

강체 선회유동 조건에서의 분무 분산 특성에 관한 연구

Dispersion Characteristics of Sprays under the Condition of Solid Body Rotating Swirl

이 충 훈*
Choong-Hoon Lee

ABSTRACT

Spray dispersion in high pressure diesel engines have been simulated experimentally with a special emphasis on the effect of swirl by using a liquid injection technique. A constant volume chamber was designed to be rotatable in order to generate a continuous swirl and to have the flow field closely resembling a solid body rotation. Emulsified fuel was injected into the chamber and the developing process of fuel sprays was visualized. The effect of swirl on the spray dispersion was quantified by calculating non-dimensionalized dispersion area according to the spray tip penetration length. The results show that the effect of swirl on the spray dispersion is different between short and long spray penetrations. For short range of spray tip penetration, the effect of swirl on spray dispersion is quite small. However, as the spray tip is penetrated into longer distance in spray chamber, the effect of swirl on spray dispersion becomes larger. These results can be used as a basic data for designing combustion chamber and injection system of direct injection diesel engine.

주요기술용어 : Spray tip penetration(분무선단거리), Swirl(선회), Spray dispersion(분무분산), Liquid injection technique(액체분사기술)

Nomenclature

d : nozzle diameter, mm
p : penetration, mm
P : injection pressure, kg/cm²
r : radius, mm
l/d : ratio of nozzle length to diameter
t : time, ms
w : width, mm
φ : spray chamber diameter, mm

Subscripts

inj : injection
dis : dispersion

1. 서론

디젤 엔진은 열기관 중에서 열효율이 높아 연료 경제성이 뛰어나기 때문에 입자상 물질 및 질소 산화물의 과다 배출에도 불구하고 중요한 동력원의 하나로 지속적으로 사용될 것이 확실하다. 특히 최근에 지구 온난화의 주원인이 화석연료의 연소과정에서 배출되는 CO₂로 밝혀지면서

* 회원, 서울산업대학교 제1공학부 자동차공학과

CO₂배출을 나라별로 규제하려는 움직임이 있다. 화석연료연소로부터 발생하는 CO₂의 대부분은 차량으로부터 배출되고 있으며 이를 줄이기 위해서는 초저연비엔진 개발이 필요하며 이것을 충족할수 있는 엔진이 디젤엔진, 그 중에서도 고속소형직분식(HSDI) 디젤엔진이다.

소형 디젤엔진의 경우 중대형 엔진에 비해 회전수가 1.5~2배 정도이므로 직분식 연소실을 채용하려면 연료/공기의 빠른 혼합이 요구되는데, 적절한 선회 강도와 연료 분사압의 고압화로 이 문제를 해결하려는 추세에 있다.

연료와 공기의 혼합 특성은 연료 분사시 연소실 형상과 더불어 공기 유동, 특히 흡기 포트에 의해 생성되는 선회 유동에 크게 영향을 받으며, 분무선단거리, 분무각, 분열 길이, 미립화 등의 분무 특성과도 밀접한 관련이 있다.¹⁾

디젤 엔진 연소실에서 분무의 선단 거리 및 분산 특성을 파악함으로써 착화시의 분무와 연소실 벽면의 상대위치, 공기와의 혼합 상태를 알 수 있다. 특히 착화 후 비정상(unsteady) 상태의 연소가 일어나는 초기 연소에 있어서는 이러한 선회 유동이 연료와 공기의 혼합 속도를 지배한다.

실제 직분식 연소실 내의 속도 분포에 대한 연구는 Monaghan과 Pettifer,²⁾ Brandl 등³⁾과 Ikegami⁴⁾ 등에 의해 이루어졌는데, 선회 속도의 특성은 연소실 벽면 근처를 제외하고는 대체적으로 연소실 중심으로부터 반경방향거리에 선형적으로 비례하는 강제 선회 유동(solid body rotation)에 가까운 것으로 알려져 있다.

물속에 연료를 분사하면 고압의 액체 연료가 고압의 공기중에 분사하는 상태를 모사할 수 있으며, 연료를 공기보다 밀도가 큰 액체 중에 분사함으로써 작은 선회수에서도 충분히 높은 공기의 선회 특성을 모사할 수 있는 장점이 있다. Yoshikawa 등⁵⁾은 물속에 연료를 분사하는 것이 고압의 공기중에 분사하는 것, 즉 직분식 디젤엔진에서 고압의 압축공기에 연료를 분사하는 조건과 유사성이 있음을 실험적으로 확인하였으며 Gray 등⁶⁾과 Way 등⁷⁾이 물 속에 액체를 분사하

는 방법을 사용하여 분무 특성을 연구하였다.

최근에는 Lee 등⁸⁾이 디젤 엔진에서 연료와 공기의 혼합 특성에 큰 영향을 미치는 인자인 선회 유동이 분무 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해, 물이 채워진 정적 분무실을 회전시켜 강제 선회 유동 조건이 되도록 하였으며, 이때의 선회 강도는 정적 분무실 회전수에 비례한다. 유화 연료(emulsified fuel)를 물이 채워진 정적 분무실에 분사하고 이의 고속도 촬영을 통하여 선회수가 분무선단거리에 미치는 영향 및 분무의 분무실 벽면충돌시의 분산특성을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 Lee 등⁸⁾의 연구의 계속 연구로서 강제선회유동 조건에서 분무의 분산특성을 파악하기 위해서 분무선단거리 변화에 따른 무차원 분무분산면적을 정의하고 이를 계산하였다. 선회 유동이 있는 조건에서의 분무선단거리에 따른 분산특성은 직분식 디젤엔진의 연소실 설계를 하는데 있어서 기초 설계자료로 활용할 수 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 회전 정적분무실

실험 장치는 회전 정적 분무실, 회전 구동부, 연료 공급부, 인젝터, 가시화 장치, 전자제어 장치 등으로 구성되어 있는데 Fig. 1에 개략도를 나타내었다.

선회 유동의 정량화를 위하여 정적 분무실이 회전을 할 수 있도록 설계 및 제작하였다. 정적 분무실의 축의 중심부에는 인젝터를 고정하였다. 인젝터가 조립된 회전축을 고정 중심으로 한 상태에서 2개의 레디얼 베어링과 1개의 스톱스트 베어링을 사용하여 정적 분무실을 고정축과 결합하였으며 고정축을 중심으로 정적분무실이 회전할 수 있도록 하였다. 레디얼 베어링은 DC 모터의 구동력을 지지하는 역할을 하며 스톱스트 베어링은 회전 정적 분무실의 자중을 지탱한다. 정적 분무실의 외주면에는 V-벨트 홈을 가공하여 DC 모터로부터 구동력이 전달되도록

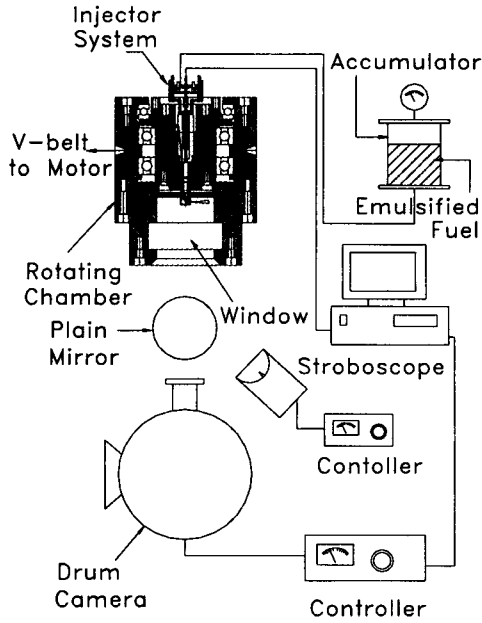


Fig. 1 Experimental setup for rotating chamber

하였다.

정적 분무실은 직경 $\phi = 66\text{mm}$, 높이 25mm인 디스크형이며, 정적 분무실의 하면에는 $\phi = 85\text{mm}$ 의 관측창을 두어 가시화가 가능하도록 하였다. 가시화 광원의 반사를 막기 위해서 정적 분무실 표면을 무광택흑염처리(anodizing)를 하였다.

회전 구동부는 0.1kW 출력의 DC 모터와 모터 컨트롤러를 연결하여 최대 회전수 1800rpm까지 회전할 수 있는데, 이때 정적 분무실은 최대 1150 rpm까지 회전이 가능하다.

연료 공급은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 정적 압력용기(accumulator)에 공압 레귤레이터를 통해서 압축 공기를 공급하면 용기 내에 있는 유화 연료가 가압되어 인젝터로 공급된다. 인젝터는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기존의 디젤 인젝터를 수정하여 사용하였다. 고속 솔레노이드 밸브와 인젝터의 푸시 로드(push rod)를 직접 연결하여 연료 분사를 개폐하였는데, 솔레노이드 밸브에 전기를 공급하여 푸시 로드(rod)가 당겨지면 니들 밸브가 들리면서(lift) 연료가 공급되고, 전기 공

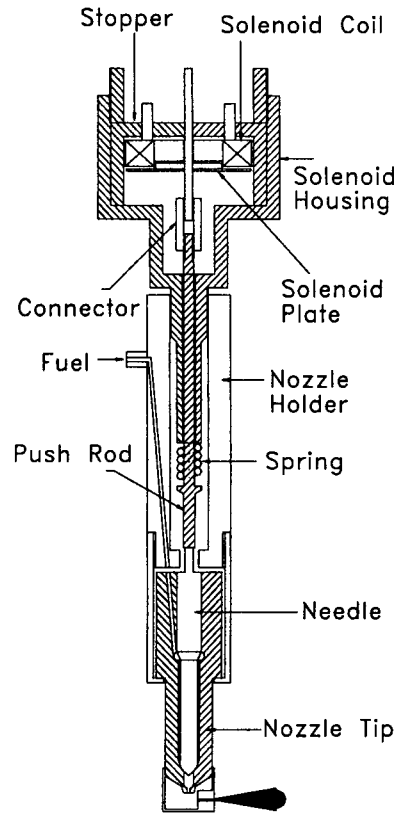


Fig. 2 Schematic of fuel injector system

급이 중단되면 푸시로드를 당기는 스프링 힘으로 니들이 밀리면서 연료 공급이 중단된다.

수중 분사를 위해 고압 공기 중의 분사 조건과 상사가 되도록 노즐을 설계하였다.⁸⁾ 노즐의 끝단부를 연삭하여 섹(sac) 부분에 $\phi = 2.5\text{mm}$ 의 구멍을 내었고, 설계한 노즐 팁을 섹 수정부에 억지끼워맞춤을 하였다. 노즐팁에는 $\phi = 1.4\text{mm}$ 의 분사공을 가공하였고, l/d 가 2.3이다.

사용된 노즐 개폐용 솔레노이드 밸브(Lucas Ledex, 5SF-29)는 1mm의 변위를 일으키는데 필요한 작동 시간(response time)이 약 3ms로 상당히 빠르며 직류 80V, 3A 용량의 구동원이 필요하다.

가시화를 위해 드럼카메라(Suwehara사 제작)를 사용하였으며, 가시화 광원은 스트로보스코프(stroboscope)를 사용하였다. 드럼의 최대 회전

속도는 5000rpm으로 셔터가 열린 시간 동안 스트로보 광원에 의한 분무 영상이 기록된다. 광원의 지속 시간은 1.5~3ms로 분무의 정지 화상을 얻을 수 있다. 렌즈는 Nikon 표준 렌즈를 사용하였고 상의 확대를 위해 카메라 링을 연결하였으며 ASA1600 컬러 또는 PSA 3200의 흑백 고감도 필름을 사용하였다.

연료분사타이밍 제어는 PC와 8253 타이머 보드를 사용하였다. 솔레노이드밸브 전원의 개폐를 위해서 SSR(solid state relay)를 이용하였고 정적분무실의 회전수 측정은 휴대용 타코미터를 사용하였다.

유화 연료의 제조를 위해 전자 저울과 초음파 발생기(ultra-sonic generator, 20kHz, 350W)를 이용하여 제조하였는데, 물과 연료가 섞이지 않는 특성 때문에 계면활성제(surfactant)로서 SPAN 80 (sorbitan monooleate, HLB=4.3)과 TWEEN 80 (polyoxyethylene sorbitan monooleat, HLB=15)을 사용하였다. 계면 활성제의 적정량은 HLB(hydrophille-lipophile balance) 방법을 이용하여 결정하였는데 W/O(water in oil) 유화 연료의 경우에는 HLB가 4~6 범위에서, O/W(oil in water) 유화 연료의 경우에는 8~18 범위에서 HLB를 결정한다. 본 연구에서는 유화 연료를 수중에 분사하는 경우 이를 가시화 하는 수단으로 사용하였으며, HLB 수가 5.5인 W/O 유화 연료를 제조하였다.⁹⁾

유화 연료의 혼합은 계면 활성제 SPAN 806 cc, TWEEN 80 1.5cc를 n-헵탄 250cc에 넣고 30 초 동안 초음파 발생기로 섞어준 후 물 50cc를 첨가하였으며 초음파 발생기의 팁(tip)을 이용하여 195W로 3분간 작동시켜 제조하였다. 이와 같은 방법을 반복하여 약 1l의 가시화용 유화연료를 제조하였다. 유화 연료는 제조 후 7일 정도는 연료와 물이 다시 분리되지 않았다.

제조된 유화 연료는 우유빛으로 흑염 처리된 정적 분무실의 색과 대비되어 가시화 하는데 유용하며 물과 유화유는 서로 섞이지 않으므로 (immiscible) 실제 디젤엔진의 공기와 연료의 혼합과정을 잘 모사할 수 있다.

2.2 분무가시화 방법

유화 연료의 가압을 위하여, 압력조절기로 조정된 압축 공기를 가압용기에 공급하였으며 이때의 압력이 분사 압력이 된다. 정적 분무실에는 물이 완전히 채워지도록 한다. 드럼카메라에 35 mm 고감도 필름을 드럼에 감고 카메라 뚜껑을 닫는다. 스트로보스코프의 rpm이 높아지면 섬광의 강도가 낮아지므로 조리개는 최대한으로 열어야한다. 스트로보스코프 광원의 발광 빈도와 드럼의 회전수에 의해 전자 셔터의 열림 시간과 필름의 감광 슬릿 폭을 결정한다. 전자 셔터의 열림 시간과 연료 분사 타이밍은 PC의 입력데이터로 사용한다.

가시화를 위한 사전 준비가 끝나면 정적 분무실을 회전시키기 위해서 모터 전원을 넣고 원하는 회전수까지 증가시켜 일정 시간이 지난 후 정적 분무실 내의 물이 강제 회전 상태에 도달하게 된다.

드럼카메라 제어기를 이용하여 드럼 회전수를 조절하고, 스트로보스코프의 섬광 빈도(frequency)를 조정하고 정적 분무실 하방의 거울과 시창을 통해 분무에 광원이 도달하도록 한다. PC에서 연료 분사 타이밍, 연료 분사 시간, 드럼 카메라 전자 셔터 열림 시간을 제어하여 가시화 하였다.

3. 결과 및 검토

3. 1가시화 결과

정적 분무실 내의 유체 유동의 특성을 살펴보기 위하여 물과 잘게 자른 색종이를 넣고 회전시킨 후 이중 노출 방법으로 촬영한 결과 유체의 속도가 반경에 비례하여 증가하였으며 강제 선회 유동임을 확인하였다.

정적분무실 회전 속도가 200, 800rpm일 때 각각의 정적분무실 벽면에서의 선회속도는 0.7 m/s, 2.7m/s로 이것을 Yoshikawa 등⁵⁾의 상사성을 이용하여 실제 직분식 디젤엔진에서의 속도는 5.3m/s, 21.3m/s 정도이며 Ikegami 등⁴⁾의 연구 결

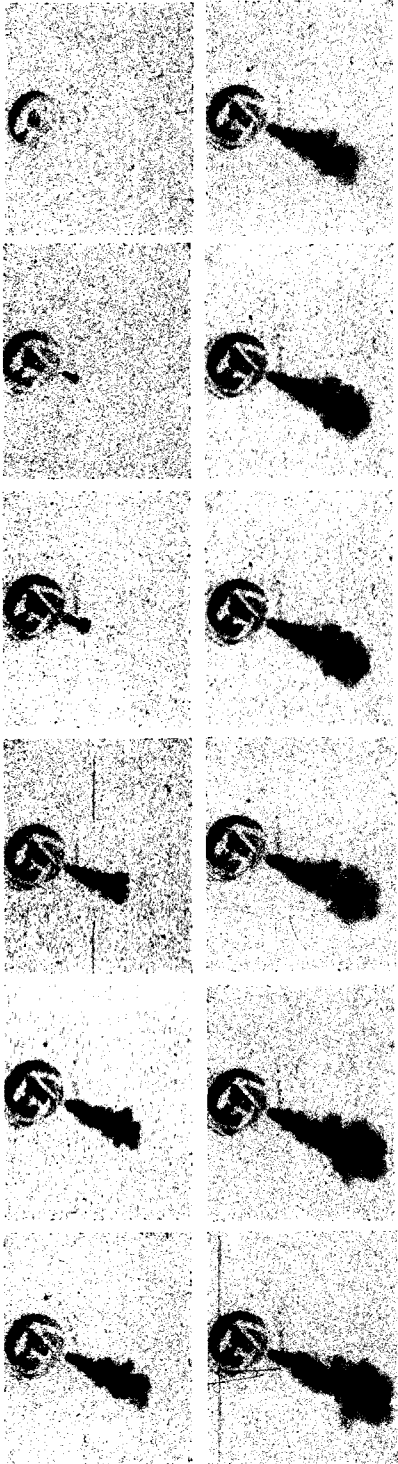


Fig. 3 Visualization of fuel injection with $\Delta t=4\text{ms}$
($P_{inj}=4\text{kg/cm}^2$, $N=0\text{rpm}$)

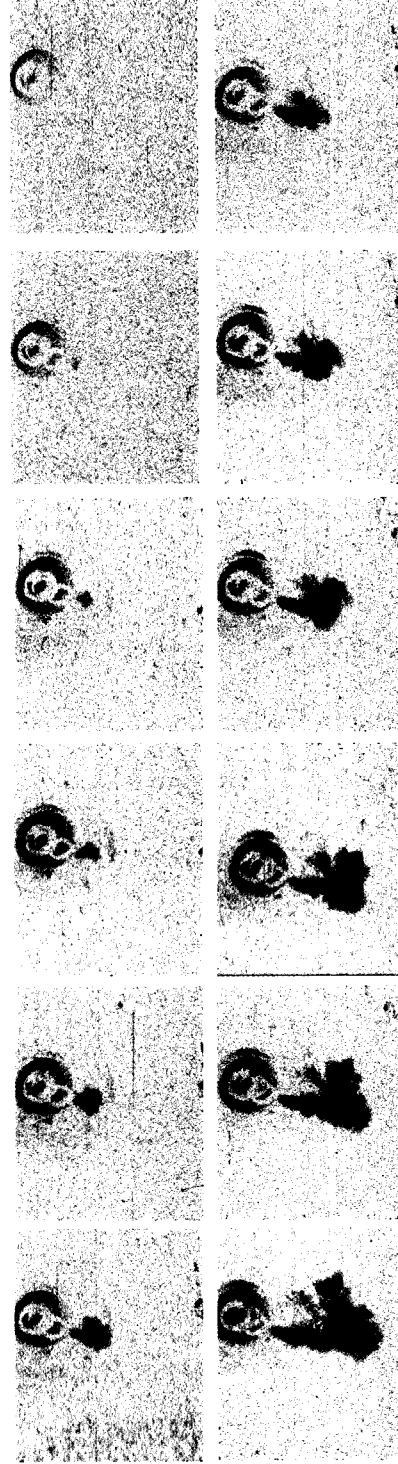


Fig. 4 Visualization of fuel injection with $\Delta t=4\text{ms}$
($P_{inj}=4\text{kg/cm}^2$, $N=800\text{rpm}$)

과에 따르면 실제 직분식 디젤엔진에서의 선회 속도에 가깝다.

정적 분무실이 정지한 경우와 회전수를 800 rpm으로 증가시킨 경우의 가시화 결과를 각각 Fig. 3, 4에 각각 나타내었으며 실험 조건 중 선회 유동이 없는 경우와 선회 강도가 가장 큰 경우를 각각 나타낸다.

네가티필름을 필름 스캐너를 사용하여 포지티브영상으로 읽어낸 것이다.

Fig. 3은 정적 분무실이 정지하고, $l/d=2.3$, 연료 분사 압력 $P_{inj}=4\text{kg/cm}^2$ 의 조건에서 4ms 간격으로 가시화한 결과이며 일반 디젤 분무와 유사한 특성을 보이고 있다. 분무의 분산 경향을 보면 분무가 벽면에 충돌하기 전까지는 넓게 분산하지 못했으며 벽면에 충돌한 후 넓게 분산되는 경향을 보였다. Fig. 4는 정적 분무실이 800rpm으로 회전하고, $l/d=2.3$, 연료 분사 압력 $P_{inj}=4\text{kg/cm}^2$ 의 조건에서 4ms 간격으로 가시화한 결과이며 연료가 분사된 후 강제 선회 유동에 의해 세트가 휘어지는 현상을 나타내었다. 한편, 선회 강도를 증가시켜도 노즐 출구에서는 분무가 크게 분산되지 못하였으며, 분무실 벽면 가까이 갈수록 선회에 의해 분산되는 효과가 증대되었다.

3.2 분무의 분산특성

강제 선회유동 조건에서 분무의 분산특성을 정량적으로 파악하기 위해 무차원 분무분산면적 A_{dis} 를 식(1)과 같이 정의하였다.

$$A_{dis} = \frac{p \times w}{r^2} \quad (1)$$

여기서 p , w , r 은 각각 Fig. 5에서 정의한 바와 분무선단거리, 분무분산폭, 분무실 반경을 나타낸다. 분무선단거리 p 와 분무분산폭 w 로 만들어지는 직사각형 면적을 분무실반경 r 의 제곱으로 나누어서 무차원화 하였다.

분무 선단 거리 p 와 분무분산폭 w 는 각각 필름 스캐너로부터 분무 이미지를 읽어들인 후 디지털타이저(Nicon Scan)를 이용하여 측정하였다. 무차원분무분산면적 A_{dis} 는 실제분무의 분산면

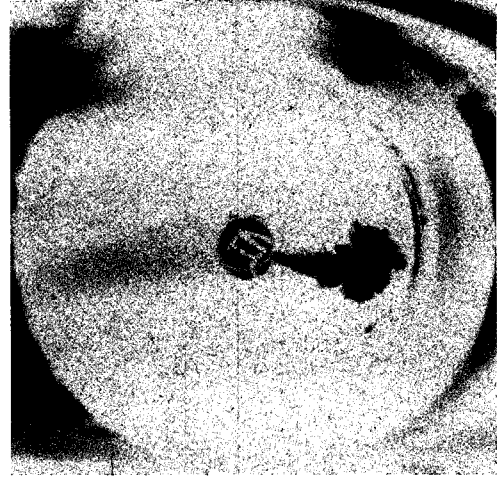


Fig. 5 Definition of penetration length and dispersion width of spray

적을 나타내지는 않지만 분산특성을 대표하는 분무선단거리와 분무분산폭을 포함하여 분무의 분산 특성을 정량적으로 나타내는데 있어서 매우 효과적인 무차원수라고 사료된다.

Fig. 6의 각각의 그림은 분무선단거리 p 의 변화에 따른 무차원분무분산면적 A_{dis} 의 값을 나타낸 것으로 동일한 분사압력에서 분무실의 회전수, 즉 선회강도를 증가시키면서 얻은 결과를 비교하여 나타내었다. 분무선단거리변화에 대한 분산특성을 파악함으로써 실험시 발생할 수 있는 분사타이밍 제어의 분균일성의 문제를 배제할 수 있었다. Fig. 6(a)~ Fig. 6(f)는 각각 분사압력을 각각 3kg/cm^2 으로부터 0.5kg/cm^2 씩 상승시켜 5.5kg/cm^2 까지 그 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 그래프에서 여러 형태의 심벌로 나타낸 것은 각각 분무실 회전수 조건에서 실험 결과를 나타낸 것이며 여러 형태의 선으로 나타낸 것은 심벌로 나타낸 실험결과를 2차 포물선(polynomial curve)으로 구한(fitting) 결과이다.

Fig. 6(a)~Fig. 6(f)의 전체적인 경향을 보면, 분무선단거리가 증가함에 따라서 무차원분무분산면적이 증가하는 특성이 압력 변화에 무관하게 유사한 경향을 보여주고 있는데, 이는 분사압력 변화가 크지 않기 때문으로 사료된다. 분무

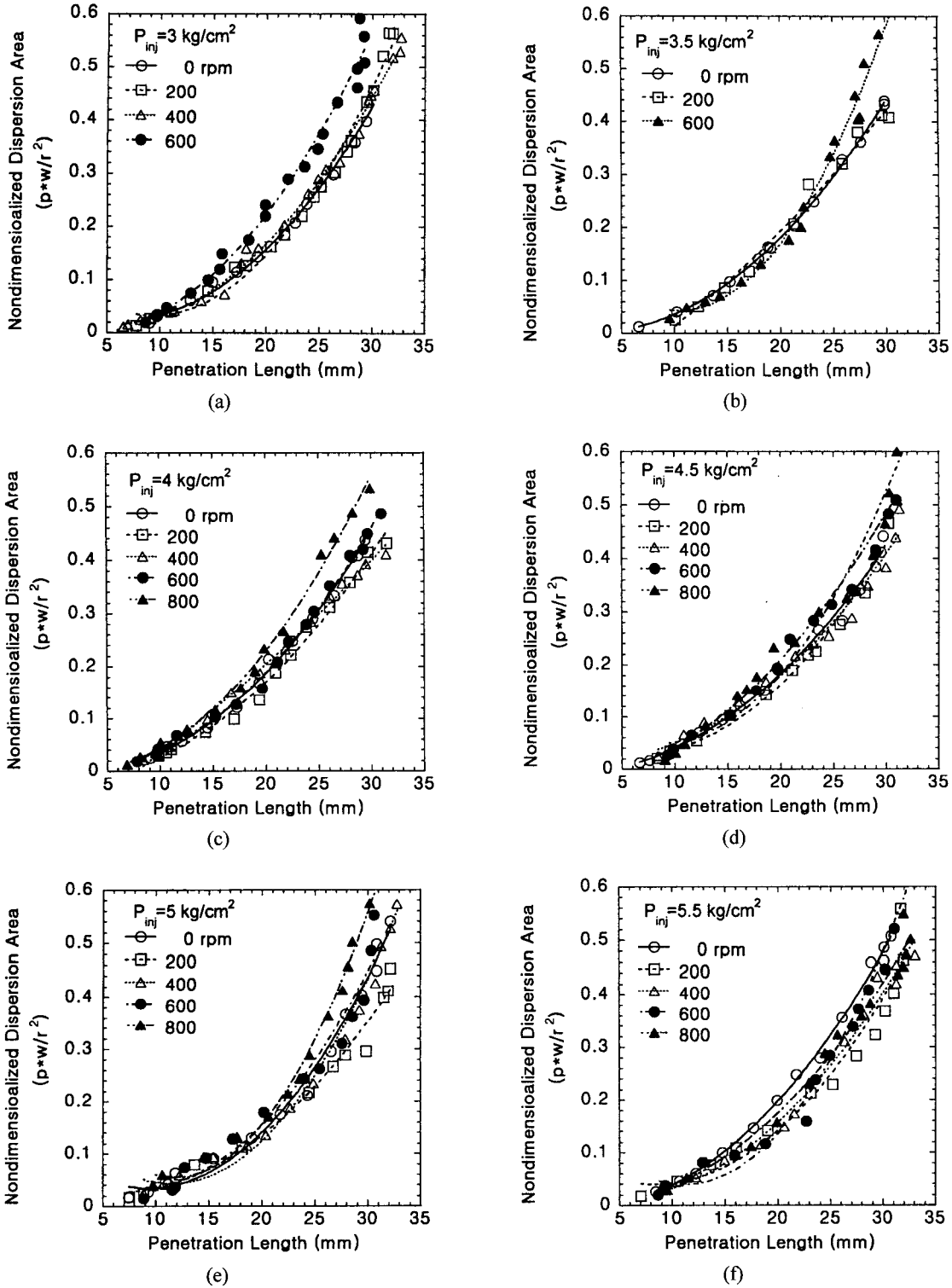


Fig. 6 Nondimensionalized dispersion are under various experimental conditions

선단거리가 작은 범위에서는 분산에 미치는 선회 강도의 영향이 미미하게 났는데 이는 노즐 팁에서 가까운 영역에서는 선회속도가 충분히 크지 않기 때문에 기인하는 것이다.

분무선단거리가 약 20mm 이상에서는 선회 강도가 증가함에 따라 분산이 크게 일어났으며 특히, 분무실 회전속도가 600rpm 이상에서 뚜렷이 나타났다. 이러한 분무선단거리에 따른 무차원분산면적의 경향로부터 선회강도, 분산특성, 분무선단거리와 관련된 흥미로운 결론을 얻을 수 있는데, 즉 분무선단거리가 크지 않은 범위에서는 선회 강도가 분무 분산에 큰 영향을 미치지 않는다는 것이다. 실제 직접분사식 디젤엔진 중 연소실 직경이 작은 경우 예를 들면, 고속소형직분식(HSDI) 디젤엔진에서는 분무분산에 있어서 선회 강도의 영향이 거의 없을 것임을 의미한다. 이러한 측면에서 HSDI 디젤엔진에서는 연료/공기의 혼합을 고압 분사를 통하여 촉진하는 것이 가장 효과적이라는 것을 입증하는 것이다. 또한 연소실 직경이 큰 대형 디젤엔진 및 선박용 엔진의 경우에는 연료/공기 혼합에 있어서 소형 직분식 디젤엔진과 상대적으로 선회강도가 중요한 역할을 할 것으로 추정할 수 있다.

또한 HSDI 디젤엔진과 같은 소형 직분식 디젤엔진에서는 연료제트의 연소실 벽면 고속 충돌에 의한 미립화 촉진 및 분산확대를 하는 것이 연료/공기 혼합을 촉진하는 효과적인 방법이라는 것을 간접적으로 추정할 수 있다.

4. 결 론

물을 채운 정적 분무실을 회전시킴으로써 강제 선회 유동장을 형성할 수 있었으며 선회수가 정적 분무실 회전수에 비례하므로 선회수를 정량화할 수 있었다. 정적 분무실에 고압의 공기 대신에 물을 채운 상태에서 회전시킴으로써 강한 선회 강도를 얻었고 주어진 회전수에서 유화 연료를 분사함으로써 강제 선회 유동장에서의 분무의 분산 거동을 연구하였다.

분무의 무차원분산면적을 정의하고 선회강

도에 따른 분산 특성을 정량화하였다. 분무선단거리가 짧은 경우에는 선회 강도가 분산에 미치는 영향이 매우 미미하게 나타났으며 분무선단거리가 어느 정도 증가한 조건에서 선회 강도의 효과가 나타났으며 이로부터 HSDI 디젤엔진과 같이 연소실 직경이 작은 직분식 디젤 연소시스템에서는 선회 강도 증대에 의한 연료/공기 혼합의 효과는 크지 않다는 것을 예측할 수 있다.

후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) A. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Corp., pp.27-59, 1989.
- 2) M. L. Monaghan, H. F. Pettifer, "Air Motion and its Effect on Diesel Performance and Emissions.", SAE 810255, 1981.
- 3) F. Brandl, I. Reverencic, W. Cartellieri, J. C. Dent, "Turbulent Air Motion in Diesel Engine and Its Effect on Engine Performance," SAE 790040, 1979.
- 4) M. Ikegami, T. Mitsuda, K. Kawatch, T. Fujikawa, "Air Motion and Combustion in Direct Injection Diesel Engines," JARI Technical Memorandum, No.2, pp.231-245, 1971.
- 5) S. Yoshikawa, K. Nishida, M. Arai, H. Hiroyasu, "Visualization of Fuel-Air Mixing Processes in a Small D. I. Diesel Engine Using the Liquid Injection Technique," SAE 880296, 1988.
- 6) J. T. Gray, N. T. Meckel, "Some Observation on the Liquid Injection Technique as a Research Tool," SAE 660748, 1966.
- 7) J. B. Way, "Investigation of Interaction Diesel Engines Using Water Model," SAE 770412, 1977.
- 8) C. H. Lee, K. H. Choi, S. H. Noh, S. H. Chung, "Effect Solid Body Rotating Swirl on Spray Tip Penetration," SAE 97098, 1997.
- 9) P. Becher, Emulsions, 2nd ed., American Chemical Society Monograph Series, 1965.