



150 LPM 가상임팩터의 최적화 연구

권오찬^a, 전원영^b, 이현우^a, 서영진^{a*}

Optimization of 150 LPM Virtual Impactor

Ochan Kwon^a, Wonyoung Jeon^b, Hyunwoo Lee^a, Youngjin Seo^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology^b Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	July	2021
Revised	31	August	2021
Accepted	4	September	2021

Keywords:

Virtual impactor
CFD (computational fluid dynamics)
Collection efficiency
Cut-off size
Particle concentration

ABSTRACT

Numerical studies were performed to design a linear slot virtual impactor with a cut-off size of 1 μm , operating at 150 LPM. A prototype model was designed with a general shape of a virtual impactor, numerical analysis was conducted, and the results were compared to a model with different design parameters. ANSYS FLUENT was used for numerical analysis, and an RSM model was used to calculate turbulence in the flow field. The particle trajectory was confirmed using DPM, and the collection efficiency and wall loss of particles inside the virtual impactor were calculated. The optimization was conducted by changing the angle and width of the acceleration nozzle. The CFD results show that reducing the angle of acceleration nozzle results in an increased cut-off size and decreased wall loss of large particles ($> 4 \mu\text{m}$).

1. 서론

국내외에서 미세입자로 인한 문제점과 제거 방법에 대한 관심이 높아지고 있으며, 입자의 분석 및 검출기로서의 장치 개발이 이루어지고 있다. 대기 중에 넓게 퍼져있는 미세입자를 제거하는 대표적인 방법으로는 필터(filter), 전기 집진기(electrostatic precipitator) 그리고 입자의 관성을 이용하는 방법이 있다. 입자의 관성을 이용하는 대표적인 장치로는 싸이클론(cyclone)이 있으며, 싸이클론은 입자의 원심력을 이용하여 상부와 하부로 입자를 분리하는 장치이다. 싸이클론은 구조가 간단하며, 제작 및 유지비용이 낮은 장점을 가지고 있으나 최소 제거 입자경이 5~10 μm 로 PM 2.5의 미세입자를 제거하는데 어려운 단점을 가지고 있다. 미세입자를 효과적으로 제거하기 위하여 입자의 충돌 효과를 이용하는 대표적인 장치로 관성 임팩터(inertial impactor)가 개발되었다. 관성 임팩터는

장치 내부의 충돌판에 입자가 수집되는 방식이기 때문에 연속적인 샘플링이 불가능하며, 충돌판에서 고체 입자가 튀는 현상으로 인한 효율 저하가 나타나는 단점이 있다. 관성 임팩터의 단점을 보완하여 충돌판을 수집 노즐로 대체한 가상 임팩터(virtual impactor)가 개발되었다. Fig. 1에서와 같이 일반적인 가상 임팩터에서는 관성 임팩터의 충돌판 대신에 minor flow를 통해 입자가 수집된다. 일반적으로 양 측면의 major flow로 전체 유량의 80% 이상이 통과하고, 입자가 수집되는 minor flow로 전체 유량의 20% 이하가 통과하기 때문에 major flow와 minor flow로 유동이 분리되는 영역에서 입자는 관성에 의하여 major flow와 minor flow로 분리된다. Major flow를 지나는 유동이 지배적이기 때문에, 작은 입자는 유선을 따라 major flow 영역을 통과하며 큰 입자는 관성력에 의하여 유선을 이탈하여 minor flow 영역을 통과한다. 입자는 수집 노즐을 통과하여 장치의 외부로 유출되기 때문에 입자의 연속

* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7302

E-mail address: yjseo@kumoh.ac.kr (Youngjin Seo).

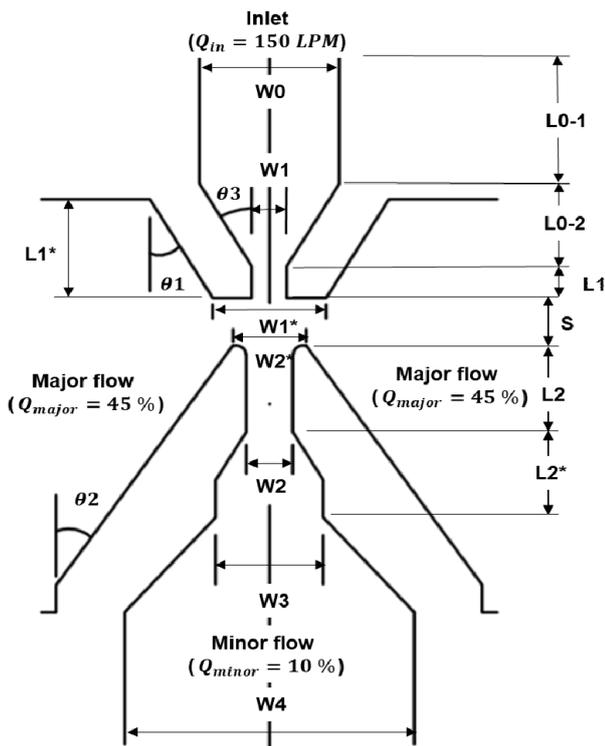


Fig. 1 Design parameters of virtual impactor

적인 샘플링이 가능해진다. 가상 임팩터는 충돌 효과를 이용하기 때문에 PM 2.5 이하의 입자에 대해 기계적인 분리가 가능하며, 연속적인 샘플링이 가능하기 때문에 대기 중 낮은 농도로 존재하는 미세입자를 농축하여 실시간 검출기로써의 역할을 수행할 수 있다. 가상 임팩터에서 입자의 관성력과 그에 따른 입자 분리는 내부 유동장에 따라 변하기 때문에 가상 임팩터의 설계 매개변수가 입자의 분리 효율을 결정하는데 중요하게 작용한다^[1].

가상 임팩터는 관성 임팩터와 같이 입자 분리 효율에 영향을 주는 여러 가지 변수에 관한 연구들이 진행되어왔다. Marple et al.^[2]은 이론적으로 가상 임팩터의 입구 가속 노즐에서 Reynolds 수를 제외한 대부분의 매개변수가 큰 입자의 효율보다 작은 입자의 수집 효율과 손실에 영향을 큰 것을 확인하였다. Huang & Chien^[3]은 Reynolds 수가 약 1500 미만일 때 중력에 의하여 입자의 수집 효율이 증가하는 것을 확인하였다. Haglund^[4]는 가상 임팩터의 입구 형상을 선형 슬롯과 원형 슬롯으로 제작하여 입자의 수집 효율을 비교하였으며, Marple & Liu^[5]는 원형 슬롯 가상 임팩터와 선형 슬롯 가상 임팩터의 노즐의 길이가 Reynolds 수 500 이하에서는 입자 분리 효율에 큰 영향을 미치나 이보다 높은 범위에서는 입자 분리 효율에 영향을 크게 미치지 않는 것을 확인하였다.

일반적으로 선형 슬롯 가상 임팩터와 원형 슬롯 가상 임팩터의 설계 매개변수의 변화에 따른 가상 임팩터 성능을 비교한 연구들

이 많이 진행되어 왔으며 새로운 형태의 가상 임팩터에 대한 연구도 이루어져왔다. Gotoh & Masuda^[6]는 annular-type의 가상 임팩터를 설계하였으며, 노즐의 각도가 작을수록 입자의 분리 효율이 감소하는 것을 확인하였다. Romay et al.^[7]은 에어로졸의 농축 효율을 높이기 위해 가상 임팩터를 연결하여 3단 가상 임팩터를 설계하였고, 내부의 입자 손실을 줄이고 주변 농도의 150배 이상으로 입자의 수집이 가능하도록 하였다. 또한 가상 임팩터의 압력 강하에 따른 입자의 분리 효율과 손실을 확인한 연구가 있었으며, 큰 압력 강하가 입자 분리효율을 증가시키는 것을 확인하였다^[8,9]. Bergman et al.^[10]은 다중 슬릿 가상 임팩터를 개발하여 휴대성이 높은 에어로졸 검출기로써의 역할이 가능한 것을 확인하였다.

최근에는 CFD (computational fluid dynamics)를 이용한 가상 임팩터의 최적 설계 및 입자 분리 성능 예측에 관한 연구들도 많이 이루어지고 있다. Satya et al.^[11]은 CSVI (circumferential slot virtual impactor)를 개발하여 111 LPM (liter per minute)의 유량에서 CFD 계산의 결과로 실제 실험에서 입자의 수집효율이 예측 가능한 것을 확인하였다. Chen et al.^[12]은 AVI (active virtual impactor)를 개발하였으며, 에어로졸 샘플을 유동장의 중심으로 집중시키기 위해 측면 공기의 흐름을 추가한 모델에 대하여 CFD 해석을 진행하고, 실험 결과를 검증하였다. Chang et al.^[13]은 가상 임팩터의 수집 노즐의 형상을 chamfer 및 직선 형태로 변경하여 실험결과와 비교하였고, CFD 해석결과로 수집 효율이 50%가 되는 입자 직경인 cut-off size 및 wall loss의 예측이 가능한 것을 확인하였다. 대체로 가상 임팩터의 작동 조건 및 내부 형상을 변경한 모델에 대하여 CFD 해석의 신뢰성을 검증하였다.

이 외에 공기 중에 있는 cut-off size보다 작은 입자들에 의한 오염 문제를 해결하기 위해 깨끗한 공기를 사용하여 가상 임팩터 내부의 유동장을 변화시키는 방법으로 가상 임팩터의 입자 수집 효율을 향상시키는 연구들도 진행되고 있다^[12,14].

가상 임팩터의 중요 설계 변수 및 작동 조건의 상관 관계에 대한 정보들이 부족하기 때문에 가상 임팩터와 관련된 연구들은 일반적으로 실험을 통해서 적용 분야에 따라 유량 및 cut-off size를 설정하여 개별적으로 이루어지고 있다. 본 연구의 목적은 초미세 입자의 분리가 가능하며, 대기 중에 낮은 농도로 퍼져있는 입자 수집이 가능하도록 150 LPM의 유량으로 작동하고, 1 μm 의 cut-off size를 가지는 가상 임팩터를 개발하는 것이다. 또한 이전 연구에서 얻어진 가상 임팩터의 설계 기법을 바탕으로 가상 임팩터의 설계 매개변수를 변경하며 수치해석을 진행하고, 해석 결과를 바탕으로 설계 매개변수에 따른 입자의 수집 효율 및 손실을 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 가상 임팩터 설계

가상 임팩터의 설계를 위하여 무차원수인 Reynolds 수와 Stokes 수가 사용된다. Reynolds 수는 가상 임팩터 내부의 유동 특성을 나타내며, 특성길이를 가속 노즐 너비(W_j)를 이용한다.

$$Re = \frac{\rho_f U W_j}{\mu_f} \quad (1)$$

여기서 ρ_f 는 공기의 밀도이며, U 는 가속 노즐을 통과한 유속, μ_f 는 공기의 점성, W_j 는 노즐의 폭이다. Stokes 수는 유체 내의 입자의 거동에 대한 무차원수로 유동의 방향이 변화할 때 $Stk \ll 1$ 의 범위에서 입자는 유선을 따라 이동하며, $Stk \gg 1$ 의 범위에서는 입자의 관성에 의한 영향이 커져 입자가 유선의 접선 방향으로 움직인다. 가상 임팩터의 Stokes 수에서 특성길이는 전통적인 관성 임팩터와 같이 노즐 폭의 절반인 $W_j/2$ 를 사용한다.

Stokes 수는 다음과 같다^[15].

$$Stk = \frac{\rho_p D_p^2 C_c U}{18 \mu_f W_j / 2} \quad (2)$$

여기서 ρ_p 는 입자의 밀도, D_p 는 입자의 직경, C_c 는 Cunningham's slip correction factor이다.

Fig. 1과 같은 일반적인 선형 슬롯 가상 임팩터의 형상을 이용하여 150 LPM의 유량에서 작동하는 프로토타입 모델을 설계하였다. 가상 임팩터의 설계에는 ANSYS design modeler (version 17.2; ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA)가 사용되었다. Stokes 수를 계산하여 프로토타입(M1)을 설계하였고, 수치해석을

진행하여 입자의 수집효율과 손실을 계산하였다. 이후 입자의 수집 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되어진 노즐의 너비 및 각도와 같은 설계 매개변수^[2]를 수정하는 방법으로 설계를 진행하였다. 각 해석에 사용된 모델의 설계 변수는 M1의 형상 치수를 기준으로 각 모델의 형상비를 무차원수로 계산하여 Table 1에 나타내었으며, M1부터 M12까지 총 12개의 모델을 설계하였다.

2.2 수치해석 설정

CFD 연구의 순서는 Fig. 2와 같다. 본 연구에서 설계한 가상 임팩터는 입구의 단면에서 가로 길이와 폭이 7:1의 종횡비를 가지고 있기 때문에 가상 임팩터의 3차원 형상을 2차원으로 단순화 시킨 형상에 대한 해석을 먼저 진행하였다. 프로토타입(M1)의 2차원 해석의 결과를 바탕으로 가상 임팩터의 주요 설계 매개변수를 수

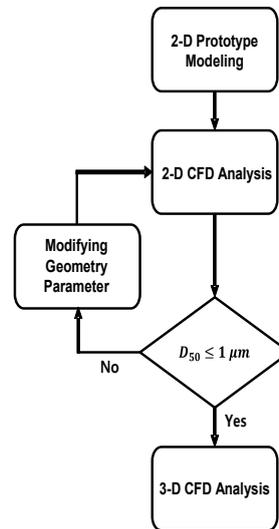


Fig. 2 Flowchart of the CFD study

Table 1 Geometrical ratio of virtual impactor

Model	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
$W_{1@Mn} / W_{1@M1}$	1	1	1	1	0.79	0.70	0.79	0.79	0.74	0.68	0.68	0.67
$W_{1*@Mn} / W_{1*@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.92	0.92	0.92
$W_{2@Mn} / W_{2@M1}$	1	1	1	1.18	1.18	1.18	1.33	1.18	1.18	1.08	1.08	1.08
$W_{2*@Mn} / W_{2*@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.95	0.95	0.92
$W_{3@Mn} / W_{3@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.03	1.03	1.02
$W_{4@Mn} / W_{4@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.01	1.01	1.01
$L_{0-1@Mn} / L_{0-1@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.68	0.68
$L_{0-2@Mn} / L_{0-2@M1}$	1	2.15	6.60	6.60	6.60	6.59	6.61	6.78	6.68	6.63	7.29	7.29
$L_{1@Mn} / L_{1@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.91	0.91	0.91
$S_{1@Mn} / S_{1@M1}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.93	0.93	0.91
$\theta_{3@Mn} / \theta_{3@M1}$	1	0.50	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17

정하여 해석을 진행하였고, 목표 1 μm 이하의 cut-off size 결과를 얻은 최종 모델(M12)에 대하여 3차원 해석을 진행하였다. 2차원 해석 결과와 비교하여 3차원 효과에 따른 입자의 수집 효율 및 벽 손실을 확인하였다.

가상 임팩터 내부의 유동장과 입자의 움직임 계산에는 ANSYS FLUENT (version 17.2; ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA)가 사용되었다. 해석 영역의 경계조건은 입자가 투입되는 1개의 입구, 2개의 major flow, 1개의 minor flow 그리고 그 외에 내부 벽면으로 이루어져 있다.

입구조건은 velocity-inlet으로 150 LPM의 유량이 균일한 속도로 유입 되는 것을 가정하여 약 27 m/s의 속도 조건을 주었다. 출구의 경계조건은 본 연구에서 가상 임팩터의 minor flow로 유출되는 유량이 전체 유량의 10%이므로 outflow 경계조건을 이용하여 minor flow의 유량비를 0.1, major flow의 유량비를 각각 0.45로 설정하였다. 가상 임팩터의 입구와 출구를 제외한 유동장 내부의 모든 벽면에서는 no-slip condition을 적용하였으며, 유동장 내부는 상온에서의 공기로 가정하여 온도 변화에 따른 특성을 고려하지 않았다. 점성 모델은 유동장 내부의 난류를 계산하기 위하여 Reynolds stress model (RSM)을 사용하였으며, 모든 벽면에서 y^+ 의 값이 1 미만이기 때문에 enhanced wall treatment를 사용하여 정상상태에 대하여 가상 임팩터 내부 유동장 계산을 진행하였다.

가상 임팩터의 내부 유동장을 계산하고, 입자의 움직임을 계산하기 위하여 DPM (discrete phase model)을 사용하였다. 입자의 해석에는 공기역학적 직경을 적용하여 0.1 μm ~ 12 μm 범위의 물의 밀도를 가진 구형 입자를 사용하였으며, 가상 임팩터의 입구에서 균일한 농도로 입자를 투입하였다. 입자가 벽면에 충돌하면 내부에 침적되는 것으로 가정하였으며, 모든 벽면에 trap 경계조건을 주어 벽면에 침적되는 입자의 수를 계산하여 벽면에서의 입자 손실을 계산할 수 있도록 하였다. 유동장 내의 입자의 농도가 10% 이하인 경우 입자가 유동장에 미치는 영향이 무시될 수 있기 때문에, 입자와 유동장의 상호 작용을 고려하지 않는 1-way coupling 방법을 적용하여 입자 해석을 진행하였다.

각 입자 크기에 대한 수집 효율($\eta_{collection}$)은 가상 임팩터 내부에서 발생하는 벽면에서의 입자 손실을 고려하여, 투입된 전체 입자의 수(n_{total})에 상대적으로 minor flow를 통과하여 출구로 빠져나간 입자의 수(n_{minor})를 기준으로 계산하였고, 다음 식과 같다.

$$\eta_{collection} = \frac{n_{minor}}{n_{total}} \times 100(\%) \quad (3)$$

가상 임팩터 내부 벽면에서 입자의 손실(η_{loss})은 입구에서 투입된 전체 입자의 수에 대하여 각 출구로 빠져나간 입자를 기준으로

계산하였으며 다음과 같다.

$$\eta_{loss} = \left(1 - \frac{n_{minor} + n_{major}}{n_{total}}\right) \times 100(\%) \quad (4)$$

3. 수치해석 결과

Table 1에 나타난 것과 같이 M1 ~ M12까지 가상 임팩터의 설계 매개변수를 변경하여 수치해석을 진행하였으며 0.1 ~ 12 μm 의 입자경에 대하여 수집 효율 및 가상 임팩터 내부에서의 벽 손실의 결과를 Fig. 3과 4에 나타내었다. M1 모델로부터 cut-off size 이상의 큰 입자는 주로 입구 가속 노즐에서 손실이 발생하여 입자의 수집 효율 감소가 나타나는 것을 확인하였다. 가상 임팩터의 입구 가속 노즐을 지나면서 유속이 약 4배 이상 증가하기 때문에, 가속 노즐각도를 감소시키고 가속 구간의 길이를 증가시켜 입자가 급격하게 가속되는 것을 방지하고자 하였다. M1 ~ M3에서는 가속 노즐의 각도를 30°에서 10°, 5°로 형상의 변경이 진행되었다. 결과적으로 가속 노즐의 길이(L_{0-2})가 2배 이상으로 증가함에 따라 입구 가속 노즐에서 발생하던 $Stk > 3$ 인 입자들의 손실이 줄어들고, 12 μm 입자에서는 수집 효율이 63%까지 증가하였다. 그러나 $Stk \approx 1$ 에서의 입자들이 수집 노즐 벽면에서 충돌하는 손실이 증가되어 전체적으로 cut-off size가 증가되는 결과를 확인하였다.

이후 수집 노즐 벽면에서 발생하는 $Stk \approx 1$ 범위의 입자 손실과 cut-off size를 감소시키기 위하여 M4~M12에서는 가속 노즐의 출구 폭(W_1)과 수집 노즐 입구의 폭(W_2)의 형상비를 수정하였다. 수집 노즐 벽면에서의 입자 충돌을 줄이기 위해 W_2 의 길이를 증가시키고, 가속 노즐을 통과한 입자들을 가상 임팩터의 유동장 중심으로 집중시키기 위하여 W_1 의 길이를 감소시켰다. W_2/W_1 의 증가에 따라 cut-off size 이상의 입자들의 벽면 손실이 감소하며, minor flow에서의 수집 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

M7은 M6와 W_2/W_1 의 비가 동일하며 W_1 과 W_2 의 치수를 증가시킨 결과를 비교하였고, cut-off size의 증가를 확인하였다. 동시에 노즐 너비(W_1, W_2) 증가로 유속이 감소함에 따라 유동 분리 영역 벽면에서 입자 손실이 증가하는 결과를 확인하였다.

가속 노즐의 각도 감소와 노즐 비(W_2/W_1) 증가에 따라 가속 노즐을 통과한 입자가 가상 임팩터의 중심선에 더 가깝게 접근하게 되어 입자의 수집 효율이 향상되는 결과를 얻었고, 최종 M12 모델에서는 프로토타입 M1에 상대적으로 cut-off size가 약 0.3 μm 작아졌으며, $Stk > 3$ 에서의 입자 손실이 30% 이상 낮아지는 결과를 확인하였다. 가속 노즐의 각도(θ)와 너비(W_1), 수집 노즐

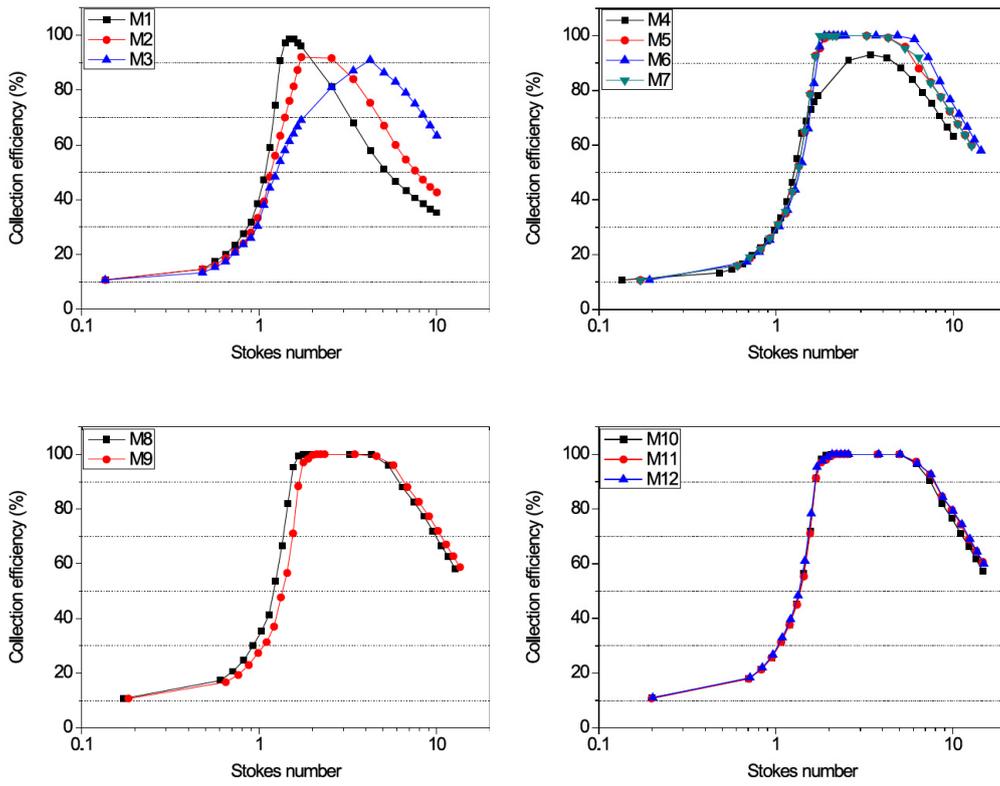


Fig. 3 Particle collection efficiency (M1~12)

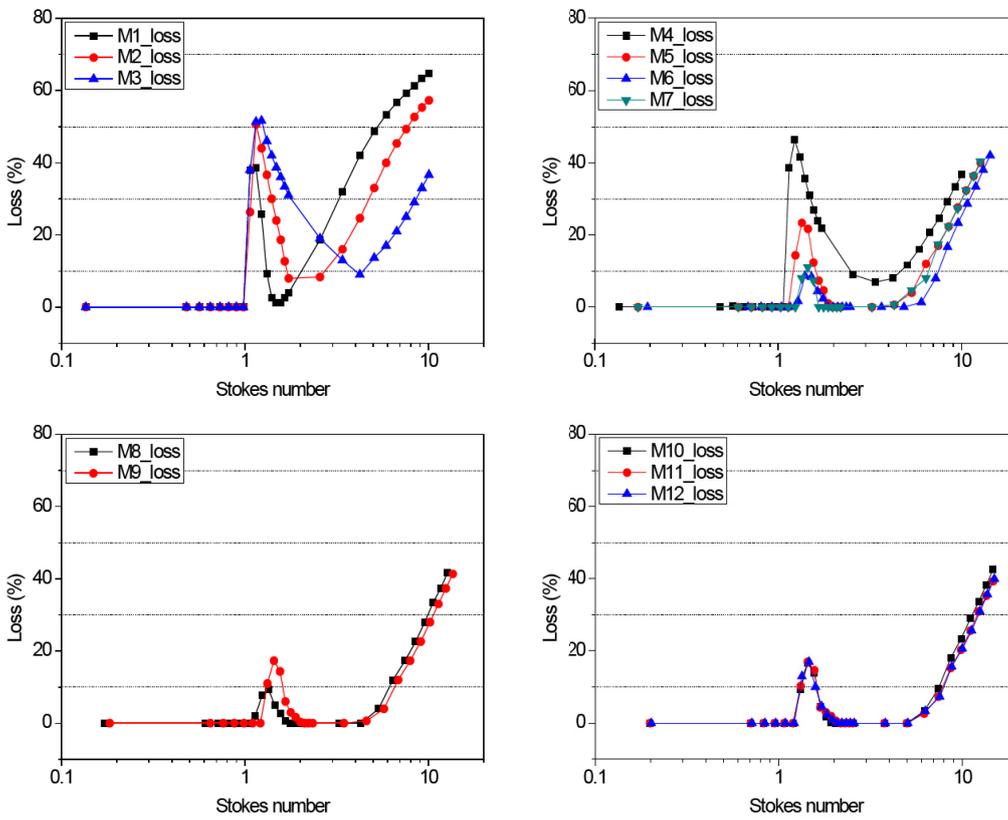


Fig. 4 Particle wall loss (M1~12)

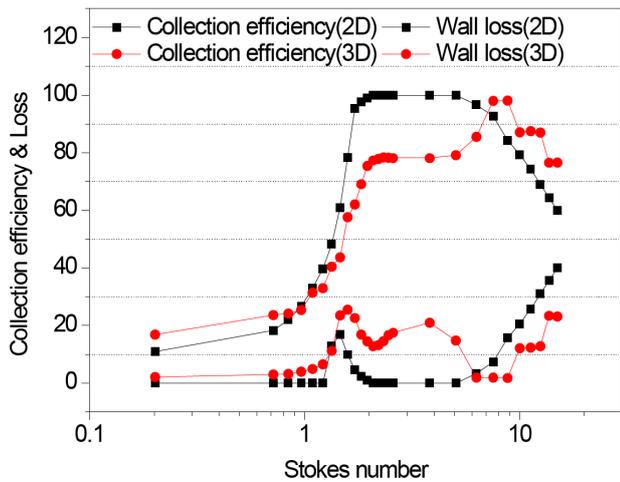


Fig. 5 Collection efficiency & wall loss (M12)

의 너비(W_2), 그리고 가속노즐의 출구와 수집노즐의 입구 간격(S) 등 각 각의 설계 매개변수의 형상비에 따라 가상 입액터의 성능 차이가 나타남을 확인할 수 있었다.

2차원 수치해석의 결과로 cut-off size $1 \mu\text{m}$ 를 만족하는 M12 모델에 대하여 3차원으로 형상을 설계하여 해석을 진행하였다. 2차원 수치해석에서는 가상 입액터의 축방향의 영향을 고려하지 않고 단면에서의 유동 및 입자 해석을 진행하였다. 그러나 3차원 해석을 진행하였을 때, 확장시킨 축 방향에서 양 측벽 부근은 선행 연구^[6]와 같이 가상 입액터의 중심부 유동에 상대적으로 측벽에서 유동 마찰의 영향을 크게 받기 때문에 유동 패턴의 변화 및 입자의 움직임에 변화가 나타났고, cut-off size 근처에서 2차원 해석 결과에 상대적으로 가상 입액터의 입자 수집 효율이 감소하는 결과를 확인하였다. Fig. 5에는 M12 모델의 2차원 및 3차원 해석에서의 입자 수집 효율 및 손실을 나타내었다. 3차원 해석 결과 cut-off size는 2차원 해석의 결과와 근접하게 약 $1 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 에서 형성이 되었으나, cut-off size 이상의 구간($Stk > 1$)에서는 측벽으로 인하여 입자 분리 영역에서 유동 패턴이 변화하면서 수집 노즐 벽면에서 발생하는 입자의 손실이 추가적으로 발생하였고, 벽면에서의 입자 손실 증가폭에 따라 입자 수집 효율이 감소하는 결과를 나타내었다. 이후 $Stk > 7$ 의 구간에서는 가속 노즐 벽면에서 발생하는 입자의 손실이 감소함에 따라 수집 효율이 증가하는 결과를 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 150 LPM의 유량으로 작동하고, 수집 효율에서 cut-off size가 $1 \mu\text{m}$ 인 가상 입액터 설계를 위하여 수치해석을 진행하였으며, 주요 형상 매개변수 변화에 따른 입자의 수집 효율과

벽 손실의 변화를 비교하였다.

Stokes 수를 통해 계산된 값을 기준으로 프로토타입(M1)을 설계하여 cut-off size 보다 큰 입자의 벽 손실을 감소시킴으로써 수집 효율을 증가시키고자 하였고, cut-off size의 감소를 위하여 설계 매개변수를 변경한 해석이 진행되었다. 입구 가속 노즐의 너비의 증가와 동시에 각도를 감소시킴으로써 가속 노즐에서 발생하는 cut-off size 이상의 입자의 손실을 감소시킬 수 있었으나, 이에 따라 수집 노즐에서의 작은 입자의 손실이 발생하여 cut-off size가 증가하는 것을 확인하였다. 수집 노즐 입구의 너비(W_2)를 증가시키고, 입구 가속 노즐의 너비(W_1)를 감소시킴으로써 벽면에서의 입자 손실 및 cut-off size의 감소를 확인할 수 있었다. 수집 노즐 및 가속 노즐의 설계에 따라 가상 입액터의 수집 효율의 향상이 나타나는 것을 확인하였고, 3차원 해석의 결과로부터 양 측벽에서의 마찰로 인한 cut-off size 이상의 입자에서 추가 손실을 확인하였다.

수치해석적 방법을 이용하여 cut-off size가 $1 \mu\text{m}$ 인 가상 입액터 M12를 설계하였으며, 가상 입액터의 설계 시 각 설계 매개변수의 변화에 따라 주로 입구 가속 노즐과 수집 노즐의 벽면에서 입자의 손실에 의한 성능의 차이가 나타나고 각 설계 매개변수가 종속적임을 확인하였다. 가상 입액터의 입자 수집 효율은 각 설계 매개변수들 간의 형상비에 따라 크게 변화하기 때문에 가상 입액터 설계 시 전체적인 형상 크기에 비례한 각 매개변수의 설정이 필요한 것으로 판단된다.

References

- [1] Houunam, R. F., Sherwood, R. J., 1965, The Cascade Centripeter: A Device for Determining the Concentration and Size Distribution of Aerosol, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., 26:2 122-131, <https://doi.org/10.1080/00028896509342711>.
- [2] Marple, V. A., Chien, C. M., 1980, Virtual Impactor: A Theoretical Study, Environ. Sci. Technol., 14:8 976-985, <https://doi.org/10.1021/es60168a019>.
- [3] Huang, C. H., Tsai, C. J., 2001, Effect of Gravity on Particle Collection Efficiency of Inertial Impactor, J. Aerosol. Sci., 32:3 375-387, [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(00\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(00)00086-0).
- [4] Haglund, J., 2003, Two Linear Slot Nozzle Virtual Impactors for Concentration of Bioaerosols, Doctorate Thesis, Texas A&M University College Station, USA.
- [5] Marple, V. A., Liu, B. Y., 1974, Characteristics of Laminar Jet Impactors, Environ. Sci. Technol., 8:7 648-654, <https://doi.org/10.1021/es60092a003>.

- [6] Gotoh, K., Masuda, H., 2001, Development of Annular-type Virtual Impactor, Powder Technol., 118:1-2 68-78, [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00296-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00296-0).
- [7] Romay, F. J., Roberts, D. L., Marple, V. A., Liu, B. Y. H., Olson, B. A., 2002, A High Performance Aerosol Concentrator for Biological Agent Detection, Aerosol Sci. Technol., 36:2 217-226, <https://doi.org/10.1080/027868202753504074>.
- [8] Lim, K. S., Lee, K. W., 2006, Collection Efficiency and Particle Loss of Virtual Impactors with Different Methods of Increasing Pressure Drop, J. Aerosol. Sci., 37:10 1188-1197, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.11.011>.
- [9] Lee, P., Chen, D. R., Pui, D. Y. H., 2003, Experimental Study of a Nanoparticle Virtual impactor, J. Nanopart. Res., 5:3-4 269-280, <https://doi.org/10.1023/A:1025538930994>.
- [10] Bergman, W., Shinn, J., Lochner, R., Sawter, S., Milanovich, F., Mariella Jr, R., 2005, High Air Flow, Low Pressure Drop, Bio-aerosol Collector using a Multi-slit Virtual Impactor, J. Aerosol. Sci., 36:5-6 619-638, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.12.010>.
- [11] Seshadri, S., Hari, S., Hu, S., McFarland, A. R., 2008, A Circumferential Slot In-Line Virtual Impactor, Aerosol Sci. Technol., 42:1 40-49, <https://doi.org/10.1080/02786820701787928>.
- [12] Chen, H. Y., Huang, H. L., 2016, Numerical and Experimental Study of Virtual Impactor Design and Aerosol Separation, J. Aerosol. Sci., 94 43-55, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.12.001>.
- [13] Chang, P. K., Hsiao, T. C., Engling, G., Chen, J. C., 2019, Computational Fluid Dynamics Study of the Effects of Flow and Geometry Parameters on a Linear Slit Virtual Impactor for Sampling and Concentrating Aerosols, J. Aerosol. Sci., 131 28-40, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.02.004>.
- [14] Chein, H., Lundgren, D. A., 1993, A Virtual Impactor with Clean Air Core for the Generation of Aerosols with Narrow Size Distributions, Aerosol Sci. Technol., 18:4 376-388, <https://doi.org/10.1080/02786829308959611>.
- [15] Hinds, W. C., 1999, Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd edition, Wiley, New York.
- [16] Gotoh, K., Masuda, H., 2000, Improvement of the Classification Performance of a Rectangular Jet Virtual Impactor, Aerosol Sci. Technol., 32:3 221-232, <https://doi.org/10.1080/027868200303759>.



Ochan Kwon

M.S. degree in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is numerical simulation.

E-mail: 5chan@kumoh.ac.kr



Wonyoung Jeon

Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology. His research interest is aerosol sampling.

E-mail: jwy0717@gmail.com



Hyunwoo Lee

Ph.D. Student in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is aerosol & fluid mechanics.

E-mail: eddi1993@kumoh.ac.kr



Youngjin Seo

Ph.D. Associate Professor, Kumoh National Institute of Technology. His research interest includes aerosol dynamics and thermal-fluid mechanics.

E-mail: yjseo@kumoh.ac.kr