

〈論 文〉

충돌판에 의한 원판형 분무의 공간분포에 관한 실험적 연구

차건종* · 김덕줄**

(1994년 8월 23일 접수)

A Study on the Distribution of Cylindrical Disk Spray by a Impinging Disk

Keun-Jong Cha and Duck-Jool Kim

Key Words : Cylindrical Disk Spray(원판형 분무), Impinging Disk(원형충돌판), Air-Assist Atomizer(공기 지원형 노즐), Disturbance(교란), Droplet(액적), Liquid Phase(액상), Vapor Phase(증기상), Spray Width(분무폭)

Abstract

The goal of this study is to provide fundametal information on the design of a new diesel injector system. The cylindrical disk spray was made by an impinging disk insited below the exit of air-assist atomizor. The disintegration processes on a twin-fluid atomization by air-assist atomizor were investigated. Liquid jet was disintegrated at the condition that wavelength was equal and longer than the circumference of the liquid jet, $\lambda \geq \pi d_0$. However, the wavelength and the diameter of the liquid jet were decreased according to the increasing of air velocity. The relative density distribution of droplets and pattern of spray by impinging disk were investigated with a C-CCD. Optimum design conditions for cylindrical disk spray were also achieved. The pattern of cylindrical spray can classified according to the size of the disk and the distance from the nozzle tip to the disk. When the space of the disk and the nozzle tip was narrow and the diameter of the disk was larger than that of the air orifice of the nozzle exit, the good distribution of spray could be achieved. When the air flowrate was constant, the spray width was decreased according to the increasing of the liquid flowrate. When the liquid flowrate was constant, the spray width was decreased according to the increasing of the air flowrate.

기 호 설 명

d : 액주의 직경 (mm)
 d_0 : 액주의 초기직경 (mm)
 D : 충돌원판 직경 (mm)
 D_0 : 공기 오리피스 직경 (mm)
 f : 카메라의 초점거리 (m)
 h : 노즐선단에서 원판까지의 거리 (mm)

l_0 : 액주의 분열길이 (mm)
 l/l_0 : 액주의 초기 분열길이에 대한 분열길이 비
 Ma : 가스의 질량유량 (g/s)
 Ml : 액체의 질량유량 (g/s)
 T : 수온 (°C)
 Ua, Ul : 기류, 액주의 평균속도 (m/s)
 x : 축방향 거리 (mm)
 λ : 액주면에 형성된 교란의 파장 (mm)
 ρ_a, ρ_l : 기체 및 액체의 밀도 (kg/m³)
 σ : 액체의 표면장력 (N/m³)

*정회원, 부산대학교 대학원

**정회원, 부산대학교 기계기술연구소

1. 서 론

현대 사회에서 디젤엔진은 효율이 높고, 단순하며 신뢰성이 높다는 장점으로 인하여 가장 중요한 동력원의 하나로 인정 받고있다. 특히 국내의 경우 버스과 트럭 등 중대형 차량이 전체 차량대수의 30%를 차지하고 있다. 이와 더불어 환경문제가 고조됨에 따라 디젤기관의 연료효율을 증가시키고 유해배출을 줄이기 위한 새로운 접근 방법의 필요성이 대두되고 있다. 디젤엔진에서 실린더내의 공기와 연료와의 혼합은 연소과정을 지배하여 엔진 성능 및 배출가스의 유해성분의 생성을 좌우하는 가장 중요한 인자중의 하나이다. 그럼에도 불구하고 배출 가스중에 포함된 배기오염 물질의 저감에 관한 연구는 주로 배출가스 후처리,⁽¹⁾ 연료 액적의 증발과 연소과정,⁽²⁾ 연료의 분사시기 및 분사시간의 변화, 연소실 형상설계 등에 역점을 두고 있다.

직접분사식 디젤엔진에서 NOx와 Soot의 저감을 위해서는 분사 타이밍을 지연시켜야 하며 이를 위해 연료의 분사율을 증가시켜야 한다.⁽³⁾ 특히 실용 직접 분사식 디젤엔진의 다공 노즐에서 분사된 연료가 연소실 벽면에 충돌하는 경우 주위 공기와의 혼합이 불충한 분무류 내부에서 Soot 뿐만 아니라 다른 유해 생성물질들이 생성되고 있다.^(4,5) 따라서 연소실 분무 연료의 균질한 혼합기 형성을 위해 연소실내의 활발한 공기 유동 효과가 매우 중요하다.^(6,7) 이를 위해 급속 혼합과 연소율을 향상 시키기 위한 Re-entrant bowl형 연소실⁽⁸⁾과 고속에서 와류강도를 감소시킨 사각 bowl형 연소실⁽⁹⁾이 개발되었다. 최근에서는 Yanagihara와 Sakata⁽¹⁰⁾가 연료의 충돌현상을 이용하여 연료의 혼합을 촉진시키는 Reflex Burn(RB)이라는 새로운 연소실 형상을 제안 하였다. 이것은 벽면과의 강한 충돌로 인해 공기의 유입을 촉진 시키고, 액체의 연료가 벽면에 침착하는 것을 피할 수 있는 장점이 있다. 그러나 다공 노즐인 실제 디젤엔진의 경우 연소실 형상의 변경은 제작상의 어려움이 따르고 형상 병형에 따른 유동조건의 변화가 생기게 된다.

실린더내의 공기와 분사된 액체와의 혼합과정을 혼합시간과 연료의 분사압력과의 관계에서, 다공 노즐의 경우 일정한 분사량에 대해 분사압력이 증가하면, 분사속도는 증가하지만 분사시간 및 혼합시간은 감소하게 된다. 한편 분사된 질량의 모멘텀

은 증가하게 되어 분사된 연료는 벽쪽으로 기울게 되어 연소실 벽면에 충돌하게 되는 단점이 있다. 따라서 낮은 압력에서도 대단히 높은 분사압력에서 얻을 수 있는 동일한 효과, 즉 연료의 분사율을 증가시키며, 착화지연시간은 단축시킬 수 있는 균질한 연료 혼합기의 형성이 가능한 새롭고 효율적인 디젤엔진의 분사전략을 세우하는데 필수적인 기초 자료를 제공하는 연구가 수행되어야만 한다.

따라서 본 연구는 단일공의 인젝터 하방에 원판을 설치하여 여기에 연료를 분사시켜 공간분포를 효율적으로 할 수 있는 분사계를 설계하고자 한다. 만약 원통형 액주가 이것의 하류에 직각방향으로 설치된 원판에 충돌하면, 원판형상의 액체(liquid fan)가 원판의 원주주위에 형성된다. 동일한 액체 질량에 대해서, 주위가스와 접하는 액체의 표면적은 원통액주보다 원판형상이 훨씬 크다. 뿐만 아니라 공간 분포 및 혼합성이 우수하다. 충돌에 의한 미립화 방법은, 상당히 오래전부터 연구^(11,12)되어왔다. 그러나 디젤엔진의 연소실에서 형성되는 원판형상의 분무의 구조에 관한 자세한 연구는 이제 국, 내외적으로 관심을 보이기 시작하는 정도에 불과한 실정이다. 최근에 국내에서 Choi 등⁽¹³⁾은 충돌판의 거리가 19~23 mm, 분사압 120 kg/cm²인 단공노즐에서 행한 디젤분무의 벽면 충돌거동에 관한 연구를 통하여 벽면 충돌분무시 입경의 크기가 직접 분사에 비해 훨씬 감소하며, 충돌면의 조도도 입경의 크기에 영향을 미친다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 먼저 저압하에서 액체 연료의 분열에 적합한 실용 이류체 분사노즐을 사용하여, 액체연료의 분무에서의 미립화 과정을 밝히고, 이를 토대로 원판과 노즐의 기구학적 노즐과 기액 유량의 물리적인 조건에 의한 분무 액적들의 공간 분포를 구명함으로써 새로운 디젤 분사계 설계에 대한 기초정보를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치를 나타낸 것이다. 실험장치는 노즐을 중심으로 공기 및 액체 공급계, 그리고 노즐에서 분출한 액주의 표면 교란과 미립화된 액적들의 공간 분포를 가시화하기 위한 광학계 및 화상처리장치로 구성되어 있다.

액체는 대형 수조탱크에서 980 kPa의 압력으로

공급되며, 미세 유량 조절밸브에 의해 일정한 유량으로 노즐에서 동축으로 설치된 직경 0.5 mm인 관을 통해 축하방으로 분출된다. 이때 액체의 유량은 실제 분사된 양을 메스실린더로 측정하였다. 미립 화용 보조 공기는 공기압축기를 공급원으로 하여, 압력조절기에서 300 kPa의 일정 압력으로 공급된다. 공기는 액체에 대해 독립된 유로를 통해 노즐내 공기실로 공급되며, 직경 4 mm의 공기 오리피스를 통해 액체와 동축하방으로 분출된다. 공기의 유량은 충류 유량계로 측정하였고, 노즐에서 분사되는 공기의 유속은 압력 및 유속 측정이 가능한 디지털 마노메터로써 노즐의 공기실 압력을 측정하여 유속으로 환산하였다.

원판은 노즐의 축하방 중심선상에 위치시켰으며, 2축 이송대를 이용하여 상하 이동이 가능하게 하였다. 이때 이송대는 분무에 방해되지 않도록 배치하였다.

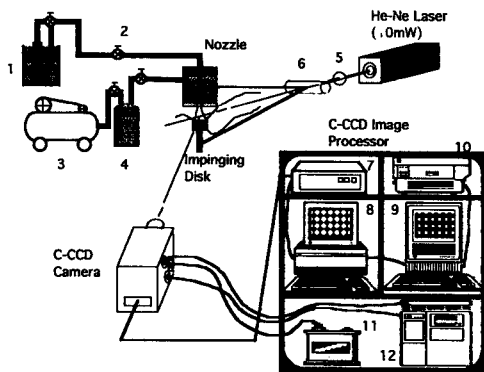
가시화를 위한 광학계로서는 광원인 He-Ne 레이저를 비롯하여 spherical 렌즈와 cylindrical 렌즈로 구성되어 있다. Cylindrical 렌즈를 통한 레이저 광은 sheet beam으로 되어 노즐에 조사된다. 화상 촬영장치로는 10⁻⁸ LUX의 매우 약한 광까지도 감지할 수 있는 C-CCD(cooled-CCD) 카메라를 사용하였다. C-CCD 카메라의 해상도는 510×492(25만 화소)이며 1개의 화소격자(pixel) 크기는

17(μm)×3(μm)이다. C-CCD카메라는 카메라 콘트롤러에 의해 제어되며, 진공펌프와 순환 냉각기에 의해 최적상태로 유지된다. C-CCD 카메라에 입력된 화상은 콘트롤러에 의해 디지털신호로 변환되어 화상처리기로 전송된다. 화상처리기는 전송된 화상을 모니터로 재생하고, 화상처리기에 저장된 각각의 이미지 화일들은 Macintosh-PC를 통하여 편집되고 칼라 프린트로 출력된다.

Table 1은 본 실험에 사용된 액체와 기체의 물성치 및 실험 범위를 나타낸 것이다. 액체와 기체의 유량은 실험용 노즐에서 분출시킬 수 있는 기체의 최대 유량(Ma=0.96 g/s)내에서 노즐을 통해 분출된 이유체 분무가 원판에 충돌하였을 때 원판에 닿아 흘러내리지 않고 공간적으로 퍼지기 시작하는 최소, 최대 액량범위를 선택하였다. 액체의 유량범위는 $Ml=1.0\text{ g/s}\sim 2.0\text{ g/s}$ 이고, 기체의 유량 범위는 $0.8\text{ g/s}\sim 0.96\text{ g/s}$ 이다.

2.2 실험방법

미립화용 보조 기류의 지원을 받는 Air-assist 동축 노즐의 경우, 액주의 분열은 보조 기류의 유량과 속도 등에 의해 직접적인 영향을 받는다. 특히 기류의 기체역학적인 효과로 인해 액주면에 형성된 교란은 성장하며, 교란의 성장은 결국 액주의 분열을 가져오게 된다. 따라서 기류에 의해 액주면에 형성된 교란의 성장과 변화가 분열에 미치는 상관관계를 정량적으로 구명하기 위하여 고속 펄스 근접 촬영기법을 이용한 순간 사진을 촬영하였다. 한편 원판에 의한 미립화 액적들의 공간분포는 원판을 중심으로 대칭성을 가지는 것으로 가정하였으며, 광원으로 레이저 sheet beam을 이용하여 한쪽



- 1. Water reservoir
- 2. Niddle valve
- 3. Compressor
- 4. Damping tank
- 5. Spherical lens
- 6. Cylindrical lens
- 7. C-CCD camera controller
- 8. Image processor
- 9. Macintosh-pc
- 10. Color printer
- 11. Vacuum pump
- 12. Circulating water cooler

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Liquid and gas properties

Liquid	Mass flow rate	Ml	0-2.0	g/s
(Water)	Temperature	T	20	°C
	Density	ρ_l	1.0	g/cm ³
	Surfact tenstion	σ	73	g/sec ²
	Density	ρ_a	1.2×10^{-3}	g/cm ³
Gas	Viscosity	μ_a	1.8×10^{-6}	g/cm.s
	Mass flow rate	Ma	0~1.0	g/s
	Mean velocity	Ua	0~200	m/s

단면만을 고려하였다.

Table 2는 가시화 장비 및 촬영조건을 나타낸 것이다.

2.2.1 이류체 액주의 1차 분열

이류체 액주의 1차 분열은 액주면에 형성된 교란의 연속적인 성장과정을 통해 분열되기 때문에 순간적으로 정지된 화상을 얻는 것이 필수적이다.

액주 분열의 순간 사진은 순간 발광속도가 0.8 msec, 단발 발광시 조도가 7.5 lux·sec인 Toshiba Co.의 MS-210 스토로보스코프를 광원으로 하고 52 mm 마이크로 렌즈를 부착한 일안 카메라와 동기시켜 스토로보스코프에 전기접점에 의한 단발 입력 신호를 주어 단발광에 의한 고속 펄스 근접 촬영기법으로 순간사진을 얻었다. 광원은 카메라에 대해 마주 보도록 하여 노즐의 중심으로부터 14.5 cm의 거리에, 카메라는 렌즈 초점거리 25 cm의 위치에 설치하였으며, 이 때 필름은 트라이 X판(ASA 400, KODAK)을 사용 하였다.

직접 촬영에 의해 얻어진 화상은 원래의 액주 크기에 대해 12배로 확대 인화하였으며, 확대된 화상을 1:1 스캐너를 사용하여 매킨토시 컴퓨터에 입력하여 교란의 간격을 실측하였다. 실측

된 교란의 간격이 파장이며, 실측된 파장을 실측된 액주의 초기 직경으로 나누어 무차원화함으로써 일반화된 파장을 얻었다.

2.2.2 원판형 분무의 공간 분포

노즐출구에서 분출된 이류체 액주는 노즐출구 하부에 있는 원판에 의해 2차 분열되어 공간적으로 대칭성을 가지고 주위로 퍼지게 된다. 이때 원판형 분무의 공간 분포도 및 미립화 특성은 기구학적인 영향으로는 원판의 직경(D)과 노즐출구에서의 거리(h)에 영향을 받는다. 특히 동측 이류체 노즐에서 공기 오리피스 직경(D_0)에 대한 원판의 직경(D)비, D/D_0 는 원판형 분무의 초기 두께를 결정한다. 따라서 공기 오리피스 직경을 일정하게 하고 원판의 직경을 변화시켰으며, 원판을 노즐 출구 아래에 설치하여 상하로 이동시켜 노즐출구에서의 거리를 변화시켰다.

미립화된 액적들의 밀도는 균일하게 조사되고 있는 광에 대한 광산란 광도에 직접적인 영향을 준다. 따라서 액적들의 광산란 특성을 이용하여 평균 시간에 대한 원판형 분무의 공간분포를 조사하였다. 이를 위한 가시화 장비는 HAMAMATSU사의 C-CCD 카메라 및 이미지 프로세스 시스템을 사용하였다.

본 실험에서 미립화된 액적들의 크기는 미립화 조건에 따라 수 μm 에서 수 백 μm 에 걸쳐 분포하는 것으로 예상된다. 이러한 액적크기는 광산란 특성에 있어서 주로 Mie scattering^(14,15)을 일으킨다. Mie scattering에 의한 광도의 세기는 광이 주사되는 쪽에서 180°위치에서 가장 강하며 원점으로 갈수록 약해지는 특성을 가진다. 따라서 본 실험에서는 25만개의 화소격자(pixel)를 가진 C-CCD에 150 mm 줌 렌즈를 부착하여 사용하였으며, 설치공간 및 산란광도를 고려하여 광원에 대해 노즐을 중심으로 120도, 1 m 위치에 설치 하였다. C-CCD 카메라의 셔터속도는 1/30 sec로 고정되어 있어 연속분무에 대한 화상을 얻었다. 화상처리기를 이용하여 화상의 국소점에 대한 광도값 및 광도에 대한 등광도선도를 구하였다. 광원으로는 파장이 632.8 nm인 10 mW의 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 분무의 단면 촬영을 위해 cylindrical lens를 이용하여 sheet beam을 노즐중심 수직축에 일치시켰다. 화상의 노이즈를 제거하기 위해 먼저 동일한 실험조건에서 미 분무화상과 분무화상을 각각 촬영

Table 2 Photography equipment and conditions

Equipment	Conditions
Camera	Lens : 52 mm (Micro) Focus distance : 0.25 m Exposure : f 5.6
	Shutter speed : B
	Film : Nega. B/W, ASA.400 (Kodak)
Stroboscope	Flashy speed : 0.8~4 μsec
	Illumination : 7.5 lux · sec
C - CCD camera	Lens : 150 mm (Macro)
	Pixels : 510 × 492 (250k) size : 17 × 3 μm^2
	Spectral response : 400~1,100 nm
Laser	Type : He - Ne
	Wave length : 632.8 nm
	Power : 10 mW

하였다. 이 화상들을 이미지 프로세스를 이용하여 분무화상에서 미 분무화상을 배경으로 처리하여 제거함으로써 분무에 대한 정확한 화상을 얻었다.

일반적으로 액체 연료의 분무에 의해 공간 상에 분포된 액적들은 주위의 온도와 압력에 영향을 받아 상변화를 일으키게 된다. 이 때 액적의 밀도가 높은 영역에서는 액적이 증기로 미처 증발되지 않고 액체상태의 액적으로 잔류하게 된다. 반면 분무된 액적들의 밀도가 낮은 영역에서는 미세한 액적들이 증기로 증발하여 공간상에 증기상태로 존재하게 된다. 여기서 전자의 경우를 액적의 액상이라 하며, 후자의 경우를 증기상이라고 한다. 이러한 상변화는 주위 온도와 압력 및 액적으로서의 대류 열 전달 효과에 기인한다. 특히 주위 기류의 난류효과는 액적의 증발속도를 증가시키며⁽¹⁶⁾ 이로 인해 액체 연료의 혼합기 형성은 더욱 촉진된다. 이와 같은 상변화로 인해 액체연료의 착화는 증기상 영역에서 시작하여 액상영역으로 화염이 전파되는 것이다. 특히 액체 연료를 사용하는 내연기관에서는 증기상에서 점화되어 화염이 형성되기 때문에 증기상이 고르게 많이 분포되어야만 완전 연소를 유도할 수 있다. 따라서 액상과 증기상의 분포를 예측하는 것은 매우 중요하다. 일반적인 카메라 렌즈는 액상 및 증기상의 액적에 의한 산란광을 모두 통과하기 때문에 그 영역을 명확하게 구분 할 수 없다. 특히 본 실험에서는 주위조건을 대기압, 상온 상태이며 액체는 물을 사용하였기 때문에 액적의 상변화가 발생되지 않는다. 그러나 경험적으로 증기상은 액적의 밀도가 낮고, 액적의 크기가 매우 작은 수 μ m의 크기를 가지는 영역에서 발생된다. 따라서 본 실험에서는 액적의 증발현상은 일어나지 않았다고 하더라도, 액적들의 공간밀도와 크기에 의한 광산란 광도를 측정함으로써 액상영역과 증기상 발생가능 영역을 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이류체 액주의 1차 분열

3.1.1 파장의 변화

Fig. 2는 액주면에 형성된 교란의 형태를 나타낸 것이다. 기류의 속도가 54 m/s, 액량이 1.7 g/s일 때이며, 노즐에서 분출된 액주에 기류의 영향으로 인해 액주표면에 돌기모양의 교란들이 어느 정도의

간격을 두고 형성되어 있음을 보여주고 있다. 이들 교란과 교란 사이의 간격을 액주면에 형성된 교란의 파장(λ)으로 정의 하였다. 파장의 변화는 액주의 불안정성에 영향을 미치기 때문에 파장의 변화를 통해 액주의 분열시기를 예측할 수 있다.

Fig. 3은 액주의 액량이 1.7 g/s일 때 다양한 기류속도에 대해서 액주의 축방향 거리에 대한 파장의 변화를 나타낸 그림이다. 분출방향거리를 액주의 초기직경으로 나눈 무차원거리(x/do)에 대한 무차원 파장(λ/do)의 변화를 보여주고 있다.

동일한 기류속도일 때 노즐의 출구에서 멀어질수록 파장은 증가하고 있다. 본 실험에서 축방향 거리가 $(x/do) < 10$ 영역에서는 파장이 초기액주의 원주보다 작지만($\lambda < do$), 하류로 갈수록 서서히 증가하여 $(x/do) > 10$ 인 영역에서는 파장이 초기액주의 원주이상으로 길어지다가($\lambda \geq \pi do$) 결국에는 액주가 분열된다.

기류속도가 증가할수록 액주의 파장은 감소하고 있다. 본 실험의 경우 액주가 분열된 파장은 기류의 속도 $Ua=0$ m/s일 때 $\lambda=4.85do$ 에서, $Ua=54$ m/s일때 $\lambda=3do$ 로 감소하였다. 또한 분출거리에 따른 파장의 증가경향은 기류속도가 증가할수록 둔화 되고 있다. $Ua=54$ m/s일 때 분출거리에 따른 파장은 초기 직경의 3배 내외로 거의 일정함을 보인다. 기류의 영향을 받지 않을 때, 액주가 분열

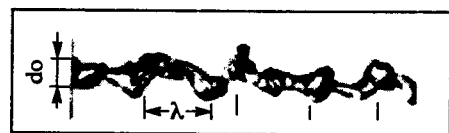


Fig. 2 Definition of wave length of liquid jet

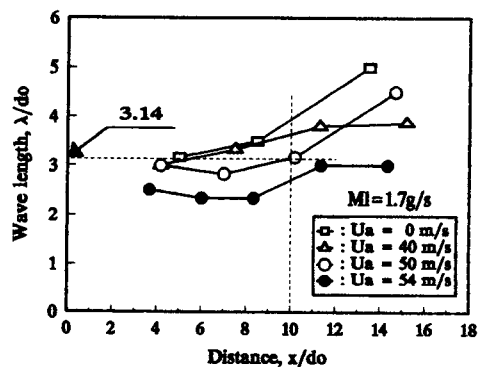


Fig. 3 Dimensionless wave length as a function of air velocity and distance

할 수 있는 교란의 파장은 초기 액주의 원주와 같거나 길다고 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 그러나 기류의 영향을 받을때 기류의 속도는 분열과정에 직접적인 영향을 미친다. 본 실험조건 내에서 기액경계면에서의 공기마찰이 심화될수록 액주의 교란이 더욱 증폭되지만, 파수는 증가하여 파와 파 사이의 파장은 상대적으로 짧아지는 것으로 관찰되었다. 이것은 유체의 표면장력보다 기체역학적인 효과가 파의 성장에 주요한 인자로 작용함을 의미한다.

3.1.2 액주직경의 변화

Fig. 4는 액량이 0.65 g/s와 1.7 g/s 조건에서 기류의 속도에 따른 액주의 직경변화률을 나타낸 것이다. 액주의 직경(d)은 동일 액주에서 형성된 서로 다른 액주직경의 평균 값을 나타낸다.

기류의 속도가 증가할수록 액주의 직경은 감소하고 있다. 동일기류의 속도에 대해서 액량이 0.65 g/s인 경우보다 1.7 g/s인 경우가 직경의 감소율이 높게 나타나고 있다. 또한 액량이 0.65 g/s인 경우 기류속도 증가에 따라 선형적으로 직경이 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 액량 1.7 g/s인 경우, 기류의 속도가 45 m/s~50 m/s 구간에서 직경이 초기직경(d_0)의 50%로 급격히 감소한 반면, 그 이상의 속도영역에서는 전구간에 걸쳐 다소 완만한 감소경향을 보인다. 이것은 유량이 1.7 g/s일 때 이미 액주면에 교란이 존재하고 있기 때문에 기류와의 마찰에 의한 stretching 효과가 크기 때문으로 생각된다. 특히 액주면에 초기 교란이 존재하는 액주의 경우, 액주직경의 감소는 일정 기류 속도 영역에서 순간적으로 이루어짐을 알 수 있다. 그리고 기류속도가 50 m/s 이상의 영역에서 직경의 감

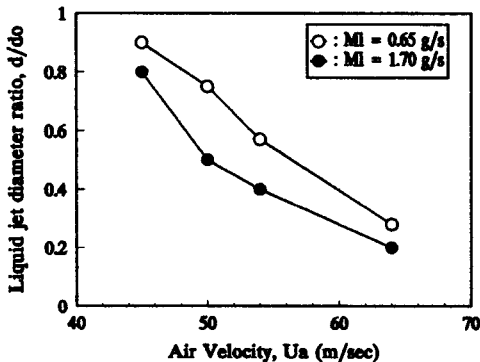


Fig. 4 Liquid jet diameter ratio as a function of air velocity and liquid flowrate

소경향이 다소 둔화되는 것은, 기류의 활발한 난류 확산 유동에 의해 액주의 분열양상이 액막분열로 발전하기 때문이며, 기류의 속도가 증가할수록 노즐 출구에서 바로 분열됨을 관찰할 수 있었다.

3.1.3 분열길이

Fig. 5는 공기속도에 대한 액주의 분열길이가 비를 나타낸 것이다. 액주의 분열길이는 기류의 속도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하다가 약 50~60 m/s 근방에서 급격히 짧아지기 시작한다. 이 속도 영역은 Fig. 3과 Fig. 4에서 파장의 길이가 액주의 직경의 3.0배 되는 시점 및 액주의 직경이 50%로 감소되는 속도영역과 일치한다. 이것은 기류의 운동에너지가 증가함에 따라, 분열양상의 변화가 발생하여 파장의 성장 및 직경의 감소가 둔화되고 있지만, 분열양상의 변화로 인한 액주의 분열은 더욱 가속되고 있음을 의미한다. 이는 액주에 형성된 교란의 성장에 의해 분열되는 액주 분열기구에서 액주가 얇은 액막으로 되어 분열되는 액막 분열기구로 발전되기 때문이다.^(17,18) 본 실험에서 $Ua \approx 60$ m/s에서 액주분열에서 액막분열로 그 분열양상이 변하여 분열길이가 원래의 액주길이에 대해 10% 정도로 짧아지고 있으며, 기류속도가 60 m/s 이상으로 증가함에 따라 분열길이는 1%~0.1%로 짧아짐을 보였다.

이상에서 이류체 액주의 1차 분열은 주위 기류의 영향으로 인해 액주면에 형성된 교란의 성장과 직

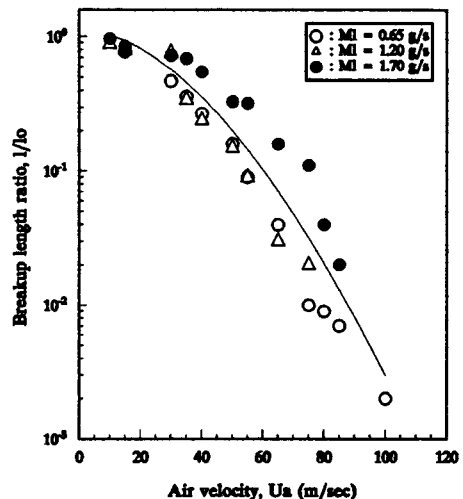


Fig. 5 Breakup length ratio as a function of the liquid flow rate and air velocity

경이 감소하여 분열함을 알 수 있다. 이러한 액주의 분열은 어느 정도의 길이를 가지는 액주이기 때문에 액체상태의 액주가 잔류하게 되어 액체 연료의 불완전 연소 및 유해 배출가스의 원인이 된다. 특히 액체 연료를 사용하는 직접 분사식 디젤 엔진의 경우, 미립화 특성뿐 만 아니라 분무 연료의 공간 분포가 중요하다. 따라서 노즐하부에 원판을 설치하여 1차 분열한 이류체 액주를 2차 분열시킴으로서 미립화 특성을 향상시키고, 분무의 반경방향 공간 분포를 극대화시킬 수 있다.

3.2 충돌에 의한 원판형 분무

3.2.1 공간 분포도 및 등광도선도

동축기류에 의해 1차 분열된 액적들은 어느 정도의 분무각을 가지고 분출방향에 집중되어 있다. 이 같이 축방향으로 분포된 액적들을 반경방향으로 넓게 분포되도록 할 뿐만 아니라 원판과의 충돌로 인한 2차 분열을 발생시켜 더욱 작은 액적을 만들기 위해 노즐출구 아래에 원판을 설치하였다. 원판의 직경과 노즐 선단으로부터의 간격은 액적의 반경방향 분포에 영향을 미칠 수 있는 기구학적 인자들이고, 유체역학적인 요인으로는 기류 및 액체의 유량과 분출속도 등을 고려하였다. 특히 노즐로부터 원판까지의 간격은 액적의 2차 충돌과 반경방향의 퍼짐을 유도하기 위해서 액주의 분열길이보다 길게 하였다.

Fig. 6은 레이저 sheet-beam을 노즐 축에 수평으로 조사하여 C-CCD 카메라로 촬영한 분무의 단면화상 한 예이다. 본 화상은 세로방향의 길이는 가로방향의 길이에 대하여 3배로 확대시킨 것이다. Fig. 6(a)는 원판과의 충돌로 인한 일반적인 분무 유형을 나타내고 있다. 원판과 충돌한 분무는 상하방향으로 어느 정도의 폭을 가지면서 원판주위를 반경 방향으로 퍼지고 있다. 또한 노즐출구 중심부위에서 산란된 빛이 가장 강하고 반경방향 및 축방향 상하로 갈수록 광도가 약해지고 있다. 여기서는 분무의 유형만을 알 수 있고 분무 액적들의 공간 분포에 대해서는 자세히 알 수 없다. 따라서 분무 내에서의 액적분포에 대한 정보를 얻기 위해 화상처리하여 등광도선도로 나타내었다. Fig. 6(b)는 화상 처리장치를 통해 산란광도에 따른 등광도선도를 나타낸 것이다. 등광도선에 나타난 수치는 최대 산란광도에 대한 상대 광도값이다. 본 실험에서는

노광에서 육안으로 관찰하였을 때 안개처럼 보이는 아주 미세한 액적들은 연소실의 고온 분위기에서 쉽게 증발되어 점화되기 때문에 증기상으로 정의하였다. 이 정의에 의해 증기상은 본 실험조건에서 약 0.2의 상대광도 값에 해당한다. 노즐 중심에서 반경방향으로 갈수록 등광도선 간격이 넓어지고 상대 광도값도 작아지고 있다. 등광도선 간격이 조밀한 노즐출구 및 원판 부근에서는 1차, 2차 분열이 발생되고 있기 때문에 액상이 집중되어 밀도가 높음을 알 수 있다. 반면 매우 작은 액적들은 기류의 영향으로 반경방향으로 날려가서 넓은 영역에 걸쳐 균일하게 분포되고 있음을 알 수 있다. 따라서 노즐출구 및 원판 부근에서는 액상으로 분포하고, 반경방향으로 멀어질수록 증기상이 균일하게 분포됨을 알 수 있다.

3.2.2 기구학적 영향과 원판형 분무의 유형

Fig. 7은 원판의 크기 및 노즐과의 거리에 따른 원판형의 분무형태를 알아보기 위해 주어진 조건에서 분무의 공간분포를 가시화시켜 등광도선도로 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 기액질량유량비(Ma/Ml)가 0.43이고 원판 간격(h)이 1 mm일 때 원판의 직경변화에 대한 분무의 공간 분포이다. 원판의 간격이 일정할 때, 직경비(D/Do)가 증가함에 따

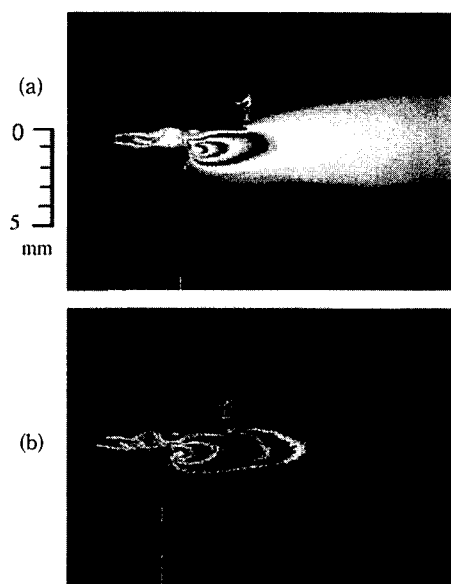


Fig. 6 Original image and contour of cylindrical disk spray ($h=1$ mm, $D/Do=1.5$, $Ma/Ml=0.96$)

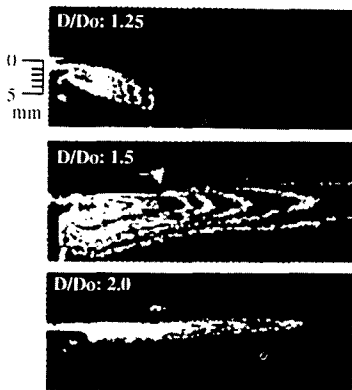
라 축방향 분무에서 반경방향의 분무로 변하며 분무 폭도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 직경비가 증가 할수록 원판 면적이 증가되어 노즐에서 분출되는 기류의 충돌 후 모멘텀과 반경방향의 모멘텀의 균형에 좌우된다고 생각된다. $h=1\text{ mm}$ 일 때 직경비 $D/D_o=2$ 에서 가장 양호한 공간분포를 보여주고 있다.

Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)와 동일한 유량조건에서 $D/D_o=2$ 일 때 원판의 위치변화에 따른 공간 분포도이다. 원판이 노즐 출구측에 가까울수록 반경방향으로 분포되고 있다. 노즐에서 멀어질수록 반경방향 분포가 둔화되며, 특히 $h=3\text{ mm}$ 에서는 분무

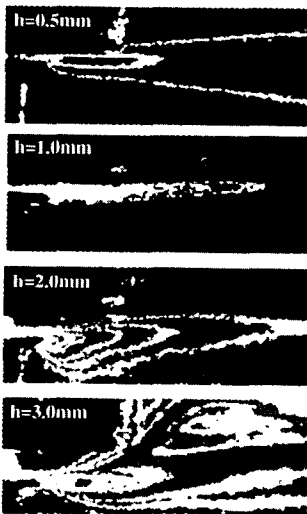
가 위쪽으로 치솟아 오르는 과도현상이 나타났으며, 이보다 더 멀어지면 축 아래로 향하는 분무가 다시 나타났다. 이것은 원판의 위치가 기류의 유동장에 영향을 주기 때문으로 생각된다. 한편, $h=0.5\text{ mm}$ 일 때가 $h=1\text{ mm}$ 일 때 보다 축 상, 하방향으로 더 퍼지고 있다. 이것은 주어진 조건에서 노즐출구와 원판 사이의 간격이 너무 협소 할때, 분무류는 더이상 충돌에 의한 유체역학적인 흐름을 따라 가지 않고 마치 평판 노즐에서 반경방향으로 큰 모멘텀을 가지고 분출되는 것과 같은 분무가 일어나기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 7(a)에 대한 상대광도 값을 측정하여 등광도선으로 정량화한 것이다. X축은 반경방향 거리(r)이고, Y축은 축방향 거리(h)로서 노즐 출구선단을 원점으로 하여 아래방향을 (-), 윗방향을 (+)로 하였다.

직경비가 클수록 분무 전체에 걸쳐 상대광도 값이 낮고, 분무가 반경방향으로 확대되어 있음을 알 수 있다. 정의에 의해, 증기상으로 볼 수 있는 상대광도 0.2이하의 아주 미세한 액적의 분포를 보면, $D/D_o=1.5$ 인 경우는 노즐 팁 주변으로부터, $D/D_o=2$ 인 경우는 원판 주변으로부터 반경방향으로 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 직경비가 클수록 분무 폭이 좁아지고 있음을 알 수 있다. $D/D_o=2$ 일 때, 노즐 선단을 중심으로 상·하 약 6 mm 폭 내에 거의 미세 균일한 액적들이 반경방



(a) $h : 1\text{ mm}$



(b) $D/D_o : 2$

Fig. 7 Contour maps of cylindrical disk spray with a variation of diameter ratio(D/D_o) and disk distance (h). ($Ma/Mi=0.43$)

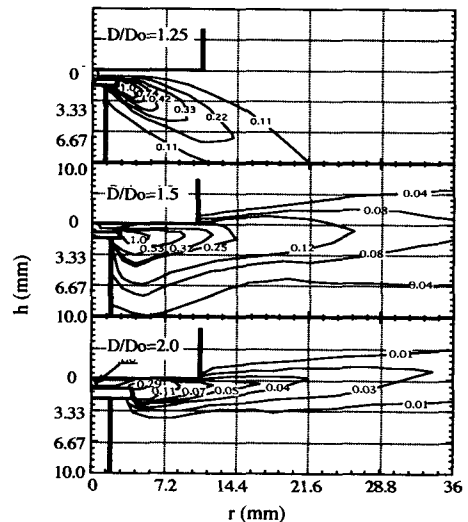


Fig. 8 Contour maps with relative intensity of cylindrical spray. ($Ma/Mi=0.43$, $h=1\text{ mm}$)

향으로 분포되어 있다.

Fig. 9는 Fig. 7(b)를 정량화 한 것이다. X축은 원판의 직경에 대한 반경방향거리(r/D), Y축은 충돌판 간격에 대한 축방향거리(x/h)를 나타낸다. $x/h=0$ 는 노즐 선단을 의미하며 이 곳을 기준으로 (-)는 아래방향, (+)는 윗방향을 나타낸다. 또한 $x/h=0$ 인 기준선을 중심으로 상·하에 있는 선들은 분무류의 외곽 경계를 상부와 하부측으로 나타낸 것이다. 일반적으로 원판이 노즐의 출구쪽으로 가까워질수록, 또 반경방향으로 멀어질수록 분무 폭이 감소함을 보인다. 그러나 $h=0.5$ mm일 때는 오히려 증가하고 있다.

$h=0.5$ mm일 때 원판 직경의 4배가 되는 반경거리($r/D=4$)에서는 $r/D=1$ 일 때에 비해 분무 폭이 약 3배 정도로 넓어짐을 보였다. 이에 반해 $h=1$ mm일 때, 반경방향 거리에 상관없이 분무 폭이 거의 일정하게 유지되고 있다. 공간적인 제한을 받지 않고 단지 좋은 미립화를 요구하는 곳에서는 $h=0.5$ mm일 때가 좋은 조건이 된다. 그러나 축방향으로의 퍼짐이 최소화되어야 하는 좁은 공간 내에서 반경방향으로의 균일한 분포가 더 중요한 경우에는 $h=1$ mm일 때가 최적조건이 된다.

Fig. 10은 기액 질량 유량비가 0.4~0.96일 때, 원판의 직경 및 거리에 따른 원판형 분무형태의 영역을 나타낸 것이다. X축은 원판의 직경을 공기 오리피스 출구 직경으로 나눈 직경비이며, Y축은 노즐출구에서 원판까지의 축방향 거리이다. 일정한 직경비에서 원판의 위치가 노즐 쪽으로 가까울수록, 분무의 공간분포는 축방향(A영역)에서 점차로 반경방향(C영역)으로 변하고 있음을 보여주고 있다. 이 변화과정에서 축방향 분무가 Fig. 6에서

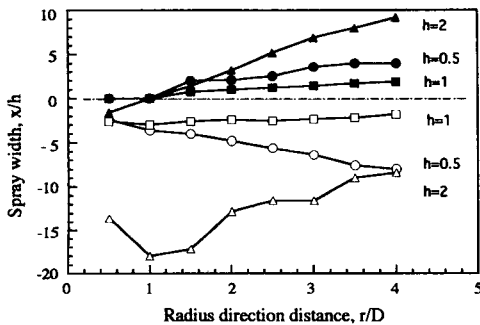


Fig. 9 Spray width with variation of the disk distance. ($D/Do=2$, $Ma/Ml=0.43$)

$D/Do=2$, $h=3$ mm인 경우와 같이 역방향으로 치솟아오르는 과도현상(C영역)이 존재하였다. Fig. 9에서 실선과 점선내가 과도현상이 나타나는 천이 영역(B영역)에 해당한다. 직경비가 증가함에 따라 천이현상이 발생하는 원판의 위치가 노즐에서 멀어지고 있으며, 직경비 1.5이상에서는 다소 일정한 위치를 유지한다. 한편 천이영역은 직경비가 증가할수록 넓어지고 있다.

공기 오리피스를 나온 동축기류는 확산하기 때문에 노즐에서 멀어질수록 반경방향 폭이 증가한다. 따라서 원판의 직경이 일정한 경우 원판의 위치가 확산기류 반경방향 폭 내에 있으면 대부분의 기류는 축하방(A영역)으로 향하게 된다. 그러므로 분무류 주위를 둘러싸고 있는 기류의 영향으로 충돌 후의 분무류는 반경방향으로의 퍼짐이 둔화되고 축하방방향으로 확산되어 분포한다. 한편 확산기류의 반경방향 폭이 원판 내에 있도록 원판을 위치하였을 때, 대부분의 기류는 액체와 함께 원판에 충돌 후 난반사하게 된다. 이 때 기류가 외부로 확산되어 과도현상(B영역)이 생기게 된다. 한편 원판의 위치가 더욱 더 노즐 가까이 가게되면 반경방향의 기류의 모멘텀이 증가되어 반경방향의 균일한 분무 분포(C영역)를 하게 된다. 이것은 노즐선단과 원판의 위치에 의해 결정된다. 원판의 직경이 일정할 때 원판이 노즐에 가까워질수록 반경방향의 액적 분포를 얻을 수 있다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이, 직접분사식 디젤엔진의 연소실내에서 가장 적합한 분무형태를 얻기 위해서는 기구학적 설계조건이 분무형태가 C영역내에 존재하도록 선택하여야 한다.

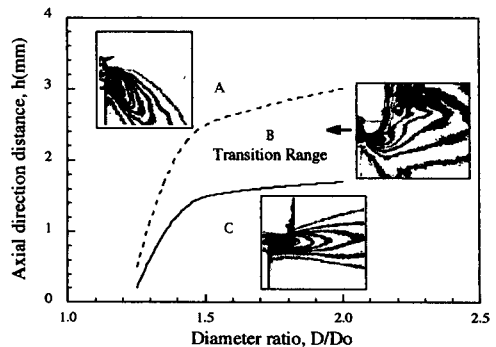


Fig. 10 Range of cylindrical disk spray type. ($Ma/Ml=0.4\sim0.96$). (A: Axial direction spray, B: Transition range, C: Radius direction spray)

3.2.3 기·액 유량의 영향

Fig. 11은 Fig. 9의 결과로부터 본 실험에 사용한 노즐에 대해 C영역에 해당하는 최적 조건 ($D/Do=2, h=1\text{ mm}$)에서 기액질량유량비 변화에 따른 분무형태를 나타낸 것이다. 액체의 유량은 (a) $MI=1.0\text{ g/s}$, (b) $MI=2.0\text{ g/s}$ 로 일정하게 유지하고 기체의 유량을 변화시켰다. 전반적으로 기액유량비가 증가할수록 반경방향으로의 분포가 현저하게 나타나고 있다. 이것은 액체의 모멘텀이 일정할 때, 기체의 유량증가에 따른 기체의 모멘텀이 증가하여 반경방향으로 급속히 퍼지고 있기 때문으로 보인다. 한편, (a)와 (b)를 동일한 기체의 유량에 대해 비교하여 보면 (a)에 비해 (b)가 반경방향거리에 따른 분무 폭이 좁고, 거의 일정함을 알 수 있다. 이것은 액량증가에 따라 액류가 원판과의 충돌

후 반경방향 성분의 운동에너지가 (a)보다 증가하기 때문이다.

Fig. 12은 $D/Do=2, h=1\text{ mm}$ 로 일정하게 하고 기액질량유량비를 변화시켰을 때, 반경방향거리에 따른 분무 폭을 나타낸 것이다. 전반적으로 노즐선단($x/h=0$)을 기준으로하여 하부(-)측으로의 퍼짐이 상부(+)측으로의 퍼짐보다 컸다. 이는 분무류가 원판과 충돌 후 반사된 분무류가 다시 노즐선단에 부딪혀 상부측으로 확산을 방해하기 때문으로 생각된다. $Ma/MI=0.4$ 인 경우는 공기의 기체역학적인 효과에 의한 반경방향으로의 퍼짐보다는 액체의 축 하방향으로의 운동량이 크기 때문에 하부측으로의 분무 폭이 큼을 알 수 있다. 또 상부측에서 $Ma/MI=0.48$ 일 때가 이보다 적은 유량비 조건에 비해 상부측 퍼짐이 가장 크게 나타났다. 이는 분무류가 가지고 있는 운동량이 어느 이상이 되면, 원판에 충돌 후 유체역학적인 흐름을 따라 이동하지 않고 원판과 노즐 선단 사이에 형성된 좁은 틈을 통하여 마치 노즐에서 분출되는 것과 같이 다시 분출되어 나오기 때문에 반경방향으로 갈수록 퍼짐

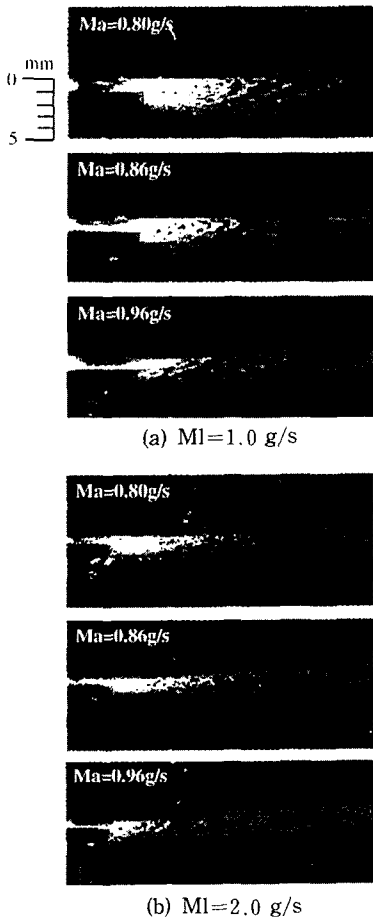


Fig. 11 Contour maps of cylindrical kisk spray with variation of air mass flowrate(Ma). ($D/Do=2, h=1\text{ mm}$)

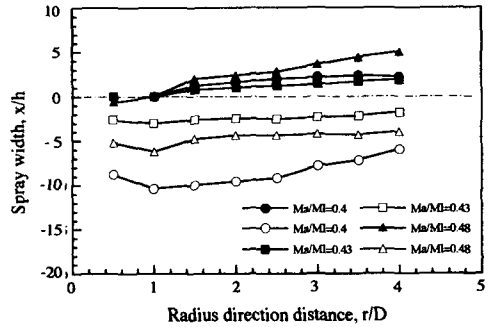


Fig. 12 Spray width with variation of gas and liquid mass flowrate. ($D/Do=2, h=1\text{ mm}$)

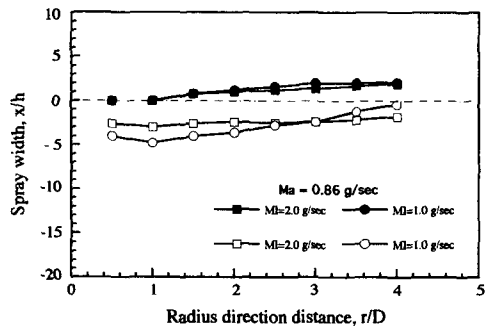


Fig. 13 Spray width with variation of liquid mass flowrate. ($D/Do=2, h=1\text{ mm}$)

이 증가하는 분무확산현상이 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 13은 동일한 공기 질량유량에서 액체의 유량을 변화 시켰을 때의 분무류의 퍼짐을 정량적으로 나타낸 것이다. 반경방향으로 갈수록 $Ml=2\text{g/s}$ 인 경우는 퍼짐 폭이 일정하게 유지되고 있는 반면 $Ml=1\text{g/s}$ 인 경우는 점차로 감소하고 있다. 원판 직경의 2.5배 되는 반경까지는 액량이 1g/s일 때가 2g/s일 때 보다 많이 퍼지고 있지만 2.5배 이상되는 곳에서부터는 오히려 적어지고 있다. 이는 분무 액적들의 운동에너지와 기류의 운동에너지와의 상호 작용에 의한 결과때문이라고 생각된다. 즉 기류의 운동에너지가 분무된 액적들의 운동 에너지보다 상당히 크게되면 분무 액적들은 기류에 의한 유동방향을 따르게 된다. 따라서 액량과 기류의 유량을 적당히 조절하면 두 유체간의 운동에너지의 상호작용에 의해 최적의 액체분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 실험의 주어진 기구학적 조건에서 기액 질량유량비 $Ma/Ml=0.43$ 일 때 축방향 퍼짐 폭이 가장 작았으며, 반경방향거리에 따른 퍼짐 폭도 일정하게 유지 되었다.

4. 결 론

본 연구는 낮은 분사압력에서도 대단히 높은 분사 압력에서 얻을 수 있는 동일한 효과를 얻을 수 있으며, 효율적인 분무의 공간분포를 얻을 수 있는 새로운 디젤 분사계의 설계를 시도하였다. 그래서 먼저 액체연료의 분무에서의 1차 분열과정을 밝히고, 이를 토대로 충돌원판에 의한 분무의 공간 분포를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기류속도가 증가할수록 액주가 분열될 때의 액주면에 형성된 파장은 감소하였다. 본 실험의 경우 기류의 속도 $Ua=0\text{m/s}$ 일 때 $\lambda=4.85do$, $Ua=54\text{m/s}$ 일때 $\lambda=3do$ 이었다.

(2) 화상해석을 통하여 원판형 분무의 구조에 대한 가시화와 액적의 상대적 크기분포에 대한 정량화가 가능하였다.

(3) 원판충돌에 의한 분무의 형태를 원판의 직경과 노즐 선단과 원판과의 거리에 따라 분류 할 수 있었다.

(4) 원판이 노즐출구 측에 가까울수록, 공기오리피스 직경에 비해 원판의 직경이 클수록 반경방향으로 크게 확대된 분무구조를 가졌다.

(5) 본 실험의 경우, $D/Do=2$, $h=1\text{mm}$, $Ma/Ml=0.43$ 조건에서 가장 양호한 공간분포를 가지는 분무 형태를 얻었다.

후 기

이 논문은 1993년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) Cho, K. R., 1991, "Diesel Particulate Control Technology in Korea," *International Seminar on Diesel Particulate Control Techniloge. MVERL KAMA*, pp. 191~205.
- (2) Han, S. J. and Park, S. H., 1993, "Vaporization and Ignition of a Liquid Fuel Droplet in a Hot Air Stream," *KSME*, Vol. 17, No. 11, pp. 2816~2829.
- (3) Aoyagi, Y., Kamimoto, T., Matsui, T. and Matsuoka, S., 1980, "A Gas Sampling Study on the Formation Processes of Soot and No in a DI Diesel Engine," *SAE 800254*.
- (4) Kamimoto, T., Takahashi, H., Kobayashi, H. and Matusuoka, S., 1982, "Convective Heat Transfer of an Impinging Diesel Flame in a Rapid Compression Machine," *SAE 821035*.
- (5) Kamimoto, T., and Bae, M. H., 1988, "High Combustion Temperature for the Reduction of Particulate in Diesel Engines," *SAE 880423*.
- (6) Gosman, A. D. and Ahmed, A. M. Y., 1987, "Measurement and Multidimensional Prediction of Flow in a Axisymmetric Port/Valve Assembly," *SAE 870592*.
- (7) Errera, M. P., Laabbe J. and Jerot, A., 1988, "Three-Dimensional Numerical and Experimental Analysis of in Cylinder Flow In an internal Combustion Engine," *SAE 880106*.
- (8) Hil, R. W., Lawrence, C. S., Clarke, D. P. and Needham, J. R., 1988, "The Optimized Direct Injection Diesel Engine for Future Passenger Cars," *SAE 880419*.
- (9) Kihara, R., Mikami, Y. and Kinbara, M., 1983, "The Advantages of the Isuze Square Combustion Chamber," *SAE 830106*.

- tion Chamber for D. I. Engines, *SAE 830372*.
- (10) Yanagihara, Y. and Sakata, I., 1990, "Development of TOYOTA Reflex Burn (TRB) System in DI Diesel Engine," *SAE 900658*.
- (11) Buchner., 1926, "The Fundamental Principles of High-Speed Semi-Diesel Engines Part1. A General Discussion of the Subject of Fuel Injection in Diesel Engines and Detailed Descriptions of Many Types of Injection Nozzles," *NACA TM No. 356*.
- (12) Lee, D. W., 1935, "A Comparison of Fuel Sprays from Several Types of Injection Nozzles," *NACA Report No. 520*.
- (13) 이장희, 김태현, 최인익, 1994, "디젤분무의 벽면 충돌거동 및 분무 입경측정," 한국자동차학회논문집, Vol. 2, No. 4, pp. 39~49.
- (14) Durao, D. F. G., Whitelaw, J. H. and Witze, P. O. 1989, *Instrumentation for Combustion and Flow in Engines*, Kluwer Academic Publishers, pp. 126~135.
- (15) Hinds, C. W., 1982, *Aerosol Technology*, A Wiley-Interscience Publishers, pp. 324~329.
- (16) Tokuoka, N., Kimura, M. and Lee, K. J., 1994, "Evaporation of Small Drops in Turbulant flow (Part 1. Effect of Spectrum of Turbulance)," '94 액체 미립화 학술강연회논문집, pp. 44~52.
- (17) Tomotika, S. 1935, "On the Instability of a Cylindrical Thread of a Viscous Liquid urrounded by Another Viscous Fluid," *Proc. Roy. Soc. A150*, Vol. Cl. pp. 322~337.
- (18) 김덕출, 1989, "同軸氣流에 의한 圓管形 液柱의 分裂機構," 경북대학교 박사학위논문.
- (19) 차건중, 1992, "可視화를 통한 二流體 液柱의 分裂特性에 關한 研究," 부산대학교 석사학위논문.