

전기적으로 분류 입경의 제어가 가능한 가상 임팩터를 이용한 대기 중 나노 입자의 분류

Size Classification of Airborne Nanoparticles Using Electrically Tunable Virtual Impactor

권순명¹, 김용호¹, 박동호¹, 황정호¹, ✉김용준¹
 Soon-myung Kwon¹, Yong-Ho Kim¹, Dongho Park¹, Junggho Hwang¹ and ✉Yong-Jun Kim¹

¹ 연세대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

✉ Corresponding author: yjk@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-2844

Manuscript received: 2008.7.11 / Revised: 2008.10.2 / Accepted: 2008.11.15

This paper reports the size classification of nanoparticles as well as electrical tuning techniques for the cut-off diameter and collection efficiency. Classifying particles < 100 nm in diameter is quite a technical challenge using a virtual impactor with the cut-off diameter being determined geometrically. However, the proposed virtual impactor can classify particles <100 nm and tune the cut-off diameter by electrically accelerating the particles. The cut-off diameter of the proposed device was tuned from 15 to 50 nm.

Key Words: Size Classification (입경별 분류), Nanometer-sized Airborne Particle (대기 중 나노 입자), Cut-off Diameter (분류 입경), Collection Efficiency (포집 효율), Virtual Impactor (가상 임팩터)

기호설명

C_c = slip-correction factor

Stk_{50} = the Stk of a particle whose collection efficiency is 50%

Re = Reynolds number

Q = flow rate

U = velocity of flow

W = injection nozzle width

d_p = target cut-off diameter

t = thickness of the microchannel

λ = mean free path of air

τ = relaxation time

μ = dynamic viscosity of a particle

ρ_p = particle density

S = jet-to-plate distance

F_E = electrostatic force

η = collection efficiency

1. 서론

대기 중에는 다양한 크기를 갖는 입자상 물질, 미세 유기물, 가스상 물질이 포함되어 있다.^{1,4} 이러한 물질들의 크기는 수 나노미터에서부터 수십 마이크로미터까지 다양하다. 이중 입자상 물질은 그 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)에 따라 미세 입자(fine particle, 공기 역학적 직경이 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 입자), 초미세입자(ultrafine particle, 200nm 이하인 입자), 그리고 나노 입자(nano-sized particle, 50 nm 이하인 입자)로 분류된다. 이러한 입자상 물질은 기후 변화를 야기하며 인체에 유해한 것으로 알려져 있다.⁵⁻⁷ 특히, 최근 연구에 의하면, 나노입

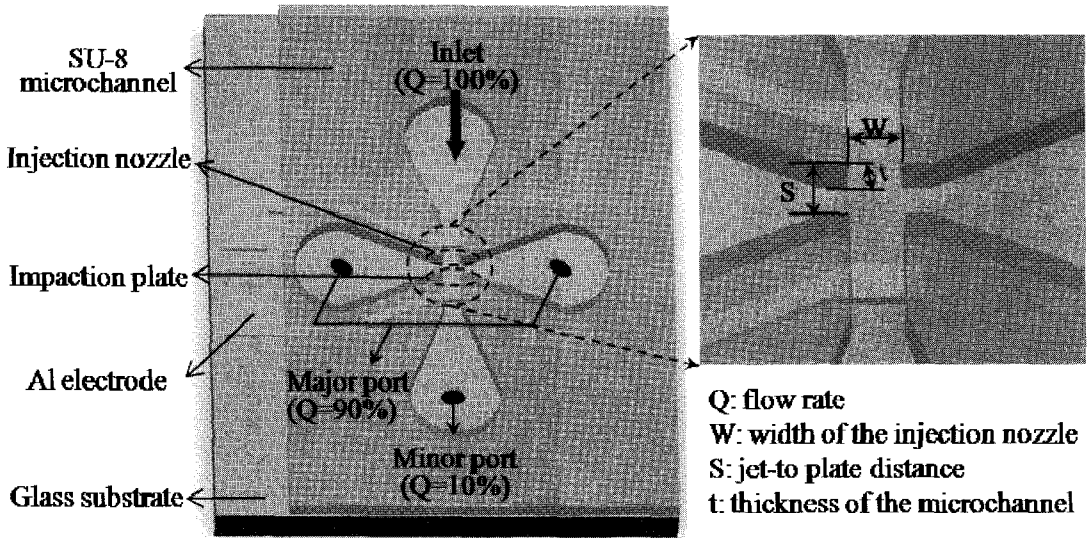


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed virtual impactor

자의 유해성은 여타의 입자에 비해 더욱 크다고 알려져있다.⁸⁻¹⁵ 따라서 나노 입자의 수 농도 (number concentration)을 크기에 따라 모니터링 하는 것은 매우 중요하다. 이에, 관성 분류법(inertial classification), 중력 침전법(gravitational sedimentation), 원심 분리법(centrifugation), 열 침강법(thermal precipitation) 등이 대기 중 입자의 크기별 분류에 사용되고 있다.¹⁶

관성 분류법의 대표적 방법인 가상 임팩터 (virtual impactor)는 높은 성능과 실시간 분류의 이점으로 입자의 샘플링에 널리 사용되고 있다.¹⁷⁻¹⁹ 가상 임팩터의 입구로 유입된 다분산 입자는 분사 노즐(injection nozzle)이라 불리는 점점 좁아지는 유로를 통과하면서 가속된다(Fig. 1). 90 도 직각으로 꺾이는 주 유동의 유량을 90 % 이상으로, 직선으로 진행하는 부 유동의 유량을 10 % 이하로 조절하면 관성이 큰 입자는 직진하여 부 유동부(minor port)로 이동한다. 반면, 관성이 작은 입자는 대부분의 유동이 집중되는 90 도 꺾인 주 유동부(major port)로 이동한다. 이러한 원리로 입자를 크기에 따라 분류한다. 가상 임팩터의 분류 입경(가상 임팩터에서의 포집 효율이 50 %인 입자의 공기 역학적 지름)은 분사 노즐의 단면적과 유량에 의해 결정된다. 기존의 가상 임팩터를 이용하여 나노 입자를 분류하기 위해서는, 입자가 음속 혹은 초음속으로 가속되어야 한다. 이는 초소형 가상 임팩터에 패키징 문제 등을 일으키게 되어 신뢰성 저하

의 요소가 되므로 기술적 장벽으로 인식되고 있다.²⁰ 또한 분류 입경을 조절하기 위해서는 매우 정밀한 유량 조절 장치가 필요하므로 분류 입경을 조절하기 위한 새로운 설계가 필요하다.

이 연구에서는 입자를 음속 또는 초음속으로 가속시키지 않고도 나노 입자의 분류 및 분류 입경의 조절이 가능한 새로운 입자 분류 칩을 제안한다. 기존 가상 임팩터에서는 나노 입자를 공기 역학적으로 가속시켰으나, 본 연구에서 제안한 가상 임팩터에서는 전극을 이용하여 전기장을 가함으로써 전기적으로 가속시켰다(Fig. 1). 전기장을 이용한 입자를 가속함으로써 노즐의 단면적과 전기장의 세기를 통해 분류 입경을 결정하도록 하였으며, 이렇게 결정된 입자 분류 입경의 범위를 기존 마이크로미터 단위에서 나노 크기까지 확장시킬 수 있었다. 즉, 음속과 같은 가혹한 환경을 제거함으로써 입자분류칩의 소형화에 이점을 가질 수 있다. 또한, 분류입경을 추가의 설계와 제작 없이 조절할 수 있다.

2. 설계와 제작

2.1 설계

유체역학적 원리와 전기적 원리를 동시에 이용하여 입자를 가속시키고 이를 이용하여 입자를 분리하는 본 장치의 설계 과정은 유체역학적 원리를 이용한 임팩터 구조의 설계와 전기장 형성을 위한

전극 설계의 두 가지 요소로 이루어져 있다.

2.1.1 유체역학 원리에 의한 임팩터 구조 설계

연구에서는 스톡스 수(Stk), 레이놀즈 수(Re), 유량 (Q), 유속(U), 분사 노즐의 너비(W)를 고려하여 가상 임팩터를 설계하였다. 가상 임팩터는 다음의 과정과 같은 시행착오법(trial-and-error)에 의해 설계하였다: 1) 분류 입경의 목표치(d_p)와 미세 유로의 두께(t), 스톡스 수(Stk) 결정; 2) Eq. (1)에 의해 미끄럼 보정 계수(slip-correction factor, SCF, C_c) 계산; 3) Eq. (2)를 이용하여 노즐의 너비(W) 계산; 4) 레이놀즈 수(Re)가 1,000 미만임을 확인하여 미세 유로에서의 공기의 흐름이 층류임을 확인.

1) 입구로 유입되는 전체 유량을 $0.30\ell/min$ 으로 정하고, 노즐의 단면적에 의한 목표 분류 입경을 $1.0\mu m$ 로 하였다. 이에 따라, 유입부, 주 유동 및 부유동의 유량은 각각 $0.30, 0.27, 0.03\ell/min$ 으로 결정하였다. 미세유로의 두께는 $200\mu m$ 로 결정하였다.

2) Stk 와 SCF 가 고려되었다. Stk 는 노즐 너비의 절반($W/2$)에서의 입자의 정지거리(stopping-distance : 초기 속도를 가진 입자가 정지된 공기 중에서 이동할 수 있는 최대 거리)와 평균 유속(U)의 비로 표현된다(Eq. (1)).

$$Stk = \frac{\tau U}{W/2} = \frac{\rho_p d_p^2 U C_c}{9\mu W} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 τ 는 이완 시간(relaxation-time : 입자가 새로운 외력 조건에서 가속 또는 감속되어 종단속도에 도달하는데 필요한 시간)이며, ρ_p 는 입자의 밀도($1g/cm^3$)이고, d_p 는 입자의 직경이고, μ 는 입자의 동역학적 점성이다. Stk_{50} (Stk_{50} : 입자의 포집 효율이 50 %인 Stk 수)이 설계에 사용되었으며, Stk_{50} 은 직사각형 노즐에서 0.229 임이 선행 연구에서 밝혀진 바 있다.^{4,21}

SCF(C_c)는 Eq. (2)에 의하여 결정된다.⁴ 공기의 평균 자유 행로(mean-free-path) λ 는 $0.066\mu m$ 이며, SCF 는 입자의 직경이 $1.0\mu m$ 이하의 범위에서만 고려되며 그 밖의 범위에서는 1 로 가정된다.⁴ 따라서 $1.0\mu m$ 의 분류 입경을 목표로 한 본 설계에서는 1 로 가정하였다.

$$C_c = 1 + 1.257 \frac{2\lambda}{d_p} + 0.40 \frac{2\lambda}{d_p} \exp(-1.10 \frac{d_p}{2\lambda}) \quad (2)$$

3) 분사 노즐의 너비(W)는 Eq. (3)에 의하여 계산되었다.

$$W = \sqrt{\frac{\rho_p d_p^2 q C_c}{9\mu Stk_{50} t}} \quad (3)$$

4) 위의 여러 변수들을 이용하여 Eq. (4)에 의해 계산된 레이놀즈 수(Re)를 점검하였다. 이상적인 분류 효율 곡선을 얻기 위하여 미세 유로에서의 유동은 층류이어야 한다. 분사노즐과 충돌면과의 거리(S , jet-to-plate distance)는 분사 노즐의 너비의 최소 1.5 배 이상이어야 한다.

$$Re = \frac{4\rho W h U}{\mu(W+t)} \quad (4)$$

위의 설계 단계에 의하여 분사 노즐의 너비는 $880\mu m$ 로 계산되었다. 따라서 노즐-충돌면 거리는 $1.32mm$ 로 계산되었다. Table 1 에 설계의 주요 변수와 결과를 정리하였다.

Table 1 Design parameters and results of the proposed device

	Description	Value
Input parameters	Flow rate (Inlet, major, minor flow)	0.3, 0.27, 0.03 ℓ/min
	Stokes number (Stk_{50})	0.229
	Slip-correction factor	1
	Thickness of the microchannel	$200\mu m$
Design results	Width of the injection nozzle	$880\mu m$
	Jet-to-plate distance	$1320\mu m$

2.1.2 입자 가속의 전기적 원리와 전극 설계

하전된 입자가 전기장 내에 놓이면 전기장의 방향과 동일한 방향의 정전기력(F_E : electrostatic force)을 받는다. 나노 입자에서 중력에 의한 중력 방향의 종단속도(terminal velocity of particle)는 무시할 수 있을 정도로 작으며, 정전기력은 전기장의 세기 E 와 전하량(q)의 곱으로 표현된다(Eq. (5)). 노즐을 통과한 직후의 입자의 속도는 유속과 동일하며, 입자의 속도는 정전기력에 의해 결정된다(Eq.(6)).

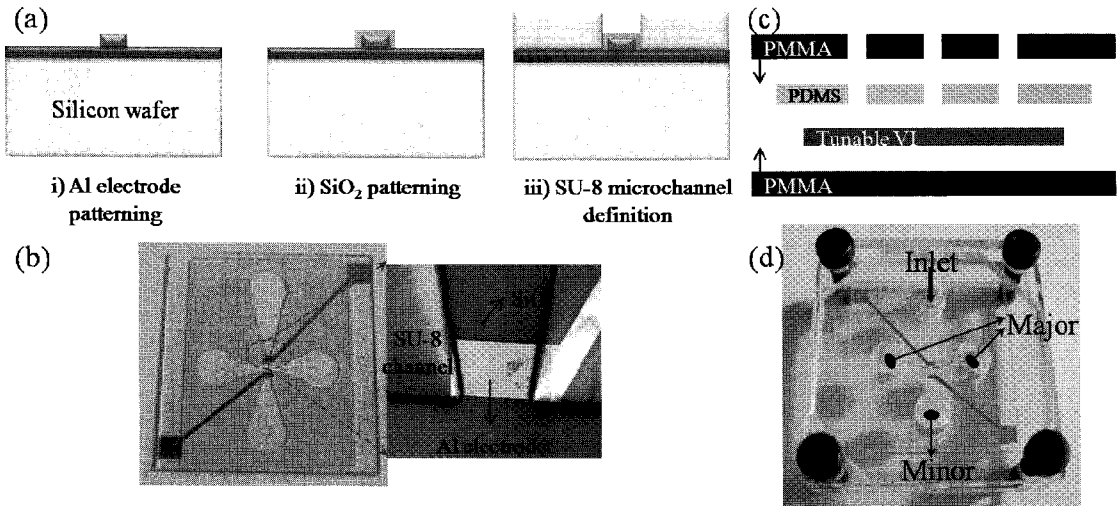


Fig. 2 Fabrication and Packaging : (a) Simplified fabrication sequence (b) Bird's-eye view of the fabricated device (c) Schematic diagram of packaging (d) Packaged device

$$F_E = qE = neE \quad (5)$$

$$F_E = ma = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} a \quad (6)$$

2.2 제작

가상 임팩터 제작 첫 번째 단계는 1 μ m 두께의 실리콘 산화막 위에 2 μ m 두께의 알루미늄 전극을 만드는 것이다. 미세 유로와 알루미늄 전극간의 절연을 위하여 3,000Å 두께의 silicon dioxide를 전극 위에 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)공정을 이용하여 증착하고 CF₄ 기체의 플라즈마를 이용한 RIE(Reactive Ion Etching)공정을 통한 미세 패턴을 구현하였다. 마지막으로 200 μ m 두께의 미세 유로를 SU-8(SU-8 2100, MicroChem Corp.)을 이용하여 구현하였다. 가상 임팩터는 가로 28mm, 세로 32mm의 크기로 제작되었으며, Fig. 2(b)와 Fig. 2(d)에 공정이 완료된 가상 임팩터와 패키징된 가상 임팩터를 각각 도시하였다. 한 쌍의 Polymethylmethacrylate(PMMA) 판을 이용하여 패키징을 하였으며, polydimethylsiloxane(PDMS, Sylgard 184, Dow Corning Corp.) 개스킷을 이용하여 강한 밀봉과 배관을 하였다(Fig. 2(c)).

3. 실험 및 결과

본 연구에서 제작한 가상 임팩터는 0.3l/min의

유량이 통과하며, 노즐의 단면적에 의해 계산된 분류 입경이 1.0 μ m이 되도록 설계되었다.

따라서 가상 임팩터의 분류 특성을 확인하는 것이 실험의 첫 번째 단계이다. 이후 전기장의 세기에 따른 분류입경 및 분류 효율의 특성을 분석하였다. 먼저, 전기장을 가하지 않은 상태에서 가상 임팩터의 구조에 의한 입자의 역학적 관성을 이용한 분류 특성을 파악하기 위하여 100nm에서 600nm의 크기 분포를 갖는 dicetyl sebacate (DOS) 입자와 0.6 μ m에서 10 μ m의 크기 분포를 갖는 탄소 입자가 혼합된 다분산 입자를 분류하였다. 이후, 전기장을 가하면서 분류 입경의 조절 특성을 파악하기 위하여 15nm에서 50nm의 크기 분포를 갖는 NaCl 입자를 사용하여 분류하였다.

3.1 분류 특성

Fig. 3(a)는 가상 임팩터의 만의 분류 특성을 알아보기 위한 실험장치의 모식도이다. 실험 장치 크게 입자 발생부(particle generator), 크기 분석부(size analyzer) 및 분류부(classifier)로 구성된다. 입자 발생부에서는 100nm에서 600nm의 크기 분포를 갖는 dioctyl sebacate(DOS) 입자와 0.6 μ m에서 10 μ m의 크기 분포를 갖는 탄소 입자가 생성된다. 최초에 대기 중 공기가 공기 정화장치를 통과하여 건조, 압축 및 여과된 상태로 유입되면, 그 공기는 탄소 입자를 발생시키는 toner chamber와 분무 장치로 공급된다. 이 때, 분무 장치에 담겨있던

500ml 의 isopropyl alcohol(IPA) 와 0.5ml 의 DOS 혼합물이 분사되며, DOS 에어로졸은 IPA 에 둘러싸인 상태로 분무된다. DOS 를 감싸고 있던 IPA 는 aerosol conditioner(TSI 3072, USA)를 통과하면서 제거된다. 이렇게 형성된 DOS 와 탄소 입자를 포함한 에어로졸은 크기 분석부로 공급된다. 입자의 크기 분포는 DOS 입자의 경우 scanning mobility particle sizer(SMPS, TSI 3936, USA)로, 탄소 입자의 경우 aerodynamic particle sizer(APS, TSI 3321, USA) 을 이용하여 분석 되었다. 분석된 에어로졸은 분

류부로 유입된다. DOS 와 탄소 입자는 가상 임팩터에 의하여 분류된다. 분류된 입자들의 크기 분포 분석은 다시 한번 SMPS 와 APS 를 이용하여 이루어진다. 이때, 제작된 가상임팩터의 주 유동부의 유량은 질량유동측정기(mass flow meter)와 진공 펌프에 의해 제어하며, 부유동부의 유량은 컴퓨터에 연결된 condensation particle counter(CPC, TSI 3022A, USA)와 SMPS 에 의해 제어된다. 가상 임팩터의 입구 유량은 0.30ℓ/min, 주 유동은 0.27ℓ/min, 부 유동은 0.03 ℓ/min 으로 제어되었다.

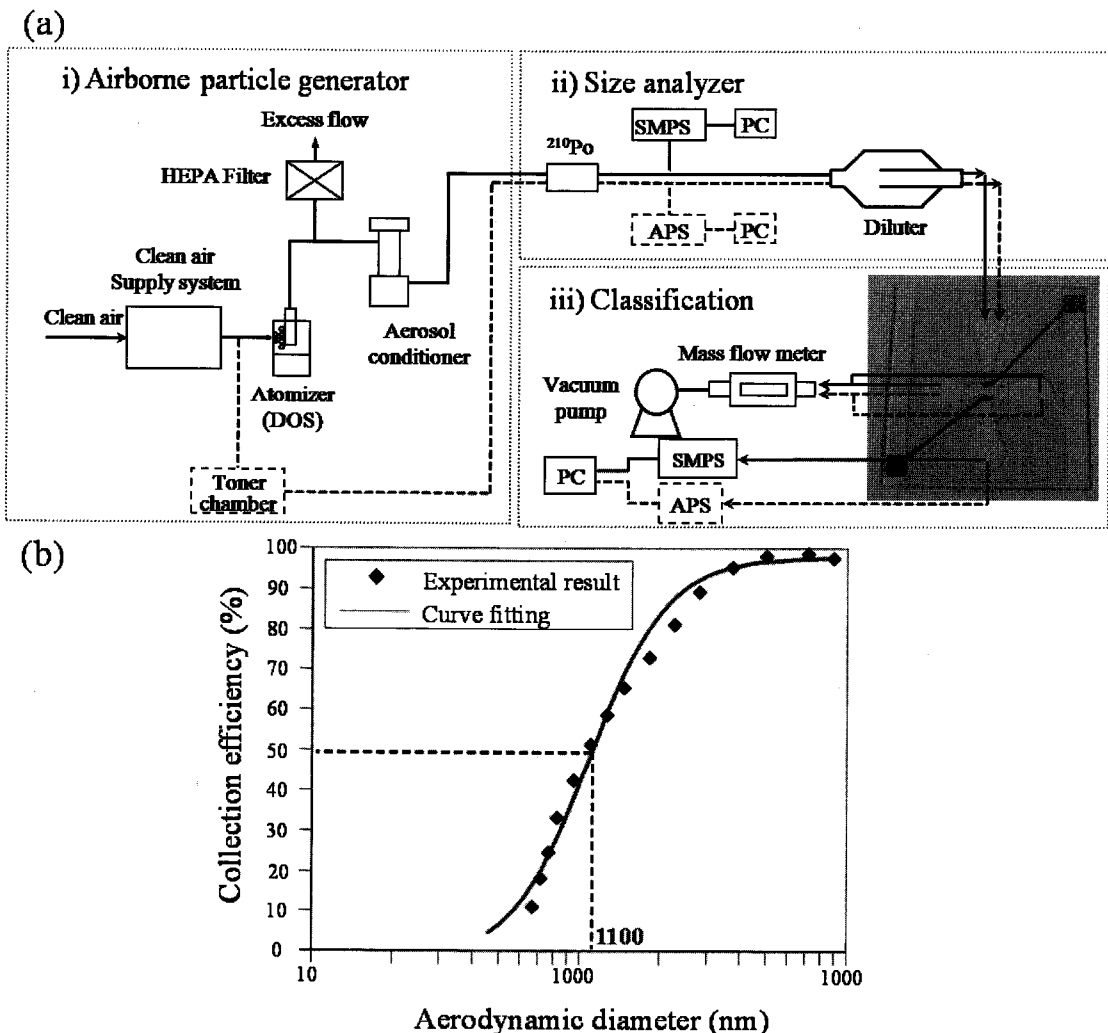


Fig. 3 (a) Experimental setup for examining cut-off characteristics of the virtual impactor (b) Measured collection efficiency without applying an electric potential. From the data, the cut-off diameter was calculated

5 회의 실험을 통해 얻은 평균 값을 이용하여 Fig. 3(b)에 주 유동에서 포집된 입자의 크기별 포집 효율을 도시하였으며, 오차는 6% 미만이었다.

포집 효율(η)은 Eq. (7)에 의하여 계산된다. N_{in} 과 N_{ma} 는 각각 입구와 주 유동에서 측정된 나노 입자의 개수 농도이다. 포집 효율 데이터는 Eq. (8)에 표현된 Boltzmann sigmoidal function(Sigma Plot, SPSS Inc.)를 이용하여 곡선 추정되었다. a_1 과 a_2 는 각각 회귀에 의한 계수이며, b 는 추정 폭, d_0 는 직경의 중간값이다.²² 실험에 의해 측정된 분류 입경은 $1.1\mu\text{m}$ 로 설계치인 $1.0\mu\text{m}$ 와는 10%의 오차가 있었다.

$$\eta = \frac{N_{in} - N_{ma}}{N_{in}} \times 100 \quad (7)$$

$$\eta = \frac{a_1}{1 + e^{-\left(\frac{d_p - d_0}{b}\right)}} + a_2 \quad (8)$$

3.2 분류 입경의 제어

제안된 가상 임팩터의 기하학적 형상에 따른 분류입경 및 효율 특성을 파악한 후, 집적된 전극에 전압에 따른 이들 특성변화를 측정하였다. 이를 위해 직경이 각각 15nm 에서 50nm 인 단분산의 NaCl 고체 입자를 사용하였다. Fig. 4(a)는 분류입경의 전기적 튜닝특성을 분석하기 위한 실험의 모식도이다. 여과 및 건조된 공기가 toner chamber에 공급되면, NaCl 입자가 생성된다. 이렇게 생성된 NaCl 입자는 ^{85}Kr 을 이용한 중화기에서 +1 가로 하전된다. Differential mobility analyzer(DMA)를 통하여 NaCl 입자를 15nm 에서 50nm 의 단분산 입자로 분

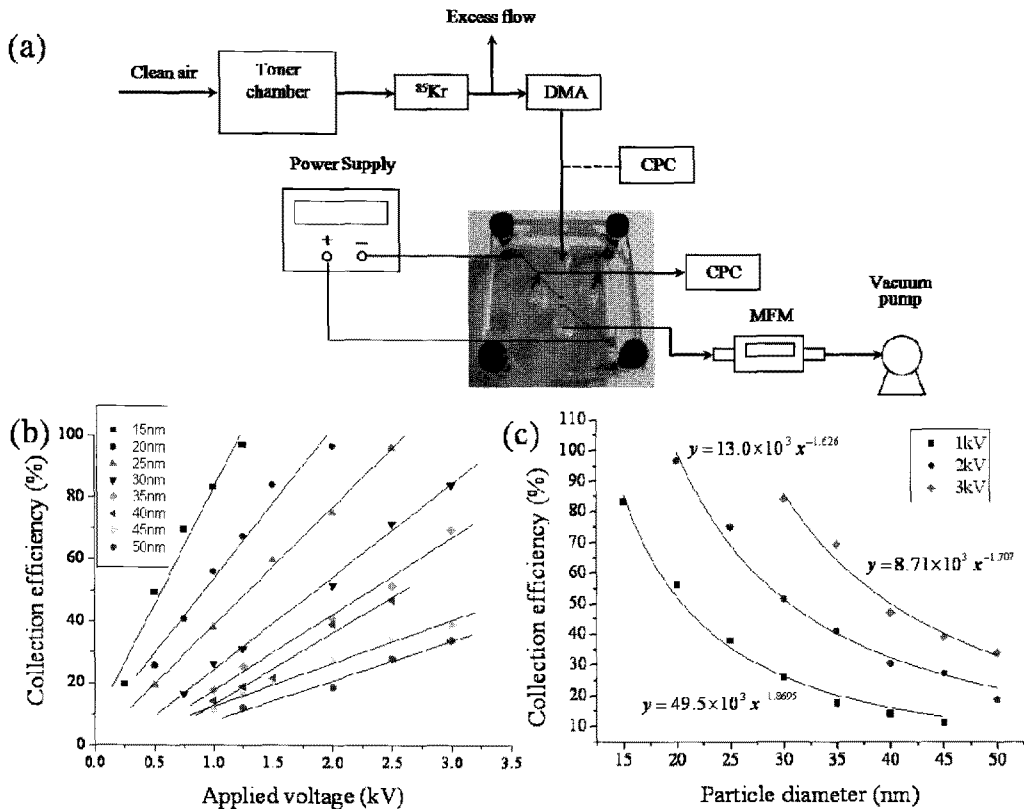


Fig. 4 (a) Experimental setup for analyzing the collection efficiency and acceleration characteristics of the nanoparticles (b) Measured collection efficiency as a function of the applied voltage (c) Measured collection efficiency as a function of the particle diameter

류하고 이를 제안된 가상 임팩터로 공급하였다. 가상 임팩터의 알루미늄 전극에 0.25kV 에서 3kV 를 가하면서 공급된 단분산 입자를 분류하였다. 입구와 주 유동, 부 유동의 유량을 각각 0.30ℓ/min, 0.27ℓ/min, 0.03ℓ/min 제어한 조건에서 5 회 실험을 수행하였다. Fig. 4(b)와 4(c)는 가해지는 전압에 따른 나노 입자의 크기에 따른 포집 효율이다. 입자의 포집 효율은 전극에 가해지는 전압이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다(Fig. 4(b)). 이는 특정 크기의 나노 입자는 전압이 증가함에 따라 더 많이 가속되기 때문이다. 또한, 일정한 전압 하에서의 분류 효율은 약 입자의 직경의 제곱에 반비례하였다(Fig. 4(c)). 이는 나노 입자의 전기적 이동도 (electric mobility)가 입자의 직경의 제곱에 반비례한다는 이론적 관계와도 잘 일치한다.

4. 결론

본 연구를 통해 미세 가공 공정을 이용한 나노 입자의 크기 기반 분류 칩이 제안하였다. 기존의 가상 임팩터는 장비의 크기가 크며 노즐의 단면적에 의해 분류 입경이 고정되어 있었다. 따라서 기존의 장비로는 나노 입자의 분류가 매우 어려웠다. 또한 나노 입자를 분류하기 위한 동작 조건은 초소형 가상 임팩터에서 가혹한 환경이다.

본 연구에서 제안한 가상 임팩터를 이용하여 나노 입자를 그 전기적 이동도에 의해 가속하여 분류하였다. 전압을 가하지 않았을 때 1.1 μ m 의 분류 입경을 갖는 가상 임팩터를 이용하여 3kV 까지 전압을 가함으로써 15nm 에서 50nm 범위를 갖는 나노 입자를 분류할 수 있었다. 이는 전기장의 세기를 조절함으로써 가상 임팩터의 분류 입경의 제어가 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 분류 입경이 고정된 기존 임팩터에서 필요했던 별도의 추가적인 설계나 공정 과정 없이 분류 입경의 조절이 가능하였다.

후 기

이 연구는 ‘지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업’(IITA-2008-C1090-0801-0038)과 ‘미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발’ 과제의 일부로 수행되었으며 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kittleson, D. B., "Engines and nanoparticles: a review," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 29, No. 5, pp. 575-588, 1998.
2. Cox, C. S. and Wathes, C. M., "Bioaerosols Handbook," CRC Press, 1995.
3. Tam, B. N. and Neumann, C. M., "A human health assessment of hazardous air pollutants in Portland, OR," *Journal of Environmental Management*, Vol. 73, No. 2, pp. 131-145, 2004.
4. Hinds, W. C., "Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particle, 2nd ed.," John Wiley & Sons Inc., 1999.
5. Jacobson, M. Z., "Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols," *Nature*, Vol. 409, No. 6821, pp. 695-697, 2001.
6. Seinfeld, J. H. and Pandis, S. P., "Atmospheric chemistry and physics," John Wiley & Sons Inc., 1998.
7. Wilson, R. and Spengler, J. D., "Particles in our air: concentration and health effects," Harvard University Press, 1996.
8. Dockery, D. W., Pope, C. A., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G. and Speizer, F. E., "An association between air pollution and mortality in six U.S. cities," *The New England Journal of Medicine*, Vol. 329, No. 24, pp. 1753-1759, 1993.
9. Kappos, A. D., Bruckmann, P., Eikmann, T., Englert, N., Heinrich, U., Hoop, P., Koch, E., Krause, G. H. M., Kreyling, W. G., Rauchfuss, K., Rombout, P., Schulz-Klemp, V., Thiel, W. R. and Wichmann, H. -E., "Health effects of particles in ambient air," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 207, No. 4, pp. 399-407, 2004.
10. Englert, N., "Fine particles and human health- a review of epidemiological studies," *Toxicology Letters*, Vol. 149, Issues 1-3, pp. 235-242, 2004.
11. Heinrich, J. and Slama, R., "Fine particles, a major threat to children," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 210, No. 5, pp. 617-622, 2007.
12. Pekkanen, J., Timonen, K. L., Ruuskanen, J., Reponen, A. and Mirmes, A., "Effects of ultrafine and

- fine particles in urban air on peak expiratory flow among children with asthmatic symptoms," *Environmental Research*, Vol. 74, No. 1, pp. 24-33, 1997.
13. Alessandrini, F., Schulz, H., Takenaka, S., Lentner, B., Karg, E., Bhrendt, H. and Jakob, T., "Effects of ultrafine carbon particle inhalation on allergic inflammation of the lung," *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, Vol. 117, No. 4, pp. 824-830, 2006.
 14. Neas, L. M., "Fine particulate matter and cardiovascular disease," *Fuel Processing Technology*, Vol. 65-66, pp. 55-67, 2000.
 15. Konaldson, K., Li, X. Y. and MacNee, W., "Ultrafine (nanometer) particle mediated lung injury," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 29, No. 5, pp. 553-560, 1998.
 16. Baron, P. A. and Willeke, K., "Aerosol Measurement, 2nd ed.," John Wiley & Sons Inc., 2001.
 17. Lim, H. H., Park, D., Maeng, J. Y., Hwang, J. and Kim, Y. J., "MEMS based integrated particle detection chip for real time environmental monitoring," *The 19th IEEE MEMS International Conference*, pp. 62-65, 2006.
 18. Maeng, J. Y., Park, D., Kim, Y. H., Hwang, J. and Kim, Y. J., "Micromachined cascade virtual impactor for aerodynamic size classification of airborne particles," *The 20th IEEE MEMS International Conference*, pp. 619-622, 2007.
 19. Kim, Y. H., Maeng, J. Y., Park, D., Hwang, J. and Kim, Y. J., "A micromachined cascade virtual impactor with a flow rate distributor for wide range airborne particle classification," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, No. 4, 043512, 2007.
 20. Lee, P., Chen, D. and Pui, D. Y. H., "Experimental study of a Nanoparticle virtual impactor," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 269-280, 2003.
 21. Hauglund, J. S. and McFarland, A. R., "A circumferential slot virtual impactor," *Aerosol Science Technology*, Vol. 38, No. 7, pp. 664-674, 2004.
 22. Demokritou, P., Lee, S. J. and Koutrakis, P., "Development and Evaluation of a High Loading PM_{2.5} Speciation Sampler," *Aerosol Science Technology*, Vol. 38, No. 2, pp. 111-119, 2004.