

충돌분무 액막의 열전달 해석모델을 고려한 범용 열/유체 프로그램 NUFLEX의 개발

김현정* · 노경철** · 유홍선† · 허남건***

Development of a general purpose thermo/fluid flow analysis program NUFLEX with heat transfer analysis model of impinging liquid film

Hyun Jeong Kim*, Kyoung Chul Ro**, Hong Sun Ryou† and Nahm Keon Hur***

Keywords : CFD(전산유체역학), Spray(분무유동), Heat transfer(열전달), Wall film(액막), Impingement(충돌분무)

Abstract

NUFLEX is a general purpose thermo/fluid flow analysis program which has various physical models including spray. In NUFLEX, spray models are composed of breakup and collision models of droplet. However, in case of diesel engine, interaction between wall-film and impingement model considering heat transfer is not coded in NUFLEX. In this study, Lee & Ryou impingement & wall-film model considering heat transfer is applied to NUFLEX. For the verification of this NUFLEX program, numerical results are compared with experimental data. Differences of film thickness and radius between numerical results and experimental data are within 10% error range. The results show that NUFLEX can be used for comprehensive analysis of spray phenomena.

1. 서론

국내에서 개발된 범용 열/유체해석 프로그램인 NUFLEX는 일반적인 유동장 해석 문제뿐만 아니라 경계면추적, 캐비테이션, 전자기장, 용해/응고 그리고 분무유동 등을 해석할 수 있는 다양한 물리적 모델들을 가지고 있다. 분무유동을 해석하기 위하여 NUFLEX는 주변기상과의 공기역학적 상호작용에 의한 액적 분열(Breakup)과 분무 형성과정에서 액적간 충돌(Collision)모델들이 적용되어 있다. 특히, 융합모델의 경우 STAR-CD나 FLUENT 등 상용프로그램에서 사용되어온 O'Rourke모델뿐 아니라 O'Rourke모델의 단점인 액적간 충돌시 위성액정을 고려하지 못하는 점을 개선한 Ko와 Ryou[1]의 모델이 포함되어 있다. 유홍선 등[2]은 NUFLEX에 적용된 모델들을 이용하여 문헌 및 상용프로그램과의 실제 해석을 통해 해석 신뢰성 및 신모델의 적용가능성을 나타낸 바 있다. 그러나 현재 디젤분무나 표면처리 등에서 필요한 분무와 벽과의 충돌에 의한 상호작용에 대한 해석은 포함되어 있지 않다.

한편 디젤엔진에서 충돌분무의 거동과 벽면의 액막형성은 혼합기의 형성과 연소 및 배기 특성 등에 직접적인 영향을 미치게 되므로 벽면 충돌후 액적 거동을 보다 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 기존의 벽 충돌해석 모델들은 Wachters와

Westerling[3]의 고온벽면에 관한 실험결과에 의존하여 충돌현상들의 각 영역들을 결정하였기 때문에 높은 충돌에너지에 의한 액적의 스플래시 현상을 근본적으로 모사할 수 없었다. 최근 스플래시 현상을 모사할 수 있는 모델개발에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서는 Lee와 Ryou[4-5]가 최근 개발된 모델들의 성능을 검증하는 연구를 수행하고 액적들의 운동에너지 보존식에 근거하여 보다 이론적으로 충돌현상을 모사할 수 있는 충돌모델을 개발한바 있다.

본 연구에서는 앞선 분무모델들의 타당성을 근간으로 NUFLEX에 Lee와 Ryou[5]의 벽 충돌모델을 도입하여 벽면 액막과 액적의 거동을 확인하고 실험값과 계산된 결과를 상호 비교하고 해석 신뢰성을 검증하고 NUFLEX에서의 종합적인 분무유동 해석가능성을 확인하고자 한다.

2. 분무모델 및 지배방정식

2.1 분무-벽면 충돌모델

Lee&Ryou[5]의 충돌모델은 충돌전후의 에너지보존에 근거하여 액적의 반동(rebounding), 부착(deposition), 스플래시(splash) 현상을 해석한다. 부착영역과 스플래시 사이의 임계기준은 다음과 같다.

$$K = Oh \cdot Re^{1.25} = 57.7 \quad (1)$$

* 중앙대학교 기계공학부 대학원, leme79@gmail.com

** 중앙대학교 기계공학부 대학원, ultra7@wm.cau.ac.kr

*** 서강대학교 기계공학과, nhur@sogang.ac.kr

† 책임저자: 중앙대학교 기계공학부, cfdmec@cau.ac.kr

K는 충돌에 대한 무차원 파라미터이다. 한편 벽면에 형성하는 액막에 기여하는 액적의 영향을 나타내기 위해 충돌 전 액적에 대한 스플래시된 액적의 질량비 r_m 은 다음과 같다.

$$r_m = m_a / m_b = 0.2 + 0.9p \quad (2)$$

p는 0과 1사이의 균일한 무작위수(random number)를 나타내며 하첨자 a와 b는 각각 충돌 후와 충돌 전을 나타낸다. 한편 충돌 후 액적 질량은 질량보존식에 의해 결정되며 충돌 후 스플래시되는 액적들의 속도성분을 결정하기 위해 에너지 보존식을 사용하여 다음과 같은 총괄웨버수에 대한 함수를 얻게 된다.

$$We_a^T = \frac{We_b^T}{r_m N_e^{1/3}} - \left(\frac{4.5 We_{bn} \gamma_{\max}^4}{r_m N_e^{1/3} Re_{bn}} - \frac{12}{r_m N_e^{1/3}} \right) - 12 \quad (3)$$

N_e 는 스플래시된 액적개수를 나타내며 하첨자 n은 수직 방향을 나타낸다. 또한 γ_{\max} 는 충돌 전 액적 질량에 대한 스플래시가 발생할 때 액막디스크의 직경비를 나타내며 2.0을 사용하였다. 한편 접선방향의 액적속도는 실험식으로부터 다음과 같이 유도한다.

$$v_f = 0.452 k_f \cdot Re_{bn}^{1/8} \cdot v_{bn} / \sqrt{\Psi} \quad (4)$$

Ψ 는 액적의 거주기간에 대한 스플래시 발생시간의 비를 나타내며 K_f 는 마찰계수를 나타낸다. 식 (3)과 (4)를 사용하여 충돌액적의 속도성분과 스플래시 각을 결정할 수 있다.

2.2 액막형성모델

Lee 와 Ryou의 액막모델은 앞서 언급된 충돌모델을 바탕으로 개발되었다. 충돌에 의해 벽면에 형성되는 액막의 질량은 다음과 같이 두 가지 요인의 합으로 결정된다.

$$m_{rem} = \sum_i N_i \frac{\rho_{d,i} \pi D_{b,i}^3}{6} + \sum_i N_i (1 - r_m) \frac{\rho_{d,i} \pi D_{b,i}^3}{6} \quad (5)$$

우변의 첫째 항은 충돌모데에서 부착영역 내에 포함되는 액적들의 질량을 나타내며 두번째 항은 스플래시에 의해 액막에 포함되거나 제거되는 액적들의 질량을 나타낸다. 벽면에 형성된 액체 연료의 질량을 기초로 하고 중력과 표면장력과의 상호작용을 고려함으로써 임의의 시간에서 액적 거주시간동안 형성된 액막의 두께와 반경을 다음과 같이 결정한다.

$$\frac{h_f}{2r_f} = 0.0177 E_0^{-0.51} \quad (6)$$

$$r_f = \sin \phi^3 \sqrt{\frac{3 \nabla_f}{\pi (2 - 3 \cos \phi + \cos^3 \phi)}} \quad (7)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{1 - (h_f / r_f)^2}{1 + (h_f / r_f)^2} \right) \quad (8)$$

$$\delta_f = \frac{m_{rem}}{\rho_d \pi r_f^2} \quad (9)$$

h_f 는 Eotvos수를 함수로 하는 렌즈형상의 액막 두께를 나타내며 ϕ 는 기하학적 형상관계식을 나타낸다. 위 관계식들을 이용하여 거주기간 동안의 액막 형상을 결정한다.

2.3 열전달모델

액막의 에너지 보존식은 다음과 같다.

$$m_f c_{p,f} \frac{dT_f}{dt} = A_w Q_L + \rho_f A_w \frac{d\delta_f}{dt} h_{fg} \quad (10)$$

h_{fg} 는 액막의 잠열을 나타내며 대류열전달 및 전도 열전달인 Q_L 에 관한 식은 다음과 같다.

$$Q_L = \frac{k_g (T_{g,\infty} - T_{f,s})}{2r_f} Nu_L + q_{cond}'' A_w \quad (11)$$

k_g 는 가스의 전도율을 의미하며 $T_{g,\infty}$ 는 액막으로부터 멀리 떨어진 지점에서의 기체온도를 나타낸다. $T_{g,\infty}$ 는 액막이 속한 국부 계산셀의 가스온도를 평균하여 결정되며, q_{cond}'' 는 벽면에서 필름으로의 전도열전달에 의한 열유속을 나타낸다. 벽면과 필름과의 경계에서는 다음과 같은 조건을 만족한다.

$$q_{cond}'' = k_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = k_{solid} \frac{\partial T_s}{\partial y} \quad (12)$$

위의 조건을 적용하여, 시간에 따른 벽면온도가 결정되며, 얻어진 벽면온도분포를 통해 벽면에서의 온도구배 및 열유속을 결정할 수 있다. 질량전달에 의한 필름 두께의 평균감소율은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{d\delta_f}{dt} = - \frac{\rho_g D_g}{2\rho_f r_f} B_d Sh_L \quad (13)$$

B_d 는 질량전달수, Sh_L 는 평균 셔우드 수를 나타낸다. (10)~(13)의 방정식을 이용하여 액막의 두께, 질량 및 온도를 구한다.

Table 1. Specifications of test cases

Test Cases	Case 1	Case 2	Case 3
Impingement Distance [mm]	24	25	30
Trap Pressure [Mpa]	1.5	2	0.1
Gas Temperature [K]	293	293	293
Wall Temperature [K]	293	293	423/443/478
Nozzle Diameter [mm]	0.3	0.25	0.22
Injection Pressure [MPa]	14	30	26
Injection Duration time [ms]	1.2	1.0	1.0
Reference	[8]	[9]	[10]

3. 수치해석 방법 및 조건

3.1 수치해석 방법

본 연구의 수치해석은 NUFLEX를 기반으로 분무 액적과 충돌 벽면과의 상호작용 및 열전달 현상의 해석을 위해서 Lee와 Ryou[5]의 모델을 추가하였다. 기상(gas phase)에 대한 계산은 오일러리안(Eulerian) 방식을, 액상(liquid phase)의 경우는 라그랑지안(Lagrangian) 방식을 사용하여 해석하였다. 분무의 미립화와 분열과정에 대해서는 Reitz와 Diwakar[6]의 모델을, 액적간 충돌에 대해서는 O'Rourke[7]의 모델을 사용하였다.

3.2 해석조건

본 연구에서 수행한 수치 해석의 계산 조건을 Table 1.에 나타내었다. Case 1~2에서는 주로 충돌분무의 거시구조에 대해서 해석한다. 즉 충돌후 벽분무의 반경과 높이에 대해 실험값과 상호비교한다. 특히 Case 3의 경우 벽에 형성되는 액막의 두께와 반경에 대해 계산결과와 실험값과 상호 비교된다. 한편 Case 4는 액막의 열전달에 대해 해석하기 위한것이며 열전달 현상이 고려된 액막의 두께와 반경 그리고 온도를 계산 하였다. Fig. 1.에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용된 계산 격자는 X, Y, Z방향으로 50×50×50으로 구성되어 있다. 계산에 사용된 시간단계는 10 μs 이며 총 분사시간에 대해 3000개의 액적군(parcel)들이 분사된다.

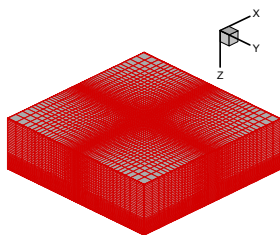


Fig 1. Calculation domain

4. 해석결과 및 고찰

4.1 벽 분무의 거시구조에 대한 해석

앞서 언급한 바와 같이 Case 1는 충돌 후 벽면에 생성되는 벽 분무의 거동을 수치해석 하였다. 기존의 많은 연구를 통하여 벽 분무의 반경과 높이에 대해 사진기법을 사용하여 측정하였으며 이에 대한 물리적 특성을 언급하였다. 여기서 벽 분무의 반경은 충돌지점부터 벽면의 접선방향 혹은 반경방향으로 진행된 거리를 나타내며 높이는 수직방향으로의 진행거리

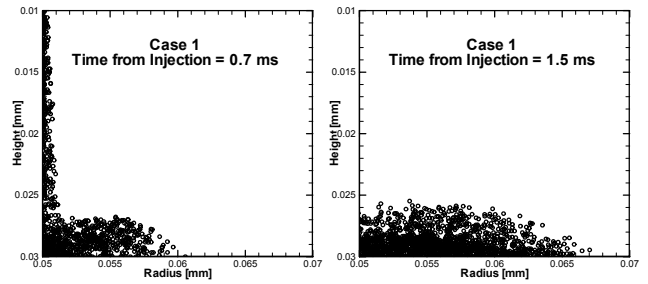


Fig 2. Predicted spray patterns for Case 1

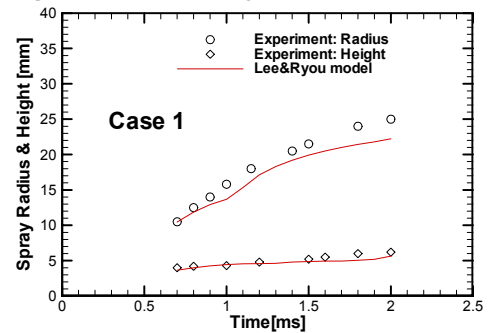


Fig 3. Comparisons of spray radius and height with experimental data for Case 1

를 나타낸다. Fig. 2는 Cases1의 분사 후 0.7ms과 1.5ms에서 충돌분무거동을 나타낸 것이다. Fig. 3는 Case 1 벽 분무 반경과 높이를 각각의 실험값과 비교한 것이다. 전반적으로 본 연구에서 개발된 충돌모델이 실험결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. Case 1의 경우 분무높이는 실험값과 약 1.6%의 오차를 보이고 있다. 벽분무 반경의 경우, 충돌초기에 실험값과 잘 일치하고 있으나 전반적으로 실험값에 비해 다소 작게 예측하고 있다. Case 1의 경우 약 9.1%의 오차를 나타낸다. 이것은 분사말기로 갈수록 점점 증가하고 있는데 충돌 후 쪼개진 액적들의 수 혹은 액적들의 질량예측에 문제점이 있는 것으로 생각된다. 실제로 충돌모델에서 사용하는 실험상관관계식은 제한적인 웨버수에 대한 경우에서 적절하기 때문에 이 식을 사용하는 경우 고압 분사인 경우에서 실제보다 작은 액적들을 생성할 수 있다. 따라서 고압분사, 즉 충돌속도가 큰 경우에 대해 보다 일반적인 실험결과가 요구된다.

4.2 벽 분무의 액막에 대한 해석

Fig. 4는 벽에 형성된 벽면 액막에 대한 두께와 반경방향으로의 퍼짐 거리를 나타낸다. 이것은 액막의 열전달 현상을 해석하기 전 필름거동에 대한 예비적 검증을 확인하기 위함이다. 액막의 두께는 실험에 비해 다소 하향예측하고 있으며 약 8%의 오차를 나타내고 있으며, 반경방향으로의 액막 진행거리 즉 액막 반경은 실험결과와 잘 일치하나 시간이 경과할수록

액막의 반경이 작게 예측되는 것은 연속충돌효과를 고려하지 못하기 때문이다.

4.2 액막의 열전달에 대한 해석

Fig. 5는 벽면의 온도에 따라 변화하는 필름두께를 정성적으로 나타낸 것이다. 필름의 두께는 최대값이 약 85 μm 정도임을 알 수 있으며 이 값과 충돌 직전의 액적직경과는 거의 동일한 오더를 가진다는 것을 알 수 있다. 실험문헌[8~10]에서 지적인 바와 같이 일반적인 디젤엔진에서의 필름 두께는 충돌되는 액적직경과 거의 같은 오더를 가지고 있다. 따라서 해석 결과는 이러한 경향을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

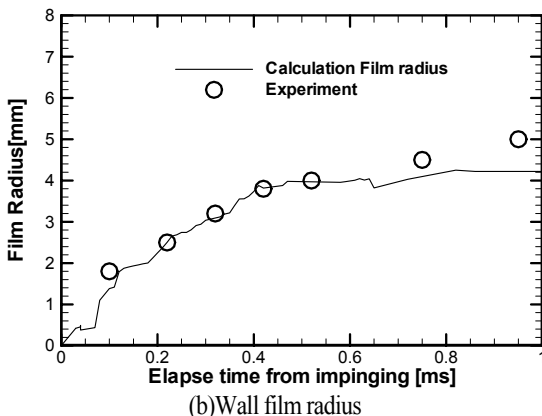
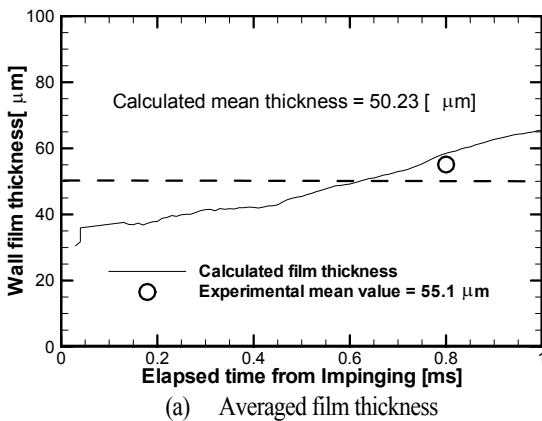


Fig 4. The predicted thickness and radius of wall film

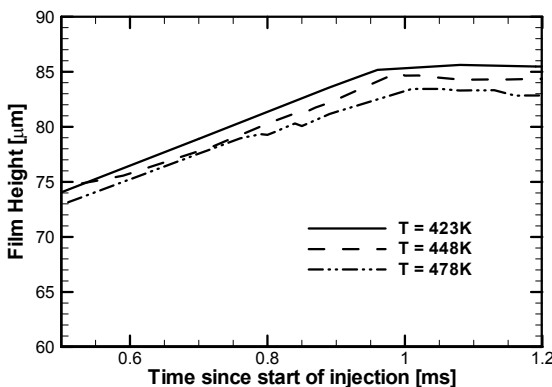


Fig 5. Calculated film height for various wall temperature

5. 결론

본 연구에서 분무충돌 및 액막형성과 열전달에 대한 수치 모델을 NUFLEX에 적용하였으며 타당성 검증을 위하여 다양한 실험값과 상호 비교하였다.

- (1) 충돌분무 거시구조의 경우, 실험값과 비교한 결과 필름두께와 반경을 정성적으로 적절하게 예측하였다. Case 1의 경우 반경방향으로의 벽 분무 거동은 실험값에 비해 다소 작게 예측하였으나 높이의 경우 벽 충돌 후 스플래시 현상을 적절히 모사되어 실험값과 매우 잘 일치하였다.
- (2) Case 2~3에서 액막 두께와 반경거리를 검증된 결과로 수행한 열전달해석에서는 실험결과와 전반적으로 잘 일치하였다. 그러나 더욱 효과적인 예측을 위해서는 본 연구에서 적용된 모델이 보완될 필요가 있다.

범용 열/유체해석 프로그램 NUFLEX에 벽 충돌모델과 필름 모델을 및 열전달모델을 적용하여 해석신뢰성을 확보하였으며, 이를 통하여 NUFLEX는 종합적인 분무해석이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산자부의 범용 열/유체 유동 해석 프로그램 개발 사업의 연구비지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ko, G.H., Lee, S.H., Ryou, H.S. and Choi, Y.K., "Development and Assessment of a Hybrid Droplet Collision Model for Two Impinging Sprays", *Atomization and spray*, Vol.13(2003), pp.251~272
- (2) 유흥선, 노경철, 강관구, 허남건, "NUFLEX의 상변화, 분무 유동 및 MHD 해석", *한국전산유체공학회(2007)*, pp.99~102
- (3) Wachterst, L.H., and Westerling, N.A.J., "The Heat Transfer from a Hot Wall to impinging Water Drops in the Spheroidal State", *Chemical Engineering Sciences*, Vol.21(1966), pp1047~1056
- (4) S.H. Lee and H.S. Ryou, "Comparison of Spray/Wall Interaction Models with Experimental Data", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.14(2000), No.6, pp.939~945
- (5) S.H. Lee and H.S. Ryou, "Development of a New Spray/Wall Interaction Model", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.26(2000), Issue 7, pp.1209~1234
- (6) Reitz, R.D., "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays", *Atomization and Spray Technology*, Vol.3(1987), pp.309-337
- (7) O'Rourke, P.J., "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays", Ph.D. Thesis, Princeton University(1981)
- (8) Katsura, N., Saito, M., Senda, J. and Fujimoto, H., "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Flat Wall", *SAE890264*(1989)
- (9) Saito, A., Kawamura, K., Watanabe, S., Takahashi, T. and Tuzuki, N., "Analysis of Impinging Spray Characteristics under High-Pressure Fuel Injection", *일본기계학회논문집(B편)*(1993), 제 59권, 제566호, pp.356~361
- (10) Arcoumanis, C. and Chang, J-C, "Flow and Heat Transfer Characteristics of Impinging Transient Diesel Sprays", *SAE940678*(1994)