

디젤분무의 미립화 및 액적분열모델(III) (Atomization and Droplet Breakup Model of Diesel Spray : III)

충북대학교 농업기계공학과
교수 노수영

지난 호 2회에 걸쳐 디젤 분무의 미립화(1차분열) 및 액적분열(2차분열)을 예측하기 위해 개발된 모델에 대하여 검토하였다. 이번 호에서는 그 중 분류에서 빠진 최근에 발표된 몇 가지 모델을 첨가하여 설명하고, 전체적인 분류를 다시 일목요연하게 표로 제시하고자 한다.

8. 공동 현상 유발 미립화 모델 (Cavitation-induced atomization model)

이 모델에는 두가지 모델 즉 원래의 공동현상유발 미립화모델과 그 모델을 수정한 모델을 포함시키기로 하고 각각에 대하여 검토하기로 한다.

8.1 공동현상유발 미립화 모델

이 모델은 Arcoumanis 등(1997)과 Arcoumanis와 Gavaises(1998)에 의해 제안된 모델이다. 공동현상유발 미립화 모델은 액체 분류의 분열에 미치는 분구 내 공동 현상을 표현하는 모델로 액체 분류의 분열은 분구 내에 형성된 기포의 붕괴에 의해 일어난다고 가정한다. 공동 현상에 의한 기포 내의 압력은 주변 압력보다 훨씬 낮기 때문에 기포는 액체분류의 표면에 도착하기 전이나 바로 후에 터진다. 기포가 표면에 도착하기 전에 찌그러져 터지는 것을 붕괴(collapse), 액주표면에 도착하여 터지는 것을 파열(burst)이라고 표현하기로 한

다. 두 경우 모두 분류 표면은 일그러지게 되고, 결국 분류는 액적으로 분열된다.

이 과정 동안 두 개의 특성 시간을 정의할 수 있다. 즉, 기포 붕괴 시간과 분류 주위에 기포가 도달하여 터지는데 필요한 시간인 기포 파열시간이다. 이 두 특성 시간 중 최소가 되는 것이 미립화 과정의 시간스케일을 결정한다고 가정한다. 또, 이러한 영향에 의해 분류 표면에 야기되는 섭동(perturbation)의 길이 스케일도 계산할 수 있다.

공동數(cavitation number)를 다음과 같이 정의하며, 이 수는 공동의 정도를 나타내기 위해 사용된다.

$$CN_{dyn} = \frac{P_{back} - P_{cav}}{\rho U_{Eff}^2 / 2} \quad (1)$$

액체의 유효 분사 속도 U_{Eff} 를 계산하기 위해서는 기포가 차지한 분사 구경의 출구에서 전체 면적(A_{Eff})를 결정하고, 모든 공동에 의한 기포들과 같은 면적을 가지는 상당 기포의 반경($R_{cav, Eff}$)을 유도할 수 있다.

$$r_{Eff} = \left(\frac{A_{Eff}}{\pi} \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$R_{cav, Eff} = \sqrt{r_{hole}^2 - r_{Eff}^2} \quad (3)$$

여기서 A_{Eff} 는 유효 노즐 구경 면적이다.

또, 액체 분류 내부의 난류 속도는 등방성 난류(isotropic turbulence)라고 가정할 경우 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u_{turb} = \sqrt{\frac{2}{3} K_{turb}} \quad (4)$$

여기서 K_{turb} 는 난류운동에너지이고, 분사 구경 내에 적용한 $k-\epsilon$ 난류 모델로부터 다음과 같이 계산된다.

$$K_{turb} = \frac{U_{Eff}^2}{8 \left(\frac{L_{hole}}{D_{hole}} \right)^2} \left(\frac{1}{C_d^2} - k_{form} \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_{dis} = \frac{C_e U_{Eff}^3}{2 L_{hole}} \left(\frac{1}{C_d^2} - k_{form} \right) \quad (6)$$

여기서 k_{form} 은 형상 손실 계수(form loss coefficient)로 0.45이고, C_e 는 실험에 의해 유도된 계수로 0.274이다. 난류운동에너지는 분사 구경의 유량계수 C_d (discharge coefficient)를 기초로 계산되기 때문에 손실계수 k_{form} 은 분사 구경의 입구 바로 전에서 발생한 난류운동에너지를 고려한 것이다.

기포붕괴시간은 기포동력학에 관한 Rayleigh 이론으로부터 계산할 수 있다.

$$\tau_{collapse} = 0.9145 R_{cav} \frac{\sqrt{\rho_{jet}}}{\rho_{Gas}} \quad (7)$$

이 식은 기포가 R_{cav} 의 반경을 갖는 기포에 대해 유용하다.

R_{cav} 반경을 갖는 기포가 분류 주변에 도달하여 터지는데 걸리는 평균 기포 파열시간은 기포들이 난류 속도를 가지고 액체 분류 내에서 반경 방향으로 대류된다고 가정한 다음 상관관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$\tau_{burst} = \frac{r_{hole} - R_{cav}}{U_{turb}} \quad (8)$$

미립화의 특성시간스케일은 기포붕괴시간과 기포파열시간 중 더 적은 시간으로 가정한다. 즉,

$$\tau_{atom} = \min \{ \tau_{collapse}, \tau_{burst} \} \quad (9)$$

또, 위의 시간에서 분류 표면의 변형에 대한 길이 스케일은 유효기포반경에 다음과 같이 비례한다고 가정할 수 있다.

$$L_{atom} \approx R_{cav, Eff} \quad (10)$$

$$\text{즉, } L_{atom} = 2\pi(r_{hole} - R_{cav, Eff}) \quad (11)$$

분류는 시간 τ_{atom} 동안 분류 표면의 변형에 의해 분열된다고 가정하면, 표면 변형 L_{atom} 에 원인이 되는 평균력을 나타내는 공동 현상이 유발하는 힘은 차원 해석에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$F_{total} \approx CN_{dyn} \cdot M_{jet} \frac{L_{atom}}{\tau_{atom}^2} \quad (12)$$

$$\text{즉, } F_{total} = C \cdot CN_{dyn} \cdot M_{jet} \frac{L_{atom}}{\tau_{atom}^2} \quad (13)$$

여기서, M_{jet} 는 미립화되는 액체 분류 요소의 질량으로 연료분사율로부터 매 시간 간격에서 결정된다. 그리고 C 는 경험적 상수로 0.9이다.

표면장력이 분류의 미립화에 대한 모든 힘에 대해 반대로 작용한다고 가정하면 안정된 분류의 반경은 다음 조건에 의해 계산된다.

$$C \cdot F_{total} = F_{surface} \quad (14)$$

$$\text{여기서, } F_{surface} = 2\pi r_{jet} \sigma \quad (15)$$

이다. 여기서 $C=0.007$ 이고, 측정이 가능한 분사구에 가장 가까운 점에서 액적의 SMD를 현실적으로 예측하기 위해 도입된 경험적 상수이다. 이 단계에서 공동 현상이 유발하여 미립화에 미치는 힘의 크기와 미립화에 원인이 되는 다른 힘 즉, 공기역학적 힘과 분류 내의 난류가 유발하여 미립화에 미치는 힘의 크기를 비교하는 것이 중요하다.

분사구의 출구에서 단면적에 작용하는 연료유효면적당 힘들은 다음 관계식으로부터 계산될 수 있다.

$$F_{aero} = \text{공기역학적(또는 가스관성) 힘} \\ = \rho_{gas} U_{Eff}^2 \quad (16)$$

$$F_{urb} = \text{액체분류 내 난류용력} \\ = \rho_l u_{urb}^2 \quad (17)$$

$$F_{cav} = \text{공동현상이 유발하는 힘} \\ = F_{total} / A_{Eff} \quad (18)$$

분열 과정에서 나타나는 다른 작은 힘들 즉, 액체분류 관성, 가스내의 난류 및 점성용력, 액체분류 내 점성용력 등은 위에 열거한 힘들에 비해 작기 때문에 무시할 수 있다.

반경 d_i (그리고 질량 m_i)를 갖는 액적의 생성 가능성은 모든 액적 크기에 대해 같다고 가정하여 생성된 액적의 크기를 임의로 선정한다. 또 분무각은 다음과 같이 계산한다.

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{L_{atom}}{\tau_{atom} \cdot u_{jet}} \quad (19)$$

Arcoumanis 등(1997)과 Arcoumanis와 Gavaises(1998)는 이 모델을 기존의 파동분열모델, 그리고 파동성장 및 난류모델과 비교를 하였다. 이들은 파동분열모델을 공기역학 유발 미립화 모델(aerodynamic-induced atomization model)로, 그리고 파동성장 및 난류모델을 분류난류유발 미립화 모델(jet turbulence-induced atomization model)로 표현하였다. 분사구에서 측정할 수 있는 한최대한 가까운 측정점에서 실험과 계산을 한 결과 분사구 내 공동현상이 분사속도와 액적크기에 크게 영향을 미치고, 비교대상의 다른 두 모델보다 공동현상유발 미립화 모델이 분무의 액

적크기를 정확하게 예측할 수 있었다고 보고하였다.

8.2 수정 공동현상유발 미립화 모델

이 모델(Modified cavitation-induced atomization model)은 Pelloni와 Bianchi(1999)에 의해 제안된 것으로 공동현상유발 미립화 모델을 수정한 것이다.

원래 모델인 공동현상유발 모델에서는 기포붕괴 시간과 파열 시간 중 더 작은 것을 미립화 특성시간 스케일로 가정하였다. 이 수정 모델의 경우는 공동현상에 의해 유발되는 표면 섭동(perturbation) 전에 경과되어야만 하는 시간이 액체분류의 분열을 결정짓는다고 가정한 것이 근본적인 차이이다. 따라서 이 모델에서 공동현상유발 미립화 특성시간은 다음과 같이 두 항의 합으로 표현된다.

$$\tau_{A,C} = \tau_{spm,c} + \tau_{exp,c} = \tau_{cav} + C_5 \tau_{w,c} \quad (20)$$

여기서 τ_{cav} 는 자발적 성장시간 $\tau_{spm,c}$ 에 대한 공동현상 시간스케일이고, $\tau_{w,c}$ 는 지수적 성장시간 $\tau_{exp,c}$ 에 대한 파동 성장시간이다.

따라서 미립화 시작을 결정하기 전에 불안정하게 되는 섭동에 필요한 시간을 계산하는 것이 가능하다.

$\tau_{spm,c}$ 는 기포의 붕괴 또는 파열에 의해 유발되는 섭동의 자발적 성장에 필요한 시간을 나타내는 것으로 원래 Arcoumanis와 Gavaises (1998)에 의한 공동현상유발 미립화 모델에서와 같이 계산한다.

즉, 공동현상의 특성시간스케일은 붕괴 시간과 파열 시간 중 더 적은 것으

로 가정한다.

$$\tau_{cav} = \min(\tau_{coll}, \tau_{burst}) \quad (21)$$

반경 R_{cav} 을 갖는 기포의 붕괴시간은 Rayleigh 이론으로부터 계산된다.

$$\tau_{coll} = 0.9145 \cdot R_{cav} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (22)$$

기공(cavity)이 분류 표면에 도달하는 데 걸리는 시간을 고려하여 계산된 기포의 파열시간을 다음과 같다.

$$\tau_{burst} = \frac{r_{hole} - R_{cav}}{u_L} \quad (23)$$

여기서 u_L 은 분류의 파동 속도 ($u_L = \sqrt{2k_{avg}/3}$)이다. R_{cav} 는 모든 기포와 같은 면적을 갖는 상당 기포의 반경이다.

$$R_{cav} = \sqrt{r_{hole}^2 - r_e^2} \quad (24)$$

여기서 r_e 는 노즐 출구에서 유효유동면적의 반경이고, r_{hole} 은 노즐 반경이다.

섭동은 Kelvin-Helmholtz 불안정성을 경험한다고 가정하는 것이 타당하므로 지수함수적 성장 시간스케일은 지난 호의 4절에서 검토한 파동성장 및 난류 모델에서의 식(4.5)를 이용하여 계산한다.

결국 이 모델에서는 원래 공동현상 유발 미립화모델에서 고려하지 않은 지수함수적 성장시간 스케일을 포함하여 공동 미립화 특성시간을 계산하는 것이 근본적으로 다른 점이다. 또, 공동현상유발 미립화의 길이스케일은 원래 모델과 같이 계산한다.

9. 여러 가지 혼합 모델

지난 호에서는 Beatrice(1995) 등에 의해 제안된 파동분열모델(WB)+TAB

모델로 이루어진 혼합모델(hybrid model)에 대해서만 검토하였다. 그 외에 최근에 제안된 혼합모델 몇 가지를 아래에 요약하기로 한다.

9.1 WGT+TAB 혼합 모델

이 모델은 Bianchi와 Pelloni(1999)에 의해 제안된 모델로 고밀도, 고압 분무의 1차 및 2차 분열 과정을 모두 표현할 수 있는 분무분열모델을 개발하기 위한 것이었다. 이 모델에서는 1차 분열 즉, 액체분류의 미립화는 파동성장 및 난류(WGT) 모델을 사용하여 계산하고, 2차 분열은 TAB 모델을 약간 수정하여 사용한다.

파동성장 및 난류 모델에서 TAB 모델로 변환은 Weber 수를 기준으로 하여 액체분류의 분열은 $We \geq 1000$ 의 조건에서 일어난다고 가정한다. 그리고, TAB 모델에서 상수 $C_k=8$ 을 사용하는 것을 각 조건별로 $C_k=0.5-8$ 까지 변화시켜 Allocca 등(1992)의 실험에 의한 분무선단 도달거리와 SMD를 조사해 본 결과 $C_k=1$ 의 경우가 가장 실험치와 잘 맞으므로 $C_k=1$ 을 사용한 TAB 모델을 이용하였다. 또, $C_k=1$ 을 사용하여 TAB 모델에 의한 예측 결과와 Pilch와 Erdman(1987)의 실험 결과를 비교한 결과 분열 시간의 예측에 큰 개선이 이루어졌다고 보고하고 있다.

9.2 WGT+MCIA+TAB 혼합 모델

이 모델은 앞서 설명한 WGT+TAB 혼합모델에 CIA 모델을 수정한 MCIA 모델을 도입한 혼합모델이다. 즉, 공동현상, 난류 그리고 공기역학이 미립화에 미치는 동시의 영향을 고려할 목적으로 Pelloni와 Bianchi(1999)에 의해 자신들

이 이전에 제안한 모델에 MCIA 모델을 첨가하였다.

앞의 WGT + TAB 모델에서와 같이 1차 분열은 $We \geq 1000$ 인 조건에서 그리고 2차 분열은 $We < 1000$ 에서 일어나는 것으로 가정하였다.

그리고, 액체 분류의 분열을 예측하기 위해서 어떤 과정이 지배적이고, 어떤 모델을 선정하느냐의 기준을 정하는데 Fath 등(1997)의 실험 결과를 기초로 하였다. 노즐출구로부터 $400 \mu m$ 거리 내에서는 공동현상과 난류가 경쟁을 하여 미립화는 두 미립화 특성시간스케일 중 더 적은 것이 과정의 지배적이라고 가정한다. 그 이상 거리에서는 미립화는 난류만에 의해 제어된다고 가정한다. 결국, 미립화시간스케일은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_A = \begin{cases} \min[\tau_{A,T}, \tau_{A,C}] & (25) \\ \tau_{A,T} & \text{노즐로부터 거리} < 400 \mu m \\ \tau_{A,C} & \text{노즐로부터 거리} > 400 \mu m \end{cases}$$

여기서 $\tau_{A,T}$ 는 WGT 모델에서 계산된 난류에 의한 특성시간 스케일이고, $\tau_{A,C}$ 는 공동현상유발 미립화 모델에서 계산된 특성시간 스케일이다.

분사된 bolb의 지름은 분류의 분열 때문에 다음의 법칙에 따라 계속 감소하는 것으로 가정하였다.

$$\frac{dr}{dt} = -L_A/\tau_A \quad (26)$$

여기서 미립화 길이스케일 L_A 는 어느 과정이 미립화를 지배하느냐에 따라 L_{AT} 또는 L_{AC} 에 해당한다. L_{AT} 는 WGT 모델에서, L_{AC} 는 MCIA 모델에서 각각 계산한다.

질량보존에 의해 분열이 일어난 후 반경 r 의 계산 parcel 내에 액적의 수 N

은 $N_0 r_0^3 = N r^3$ (N_0 : 계산 parcel 내 반경 r_0 의 모액적수)에 의해 시간에 따라 조정한다. 분무각은 다음과 같이 계산한다.

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{L_A/\tau_A}{U} \quad (27)$$

여기서 U 는 액체분류와 주위가스 사이의 상대속도이다.

9.3 WB+FIPA 혼합 모델

이 모델은 액체분류의 미립화(1차 분열)는 파동분열(WB) 모델을 사용하고, 액적분열(2차 분열)은 지난호에서 검토한 FIPA 모델을 사용하는 혼합모델이다.

We 수를 기준으로 $We \geq 1000$ 일 경우는 파동분열모델을 사용하고, 그 이하일 경우 2차 분열로 가정하여 FIPA 모델을 사용한다.

Habich 등(1997)이 FIPA 모델을 개발하고, 이 모델을 파동분열모델과 함께 사용하여 실험 결과와 비교한 결과

10. 조합 모델(Combined model)

이 모델은 Arcoumanis 등(1997)에 의해 제안된 경험적 모델의 한 종류로 지금까지 제안된 여러 가지 경험적 모델들을 조합시켜 2차 분열을 예측하기 위해 개발된 모델이다.

이 모델에서는 여섯 개의 분열 영역으로 다음과 같이 구분한다.

1. $We \leq 12$: 진동 분열
2. $12 < We \leq 18$: 주머니 형태 분열
3. $18 < We \leq 45$: 주머니 및 수술 형태 분열
4. $45 < We \leq 100$: 혼돈(chaotic) 분열

5. $100 < We \leq 350$: Sheet 벗김 형태
분열

6. $350 < We \leq 1000$: 파동 물마루 벗김
형태 분열

7. $1000 < We < 2760$: 파국적 분열
가장 발생 가능성이 있는 액적분열의
형태가 결정되면, 분열시간은 다음에 의
해 계산한다.

$$t = \tau_b \cdot \tau \quad (28)$$

$$\tau = \frac{d_d}{u_r} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (29)$$

여기서 τ_b 는 무차원 분열시간, d_d 는 액
적 직경, u_r 은 gas와 액적의 상대속도,
 ρ_l 과 ρ_g 는 액체와 gas의 밀도이다.
만일 τ 가 액적의 수명보다 더 크다면
분열이 일어난다.

1. $We > 12$:

$$\tau_b = 0.25\pi \left[\frac{\sigma}{\rho_l d^3} - 6.25 \frac{\mu_l}{\rho_l d^2} \right]^{-0.5} \quad (30)$$

2. $12 \leq We \leq 18$:

$$\tau_b = 6(We - 12)^{-0.25} \quad (31)$$

3. $18 < We \leq 45$:

$$\tau_b = 2.45(We - 12)^{0.25} \quad (32)$$

4. $45 < We \leq 351$:

$$\tau_b = 14.1(We - 12)^{-0.25} \quad (33)$$

5. $351 < We \leq 2670$:

$$\tau_b = 0.766(We - 12)^{0.25} \quad (34)$$

6. $2670 < We$: $\tau_b = 5.5$ (35)

점도의 영향을 포함시키기 위해서는
다음식을 사용한다.

$$\tau_b = \tau_b / (1 - Oh/7), \quad We < 1000 \quad (36)$$

분열시간 동안 액적은 찌그러진다고
가정하고, 그 변형 변수(deformation
parameter) D_{dt} 는 다음 식으로 구한다.

$$\frac{D_{dt} - D_d}{D_{max} - D_d} = 0.8 \frac{t}{\tau_b} \quad (37)$$

여기서 $D_{max}/D_d = 1 + f(Oh) We^{0.5}$ 로 액적
의 최대 가능한 변형을 나타낸다. $f(Oh)$
는 Ohnesorge 수에 따라 다르지만, 이
모델에서는 0.19를 택하였다.

액적 변형은 액적의 항력계수에 영향
을 미치므로 변형된 액적의 항력계수
 C_{Ddt} 는 다음식에 의해 계산한다.

$$C_{Ddt} = C_{Dsp} \left[0.4 + 0.6 \frac{D_{dt}}{D_d} \right] \quad (38)$$

여기서 C_{Dsp} 는 구형액적의 항력계수이
다.

이 모델은 경험적 모델 중 Pilch와
Erdman 모델(6.2절 참조)과 유사하지만,
 We 수에 따른 분열 영역을 좀 더 세분
한 것을 알 수 있다.

11. 미립화 및 액적분열 모델의 분류

지금까지 3회에 걸쳐 검토한 미립화
및 액적분열 모델을 분류하면 표 2와
같이 일목요연하게 정리할 수 있다. 이
번 호에서 검토한 모델들을 첨가한 관
계로 1회에 제시한 표1과는 여러 가지
로 달라졌다.

참고문헌

Allocca, L., Belardini, P., Bertoli, C.,
Corcione, F. and De Angelis, F., SAE
paper 920576, 1992

Arcoumanis, C., Gavaises, M. and
French, B., SAE paper 970799, 1997

Arcoumanis, C. and Gavaises, M.,
Atomization and Sprays, Vol. 8, pp.
307-347, 1998

Beatrice, C., Belardini, P., Bertoli, C.,
Cameretti, M.C. and Cirillo, N.C.,
SAE paper 950086, 1995

Bianchi, G.M. and Pelloni, P., SAE

paper 1999-01-0226, 1999

Corcione, F.E., Allocca, L., Pelloni, P., Bianchi, G.M., Luppino Bertoni, F. and Ivaldi, D., private communication, 1999

Fath, A., Munch, K.U. and Leiperts, A., Proc. of ICLASS-97, August. 18-22, Seoul, Korea, pp. 513-520, 1997

Habchi, C., Verhoeven, D., Huynh, C., Lambert, L., Vanhemelryck, J.L., and Baritaud, T., SAE paper 970881, 1997.

Pelloni, P. and Bianchi, G.M., private communication, 1999

Pilch, M. and Erdman, C.A., Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, pp. 309-337, 1987

Table 2. Classification of atomization and droplet breakup model

