면 솔레노이드 2가 노즐홀더 2의 니들을 누르고 있기 때문에 분사펌프에서 가압된 연료는 노즐홀더 1로만 분사되다가 측정시작신호에 의해서 일정기간 동안 솔레노이드 1을 작동시키고 동시에 솔레노이드 2를 해제시키면 순간적으로 노즐홀더 2로만 분사가 이루어진다. 이 경우에는 고압관내 잔류압력의 변화가 거의 없기 때문에 단발분사과정은 연속적인 분사과정과 매우 유사하게 나타나게 된다.

2.2 분무거동 촬영장치

Fig.2는 분무거동 촬영장치 구성도이다. 직류 모터에 의해서 구동되는 캠에 의해 가압된 연료는 노즐홀더 1로 분사되다가 측정시작신호가 들어오면 캠축에 부착된 반사판에 의해서 포토센서(Photo sensor)가 솔레노이드 작동신호를 발생한다. 이 신호에 의해서 솔레노이드 콘트롤러(Solenoid controller)는 작동중에 솔레노이드 2를 해제하고 동시에 작동해제중인 솔레노이드 1을 작동시키므로써 제한된 공간인 압력실로 분사가 이루어진다. 이 때 솔레노이드 콘트롤러에서 설정된 시간 만큼 솔레노이드가 작동 또는 해제되며 작동시간은 10~99990μs 범위 내에서 10μs씩 조절 가능하며 노즐홀더 1로 분사된 분무는 다시 연료탱크로 되돌아가 재사용된다. 노즐홀더 2로

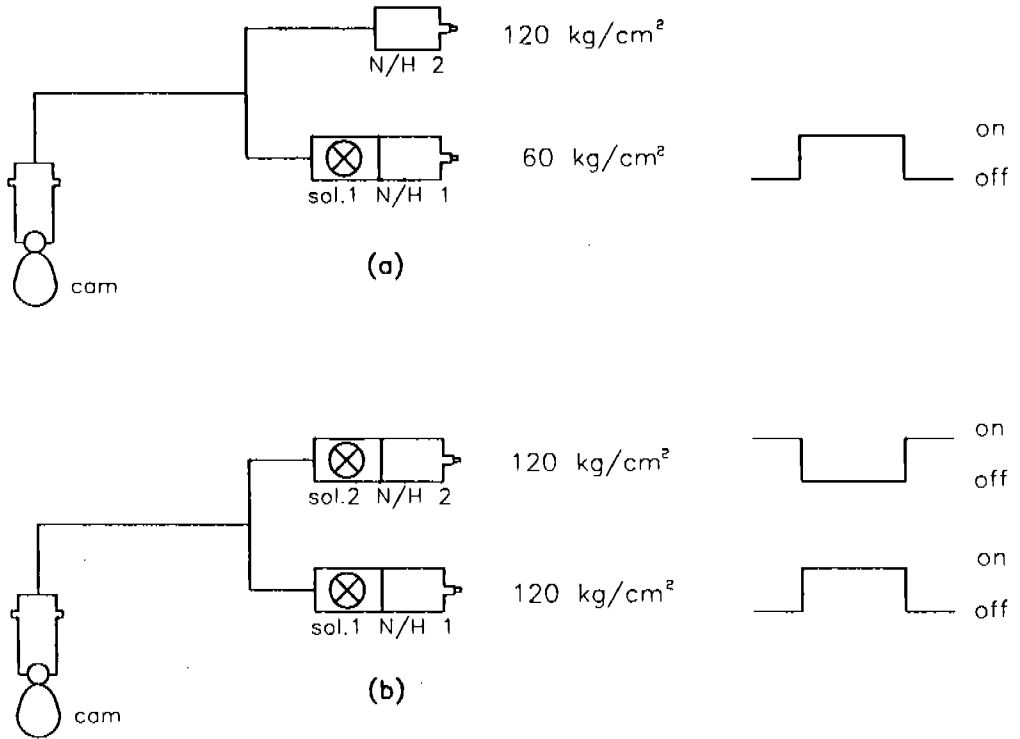


Fig.1 Single injection system.

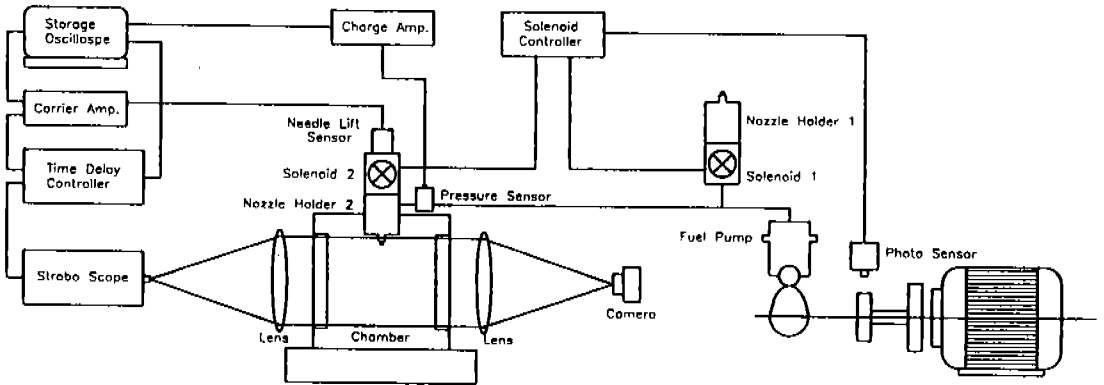


Fig.2 Schematic of the spark shadowgraphy system

분사되는 순간에 니들리프트 센서(Needle lift sensor)는 새로운 신호를 발생하고, 이 신호는 시간지연장치(Time delay controller)에서 일정시간 만큼 지연된 후 스트로보스코프(Strobo-scope) 구동신호를 발생한다. 사진은 분무의 형태를 관찰하기 위해 단순히 역조명 사진기법(Back-illuminated photograph)을 사용하였다. 시간지연장치에서 지연시간을 조절하므로써 분사개시후의 각 시간별로 분무거동촬영을 할 수 있으며 지연시간은 0~9999 μ s 간격으로 조절 가능토록하였다.

2.3 분무입경 측정장치

분무입경 측정을 위해서 Fig2의 분무거동촬영 장치 구성도에서 촬영부인 카메라와 2개의 볼록 렌즈, 스트로보스코프를 제외하고, 영국 멜번(Malvern)사의 분무입경측정장비를 측정부 좌우에 설치하여 사용하였다. 분무입경측정시에도 앞에서 설명한 단발분사장치와 시간지연장치는 분무거동촬영장치의 것을 그대로 사용하고 시간지연장치에서 발생하는 트리거(Trigger) 신호에 의해서 분무입경은 측정되며 측정결과는 전용 컴퓨터(Micro-computer)에서 처리되어 평균입경별 체적분포도 등이 구해진다.

분무입경의 측정원리는 빔 익스펜더(Beam expander) 등에 의해서 만들어진 평행광은 큰 입자에 의해서 작은 각으로 산란되고 작은 입자에 의해서 큰 각으로 산란된다. 이렇게 산란된 빛은 퓨리에 변환 렌즈(Fourier transform lens)에 의해서 같은 각을 갖고 입사된 여러 갈래의 빛은 렌즈 중심축에서 촛점거리 만큼 떨어져서 렌즈와 평행인 평판의 동심원에 모이게 된다. 따라서 일정거리(Cut off distance)내에서 여러 입자들에 의해서 산란된 빛은 퓨리에 변환 렌즈에 의해서 산란된 각도에 따라 링(Ring) 모양의 포토검출기(Photo detector)에 각각 모이게 된다. 링 모양의 포토검출기에서 검출되는 산란된 빛의 양을 동시에 측정하여 비교 계산하므로써 분무입경의 체적분포 및 평균분무입경이 구해진다.⁽¹²⁾

분무입경 측정에 사용된 퓨리에 변환 렌즈의 촛점거리는 300mm이고 Vignetting 효과에 의한 오차를 줄이기 위해 400mm 이내(Lens out-dista-

nce)에서 분무입경이 측정되도록 렌즈와 노즐 중심축까지의 거리를 350mm로 하였으며 사용 렌즈의 분무입경 측정범위는 5.8~564 μ m이다.

2.4 실험방법

분무거동촬영 및 입경측정은 Table 1의 조건에서 수행되었다. 분무거동촬영은 분사초기에는 100 μ s 간격으로 촬영하였고, 0.5ms 이후에는 0.2~0.5ms 간격으로 촬영하였다. 분무입경측정 위치는 Fig3에 나타난 바와 같이 단순분사시에는 노즐출구에서 100mm 떨어진 곳(L=100)에서 측정하였으며, 충돌분사시에는 분무충돌면을 노즐에서 24mm 떨어진 곳에 설치하고 분무입경측정은 노즐 중심축에서 15mm 떨어지고 (r=15), 노즐선단으로부터 19mm 떨어진 곳(Z=19)에서, 충돌면의 직경 d=10, 12, 15mm인 3가지 경우에 대해서 측정하였으며, 분무거동 촬영결과 충돌벽면을 타고 흐르는 보다 굵은 분무의 입경을 측정하기 위하여 d=15인 경우의 충돌면에 대해서 Z=23인 위치에서 분무입경을 측정하였다. 분무입경의 측정시간은 단순분사시에는 분사개시후 1.35, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.0, 3.4, 3.9, 4.5, 5.0ms에 대해서 측정하였고, 충돌분사시에는 1.35ms 대신 1.2ms에 대해서 측정하였으며, 이는 측정위치가 다른 관계로 각 측정부위에 분무선단이 도달하는 시간이 다르기 때문이다.

측정결과는 5회 반복 측정한 후 그 평균값을 취하였으며 분무입경의 체적분포를 구하기 위해서는 Rosin-Rammler의 분포함수를 이용하였다. Fig4는 분무거동촬영 및 입경측정시에 사용된 디젤노즐의 분사압력과 니들의 양정을 나타낸다.

Table 1 Experimental Condition

Revolution	500rpm
Nozzle	DN4SK1
Fuel Pump	PFR1K
Injetion Quantity/Cycle	50.1mg/cycle
Injection Pressure	120kg/cm ²
Ambient Pressure	Atmospheric

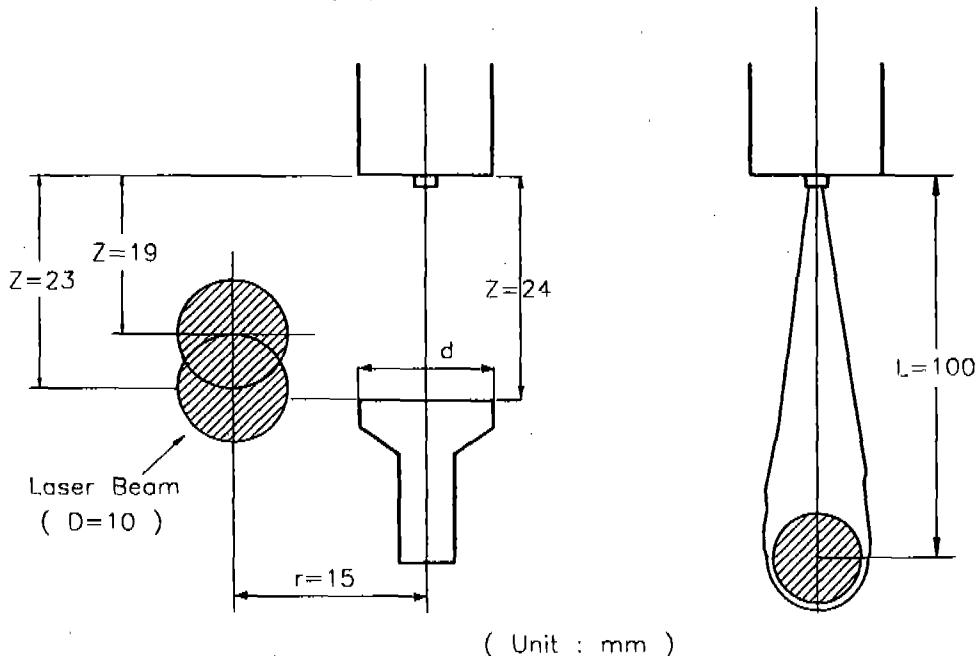


Fig.3 Measuring position of droplet size.

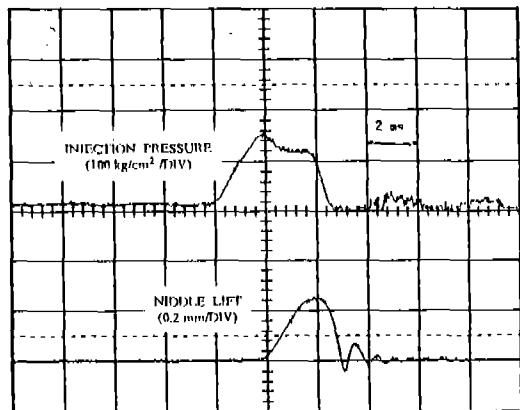


Fig.4 Needle lift and injection pressure during the experiment.

3. 실험결과

3.1 분무거동 촬영결과

Fig.5는 대기압 분위기중에 분사된 충돌분사시의 분무거동을 순간 촬영한 결과를 보이고 있다. 분사초기의 분무의 형태는 공기저항에 의해서

어린 소나무 형태를 하고 있으나 분무 증양으로 계속 유입되는 분무의 운동에너지에 의해서 초기분무의 일부가 좌우로 갈라지고 있음을 알 수 있으며, 분사개시후 0.8ms에서 충돌면에 도달하는 것으로 추정되며 1.2ms후에 측정부 위에 분무선단이 도달하고 있다. 분사개시후 2.4ms부터는 충돌면을 타고 흐르는 보다 굵은 액적이 발생하고 있으며 이는 충돌면의 마찰에 의해서 나타나는 현상으로 추정된다.

분사개시후 3.8ms에서 촬영된 사진에 의하면 노즐출구에서 분무줄기가 가능어지다가 다시 끊어지는 현상이 나타나고 있는데 이는 Fig.4의 니들양정에서 알 수 있듯이 2차 분사에 의한 것으로 사료된다. 또 분사개시후 5.4ms의 분무거동촬영 사진에는 Dribbling에 의한 분무거동이 나타나고 있다. Fig.6의 단순분사시의 분무거동 촬영결과이다.

3.2 분무입경 측정결과

Fig.7은 분무충돌면의 직경 $d=15$ 이고 $Z=19$ 에서 측정된 시간변화에 따른 분무입경별 체적분포도로서 분무선단이 측정위치에 도달하는 $t=1.2$

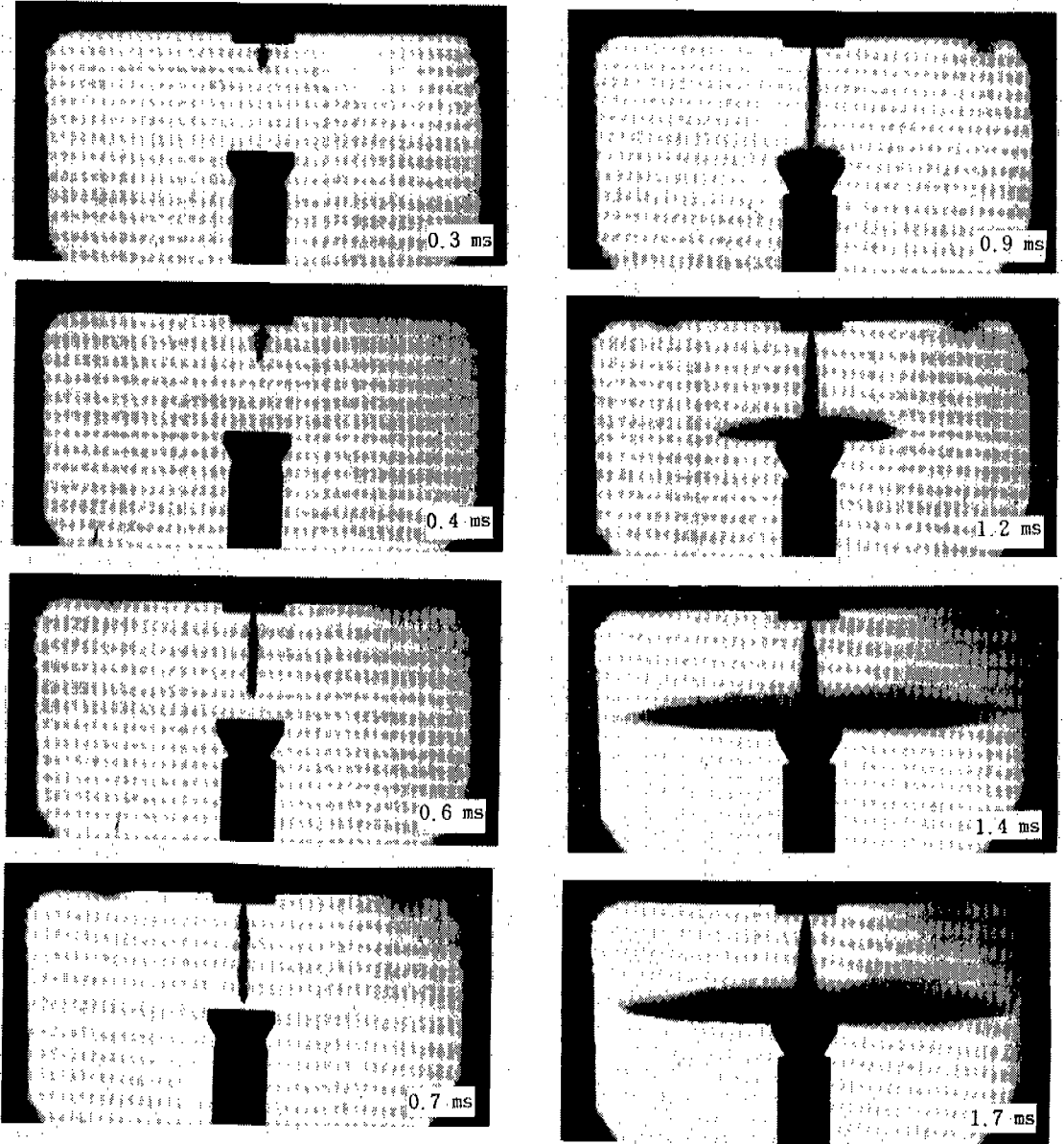
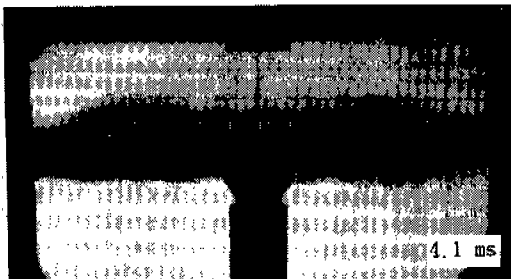
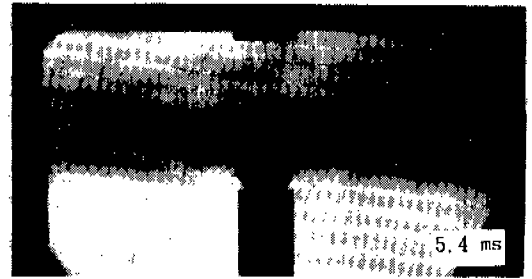
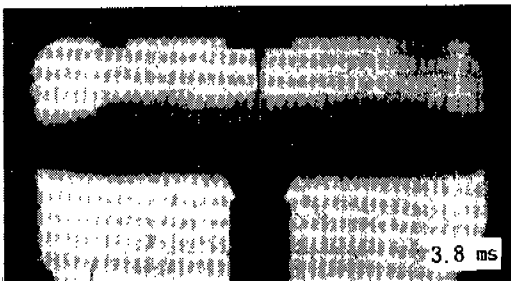
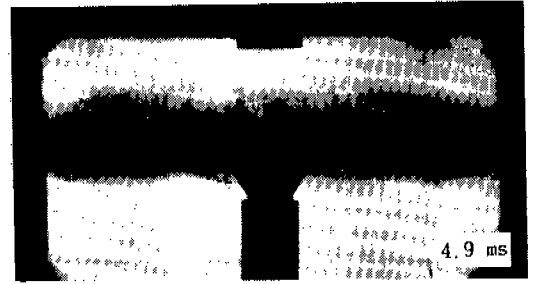
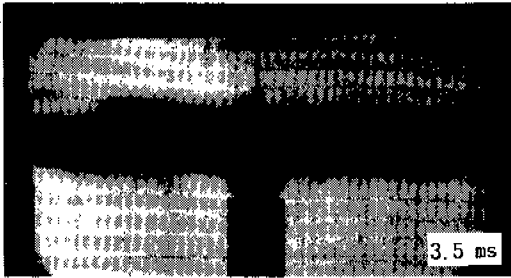
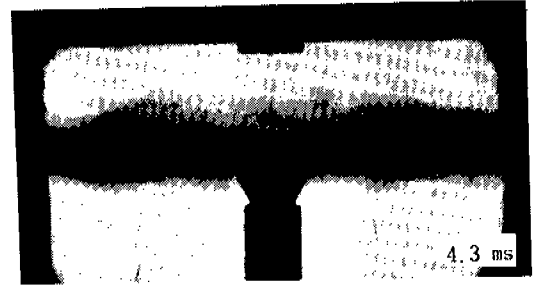
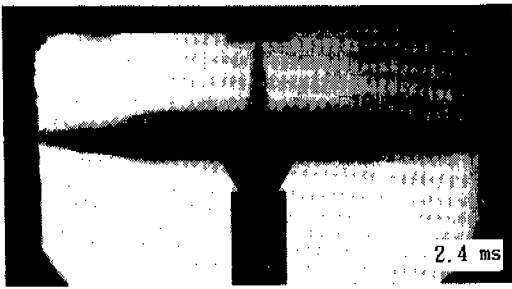


Fig.5 Spray motion by impingement



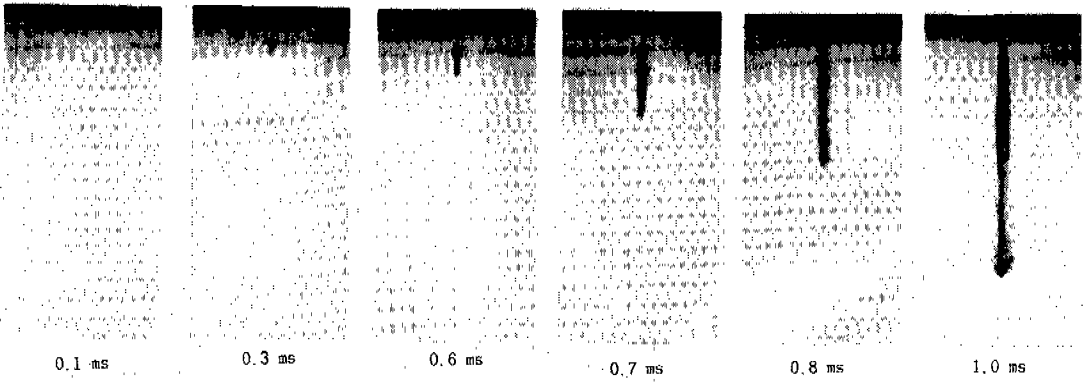


Fig.6 Spray motion without impingement

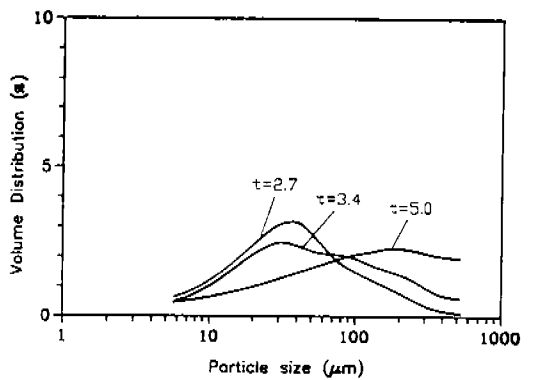
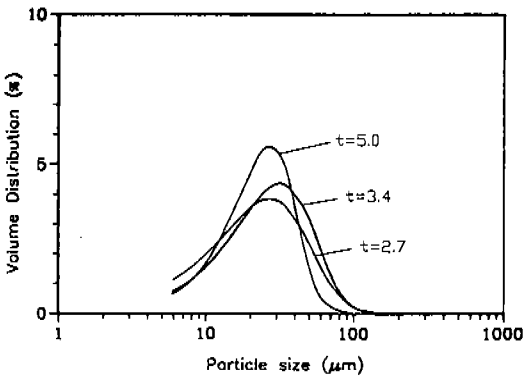
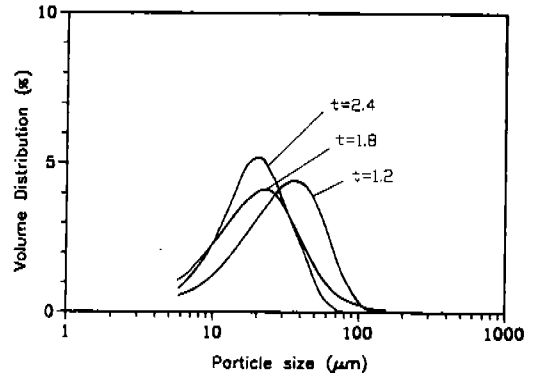
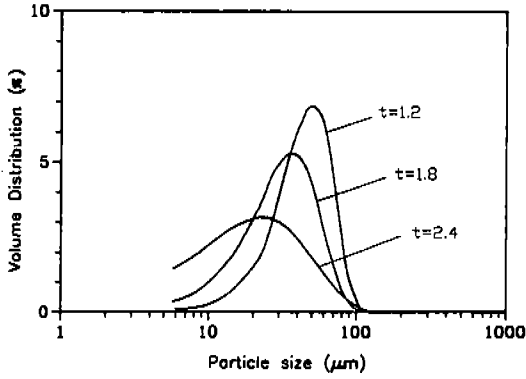


Fig.7 Particle size distribution with time after injection at $d=15$ and $Z=19$

Fig.8 Particle size distribution with time after injection at $d=15$ and $Z=23$

ms에서의 입경별 체적분포는 비교적 분무입경이 큰쪽에 주로 분포되어 있다가 시간이 경과함에 따라 입경별 체적분포가 분무입경이 작은쪽으로 이동하며 $t=2.4\text{ms}$ 이후 부터는 다시 분사입경이 큰쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있으며, 이는 분사초기에 유체의 관성에 의해서 압력에너지가 운동에너지로 변환되는데 시간이 걸리는 관계로 분무선단의 관통속도가 작게 나타나고, 분사 중반에는 충분히 발달된 운동에너지에 의해서 미립화가 촉진되다가 분사말기에 분사압력강하에 의해 운동에너지가 다시 약화되기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. $t=5.0\text{ms}$ 에서의 입경별 체적분포는 분사가 끝난후 충돌된 분무가 공기중에 산란되어 있는 분무입자가 측정된 결과이다.

Fig.8은 분무충돌면의 직경 $d=15$ 이고, 측정위치 $Z=19$ 에서 $Z=23$ 으로 변경시킨 상태에서 측정된 분무입경별 체적분포도로서 분사초기에는 Fig.7과 같은 경향으로 보이고 있으나 분사개시후 $t=2.7\text{ms}$ 이후에는 충돌분무의 일부가 충돌면과의 마찰에 의해서 충돌면을 타고 흐르는 현상에 의해 미립화가 촉진되지 못하고 있는 것(보다 굵은 입자가 나타나는 것)으로 생각된다.

Fig.9는 단순분사시의 분무입경별 체적분포도로서 분무선단이 측정위치에 도달하는 $t=1.35\text{ms}$ 에서의 분무입경별 체적분포에 의하면 SMD가 $564\mu\text{m}$ 을 초과하는 입자가 존재함을 알 수 있으며, 시간이 경과함에 따라 입경별 체적분포가 작은 쪽으로 이동하고 있다. $t=4.5\text{ms}$ 인 경우에는 분사된 분무가 측정된 결과이며 $t=5.0\text{ms}$ 에서 측정된 결과는 이차분사에 의한 것으로 생각된다.

Fig.10은 $Z=19$ 에서 분무충돌면의 직경을 달리 한 경우에 측정된 분무입경(SMD)으로서 분무충돌면적이 작으면 작을수록 $t=2.4\text{ms}$ 의 경우를 제외하고 분무입경이 작아지고 있음을 알 수 있으며, 앞에서 설명한 바와 마찬가지로 분사초기에 분무입경이 크게 나타나다가 분사 중반에 왕성한 운동에너지에 의해서 분무입경이 작아지고 분사말기에 분사압력강하에 의해 운동에너지가 약화되면서 분무입경이 다시 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.11은 분무충돌면의 직경 $d=15$ 인 경우에

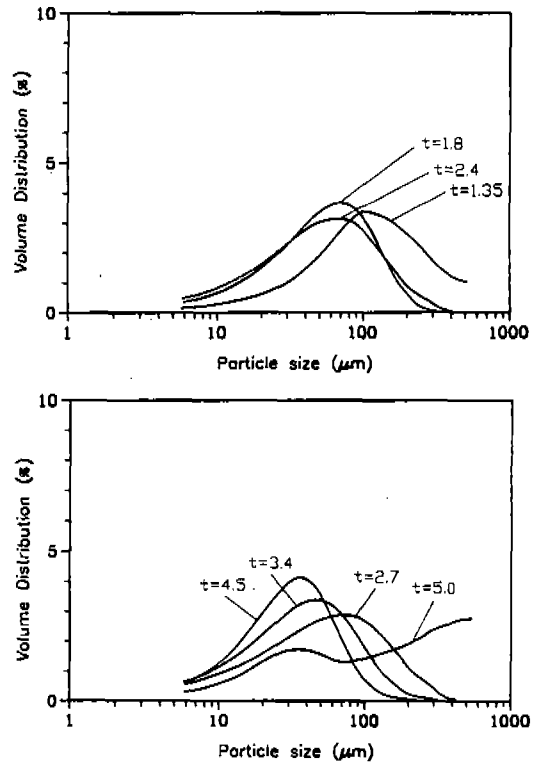


Fig.9 Particle size distribution with time after injection at $L=100$.

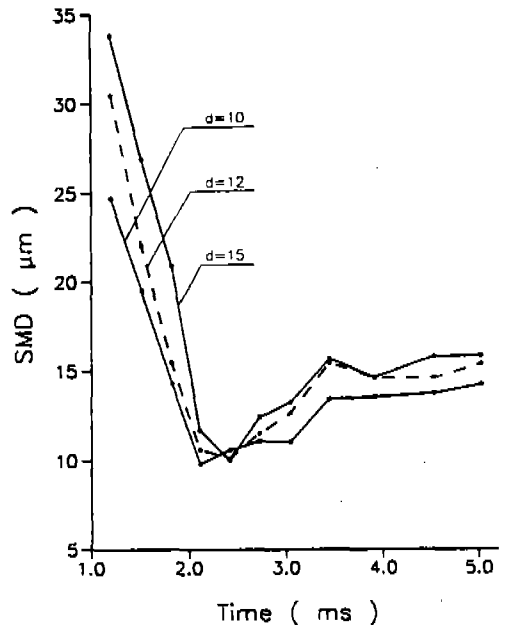


Fig.10 SMD with impinging surface area.

분무입경 측정위치를 $Z=19$ 와 $Z=23$ 에서 측정결과와 단순분사시이 분무입경측정 결과로서 $Z=19$ 에서 측정한 입경이 단순분사시보다 작으며 $Z=23$ 에서 측정한 입경은 분사초기에 상당히 작게 나타나다가 분사중반 이후에는 충돌면과 분무의 마찰에 의해서 단순분사시 보다도 입경이 더 크게 나타나다. 단순분사시에 $t=5.0ms$ 에서 분무입경이 갑자기 증가하는 것은 이차분사에 의해 나타나는 현상이다.

Fig.12는 한번의 분사 싸이클에 대해서 각 측정위치별로 사이클 평균한(Cycle averaged) 분무입경별 체적분포도로서 앞에서 설명한 실험조건에서 이차분사가 나타나는 $t=5.0ms$ 의 결과를 제외하고 계산한 평균값이며 Table 2는 사이클 평균한 분무입경의 크기이다.

Fig.12와 Table 2에서 알 수 있듯이 단순분사시 보다는 충돌분사시의 분무입경이 더 작게 나타나고 있음을 알 수 있으며 충돌분사시 충돌벽면을 타고 흐르는 경우에도 단순분사 보다는 입경이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 충돌분무시에 충돌면에 부착되는 연료의 양을 전체분사량으로 나눈 값을 부착율로 정의하여 부착된 연료의 양을 미소량 저울(Micro-scale)로 측정한 결과 충돌면의 직경이 작으면 작을수록 부착율이 작게 나타났다. 또 충돌면의 면적이 작아짐에 따라 분무입경이 작아지고 마찰면적이 줄어들므로 충돌면의 직경 $d=10$, $Z=23$ 위치에 대해서 실험을 수행할 경우 $d=15$ 의 경우보다 분무입경이 작게 나타날 것으로 추정된다.

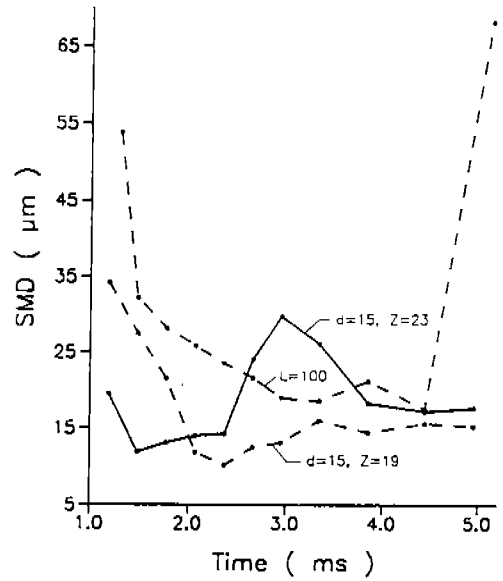


Fig.11 Comparison of SMD with measuring condition.

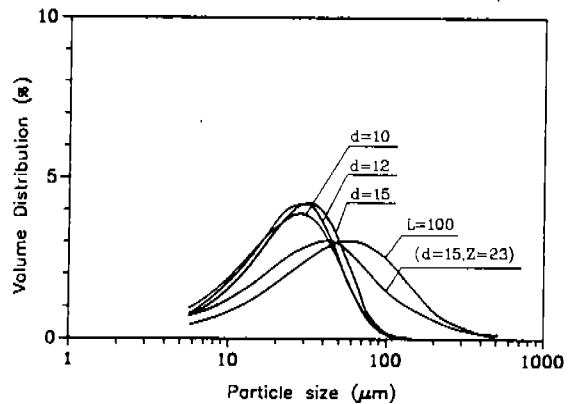


Fig.12 Cycle averaged particle size distribution.

Table 2 Measured Droplet Size

Impingement Surface Diameter(mm)	Cycle Averaged SMD	Deposition Rate(%)
d=10	12.95	3.85
d=12	14.05	6.5
d=15	15.08	9.64
d=15($Z=23$)	17.03	
L=100	23.01	

4. 결 론

참 고 문 헌

단순분사시에 충돌분사시의 분무거동 및 입경 측정을 위하여 단발분사장치를 제작하는 등 실험장치를 구성하였고, 각 실험조건별로 분무거동촬영 및 분무입경측정을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분사초기에는 유체의 관성과 공기저항에 의해서 분무선단의 운동에너지는 충분치 못하여 분무입경이 비교적 크게 나타남을 알 수 있었고 분무거동 촬영결과 초기분무의 일부는 분무 중앙으로 계속 유입되는 분무의 속도에너지에 의해서 분무 중심에서 벗어나 미립화가 일어남을 알 수 있었다.
- 2) 충돌분사시의 분무입경이 단순분사시의 분무입경에 비해서 현저하게 감소함을 알 수 있으며 충돌분사시 충돌면의 면적이 작으면 작을수록 분사된 연료의 부착율은 감소하였다.
- 3) 충돌면의 조도(roughness)가 거칠게 가공된 상태에서 실험이 수행되었기 때문에 충돌면의 면가공을 매끈하게 한다면 분사된 연료의 부착율을 감소시킬 수 있고 분사말기에 충돌면과의 마찰에 의해 나타나는 분무입경의 증가도 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

본 실험이 상온상압에서 수행되었으므로 가압된 상태에서 실험을 수행하면 분무관통속도가 저하되어 충돌에너지가 감소하므로 분무입경은 증가할 것으로 추정되나, 실제 엔진에서 분사초기에 피스톤은 상승 중이므로 상대적 관통속도가 증가되어 이는 분무입경을 감소시키는 방향으로 작용하므로 벽면 충돌에 의한 연소방식은 어느 정도 타당성이 있을 것으로 추정된다.

1. H. Hiroyasu, et al., "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE 740715, 1974.
2. 岡田博 외, "ディーゼル噴霧の粒径分布", 日本機械學會論文集(B編), Vol.56, No.523, 1990, pp.320-325.
3. 廣安博之 외, "高壓霧氣中に噴射されたディーゼル噴霧の平均粒径", 日本機械學會論文集(B編), Vol.55, No.518, 1989, pp.3239-3245.
4. H. Hiroyasu, et al., "Structure of Fuel Spray in Diesel Engines", SAE Paper 900475, 1990.
5. S. Matsuoka, et al., "Measurement of Droplet Diameter and Fuel Concentration in a Non-Evaporating Diesel Spray by Means of an Image Analysis of Shadow Photographs", SAE 840276, 1984.
6. R.D. Reitz, et al., "Effect of Drop Breakup on Fuel Spray", SAE Paper 860469, 1986.
7. G. Takeshi Sato, Structure of Diesel Spray, IC-LASS-85 Proceedings.
8. 嶋田泰三 외, "高壓燃料噴死によるエンジン性能の改善", 内燃機關, Vol.29, No.367, 1990.
9. 松岡 信, "新しいディーゼル燃料ユニセル燃料ユニセプとOSKA-D燃料方式", 内燃機關, Vol.28, No.360, 1989, pp.79-88.
10. 藤本元 외, "壁面衝突ディーゼル噴霧の性状(その1)", 日本機械學會論文集(B編), Vol.54, No.504, 1988, pp.2252-2259.
11. 藤本元 외, "壁面衝突ディーゼル噴霧の性状(その2)", 日本機械學會論文集(B編), Vol.56, No.521, 1990, pp.227-234.
12. 배종욱, 디젤기관외 연료분무 특성에 관한 연구, 부산수산대학교 박사학위논문, 1990.
13. System 2600-Instruction Manual, Malvern Instruments Ltd.