*Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 6, pp.187-194 (2005)*

Copyright © 2005 KSAE
1225-6382/2005/078-25

# GDI 분무거동 해석을 위한 혼합분열모델 및 증발모델의 검증

심 영 삼[1] · 최 경 민[2] · 김 덕 줄[*2]

부산대학교 기계공학과[1] · 부산대학교 기계공학부[2]

# Validation of Hybrid Breakup Model and Vaporization Model for Analysis of GDI Spray Behavior

Youngsam Shim[1] · Gyungmin Choi[2] · Duckjool Kim[*2]

[1]*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*
[2]*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*
***(Received 14 July 2005 / Accepted 26 July 2005)***

**Abstract** : The objective of this study is to validate the hybrid breakup model and the vaporization model for GDI spray analysis at vaporization and non-vaporization conditions. The atomization process is modeled by using hybrid breakup model that is composed of Linearized Instability Sheet Atomization (LISA) model and Aerodynamically Progressed Taylor Analogy Breakup (APTAB) model. The vaporization process is modeled by using modified Abramzon & Sirignano model. The exciplex fluorescence method was used for comparing the calculated results with the experimental ones. The experiment and the calculation were performed at the ambient pressures of 0.1 MPa, 0.5 MPa and 1.0 MPa and the ambient temperature of 293K and 473K.

**Key words** : GDI(가솔린 직접 분사), Spray tip penetration(분무 관통 길이), Velocity field(속도장), Hybrid breakup model(혼합 분열 모델), Vaporization model(증발모델)

## Nomenclature

| | |
|---|---|
| $C_p$ | : specific heat |
| D | : vapor/air binary diffusion coefficient |
| k | : thermal conductivity |
| Pr | : Prandtl number |
| r | : radius |
| Re | : Reynolds number |
| Sc | : Schmidt number |
| U | : total velocity of the droplet |
| Y | : mass fraction |
| y | : drop distortion parameter |
| We | : Weber number |
| Ω | : growth of the most unstable wave |

### Subscipts

| | |
|---|---|
| F | : fuel vapor |
| g | : gas |
| s | : surface |
| ∞ | : far from a droplet |

*To whom correspondence should be addressed.
djkim@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

GDI 엔진은 연료를 직접 연소실로 분사해 초희박 연소를 실현함으로써 연비와 출력을 동시에 향상시킬 수 있다. 이러한 GDI 엔진은 부분 부하 영역에

서는 성층화에 의한 초희박 연소가 가능해 연비를 향상시킬 수 있으며, 고부하 영역에서는 이론 공연비 조건에서 연소를 통한 고출력을 낼 수 있는 장점이 있다. 또한 GDI 엔진은 공연비의 제어가 가능하고, 응답성이 좋으며, 연료 분사시기를 정확히 제어할 수 있어 혼합기 분포의 제어뿐만 아니라 고효율의 연소를 이룰 수 있다. 이러한 고효율 엔진 연소를 이루기 위해서는 GDI 엔진의 실린더 내 분사된 연료의 거동, 공기 · 연료 혼합기 형성과정 및 고온 고압의 분위기 조건에서 발생하는 분무의 증발현상에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해 GDI 인젝터의 분무특성 및 분무의 증발 현상에 대한 실험 및 수치적 연구가 활발히 진행되고 있다.

실험적 연구로 Zhao 등[1]은 GDI 엔진용 인젝터의 분무 발달과정을 2차원 Mie 산란 기법을 이용하여 가시화하였고, PDA장치를 이용하여 연료 액적의 SMD를 측정하였다. 한편, 혼합기의 증발 과정 해석을 위해 Exciplex 형광법을 이용하여 연료의 공간 분포를 해석하려는 연구도 활발히 이루어지고 있다. Ghandhi 등[2]과 Hwang 등[3]은 플루오로벤젠/DEMA/헥산 혼합물의 연료를 이용한 exciplex 형광법으로 인젝터의 기 · 액상 분무의 분리 가시화 및 분무 거동에 대한 연구를 시도하였다.

분무의 미립화 및 증발에 대한 수치적 해석을 위한 분열모델 및 증발모델에 대한 연구도 활발히 진행되어 왔다. 중공원추형 분무의 해석을 위해 이전의 연구는 주로 액주나 액막으로부터 액적으로 분열되는 1차 분열과정과 액주나 액막으로부터 분열된 액적이 더 작은 액적으로 미립화되는 2차 분열과정 중 하나의 과정만 고려하여 모사하였다. 그러나 최근에는 1차 분열과 2차 분열 과정을 모두 고려한 혼합분열 모델에 대한 연구가 진행되고 있다. Beatrice 등[4]은 WB(Wave Breakup) 모델과 TAB (Taylor Analogy Breakup) 모델을 이용한 혼합분열 모델을 제안하였다. 액적의 직경이 큰 노즐 근처에서 WB 모델을 사용하고, 분사된 액적의 최대 직경이 95% 이하가 되는 액적에 대해서는 TAB 모델을 사용하였다. Schmitd 등[5]은 LISA 모델과 TAB모델을 혼합한 모델을 제안하였다.

증발 모델에 대한 기존의 연구는 연료 액적의 증발에 대한 연구와 디젤 엔진에서의 증발 현상에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 그러나 GDI 엔진 내에서의 분무 증발에 대한 연구는 아직 미흡하여 이에 대한 연구가 필요하다. Han 등[6]은 기존 KIVA 코드에 사용된 Spalding 모델에서 액체상태 및 기체 상태에서 물성치 계산방법을 개선하여 GDI 엔진 내 분무의 분열 및 증발과정에 대해 해석하였다. Suh 등[7]은 GDI 엔진 내 연료 분포의 거동과 공기 · 연료의 혼합기 형성과정을 모델링하였다. Schänzlin 등[8]은 정적 챔버 및 GDI엔진 내에서의 분무거동 및 증발과정에 대한 해석을 하였다. 이러한 모델들을 엔진 내 분무 거동의 해석에 적용하기 위해서는 다양한 분위기 조건에서 모델에 대한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 수정된 KIVA 코드[9]를 사용하여 GDI 분무의 분열 및 증발과정의 해석을 위한 혼합분열모델 및 증발모델에 대한 검증을 수행하였다. 혼합분열모델은 선행연구에 따라 분열모델은 LISA+APTAB[10]을, 증발모델은 수정된 Abramzon & Sirignano 모델[11]을 선정하여 증발 및 비증발 조건에서 검증하여 그 유용성을 평가하였다. 검증을 위해 Exciplex 형광법을 이용하여 취득한 분무형상, 관통길이, 질량분포 등과 같은 분무 특성을 계산 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 조건

Fig. 1은 기 · 액상의 분포 해석을 위한 실험장치이다. 실험장치는 크게 GDI 분사계와 분무실, 광학계 및 화상취득장치, 신호 처리계로 구성되어 있다. 본 실험에서의 분사계는 와류형 고압 인젝터, 연료탱크 및 가압용 질소 탱크로 구성되어 있다. 광원으로는 10Hz Nd-YAG레이저(60mJ/pulse)의 4차 조화파(266 nm)를 사용하였다. 형광화상의 취득은 이중 MCP(Micro- channel plate)가 정착된 ICCD 카메라를 사용하였다.

Table 1은 실험 및 계산 조건을 나타낸 것이다. 분위기 온도는 297K(비증발 조건)와 473K(증발조건)로 선정하였으며, 각각의 분위기 온도에서 분위기 압력을 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa로 하여 계산 및 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 실험 및 계산에 사용된 와류형 고압 인젝

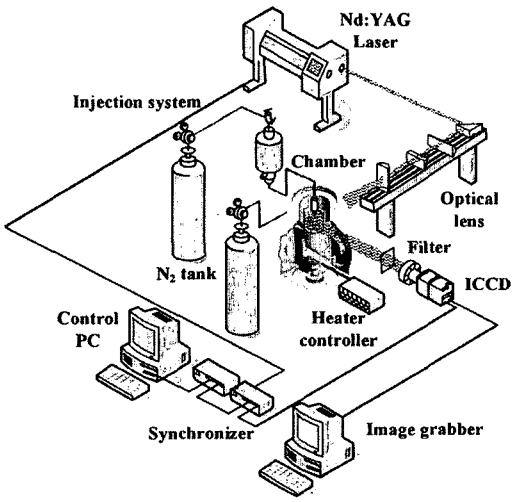


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Experimental and calculation condition

| Fuel | Hexane/Flourobenzene/DEMA |
|---|---|
| Injection pressure (MPa) | 5.1 |
| Injection duration (ms) | 2 |
| Injection quantity (mg) | 15 |
| Ambient gas | N2 |
| Ambient temperature (K) | 293,473 |
| Ambient pressure (MPa) | 0.1,0.5,1.0 |

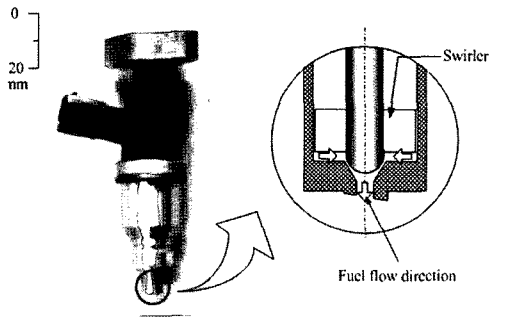


Fig. 2 Configuration of injector and vertical view of tip

터와 인젝터 팁의 단면을 나타낸 그림이다. 이 인젝터로부터 생성된 중공 원추형 분무의 특성에 대한 실험 및 계산 결과는 분무의 인젝터 축을 중심으로 한쪽 단면에 대해서만 나타내었다.

## 3. 해석 모델

### 3.1 분열 모델

#### 3.1.1 1차 분열 모델 (LISA 모델)

1차 분열 모델로 Schmidt 등[5]이 제안한 LISA모델을 사용하였다. LISA 모델은 인젝터 내부의 유동에서 완전 발달 분무로의 변이과정을 필름 형성(film formation), 액막 분열(sheet breakup) 그리고 미립화(atomization)의 세 단계로 모사하였다. 분열길이 이전의 액적은 분열, 충돌, 항력 등의 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

분열길이 L은 다음과 같이 표현된다.

$$L = U\tau = \frac{U}{\Omega} ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right) \tag{1}$$

여기서, Dombrowski와 Hooper의 연구에 의하면 $\ln(\eta_b/\eta_0)=12$이다. 분열 후 액적의 크기는 다음과 같다.

$$d_D = \frac{3\pi d_L^2}{K_L} \tag{2}$$

여기서, $d_L$은 액사(ligament)의 지름이고, $K_L$은 액사 중 가장 불안정한 파의 길이이다

#### 3.1.2 2차 분열 모델(APTAB 모델)

액막의 분열 후 2차 분열 과정의 모사를 위해 Park 등[12]에 의해 제안한 APTAB 모델을 사용하였다. 모델 방정식은 다음과 같다.

$$y + \frac{5N}{ReK}y + \frac{1}{K}y\left[\frac{8}{We} - \frac{8}{19} - \frac{2}{19}y\right] = \frac{8}{19K} \tag{3}$$

APTAB 모델 방정식의 해는 4차 Runge-Kutta 초기값 해석자로부터 구할 수 있다.

액적의 분열 기준은 다음과 같다.

$$2(1+0.5y)^5 + (1-0.5y)^{-1} - 4(1+0.5y)^{-4} > C_b We \tag{4}$$

### 3.2 증발 모델

액적 증발을 모사하기 위해 기체장의 해석에는 Stefan 유동을 고려한 Abramzon & Sirignano가 제안한 모델[13]을 수정하여 사용하였다. 이 모델에서는 액적의 온도는 공간상으론 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.

$$\dot{m}_F = 2\pi r_s \rho_g D_g Sh^* \ln(1+B_M) \tag{5}$$

$$\dot{m}_F = 2\pi r_s \frac{k_g}{C_{pg}} N^* \ln(1+B_T) \tag{6}$$

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

$$B_M = \frac{Y_{F_S} - Y_{F_\infty}}{1 - Y_{F_S}} \tag{7}$$

$$B_T = \frac{C_{pg}(T_\infty - T_S)}{L(T_S) + Q_L/\dot{m}} \tag{8}$$

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

$$Q_L = \dot{m}\left\{\frac{C_{pg}(T_\infty - T_S)}{B_T} - L(T_S)\right\} \tag{9}$$

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

$$N^* = 2 + \frac{(N_0 - 2)}{F(B_T)} \tag{10}$$

$$Sh^* = 2 + \frac{(Sh_0 - 2)}{F(B_M)} \tag{11}$$

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

$$F(B) = (1+B)^{0.7} \frac{\ln(1+B)}{B} \tag{12}$$

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

$$N_0 = 2 + 0.6\sqrt{Re}\, Pr^{1/3} \tag{13}$$

$$Sh_0 = 2 + 0.6\sqrt{Re}\, Sc^{1/3} \tag{14}$$

위 식에서 계산에 사용된 열역학적 및 물리적 상태량은 막의 기준온도를 이용한 1/3법칙으로 계산하였다.

식 (5)와 식 (6)으로부터 Spalding의 전달 함수 $B_M$과 $B_T$ 사이의 관계식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$B_T = (1+B_M)^{\phi} \tag{15}$$

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

### 4.1 비증발 조건($T_a$ = 293K)

분위기 온도가 293 K인 비증발 조건에서 GDI 분무 거동의 해석을 위해 1차분열 모델로 LISA모델을, 2차 분열 모델로 APTAB 모델을 사용한 혼합 분열 모델을 이용하였다. 분위기 압력은 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa 로 세 가지 조건에서 분무 관통길이와 분무 거동에 대해 해석하였다.

Fig. 3은 비증발 조건에서 분위기 압력의 변화에 따른 분무 관통길이에 대한 실험 및 계산 결과를 나타낸 그림이다. 모든 분위기 압력 조건에서 대체로 실험 결과와 계산 결과가 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 한편, 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 관통길이가 더 짧아지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력이 증가함에 따라 주위 기체의 밀도가 증가하여 분무의 성장을 둔화시키기 때문이라 사료된다.

Fig. 4는 비증발 조건에서 분사 후 3.0 ms, 인젝터 팁으로부터 30 mm의 거리에서 반경 방향에 따른 SMD 크기 분포를 나타낸 그림이다. SMD는 분무의 중심에서 작게 나타났으며, 분무 외각으로 갈수록 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 한편, 분위기 압력이 증가 할수록 SMD 크기가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력이 증가함에 따라 분무의 성장이 억제되어 액적들의 분산이 활발하지 못해 액적들간 충돌에 의한 병합이 많이 일어났기 때문이라 사료된다.

Fig. 5는 분위기 온도 293 K, 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa 일 때, 분사 후 3.0 ms 까지 분무 거동의 실험 및 계산 결과를 나타낸 그림이다. 모든 압

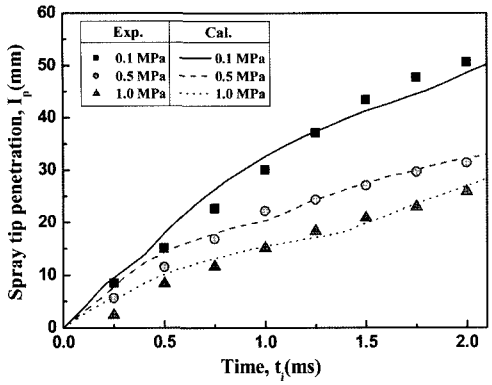


Fig. 3 Experimental and calculated spray tip penetration($T_a$ = 293K)

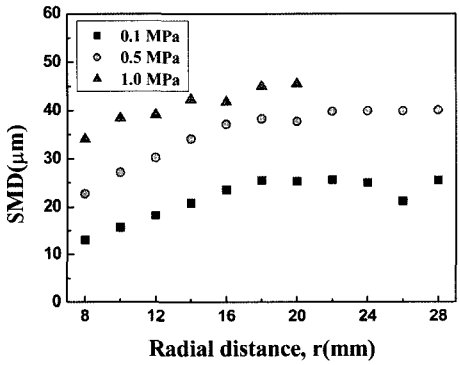


Fig. 4 Calculated SMD of droplet(Z = 30 mm, $T_a$ = 293K)

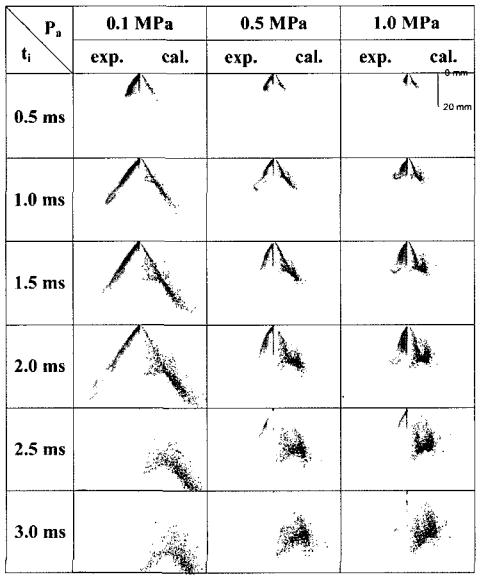


Fig. 5 Comparison of experimental and calculated liquid spray formation($T_a$ = 293K)

력 조건에서 GDI 분무는 분사 후 중공원추형으로 계속 성장하다가 시간이 지남에 따라 분무 외각부근에 와를 생성하는 형태를 보이고 있다. 특히, 분위기 압력이 큰 경우, 와의 생성이 뚜렷하게 나타났다. 이것은 분위기 압력이 증가함에 따라 주위의 기체가 분무 고유의 성장을 방해하게 되고 이러한 영향이 특히 분무의 외각 영역에서 더 크게 나타나기 때문이라 사료된다. 그리고 분무 거동의 실험 결과와 계산 결과를 비교해보면, 대체로 실험 결과와 계산 결과가 유사하게 나타났다. 하지만, 분사 후 2.0 ms 이후에는 실험 결과와 계산 결과의 오차가 발생 하였으며, 분위기 압력이 0.5 MPa, 1.0 MPa로 높은 경우에는 오차가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있었다.

이는 분열 모델에서 액적에 대한 항력 계산 시 분위기 압력이 영향을 미치게 되는데, 분위기 압력이 큰 경우에는 이러한 항력을 과도하게 계산하고, 시간이 지남에 따라 이런 오차가 점점 커지기 때문이라 사료된다.

### 4.2 증발 조건($T_a$ = 473K)

분위기 온도 473 K, 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa인 증발 조건에서 LISA+APTAB 모델, 수정된 Abramzon & Sirignano 의 모델을 이용하여 GDI 분무의 미립화 및 증발 과정에 대한 해석을 하였다.

FIg. 6은 증발 조건에서 분위기 압력에 따른 분무 관통길이를 나타낸 그림이다. 분위기 압력이 0.1 MPa 인 경우에는 분무 관통 길이의 계산 결과가 실험 결과보다 더 길게 나타났다. 반면 분위기 압력이 0.5 MPa, 1.0 MPa인 경우에는 대체적으로 계산 결과와 실험 결과가 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력이 낮은 경우 분무의 증발이 활발하게 일어나 직경이 작은 액적들이 많이 나타나고 이러한 액적들은 실험을 통해 얻은 화상에 잘 나타나지 않게 되지만, 계산에서는 액적의 직경이 작더라도 계산에 고려되기 때문에, 계산된 분무 관통길이가 실험 결과보다 더 길게 나타나는 것으로 사료된다. 한편, 분위기 압력이 높은 경우는 분위기 압력이 낮은 경우보다 증발이 잘 일어나지 않기 때문에 계산 결과와 실험 결과의 차이가 작은 것으로

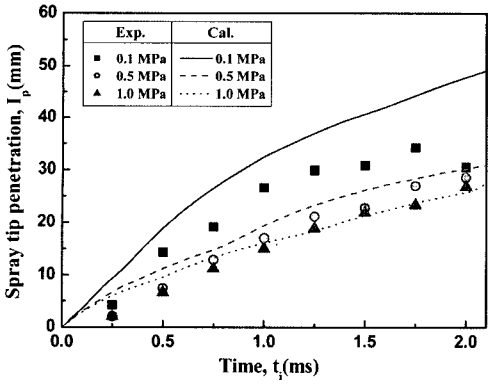


Fig. 6 Experimental and calculated spray tip penetration($T_a$ = 473K)

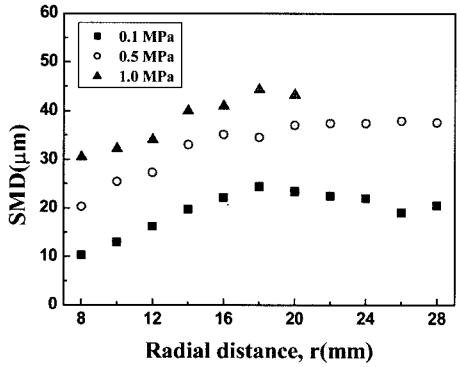


Fig. 7 Calculated SMD of droplet(Z = 30 mm, $T_a$ = 4793K)

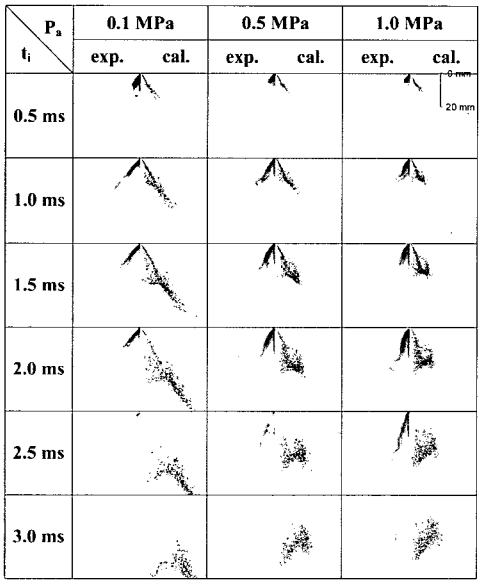


Fig. 8 Comparison of experimental and calculated liquid spray formation($T_a$ = 473K)

사료된다. 상기의 실험 한계를 고려하면 증발 조건에서도 잘 일치하는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 증발 조건에서 선단거리 30 mm에서 분사 후 3.0 ms 일 때, SMD 분포를 반경방향에 대해 나타낸 것이다. 비증발 조건과 마찬가지로 분무의 중심보다 외각에서 SMD 값이 크게 나타났으며, 분위기 압력이 높을 수록 SMD 값이 크게 나타났다. 그리고 Fig. 5의 비증발 조건의 SMD 값과 비교해 보았을 때, 상대적으로 그 값이 더 작게 나타난 것을 볼수 있었다. 이것은 액적의 증발에 의해 SMD 값이 작아졌기 때문이라 사료된다.

Fig. 8은 증발 조건에서 액체 분무의 거동을 나타낸 그림이다. 실험 결과와 계산 결과를 비교해 보면 대체로 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, 비증발 조건과 마찬가지로 분사 후 2.0 ms 이후에는 실험 결과와 계산 결과 사이의 오차가 비교적 커지는 것을 볼 수 있었다. 이러한 오차는 비증발 조건에서 보다 더 크게 나타났다. 이는 실험을 통한 화상 취득 시 증발로 인해 크기가 작아진 미세한 액적들이 잘 나타나지 않는 반면, 계산 결과에서는 이러한 액적들이 무시되는 것이 아니라 계산에 포함되기 때문으로 사료된다. 한편, 비증발 조건의 분무 거동과 비교해 보았을 경우, 실험 및 계산으로부터 취득된 이미지가 더 희미하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 증발 조건에서 분무의 증발이 활발히 일어나 실제 액체 분무의 밀도가 더 낮아졌기 때문이라 사료된다. 따라서 고압의 조건에서 연구가 더 필요할 것으로 사료되나 대부분의 조건에서 실험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 보아 실제 엔진 내 분무 거동에 적용 가능할 것으로 사료된다.

Fig. 9는 증발조건에서 각 분위기 압력에서의 증기상의 분포와 주위 가스의 속도장의 계산 결과를 나타낸 것이다. 액상의 거동과 마찬가지로 분위기 압력이 증가함에 따라 기상 분무의 분포가 분무의 중심에 많이 분포하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 실험 및 계산 결과도 얻은 분무 거동과 비교해보았을 경우 액적들이 많이 분포하는 영역에서 기상 연료의 농도가 더 높은 경향을 나타내었다. 주위 기체의 속도장 결과로부터, 각각의 분위기 압력에서 분무의 중심에서 높은 속도 분포를 나타냈으며, 분무의

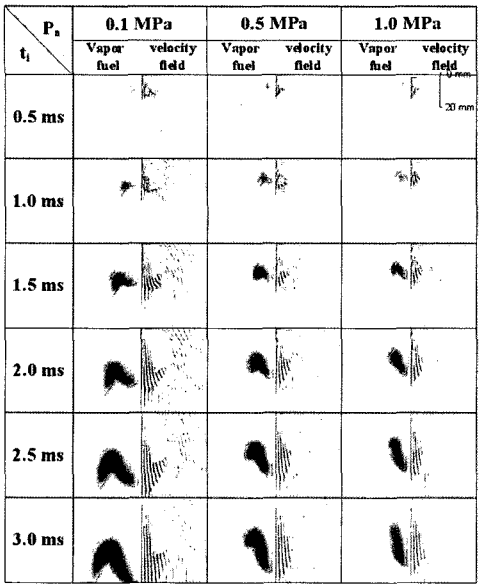


Fig. 9 Comparison of experimental and calculated liquid spray formation($T_a$ = 473K)

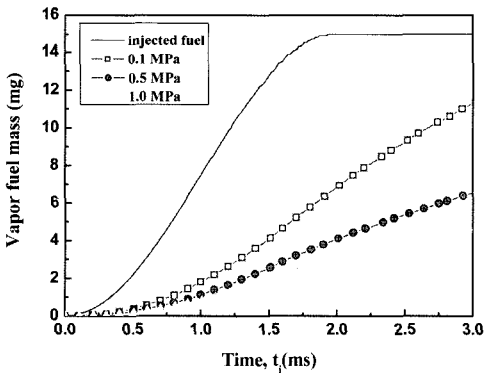


Fig. 10 Mass of injected and vaporized fuel at various ambient pressures($T_a$ = 473K)

외각부근에서 와가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 10은 분사 후 생성되는 증기상의 연료 질량을 나타낸 그림이다. 실선은 2.0 ms까지 분사된 연료의 누적 질량을 나타낸 것이고, 나머지 선들은 각 분위기 압력에서 분사 후 시간이 지남에 따라 생성되는 증기의 누적 질량을 나타낸 그림이다. 분사 후 3.0 ms가 되었을 때 분위기 압력이 0.1 MPa인 경우, 약 11 mg의 증기 연료가 생성되었으며, 이는 분사된 연료의 73 % 정도이다. 반면 0.5 MPa, 1.0 MPa의분위기 압력에서는 약 7 mg, 5 mg 의 기상 연료가 생성되었으며, 이는 분사된 연료량의 약 45%, 33 % 정도이다. 위의 결과로부터 분위기 압력이 증가함에 따라 액적의 증발이 둔화되는 경향을 나타내었는데, 이것은 분위기 압력의 증가로 증발에 필요한 에너지가 더 필요하게 되어 증발하기까지 시간이 더 길어지기 때문이라 사료된다. 이러한 분위기 압력의 변화에 따른 증발 연료 질량의 관계는 실제 엔진 설계에 유익한 정보를 제공하리라 기대된다.

## 5. 결 론

GDI 분무의 미립화 및 증발 과정에 대한 모델링을 하기 위해서 분열 과정과 증발 과정의 모사를 위해 1차 분열(LISA 모델)과 2차 분열(APTAB 모델)을 고려한 혼합 분열 모델과 수정된 Abramzon & Sirignano 모델을 이용하여 분위기 온도 293 K, 473 K, 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa 의 조건에서 계산 및 실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 분무 관통 길이는 증발 및 비증발 조건에서 계산 결과가 실험 결과와 잘 일치 하였다.
2) 증발 및 비증발 조건에서 계산된 분무 발달 과정을 실험 결과와 비교하였을 경우, 분사 후 후기에 항력 계산 시 발생한 오차로 인해 정확한 예측은 어려웠지만, 대체로 양호한 결과를 나타내었다.
3) 계산된 SMD 값은 분위기 압력이 높을수록 크게 나타났으며, 증발 조건에서 SMD 값이 비증발 조건에서 보다 더 작게 나타났다.
4) 증발 조건에서 기상 분무의 분포와 기체 속도장의 계산 결과, 분위기 압력이 증가할수록 분무의 중심영역에 기상 연료가 많이 분포하는 것을 볼 수 있었으며, 기체 속도장의 경우 분무의 중심 영역이 외각 지역보다 더 큰 속도 분포를 나타내었고, 분무의 외각에서는 주위 기체와의 상호 영향으로 와가 생성 되었다.
5) 증발조건에서 분사된 연료량과 증발된 연료량을 비교하였을 때, 압력이 낮을수록 증발률이 더 높게 나타났다.
6) 비증발 조건과 증발 조건에서의 각 모델의 분무 거동 예측능력을 비교해 보았을 때, 대체로 양호한 결과를 얻을 수 있어, 엔진 적용이 가능할 것으로 사료되나 고압 조건에 있어서 모델의 보완이 요구된다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구임.

### 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) J. B. Ghandhi, P. G. Felton, B. F. Gajdeczko and F. V. Braco, "Investigation of The Fuel Distribution in A Two Stroke Engine with and Air-Assisted Injector," SAE 940394, 1994.
3) S. C. Hwang, D. S. Choi and D. J. Kim, "Characteristics of Spray Development from Vapor/Liqiud Phase Distribution for GDI Spray," Transactions of KSAE, No.9, Vol.2, pp. 50-58, 2001.
4) 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.
5) D. P. Schmidt, J. K. Martin and R. D. Reitz, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE 1999-01-0496, 1999.
6) 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.
7) E. S. Suh, and C. J. Rutland, "Numerical Study of Fuel/Air Mixture Preparation in a GDI Engine," SAE 1999-01-3657, 1999.
8) K. Schänzlin and T. Koch, "Characterization of Mixture Formation in a Direct Injected Spark Ignition Engine," SAE 2001-01-1909, 2001.
9) 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.
10) D. W. Kang, S. C. Hwang and D. J. Kim, "Comparison of GDI Spray Prediction by Hybrid Model," Transaction of KSME, Vol.12, No.27, pp.1744-1749, 2003.
11) Y. S. Sim, S. C. Hwang and D. J. Kim, "The Numerical Study on reakup and Vaporization Process of GDI Spray under High-Temperature and High-Pressure Conditions," Transactions of KSAE, Vol.12, No.3, 2004.
12) J. H. Park, S. S. Hwang, and Y. B. Yoon, "Aerodynamically Progressed Taylor Analogy Breakup(APTAB) Model for Accurate Prediction of Spray Droplet Deformation and Breakup," ILASS-Korea, Vol.5, No.2, pp.53-60, 2000.
13) 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.