

분위기 온도에 따른 충돌 분무의 거동에 대한 실험 및 수치적 연구

심영삼¹⁾ · 최경민^{*2)} · 김덕줄²⁾

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾

Experimental and Numerical Study on Behavior of Impinging Spray according to Ambient Temperature

Youngsam Shim¹⁾ · Gyungmin Choi^{*2)} · Duckjoon Kim²⁾

¹⁾Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 6 December 2006 / Accepted 1 February 2007)

Abstract : The numerical study on behavior of impinging spray from high-pressure swirl injector under various ambient temperatures was performed by using spray vaporization model and spray-wall impingement model implemented in modified KIVA code, and these spray models were estimated by comparison with experimental results. To compute the spray-wall impingement process, the Gosman model, which is based on the droplet behavior after impingement determined by experimental correlations, was used. The modified Abramzon and Sirignano model, that includes the effects of variable thermodynamic properties and non-unitary Lewis number in the gas film, was adapted for spray vaporization process. The exciplex fluorescence measurements were also conducted for comparison. The experimental and numerical analysis were carried out at the ambient pressures of 0.1 MPa and at the ambient temperature of 293 K and 473 K, and the spray characteristics, such as spray-wall impingement process, gas velocity field, SMD and vapor concentration, were acquired. It was found that the impinging spray develops active and SMD is small at vaporization conditions.

Key words : GDI(가솔린 직접 분사), Exciplex fluorescence measurement(Exciplex 형광 측정), SMD(자우터 평균 입경), Spray-wall impingement model(분무-벽 충돌 모델), Vaporization model(증발모델)

Nomenclature

Cp : specific heat, kJ/kg · K
D : vapor/air binary diffusion coefficient
k : thermal conductivity, W/m · K
Pr : Prandtl number
r : droplet radius, μm
Re : Reynolds number

Sc : Schmidt number
YF : mass fraction of fuel vapor

Subscripts

A : free stream gas(air)
r : reference condition
s : droplet surface
∞ : free stream condition

*Corresponding author, E-mail: choigm@pusan.ac.kr

1. 서론

연료를 실린더 내에 직접 분사하는 GDI 엔진은 부분부하 영역에서는 점화 플러그 주위에 농후한 혼합기를 분포시킴으로써 성층화에 의한 초회박 연소가 가능해 연비 향상과 배출물 저감의 장점이 있으며, 고부하 영역에서는 흡입행정에서 연료가 분사되고 분사된 연료는 실린더 내 공기를 냉각시키기 때문에 충전 효율이 높아지고 노킹 발생이 억제되어 높은 압축비가 가능해 출력 성능을 개선할 수 있다. 이러한 GDI 엔진은 압력 스윙형 인젝터를 이용하여 연료를 실린더 내에 직접 분사하기 때문에 연료 분무의 미립화, 증발, 벽 충돌 특성에 대한 이해가 매우 중요하다. 특히, GDI 분무는 연료 분사 시기에 따라 피스톤 헤드나 실린더 벽과 충돌하는 경우가 발생한다. 이러한 충돌 현상은 액적의 분열에 의한 분무 표면적의 증가, 분무의 분산 촉진 등의 장점이 있으나, 벽에 생성된 액막의 미연소로 인한 Soot 및 미연소 탄화수소의 증가로 인한 연소 효율 저하의 우려가 있어 이에 대한 이해가 필요하다.

분무 현상에 대한 실험적 연구로 Zhao 등¹⁾은 GDI 엔진용 인젝터의 분무 발달과정을 2차원 Mie 산란 기법을 이용하여 가시화하였고, PDA(Phase Doppler Anemometry)장치를 이용하여 연료 액적의 SMD를 측정하였다. Hwang 등²⁾은 LIEF(Laser Induced Exciplex Fluorescence) 기법을 통해 연료의 기·액상 분포를 측정하여 분무 성장에 대한 특성을 분석하였다. 그러나 실험적 연구는 장치에 따른 제약이 크기 때문에 전산 기법에 의한 수치적 연구는 보다 필요한 물성치에 대한 정보취득을 가능하게 한다.

분무 해석 시뮬레이션은 분무 미립화, 분무 증발, 벽 충돌에 대한 연구로 분류된다. 최근의 분무 미립화에 대한 연구는 주로 1차 분열과 2차 분열 과정을 모두 고려한 혼합 분열 모델을 중심으로 진행되고 있다. Beatrice 등³⁾은 WB(Wave Breakup) 모델과 TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델을 이용한 혼합 분열모델을 제안하였다. Schmidt 등⁴⁾은 LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 모델과 TAB모델을 혼합한 분열 모델을 제안하여 중공 원추형 분무에 대한 수치적 해석을 하였다. 증발 모델에 대한 연구로 Han 등⁵⁾은 KIVA 코드에 사용된

Spalding 모델에서 액체 상태 및 기체 상태에서 물성치 계산방법을 개선하여 GDI 엔진 내 분무의 분열 및 증발과정에 대해 해석하였다. Suh 등⁶⁾은 GDI 엔진 내 연료 분포의 거동과 공기·연료의 혼합기 형성과정을 모델링하였다. 분무 벽 충돌에 대한 모델로는 Warkins 그룹의 모델⁷⁾, Fujimito 그룹의 모델⁸⁾, Gosman 그룹의 모델⁹⁾ 등이 있다. 그러나 이 모델들은 디젤 연료 분무의 층돌 과정 해석에 주로 적용되어 왔다. 따라서 GDI 분무의 벽 충돌과정의 수치적 해석을 위해서는 위의 모델들의 GDI 분무에 대한 적용 가능성의 평가가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 증발 모델과 벽 충돌 모델을 수정된 KIVA 코드¹⁰⁾에 적용하여 다양한 분위기 온도 조건에서 GDI 분무의 벽 충돌 과정에 대한 해석과 분무 모델에 대한 평가를 하고자 하였다. 증발 모델로는 수정된 Abramzon & Sirignano 모델¹¹⁾을 이용하였으며, 벽 충돌 모델은 유막과 액적분열을 고려한 Gosman 모델⁹⁾을 사용하였다. 수치해석 결과는 Exciplex 형광 계측을 통하여 취득한 실험 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 기·액상의 분포 해석을 위한 실험장치이다. 실험 장치는 크게 GDI 분사계와 분무실, 광학계 및 화상 취득 장치, 신호 처리계로 구성되어 있다. 인젝터는 압력 스윙형 인젝터이며, 광원으로는

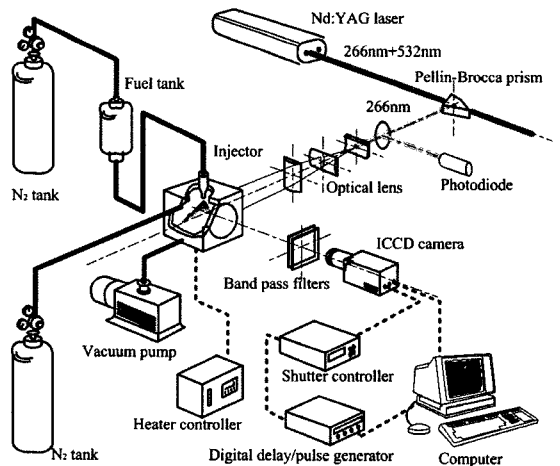


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Experimental and computing conditions

| Fuel | Hexane/Fluorobenzene/DEMA |
|--------------------------|---------------------------|
| Injection pressure (MPa) | 5.1 |
| Injection duration (ms) | 2 |
| Injection quantity (mg) | 14 |
| Ambient gas | N ₂ |
| Ambient temperature (K) | 293, 473 |
| Ambient pressure (MPa) | 0.1 |
| Impingement distance(mm) | 46.7 |

10Hz Nd-YAG 레이저(60mJ/pulse)의 4차 조화파(266 nm)를 사용하였다. 형광화상의 취득은 ICCD 카메라를 사용하였다.

Table 1은 실험 및 계산 조건을 나타낸 것이다. 대기압 하에서 분위기 온도 297K(비증발 조건)와 473K(증발 조건)로 선정하여 해석하였다.

3. 분무 해석 모델

3.1 벽 충돌 모델

Gosman등⁹⁾은 기존의 실험과 모델들을 분석하여 충돌 현상을 표면 온도와 충돌 속도에 따라 10 개의 구간으로 구분하였다. 충돌 형태는 Fig. 2와 같이 구분하였으며, 이를 충돌 조건에 따라 Fig. 3과 같이 구분하여 적용하였다.

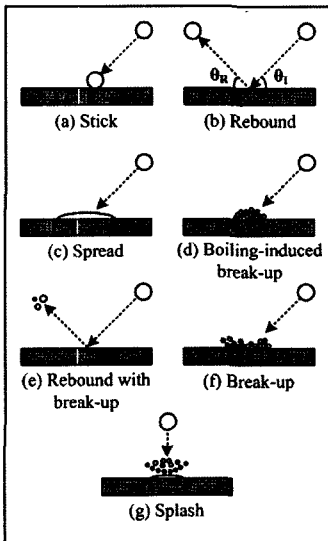


Fig. 2 Schematic of different impaction regimes

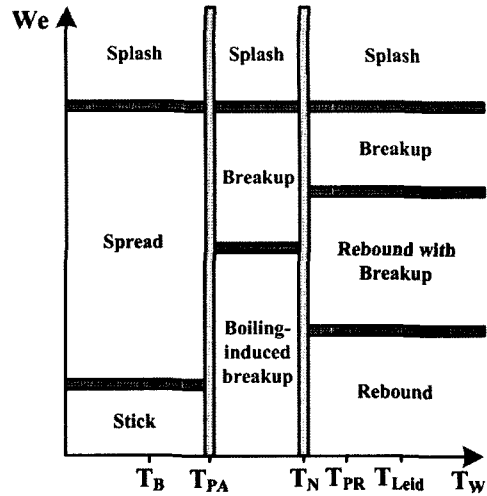


Fig. 3 Overview of droplet impingement regimes and transition condition for dry wall at fixed Laplace number and surface roughness

3.2 증발 모델

분무 증발을 모사하기 위해 Stefan 유동을 고려한 Abramzon & Sirignano가 제안한 모델¹¹⁾을 수정하여 사용하였다. 이 모델에서는 액적의 온도는 공간상 으론 일정하나 시간상으로는 변한다고 가정하였으며, 액적 표면과 기체 유동사이의 열 및 질량 전달이 일정한 두께를 갖는 가상의 막 내에 집중되어 있다고 가정하였다.

증발률 식은 다음과 같다.

$$\dot{m}_F = 2\pi r_s \rho_g D_g Sh^* \ln(1 + B_M) \tag{1}$$

$$\dot{m}_F = 2\pi r_s \frac{k_g}{C_{pg}} N^* \ln(1 + B_T) \tag{2}$$

여기서 하첨자 ‘s’는 액적의 표면을 나타내고, ‘g’는 기체막을 나타낸다. 그리고 B_M , B_T 는 각각 Spalding의 질량전달수 및 열전달수로 다음과 같다.

$$B_M = \frac{Y_{F_s} - Y_{F_\infty}}{1 - Y_{F_s}} \tag{3}$$

$$B_T = \frac{C_{pg}(T_\infty - T_s)}{L(T_s) + Q_L/\dot{m}} \tag{4}$$

여기서, $L(T_s)$ 는 연료의 증발 잠열을 나타내고, Q_L 은 액적 속으로 전달된 열로 다음과 같다.

$$Q_L = \dot{m} \left\{ \frac{C_{pg}(T_\infty - T_s)}{B_T} - L(T_s) \right\} \quad (5)$$

액적 증발시 대류의 영향을 고려했을 때 열 및 물질전달은 다음의 식에 의해 결정 된다.

$$N^* = 2 + \frac{(N_0 - 2)}{F(B_T)} \quad (6)$$

$$Sh^* = 2 + \frac{(Sh_0 - 2)}{F(B_M)} \quad (7)$$

강제대류나 자연대류가 없을 경우라 하더라도 증발하는 액적의 경우는 반지름 방향의 유동이 항상 존재한다. 이러한 Stefan 유동은 막의 두께를 증가시키는 역할을 한다. Abramzon & Sirignano는 이러한 막 두께의 변화가 Spalding의 전달수 B에 영향을 받는다고 하였다.

$$F(B) = (1+B)^{0.7} \frac{\ln(1+B)}{B} \quad (8)$$

그리고 비증발 상태에서 Nusselt 수와 Sherwood 수는 Ranz와 Marshall가¹²⁾ 제안한 식을 이용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$N_0 = 2 + 0.6 \sqrt{Re} Pr^{1/3} \quad (9)$$

$$Sh_0 = 2 + 0.6 \sqrt{Re} Sc^{1/3} \quad (10)$$

위 식에서 계산에 사용된 열역학적 상태량은 막의 기준온도를 이용한 1/3법칙으로 계산하였다. 1/3법칙은 다음과 같다.

$$T_r = T_s + \frac{1}{3}(T_\infty - T_s) \quad (11)$$

$$Y_{F,r} = Y_{F,s} + \frac{1}{3}(Y_{F,\infty} - Y_{F,s}) \quad (12)$$

$$Y_{A,r} = 1 - Y_{F,s} \quad (13)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 Spalding의 전달 함수 B_M 과 B_T 사이의 관계식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$B_T = (1 + B_M)^\phi \quad (14)$$

여기서 $\phi = \frac{C_{pg}\rho_g D_g}{k_g} \frac{Sh^*}{N^*}$ 이다. 그리고 액체상태 및 기체상태의 물성치들은 온도 및 압력의 함수로

계산하였으며, 혼합물의 물성치는 혼합법칙을 사용하여 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

분위기 온도가 293K인 비증발 조건과 473K인 증발 조건에서 Gosman 모델⁹⁾과 Abramzon & Sirignano 모델¹¹⁾을 사용하여 분무 벽 충돌 과정에 대한 해석을 하였다.

Fig. 4는 비증발 조건에서 분사 후 1.6 ms 부터 4.8 ms 까지 충돌 분무의 발달 과정에 대한 실험 및 계산 결과를 나타내고 있다. 분사 후 3.6 ms까지는 비교적 계산 결과가 실험 결과와 잘 일치하였다. 그러나 4.0 ms 이후에는 근소한 오차를 나타내고 있다. 이러한 오차는 분무 벽 충돌 과정 계산에서 충돌 후 액적 크기에 대한 계산 오차로부터 발생한 것으로 사료된다. 분무는 분사 후 2.0 ms에서부터 벽과 충돌하였으며, 충돌 후에는 반경 방향으로 와류를 형성하며 성장해 나갔다. 이는 분무 외각에서 형성되었던 와류가 벽과 충돌하면서 반경 방향 속도에 의해 외각으로 이동하면서 생긴 현상으로 사료된다.

Fig. 5는 분위기 온도가 473 K인 증발 조건에서의 분무 벽 충돌 과정에 대한 실험 및 계산 결과를 나타내고 있다. 증발 조건에서는 비증발 조건에 비해 액적의 수밀도가 더 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 액적들이 고온의 분위기 온도에서 증발하여 기상을 형성하기 때문이라 사료된다. 한편, 증발 조건에서 액적의 분포가 비증발 조건에 비해 반경 방향으로 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은

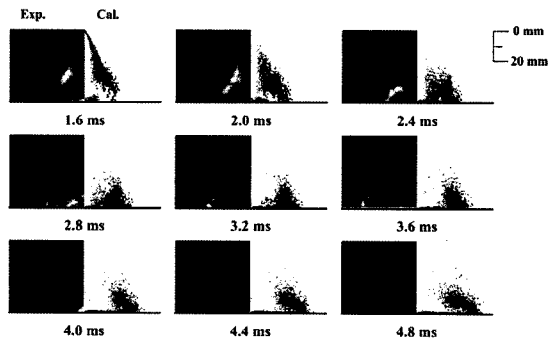


Fig. 4 Experimental and calculated spray-wall impingement process at the ambient temperature 293K (Liquid phase)

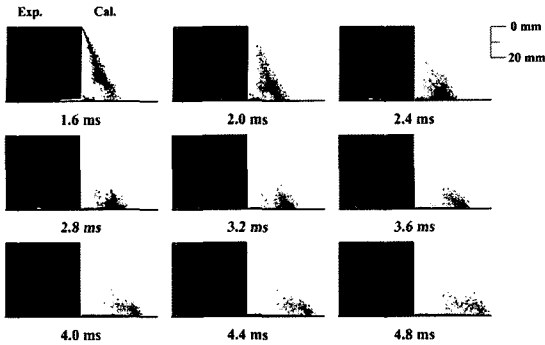


Fig. 5 Experimental and calculated spray-wall impingement process at the ambient temperature 473K (Liquid phase)

분위기 온도의 증가에 의해 주위 기체의 밀도가 낮아져 액적과 주위기체의 상호 작용으로 인한 운동 에너지의 소실이 더 적기 때문이라 사료된다.

Fig. 6은 충돌 후 시간에 따른 반경 방향 거리를 나타내고 있다. 반경 방향 거리는 비증발 조건에 비해 증발 조건에서 더 크게 나타났다. 모든 시간 구간에 대해서 반경 방향 거리 차이는 실험적 결과에 의하면 평균 15%로 나타났으며, 계산결과에 의해서는 평균 14%로 유사한 경향을 보여 주었다.

Fig. 7은 분위기 온도가 293K인 비증발 조건과 473K인 증발 조건에서 주위 기체의 속도장을 나타낸 그림이다. 비증발 조건에서 기체의 속도는 분무 중심 영역에서 높은 속도를 나타내고 있다. 또한, 분무 외각 영역에서는 와류가 형성되는 것을 볼 수 있었다. 생성된 와류는 분무와 같이 벽 충돌 후 반경

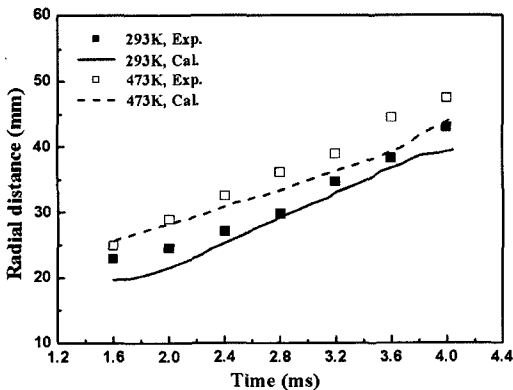


Fig. 6 Experimental and calculated radial distance after wall impingement at the ambient temperature of 293 K and 473 K

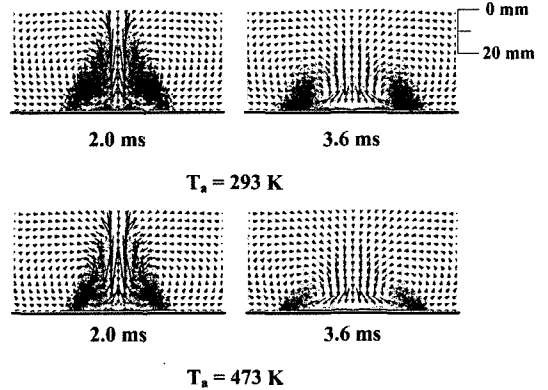


Fig. 7 Calculated velocity field of ambient gas at the ambient temperature 293 K and 473 K

방향으로 성장하였다. 한편, 증발 조건에서는 비증발 조건에 비해 와류가 형성되는 영역이 더 외각에 분포하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력이 0.1 MPa로 동일한 조건에서 분위기 온도의 증가로 인해 기체의 운동이 더 활발해지기 때문이라 사료된다. 또한 이러한 영향으로 와류 주위에 많은 분포를 나타내는 액적 또한 분무 외각에서 많이 분포하였다.

Fig. 8은 충돌 벽으로부터 5 mm 상단에서의 주위 기체의 반경 방향 속도를 분위기 온도 473K, 분사 후 3.0ms 에서의 최대 속도로 무차원화하여 나타낸 그래프이다. 분위기 온도는 293K, 473K이며, 분사 후 3.0 ms와 4.0 ms에서 계산된 값을 나타내고 있다. 분사 후 시간이 지남에 따라 반경 방향의 속도가 감

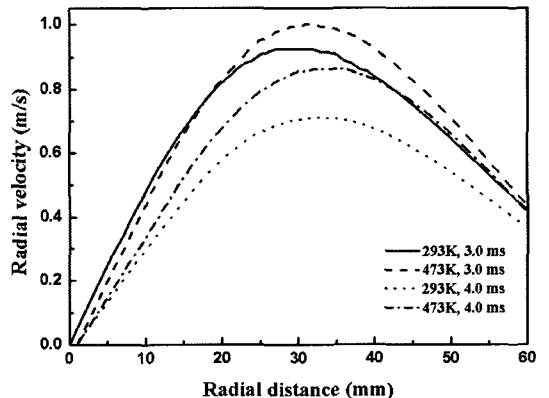


Fig. 8 Calculated dimensionless radial velocity of ambient gas at the 5 mm from wall at 3.0 ms and 4.0 ms after start of injection

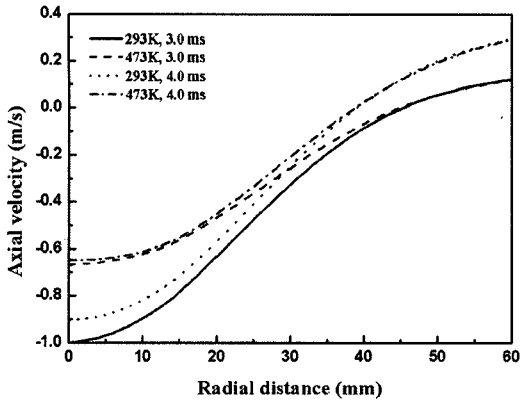


Fig. 9 Calculated dimensionless axial velocity of ambient gas at the 5 mm from wall at 3.0 ms and 4.0 ms after start of injection

소되는 것을 알 수 있었다. 비증발 조건에서는 25%, 증발 조건에서는 12% 감소하였다. 이에 의해 분무 역시 시간이 경과함에 따라 반경 방향으로의 성장 속도가 둔화 될 것으로 사료된다. 또한 증발 조건에서는 주위 기체의 운동이 활발해짐에 따라 반경 방향의 속도가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 특히, 분사 후 4.0 ms에서는 증발 조건에서의 속도가 15% 더 크게 나타났다. 따라서 분위기 온도가 높은 경우 주위 기체와의 상호 작용으로 분무의 반경 방향으로의 성장이 더 활발히 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 9는 충돌 벽으로부터 5 mm 상단에서의 주위 기체의 축 방향 속도를 분위기 온도 293K, 분사 후 3.0 ms에서의 최대 속도로 무차원화하여 나타낸 그래프이다. 그림에서 음의 속도 성분은 연료 분사 방향, 즉 하류 방향의 속도를 나타낸다. 증발 조건에 비해 비증발 조건에서 분무 중심에서 속도 성분이 크게 나타났으며, 분무 외각에서는 분위기 온도와 상관없이 유사한 경향을 보여주었다. 증발 조건에서 분무 중심에 분포하는 액적들은 증발로 인해 그 질량이 작아지고, 주위 기체의 영향으로 낮은 속도를 가지게 된다. 그리고 주위 기체의 역시 액적의 영향으로 낮은 속도를 가지게 되는 것으로 사료된다. 또한 비증발 조건에서 분무 중심에서의 높은 속도 값은 액적이 벽 충돌 후에도 높은 속도를 가지도록 유도한다. 즉, 이러한 현상은 비증발 조건에서 충돌 후 분무의 분포가 증발 조건에 비해 벽로부터 더 높

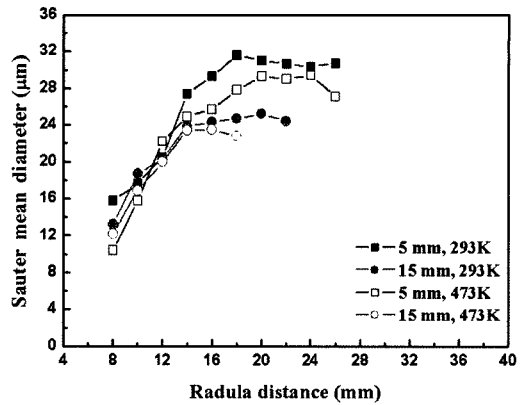


Fig. 10 Calculated Sauter Mean Diameter at the 2.0 ms after start of injection

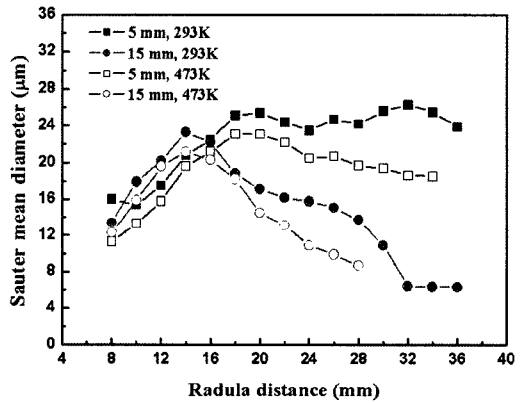


Fig. 11 Calculated Sauter Mean Diameter at the 3.6 ms after start of injection

은 영역까지 분포 한다는 것을 나타낸다.

Fig. 10과 Fig. 11은 증발 및 비증발 조건에서 분사 후 2.0 ms, 3.6 ms에서 충돌 벽으로부터 5 mm, 15 mm 상단의 SMD 분포를 계산한 결과이다. 증발 및 비증발 조건에서 SMD는 시간이 지남에 따라 분포 영역이 넓어지면서 그 크기는 줄어든 것을 볼 수 있었다. 이것은 벽충돌 후에 분무가 미립화되며 반경 방향으로 성장해 나가기 때문으로 사료된다. 또한, 증발 조건에서 SMD 값이 비증발 조건보다 더 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 증발 조건의 경우 액적들과 주위 기체와의 열 및 물질 전달이 활발히 일어나 증발이 촉진되기 때문이다.

Table 2는 계산된 SMD의 평균값을 보여준다. 각 시간 조건에서 벽으로부터의 거리가 15 mm인 경우가 5 mm인 경우보다, 더 작은 SMD를 나타낸다. 또

Table 2 Calculated average Sauter Mean Diameter (μm)

| Distance | Time | 2.0 ms | | 3.6 ms | |
|----------|------|--------|-------|--------|-------|
| | | 5 mm | 15 mm | 5 mm | 15 mm |
| 293 K | | 26.5 | 22.0 | 22.7 | 15.3 |
| 473 K | | 24.0 | 19.8 | 17.7 | 14.8 |

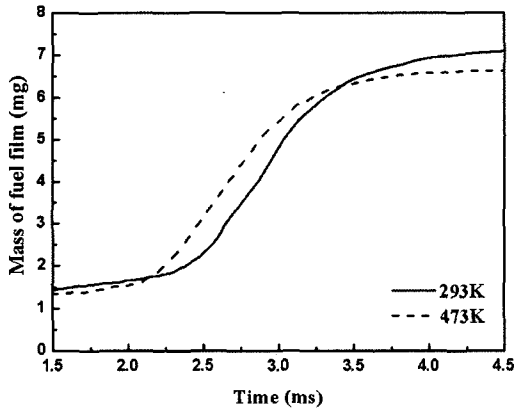


Fig. 12 Calculated mass of fuel film at the ambient temperature of 293K and 473 K

한 분사 후 시간이 지남에 따라 SMD가 작아졌으며, 분위기 온도가 높은 조건에서 더 작은 SMD를 나타낸다. SMD는 비증발 조건에 비해 증발 조건에서 분사 후 2.0 ms에서는 9%, 3.6 ms에는 14% 작게 나타났다.

Fig. 12는 증발 및 비증발 조건에서 분무 벽 충돌에 의해 형성된 연료 액막의 질량 변화를 시간에 대해 나타낸 것이다. 연료 액막의 질량은 분사 후 2.0 ms부터 급격히 증가하지만, 4.0 ms 이후에는 비증발 조건의 경우 7.2 mg, 증발 조건의 경우 6.5 mg으로 일정한 값을 나타내었다. 즉, 4.0 ms 이후에는 분무와 벽의 충돌 현상이 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있었다. 또한, 분사 후 약 2.0 ms에서 3.5 ms까지는 증발 조건에서 액막의 질량이 비증발 조건에서보다 더 크게 나타났지만, 3.5 ms 이후에는 비증발 조건에서의 액막의 질량이 더 큰 것을 볼 수 있었다. 이것은 충돌 초기에는 증발 조건에서의 반경 방향 운동량이 더 크기 때문에 벽면과 충돌이 활발히 일어나지만, 시간이 지남에 따라 고온의 분위기 조건에 의해 벽에 분포하는 액적들의 증발이 촉진되기 때문이다.

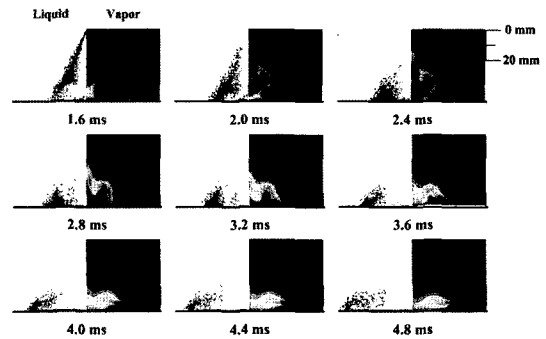


Fig. 13 Calculated liquid and vapor fuel distribution at the ambient temperature of 473 K

Fig. 13은 증발 조건에서 액상의 분무와 액적이 증발하여 형성된 기상 분포를 나타낸 그림이다. 그림의 우측이 기상을 나타내고 있다. 기상 분포는 액상과 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 벽 충돌 후에는 반경 방향으로 액상 분포가 이동함에 따라 기상 역시 반경 방향으로 성장해 나가는 것을 볼 수 있었다. 초기의 기상 분포는 분무의 중심 영역에서 높게 나타났다. 이것은 분무 중심에 작은 액적들이 많이 분포하여 증발이 활발히 진행되기 때문이라 사료된다. 한편, 충돌 전 높은 밀도를 나타내는 기상 분포가 충돌 후 시간이 지남에 따라 점점 줄어들어 가는 것을 볼 수 있는데, 이것은 벽 충돌 후 벽면에서의 연료 액막의 형성과 함께 기상의 분무도 충돌 벽 주위에 많이 분포되기 때문이라 사료된다.

5. 결론

GDI 분무의 벽 충돌 및 증발 과정에 대한 해석을 위해, Gosman의 충돌 모델과 수정된 Abramzon & Sirignano의 모델을 이용하여 분위기 온도 293K, 473K, 분위기 압력 0.1 MPa의 조건에서 계산 및 실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 분무는 충돌 후 반경 방향으로 성장해 나갔으며, 이러한 성장은 분위기 온도가 높은 경우에 더 활발하게 진행되었다.
- 2) 증발 조건에서 충돌 후 분무는 비증발 조건에서보다 충돌 벽면 근처에 많이 분포하였으며, 반경 방향으로 분포는 15% 더 크게 나타났다.
- 3) 비증발 조건에서보다 증발 조건에서 분무의 반경 방향 속도와 축 방향 속도가 더 크게 나타났다.

- 4) SMD 분포는 충돌 후 시간이 지남에 따라 분포 영역이 넓어졌으며, SMD는 더 작아지는 경향을 나타내었다. 또한 증발 조건에서 SMD가 비증발 조건보다 더 작게 나타났다.
- 5) 증발조건에서 벽 충돌 후 액적으로부터 증발된 기상의 연료 분무는 액적과 비슷한 경향을 보이며 성장하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유 과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) F. Zhao, J. Yoo, Y. Liu and M. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injector for DI Gasoline Engines," SAE 961925, 1996.
- 2) S. C. Hwang, D. S. Choi and D. J. Kim, "Characteristics of Spray Development from Vapor/Liquid Phase Distribution for GDI Spray," Transactions of KSAE, Vol.9, No.2, pp.50-58, 2001.
- 3) C. Beatrice, P. Belardini, C. Bertoli, M. C. Cameretti and N. C. Cirillo, "Fuel Jet Models for Multidimensional Diesel Combustion Calculation: An Update," SAE 950086, 1995.
- 4) D. P. Schmidt, J. K. Martin and R. D. Reitz, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE 1999-01-0496, 1999.
- 5) Z. Han, R. D. Reitz, P. J. Claybaker and C. J. Rutland, "Modeling the Effects of Intake Flow Structures on Fuel/Air Mixing in a Direct-Injected Spark-Ignition Engine," SAE 961192, 1996.
- 6) E. S. Suh and C. J. Rutland, "Numerical Study of Fuel/Air Mixture Preparation in a GDI Engine," SAE 1999-01-3657, 1999.
- 7) A. P. Walkins and K. Park, "Assessment and Application of A New Spray Wall Impaction Model," Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbine, I. Mech. E, pp.1-10, 1996.
- 8) J. Senda, M. Kobayashi, S. Iwashita and H. Fujiimoto, "Modeling of Diesel Spray Impingement on A Flat Wall," SAE 941894, 1994.
- 9) C. Bai and D. Gosman, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," SAE 950283, 1995.
- 10) A. A. Amsden, T. D. Butler and P. J. O'Rourke, KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays, Los Alamos National Laboratory Report, LA-11560-MS, 1989.
- 11) B. Abramzon and W. A. Sirignano, "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculation," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.32, No.9, pp.1605-1618, 1989.
- 12) W. E. Ranz and W. R. Marshall, "Evaporation from Drops," Chemical Engineering Progress, Vol.48, pp.141-146, 173-180, 1952.