

벽면충돌 가솔린 분무 모델

Modeling of a Gasoline Spray Impinging on a Wall

김 태 완*, 원 영 호**, 박 정 규***
Tae-Wan Kim, Young-Ho Won, Jung-Kyu Park

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

In the present research, the spray-wall interaction was investigated by a laser sheet visualization method. 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 enlarged images of droplets.

The experimental results were compared with model predictions which are based on OPT method. The model has been modified to have the better agreement with the experimental result, and was implemented in the KIVA-II code.

주요기술용어 : Atomization(미립화), Laser sheet visualization(레이저시트 가시화), Spray impinging(충돌분무), Modeling of spray(분무모델)

1. 서 론

MPI 가솔린 기관에서 연료분사시 흡기포트 및 밸브에 부착되는 연료량을 감소시키고 미립화를 촉진시키면 기관응답성과 냉간 시동시 HC 배출량이 줄어든다.¹⁾ 최근에는 벽면에 부착되는 연료량을 줄이기 위해서 분무의 확산이

작은 hole형 노즐이 채용되고 있다. Hole형 노즐은 종래 사용된 핀틀형 노즐에 비해 노즐 출구에서 미립화 성능은 떨어지나, 액적의 큰 운동에너지로 인하여 액적이 벽면에 충돌할 때 미립화가 촉진된다. 따라서, 액적의 벽면충돌에 의한 미립화 기구를 명확히 파악하는 것이 중요하다.

벽면 충돌 미립화 기구는 디젤기관의 연료분무를 대상으로 많은 연구가 수행되었다.^{2,3)} 그러나 디젤분무는 액적의 직경, 충돌속도, 입자

* 회원, 울산대학교 대학원

** 회원, 울산대학교 기계자동차공학부

*** 회원, 건국대학교 기계항공우주공학부

의 수밀도, 분위기 압력 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.

Naber²⁾ 등은 액적이 벽면에 저속으로 충돌하면 반사되고, 충돌속도가 커지면 벽면에 수직인 속도 성분이 소멸하여 액체 분류와 같이 벽면을 따라 이동하는 모델을 제시하였다. 이 모델은 충돌 후 분무의 벽면에 수평방향의 확산을 과도하게 예측하여, 이에 대한 수정모델들이 제시되고 있다.

Naitoh 등⁴⁾은 OPT (Oval - Parabola Trajectory) 모델을 사용하여 평판에 충돌하여 분열된 액적의 직경을 이론적으로 예측하였다. OPT 모델은 충돌로 인한 액적의 변형률과 변형속도의 궤적을 나타내는 식을 사용하여, 충돌 후 액적 직경을 예측하였다. 계산결과는 실험결과와 비교하여 만족한 결과를 보이며, 충돌 후 액적 직경분포가 bimodal 분포를 보여주고 있는 것이 관심을 끈다.

Gavaises⁵⁾ 등은 액적이 벽면 충돌시 충돌에너지 흡수하여 변형이 촉진되고, 변형이 한계치를 넘으면 액적이 분열하는 모델을 제시하였다. 항력과 벽면 충돌에 의한 액적의 변형과 분열은 TAB 모델을 사용하여 예측하였다.

위의 충돌분무 계산모델은 실험식 혹은 실험보정 계수를 사용하고 있으나, 근거가 되는 실험결과가 디젤분무 혹은 핀틀형 인젝터의 가솔린 분무를 대상으로 한 것이어서, 본 연구대상인 hole형 인젝터의 가솔린 분무와는 다를 것으로 예상되므로 이에 대한 검토가 필요하다.

본 연구는 자체 제작한 단공 hole형 인젝터를 사용하여, 연료분무의 벽면 충돌속도와 충돌각도가 벽면에 부착하는 연료의 양, 충돌 후 액적 크기, 연료의 공간적 확산에 미치는 영향을 실험적으로 파악하고, 그 결과를 OPT 모델의 계산결과와 비교하여 모델의 보완을 시도하였다.

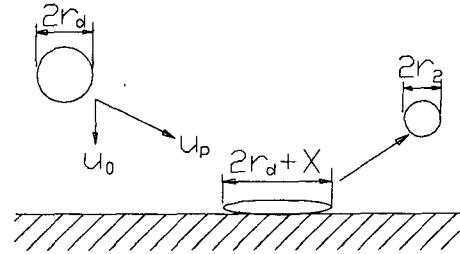


Fig. 1 Schematic breakup process of impinging droplet

2. 수치 모델

2.1 액적분열 모델

2.1.1 OPT 모델⁴⁾

충돌 전 반경이 r_d 인 구형 액적이 벽면에 충돌하면 Fig. 1과 같이 원판으로 변형되고 변형이 최대로 될 때 분열된다. 이때 변형값 X 의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{X} = -C_c \rho_l r_d^2 \dot{X}^2 - m C_k \frac{\sigma}{\rho_l r_d^3} X \quad (1)$$

$$\dot{X} = u_o, X = 0 \quad \text{at } t = 0 \quad (2)$$

여기서,

m : 충돌 전 액적질량 ($= \frac{4}{3} \pi \rho_l r_d^3$)

ρ_l : 연료밀도

σ : 표면장력

u_o : 충돌속도의 수직성분

t : 충돌 후 경과시간

C_c, C_k : 실험상수

식(1)은 4차 Runge-Kutta 법으로 수치해를 구할 수 있으며 \dot{X} 값이 0일 때 X 는 최대값을 갖는다. 이때 변형된 액적을 원판에 근사시키고, 이 원판에서 분열된 작은 원판조각이 구형 액적으로 변한다고 가정하면 에너지 보존식과 질량 보존식을 사용하여, 충돌로 분열된 액적의 반경, r_2 는 다음 식으로 나타낸다.

$$r_2 = \frac{4 r_d^3}{(r_d + \frac{X}{2})^2} \quad (3)$$

2.1.2 벽면부착 연료비율

Naitoh⁴⁾ 등은 에너지 보존식을 사용하여 충돌 후 벽면에 부착하는 연료량을 계산하였으나 결과는 실제 실험결과와 큰 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 새로운 모델을 제시하였다. 충돌 후 분열된 액적의 수는 액적이 받는 충격력에 비례한다고 가정한다. 따라서 충격력 F 와 분열된 액적의 개수, n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{m u_o}{t_{br}} \quad (4)$$

$$C_n F = 4 \pi r_2 \sigma n \quad (5)$$

여기서,

C_n : 비례상수

t_{br} : 충돌 후 분열까지 경과시간

식(4)의 t_{br} 은 식(1)에서 구하고, 식(5)로부터 n 을 구하면 벽면에 부착하는 연료분율 S_f 는 다음과 같이 나타낸다.

$$S_f = 1 - n \frac{r_2^3}{r_d^3} \quad (6)$$

2.2 충돌 후 액적의 거동

벽면 충돌 후 분열된 액적의 속도는 충돌 분무의 확산 사진에 근거하여 충돌 전 액적의 수직속도 성분과 수평속도 성분의 합의 0.4로 하였다. Fig. 2에 충돌분무의 형상을 도식적으로 나타내고, 액적의 충돌각도 α , 충돌 후 분열된 액적의 고도각 θ 와 방위각 ψ 를 정의한다. 그림에서 고도각 θ 는 가시화 실험결과로부터 벽면에서 충돌각 α 의 1/2의 범위에서 분포하고, 벽면 근처에서 액적의 수밀도가 높은 것을 고려하여 다음 식으로 나타낸다.

$$\theta = \frac{\alpha}{2} P^2 \quad (7)$$

여기서, P 는 0과 1 사이의 난수이다.

한편 방위각 ψ 는 벽면제트 충돌이론에서 도출된 다음의 Reitz²⁾식을 사용한다.

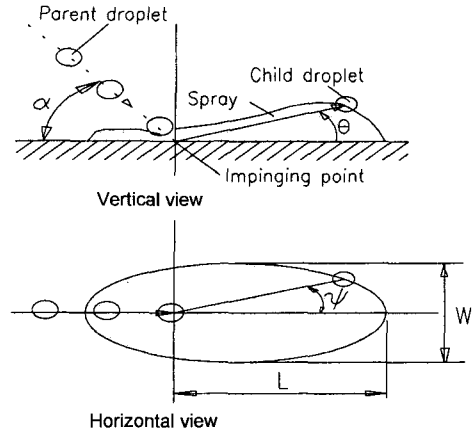


Fig. 2 Definition of impinging angle, α , spray penetration, L and width, W

$$\psi = -\frac{\pi}{\beta} \ln\{1 - P(1 - e^{-\beta})\} \quad (8)$$

위 식에서 β 는 다음 식으로 구해진다.

$$\sin \alpha = \frac{e^{\beta} + 1}{e^{\beta} - 1} \frac{1}{1 + (\frac{\pi}{\beta})^2} \quad (9)$$

위의 충돌모델을 KIVA-II 코드에 추가시켜 분무의 거동을 계산하였다. 분공에서 분출된 액적의 크기는 실측 크기를 사용하였으며 벽면 충돌 전까지 분무기의 저항에 의한 액적의 분열은 없는 것으로 하였다. 또한 공기 저항에 의한 액적의 변형이 항력에 미치는 영향은 고려하지 않았다. 충돌 후 벽면에 부착된 연료의 속도는 없는 것으로 가정하였다.

3. 실험장치 및 방법

충돌 후 분무의 거동 및 액적의 크기 분포를 관찰하기 위해 레이저시트 여기 형광 가시화법⁶⁾을 사용하였다. 실험에 사용된 가솔린 인젝터는 노즐의 직경이 0.28mm인 단공 hole형 노즐이다. 분공에서 분출된 연료는 액주를 형성하고, 이 액주가 분열되어 굴곡진 구형 액적으로 되어, 분공에서 60mm 떨어진 충돌점에 도달한다. 연료 분사압력은 고압질소 봄베를 사용하

여 1~6atm으로 조절하였다. 연료 분사시간은 10ms이고, 분위기는 유동이 없는 온도 25°C, 압력 1 기압의 대기이다. 벽면 충돌 후 벽면에 부착하는 연료량은 충돌 점을 중심으로 직경 20 mm의 원주에 틈새 1mm의 홈을 내어 이곳에 유입되는 연료량으로 측정하였다. 충돌판의 온도는 25°C이고 조도는 약 1μm이다.

가시화 실험장치의 개략도는 Fig. 3에 나타내었다. 광원으로는 펄스 Nd:YAG 레이저의 제 2 고조파(펄스 지속시간 10ns, 파장 532nm)를 사용하고, 레이저빔은 3개의 원통렌즈를 사용하여 측정부위에서 두께 약 0.3mm의 시트 광으로 변환되어 분무의 중심단면을 통과한다. 분무로부터의 산란광 및 형광은 레이저 시트광과 직각을 이루는 방향에서 촬영하였다. 분무의 수평단면을 촬영할 때는 그림에서처럼 평판 유리 충돌판을 통하여 거울에 반사된 화상을 촬영하였다. 형광은 35mm 스틸 카메라에 의하여 촬영된다. 필름은 Kodak ASA 400 네가 필름을 사용하였다. 촬영시각은 레이저 발광신호와 인젝터 분사시간을 펄스 발생기로 동기하여, 연료분사 개시 후 원하는 시각에 레이저를 발광시켜 화상을 얻었다. 화상해석에는 동일한 조건에서 5회 촬영하여 평균값을 취하였다. 한편 촬영된 광도를 정량화하기 위해 분무 촬영전에 gray-scale을 촬영하여 촬영장치의 감마 값을 도출하여 화상을 보정하였다. 현상된 필름은 칼

라필름 스캐너(Nikon제 Cool-scan)를 사용하여 디지털 처리한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 분열 액적의 크기

충돌 전 액적의 평균직경은 실측에 의하면 분사압력의 영향을 거의 받지 않고, 대략 640 μm이다. 이 값은 분공 경 보다 큰 것으로 액주가 긴 원통으로 분열된 다음에 구형 액적으로 수축되었기 때문으로 생각된다. 충돌속도는 연료의 분사압력을 변화시켜 조정하였다. 노즐 오리피스의 속도계수로 Borda형 표준적 계수인 0.98로 취하면 분사압력이 3과 6atm에서 충돌속도는 29.3과 41.4m/s이다.

Fig. 4는 OPT모델에 의한 벽면 충돌 후 액적 직경의 계산 결과를 가시화를 이용한 실측결과와 비교한 그림이다. 측정값은 동일조건에서 촬영한 5매의 액적 사진의 평균값이다. 계산식(1)에서 실험계수 C_c 와 C_k 는 각각 0.5와 2.0으로 하였다. 충돌각도가 60°와 90°인 경우 계산치는 실측치와 거의 일치하고, 충돌각도와 충돌속도가 커질수록 직경이 감소하는 경향을 잘 예측하고 있다. 그러나 충돌각도가 30°에서는 계산치가 실측치보다 다소 크다. 이러한 결과들을 볼 때 OPT 모델은 분열된 액적의 크기를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

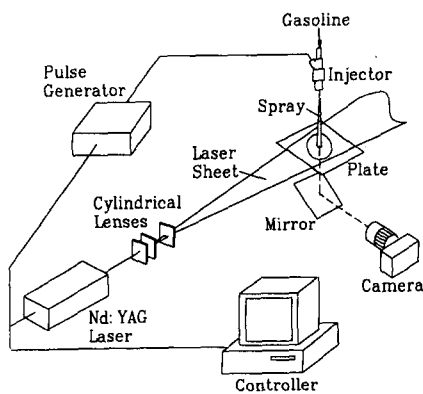


Fig. 3 Experimental setup

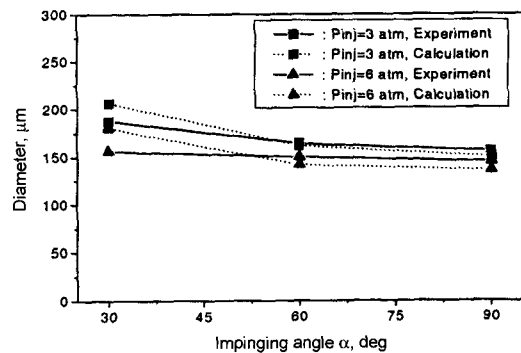


Fig. 4 Diameter of breakup droplets calculated by OPT model and measured

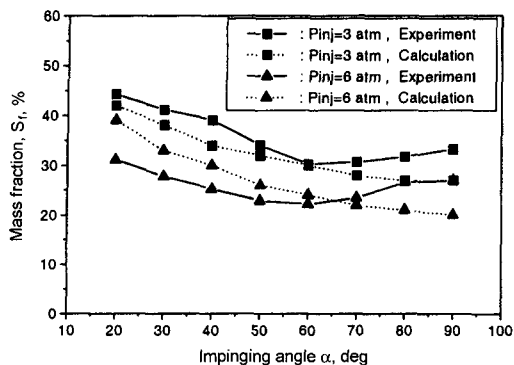


Fig. 5 Mass fraction of fuel stuck on the wall

4.2 벽면 부착 연료량

분무의 벽면 충돌속도와 충돌각도의 변화에 따른 벽면에 부착되어 액막을 형성하는 연료분율, S_f 를 Fig. 5에 나타내었다. 측정값은 100번 분사의 평균값이다. 그림에서 실선으로 나타낸 실측결과를 보면 충돌각도와 분사압력, 즉 충돌속도가 증가하면 부착 연료량은 감소한다. 그러나 충돌각도가 70°보다 큰 경우 벽면부착 연료 분율이 오히려 증가하는 경향을 보인다. 이는 충돌 후 비산된 액적이 충돌 전 액적과 간섭으로 벽면에 재 부착되는 현상 때문으로 생각된다.

반면에 식(6)으로 구한 부착분율, S_f 를 보면 충돌각도의 증가에 따라 단순감소하고 있다. 또 충돌각도가 작아짐에 따라 충돌속도 증가에 따른 부착물의 차이가 적어진다. 이러한 계산결과는 Naitoh⁴⁾ 모델에 비해 많이 개선된 것이지만 실측결과와 차이가 있다. 이러한 차이는 벽면에 형성된 액막의 영향을 고려한 정교한 모델을 사용하면 줄어들 것으로 생각된다.

4.3 연료의 수평확산

충돌 후 분열된 액적이 방위각 ψ 로 비산될 확률은 충돌 후 분무의 수평적 연료 확산량과 관계가 있다. Reitz²⁾가 제안한 식(8)을 이용하여 이론적으로 ψ 에 따른 연료량 분포를 도출할 수 있다. Fig. 6에서 ψ 에 따른 분무의 수평 연

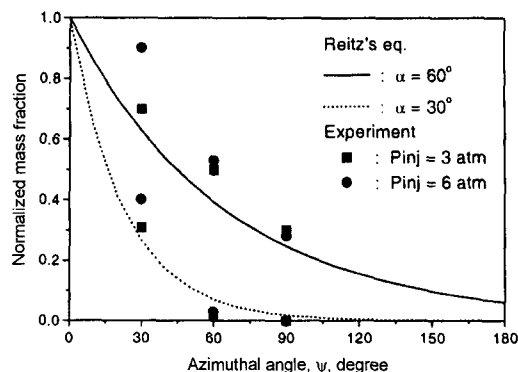


Fig. 6 Horizontal fuel dispersion normalized by the mass flow at $\phi=0$

료 확산량의 실측치와 계산치를 비교한다. 그림의 실선은 충돌각도 $\alpha=60^\circ$, 점선은 $\alpha=30^\circ$ 에서 Reitz식에 의한 연료량 분포를 나타내고, 사각형은 분사압력 3atm, 원형표시는 분사압력 6 atm의 분무를 화상 해석하여 얻은 값이다. Reitz식은 실측값을 잘 예측하고 있다.

4.4 충돌분무의 형상

Fig. 7은 분사압력이 3atm, 충돌각도가 60°에서 분사 개시 후 시간경과에 따른 분무의 발달 과정을 실측한 결과와 모델계산 결과를 비교한 그림이다. 그림의 좌측은 분무중심을 통과하는 수직단면을, 우측은 충돌 면에서 2mm 위의 수평단면을 가시화한 결과이다. 그림에서 시간, t 는 분사 후 경과시간이다. 계산결과는 분무의 외형, 즉 분무선단 길이, 폭, 벽면으로부터의 높이에서 실측결과와 잘 일치하고 있다. 수평단면 가시화 실측결과를 보면 분무선단에 액적의 수밀도가 높은 띠 모양이 관측된다. 이는 분무선단에서 액적이 공기에 의해 받는 항력이 액적변형의 증가와 주위 액적의 수밀도 감소로 인하여 선단 후방의 액적이 받는 항력보다 크기 때문에 후방의 액적에 추월 당하여 선단에 정체되기 때문으로 생각된다. 계산결과는 액적 변형과 수밀도가 항력에 미치는 영향을 고려하지 않아 이러한 특징을 보여 주지 않는다.

Fig. 8과 Fig. 9는 분사압력 3atm에서 충돌각

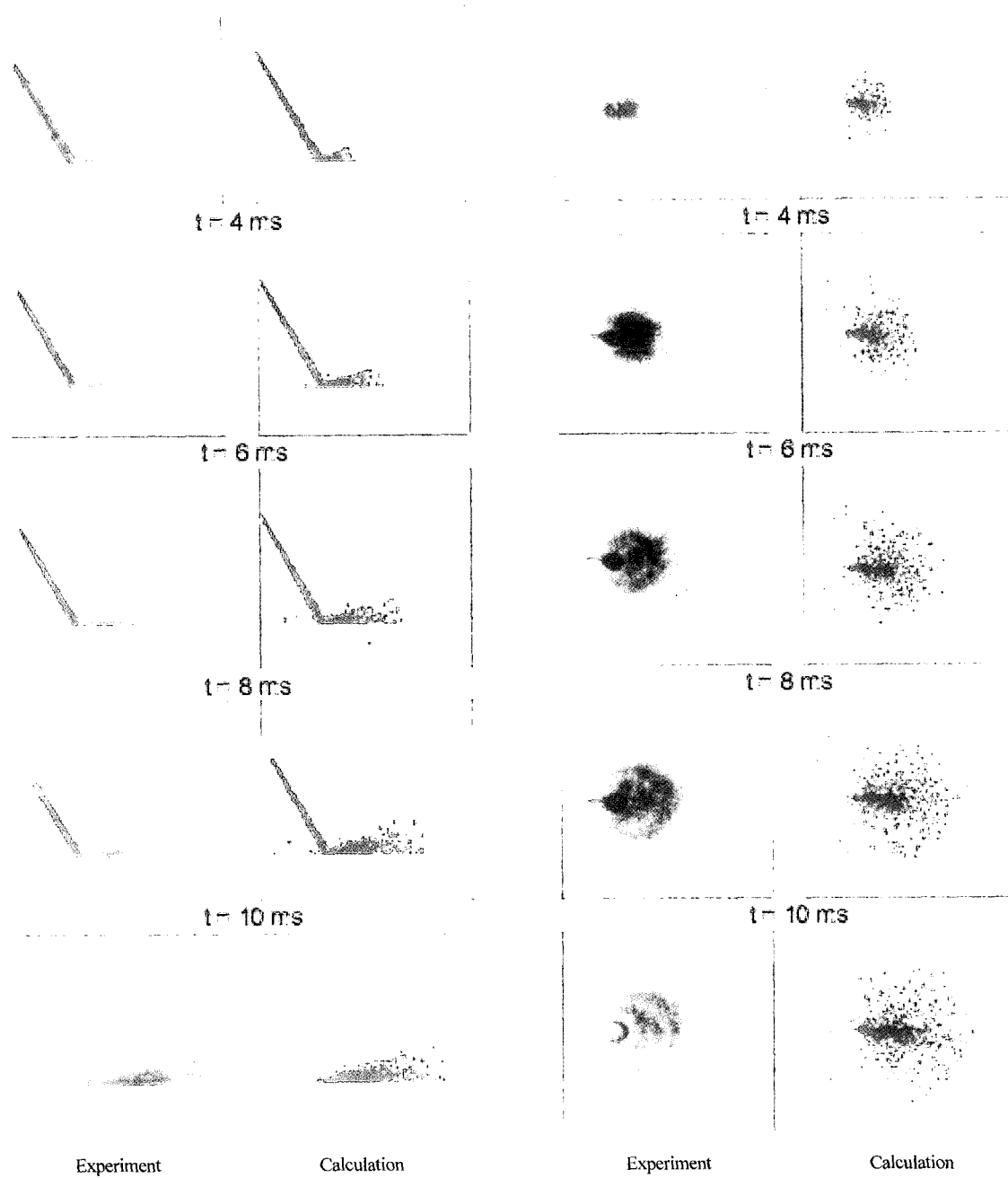


Fig. 7 Comparison of experimental and calculational results at injection pressure, 3atm and impinging angle 60°

도를 30°, 60°, 90°로 변화시켰을 때, Fig. 2에 정의된 분무의 선단도달거리L과 분무 폭W를 각각 나타낸 그림이다. Fig. 10과 Fig. 11은 분사 압력 6atm에서의 결과이다. 분사각도가 30°인

경우 분무 폭의 계산결과는 실측결과와 일치하나 선단도달거리는 실측치보다 작게 예측하고 있다. 그 외의 조건에서는 계산결과와 실측결과는 잘 일치하고 있다.

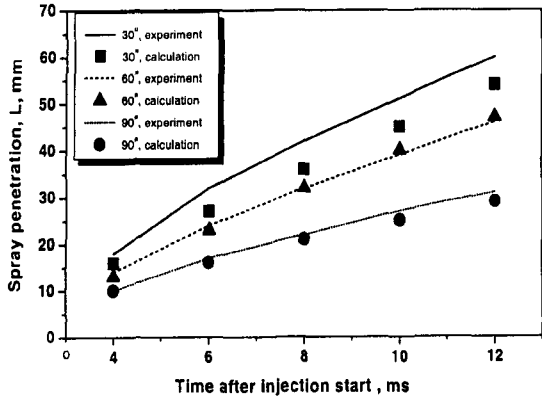


Fig. 8 Variation of spray penetration length, L at injection pressure, 3atm

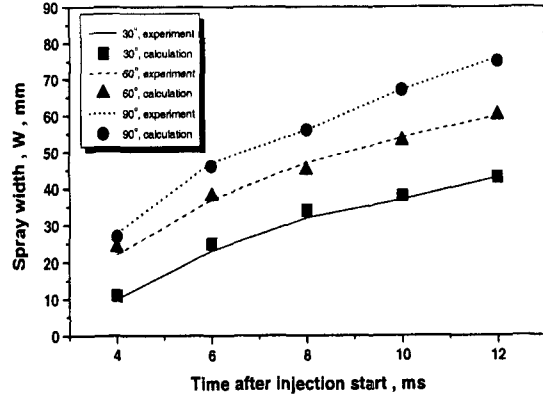


Fig. 11 Variation of spray width, W at injection pressure, 6atm

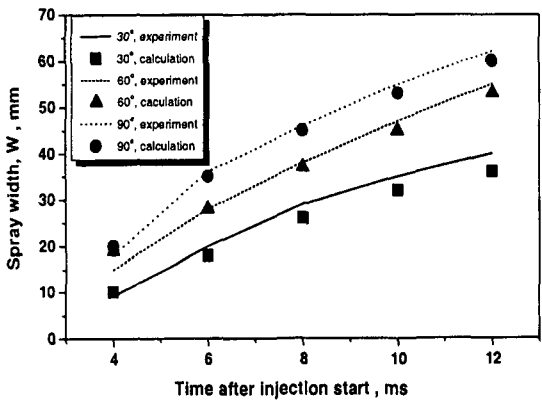


Fig. 9 Variation of spray width, W at injection pressure, 3atm

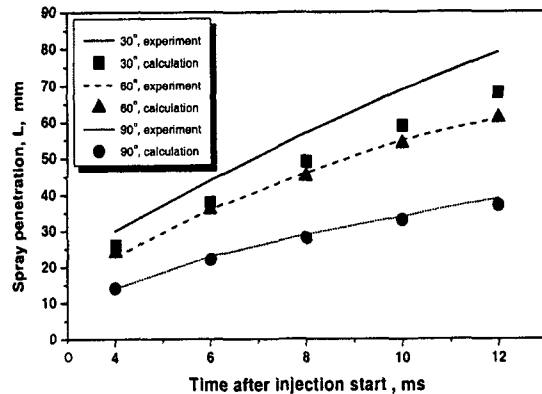


Fig. 10 Variation of spray penetration length, L at injection pressure, 6atm

5. 결론

벽면에 충돌하는 단공 가솔린 분무의 분열과 확산과정을 벽면충돌 모델인 OPT 모델을 KIVA-II 코드에 추가시켜 계산하였다. 계산결과를 레이저 시트 광을 이용하여 실측결과와 비교하였다. 또한 분무의 벽면 충돌속도와 충돌각도의 영향을 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) OPT모델은 충돌각도가 큰 경우에 충돌속도가 액적 분열에 미치는 효과는 잘 예측하는 반면 충돌각도가 작은 경우에는 오차가 크다.

2) 분사압력과 충돌각도가 증가할수록 벽면에 부착하는 연료량은 줄어드나, 충돌각도가 70°보다 큰 영역에서는 충돌각도가 커질수록 부착 연료량은 다소 증가한다.

3) 충돌 후 액적의 확산 모델은 실측 분무의 확산 과정을 잘 나타내 주고 있다. 그러나 분무의 수평단면 실측결과에서 분무선단에 액적의 수밀도가 높은 띠 모양이 관측되나, 모델계산은 이러한 특징을 보여주지 않는다. 이는 선단에서 액적의 변형 증대와 주위 액적의 수밀도의 감소가 액적의 항력을 증가시키는 효과를 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

4) 충돌속도가 커질수록 분열로 인한 미립화가 촉진된다. 또한 충돌각도가 증가할수록 미

립화가 촉진되나, 충돌속도가 커질수록 촉진효과
는 작아진다.

참 고 문 헌

- 1) H. Iwamoto et al., "An Analysis of Induction Port Fuel Behavior", SAE 912348, pp. 1777-1786, 1991.
- 2) J. D. Naber et al., "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE 880107, 1988.
- 3) J. Senda et al., "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall", SAE 941894, 1994.
- 4) K. Naitoh et al., "Numerical Prediction of Fuel Secondary Atomization Behavior in SI Engines Based on Oval-Parabola Trajectories (OPT) Model", SAE 940526, 1994.
- 5) M. Gavaises et al., "Modeling wall impaction of diesel sprays", Int. J. Heat and Fluid, Vol.17, No.2, pp.130-138, 1996.
- 6) 원영호, 임치락, "간헐 가솔린 분무의 충돌에 의한 미립화 촉진", 한국자동차공학회는 논문집, 제6권 제5호, pp.174-181, 1998.