

碩士學位論文

노즐형상비에 따른 디젤분무의 특성



濟州大學校 大學院
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

機械工學科

梁 允 碩

110-1581

2000年 12月

노즐형상비에 따른 디젤분무의 특성

指導教授 許 鐘 哲

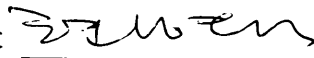
梁 允 碩

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



梁允碩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

2000年 12月

The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Diesel Spray Characteristics

Yun-Seok Yang

(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

December 2000

목 차

SUMMARY	i
I. 서 론	1
II. 실험장치 및 방법	5
2-1. 연료분사 실험장치	5
2-2. 사진촬영 방법 및 실험조건	10
III. 실험결과 및 고찰	14
3-1. 노즐내 유체의 유동	14
3-2. 대기압하에서 노즐형상비에 따른 디젤분무의 초기분열과정	17
3-3. 분위기압력하에서 노즐형상비에 따른 디젤분무의 초기분열과정	22
3-4. 노즐형상비에 따른 디젤분무의 특성	26
3-5. 디젤분무의 미립화기구 관찰	38
VI. 결 론	40
V. 참고문헌	42

summary

In this study, diesel spray characteristics has been conducted to investigate the effect on nozzle aspect ratio(L/D). A single hole nozzle which is 0.45mm in diameter and 2.78, 3.89, 5 in the nozzle aspect ratio is used. Injection pressure is 14MPa and ambient pressure are 0.1MPa and 3MPa. By nozzle aspect ratio, the disintegration process of a diesel spray was observed. The double flash method has been employed to visualize the developing process of the diesel spray.

The result obtained in this study are as follows.



- 1) In the case of the nozzle aspect ratio under the same nozzle diameter, injection pressure and ambient pressure is smaller, disturbance is the direct cause of atomization of spray so the break - up length decreases and the initial spray angle increases. With the result that the breakup process of the spray becomes especially more active in that point as the transition point of nozzle tip appears earlier.
- 2) When the spray is fully developed, the spray bottom is shown as non - disturbance liquid column within about 1~2mm from the nozzle tip. As nozzle aspect ratio is larger, non - disturbance liquid column becomes longer.

- 3) Due to the surface wave, ligaments of the shape thread appear at the boundary of liquid column right after spray. The more developed wave together the progress of spray transforms ligaments into droplets that have generally the uniformed size.
- 4) In the case of nozzle aspect ratio 2.78, 3.89, 5 the spray injected under the ambient pressure has no great influence on the spray tip penetration but the transitional point occurred early in the order of nozzle aspect ratio 2.78, 3.89, 5 with the lapse of injection time.
- 5) In the period of initial injection, the spray angle has the large measurements in case of the small nozzle aspect ratio, while the fully developed spray has the largest spray angle in case of the nozzle aspect ratio is 3.89.
- 6) As a result we know that the disintegration process of a diesel spray nozzle aspect ratio is an important variable for the initial atomization and fully development spray has suitable nozzle aspect ratio.

I. 서 론

디젤엔진은 주로 중대형 자동차에 대한 주된 원동기로서 널리 사용되어져 왔으나, 높은 효율 및 낮은 오염물질 형성 때문에 최근 소형자동차에 대한 적용이 큰 관심을 불러일으키고 있다.

현재 세계적으로 배기 규제가 강화되고 있는 추세에 비추어, 디젤엔진으로부터 배출되는 NO_x 를 포함하는 배기가스의 배출은 운전조건에 따라 다르나 공회전때나 감속때에 가솔린 기관의 약 2배가 배출되므로 디젤엔진에서의 배기가스 저감기술을 개발하는 것은 매우 시급한 당면 과제로 되 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 먼저 기관내의 연소에 영향을 미치는 인자를 연구할 필요가 있다. 이것은 연료 분사장치의 특성과 흡기포트와 연소실 형상에 따른 연소실내에서의 공기유동특성 및 연소실내에 분사되는 연료분무의 형태 등에 의해 크게 좌우된다. 디젤분무의 형태는 노즐형상과 분사 및 분위기압력에 의해 크게 좌우되며, 또한 이들은 디젤 연소에 영향을 미치는 많은 변수 즉 분무의 분열길이, 분무 입경분포, 분무각, 분무도달거리 등에 큰 영향을 미친다. 따라서 디젤분무 형태를 최적화 시킴으로서 연소효율을 높이고 배기가스를 저감시킬 수 있다[1].

단공노즐을 채용하는 디젤기관에 있어서 고압의 연료는 미세한 오리피스를 통과하여 연소실에 분사되는 순간 압축에너지가 운동에너지로 변환되므로써 미세한 액적을 생성시키고 이는 공기와의 접촉면적을 증가시킨다. 또 이렇게 분사된 연료는 공기와 혼합하여 자 발화 연소가 시작되기까지는 분사후 약 1~1.5msec의 시간이 걸린다. 이 경우 연료분무는 적당한 관통도와 미립화된 입자를 가져야만 공기와의 양호한 혼합기를 형성하게 된다. 그러나 분사직후 분무는 미분열 액주의 상태이며, 또한 시간경과에 따라 액주가

분열하여 미립화되는 복잡한 과정을 거치기 때문에 양호한 분무조건을 얻는다는 것은 이토마이저 설계에 있어서 어려운 점이 많다. 그러므로 디젤엔진 연소실내를 보다 효율적인 연소를 위해서는, 착화 지연기간동안 분무의 분열 및 발달 과정을 명확히 구명, 해석해야 하며, 그 분무의 발달과정, 생성된 액적의 크기 및 분산 등을 적절히 제어해야 한다.

디젤분무의 분열은 비정상상태의 유체의 운동으로 일반적으로 해석이 곤란하고 분무현상이 고속이면서 순간적으로 이루어지기 때문에 미립화 과정의 관찰이나 측정이 어려운 문제점이 있다. 뿐만 아니라 미립화 시스템 설계에 적용하기 위해서는 상당한 실험적 경험적 자료를 필요로 하고 있다. 지금까지의 연구진행을 보면 미립화 과정은 크게 두 단계로 나뉘어지며 첫 단계는 연료의 분사압력, 노즐의 개방특성, 노즐의 팁 형상 등의 노즐 설계 요소에 의해 영향을 받는 노즐 출구부근에서 발생하는 초기 미립화 과정이고, 두 번째 단계는 분무가 주위 기체를 관통하고 성장하는 동안 주위 기체의 유동과 연료 액적들의 상호작용에 의존하는 미립화 과정이다.

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

많은 연구자들이 디젤엔진에서의 분무도달거리에 대해서 연구하였다. Schweizer (1937), Wakuri et al. (1960) 및 Dent (1971) 의 상관함수는 도달거리가 분사시작으로부터 시간의 제곱근에 비례하는 것을 보였다. 모든 실험적 연구는 분사의 초기단계, 즉 분사시작으로부터 약 1msec까지의 시간에 대해서 제대로 되어 있지 않다. Reitz (1978) 는 제트 미립화에 대한 광범위한 사진촬영에 위한 연구를 통해 초기 분사시 연료제트의 속도가 일정하다고 보고하였다.

연료제트 도달거리에 대한 광범위하고 정밀한 연구가 Hiroyasu et al. (1978) 에 의해 행하여졌다. 그는 분무 개시시 분무 도달거리의 기울기가 1

이나, 짧은 시간이 경과한 뒤에는 기울기가 0.5로 변한다고 밝혔다. 또한 Hiroyasau 그룹(Hiroyasu et al., 1982; Shimizu et al., 1983; Arai et al., 1984)은 노즐과 분무제트내에 위치한 미세한 와이어 스크린 검지기와 노즐 사이의 전기저항을 측정함으로써 분무유동 영역에서의 붕괴길이(Break-up length)를 측정하였다.

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

Zanelli (1988)는 노즐직경을 일정하게 하고 오리피스 길이를 변화시켜 노즐내 유동에서의 속도 재구성이 분류의 초기교란에 영향을 미쳐 결국 완전히 발달된 분무의 상태가 달라지며, 노즐 형상비에 따른 교란되지 않은 미분열 액주를 계측하였다. 그리고 연료분사시 노즐내 니어들양정의 변화가 연료의 유도단면을 변화시켜 분류가 가속, 감속되는 분사계 천이를 확인하였다.

허동 (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 계측하고 분위기압력이 디젤분무에 미치는 영향을 구명하였다.

실용 디젤기관의 연료분무는 비정상 간헐분무이므로 연료분무의 일관성 있는 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 노즐길이가 1.25mm, 1.75mm, 2.25mm이고 노즐직경이 0.45mm, 그리고 노즐형상비가 각각(2.78, 3.89, 5)인 단공노즐을 사용하여 디젤연료를 일정압력으로 분사시켜 대기압과 일정분위 기압력 하에서 노즐형상비에 따른 디젤분무특성을 Double flash에 의한 사진촬영에 의해 가시화 하여 분무선단도달거리, 분무속도, 분무각등을 구하였고 분무의 초기발달과정, 천이점해석 및 분열기구를 보다 정량적으로 해석하기 위하여 확대사진촬영을 행하여 디젤분무의 미립화형성과정에 관한 실험적 기초자료를 얻고자 한다.



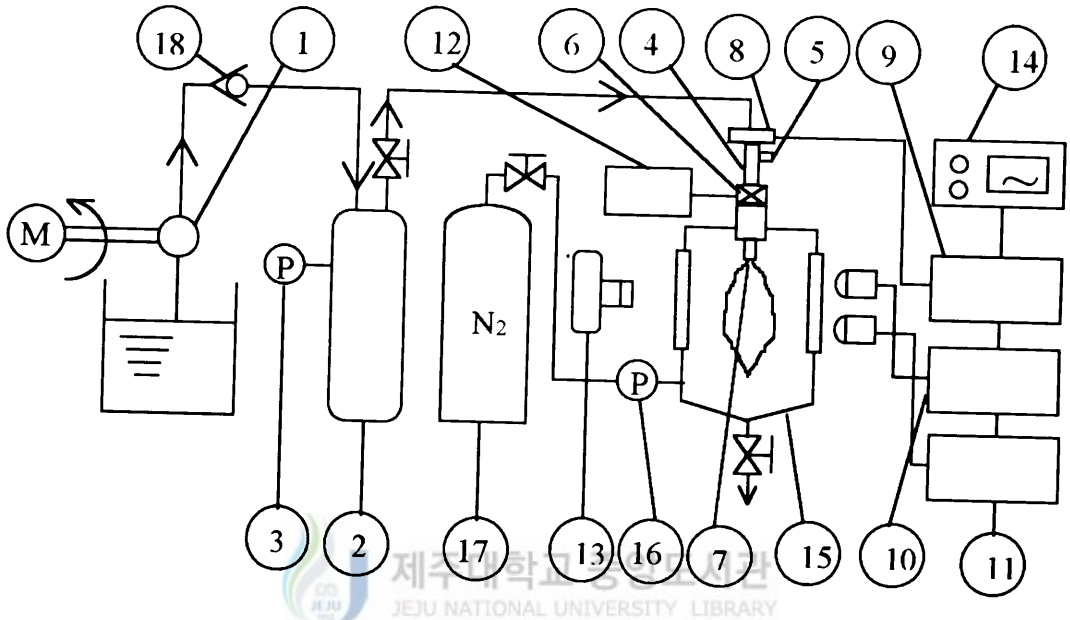
II. 실험장치 및 방법

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 플런저펌프 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 5.11ℓ이며 주로 플런저 펌프에서 고압 연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 하고, 분사노즐 입구에 설치된 제 2 축압실은 최종적으로 디젤연료가 노즐에서 분사되는 동안의 설정압력의 강하와 맥동을 가능한 없애주는 역할을 한다.

본 실험에 사용한 연료분사 제어장치는 노즐홀더 상부에 솔레노이드(6)를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드를 작동시키지 않은 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니이들을 압착하고 있는 스프링들의 상부판을 끌어 당기게되며,



- | | |
|---|-----------------------------|
| 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

노즐 제어장치에 설정된 시간동안 연료가 분무관측용 용기내로 분사된다. 분무관측용 고압용기(15)는 내부직경 196mm, 길이 500mm로 양측면에 사진 촬영이 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 플러저펌프와 제 1 축압실사이에 체크 밸브(18)를 설치하여 분사압력을 28MPa로 올리는데 무리가 없도록 하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 노즐직경이 0.45mm, 노즐길이 2.25mm이고 노즐형상비는(L/D) 5인 단공노즐의 상세도이며 노즐형상비가 3.89일 때와 2.78일 때 노즐의 길이는 각각 1.75mm와 1.25mm가된다. 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.

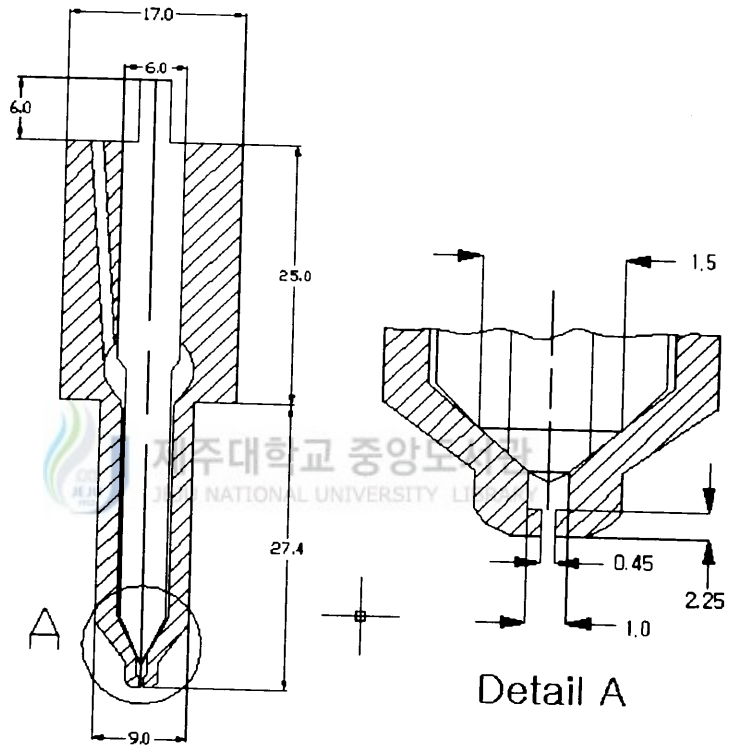


Fig. 2 Detail of single hole nozzle (L/D=5)

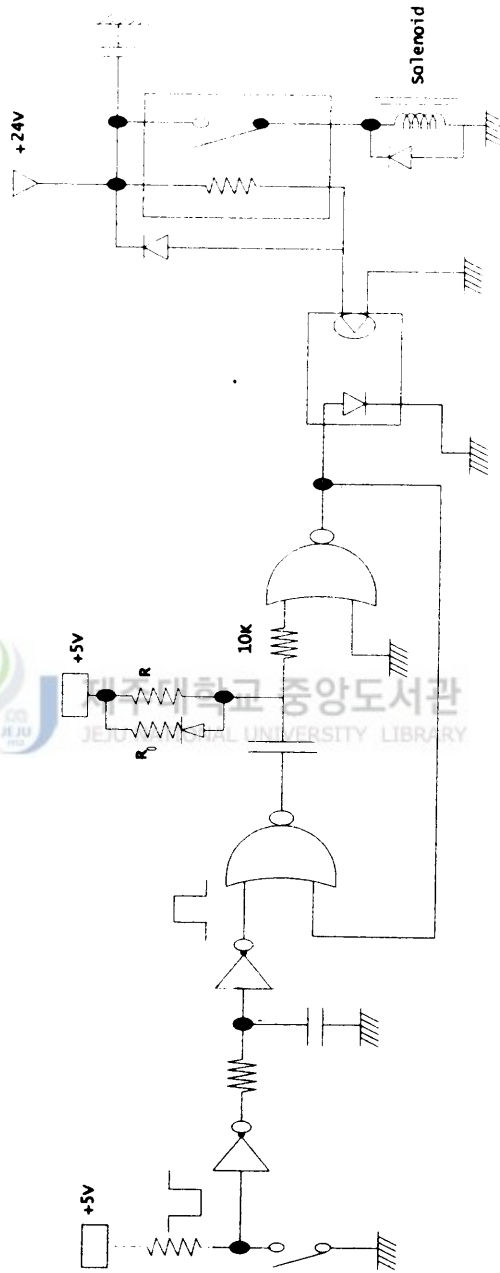


Fig. 3 Nozzle driving circuit

2-2. 사진촬영 방법 및 실험조건

디젤 연료유의 미립화현상을 가시화 하는 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 경과 후까지의 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 수광부 사이에 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 발생한 발진신호이며 상단펄스는 그 신호를 받아서 지정된 시간만큼 두 번 지연되는 펄스이다.

디젤분무는 분사속도가 고속이므로 정지된 상을 촬영하기가 상용 μs 단위 스트로보스코프 광원으로는 곤란하므로 본 연구에서는 발광시간이 17ns인

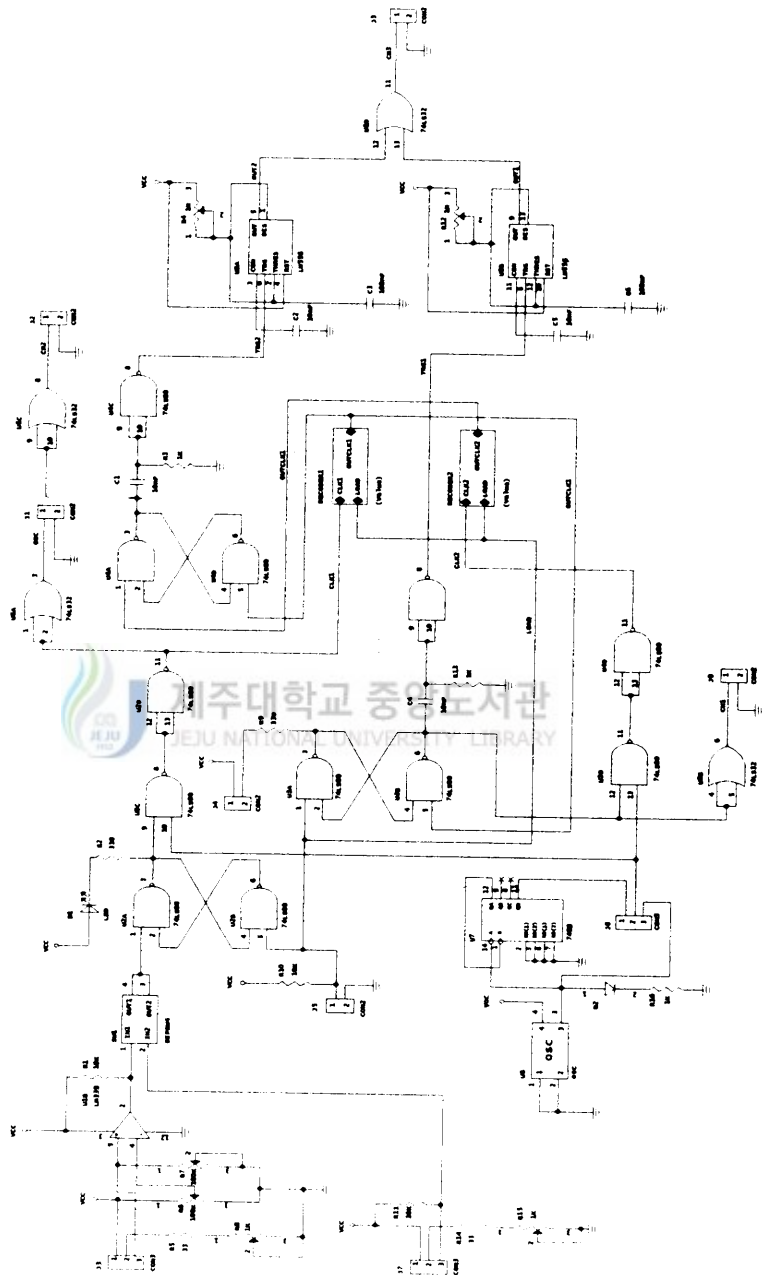


Fig. 4 Double pulse generator delay circuit

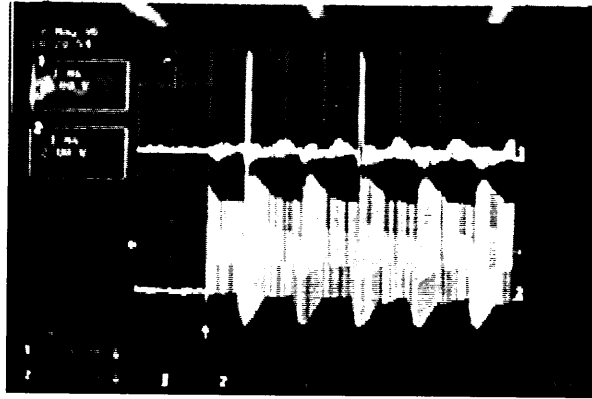


Photo. 1 Photograph of double pulse signal from delay circuit

나노라이트를 분무확대 사진촬영에 사용하였다. 이 때 확대촬영용 렌즈는 확대배율이 4.5배이므로 촬영된 분무의 형상을 인화할 경우 약 15배 확대가 가능하다. 또한 카메라는 Nikon F-2와 Nikon F-801, 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)	14
Ambient press. (MPa)	0.1, 3
Ambient temperature	Room temperature
Ambient gas	N ₂ gas
Fuel	Low sulfur diesel oil (S = 0.84)
Nozzle	Single hole (L/D=2.78, 3.89, 5, D=0.45)
Lens	105mm Micro, Telemicrolens (Magnification : X 4.5)
Camera	Nikon F-2, Nikon F-801
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. 노즐내 유체의 유동

Fig. 5는 노즐내로 유입되는 연료의 압력분포를 나타낸 그림이다. 연료가 노즐내로 유입되면 관벽근처에서는 급격한 압력강하가 발생하게되고 오리피스를 통과하여 분위기압력하에 분사되며, 경우에 따라서는 증기압 이하로 하락되어 관내에서 공동현상(Cavitation)이 일어 날 수도 있다.

그림에서 L_c 는 속도가 재구성되는 길이이며 분사압력에 따라 달라진다. 일반적으로 미립화 영역에서 분사속도가 증가하면 L_c 의 길이는 길어지고 그로 인해 붕괴길이(Break-up length)는 반대로 작아지나 분무각은 증가하는 경향이 있다[2].

Fig. 6은 노즐길이 L 이 초기 미립화에 미치는 영향을 도식화한 그림이다. 그림에서 간극(Gap)안으로 유입된 유체의 속도는 순간감소하고 압력은 상대적으로 증가하게 된다. 간극 내부에서 그런 현상에 의해 Cavitation Bubbles의 소멸에 의한 디스터번스(Disturbance)가 발생하게 되는데 Fig. 6(a)경우처럼 길이(L_1)가 작으면 디스터번스가 분류(Jet)의 발생이나 액체의 미립화에 직접적인 요인으로 작용하게 된다. 반면 길이(L_2)가 긴 Fig. 6(b)의 경우 디스터번스가 간극 근처에서 생성되어 분류의 발생이나 액체미립화에 커다란 영향을 미치지 못하게 된다[3]. 따라서 분사압력, 노즐직경이 일정하다면 오리피스길이 L 이 분류의 분포과정에 큰 영향을 미치므로 미립화기구의 주요 변수가 된다.

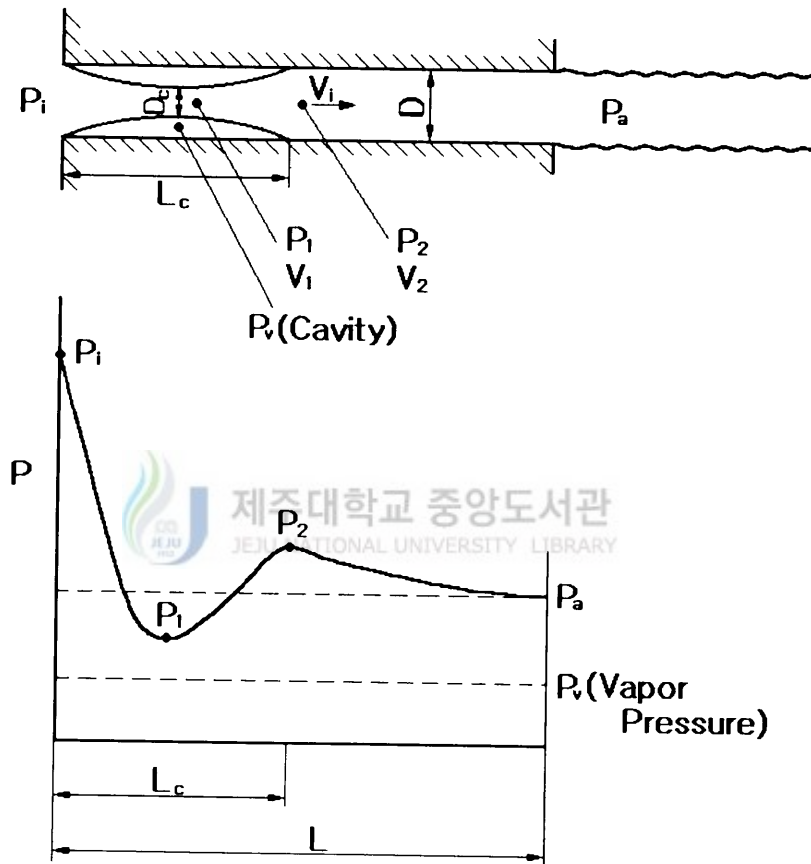


Fig. 5 Internal flow and pressure distribution in the nozzle

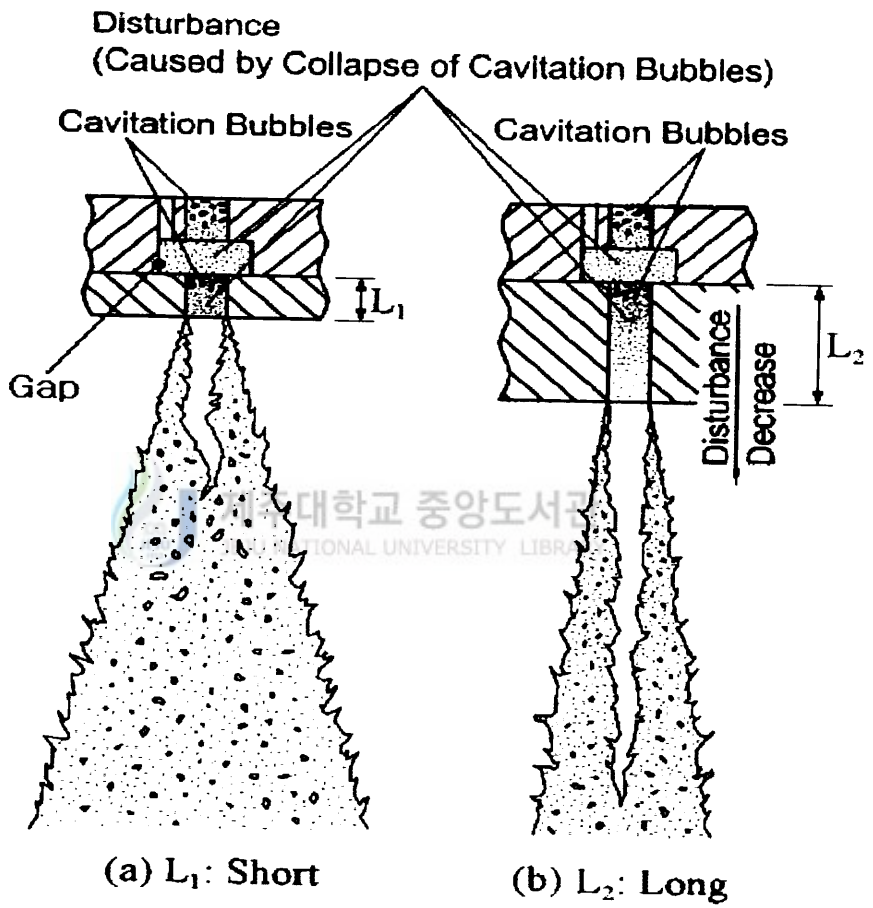


Fig. 6 Schematics of internal flow in the hole nozzle and liquid jet

3-2. 대기압하에서 노즐형상비에 따른 디젤분무의 초기분열과정

Photo. 2, 3은 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 각각 2.78, 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력을 14MPa로 고정하고 분위기압력이 0.1MPa일 때 나노라이트 광원을 사용하여 105mm Telemicro lens로 디젤분무의 초기 분열 과정을 촬영한 확대사진이다. 확대배율은 4.5배이고 사진의 전체 실제길이는 8mm이다.

Photo. 2는 대기압하에서 노즐형상비가 2.78인 단공노즐을 사용하여 디젤분무의 초기분열과정을 촬영한 사진으로 분사초기 분무의 발달과정을 0.02ms의 시간지연에 따른 확대사진이다. 시간이 0.02ms에서의 분무를 보면 분무의 실제길이는 5mm이고 분사직후 미분열액주가 약 0.8mm까지 관찰되고, 그후 액주에서 미세한 과가 형성되고 있으며 분무선단부근에서 급격하게 체적이 증가하면서 불규칙한 액사가 형성되고 있다. 시간이 0.08ms에서의 네번째 사진을 보면 분무선단에서의 체적이 더욱 증가되었으며 분무선단에서 정지된 공기의 저항으로 운동량이 감소된 선발분무를 후발분무가 추월하면서 서로간의 충돌로 인하여 분무의 미립화가 촉진되고 있다. 시간이 0.12ms인 마지막 사진을 보면 액주에서 형성되어 액사형태로 발달되던 과가 액적으로 분리되어 나가고 있고 분무의 선단부근에서는 무수히 불규칙한 액사가 형성되고 있으며 체적은 더욱 증가하여 마치 화살촉모양의 액사로 발달되고 있다.

Photo. 3은 Photo. 2와 동일조건하에서 노즐형상비가 5인 단공노즐을 사용하여 분무의 초기분열과정을 촬영한 사진이다. 우선 시간이 0.02ms인 왼쪽 사진을 살펴보면 분무의 길이는 약 4.5mm로써 Photo. 2와 비교해볼 때 전체적인 분무의 길이는 비슷하지만 미분열액주의 길이는 1.2mm로 미분열액주의 길이가 증가된 것을 볼 수 있는데 이는 분사전에 노즐내에서 노즐의

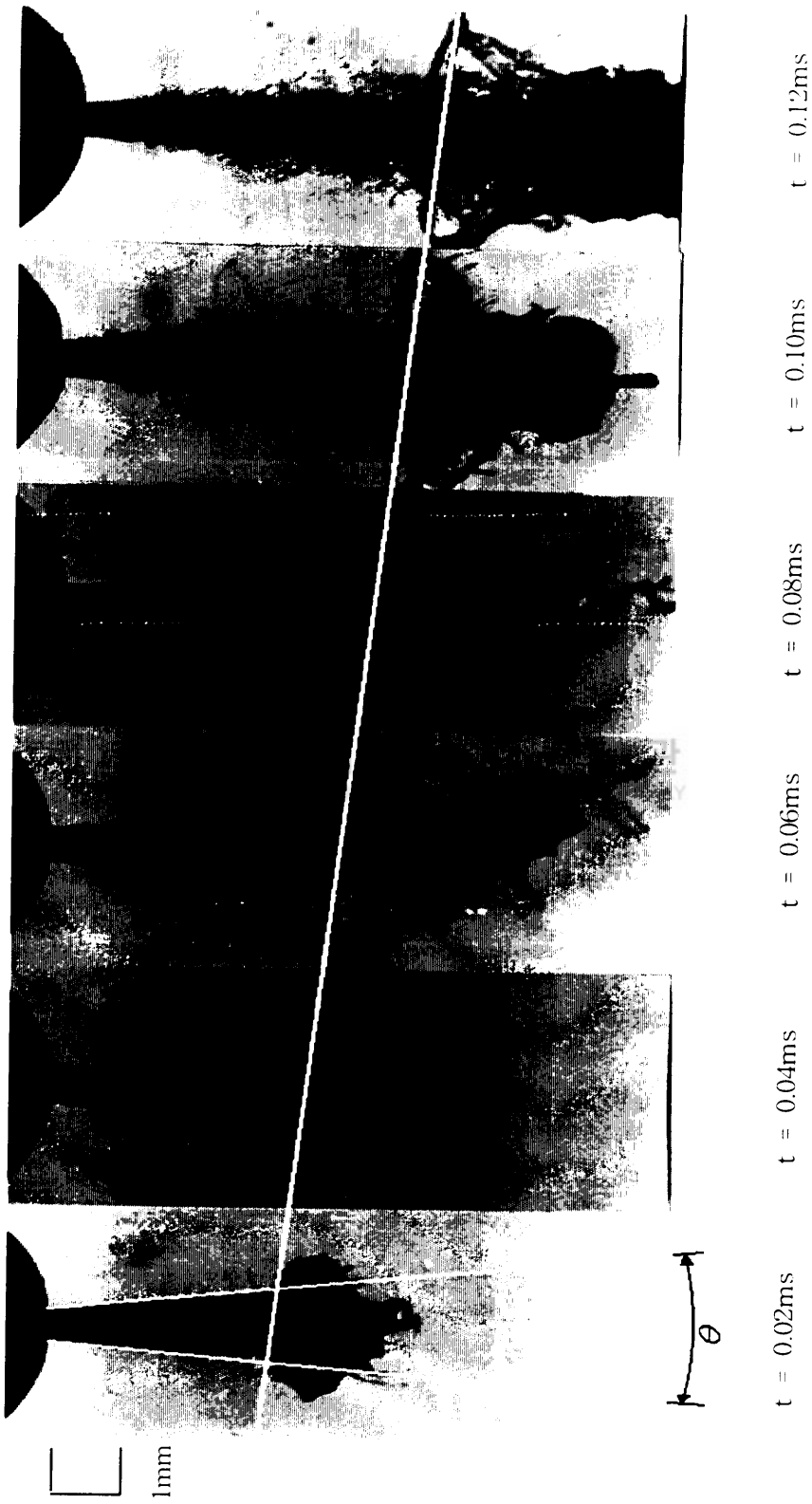


Photo. 2 Enlarged photographs of initial diesel spray
 ($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=2.78$)

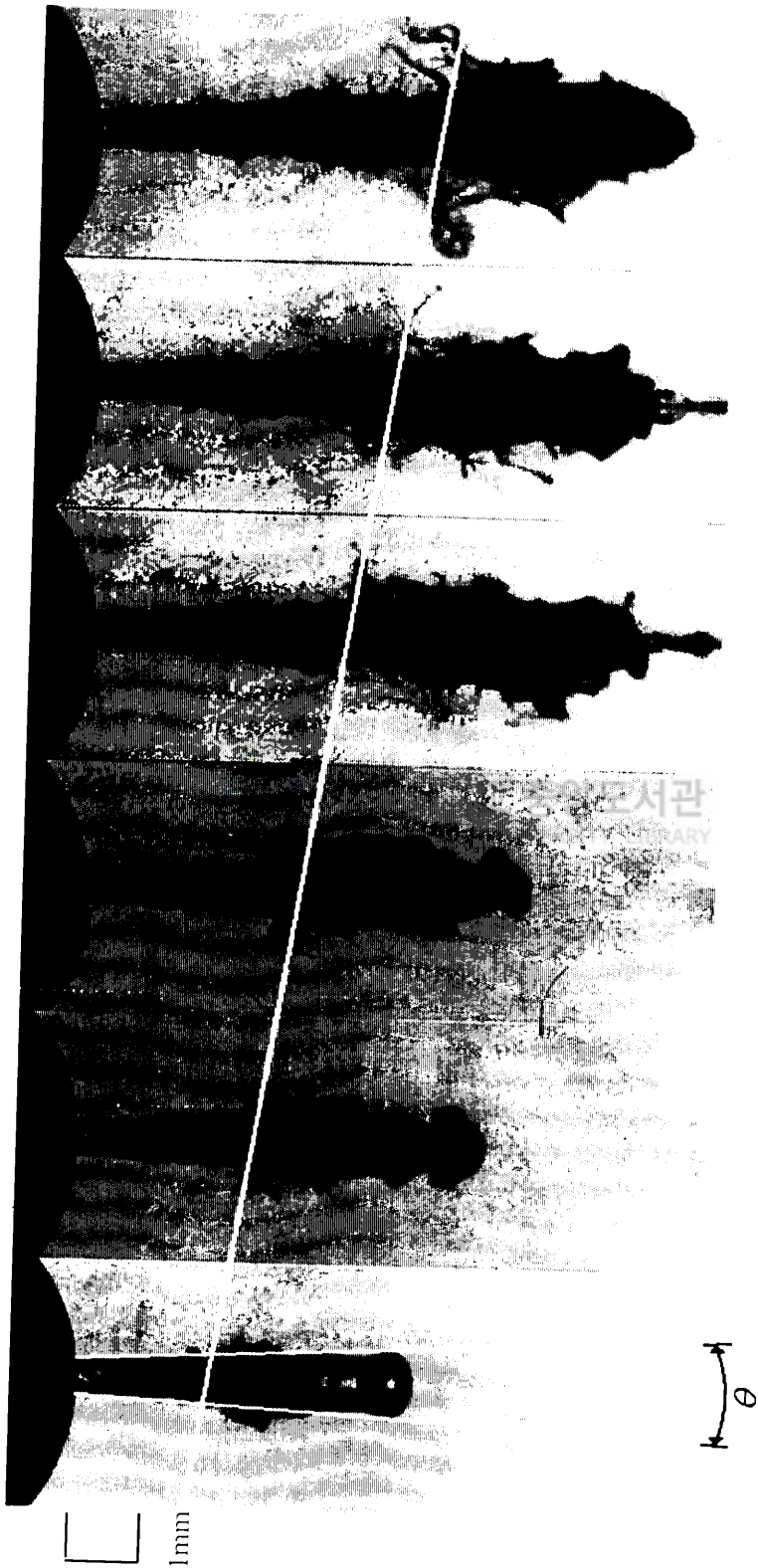


Photo. 3 Enlarged photographs of initial diesel spray

($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=5$)

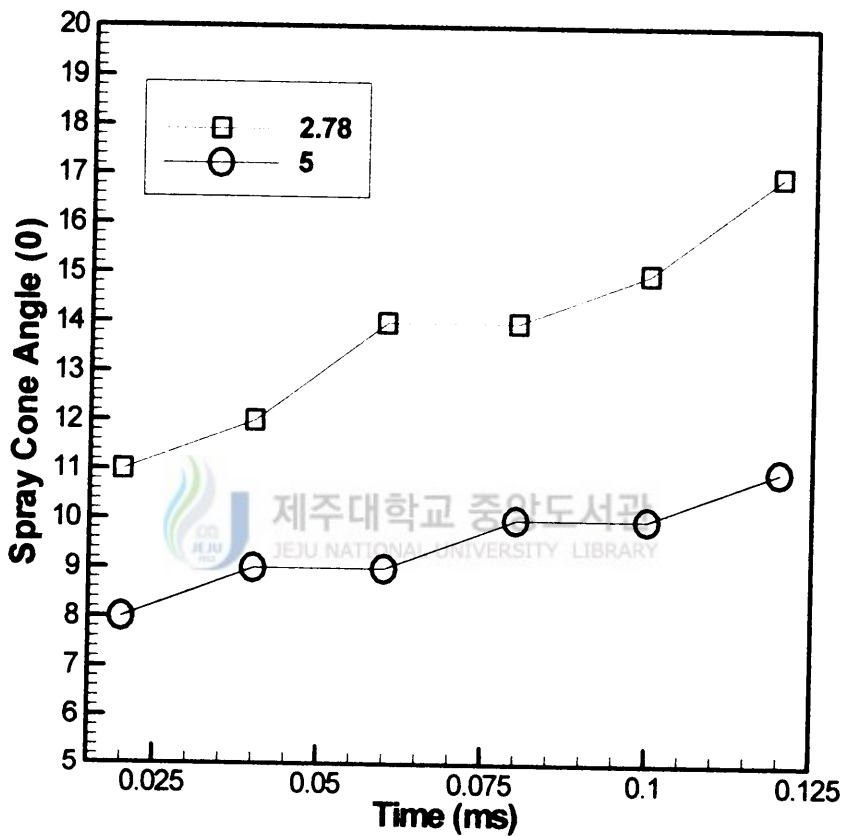


Fig. 7 Influence of nozzle aspect ratio on spray cone angle at $P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$ ($D=0.45\text{mm}$)

길이만큼 채워진 연료가 분사개시와 동시에 노즐외부로 분무되기 때문이며 이는 초기분무각에도 큰 영향을 미치는 요인으로 판단된다. 시간의 경과에 따른 사진을 계속해서 살펴보면 분무액주의 표면에서 형성된 파가 액사 및 액적으로 분리되면서 분무의 분열을 주도하고 있는 것을 관찰할 수 있다.

분무초기이지만 Photo. 2, 3을 비교해볼 때 분무각의 차이가 현저하다는 것을 볼 수 있다. 이는 노즐길이의 차이 즉 노즐형상비의 차이에서 발생하는 공동현상과 밀접한 관련이 있다. 그리고 사진에서의 사선으로 비교해볼 때 노즐형상비가 커짐에 따라 미분열액주의 길이가 길어짐으로서 표면과의 형성 및 액적, 액사로의 분열도 느려짐을 쉽게 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 Photo. 2, 3에 나와있는 사진을 근거로 노즐형상비에 따른 분무원추각을 그래프로 나타낸 그림이다. 노즐형상비가 5일 때는 시간경과에 따른 분무원추각의 차이가 작지만 노즐형상비가 2.78일 때는 0.02ms일 때와 0.12ms일 때 분무원추각이 약 6° 정도로 큰 차이를 보이고있고 노즐형상비가 2.78, 5일 때 동일조건하에서의 분무원추각의 차이도 현저함을 알 수 있다. 이는 노즐형상비의 차이에서 발생하는 공동현상과 밀접한 관련 있다.

3-3. 분위기압력하에서 노즐형상비에 따른 디젤분무의 초기분열과정

Photo. 4는 노즐직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 2.78인 단공노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고, 분위기압력이 3MPa인 용기내로 분사시켰을 때 분무의 분열과정을 1, 2차 나노라이트광원으로 촬영한 확대사진이며, 사진전체길이는 8mm이다. t_1 은 분사개시직후 지연시간이고 t_2 는 t_1 으로부터의 지연시간이므로 따라서 사진 한 장에 나와있는 분무는 동일분무이다. t_1 이 0.06ms이고 t_2 가 0.03ms인 왼쪽사진을 보면 대기압하에서의 Photo. 2와 비교해볼 때 체적이 증가한 것을 볼 수 있으나 분위기압력의 영향으로 분무선단도달거리와 미분열 액주의 길이가 현저히 짧아진 것을 관찰할 수 있고, 액주에서 파생된 미세한 액사가 훨씬 증가한 것을 관찰할 수 있다. 또한 분사개시직후 0.5mm이내에서 미분열액주의 형태로 분사되지만 이후 반경방향으로 급격히 발달하고 있는 것을 확인할 수 있다. t_1 이 0.06ms이고 t_2 가 0.06ms인 가운데 사진을 보면 분무각이 서서히 증가하고 있으며 일부 액사에서 액적으로 분리되는 모습을 볼 수 있으며 액체의 미립화가 어느 정도 되어가고 있는 것이 관찰된다. t_2 가 0.09ms인 오른쪽 사진을 보면 분무각의 증가와 더불어 이전의 사진들보다 액사의 수가 현저히 나타나고 있으며 액적으로서의 분열도 미립화가 상당히 진척된 것을 볼 수 있다. 그러나 아직까지 분무선단에서의 분열은 관찰할 수가 없다.

Photo. 5는 Photo. 4와 동일한 조건에서 노즐형상비가 3.89인 단공노즐을 사용하여 촬영한 사진으로 Photo. 4와 비교해 볼 때 미분열 액주의 길이는 약1mm로 길어졌지만 그 영향으로 체적은 감소되었다. 그리고 Photo. 4의 오른쪽사진과 비교해볼 때 전체적인 분무선단도달거리의 차이는 없지만 액주에서 액사로의 분열은 덜하고 그로 인한 액적으로서의 분열도 거의 볼 수가 없다. 그리고 Photo. 4에서는 볼 수 없었던 분무선단에서의 분열이 서서히 발생하고 있음을 관찰할 수가 있다. 이처럼 Photo. 5에 비해 Photo. 4에서의 분무초기의 분열이 현저함은 Fig. 6

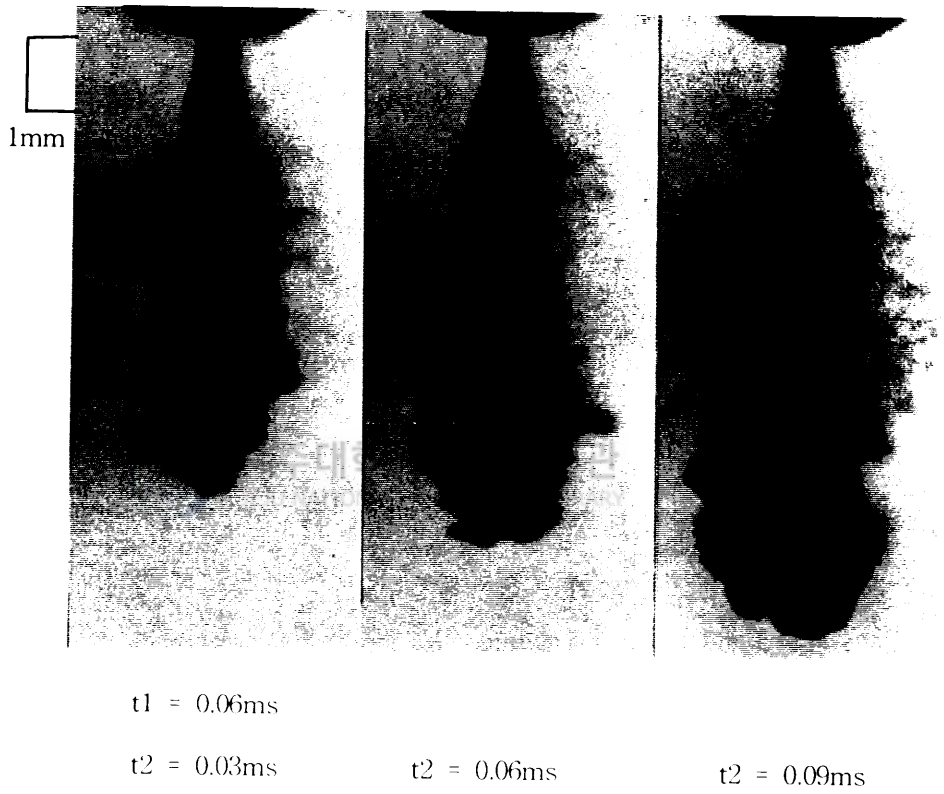
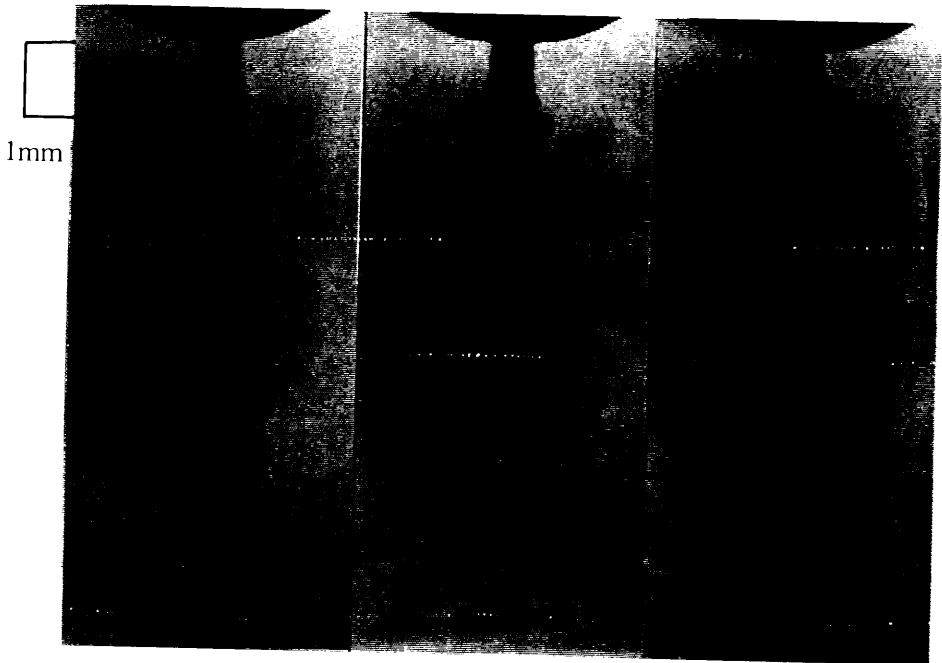


Photo. 4 Enlarged photographs of initial diesel spray using double flash ($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=2.78$)



$t_1 = 0.06\text{ms}$

$t_2 = 0.03\text{ms}$

$t_2 = 0.06\text{ms}$

$t_2 = 0.09\text{ms}$

Photo. 5 Enlarged photographs of initial diesel spray using double flash ($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=3.89$)

에서처럼 노즐형상비의 차이 즉 노즐길이의 차이 때문에 발생하는 디스터번스의 발생이 분무의 분사초기에 직접적으로 영향을 미치게 되어 초기 분무각의 증가와 활발한 초기 미립화를 이끄는 것을 알 수 있다.



3-4. 노즐형상비에 따른 디젤분무의 특성.

Photo. 6, 7, 8은 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5이고 직경이 0.45mm인 단공노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고, 분위기압력이 3MPa 일 때 시간경과에 따른 분무의 분열과정을 촬영한 Double flash사진이다. 광원은 나노라이트 광원(이때 촬영시간 t_1)과 스트로보스코프 광원(이때 촬영시간 t_2)을 사용하여 촬영하였다. 사진 한 장에 나와 있는 분무는 동일분무이며 사진 전체의 실제길이는 70mm이다.

Photo. 6은 분사압력이 14MPa인 조건에서 분위기압력이 3MPa인 용기내로 분사시켰을 때 노즐형상비가 분무선단도달거리와 분무각의 발달과정에 미치는 영향을 촬영한 순간사진의 일레이며, 디젤분무의 시간경과에 따른 발달과정을 보여주고 있다.

t_1 에서의 분무는 분사개시후 0.15ms에서 고정하여 촬영한 것으로 실제길이는 약 8mm이며 분무의 길이는 거의 일정하므로 회로가 정상적으로 작동하고 있다. t_2 는 0.50ms에서 1.20ms까지 지연된 시간이며 t_2 가 1.20ms일 때 분무의 실제길이는 약 70mm이다. 분무선단도달거리는 t_2 의 시간경과에 따라 발달하다가 0.80ms를 지나면서 분무선단도달거리가 급격히 감소하면서 0.90ms의 사진을 보면 반경방향으로 분무가 급격히 발달하고 있으며 아울러 분무각의 증가가 현저히 드러나고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 선발분무와 뒤따라오던 후발분무간의 충돌 및 추월현상에 의한 변화로 판단할 수 있다. 이 시점으로부터 분무의 천이영역으로 판단하여도 무리가 없을 것 같다. 그리고 이후에 분무가 완전히 발달된다고 사료되나 분무의 미립화기구를 설명하기에는 부족한 점이 많다.

Photo. 7은 동일조건하에서 노즐형상비가 3.89일 때 t_1 을 0.20ms로 고정하고 t_2 의 시간지연에 따른 분무의 발달과정을 촬영한 사진이다. Photo. 6과

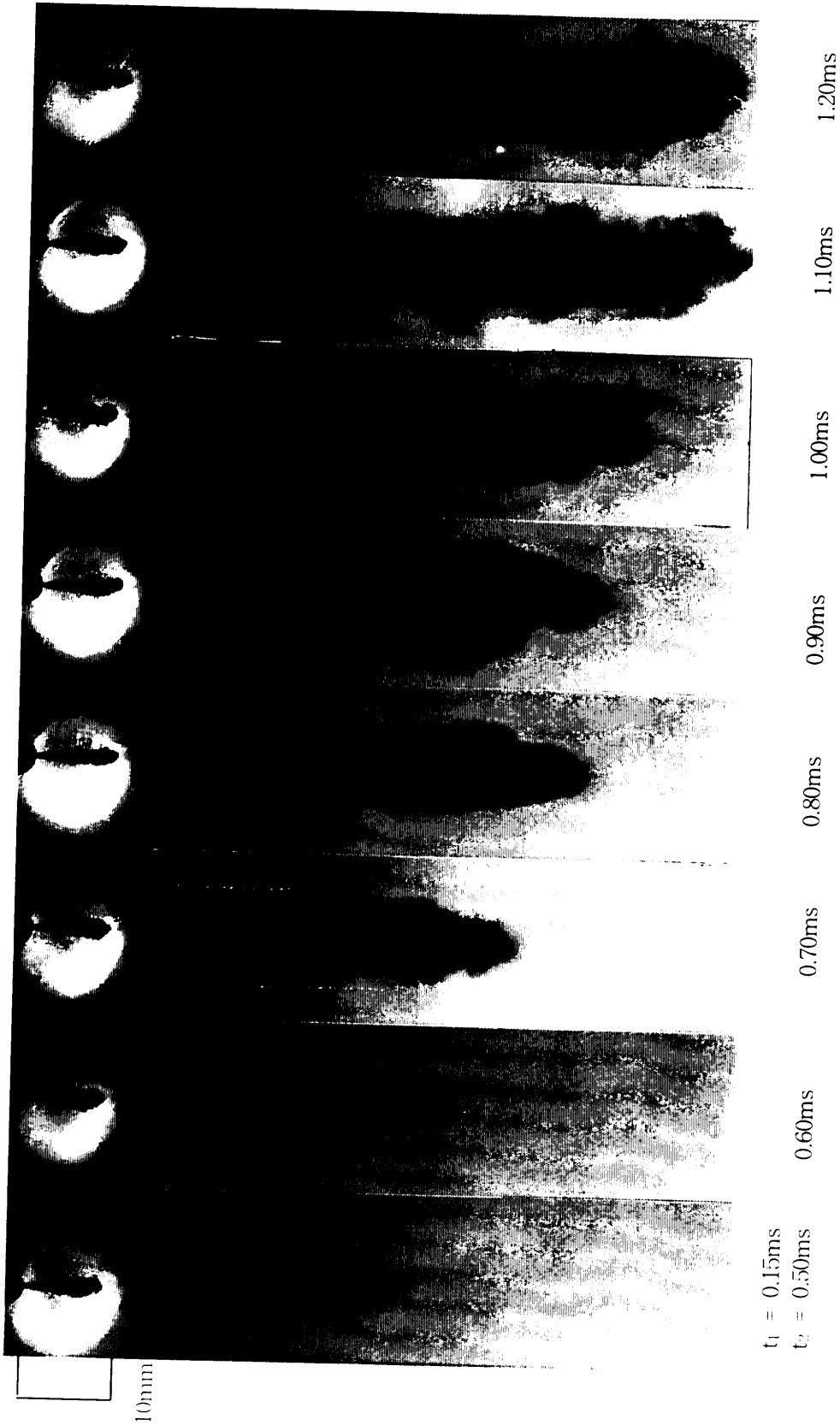


Photo. 6 Photographs of developing spray
 ($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=2.78$)



$t_1 = 0.20\text{ms}$
 $t_2 = 0.45\text{ms}$

0.55ms

0.65ms

0.75ms

0.85ms

0.95ms

1.05ms

1.15ms

Photo. 7 Photographs of developing spray
 ($P_1=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=3.89$)

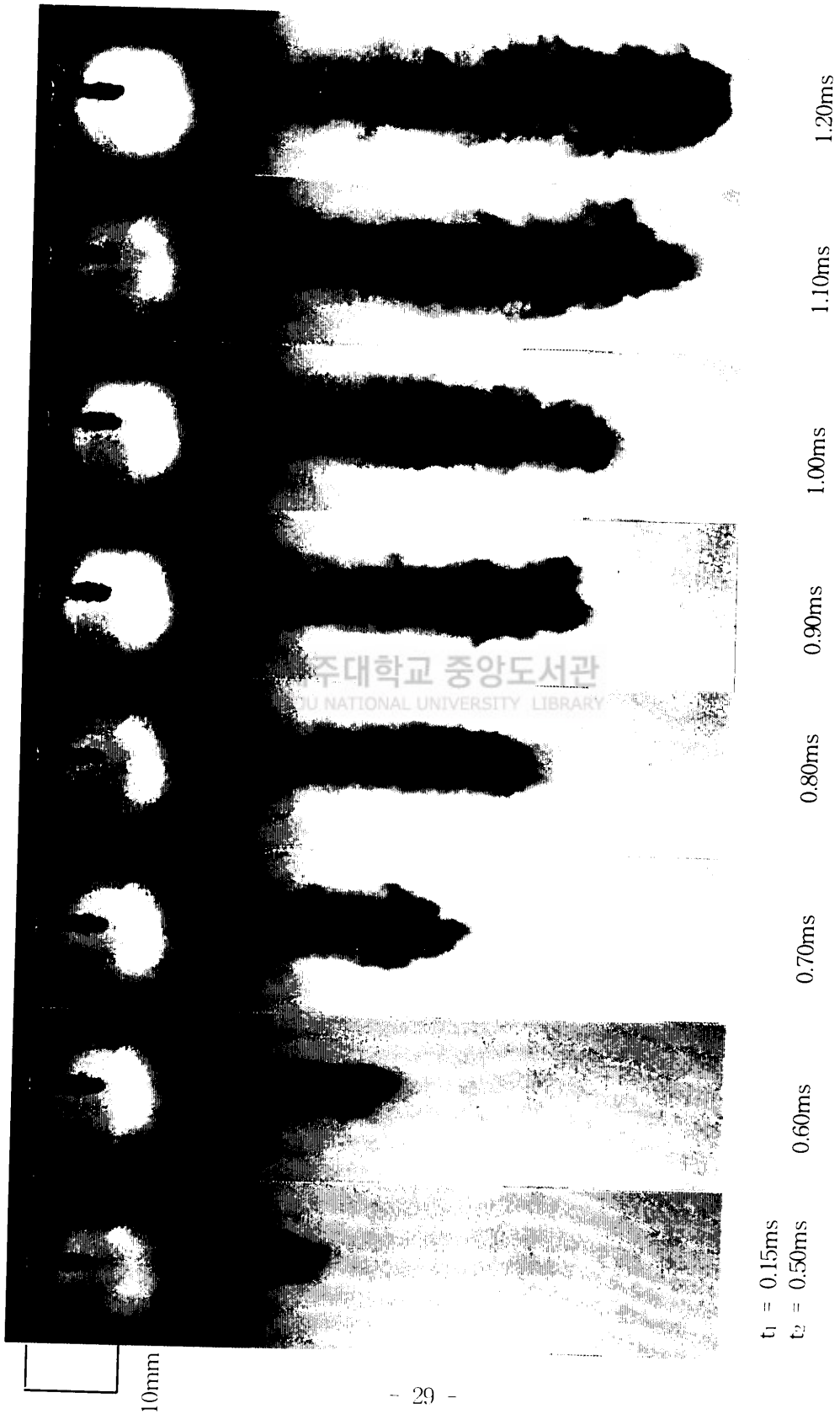


Photo. 8 Photographs of developing spray
 ($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$, $L/D=5$)

$t_1 = 0.15\text{ms}$
 $t_2 = 0.50\text{ms}$

비교해볼 때 t_2 가 0.95ms이후부터 분무선단도달거리가 급격히 감소하고있고 분무각의 증가도 함께 관찰할 수 있다. t_2 가 1.05ms이후의 사진을 보면 분무가 반경방향으로 활발히 발달된 것을 볼 수 있으며 분무각은 오히려 Photo. 6의 1.1ms이후 사진보다 증가한 것을 관찰할 수 있고, 천이점 이후에서는 오히려 노즐형상비가 2.78일 때 보다 3.89일 때가 분무의 미립화가 더 활발하다는 것을 관찰할 수 있다.

Photo. 8은 Photo. 6, 7과 동일조건하에서 노즐형상비가 5이고 t_1 을 0.15ms로 고정하고 t_2 의 시간지연에 따른 분무의 미립화과정을 촬영한 사진으로 Photo. 6, 7과 비교해보면 t_2 가 1.1ms이후부터 분무선단도달거리가 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 전체적인 분무의 미립화가 미소함을 관찰할 수 있다.

Fig. 8은 디젤분무의 형상을 정량적으로 해석하기 위하여 Hiro Hiroyasu가 모델링 한 것이다. 본 그림에서 θ 는 분무각을 나타내고 일반적으로 붕괴길이는 분무의 분사속도가 200(m/s)이상일 때 그 길이가 평균 10~30mm로 알려져 있다.

Fig. 9, 10은 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa 이고 상온 대기압하의 용기내로 분사시켰을 때 노즐형상비에 따른 분무선단도달거리와 분무선단속도를 그래프로 나타낸 그림이다. Fig. 9로부터 분무선단도달거리는 노즐형상비 및 분사시간 경과에 따라 거의 일정하다가 0.55ms 이후 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 순으로 발달되고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 시간경과에 따른 분무속도를 나타낸 그림으로 분무선단도달거리와 마찬가지로 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 순으로 크게 나타난다. 그러나 이 두 그래프를 보고 노즐형상비에 따른 분무의 분열과정 특성을 관찰하거나 천이점 발생지점을 파악하기에는 다소 어려운 점이 있다.

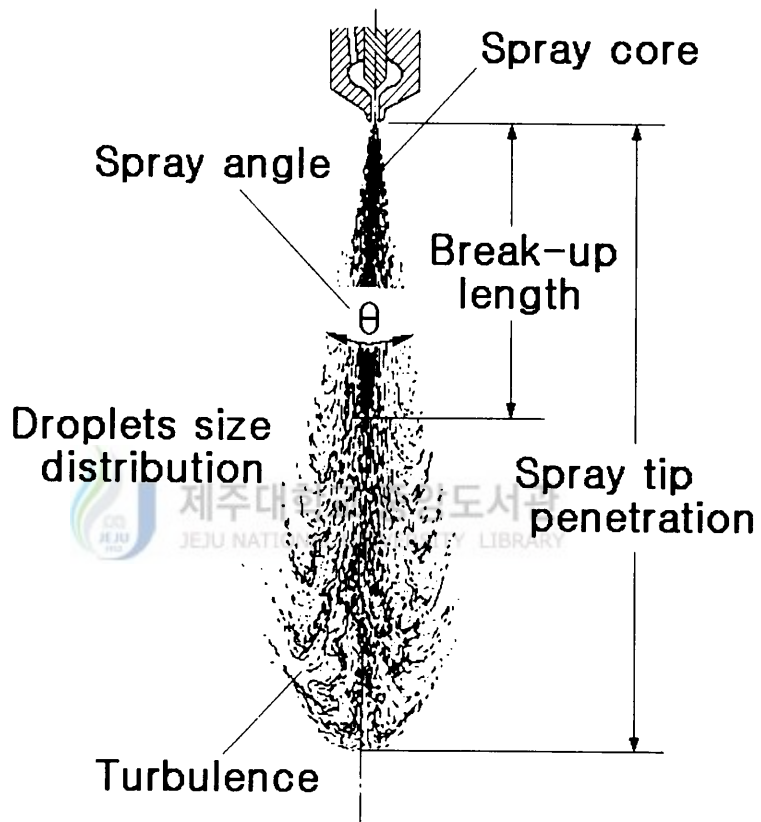


Fig. 8 Parameters of a spray

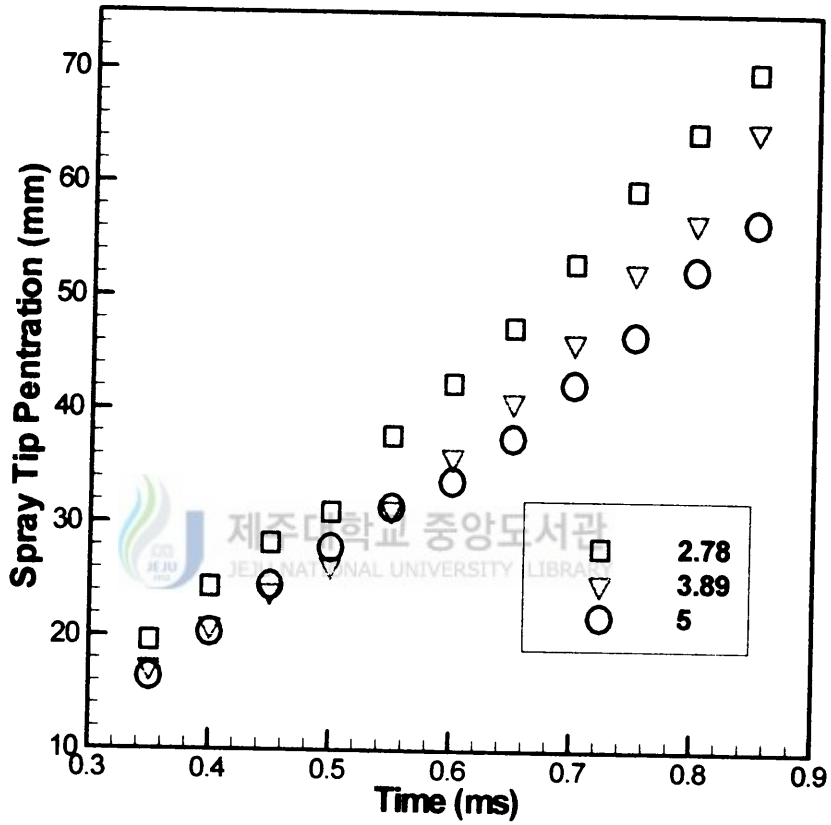


Fig. 9 Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration at $P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$ ($D=0.45\text{mm}$)

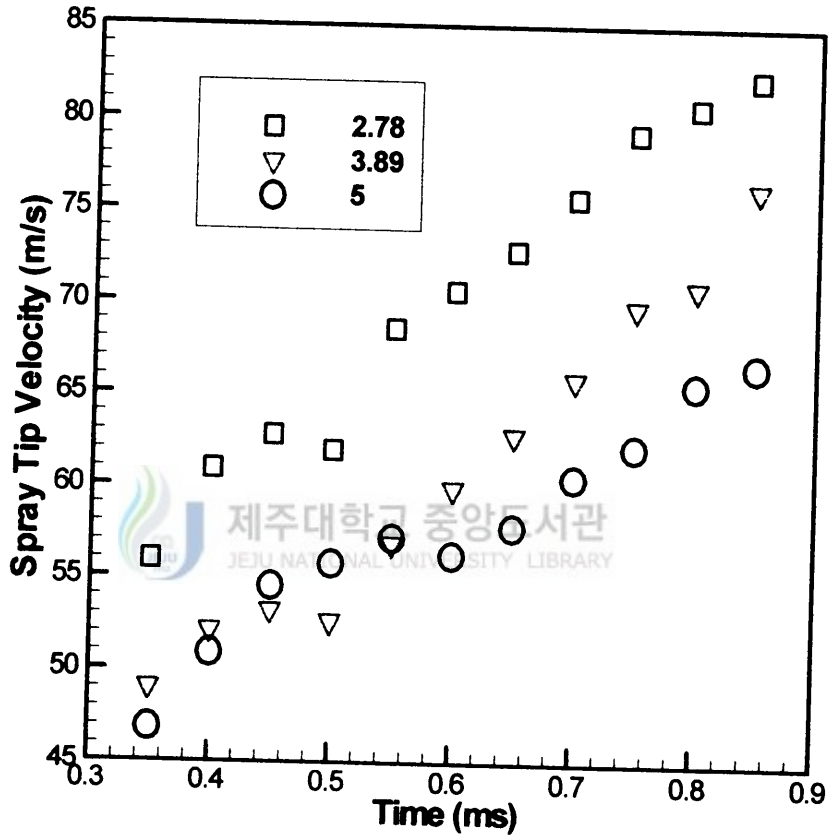


Fig. 10 Influence of nozzle aspect ratio on spray tip velocity at $P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$ ($D=0.45\text{mm}$)

Fig. 11, 12, 13은 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고 분위기 압력이 3MPa인 조건으로 용기내로 분사하였을 때의 노즐형상비에 따른 분무선단도달거리와 분무각 및 속도를 그래프로 나타낸 그림이다.

Fig. 11은 분무선단도달거리를 나타낸 그래프로서 분사초기에는 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 순서로 분무선단도달거리가 길게 나타나고 있다. 그리고 천이점의 발생은 노즐형상비가 2.78일 때는 0.95ms, 3.89일 때는 1.0ms, 5일 때는 1.1ms 부근에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 분무가 천이점을 지나 완전히 발달되었을 때 분무선단도달거리는 노즐형상비와 무관하여 분사시간의 경과에 따라 거의 같게 발달하고 있다고 보아도 좋을 것이다.

Fig. 12는 분무각을 나타낸 그래프로서 분사초기에는 2.78, 3.89, 5인 순서로 큰 값을 보이고 있다. 이것은 분사초기에 노즐형상비가 작을수록 디스퍼번스의 영향을 많이 받아 분무각이 커지고 천이점도 일찍 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 1.25ms이후 즉 분무가 천이점을 지나 완전히 발달된 이후부터는 3.89, 2.78, 5인 순서로 크게 나타나고 있다.

Fig. 13은 분무의 속도를 나타낸 그래프로서 분사초기에는 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 순서로 큰 값을 나타나고 있으나 천이점 이후에는 3.89, 2.78, 5인 순서로 나타나고 있다.

위 결과로부터 분사초기에는 분무선단도달거리, 분무각, 분무속도가 노즐형상비가 작은 순서로 큰 값을 보이다가 분무가 완전히 발달된 이후에는 노즐형상비가 3.89, 2.78, 5인 순서로 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 노즐형상비가 분무의 발달과정에 미치는 영향은 분사초기뿐 만 아니라 천이점 이후에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

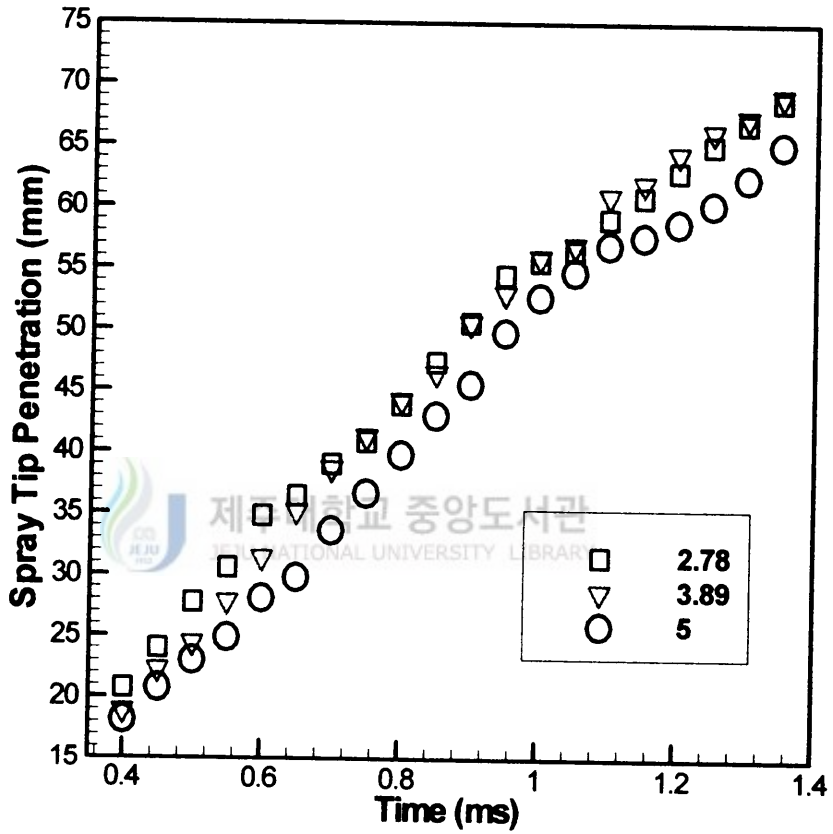


Fig. 11 Influence of nozzle aspect ratio on spray tip penetration at $P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$ ($D=0.45\text{mm}$)

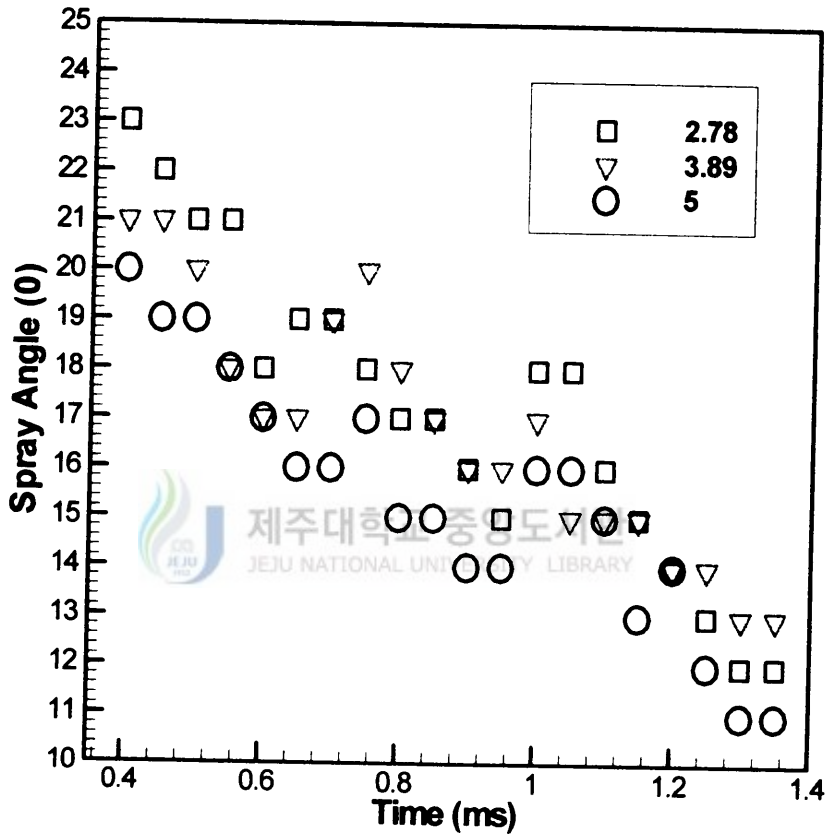


Fig. 12 Influence of nozzle aspect ratio on spray angle
at $P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$ ($D=0.45\text{mm}$)

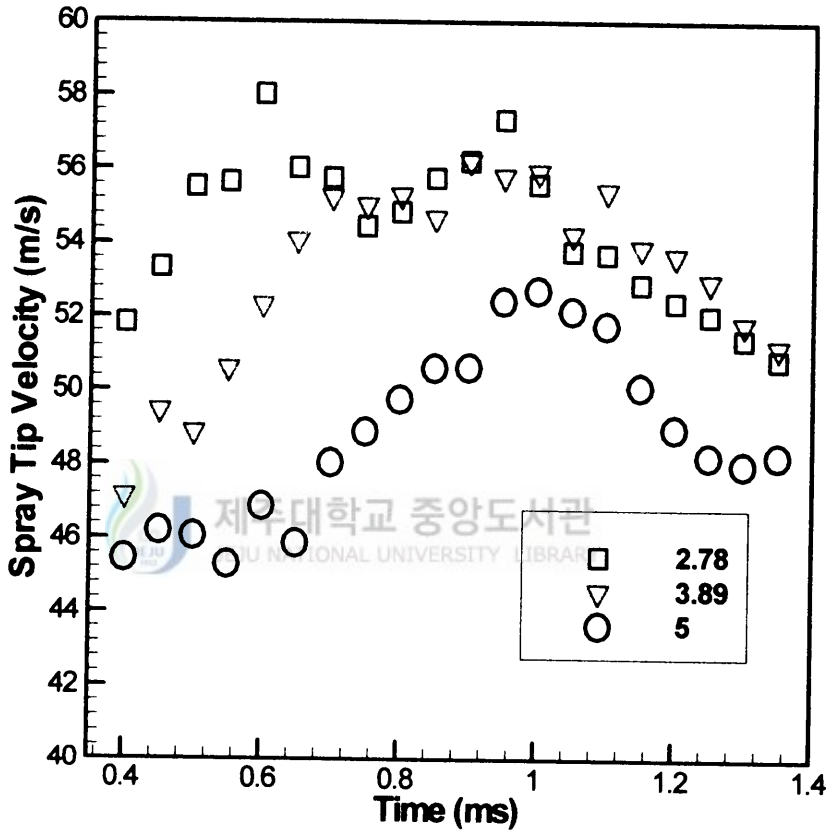


Fig. 13 Influence of nozzle aspect ratio on spray tip velocity
at $P_i=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$ ($D=0.45\text{mm}$)

3-5. 디젤분무의 미립화기구 관찰

Photo. 9는 분사압력이 14MPa, 분위기압력이 0.1MPa, 노즐형상비가 3.89, 노즐직경이 0.45mm일 때 분무의 분산과정을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 확대사진을 스캐너로 읽은 다음 분무초기 분무의 분산과정을 해석하였다.

Photo. 9(a)는 분사된 후 0.30ms에서의 분무사진이다. 사진에서 구간①은 교란되지 않은 미분열장이며 노즐형상비에 의해 결정되며 Photo. 2, 3에서 본 바와 같이 노즐형상비가 클 수록 그 길이는 길어진다. 구간②는 노즐선단 부근에서 발생한 파가 상류로 갈수록 점점 성장 교란되어 결국 이 파로부터 액사 및 액적발생이 구간 ③의 끝까지 계속되고 있다. 구간④는 정지된 주위공기의 저항으로 인해 분무가 정체되고 그로 인해 후발분무와 선발분무가 서로 충돌하여 원추각⑥보다 큰 분무각을 형성하면서 반경방향으로 발달되고 있다. 구간⑤는 후발분무가 선발분무를 추월하여 발달되고 있으며 액사 및 액적이 발생되고 있지 않다.

Photo. 9(b)는 동일조건하에서 분사개시 후 0.35ms에서의 분무사진이다. 그림에서 (A)는 앞에서 살펴본 분무의 추월에 의해 발생한 액사와 액적을 보여주며 분열과정 중에 있어 불안정하다. (A)와 (B)의 분열과정은 추월현상으로 발생한 불안정한 액체 덩어리간의 친화력과 분열되려는 힘과의 상호작용, 액사와 액적간의 충돌 및 공기와의 마찰등에 의해 액적이 생성되고 있다.

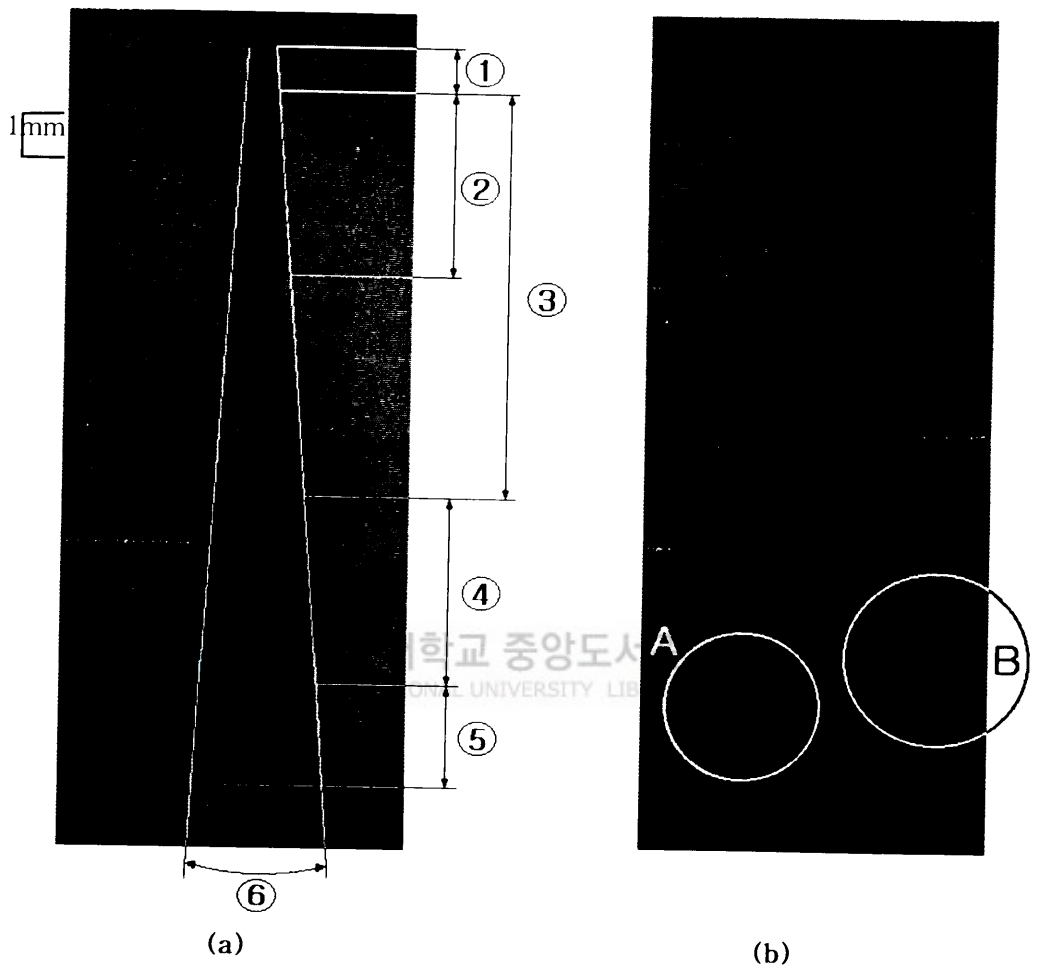


Photo. 9 Disintegrating mode of developing spray($P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$,
 $D=0.45\text{mm}$, $L/D=3.89$, $t=0.30\text{ms}$ (a), $t=0.35\text{ms}$ (b))

VI. 결 론

본 연구는 노즐직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고 분위기압력을 0.1, 3MPa로 변화시켜 노즐형상비에 따른 디젤분무의 발달과정을 나노라이트와 스트로보광원에 의한 고속순간 확대사진을 상세히 관찰하여 디젤분무의 분산특성을 정량적으로 해석하고 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 노즐직경이 같고 분사압력과 분위기압력이 일정할 경우 노즐형상비가 작을수록 디스터번스의 발생이 분무의 초기미립화에 직접적인 요인으로 작용하여 붕괴길이가 작아지고 초기분무각은 커지는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 천이점이 일찍 발생하여 노즐선단에서의 미립화가 활발히 진행된다.
2. 분사개시후 분무된 연료는 약 1~2mm 까지 교란되지 않은 액주상태의 분무로 분출되고 있으며, 노즐형상비가 클수록 미분열액주의 길이는 길어진다.
3. 분사개시직후 분무액주는 표면파에 의해 액사 및 액적의 형태로 분열되고 이 때 발생된 액적군은 대체로 크기가 균일하였다.
4. 분무선단영역에서 분무류는 분위기압력의 저항으로 운동량이 감소되어 후발분무가 선행분무류를 추월하게 된다. 이 때 액적 상호간의 충돌에 의해 분무는 반경방향으로 급격히 팽창하면서 길이가 매우 긴 부수한 액적군이 활발히 형성되고 있으며 매우 불안정한 파형을 이루고 있다.

5. 노즐형상비가 2.78, 3.89, 5인 경우 분위기압력하에 분사된 분무는 분무선 단도달거리에 큰 영향이 없으나 분사시간경과에 따라 2.78, 3.89, 5인 순서로 천이점이 일찍 발생하였다.
6. 분무각은 노즐형상비가 작을수록 큰 값을 가지나, 천이점을 지나 분무가 완전히 발달되었을 때는 노즐형상비가 3.89일 때가 가장 크게 나타났다.
7. 노즐형상비에 따른 분무의 분열과정을 살펴본 결과 분무의 발달과정에서 노즐형상비가 분무초기의 미립화를 지배하는 주요 변수임을 알 수 있으며, 완전히 발달된 분무의 경우에 적정 분무각에 대한 노즐형상비가 존재함을 알 수 있다.



V. 참고문헌

- [1] 명현국, 1995, “디젤엔진의 분무형태에 따른 연소 및 배기 특성에 관한 연구”, 국민대학교 자동차공학과.
- [2] 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.
- [3] N. Tamaki., M. Shimizu and H. Hiroyasu, 2000, “Enhanced Atomization of a Liquid Jet by Cavitation in Nozzle Hole” , ICLASS-2000, pp. 292~299.
- [4] Reitz, R. D., 1978, “Atomization and other Breakup Regimes of a Liquid Jet”, Ph. D. Thesis, Princeton University.
- [5] 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.
- [6] 허종철, 구자왕, 이규영, 양옥룡, 1991, “디젤분무의 초기분산과정에 관한 실험적 연구”, 한국자동차공학회 논문집, 13권 2호, pp. 42-49.
- [7] 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.
- [8] 許鐘哲, 1992, “單孔 디젤 노즐의 微粒化 形成機構에 關한 實驗的 研究”, 仁荷大學校 工學博士學位論文.
- [9] 현기수, 1992, “노즐形狀비가 디젤 噴霧의 分散過程에 미치는 影響”, 仁荷大學校 工學碩士學位論文.

- [10] 구자예, 정홍철, 1994, “노즐부근에서의 비정상분무 거동”, 한국자동차공학회 논문집, Vol 2, pp. 100-111.
- [11] Masataka Arai, 1994, “Break-up Mechanisms of Speed Liquid Jet and Control Method for a Spray Behavior”, International Symposium on Advanced Spray Combustion, pp. 11~24.
- [12] Hiro Hiroyasu, “Structures of Fuel Spray in Diesel Engines”, 1995년도 한국액체미립화학회 학술강연회 논문집, pp. 7~22.
- [13] 허종철, 고경남, 1996, “분위기 압력이 디젤분무특성에 미치는 영향”, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제7권 1호 pp. 35-44.
- [14] 이상용, 1996, “액체미립화”, 대우학술총서 자연과학.
- [15] 이봉수, 구자예, 이장희, 1998, “디젤 분무의 초기 미립화 특성”, 1998년도 한국액체미립화학회 학술강연회 논문집, pp. 63~69.



감사의 글

얼마 살지는 않았지만 저의 인생에 있어서 지난 2년은 짧지만 그 짧은 시간은 나에게 커다란 도약과 발전의 시간이었고 미흡한 본 논문이 완성되기 까지 많은 도움을 아끼시지 않은 분들에게 감사의 말씀을 전하려 합니다.

먼저 많은 충고와 격려로 지도하여 주신 허종철 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 관심을 갖고 돌봐주신 고장권 교수님, 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 현명택 교수님, 임중환 교수님, 조경호 교수님, 정동원 교수님 그리고 최경현 교수님께 감사드립니다.

어려울 때마다 서로에게 격려를 아끼지 않았던 제어실험실의 병수, 민호, 상철, 열전달실험실의 동원형, 양훈형, 혁진, 석우, 동언, 정형가공실험실의 형일형, 고체역학실험실의 승철형, 경부형, 훈기형 그리고 학과사무실의 오명범, 강남훈 선생께도 감사드립니다, 그리고 기쁠 때나 슬플 때나 늘 같이 있었던 소중한 우리 실험실 식구들, 선배로서 때론 친구로서 우리 유체역학실험실을 잘 이끌어준 상필형, 논문에 많은 조언과 도움을 주었던 실험실 최고 참 창수형, 실험실 살림을 맡으면서도 불평 없이 실험을 도와준 승현, 멀리 있지만 항상 힘이 되 주었던 동현형, 그리고 학부생 대옥, 진오에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

무엇보다도 소중한 우리가족들, 매형, 누님내외분과 하나뿐인 이쁜 조카은수, 대학원 진학을 반가와 하며 힘이 되어준 형, 자신들의 배움의 한을 못한 아들에게서 풀어보시려 했던 소중한 나의 아버지, 어머니 머리 숙여 감사드립니다, 그리고 나에게 물질적으로 정신적으로 힘이 되어준 효정양에게도 감사드립니다, 마지막으로 어렵고 힘들 때마다 용기와 힘이 되었던 제 자신에게도 감사하고 싶습니다.

2000년 12월