

마이크로머시닝을 이용한 패러데이 케이지의 전기적 가상 임팩터 적용

Application of Micromachined Faraday Cage to Electrical Virtual Impactor

*권순명¹, 김용호², 박동호¹, 박철우¹, 황정호¹, #김용준¹

*S. Kwon¹, Y.H. Kim², D. Park¹, C. W. Park¹, J. Hwang¹, #Y. J. Kim(yjk@yonsei.ac.kr)¹

¹ 연세대학교 기계공학부, ² 삼성전자

Key words : Faraday Cage, Virtual Impactor, Airborne Particle Concentration

1. 서론

최근 들어 대기 환경이 악화됨에 따라 대기 환경을 측정할 수 있는 장비에 대한 수요가 증가하고 있다. 대기 중에는 많은 종류의 부유 입자가 존재하며, 그 크기 또한 다양하기 때문에 대기 중 부유 입자의 크기 별로 분류하여 그 농도를 측정하는 것은 대기의 질을 결정하는 데 있어서 매우 중요하다. 특히 대기 중 부유 입자 중 직경이 50nm 이하의 입자는 나노 입자(nano particle) 이라고 하는데[1], 이들은 호흡을 통해 쉽게 인체에 흡입되고 폐포 등 호흡기관에 깊이 침투하며, 재배출이 거의 불가능한 특징이 있어서 호흡기계의 만성 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다.

이미 대기 중 나노 입자를 감지할 수 있는 상용 장비가 몇 가지 보급되어 있다[2]. 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[3].

대기 중 나노 입자의 측정을 위한 중요한 두 단계는 1) 나노 입자의 농축(concentration), 2) 나노 입자의 수농도(number concentration) 측정이다. 대기 중에 부유하는 입자는 그 양을 측정하기에 매우 어려울 정도로 적은 양이 포함되어 있기 때문에 그 농도를 농축시키는 것이 계측기의 성능을 배가시키는 데 매우 중요한 단계이다. 대기 중 부유하는 입자의 농도를 측정하는 대표적인 두 가지 방법은 질량농도(mass concentration)와 수농도(number concentration)의 측정이 있다. 나노 입자의 경우 질량이 매우 작아서 질량을 측정하는 것이 매우 어렵다. 또한 호흡기계 질환을 유발의 원인인 폐포 침착의 관점에서 볼 때, 폐포 침착물이 질량농도보다 수농도와 더 직접적인 관계가 있다는 것이 알려져 있어서 수농도의 측정이 의미가 있다.

본 연구에서는 전기적 가상 임팩터를 이용하여 나노 입자의 농도를 농축하였다. 전기적 가상 임팩터의 배출구에 마이크로머시닝 공정으로 제작된 전극을 제작하여 패러데이 케이지의 원리를 이용하여 하전 입자의 전류를 측정함으로써 수농도 농축의 효과를 확인하였다.

2. 나노 입자의 농축

나노 입자의 분류를 위하여 가상 임팩터를 사용하였다. 가상 임팩터(virtual impactor, VI)는 높은 성능과 실시간 분류의 이점으로 입자의 크기별 분류에 널리 사용되고 있다. 가상임팩터의 입구로 유입된 다분산 입자는 분사 노즐(injection nozzle)이라 불리는 점점 좁아지는 유로를 통과하면서 가속된다 (Fig. 1). 90도 직각으로 꺾이는 주 유동의 유량을 90% 이상으로, 직선으로 진행되는 부 유동의 유량을 10% 이하로 조절하면 관성이 큰 입자는 직진하여 부 유동부(minor port)로 이동한다. 반면, 관성이 작은 입자는

대부분의 유동이 집중되는 90도 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[4,5].

이러한 가상임팩터는 다음과 100 nm 이하의 입자를 분류하기 위해서는 입자를 음속이상으로 가속시켜야 한다는 문제점이 있다. 이는 입자의 파쇄를 야기한다. 또한, 이러한 가혹한 동작환경은 가상임팩터의 소형화 시 엄격한 패키징 기술을 요한다.

따라서 하전된 나노 입자를 이용하고 임팩터 미세 유로 내에 전기장을 인가하여 전기적으로 입자를 가속시키는 방법을 사용한다. 이는 가상 임팩터의 분류 입경을 나노 입자의 범위까지 넓힐 수 있을 뿐만 아니라, 인가 전압의 제어를 통해 분류 입경을 전기적으로 조절할 수 있도록 할 수 있다[6].

가상 임팩터의 부유동부(minor port)의 유량은 총 유량의 10% 이내이다. 부유동부로 분류되는 입자의 수농도는 총유량의 10%의 공기에 포함하게 되어 10 배의 수농도 농축의 효과를 얻을 수 있다.

3. 나노 입자의 측정

크기별 분류 및 수농도 농축 후, 감지를 위해서 현재 가장 널리 사용되는 기법은 입자를 전기적으로 하전시키고 포집하여 하전량을 측정하는 것이다. 입자의 하전량을 측정하는 방식은 패러데이 케이지의 원리를 이용한다. 유로 내 하전된 입자가 금속 전극(Faraday cage)에 포집되면 전하를 전극에 공급하여 전극에 전류가 흐르게 된다. 이때 전극에 흐르는 전류(I)는 전극 포집률(P), 입자의 하전수(n), 유량(Q), 입자 수농도(N)에 비례한다.

$$I = Pn e Q N_t$$

하전 입자에 의한 전류를 측정함으로써 수농도를 계산할 수 있다.

4. 제작

Fig. 2 는 제작과정이다. 가상 임팩터 제작 첫 번째 단계는 1 μm 두께의 실리콘 산화막 위에 2 μm 두께의 알루미늄 전극을 형성하는 것이다. 미세 유로와 알루미늄 전극 간의 절연을 위하여 3,000 Å 두께의 실리콘 산화막을 전극 위에 증착하여 미세 패딩을 구현하였다. 마지막으로 200 μm 두께의 미세 유로를 SU-8 (SU-8 2100, MicroChem Corp.)을 이용하여 구현하였다. Fig. 3 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.

5. 실험 및 결과

직경이 80nm~230nm PSL 입자를 이용하여 가상 임팩터의 분류 특성을 파악하는 실험의 장치를 Fig. 4에 도시하였다. 총 유량을 0.22lpm, 주유동과 부유동의 유량을 각각 0.2lpm, 0.02lpm 으로 제어하여 얻은 부유동에서의 포집 효율을 Fig.5에 도시하였다. 190nm의 분류 입경을 확인할 수 있었다. 이는 190nm 이상의 입자를 부유동으로 포집할 수 있다는 것을 의미한다.

전기적으로 입자를 가속하기 위해 가속전극에 1.1kV의 전압을 인가하면서 부유동측 측정 전극(Faraday Cage)에 흐르는 전류를 측정하였다(Fig.6). 전압을 인가하지 않았을 때 4fA의 전류가 흘렀으며, 전압을 인가했을 때 16fA의 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다. 이는 4배의 수농도 농축의 효과가 있음을 의미한다.

6. 결론

전기적 가속원리를 이용한 가상 임팩터를 이용하여 나노 입자의 수농도를 농축하였다. 수농도 농축의 효과는 패러데이 케이지의 원리를 이용하여 하전 입자에 의한 전류 측정의 방법으로 확인할 수 있었다.

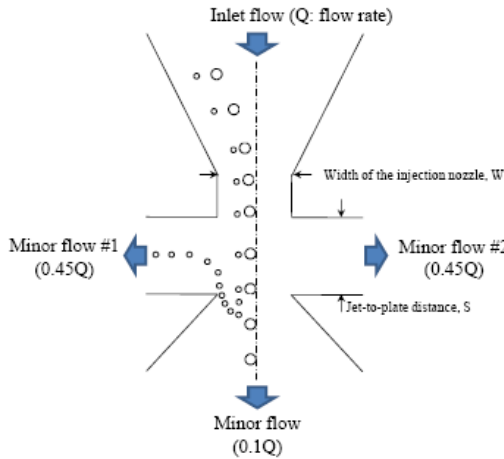


Fig. 1 Schematic view of virtual impactor

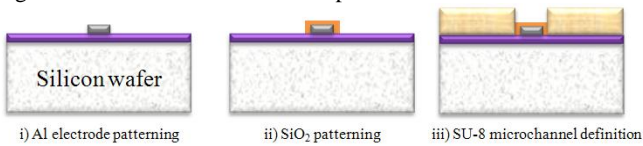


Fig. 2 Simplified fabrication sequence of the proposed micro VI.

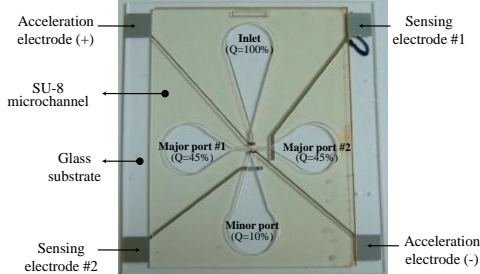


Fig. 3 Optical photograph of the fabricated micro VI.

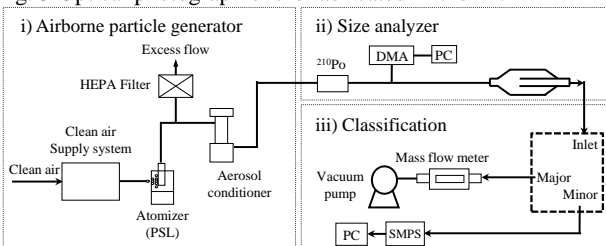


Fig. 4 Experimental setup for examining cut-off characteristics of the micro VI

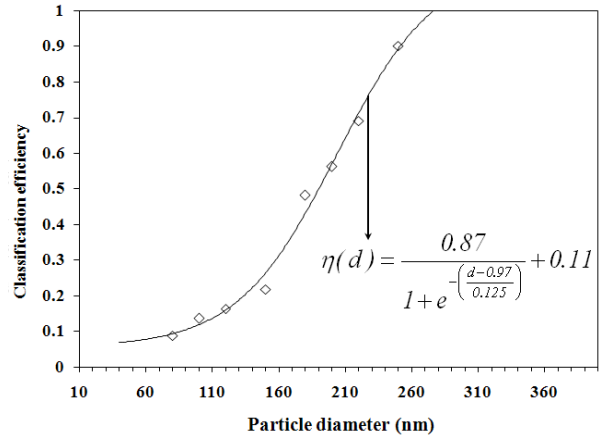


Fig. 5 Measured collection efficiency without applying an electric potential. From the data, the cut-off diameter was calculated.

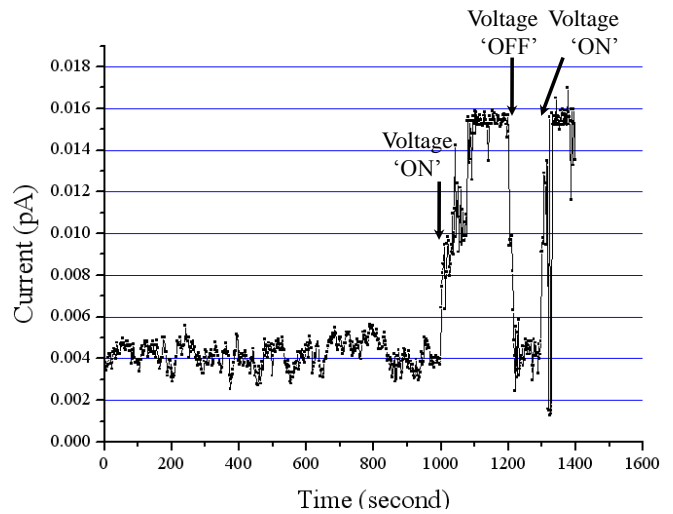


Fig. 6 output signal amplification results by applying the electric potential to the accelerating electrodes.

후기

본 연구는 ‘미래형 자동차 배기가스 제로화 기술 개발’ 과제와 ‘신·재생에너지기술개발사업 (2008-N-PV08-P-06-0-000)’의 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. George M whitesides, Nature supplement Insight:lab-on-a-chip 442, 368-373, 2006.
4. 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
5. H. H. Lim, D. Park, J.Y. Maeng, J. Hwang, and Y.J. Kim, Proc. Int. Conf. Microelectromech. Syst. 2006, 62.
6. 권순명, 김용호, 박동호, 황정호, 김용준, “전기적으로 분류 입경의 제어가 가능한 가상 임팩터를 이용한 대기 중 나노 입자의 분류”, 한국정밀공학회지, 26, 118-125,2009.