

중공 원추형 연료 분무의 미립화 및 벽 충돌 과정에 대한 연구

심 영 삼¹⁾ · 최 경 민²⁾ · 김 덕 줄^{*2)}

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾

A Study on Atomization and Wall Impingement Process of Hollow-Cone Fuel Spray

Youngsam Shim¹⁾ · Gyungmin Choi²⁾ · 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 December 2005 / Accepted 27 February 2006)

Abstract : Numerical analysis about atomization and wall impingement process of hollow-cone fuel spray is performed by a modified KIVA code with hybrid model. 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 Gosman model, which is based on the droplet behaviors after impingement determined by experimental correlations, is used for spray-wall impingement process. The LIEF technique was used to compare the results with those of experiment. The calculations and experiments are carried out at the ambient pressures of 0.1 MPa and 0.5 MPa and the ambient temperature of 293K. It was found that the calculated results show satisfactory agreement with experimental ones.

Key words : GDI(가솔린 직접 분사), Spray tip penetration(분무 관통 길이), SMD(자우터 평균 입경), Hybrid breakup model(혼합 분열 모델), Spray-wall impingement model(분무-벽 충돌 모델)

Nomenclature

- d_D : droplet diameter
- d_L : ligament diameter
- K : ρ_l/ρ_g
- K_L : the most unstable wave length of ligament
- L : breakup length
- U : total velocity of the droplet
- y : drop distortion parameter
- We : Weber number
- Ω : growth of the most unstable wave

1. 서론

가솔린 엔진은 엔진의 고연비화, 고출력화를 이루기 위해 PFI(Port Fuel Injection) 방식에서 연료를 연소실 내에 직접 분사하는 GDI(Gasoline Direct Injection) 방식으로 발전하여 왔다. 이러한 GDI 엔진은 연료를 원하는 곳에 직접 분사 할 수 있기 때문에 부분 부하 영역에서는 성층화에 의한 초회박 연소가 가능해 연비를 향상시킬 수 있으며, 고부하 영역에서는 이론 공연비 조건에서 고출력을 낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 더 높은 출력과 연비를 얻기 위해서는 엔진 내에 분사된 분무의 특성과 거동에 대한 해석이 매우 중요하다. 이를 위해 실험 및 전산

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

기법을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

GDI 엔진은 대부분 압력 스웰형 인젝터를 이용한다. 압력 스웰형 인젝터는 노즐 내부의 와류실에 의한 접선 방향 속도 성분과 축 방향 속도 성분이 합쳐져 원심력에 의해 반경 방향으로 퍼져나가 중공 원추형(hollow cone)의 액체 막을 형성하게 된다. 이러한 액체 막이 주위 기체와의 영향으로 액사, 액적으로 분열 되어 미립화 되는데, 이러한 미립화 과정이 연소 특성에 많은 영향을 미치기 때문에 분무의 분열 과정에 대한 연구가 필요하다.

Zhao 등¹⁾은 GDI 엔진용 인젝터의 분무 발달과정을 2차원 Mie 산란 기법을 이용하여 가시화하였고, PDA장치를 이용하여 연료 액적의 SMD를 측정하였다. 또한 Hwang 등²⁾은 LIEF 기법을 통해 연료의 기·액상 분포를 측정하여 분무 성장에 대한 특성을 분석하였다. 그러나 이러한 실험적 연구는 실험에 따른 제약이 크기 때문에 다양한 조건에서 정보 취득이 힘들다. 따라서, 이를 보완하기 위한 수치적 연구도 활발히 진행되고 있다. 중공 원추형 분무의 미립화 과정의 해석을 위해 많은 분열 모델들이 제안되었지만, 이러한 모델들을 이용하여 액주나 액막으로부터 액적으로 분열되는 1차 분열과정과 액주나 액막으로부터 분열된 액적이 더 작은 액적으로 미립화되는 2차 분열 과정을 동시에 해석하는 것은 어렵다. 따라서, 최근에는 1차 분열과 2차 분열 과정을 모두 고려한 혼합분열 모델에 대한 연구가 진행되고 있다. Beatrice 등³⁾은 WB(Wave Breakup) 모델⁴⁾과 TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델⁵⁾을 이용한 혼합분열모델을 제안하였다. 액적의 직경이 큰 노즐 근처에서 WB 모델을 사용하고, 분사된 액적의 최대 직경이 95% 이하가 되는 액적에 대해서는 TAB 모델을 사용하였다. Schmidt 등⁶⁾은 LISA 모델과 TAB모델을 혼합한 분열 모델을 제안하여 중공 원추형 분무에 대한 수치적 해석을 하였다.

한편, GDI 분무는 연소실 내에 직접 분사되기 때에 분무가 피스톤 헤드나 실린더 벽에 충돌하게 된다. 이러한 충돌 형상은 충돌 후 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 있다. 이러한 충돌 과정에 대한 실험 및 수치적 해석은 주로 직접 분사 방식을 사용하는 디젤 엔진을 중심으로 활발히 진행되어 왔다. 실제로 분무의 벽 충돌 과정에 대한 수치적 모델로 많이 사용되는 모델로는 Warkins 그룹의 모델,⁷⁾ Fujimoto 그룹의 모델,⁸⁾ Gosman 그룹의 모델⁹⁾ 등이 있다. 그러나 이러한 모델들은 주로 디젤 연료 분무의 충돌 과정 해석에 많이 적용되어 왔다. 따라서 GDI 분무의 벽 충돌과정의 수치적 해석을 위해서는 디젤 엔진에 사용된 충돌 모델의 적용 가능성의 평가 혹은 GDI 분무에 합당한 충돌 모델들의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 혼합 분열 모델 및 벽 충돌 모델을 수정된 KIVA 코드¹⁰⁾에 적용하여 GDI 분무의 분열 및 벽 충돌 과정에 대해 해석하고자 하였다. 혼합 분열 모델은 선행연구에 따라 LISA+APTAB 모델¹¹⁾을, 벽 충돌 모델은 유막과 액적분열을 고려한 Gosman 모델⁹⁾을 이용하여 비충발 조건에서 두 가지 분위기 압력에 대해 해석을 하였으며, 모델의 신뢰성을 평가하기 위해 LIEF 기법을 통한 실험 결과와 비교 검토 하였다.

2. 해석모델

2.1 혼합 분열 모델

2.1.1 1차 분열 모델(LISA 모델)

Schmidt 등⁶⁾이 제안한 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.

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

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

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

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

2.1.2 2차 분열 모델(APTAB 모델)

액막의 분열 후 2차 분열 과정의 모사를 위해 기존의 LISA 모델에서 사용된 TAB 모델 대신에 Park 등¹²⁾에 의해 제안된 APTAB 모델을 사용하였다. APTAB 모델에서는 TAB 모델에서 고려되지 않은 외부의 공기역학적 힘에 의한 액적의 변형의 효과를 고려하였다. 모델 방정식은 다음과 같다.

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

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

액적의 분열 기준은 다음과 같다.

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

2.2 벽 충돌 모델

Gosman 등⁹⁾은 기존의 실험과 모델들을 분석하여 충돌 현상을 표면 온도와 충돌 속도에 따라 10 개의 구간으로 구분하였다. 우선 충돌 형태를 Fig. 1과 같이 구분하고, 이를 충돌 조건에 따라 Fig. 2와 같이

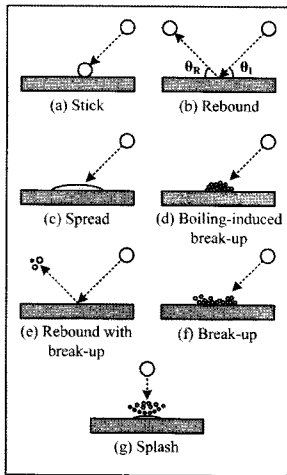


Fig. 1 Schematic of different impaction regimes

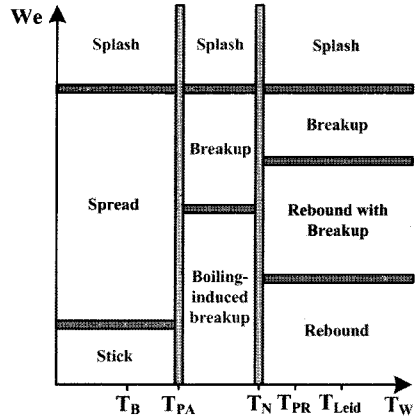


Fig. 2 Overview of droplet impingement regimes and transition condition for dry wall at fixed Laplace number and surface roughness

구분하여 적용하였다.

2.3 계산격자 및 조건

본 연구에서는 셀의 크기가 1 mm × 1 mm 인 균일 격자를 사용하였으며, 초기 parcel의 수는 2000으로 선정하여 계산하였다. Table 1에 계산조건을 나타내었으며, 이는 실험 조건과 동일하다.

3. 실험방법 및 조건

Fig. 3은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 크게 GDI 분사계와 분무실, 광학계 및 화상취득장치, 신호 처리계로 구성되어 있다. 본 실험에서의 분사계는 와류형 고압 인젝터, 연료탱크 및 가압용 질소 탱크로 구성되어 있다. 연료의 분사압력은 블레더형 연료 탱크에 질소를 가압하여 조절함으로써 분사 시 발생하는 맥동과 압력변동을 줄일 수 있도록 하였다. 광원으로는 10 Hz Nd-YAG 레이저(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. 가솔린은 복합 물질로서 미소한 자연형광의 발생으로 오차가 발생하며, 비등점도 균일하지 않아 실험 용매로 사용하기엔 적합하지 못하다. 따라서 가솔린을 대신하기 위해 가솔린 성분 중에 하나인 헥산을 용매로 사용하

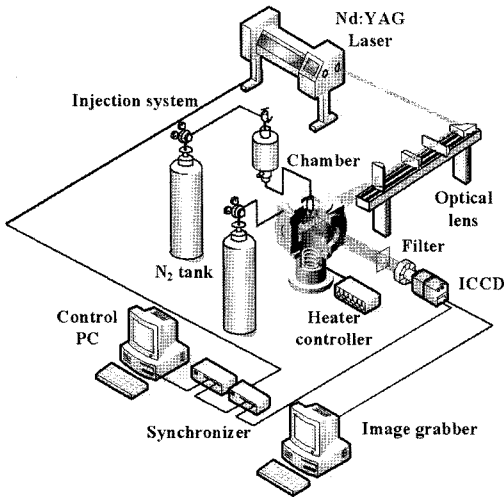


Fig. 3 Schematic of experimental setup

Table 1 Experimental and calculation condition

Fuel	Hexane/Flourobenezene/DEMA
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Injection quantity (mg)	14
Ambient gas	N ₂
Ambient temperature (K)	293
Ambient pressure (MPa)	0.1, 0.5
Impingement distance(mm)	46.7

였다. 한편, 분무의 성장 특성에 영향을 미치는 분위기 압력의 영향을 알아보기 위해 압력을 0.1 MPa, 0.5 MPa로 바꿔가면서 측정하였다. 분위기 온도는 273 K의 비증발 조건으로 선정하였다. 그리고 분무 벽 충돌실험에서 인젝터 팁으로부터 충돌 벽면까지의 거리는 46.7 mm로 선정하여 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 자유 분무

분위기 온도가 293K, 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa인 조건에서 분무의 미립화 과정 및 분무 특성에 대한 해석을 하였다. GDI 분무의 분열 과정 해석을 위해 1차 분열 모델로 LISA 모델을, 2차 분열 모델로 APTAB 모델을 사용한 혼합 분열 모델을 이용하였다.

Fig. 4는 분위기 압력이 0.1 MPa 일 때 초기 분무(pre spray), 주 분무(main spray)의 연료의 분사 후 분

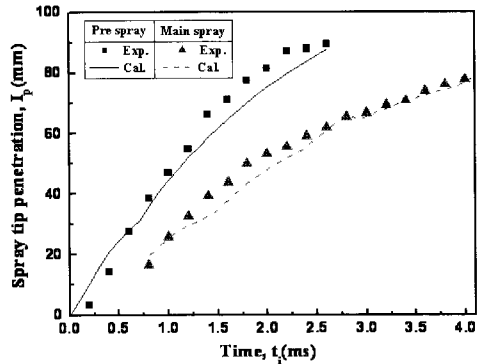


Fig. 4 The experimental and the calculated spray tip penetration (Pa = 0.1 MPa)

무 관통 길이를 나타낸 그림이다. 초기 분무(pre spray)는 분사 초기 분사 노즐 중심부에 형성되는 상대적으로 큰 액적들을 말하며, 주 분무(main spray)는 초기 분무가 분사된 후 노즐 경계를 따라 형성된 액막이 공기와의 상대 속도에 의한 항력에 의해 분열된 작은 크기의 액적을 말한다. 그리고 이런 주 분무가 중공 원추형을 이루게 된다. 그림의 결과로부터 초기 분무의 계산 결과가 실험 결과보다 약간 작게 나타나지만 대체로 유사한 경향을 보여주었으며, 주 분무의 계산 결과도 실험 결과와 매우 잘 일치 하였다. 그리고 초기 분무의 분무관통 길이가 주 분무의 분무 관통 길이보다 대체로 크게 나타나는 데, 이것은 액적의 입경이 큰 초기 분무가 주 분무보다 액적의 크기가 크기 때문에 관성력이 크며, 주 분무보다 먼저 분사되었기 때문이라 사료된다.

Fig. 5는 분위기 압력이 0.5 MPa 일 때, 초기 분무

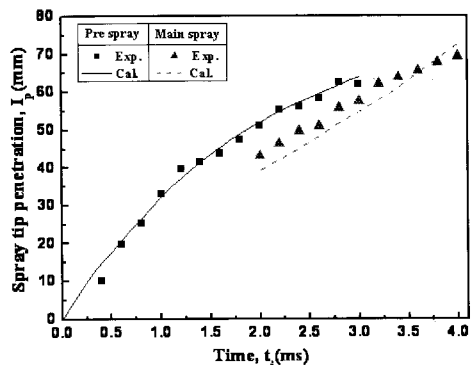


Fig. 5 The experimental and the calculated spray tip penetration (Pa = 0.5 MPa)

와 주 분무의 분무 관통 길이를 나타낸 그림이다. 분사 후 초기에는 초기 분무와 주 분무의 계산결과가 실험 결과와 잘 일치하였다. 한편, 초기 분무와 주 분무의 분무 관통 길이가 분위기 압력이 0.1 MPa 인 경우 보다 더 작게 나타났으며, 초기 분무와 주 분무의 분무 관통 길이의 차이 역시 더 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 분위기 압력의 높아짐에 따라 주위 기체의 밀도가 증가하여 액적에 가해지는 분무의 성장을 방해하기 때문이라 사료된다.

Fig. 6과 Fig. 7에 분위기 압력이 0.1 MPa, 0.5 MPa 일 때, GDI 분무의 발달 과정을 나타내었다. 좌측이 실험 결과, 우측이 계산 결과를 나타낸다. 실험 결과와 계산 결과를 비교해보면 압력 조건에 상관없이 대체로 유사한 경향을 나타내었다. 그리고 초기 분무의 경우에는 분무의 중심 영역에 분무가 밀집되어 분사 되는 것을 볼 수 있었고, 주 분무는 액막을 형성하면서 공기와의 상대 속도에 의해 중공 원추형의 분무를 형성하는 것을 볼 수 있었다. 한편, 분

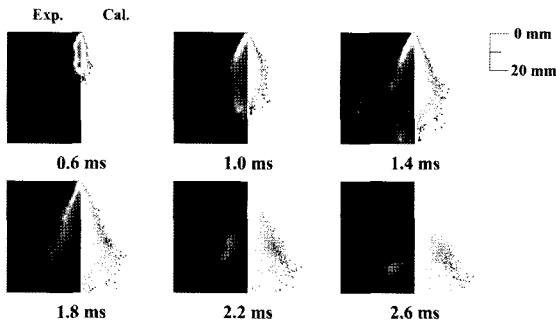


Fig. 6 The experimental and the calculated results for spray development process ($P_a = 0.1$ MPa)

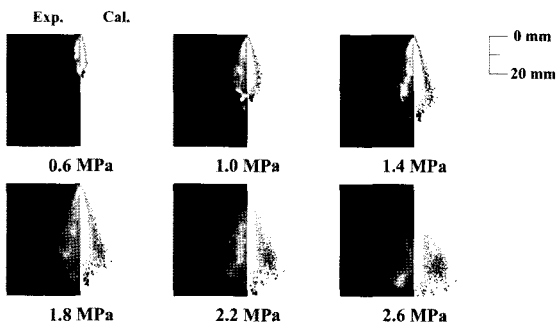


Fig. 7 The experimental and the calculated results for spray development process ($P_a = 0.5$ MPa)

위기 압력이 높은 경우 분무 폭과 분무 관통 길이가 더 작게 나타났다. 이것은 분위기 압력의 증가함에 따라 분무 주위의 가스의 밀도가 높아져, 분무의 발달을 방해하기 때문이라 사료된다. 그리고 분위기 압력이 높은 경우가 분위기 압력이 낮은 경우보다 분무 외각에서의 와류의 발생이 활발한 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 주위 기체의 밀도에 의한 영향으로 생각된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 분위기 압력이 0.1 MPa, 0.5 MPa 일 때, 분사 후 3.0 ms에서 인젝터 팁으로부터의 선단거리에 따른 반경 방향의 SMD 분포를 나타낸다. 그림으로부터 분무의 중심 영역에서는 선단거리가 증가함에 따라 SMD 값이 커지는 것을 볼 수 있었고, 분무의 외각 영역에서는 선단거리가 증가함에 따라 SMD 값이 더 작아지는 것을 볼 수 있었다. 이것은

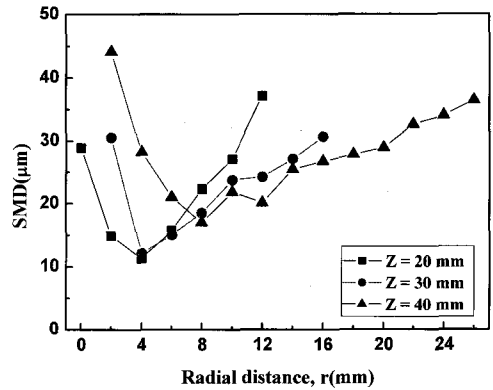


Fig. 8 The calculated SMD of droplets ($Z=30$ mm, $P_a = 0.1$ MPa)

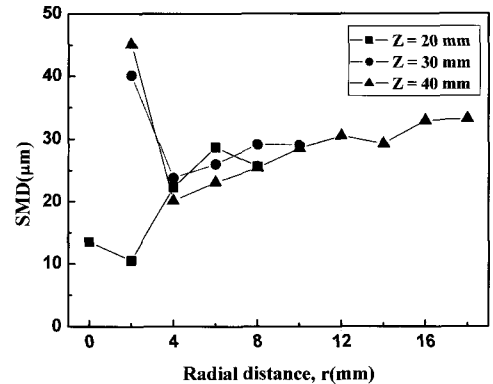


Fig. 9 The calculated SMD of droplets ($Z=30$ mm, $P_a = 0.5$ MPa)

분무의 중심 영역에서 초기의 직경이 큰 액적들이 서로 충돌 병합하면서 액적의 크기가 성장 하는 것으로 보이며, 반면 분무의 외각에서는 액적이 분산이 활발하게 일어나고 이에 따라 주위 기체의 영향을 많이 받기 때문에 미립화가 활발히 진행되어 액적의 크기가 작게 나타나는 것으로 사료된다. 한편, 분위기 압력이 높은 경우 세 조건의 선단거리에서 SMD 값의 차가 크지 않은 것을 볼 수 있었다. 이것은 높은 밀도의 주위 기체에 의한 액적 분열이 낮은 분위기 압력에 비해 활발하지 않기 때문이라 사료된다.

4.2 충돌 분무

분위기 압력이 0.1 MPa, 0.5 MPa의 두 조건에서 LISA+APTAB 모델을 분열 모델로, Gosman 그룹의 모델을 충돌 모델로 사용하여 연료 분사 후 분무 벽 충돌과정에 대한 해석을 하였다. 여기서 인젝터 팁으로부터 충돌 면까지 거리는 46.7 mm이다.

Fig. 10은 분위기 압력이 0.1 MPa의 조건에서 연료 분사 후 1.8 ms 부터 5.0 ms까지의 GDI 분무의 벽 충돌 과정에 대한 계산 및 실험 결과이다. 좌측은 실험 결과물, 우측은 계산 결과를 나타낸다. 두 결과로부터 대체로 계산 결과와 실험 결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 한편, 계산 결과의 이미지가 더 선명하고 더 많은 액적들이 분포하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 실험에서는 작은 크기의 액적들이 잘 나타나지 않지만 계산에서는 이러한 액적들이 전부 고려되기 때문이라 사료된다. 그리고 충돌 후 연료 분무는 분무의 반경 방향 속도 성분에 의해 외각으로 이동하였다.

Fig. 11은 분위기 압력이 0.5 MPa 인 조건에서 연료 분무의 충돌 과정을 나타낸 그림이다. 대체로 충돌 후 분무 거동에 대한 계산 결과가 실험 결과와 잘 일치 하였다. 한편, 충돌이 처음 시작되는 시간이 분위기 압력이 낮은 경우보다 0.6 ms 더 늦게 나타나는 것을 볼 수 있었는데, 이것은 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 관통 길이와 분무 폭이 작아지기 때문에 충돌 거리까지 도달하는데 더 많은 시간이 필요한 것이라 사료된다. 또한, 분위기 압력이 0.1 MPa인 경우와 마찬가지로 분무는 벽면의 외각으로 성장해 나가는데, 주위 기체의 밀도에 의해 분위기 압력이

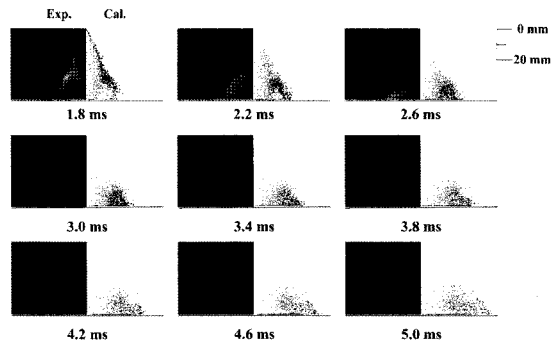


Fig. 10 The calculated and the experimental spray / wall impingement process at the ambient pressure of 0.1 MPa

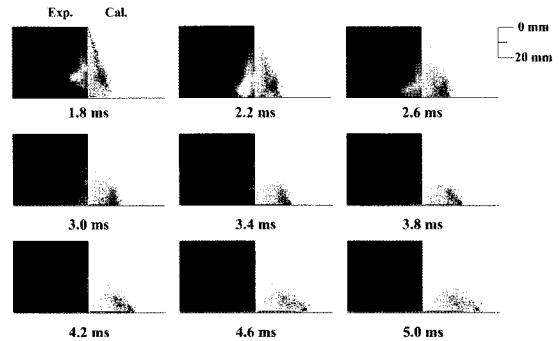


Fig. 11 The calculated and the experimental spray / wall impingement process at the ambient pressure of 0.5 MPa

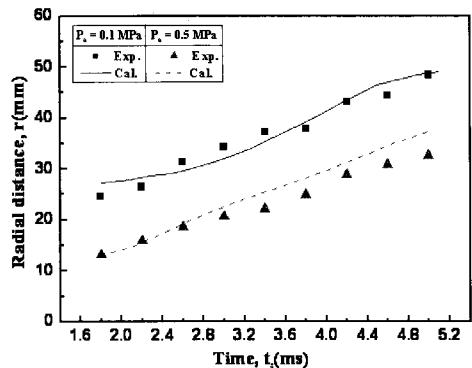


Fig. 12 The calculated and the experimental radial distance after wall impingement of GDI spray at the ambient pressures of 0.1 MPa and 0.5 MPa

낮은 경우 보다는 성장이 둔화 된 것을 볼 수 있었다.

Fig. 12는 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa의 두 가지 조건에서 충돌 후 연료 분무의 반경 방향으로의 도달 거리를 나타낸 것이다. 분위기 압력의 변화에 따

라 다소 오차가 나타나지만 대체로 실험 결과와 계산 결과가 잘 일치하였다. 그리고 분위기 압력이 높은 경우 주위 가스의 영향으로 반경 방향 도달 거리가 더 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

5. 결론

GDI 분무의 미립화 및 벽 충돌 과정의 모사를 위해 1차 분열 모델(LISA 모델)과 2차 분열 모델(APTAB 모델)을 고려한 혼합분열 모델과 Gosman 모델을 이용하여 분위기 온도 293K, 분위기 압력 0.1 MPa, 0.5 MPa의 조건에서 계산 및 실험을 수행하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 자유 분무 조건에서 LISA+APTAB 모델을 사용한 초기 분무와 주 분무의 분무 관통 길이에 대한 계산 결과는 실험 결과와 잘 일치하였다.
- 2) 자유 분무에서 분무 발달 과정의 계산 결과를 실험 결과를 비교해 보았을 때, 초기 분무에서 약간의 오차를 보였지만, 대체로 양호한 결과를 나타내었다.
- 3) 자유 분무에서 SMD 분포는 분무 중심에서 크게 나타났으며, 분무 외각으로 갈수록 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보여주었다.
- 4) 분무 벽 충돌 조건에서 Gosman 모델을 이용한 충돌 후 분무 발달 과정에 대한 계산 결과는 실험 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.
- 5) 충돌 분무에서 GDI 분무의 벽 충돌 후 반경 방향 도달 거리에 대한 계산 결과는 입력 변화에 관계 없이 실험 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

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, 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) P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 872089, 1987.
- 5) R. D. Reitz, "Modeling Atomization Process in High-Pressure Vaporizing Spray," Atomization and Spray Technology, Vol.3, pp.309-337, 1987.
- 6) D. P. Schmidt, J. K. Martin, and R. D. Reitz, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE 1999-01-0496, 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) 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.