

관성/확산필터를 이용한 나노입자의 분류기술 연구

김용구¹⁾ · 이상열¹⁾ · 김한나¹⁾ · 노학재¹⁾ · 봉춘근^{1)*} · 김대성²⁾

¹⁾㈜그린솔루스, ²⁾서울대학교 멀티스케일 에너지 시스템 연구단

(2015년 5월 1일 투고, 2015년 5월 27일 수정, 2015년 5월 27일 게재확정)

Classification of Nanoparticles by Inertial/Diffusion Filter

Yonggu Kim¹⁾, Sangyul Lee¹⁾, Hannah Kim¹⁾, Hakjae Noh¹⁾, Choonkeun Bong^{1)*}, Daesung Kim²⁾

¹⁾*Institute of Environmental Technology, Greensolus Co., Ltd., Seoul, Korea*

²⁾*Global Frontier Center for Multiscale Energy Systems, Seoul National University, Seoul, Korea*

(Received 1 May 2015; Revised 27 May 2015; Accepted 27 May 2015)

Abstract

The purpose of this research is to find out the collection property of nanoparticle in diffusion filter to know particle size dispersion of nanomaterial using inertial force and principle of Brownian diffusion motion. We used inertial filters which are two different type and diffusion filters made by various kinds of Wiremesh and the different pieces of filter to compare with particle size distribution using NaCl particles.

Finally, We made a conclusion as follows : (1) the bigger available charging volume is and the larger specific surface area of inertial filter is, the better collection efficiency is. (2) The higher wire-mesh number of filter is, the more collection efficiency of small particle is increasing because the wire of the higher Wiremesh number filter is thinner and denser. (3) The more pieces of wire-mesh filter, the more collection efficiency is increasing because it makes the residence time longer.

Keywords : Nanoparticle classification, Inertial filter, Diffusion filter, Inertial force, Brownian diffusion

* Corresponding author.

Tel : +82-(0)70-8290-5050 E-mail : reenbeemail@naver.com

1. 서 론

급속한 산업발전과 지구환경의 변화에 따라 다양한 오염물질의 발생과 오염원의 증가로 인해 실생활에서의 환경악화는 가속화되고 있다. 특히, 초미세먼지(<2.5 μm), 극초미세입자(<100 nm), 나노입자(<50 nm) 등으로 인한 건강위해성 관련 피해사례도 발생하고 있다. 또한, 최근에는 입자크기가 작아질수록 비표면적(surface area to volume ratio)의 증가로 인한 반응성 및 독성이 증가한다고 알려지면서 극초미세입자와 나노입자에 대한 관심이 증대되고 있다(Oberdörster, 2004).

현재 우리나라뿐만 아니라 외국의 경우, PM₁₀ 과 PM_{2.5}에 대한 중요성을 인식하고 다양한 규제를 마련하고 있으며, 최근에는 이보다 더 작은 크기의 나노물질에 대한 잠재적 위험성이 더 큰 것으로 여러 연구에서 보고하고 있다. 직경 100 nm 이하인 극미세입자를 대상으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 입자의 크기가 작을수록 표면적의 증가로 인해 인체 위해성 또한 증가할 것이라는 의견이 지배적이다. 자동차 배기가스의 대부분이 극미세입자로 이루어져 있으며, 극미세입자는 도시지역 대기오염 증가의 주요 원인으로 알려져 있다.(Thomas et al., 2005)

연구진행에 앞서 나노입자를 분류·제거하고자 하는 최근 연구결과들을 살펴보았다. Otani et al.(2007)의 연구에서는 SUS304(DanHawn machinery Inc., Korea)의 섬유필터를 사용하여 나노입자를 분류하였는데, 여과속도가 작을수록 작은 입경에서의 포집효율이 높고 속도가 증가할수록 100 nm 이상 입자들의 포집 효율이 증가하였다. 이는 같은 관성필터 재질이더라도 통과유량(여과속도)의 변화로써 입경분리 조절이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 이 연구를 통해 개발된 Nanosampler는 관성력을 이용하여 입자의 크기를 0.07μm 까지 분리할 수 있는 기술로써 KANOMAX에 의해 상용화되었다. Brochot et al.(2011)도 5 nm에서 400 nm 범위 나노입자의 입경에 따른 침투율에 관한 연구를 진행하였다. Kwon et al.(2009)는 가상 입벽터를 이용하여 나노입자를 전기적 이동도에 의해 가속하여 분류하는 연구를 진행하여 15 nm에서 50 nm 범위를 갖는 나노 입자를 분류하였다. 하지만 현재 국내의 경우, 나노입자의 크기별 분리기술이 축적되어 있지 않아 주로 선진

외국의 기술에 의존하는 경우가 대부분이다. 이에 따라 국내에서도 미세입자의 특성을 파악하기 위하여 미세입자 분류를 위한 독자적인 기술개발이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구는 기존 연구 결과를 바탕으로 관성필터와 확산필터를 제작하여 필터의 입자 포집특성과 입자 제거 원리를 확인하는 기초연구이며, 향후 100 nm 이상의 입자만을 제거하는 관성필터와 100 nm 이하의 입자를 10 nm 단위로 분극하여 제거할 수 있는 확산필터를 제작하는데 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 필터링 기본원리 및 포집특성

대기 중 존재하는 100 nm 이하의 나노입자 입경분리 필터 개발을 위해 필요한 주요 필터링 기본원리 및 포집특성을 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

입자가 일반 필터에의 통과 여부를 결정하는 주된 요인은 관성과 브라운 확산 원리이며, 100 nm 이하의 나노입자에 대한 필터의 지배적인 집진기작은 브라운 확산과 정전기력이다. 섬유 직경이 수백 nm 이하(나노섬유)로 되면 직접차단이 가장 중요한 집진기작으로 작용하게 되고, 나노섬유가 되면서 압력손실이 더 낮아지는 효과가 있어 실질적으로 필터의 성능이 증대된다. 또한 에어필터의 여재는 일반적으로 섬유상 재질을 사용하고 있으며 여재의 섬유 틈새 구멍보다 큰 입자가 걸려 제거되는 원리

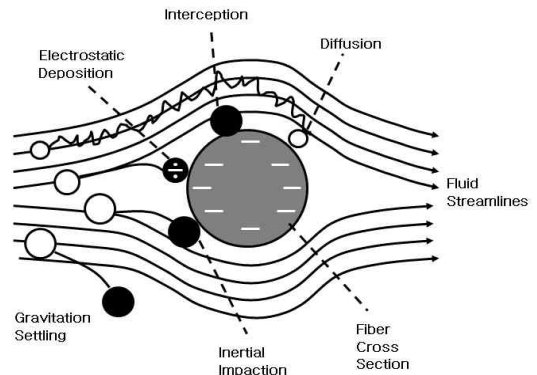


Fig. 1. Collection mechanisms of particle for mono fiber.

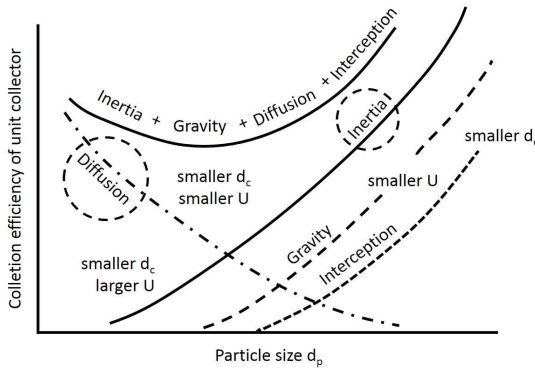


Fig. 2. Characteristic of particle collection by filter.

가 아니고 여재를 구성하는 섬유 하나하나에 입자가 접촉함으로써 포집하는 원리로 입자를 제거한다.

관성충돌과 브라운 확산에 의한 값들은 Stokes number와 Peclet number에 의해 규정되는 것이 일반적이는데, 이를 식 1과 식 2에 나타내었다. 여기서 C_c 는 커닝햄 슬립 보정계수, ρ 는 입자의 밀도, d_p 는 입자의 직경, u 는 통과속도, μ 는 점성계수, D 는 입자의 브라운 확산계수, d_f 는 섬유의 직경을 나타낸다.

입자가 일반 필터에의 통과 여부를 결정하는 주된 요인은 관성과 브라운 확산 원리이며, 100 nm 이하의 나노입자에 대한 필터의 지배적인 집진기작은 브라운 확산과 정전기력이다. 섬유의 직경이 수백 nm 이하(나노섬유)로 되면 직접차단이 가장 중요한 집진기작으로 작용하게 되고, 나노섬유가 되면서 압력손실이 더 낮아지는 효과가 있어 실질적으로 필터의 성능이 증대된다. 또한 에어필터의 여재는 일반적으로 섬유상 재질을 사용하고 있으며 여재의 섬유 틈새 구멍보다 큰 입자가 걸려 제거되는 원리가 아니고 여재를 구성하는 섬유 하나하나에 입자가 접촉함으로써 포집하는 원리로 입자를 제거한다.

관성충돌과 브라운 확산에 의한 값들은 Stokes number와 Peclet number에 의해 규정되는 것이 일반적이는데, 이를 식 1과 식 2에 나타내었다. 여기서 C_c 는 커닝햄 슬립 보정계수, ρ 는 입자의 밀도, d_p 는 입자의 직경, u 는 통과속도, μ 는 점성계수, D 는 입자의 브라운 확산계수, d_f 는 섬유의 직경을 나타낸다.

$$Stk = \frac{C_c \rho_p d_p^2 u}{9 \mu d_f} \quad (\text{식 1})$$

$$pe = \frac{u d_f}{D} \quad (\text{식 2})$$

필터에 의한 제거효율은 Stokes number가 증가함에 따라 증가하고, Peclet number가 감소할수록 증가한다. 따라서 일반적으로 극도로 높은 여과속도일 경우 상대적으로 큰 입자에 대해서는 높은 제거율을 얻을 수 있고, 작은 입자들의 경우 제거율이 낮은 것으로 나타난다.

2.2 관성필터에 의한 입경분포 측정

관성력을 이용하여 100 nm 초과 입자를 제거하기 위한 관성필터의 원리를 그림 3(Otani et al., 2007)에 나타내었다. 관성필터는 여과속도가 높을수록 입경이 큰 범위의 입자의 포집효율이 높아지며, 반대로 입경이 작은 범위의 입자의 포집효율은 낮아지게 된다. 그림 3의 (A)는 관성력에 의한 이상적인 입자 포집효율 곡선(E curve)을 나타낸 것으로 여과속도가 증가하게 되면 관성력에 의해 (B)의 곡선은 입경이 큰 범위에서 포집효율이 높아지게 되며, 입경이 작은 범위는 포집효율이 낮아짐에 따라 (C)곡선의 형태로 점차 변하게 된다.

실험장치 구성은 그림 4에 나타내었다. 주요 시스템의 구성은 컴프레서, 입자발생장치, Diffusion dryer, 중화기, 클린챔버, 관성필터, 유량분배기, 입자 측정 관리프로그램 등으로 이루어져 있다. 입자 측정 방법은 입자발생부에서 보내진 입자는 수분을 제거하기 위해 실리카겔을 통하여 클린챔버로 보내진 후, 챔버 내부의 노즐을 통과하여 나온 후 관성필터를 거쳐 CPC로 흘러들어가 입자를 계수하는 과정을 거쳐 행해진다. 현재 이 시스템의 측정가능한 입자의 개수농도는 10,000 개/cm³ 이하이고, 이 시스템의 측정 가능한 최소 입경은 약 10 nm 이다.

유량은 2.7 L/min으로 Atomizer(Model 4810, HCT Co., Ltd, 한국)에 주입하여 NaCl의 입자를 발생시켰다. 증류수의 경우 원액 그대로 사용하였고, NaCl(0.9 %, Saline Solution, 대한약품공업)의 경우 0.9 %짜리 원액으로 입자를 발생시켜 SMPS(TSI, INC. CPC3010, DMA3081, 미국)를 사용하여 측정하였다. 장비의 측정한계치인 10,000 #/cm³을 초과하

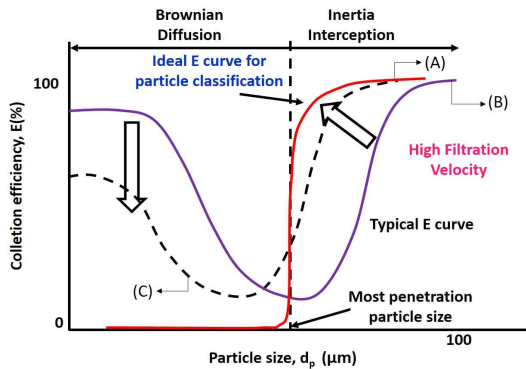


Fig. 3. Principle of inertial filtration.

었다. 따라서 데이터의 정확성을 위하여 Diluter (Model DI-120, HCT Co., Ltd, 한국)를 통해 1,000배 정도 희석하여 사용하였으며, 동일 조건에서 3회 이상 측정하였다.

Atomizer로부터 발생된 입자의 수분을 제거하기 위해 실리카겔이 들어있는 Diffusion Dryer에 통과시키고, 챔버로 보내어 20 °C로 온도를 조절하였다. 챔버 내부의 노즐을 통하여 나온 입자는 마찰이나 기타 외부요인에 의해 전기적인 대전이 될 수 있으므로 이를 대기 중의 입자와 같은 표준 중성입자로 만들어 주기 위해 에어로졸 대전 중화장치(aerosol charge neutralizer)를 통과시켰다. 중성으로 대전된 입자는 관성필터로 들어가게 되는데, 이 때 입자가 관성필터를 통과하는 속도를 높여주기 위해 펌프를 이용하여 17.8 L/min의 유량으로 관성필터로 투입시켰다. 필터를 통해 빠져나온 입자를 전기적 이동도를 이용해 크기별로 분리하는 DMA(differential mobility analyzer)와 광학적 입자 계수기인 CPC (Condensation Particle Counter)를 이용하여 입경 분포를 측정 분석하였다.

관성필터는 직육면체와 원통형의 2가지 타입으로 제작하였다. 충전재료는 Wiremesh 400(mesh filter Industry Inc., Korea)을 사용하여 필터홀더에 충전하여 사용하였다. 홀더 모양이 직육면체 타입의 경우, Wiremesh의 사용량은 2000 cm²이며, 지그재그형태로 충전하였다. 홀더 크기는 63 mm x 42 mm x 27 mm이며, 충전가능 최대 체적은 71.4 cm³, 충전률은 13.07 %, 필터 통과 유속은 0.30 m/sec로 구성하였다. 홀더 모양이 원통형 타입의 경우, Wiremesh의

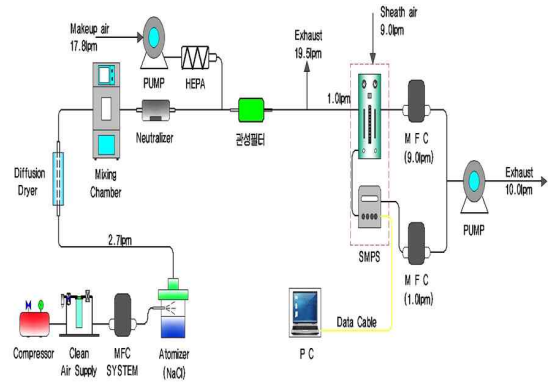


Fig. 4. Experimental setup of inertial filtration.

사용량은 1000 cm², 직육면체 타입의 절반 수준이다. 홀더 크기는 직경 22 mm, 길이 40 mm로 제작하였고, 충전가능 최대체적 15.68 cm³, 충전율 30.81 %, 필터 통과 유속은 0.90 m/sec이다. 제작된 2가지 타입의 관성필터에 대한 사양을 표 1에 나타내었다.



2.3 확산필터에 의한 입경분포 측정

그림 5는 브라운 확산 원리를 이용하여 100 nm 이하 입자를 제거하기 위한 확산필터의 원리를 나타낸 것이며, 실험장치의 구성은 그림 6에 나타내었다. 브라운 확산운동은 입자의 크기가 작을수록 증가하며, 확산에 의한 입자의 부착도 이것에 비례하여 입자의 크기가 작을수록 증가한다. 또한 유속이 낮을수록 입자가 섬유 표면 근처에서 더 많은 시간을 가질 수 있으므로 확산에 의한 여과가 증가하게 되는 경향이 있는 것으로 알려져 있다(Ji et al., 2013). 이처럼 그림5와 같이 확산운동에 의한 이상적인 입자 포집효율(A)을 나타내기 위해선 여과속도 조절(Controlling filtration velocity)을 통해 (B)의 곡선이 (C)의 곡선의 형태로 변화를 유도하여 입경이 작은 범위의 포집효율 성능을 높이도록 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 포집특성을 알아보기 위해 섬유 확산필터를 제작하였다. 확산필터 실험은 조건을 달리하여 2가지 경우에 대해 알아보았다. 첫 번째 실험은 Wiremesh 종류에 따른 포집효율을 알아보는 실험이고, 두 번째 실험은 Wiremesh 장착수에 따른 포집효율을 알아보는 실험을 수행하였다. 포집효율은 식 3과 같이 계산하였다.

Table 1. Specifications of inertial filters with different type.

Specification	Type I	Type II
Wiremesh	Wiremesh 400	
Quantity of Wiremesh	20 cm x 100 cm(2,000 cm ²)	10 cm x 100 cm(1,000 cm ²)
Type of packing	Zigzag	Cylinder
Shape of holder	Square	Cylinder
Size of holder(mm)	63 x 42 x 27	ø 22 x 40
Volume of packing	71.44 cm ³	15.20 cm ³
Rate of packing	13.07 %	31.71 %
Velocity of flow	0.30 m/sec	0.90 m/sec

Pictures



$$\text{포집효율(\%)} = \frac{(\text{필터통과전입자수} - \text{필터통과후입자수})}{\text{필터통과전입자수}} \times 100(\%)$$

(식 3)

Wiremesh는 나노입자의 확산성질을 이용한 것으로 Wiremesh의 개수에 따라 확률적 분포에 의해 포집되는 입자의 크기가 달라진다. 따라서 이에 따라 입경별 분리가 가능할 것으로 판단되었다. 또한 Wiremesh의 숫자가 클수록 wire가 가늘고, wire의 개수가 많기 때문에 나노입자의 포집 효율이 증가할 것으로 판단된다.

확산필터에 의한 입경분포 측정 실험조건은 관성필터에 의한 입경측정분포 실험과 동일한 조건

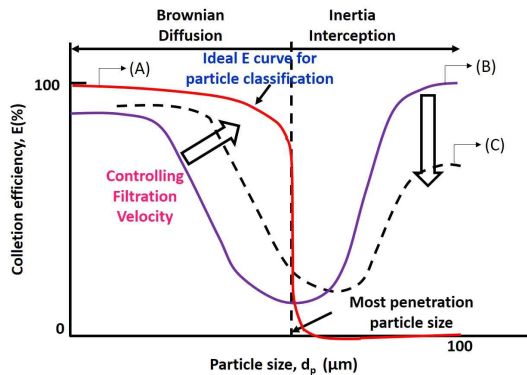


Fig. 5. Principle of diffusion filtration.

및 구성으로 하였으며, 확산필터의 주입유량을 1.0 L/min로 하였다. 각 mesh 종류의 사양을 표 2에 나타내었다. 나노입자의 입경분리를 위한 분리용 필터를 개발하기 위해 설계 제작된 확산필터의 홀더에 Wiremesh 장착수를 2개 이상 증가시켜 나노입자 입경분리 특성을 파악하는 실험을 수행하였다. Wiremesh 장착수에 따른 포집효율을 알아보기 위한 실험 구성은 Wiremesh 종류에 따른 실험구성과 동일하며, Wiremesh 400을 이용하여 sheet 장착수를 1개, 3개, 5개로 구분하여 입경분포 특성을 알아보았다.

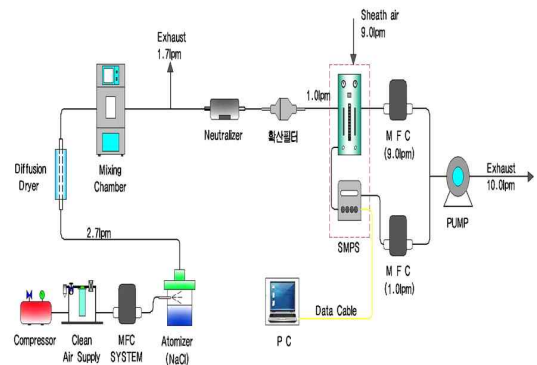


Fig. 6. Experimental setup of diffusion filtration.

Table 2. Specifications of diffusion filters with different types.

Specification	Wiremesh 400	Wiremesh 500
Material	SUS316	SUS316
Diameter of mesh(mm)	0.030	0.025
Thickness of mesh(mm)	0.06~0.07	0.05~0.06
Pitch of mesh(μm)	30	25
Porosity(%)	28.2	25.6
Filtration velocity(m/sec)	0.026	0.026

3. 결과 및 고찰

3.1 관성필터에 의한 입자 포집특성

그림 7은 관성력에 의한 관성필터를 통해 포집된 입자의 수를 나타낸 것이다. 그림 8과 같이 정방향 관성필터의 경우 약 38 nm 크기의 입자부터 급격하게 포집효율이 증가하며, 원통형 관성필터의 경우는 약 41 nm 크기의 입자부터 급격하게 포집효율이 증가하였다. 정방향 관성필터의 경우 지그재그로 mesh가 충전되어 있어 원통형에 비해 Wiremesh의 충전 가능 최대 체적량이 크고 그에 따라 비표면적이 넓어 포집효율이 더 높은 것으로 판단된다.

3.2 확산필터에 의한 입자 포집특성

3.2.1 Wire-mesh 종류에 따른 포집특성

확산필터에 의한 입자 포집 특성을 알아보기 위해 먼저 Wiremesh 종류(Wiremesh 400과 Wiremesh 500)에 따른 입경분포와 포집효율을 알아보았다. 그림 9와 그림 10과 같이 Wiremesh 400과 Wiremesh

500으로 NaCl의 입자를 분리하였을 때 입자의 직경에 따른 포집 효율을 나타내었다. 그래프에 나타난 바와 같이 Wiremesh 400을 이용하였을 때 포집효율이 양호하고 입경분리가 가능한 것을 알 수 있었다. 반면에 Wiremesh 500을 이용하였을 경우에는 작은 입자에서의 포집효율은 좋으나 큰 입자까지 모두 포집하는 단점이 발생하였다.

3.2.2 Wire-mesh 장착수에 따른 포집특성

나노입자의 입경분리를 위한 분리용 필터 개발을 위해 확산필터에 장착되는 Wiremesh sheet 수를 달리한 실험 결과를 살펴보았다. SMPS를 이용하여 Wiremesh의 개수에 따른 입자수를 알아본 결과 입자 포집 전과 입자 포집 후의 입자 수 변화가 그림 11과 같이 나타났다. 앞선 Wiremesh 종류에 따른 포집특성 실험에서와 마찬가지로 작은 입자의 수가 큰 입자의 수보다 매우 적어 그래프로 다 나타내지 못하였지만, 필터 후단에서 측정된 입자수가 필터 전단에서 측정된 입경분포에 비해 입자 개수농도가 상당히 감소하였음을 알 수 있다.

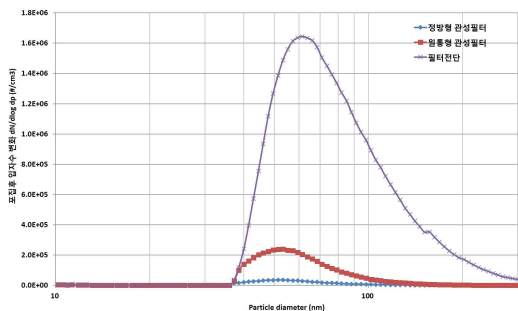


Fig. 7. Change of number particle size distribution after collecting by inertial filter.

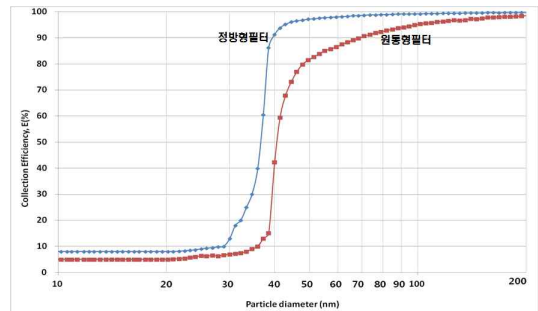


Fig. 8. Collection efficiency of nanoparticles according to the type of inertial filter.

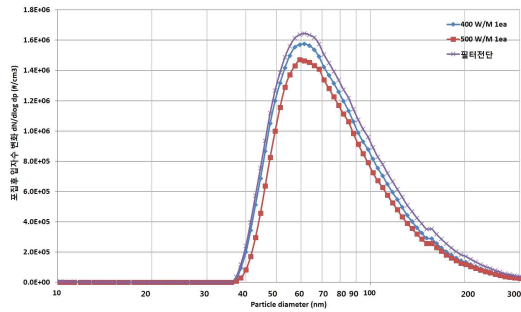


Fig. 9. Change of number particle size distribution after collecting by diffusion filter.

Wiremesh sheet 수 별로 입자 크기에 따른 포집 효율을 그림 12와 같이 나타내었다.

사이즈가 35 nm 이하인 입자의 경우, 포집효율이 70 % 이상으로 상당히 제거가 되는 것으로 나타났다. 포집율 50 %를 최대투과율경이라고 봤을 때, Wiremesh가 1장일 경우 36 nm의 입자까지 제거되고, 3장일 경우 38 nm까지 제거, 5장일 경우 43 nm까지 제거가 되는 것으로 판단된다. 즉, Wiremesh의 장착수가 많을수록 포집효율이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 확산필터를 통해 특정 크기의 입자를 포집 제거할 수 있는 기술개발이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Wiremesh를 이용하여 관성필터 및 확산필터를 자체 제작하고, 관성력과 브라운 확산

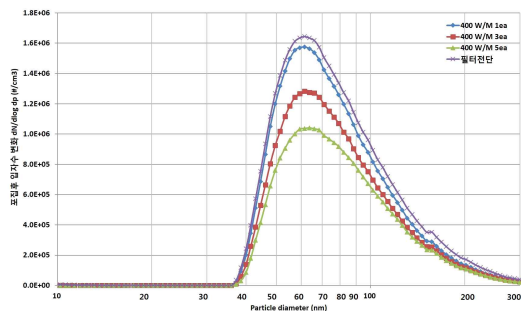


Fig. 11. Change of number particle size distribution after collecting by diffusion filter.

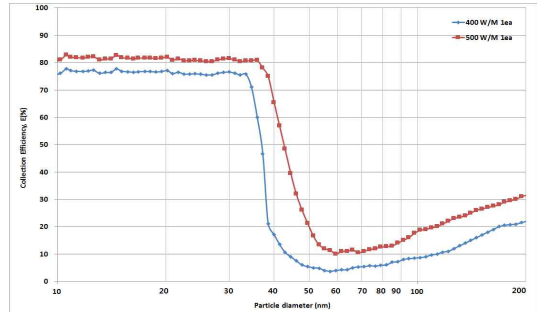


Fig. 10. Collection efficiency of nanoparticles according to the type of Wiremesh.

운동에 따른 나노입자의 포집 특성을 알아보았으며 연구결과는 다음과 같다.

정방형과 원통형으로 제작된 관성필터의 경우, 관성필터 전단에서 측정된 입자수가 후단에서 측정된 입경분포에 비해 입자 개수농도가 상당히 감소하였음을 알 수 있었다. 관성필터의 포집효율은 이론상의 포집효율과 유사한 그래프가 나타났으며, 정방형 필터의 관성필터가 원통형에 비해 Wiremesh의 충전 가능 최대 체적량이 크고 그에 따라 비표면적이 넓어 포집효율이 더 높은 것으로 판단되었다.

Wiremesh의 종류를 달리하여 제작된 확산필터의 경우, 필터 전단에서 측정된 입자수가 필터후단에서 측정된 입경분포에 비해 입자 개수농도가 상당히 감소하였음을 알 수 있었다. 높은 숫자의 Wiremesh 일수록 작은입자의 포집효율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

Wiremesh의 장착수를 달리하여 제작된 확산필터의 경우, 사이즈가 35 nm 이하인 입자의 포집효율이

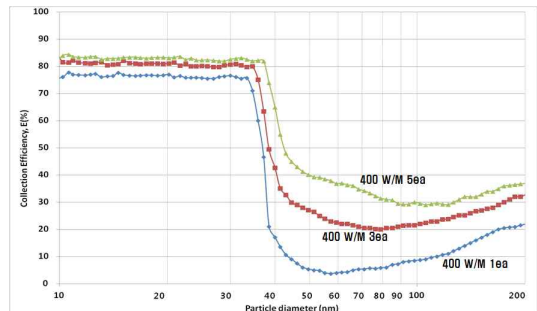


Fig. 12. Collection efficiency of nanoparticles according to the number of Wiremesh sheet.

70 % 이상으로 상당히 제거가 되는 것으로 나타났다. 즉, Wiremesh 장착수가 많을수록 입자의 체류시간이 증가하기 때문에 포집효율이 증가하는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 제작한 관성필터와 확산필터 실험 결과 모두 이론적 제거원리와 유사한 그래프로 나타났다. 따라서 대기 중에 존재하는 100 nm 이하의 입자를 효율적으로 분석하기 위해 100 nm를 초과하는 입자를 관성필터에 의해 제거하고, 브라운 확산 특성을 이용하여 100 nm 이하의 입자를 10 nm 단위로 분극하는 기술개발이 가능할 것으로 판단된다. 특히, Peclet number, Stokes number, 필터의 두께, 여과 속도 등의 적절한 조절로써 분극 입경을 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경정책기반공공기술개발사업 (과제번호 : 2013000160001)의 “대기환경 중 나노입자 측정 및 처리기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

Brochot, C., Mouret, G., Michielsen, N., Chazelet, S. and Thomas, D. (2011). Penetration of nanoparticles in 5nm to 400nm size range through two selected fibrous media, *J. Phys: Conf. Ser.* 304: 012068, doi: 10.1088/1742-6596/304/1/012068.

Furuuchi. M., Eryu. K., Nagura. M., Hata. M., Kato. T., Tajima. N., Sekiguchi. K., Ehara. K., Seto. T. and Otani. Y. (2010). Development and performance evaluation of air sampler with inertial filter for nanoparticle sampling, *aerosol and air quality research*, 10, 185-192.

Otani.Y., Eryu. K., Furuuchi. M., Tajima. N. and Tekasakul. P. (2007). Inertial classification of nanoparticles with fibrous filters, *aerosol and air quality research*, 7(3), 343-352.

Ji, S.M.(2013). Particle loading characteristics of electret air filter for differently charged fine particle, Korea University.

Park, H.S. and Lim, K.S. (2009). Aerosol filtration and electrostatic properties of electrospun nanofiber air filters, *Particle and Aerosol Research*, 5(2), 71-81.

Oberdörster E. Manufactured nanomaterials (Fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass, *Environ Health Persp* 2004, 112, 1058-1062.

Thomas, K. and Sayre, P. : Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, Part I: Evaluating the human health implications of exposure to nanoscale materials. *Toxicological Sciences*, 87(2), 316-321, 2005.

Kwon, S., Kim, Y., Park, D., Hwang, J., Kim, Y. (2009). Size classification of airborne nanoparticles using electrically tunable virtual impactor, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, 26(2), 118-125.