

공기유입을 고려한 2 유체 분무의 실험 및 수치해석적 연구

성영주* · 김동일** · 오상현***

An Experimental and Numerical Study On Structure of Twin-fluid Spray with Air Entrainment

Seoung Young Ju, Kim Dong Il(Graduate School, Pusan National University)
Oh Sang Heun (Professor, Pusan National University)

Key Words : Spray(분무), Air entrainment(공기유입), Twin-fluid Nozzle(2 유체노즐).

Abstract

The entrainment of air into spray jets has been considered. Entrainment is defined as the quantity of ambient gas that is drawn into a spray. Numerical study is performed to investigate an air entrainment into spray jets and compared with results of experiment of air entrainment. Experimental measurements were performed with PDA and PIV system. Experimental and numerical results show that the air entrainment was affected droplet size and velocity.

기호설명

- ρ : 밀도
- u, v : 축방향과 반경방향 속도
- x, r : 축방향과 반경방향 거리
- U_i : 순간 축방향 속도 성분
- u_i : 평균 축방향 속도 성분
- u_i' : 변동 축방향 속도 성분
- S_{pp} : 기상과 액상의 상호작용으로 인한 생성항
- S_{ϕ} : 생성항
- g : 중력
- C_D : 항력 계수
- m : 질량 유동율
- Ψ : 무차원 공기 유입율
- d : 직경

Subscript

- i : Lagrangian 방식으로 정의한 I 방향
- p : 분산상
- t : 총합
- i : 노즐의 출구부분

Superscript

- k : k 번째 계산 액적

1. 서론

공기 유입은 연료가 노즐로부터 분사될 때 분무의 경계면에 수직하게 유입되는 공기의 양으로 정의 된다. 액체 연료의 연소, 분무 건조기, 가스 세척기 등과 같은 많은 산업용 장치의 성능은 분무와 주위 기체의 혼합에 의존한다.

가스터빈과 디젤 엔진 같은 연소장치에서 공기의 유입율은 국부적인 당량비를 조절하므로써 NOx 생성에 영향을 미친다. 그리고, 노에서 더욱 높은 공기 유입율은 분무의 감속을 증대시키고 액적을 더욱 서서히 움직이게 하여 액적의 잔존시간에 큰 영향을 미친다. 이처럼 분무에 있어 중요한 역할을 하는 공기의 유입량에 관한 다양한 연구가 이에 근거 하여 수행되고 있다.

Ricou-Spalding⁽¹⁾은 일정한 압력하에서 정지한 공기에 여러 가지 기체(공기, 이산화탄소, 프로판, 수소)를 분사하여 형성되는 난류제트에서 축방향으로의 질량 유동율을 측정함으로써 공기 유입율에 대한 모델을 제시하였다.

Briffa 와 Dombrowski⁽²⁾는 고체입자(lycopodium powder)를 평판 분무의 내, 외부 공기에 섞어 보냄으로써 유입된 공기의 속도를 측정하였고 이를 사

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계기술 연구소

*** 부산대학교 기계공학부 기계기술 연구소

진으로 촬영하였다. 여기서, 분무 내부의 속도는 직경 15 μm 인 액적의 속도로 가정하였다. 모델은 유입된 질량 유동률과 축방향 거리 사이의 선형적인 관계를 증명하여 만들었다. 그러나, 비선형적인 관계가 실험에서 발견되었다.

MacGregor⁽³⁾는 구형 액적의 항력과 분류의 운동량에 근거한 간단한 모델을 개발하였으며 이를 시험하기 위해 Ricou-Spalding⁽¹⁾의 실험장치를 이용하였다. 두개의 노즐에서 얻어진 실험 결과는 입구 질량 유동률과의 선형적인 관계를 보여 주었다. 그러나, 실험 결과는 공기 유입이 거의 발생하지 않거나 아예 발생하지 않는 임계 질량 유동률이 있음을 나타내었다. 하지만, 그 모델의 단순성으로 인하여 실험과 계산의 결과는 유사한 경향을 보였으나 일치하지는 않았다.

이외에도 많은 연구가 공기 유입과 관련하여 수행되어졌으나 아직까지는 분무시 액적의 크기나 속도에 한정되고 있으며 공기 유입에 관한 명확한 해석은 이루어지지 않고 있다.

이번 연구에서는 선행된 실험을 바탕으로 하여 2 유체 분무 노즐로부터 형성되는 분무의 특성과 함께 분무 경계면에서의 공기 유입량을 계산하기 위한 좀더 나은 모델을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

선행연구⁽⁸⁾⁻⁽⁹⁾에서 사용한 실험장치는 다음과 같다.

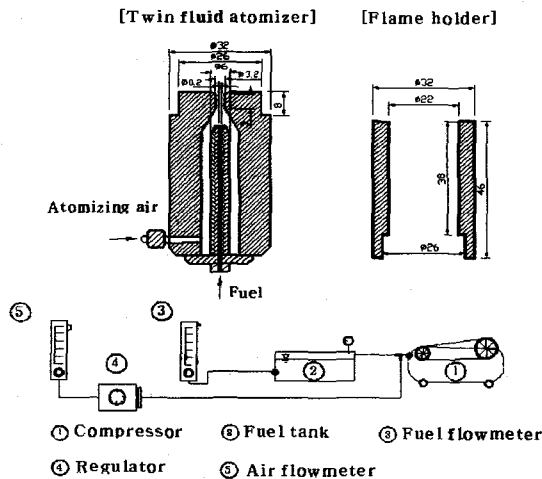


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에는 공기보조(air-assist)형 노즐을 이용하였으며, 장치는 크게 공기 공급계와 연료 공급계로

분류된다. 또한, 미립화용 공기는 압력 조절기에 의해 1kgf/cm² 이하로 조절되며 마노미터에서 유량이 검출되고 노즐에 유입된다. PIV 와 PDA system 에 대한 자세한 설명은 참고 문헌⁽⁹⁾을 참조하기 바란다.

2.2 실험 조건

실험에서는 연소시 대표적인 안정화 화염이 생성되는 조건으로서 다음과 같이 3 가지로 주었다.

Table 1. Experimental conditions

condition	A	B	C
Fuel(cc/min)	21	21	21
Air(l/min)	32	29	25

이번 연구에서는 공기 유입에 대한 좀더 정확한 계산을 위하여 조건 A 의 결과를 이용하였다.

3. 수치해석

3.1 연속상의 지배 방정식

연속상에 대한 지배 방정식은 질량 및 운동량 방정식과 난류 운동 에너지와 소산율에 대한 난류 방정식으로 이루어져 있다. 축대칭 2 차원 정상상태에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) = \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_p \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_p \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_\phi + S_{p\phi}$$

3.2 분산상의 지배 방정식

액적이 연속상의 난류장을 통해 움직일 때 라그랑지안 방법을 이용하여 개개의 액적을 추적함으로써 계산한다. 이 계산은 몬테 카를로의 통계적인 방식을 이용하였고, 분산상에 대한 통계적인 정보를 얻기 위해 적절한 수의 계산 액적을 추적해야 한다. 이 각각의 계산액적은 같은 크기, 속도를 가지는 물리적 액적의 집단이다. 라그랑지안 방식으로 정의한 i 방향 k 번째 계산 액적의 위치, 속도에 관한 식은 다음과 같다.

$$\frac{dx_{pi}^k}{dt} = U_{pi}^k \quad (2)$$

$$\frac{dU_{pi}^k}{dt} = \frac{U_i - U_{pi}^k}{\tau_p^k} + g_i \quad (3)$$

여기서, $\tau_p^k = \frac{4d_p^k \rho_p}{3C_D^k |U - U_p^k|}$, $U_i = u_i + u_i'$

3.3 수치해석 절차

이번 연구에서 연속상의 지배방정식을 풀기위해 유한 체적법(FVM)을 이용하여 이산화하였고 hybrid scheme 을 대류, 확산항에 적용하였다. 계산은 psi-cell 모델을 이용하여 하였으며, 압력등의 진동해를 방지하기 위해 엇갈림 격자계를 사용하였다. 계산에 필요한 분산상의 초기조건은 다음과 같다.

Table 2. Initial conditions of droplet

SMD(D_{32})	50 μ m
Maximum Diameter of droplet	100 μ m
Maximum Spray angle	30°
Initial velocity	12.5m/s

액적의 궤적과 속도를 계산하기 위해 10~100 μ m 의 다른 직경을 가지는 10 개의 액적군을 사용하였고, 액적군은 600 개의 계산 액적으로 구성되어 있다. 액적의 속도, 크기, 그리고 수밀도 분포등의 초기 조건은 Z=2mm 단면의 조건을 사용하였다.

3.4 계산격자

본 연구에 이용된 계산격자는 축방향 200mm , 반경 방향 75mm 지점을 계산영역으로 정하였으며, 분사되는 액적의 거동을 더욱 세밀하게 관찰하기 위해 축 중심부근에서는 격자의 간격을 좁게하고 반경방향으로 갈수록 간격이 넓어지는 비균등 간격 격자를 사용하였다. 이는 Fig 2 에 나타내었다.

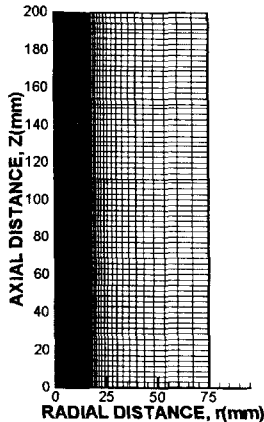


Fig. 2 Grid system (71 x 71)

3.5 공기 유입

공기 유입량을 계산하기위해서 많은 방법들이 있다. 하지만, 이번 연구에서는 먼저 축방향 속도 성분이 거의 0 에 가까운 부분을 경계면으로 정하였고 또 이때의 반경방향 속도를 이용하여 주위

공기의 유입량을 계산하는 방법을 사용하였다.

Fig 3 의 분무 경계면에서 공기의 유입 속도 V 를 구할 수 있다. 이 반경 방향의 속도를 이용하여 축방향 거리 X 에서의 국부적인 공기량을 다음의 미분식을 계산하여 구하였다.

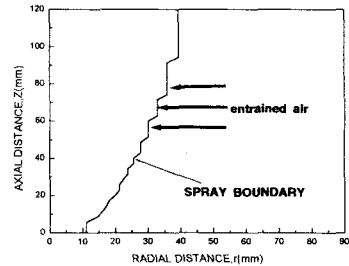


Fig. 3 Define of the Spray Boundary

$$\frac{dm_e}{dx} = 2\pi\rho_g r_i v_i \quad (4)$$

노즐 선단부에서 축방향 거리 까지의 공기 유입량은 식(4)를 직접 적분한 식으로부터 계산하여 구하였다.

$$m_e = 2\pi\rho_g \Delta x r_i v_i \quad (5)$$

이와 비교하기 위하여 MacGregor⁽³⁾가 분무에 대하여 제안한 식을 도입하였다.

$$\frac{m_i}{m_e} = K \left(\frac{x}{d} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2} \quad (6)$$

여기서, $m_e = m_i - m_l$ 이므로, 식 (6)을 다시 정리하면 다음과 같다. 실험과의 비교를 위하여 공기유입 계수를 수정 도입하였다.

$$m_e = K \left(\frac{x}{d} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2} (m_i - m_l) \quad (7)$$

전체 질량 유동율은 유입되는 공기량과 초기에 분사되는 공기량의 합으로 정의될 수 있다.

$$m_i = m_e + m_l \quad (8)$$

ψ 는 무차원 공기유입율을 나타낸다.

$$\psi = \frac{m_e}{m_i} = \frac{m_i}{m_i} - 1 \quad (9)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 분무의 SMD

Fig 4 는 노즐 선단으로부터 거리 Z=20 mm, 50 mm 그리고, 100 mm 단면에서의 반경방향에 따른 액적 크기의 분포를 실험치와 계산치를 비교하여 나타낸 것이다. 유동장에서 액적의 크기분포는 난류 분산 효과와 상대 속도에 따라 변한다. 노즐 중심부에서 경향은 실험치와 계산치가 거의 일치

하지만, 계산에서 난류 분산의 효과를 과소평가하였기 때문에 액적의 크기 분포는 거의 균일한 분포를 나타내며 계산에서 사용한 액적의 분산이 실

험을 따라가지 못해 비교적 공기의 유입이 많은 상류측에서는 실험과 계산이 잘 일치하지 않으며 공기의 유입이 적은 하류로 갈수록 잘 일치한다.

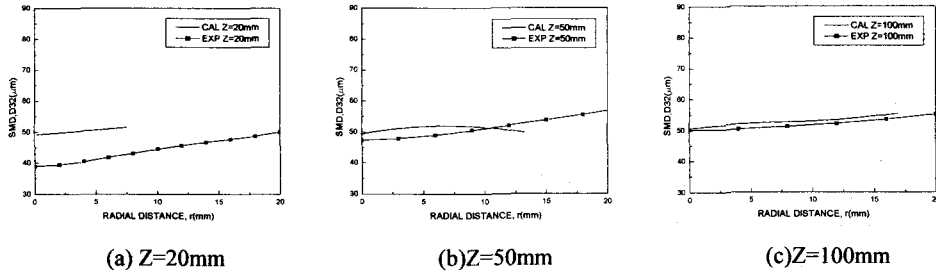


Fig. 4 Distribution of SMD of Drop
((a) Z=100 mm (b) Z=50 mm (c) Z=20 mm)

4.2 액적의 속도분포

Fig.5는 각각 Z=20,50,100 mm 단면에서의 10, 35, 60 μm 인 액적들에 대하여 실험결과와 계산결과를 비교하여 나타낸 것이다. 계산과 실험의 결과를 살펴보면 중심축에서 분무 경계면으로 갈수록 액적의 축방향 속도는 감소한다. 이는 액적이 클수

록 중심축에서의 속도가 크고, 분무의 경계면으로 갈수록 감소폭이 크기 때문이다. 이러한 경향은 실험과 계산모두에서 유사한 경향을 나타내고 있다.

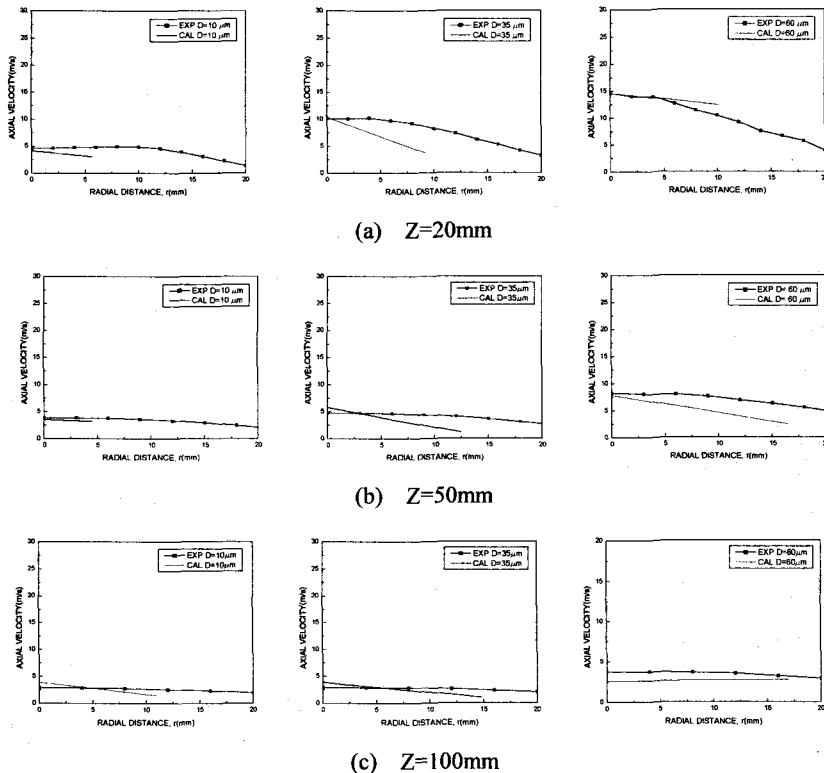


Fig. 5 Distribution of Drop Velocity
((a)d=10 μm, (b)d=35 μm, (c)d=60 μm)

실험치와 계산치의 결과 비교에서는 10 μm, 35 μm 같은 작은 액적들에서 특히, 그 차이가 크게 나타났다. 이는 먼저, 본 연구에서 이용한 액적의

수가 너무 작았기 때문에 실험 결과에 미치지 못하였고 계산과정에서 주위 공기의 유입을 과소 평가 하였기 때문에 비교적 작은 액적인 10, 35 μm

액적들은 주위의 큰 액적에 비하여 주위 공기의 유입으로 인한 영향을 많이 받게 되므로 그 오차는 더욱 커졌으며 또한, 분산 거리도 짧아졌다. 하지만, 상류측에 비하여 하류측에서는 비교적 공기의 유입량이 적기 때문에 계산결과에서 어느 정도의 오차를 줄일수 있었다.

4.3 분무의 구조

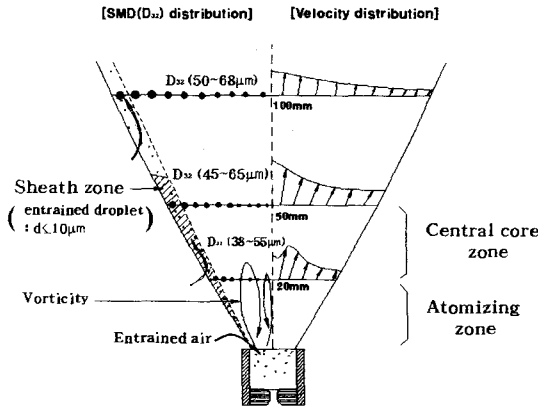


Fig. 6 Structure of the spray

Fig 6 은 선행 연구⁽⁹⁾에서 도입한 분무의 구조를 나타낸 그림이다. 분무 구조는 축 방향에 따라 크게 미립화 영역, 중심부 영역과 외주 영역으로 나누어진다.

Z=20mm 단면은 미립화 영역으로 액주가 미소한 액적으로 분열되어 미립화 공기에 의해 가속되는 영역이다. 실험에서는 난류운동 에너지와 와도장의 영향으로 비교적 관성력이 작은 액적들이 존재하였으며 따라서, 축방향 속도도 Z=50mm 에 비하여 비교적 낮게 나타났다. 하지만, 계산결과는 이와 달리 하류측 보다 상류측에서 가장 높은 속도 분포를 보였으며 이는 분무와 주위 공기 사이의 에너지 전달을 고려하지 못한 결과이다.

Z=20~50mm 단면은 축 방향 속도 분포가 액적의 관성력에 크게 작용하는 중심부 영역이다. 실험에서는 미립화 영역에 비하여 좀더 큰 액적들이 존재하였다. 이러한 경향은 하류로 갈수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.

외주영역은 유입되는 주위 공기의 영향이 크게 작용하는 영역으로 실험에서는 10 \$\mu\$m 이하의 액적들이 분무 경계면으로 유입되어 하류로 빠른 기류에 편승되어 이동하는 것을 볼 수 있었다.

4.4 공기 유입량

Fig 7 은 국부적인 공기의 유입양을 나타내고 있으며 선행연구⁽⁹⁾된 실험결과와 비교하였다.

실험치와 계산치 모두 상류측보다는 하류측으로 갈수록 공기의 유입량이 점차 감소하는 경향을

나타내고 있음을 볼 수 있다. 이것은 분무의 경계면에서 유입되는 공기의 속도가 크게 나타나기 때문이다.

실험치와 계산치의 결과에서 그 경향은 서로 비슷하였다. 이는 선행 연구⁽⁹⁾에서 알 수 있듯이 액적이 작을수록 큰 액적에 비하여 상대속도는 작으나, 하류로 갈수록 액적과 주위기체의 상대 속도차가 미소해지고 전체적으로 균일한 분포를 나타내므로 하류로 갈수록 상류측에 비하여 공기의 유입량이 감소하게 된다.

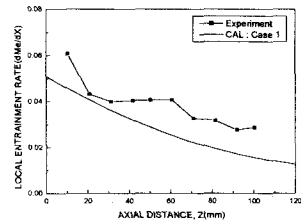


Fig. 7 Local Entrainment Rate

실험과 계산의 오차는 난류 분산의 영향을 과소 평가한 계산의 액적 분산이 실험의 액적 분산을 따라가지 못하였고 계산에서 실험에 비하여 전체적인 분무의 폭이 하류측으로 갈수록 상류측에 비하여 작게 나타났기 때문에 상류측보다 하류측으로 갈수록 실험치와 계산치의 오차가 커지게 되었다.

Fig 8, Fig 9 와 Fig 10 은 각각 공기 유입량, 총 질량 유동을 그리고, 무차원화한 공기의 유입율을 실험치와 계산치를 비교하여 나타낸 것 이다. 먼저, 계산에서의 Case 1 은 분무시의 축방향 속도와 반경 방향 속도를 고려하여 계산한 것이다. 그리고, 계산에서의 Case 2 는 질량 분율을 고려 하여 MacGregor⁽³⁾가 제안한 간단한 모델을 수정하여 계산한 것이다.

먼저 Fig 8, Fig 10 은 축방향 거리에 따른 공기의 유입량과 그것을 무차원화한 공기의 유입율을 나타내고 있다. 두 가지 계산 모두 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만, 상류측에서는 계산에서의 Case 1 이 잘 일치하였고, 하류측에서는 계산에서의 Case 2 가 비교적 잘 일치하였다. 계산에서의 Case 1 이 하류측으로 갈수록 실험치와 맞지 않는 것은 분무 경계면의 설정과 또한 경계면에서의 실험과 계산에서의 속도 차이로 생각된다. 그리고, 계산에서의 Case 2 에서는 상류측에서의 임계질량분율을 고려 하지 못하였기 때문에 하류측에 비하여 상류측으로 갈수록 실험치와 잘 일치하지 않는다.

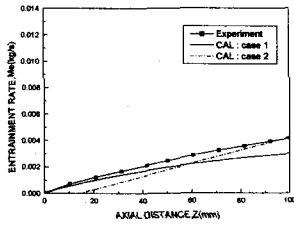


Fig. 8 Entrainment Rate

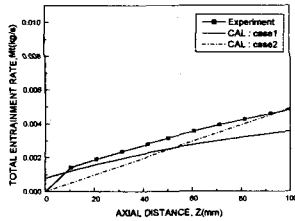


Fig. 9 Total Mass Flow Rate

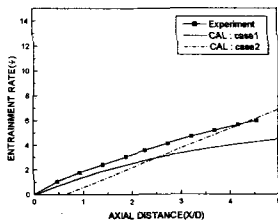


Fig. 10 Nondimensional Entrainment Rate

Fig 9 는 축방향 거리에 따른 총질량 유동율을 나타내고 있다. 실험에서 사용한 공기의 초기질량 유동율을 고려 하였기 때문에 계산에서의 Case 1 은 실험치에 비해 상류측에서 좀더 높게 나타났다. 그리고, 계산에서 초기에 미립화 공기량을 고려하였기 때문에 계산에서의 Case 2 는 임계 질량분율로 인한 오차를 어느 정도 감소 시킬 수 있었고 실험에서의 결과와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

PDA 와 PIV 를 이용한 2 유체 분무의 실험결과를 이용하여, 수치 계산을 수행하였다. 실험치와 계산치를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 공기의 유입양이 많은 상류측에서 액적의 SMD 분포는 작게 나타났으며 하류측으로 갈수록 크기가 증가하였다. 그리고, 공기 유입이 적은 하류측으로 갈수록 속도 분포는 감소하는 경향을 나타내었다.
- ② 반경 방향의 속도 분포를 이용하여 주위 공

기의 유입량을 계산하는 경우 좀더 정확한 분무 경계면의 설정과 또한, 분무 경계면에서의 유입 속도를 계산하여야 한다.

- ③ 공기의 질량 유동율을 이용하여 계산하는 경우 공기의 유입을 발생시키는데 필요한 최소한의 임계질량 유동율을 반드시 고려하여야 한다.

참고문헌

- (1) Ricou, F. P. R. and Spalding, D.B.,1961, "Measurement of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", J. of Fluid Mech., Vol.51, pp.773 ~ 779
- (2) Briffa, F.E.J. and Dombrowski, N., 1966, "Entrainment of Air into a Liquid Spray", AIChE. J., pp.708 ~ 717
- (3) MacGregor, S.A., 1991, "Air Entrainment in Spray Jets", Int. J. of Heat and Fluid Flow, Vol.12, pp.279 ~ 283
- (4) Boysan, F. and Binark, H., 1979, "Predictions of Induced Air flow in Hollow cone Spray", J. of Fluids Engineering, Vol.101, pp.313 ~ 318
- (5) Sutherland, I.J., Sojka, P.E. and Plesniak, M.W., 1997, "Entrainment by ligament Controlled Effervescent Atomizer-Produced Sprays", Int. J. Multiphase Flow Vol.23, No.5, pp.865 ~ 884
- (6) Ruff, G.A., Sagar, A.D. and Faeth, G.M., 1989, "Structure and Mixing Properties of Pressure Atomized Sprays", AIAA J., Vol.27, No.7, pp.901 ~ 908
- (7) S.H. Park and H D. Shin, 1993, "Measurements for entrainments characteristics of swirling jet," Int. J. Heat Mass transfer. Vol.36, No.16, pp.4009 ~ 4018
- (8) 김동일, 오상현, 1998, "2 유체 분무 액적의 거동에 관한 실험 및 수치해석 연구", 한국액체미립 화학회지, 제 3 권, 제 4 호, pp.63 ~ 71
- (9) 채효철, 김동일, 오상현, 2001, "공기 유입을 고려한 2 유체 분무의 구조에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp.9 ~ 17