

## 간헐 가솔린 분무의 충돌에 의한 미립화 촉진 Impinging Atomization of Intermittent Gasoline Sprays

원 영 호\*, 임 치 략\*\*  
Y. H. Won, C. R. Lim

### ABSTRACT

Experimental and analytical studies are presented to characterize the break-up mechanism and atomization processes of the intermittent-impinging-type nozzle. Gasoline jets passing through the circular nozzle with the outlet diameter of 0.4 mm and the injection duration of 10 ms are impinged on each other. The impingement of fuel jets forms a thin liquid sheet, and the break-up of the liquid sheet produces liquid ligaments and droplets subsequently.

The shape of liquid sheets was visualized at various impinging velocities and angles using the planer laser induced fluorescence (PLIF) technique. Based on the Kelvin-Helmholtz wave instability theory, the break-up length of liquid sheets and the droplet diameter are obtained by the theoretical analysis of the sheet disintegration. The mean diameter of droplets is also estimated analytically using the liquid sheet thickness at the edge and the wavelength of the fastest growing wave. The present results indicate that the theoretical results are favorably agreed with the experimental results. The size of droplets decreases after the impingement as the impinging angle or the injection pressure increases. The increment of the injection pressure is more effective than the increment of the impinging angle to reduce the size of droplets.

주요기술용어 : Gasoline Spray(가솔린 분무), Fuel Injector(연료분사기), Atomization(미립화), Jet Impingement(분류충돌), Liquid Sheet(액막), Fuel Droplet(연료액적), Laser Sheet Visualization (레이저 시트 가시화), LIF(레이저 여기 형광법)

---

\* 정회원, 울산대학교 자동차공학과  
\*\* 울산대학교 대학원

# 1. 서 론

가솔린 엔진의 혼합기 형성은 연소를 지배하는 주요인자로서 엔진 출력, 연료소비율, 배기가스 성능, 운전성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 양호한 혼합기 형성을 위하여 다양한 형태의 연료 인젝터가 개발되어 있다.<sup>1)</sup> 연료 분류를 상호 충돌시켜 미립화를 촉진시키는 방법은 충돌각도와 속도를 변화시킴으로써 충돌 후 분무의 액적의 크기와 연료의 공간확산을 용이하게 조절하는 것이 가능하여 이전부터 로켓 엔진에 주로 사용되었으며, 최근에는 가솔린엔진의 연료 인젝터에도 사용되고 있다. 상호충돌 방법을 가솔린 인젝터에 적용할 경우 충돌각을 작게 하여 연료의 미립화를 촉진시키면서 분무의 확산을 억제하고 분무의 관통력을 유지하여, 분무의 벽면 충돌시 액막형성을 최소화하고 벽면충돌에 의한 2차 미립화를 촉진하는 이점이 있다. 로켓 엔진에 사용되는 연속분류의 충돌에 관하여는 많은 실험적, 이론적 연구가 행해졌으나, 이들 결과를 가솔린 분무와 같은 간헐분무에 적용하기 위해서는 양 분무의 차이점에 관한 연구가 선행되어야 한다.

연료분류의 충돌에 의한 미립화는 충돌점 주위에 형성된 Fig.1에 나타난 형상의 액막이 주위공기의 교란으로 파동 운동을 하면서 액주 또는 액적으로 분열된다.

Huang<sup>2)</sup>의 정면 충돌분류 실험에 의하면 충돌로 형성되는 액막의 분열은 웨버수가 1,000 이하의 저 웨버수 영역에서는 액막이 정맥류형 파동에 의하여 분열되고, 그 이상의 고 웨버수 영역에서는 사인곡선형 파동에 의하여 분열된다. 아울러 저 웨버수 영역에서는 웨버수 증가에 따라 액막의 반경이 증가하고, 고 웨버수 영역에서는 반대의 경향을 관찰하였다.

Wiehs<sup>3,4)</sup>는 사인곡선형 파동에 의한 액막의 분열과정을 액체의 점성을 고려하여 이론적으로 연구하였다. 해석 결과에 의하면 액막의 분열을 지배하는 최대성장률을 갖는 파동의 파수(wave number)는 일정하지 않고 액막의 반경방향으로 진행하면서 증가하는 것을 명확히 하고 액막이 분열되어 원통형 액주를 형성하고 이 액주가 액적으로 미립화 될 때 액적 직경은 웨버수가 증가함

에 따라 Rayleigh 분열기구에 의한 값보다 커지는 것을 이론적으로 도출하였다.

Ibrahim<sup>5)</sup>은 고·저 웨버수의 각 영역에서 독립된 모델을 제안하여 액막형상과 액적직경을 이론적으로 예측하였다. 저 웨버수 영역에서는 예측 결과가 실험결과와 잘 일치하고 있으나, 고 웨버수 영역에서는 실험결과와 비교하여 만족할 수준의 계산결과는 도출하지 못하였다. 이는 전체 액막의 두께를 충돌점의 액막 두께와 같다고 가정 한 단순한 모델을 사용했기 때문으로 생각된다.

Anderson<sup>6)</sup>등은 충돌 전 분류의 유동이 층류인 경우 충돌로 생긴 액막의 가장자리에 작고 규칙적인 파동이 생기고, 액막이 분열되면서 즉시 액적을 형성하는 것을 관찰하였다. 그러나 분류가 난류인 경우 액막에 생기는 파동의 진폭이 크고, 액막은 먼저 원통형 액주로 분열되고 다시 이 액주가 분열되어 액적이 되는 과정을 제안하였다.

野木<sup>7)</sup>은 가솔린 엔진에 응용을 목적으로 간헐 충돌분류의 액적직경을 충돌속도와 충돌각도를 변화시키면서 광범위하게 측정하였다. 간헐분류는 연속분류와 달리 분사초기에 액적직경이 크게 되는 경향을 보이고 이로 인하여 분사시간이 짧을 수

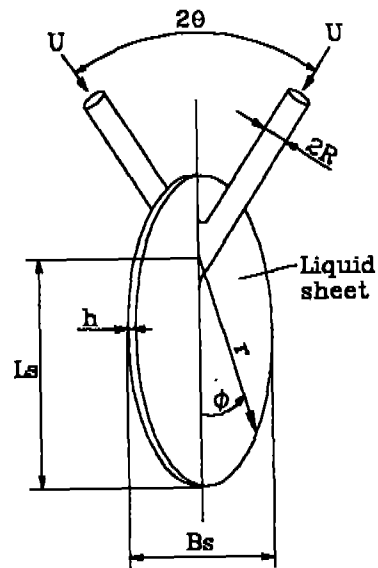


Fig.1 Schematic and notation for a sheet formed by impinging jets

록 액적직경이 커지는 결과를 얻었다. 충돌속도와 충돌각도의 증가에 따라 액적의 크기가 작아지나, 충돌각도의 증가에 따른 액적직경의 감소율이 더 크다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 野木등이 사용한 것과 거의 같은 실험 장치를 사용하여 간헐 충돌분무를 형성시키고, 연료 충돌부의 액막 형상을 레이저 시트광을 이용한 레이저 여기형광법으로 관찰하였다. 액막의 선형안정이론에 의해 계산된, 분열길이와 실측된 분열길이를 비교하였고, 액막의 분열 길이로부터 액막 가장자리의 두께를 산출하고 이 액막두께와 액막에 발생하는 최대성장률을 갖는 사인곡선형 파동의 파장으로부터 액적의 직경을 예측하는 모델을 제시하였다. 모델에 의한 계산결과를 분무의 확대사진을 이용한 액적의 평균직경 측정결과와 비교하여 타당성을 검토하였다.

## 2. 이 론

Fig.1에 속도  $U$ 의 연료분류가  $2\theta$ 의 충돌각도를 가지고 상호 충돌했을 때 충돌점 주위에 형성되는 액막의 형상과 좌표를 나타내었다. Naber<sup>8)</sup>에 의하면 충돌점에서의 초기 액막두께  $h_i$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i = \frac{\beta R \sin \theta}{e^\beta - 1} e^{\beta(1-\phi/\pi)} \quad (1)$$

위 식에서  $\beta$ 는 질량, 운동량 보존식에서 유도되는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{e^\beta + 1}{e^\beta - 1} \cdot \frac{1}{1 + (\pi/\beta)^2} \quad (2)$$

액막의 반경방향의 속도,  $U$ 가 일정하면 질량 보존식으로부터 액막의 반경  $r$ 에서 액막 두께  $h$ 는 다음과 같다.<sup>5)</sup>

$$h = \frac{R}{\sin \theta} \cdot \frac{h_i}{r} \quad (3)$$

웨이버수 ( $We = \rho_l U^2 D / \sigma$ )가 1,000 이상의 범위에서 액막의 분열에 대한 이론적 해석은 확립되어 있지 않으나, 많은 실험결과들<sup>6)</sup>에 의하면 최대성장률,  $n_{max}$ 의 누적 값이 다음 조건을 만족할 때 액막이 분열된다.

$$\int_0^{r_e} \frac{n_{max}}{U} dr = 12 \quad (4)$$

위 식에서  $r_e$ 는 분열길이를 나타내며 Squire<sup>6)</sup>의 액막의 안정이론에 의하면 액막에 생기는 파동의 최대성장률은 다음 식으로 나타낸다.

$$n_{max} = \frac{\rho_g U^2}{\sqrt{2\rho_l \sigma h}} \quad (5)$$

한편 Weihs의 연구에 의하면 유체의 점성을 고려한 액막 가장자리에서의 사인곡선형 파동의 성장률  $n$ 은 다음과 같다.

$$n = \frac{\nu k^2 (\rho_l h)^{1/2}}{2} \left[ -1 + \left( 1 + \frac{8(\rho_g k U^2 - \sigma k^2)}{\nu^2 k^4 \rho_l h} \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

여기서  $\nu$ 는 연료의 동점성계수,  $\sigma$ 는 표면장력,  $k$ 는 파수,  $\rho_l$ 와  $\rho_g$ 는 각각 연료와 공기의 밀도를 나타낸다.

액막의 분열로 액적이 형성되는 과정은 다음의 두 가지 과정을 생각할 수 있다. 첫 번째는 액적은 최대성장률을 갖는 파동의 반파장의 폭과 분열시의 액막 두께  $h_e$ 와 같은 두께를 갖는 얇은 띠가 표면장력에 의해 원통형 액주로 수축된 후 이 액주가 Rayleigh 분열기구에 따라 분열되어 형성되는 것으로, 이 때 액적의 직경  $d$ 는 다음과 같이 된다.<sup>4)</sup>

$$d = 1.89 \sqrt{\frac{4h_e}{k}} \quad (7)$$

두 번째는 액막에서 분열된 때가 분열과 동시에 길이방향으로도 폭과 같은 크기로 분열되고 이때 생긴 정사각형 미소액막이 수축되어 액적을 형성하는 것으로, 이 때 액적 직경  $d$  는 다음과 같이 된다.<sup>9)</sup>

$$d = \left[ \frac{6}{\pi} \left( \frac{\pi}{k} \right)^2 h_e \right]^{1/3} \quad (8)$$

식 (7),(8)에서  $k$ 는 식(6)의 성장률이 최대가 될 때 파동의 파수이다.

### 3. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 분사 노즐은 MPI 기술린엔진용 단공 노즐의 선단에 내경 0.4mm, 길이 20mm의 원형튜브를 부착시킨 것을 사용하였다. 연료는 고압질소에 의해 가압 분사되며, 양 인젝터에 동일 펄스를 입력시켜 동일시각에 같은 분사기간 동안에 연료가 분사되도록 하였다. 분사기간은 10ms이다. 노즐출구에서 충돌점까지 거리는 3mm로 고정했다.

연료 액막의 가시화 실험은 레이저시트광을 이용한 레이저여기형광법을 사용했다. 형광물질로는 로다민(Rhodamine) 6G를 사용하였으며<sup>10)</sup>, 이 방

법은 산란법에 비하여 액적에 의한 다중산란의 영향을 적게 받아, 액막의 형상을 보다 명료하게 관찰할 수 있는 장점이 있다.<sup>11)</sup> Fig.3은 액막을 형광법과 산란법으로 가시화한 결과를 비교한 그림이다. 산란광 화상은 작은 액적에 의한 산란과 다중산란의 영향으로 액막이나 액주에 산란광강도의 불균일 반점이 생겨, 액막이나 액주의 분열여부를 정확히 파악하기 곤란하다. 반면에 형광화상은 이러한 현상이 많이 완화되었음을 알 수 있다. 형광물질의 여기용 광원으로는 발광시간 10ns, 파장 532nm 의 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 레이저 빔은 3개의 원통렌즈로 두께 약 0.3mm의 시트광이 되어 Fig.2와 같이 액막의 두께 방향의 중

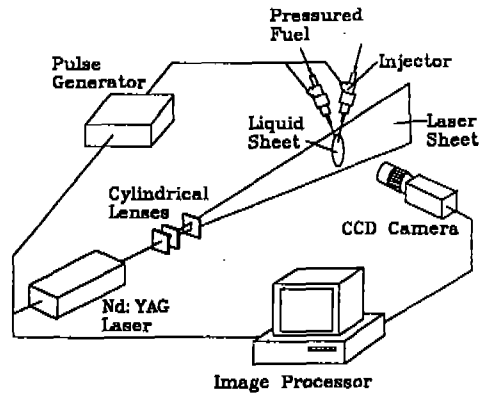
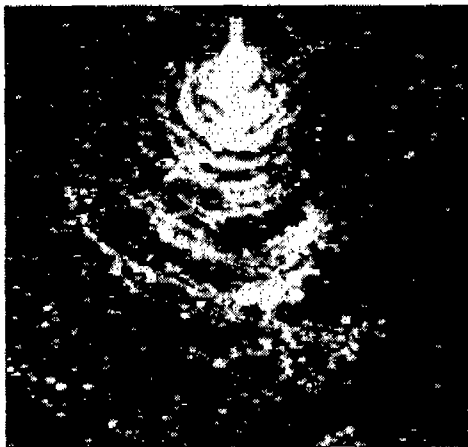
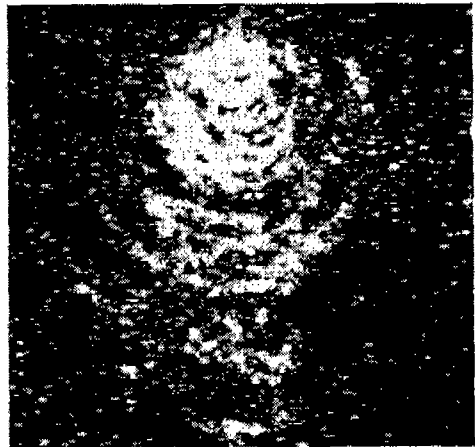


Fig.2 Experimental setup



Fluorescence image



Scattering image

Fig.3 Comparison of fluorescence and scattering images of a liquid sheet

심을 통과한다. 형광 촬영은 접사링을 사용하여 배율을 적절히 조절하여 CCD 카메라로 촬영하였다. 분열 후 액적 평균직경은 액적군의 확대사진법<sup>10)</sup>을 이용하여 충돌점에서 수직으로 50mm 하류에서 측정하였다. 측정은 동일조건에서 10회 수행하여 평균값을 취하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 액막길이 및 폭

Fig.4는 분사압력,  $P_{inj}$ 은 3기압으로 일정하고, 충돌각도를 변화시켰을 때 액막의 형상을 가시화한 결과이다. 화상의 크기는  $19\text{mm} \times 19\text{mm}$ 이다. 액막에는 충돌점에서부터 파동이 관찰되며, 이러한 파동의 파장은 충돌점에서 멀어질수록 커지는 경향을 보인다. 액막은 주위공기와의 간섭으로 인한 교란에 의해 파동의 진폭이 증가하여 액체의 표면장력과 액막의 운동에너지로 인한 관성력의

균형이 깨어지면서 분열되어 액주 또는 액적으로 분열되는 과정을 거치는데<sup>12,13)</sup> 이를 액막화상에서 확인할 수 있다. 모든 화상에서 액막은 분열 후 불규칙한 형상의 액주와 액적이 혼재하여 복잡한 형상을 보이고 있으나, 충돌각도가 작은 경우 액주의 형성이 뚜렷하지 않고 액막이 분열되어 즉시 액적을 형성하는 것이 관찰된다. 이에 비해 충돌각도가 큰 경우 비교적 액주가 잘 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig.5는 충돌각도( $2\theta$ )가 60도로 일정하고, 분사압력 즉 충돌속도를 변화시켰을 때 액막의 형상을 가시화한 화상이다. 분사압력의 증가에 따라 파동의 파장이 다소 작아지는 것이 관찰된다. 액막길이와 최대폭은 분사압력변화에 따라 그다지 변하지 않는다.

Fig.4와 같은 액막화상을 이용하여 충돌각도를 30도에서 120도까지 변화시키면서 측정한 액막의 길이,  $L_s$ 를 Fig.6에, 액막의 최대폭,  $B_s$ 를 Fig.7에 나타내었다. 두 그림에서 대체적으로 충돌각도

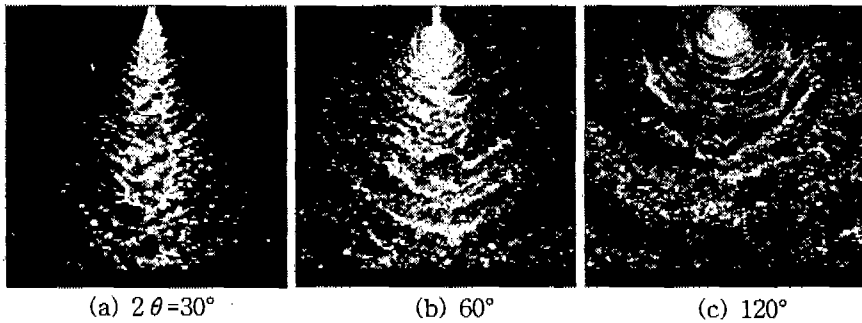


Fig.4 The effect of impinging angle on liquid sheet images at injection pressure is 3atm

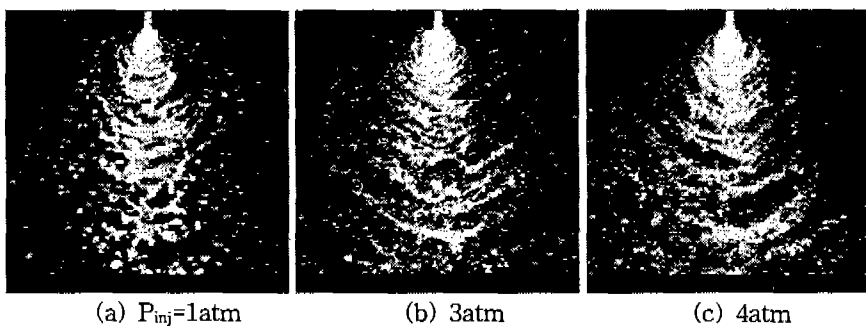


Fig.5 The effect of injection pressure on liquid sheet images at impinging angle is 60°

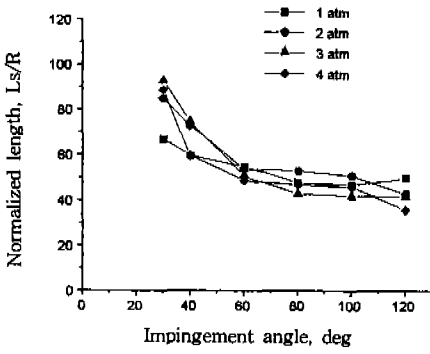


Fig.6 Variation of sheet length with impingement angles at  $P_{inj}=3atm$

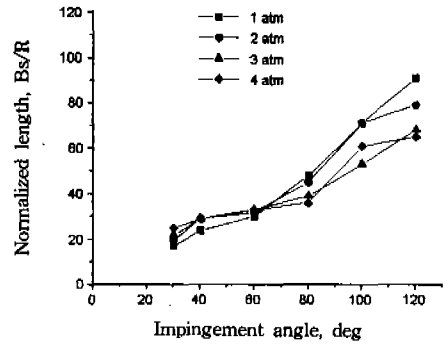


Fig.7 Variation of sheet width with impingement angles at  $P_{inj}=3atm$

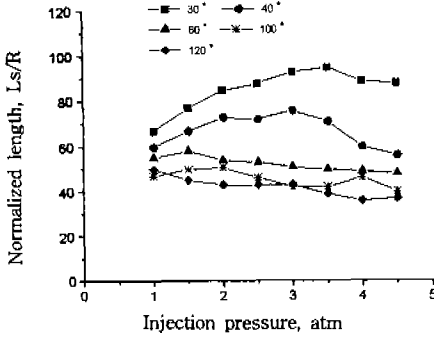


Fig.8 Variation of sheet length with injection pressures at  $2\theta=60^\circ$

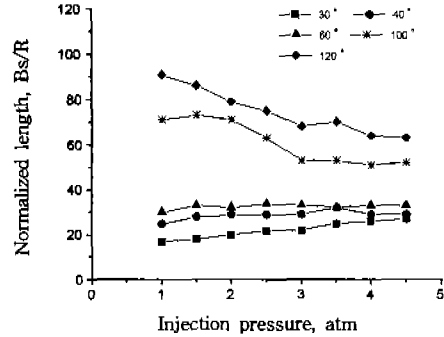


Fig.9 Variation of sheet width with injection pressures at  $2\theta=60^\circ$

가 증가하면 액막길이는 감소하고, 액막 폭은 증가한다. Fig.6에서 액막길이는 충돌각도가  $60^\circ$ 보다 작은 범위에서 큰 폭으로 감소하나, 이 보다 큰 범위에서는 분사압력에 상관없이 거의 일정한 값을 유지한다. 이와 대조적으로 액막폭은 충돌각도에 비례하여 증가하는 것을 Fig.7에서 알 수 있다.

Fig.8과 Fig.9는 Fig.5와 같은 일정 충돌각도에서 분사압력을 변화시키면서 얻은 액막화상을 이용하여 액막의 길이와 폭을 측정된 결과이다. 분사압력이 증가하면 대략적으로 액막길이는 감소하고, 액막 폭은 다소 증가하나, 그 변화 폭은 충돌각도의 영향에 비하면 비교적 작다.

실제 측정된 액막 분열길이를 식(4)에 의해 예측한 분열길이와 비교하면 실측 액막분열길이는 예측 분열길이의 1/2정도에 지나지 않는다. 이는 식(4)가 층류 정상유동에 적합한 식인데 반하여

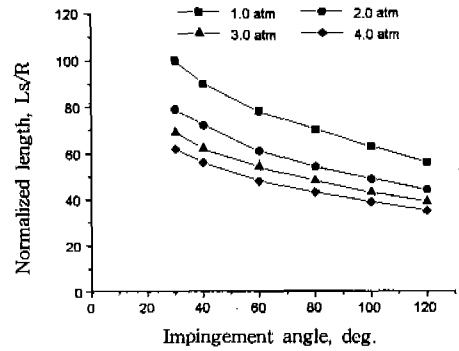


Fig.10 The half of sheet length calculated by equation (4)

본 실험의 액막유동은 난류 비정상유동으로 층류 정상유동에서 고려되지 않는 교란의 영향 때문으로 생각된다.

Fig.10에 식(4)에 의해 계산된 분열길이의 1/2

값을 나타내었다. 이 그림을 Fig.6과 비교하면 충돌각도가 40도 이상, 분사압력이 2기압 이상에서는 실측분열길이는 식(4)에 의한 예측분열길이의 1/2값에 근접함을 알 수 있다.

## 4.2 액적의 직경

Fig.11과 Fig.12에 액적군의 확대사진을 이용하여 측정된 액적의 평균직경을 Fig.6의 실측분열길이의와 식(7), (8)에 의하여 계산된 직경과 비교하였다. 액적직경 측정은 분사 후 9ms, 충돌점에서 액막 중심축을 따라 50mm 하류에서 행하였다. Fig.11에서 분사압력이 3atm으로 일정할 때 충돌각도가 증가하면 액적의 평균직경은 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 계산값도 실측값과 같은 경향을 보이고 있으나 식(8)에 의한 값이 보다 실측값에 근접하고 있다.

Fig.12는 충돌각도가 60도로 일정하며 분사압력을 변화시켰을 때, 평균 직경의 변화를 나타내고 있다. 분사압력이 증가함에 따라 평균직경은 감소하며, 감소 폭은 Fig.11의 충돌각도 증가에 따른 감소 폭보다 크다. 계산값은 분사압력이 1.5기압 이하이면 실측값과 차이가 크나, 그 외의 영역에서는 실측값과 잘 일치하고 있다. Fig.11에서와 마찬가지로 식(8)에 의한 계산값이 실측값에 보다 근접한다. 이는 액막이 분열되어 원통형 액주를 형성하지 않고 직접 액적으로 되는 과정이 지배적임을 간접적으로 나타내나, 보다 명확히 분열 과정을 파악하려면 분열부위를 확대하여 관찰하는 것이 필요하다.

Fig.13과 Fig.14는 액막의 분열길이를 실측값을 사용하지 않고 식(4)에서 구한 값의 1/2로 취하고, 식(7)과 (8)을 사용하여 구한 액적직경 값

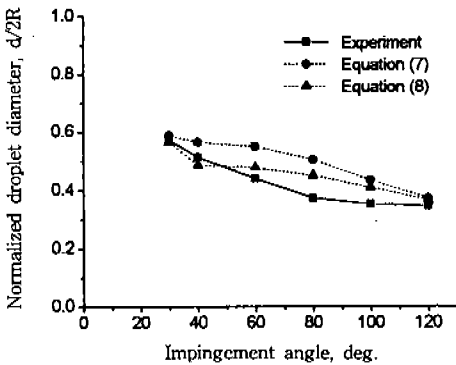


Fig.11 Comparison of calculated droplet diameter with experimental results at  $P_{inj}=3atm$

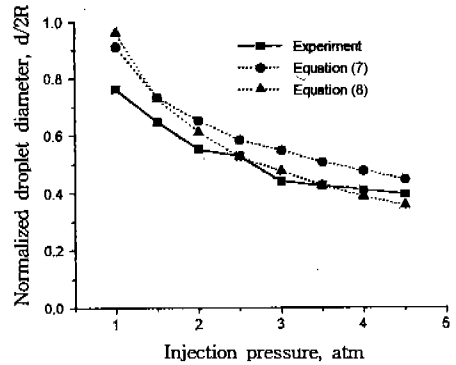


Fig.12 Comparison of calculated droplet diameter with experimental results at  $2\theta=60^\circ$

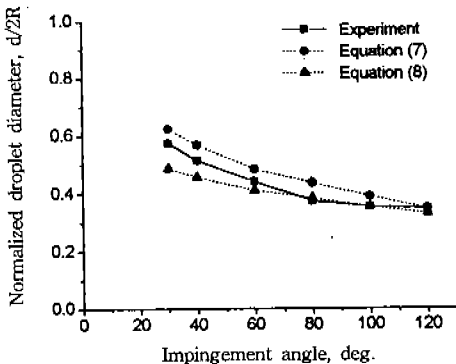


Fig.13 Comparison of calculated droplet diameter with experimental results at  $P_{inj}=3atm$

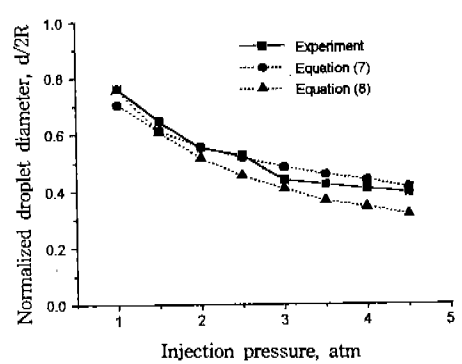


Fig.14 Comparison of calculated droplet diameter with experimental results at  $2\theta=60^\circ$

을 실측값과 비교한 그림이다. Fig.10에서와 같이 식(4)에서 구한 값의 1/2로 예측한 분열길이가 실측값과 잘 맞지 않는 분사압력이나 충돌각도가 작은 영역에서도 계산된 액적직경 값은 실측 직경 값과 잘 일치하고 있음이 관심을 끈다. 식(7)과 식(8)의 결과를 비교하면 식(7)은 실측값보다 다소 큰 값을 식(8)은 다소 작은 값을 보여주고 있다.

## 5. 결 론

간헐충돌 가솔린 분무의 액막분열 과정을 충돌 각도와 분사압력을 변화시키면서, 2차원 레이저 여기 형광법으로 관찰하였다. 또한 액막의 분열 길이와 분열 후 형성된 액적의 평균직경을 예측하는 모델을 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 충돌각도와 분사압력이 증가할수록 액막길이는 감소하고, 액막 폭은 증가하나, 충돌각도의 변화에 따른 액막길이와 폭의 변화량이 분사압력에 따른 변화량 보다 크다.
- 2) 충돌각도와 분사압력이 증가할수록 액적의 평균직경은 감소하나, 분사압력 증가에 따른 감소 폭이 더 크다.
- 3) 간헐충돌분무의 액막유동은 난류유동이며, 분열길이는 대략적으로 연속충돌분무의 선형 안정 이론에 의해 예측되는 분열길이의 1/2 정도이다.
- 4) 간헐충돌분무의 분열 후 액적직경은 연속충돌분무의 사인곡선형 파동의 불안정이론에 근거한 분열 모델로부터 예측이 가능하다.

## 후 기

이 논문은 1997년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. Lai, M.C. et al., "An Experimental and Analytical Investigation of the Spray Structure from Automotive Port Injectors", SAE Trans. 941873, 1994.

2. Huang, J.C.P., "The Break-up of Axisymmetric Liquid Sheets", J. Fluid Mech. Vol 43, part 2, pp. 305~319, 1970.
3. Weihs, D., "Stability of Thin, Radially Moving Liquid Sheets", J. Fluid Mech. Vol 87, part 2, pp. 289~298, 1978.
4. Weihs, D. and Frankel, I., "Equilibrium Shape and Stability of A thin Liquid Cylinder in Cross Flow at Low Weber Numbers", J. Fluid Mech. Vol. 116, pp. 393~409, 1982.
5. Ibrahim, E.A. and Przekwas, A.J., "Impinging Jets Atomization", Phys. Fluids A3(12), pp. 2981~2987, December 1991.
6. Anderson, W.E., Ryan, H.M. and Santoro, R.J., "Impinging Jet Injector Atomization", Liquid Rocket Engine Combustion Instability, pp. 215~246, AIAA inc., 1995.
7. 野木 外 2名, "ガソリン機関用燃料噴射弁の間歇衝突微粒化に関する研究", 日本機械學會論文集 (B編) 58巻, 552號, pp. 2607~2611, 1992.
8. Naber, J.D. and Reitz, R.D., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE Trans. 880107, 1988.
9. 임치락 외 1명, "간헐가솔린 분무의 충돌에 의한 미립화 촉진에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. I, pp. 85~90, 1997.
10. 원영호, "LIF법을 이용한 가솔린 분무의 가시화", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 Vol. 2, pp. 39~44, 1996.
11. 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編) 62巻, 599號, pp. 2861~2866, 1996.
12. 정석호 외 2명, "충돌제트의 유량분포 및 혼합특성에 관한 실험적 연구" 대한기계학회논문집 (B) 제21권 제1호, pp. 99~112, 1997.
13. 윤석주 외 1명, "원추형 액막분열에 의한 액적 크기 예측", 한국액체미립화학회지, 제 2권 제 11호, pp. 8~17, 1997.