

PDPA계측에 의한 다공 디젤 노즐의 분무 미립화 특성에 관한 연구

A Study on the Spray Atomization Characteristics of a Multi-Hole Diesel Nozzle using PDPA System

이 지 근*, 오제하**, 강 신 재***, 노 병 준***
J. K. Lee, J. H. Oh, S. J. Kang, B. J. Rho

ABSTRACT

The spray characteristics of a direct injection multi-hole diesel nozzle having the 2-spring nozzle holder were investigated by using the image processing system and a PDPA(phase Doppler particle analyzer) system. The spray tip penetration, the spray angle, and the droplet diameter and velocity with the variation of the pump speed, injection quantity were measured.

From the experiments, we know that there are small droplets which are not to be detected with spray image around the leading edge of the spray. In order to represent the mean characteristics of the intermittent spray very well, it is very important to set the time windows accurately. From the measurements along the axis of the spray, close to the nozzle, the initially injected droplets are overtaken by droplets that follow them. And also there are the maximum axial mean velocity and SMD at the following part of the leading edge of the spray.

주요기술용어 : Intermittent Spray(간헐분무), Multi-hole Nozzle(다공노즐), PDPA(phase Doppler particle analyzer), SMD(Sauter mean diameter)

1. 서론

최근 들어 환경오염에 대한 우려와 보호의 필요성이 널리 인식됨에 따라 디젤기관으로부터 배출되는 오염 물질을 줄이려는 법적 규제가 날로 엄해지고 있다. 따라서 경유를 연료로 사용하는 디젤기관의 유해 배기가스 저감과 관련된 문제는 디젤기관의 존재를 결정하는 매우 중요한 문제로서 많은 연구가 행해지고 있다. 이러한 직접분사식 디젤기관의 연소특성은 간

헐적으로 분사되는 연료 분무의 시간적·공간적 분포 특성에 많은 영향을 받는다.

또한 디젤분무는 연료 분사율, 분무각, 분무선단 도달거리 등과 같은 분무의 거시적 특성과, 액적크기 및 속도분포 등과 같은 미시적 특성 그리고 연료분사계의 작동 조건에 영향을 받는다. 따라서 연료분사계에 대한 연구는 디젤기관의 배기가스 문제를 극복하고 기관성능을 향상시키기 위한 가장 중요한 방법 중 하나로, 오래 전부터 연구되어져 왔다^{(1),(2),(3)}. 이러한 연구의 상당 부분은 단공 노즐에 대한 경우

* 전북대학교 국제지원사업단

** 전북대학교 공업기술연구소

*** 전북대학교 기계공학부

로서, 연속적 또는 간헐적^{(4),(5)}으로, 정지 공기 또는 배압이 있는 챔버 내에서 수행된 것이다. Hiroyasu 등⁽¹⁾은 단공 노즐 분무의 선단 도달 거리와 분무각에 관한 연구를 수행하였으며, 서로 다른 3종류의 단공노즐을 사용하여 노즐 형상비가 분열길이와 분무각에 미치는 영향을 조사하였다. Koo 등⁽⁴⁾은 PDPA를 사용하여 액적크기와 속도를 측정하였다. 또한, 간헐분무 특성을 고찰하기 위해 크랭크 각에 따른 분석을 수행하였고, 분무영상해석으로부터 낮은 배압에서 분출되는 액체에 표면파가 존재함을 관찰하였다.

이러한 단공노즐에 대한 연구결과를 바탕으로 최근에는 실제 엔진에서 주로 사용되고 있는 다공 디젤 노즐의 분무특성에 관한 연구가 이루어지고 있다. Xu 등⁽²⁾은 단공노즐과 다공노즐분무의 비교를 통하여 다공 노즐 분무의 거동은 단공 노즐의 것과는 매우 다르게 나타남을 관찰하였다. Yoshikawa 등⁽⁶⁾은 4공 노즐을 사용하여 노즐의 길이 대 직경비, 피스톤 캐버티 직경, 흡기스웰을 변수로 연료소비율, 스모크, 탄화수소(HC), NOx에 대해 조사하고, 분무도달거리와 피스톤 캐버티의 최적직경의 관계를 조사하였다. Arcoumanis 등⁽⁷⁾은 1-스프링 노즐과 2-스프링 노즐의 무화특성의 비교를 통해 2-스프링 노즐이 주분사기간동안의 연료무화를 개선시키고 평균액적크기를 감소시킴을 관찰하였다. Chen 등⁽⁸⁾은 분공형 노즐 설계시 발생하는 문제를 해결할 수 있는 새로운 방법을 제시하고, 분공형 노즐의 최적화가 연료-공기의 혼합을 개선시키고 더 효율적인 연소를 이룰 수 있음을 보인 바 있다.

본 연구에서는 직접분사식 디젤기관에서 사용되는 다공 디젤 노즐의 간헐분무 특성을 실험적으로 고찰하기 위하여 실제 기관에서 사용되는 연료분사계와 동일하게 분사가 이루어지는 분무 시스템을 제작하였다. 또한 첨단 레이저 계측기법 중 하나인 PDPA(phase Doppler particle analyzer)를 이용하여 시간의 변화에 따른 분무형태를 측정함으로써, 최근 들어 연구가 활발히 수행되고 있는 다공 노즐 분무의 특성을 밝히고, 이와 더불어 고성능 디젤기관

의 개발에 있어서 분무노즐 설계에 활용될 수 있는 실험적으로 규명된 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험장치

상온·대기압하에서의 분무특성을 관찰하기 위해 Fig.1과 같이 연료분사 시스템을 구성하였다.

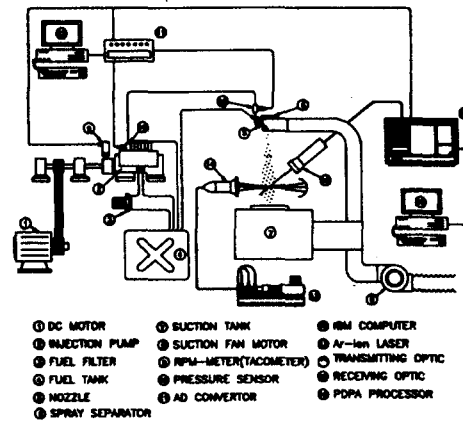


Fig.1 Schematic of experimental setup

실험장치는 크게 연료분사장치부, 분무영상 획득장치부, PDPA 측정장치부로 나눌 수 있다. 연료분사장치부는 분사펌프와 노즐을 포함하며, 분무영상획득장치부는 광원, CCD 카메라, 영상처리장치 등으로 구성되어 있다. 분사펌프는 V8기통 엔진에 사용되는 직렬형 펌프로써, 최대 3600rpm인 DC모터에 의해 구동된다. 연료는 비중 0.8315, 동점도 3.71cSt, 굴절율 1.468의 물성치를 가진 KS 2호의 저황유를 사용하였다. 분사노즐은 2-스프링 홀더를 가진 single-cone, mini-sac 형의 5공 노즐이다. 1차 스프링의 개변압은 150kg/cm²이고 2차 스프링의 개변압은 220kg/cm²이다. 노즐은 홀 직경이 0.33mm인 분공 2개와 0.32mm인 분공 3개로 구성되어 있으며, 길이 대 직경비는 각각 2.813($d_h=0.32mm$)와 2.727($d_h=0.33mm$)이다. Fig.2는 각 분공의 위치와 분사되는 다섯 분무의 개략도를 도식적으로 나타낸 것이다. 분무의 번호는 임의로 정한 것이며, 실제 엔진에서

노즐은 수직축으로부터 25°(offset angle) 만큼 경사져 있으며, 150°의 분무 cone 각을 갖는다.

분무 가시화시스템은 발광시간이 30 μs인 스트로보스코프(DX-525A)와 CCD카메라(Toshiba, IK-536)를 사용하여 촬영하고 영상처리 소프트웨어를 사용하여 분석을 수행하였다.

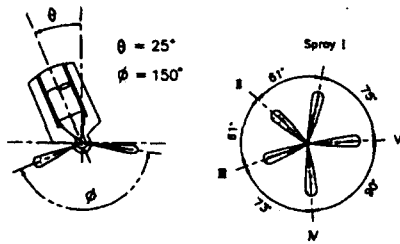


Fig.2 Outline of five sprays

액적의 크기와 속도를 측정하기 위해 2차원 PDPA 시스템(DANTEC Co.)을 사용하였다. 측정계적을 지나는 액적의 산란광은 수광부에 수집되어 2개의 광배율기(photomultiplier)에서 전기적 신호로 변환되고, 신호처리기(DANTEC, 58N10)를 통해 컴퓨터에서 액적의 속도와 크기에 관한 데이터를 일괄처리 하였다. 이 때 속도 측정에 대한 오차 범위는 ±2% 이내로 나타났으며, 액적은 구형도가 90% 이상인 것만 데이터로서 획득하였다.

3. 실험조건 및 측정방법

다공 노즐분무의 특성을 파악하기 위해 펌프의 작동조건을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 이 때, 펌프 회전수는 400rpm, 600rpm, 분사량(mg/st-hole)은 0.867, 0.476, 0.945로 변화시켰다. Fig.3은 분무장의 개략도와 더불어 PDPA계측을 위한 측정점의 위치를 나타낸 것이다. 이 때, 측방향을 Z축으로, 반경방향을 r축으로 설정하였다. 측방향 측정 위치의 설정은 노즐에 가까울수록 보다 유용한 정보의 획득이 기대되지만, PDPA계측을 위한 다공 분무 분리장치 설치로 인하여, 노즐 선단으로부터 30mm 떨어진 위치부터 200mm 하류지점까지, 반경방향으로는 2mm 간격으로 측정하였다. 분무영상을

획득하기 위해 매크로렌즈를 장착한 카메라를 사용하여 스트로보스코프의 발광시기 조절에 의해 분무의 정지영상을 획득하였다.

분사의 시작은 펌프의 분사시기조절기 부근에 설치한 광센서와 AD 변환기를 사용하여 결정하였다.

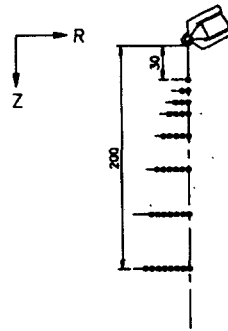


Fig.3 Measurement positions

광센서(Autronics, BF3)는 실험에 사용된 분사 펌프의 분사시기 보다 15° 이전에 신호를 발생하도록 설치하였다. 이 신호를 PDPA의 외부 트리거 신호로 이용하였으며, 스트로보스코프의 발광시기제어의 기준 신호로 이용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 분무의 거시적 특성

4.1.1 분무구조

다공노즐의 분무구조, 선단도달거리, 분무각

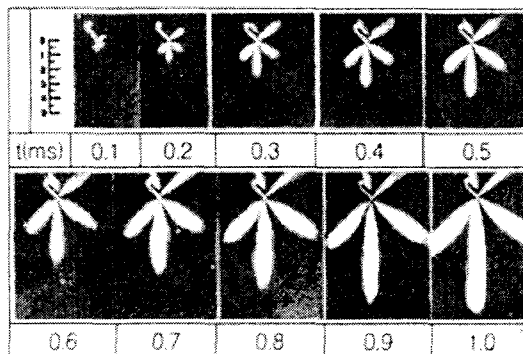


Photo 1 Spray development with time after the injection start(ms)

등의 거시적 특성과 더불어 각 분공사이의 분무특성을 파악하고자 분무 가시화 장치를 이용하여 분무 영상을 획득하였다. Photo 1은 간헐적으로 분사되는 다공분무의 발달과정을 알아보기 위하여 다섯 개의 분공 중 직경이 0.32mm인 1번 분공에 대해, 분사 시작 후 0.1ms부터 0.1ms 간격으로 획득한 분무 영상을 나타낸 것이다.

정지 대기 중에 형성되는 다공 노즐 분무는 완벽하지는 않지만 대칭 구조를 이루고 있으며, 선단부는 정지공기의 저항에 의해 타원형태를 이루고 있다. 분사 초기에도 비교적 폭이 넓은 분무를 형성하고 있으며, 시간변화에 따라 거의 유사한 형태로 발달되어 감을 알 수 있다. 또한 각 분공에 의해 형성되는 분무는 공간상의 위치가 서로 달라 명확히 알 수 없지만 거시적으로 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다.

4.1.2 분무도달거리

분무 발달과정을 보다 정량적으로 알아보기 위하여 분무 영상으로부터 시간변화에 따른 선단도달거리를 측정하였다. Fig.4는 펌프 회전수 600rpm, 분사량이 0.946mg/st-hole 일 경우, 다섯 개 분무의 선단도달거리를 나타낸 것이다.

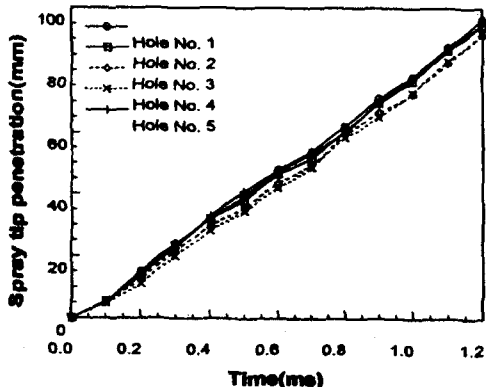


Fig.4 Spray-tip penetration with time from the start of injection

분사시작 후 시간변화에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 각 분공 사

이에 약간의 차이를 보이고 있으며, 특히 분공경이 큰 3번($d_n=0.33\text{mm}$) 분공과 4번 분공의 도달거리가 다른 분공보다 좀더 짧게 나타나고 있다. 이것은 다공노즐의 경우 노즐 섹(sac)에 동일한 압력이 작용한다 하더라도 분공경이 서로 다르면 방출계수 차이에 따른 유효 분사속도가 달라지기 때문으로, 분공경이 큰 경우 상대적으로 분사속도가 감소하기 때문으로 생각된다. 이와 같이 분공 사이에 존재하는 편차는 분공경이 동일하지 않은 것이 가장 큰 요인으로 생각되지만, 이외에도 분공의 배치에 따른 내부 유동의 변화도 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 측정 결과 사이의 가장 큰 차이는 분사 시작 후 0.5ms 근처에서 최대 6.5mm의 차이를 나타내고 있으며, 이 지점에서 각 분공의 평균값에 대한 표준편차는 2.63mm로 평가되었다.

4.1.3 분무각

Fig.5는 분무의 확산정도를 알아보기 위하여 펌프회전수 600rpm, 분사량이 0.946mg/st-hole 일 경우, 다섯 개 분무의 분무각 변화를 시간변화에 대하여 나타낸 것이다.

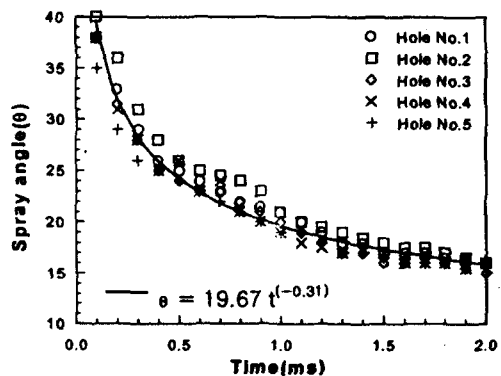


Fig.5 Spray angle with time from the start of injection

분사 초기에는 40° 가까운 큰 분무각을 나타내는 반면, 분무가 발달되어감에 따라 거의 역함수 형태로 감소함을 알 수 있다. 분사시작 후 약 1.5ms 이후에는 약 16° 근처값에 수렴하고 있다. 또한 분사 초기에는 각 분공 사이에

비교적 큰 차이를 보이지만, 시간이 경과함에 따라 각 분공사이의 차이가 점차 감소함을 알 수 있다. 각 분공사이의 가장 큰 차이는 분사 시작 후에 0.2ms에서 나타나며 최대 7°의 차이를 나타내고, 이 지점에서 각 분공의 평균값에 대한 표준편차는 2.6°로 나타났다.

4.1.4 분무 선단부의 거동

다공 노즐 분무의 발달에 많은 영향을 끼치는 분무 선단부의 거동을 알아보기 위하여 Fig.3으로 정의된 분무의 축방향 및 반경방향 위치에서 PDDA를 이용하여 측정된 액적 도달 시간을 Fig.6에 나타내었다.

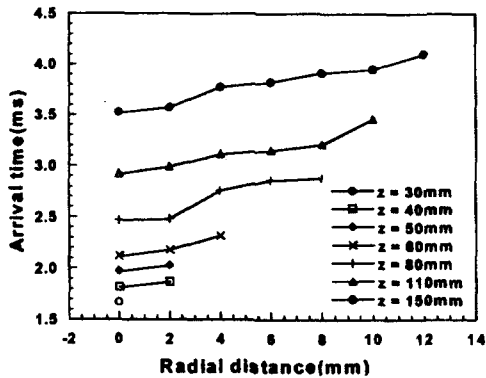


Fig.6 Arrival time with radial distance along spray axis

액적 도달시간은 분사시작 후 액적이 처음 검출되는 시간으로 정의하였으며, 펌프의 작동 조건은 400rpm, 분사량은 0.867mg/st-hole이다. 축방향 거리 증가와 더불어 반경방향 거리가 증가함에 따라 분무도달시간은 완만하게 증가하며, 그 기울기는 측정위치와 관계없이 비슷하게 나타나고 있다. 이것을 Photo 1의 분무 영상과 비교해 보면, 분무 영상에 나타난 선단부는 거의 타원 형태를 이루고 있으며, 분무 폭은 매우 좁고 비교적 뚜렷한 경계를 나타내고 있다. 그러나 Fig.6의 경우 분무경계 바깥부분에 해당하는 영역에서 액적이 검출되고 있다. 이것은 분무 선단부의 외곽부분에는 충분한 산란광을 내지 않아 분무 영상으로 확인할

수 없는 구름(cloud) 형태의 미세한 액적들이 존재하고 있음을 의미하는 것이다. 이러한 결과는 Gong 등⁽⁹⁾의 LDV 측정결과와 유사한 것으로, 분무 중심부에 존재하는 큰 액적의 분열에 의해 형성된 작은 액적이 분무 외곽으로 밀려 나가면서 형성되는 것으로 추측된다.

4.2 액적 속도 및 크기

Fig.7은 펌프 회전수 400rpm, 분사량 0.867mg/st-hole일 때 축 중심에서 축방향 거리변화에 따른 축방향 속도분포를 시간변화에 대하여 나타낸 것이다.

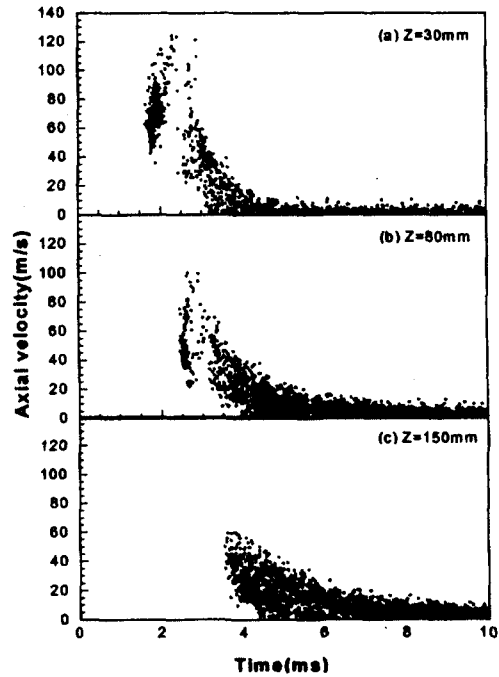


Fig.7 Time-resolved axial velocity distribution along the spray axis

비교적 노즐에 가까운 Z=30mm의 경우를 살펴보면, 측정위치에 처음 도착하는 분무 선단부의 액적 속도보다 뒤 이어 측정점을 지나는 분무 중심부의 액적의 속도가 더 높게 나타남을 볼 수 있다. 이와 같이 간헐적으로 분사되는 디젤 분무에서 분무 선단부의 액적이 뒤따

르는 액적에 의해 추월 당하는 현상은 근본적으로 시간에 따른 분사율의 변화와 관련되었다고 생각되지만, Koo 등⁽⁴⁾이 지적한 바와 같이 분무 선단부가 정지 공기 중을 관통하는 동안 저항에 의해 속도가 감소하는 반면 뒤따르는 액적은 상대적으로 작은 저항을 받아 분사 당시의 운동량을 더 오래 유지하기 때문에 생각된다. 축방향 속도가 최고점에 도달한 후 매우 신속히 감소함을 볼 수 있다. 축방향 거리가 증가한 Z=80mm와 Z=150mm의 경우를 살펴보면 분무 선단부의 거동은 분무 하류로 갈수록 분사율 또는 공기 저항의 영향이 감소하며, 분무의 운동량이 주변으로 상당 부분 확산되었음을 알 수 있다.

Fig.8은 액적크기와 축방향속도 사이의 상관관계를 알아보기 위하여 Fig.7과 동일한 조건에 대하여 축방향속도와 액적크기 사이의 관계를 여러 가지 축방향 위치에 대하여 나타낸 것이다.

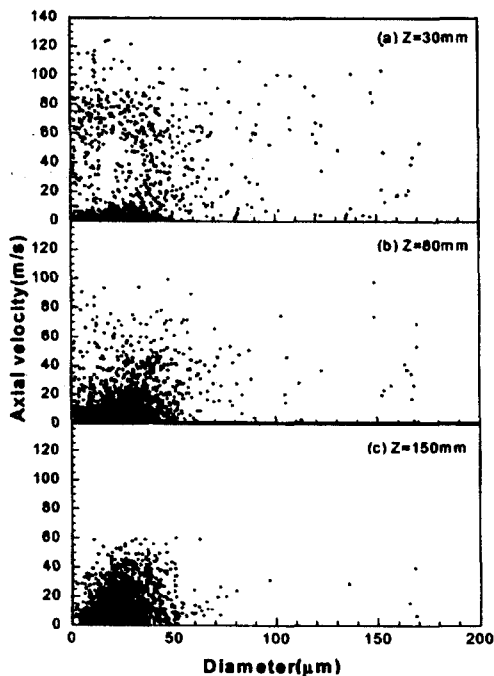


Fig.8 Correlation between the axial velocities and the diameters of drops along the spray axis

노즐에 가까운 Z=30mm의 경우, 액적크기와 축방향 속도 사이의 뚜렷한 상관관계를 찾아볼 수 없으며, 불규칙적으로 큰 액적이 높은 속도에서 낮은 속도범위에 폭넓게 분포되어 있음을 볼 수 있다. 그러나 분무 하류방향으로 갈수록 축방향 속도 감소와 더불어 큰 액적이 점점 감소하여 Z=150mm의 경우 불규칙적으로 생성되었을 것으로 판단되는 큰 액적을 제외하고 대부분 60μm이하의 액적으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 축방향 거리에 따른 액적크기 변화는 액적 분열과정이 완전히 종료되지 않고 진행 상태에 놓여 있음을 의미하는 것으로서 분사 당시 이루어지는 초기 분열과정과 더불어 분무가 진행되면서 겪는 2차 분열이 분무장의 미립화 특성에 많은 영향을 끼침을 알 수 있다.

4.3 분무의 간헐 특성

Fig.7과 Fig.8은 여러 사이클 동안 측정점을 지나는 액적 신호를 동일한 측정시간에 대하여 나타낸 것이다. 이것은 분무의 전반적인 거동을 살펴보기 위한 것으로, 분무가 측정점을 지나는 동안의 평균특성과 이에 대한 파동특성 등을 알 수 없다. 따라서 디젤분무와 같은 비정상 간헐 분무의 특성을 보다 정량적으로 살펴보기 위해서는 분사 사이클의 각 시간구간 (time window)에 따른 분석이 행해져야 한다. 일반적으로 N회의 사이클 변화를 겪는 경우 시간구간 Δt에 대한 앙상블 평균속도 (ensemble average velocity) U는 다음과 같이 정의된다⁽⁴⁾.

$$U(\bar{t}, \Delta t) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} U_{ij}(\bar{t} \pm \frac{\Delta t}{2}) \quad (1)$$

평균속도에 대한 파동속도 U_{rms} 는 다음과 같다.

$$U_{rms}(\bar{t}, \Delta t) = \left[\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} u_{ij}^2 \left(\bar{t} \pm \frac{\Delta t}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서, $u_{ij} = U_{ij} - U$ 이다. 또한 N_i 는 i 번
 cycle 사이의 시간구간 내의 측정 데이터 개수
 이며, N_c 는 데이터 획득에 이용된 사이클 수,
 N_t 는 전체 측정 데이터 수이다.

한편, 평균액적크기는 표면적 대 체적비로
 표현의 되는 $D_{32}(SMD)$ 가 이용되며 다음과 같
 이 정의된다.

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_i} d_{ij}^3 \left(\bar{t} \pm \frac{\Delta t}{2} \right)}{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_i} d_{ij}^2 \left(\bar{t} \pm \frac{\Delta t}{2} \right)} \quad (3)$$

여기서, 시간구간 Δt 는 간헐특성을 해석할
 수 있을 정도의 작은 값을 가져야 하며, 너무
 작은 경우 데이터가 부족하여 평균특성을 나타
 낼 수 없게 된다. 따라서 비정상 간헐분무의
 경우 시간구간(Δt)의 선정이 매우 중요하며,
 전체적인 평균특성에 영향을 끼친다.

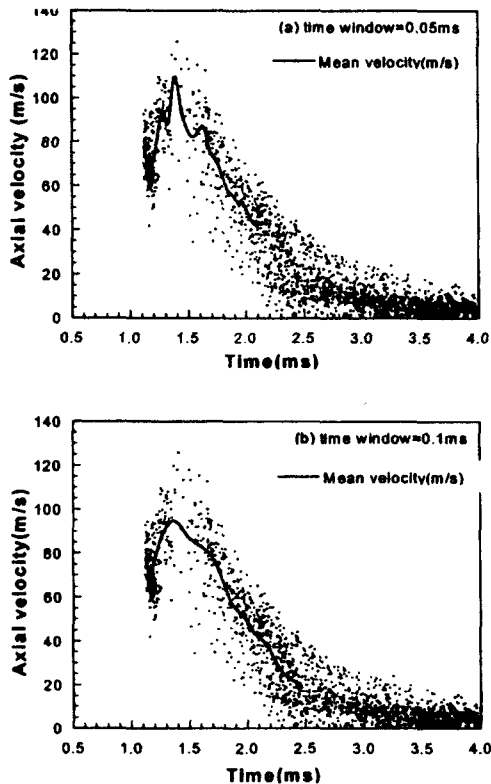


Fig.9 Axial mean-velocity distribution with the variation of time windows

Fig.9는 시간구간의 선정이 간헐분무의 평균
 특성에 끼치는 영향을 알아보기 위하여 펌프회
 전수 600rpm, 분사량 0.476mg/st-hole일 때
 $Z=40\text{mm}$ 위치에서 측정한 축방향속도를 시간
 구간의 설정에 의해 얻어진 평균속도와 함께
 나타낸 것이다. 이 때, 시간구간은 0.05ms에서
 1ms까지 0.05ms 간격으로 변화시켰으며, 이 중
 1ms와 0.05ms에 대한 결과를 나타내었다.

Fig.9(a)는 시간구간이 0.05ms에 대한 것이고,
 Fig.9(b)는 시간구간이 0.1ms일 경우에 대한 것
 이다. 시간구간이 지나치게 크면 매우 짧은 분
 사기간 동안의 특성을 충분히 표현할 수 없다.
 또한 너무 짧을 경우, Fig.9(a)에 나타낸 바와
 같이 실제 속도분포의 평균특성을 나타내지 못
 하고 평균값의 변동이 심하게 된다. 특히 무화
 과정을 이해하는데 가장 중요한 부분인 분무
 선단부와 분무 중심부가 측정점을 통과하는 시
 간에서 많은 차이를 나타내고 있다. 따라서
 1~1.5ms 정도의 매우 짧은 분사기간을 갖는
 비정상 간헐 분무의 평균 특성을 보다 잘 표현
 하기 위해서는 시간구간의 설정이 매우 중요하
 며, 회전수와 같은 분사 펌프의 작동 조건과
 분무장의 상태, 그리고 데이터 획득율(data
 rate) 등을 고려하여 시간구간을 설정하여야 한
 다. 본 연구에서는 유효 데이터 획득율(data
 validation) 등을 고려하여 Δt 를 0.10ms로 결
 정하였다.

Fig.10은 펌프회전수 400rpm, 분사량
 0.867mg/st-hole일 때 축방향 거리에 따른 축
 방향 평균속도와 SMD 분포를 시간변화에 대
 하여 함께 나타낸 것이다. Fig.10(a)에서 노즐
 에 가까운 $Z=40\text{mm}$ 의 경우를 살펴보면 Fig.7에
 서 언급한 바와 같이 분무 선단부보다 뒤따르
 는 액적군이 더 높은 속도를 갖는다. 평균속도
 에 대한 분산도에 해당하는 파동속도값 역시
 최대 평균속도를 나타내는 시간대에서 높은 값
 을 나타내며, 평균속도와 같이 시간이 경과함
 에 따라 급격히 감소하고 분무하류로 갈수록
 속도의 절대값 또한 감소함을 알 수 있다.

SMD의 변화를 살펴보면 $Z=40\text{mm}$ 에서 분무
 선단부를 구성하는 액적군의 경우 대략 $35\mu\text{m} \sim$
 $40\mu\text{m}$ 범위를 갖는 반면 뒤따르는 액적군의

SMD는 최대 85 μm 의 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 분무 선단부가 주위 공기의 항력을 가장 크게 받는 반면, 뒤따르는 액적들은 보다 작은 항력을 받기 때문이라고 판단되며, 이 영역에서 속도 차이에 의한 액적 충돌과 합착에 의해 형성되는 비구형 액적의 존재로 인하여 매우 큰 값의 SMD가 나타나는 것으로 생각된다.

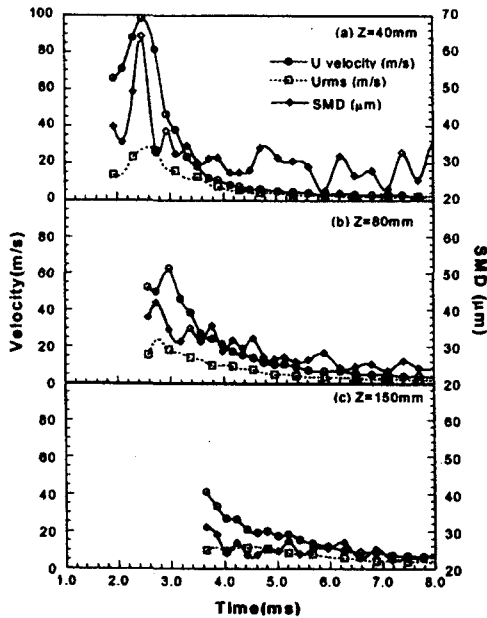


Fig.10(a) SMD and mean- and rms-velocity distributions along the spray axis

시간이 지남에 따라 SMD는 감소하지만 분무 꼬리부분에 해당되는 시간에서 매우 불규칙적인 양상을 보이고 있다. 이것은 평균액적 크기를 나타내는 SMD가 액적 직경의 3승과 2승의 비로 되어 있음을 상기해 볼 때, 보다 큰 액적에 가중치가 주어질수록 높게 평가되는 것으로서, 불규칙적인 매우 큰 액적이 이 시간대에서 형성되고 있음을 짐작할 수 있다. 그러나 이러한 경향은 축방향거리가 증가함에 따라 감소하며, 분무 하류에서는 거의 일정해지는 경향을 보이고 있다.

Fig.10(b)는 축방향 속도분포와 SMD의 상관관계를 나타낸 것이다. 노즐에 가까운 Z=40mm

의 경우를 살펴보면, 30 μm 이하의 작은 액적의 경우 매우 낮은 축방향 속도분포를 나타내는 반면, 이 이상의 큰 액적은 상대적으로 매우 높은 축방향 속도분포를 나타내고 있다. 그러나 축방향거리가 점차 증가함에 따라 작은 크기의 액적의 속도가 약간 상승하며, 큰 액적의 속도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 분무 하류에 해당하는 Z=150mm의 경우 30 μm 이하의 액적으로 구성되어 있으며 축방향 속도와 강한 상관 관계를 보여주고 있다.

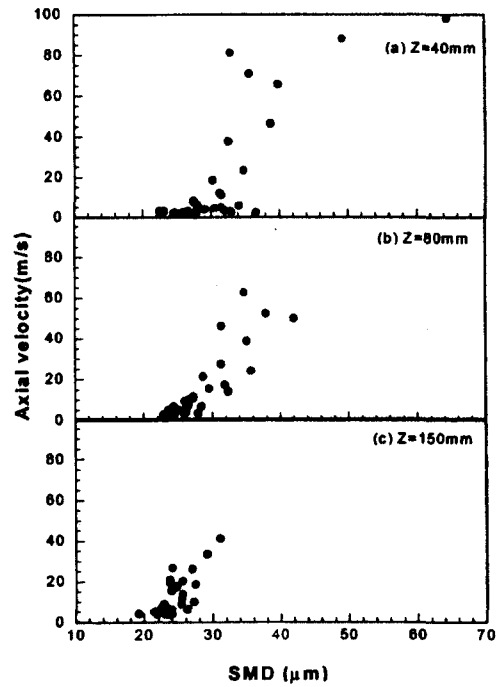


Fig.10(b) Correlation between axial mean velocity along spray axis

Fig.11은 펌프회전수 400rpm, 분사량 0.867mg/st-hole 일 때 Z=80mm에서 축방향 평균속도와 SMD 분포를 반경방향 거리변화에 대하여 나타낸 것이다.

Fig.11(a)에서 반경방향거리가 증가함에 따라 축방향속도와 SMD는 감소하며, 분무축 중심에서 최고 속도와 최대 SMD가 발생함을 알 수 있다.

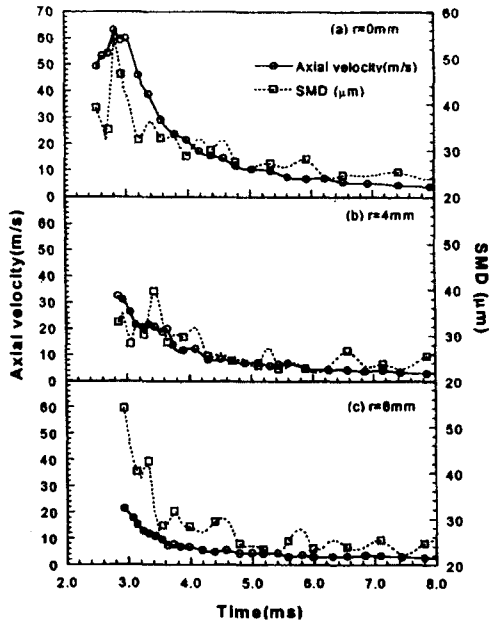


Fig.11(a) SMD, mean velocity distribution with radial distance

그러나 반경방향 거리가 증가함에 따라 속도가 감소하고 평균액적 크기가 작아지던 것이, 분무경계 부분에 해당하는 $r=8\text{mm}$ 에서 예상으로 큰 평균 직경을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 분무경계 부분에서 공기 유입현상과 더불어 분무 선단부가 공기와의 저항으로 인해 분무 외곽부분으로 밀려나면서 발생하는 와도의 영향으로 인하여 확산되던 액적들이 합착을 일으키기 때문이라 생각된다^{(10),(11)}.

Fig.11(b)의 축방향속도와 평균액적크기와의 상관관계를 살펴보면 비교적 강한 상관관계를 나타내지만, 분무 외곽으로 갈수록 기울기가 점점 작아짐을 볼 수 있다.

5. 결 론

분무 영상해석과 PDPA를 이용한 다공디젤 노즐의 분무특성 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

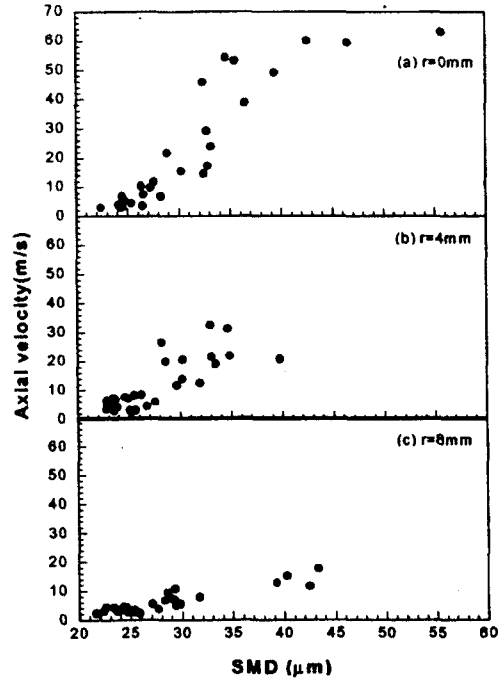


Fig.11(b) Correlation between the axial mean velocity and SMD with the radial distance

1. 분무 선단부의 외곽부분에는 분무 영상으로 확인할 수 없는 미세한 액적들이 존재하고 있음을 알 수 있었다.
2. 간헐적으로 분사되는 디젤 분무의 평균특성을 보다 잘 표현하기 위해서는 시간구간의 설정이 매우 중요하며, 펌프의 작동조건과 데이터 획득을 등을 고려하여 시간구간을 설정하여야 함을 알 수 있었다.
3. 노즐에 가까운 분무 중심축에서 분무선단부보다 뒤따르는 액적의 속도가 더 높게 나타나는 추월 현상이 발생하며, 선단부 다음의 영역에서 축방향 최대속도와 SMD의 최대값이 관찰됨을 알 수 있었다.
4. 노즐에 가까운 분무장에서 액적크기와 축방향속도의 뚜렷한 상관관계를 보이지 않지만, 분무 하류로 갈수록 강한 상관관계가 보임

을 알 수 있었다.

5. 분무 외곽으로 갈수록 액적크기는 감소하는 경향을 보이지만 분무 선단부의 외곽부분에서는 다소 증가하는 경향을 나타냈다.

후 기

본 논문은 전북대학교 자동차신기술연구소 지원(과제번호:AR9604)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. H. Hiroyasu and M. Arai, "Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE 900475.
2. Min Xu and H. Hiroyasu, "Development of a New Optical Technique for Measuring Diesel Spray Penetration," SAE 902077.
3. H. Hiroyasu, and T. Kadota, "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber," SAE 740715.
4. Ja-Ye Koo and Jay K. Martin, "Comparisons of Measured Drop Sizes and Velocities in a Transient Fuel Spray with Stability Criteria and Computed PDF's," SAE 910179.
5. Kiichiro Takeuchi, Jiro Senda, and Masayuki Shikuya, "Transient Characteristics of Fuel Atomization and Droplet Size Distribution in Diesel Fuel Spray," SAE 830449.
6. Shigeru Yoshikawa, Ryunosuke Furusawa, Masataka Arai, and H. Hiroyasu, "Optimizing Spray Behavior to Improve Engine Performance and to Reduce Exhaust Emissions in a Small D.I. Diesel Engine," SAE 890463, pp. 89-95.
7. C. Arcoumanis, E. Cossali, G. Paal and J. H. Whitelaw, "Transient Characteristics of Single-Hole Diesel Sprays," SAE 890314.
8. Yong Chen and David B. Kittelson, "Geometric Optimization of Nozzles for Inclined Injectors for DI Diesel Engines," SAE 960868.
9. Gong, Y. and Peng, Z., "LDA Analysis of High Injection Pressure Diesel Fuel Spray and Entrainment Air Flow," SAE 941951.
10. Hajime Fujimoto, Gi-Soo Hyun, Mitsuhide Nogami, Katsutosi Hirakawa, Takatsugu Asai, and Jiro Senda, "Characteristics of Free and Impinging Gas Jets by Means of Image Processing," SAE970045.
11. Tomohisa Dan, Sayo Takagishi, Jiro Senda and Hajime Fujimoto, "Effect of ambient gas properties for characteristics of non-reacting diesel fuel spray," SAE970352.