

집속효율 향상을 위한 외장유동노즐 가속 구간의 최적설계 연구

이진우¹⁾ · 진정민¹⁾ · 김윤제^{*,2)}

¹⁾성균관대학교 일반대학원 기계공학과

²⁾성균관대학교 기계공학부

Optimal Design of Sheath Flow Nozzle Acceleration Section for Improving the Focusing Efficiency

Jin-Woo Lee¹⁾ · Jung-Min Jin¹⁾ · Youn-Jea Kim^{*,2)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

(Received 5 July 2019 / Revised 6 September 2019 / Accepted 11 October 2019)

ABSTRACT

There is a need to use sheath flow nozzle to detect bioaerosol such as virus and bacteria due to their characteristics. In order to enhance the detection performance depending on nozzle parameters, numerical analysis was carried out using a commercial code, ANSYS CFX. Eulerian-lagrangian approach method is used in this simulation. Multiphase flow characteristics between primary fluid and solid were considered. The detection performance was evaluated based on the results of flow field in nozzle chamber such as focusing efficiency and swirl strength. In addition, Latin hypercube sampling(LHS) of design of experiment(DOE) was used for generating a near-random sampling. Then, the acceleration section is optimized using response surface method(RSM). Results show that the optimized model achieved a 6.13 % in a focusing efficiency and 11.47 % increase in swirl strength over the reference model.

Key Words : Sheath Flow Nozzle(외장유동노즐), Focusing Efficiency(집속효율), Latin Hypercube Sampling(라틴 하이퍼큐브 샘플링), Design of Experiments(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법)

1. 서론

외장유동 노즐(sheath flow nozzle)은 형광분석기(SPFS,

Single-Particle Fluorescence Spectrometer)의 구성 요소 중 하나로 에어로졸 입자를 탐지할 수 있도록 외장유동에 의한 입자 집속(focusing)을 높여준다. 이때 집속된 입자들에 조사된 광원이 반사되어 파장으로 측정 장비에 기록 되어 입자 크기를 검출할 수 있어 다양한 연구에 활용되고 있다^{1,2)}(Fig. 1 참조). 군사적 관점

* Corresponding author, E-mail: yjkim@skku.edu
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

에서 전시에 사용되는 생화학무기(BWAs, Biological Warfare Agents)는 바이오에어로졸(bioaerosol)형태로 심각한 사고를 초래하는 유해한 물질로 알려져 있다^[3,4]. 게다가 에어로졸의 작은 크기로 인해 광원에 노출되는 입자 수가 적어 적절한 신호가 수집되지 못하거나 크기와 모양에 의한 관성에 영향을 많이 받아 효과적인 탐지가 어렵다. 이를 해결하기 위해 공기역학적 관점으로 설계된 노즐을 활용하여 입자를 집중시킨다. 미국 육군 연구소는 미세 에어로졸 입자를 효과적으로 탐지하기 위해 입자 집속 연구를 수행하였는데 외장유동이 적용된 3세대 노즐을 제시하고 특정 유량에서 효율적으로 입자 탐지가 되는 것을 실험적으로 확인하였다^[5]. 제시된 노즐 제원을 가지고 Song 등^[6]은 노즐 형상각 변화에 따른 연구를 수행하여 입자 재순환을 개선하여 에어로졸 집속 효율을 향상시켰다. Lee 등^[7]은 외장유동이 집속 입자에 미치는 영향을 조사하여 입자의 평균 체류시간, 입자 수 농도 분포 및 손실률을 수치적으로 계산하였고 광학 캐비티 내부의 흐름을 검증하기 위해 실험적으로 비교 연구를 수행하였다. Pan 등^[8]은 입자 집속을 위해 광영동(photophoresis)을 활용하는 방법을 제시하였는데 실험적으로 입자 집속에 효과적이라는 것을 증명하였다. Choi 등^[9]은 정전기를 활용한 나노입자(nano particle) 집속을 수치해석 및 실험을 통해 검증하여 그 유효성을 확인하였다. Jin 등^[10]은 3세대 노즐의 내외부 노즐 분사각이 입자 집속율에 미치는 영향을 분석하였으며, 또한 반응표면

법을 이용하여 최적화 연구를 수행하였다. 이와 같이 에어로졸 입자 탐지를 위한 입자 집속율 향상이 중요한 것을 앞서 언급한 연구를 통해 알 수 있다. 본 연구에서는 에어로졸 집속을 향상을 위한 외장유동 노즐 내부 유동을 수치적으로 해석하였고 결과를 바탕으로 최적화 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 모델링

본 연구에서는 미국 육군 연구소에서 생화학 무기 탐지를 위해 제시한 3세대 외장유동 노즐 제원을 사용하였다^[5]. 외장유동 노즐의 경우 외부 노즐(outer nozzle), 내부 노즐(inner nozzle), 그리고 챔버(chamber)로 구성되는데 모델 형상을 Fig. 2에 도시하였다. Design Modeler를 이용하여 3차원 형상을 설계하였고 내부 노즐과 외부 노즐의 결합은 압입 후 볼트 체결로 구성되나 유체 거동 해석에 큰 영향을 미치지 않아 유동장만 구현하였다.

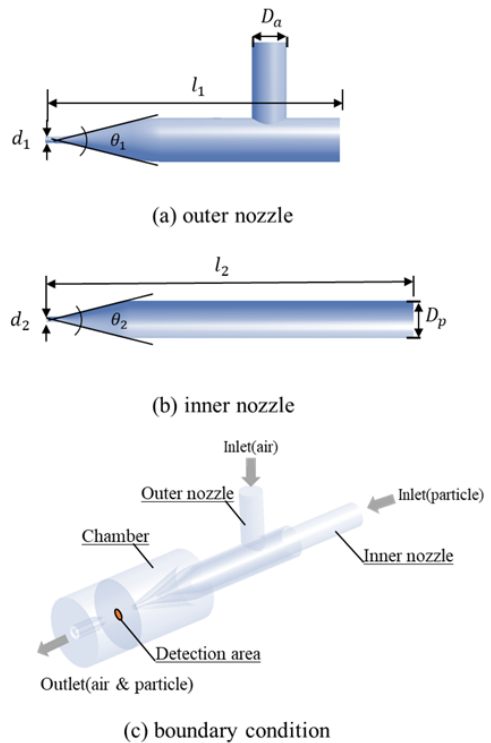


Fig. 2. Schematic of sheath flow nozzle

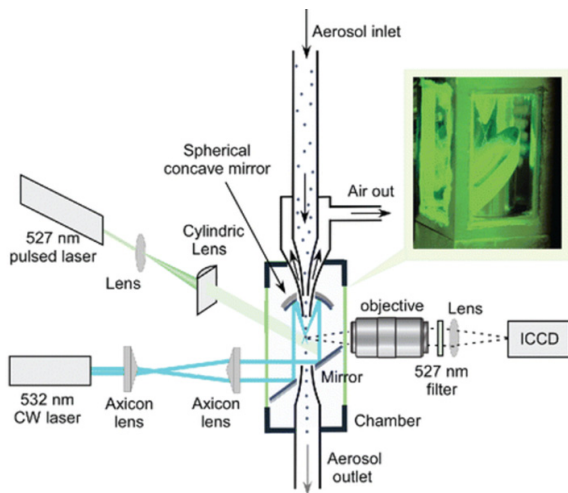


Fig. 1. Schematic of the experimental setup for observing the aerosol stream focused^[8]

Table 1. Specification of the sheath flow nozzle

Outer nozzle	
Inlet diameter of outer nozzle (D_o)	6.4 mm
Outlet diameter of outer nozzle (d_1)	1.3 mm
Injected angle of outer nozzle (θ_1)	30 °
Length of outer nozzle (l_1)	55 mm
Inner nozzle	
Inlet diameter of inner nozzle (D_p)	6.8 mm
Outlet diameter of inner nozzle (d_2)	0.9 mm
Injected angle of inner nozzle(θ_2)	30 °
Length of inner nozzle (l_2)	68.2 mm

Table 2 Boundary condition of present simulation

Working sheath fluid	Air at 25 °C
Aerosol particle solid	TiO ₂
Inlet (air)	1.0 LPM
Inlet (particle)	1.0 LPM
Outlet	1 bar
Convergence criteria	1.00E-05
Molar mass (TiO ₂)	79.866 g/mol
Density (TiO ₂)	4.23 g/cm ³
Diameter (TiO ₂)	9.6 μm

2.2 수치해석

본 연구에서는 외부 노즐과 내부 노즐에서의 작동 유체가 다르기 때문에 다상유동 해석 기법 중 하나인 Lagrangian particle tracking 기법을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 이 모델의 경우 입자 분산에는 Eulerian-Lagrangian 접근법을 기반으로 계산하지만, 연속체 유체 유동에 대해서는 Navier-Stokes 방정식에 의해 계산된다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 위한 지배방정식으로 비압축성 유동 및 시간 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (U \cdot U) \\ & = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nabla \cdot \nu \nabla U + \nabla \cdot \overline{u'u'} + f \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, ρ 는 연속체 밀도, U 는 속도 벡터, p 는 압력, 그리고 f 는 체적력(body force)을 의미한다. 운동량 방정식을 계산하기 위해 난류 분산력, 부력, 그리고 항력을 고려하였으며 Schiller-Naumann 상관식을 사용하였다^[11]. 선행 연구를 참고하여 초경유동을 방지하여 작동 유체가 원활히 분사할 수 있도록 입자 탐지에 효과적인 1 LPM(L/min)의 공기 유입량을 선정하였다. 에어로졸 입자는 TiO₂로 물성과 경계조건을 Table 2에 나타내었다^[5].

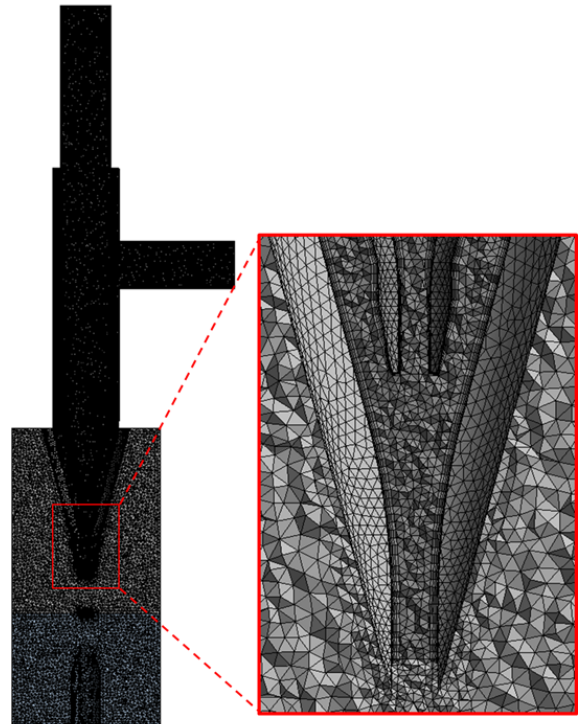


Fig. 3. Grid system applied in the present study

2.3 격자의존성 평가

본 연구에서 사용한 난류모델은 $k-\epsilon$ 의 장점이 결합된 $k-\omega$ 기반의 SST(shear stress transport)모델을 사용하였다. SST 모델의 경우 유동박리(flow separation)에 의한 2차 유동(secondary flow) 및 역압력구배(adverse

pressure gradient) 조건에서 발생하는 유동박리를 정확하게 예측해주는 장점이 있기 때문에 토출되는 유체 거동을 모사하기 위해 사용하였다. 격자계의 경우 난류 모델에 따른 경계층 두께를 산정하기 위하여 y^+ 를 1 이하로 선정하여 벽면에 중첩층을 구성하였으며 유로 내부는 비정렬격자로 구성하였다(Fig. 3 참조). 격자수가 증가할수록 정확성은 향상되지만 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 격자의 준성을 판단하기 위해 격자수를 20만개부터 500만개까지 늘리며 격자의준성 평가를 수행하였다. 노즐을 통한 유체의 분사는 압력에 의한 원리이므로 챔버 내부에 압력장이 충분히 발달되는 격자수를 선정하기 위해 챔버 내부의 압력분포를 목적함수를 선정하여 이를 Fig. 4에 도시하였다. 그 결과 약 300만개 이상에서 비교적 수렴되어 이를 최종 격자계로 선정하였다. 챔버 외벽으로부터 전달되는 열영동(thermophoresis) 현상은 무시하였고, 외장유동과 에어로졸 입자 간 거동특성만 해석하였다.

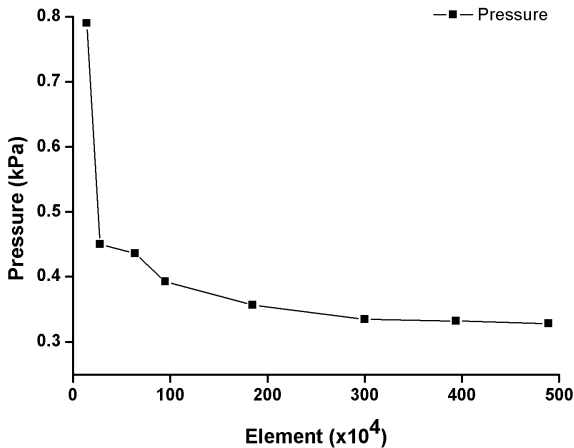


Fig. 4. Grid dependency test

3. 최적설계

3.1 목적함수

본 연구에서는 에어로졸 입자 탐지 성능에 대해 노즐 출구로부터 20 mm 떨어진 탐지영역(detection area)에서의 집속효율(focusing efficiency)과 외부노즐 출구영역에서 스윙 강도(swirl strength)를 목적함수로 선정하였는데, 집속효율은 다음 식으로 표현된다.

$$E_D = \frac{m_i}{m} \tag{3}$$

여기서 m_{total} 은 입자에 분사된 에어로졸 입자의 총 질량이고, m_i 은 챔버 내 탐지 영역을 지나는 에어로졸 입자의 질량이다. 스윙강도는 다음 식으로 표현된다.

$$\lambda_{\alpha} = \frac{\xi_j + \xi_k}{2} \sqrt{3} \tag{4}$$

여기서 ξ 는 Vorticity이며 상용코드를 이용하여 국부 스윙 모션의 강도를 계산하였다^[2].

입자의 거동은 체류시간에 따라 Stokes 항력의 영향을 받게 되는데 체류시간 동안 입자가 광원에 노출되는 시간이 길수록 입자 탐지 성능에 영향을 미칠 것으로 유추되지만 본 연구에서는 스윙 강도에 의한 입자의 분사각 확장^[13]과 소음 진동이 노즐 내부 유동의 안정성에 미치는 영향을 고려하여^[14] 스윙 강도를 목적함수로 선정하였다.

3.2 설계변수

선행 연구^[6,10]에서는 외장유동 노즐 형상각을 최적화하여 입자의 재순환(recirculation)을 개선하고 집속율을 높였다. 아음속 유동의 경우 공기역학적으로 좁아지는 유로 형상에 의해 가속되며 입자는 수송유체에 의해 입자의 거동 특성이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 노즐 직경을 제외한 속도에 영향을 미치는 노즐 출구길이와 노즐간 거리를 설계변수로 선정하여 해석을 진행하였다(Fig. 5 참조). 여기서 x_1 은 내부 노즐 출구길이, x_2 은 두 노즐 간 거리, 그리고 x_3 은 외부 노즐 출구길이이다. 본 연구에서 설정한 설계 제원은 Table 3에 기술하였다.

Table 3. Design parameters applied in this study

Design variables	Description	Level 1	Level 2 (Ref.)	Level 3
x_1	Inner outlet length [mm]	1.8	2	2.2
x_2	Distance between nozzles [mm]	5.3	6.3	7.3
x_3	Outlet outlet length [mm]	1.5	2.5	4.5

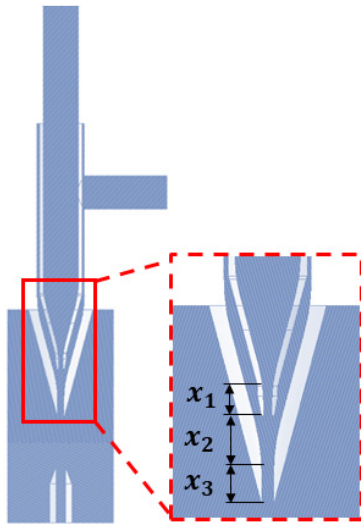


Fig. 5. Design points for optimization at axial cross-section of the nozzle

3.3 실험계획법

실험계획법(design of experiments, DOE)은 연구를 체계적으로 계획하고 수행하며 통계적 분석 방법으로 문제에 대하여 최소의 실험 횟수로 최대의 정보를 얻는 방법을 계획하는 것이다^[15]. 실험계획법에서의 가장 중요한 목적은 특성 값을 최대 또는 최소로 하는 최적조건을 찾는 것이다. 최적조건은 실제 실험의 유무에 관계없이 설계인자만의 조합으로 결정되는 제약이 있다. 하지만 실험계획법은 반응모델을 구성하는데 필요한 실험 횟수를 최소한으로 줄여줌과 동시에 높은 신뢰도를 갖는 반응모델을 만들 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 대표적인 전산 실험계획방법 중 하나인 LHS(Latin Hypercube Sampling) 기법을 사용하였다. LHS의 경우 실험공간 전체에서 실험점이 골고루 추출되도록 각 입력 변수의 범위를 n 개의 범위로 나눈 후, 각 구간에서 하나씩 추출하되 중복되지 않게 n 개의 설계점을 추출하는 방법이다^[16]. 여기서 n 은 총 실험점의 수인데, 본 연구에서는 LHS의 총 실험점 구성을 위한 샘플 유형으로 CCD(Central Composite Design) 기법을 사용하였다. CCD의 경우 설계변수의 개수가 적을 때 실험 횟수를 최소화하고 효율을 증대시킬 수 있다는 장점과 요인점, 축점, 그리고 중심점으로 구성되며 직교성(orthogonality)과 회전가능성의 장점을 가진다^[17]. CCD기법의 총 설계점(design point) 수는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

Table 4. Design points of design of experiments

Design point	x1 (mm)	x2 (mm)	x3 (mm)	Focusing efficiency (%)	Swirl strength (1/s)
1	2.027	6.833	3.2	77.4713	2729.49
2	2.053	6.300	3.8	72.3360	1528.7
3	1.867	6.433	1.6	70.3929	3139.6
4	2.160	5.367	3.6	57.6194	1379.35
5	1.893	5.633	1.8	60.5950	3689.4
6	1.840	5.500	4.4	46.6218	1451.97
7	2.133	7.100	3.4	76.6088	1874.24
8	2.107	6.700	4.2	77.4341	1620.32
9	2.000	5.767	2.4	65.7418	4514.53
10	2.187	6.567	2.2	76.6355	4170.65
11	1.947	6.033	2.8	70.2808	4027.82
12	1.920	6.967	2	76.1686	3741.15
13	1.973	6.167	3	70.2120	3299.53
14	1.813	7.233	4	77.4245	1657.05
15	2.080	5.900	2.6	68.4455	4548.43

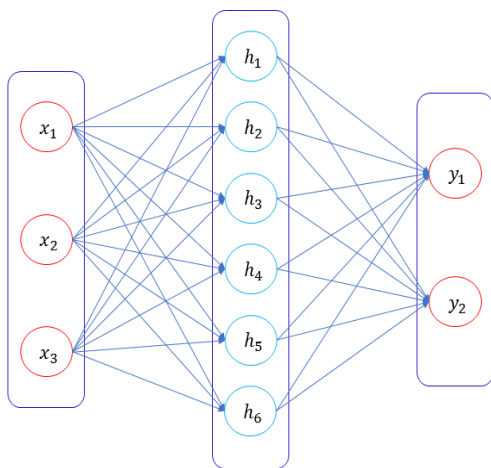
$$y = 2^k + 2k + 1 \quad (4)$$

위 식에서 y 는 실험의 개수, k 는 설계변수의 수를 의미한다. 본 논문에서는 설계변수가 3개 이므로 15개의 중복되지 않는 설계점을 도출하였는데 수치해석 결과를 Table 4에 나타내었다.

3.4 반응표면법

반응표면법(Response Surface Method, RSM)은 근사식을 가정하여 설계변수와 반응변수간의 상호작용이 설계하는 모델에 어떠한 영향을 주는지 수학적, 통계적으로 분석하여 최적화된 조건을 얻어내기 위해 Box와 Wilson이 고안한 실험계획법이다^[18]. 또한 반응표면법은 여러 개의 인자 변화가 목적함수에 영향을 주고 있을 때 이러한 인자들의 영향이 이루는 반응표면을 회귀함수(regression function)로 추정하는 통계적 분석 방법이다. 본 연구에서 사용한 인공신경회로망(artificial

neural networks)기법은 인간의 신경계에서 정보 전달 및 처리를 중심으로 두는 방식으로 설계변수에 대한 출력변수의 응답 값을 도출한다¹⁹⁾. 뉴런(neural)이라는 정보처리 단위가 모여 적절한 값을 나타내며, 외부 자극에 적절한 가중치를 곱한 다음 전달 함수를 통해 다음 뉴런에 정보를 추가하는 형식이다. 여러 개의 노드(node)가 모여 층(layer)을 구성하고, 층이 모여 복잡한 망(network)을 형성한다. 여기서, 각각의 노드는 다른 노드와 연결되어 신호를 주고 받으며, 전달 신호 세기는 연결 가중치(network weight)에 의해 결정된다. 신경회로망의 장점은 인간 신경계의 정보 전달과 처리에 초점을 맞춘 방식으로 입력 변수에 대한 출력 변수 반응 값을 도출한다. 일반적인 신경회로망의 경우, 입력 정보는 출력 변수와 동일한 수의 뉴런을 가진 은닉층(hidden layer)과 출력층(output layer)을 통해 출력 값을 도출한다(Fig. 6 참조). 은닉층의 뉴런 수가 작을 경우 공간의 곡률에 대해 시뮬레이션을 수행하지 않는다. 하지만 뉴런 수가 증가할 경우 시뮬레이션은 수행되지만 곡률 영역에서 과도 해석으로 문제가 발생할 수 있다. 이러한 연구결과로 입력 층 뉴런 개수의 1.5배에서 2배가 되도록 숨겨진 층에 대한 뉴런 개수를 결정함으로써 비선형적인 곡률 문제에 대해 적절한 해석이 가능하다. 본 연구에서는 은닉층 뉴런 개수를 입력층 뉴런 개수의 2배가 되도록 하여 입력 층의 뉴런 개수와 은닉층 뉴런 개수를 각각 3개와 6개로 각각 설정하였다.



(a) Input layer (b) Hidden layer (c) Output layer

Fig. 6. Diagram of the neural network process

3.5 최적설계

본 연구에서는 최적설계 방법으로 다목적 유전 알고리즘(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)을 사용하였다. 유전 알고리즘(genetic algorithm)은 유전학과 자연 진화를 흉내낸 적응 탐색 기법으로 부모의 유전 자로부터 자손 유전자를 생성하는 유성생식과 자연환경의 진화원리를 모방한다²⁰⁾. 문제 해결에 적용되는 경우 기본적인 전체는 인위적인 진화현상을 일으킬 초기 집단을 구성한다. 여기서 집단은 잠정적 해를 뜻하는 다수의 개체이며, 이들은 유전자의 역할을 반영한다. 이러한 집단은 세 가지 진화적 프로세스를 사용하는데, 교배(crossover), 선택(selection), 그리고 돌연변이(mutation)로 구성된다. 초기 단계에서 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 집단이 형성되어 설계영역 내에 무작위로 분포되도록 선정되거나 선택되며 성능이 좋은 개체들이 많이 선택되어 복제되고 나쁜 개체들은 소멸된다. 선택된 개체는 교배를 통해 재결합되고, 교배는 일반적으로 집단 내에 정보만을 사용하여 변화를 시도한다. 돌연변이는 선택된 개체 중 하나 이상을 임의로 변경하여 집단에 새로운 정보를 제공한다. 이러한 변화는 낮은 확률로 발생하며, 새롭게 형성된 집단은 다시 평가되는 과정을 반복하여 최적의 해를 도출하게 된다. 다목적 유전 알고리즘은 목적함수가 2개 이상인 유전 알고리즘을 의미하며 다목적(multi-objective) 최적화에 특히 적합하여 비선형성이 강한 유체기계 설계에 많이 활용되고 있다²¹⁻²³⁾. 본 연구는 상용프로그램인 ANSYS Ver. 18.1을 사용하여 집속효율은 Max, 스월강도는 Min으로 설정하였으며 집속효율의 가중치를 높여 집속효율을 우선시하는 최적설계를 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 외장유동 노즐의 가속 구간이 에어로졸 집속 효율에 미치는 영향을 고찰하였다. 노즐을 구성하는 직경 D_1 , D_2 , d_1 , d_2 를 고정하여 유로 면적을 일정하게 하여 변수 x_3 에 의해 유로 최소 면적 위치가 결정되도록 설정하였다. 외부 노즐과 내부 노즐의 출구 길이와 노즐 간 거리를 설계 변수로 설정하였고 실험계획법을 사용하여 중복되지 않는 15개의 설계점을 도출하여 해석을 수행하였다. 해석결과를 기반으로 반응표면법을 통해 민감도 분석을 진행하였으며 다목적 유전 알고리즘을 통해 집속효율과 스월강도에 대한 최

적점을 도출하여 결과를 Table 5에 기술하였다. 집속효율이 높은 점을 선정하여 수치적으로 해석하였고 결과를 비교하였다. 외장유동 노즐을 통해 분사되는 입자 거동을 전산해석과 측정사진^[5]을 Fig. 7에 도시하였는데 유사한 입자 거동으로 진행되는 것을 확인하였다. 이는 내부 노즐을 통해 유입된 에어로졸 입자는 외부 노즐을 통해 유입된 수송 유체에 의해 확산이 억제되어 챔버로 집속 분사되는 것으로 유추할 수 있다. 노즐을 통해 토출되는 입자가 분산되지 않고 수송유체에 의해 집속되는 것을 확인할 수 있으며, 에어로졸 입자의 운동 방향성이 수송 유체에 의해 축 방향으로 변화함을 알 수 있다. 이는 챔버 내부 입자 평균자유행로(mean free path)가 길어져 입자의 집속효율 향상으로 이어진다는 것을 유추할 수 있다. 그러나 입자 속도가 압축성 유동에 가까워지면($Ma > 0.3$) 입자 탐지에 과측정(overestimation)이 발생할 수 있고 스윙 강도가 강해지면 분사각이 증가하거나 노즐 소음으로 인한 진동으로 불안정한 문제가 발생하게 된다^[13]. Fig. 8은 설계변수가 목적함수에 미치는 민감도 분석 결과를 도시하였다. 여기서 입력 매개변수(input parameter)의 0.5 값은 기준(ref.)값이다. 본 연구에서 가속 구간으로 선정된 설계변수들이 노즐 내부 외장 유동(air)의 유속에 미치는 영향을 Fig. 8(a)를 통해 알 수 있다. 세 가지 변수 모두 입력 매개변수가 증가할수록 속도가 증가한다. Fig. 8(b)에 따르면 x_1 과 x_2 는 매개변수에 따라 양(+)의 기울기를 갖지만 x_3 은 오히려 음(-)의 기울기를 갖는다. x_1 이 증가하면 입자의 가속구간이 증가하는데 이때 내부 노즐 출구 끝단에서 입자 병목(bottleneck) 현상이 발생에 따라 집속현상이 증가함을 알 수 있다. 또한 x_2 가 증가하면서 노즐 사이 간격이 감소하게 되고 혼합 구간이 감소하게 되는데 수송 유체의 운동량 손실이 감소하여 입자 집속효율이 높아지는 것을 알 수 있다. 반면 x_3 에서 가속 구간이 짧아지면서 입자의 관성력이 상대적으로 작아지게 되어 수송유체에 의한 집속에 유리할 것으로 유추된다. 스윙 강도의 민감도 분석에서 x_1 과 x_3 은 0.3-0.4 사이의 매개변수 값에서 최대 스윙 강도가 발생함을 알 수 있다(Fig. 8(c) 참조). 반면 x_2 는 상대적으로 스윙 강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 출구 길이가 증가하면서 축 방향 관성이 증가함으로써 스윙 강도가 감소하는 것으로 유추할 수 있다. 또한 본 연구에서는 일정한 출구 면적을 가지고 수행했기 때문에 x_3 에 의해 노즐의 최소 면적의 위치가 결정되는 것을 유추할 수 있으며 변수 x_3

을 출구길이뿐만 아니라 토출구로부터 떨어진 최소면적의 위치로 정의할 수 있을 것으로 판단된다. 선정된 최적점의 전산해석 결과 오차는 3.11 %로 선정된 최적점의 타당성을 확인하였고, 기준 모델 대비 집속효율은 6.13 % 증가하였고 난류강도는 11.47 % 감소하였다. 따라서 기준 모델 대비 집속 효율이 개선되고 스윙 강도로 인한 영향이 작은 외장유동 노즐 형상을 도출하였다. Fig. 9는 기준모델과 최적모델의 탐지영역(detection area)에서 입자의 부피 분율(void fraction)을 비교한 것이다. 기준 모델 대비 최적모델의 입자 분율이 중심 방향으로 집중된 것을 확인할 수 있다. 출구 영역에서의 스윙 강도 비교를 Fig. 10에 도시하였는데 최대 스윙 강도가 발생하는 영역이 개선된 것을 확인하였다. 이는 최적모델이 기준모델 대비 개선된 모델은 최대의 집속효율을 가지며 개선된 스윙강도로 진동 측면에서 안전성이 확보됨에 따라 유지관리 측면에서 노즐 교체 주기를 연장할 것으로 사료된다.

Table 5. The results of optimization and reference

	Ref.	Opt.	CFD
x_1 (mm)	2	1.807	1.807
x_2 (mm)	6.3	7.28	7.28
x_3 (mm)	2.5	2.325	2.325
Focusing efficiency (%)	73.6	79.73	77.25
Swirl Strength (1/s)	4854.28	3230.5	4297.2

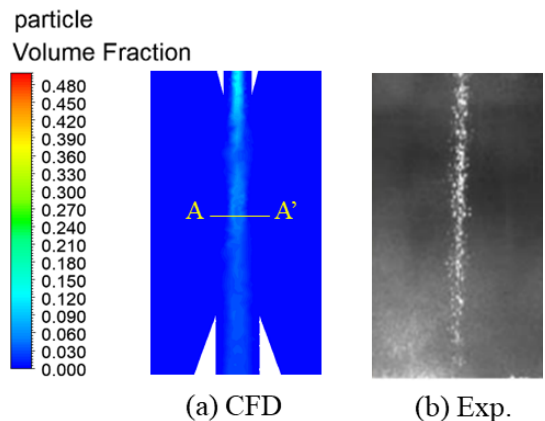


Fig. 7. The particle behavior in the chamber

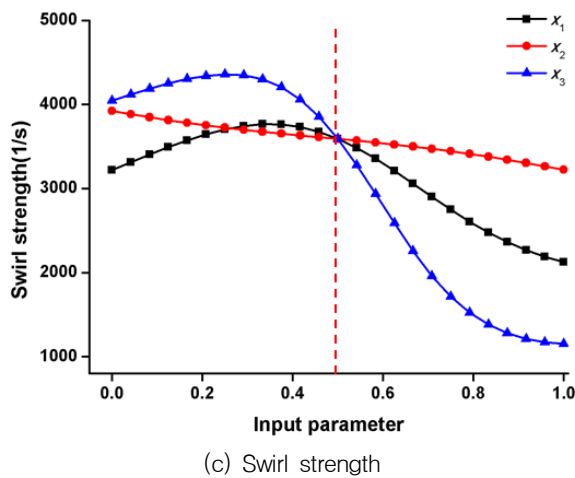
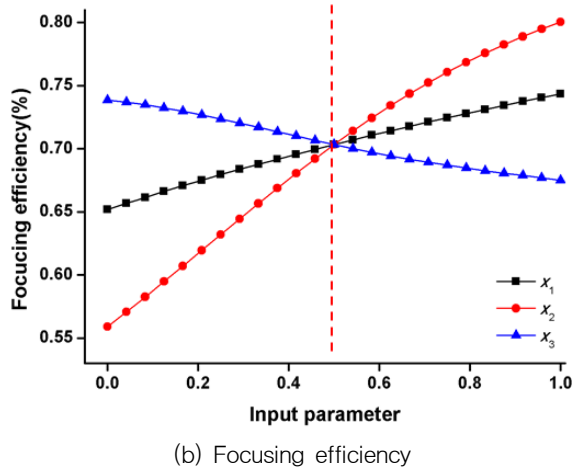
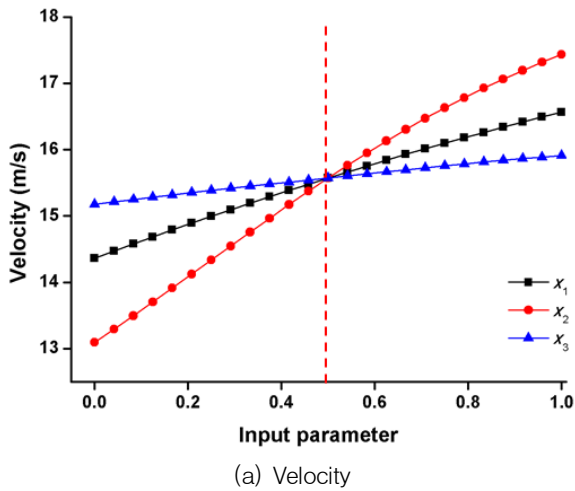


Fig. 8. Sensitivity analysis for design parameters

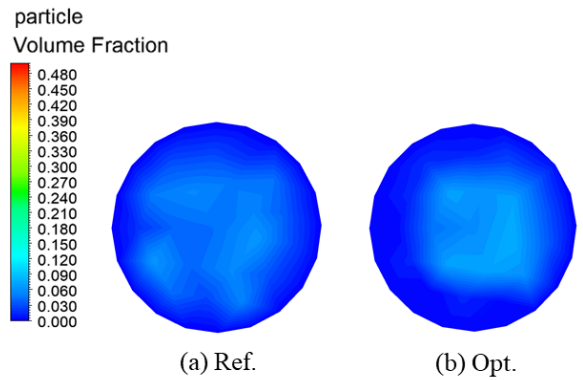


Fig. 9. The distribution of volume fraction of TiO_2 at cross-section(A-A' in Fig. 7(a))

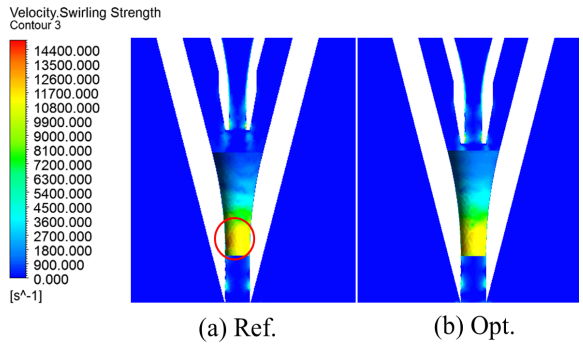


Fig. 10. The swirling strength contour at outer nozzle outlet

5. 결론

본 연구에서는 외장유동 노즐의 가속 구간을 설계 변수로 선정하여 실험계획법과 반응표면법을 통해 최적설계를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 민감도 분석을 통해 선정된 설계 변수는 매개변수에 따라 노즐 내 유속과 목적함수에 미치는 영향을 확인하였다. 각 설계변수들은 유속에 영향을 주는 것으로 확인되었고 내부 노즐의 가속 구간 x_1 과 노즐 간 거리 x_2 는 길어질수록, 외부 노즐의 가속 구간 x_2 는 짧아질수록 집속 효율에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, x_2 를 제외한 x_1 과 x_3 는 스윙강도에 미치는 설계인자인 것을 확인하였다. 집속효율과 스윙 강도를 다목적유전

알고리즘을 통해 최적점을 선정하여 집속효율은 6.13 %이 증가하고 스윙 강도는 11.47 % 감소하여 최대 집속효율을 가졌으며, 기준모델 대비 스윙강도가 개선된 모델을 도출하였다.

- (2) 본 연구에서는 최적화 기법 중 반응표면법을 활용하여 최적설계를 수행하였다. 반응표면법은 관심 영역 전체에서 속한 임의 변수의 수준에서 결과값을 예측하고, 이를 통해 원하는 결과값을 얻을 수 있도록 변수 수준을 최적화 하는 통계 분석법을 의미하며 반응표면법에 따라 도출되는 최적해를 가질 수 있음을 의미한다. 따라서 정량적 실험 연구를 통해 수치해석의 유효성 및 재현성을 확인하여 외장유동 노즐에 적합한 최적화 기법을 확립하는 것이 중요하다. 향후 본 연구 결과가 외장유동 노즐 성능 개선 최적화 정립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있길 바란다.

후 기

본 논문은 국방화생탐지 특화연구센터를 통한 국방과학연구소에서 지원하여 연구하였으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Agranovski, V., Ristovski, Z., Hargreaves, M., Blackall, P. J., and Morawska, L. "Real-time Measurement of Bacterial Aerosols with the UVAPS: Performance Evaluation," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 301-317, 2003.
- [2] Bridgeman, J., Baker, A., Brown, D., and Boxall, J. B., "Portable LED Fluorescence Instrumentation for the Rapid Assessment of Potable Water Quality," *Science of the Total Environment*, 524, 338-346, 2015.
- [3] Kim, K. H., Jahan, S. A., and Kabir, E., "A review on Human Health Perspective of Air Pollution with Respect to Allergies and Asthma," *Environment International*, 59, 41-52, 2013.
- [4] Cabalo, J. B., Sickenberger, R., Underwood, W. J., and Sickenberger, D. W., "Micro-UV Detector," *Optically Based Biological and Chemical Sensing for Defence*, International Society for Optics and Photonics, Vol. 5617, pp. 75-86, 2004.
- [5] Pan, Y. L., Bowersett J., Hill, S. C., Pinnick, R. G. and Chang, R. K., "Nozzle for Focusing Aerosol Particles," ARL-TR-5026, U.S. Army Research Laboratory, 2009.
- [6] Song, I. Y., Choi, S. K. and Kim, Y. J., "Optimal Design of a Sheath Flow Nozzle for Detecting Biological Warfare Agents," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 17, pp. 8360-8364, 2017.
- [7] Pan, Y. L., Kalume, A., Wang, C., & Santarpia, J. L., "Opto-aerodynamic Focusing of Aerosol Particles," *Aerosol Science and Technology* 52.1, 13-18, 2018.
- [8] Lee, H., Jeong, Y. S., Choi, K., & Shin, W. G., "The Effect of Sheath Flow Rate on the Particle Trajectory Inside an Optical Cavity with Direct Flow Configuration," *Journal of Aerosol Science*, 114, 146-156, 2017.
- [9] Choi, H., Kang, S., Jung, W., Jung, Y. H., Park, S. J., Kim, D. S., and Choi, M., "Controlled Electrostatic Focusing of Charged Aerosol Nanoparticles Via an Electrified Mask," *Journal of Aerosol Science*, 88, 90-97, 2015.
- [10] Jin, J. M., Lee, J. W., Kang, M. S., K, H. C., and Kim, Y. J., "Effects of Sheath Flow Nozzle Shape on the Focusing Efficiency of Aerosol Particles," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 22, No. 4, pp. 13-18, 2019.
- [11] TANAKA, Z., and IINOYA, K., "New Approximate Equation of Drag Coefficient for Spherical Particles," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 3, No. 2, pp. 261-262, 1970.
- [12] ANSYS Help Version 18.1, 2018, Ansys Inc.
- [13] Wang, G., & Bachalo, W. D., "The Effect of Swirl on the Velocity and Turbulence Fields of a Liquid Spray," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 114, No. 1, pp. 72-81, 1992.
- [14] Ibrahim, A. A., and Jog, M. A., "Effect of Liquid and Air Swirl Strength and Relative Rotational Direction on the Instability of an Annular Liquid Sheet," *Acta Mechanica* 186.1-4, pp. 113-133, 2006.
- [15] Fisher, R. A., "Design of Experiments," *Br Med J*,

- Vol. 1, No. 3923, pp. 554-554, 1936.
- [16] Stein, M., "Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling," *Technometrics*, Vol. 29, No. 2, pp. 143-151, 1987.
- [17] Kim, H. J., "Extended Central Composite Designs with the Axial Points Indicated by Two Numbers," *The Korean Communications in Statistics*, Vol. 9, pp. 595-605, 2002.
- [18] Box, G. E. P. and Wilson, K. B., "On the Experimental Attainment of Optimum Conditions," *Journal of the Royal Statistical Society B (Methodological)*, Vol. 13, pp. 1-45, 1951.
- [19] Basheer, I. A., and Hajmeer, M., "Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application", *Journal of Microbiological Methods*, Vol. 43, No. 1, pp. 3-31, 2000.
- [20] Fonseca, C. M., and Fleming, P. J., "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation Discussion and Generalization," *Icga* Vol. 93, pp. 416-423, 1993.
- [21] Jo, Y. M., and Choi, S. I., "Shape Optimization of UCAV for Aerodynamic Performance Improvement and Radar Cross Section Reduction," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 56-68, 2012
- [22] Cortes, O., Urquiza G. and Hernandez, J. A., "Optimization of Operating Conditions for Compressor Performance by Means of Neural Network Inverse," *Applied Energy*, Vol. 86, No. 11, pp. 2487-2493. 2009.
- [23] Kotani, M., Matsumoto H. and Kanagawa T., "Acoustic Diagnosis for Compressor with Hybrid Neural Network," *IJCNN-91-Seattle International Joint Conference*, Vol. 1, pp. 251-256, 1991.