

벽면 충돌 가솔린 분무의 미립화*

원영호 · 김태완

자동차공학과

<요약>

현재 대부분의 가솔린 기관은 흡기포트에 연료를 분사시켜 혼합기를 형성하는 방법(MPI)을 채용하고 있다. 인젝터에서 분사된 연료는 포트 벽면과 흡기밸브에 충돌하여 일부는 벽면에 부착하여 액막을 형성하고 나머지는 충돌에너지에 의하여 작은 액적으로 2차 미립화된다. 이러한 충돌분무의 특성은 기관 응답성과 배기가스에 큰 영향을 미친다. 따라서 이러한 특성을 명확히 파악하는 것은 기관 성능 개선에 중요하다.

본 연구는 단공 hole노즐을 사용하여 벽면에 충돌하는 가솔린 분무의 미립화 특성을 레이저 시트광을 이용한 가시화법으로 조사하였다. 연료에 형광물질을 첨가하여 레이저로 이를 여기시켜 얻은 형광과 액적의 산란광을 동시에 촬영하여 분무의 공간적 확산, 연료농도의 분포, 미립화 정도를 정성적으로 측정하였다. 충돌각도, 충돌속도가 충돌 후 분무의 미립화 특성에 미치는 영향을 파악하였다. 벽면에 부착되어 액막이 되는 연료량도 충돌부 주위에 설치된 가는 틈새로 흘러든 연료량을 측정하여 정량적으로 계측하였다.

Atomization of Gasoline Sprays Impinging on the Wall

Young-Ho Won and Tae-Wan Kim
Dept. of Automotive Engineering

<Abstract>

Most gasoline engines employ a port injection system to achieve the better fuel-air mixing. A part of injected fuels adheres to the wall or intake valve and forms a film of liquid fuel. The other is secondarily atomized by the spray-wall interaction. A better

* 본 연구는 1997년도 울산대학교 대학원 활성화 특별연구비에 의하여 수행되었음

understanding of this interaction will help in designing injection systems and control strategies to improve engine performance and exhaust emissions.

In the present research, the spray-wall interaction was investigated by laser sheet visualization method. The fluorescence from the fuel doped with fluorescer(Rhodamine 6G) and scattering light were imaged simultaneously by a negative color film. The shape of sprays was pictured at various impinging velocities and angles. The fuel dispersion was estimated by fluorescence light, and the atomization was evaluated by the fluorescence/scattering light ratio. The amount of fuel in a film was measured by weighting the fuel trapped in a circular narrow groove around the impinging point.

1. 서 론

MPI가솔린 기관에서 연료분사시 흡기포트 및 벨브에 부착되는 연료량을 감소시키고 미립화를 촉진시키면 기관응답성과 냉간시동시 HC배출성능이 향상된다.⁽¹⁾ 최근에는 벽면에 부착되는 연료량을 줄이기 위해서 분무의 확산이 작은 hole형 노즐의 일반적으로 채용되고 있다. hole노즐은 종래 사용된 펀틀형 노즐에 비해 노즐출구에서 미립화 성능은 떨어지지만, 액적의 큰 운동에너지로 인하여 액적이 벽면에 충돌할 때 미립화가 촉진된다. 그러므로 액적의 벽면 충돌에 의한 미립화 기구를 명확히 파악하는 것이 기관성능을 개량하는데 중요하다.

벽면 충돌 미립화 기구는 디젤기관 연료분무를 대상으로 많은 연구가 수행되었다.⁽²⁾⁽³⁾ 그러나 디젤분무는 액적의 직경, 충돌속도, 입자의 수밀도, 분위기압력 및 온도 등에서 가솔린 분무와 많은 차이가 있다. 따라서 이들 결과를 그대로 가솔린 분무에 적용하는 것은 무리가 있다. 가솔린 분무에 대한 연구는 최근에 실험적, 이론적으로 수행되고 있으나 연구결과는 디젤분무에 비해 아주 적다.

Nagaoka 등⁽⁴⁾은 펀틀형 노즐에 의한 가솔린분무의 벽면충돌 현상을 연구하였다. 충돌점에 생기는 액막의 분열에 기초한 실험식을 사용하여 벽면 충돌 후 생성되는 연료액적의 직경, 속도 및 방향 등을 예측하는 계산모델을 제안하였다.

Naitoh 등⁽⁵⁾은 OPT(Oval-Parabola Trajectory)모델을 사용하여 액적군이 평판에 충돌하여 분열된 액적의 직경을 이론적으로 예측하고 있다. OPT모델은 충돌로 인한 액적의 변형률과 변형속도의 계적을 나타내는 식을 사용하여, 충돌 후 액적 직경뿐만 아니라 액막을 형성하는 연료량을 이론적으로 예측하는 것이 가능하다. 계산결과는 실험결과와 비교하여 만족한 결과를 보이며, 충돌 후 액적 직경분포가 bimodal분포를 보여주고 있는 것이 관심을 끈다.

Bai 등⁽⁶⁾은 액막으로 피막된 평판에 충돌하는 액적과 액막이 없는 벽면에 충돌하는 액적의 거동을 구별하여 해석하였다. 웨버수, 벽면온도, 벽면 거칠기의 변화에 따라 액적의 분열거동이 여러 형태로 변하는 것을 상세히 설명하고 각 분열형태에서 액적의 미립화, 확산에 관한 실험식을 사용하여 분무의 거동을 예측하였다. 계산결과는 디젤분무와 가솔린 분무 모두에 적용하여 실험과 비교적 일치하는 결과를 얻었다.

Stanton 등⁽⁷⁾은 Bai와 유사한 계산모델로 벽면 충돌 디젤분무의 미립화과정을 일 단계로

액적의 벽면부착 확산되어 액막을 형성하고, 다음 단계로 액막에 충돌하는 액적에 의한 액막의 비산으로 미립화하는 기구를 모델화하였다. 이러한 미립화기구는 가솔린 분무와 동일 하므로 가솔린분무에도 적용이 가능할 것으로 생각된다.

위의 충돌분무 계산모델은 실험식 혹은 실험 보정계수를 사용하고 있으나, 근거가 되는 실험결과가 디젤분무 혹은 펀틀형 가솔린분무를 대상으로 한 것이어서, 본 연구대상인 hole형 가솔린 분무와는 다소 다를 것으로 간주되므로 이에 대한 검토가 필요하다.

본 연구는 현재 가솔린기관에 사용되고 있는 MPI용 단공 hole형 분사노즐을 사용하여, 연료분무의 벽면 충돌속도와 충돌각도가 액막을 형성하는 연료량, 충돌 후 액적직경, 연료의 공간적 확산, 액적의 미립화에 미치는 영향을 실험적으로 파악하고, 이 결과를 이미 제작된 모델에 의한 계산 결과와 비교 검토한다. 비교결과는 실제 기관에서 충돌분무를 모델 계산하는데 필요한 자료로 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

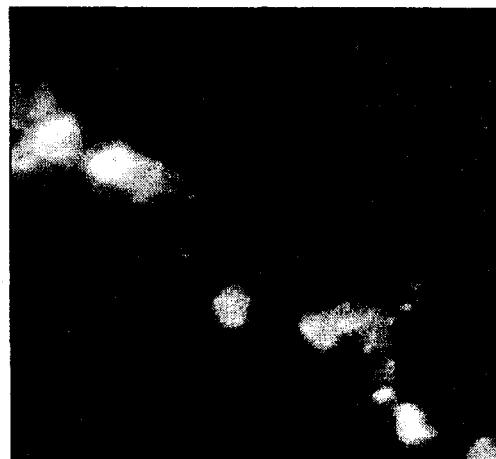


Fig.1 Enlarged photograph of impinging droplets

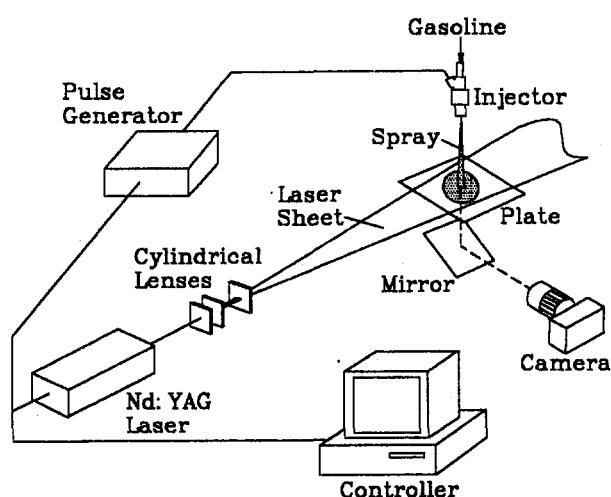


Fig.2 Experimental setup

2. 실험장치 및 방법

충돌 후 분무의 분산 및 액적 크기 분포와 액막의 거동을 관찰하기 위해 형광/산란광 동시촬영법⁽⁸⁾을 사용하였다. 연료로부터의 형광을 얻기 위해서 시판 가솔린에 로다민(Rhodamine) 6G를 중량비로 가솔린의 0.02 % 혼입하였다. 형광물질은 가솔린에 직접 용해되지 않으므로, 상용제로 에탄올 10%를 첨가하였다. 실험에 사용된 가솔린 인젝터는 현재 MPI 가솔린 기관에서 널리 사용되고 있는 노즐직경이 0.4 mm인 단공 hole노즐을 사용하였다. 분공에서 분출된 연료는 액주를 형성하고 Fig. 1에서와 같이 액주가 분열되어 굴곡진 구형 액적으로 되어, 분공에서 60 mm 떨어진 충돌점에 도달한다. 연료 분사압력은 고압질소 불베를 사용하여 1 ~ 5 기압으로 조절하였다. 연료분사기간은 10 ms이고, 분위기는 공기 유동이 없는 대기이다. 평판 충돌 후 액막을 형성하는 연료량의 측정은 충돌점을 중심으로 직경 20 mm에 틈새 1 mm의 흄을 내어 이곳에 유입되는 연료량을 액막을 형성하는 연료량으로 간주하였다.

가시화 실험장치 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 광원으로는 펄스 Nd:YAG 레이저의 제2 고조파(펄스 지속시간 10 ns, 파장 532 nm)를 사용하고, 레이저 범은 3개의 원통렌즈를 사용하여 측정부위에서 두께 약 0.3 mm의 시트 광으로 변환시켜 분무의 중심단면을 통과시켰다. 분무로부터의 산란광과 형광은 레이저 시트광과 직각을 이루는 방향에서 촬영하였다. 분무의 수평단면을 촬영할 때는 그림에서처럼 유리 충돌판을 통하여 거울에 반사된 화상을 촬영하였다. 산란광과 형광은 35 mm 스텀카메라에 의하여 촬영된다. 필름은 Kodak ASA 400 네가 필름을 사용하였다. 산란광은 형광에 비하여 아주 강하므로 적색필터를 렌즈 앞에 장착하여 산란광의 강도를 형광과 비슷한 수준으로 감쇄시켜 촬영하였다. 촬영시간은 레이저 발광신호와 인젝터 분사시간을 펄스 발생기로 동기하여, 연료분사 개시 후 원하는 시간에 레이저를 발광시켜 화상을 얻었다. 화상해석에는 동일조건에서 5회 촬영하여 평균값을 취하였다. 한편 촬영된 광도를 정량화하기 위해 분무 촬영 전에 gray-scale을 촬영하여 촬영장치의 감마값을 도출하여 화상을 보정한다. 현상된 필름은 칼라필름스캐너(Nikon 제 Coolscan)를 사용하여 디지털 처리되어 RGB화상으로 색분해된다. 로다민의 형

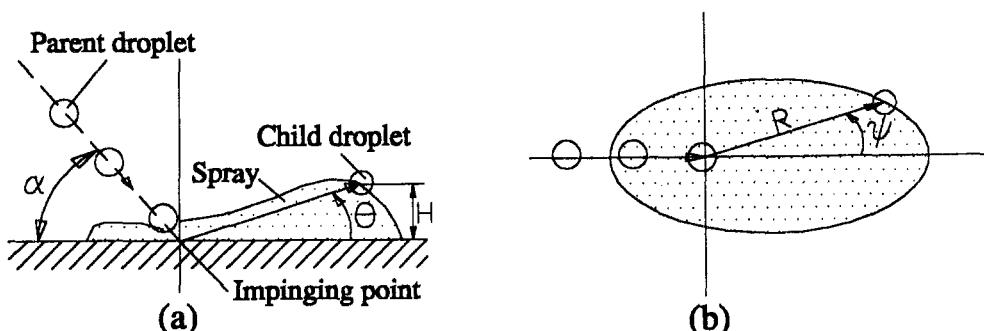


Fig.3 Definition of impinging angle, α , azimuthal angle, Ψ , and altitude angle, θ . (a) Vertical view (b) Horizontal view

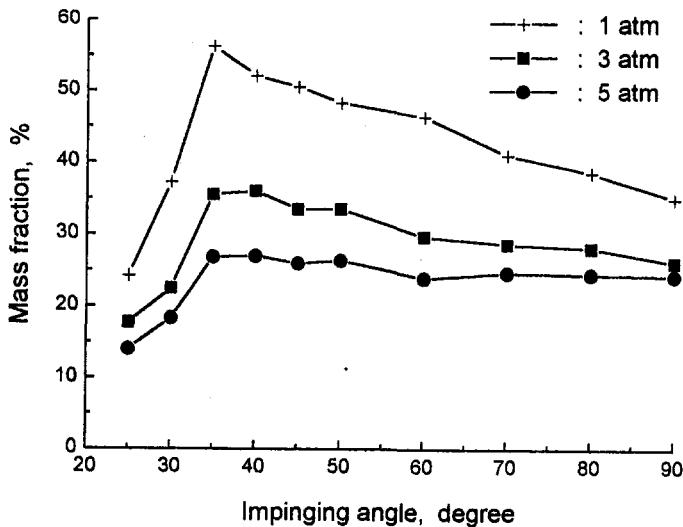


Fig.4 Mass fraction of a film of liquid fuel

광은 적황색이고 레이저 색은 녹색이다. 따라서 분무의 R화상은 형광을 나타내고, G화상은 산란광을 나타낸다. 이때 G화상에는 약간의 형광이 포함되어 있으나 산란광강도가 형광에 비해 월등히 커서 산란광 영향이 지배적이므로, 산란광을 나타낸다고 보아도 무리가 없다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액막을 형성하는 연료량

Fig. 3에 충돌분무의 형상을 도식적으로 나타내고 분무의 충돌각도 α , 충돌 후 분열된 액적의 비산각도, θ 와 ψ 를 정의하였다. 분무의 벽면 충돌속도와 충돌각도, 변화에 따른 벽면에 부착되어 액막을 형성하는 연료량의 충돌전 연료량에 대한 분율을 Fig. 4에 나타내었다. 충돌속도는 분무의 분사압력을 변화시켜 조정하였다. 노즐 오리피스의 속도계수는 Borda형 표준적계수인 0.98로 취하면 분사압력이 1, 3 및 5 기압에서 충돌속도는 16.9, 29.3 및 37.9 m/s이다. 그림에서 분사압력 즉, 충돌속도가 증가할수록 부착연료량은 감소한다. 충돌각도가 증가하면 분사압력이 1기압에서는 부착연료 분율이 감소하나, 분사압력이 3기압, 5기압에서는 감소 폭이 미미하다. 그러나 충돌각도가 35°보다 작은 영역에서는 충돌각도가 증가하면 벽면부착 연료분율이 오히려 증가하는 경향을 보인다. 이는 액적의 벽면에 수직 충돌속도가 작아서 액적이 분열되지 않고 벽면에서 반사되는 현상 때문으로 생각된다.⁽⁷⁾

3.2 분무의 형상

Fig. 5는 분무의 분사압력과 충돌각도를 변화시켰을 때 시간경과에 따른 분무 윤곽의 변화를 나타낸 그림이다. 레이저 시트광은 충돌 면에서 2 mm 위의 수평단면을 통과한다. 그림은 동일 분사조건에서 충돌 후 경과시간이 1, 2, 3, 4, 6, 8 및 10 ms 후의 분무 윤곽을 겹쳐 그린 것이다. 충돌각도가 감소할수록 분사방향으로의 연료확산이 증가되고 분사방향에 수직한 폭은 감소한다. 충돌각도가 30° 이면 분사방향 반대쪽으로는 연료가 거의 확산되지 않는다. 시간경과에 따른 분무의 발달을 보면 초기 1 ms에는 분무의 확산이 크다. 이 때 분무의 색은 황색으로 벽면에 액막이 형성되어 확산되는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 분무의 중심 수직단면을 가시화한 결과이다. 충돌 분무의 벽면부터의 최대 높이는 분사압력이 1기압에서 3기압으로 증가하면 약간 증가하나 분사압력을 5기압으로 높여도 최대 높이는 거의 변화가 없다.

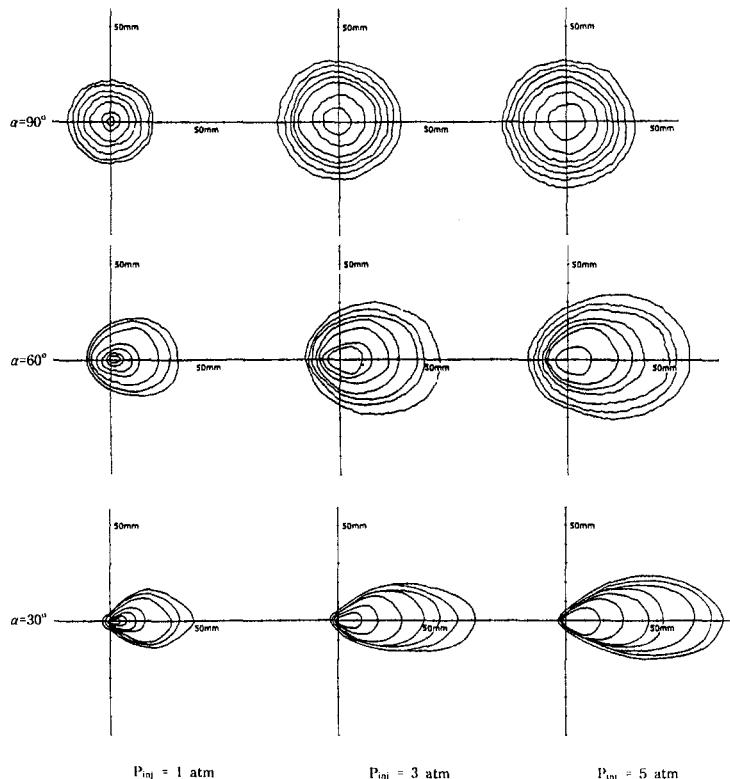


Fig. 5 Horizontal tomograms of sprays at 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 ms after the start of wall impingement (α = Impinging angle, P_{inj} = Injection pressure)

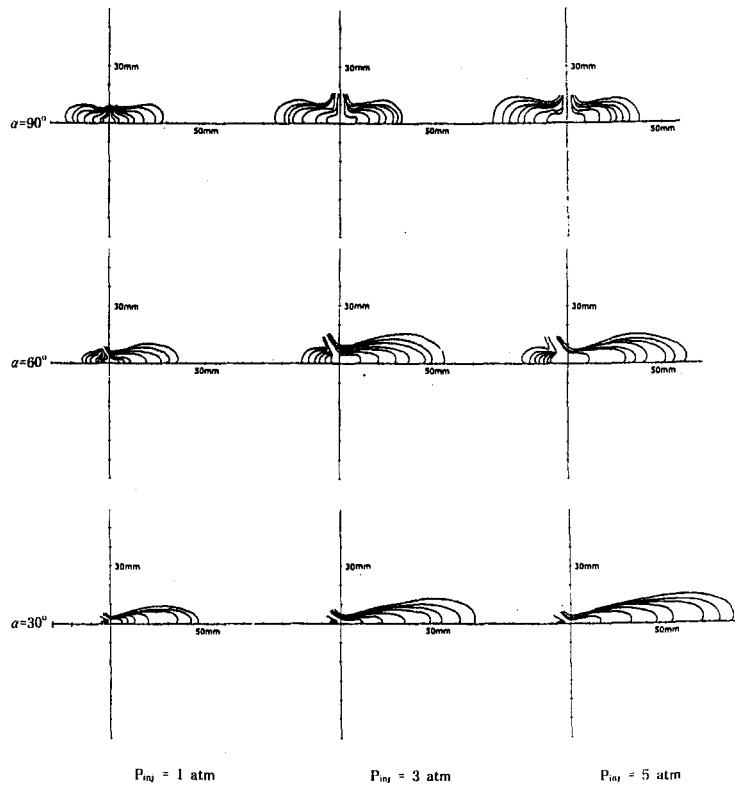


Fig. 6 Vertical tomograms of sprays at 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 ms after the start of wall impingement (α = Impinging angle, P_{inj} = Injection pressure)

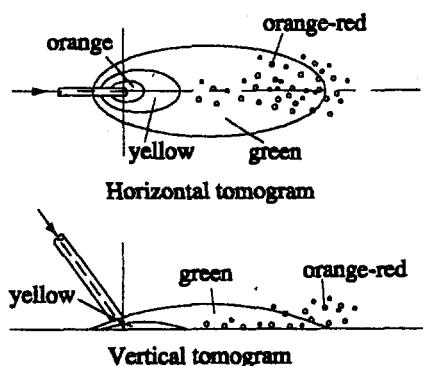


Fig. 7 Color distribution of the image of a impinging spray

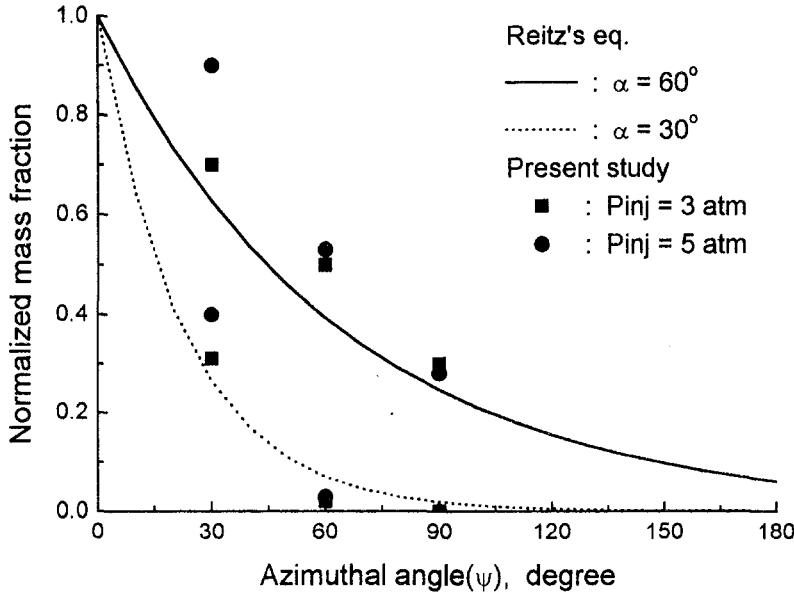


Fig. 8 Horizontal fuel dispersion normalized by the mass flow at $\psi=0$

3.3 분무의 색분포

분무의 형광강도는 형광물질의 농도 즉, 연료농도에 비례하므로 형광강도를 나타내는 화상의 R값은 연료농도에 비례하는 것으로 간주한다. R값(Red pixel 값)과 G값(Green pixel 값)의 비(R/G값)가 작아질수록 화상의 색은 주황색→황색→녹색으로 변한다. 분무는 액막, 액주와 크고 작은 액적들로 이루어져 있는데, 액주와 액막은 주황색을 작은 액적은 레이저의 색인 녹색을 띠고 있다.⁽⁹⁾ 이것은 액적군의 형광/산란광 강도비가 액적군의 평균직경에 비례하는 것과 관련이 있다.⁽⁸⁾ 또한 액적의 형광도 직경이 커질수록 lasing효과⁽⁹⁾에 의하여 적색을 띠게된다. 위의 결과를 종합하면 정성적으로 R/G값이 작아짐에 따라 액막→액주→큰 액적→작은 액적으로 미립화가 전전되는 것으로 간주할 수 있다. 특히 R/G값과 액적직경과의 정량적 관계는 추후 실험적으로 확인할 예정이다. Fig. 7은 분무화상에서 색분포를 도식적으로 나타낸 것이다. 위쪽 그림의 수평단면 화상에서 분무는 서로 다른 색을 띤 3겹의 층으로 이루어져 있다. 충돌점 근처의 중심부는 오렌지색으로 이는 충돌 전 분무의 색으로 액주나 비교적 큰 액적에 의한 것이다. 그림의 황색 층은 벽면에 부착된 연료 막에 액적이 충돌하여 밀크 왕관현상과 같이 연료가 비산되는 영역을 나타낸다. 외각에 폭 넓은 영역은 미립화된 작은 액적이 존재하여 산란광이 형광에 비해 아주 강하게 나타나는 영역으로 녹색을 띤다. 이 영역에는 산발적으로 존재하는 적황색을 띤 입자는 비교적 큰 액적을 나타낸다. 위의 결과로부터 분무의 색으로부터 미립화 과정을 대략적으로 파악하는 것이 가능하다.⁽¹⁰⁾

3.4 연료의 확산

Fig. 3에서 충돌 후 생긴 액적이 방위각, Ψ 로 비산될 확률은 충돌 후 분무의 수평적 연료 확산량과 관계가 있다. Reitz⁽¹¹⁾는 벽면 충돌제트이론으로부터 이론적으로 Ψ 에 따른 연료량분포를 도출하였다. Fig. 8에서 실선은 충돌각도, $\alpha = 60^\circ$, 점선은 $\alpha = 30^\circ$ 에서 연료량 분포를 나타내고, 사각형은 분사압력 3기압, 원형표시는 분사압력 5기압의 분무를 화상해석하여 얻은 값이다. Reitz식은 실측값과 잘 일치하고 있다.

3.5 미립화

충돌전 액적의 평균직경은 Fig. 1과 같은 액적 확대사진으로 측정하였다. 분사압력 1, 3 및 5기압에서 액적 평균 직경은 각각 470, 400 및 340 μm 이다.

Fig. 9는 Fig. 6과 같은 분무의 수직단면 사진에서 R값과 G값의 비율 즉, 형광/산란광 강도비를 측정한 결과이다. 이 강도비는 대략적으로 액적의 평균직경을 나타내므로 강도비가 작을수록 미립화가 양호하다고 간주할 수 있다. 그림에서 분사압력과 충돌각도가 증가 할수록 미립화가 양호하다. 특히 충돌각도가 30° , 60° 에서 분사압력의 영향이 아주 크다. 반면에 충돌각도가 90° 인 경우 분사압력의 영향은 미미하다. Fig. 10은 Fig. 5와 같은 분무의 수평 단면사진의 해석 결과이다. 분사압력과 충돌각도가 미립화에 미치는 영향은 Fig. 9의 수직단면의 결과와 대체로 일치하나, 충돌각도가 60° 에서 90° 로 증가하면 미립화가 다소 악화하는 경향을 보이는데, 이는 측정한 위치에서 국부적으로 큰 액적이 존재하기 때문으로 생각된다. 보다 명확한 설명을 위해서 확대사진을 이용한 액적분포 측정실험을 예정하고 있다.

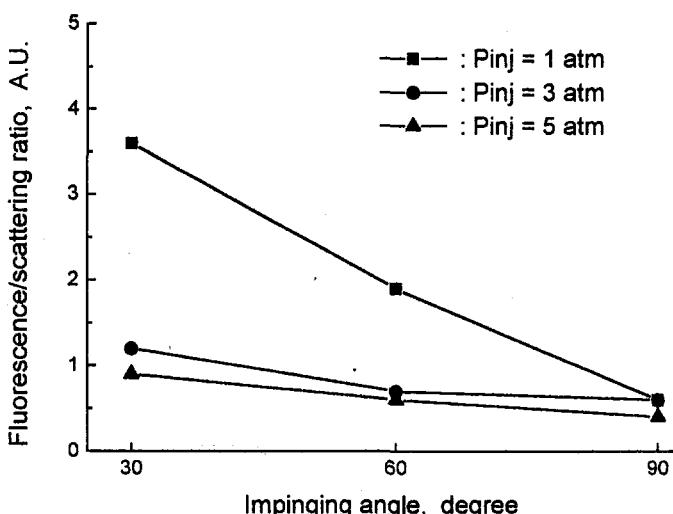


Fig. 9 Fluorescence/scattering ratios at various injection pressures and impinging angles (Vertical spray tomogram)

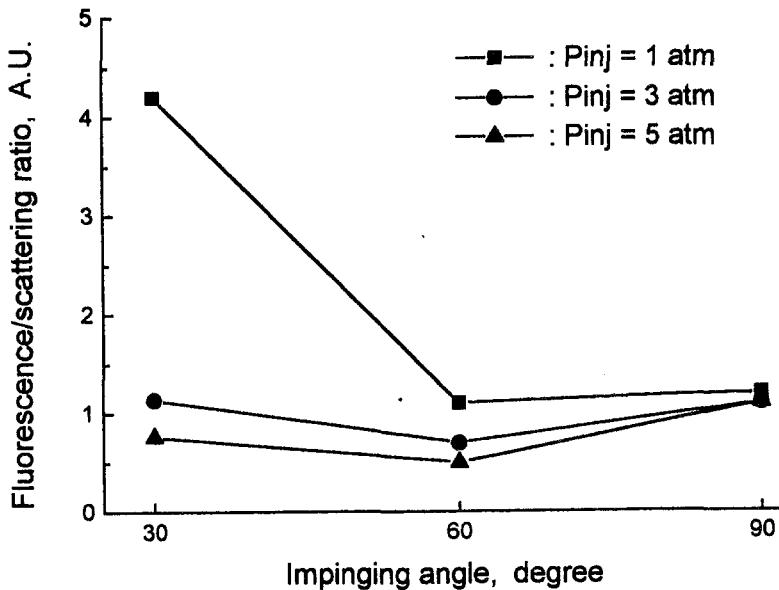


Fig. 10 Fluorescence/scattering ratios at various injection pressures and impinging angles (Horizontal spray tomogram)

4. 결 론

벽면에 충돌하는 가솔린 분무의 미립화기구를 레이저 시트광을 이용한 형광/산란광 동시에 촬영법으로 관찰하여 분무의 벽면 충돌속도 및 충돌각도가 미립화에 미치는 영향을 조사하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 충돌속도, 충돌각도 및 충돌 후 경과시간 변화에 따른 분무의 형상 변화를 가시화하였다.
- 2) 분무의 칼라사진의 색 분포로부터 미립화 분포를 판별할 수 있다. 즉 미립화가 진행될수록 분무의 색은 적황색, 황색, 녹색으로 변해간다.
- 3) 분사압력과 충돌각도가 증가할수록 미립화가 촉진되나, 분사압력이 크거나 충돌각도가 큰 경우에는 촉진효과는 작다.
- 4) 분사압력과 충돌각도가 증가할수록 벽면에 부착하는 연료량은 줄어드나, 충돌각도가 35°보다 작은 영역에서는 충돌각도가 감소할수록 부착량은 오히려 감소하는 경향을 보인다.

참고문헌

- 1) Iwamoto, H., et al., "An Analysis of Induction Port Fuel Behavior," SAE Trans. 912348, pp 1777- 1786, 1991
- 2) Naber, J.D., et al., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE Trans. 880107, 1988
- 3) Senda, J., et al., "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SAE Trans. 941894, 1994
- 4) Nagaoka, m., et al., "Modeling Fuel Spray Impingement on a Hot Wall for Gasoline Engines," SAE Trans. 940525, 1994
- 5) Naitoh, K., et al., "Numerical Prediction of Fuel Secondary Atomization Behavior in SI Engine Based on Oval-Parabola Trajectories(OPT) Model," SAE Trans. 940526, 1994
- 6) Bai, C., et al., "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," SAE Trans. 950283, 1995
- 7) Stanton, D.W., et al., "Modeling Fuel Film Formation and Wall Interaction in Diesel Engines," SAE Trans. 960628, 1996
- 8) 원영호, "형광/산란광 동시 촬영법을 이용한 가솔린 분무의 거동에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제5권 제6호, pp. 167 - 174, 1997
- 9) Serpenguzel, A., 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
- 10) 小田 外1名, "レーザシートによる噴霧断面の可視化法,"日本機械學會論文集(B) 62券599號, pp. 2861-2866, 1996
- 11) Naber, J.D., et al., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement," SAE Trans. 880107, 1988