

## Structural analysis and design proposal of fine dust mask with nanofiber filter fabricated using electrospinning

Sang Yun Han<sup>†</sup>

Department of Industrial Design, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

(Received July 29, 2017)

(Revised August 11, 2017)

(Accepted August 18, 2017)

**Abstract** The microstructures of nonwoven fabric with and without nanofibers used as a filter for air purification type mask were investigated using scanning electron microscope. Moreover, we proposed a new mask design which is effective in the improvement of the fine dust blocking property. When comparing to nonwoven fabrics of which an average diameter was 25  $\mu\text{m}$ , the nanofibers formed by the electrospinning process had a tight mesh structure arranged irregularly with a relatively large specific surface area, which could be associated with their much smaller diameter ranging from 25 to 120 nm. Such a prominent structural feature at nanofibers led to mechanical adsorption of fine particles, resulting in enhancement of filtering behavior maintaining high permeability. In addition to the excellent performance of the mask filter, wearing the mask properly is expected to maximize the blocking property of fine dust. To meet such a requirement, a new mask design that can be closely attached to the face in order to effectively block fine dust entering the gap between the face and the mask.

**Key words** Microstructure, Mask, Nonwoven fabric, Nanofiber, Electrospinning, Fine dust

## 전기방사 나노섬유 필터를 활용한 미세먼지 마스크의 구조 분석 및 디자인 제안

한상윤<sup>†</sup>

한서대학교 산업디자인학과, 서산, 31962

(2017년 7월 29일 접수)

(2017년 8월 11일 심사완료)

(2017년 8월 18일 게재확정)

**요약** 본 연구에서는 공기 정화식 마스크의 필터로 사용되는 일반적인 부직포와 전기방사 나노섬유가 코팅된 부직포에 대한 미세 구조를 분석하고 미세먼지 차단 특성을 향상 시킬 수 있는 새로운 마스크 디자인을 제안하였다. 평균적으로 25  $\mu\text{m}$ 의 직경을 갖는 부직포 섬유와 달리 전기방사 방법으로 형성된 나노섬유는 그 직경이 25 nm~120 nm로 매우 작아 비표면적이 크고, 불규칙적으로 배열된 촘촘한 그물방 구조를 갖고 있었다. 일반적인 부직포 필터는 부직포 섬유의 정전기력에 의해 미세먼지를 흡착할 수 있었지만, 수십  $\mu\text{m}$  크기 이상의 기공이 부직포 전반에 걸쳐 존재하기 때문에, 수  $\mu\text{m}$  크기를 갖는 미세먼지를 여과하는데 한계가 있었다. 반면 나노섬유가 코팅된 부직포 필터의 경우, 나노섬유의 구조적 특성으로 인해 투과성과 통기성을 유지하면서 수  $\mu\text{m}$  크기의 미세먼지를 기계적으로 흡착하여 효과적으로 여과할 수 있었다. 우수한 마스크 필터의 성능과 더불어 올바른 마스크 착용이 미세먼지 차단 특성을 극대화 할 수 있는데, 이를 위해 안면부와 마스크 사이의 틈으로 미세먼지의 유입을 막을 수 있도록 안면부에 밀착이 잘 될 수 있는 새로운 마스크 디자인을 제안하였다.

### 1. 서론

전 세계적으로 대기 환경오염 문제로 인한 미세먼지 발생 빈도와 정도가 지속적으로 증가함으로 인해 이를 효과적으로 여과할 수 있는 호흡보호구(마스크)에 대한

필요성과 관심이 급증하고 있다. 이에 따라, 기존의 기본적인 마스크의 형태를 탈피하여 미세먼지의 정화 기능이 강화된 다양한 재질 및 형태로 성능을 향상 시키는 연구가 활발해지고 있으며, 이미 국내외 관련 업체들이 정화 기능, 마스크 구조 스타일, 피부 밀착력, 얼굴이 보이는 마스크 등 차별화된 형태의 기능성 제품들을 개발하여 시장에 출시하고 있다.

미세먼지는 100  $\mu\text{m}$  이하의 직경을 갖는 고체 또는 액

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: pluseo@naver.com

Table 1  
Kinds of air purification type mask

Kinds	Purpose of use	Division	Material	Permission
Health mask (KF80)	Prevent the inflow of yellow dust and fine dust into human body and protect respiratory system	Quasi-drug	Non-woven	○
Health mask (KF94)	Protect respiratory tract from infectious disease infections	Quasi-drug	Non-woven	○
Industrial dust mask	Protect the respiratory system from fine dusts at industrial sites	industrial supplies	Non-woven	×

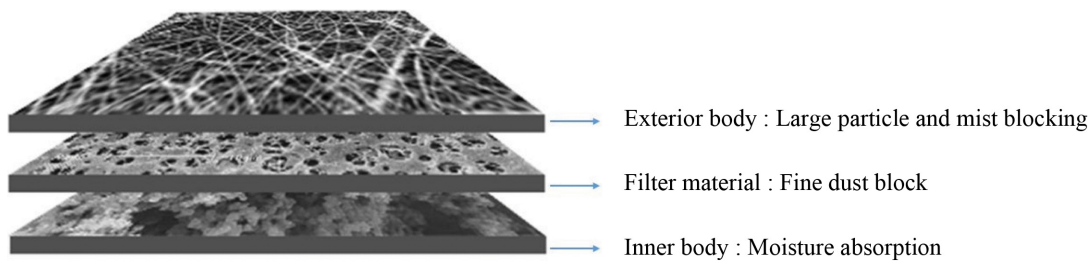


Fig. 1. Structure of air purification type mask.

체 성상의 물질들로 구성된 부유 입자성 분진이다. 미세 먼지는 발생 기원에 따라 다양한 물리적 화학적 특성을 지니게 되며, 날씨, 지역적 특징, 시간의 변화에 따라 차이를 보이게 된다. 예를 들어, 자동차 배기가스, 발전소, 산불, 산업 공정을 포함한 다양한 연소 과정을 통해 발생한 미세먼지는 지름이  $2.5 \mu\text{m}$  이하이며, 질산, 황산, 염화나트륨, 유기 탄소, 미량 금속 등을 포함하고 있다 [1]. 특히, 지름이  $10 \mu\text{m}$  이하인 미세먼지는 폐 침투를 통해 심각한 건강 영향을 일으킬 수 있기 때문에, 환경부에서는 전국의 미세먼지 및 오존을 대기오염측정망에서 측정하여 5단계의 예보 등급을 제시하고 취약계층(노약자, 어린이, 호흡기질환자, 심폐질환자 등)의 행동요령 및 외출시에는 마스크(보건용 마스크 인증상품)를 착용을 권고하고 있다 [2, 3].

식품의약품안전처에서 정한 호흡 보호구의 공기 정화식 마스크는 Table 1과 같이 다양한 종류가 있으며, 대부분이 섬유조직이 무작위로 얽혀있는 부직포를 필터로 사용하고 있다. 이러한 필터는 부착(Interception), 관성충돌(Inertial impaction), 중력침강(Sedimentation), 확산(Diffusion), 정전기(Electrostatic attraction)의 원리 미세먼지를 여과할 수 있다 [4]. 또한, Fig. 1의 공기 정화식 마스크 구조 모식도와 같이 마스크 필터는 입자가 큰 분진 및 미스트를 차단시키는 외면체와 마스크 부착 부위에 생성되는 수분을 흡수할 수 있는 내면체 사이에 위치하여 미세먼지 투과를 효과적으로 방지시키는 역할을 하게 된다 [5]. 식품의약품안전처에서는 보건용 마스크(KF80)의 미세입자 차단기준은 입자크기 평균  $0.6 \mu\text{m}$ 의 입자를 80% 이상 차단하도록 기준을 정하고 있으며, 보건용 마

스크(KF94)는 입자크기 평균  $0.4 \mu\text{m}$ 의 입자를 94% 이상 또는 99% 이상 차단하도록 기준을 정하고 있다 [6].

최근 나노섬유 기술이 급속도로 발전함에 따라 이를 이용한 다양한 제품들이 개발되고 있다. 특히, 전기방사 나노섬유는 수백 nm 이하의 크기를 갖는 초극세 섬유로서 섬유의 생성과 동시에 3차원 네트워크로 융착되어 적층된 형태로 제조 되는 특징이 있다. 이로 인해 전기방사 나노섬유는 기존 섬유에 비해 부피 대비 표면적 비가 매우 높고, 높은 기공도를 지니고 있어 내부의 땀 등을 배출할 수 있는 호흡성과 방풍성을 가짐과 동시에 외부에서 입자의 유입을 효과적으로 차단할 수 있는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 미세먼지 및 황사와 같은 대기오염의 잦은 발생으로 인해 사용 횟수가 늘어나는 공기 정화식 마스크 제품들에 널리 사용되고 있는 부직포 필터와 전기방사 나노섬유를 적용한 필터의 구조적 특성 및 여과 효율 성능을 비교 분석하고, 이를 통하여 효과적인 공기 정화식 마스크 개발을 위한 디자인을 제안하고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 전기방사 방법을 이용하여 부직포에 나노섬유를 코팅하였다. Fig. 2는 이에 대한 전기방사 나노섬유 형성 방법을 보여주는 모식도이다. 나노섬유 원료가 되는 고분자 용액은 Syringe에 의해 전기방사 방향으로 수직으로 배치된 모세관 노즐에 공급 된다. 이 때 고분자 용액은 중력과 표면장력의 균형에 의해 Taylor

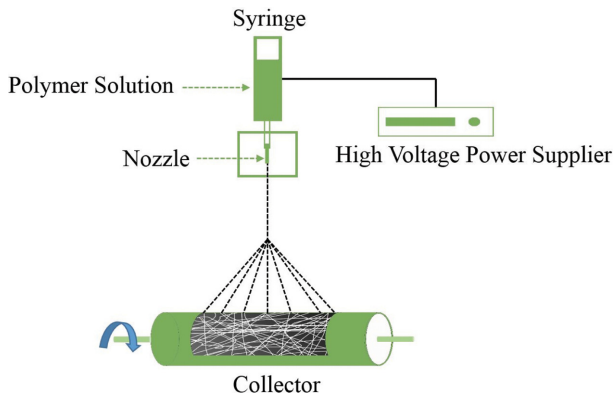


Fig. 2. Electrospinning process for the coating of nanofiber on nonwoven fabric.

cone 형태로 노즐 끝에 매달려 있게 된다. High Voltage Power Supplier에서 표면장력을 극복할 만큼 충분히 큰 전기장을 인가할 경우, Taylor cone 끝에서 하전된 고분자 용액의 jet가 방출하게 된다. 특히, 고분자 용액의 점도가 낮을 경우, 표면장력 때문에 미세방울로 분괴되어 나노섬유가 형성되는 않는 현상을 방지하기 위해 본 연구에서는 충분히 높은 점도를 갖는 고분자 용액을 나노섬유 원료로 사용하였다. 방출된 하전된 고분자 용액 jet가 집전판(Collector)에 도달되는 과정 중에 고분자 용액 표면에 하전된 전류의 반발작용으로 더욱 작은 여러 나노섬유로 분열되는 현상이 발생하여 부직포에는 직경이 수십 나노미터인 나노섬유가 균일하게 형성되었다[7, 8]. 주사전자현미경을 이용하여 부직포 필터와 나노섬유 필터의 미세 구조를 관찰하였으며, 부도체인 특성을 갖고 있는 부직포 및 나노섬유 표면에 전하가 축적되어 발생하는 주사전자현미경 공간분해능 저하 현상을 방지하기 위해서 수 나노미터 두께의 백금을 DC sputtering 방법으로 시편 표면에 코팅한 후 주사전자현미경 분석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 전기방사 나노섬유 코팅 전후의 부직포에 대한 주사전자현미경 결과이다. 나노섬유가 형성되기 전 부직포는 비교적 균일한 형태와 크기를 갖는 섬유로 구성된 것을 확인할 수 있다. 부직포의 섬유 직경은 평균적으로 약  $25\ \mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 이러한 섬유들이 불규칙적으로 배열되어 네트워크 형태로 부직포를 구성함을 알 수 있다. 부직포 섬유의 배열이 불규칙하기 때문에 섬유와 섬유 사이의 빈 공간인 기공 크기 또한 불균일하며, 평균적으로 약  $50\ \mu\text{m}$  이상의 크기를 갖는 기공들이 부직포에 전반에 걸쳐 형성된 것으로 판단된다. 따라서 수  $\mu\text{m}$  크기를 갖는 입자들이 이러한 기공을 따라 침투가 원활히 일어날 것으로 예측되기 때문에, 부직포를 이용한 필터의 경우 인체에 유해한  $10\ \mu\text{m}$  이하의 미세먼지를 여과하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 반면 전기방사 나노섬유가 형성된 부직포 시편의 경우,  $25\ \text{nm}$ 에서  $120\ \text{nm}$  직경을 갖는 매우 미세한 전기방사 나노섬유가 다량 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 더욱이, 이러한 나노섬유가 부직포를 구성하는 섬유와 균일하게 섞여 강하게 결합된 구조를 가지고 있었다. 특히나 전기방사 나노섬유는 그 크기가 매우 작고 촘촘하게 배열되어 마치 그물형태로 부직포 내에 형성된 것을 확연히 관찰할 수 있다. 따라서 나노섬유가 적층된 부직포의 경우, 기공 크기가 수  $\text{nm}$ 에서 수십  $\text{nm}$ 로 매우 작기 때문에 나노섬유가 없는 일반적인 부직포 보다 미세먼지 차단 특성이 클 것으로 예측된다.

앞서 설명한 바와 같이 일반적인 부직포 내에 존재하는 기공은 수십  $\mu\text{m}$  크기를 가지고 있기 때문에 미세먼지가 섬유 표면에 직접 닿지 않을 경우 그대로 통과하게 된다. 반면 부직포 섬유 표면에 도달한 미세먼지는 정전기력에 의해 부직포 섬유 표면에 포획되어 흡착된다(Fig. 4(a)). 그러나, 이러한 정전기력에 의한 미세먼지 여과

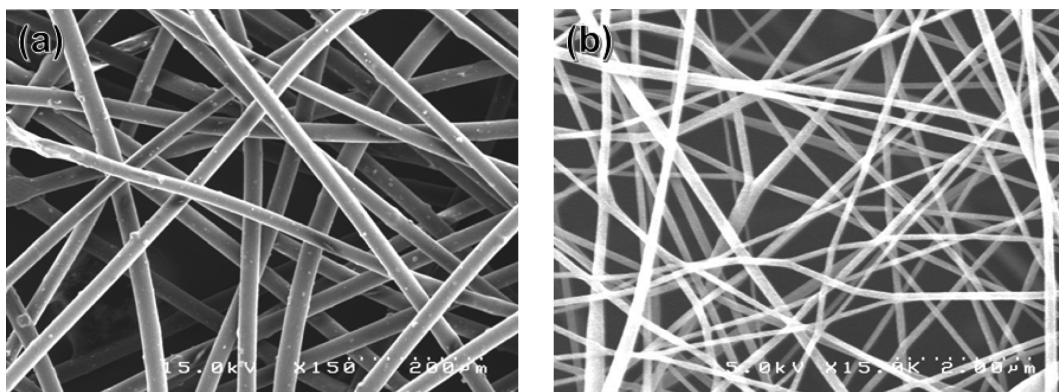


Fig. 3. Scanning electron microscope (SEM) images taken from nonwoven fabrics (a) before and (b) after coating nanofibers formed using electrospinning process.

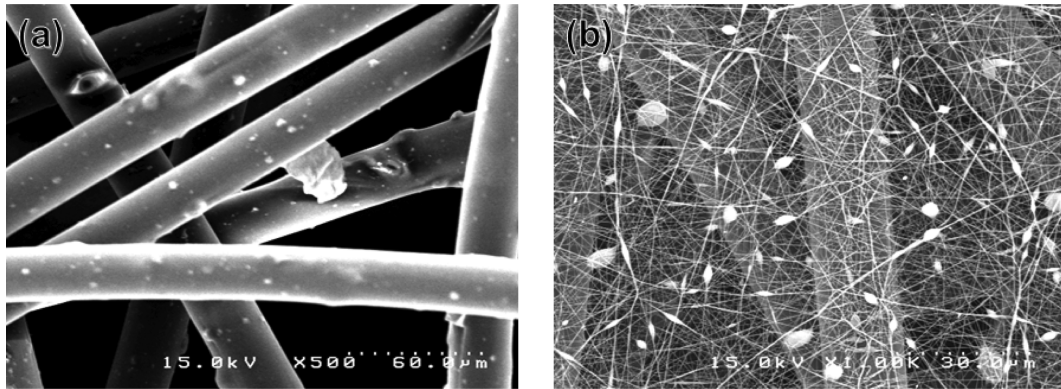


Fig. 4. SEM images obtained from (a) nonwoven fabrics and (b) nanofibers where fine dusts absorbed.

방법은 사용 시간이 경과함에 따라 정전기력이 감소하여 포집 효율이 급속히 저하된다는 단점을 가지고 있다[9]. 전기방사 나노섬유가 코팅된 부직포의 경우, 나노 섬유의 직경이 부직포 섬유보다 매우 작아 비표면적이 크고 매우 촘촘한 그물망 구조를 갖기 때문에 나노 섬유 표면의 정전기력 보다는 기계적 구조로 미세먼지를 여과 한다(Fig. 4(b)). 즉, 나노섬유 필터는 사용 시간에 상관없이 미세먼지 여과 효율이 유지되는 장점을 가질 것으로 예측된다[10]. 따라서 나노섬유 필터를 정화식 마스크에 활용할 경우 기존 부직포 필터 마스크 보다 미세먼지 차단율이 상대적으로 높고, 높은 투과성과 통기성이 부여 될 수 있어 그 활용도가 높을 것으로 판단된다.

필터의 여과 기능이 좋다는 점만으로 미세먼지를 비롯한 인체에 유해한 물질을 완벽히 차단할 수 있는 것은 아니다. 마스크 필터의 성능은 최우선적으로 고려되어야 사항이지만, 이를 올바르게 착용하지 못하면 미세먼지가 인체에 유입되는 것을 막을 수 없다. 마스크 착용 시 가장 중요한 점은 안면부와 마스크 사이의 틈으로 미세먼

지의 유입을 차단할 수 있도록 안면부에 밀착이 잘 되어야 한다. 즉, 마스크와 안면부 사이를 통해서 공기가 새지 않도록 마스크의 크기 및 형태 등을 고려하여 안면부 밀착에 문제가 없는 마스크를 선정하는 것이 중요하다 [5]. 따라서 본 연구에서는 마스크 착용 시 밀착성을 향상 시킬 수 있도록 Fig. 5와 같이 마스크를 디자인하였다. 특히 본 연구에서 제안한 디자인은 마스크와 일반적인 마스크와 달리 코 부위의 틈을 막을 수 있는 유연성 있는 고정성을 고려하였으며, 턱 옆, 아래 부위의 밀착성 높임과 동시에 마스크 착용 시 입 옆 부위가 뜨는 점을 보완하였다.

### 3. 결 론

전기방사 방법으로 부직포에 나노섬유를 코팅하여 마스크용 필터를 제작하고 일반적인 부직포 마스크 필터와 구조적 형태적 차이를 주사전자현미경 분석을 통하여 비교 평가하였다. 전기방사에 의해 형성된 나노섬유는 수nm~수천nm 크기의 직경을 가지며, 무작위로 배열되어 있었다. 또한, 전기방사 나노섬유는 부직포 섬유와 강하게 결합하여 부피 대비 표면적이 매우 큰 촘촘한 그물망 형태로 유지하고 있었다. 반면 일반적인 부직포는 약  $20\mu\text{m}$  평균 직경을 갖는 균일한 섬유로 구성되어 있으며, 평균적으로  $50\mu\text{m}$  이상의 크기를 갖는 기공이 부직포 전반에 걸쳐 존재하였다. 부직포 섬유와 나노섬유의 구조적 특성 차이로 인해 부직포는 섬유 표면의 정전기력에 의해 제한적으로 미세먼지를 차단하고, 나노섬유는 기계적 원리로 미세먼지를 흡착하여 부직포 보다 더욱더 효과적으로 미세먼지를 여과함을 알 수 있었다. 더불어 미세먼지 차단 특성을 극대화하기 위해서는 안면부와 마스크 사이의 틈으로 유입되는 미세먼지를 차단하는 것이 필요하며, 이를 위해 기존의 마스크와 비교하여 안면부에 밀착 특성이 우수한 새로운 구조의 마스크를 디자인하였다.

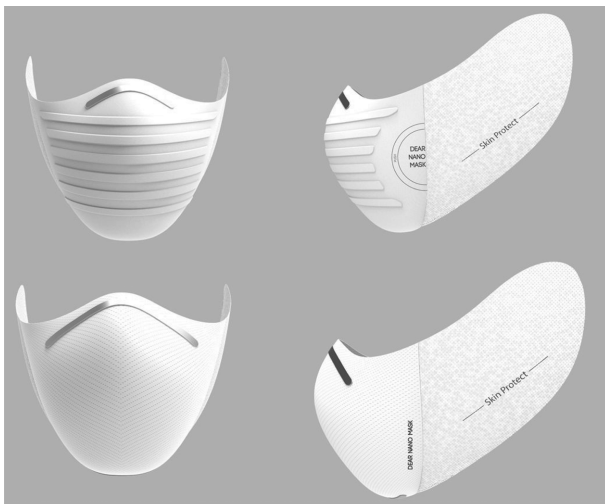


Fig. 5. The proposed mask design.

## References

- [ 1 ] R. Maus and H. Umhauer, "Collection efficiencies of coarse and fine dust filter media for airborne biological particles", *J. Aerosol Sci.* 28 (1997) 401.
- [ 2 ] Ministry of Environment, "Outline of pilot project of fine dust forecasting system and high density treatment behavior" (2013).
- [ 3 ] J.Y. Jang and S.W. Kim, "Evaluation of filtration performance efficiency of commercial cloth masks", *J. Environ. Health Sci.* 41 (2015) 203.
- [ 4 ] W.G. Choi, B.Y. Min, G.N. Kim and G.N. Lee, "HEPA filter low level of waste and reduction technology of waste", KAERI (2010).
- [ 5 ] S.G. Kim, "Research institute for healthcare policy korean medical association", *Medical Policy Forum* 12 (2014) 37.
- [ 6 ] Food and Drug Administration : [www.mfds.go.kr](http://www.mfds.go.kr).
- [ 7 ] D.H. Reneker and A.L. Yarin, "Electrospinning jets and polymer nanofibers", *Polymer* 49 (2008) 2387.
- [ 8 ] Z.M. Huang, Y.Z. Zhang, M. Kotaki and S. Ramakrishna, "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites", *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 2223.
- [ 9 ] D.H. Han, "Domestic marketed dust mask is suitable for fine dust and dust", Korea National Institute of Respiratory Sciences Safety & Health Awareness Day (2014).
- [10] K.H. Yoon, B.S. Hsiao and B. Chu, "Functional nanofibers for environmental applications", *J. Mater. Chem.* 18 (2008) 5326.