

2유체 분무 액적의 거동에 관한 실험 및 수치 해석적 연구

Experimental and Numerical Study on the Air-assist Atomizer Spray Droplets

김동일, 오상현
D.I. Kim, S.H. Oh

Abstract

An experimental and numerical study of a spray flow is performed to investigate the spray characteristics using an air-assisted atomizer. A Partical Dynamic Analyzer(PDA) is used to measure SMD, drop velocity, and drop number density whose the initial conditions have considerable effect on the numerical results. The measured experimental data have been used to asses the accuracy of model predictions. Numerical investigation is made with the Eulerian - Lagrangian formulism. Turbulent dispersion effects using a Monte-Carlo method, turbulent modulation effect and entrainment of air are also numerically simulated.

Results show that the numerical predictions of SSF(Stochastic Separated Flow) analysis yielded reasonable agreement with the experimental data. However, the model calculations for small drops produced the inconsistent numerical results due to the effect of surrounding air entrainment.

주요기술용어 : Measurement Technique(측정기술), Numerical Model(수치계산), Turbulent Modulation effect(난류변조기법), Air Entrainment(공기유인)

기호설명

<p>C_D : drag coefficient</p> <p>C_1, C_2, C_n : coefficients in turbulent model</p> <p>d_p : drop diameter</p> <p>D_{32} : Sauter mean diameter</p> <p>G_k : turbulence energy production term</p> <p>g : gravity</p> <p>k : turbulent kinetic energy</p> <p>L_c : eddy size</p> <p>N : normal(Gaussian) distribution</p> <p>n : number of drops represented by a computational drop</p>	<p>P : present grid point</p> <p>p : pressure</p> <p>Re : drop Reynolds number</p> <p>r : radial coordinate</p> <p>$Sp \varphi$: source term due to interactions between gas and drops</p> <p>$S \varphi$: source term</p> <p>s : standard deviation</p> <p>U, u, u' : instantaneous, mean and fluctuating axial velocity components</p> <p>V, v, v' : instantaneous, mean and fluctuating radial velocity components</p>
Subscript	Superscript
<p>i : ith direction</p> <p>eff : effect</p> <p>I, J : index to identify a grid node</p> <p>p : dispersed phase</p>	<p>k : kth computational drop</p> <p>x : x directional components</p> <p>y : y directional components</p>

1. 서론

분무는 내연기관, 액체로켓, 가스터빈 기관 등과 같은 연소 시스템에 광범위하게 사용되고 있다. 연소 시스템에 이용되는 분무 특성을 이해하기 위해 많은 연구가 수행되고 있으나, 분무에서 발생하는 제반 사항을 모두 고려하는 것은 불가능하다. 그러나 최근 컴퓨터의 발달과 분무에 관한 계측장비 및 측정기술의 진보로 분무에 관한 연구가 과거에 비하여 활발해지고 있다. 실험적 연구는 주로 분무각, 액적의 궤적, 액적의 속도, 그리고 액적크기 분포 등의 측정에 집중되어 있다. 분무의 이론적 해석은 액적과 난류의 상호작용에 대한 연구가 최근에 많이 수행되고 있지만, 등방성 난류와 난류 분산의 영향과 같은 기본적인 문제에 대한 회박분무의 해석에 국한되고 있다.

분무의 해석에 있어서 어려운 점은 액적/난류간의 상호작용, 즉 액적의 난류 분산, 액적의 존재에 의한 연속상의 변동인 난류 변조(turbulence modulation), 그리고 난류의 직접적인 영향을 받는 상간의 에너지 전달을 명확히 정의하는 것이다.

미립화, 증발, 혼합, 그리고 연소의 특성을 정확히 예측하기 위해 분무의 초기조건의 중요성이 대두된다. 특히, 분사기 출구 부근의 거동은 모든 액체 유동간의 천이와 회박분무영역의 시작을 나타내는 액적의 분산을 포함한다. 이 출구 부근의 분무는 구형이라기 보다는 불규칙적인 형상을 가지고, 액적 간의 충돌, 상간의 전달물에서 액적 체적부분의 영향, 그리고 액적의 분열과 같은 복잡한 현상을 수반하고 있다. 이러한 분무 초기조건의 부정확성은 분무모델 개발과 해석 결과에 한계를 가져오고 있다. 다음은 대표적인 이론해석의 연구동향이다.

Dukowicz⁽¹⁾는 등온 액체분무를 주위 기체에

분사하여, 그 거동을 계산하였다. 그는 주위 기체의 난류운동이 액적의 분산에 미치는 영향을 통계적인 방법을 이용하여 계산하고, 디젤 분무 실험과 비교하였다. 그래서 그는 분무의 도달거리가 계산치와 실험치가 상당히 일치함을 보였으나, 분사기 근처의 데이터의 신뢰성을 획득하는데는 실패하였다.

Gosman과 Ioannides⁽²⁾는 기존의 액적 모델에 난류분산 효과의 통계적 방법론을 포함한 모델로 확장하였다. 그들은 액적의 초기 크기분포, 평균속도 등의 초기조건의 불명확성에 비해 분산효과는 작고, 분산의 정도는 액적궤적의 길이와 평균 와의 크기의 비에 의해 결정됨을 확인하였다. 그리고 정밀한 실험에 의한 정확한 초기치가 분무계산의 신뢰성 획득에 결정적인 영향을 미침을 아울러 밝혔다.

Chang 등⁽³⁾은 등온의 원추형 분무에 대한 2상의 난류구조를 규명하기 위하여 이론 및 실험적 연구를 병행하였다. 실험은 2성분의 PDP A를 이용하여 평균과 변동속도 성분, 액적의 수밀도, 그리고 액적의 크기 분포를 측정하였다. 이 측정을 통해 이론해석에 필요한 초기조건을 제공하였다. 이론해석은 기존의 해석 방식에 난류 변조 기법을 도입하였다. 그들은 이론과 실험치의 비교가 부분적으로 잘 일치한다고 보고하였으나, 실험용으로 선택한 분무모델은 스모크 발생에 의한 분무이기 때문에 실제 현상과는 다소 거리가 있다.

이와 같이 분무의 이해를 위한 상당한 진전이 이루어 지고 있으나 합리적이고 완전한 이해가 이루어지기는 아직 큰 차이가 있다. 궁극적으로 분무연소의 해석에 있어서 먼저 해결되어야 하는 것이 액적의 미립화 과정과 비연소시 분무의 특성에 관한 연구의 선행이다.

본 연구는 백등유를 이용한 비연소시 2유체 노즐에 의하여 형성되는 분무의 특성

PDA(Partical Dynamic Analyzer)를 이용하여 측정된 연료입자의 크기, 속도, 수밀도 등을 측정하였다. 분무계산에 많이 수행된 모델과 공기유인 효과를 도입하여 기존 모델의 2유체 분무 해석에 적용성을 검토하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

2.1.1 실험장치

본 연구에 사용될 노즐과 실험장치의 개략도는 Fig.1에 나타난 것과 같으며 노즐은 공기 보조(air - assist)형으로서 연료의 분출 직경은 0.2mm이며 연료와 공기는 노즐 내부에서 혼합-미립화되는 2유체 노즐의 내부혼합형으로 연료와 공기의 최종 분출 직경은 $\phi 3.2\text{mm}$ 이다. 2유체 분사 노즐에서 고속의 기류는 상대적으로 천천히 유동하는 액체 연료에 충돌하고, 연료는 내부 벽면을 따라 얇은 액체막을 형성한다. 이러한 막들이 큰 액적을 형성하기 위하여 분열되고 큰 액적은 공기의 전단력등에 의하여 미세한 액적으로 된다.

실험에 사용될 실험장치는 Fig.1의 개략도와 같이 공기 공급계와 연료 공급계로 크게 구분된다. 압축기에서 발생한 공기는 연료 유량 조절과 미립화용 공기로 사용된다. 미립화용 공기는 압력 조절기에 의해 1kgf/cm^2 이하로 조절되며 U-자관 마노메타에서 유량이 검증되고 노즐에 유입된다. 연료 유량은 일정 압력에서 일정 시간 동안 유리관에서 노즐로 흘러간 유량을 직접 측정함으로써 검증하였다. 이때 수두 차에 대한 오차를 없애기 위하여 연료탱크에 가해지는 압력은 $0.7\sim 1.0\text{kgf/cm}^2$ 범위에서 사용하였다.

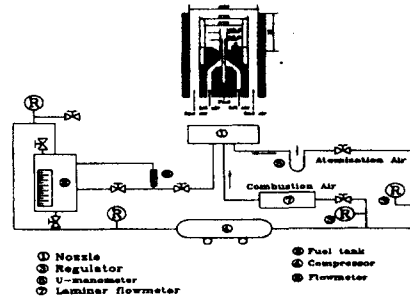


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.1.2 실험방법

액적의 크기와 속도의 동시측정은 PDA(Dntec model 58N10)를 이용하여 실시한다. PDA는 위상/도플러법을 이용함으로써 액적에 의하여 산란된 레이저광은 도플러 신호를 발생시키고 이러한 도플러 신호는 광 검출기의 위치에 따라 위상이 다르다는 것을 이용한다. 위상/도플러법은 액적의 크기가 위상차에 비례하는 것을 이용하여 위상차로부터 액적의 크기를 구하며 입자의 크기와 속도의 동시 측정이 가능한 것으로서 현재 분무 연구에 활발히 사용되고 있다. Fig.2는 이러한 광학계의 개략도로서 최대 출력 5W의 아르곤-이온 레이

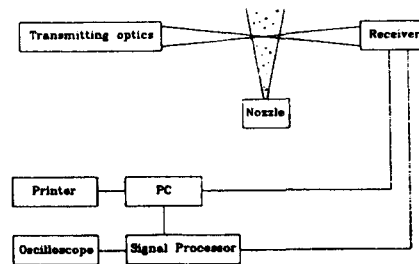


Fig.2 Schematic diagram of the optic system

저, 전달부, 이송계, 수광부, 도플러 신호 처리계, 개인용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 실험에 대한 상세한 정보는 참고문헌⁽¹²⁾를 참조하기 바란다.

2.2 이론해석

본 연구에서 연속상에 대해서는 오일러안(Eulerian) 기법을 사용하고, 분상상은 라그랑지안(Lagrangian) 기법을 사용한다.

2.2.1 연속상 방정식

현재의 분무유동에 대한 난류운동을 기술하기 위한 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 연속상에 대한 지배방정식은 질량보존과 난류운동에너지와 소산율에 대한 난류 방정식과 연계된 운동량 보존으로 이루어져 있다. 축대칭 2차원 정상상태의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \varphi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \varphi) + \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma \varphi) + S_\varphi + S_{\varphi p} \quad (1)$$

변수 $\varphi, \Gamma, S_\varphi$, 그리고 $S_{\varphi p}$ 는 참고문헌⁽³⁾에 수록되어 있다.

여기서 $S_{\varphi p}$ 는 연속상과 액적간의 상호작용에 기인한 소스항을 나타낸다.

연속상에 대한 액적의 효과는 운동량을 생성할 뿐만 아니라 난류 구조에도 영향을 미친다. 그런데 액적의 존재로 인한 난류 변조 기법은 지금까지의 대부분의 이론적 연구에 적용되지 않았는데, 이는 분무 모델이 회박유동이었기 때문이다. 난류 변조 기법은 크게 Mostafa, Mo-

ngia⁽⁶⁾의 모델과 Shuen 등⁽⁷⁾의 모델로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 Shuen 등⁽⁷⁾의 모델을 적용하였다.

$$S_{\rho k} = \overline{US_{\rho u}} + \overline{VS_{\rho v}} - u \overline{S_{\rho u}} - v \overline{S_{\rho v}} \quad (2)$$

$$S_{\rho \epsilon} = -C_3 \rho \frac{\epsilon}{k} (\overline{u' S_{\rho u}} + \overline{v' S_{\rho v}}) \quad (3)$$

여기서 $C_3 = 1.5$

2.2.2 분산상 방정식

액적은 연속상의 난류장을 통해 움직일 때 라그랑지안(Lagrangian) 방법을 이용하여 개개의 액적을 추적함으로써 계산한다. 이 계산은 근본적으로 통계적인 접근(Monte Carlo)방식이고, 분산상에 대한 통계적인 정보를 얻기 위해 적절한 수의 계산액적을 추적해야 한다. 이 각각의 계산액적(computational drops)은 같은 크기, 속도를 가지는 물리적 액적의 집단이다. 라그랑지안 방식으로 정의한 i 방향의 k 번째 계산액적의 위치, 속도에 관한 식은 다음과 같다.

$$\frac{dx_{pi}^k}{dt} = U_{pi}^* \quad (4)$$

$$\frac{dU_{pi}^*}{dt} = \frac{U_i - U_{pi}^*}{\tau_p^k} + g_i \quad (5)$$

$$\text{여기서 } \tau_p^k = \frac{4d_{pi}^* \rho_p}{3C_D^k |U - U_{pi}^*|}$$

$$U_i = u_i + u_i'$$

위의 식중 속도(U_i)는 순간적인 속도이다. 액적에 대한 항력 계수는 경험적인 식으로 주어진다.

$$C_b^* = \frac{24}{Re^*} \left[1 + \frac{(Re^*)^{2/3}}{6} \right] \quad , Re^* \leq 1000 \quad (6)$$

$$= 0.44 \quad , \quad Re^* > 1000 \quad (7)$$

여기서 액적의 레이놀드 수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re^* = \rho |U - U_p^*| d_p^* / \mu \quad (8)$$

k번째 계산액적의 궤적은 시간에 대해 속도를 바로 적분함으로써 결정한다.

액적은 와(eddy)의 수명(lifetime) τ_e 와 와내의 k번째 계산액적의 잔류시간 τ_r^k 중 최소의 시간에 대해 난류장의 와와 상호작용한다고 가정한다. 그래서 액적/와 간의 상호작용을 확실히 하기 위하여 Δt 는 다음의 정의를 만족한다.

$$\Delta t \leq \min(\tau_e, \tau_r^k) \quad (9)$$

$$L_e = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / \epsilon \quad (10)$$

와의 특성 크기가 (11)식으로 정의되는 소산 스케일로 가정하면, 와의 수명 τ_e 는 다음과 같이 계산한다.

$$\tau_e = L_e / |u'| \quad (11)$$

와내의 k번째 계산액적의 잔류시간은 아래의 (13)식에서 얻는다.

$$\tau_r^k = L_e / |U - U_p^*| \quad (12)$$

2.2.3 수치해석 절차

본 연구에서 연속상의 지배방정식을 풀기 위해 유한체적법(FVM)을 이용하여 이산화하고, Hybrid scheme을 대류·전도항에 적용한다. 계산은 SIMPLE 방식에 의거하여 수행하고, 엇갈림 격자계를 사용한다.

연속상에서 적용하는 k-ε 난류모델에 일관되게, 분산상에 의한 변동속도 u' 은 가우스 분포함수에 의해 임의 선택한다. 가우스 분포함수의 식은 다음과 같다.

$$G(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u'^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

여기서, $\sigma = \sqrt{(2/3)k}$; 표준편차

k; 연속상의 난류 운동에너지

그래서 각각의 Δt 에서 주어진 u' 는 가우스 분포함수에서 대응하는 값을 가진다. 액적의 순간속도성분은 식(5)의 비선형 상미분방정식을 축차적으로 적분함으로써 결정한다. 상간의 상호작용에 의한 운동량 소스항 S_{pp} 은 Crow 등⁽⁹⁾이 제시한 PSI-cell 방법에 의해 계산한다.

2.2.4 공기유인 계산

본 연구의 계산에 사용한 공기유인 효과는 Rico & Spalding⁽¹⁰⁾의 식을 수정하여 도입하였다. 이 식은 각 분무의 영역에 유인되는 공기량을 영역의 면적과 이에 수직하는 공기량의 곱으로 나타낸다.

$$M_a/M_n = 0.32h/D - 1 \quad (14)$$

(M_a : 유인되는 공기량, M_n : 노즐을 통해 들어오는 공기량, h: 노즐로부터의 축 거리, D: 노즐의 직경)

2.2.5 연속상의 경계조건

연속상의 분출속도 분포와 나머지 변수(k, ε, p 등)는 TEACH 코드의 식을 수정하여 사용하였고, 노즐 벽면에서는 벽법칙을 적용했다. 중심축상에서는 각 변수의 반경방향 구배를 0으로 두었다.

2.2.6 계산격자

본 연구의 계산에 사용한 축방향과 반경방향으로 51×51개의 격자를 생성했다. 분사되는 액적의 거동을 더욱 세밀하게 계산하기 위해서 축 중심부근에서는 격자의 간격을 좁게하고, 축에서 멀어질 수록 그 간격이 넓어지는 비균등간격 격자를 사용하였다.

2.2.7 액적의 초기조건

계산에 필요한 초기 조건은 다음과 같다.

D32	45 μm
최대 입경	100 μm
최대 분사각	25 °
초기분사 속도	12.5 m/s

액적의 궤적과 속도를 계산하기 위해 10~100 μm까지 다른 직경을 가진 10개의 액적군을 사용했고, 액적군은 600개의 계산 액적으로 구성되어 있다. 액적군의 액적분포와 수밀도 분포는 Nukiyama-Tanazawa 분포함수를 적용하였다. 액적의 초기 조건은 실험의 Z= 2mm 단면의 조건을 사용했다.

4. 결과 및 고찰

난류변조 기법이 포함된 기본적인 Stochastic Separated Flow(이하 SSF) 해석과 공기유인의 효과를 모델에 적용한 해석으로 예측한 결과를 실험결과와 비교하여 본 논문에서 나타내었다.

4.1 액적의 속도 분포

Fig.3(a),(b),(c)는 10 μm, 35 μm, 60 μm 입자의 Z=50 mm 단면에서의 속도를 실험치와 계산치를 비교해 나타낸 것이다. 본 연구가 비교

한 실험 연구에서 다른 주류영역은 외부로부터 유인된 기류에 편승해서 비행하는 입자와 노즐 출구로부터 직접 비행하여 오는 운동량이 큰 입자로 구성되는 중심부와 유인되는 주류 공

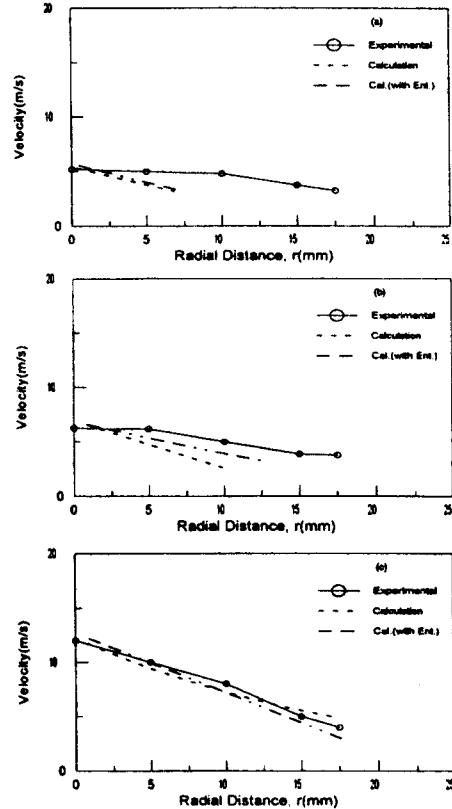


Fig.3 Distributions of Drop Velocity (Z=50mm, (a) d=10 μm, (b) d=35 μm, (c) d=60 μm)

기의 영향이 크게 작용하여 입자의 속도 변동이 큰 외주부(sheath region)로 구성되어 있다. 외주부는 중심부보다 액적의 운동량 감소가 빠르며 운동량을 잃은 입자는 유인된 공기에 편승하여 중심부로 이동한다.

계산과 실험 결과를 살펴보면 중심축에서 액적의 속도는 가장 크고 반경방향으로 액적의 축방향 속도는 감소한다. 이는 액적이 클수록

중심축에서 속도가 크고, 분무의 외주로 갈수록 감소폭은 크기 때문이다. 작은 입자는 난류분산에 민감하기 때문에 난류분산이 고려되지 않은 Deterministic Separated Flow(이하 DSF) 해석은 $10\mu\text{m}$ 와 같은 미세한 입자의 속도거동을 해석치 못하기 때문에 결과를 수록치 않았다. 실험치와 이론치의 결과비교는 $10\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ 에서 오차가 특히 크다. 그 원인은 먼저 계산 액적의 수가 너무 적어 액적의 분산이 작아서 실험결과에 미치지 못한다. 주위 공기 유인이 무시된 계산결과에서 작은 액적 $10\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$ 는 실험치에 비해 빨리 속도 감소하고 분산거리도 짧다. 특히, $35\mu\text{m}$ 의 액적의 계산에서 공기 유인이 고려된 계산결과는 다소 분산거리도 증가하며 실험결과에 보다 일치하고 있다. 이는 유인되는 공기량의 계산이 축 방향으로의 거리 및 면적에 비례하기 때문에 $10\mu\text{m}$ 와 같이 중심부에 잔존하는 미소 액적의 계산시 실제와 거리가 있다. 그런데 분산거리는 유인효과가 무시된 계산보다 고려된 계산결과가 좀더 반경방향으로 확산했음을 알 수 있다. $60\mu\text{m}$ 입자의 속도 분포는 두 계산치의 예측이 거의 비슷하고 실험치와도 잘 맞는다. 따라서 액적이 클수록 난류 변동과 공기유인의 효과는 작아짐을 알 수 있다.

Fig.4(a),(b),(c)는 $10\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ 입자의 $Z=100\text{mm}$ 단면에서의 속도분포를 비교한 것으로 50mm 단면과 비교하여 하류로 갈수록 액적의 속도 분포는 균일해진다. 또한, 공기 유인의 과 공기유인의 효과는 작아짐을 알 수 있다.과 공기유인의 효과는 작아짐을 알 수 있다. 효과는 액적이 커질수록 50mm 단면에 비해 100mm 단면에서 큰 영향을 미쳐 실험결과에 일치하고 있다. 그리고 작은 액적 뿐만 아니라 큰 액적($60\mu\text{m}$)의 경우 외부로 갈수록 실험치와의 오차가 조금 커진다. 이 결과는 반경방향으로 갈수록 유인되는 공기량이 증가하여 자기

계적을 가지고 분무외각으로 비행하는 큰 액적의 운동량에 공기유인 효과가 크다는 것을 나타낸다.

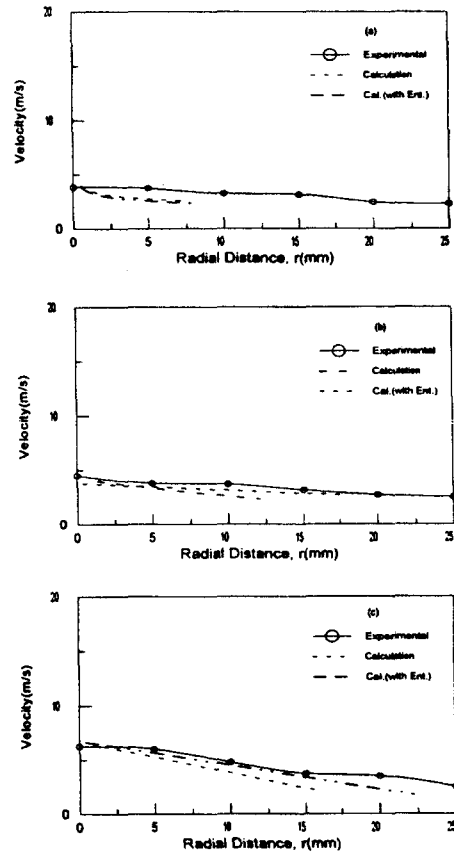


Fig.4 Distributions of Drop Velocity ($Z=100\text{mm}$, (a) $d=10\mu\text{m}$, (b) $d=35\mu\text{m}$, (c) $d=60\mu\text{m}$)

4.2 액적의 축방향 속도 및 상대속도 분포

Fig.5(a),(b),(c)는 $10\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$ 입자의 축방향 속도를 중심축상에서 실험치와 계산치를 비교해 나타낸 것이다.

$10\mu\text{m}$ 입자는 실험치와 계산치가 많은 차이를 보이고 있다. 특히 앞 난에서도 언급한 것처럼 $10\mu\text{m}$ 입자의 거동은 DSF 방법으로는 해석이 부정확하고 SSF 방법도 실험치와 다소 일

치하지만 기류와 액적의 상대속도가 큰 노즐 부근에서 많은 오차가 있다.

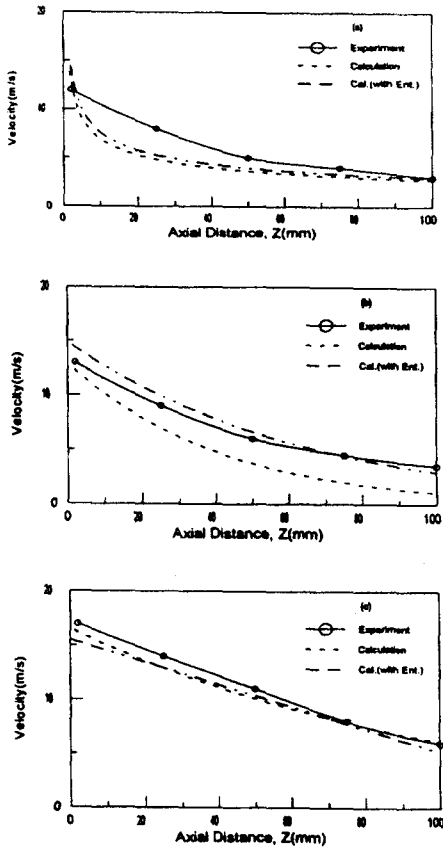


Fig.5 Axial Variations of Drop Velocity
((a) $d=10 \mu\text{m}$, (b) $d=35 \mu\text{m}$, (c) $d=60 \mu\text{m}$)

액적의 크기가 작을수록 관성력이 작아 기류에 쉽게 종속되기 때문에 $10 \mu\text{m}$ 입자의 실험치와 계산치가 다른 것은 노즐 부근에서의 계산이 실제 속도분포를 정확하게 예측할 수 없다고 말할 수 있다. 공기 유인효과가 고려된 계산이 고려되지 않는 계산보다 노즐 부근에서 보다 실험결과에 일치함을 보여준다. 반면에 $35 \mu\text{m}$ 와 $60 \mu\text{m}$ 입자의 경우((b),(c))는 계산치가 실험

치에 잘 일치하고 있지만, 노즐 부근에서 다소 차이가 있고, 공기 유인의 효과는 상류쪽에서 나타난다. Fig.6은 $10 \mu\text{m}$, $35 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$ 입자와 기류 상대속도를 축방향으로 SSF와 DSF 방법으로 계산한 것을 나타내었다.

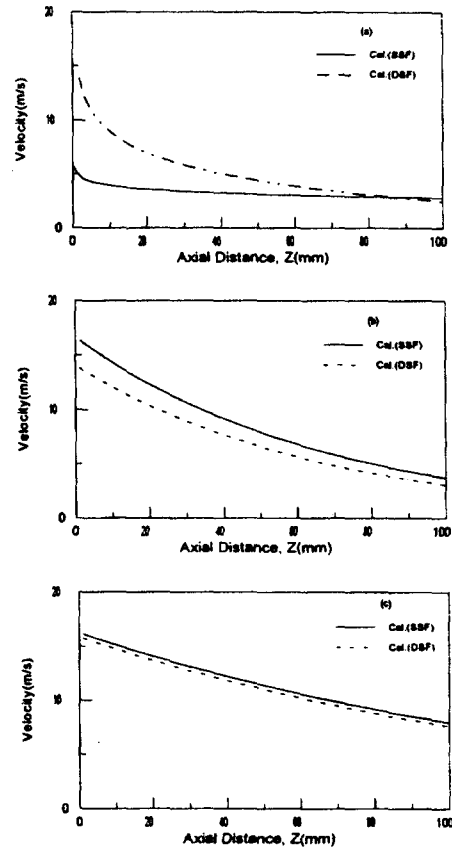


Fig.6 Axial Variations of Relative Velocity
((a) $d=10 \mu\text{m}$, (b) $d=35 \mu\text{m}$, (c) $d=60 \mu\text{m}$)

이 상대속도의 계산결과와 축방향 속도분포를 비교해 보면 상대속도가 큰 상류쪽에서 속도분포의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 상대속도가 크면 유인되는 공기량이 많아지기 때문에 공기유인 효과가 분무계산에 필요하다는 것

을 나타낸다. 특히, 액적이 작을수록 큰 액적에 비해 상대속도의 크기는 작지만, 상대적으로 공기의 유인효과는 큰 액적에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

4.3 액적의 난류강도

Fig.7은 반경방향에 따른 액적의 난류강도 ($\sqrt{(V_r)^2/V_p}$)를 실험치와 공기유인이 포함된 계산과 포함되지 않은 계산결과를 각 단면에서 나타낸 것이다. 실험 결과를 보면 Z=50mm 단면에서 분무 중심보다 분무 외각으로 갈수록 약간 증가하는것은 주위 공기의 유인에 의해 운동량이 감소한 액적이 영향을 받아 분무 외각에서 난류강도가 높기 때문이다.

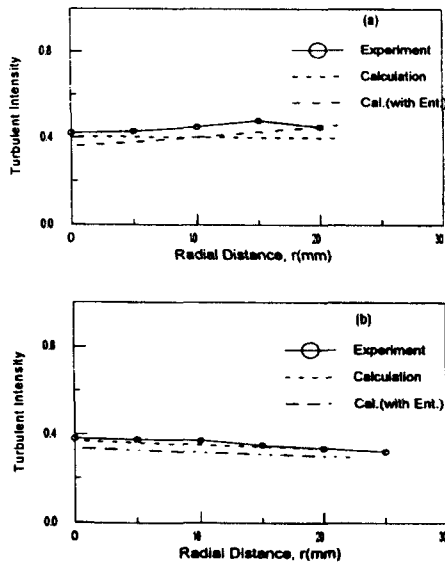


Fig.7 Distributions of Turbulent Intensity of Drop ((a) Z=50 mm, (b) Z=100 mm)

하류로 갈수록 분무 중심부보다 분무 가장자리에서 상대적으로 크게 감소함으로써 단면에 따른 분포가 비교적 균일하여 진다. Z=50mm에

서의 두 계산치에 의한 액적의 난류강도는 분무 중심과 외각이 거의 균일하게 나타나지만, 공기유인이 포함된 경우는 미약하게 액적의 난류강도가 증가하는 것이 나타난다. 이 오차의 가장 큰 원인은 주위 공기유인 효과가 액적의 분산거리에만 영향을 미치고 운동량에는 큰 영향을 미치지 못했기 때문이다. 하류로 갈수록 분포가 균일해지는 것은 기류의 운동량이 크게 감소하고 주위로 부터 유인되는 공기량이 미소하여 액적에 영향을 미치지 못하기 때문이다.

4.4 분무의 SMD

Fig.8은 연소기 선단으로부터 거리 Z=50 mm 단면과 Z=100 mm 단면에서의 반경방향에 따른 액적 크기의 분포를 실험치와 계산치를 비교해 나타난 것이다.

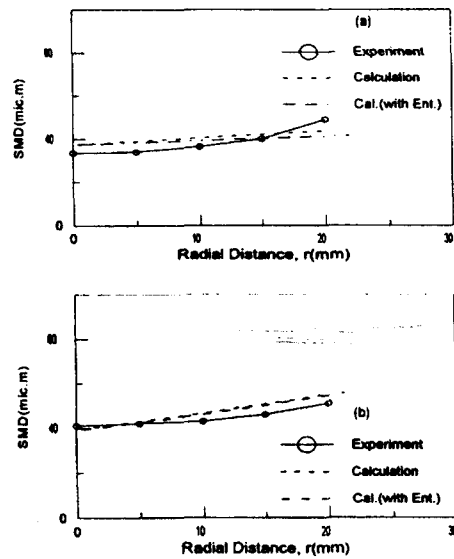


Fig.8 Distributions of Sauter Mean Diameter of Drop ((a) Z=50 mm, (b) Z=100 mm)

유동장에서 액적의 크기분포는 난류분산 효과와 상대속도에 따라 변화노즐중심에서는 관성

력이 작아진 미소입자가 존재하고 외각으로 멀어짐에 따라 기류에 종속되지 않고 비행한 큰 액적이 존재하여 분무 중심부보다 액적의 크기가 크다. 이러한 경향은 실험치와 계산치가 일치한다.

Z=50 mm 단면조건에서 공기유인 효과가 포함되거나 되지않은 두 해석 모두 거의 유사한 경향을 보여주며 실험치와 일치한다. 결과를 수록치 않은 DSF 해석은 난류분산이 무시되었기 때문에 액적 크기는 증가하지 않고 균일한 결과를 나타내었다. Z=100 mm 단면조건에서는 두 결과가 거의 일치하는데, 50 mm 단면보다 하류로 갈수록 난류분산의 효과는 작다.

액적의 크기분포의 계산을 통해서도 공기유인의 효과가 액적의 운동량에는 영향을 미치지 않는다는 액적 속도의 계산과 같은 결과가 나타났다. 이로부터 공기유인 효과가 액적의 크기 분포에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다.

4.5 액적의 수밀도와 질량유속 분포

Fig.9는 분무에서 분무입자의 공간적 수밀도를 실험치와 이론치를 비교한 것으로 종축은 단위 체적(cc)에 포함된 분무입자의 수를 나타내고 횡축은 분무 중심으로부터 반경방향으로의 거리이다. Z=50mm 단면 중심축에서 2500 개/cc이고 Z=100mm 단면에서는 약 1800개/cc 정도로 분무 내측은 감소하였으며, 분무 외측의 수밀도는 증가하였음을 실험과 계산 결과에서 보여주고 있다. 이는 액적의 축 방향 속도 감소에 의한 분무 가장자리로의 확산에 의해서 분무의 폭이 증가함에 따라 분무군 중심에서 액적의 수밀도는 감소하고 외측에서는 증가했기 때문이다.

Fig.11은 분무의 Z=50mm 단면과 Z=100mm 단면에서 각 액적들의 질량유속을 계산한 것이

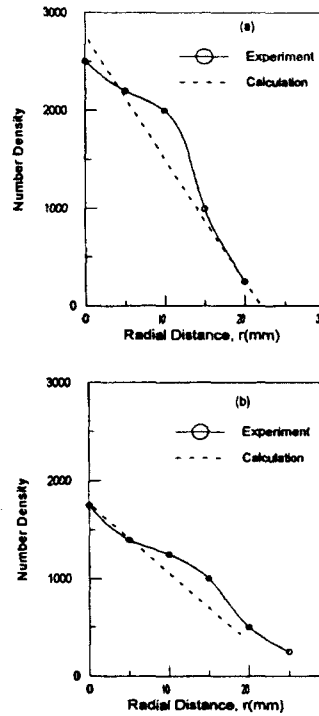
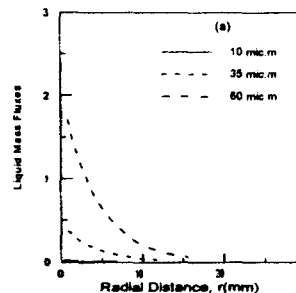


Fig.9 Distributions of Number Density of Drop ((a) Z=50 mm, (b) Z=100 mm)

다. 결과는 실험치가 없기 때문에 수밀도 분포를 이용하여 계산하였다. 종축은 단위시간(s), 단위면적(m²)당 운동한 액적의 질량(kg)을 보여준다.



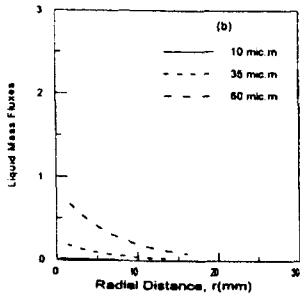


Fig.10 Distributions of Liquid Mass Fluxes
((a) Z=50 mm, (b) Z=100 mm)

이 결과를 보면 큰 액적은 자기 고유의 비행각을 가지고 분무의 외각으로 운동하고 보다 작은 액적은 대부분이 분무 내부에 한정되어 있음을 알 수 있다.

5. 결론

PDA를 이용한 2유체 분무의 측정결과를 이용하여, 분무의 수치계산을 수행했다. 실험치와 계산치를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액적이 작을수록 속도 분포에 대한 공기의 유인 효과는 큰 액적에 비해 상대적으로 크다.
2. 실험과 모델계산에서 액적과 기류의 상대속도는 노즐 부근에서 가장 크고, 하류로 갈수록 감소한다.
3. 액적의 난류강도의 실험결과는 노즐 부근에서 크고 분무 외주부로 갈수록 증가하며, 하류로 갈수록 감소하고 분포가 균일하여 진다.
4. 액적의 SMD와 수밀도 분포는 실험치와 거

의 일치하고 있으나, SMD 분포의 경우 노즐 부근과 분무의 외주부에서 실험결과와 다소 차이를 보이고 있다. 또한, 공기유인 효과가 작다.

5. 난류변조 기법이 포함된 SSF 해석과 여기에 공기유인 효과를 고려한 모델을 실험과 비교해 볼때, 2유체 분무 유동장 해석시 큰 액적의 경우 기존의 SSF 모델을 적용할 수 있고, 작은 액적(35 μ m 이하)의 경우는 공기의 유인 효과가 대단히 크기 때문에 모델에 반드시 고려하여야 한다.

6. 참고문헌

1. Dukowicz, J.K., "A Particle-Fluid Numerical Model for Liquid Sprays", J. of Computational Physics, Vol.35, pp.229~253, 1980
2. Gosman, A.D., and Ioannides, E., "Aspects of Computer Simulation of Liquid-Fueled Combustors", AIAA paper 81-0323, 1981
3. Chang, K.C., Wang, M.R., Wu, W.J., and Hong, C.H., "Experiment and Theoretical Study on Hollow-Cone Spray", J. of Propulsion and Power, Vol.9, No.1, pp.28~34, 1993
4. O'Rourke, P.J., "Statistical Properties and Numerical Implementation of a Model for Droplet Dispersion in a Turbulent Gas", J. of Computational Physics, Vol.83, pp.345~360, 1989
5. Chang, K.C., and Wu, W.J., "Sensitivity Study on Monte Carlo Solution Procedure of Two Phase Turbulent Flow", Numerical Heat Transfer, Vol.25, pp.1~22, 1993
6. Mostafa, A.A., Mongia, H.C., "On the interaction of particles and turbulent fluid flow", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol.31, No.10, pp. 2063-2075, 1988

7. Shuen, J.S., Soloman, A.S.P., Zhang, Q.F., and Faeth, G.M., "Structure of Particle-Laden Jets: Predictions and Measurements", *AIAA J.*, Vol.23, No.3, pp.396~404, 1985
8. Ruff, G.A., Bernal, L.P., and Faeth, G.M., "Structure of the Near-Injector Region of Non-evaporating Pressure-Atomized Sprays", *J. of Propulsion and Power*, Vol.7, No.2, pp.221~230, 1991
9. Crow, C.T., Sharma, M.P., and Stock, D.E., "The Particle Source-In Cell (PSI-CELL) Model for Gas-Droplet Flows", *J. of Fluids Engineering*, Vol. 99, pp.325~332, 1977
10. Ricou, F., P., R. and Spalding, D.B., "Measurement of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", *J. of Fluid Mech.*, Vol.51, pp.773~779, 1972
11. Briffa, F.E.J., and Dombrowski, N., "Entrainment of Air into a Liquid Spray", *AIChE. J.*, pp. 708~717 1966
12. 오상현, 백민수, "2 유체 분사노즐을 이용한 분무 및 연소특성에 관한 실험적 연구", *대한기계학회논문집*, 제19호, 제2권, pp. 1990~2000, 1995