

첨단 전자 산업에서 배출되는 입자 농도 측정을 위한 희석장치 성능 연구

정지우¹⁾ · 오재호¹⁾ · 유기현¹⁾ · 강한이²⁾ · 황정호^{1)*}

¹⁾연세대학교 기계공학부

²⁾삼성전자 주식회사 글로벌 제조&인프라총괄 인프라품질분석팀

(투고 2025년 3월 14일, 수정 2025년 8월 18일, 게재확정 2025년 12월 8일)

Development and Performance Evaluation of a Dilution Device for Particle Concentration Measurement in Advanced Electronics Manufacturing

Jiwoo Jung¹⁾, Jaeho Oh¹⁾, Gihyeon Yu¹⁾, Hani Kang²⁾, Junggho Hwang^{1)*}

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea*

²⁾*Infra Quality Analysis Team, Global Manufacturing & Infra Technology, SAMSUNG ELECTRONICS
Co.Ltd., Pyeongtaek, 17786, Korea*

(Received March 14 2025; Revised August 18 2025; Accepted December 8 2025)

Abstract

In advanced electronics manufacturing, including semiconductor and display production, generation of particles during manufacturing process has been occurred. Consequently, the monitoring of particle concentrations in pipelines prior to air emission is essential for efficient particle removal. To accurately measure high particle concentrations, dilution devices have been developed to control the particle concentrations to the detection range of measurement instruments. In this study, the development of the dilution device was optimized via computational fluid dynamics (CFD) simulations using both Eulerian and Lagrangian methods. The experiment results demonstrated that the dilution device exhibited an error of 18% between the experimental and theoretical values at a maximum dilution ratio of 35 for nano-sized polystyrene latex particles. Additionally, the experiments with SiO₂ particles validated the dilution efficiency of device, showing an error of 12% between the experimental and theoretical values. This study validated the performance of the developed dilution device for accurately measuring high particle concentrations before the removal of particles. The device demonstrates considerable potential for real-time particle monitoring, thereby enhancing the operational stability, efficiency, and maintenance of particle removal systems.

Keywords: Aerosol, Nano particle, Dilution device, Dilution ratio, Electronics industry, Exhaust

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2821

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 서론

반도체 및 디스플레이 산업과 같은 첨단 전자 산업에서는 다양한 제조 공정 중 다량의 입자가 부산물로 발생한다(Huang et al., 2005). 이러한 입자는 주로 기계적 마모 또는 화학적 반응에 의해 생성되며(Choi et al., 2015a; Chang and Chang, 2006), 특히 화학 기상 증착(Chemical Vapor Deposition, CVD) 및 식각(Etching, ETCH) 공정에서 입자 발생이 보고되고 있다(Abreu et al., 1994; Hammond, 1991; Moriya et al., 2005; Ito et al., 2008)

CVD 공정은 반도체 및 디스플레이 제조에서 필수적인 박막 증착 기술로(Forsyth and Liu, 2002; Kim et al., 2023), 전구체(precursor)와 반응기체 간의 동종반응(homogeneous reaction) 또는 이종반응(heterogeneous reaction)을 활용하여 기판 표면에 박막을 형성하는 방식이다(Carlsson and Martin., 2010). 그러나 이 과정에서 핵형성(nucleation), 응집(coagulation), 확산(diffusion) 등의 단계를 거쳐 미세 입자가 생성된다(Okuyama et al., 1990). 이는 박막의 품질을 저하시켜 제품 불량률을 증가시키는 주요 요인으로 작용하기 때문에, 부산물 입자는 배기 시스템을 통해 신속하게 제거해야 한다(Nagai, 2007).

반도체 제조 공정에서는 다양한 재료가 사용되며(Gilles and Loehr, 1994), 공정에 사용된 물질간의 반응으로 부산물이 발생할 수 있다(Lee and Hong., 2022). 예를 들어, CVD 공정과 확산 공정에서 챔버 유지 관리를 위해 챔버를 개방할 때, 공기 중 SiH_4 와 H_2O 의 가수분해 반응을 통해 SiO_2 입자가 부산물로 발생된다(Choi et al., 2015b). 이처럼 발생한 다량의 부산물은 배기 시스템을 통해 처리되며, 스크러버(scrubber), 전기집진기 등의 저감 장치를 이용하여 제거된다(Lieberman, 1996; Peng et al., 2025; Lee et al., 2015; Oviroh et al., 2019; Kim et al., 2010).

배출되는 입자의 특성은 공정 유형에 따라 다르게 나타난다. Lu 등(Lu et al., 2023)은 공정 장비에서 발생하는 특정 고농도 오염 물질을 위한 스크러버 처리 이후 입자 농도를 측정하기 위해 ETCH, CVD 공정과

연결되는 스크러버 후단에서 마이크로 오리피스 캐스케이드 임팩터를 이용해 입자 질량 분포를 측정하였다. ETCH 공정 챔버와 연결된 Burn-wet 스크러버 후단에서는 질량 중앙 입경(Mass Median Diameter; MMD) 140 nm, 총 질량 농도(Total Suspended Particles; TSP) 18.3 mg/m^3 가 측정되었고, ETCH 공정 챔버와 연결된 Plasma-wet 스크러버 후단에서는 MMD 270 nm, TSP 2.5 mg/m^3 가 측정되었으며 CVD 공정 챔버와 연결된 Thermal-wet 스크러버 후단에서는 MMD 170 nm, TSP 42.8 mg/m^3 가 측정되었다. 따라서, 공정 종류와 스크러버 종류에 따라 배출되는 입자의 크기는 다르지만 100 ~ 300 nm의 질량 중앙 입경을 갖는 입자가 분포한다. 총 부유 입자 질량 농도 또한, 스크러버 종류와 오염원에 따라 $2.5 \sim 42.8 \text{ mg/m}^3$ 로 부유하고 있음을 확인할 수 있다. 일부 반도체 배기 공정에서는 공정 부산물이 펌프 내부에 퇴적, 축적되어 펌프 고장 및 파손의 주요 원인이 되기도 한다(Baek et al., 2024; Li et al., 2021) 이에 따라 실시간 모니터링 시스템을 통한 정기 예방 유지보수가 필요하다.

디스플레이 제조 공정에서도 다양한 화학 물질이 사용됨에 따라 부산물이 발생한다(Park et al., 2019). 디스플레이의 박막트랜지스터(Thin Film Transistor, TFT)를 만드는 과정에 증착, 세정, 포토레지스트, 식각 등의 여러 공정에서 발생하는 온실가스 및 입자는 산, 알칼리, 유기물 등의 성분별로 분류하여 적절한 저감 장치를 통해 처리된다(Wei et al., 2018). 예를 들어, 산 및 알칼리 성분은 스크러버를 통해 제거되고, 유기물은 축열연소탈취장치(Regenerative Thermal Oxidizer, RTO)를 통해 처리된다. Choi 등(Choi and An, 2016)은 LED 제조 공정에서 생성된 산소 및 인듐 기반의 섬유형 입자를 수집하여 분석하였으며, 섬유 입자의 길이와 직경은 각각 약 500 ~ 2000 nm 및 30 ~ 50 nm임을 확인하였다. 공정 챔버를 개방하여 부품 교체 및 진공 청소를 하는 유지보수 중 측정된 입자의 농도는 $0.09 \sim 1.9 \mu\text{g/m}^3$ 로 측정되었다. 또한, 최근 디스플레이 패널, 반도체 소자, 태양전지 등 첨단 전자 산업에서 사용되는 원자층 증착(Atomic Layer Deposition, ALD) 공정에서도 600시간 연속 운전 동

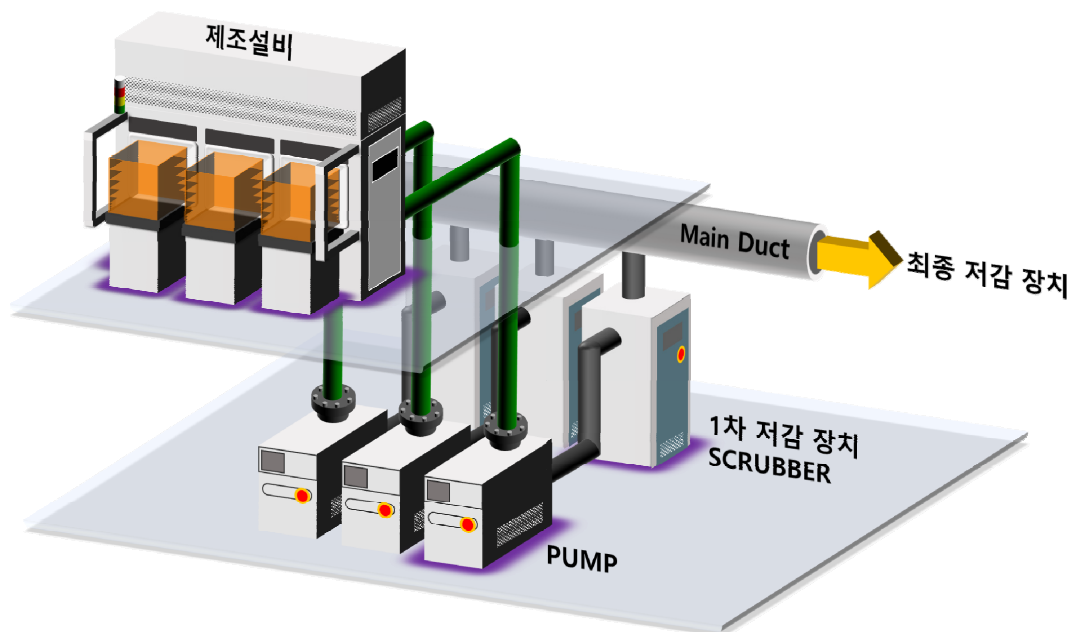


Figure 1. Schematic of exhaust duct in semiconductor manufacturing facility

안 챔버-펌프 사이에 공정 부산물을 포집하는 콜드트랩을 설치하여 ALD 공정에서 발생하는 부산물을 포집하였고, 부산물이 총 520g이 포집됨이 보고된 바 있다 (Lee et al., 2024).

그림 1은 제조설비와 연결된 입자 배기 개략도이다. 반도체 및 디스플레이 제조 공정에서 배출되는 배기가스를 처리하기 위해 국소 배기 시스템을 사용한다(Yeh et al., 2024). 해당 시스템은 다양한 배기 오염 물질이 포함된 혼합 가스를 처리하기 위해 진공 펌프 후단에 스크러버 등의 1차 저감장치를 적용하며, 제조 설비의 배기 시스템에 직접 연결되어 처리된다. 각 제조 설비에서 배출된 배기가스는 1차 처리되어 메인 덕트(Main Duct)로 집결되며, 최종 저감 장치를 거쳐 환경에 안전하게 배출된다. 최종 저감 장치의 종류로는 중력 침전 장치, 사이클론, 전기 집진기 등이 포함된다(Peng et al., 2025). 이러한 다단계 배기 시스템을 통해 유해 입자 및 가스를 효과적으로 관리할 수 있으며, 제조 공정의 안정성과 작업 환경의 안전성을 확보할 수 있다.

반도체 공정 배출구에서 나오는 체적 유량은 약 500 m³/min로 높은 체적 유량을 보이고 있고, 배관 내 유

속은 5 ~ 15 m/s 수준이다(Chein et al., 2005; Shiu et al., 2003). 또한, 이렇게 배출되는 가스를 분해하기 위해 사용되는 Burn-wet scrubber의 경우 연소부는 700℃ 이상까지 가열되지만, 습식 스크러빙 및 냉각 과정을 거치며 상온 부근까지 냉각된다(Wang et al., 2025). 따라서 스크러버 이후의 배출되는 가스와 입자는 상온, 상압 상태이다(Tsai et al., 2004). 이 과정에서 배관을 따라 흐르는 입자는 고농도로 존재하며, 높은 유속과 큰 온도 변화라는 가혹한 조건에서 이동한다. 이러한 조건에서 공정 배기 배관 내 입자 농도를 정밀하게 계측하면 배관 상·하류 농도 차이를 통해 벽면 침착·막힘 시점을 예측하고 스크러버의 실시간 처리 효율을 평가할 수 있으므로, 이는 배관의 예방정비 및 입자 처리 장치(스크러버 등)의 안정적 운영을 체계적으로 수행하기 위해 필수적이다(Park et al., 2025).

배관을 흐르는 입자의 농도는 측정 위치에 따라 달라지며, 1차 저감 장치로 인해 입자가 일부 저감되어 스크러버 전단 P-S(P는 Pump, S는 Scrubber를 의미)배관, 스크러버 후단 S-D(S는 Scrubber, D는 Main Duct를 의미)배관 순으로 입자의 농도가 높게 나

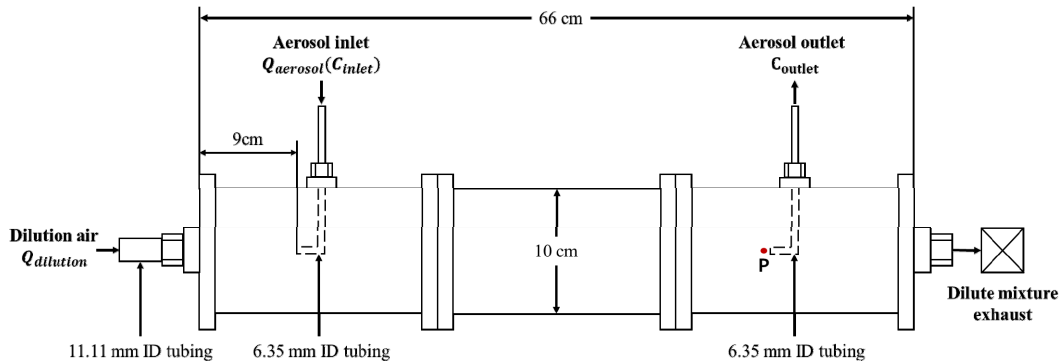


Figure 2. Schematic of a dilution device

타난다. 스크러버 후단에서의 농도가 최대 50 mg/m^3 수준으로 나타나고 있다. 이는 스크러버의 효율이 약 90%라고 했을 때, 스크러버 전단에서의 농도는 10배 수준인 약 500 mg/m^3 으로 보인다. 또한, 이러한 배기관 내부의 고농도 입자 환경으로 인해 기존의 상용 입자 측정 장비를 활용한 정확한 측정이 어려운 한계가 존재한다. 기존의 중량법은 채취 시간이 상대적으로 길고 필터 교체를 필요로 하기 때문에 배기관 내 부유하는 나노 크기 입자의 농도를 실시간으로 측정하는 것이 어렵다. 따라서, 정밀하고 실시간 대응이 가능한 측정 기술이 요구된다. 상용 실시간 입자 측정 장비들은 최대 측정 농도 한계를 가지고 있으며, 대표적으로 나노 입자를 측정하는 장비인 Condensation particle counter (model 3775, TSI, USA)의 경우에는 10^7 개/ cm^3 의 입자가 최대 측정 한계로, 100 nm 입자 기준 12 mg/m^3 의 질량 농도 측정 한계를 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, 샘플링된 입자의 농도가 측정 장비의 한계치를 초과하는 경우, 희석을 통해 측정 조건을 조정해야 실시간 모니터링이 가능하다.

본 연구는 고농도 배기관 환경에서 기존 입자 측정 방법의 적용 한계를 해소하고자 한다. 이를 위해 상용 입자계수기를 활용해 300 nm 이하 나노 입자의 실시간 농도 측정을 가능하게 하는 희석 장치를 개발하는 것을 목표로 한다. 희석 장치 단면 형상에 따른 희석 성능을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)으로 비교하여 최적 형상을 도출하고, 제작된 희석장치의 희석비를 실험적으로 검증하였다. 이를 위해 다양한

입자 농도 범위에서 희석 성능을 평가하였으며, 입자 재질에 따른 성능 차이를 비교하기 위해 PSL(Polystyrene Latex) 입자와 SiO_2 입자를 이용하여 실험을 진행하였다.

2. 희석 장치 선정: CFD 계산

2.1 희석 장치 후보군

그림 2는 희석 장치의 개요도를 보여준다. 희석장치는 크게 희석공기 주입부, 입자 주입부, 희석된 입자 측정부, 배기부로 구성 되어있다. 그림 1의 S-D 배관에서 샘플링 된 에어로졸은 그림 2의 Aerosol Inlet으로 유입된다. 이때 유량은, $Q_{aerosol}$ (L/min) 이고 입자 농도는 C_{inlet} (mg/m^3) 이다. 유입된 에어로졸은 희석공기와 혼합된다. 이때 희석 공기의 유량은 $Q_{dilution}$ (L/min) 이다. 이론적인 희석비는 다음과 같은 식으로 정의된다. (Lipsky et al., 2004)

$$\text{이론 희석비} = \frac{Q_{aerosol} + Q_{dilution}}{Q_{aerosol}} \quad (1)$$

희석 공기와 섞인 에어로졸은 그림 2의 Aerosol outlet을 통해 계측 장비로 C_{outlet} 의 농도로 측정된다. 따라서 희석비는 다음 식으로 정의될 수 있다.

$$\text{실제 희석비} = \frac{C_{inlet}}{C_{outlet}} \quad (2)$$

만약 에어로졸과 희석 공기의 혼합이 잘 이루어졌다면 식(2)는 식(1)과 동일하게 되지만 체류시간이 짧아 비

균일한 혼합이 일어나거나, 벽면 침착 등으로 입자 손실이 일어나면 차이가 나게 된다.

본 연구에서는 표 1과 같이 세가지의 희석 장치 형상을 선정하여 성능을 비교하였다. 성능 비교를 위해 전산 유체 역학(CFD) 방법을 사용하여 입자 농도 C 의 공간 분포를 계산하였다.

Table 1. Three dilution ducts

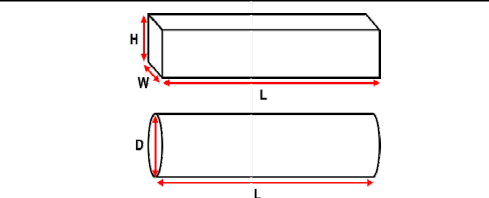
	
Duct	Size[mm]
40mm×40mm	40(H)×40(W)×600(L)
80mm×80mm	80(H)×80(W)×600(L)
100mm diameter	100(D)×600(L)

그림 3은 전산유체역학을 위해 사용된 3D CAD 모형 및 격자의 개수를 보여준다. 실제 희석공기는 희석 공기 주입부로 유입되나, 단면의 효과만을 비교하기 위해 희석공기 주입부를 생략하고 주입면 전체를 균일 유속으로 설정하였다. 이를 통해 혼합을 최소화하는 보수적 조건에서 해석되었다. 희석 장치 내에 주입되는 희석 공기 유량과 에어로졸 유량은 68 L/min과 2 L/min이다. 희석 장치의 세가지 형상에 따라 달라지는

희석 공기 유속은 각각 0.708 m/s, 0.177 m/s, 0.144 m/s이다. 주입되는 입자 속도는 1.05 m/s가 된다.

2.2 CFD계산: 입자 농도 - 대류 확산 방정식

입자 농도를 계산하기 위해, 상용 CFD 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT 2021 R1을 사용하였다. Eulerian approach를 사용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$(\vec{V} \cdot \nabla)C = D\nabla^2 C \quad (3)$$

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

$\vec{V}$ 는 속도 벡터이고, D 는 입자의 확산 계수이며(Hinds and Zhu, 2022) C 는 입자의 농도이다. 왼쪽의 항은 대류(Convection)항을 나타내고, 오른쪽의 항은 확산(Diffusion)항을 나타낸다. 입자의 확산 계수는 PSL입자(300 nm 기준)에 대해 $2.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 값을 가지는 상수를 사용했다(Hinds and Zhu, 2022). k 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant), T 는 유체의 온도, d_p 는 입자의 직경이다. C_c 는 미끄럼 보정계수 (Cunningham correction coefficient)이고, 아래의 식으로 규정할 수 있다(Hinds and Zhu, 2022).

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} [2.34 + 1.05 \exp(-0.39 \frac{d_p}{\lambda})] \quad (5)$$

λ 는 공기의 평균 자유 행정(mean free path)이고, 1atm, 293 K 일 때, $0.066 \mu\text{m}$ 를 가진다.

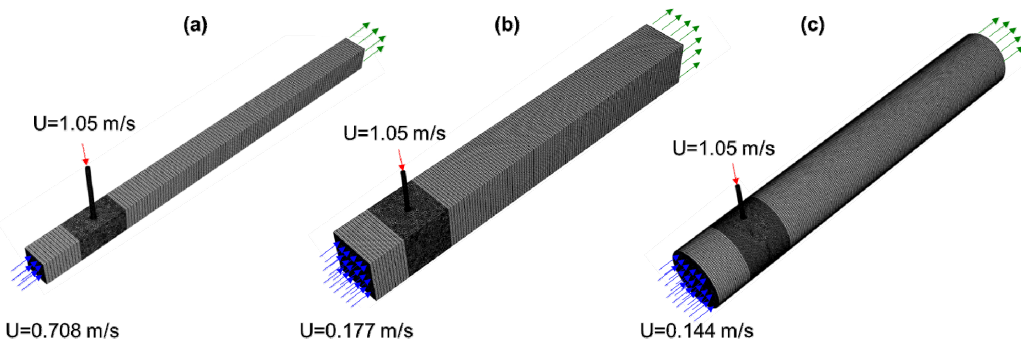


Figure 3. Geometry and mesh of dilution duct (a) 40mmx40mm duct; number of mesh is 147,317 (b) 80mmx80mm duct; number of mesh is 550,373 (c) 100mm diameter duct; number of mesh is 839,823. Blue arrows indicate the velocity inlet for dilution air, red arrows the velocity inlet for aerosol, and green arrows the pressure outlet; all remaining surfaces are treated as no-slip walls.

속도 벡터 $\vec{V}$ 는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 해석하여 구하였다. 대상 희석장치 내 유동이 레이놀즈 수가 4000 이상인 난류 유동에 해당하므로, 난류 모델 standard k- ϵ model 을 사용하였다. 유동의 outlet은 pressure-outlet을 적용하였다. 희석장치 내부의 모든 벽면은 속도에 대해서는 no-slip 조건을 적용하였다. 입자에 대해서는 perfect sink 조건 ($C=0$)을 적용하였다. 자세한 경계조건은 표 2에 요약되어 있다. 모든 수렴 조건은 10^{-4} 을 적용하였다.

Table 2. Boundary condition

Case		Flow rate [L/min]	Velocity [m/s]	Flow field	Eulerian
40mm×40mm	Dilution air	68	1.05	$\vec{V} = \vec{V}_{inlet}$	C=constant('0')
	Aerosol inlet	2	0.708	$\vec{V} = \vec{V}_p$	C=constant('1')
	wall	-	-	-	C = 0
	outlet	-	-	$\frac{\partial \vec{V}_p}{\partial n}$	$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$
80mm×80mm	Dilution air	68	1.05	$\vec{V} = \vec{V}_{inlet}$	C=constant('0')
	Aerosol inlet	2	0.177	$\vec{V} = \vec{V}_p$	C=constant('1')
	wall	-	-	-	C = 0
	outlet	-	-	$\frac{\partial \vec{V}_p}{\partial n}$	$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$
100mm diameter	Dilution air	68	1.05	$\vec{V} = \vec{V}_{inlet}$	C=constant('0')
	Aerosol inlet	2	0.144	$\vec{V} = \vec{V}_p$	C=constant('1')
	wall	-	-	-	C = 0
	outlet	-	-	$\frac{\partial \vec{V}_p}{\partial n}$	$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$

2.3 CFD계산: 입자 거동 방정식

유동장 내 입자의 시간 별 위치 추적을 해석하기 위해,

Lagrangian method를 사용하였다. DPM (Discrete Phase Model)을 사용하였으며, 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{V}_p}{dt} = F_d(\vec{V} - \vec{V}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (6)$$

$$F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c} \quad (7)$$

여기서, $\vec{V}_p$ 는 입자의 속도, $F_d(\vec{V} - \vec{V}_p)$ 는 입자의 단위 질량당 항력, F_d 는 항력, ρ_p 는 입자의 밀도($\rho_p = \rho_{PSL} = 1050 \text{ kg/m}^3$)이다. 입자의 속도를 구한 뒤에, 입자의 위치는 다음 방정식을 통해 계산할 수 있다.

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \int_n^{n+1} \vec{V}_p^{n+1} dt \quad (n \geq 0) \quad (8)$$

x_p^n 는 입자의 위치 벡터, $\vec{V}_p$ 는 입자의 속도 벡터, n 은 time step이다.

3. 실험 방법

그림 4는 본 연구를 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 희석을 위한 공기가 희석공기 주입부로 희석장치에 주입되며 1/4 inch 내경을 갖는 튜브와 연결하였다. 입자 주입부는 1/4 inch 내경의 프루브를 통해 희석시키고자 하는 입자 샘플을 주입하였다. 희석공

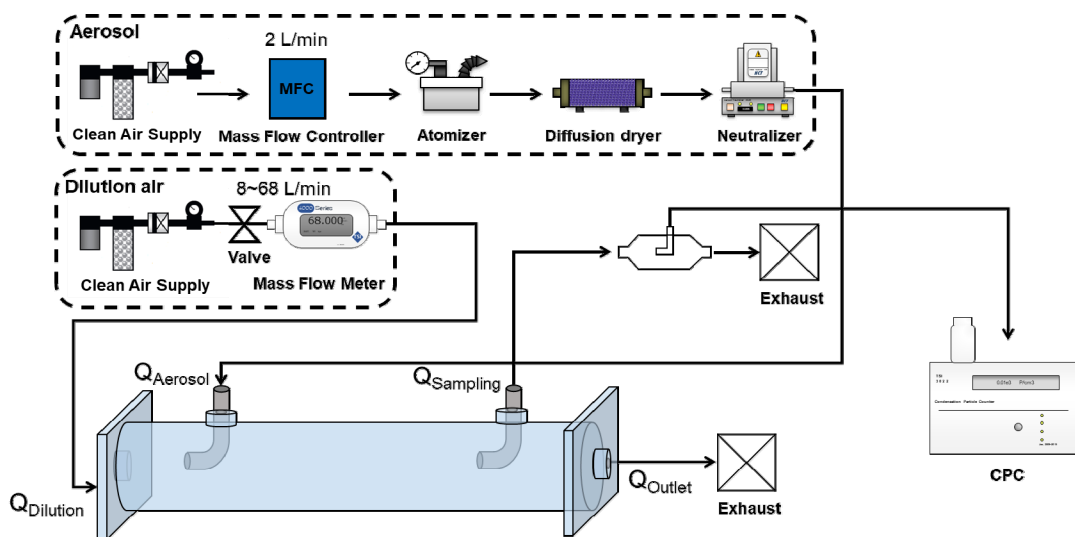


Figure 4. Schematic diagram of the experimental setup

기와 주입 입자의 혼합을 위해 주입 방향을 마주보게 설정하였으며 희석공기와 혼합되어 희석된 입자를 측정하기 위해 입자 측정부에 상용입자 측정기를 설치하였다. 희석 성능 실험은 입자 발생기의 유입 유량을 고정시키고, 희석을 위해 주입되는 공기 유량을 변경시키면서 희석장치 후단에서 희석된 입자를 상용 입자 측정 장비로 계측하였다. 이때, 사용된 각 유량을 $Q_{aerosol}$, $Q_{dilution}$, $Q_{sampling}$, Q_{outlet} 으로 표기할 수 있으며, 각각 에어로졸 주입 유량, 희석 공기 주입 유량, 입자 계측기 흡인 유량, 그리고 배기로 배출되는 유량을 의미한다. 배기되는 유량은 에어로졸 주입 유량과 희석 공기 주입 유량의 합에서 입자 계측기 흡인 유량을 제외하여 계산할 수 있다.

입자 발생기로 atomizer (model 9302, TSI Inc, USA)를 사용하였으며, 입자 발생 유량이 높아지면 희석 유량도 증가하여 실험실 내에서 구현 가능한 최대 희석비를 보기 위해 발생 유량은 입자 발생 최소 유량인 2 L/min으로 고정하였다. 실험 입자로는 PSL (240 nm)과 SiO₂ powder (300 nm, Sukgyung AT, Korea)를 사용하였다. PSL 입자 농도는 발생기의 최대 농도(4.21 mg/m³)에서 약 0.50 mg/m³ 간격으로 단계별 감소시켜 4.21, 3.71, 3.21, 2.71, 2.20 mg/m³을 설정하고, 최저 농도 1.24 mg/m³를 추가하여 총 여섯 조건을 구성하였다. 또한 SiO₂ 입자농도는 1.84, 2.22, 3.00 mg/m³으로 구성하였다. 희석 전 입자농도는 입자 발생기에서 2 L/min으로 발생된 입자를 dilutor로 분기한 후, 입자계측기로 측정하였다. 입자 희석에 사용되는 공기는 clean air supply를 이용하여 압축공기의 수분 성분을 제거하고, 헤파(High Efficiency Particulate Air, HEPA) 필터를 거친 깨끗한 공기만을 주입하였다. 이때 공기는 밸브로 유량을 조정하였으며 유량계(4143, TSI, USA)를 통해 유량값을 계측하여 희석비에 맞는 희석 유량(8 ~ 68 L/min)을 공급하였다. 이후, 희석된 샘플 흐름은 입자 계측기의 흡인 유량(0.3 L/min)과 허용 압력 범위를 유지하기 위해, 희석장치 후단에 dilutor를 추가로 설치하였다. 이 dilutor는 희석된 샘플의 과잉 유량을 vent 라인으로 후회·배출하여 초과 압력을 제거하고, 측정 장비에 필요한 유량만 안정적으로 공급하도록 설계되었다. 그리고 입자 계측시, 계측기 전단에 neutralizer(Soft X-ray charger 4530, HCT,

Korea)를 연결하여 입자를 중화시킨 후 계측하였다. 입자 계측기로는 나노 크기의 입자 측정을 위해, condensation particle counter (model 3775, TSI, USA, CPC)을 사용하였다. CPC의 경우 입자 개수를 측정하는 장비로, 발생시키는 단분산 입자의 크기, 밀도 등 입자의 물리적 특성에 따라 질량 농도를 산출하여 질량 농도로 표기하였다. 수농도를 질량 농도로 바꾸는 식은 다음과 같다.

$$\text{질량농도}[g/cm^3] \quad (9)$$

$$= \text{수농도}[\#/cm^3] \times \text{입자질량}(\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_p)[g]$$

d 는 입자 직경, ρ_p 는 입자의 밀도이다.

4. 결과 및 토의

4.1 희석 장치 선정

희석비 35에 대해서 입자 유량 2 L/min과 희석 공기 유량 68 L/min 이 덕트로 주입되며, 3가지 덕트의 단면적에 따라 희석 공기 유속을 0.708 m/s, 0.177 m/s, 0.144 m/s로 설정하였다.

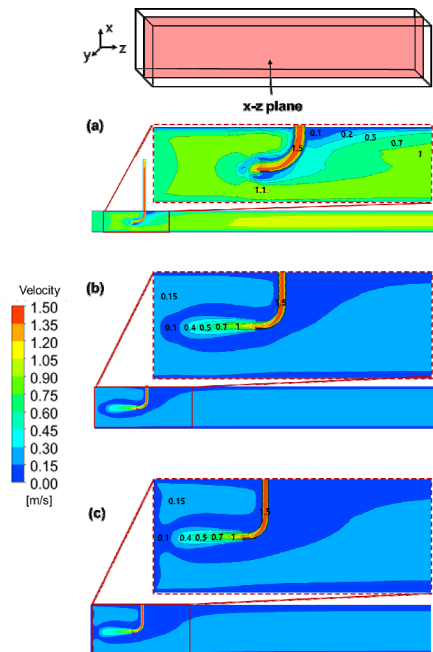


Figure 5. Contours of velocity with change of dilution duct (a) 40mmx40mm duct (b) 80mmx80mm duct (c) 100mm diameter duct

그림 5는 3가지 덕트 형상에서 x-z 평면에 대한 유속 분포를 순차적으로 보여준다. (a)는 40mm×40mm duct 내 유속 분포, (b)는 80mm×80mm duct 내 유속 분포, (c)는 100mm diameter duct 내 유속 분포를 보여준다. 세가지 형상 모두 입자 주입 유동을 보면, 1.05 m/s로 주입되는 입자가 희석 유속과 만나 유속이 점차 느려지는 분포를 가지고 있다. 주입되는 입자 주변에서 다양한 유속 분포가 보이고 입자 주입부를 지난 후 일정한 유속을 볼 수 있다. 40mm×40mm duct는 1 m/s, 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct는 0.15 m/s 정도임을 확인할 수 있다. 이는 주입 유동과 희석 유동이 섞인 이후 안정된 속도가 유지된다고 볼 수 있다. 유속 분포가 조밀한 입자 주입부 주변을 보면, 3가지 형상 모두 입자 주입부 뒷면에서 유속이 0.1 m/s로 느려진다. 이 수치는 40mm×40mm duct의 경우 단면적이 가장 작아 상대적으로 빠른 덕트 내 유속(1 m/s)과 비교하여 프루브 뒷면의 유속과의 차이가 가장 큼을 보여주며, 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct는 덕트 내 0.15 m/s 유속과 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.

그림 6은 3가지 덕트 형상의 x-z 평면과 aerosol outlet인 점 P가 위치한 x-y 평면에서 Eulerian 방식으로 해석한 입자 농도 분포를 보여준다. 이때 입자 농도는 에어로졸 주입 농도로 나눈 무차원화 된 농도이다. 그림 6의 (a)는 40mm×40mm duct의 단면에 대한 결과이다. 40mm×40mm duct의 희석 공기 유속이 0.7 m/s 정도로 세가지 형상 중 가장 빠르다. 이에 따라, 희석 공기 유속이 너무 높으면 주입되는 입자가 주입 방향으로 퍼지지 못하고 상대적으로 유속이 느린 샘플링 프루브 뒤를 따라 입자가 흘러 덕트 상단으로 집중되는 결과를 보여준다. 그림 6의 (b)와 (c)의 경우 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct의 단면을 보여준다. 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct는 40mm×40mm duct보다 4배 정도 느린 단면 유속을 가지며 주입되는 입자가 주입하는 방향으로 넓게 퍼진 후 희석 공기를 따라 뒤로 흐름에 따라, 중앙으로 입자가 흐름을 보여준다. 80mm×80mm duct보다 단면유속이 느린 100mm diameter duct는 덕트 후단 단면에서의 입

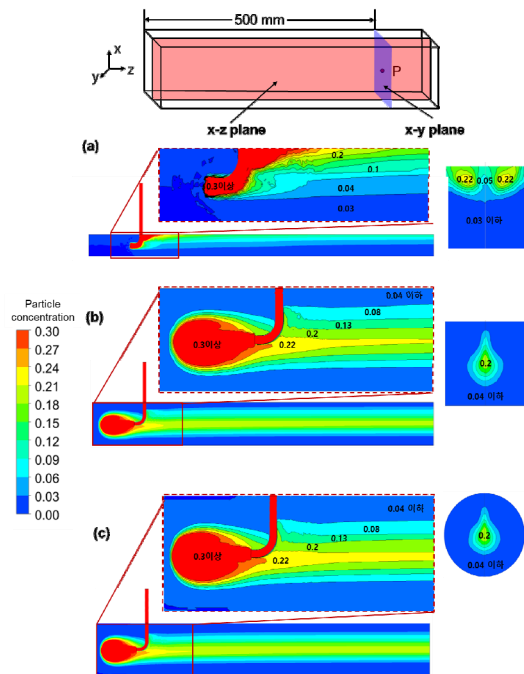


Figure 6. Numerical results of particle concentration on Eulerian approach (a) 40mm×40mm duct (b) 80mm×80mm duct (c) 100mm diameter duct

자 농도가 더 높음을 알 수 있다.

표 3는 덕트 후단 입자 측정부(그림 6 P점)가 위치한 단면에서 입자의 평균농도, 표준편차와 상대표준편차(Relative Standard Deviation; RSD)를 보여준다. RSD는 평균치와 측정치 사이의 차이를 보여주는 척도로, 덕트 후단 단면 내에서 입자의 분포가 균일한지를 보여주는 값으로 사용되었다. RSD 값이 작을수록 입자가 고르게 위치함을 알 수 있다. 각 수치들은 다음과 같은 수식으로 계산되었다.

Area-weighted Average Mass Concentration

$$x_0 = \frac{1}{A} \int x dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n x_i | A_i | \quad (10)$$

Standard Deviation

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_0)^2}{n}} \quad (11)$$

Relative Standard Deviation (RSD)

$$RSD = \frac{\sigma}{x_0} \times 100 \quad (12)$$

x_i 는 면적 A_i 에서의 질량 농도, x 는 면적을 이루는 Cell에서의 농도 값, x_0 는 x 의 평균, n 은 총 면의 개수이다. 중앙의 고농도 영역은 전체 셀 수의 소수부분에 해당하여, 극단값이 전체 σ 에 미치는 영향이 제한적으로 산출되었다.

Table 3. Numerical results of average particle concentration, standard deviation, and RSD in a cross section at the back end of the dilution device

	40mmX40mm	80mmX80mm	100mm diameter
Average concentration (kg/m ³)	0.0293	0.0192	0.0195
Standard deviation	0.0409	0.0401	0.0388
RSD (%)	1.397	2.086	1.990

40mm×40mm 단면에서 측정된 입자 농도는 0.0293 kg/m³로 도출되었고, 이는 다른 장치들에 비해 높은 값을 가지는 것을 확인하였다. 또한, 40mm×40mm 단면의 RSD 값은 1.40%로 다른 장치들에 비해 가장 낮은 값을 보인다. 이를 통해, 40mm×40mm 단면이 다른 단면들보다 입자 분포가 균일하고 입자의 희석에도 유리해 보인다. 하지만, 측정하고자 하는 입자는 희석된 후 입자 측정부(그림6 P점)를 통해 측정 장치로 이동하게 된다. 따라서, 입자 측정부가 위치하는 중앙에 입자가 분포하여야 정확한 측정이 가능하다. 40mm×40mm duct 시뮬레이션 결과에 따르면, 이 단면에서는 유동이 상부로 치우치는 현상이 두드러져 중앙부에서의 측정 정확도를 저해하고, 재현성 또한 떨어뜨릴 수 있어 실제 계측에 적용하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 빠른 유속에 의해 입자가 상단부로 집중되는 40mm×40mm duct는 적절한 희석 장치 형상이 아님으로 판단하였다. 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct의 경우, 단면 유속에 따라 입자의 농도 분포는 중앙에 집중 되어있고 사각 형상인 80mm×80mm duct의 경우 100mm diameter에 비해 상대적으로 입자가 지나지 않는 모

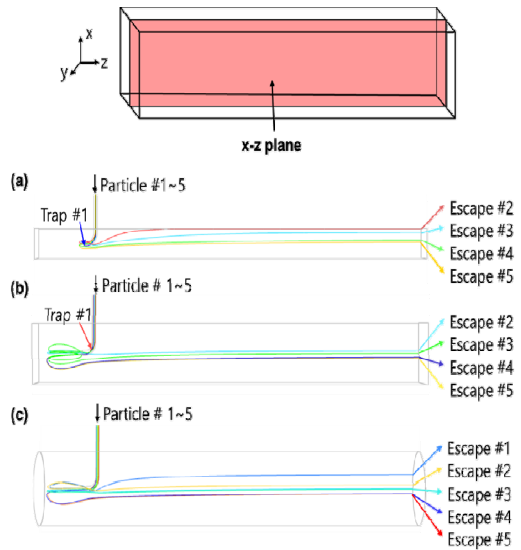


Figure 7. Particle trajectories of the 300 nm size of PSL with the change of dilution duct (a) 40mmx40mm duct (b) 80mmx80mm duct (c) 100mm diameter duct

서리 부분에 의해 농도 분포 상대 표준 편차(RSD) 값이 더 높다. 따라서, 덕트 내 단면적이 넓을수록 입자 주입 시 넓게 퍼지는 효과로 100mm diameter의 희석 장치가 희석에 가장 유리함을 확인하였다.

그림 7는 3가지 덕트 형상 x-z평면에서 희석 공기와 혼합에 따른 거동을 보여주는 대표 입자 5개의 거동이다. 그림 7의 (a)는 40mm×40mm duct에서의 입자 거동을 보여주며, 세가지의 희석 장치 형상 중 가장 작은 단면적으로 유속이 빨라 상대적으로 유속이 느린 입자 주입부 뒤를 따라 입자가 거동함으로써 입자가 덕트 상단부와 중심에 집중되는 것을 볼 수 있다. 그림 7의 (b)와 (c)는 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct의 입자 거동을 보여준다. 입자 주입 시, 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct에서의 주입된 입자는 주입 방향으로 넓게 퍼지는 모습을 보여주고 중앙을 중심으로 입자가 거동함을 보여준다. 40mm×40mm duct, 80mm×80mm duct와 100mm diameter duct에서의 입자의 최대 체류시간은 각각 1.32초, 3.19초, 4.07초이다. 희석장치 내의 입자의 체류시간이 길어질수록 입자가 확산될 수 있는

시간이 늘어나므로, 더 균질한 혼합을 기대할 수 있다.

이와 같이 Lagrangian 방식도 Eulerian 방식 결과와 유사하게 단면적이 좁을수록 희석공기 주입속도가 빨라짐에 따라, 마주보는 방향에서 주입되는 입자 유동이 주입 방향으로 넓게 퍼지지 않고 빠른 희석 공기에 의해 주입 되자마자 주입부를 따라 덕트 상단으로 이동하는 것을 확인 할 수 있다.

4.2 선정된 희석 장치에 대해 희석 성능 평가

그림 8은 6가지의 농도의 240 nm PSL 입자 발생시, 설정한 희석비에 따라 실제 측정된 입자 농도를 바탕으로 산출한 측정 희석비를 나타낸 그래프이다. 그래프에 제시된 대각선은 이론 희석비와 측정 희석비가 완전히 일치할 경우를 의미한다. 희석비가 5에서 30 구간인 경우 이론 희석비 대비 최대 13% 이내의 오차율을 보였고, 희석비가 35일 때에는 오차율이 최대 18% 수준으로 소폭 증가하는 경향을 확인하였다. 이는 전반적으로 희석 장치가 비교적 높은 정확도를 유지하지만, 희석비가 커짐에 따라 측정 희석비와 이론 희석비 간의 오차가 다소 증가할 수 있음을 시사한다.

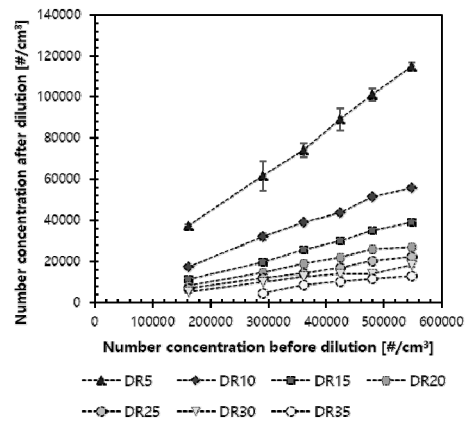


Figure 9. Comparison of 240nm PSL particle number concentrations before and after dilution under different dilution ratios

그림 9에 도식화한 희석 전 입자 개수농도와 실측된 입자 개수농도 간의 상관관계를 보여주는 결과이다. 그래프에 제시된 기울기 값은 각각 0.2021, 0.1002, 0.0735, 0.0511, 0.041, 0.0311, 0.0302으로 이론적으로 설정된 희석비와 유사한 경향을 보였다. 또한 결

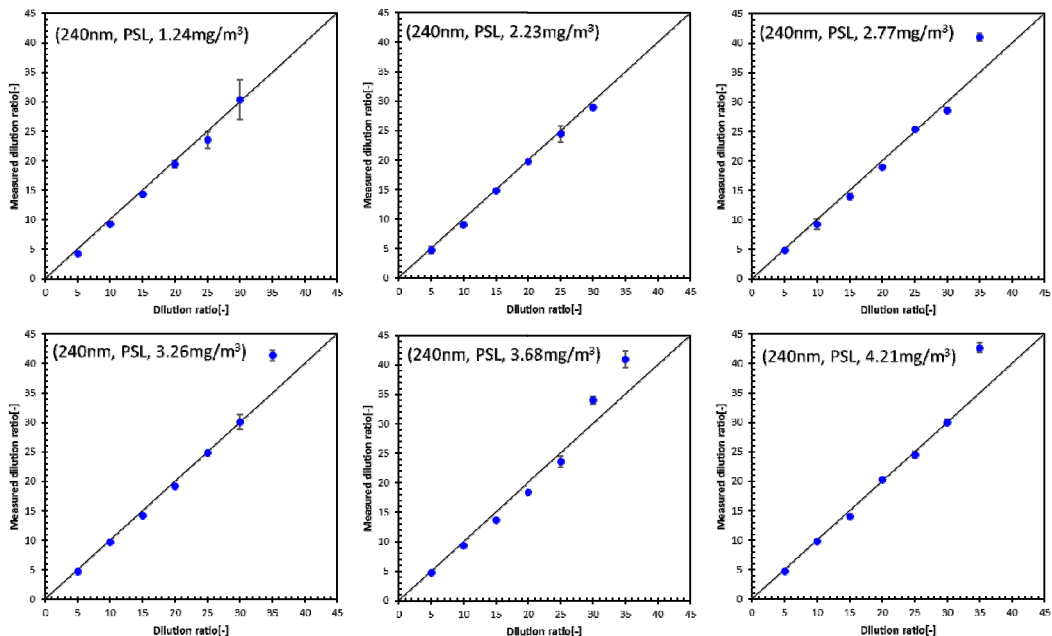


Figure 8. Comparison of 240nm PSL particle concentrations to evaluate dilution accuracy at different initial concentrations

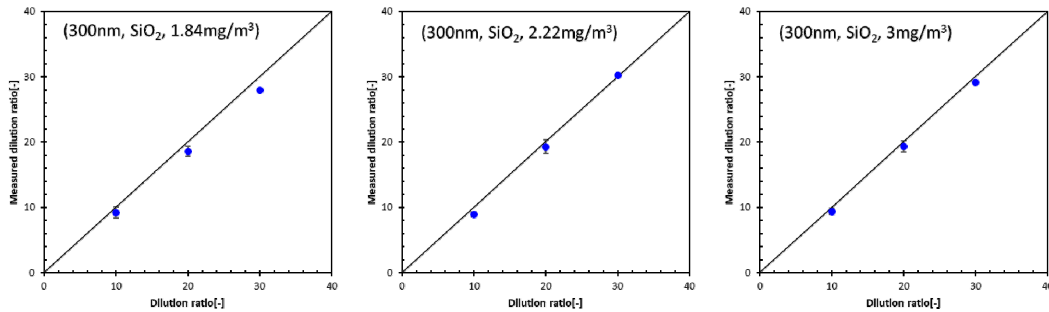


Figure 10. Comparison of 300nm SiO₂ particle concentrations to evaluate dilution accuracy at different initial concentrations

정계수(R^2)가 0.9978, 0.9943, 0.9972, 0.9853, 0.9943, 0.9651, 0.9345로 나타나, 전반적으로 높은 상관성을 확인할 수 있었다. 이는 주입되는 입자와 희석 공기가 희석 장치 내부에서 적절히 혼합되어, 설정된 희석비에 부합하는 희석이 이루어진 결과로 판단된다.

그림 10은 300 nm SiO₂ 입자를 3가지 초기 농도로 발생시킨 뒤, 이론적으로 설정한 희석비와 실험적으로 측정된 희석비 간의 선형성을 나타낸 결과이다.

희석비 10부터 30 구간인 경우, 이론 희석비 대비 측정 희석비의 오차율은 최대 12% 이내로 확인되었다. 이는 300 nm SiO₂ 입자에 대해서도 희석 장치가 비교적 정확한 희석 성능을 유지함을 시사한다.

그림 11은 SiO₂ 입자에 대해 희석 전 입자 개수농도와 실측 입자 개수농도 간의 상관관계를 나타낸다. 그

래프의 기울기가 각각 0.1011, 0.0485, 0.0328로 이론적으로 설정한 희석비로 계산된 값과 유사함을 보였으며, 결정계수(R^2)가 0.9914, 0.9977, 0.9821로 높은 상관성을 확인하였다.

앞선 실험 결과들로, 해당 희석 장치의 희석 성능은 입자의 성분에 영향을 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 희석 장치의 희석 성능은 희석비에 대해서 영향을 받는 것으로 보인다. 실제로 희석비가 35를 초과하는 조건에서는 CPC를 통해 입자 수농도를 정확하게 계측하기 어려웠는데, 이는 CPC의 검출 한계 범위를 벗어났거나 측정 편차가 커졌기 때문으로 추정된다.

이는 그림 12에서 확인할 수 있듯이, 희석비를 35에서 40으로 증가시킬 경우 희석 장치를 통과하는 총 유

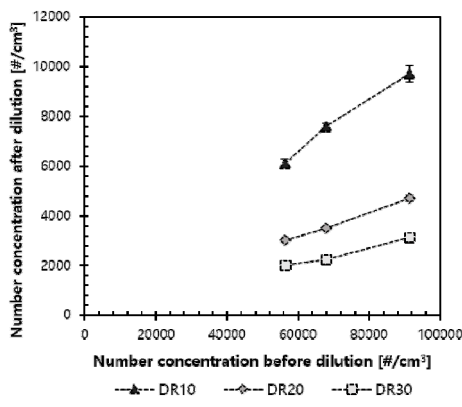


Figure 11. Comparison of 300nm SiO₂ particle number concentrations before and after Dilution under different dilution ratios

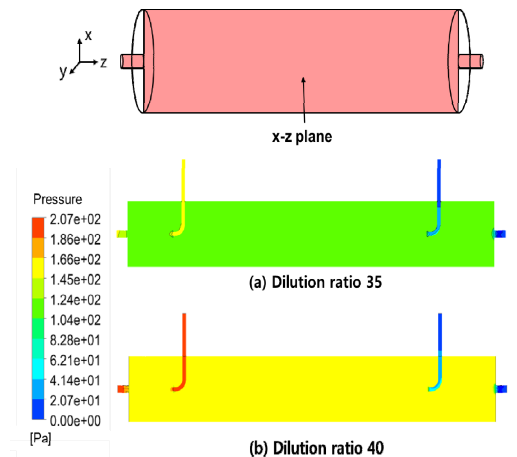


Figure 12. Contours of pressure variation with increasing dilution ratio

량이 70 L/min에서 80 L/min으로 변하며, 이로 인해 희석 장치 내부 압력이 114.7 Pa에서 157.3 Pa로 상승한다. 이러한 내부 압력 증가는 희석된 샘플을 CPC 정격 유량에 맞게 분기 과정에서 초과 유량이 충분히 배출되지 못해 발생한 것으로 판단된다. 이로 인해 CPC 입구 조건이 교정 범위를 벗어나 실제 샘플 유입이 정상적으로 유지되지 않아 결과적으로 입자가 존재하더라도 CPC가 안정적인 계측 조건을 상실하여 정확한 계측 및 보정된 측정이 이루어지지 않을 수 있다. 또한 CPC 내부의 임계 오리피스 전후 영역에서는 벽면 충돌 및 재순환 유동으로 인해 입자 손실이 집중적으로 발생할 수 있다(Chen et al., 2007). 희석비가 클수록 입자의 농도는 낮아지고 이러한 벽면 손실이 더욱 증가하여 측정 불가 현상이 발생할 수 있다. 따라서 희석비가 큰 조건(희석비 40 이상)에서는 CPC의 교정 조건 이탈과 벽면 손실 증가가 복합적으로 작용하여 입자 측정이 불가능해진 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 고농도 비산 입자를 실시간으로 측정하기 위한 희석 장치를 설계 및 제작하고자 수치해석을 수행하였으며, 240 nm PSL 입자와 300 nm SiO₂ 입자를 대상으로 희석 성능을 평가하였다. 희석 장치 설계 과정에서 Eulerian 방식과 Lagrangian 방식을 모두 적용하여 입자 농도 분포 및 거동을 해석함으로써, 최적화된 희석 장치 구조를 도출하였다. 실험 결과, PSL 입자를 활용한 희석 성능 평가에서 실험값과 이론값 간의 최대 오차율이 18%로, 전반적으로 이론 희석비와 유사한 수준을 보였다. 또한, SiO₂ 입자를 이용한 희석 성능 평가에서는 이론값과 대비 최대 12% 이내의 오차율로, 우수한 희석 정확도를 확인할 수 있었다. 이를 통해, 본 희석 장치가 입자의 초기 농도나 입자의 성분에 크게 영향받지 않고 안정적인 희석 성능을 발휘함을 알 수 있었다. 본 연구 결과는 첨단 전자산업 설비 내 고농도 비산 입자의 희석을 통한 실시간 계측에 사용될 수 있을 것이라 판단한다.

감사의 글

본 연구는 삼성전자의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

- Abreu, R. A., Troup, A. P., & Sahm, M. K. (1994). Causes of anomalous solid formation in the exhaust systems of low-pressure chemical vapor deposition and plasma enhanced chemical vapor deposition semiconductor processes. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 12(4), 2763-2767.
<https://doi.org/10.1116/1.587189>
- Baek, S. Y., Park, J., Koh, T., Kim, D., Woo, J., Jung, J., Park, S. J., Lee, C., & Choi, C. (2024). Achievement of green and sustainable CVD through process, equipment and systematic optimization in semiconductor fabrication. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11(4), 1295-1316.
<https://doi.org/10.1007/s40684-024-00606-y>
- Carlsson, J. O., & Martin, P. M. (2010). Chemical vapor deposition. In *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings* (pp. 314-363). William Andrew Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2031-3.00007-7>
- Chang, M. B., & Chang, J. S. (2006). Abatement of PFCs from semiconductor manufacturing processes by nonthermal plasma technologies: A critical review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(12), 4101-4109.

- <https://doi.org/10.1021/ie051227b>
- Chen, H. M., Aggarwal, S. G., Wu, H. H., Chen, T. M., & Huang, C. C. (2005). Field enhancements of packed-bed performance for low-concentration acidic and basic-waste gases from semiconductor manufacturing process. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(5), 647-657.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464644>
- Chen, S. C., Tsai, C. J., Wu, C. H., Pui, D. Y., Onischuk, A. A., & Karasev, V. V. (2007). Particle loss in a critical orifice. *Journal of Aerosol Science*, 38(9), 935-949.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.06.010>
- Choi, K. M., & An, H. C. (2016). Characterization and exposure measurement for indium oxide nanofibers generated as byproducts in the LED manufacturing environment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(2), D23-D30.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1101122>
- Choi, K. M., An, H. C., & Kim, K. S. (2015b). Identifying the hazard characteristics of powder byproducts generated from semiconductor fabrication processes. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(2), 114- 122.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2014.955178>
- Choi, K. M., Kim, J. H., Park, J. H., Kim, K. S., & Bae, G. N. (2015a). Exposure characteristics of nanoparticles as process by-products for the semiconductor manufacturing industry. *Journal of Occupational and Environmental hygiene*, 12(8), D153-D160.
<https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1009983>
- Forsyth, B. R., & Liu, B. Y. (2002). Exhaust Aerosol of a plasma enhanced CVD system: I. Size distribution measurements. *Aerosol Science & Technology*, 36(5), 515-525.
<https://doi.org/10.1080/02786820252883757>
- Gilles, D. G., & Loehr, R. C. (1994). Waste generation and minimization in semiconductor industry. *Journal of Environmental Engineering*, 120(1), 72-86.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1994\)120:1\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:1(72))
- Hammond, M. L. (1991). CVD exhaust-safety and environmental sanity. *Le Journal de Physique IV*, 2(C2), C2-449.
<https://doi.org/10.1051/jp4:1991255>
- Hinds, W. C. (1982). *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles*(Book). New York, Wiley-Interscience, 1982. 442 p.
- Huang, C. H., Ho, Y. T., & Tsai, C. J. (2005). Measurement of inorganic acidic gases and particles from the stack of semiconductor and optoelectronic industries. *Separation Science and Technology*, 39(9), 2223-2234.
<https://doi.org/10.1081/SS-120039319>
- Ito, N., Moriya, T., Uesugi, F., Matsumoto, M., Liu, S., & Kitayama, Y. (2008). Reduction of particle contamination in plasma-etching equipment by dehydration of chamber wall. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(5R), 3630.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.47.3630>
- Kim, H. J., Han, B. W., Hong, W. S., Shin, W. H., Song, D. K., Jung, S. H., ... & Yoo, S. Y. (2010). Evaluation of fine-particle removal performance of novel ESP with highly durable chargers and collectors. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*,

- 34(4), 423-428.
<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2010.34.4.423>
- Kim, M., Ma, K. Y., Kim, H., Lee, Y., Park, J. H., & Shin, H. S. (2023). 2D materials in the display industry: status and prospects. *Advanced Materials*, 35(43), 2205520.
<https://doi.org/10.1002/adma.202205520>
- Lee, J. O., Kang, W. S., Hur, M., Lee, J. Y., & Song, Y. H. (2015). Achieving uniform layer deposition by atmospheric-pressure plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 597, 7-13.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.11.015>
- Lee, Y., Kim, C., & Hong, S. J. (2022). Industrial internet of things for condition monitoring and diagnosis of dry vacuum pumps in atomic layer deposition equipment. *Electronics*, 11(3), 375.
<https://doi.org/10.3390/electronics11030375>
- Lee, W. W., Jeon, Y., Cho, E. S., & Kwon, S. J. (2024). Component Analysis and Formation Minimization Method of By-product for the Process Stabilization of Al₂O₃ by ALD Equipment. *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, 23(4), 135-140.
- Li, Y., Zhu, Y., Hao, Y., Xiao, P., Dong, Z., & Li, X. (2021, September). Practical reviews of exhaust systems operation in semiconductor industry. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 859, No. 1, p. 012074). IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/859/1/012074>
- Lieberman, V. (1996). Design of production chemical vapor deposition equipment. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 14(1-3), 161-165.
[https://doi.org/10.1016/0264-1274\(96\)83429-9](https://doi.org/10.1016/0264-1274(96)83429-9)
- Lipsky, E. M., Pekney, N. J., Walbert, G. F., O'Dowd, W. J., Freeman, M. C., & Robinson, A. (2004). Effects of dilution sampling on fine particle emissions from pulverized coal combustion. *Aerosol Science and Technology*, 38(6), 574-587.
<https://doi.org/10.1080/02786820490479851>
- Lu, H. H., Lu, M. C., Le, T. C., An, Z., Pui, D. Y., & Tsai, C. J. (2023). Continuous improvements and future challenges of air pollution control at an advanced semiconductor fab. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(5), 230034.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.230034>
- Moriya, T., Nakayama, H., Nagaike, H., Kobayashi, Y., Shimada, M., & Okuyama, K. (2005). Particle reduction and control in plasma etching equipment. *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*, 18(4), 477-486.
<https://doi.org/10.1109/TSM.2005.858464>
- Nagai, M. (2007). Impact of particulate contaminants on the current leakage defect in OLED devices. *Journal of The Electrochemical Society*, 154(12), J387.
<https://doi.org/10.1149/1.2784167>
- Okuyama, K., Ushio, R., Kousaka, Y., Flagan, R. C., & Seinfeld, J. H. (1990). Particle generation in a chemical vapor deposition process with seed particles. *AIChE Journal*, 36(3), 409-419.
<https://doi.org/10.1002/aic.690360310>
- Oviroh, P. O., Akbarzadeh, R., Pan, D., Coetzee, R. A. M., & Jen, T. C. (2019). New development of atomic layer deposition: processes, methods and applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 20(1),

- 465-496.
<https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1599694>
- Park, J., Yoo, B., Baek, S. Y., Youn, C., Kim, S., Kim, D., ... & Choi, C. (2025). Advancing Condition-Based Maintenance in the Semiconductor Industry: Innovations, Challenges and Future Directions for Predictive Maintenance. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*.
<https://doi.org/10.1109/tsm.2025.3530964>
- Park, S. H., Park, H. D., & Ro, J. (2019). Types & characteristics of chemical substances used in the LCD panel manufacturing process. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 29(3), 310-321.
<https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2019.29.3.310>
- Peng, J. L., Yeh, M. P., Liu, K. H., Chen, T., Chuang, T. S., Lee, S. L., & Tung, K. L. (2025). Source and characteristics of inorganic acidic gases and aerosols emission in a semiconductor plant. *Separation and Purification Technology*, 354, 128806.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128806>
- Shiu, H. R., Ou, F. C., & Chen, S. L. (2003). Optimization design of exhaust duct system in semiconductor factory using dynamic programming method. *Building and Environment*, 38(4), 533-542.
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00181-6)
- Tsai, C. J., Chang, C. T., Liu, T. W., Huang, C. C., Chien, C. L., & Chein, H. M. (2004). Emission characteristics and control efficiency of acidic and basic gases and aerosols from packed towers. *Atmospheric Environment*, 38(4), 643-646.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.10.002>
- Wei, Y., Yang, M., & Chien, M. (2018). Green Manufacturing. *Flat Panel Display Manufacturing*, 441-455.
<https://doi.org/10.1002/9781119161387.ch19>
- Wang, G., Yu, X., Wang, G., Kong, X., Li, Z., Xie, Y., & Liu, K. (2025). Research on the influence of intake structure on Local-Scrubber combustion process. *Chemical Engineering Journal*, 511, 162126.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162126>
- Yeh, M. P., Wu, L. F., Fan, E. T., Chen, T., Chuang, T. S., Lee, S. L., & Tung, K. L. (2024). Characteristics of inorganic acid emission from various generation semiconductor manufacturing factories. *Chemosphere*, 347, 140745.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140745>

