분무실 밀도 변화가 충돌 디젤분무 특성에 미치는 영향

The Effect of Ambient Gas Density on the Development of Impinging Diesel Spray

김 종 현*, 이 봉 수**, 구 자 예***

J. H. Kim, B. S. Lee, J. Y. Koo

Abstract

Experimental investigation of unsteady impinging diesel spray on the flat plate have been carried out using high speed camera and Malvern system. The density ratios of ambient gas to diesel fuel were varied using N_2 and Ar gas in the case of 14.9, 21.2, 28.4, 35.1, 40.4, and 50.1. With the increase of gas density ratio, the radial penetration is decreased due to the resistance of the ambient gas. With the increase of the gas density ratio and the distance between nozzle tip and flat plate, the height of spray is increased due to the entrance and circulation. With the increase of gas density ratio, SMD is decreased on the nearby position at the center of flat plate, but SMD is increased on the far position. As the distance between nozzle tip and flat plate is increased, SMD is always decreased.

주요기술용어 : Impinging diesel spray(충돌디젤분무), Density ratio(밀도비), Spray tip penetration (분무선단 도달거리), SMD(Suater mean diameter), Back pressure(배압)

1. 서 론

지구 온난화의 원인으로 지적되고 있는 이산화탄소(CO_2)의 배출 규제가 예고되고 있어 환경 친화적인 저공해 및 무공해 자동차 개발이 진행되고 있다. 그러나 무공해 자동차가 실용화되기까지는 기술적, 경제적인 어려움으로 상당한 기간이 소요될 것으로 예상되므로, 그 전까지는 기존의 내연기관을 개량하여 에너지 효율을 극대화하고 유해배출가스를 저감시키는 것이 당면 과제이다. 따라서 가솔린기관에 비하여 연비가 우수한 디젤기관에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

디젤기관은 연료의 분사 방법에 따라 직접분사식(DI)과 간접분사식(IDI)이 있으며, 직접분사식은 간접분사식에 비하여 높은 열효율과 과잉호름 손실 방지 등으로 인하여 10~15% 정도 열효율이 높아 이산화탄소(CO_2) 배출을 줄일 수 있다.

직접분사식 디젤기관에서 실린더 내에 분사되는 분무의 액적들은 기관이 구동됨에 따라 피스톤 상부와 실린더 벽면 그리고 흡기밸브 표면과의 충돌을 피할 수 없으며, 충돌 후 기관 내의 액적들의 거동과 미립화 정도는 액적 증발 및 혼합기 형성과정, 연소과정 등에 매우 중요한 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

Watkins와 Park[1]은 5개의 분공으로 구성된 직접분사식 디젤기관에서 각 분공의 분무를 적당한 충돌판에 충돌시켜 연료의 미립화를 촉진시키고 연료가 연소실 내부에 적절히 분포하여 공기와 잘 혼합되도록 하는 연구를 수행하였으며, Kato와 Onishi[2]는 단공 노즐에서 분사되는 연료를 돌출부에 충돌시켜 연료입자가 연소실 내에 골고루 분포 되게 하여 입자상 물질과 질소산화물을 동시에 저감시킬 수 있는 방법을 연구하였으며, Katsura[3]등은 단공 노즐이 장착

* 한국항공대학교 인턴연구원

** 한국항공대학교 대학원 항공기계공학과

*** 한국항공대학교 항공기계공학과

된 직접분사식 디젤기관에서 연료를 평판에 충돌시킨 후 주위기체의 밀도 변화에 따른 분포 상태를 연구하였으며, 최근에 Arcoumanis와 Chang[4]은 PDA를 이용하여 상압하에서 분무가 평판에 충돌한 후 액적들의 속도 및 입경을 측정하고 열전달을 해석하였다.

지금까지의 연구들은 실험이 용이한 대기압하에서 주로 수행되었고, 대기압보다 높은 배압하에서 충돌분무의 거동 및 액적의 미립화에 대한 연구는 부족하다. 따라서 본 연구에서는 직접분사식 디젤기관에 사용되는 홀형 단공 인젝터를 사용하여 비정상 디젤 분무를 정적 분무실 내의 평판에 충돌시킨 후 충돌거리와 주위기체 밀도 변화에 따른 연료의 유동 특성 및 연료의 미립화 상태를 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 연료분사계, 분무 가시화를 위한 실험장치 및 광산란법을 이용한 입경 측정장비(Malvern 시스템)로 구성되어 있다.

2.1 연료분사계

분사펌프와 노즐의 사양은 Table 1과 같다. 분사펌프에는 이차분사를 방지하기 위하여 CPV (constant pressure valve)를 장착하였다. 직접분사식 디젤기관에 사용되는 인젝터는 홀형 다공 노즐을 주로 사용하나 다공 노즐은 각 홀에서 분사되는 분무가 서로 간섭을 일으켜 분무 거동 및 입경 측정 실험에 부적합하여 본 실험에서는 인젝터 선단의 중심축에 직경 0.26mm 단공 노즐을 제작하여 사용하였으며 니들 변위를 측정하기 위하여 최대 ±1mm까지 측정 가능한 AVL-424 니들변위 센서를 사용하였다. 노즐의 스프링 시트에 니들변위 측정용 마그네틱 코어를 은납으로 용접하여 니들이 작동하면 센서내의 자장이 변화를 일으켜 변위를 측정할 수 있다.

Table 1. Specification of F.I.E

Injection Pump	Nozzle
Maker : DPICO	No. of Hole : 1
Type : PE-6P	Hole Dia. : 0.26mm
No. of Plunger : 6	Needle Lift : 0.28mm
Plunger Dia. : 12mm	Sac Vol. : 1.21mm^3
Plunger Stroke : 7mm	L / D = 3.08

2.2 분무가시화 장치

주위기체가 가압된 상태에서 분무를 관측하기 위하여 가시화 창의 직경이 160mm이고 두께가 19mm인 원형 강화유리가 부착된 정적분무실을 제작하였다. 또 정적 분무실 내부의 중심에 높이 조절이 가능한 직경 90mm의 원형 충돌판을 설치하였다.

분사펌프는 직류 모터로 구동되며 분사펌프 축에 연결된 로터리 인코더에서 분사펌프가 1회전 할 때마다 신호를 주기적으로 발생시킨다. 이 신호가 모든 시스템의 기준신호가 된다. 분사펌프 6개의 인젝터 연료 라인 중 5개는 보조탱크로 되돌려지고 1개의 라인에 주인젝터와 보조인젝터를 장착한다. 주인젝터를 정적분무실에 설치하고 보조인젝터에 솔레노이드 차단 밸브를 설치한다. 기준신호는 분사펌프가 1회전할 때마다 발생하므로 초기화 장치(reset controller)를 만들어 스위치 작동 시 한번의 신호만 기준신호로 취하게 하고, 초기화 장치로부터 나오는 한번의 신호를 솔레노이드 콘트롤러에 입력시키면 일정 기간 동안 솔레노이드 차단 밸브가 작동하여 주인젝터에서 정적분무실에 단발 분사를 취할 수 있다. 동시에 이 신호를 시간지연회로로 보내어 일정 시간 후 광원 콘트롤러에 의해 광원을 작동시킨다. 충돌분무 형태를 촬영하기 위하여 Fig. 1과 같이 광학계를 구성하여 쉐도우그래프(shadowgraph) 방법으로 촬영하였으며, Fig. 2는 각 장치의 동기를 위한 시간 선도를 나타낸다.

밀도비 변화에 따른 내부 충돌 후의 분무유동을 관찰하기 위해 질소와 아르곤 기체를 이용하여 각각 1.1MPa, 2.1MPa, 2.6MPa로 정적분무실을 가압하였고, 노즐팁에서 충돌 평판까지의 거리는 10mm, 20mm, 30mm로 변화시켰다. 분무사진 촬영은 초당 25,000 프레임이므로

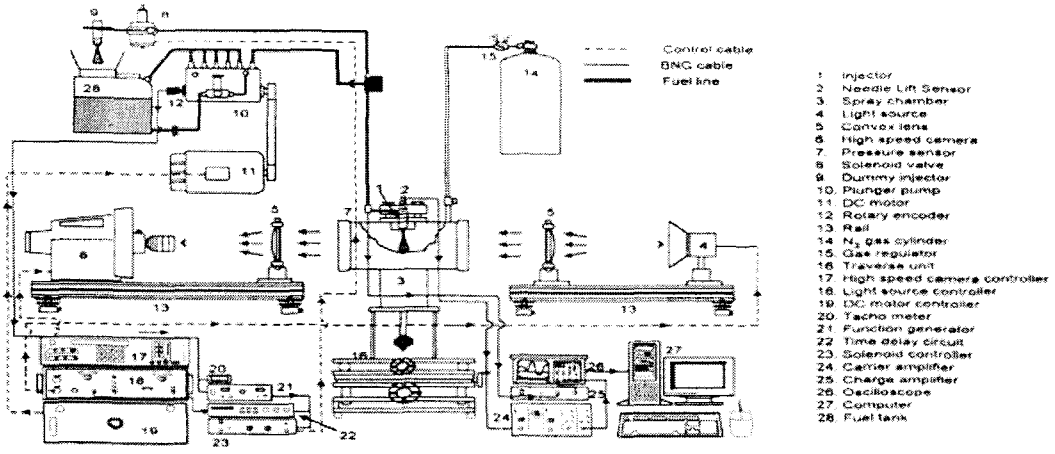

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

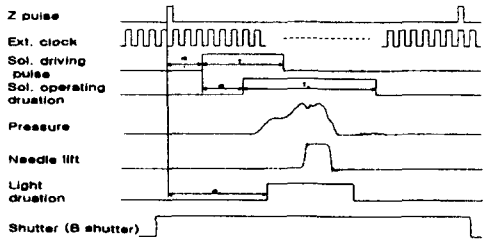

Fig. 2 Timing diagram for synchronization

시간 간격은 40μs이지만, 실험데이터는 80μs 간격으로 처리하였다. 데이터 처리기준은 분무가 평판에 충돌한 순간으로 설정하였다. 디젤연료의 밀도(ρ_l=840kg/m^3)와 상온(24℃)에서의 이상기체 방정식을 통해 기체의 밀도(ρ_a)를 구하여 Table 2에 디젤연료와 기체의 밀도비를 정리하였다.

Table 2. Ambient gas states

P_{gas}(MPa)	Gas Composition	$\rho_g/\rho_l\times10^3$
1.1 MPa	N_2	14.9
	Ar	21.2
2.1 MPa	N_2	28.4
	Ar	40.4
2.6 MPa	N_2	35.1
	Ar	50.1

2.3 분무입경 측정장비

Malvern 시스템은 분무 속도의 측정은 불가능하지만 측정 체적이 상대적으로 커서 분무의 측정 위치와 시간에 따라 변하는 디젤분무의 평균 입경을 측정하는데 적합하다고 판단된다.

광산란법을 이용한 Malvern 시스템은 2mW 출력의 He-Ne(λ=633nm) 레이저 및 광확대부로 구성된 발광부와 31개의 반원형 센서로 구성된 수광부로 이루어져 있다. 측정원리는 Fraunhofer 회절이론을 이용한 것으로 광확대부에 의하여 만들어진 평행광에 의하여 큰 입자는 작은 산란각을 만들고 작은 입자는 큰 산란각을 형성하는 특성을 이용한 장치이다. 각기 다른 액적들에 의해 회절된 산란광은 Fourier transform 렌즈에 의하여 산란된 위치에 상관없이 산란각에 따라 반원형의 광검출기에 모이게 되고, 검출기에 나타나는 산란광의 위치와 산란된 빛의 양을 동시에 측정하여 계산함으로서 분무입경의 분포 및 평균입경을 얻을 수 있다.

가압 상태의 정적분무실에서 Malvern 시스템을 이용해 분무입경을 측정하기 위하여 Fig. 1의 가시화 장치 중에서 고속카메라와 2개의 볼록렌즈, 광원을 제거하고 고속카메라 위치에 Malvern 시스템의 발광부를, 광원 위치에 수광부를 장착하여 입경을 측정하였으며, Malvern 시스템의 레이저 강도를 올리기 위하여 정적분무실의 강화유리를 석영(quartz)으로 대체하였다. 수광부에는 초점거리가 300mm인 렌즈를 장착하였다. 이 렌즈에 의하여 입경 측정범위가 5.8~564μm로 정해지고 측정영역의 직경은 발광부의 광확대부에 의해 10mm가 된다. 데이

터를 1회 샘플링 하는데 걸리는 시간은 10μs 이다.

데이터를 처리할 때 측정시간의 기준은 니들이 움직이는 순간으로 선정하였고 입경측정 위치는 노즐팁에서 충돌평판까지의 거리인 L=20mm, 30mm이며, 충돌 평판에서 노즐팁을 중심으로 한 반경방향으로 R=15mm, 20mm, 25mm에서 각각 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 연료분사시 니들변위와 분사압력 선도를 나타낸 그림이다. 노즐 팁과 충돌평판 사이의 거리를 L, 충돌평판과 충돌분무의 높이를 H, 분무중심에서 분무선단 사이의 거리를 R로 정의하였다.

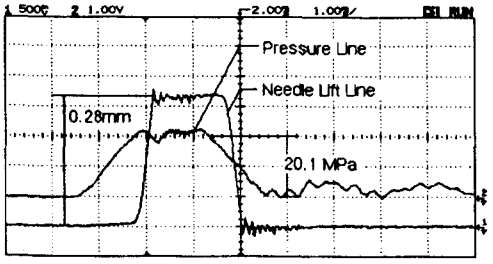

Fig. 3 Needle lift and pressure line

3.1 분무가시화 결과

Fig. 4는 충돌평판과 노즐팁 사이의 거리가 30mm인 경우 밀도비를 변화시키면서 충돌평판에 분무가 충돌하기 전까지의 시간에 대한 분무선단도달거리를 측정한 그래프이다. 밀도비가 증가할수록 기체 저항이 증가하여 분무선단 도달거리가 줄어드는 것을 알 수 있다.

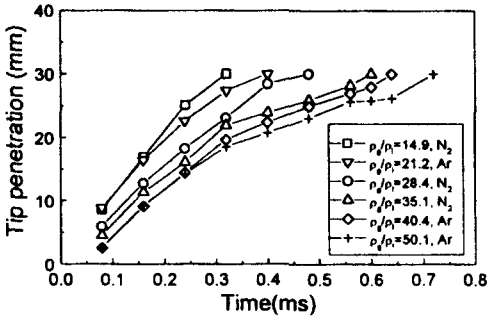

Fig. 4 Spray tip penetration before impinging on the wall

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리 L이 10mm, 20mm, 30mm인 경우에 대하여 Table 2에 나타낸 밀도비로 주위기체를 변화시키면서 충돌분무의 반경방향 길이 R을 측정한 결과이다. 밀도비가 증가하면 공통적으로 반경방향으로의 길이가 감소하는 것을 알 수 있다. 밀도비가 증가하면 분무의 반경방향의 운동에너지가 주위기체로 급속히 전달되고, 기체와의 공기역학적 저항에 의하여 분무의 확산이 감소하기 때문이다.

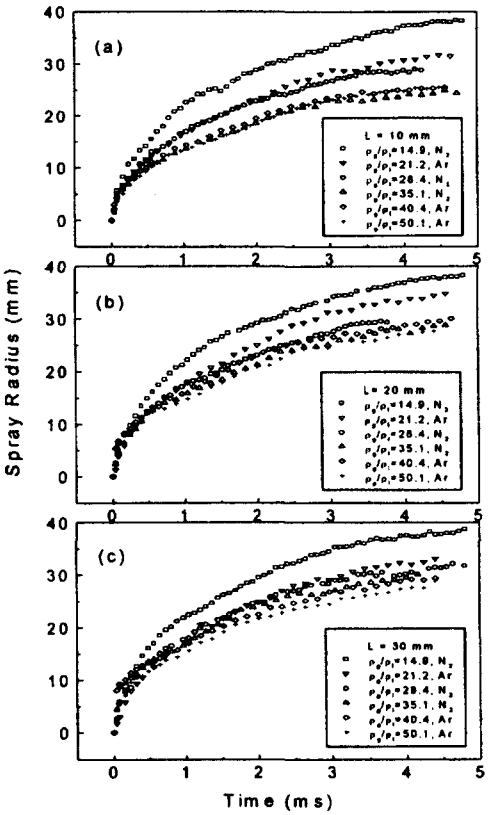

Fig. 5 Spray radius variation after impinging spray

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리 L이 10mm, 20mm, 30mm인 경우 밀도비를 변화시키면서 충돌분무의 높이 H를 측정한 그래프로서, 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리가 10mm, 20mm일 때는 밀도비의 영향을

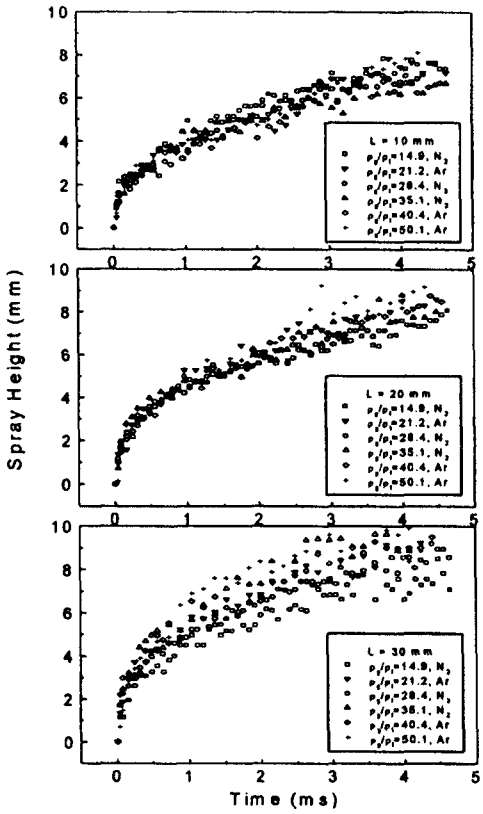

Fig. 6 Spray height variation after impinging spray

명확히 구별하기가 힘드나, 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리가 30mm일 때는 밀도비가 증가함에 따라 충돌 후 분무의 높이가 증가함을 알 수 있다. 노즐팁에서 충돌평판까지의 거리와 밀도비가 증가할수록 분무는 주위기체에 더 많은 운동에너지를 전달하여 주위기체에 커다란 순환을 일으키며 분무 자신의 운동에너지는 감소된다. 주위기체가 운동에너지를 얻을수록 분무가 충돌평판에 충돌한 후 분무선단에서 주위기체의 순환에 의하여 더 큰 와류를 만들어 충돌 후 분무의 높이가 커진다고 판단된다.

Fig. 7은 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리가 10mm이고, 밀도비가 14.9인 경우에 대해 연료가 분사되어 충돌평판에 충돌하는 과정을 나타낸 사진으로서, 충돌평판에 충돌한 후의 분무의 거동을 보여주고 있다. 분사 시작 후의 경과시간을 각 사진의 아래에 나타내었다. 분무가 충돌판에 충돌 후 디스크 형태를 이루다가

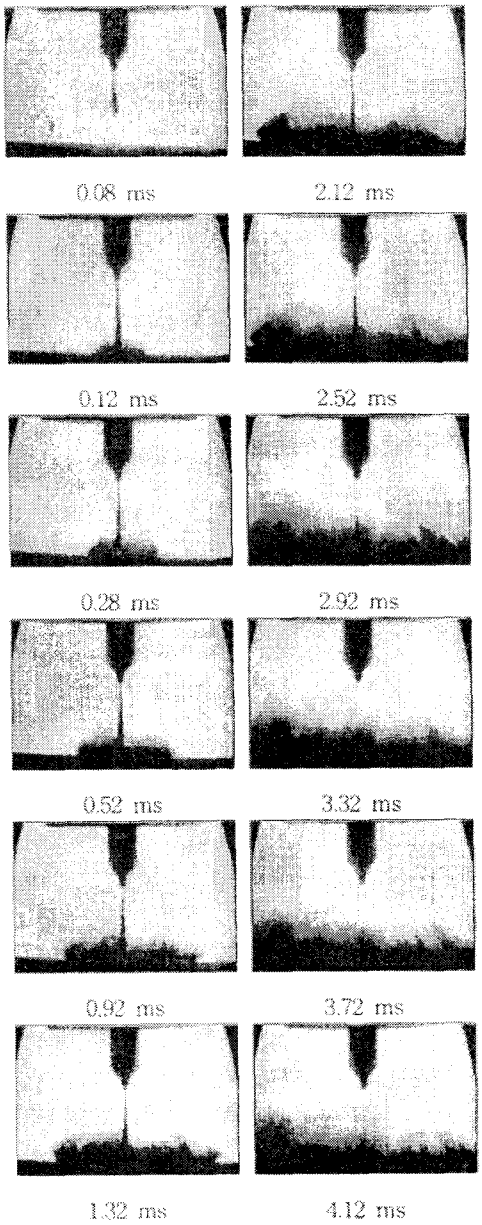

Fig. 7 Photograph of impinging spray (L=10mm, ρ_g/ρ_l=14.9)

점차 분무선단과 정체영역이 발달하는 것을 알 수 있다

3.2 입경 측정 결과

Fig. 8의 (a)는 노즐팁에서 충돌판까지의 거리가 20mm이고 충돌평판의 중심으로부터 반경방향 거리가 15mm의 위치에서 밀도비 변화에

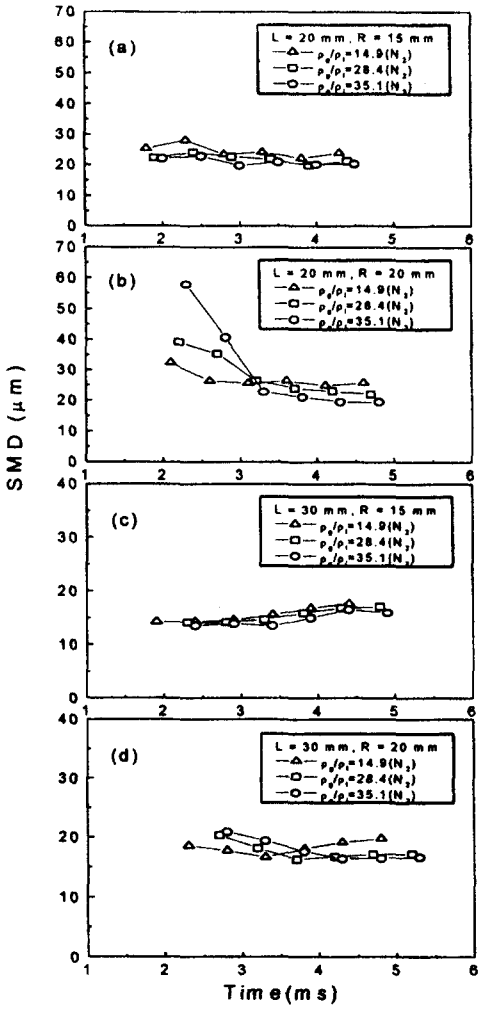

Fig. 8 Droplet sizes of impinging spray at various gas density ratio

따른 SMD를 시간에 대하여 나타낸 그래프이다. 분무중심에서 반경방향의 거리가 작을 경우에는 밀도비가 증가할수록 SMD가 감소하는 경향을 나타내고, Fig. 8의 (b)와 같이 분무중심에서 반경방향의 거리가 증가하면 밀도비가 증가할수록 반대로 SMD가 증가하는 경향을 나타낸다. 그와 같은 이유는 분무중심에서 반경방향의 거리가 작을 경우, 즉 분무의 충돌위치 근방에서는 분무가 운동에너지를 유지하고 있으므로 밀도비 증가로 인한 기체 저항이 증가하여 분무의 분열이 증가되어 SMD가 작아지는 경향을 나타내고 있으나, 분무중심에서

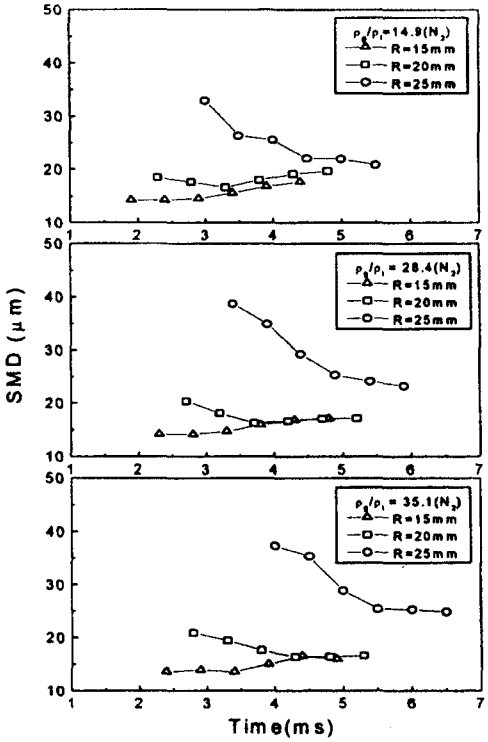

Fig. 9 SMD of impinging spray at different gas density ratios and radial positions on the flat plate in L=30mm

반경방향의 거리가 증가하면 분무가 충돌평판에 충돌한 후 증가한 거리의 위치까지 분무가 도달할 때 주위기체 밀도가 증가할수록 분무의 운동에너지가 주위기체로 전달되는 양이 증가하여 운동에너지가 감소되고, 앞선 분무를 후속되는 분무가 추월하면서 연료가 응집되어 SMD가 증가한다고 생각된다. Fig. 8의 (c)는 노즐팁에서 충돌판까지의 거리가 30mm이고 분무중심에서 반경방향의 거리가 15mm, Fig. 8의 (d)는 노즐팁에서 충돌판까지의 거리가 30mm이고 분무중심에서 반경방향의 거리가 20mm일 때의 결과로서 노즐팁에서 충돌판까지의 거리가 20mm일 때와 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 노즐팁에서 충돌판까지의 거리를 30mm로 일정하게 한 상태에서 밀도비 변화 및 충돌평판의 중심으로부터 반경방향 거리 변화에 따른 액적의 SMD변화를 시간에 대하여 나타낸 그래프이다. 기체밀도가 일정할 때 충돌

평판의 중심으로부터 반경방향 거리가 증가할수록 액적의 SMD가 증가함을 알 수 있다. 충돌평판의 중심으로부터 반경방향 거리가 작을 때는 앞선 분무를 후속되는 분무가 추월하여 액적이 응집되는 효과가 작지만 충돌평판의 중심으로부터 반경방향 거리가 증가함에 따라 앞선 분무와 후속되는 분무의 응집효과가 증가하여 액적의 SMD가 증가한다고 판단된다.

4. 결 론

아르곤과 질소를 이용하여 정적 분무실 내부의 주위기체 밀도를 변화시키고 노즐팁과 충돌평판 사이의 충돌길이를 변화시키면서 연료분사를 수행하여 충돌평판에 충돌한 분무의 거동 및 액적의 미립화 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정적분무실 내의 밀도가 높을수록, 충돌평판에 충돌한 후의 분무는 반경방향 발달길이(R)가 감소한다. 충돌평판이 노즐 근방에 위치할 때는 충돌분무높이(H)는 분무밀도에 따라 크게 변하지 않지만 충돌평판이 노즐에서 멀어짐에 따라 증가한다.

2. 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리가 증가할수록 충돌분무의 반경방향 발달길이(R) 및 분무높이(H)가 모두 증가한다.

3. 분무가 충돌평판에 충돌한 후 충돌 위치와 가까운 곳에서는 분무의 운동에너지가 유지되고 있으므로, 기체 밀도가 증가할수록 분무액적의 분열이 증가하여 분무액적의 SMD가 감소하지만, 충돌 위치와 먼 곳에서는 연료의 운동에너지가 감소되므로 기체밀도가 증가하면 분무액적이 응집되는 경향이 커져서 SMD가 증가한다.

4. 노즐팁과 충돌평판 사이의 거리가 증가하면 기체 저항이 커지므로 충돌한 후 액적의 SMD가 감소한다.

참고 문헌

1. A. P. Watkins and K. Park, "Assessment and Application of a New Spray Wall Impaction Model," Computers in Reciprocating Engines and Gas turbines, I.Mech.E, pp. 1~10, 1996.
2. S. Kato and S. Onishi, "New Shape of Diesel Engine by Impingement of Fuel Jet (OSKA-d)," SAE Paper 901618, 1990.
3. N. Katsura, M. Saito, J. Senda, and H. Fujimoto, "Characteristic of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," SAE Paper 890624, 1989.
4. C. Arcoumanis and J. C. Chang, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Transient Diesel Spray," SAE Paper 940678, 1994.
5. H. Hiroyasu and T. Kadota, "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber," SAE Paper 740715, 1974.