

노즐형상비가 발달과정인 디젤분무에 미치는 영향

허종철*, 이규영**

The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Developing Diesel Spray

Jong-Chul Huh*, Gyou-Young Lee**

Summary

With a single hole nozzle of the practical small-type diesel engine as a testing one, the authors experimentally investigated the effects of the nozzle aspect ratio and injection pressure on the dispersion and the spray characteristics of the diesel fuel being injected under the ambient pressure.

The spray angle in the period of initial injection has the large measurements in case of the low nozzle aspect ratio, while the fully developed spray has the largest spray angle at the aspect ratio 4. An optimum nozzle aspect ratio for a maximum spray angle exists in the case of a fully developed spray. And the smaller the nozzle aspect ratio, the earlier the transition point of the spray.

It is found that the nozzle aspect ratio is a parameter of the greatest significance in the designing of injection system because the nozzle aspect ratio is governing the break-up and atomization characteristics of the diesel spray.

서론

내연기관에서 연소실내로 분사된 액체연료는 분무 제트로서 고밀도의 유립으로 분열하여 분무를 형성, 액적으로 증발하며 연료와 공기와의 혼합이 순식간에 이루어지고 있다. 이러한 혼합기 형성으로 연료입자가 조밀하게 분포된 영역에서는 공기가 부족함으로, 희박하게 분포된 영역에서는 흡입된 공기가 양

호한 연소조건을 충족시키지 못함으로써 불완전연소를 유발시켜 유해공해물질의 배출요인이 되고 있다(일본기계학회, 1986). 한편, 많은 직접분사식 디젤 엔진에서 분사종료시 분무는 분사압력이 매우 낮게 되어 긴 액사와 100 μ m 정도의 액적이 형성되므로써 매연 및 미연소 탄화수소를 발생에 주요한 원인이 되고 있음이 잘 알려져 있다.

이를 개선키 위해 노즐직경 및 형상비를 축소하고, 분사압력을 증가시켜 보다 미세한 액적을 생성시키

* 공과대학 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

** 인하공업전문대학 기계과

는 동시에 (Chigier, 1981) 노즐형상비 및 분사압력에 따라 연료가 충분히 미립화 되는데 필요한 시간, 분무의 발달과정 등을 정확히 파악할 필요가 있다.

액체분류의 길이를 액체분류속도의 함수로 표시하여 액체분류의 분열 및 분산형태에 관한 연구는 Heanlein와 Obnesorge (1932), McCarthy (1974)로부터 Reitz (1978), Hiroyasu (1988)에 이르러 액체분류의 분무류영역을 구분하였다. 이러한 분무류 영역의 발달과정을 구명하기 위해 Arai (1984)와 하 (1984) 등은 분무선단거리가 분사개시로 부터 경과 시간의 1승에 비례하는 영역과 0.5승에 비례하는 영역 즉, 발달과정의 분무와 완전히 발달된 분무와의 천이시간의 존재와 노즐직경과 형상비가 다른 노즐을 사용하여 분사속도에 따라 Breakup length를 예측하여 분무의 분열과정을, Reitz (1978)는 분무의 분사개시로 부터 시간경과에 따라 고속 사진촬영을 행하여 분무의 분산과정을 구명하였다. 또한 액체분무의 속도는 노즐의 형상에 따라 달라지므로 노즐저항계수 (Ruiz, 1991), 노즐내유동의 관찰 (Hiroyasu, 1991) 등의 연구가 있다.

이와같이 노즐의 형태, 노즐내에서 발생하는 난류유동, 분위기 및 분사액체의 조건, 분무와 주위 기체와의 마찰등 지배변수와 유동현상의 증점으로 분무가 완전히 발달되기까지 미립화기구를 구명하는데 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 분위기압력하에서 단공노즐을 통하여 일정압력으로 분사될 경우 노즐형상비가 디젤연료의 분사초기의 분무발달과정, 미립화특성에 미치는 영향을 파악하여 소형 디젤기관의 분사제동 설계를 위한 기초자료를 얻고자 한다.

실험장치 및 방법

1. 공시 분사노즐

Fig. 1은 실용의 직접분사식 소형 디젤기관에서 사용되는 단공노즐이다. 본 실험에서는 상세도면에 표시한 바와 같이 오리피스길이(L)을 변화시켜 노즐형상비(L/D)를 변수로 하여 실용 디젤기관의 채용범위 내에서 실험조건으로 택하였다.

본 실험에 사용하기 위하여 제작된 3종의 공시노즐 사양은 Table 1과 같다.

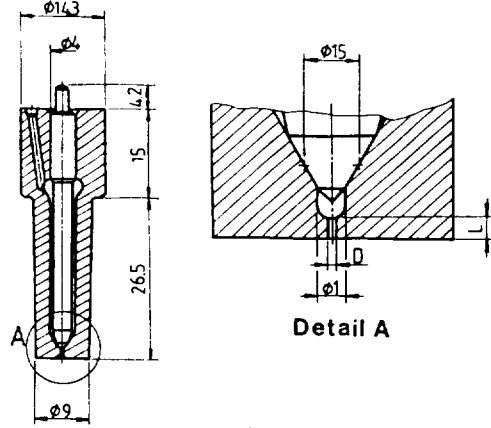


Fig. 1. Details of single hole nozzle.

Table 1. Specification of nozzles.

Nozzle diameter (D)	Aspect ratio (L/D)
0.45mm	2, 4, 5

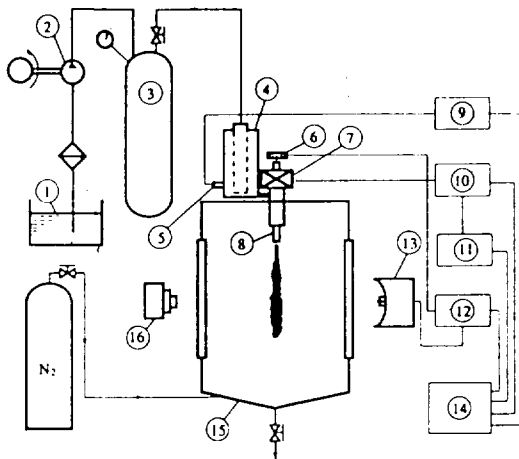
2. 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치의 개요도를 Fig. 2에 도시하였다. 연료는 연료탱크(1)로부터 연료분사펌프 시험장치에 내장된 순환펌프에 의해 연료필터를 통해 분사펌프(2)로 보내진다. 분사펌프의 플린저는 계속하여 연료를 가압시켜 축압실(3.4)로 보내진다.

제1축압실(3)은 내압 30MPa, 내부용적 5.11리터이며 주로 플랜저 펌프에서 고압 연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 하며, 분사노즐 근처에 설치된 제2축압실(4)은 최종적으로 디젤연료가 노즐에서 분사되는 동안의 설정 압력의 강하와 맥동을 가능한 없애 주는 역할을 한다.

Fig. 3은 고압의 연료가 분사기간 동안, 제2축압실에 설치한 압력변환기(5)의 압력변화를 나타낸 오스카스코프 사진으로서 종축(Y축)은 압력변화, 횡축(X축)은 분사시간 즉 분사밸브의 개폐 시간이다. 그림으로부터 분사기간 중의 분사압력은 거의 일정하게 유지됨으로 분사기간 동안은 정상분무 상태이다.

연료 분사압력은 노즐 홀더의 연료 입구측에 부착된 압력변환기(5)로부터 디지털 지시기(9)에 의해 측정되며 축압실과 분사노즐 사이에 아나로그 압력



1. Fuel Tank
2. Fuel Injection Pump
3. 1st Accumulator
4. 2nd Accumulator
5. Pressure Transducer
6. Photo-Interrupter
7. Injection System
8. Injection Nozzle
9. Pressure Transducer Indicator
10. Nozzle Driving Circuit
11. Nozzle Driving Controller
12. Retarder
13. Stroboscope
14. Oscilloscope
15. Pressure Chamber
16. Camera

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

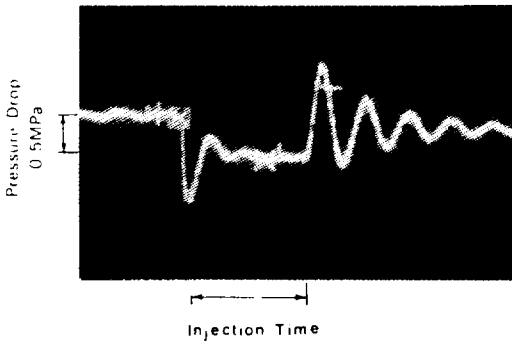


Fig. 3. Photographs of pressure drop of pressure transducer ($P_i = 21\text{MPa}$).

제를 부착하여 분사압력을 정확하게 조정하였다.

본 실험에 사용한 분사제는 실용 노즐 홀더의 상부에 솔레노이드를 부착한 전자제어 분사제로 개조하여 사용하였다. 개조된 전자제어 분사제의 상세도는 Fig. 4와 같다.

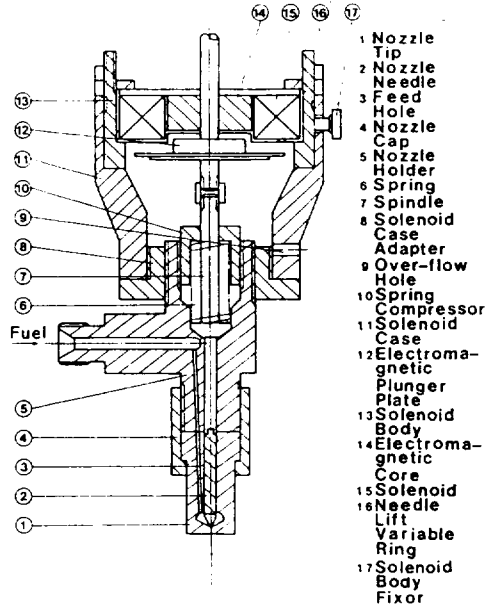


Fig. 4. Modified injection nozzle.

Fig. 4로 부터 연료분사는 솔레노이드(15)를 작동시키지 않는 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니들들을 압착하고 있는 스프링들의 상부판(12)을 끌어 당기게 되며, 노즐 제어장치에 설정된 시간동안 연료가 분무관측용 압력용기내로 분사된다. 노즐 제어 장치의 설정 시간은 0.1msec로 부터 100msec까지 조절이 가능하다.

분무관측용 고압용기는 내부직경 196mm, 길이 500mm로 양측면에 사질촬영이 가능하도록 길이 230mm, 폭 130mm, 두께 19mm의 강화유리 관측창을 부착 하였다. 고압용기내의 충전가스는 질소가스를 사용하였고, 용기내의 압력은 부르돈(Bourdon) 압력계를 사용하여 내부압력을 측정하였다. 가압 가능한 압력은 4MPa이상이므로 수압시험을 하였으나, 안전을 고려하여 본 연구에서는 3MPa까지 실험을 행하였다.

3. 사진촬영 장치 및 조건

디젤 연료유의 미립화 현상을 가시화하는 방법중 본 연구에서는 투과광에 의한 순간 사진촬영법에 의해 분무현상을 가시화하여 관찰하였다.

노즐을 통하여 분사된 분무가 분사직후로부터 임의시간 경과후까지의 분무현상을 촬영하기 위한 분사개시 신호는 Fig. 2의 분사제(7) 상단에 위치한 포토인터럽터(Pho-interrupter, 6)의 신호를 이용하였다. 노즐 제어장치(10, 11) 및 제어회로에 의해 슬레노이드가 작동하면 스피들 상단이 상승하여 포토인터럽터의 빛을 차단하는 순간에 분사개시신호가 발생하게 되며, 이 불안정한 신호는 회로 중의 트랜지스터와 슈미트 트리거소자를 지나면서 증폭되어 보다 정확한 레벨의 신호로 바뀐다. 이 신호는 신호 지연장치(12)에서 재 증폭되고 설정된 시간만큼 지연된 후에 스트로보에 입력되어 적정노출 광량으로 순간 발광시킨다. 이 장치의 신호지연 시간 범위는 0.001msec로 부터 9msec까지 가능하다.

이 때 카메라는 B-셔터 상태이므로 이 순간광을 받아들여 지연시간동안 분사된 분무 상태가 필름상에 감광되어 촬영된다.

사진촬영 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Photographic conditions.

Discriptions	Photographic conditions
Injection pressure (MPa)	7, 14, 21
Ambient pressure (MPa)	0.1, 1.5, 3.0
Ambient temperature	Room temperature
Ambient gas	N ₂ gas
Fuel	Low sulfur diesel oil
Nozzle	Single hole
Lens	105mm Microlens
Spark light source	Strbsoscope(Pulse duration : 4μsec)

촬영된 분무사진은 같은 비례척으로 촬영된 스케일로 분무선단길이, 분무폭등을 직접 측정하여 데이터화 하였다. 분무선단도달거리는 노즐선단으로부터 분무입자의 도달거리로 하였고, 분무각은 반경방

향으로 불안정한 표면파와 축방향분무속도의 발달상황을 표현할 목적으로 $\theta = 2 \tan^{-1}(Z/X/2)$ 로 정의하여 임의의 시간에서 분무각을 측정하였다. 또한 완전히 발달된 분무의 분무각은 노즐직경의 60배되는 지점에서 분무 표면에 접선을 그어 각을 측정하였다.

결과 및 고찰

일반적으로 아토미이저에 채용되는 단공노즐은 압력손실을 최소화하기 위해 노즐 형상비가 5미만을 많이 취한다. 이 경우에 있어서 노즐내 유동은 완전히 발달되지 못하고 동시에 공동현상을 동반하기 때문에 정량적으로 해석하는 것이 불가능하다.

그러나 오리피스내 유동은 관유동으로 생각할 수 있기 때문에 유량계수로 고려될 수 있다.

유량계수는 실제 분사율과 이론적인 분사율의 비이므로

$$C_D = (Q/At) / (2\Delta P/\rho)^{0.5}$$

이다. 유량계수 C_D 값은 레이놀즈수(Re), 노즐형상비(L/D), 노즐직경(D), 분위기 압력, 노즐내 공동현상등에 따라 변하는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 레이놀즈수(분사압력)에 따른 노즐형상비만을 고려하였다.

Fig. 5는 노즐직경 0.45mm에서 노즐형상비가 2, 4, 5인 경우, 각 분사압력에서 유량계수 값을 나타내고 있다.

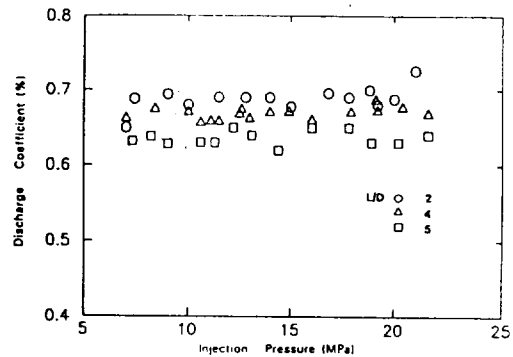


Fig. 5. Variation of discharge coefficient with injection pressure for various nozzle aspect ratio (Pa=0.1MPa, D=0.45mm).

그림으로부터 유량계수 값은 분사압력에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 실험범위의 분사압력에서는 노즐형상비가 같으면 압축에너지가 속도에너지로 변환되는 비가 같다고 볼 수 있다. 또한 유량계수 값은 노즐형상비가 작을수록 크게 나타나고 있으나 노즐형상비가 2, 4인 경우는 거의 같고 5인 경우는 급격히 떨어져 에너지 변환시에 손실이 많음을 보여주고 있다.

Photo. 1은 직경 0.45mm, 형상비가 5와 2인 노즐을 사용하여 분사압력이 7MPa인 조건으로 상온대기압 용기내로 분사시켰을 때 분무의 성장과정을 보여준다.

사진에서 노즐형상비가 5인 경우 분사직후의 분무는 미분열 액주이며 액주표면에 파가 전혀 관찰되지 않고 있다. 이 관찰되지 않은 액주는 분사시간이 경과하여도 노즐 선단으로부터 약 1~2mm가 유지되며 그 하류 이후에서 표면에 파가 발생하여 그 파로부터 액사가 형성되고 있다.

노즐형상비가 2인 경우 분사직후의 분무는 이미 액주표면에 파가 발생되고 있으며 0.2msec에서는 액주형태가 소멸되어 반경방향으로 분무가 급격한 팽창과 더불어 액사가 활발하게 생성되고 있다.

0.3msec에서 분무류 주위에 액적이 관찰되고 있으며, 0.8msec에서는 분무주위로 액적이 분열되어 분무각이 급격히 감소하고 있다. 노즐형상비가 5인 경우와 비교할 때 노즐형상비가 2인 경우는 분사초기인 약 0.5~0.6msec까지 반경방향으로 분산과 추월이 급격하게 증가되고 있으며 그 이후 분산이 촉진되어 빠른 시간내에 분무가 완전히 발달하고 있다. 그러나 분무의 관통도는 노즐형상비 및 분사 경과 시간에 무관하게 거의 일정하다.

Fig. 6, 7은 각각 분사압력이 7MPa 및 21MPa로 상온 대기압에 분사하였을 때 노즐형상비가 분무선단 도달거리 및 분무각에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림으로부터 분무선단도달거리는 노즐형상비 및 분사 경과 시간에 따라 거의 일정하다. 분사초기의 경우에 분무각은 노즐형상비가 2, 4, 5인 순으로 크게 나타나고, 분무가 완전히 발달했을 경우는 노즐형상비가 5, 4, 2인 순으로 크게 나타나 분사초기와는 반대 경향을 보이고 있다. 이는 Photo. 1에서 관찰한 바와 같이 노즐형상비가 2인 경우 액사 및 액주 형성

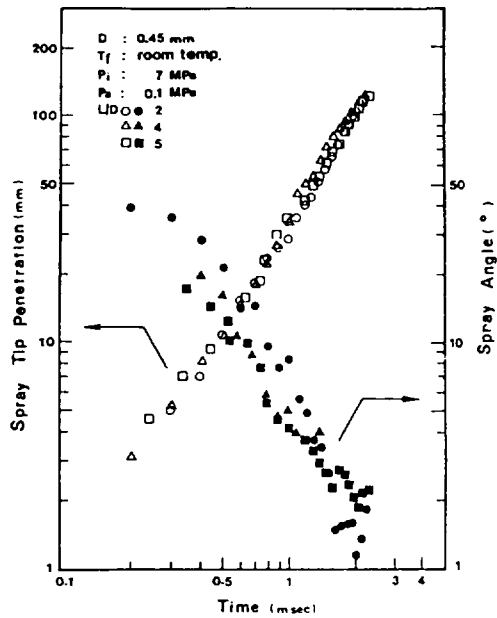


Fig. 6. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

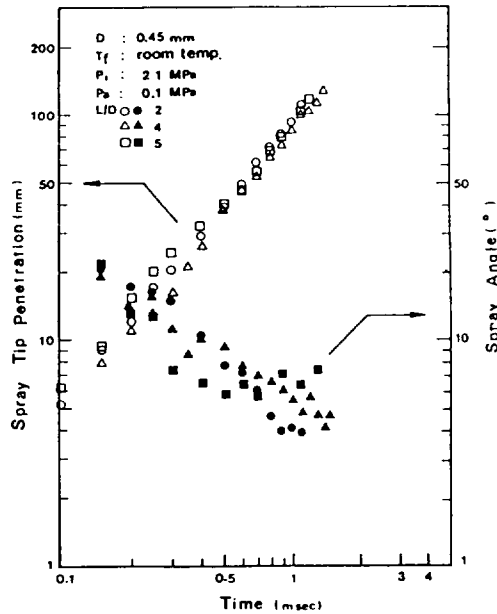


Fig. 7. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

이 활발하기 때문에 분사시간이 경과함에 따라 액적이 반경방향으로 이탈하여 분무의 주류역만이 존재

하기 때문이다. 반면 노즐형상비가 5인 경우 분사후 약 1.0~1.5msec에서 반경방향으로 분산이 촉진되고 있다. 그러므로 노즐내에서 고압의 연료는 케비테이션을 동반한 난류 유동이므로 오리피스길의 변화는 유량계수의 값을 변화시키므로 분무의 분열과정 즉 미립화에 중요 변수임을 알 수 있다.

Photo. 2는 노즐직경 0.45mm, 노즐형상비 5와 2, 분사압력 21MPa, 분위기압력 1.5MPa인 조건에서 시간 경과에 따른 발달과정의 분무 확대사진이다.

노즐형상비가 5인 경우는 Photo. 1의 경우와 마찬가지로 분사압력 및 분위기압력이 증가되어도 노즐선단 부근에 교란이 없는 액주가 약 1~2mm크기로 형성되어 0.6msec까지 지속되며 이 액주의 하류로부터 액사가 형성되고 액적이 발생하고 있다. 이는 고압의 연료가 오리피스내에서 유동이 확립되어 노즐 밖으로 교란이 없는 액주의 형태로 분출됨으로써 분무는 액적생성을 억제시키고 동시에 분리관통도를 증가시키는 것으로 생각된다.

반면 노즐형상비가 2인 경우는 분사후 0.1msec에서 액사형성이 활발하게 이루어지고 있으며 0.2msec에서 이미 액주가 분열되어 있으며 분위기압력의 영향으로 분무주위에 미세한 액적이 관찰되고 있다. 0.5msec에서는 분무선단의 액주가 분열되어 분무체적이 급작스럽게 팽창하고 분무선단이 분열함으로써 천이점 발생이 빠르고 분무가 일찍 확립되는 것으로 예측된다. 완전히 발달된 6.0msec에서는 노즐형상비가 5보다 분산이 촉진되어 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8, 9는 분사압력이 21MPa이고 분위기압력이 각각 1.5 및 3MPa인 경우 노즐형상비가 분무선단 도달거리 및 분무각에 미치는 영향을 나타내고 있다.

그림으로부터 분무선단도달거리는 노즐형상비와 무관하여 분사시간 경과에 따라 거의 같게 발달하고 있으나 천이점 발생은 노즐형상비가 작을수록 빨리 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 이것은 빠른 시간내에 분무가 확립되는 것으로 사료된다.

분위기압력의 1.5MPa에서 분무각은 대기압의 분위기압력과 마찬가지로 분사초기에는 노즐형상비가 2, 4, 5인 순으로 큰 값을 보이나 분무가 완전히 발달되었을 경우에는 노즐형상비 4, 2, 5순으로 4인 경우가 가장 크게 나타났다. 그리고 분위기압력의

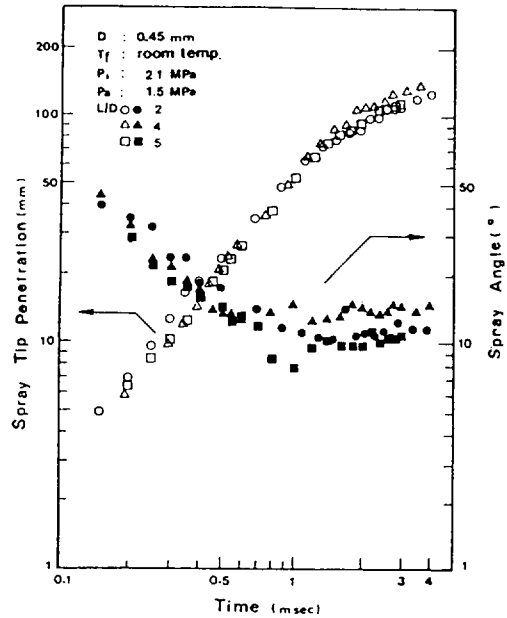


Fig. 8. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

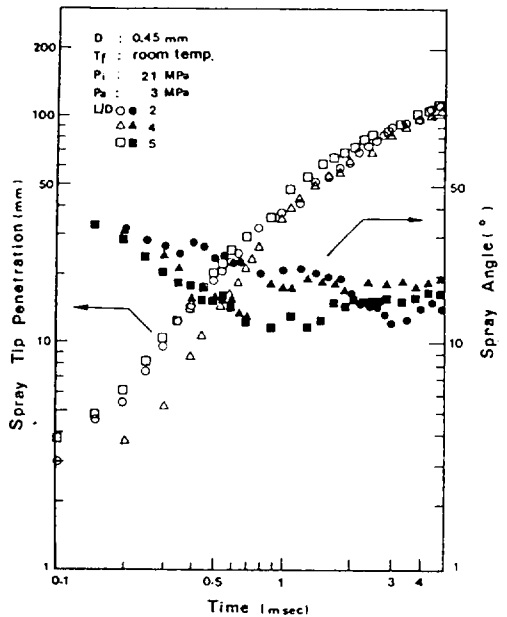


Fig. 9. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

3MPa인 경우는 천이점 이전에서 Fig. 8과 같은 경향을 보이며 분무가 완전히 발달했을 경우에는 4, 5, 2

로 역시 노즐형상비가 4인 경우가 가장 크게 나타났다. Fig. 8, 9에서 분위기압력의 증가할 때 분무각은 분사 초기에는 노즐형상비가 2, 4, 5인 순으로 크게 나타나고 있으나 분무가 완전히 발달되었을 경우에는 4인 경우가 가장 크다. 이것은 분사초기에는 유량계수의 값이 큰 순으로 분열이 활발하나 분위기압력의 증가에 따라 분산 효과가 달라져 유량계수의 값만으로는 분산 효과에 미치는 영향을 결정해서는 안됨을 보여준다.

Fig. 10, 11은 분사압력 14MPa, 분위기압력이 각각 1.5MPa 및 3MPa인 경우 노즐 형상비가 분무선단도 달기리 및 분무각에 미치는 영향을 나타내고 있다.

분무선단도달기리는 Fig. 8과 9의 경우와 마찬가지로 노즐형상비에 의한 영향은 거의 없으나 천이점은 노즐형상비가 작으면 일찍 발생하였다.

3MPa, 분위기에서 분무각은 Fig. 8과 9와 같은 경향을 보이나, 1.5MPa의 분위기에서의 분무각은 천이점 근방에서 현저한 차이를 보이고 있다. 그러므로 노즐형상비가 분사압력, 분위기압력에 상관관계가 있음을 알 수 있다.

그러나 Hiroyasu (1982)는 대기압하에 분사된 분무는 노즐형상비가 분무의 분산 및 분열과정에 미치는

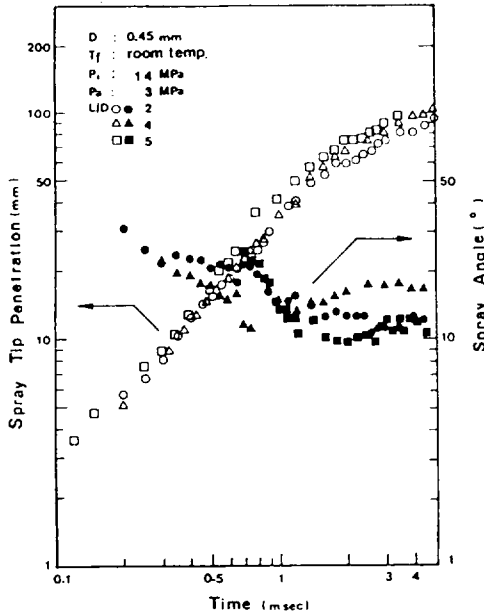


Fig. 10. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

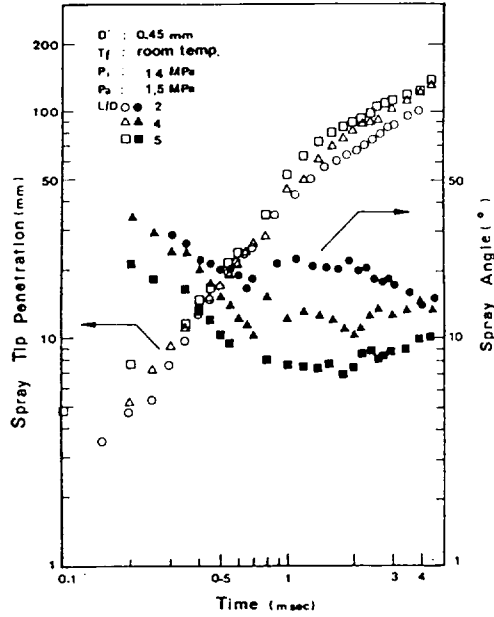


Fig. 11. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

영향은 크나 고압의 분위기 조건에서는 영향이 작다고 하였다. 이는 본 연구 결과와 상이하다.

Fig. 12, 13은 분사압력 7MPa, 분위기압력이 각각

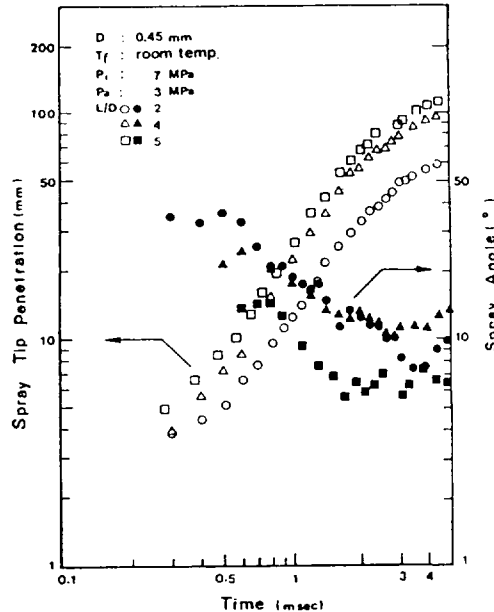


Fig. 12. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

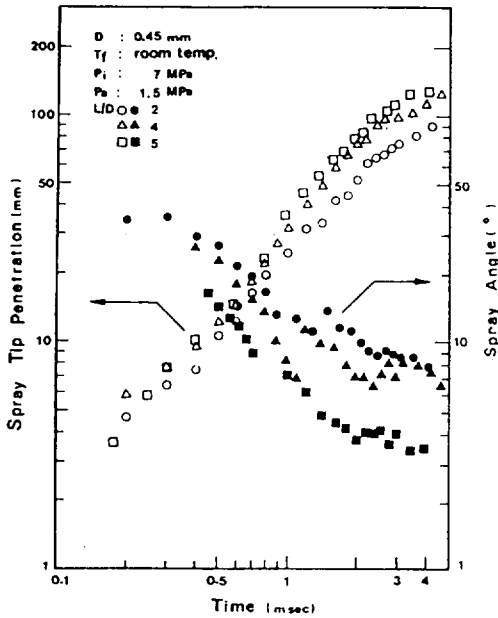


Fig. 13. Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration and spray angle.

1.5MPa 및 3MPa인 경우 노즐 형상비가 분무선단 도달거리 및 분무각에 미치는 영향을 나타내고 있다. 분무선단도달거리는 Fig. 8, 9의 경우와 마찬가지로 노즐형상비에는 거의 일정하나 천이점은 노즐형상비가 작으면 일찍 발생하였다. 3MPa의 분위기에서 분무각은 Fig. 8, 9와 같은 경향을 보이나, 1.5MPa의 분위기에서의 분무각은 노즐형상비가 4인 경우가 현저히 감소하고 있다.

위 실험결과로부터 노즐형상비의 변화가 분무의 발달에 큰 영향을 미치고 있기 때문에 분사제 설계에 있어서 중요한 변수임을 알 수 있다.

적 요

본 연구는 소형디젤기관용 연료분사 노즐을 시험 노즐로 하여 분위기압력하에서 분사하였을 경우 노즐형상비, 분사압력이 분무의 분산 및 분무특성에 미치는 영향을 실험적으로 구명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 노즐형상비가 큰 경우 분사압력이나 분위기압력을 높여도 노즐선단 부근에 교란이 없는 약 1~2mm 크기의 미분열 액주가 존재하고 분사후 일정시간까지 지속되며, 이 액주는 분사 개시후 시간이 경과함에 따라 미분열 액주의 하류로 부터 점차 표면파에 의한 액사군이 형성되고 액적이 발생한다.

2) 노즐형상비가 작은 경우 액적 및 천이점의 발생 시간이 빨라지고, 완전히 발달된 분무인 경우에는 최대 분무각에 대한 적정 노즐형상비가 존재한다.

3) 분사초기에 분무각은 노즐형상비가 작은 경우에 큰값을 가지나, 완전히 발달된 경우에는 노즐형상비가 4일때 가장 크게 나타났다.

4) 대기압하에 분사되는 분무의 성장은 분사시간 경과에 따라 기울기가 약 1인 직선으로 발달되고 있다. 이는 대기압하에서는 분무성장은 오직 분사압력에만 의존되고 있다.

후 기

본 연구는 일부 1992년 제주대학교 자체학술연구비의 지원에 의해 이루어진 것이며 이에 사의를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

Arai, M., M. Tabata, H. Hiroyasu, and M. Shimizu, 1984. Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle, SAE Paper, No. 840275.
 Chigier, N., 1981. Energy, Combustion and Environment, McGraw-Hill Book Co., 315-316.
 Dent, J. C., 1970. A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods of Studying

Spray Penetration, SAE Paper, No. 710571.
 Giffen, E., 1953. The Atomization of Liquid Fuels, John Wiley and Sons Inc., 18-29.
 河鍾律, 1984. 데이젤噴霧의形成およびその周圍氣體の流動と着火れとの關係關する研究, 慶應義塾大學工學博士學位論文.
 Hiroyasu, H., M. Shimizu, and M. Arai, 1988. Break-up Length and Spray Formation Mech-

- anism of a High Speed Liquid Jet, *ICLASS-88*, 177-184.
- Hiroyasu, H., M. Shimizu, and M. Arai, 1982. Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, *ICLASS-82*, 275-282.
- Hiroyasu, H., M. Shimizu, and M. Arai, 1991. Similarity Between the Break-up Lengths of a High Speed Liquid Jet in Atmospheric and Pressurized Conditions, *ICLASS-91*, 563-570.
- McCarthy, M. J. and M. A. Molly, 1974. Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design, *Chem. Eng. J.*, 7: 1-20.
- 日本機械學會, 1986. 機械工學使覽, 應用編, B7, 內燃機閱, B7-77.
- Reitz, R. D., 1978. Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet, Ph. D. Thesis, Princeton University.
- Ruiz, F., 1991. A Few Useful Relations for Cavitating Orifices, *ICLASS-91*, 595-602.

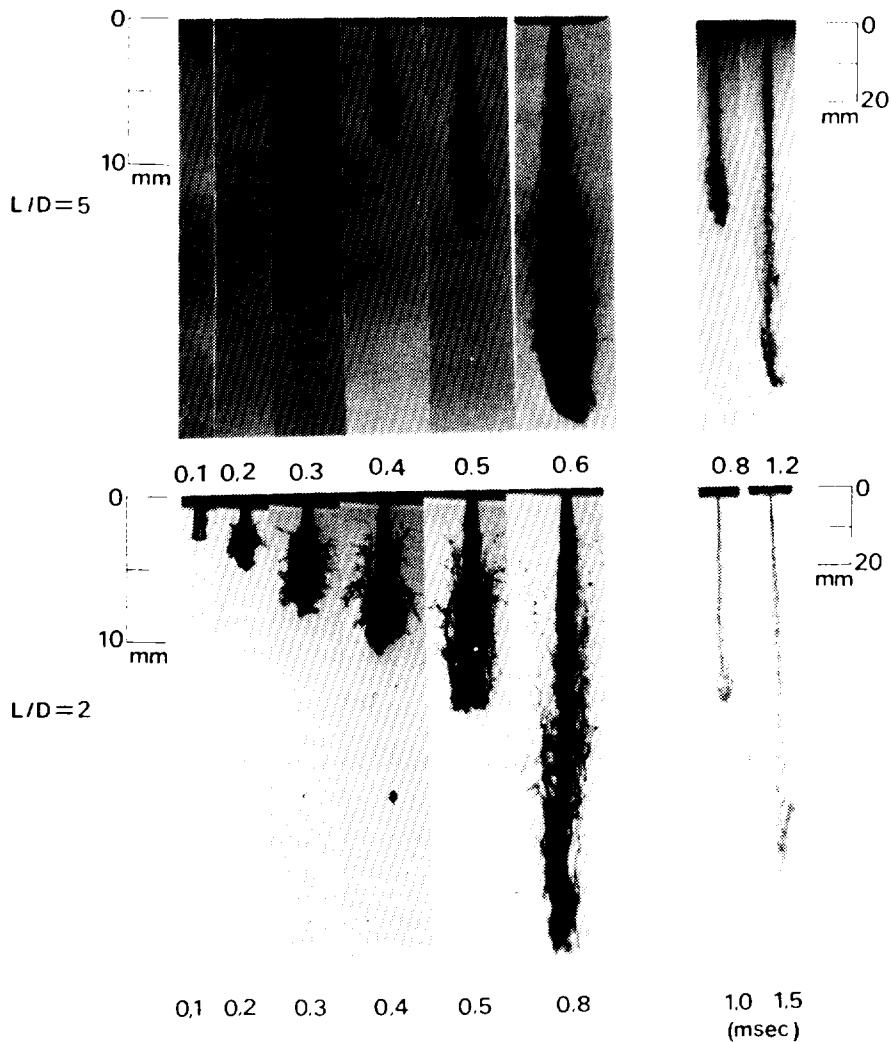


Photo. 1. Photographs of developing and fully developed spray from injection start ($P_i=7\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$).

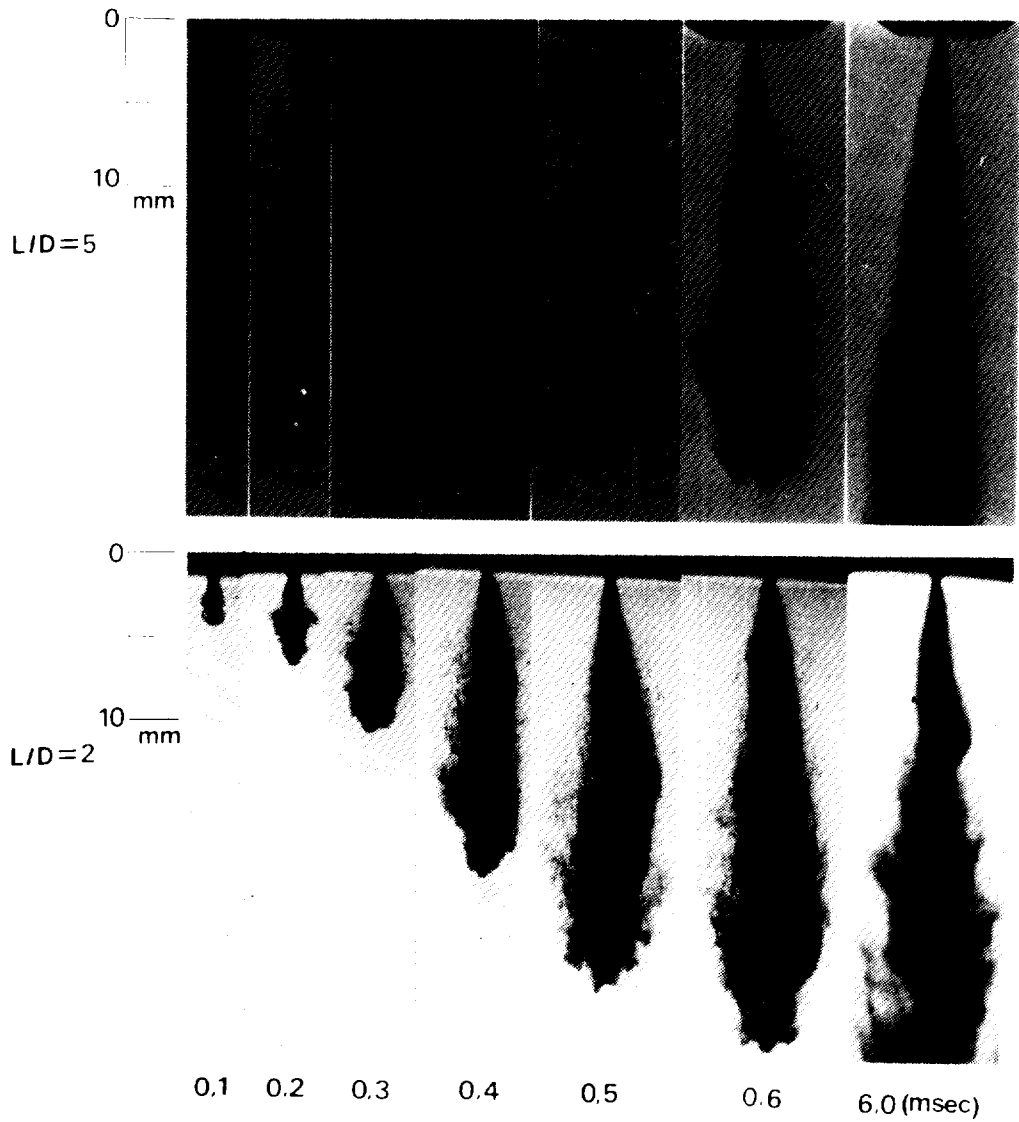


Photo. 2. Photographs of developing and fully developed spray from injection start ($P_i=21\text{MPa}$, $P_a=1.5\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$).