

# 초음파 미립화 노즐의 분무 특성에 미치는 주요 인자의 영향

정선용, 이계복\*  
충북대학교 기계공학부

## Effect of Major Factors on the Spray Characteristics of Ultrasonic Atomizing Nozzle

Jeong Seon Yong, Lee Kye Bock\*

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

**요약** 분무식 노즐(spray nozzle)은 액체의 표면을 증가시키기 위해 에너지를 공급하여 액체를 다수의 액적으로 미립화시키는 장치로 연소과정에서의 연료의 미립화 또는 표면이나 입자의 코팅 등 여러 산업분야에 다양한 목적으로 응용된다. 초음파 미립화 노즐은 진동 발생장치로부터 고진동수의 전기에너지를 받아 같은 진동수의 기계적 에너지로 변환시키는 변환기를 갖고 있다. 변환된 에너지를 액체에 부가하여 고주파 진동에 의해 미세한 액적을 생성하여 분사한다. 코팅작업에서 가압되지 않은 저속의 분무는 액적이 튕겨나가지 않고 표면에 달라붙어 과도하게 분사되는 양을 줄일 수 있다. 초음파 미립화 노즐은 초음파 진동부 외벽에 공기를 공급해 줄 수 있는 공간을 통해 생성된 보조 공기흐름을 이용하여 저속의 액적을 운반하여 분무특성이나 분무형상을 조절할 수 있다. 따라서 주위 공기의 흐름을 이용하여 원하는 분무특성을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 액적의 분사 운동을 모사하기 위해 라그랑지안 분산상 모델(DPM)을 적용한 상용코드 FLUENT를 사용하여 액적 주위의 공기흐름을 동반하는 초음파 미립화 노즐을 해석하였다. 노즐 수축부 형상, 액적의 크기 그리고 공기 측 압력차의 크기를 변화시키며 수치해석을 수행하여 코팅용 분무를 위한 최적 조건을 연구하였다.

**Abstract** The atomization of a liquid into multiple droplets has many important industrial applications, including the atomization of fuels in combustion processes and coating of surfaces and particles. Ultrasonic atomizing nozzle has a transducer that receives electrical input in the form of a high frequency signal from a power generator and converts that into mechanical energy at the same frequency. Liquid is atomized into a fine mist spray using high frequency sound vibrations. In coating applications, the unpressurized, low-velocity spray reduces the amount of overspray significantly because the droplets tend to settle on the substrate, rather than bouncing off it. The spray can be controlled and shaped precisely by entraining the slow-moving spray in an ancillary air stream using specialized types of spray-shaping equipment. The desired patterns of spray can be obtained using an air stream. To simulate the water mist behavior of an ultrasonic atomizing nozzle using an air stream, the Lagrangian dispersed phase model was employed using the commercial code FLUENT. The effects of the nozzle contraction shape, water droplet size and the pneumatic pressure drop on the spray characteristics were investigated to obtain the optimal condition for coating applications.

**Keywords** : Atomization; CFD Simulation; Coating; Dispersed Phase Method; Spray

### 1. 서론

일반산업 분야 및 의료산업에 사용되는 부품들이 보  
다 정교해지며 구조가 복잡함에 따라 코팅환경에서 코팅

입자가 더욱 미세하고 박막이며 균일한 품질을 요구되는  
고품질의 코팅수요가 늘어나고 있으며, 코팅액의 다양한  
기능성이 요구되어 지면서 코팅원료의 가격도 증가되고

본 논문은 2016년도 산학융합 R&D 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*Corresponding Author : Kye Bock, Lee(Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-3232 email: kblee@chungbuk.ac.kr

Received March 16, 2017

Revised (1st April 11, 2017, 2nd May 1, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

있다. 의료분야에 많이 사용되고 있는 풍선 카테터 (balloon catheter)는 스텐트(stent)와 구조가 유사한데 길이가 20 ~ 100 mm까지의 긴 구조를 가지며 스텐트의 기능과 같이 혈액통로 확보 및 혈관내벽 지지기능과 같으며 요구되는 길이가 긴 경우에 사용된다. 스텐트 및 풍선 카테터는 약 200  $\mu\text{m}$  두께의 미세한 탄성체의 복잡한 구조를 가진 형상에 100mm 정도의 길이를 균질한 박막 코팅을 처리하기 위해서는 매우 얇게 여러 번 반복적으로 코팅을 연속적으로 처리해야 한다. 카테터와 같이 복잡한 형상으로 길이가 길고 여러 번 반복적으로 대량의 코팅을 지속적으로 유지해야 하는 환경에서는 생산시간을 충족하기 위해 최대 분당 1000  $\mu\text{l}$  수준의 다량의 코팅액을 높은 효율로 처리하기 위해서는 새로운 첨단 분사시스템 개발이 매우 필요한 실정이다[1-2].

미립화는 액체의 분류나 막이 액체 자신의 운동에너지나 초음파 등의 외부의 진동 장치, 빠른 속도의 공기 같은 기체에 의해 분열되는 과정이다. 여러 산업분야에 다양한 목적으로 응용되는 분무식 노즐(spray nozzle)은 액체를 미립화 하여 액체의 표면을 증가시키기 위해 에너지를 공급하는 방법으로 압력형, 회전형, 이유체 미립화기를 사용한다. 이유체 노즐(two fluid nozzle)은 액체의 흐름에 기체를 충돌시키거나 빠른 기체의 흐름에 액체를 분사시켜 액체를 미립화 시키는 노즐로서 비교적 작은 압력으로 우수한 미립화 성능을 기대할 수 있다. 또한 이유체 노즐은 분사지연 기간에 공기를 연속적으로 공급하여 노즐 내부에 잔존하는 액체를 모두 외부로 배출시킴으로써 염의 발생 가능성이 있는 액체로 인한 노즐 막힘 현상을 해결할 수 있다. 외부에서 진동장치에 의한 기계적 에너지를 액체에 부가하기 위해 초음파를 이용하여 원하는 크기의 액적을 생성하는 초음파 노즐은 고분자를 미세하게  $\mu\text{m}$  단위의 입자로 분사하기 때문에 Particle이 생기지 않고 균일한 코팅작업에 이용할 수 있다[3-4].

코팅을 위한 이유체 노즐의 특성은 노즐형상(internal mixing, external mixing), 두 유체의 속도차, 코팅액 물성치(밀도, 표면장력)의 영향을 받는다. 기체의 분사압력이 증가할수록 코팅액에 대한 기체의 질량비가 커지고 코팅액의 액적크기는 작아지게 된다. 코팅액의 토출량은 토출압력 및 노즐의 종류에 의해 조정될 수 있다. 액적의 크기가 작을수록 분류의 분무각은 커지게 된다[5]. 다양한 산업분야에 응용되고 있는 이유체 노즐의 분무구조에

미치는 주요 인자에 대한 영향을 평가하기 위한 연구가 많이 진행되고 있고 연구 방법으로는 실험 및 CFD기법이 사용된다. 실험은 노즐분사 특성 및 주요인자에 대한 변경이 상대적으로 자유롭지 못한 제한점 때문에 최근들어 CFD 기법을 이용한 수치해석방법 활발히 진행되고 있다.

현재 의료용 코팅 노즐은 전량 수입에 의존하고 있으며 독점적인 형태로 이루어져 있어 가격 경쟁력이 문제가 되고 있고 스텐트 코팅용 초음파 분무식 노즐은 사이드 피딩(side feeding)방식으로 수심 마이크로의 코팅입자를 낮은 공압으로 폭이 협소한 형태로 포커싱(focusing)시키며 분주범위가 노즐 출구로부터 0.26 ~ 0.77mm로 협소하다. 기체가 동시에 분사되는 일체형 노즐은 분주 범위가 1.778~6.35mm로 다소 넓다. 본 연구를 통해 분주 범위를 약 10mm까지 넓히는 노즐 설계방법을 개발하려고 한다[6-7].

본 연구에서는 외부에서 진동장치에 의한 기계적 에너지를 코팅액에 부가하기 위해 초음파를 이용하여  $\mu\text{m}$  단위의 원하는 크기의 액적을 생성하고 노즐에 일체형으로 초음파 진동부 외벽에 공기 라인을 공급해 줄 수 있는 공간을 만들고 공기 라인의 수축부 설계에 따라 유로를 변경하여 분사시켜 원하는 분사 단면 면적을 구현하기 위한 주요 인자의 영향을 평가하여 설계 기본자료를 도출하려고 한다. 설계된 노즐이 원하는 코팅 균일도를 만족시키는지 확인하기 위해 노즐에서의 이상 유동을 CFD 상용코드를 사용하여 해석하였다. 노즐에서의 유동을 해석하기 위해 축대칭 좌표계를 사용하여 제트 유동이 난류인 경우를 해석하였다. 이상 제트유동을 해석하기 위해 Dispersed Phase Method(DPM)을 사용하였다[8-10].

## 2. 이론적 해석

### 2.1 초음파를 이용한 이유체 노즐

현재 사용되는 의료용 코팅 분무식 노즐은 Fig. 1과 같이 초음파를 이용하여 작은 크기의 액적을 생성하여 분사하는 노즐로 초음파 발생기에 의해 발생된 초음파가 노즐 상단부의 동축케이블 선으로 들어가 진동자를 진동시켜서 용액을 쪼개어 액적(liquid drop)의 형태로 뿌려지는 원리이고 사이드 피딩(side feeding)방식으로 수심

마이크로의 코팅입자를 낮은 공압으로 액적 주위로 공기를 분사시켜 폭이 협소한 형태로 포커싱(focusing)시키며 분주범위가 노즐 출구로부터 협소하다. 초음파 노즐은 주파수가 높아질수록 분무 입자는 미세해지나 최대 유량이 적어짐으로 1000ul이상의 조건 대비 최소의 입자크기를 가지는 주파수를 이론식으로 구하여 노즐의 주파수를 지정하였다. 이러한 초음파 진동부 외벽에 공기 라인을 공급해 줄 수 있는 공간을 만들고 홀 아래 격자의 설계에 따라 공기의 유로를 변경시켜 노즐출구로부터 10 mm 까지 분주범위를 넓히고 단면의 직경이 2mm 이내의 분사 면적을 구현하고자 한다. 이를 위해 균일한 공기 공급을 위해서 대칭적인 구조가 필요하며 홀의 개수는 3개로 설정하여 균일하고 일관성 있는 공기를 초음파 스프레이의 가이드라인으로 사용하고자 한다. 대상물과의 거리와 에어의 흐름에 따라 10 mm까지 포커싱(focusing)을 조절해서 기존에 있던 초음파노즐의 특성을 살리면서 더 많은 유량과 더 넓고 조절 가능한 범위에 코팅을 가능하기 때문에 의료용 약물이나 코팅 용액을 낭비하지 않고 미세한 정밀 코팅을 할 수 있게 하려고 한다.

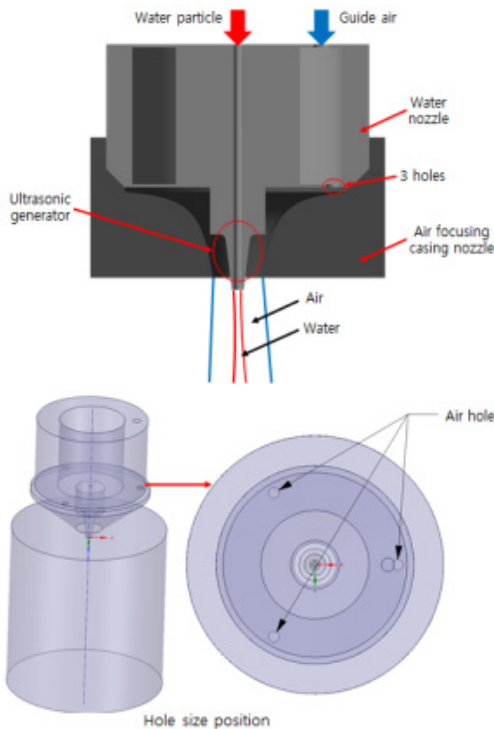


Fig. 1. Schematics of the ultrasonic atomizing nozzle

## 2.2 수치해석

이유체노즐의 분무 특성을 실험적인 방법으로 분석한다는 것은 시간적으로도 경제적으로도 비용이 많이 든다. 하지만 컴퓨터를 이용한 전산유체역학 해석적 방법을 이용하면 내부의 유동특성인 압력분포, 속도 벡터 등을 쉽게 계산할 수 있고 최근 들어 컴퓨터의 성능의 급속한 발전으로 전산유체역학의 사용이 확대되는 추세이다. 이에 따라 본 연구에서는 수치 해석적 기법을 이용하여 CFD 상용코드인 ANSYS FLUENT 17.1과 내부 유동장의 격자구조는 ANSYS Meshing을 사용하였다[10].

### 2.2.1 지배방정식

기체 유동장 내 노즐에서 분사된 액적의 거동 및 연속체인 기체 유동장과의 상호 작용에 대한 모사를 위하여 Lagrange 기법을 바탕으로 한 DPM을 적용하였다. DPM은 Euler-Lagrange 접근 방법을 따른다. 연속체로 계산될 유체상은 나비에-스톡스 방정식을 계산함으로써 연속체로서 처리되고 반면에 분산된 상은 계산된 유동장을 통해 입자들을 분사함으로써 계산된다. 이때 분산된 입자들은 유동장에서 계산된 운동량, 질량, 그리고 에너지를 서로 교환할 수 있다. DPM의 접근 방법은 Lagrangian을 기반으로 입자들의 힘을 유동장의 에너지와 상호교환 함으로써 분산된 상 입자의 경로를 예측한다. 이 힘의 균형은 입자에 작용하는 힘을 동등하게 하고 다음과 같은 방정식으로 적용된다.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (1)$$

우변의 첫째항은 입자에 작용하는 단위질량 당 항력이고,  $\tau_r$ 는 액적 혹은 입자 완화 시간으로 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (2)$$

$\vec{F}$ 는 입자의 단위질량당 추가 가속도항이고,  $\vec{u}$ 는 유체 속도,  $\vec{u}_p$ 는 입자 속도,  $\mu$ 는 유체 입자의 점성,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $\rho_p$ 는 입자의 밀도, 그리고  $d_p$ 는 입자의 지름,  $C_d$ 는 항력계수,  $Re$ 는 레이놀즈수 이다.

$$Re = \frac{\rho d_p \sqrt{u_p - u}}{\mu} \quad (3)$$

난류유동의 해석을 위해 현재까지 가장 범용적인 난류모델인  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 난류 운동에너지( $k$ )와 난류 소멸률( $\epsilon$ ) 방정식은 다음과 같다.

$k-\epsilon$  난류방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $G_k$ 는  $k-\epsilon$ 모델에서 난류 생성 방정식에서 계산된 속도 구배로 인한 난류 운동 방정식의 생성항이고  $G_b$ 는 부력 효과로 인해 생기는 생성항이다. 또한,  $Y_M$ 은 소멸률에 대한 fluctuating dilatation을 나타내며  $\rho$ 는 유체 밀도,  $u_i$ 는 유체의 속도,  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ 은 상수값이다.  $\sigma_k$ 와  $\sigma_\epsilon$ 은  $k$ 와  $\epsilon$ 의 난류 Prandtl 수이고  $S_k$ 와  $S_\epsilon$ 은 사용자 정의 생성항을 나타낸다.  $\mu_t$ 는 난류 점성계수이며 다음과 같은 방정식으로 정의 된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

여기서  $C_\mu$ 는 상수값이다.

### 2.2.2 모델링 및 격자생성

전산 수치해석에서 격자의 모양과 격자의 개수, 격자의 질 등이 유동 해석의 신뢰도에 영향을 준다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 비정렬 방식을 이용하여 격자를 처리하였고 격자의 개수를 최소 50만개에서 120만개로 변화시키며 민감도 분석을 수행하여 격자의 개수를 최소 100만개 이상으로 결정하였다.

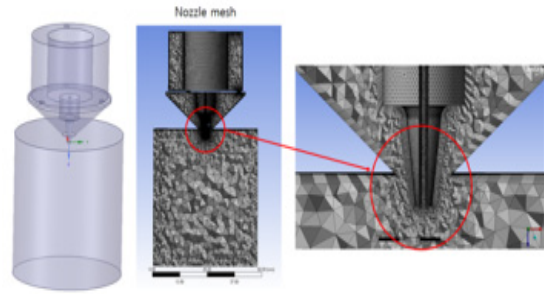


Fig. 2. Computational mesh of ultrasonic atomizing nozzle

### 2.2.3 경계조건

이상 노즐유동을 해석하기 위해서 노즐 내 공기 입출구의 압력, 코팅액의 유량조건을 그리고 노즐 벽에서 경계조건을 사용하였다. 노즐 내 공기의 출구 경계조건은 압력경계조건(대기압), 입구에서는 원하는 압력조건을 적용하였다. 또한 노즐 내부의 벽 경계조건은 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

외부에서 진동장치에 의한 기계적 에너지를 코팅액에 부가하기 위해 초음파를 이용하여 액적을 생성하고 노즐에 일체형으로 초음파 진동부 외벽에 공기 라인을 공급해 줄 수 있는 공간을 만들어 공기 라인의 수축부 설계에 따라 유로를 변경하여 분사시켜 액적의 원하는 분사 단면 면적을 구현하기 위한 액적 입자의 크기, 노즐 수축부의 형상, 공기 축 분사압력의 크기 등 주요 인자의 영향을 이상유동 모델인 Dispersed Phase Method(DPM)을 사용하여 수치적으로 해석하였다.

### 3.1 액적 입자의 크기 영향

액적입자의 크기에 따른 노즐 분사영역의 특성을 해석하였다. Fig. 3은 액적의 입자 크기 5, 20, 100  $\mu\text{m}$ 일 때 출구속도 0.015 m/s에서 노즐출구 직경 1.2 mm에서 분사되는 형상이다. Fig. 3에 나타난 것처럼 액적 직경이 작을수록 노즐에서 분사된 액적이 더 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 노즐 출구에서 5mm, 10 mm 위치에서의 코팅액의 체적분률을 나타낸다. 노즐 출구에서 거리가 5 mm, 10 mm일 때의 액적이 분사되는 단면영역의 직경을 Table 1에 mm 값으로 나타냈다. 액적이 입경이 작을

수축 노즐 출구로부터 일정거리에서 분사영역이 더 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

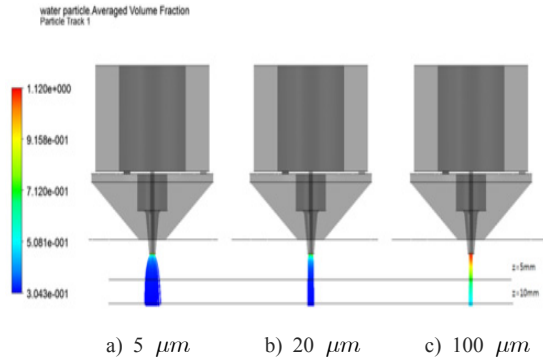


Fig. 3. Contour plots of liquid droplet volume fraction for various droplet size

Table 1. Spray cross section diameter of liquid droplet along the streamwise direction

| Particle size | z=5mm | z=10mm |
|---------------|-------|--------|
| 5 μm          | 5.3   | 5.8    |
| 20 μm         | 2.3   | 3.0    |
| 100 μm        | 2.0   | 2.1    |

### 3.2 공기축 입출구 압력차의 크기 영향

코팅액 노즐에 일체형으로 초음파 진동부 외벽에 공기 라인을 공급해 줄 수 있는 공간을 만들고 홀 아래 격자의 설계에 따라 공기의 유로를 변경시켜 공기 라인의 수축부를 따라 분사시켜 원하는 분사 단면 면적을 구현하기 위해 공기 축 분사압력을 변화시키며 이유체 노즐 유동의 특성과 노즐분사 영역을 비교하였다.

Fig. 4는 압력차 10, 50, 100 Pa일 때 노즐에서 분사된 액적의 체적분포를 나타낸다. 코팅액과 공기의 밀도차와 출구면적을 고려하여 코팅액과 일정각도로 충돌하는 공기의 운동량 크기를 변화시키기 위해 공기축의 압력차를 바꾸며 공기 속도를 조절하였다. 주위 공기의 영향으로 분사된 액적이 공기가 분사되지 않는 경우에 비해 중앙부에 더 집중되는 것을 알 수 있다. Table 2는 압력차에 따른 제트출구로부터 5mm, 10 mm에서의 액적의 분사 단면면적의 직경을 나타낸다. 주위 공기의 영향으로 분사 단면면적의 직경이 공기가 분사되지 않는 경우에 비해 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 압력차가 커져 공기의 운동량이 코팅액의 운동량보다 상대적으로

커지면 분사단면의 직경이 오히려 증가하는 것을 알 수 있다.

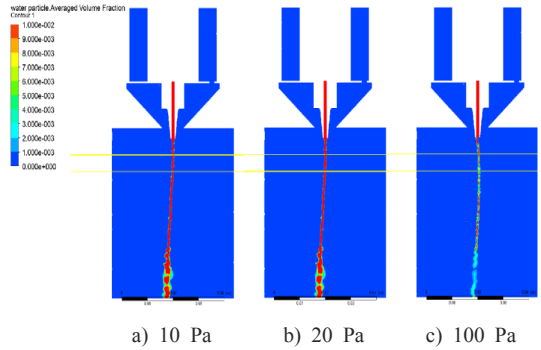


Fig. 4. Contour plots of liquid droplet volume fraction for different pressure difference

Table 2. Spray cross section diameter of liquid droplet along the streamwise direction

| Pressure difference | z=5mm | z=10mm |
|---------------------|-------|--------|
| 10 Pa               | 1.3   | 1.1    |
| 50 Pa               | 1.2   | 1.1    |
| 100 Pa              | 0.8   | 1.0    |
| 200 Pa              | 1.7   | 2.2    |

### 3.3 노즐 수축부의 영향

노즐의 수축부는 유동을 가속화, 균일화시키며 출구에서 균일 분포 및 낮은 난류강도를 갖는 영역이 최대가 되도록 설계되어야 하고 수축부 성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 수축부 형상, 수축부 길이, 수축부의 입구와 출구의 면적비, 수축부로 유입되는 유동의 상태 등이 있다. 본 연구에서는 수축부 형상에 따른 분무특성을 평가하기 위해 주어진 입구와 출구의 면적과 길이에 대해 압력차 10 Pa인 경우에 대해 유동특성 해석을 수행하여 Fig. 5에 나타냈다. 노즐 출구에서 5mm, 10 mm 위치에서의 코팅액이 집중되는 분사영역의 단면 직경이 공기가 분사되지 않는 경우와 비교해 분사영역의 단면 직경은 감소하지만 중심축에 대해 비대칭의 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. 노즐 주위의 공기 속도분포를 보면 수축부 형상이 공기 유동을 균일하게 분포시키지 못하여 분사된 액적이 비대칭 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

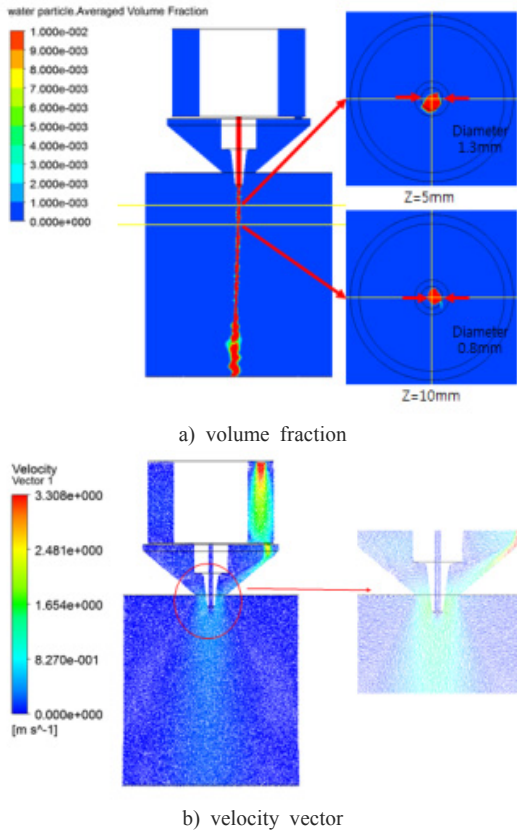


Fig. 5. Contour plot of liquid droplet volume fraction and velocity vector in the linear contraction nozzle

분사되는 액체의 비대칭분포를 개선하기 위해 Batchelor와 Shaw[11]가 제안한 포물선 형태의 수축노즐을 사용한 경우에 대한 해석결과를 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 노즐 주위의 공기 분포가 균일하게 대칭분포가 개선되면서 분사된 액적의 분포도 중심축에 대해 대칭분포가 직선형 수축노즐에 비해 향상되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

외부에서 진동장치에 의한 기계적 에너지를 코팅액에 부가하기 위해 초음파를 이용하여 원하는 크기의 액적을 생성하고 노즐에 일체형으로 진동부 외벽에 공기 라인을 공급해 줄 수 있는 공간을 만들어 공기 라인의 수축부 설계에 따라 유로를 변경하여 분사시켜 액적의 원하는 분사 단면 면적을 얻기 위한 액적 입자의 크기, 노즐 수

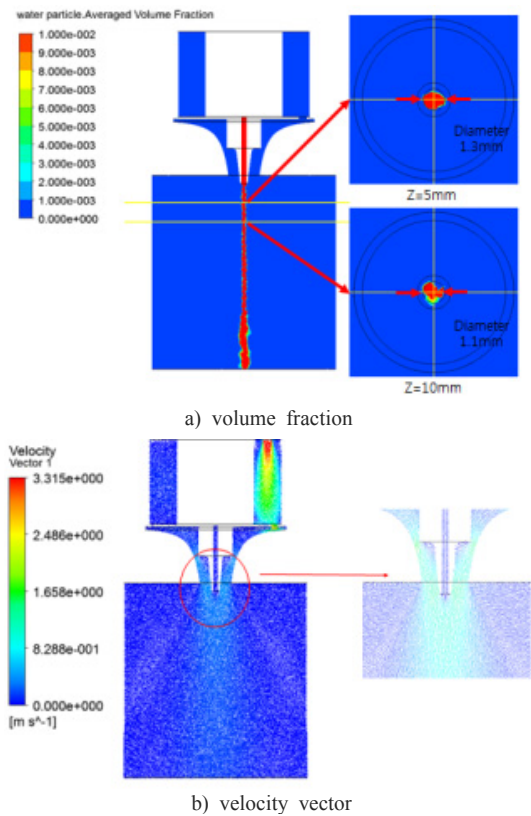


Fig. 6. Contour plot of liquid droplet volume fraction and velocity vector in the BS contraction nozzle

축부의 형상, 공기 측 분사압력의 크기 등의 영향을 수치적으로 해석하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액적이 입경이 작을수록 노즐 출구로부터 일정거리에서 더 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.
2. 액적 주위로 공기를 분사시켜 코팅액에 공기를 일정각도로 충돌시켜 분사된 액적을 중앙부에 집중시켜 원하는 분사영역의 직경을 조절할 수 있는 것을 확인하였고 원하는 분사직경을 얻기 위한 공기 측 압력차를 구하였다.
3. 분사되는 액체의 비대칭분포를 개선하기 위해 수축노즐의 형태를 포물선 형태인 Batchelor-Shaw 방법을 사용한 노즐을 사용한 경우에 직선형 수축노즐을 사용하는 경우에 대해 대칭분포가 개선되는 것을 알 수 있다.

## References

- [1] S. C. Tsai, Y. L. Song, C. S. Yang, W. Y. chiu, H. M. Lin, "Ultrasonic spray pyrolysis for nanoparticles synthesis", *Journal of Materials Science*, vol. 39, no. 11, pp. 3647-3657, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JMSSC.0000030718.76690.11>
- [2] W. Duangkhamchan, F. Ronsse, F. Depypere, K. Dewettinck, J. G. Pieters, "CFD study of droplet atomisation using a binary nozzle in fluidized bed coating", *Chemical Engineering Science*, vol. 68, pp. 555-566, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.10.022>
- [3] P. D. Hede, P. Bach and A. D. Jensen, "Two-fluid spray atomisation and pneumatic nozzles for fluid bed coating/agglomeration purposes: A review", *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 3821-3842, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.04.014>
- [4] Y. J. Choi, S. M. Kang, D. J. Kim, J. K. Lee, "Effect of Nozzle cap geometry for swirl-type two-fluid nozzle on the spray characteristics", *Journal of ILASS-KOREA*, vol. 13, no. 3, pp. 134-142, 2008.
- [5] S. Y. No, "Empirical correlations for breakup length of liquid jet in uniform cross flow-A review", *Journal of ILASS-KOREA*, vol. 18, no. 1, pp. 35~43, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.15435/JILASSKR.2013.18.1.035>
- [6] S. M. Sumon and S. W. Lee, "Numerical analysis of effects of water mist injection characteristics on cooling performance in heated chamber", *Journal of ILASS-KOREA*, vol. 17, no. 2, pp. 64~70, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.15435/JILASSKR.2012.17.2.064>
- [7] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, Butterworth Heinemann, 1998.
- [8] K. X. Steirer, J. J. Berry, M. O. Reese, M. F. A. M. Hest, A. Miedaner, M. W. Liberatore, R. T. Collins, D. S. Ginley, "Ultrasonically sprayed and inkjet printed thin film electrodes for organic solar cells", *Thin Solid Films*, vol. 517, pp. 2781-2786, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.10.124>
- [9] K. Gonda, K. Kadota, Y. Deki, Y. Tozuka, A. Shimosaka, "Fabrication of composite particles by liquid-liquid interfacial crystallization using an ultrasonic spray nozzle", *Powder Technology*, vol. 269, pp. 401-408, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.042>
- [10] FLUENT, *Fluent 17.1 User's Guide*, 2016.
- [11] A. K. M. F. Hussain and V. Ramjee, "Effects of axisymmetric contraction shape on incompressible turbulent flow", *TRANS of the ASME, J. Fluids Engineering*, vol. 98, pp. 58-69, 1976.  
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3448210>

### 정 선 용(Kye-Bock Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 충북대학교 기계공학부 (공학사)
- 2017년 2월 : 충북대학교 기계공학과 대학원 석사
- 2017년 2월 ~ 현재 : (주) 앤플렉스 연구원

<관심분야>  
유체기계, 전산유체

### 이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>  
난류유동, 유체기계, 전산유체