

혼합모델에 의한 GDI 분무예측의 비교

강동완* · 황순철* · 김덕줄†

(2003년 7월 7일 접수, 2003년 10월 29일 심사완료)

Comparison of GDI Spray Prediction by Hybrid Models

Dong-Wan Kang, Soon-Chul Hwang and Duck-Jool Kim

Key Words : GDI(가솔린 직접분사), Spray(분무), Breakup(분열), Hybrid Model(혼합모델), Spray Tip Penetration(분무관통길이), SMD(자우터 평균 입경)

Abstract

The purpose of this study is to obtain the information about the development process of GDI spray. To acquire the characteristics of GDI spray, the computational study of hollow cone spray for high-pressure swirl injectors was performed. Several hybrid models using the modified KIVA code have been introduced and compared. WB model and LISA model were used for the primary breakup, and DDB and APTAB models were used for secondary breakup. To compare with the calculated results, the experimental results such as cross-sectional images and SMD distribution were acquired by laser Mie scattering technique and Phase Doppler Analyzer respectively. The results show that LISA+APTAB hybrid model has the best prediction for spray formation process.

기호설명

a : 모액적의 반경
 r : 생성액적의 반경
 Λ : 최대 성장률 파동의 파장
 Ω : 최대 파동 성장률
 η : 반경방향의 표면 변위
 B_0 : 액적크기상수
 B_1 : 분열시간상수
 k_v : 속도비례상수
 w : 액체와 주위 공기의 상대속도
 U : 액적의 전체속도
 y : 액적의 무차원 변위
 ρ : 밀도
 μ : 점성계수

K : 기체와 액체의 밀도비
 N : 기체와 액체의 점성계수비
 Re : 레이놀즈수
 We : 웨버수

첨자설명

D : 액적
 L : 액사
 l : 액체
 g : 기체
 b : 분열시점
 0 : 초기

1. 서론

실린더 내에 직접 분사를 시키는 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진의 경우, 관심이 되고 있는 유해배출물질 생성의 제어를 위해서는 분사시의 양호한 혼합기 형성을 위한 미립화 특성에 대한 연

* 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : djkim@pusan.ac.kr

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

구가 이루어져야만 한다. 따라서 GDI 엔진에서 사용되는 와류형 고압 인젝터의 증공원추형 분무에 대한 실험적, 해석적 연구가 요구된다. Zhao 등⁽¹⁾은 GDI 엔진용 인젝터의 전체적인 분무 발달과정을 2차원 Mie 산란 기법을 이용하여 가시화하였고, 분무의 미립화 과정을 연구하기 위해서 PDA 장치를 사용하여 연료 액적의 SMD를 측정하였다.

수치기법 및 컴퓨터 계산능력의 향상으로 분무 미립화 과정의 복잡한 현상을 파악하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 액체연료 분무 과정들이 매우 복잡하여 수치해석에 의한 분무 해석은 쉽지 않은 상황이다. 현재까지 진행된 대부분의 연구에서 액적 분열모델은 1차 분열과 2차 분열 중 하나의 현상만을 고려했기 때문에 실제의 분무현상을 정확하게 예측하지 못했다. 따라서 1차 분열과 2차 분열을 적절히 조합한 혼합분열 모델의 개발이 요구되고 있다. Beatrice 등⁽²⁾은 WB(Wave Breakup) 모델과 TAB(Taylor Analogy Breakup) 모델을 조합한 혼합분열모델을 제안하였다. 이 모델은 액적의 직경이 큰 노즐 근처에서 WB 모델을 사용하고, 분사된 액적의 최대 직경이 95% 이하가 되는 액적에 대해서는 TAB 모델을 사용하였다.

Kim 등⁽³⁾은 WB 모델과 액적의 비선형 효과를 고려한 DDB(Droplet Deformation and Breakup) 모델을 조합한 혼합분열모델을 제안하였다. DDB 모델은 순수 인장성 유동이라는 가정 때문에 Weber 수가 20보다 작은 주머니형(Bag-type) 분열영역에서 복원력이 존재하는 액적에 대해서는 적용하기 힘든 단점이 있다.

본 연구에서는 전단형(Shear-type)이나 주머니형의 분열 현상에 대해서도 기존의 모델보다 더 정확한 예측을 수행할 것으로 예상되는 공기역학적으로 진보된 APTAB(Aerodynamically Progressed TAB) 모델을 이용한 혼합모델을 적용하였다. 1차 분열로 WB 모델과 LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 모델을 사용하고 2차 분열로는 DDB 모델과 APTAB 모델을 사용한 혼합모델을 개발하였으며, 수정된 KIVA-II 코드⁽⁴⁾를 이용하여 분무 발달과정, 분무관통길이, SMD 분포에 대한 해석을 수행하였다. Nd:YAG 레이저와 CCD카메라를 이용한 Mie 산란기법으로 분무외형과 분무관통길이를 구하였으며, PDA 시스템을 이용하여 SMD 분포를 구하였다.⁽⁵⁾ 그리고 각 모델이 가지는 예측 정확성을 이 실험결과와 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 가시화 장치 및 PDA 시스템으로 구성된다.

가시화 장치는 크게 네 부분으로 나눌 수 있다. GDI용 와류형 고압 인젝터, 질소 탱크 및 블레더형 연료탱크로 구성된 분사시스템, Nd:YAG 레이저, 다수 렌즈 및 프리즘으로 구성되어 레이저 평면광을 만들어주는 광학시스템, 각종 필터, 이중 프리즘 및 ICCD 카메라로 구성된 화상취득시스템, 정확한 신호의 동기를 위한 동기 신호 처리시스템으로 구성되어 있다. Nd:YAG 레이저를 평면광으로 조사하여 순간적인 유동장에서의 분무단면 영상을 획득하였다.

분무 입자의 크기를 취득하기 위한 PDA 실험장치의 구성은 크게 분사시스템, PDA 시스템의 두 부분으로 나눌 수 있으며, 분사시스템은 가시화 장치의 구성과 동일하다. PDA 시스템은 레이저를 포함한 송광부, 수광부, 신호처리, 3차원 이송장치, 이송장치 제어기 등으로 이루어져 있다. 측정 위치는 분무 축방향으로 노즐팁으로부터 30 mm의 거리에서 측정하였으며 반경방향으로 분무 중심축으로부터 2 mm 간격으로 측정하였다.

분위기 온도는 상온으로 하였으며, 실험을 위한 분사량은 실제 GDI 엔진의 희박연소모드와 유사한 15 mg으로 정하였다. 분사시간은 2 ms로 고정하고 측정 시간은 분사 시작 후 0.5 ms 간격으로 4 ms까지 하였다. 실험조건은 Table 1과 같으며, 연료의 물성치는 Table 2와 같다.

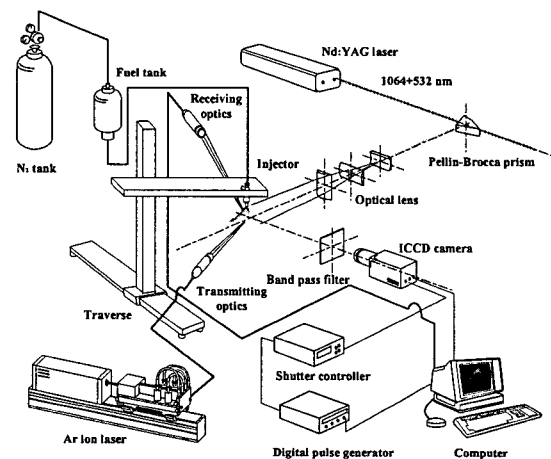


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Fuel	Hexane (C ₆ H ₁₄)
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection duration (ms)	2
Injection quantity (mg)	15
Ambient gas	Air
Ambient temperature	Room temp.
Ambient pressure (MPa)	0.1

Table 2 Fuel properties

	Hexane (C ₆ H ₁₄)
Density (kg/m ³)	663
Viscosity (10 ⁻⁴ kg/m·s)	3.07
Surface tension (10 ⁻² kg/s ²)	1.846

3. 분열모델

3.1 1차 분열모델

WB 모델을 1차 분열로 사용한 경우는 Beatrice 등⁽⁷⁾이 제안한 조건을 사용하여 혼합하였다. 즉 노즐 근처에서는 WB 모델을 이용하여 해석하며, 분사된 액적의 최대 직경의 95% 이하가 되면 DDB 모델과 APTAB 모델로 해석하였다. LISA 모델을 1차 분열로 사용한 경우는 분열길이 이후에 DDB 모델과 APTAB 모델을 사용하여 해석하였다.

3.1.1 WB 모델

WB 모델은 Reitz⁽⁶⁾가 제안한 모델로 원통형 축대칭 액체류의 표면에 형성되는 Kelvin-Helmholtz 형 파동을 기초로 하며, 전단 유동에 의한 분열을 예측할 수 있다. 액적 분열은 반경 r 을 갖는 새로운 액적이 특성 반경 a 를 갖는 원래 액적으로부터 다음과 같이 형성된다고 가정하여 모델화한다.

$$r = B_0 \Lambda \quad \text{for } B_0 \Lambda \leq a$$

$$r = \min \left[\left(\frac{3\pi a^2 W}{2\Omega} \right)^{0.33}, \left(\frac{3a^2 \Lambda}{4} \right)^{0.33} \right] \quad \text{for } B_0 \Lambda > a \quad (1)$$

그리고 액적 반지름의 변화율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a-r)}{\tau} \quad \text{for } r \leq a \quad (2)$$

여기서, τ 는 액적의 분열 시간으로 다음과 같다.

$$\tau = \frac{3.726 B_1 a}{\Omega \Lambda} \quad (3)$$

이 모델에서 사용한 모델 상수는 $B_0=0.61$, $B_1=10$ 을 사용하였다.

3.1.2 LISA 모델

LISA 모델은 Schmidt 등⁽⁷⁾이 제안한 모델로 인젝터 내부의 유동에서 완전 발달 분무로의 변이과정을 필름 형성(film formation), 액막 분열(sheet breakup) 그리고 미립화(atomization)의 세 단계로 나누어 모델링하였다. 본 연구에서는 2차 분열 단계인 마지막 미립화 단계를 제외한 1차 분열만을 고려했다.

분열길이 이전의 액적은 분열, 충돌, 항력 등의 영향을 받지 않는다고 가정한다. 분열길이 L 은 다음과 같이 표현된다.

$$L = U \tau = \frac{U}{\Omega} \ln \left(\frac{\eta_b}{\eta_0} \right) \quad (4)$$

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

$$d_D = \frac{3\pi d_L^2}{K_L} \quad (5)$$

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

3.2 2차 분열 모델

3.2.1 DDB 모델

Ibrahim 등⁽⁸⁾은 액적의 변형을 에너지 보존법칙을 이용하여 반액적(half droplet)의 무게 중심 좌표값으로 표현한 액적 변형 및 분열 모델을 제안하였다. DDB 모델은 TAB, ETAB에서 고려하지 않은 큰 변형에서의 비선형 효과를 고려하였다.

모델 방정식은 다음과 같다.

$$K \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{4N}{Re} \frac{1}{y^2} \frac{dy}{dt} + \frac{27\pi^2}{16We} y \left[-2(cy)^{-6} \right] = \frac{3}{8} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } K = \frac{\rho_l}{\rho_g}, \quad N = \frac{\mu_l}{\mu_g}, \quad We = \frac{\rho_g W^2 r}{\sigma}, \quad Re = \frac{\rho_g W r}{\mu_g}$$

이다.

액적의 분열이 일어나는 조건은 다음과 같다.

$$\frac{a}{r} = \frac{3\pi}{4} y = \frac{We}{6\pi} \quad (7)$$

3.2.2 APTAB 모델

공기역학적으로 진보된 TAB 모델은 Park 등⁽⁹⁾

에 의해 제안되었다. 모델 방정식은 다음과 같다.

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

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

액적의 분열 기준은 다음과 같다.

$$2(1+0.5y)^5 + (1-0.5y)^{-1} - 4(1+0.5y)^{-4} > C_b We \quad (9)$$

4. 계산격자 및 계산조건

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 형태로써 계산시간과 정확도를 고려하여 예측능력이 가장 뛰어난 비정렬 격자에서 수정된 KIVA-II 코드를 사용하여 GDI 분무의 거동을 해석하였다. 노즐로부터 축방향 40 mm까지는 분무형상을 고려한 비균일 격자이며, 40 mm 이후부터는 셀의 크기가 1 mm × 1 mm인 균일 격자이다. 초기 parcel 수는 선행연구를 통해 최적조건으로 구한 2000으로 선정하였다. 본 연구의 계산 조건으로는 Table 1의 실험 조건과 Table 2의 연료의 물성치를 사용하여 계산하였다.

5. 계산결과 및 고찰

WB 모델의 분열시간상수 B_1 과 LISA 모델의 속도비례상수 k_v 는 인젝터의 특성에 의존하기 때문에 정확한 계산결과를 예측하기 위해서는 각각의 상수에 대한 고려가 선행되어야 한다.⁽¹⁰⁾

Fig. 3은 분무관통길이에 대한 WB 모델의 분열시간상수 B_1 의 영향을 나타낸 그림이다. B_1 이 60일

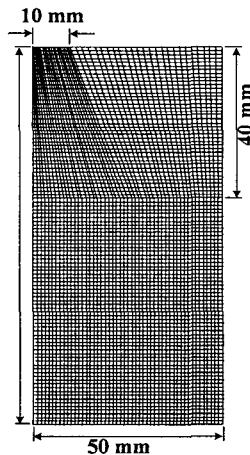


Fig. 2 Computational grid system

때 분사 후 0.75 ms까지 실험값과 일치하며, 가장 좋은 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4는 LISA 모델의 속도비례상수 k_v 의 변화에 따른 분무관통길이의 예측결과를 나타낸 그림이다. Schmidt 등⁽⁷⁾이 보고한 것처럼 k_v 의 값이 0.7정도 일 때 가장 양호한 결과를 보이고 있다. 따라서 WB 모델은 B_1 을 60으로 정하고, LISA 모델은 k_v 를 0.7로 정하여 혼합모델에 적용하였다.

Fig. 5는 각각의 혼합모델을 사용하여 분무관통길이의 계산결과를 비교한 그림이다. 분사 후 0.75 ms까지는 모든 모델들의 예측값이 실험값과 유사하지만, 0.75 ms 이후부터는 1차 분열모델로서 WB 모델을 사용했을 때 보다 LISA 모델을 사용하였을 때 실험값에 더 일치하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. WB 모델의 경우 디젤 분무의 분열을 모델링하기 위해서 제안되었던 반면, LISA 모델은 중공원추형 분무의 분열을 모델링하기 위해서 제

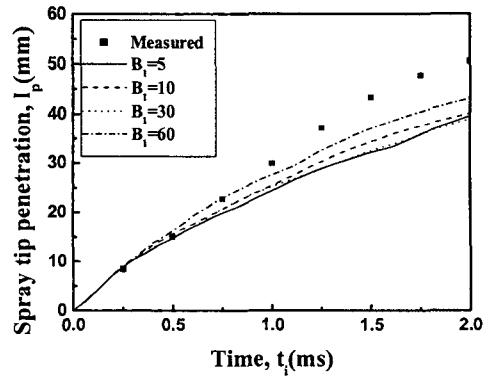


Fig. 3 Effect of B_1 on spray tip penetration

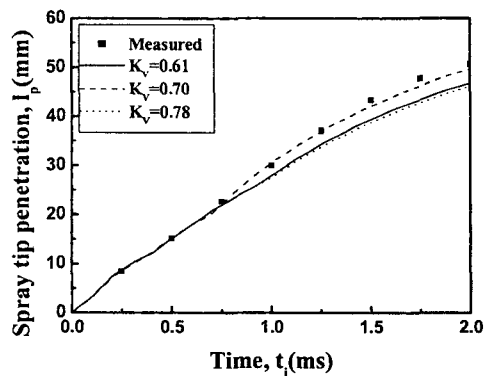


Fig. 4 Effect of k_v on spray tip penetration

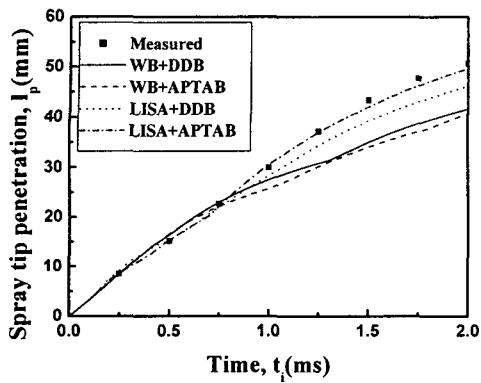


Fig. 5 Comparison of spray tip penetration for various hybrid models

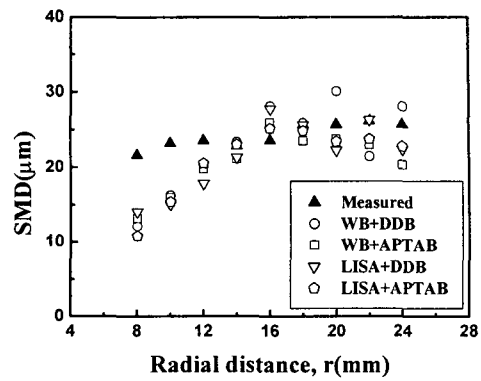


Fig. 6 Comparison of SMD distribution for various hybrid models

안되었다. 따라서 분열현상을 더 잘 표현하기 위해 액막의 분열길이 개념을 도입한 LISA 모델이 GDI분무의 거동을 해석하는데 더 적절하다고 사료된다.

We수가 큰 전단형태의 액적분열 현상이나 We수가 작은 주머니형태의 액적분열 현상에 대해서도 기존의 TAB 모델이나 DDB 모델에 비하여 더 정확한 예측을 할 수 있다고 알려진 공기역학적으로 진보된 APTAB 모델을 2차분열모델로 사용한 LISA+APTAB 혼합모델이 다른 혼합모델에 비하여 분무관통길이 계산 결과가 실험값과 가장 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 각 혼합모델을 사용하여 분무반경방향에 따라 SMD 분포를 비교한 그림이다. 전체적으로 분무반경 12 mm 이후부터 실험값과 비슷함을 보이며, 분무반경 12 mm 이내에서는 잘 맞지 않는 것을 볼 수 있다. 이것은 본 실험에 사용한 인젝터의 내부유동의 변화까지는 고려할 수 없기 때문에 발생하는 차이로 사료되며, 양질의 결과를 얻기 위해서는 인젝터의 내부유동에 대한 추가적인 고려뿐만 아니라, 액적의 크기 분포함수에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다. 분무반경 12 mm 이후에서는 LISA+APTAB 모델의 SMD 분포가 가장 양호한 결과를 보였다.

Fig. 7은 이상의 혼합모델 중에서 본 실험에서 가장 예측능력이 우수하다고 판단되는 LISA+APTAB 모델과 Mie 산란기법을 통해 취득한 분무의 수직 단면 화상을 0.5 ms 간격으로 비교한 그림이다. 분사초기 1.5 ms까지의 화상에서는 인젝터의 특성상 분무내부에 실제로 액적들이 농후하게 존재함으로써, Fig. 6에서와 같이 계산결

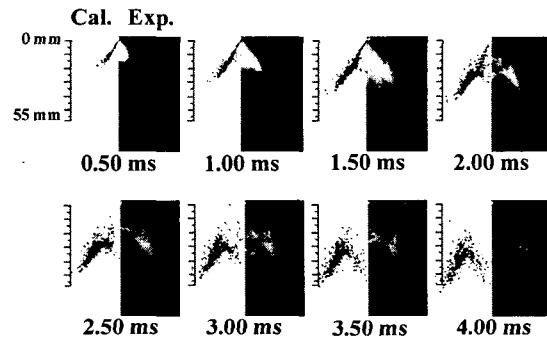


Fig. 7 Comparison of calculated and experimented spray formation for LISA+APTAB model

과와 차이가 조금 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 그 이후에서는 대체로 계산과 실험이 유사한 결과를 보이고 있으며, 분사 후 1.5 ms부터 와류(vortex)가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 와류의 발생은 분무가 발달함에 따라 하류에서 액적들이 운동량을 잃고 유입되는 주위 기체의 유동을 따라 이동함으로써 분무외곽에서 와류가 형성되는 것으로 사료된다.

6. 결론

실험과 같은 조건하에서 GDI 분무의 분열을 모델링하기 위하여 1차 분열은 WB, LISA 모델을 2차 분열은 DDB, APTAB 모델을 사용하여 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) WB 모델의 분열시간 상수 B_1 은 60을 사용했을 때 가장 양호한 결과를 보였으며, LISA 모델의 속도 상수 k_v 는 0.7을 사용했을 때 가장 양호

한 결과를 보였다.

(2) 액막의 분열길이 개념을 도입한 LISA 모델을 사용한 경우 WB 모델보다 양호한 결과를 보였다.

(3) 분사 후 운동량을 잃은 작은 액적들이 주위 공기 유입의 영향으로 분무외각에서 와류를 형성하였다.

(4) LISA+APTAB 모델의 분무관통길이와 SMD의 예측값이 실험값과 가장 잘 일치하였다.

참고문헌

- (1) Zhao, F., Yoo J., Liu, Y., and Lai M., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injector for DI Gasoline Engines," SAE Paper, No. 961925.
- (2) Beatrice, C., Belardini, P., Bertoli, C., Cameretti, M. C., and Cirillo, N. C., 1995, "Fuel Jet Models for Multidimensional Diesel Combustion Calculation: An Update," SAE Paper, No. 950086.
- (3) Kim, J. I., and No, S. Y., 2001, "Development of Hybrid Model for Simulation of Diesel Spray Dynamics," *J. KSAE*, Vol. 9, No. 1, pp. 8~19.
- (4) Kwak, S. M., Ryu, K. H., Choi, D. S., Kim, D. J., 2001, "Average Droplet Size Distribution of a GDI Spray by Simultaneous Fluorescence/Scattering Image Technique," *KSME(B)*, Vol. 25, No. 6, pp. 868~875
- (5) Amsden, A. A., Butler, T. D., O'Rourke, P. J., 1989, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory report, LA-11560-MS.
- (6) Reitz, R. D., 1987, "Modeling Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing sprays," *Atomization and Spray Technology*, Vol. 3, pp. 309~337.
- (7) Schmidt, D. P., Martin, J. K., and Reitz, R. D., 1999, "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field," SAE Paper, No. 1999-01-0496.
- (8) Ibrahim, E. A., Yang, H. Q., and Przekwas, A. J., 1993, "Modeling of Spray Droplets Deformation and Breakup," *AIAA J. Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 4, pp. 652~654.
- (9) Park, J. H., Hwang, S. S., and Yoon, Y. B., 2000, "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.
- (10) Beal, J. C., Reitz, R. D., 1990, "Modeling Spray Atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor Hybrid Model," *Atomization and Sprays*, Vol. 9, pp. 623~650.