

다양한 조건의 저압 공정 모니터링을 위한 입자 집속 장치 개발

김명준¹⁾ · 김동빈^{2),3)} · 강상우^{3),5)} · 김태성^{2),4)*}

¹⁾한국기계연구원 환경시스템연구본부, ²⁾성균관대학교 기계공학부

³⁾한국표준과학연구원 진공기술센터, ⁴⁾성균관대학교 성균나노과학기술원

⁵⁾과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학과

(2017년 3월 15일 투고, 2017년 4월 4일 수정, 2017년 4월 17일 게재확정)

Development of particle focusing device to monitor various low pressure processes

Myungjoon Kim¹⁾ · Dongbin Kim^{2),3)} · Sang-Woo Kang^{3),5)} · and Taesung Kim^{2),4)*}

¹⁾*Environmental System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials*

²⁾*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University*

³⁾*Vacuum Center, Korea Research Institute of Standards and Science*

⁴⁾*Sungkyunkwan Advanced Institute of Nanotechnology, Sungkyunkwan University*

⁵⁾*Advanced Device Technology, University of Science and Technology*

(Received 15 March 2017; Revised 4 April 2017; Accepted 17 April 2017)

Abstract

As semiconductor process was highly integrated, particle contamination became a major issue. Because particle contamination is related with process yields directly, particles with a diameter larger than half pitch of gate should be controlled. PBMS (Particle beam mass spectrometry) is one of powerful nano particle measurement device. It can measure 5~500 nm particles at ~ 100 mtorr condition in real time by in-situ method. However its usage is restricted to research filed only, due to its big device volume and high price. Therefore aperture changeable aerodynamic lenses (ACALs) which can control particle focusing characteristics by changing its aperture diameter was proposed in this study. Unlike conventional aerodynamic lenses which changes particle focusing efficiency when operating condition is changed, ACALs can maintain particle focusing efficiency. Therefore, it can be used for a multi-monitoring system that connects one PBMS and several process chambers, which greatly improves the commercialization possibility of the PBMS. ACALs was designed based on Stokes number and evaluated by numerical method. Numerical analysis results showed aperture diameter changeable aerodynamic lenses can focus 5 to 100 nm standard particles at 0.1 to 10 torr upstream pressure.

Keywords: Aerodynamic lenses, Aperture diameter changeable lens, CFD, Particle focusing

* Corresponding author.

Tel : +82-31-290-7466

E-mail : tkim@skku.edu

1. 서론

반도체 공정 중 발생하는 입자는 공정 수율을 감소시키는 중요한 요인 중 하나이다 (O'Hanlon, 1992). 예를 들어, 전도성 입자가 양 게이트 사이에 증착되면 의도하지 않은 전기 간섭이 발생하며, 비전도성 입자는 전자의 흐름을 막아버리기도 한다. 때로는 물리적인 충격으로 회로를 망가뜨리기도 한다. 반도체 선폭이 점점 감소함에 따라 이러한 수율에 영향을 줄 수 있는 입자의 크기도 함께 감소하였다 (Selwyn and Patterson, 1992). 표 1은 ITRS 2015 (International technology roadmap for semiconductors 2015)에서 발표한 반도체 1/2 선폭 로드맵이다. 지금도 20 nm 입자까지 제어되어야 하며, 2020년대에는 10 nm 급 입자까지 제어되어야 하는 상황이다. 현재 클린룸 기술의 발달로 외부에서 유입되는 입자에 대한 제어는 비교적 잘 이루어지고 있으나, 공정 중 챔버 내부에서 생성되는 입자에 대한 제어는 미비한 실정이다. 이러한 내부 발생 입자들을 제어하기 위해서는, 우선 챔버 내부의 입자 수농도를 실시간으로 측정할 수 있는 기술이 요구 된다.

공정 중 발생하는 입자 수농도를 측정하기 위해 현재 일반적으로 사용되는 방법은 PWP (particles per wafer pass) 방식으로, 베어 웨이퍼를 이용하여 공정을 진행한 뒤 증착된 입자의 양을 웨이퍼 표면 분석기 (wafer surface scanner)를 이용하여 측정하는 방식이다. 이 방식은 비실시간, ex-situ 방식으로 모니터링 방식으로는 부적합하다 (Takahashi and Daugherty, 1996). 이후 실시간, in-situ 방식으로 입자 수농도를 측정할 수 있도록 개발된 ISPM (In-situ particle monitoring sensor)은 광학적인 방법을 이용하는 원리의 한계로 인해 100 nm 이하의 입자에 대한 측정 효율이 떨어진다는 단점을 지닌다 (Miyashita et al., 1999). 한편 Ziemann et al. (1995)에 의해 개발

된 PBMS (Particle beam mass spectrometer)는 5~500 nm 입자의 수농도를 ~ 100 mtorr의 저압조건에서 실시간, in-situ로 측정할 수 있어, 반도체 공정 모니터링에 적합한 장비이다. 이러한 장점을 바탕으로 다양한 공정의 입자 수농도 모니터링 연구에 사용되었으나(Kim et al., 2002; Na et al., 2010; Choi et al., 2013), 장비가 너무 크고 비싸다는 단점으로 인해 실제 공정에서 상용화 되어 사용되고 있지는 못한 실정이다. 이에 장비의 부피를 줄이고, 다른 장비와 결합을 시키는 (Kim et al., 2016) 등, 다양한 방법으로 PBMS의 범용성을 늘리고자 하는 연구가 진행 중이다.

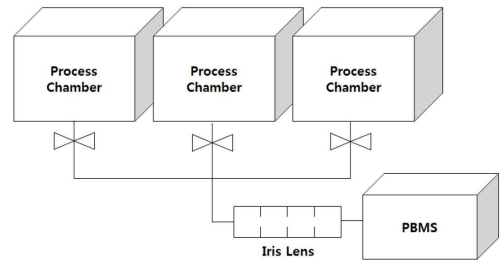


Fig. 1. Schematic of multi particle number concentration monitoring system consist of single PBMS and multiple process chambers.

본 연구에서는 그림 1과 같이 하나의 PBMS를 이용해 여러 개의 공정 챔버를 번갈아 모니터링 하는 형태의 멀티 모니터링 시스템을 제안하고자 한다. 각 챔버마다 다른 공정 조건을 가지고 있기 때문에 기존 PBMS와 비교하여 본 시스템에서는 PBMS 전단에서 입자를 입자빔 형태로 집속시키는 장치인 공기 역학 렌즈의 역할이 중요해진다. 공기 역학 렌즈는 오리피스와 여러 개의 렌즈, 노즐로 구성된 장치로 그 형상에 의해 내부에 수축-발산 유동이 형성

Table 1. Half pitch size of Dram, NAND Flash and MPU/SoC Metalx projected by ITRS 2015 (nm).

	2015	2017	2019	2021	2024	2027	2030
Dram	24	20	17	14	11	8.4	7.7
NAND Flash	15	14	12	12	12	12	12
MPU/SoC Metalx	28	18	12	10	6	6	6

되고 입자는 그 유동을 따라가지 못해 점점 증상으로 집속되는 원리를 이용한 장치이다. Liu et al., (1995)에 의해 처음으로 제안된 이후, 입자 관련 측정 장치 전단이나 (Lee et al., 2009), 입자 관련 공정 (Qi et al., 2010) 등에 사용되었다. 그러나 공정 조건이 바뀌면 입자 집속 특성이 바뀌기 때문에 기존 공기 역학 렌즈는 멀티 모니터링 시스템에서 입자 집속 효율을 확보할 수가 없다. 더 넓은 범위의 압력 조건에서 사용 가능하거나 (Scheiner et al., 1999), 다양한 입자 직경에 대해 사용할 수 있는 공기 역학 렌즈 (Lee et al., 2013)가 연구되기도 하였으나, 이들 공기 역학 렌즈는 사용된 렌즈의 숫자가 증가하여 장치의 길이가 증가한다는 문제점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같은 형태의 중공 직경을 변경하여 집속 특성을 바꿀 수 있는 직경 가변형 공기 역학 렌즈를 개발하고 이를 수치해석적 방법을 이용하여 검증하였다.

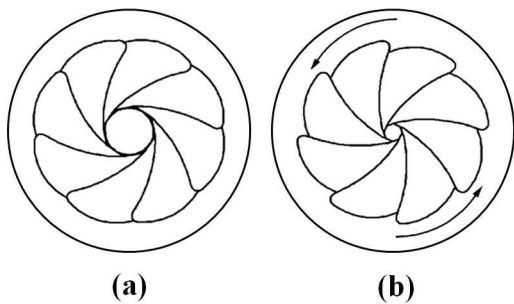


Fig. 2. Schematic of aperture diameter changeable lenses; (a) iris lens, (b) reducing aperture diameter by controlling iris.

2. 이론 및 방법

2.1 설계 이론

공기 역학 렌즈의 성능을 판단하는 요소 중 가장 중요한 것은 입자 집속 효율과 입자 투과 효율이다. 전자는 입자가 얼마나 잘 집속 되었는지 판단하는 요소이며, 후자는 입자 손실량을 판단하는 척도이다. 공기 역학 렌즈 설계는 보통 주어진 공정 조건 (유량, 작동 압력, 가스종, 입자 특성 등)에서 최적의

성능을 낼 수 있는 렌즈 관련 변수 (각 렌즈 중공 직경, 렌즈간 간격, 관 내경 등)를 결정하는 순으로 이루어진다. 입자 집속 효율은 입자가 이송 유체를 얼마나 잘 따라가느냐를 나타내는 무차원 수인 스토크 수 (Stokes number)에 의해서 결정된다. 스토크 수는 식 (1)과 같이 정의되며 스토크 수가 작으면 입자가 유선을 그대로 따라가 집속이 되지 않게 되고, 스토크 수가 너무 크면 입자가 유선을 과도하게 벗어나 렌즈 벽이나, 관 벽에 집진되는 문제가 생긴다. 따라서 적절한 스토크 수를 만족하도록 렌즈를 설계하는 것이 중요하다.

$$St = \frac{\tau u_f}{d_f} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c u_f}{18 \mu d_f} \quad (1)$$

여기서 τ 는 입자 완화 시간 (particle relaxation time), u_f 는 이송 유체의 유속, d_f 는 렌즈의 중공 직경, ρ_p , d_p 는 각기 입자의 밀도와 직경을 의미하며, C_c 는 미끄럼 계수, μ 는 동점성 계수를 의미한다.

한편 레이놀즈 수 (Reynolds number), 마크 수 (Mach number), 누센 수 (Knudsen number)는 공기 역학 렌즈 내의 안정적인 유동장 형성을 위해 고려되어야 하는 무차원 수이다. 난류에서는 안정된 유동장이 형성되지 않으므로, 레이놀즈 수는 층류가 되도록 설계하여야 하며, 마크 수의 경우는 마찬가지로 아음속이 되도록 설계되어야 한다. 누센 수의 경우 연속 영역이 되도록 설계되어야 한다.

식 (1)에서 볼 수 있듯이 스토크 수는 렌즈 중공 직경에 영향을 받는다. 때문에 렌즈 중공 직경을 변경하게 되면 스토크 수가 변하게 되고, 이를 통해서 입자 집속 효율을 조절 할 수 있게 된다. 공기 역학 렌즈의 경우 입자의 집속 효율이 최대가 되는 스토크 수는 1 전후로 알려져 있다 (Wang et al., 2005a).

2.2 수치해석 이론

공기 역학 렌즈 이론을 바탕으로 설계된 중공 가변형 공기 역학 렌즈의 검증은 수치해석을 통해서 이루어졌다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 ANSYS사의 FLUENT 16.1 버전이 사용되었다. 설계 단계에서 장치 내부의 유동이 층류가 되도록 설정하였기 때문에 수치해석에서도 층류 조건이 사용되

었으며, 정상 상태로 가정하였다. 식 (2)와 식 (3)은 각기 수치해석에서 사용된 연속 방정식과 운동량 방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{3}$$

저압 조건이고 압력의 변동이 심하기 때문에 압축성 유동 해석을 진행하였으며, 이때 사용된 에너지 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i [\rho E + p] \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) \tag{4}$$

여기서 k_{eff} 는 유효 전도율을 의미하며, $(\tau_{ij})_{eff}$ 는 편향 응력 텐서이다.

입자 해석의 경우, 입자 수농도가 유동에 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 낮다고 판단되었기 때문에 유동장을 먼저 계산한 뒤 입자를 추적하는 DPM (Discrete phase model)이 사용되었다. 입자는 표준 밀도 (1g/cc)를 가지는 구형 입자로 가정되었으며, 이때 유동장 내에서 입자의 거동은 다음과 같은 지배방정식에 의해 결정된다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_{drag} + F_{diffusion} \tag{5}$$

여기서 F_{drag} 는 항력에 의해 입자가 받는 힘이며, $F_{diffusion}$ 은 확산에 의해 입자가 받는 힘을 나타내는 항이다. 다만 본 연구에서는 좁은 직경을 통과한 유

동의 유속이 충분히 빨라 디퓨전에 의한 효과보다 항력에 의한 효과가 지배적이라고 판단하였고, Brownian motion에 의한 디퓨전 항은 생략하였다.

항력에 의해 입자가 받는 힘은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$F_{drag} = \frac{u_f - u_p}{\tau} = \frac{3\pi\mu d_p (u_f - u_p)}{m_p C_c} \tag{6}$$

여기서 u_p 는 입자의 속도를 나타내며, m_p 는 입자의 질량을 의미한다. 미끄럼 계수의 경우 입자의 크기가 기체의 평균 자유 행로와 비슷하거나 더 작아질 경우 기체 분자가 입자에 완전히 충돌하지 못하는 현상을 보정하기 위한 계수로 식 (7)과 같이 정의된다.

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left(2.34 + 1.05 \exp(-0.39 \frac{d_p}{\lambda}) \right) \tag{7}$$

FLUENT는 고정된 미끄럼 계수 값만 제공하지만, 공기 역학 렌즈는 여러 개의 렌즈를 거치는 동안 압력이 급격하게 변화하므로 미끄럼 계수의 변동도 심하다. 따라서 본 연구에서는 UDF (User-defined function)기능을 이용하여 압력에 따른 미끄럼 계수 변화가 적용되도록 하였고, 모델링한 UDF는 기존 연구와의 비교를 통해 검증하였다(Wang et al., 2005b).

2.3 해석 모델

표 2는 직경 가변형 공기 역학 렌즈 설계에 있어서 고려해야 될 변수들을 정리해놓은 것이다. 출구 압력과 유량은 후단에 연결되는 PBMS에 의해서 결정되며, 나머지 유동 및 입자 조건은 전단 공정 조건에 따라서 결정된다. 본 연구에서는 최대한 넓은 범위의 공정 조건에서 입자를 집속하는 장치를 개

Table 2. Design parameters and requirements for aperture diameter changeable aerodynamic lenses.

Parameter	Status	Value	Parameter	Status	Value
Lens diameter	St control	Changeable	Gas species	Process condition	Given
Re	Requirement	Laminar	Inlet pressure	Process condition	Given
Kn	Requirement	Continuum	Outlet pressure	PBMS condition	1 mTorr
Ma	Requirement	Subsonic	Flow rate	PBMS condition	100 sccm
Spacer length	Fixed geometry	10~50 x d_f	Particle density	Process condition	Given
Tubing diameter	Fixed geometry	> 5 x d_f	Particle diameter	Process condition	Given

발하는 것이 목적이기 때문에, 우선 렌즈 중공 직경 범위를 설정한 다음 집속할 수 있는 조건 범위를 설정하는 순으로 설계가 진행되었다.

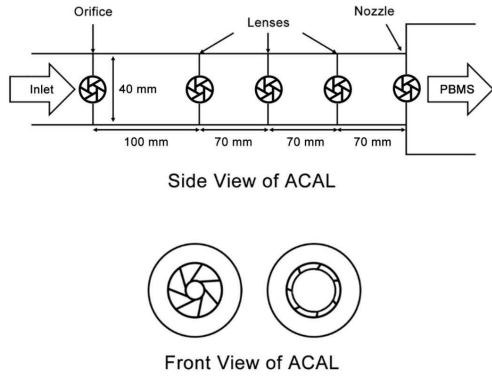


Fig. 3. Schematic of aperture diameter changeable aerodynamic lenses.

그림 3은 이러한 과정을 통해 설계한 직경 가변형 공기 역학 렌즈의 모식도이다. 0~20 mm 범위의 중공 직경을 가지는 직경 가변형 렌즈 5개가 직렬로 연결된 형태로, 오리피스와 첫 번째 렌즈의 간격은 100 mm이고, 각 렌즈간의 간격은 70 mm로 설계되었다. 각 렌즈를 연결하는 관의 내경은 40 mm이다.

수치해석 모델은 본 모식도를 바탕으로 제작이 되었다. 장치가 축대칭 형태이기 때문에 2D 축대칭 (2D axisymmetric) 형태로 모델링 되었으며, 격자는 사각 격자 10만개 가량이 사용되었다. 경계조건 및 각 렌즈의 직경 조건은 표 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 case 1a의 압력 및 유속 결과이다. 그래프의 경우 직경 가변형 공기 역학 렌즈 중심축에서의 데이터를 추출해서 그린 것이며, 그래프 상의 검은색 글씨는 수치해석에서 추출된 데이터 (그림 4(b)에서 괄호 안 숫자는 팽창 후 최대 유속을 의미), 붉은색 글씨는 이론적으로 계산된 결과를 의미한다. 압력과 속도 모두 각 오리피스와 렌즈, 노즐을 거칠 때 크게 변하는 모습을 보여준다. 압력의 경우 각 중공을 거칠 때마다 단계적으로 감소하며, 각 중공 사이에서는 비교적 일정하게 유지되는 모습을 보여주었으며, 유속의 경우 중공을 지난 직후 유동이 수축하면서 크게 증가하였다가 이후 팽창하면서 다시 감소하는 패턴을 반복적으로 보여주었다. 압력의 경우 이론값과 수치해석값이 유사하게 나타난 반면 속도의 경우 두 결과 사이에 차이가 존재한다. 이는 이론적 계산의 경우 유속이 유량을 중공 단면적을 나눈 값으로 계산된 반면, 수치해석의 경우 유체 점성의 의해 중공 중심부에서의 유속이 평균 유속보다 높게 나타나기 때문에 이론값보다 높게 나타난 것이다.

그림 5는 case 1a의 내부 유선과 각 입자의 거동 결과이다. 유선의 경우 수축 팽창 유동장이 잘 형성된 것을 확인 할 수 있다. 입자 해석의 경우 집속 효율은 입자 크기와 관계 없이 높게 잘 나타났으나, 투과 효율의 경우 작은 입자의 경우 (5, 10 nm)에는 별다른 문제가 없었던 반면, 큰 입자의 경우 (50, 100 nm)에는 오리피스 부분에서 손실이 발생하여 낮게 나타났다. 이는 중공의 직경이 너무 커서 수축 유동이 약하게 형성되었고, 상대적으로 높은 관성력을 가지는 큰 입자에 대해 충분한 항력을 가하지 못

Table 3. Analysis conditions used for evaluation of aperture diameter changeable aerodynamic lenses.

	Case 1a	Case 1b	Case 2	Case 3
Carrier gas	Air	Air	Argon	Nitrogen
Inlet pressure	0.1 torr	0.1 torr	1 torr	10 torr
Outlet pressure	0.001 torr			
Orifice diameter	20 mm	10 mm	4.5 mm	0.3 mm
Lens diameter	20, 20, 20 mm	10, 10, 10 mm	6, 6, 6 mm	3, 3, 3 mm
Nozzle diameter	20 mm	10 mm	4.5 mm	3 mm

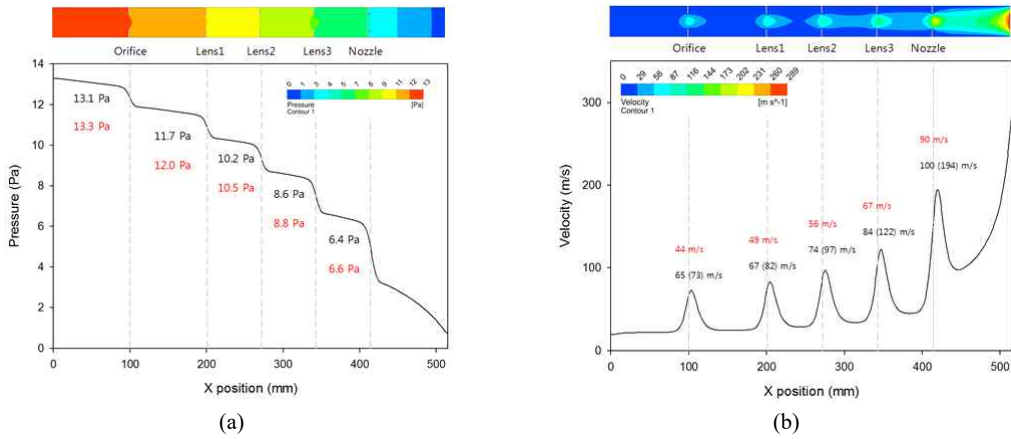


Fig. 4. Analysis result of case 1a: (a) pressure contour and profile at centerline and (b) velocity contour and profile at centerline (black: numerical results; red: theoretical calculation results; brackets indicate maximum speed).

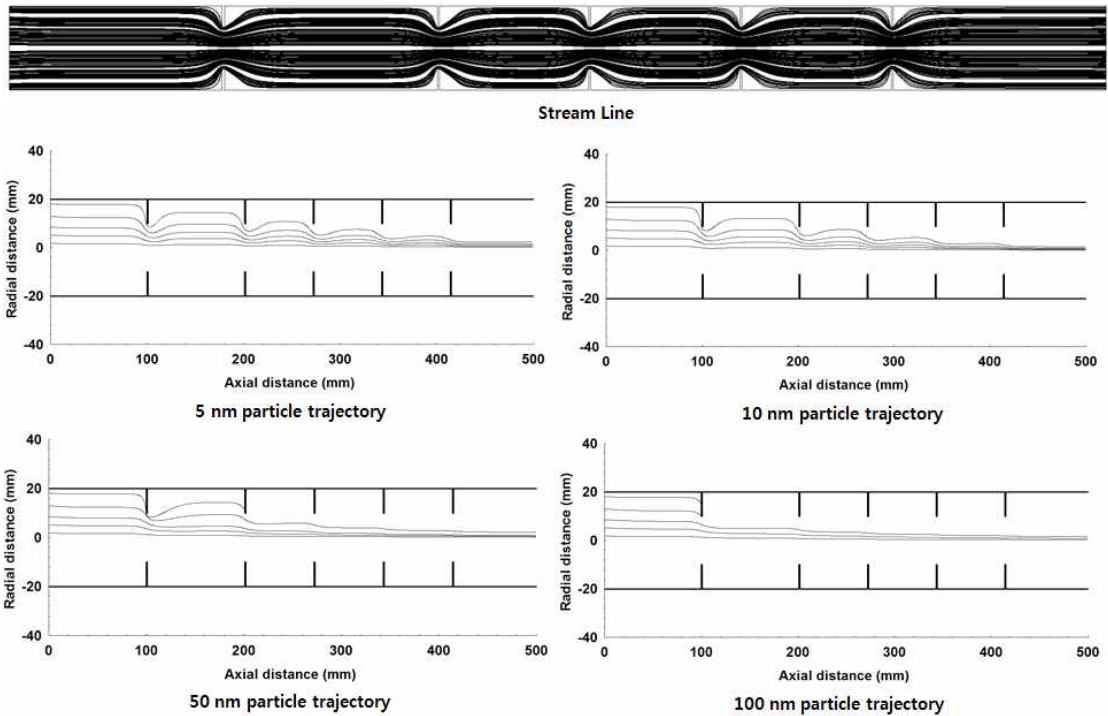


Fig. 5. Streamline and particle trajectory results of case 1a.

하였기 때문에 발생한 현상이다. 입자의 손실이 크게 발생하면 입자를 집속하더라도 측정에 충분한 농도를 확보할 수 없으므로, 해당 조건은 입자 집속

에 부적합하다고 할 수 있다.

큰 입자의 투과율이 낮은 문제점을 해결하기 위해 오리피스와 각 렌즈, 그리고 노즐의 직경을 case

Table 4. Theoretically calculated Stokes number at each aperture, and numerically calculated particle focusing efficiency.

	d_p	St					Focusing Efficiency
		Orifice	Lens 1	Lens 2	Lens 3	Nozzle	
Case 1a	5 nm	0.08	0.09	0.11	0.15	0.24	0.135
	10 nm	0.15	0.17	0.22	0.30	0.48	0.078
	50 nm	0.76	0.87	1.11	1.49	2.38	0.109
	100 nm	1.51	1.75	2.21	2.98	4.77	0.177
Case 1b	5 nm	0.09	0.11	0.14	0.19	0.48	0.014
	10 nm	0.18	0.22	0.27	0.39	0.95	0.007
	50 nm	0.92	1.08	1.36	1.93	4.76	0.012
	100 nm	1.84	2.15	2.73	3.85	9.52	0.040
Case 2	5 nm	0.06	0.03	0.04	0.05	0.14	0.488
	10 nm	0.11	0.06	0.08	0.10	0.28	0.089
	50 nm	0.55	0.31	0.38	0.48	1.41	0.002
	100 nm	1.10	0.62	0.76	0.95	2.82	0.039
Case 3	5 nm	0.12	0.14	0.14	0.25	0.60	-
	10 nm	0.24	0.27	0.29	0.49	1.20	0.001
	50 nm	1.22	1.36	1.44	2.47	5.98	0.022
	100 nm	2.45	2.72	2.88	4.94	11.96	0.022

1a의 20 mm에서 10 mm로 변경한 case 1b 모델을 추가하였다. 그림 6은 case 1b의 압력 및 유속 결과로, 각 중공에서 큰 변화가 생긴다는 점은 case 1a과 같지만, 중공 사이에서의 변화가 상대적으로 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 좀 더 안정적인 유동장

이 형성되었음을 의미하는 것이다. 그림 7은 case 1b의 유선과 입자 거동 결과로, 유선의 경우 case 1a과 마찬가지로 수축 발산 유동이 잘 형성되어 있음을 볼 수 있고, 입자의 경우 case 1a과 달리 큰 입자도 손실 없이 잘 집속되는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니

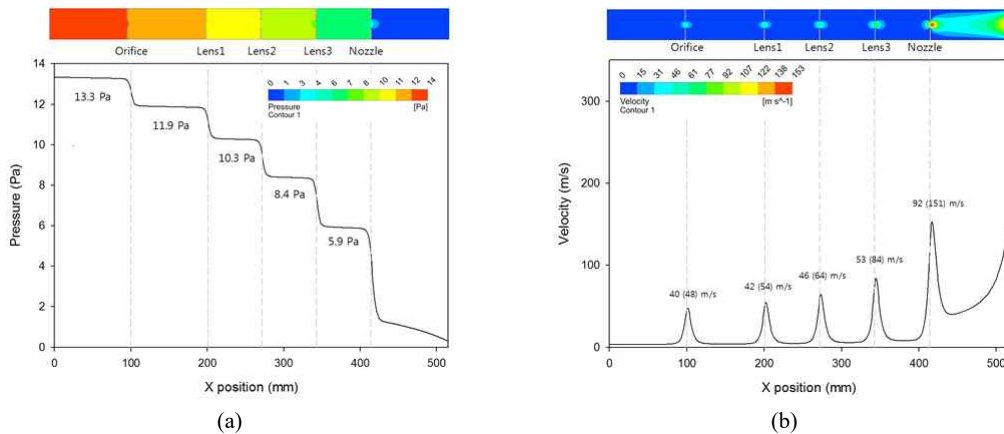


Fig. 6. Analysis result of case 1b: (a) pressure contour and profile at centerline and (b) velocity contour and profile at centerline (black: numerical results; brackets indicate maximum speed).

라 전체적인 집속 효율도 향상된 것을 볼 수 있다. 표 4는 각 중공 별로 입자 크기에 따른 스톡크 수와 집속 효율을 정리해 놓은 것이다. 집속 효율은 입자의 최종 원주 방향 위치를 초기 원주 방향 위치로 나눈 값으로, 0에 가까울수록 입자가 집속이 잘 되었음을 의미한다. 표 4에 따르면 case 1b의 경우 case 1a에 비해 전반적으로 스톡크 수가 다소 높게 나타났고, 이는 입자가 지닌 관성력이 증가했다는 의미로 큰 입자의 손실율이 감소한 것과는 배치되는 지표이다. 스톡크 수가 증가했음에도 불구하고 큰 입자의 손실율이 감소한 것은 중공 직경과 관 직경의 비에 의한 영향 때문이다. Liu et al. (1995)에 따르면 중공 직경과 튜브 직경의 비도 입자 집속 특성에 큰 영향을 미치는 변수 중 하나로, 튜브 직경/중공 직경의 값이 4일 경우 (case 1b) 최적 입자 집속 스톡크 수가 약 0.9인 반면, 2일 경우 (case 1a) 스톡크 수가 3이 되어도 집속 효율이 50% 미만으로 나타났다. 즉 단순히 스톡크 수만 비교 했을 때는 case 1b가 case 1a 보다 증가하였지만, 형상의 차이로 인한 최적 집속 스톡크 수가 훨씬 감소하였기 때문에 손실율도

감소한 것이다.

Case 1a과 case 1b의 결과는 직경 가변형 공기 역학 렌즈의 장점을 보여주는 하나의 예이다. 실제 공정에서 다양한 요인에 의해 입자 집속 효율이 변하게 되면 기존 공기 역학 렌즈의 경우 대처를 할 수가 없지만, 직경 가변형 공기 역학 렌즈는 단순히 각 중공의 직경을 변경시키는 것 만으로도 입자 집속 효율이나 투과 효율을 개선할 수 있음을 보여준다.

그림 8은 case 2의 유선 및 입자 궤적 결과이다. 유선의 경우 case 1a이나 case 1b와 달리 중공 뒤에서 와류가 발생하긴 하지만, 수축 팽창 유동 자체는 잘 형성 된 것을 확인 할 수 있다. 와류는 주 유동에 직접적인 영향을 미치지 못하기 때문에, 공기 역학 렌즈 내에서 와류는 수축 발산 유동의 형성을 방해할 정도로 커지지만 않으면 큰 문제가 되지 않는 것으로 알려져 있다 (Wang and McMurry, 2006). 입자 궤적의 경우 10, 50, 100 nm 입자는 집속 효율과 투과 효율 모두 0.1 이하로 높게 나타났으나, 5 nm 입자의 경우에는 집속 효율이 0.488 정도로 다소 낮게 나타났다. Case 1과 전단 조건이 완전히 바뀌었음에

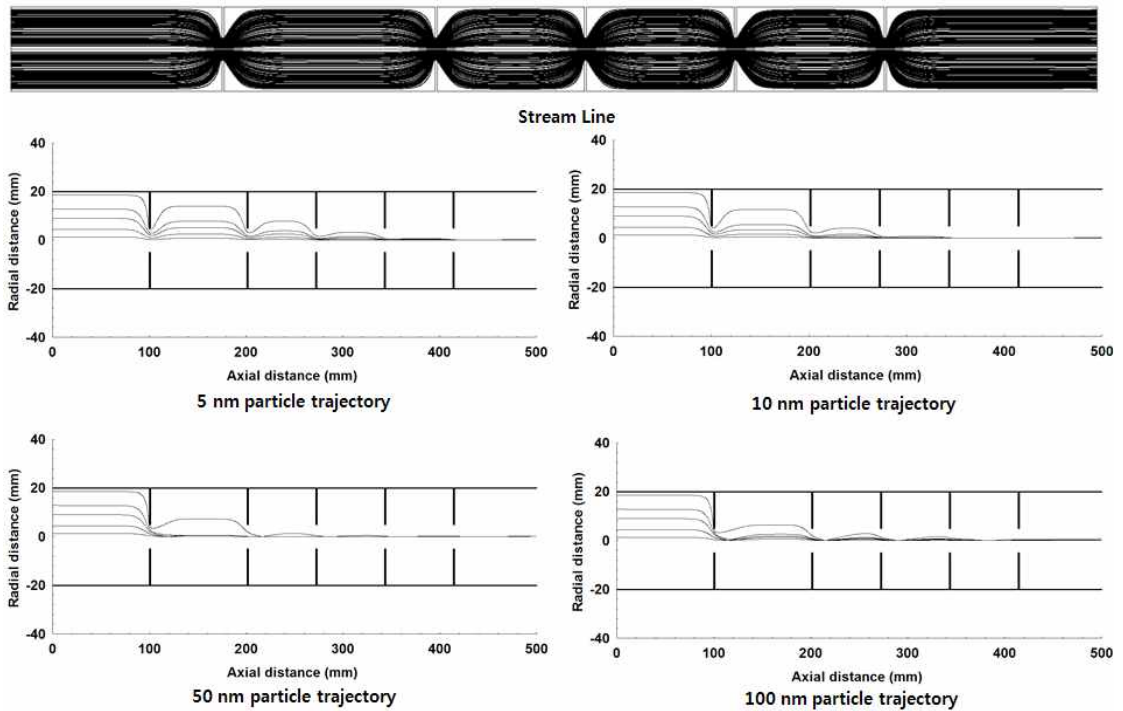


Fig. 7. Streamline and particle trajectory results of case 1b.

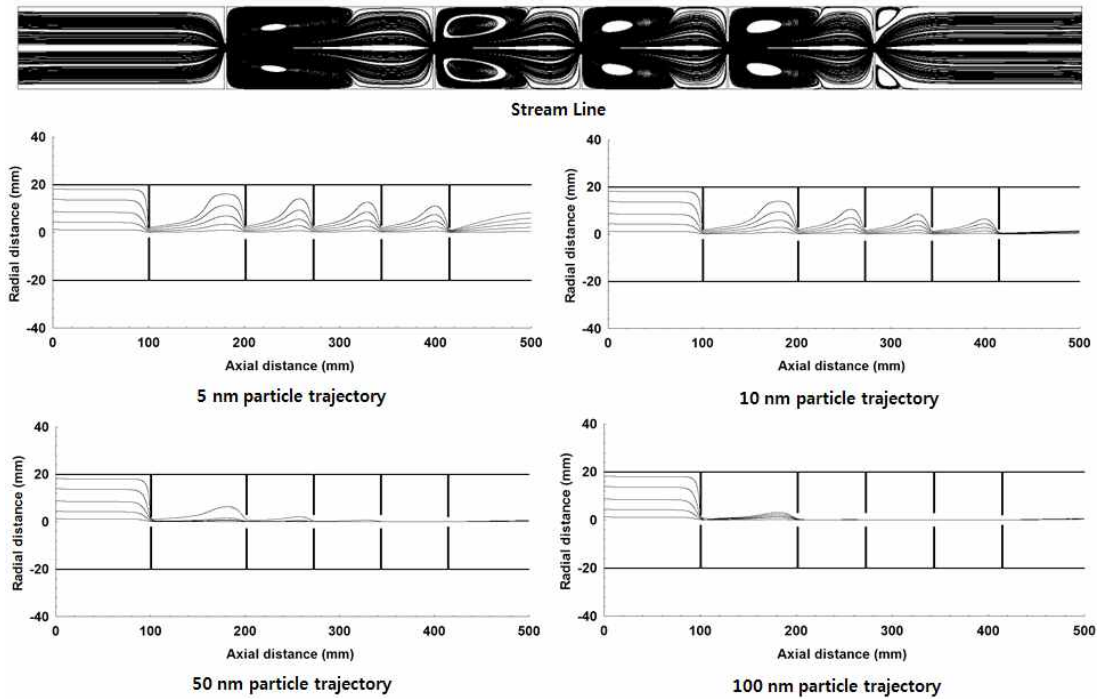


Fig. 8. Streamline and particle trajectory results of case 2.

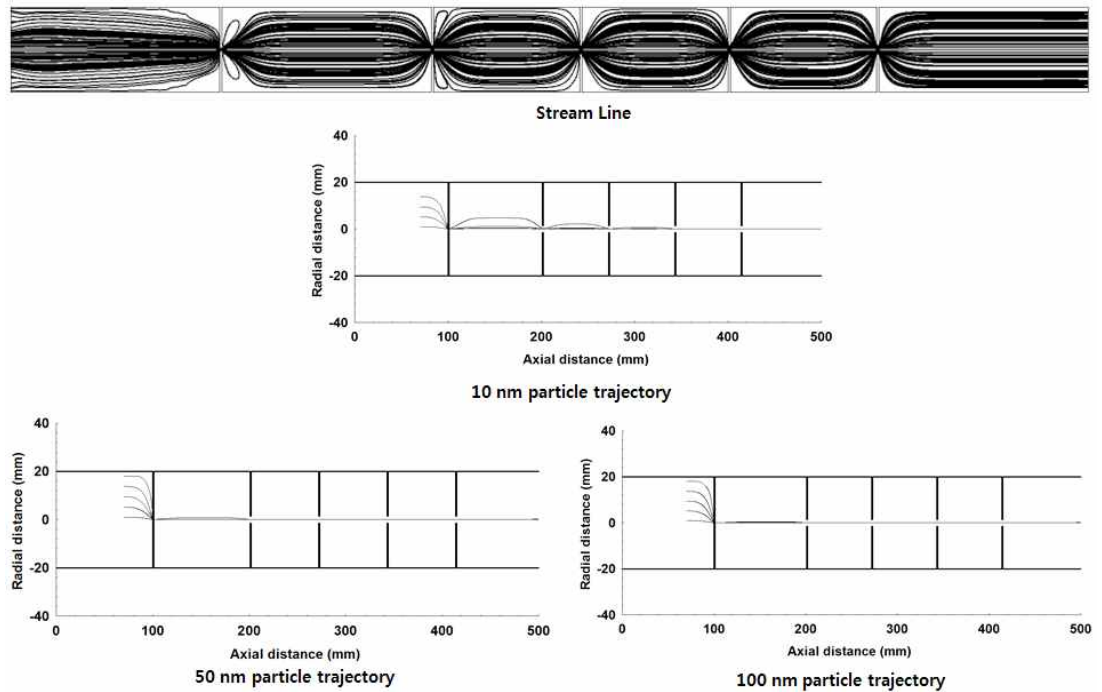


Fig. 9. Streamline and particle trajectory results of case 3.

도 불구하고 10, 50, 100 nm 입자 집속 효율을 확보할 수 있었던 것은 표 4의 스톡크 수를 통해 설명이 가능하다. 중공 직경의 변화를 통해 각 중공에서의 스톡크 수를 최적 스톡크 수에 인접하게 유지할 수 있었기 때문에 입자 집속 효율이 높게 나타난 것이다. 반면 상대적으로 스톡크 수가 많이 감소하여 최적 집속 스톡크 수에서 떨어진 5 nm 입자의 경우 집속 효율이 감소한 모습을 보여주었다. 이러한 결과는 공정 조건 외에도 입자의 크기에 따라서도 각 중공의 직경을 변경할 필요성이 있음을 보여준다.

그림 9는 case 3의 해석 결과이다. 유선의 경우 case 1a과 비슷한 형태의 잘 발달된 수축 발산 유동이 형성되었고, 입자 케적 또한 10, 50, 100 nm 입자 모두 약 0.022 이하의 높은 집속 효율과 투과 효율을 보여주었다. 5 nm 입자의 경우 해석에 필요한 계산 리소스가 과다하여 생략되었다.

0.1~10 torr 범위의 전단 압력 조건에 대한 수치해석 결과, 직경 가변형 공기 역학 렌즈는 중공의 직경을 변경하는 것 만으로도 5~100 nm 입자에 대한 집속 효율과 투과 효율을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 다양한 공정 조건을 가진 여러 개의 공정 챔버를 번갈아 가면서 모니터링 하는데 있어 직경 가변형 공기 역학 렌즈가 충분히 활용될 수 있음을 보여주는 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 저압에서 실시간, in-situ 방식으로 나노 입자의 수농도를 모니터링 하는 장치인 PMBS의 상용화를 위해, 하나의 PBMS로 여러 개의 공정 챔버를 번갈아 모니터링 하는 시스템을 제안하였다. 이러한 시스템에서는 PBMS 전단에서 입자를 집속 하는 장치인 공기 역학 렌즈의 역할이 중요해진다. 기존 공기 역학 렌즈는 작동 환경이 바뀌게 되면 입자의 집속 효율이 달라지게 되므로, 다양한 공정 조건을 모니터링 하기에 부적합하다. 이에 중공의 직경을 자유롭게 조절할 수 있도록 조리게 방식을 채택한 직경 가변형 공기 역학 렌즈를 새롭게 제안하였으며, 기존 공기 역학 렌즈 설계 이론을 바탕으로 설계를 진행하였다.

설계된 직경 가변형 공기 역학 렌즈는 수치해석

적 방법을 이용하여 검증하였다. 중공간의 간격과 관 내경은 고정시킨 상태에서 각 중공의 직경을 변경시키는 것 만으로 0.1~10 torr 조건에서 5~100 nm의 입자를 일정 수준 이상 집속할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 직경 가변형 공기 역학 렌즈가 다양한 공정 조건에 대응하여 입자 집속 효율을 확보할 수 있음을 검증할 수 있었다.

다만 5, 10 nm의 경우 확산에 의한 효과를 크게 받는 입경 범위로, Brownian diffusion 효과가 적용될 경우 Wang et al. (2005b)의 연구 사례와 같이 확산 효과를 무시한 것 대비 집속 효율이 감소하고 손실율이 증가할 수 있다. 따라서 작은 입자들을 집속하고자 할 때는 집속 가능한 입경 범위를 감소시키더라도 이들 입자에 대한 최적 스톡크 수를 가지는 중공 직경을 확보할 필요성이 있다. 또한 확산 효과로 인한 입자 거동 변화 예측 연구가 추가로 필요하다.

Reference

- Choi, H., Kim, H., Yoon, D., Lee, J.W., Kang, B.K., Kim, M.S., Park, J.G., Kwon, S.B., and Kim, T. (2013). Development of CO₂ gas cluster cleaning method and its characterization. *Microelectronic Engineering*, 102, 87-90.
- Kim, D., Mun, J., Kim, H., Yun, J.Y., Kim, Y.J., Kim, T., Kim, T., and Kang, S.W. (2016). Development of particle characteristics diagnosis system for nanoparticle analysis in vacuum. *Review of Scientific Instruments*, 87(2), 023304
- Kim, T., Suh, S.M., Girshick, S.L., Zachariah, M.R., McMurry, P.H., Rassel, R.M., Shen, Z., and Campbell, S.A. (2002). Particle formation during low-pressure chemical vapor deposition from silane and oxygen: Measurement, modeling, and film properties. *Journal of Vacuum Science & Technology a-Vacuum Surfaces and Films*, 20(2), 413-423.
- Lee, K. S., Hwang, T. H., Kim, S. H., Kim, S. H., and Lee, D. (2013). Numerical Simulations on Aerodynamic Focusing of Particles in a Wide Size Range of 30 nm-10 μm. *Aerosol Science*

- and Technology*, 47(9), 1001-1008.
- Lee, K. S., Kim, S., and Lee, D. (2009). Aerodynamic focusing of 5–50 nm nanoparticles in air. *Journal of Aerosol Science*, 40(12), 1010-1018.
- Liu, P., Ziemann, P. J., Kittelson, D. B., and McMurry, P. H. (1995). Generating Particle Beams of Controlled Dimensions and Divergence: I. Theory of Particle Motion in Aerodynamic Lenses and Nozzle Expansions. *Aerosol Science and Technology*, 22(3), 293-313.
- Miyashita, H., Kikuchi, T., Kawasaki, Y., Katakura, Y., and Ohsako, N. (1999). Particle measurements in vacuum tools by in situ particle monitor. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 17(3), 1066-1070.
- Na, J., Kim, T., Choi, J.B., Kim, Y.J., Shin, Y.H., Yun, J.Y., and Kang, S.W. (2010). Effects of process variables on TiN particle formation during metal-organic chemical vapor deposition. *Electrochemical and Solid State Letters*, 13(7), H248-H252.
- O'Hanlon, J.F. (1992). Impact of vacuum equipment contamination on semiconductor yield. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 10(4), 1863-1868.
- Qi, L., McMurry, P. H., Norris, D. J., and Girshick, S. L. (2010). Micropattern Deposition of Colloidal Semiconductor Nanocrystals by Aerodynamic Focusing. *Aerosol Science and Technology*, 44(1), 55-60.
- Schreiner, J., Schild, U., Voigt, C., and Mauersberger, K. (1999). Focusing of Aerosols into a Particle Beam at Pressures from 10 to 150 Torr. *Aerosol Science and Technology*, 31(5), 373-382.
- Selwyn, G.S., and Patterson, E.F. (1992). Plasma particulate contamination control. II. Self-cleaning tool design. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 10(4), 1053-1059.
- Semiconductor Industry Association. (2015). International Technology Roadmap for Semiconductors 2015, <http://public.itrs.net/Files/2003ITRS/Home2003.htm>.
- Takahashi, K.M., and Daugherty, J.E. (1996). Current capabilities and limitations of insitu particle monitors in silicon processing equipment. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 14(6), 2983-2993.
- Wang, X., Kruis, F.E., and McMurry, P.H. (2005a). Aerodynamic focusing of nanoparticles: I. Guidelines for designing aerodynamic lenses for nanoparticles. *Aerosol Science and Technology*, 39(7), 611-623.
- Wang, X., Gidwani, A., Girshick, S.L., and McMurry, P.H. (2005b). Aerodynamic focusing of nanoparticles: II. Numerical simulation of particle motion through aerodynamic lenses. *Aerosol Science and Technology*, 39(7), 624-636.
- Wang X., and McMurry, P.H. (2006). A Design Tool for Aerodynamic Lens Systems. *Aerosol Science and Technology*, 40(5), 320-334.
- Ziemann, P. J., Liu, P., Rao, N.P., Kittelson, D.B., and McMurry, P.H. (1995). Particle-beam mass-spectrometry of submicron particles charged to saturation in an electron-beam. *Journal of Aerosol Science* 26(5), 745-756.