

디젤 충돌 분무의 발달 과정 및 내부 유동 특성

Internal Structure and Velocity Field of the Impinging Diesel Spray on the Wall

전 문 수*, 서 현 규, 박 성 욱, 이 창 식
M.S. Chon, S.K. Suh, S.W. Park, and C.S. Lee

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the internal structure of the impinged diesel spray at various experimental conditions. To examine the effect of various factors on the development of a diesel spray impinging on the wall, experiments were conducted at the various injection pressures, wall distances from the nozzle tip and angles of wall inclination. The PIV system consists of a double pulsed Nd:YAG laser was utilized to analyze the internal flow structure of impinged diesel sprays. The velocity fields from the PIV system were compared with the results measured by the phase Doppler particle analyzer(PDPA)system. The results show that internal flow pattern of the impinged spray was similar with the results from the PDPA system. The radial velocity of the impinged spray was increased with the increase in the injection pressure and near the nozzle-wall distance. The generation of vortex was also promoted with the increase in angles of wall inclination.

주요기술용어(Key Words): Impinged spray(충돌 분무), PIV(Particle image velocimetry, 입자영상유속계), phase Doppler particle analyzer(PDPA, 위상도플러 입자분석기)

1. 서 론

고압 분사 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성은 연료의 분무 특성에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 최근에는 엔진의 고속화 및 소형화 추세로 인하여 분사된 연료 분무와 연소실 벽면의 충돌이 불가피하며, 연료 분무와 벽면의 상호 작용은 연료 분무의 미립화 및 연료 공기 혼합기 형성에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나이다.

충돌 분무는 자유 분무와는 다른 분열 및 혼합 특성을 가지고 있다. 특히, 분무 내부 액적

들의 충돌 효과로 인한 분열과 튀어오름, 분무 발달 과정 중의 외부 공기의 유입 및 혼합 과정 등이 활발히 이루어지고 있다. 따라서 충돌 분무의 특성은 연료의 미립화, 액적의 분포도 및 연소 과정의 측면에서 매우 중요하게 취급되어 충돌 분무에 대한 이론적이고 실험적인 많은 연구가 수행되어져 왔다.

Ko와 Arai^{1,2)}는 다양한 분사 압력과 분위기 압력 등의 실험 조건에서 충돌 분무의 특성을 자유 분무와 비교·연구하여 충돌 벽면의 거리가 짧아질수록 분무의 공간 분포도가 증가한다고 보고하고, 이에 따른 경험식을 제시하였다.

Park 등³⁾은 충돌 분무에 분무 거동을 연료의 미립화 관점에서 분석하여 보고하였으며,

* 충주대학교 에너지시스템공학과

이 외에도 충돌 분무의 특성에 관한 많은 연구들이 보고되고 있다¹⁻⁶⁾.

최근에는 충돌 분무의 미립화 특성 및 주위 공기와의 혼합 과정에 근본적인 원인을 제공하는 분무 내부 및 주위 공기의 유동 특성을 직접 해석하려는 시도가 이루어지고 있으며, 어느정도 가시적인 결과가 보고되고 있다. Cha와 Kim⁷⁾은 충돌 분무의 내부 구조를 분류하고, 충돌 분무의 내부에서의 상호 작용에 대한 모델을 제안하였으며, Wu 등⁸⁾은 광원부인 레이저의 강도를 조절함으로써 PIV(particle image velocimetry)가 가지고 있는 속도 벡터 방향의 모호성을 해결할 수 있다고 보고하였다. Yang 등⁹⁾은 PIV법을 사용하여 연소실 내의 스웰과 스퀘시 유동의 속도 분포를 규명하였으며, 디젤 분무의 내부 구조와 연료 액적의 속도장을 PIV와 LIF(Laser Induced Fluorescence)법을 이용하여 Cao 등¹⁰⁾이 조사하였다.

그러나 기존의 분사 조건의 변화에 따른 충돌 분무의 발달 과정에 대한 거시적 연구로는 연료 분무의 충돌 현상이 분무 액적의 미립화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기가 어렵고, 입경이나 속도 측정과 같은 연료 미립화 특성에 대한 미시적 관점의 연구들도 연료 액적의 측정 위치나 실험 조건 등이 제한되어 있다.

따라서 본 연구에서는 PIV 시스템을 적용하여 고압 분사식 디젤 분사 시스템의 충돌 분무의 다양한 분사 조건 변화에 따른 내부 유동 특성을 정량적으로 해석하였으며, 충돌 후 액적의 속도 분포를 측정하여 분무 거동과 내부 유동 특성을 규명하였다. 또한 PIV 시스템에 의한 충돌 분무의 속도 측정 결과를 PDPA 시스템에 의한 실험 결과와 비교·분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

디젤 고압 분사 시스템으로부터 분사된 연료 분무의 발달 과정을 가시화 하고 충돌 액적의 속도 분포를 확인하기 위하여 다양한 충돌 조건하에서 실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 PIV 시스템의 개략도를 나타낸 것

이다. 본 연구에 사용된 PIV 시스템은 인젝터의 분사 신호와 영상 취득부를 동기화시켜주는 신호 동기부, 광원으로 사용되는 Nd:YAG 레이저 및 영상 취득을 위한 CCD 카메라로 구성된다. 연료 분사 시스템은 고압의 일정한 분사 압력을 형성하기 위한 압축 공기, 레귤레이터, 고압 펌프 및 커먼레일 등으로 구성된다.

PIV 시스템을 이용한 충돌 분무의 속도 측정을 위해 1,280(H)×1,024(V)의 해상도를 갖는 CCD 카메라를 이용하여 원시 화상을 취득하였으며, two-frame cross-correlation 기법을 이용하여 측정된 속도 벡터의 방향의 모호성을 제거하였다. 본 실험에 사용된 PIV 시스템의 구체적인 제원은 Table 1에 나타내었다.

한편, 연료 인젝터와 광원부 및 CCD 카메라를 동기시키기 위하여 디지털 신호 발생기를 사용하였으며, Fig. 2에 디지털 신호 발생기를 이용한 Nd:YAG 레이저의 Q-switch 신호, fire lamp 신호, 연료 인젝터의 분사 신호 및 CCD 카메라 신호의 동기화 과정을 나타내었다.

2.2 실험 방법

본 실험에 사용된 인젝터의 노즐 지름과 깊이는 각각 0.3, 0.8mm인 2.67의 형상비(L/D)를 갖는 커먼레일식 전자 제어 단공 인젝터이며, Fig. 3에 인젝터의 형상을 나타내었다.

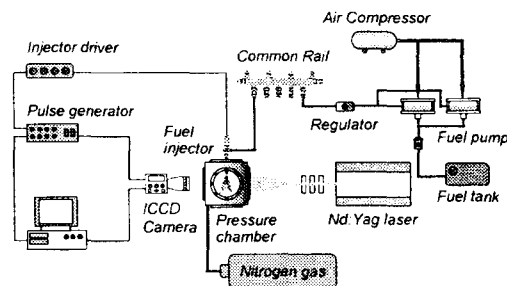


Fig. 1 Schematic of the PIV system

Table 1. Specification of the PIV system

Light source	Nd:YAG laser
Wave length	532nm
Laser power	270mJ (Max.)
Beam thickness	~1mm
CCD Resolution	1,280(H)×1,024(V)pixels

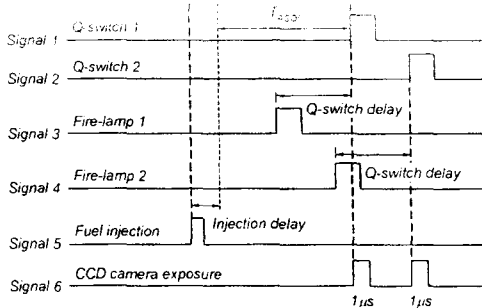


Fig. 2 Signals synchronization for experiment

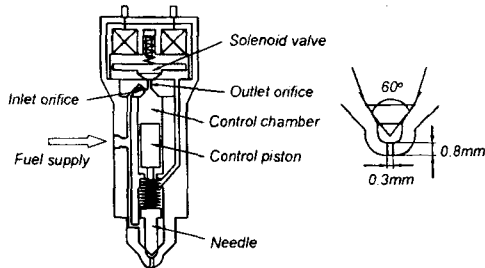
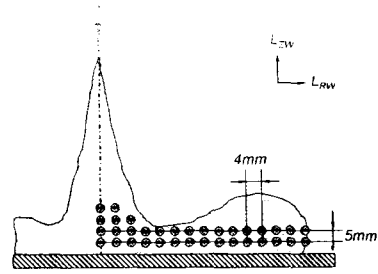
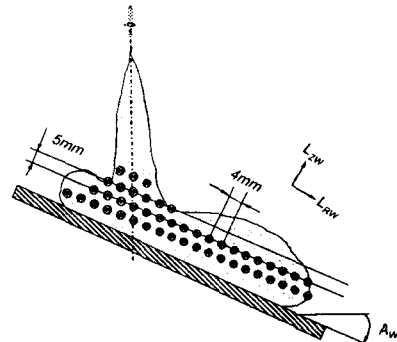


Fig. 3 Configuration of tested injector



(a) Impingement spray ($A_w=0^\circ$)



(b) Impingement spray ($A_w=30^\circ, 45^\circ$)

Fig. 4 Measurement points and coordinates system

Table 2. Experimental conditions

Injection system	Common-rail type
Number of holes	1
Hole diameter	3mm
Rail pressure	60, 80, 100MPa
Injection duration	1msec
Ambient pressure	0.1MPa
Ambient temperature	293K
Nozzle-wall distance	30, 50, 70mm
Inclined angle of the wall	0, 30, 45°

연료의 분사 압력과 인젝터와 벽 사이의 거리, 충돌 각도가 충돌 분무의 내부 유동 및 분무의 발달 과정에 미치는 영향 등을 분석하기 위하여 연료의 분사 압력은 60, 80 및 100MPa에서 실험을 수행하였으며, 충돌 거리는 30, 50, 70mm에서 충돌 각도 0, 30, 45°에서 실험을 수행하였다. 이 때 연료의 분사 기간은 1ms로 일정하게 유지하였다. 자세한 실험 조건을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

한편 PDPA 시스템을 이용하여 충돌 분무 액적의 입경 및 속도를 측정할 경우에는 고압 분사시 충돌한 액적이 Doppler신호를 방해하는 것을 고려하여 80MPa의 분사 압력의 경우에만 실험을 수행하였으며, PDPA 실험시의 측정점들을 다. Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

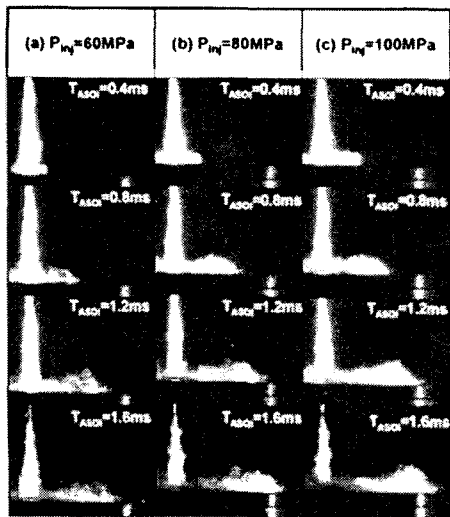
3.1 충돌 분무의 발달 과정

디젤 충돌 분무의 발달 과정과 분무 특성을 분석하기 위하여 충돌 거리가 동일한 경우, 분사 압력과 충돌 각도에 변화에 따른 디젤 분무의 발달 과정을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다.

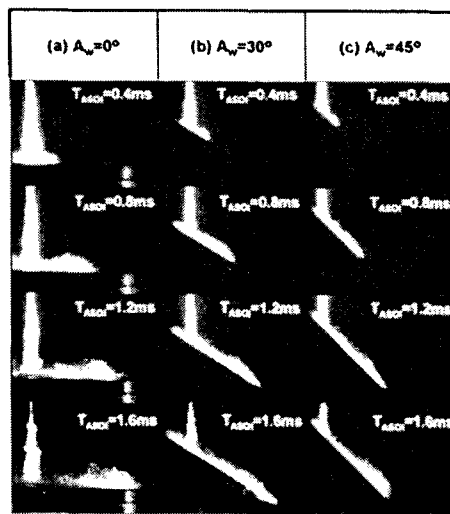
Fig. 5 (a)에 나타낸 바와 같이 분사 압력 변화에 따른 충돌 분무의 발달 과정은 분사 압력이 높을수록 연료 분무의 충돌이 빨리 일어나는 것을 알 수 있으며, 충돌 초반에는 분사 압력이 100MPa인 경우가 60MPa의 경우보다 반

경 방향의 도달 거리가 크게 나타났으나, 중순 후반으로 갈수록 분무의 도달 거리의 차이가 점점 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Fig.5 (b)는 충돌 벽면의 각도 변화에 따른 충돌 분무의 발달 과정을 나타낸 것이다. 연료 분무의 충돌 후 분무 형태는 충돌 각도가 클수록 인젝터 중앙에서 좌우로의 반경 방향의 거리가 상당히 차이 나고 있음을 알 수 있다. 또한 충돌 각도가 45°인 경우가 30°보다 우측 부



(a) $P_{amb}=0.1MPa, L_w=50mm, A_w=0^\circ$



(b) $P_{inj}=80MPa, P_{amb}=0.1MPa, L_w=50mm$

Fig. 5 Development behavior of impinged diesel sprays on the wall

분의 반경 방향이 보다 빨리 성장하나 좌측 반경 방향은 감소하는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 인젝터와 충돌면의 거리 변화에 따른 충돌 분무의 도달 거리와 높이를 정량화하여 나타낸 것이다. 분무 도달 거리의 경우 벽면 거리가 짧아질수록 증가하는 경향을 보였으나 그 차이는 크지 않았으며, 분무 높이의 경우 충돌 거리의 차이에 따라 큰 차이가 없이 거의 일정한 경향을 보였다.

Fig. 7에는 분사 압력과 충돌 벽면 각도 변화에 따른 분무 도달 거리와 분무 높이를 나타내었다. 동일한 충돌 거리에서 분사 압력이 분무 도달 거리에 미치는 영향을 비교한 Fig. 7의 (a)를 살펴보면, 분사 초기에는 시간의 경과에 따라 분무 도달 거리가 급격히 증가하는 경향을 보였으나 후반으로 갈수록 증가 경향이 감소하고 있으며, 분사 압력이 증가할수록 분무 도달거리가 큰 것으로 나타났다.

한편, 동일한 분사 압력에서 충돌 벽면의 각도에 따른 분무 도달 거리와 분무 높이는 Fig. 7의 (b)에 나타내었다. 경사 각도가 증가할수록 분무 도달 거리가 뚜렷이 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 분무의 충돌 경사 각도가 증가할수록 분무 액적의 운동량이 증가하고 벽면 마찰의 영향이 감소하여 반경 방향으로의 분무 성장이 빠르게 진행된 것으로 판단된다. 분무 높이의 경우에는 충돌 거리와 분사 압력의 영향과 동일하게 충돌 벽면의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

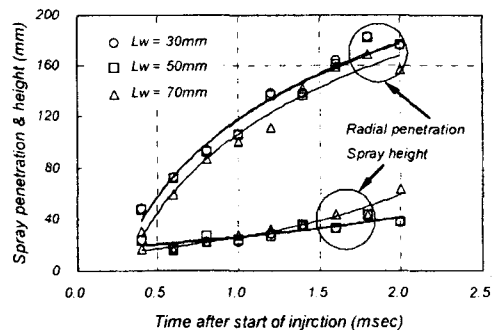
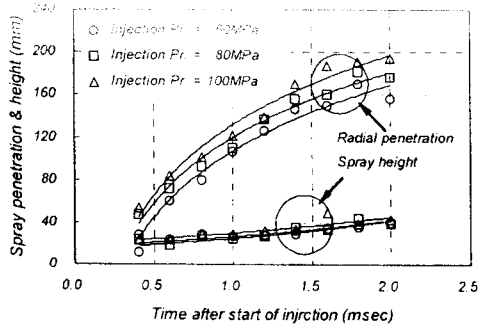
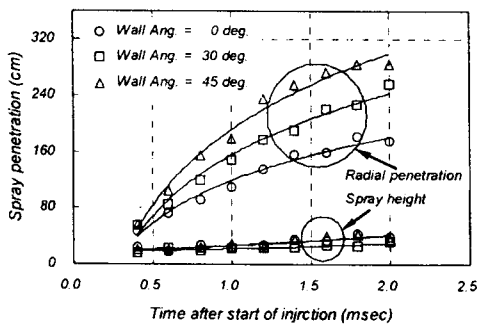


Fig. 6 Comparison of the radial penetration and height of the spray impinged on the wall according to the nozzle-wall distance ($P_{inj}=80MPa, P_{amb}=0.1MPa$)



(b) $P_{inj}=60, 80, 100\text{MPa}, A_w=0^\circ$



(b) $P_{inj}=80\text{MPa}, A_w=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$

Fig. 7 Comparison of the radial penetration and the height of the spray impinged on the wall ($L_w=50\text{mm}, P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

3.2 충돌 분무의 속도 분포

디젤 충돌 분무의 내부 발달 과정과 유동 특성을 조사하기 위하여 분사 압력, 충돌 거리 및 충돌 각도 등을 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 분사 시작 후 0.6msec 경과후의 분사 압력의 변화에 따른 충돌 분무 내부의 속도 분포를 나타낸 것으로 분무 영역 내의 점선은 속도 분포를 측정 한 영역이다. 선도에서 볼 수 있듯이 충돌 분무 내부의 속도는 분사 압력에 크게 영향을 받고 있으며, 반경 방향으로 진행할수록 속도의 크기가 증가함을 알 수 있다. 분사 압력이 60MPa의 경우 최대 속도가 측정 영역 내의 우측 부분에 분포하는 것을 알 수 있으며, 분사 압력이 증가할수록 최대 속도 분포 영역이 넓어지고 있으며, 속도 벡터의 크기도 증가하여 빠른 속도로 측정 영역 외부로 퍼

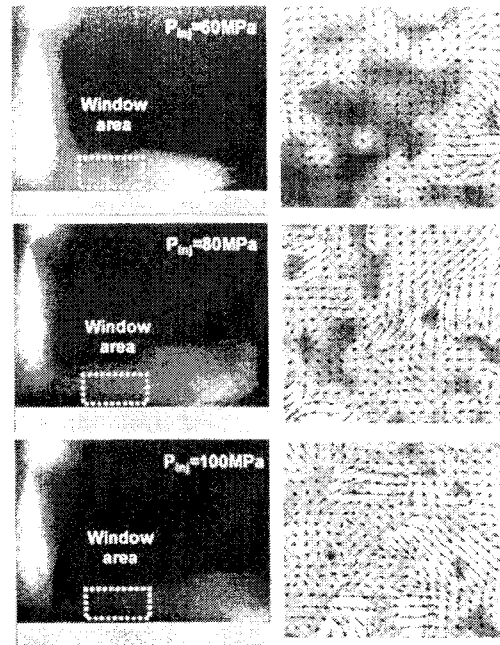


Fig. 8 Effect of injection pressure on the velocity field of the spray impinged on the wall ($L_w=30\text{mm}, A_w=0^\circ, T_{ASOI}=0.6\text{ms}$)

져나가는 것을 확인할 수 있다. 이것은 분사 압력이 증가함에 따라 분무 액적의 충돌에 의한 분무 액적의 운동량이 증가하여 충돌 분무 내부의 유동을 활성화 시키고 상대적으로 높은 속도의 분포를 가지는 것으로 판단된다.

충돌 거리가 분무의 발달 과정과 내부 유동에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다. 분사 후 0.6ms일때 충돌 분무 내부의 속도 분포는 충돌 거리가 30mm의 경우에는 비교적 활발한 혼합 유동 특성을 나타내고 있으나, 70mm의 경우에는 혼합 유동 특성이 상대적으로 발달하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 충돌 거리가 짧아질수록 충돌에 의한 분무 내부의 운동량이 커져 동일한 분사 기간에 분무 내부의 높은 속도 벡터가 형성되어 분무 내부의 혼합 유동 특성 발달에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 충돌 분무 내부의 혼합 유동 특성의 발달로 분무 내부에서 강한 와류가 형성되는 것을 알 수 있으며, 충돌 거리가 가까울수록 강한 와류가 형성됨으로써 액적

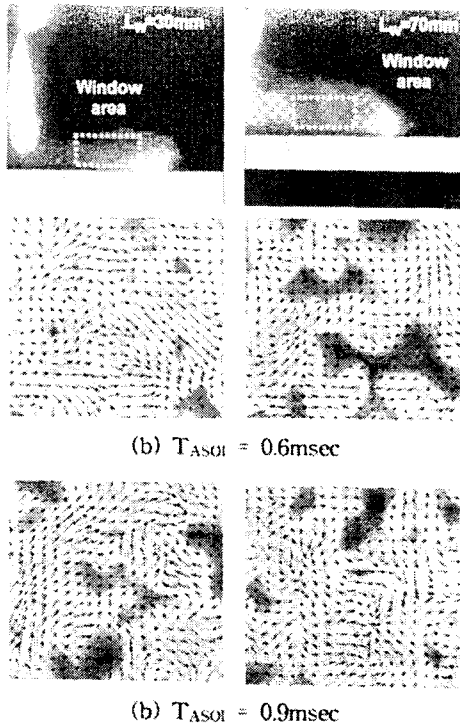


Fig. 9 Effect of nozzle-wall distance on the velocity field of the spray impinging on the wall ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $A_w=0^\circ$)

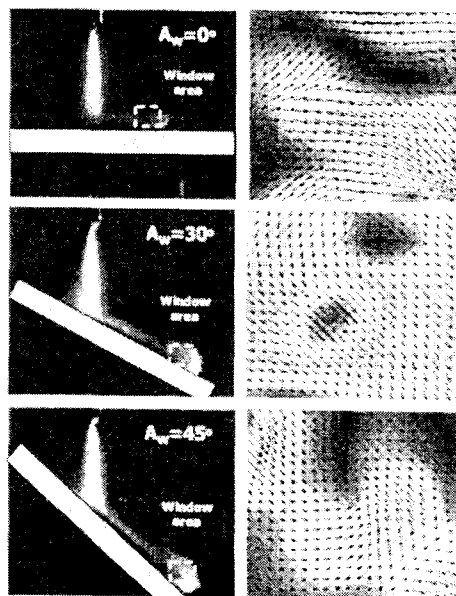


Fig. 10 Effect of angle of wall inclination on the velocity field of the spray impinging on the wall ($P_{inj}=80\text{MPa}$, $L_w=30\text{mm}$, $T_{ASOI}=0.6\text{ms}$)

의 분열과 섞임으로, 외부 공기의 유입과 혼합 과정 등이 충돌면 위에서 활발히 이루어진다고 판단된다.

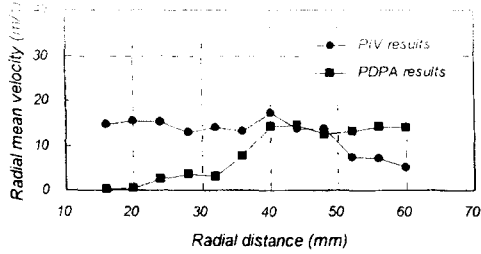
충돌 벽면의 경사 변화가 충돌 분무 내부의 속도 분포 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 분무 말단의 속도 분포를 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 충돌 각도가 0° 인 경우에 충돌 벽면과의 마찰에 의한 영향이 커서 분무 액적이 퍼져나가는 정도가 다른 두 경우에 비하여 약하게 나타났다. 반면에 충돌 각도가 30° 인 경우, 충돌의 효과가 작아져 반경 방향 유동이 강해지고 충돌 벽면에서 반경 방향으로 분무 액적들이 0° 인 경우에 비하여 빠르게 확산되는 것으로 나타났다. 충돌 각도가 45° 인 경우는 확산 정도가 더욱 강해져 속도가 높아 순간적으로 액적의 밀도가 낮아지는 현상이 발생하여 유동이 더 퍼져 나가지 못하고 속도가 둔화되어 와류를 형성한다고 판단된다. 이러한 와류가 형성됨으로써 충돌 분무 액적의 분산과 이동이 촉진되고, 분무 내부로의 주위 공기 유입과 혼합을 유발하는 원인을 제공하고 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

3.3 충돌 분무의 미립화 특성

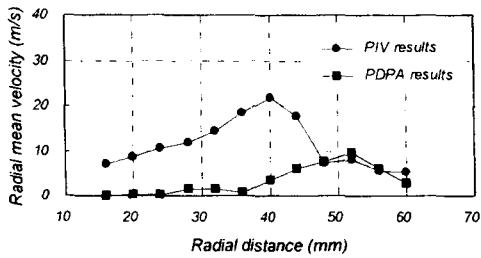
충돌 분무의 미립화 특성을 확인하기 위하여 PDPA 실험 장치를 이용하여 반경 방향의 속도를 측정하였으며, 그 결과를 PIV에 의한 측정 결과와 비교하였다.

Fig. 11은 인젝터와 충돌 벽면사이의 거리가 30mm인 경우의 충돌 벽면으로부터 5mm와 10mm지점에서의 반경 방향 속도를 비교한 것이다.

선도에서 알 수 있듯이 두 실험 결과에 의한 최고 속도는 거의 비슷한 것으로 나타났으나, 속도의 증감 경향은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 충돌 벽면으로부터 5mm지점의 반경 방향의 최대 속도는 분무의 중심 지점인 반경 방향 거리 40mm지점에 위치하는 것으로 나타났다. 이는 벽면 충돌시 축 방향 운동량이 반경 방향의 운동량으로 변화되어 충돌 분무의 중간 지점까지 액적의 반경 방향 속도가 증가되며, 이후 벽면과 주위 공기의 마찰 등으로 인하여 속도 및 분무 도달 거리가 감소하는 것으로 생각된다.

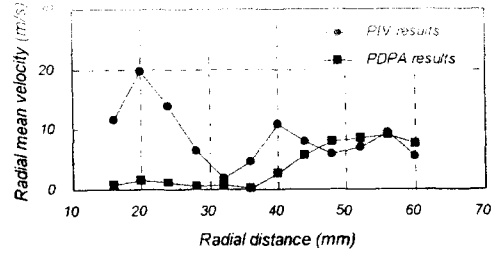


(a) $L_{wz} = 5\text{mm}$

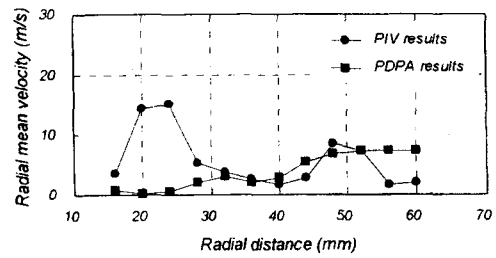


(b) $L_{wz} = 10\text{mm}$

Fig. 11 Comparison of the radial velocity result according to the distance from the wall
($P_{inj}=80\text{MPa}$, $A_w=0^\circ$, $L_w=30\text{mm}$)



(a) $L_w = 50\text{mm}$



(b) $L_{wz} = 10\text{mm}$

Fig. 12 Comparison of the radial velocity result according to the nozzle-distance
($P_{inj}=80\text{MPa}$, $A_w=0^\circ$, $L_w=30\text{mm}$)

Fig. 12는 인젝터와 충돌 벽면의 거리에 변화에 따른 반경 방향 속도 분포를 비교하여 나타낸 것으로 충돌 벽면으로부터 10mm 지점에서의 속도 측정 결과이다. 충돌 벽면 거리의 변화가 반경 방향 속도에 미치는 영향은 벽면 거리가 짧을수록 반경 방향의 최고 속도에 도달하는 거리가 짧은 것으로 나타났다. 이것은 충돌 거리가 짧을수록 동일한 분사 압력에서 충돌의 효과가 크게 작용하여 분무의 중심으로부터 반경 방향으로 빠르게 퍼져 나가는 액적들의 운동 에너지가 높아 분무의 유동을 이끌어가고, 액적의 미립화가 진행되어 운동량이 감소하여 속도가 감소하는 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 반경 방향의 속도 측정값이 다소 다른 경향을 나타내고 있다. 이는 PIV에 의한 측정 결과는 시간 평균 측정값인 PDPA에 의한 실험의 결과와는 달리 동일한 충돌 분무에 대한 측정 결과이기 때문인 것으로 판단된다. 또한 PDPA에 의한 측정 결과의 경우 측정 체적 내에 부유하는 액적들의 영향으로 Doppler 신호가 간섭을 받아 반경 방향 속도의 값이 PIV에 의한 측정 결과보다 상대적으로 작은 값을 갖는 것으로 생각된다.

4. 결론

고압 디젤 인젝터를 이용한 충돌 분무의 분사 압력과 충돌 거리, 충돌 각도 등의 변화에 따른 분무 발달 과정과 내부 유동의 특성을 PIV 및 PDPA를 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 충돌 분무의 분무 도달 거리는 분사 압력이 높고, 인젝터와 충돌 벽면사이의 거리가 짧으며, 충돌 각도가 클수록 커지는 것으로 나타났으나 분무 높이의 경우에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (2) 분사 압력이 클수록 충돌 벽면과 분무 액적의 충돌의 효과가 증가하여 액적의 속도와 와류가 충돌 분무 내부의 혼합 특성을 활성화 시키고 상대적으로 높은 속도의 분포를 가지는 것으로 나타났다. 충돌 거리가 가까울수록 충돌 벽면과 분무의 충돌이 빨리 일어나 속도장의 발달에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (3) PIV와 PDPA 실험을 통하여 반경 방향 속

로 분포 비교 결과, 락된 중합사 축 방향 운동량이 반경 방향의 운동량으로 변화되어 충돌 분무의 중간 지점까지 액적의 반경 방향 속도가 증가되어 분무의 중심 지점에서 최대 속도가 나타났으며, 충돌 벽면 거리가 짧을수록 반경 방향의 최고속도에 도달하는 거리가 짧은 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2004학년도 충주대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) K. Ko and M. Arai, "The Characteristics of Postimpingement Diesel Spray, Part 1: Penetration and Volume", *Atomization and Sprays*, Vol. 12, pp. 403-417, 2002.
- 2) K. Ko and M. Arai, "The Characteristics of Postimpingement Diesel Spray, Part 2: Empirical Equation of Penetration", *Atomization and Sprays*, Vol. 12, pp. 419-430, 2002.
- 3) S. W. Park, M. S. Chon, S. H. Seo, and C. S. Lee, "Macroscopic Behaviors and Atomization Characteristics of a Diesel Spray Impinged on the Wall", *The 8th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia*, pp. 127-134, 2003.
- 4) Daichin and S. J. Lee, "Evaluation of Recursive PIV Algorithm with Correlation Based Correction Method using Various Flow Images", *KSME International Journal*, Vol. 17, No.3, pp.408-421, 2003.
- 5) P. O. Calendini, T. Duverger, A. Lecerf, and M. Trinite, "In-cylinder Velocity Measurements with Stereoscopic Particle Image Velocity in a SI Engine", *SAE Paper 2000-01-1798*, 2000.
- 6) A. Nauwerck, J. Gindele, U. Spicher, H. Rosskamp, and G. Landwehr, "Investigation of the Transient In-cylinder Flow inside a Two Stroke Engine with Particle Image Velocimetry", *SAE Paper 2000-01-0902*, 2000.
- 7) K. J. Cha and D. J. Kim, "Study on Internal Structure and Micro Behavior of an Impinging Diesel Fuel Spray", *KSME International Journal*, Vol. 23, No.4, pp.470-478, 1999.
- 8) Z. Wu, Z. Huang, and L. Hao, "An Image-shifting Technique based on Gray-scale Classification for Particle Image Velocimetry", *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 567-575, 2002.
- 9) Y. Yang, C. Liu, J. Liu, and H. Zhao, "Study on Spatial Characteristics of the In-cylinder Flow Field in an I.C. Engine using PIV", *SAE Paper 982632*, 1998.
- 10) Z. M. Cao, K. Nishino, S. Mizuno, and K. Torii, "PIV Measurement of Internal Structure of Diesel Fuel Spray", *Experimental in Fluids*, pp. 221-219, 2000.