

간헐 다공 디젤 분무의 미립화 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Atomization Characteristics in an Intermittent Multi-hole Diesel Spray

이 지 근*, 강 신 재**, 노 병 준**
Jeekuen Lee, Shinjae Kang, Byoungjoon Rho

ABSTRACT

This experimental study is to investigate the intermittent spray characteristics of the multi-hole diesel nozzle with a 2-spring nozzle holder. Without changing the total orifice exit area, its hole number varied from 3($d_n=0.42\text{mm}$) to 8($d_n=0.25\text{mm}$). Through the use of the 2-D PDPA(phase Doppler particle analyzer), the droplet diameter and the velocity of the diesel spray injected intermittently from the multi-hole nozzle into the still ambient were measured. And the calculations of time-resolved diameters, SMD and AMD were made.

The results can be summarized as follows. The spray of the multi-hole nozzle consisted of three parts. These are the leading edge, the central part and the trailing edge. And most of droplets produced at the trailing edge of spray. In the spray flow field, the measuring position which represented the intermittent spray characteristics well was near the nozzle tip. But at the downstream of the spray, its characteristics disappeared, and spray behavior showed a quasi steady state regardless of the time evolution of the spray. The overall mean SMD of the spray increased with the spray development, and showed their maximum value near 1.5ms regardless of hole number.

주요기술용어 : Intermittent spray(간헐 분무), Atomization(미립화), SMD(Sauter mean diameter), Multi-hole nozzle(다공노즐)

Nomenclature

d_n : nozzle diameter, mm
 Z : axial distance, mm
 X : radial distance, mm
 Δt : time windows, ms

AMD : arithmetic mean diameter, μm

SMD : sauter mean diameter, μm

1. 서 론

액체 연료를 작은 크기의 액적으로 미립화 시키고, 운동에너지를 이용하여 무화 정도를 향상 시킴과 동시에 균일한 혼합을 이루기 위해서는 분사된 연료의 미립화 특성에 대한 이해가 필요

* 회원, 전북대학교 국책지원사업단

** 회원, 전북대학교 기계공학부

하다. 특히 디젤기관과 같이 매우 짧은 시간동안 비정상적으로 연소실 내로 분사되는 연료의 완전 연소를 위해서는 분사율과 같은 분사계특성과 분무의 간헐특성에 대한 정확한 이해가 요구된다.

최근 들어 직접분사식 엔진이 주로 이용되면서 다공노즐이 사용되고 있지만, 단공노즐과 달리 실험적 연구에 상당한 제약이 따르며, 아직도 규명되지 않고 있는 부분이 많이 존재하고 있다. 또한 액적 크기에 관한 연구 중 상당부분은 간헐적으로 분사되는 분무를 시간에 독립적인 연속분무로 해석하여, 분사기간동안의 평균특성을 주로 고찰하였다. 따라서 매우 짧은 시간동안에 분열 과정을 거쳐 완전한 분무를 형성하는 간헐 디젤 분무의 발달과정에 관한 상세한 정보를 얻을 수가 없으며, 액적 분열 및 합착 그리고 재분열 등과 같은 분열기구를 검증할 만한 자료가 부족하여 이에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있는 실정이다.

이와 관련된 연구로 Quoc와 Brun¹⁾은 디젤 분무에서 액적 발달 과정은 분열, 증발, 합착의 3가지의 물리적인 현상에 지배된다고 제시한바가 있으며, Hosoya와 Obokata²⁾는 PDA를 이용하여 단공 및 다공노즐의 분무특성을 정상상태에서 고찰한 바가 있다. Hiroyasu와 Arai³⁾는 간헐 단공노즐 분무의 액적 크기를 액침법을 이용하여 조사하고, 분사압이 증가할수록 액적 크기가 감소함을 제시하고, SMD에 관한 실험식을 유도하였다. Arcoumanis와 Chang⁴⁾ 등은 주분사기간 동안 2 스프링 노즐에 의해 형성된 분무의 무화성능이 1 스프링 노즐보다 향상됨을 보인바가 있다. Koo와 Martin⁵⁾은 간헐 분무의 액적 크기를 PDA를 이용하여 측정하고, 액적크기 분포는 log-hyperbolic 함수와 같은 세 개 또는 그 이상의 독립 변수를 가진 분포식에 의해 더 잘 표현됨을 보였다. Quoc와 Brun¹⁾은 PDA를 이용하여 액적 크기분포를 측정하였으며, 측정된 넓은 범위의 액적 크기분포는 디젤분무의 난류 및 간헐특성을 나타내는 것이라고 하였다.

본 연구에서는 다공노즐 분무의 간헐특성과 미

립화 특성을 이해하므로써 고성능 분무노즐 설계에 기본 자료로 활용될 수 있는 실험적으로 구명된 데이터를 제시하고자 하였다.

2. 실험장치

2.1 연료분사장치

다공 디젤노즐에 의해 형성되는 디젤분무의 미립화 특성을 실험적으로 연구하기 위하여 연료분사장치와 PDPA 시스템으로 구성된 실험장치를 사용하였다.

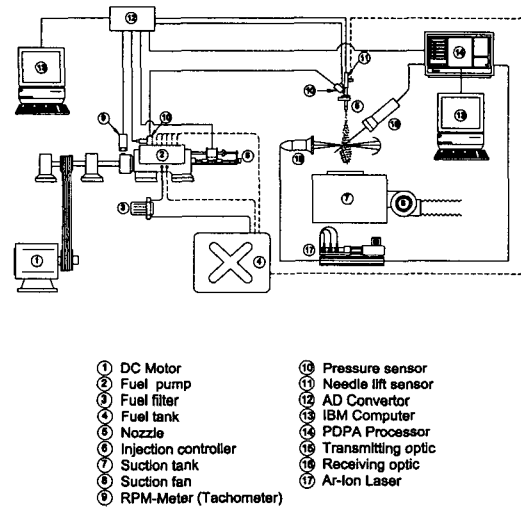


Fig. 1 Schematic diagram of the experiment apparatus

상온·대기압하에서 간헐적으로 분사되는 분무특성을 관찰하기 위해, Fig.1에 나타난 것과 같이 연료분사펌프, 구동 모터, 분사된 연료 액적 포집장치 및 고정 프레임 등으로 구성된 연료분사장치를 사용하였다. 분사펌프는 직경 12mm의 우권 양리드 플린저를 사용하는 8기통 in-line 형식이다. 구동모터는 DC 15kW로서, 최고 3600rpm의 속도로 회전할 수 있으며, 모터의 회전속도는 속도 제어반에 의해 제어된다.

한편, 시험에 사용된 연료는 24°C에서 비중 0.8315, 동점도 3.71cSt, 굴절율 1.468의 물성치를 가진 KS 2호의 경유이다.

2.2 다공노즐

실험에 이용된 분사노즐은 2-스프링 홀더를 가진 미니 색(mini-sac) 형의 다공(multi-hole) 노즐이다. 예양정은 $0.06^{±0.02}$ mm로 설정되어 있으며, 니들의 전체 양정은 0.39mm로, 또한 1,2차 개변압은 150bar, 220bar로 각각 설정되었다. 다공노즐의 형상변화가 분무특성에 끼치는 영향을 고찰하기 위하여 분공의 길이와 전체 분공 면적을 일정하게 유지한 상태에서 분공 수를 3공, 5공, 8공으로 변화시켰다. 분공 수에 따른 직경과 출구면적은 Table 1에 나타낸 것과 같다.

Table 1 The total area and the diameter of the tested nozzles

Hole no.	3	5	8
Diameter	0.42	0.32	0.25
Total area	0.416	0.402	0.393

한편, 실험에 이용된 펌프 회전수는 500rpm이며, 연료 분사량은 다공 노즐 전체 분사량이 $30\text{mm}^3/\text{st}$ 이 되도록 유지하였다. 따라서 노즐 분공 수 변화에 따라 한 개의 분공을 통과하는 유량은 서로 다르며, 3공, 5공, 8공 노즐의 경우 각각 $14.2\text{mm}^3/\text{st}$, $7.3\text{mm}^3/\text{st}$, $5.6\text{mm}^3/\text{st}$ 이다.

2.3 PDPA 측정장치

디젤 분무 유동장의 액적의 크기와 속도를 동시에 측정하기 위해 2차원 PDPA 시스템을 사용하였다. PDPA 시스템은 광원, 광학계통부, 신호처리부 그리고 3차원 이송장치로 구성되어 있다. 광원으로는 750mW, 공냉식 아르곤 이온(Ar-ion) 레이저를 이용하였다. 송광부로부터 나오는 514.5nm (green), 488nm (blue) 두 개의 레이저빔은 초점렌즈에 의해 한 점에 초점을 맺어 측정체적을 이루게 된다. 이 측정체적을 지나가는 액적에 의해 산란된 광은 수광부에 의해 수집되어 4개의 광전증폭기(photomultiplier)에 의해

전기적 신호로 변환된 후 신호처리기(DANTEC, 58N50)를 거쳐 컴퓨터에서 일괄 처리하였다.

다공노즐 분무는 2차원 축대칭 구조를 가지고 있으므로, 액적 크기 측정은 분무 진행방향으로 설정된 Z축과 반경방향으로 설정된 X축에 대하여 2차원적으로 수행되었다. 축방향 위치변화는 노즐 선단에서 10mm 떨어진 지점에서부터 20mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm, 120mm, 150mm, 180mm까지 총 9 위치에서 측정을 수행하였다. 반경방향 측정점은 분무 중심축 근처에서는 조밀하게 그리고 분무외곽으로 갈수록 점점 간격을 크게 하여 15점을 측정하였다.

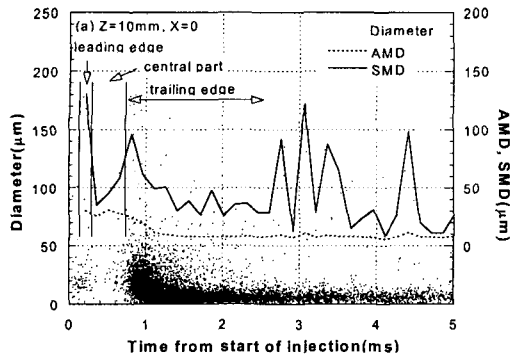
3. 실험결과 및 고찰

3.1 평균직경

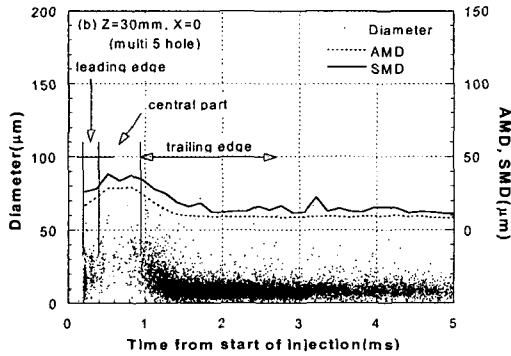
분무의 미립화 특성을 알아보기 위한 방법으로 평균직경이 있으며, 디젤분무가 형성되는 연소실 내 주요 거동은 증발과 착화 등을 포함한 연소과정으로, 체적대 표면적비로 정의되는 SMD(D_{32})가 주로 사용되고 있다. 이것은 액적의 체적과 표면적 변화가 증발, 열전달 및 연소를 포함한 각종 화학반응과 직접 관련되어 있기 때문이다.

Fig.2는 간헐적으로 분사되는 5공 노즐 분무의 축방향 거리에 따른 액적 크기 변화를 고찰하기 위하여 Z=10mm, Z=30mm에서 액적 크기와 산술평균직경(AMD, D_{10}) 그리고 SMD(D_{32})를 함께 나타낸 것이다. 여기서, AMD 및 SMD 계산에 이용된 시간 윈도우(time window, Δt)는 0.15ms 이다.

Fig.2의 시간에 따른 액적 크기 변화를 살펴보면, 분사시작 후 분무 선단이 측정점에 도달하기 전에 액적이 검출되지 않거나 측정점 근처의 부유 액적이 검출되는 일정기간이 있다. 또한 분무 선단이 측정점에 도달 후 비교적 작은 크기의 액적이 검출되는 분무 선단부(leading edge)를 구성하는 기간이 있으며, 부유 액적과 비교적 명확히 구분된다.



(a) Z=10mm, X=0



(b) Z=30mm, X=0

Fig. 2 Time-resolved evolution of droplet diameter, AMD, and SMD for the 5 hole nozzle

분무 선단부가 통과하고 난 후 일정기간동안 액적이 거의 검출되지 않고 있다. 이 기간은 분무 선단부와 혼합유동영역에 둘러싸인 분무 중심부 (central part)가 측정지점을 통과하는 기간으로, 액적이 적어도 구형으로 이루어져 있지 않음을 의미하는 것이다. 그러나 분무 선단부와 분무 중심부의 경계는 명확하지 않으며, 중심부의 끝 부분 또한 그 경계를 뚜렷이 구분하기 어렵다.

이와 같이 분무 중심부에서 액적 검출빈도가 떨어지는 것은 액적이 없는 것이 아니라, 구형액적이 존재하지 않음을 나타내는 것이다. 액적 크기 측정을 위해 이용된 PDPA는 구형 액적이 측정체적을 통과하는 동안 발생된 산란광의 위상지

연을 기초로 액적 크기를 평가한다. 본 연구에서는 서로 다른 위치에서 검출된 위상차로부터 계산한 액적 크기가 서로 같거나, 차이가 10% 이내가 되면 구형 액적으로 판단하여 액적 크기를 평가하였다. 따라서 측정결과로부터 분무 중심부가 액사 및 이와 유사한 비구형 액적, 그리고 측정 범위를 초과하는 큰 크기의 액적으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

한편, 분무 중심부가 측정지점을 통과하고 난 후 액적 검출 빈도가 현저하게 증가하며 50 μm 이상의 큰 액적 또한 다량 검출되고 있어, 분무 꼬리부분(trailing edge)에 해당하는 1ms 이후부터 5ms 범위에서 대부분의 액적이 생성됨을 알 수 있다. 이 기간은 연료분사가 종료되는 시점으로, 분무 선단부 및 분무 중심부의 유동 특성과 더불어 분사가 종료되고 난 후 분무 꼬리부분의 유동특성이 액적 형성에 많은 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 따라서 분사가 종료되는 시점의 분사율 형상이 Δ (delta)모양과 같이 매우 날카롭게 종료되어야 하며 분사종료시점의 분사압력 또한 많은 영향을 끼칠 것으로 생각된다.

Z=10mm 위치에 대한 Fig.2(a)를 살펴보면, 분무 선단부의 액적 검출 빈도가 매우 낮게 나타나 선단부의 두께가 매우 얇음을 예측할 수 있다. 분무 중심부에 해당하는 영역에서 액적은 거의 검출되지 않고 있다. 분무 꼬리부의 시작부분에서 50 μm 이상의 큰 액적이 검출되며, 이후 대부분의 액적이 25 μm 이하이지만 불규칙적으로 큰 크기의 액적이 검출되고 있다. 측정된 액적의 산술평균인 AMD의 변화를 살펴보면 분사기간동안 약 25 μm 정도의 크기를 나타내는 반면, 1.2ms 이후부터는 약 10 μm 의 일정한 크기를 유지하고 있다. SMD의 변화는 시간에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 매우 불규칙적인 거동을 나타내고 있다. 이것은 SMD가 체적(d^3)대 표면적(d^2)비의 평균직경이므로 데이터 개수가 적고 큰 액적이 있을 경우 큰 액적에 가중치가 주어져 크게 평가된 것으로, 평균 계산에 이용된 시간 윈도우의 설정에 따라 달라진다. 즉, 시간 윈도우를

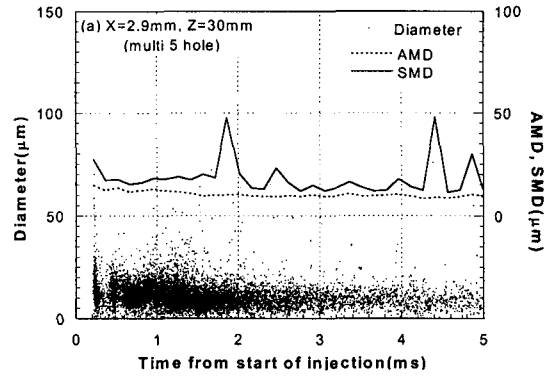
0.15ms에서 점점 증가시키면 파동특성은 사라지고 완만한 변화 경향을 나타내는 반면 간헐 특성에 대한 정보를 점점 잃어버리게 된다. 또한 시간 윈도우를 너무 작게 하면 평균특성을 상실하고 간헐 특성 속에 내포된 사이클 변동과 더불어 파동특성 그 자체를 나타내게 된다. 따라서 시간윈도우즈의 설정은 실험조건과 작동조건에 따라 달라지게 된다. 이와 관련하여 Pitcher와 Wigley⁶⁾는 액적 크기의 통계학적 처리를 위한 시간윈도우를 0.04ms 설정한 바가 있으며, Quoc와 Brun¹⁾은 광학적으로 접근이 가능하고 1000rpm으로 작동되는 엔진에서 얻어진 액적 데이터의 평균처리를 위한 시간 윈도우를 3~6°CA로, 그리고 Arcoumanis와 Whitelaw⁷⁾ 등은 분무의 중심선 상에서, 축방향 속도의 평균처리를 위해 시간 윈도우를 0.1ms로 설정한 바가 있다.

Z=30mm 위치에 대한 Fig.2(b)를 살펴보면, 분무 선단부의 시작이 보다 명확하게 나타나고 있으며, 검출되는 액적 수와 폭 또한 상당히 증가되었다. 그러나 분무 중심부의 액적 검출 빈도는 여전히 낮게 나타나고 있다. 분무 꼬리부의 시작 부분의 액적크기는 상당히 감소하여 약 40 μ m 이하의 크기분포를 나타내지만 간혹 50 μ m 이상의 큰 액적이 검출됨을 알 수 있다.

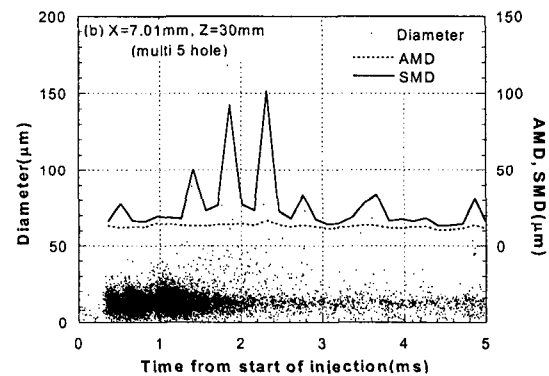
이상과 같이 노즐근처 분무 중심부에서 시간변화에 따른 액적크기 변화로부터 간헐분무의 발달 과정을 정성적으로 고찰 할 수 있으며, 간헐적으로 분사되는 디젤분무는 정지된 주위 공기에 저항을 받고 작은 액적으로 구성된 분무 선단부(leading edge), 분무 선단부와 혼합유동영역에 둘러싸여 공기의 저항을 거의 받지 않고 미립화가 아직 종료되지 않은 분무 중심부(central part), 그리고 분무 중심부가 통과하면서 형성되는 분무 꼬리부(trailing edge)로 구성되어 있음을 알 수 있다.

Fig.3은 5공 노즐 분무의 반경방향 거리에 따른 액적크기 변화를 알아보기 위하여 Z=30mm 위치에서 분무 중심으로부터 2.9mm, 7.01mm 떨어진 지점의 액적크기를 시간변화에 대하여 나

타낸 것이다.



(a) X=2.9mm, Z=30mm

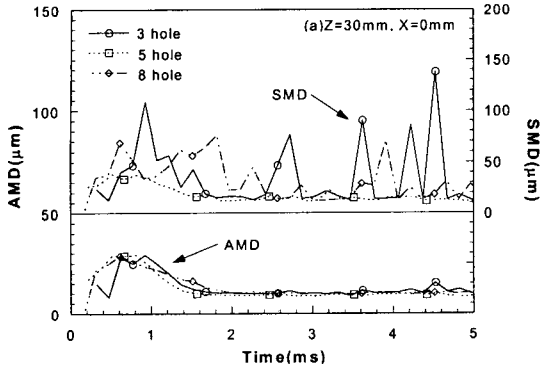


(b) X=7.01mm, Z=30mm

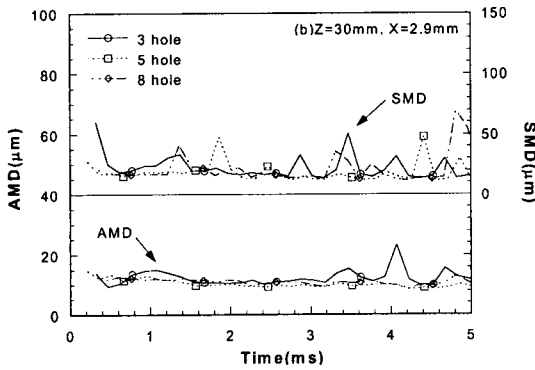
Fig. 3 Time-resolved evolution of droplet diameter, AMD, and SMD for the 5 hole nozzle

분무 중심에 대한 Fig.2(b)와 비교해 보면, 액적 검출 빈도가 매우 낮은 중심부의 존재를 확인할 수 없으며, X=7.01mm에 대한 Fig.3(b)의 경우 분무가 측정점에 도착함과 동시에 많은 수의 액적이 검출되고 있다. 또한 50 μ m 이상의 큰 액적이 나타나지 않고, 대부분 40 μ m 이하의 액적이 검출되고 있어 분무 중심부 보다 균일해져 감을 알 수 있다.

Fig.4는 Z=30mm에서 분무 중심축과 반경방향으로 2.9mm 떨어진 지점의 AMD와 SMD 변화를 노즐 분공 수에 대하여 나타낸 것이다.



(a) Z=30mm, X=0



(b) Z=30mm, X=2.9mm

Fig. 4 Time history of AMD and SMD for three different multi-hole nozzles

분무 중심에 해당하는 Z=30mm, X=0에서 SMD의 변화는 5공 노즐이 가장 작은 크기를 나타내는 반면 3공과 8공 노즐은 큰 변동을 나타내고 있다. AMD 또한 5공 노즐이 약간 작게 나타나지만 뚜렷이 구분하기는 어려운 정도이다.

Z=30mm에서 반경방향으로 2.9mm 떨어진 Fig.4(b)를 살펴보면 SMD는 분공 수가 증가할수록 균일해지며, AMD는 매우 근소한 차이이지만 5공 노즐이 가장 작게 나타나고 있다.

이와 같은 임의의 공간점에서 시간변화에 따른 고찰로부터 노즐에서 분사된 액체 연료가 분사됨

과 동시에 구형 액적으로 구성된 완전 분무를 형성하는 것이 아니라 액사 또는 비구형 액적들로 구성된 분무 중심부가 분무 하방향으로 진행하면서 이들로부터 분리된 작은 액적의 형성과 같은 재분열과정을 통해 완전 분무가 형성된다는 사실을 유추할 수 있다.

3.2 액적 크기변화의 간헐 특성

다공노즐 분무의 형성과정을 이해하기 위해 Fig.2~Fig.4에 나타난 바와 같이 임의의 공간점에서 액적 크기를 시간변화에 대하여 살펴보았다. 이와 더불어 분무의 발달과정과 진행정도를 보다 정량적으로 알아보기 위해서는 분무 유동장 전체에 대한 평균액적 크기를 시간변화에 대하여 나타내는 것이 필요하다.

Fig.5는 분무 유동장 전체의 평균 SMD (overall mean SMD)의 변화를 알아보기 위하여 측정점 전체에 대한 SMD의 평균값을 시간변화에 따라 3공, 5공, 8공 노즐에 대하여 나타낸 것이다.

이때, 분무 유동장의 측정점수는 144점이며, 측정점의 경계는 분무 영상으로부터 확인한 외곽부분을 포함하도록 설정되었다. 또한 SMD 계산에 이용된 시간윈도우는 0.15ms이다.

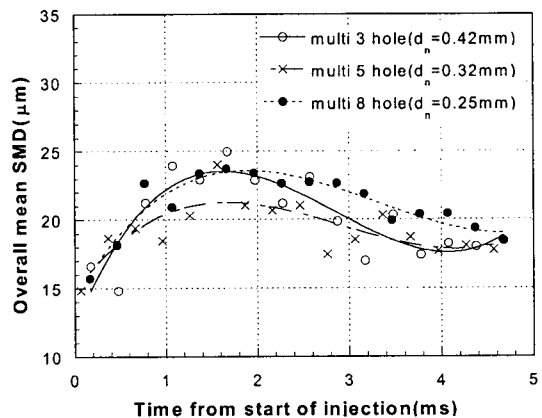


Fig. 5 Time history of overall mean SMD for three different multi-hole nozzles

그림을 살펴보면 분사시작 후 시간이 경과함에 따라 SMD는 점점 증가하여 1.5ms 근처에서 노즐 분공 수와 관계없이 최대값을 나타내고 있다. 3공 노즐은 25 μ m를 그리고 5공 및 8공 노즐은 각각 24 μ m, 23.5 μ m를 나타내고 있다. 이 후 SMD는 점점 감소하며, 3공과 5공 노즐의 경우 4.5ms 근처에서 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 측정 기간동안의 평균값을 분공 수에 대하여 살펴보면, 3공, 5공, 8공 노즐이 각각 20.1 μ m, 19.2 μ m, 21.0 μ m를 나타내 노즐 분공 수에 따른 뚜렷한 차이를 나타내지 않고 있다.

3.3 분무 유동장의 평균 액적 크기

간헐적으로 분사되는 분무의 발달과정에 대한 평균특성을 고찰하기 위해서는 Fig.5에 나타난 시간변화에 따른 평균특성과 더불어 분무 진행방향에 따른 평균특성을 알아 볼 필요가 있다.

Fig.6은 5공 노즐에 대해, 반경방향 측정점에서 20ms 동안 측정된 전체 액적의 SMD를 축방향 거리 10mm, 20mm, 30mm에 대하여 나타낸 것이다.

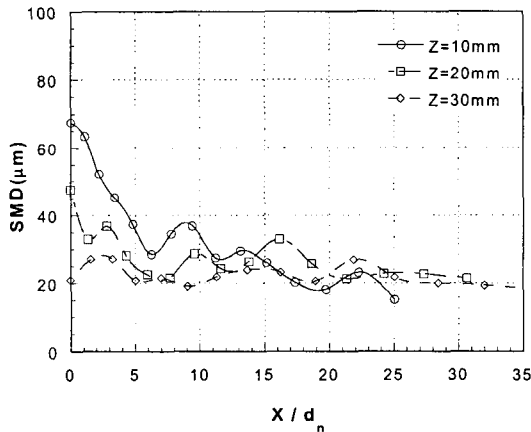


Fig. 6 SMD profiles along the radial distance for the 5 hole nozzle

분무 중심에서 가장 큰 SMD를 나타내고 있으며, 노즐선단에 가까운 Z=10mm의 경우, 분무 중

심부에서 70 μ m 정도의 큰 SMD를 나타낸 후 분무 외곽부분으로 갈수록 신속히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 축방향 거리가 증가할수록 이러한 경향은 점차 감소하여 Z=30mm의 경우 분무 중심부와 외곽모두 거의 비슷한 SMD를 나타내고 있다. 또한 노즐 분공 수에 관계없이 분무 외곽으로 갈수록 SMD는 감소하며, X/d_n=6 근처를 경계로 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

Fig.7은 Fig.6에 나타낸 각 반경방향 지점에서 20ms동안 측정된 전체 액적에 대한 SMD 중 분무 중심축에 대한 SMD를 축방향 거리변화에 대하여 나타낸 것이다.

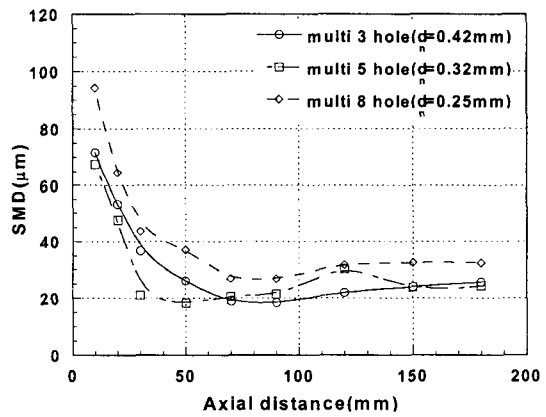


Fig. 7 SMD profiles along the axial distance for three different multi-hole nozzles

노즐 선단 근처에서 가장 큰 SMD를 나타낸 후 신속히 감소하여 Z=50mm 근처에서 준정상 상태에 도달하며 분무 하방향으로 갈수록 액적의 합착 등으로 인하여 액적 크기가 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig.8은 Fig.6에 나타낸 측정단면의 반경방향 SMD의 평균값을 측정단면의 평균 SMD로 정의하고, 축방향 거리에 대하여 나타낸 것이다.

노즐 근처에서 분공 직경이 큰 3공 노즐이 가장 큰 SMD를 나타낸 후 급격하게 SMD가 감소하여 분무 하류에서는 오히려 작은 SMD를 나타

내고 있다. 축방향 거리가 증가함에 따라 SMD는 감소하며, 분공 수에 관계없이 Z=50mm 근처에서 준정상상태에 도달함을 알 수 있다.

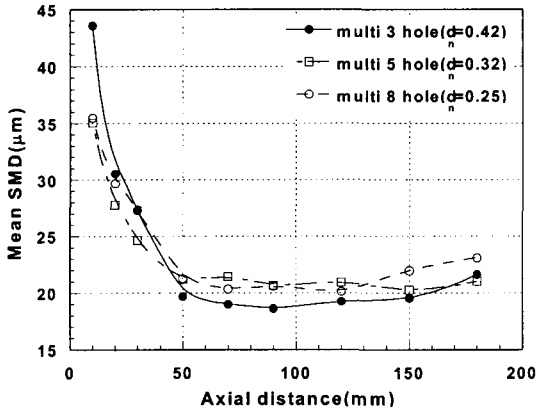


Fig. 8 Mean SMD profiles at various axial cross sections for three different multi-hole nozzles

4. 결론

자유 대기 중으로 간헐적으로 분사되는 다공 노즐 분무의 미립화 특성을 PDDPA를 이용하여 고찰하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 다공노즐 분무는 비교적 작은 크기의 액적으로 구성된 분무 선단부(leading edge), 분무 선단부와 혼합유동영역에 둘러싸인 분무 중심부(central part), 그리고 분무 중심부가 통과하면서 형성되는 분무 꼬리부(trailing edge)로 구성되어 있으며, 대부분의 액적은 분무 꼬리부에서 형성된다.
- 2) 분무 유동장에서 간헐분무의 특성을 가장 잘 나타내는 위치는 노즐 근처이며, 분무 하방향으로 갈수록 간헐 특성은 사라지고 시간에 독립적인 준정상상태(quasi-steady state)가 됨을 알 수 있었다.
- 3) 간헐 다공 디젤분무의 시간변화에 따른 평균 SMD는 시간에 따라 증가하여 1.5ms 근처에

서 노즐 분공 수와 관계없이 최대값을 나타낸 후 점점 감소하였다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 과학기술기초 중점 연구지원과제(1998-018-E00030)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) H. X. Quoc and M. Brun, "Study on Atomisation and Fuel Drop Size Distribution in Direct Injection Diesel Spray," SAE 940191, 1994.
- 2) H. Hosoya and T. Obokata, "Effect of Nozzle Configuration on Characteristics of Steady-State Diesel Spray," SAE 930593, 1993.
- 3) H. Hiroyasu and M. Arai, "Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE 900475, 1990.
- 4) C. Arcoumanis, J. C. Chang and T. Morris, "Spray Characteristics of Single-and Two-Spring Diesel Fuel Injectors," SAE 930922, 1993.
- 5) J. Y. Koo and J. K. Martin, "Droplet Size and Velocities in a Transient Diesel Fuel Spray," SAE 900397, 1990.
- 6) G. Pitcher and G. Wigley "A Study of the Breakup and Atomization of a Combusting Diesel Fuel Spray by Phase Doppler Anemometer," Sixth International Symposium on Application of Laser Technique to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 1992.
- 7) C. Arcoumanis, E. Cossali, G. Paal and J. H. Whitelaw, "Transient Characteristics of Multi-Hole Diesel Sprays," SAE 900480, 1990.