

전자유압식 분사계에 의한 초고압 디젤분무의 거동에 관한 연구(Ⅱ)

A Study on the Behaviour of Ultra-High Pressure Diesel Spray by Electronic Hydraulic Fuel Injection System(Ⅱ)

장 세 호*, 안 수 길**
S. H. Jang, S. K. Ahn

ABSTRACT

Behaviour of ultra-high pressure diesel spray in a constant-volume pressure chamber was studied with injection pressure ranging from 20 to 160MPa. Sprays were observed by the right angle scattering method. As a result, the spray tip penetration is first proportional to a time, and after that, it is proportional to 0.52 of the time during at the time of injection. The spray angle, jet angle of spray and spray max. width were larger as injection pressure and back pressure increase. An empirical correlation was made for the parameters of injection pressure, air-fuel density ratio, spray tip distance, spray angle, jet angle of spray and max. spray width.

주요기술용어 : Ultra-High Pressure Diesel Spray(초고압디젤분무), Injection Pressure(분사압력), Spray Tip Distance(분무선단도달거리), Spray Angle(분무각), Jet Angle of Spray(분사각), Spray max. width(분무최대폭)

1. 서 론

직접분사식 디젤기관은 예연소실 기관에 비해 열효율이 높기 때문에 소형고속기관에서도 많이 채용되는 추세이다. 그러나 직접분사식 기관은 예연소실만큼 강한 난류작용에 의한 연료와 공기의 혼합을 기대할 수 없기 때문에 분사된 연료의 운동

량에 의한 공기유입에 의존하는 혼합기 형성이 직접분사식 기관의 연소에 중요한 역할을 하고 있다. 직접분사식 디젤기관에 있어서 NO_x와 배기 미립자의 배출을 저감시키면서 출력을 개선시키기 위해 분사시기와 분사기간의 제어 및 초고압 연료분사가 가능한 전자유압식 연료분사계에 대한 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 초고압분사에 의한 연소 메카니즘에 대해서는 아직 확실하지는 않지만, 매우 큰 에너지가 연료와 연소장에 가해짐으로써 분무증발속도, 혼합기 형성속도가 향상되어

* 정회원, 부경대 실습과
** 정회원, 부경대 제어기계공학과

연소기간이 단축된다고 생각된다. 보시식 분사계를 이용한 분무특성의 연구는 많이 진행되어 왔지만, 전자유압식 분사계를 이용한 초고압 디젤분무의 특성을 연구한 예는 많지가 않다. 따라서 초고압분사에 의한 연소개선을 도모하기 위해서는 먼저 초고압분사에 의한 분무특성 등의 기초적인 연구가 필요하다고 생각된다. 본 연구에서는 전자유압식 분사장치를 이용하여 종래의 분사압력 영역에서부터 160MPa의 초고압 분사압력에 이르기까지 연료를 정용용기내에 분사시킬때, 비증발 디젤분무의 거동에 대해서 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig.1은 전자유압식 연료분사계를 나타낸 것이며, 분사계의 작동원리는 다음과 같다. 먼저 유압 펌프로써 유압유를 압축시켜 어큐뮬레이터에 저장시킨 다음, Solenoid Valve Controller^⑬에 의하여 4-Way 솔레노이드밸브^⑩의 "A"측 솔레노이드밸브를 ON시키면, 어큐뮬레이터에 저장되어

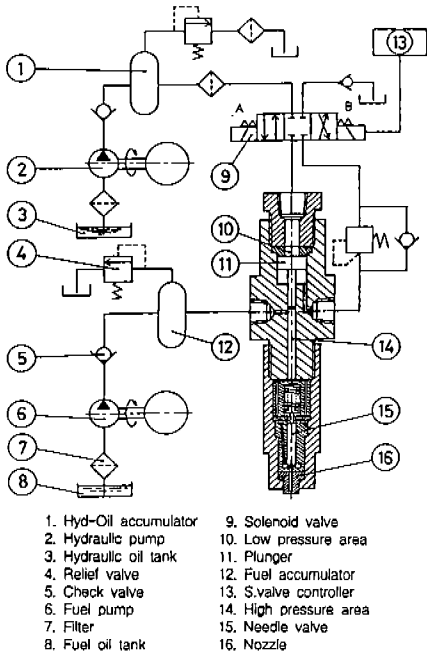


Fig.1 Schematic diagram of electronic hydraulic fuel injection system

있던 압축 유압유에 의해 플런저^⑪는 하강되고, 이때 플런저 하부에 유입되어 있는 연료가 플런저에 의해 압축되어 압력은 급격히 상승하고 니들밸브의 개변압이상이 되면 노즐을 통하여 분사된다. 그리고 "B"측 솔레노이드밸브가 ON되면 플런저 하부에 유압유가 유입되어 플런저를 상승시킨다.

Fig.2는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 고압정용용기는 가로150mm×세로150mm, 높이 300mm의 사각형으로 되어 있으며, 앞면과 배면 및 측면에 폭 50mm, 높이 250mm의 강화유리창을 설치하여 분무의 관측이 가능하도록 하였다. 정용용기내의 노즐중심과 평행하게 투명한 셀로판 눈금자를 설치하여 분무와 함께 촬영함으로써 분무거동을 측정할 수 있도록 하였으며, 정용용기내의 벽면에서 빛이 반사되는 것을 방지하기 위하여 내벽에 먹지를 부착하였다. 광원으로써 사용된 스트로보램프의 발광시간은 2 μ s이고, 필름은 Kodak Tri-X 400 흑백필름을 사용하였다.

실험방법은 고압정용용기내에 전자유압식 분사장치에 의해 연료를 분사시킬 때, 노즐선단에 설치되어 있는 포토커플러에서 연료의 분사개시를 감지하여 2차 Pulse Generator를 동작시키고, 소정의 시간만큼 지연된 2차 Pulse Signal이 스트로보스코프를 작동시켜 분사개시후 소정의 시간만큼 지연된 시간대의 분무를 촬영할 수 있도록 하

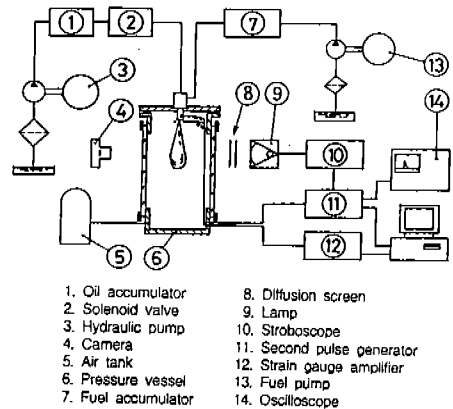


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

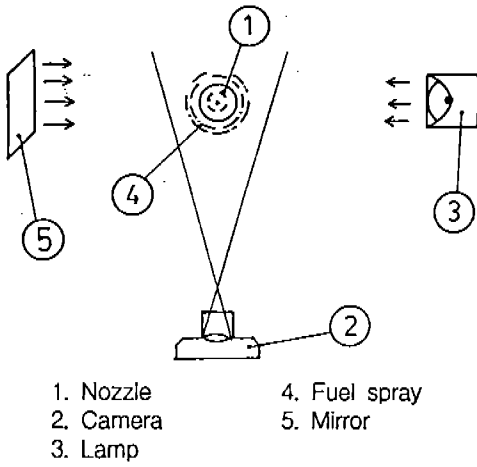


Fig.3 Schematic diagram of optical system

였다. Fig.3은 분무촬영에 사용된 촬영법으로써 램프와 카메라를 90°로 설치하고, 분무 뒷면에 거울을 설치하여 램프 반대편에 분무의 그림자가 생기지 않도록 하였다. 실험에 사용한 노즐은 $\phi=0.25\text{mm}$ 인 단공노즐을 사용하였고, 분사압력은 20~160MPa로 조정하였으며, 고압정용용기내의 분위기 공기압력은 1.0MPa, 1.5MPa, 2.0MPa로 변화시켰다. 이때의 주위공기밀도와 연료액체의 밀도비(ρ_w/ρ_f)는 각각 1.39×10^{-2} , 2.08×10^{-2} , 2.78×10^{-2} 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무선단도달거리 및 분무선단속도

Fig.4는 배압(2MPa)을 일정히 하고 분사압력을 변화시켰을 때, 분사기간중의 분무선단도달거리를 대수좌표에 나타낸 것이다. 분사압력에 따라 분사개시후 시간 $t=0.3 \sim 0.4\text{ms}$ 부근에서 천이점이 나타나고 있으며, 분무선단도달거리는 천이점 이전에는 시간 t 에 비례하고, 천이점 이후에는 시간 t 의 0.52승에 비례하고 있다.

한편, H.Hiroyasu 등³⁾은 분사압력 70~150bar, 배압 10~30bar, 노즐직경 0.3mm의 실험조건하에서 비증발분무의 분무선단도달거리를 조사한 결과 분사초기에는 분무선단속도가 일정하여 시간 t 에 대해서 선형적으로 증가하고, 이어서 분무의 분열이 일어난 후에는 시간 t 의 제곱근에 비례하

며, 천이점은 분사후 0.3~0.5ms부근에서 나타난다고 하였다. 따라서 160MPa의 최고압으로 분사된 분무의 거동과 비슷한 결과가 나타남을 알 수 있다. 천이점 이후의 분무선단도달거리에 대한 실험식을 유도하면 분무선단도달거리(L_s)는 시간 t 의 0.52승에 비례하기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s = K \cdot t^{0.52} \quad (1)$$

여기서 K 는 분무의 운동량(분출속도, 노즐직경, 연료밀도)과 분위기 공기의 밀도 및 점도 등의 함수로써

$$K = f(V_0, d_n, \rho_f, \rho_a, \mu_a) \text{이다.} \quad (2)$$

분무의 운동량은 분사압력과 밀접한 관계가 있으므로 K 와 분사압력과의 관계를 나타내면 Fig.5와 같다. 20MPa에서 160MPa까지 그 대수치의 선형성이 매우 높게 나타나고 있다. 그리고 연료와 공기의 밀도비(ρ_f/ρ_a)와 K 의 관계를 나타내면 Fig.6과 같으며 대수치의 선형성이 역시 매우 높게 나타난다. 따라서 분사압력 20MPa에서 160MPa

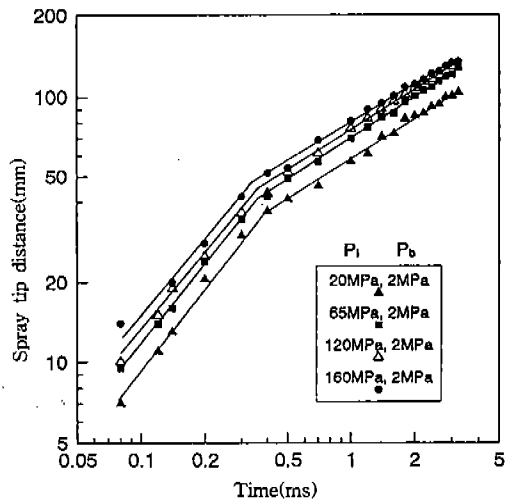


Fig.4 Effect of injection pressure on spray tip distance

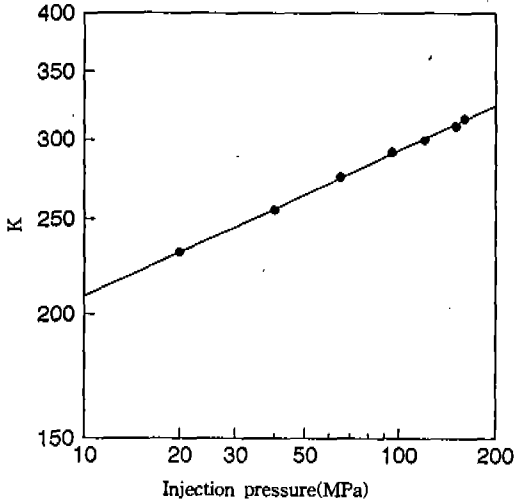


Fig.5 Relation between K and injection pressure

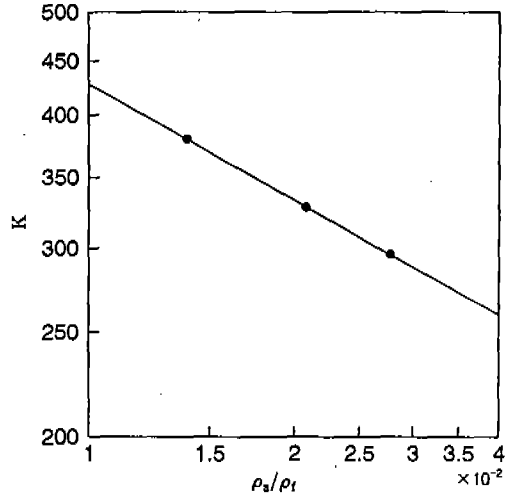


Fig.6 Relation between K and ambient air-fuel density ratio

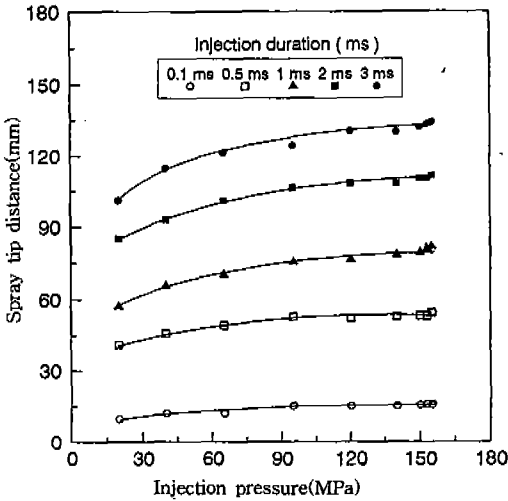


Fig.7 Effect of injection pressure on spray tip distance

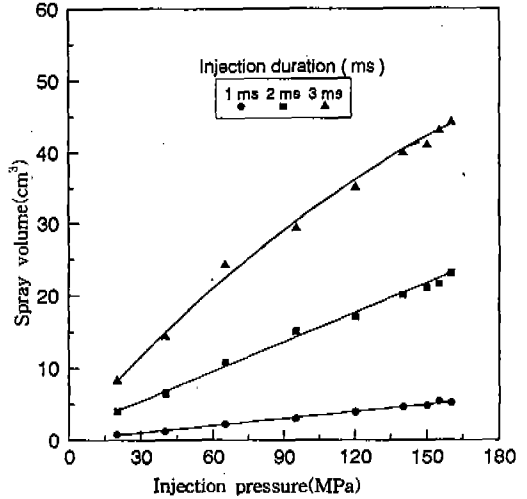


Fig.8 Effect of injection pressure on spray volume

까지의 분무선단도달거리에 대한 무차원 실험식을 구하면 다음과 같이 분무선단도달거리(L_s)는 분사압력보다 분위기 밀도비의 영향이 더 큼을 알 수 있다.

$$\frac{L_s}{d_n} = 41 \left(\frac{\rho_f}{\rho_a} \right)^{-0.3599} \cdot (P_f)^{0.1476} \cdot (t)^{0.52} \quad (3)$$

Fig.7은 분사개시후 0.1, 0.5, 1, 2, 3ms일 때의 분무선단도달거리를 분사압력변화에 따른 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 분사압력 100MPa이하에서는 분사압력이 증가함에 따라 동일시간에 있어서의 분무선단도달거리가 지속적으로 증가하지만 100MPa이상이 되면 완만히 증가함을 알 수 있다. 이는 분무선단도달거리가 연료액적의 운동량에 비례하므로 분사압력이 높아지면 노즐에서의 분출속도도 크게되어

증가하지만, 반면에 연료액적의 직경은 미립화의 촉진으로 작아져 관통력은 작아진다. 따라서 분사압력이 어느 한도 여기서는 약 100MPa 이상이 되면 후자의 영향이 크게 되어 도달거리는 완만히 증가한다고 생각된다.

Fig.8은 분사개시후 1, 2, 3ms 일때의 분무체적을 분사압력변화에 따른 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 분사압력이 증가하면 분무체적은 급격히 증가함을 알 수 있다. 분사압력이 20MPa에서 160MPa로 증가하면 분무체적은 5배이상 커짐을 알 수 있다. 따라서 초고압으로 연료를 분사하면 분무의 미립화가 급격히 일어나고, 분무내로의 공기유입이 증대되어 분무내에서의 공연비가 증대됨을 알 수 있다.

Fig.9는 분사압력변화에 따른 분무선단속도를 나타낸다. 분사압력 20, 110, 160MPa일때 노즐을 통과하는 연료의 평균유속을 계산해보면 각각 170, 270, 320m/s로 분사압력이 높을수록 분무선단속도가 빠르게 나타날 것으로 생각된다. 그러나 그림에 의하면 전체적으로 분사초기에는 분무선단속도가 매우 높으나 시간이 경과 할수록 급격히 떨어져 특히 160MPa와 110MPa의 경우 분사초기에는 160MPa가 빠르고 어느 시점을 지나면서 오히려 110MPa가 빨라지고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 분무성장과정에서 분사초기에는 액

주인 상태로 분무의 미립화가 아직 충분히 일어나지 않고 있기 때문에 분사압력이 160MPa일때 운동량이 더 크므로 분무선단속도가 빠르게 나타난다고 생각된다. 그러나 어느 시점을 지나면서 미립화가 촉진되면 초고압에 의해 액적의 직경이 작아져 액적의 비상속도가 급격히 감쇠되고, 아울러 분무체적의 증가로 액적군들이 공기와 충돌하는 면적이 커서 공기저항을 더욱 많이 받게 됨으로 160MPa로 분사한 경우의 분무선단속도가 오히려 더 느려진다고 생각된다.

Fig.10은 분사압력 160MPa의 경우 배압변화에 따른 분무선단속도를 나타낸다. 배압이 낮으면 분위기 밀도가 낮기 때문에 분사초기에는 분무선단속도가 빠르게 나타나지만, 시간이 경과할수록 분무선단속도는 급격히 떨어지고 나중에는 오히려 더 느려지게 된다. 이는 배압이 낮으면 분무선단속도가 빠르기 때문에 주위공기와의 상대속도가 더욱 커져 미립화가 촉진되기 때문인 것으로 생각된다.

3.2 분사각과 분무각

Fig.11에 나타낸 바와 같이 분사각은 노즐에서 분출되는 제트의 접선이 서로 이루는 각(θ_s)으로, 분무각은 분무단류확산부의 접선이 서로 이루는 각(θ_s)으로 각각 정의하였다. Fig.12는 배압(2MPa)

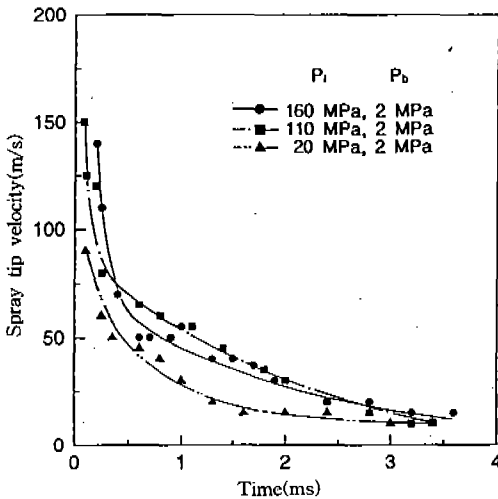


Fig.9 Effect of injection pressure on spray tip velocity decay

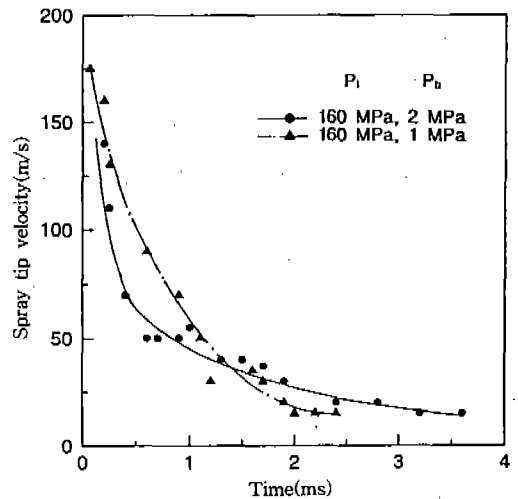


Fig.10 Effect of back pressure on spray tip velocity decay

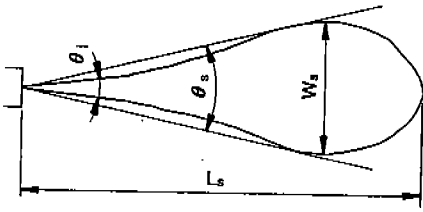


Fig.11 Definition of spray angle(θ_s) and jet angle of spray(θ_j)

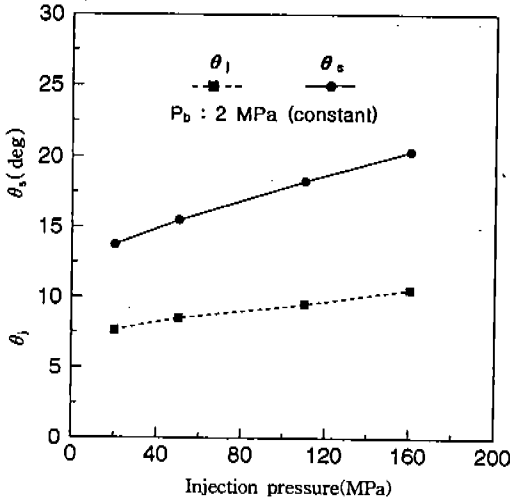


Fig.12 Effect of injection pressure on spray angle(θ_s) and jet angle of spray(θ_j)

이 일정한 경우 분사압력의 변화에 따른 분무각과 분사각을 나타낸 것으로 분사각은 분사압력이 증가함에 따라 완만히 증가하는 반면, 분무각은 현저히 증가함을 알 수 있다. Fig.13은 분사압력 160MPa, 110MPa 그리고 35MPa에 있어서 배압의 변화에 따른 분무각과 분사각을 나타낸 것으로 분무각은 분사각보다 배압의 영향을 더 많이 받아 증가하고 있으며 분사각의 약 2배가 됨을 알 수 있다. 한편, Y.Wakuri 등⁴⁾은 디젤분무의 분무각에 대해서 운동량이론을 적용하여 해석을 행했으며, 분무각(θ_s)은 노즐과 연료 및 주위 공기의 물성치에 따라 결정되며 다음과 같이 나타내었다.

$$\theta_s = f\left(\frac{\rho_f}{\rho_a}, \frac{V_o \cdot d_n \cdot \rho_f}{\mu_a}\right) \quad (4)$$

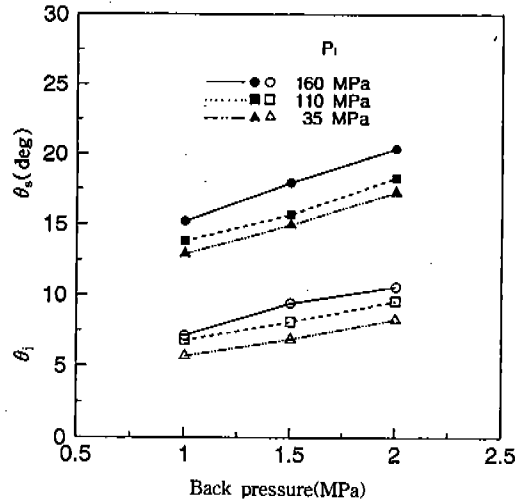


Fig.13 Effect of back pressure on spray angle(θ_s) and jet angle of spray(θ_j)

실험결과 $\frac{V_o \cdot d_n \cdot \rho_f}{\mu_a}$ 의 영향은 거의 없으며, 단지 연료와 공기의 밀도비 (ρ_f / ρ_a)의 함수로 나타내어진다고 하였다.

$$\text{즉, } \theta_s = G \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right) \quad (5)$$

V_o : 노즐출구속도

d_n : 노즐직경

ρ_f : 연료밀도

ρ_a : 공기밀도

μ_a : 공기점도

그리고 H.Hiroyasu⁵⁾는 실험을 통하여 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$\theta_s = 83.5 \left(\frac{L_n}{d_n}\right)^{-0.22} \cdot \left(\frac{d_n}{d_s}\right)^{0.15} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.26} \quad (6)$$

L_n : 노즐길이

d_n : 노즐직경

d_s : 노즐의 Sac Chamber 직경

또 Z.Huang⁶⁾는 분무각을 다음과 같이 나타내었다.

$$\tan \theta_s = 1.14 \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.35} \quad (7)$$

본 실험에 의하면, 분사각과 분무각은 분위기 공기의 밀도 변화의 영향은 물론 분사압력의 영향도 상당히 받고 있음을 확인하였으며, 본 실험 범위내에서 분사각과 분무각의 실험식은 각각 다음과 같다.

$$\theta_j = 20.2 (P_i)^{0.387} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.729} \quad (8)$$

$$\theta_s = 26 (P_i)^{0.432} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.648} \quad (9)$$

식 (8), (9)에서 분사압력(P_i)의 지수와 밀도비(ρ_a / ρ_f)의 지수를 서로 비교해보면, 밀도비(ρ_a / ρ_f)의 지수가 큼을 알 수 있다. 따라서 분사각 θ_j 와 분무각 θ_s 는 분사압력 P_i 보다 연료와 주위기체와의 밀도비에 더 의존성이 있음을 알 수 있다.

3.3 분무최대폭 및 분무확산속도

Fig.14와 Fig.15는 분사압력(P_i) 및 배압(P_b)에 따른 분무의 최대폭을 각각 나타낸 것이다. 분무최대폭은 배압이 일정한 경우 시간경과에 따라 분사압력이 높을수록 급격히 커지고 있다. 이는 분사초기의 낮은 압력으로 분출된 저속 분무를 후발의 고압분사에 의한 고속분무가 충돌함으로써 앞서 나간 분무를 부수며 반경방향으로 확산시키기 때문에 분무최대폭은 급격히 커진다고 생각된다. 그리고 Fig.15에서 동일한 분사압력의 경우 분사초기에는 배압의 영향을 크게 받지 않으나 분무성장후에는 배압의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 이는 분사초기에는 분무체적이 작기 때문에 공기의 저항이 작으므로 배압의 영향을 크게 받지 않고 분사압력의 영향을 많이 받으며, 분무가 성장한 후에는 분위기 공기의 밀도에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 한편, 본 실험의 조건하에서 최대분무폭(W_s)의 실험식은 다음과 같다.

$$W_s = 4.9 \cdot (P_i)^{0.638} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.504} \cdot (t)^{0.57} \quad (10)$$

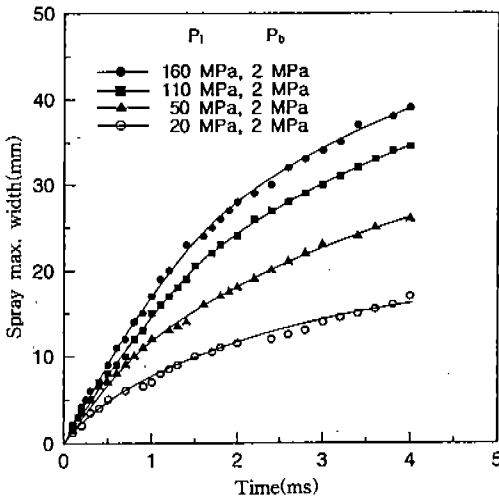


Fig.14 Effect of injection pressure on max. spray width

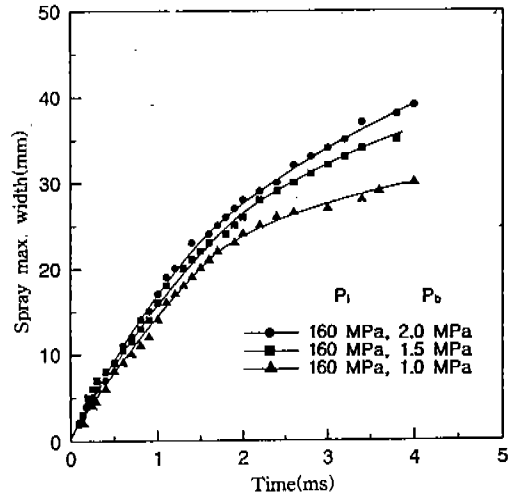


Fig.15 Effect of back pressure on max. spray width

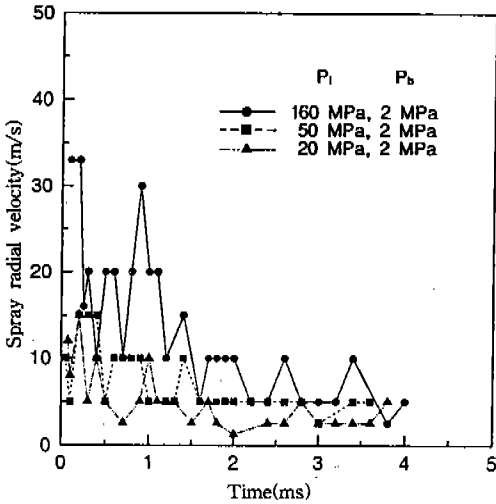


Fig.16 Effect of injection pressure on spray radial velocity

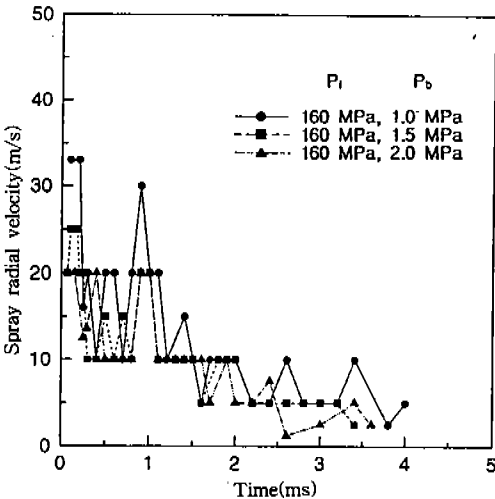


Fig.17 Effect of back pressure on spray radial velocity

Fig.16과 Fig.17은 분사압력 및 배압의 변화에 따른 분무반경방향으로의 분무확산속도를 나타낸 것이다. 분사압력이 높을수록 확산속도가 크게 나타났으며, 분사초기에는 확산속도가 매우 크게 나타나지만 시간이 경과함에 따라 점차적으로 작아지고 있음을 알 수 있다. 분무반경방향으로의 확산속도가 요동하는 것은 분무내의 난류성분이 확산속도에 영향을 주기 때문이라 생각되고, 분사압

력이 높을수록 진폭이 큰 것은 난류성분이 그만큼 더 크기 때문이라 생각된다. Fig.17에서 동일한 분사압력의 경우 배압의 영향은 분사초기에는 그다지 크지 않은 반면에 분무가 성장한 후에는 크게 미치는 것을 확인하였다. 그리고 분무반경방향으로의 확산속도는 분무선단속도의 약 1/5정도 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

전자유압식 분사장치를 이용하여 종래의 분사압력부터 초고압 분사압력까지의 넓은 범위에서 연료를 정용용기에 분사시킬 때, 초고압 디젤분무의 거동을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무선단도달거리는 분사압력에 관계없이 분열전에는 시간 t 에 비례하고, 분열후에는 시간 t 의 0.52승에 비례하였다.
- 2) 분무선단속도는 분사초기에는 매우 빠르지만 곧 급격히 감소하고, 그 이후는 완전히 감소하였다.
- 3) 분무각과 분사각은 분사압력과 배압이 높을수록 증가하였으며, 그 증가율은 분사압력보다 배압의 영향을 더 많이 받았다.
- 4) 분무의 반경방향으로의 확산속도는 분사압력이 높을수록 매우 높게 나타났으며, 배압의 영향이 분사초기에는 그다지 크지 않은 반면에 분무가 성장한 후에는 크게 미치는 것을 확인하였다. 그리고 분무확산속도는 분무선단속도의 약 1/5정도이었다.
- 5) 본 실험의 범위내에서 분무선단도달거리와 분사각 및 분무각 그리고 분무최대폭에 대한 실험식을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Shinji Kobayashi, "NOx Reduction from Diesel Combustion Using Pilot Injection with High Pressure Fuel Injection", SAE Paper 920461, 1992.
2. T.Kamimoto, "Effect of High Pressure Injection on Soot Formation Processes in a

- rapid Compression Machine to Simulate Diesel Flames”, SAE Paper 871610, 1987.
3. H.Hiroyasu et al., “Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle”, SAE 840275.
 4. Y.Wakuri et al., “Studies on the Penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine”, Bulletin of JSME, Vol. 3, No. 9, pp. 123~130, 1960.
 5. H. Hiroyasu and M.Arai, “Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines”, SAE paper 900475.
 6. Z. Huang, L. F. Zhang and B. Z. Li, “The Laser Holographic Study on Fuel Atomization of Diesel Spray”, COMODIA 90, pp. 303~308, 1990.
 7. 장세호, 김준효, 안수길, “전자유압식 분사계에 의한 초고압 디젤분무의 거동에 관한 연구(I)”, 한국자동차공학회논문집, 4권 제2호, pp. 137~146, 1996. 3.