분위기 조건에 따른 GDI 분무거동의 수치적 연구

심영삼† · 황순철* · 김덕줄**

The Numerical Study of GDI Spray Behavior on Various Ambient Conditions

Young-Sam Shim, Soon-Chul Hwang and Duck-Jool Kim

Key Words : GDI(가솔린 직접 분무), Equivalence Ratio(당량비), Vaporization Model(증발모델), Breakup Model(분열모델), Hybrid Model(혼합모델)

Abstract

The purpose of this study is to obtain the accurate prediction for the atomization and vaporization processes of GDI spray. Atomization process is modeled using hybrid model that is composed of Linearized Instability Sheet Atomization (LISA) model and Aerodynamically Progressed TAB (APTAB) model. Vaporization process is modeled using Spalding model and Abramzon & Sirignano model. To obtain the experimental results for comparing with calculated results, the cross-sectional images of liquid and vapor phases and SMD distribution were acquired by exciplex fluorescence method and Phase Doppler Analyzer respectively. The experiment and computation was performed at the ambient pressure of 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa and the ambient temperature of 293K, 473K. The calculated results by modified KIVA-II code show good agreement with experimental results.

기호설명

Ω	: 최대 파동 성장률
U	: 액적의 전체속도
y	: 액적의 무차원 변위
Re	: 레이놀즈수
We	: 웨버수

1. 서 론

엔진의 실린더 내로 연료를 직접 분사 시키는 GDI 엔진의 경우, 미립화 및 혼합기 형성 과정은 배출물 저감 및 엔진 효율향상에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 GDI 엔진에 사용되는 와류형 고압 인젝터에 대한 실험적, 수치적 연구가 활발히 진행되고 있다. Zhao 등[1]은 GDI 엔진용 인젝터의 전체적인 분무 발달과정을 2 차원 Mie 산란 기법을 이용하여 가시화하였고, PDA 장치를 사용하여 연료 액적의 SMD 를 측정하였다. 혼합기의 증발 과정 해석을 위해 exciplex 형광법을 이용한 연구도 활발히 이루어지고 있다. Ghandhi 등[2]은 플루오로벤젠/DEMA/헥산 혼합물을 사용한 exciplex 형광법으로서 공기보조 인젝터의 기·액상 분무의 분리 가시화를 시도하였다. Hwang 등[3]은 플루오로벤젠/DEMA/헥산 시스템을 사용한 exciplex 형광법을 이용하여 GDI 인젝터를 대상으로 혼합기 형성과정을 해석하였다.

분무의 미립화 및 분무 증발에 대한 수치적 연구도 활발히 진행되고 있다. 중공 원추형 분무의 미립화 모사를 위해 2 가지 이상의 모델로 이루어진 혼합분열 모델을 이용한 연구가 활발히 시도되고 있으며, 증발의 경우에는 액적의 증발 혹은 디젤엔진의 분무증발을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서 GDI 엔진에 사용되는 와류형 고압 인젝터의 분무증발 과정에 대한 연구가 필요하다. Han 등[4]은 기존 KIVA-II 코드에 사용된

† 부산대학교 대학원
* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계공학부
E-mail : djkim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

Spalding 형태의 모델에서 액체상태 및 기체상태에서 물성치 계산방법을 개선하여 GDI 엔진 내 분무의 분열 및 증발과정에 대해 해석하였다. Suh 등[5]은 LISA 모델과 Spalding 모델을 사용하여 GDI 엔진 내 연료 분포의 거동과 공기·연료의 혼합기 형성과정을 모사하였다.

본 연구에서는 KIVA-II 코드[6]를 사용하여 GDI 엔진에 사용되는 와류형 고압 인젝터의 분열 및 증발과정에 대한 해석을 하였다. 액적의 분열과정은 LISA(Linearized Iinstability Sheet Atomization) 모델[7]을 1 차 분열모델로 APTAB(Aerodynamically Progressed TAB) 모델[8]을 2 차 분열 모델로 사용한 혼합모델을 이용하여 해석하였고, 분무증발 모사를 위해 KIVA-II 코드에서 사용된 Spalding 모델[9]과 Stefan 유동을 고려하여 Spalding 모델을 개선한 Abramzon & Sirignano 모델[10]을 사용하였다. 모델의 검증을 위해 분무형상, 관통길이, SMD, 질량분포, 당량비 등 계산 결과와 exciplex 형광법 및 PDA 장치를 이용하여 취득한 실험값을 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

기·액상의 분포 해석을 위한 실험장치는 Fig. 1 과 같이 구성되어 있다. 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-YAG 레이저(60mJ/pulse)의 4 차 조화파(266 nm)를 사용하였다. 형광화상의 취득은 이중 MCP(Micro-channel plate)가 정착된 ICCD 카메라를 사용하였다. 실험 조건은 Table 1 과 같다

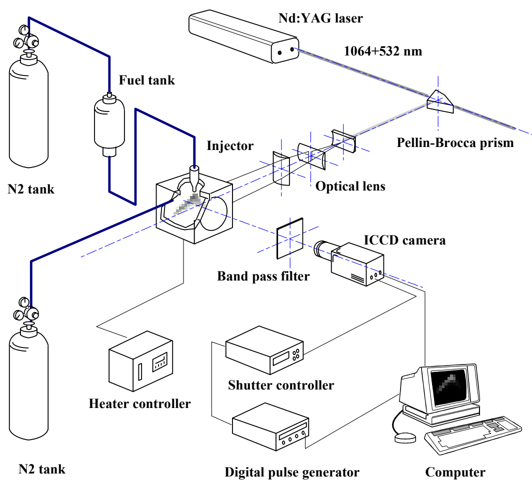

Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Fuel	Hexane / F.Z ./ DEMA
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Injection quantity (mg)	15
Ambient gas	N_2
Ambient temperature(K)	293, 473
Ambient pressure (MPa)	0.1, 0.5, 1.0

3. 해석 모델

3.1 분열모델

3.1.1 1 차 분열

1 차 분열 모델로 Schmidt 등이 제안한 LISA 모델을 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 L 은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, Dombrowski 와 Hooper 의 연구에 의하면 $\ln(\eta_b/\eta_0) = 12$ 이다. 분열 후 액적의 크기는 다음과 같다.

$$d_D = \frac{3\pi d_L^2}{K_L} \qquad (2)$$

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

3.1.2 2 차 분열

액막의 분열 후 2 차 분열 과정의 모사를 위해 Park 등에 의해 제안한 APTAB 모델을 사용하였다. 모델 방정식은 다음과 같다.

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

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

액적의 분열 기준은 다음과 같다.

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

3.2 증발모델

액적 증발을 모사하기 위해 Spalding 모델과

Stefan 유동을 고려한 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하였고, 액적의 온도는 공간상으론 일정하나 시간상으로는 변한다고 가정한 무한전도 모델을 사용하였다.

Abramzon & Sirignano 모델은 액적 표면과 기체 유동사이의 열 및 질량 전달이 일정한 두께를 갖는 가상의 막 내에 집중되어 있다고 가정한 막이론을 도입하였다.

액적 증발시 대류의 영향을 고려했을 때 열 및 물질전달은 다음의 식에 의해 결정된다

$$Nu^* = 2 + \frac{(Nu_0 - 2)}{F(B_T)} \tag{5}$$

$$Sh^* = 2 + \frac{(Sh_0 - 2)}{F(B_M)} \tag{6}$$

강제대류나 자연대류가 없을 경우라 하더라도 증발하는 액적의 경우는 반지름 방향의 유동이 항상 존재한다. 막이론에 입장에서 보면 이러한 Stefan 유동은 막의 두께를 증가 시키는 역할을 한다. Abramzon & Sirignano 는 이러한 막 두께의 변화가 Spalding 의 전달수 B 에 영향을 받는다고 하였다.

$$F(B) = (1 + B)^{0.7} \frac{\ln(1 + B)}{B} \tag{7}$$

그리고 비증발 상태에서 Nusselt 수와 Sherwood 수는 Ranz 와 Marshsll 의 식을 이용하였다.

$$Nu_0 = 2 + 0.6\sqrt{\mathrm{Re}}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \tag{8}$$

$$Sh_0 = 2 + 0.6\sqrt{\mathrm{Re}}\,Sc^{1/3} \tag{9}$$

여기에 계산에 사용된 열역학적 및 물리적 상태량은 1/3 법칙을 이용하여 계산하였다.

그리고 막이론에 의해서 다음의 증발률식이 얻어진다.

$$\dot{m}_F = 2\pi r_s \rho_g D_g Sh^* \ln(1 + B_M) \tag{10}$$

$$\dot{m}_F = 2\pi r_s \frac{k_g}{C_{pg}} Nu^* \ln(1 + B_T) \tag{11}$$

여기서 하첨자 ‘s’는 액적의 표면을 나타내고 ‘g’는 기체막에서 계산된 값이라는 것을 나타낸다. 그리고 B_M , B_T 는 각각 Spalding 의 질량전달수를 및 열전달수로 다음과 같다.

$$B_M = \frac{Y_{F_S} - Y_{F_\infty}}{1 - Y_{F_S}} \tag{12}$$

$$B_T = \frac{C_{pg}(T_\infty - T_s)}{L(T_s) + Q_L / \dot{m}} \tag{13}$$

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

$$Q_L = \dot{m}\left\{\frac{C_{pg}(T_\infty - T_s)}{B_T} - L(T_s)\right\} \tag{14}$$

식(10)과 식(11)의 두 식으로부터 Spalding 의 전달함수 B_M 와 B_T 사이의 관계식을 유도할 수 있다.

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

여기서 $\phi = \frac{C_{pg}\rho_g D_g}{k_g}\frac{Sh^*}{Nu^*}$

그리고 액체상태 및 기체상태의 물성치들은 온도 및 압력의 함수로 계산하였으며, 혼합물의 물성치는 혼합법칙[3]을 사용하여 계산하였다.

4. 계산조건 및 격자

본 연구에서는 Fig. 2 와 같은 형태로서 계산시간과 정확도를 고려하여 예측능력이 가장 뛰어난 비정렬 격자에서 수정된 KIVA-Ⅱ 코드를 사용하여 GDI 분무의 거동을 해석하였다. 노즐로부터 축방향 40 mm 까지는 분무형상을 고려한 비균일 격자이며, 40 mm 이후부터는 셀의 크기가 1 mm × 1 mm 인 균일 격자이다. 초기 parcel 수는 2000 을 사용하였다. 본 연구의 계산 조건으로는 Table 1 의 실험 조건을 사용하여 계산하였다.

5. 계산결과 및 고찰

Fig. 3 과 Fig. 4 는 Spading 모델(model 1)과 Abramzon & Sirignano 모델(model 2)을 사용해 분

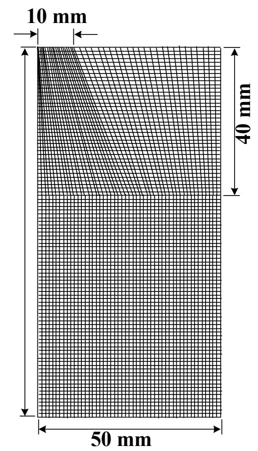

Fig. 2 Computational grid system

위기 온도가 293K, 473K 에서 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1,0 MPa 일 때 분무관통길이의 계산값을 실험값과 비교한 그림이다. 분위기 온도가 293K 인 경우 두 가지 모델 모두 실험값과 유사한 결과값을 나타냄을 볼 수 있다. 그러나 분위기 온도가 473K 인 경우에는 실험값과 계산값이 잘 일치하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이것은 실험에서는 높은 분위기 온도가 때문에 분무선단에서 액적들이 증발하게 되어 화상 취득시 분무선단에서 액적들이 잘 나타나지 않지만, 계산시에는 분무 선단에서 상대적으로 SMD 가 크고 빠른 속도를 가지는 액적들이 많이 분포하게 되는데, 액적 증발 계산에서는 이러한 액적들에 대한 증발을 작게 예측하는 경향 때문에 분무선단에 액적들이 남아있게 된다. 따라서 분무관통길이 계산에 이런 액적들이 많이 포함되어 있어 상대적으로 실험값보다 분무관통길이를 크게 예측하는 것으로 생각된다.

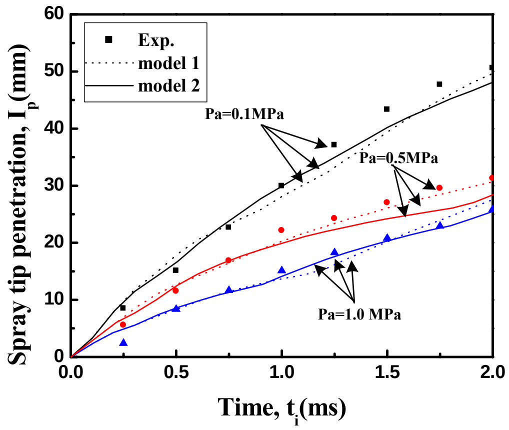

Fig. 3 Spray tip penetration at different pressure and T_a=293K

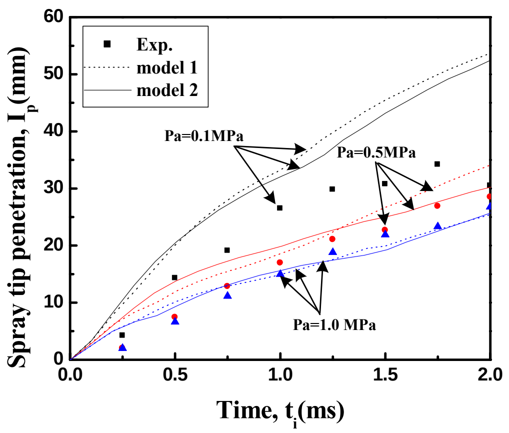

Fig. 4 Spray tip penetration at different pressure and T_a=473K

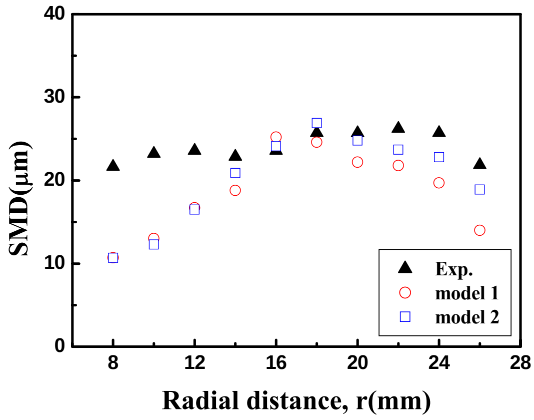

Fig. 5 SMD distribution at T_a=293K

Fig. 5 는 각 증발모델을 사용해 분위기 온도 293K, 분위기 압력 0.1 MPa 의 조건에서, 분사 후 3.0 ms, 선단거리 30 mm 에서 측정한 SMD 값의 실험값과 계산값을 비교한 그림이다. 전체적으로 분무 반경 12 mm 이전에는 실험값과 계산값이 차이가 나지만 12 mm 이후에는 비슷한 결과를 나타냄을 볼 수 있다. 이것은 계산시 실험에 사용한 인젝터의 내부유동의 변화까지는 고려할 수 없기 때문에 발생하는 차이로 사료되며, 양질의 결과를 얻기 위해서는 인젝터의 내부유동에 대한 추가적인 고려뿐만 아니라, 액적의 크기 분포함수에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다. 분무반경 12 mm 이후에는 model 2 가 실험값과 조금 더 유사한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 6 은 분위기 온도 293K 일 때. 다양한 분위기 압력에서 분열모델로 LISA+APTAB 모델을, 증발모델로 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하여 분무형상의 실험값과 계산값을 비교한 그림이다. 대체로 분사 후 2.0 ms 이전에는 실험값과 유사하

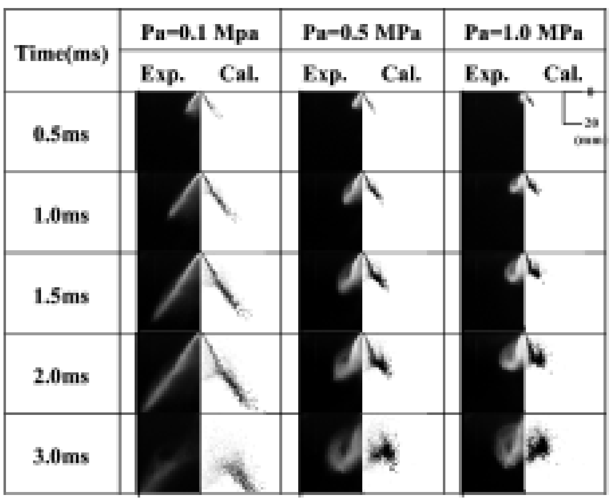

Fig. 6 Spray formation at different pressure and T_a=293K

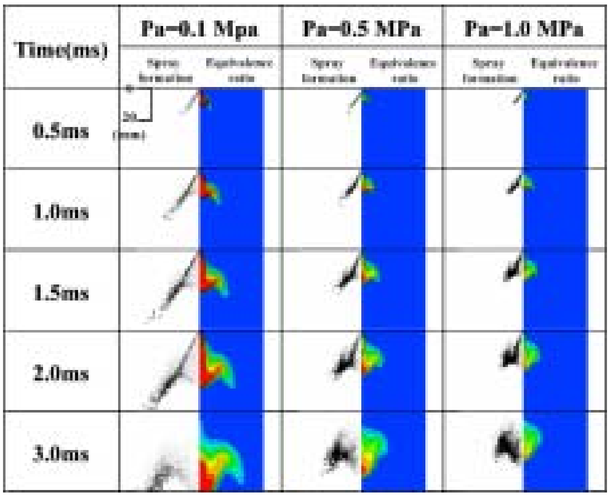

Fig. 7 Vapor fuel mass distribution at different pressure and T_a=473K

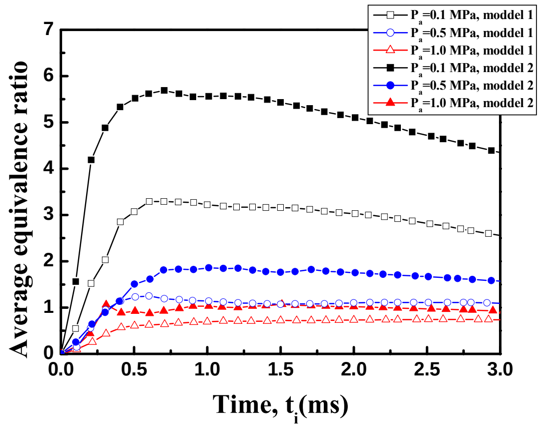

Fig. 9 Vapor fuel mass distribution at different pressure and T_a=473K

지만 2.0 ms 이후에는 차이가 나타났으며, 또한 분위기 압력이 증가함에 실험값과의 오차가 더 증가하는 경향을 보였다. 그리고 분위기 압력이 높아짐에 따라 계산된 분무관통길이가 실험 값보다 짧게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 분위기 압력이 증가하면서 액적에 대한 항력 값을 과도하게 예측하였기 때문으로 사료되며, 양질의 결과를 얻기 위해서는 항력계수에 대한 수정이 필요할 것으로 보인다. 분위기 압력이 높아지면서 분무가 원추형태에서 붕괴되어 분무 중심으로 밀집되는 경향을 나타내었고, 분무선단에서 와류가 형성되었다. 와류의 발생은 분무가 발달함에 따라 하류에서 액적들이 운동량을 잃고 유입되는 주위 기체의 유동을 따라 이동함으로써 분무외곽에서 와류가 형성되는 것으로 사료된다.

Fig. 7 은 분열모델로 LISA+APTAB 모델을, 증발모델로 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하여 분위기 온도 473K 에서 분위기 압력에 따라 분무의 발달 과정과 그에 따른 당량비 변화를 나타낸 그림이다. 당량비 분포는 분위기 압력이 0.1 MPa 일 때 0 에서 7, 0.5 MPa 일 때 0 에서 3, 1.0 MPa 일 때 0 에서 2 를 나타낸다. 분위기 압력이 증가함에 따라 전체적인 당량비의 값이 작게 나타났다. 이것은 분위기 압력이 높아 짐에 따라 증발을 위한 온도도 같이 증가 하기 때문에 같은 온도의 조건에서는 분위기 압력이 낮을수록 증발이 더 잘되기 때문으로 사료된다. 분무 발달 과정과 당량비를 비교해 보면, 분무선단이나 분무의 외각 부분에서 증발이 잘 일어나지 않는 것을 볼 수 있는데, 이것은 분무의 선단부분이나 외각부분에서 상대적으로 큰 SMD 를 가지는 액적들이 분포해 액적 가열 시간 및 증발에 걸리는 시간이 많아 증발이 잘 일어나지 않기 때문으로 사료된다. 분무형상은 중공 원추형이지만 증발된 연료의 분포는 중실 원추형의 형태를 나타내었다.

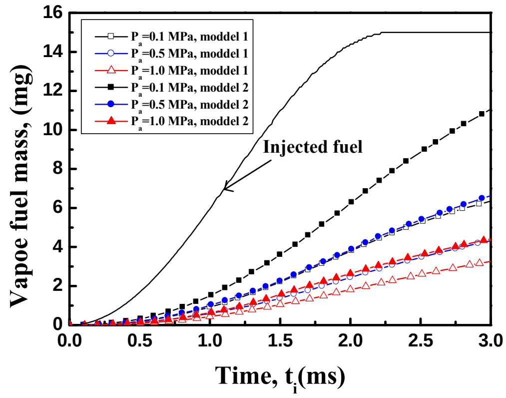

Fig. 8 Mass of injected and of evaporated fuel at different pressure and T_a=473K

Fig. 8 은 분사 후 3.0 ms 까지 분사된 연료의 양과 증발된 연료의 양을 나타내는 그림이다. model 1 의 증발을 작게 예측한다는 단점을 보완한 model 2 의 경우가 model 1 보다 증발이 더 잘되는 것을 볼 수 있다. 그리고 각 모델의 경우 분위기 압력이 증가함에 따라 연료의 증발이 더 적게 일어나는 것을 볼 수 있었다. model 2 의 경우 분사 후 3.0 ms 에서 분위기 압력이 0.1 MPa 일 때 분사된 연료의 74 %, 0.5 MPa 일 때 분사된 연료의 45 % , 1.0 MPa 일 때 분사된 연료의 30 % 가 증발하였다. 즉, 분위기 압력이 낮을수록 증발이 더 잘되는 것을 볼 수 있었으며, 이것은 같은 분위기 온도인 경우에는 분위기 압력이 낮을수록 증발이 더욱 잘 되기 때문이라 사료된다.

Fig. 9 는 챔버내 평균 당량비의 변화를 나타낸 그림이다. model 2 의 경우가 평균 당량비가 높게 나타났고, 분위기 압력이 낮을수록 높은 당량비 값을 나타내었다. 이것은 model 2 의 경우가 증발

률을 더 높게 예측하기 때문에 증발이 잘 일어나 더 높은 당량비를 나타내고 있고, 분위기 압력이 낮을수록 증발이 더욱 잘 일어나기 때문에 당량비가 더 높게 나타나는 것으로 사료된다. 대부분 분사 초기 0.5 ms 부근에서 경우 최대 당량비를 나타내고 있다.

6. 결 론

GDI 분무의 미립화 및 증발 과정에 대한 모델링을 하기 위해서 분열모델은 1 차 분열(LISA 모델)과 2 차 분열(APTAB 모델)을 고려한 혼합 모델을 사용하였으며, 증발과정 모사를 위해 Spalding 모델(model 1), Abramzon & Sirignano 모델(model 2)을 이용하여 해석하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 분무관통길이는 분위기온도가 293K 인 경우 두 가지 증발 모델의 경우 모두 실험과 비슷한 경향을 보이지만 473K 인 경우는 약간의 차이를 보여주었다.

(2) SMD 의 경우 분무 중심에서는 차이를 보이지만 분무 외각으로 갈수록 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, Abramzon & Sirignano 모델을 사용한 경우가 조금 더 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 분무발달 과정과 증기연료 분포는 분사초기에는 양호한 결과를 얻을 수 있었지만, 분사후기로 갈수록 차이를 보이고 있다.

(4) Abramzon & Sirignano 의 모델이 Spalding 의 모델보다 분사초기 및 후기에서 증발율이 더 높게 예측한다. Spalding 모델이 증발률을 작게 예측하는 단점이 있어, 엔진 적용에 있어서는 spalding 모델을 개선한 Abramzon & Sirignano 모델을 사용하였을 경우 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

(1) Zhao, F., Yoo J., Liu, Y., and Lai M., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injector for DI Gasoline Engines", SAE Paper, No. 961925.
(2) Ghandhi, J. B., Felton, P. G., Gajdeczko B. F. and Braco F. V, 1994, "investigation of the Fuel Distribution in a two stroke Engine with and Air-Assisted Injector", SAE Paper, No. 940394.
(3) Hwang, S. C., Choi, D. S., Kim, D. J., 2001,"Characteristics of Spray Development from Vapor/Liqiud Phase Distribution for GDI Spray", KSAE, No.9, Vol 2, pp 50~58
(4) Han, Z., Reitz, R. D., Claybaker, P. J., amd Rutland, C. J., 1996, "Modeling the Effects of Intake Flow Structures on Fuel/Air Mixing in a Direct-Injected Spark-Ignition Engine", SAE Paper, No. 961192.
(5) Suh, E. S., and Rutland, C. J., 1999, "Numerical Study of Fuel/Air Mixture Preparation in a GDI engine", 1999, SAE Paper, No. 1999-01-3657.
(6) Amsden, A. A., Butler, T. D., O'Rourke, P. J., 1989, "KIVA-Ⅱ: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays", Los Alamos National Laboratory report, LA-11560-MS.
(7) Schmidt, D. P., Martin, J. K., and Reitz, R. D., 1999, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field", SAE Paper, No. 1999-01-0496.
(8) Park, J. H., Hwang, S. S., and Yoon, Y. B., 2000, "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.
(9) Spalding, D. B., 1953, "The Combustion of Liquids Fuel", Fourth Symposium (international) on Combustion, 847, Williams & Wilkins.
(10) Abramzon, B., and Sirignano W. A., 1989, "Droplet Vaporization model for spray combustion calculation", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol32, No. 9, pp 1605~1618