

碩士學位論文

분사압력 분위기압력이 디젤분무특성에 미치는 영향



濟州大學校 大學院

機械工學科 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이 창 수

1999年 12月

분사압력 분위기압력이 디젤분무특성에 미치는 영향

指導教授 許 鐘 哲

李 昌 洙

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.



제주대학교 중앙도서관

JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1999年 12月

李昌洙의 工學碩士學位 論文을 認准함.

審査委員長 권 기 린

委 員 권 영 태

委 員 許 鐘 哲

濟州大學校 大學院

1999年 12月

**Effects of Injection Pressure and
Ambient
Pressure on Diesel Spray
Characteristics**

Chang-Su Lee

(Supervised by professor Jong-Chul Huh)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

**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**

1999. 12.

목 차

SUMMARY	1
I. 서 론	1
II. 실험장치 및 방법	4
2-1. 연료분사 실험장치	4
2-2. 사진촬영 방법 및 실험조건	9
III. 실험결과 및 고찰	13
3-1. 분사압력, 분위기압력에 의한 분무의 발달과정	13
3-2. 분무의 분열기구 관찰	33
VI. 결 론	37
V. 참고문헌	39

SUMMARY

This experimental study has been conducted to investigate the effect of injection pressure on spray characteristics under the parameter of ambient pressure through a single hole nozzle that aspect ratio(L/D) is 5 and diameter is 0.35mm. Injection pressure increases from 7 to 28MPa and ambient pressure increases from 0.1 to 3MPa. The double flash method was used to visualize diesel sprays.

The results obtained in this study are as follows.

- 1) The spray being injected under the atmospheric pressure is developing along the straight line of the slope of 1.0 with the lapse of time. It is concluded that the growth of the spray being injected under the atmospheric pressure is only dependant on the injection pressure.
- 2) When the injection pressure is increased under high ambient pressure, Tip penetration is developing along the straight line of the slope of 1.0 before the transition point and then the slope of 0.5. The surface waves become smaller. As a result, the number of droplets are increased.
- 3) If the ambient pressure is increased, the spray angle is increased and the transition point of spray tip penetration occurs earlier. The breakup

process of the spray becomes especially more active for about 0.3msec before and after the transition point.

- 4) The disintegrating mechanism of the liquid spray is affected by two combined effects: a) friction forces between the surface waves generated at the surface of the liquid column and the ambient gas, b) collisions of liquid droplets and ligaments by spray overtaking.



I. 서 론

디젤기관은 높은 열효율과 구조적인 잇점으로 인해 여러 분야에 사용되고 있지만 디젤엔진에서 발생하는 soot와 NOx등의 배기가스 배출에 대한 문제점이 지적되고 있다. 분사된 연료는 연료의 미립화, 연료의 증발 과정을 거쳐 혼합기의 형태로 연소하게 되며, 연소기간동안 연료의 미립화가 열효율 및 배기가스 생성에 가장 중요한 인자가 되고 있다.

디젤기관의 연료미립화 과정은 크게 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계는 연료의 분사압력, 인젝터 팁 형상 등의 인젝터 설계요소에 의해 영향을 받는 인젝터 출구 부근에서 발생하는 초기 미립화 과정이고, 두 번째 단계는 분무가 주위 기체를 관통하고 성장하는 동안 주위 기체의 유동과 연료액적들의 상호작용에 의존하는 미립화 과정이다. 이와 같이 분산은 난류유동의 영향, 주위 기체와의 마찰 그리고 분사액체 및 주위 기체의 조건(밀도, 점도, 표면장력 등), 노즐의 형태(L/D) 등의 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다.

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 (1984)에 이르러 액체분류의 분무류 영역을 구분하였다. 이러한 분무류 영역의 발달과정을 구명하기 위해 Dent (1971), Hiroyasu (1984) 등은 분무선단도달거리가 분사개시로부터 경과시간의 1승에 비례하는 영역과 0.5승에 비례하는 영역, 즉 발달과정의 분무와 완전히 발달된 분무와의 천이시간의 존재와 노즐직경과 형상비가 다른 노즐을

사용하여 분사압력에 따라 Breakup length를 예측하였다.

Scott (1976)는 선회가 없는 직접분사식 연소실을 갖는 기관은 전적으로 분사된 연료와 공기와의 혼합이 열효율 및 연소상태를 제어하기 때문에 가장 적절한 연소조건은 분사된 연료의 분무가 착화지연시간 전 75%에서 $25\mu\text{m}$ 이하의 액적을 생성시켜야 하며, 이때 분무선단은 벽면에 도달해야 한다고 주장하였다.

千田二郎 (1984), 하 (1984) 등은 순간광원을 이용한 직접사진촬영에 의해 분사초기의 분무형성과정, 액적분포 등을 조사, 연구하였다.

하 (1984)는 분위기압력의 변화에 따른 분무특성을 순간광원을 이용한 직접사진촬영법에 의해 분무선단도달거리와 분무각을 측정하여 분무발달 과정을 구명하였고, 열선유속계를 사용하여 성장과정의 분무 주위에 유동분포를 연구 하였다.

Zanelli (1988)는 노즐직경을 일정하게 하고 오리피스스의 길이를 변화시켜 노즐내 유동에서 속도의 재구성이 분류의 초기교란에 영향을 미쳐 결국 완전히 발달된 분무의 상태가 달라지며, 노즐 형상비에 따른 교란되지 않은 미분열 액주를 예측하였다. 그리고 연료분사시 노즐내 니어들양정의 변화가 연료의 유도단면을 변화시켜 분류가 가속, 감속되는 분사계의 천이를 확인 하였다.

허등 (1991)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 액주로부터 시간경과에 따른 분열과정을 연구하였다.

Takahashi등 (1994)은 대기압과 분위기압력하에 확대 Shadowgraphy로 분무초기의 고압 디젤분무형상을 분석하였는데 분사후 0.3ms까지는 분무선단이 무딘영역(Insensitive region)이 있고, 이것은 분사압력을 높이면 짧아지

며 분무에서 발생한 난류유동과 관련이 있음을 보고했다.

허등 (1996)은 분위기압력이 디젤분무특성에 미치는 영향을 구명하기 위해 단공노즐(L/D=3.89)을 사용하여 일정압력으로 연료를 분사시켜 분사압력과 질소가스를 충전한 분위기압력을 변수로 하여 나노라이트(nanolite)와 스트로보스코프(stroboscope) 2개의 광원을 사용한 Double flash에 의해 분무선단도달거리, 분무선단속도, 분무원추각 등을 직접 측정하고 분위기압력이 디젤분무에 미치는 영향을 구명하였다.

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 영향은 최근에 연구되어 왔다.

실용 디젤기관의 연료분무는 비정상 간헐분무이므로 연료분무의 일관성있는 해석을 위해서는 분사율이 시간에 따라 일정한 정상분무로 유지되어야 한다. 이 상태를 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 0.35mm인 단공노즐을 사용하여 디젤연료를 일정압력으로 분사시켜 분사압력, 분위기압력을 변화하면서 노즐직경이 디젤분무특성에 어떠한 영향을 미치는가를 Double flash에 의한 사진촬영에 의해 가시화하여 분무선단도달거리, 분무속도, 분무각등을 구하였고 분무발달과정 및 분열기구를 보다 정량적으로 해석하기 위하여 확대사진촬영을 행하여 디젤연료의 분무, 분산특성에 관한 실험적 기초자료를 얻고자 한다.

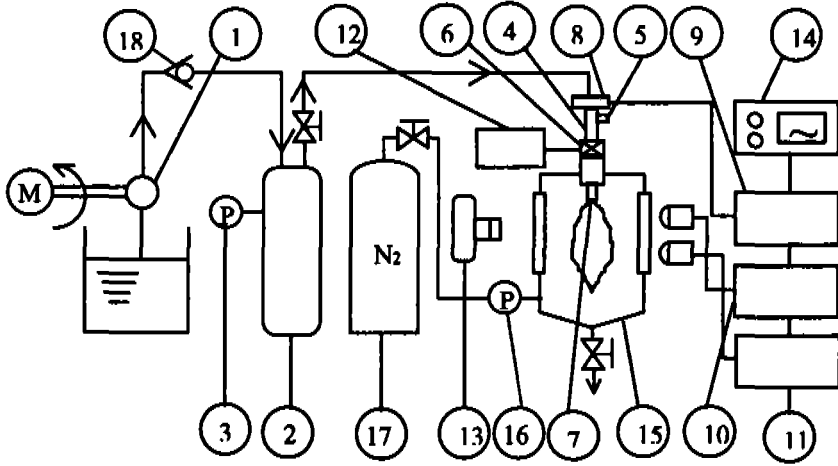
II. 실험장치 및 방법

2-1. 연료분사 실험장치

본 연구에 사용된 연료분사 실험장치는 차량용 6기통 디젤엔진에 사용되는 분사펌프를 이용하여 연료분사 시스템, 연료분사 제어장치, 신호지연장치 및 스트로보스코프와 나노라이트를 광원으로 하는 사진 촬영장치로 구성하였다. 본 실험에 사용한 실험장치의 개요도는 Fig. 1에 도시하였다. 자동차용 분사펌프를 가변모터에 연결, 150rpm에서 1,800rpm까지 회전수를 변동시킬 수 있게 하여 풀린저펌프 1개만을 연료의 가압장치로 사용하였고 나머지 5개는 다시 연료탱크로 복귀시켰다.

연료탱크내의 필터를 통과하여 분사펌프에 의해 가압된 연료는 분사펌프와 분사노즐 사이에 설치된 제 1, 제 2 축압실에 저장된다. 이들은 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 5.11 l이며 주로 풀린저 펌프에서 고압 연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 하고, 분사노즐 입구에 설치된 제 2축압실은 최종적으로 디젤연료가 노즐에서 분사되는 동안의 설정압력의 강하와 맥동을 가능한 없애주는 역할을 한다.

본 실험에 사용한 연료분사 제어장치는 노즐홀더의 상부에 솔레노이드(6)를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드를 작동시키지 않는 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니들들을 압착하고 있는 스프링들의 상부판을 끌어 당기게 되



- | | |
|-----------------------------------------|-----------------------------|
| 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. Photointerrupter | 17. N ₂ Gas bomb |
| 9. Double pulse generator delay circuit | 18. Check valve |

Fig. 1 Experimental apparatus

며, 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.

또한 연료 분사압력은 노즐홀더의 연료 입구측에 부착된 압력변환기(5)로부터 디지털 지시기에 의해 계측되며 축압실과 분사노즐 사이에 아나로그 압력계를 부착하여 분사압력을 보다 정확하게 조정하였다.

그리고 풀러저펌프와 제 1 축압실사이에 체크 밸브(18)를 설치하여 분사압력을 28MPa로 올리는데 무리가 없도록 하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 단공노즐의 상세도이며 노즐직경이 0.35mm이고 노즐형상비는 5로 하여 실험을 행하였다. Fig. 3은 전자밸브의 작동시간을 제어하기 위한 노즐 구동장치의 제어회로도이다. 노즐구동장치의 제어는 분사시간을 설정한 후에 작동스위치를 누르면 구동장치를 거쳐 솔레노이드 밸브에 전류가 흘러 작동되도록 하였으며, 설정기간 동안 두 번 지연된 후 제어회로에 의하여 솔레노이드의 전류를 차단하도록 하였다. 이 장치의 설정시간은 0.001ms로부터 99ms까지 조절이 가능하다.

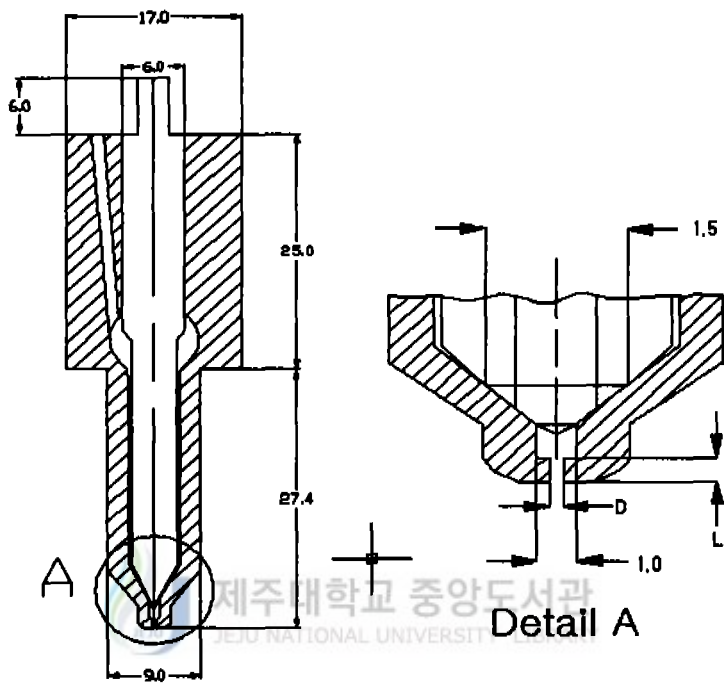


Fig. 2 Detail of single hole nozzle

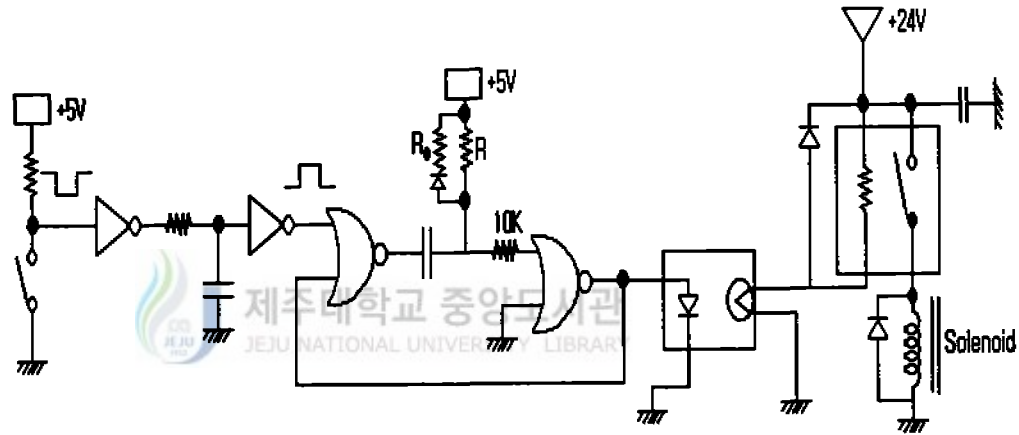


Fig. 3 Nozzle driving circuit

2-2. 사진촬영 방법 및 실험조건

디젤 연료유 미립화현상을 가시화하는 방법에는 직접사진, 홀로그래피 및 슈리렌사진 등이 있으나 본 연구에서는 투과광에 의한 순간 사진촬영법에 의해 분무의 미립화현상을 가시화하여 관찰하였고 이를 해석하였다.

노즐을 통하여 분사된 분무가 분사직후로부터 임의시간 경과후까지의 분무형상을 촬영하기 위한 분사개시 신호는 노즐 니들(Nozzle needle)의 상단부와 접촉하고 있는 전자밸브의 스피들(Spindle) 상단사이에 위치한 포토인터럽터(Photo-interrupter)의 신호를 이용하였다. 노즐 제어장치에 의해 전자밸브가 작동하면 스피들 상단이 상승하여 포토인터럽터의 빛을 차단하는 순간에 분사개시신호가 발생하게 되어 Fig. 4에 표시한 회로로 입력된다.

Fig. 4는 분사개시 초기신호 발생장치로써 포토인터럽터의 감광부와 수광부사이에 전자밸브의 스피들에 의해 초기신호가 발생하게 되면 구형파의 시그널을 발생시키는 전기 회로도이다. 이 미약하고 불안정한 초기신호는 회로 중의 트랜지스터와 슈미트 트리거소자를 지나면서 증폭되어 보다 정확한 레벨의 신호로 바뀐 후 Fig. 4에 도시된 신호발생 지연회로에서 재 증폭되고 설정된 시간만큼 두 번 지연된 후에 스트로보스코프와 나노라이트에 입력되어 적정 노출광량으로 순간 발광시킨다. 이 때 카메라는 B-셔터 상태이므로 이 두 번의 순간광을 받아들여 동일한 분무의 발달상태가 두 번 필름상에 감광되어 촬영된다.

Photo. 1은 Double flash에 의해 펄스가 두 번 발생하는 오실로스코프 사진이다. 사진에서 하단펄스는 분사개시와 함께 발생된 발진신호이며 상단펄스는 그 신호를 받아서 지정된 시간만큼 두 번 지연되는 펄스이다.

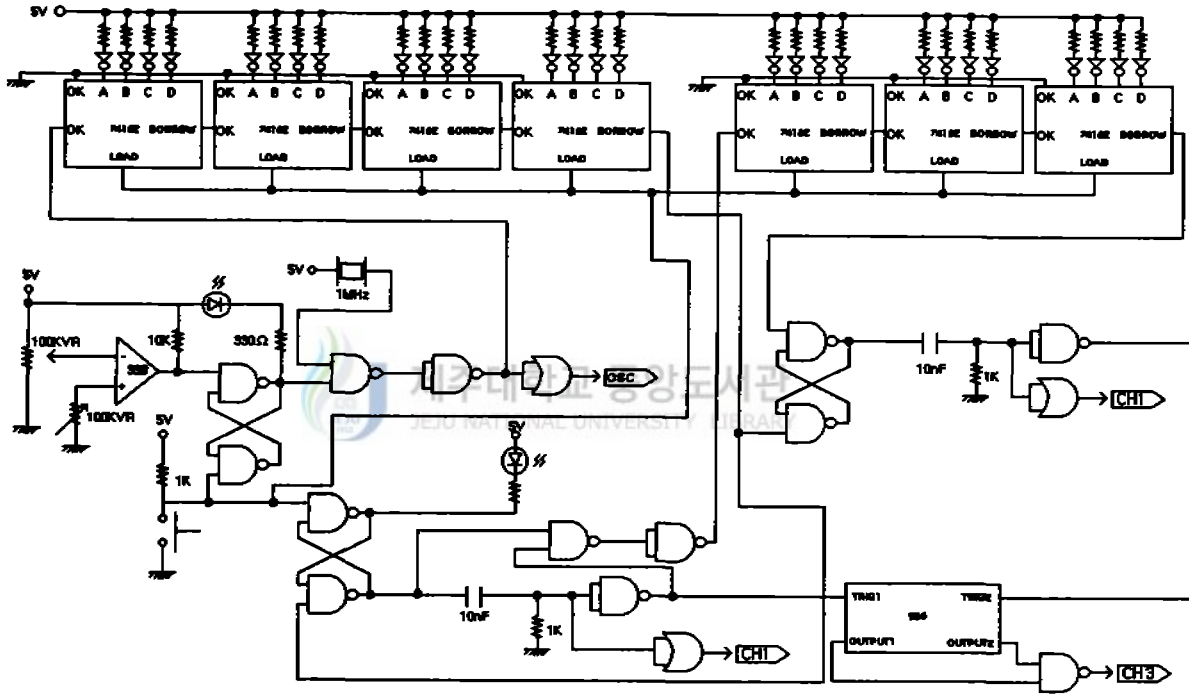


Fig. 4 Double pulse generator delay circuit

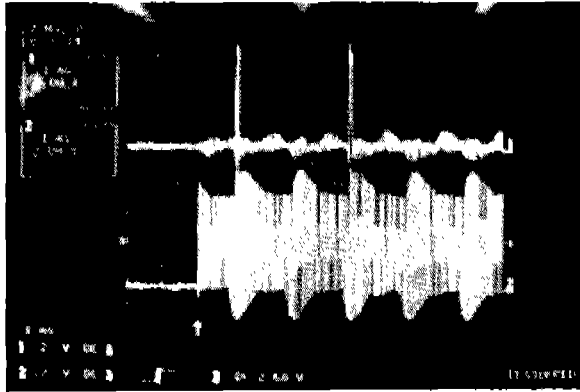


Photo. 1 Photograph of double pulse signal from delay circuit

디젤분무는 분사속도가 고속이므로 정지된 상을 촬영하기가 상용 μs 단위 스트로보스코프 광원으로는 곤란하므로 본 연구에서는 발광시간이 17ns인 나노라이트를 분무확대 사진촬영에 사용하였다. 이 때 확대촬영용 렌즈는 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 신호지연장치로부터 입력신호를 받아 발광되는 순간 분무가 필름에 감광되게 하였다. 또한 촬영된 분무사진은 같은 비례척으로 촬영된 스케일로 분무선단도달거리, 분무속도등을 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=0.35,)
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. 분사압력, 분위기압력에 의한 분무의 발달과정

Photos. 2, 3, 4는 직경이 0.35ms이고 노즐형상비가 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력 및 분위기압력을 변수로 하여 촬영한 Double flash사진이다. 1차광원으로 나노라이트를, 2차광원으로 스트로보스코프를 사용하였다. 따라서 사진한장에 나와 있는 분무는 동일분무이다.

Photo. 2는 분사압력이 7MPa인 조건으로 분위기압력이 1MPa인 용기내로 분사시켰을 때 분무의 발달과정을 촬영한 순간사진의 일례이며, 디젤분무의 시간경과에 따른 발달과정을 보여주고 있다.

t_1 에서의 분무는 분사개시후 0.2ms에서 고정하여 촬영한 것으로 실제길이는 4mm이고 교란되지 않은 액주임을 알 수 있으며, 분무의 길이는 어느것이나 일정하므로 회로가 정상적으로 작동하고 있다. t_2 는 0.6ms에서 1.8ms까지 지연된 시간이며, t_2 가 1.6ms일 때 분무의 길이는 50mm이다. 분무선단 도달거리는 t_2 의 시간경과에 따라 발달하고 있으나 1.0ms를 지나 1.2ms까지를 보면, 분무선단도달거리가 짧아지면서 체적이 급격히 증가된 것을 볼 수가 있는데 이부분에서 천이가 일어나는 것으로 보여지며 천이점을 지나면서 분무의 분열이 촉진되고 있고 이후 분무가 완전히 발달되고 있는 과정을 이 사진에서 명확하게 보여주고 있다.

Photo. 3은 분사압력이 28MPa이고 분위기압력이 2MPa인 용기내로 분사시켰을 때의 사진으로서 분사압력과 분위기압력을 높였을 때의 분무사진이다.

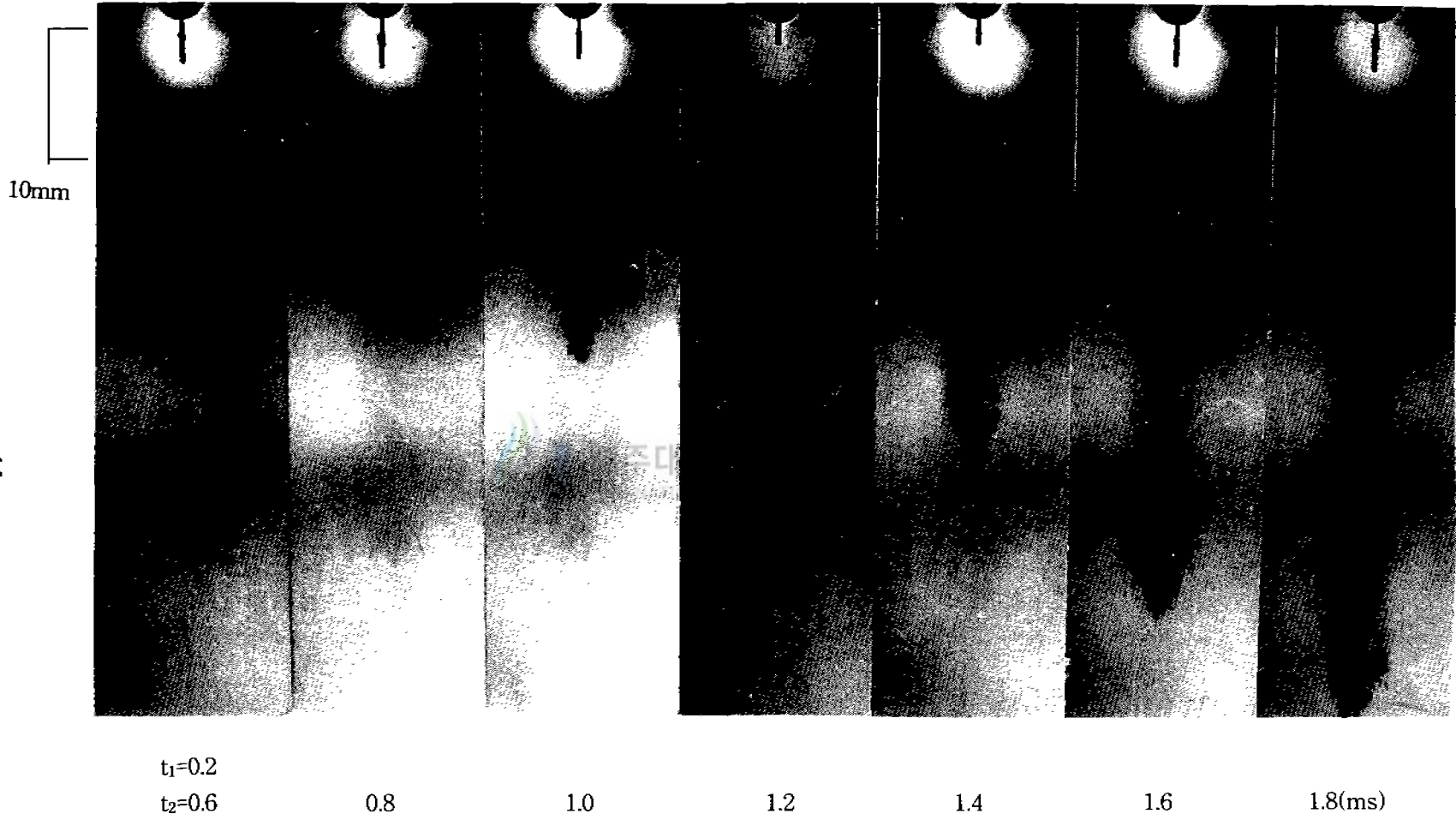
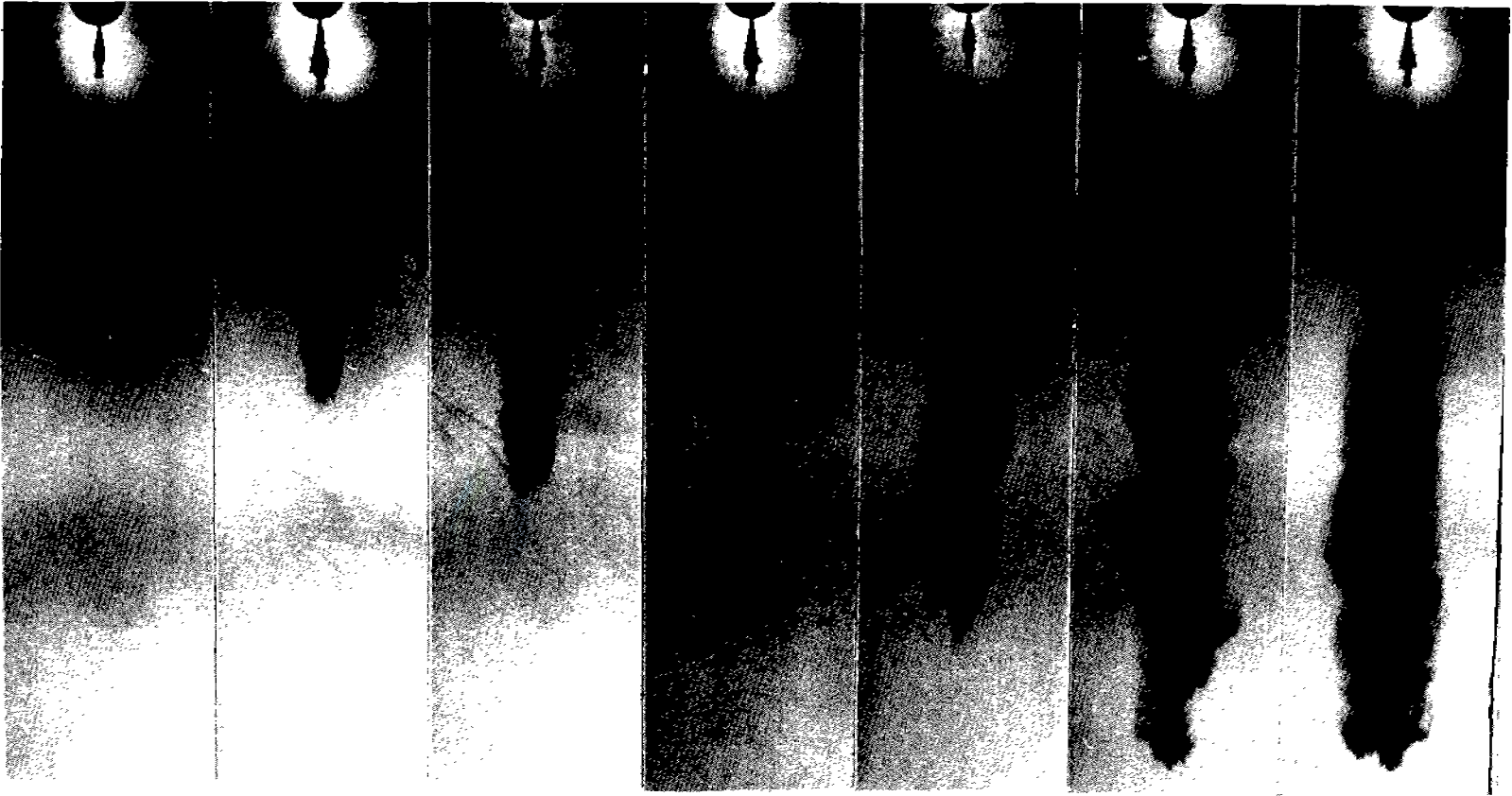


Photo. 2 Photographs of developing spray from injection start
($P_i=7\text{MPa}$, $P_a=1\text{MPa}$, $D=0.35\text{mm}$)

10mm



$t_1=0.1$

$t_2=0.3$

0.4

0.5

0.6

0.7

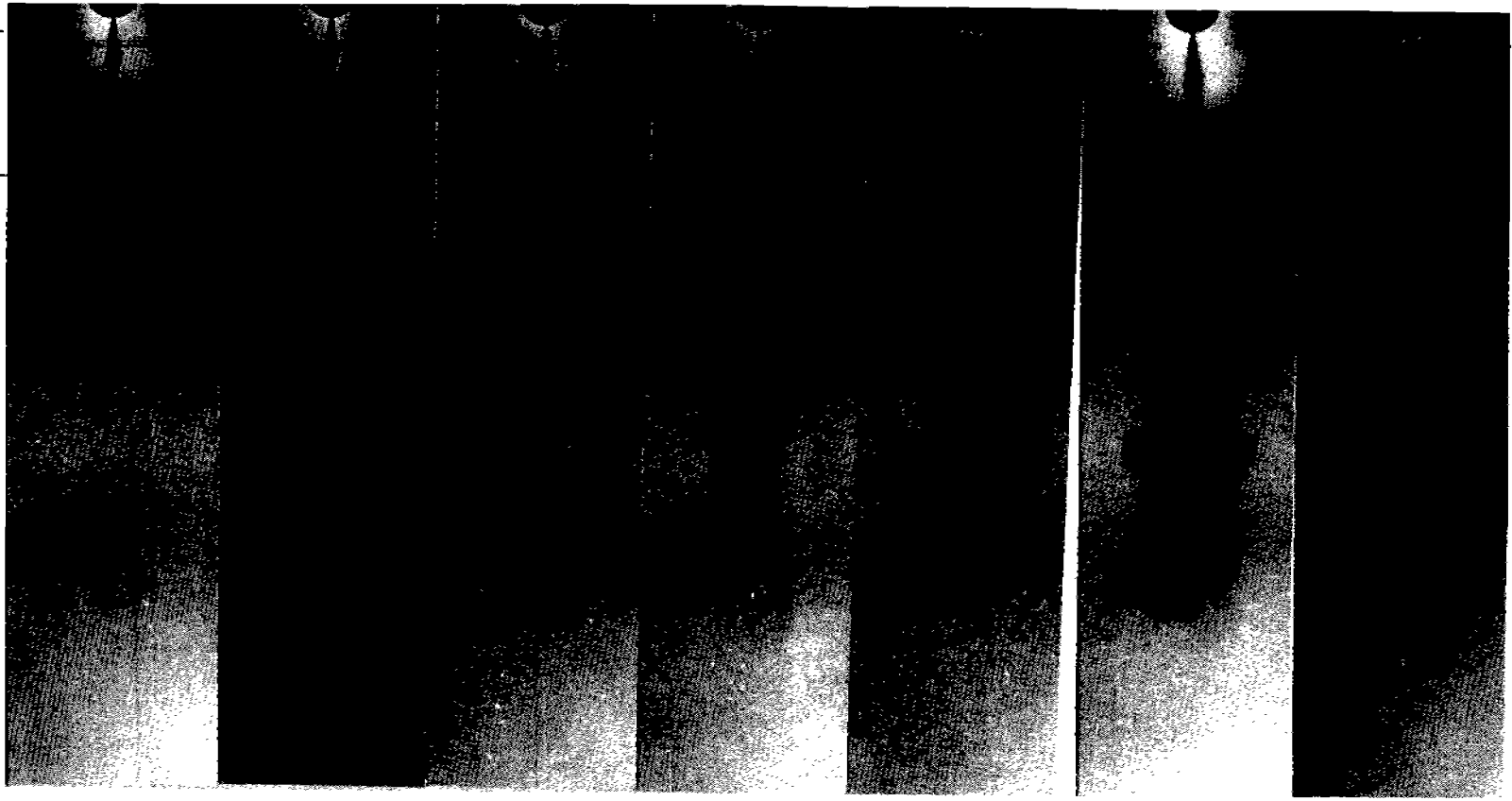
0.8

0.9(ms)

Photo. 3 Photographs of developing spray from injection start
($P_i=28\text{MPa}$, $P_a=2\text{MPa}$, $D=0.35\text{mm}$)

10mm

- 16 -



$t_1=0.1$
 $t_2=0.2$

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9(ms)

Photo. 4 Photographs of developing spray from injection start
($P_i=28\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.35\text{mm}$)

t_1 일 때의 분무는 분사개시후 0.1ms에서 고정하여 촬영한 것으로 분무는 교란되지 않은 액주임을 알 수 있고, t_2 는 0.3ms에서부터 0.9ms까지 지연된 시간이다. Photo. 2와 비교했을 때 분무각의 증가와 더불어 동일시간대에서 분무선단도달거리가 많이 증가했음을 보여주고 있다. t_2 가 0.4ms 이후 분무의 경계부분에서부터 분열이 시작되어서 액사 및 액적으로 떨어져 나가고 있다. 또 한 t_2 의 시간이 0.8ms에서 0.9ms일 때 분무속도가 현저히 떨어지면서 체적이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데 이 때가 천이가 일어나고 있는 시간이라고 사료된다. 천이점 이후 분무의 분열이 활발히 진행되어 분무가 완전히 발달된다고 보여지나, 이 사진에서는 천이점 이후의 분열과정을 보여주고 있지 못하다.

Photo. 4는 분사압력이 28MPa이고 분위기압력이 3MPa인 조건에서 시간경과에 따른 분무사진이다. Photo. 3과 비교해 볼 때 동일분사조건에서 분위기압력을 증가시켰다. t_2 가 0.7ms 이후 급격히 분무의 속도가 떨어지고 있다. 분위기압력의 영향으로 인해 떨어진 분무의 속도는 반경방향의 분무로 분열되고 이러한 영향은 분무각의 증가로 나타는데, 이 지점에서 천이가 일어나고 있음을 알 수 있다.

Figs. 5-16은 직경이 0.35mm이고 노즐형상비가 5인 노즐을 사용하여 분사압력이 7, 14, 21, 28MPa이고 분위기압력이 0.1, 1, 2, 3MPa인 상태의 용기내로 분사시켰을 때 분사압력에 따른 분무선단도달거리와 분무선단속도 및 분무각을 로그-로그 그래프로 나타낸 그림이다.

Fig. 5는 분위기압력이 0.1MPa일 때 분사압력에 따른 분무선단도달거리를 비교한 그래프이며, 분사압력이 높을수록 분무선단도달거리가 상승되었음을 보여준다. 이 그래프에서 분무선단도달거리는 각 분사압력에 관계없이 기울기가 약 1인 직선으로 나타남을 알 수 있다. 이것으로 미루어 대기압하에서 분무

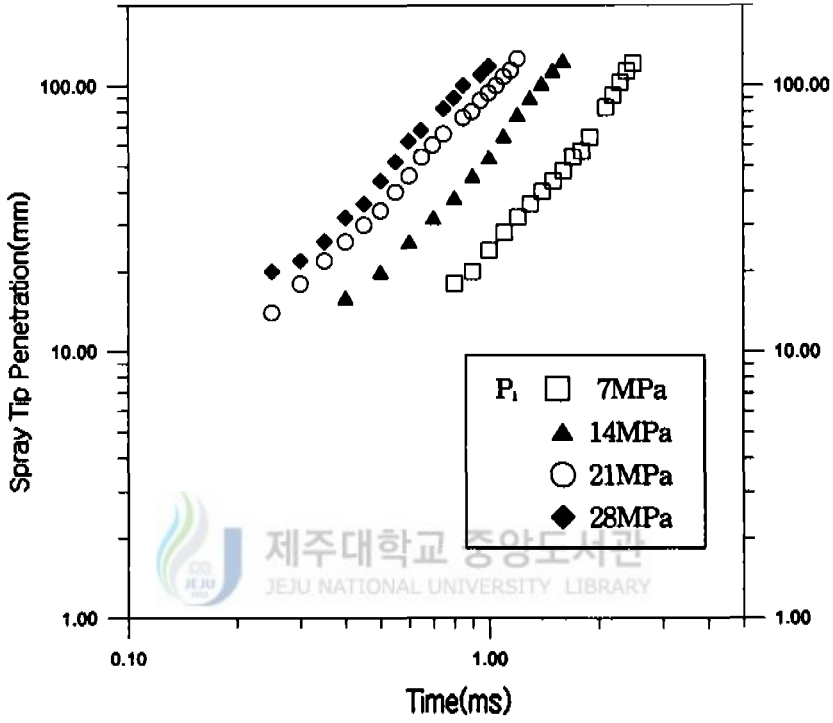


Fig. 5 Influence of injection pressure on spray tip penetration at $P_a=0.1\text{MPa}$

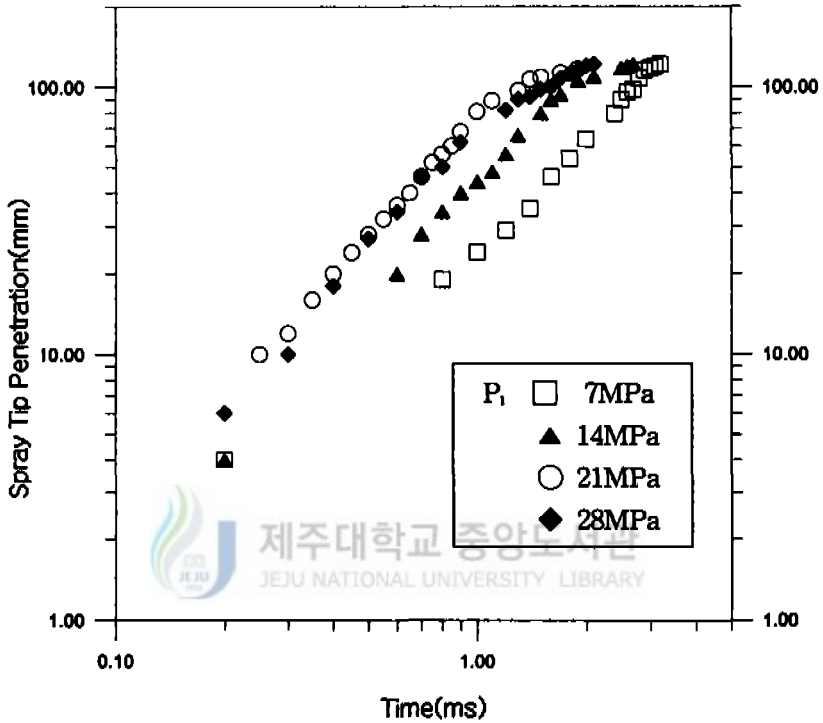


Fig. 6 Influence of injection pressure on spray tip penetration at $P_a=1\text{MPa}$

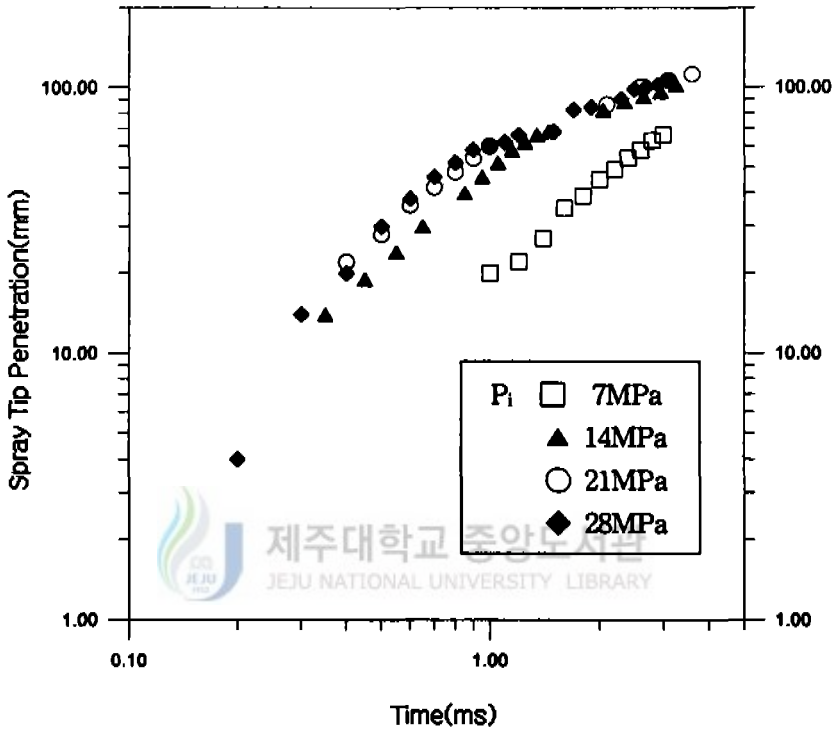


Fig. 7 Influence of injection pressure on spray tip penetration
at $P_a=2\text{MPa}$

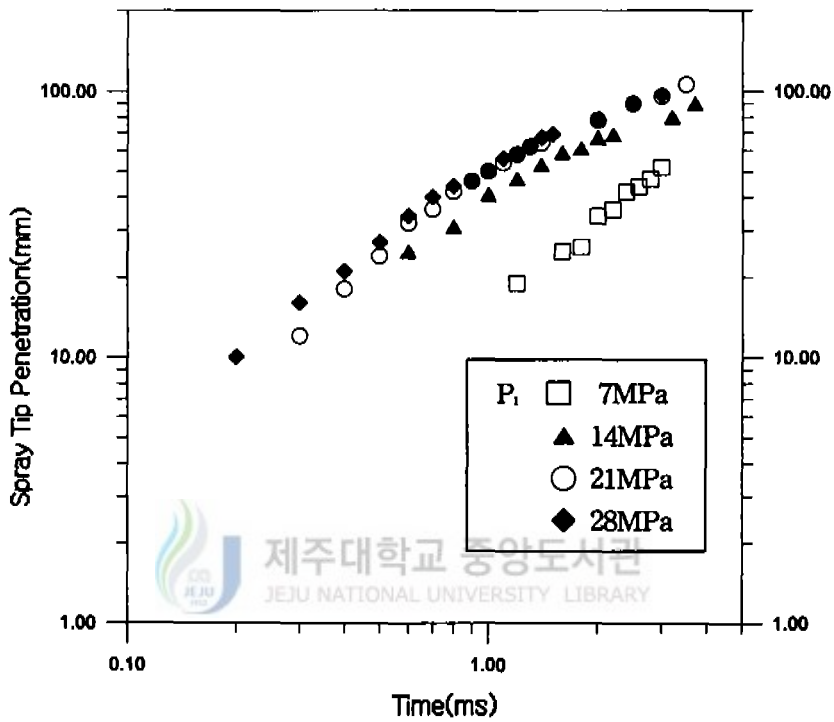


Fig. 8 Influence of injection pressure on spray tip penetration at $P_a=3\text{MPa}$

의 성장은 분사압력에만 의존하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 분위기압력이 1MPa일 때 분사압력에 따른 분무선단도달거리이다. 분사직후 분무는 기울기가 약 1인 직선으로 발달되다가 분위기압력의 영향으로 기울기가 점차 완만해지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 분위기압력이 2MPa에서 분사압력에 따른 분무선단도달거리이다. 전체적으로 약간 완만한 형태의 기울기를 보이고 있으며, 천이점을 지나면서 기울기가 약 0.5인 직선으로 발달되고 있고, 또한 분무선단도달거리가 짧아지고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 분위기압력이 3MPa에서의 분무선단도달거리이고, 분사초기부터 기울기가 약 0.5인 직선으로 발달되고 있다. 이상에서와 같이 분위기압력 하에서 각 분사압력에 따른 분무선단도달거리를 비교하였는데, 분사압력에 비례하여 분무선단도달거리는 발달하고 있고, 분위기압력에 반비례하는 것을 알 수 있었다.

Figs. 9, 10, 11, 12는 분위기압력이 0.1, 1, 2, 3MPa일 경우 분사압력에 따른 분무속도이다.

Fig. 9는 대기압하에서 분무속도이다. 분사압력이 7MPa일 경우 2.5ms를 전후해서 분무속도가 감소되고 있는데 이 부분에서 천이가 일어나고 있는 것을 알 수 있고, 분사압력이 14MPa에서는 1.4ms부근에서 천이가 일어나는 것으로 보인다. 분사압력이 21, 28MPa에서는 0.6ms에서 0.8ms사이에서 천이가 일어나고 있다. 전체적으로 분사압력이 높을수록 분무속도는 증가된 것을 알 수 있다.

분위기압력이 1MPa인 Fig. 10에서 분사압력이 7MPa일 때 분무속도는 분사직후 서서히 증가하다가 1.8ms를 지나면서 급격히 떨어지고 있는 것을 볼 수 있는데 여기에서 천이가 발생하는 것으로 사료되며 이때부터 반경방향으로

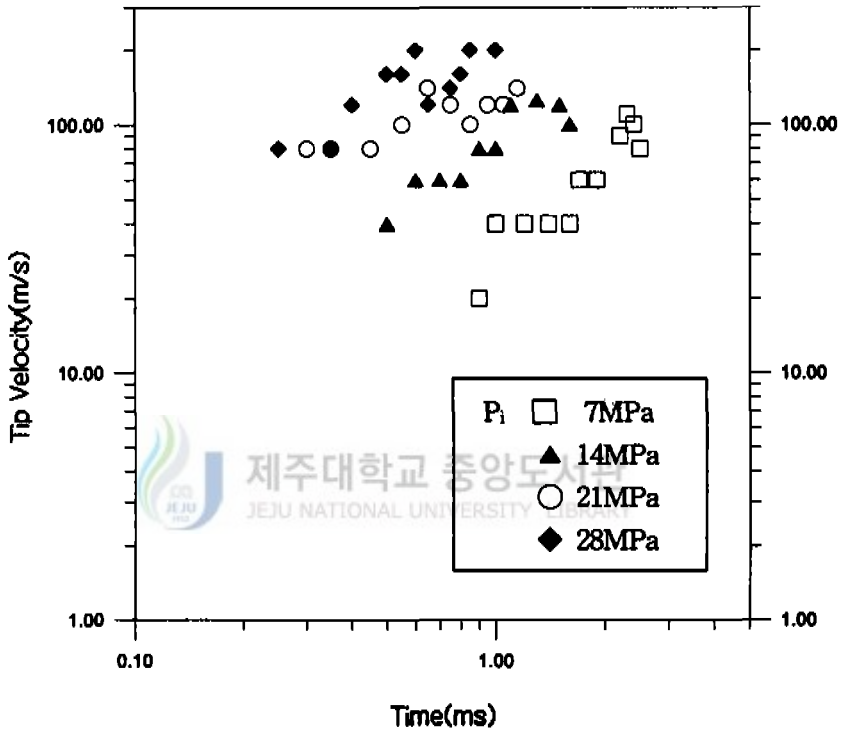


Fig. 9 Influence of injection pressure on spray tip velocity at $P_a=0.1\text{MPa}$

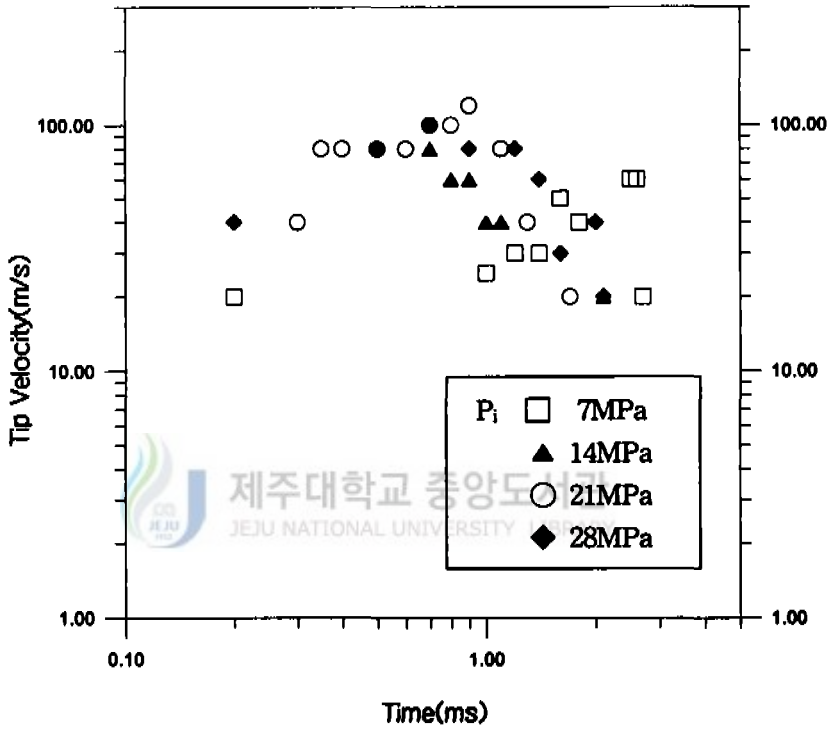


Fig. 10 Influence of injection pressure on spray tip velocity at Pa=1MPa

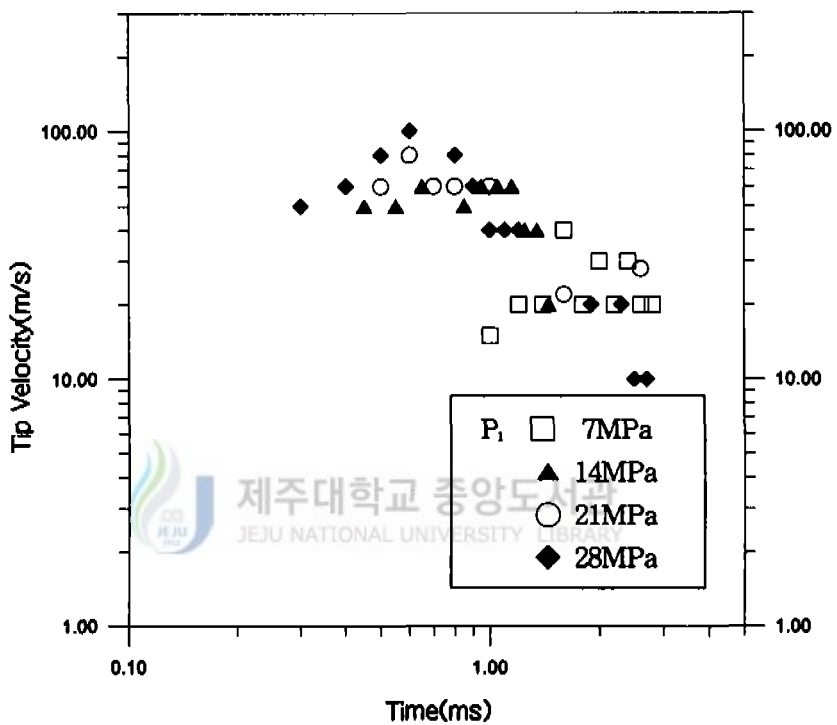


Fig. 11 Influence of injection pressure on spray tip velocity at $P_a=2\text{MPa}$

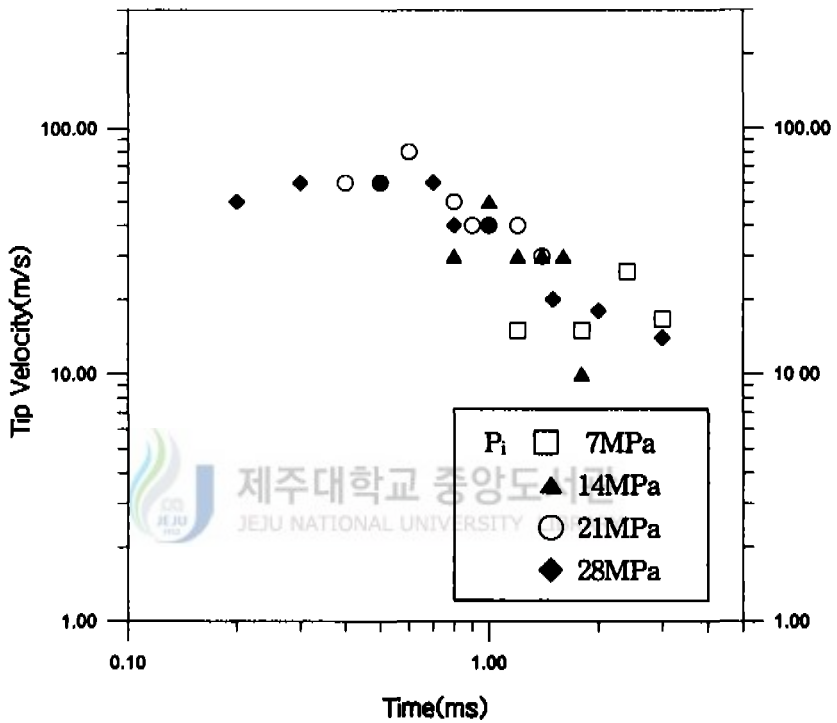


Fig. 12 Influence of injection pressure on spray tip velocity at $P_a=3$ MPa

분무가 발달되기 시작해서 이후에 완전히 발달되어진다. 분사압력이 14, 21, 28에서의 분무는 0.8ms에서 1.2ms사이에서 분무의 속도가 감소되고 있는데, 이부분에서 천이가 일어나고 있다.

Fig. 11은 분위기압력이 2MPa에서의 분무속도인데 분사압력이 7MPa에서는 1.6ms 부근에서 속도가 감소하고 있고, 14,21,28에서는 0.6에서 0.8ms부근에서 속도가 감소되고 있다. 속도가 급격히 감소되는 이부분에서 천이가 발생하고 있다. 그리고 분사압력이 14MPa 이상일 경우에는 천이점이 거의 비슷하지만 7MPa일 경우에는 천이가 아주 늦게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이것은 분사압력이 낮기 때문에 공기와의 마찰력이 감소되어 미립화가 지연되는 것이라 사료된다.

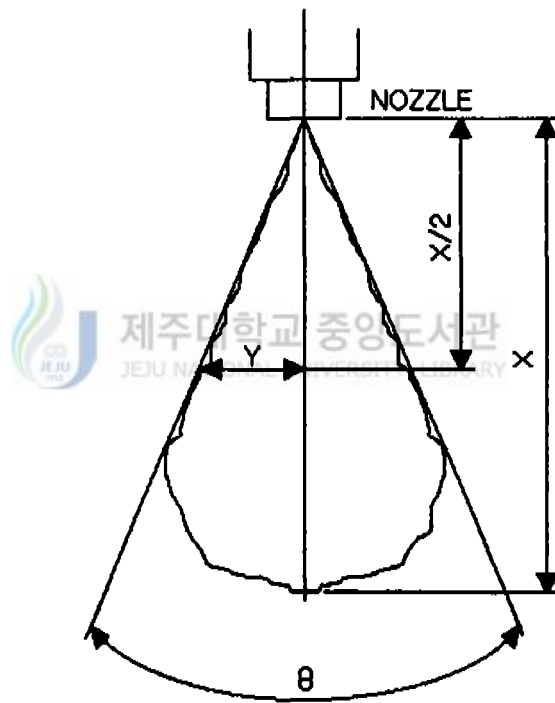
Fig. 12는 분위기압력이 3MPa일 경우인데, 분사직후 분무속도는 거의 변화가 없다가 서서히 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 분위기압력의 영향에 의해 분사직후부터 분무의 미립화가 활발히 진행되고 있는 것이다. 종합적으로 살펴보면 분무속도는 분사압력에 비례하고 있으나 분위기압력이 증가하면 분무속도는 현저히 줄어들었고 분무의 분열은 촉진되었다.

Fig. 13은 디젤분무의 형상을 정량적으로 해석하기 위하여 모델링한 것이다. 본 연구에서 분무각은 각 실험조건하에서 촬영된 분무사진의 노즐선단으로부터 분무선단까지의 거리를 X 로 하여 $\theta = 2 \tan^{-1}(2Y/X)$ 으로 구하였다.

Fig. 14는 대기압하에서 분무의 분무각을 나타낸다. 분사직후 분무각은 일정하지만 1ms를 전후해서 분무각이 점차 감소하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 분사직후 액주로부터 표면파가 생성되어 분무의 분열이 시작되면서 축방향과 반경방향으로 분무가 성장하다가 일정시간 경과 후 반경방향의 분무의 폭이 일정하게 됨으로써 분무가 완전히 발달되고 있기 때문이다.

Fig. 15, 16,17은 분위기압력이 1, 2,3MPa일 때 각 분사압력에서 분무각을

나타낸 그래프이다. 분위기압력이 증가할수록 분무각은 약간씩 커지고 있는 것을 알 수 있으며, 분사압력에 의한 분무각의 변화는 점차 줄어드는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 분위기압력이 높은 경우에 분사직후 분무의 미립화가 활발히 진행되어 분무의 분열이 촉진된다는 것을 보여준다. 하지만, 이 그래프에서 각각의 분사압력에서 분무각에 의한 분무특성을 파악하는기는 부족함이 많았다.



$$\theta = 2 \tan^{-1}(2Y/X)$$

Fig. 13 Definition of spray angle(θ)

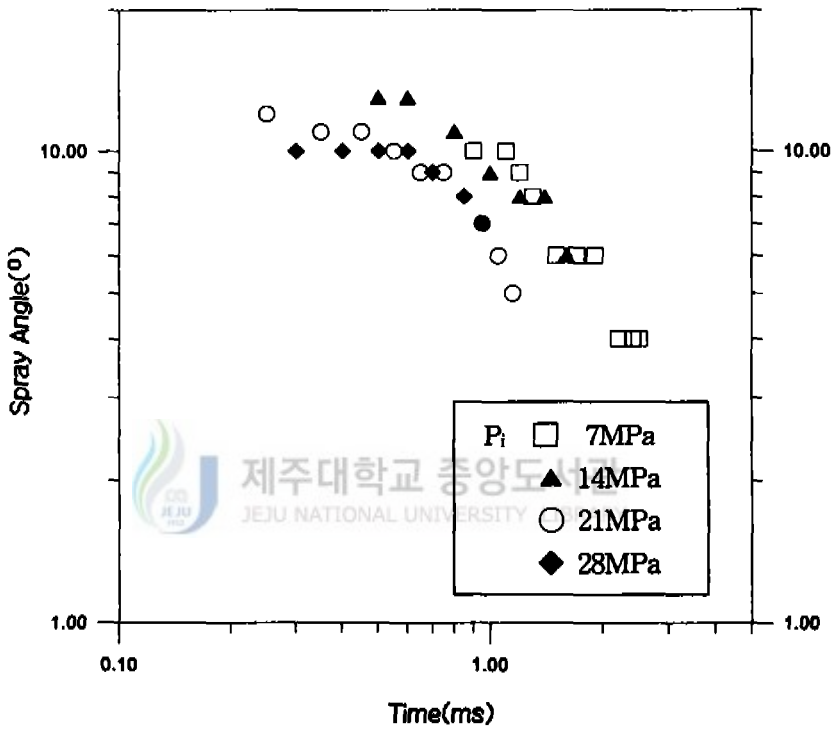


Fig. 14 Influence of injection pressure on spray angle at Pa=0.1MPa

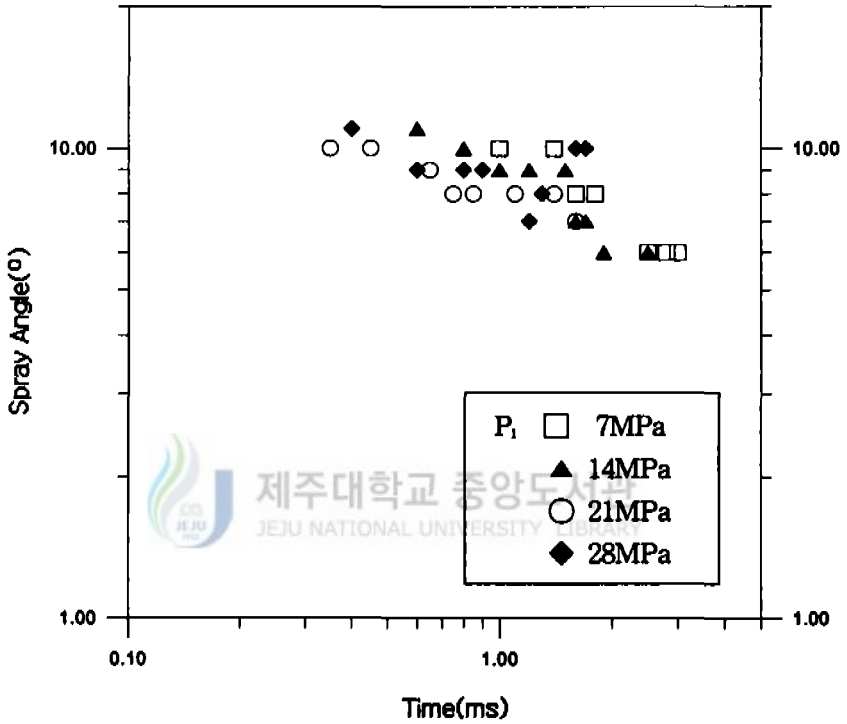


Fig. 15 Influence of injection pressure on spray angle at $P_a=1\text{MPa}$

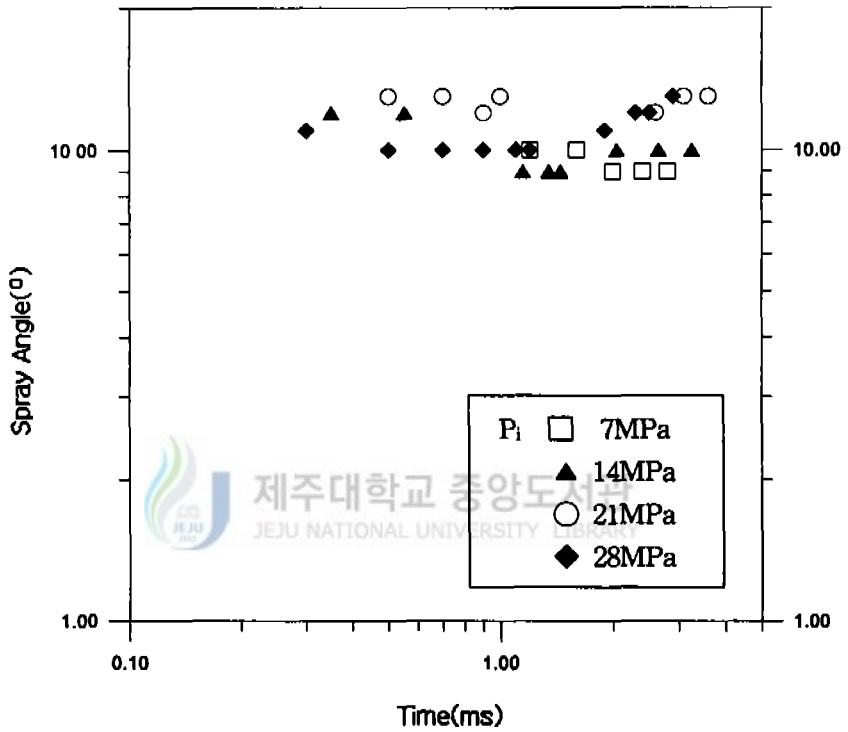


Fig. 16 Influence of injection pressure on spray angle at Pa=2MPa

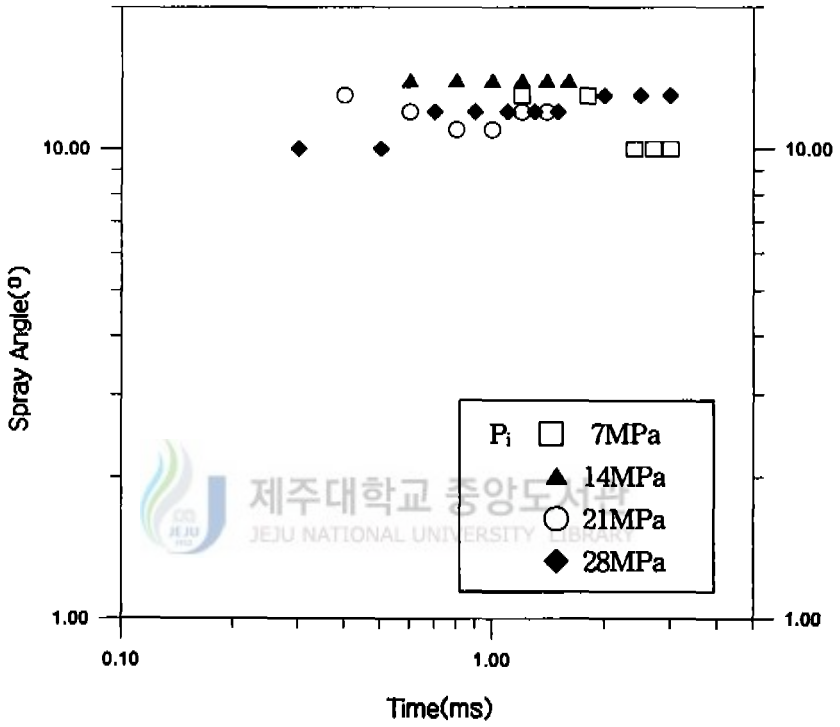


Fig. 17 Influence of injection pressure on spray angle at $P_a=3\text{MPa}$

3-2. 분무의 분열기구 관찰

Photo. 5는 직경이 0.45mm인 노즐을 사용하여 분위기압력이 대기압이고 분사압력이 7MPa에서 t_1 시간을 0.18ms로 고정시키고 1차와 2차 모두 나노라이트광원, 105mm 렌즈를 사용하고, t_2 시간의 변화에 따른 분무초기의 분산과정을 촬영한 확대사진이고 확대배율은 4.5배로 사진의 전체길이는 8mm이다. 동일분무이므로 분무의 분열을 좀 더 객관적으로 해석할 수 있다. t_1 에서 분무의 형태를 살펴보면, 노즐선단에서 약 1mm까지는 전혀 교란되지 않은 액주표면(Intact core)이 그 후에 미세한 파가 발생되어 분무선단으로 갈수록 점차 파가 성장 발달되고 있다. t_2 가 0.03ms인 왼쪽사진을 살펴보면 분무의 체적이 증가했고 액주표면파가 미세해지고 있다. t_2 가 0.09ms인 가운데 사진을 관찰해 보면 액주표면파가 더욱 미세하고 불안정하게 성장하고 있으며 그 불안정한 파로부터 액사(Ligament)가 발생하기 시작하고 있다. t_2 가 0.10mm인 오른쪽사진을 보면 체적의 증가와 더불어 액사형성이 더욱 미세해지고 결국 이러한 파와 액사로부터 액적으로 분열되고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 17(a)는 14MPa로 대기압하에 분사된 후 0.23ms경과후의 분무사진이다. 그림에서 구간(1)은 교란되지 않은 미분열장이며 노즐형태에 의해 그 길이가 결정된다. 구간(2)는 노즐선단 부근에서 발생된 파가 상류로 갈수록 점점 성장 교란되어 결국 이 파로부터 액사 및 액적발생(E-D)이 구간 (2)의 끝까지 계속되고 있다. 구간(4)는 분사후 0.23ms경과후 분무가 정체된 정체영역(Stagnation region)으로 액사 및 액적이 발생하지 않고 있다.

이것은 분사된 연료가 구간(2)를 고려할 때 분무원추각(6)의 원추형태로 계속하여 분사되어 분무선단에 이르러서는 정지된 공간의 공기저항을 받아

원추각보다 큰 반구형상의 분무를 형성하면서 정제되고 있다. 계속해 분사된 분무는 정제영역을 뚫고 성장해 가면서 후발분무가 선발분무를 추월함으로써 구간(2)와 (4)의 경계인 (A)에서 운동량이 떨어진 불안정하고 교란된 액체가 분무원추각의 외부로 확산되는 것을 보여준다. 시간이 경과함에 따라 분무는 반경방향으로 운동량이 더욱 감소하여 불안정하고 교란된 액체 덩어리로부터 액사 및 액적(B)가 생성되고, 시간이 좀더 지나면 안정상태에 도달해서는 (C)와 같이 균일한 액적이 생성되어 구간(3)에 비교적 안정된 액사 및 액적이 입자군을 이루게 된다.

Fig. 17(b)는 같은 조건에서 분사시간이 0.30ms에서의 분무사진이다. 그림에서 (A)는 앞에서 살펴본 분무의 추월에 의해 발생한 액사와 액적을 보여 주며 분열과정 중에 있어 불안정하다. (B)의 액적은 분사된 후 0.30ms 이전에서 분무가 추월하여 발생한 불안정한 (A)상태가 시간이 경과함으로써 점점 안정되어 생성된 것이다. 그러나 이 액적은 크기가 균일하지 못하다. (A)에서 (B)까지 과정은 추월현상으로 발생한 불안정한 액체 덩어리간의 친화력과 분열되려는 힘과의 상호작용, 액사와 액적간의 충돌 및 공기와의 마찰등에 의해 액적이 생성되며 이 분열과정에서 생성된 액적의 입경은 균일하지 않다. 반면 (C)는 액주표면으로부터 발생한 액적으로 생각되며 미세하고 균일하지만 추월현상에 의해 생성된 액적보다는 입자수가 훨씬 적다. 따라서 액주표면에서 발생한 액적보다 분무의 추월현상에 의해 생성된 액적이 분무의 분산 및 미립화를 지배하고 있음을 알 수 있다.



$t_1 = 0.18$

$t_1 = 0.18$

$t_1 = 0.18$

$t_1 = 0.03$

$t_1 = 0.09$

$t_1 = 0.10$

Photo. 5 Enlarge photographs of initial diesel spray by double flash

($P_1 = 7 \text{ MPa}$ $P_a = 0.1 \text{ MPa}$, $D = 0.45$)

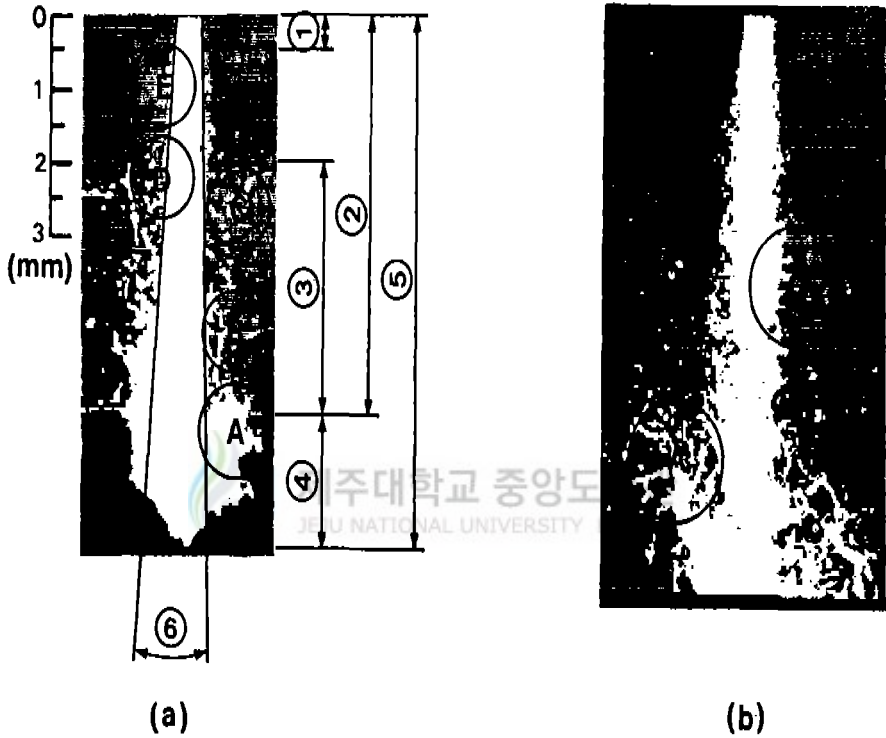


Fig. 17 Disintegrating mode of developing spray($P_i = 14\text{MPa}$, $P_a = 0.1\text{MPa}$
 $D = 0.35\text{mm}$, $L/D = 3.857$, $t = 0.23\text{msec}$ (a), $t = 0.30\text{msec}$ (b))

VI. 결 론

본 연구는 노즐직경이 0.35, 0.45mm이고 노즐형상비(L/D)가 5인 단공노즐을 사용하여 분위기압력이 0.1, 1, 2, 3MPa일 때 분사압력을 7에서 28까지 변화시켜 디젤분무의 초기분열과정을 나노라이트와 스트로보광원에 의한 고속순간 확대사진으로 상세히 관찰하여 디젤분무의 분산특성을 정량적으로 해석하고 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 대기압하에서 분사된 분무의 성장은 분사시간 경과에 따라 기울기가 약 1인 직선으로 발달되고 있다. 이것으로 대기압하에서 분무성장은 분사 압력에만 의존하고 있음을 알 수 있다.

2. 분사압력을 높이면 분무액주의 표면파는 더욱 미세해지고, 이 경우에 발생하는 액적군은 보다 많아지며, 형성되는 액적군의 크기는 대체로 균일하였다.

3. 동일분사압력에서 분위기압력이 높으면 분무각이 커지고 천이점이 일찍 발생하며, 천이점 전후 약 0.3ms시간대에서 분무의 미립화가 활발히 진행된다.

4. 분위기압력이 대기압보다 높을 경우 분무선단 도달거리는 천이점 전에서는 약 1인 직선으로 발달하다가 천이점 이후에 약 0.5인 직선으로 발달되고 있다. 또한 분위기압력이 3MPa인 경우에는 분무초기부터 기울기가 약 0.5

인 직선으로 발달되고 있다.

5. 분위기압력이 낮을 때 분무속도는 천이점 전에서 직선적으로 발달하다가 천이점 이후 감소하고 있다. 또한 분위기압력이 높을 경우 분무속도는 천이점 전에서 거의 일정하다가 이후에 점차 감소하고 있다.

6. 분무선단영역에서 분무류는 분위기압력의 저항으로 운동량이 감소되어 후발분무가 선행분무류를 추월하게 된다. 이 때 분무가 반경방향으로 급격히 팽창하면서 길이가 매우 긴 무수한 액적군이 활발히 형성되고 있으며 매우 불안정한 파형을 이루고 있다.

7. 액체분류의 분열기구는 액주표면에 발생된 표면파와 주위 기체와의 마찰에 의한 분열과 후발분무가 분무선단영역에서 선발분무를 추월함으로써 발생된 액적군의 상호작용에 의한 분열등이다.

V. 참고문헌

- M., H. Hiroyasu, 1991, "Similarity between the Break-up Lengths of a High Speed Liquid Jet in Atmospheric and Pressurized Conditions", ICLASS-91, pp. 563-570.
- 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實驗的研究", 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圍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 工學博士學位論文.
- 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 工學博士學位論文.
- 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.
- 구자에, 정홍철, 1994, "노즐부근에서의 비정상분무 거동", 한국자동차공학회 논문집, Vol 2, pp. 100-111.
- J. H. Lienhard and J. B. Day, "The Breakup of Superheated Liquid Jets", ASME Journal of Basic Engineering, pp. 515-522, September(1970).
- 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.

Scott, W. M. and Mech, M. I., 1976, "Diesel Engine Combustion Chamber Design", S.B.I.A, Brussels, DP 20896.



감사의 글

지난 2년간 저에게 소중한 시간이 되도록 많은 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

보잘 것 없는 저에게 많은 충고와 격려로 지도하여 주신 허종철 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 항상 관심을 갖고 들봐주신 고장권 교수님, 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님, 그리고 미국에 계신 정동원 교수님께 감사드립니다.

제 실험에 필요한 회로를 만드는데 도움을 주신 고성택 교수님과 대학원생 한철규님에게 감사드립니다. 2년 동안 어려울 때마다 곁에서 도움을 준 동현이에게 감사의 마음을 전합니다. 실험실의 굵은 일을 도맡아 해준 상필이 형과 밝은 실험실 분위기를 유지해주는 윤석이에게 고마움을 전하며 여러 가지 힘든 일을 같이 하고 도움을 준 기계공학과 대학원생들에게 감사를 드립니다. 또한 항상 저에게 기쁨을 주는 여자친구 자영에게 고마움을 표합니다. 무엇보다도, 항상 저를 걱정해주고 도와주신 형님과 누님 그리고 동생 봉호와 이 기쁨을 같이 하고 싶습니다. 끝으로 지금까지 이해와 사랑으로 저를 보살펴 주신 부모님께 이 논문을 바칩니다.

1999. 12. 이 창 수