

碩士學位論文

디젤분무의 미립화 형성과정에
관한 실험적 연구



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

金 祺 峯

2000年 6月

디젤분무의 미립화 형성과정에 관한 실험적 연구

指導教授 許 鐘 哲

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000年 6月



濟州大學校 産業大學院

機械에너지工學科

金 祺 峯

金祺峯의 工學碩士學位 論文을 認准함.

2000 年 6 月

審査委員長 _____ 印


委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

An Experimental Study on Atomizing Formation Process of Diesel Spray

Ki-Bong Kim

(Supervised by professor Jong-Chul Huh)

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

**DEPARTMENT OF MECHANICAL-ENERGY
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL INDUSTRIAL UNIVERSITY**

2000. JUNE

목 차

SUMMARY	1
I. 서 론	3
II. 실험장치 및 방법	6
2-1. 연료분사 실험장치	6
2-2. 사진촬영 방법 및 실험조건	11
III. 실험결과 및 고찰	15
3-1. 디젤분무초기에 분무의 발달과정	15
3-2. 분위기압력에 의한 분무의 발달과정	24
3-3. 분무의 분열기구 관찰	34
VI. 결 론	37
V. 참고문헌	39



SUMMARY

In this study, the experiment has been conducted to investigate the spray characteristics under the parameter of an ambient pressure with a single hole nozzle having aspect ratio(L/D) of 5 and diameter of 0.45mm. Under the condition of the injection pressure of 14MPa, the initial disintegrating process of a diesel spray is investigated and analyzed according to change of the ambient pressures, 0.1, 1, 2 and 3MPa. The double flash method has been employed to visualize the process of the diesel sprays.

The results obtained in this study are as follows;



- 1) After spray starts, the spray is shown as non-disturbance liquid column within about 1~2mm from the nozzle tip, whose diameter is similar to that of a nozzle. For the same injection pressure, the increase of the ambient pressure makes the length of the non-disturbance liquid column become short.
- 2) 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.

3) In case spraying into chambers having different ambient pressures, 1, 2, and 3MPa, the spray tip velocities reach up to 1.5, 1.2, and 0.6ms, respectively, and decrease with lapse of time. The spray angle keeps increasing for 0.6, 1.2, and 1.4ms after spray under the various ambient pressures, 3, 2, and 1MPa, respectively, and begins to decrease and maintains the constant value. Therefore, the transition points appear near the point where the velocity decreases and the spray angle increases, simultaneously. The higher ambient pressure leads to fast appearance of transition under the same spray pressure.

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

I. 서 론

디젤엔진은 다른 내연기관에 비해 높은 열효율과 구조적인 잇점으로 화물, 증기, 버스 이외에 승용차까지 사용이 늘고 있다. 반면 매연, 질소산화물 등이 배출되어 여러가지 환경오염 문제가 발생됨으로 그에 대한 대책이 시급하다. 가솔린엔진의 경우 전자제어엔진 및 후처리기술 등의 발달로 배출가스 저감기술이 발달하고 있으나 디젤엔진의 경우 상대적으로 미약한 실정이다. 따라서 배출가스 감소 및 효율의 극대화를 위하여 연소실 내에서 혼합기 형성과정에 관한 연구가 필요하다. 혼합기의 형성과정은 연료분사 장치의 특성, 흡기포트 그리고 연소실 형상에 따른 연소실 내에서의 공기유동특성 및 연소실 내에 분사되는 연료분무의 형태등에 좌우된다. 디젤분무의 형태는 노즐형상(L/D)과 분사압력 및 분위기압력 등에 의해 크게 좌우되며 이는 분사분무의 관통도, 분무각, 입경분포 등에 영향을 미친다.

소형 고속 디젤엔진에서는 약 1msec의 짧은 착화지연 기간중에 연료가 충분히 무화되어 공기와 혼합되어야 한다. 그러나 연소실 크기의 제한으로 분사된 연료입자는 비행거리가 제한되며, 고속운전으로 인하여 분무의 분열에 필요한 시간은 극히 짧다. 연소실내의 높이가 작음으로 인하여 분무거리가 길어지면 피스톤 표면과 충돌이 일어난다. 분무의 관통력이 너무 작으면 연료와 공기의 혼합이 부진하여 불완전연소가 되고 너무 크면 연소실벽에 부착되는 벽면적심(wall wetting) 현상이 나타나 연료가 불완전연소가 되면서 유해배출가스가 다량 발생한다. 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 실험과 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 설계요소에 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 연구중에서 본 연구에 관련된 분야의 연구 동향을 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 측정하였다.

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

허 등(1991)은 분무의 분산과정을 구명하기 위해 발달과정의 분무를 직접사진촬영하여 분위기압력 변화에 따른 분무선단도달거리와 분무각을 구했고 또한 분무초기 과정을 확대 사진촬영하여 분사직후 분출

된 분무는 미분열 액주이며 그 액주로부터 시간경과에 따른 분열과정을 연구하였다.

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 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 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 노즐 직경이 0.45mm인 단공노즐을 사용하여 디젤연료를 일정압력으로 분사시켜 분위기압력을 변화하면서 디젤분무특성에 어떠한 영향을 미치는가를 Double flash에 의한 사진촬영에 의해 가시화하여 분무선단도달거리, 분무속도, 분무각등을 구하였고 천이점등의 해석, 분무발달과정 및 분열기구를 보다 정량적으로 해석하기 위하여 확대 사진촬영을 행하여 디젤분무의 미립화 형성과정에 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 5.11 ℓ이며 주로 플런저 펌프에서 고압 연료라인을 거쳐 나오는 관내 맥동을 줄여주는 역할을 하고, 분사노즐 입구에 설치된 제 2축압실은 최종적으로 디젤 연료가 노즐에서 분사되는 동안의 설정압력의 강하와 맥동을 가능한 없애주는 역할을 한다.

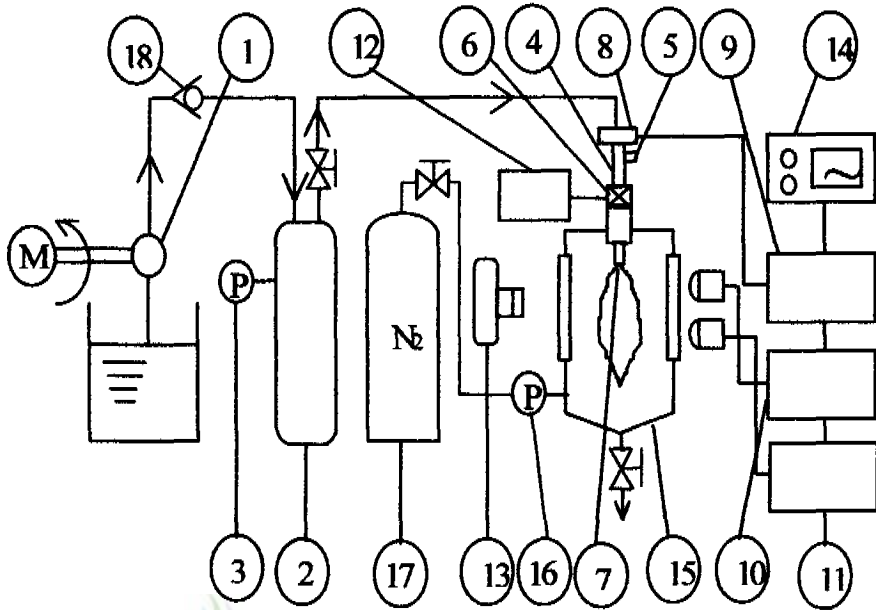
본 실험에 사용한 연료분사 제어장치는 노즐홀더의 상부에 솔레노

이드(6)를 부착한 전자제어 분사시스템을 사용하였다. 연료분사는 솔레노이드를 작동시키지 않는 상태에서 노즐 구동장치에 의하여 통전시키면 자화된 솔레노이드가 노즐의 니들(Needle)을 압착하고 있는 스피들(Spindle)의 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.

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

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

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 단공노즐의 상세도이며 노즐직경이 0.45mm이고 노즐형상비는 5로 하여 실험을 행하였다. Fig. 3은 전자 밸브의 작동기간을 제어하기 위한 노즐 구동장치의 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 하였다. 이 장치의 설정시간은 0.001ms로부터 99ms까지 조절이 가능하다.



- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. Plunger pump | 10. Nanolite |
| 2. 1st accumulator | 11. Strobe |
| 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

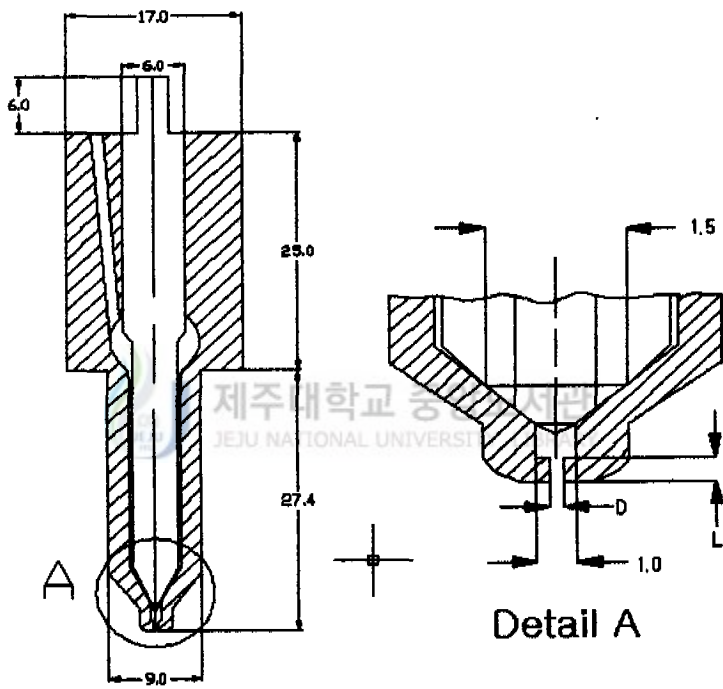


Fig. 2 Details of single hole nozzle

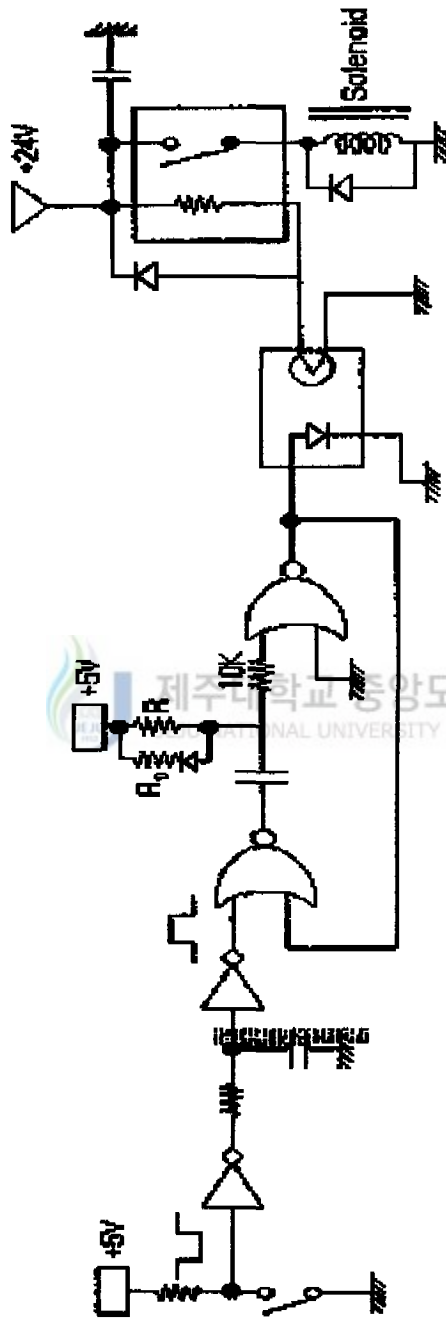


Fig. 3 Nozzle driving circuit

2-2. 사진촬영 방법 및 실험조건

디젤 연료유의 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 니이들의 상단부와 접촉하고 있는 전자밸브의 스프링들 상단사이에 위치한 포토인터럽터(Photo-interrupter)의 신호를 이용하였다. 노즐 제어장치에 의해 전자밸브가 작동하면 스프링들 상단이 상승하여 포토인터럽터의 빛을 차단하는 순간에 분사개시신호가 발생하게 되어 Fig. 4에 표시한 회로로 입력된다. Fig. 4는 분사개시 초기신호 발생장치로써 포토인터럽터의 감광부와 수광부사이에 전자밸브의 스프링들에 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 발진신호

F

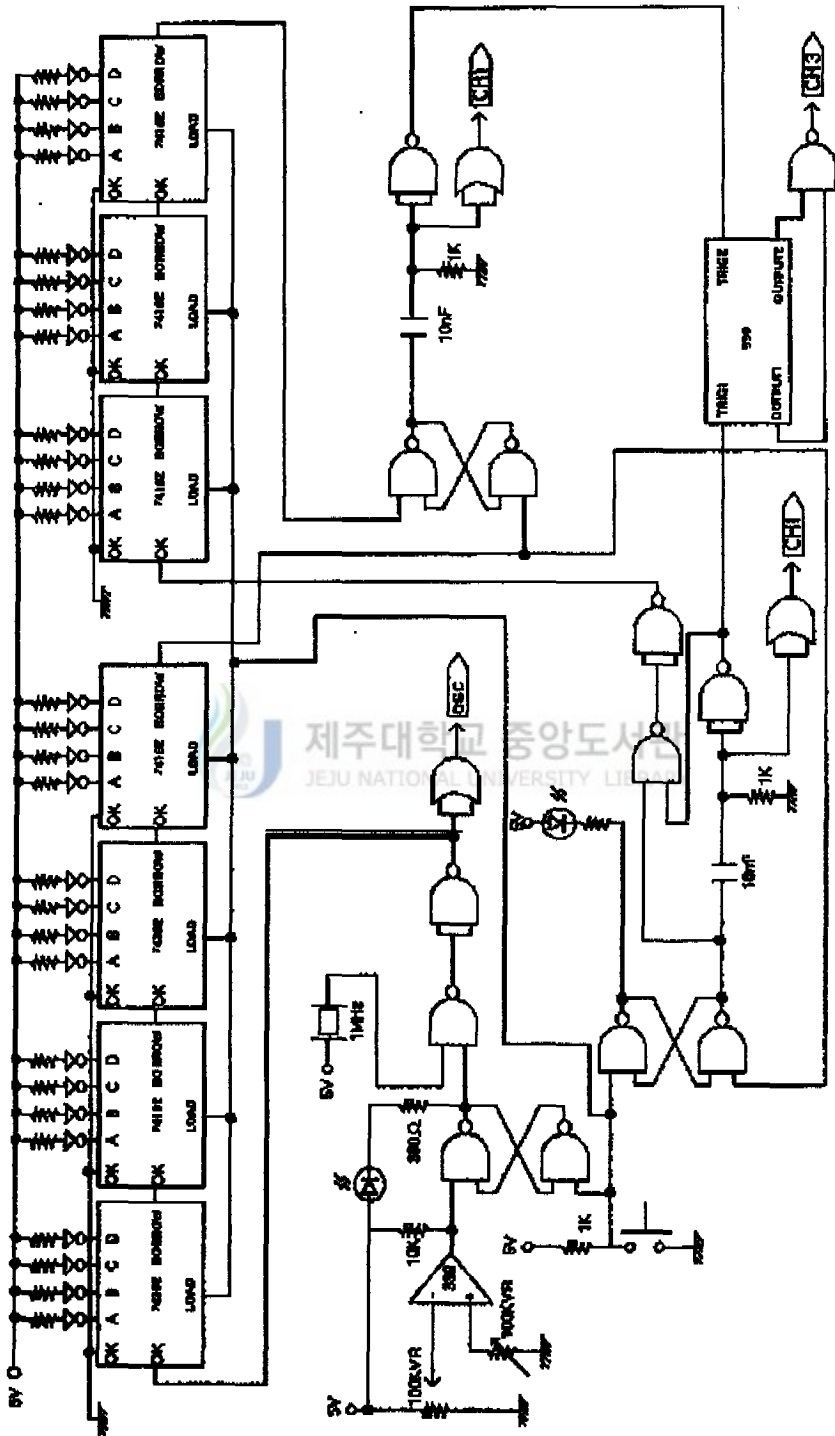


Fig. 4 Double pulse generator delay circuit

이며 상단펄스는 그 신호를 받아서 지정된 시간만큼 두 번 지연되는 펄스이다.

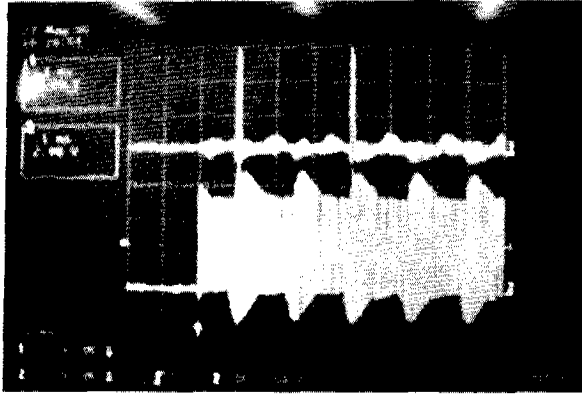


Photo. 1 Photograph of double pulse signal from delay circuit

디젤분무는 분사속도가 고속이므로 정지된 상을 촬영하기가 상용 μ s 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 비례적으로 촬영된 스케일로 분무선단도달거리, 분무속도등을 직접 측정하고 분석하였다. 사진촬영 및 실험조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental conditions

Discriptions	Conditions
Injection press. (MPa)	14
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=0.45,)
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. 디젤분무초기에 분무의 발달과정

Photos. 2~5는 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력을 14MPa로 고정하고 분위기압력이 0.1, 1, 2, 3MPa일 때 1차, 2차 나노라이트 광원을 사용하여 105mm Telemicro lens로 분무초기의 분산과정을 촬영한 확대사진이다. 따라서 사진한장에 나와있는 분무는 동일분무로서 분무의 발달과정을 정확하게 관찰할 수 있다. 확대배율은 4.5배이고 사진의 전체 실제길이는 8mm이다. t_1 은 분사개시후 회로에 설정된 시간만큼 지연된 후에 1차광원에 입력되는 시간이고 t_2 는 분사개시후 설정된 시간만큼 지연된 후에 2차광원에 입력되는 시간이다.

Photo. 2는 대기압하에서의 분무의 발달과정을 촬영한 사진으로 t_1 을 0.10ms로 고정하고 t_2 의 시간지연에 따른 분사초기 분무의 발달과정을 관찰하기 위한 확대사진이다. t_1 에서의 실제길이는 약 3mm이며 액주의 형태로 분무가 발달하는 것을 확인할 수 있으며, 노즐의 형태와 분사압력에 의해서 결정되어진다. t_2 가 0.20ms에서의 분무를 보면 분무길이가 증가하면서 액주에서 파가 형성되고 있다. t_2 가 0.25ms에서의 가운데 사진을 보면 분사초기에 형성된 파가 점점 발달하여 액주에서 액사형태로 분열되고 있으며, 분무의 체적이 약간 증가된 것을 볼 수 있다. t_2 가 0.30ms에서 분무는 분사초기에 액주에서 형성된 파가 발달하여 액사에서 액적으로 떨어져 나가려는 것을 관찰할 수 있으며, 분무의 체적이 급격히 증가되고 있는데 이는 분무선단부근에서 분사된 연료가 공기의 저항으로 정체되어 축방향으로의 발달이 지연되는 동안에 반경방향으로 분무가 발달되고 있는 것이다. 또한

분무선단의 형태는 분사초기의 형상과 거의 일치하여 분무선단에서의 분열은 아직까지 일어나지 않고 있다.

Photo. 3는 분위기압력이 1MPa일 때, t_1 을 0.10ms로 고정하고 t_2 의 시간 변화에 따른 분무의 발달과정을 보여주는 그림이다.

t_2 가 0.20ms인 왼쪽사진을 살펴보면 대기압에서와 비슷한 형태로서 액주에서 파가 발생하고 있으며 t_2 가 0.30ms인 가운데사진을 보면 액주에서 발생된 파가 액사 및 액적으로 분열되었고 분위기압력의 영향으로 분무선단이 불안정한 형태로 변하면서 분열이 시작되고 있다. t_2 가 0.40ms인 오른쪽 사진은 액주에서의 파가 더욱 발달하여 분열이 진행되고 있으며, 분무의 체적이 훨씬 증가한 것을 볼 수 있다.

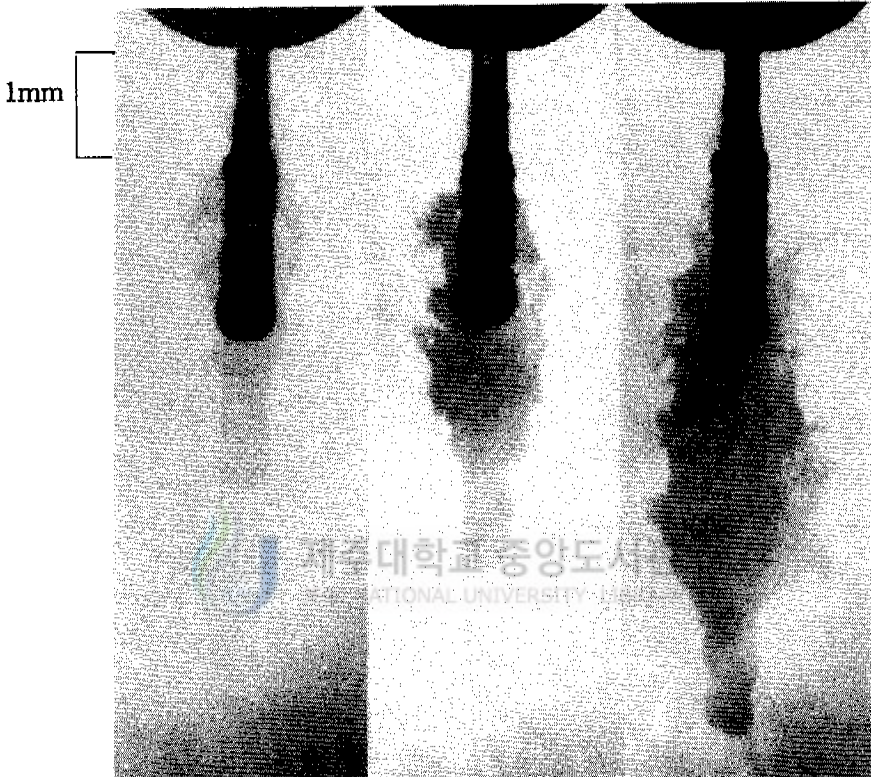
Photo. 4는 분위기압력이 2MPa일 때 t_1 을 0.10ms로 고정하여 촬영하고 t_2 의 시간지연에 따른 분무의 발달과정을 관찰하기 위한 사진이다. t_1 에서의 분무는 교란되지 않은 액주의 형태로 분무가 발달하고 있으며 t_2 가 0.25ms에서의 사진을 보면 액주에서 발생된 파가 액사 및 액적으로 떨어져 나가고 있으며 액주의 형태도 불안정하게 변하고 있다. t_2 가 0.30ms인 가운데사진을 보면 분무의 체적증가와 더불어 분무가 더욱 발달하였다. t_2 가 0.35ms에서의 분무를 살펴보면 분무선단에서의 분열이 일어나는 것을 볼 수 있고 매우 불규칙한 형상을 하고 있다.

Photo. 5는 분위기압력이 3MPa인 조건에서 t_1 을 0.15ms로 고정하고 t_2 의 시간지연에 따른 분무의 발달과정을 촬영한 사진이다. t_2 가 0.25ms인 왼쪽사진을 보면 분무의 형상이 매우 불규칙하고 액주에서 발생된 파가 액사에서 액적으로 떨어져 나간 것도 볼 수 있으며 t_2 가 0.30, 0.35ms에서의 분무는 체적의 증가와 더불어 분무의 미립화가 빨리 진행된 것을 알 수 있다.

Photo. 6은 노즐직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고 분위기압력이 0.1, 1, 2, 3MPa인 용기내로 연료를 분사시켰을 때 각 분위기압력에 따른 분산특성을 알아보기 위해 비교한 사진이다. 분위기압력이 높을수록 분무선단도달거리는 짧아지고 있으며 공기의 저항으로 분무선단의 체적이 증가한 것을 볼 수 있다.

Photo. 7은 대기압하에서 분사압력이 14MPa, 분위기압력이 0.1MPa이고 노즐 직경이 0.45mm일 때 분무의 분산과정을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 확대사진을 스캐너로 읽은 다음 A, B, C, D, E, F로 구분하여 분무초기 분무의 분산과정을 해석하였다.

(A)영역에서의 분무는 교란되지 않는 액주의 형태로 노즐의 형태에 의해서 그 길이가 결정되어 지며, 영역(B)와 (C)를 보면 액주에서 파가 형성되고 있는 것을 볼 수 있고 영역(D)와 (E)에서는 (B), (C)에서 형성된 파가 발달되고 있다. 영역(F)에서는 정지된 공간의 공기저항으로 선발분무가 정체되면서 반경방향으로 분무가 발달되고 있다.



$t_1 = 0.10\text{ms}$

$t_1 = 0.10\text{ms}$

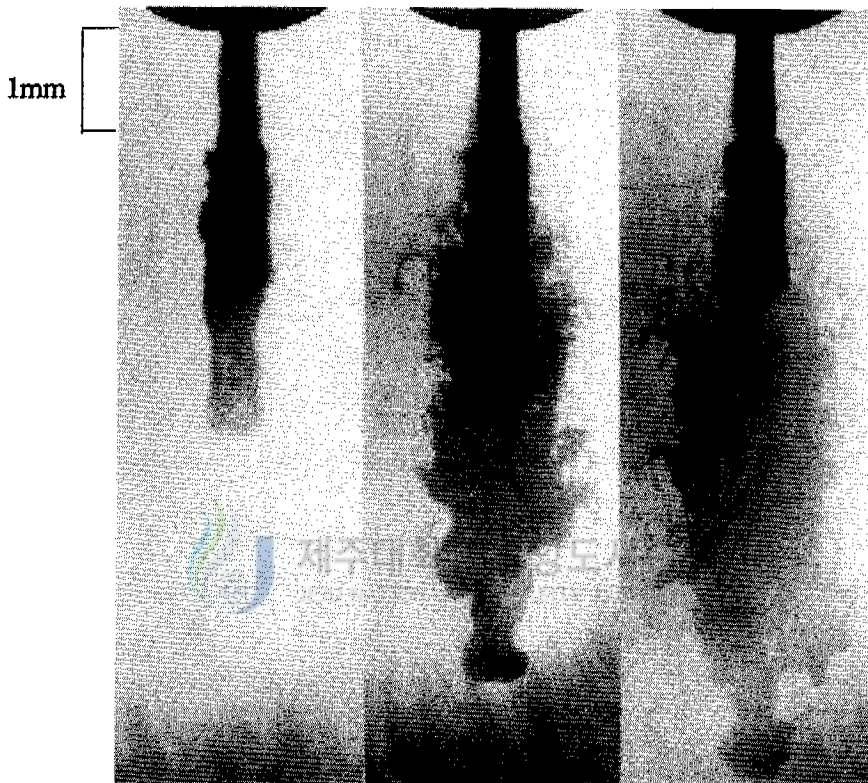
$t_1 = 0.10\text{ms}$

$t_2 = 0.20\text{ms}$

$t_2 = 0.25\text{ms}$

$t_2 = 0.30\text{ms}$

Photo. 2 Enlarged photographs of initial diesel spray by double flash at $P_a=0.1\text{MPa}$ ($P_i=14\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



$t_1 = 0.10\text{ms}$

$t_1 \approx 0.10\text{ms}$

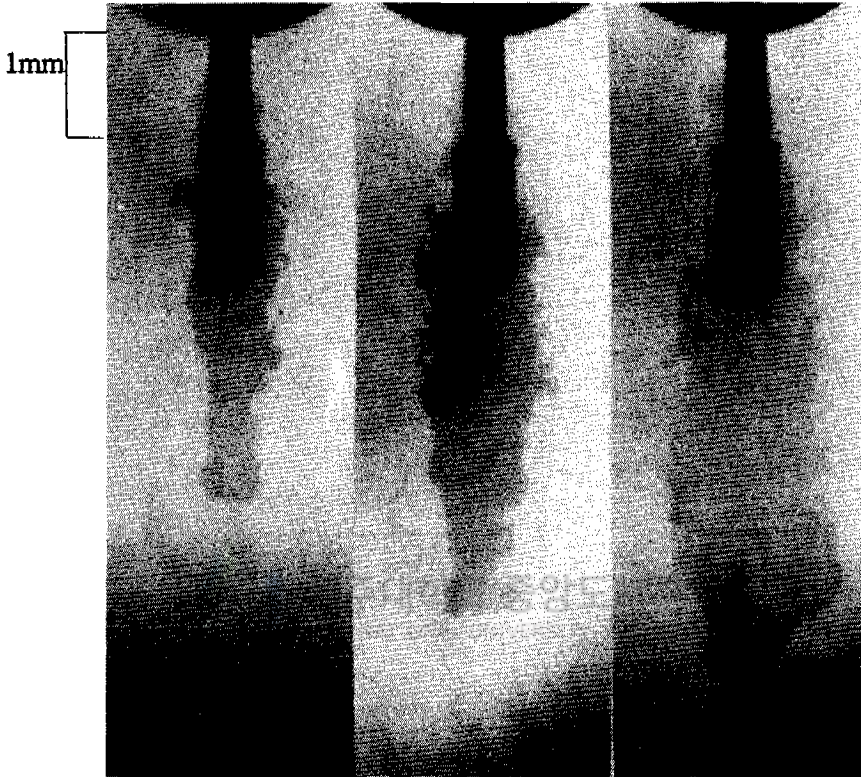
$t_1 = 0.10\text{ms}$

$t_2 = 0.20\text{ms}$

$t_2 = 0.30\text{ms}$

$t_2 = 0.40\text{ms}$

Photo. 3 Enlarged photographs of initial diesel spray by double flash at $P_a=1\text{MPa}$ ($P_i=14\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



$t_1 = 0.10\text{ms}$

$t_1 = 0.10\text{ms}$

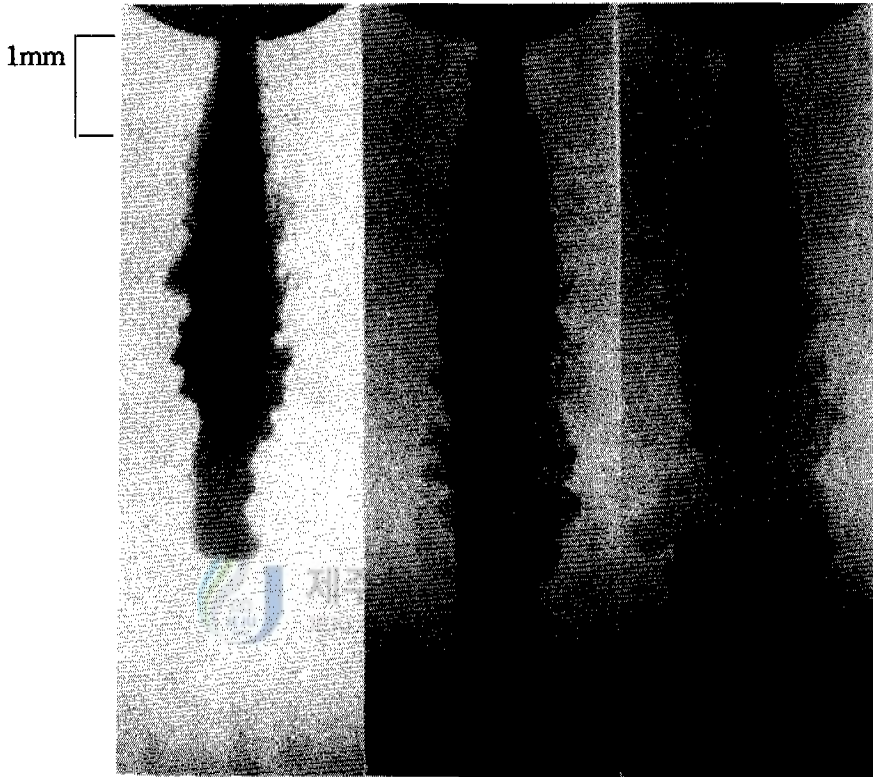
$t_1 = 0.10\text{ms}$

$t_2 = 0.25\text{ms}$

$t_2 = 0.30\text{ms}$

$t_2 = 0.35\text{ms}$

Photo. 4 Enlarged photographs of initial diesel spray by double flash at $P_a=2\text{MPa}$ ($P_i=14\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



$t_1 = 0.15\text{ms}$

$t_1 = 0.15\text{ms}$

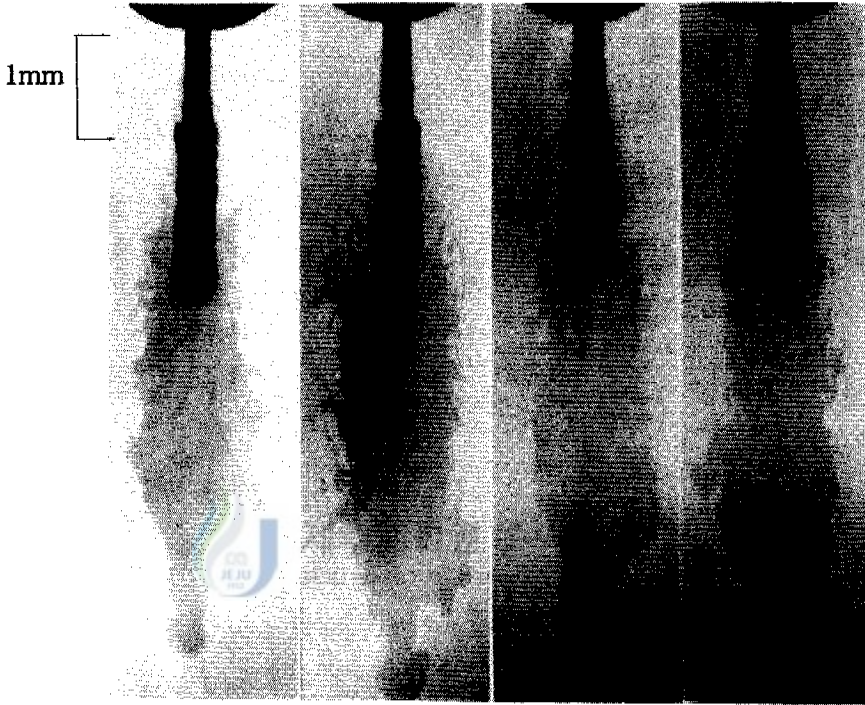
$t_1 = 0.15\text{ms}$

$t_2 = 0.25\text{ms}$

$t_2 = 0.30\text{ms}$

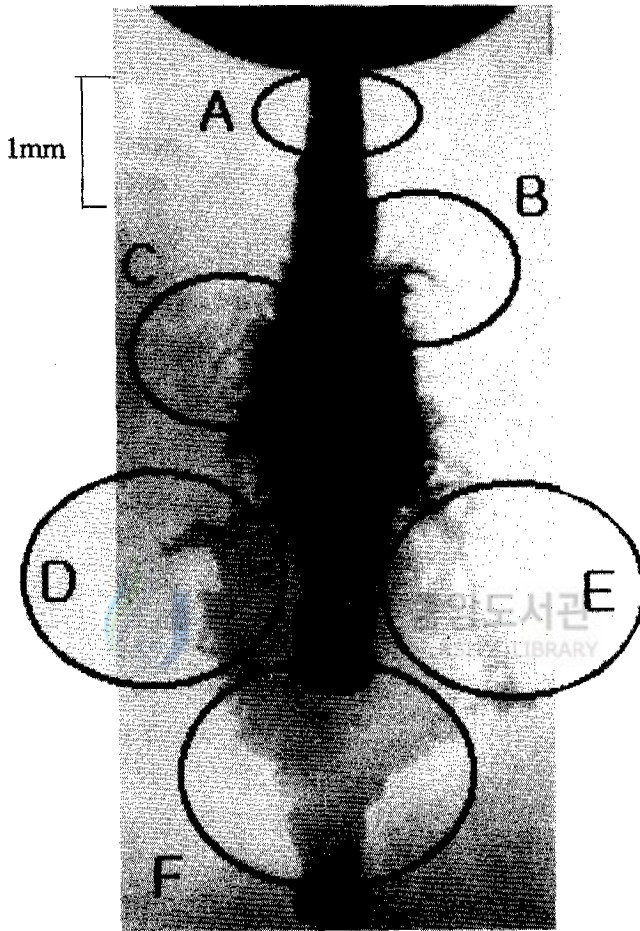
$t_2 = 0.35\text{ms}$

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



$t_1 = 0.10\text{ms}$	$t_1 = 0.10\text{ms}$	$t_1 = 0.10\text{ms}$	$t_1 = 0.15\text{ms}$
$t_2 = 0.30\text{ms}$	$t_2 = 0.40\text{ms}$	$t_2 = 0.35\text{ms}$	$t_2 = 0.35\text{ms}$
$P_a = 0.1\text{MPa}$	$P_a = 1\text{MPa}$	$P_a = 2\text{MPa}$	$P_a = 3\text{MPa}$

Photo. 6 Enlarged photographs of initial diesel spray by double flash with various ambient pressure ($P_i=14\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



$$t_1 = 0.25\text{ms}$$

$$t_2 = 0.35\text{ms}$$

Photo. 7 Disintegrating mode of initial diesel spray at

$P_i=14\text{MPa}$, $P_a=0.1\text{MPa}$ and $D=0.45\text{mm}$

3-2. 분위기압력에 의한 분무의 발달과정

Photos. 8~10은 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 5인 단공노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa이고, 분위기압력이 1, 2, 3MPa 일 때 시간경과에 따른 분무의 분열과정을 촬영한 Double flash사진이다. t_1 은 나노라이트 광원을 사용하여 촬영하였으며 t_2 는 스트로보스코프 광원을 사용하였다. 사진 한장에 나와 있는 분무는 동일분무이며 사진 전체의 실제길이는 30mm이다.

Photo. 8는 분사압력이 14MPa인 조건에서 분위기압력이 1MPa인 용기내로 분사시켰을 때 분무의 발달과정을 촬영한 순간사진의 일례이며, 디젤분무의 시간경과에 따른 발달과정을 보여주고 있다.

t_1 에서의 분무는 분사개시후 0.20ms에서 고정하여 촬영한 것으로 실제길이는 약 6mm이며 분무의 길이는 거의 일정하므로 회로가 정상적으로 작동하고 있다. t_2 는 0.65ms에서 0.90ms까지 지연된 시간이며 t_2 가 0.90ms일 때 분무의 실제길이는 26mm이다. 분무선단도달거리는 t_2 의 시간경과에 따라 발달하다가 0.80ms를 지나면서 분무선단도달거리가 급격히 감소하면서 반경방향으로 분무가 급격히 발달하고 있으며 분무의 분열이 활발히 진행되고 있다. 이 그림은 분사초기 액주에서 발생된 파와 이후 분위기압력에 의한 분무의 분열과정을 자세하게 보여주고 있으나, 천이점을 파악하기에는 부족하다고 사료되며 이 이후에 천이가 발생하고 있는 것으로 보여진다.

Photo. 9은 분사압력이 14MPa이며 분위기압력이 2MPa인 용기내로 분사시켰을 때 t_1 을 0.20ms로 고정하고 t_2 의 시간지연에 따른 분무의 발달과정을 촬영한 사진이다. t_2 가 0.70ms인 사진을 보면 분무가 반경방향으로 활발

히 발달된 것을 볼 수 있으며 t_2 가 0.80ms까지 분무는 반경방향으로 발달하면서 분무액주에서 액적으로 활발히 미립화가 진행되고 있고, 이후 분무가 축방향으로 발달하면서 계속해서 미립화가 진행되고 있는 것을 볼 수 있다.

Photo. 10는 분위기압력이 3MPa인 용기내로 분사시켰을 때의 사진으로서 분위기압력을 증가시키고 분사압력은 14MPa로 고정하였다. t_1 은 0.30ms로 고정하여 촬영하였으며 t_2 의 시간지연에 따른 분무의 발달과정을 보여주는 분무사진이다. t_2 가 0.70ms에서부터 분무는 반경방향으로 활발히 발달하고 있으며 Photo. 8, 9와 동일시간대에서 비교해보면 분무의 미립화는 더욱 활발히 진행된 것을 볼 수 있다. t_2 가 1.00ms 이후에 분무는 완전히 발달하고 있다.

Fig. 5는 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.

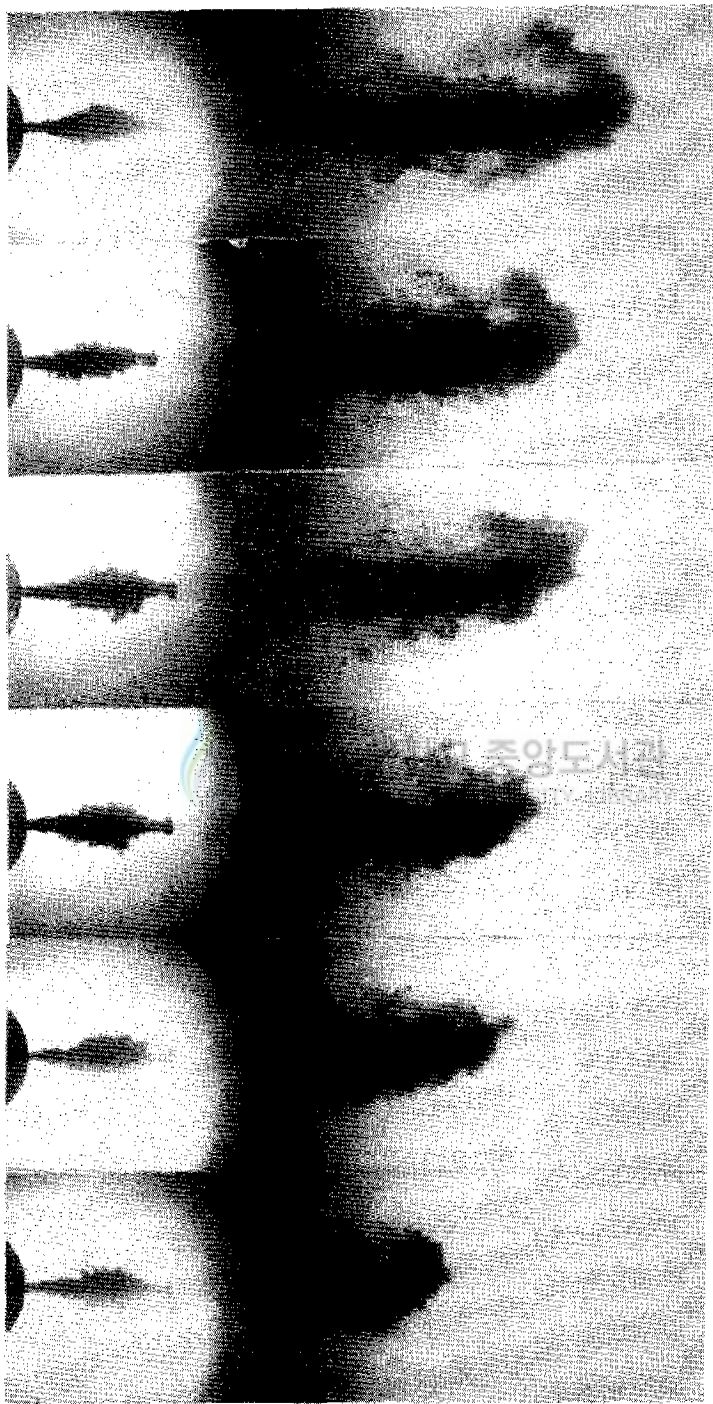
Figs. 6~8은 직경이 0.45mm이고 노즐형상비가 5인 노즐을 사용하여 분사압력이 14MPa 일 때 분위기압력에 따른 분무선단도달거리와 분무각 및 속도를 그래프로 나타낸 그림이다.

Fig. 6은 분무선단도달거리를 나타낸 그래프로서 분위기압력이 높을수록 분무선단도달거리가 짧아진 것을 알 수 있으며 대기압하에서 분무의 기울기는 약 1인 직선으로 나타나고 분위기압력이 1, 2MPa는 완만한 형태의 기울기로 발달하고 있는데 분위기압력이 3MPa일 때 그래프의 기울기는 약 0.5인 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 분무각을 나타낸 그래프이며 분위기압력이 높을수록 분무의 분무각이 증가된 것을 볼 수 있다. 하지만 각각의 분위기압력에서 분무의 특성을 파악하기에는 어려운 점이 많았다.

Fig. 8은 분무선단속도를 나타낸 그래프이다. 대기압하에서 분무선단속도는 불규칙적으로 변하고 있으며 분위기압력이 1MPa에서의 분무선단속도는 1.50ms 부근에서 감소하고 있는데 여기에서 천이가 일어난다고 사료되며 축방향으로 발달되던 분무가 분위기압력의 영향으로 선발분무가 정제되고 후발분무와의 충돌등으로 인해서 반경방향으로 급격히 발달하게 된다. 분위기압력이 2MPa에서는 1.20~1.40ms에서 속도가 감소하면서 천이가 일어난다고 사료되며 분위기압력이 3MPa에서는 0.60ms를 전후해서 천이가 발생하고 있는 것으로 보여진다.

이상에서와 같이 분사압력이 14MPa일 경우에 분위기를압력을 변수로 하여 분무의 분열과정을 살펴본 결과 분위기압력이 높을수록 분무의 분무선단도달거리와 분무선단속도는 감소하고 있으며 이는 반경방향의 분열로 발달하여 분무각의 증가로 이어져 분무의 미립화가 활발히 진행되는 것을 알 수 있다.



$t_1=0.2$
 $t_2=0.45$

0.7(ms)

0.65

0.6

0.55

0.5

Photo. 8 Photographs of developing spray
 ($P_1=14\text{MPa}$, $P_a=1\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



$t_1=0.2$

$t_2=0.5$

0.55

0.6

0.65

0.7

0.75(ms)

Photo. 9 Photographs of developing spray

($P_1=14\text{MPa}$, $P_a=2\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



$t_1=0.3$

$t_2=0.4$

0.45

0.5

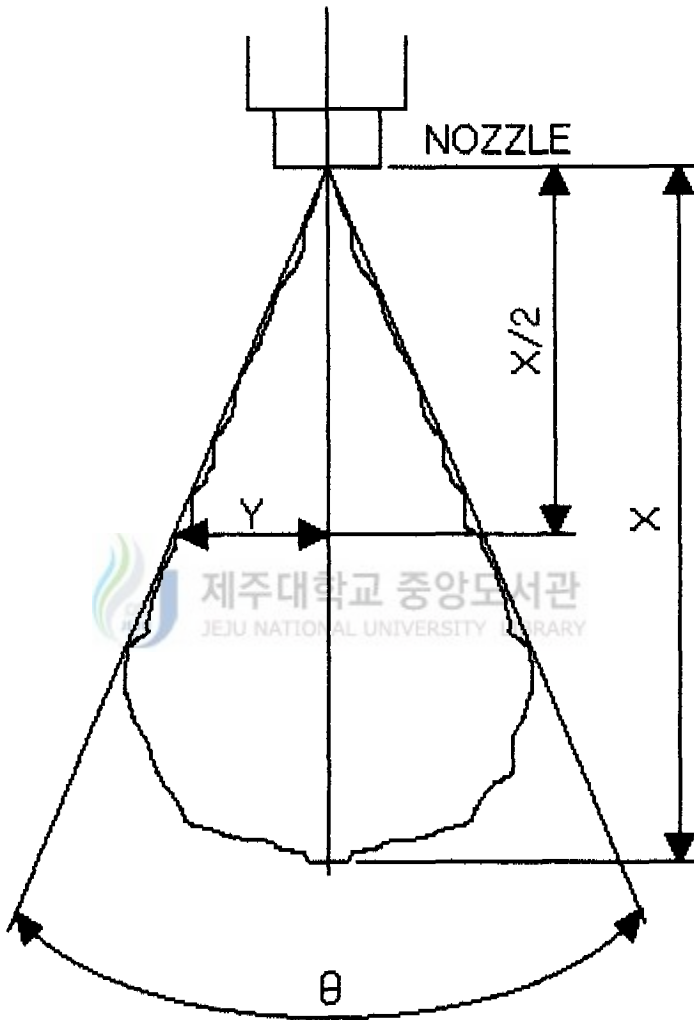
0.65

0.7

0.75(ms)

Photo. 10 Photographs of developing spray

($P_1=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, $D=0.45\text{mm}$)



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

Fig. 5 Definition of spray angle(θ)

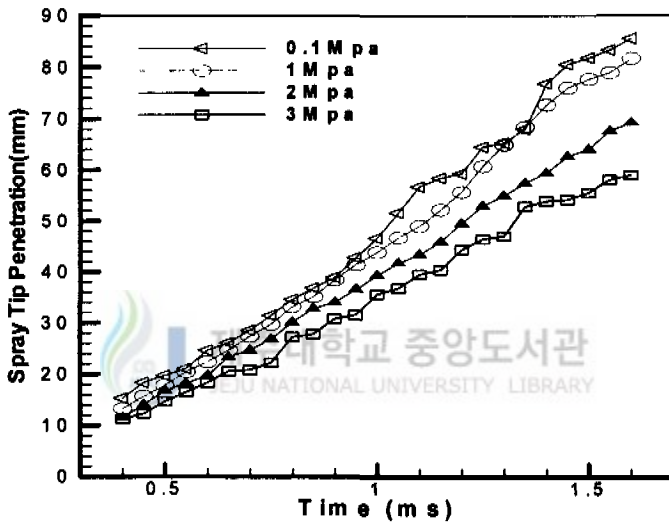


Fig. 6 Influence of ambient pressure on spray tip penetration

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

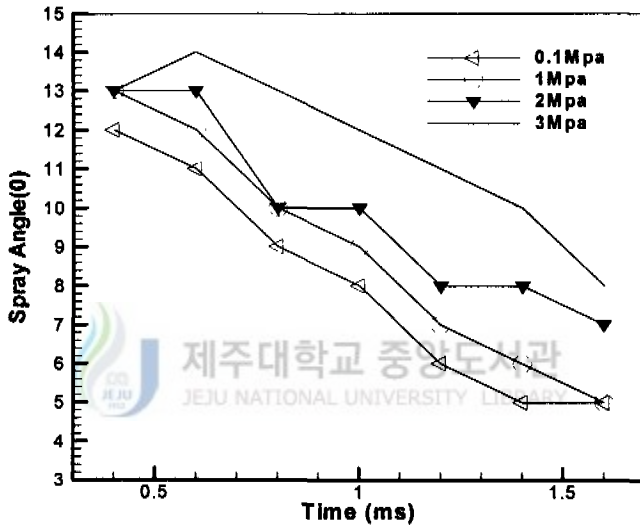


Fig. 7 Influence of ambient pressure on spray angle

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

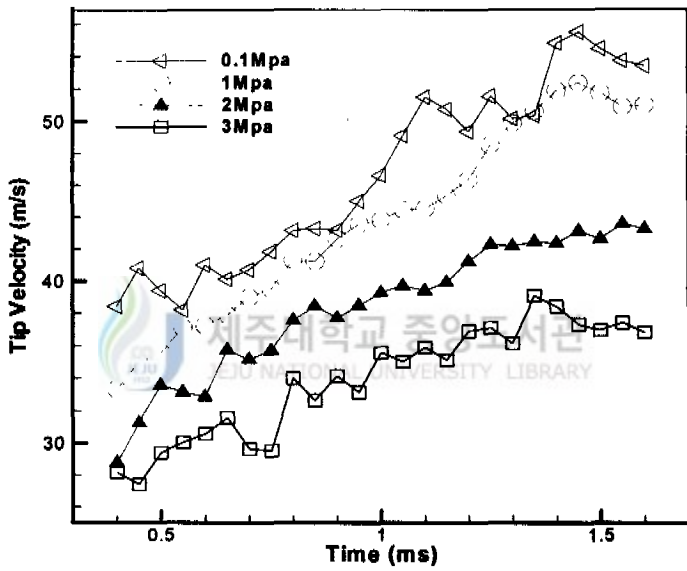


Fig. 8 Influence of ambient pressure on tip velocity

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

3-3. 분무의 분열기구 관찰

Fig. 9(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 액적 발생(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 공기 저항을 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 입자군을 이루게 된다.

Fig. 9(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 마찰등에 의해 액적이 생성되며 이 분열과정에서 생성된 액적의 입경은 균일하지 않다. 반면 (C)는 액주표면으로부터 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.



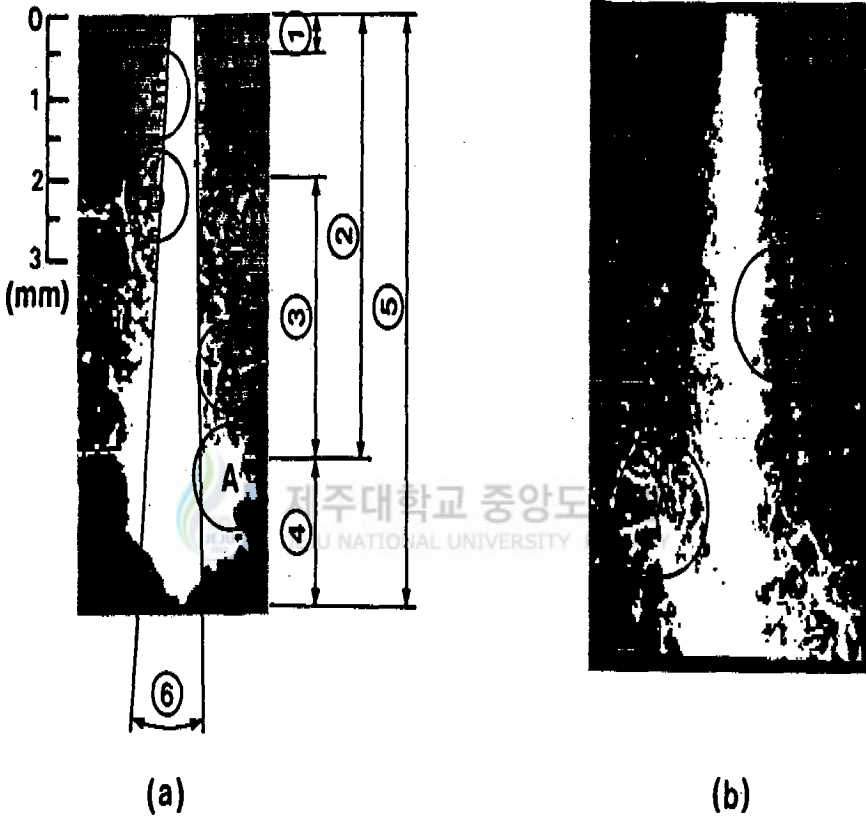


Fig. 9 Disintegrating mode of developing spray

(a) $t = 0.23\text{msec}$, (b) $t = 0.30\text{msec}$

($P_i = 14\text{MPa}$, $P_a = 0.1\text{MPa}$, $D = 0.35\text{mm}$, $L/D = 3.857$)

VI. 결 론

본 연구는 디젤분무의 초기 미립화형성 과정을 파악키 위해 14MPa의 압력으로 단공노즐(D=0.45mm, L/D=5)을 통하여 각각 0.1, 1, 2, 3MPa의 분위기 조건에 분사시켰다. 디젤분무의 발달과정은 나노라이트광에 의한 1차 계측후 스트로보광원에 의한 2차 계측으로 디젤분무의 성장 및 분산과정을 정량적으로 해석하였고, 초기분무의 분열과정은 나노라이트 1, 2차 광원에 의한 확대사진촬영 결과로부터 해석하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 압력용기내로 분사된 분무는 노즐상부로부터 약 1~2mm까지 노즐의 직경과 거의 같고 교란되지 않은 미분열 액주를 형성하고 있으며, 분사압력이 일정한 경우 분위기압력이 높을수록 미분열액주 길이는 짧아진다.
2. 분사직후 분무액주는 표면파에 의해 액주 주위에서 실모양의 액사가 형성되며, 분무의 성장과 더불어 형성된 파가 발달하여 액사에서 액적의 형태로 분열되고 이 때 발생된 액적군은 대체로 크기가 균일하였다.
3. 분사압력이 14MPa일 때 분위기압력이 1, 2, 3MPa인 용기내로 분사시켰을 경우 분무선단속도는 분사개시 후 각각 1.5, 1.2,

0.6ms에서 최대가 되며 시간경과에 따라 감소하고, 분무각은 분위기압력이 3MPa에서는 분사개시 후 0.6ms까지 증가하다가 이후 감소하여 일정하게 유지되며 분위기압력이 2, 1MPa로 감소하면 각각 1.2, 1.4ms에서 일정하다.그러므로 천이점은 속도가 감소하고 분무각이 증가하는 부근에서 발생하고 있으며 동일분사압력에서 분위기압력이 높을수록 천이가 빨리 일어나는 것을 알 수있다.

4. 액체분류의 분열기구는 액주표면에 발생된 표면파와 주위기체와의 마찰에 의한 분열과 분무선단영역에서 분위기압력의 저항으로 운동량이 감소된 선발분무를 후발분무가 추월함으로써 발생된 액적군의 상호작용에 의한 분열등이다.



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.
- 허종철, 구자왕, 이규영, 양옥룡, 1991, "디젤분무의 초기분산과정에 관한 실험적연구" 한국자동차공학회 논문집, 13권 2호 pp. 42-49.
- Huh, J. C., Lee, G. Y., O. Y. Yang, 1991, "An Experimental Study on Initial Behavior of Diesel Fuel Spray Characteristics", ICLASS-91, pp. 283-290.
- 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.
- 허종철, 고경남, 1996, "분위기압력이 디젤분무특성에 미치는 영향", 제

주대학교 산업기술연구소 논문집, 제7권 1호 pp. 35-44.

Hiroyasu, H., Shimizu, M. and Arai, M., 1991, "Similarity between the Break-up Lengths of a High Speed Liquid Jet in Atmospheric and Pressurized Conditions", ICLASS-91, pp. 563-570.

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", 한국자동차 공학회 논문집, Vol 2, pp. 100-111.

Lienhard J. H. and J. B. Day, 1970. "The Breakup of Superheated Liquid Jets", ASME Journal of Basic Engineering, pp. 515-522.

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.

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

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 글

10여년 동안의 직장 생활을 하면서 반복적으로 이루어지는 업무에 나태해져가고 현실에 안주해 가는 느낌을 저버릴 수가 없었는데 그러던 중에 좋은 기회가 되어 자기 개발과 재충전을 할 수 있는 시간을 가질 수 있어서 무척 기쁘게 생각합니다.

여러면에서 부족한 부분을 성심, 성의껏 지도해주신 허종철 교수님께 깊은 감사할 드리며, 격려와 관심으로 돌봐주신 고장권 교수님, 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 현명택 교수님, 임종환 교수님, 정동원 교수님, 조정호 교수님 그리고 최경현 교수님께도 감사드립니다.

실험을 하면서 준비부터 실험, 자료정리, 논문 작성까지 많은 도움을 주고 같이 고생을 해준 이창수, 이동현, 홍상필, 양윤석, 정승현군 그리고 대학원 학우들에게도 고마움과 감사를 전합니다.

또한 변함없는 사랑으로 보살펴 주신 부모님, 장인, 장모님께 깊이 감사드리며, 그동안 소홀했던 주위의 여러분들께 죄송하고 고맙다는 말을 드립니다. 아울러 직장생활과 살림 등으로 피곤함에도 내색하지 않고 도와준 아내와 사랑스런 준영, 수현과 이 기쁨을 나누고 싶습니다.

2000년 6월

김 기 봉