

고온 · 고압의 분위기 조건에서 GDI 분무의 분열 및 증발과정에 대한 수치적 연구

심 영 삼¹⁾ · 황 순 철^{*1)} · 김 덕 줄²⁾

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾

The Numerical Study on Breakup and Vaporization Process of GDI Spray under High-Temperature and High-Pressure Conditions

Youngsam Sim¹⁾ · Soonchul Hwang^{*1)} · Duckjool Kim²⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

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

(Received 10 February 2004 / Accepted 18 March 2004)

Abstract : The purpose of this study is to improve the prediction ability of the atomization and vaporization processes of GDI spray under high-pressure and high-temperature conditions. Several models have been introduced and compared. The atomization process was modeled using hybrid breakup model that is composed of Conical Sheet Disintegration (CSD) model and Aerodynamically Progressed TAB(APTAB) model. The vaporization process was modeled using Spalding model, modified Spalding model and Abramzon & Sirignano model. Exciplex fluorescence method was used for comparing the calculated with the experimental results. The experiment and calculation were performed at the ambient pressure of 0.5 MPa and 1.0 MPa and the ambient temperature of 473K. Comparison of calculated and experimental spray characteristics was carried out and Abramzon & Sirignano model and modified Spalding model had the better prediction ability for vaporization process than Spalding model.

Key words : GDI(가솔린 직접 분사), Equivalence ratio(당량비), Spray tip penetration(분무관통길이), Vaporization model(증발 모델), Hybrid breakup model(혼합 분열 모델)

Nomenclature

B_M : mass transfer number

B_T : heat transfer number

c_p : specific heat

D : vapor/air binary diffusion coefficient

k : thermal conductivity

L : latent heat of vaporization

r : radius

Re : Reynolds number

Sc : Schmidt number

T : temperature

Y : mass fraction

ρ : density

Ψ : symbol that stands for c_p , k and μ

Subscripts

d : droplet

F : fuel vapor

*To whom correspondence should be addressed.

djkim@pusan.ac.kr

- g : gas
- r : reference value
- s : surface
- ∞ : far from a droplet

1. 서론

엔진의 실린더 내에 연료를 직접 분사시키는 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진의 경우 분무의 미립화 및 증발 특성은 엔진의 효율 향상에 중요한 영향을 미친다. 따라서 실린더 내에서 일어나는 연료분무의 분포 거동과 공기·연료의 혼합기의 형성 과정에 대한 이해가 매우 중요하며, 고온·고압의 분위기에서 발생하는 분무의 증발 현상에 대한 이해도 더욱 필요로 하고 있다. 따라서 현재 이에 대한 실험적, 수치적 연구들이 활발히 진행되고 있다.

실험적 연구로 Zhao 등¹⁾은 GDI 엔진용 인젝터에 2차원 Mie 산란 기법을 적용하여 분무 발달과정을 가시화하였고, PDA장치를 이용하여 연료 액적의 SMD를 측정함으로써 분무의 미립화 과정에 대한 연구를 하였다. 혼합기 증발 과정 해석을 위해 Hwang 등²⁾은 플루오로벤젠/DEMA/헥산 혼합물을 사용한 exciplex 형광법으로 GDI 분무의 기 액상 분리 가시화를 시도하였다. Lee 등³⁾은 분위기 조건에 따른 분무 거동을 가시화 하였고, PDPA 장치를 이용하여 평균 입경과 평균 속도를 측정하였다.

분무 미립화 및 증발 현상에 대한 수치적 연구도 활발히 진행되고 있다. 이전까지 분무의 미립화 과정에 대한 수치적 연구는 대부분 1차 분열과 2차 분열 중 하나의 현상만을 고려하여 해석하였다. 따라서 복잡한 분무의 미립화 과정을 정확하게 예측하지 못했다. 그러므로 최근 1차 분열과 2차 분열과정을 모두 고려한 혼합분열 모델의 연구가 활발히 진행되고 있다. Beatrice 등⁴⁾은 WB(Wave Breakup) 모델과 TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델을 이용한 혼합분열모델을 제안하였다. Park 등⁵⁾은 1차 분열 모델로 WB모델과 LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 모델, 2차 분열 모델로 TAB 모델, RT(Rayleigh-Taylor) 모델, DDB(droplet deformation and breakup) 모델을 사용하여 6개의 모델에 의한 분무 특성의 계산 결과를 비교 하였다. Kang 등⁶⁾은 GDI

엔진 인젝터의 분열과정 모델링을 위해 LISA 모델과 APTAB(Aerodynamically Progressed TAB) 모델을 이용한 혼합분열모델을 제안하였다.

분무의 증발과정에 대한 수치적 연구는 고온, 고압의 분위기에 연료를 분사하는 디젤분무에서 뿐만 아니라 GDI 엔진 내에서의 일어나는 분무의 증발에 대해서도 활발히 진행되고 있다. Han 등⁷⁾은 기존에 사용된 Spalding 모델에서 액체상태 및 기체상태에서 물성치 계산방법을 개선하여 GDI 엔진 내 분무의 분열 및 증발과정에 대해 해석하였다.

본 연구에서는 분무의 미립화 과정을 모사하기 위해 CSD(Conical Sheet Disintegration)모델⁸⁾을 1차 분열로, APTAB모델⁹⁾을 2차 분열 모델로 사용한 혼합분열모델을 이용하였으며, 분무증발 모사를 위해 Spalding 모델¹⁰⁾, 수정된 Spalding 모델⁷⁾, Abramzon & Sirignano의 모델¹¹⁾을 수정하여 사용하였다. 수정된 KIVA-II 코드¹²⁾에서 각 모델을 적용하여 분무거동에 대한 계산을 수행하였으며, Exciplex 형광법에 의한 실험 결과와 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 Exciplex 형광법을 위한 실험장치도 이다. 실험장치는 크게 GDI 분사계와 분무실, 광학계 및 가시화장치, 신호 처리계의 네 부분으로 구성되어 있다. 분사계는 와류형 고압 인젝터, 연료탱크 및

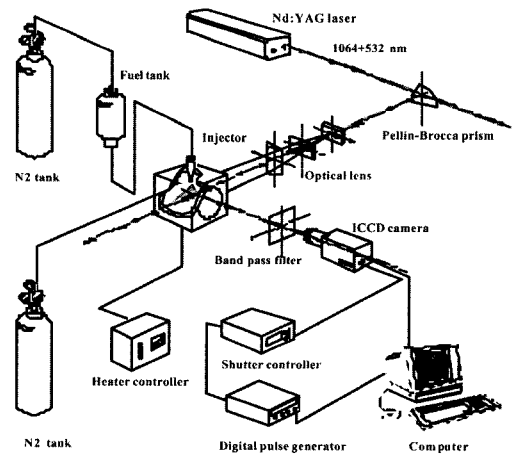


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Fuel	Hexane/Fluorobenzene/DEMA
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Injection quantity (mg)	15
Ambient gas	N ₂
Ambient temperature (K)	473
Ambient pressure (MPa)	0.5, 1.0

가압용 질소 탱크로 구성되어 있으며, 광원으로는 10 Hz Nd-YAG레이저(60 mJ/pulse)의 4차 조화파(266 nm)를 사용하였다. 형광화상의 취득은 이중 MCP(Micro-channel plate)가 장착된 ICCD 카메라를 사용하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다.

3. 해석모델

3.1 분열모델

액적의 분열 과정을 모사하기 위해 1차 분열 과정과 2차 분열 과정을 모두 고려한 혼합분열 모델을 사용하였다. 1차 분열 과정은 Iyer와 Han등⁸⁾이 제안한 CSD(Conical Sheet Disintegration) 모델을 사용하였고, 2차 분열 과정은 기존에 사용한 TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델 대신에, 이를 개선하여 Park 등⁹⁾이 제안한 APTAB(Aerodynamically Progressed TAB) 모델을 적용하여 계산하였다. 이 모델은 TAB 모델보다 전단형이나 주머니형의 분열 현상에 대해서 더 정확한 계산 결과를 보여준다. 따라서 APTAB 모델을 2차 분열 과정의 계산에 적용하였을 경우 더 정확한 계산 결과를 얻을 수 있다.

3.2 증발모델

3.2.1 Spalding 모델

액적 증발과정 모사를 위해 Spalding¹⁰⁾에 의해 제안된 모델로 저압의 조건에서 증발 과정 해석을 위해 많이 이용되고 있다. 그러나 물성치의 계산에서 주위 가스의 영향이 적게 고려되는 단점이 있다. 모델 방정식은 Table 2와 같이 주어진다.

3.2.2 수정된 Spalding 모델

기존의 Spalding 모델에서 더 정확한 계산을 위해 열역학적 물성치의 값에 대한 계산 방법을 개선한

Table 2 Equations of Spalding model

Droplet temperature change	$\rho_d \frac{4}{3} \pi r^3 c_{pd} \frac{dT}{dt} - \rho_d A \pi r^2 RL(T_d) = 4 \pi r^2 Q_d$
Droplet radius change	$R = - \frac{\rho_g D(T_r)}{2 \rho_d r} \frac{Y_{F,s} - Y_{F,\infty}}{1 - Y_{F,s}} Sh$
Heat conduction rate	$Q_d = \frac{k_g(T_r)(T_\infty - T_d)}{2r} N$
Sherwood number	$Sh = (2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc_d^{1/3}) \frac{\ln(1 + B_M)}{B_M}$
Nusselt number	$N = (2.0 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \frac{\ln(1 + B_M)}{B_M}$
Transfer number	$B_M = \frac{Y_{F,s} - Y_{F,\infty}}{1 - Y_{F,s}}$

Table 3 Equations of property calculation for modified Spalding model

Reference temperature	$T_r = T_s + \frac{1}{3}(T_\infty - T_s)$
Reference composition	$Y_{F,r} = Y_{F,s} \frac{1}{3}(Y_{F,\infty} - Y_{F,s})$ $Y_{A,r} = 1 - Y_{F,s}$
Mixture rule	$\Psi_g = Y_{A,r} \cdot \Psi_A(T_r) + Y_{F,r} \cdot \Psi_d(T_r)$
Reference gas density	$\rho_{g,r} = \left(\frac{Y_{A,r}}{\rho_A} + \frac{Y_{F,r}}{\rho_v} \right)$
Surface mass fraction	$Y_{F,s} = \left[1 + \frac{M_A}{M_F} \left(\frac{p}{p_v} - 1 \right) \right]$

Table 4 Equations of Abramzon & Sirignano model

Droplet vaporization rate	$\dot{m}_F = 2 \pi r_s \rho_g D_g Sh^* \ln(1 + B_M)$ $\dot{m}_F = 2 \pi r_s \frac{k_g}{c_{pg}} N^* \ln(1 + B_T)$
Heat penetrating into the liquid phase	$Q_L = \dot{m} \left\{ \frac{c_{pg}(T_\infty - T_d)}{B_T} - L(T_d) \right\}$
Mass transfer number	$B_M = \frac{Y_{F,s} - Y_{F,\infty}}{1 - Y_{F,s}}$
Heat transfer number	$B_T = \frac{c_{pg}(T_\infty - T_d)}{L(T_d) + Q_L / \dot{m}}$
Modified Sherwood number	$Sh^* = 2 + \frac{(Sh_0 - 2)}{F(B_M)}$ $Sh_0 = 2 + 0.6 \sqrt{Re Sc}^{1/3}$ $F(B) = (1 + B)^{0.7} \frac{\ln(1 + B)}{B}$
Modified Nusselt number	$N^* = 2 + \frac{(N_0 - 2)}{F(B_T)}$ $N_0 = 2 + 0.6 \sqrt{Re Pr}^{1/3}$

것이다.⁷⁾ 1/3법칙을 사용하여 기준이 되는 온도나 구성을 기본으로 계산하였으며 비열, 열전도율, 점도 등은 혼합법칙을 이용하여 계산하였다. 물성치 계산식은 Table 3과 같다. 그리고 기본 방정식은 Table 2와 같다.

3.2.3 Abramzon & Sirignano 모델

액적과 기체 사이의 열 및 물질 전달에 Stefan 유동을 고려한 모델로 Abramzon & Sirignano¹¹⁾이 제안하였다. 이 모델에서 액적 표면과 기체 유동 사이의 열 및 질량 전달이 일정한 두께를 갖는 가상의 막 내에 집중되어 있다고 가정하였다. 물성치 계산은 수정된 Spalding 모델과 같이 Table 3의 식을 사용하였으며, 모델 방정식은 Table 4와 같다.

4. 계산조건 및 격자

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 격자의 형태를 나타낸 것이다. 선행연구¹³⁾에 따라 노즐로부터 축 방향 40 mm까지는 분무형상을 고려한 비균일 격자를 사용하였고, 40 mm이후부터는 격자 간격이 1 mm × 1 mm로 균일한 격자를 사용하였다. 분사 후 초기에 액적이 많이 분포하는 인젝터 팁 부근에 격자의 간격을 조밀하게 함으로써 더 좋은 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 초기 파셀 수는 2000을 사용하였고, 계산 조건은 실험과 같이 Table 1의 조건을 사용하였다.

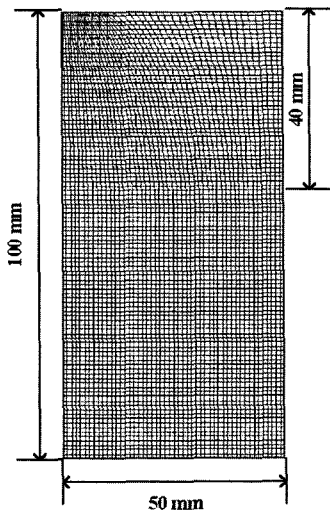


Fig. 2 Computational grid system

5. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 CSD모델과 APTAB 모델을 사용한 혼합분열모델로 분무의 미립화 과정을 해석하였고, Spalding 모델, 수정된 Spalding 모델, Abramzon & Sirignano 모델 등 세 가지 모델을 사용하여 분무의 증발에 대한 계산을 수행하였다. 그리고 계산 결과를 실험 결과와 비교하였다.

Fig. 3은 분위기 온도가 473K, 분위기 압력이 0.5 MPa, 1.0 MPa 인 분위기 조건에서 분무관통길이의 실험 결과와 계산 결과를 비교한 그림이다. 분위기 압력이 0.5 MPa 인 경우 분무관통길이의 계산 결과는 대체로 실험 결과보다 다소 크게 나타나는 경향이 보였다. 이것은 계산 시 인젝터로부터 분사된 액적 중 입경이 큰 액적은 큰 운동 에너지를 가지기 때문에 분무의 선단 부근에 많이 분포하게 되는데, 이러한 액적들은 증발하기까지 시간이 많이 걸리게 되어 증발이 완전히 이루어지지 않고 남아 있지만, 실제 분무 증발에서는 분무의 선단에 분포하는 액적들이 빨리 증발하여 사라지거나, 완전히 증발되지 않았다 하더라도 입경이 아주 작기 때문에 실험에 의한 화상에서는 잘 나타나지 않기 때문이다. 한편, 세 가지 증발 모델에 의한 결과를 비교해보면 증발 모델에 의한 큰 차이는 나타나지 않았지만 수정된 Spalding 모델이나 Abramzon & Sirignano 모델을 사용한 경우가 정확한 결과를 보여주었다. 압력이 1.0 MPa 인 경우 분위기 압력이 0.5 MPa인 경우보다

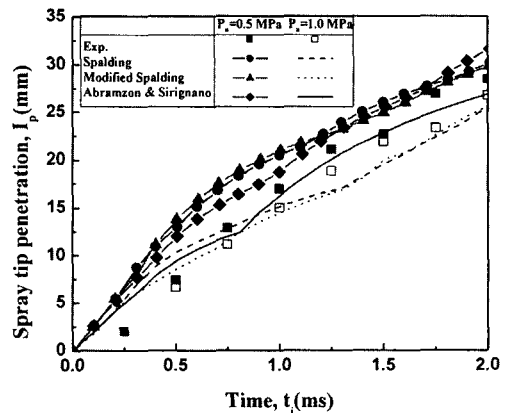


Fig. 3 Comparison of experimentally determined and calculated spray tip penetration ($T_a=473K$)

분무관통길이가 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 분위기 압력이 높아짐에 따라 챔버 내의 기체 밀도가 증가하여 분무성장을 방해하기 때문이다. 그리고 실험 결과와 계산 결과의 오차가 분위기 압력이 1.0 MPa인 경우가 0.5 MPa인 경우보다 작은 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력이 높아짐에 따라 증발에 대한 영향이 더 적어졌기 때문으로 보인다. 또한, 증발 모델에 의한 계산 결과의 차이는 크게 나타나진 않았다. 하지만 Abramzon & Sirignano 모델이 분사 후 1.0 ms 이후에 더 좋은 결과를 보여주고 있다.

Fig. 4는 인젝터로부터 연료가 분사된 후 증발된 증기 연료의 질량 변화의 계산 결과를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 실선은 인젝터로부터 분사된 연료의 누적된 질량을 나타낸 것이고, 나머지 선들은 분사된 연료로부터 증발된 증기 연료의 질량을 나타낸 것이다. 대체로 분위기 압력이 낮은 경우 증발된 연료의 양이 많이 나타났다. 즉, 분위기 압력이 낮을수록 증발이 더 잘 일어나는 것을 알 수 있다. 그리고 Spalding 모델을 사용한 경우보다 수정된 Spalding 모델이나 Abramzon & Sirignano 모델을 사용한 경우가 증기 연료의 양이 더 많이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 즉, 두 모델을 사용한 경우 증발률이 더 높게 예측함을 알 수 있었다. 기존 연구들에 의하면 Spalding 모델은 고온, 고압의 분위기 조건에서 증발률을 상당히 낮게 예측하는 단점과 액적이나 주위 기체의 물성치의 계산에도 단점이 있기 때문에 분

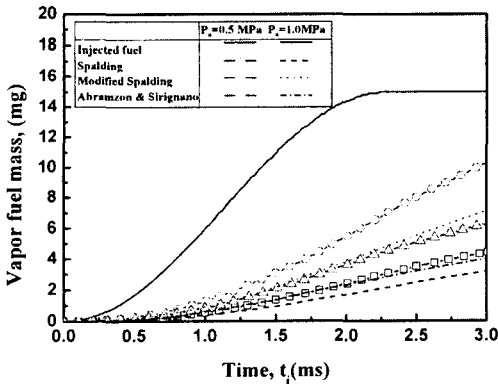


Fig. 4 Mass of injected fuel and vaporized fuel at different pressures ($T_a=473\text{K}$)

위기 압력과 온도가 높은 경우에는 적합하지 않다. 따라서 고온 고압의 분위기 조건에서는 Spalding 모델이나 Abramzon & Sirignano 모델을 사용할 경우 더 정확한 결과를 나타낼 것으로 사료된다.

Fig. 5는 분열 모델로 CSD+APTAB 모델, 증발 모델로 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하여, 분위기 압력이 0.5 MPa이고 분위기 온도가 473K일 때, 액상 분무의 발달과정의 계산 결과를 실험 결과와 비교하여 나타낸 그림이다. 좌측 그림은 실험 결과를 나타낸 것이고, 우측은 계산 결과를 나타낸 것이다. 대체로 계산 결과와 실험 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 하지만, 분사 후 2.0 ms 이후에는 차이를 나타내었다. 이것은 분위기 압력이 증가하면서 액적의 항력 계산에서 발생한 오차로 보인다. 따라서 계산 결과의 개선을 위해서는 항력에 대한 계산 방법의 개선이 필요할 것으로 보인다.

Fig. 6은 분위기 압력 0.5 MPa, 분위기 온도가 473K 일 때, 기상 분무의 발달과정에 대한 실험 결과를 계산된 당량비 분포와 비교하여 나타낸 그림이다. 증발 모델로는 Abramzon & Sirignano 모델을

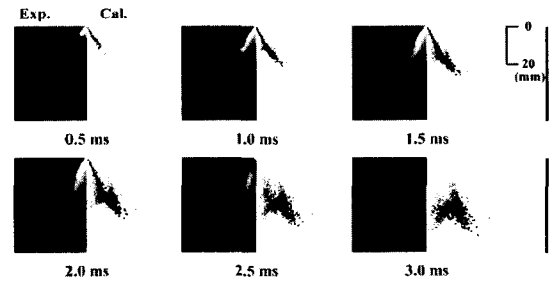


Fig. 5 Comparison of experimental and calculated results of liquid spray formation ($T_a=473\text{K}$, $P_a=0.5 \text{ MPa}$)

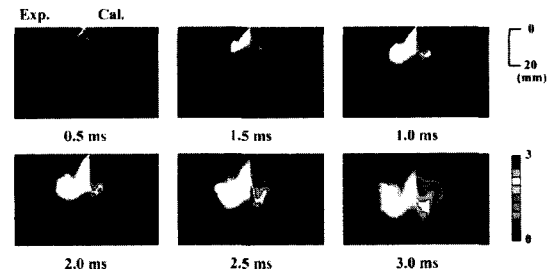


Fig. 6 Comparison of experimental and calculated results of gas spray formation ($T_a=473\text{K}$, $P_a=0.5 \text{ MPa}$)

사용하였다. 그림의 좌측은 실험에 의해 얻어진 기상 분포를 나타내며, 우측은 계산된 당량비 분포를 나타낸 것이다. 분사 후 초기에는 실험 결과와 계산 결과가 비슷한 경향을 보이지만 2.0 ms 이후에는 많은 차이를 보이고 있다. 이것은 실험의 경우는 인젝터로부터 분사된 액적이 분사 후 초기부터 주위와의 열 및 물질 전달이 활발히 일어나 빠르게 증발하지만, 계산의 경우는 액적의 증발에 걸리는 시간이 과도하게 계산되기 때문이라 사료된다.

Fig. 7은 분위기 압력이 1.0 MPa이고 분위기 온도가 473K일 때, 액상 분무의 발달과정의 계산 결과와 실험 결과를 나타낸 그림이다. 분열 모델로는 CSD+APTAB 모델, 증발 모델로 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하였다. 그림으로부터 계산 결과와 실험 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 하지만, 분사 후 2.5 ms 이후에는 차이를 나타내었다.

Fig. 8은 분위기 압력 1.0 MPa, 분위기 온도가 473K 일 때, 기상 분무의 발달과정에 대한 실험 결과를 계산된 당량비 분포와 비교하여 나타낸 그림이다. 증발 모델로는 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하였다. 분위기 압력이 0.5 MPa 일 때와 마찬가지로 분사 후 초기에는 실험 결과와 계산 결과가 비슷한 경향을 보이지만 2.0 ms 이후부터는 많은 차이를 나타냈다. 그리고 당량비분포를 보면, 분위기 압력에 상관없이 분무의 중심에 당량비가 높게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 분무의 중심에서 기체의 속도가 빠르기 때문에 주변 영역에서보다 기체의 양이 상대적으로 적어 당량비가 높게 나타나는 것으로 사료된다. 그리고 실험 결과와 계산 결과 모

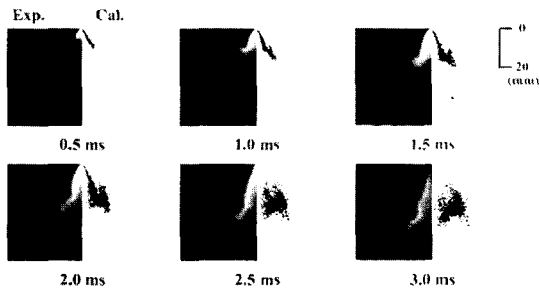


Fig. 7 Comparison of experimental and calculated results of liquid spray formation (Ta=473K, Pa=1.0 MPa)

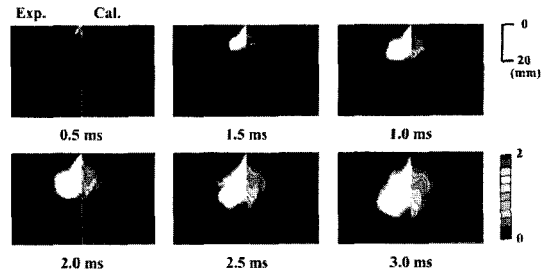


Fig. 8 Comparison of experimental and calculated results of gas spray formation (Ta=473K, Pa=1.0 MPa)

두 액상은 증공원추형 분무를 나타내지만, 기상은 증실원추형 분무를 나타내었다.

Fig. 9는 Abramzon & Sirignano 모델을 이용하여 계산한 결과로 분사 후 챔버 내의 연료의 양을 혼합기 농도에 따라 구분하여 나타낸 그림이다. 분위기 압력이 0.5 MPa인 경우에는 농후한 혼합기($\phi > 1.5$)에 포함된 연료의 양이 희박한 혼합기($\phi < 0.5$)에 포함된 연료의 양보다 많이 나타났다. 반면 분위기 압력이 1.0 MPa인 경우에는 농후한 혼합기($\phi > 1.5$)에 포함된 연료의 양보다 희박한 혼합기($\phi < 0.5$)에 포함된 연료의 양이 더 많이 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력이 0.5 MPa인 경우가 분위기 압력이 1.0 MPa인 경우보다 증발 온도가 더 낮기 때문에 같은 분위기 온도에서 분위기 압력이 0.5 MPa인 경우가 분위기 압력이 1.0 MPa인 경우보다 증발이 더 활발히 일어나 농후한 혼합기 양이 더 많이 나타나는 것으로 사료된다.

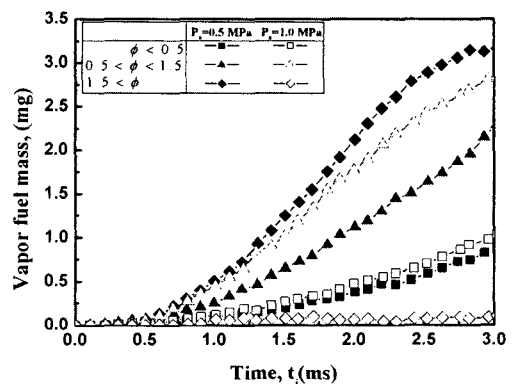


Fig. 9 Evolution of rich lean mixtures in the spray region

6. 결론

고온·고압의 분위기 조건에서 분무의 미립화 및 증발 과정에 대한 해석을 수정된 KIVA-II코드를 이용하여 계산하였다. 분열 모델로는 CSD모델과 APTAB 모델로 이루어진 혼합분열모델을 사용하였고, 증발 모델로는 Spalding 모델, 수정된 Spalding 모델, Abramzon & Sirignano 모델을 사용하여 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분무관통길이의 실험 결과와 계산 결과를 비교해보았을 때, 계산된 결과가 실험 결과보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그리고 Abramzon & Sirignano 모델을 사용한 경우 계산 결과가 가장 정확하게 나타났다.
- 2) 기상 및 액상 분무의 발달 과정에 대한 계산 결과, 분사 후 초기에는 실험 결과와 유사한 경향을 보였지만 후기로 갈수록 계산 결과와 실험 결과의 차이가 크게 발생하였다. 그리고 실험과 계산 결과의 오차는 기상의 경우 크게 나타났지만, 액상의 경우는 대체로 정확한 결과를 보여주고 있다.
- 3) 연료 분사 후 증발된 증기 연료의 양은 Abramzon & Sirignano 모델과 수정된 Spalding 모델을 사용한 경우가 Spalding 모델을 사용한 경우보다 크게 나타났다. 즉, 두 모델이 증발률을 더 크게 예측하는 것으로 보인다.

References

- 1) F. Zhao, J. Yoo, Y. Liu, M. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injector for DI Gasoline Engines," SAE 961925, 1996.
- 2) S. C. Hwang, D. S. Choi, D. J. Kim, "Characteristics of Spray Development from Vapor/Liquid Phase Distribution for GDI Spray," Transactions of KSAE, Vol.2, No.9, pp.50-58, 2001.
- 3) C. S. Lee, K. H. Lee, S. C. Choi, S. I. Kwon, "Effect of Ambient Conditions on Spray Behavior of Gasoline Injector," Transactions of KSAE, Vol.8, No.2, pp.27-32, 2000.
- 4) C. Beatrice, P. Belardini, C. Bertoli, M. C. Cameretti, N. C. Cirillo, "Fuel Jet Models for Multidimensional Diesel Combustion Calculation: An Update," SAE 950086, 1995.
- 5) S. W. Park, H. J. Kim, Y. Rhyu, C. S. Lee, "Modeling of Spray Atomization of Fuel Injector Using Hybrid Model," Transactions of KSAE, Vol.10, No.6, pp.27-33, 2002.
- 6) D. W. Kang, S. C. Hwang, D. J. Kim, "Comparison of GDI Spray Prediction by Hybrid Model," Transactions of KSME, Vol.12, No.27, pp.1744-1749, 2003.
- 7) Z. Han, R. D. Reitz, P. J. Claybaker, C. J. Rutland, "Modeling the Effects of Intake Flow Structures on Fuel/Air Mixing in a Direct-Injected Spark-Ignition Engine," SAE 961192, 1996.
- 8) C. O. Iyer, Z. Han, "Fuel Spray Modeling of Outward-Opening Pintle Injectors," ILASS Americas, 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System, Madison, WI, 2002.
- 9) J. H. Park, S. S. Hwang, 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.
- 10) D. B. Spalding, The Combustion of Liquids Fuel, Fourth Symposium (international) on Combustion, 847, Williams & Wilkins, 1953.
- 11) B. Abramzon, W. A. Sirignano, "Droplet Vaporization Model for Spray Combustion Calculation," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.32, No.9, pp.1605-1618, 1989.
- 12) A. A. Amsden, T. D. Butler, P. J. O'Rourke, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory Report, LA-11560-MS., 1989.
- 13) D.W. Kang, "A Study on Hybrid Breakup Models for Modeling of GDI Spray," Master's Thesis, Pusan National University, 2003.