

碩士學位論文

大氣壓下에서 디젤噴霧初期의  
分裂過程에 관한 實驗的 研究

濟州大學校 大學院

機械工學科



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

高 炅 男

1994年 12月

# 大氣壓下에서 디젤噴霧初期의 分裂過程에 關한 實驗的 研究

指導教授 許 鐘 哲

高 旻 男

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1994年 12月

高旻男의 工學碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長 권 기 리

委 員 金 貴 植

委 員 許 鐘 哲



濟州大學校 大學院

1994年 12月

---

**An Experimental Study on Dispersion Process  
of Initial Diesel Spray  
in Atmospheric Conditions**

**Gyeong-Nam Ko**

**(Supervised by professor Jong-Chul Huh)**



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

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY**

**1994. 12.**

# 목 차

Summary	1
I. 서 론	3
1-1. 연구의 배경	3
1-2. 종래의 연구동향	5
1-3. 연구목적	7
II. 실험장치 및 방법	9
2-1. 연료 분사장치 및 측정 시스템	9
2-2. 사진촬영 장치 및 실험조건	15
III. 실험 결과 및 고찰	20
3-1. 대기압하에서의 분무의 발달과정	20
3-2. 분무초기에서 액주의 분열 및 액적형성 과정	33
3-3. 미립화 형성기구	38
IV. 결론	43
V. 참고문헌	45

---

# SUMMARY

Basic experiments have been conducted to investigate the effects of injection pressure on the dispersion and spray characteristics under the atmospheric conditions. Also this study shows the course of forming the ligaments and droplets after non-disintergrated intact core is changed into disintergrated one in the initial stage of the diesel fuel spray.

The results obtained as fallows.

1. Discharge coefficient of each injection pressure is almost constant regardless of injection pressure, and therefore the ratio of changing pressure energy into kinetic energy is same when nozzle aspect ratio is constant.

2. 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.

3. Spray angle increases with higher injection pressure when the lapse of time is equal. In the initial stage of spray, it largely decreases and reaches finally constant value as 0.8 - 1.2 ms has passed since the beginning of injection.

4. As the injection time is increased from the injection start to the fully developed spray, the ligaments yield droplets as a results of friction

---

forces between the surface waves generated at the surface of the intact core and the ambient gas.

5. Spray overtaking which the shooting spray penetrates through the preceding spray and finally becomes the spray head is occurred.

Therefore the long and numerous ligaments are generated from the spray tip and the ligaments become droplets. The droplets generated from this phenomenon are bigger and more irregular than the droplets produced from the jet surface waves.

# I. 서 론

## 1-1. 연구의 배경

액체미립화는 액체를 미세한 액적으로 된 분무상태로 하거나 역으로 초미립상태의 것을 합쳐 응집시키는 방법의 총칭으로 평균입경이 수 nm에서 mm까지 광범위하게 연구 대상이 되고 있다. 이 분야의 연구과제로는 분무생성기구의 열유체공학적 해명, 분무특성의 제시, 분무의 운동, 증발, 연소반응등에 관한 이론적 실험적연구, 분자 및 증기의 응집기구의 물리화화적인 해명이 있고, 분무, 미세입자 생성법의 개발연구와 공업적 응용법의 개발등이 있다.

이들 중 디젤기관에서 완전연소에 가깝도록 연료를 가능한한 작은 액적으로 미립화 시키는 동시에 충분한 관통도를 갖도록하는 것은 연소생성물중의 Soot, 미연탄화물과 NO<sub>x</sub> 등의 오염물질 배출과 밀접한 관련이 있다 (Chigier등, 1981).

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

연료 분사개시후 약 1~2ms의 착화지연기간중에 연료가 충분히 무화되어 증발되어야 하나, 연소실 크기의 제한으로 인하여 분사된 연료입자의 비

행거리가 제한된다. 그러므로 연료가 충분히 미립화되는데 분무길이와 시간 등을 고려할때, 시간적, 공간적으로 연료분무의 발달상태 및 분열과정을 알아내야 하고 또한 미분열상태의 분무주류부와 분무액적이 연소실 벽면에 충돌한 후 분산되고 있다고 알려져 있다. 그러므로 연료가 연소하기 전 증발, 혼합기 형성과정과 연소실 벽면 충돌시의 연료분무의 분무액적의 거동을 구명하기 위해서는 분사초기의 분무의 분열, 발달상태 등 분무특성을 정확하게 파악하는 연구가 선행 되어야 한다(千田二郎, 1984).

디젤분무의 분사초기의 분무특성에 영향을 주는 요인으로는 노즐입구에서 발생하는 공동현상(Cavitation phenomena), 분무유동에 의한 속도재구성(Velocity profile rearrangement)의 영향, 주위기체와의 상호작용과 유입에 의한 공기역학적 효과(Aerodynamic effect), 분무유동내에서 나타나는 유체 난류(Liquid turbulence), 공급압력의 진동(Supply pressure oscillation) 등을 들 수 있고(Reitz, 1982), 이와같은 현상들을 지배하는 주요변수로는 크게 연료특성, 분사노즐, 연소실 상태 등 3가지로 나눌 수 있다. 연료특성에는 밀도, 점도, 표면장력과 분사유량이, 분사노즐에는 분사압력, 노즐직경, 노즐형상비가, 연소실 상태는 분위기압력, 주위기체의 밀도, 연소실온도 등으로 세분할 수 있다. 미립화형성 기구는 이러한 지배변수들에 의해 분무특성이 결정되나 지배변수와 유체역학적 현상의 중첩으로 아직까지도 확실한 구명이 이루어 지지 않고 있다.

따라서 디젤분무에 관한 연구를 수행함에 있어서 우선적으로 분사초기의 분무, 분산특성에 관한 연구와 더불어 분무선단도달거리와 분무각사이의 상관관계등을 파악할 필요가 있다.



## 1-2. 종래의 연구 동향

디젤분무 및 분무초기거동에 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 보다 세분화하였다. 이중 분무영역의 발달과정을 구명하기 위해 Dent (1971), Hiroyasu (1984) 등은 분무선단거리가 분사개시로 부터 경과시간의 1승에 비례하는 영역과 0.5승에 비례하는 영역 즉, 발달과정의 분무와 완전히 발달된 분무와의 천이시간의 존재와 분사속도에 따라 Breakup length를 예측하여 분무의 분열과정을, Reitz (1978)는 분무의 분사개시로 부터 시간경과에 따라 고속 사진촬영을 행하여 분무의 분산과정을 구명하였다.

하등 (1984)은 분위기압력의 변화에 따른 분무특성을 순간광원을 이용한 직접 사진촬영법에 의해 실험을 수행한 결과 분무선단도달거리는 분위기압력이 높을수록 짧아지고 분무각은 증가하는 것을 확인했으며 열선 유속계를 이용하여 주위공기의 역학적인 거동에 관한 연구도 함께 수행하였다.

구 (1990)는 상온 대기압하에서 단공노즐을 사용하여 디젤분무의 초기 분산과정을 확대 사진촬영을 통해 관찰한 결과 분사초기에 분무선단속도가 최저가 되는 1차 천이점이 존재함을 확인하였다.

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 액주로 부터 시간경과에 따라 분열과정을 연구한 바 있

다.

Smallwood등 (1994)은 최초의 분사직후의 액주로 부터 분무선단이 분열되는 현상을 구명하기 위해 단공노즐을 사용하여 간헐적이고 매우 순간적인 밀집한 디젤분무를 2차원 레이저광을 투과함으로써 디젤분무의 Dense core 영역도 노즐입구에서 매우 가까운 곳에서부터 분열하고 있고 그것은 액주나 액사라기보다는 액적으로 해석했다.

Takahashi등 (1994)은 대기압과 분위기압력하에 확대 Shadowgraphy 로 분무초기의 고압 디젤분무형상을 분석하였는데 분사후 0.3ms까지는 분무선단이 무던영역(Insensitive region)이 있고 이것은 분사압력을 높이면 짧아지며 분무에서 발생한 난류유동과 관련이 있음을 보고했다.

Huang등 (1994)은 오리피스 유동패턴의 역할을 대기압하에서 분사압력과 노즐형상비를 변수로 하여 구명하였다. 오리피스 입구측이 직각인 S-type 과 둥근 R-type 으로 실험한 결과 S-type 의 오리피스가 보다 작은 액적을 생성시키며, 오리피스 유동패턴과 분사속도는 연료미립화에서 두가지 주요인자 임을 보였다.

Shimazaki등 (1994)은 CCD 카메라를 이용하여 Pseudo high speed image 촬영 시스템을 창안하여 디젤분무에 적용하고 분무구조등이 보다 쉽게 관찰됨을 보였다.

구등 (1994)은 위상도플러 입자측정기를 사용하여 액적크기(S.M.D.) 는 분무실의 가스밀도나 연료액체의 밀도비가 실제 디젤엔진의 연소실과 비슷한 조건에서 분무가장자리의 액적크기는 분사시간에 관계없이 약 20 $\mu$ m로 거의 일정함을 보였다.

이상과 같은 종래의 연구는 대부분의 경우 완전히 발달된 분무기구를 연구대상으로 하고 있으며 분무가 분사직후 부터 완전히 발달될 때까지의 분열기구에 관한 연구가 최근까지 진행되고 있으나 아직도 그 해석이 어렵고 미흡한 부분이 많은 실정이다.

### 1-3. 연구 목적

소형 직접분사식 디젤기관에서 연소실내로 분사된 액체연료는 분무제트로서 고밀도의 유립으로 분열하여 분무를 형성하고 액적으로 분열하여 증발하며 연료와 공기와의 혼합이 순식간에 이루어지고 있다. 이러한 혼합기형성으로 연료입자가 조밀하게 분포된 영역에서는 공기가 부족하고, 반대로 희박하게 분포된 영역에서는 흡입된 공기가 양호한 연소조건을 충족시키지 못함으로써 불완전 연소를 유발시켜 유해공해물질의 배출요인이 되고 있다(일본기계학회, 1986).

한편, 연료 분사압력에 의하여 니들밸브가 자동개폐되는 실용기관 분사시스템에 있어서는 분사율이 시간에 따라 변하는 비정상 간헐분무이므로 그 해석이 매우 곤란하다. 따라서 연료분무의 일관성있는 해석을 위해서는 분사율이 시간에 따라 일정한 정상분무로 유지되어야 하므로 정상분무상태를 실현하기 위하여 축압실을 설치할 필요가 있으며 연료가 분사되는 동안 설정압력이 강하할때 맥동을 줄여야 한다.

본 연구에서는 상온대기압하에서 노즐형상비가 4이고 노즐직경이 0.45mm인 노즐로 부터 분사율이 일정한 연료분무가 시간경과에 따라 액주상태에서 완전히 발달된 분무로 되는 과정을 확대사진촬영을 통하여 가시화

하고, 이들로 부터 디젤분무의 분무선단도달거리와 분무각사이의 상관관계와 분무선단속도를 정량적으로 해석하고 또한 촬영된 확대사진으로 부터 디젤 분무의 분사초기의 분산, 분열특성에 관한 실험적 기초자료를 얻고자 한다.



## II. 실험장치 및 방법

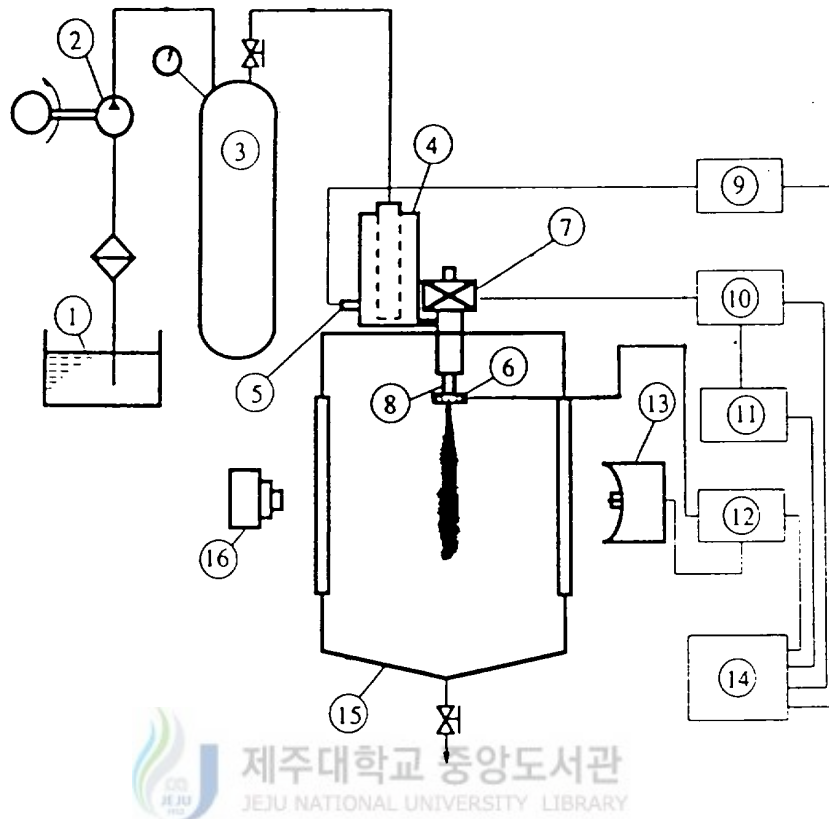
### 2-1. 연료 분사장치 및 측정 시스템

본 연구의 실험장치는 연료분사 시스템, 연료분사 제어장치, 신호지연장치 및 스트로보와 나노라이트를 광원으로 하는 사진 촬영장치로 구성하였다. 자동차용 분사펌프를 가변모터에 연결하여 플린저펌프 1개 만을 연료의 가압장치로 사용하였고 나머지 5개는 다시 연료탱크로 복귀시켰다.

본 실험에 사용한 실험장치의 개요도는 Fig. 2-1에 도시하였다.

연료탱크내의 필터를 통과하며 여과된 연료는 가변모터에 의하여 구동되는 자동차용 플린저펌프에 의하여 소정의 압력에 도달할 때까지 가압되어 제 1, 제 2 축압실에 저장된다. 분사펌프와 분사노즐 사이에 설치된 제 1 축압실(3)과 제 2 축압실(4)은 가압된 연료가 연료분사장치의 최종기구인 노즐(8)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.

본 실험에 사용한 연료분사 제어장치는 실용 노즐홀더의 상부에 솔레노이드를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드



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

**Fig. 2-1 Schematic diagram of experimental apparatus**

를 작동시키지 않는 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니어들을 압착하고 있는 스펀들의 상부판을 끌어 당기게 되며, 노즐 제어장치에 설정된 시간동안 연료가 분무관측용 용기내로 분사된다. 분무관측용 용기(15)는 내부직경 196mm, 길이 500mm로 양측면에 사진촬영이 가능하도록 길이 230mm, 폭 130mm, 두께가 19mm인 강화유리 관측창을 부착 하였다.

또한 연료 분사압력은 노즐홀더의 연료 입구측에 부착된 압력변환기(5)로 부터 디지털 지시기(9)에 의해 계측되며 축압실과 분사노즐 사이에 아나로그 압력계를 부착하여 분사압력을 보다 정확하게 조정하였다.

Photo. 2-1은 고압의 연료가 분사기간 동안, 제 2 축압실에 설치한 압력변환기(5)의 압력변화를 나타낸 오실로스코프 사진으로서 중축은 압력변화, 횡축은 분사시간, 즉 분사밸브의 개폐시간이고 한 눈금(1 Division)은 10ms를 나타낸다. 사진에서 분사기간중의 분사압력은 거의 일정하게 유지되므로 연료분사기간중의 분무는 정상분무 상태이다.

Fig. 2-2는 본 실험에서 사용한 단공노즐의 상세도이며 노즐직경이 0.45mm, 노즐형상비는 4로 하여 실험을 행하였다.

Fig. 2-3은 전자밸브의 작동기간을 제어하기 위한 노즐 구동장치의 제어회로도이다. 노즐구동장치의 제어는 분사기간을 설정한 후에 작동스위치를 누르면 구동장치를 거쳐 솔레노이드 밸브에 전류가 흘러 작동되도록 하였으며, 설정기간 동안 작동된 후 제어회로에 의하여 솔레노이드의 전류를 차단하도록 하였다. 이 장치의 설정시간은 0.1ms로 부터 100ms까지 조절이 가능하다.

Fig. 2-4에 표시한 회로도는 노즐 구동장치에서 들어오는 미세한 신호

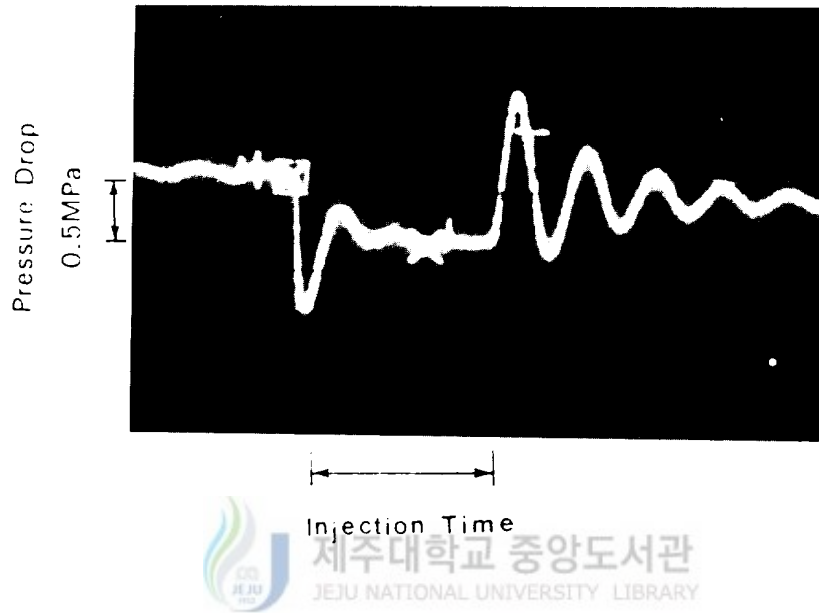


Photo. 2-1 Photographs of pressure drop of pressure transducer ( $P_i=21\text{MPa}$ )



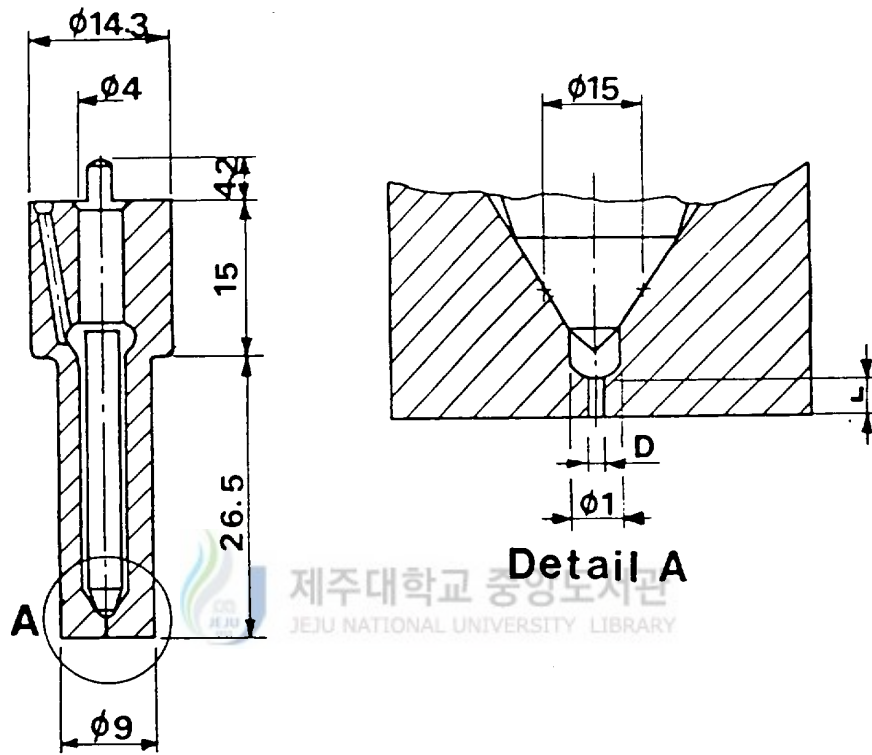


Fig. 2-2 Details of single hole nozzle

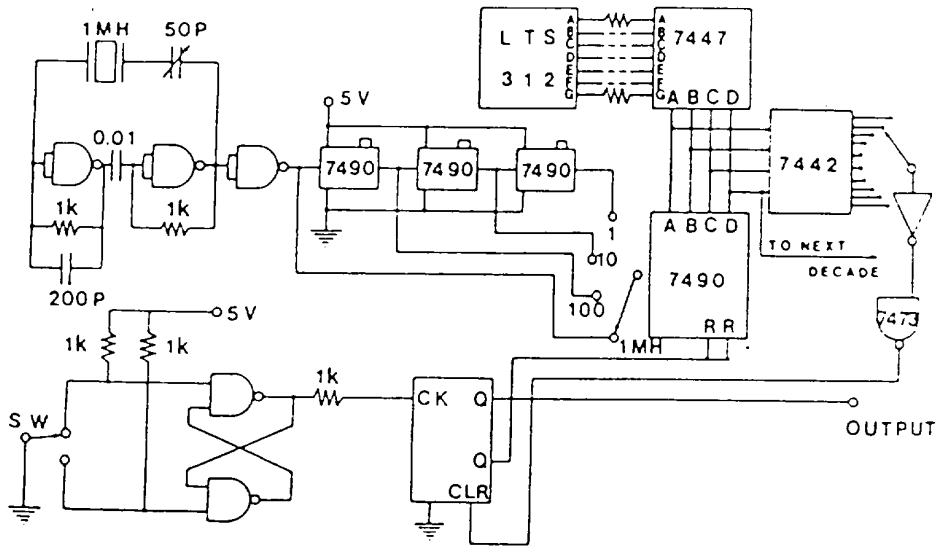


Fig. 2-3 Nozzle control circuit

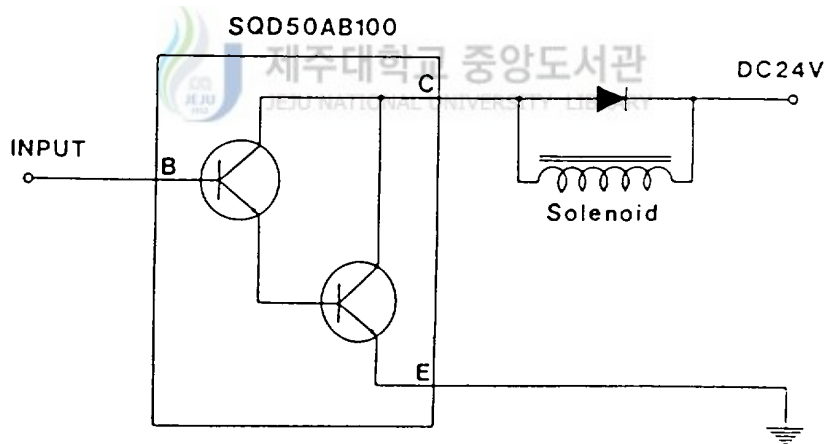


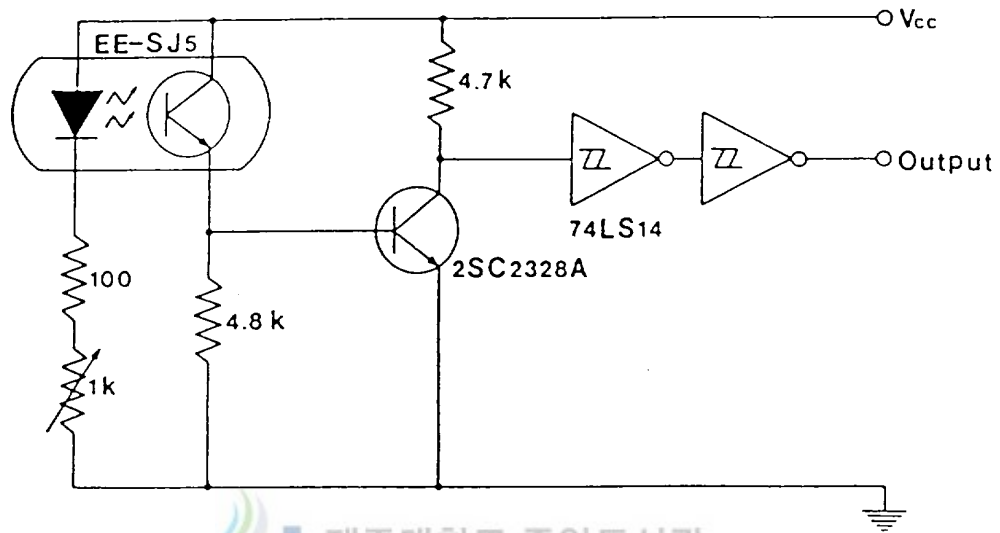
Fig. 2-4 Nozzle driving circuit

를 받아 솔레노이드를 구동시킬 수 있는 전류로 증폭하며 솔레노이드의 역기 전류로부터 회로를 보호한다.

## 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 분무현상을 가시화하여 관찰, 해석하였다.

노즐을 통하여 분사된 분무가 분사직후로부터 임의시간 경과후까지의 분무형상을 촬영하기 위한 분사개시 신호는 노즐선단에 발광 다이오드와 감광측을 고정하는 장치를 제작하여 부착하였다. 노즐 제어장치에 의해 전자밸브가 작동하여 실제 디젤유가 분사되는 순간 분사개시 신호가 발생하게 되어 Fig. 2-5에 표시한 회로로 입력된다. Fig. 2-5는 분사개시 초기 신호 발생장치로서 발광 다이오드와 감광측 사이에 디젤유가 침입하여 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. 2-6에 도시된 신호 지연장치에서 재 증폭되고 설정된 시간만큼 지연된 후에 스트로보스코프나 나노라이트에 입력되어 적정노출 광량으로 순간발광 시킨다. 이 신호지연장치의 신호지연 시간 범위는 0.001ms로부터 9ms까지 이다. 이 때 카메라는 B-서티 상태이므로 이 순간광을 받아들여 분무상태가 필름상에 감광되어 촬영된다. 전체분무 사진촬영에는 105mm마이크로렌즈와 스트로보의



**Fig. 2-5 Photo-interrupter circuit for initial signal**

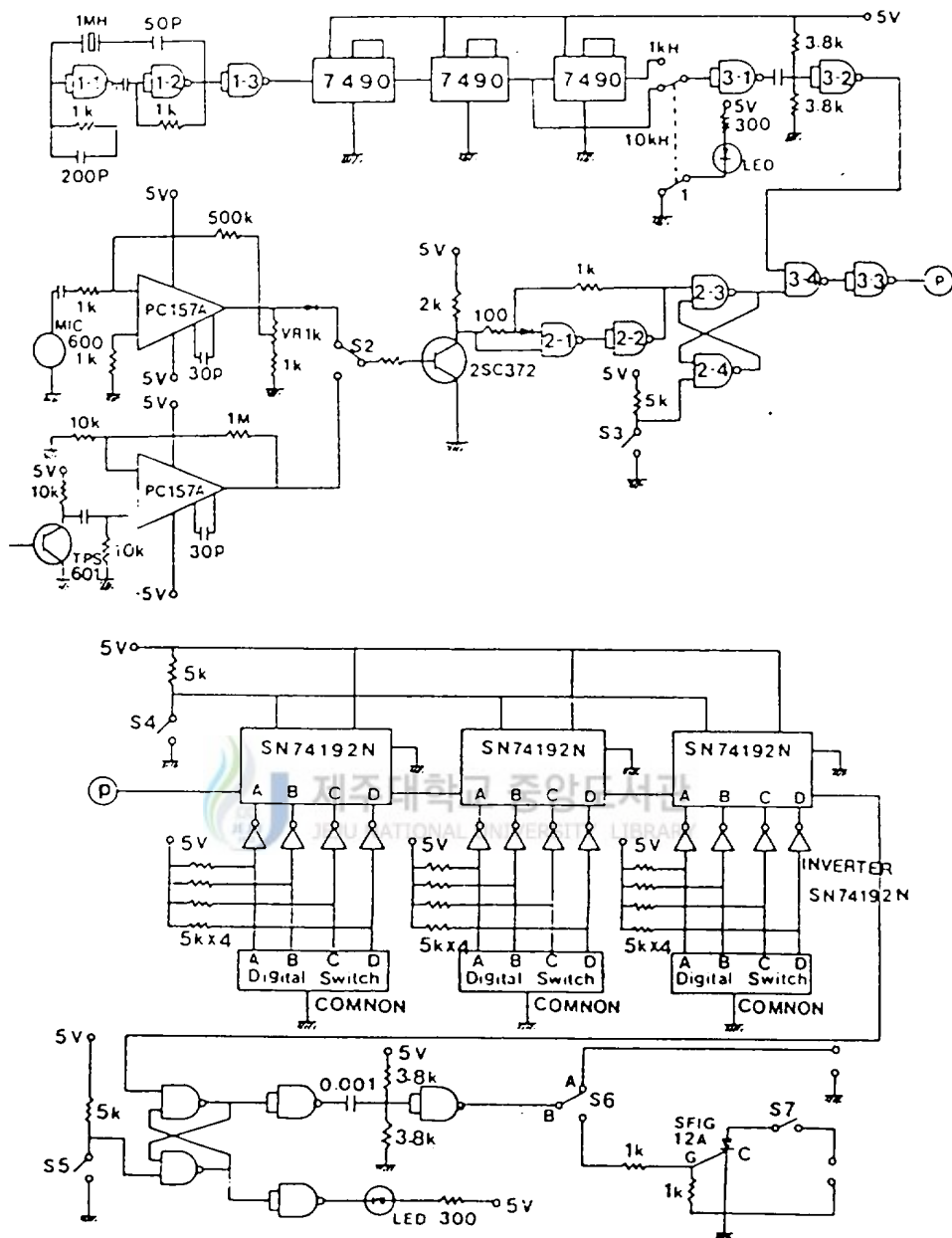


Fig. 2-6 Time delay circuit

광원을 사용하였다.

디젤분무는 분사속도가 고속이므로 정지된 상을 촬영하기가 상용  $\mu\text{s}$ 단 위 스트로보스코프 광원으로는 곤란하므로 본 연구에서는 발광시간이 17ns 인 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 분무선단길이, 분무폭등을 직접 계측하고 분석하였다. 사진촬영 및 실험조건은 Table 1 과 같다.



Table 1. Experimental conditions

Discriptions	Conditions
Injection press. (MPa)	7, 14, 21
Ambient press. (MPa)	0.1
Ambient temperature	Room temperature
Fuel	Low sulfur diesel oil (S = 0.84)
Nozzle	Single hole
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 $\mu$ s) Nanolite (Pulse duration : 17 ns)

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3-1. 대기압하에서의 분무의 발달과정

유량계수는 레이놀즈수, 노즐형상비, 노즐직경, 분사압력과 분위기압력차 ( $\Delta P$ ), 공동현상등에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 노즐 직경이 0.45mm, 노즐형상비가 4인 경우만을 고려하여 유량계수를 구하였다. 이 때 실험범위의 분사압력하에서는 노즐내 유동이 완전히 발달하지 못하고 동시에 공동현상을 동반하기 때문에 관내 유동을 정량적으로 해석하는 것이 불가능하다. 그러나 오리피스내 유동은 유량계수를 고려할 때 관 유동으로 생각할 수 있다.

유량계수는 실제 분사율( $Q/t$ )과 이론적인 분사율의 비 이므로

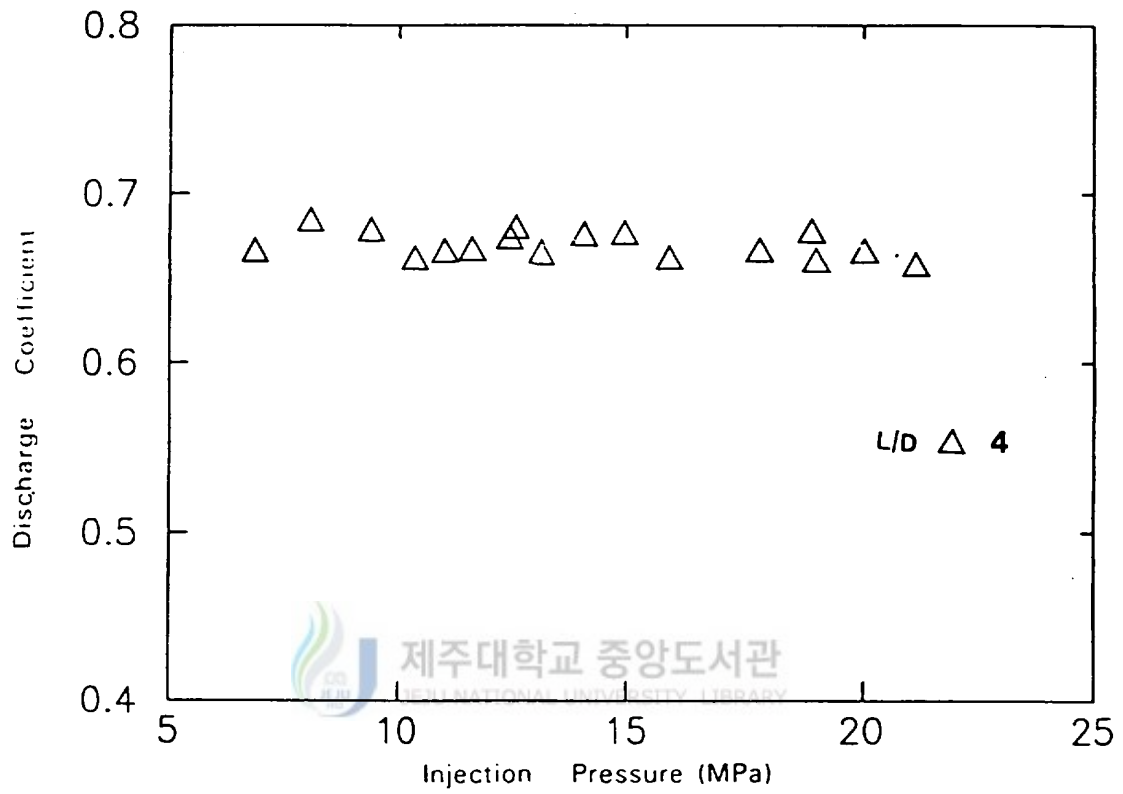
$$C_D = \{Q/At\}/\{2\Delta P/\rho\}^{0.5}$$

이다.

Fig. 3-1은 실험범위의 분사압력에서 유량계수의 값을 나타내고 있다. 그림으로 부터 유량계수 값은 분사압력에 관계없이 약 0.68로 거의 일정함을 알 수 있다. 따라서 노즐형상비가 4인 경우에 실험범위의 분사압력하에서는 압축에너지가 속도에너지로 변환되는 비가 일정하다고 볼 수 있다.

Photo. 3-1, 3-2, 3-3은 대기압상태의 용기내로 연료를 각각 7, 14, 21





**Fig. 3-1** Variation of discharge coefficient with injection pressure (D=0.45mm)

MPa의 압력으로 분사시켰을 때 스트로보 광원에 의한 순간 사진촬영법에 의해 촬영한 사진으로 디젤분무의 일례를 보여주고 있다. 이 사진에서 분무류의 분사초기에는 분사압력이 높을수록 분무의 폭은 넓어지고 있으나 1.0ms이후에는 거의 변화가 없음을 보여주고 있다. 그러나 이 사진들로 부터 분무의 분열과정이나 분사초기에 있어서 분산의 관찰은 거의 곤란하였다. 고압의 연료가 노즐을 통하여 분사될 때 촬영된 분무사진은 B-shutter 투영시 광원의 발광시간의 제약을 받기 때문에 분무가 정지하지 않게 촬영된다.

Chella등 (1986)은 고속으로 분사되는 분사류의 분열상태, 미립화된 입자를 정지된 상태로 촬영하기 위해서는 광원의 발광시간이 최소 50ns 이하이어야 한다고 보고했다.

Fig. 3-2는 일반적인 디젤분무의 형상을 정량적으로 해석하기 위하여 모델링한 것이다. Tanazawa에 의하면 분무선단도달거리는 중력의 영향을 받지 않는 경우에 있어 입자의 도달거리라고 정의하였다. 본 연구에서는 각 실험조건하에서 촬영된 분무사진의 노즐선단으로부터 분무선단까지의 거리(X)로 하였고, 분무각  $\theta$ 는  $2\tan^{-1}(2Y/X)$ 로 하여 분무각을 산출 하였다.

Fig. 3-3, 3-4, 3-5는 분사압력이 각각 7, 14, 21MPa인 조건에서 상온대기압 상태의 용기내로 분사시켰을 때 시간경과에 따른 분무선단도달거리 및 분무각의 관계를 나타내고 있다.

그럼으로 부터 7, 14, 21MPa로 분사압력이 상승함에 따라 분사시간 경과에 따른 분무선단도달거리는 증가하고 있다. 즉 분사압력이 7MPa에서 분사개시후 1ms에서의 분무선단도달거리는 약 30mm이고 14MPa에서는 약 40mm이며 21MPa에서는 약 70mm이다. 또한 각 분사압력에서의 분무선단

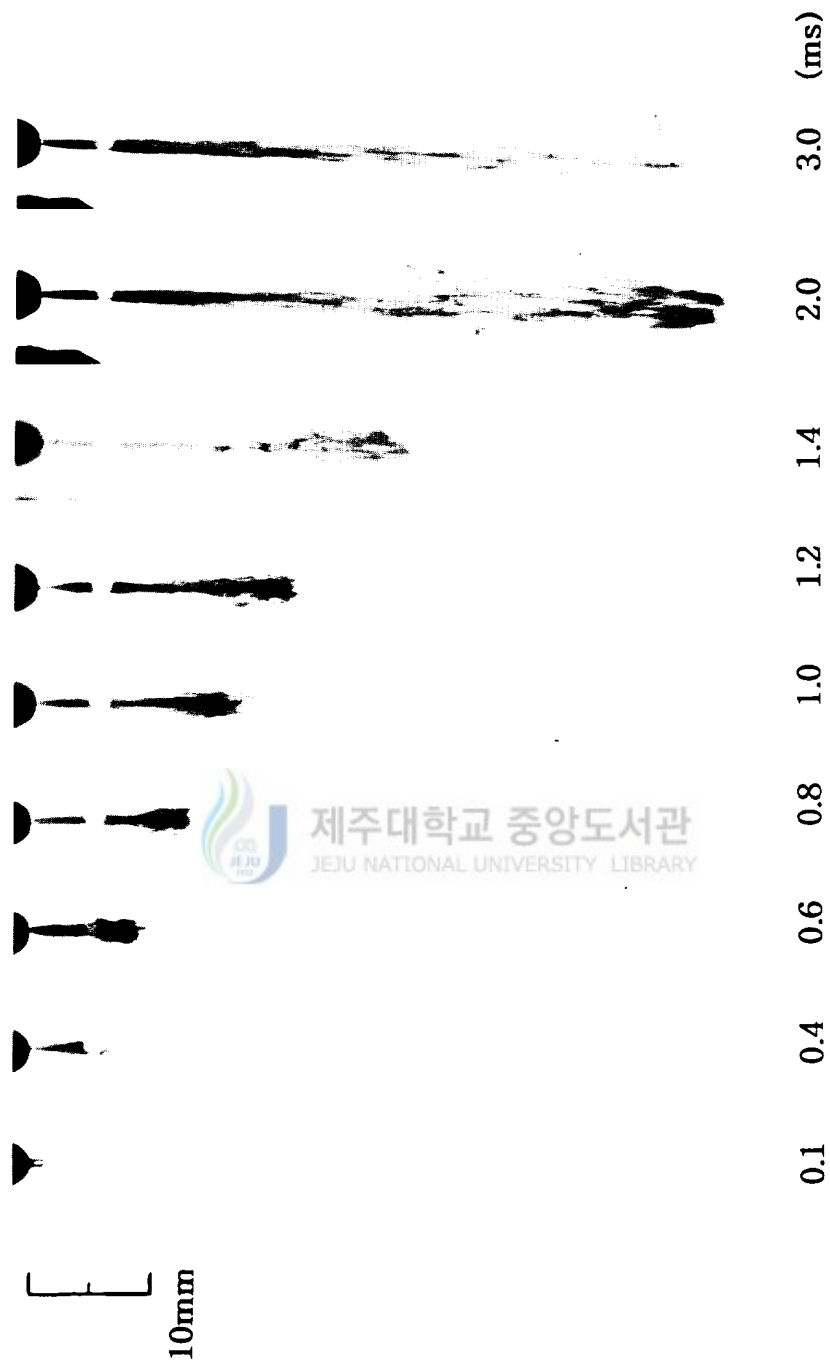


Photo. 3-1 Photographs of developing spray  
from injection start ( $P_i = 7\text{MPa}$ )

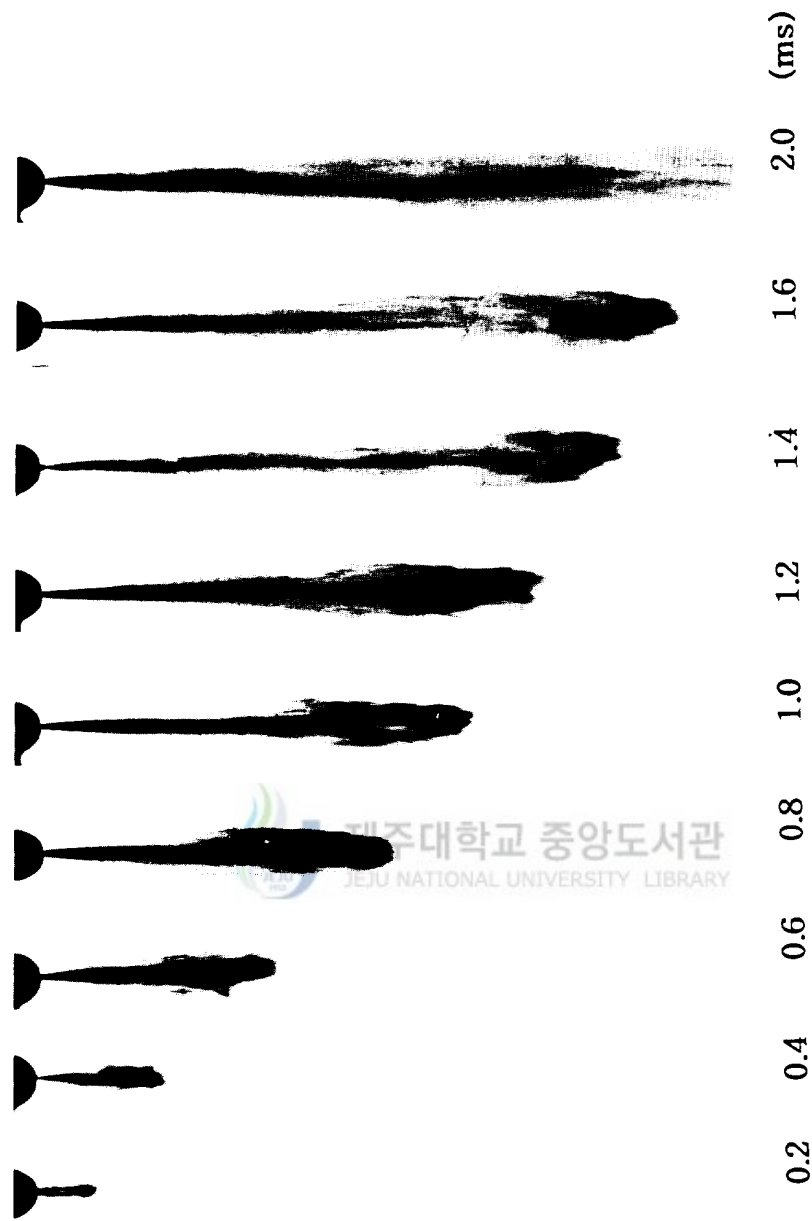


Photo. 3-2 Photographs of developing spray  
from injection start ( $P_i = 14\text{MPa}$ )

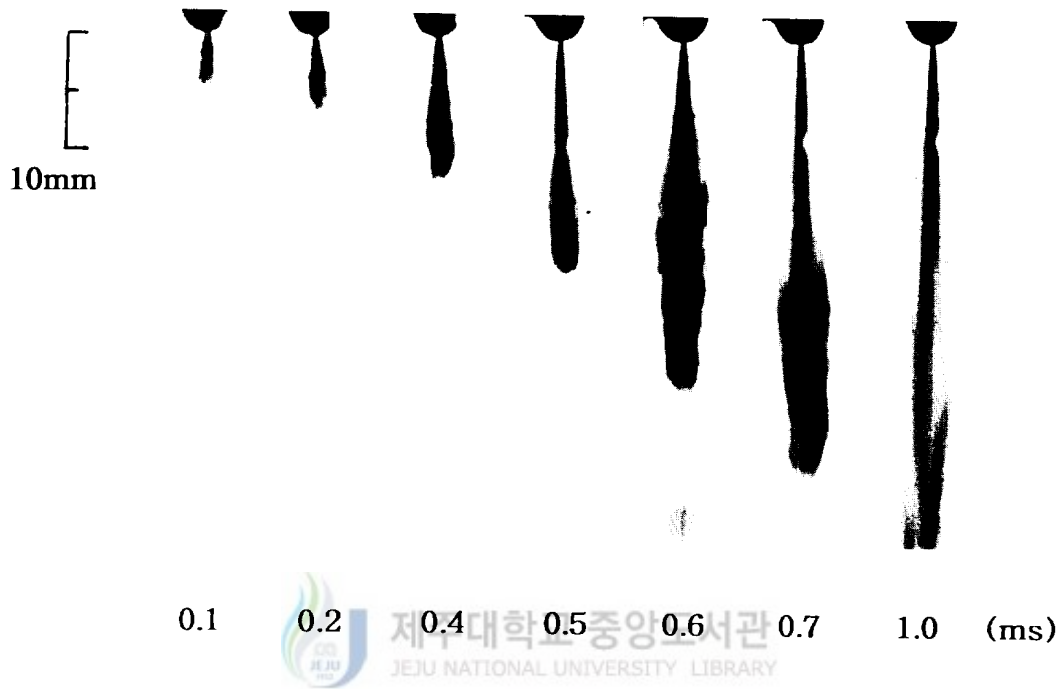


Photo. 3-3 Photographs of developing spray from injection start ( $P_i = 21\text{MPa}$ )

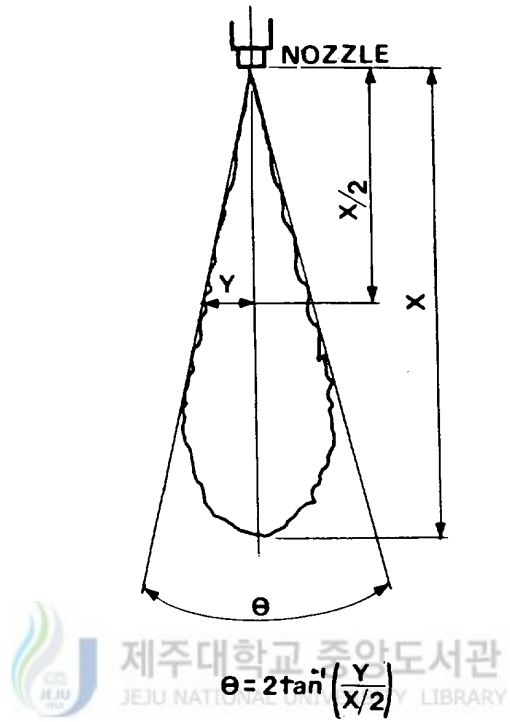


Fig. 3-2 Definition of spray angle( $\theta$ ) & penetration( $X$ )

도달거리는 Log-Log 좌표에서 기울기가 1인 직선으로 증가한다. 따라서 대기압하에서 분사된 분무의 성장은 분사압력에만 관련이 있음을 알 수 있다.

분무각은 그림들을 서로 비교하면 분사압력이 높을수록 초기분무각은 증가한다. 이는 분사노즐로 부터 연료가 분출될 때 압력에너지가 운동에너지로 전환되는 과정에서 반경방향의 운동량 증가에 기인하고 있다. 그 이후의 분무각은 급격히 감소하여 분사개시후 약 0.8-1.2 ms 에 도달하면 일정하게 되고있다. 이것은 반경방향의 운동량이 일정시간 후 급격히 감소하면서 결국 중심축방향의 운동량과 거의 같아지기 때문이라고 사료된다. 또한 분사압력이 높으면 분무각의 발달시간이 지연되어 분무의 분열시간이 길어지며 이 분열시간이 일차미립화(Primery atomization) 시간(Leferbvre, 1988)이라 생각된다.

Fig. 3-6은 분사압력이 14MPa 및 21MPa인 조건하에서 상온대기압 상태의 용기내로 연료를 분사시켰을 때 시간경과에 따른 분무선단속도를 Log-Log좌표로 나타낸 그림이다. 그림으로 부터 시간경과에 따라 직선적으로 분무가 발달되고 있고 Fig. 3-3, 3-4, 3-5와 마찬가지로 분사압력이 14MPa일 때 보다 21MPa일 때가 분무선단속도가 더 빠르고 그 기울기도 서로 비슷하다.

Fig. 3-7은 분사압력 7, 14, 21MPa에서 완전히 발달된 분무에서의 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 분사압력이 7MPa에서는 약  $4^\circ$ , 14MPa에서 약  $8^\circ$ , 21MPa이 되어서는 약  $10^\circ$ 로 14MPa과 21MPa에서는 거의 비슷한 분무폭을 가지며, 분사압력이 7MPa과 14MPa에서는 분무폭이 조금 더 증가하는 경향을 보이고 있다.

그러므로 대기압하에서 분사된 분무의 발달과정을 종합적으로 검토해

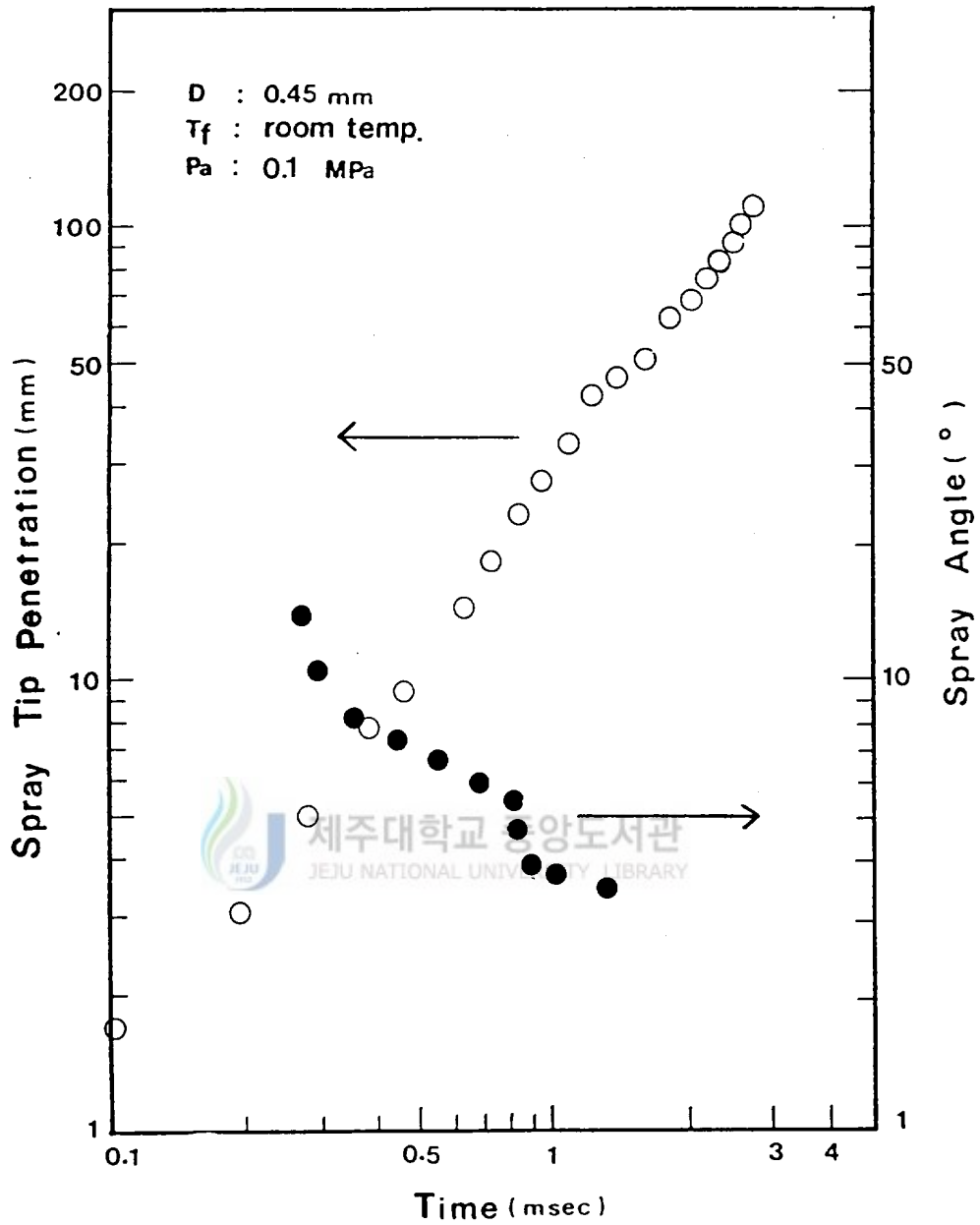


Fig. 3-3 Influence of injection pressure on spray tip penetration and spray angle ( $P_i = 7\text{MPa}$ )



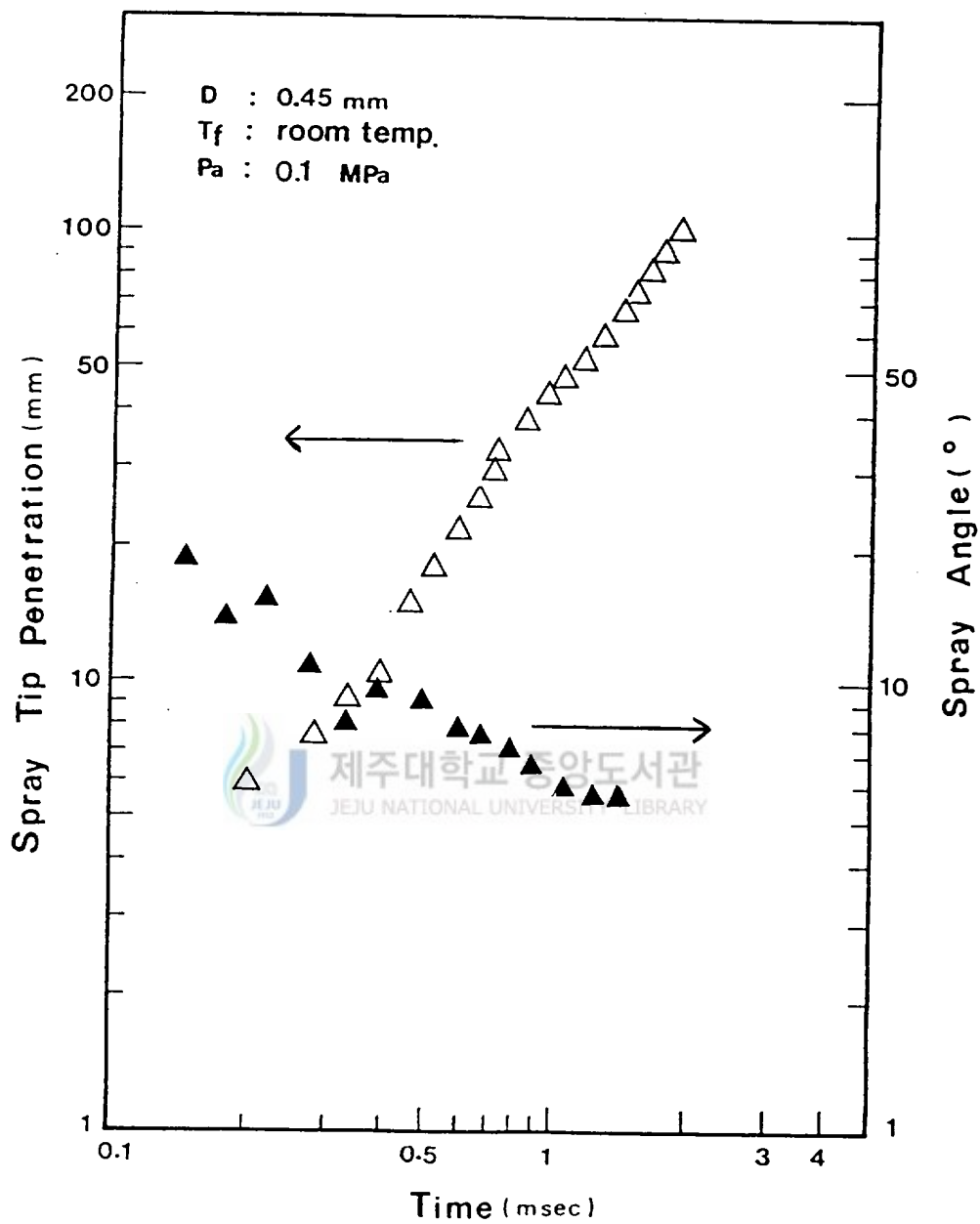


Fig. 3-4 Influence of injection pressure on spray tip penetration and spray angle ( $P_i = 14\text{MPa}$ )

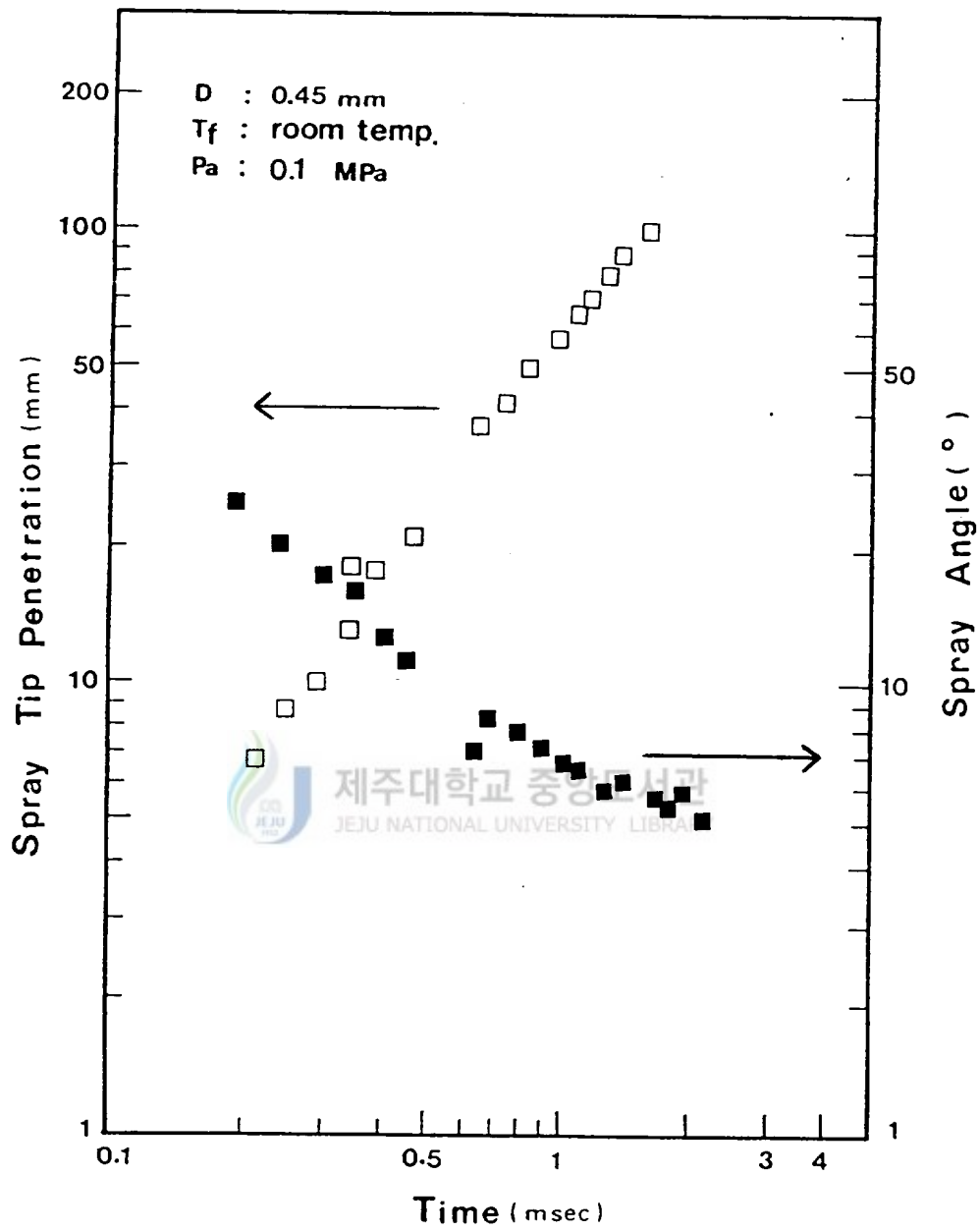


Fig. 3-5 Influence of injection pressure on spray tip penetration and spray angle ( $P_i = 21\text{MPa}$ )

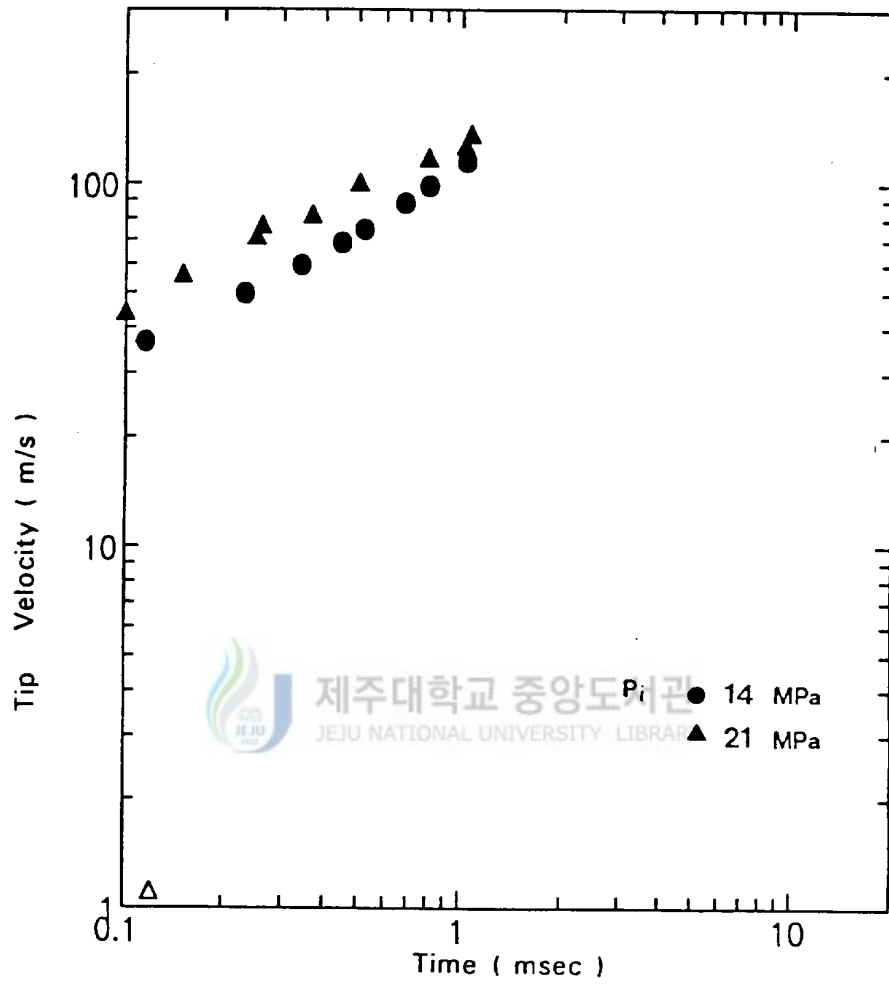
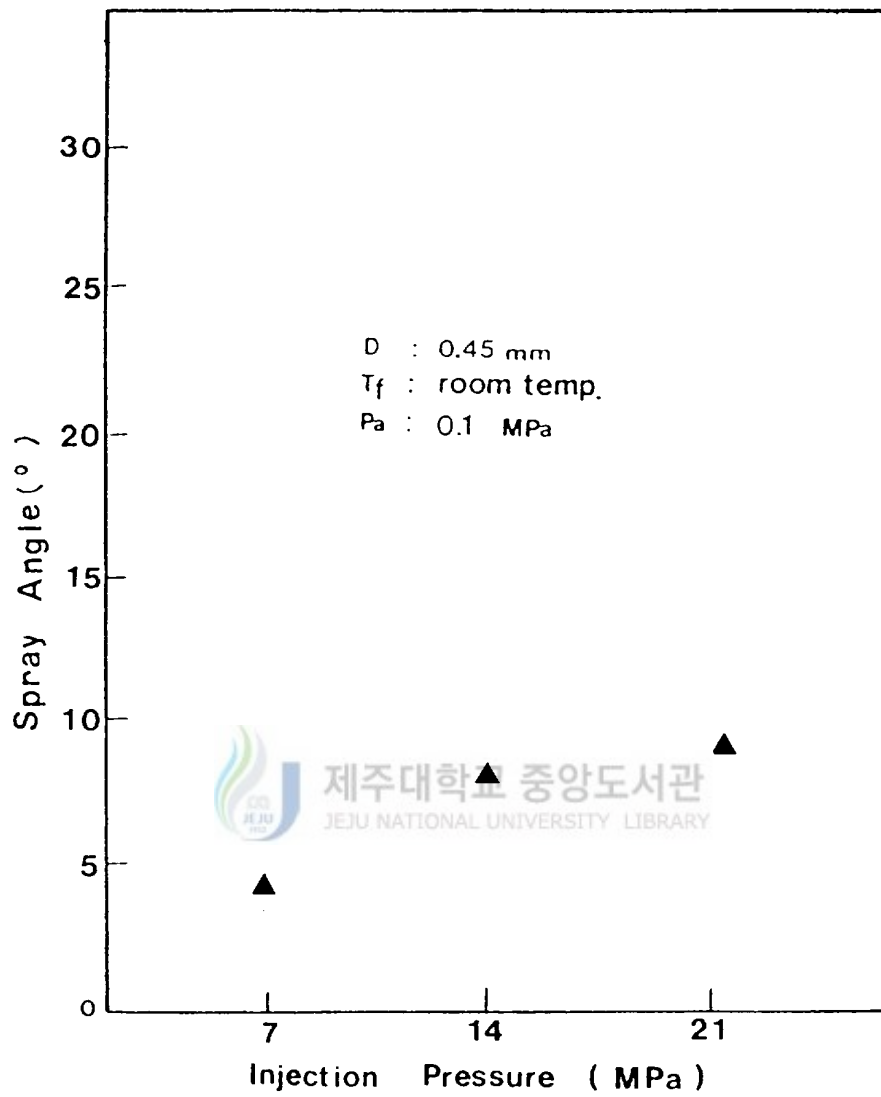


Fig. 3-6 Influence of injection pressure on spray tip velocity



**Fig. 3-7 Influence of injection pressure on spray angle in case of fully developed spray**

보면, 분무선단은 시간경과에 따라 직선적으로 발달하고 있기 때문에 대기압 하에 분사된 분무의 성장은 분사압력에만 의존하고 있다. 또한 분무각의 발달은 분사직후 임의시간까지만 반경방향으로 증가하고 그 이후는 일정하게 된다.

### 3-2. 분무초기상태에서 액주의 분열 및 액적형성 과정

Photo. 3-4, 3-5는 Nanolite 광원, Telemicro lens를 사용하고 상온대기압 상태의 용기내로 연료를 분사시키고 분사압력이 각각 7, 21MPa일 때의 확대사진으로 분무의 성장을 시간경과에 따라 촬영한 순간 확대사진이며, 이것은 고속의 액체분류가 분열성장하여 미립화되는 초기과정과 분산특성을 보여주고 있다.

#### A) 분사압력이 7MPa인 경우

분사직후 0.01ms에서의 분무는 전혀 교란되지 않는 미분열 상태인 리벳 모양의 액주를 보여주고 있다. 이 액주는 분사시간이 0.05ms에서 0.10ms로 경과함에 따라 전혀 교란되지 않는 액주표면이 노즐선단에서 약 0.5mm이후 미세한 파가 발생하여 분무선단으로 갈수록 파가 성장 발달하고 있다. 교란되지 않은 액주로 부터 교란된 파가 발생한 것은 노즐내 유동이 발달된 난류임이 추측된다. 그러므로 액주 표면파의 발생과 교란성장은 노즐내 유동과 밀접한 상관관계가 있음을 보여준다.

분사후 0.15ms에서는 액주표면파가 더욱 미세하고 불안정하게 성장하고

있으며, 그 불안정한 파로부터 액사가 발생하기 시작하고 있다. 분사후 0.20ms에서 0.30ms사이에는 액사형성이 더욱 미세해지고 결국 이러한 파와 액사로 부터 액적이 분열되고 있음이 확인된다.

분사시간이 0.30ms이후 에서는 분무선단 부근에서 분무의 원추단면적이 급격히 증가하고 분무의 액주로 부터 굵은 액사가 발달함으로써 미분열 액주가 반경방향으로 분열되고 있음을 보여준다. 이는 분무선단이 정체되고 있는데 반하여 후발분무는 지속적으로 정상분무되고 있기 때문에 분무의 선단을 관통 추월함으로써 반경방향으로 분무가 확산되고 있다.

또 분무시간이 0.30ms에서 0.40ms사이 분무선단의 액주에는 굵고 불안정한 액사로 부터 액적이 발생되고 있으며, 이 때 생성된 액적은 액주 표면 파로부터 생성된 액적보다 크고 불균일하다. 0.40ms이후 에서는 이 균일치 못한 액사와 액적이 분무의 액주 주위에 잔존함이 확인되고 있다. 0.55ms이후 분사시간이 증가함에 따라 분무선단 주위 부근에서의 분무 원추단면적은 계속 증가하고 있다. 0.70ms에서 1.0ms에서는 액주표면에서 아주 미세한 액적이 분리되어 가는 모습이 보이고 이 액적들은 후발분무의 추월에 의해 생성된 액적들 보다 더욱 작고 균일한 입경을 관찰할 수 있다.

#### B) 21MPa의 분사압력으로 분사시켰을 경우

Photo. 3-4의 21MPa에서 분사직후인 0.01ms의 분무는 교란되지 않는 액주가 노즐 연직하 방향으로 성장했음을 보여주며 액주부분의 머리모양은 리벳의 형태로 7MPa에서의 형태와 거의 같은 양상을 보인다. 0.03ms에서는 리벳모양의 액주가 분사압력에 의해 조금 더 성장하였으며 분무선단의 액주는 반경방향으로 성장할 조짐을 보이고 있다.

0.06ms에서 0.12ms사이의 분무는 분무시간이 경과함으로써 분사유량의 증가와 더불어 노즐 연직하 방향과 주위공기의 저항에 의한 분무의 반경방향과의 속도벡터를 합성한 방향으로 리벳모양의 형태가 분열성장 하고 있다.

교란되지 않는 미분열 액주는 노즐선단 근처에서 존재하기 시작했으며 분사표면에 액사가 발달하기 시작하고 0.12ms에서는 미소한 액적들이 분리되고 있다. 이 때의 분무선단은 차츰 리벳모양에서 벗어나면서 교란된 액주 표면파가 발생하고 있다. 0.15ms부터 액적형성이 활발해지고 비교적 안정된 형태의 분무를 보여주고 있다.

0.20ms에서의 분무는 액주표면으로 부터 발생된 미소액적과 후발분무의 추월현상에 의해 분리된 액적들과 혼합되어가는 모습이 보인다. 분사압력이 7MPa에서 0.70ms이후에야 나타나기 시작한 추월현상이 21MPa에서는 0.20ms에서 바로 보이고 있다. 0.30ms에서 0.40ms에서는 이러한 추월현상이 더욱 발달되고 있으며 액주표면으로 부터 발생된 미소액적과 구별이 없게 섞여 있다.

완전히 발달된 1.0ms에서의 분무는 노즐선단으로 부터 1mm미만의 교란되지 않는 액주가 확인된다.

21MPa에서는 7MPa에서와는 달리 분무와 주위기체와의 상대속도가 크게 되어 액주 표면파가 더욱 교란되어 액주로 부터 액사 및 액적발생이 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, 발생된 파와 주위기체와의 마찰로 인하여 액사가 성장하며 이

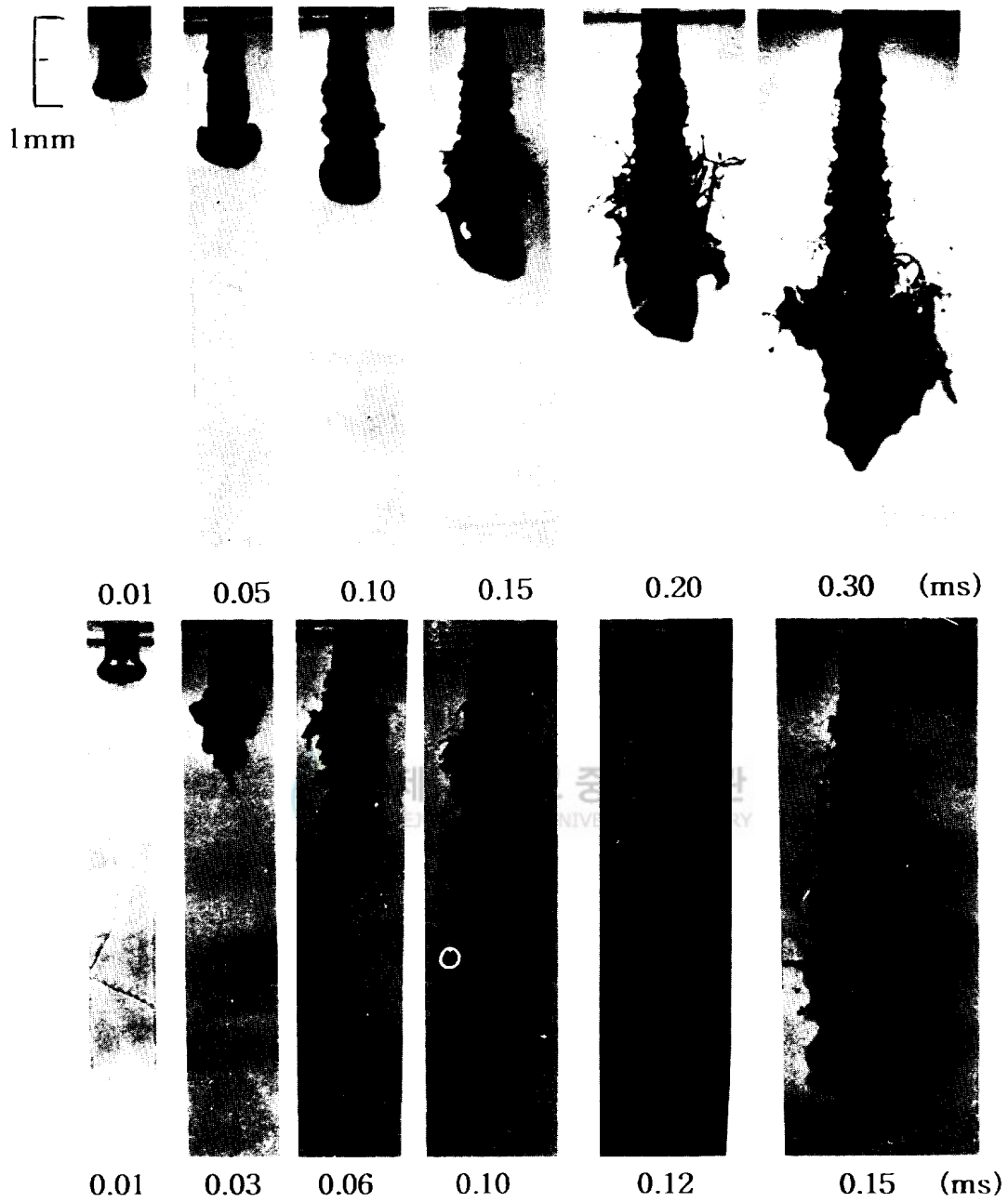


Photo. 3-4 Enlarge Photographs of developing spray from injection start (upper :  $P_i = 7\text{MPa}$ , under  $P_i = 21\text{MPa}$ )



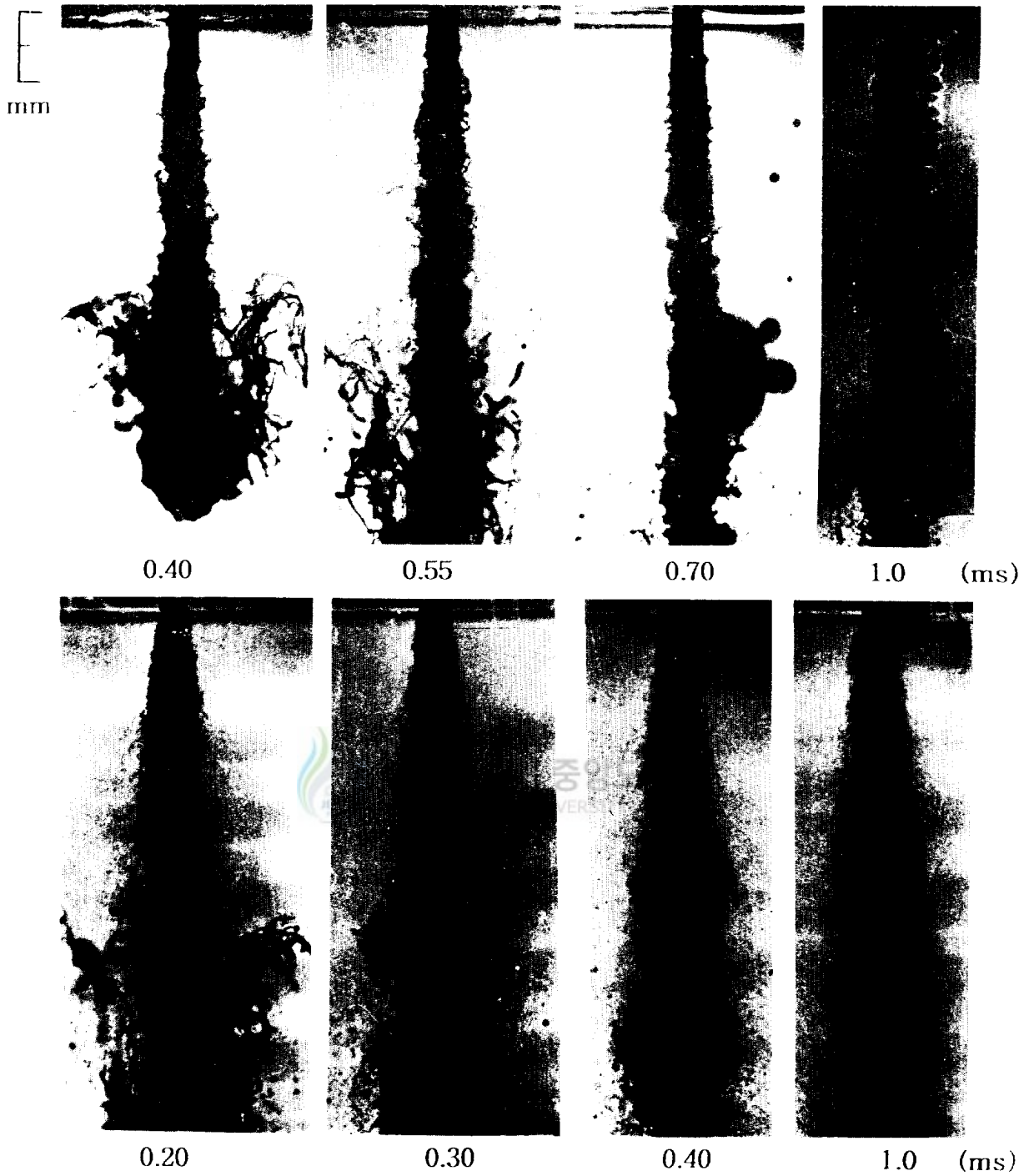


Photo. 3-5 Enlarge Photographs of developing spray from injection start (upper :  $P_i = 7\text{MPa}$ , under  $P_i = 21\text{MPa}$ )

액사로 부터 액적이 발생한다.

### 3-3. 미립화 형성기구

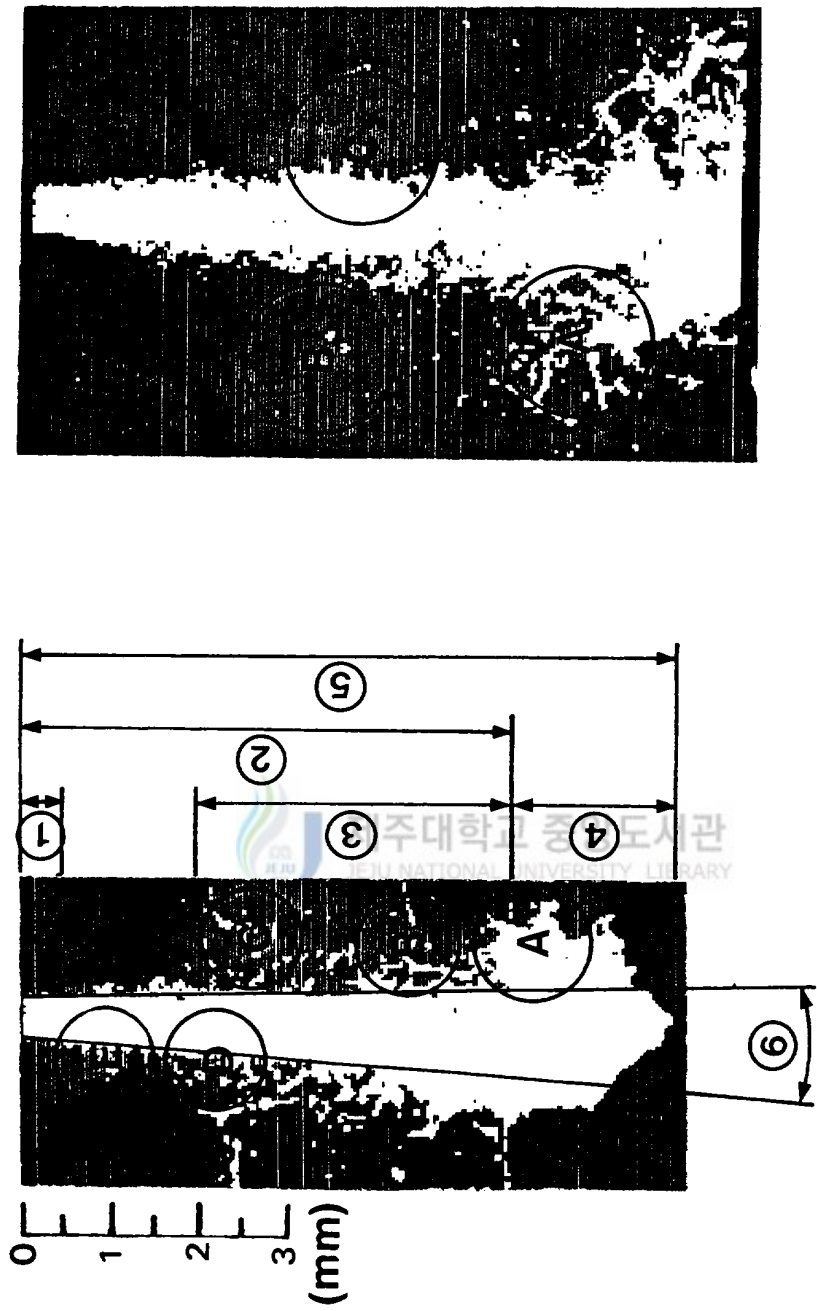
Fig. 3-8(a)는 14MPa로 대기압하에 분사된 후 0.23ms경과후의 분무사진이다. 그림에서 구간(1)은 교란되지 않은 미분열장이며 노즐형태에 의해 그 길이가 결정된다. 구간(2)는 노즐선단 부근에서 발생된 파가 상류로 갈수록 점점 성장 교란되어 결국 이 파로 부터 액사 및 액적발생(E-D)이 구간(2)의 끝까지 계속되고 있다. 구간(4)는 분사후 0.23ms경과후 분무가 정체된 정체영역(Stagnation region)으로 액사 및 액적이 발생하지 않고 있다.

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 정체되고 있다. 계속해 분사된 분무는 정체영역을 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 덩어리로 부터 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 입자균을 이루게 된다.

그림 (b)는 같은 조건에서 분사시간이 0.30ms에서의 분무사진이다. 그림에서 (A)는 앞에서 살펴본 분무의 추월에 의해 발생된 액사와 액적을 보여

주며 분열과정 중에 있어 불안정하다. (B)의 액적은 분사된 후 0.30ms 이전에서 분무가 추월하여 발생된 불안정한 (A)상태가 시간이 경과함으로써 점점 안정되어 생성된 것이다. 그러나 이 액적은 크기가 균일하지 못하다. (A)에서 (B)까지 과정은 추월현상으로 발생된 불안정한 액체 덩어리간의 친화력과 분열되려는 힘과의 상호작용, 액사와 액적간의 충돌 및 공기와의 마찰 등에 의해 액적이 생성되며 이 분열과정에서 생성된 액적의 입경은 균일하지 않다. 반면 (C)는 액주표면으로 부터 발생된 액적으로 생각되며 미세하고 균일하지만 추월현상에 의해 생성된 액적보다는 입자수가 훨씬 적다. 따라서 액주표면에서 발생된 액적보다 분무의 추월현상에 의해 생성된 액적이 분무의 분산 및 미립화를 지배하고 있음을 알 수 있다.

Photo. 3-6은 분사압력이 7MPa로 일정하고 연료분사후 분무각이 일정하게 된 시간에서 완전히 발달된 분무의 내부 확대사진이다. 그림의 (A)영역에서는 액주근방에 섬유조직과 같은 돌기모양의 액사와 액적 형상을 볼 수 있다. 이 분열과정은 Dentrific한 분무구조로서 아직 미립화가 완성되지 않은 영역으로 이것은 분무의 운동에너지에 의하여 주위공기의 난류현상에 기인하는데, 분무의 액면과 주위공기와의 상대속도로 상호 전단력, 주위공기와의 마찰등이 발생하여 액주면이 분열된다고 사료된다. (B)영역은 노즐의 출구로부터 거리가 좀더 증가된 분무중의 주류역(Main jet region)이 끝나는 영역으로 분사노즐의 출구로부터 거리가 증가된 것인데 돌출된 그물모양의 말단부에서는 액사로 부터 액주, 불안정한 액적으로 부터의 보다 안정된 액적으로 분열이 일어나고 있다. 이 과정은 Chaotic한 분열과정으로 사료된다. (C)영역은 분무선단에서의 분열 양상인데 주위공기와의 혼합유역으로 다소 균일한 액적생성을 보이고 있으며 완전히 발달된 분무의 내부이다. 분사노



(a)

(b)

Fig. 3-8 Disintegrating mode of developing spray

( $P_i = 14\text{MPa}$ , (a)  $t = 0.23$  ms, (b)  $t = 0.30$  ms)

즐로 부터 분사된 액주상태의 연료는 (A), (B)과정을 지나 (C)단계에서 다소 불균일한 액적형성을 보이고 있다.

이러한 대기압하에서 완전히 발달된 분무의 분열은 액체분류와 주위기체와의 상대운동의 결과로 인하여 분무의 내부에 발생하는 난류에 의해 분열되고 있기 때문에, 균일한 액적을 생성키 위해서는 분위기압력을 상승시켜서 이 과정을 재 분열시켜 제어해야 한다고 사료되며 추후 상세히 검토되어야 할것이다.



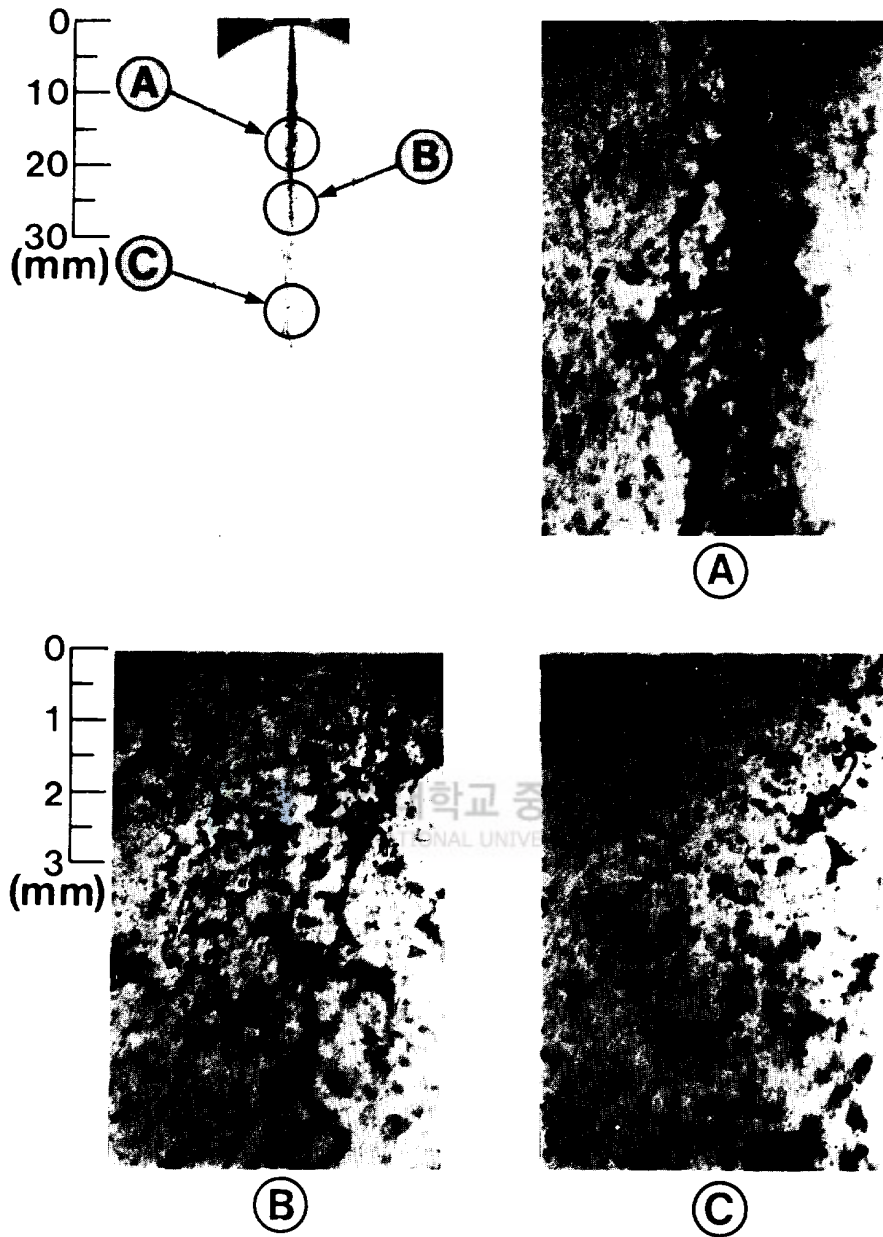


Photo. 3-6 Inner structures of fully developed spray ( $P_i=7\text{MPa}$ )

## IV. 결 론

본 연구는 상온대기압하에서 노즐직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 4인 경우에 분사압력이 분무의 분산 및 분무특성에 미치는 영향을 정량적으로 해석하였다. 특히 분사직후 교란되지 않은 미분열 액주가 교란된 액주로 변화하여 다시 액사에서 액적으로 형성되는 과정을 미세시간 경과에 따라 상세히 가시화시켜 디젤분무초기의 분열과정을 실험적으로 구명하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각 분사압력에서 유량계수의 값은 실험범위의 분사압력에 관계없이 거의 일정하다. 따라서 노즐형상비가 일정하면 압축에너지가 속도에너지로 변환되는 비도 같다.

2. 대기압하에 분사된 분무의 성장은 분사시간 경과에 따라 기울기가 약 1인 직선으로 발달되고 있다. 이것으로 대기압하에서의 분무성장은 분사압력에만 의존하고 있음을 알 수 있다.

3. 분무각은 분사개시후 같은 경과시간에서 연료의 분사압력이 높을 때 증가하며, 초기분무각은 분사직후 큰 값으로 점차 감소하여 분사개시후 약 0.8-1.2 ms에 도달하면 일정하게 된다.

4. 분무가 노즐로 부터 하류로 성장해감에 따라 미분열 액주의 표면에 발생된 표면파와 주위기체와의 마찰에 의한 분열로 액사가 형성되고 액사로 부터 액적이 분리되고 있으며, 이 액적들은 입경이 작고 대체로 균일하다.

5. 분무 선단부근에서는 후발분무가 선행분무의 선단을 추월하게 되어

분무선단이 급격히 팽창함에 따라 길고 무수한 액사와 액적들이 발생하고 이들의 입경은 표면파로부터 발생한 액적들 보다 크고 불균일 하다. 그러므로 분무의 추월이 분무의 분산 및 미립화를 지배하고 있음을 알 수 있다.

6. 완전히 발달된 분무의 내부구조는 아직 미립화가 완성되지 않은 Dentritic한 구조를 갖는 영역과, Dentritic한 구조와 Chaotic한 분열의 중첩된 영역 그리고 다소 균일한 액적이 생성되는 영역으로 구분된다.





## V. 참고문헌

- Arai, 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.
- Chella, G., L. Tognotti and S. Zanelli, 1986, "A High Speed Photographic System and its Application in Spray Diagnostics", Atomization and Spray Technology 2, pp. 187-200.
- Chigier, N., 1981, "Energy, Combustion and Environment", McGraw-Hill Book Co., pp. 315-316.
- 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 工学博士學位論文.

- 한국동력자원연구소, 1982, “유류버너의 비연소식 시험장치설계 및 시험법”, 연구보고서, KE-82T-14, pp. 51-52.
- Heywood, J. B., 1988, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill Book Company, pp. 586-591, pp. 620-621, pp. 635-637.
- Huang, Z., Y. M. Shato, S. Shiga, H. nakamura, T. Karasawa, 1994, “The Roll of Orifice Flow pattern in Fuel Atomization”, ICLASS-94, pp. 86-93.
- 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.
- 横田 克顔, 松剛 信, 1977, “ディーゼル機関の燃料噴霧の實驗的研究”, 日本機械學會 論文集, 43(373).
- 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.
- 具滋旺, 1990, “디젤噴霧의 初期分散에 關한 實驗的 研究”, 仁荷大學校 工學 碩士學位論文.
- 구자예, 정홍철, 1994, “노즐부근에서의 비정상분무 거동”, 한국자동차공학회 논문집, Vol 2, pp. 100-111.
- Leferbvre, A. H., 1988, “Atomization and Spray”, Hemisphere Publishing Corporation, pp. 1-58.

- 
- 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.
- Nagai, K. Sato and Ch. W. Lee, 1985, "Atomization Characteristics of Superheated liquid Jet", ICLASS-85.
- 朴種久, 李奎瑩, 梁玉龍, 1987, "디젤噴霧特性에 관한 基礎的 研究", 仁荷大學教 産業技術科學研究所 論文集 第15集.
- 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.
- Sato, G. T., H. Tanabe, H. Fujimoto, 1982, "An Investigation of Diesel Sprays", ICLASS-82, pp. 229-235.
- Shimazaki, N., G. Oghara, M. Nakayama, 1994, "Development of Pseudo High Speed Image Photographic Systems and Application to Diesel Sprays", ICLASS-94, pp. 244-251.
- Smallwood, G. J., O. L. Gulder, D. R. Snelling, 1994, "Tomographic Visualization of The Dense Core Region in Transient Diesel Sprays", ICLASS-94, pp. 270-277.
- 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.

## 감사의 말씀

이 논문이 완성될 때까지 끊임없는 충고와 격려로 인도하여 주신 허 중철 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 처음 대학원에 들어와서 지도하여 주신 고 장권 총장님께도 감사의 말씀을 전합니다.

그리고 항상 이해와 관심으로 돌봐주신 김 만수 교수님, 권 기린 교수님, 김 귀식 교수님, 미국에 계신 현 명택 교수님, 임 종환 교수님께 감사드립니다. 또한 회로 만드는데 도움을 주신 전자공학과 고 성택 교수님께도 고마움을 표합니다.

실험장치에 많은 관심을 갖고 도와주신 제일보령사 이 부근 사장님과 유 인용 선생님, 조성배 선생님께도 감사드립니다.

지난 2년간 관심갖고 지켜봐 주신 공대 조교 선생님들과 행정실 선생님들, 또한 기계공학과 대학원생들에게도 감사드립니다. 학과 일을 도맡아서 처리해준 현 경수 선생, 인문대학 오 경석 선생님, 정 여은 학생에게도 감사드리고, 여러가지로 도움을 주신 기계공학과 재학생들과 친구 용진이에게도 고마움을 표합니다.

끝으로 이 논문이 나오기까지 이해와 사랑으로 용기를 북돋아 주신 아버님, 어머님과 형님 세분, 여동생과 오늘의 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

1994. 12.

고 경남