

디젤분무의 분열길이 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Break-up Length for the Diesel Sprays

장 세 호 · 라 진 흥

S. H. Jang and J. H. Ra

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), Diesel Spray(디젤분무), Break-up Length(분열길이), Liquid Core(액주), Injection Pressure(분사압력), Spray Total Resistance(분무저항)

Abstract : The injected liquid does not break-up instantly after injection for diesel engine. There is some unbroken portion, which is the liquid core(The length of liquid core is called the break-up length) in the spray. If the liquid core is longer than the depth of the bowl in the small DI diesel engine, the liquid core impinges on the surface of the piston. Once the liquid core impinges on the surface, it cannot ignite or burn rapidly and thus prolongs burning time with a degradation in thermal efficiency. The break-up length of a diesel spray in a compressure vessel was measured by an electric resistance method. A voltage was applied between the nozzle and screen, bar, needle electrode inserted at various axial and radial positions into atomizing sprays. As a result, a current flows not only in the region of liquid core but also through the droplets of the spray. It is found that the break-up length measured with screen electrode is overestimated. The break-up length of the spray is found to be proportional to the square root of the density ratio of fuel and surrounding gas. The break-up length of the spray decreases as the injection pressure and the back pressure increase

1. 서 론

디젤기관의 성능과 연소실에서 배출되는 soot, 미연탄화수소, NOx 등은 연소실에 분사된 분무의 구조와 거동에 의해 크게 영향을 받는다¹⁾. 그러므로 종래부터 디젤분무의 도달거리, 분무각, 입경분포 등에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다²⁻⁵⁾. 디젤엔진에서 연료는 고온·고압의 연소실에 간헐적으로 분사되어 미립화, 증발, 공기와의 혼합에 의해 연소되는데, 미립화 과정중에는 아직 분열되지 않은 부분인 액주(Liquid core)가 존재하고 있다. 이를 분열길이(Break-up length)라고 하고, 이 액주(Liquid core)가 연소실 벽면(piston crown)에 충돌하게 되면 열효율과 배기가스에 큰 영향을 미치기 때문에 고압분사된 분무내에 존재하는 액주의 분열길이를 파악하는 것이 소형기관의 연소실 설계에 매우 중요하다.

고압분사된 디젤분무의 분열길이 측정에 관한 연구로써 清水正則⁶⁾ 등은 분무의 측상에 금속망으로 된 전극을 설치하고, 액주의 연속과 불연속이 각각 50%씩의 빈도로 생기고 있는 때에 대응하는 고저항과 저저항의 파형이 교대로 나타나는 위치를 분열길이라고 정의하였고, Chehroudi⁷⁾ 등은 유사한 실험으로 핀형 전극을 사용하여 노즐과 전극사이의 저항을 측정하고 액주가 존재하지 않는 영역의 분무액적들에 의해서도 미세한 전류가 흐른다고 하였으며, 清水正則⁶⁾ 등에 의한 분열길이보다 약 50% 정도 적은 실험식을 제안하였다.

본 연구에서는 전극의 형상을 다양하게 제작하여 노즐에서 분사되는 분무의 측상에 설치하고, 노즐과 전극사이에 정전압을 가한 뒤 분무에 의한 전압강하를 측정함으로써 분무내에서 액주가 존재하지 않는 영역의 액적들에 의해서도 전류가 통하는지를 확인하고, 분무의 축방향과 반경방향으로의 저항변화를 측정함으로써 분무의 분열길이(break-up length) 측정을 시도하였다.

접수일 : 1999년 4월 23일

장세호 : 강원전문대학 기관과

라진흥 : 부경대학교 실습선(탐양호)

2. 디젤분무의 분열길이 측정

Fig. 1은 분무의 분열길이와 액주의 저항측정에 사용된 전기회로도이다. 분무의 분열길이는 노즐을 음극(-)으로 하고, 제작한 전극을 양극(+)으로 하여 양단에 정전압 DC 12volt를 가했다. 이때 B와 C 지점간의 전압강하를 측정해보면, 연료를 분사시키지 않은 상태에서 전극이 노즐 끝에 닿으면 전압(V_2)은 0volt로 전압강하가 일어나며, 전극이 노즐선단에서 떨어지면 전압강하는 일어나지 않고 전압(V_2)은 12volt로 나타난다. 따라서 노즐에서 분사되는 시료는 도체이므로 분무내에 존재하는 액주가 전극에 닿으면 전류는 액주를 통하여 흐르게 되고, 전극이 액주가 존재하지 않는 영역에 위치하면 전류는 흐르지 않게 된다. 그러므로 본 연구에서는 액주가 존재하지 않는 상태, 즉 전압강하가 전혀 일어나지 않는 상태인 12volt와 미세한 전압강하가 발생하는 상태의 빈도가 각각 측정기간의 50%씩 검출되는 위치를 분열길이라고 정의하였다. 한편, A와B지점, B와 C지점간의 전압과 전류를 알면 액주와 분무의 저항은 다음 식에서 구할 수 있다.

$$I = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V_0 - V_2}{20[k\Omega]} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{V_2}{I} \quad (2)$$

(여기서 V_0 는 가한 전압, V_2 는 측정된 전압, R_s 는 분무저항)

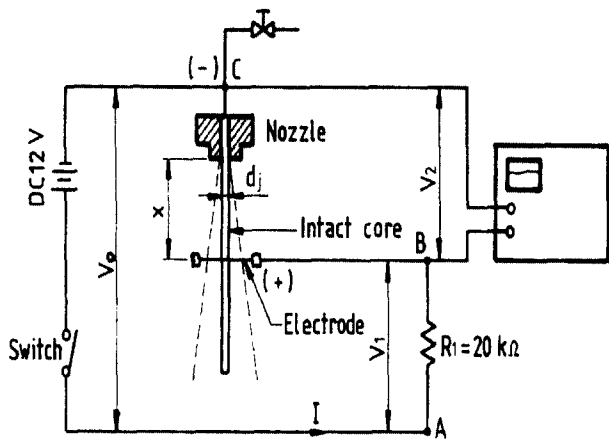


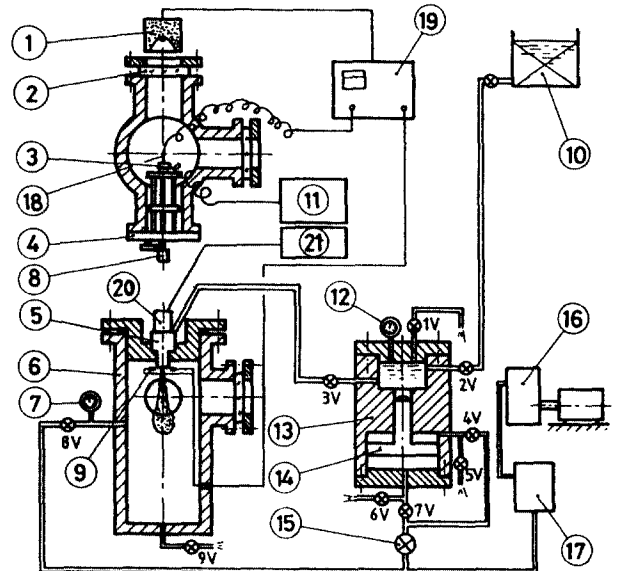
Fig. 1 Measuring electric circuit for spray resistance

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 고압용기, 축압기, 3차원 이송장치 (3-Dimensional traverse), Air compressor, Air tank, sensor부 등으로 구성되어 있다. 고압용기는 내경 150mm, 높이 300mm이며, 측면에 90 사이각으로 두곳에 두께 15mm, 직경 80mm인 강화유리창을 설치하여 조명 및 관찰을 할 수 있도록 하였다. 또한 노즐과 전극에 정전압을 가한 뒤 분무의 액주에 의한 전압강하를 분무의 축방향과 반경방향으로 측정하기 위하여 고압용기 내부의 한쪽 측면에 마이크로미터와 1 Pulse에 7.5° 회전하는 Stepping motor, 랙과 피니언등으로 구성되어 상하 65mm, 좌우 30mm, 전후 25mm로 이동이 가능한 3차원 이송장치를 제작 설치하였다. 그리고 압축비 16:1의 압축공기에 의한 축압에 의해 연료를 분사시켰다.

Fig. 3은 실험에 사용된 전극형상을 나타내 것으로서 직경이 30mm, 60mesh인 스테인레스망 전극과 직경이 0.3mm인 스테인레스 바아 전극 그리고 끝부분만 전류가 통할 수 있도록 제작된 니



- 1.Lamp 2.Reinforced glass 3.Stepping motor 4.3-Dimensional traverse 5. Fuel nozzle 6. High pressure chamber 7. Pressure gauge 8. Micrometer 9. Photo coupler 10. Fuel tank 11. Stepping motor controller 12. Pressure gauge 13. Accumulator 14. Plunger 15. Air pressure regulator 16. Air compressor 17. Air tank 18. Electrode 19. Oscilloscope 20. Solenoid 21. Solenoid controller

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

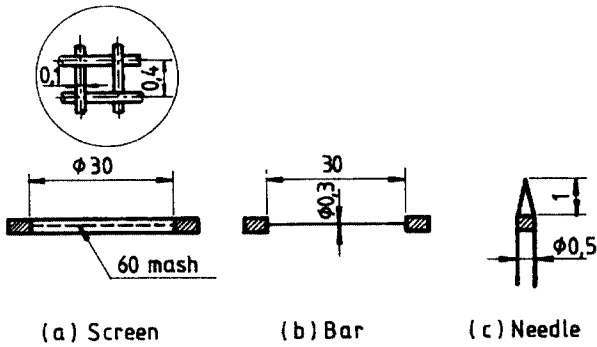


Fig. 3 Configuration of electrode used experiments

들 전극을 사용하였다. 한편, 노즐출구에서의 액주 직경은 PENTAX-X MACRO 1:4 50mm F4인 카메라를 이용하여 노즐 출구부에 초점을 맞추고 촬영한 후 확대 인화하여 액주직경을 측정하였다. 실험에 사용된 액체시료는 물 1000ml중에 순도가 99%인 소금10g을 용해시킨 소금물을 사용하였다. 실험에 사용한 분사밸브는 YANMAR DIESEL ENGINE의 LD형 분사밸브를 사용하고, 노즐팁은 노즐직경(D)이 0.5mm, 노즐 형상비(L/D)가 2, 4, 7인 단공노즐을 제작하여 사용하였다. 분사압력은 7.8MPa에서 14.1MPa, 배압은 0.1MPa에서 2.0MPa로 각각 변화시켜 실험을 행하였다.

3.2 실험방법

실험은 Fig. 2에서 Air compressor를 이용하여 Air tank에 공기를 2.5MPa 이상으로 저장시키고, Plunger⑭ 상부에는 시료를 가득 채운다. 그리고 고압용기내의 압력을 소정의 압력만큼 충전시킨 다음 Air pressure regulator⑮를 적절히 조정하여 Plunger⑭ 상부측 시료 압력이 소정의 압력으로 상승되면 밸브(3V)를 열어서 시료를 연속 분사시킨다. 이때 노즐선단에 부착되어 있는 포토커플러에서 분사 시작을 감지하여 메모리 오실로스코프에 트리거 시킴으로써 분사개시후 분무내에 존재하는 액주에 의한 전압강하파형을 오실로스코프로 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 액주의 저항

액주직경(d_j)이 일정한 연속액주의 저항값(R)은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$R = \frac{\xi \cdot x}{\pi \cdot d_j^2 / 4} \quad \text{or} \quad dR = \frac{\xi \cdot dx}{\pi \cdot d_j^2(x) / 4} \quad (3)$$

(여기서 $d_j(x)$ 는 노즐로부터 x 거리에서의 액주 직경)

Fig. 4는 시료의 고유저항 측정 회로도이며, 시료의 고유저항치(ξ)는 0.79Ω/m이었다.

Fig. 5는 Screen, bar, Needle 전극을 사용하여 노즐선단에서 1.5m 높은 위치에 설치되어 있는 탱크에서 대기압하로 흘러내리는 액주의 저항을 노즐선단에서 축방향거리(x)에 대한 저항(R)을 측정한 것이다. 실선으로 나타낸 곡선은 액주의 직경이 노즐선단에서 전극간의 거리(x)에 관계없이 항상 노즐공의 직경과 동일하다는 가정하에 계산된 액주의 축방향거리(x)에 대한 액주의 저항치이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 축방향거리(x)에

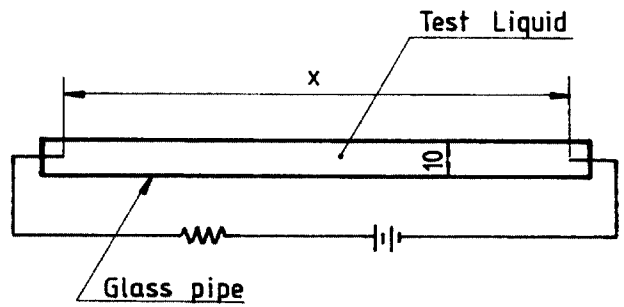


Fig. 4 Schematic diagram of resistivity experiments

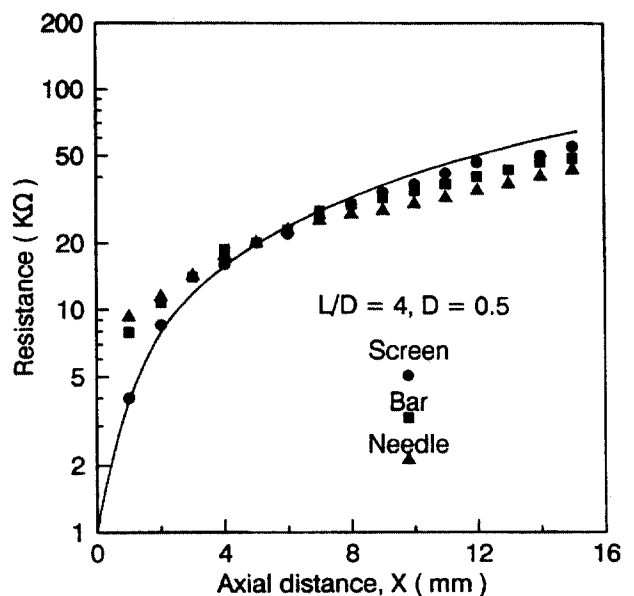


Fig. 5 Effect of electrode on resistance of liquid column

있어서 전극의 형상에 따라 액주의 저항이 Screen > Bar > Needle 순으로 약간 높게 나타난다. 이것은 액주에 접촉하는 전극의 면적이 Screen은 0.31mm², Bar는 0.47mm², Needle은 0.81mm²로써 액주에 닿는 전극의 면적을 비교해 보면, Screen 전극쪽이 제일 적기 때문에 Screen 전극의 접촉저항이 가장 크게 되고, 분무의 저항은 크게 나타나는 것으로 생각된다. 또한 계산치와 실험치가 거의 일치하고 있으며, 노즐선단 근처에서 저항이 불안정하게 나타나는 것은 전극에 액주의 충돌에 의하여 전극의 진동에 의한 것으로 생각되며, 축방향거리 x = 7이후에서 전극에 의해 측정된 측정치가 계산치보다 낮은 저항치를 나타내는 것은 액주가 노즐에서 멀어질수록 내부난류 및 표면저항에 의하여 분열이 증대하고 액주의 표면이 불안정하게 되어 액주의 표면적이 커지기 때문인 것으로 생각된다.

4.2 분무의 저항

Fig. 6은 분사압력 12.5MPa, 배압 1.5MPa로 분사된 분무의 저항을 Screen, Bar, Needle전극을 사용하여 분무의 축방향거리(x)에 대한 저항을 측정하는 것이다. 그림에서 실선은 노즐선단에서 전극간의 거리(x)에 관계없이 노즐 출구부의 액주의 직경이 계속 유지된다는 가정하에 계산된 축방향거리에 대한 액주의 저항치이다. 동일한 측정거리에서 Screen전극에 의해 측정된 분무저항이 Bar, Needle전극에 의해 측정된 분무저항보다 조금 낮

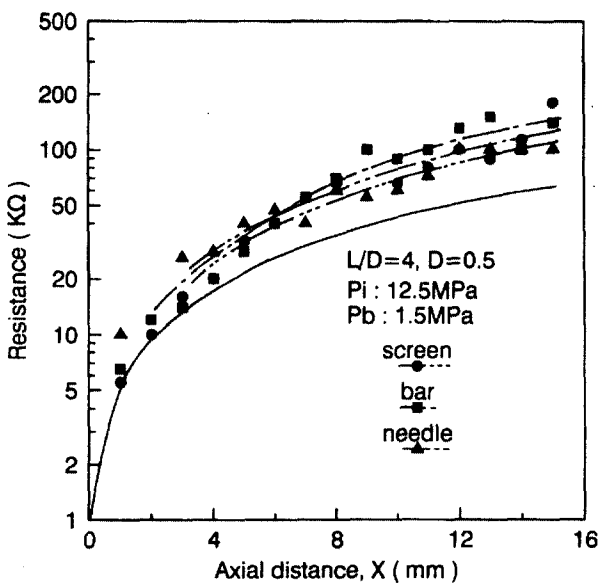


Fig. 6 Effect of electrode on spray total resistance

은 값을 나타내고 있다. 이것은 분무내에 존재하는 액주 뿐만 아니라 액적들에 의해서도 전류가 흐르기 때문인 것으로 생각된다. 또한 직경이 일정한 액주의 계산된 저항치와 전극들에 의해 측정된 측정치와의 차가 노즐에서 멀어질수록 크게 나타나는 것은 분사된 액주와 주위의 공기와의 상대속도가 증가함으로 인한 마찰의 증대로 액체표면의 불안정이 가속화되어 액주의 미립화가 급격히 일어나기 때문에 분무내에 존재하는 액주의 직경이 감소되기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 x = 25mm 위치에서 반경방향으로 Bar전극을 사용하여 분무중심에서 2.5mm 떨어진 위치(A지점)와 1.5mm 떨어진 위치(B지점), 그리고 분무중심부에서 분무의 저항을 측정하는 것이다. 실험에 의한 결과 오실로스코프에 나타난 파형에 의하면 액주가 존재하지 않는 영역인 외주부(A지점)에서도 전하를 띤 액적들에 의하여 전압강하가 간헐적으로 미소하게 일어나고 있다. 이러한 저항을 액적저항(Droplet resistance)이라 하며, 액주의 저항과 액적저항을 합하여 총저항(Total resistance)이라고 부른다. 또한 분무의 중심부인 C 지점에서 약 11.2volt로 전압강하가 일어나고 있으므로 분무내에 액주가 존재함을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 6에서 Screen전극에 의한 분무저항 측정에서 분무내에 존재하는 액주와 전하를 띤 액적에 의하여 전류가 흐르기 때문에 다른전극에 의한 측정치보다 더 낮은 분무저항이 측정되는 원인이 됨을 알 수 있다. 따라서 Screen전극에 의한 분열길이 측정은 과대평가 될 수 있기 때문에 본 실험에서의 분열길이 측정은 Bar전극을 사용하였으며, Bar전

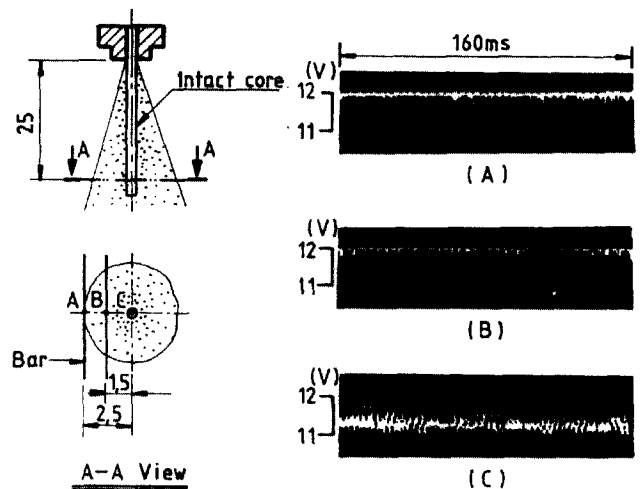


Fig. 7 Example of the spray droplet resistance experiments

극과 Screen전극에서 분무에 접촉하는 면적을 비교해보면 Bar전극의 접촉면적이 Screen전극의 접촉면적보다 매우 적으므로 bar전극으로 측정된 전압강하 파형은 모두 액주에 의한 것으로 간주하고 각각의 조건에 대한 분열길이 측정을 행하였다.

4.3 분무의 분열길이

Fig. 8은 분무의 무차원 축방향거리에 대한 무차원 저항치를 나타낸 것이다. 측정된 저항(R)과 노즐과 전극사이의 거리(x)를 무차원화 시키면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{R}{(4\xi x / \pi d_j^2)} \quad \beta = \frac{x}{d_j (\rho_L / \rho_a)^{1/2}} \quad (4)$$

여기서 α 는 분무의 저항(R)을 동일한 거리에서 노즐선단의 액주직경(d_j)과 동일한 직경을 갖는 액주의 저항치로 나눈 값이고, ρ_L 은 연료밀도, ρ_a 는 공기밀도를 나타낸다. Fig. 8에서 β 의 범위는 $1 < \beta < 5$ 이며, 무차원 축방향거리와 무차원 저항(R)을 만족시키는 식을 세우면 다음과 같다.

$$\alpha = \exp\left[\frac{(\beta - \beta_0)}{C}\right] \quad (5)$$

여기서 β_0 는 X축의 절편이며, 식(4)의 α , β 를 식(5)에 대입해서 $\frac{dR}{dx}$ 를 구하고, 식(3)에서의

$\frac{4\xi}{\pi \cdot d_j^2(x)}$ 와 등치를 시키면 $\frac{d_j(x)}{d_j}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\frac{d_j(x)}{d_j} = \frac{\exp[-(\beta - \beta_0)/2C]}{(1 + \beta/C)^{1/2}} \quad (6)$$

또한 식(6)에서 $\beta = \beta_0$ 일때의 접선의 기울기를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d(d_j(x))}{dx} &= -\frac{\left(\frac{1+\beta_0}{C}\right)^{-1/2} + \left(\frac{1+\beta_0}{C}\right)^{-3/2}}{2C\left(\frac{\rho_L}{\rho_a}\right)^{1/2}} \\ &= -\frac{1 - \frac{\beta_0}{C} + \frac{9(\beta_0/C)^2}{8}}{C\left(\frac{\rho_L}{\rho_a}\right)^{1/2}} \quad (7) \end{aligned}$$

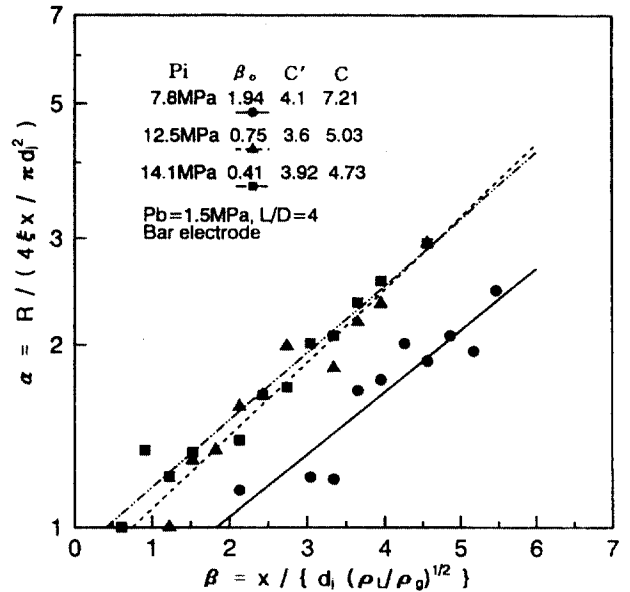


Fig. 8 Measured non-dimensional resistance versus non-dimensional axial distance for the sprays

식(7)에서 x에 대하여 적분하면 액주의 길이(Core length)는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{x_L}{d_j} &= \left[\beta_0 + C \left(1 - \frac{\beta_0}{C} + \frac{9(\beta_0/C)^2}{8} \right)^{-1} \right] \\ &\cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_a} \right)^{1/2} = A \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (8) \end{aligned}$$

따라서 식(8)에서 분무의 분열길이는 연료와 주위공기와의 밀도비의 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 식(8)에서 清水正則⁵⁾등은 $A = 15.8$ 을 제안하였고, Chehroudi⁷⁾등은 $A = 7.15$ 를 제안하였다. 본 실험에 의하면 $A = 4.73 \sim 7.21$ 이었다.

4.4 전극형상과 분사압력 및 배압의 변화에 따른 분열길이의 변화

Fig. 9는 일정한 분사압력(12.5MPa)하에서 배압(0.1, 1.5, 2.0MPa)의 변화에 대한 분무의 축방향거리의 저항을 나타낸 것이다. 동일한 축방향거리에서는 배압이 높을수록 높은 저항을 나타내고 있다. 이는 배압이 높을수록 분무와 주위공기와의 마찰의 증대로 분열이 촉진되어 액주의 직경이 감소하기 때문이라 생각된다.

Fig. 10은 일정한 배압(1.5MPa)하에서 분사압력(9.4, 12.5, 14.1MPa)의 변화에 대한 분무의 축방

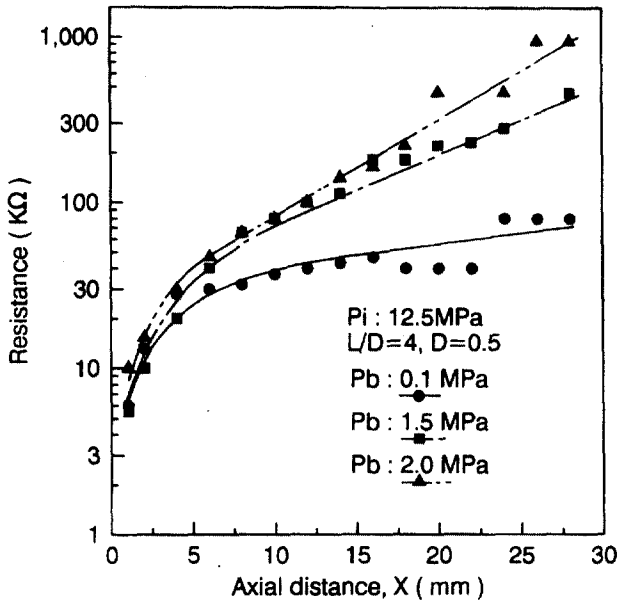


Fig. 9 Effect of back pressure on spray total resistance

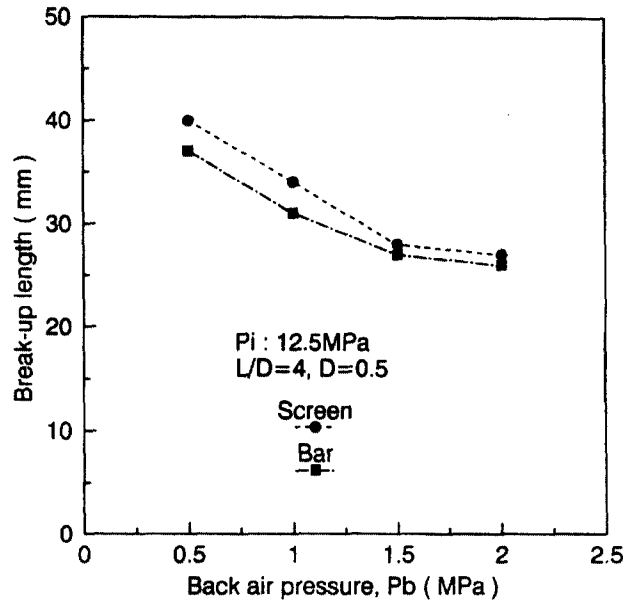


Fig. 11 Effect of electrode and back pressure on break-up length

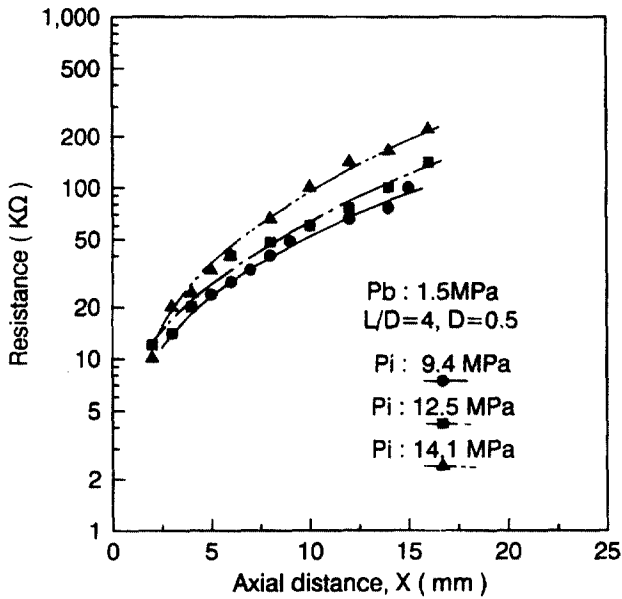


Fig. 10 Effect of injection pressure on spray total resistance

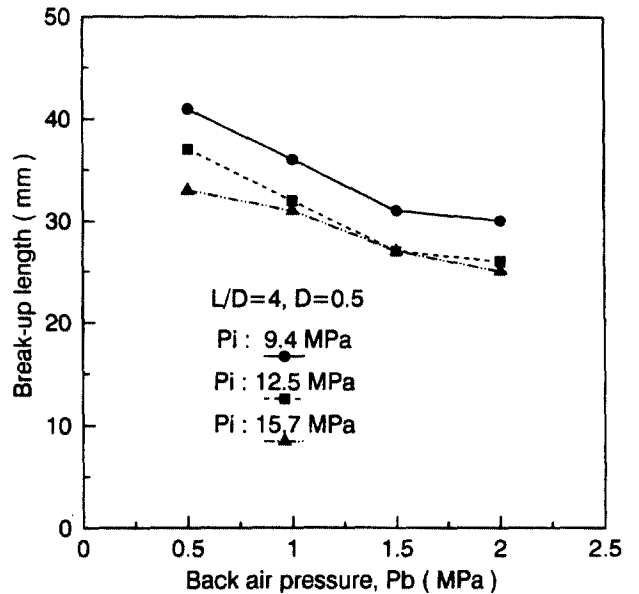


Fig. 12 Effect of injection pressure and back pressure on break-up length

향거리(X)의 저항을 나타낸 것이다. 저항치는 일정한 거리에서 액주의 단면적에 반비례하기 때문에 분사압력이 높을수록 같은 축방향거리에서 높은 저항이 나타나는 것으로 보아 액주의 직경이 감소된 것으로 여겨진다. 이러한 현상은 분사압력이 높으면 높을수록 주위공기와의 상대속도가 증가하여 분무의 미립화가 촉진되어 액주의 직경이 더욱 작아지기 때문이라 여겨진다.

Fig. 11은 Screen전극과 bar전극을 사용하여 일정한 분사압력(12.5MPa)하에서 배압(0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa)의 변화에 따른 분무의 분열길이를 측정 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Screen전극에 의해 측정된 분열길이는 Bar전극에 의해 측정된 분열길이보다 크게 나타나고, 배압이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 Screen전극에 의한 분열길이 측정은 과대평

가됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 분사압력과 배압의 변화에 따른 분무의 분열길이를 나타낸 것이다. 분사압력과 배압이 증가할수록 분열길이는 감소하고 있다. 이는 분사압력과 배압이 증가함으로 인하여 주위기체와의 상대속도, 액체와 주위기체와의 밀도비 등 유체내부와 외부에 작용하는 유체역학의 증대로 인하여 액주의 분열이 가속화되어 분열길이가 감소된다고 생각된다.

Fig. 13은 분사압력 12.5MPa, 배압 1.5MPa의 조건하에서 노즐의 형상비 L/D 변화에 따른 분무의 분열길이를 나타낸 것이다. L/D가 클수록 분열길이가 커지는 경향을 나타내며, 이는 연료가 노즐공 내에서 연료가 가지고 있는 운동에너지 중에서 반경방향의 운동에너지가 노즐공을 통과하면서 감소되어 분사되기 때문인 것으로 생각된다.

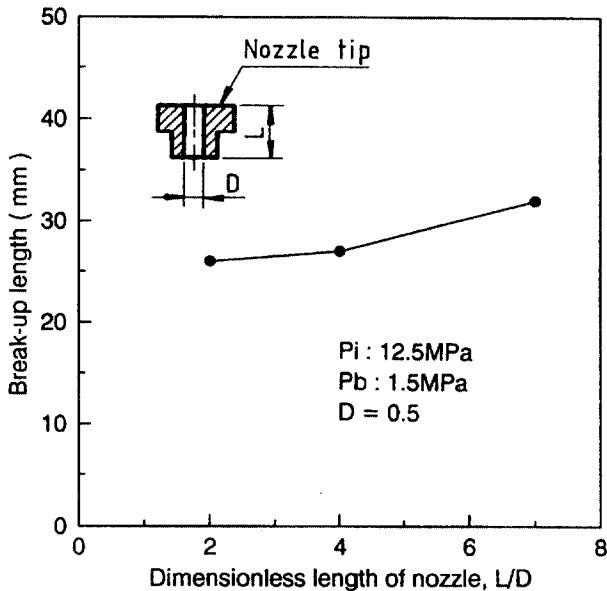


Fig. 13 Effect of L/D on break-up length

5. 결 론

고압용기내에 연속분사한 분무의 분열길이를 전압강하법을 이용하여 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무내에서 액주가 존재하지 않는 영역에서도 전하를 띤 액적에 의하여 미세한 전류가 흐른다.
- 2) Screen전극에 의한 분열길이 측정은 분무내에 존재하는 액주의 실제길이보다 과대평가됨을 확인하였다.

- 3) 분무의 분열길이는 연료와 주위공기와의 밀도비의 제곱근에 비례하고, 비례상수 A는 4.73~7.21 이었다.
- 4) 분무의 분열길이는 분사압력과 배압이 증가할수록 감소하고, 노즐의 형상비 L/D가 클수록 증가하였다.

참고문헌

1. 清水正則, 新井雅隆, 廣安薄之., "高速噴流の分裂長さの測定", 日本機械學會論文集, 第49卷, 448號, pp. 2886~2892, 1983
2. Hakki OZ, I., "Calculation of Spray Penetration in Diesel Engines", SAE Paper, No. 690254
3. Dent, J. C., "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Spray Penetration", SAE Paper, No. 710571
4. Hay, H. and Jones, P. L., "Comparison of the Various Correlations for Spray Penetration", SAE Paper, No. 720776
5. Hiroyasu, H. and Kadota, T., "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE Paper, No. 740715
6. 清水正則, 新井雅隆, 廣安薄之., "高速噴流の分裂長さと噴霧角", 日本機械學會論文集, 第51卷, 461號, pp. 257~264, 1983
7. Chehroudi, B., Shih-Hsiung, C. and Bracco, F. V., "On the Intact Core of Fuel-Cone Sprays", SAE Paper, No. 850126
8. Arai, M., Tabata, M. and Hiroyasu, H., "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle", SAE Paper, No. 840275
9. Bower, G., Chang, S. K., Corradini, M. L., EL-Beshseeshy, M., Martin, J.K., and Kruegger, J., "Physical Mechanisms for Atomization of a Jet Spray: A Comparison of Models and Experiments", SAE Paper, No. 881318
10. Kuo, T. W. and Bracco, F. V., "Computations of Drop Sizes in Pulsating Sprays and of Liquid-Core Length in Vaporizing Sprays", SAE Paper, No. 820133
11. Bracco, F. V., "Modeling of Engine Sprays", SAE Paper, No. 850394
12. Levich, V. G., "Physicochemical Hydrodynamics", Prentice Hall Inc., pp. 639~650