

직접분사식 디젤엔진에서의 분무충돌과 연료액막형성 해석

김만식* · 민경덕** · 강보선***

Simulation of Spray Impingement and Fuel Film Formation
in a Direct Injection Diesel Engine

Manshik Kim, Kyoungdoug Min and Boseon Kang

Key Words: Direct Injection Diesel Engine (직접분사식 디젤엔진), Spray Impingement Model (분무충돌모델), Fuel Film Formation Model (연료액막형성모델)

Abstract

Spray impingement model and fuel film formation model were developed and incorporated into the computational fluid dynamics code, STAR-CD. The spray/wall interaction process were modelled by considering the change of behaviour with surface temperature condition and fuel film formation. We divided behaviour of fuel droplets after impingement into stick, rebound and splash using Weber number and parameter K. Spray impingement model accounts for mass conservation, energy conservation and heat transfer to the impinging droplets. A fuel film formation model was developed by integrating the continuity, the Navier-Stokes and the energy equations along the direction of fuel film thickness. The validation of the model was conducted using diesel spray experimental data and gasoline spray impingement experiment. In all cases, the prediction compared reasonably well with experimental results. Spray impingement model and fuel film formation model have been applied to a direct injection diesel engine combustion chamber.

1. 서 론

디젤엔진은 현재 상업적으로 실용화된 엔진 중에서 가장 높은 열효율을 가지는 것으로서 큰 출력을 필요로 하는 대형트럭이나 선박 등의 수송용엔진과 산업용엔진으로 널리 사용되고 있다. 현재는 디젤엔진의 장점을 이용한 소형 직접분사식 디젤엔진의 개발이 선진국을 중심으로 활발히 진행중이다. 소형 직접분사식 디젤엔진에서 연소실내로 분사되는 분무 액적의 벽면에서의 충돌

및 액막 형성을 이해하는 것은 배기가스 저감 및 엔진 성능향상을 위한 필수적인 연구분야이다. 본 연구에서는 충돌 분무의 거동을 결정하는데 중요한 역할을 하는 파라미터들을 이용하여 분무충돌 모델과 연료액막형성 모델을 수립하였고 STAR-CD를 이용한 코드화를 수행하여 실제에 가까운 분무 거동을 예측함과 동시에 실제 엔진에 적용하여 계산을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1에 나타낸 실험 장치는 분무충돌 모델을 검증하기 위한 것으로서 크게 연료분사 시스템과 분무가시화 시스템으로 구성되어 있다. 연료분사 시스템은 고압 질소 가스에 의하여 압축되는 연료를 압력탱크로부터 인젝터에 공급하게 구성하

* 회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

e-mail : kadmin@snu.ac.kr

Phone : 02-880-1661

FAX : 02-883-0179

*** 회원, 전남대학교 자동차공학부

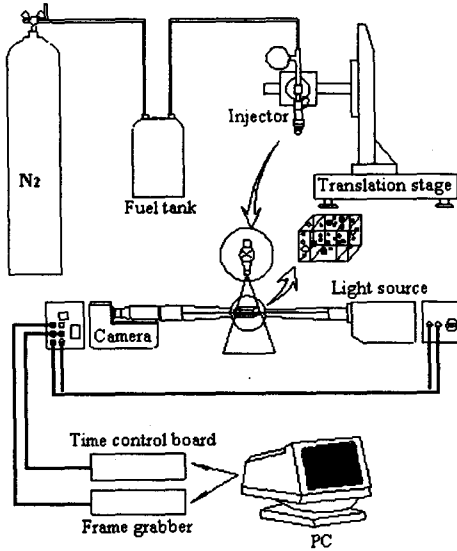


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

였다. 인젝터는 핀틀형이며, 분무각은 대략 30° 이내, 분사압력은 421.4 kPa로 유지하였고, 분사기간은 4 ms로 하였다. 연료는 실제 연료와 물리적 특성이 유사한 이소옥탄(C_8H_{18})을 사용하였다. 연료분무의 분사각은 충돌면과 수직축에서 30° 기울여, 충돌 후 연료 분무를 관찰하였다. 분무가시화시스템은 PMAS(Particle Motion Analysis System, V-tek, MX-11)를 이용하였다. 충돌 후 분무의 거동을 가시화하기 위하여, CCD 카메라에 $f=105$ mm 렌즈를 부착하고, 카메라와 측정 영역 사이에 볼록 렌즈($f=600$ mm, $D=90$ mm)를 사용하여 분무 이미지를 확대시킨 후, 프레임그래버를 거쳐 컴퓨터에 이미지를 저장하였다.

3. 분무충돌과 연료액막형성 모델링

3.1 분무충돌 모델링

본 연구에서는 기관의 초기 시동시, 저부하 운전조건과 고부하 운전조건을 각각 구분하여 모사하기 위해 벽면을 온도조건에 따라 hot wall 과 cold wall 로, 연료액막 형성 여부에 따라 dry wall 과 wetted wall 로 구분하여 모델링하였다. 액적의 충돌에너지가 커질수록 cold wall 일 경우 되튀김(rebound), 퍼짐(spread), 쪼개져서 되튀김(splash)의 거동을 보인다고 하였고 hot wall 일 경우에는 되

튀김, 쪼개져서 되튀김의 거동을 보인다고 구분하여 모델을 수립하였다.

3.1.1 Cold wall 모델

Dry wall

벽면의 온도가 연료 액적의 포화온도보다 낮은 경우 다음에서 설명하는 cold wall 모델이 적용된다. 액적이 부착되어 퍼지는 경우는 모든 연료가 해당하는 셀에 액막으로 형성된다고 가정하였고 되튀기는 경우와 쪼개져서 되튀기는 경우는 입사하는 액적의 일부가 충돌면에 남는다고 모델링하였다. 벽면에 남아있는 연료는 액막으로 형성되고 이를 연료액막유동 모델에서 연속방정식의 생성항으로 고려하였다. 본 연구에서는 We 수와 (1) 식으로 주어지는 파라미터 K 값을 이용하여 액적이 충돌한 후의 거동이 변하는 임계값을 결정하였다.

$$K = \sqrt{We} \cdot \sqrt{Re} = \left(\frac{\rho^3 d^3 u^5}{\sigma^2 \mu} \right)^{0.25} \quad (1)$$

입사하는 액적이 되튀기는 임계 We 수는 Stow⁽¹⁾의 결과를 이용하였고 쪼개져서 되튀기는 임계값은 Mundo⁽²⁾의 실험값 및 이론계산을 통해 결정하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 입사하는 액적이 되튀기는 경우의 수직, 수평 방향의 속도 변화를 모델링하였다⁽³⁾.

충돌 후 되튀기거나 쪼개져서 되튀기는 질량비는 다음과 같이 모델링하였다.

$$\frac{m_s}{m_d} = 0 \quad (\text{spread}) \quad (2)$$

$$\frac{m_s}{m_d} = 0.2 + 0.6\alpha \quad (\text{rebound, splash}) \quad (3)$$

m_s 는 충돌 후 되튀기거나 쪼개져서 되튀기는 액적의 질량이고 m_d 는 입사하는 액적의 질량이다. α 는 0 과 1 사이의 난수로 하였다.

입사하는 액적의 K 값이 57.7 보다 클 경우 원래의 액적은 충돌 후 1에서 식 (2), (3)의 질량비를 뺀 양만큼이 액막으로 형성되며 액적의 나머지 질량은 같은 질량을 갖는 4 개의 작은 액적군으로 나뉘어 되튀긴다고 가정하였다.

쪼개져서 되튀기는 경우 각각의 쪼개진 액적의 지름, d_i ($i=1\sim4$) 는 Mundo⁽²⁾의 거친면에 충돌한 액적의 실험데이터로 구한 확률함수를 이용하

여 결정하였다. 되튀기는 액적의 속도를 각각 u_i ($i=1\sim4$) 라 하면 에너지 보존에 의해 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^4 \frac{1}{8} m_s u_i^2 + \pi \sigma \sum_{i=1}^4 d_i N_i^2 = E_{splash} \quad (4)$$

E_{splash} 는 액적이 쪼개져서 되튀길 때의 에너지로서 액적의 충돌 전 운동에너지와 표면장력에너지를 합에서 쪼개져서 되튀기는 현상이 일어날 때의 임계에너지를 뺀 것으로 표현된다.

되튀기는 액적의 속도비는 Ghadiri⁽⁴⁾의 실험을 이용하여 근사하였다.

$$\left(\frac{u_i}{u_j}\right) \approx \ln\left(\frac{d_i}{d_o}\right) / \ln\left(\frac{d_j}{d_o}\right) \quad (i, j = 1\sim4, i \neq j) \quad (5)$$

충돌된 액적이 쪼개져서 되튀기는 각도 β_i ($i=1\sim4$)는 Mundo⁽²⁾의 거친면에 대한 실험 데이터를 사용하였고 실험 데이터의 편차를 고려한 식을 이용하였다.

되튀기는 액적이 퍼지는 각도, α_i ($i=1\sim4$) 중에서 임의의 방향으로 2개를 가정하고 나머지 두 각도는 다음과 같은 운동량 보존식을 적용하여 결정하였다.

$$\sum_{i=1}^4 \frac{m_s}{4} u_i \cos(\alpha_i) \cos(\beta_i) = c_j m_d u \cos(\theta_i) \quad (6)$$

Wetted wall

δ_{fl}/d_{SMD} 가 0.2 보다 큰 경우 wetted wall로 영역이 옮겨진다고 가정하여 계산을 수행하였으며 다른 거동은 dry wall과 동일하다고 하였으나 쪼개져서 되튀기는 액적의 질량비는 식 (2), (3) 대신 Yarin⁽⁵⁾의 무차원화된 충돌 속도를 이용하여 결정하였다.

3.1.2 Hot wall 모델

벽면의 온도가 연료의 포화온도보다 큰 경우는 벽면에서 액적으로 열전달 계산을 첨가하였다. 충돌 후 액적의 거동은 We 수 80을 경계로 구분하여 모델링하였다⁽⁶⁾. 되튀기는 경우와 쪼개져서 되튀기는 경우 모두 cold wall의 경우와 동일한 식을 적용하였다⁽³⁾.

액적이 벽면에 충돌하는 경우 열전달량은 다음과 같이 구하였다.

$$Q = a_d S_d \tau_d \Delta T \quad (7)$$

S_d 는 액적이 벽면과 접촉하는 면적이며 τ_d 는 액적이 벽면과 접촉하는 시간으로 Senda⁽⁷⁾의 실험 데이터를 이용하였다.

3.2 연료액막형성 모델링

고압의 인젝터에서 분사되어 벽면에 충돌하는 연료는 액막을 형성하여 흐르게 되며 이에 대한 모델을 수립하였다⁽⁸⁾. 연료액막의 유동은 연속방정식, Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식으로부터 구할 수 있는데 연료액막은 매우 얇게 형성된다고 가정하면 액막 형성의 두께 방향 (z 방향)으로의 구배가 훨씬 크다고 할 수 있고 x, y 방향으로의 압력구배항은 무시할 수 있다. 운동량방정식에는 액적의 충돌로 인한 접선방향 운동량, 주변 가스에 의한 운동량, 벽면의 전단 응력 등을 생성항으로 입력하여 계산하였다. 식 (8)~(11)에 이상의 사항을 고려하여 액막의 높이 δ 에 대해 연속방정식, 수정된 Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식을 적분한 식을 나타내었다.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\delta \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\delta \bar{v}) = \text{source} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\delta \bar{u}) + \xi_p \frac{\partial}{\partial x}(\delta \bar{u}^2) + \xi_p \frac{\partial}{\partial y}(\delta \bar{u} \bar{v}) \\ = \frac{1}{\rho}(\tau_\delta(u) - \tau_w(u)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\delta \bar{v}) + \xi_p \frac{\partial}{\partial x}(\delta \bar{u} \bar{v}) + \xi_p \frac{\partial}{\partial x}(\delta \bar{v}^2) \\ = \frac{1}{\rho}(\tau_\delta(v) - \tau_w(v)) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial}{\partial t}(\delta \bar{T}) + \xi_p \frac{\partial}{\partial x}(\delta \bar{u} \bar{T}) + \xi_p \frac{\partial}{\partial y}(\delta \bar{v} \bar{T}) \right) \\ = -\frac{6k}{\delta} \{2(\bar{T} - T_w) - (T_\delta - T_w)\} \\ + m_d \left[\frac{c_p(T_d - \bar{T})}{A \delta dt} \right] (1 - x_r) \end{aligned} \quad (11)$$

\bar{u}, \bar{v} 는 연료액막의 두께방향으로 평균된 x 축, y 축 방향으로의 액막의 속도 성분이며 ξ_p 는 속도형상에 따라 결정되는 상수이다. \bar{T} 와 T_w 은 각각 연료의 두께방향으로 평균된 액막의 온도와 벽면의 온도이며 ξ_t 는 액막의 온도형상에 따라 결정되는 상수이다. 분무충돌계산에서 구한 값을 입력으로 하고 식 (8) ~ 식 (11)을 차분화하여 액막의 두께, 속도 성분과 액막의 평균온도를 계산

하였다. 공간에 대하여 차분화된 방정식들을 계산할 때 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하였다. 또한 위의 방정식들은 엔진 연소실과 같이 임의의 형상을 갖는 영역에서도 계산이 가능하도록 수정하였다.

4 결과 및 검토

4.1 가솔린 분무충돌 실험

PMAS 로 측정된 가솔린 인젝터의 SMD 값과 초기 액적의 속도를 입력으로 하여 계산을 수행하였다. Fig. 2 는 가솔린 분무충돌 실험결과와 계산결과를 비교한 것이다. Table 1 에 계산조건을 나타내었다. 분무의 반지름과 높이, 분사 후 약 5 ms 이후에 분무 선단에서 발생하는 와류를 잘 예측하는 것을 알 수 있다.

4.2 디젤 분무충돌 실험

Fig. 3 은 laser extinction 방법을 이용하여 측정한 디젤분무 실험데이터⁽⁹⁾와 계산결과를 비교한 것이다. 실험결과와 그림은 측정된 결과 이미지를 재구성한 것으로서 액적의 분포와 분무의 외형만을 알 수 있다. Table 1 에 계산조건을 나타내었다. 계산결과는 분무의 반지름과 높이를 맞게 예측함을 알 수 있고 분무 선단에서 발생하는 와류도 예측하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Calculation conditions for gasoline/diesel impinging sprays

| | Gasoline | Diesel |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Wall distance (mm) | 27.2 | 24.0 |
| Injection duration (ms) | 4.0 | 1.2 |
| Injected fuel mass (mg) | 8.02 | 7.98 |
| Injection angle (deg.) | 60 | 90 |
| Injected fuel | C ₈ H ₁₈ | Diesel fuel |
| Gas density (Kg/m ³) | 1.2 air | 18.5 air |

4.3 직접분사식 디젤엔진조건에서의 계산

소형직접분사식 디젤엔진조건에서 연료액막유동 모델을 포함한 분무충돌 모델을 적용하여 계산하였다. Table 2 에 계산에 사용된 엔진의 사양과 계산조건들을 나타내었다. 분사노즐이 5공인 것을 이용하여 1/5 원에 대해서만 11,232 개의 격자를 구성하였고 사이클 경계조건을 사용하였다.

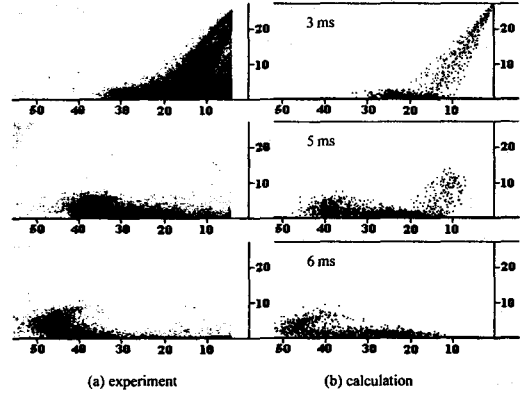


Fig. 2 Gasoline spray development pattern (a) experiment (b) calculation

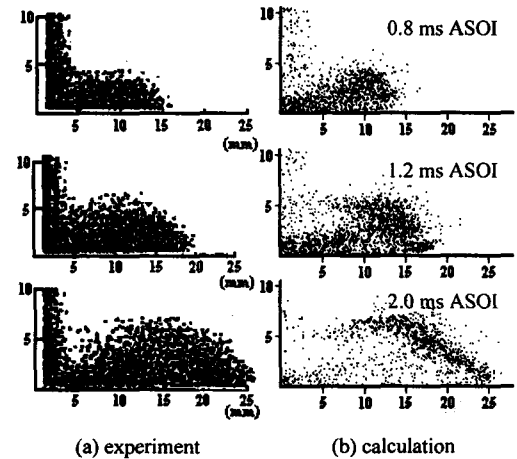


Fig. 3 Comparison of spatial distribution of droplet parcels (a) experiment (b) calculation

계산에 사용된 연료는 dodecane 이며 [BTDC 15° ~ TDC] 구간에서 연료가 분사된다고 하였으며 초기유동조건으로는 압축행정 초기에 Bessel 함수를 사용하여 스웰비를 각각 2.0, 3.0 으로 하여 계산하였다. 압축 초기조건으로는 과급을 고려하여 연소실 내부의 압력과 온도를 각각 0.13 MPa, 320 K 로 하였다. Fig. 4 는 압축행정초기의 스웰비가 2.0, 3.0 일 때의 분무의 발달을 나타낸 것으로서 스웰과 분무충돌에 의해 연소실 내부의 분무의 혼합이 촉진됨을 알 수 있다. 스웰비가 클수록 스웰반대 방향으로의 액적의 분산이 적어짐을 볼 수 있고 스웰비가 작은 경우에 비해 피스톤의 벽면에 분무가 도달하기 이전에 분무가

Table 2 Calculation conditions for HSDI diesel engine

| | |
|-------------------------|----------|
| Engine speed (rpm) | 1500 |
| Bore (mm) | 87.5 |
| Stroke (mm) | 87 |
| Compression ratio | 17.2 |
| Injected fuel mass (mg) | 40 |
| BDC Swirl ratio | 2.0, 3.0 |

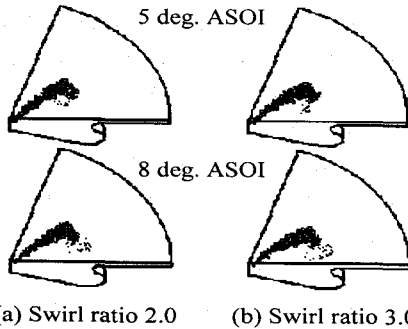


Fig. 4 Spray impingement pattern development for HSDI diesel engine case (a) swirl ratio = 2.0 (b) swirl ratio = 3.0

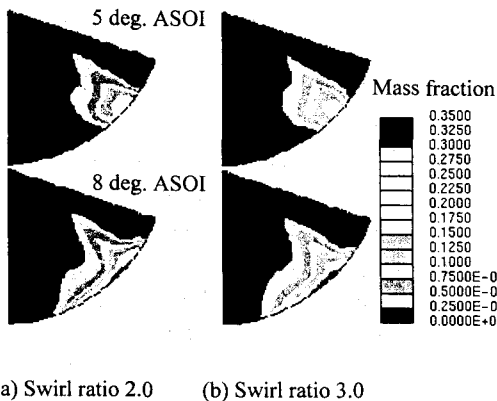


Fig. 5 Fuel vapor distribution for HSDI diesel engine case (a) swirl ratio = 2.0 (b) swirl ratio = 3.0

휘어짐을 볼 수 있으며 이는 액적이 벽면에 충돌되거나 퇴적되는 현상을 줄일 것임을 알 수 있다. Fig. 5는 스월비가 2.0, 3.0일 때 인젝터의 분사방향을 포함하는 평면에서 연료증기의 농도 분포를 나타낸 것으로서 스월비가 클수록 공기와 증기의 혼합이 활발해짐을 알 수 있다. 또한 피스톤 벽면에서 분무충돌로 인해 쪼개진 작은 액

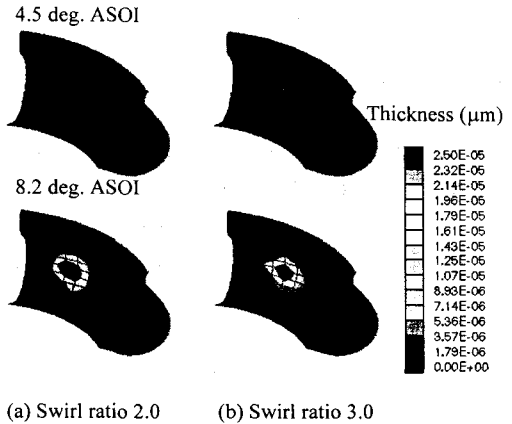


Fig. 6 Fuel film distribution for HSDI diesel engine case (a) swirl ratio = 2.0 (b) swirl ratio = 3.0

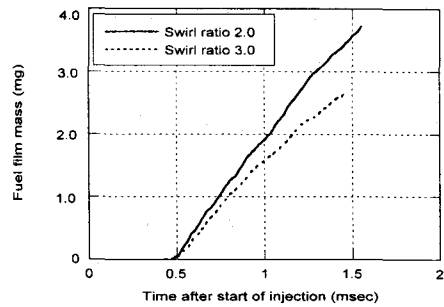


Fig. 7 Comparison of fuel film mass according to BDC swirl ratio

적들과 벽면에서의 증발로 인한 고농도의 연료증기가 생성되는 것을 알 수 있다. 또한 충돌면에 연료액막이 형성되는데 이는 연소시 수트 등의 생성에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 6은 스월비가 2.0, 3.0일 때의 연료액막의 발달을 나타낸 것으로 분사 후 약 4.5° 이후부터 액막이 형성됨을 알 수 있고 스월이 큰 경우 유동에 의해 벽면에 충돌하는 액적의 비율이 줄어들어서 액막이 존재하는 면적이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 7은 시간에 따라 액막으로 남아있는 연료의 양을 정량적으로 나타낸 것이다. 스월비가 큰 경우 분무가 벽면에 도달하기 이전에 유동에 의해서 휘어지며 벽면에 도달하는 액적의 양이 줄어들고 연료액막으로 형성되는 연료의 양을 줄임음을 알 수 있다. 초기 스월비가 2.0일 경우 분사된 양의 약 5%가량이 분사 후 1.0 ms 일 때 연료액막으로 존재하

고 있음을 알 수 있다. 이상에서 알 수 있듯이 흡입유동의 형태와 분무충돌은 연소실 형태와 함께 연료 농도의 분포에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 개발한 모델을 이용하여 실제 엔진조건에서의 계산을 수행할 경우 연료와 공기의 혼합상태를 3차원적으로 파악할 수 있으므로 연료와 공기의 혼합을 촉진시키고 유해 배출물이 저감되는 충돌면의 위치나 거리를 파악할 수 있게 된다.

5. 결론

(1) 소형 고속직분식 디젤기관에서 발생하는 분무충돌을 해석하기 위해 분무충돌에 영향을 미치는 인자들을 파악하여 분무충돌모델과 연료액막 유동 모델을 수립하였고 가솔린 분무실험과 디젤 분무 실험 데이터를 이용하여 모델을 검증하였다.

(2) 개발된 모델을 이용하여 고속직접분사식 디젤엔진조건에서의 계산을 수행하였으며 스웰조건에 따른 액막의 형성여부와 형성되는 시간, 연료 증기와 주위 공기와의 혼합 형태를 예측할 수 있었다.

(3) 본 연구에서 계산한 직분식 디젤엔진조건에서의 분무는 흡입공기의 스웰비가 클수록 스웰의 방향으로 휘어져 피스톤 벽면에 충돌되는 양이 줄어들며 액막으로 형성되는 연료의 양과 액막으로 존재하는 면적이 줄어든다.

(4) 본 연구에서 계산한 직분식 디젤엔진조건에서 압축초기 스웰비가 2.0 일 경우, 분사시작부터 약 4.5° 후에 벽면에서 연료액막이 형성되며 약 10° 후에는 분사된 양의 약 5% 가량이 연료액막으로 존재하였다.

후기

본 연구는 G7 차세대자동차기술개발사업의 지원으로 이루어진 연구로서 이에 관계기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) C. D. Stow and M. G. Hadfield, "An Experimental Investigation of Fluid Flow Resulting from the Impact of a Water Drop with an Unyielding Dry Surface," *Pro. R. Soc. London*, Vol. 373, pp. 419~441, 1981.
- (2) C. Mundo, M. Sommerfeld and C. Tropea, "Droplet-Wall Collisions : Experimental Studies of the Deformation and Breakup Process," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 21, No. 2, pp. 151~173, 1995.
- (3) M. Kim, B. Kang and K. Min, "Simulation of Spray Impingement in a Direct Injection Diesel Engine," *The 15th International Combustion Engine Symposium*, Seoul, pp. 465~470, 1999.
- (4) H. Ghadiri, "Raindrop Impact, Soil Splash and Cratering," Ph. D Thesis, University of Reading, 1978.
- (5) A. L. Yarin and D. A. Weiss, "Impact of Drops on Solid Surfaces : Self-Similar Capillary Waves, and Splashing as a New Type of Kinematic Discontinuity," *J. Fluid Mech.*, Vol. 283, pp. 141~173, 1995.
- (6) A. P. Watkins and K. Park, "Assessment and Application of a New Spray Wall Impaction Model," *IMEchE*, C499/004/96, pp. 1~10, 1996.
- (7) J. Senda *et al.*, "Modeling on Diesel Spray Impinging on Flat Wall," *Int. Symp. COMQDIA 94*, pp. 411~416, 1994.
- (8) 김만식, 조훈, 유상석, 김세준, 민경덕, "분무충돌 기초실험 및 컴퓨터코드 개발," 제7회 차세대자동차기술논문집, pp. 165~170, 1999.
- (9) N. Katsura *et al.*, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall," *SAE Paper*, No. 890264, 1989.