

디젤분무의 분무특성에 관한 실험적 연구

고경남* · 허종철**

An Experimental Study on Spray Mechanism of Diesel Spray

Kyung-Nam Ko* and Jong-Chul Huh**

ABSTRACT

This experimental study has been conducted to investigate spray mechanism of diesel spray under the parameters of injection pressure and ambient pressure. Also this study provides the information on effect of sac chamber. The results obtained in this study are as follows : The higher ambient pressure, the shorter length of the ligaments and atomization is happened droplet from ligament rapidly. The fuel which remain in sac chamber and orifice becomes projected liquid column of spray tip at initial stage, this is atomized by overtaking of spray tip for time elapsed.

Key words : Diesel spray, Spray tip penetration, Spray tip velocity, Spray angle, Sac chamber

1. 서 론

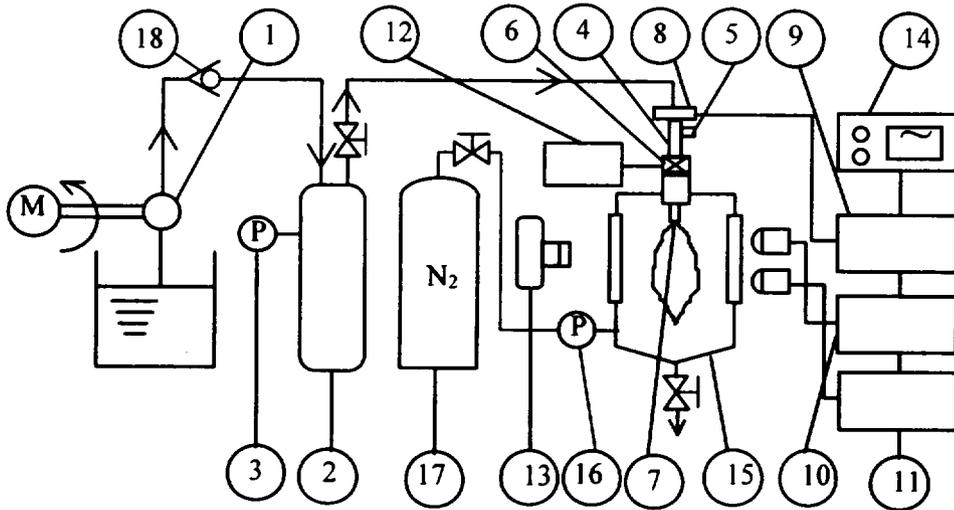
디젤기관은 주로 중대형 자동차에 대한 주된 원동기로서 널리 사용되어져 왔으나 이 엔진의 높은 열효율 및 낮은 오염물질형성 특성 때문에 최근 소형자동차에 대한 적용이 큰 관심을 불러 일으키고 있다. 일반적으로 액체연료의 미립화 목적은 체적당 표면적을 크게하는 것으로 디젤기관의 경우 요구되는

분무의 특성은 기관의 형식이나 성능에 따라 다르다. 따라서 연료를 미립화 하는데는 그 목적이나 분무에 대한 요구를 충분히 파악하여 알맞은 미립화를 도모하는 것이 중요하다.

디젤분무의 경우 분사개시후 약 1-2ms의 착화지연기간 중에 연료가 충분히 무화되어 증발되어야 하고 분무길이와 시간등을 고려할 때 연료분무의 발달상태 및 분열과정을 정량적으로 분석하는 것은 어려운점이 많다. 이것은 분사기 종류의 다양성과 분열현상이 매우 빠르게, 또 매우 복잡한 원인에 의하여 일어난다고 사료되기 때문이다. 그러므로 연료가 연소하기전 증발,

* 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 기계공학과
Dept. of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ.



- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1. Plunger Pump | 10. Nanolite |
| 2. 1st Accumulator | 11. Stroboscope |
| 3. Pressure Gauge | 12. Nozzle Controller |
| 4. 2nd Accumulator | 13. Camera |
| 5. Pressure Transducer | 14. Oscilloscope |
| 6. Solenoid | 15. Pressure Chamber |
| 7. Fuel Injection Nozzle | 16. Pressure Gauge |
| 8. Photo - interrupter | 17. N ₂ Gas Bomb |
| 9. Pulse Generator Delay Circuit | 18. Check valve |

Fig. 1 Experimental apparatus

혼합기 형성과정 등을 구명하기 위해서는 분사 초기의 분무의 분열, 발달상태등 분무특성을 정확하게 파악하는 연구가 선행되어야 한다¹⁾.

디젤기관에 대한 지금까지의 연구는 엔진의 성능향상과 효율향상이 주 관심사였다^{2),3)}. 그러나 최근의 스모그현상, 산성비, 지구온난화 등에 의한 환경파괴에 대한 의식이 고조되면서 쾌적한 생활환경의 추구에 따라 배기가스에 대한 연구도 주요과제로 대두되고 있다⁴⁾. Reitz⁵⁾는 분류의 미립과 구조를 광범위한 사진촬영에 의해 구명하였고, 그중 분사초기의 분류속도는 일정한 값이 됨을 보였다. Hiroyasu 등⁶⁾은 분사압력이 일정한 분사계를 사용하여 분무선단도달거리와 분무각을 구하였고 분무선단도달거리를 연료의 분사개시시간으로부터 경

과시간의 1승에 비례하는 영역과 경과시간의 0.5승에 비례하는 영역으로 나누어 실험식을 구하였다. 고 등⁷⁾은 분위기압력을 3MPa 까지 올릴 수 있는 압력용기와 직경이 다른 단공노즐 3개에 대해 실험분석한 결과 노즐직경이 작을 수록 천이점이 일찍 발생함을 규명하였다. 송 등⁸⁾은 분사압력과 노즐직경변화에 따른 디젤노즐에서의 분무특성을 실험한 결과 노즐직경이 너무 크게되면 무화가 되지 않고 너무 작으면 관통거리가 짧아지는 문제점이 발생하기 때문에 노즐직경은 연소실형상에 따라 최적의 상태로 설계되어야 함을 밝혔다.

이상의 연구동향을 살펴보면 착화지연후의 연소와 배기가스의 상태를 결정하는 분무초기는 아직 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 직

경이 0.35mm인 단공노즐을 사용하여 분사개시후 2ms까지의 분무초기에 대해 전체사진과 확대사진 촬영에 의한 디젤분무의 정량적인 분석과 분무특성을 밝혀 연소실설계의 기초자료를 얻고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 연료분사 실험장치는 차량용 6기통 디젤엔진에 사용되는 분사펌프를 이용하여 연료분사 시스템, 연료분사 제어장치, 신호지연장치 및 스트로보스코프와 나노라이트를 광원으로 하는 사진 촬영장치로 구성하였다. 자동차용 분사펌프를 가변모터에 연결, 150rpm에서 1800rpm까지 회전수를 변동시킬 수 있게 하여 플런저펌프 1개 만을 연료의 가압장치로 사용하였고 나머지 5개는 다시 연료탱크로 복귀시켰다. 본 실험에 사용한 실험장치의 개요도는 Fig. 1에 도시하였다.

연료탱크내의 필터를 통과하며 여과된 연료는 소정의 압력에 도달할 때까지 가압되어 제 1, 제 2 축압실에 저장된다. 분사펌프와 분사노즐 사이에 설치된 제 1 축압실(2)과 제 2 축압실(4)은 가압된 연료가 연료분사장치의 최종기구인 노즐(7)을 거쳐 분사되는 동안 시간경과에 따른 분사율을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 제 1 축압실은 내압이 30MPa, 내부체적 5.11리터이며 주로 플런저펌프에서 고압연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여 주는 역할을 하고, 분사노즐입구에 설치된 제 2 축압실은 최종적으로 디젤연료가 노즐에서 분사되는 동안의 설정 압력의 강하와 맥동을 가능한 없애주는 역할을 한다.

본 실험에 사용한 연료분사 제어장치는 실용노즐 홀더의 상부에 솔레노이드(6)를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드를 작동시키지 않는 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니들을 압착하고 있는 스펀들의 상부판을 끌어 당기게 되며, 노즐 제어장치에 설정된 시간동안 연료가 분무관측용 용기내로 분사된다. 분무관측용 고압용기

(15)는 내부직경 196mm, 길이 500mm로 양측면에 사진촬영이 가능하도록 길이 230mm, 폭 130mm, 두께가 19mm인 강화유리 관측창을 부착하였다. 연료분사압력을 보다 정확하게 조정하기 위하여 노즐홀더의 연료 입구측에 압력변환기(5)를 부착하였고 이때 측정된 압력은 디지털 지시기에 의해 나타난다. 축압실과 분사노즐 사이에 아나로그 압력계를 부착하였다. 플런저펌프와 제 1 축압실 사이에 체크밸브(16)를 설치하여 분사압력을 올리는 데 무리가 없도록 하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 단공노즐의 상세도이며 노즐직경이 0.35mm 이고 노즐형상비는 3.75로 하여 실험을 행하였다.

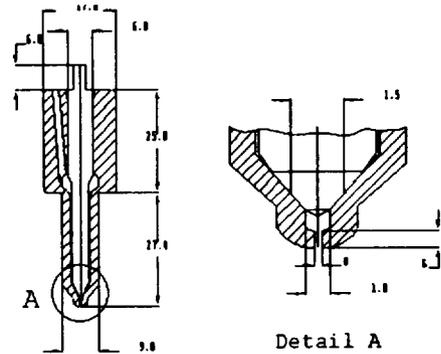


Fig. 2 Detail of single hole nozzle

노즐을 통하여 분사된 분무가 분사직후로부터 임의시간 경과후까지의 분무형상을 촬영하기 위한 분사시작 신호는 노즐 니들의 상단부와 접촉하고 있는 전자밸브의 스펀들 상단사이에 위치한 포토인터럽터의 신호를 이용하였다. 노즐 제어장치에 의해 전자밸브가 작동하면 스펀들상단이 상승하여 포토인터럽터의 빛을 차단하는 순간에 분사시작 신호가 발생하게 되어 펄스발생 지연회로(9)에서 재 증폭되고 설정된 시간만큼 지연된 후에 스트로보스코프나 나노라이트에 입력되어 적정노출 광량으로 순간 발광 시킨다. 이 때 카메라는 B-셔터 상태이므로 이 순간광을 받아들여 필름에 감광되어 촬영된다. 전체분무 사진촬영에는 105mm 마이크로렌즈를 사용하였고 분무확대사진촬영은 텔레마이크로

Table 1. Photographic conditions

Discriptions	Conditions
Injection press. (MPa)	7, 14
Ambient press. (MPa)	0.1, 1, 3
Ambient temperature	Room temperature
Fuel	Low sulfur Diesel oil (S=0.84)
Nozzle	Single hole (L/D=3.57)
Lens	105mm Micro lens, Telemicro lens
Camera	Nikon F-2
Spark light sources	Strobo (Pulse duration : 20 μ s) Nanolite (Pulse duration : 17 ns)

렌즈를 사용하였다.

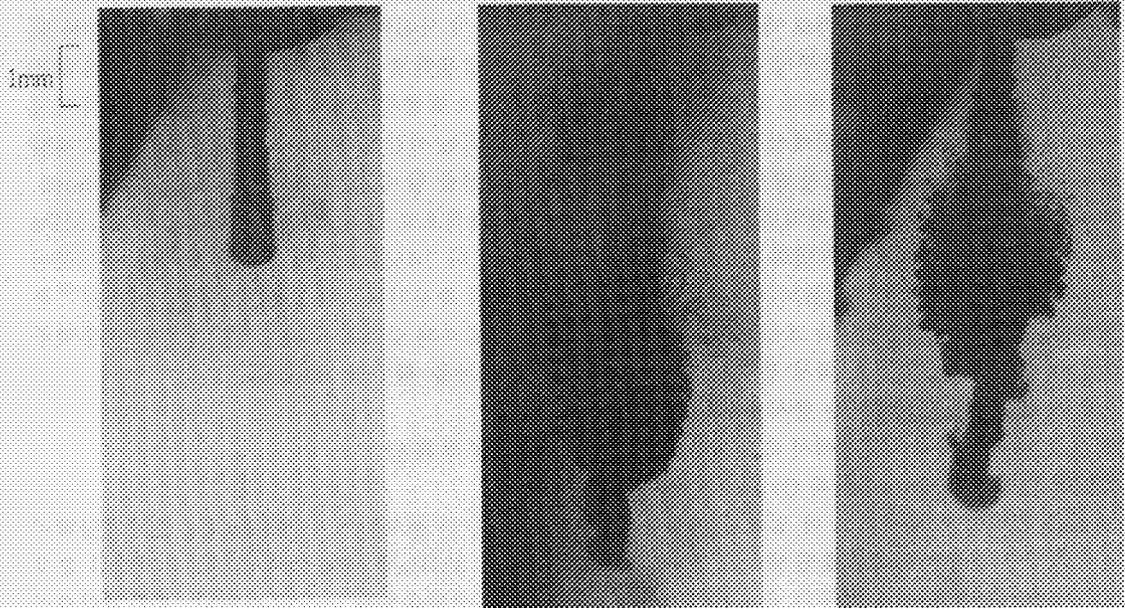
디젤분무는 분사속도가 고속이므로 정지된 상을 촬영하기가 상용 μ s단위 스트로보스코프 광원으로는 곤란하므로 본 연구에서는 발광시간이 17ns인 나노라이트를 분무확대 사진촬영에 사용하였다. 이때 확대촬영용 텔레마이크로렌즈는 확대배율이 4.5배이므로 촬영된 분무의 형상을 인화할 경우 약 15배 확대가 가능하다. 또한 촬영된 분무사진은 같은 비례척으로 촬영된 스케일로 분무선단 도달거리, 분무각, 분무원주각 등을 직접 측정하고 분석하였다. 사진촬영 및 실험조건은 Table 1과 같다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 확대사진관찰

Photo. 1은 분사압력이 7MPa, 분위기압력이 0.1, 1, 3MPa에서, 분사개시후 0.1ms일때의 분무모양이다. 분위기압력이 대기압인 (A)사진의 0.1MPa일 때는 액사나 액적이 전혀 보이지 않는 액주상태를 보여준다. 노즐구멍과 바로 인접한 액주는 교란되지 않는 스무스한 액주로서 주위기체와의 마찰이 이루어질 시간적, 공간적 여유가 없기 때문인 것으로 사료되며, 이 영역 하단부는 조금 교란된 파가 발생하고 있다. 이 교란된 파는 나중에 주위기체와의 마찰과 내부의 유동변화, 즉 액주내부의 속도변화 및 난류현상이나 공동현상(Cavitation)등

에 의해 액사로 떨어져 나가고 결국 액적으로 이탈하여 미립화가 이루어진다고 사료된다. 그러나 분위기압력이 1MPa일 때의 (B)사진에서는 주위기체밀도의 증가로 인해 액주중간영역에서 무수한 액사와 액적이 발생하고 있다. 이것은 노즐내부의 유동변화도 미립화에 영향을 미치지 않지만 단지 주위기체의 밀도변화만으로도 충분히 미립화에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 또한 액적으로 떨어져 나가기 직전의 액사를 관찰하여 보면 Hewitt와 Hall-Taylor⁹⁾의 액적이탈기구에서 교란파의 감감에 의한 액적이탈과 교란파의 하부절단에 의한 액적이탈이 혼합된 양상을 보이며 미립화가 진행되고 있다. 또한 노즐구멍과 바로 인접한 액주는 (A)사진과 마찬가지로 교란되지 않는 액주를 보여준다. 이것으로 분위기압력이 1MPa로는 노즐구멍과 바로 인접한 액주에는 별 영향을 미치지 못한다고 사료된다. 또한 분무선단 부분에 돌출되어 있는 액주를 쉽게 볼 수 있다. 이것은 Fig.2에 있는 노즐상세도의 Sac chamber 와 Orifice에 잔존해 있던 연료로 보인다. 이것은 분사완료후 연소할 때 불완전연소의 주원인이 되는 것으로 사료되며, 이 부분은 교란이 거의 없는 것으로 보아 내부의 유동변화도 미립화에 상당한 영향을 미친다고 사료된다. 분위기압력이 3MPa인 (C)사진은 액주중간영역에서 (B)사진과 마찬가지로 액주에서 액사와 액적이 떨어져 나가고 있으나 (B)사진과는 달리 액사는 별로 없고 액적이 주로 보이고 있다. 이것은 연료의 표면장력

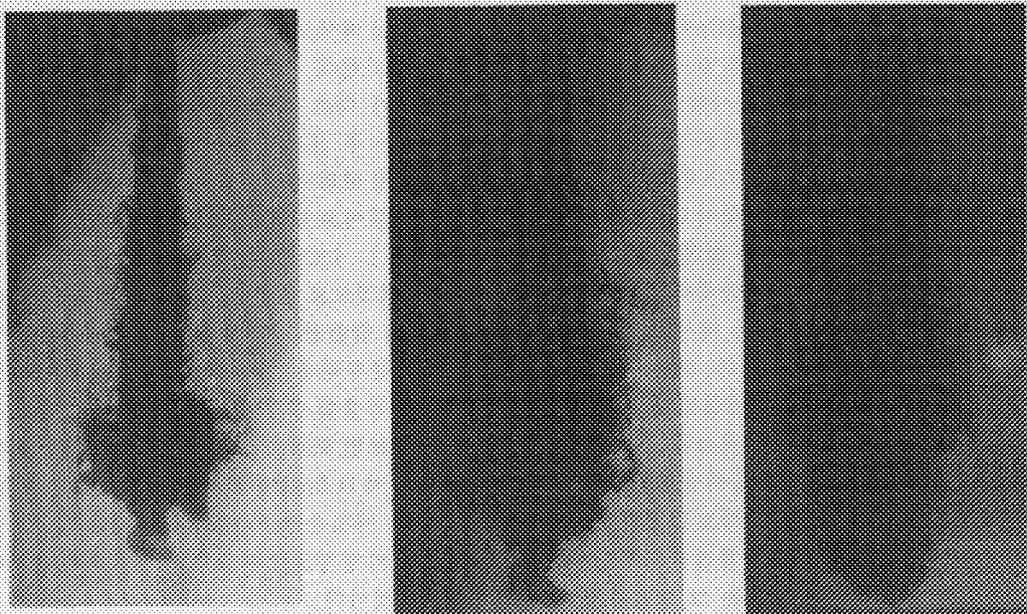


(A) $P_s = 0.1 \text{ MPa}$

(B) $P_s = 1 \text{ MPa}$

(C) $P_s = 3 \text{ MPa}$

Photo. 1 Diesel spray of 0.1ms from injection start ($P_i = 7\text{MPa}$)



(A) $P_s = 0.1 \text{ MPa}$

(B) $P_s = 1 \text{ MPa}$

(C) $P_s = 3 \text{ MPa}$

Photo. 2 Diesel spray of 0.1ms from injection start ($P_i = 14\text{MPa}$)

에 의한 부착력이 주위기체밀도의 증가로 인해 와해되고 액사의 길이가 짧아지면서 바로 액적으로 떨어져 나간다고 사료된다. 또한 노즐구멍 부근의 액주는 스무스한 부분이 거의 없이 바로 교란된 파가 일어나고 있으며 이것은 (B)사진에서는 발생되지 않다가 분위기압력이 3MPa이 되자 발생되고 있다. 이 교란된 파는 일정한 시간이 경과되면 (B)사진과 마찬가지로 액사에서 액적으로 미립화 된다고 사료된다. 또한 분무선단 부분에는 (B)사진에서도 볼 수 있었던 돌출된 액주가 관찰되나 그 길이가 (B)사진보다 2배 정도 길다. 이것도 역시 불완전연소의 원인으로 보이며 (B)사진에서는 분사개시와 동시에 압력실의 연료가 압력에너지에서 속도에너지로 변환되면서 먼저 Sac chamber와 Orifice에 남아 있던 연료를 밀어내며 분사되고 이 밀려난 연료는 사진에서와 같은 분무선단의 돌출된 액주가 된다고 사료된다. 그러나 이 돌출된 액주는 속도에너지가 없으므로 분무선단에 추월당하기 시작하며 결국 분무선단과 같이 미립화 된다고 사료된다. 따라서 (C)사진은 분무선단이 돌출된 액주를 추월하기 전이고 (B)사진은 어느정도 추월한 것이라고 사료된다.

Photo. 2는 분사압력이 14MPa에 분위기압력이 0.1, 1, 3MPa, 분사개시후 0.1ms 일 때의 분무모양이다. (A)사진은 분사압력의 증가로 Photo. 1의 (A)사진과는 전혀 다른 모양을 보여준다. 노즐구멍 바로 하단에는 스무스한 액주를 보다가 조금더 하단에는 가는 액사들이 다수 발생하고 있으나 액적으로 떨어져 나가는 것은 거의 보이지 않는다. 이러한 현상은 분무선단에서도 마찬가지로 분무중간영역 보다 더 많은 액사가 발생되고 있으나 액적은 거의 보이지 않는다. 또한 이 사진에서도 분무선단에 돌출된 액주가 관찰된다. 분위기압력이 1MPa인 (B)사진은 주위가스밀도의 증가로 액주중간영역에서 액사와 액적들이 공존하고 있다. 이 사진에서도 돌출된 액주가 보이고 있으나 분사압력이 7MPa일 때보다 더 빠른 분무선단의 추월현상으로 Photo. 1의 (B)사진보다는 그 길이가 짧다. 분위기압력이 3MPa인 (C)사진은 돌출된 분무가 보이지 않는다. 이것은 분사개시후 0.1ms이전에서 분무선단에 돌출된 분무가 존재하였다가 분무선

단의 추월현상으로 돌출된 분무가 소멸하였다고 사료된다. 이 사진에서는 분무전체에 걸쳐 무수한 액적들이 발생하고 있으며 액사는 거의 관찰되지 않는다. 이것으로 분위기압력이 높을수록 액주에서 액사로 분열되는 시간이 짧으며 액사에서 액적으로 재빨리 분열됨을 알 수 있다. 또한 Photo. 1과 Photo. 2를 전체적으로 관찰 하였을 때 분사압력이 7MPa 일 때 보다 14MPa 일 때가 분무체적이 증가하여 미립화가 촉진되었으며 또한, TAKAHASHI¹⁰⁾ 등의 실험결과와 같이 모든 분무에서 노즐하단에 액주가 발생됨을 확인할 수 있다.

3.2. 분무특성

Fig. 3은 분사압력이 7MPa이고 분위기압력이 0.1, 1, 3MPa일 때의 분무선단도달거리와 분무각, 분무선단속도를 나타낸 것이다. 분위기압력이 대기압인 0.1MPa일 때 분무선단도달거리는 직선적으로 증가한다. 이때의 분무각은 분사초기에는 약 17°로 일정하다가 0.4ms이후에는 분무의 속도증가로 급격히 떨어지고 있다. 분위기압력이 1MPa일 때에도 역시 분무선단도달거리는 직선적으로 증가한다. 그러나 이것은 시간이 더 경과하면 기울기가 다소 꺾일것으로 사료되며¹¹⁾ 분무각은 0.6ms이후 급격히 떨어지고 있다. 분위기압력이 3MPa일 때의 분무선단도달거리는 1.3ms이후 기울기가 꺾이고 있고 분무각은 0.4ms이후 분위기압력이 0.1, 1MPa일 때와 달리 완만히 감소하고 있다. 이것으로 넓은 분무각은 양호한 분무의 분포인 점을 감안한다면 분위기압력이 3MPa은 되어 양호한 분무각을 얻을 수 있고 따라서 연소실 공간을 최대한 활용할 수 있다고 사료된다. 또한 분무선단 속도를 보면 모든조건에서의 속도가 분사초기에 해당하는 약 0.5ms에서 속도가 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 이것은 Sac chamber와 Orifice에 남아있던 연료의 영향으로 사료되며 추후 계속 연구해나가야 할 것이다.

Fig. 4는 분사압력이 14MPa이고 분위기압력이 0.1, 1, 3MPa일 때의 분무선단도달거리, 분무각, 분무선단속도를 나타낸 것이다. 분위기압력이 0.1

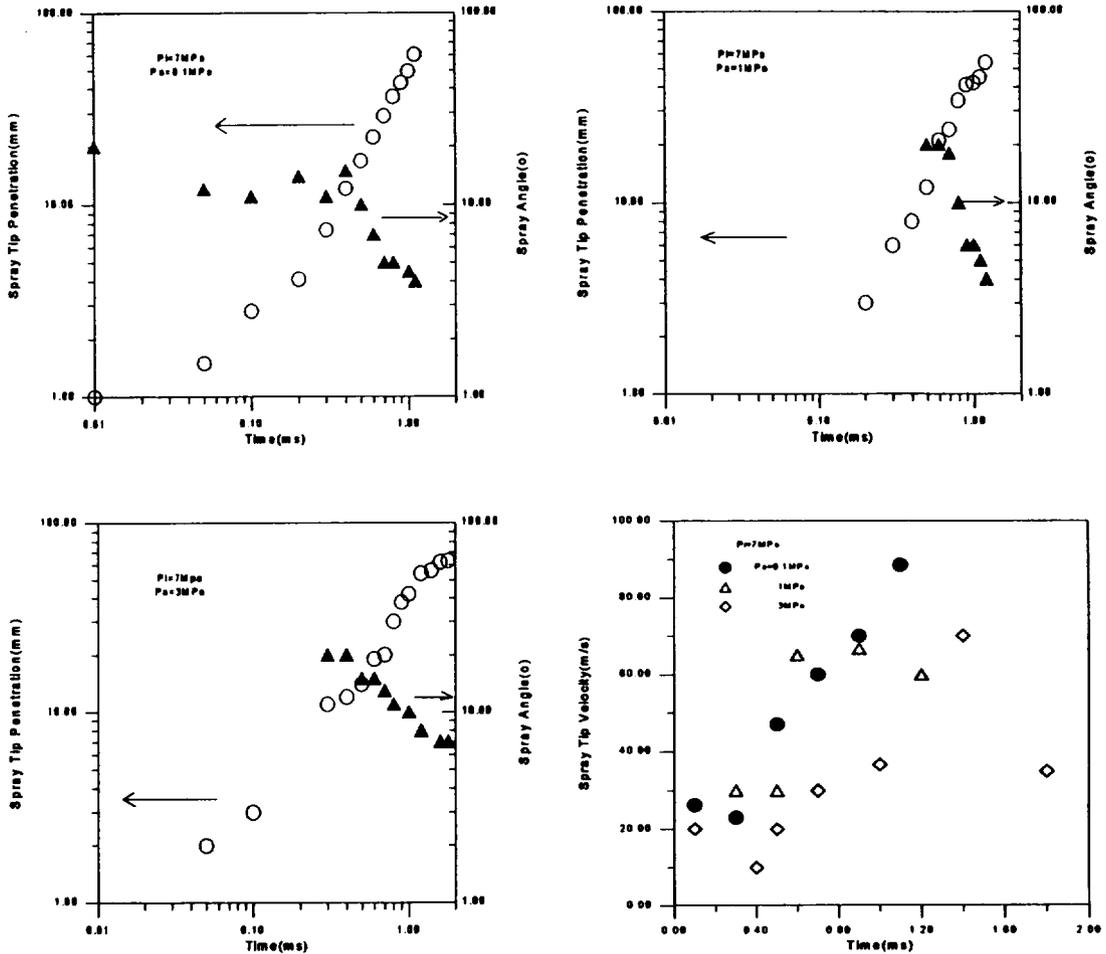


Fig. 3 Spray tip penetration, spray angle and spray tip velocity for time elapsed ($P_i = 7MPa$, $P_a = 0.1, 1, 3MPa$)

MPa일 때의 분무선단도달거리는 Fig. 3에서와 같이 직선적으로 증가한다. 분무각도 역시 급격히 떨어져지고 있으나 Fig. 3에서 0.7ms의 분무각은 약 5° 이지만 Fig. 4에서는 약 10° 로 분무각은 분사 압력의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 분위기압력이 1MPa일 때도 분무선단도달거리는 직선적으로 증가하나 Fig. 3에서 거론했듯이 좀더 시간이 경과 하면 꺾일것이라 사료되고 분무각도 역시 약 0.6ms 이후 급격히 떨어져지고 있다. 분위기압력이 3MPa일 때의 분무선단도달거리는 약 1.2ms이후에 기울기가 분사압력이 7MPa 일 때보다 급히 꺾이고 있다.

그러나 분무각은 약 0.9~1.0ms까지는 감소하다가 그이후는 다시 증가하는 현상을 보이고 있다. 이것은 분무초기에 속도에너지가 큰 분무가 분위기압력을 치고 나오면서 분무선단속도의 증가와 동시에 분무각은 감소하지만 약 1ms에서 큰 분위기압력으로 인해 분무선단속도가 떨어지면서 그 결과 분무각의 증가하고 있다고 사료된다. 분무선단속도 그래프를 보면 분위기압력이 1, 3MPa일 때 약 0.8~1.0ms 사이에 속도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 분사압력이 증가로 Fig. 3에서 볼 수 있었던 분무초기에 속도가 떨어지는 현상은 볼 수 없다.

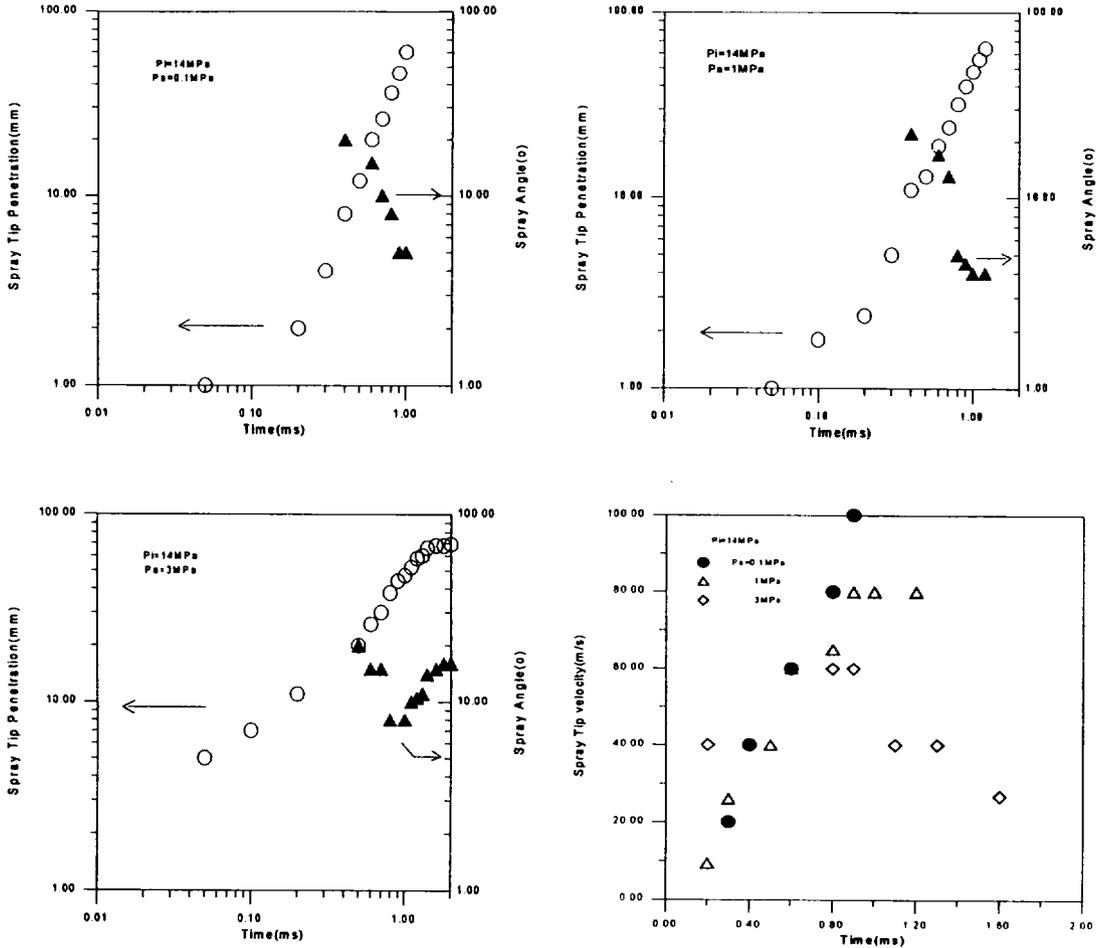


Fig. 4 Spray tip penetration, spray angle and spray tip velocity for time elapsed ($P_i = 14\text{MPa}$, $P_a = 0.1, 1, 3\text{MPa}$)

IV. 결론

본 연구는 노즐형상비(L/D)가 3.57이고 노즐직경이 0.35mm인 단공노즐을 사용하여 분사압력과 분위기압력을 변수로 디젤분무의 분무특성에 대해 실험적으로 구명하였고, Sac chamber가 디젤분무에 미치는 영향을 밝혔다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 분위기압력이 클수록 액주에서 액사로 분열될

때 액사의 길이가 짧고, 액사에서 액적으로 분열이 일어나면서 미립화 한다.

2) Sac chamber와 Orifice에 남아있는 연료는 분무초기에 분무선단에 밀려나와 돌출된 액주로 되고, 돌출된 액주는 시간의 경과에 따라 분무선단에 추월되면서 미립화 된다.

3) 분위기압력이 3MPa은 되야 양호한 분무각을 얻을 수 있고 따라서 연소실 공간을 최대한 활용할 수 있다고 사료된다.

4) 분무선단 도달거리는 분사압력이 14MPa이

고 분위기압력이 3MPa일 때, 분사개시후 약 1.2ms에서 분무각의 증가로 급격히 그 기울기가 감소한다.

V. 참고문헌

- 1) 千田二郎, 昭和59年9月, ディーゼル噴霧の噴霧特性に関する實驗的研究, 同志士大學博士學位論文.
- 2) Ishida M., Chen Z. L., Luo G. F. and Ueki H., 1994, The Effect of Pilot Injection on Combustion in a Turbo-charged D.I. Diesel Engine, SAE Paper 941694
- 3) H. Yilang, Zhang L. and Liu W., 1994, The Optimum of Heat Release Patterns in High Speed D.I. Diesel Engine, SAE Paper 941694
- 4) Takida Y., Ishikawa N., Masanori and Tsujimura K., 1994, Diesel Combustion Using VCO Nozzles with High Pressure Fuel Injection, SAE Paper 940899
- 5) Reitz, R.D., 1978, Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet, Princeton University
- 6) Arai, M., M. Tabata, H. Hiroyasu and M. Shimizu, 1984, Disintegrating Process and Spray Characteristics of Fuel Jet by a Diesel Nozzle, SAE Paper No. 840275.
- 7) 고경남, 문창은, 허종철, 1996, 노즐직경이 디젤분무의 분산과정에 미치는 영향, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제7권 2호 pp. 30-40
- 8) 송규근, 오영택, 안진근, 김강출, 1997, 디젤노즐의 분무거동에 관한 연구, SAE No. 97370119
- 9) Hewitt, G. F. and Hall-Taylor, N. S., 1970, Annular Two-Phase Flow, Pergamon Press
- 10) H. Takahashi, M. Kono, H. Yanagisawa, 1997, Initial Atomization of an Intermittent Spray from a Diesel Nozzle, ICLASS-'97 pp. 529-536
- 11) 허종철, 고경남, 1996, 분위기압력이 디젤분무특성에 미치는 영향, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제7권 1호 pp. 35-44