

분무 분열 모델의 평가 및 디젤 엔진 연소 해석에의 적용

박 원 아¹⁾ · 이 효 원²⁾ · 민 경 덕^{*1)}

서울대학교 기계항공공학부¹⁾ · 현대자동차 연구개발본부 상용디젤엔진 시험팀²⁾

Evaluation of Droplet Breakup Models and Application to the Diesel Engine Combustion Analysis

Wonah Park¹⁾ · Hyowon Lee²⁾ · Kyoungdoug Min^{*1)}

¹⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Commercial Diesel Engine Test Team, Research & Development Division, Powertrain R&D Center, Hyundai Motor Group, 772-1 Jangdeok-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 16 February 2012 / Revised 30 April 2012 / Accepted 19 June 2012)

Abstract : It is important to understand the fuel injection characteristics, particularly the atomization, penetration, and breakup, for reducing the emissions in Diesel engines because those characteristics are related to the formation of the emissions. 3-dimensional CFD code can provide a fundamental understanding of those characteristics. In this study, two different breakup models (the Reitz-Diwakar model and the Kelvin-Helmholts Rayleigh Taylor model) were validated with the experimental data in a constant volume vessel. Then, the effect of the breakup model on the characteristics of the engine combustion and emission was studied.

Key words : Breakup model(분열모델), Diesel engine(디젤 엔진), Spray penetration(분무 관통길이), Fuel sprays(연료 분무), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

직분식 디젤엔진은 고효율 및 낮은 이산화탄소 배출 특성으로 인해 각광받고 있으나 점점 강화되고 있는 배출물 규제를 만족시키기 위해서는 질소산화물(NOx) 및 입자상 물질(PM) 배출량을 줄이기 위한 많은 연구가 필요하다. 디젤 엔진은 그 특성상 희박 연소 조건이고 PM이 발생하기 때문에 기존의 가솔린 엔진에서 사용했던 후처리 기술을 그대로 적용할 수 없다.¹⁾ 또한 디젤 자동차는 가솔린 자동차보다 가격이 높기 때문에 자동차 원가를 높일 우려가 있는 후처리 장치의 사용은 부담이 따른다. 따라서 보다 근본적으로 연소실 내에서 발생하는 배출물을 줄이는 연구가 필요하다.

연소실 내에서 배출물을 줄이기 위해서는 디젤엔진 배출물 생성에 주된 영향을 미치는 연료의 분무, 액적의 분열을 거쳐 연소에 이르는 일련의 과정을 이해하는 것이 중요하다. 인젝터를 통해 고속으로 분사된 액체 연료는 작은 액적들로 분열되면서 연소실 내로 침투하게 된다. 이후 액적은 기화하여 고온 고압의 공기와 섞이게 되고 자발화 시점에 도달하면 연소가 시작된다.²⁾ 3차원 전산유체역학(CFD) 코드를 이용하면 엔진 내부의 분무 및 연소 과정에 대한 예측이 가능하며, 보다 정확한 예측을 위해서는 정확한 분무 모델의 확립이 필수적이다. 분무 모델은 연료 분사 모델, 미립화 모델, 액적 분열 모델, 열 및 운동량 전달 모델, 증발 모델 등 여러 세부 모델로 구성되어 있다. 특히 액적의 분열 모델은 분무 관통 길이, 증발, 공기와의 혼합에 영향을 미치는 중

*Corresponding author, E-mail: kadmin@snu.ac.kr

요한 모델이다.

Reitz 등은 공기 역학적인 힘에 의한 액적의 분열을 묘사한 모델을 확립하였으며³⁾, 이후에 Kelvin-Helmholtz (KH), Rayleigh-Taylor (RT) 두 가지 분열 모델을 접목하여 KH-RT 모델을 제안하였다.^{4,5)} Jia 등은 KIVA를 사용하여 3가지 분무 분열 모델 - Taylor Analogy Breakup (TAB)⁶⁾, Cascade Atomization and Drop Breakup (CAB)⁷⁾, KH-RT - 을 검증하고 KH-RT 모델을 HCCI 엔진 연소에 적용한 바 있다.⁸⁾

본 연구에서는 3D CFD 코드인 Star-CD 4.10 버전을 사용하여 두 가지 액적 분열모델(Breakup model)을 비교 및 검증하고, 분열 모델의 차이가 엔진 성능 및 배출물 예측에 어떠한 영향을 미치는지 살펴 보았다.

2. 해석 모델

2.1 분무 모델

공기 등과 같이 연속인 매질 속에 액적 등의 분산된 상의 속도, 위치, 크기와 온도 등을 계산할 경우 Lagrangian 보존 방정식을 풀어 구할 수 있다. 이 방정식들은 1차의 상미분 방정식 형태로 나타나며 실제 분사된 액적들의 특성을 묘사할 수 있는 일정한 수의 계산용 액적들의 궤적을 적분하는 방법을 이용한다.⁹⁾

2.1.1 액적 분열 모델

분무의 특성은 연료의 물성, 연소실 내 기체의 상태, 인젝터 분공 형상 등의 영향을 받는다. 분사된 액체 연료는 노즐 출구를 지나면서 주변 기체와의 공기역학적인 상호작용을 통해 액적들로 분열하게 된다. 액적은 액적과 주변 유동과의 상대속도에 의해 액적 주위에 발생하는 불균일 압력장 속에서 변형되게 된다. 이러한 공기 항력에 의해 액적은 변형 과정을 거쳐 작은 액적들로 분열하게 된다. 액적의 분열 과정은 액적의 운동량, 표면장력, 점성력 등에 의해 결정되며 주위 기체의 물리적 특성의 영향을 받는다.²⁾ Star-CD에서 주로 사용되는 분무 분열 모델로는 Reitz-Diwakar 모델이 있다. KH-RT 모델은 Star-CD 에서 제공되는 모델이 아니므로 서브루틴(Subroutine)을 사용하여 실행되도록 하였다.

1) Reitz-Diwakar 모델³⁾

공기 항력에 의한 액적의 분열을 계산하며 아래와 같은 두 가지 경우에 대해 분열 과정을 계산한다. 분열 후의 액적의 지름은 아래 식과 같이 계산된다.

$$\frac{dD_d}{dt} = -\frac{(D_d - D_{d,stable})}{\tau_b} \quad (1)$$

여기서, D_d 는 초기 액적 지름, $D_{d,stable}$ 는 분열 후 액적 지름, τ_b 는 분열 관련 시간 상수를 의미한다.

① Bag breakup : 액적 주위의 불균일한 압력장에 의해 액적이 팽창되고 표면장력을 극복하면 분열이 발생한다. Bag breakup에 의한 액적의 분열은 아래 식에 의해 계산된다.

$$We \equiv \frac{\rho |\mathbf{u} - \mathbf{u}_d|^2 D_d}{2\sigma_d} \geq C_{b1} \quad (2)$$

$$\tau_b = \frac{C_{b2} \rho_d^{1/2} D_d^{3/2}}{4\sigma_d^{1/2}} \quad (3)$$

여기서 We 는 웨버 수, ρ 는 밀도, σ 는 표면 장력 계수, u 는 속도, Re 는 레이놀즈 수이며, 아래첨자 d 는 액적의 물성치를 의미한다.

② Stripping breakup : 작은 액적이 큰 액적의 표면에서 떨어져 나가는 현상을 묘사한다.

$$\frac{We}{\sqrt{Re_d}} \geq C_{s1} \quad (4)$$

$$\tau_b = \frac{C_{s2}}{2} \left(\frac{\rho_d}{\rho} \right)^{1/2} \frac{D_d}{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_d|} \quad (5)$$

C_{b1} , C_{b2} , C_{s1} , C_{s2} 는 실험적으로 결정되는 상수로 본 연구에 사용된 상수의 값은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 정적 연소기에서 측정된 분무관통길이의와 비교를 통해 상수를 결정하였다.

2) KH-RT 모델^{4,5)}

KH-RT 모델은 Kelvin-Helmholtz 분열 모델과 Rayleigh-Taylor 분열 모델을 함께 사용하여 분무의 분열과정을 묘사한다. 분열길이(Breakup length) 이전에는 KH 불안정성에 의해 액적이 분열되며 분열 길이가 이후에는 KH 및 RT 메커니즘이 함께 적용된다. KH-RT 모델에서도 분열 후 액적의 지름은 식(1)

과 같이 계산된다.

① Breakup length, L_b

$$L_b = \frac{1}{2} B_1 \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho}} D_d \quad (6)$$

② Kelvin-Helmholtz breakup

$$\tau_b = \frac{3.788 B_1 (\frac{1}{2} D_d)}{\Omega_{wave} \Lambda_{wave}} \quad (7)$$

$$D_{d,stable} = 2 B_0 \Lambda_{wave} \quad (8)$$

여기서, Ω 는 최대성장률(Maximum growth rate)이며 Λ 는 최대성장률 Ω 에서의 파장(Wavelength)을 의미한다.

③ Rayleigh-Taylor breakup

$$\tau_b = C_\tau / \Omega_{RT} \quad (9)$$

$$D_{d,stable} = C_{RT} \Lambda_{RT} \quad (10)$$

B_1, B_0, C_{RT}, C_τ 는 실험적으로 결정되는 상수로 본 연구에서 사용된 상수의 값은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 정적 연소기에서 측정된 분무관통길이와의 비교를 통해 상수를 결정하였다.

2.2 연소 모델

연소 모델로는 ECFM-3Z 모델¹⁰⁾ (Extended Coherent Flame Model - 3 Zones)을 사용하였다.

ECFM-3Z 모델은 세 가지 모델 - 자발화(Auto-ignition), 예혼합 화염(Premixed propagating flame) 및 확산화염(Diffusion flame) - 이 결합된 연소 반응 모델이다. 각각의 계산 격자는 순수 연료 영역, 공기

Table 1 Constants for breakup models

Model	Const.	Value
Reitz - Diwakar	C_{b1}	6
	C_{b2}	π
	C_{s1}	0.5
	C_{s2}	20
KH-RT	B_1	18
	B_0	0.61
	C_{RT}	0.05
	C_τ	9

및 잔류 가스 영역, 혼합 영역의 세 개 영역으로 구성된다. 연소 반응은 혼합 영역에서만 발생하며, 자발화, 예혼합화염, 확산화염에 의한 연소 반응을 모두 고려한다.

3. 분열 모델 비교 및 평가

3.1 분무관통길이 검증

3.1.1 실험 장치 및 실험 조건

실험장치는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 광원으로 사용되는 램프와 광원을 전달하는 오목거울, 영상 획득을 위한 카메라를 포함하는 가시화 장치, 분무를 위한 인젝터와 연료 펌프를 포함하는 연료 공급 및 분사장치, 일정한 압력을 유지하기 위한 정적 용기 이렇게 세 부분으로 구성된다.

본 연구에서는 293 K 에서 정적연소기에 10 bar의 질소를 채우고 연료를 분사하였다. 분공의 지름이 0.152 mm인 단공 인젝터를 사용하여 인젝터의 분사압- 분사시간이 600 bar - 500 usec, 1000 bar - 500 usec 인 두 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다.

분무관통길이(Spray tip penetration)를 측정하기 위해 섀도우그래프법(Shadowgraph method)을 이용하였다. 각 조건에 대하여 분무 형상 이미지 데이터를 획득하였으며, Matlab 프로그램을 이용하여 다음 과정; 실험을 통해 얻은 RGB이미지 Grayscale로 변환 → Histogram stretching과 Histogram adjustment를 통한 명암 재분배로 Contrast 향상 → Binary이미지로 변환 → 노이즈 제거 → 분무 경계값 추적 → 분무 관통길이 획득, 을 통하여 분무관통길이를 측정하

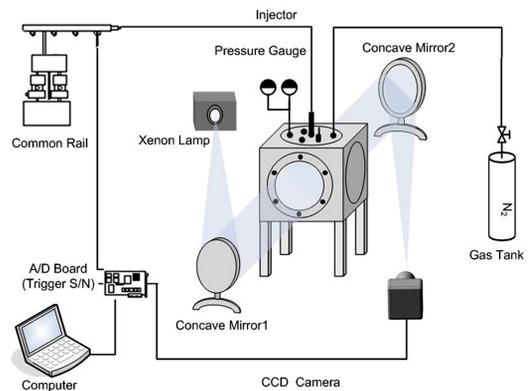


Fig. 1 Experimental setup

었다. 각 조건에 대해 3회의 반복 실험을 통하여 얻어진 평균값을 최종적으로 사용하였다.

3.1.2 계산용 격자

분무 모델 검증을 위해 Fig. 2와 같은 직육면체형상의 격자를 구성하였다. 전체 격자의 크기는 20×20×100 mm, 각 격자의 크기는 1×1×1 mm 이며 총 계산 격자는 40,000개이다.

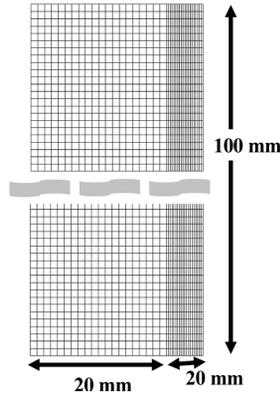


Fig. 2 Computational meshes

3.1.3 결과 및 분석

두 가지 분무 분열 모델(Reitz-Diwakar 및 KH-RT 모델)의 검증을 위해 두 가지 인젝터 분사압 조건에 대해 분무관통길이를 실험값과 비교하였다.

Fig. 3은 인젝터의 분사압 - 분사시간이 600 bar - 500 usec, 1000 bar - 500 usec인 경우에 대해 분무관통길이를 비교한 것이다. 초기에는 두 모델의 분무관통길이가 유사하게 나타나다가 점점 그 격차가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 600 bar - 500 usec, 1000 bar - 500 usec 분사 조건에서 동일하게 나타난다. 연료 분사 초기에는 분열모델 보다는 미립화 (Atomization) 모델의 영향이 더 크고, 분사 이후 시간이 지남에 따라 분열모델의 영향이 커지게 되는데, 두 경우에 미립화 모델이 동일하기 때문에 이런 결과가 나타난다.

600 bar - 500 usec의 경우에는 분사 초기에는 두 모델 모두 실험보다 분무관통길이를 길게 예측하였다. 시간이 지남에 따라 KH-RT 모델이 분무관통길이를 실험과 유사하게 예측하는 반면 Reitz-Diwakar 모델은 실험보다 최대 20 % 정도 길게 예측하였다.

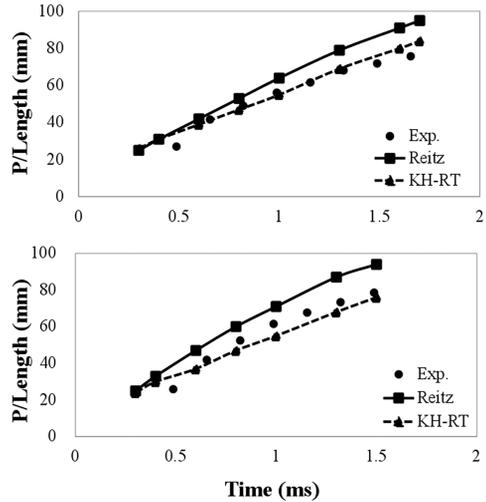


Fig. 3 Comparisons of predicted and measured spray penetration (a)600 bar - 500 usec condition (b)1000 bar - 500 usec condition

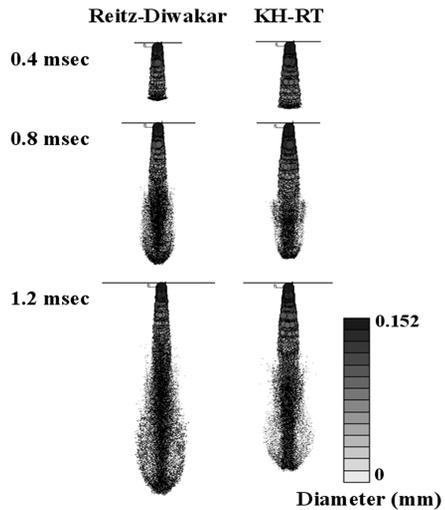


Fig. 4 Comparisons of predicted droplet distribution for 600 bar - 500 usec condition

1000 bar - 500 usec의 경우에도 역시 분사 초기에는 두 모델이 실험보다 더 길게 분무관통길이를 예측하였으며, 시간이 지남에 따라 KH-RT 모델은 최대 10 % 정도 짧게 Reitz-Diwakar 모델은 최대 20 % 정도 길게 예측하였다.

Fig. 4는 분사 이후 0.4, 0.8, 1.2 msec 시점에서 KH-RT 모델과 Reitz-Diwakar 모델의 액적 크기 및 분포를 비교한 그림이다. 앞서 살펴본 바와 같이 분

무 관통길이는 Reitz-Diwakar 모델이 더 길게 나타난다. 액적의 크기는 분무의 중심부에서는 Reitz-Diwakar 모델이, 주변부에는 KH-RT 모델이 더 작은 크기로 예측된다.

2.2.1절에서 설명한 실험적 상수들에 의해 분열된 액적의 크기 및 분무 관통길이 조절이 가능한데, Reitz-Diwakar 모델 보다는 KH-RT 모델이 상수 조절에 의해 변화시킬 수 있는 폭이 더 크다.

3.2 분열 모델의 엔진 연소에의 적용

분무 분열 모델의 차이가 엔진 연소 및 배출물 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 엔진 연소 해석을 수행하였다.

3.2.1 실험 장치 및 실험 조건

실험에 사용된 엔진은 단기통 디젤엔진으로 엔진 및 인젝터 관련 제원 및 운전 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Specifications and operating conditions

Displacement (cc)	497
Bore × Stroke (mm)	83 x 92
Compression ratio	15.5
Con. rod length (mm)	145.8
Speed (rpm)	1500
EGR (%)	30
Inj. diameter(mm)	0.13
Inj. angle (°)	153
No. of hole	7 holes
Inj. pressure (bar)	750
Inj. mass (mg)	14.4
Inj. timing (BTDC °CA)	5

3.2.2 계산용 격자

엔진 연소 해석을 위한 격자는 Fig. 5와 같다. 계산의 효율성을 위하여 전체 연소실 크기를 인젝터의 분공 개수로 분할한 계산 격자를 사용하고, 대칭 경계 조건을 적용하였다.

분할된 계산 격자의 중심각은 약 51.4°이며, 계산 격자의 크기는 약 1 mm 내외로 구성하였다. BDC에서의 계산 격자의 수는 52,000 여 개, TDC에서 계산 격자의 수는 16,400 여 개이다.

3.2.3 결과 및 분석

Fig. 6은 연소 기간 동안 실린더 내부의 열발생률

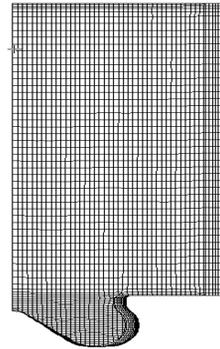


Fig. 5 Computational meshes

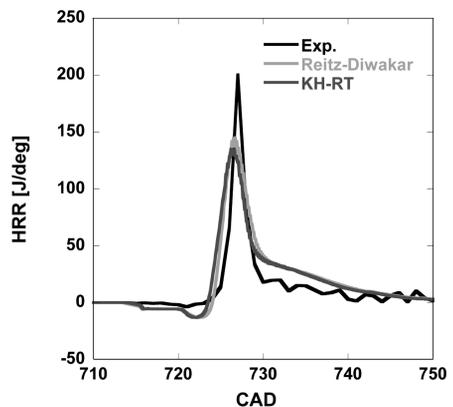


Fig. 6 Measured and predicted heat release rate (HRR)

을 보여주는 그래프이다. 열발생률의 경우, 두 분열 모델이 유사하게 예측하였고, 실험값보다 최대 열발생률을 낮게 예측하였다. 연소 시작 시점의 경우, KH-RT 모델, Reitz-Diwakar 모델, 실험 순으로 나타났다. Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 KH-RT 모델이 Reitz-Diwakar 모델 보다 분무 가장자리에서의 액적을 더 작게 예측하여 증발 및 연소가 빨리 시작되었기 때문으로 생각된다.

엔진 연소 결과 배출되는 NO_x 및 Soot 의 양은 Table 3에 나타내었다. NO_x의 경우, 두 분열모델의 차이가 2% 정도로 동등한 수준을 나타내었고 실험 대비 1.5배 정도로 많게 예측하였다. Soot의 경우 두 모델의 차이가 크게 나타났으며 실험값보다는 작게 예측하는 경향을 보였다. 이는 Reitz-Diwakar 모델이 KH-RT 모델에 비해 전체적인 액적의 크기를 작게 예측함하고 분무관통길이는 길게 예측함으로써, 공기와 연료의 혼합을 촉진시켜 나타난 결과이다.

Table 3 Comparison of measured and predicted NOx and soot emissions

Emission \ Case	Experiment	Reitz-diwakar	KH-RT
NOx (ppm)	240	357	348
Soot (g)	4.20E-06	1.13.E-06	1.92.E-06

4. 결론

본 연구에서는 두 가지 액적 분열 모델을 비교 및 검증하고 액적 분열 모델이 엔진 연소 및 배출물 특성에는 어떤 영향을 미치는 지에 대해 살펴보았다.

- 1) Reitz-Diwakar 모델은 KH-RT 모델보다 분무 관통길이를 더 길게 예측하였다. KH-RT 모델이 실험에서 측정된 분무관통길이와 더 근접한 결과를 보였다.
- 2) 두 가지 분무분열모델을 엔진 연소해석에 적용한 결과, 액적분열모델의 차이가 실린더 내부 열발생률에는 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.
- 3) NOx의 경우 두 액적분열모델 모두 실험값보다 크게 예측하는 경향을 가졌으나, 모델차이에 의한 NOx 배출량은 동등 수준이었다. Soot의 경우 두 모델 모두 실험보다는 작게 예측하는 경향을 보였으며, 액적의 크기를 작게 예측하는 Reitz-Diwakar 모델이 KH-RT 모델에 비해 Soot 양을 더 작게 예측함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 현대자동차그룹, 2단계 두뇌한국21사업 서울대학교 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력사업단 및 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원을 받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

References

- 1) Y. Han, W. Park and K. Min, "Soot and Temperature Distribution in a Diesel Diffusion Flame: 3-D CFD Simulation and Measurement with Laser Diagnostics," Int. J. Automotive Technology, Vol.12, No.1, pp.21-28, 2011.
- 2) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGRAW-HILL, New York, pp.522-531, 1988.
- 3) R. D. Reitz and R. Diwakar, "Effect of Drop Breakup on Fuel Sprays," SAE 860469, 1986.
- 4) J. C. Beale and R. D. Reitz, "Modeling Spray Atomization with the Kelvin-Helmholtz / Rayleigh-Taylor Hybrid Model," Atomization and Sprays, Vol.9, pp.623-650, 1999.
- 5) L. M. Ricart, R. D. Reitz and J. E. Dec, "Comparisons of Diesel Spray Liquid Penetration and Vapor Fuel Distributions with In-cylinder Optical Measurements," Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.122, 4, pp.588-595, 2000.
- 6) P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup," SAE 872086, 1987.
- 7) F. X. Tanner, "A Cascade Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-evaporating Diesel Fuel Sprays," SAE 970050, 1997.
- 8) M. Jia, Z. Peng and M. Xie, "Evaluation of Breakup Models and Application to Mixture Preparation Process for Diesel HCCI Engines," SAE 2008-01-0023, 2008.
- 9) STAR-CD v4.10 Methodology, CD-adapco, 2009.
- 10) O. Colin and A. Benkenida, "The 3-Zone Extended Coherent Flame Model (ECFM3Z) for Computing Premixed/Diffusion Combustion," Oil & Gas Science and Technology, Vol.59, No.6, pp.593-609, 2004.