

입자 추적 기법을 활용한 에어로졸 제트 프린팅 공정의 분사 특성에 대한 CFD 해석적 분석

CFD Analytical Analysis of Jetting Characteristics in Aerosol Jet Printing Process Using Particle Tracking Technique

정상민¹ · 박승운¹ · 최의근² · 오수빈² · 이철희^{1*}

Sang-Min Chung, Seungwoon Park, Euikeun Choi, Soobin Oh and Chul-Hee Lee

Received: 6 Sep. 2023, Accepted: 13 Dec. 2023

Key Words : Aerosol Jet Printing(에어로졸 제트 프린팅), Computational Fluid Dynamics(전산 유체 역학),
Printing Width(인쇄 선폭), Particle Tracking(입자 추적), Simulation(시뮬레이션)

Abstract: This paper investigates the jetting characteristics of an aerosol jet printing (AJP) process as a function of design and operating conditions. The governing equations of the AJP system are derived for experimentation and analysis. To understand the characteristics of the AJP system, this thesis analyzes the jetting characteristics as a function of the flow rate of the carrier gas and the sheath gas, and the variation of the linewidth with the nozzle exit size based on particle tracking. This thesis focuses on computational fluid dynamics (CFD), which is a computer simulation. The particle tracking results obtained by CFD were analyzed using MATLAB. CFD analytical models can be analyzed in environments with different conditions and consider more specific situations than mathematical computational models. The validity of the CFD analysis is shown by comparing the experimental results with the CFD analysis.

기호 설명

d_c : jet printing diameter of the carrier gas

\vec{F} : external force

\vec{g} : gravity

n : number of print line measurements

Q : total flow rate of the sheath and carrier gas

R : Radius of the nozzle

r : carrier gas flow radius

t : time

u : velocity

V_{max} : maximum flow rate

X_i : distance of AJP print line

μ : viscosity

ρ : mass density

$\vec{\tau}$: viscous stress

\vec{v} : velocity vector

∇ : vector space

1. 서론

최근 전자기기와 마이크로 디바이스 등에서 EMI (Electromagnetic Interference)로 인한 문제를 극복하기 위해 전자 제품이나 장치를 제조하는데 전자기 방출을 차폐하고 제어할 수 있는 정밀한 제조 방법인 AJP가 중요한 적층 제조 기술로 부상하고 있다.¹⁾ APJ는 에어로졸화된 잉크 입자를 기관에 분무 및 증착하여 기능성 소재를 제어할 수 있는 솔루션을 제

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr
1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea
2 R&D Center, PROTEC Co., LTD., Anyang 14055, Korea
Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시함으로써 전자기 특성을 가진 복잡한 전자부품, 센서 및 마이크로 스케일 장치를 제작하는 방법을 제공한다.²⁾ Fig. 1은 AJP의 작동 흐름 및 노즐의 모양을 보여주고 있다. 또한 AJP 형상에 대한 세부정보는 Table 1에 나타냈다. AJP의 내부는 외각의 시스가스(Sheath gas)가 단면적이 작아지는 부분에서 가속하여 캐리가스(Carrier gas)를 둘러싸면서 분사한다. 노즐 내부의 유체 흐름은 축 대칭이고, 규칙적인 흐름의 층류이다.³⁾ 입자의 거동을 나타내는 무차원의 스토크스 수(Stokes number)를 이용하여 입자의 궤적을 분석하였다.⁴⁾ 또한 입자의 거동은 샤프만 양력(Saffman lift force)에 의한 영향을 받는다.⁵⁾ 또한 에어로졸 흐름의 직경은 푸아죄유 법칙(Hagen Poiseuille's law)의 따라 구할 수 있으며,⁶⁾ 입자의 작용하는 힘은 CFD 해석을 통해 구할 수 있다.

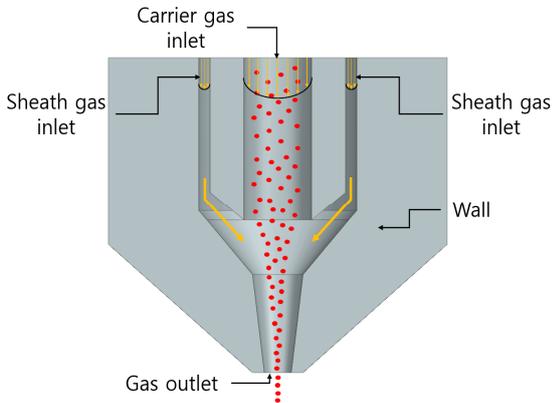


Fig. 1 AJP operating flow and nozzle shape.

Table 1 Nozzle geometry information.

Type	Diameter	Unit
Carrer gas inlet	1.5	mm
Sheath gas inlet	0.25	
Gas outlet	0.6	

본 연구에서는 설계 파라미터와 작동조건이 인쇄 결과에 미치는 영향을 밝히는데 중점을 두고 AJP 시스템의 분사 특성에 대한 통찰력을 얻기 위해 캐리어 가스 및 시스가스의 유량과 노즐 출구로부터 인쇄되는 선폭 크기 결과를 이용하여 선폭 변화에 미치는 영향에 대해 연구하였다. AJP 시스템 내에서 유체 흐름을 시뮬레이션하는 CFD 해석을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 기반 분석 모델을 활용하는 접근 방식은 다양한 변수를 포함하여 더욱 정확하게 분석할 수 있다.⁷⁻¹³⁾ 해석 결과를 분석하기 위해 실험

데이터와 비교하여 경향성을 파악하였고, 또한 MATLAB을 사용하여 실험 및 해석 데이터를 분석하였다.

2. 이론

2.1 지배방정식

AJP 공정의 분사 특성을 분석하기 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS Fluent를 사용했다. CFD는 유체의 흐름을 모델링 및 시뮬레이션하여 유체의 흐름 등을 이해하고 예측하기 위해 사용된다. 수치해석에 사용된 지배방정식인 연속 방정식, 운동량 방정식은 식 (1)-(3)과 같이 표현된다.¹⁴⁻¹⁵⁾

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

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot \vec{v}) + S_v \quad (2)$$

$$\text{Where } S_v = -\nabla(P) + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} + \rho \vec{g} \quad (3)$$

여기서 t 는 시간을, ∇ 는 공간 기울기 연산자를, ρ 는 질량 밀도를, \vec{v} 는 속도벡터를, $\vec{\tau}$ 는 점성 응력을, \vec{F} 는 외력을, \vec{g} 는 중력을, μ 는 점성을 나타낸다.

2.2 AJP 분사 특성 분석 모델

분사 직경을 확인하기 위해 몇 가지에 대한 가정을 기반으로 진행했다. AJP 분사 특성의 분석 모델 Fig. 2는 노즐 내부와 외부의 가스는 비압축성 가스이고, 시스가스와 캐리가스는 혼합되지 않는다고 가정했으며, 가스의 흐름은 층류이며, 직경의 변화가 없다고 가정했다. Fig. 2에 노즐의 푸아죄유법칙을 고려한 속도 분포의 수학적 모델은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$u = V_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (4)$$

여기서 u 는 유속을, V_{\max} 는 노즐 중심에서의 유량을, R 은 노즐의 반경을, r 은 캐리가스의 흐름 반경을, Q 는 캐리가스와 시스가스의 유량의 합으로 나타내며, Fig. 2의 최대 유량은 $V_{\max} = \frac{2Q}{\pi R^2}$ 으로 표현된다. 노즐의 중심에서 멀어질수록 유량 및 유속이 작아진다는 것을 알 수 있다.¹⁶⁻¹⁸⁾

AJP를 통해 인쇄된 선의 폭은 식 (5)를 통해 나타내었다.

$$d_c = \sum_{i=1}^n X_i / n \quad (5)$$

여기서 d_c 는 캐리가스의 선폭을, X_i 는 AJP 인쇄선의 상단 경계선에서 하단 경계선까지 거리를, n 은 측정 횟수를 나타낸다.¹⁹⁾

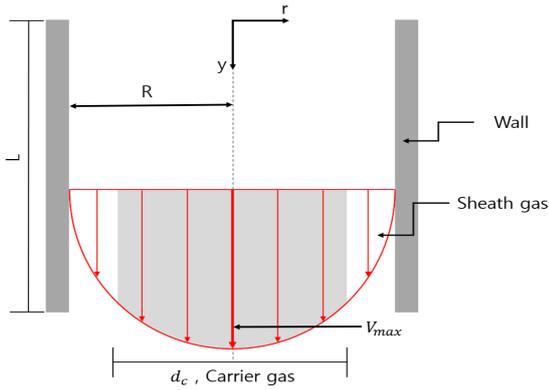


Fig. 2 Mathematical analytical model of the velocity distribution of carrier gas jetting in the AJP.

3. 실험

실험은 에어로졸 제트 프린팅 장비를 사용하여 기관 위에 프린팅을 진행하였으며, 하나의 직선으로 프린팅하였고, 노즐과 기관 사이의 간격은 1mm로 프린팅을 진행하였다. Fig. 3(a)는 실험에 사용한 장비이며, 세부 구성을 나타냈다. Fig. 3(b)는 AJP로 인쇄한 선이다.

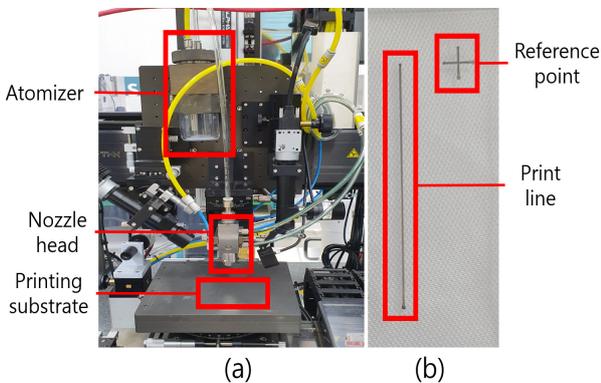


Fig. 3 AJP equipment and print results; (a) detailed configuration of the AJP system; (b) line printed by the AJP system.

Fig. 4(a-d)는 잉크가 충분히 증착되게 하도록 시간을 두고 광학현미경(Leica DVM6A)을 사용하여 관찰한 동일한 위치에서 인쇄선(캐리가스 유량은 70sccm으로 동일하며, 시스가스 유량은 각각 a: 70, 140, 210, 280sccm)의 모습이다. Fig. 4의 분사된 선폭을 식(5)를 통해 AJP의 선폭 측정의 시각화를 Fig. 5에 나타내었으며, 인쇄된 선에서 분리되어 벗어난 잉크 방울은 고려하지 않았다.

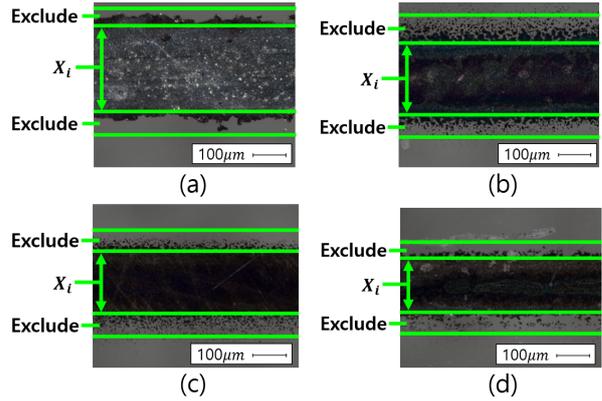


Fig. 4 Optical microscope images of printed lines from AJP experiments with sheath and carrier gases. The flow rate of the carrier gas was all 70 sccm, and the flow rate of the sheath gas was varied to (a) 70sccm; (b) 140sccm; (c) 210sccm; (d) 280sccm.

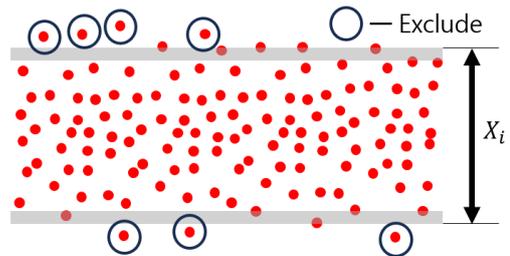


Fig. 5 Visualize print line measurements in experiments.

4. CFD 해석

4.1 해석 모델

CFD 해석 모델은 Fig. 6와 같이 메쉬의 품질을 높이기 위하여 모델링을 부분으로 나누어서 진행했으며, 모델의 위쪽에 입구를 통하여 바깥 원통에는 시스가스, 안쪽 원통에는 캐리가스가 출입한다. 원통부분의 외부 벽면은 배출구로 대기압(101325 Pa)을 적용하였다. 모델의 바닥에는 벽으로 설정하였고, 모델

은 좌우 대칭인 모델이기 때문에 시메트리를 적용하여 1/2로 해석을 진행하여 해석 시간을 단축하였다. 또한 해석 모델은 공극이 없는 모두 유체로 구성되었다. 해석 모델은 다상 흐름에서 각 유체의 부피 비율 및 경계면을 추적하여 두 개 이상의 혼합되지 않는 유체를 모델링하는 수치해석 기술인 VOF(Volume of Fluid)를 사용하였고, 복잡한 유동에서 수렴성이 좋은 음해법으로 해석하였다. 압력 기반 솔버를 사용하였고, 정상 상태 흐름에 대해 정확하고 효과적인 단상 구현을 얻기 위해 압력-속도 결합 알고리즘을 사용하였다. 또한 결합 알고리즘을 통해 수렴 속도를 빠르게 만들었다.¹⁴⁾ AJP의 복잡한 유동 흐름을 분석하기 위해 전단응력 전달 $k-\omega$ 모델을 사용한다. $k-\omega$ 모델은 벽 근처 영역의 정확한 공식과 자유 유동 독립성을 효과적으로 혼합해 흐름에 대해 더 정확하고 신뢰할 수 있는 모델이다.¹⁵⁻¹⁶⁾ 또한 메쉬는 헥사코어로 0.016mm로 설정하였으며, 노드 수는 1,805,897개로 구성하였다. 유동해석 결과의 신뢰도를 높이기 위한 그리드 독립성테스트를 진행하였다. 메쉬의 크기가 0.016mm 보다 큰 경우 해석결과가 발산하였고, 메쉬의 크기가 0.016mm에서 해석결과에 오차가 수렴하였다. 해석의 정확도를 높이기 위해 100회의 반복 수행으로 진행하였으며, 시스가스와 캐리가스는 각각 질소와 잉크로 설정하였다. 설정된 유체의 세부 정보는 Table 2에 나타냈으며, 해석모델에서 환경 온도는 상온 25 °C로 설정하였다. AJP의 분사 특성을 검증하기 위해 CFD 해석 파라미터는 시스가스와 캐리가스의 유량 변화 및 분사 높이로 설정 하였고 Table 2에 나타냈다. 또한 사용한 유체에 대한 세부정보는 Table 3에 나타냈다.

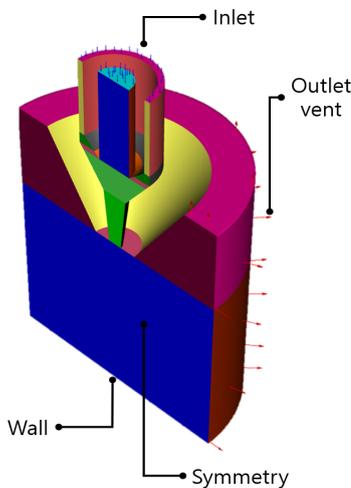


Fig. 6 Configuring a CFD analysis model.

Table 2 CFD analysis parameters for sheath and carrier gas.

Sheath gas(nitrogen)	Carrier gas(ink)	Unit
70	70	sccm
140		
210		
280		
100	50	
	100	
	150	
	200	

Table 3 Details of the fluids used for sheath and carrier gas.

	Sheath gas	Carrier gas	Unit
Material	nitrogen	ink	-
Density	1.138	1600	kg/m ³
Viscosity	0.00001663	0.08	kg/(m · s)

4.2 해석 결과

CFD 해석 수행은 해석 중 잔차가 발생한다. 잔차는 CFD 해석 중 미분방정식을 수치적으로 풀 때 발생하는 오차이며, 본 연구에서 CFD 해석은 0.00001 미만의 오차를 가지고 있어 해석이 잘 수렴했다. Fig. 7(a)는 시스가스의 유동흐름의 속도를 나타냈다. 유량은 동일하기에 단면적이 감소하는 노즐 헤드 부분에서 나올 때의 속도가 가장 빠르며, 노즐 헤드에서 거리가 멀어질수록 속도가 감소하며 좌우 방향으로 퍼지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 캐리가스의 유동흐름의 속도를 나타냈다. 캐리가스 또한 노즐 헤드 부분에서 속도가 증가하며, 노즐 헤드에서 멀어질수록 속도가 감소한다. Fig. 7의 두 형상을 보면 시스가스가 캐리가스를 감싸고 있는 것을 확인할 수 있으며, 노즐 중심에 가까울수록 유속이 빠르고, 멀어질수록 유속이 감소하는 것을 나타낸다.

CFD 해석 결과 중 입자 추적 결과를 통해 Fig.8과 같이 나타내어 구하였고, 시스가스를 제외한 캐리가스의 입자분포의 결과를 도출했다. 실험의 조건과 동일하게 인쇄선에서 벗어난 잉크 방울 즉 잉크 입자는 고려하지 않았고, 캐리가스의 유동 흐름을 분사 높이에 따라 1mm 간격으로 1-5mm까지 5가지 케이스로 나누어 시스가스 및 캐리가스의 유량 변화에

따른 선풍을 분석하여 시스가스 및 캐리가스의 유량이 AJP시스템에 미치는 영향을 분석하고 실험 결과와 비교하였다.

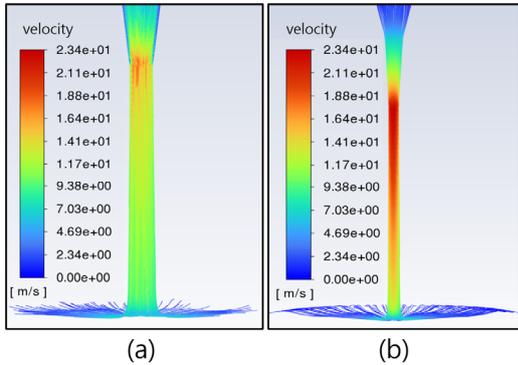


Fig. 7 CFD analysis flow velocity results for; (a) carrier gas; (b) sheath gas.

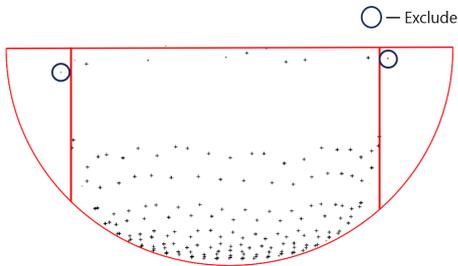


Fig. 8 CFD Particle Tracking Analysis Results.

4.2.1 시스가스 유량의 프린팅 영향력 및 실험과의 검증

시스가스 유량의 변화에 따른 AJP의 분사특성을 분석하기 위해 인쇄 선풍을 측정하였다. Fig. 9은 캐리가스의 유량은 70sccm으로 고정시킨 뒤 시스가스의 유량 변화(70, 140, 210, 280sccm)에 따른 실험과 CFD해석의 결과를 노즐 헤드와 기관사이의 거리가 1mm인 케이스의 선풍에 변화량을 나타내며, CFD 해석을 검증하기 위하여 실험 결과와 비교하였다. 실험 결과와 CFD 해석 결과 모두 시스가스의 유량 증가에 따라 인쇄선의 두께가 감소하는 경향을 보여주며, 이는 시스가스의 유량이 높을수록 캐리가스를 더 감싸면서 분사하는 것을 의미하며, 시스가스의 유량이 AJP 분사 특성에 영향을 준다는 것을 의미한다. 시스가스의 유량이 높을수록 인쇄 폭이 얇은 인쇄의 가능성을 나타내며, 같은 캐리가스의 유량에서 시스가스 유량에 증가에 따라 캐리가스의 입자가 인쇄선의 중앙으로 모이게 되므로, 인쇄된 인쇄선의 높이 또한 증가한다. 또한 실험 결과 대비 CFD 해석 결과의 오차는 시스가스가 70sccm일 때 가장 큰 오차를 보였으며, 280sccm일 때 오차가 가장 작았다. 4

개의 파라미터에서 의 오차의 평균은 7.66%이다. 오차의 발생 원인으로서는 실험환경의 온도조건 및 압력 조건을 제외한 습도, 풍속, 풍향 등의 환경변수와 분사 시 발생하는 공기저항은 CFD 해석에서 고려하지 않았다. 또한 실험 중 발생하는 외란에 의해 오차가 발생할 수 있다.

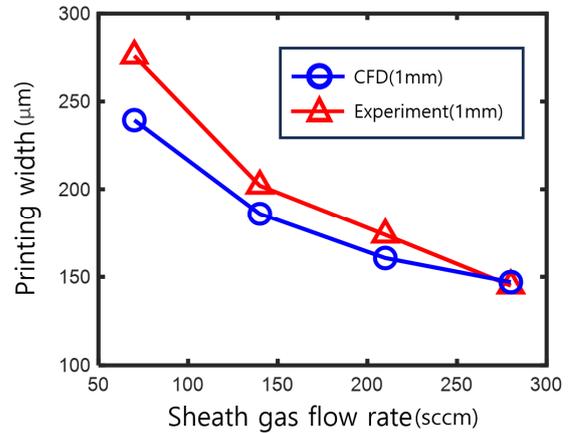


Fig. 9 Experimental and CFD analysis results of sheath gas flow rate variation.

4.2.2 캐리가스 유량의 프린팅 영향력

Fig. 10은 시스가스의 유량은 100sccm으로 고정시킨 뒤 캐리가스의 유량 변화(50, 100, 150, 200sccm)에 따른 CFD 해석 결과를 노즐 헤드와 기관 사이의 거리가 1mm인 케이스와 5mm인 케이스의 선풍의 변화량을 나타낸다. CFD 해석 결과 캐리가스 유량의 증가에 따라 인쇄선의 두께가 증가하는 경향을 보여주며, 이는 캐리가스의 유량이 높을수록 시스가스의 캐리가스를 감싸주는 역할을 다하지 못하는 것을 나타낸다. 캐리가스 유량의 증가에 따라 캐리가스의 입자 분포의 넓이가 증가하며 퍼져나가는 것을 나타낸다.

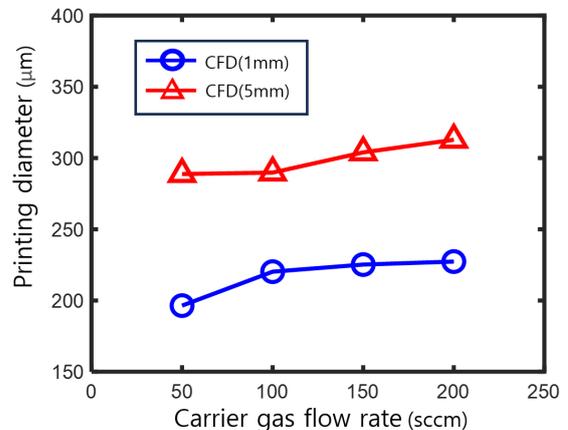


Fig. 10 CFD analysis results of sheath gas flow rate variation.

4.2.3 시스 및 캐리가스 유량의 프린팅 영향력 및 분사 높이에 따른 영향력

Fig. 11은 시스가스(S)와 캐리가스(C)의 유량 변화(시스가스 유량 : 캐리가스 유량 - 50:50, 100:100, 150:150, 200:200)에 따른 1-5mm 노즐의 높이 변화의 결과를 나타내며, 세부 유량은 Table 4에 나타냈다. 앞 단락에서 시스가스, 캐리가스의 단일 유량 변화에 따른 결과는 확실한 차이가 나타났다. 하지만 시스가스와 캐리가스의 유량 비는 동일하게 설정하고, 각각의 유량을 증가시켰을 때의 변화는 미미했다. 이는 전체 유량에서 시스가스와 캐리가스 중 어떤 변수의 유량을 변화시키나에 따라 선폭의 크기가 변화한다는 것을 나타내며, 시스가스와 캐리가스의 유량 비에 따라 선폭이 변화한다는 것을 의미한다. 또한 노즐 헤드와 인쇄 기판 사이의 거리가 멀어질수록 선폭이 증가한다. 이는 노즐 헤드와 인쇄 기판 사이의 거리가 멀어질수록 캐리가스의 입자를 모아 주는 역할을 하는 시스가스가 제 역할을 하지 못하는 것을 시사한다.

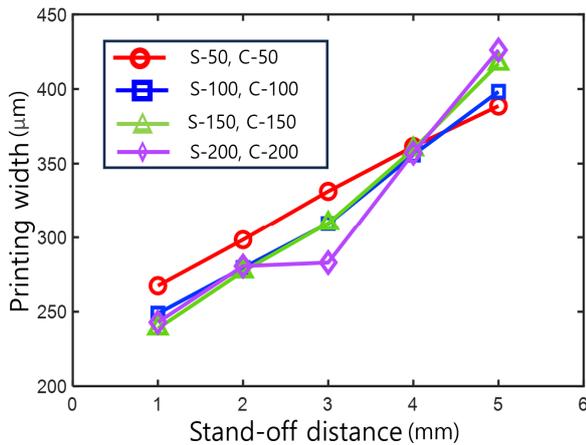


Fig. 11 CFD analysis results of flow rate variation of sheath gas and carrier gas.

Table 4 Details of the parameters used in the CFD analysis for sheath gas and carrier gas flow rates.

Flow Rate Ratio	Sheath gas	Carrier gas	Unit
1	50	50	sccm
	100	100	
	150	150	
	200	200	

5. 결론

본 논문에서는 AJP 시스템에서 분사 특성을 분석하기 위해 입자 추적 기법을 활용하여 CFD 해석으로 분석하여 실험 데이터와 비교하였다. 시스가스의 유량에 따라 유량이 높아지면 선폭이 감소하였다. 이는 시스가스가 캐리가스를 더욱 감싸면서 분사하는 것을 의미한다. 또한 캐리가스가 시스가스의 영향으로 인쇄선 중앙으로 모이게 되고, 이는 인쇄선의 높이 증가를 의미한다. 캐리가스의 유량에 따라 유량이 높아지면 선폭은 증가하였다. 이는 시스가스가 캐리가스의 유량 증가로 인해 캐리가스를 감싸는 역할을 하지 못하는 것을 의미한다. 시스가스와 캐리가스의 유량 비가 동일하게 캐리가스와 시스가스의 유량을 동시에 증가시켰을 때 선폭의 변화가 적었다. 이는 선폭은 전체 유량 비에 따라 결정되고, 시스가스와 캐리가스의 유량에 따라 선폭의 넓이가 결정되는 것을 의미한다. 분사 높이에 따라 실험과 CFD 해석은 높이가 증가하면 선폭이 증가하였다. 이는 분사 높이가 증가하면서 분사 직경이 증가하며 퍼지는 것을 의미한다. AJP 시스템에서 본 연구의 파라미터(캐리가스의 유량 변화 및 시스가스의 유량변화, 분사 높이변화)는 인쇄 품질에 주요 영향을 주는 것으로 나타났다.

실험과 CFD 해석의 AJP 시스템의 분사 특성에 대해 분석은 동일한 경향성을 보여주며 이는 CFD 해석이 원활하게 진행되었음을 의미하지만 실험과 CFD 해석의 오차 범위를 줄이는데 한계가 있었다. 실험과 CFD 해석의 결과를 일치시키기 위해서는 환경 변수에 민감한 유체 해석에서는 많은 환경 변수를 고려해야 함을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업기술평가관리원을 통해 차세대지능형반도체기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(20016130).

이 논문은 순천향대학교 기계공학과 Advanced Printing Lab으로부터 에어로졸 제트 프린팅 장비 및 실험의 지원을 받아 수행된 연구임.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지

가 없음을 명시합니다.

References

- 1) S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, Chepuri R. K. Rao, M. Vijayan and D. C. Trivedi, "EMI shielding: Methods and materials—A review," *Journal of applied polymer science*, Vol.112, No.4, pp.2073-2086, 2009.
- 2) Ethan B. Secor, "Principles of aerosol jet printing," *Flexible and Printed Electronics*, Vol.3, No.3, 035002, 2018.
- 3) Hampus. Söderqvist, "Modeling and simulation of particle dynamics in microfluidic channels," 2017.
- 4) A. A. Zick and G. M. Homsy, "Stokes flow through periodic arrays of spheres," *Journal of fluid mechanics* Vol.115, pp.13-26, 1982.
- 5) X. Zheng and Z. Silber-Li. "The influence of Saffman lift force on nanoparticle concentration distribution near a wall," *Applied physics letters*, Vol.95, No.12, 2009.
- 6) P. J. Schmid and D. S. Henningson, "Optimal energy density growth in Hagen-Poiseuille flow," *Journal of Fluid Mechanics* Vol.277, pp.197-225, 1994.
- 7) Choi. Yo. Han, Yoo. Il. Hoon and Lee. Chul. Hee, "Thermal Flow Analysis of an Engine Room using a Porous Media Model for Imitating Flow Rate Reduction at Outlet of Industrial Machines," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.19, pp.62-68, No.1, 2022.
- 8) Won. Jonggeun, Yoon. Jongil, Lee. Hyunah, Chung. Seonggyo and Jeong Jaesu, "Simulation Analysis on Static Safety of 55Hp-Servo-Based Hydrostatic Transmission," *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.1, pp.34-42, 2022.
- 9) Park. Seung. Woon, Choi. Yo. Han and Lee. Chul. Hee "Review of Regulation for Rollover Test and Evaluation of Safety for Buses by using Simulation of Multi-body Dynamics," *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.3, pp.39-46, 2022.
- 10) Choi. Seong. Woong, Kwak. Kyung. Sin, Le. Quang. Hoan and Yang. Soon. Yong, "A Study on Simscape based 6DOF Field Robot Simulation Model" *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.3, pp.1-10, 2022.
- 11) Yeong. Jun. Yu, An. Young. Chul, Lee. Kwang. Hee, Park. Joeng. Hyun, Lee. Dae. yup and Lee. Chul. Hee, "Fatigue and Severity Analysis of Drive Axle Parts According to Forklift Driving Environment," *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.2, pp.24-30, 2023.
- 12) Park. Jeong. Woo, Khan. Haroon, Ahmad, Je ong. Eun. A, Kwon. Sung. Ja, Yun. So. Nam and Lee. Hue. Sung, "Pressure/Flow Pulsation Characteristics of the Hydraulic System for Behaviour Prediction of the Prefill Valve," *Journal of Drive and Control*, Vol.18, No.2, pp.1-8, 2021.
- 13) Noh. Dae. Kyung, Lee. Dong. Won, Kim. Taek. June and Jang. Joo. Sup, "Developing Analysis Model of Hydraulic System for Dental Chair," *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.1, pp.27-33, 2023.
- 14) F. Sambou, J. J. Gonzalez, M. Benmouffok and P. Freton, "Theoretical study of the arc motion in the hollow cathode of a dc thermal plasma torch," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.55, No.2, 025201, 2021.
- 15) S. Binder, M. Glatthaar and E. Rädlein, "Analytical investigation of aerosol jet printing," *Aerosol Science and Technology*, Vol.48, No.9, pp.924-929, 2014.
- 16) ANSYS Fluent 2020, ANSYS Fluent Tutorial Guide 2021 R1, ANSYS, Canonsburg, PA
- 17) C. M. Rhie and W. L. Chow, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation," *AIAA Journal*, Vol.21, No.11, pp.1525-1532, 1983.
- 18) F. R. Menter, M. Kuntz and R. Langtry, "Ten years of experience with the SST turbulence model. Turbulence," *Heat and Mass Transfer*, Vol.4, pp.625-632, 2003.
- 19) S. Ramesh, Z. Xu, I. V. Rivero, and D. R. Cormier, "Computational fluid dynamics and experimental validation of aerosol jet printing with multi-stage flow focusing lenses. *Journal of Manufacturing Processes*," Vol.95, pp.312-329, 2023.