

MEMS 기반 전기 이동도 분석기를 이용한 대기 중 나노 입자의 분류

Classification of nano-sized airborne particle using MEMS based electrical mobility analyzer

*권순명¹, 정일현¹, 김용호¹, 박동호¹, 황정호¹, #김용준¹
 *S. Kwon¹, I.H. Jung¹, Y.H. Kim¹, D. Park¹, J. Hwang¹, #Y.J. Kim(yjk@yonsei.ac.kr)¹
¹ 연세대학교 기계공학부

Key words : electrical mobility analyzer, particle size classification

1. 서론

최근 들어 대기 환경이 악화됨에 따라 대기 환경 모니터링의 수요가 증가하고 있다. 대기 중에는 많은 종류의 부유 입자가 존재하며, 그 크기 또한 다양하기 때문에 대기 중 부유 입자의 크기 별 분류는 대기의 질을 결정하는데 있어서 매우 중요하다. 대기 중 부유 입자 중에서 직경이 50nm 이하의 입자는 나노 입자(nano particle) 이라고 하는데[1], 이들은 쉽게 흡입되고 호흡기 깊이 침투하는 특징이 있어서 호흡기계의 만성 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다. 따라서 대기 중의 나노 입자를 분류하고 감지하는 것은 매우 중요하다.

이미 대기 중 입자를 감지할 수 있는 상용 장비가 몇 가지 보급되어 있다[2-5]. 하지만 이러한 장비들은 부피가 크고 가격이 비싸기 때문에 넓은 범위에 걸친 실시간 모니터링 시스템에는 적합하지 않다. 따라서 대기 중 입자를 분류하고 감지하는 소형 시스템이 필요하다. 잘 알려진 대로 소형의 시스템은 그 크기뿐만 아니라 생산 원가 절감 측면에서도 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 소형 시스템은 대기 중 부유 물질 감지 네트워크를 구현하는데 매우 적합하다[6].

대기 중 나노 입자 측정 장치에 대한 필요성에도 불구하고, 지금까지 'Lab-on-a-Chip' 이라는 개념으로 널리 알려진 대부분의 소형 나노 입자 측정 장치는 액체 기반의 유기 분자를 측정하는 장치였다[7]. 지금까지 Lab-on-a-Chip의 개념을 도입한 기체 기반의 시스템에 대한 연구는 널리 이루어지지 않고 있으며, 미세 가공 기술을 이용한 대기 중 입자를 분류할 수 있는 시스템에 대한 몇몇 연구만이 있었다[7, 8]. 더욱이 지금까지 알려진 대기 중 부유 입자의 분류는 직경이 100nm 에서 10 μ m 로 제한되어 있다. 대표적 입자 분류 및 포집 장치인 가상 입핵터와 같은 장치를 나노 입자에 적용하기는 매우 어렵기 때문이다. 가상 입핵터에서 분류 입경은 가상 입핵터 구조의 분사 노즐 크기에 따라 결정되므로 분류 입경을 조절이 불가능하며 분사 노즐의 크기를 새롭게 결정하여 재설계를 해야 하는 문제를 가지고 있다[7]. 또한 가상 입핵터는 분류 입경을 기준으로 크고 작음을 구분하여 분류하는 장치이기 때문에 단분산에 가깝도록 매우 좁은 범위의 크기 분포를 갖도록 입자를 분류하는 것은 불가능하였다.

본 연구에서 대기 중 나노 입자를 분류하는 장치인 nano-electrical mobility analyzer (NEMA)를 제안하였다. NEMA의 분류 입경은 조절이 가능하며 분류 범위는 가상 입핵터보다 정밀하다. NEMA의 분류 범위는 집적된 전극을 통해 전기장에 의해 결정이 된다. 전극을 통해 가해지는 전기장을 조절하는 방법을 통해 분류 입경의 제어가 가능하기 때문에 추가적 설계와 제작의 과정이 필요 없다. 따라서 NEMA는 다양한 분류 범위를 갖게 되며, 더불어 소형화와 생산 원가 측면의 이점을 갖고 있다.

2. 나노 입자 분류 원리

NEMA의 분류 원리는 상용화된 입자 분류 장치 중 하나인 differential mobility analyzer (DMA)의 원리와 유사하다.

DMA의 입자 분류는 정전기적 원리와 공기동역학적 원리에 의해 이루어진다(Fig. 1). 공기 유동내의 하전된 입자는 공기동역학적 힘(aerodynamic force)과 정전기력(electrostatic force)을 받는다. 공기동역학적 힘은 입자를 포함한 공기의 유동의 방향으로 작용하고 있으며, 이는 마이크로 채널의 방향과 같다. 집적된 전극을 통해 마이크로 채널의 방향과 수직방향으로 형성된 전기장에 의해 공기 유동 내의 하전된 입자는 전기장의 방향과 같은 방향으로 정전기력을 받는다. 유동내의 입자는 입자의 직경과 반비례하는 전기 이동도(electrical mobility)에 의하여 유동을 가로지르는 방향으로 운동한다. 직경에 따라 다른 전기 이동도에 의하여 유동을 가로지르는 입자의 운동 방향이 결정되며, DMA는 이러한 원리로 입자를 크기 별로 분류한다[9]. 상용 DMA와 NEMA의 차이는 그 구조에 있다. DMA는 원통형의 유로의 중앙에 원기둥 형태의 전극이 형성되어 있다. NEMA의 경우 공정의 단순화를 위해 사각 형태의 유로를 형성하고 양 측면에 두 개의 전극을 집적하였다. 이와 같이 DMA와 NEMA의 사이에 구조적 차이가 있으나, 이것이 분류의 기본 원리에 영향을 주지는 않는다.

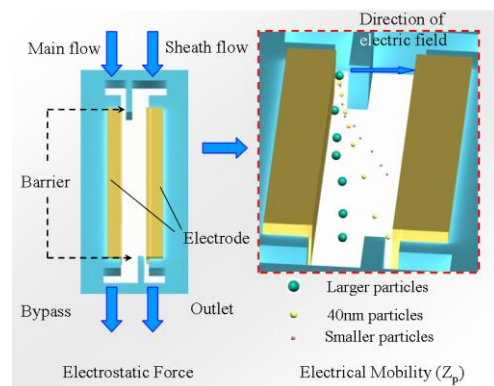


Fig. 1 Schematic view and particle classification principle of the NEMA

3. 제작

Fig. 2(a)에 NEMA의 제작 공정을 도시하였다. BOE(Buffered Oxide Etching)과정을 통해 습식 식각을 위한 SiO₂ 마스크를 형성하고, TMAH (tetramethyl-ammonium hydroxide)를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 습식 식각을 하여 마이크로 채널을 형성하였다. 전극과 마이크로 채널 구조 사이의 전기적 절연을 이루기 위해 습식 산화 과정을 통해 SiO₂ 막을 형성하고, sputtering 공정을 이용하여 알루미늄 전극을 형성하였다. 제작된 NEMA 디바이스는 PMMA (polymethylmethacrylate)판과 PDMS (polydimethylsiloxane) 개스킷을 이용하여 패키징하였다. Fig. 2(b)에 제작된 디바이스를 도시하였으며, Fig. 3에 패키징 과정의 모식도와 패키징된 디바이스를 도시하였다.

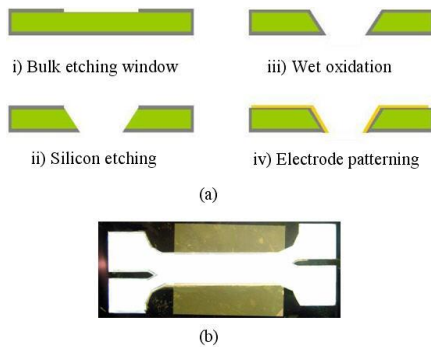


Fig. 2 (a) Simplified fabrication sequence, and (b) Fabrication result of the NEMA.

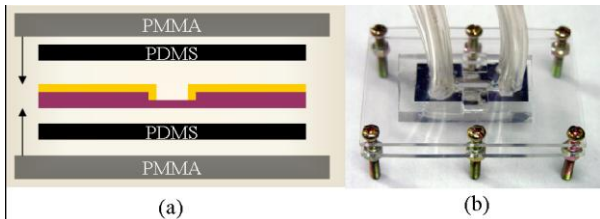


Fig. 3 Simplified packaging scheme: (a) Packaging scheme, and (b) Optical image of the packaged NEMA.

4. 실험 및 결과

직경이 100nm 이하인 다분산의 NaCl 입자를 사용하여 수행한 실험의 모식도를 Fig. 4 에 도시하였다. NEMA 내에서 다분산 NaCl 입자는 particles 전극에 인가된 전압에 의하여 분류된다. NEMA 내에서 전기장에 의한 정전기력을 받을 수 있도록 ^{210}Po 을 이용하여 입자를 하전시켰다. 다분산 입자가 유입되는 유로와 층류 형성을 위한 sheath air 를 유입시키기 위한 유로가 각각 연결되었으며, 배출구는 원하는 직경의 입자 포집을 위한 배출구와 포집하지 않는 입자를 포함하는 유동을 바이패스 하기 위한 배출구가 형성하였다. 실험에서의 유량은 진공 펌프를 이용하여 조절되었다. 포집된 입자는 상용 입자 측정 장치를 이용하여 직경별 수농도를 측정하였다. Fig. 5 에 직경이 각각 25nm, 40nm, 50nm NaCl 입자의 포집 효율과 인가 전압의 관계를 도시하였다. 입자의 직경이 클수록 포집효율이 최대가 되는 인가 전압이 크게 나타났으며, 이는 입자의 전기적 이동도가 입자 직경의 제곱에 반비례한다는 이론적 사실과 일치한다.

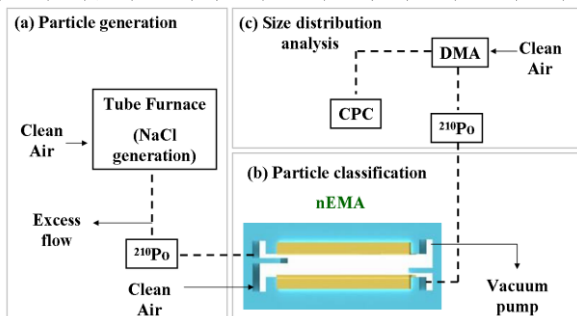


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for airborne particle classification: Polydispersed NaCl particles are generated in the part (a), the generated particles are classified in the part (b) using the proposed NEMA, and the size distribution of the classified particles are analyzed in the part (c).

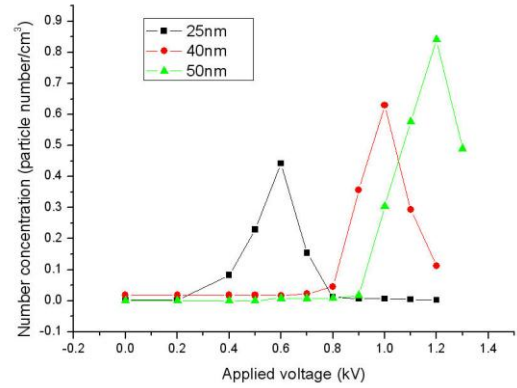


Fig. 5 Collection efficiency of device

5. 결론

본 연구에서는 멤스 공정을 이용하여 대기 중 나노 입자의 크기 별 분류를 위한 NEMA 를 제안하였다. 간단한 bulk micromachining 공정을 이용하여 NEMA 가 제작되었으며, NaCl 입자를 이용하여 실험이 수행되었다. 특정 크기의 입자에 대하여 특정 전압을 가했을 때 포집 효율이 최대가 됨을 확인하였으며, 나노 입자의 크기 별 분류가 인가 전압을 조절을 통해 가능함을 확인할 수 있었다. NEMA 는 장치의 크기 측면에서 이점을 가지고 있으며, 생산 비용 측면에서 유리함을 가지고 있어 나노 입자를 분류 및 측정용 상용 장치에 NEMA 시스템이 이용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

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

참고문헌

1. K. Bracey, Air matters 1997, 2, 2
2. P.A. Baron and K. Willeke , Aerosol measurement, John Wiley & Sons., Inc., New York, 2001.
3. D.R. Chen, D.Y.H. Pui, D. Hummes, H. Fissan, F.R. Quant, and G.J. Sem, “Design and Evaluation of Nanometer Aerosol Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA)”, J. Aerosol Sci., **29**, 497-509, 1998.
4. G.J. Sem, “Design and performance characteristics of three continuous-flow condensation particle counters : a summary”, Atmospheric Research, **62**, 267-294, 2002.
5. M. Marjamaki, J. Keskinen, D.R. Chen, and D.Y.H. Pui, “Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI)”, J. Aerosol Sci., **31**, 249-261, 2000.
6. George M whitesides, Nature supplement Insight:lab-on-a-chip **442**, 368-373, 2006.
7. Yong-Ho Kim, Jwa-Young Maeng, Dongho Park, Il-Hyun Jung, Jungho Hwang and Yong-Jun Kim, Appl. Phys. Lett. **91**, p043512 1-4 ,2007
8. H. H. Lim, D. Park, J.Y. Maeng, J. Hwang, and Y.J. Kim, Proc. Int. Conf. Microelectromech. Syst. 2006, 62.
9. William C. Hinds 1999 Aerosol technology (New York) John Wiley & Sons, Inc. 342-343