

외장유동 노즐 형상이 에어로졸 입자 집속효율에 미치는 영향

진정민* · 이진우* · 강민성* · 강현철** · 김윤제***†

Effects of Sheath Flow Nozzle Shape on the Focusing Efficiency of Aerosol Particles

Jeong-Min Jin*, Jin-Woo Lee*, Min-Sung Kang*, Hyun-Chul Kang**, Youn-Jea Kim***†

Key Words : Aerosol(에어로졸), Nozzle(노즐), CFD(전산유체해석), Optimization(최적화), DOE(실험계획법), RSM(반응표면법)

ABSTRACT

Viruses, bacteria, and toxins are some of the biological warfare agents (BWAs) used in military operations that can cause fatalities by spreading diseases in ecosystems and spreading to even humans. BWAs are initially difficult to detect and require considerable amount of treatment time because BWAs are self-breeding, easily spread, and have latent periods, preventing the immediate onset of symptoms. Because BWAs exist in an aerosol form, many studies have been conducted to investigate biological weapons. In this study, the shape of the sheath flow nozzle was optimized to improve the focusing efficiency of the aerosol particles. ANSYS CFX ver. 18.1 was used for conducting the numerical analysis. The design parameters for optimization included the injection angle of the external and internal nozzles. The experimental results were obtained using the design of experiment to minimize the analysis time and obtain maximum information. Based on the results, the optimum shape was determined using the response surface method (RSM). The results were compared by CFD with the RSM results. The relative error was 0.14%; thus, the validity of the proposed method was confirmed. The results of the reference model and optimal shape were compared, and the relative error was 3.36%.

1. 서론

화생방 전쟁 시 사용되는 생물학 무기(BWAs, biological warfare agents)는 바이러스, 세균, 독소를 말하며, 사용 시 인간을 포함한 생태계에 질병을 유발하여 치명적인 피해를 입힐 수 있다. 또한, 생물학 무기는 공격 발생 사실을 초기에 감지하는 것이 어렵고 한번 오염되면 스스로 번식, 확산하는 특성을 가지고 있을 뿐 아니라 일정기간의 잠복기가 있어 즉각적으로 증상이 나타나지 않기 때문에 병원체를 규명하고 치료 방법을 찾는 데 많은 시간이 소요되는 특징을 가지고 있다. 이러한 이유는 일반적으로 생물학 무기가 기체나 안개와 같은 에어로졸 형태로 존재하기 때문이다. 특히, 생물학 무기는 무색, 무취의 형태로 공기 중에 에어로졸 형태로 살포

가 가능하여 검출하기가 어렵다⁽¹⁾. 이러한 특성으로 생물학 무기 검출을 위한 많은 실험적, 수치적 연구가 수행되고 있다. Miljevic 등⁽²⁾은 에어로졸과 액체 사이의 접촉 표면적을 증가시키는 수단으로서 유리 노즐 팁이 장착된 임핀저(impinger)로 초미립자의 포집에 대한 연구를 실험적으로 수행하였다. Hill 등⁽³⁾은 대기 중의 생물학적 입자를 특성화할 수 있는 실시간 탐지 방법으로 12개의 노즐로 구성된 에어로졸 발생기를 이용하여 연구하였으며, 레이저를 이용하여 입자의 광특성을 제시하고 다양한 대기 조건에서 측정된 입자 스펙트럼을 보여줌으로써 관련 기술의 성능을 입증하였다. Huang 등⁽⁴⁾은 단일 노즐의 관성 충돌기 내부를 비압축성 유동으로 가정하여 충돌판 지름과 입자 밀도가 포집 효율에 미치는 영향을 연구하였다. Romay 등⁽⁵⁾은 에어로졸 집

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate school of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 한국지질자원연구원(Senior Officer, Public Relations Department, KIGAM)

*** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

중 장치로 3가지 단계를 거치는 가상 충돌 장치 입자 샘플러를 개발 및 제작하여 크기 별 입자 포집의 손실을 최소화하고 검출 기기의 한계 및 검출 속도를 향상시키는 연구를 수행하였다. Rezvanpour 등⁽⁶⁾은 제약 입자 제조공정에서 용액 및 질소 유속 등의 매개 변수가 입자 포집 효율에 미치는 영향을 연구하였다. Taketani 등⁽⁷⁾은 레이저 유도 형광(LIF, laser-induced fluorescence)기술을 사용하여 특정 유형의 에어로졸 입자를 대기에서 온라인으로 탐지하기 위한 계측기 개발 연구를 수행하여 장비의 성능을 향상시켰다. Rostedt 등⁽⁸⁾은 외장유동 노즐(sheath flow nozzle)을 이용하여 에어로졸 입자를 집속시키기 위해 에어로졸 유입량에 따른 외장유동 노즐 유동을 수치적으로 해석하였으며, 이를 실험과 비교 분석하였다. Chun 등⁽⁹⁾은 노즐 형상과 유체 입자의 크기에 따른 입자 거동 특성을 연구하였다. Han 등⁽¹⁰⁾은 입자 물질의 대부분이 입자 제거 설비에 의해 제거되지만 미세 입자는 다른 크기의 입자에 비해 제거 효율이 낮아 응결로 미세입자를 성장시켜 제거하는 실험을 수행하였다. Yang 등⁽¹¹⁾은 에어로졸 형태로 분사되는 DDAC(did-ecyldimethylammonium chloride)의 포집 및 분석 방법을 연구하였는데, XAD 흡착제를 사용한 DDAC 포집 및 이온크로마토그래피를 이용한 분석 방법이 DDAC 농도를 신속하고 편리하게 모니터링 할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구의 주된 목적은 에어로졸 탐지를 위해 외장유동 노즐의 분사각을 최적화하여 에어로졸 입자의 집속효율을 향상시키기 위한 것이다. 최적화를 위해 상용프로그램인 ANSYS CFX

Table 1 Design parameters of sheath flow nozzle

Outer nozzle	
Diameter of outer nozzle(D_1)	9mm
Inlet diameter of air(D_{air})	6.4mm
Height of outer nozzle pipe(H_1)	20mm
Length of outer nozzle(L_1)	55mm
Outlet diameter of outer nozzle(D_o)	1.3mm
Injected angle of outer nozzle(θ_1)	15°
Inner nozzle	
Diameter of inner nozzle(D_2)	6.8mm
Length of inner nozzle(L_2)	68.2mm
Outlet diameter of inner nozzle(D_i)	0.9mm
Injected angle of inner nozzle(θ_2)	15°

Ver. 18.1을 사용하였으며, 실험계획법(Design of Experiment, DOE)을 적용하여 설계변수에 대한 해석 횟수를 최소화 하였다. 그리고, 그 결과를 기반으로 ANSYS에서 제공하는 반응면 최적설계 기법(Response Surface Method, RSM)을 이용하여 최적화 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 모델링

본 연구에서 사용된 외장유동 노즐은 미 육군 연구소에서 제시한 에어로졸 입자 포집 및 탐지를 위해 SPFS-puffer system의 에어로졸 발생 장치의 부속품이다. 외장유동 노즐은 외부 노즐(outer nozzle)과 내부 노즐(inner nozzle)로 구성되었으며, 모델 형상을 Fig. 1에 도시하였다. 노즐의 3차원 형상은 ANSYS Design Modeler를 이용하여 설계하였으며, 내부 노즐 입구 지름(D_2)은 6.8mm, 내부 노즐의 바깥 지름(D_i)은 0.9mm이고, 외부 노즐의 입구 지름(D_{air})은 6.4mm, 외부 노즐의 바깥지름(D_o)은 1.3mm 이며, 입자가 외부로 나가는 챔버 노즐의 지름은 2mm로 구성하였다. 노즐 형상에 대한 세부적인 치수는 Table 1에 기술하였다.

2.2 수치해석

본 연구에서는 노즐에 유입된 에어로졸 입자에 대한 다상유동을 계산하기 위해서 라그랑지안 입자추적(Lagrangian particle tracking) 모델을 사용하였다⁽¹²⁾. 이 모델은 연속체와 같은 유체 유동에 대해서는 Navier-Stokes 방정식에 의해 계산되어지며, 움직이는 입자의 분산에 대해서는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 기반으로 계산된다. 따라서 수치해석은 비압축성 유동 및 시간 평균 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하는 지배방정식을 사용하였다.

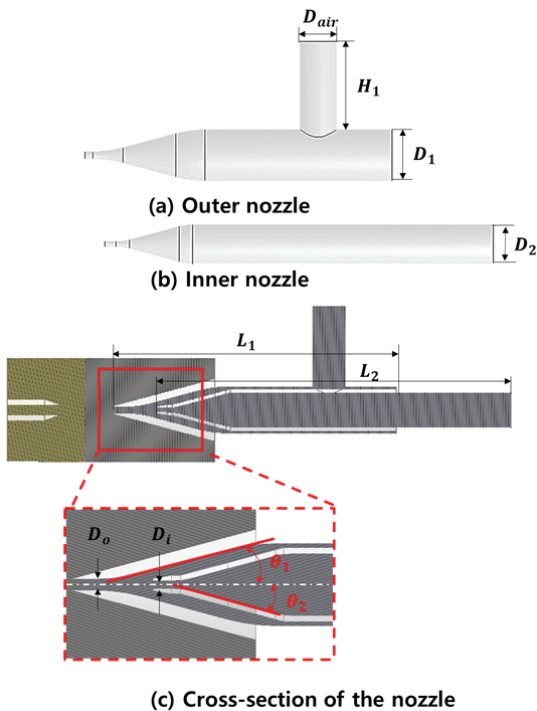


Fig. 1 Schematic of sheath flow nozzle

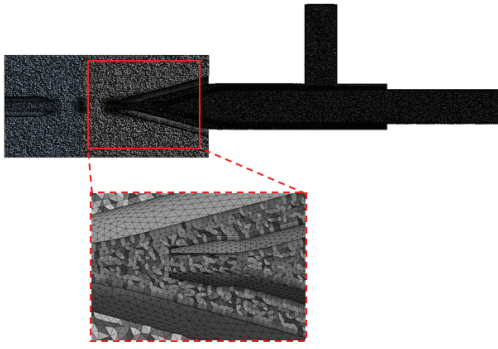


Fig. 2 Grid systems applied in this study.

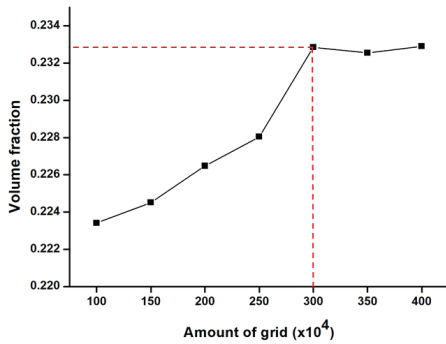


Fig. 3 Grid dependency test.

Table 2 Boundary conditions applied in the study

Working sheath fluid	Air at 25°C
Working aerosol particle	TiO ₂
Sheath fluid inlet	1.0 LPM
Particle inlet	1.0 LPM
Outlet	1 atm
Turbulence model	Shear Stress Transport
Convergence criteria	1.00E-5

Table 3 Properties of aerosol particle, TiO₂

Aerosol particle	
Particle solids	TiO ₂
Molar mass	79.866 g/mol
Density	4.23 g/cm ³
Size	9.6 μm

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) + \nabla p = 0 \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도를 의미하며, t 는 시간, U 는 속도, p 는 압력을 의미한다.

또한, 본 연구에서는 입자 유동의 정확성을 높이기 위해 난류모델은 $k-\omega$ 난류모델과 $k-\epsilon$ 난류모델의 장점을 결합하여 역압력구배(adverse pressure gradient) 조건에서 발

Table 4 Design variables applied in this study

Design variables	Description	Level 1	Level 2 (Ref)	Level 3
X_1	Inner angle [°]	14	15	18
X_2	Outer angle [°]	13	15	20

Table 5 Results of design of experiment.

	X_1	X_2	Detecting efficiency [%]
1	16	16.5	79.08
2	14	16.5	88.13
3	18	16.5	76.45
4	16	13	80.39
5	16	13	83.60
6	14	13	91.73
7	18	13	73.43
8	14	20	87.21
9	18	20	74.80

생하는 유동의 분리를 정확하게 예측하는 $k-\omega$ 기반의 SST(shear stress transport) 모델을 사용하였다⁽¹³⁾. 격자의 경우 난류 모델에 따른 경계층 두께를 산정하기 위하여 y^+ 를 고려하였으며, 일반적으로 SST 난류 모델의 경우 y^+ 가 1이하 일 때 해석이 정확하다고 알려져 있어 노즐 내부 벽면에 경계층을 주어 해석의 타당성을 확인하였다(Fig. 2 참조). 또한 격자 의존성을 판단하기 위해 격자수를 약 100만개부터 400만개까지 늘려가며 입자의 체적분율(volume fraction)을 고찰하였는데 총 300만개 이상에서 일정한 값을 얻을 수 있어 이를 기반으로 격자계를 구성하였다(Fig. 3 참조). 노즐로 유입되는 에어로졸 입자 및 외장유동을 위한 공기의 유량은 미 육군연구소의 실험값⁽¹⁴⁾을 참고하여 설정하였다. 각 유량은 에어로졸 입자 및 공기가 1.0 LPM이 되도록 설정하였다(Table 2 참조). 에어로졸 입자는 미 육군연구소의 실험을 참고하여 TiO₂로 선정하였으며 이에 대한 물성은 Table 3에 기술하였다.

3. 최적설계

3.1 목적함수

본 연구의 목적함수는 집속효율(focusing efficiency)로 선정하였으며, 다음 식으로 표현된다.

$$E_D = \frac{m_{particle}}{m} \quad (3)$$

여기서 m 은 유입된 입자의 총 질량을 의미하며, $m_{particle}$ 은 집속된 입자의 질량을 의미한다.

3.2 설계변수

외부 및 내부 노즐로 구성된 외장유동 노즐의 출구 형상이 변화하게 되면 유입된 입자의 속도 및 운동 방향이 변하게 되고 이는 입자 거동 특성 변화를 야기하기 때문에 성능지표인 집속효율에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 최적화를 위한 설계변수로 외부 노즐 분사각(θ_1)과 내부 노즐 분사각(θ_2)으로 설정하였다(Fig. 1 참조).

3.3 실험계획법

실험계획법은 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대한 실험을 어떻게 수행하고, 데이터를 어떻게 얻을 것이며 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 방법이다. 본 연구에서는 외장유동 노즐에 대한 최적화를 전산유체역학을 이용하여 해석을 수행하였다. 하지만, 하나의 설계점을 해석하는데 많은 시간이 소요되기 때문에 다중의 설계변수에 대한 해석시간을 최소화하고 최대의 정보를 얻기 위하여 실험계획법을 사용하였다. 또한, 설계점의 구성을 위해 실험계획법에서 실험점 배치 방법 중 하나인 중심합성계획법(central composite design)을 사용하였다. 중심합성계획법은 여러 가지 방법 중 상대적으로 설계변수의 개수가 적을 때 실험 횟수를 최소화하고 효율을 증대할 수 있고, 곡면적 변화에 대한 추정이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 중심합성계획법은 요인점, 축점, 중심점으로 구성되고 직교성과 회전가능성의 장점을 가진다⁽¹⁵⁾. 중심합성계획법은 다음과 같이 표기된다.

$$y = 2^k + 2k + 1 \tag{4}$$

여기서 y 는 실험의 횟수, k 는 설계변수의 개수를 의미한다. 본 논문에서는 설계변수가 2개 이므로 9개의 결과를 도출하였고, 설계변수의 수준을 Table 4에 기술하였고, 수치해석 결과를 Table 5에 나타내었다.

3.4 반응표면법

반응표면법은 여러 가지 설계 변수들 간의 상호작용이 결과에 미치는 영향을 수학적으로 분석하여 최적화된 조건을 얻어 내기 위해 Box와 Wilson⁽¹⁶⁾이 고안해 낸 실험계획법이다. 반응표면법은 여러 개의 독립변수를 조합하여 반응량이 최적이 되는 모델을 선정하고, 독립변수 간의 상호작용을 결정하는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 실험계획법의 결과를 기반으로 반응표면법 중 하나인 Kriging 기법을 사용

Table 6 Results of response surface method

Candidate point	X_1	X_2	E_D	Volume fraction
Point 1	14	13	91.73	0.23083
Point 2	14.018	13.879	90.15	0.23106
Point 3	14.01	14.754	89.44	0.23203

Table 7 Comparison results of focusing efficiency and volume fraction between the RSM and CFD

	X_1	X_2	E_D	Volume fraction
Reference model	15	15	88.62	0.23285
RSM Point	14	13	91.73	0.23083
CFD	14	13	91.60	0.23065

하였는데, 이는 다음 식으로 구성된다.

$$y(x) = f(x) + z(x) \tag{5}$$

여기서 $y(x)$ 는 설계변수 x 에 대한 미지의 함수이다. $f(x)$ 는 설계변수로 알려진 다항식의 함수이고, $z(x)$ 는 평균이 0이고 분산(σ^2)이 0이 아닌 공분산(covariance)이다.

$$cov(z(x^i), z(x^j)) = \sigma^2 R[R(x^i, x^j)], \tag{6}$$

$$i, j = 1, \dots, n_s$$

여기서 R 은 상관행렬이고 $R(x^i, x^j)$ 는 두 점 사이의 공간 상관함수이다. 상관함수의 Gaussian 상관함수는 다음과 같이 표기된다.

$$R(x^i, x^j) = \prod_{k=1}^{n_{dv}} \exp[-\theta_k |x_k^i - x_k^j|^{p_k}] \tag{7}$$

위 식에서 n_{dv} 는 설계변수의 개수이고, θ_k 와 p_k 는 모델에 적합한 미지의 상관변수이며, x_k^i 와 x_k^j 는 k_{th} 변수에 대한 표본점을 나타낸다⁽¹⁷⁾.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 외장유동 노즐의 형상이 에어로졸집속효율에 미치는 영향을 고찰하였다. 설계변수는 외부 노즐과 내부 노즐의 분사각으로 설정하였으며, 설계변수에 대한 해석 시간을 줄이고자 실험계획법을 사용하여, 9개의 설계점을 도출하였으며 각 지점에 대한결과를 기반으로 반응표면법을 이용하였다. 반응표면법으로 3개의 최적점을 얻었고 그 결과는 Table 6에 기술하였다. 3개의 최적점 중 가장 집속효율이 높은 점을

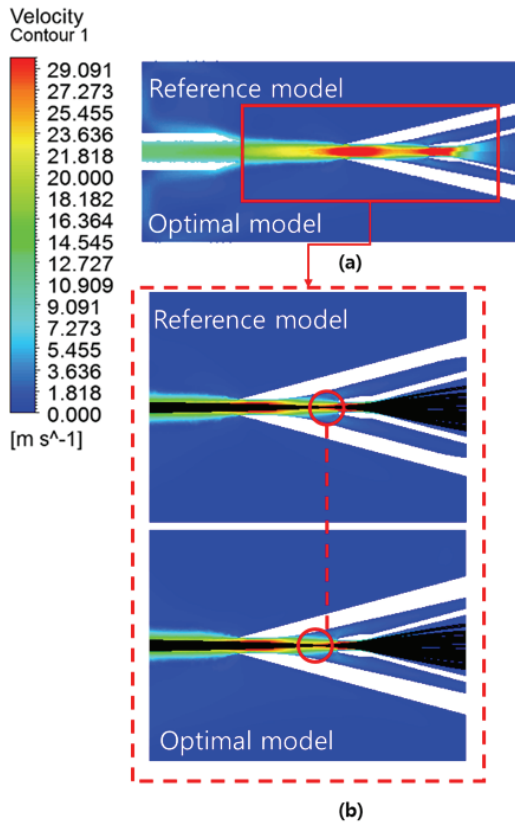


Fig. 4 Comparison of velocity distributions between optimal model and reference model (a) velocity field (b) particle flow characteristics

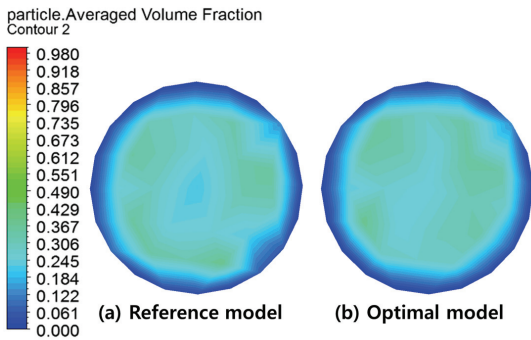


Fig. 5 Comparison of volume fraction at detecting area

CFD를 이용하여 결과를 비교하였다. 그 결과는 Table 7에 기술하였다. 반응표면법과 CFD 값의 상대오차는 0.14%를 나타내어 반응표면법 결과의 타당성을 확인하였다. 최적화된 형상과 기본 형상에 대한 집속 효율의 상대오차는 3.36%를 나타내었다(Table 7 참조). Figure 4은 기본 모델과 최적 모델의 횡단면에서의 속도장을 나타낸 것이다. 그림과 같이 내부 노즐에서의 분사각이 감소하여 에어로졸 입자의 속도가 증가하게 될 뿐 아니라 가속되는 영역이 기존 형상에 비해 출구 영역으로 이동한 것을 알 수 있다. 따라서 에어로졸 입자 속도가 증가하여 관성력이 증가하기 때문에 입자의 운동 방향성을 유지시켜

집속효율이 향상되는 것으로 판단된다. 외부 노즐에서 분사각 또한 감소하여 외장유체 유입 구간 감소로 외장유체 속도가 증가하여 에어로졸 입자의 유동방향을 보조하는 힘이 강해짐을 예측할 수 있으며 유동 개선에 따른 입자 집속효율이 향상됨을 유추할 수 있다. Figure 5는 기본 모델과 최적 모델의 탐지 영역에서의 입자 체적분율을 확인한 결과이다. 와·내부의 분사각이 감소하면서 체적분율은 감소하였으나 입자와 외장유체가 중심부로 집중되는 것을 확인할 수 있다(Table 7 참조). 이러한 결과는 입자와 외장유체의 관성력 증가로 유동의 방향성을 유지하여 탐지영역에 집속효율이 향상되는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 노즐 형상 변화에 따라 입자와 외장유체 속도가 계속 증가하게 되어 압축성 유동의 특성을 나타내게 되면 입자 검출의 정확성과 노즐 유동의 안정성에 문제가 나타날 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 외장유동 노즐의 외부와 내부의 분사각을 설계변수로 설정하여 실험계획법과 반응표면법으로 최적화를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 내부 노즐의 분사각 감소는 에어로졸 입자의 속도를 증가시키는 요인이 되고 이에 따라 운동 방향성이 유지되고 집속 효율이 향상됨을 알 수 있다.
- 2) 외부 노즐의 분사각 감소는 외장유체의 속도를 증가시켜 입자의 유동을 보조하는 힘이 증가하여 입자를 중심으로 집중시키는데 영향을 미쳐 집속효율이 향상되는 경향을 나타내었다.

이러한 결과를 통해 외장유동 노즐의 분사각은 에어로졸 입자 집속효율에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 설계변수와 다양한 최적화 기법을 적용하여 외장유동 노즐에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 국방화생탐지 특화 연구센터를 통한 국방과학연구소에서 지원하여 연구하였음.

Reference

- (1) Huang, H. C., Pan, Y. L., Hill, S. C., Pinnick, R. G. and Chang, R. K., 2008, "Real-time Measurement of Dual-wavelength Laser-induced Fluorescence Spectra of Individual Aerosol Particles", Optical Society of America, Vol. 16, pp. 16523-16528.
- (2) Miljevic, B., Modini, R. L., Bottle, S. E. and Ristovski, Z. D.,

- 2009, "On the efficiency of impingers with fritted nozzle tip for collection of ultrafine particles", *Atmospheric Environment*, Vol. 6, pp. 1372-1376.
- (3) Hill, S. C., Pinnick, R. G., Niles, S., Pan, Y. L., and Holler, S., 1999, "Real-time Measurement of Fluorescence Spectra from Single Airborne Biological Particles", *Field Analytical Chemistry and Technology*, Vol. 3, pp. 221-239.
- (4) Huang, C. H. and Tsai, C. J., 2002, "Influence of impaction plate diameter and particle density on the collection efficiency of round-nozzle inertial impactors", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 6, pp. 714-720.
- (5) Romay, F. J., Roberts, D. L., Marple, V. A., Liu, B. Y. H. and Olson, B. A., 2002, "A high-performance aerosol concentrator for biological agent detection", *Aerosol Science & Technology*, Vol. 2, pp. 217-226.
- (6) Rezvanpour, A., Attia, A. B. and Wang, C. H., 2010, "Enhancement of particle collection efficiency in electro-hydrodynamic atomization process for pharmaceutical particle fabrication", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 24, pp. 12620-12631.
- (7) Taketani, F., Kanaya, Y., Nakamura, T., Koizumi, K., Moteki, N. and Takegawa, N., 2013, "Measurement of fluorescence spectra from atmospheric single submicron particle using laser-induced fluorescence technique", *Journal of aerosol Science*, Vol. 58, pp. 1-8.
- (8) Rostedt, A., Putkiranta, M., Marjamäki, M., Keskinen, J., Janka, K., Reinivaara, R. and Holma, L., 2006, "Optical chamber design for aerosol particle fluorescent measurement", In *Optically Based Biological and Chemical Detection for Defence III*, International Society for Optics and Photonics, Vol. 6398, p. 63980G.
- (9) Chun, U. H., Kim, J. C. and Hwang, S. S., 1998, "Effects of Particle Size and Injector Geometry on Particle Dynamics", *Transactions of Korea Society of Automotive Engineers*, Vol. 6, pp. 97-103(in Korean).
- (10) Han, S. W. and Hwang, J. H., 2000, "Condensational Growth of Fine Aerosol Particles to Increase Precipitation Efficiency", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 8, pp. 1069-1076(in Korean).
- (11) Yang, J. S., Choi, S. B., Park, S. Y. and Lee, S. B., 2012, "Analysis of didecylmethylammonium chloride(DDAC) aerosol in inhalation chamber", *Analytical Science and Technology*, Vol. 5, pp. 307-312.
- (12) ANSYS Inc. CFX User Guide, "Particle Transport Modeling", version 18.1, 2018.
- (13) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T. J., 1997, "Turbulence modeling validation, testing, and development".
- (14) Pan, Y. L., Bowersett, J., Hill, S. C., Pinnick, R. G. and Chang, R. K., 2009, "Nozzle for Focusing Aerosol Particles", ARL-TR-5026, U.S. Army Research Laboratory.
- (15) Im, J. B., Ro, Y. H. and Park, J. S., 2006, "An improved stochastic algorithm using kriging for practical optimal designs", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 34, pp. 33-44.
- (16) Box, G. E. P. and Wilson, K. B., 1951, "On the experimental attainment of optimum conditions", *Journal of the Royal Statistical Society B(Methodological)*, Vol. 13, pp. 1-45.
- (17) Kim, J. B., Hwang, K. Y. and Kwon, B. I., 2011, "Optimization of Two-Phase In-Wheel IPMSM for Wide Speed Range by Using the Kriging Model Based on Latin Hypercube Sampling", *Journal of IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 47, pp. 1078-1081.