濟州大學校 産業技術硏究所 論文集, 第7卷, 1號, pp.35~44, 1996. 6
Cheju National Univ. R.I.I.T. Jour., Vol.7, No.1, pp.35~44, 1996. 6

분위기 압력이 디젤분무특성에 미치는 영향

허 종 철* · 고 경 남**

Effect of Ambient Pressure on the Diesel Spray Characteristics

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

ABSTRACT

An experimental study has been carried out to investigate the influences of injection pressure and ambient pressure on diesel spray. Especially, diesel sprays were visualized by means of double flash. The visualized spray volumes at the ambient pressure of 3MPa increase more steeply with respect to the elapsed injection time than the atomospheric pressure. The spray tip penetration is increased according to higher injection pressure and lower ambient pressure. When the ambient pressure is further increased, the transition of the spray tip penetration occurs earlier. And the spray tip velocity increases with higher injection pressure but decreases with higher ambient pressure. The spray cone angle does not vary with increasing injection time, but it depends significantly on the ambient pressure.

Key words : Diesel spray, Spray tip penetration, Spray tip velocity, Spray cone angle

I. 연구목적

직접분사식 디젤기관은 높은 열효율 및 구조적 잇점으로 인하여 여러분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 디젤분무의 미립화과정은 열효율과 연소시 발생되는 배출가스, 소음등을 지배하고 고온, 고압의 연소실내에 분사되는 연료는 분사노즐을 통과하는 순간에 분무를 형성한후 가열, 증발, 혼합, 분리, 발화하는 복잡한 물리적, 화학적 과정을 거쳐 연소가 종료되며 이 때 연소실내의 압축착화에 의해 일을 하고 동시에 배출가스의 생성 및 진동, 소음등이 발생한다. 그러므로 디젤기관이 공해 물질을 저감시키고, 열효율 향상을 통해 엔진성능의 개선을 위해서는 우선적으로 연료를 가능한한 균일한 액적으로 미립화시키는 동시에 충분한 관통도를 가져야 한다. 그러나 분사직 후 분무는 미분열 액주상태이며, 또한 시간경과에 따라 액주가 분열하여 미립화되는 복잡한 분열과정을 거치기 때문에 양호한 분무조건을 얻는 분사계의 설계에 있어서는 어려운 점이 많다.

미립화 형성에 영향을 주는 요인으로는 노즐

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

입구에서 발생하는 공동현상, 노즐내 유동에 의한 속도 재구성, 분무와 주위 기체와의 상호 작용과 주위 기체의 유입에 의한 공기 역학적 효과, 분무의 분열과정에서 나타나는 유체난류등 유체역학적 현상과 분사계에서의 공급압력의 진동등 많은 요인이 있다[1]. 또한 미립화형성은 분사압력, 분위기압력, 노즐직경, 노즐형상비 및 연료의 물성등에 의해 지배되며, 따라서 이들 지배변수와 미립화 형성 기구간의 상관관계가 명확히 파악되어야 하나 아직 미약한 실정이다.

디젤분무에 관한 종래의 연구중에서 본 연구에 관련된 분야의 연구동향을 개괄하면 다음과 같다.

분무영역의 발달과정을 구명하기 위해 Dent[2], Arai[3-5] 등은 분무선단도달거리가 분사개시로 부터 경과시간의 1승에 비례하는 영역과 0.5승에 비례하는 영역 즉, 발달과정의 분무와 완전히 발달된 분무와의 천이시간의 존재와 분사속도에 따라 Breakup length 를 계측하여 분무의 분열과정을 구명하였다. Sato[6,7] 등은 발달과정의 분무구조를 관찰하여 분무선단도달거리, 분무선단속도, 분무각, 분무원추각, 분무체적 등을 시간경과에 따라 분석함으로써 분무선단이 천이되는 시간에서 분무가 완전히 발달됨을 주장하였다. 하[8]는 분위기압력의 변화에 따른 분무특성을 순간광원을 이용한 직접 사진촬영법에 의해 실험을 수행한 결과 분무선단도달거리는 분위기 압력이 높을수록 짧아지고 분무각은 증가하는 것을 확인했으며 열선 유속계를 이용하여 주위공기의 역학적인 거동에 관한 연구도 함께 수행하였다. 구[9] 는 상온 대기압하에서 단공노즐을 사용하여 디젤분무의 초기 분산과정을 확대 사진촬영을 통해 관찰한 결과 분사초기에 분무선단속도가 최저가 되는 1차 천이점이 존재함을 확인하였다. 허 등[10] 은 분무의 분산과정을 구명하기 위해 발달과정의 분무를 직접 사진촬영하여 분위기압력 변화에 따른 분무선단도달거리와 분무각을 구했고, 또한 분무초기 과정을 확대 사진촬영하여 분사직후 분출된 분무는 미분열 액주이며 그 액주로 부터 시간경과에 따라 분열과정을 연구한 바 있다. Takahashi 등[11]은 대기압과 분위기압력하에 확대 Shadowgraphy 로 분무초기의 고압 디젤분무형상을 분석하였는데 분사후 0.3ms까지는 분무선단이 무딘영역(insensitive region)이 있고 이것은 분사압력을 높이면 짧아지며 분무에서 발생한 난류유동과 관련이 있음을 보고했다. Shimazaki 등[12]은 CCD 카메라를 이용하여 Pseudo high speed image 촬영 시스템을 창안하여 디젤분무에 적용하고 분무구조등이 보다 쉽게 관찰됨을 보였다.

이상과 같은 종래의 연구동향을 보면 디젤분무에 관한 연구를 수행함에 있어서 우선적으로 분사초기의 분무, 분산특성에 관한 연구와 더불어 분무선단도달거리와 분무각사이의 상관관계 등을 파악할 필요가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 관측창이 있는 고압용기에 단공노즐을 통하여 일정압력으로 연료를 분사하여 분사압력, 분위기압력을 변수로하여 분무선단도달거리, 분무선단속도, 분무원추각 등을 Double flash 에 의해 가시화 하고 분위기압력이 디젤분무에 미치는 영향을 분석하는데 그 목적이 있다.

II. 실험장치 및 방법

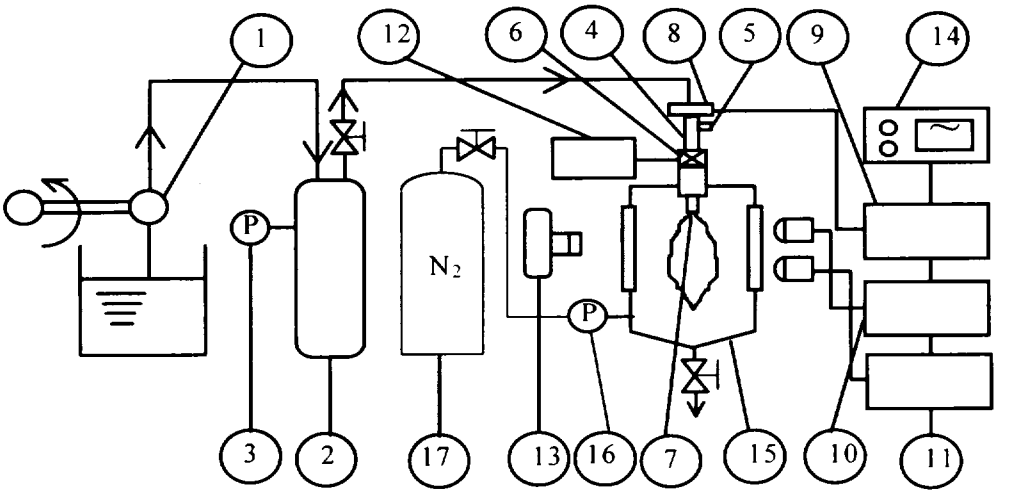
본 실험에 사용한 실험장치의 개요도는 Fig.1 에 도시하였다.

연료탱크내의 필터를 통과하며 여과된 연료는 가변모터에 의하여 구동되는 자동차용 플란저펌프(1)에 의하여 소정의 압력에 도달할 때까지 가압되어 제 1, 제 2 축압실에 저장된다. 플런저펌프와 분사노즐 사이에 설치된 제 1 축압실(2)과 제 2 축압실(4)은 가압된 연료가 연료분사장치의 최종기구인 노즐을 거쳐 분사되는 동안 시간경과에 따른 분사율(분사압력)을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 제 1 축압실은 내압이 30MPa, 내부용적 5.11리터이며 주로 플런저 펌프에서 고압 연료라인를 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 하고, 분사노즐 입구에 설치된 제 2축압실은 최종적으로 디젤연료가 노즐

에서 분사되는 동안의 설정 압력의 강하와 맥동을 가능한 없애주는 역할을 한다.

연료 분사압력은 노즐홀더의 연료 입구측에 부착된 압력변환기(5)로 부터 계측되며 적정 압력이 되었을 때 노즐 구동장치(12)에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드(6)가 노즐의 니이들을 압착하고 있는 스핀들의 상부판을 끌어 당기게 되고, 이 때 니이들이 들리게 되며 분사노즐(7)을 통하여 연료가 분사된다. 이때 노즐을 통하여 분사된 분무가 분사직후로 부터 임의시간 경과후 까지의 분무형상을 촬영하기 위한 분사개시 신호는 노즐 니들밸브와 연결된 솔레노이드 스핀들의 Photo - interrupter(8) 를 차단하는 순간 구형파의 시그널을 발생시켜 회로 중의 트랜지스터와 슈미트 트리거소자를 지나면서 증폭되어 보다 정확한 레벨의 신호로 바뀐 후 Double pulse 발생기 지연회로(9)에서 재 증폭되고 설정된 시간만큼 두 번 지연된 후에 나노라이트(10)와 스트로보스코프(11)에 입력되어 적정노출 광량으로 순간발광 시킨다. 이 때 카메라(13)는 B-셔터 상태이므로 이 두 번의 순간광을 받아들여 동일한 분무상태가 두 번 필름상에 감광되어 촬영된다. 이 신호지연장치의 신호지연 시간 범위는 0.001ms로 부터 9ms까지 이다.

여기서 촬영된 분무사진은 같은 비례척으로 촬영된 스케일로 분무선단도달거리, 분무원추각 등을 직접 계측, 분석하였다. 분무관측용 고압용기(15)는 내부직경 196mm, 길이 500mm로 양측면에 사진촬영이 가능하도록 길이 230mm, 폭 130mm, 두께가 19mm인 강화유리 관측창을 부착 하였다. 고압용기내의 충진가스는 질소가스(17)를 사용하였고, 용기내의 압력은 부르돈 압력계(16)를 사용하여 내부압력을 측정하였다. 이 때의 최고압력은 안전을 고려하여 3 MPa 까지



1. Plunger Pump
2. 1st Accumulator
3,16. Pressure Gauge
4. 2nd Accumulator
5. Pressure Transducer
6. Solenoid
7. Fuel Injection Nozzle
8. Photo - interrupter
9. Double Pulse Generator Delay Circuit
10. Nanolite
11. Stroboscope
12. Nozzle Controller
13. Camera
14. Oscilloscope
15. Pressure Chamber
17. N_2 Gas Bomb

Fig.1 Experimental apparatus

설정하여 실험을 행하였고 사진촬영 및 실험조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Photographic conditions

Discriptions	Photographic Conditions
Injection press (MPa)	7, 14, 21
Ambient press (MPa)	0.1, 0.3, 1, 2, 3
Ambient temperature	Room temperature
Ambient gas	N_2 gas
Fuel	Low sulfur diesel oil (S = 0.84)
Nozzle	Single hole (L/D = 3.89)
Lens	105mm Microlens
Spark light sources	Stroboscope
	Nanolite

Fig. 2는 고압의 연료가 분사기간 동안 제 2 축압실에 설치한 압력변환기의 압력변화를 나타낸 오슬로스코프(14) 사진으로서 종축은 압력변화, 횡축은 분사시간, 즉 분사밸브의 개폐시간이고 한 눈금(1 Division)은 10ms를 나타낸다. 사진에서 분사기간중의 분사압력은 거의 일정하게 유지되므로 연료분사기간중의 분무는 정상분무상태이다. Fig. 3은 Double flash 에 의해 pulse 가 두 번 발생하는 오실로스코프 사진이다. 사진에서 하단 펄스는 분사개시와 함께 발생된 발진신호이며 상단펄스는 그 신호를 받아서 지정된 시간만큼 두 번 지연되는 펄스를 보여주고 있다. Fig. 4는 본 실험에서 사용한 단공노즐의 상세도이며 노즐직경은 0.45mm, 노즐형상비(L/D)는 3.89로 하여 실험을 행하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 유량계수

유량계수는 레이놀즈수, 노즐형상비, 노즐직경, 분사압력과 분위기압력차(△P), 공동현상등에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 노즐직경이 0.45mm, 노즐형상비가 3.89인 경우만을 고려하여 유량계수를 구하였다. 이 때 실험범위의 분사압력하에서는 노즐내 유동이 완전히 발달하지 못하고 동시에 공동현상을 동반하기 때문에 관내 유동을 정량적으로 해석하는 것이 불가능하다. 그러나 오리피스내 유동은 유량계수를 고려할 때 관 유동으로 생각할 수 있다.

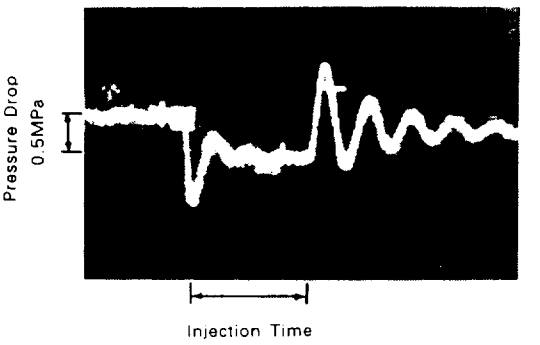


Fig. 2 Photograph of pressure drop of pressure transducer(P_i = 21 MPa)

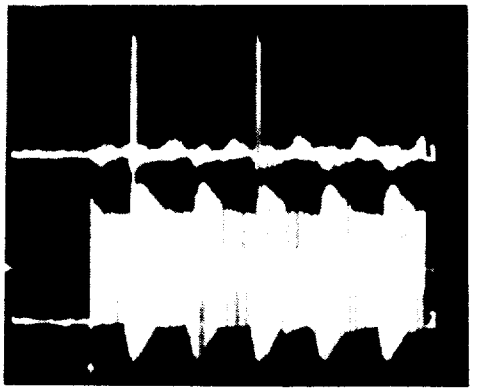


Fig. 3 Photograph of double pulse signal from delay circuit

Fig. 5는 실험범위의 분사압력에서 유량계수의 값을 나타내고 있다. 그림으로 부터 유량계수 값은 분사압력에 관계없이 약 0.67 로 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 노즐형상비가 3.89인 경우에 실험범위의 분사압력하에서는 압축에너지가 속도에너지로 변환되는 비가 일정하다고 볼 수 있다.

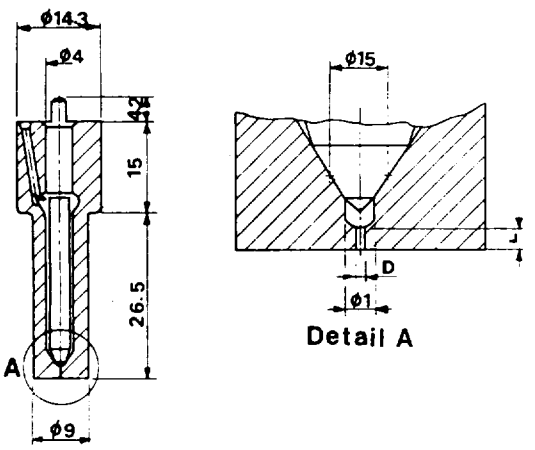


Fig. 4 Details of signal hole nozzle

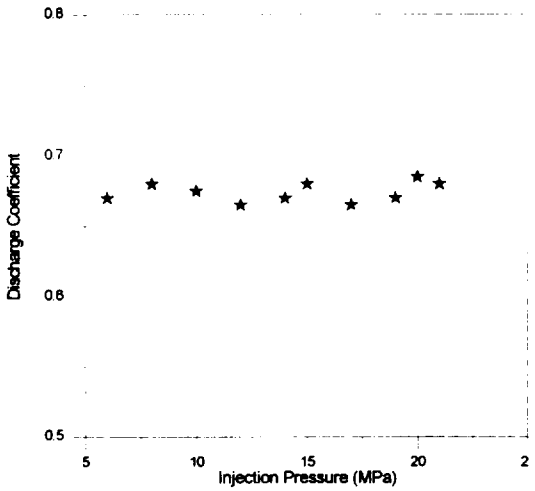


Fig. 5 Variation of Discharge coefficient with injection pressure

3.2 사진관찰

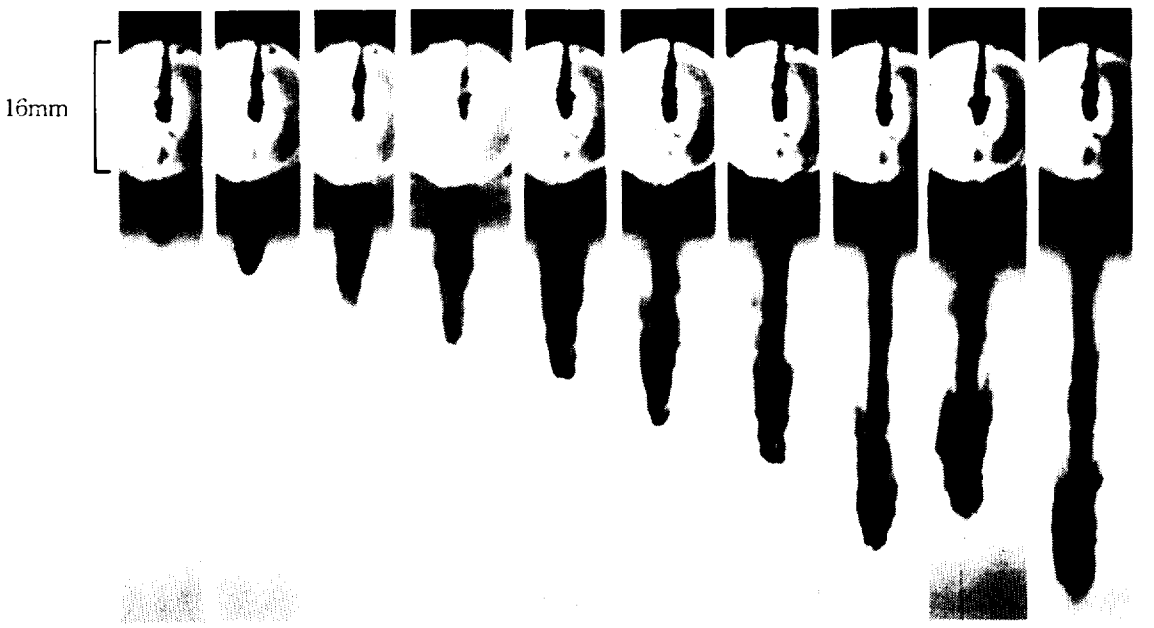
Fig. 6 은 분위기압력이 대기압일때와 3 MPa 일 때 분사압력 14, 21 MPa 로 분사시켰을 때의 Double flash 사진이다. 1차광원으로 노늘끝에 원형광원인 나노라이트를 사용했고 하단의 광원은 2차 광원으로 스트로보스코프 광을 사용했다. 따라서 사진 1장에 나와있는 분무는 동일 분무이다.

3.2.1 대기압하에 분사압력 14 MPa 일 때

Fig. 6 의 위쪽 사진을 보면 t_1 은 나노라이트 광원으로 1차 분무의 모양을 분사개시후 0.15 ms 에서 고정하여 촬영한 것으로 교란 되지 않은 액주임을 알 수 있고 t_2 는 0.15ms 이후의 임의의 시간에따른 분무의 모양이다. t_1으로 잡은 분무의 길이는 어느것이나 일정하므로 Double flash 회로가 정상적으로 작동하고 있음을 알수 있다. 사진에서 분무선단도달거리는 t_2 의 시간경과에 따라 일정하게 성장하고 있으나 분무속도가 빨라서 선명하게 분무모양을 관찰하기는 힘들다. 그러나 t_2 가 0.4 ms 이후부터는 분무선단으로 갈수록 교란된파가 성장 발달하고 있으며, 선발분무가 주위 가스와의 마찰에 의해 질량이 떨어지면서 더 이상 속도를 내지 못하고 후발분무의 운동량에 밀려 액사에서 액적으로 분리되면서 액주옆에 액적군을 이루게 된다. 여기에서 교란되지 않는 액주로부터 교란된파가 발생하는 것은 노즐내 유동이 발달된 난류임이 추측된다. 또한 이 사진들에서 분무가 액주에서 액사, 액적으로 미립화 되어가는 과정을 볼 수 있지만, 이 사진들만으로는 액적의 분열과정을 세심히 관찰하기는 어려웠다.

3.2.2 분위기압력 3 MPa 하에 분사압력 21 MPa 일 때

Fig. 5 의 아랫쪽 사진을 보면 t_1 에 해당하는 시간은 0.3ms 이고 대기압하에서의 사진과 마찬가지로 분무길이가 일정하다. 그이후 t_2 에 해당하는 시간만큼 분무가 성장하고 있으나 분무선단도달거리는 대기압하에서의 상황과는 다르다. 즉 t_2 가 0.4ms 까지는 분무의 성장이 일정하나 0.4ms 이후는 다소 분무의 성장이 더딘 것을 관찰할 수 있다. 이때가 천이점이 발생하는 시간으로 추측된다. 또한 대기압하일때와 사진을 비교하여 보면 훨씬 선명하게 촬영되어 있고 이것은 분무속도가 대기압에 비해 많이 떨어졌기 때문이다. 분위기압력으로 인해 떨어진 속도는 반경방향의 분무로 분열되고 이렇한 영향이 분무각의 증가로 나타나고 있다. 그리고 분위기압력하에서는 대기압하에서 볼 수 있었던



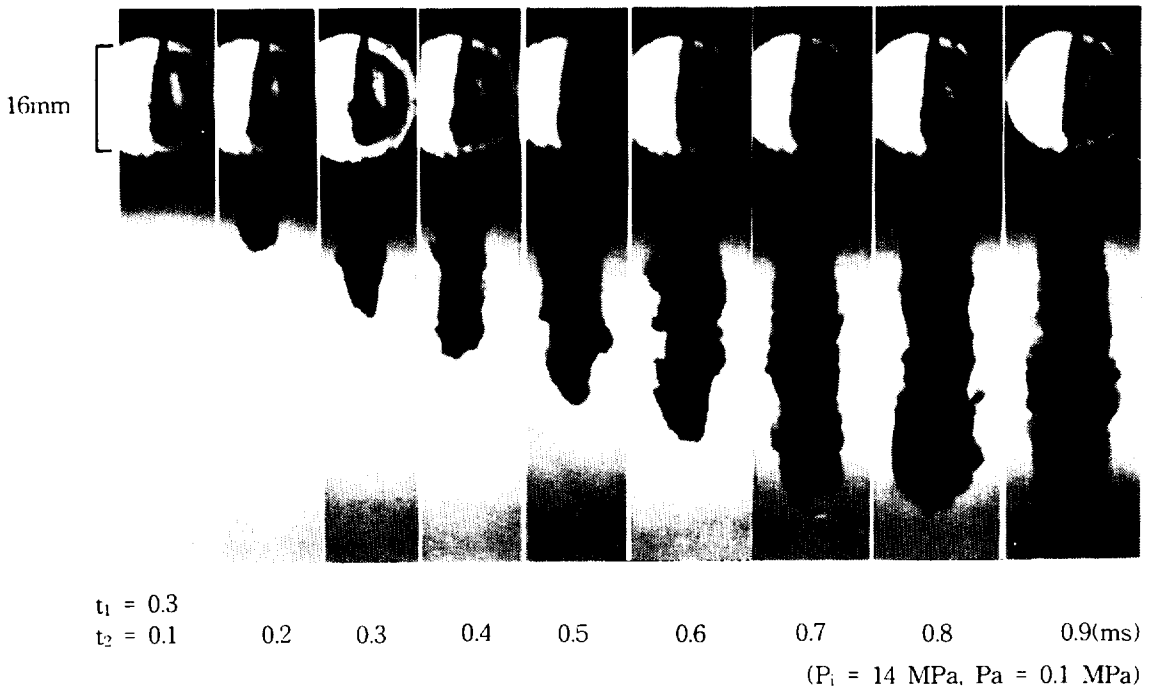


Fig. 6 Photographs of developing and developed sprays from injection start (L/D = 3.89)

분무의 액사와 액적과정이 거의 구분이 안되고 액주에서 액적으로 바로 미립화되고 있다. 또한 대기압하에서는 속도가 떨어진 선발분무만 교란된파가 형성 됐으나 분위기압력하에서는 분무전체에 걸쳐 교란된파가 보이고 있고 이들이 분위기압력하에서 미립화를 지배하고 있다고 사료된다.

3.2.3 분위기압력하에서 완전히 발달한 분무사진관찰

Fig. 7 은 분위기압력이 둘다 3 MPa 이고 왼쪽사진은 분사압력이 14 MPa 에 t_1 이 분사개시후 1.6 ms 이고 t_2 가 1.7 ms 에서의 분무모양이다. 오른쪽사진은 분사압력 21 MPa 일때의 t_1 이 1.3 ms 이고 t_2 가 왼쪽사진과 마찬가지로 1.7 ms 이다. 이 두사진은 Fig. 6 과 같은 스케일로서 거이 분무선단도달거리가 차이 없는 것으로 봐서 완전히 발달한 분무임을 알 수 있다.

t_1 = 1.6 ms	t_1 = 1.3 ms
t_2 = 1.7 ms	t_2 = 1.7 ms
P_i = 14 MPa	P_i = 21 MPa
Pa = 3 MPa	Pa = 3 MPa

Fig. 7 Photographs of fully developed spray

두사진을 비교하여 보면 분무폭이 Fig. 6 에서의 사진들보다 약 2배 정도 분산되어 있고 천이점이후 완전히 발달된 분무의 전형적인 예라 할 수 있다. 또한 분무의 밀도나 분무각은 분사압력이 14 MPa 일때보다 21 MPa 일때가 훨씬 크다는 것을 이사진을 통해서 알 수 있다. 이것은 분사압력이 클수록 분산이 잘된다는 것을 의미한다.

3.3 분무선단도달거리, 분무선단속도 및 분무원추각

Fig. 8, 9, 10 은 실험범위의 분위기압력에서 분사압력을 7, 14, 21 MPa 로 정하여 시간경과에 따른 분무선단도달거리를 나타내고 있다. 즉 그림의 횡축은 전자밸브의 스핀들이 Photo - interrupter 의 빛을 차단하는 순간으로부터의 경과시간이며 종축은 분무선단도달거리이다.

그림에서 분위기압력이 대기압과 0.3 MPa에서는 거의 분무선단도달거리가 같고 기울기가 약 1이다. 따라서 대기압과 0.3 MPa 에서의 분무선단도달거리는 오직 분사압력에만 의존한다. 이러한 경향은 분위기압력이 1MPa 에서도 뚜렷이 구분되지는 않는다. 그러나 2, 3 MPa 에서는 일정시간이 지난후 눈에 띄게 분무선단도달거리가 꺽이는 것이 보인다. 이곳이 천이점이며 분위기압력 3 MPa을 기준으로 하여 분사압력 7, 14, 21 MPa 에서의 천이점은 각각 1.3, 1.1, 0.8 ms 로 분사압력이 클수록 천이점이 일

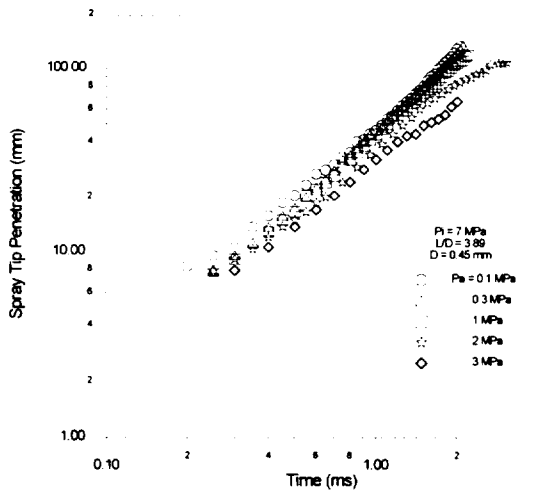


Fig. 8 Influence of ambient gas pressre on spray tip penetration (Pi = 7 MPa)

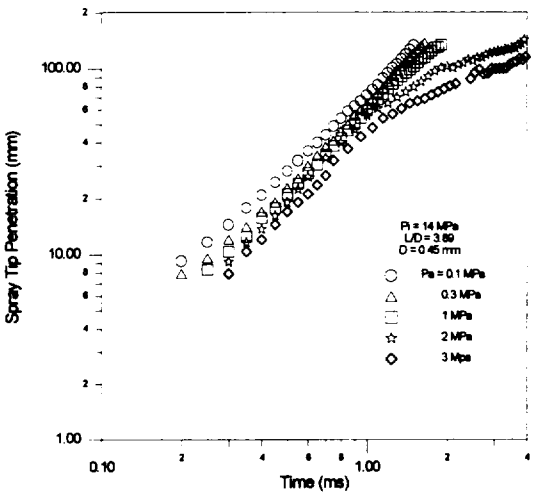


Fig. 9 Influence of ambient gas pressre on spray tip penetration (Pi = 14 MPa)

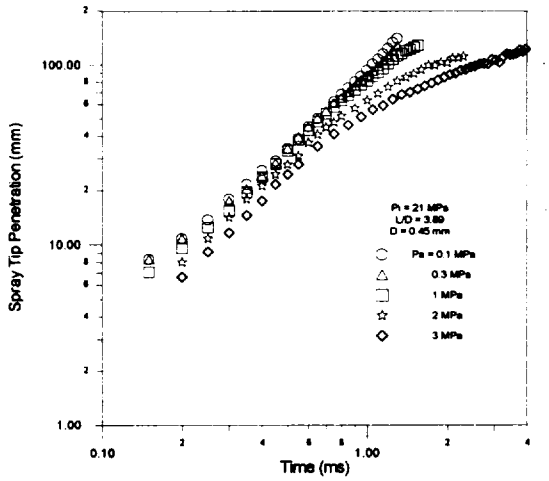


Fig. 10 Influence of ambient gas pressre on spray tip penetration (Pi = 21 MPa)

찍 일어나고 있다. 그리고 동일한 분사압력에서는 분위기압력이 클수록 천이점이 더 일찍 발생하고 있고 따라서 분무선단도달거리는 떨어지고 있다. 이것은 축방향으로 분무가 돌진하는 것이 분위기압력의 영향을 받아 반경방향으로 분산되고있기 때문으로 사료된다. 그것은 Fig. 7 의 사진을 보면 알 수 있다.

Fig. 11, 12, 13 에서 횡축은 분사개시후의 경과시간이고 종축은 분무선단속도 이다. 이 그림들에서 분위기압력이 대기압과 0.3MPa 에서는 속도가 직선적으로 증가하고 있다. Fig. 11 은 분사압력이 7 MPa일때의 속도변화추이를 나타내는 그림인데 전체적으로 보면 속도가 0.8 - 1 ms 까지는 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있다. 그후 1.3 까지는 거이 등속을 유지하면서 분사되다가 1.3ms - 1.7ms 이후에 속도가 급감하고 있다. 이때가 분무의 천이점이며 이후로

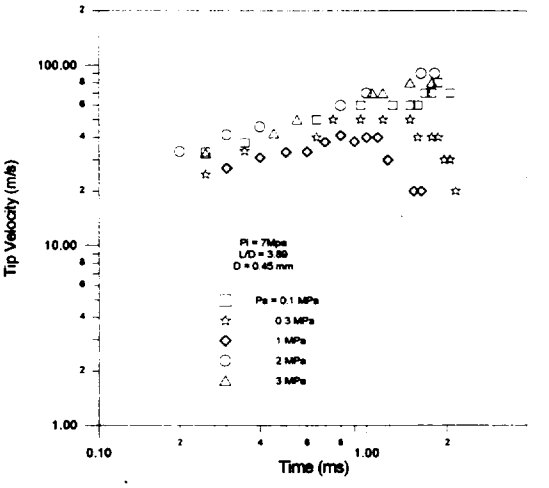


Fig. 11 Influence of ambient gas pressure on spray tip velocity (P_i = 7MPa)

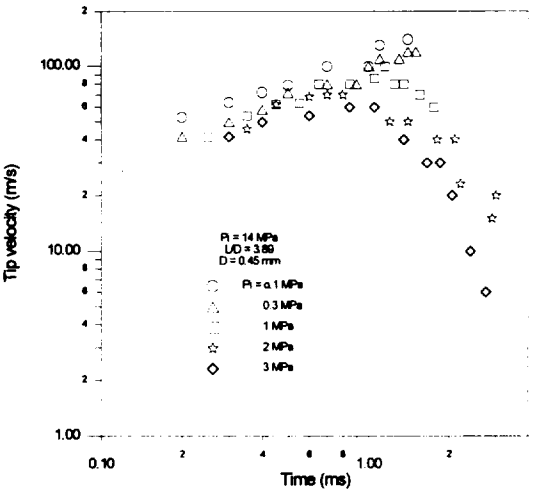


Fig. 12 Influence of ambient gas pressure on spray tip velocity (P_i = 14MPa)

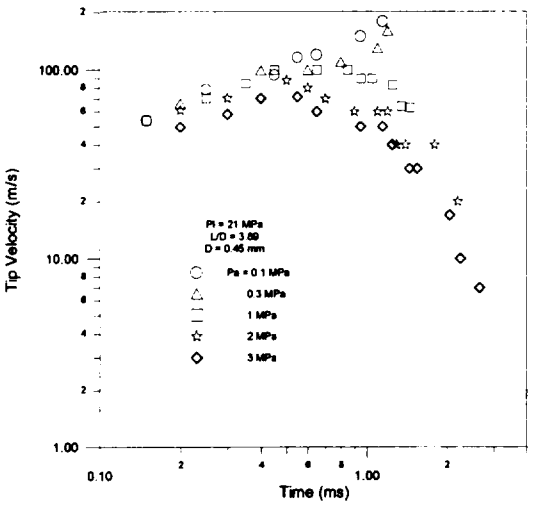


Fig. 13 Influence of ambient gas pressure on spray tip velocity (P_i = 21MPa)

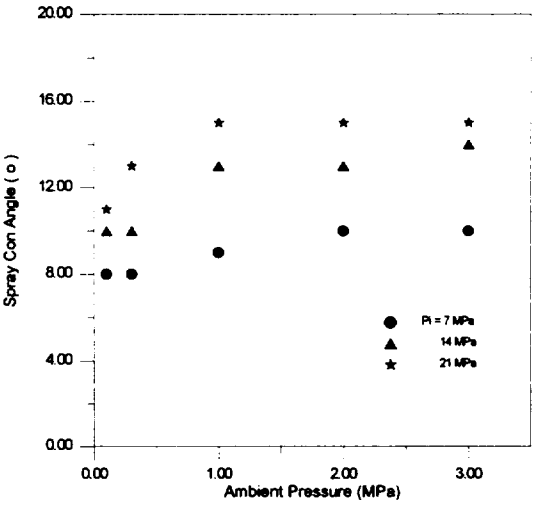


Fig. 14 Influence of ambient gas pressure on spray cone angle

분무가 완전히 발달한다고 사료된다. Fig. 12 는 분사압력이 14MPa 일때의 속도변화추이고 약 1.1 - 1.5 ms 이후에 천이점이 발생하게 되는데 이것은 Fig. 11 에서보다 조금일찍 천이점이 발생하고 있다. 이렇한 경향은 분사압력이 21MPa 인 Fig. 13 에서도 나타나지만 이때는 훨씬 빠른 0.65 - 0.85 ms 에서 천이점이 발생하고 있고 또한 속도가 떨어지는 경향은 Fig. 11, 12 에서보다 다소 완만하다. 따라서 분사압력이 21 MPa 에서가 천이점도 일찍 발생하고 속도도 완만히 떨어지는 것으로 봐서 미립화도 7, 14 MPa 에서보다 더 잘되고 있고 관통력도 더 좋음을 알 수 있다.

Fig. 14 는 분위기압력의 변화에 따른 분무원추각의 영향을 나타내고 있다. 분무원추각은 분사개시후 시간에 따른 변화에 관계없이 일정하므로[13] 본 실험조건에서 분무원추각의 변화를 관찰했다. 그림에서 분위기압력이 대기압에서 1 MPa 까지는 약 2 - 4 ^{0} 까지 증가하고있으나 그 이후의 분위기압력에서는 거이 일정하다. 또한 분사압력이 클수록 분무원추각은 더크다. 이것은 분무선단속도에서 분사압력이 클수록 천이점이 일찍 발생하는 것과 관련이 있다고 추측된다. 즉 시간의 변화에 따른 연료분사량이 일정하고 분무원추각은 크므로 천이점이 일찍 발생하고 따라서 속도도 떨어지고 있다고 사료된다.

IV. 결 론

본 연구는 분위기압력을 변수로 하여 노즐직경이 0.45mm이고 노즐형상비(L/D)가 3.89인 경우에 분사압력이 분무특성에 미치는 영향을 정량적으로 해석하였다. 특히 Double flash에 의해 디젤분무를 가시화 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대기압하에서는 속도가 떨어진 선발분무만 교란된파가 형성됐으나 분위기압력하에서는 분무전체에 걸쳐 교란된파가 보이고 있고 이들이 분위기압력하에서 미립화을 지배하고 있다고 사료된다.

2. 대기압하에 분사된 분무의 성장은 분사시간 경과에 따라 기울기가 약 1인 직선으로 발달되고 있다. 이것으로 대기압하에서의 분무성장은 분사압력에만 의존하고 있다.

3. 분위기압력에 따른 분무선단도달거리는 분위기압력이 클수록 감소하고, 분사압력이 클수록 증가하고 있다. 그리고 동일한 분사압력에서는 분위기압력이 클수록 천이점이 더 일찍 발생

하고 있고 따라서 분무선단도달거리는 떨어지고 있다.

4. 분위기압력에 따른 분무선단속도는 분사압력이 클수록 빠르고 분위기압력이 클수록 떨어진다. 또한 분사압력과 분위기압력이 클수록 천이점이 일찍 발생하였고, 실험범위의 분사압력이 클수록 속도가 완만히 떨어진다.

5. 분무원추각은 분사압력이 클수록 커지고 같은 분사압력에서 분위기압력이 대기압에서부터 1MPa까지는 증가하며 1MPa 이후로는 거의 일정하다.

V. 참고문헌

1. Reitz, R. D., F. V. Bracco, 1982, Mechanism of breakup of round liquid jets, Phys. Fluids, pp. 233-249.
2. Dent, J. C., 1971, "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration", SAE Paper, No. 710571.
3. Varde, K.S. and Popa, D.M., 1983, Diesel Fuel Spray Penetration at High Injection Pressure, SEA Paper, No. 830448.
4. Arai, M., Tabata, M., Hiroyasu, H. and Shimizu, M., 1984, Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injection by a Diesel Nozzle, SAE Paper, No. 840275.
5. Yule, A.J., Mo,S.L., Tham,S.Y. and Aval, S.M., 1985, Diesel Spray Structure, ICLASS -85, pp. IIB/2/1 - IIB/2/15
6. Kuniyoshi, H., Tanabe, H., Sato, G. T. and Fujimoto, H., 1980. Investigation on the Characteristics of Diesel Fuel Spray, SAE Paper, No, 800968.
7. Sato, G.T., 1985, Structure of Diesel Spray, ICLASS-85, pp. IP/1/1-IP/1/10.
8. 河鐘律, 1984, ディーゼル噴霧の形式およびその周圍氣體の流動と着火れとの 關係に關する研究, 慶應義塾大學 工學博士學位論文.
9. 허종철, 구자왕, 이규영, 양옥룡, 1991, 디젤분무의 초기분산과정에 관한 실험적연구, 한국자동차공학회 논문집, 13권 2호 pp. 42-49.
10. Huh, J. C., G. Y. Lee, O. Y. Yang, 1991, An Experimental Study on Initial Behavior of Diesel Fuel Spray Characteristics, ICLASS -91, pp. 283-290.
11. Takahashi, H., H. Yanagisawa, S. Shiga, T. Karasawa, H. Nakamura, 1994, Analysis of High-pressure Diesel Spray Formation in the Early Stage of Injection, ICLASS-94, pp. 262-269.
12. Shimazaki, N., G. Ogihara, M. Nakayama, 1994, Development of Pseudo High Speed Image Photographic Systems and Application to Diesel Sprays, ICLASS-94, pp. 244-251.
13. 허종철, 1992, 단공디젤노즐의 미립화 형성기구에 관한 실험적 연구, 인하대하교 공학박사학위논문.