

碩士學位論文

노즐直徑이 디젤噴霧의 分散過程에
미치는 影響에 關한 實驗的 研究

濟州大學校 大學院

機械工學科



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

文 昌 殷

1996年 12月

노즐直徑이 디젤噴霧의 分散過程에 미치는
影響에 關한 實驗的 研究

指導教授 許 鐘 哲

文 昌 殷

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.


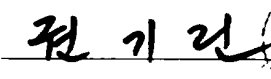
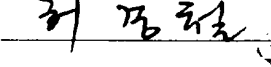

1996年 12月

文昌殷의 工學碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長

委 員

委 員

濟州大學校 大學院

1996年 12月

An Experimental Study on Effect of Nozzle
Diameter in a Breakup Process of Diesel Spray

Chang-Eun Mun

(Supervised by professor Jong-Chul Huh)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1996. 12.

목 차

Summary	1
I. 서 론	3
1-1. 연구의 배경	3
1-2. 종래의 연구동향	4
1-3. 연구목적	7
II. 실험장치 및 방법	9
2-1. 연료분사 실험장치	9
2-2. 사진촬영 장치 및 실험조건	16
III. 실험 결과 및 고찰	19
3-1. 분무초기의 분산과정	19
3-2. 노즐직경이 분무발달에 미치는 영향	23
3-3. 완전히 발달된 분무의 해석	44
IV. 결론	49
V. 참고문헌	51

SUMMARY

This experimental study has been conducted to investigate the effect of nozzle diameter on spray characteristics under the parameters of injection pressure and ambient pressure. The double flash method was used to visualize diesel sprays. The results obtained in this study are as follows.

1. The diesel spray is divided into smooth liquid core, disturbed liquid core and the chaotic region which is generated the droplets and the ligaments by spray overtaking.

2. Spray tip penetration with nozzle diameter variation is developing in line with 0.45, 0.25 and 0.35mm in the condition that ambient pressure increases from 1MPa to 3MPa in spray pressure 7MPa, and becomes 0.25, 0.35 and 0.45mm respectively in spray pressure 28MPa. Also, the transition point occurs in line with 0.45, 0.35 and 0.25 in this condition.

3. Spray tip velocity with nozzle diameter variation becomes in line with 0.25, 0.45 and 0.35 under ambient pressure 3MPa and injection pressure 7MPa but it is changed into 0.25, 0.35 and 0.45mm respectively under spray pressure 28MPa. It is concluded that the transition point is generated early, the velocity is decreased gentle-slopingly and the atomization in this course grows better and more.

4. The transition point with spray velocity variation under the spray pressure of experimental range in ambient pressure 3MPa is generated in earlier duration time as nozzle diameter is 0.25mm and showed up 0.35 and 0.45mm one after the other as high spray pressure. Also, spray velocity is gradually decreased as the increase of the spray velocity.

5. Spray cone angle is increased as the increase of spray pressure and nozzle diameter is increased in line with 0.35, 0.25 and 0.45mm.



I. 서 론

1-1. 연구의 배경

디젤분무에 관한 연구는 자유계면을 갖는 비정상상태인 유체의 운동을 취급하므로 일반적으로 해석이 곤란하고, 분무현상이 고속이면서 순간적으로 이루어지기 때문에 미립화 과정의 관찰이나 측정이 어려운 문제점이 있다. 뿐만 아니라 미립화 시스템설계에 적용하기 위해서는 상당한 실험과 경험적 자료를 필요로 하고 있다.

압축된 공기와 미립화된 연료와의 접촉으로 자연발화되는 디젤기관은 열기관중 타 기관에 비해서 높은 열효율을 얻을 수 있고, 뛰어난 내구성, 저가의 연료를 사용할 수 있는 경제적인 잇점이 있어 자동차, 철도차량, 군용의 특수차량, 선박용 등의 여러분야에 다양하게 이용되고 있다.

디젤기관의 연소과정은 크게 착화지연기간, 급격연소기간, 제어연소기간, 후연소기간 등으로 나눌 수 있는데, 이중에서 착화지연기간은 디젤기관의 시동성능, 대기오염물질의 생성, 연소소음의 발생, 운전성능 등에 큰 영향을 미친다.

단공노즐을 사용하는 직접분사식 디젤기관에 있어서 고압의 연료는 연소실에 분사되는 순간 압축에너지가 운동에너지로 변환되며, 연료분사개시후 약 1~2ms의 착화지연기간중에 연료가 충분히 무화되어 증발, 공기와 혼합되어야한다. 그러나 연소실크기의 제한으로 분사된 연료입자는 비행거리가 제한되며, 고속운전으로 인하여 분무의 분열에 필요한 시간은 극히 짧아진다.

그러므로 연료가 충분히 미립화되는데 있어 분무길이와 미립화 형성시간 등을 고려할 때, 시간적 공간적으로 연료분무의 발달상태 및 분열과정을 정확히 파악하여야 한다. 또한 분사된 분무는 연소실 벽면에 충돌한 후 분산되고 있다고 생각되므로 소형 고속디젤기관에서 연료가 연소하기전의 혼합과정과 연소실벽면 충돌의 예측 등, 연료분무와 분무액상의 거동을 구명하기 위해서는 분사초기의 분무의 분열, 발달과정등 분무특성을 정확하게 파악할 필요가 있다(千田, 1984).

분사초기에 분무특성에 영향을 주는 요인으로는 노즐입구에서 발생하는 공동현상, 분무유동에 의한 속도 재구성의 영향, 주위기체와의 상호작용과 유입에 의한 공기 역학적효과, 분무유동내에서 나타나는 유체난류, 공급압력의 진동 등이 있고(Reitz, 1982), 이와 같은 현상들을 지배하는 주요변수로는 노즐형상비, 주위기체와의 압력, 밀도, 온도 그리고 분사연료의 온도, 밀도, 표면장력, 점성, 분사유량 등을 들 수 있다.

단공노즐로 부터 분사된 연료분무류가 시간경과에 따라 어떠한 분열과정을 거쳐 완전히 발달되는지 구명하기 위하여 분사된 디젤분무의 분무선단 도달거리와 분무각 사이의 상관관계 및 분사초기의 분무, 분산특성에 관한 기초자료를 파악할 필요가 있다.

1-2. 종래의 연구동향

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

액체분류의 길이를 액체분류속도의 함수로 표시하여 액체분류의 분열

및 분산형태에 관한 연구는 Giffen (1953)과 McCarthy (1974)로부터 Reitz (1978), Hiroyasu 등(1984)에 이르러 액체분류의 분무류영역을 구분하였다.

이러한 분무류 영역의 발달과정을 구명하기 위해 Dent (1971), Hiroyasu 등(1984)은 분무선단 도달거리가 분사개시로 부터 경과시간의 1승에 비례하는 영역과 0.5승에 비례하는 영역 즉, 발달과정의 분무와 완전히 발달된 분무와의 천이시간의 존재와 노즐직경과 형상비가 다른 노즐을 사용하여 분사압력에 따라 분열길이(Breakup length)를 측정하여 분무의 분열과정을, Reitz (1978)는 분무의 분사개시로 부터 시간경과에 따라 고속 사진촬영을 행하여 분무의 분산과정을 구명하였다.

千田 (1984), 하 등(1984)은 순간광원을 이용한 직접사진촬영에 의해 분사초기의 분무형성과정, 액적분포 등을 조사, 연구하였다.

하 (1984)는 분위기압력의 변화에 따른 분무특성을 순간광원을 이용한 직접사진촬영법에 의해 실험을 수행한 결과 분무선단 도달거리는 분위기압력이 높을수록 짧아지고 분무각은 증가하는 것을 확인했으며 열선유속계를 이용하여 주위공기의 역학적 거동에 관한연구도 함께 수행하였다.

Wakuri (1988)는 분사압력이 엔진회전속도에 무관한, 즉 저속에서도 고압분사가 가능한 분사계를 고안하여 디젤엔진의 배기가스를 저감시킴으로써 높은 분사압력이 연소상태를 양호하게 한다는 것을 입증시켰다.

Zanelli (1988)는 노즐직경을 일정하게 하고 오리피스의 길이를 변화시켜 노즐내 유동의 재구성이 분류 초기교란에 영향을 미쳐 결국 완전히 발달된 분무의 상태가 달라지며, 노즐 형상비에 따른 교란되지 않은 미분열 액주를 측정하였다. 그리고 연료분사시 노즐내 니들양정이 변화가 연료의 유로단면을 변화시켜 분류가 가속, 감속되는 분사계의 천이를 확인하였다.

허 등(1991)은 분무의 분산과정을 구명하기 위해 발달과정의 분무를 직접 사진촬영하여 분위기압력 변화에 따른 분무선단 도달거리와 분무각을 구했고 또한 분무초기 과정을 확대 사진촬영하여 분사직후 분출된 분무는 미분열 액주이며 그 액주로 부터 시간경과에 따른 분열과정을 연구하였다.

허 (1992)는 분사초기의 분무 형성과정과 그 분열 발달과정, 그리고 충분히 발달될 때까지 분무 형상을 스트로브스코프광원에 의한 고속 직접사진과 나노라이트광원의 고속순간 확대사진으로 상세히 관찰하였다.

Takahashi 등(1994)은 대기압과 분위기 압력하에 확대 Shadowgraphy로 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(1994)은 CCD카메라를 이용하여 Pseudo high speed image 촬영시스템을 창안하여 디젤분무에 적용하고 분무구조등이 보다 쉽게 관찰됨을 보였다.

구 등(1994)은 위상도플러 입자측정기를 사용하여 분무실의 가스밀도나 연료액체의 밀도비가 실제 디젤엔진의 연소실과 비슷한 조건에서 분무 가장 자리의 액적크기(S.M.D)는 분사시간에 관계없이 약 $20\mu\text{m}$ 로 거의 일정함을 보였다.

허 등(1996)은 분위기압력이 디젤분무특성에 미치는 영향을 구명하기 위해 단공노즐(L/D=3.89)을 사용하여 일정압력으로 연료를 분사시켜 분사압력과 질소가스를 충전한 분위기압력을 변수로 하여 나노라이트와 스트로브스코프 2개의 광원을 사용하여 Double flash에 의해 분무선단 도달거리, 분무선단속도, 분무원추각 등을 계측하고 분위기 압력이 디젤분무에 미치는 영향

을 구명하였다. 즉 대기압하에서 분사된 분무의 성장은 분사압력에만 의존하며 시간의 경과에 따라 기울기가 약 1인 직선으로 발달되며, 분위기 압력에 따른 분무선단 도달거리는 분위기 압력이 클수록 감소하고, 분사압력이 클수록 증가하며 분무선단속도는 분사압력이 클수록 빠르고 분위기 압력이 클수록 떨어지며, 분사압력과 분위기압력이 클수록 천이점이 일찍 발생하고, 분무 원추각은 분사압력이 클수록 커지는 것을 확인하였다.

이상과 같이 종래의 연구동향을 살펴보면 디젤분무에 관한 연구를 수행함에 있어서 대부분의 경우 완전히 발달된 분무를 연구대상으로 하고 있으며, 또한 분무가 분사직후부터 완전히 발달될 때까지의 분열과정에 관한 연구 및 분사압력, 분위기압력하에서 노즐형상 등의 변화가 디젤분무에 미치는 영향 등이 최근에 연구되어 왔다.

1-3. 연구목적

직접분사식 소형디젤기관에서 연소실내로 분사된 액체연료는 분무제트로서 고밀도의 유립으로 분열하여 분무를 형성, 액적으로 분열하여 증발하며 공기와의 혼합이 순식간에 이루어지고 있다. 이러한 혼합기 형성으로 연료입자가 조밀하게 분포된 영역에서는 공기가 부족하고, 반대로 희박하게 분포된 영역에서는 흡입된 공기가 양호한 연소조건을 충족시키지 못함으로써 불완전연소를 유발시켜 유해공해물질의 배출요인이 되고 있다(日本機械學會, 1986).

디젤분무의 미립화과정을 살펴보면 고온, 고압으로 연소실에 분사되는 연료는 분사노즐을 통과하는 순간에 분무를 형성한 후 가열, 증발, 혼합, 분

리, 발화하는 복잡한 물리적, 화학적 과정을 거쳐 연소가 종료되며 이때 연소실내의 압축착화에 의해 일을 하고 동시에 배출가스의 생성 및 진동 소음이 발생한다. 그러므로 디젤기관의 공해물질을 저감시키고 열효율 향상을 통해 엔진성능의 개선을 위해서는 우선적으로 연료를 가능한 한 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.

실용 디젤기관의 연료분무는 비정상 간헐분무이므로 그 해석이 곤란하기 때문에 연료분무의 일관성있는 해석을 위해서는 분사율이 시간에 따라 일정한 정상분무로 유지되어야 하므로 정상간헐분무상태를 실현하기 위하여 축압실을 설치할 필요가 있으며 연료가 분사되는 동안 설정압력이 강하할 때 맥동을 줄여 연료분무의 해석을 용이하게 하여야 한다.

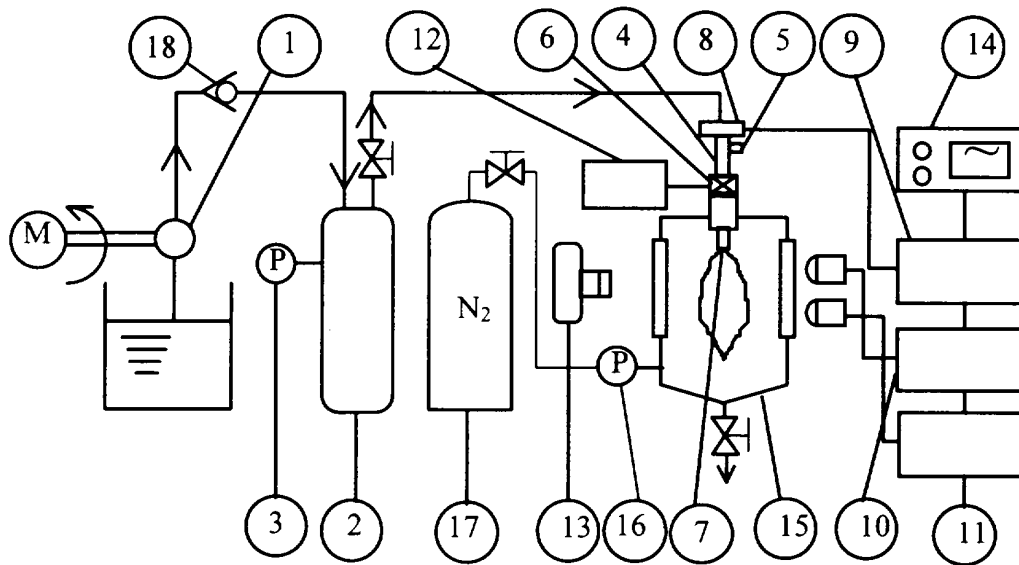
본 연구에서는 관측창이 있는 압력용기에 노즐형상비가 5이고 노즐직경이 0.25, 0.35, 0.45mm인 단공노즐을 사용하여 디젤연료를 일정압력으로 분사시켜 분사압력, 분위기압력 등을 변화시키면서 노즐직경이 분무선단속도, 분무선단 도달거리, 분무각, 분무원추각 등에 어떠한 영향을 미치는가를 Double flash에 의한 사진촬영에 의해 가시화함으로써 분무발달과정 및 분열기구를 보다 정량적으로 해석하여 디젤연료의 분무, 분산특성에 관한 실험적 기초자료를 얻고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

2-1. 연료분사 실험장치

본 연구에 사용된 연료분사 실험장치는 차량용 6기통 디젤엔진에 사용되는 분사펌프를 이용하여 연료분사 시스템, 연료분사 제어장치, 신호지연장치 및 스트로보와 나노라이트를 광원으로 하는 사진 촬영장치로 구성하였다. 자동차용 분사펌프를 가변모터에 연결, 150rpm에서 1,800rpm까지 회전수를 변동시킬 수 있게 하여 플린저펌프 1개만을 연료의 가압장치로 사용하였고 나머지 5개는 다시 연료탱크로 복귀시켰으며 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 분사율(분사압력)을 일정하게 유지시키는 역할을 한다. 제 1 축압실은 내압이 30MPa, 내부용적 5.11리터이며 주로 플린저 펌프에서 고압 연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 하고, 분사노즐 입구에 설치된 제 2축압실은 최종적으로 디젤연료가 노즐에서 분사되는 동안의 설정 압력의 강하와 맥동을 가능한 없애주는 역할을 한다.



- | | |
|---|-----------------------------|
| 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. Double Pulse Generator Delay Circuit | 18. Check valve |

Fig. 1 Experimental apparatus

본 실험에 사용한 연료분사 제어장치는 실용 노즐홀더의 상부에 솔레노이드(6)를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드를 작동시키지 않는 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니어들에 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 부착하였으며 용기내 분위기압력을 3MPa까지 상승시키기 위하여 질소가스(17)를 충전하여 사용하였다. 연료 분사압력은 노즐홀더의 연료입구측에 부착된 압력변환기(5)로 부터 디지털 지시기에 의해 측정되며 측정압실과 분사노즐 사이에 아나로그 압력계를 부착하여 분사압력을 보다 정확하게 조정하였다. 플린저펌프와 제1측압실 사이에 체크밸브(18)를 설치하여 분사압력을 28MPa로 올리는데 무리가 없도록 하였다.

Photo. 1은 고압의 연료가 분사기간 동안, 제 2 측압실에 설치한 압력변환기의 압력변화를 나타낸 오실로스코프 사진으로서, 종축은 압력변화, 횡축은 분사시간, 즉 분사밸브의 개폐시간이고 한 눈금(1 Division)은 10ms를 나타낸다. 사진에서 분사기간중의 분사압력은 거의 일정하게 유지되므로 연료 분사기간중의 분무는 정상분무 상태이다.

Photo. 2는 Double flash에 의해 펄스가 두 번 발생하는 오실로스코프 사진이다. 사진에서 하단펄스는 분사개시와 함께 발생한 발진신호이며 상단 펄스는 그 신호를 받아서 지정된 시간만큼 두 번 지연되는 펄스를 보여주고 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 단공노즐의 상세도이며 노즐직경이 0.25,

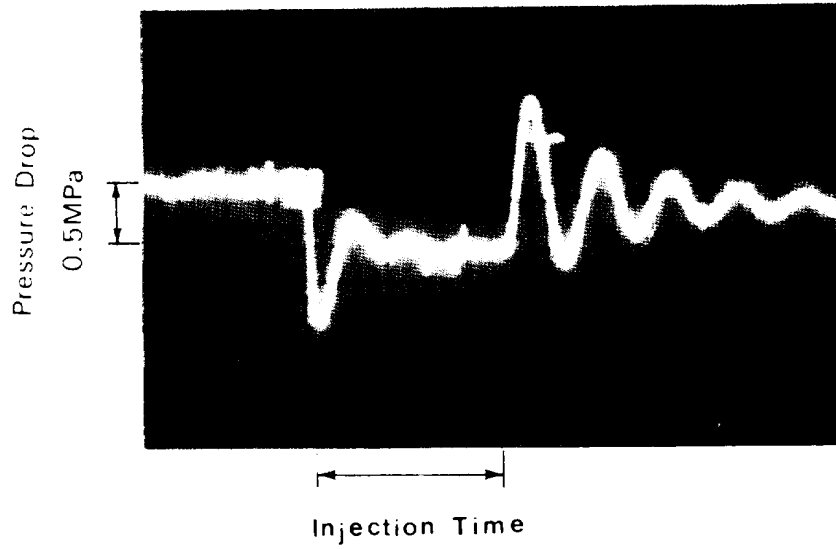


Photo. 1 Photograph of pressure drop of pressure transducer
($P_i = 21 \text{ MPa}$)

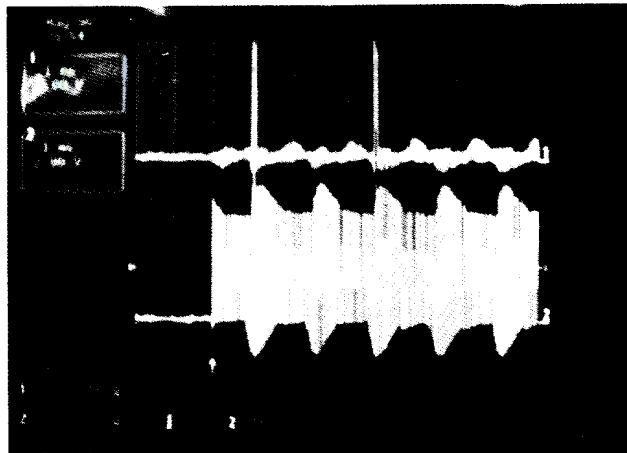


Photo. 2 Photograph of double pulse signal from delay circuit

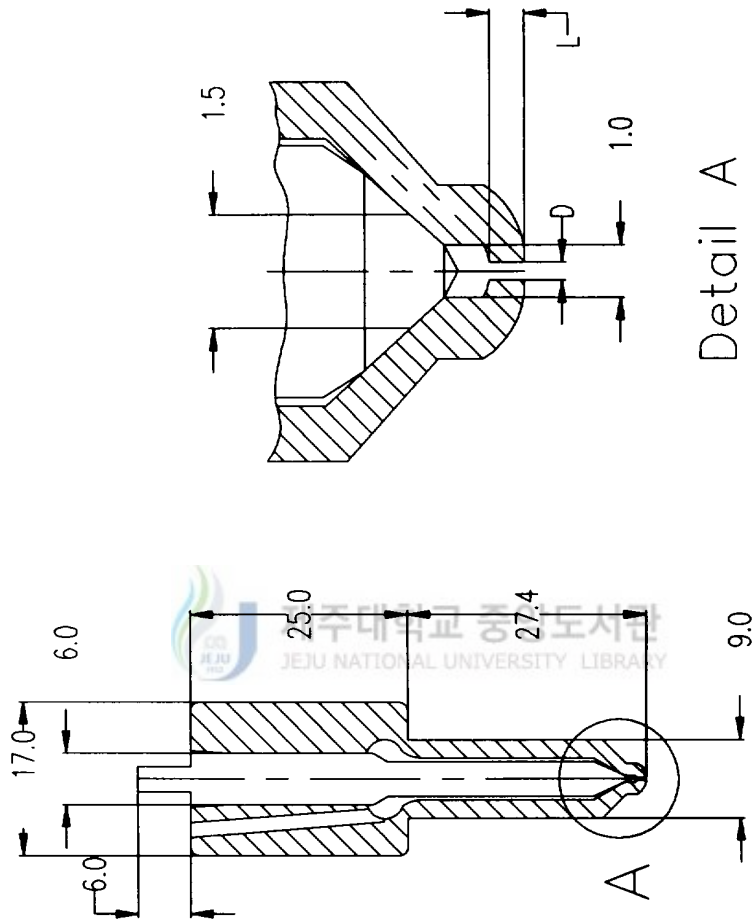


Fig. 2 Detail of single hole nozzle

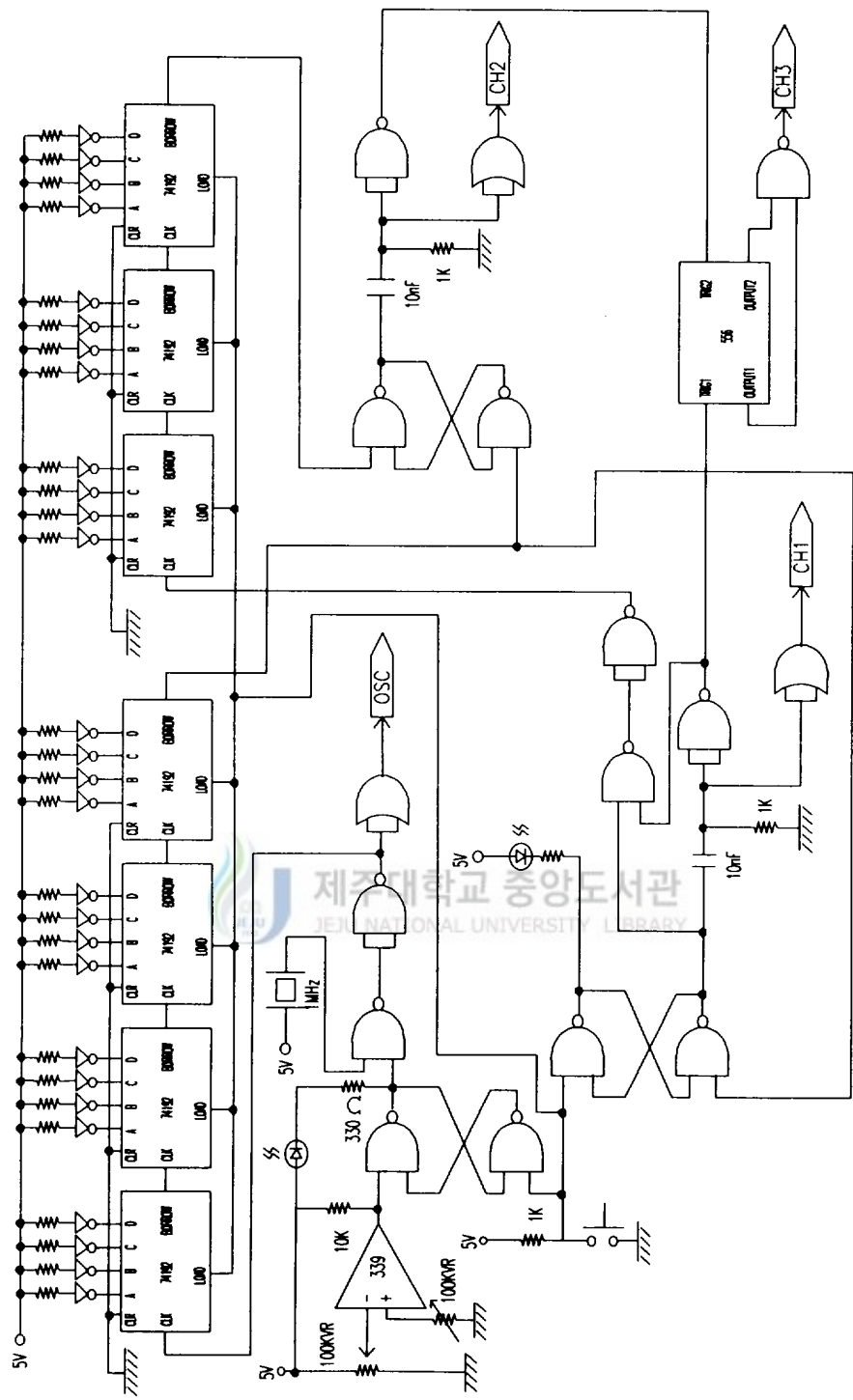


Fig. 3 Double pulse generator delay circuit

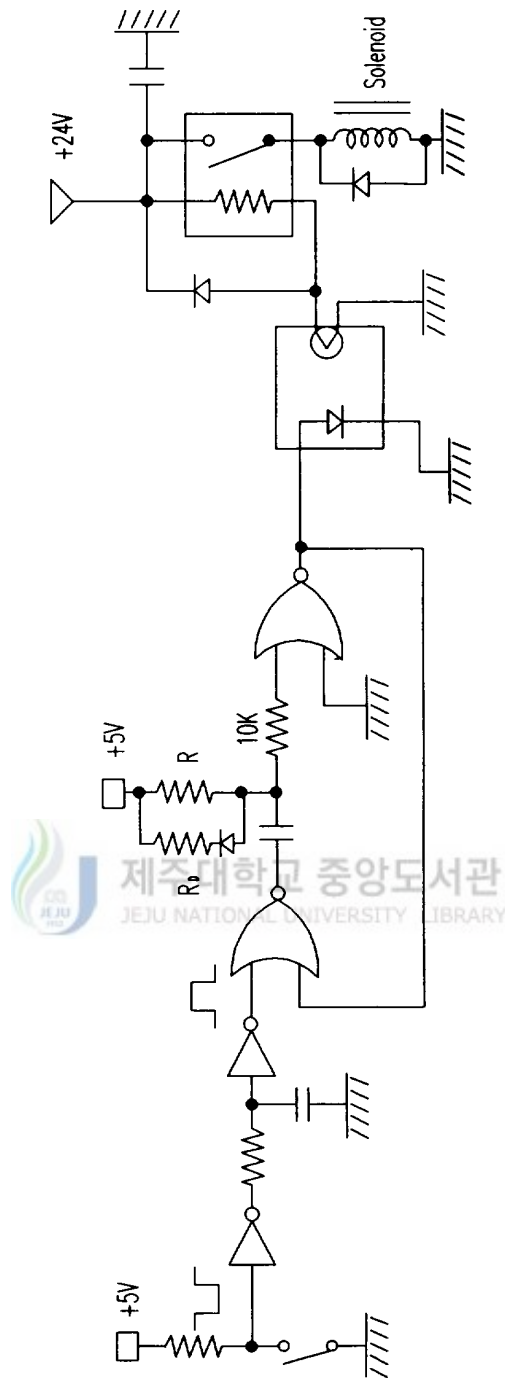


Fig. 4 Nozzle driving circuit

0.35, 0.45mm 노즐형상비는 5로 하여 실험을 행하였다. Fig. 3은 전자밸브의 작동시간을 제어하기 위한 노즐 구동장치와 분사개시 초기신호 발생장치 제어회로도이다. 노즐구동장치의 제어는 분사기간을 설정한 후에 작동스위치를 누르면 구동장치를 거쳐 솔레노이드 밸브에 전류가 흘러 작동되도록 하였으며, 설정기간 동안 두 번 지연된 후 제어회로에 의하여 솔레노이드의 전류를 차단하도록 하였으며, 이 장치의 설정시간은 0.001ms로 부터 9ms까지 조절이 가능하다. 초기신호 발생장치는 포토인터럽터(Photo-interrupter)의 감광부와 수광부사이에 전자밸브의 스피들에 의해 초기신호가 발생하게 되면 구형파의 시그널을 발생시킨다.

Fig. 4에 표시한 회로도는 노즐 구동장치에서 들어오는 미세한 신호를 받아 솔레노이드를 구동시킬 수 있는 전류로 증폭하는 장치이며 솔레노이드의 역기전류로부터 회로를 보호하도록 설계되어 있다.

2-2. 사진촬영 장치 및 실험조건

디젤 연료유의 미립화 현상을 가시화하는 방법에는 직접사진, 홀로그래피 및 슈리렌사진 등이 있으나, 본 연구에서는 투과광에 의한 순간 사진촬영법에 의해 분무의 미립화현상을 가시화하여 관찰, 해석하였다.

노즐을 통하여 분사된 분무가 분사직후로부터 임의시간 경과후까지의 분무형상을 촬영하기 위한 분사개시 신호는 노즐 니이들의 상단부와 접촉하고 있는 전자밸브의 스피들 상단사이에 위치한 포토인터럽터의 신호를 이용하였다. 노즐 제어장치에 의해 전자밸브가 작동하면 스피들상단이 상승하여 포토인터럽터의 빛을 차단하는 순간에 분사개시 신호가 발생하게 되어

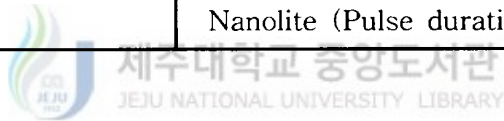
Fig. 3에 표시한 회로로 입력된다. 이 미약하고 불안정한 초기신호는 회로 중의 트랜지스터와 슈미트 트리거 소자를 지나면서 증폭되어 보다 정확한 레벨의 신호로 바뀐 후 Fig. 3에 도시된 신호발생 지연회로에서 재 증폭되고 설정된 시간만큼 두 번 지연된 후에 스트로브스코프와 나노라이트에 입력되어 적정노출 광량으로 순간발광 시킨다. 이 때 카메라는 B-셔터 상태이므로 이 두 번의 순간광을 받아들여 동일한 분무의 발달상태가 두 번 필름상에 감광되어 촬영된다. 전체분무 사진촬영에는 105mm 마이크로렌즈와 스트로브스코프의 광원을 사용하였다.

디젤분무는 분사속도가 고속이므로 정지된 상을 촬영하기가 상용 μ s단위 스트로브스코프 광원으로는 곤란하므로 본 연구에서는 발광시간이 17ns인 나노라이트를 분무확대 사진촬영에 사용하였다. 이 때 확대촬영용 Telemicro lens는 확대배율이 4.5배이므로 촬영된 분무의 형상을 인화할 경우 약 15배 확대가 가능하다. 또한 카메라는 Nikon F-2, 필름은 KODAK Tri-X(ASA 400)를 사용하였다.

촬영방법은 촬영될 분무가 통과할 지점에 집광렌즈로 나노라이트빛을 균일한 조도로 조사한 후 카메라 초점을 맞추고, 카메라는 B-셔터 상태로 하여 나노라이트가 신호지연장치로 부터 입력신호를 받아 발광되는 순간 분무가 필름에 감광되게 하였다. 또한 촬영된 분무사진은 같은 비례척으로 촬영된 스케일로 분무선단 도달거리, 분무원추각 등을 직접 계측하고 분석하였다. 사진촬영 및 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Discriptions	Conditions
Injection press. (MPa)	7, 14, 21, 28
Ambient press. (MPa)	0.1, 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=5, D=0.25, 0.35, 0.45mm)
Lens	105mm Micro, Telemicrolens (Magnification : X 4.5)
Camera	Nikon F-2
Film	KODAK Tri-X(ASA 400)
Spark light sources	Strobo (Pulse duration : 20 μs) Nanolite (Pulse duration : 17 ns)



III. 실험결과 및 고찰

3-1. 분무초기의 분산과정

Photo. 3은 직경이 0.45mm인 노즐을 사용하여 분위기압력이 대기압이고 분사압력이 7MPa에서 t_1 시간을 0.18ms로 고정시킨다음 1차와 2차 모두 나노라이트광원, 105mm Telemicro lens를 사용하고 t_2 시간의 변화에 따른 분무초기의 분산과정을 촬영한 확대사진이다. 확대배율은 4.5배로 사진의 전체 실제길이는 8mm이다. 왼쪽사진을 살펴보면 t_2 가 0.03ms로 분무체적이 증가한 것 밖에는 아직 분열이 이루어지지 않고 있다. 그러나 t_2 가 0.09ms인 가운데 사진을 관찰해 보면 분무의 경계부근에서 부터 액사가 보이기 시작하고 액적으로 벌써 떨어져 나간 것도 보인다. t_2 가 0.10ms인 오른쪽사진을 보면 훨씬 체적이 증가했고 가운데 사진보다 경계부분이 더 교란된 분무를 관찰할 수 있다.

Photo. 4는 3MPa의 분위기압력상태의 용기내로 21MPa의 분사압력으로 분무의 성장을 시간경과에 따라 촬영한 순간확대사진이며, 이것은 고속의 액체분류가 분열성장하여 미립화되는 분무초기과정과 분산특성을 보여주고 있다. 이 경우는 Photo. 3과는 분무형태가 현저히 다르다. 즉 액사부분이 거의 보이지 않고 액적으로 바로 분리되어 나가는 것이 보인다.

분사압력이 21MPa에서는 7MPa과는 달리 분무와 주위 기체와의 상대속도가 크게 되어 액주 표면파가 더욱 교란되어 액주로 부터 액사 및 액적

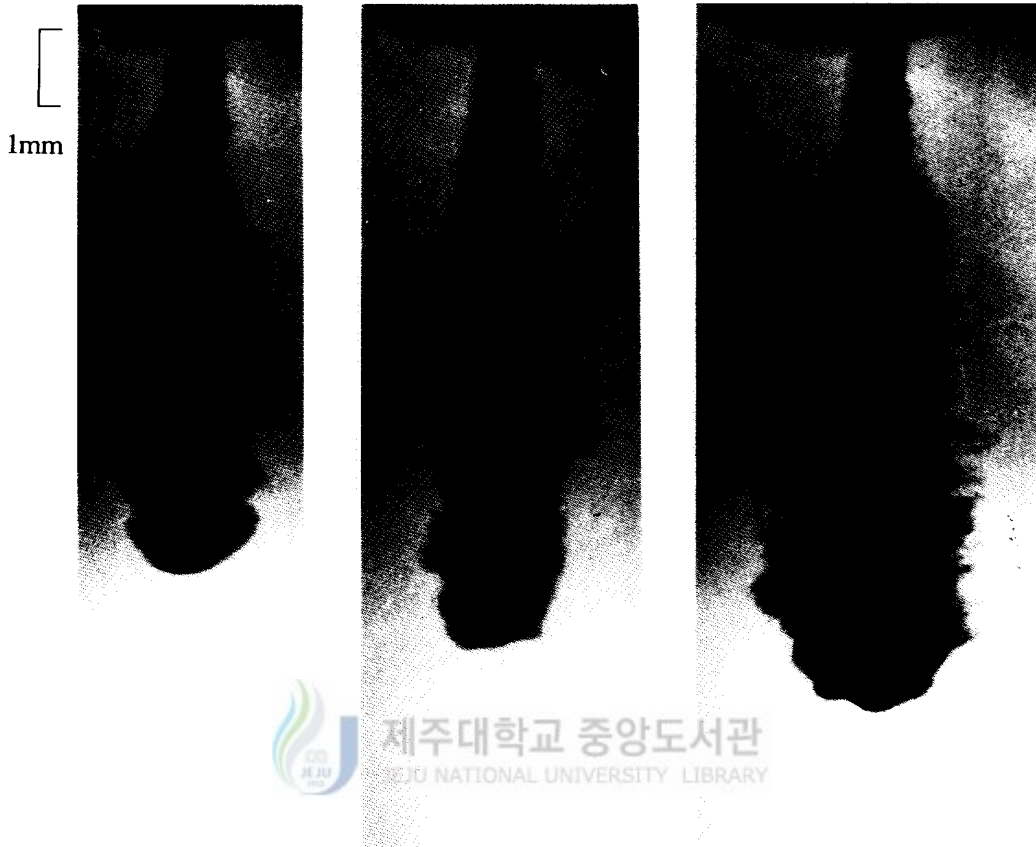


$t_1 = 0.18 \text{ ms}$
 $t_2 = 0.03 \text{ ms}$

$t_1 = 0.18 \text{ ms}$
 $t_2 = 0.09 \text{ ms}$

$t_1 = 0.18 \text{ ms}$
 $t_2 = 0.10 \text{ ms}$

Photo. 3 Enlarge photographs of initial diesel spray by double flash ($P_i = 7\text{MPa}$, $P_a = 0.1 \text{ MPa}$, $D = 0.45\text{mm}$)

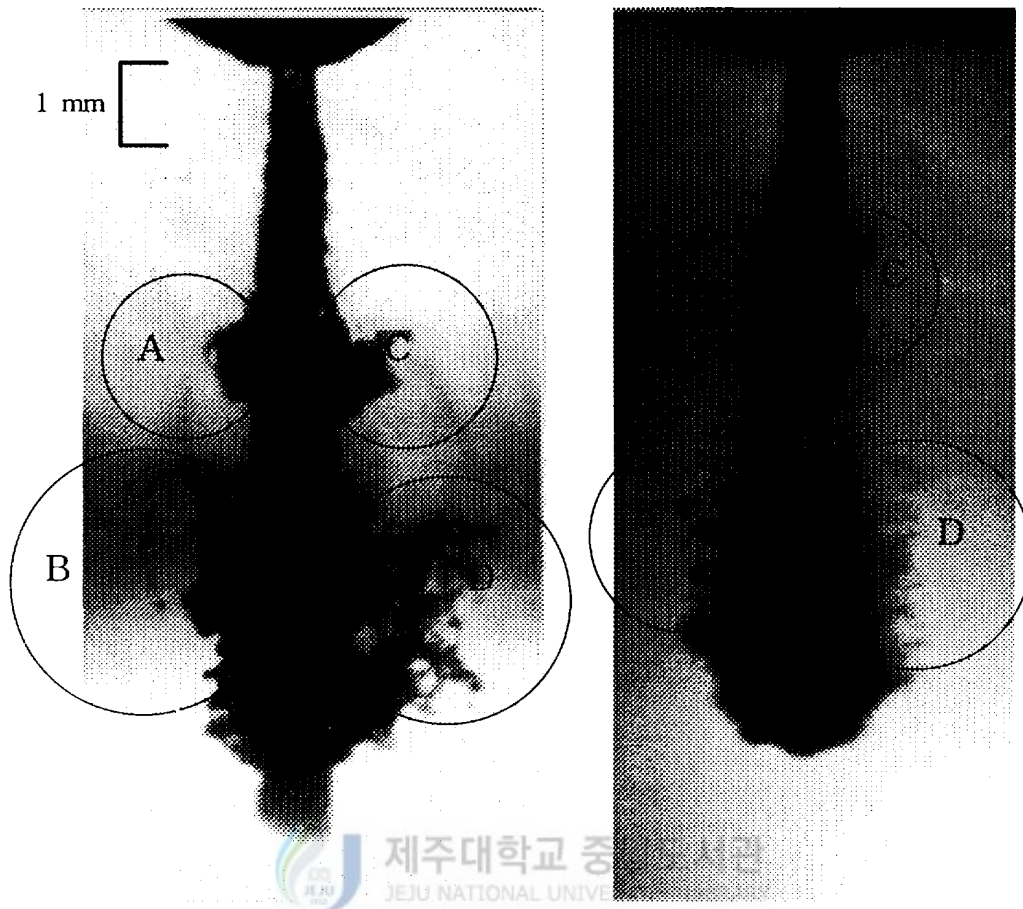


$t_1 = 0.12$ ms
 $t_2 = 0.06$ ms

$t_1 = 0.12$ ms
 $t_2 = 0.08$ ms

$t_1 = 0.12$ ms
 $t_2 = 0.10$ ms

Photo. 4 Enlarge photographs of initial diesel spray by double flash ($P_i = 21$ MPa, $P_a = 3$ MPa, $D = 0.45$ mm)



(A)

$t_1 = 0.18 \text{ ms}$

$t_2 = 0.10 \text{ ms}$

(B)

$t_1 = 0.12 \text{ ms}$

$t_2 = 0.10 \text{ ms}$

Photo. 5 Disintegrating mode of initial diesel spray

발생이 빠르고 균일하며, 추월현상에서 발생된 액사는 반경류 방향으로 보다 축방향으로 형성되고 그 액사로 부터 액적이 발생하고 있음이 관찰된다. 그러므로 액체분류의 초기 분사기구는 노즐내 난류유동에 기인하여 파가 발생하고, 이 발생된 파와 주위기체와의 마찰로 인하여 액사가 성장하며 이 액사로 부터 액적이 발생한다.

Photo. 5는 분무초기의 분산과정을 보다 세밀히 관찰하기 위하여 확대 사진을 스캐너로 읽은 다음 각각 A, B, C, D영역으로 구분하였다. 초기의 t_1 의 분무인 A부분이 B로 분열이 되고 C부분이 D로 분열되는 것을 확인할 수 있다.

3-2. 노즐직경이 분무발달에 미치는 영향

Photos. 6-8은 분위기압력과 분사압력을 변수로 하여 노즐형상비가 5이고 노즐직경이 0.45mm, 0.35mm, 0.25mm인 Double flash사진이다. 1차광원으로 노즐 끝에 원형광원인 나노라이트를 사용했고 하단의 광원은 2차광원으로 스트로브스코프광을 사용했다. 따라서 사진1장에 나와있는 분무는 동일분무이다.

Photo. 6은 직경이 0.45mm인 노즐을 사용하여 분사압력이 28MPa인 조건으로 분위기압력이 3MPa인 용기내로 분사시켰을 때 분무의 성장과정을 촬영한 순간사진의 일 예이며, 디젤분무의 시간경과에 따른 분열과정을 보여주고 있다.

t_1 은 나노라이트 광원으로 1차분무의 모양을 분사개시후 0.16ms에서 고정하여 촬영한 것으로 교란되지 않은 액주임을 알수있고 t_2 는 0.16ms이후

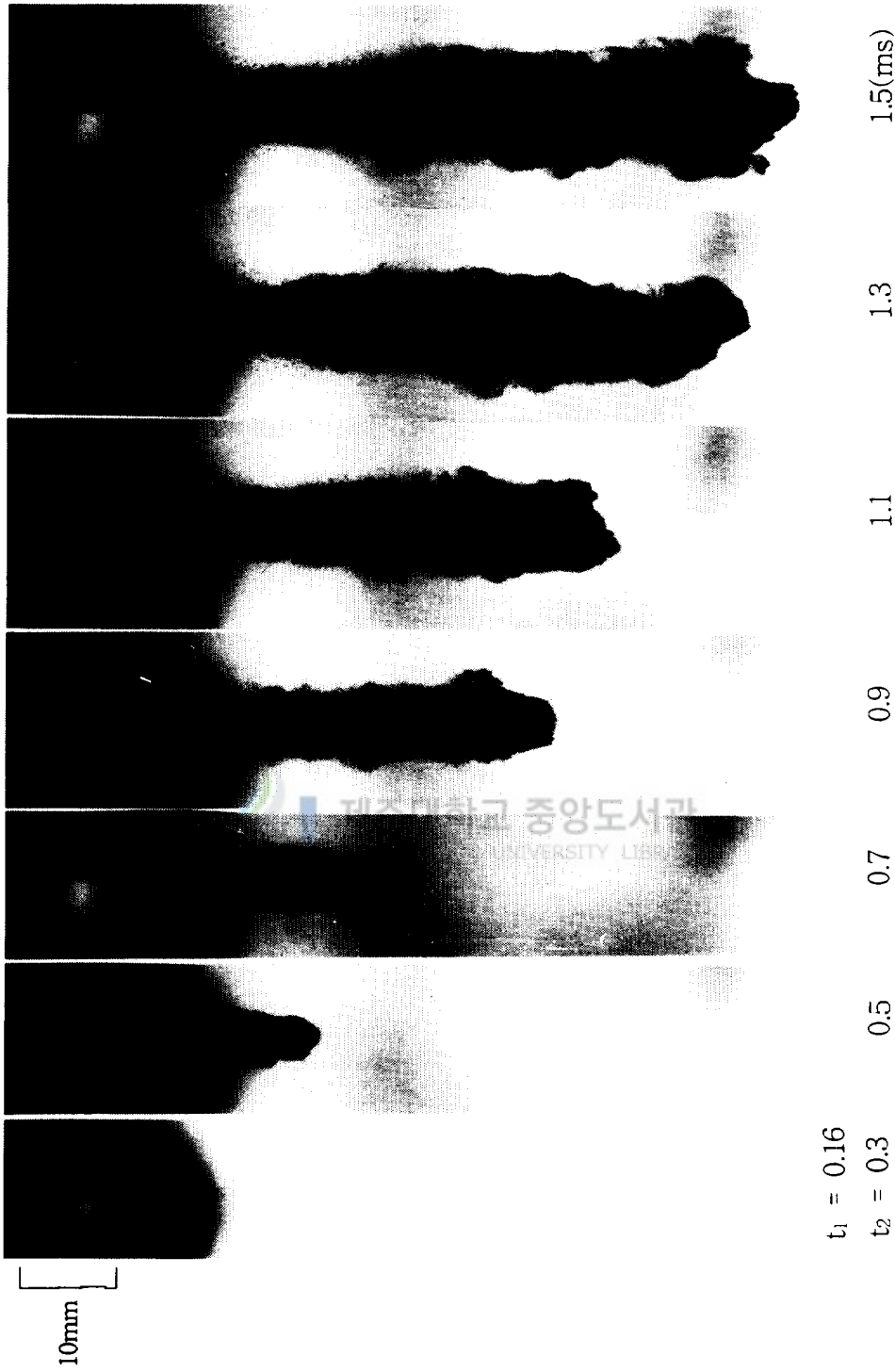


Photo. 6 Photographs of developing spray from injection start
 ($P_i = 28$ MPa, $P_a = 3$ MPa, $D = 0.45$ mm)



Photo. 7 Photographs of developing spray from injection start
 ($P_i = 14$ MPa, $P_a = 2$ MPa, $D = 0.35$ mm)



$t_1 = 0.1$
 $t_2 = 0.4$

1.0 1.6 2.2 2.8 3.4 4.0(ms)

Photo. 8 Photographs of developing spray from injection start
 ($P_i = 7 \text{ MPa}$, $P_a = 3 \text{ MPa}$, $D = 0.25\text{mm}$)

임의의 시간에 따른 분무의 모양이다. t_1 으로 잡은 분무의 길이는 어느것이
나 일정하므로 Double flash회로가 정상적으로 작동하고 있음을 알 수 있
다. 분무선단 도달거리는 t_2 의 시간경과에 따라 성장하고 있으나 1.3ms 이
후는 급격히 속도가 떨어지며 분위기압력으로 인해 떨어진 속도는 반경방향
의 분무로 분열되고 이러한 영향은 분무각의 증가로 나타난다. 이때가 천
이점이 발생하는 시간으로 추측되며 이후로는 분무가 완전히 발달한다고 보
여진다. 분위기 압력이 높을수록 천이점은 빨리 일어나고 있고 따라서 분
무선단 도달거리는 떨어지고 있다. 이 사진들만으로는 분무가 미립화되어
가는 과정을 볼수 있지만 액적의 분열과정을 세심히 관찰하기는 어려웠다.

Photo. 7은 직경이 0.35mm인 노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa인 조
건으로 분위기압력이 2MPa 인 용기내로 분사시켰을 때의 사진으로서 분사
압력이 28MPa에 비하여 낮지만 노즐직경이 0.45mm보다 작아서 분무의 성
장속도가 빠른 것을 알 수 있고 시간경과에 따라서 미분열액주의 표면파로
부터 액사가 형성되고 있으며 액사로부터 액적이 분리되어 미립화되고 있다
고 보여진다.

Photo. 8은 직경이 0.25mm인 노즐을 사용하여 분사압력이 7MPa, 분위
기압력이 3MPa 인 용기내로 분사시켰을 때의 사진이며 t_1 에 해당하는 시간
은 0.1ms이고 이때의 분무는 교란되지 않은 액주임을 알 수 있고 그 이후
 t_2 에 해당하는 시간만큼 분무는 성장하고 있으나 t_2 가 1.0ms이후는 분무의
성장이 더딘 것이 관찰되고 이때가 천이점이 발생한 시간으로 추측되며 그
이후는 분무의 액사와 액적이 거의 구분이 안되며 액주에서 액적으로 바로
미립화되고 있다고 사료된다.

Figs. 5-8은 노즐분사압력 7, 14, 21, 28MPa, 분위기압력 3MPa인 상태

의 용기내로 분사시켰을 때 노즐직경에 따른 분무선단 도달거리와 분무각 및 분무선단속도를 로그-로그 그래프로 나타낸 그림으로 상단그래프의 횡축은 전자밸브의 스피들이 포터인터럽터의 빛을 차단하는 순간으로부터의 경과시간이며 종축은 분무선단 도달거리 및 분무각이다. 하단그래프의 횡축은 분사개시후 경과시간이고 종축은 분무선단속도이다.

Fig. 5는 분사압력 7MPa, 분위기압력 3MPa의 조건으로 그래프에 나타난 분무선단 도달거리와 분무각 및 분무선단속도를 비교하면 속도는 시간경과에 따라 상승하다가 직경이 0.45는 1.0ms부근에서 직경이 0.35는 2.0ms에서 0.25는 0.7ms부근에서 갑자기 떨어지며 분무의 성장도 둔화되는것을 알 수 있고 천이점은 0.25, 0.45, 0.35mm순으로 나타나며, 분무각은 분사개시후 시간경과에 따라 점차 작아져서 일정하게 된다.

Fig. 6과 7은 분사압력 14, 21MPa에서 실험한 것으로 분사압력이 14MPa에서는 분사압력 7MPa일 때와 비교하면 분무의 성장은 분사초기부터 상당히 빠른 것을 알 수 있고 천이점은 노즐직경에 관계없이 모두 0.9-1.0ms 부근에서 나타나며, 천이점 이후는 분무의 성장이 완만히 진행된다. 분사압력 21MPa인 경우는 천이점은 0.6-1.0ms 부근에서 노즐직경 0.25, 0.35, 0.45mm 순으로 나타난다. 분무각은 그림들을 서로 비교하면 분사압력이 높을수록 초기분무각은 증가한다. 이는 분사노즐로 부터 연료가 분출될 때 압력에너지가 운동에너지로 전환되는 과정에서 반경방향의 운동량 증가에 기인하고 있다고 사료된다.

Fig. 8은 분사압력 28MPa, 분위기압력 3MPa의 조건에서 실험한 것으로 천이점은 노즐직경이 0.25는 0.5ms에서, 0.35는 0.6ms에서, 0.45는 0.9ms에서 나타나는 모양을 자세히 알 수 있고 분무선단속도는 완만히 상승하다가

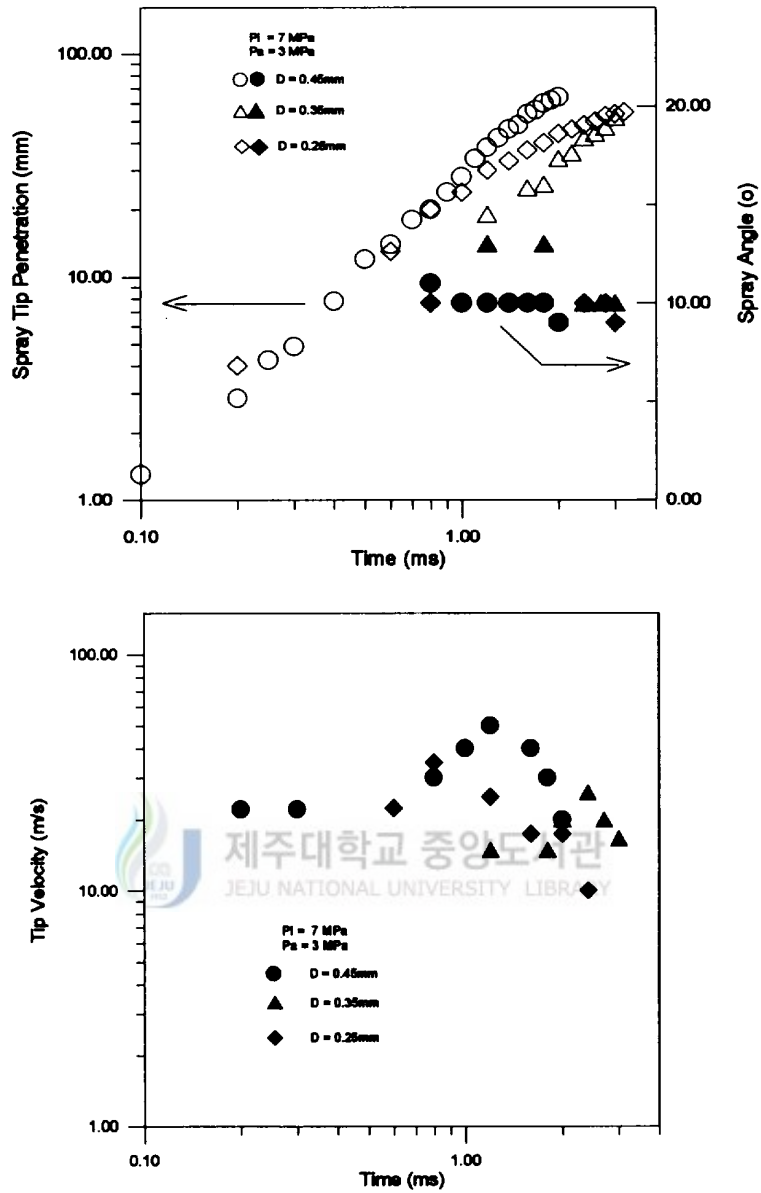


Fig. 5 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray tip velocity for time elapsed

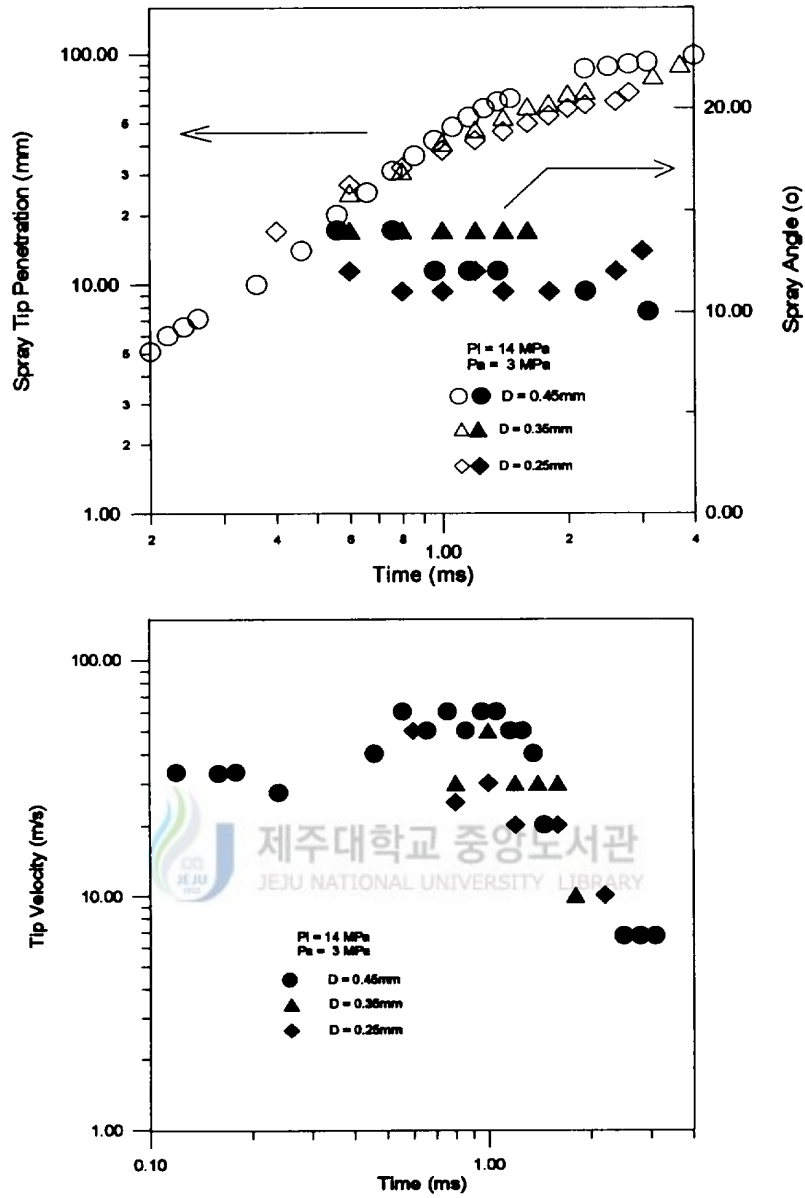


Fig. 6 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray tip velocity for time elapsed

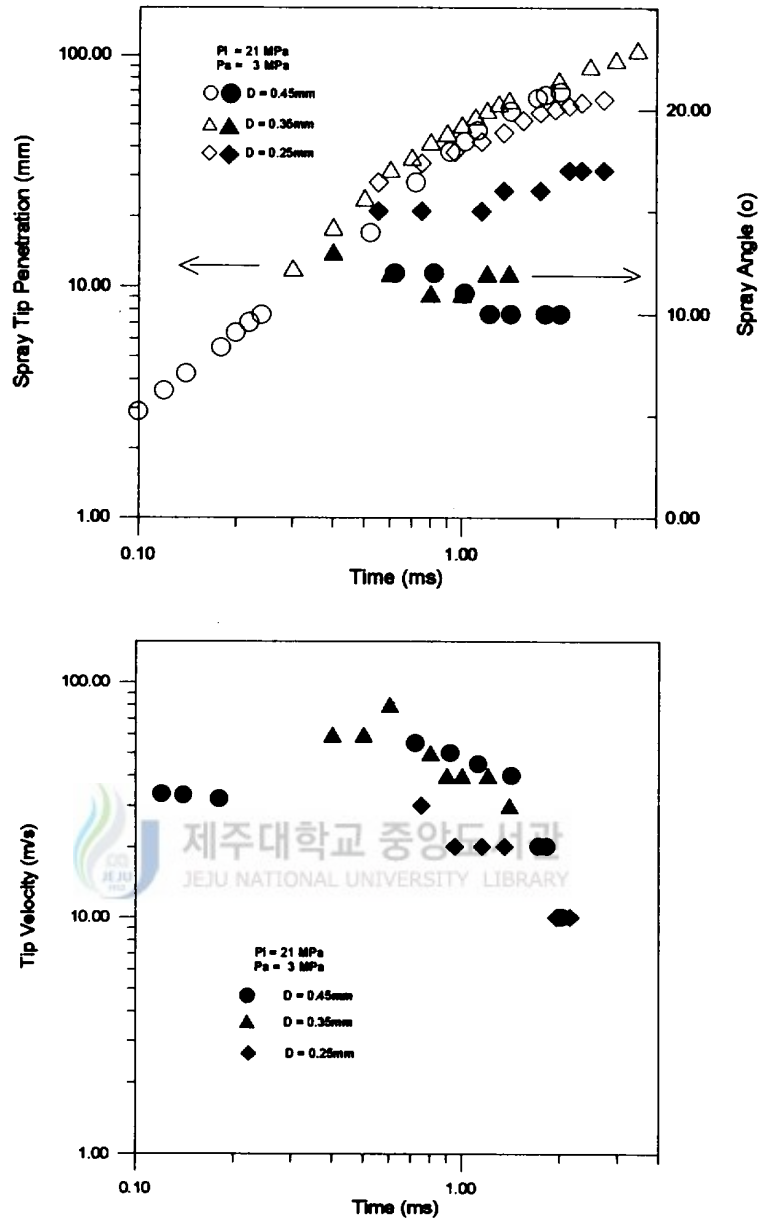


Fig. 7 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray tip velocity for time elapsed

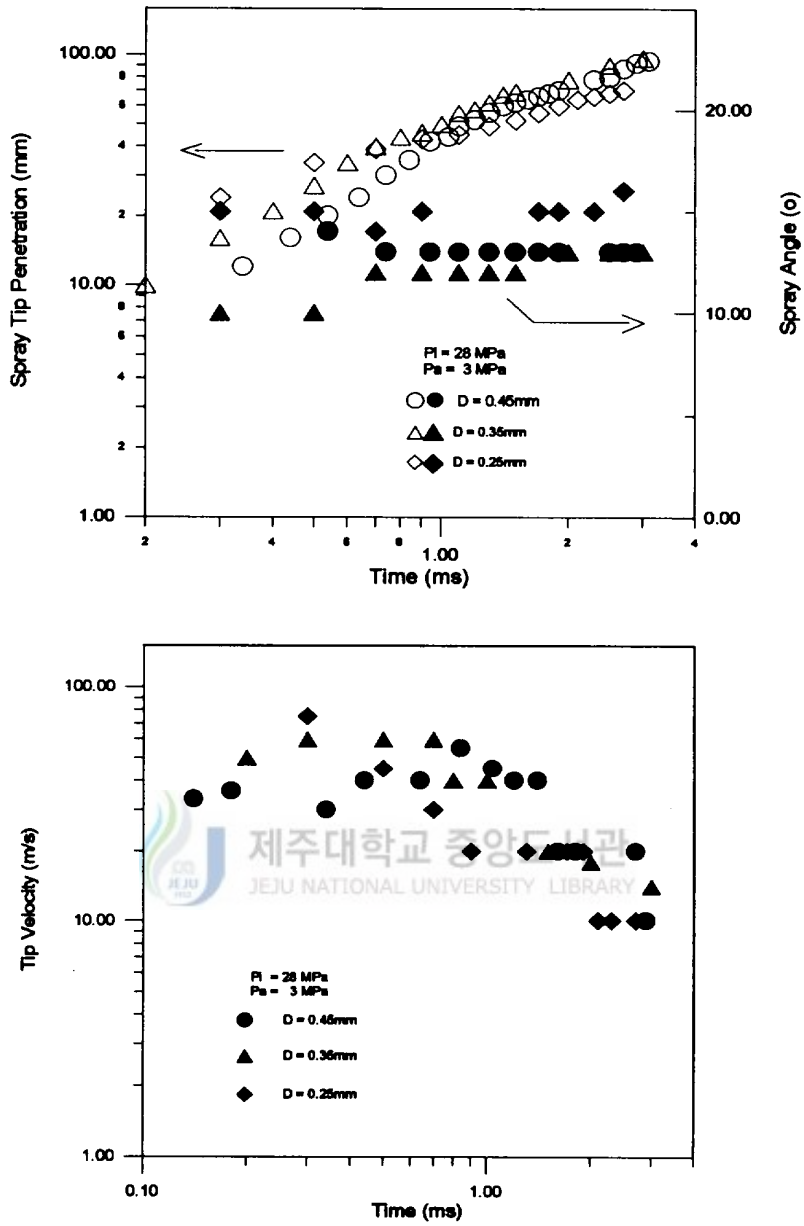


Fig. 8 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray tip velocity for time elapsed

0.5-0.9ms 이후에 천이가 발생하면서 천천히 떨어진다. 따라서 분위기압력이 3MPa로 일정할 경우 분사압력이 높을수록 천이점도 일찍 발생하고 속도도 완만히 떨어지는 것으로 봐서 미립화도 잘되고 관통력도 좋음을 알 수 있으며 분무의 성장은 천이점 이전은 노즐직경 0.25mm가 빠르나 천이점을 지나면서 분사압력 7, 14MPa에서는 0.45가 빠르고, 21, 28MPa에서는 0.35가 빨라진다.

Fig. 9와 10은 분사압력을 7MPa로 일정하게 하고 분위기압력을 0.1, 1, 2, 3MPa로 변화시켰을 때 노즐직경이 시간변화에 따라 분무선단 도달거리 및 분무각에 미치는 영향을 나타내고 있다.

Fig. 9에서 상단 그래프는 분사압력 7MPa인 조건하에서 노즐형상비가 5이고 직경이 0.25, 0.35, 0.45mm인 노즐을 사용하여 상온 대기압상태의 용기내로 분사시켰을 때 시간경과에 따른 분무선단 도달거리 및 분무각을 나타낸 그림으로서 노즐직경이 0.25mm는 분사개시후 1ms에서 분무선단 도달거리는 약 60mm이고, 노즐직경이 0.35mm는 분사개시후 1ms에서 분무선단 도달거리는 약 20mm이며, 노즐직경이 0.45mm는 분사개시후 1ms에서 분무선단 도달거리는 약 40mm로서 분무의 성장은 분무초기부터 끝까지 0.25, 0.45, 0.35mm 순으로 나타나고 대기압하에서 분무선단 도달거리는 기울기가 약 1인 직선으로서 오직 분사압력에만 의존하여 발달함을 알 수 있고 대기압에서 분무각은 분사초기부터 점차로 작아진다. 그러나 분위기압력을 1, 2, 3MPa (Fig. 9하단과 Fig. 10) 로 상승시킬 경우 분무의 성장은 0.45, 0.25, 0.35mm 순으로 되며 일정시간이 지난후 눈에 띄게 분무선단 도달거리가 꺾이는 것이 보인다. 이것은 축방향으로 분무가 돌진하는 것이 분위기 압력의 영향을 받아 반경방향으로 분산되고 있기 때문으로 사료되

며, 분무각은 분위기압력 1MPa에서는 대기압보다 완만히 감소하고 분위기압력 2, 3MPa에서는 노즐직경 0.45, 0.35는 시간경과에 따라 조금씩 감소하는 경향이 있으나 0.25mm는 거의 일정하다.

Fig. 11과 12는 분사압력을 14MPa로 하고 분위기압력 변화에 따른 분무선단 도달거리 및 분무각을 나타낸 그림이다. 분사압력이 14MPa, 분위기압력이 대기압(Fig. 11상단 그래프)인 상태에서 분무는 노즐직경이 0.25, 0.45, 0.35mm 순서로 직선으로 성장하며 분무각은 분사압력 7MPa에서와 마찬가지로 분사초기부터 작아진다. 분위기압력을 1, 2, 3MPa(Fig. 11하단과 Fig. 12)로 상승시킬 경우, 천이점을 지나면서 분무선단 도달거리는 0.45, 0.35, 0.25mm 순으로 되어 노즐직경이 클수록 분무의 성장이 빠르게 나타나고 있다. 또한 천이점은 0.25, 0.35, 0.45mm 순으로 발생하며 분무각은 분위기압력 1MPa에서는 노즐직경이 0.45, 0.35는 감소하고 0.25mm는 0.6ms이후는 일정하나, 분위기압력 2, 3MPa인 경우 천이점 이후는 일정한 값을 유지하고 있다.

Fig. 13과 14는 분사압력을 21MPa로 하고 용기내 분위기압력 변화에 따른 분무선단 도달거리 및 분무각을 나타낸 그림이다. 대기압인 상태에서 분무는 노즐직경이 0.25와 0.35는 같이 성장하고 0.45mm는 뒤쳐진다. 분위기압력을 1, 2, 3MPa로 상승시킬 경우 분무선단 도달거리는 0.35, 0.45, 0.25mm 순으로 변하여 분사압력 7, 14MPa와는 또다른 양상을 보이고 있으며 분무각은 대기압에서는 감소하고 분위기압력이 높을수록 노즐직경 0.45, 0.35는 천이점이후는 감소하나 0.25는 조금씩 증가한다.

Fig. 15와 16은 분사압력을 28MPa로 높이고 분위기압력이 0.1, 1, 2, 3MPa인 용기내로 분사시킬 경우 노즐직경이 시간변화에 따른 분무의 분

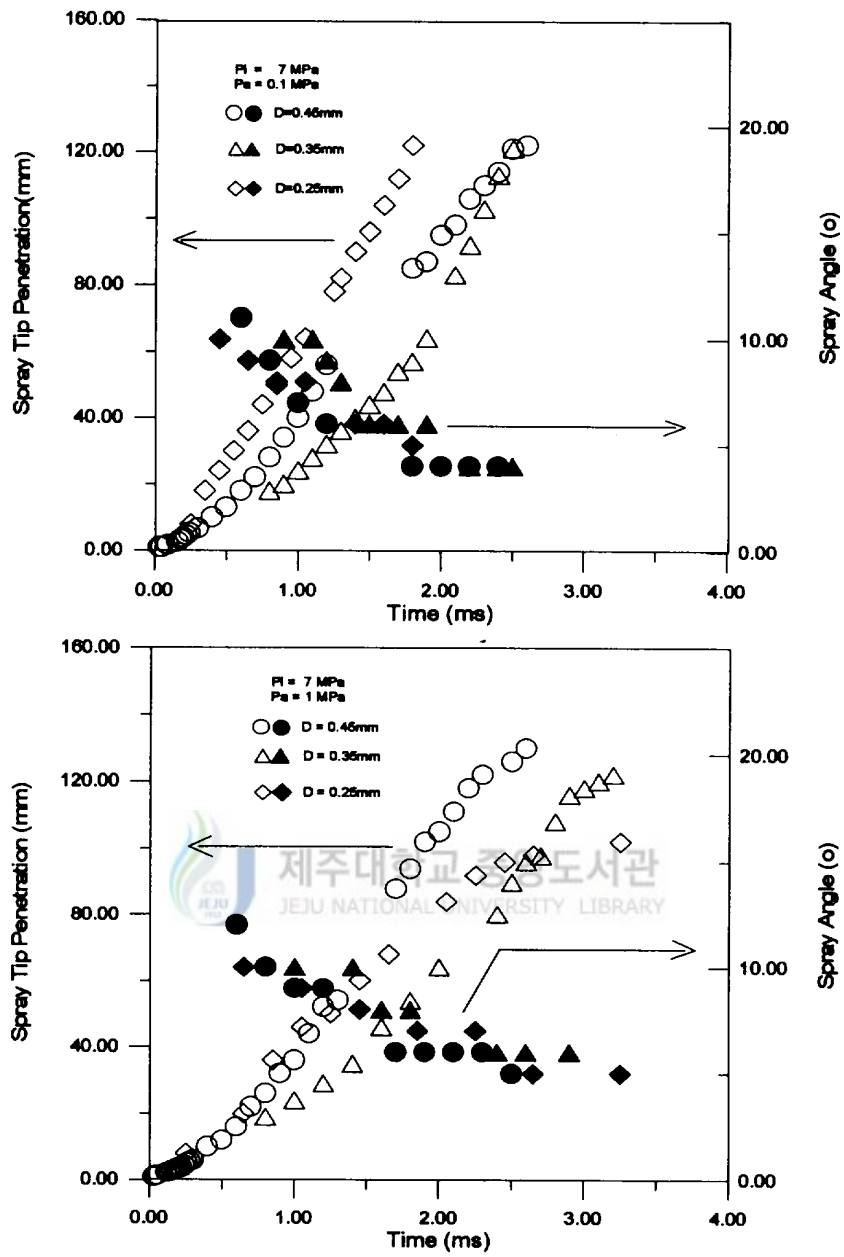


Fig. 9 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

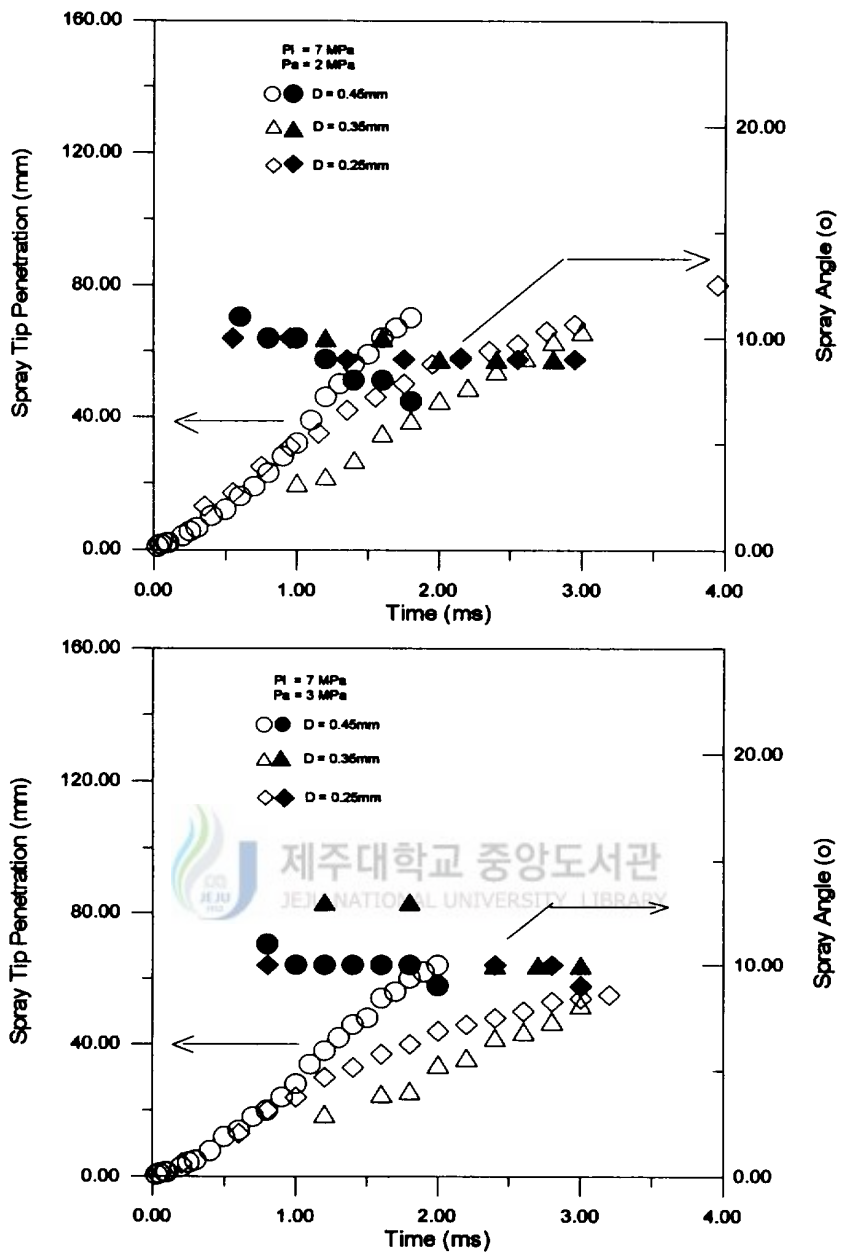


Fig. 10 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

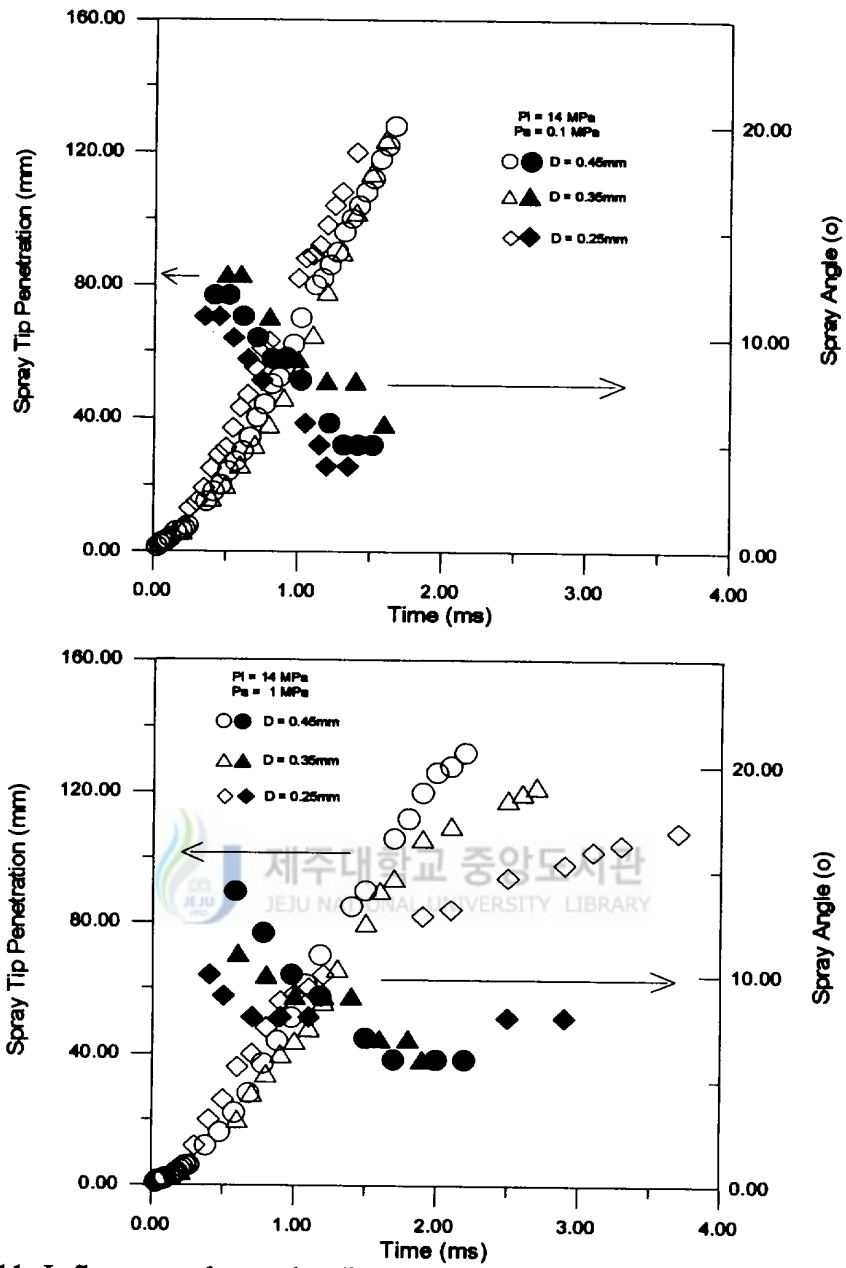


Fig. 11 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

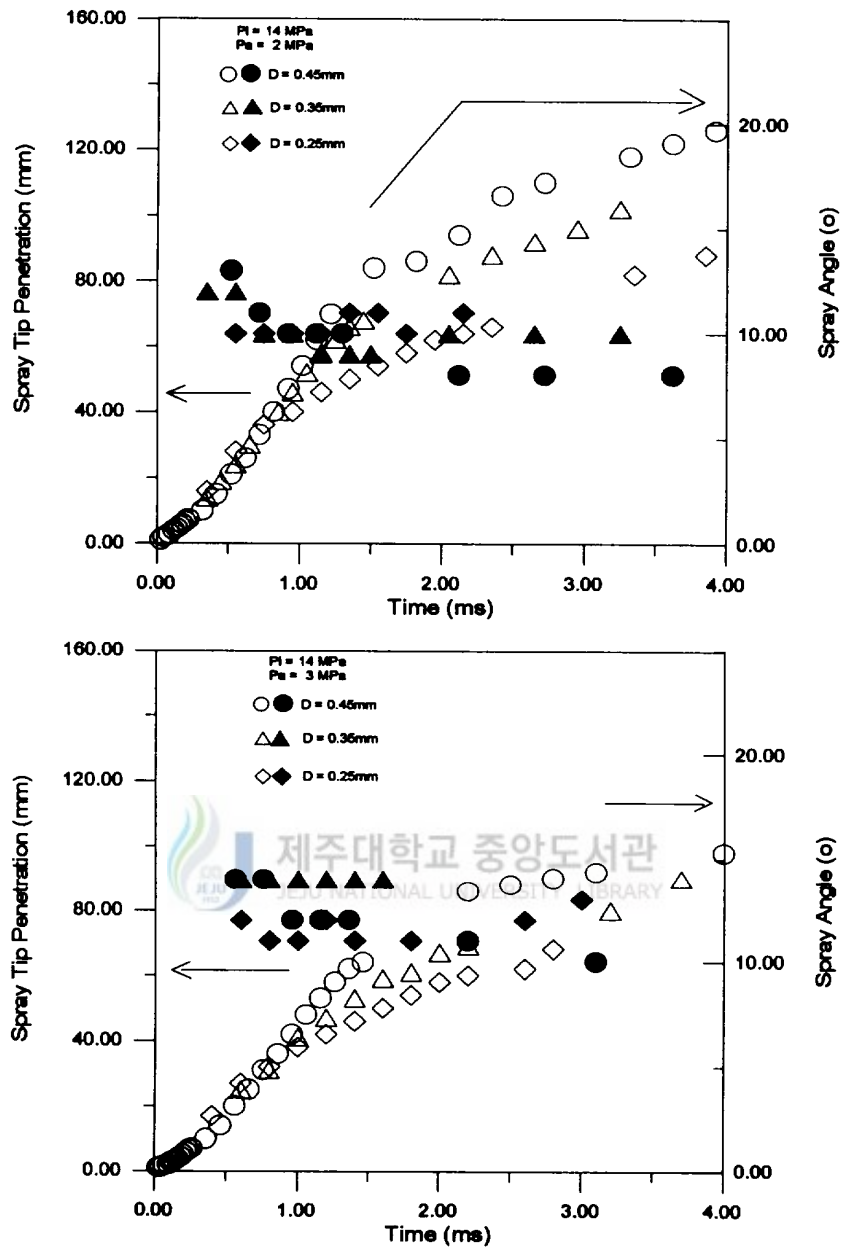


Fig. 12 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

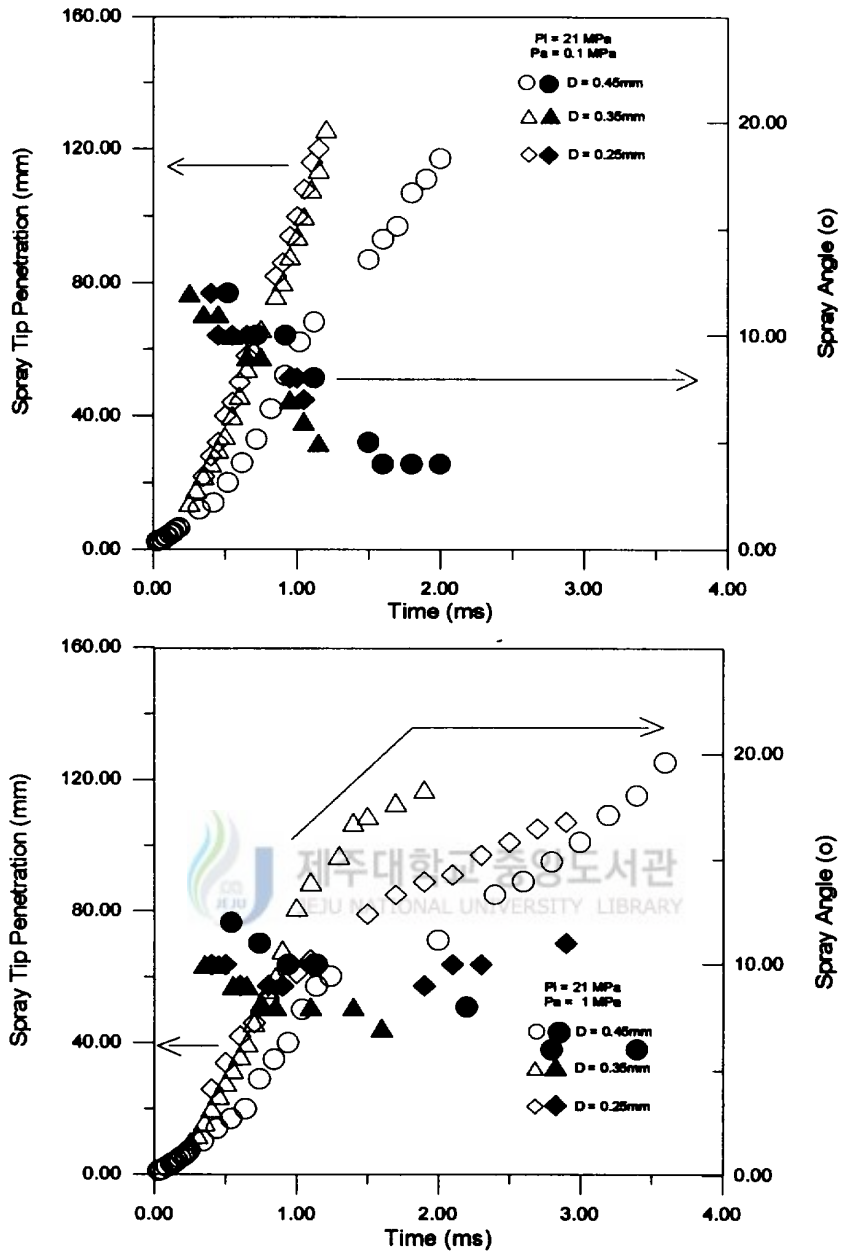


Fig. 13 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

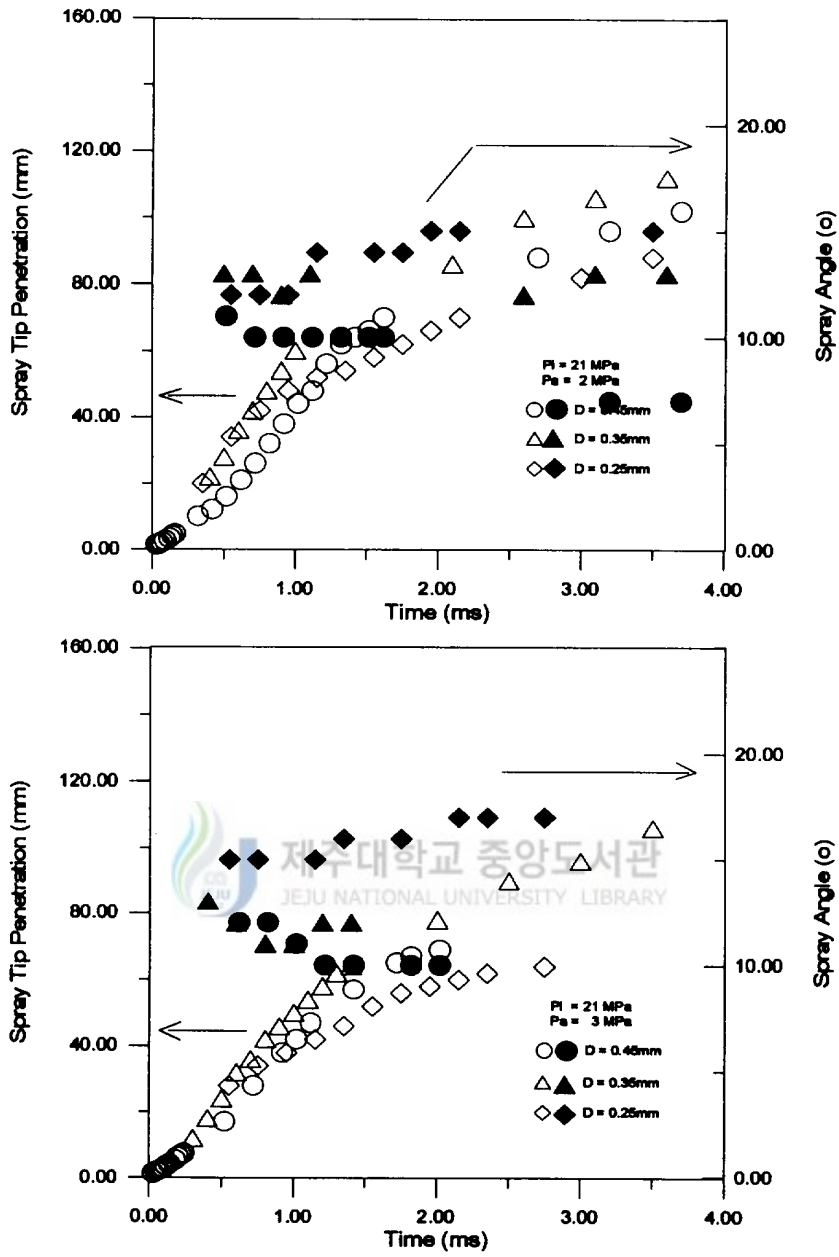


Fig. 14 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

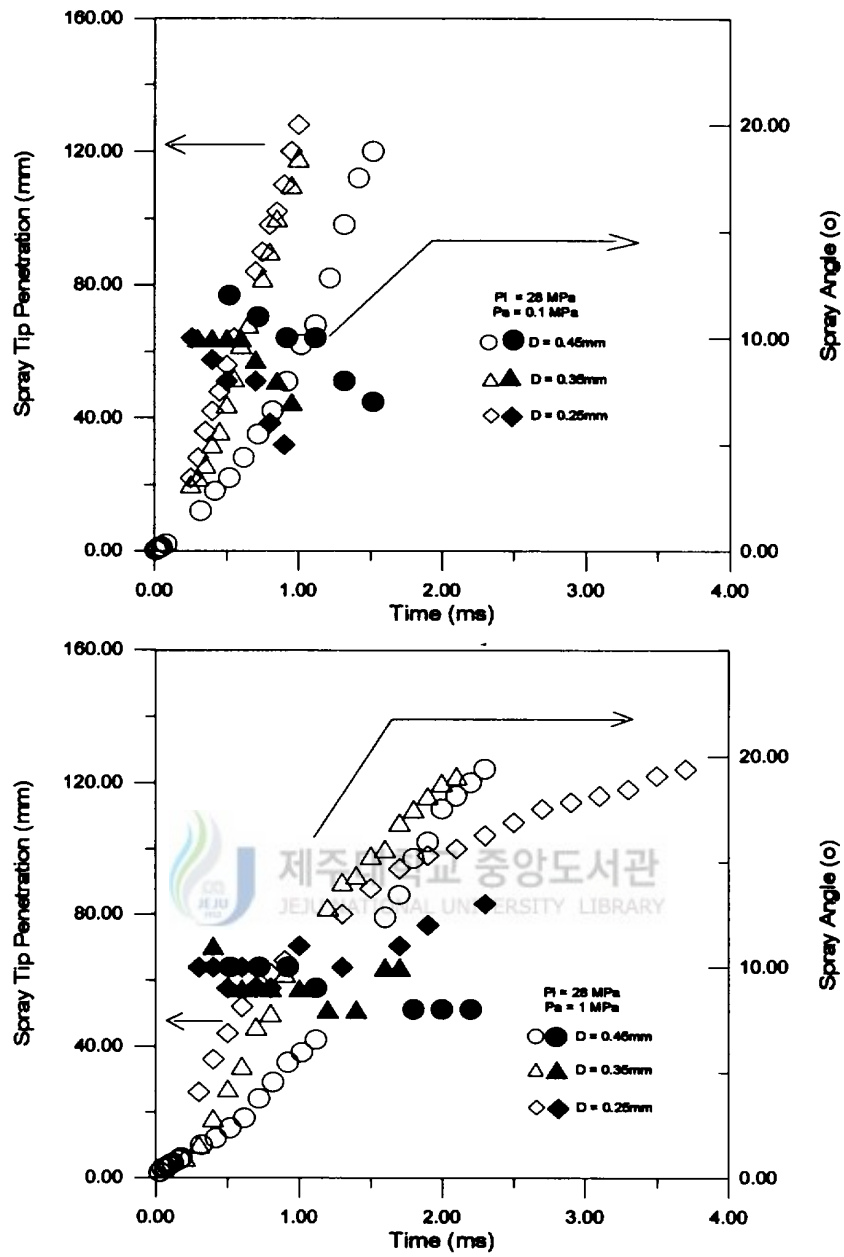


Fig. 15 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

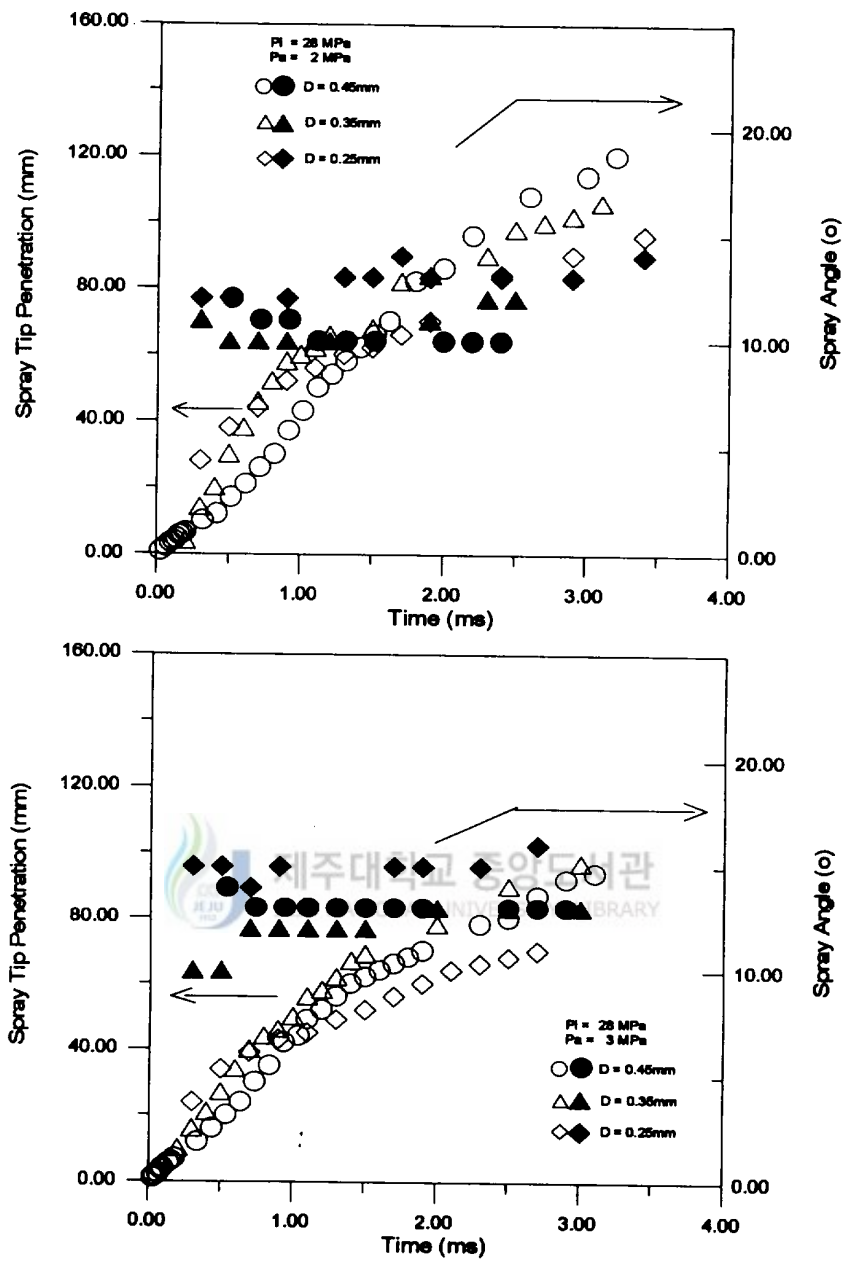


Fig. 16 Influence of nozzle diameter on spray tip penetration and spray angle for time elapsed

산과정을 분무선단 도달거리 및 분무각으로 나타낸 그림이다. 분위기압력이 상온대기압 상태에서 시간경과에 따른 분무선단 도달거리는 노즐직경이 0.25, 0.35, 0.45mm 순으로 급격히 증가하며 분무각은 감소한다. 분위기압력이 높을수록 분무의 발달이 지연되고 성장이 둔화되어 천이점이 일찍 발생하고 있으며 분무각은 노즐직경 0.45mm는 분위기압력 1, 2MPa에서는 감소하며 3MPa에서는 거의 일정하고, 노즐직경 0.35, 0.25는 분위기압력이 높을수록 조금씩 증가한다.

실험에서 연료의 분사압력이 일정한 경우, 노즐로부터 분사되는 분무류는 분위기압력이 증가할수록 분무의 추월이 주위 공기혼입을 증가시켜 분무의 분산에 기여하고 공기와 분무류의 밀도비가 대기압보다 증가되었기 때문에 분무선단 도달거리는 감소되는 것으로 생각된다. 따라서 분위기압력에 분사된 분무는 분위기압력이 높을수록 분무의 반경방향으로 성장이 증가되어 분사개시로부터 보다 짧은 시간내에 천이가 발생한다.

천이점 이후에서는 액주가 분열되어 액적상태로 됨으로 분무선단에서의 시간에 따른 운동량 손실비율이 크게 되어 천이점 이후는 기울기가 작아진다고 사료된다.

Fig. 17과 18은 분위기압력 변화에 따른 분무원추각의 영향을 나타내고 있다. 분무원추각은 동일한 분사압력 및 분위기압력하에서는 분사개시후 시간경과에 따른 분무의 변화에 관계없이 일정하게 나타난다. Fig. 17에서 상단 그래프는 분사압력 7MPa 에서 분위기압력을 변화시켜가며 분무원추각을 측정한 결과로 대기압에서는 노즐직경 0.45는 13°, 0.35는 11°, 0.25mm는 14° 이나 분위기압력을 1, 2, 3MPa로 높이면 분무원추각은 노즐 직경 0.45, 0.25, 0.35mm 순으로 커지며, 3MPa에서 0.45는 19° 로 가장크고

0.35는 17° 0.25는 18° 가 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 17 하단그래프와 Fig. 18 상단그래프는 분사압력 14, 21MPa에서의 분무원추각을 나타낸 그림으로 노즐직경 0.45, 0.25, 0.35mm 순으로 크게 나타난다.

Fig. 18에서 하단그래프는 분사압력 28MPa에서 분위기 압력을 변화시킬 경우 노즐직경에 따른 분무원추각을 나타낸 그림으로서 대기압부터 3MPa로 올라갈수록 분무원추각은 증가하며 3MPa에서 0.45는 21° , 0.35는 16° , 0.25는 20° 이다. 동일한 노즐직경에서 분무원추각은 분사압력과 분위기압력이 클수록 더 크다. 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.

3-3. 완전히 발달된 분무의 해석

Photo. 9는 노즐분사압력 7MPa, 분위기압력 3MPa인 조건에서 천이점 이후 노즐직경에 따른 분무의 발달된 모습을 촬영한 사진이다. 1차광원으로 노즐끝에서 72mm지점에 원형광원으로 나노라이트를 사용하고 하단의 2차광원은 스트로브스코프광을 사용했다. 왼쪽사진은 직경이 0.45mm 노즐로 t_1 은 2.1ms t_2 는 4.5ms 이고, 가운데 사진은 직경이 0.35mm 노즐로 t_1 은 2.7ms t_2 는 6ms 이며, 오른쪽사진은 직경이 0.25mm 노즐로 t_1 은 3.5ms t_2 는 9ms 일때의 분무 모양이다. 이 세 개의 사진은 모두 같은 스케일로서 동일한 조건(분사압력 7MPa, 분위기압력 3MPa)에서 노즐직경에 따른 분무

의 분산특성을 t_1 과 t_2 의 분사시간경과에 의거 비교 해보면 노즐직경이 클수록 분무선단속도가 빠르며 직경이 작을수록 분무선단속도가 느린 것을 알 수 있고, 분무의 형태가 천이점 이후 완전히 미립화 되어 액적의 분열과정을 살펴볼 수 있는 분무의 전형적인 예라 할 수 있다.



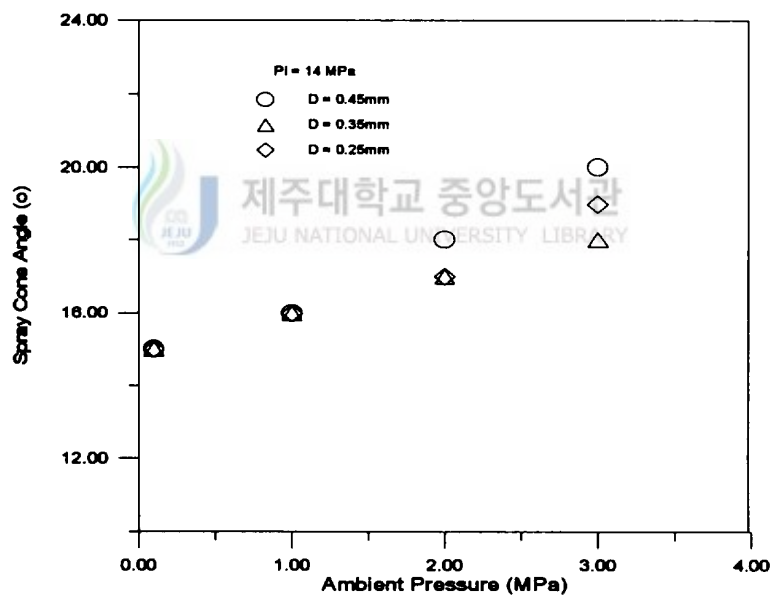
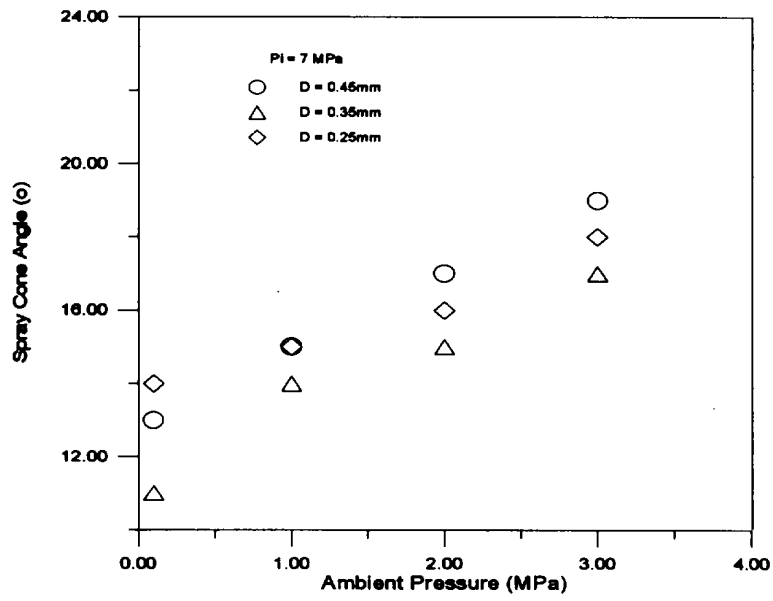


Fig. 17 Influence of nozzle diameter on spray cone angle for ambient pressure

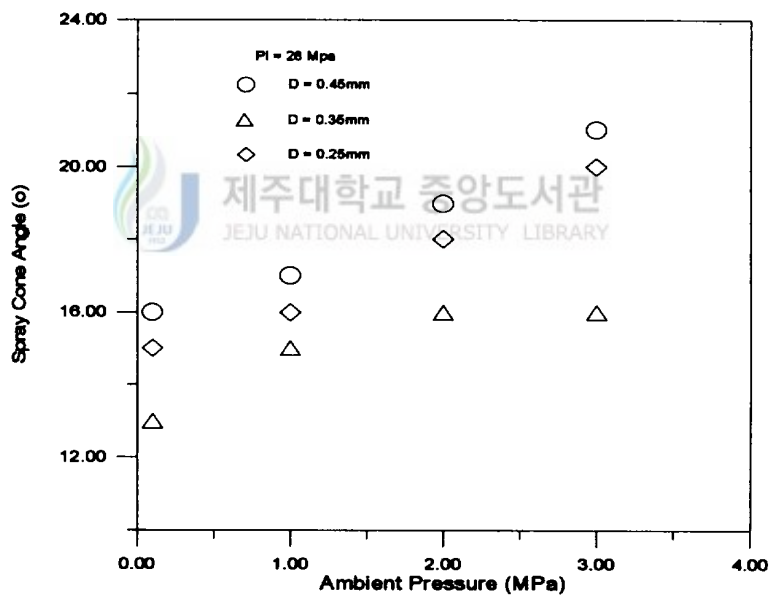
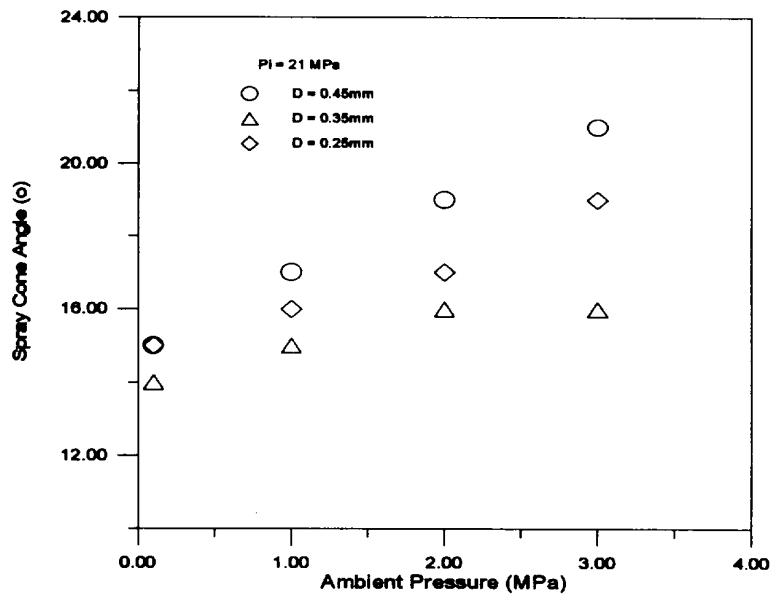


Fig. 18 Influence of nozzle diameter on spray cone angle for ambient pressure



$t_1 = 2.1 \text{ ms}$
 $t_2 = 4.5 \text{ ms}$
 $P_1 = 7 \text{ MPa}$
 $P_a = 3 \text{ MPa}$
 $D = 0.45 \text{ mm}$

$t_1 = 2.7 \text{ ms}$
 $t_2 = 6 \text{ ms}$
 $P_1 = 7 \text{ MPa}$
 $P_a = 3 \text{ MPa}$
 $D = 0.35 \text{ mm}$

$t_1 = 3.5 \text{ ms}$
 $t_2 = 9 \text{ ms}$
 $P_1 = 7 \text{ MPa}$
 $P_a = 3 \text{ MPa}$
 $D = 0.25 \text{ mm}$

Photo. 9 Photographs of fully developed spray

IV. 결 론

본 연구는 노즐형상비(L/D)가 5이고 노즐직경이 0.25, 0.35, 0.45mm인 단공노즐을 사용하여 분사압력(7, 14, 21, 28MPa)과 분위기압력(0.1, 1, 2, 3MPa)을 변화시킬 때 노즐직경이 디젤분무의 분산과정에 미치는 영향을 실험적으로 구명하였다. 특히 Double flash에 의해 디젤분무를 가시화하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분무류는 교란되지 않은 미분열액주, 교란된 액주 및 Chaotic한 분열과정을 갖는 영역으로 구분되며 이들은 우선적으로 추월현상에 의해 분열을 주도한 후 주위공기와의 마찰과 액적상호간의 충돌로 미립화 되면서 분산이 추진된다.

2. 노즐직경에 따른 분무선단 도달거리는 대기압하에서는 노즐직경이 0.25mm 일때가 가장 빨리 성장하며, 분사압력이 7MPa에서 분위기압력을 1, 2, 3MPa로 상승시킬 경우는 노즐직경이 0.45, 0.25, 0.35mm순으로 성장하고, 분사압력이 28MPa에서는 노즐직경이 0.25mm가 약 1ms 이전까지는 빨리 성장하나 그 이후는 분무의 천이점발생으로 인하여 직경이 다른노즐보다 늦게 성장한다. 분무의 성장은 분사압력이 클수록 증가하며, 천이점은 동일한 분사압력에서는 분위기압력이 클 수록 일찍 발생한다.

3. 노즐직경에 따른 분무선단속도는 분위기압력이 3MPa하에 분사압력이 7MPa에서는 0.25, 0.45, 0.35mm 순이지만, 분사압력이 28MPa에서는 0.25, 0.35, 0.45mm 순으로 변하여 분위기압력과 분사압력이 높을수록 천이점은

일찍 발생하고, 속도는 완만히 떨어지며 미립화도 잘된다.

4. 분위기압력이 3MPa일 때 실험범위의 분사압력에서 분무선단속도에 따른 천이점은 노즐직경이 0.25mm 일때가 가장 일찍 발생하고 분사압력이 높아짐에 따라 0.35, 0.45mm 순으로 나타난다. 같은 조건에서 분무선단속도는 분사압력이 7, 14MPa 일 때는 급히 떨어지나 21, 28MPa에서는 점차 완만히 떨어진다.

5. 분무각은 분사압력과 분위기압력이 증가할수록 커지고 분위기압력이 대기압과 1MPa에서는 시간경과에 따라 점차 감소하지만 2, 3MPa로 갈수록 분무선단도달거리의 감소로 인하여 일정하거나 조금씩 증가한다.

6. 분무원추각은 분위기압력이 높을수록 증가하고 노즐직경이 0.45, 0.25, 0.35mm 순으로 크다.



V. 참고문헌

- 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.
- 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実験的研究", 同志士大學博士學位論文.
- Dent, J. C., 1971, "A Basis for the CoMParison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration", SAE Paper, No.710571.
- Giffen, E., 1953, "The Atomization of Liquid Fuels", John Wiley and Sons Inc, pp. 18-29.
- 河鐘律, 1984, "ディーゼル噴霧の形式およびその周囲氣體の流動と着火れとの關係に関する研究", 慶應義塾大學 工学博士學位論文.
- 許鐘哲, 1992, "單孔 디젤 노즐의 微粒化 形成機構에 관한 實驗的 研究", 仁荷大學校 工学博士學位論文.
- 허종철, 고경남, 1996, "분위기 압력이 디젤분무특성에 미치는 영향", 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제7권 1호 pp. 35-44.
- 허종철, 구자왕, 이규영, 양옥룡, 1991, "디젤분무의 초기분산과정에 관한 실험적연구" 한국자동차공학회 논문집, 13권 2호 pp. 42-49.
- 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.

- 日本機械學會, 昭和 61年 4月, “機械工學便覽 - 應用編 - B7 內燃機關”,
pp. B7-77.
- 구자예, 정홍철, 1994, “노즐부근에서의 비정상분무 거동”, 한국자동차공학회
논문집, Vol 2, pp. 100-111.
- McCarthy, M. J. and Molly M. A., 1974, “Review of Stability of Liquid
Jets and the Influence of Nozzle Design”, Chem. Eng. J.
Vol. 7, pp. 1-20.
- Reitz, R. D., 1978, “Atomization and other Breakup Regimes of a Liquid
Jet”, Ph. D. Thesis, Princeton University.
- Reitz, R. D., F. V. Bracco, 1982, “Mechanism of breakup of round liquid
jets”, Phys. Fluids, pp. 233-249.
- 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.
- 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.
- Wakuri, Y. and Takasaki, K., 1988, “Influence of High Pressure Injection
in a Diesel Engine with a Newly Developed Accumulator Type
Fuel Injection System”, ICLASS-88, pp. 383-389.
- Zanelli, S., 1988, “Behavior of a Liquid Jet Near the Nozzle”, ICLASS-88,
pp. 1-14.

감사의 말씀

이 논문을 완성하기 까지 끊임없이 지도하고 격려하여 주신 허 종철 지도교수님께 깊은 감사를 드리며, 항상 친절히 가르쳐 주시고 많은 이해와 관심으로 돌봐주신 고 김 만수 교수님, 권 기린 교수님, 김 귀식 교수님, 현 명택 교수님, 임 중환 교수님께도 감사드립니다. 또한 실험장치의 회로를 만드는데 도움을 주신 전자공학과 고 성택 교수님께도 고마움을 표합니다.

본 연구의 실험기간중 실험 및 자료정리 등 여러가지 많은 도움을 주신 고 경남 선생님과 강 재택 선생님 기계공학과 대학원생들에게도 감사드립니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 조용히 지켜보면서 어려움을 참고 견디며 도와준 아내 용숙에게도 고마움을 전하며, 탈없이 자라준 정호, 현숙과 이 기쁨을 함께하고자 합니다.

1996. 12.

문 창 은