

# 디지털 이미지 법을 이용한 가솔린 분무의 유동 특성에 관한 연구

## A Study on the Flow Characteristics of Gasoline Spray using Digital Image Processing

이 창 식\*, 이 기 형\*, 전 문 수\*\*, 김 영 호\*\*\*  
C. S. Lee, K. H. Lee, M. S. Chon, Y. H. Kim

### ABSTRACT

This paper describes the fuel spray characteristics of gasoline port injectors such as the breakup procedures of liquid fuel, breakup and extinction behaviors of fuel spray at nozzle tip, time history of SMD and velocity distribution of fuel spray in the direction of fuel stream. Pintle-type gasoline fuel injector was used to analyze mentioned spray characteristics. In order to visualize the fuel spray behaviors and to measure the droplet mean diameter and velocities of spray droplets, the Schlieren method, digital image processing and auto-correlation PIV were applied in this study. In addition, the spray characteristics according to the variation of time were considered. The results of fuel spray show that the liquid sheet breakup starts at 10 mm downstream of nozzle tip and the droplet formation becomes dominant at 20 mm downstream actively. The flying time is approximately 4msec between 50 mm and 80 mm down the nozzle tip. Also, SMD of fuel spray, the number of droplets and fuel velocity distribution at each point of downstream are discussed.

주요기술용어 : Port Injection(포트 분사), Spray Characteristics(분무 특성), Particle Image Velocimetry(입자 영상 속도계), Auto-Correlation(자기 상관)

### 1. 서 론

전자 제어 가솔린 기관의 연료 분무 특성은

기관 내의 연소 및 배출 특성에 영향을 미치는 주된 인자로 작용하고 있으며, 특히 연료 분무의 분사각, 관통도, 분무 미립의 입경 등과 같은 분무 특성은 혼합기 형성과 엔진의 성능에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나이다. 또한 유해 배기 가스의 생성과 연료 소비 저감을 위해서는

\* 정회원, 한양대학교 기계공학부

\*\* 정회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* (주)현대자동차

분사량의 정밀한 제어와 응답 성능 그리고 연료 분무의 유동 형태 및 공기와의 혼합 과정 등과 같은 물리적 현상을 이해하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이러한 연료 분무의 혼합기 형성 과정을 지배하는 분무의 분사각, 관통도 등과 같은 거시적 현상과 분무 미립의 지름, 속도, 입경 분포 등과 같은 미시적 현상의 해석은 연소 및 배출물 특성을 개선시키는 중요한 인자로 취급되고 있다. 일반적으로 연료의 분무 특성은 연료 분사량의 정밀 제어, 연료의 무화 과정, 분무의 관통도, 흡기 밸브 및 포트 내에 부착되는 액막의 거동, 액적의 증발 과정, 흡입 포트 및 실린더 내에서 분무의 유동과 가시화 등에 관한 다양한 관점에서 이론 및 실험적 접근이 이루어지고 있으며, 이들 연구를 포함한 많은 연구들이 주로 고속 촬영 및 이에 관련된 분무 현상의 물리적 해석에 주안을 둔 연구와 분무 모델링에 의한 수치 해석적 방법이 대부분이다.<sup>1-4)</sup> 그러나 분무는 분위기 조건 및 연료의 물성, 노즐 또는 인젝터의 구조에 따라서 그 특성이 크게 영향을 받게되며, 이론적 모델링 또한 많은 가정하에 이루어지므로 실험과 부합되는 연구 결과를 기대하기 어려운 실정이다.

이와 같은 분무 유동은 흡기관 및 실린더 내에서 2상 유동의 형태로 난류 유동을 수반하며, 분무 현상 또한 연료 액적군으로 이루어져 있으므로 이들 특성들의 시간 경과에 따른 분열, 충돌, 증발 현상 등이 복합적으로 일어나기 때문에 실험적 방법에 의한 연구가 비교적 활발하게 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 핀틀형 기술린 연료 인젝터로부터 분사되는 연료의 분무 거동을 가시화하고, 디지털 이미지 처리 기법으로 연료 분무 입경을 측정하여 분무의 미립화 특성을 분석하였다. 또한 자기 상관 PIV법을 이용하여 분무 미립의 속도를 측정하여 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 유동 특성을 구하여 연료의 무화 과정, 분무 도달 거리와 분무 입경과의 관계 등을 규명하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

기술린 기관의 분사 노즐로부터 분사되는 연료의 분무 특성을 실험적으로 분석하기 위한 연료 분사 시스템 및 분무 측정 장치를 Fig.1과 같이 구성하였다. 실험장치는 광원과 CCD카메라, 4채널 실시간 제어 시스템 및 이미지 보드, 제어 보드를 갖는 컴퓨터로 구성된 입자 운동 해석 장치 (particle motion analysis system, V-tek, model MX-II)를 사용하였다. 또한 인젝터의 솔레노이드를 구동하는 분사 제어 시스템과 인젝터를 이송시키기 위하여 최소 10 $\mu$ m까지 제어가 가능한 3축 이송 장치를 사용하였다.

분무 입자의 평균 입경과 평균 속도 등과 같은 미세한 거동은 105mm 렌즈를 직접 CCD 카메라에 연결한 후 연료 인젝터가 장착된 미세 거리 이송 장치를 측정점으로 이동하면서 원시 화상을 취득하였으며, 분사각, 분사 거리 등과 같은 거시 분무 화상의 경우는 200mm의 직경을 가지는 필드 렌즈(field lens)를 사용하여 스틸 카메라(Nikon, FM2)로 직접 촬영하였다. 실험에 사용한 인젝터는 핀틀형이며, 이 때 연료의 분사 압력은 0.3MPa, 분사 기간은 5msec로 일정하게 유지시켰다. 또한 실시간 제어 장치를 이용하여 분사 시작 후 광원에 공급되는 고전압 신호의

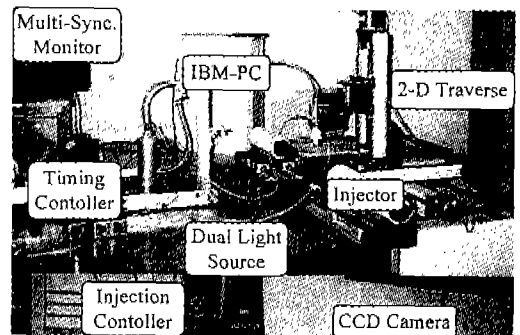


Fig.1 Photograph of gasoline fuel injection system and PMAS

공급 시간을 조절하여 시간 변화에 따른 분무 입자의 평균 입경, 분무 입자 공간 분포 및 시간 분포를 동시에 분석할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다.

## 2.2 분무 입경 및 속도의 측정

분무의 입경은 디지털 이미지 처리를 통하여 평균 입경(SMD)을 구하였다.<sup>5)</sup> 또한 분무 입자의 속도의 경우는 이미지 처리에 의한 자기 상관 PIV법을 이용하여 측정하였으며, 그 과정은 다음과 같다.<sup>6-7)</sup> 먼저 분무 유동장에 시간 간격이 짧은 2개의 연속된 광 신호를 주고 이들에 의하여 생기는 입자 쌍으로 이루어진 원시 화상을 얻는다. 이 원시 화상에 존재하는 입자 쌍들의 평균 이동 변위는 식 (1)에 나타난 바와 같이 자기 상관 함수를 이용하여 직접 계산할 수 있다.

$$R(s) = \int_{spot} I(X) \cdot I(X+s) \cdot dX \quad (1)$$

여기서  $R(s)$ ,  $s$ 는 각각 자기 상관 값과 2차원 변위 벡터이며  $I(X)$ 는 원시 화상의 광의 분포이다. 이와 같은 자기 상관 함수는 이중 또는 다중 노출에 의하여 얻어진 화상에서 속도 계산시 자주 사용되는 기법으로 알려져 있으나 직접 계산할 경우 시간이 많이 소요되므로 일반적으로 식 (2)와 같이 Fourier 변환에 의하여 스펙트럼을 구한 후 역 Fourier 변환을 하여 상관 함수를 구하는 방식이 많이 사용된다.

$$R(s) = FT^{-1}[I_f(x_f)] = Const \cdot$$

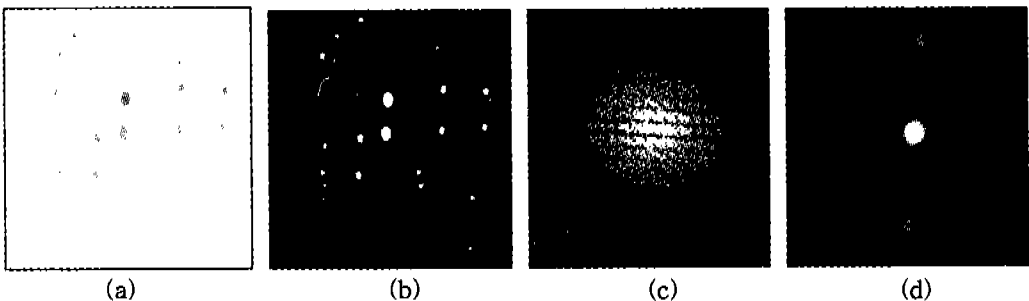
$$\int I(X+s) \cdot dX \quad (2)$$

그러나 본 연구에서와 같이 역 Fourier 변환에 의한 자기 상관 함수의 계산의 경우 변환 영역이 위상차가 존재하지 않는 공간 영역이고, 변환 함수 역시 연속 함수가 아닌 이산화된 함수이므로 식 (3)에 나타난 것과 같은 이산 Fourier 변환식을 사용하여 식 (2)에 나타난 역 Fourier 변환을 계산할 수 있다.

$$G = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} F(m, n) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi b m}{M}\right) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi a n}{N}\right) \quad (3)$$

여기서  $F$ 와  $G$ 는 각각 변환 전후의 광의 강도이며,  $M$ 과  $N$ 은 각각 가로와 세로 방향의 화소 수(pixel number)이다. 따라서 원시 화상에 나타난 입자 쌍들의 자기 상관 값은 Fourier 변환을 2회 연속하여 수행함으로써 쉽게 계산할 수 있으며, Fig.2에 실제 분무 유동장에 적용한 자기 상관 함수의 처리 과정을 나타내었다.

Fig.2(d)와 같은 원시 화상에 대한 자기 상관 값의 공간 분포는 Fig.3과 같이 나타나며 변환 영역의 중심에 나타나는  $s=0$ 인 자기 상관 점(self-correlation peak,  $R_p$ )과 두 번째 입자들에 대한 첫 번째 입자들의 상관 값인 양의 변위 상관 점(positive displacement peak)을 구하여 변환



(a : raw image, b : thresholded and negated image, c : fringe pattern from 1st FFT, d : correlation pattern from 2nd FFT)

Fig.2 Images processing results of auto-correlation PIV

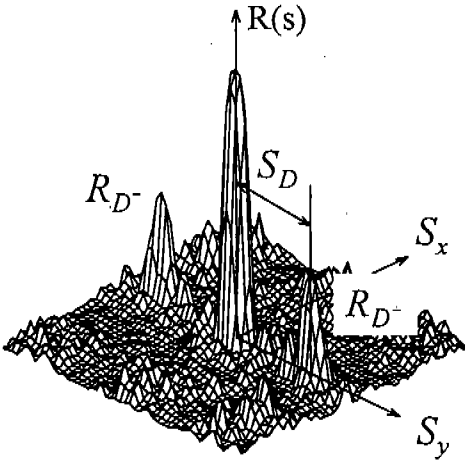


Fig.3 Example of correlation function

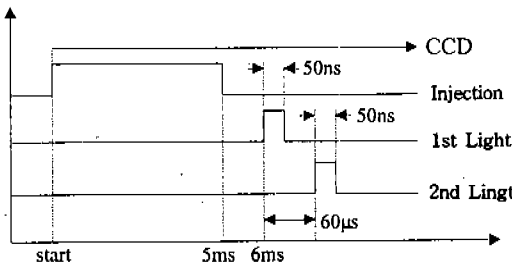


Fig.4 Time chart for injection and image capture

영역에서 존재하는 입자 쌍들의 평균 이동 변위를 구하고 조사된 펄스 광의 시간 간격으로 나누면 속도를 계산 할 수 있다.

분무 입경 및 속도의 측정은 분무 중심 축에서 분사 노즐로부터 50mm인 거리인 지점과 분사 목표 지점인 80mm인 지점에서 측정하여 분무의 입경 및 속도, 도달 시간 등을 구하였으며, Fig.4에 원시 화상 취득시의 광원부와 CCD 카메라, 그리고 연료 인젝터의 구동 시간과의 관계를 도시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분사 연료의 분열 거동

가솔린 연료 인젝터(핀틀형 노즐) 분무의 축 방향의 거리를 변화시켜 가면서 관찰한 분열 거

동을 Fig.5에 나타내었다. 이 때의 측정 단면의 크기는 3.2mm(H)×4mm(V)이고, 화상은 분사 시작 후 6msec에서 취득하였다.

핀틀형 연료 인젝터로부터 분사되는 액체 연료의 분열 거동을 살펴보면 축 방향 거리 L=0로부터 연료가 액막의 형태로 분사되어 L=10mm 지점까지 분열이 이루어지는 것으로 나타났다. 액막의 분열 기구에는 친공에 의한 분열 기구와 공기 역학적으로 발생한 파에 의한 분열 기구가 있는데 여기서는 두 가지의 분열 기구가 동시에 나타나고 있다. 노즐 출구 부근의 액막 표면에서는 액체 연료 내부에 존재하는 난류 성분 등과 같은 내부 작용력과 연료의 분사 속도에 의해 형성되는 외부 공기와의 상대 속도 차이로 생기는 전단 응력과 같은 외부 작용력으로 인하여 파형이 형성되고 파동의 불안정성에 의하여 분열 현상이 진행된다. 또한 L=3mm 지점에서는 액막 내부에 친공이 발생하여 이 작은 친공들이 표면 장력에 의해 커지면서 인접한 친공과 합쳐져 L=7mm 지점에서 그물막의 형태를 이루고 있다. 따라서 핀틀형 노즐의 초기 분사에 형성된 표면 파형이 액막을 액주로 분열 시키기 전에 친공으로 인하여 액사들로 이루어진 그물막이 형성된 후 액적으로 분열되고 있으며 L=10mm인 지점에서 액적의 생성이 진행되어 L=20mm 지점에서 액적이 활발하게 생성되고 있는 것으로 나타났다.

#### 3.2 분무 형성 과정

Fig.6에는 노즐 팁에서 분사 초기의 분무의 형성 과정을 시간에 따라 비교하여 나타내었다. 인젝터에서 분사되는 연료 분무는 분사 신호를 준 후 1.8msec 이후에서 관측되었다. 이러한 현상은 인젝터의 솔레노이드에 자기장이 형성되어 니들이 열려서 연료가 분사되기 시작하는데 필요한 기계적 지연 시간이 약 1.8msec 정도 소요됨을 나타내는 것이다. 이후의 분무 형성은 과도기적인 상태로 하류 및 반경 방향으로 급격히 진행되고 있으며, 2.4msec를 지나면서 점차로 안정된 분무가 형성되고 있는 것으로 나타났다. 또한 초기 분무의 형태가 안정을 이루지 못하고 시간의 진행에 따른 변화가 심하게 나타나 분사 초기에는 연료 유량의 변동이 매우 클 것으로 예측된다.

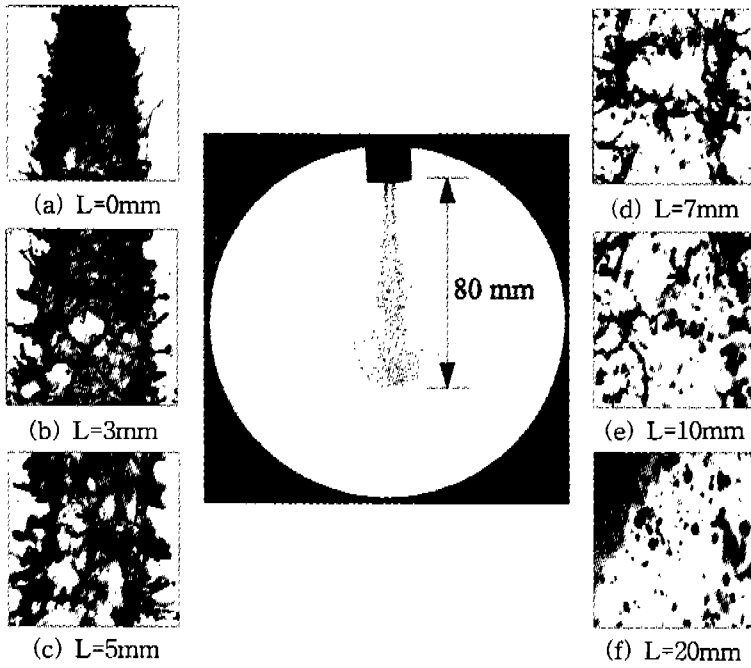


Fig.5 Breakup procedures of the spray from the Pintle type injector

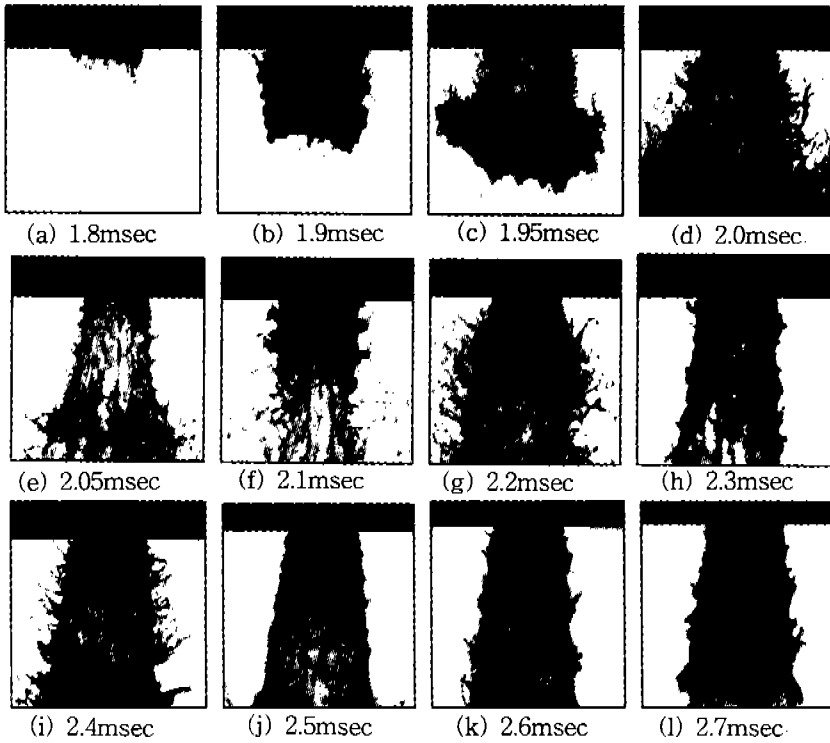


Fig.6 Time history of initial spray developments at nozzle tip

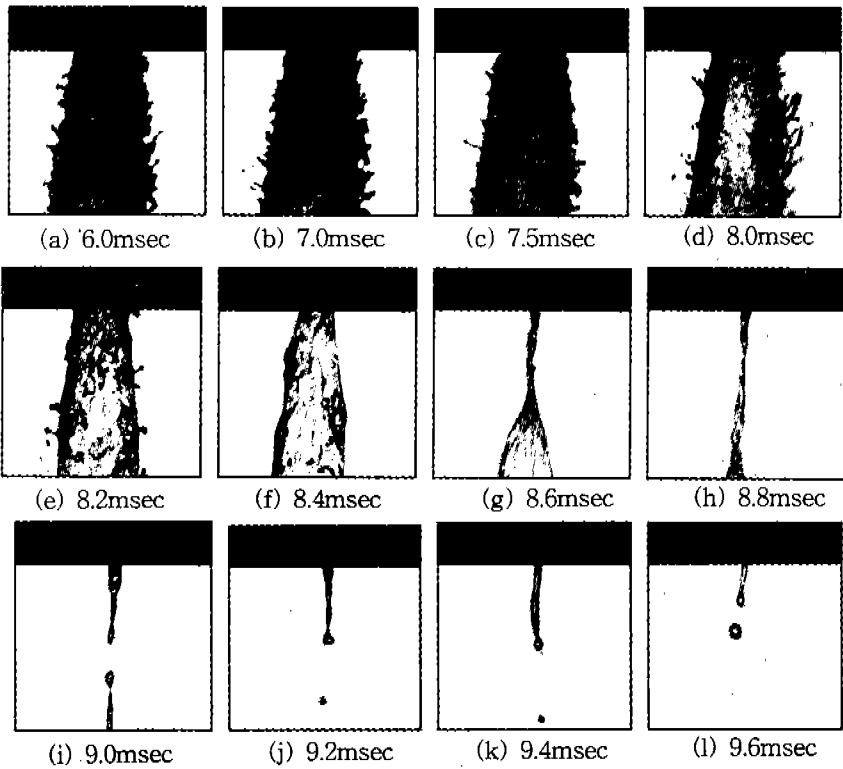


Fig.7 Time history of spray extinction at nozzle tip

### 3.3 분무 소멸 과정

한편 분무의 소멸 과정은 Fig.7에 도시하였다. 분사 말기에는 분사 경과 시간이 7.5msec 이후에서부터 분무 형태가 점차로 불안정해지는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 니들 밸브가 닫히기 시작하여 유량이 감소하고, 분사각이 작아져서 연료 분사가 정지될 때 까지 분무 흐름의 과도 현상이 수반됨을 의미한다.

### 3.4 분무의 평균 입경

Fig.8에는 본 실험에서 측정 영역 내에 존재하는 입자수와 평균 입경(SMD) 및 표준 편차와의 관계를 도시하였다. 평균 입경 및 표준 편차의 변화는 입자수의 증가에 따라 점차로 그 폭이 감소하여, 입자수가 약 800 정도 되었을 때 표준 편차는 2.5가 되고 평균 입경 또한 대체적으로 안정되는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 실험에서는 입자수가 800개 이상이 되

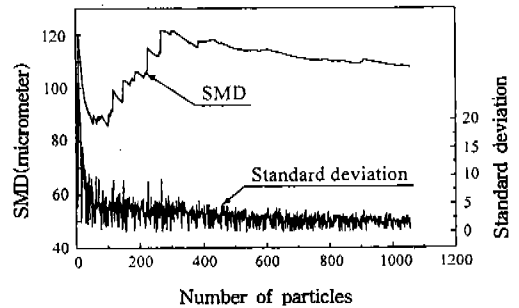


Fig.8 SMD and standard deviation with particle numbers

는 50개 화상의 이미지 처리를 통하여 평균 입경을 구하였다.

Fig.9는 노즐 팁으로부터 하류 방향으로 80mm 지점인 곳의 분무 중심에서 시간 경과에 따른 분무 입자의 평균 직경과 측정 영역 내에 존재하는 분무 입자수 변화를 나타낸 것이다.

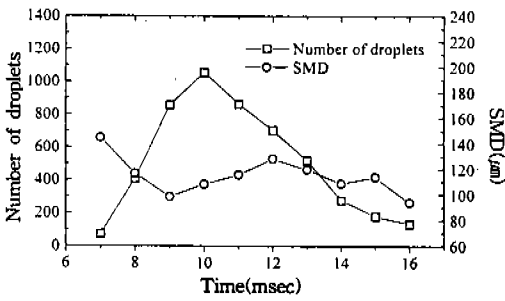


Fig. 9 Time history of spray arrival at 80mm downstream

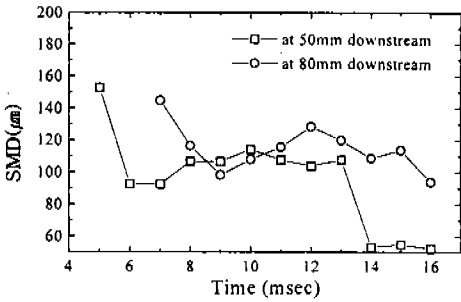


Fig. 10 Time history of SMD at 50mm and 80mm downstream

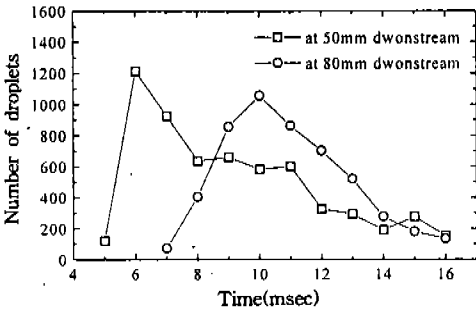


Fig. 11 Time history of SMD at 50mm and 80mm downstream

분무 입자는 분사 후 7msec에서부터 나타나기 시작하며, 입자수는 시간이 경과할수록 증가하나 10msec에서 최대값을 갖고, 이후에는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 분무 입자의 평균 직경은 초기에는 큰 값을 가지나 점차 감소하다가 증가하는 경향을 갖는 것으로 나타나고 있으나 대체적으로 110 $\mu\text{m}$  내외의 값을 갖는 것으로

측정되었다. 또한 가장 많은 분무 입자 수를 갖는 10msec에서는 평균 입경이 108 $\mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 이상의 결과는 분무 액적군의 선두에서는 상대적으로 적은 수의 입자가 비교적 큰 직경을 갖고 있으며 시간이 경과됨에 따라서 그 수는 급격히 증가하고 입자의 평균 직경은 작아지고 있어 액적군의 중심부에서는 분열이 활발하게 잘 이루어지고 있음을 의미한다. 그리고 분사 기간은 5msec로 분사하였으나 분사 목표 지점에 입자가 도달하는 시간은 7msec에서 16msec인 것으로 나타나 분무의 하류로 내려갈수록 분무를 이루고 있는 시간의 폭이 넓어지고 있음을 알 수 있다.

한편 Fig.10과 Fig.11에는 분무 중심 축에서 상류와 하류 사이의 분무 형태의 변화를 알아보기 위하여 50mm 지점과 분사 목표 지점인 80mm 지점의 분무 중심 축에서 Sauter 평균 직경과 입자 수의 변화를 나타내었다. 두 지점 모두 입자군의 선두에서는 소량의 큰 입자가 관측되었으나 이후 입자수는 급격히 증가하고 평균 직경은 감소하는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 입자군의 선두에 존재하는 큰 입자들은 분무 선단의 공기와 부딪혀 급격한 분열이 이루어지고 있으며, 따라서 입자수는 증가하고 연료의 평균 입경은 감소하는 것으로 생각된다. 또한 두 지점에서

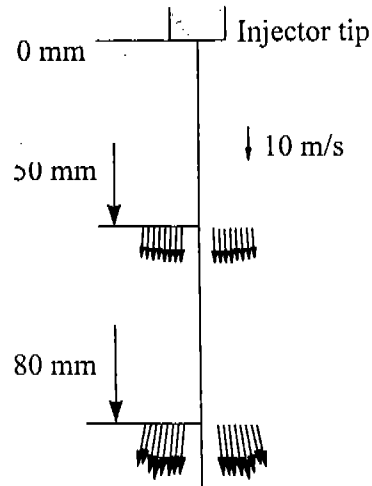


Fig. 12 Velocity distribution at 50 and 80mm downstream

가장 많은 입자수를 갖는 시간이 각각 6msec, 10msec로 나타나 두 지점 사이의 연료 입자군의 비행 시간은 약 4msec로 추정되었다.

### 3.5 분무 속도

Fig.12에는 하류 방향으로 50mm와 80mm인 지점에서 자기 상관 PIV에 의해 측정된 속도를 나타내었다. 분무 입자의 속도는 Fig.4에 도시한 바와 같이 두 지점 모두 분사 후 8msec에서 측정하였다.

분무 입자의 속도는 분무 중심 축에서 외곽 방향으로 CCD 카메라를 1mm씩 외부 방향으로 이송하면서 측정하였으며, 속도 측정 면적은 이전 면적의 약 70%정도 중첩되었다. 속도 측정 결과 하류 방향으로 내려갈 수록 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 분무 입자의 속도는 하류보다는 상류에서 빠르게 나타나지만 본 실험에서와 같이 하류에서의 속도가 빠르게 나타나는 이유는 Fig.10에 나타낸 바와 같이 분사 시작 후 8msec에서 측정 지점이 50mm인 지점에서는 분무 입자군의 후류가 지나고 있고, 80mm인 지점에서는 입자군의 선단이 지나고 있기 때문에 50mm인 지점에서 속도가 낮게 측정되는 것으로 판단된다. 한편 반경 방향의 속도 분포는 분무 중심에서 외곽 방향으로 나아갈수록 속도는 감소하는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 이는 분무 외곽에서 일어나는 주위 공기와의 마찰에 의해서 분무 입자의 속도가 감소하고 있는 것으로 사료되며, 속도의 방향도 조금씩 외부로 향하고 있음을 알 수 있다. 또한 이 때 두 지점에서 측정된 분무 입자의 최대 속도와 최소 속도는 각각 16.72m/s와 10.56m/s로 나타났다.

## 4. 결 론

흡기 포트 분사 방식의 인젝터의 분무 특성을 해석하기 위하여 디지털 이미지 처리법과 자기 상관 PIV법을 적용하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 거시 촬영 결과 분무는 주어진 조건에서 노즐 선단으로부터 하류 방향으로 약 3~

7mm지점 사이에서 분열이 시작되고, 10mm 지점에서 액적 생성이 진행되며, 20mm지점에서 액적이 활발하게 생성되고 있는 것으로 관찰되었다.

- 2) 분사 목표 지점인 80mm에서 분무 입자는 분사 후 7msec에서부터 나타나기 시작하며, 입자수는 시간이 경과할수록 증가하여 10msec에서 최고값을 갖고 이후에 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 분무 입자의 Sauter 평균 직경은 액적군의 선두에서는 144.7 $\mu$ m이며 대체적으로 110 $\mu$ m 내외의 값을 가지고 있었으며, 하류로 내려갈수록 액적군을 이루고 있는 폭이 넓어지고 있었다.
- 3) 입자군의 선두에 존재하는 큰 입자들은 분무 선단의 공기와 부딪혀 급격히 분열하여 입자수는 증가하고 연료의 평균 입경은 감소하고 있었으며, 50mm 및 80mm 지점에서 가장 많은 입자수를 갖는 시간이 각각 6msec, 10msec로 나타나 두 지점 사이의 연료 입자군의 비행 시간은 약 4msec로 추정되었다.
- 4) 분무 입자의 속도의 경우 분무 입자군의 후류보다는 선두에서 빠른 속도를 갖는 것으로 측정되었으며, 분무 중심에서 외곽 방향으로 나아갈수록 속도는 감소하는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 또한 이 때의 측정된 두 지점에서의 최대 속도와 최소 속도는 각각 16.72m/s와 10.56m/s로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 1997년도 학술진흥재단 지원 자유 공모과제(과제 번호 1997-001-E00092) 학술 연구 조성비에 의해 수행된 것으로서 연구를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. F.Q. Zhao, M.C. Lai, and D.L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for



- Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines", SAE Paper Series No. 970625, 1997.
2. M. Tabata, M. Kataoka, M. Fujimoto, and Y. Noh, "In-Cylinder Fuel Distribution, Flow Field, and Combustion Characteristics of a Mixture Injected SI Engine", SAE SP-1090, Engine Combustion and Flow Diagnostics, SAE Paper No. 960104, pp. 33~49, 1995.
  3. F.Q. Zhao, M.C. Lai, and D.L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection - A Critical Review", SAE Paper Series No. 950506, 1995.
  4. 이 기형, 이 창식, "희박 연소 안정화를 위한 가스 유동장 조건에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, Vol. 19, No. 3, pp. 763 ~770, 1995.
  5. 조 병욱, 이 창식, 임 경수, "가솔린 기관용 인젝터의 분무 구조에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제3권, 제1호, pp. 118 ~128, 1995.
  6. A. Cenedese, A. Paglialunga, "Digital Direct Analysis of Multiexposed Photograph in PIV", Experiments in Fluid 8, pp. 273~280, 1990.
  7. 이창식, 이기형, 전문수, 김영호, "고속 유동 계측을 위한 PIV 시스템 개발에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집(II), pp. 78~83, 1996. 11. 29.