

연료액적의 Air-Assisted Breakup 에 대한 수치해석적연구

A Numerical Study on Air-Assisted Breakup of Fuel Droplets

황 상 순*

S. S. Hwang

ABSTRACT

Breakup models are evaluated using the experimental drop trajectory in this study. The experimental conditions correspond to Weber # 56, 260, 463. Computations are carried out using a modified KIVA-II program with 2 different breakup submodel(TAB and Wave breakup model) and dynamic drag model which the drag coefficient changes dynamically with distortion parameter. Results show that computation with wave breakup model represents the experimental drop trajectory better than that with TAB submodel. And result with wave breakup model shows similar breakup pattern to experimental breakup process. It is thought that in wave breakup model the small drops are shed from the parent drop throughout parcel lifetime such that this modelling represents the real breakup process well.

주요기술용어 : Weber # (웨버 수), Instability Wave(불안정파), Distortion Parameter (무차원 변위계수), Parent Drop(모액적), Satellite Drop(위성액적)

1. 서론

연료분사과정은 기존디젤엔진 뿐만아니라 전자제어가솔린엔진에서도 널리 쓰여지고있다. 디젤엔진에서의 성능에 직접 영향을 주는 연소과정은 액체연료의 증발특성에 많은 지배를 받고 있고, 전자제어 가솔린기관의 흡기포트내에서의 적절한 혼합기형성은 기관의 성능 및 배기특성에 직접적인 영향을 주게된다. 이러한 증발특성은 연료액적의 전체 표면적의 크기에 비례하게 되며 이는 액체연료의 미립화 정도에 의존하게 된다.

이와 같은 미립화 특성에 영향을 미치는 물리적과정으로 액적의 breakup, collision, wall impingement를 들 수가 있는데 이중

가장 지배적인 인자는 액적의 breakup 과정이다.

통상 액적의 breakup 과정은 액적과 주위 가스와의 상대속도차이에 의하여 일어나는데 디젤연료에는 높은 연료압에 의하여 Air-assisted injector 인 경우는 높은 공기압에 의하여 필요한 높은 상대속도를 발생시킨다.

액적의 breakup 과정에 대한 기본적인 연구는 오래전 부터 많은 연구자에 의하여 이루어져 왔다(1 - 5).

특히, Pilch(6) 등은 액적의 표면장력과 주위가스의 관성력의 비인 Weber 수 ($\rho u^2 a / \sigma$)에 의하여 몇가지 형태의 breakup 영역이 존재함을 밝혀내고 Weber

* 인천대학교 기계공학과

수가 증가됨에 따라 bag breakup, boundary stripping, catastrophic breakup으로 나누워짐을 실험적으로 보여주었다. 이런 breakup 과정에 대한 실험 및 이론적으로 얻어진 기본 데이터는 breakup 모델화 과정에 적용되어 연료분무와 연소과정이 존재하는 유동장을 수치 해석 하고자 하는 다차원 압축성유체 프로그램에 활용되고 있으며 대표적인 것으로 Amsden 등(7)에 의해 개발된 KIVA 프로그램을 들 수 있다.

이러한 breakup model이 실제 현상을 제대로 나타내도록 하기 위하여서는 많은 실험적인 연구를 통한 model 상수의 일반성이 확보되어야 한다.

이와 관련하여 Liu 등(8)은 잘 제어된 노즐로부터의 유동조건에서 단일액적크기의 연료를 분사시켜 Weber 수 300 이상의 catastrophic 영역에서 액적의 유속방향표면에 불안정파가 존재함을 보여주었고, 이러한 불안정파의 발달은 액적의 breakup 기구와 밀접한 관계가 있음으로 파악하여 몇가지 모델상수를 제안하였다. 또한 Hwang 과 Reitz(9)는 앞서 Liu의 실험을 보완한 반복스파크광원을 이용한 고배율 고속촬영실험을 통하여 불안정파의 파장과 성장속도를 측정하여 breakup 기구가 액적의 breakup 단계에 따라 Kelvin - Helmholtz 및 Rayleigh - Taylor instability와 상관 관계가 있음을 밝혀내었다.

본 연구는 이와 같은 기초실험결과를 바탕으로 수치계산에 적절한 breakup 모델들을 적용하여 각 모델의 특성과 유효성을 살펴보고자 한다.

수치계산은 유동계산에서 ALE(Alternate Lagrangian Eulerian)방법을 사용한 3차원 압축성유체역학 프로그램인 KIVA-II를 본 연구에 맞게 일부 개조하여 사용한다.

수치해석에서 액적에 대한 수치해석방법은 Fig.1에서 나타나 있는 바와 같이 blob 이라는 discrete parcel로 생각하며 이를 Motecarlo 방법과 유사하게 액적들의 동적기

동을 나타낸다.

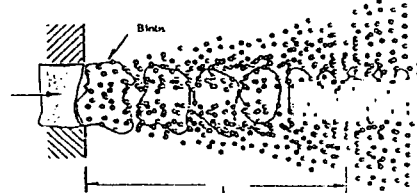


Fig.1 Discrete parcel(blob) in numerical computation of fuel spray

본연구에 사용된 Breakup model 및 액적의 공기저항계수 submodel은 다음과 같다.

2. Breakup Model

a. TAB (Taylor Analogy Breakup) model(10)

TAB 모델은 액적의 breakup 과정에 작용하는 힘을 스프링-댐핑-질량이 있는 시스템으로 유사화 시키고 시스템의 진폭에 해당되는 액적표면에서의 무차원 변위함수 (distortion parameter)가 일정값을 가질 때 액적이 breakup 되는 것으로 가정한다.

이와 같은 변위함수에 관련된 식은 다음과 같은 2차 상미분방정식에 의하여 결정된다.

$$\ddot{y} = \frac{2\rho_g U^2}{3\rho_l r^3} - \frac{8\sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{5\mu_l}{\rho_l r^2} \dot{y} \quad (1)$$

$$y(t) = \frac{We}{12} + e^{-i\omega t} \left(\left(y(0) - \frac{We}{12} \right) \cos \alpha t + \left(\frac{\dot{y}(0)}{\omega} + \frac{y(0) - \frac{We}{12}}{\alpha \tau_d} \right) \sin \alpha t \right) \quad (2)$$

윗식에서 나타나 있는 바와 같이 y 의 값은 유동조건과 액적과 주위가스의 물성치의 함수로 주어진다.

b. Wave Breakup Model(11)

이 모델은 Fig.2 에서 보는 바와 같이 액 주표면위에 공기와의 상대속도에 의하여 미소 크기의 불안정파인 표면파가 존재한다고 생각하고 이것을 다음과 같은 형태로 가정하였다.

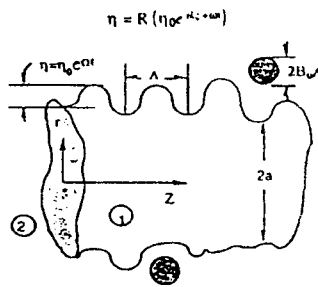


Fig.2 Infinitesimal surface wave on the liquid surface

이 불안정파를 기본 연속방정식과 운동량방정식을 만족하게 하여 불안정이론(Instability theory)에 의한 dispersion equation 으로 나타내게 한다. 이 식에 속도 및 압력에 대한 경계조건을 적용하면 다음과 같은 불안정파의 최대 성장속도 및 파장을 구할 수 있게된다.

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{(1 + 0.45Z^{0.5})(1 + 0.4T^{0.7})}{(1 + 0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \quad (3)$$

$$\Omega \left(\frac{\rho_1 a^3}{\sigma} \right)^{0.5} = \frac{0.34 + 0.38We_2^{1.5}}{(1 + Z)(1 + 1.4T^{0.6})} \quad (4)$$

$$Z = \frac{We_1^{0.5}}{Re_1}; T = ZWe_2^{0.5}; We_1 = \frac{\rho U^2 a}{\sigma}$$

$$We_2 = \frac{\rho_2 U^2 a}{\sigma}; Re_1 = \frac{Ua}{\nu_1}$$

여기서 액적의 breakup 은 다음과 같은 새로이 생성되는 액적에 대한 제한 조건을 만족하도록 하였다.

$$r = B_0 \Lambda \quad (B_0 \Lambda \leq a) \quad (5-a)$$

$$r = \min \left\{ (3\pi a^2 U / 2\Omega)^{0.33}, (3a^2 \Lambda / 4)^{0.33} \right\} \quad B_0 \Lambda > a \text{ 일때} \quad (5-b)$$

그리고 모체가되는 액적의 특성크기는 특성시간 τ 에 따라 변화 되며, 특성시간 τ 는 불안정파성장속도 와 해당파장에 의존하는 다음식에 의하여 주어진다.

$$\tau = \frac{3.726 B_1 a}{\Lambda \Omega} \quad (6)$$

여기서 B1 은 breakup time constant 로서 실험적으로 결정되어야 할 상수이다.

위의 두가지 본연구에 적용될 TAB 모델과 Wave 모델의 기본적인 차이점은 다음과 같다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이 TAB 모델은 distortion paramter γ 가 1 에 도달하면 lb 라는 지연시간후에 순간적으로 같은 blob 내 에 새로이 형성된 작은 액적들로 채워지게 된다. 그러나 Wave 모델은 모액적(parent droplet)으로 부터 breakup 되는 동안 그 표면으로 부터 계속적으로 새롭게 생긴 액적들이 떨어져 나가게 된다. 이 모델은 고압 분사시 기화에 의한 연료액적의 예측과 같은 현상을 보다 실제적으로 예측을 가능하게 해 줄 수 있는 특징이 있다.

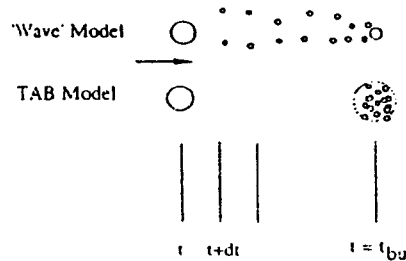


Fig.3 Difference between Wave model and TAB model

3. 액적의 항력모델

수치계산상에서 상대속도 W 로 공기속을 움직이는 액적에 대한 운동방정식은 다음과

같은 식으로 표시할 수 있다.

$$\rho_1 V \frac{d^2 \bar{X}}{dt^2} = C_d A_f \rho_2 W^2 / 2 \quad (7)$$

여기서 \bar{X} , v , A_f 는 각각 액적의 위치, 부피, 전방면적(frontal area)을 나타낸다.

그리고, 공기저항계수 C_d 는 통상 액적을 구로 생각하여 구에 대한 실험치를 도입하여 계산을 하였으나(8), 실험결과(9)를 살펴볼 때 액적이 공기류의 관성력에 의하여 초기 구형에서 변형되어 높은 상대속도에서는 거의 원판형으로 변형되어 버리기 때문에 이러한 액적의 변형을 고려해야 할 것이다. 그래서 본 연구에서는 Fig. 4 에서 보는 바와같이 TAB 모델에서 계산되는 distortion parameter를 액적의 변위로 두고 하한치를 구의 항력계수로 상한치를 원판형의 항력계수로 하는 다음과 같은 레이놀즈수와 distortion parameter를 고려한 액적항력모델을 도입한다(9).

$$C_d = C_{d,sphere} (1 + 2.632y) \quad (8)$$

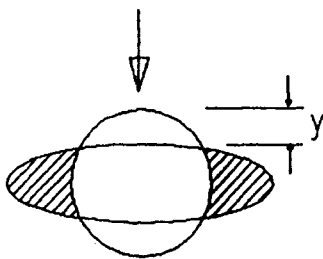


Fig. 4 distortion parameter를 고려한 동적 항력모델

4. 비교대상 실험결과

실험장치는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 압전 방식의 Liu-Berlund 액적발생기와 폭이 1.3mm, 길이가 10mm인 직사각형 slit 형태의 공기노즐로 구성되어 있으며 유속방향과 액적의 분사방향은 직각을 이룬다.

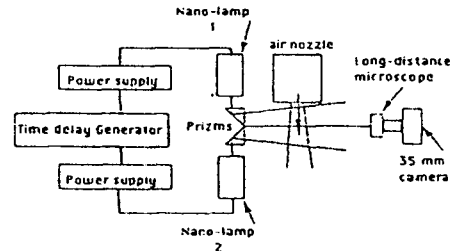


Fig.5 Experimental Apparatus

사용된 연료는 표준디젤오일로서 점성은 0.212Ns/m², 밀도 824 kg/m³, 표면장력 0.02kg/s²이다. 발생된 액적은 크기가 직경 189 μm, 유입속도 17m/s의 값을 가진다. 실험조건은 표 1에 나타나 있으며 실험을 통해 각 실험조건에서 연료액적의 깨짐 및 breakup 형태, 불안정과의 생성등과 같은 정보는 고속도 고배율 사진촬영에 의하여 얻을 수 있었다. Case 1은 Bag breakup 영역을 Case2는 Boundary stripping 영역을 Case 3는 Catastrophic breakup 영역을 대표적으로 나타낸다. 자세한 실험 결과는 Hwang(9)의 논문을 참고하기 바란다.

표 1

case	유 속	Weber 수	Re #
1	70 m/s	56	900
2	150 m/s	260	1980
3	200 m/s	463	2573

5. 수치결과 및 고찰

TAB 및 Wave 모델을 사용하여 표 1에서 표시된 조건에서 계산된 수치결과를 실험결과와 비교해 보기로 한다. 두 모델 공히 액적항력에 대한 모델은 앞서 설명된 액적의 변형을 고려한 모델이 도입된다.

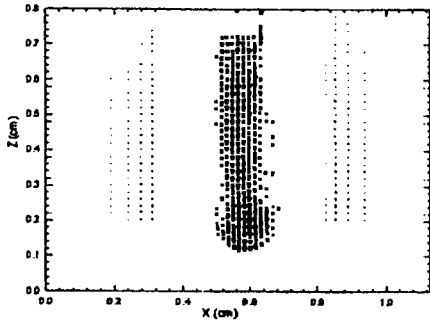


Fig.6 Velocity field in 200 m/s inflow

먼저 Fig. 6 에서는 공기유속 200m/s 에서의 속도장을 보여주는 데 노즐출구에서 분출되는 유동의 속도벡터 크기는 거의 균일하게 분포되어 있어 실제 실험조건에서의 노즐 출구부분의 균일한 분포를 잘 묘사하고 있다. 분류가 하류로 갈수록 전단류에 의한 전형적인 포물선형태를 띄고 있다.

Fig 7 은 catastrophic breakup 영역인 공기유속 200m/s 에서 단일크기로 40MHz 로 주입되는 연료액적이 공기노즐에서 공기류와 수직으로 충돌하여 breakup 되는 과정을 보여주고 있다. 모액적으로부터 연속적으로 떨어져 나가는 크기가 작은 위성액적들을 잘 보여주고 있는데 이것은 새로운 액적이 그림에 보는 바와 같이 개수가 몇개정도만 생긴 것이 아니라 많은 숫자인데 여러개의 크기가 같은 액적을 하나의 blob 으로 표시하였기 때문이다.

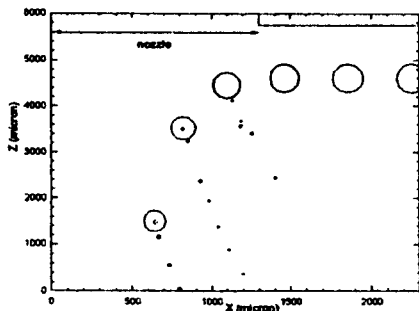
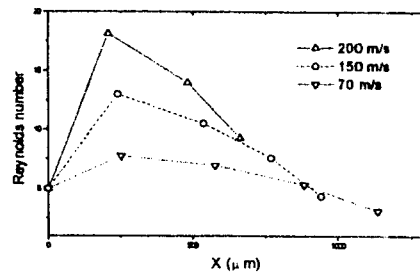


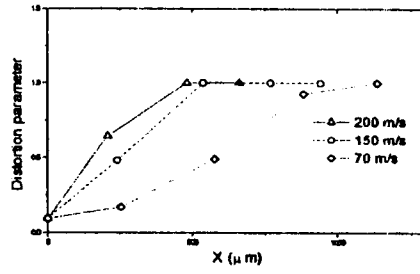
Fig. 7 Breakup process of fuel droplets in 200m/s inflow(Wave model)

Fig 8 은 breakup 의 궤적을 나타내는 모액

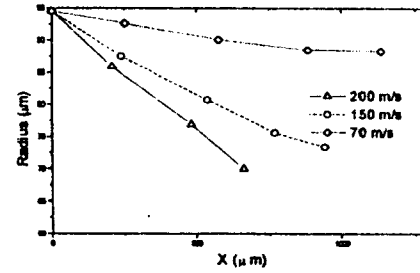
적에 대한 변위 및 유동변수에 대한 값을 나타낸 것으로 좌표축 x 는 노즐 slit 쪽으로 두었다. 여기서 3 가지 대표적인 breakup 영역에 대한 결과를 같이 표시하여 전체 경향을 파악하고자 한다.



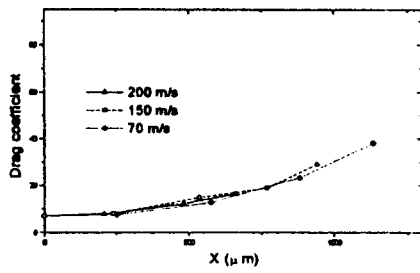
(a)



(b)



(c)

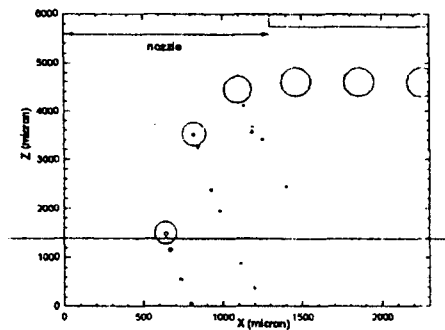


(d)

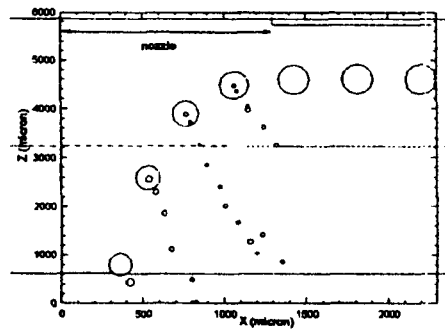
Fig.8 x variation of (a) Reynolds # (b) distortion parameter (c) size (d) drag coefficient of parent droplets for case 1, 2, 3

Fig. 8 (a)는 액적레이놀즈수를 나타낸 것으로서 연료액적이 노즐에서 나오는 공기류와 만날 때 액적과 공기류사이의 상대속도가 최대로 나타나 최대의 값으로 상승하고 있음을 보여준다. 그 후 액적이 공기류의 관성력에 의하여 공기류를 따라감에 따라 상대속도가 줄어들어 x 축이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 distortion parameter를 나타낸 것으로서 공기류와 만나기 전의 액적

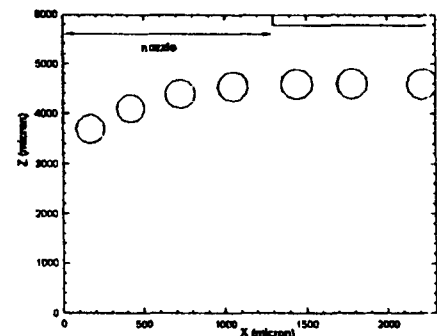
의 경우 공기류에 의한 변형이 나타나지 않다가 공기류와 접함에 따라 액적이 공기류에 의하여 점차 납작하게 변화되는 것을 값의 증가로 알 수 있다. 값이 점차 커져 breakup이 일어나는 1의값으로 접근하고 또한 공기의 유속이 작을 수록 breakup이 일어나는 시점이 늦어지는 일반적인 경향을 잘 보여준다.



(a) 200 m/s



(b) 150 m/s



(c) 70 m/s

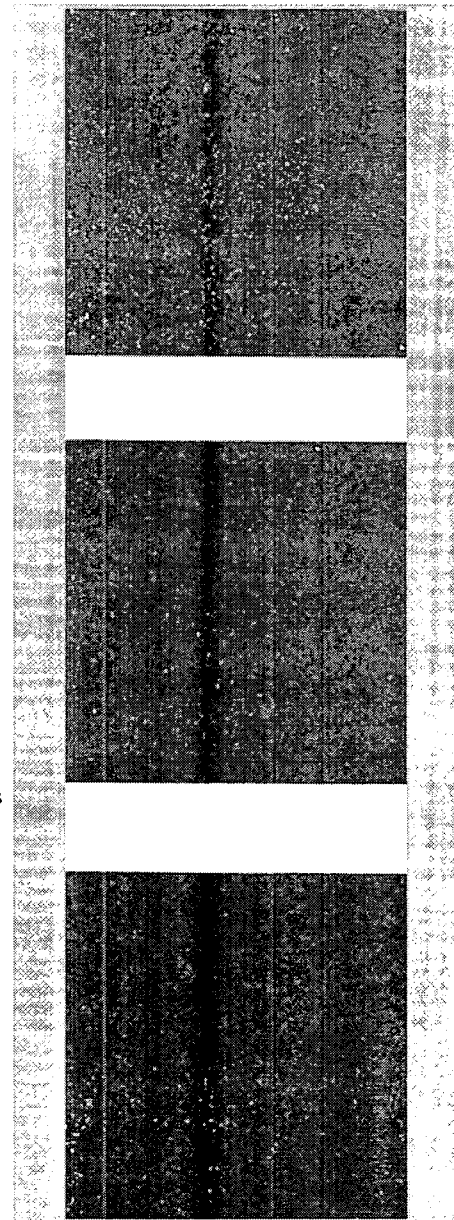


Fig.9 Comparison of computational results and experimental data (case 1,2,3)

연료액적의 크기변화는 Fig. 8(c)에 나타나 있으며 Weber 수가 커짐에 따라 모액적의 크기가 급격히 줄어들음을 알 수 있다. 공기유속 70m/s의 경우 weber 수가 낮은 bag breakup 영역으로서 breakup에 의한 모액적의 크기감소는 미미함을 알 수 있다. Fig (8-d)는 액적의 항력계수를 보여주는 것으로 x 축으로 감에 따라 distortion parameter는 증가하고 레이놀즈수가 줄어들어 따라 구의 항력계수가 늘어남으로 인하여 전체적으로 액적의 항력계수는 증가됨을 보여주고 있다.

Fig 9.은 실험에 의한 각 breakup 영역에서 대표적인 연료액적의 breakup 과정을 반복 초고속배율사진촬영결과(9)와 실험과 동일한 조건에서의 액적직경 및 궤적변화에 대한 수치결과를 그래픽으로 나타낸 것이다. 적용된 breakup model은 wave breakup 모델이다. 200m/s 에서 모액적으로부터 떨어져 나가는 위성액적의 위치 및 크기를 보여주고 있으며, 실험사진에서는 연료액적의 형상이 공기류와 접하는 순간 거의 납작하게 되는 것을 볼 수 있는 데, 이는 수치계산에서 distortion parameter가 공기류와 만날 때 1의 값에 급속하게 접근하여 거의 원판형을 나타내고 있는 Fig(8-b)의 결과에서도 유추될 수 있다. 또한 수치계산에서 모액적 하류쪽에서 크기가 작은 새로운 액적이 형성됨을 보여준다. 그리고 Weber 수가 클수록 즉 유속이 클수록 위성 액적의 크기가 작아지는 것을 Fig(9-a)와 Fig(9-b)를 비교해 보면 잘 알 수 있다. 그리고 수치계산에서 모액적이 전체적인 액적의 궤도를 형성하면서 유지되고 있음을 보여주는 데 실험결과에서도 모액적의 존재를 확인할 수 있고 위성액적이 순차적으로 떨어져 감을 알 수 있다. 70m/s의 조건에서는 위성액적의 존재를 실험사진에서 거의 확인할 수 없는 데 수치결과에서도 액적의 형태만이 distortion parameter의 크기로서 변화하고 모액적의 개개 질량은 거의 변함이 없음을 알 수 있었다.

Fig 10에서는 실험에서 얻은 액적궤적에 대한 데이터와 TAB 및 Wave 모델을 적용한 수치결과에서의 모액적의 궤적을 비교한 결과를 보여주고 있다. 수치계산에서 액적의 궤적에 영향을 주는 인자로는 breakup time constant과 액적의 공기저항계수를 들 수가 있는데 공기저항계수는 동일한 모델을 사용하였기 때문에 breakup time constant 값이 결정적인 인자이다.

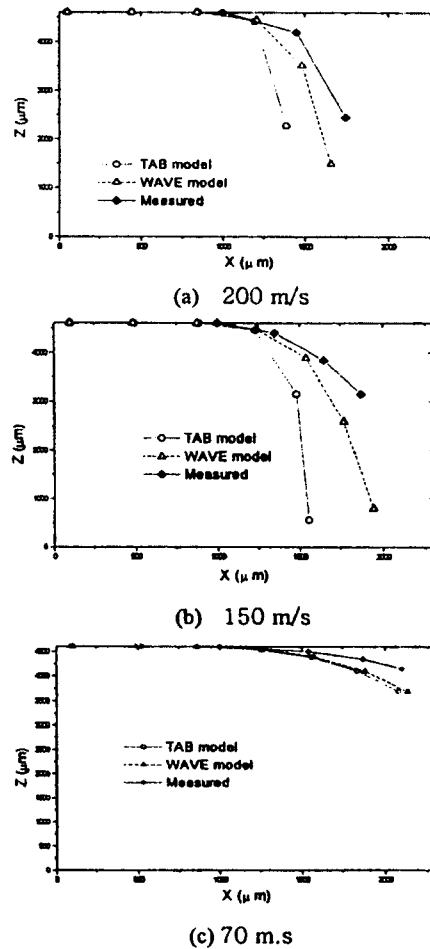


Fig. 10 Comparison of numerical results and measurements for drop trajectory

Reitz(11)는 B1의 값으로 10 정도의 값을 주로 많이 사용하여 고압분사에 의한 디젤엔

진연소과정을 잘 예측할 수 있어서 이 수치를 추천하였는데 물론 이같은 각 유동조건에 따른 불확실성을 갖고 있다. 본 연구에서는 B1를 10으로 두고 계산하였다.

모델들의 유효성을 검증하기 위하여 액적의 궤적 뿐만 아니라 액적의 크기변화를 알 수 있어야 하는데 Fig 9에서 보는 바와 같이 액적이 공기류속에서 가지는 형상의 복잡성(특히 모액적에 있어서)으로 인하여 크기를 정의하기가 매우 어렵기 때문에 실험결과로서 액적의 궤도에 대한 값만으로 두 모델을 검증하고자 한다.

Fig 10에서 보듯이 유속 200m/s, 150m/s에서 Wave 모델이 TAB 모델 보다 실측치에 보다 접근하고 있음을 보여 주고 있다.

전반적으로 TAB 모델이 Wave 모델에 비해 액적궤적이 더 굴절되어 있어 공기류관성에 좀더 영향을 받고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 TAB 모델을 사용한 결과가 실제현상에 벗어나 있는 것은 이 모델의 특성을 살펴보면 알 수 있을 것 같다.

앞서 breakup 모델 설명에서 기술한 바와 같이 TAB 모델은 distortion parameter가 1로 접근후 breakup time constant t_u 후에 같은 blob 내에서 일시적으로 크기가 작은 액적으로 바뀌게 되어 있는 것으로 액적의 공기저항계수의 급격한 증가를 가져오게 되는 데 이는 Fig.11의 TAB 모델을 사용한 수치계산에서의 액적공기저항계수값의 변화에서 확인할 수 있다.

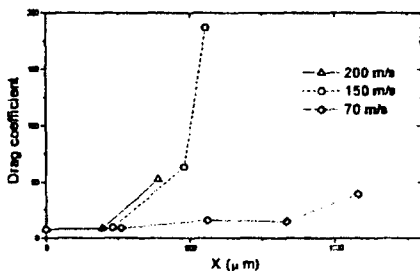


Fig.11 Variation of droplet drag coefficient with TAB model

70m/s의 경우에는 액적의 breakup이 거의 나타나지 않아 TAB 모델을 사용한 Cd는 앞서 Fig(8-d)에서의 Wave 모델에서의 Cd값과 거의 동일하나 200m/s, 150m/s의 경우 x축의 증가에 따라 급격한 Cd값의 증가를 보여줘 액적이 보다 공기의 관성력의 영향을 많이 받게 된다.

Fig.9의 실험결과 사진에서 확인할 수 있는 바와 같이 액적이 공기류와 접촉했을 때 액적이 breakup되는 과정에서 모액적으로부터 순차적으로 액적이 떨어져 나가고, 일정기간 모액적이 breakup과정중에 남아 있게 된다. 이러한 모액적은 공기저항계수에 상당한 영향을 미치게 되어 액적궤적에 결정적으로 영향을 주게 된다. 그래서 Fig. 9에서의 수치계산에서 나타난 바와 같이 모액적이 breakup과정에서 일정기간 유지되는 Wave 모델이 실제현상을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

TAB 모델의 경우는 기본적으로 breakup time constant를 실제현상을 제대로 나타낼 수 있게 실험결과와 parametric study를 통하여 보완이 있어야 할 것으로 생각 된다.

본 연구는 실험결과를 바탕으로 breakup 모델에 대한 일차적인 검증은 해보았으나, 계속적인 연구를 통해 각 모델에서 실험적으로 결정되어야 할 모델상수의 일반성확보를 위한 매개변수연구가 뒤따라야 할 것이다.

6. 결론

공기와 의 상대속도에 의한 연료액적의 breakup 과정을 수치해석하기 위하여 KIVA-II 프로그램을 개조하여 수치계산하였으며, 연료액적궤적에 대한 데이터 및 액적 breakup 과정에 대한 고배율 고속사진실험결과와 비교 검토하였다. 사용된 breakup 모델은 TAB 과 Wave 모델이며 액적의 공기항력 모델은 액적의 변위를 고려한 동적액적모델을 사용하였다.

수치결과 Wave 모델이 좀 더 실제 액적궤

적 및 breakup 과정을 잘 재현하고 있음을 확인 할 수 있었는데 이는 breakup 과정에서 모액적의 순차적인 변화를 제대로 고려해준 것이라 판단되며, 또한 실제 breakup 시의 고배율사진 결과와도 일치함을 알 수 있었다. 그리고 액적의 공기류에 의한 변형과정을 무차원 변형계수를 도입하여 액적의 변형에 의한 공기항력영향을 고려 할 수 있었다. 이 모델은 분사과정이 포함된 여러 응용조건에 기본적으로 적용될 수 있는 모델이라 생각된다. TAB 모델의 경우 적절한 Breakup time constant 결정을 위한 여러 모델변수에 대한 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본연구는 1995 년도 학술진흥재단의 학술연구조성비(신진연구과제)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ranger A.A. and Nicholls J.A., "The Aerodynamic Shattering of Liquid Drops," AIAA J., Vol . 7, pp.285-291,1969.
2. Wu P.K. and Feath G.M., "Aerodynamic effects on Primary Breakup of Turbulent Liquids," Atomization and Spray, Vol. 3, pp.265-289,1993.
3. Mahoney T.J. and Sterling M.A., "The Breakup Length of Laminar Newtonian Liquid Jets in Air," ICLASS-1978, Tokyo,1978.
4. Krzeczowski S.A., " Measurement of Liquid Droplet Disintegration Mechanism," Int. J. Multiphase Flows,

- Vol. 6, pp.227-239, 1980.
5. Rayleigh, W.S., " On the Instability of Jets," Proc. London Math. Soc., Vol. 4, p 10.,1878.
6. Pilch M. and Erdman C.A., "Use of Breakup Time Data and Velocity History Data to Predict the Maximum Size of Stable Fragments for Acceration-Induced breakup of Liquid Drop," Int. J. Multiphase Flows, Vol.13, pp.741-757,1987.
7. Amsden A.A., O'Rourke P.J. and Butler T.D., "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory Report No. LA-11560-MS,1989.
8. Liu A.B. and Reitz R.D., "Mechanisms of Air-Assisted Liquid Atomization," Atomization and Sprays, Vol. 3, pp.1-21,1992.
9. Hwang S.S., Liu Z. and Reitz R.D., "Breakup Mechanisms and Drag coefficients of High Speed Vaporizing Liquid Drops," Atomization and Sprays, accepted, 1996
10. O'Rourke P.J. and Amsden A.A., "The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup." SAE 872089, 1987.
11. Reitz R.D., " Modelling Atomization Processes in High -Pressure Vaporizing Sprays," Atomization Sprays Technology, Vol . 3, pp.309-337, 1987.