

〈논 문〉 SAE NO. 97370124

형광, 산란광 동시 촬영법을 이용한 가솔린 분무의 거동에 관한 연구

Visualization of Gasoline Sprays Via a Simultaneous Imaging of Fluorescence and Scattering Lights

원 영 호*
Y. H. Won

ABSTRACT

The penetration depth and the size distribution of the droplets of fuel sprays are important in the operation of spark-ignition MPI engines. A fluorescence/scattering image technique for droplet sizing was applied to measure the droplet size distribution in non-evaporating gasoline sprays. The fluorescence and scattering lights were imaged simultaneously by the two-dimensional visualization system composed of a laser sheet, a doubling prism, optical filters, and a CCD camera. Quantitative droplet size distributions were extracted from evaluating the ratio of the two light densities.

The mean droplet size measured by the fluorescence/scattering technique was compared with the result obtained by the enlarged photographs of droplets. The fluorescence/scattering image technique also gives the useful information of the characteristics of droplet impingement on a inclined wall.

주요기술용어 : Gasoline Spray(가솔린분무), Laser Induced Fluorescence(레이저여기형광법), Laser Scattering(레이저 산란), Laser Sheet(레이저 시트광), Gasoline Injector(가솔린 인젝터), Droplet Sizing(입경측정)

1. 서 론

가솔린엔진에 사용되는 연료인젝터의 분무특성 중 연료의 공간적, 시간적 확산특성과 액적의 평균직경은 엔진출력, 효율 및 배기가스 배출에 큰 영향을 미친다. 따라서 현재 여러 형태의 인젝터가 개발되어 있고, 새로운 형태의 인젝터도 속속

제안되고 있다.^{1),2)} 이러한 인젝터에 의해 형성되는 분무의 성능을 평가하기 위해서 신뢰성 있고 간편한 분무의 확산과정의 가시화 및 평균 입경 측정법의 개발은 중요하다.

근래에 분무의 입경측정은 비접촉 광학적 방법이 주로 사용되고 있다. 이러한 측정법에는 광회절법, PDA법, 투과광 감쇄법³⁾이 있다. 회절법은 레이저 빔을 분무에 입사시켜, 액적으로부터의 회절광 패턴으로 레이저 빔의 전 광로 중의

*정회원, 울산대학교 자동차공학과

액적 평균직경을 측정하는 방법으로, 광도 중의 액적의 입경분포는 알 수 없다. 반면에 PDA법은 액적의 산란광 위상차에 의해 액적직경을 측정하는 방법으로 측정영역이 일 점이므로, 분무 전체의 입경분포를 알기 위해서는 측정점을 이동하여 다수의 위치에서 측정을 반복해야하는 단점이 있다. 투과광 감쇄법은 액적에 의한 광감쇄를 이용하여 분무 전체의 평균입경을 측정하는 방법으로, 국소 입경측정에는 적합하지 않다. 이러한 단점들을 보완하기 위해서 최근에는 공간, 시간 분해 능이 뛰어난 레이저 시트 광을 이용한 측정법이 사용되고 있다. 측정원리에 따라 산란광 편광비 강도법⁴⁾과 형광/산란광 강도비법⁵⁾이 있다. 전자는 평균입경이 디젤분무에서와 같이 50 μ m 이하의 액적에 적용 가능하여, 액적직경이 이 보다 큰 가솔린분무에 적용하는데는 무리가 예상된다.⁴⁾ 반면 후자는 입경의 상대적 대소를 측정하는 것으로 절대 값을 알기 위해서는 분무내의 한 영역의 평균액적 직경을 미리 알고 있어야 한다. 이 방법은 디젤분무에는 적용되었으나 가솔린 분무에는 적용예가 없다.

본 연구에서는 형광/산란광 강도비법의 가솔린 분무에 대한 사용 가능성을 조사하였다. 펄스레이저 시트 광을 분무의 중심단면에 통과시킬 때, 형광물질을 혼입한 분무내의 액적으로부터의 산란광과 형광을 동시에 촬영하여 얻어진 화상으로부터 전체 분무내의 액적의 상대적 크기를 측정하는 방법을 개발하였다. 이 방법을 사용하여 여러 종류의 MPI 가솔린 인젝터에 의한 분무의 확산과정 가시화 및 액적 평균직경 분포를 측정하였다. 대기 중에 분사된 자유분무와 경사면에 충돌하는 충돌분무에 대하여 실험을 수행하였으며, 이 때 얻어진 평균 액적직경 값은 액적군의 확대사진에서 얻어진 결과와 잘 일치하였다. 또한 이 방법은 종래 측정방법으로는 측정이 어려운 충돌벽면 근처에서의 입경변화도 측정할 수 있었다.

2. 액적군의 형광, 산란 특성과 평균직경과의 관계

Fig.1과 같이 레이저 시트 광을 형광물질을 용

해시킨 가솔린 분무의 중심에 통과시킬 때, 레이저가 형광물질을 여기시켜 형광이 발생한다. 그림에서와 같이 다수의 액적이 존재하는 관심영역 내의 액적들로부터 형광강도 I_{fl} 는 형광물질의 농도 즉 액적의 질량밀도에 비례하므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁶⁾

$$I_{fl} = C_1 \cdot I_0 \sum_1 n_i \cdot D_i^3 \quad (1)$$

여기서 C_1 : 비례정수, I_0 : 레이저광 강도,

n : 액적의 개수, D : 액적 직경

비례정수 C_1 은 형광의 흡광계수, 양자수율, 검출광학계 등에 의해 결정된다. 한편 관심영역으로부터의 산란광강도 I_{sca} 는 다음과 같이 나타낸다.

$$I_{sca} = C_2 \cdot I_0 \sum_1 Q_{sca,i} \cdot n_i \cdot D_i^2 \quad (2)$$

여기서 C_2 : 비례정수, $Q_{sca,i}$: 산란효율

산란효율 $Q_{sca,i}$ 는 입자 파라메타 $\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$, 산란

광 검출각도의 함수로 구형 액적의 경우 Mie 산란이론으로 계산된다.⁷⁾ 관심영역내의 액적군의 평균 산란효율 $\overline{Q_{sca}}$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\overline{Q_{sca}} = \frac{\sum_1 Q_{sca,i} \cdot n_i \cdot D_i^2}{\sum_1 n_i \cdot D_i^2} \quad (3)$$

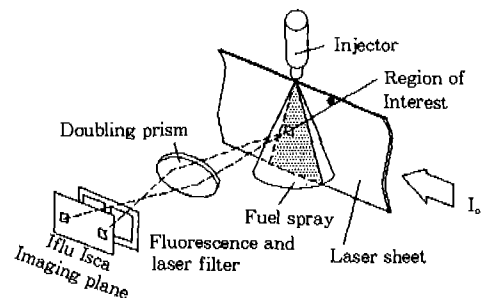


Fig.1 2-D Simultaneous Imaging System of Fluorescence and Scattering Lights

Sauter 평균직경의 정의로부터 관심영역내의 액적군의 Sauter 평균직경, D_{32} 은 식 (1), (2), (3)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{32} = \frac{\sum_1 n_i \cdot D_i^3}{\sum_1 n_i \cdot D_i^2} = C \cdot \overline{Q_{sca}} \cdot \frac{I_{flu}}{I_{sca}} \quad (4)$$

위 식에서 $\overline{Q_{sca}}$ 는 관심영역내의 액적군의 입경 분포를 Nukiyama-Tanasawa식⁵⁾으로 가정하고 Mie 산란이론으로 계산하면 Fig.2에 나타낸 결과를 얻는다. 평균산란효율은 D_{32} 가 $100\mu m$ 이하인 경우 D_{32} 의 감소에 따라 감소하나, $100\mu m$ 이

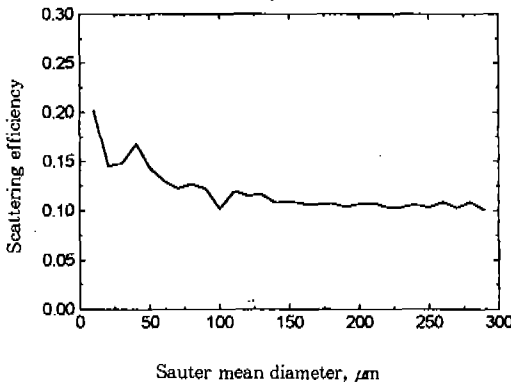


Fig.2 Scattering Efficiency of Droplets

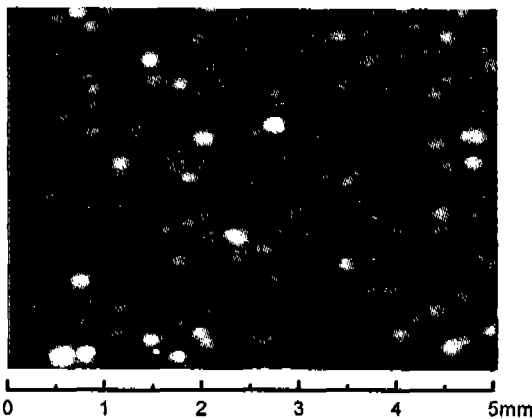


Fig.3 Enlarged Photograph of Droplets

상에서는 값이 약 0.12로 거의 일정하다. 본 연구에서 측정하고자 하는 가솔린 분무의 D_{32} 는 $100\sim 300\mu m$ 의 범위이므로, 식 (4)의 $C \cdot \overline{Q_{sca}}$ 는 상수로 볼 수 있다. 따라서 형광/산란광 강도비는 분무내의 액적군의 D_{32} 에 비례하는 것으로 볼 수 있다. 한편 $C \cdot \overline{Q_{sca}}$ 의 값은 다음과 같은 방법으로 구하였다. 관심영역을 확대 촬영하여 얻어진 Fig.3과 같은 액적군의 사진에서 개개의 액적의 직경을 측정하여 D_{32} 를 구하고, 형광/산란광 동시 촬영 분무화상에서 동일 관심영역의 I_{flu}/I_{sca} 의 값을 구하여, 식 (4)로부터 $C \cdot \overline{Q_{sca}}$ 값을 구하였다. 이렇게 구해진 값은 동일 촬영 광학조건에서는 일정하다.

3. 실험장치 및 방법

연료로부터 형광을 얻기 위해서 시판 가솔린에 로다민(Rhodamine) 6G를 중량 비로 가솔린의 0.01% 혼입하였다. 형광물질은 가솔린에 직접 용해되지 않으므로, 상용제로 에탄올 1%를 첨가하였다. 형광물의 흡수 및 형광 특성은 Fig.4에 나타내었다. 실험에 사용된 가솔린 인젝터는 현재 DOHC 엔진에 널리 사용되고 있는 4공, 2공, 핀틀형 3종류이다. 핀틀형 노즐은 원추형 액막의 분열에 의한 미립화를 이용하고, 4공형과 2공형 노즐은 분공에서 분출된 액주를 서로 충돌시켜 미립화를 촉진하는 방법을 이용하고 있으나, 4공형은 정면충돌을, 2공형은 스침충돌이다.⁸⁾ 시험장치 개략도는 Fig.5에 나타내었다. 연료분사압

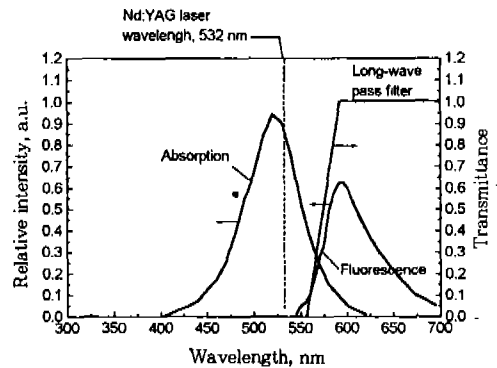


Fig.4 Fluorescence and Absorption Spectra

력은 고압질소 봄베를 사용하여 3기압으로 하였다. 인젝터 개변시간은 분사량이 20mg이 되도록 각 인젝터에 따라 적절히 조절하였다. 연료는 공기 유동이 없는 대기 중에 분사시켜, 충돌이 없는 자유분무와 분공에서 50mm 거리에 설치된 수평면과 30도 각을 이루는 유리 경사면에 충돌시킨 충돌분무를 대상으로 실험하였다.

광원으로는 펄스 Nd : YAG 레이저의 제2고조파(펄스 지속시간 10nsec, 파장 532nm)를 사용하고, 레이저 빔은 3개의 원통렌즈를 사용하여 측정부위에서 두께 약 0.3mm의 시트 광으로 변환시켜 분무의 중심단면을 통과시켰다. 분무로부터의 산란 광과 형광은 레이저 시트 광과 직각을 이루는 방향에서 촬영하였다. 산란 광과 형광을 동일화면에 수록하기 위하여 2중 프리즘(Toshiba제)을 사용하여 화면 왼쪽에는 형광을 오른쪽 반쪽에는 산란 광을 촬영하였다. 자세한 촬영광학계는 Fig.1에 나타내었다. 산란광 통과 필터는 중심파장 532nm, 통과 파장폭 3nm의 밴드 패스필터를 사용하였고, 형광 필터로는 Fig.4에 나타낸 것과 같은 장파장(570nm) 통과 필터를 사용하였다. 산란광 및 형광은 75mm 줌렌즈에 의해 CCD 카메라(Panasonic BW-500)에 집광된다. Fig.3과 같은 분무내 미소영역의 확대 촬영 시에는 렌즈와 카메라 사이에 접사량을 삽입하여 배율을 높였다. CCD 카메라에 의해서 얻어진 화상은 화상처리보드(DT-2853)에 의하여 컴퓨터에 수록되어 처리된다. 또

한 본 실험조건에서는 산란광 강도가 형광강도에 비해 강하므로, 산란 광과 형광의 강도를 거의 동등하게 하기 위하여 산란광 필터 앞에 투과율 25%의 감쇄필터를 설치하였다.

촬영시간은 레이저 발광신호와 인젝터 분사시간을 펄스 발생기로 동기하여 연료분사 개시 후 원하는 시간에 레이저를 발광시켜 화상을 얻었다. 화상해석에는 동일조건에서 5회 촬영하여 평균값을 취하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig.6은 각 노즐에 의한 자유분무의 선단 도달 거리를 측정한 결과이다. 선단 도달거리는 분무의 관통력을 나타내므로 관통력은 4공, 2공, 핀틀형 순서로 양호함을 알 수 있다. 일반적으로 동일 분사압력 조건에서 분무의 확산과 미립화가 촉진되면 분무의 관통력이 작아지는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Fig.7의 자유분무의 형광, 산란광 동시촬영 화상으로부터 확인할 수 있다.

Fig.7에서 밝은 영역일수록 광강도가 높은 영역으로 연료농도가 높은 영역을 나타낸다. 핀틀형에서는 초기의 중공 원추형 분무가 하류로 갈수록 확산되어 분무의 반경방향의 농도분포가 비교적 균일하게 되는 것이 관찰된다. 반면에 4공형에서는 확산이 작고 분무의 진행방향으로 농도의 불균일 스케일이 큰데 이것은 액주에 사인곡선형 파동이 발생하여 액적으로 분열된 영향으로

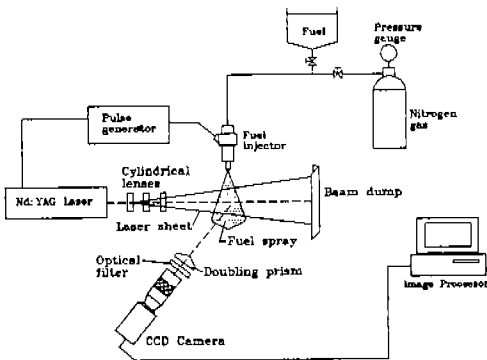


Fig.5 Experimental Setup

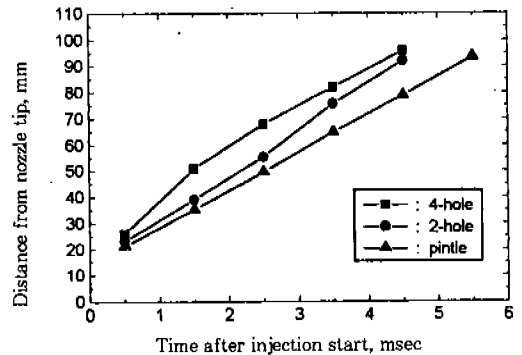


Fig.6 Spray Tip Penetration

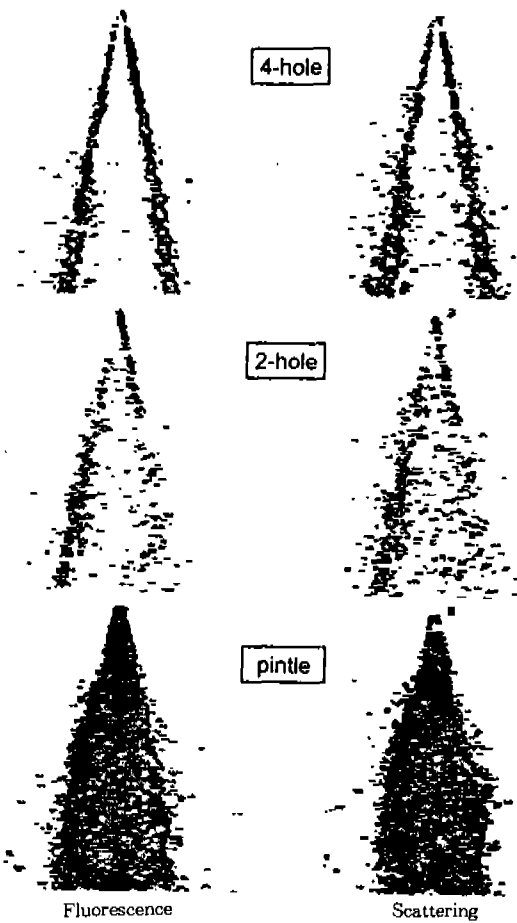


Fig.7 Fluorescence/Scattering Images of Free Sprays

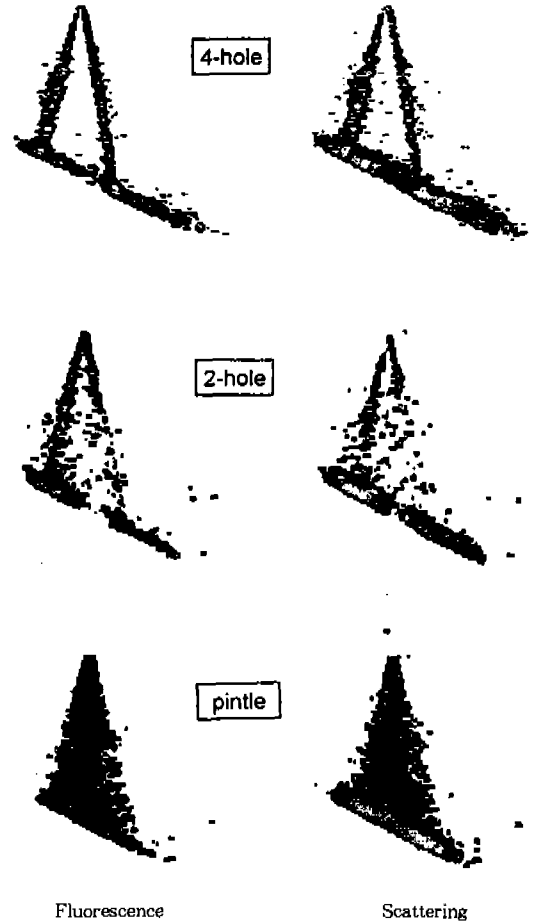


Fig.8 Fluorescence/Scattering Images of Impinging Sprays

생각된다.⁸⁾ 이러한 유형의 미립화에서는 핀틀형 분무와 같이 얇은 액막의 분열로 인한 미립화 보다 액적의 직경이 크지만, 액주의 상호 충돌이 없는 단공형 분무보다는 미립화가 크게 촉진된다. 또한 2공형은 4공형과 비교해서 확산정도는 비슷하나 미립화는 보다 촉진되었음을 알 수 있다. 이로부터 스킴충돌은 연료확산을 억제하면서 미립화를 촉진하는데 효과적임을 알 수 있다.

Fig.8은 인젝터의 분공에서 50mm의 거리에 설치된 30도 경사면에 충돌하는 분무의 형상을 나타낸 화상이다. 모든 화상에서 충돌 후의 형광/산란광 강도 비는 충돌 전에 비해서 감소하고

있다. 2절에서 언급한 바와 같이 형광/산란광 강도 비는 액적 직경에 비례하므로, 분무의 벽면충돌로 미립화가 촉진되었음을 알 수 있다. 또한 핀틀형에서는 충돌 후 분무의 확산이 타 분무보다 적다. 이것은 핀틀형 분무의 관통력이 상대적으로 작고 충돌면적이 크데 기인한다.

Fig.7과 Fig.8과 같은 형광/산란광 동시촬영 화상의 광강도비를 2절에서 설명한 방법에 따라 해석하여 분무내 액적의 직경분포의 공간적, 시간적 변화를 정량적으로 산출하였다. 먼저 해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 액적군의 확대 촬영법을 이용한 평균직경 측정결과와 비교하였

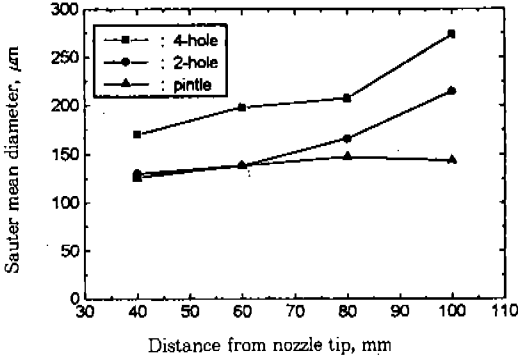


Fig.9 Sauter Mean Diameter of Droplets Along the Spray Axis

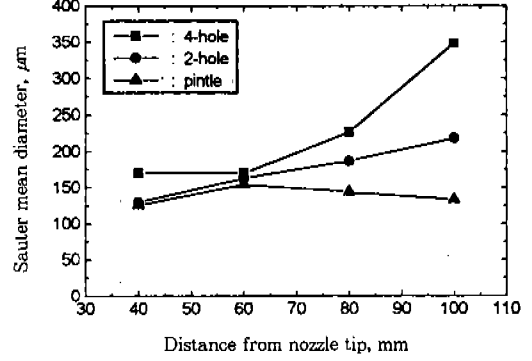


Fig.10 Variation of Sauter Mean Diameter of Droplets Along the Spray Axis

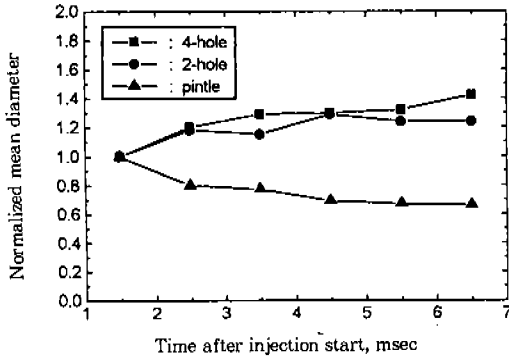


Fig.11 Variation of Sauter Mean Diameter of Sprays after Injection Start

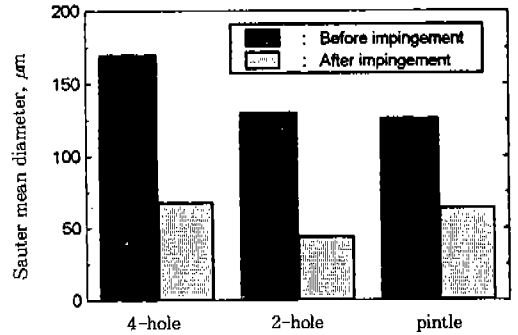


Fig.12 Atomization of Sprays by the Impingement on the Inclined Wall

다. Fig.9는 분무내 액적군의 확대 촬영을 통해 얻어진 Fig.3과 같은 화상에서 개개의 액적 직경을 평균한 Sauter 평균직경을 나타낸다. 한편 Fig.10은 2절에서 설명한 형광/산란광 강도 비로부터 산출한 직경변화를 나타낸다. 그림에서 분공에서의 거리 40mm의 평균직경값은 Fig.9의 확대사진법의 결과를 사용하였고, 나머지 위치에서의 평균직경은 형광/산란광 강도비로부터 산출한 것이다. Fig.9와 Fig.10을 비교하면 액적의 Sauter 평균값은 다소 차이가 있지만, 노즐 분공에서부터의 거리변화에 따른 Sauter 평균직경 변화 추이가 대체적으로 일치함을 알 수 있다.

Fig.11은 분사개시 후 시간경과에 따른 전체 분무내의 Sauter 평균직경 변화를 나타내고 있다. 그림에서 Sauter 평균직경은 분사개시 후 경

과시간 1.5msec에서의 값으로 무차원 시켰다. 핀틀형은 시간경과에 따라 직경이 약간 감소하는 반면 2공형과 4공형에서는 반대로 증가하는 경향을 보인다. 이것은 연료 분산이 불량하여 하류에서 액적이 서로 합체되었기 때문으로 생각된다. 이러한 경향들은 이미 보고된 결과들과 대체로 일치한다.^{9),10)} 위의 결과들로부터 형광/산란광 강도비법은 분무내의 액적직경의 공간 분포 및 시간적 변화를 파악하는데 유효한 수단임을 알 수 있다.

Fig.12는 Fig.8의 충돌분무에서 벽면 충돌 전후의 Sauter 평균직경의 변화를 나타낸 것이다. 충돌전의 직경은 확대사진법에 의하여 측정된 값을 사용하였고, 충돌 후 직경은 형광/산란광 강도비로부터 구한 값이다. 이 그림에서 2공형과 4

공형은 충돌 전 액적직경이 핀틀형보다 크지만 충돌 후 직경은 거의 동일한 수준으로 감소한다. 이러한 감소경향은 Naitoh¹¹⁾ 등의 실험 결과와 유사하다. 2공형과 4공형을 비교하면 충돌속도는 4공형이 큼에도 불구하고 충돌 후 액적 크기의 감소는 2공형이 크다. 이는 벽면충돌에 의한 미립화가 충돌속도 뿐만 아니라 충돌전 분무의 난류강도 혹은 액적의 왜곡율¹²⁾ 등에도 영향을 받을 가능성도 생각할 수 있으나 명확한 설명에는 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

연료분무내 액적으로부터의 형광과 산란광을 동시에 촬영하여, 형광/산란광 강도 비로 액적크기를 측정하는 방법을 제시하고, 측정 결과의 타당성을 확대사진법에 의한 결과와 비교하여 확인하였다. 이 방법을 사용하여 여러 종류의 가솔린 MPI 인젝터에 의한 분무의 확산 및 액적직경 분포를 측정하였다. 본 연구에서 얻은 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 형광/산란광 강도비에 의한 액적군의 평균 직경 측정법은 액적군의 확대사진법에 의한 직경 측정결과와 비교함으로써 신뢰성 있는 방법임을 확인하였다.
- 2) 분무의 확산, 미립화 특성은 핀틀형, 2공형, 4공형 순서로 양호하고, 분무의 관통성은 반대로 4공형, 2공형, 핀틀형 순서로 양호하다.
- 3) 액주를 상호 충돌시키면 미립화가 촉진된다. 충돌 방법 중에서 스팀 충돌을 사용하는 2공형이 정면 충돌을 사용하는 4공형보다 연료확산을 크게 증가시키지 않으면서 미립화를 보다 촉진시킨다.
- 4) 벽면 충돌에 의한 미립화 촉진은 2공형과 4공형에서 양호하나, 충돌속도가 작고 충돌면적이 넓은 핀틀형은 효과가 이들보다 적다.

후 기

본 연구는 울산대학교 학술연구 지원과제로서 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. Hiroshi Iwamoto, et al., "An Analysis of Induction Port Fuel Behavior," SAE Paper 912348, pp.1777~1786, 1991.
2. Tomojiro Sugimoto, et al., "Toyota Air-Mix Type Two-hole Injector for 4-valve Engines," SAE Paper 912351, pp.1787~1793, 1991.
3. Takeyuki Kamimoto, et al., "A New Technique for the Measurement of Sauter Mean Diameter of Droplet in Unsteady Dense Sprays," SAE Paper 890316, pp. 397~408, 1989.
4. J. T. Hodges, et al., "Planer Liquid and Gas Fuel and Droplet Size Visualization in a DI Diesel Engine," SAE Paper 910726, pp.1284~1302, 1991.
5. 葉啓南 외 2명, "형광, 산란광에 의한 비증발분무의 Sauter 평균입경 측정에 관한 연구," 일본 기계학회논문집 59권 568호, pp. 4008~4013, 1993.
6. Ali Serpenguzel, et al., "Two-dimensional imaging of sprays with fluorescence, lasing, and stimulated Raman scattering," Applied Optics, Vol.31, No.18, June, pp. 3543~3551, 1992.
7. L. P. Bayvel, et al., "Electromagnetic Scattering and Its Applications," Applied Science Publishers, pp.22~36, 1981.
8. 이상용, "액체의 미립화", 민음사, pp.73~79, 1996.

9. 안순혁 외 4명, “가솔린-메탄올 혼합연료의 분무 특성에 관한 연구,” 한국자동차공학회 1995년도 추계학술대회논문집, pp.184~189, 1995.
10. 이기형 외 3명, “MPI 가솔린기관의 분무 및 벽류 거동특성에 관한 연구,” 한국자동차공학회 1995년도 추계학술대회논문집, pp.307~313, 1995.
11. Ken Naitoh, et al., “Numerical Prediction of Fuel Secondary Atomization Behavior in SI Engine based on the Oval-Parabola Trajectories(OPT) Model,” SAE Trans 940526, pp.897~914, 1994.
12. Ming-Chia Lai, et al., “An Experimental and Analytical Investigation of the Spray Structure from Automotive Port Injectors,” SAE Trans. 941873, pp.833~853, 1994.