

<학술논문>

벽면 캐비티 각에 따른 GDI 분무의 벽 충돌 과정에 대한 수치적 연구

심영삼* · 최경민† · 김덕줄**

(2007년 7월 4일 접수, 2007년 10월 16일 심사완료)

Numerical Study on Wall Impingement Process of GDI Spray According to Wall Cavity Angle

Young-Sam Shim, Gyung-Min Choi and Duck-Jool Kim

Key Words : Gasoline Direct Injection(가솔린직접분사), Fuel Film(연료액막), Hybrid Breakup Model (혼합분열모델), Spray-Wall Impingement Model(분무벽충돌모델)

Abstract

A spray-wall impingement process of a hollow-cone fuel spray from the high-pressure swirl injector in the Gasoline Direct Injection (GDI) engine were experimented and calculated at various wall geometries. The Linearized Instability Sheet Atomization (LISA) & the Aerodynamically Progressed Taylor Analogy Breakup (APTAB) model and the Gosman model were applied to model the breakup and the wall impingement process of the hollow-cone fuel spray. The numerical modelings were implemented in the modified KIVA code. The calculation results of spray characteristics, such as a spray development process and a radial distance after wall impingement, compared with the experimental results by the Laser Induced Exciplex Fluorescence (LIEF) technique. The droplet size distribution and the ambient gas velocity field, which are generally difficult to obtain by the experimental methods, were also calculated and discussed. It was found that the radial distance after wall impingement and Sauter Mean Diameter (SMD) decreased with increasing a cavity angle.

기호설명

d_0 : 초기액적직경

d_D : 액적직경

d_L : 액사직경

K : ρ_l / ρ_g

K_L : 액사의 최대 불안정과 길이

L : 액막분열길이

La : 라플라스 수

N : μ_l / μ_g

Re : 레이놀즈 수

U : 액적전체속도

y : 액적 변형 무차원수

We : 웨버수

τ : 분열시간

Ω : 최대파동성장률

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : choigm@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

* 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부

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.⁽¹⁾ 이러한 GDI 엔진은 압력 스윙형 인젝터를 이용하여 연료를 실린더 내에 직접 분사하기 때문에 연료 분무의 미립화, 증발, 벽충돌 특성에 대한 이해가 매우 중요하다. 특히, GDI 분무는 연료 분사 시기에 따라 피스톤 헤드나 실린더 벽과 충돌하는 경우가 발생한다. 이러한 충돌 현상은 미립화 촉진의 장점이 있으나 피스톤 벽면에 연료 액막을 형성한다는 단점이 있다. 연료 액막은 미연 탄화수소와 같은 배출물을 발생시키며, 이러한 배출물은 엔진 성능을 저해하는 주요 원인으로 작용한다.⁽²⁻⁵⁾ 따라서 분무의 벽 충돌 과정 및 연료 액막에 대한 이해는 매우 중요하다. 특히, GDI 엔진은 피스톤 캐비티 형상을 이용해 주위 기체의 유동을 발생시켜 성층화를 이루기 때문에 피스톤 형상에 따른 분무 충돌 현상의 이해는 필수적이다.

따라서 분무의 벽 충돌 현상에 대한 연구들이 계속적으로 진행되어 왔다. Kawajiri 등⁽⁶⁾은 실린더 내에서 연료 분무, 주위 기체, 분무 벽 충돌의 상호 관계가 혼합기 형성에 미치는 영향을 실험 및 수치적 방법을 통해 해석하여 작은 액적들은 주위 기체 유동의 영향을 많이 받으며, 벽에 충돌하는 액적들은 주위 기체와의 상호작용으로 분무 외각에 와류를 형성한다는 결론을 얻었다. Kang 등⁽⁷⁾은 LIEF (Laser Induced Exciplex Fluorescence) 기법으로 캐비티 직경이 와류 발생에 영향을 미치며, 분무는 분위기 온도가 증가함에 따라 반경 방향으로의 성장이 활발해지는 것을 관찰하였다. 그러나 이러한 연구들에도 불구하고 실험적 제약 때문에 다양한 분위기 조건에서의 분무-벽 충돌 현상에 대한 완전한 이해는 부족한 상황이다. 이는 분무 충돌 현상에 대한 적절한 모델을 이용한 수치적 계산을 통해 극복할 수 있다.

분무-벽 충돌 모델은 충돌 거동에 대한 실험을 기본으로 두고 있다. 대표적인 모델로는 Watkins 모델,⁽⁸⁾ Fujimoto 모델,⁽⁹⁾ Gosman 모델⁽¹⁰⁾ 등이 있으며, 가장 보편적으로 이용되고 있다. 그러나 이러한 모델들은 디젤 엔진에서 충돌 과정 해석에 주로 이용되어 왔기 때문에, GDI 엔진에 적용하기

위해서는 분무-벽 충돌 모델의 적용 가능성에 대한 검증이 필요하다. 따라서 저자들의 선행 연구로⁽¹¹⁾ Gosman 모델을 이용하여 다양한 분위기 압력에서 GDI 분무의 벽 충돌 과정을 계산하였으며, 실험 결과와 비교하여 검증하였다.

본 연구에서는 혼합 분열 모델로는 저자 등⁽¹²⁾에 의해 제안된 LISA-APTAB 모델, 충돌 모델로는 저자 등⁽¹¹⁾에 의해 검증된 Gosman 모델을 이용하여 벽면 형상에 따른 GDI 분무의 벽 충돌 과정에 대해 계산하였으며, 이를 실험 결과와 비교하였다. 또한 실험에 의해 취득이 어려운 분위기 기체 속도, SMD, 벽면에서의 연료 액막 질량 등을 수치적 방법으로 해석하였다.

2. 분무해석모델

Fig. 1은 GDI 인젝터에서 분사된 증공 원추형 연료 분무의 물리적 현상을 나타낸 그림이다. 분사된 연료는 액막을 형성하며, 액막은 다시 액사, 액적으로 분열된다. 이 액적들은 주위 기체와의 상호작용으로 미립화된다. 또한 미립화된 액적은 서로 충돌하여 병합되기도 하며, 피스톤 벽과 충돌하는 경우도 발생한다. 본 연구에서는 액막 형성 및 1차 분열에는 LISA (Linearized Instability Sheet Atomization) 모델,⁽¹³⁾ 2차 분열에는 APTAB (Aerodynamically Progressed Taylor Analogy Breakup) 모델,⁽¹⁴⁾ 충돌은 Gosman 모델,⁽¹¹⁾ 액적 간 병합은 O'Rourke 모델⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

2.1 혼합분열모델

2.1.1 액막 형성 및 1차 분열 (LISA 모델)

Schmidt 등⁽¹²⁾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.

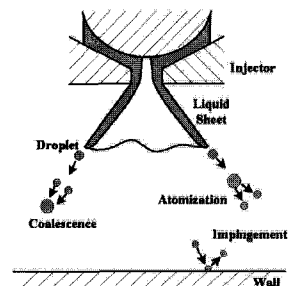


Fig. 1 Spray phenomena⁽¹⁵⁾

분열길이 L 은 다음과 같다.

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

여기서 η_n/η_0 는 Dombrowski 와 Hooper⁽¹⁶⁾가 제안한 12 를 사용하였다.

분열 후 액적의 크기는 다음과 같다.

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

여기서 d_L 은 액사의 지름이고, K_L 은 액사의 최대 불안정한 파의 길이이다.

2.1.2 2 차 분열 (APTAB 모델)

Park 등⁽¹⁴⁾이 제안한 APTAB 모델에서는 TAB 모델을 개선한 것으로, TAB 모델에서 고려되지 않은 외부의 공기역학적 힘에 의한 액적의 변형의 효과를 고려하였다. 모델 방정식은 다음과 같다.

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

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

액적의 분열 기준은 다음과 같다.

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

2.2 분무-벽 충돌 모델

Gosman 등⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 분무-벽충돌 모델은 다양한 실험을 바탕으로 마른 표면과 젖은 표면에 충돌하는 액적의 거동을 다루고 있다. Fig. 2 는 액적이 충돌할 경우 일어나는 현상을 6 가지로 구분하여 나타낸 것이다. 이 모델에서는 충돌 현상을 액적의 충돌 전 특성에 따라 마른 표면의 경우 Stick, Spread, Splash 의 순으로 젖은 표면에 대해서는 Rebound, Spread, Splash 순으로 단순화 하였다. Fig. 3 은 We 수와 벽면온도에 따라 충돌 영

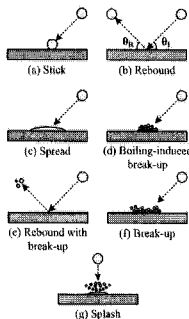


Fig. 2 Schematic of different impaction regimes

역을 나타낸 그림이다. 마른 표면의 경우 Stick 과 Spread 는 Adhesion 으로 통합하여 고려하였다.

Adhesion 과 Splash 의 기준 We 는 다음과 같다.

$$We_{cr} = A \cdot La^{-0.18} \quad (5)$$

여기서 A 는 벽면의 표면 거칠기에 의존하는 값이며, La 는 Laplace 수를 나타낸다.

$$La = \frac{\rho_a \sigma d}{\mu^2} \quad (6)$$

젖은 표면의 경우 기준은 다음과 같다.

$$\text{Rebound} \rightarrow \text{Spread} : We_{cr} = 5 \quad (7)$$

$$\text{Spread} \rightarrow \text{Splash} : We_{cr} = 1320 \cdot La^{-0.18} \quad (8)$$

2.3 계산 조건

Table 1 은 계산 조건을 나타내고 있다. 계산 영

Table 1 Calculation and experiment condition

Fuel	Hexane
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection quantity (mg)	2
Injection duration (ms)	15
Ambient gas	N ₂
Ambient temperature (K)	293
Ambient pressure (MPa)	0.1, 0.5
Impingement distance (mm)	46.7
Cavity diameter (mm)	30
Cavity angle (degree)	0, 30, 60, 90

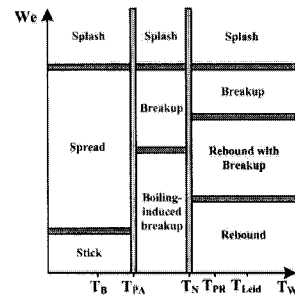


Fig. 3 Overview of droplet impingement regimes and transition condition for dry wall

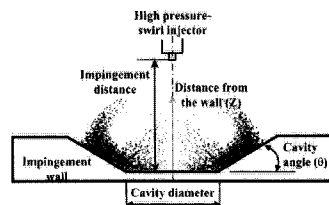


Fig. 4 Explain of geometry parameter

역은 100 mm × 50 mm 이며, 5000 개의 parcel 은 2.0 ms 동안 계산 영역 내로 분사된다. 분무각은 실험에 근거하여 60°로 하였다. 분사 속도는 다음 식을 이용하여 계산 하였으며, 본 연구에서는 85.967 m/s 이다.

$$U = k_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_f}} \quad (9)$$

여기서, ρ_f 은 액체 밀도이며, Δp 는 분사압과 분위기압의 차이이다. 속도비례 상수 k_v 는 다음과 같다.

$$k_v = \max \left[0.7, \frac{4\dot{m}}{\pi d_0^2 \rho_f \cos(\theta)} \sqrt{\frac{\rho_f}{2\Delta p}} \right] \quad (10)$$

여기서, \dot{m} 은 질량유량, θ 는 분사각을 나타낸다. 초기 분위기 압력과 분위기 온도는 0.1 MPa, 293K 이다. 충돌거리는 46.7 mm 이며, 캐비티 직경은 30 mm 이다. 벽면 형상의 변화를 위한 캐비티 각은 0°, 30°, 60°, 90° 이다. Fig. 4 는 실험 조건에 대한 기하학적 치수를 나타내고 있다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 5 는 연료 분무의 거동 해석을 위한 실험장치이다. 실험 장치는 크게 GDI 분사계와 분무실, 광학계 및 화상 취득 장치, 신호 처리계로 구성되어 있다. 인젝터는 중공 원추형 분무를 형성하는 압력 스웰형 인젝터이며, 광원으로는 10Hz Nd-YAG 레이저(60 mJ/pulse)의 4 차 조화파(266 nm)를 사용하였다. 형광화상의 취득은 ICCD 카메라를 사용하였다. 사용된 인젝터는 와류형 고압 인젝터로 가압용 질소탱크와 연료탱크에 연결되어 있다. 실험 조건은 Table 1 의 계산 조건과 같이 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

분위기 온도 293K, 분위기 압력 0.1 MPa 의 조건에서 LISA-APTAB 모델⁽¹¹⁾과 Gosman 모델⁽¹⁰⁾을 이용하여 벽면 캐비티 각에 따른 중공 원추형 분무의 충돌 거동을 계산 및 실험을 통해 해석하였다.

Fig. 6 은 분사 후 3.0 ms 에서 벽면의 캐비티 각에 따른 분무 구조에 대한 계산 및 실험 결과를 나타낸 그림이다. 충돌 거리는 46.7 mm 로 하였는데, 이는 GDI 엔진에서 분사시기 bTDC 60°로 후

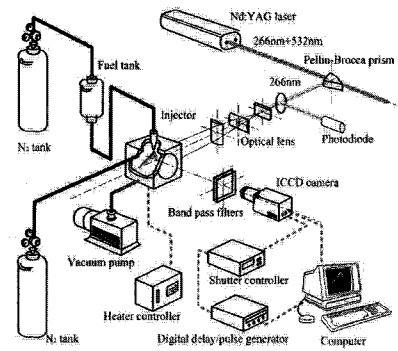


Fig. 5 Experimental setup

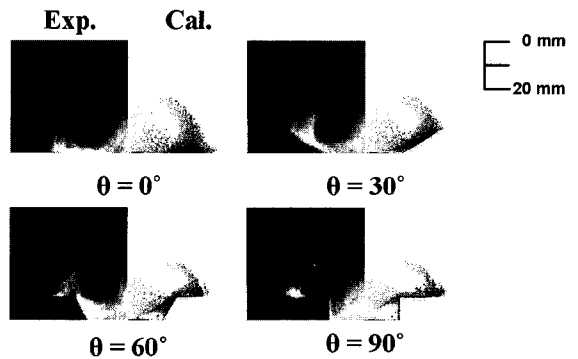


Fig. 6 Calculated and experimented impinging spray structure at 3.0 ms after start of the injection

기 분사 조건이다. 그림의 좌측은 LIEF 기법에 의한 실험결과를 나타내고, 우측은 계산결과를 나타낸 것이다. 대체로 계산 결과는 실험 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 캐비티 각이 증가함에 따라 충돌 분무의 반경 반향으로의 성장이 둔화되는 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 캐비티 각이 증가함에 따라 분무는 벽면을 따라 상승하며 성장해 나가야 하기 때문에, 캐비티 각이 클 경우 분무의 성장에 대한 저항이 증가하게 되기 때문이다. 한편, 분무의 축 방향 분포는 캐비티 각의 증가에도 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있었다. 이것은 충돌 벽이 없는 분무가 벽과 충돌하기 전 분무 외각에 형성된 와류에 의해 이 영역에 분포하는 액적들은 충돌 벽면까지 도달하지 못하고 분무의 축 방향 분포를 주도하기 때문에 분무의 축 방향 분포는 충돌에 많은 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 분무의 충돌 후 반경 방향 성장 거리의 실험 및 계산 결과를 나타내고 있다. 계산 결과는 실험 결과보다 작게 나타났지만, 대

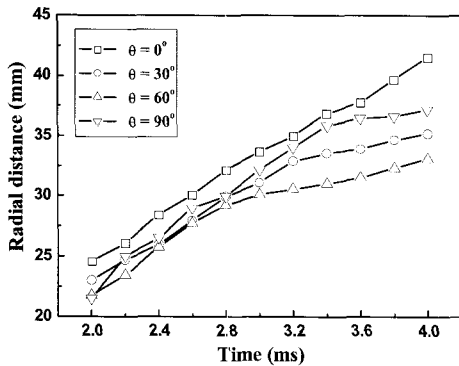


Fig. 7 Experimental radial distance after start of the injection

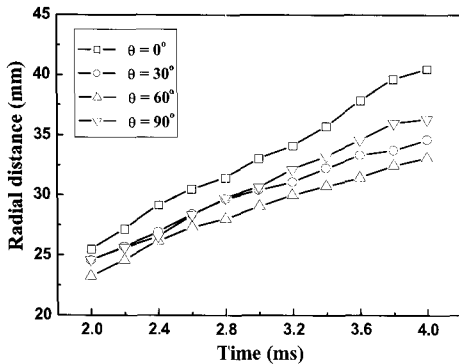


Fig. 8 Calculated radial distance after start of the injection

체로 유사한 경향을 보여주고 있다. 계산 결과가 실험 결과보다 작게 나타나는 것은 분무의 충돌 후 반경 방향 속도의 계산의 오차나 혹은 분위기체의 밀도에 의한 분무 성장의 둔화가 더 크게 예측되었기 때문이라 사료된다. Fig. 5에서와 마찬가지로 반경 방향 성장 거리는 캐비티 각이 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 캐비티 각이 90°일 경우의 반경 방향 성장 거리는 캐비티 각 0°일 경우보다 작게 나타나지만, 캐비티 각이 30°, 60°일 경우보다는 크게 나타났다. 이것은 캐비티 각이 90°일 경우에는 충돌 시 분무가 캐비티 내부와 외부로 나누어져 충돌하게 되는데, 캐비티 내부에 충돌하는 분무는 벽면의 저항에 의해 반경 방향 성장이 방해를 받지만, 외부에 충돌하는 경우에는 벽면에서의 경사가 없기 때문에 벽에 대한 저항 없이 성장하기 때문이다. 한편, 캐비티 각이 증가하는 경우 충돌 분무 반경 방향 거리는 초기에 증가량에 비해 2.8 ms 이후 캐비티 각에 의한 저항으로 그 증가량이 감소하는 것을 볼 수 있었다.

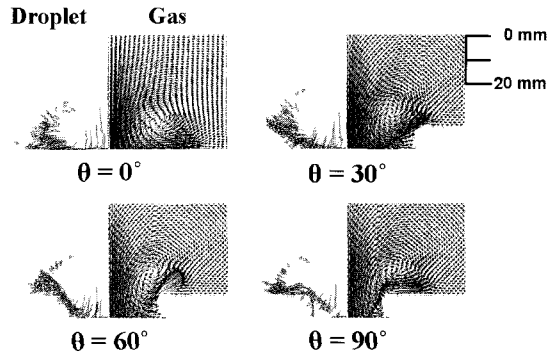


Fig. 9 Calculated velocity of droplets and ambient gas at 3.0 ms after start of the injection

Fig. 9는 분사 후 3.0 ms에서 액적과 주위 기체의 속도에 대한 계산결과를 나타내고 있다. 액적과 주위 기체는 서로간의 상대 운동의 영향으로 유사한 속도 분포를 보여주고 있다. 분무의 중심에는 액적 및 기체의 속도가 높게 분포하는 것을 볼 수 있으며, 분무 외각에는 주위 기체와 액적의 상호 작용에 의한 와류가 형성되는 것을 볼 수 있었다. 또한 캐비티 직경이 증가함에 따라 와류의 형성이 분무 중심으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 캐비티 각이 증가할수록 벽면에 의한 저항에 의해 액적이 분무 중심에 더 많이 분포하게 되며, 액적과 주위 기체의 상호 작용으로 생성되는 와류 역시 분무 중심에 더 가깝게 위치하기 때문이다.

Fig. 10에서 Fig. 13의 그림은 분사 후 3.0 ms에서 충돌 벽면으로부터 거리(Z)가 5 mm, 15 mm 일 때 캐비티 각에 따른 반경 방향 및 축 방향 속도의 계산 결과를 나타내고 있다. 반경 방향 및 축 방향 속도의 양의 값은 각각 분무 외각 방향과 상류 방향을 나타낸다. Fig. 10과 Fig. 11로부터 충돌 벽면으로부터의 거리(Z)가 5 mm 일 경우에는 캐비티 각이 증가함에 따라 반경 방향 속도는 감소하며, 축 방향 속도는 증가하는 것을 볼 수 있었다. 반경 방향 속도의 감소는 캐비티 각의 증가에 의한 분무 성장의 방해 때문이며, 축 방향 속도의 증가는 분무가 충돌 후 벽면을 따라 상류로 이동하며, 또한 분무 외각에 형성되는 와류에 의해 상류로 성장하기 때문이라 사료된다. 반경 방향 속도는 분무가 많이 분포하는 영역에서 높게 나타났으며, 축 방향속도는 공기 코어의 영향으로 분무 중심 영역에 높게 나타났다. Fig. 12와 Fig. 13으로부터 충돌 벽면에서의 거리(Z)가 15 mm 일 경우,

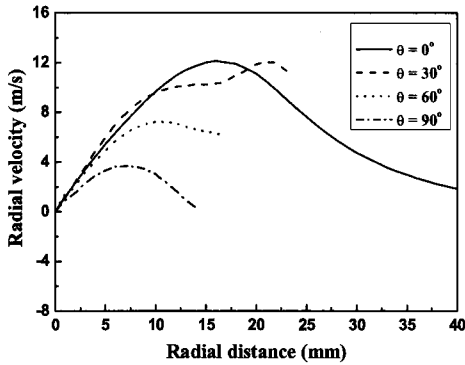


Fig. 10 Calculated radial velocity of ambient gas at 3.0 ms after start of the injection ($z = 5$ mm)

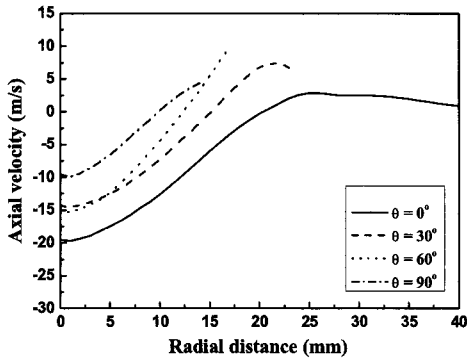


Fig. 11 Calculated axial velocity of ambient gas at 3.0 ms after start of the injection ($z = 5$ mm)

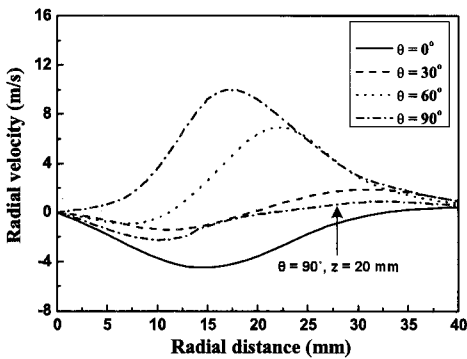


Fig. 12 Calculated radial velocity of ambient gas at 3.0 ms after start of the injection ($z = 15$ mm)

반경 방향 속도는 캐비티 각이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 그러나 5 mm 일 경우와 달리 캐비티 각 0°, 30°, 60° 일 때 일부 구간에서 반경 방향 속도가 음의 값을 나타내는데, 이것은 와류에 의해 분위기 기체의 유동이 분무 중심을 향하기 때문이라 사료된다. 캐비티 각 90°일 경우에는 반경 방향 속도가 반경 방향 거리에 상관없

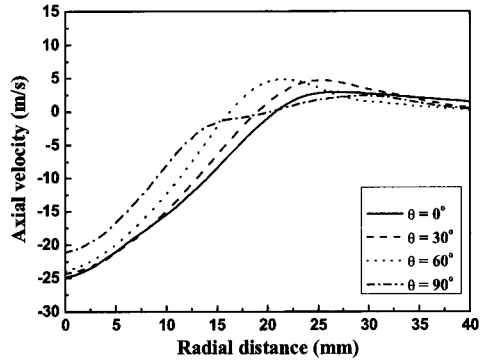


Fig. 13 Calculated axial velocity of ambient gas at 3.0 ms after start of the injection ($z = 15$ mm)

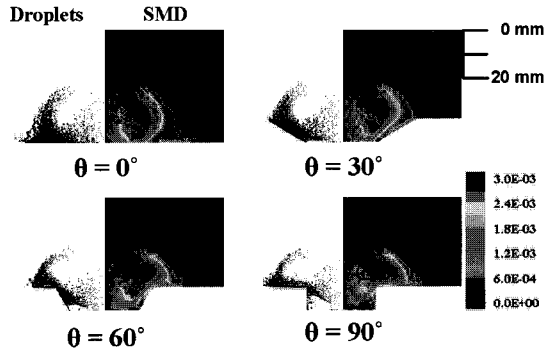


Fig. 14 Calculated Sauter Mean Diameter (SMD) of droplets at 3.0 ms after start of the injection

이 양의 값을 나타내었는데, 이것은 캐비티 각이 90°인 경우 와류가 다른 조건에 비해 상단에 위치한다는 것을 나타낸다. 실제로 충돌 벽면에서 상단 20 mm 거리에서는 분무 중심 영역에서 반경 방향 거리가 음의 값을 나타내었다. 축 방향 속도는 캐비티 각이 증가함에 따라 대체로 증가하였다. 또한, 축 방향 속도는 분무 중심에서는 하류 방향을 나타내는 음의 값으로 나타났지만, 반경 거리 15 mm 이후에는 와류의 영향으로 양의 값을 나타내기 시작하였다.

Fig. 14는 분사 후 3.0 ms 에서 Sauter Mean Diameter (SMD)를 나타낸 그림이다. SMD는 대체로 액적의 수밀도가 높은 영역에서 크게 나타났으며, 주위 기체와의 상호 작용이 활발한 분무 중심에서는 상대적으로 작은 크기를 나타낸다. 이는 액적의 수밀도가 높은 영역에서는 액적들 간 충돌 병합 현상이 활발하게 일어나 액적의 크기가 증가하는 경우가 발생할 수 있으며, 또한, 주위 기체의 영향이 적어 액적의 분열이 활발하지 못하기 때문에 SMD가 크게 나타나며, 분무 중심에서는 주위기

체에 의한 항력 등의 영향으로 액적의 분열이 활발하게 일어나 SMD 가 작게 나타나는 것으로 사료된다. 한편 캐비티 각이 증가함에 따라 큰 SMD 를 가지는 액적의 수밀도가 줄어 드는 것을 볼 수 있었다. 이러한 현상의 원인은 캐비티 각이 증가함에 따라 인젝터 팁에서 벽까지 거리가 짧아지고, 충돌 하기까지의 시간이 짧아짐에 따라 충돌에 의한 액적의 분열 및 액막 형성이 더 활발해지고, SMD 는 더 작아지기 때문이라 사료된다.

Fig. 15 는 충돌 후 벽면에 형성되는 연료 액막의 질량 변화에 대한 계산 결과를 나타낸 것이다. 액막의 질량은 캐비티 각이 증가함에 따라 증가하였다. 이것은 캐비티 각이 증가함에 따라 인젝터 팁과 벽사이의 거리가 짧아져 액적과 벽과의 충돌 현상이 활발해지기 때문이라 사료된다. 연료 액막의 질량은 약 1.0 ms 에서부터 증가하다 일정기간 정체하며, 그 이후 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 1.0 ms 에서 분무와 벽의 충돌이 최초로 일어난다는 것을 알 수 있는데, 이는 sac(액) 볼륨에 의한 초기분무에 의한 충돌이며, 초기분무의 충돌 후 일정시간이 지나면 주분무의 충돌이 시작된다는 것을 알 수 있다. 이러한 주분무의 충돌 시작 시간은 캐비티 각이 증가할수록 인젝터 팁과 벽사이의 거리의 감소로 빨라지며, 이 때문에 초기분무와 주분무의 충돌 시간 차이인 정체시간은 짧아지게 된다.

5. 결론

GID 분무의 벽면 캐비티 각에 따른 충돌 과정에 대한 해석을 위해, 분무 미립화 모델로 LISA-APTAB 모델을, 충돌 모델로 Gosman 모델을 이용하여 분위기 온도 293K, 분위기 압력 0.1 MPa 의 조건에서 계산 및 실험을 수행하여 다음의 결론을

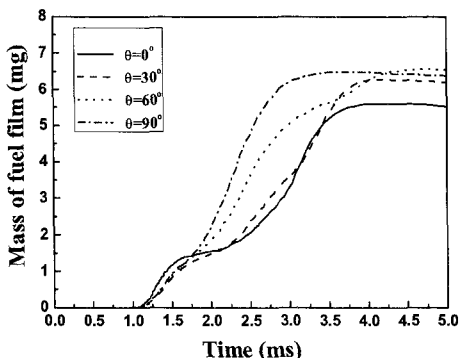


Fig. 15 Calculated mass of impinging fuel film after start of the injection

얻었다.

(1) 반경 방향 성장은 캐비티 각이 0° 일 때 가장 크게 나타났으며, 90° 일 때가 30°, 60° 때 보다 크게 나타났다

(2) 충돌 후 반경 방향 거리의 계산 결과가 실험 결과보다 다소 작게 나타났지만, 대체로 일치하는 경향을 나타내었다.

(3) 주위 기체와 액적간 상호 작용으로 인한 와류는 캐비티 각이 증가함에 따라 분무 중심에서 생성되었다.

(4) SMD 는 캐비티 각이 증가함에 따라 작아졌다. SMD 는 액적의 수밀도가 높은 영역에서 크게 나타났으며, 주위기체와 상호 작용이 활발한 분무 중심 영역에서 작게 나타났다.

(5) 연료 액막의 질량은 캐비티 각이 큰 경우 더 크게 나타내었다.

6. 후 기

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

참고문헌

- (1) Zhao, F., Lai, M. C. and Harrington, D. L., 1999, "Automotive-Spark Ignited Direct-Injection Gasoline Engines," *Progressed in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, pp. 427~532.
- (2) Drake, M. C., Fansler, T. D., Solomon, A. S. and Szekely, G. A. J., 2003, "Piston Fuel Films as a Source of Smoke and Hydrocarbon Emissions from a Wall-Controlled Spark-Ignited Direct-Injection Engine," SAE Paper, No. 2003-01-0547.
- (3) Sandquist, H., Lindgren, R. and Denbratt, I., 2000, "Sources of Hydrocarbon Emissions from a Direct Injection Stratified Charge Spark Ignition Engine," SAE Paper, No. 2000-01-1906.
- (4) Stevens, E. and Steeper, R., 2001, "Piston Wetting in an Optical DISI Engine: Fuel Films, Pool Fires, and Soot Generation," SAE Paper, No. 2001-01-1203.
- (5) Ortmann, R., Amdt, S., Raimann, J., Grzeszlik, R. and Wurfel, G., 2001, "Methods and Analysis of Fuel Injection, Mixture Preparation and Charge Stratification in Different Direct Injected SI Engines," SAE Paper, No. 2001-01-0970.
- (6) Kawajiri, K., Yonezawa, T., Ohuchi, H., Suida, M. and Katashiba, H., 2002, "Study on Interaction Between Spray and Air Motion, and Spray Wall Impingement," SAE Paper, No. 2002-01-0836.
- (7) Kang, J. J., Kim, D. W., Choi, G. M. and Kim, D. J., 2006, "Effect of the Shape of Impingement Plate on the Vaporization and Formation of Fuel Mixture in

- Impingement Spray," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 565~593.
- (8) Watkins, A. P. and Park, K., 1996, "Assessment and Application of a New Spray Wall Impaction Model," *Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbine, I. Mech. E.*, pp 1~10.
- (9) Senda, J., Kobayashi, M., Iwashita, S. and Fujiomoto, H., 1994, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," SAE Paper, No. 941894.
- (10) Bai C. and Gosman, D., 1995, "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation," SAE Paper, No. 950283.
- (11) Shim, Y. S., Choi, G. M. and Kim, D. J., 2007, "Experimental and Numerical Study on Behavior of Impinging Spray According to Ambient Temperature," *Trans. of the KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp. 124~131.
- (12) Shim, Y. S., Hwang, S. C. and Kim, D. J., 2004, "Numerical Analysis of Spray Behavior and Vaporization Characteristic of GDI Engine Injector under Ambient Conditions," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 5, pp. 545~552.
- (13) Schmidt, D. P., Martin, J. K. and Reitz, R. D., 1999, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE Paper, No. 1999-01-0496.
- (14) Park, J. H., 2002, "Development of Numerical Spray Models and Application to Aeropropulsion Engines," Ph. D. Thesis, Seoul National University.
- (15) O'Rourke, P. J., 1981, "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Ph. D. Thesis, Princeton University.
- (16) Dombrowski, N. and Hooper, P. C., 1962, "The Effect of Ambient Density on Drop Formation in Sprays," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 17, pp. 291.