

섬유소재의 미세먼지 오염도 평가 방법 개발에 관한 연구

황소영*, 권진경**, 김영실**, 최은진**, 김다진**, 김민**, 육세진*,#

*한양대학교 기계공학부, **KOTITI 시험연구원

Method to Evaluate Fabric Contamination Due to Fine Dust

So-Young Hwang*, Jin-Kyung Kwon**, Young-Sil Kim**, Eun-Jin Choi**, Da-Jin Kim**, Min Kim**,
Se-Jin Yook*#

*School of Mechanical Engineering, Hanyang UNIV., **KOTITI Testing & Research Institute

(Received 16 September 2021; received in revised form 28 September 2021; accepted 12 October 2021)

ABSTRACT

Recently, functional clothes that can reduce deposition and/or penetration of fine dust have been developed. However, there are no methods to quantitatively evaluate the performance of these clothes. In this study, we developed a method to contaminate a fabric using fine dust and established an approach to quantitatively assess the degree of particle contamination on the fabric surface. Silicate powder was chosen as the particle to simulate fine dust because silicate particles are fluorescent under UV light; therefore, they can be distinguished from any color of non-fluorescent fabric surface. A camera with a high-resolution lens system was used to scan the surface of the contaminated fabric surface, and the degree of particle contamination of the fabric surface was analyzed in terms of the pixels corresponding to the area of the fabric surface contaminated by silicate particles. Finished or unfinished nylon fabrics as well as cotton fabrics were contaminated with silicate particles, and their surfaces were scanned using the established camera. The proposed assessment method was found to be useful for quantitatively comparing the degree of particle contamination of the fabrics.

Keywords : Fine Dust(미세먼지), Aerosol(에어로졸), Fabric(섬유소재), Contamination(오염)

1. 서 론

많은 국가에서 대기 중 미세먼지 농도가 세계보건기구(WHO)의 권고 수준보다 높아서 미세먼지는 전세계적인 문제가 되었으며, WHO는 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하였다^[1]. 미세먼지는 대기 중에 떠다니는 입자상 물질로 주로 화석 연료를 태

우거나 공장, 자동차 등의 배출가스에서 다량 발생된다. 미세먼지의 성분은 지역, 계절, 기상조건 등에 따라 다르지만 일반적으로 대기 중 오염물질이 반응하여 형성된 유기화합물로 이루어져 있어 건강에 해로운 성분을 포함하고 있다^[2]. 미세먼지는 다양한 질환을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있으며^[3], 폐 기능의 저하와 심장 질환을 발생시키기도 한다^[4]. 사람의 신체 중 외부 환경과 가장 접촉이 많은 부위는 피부인데, 미세먼지가 피부 세포를 파괴하기도 하고 피부 질병을 유발하기도 하

Corresponding Author : ysjnuri@hanyang.ac.kr

Tel: +82-2-2220-0422, Fax: +82-2-2220-2299

는 것으로 알려져 있다^{5,6)}. 한편, 현대인은 실내에서 머무는 시간이 많은데 실내 공간에 존재하는 미세먼지 또한 각종 호흡기 질환과 피부 질환을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 실내 미세먼지의 주요 원인으로는 인간의 활동으로 인한 발생, 사무용품이나 건축자재로부터의 방출, 외부로부터의 공기 유입 등이 있다. 인간의 활동에 의한 미세먼지 발생의 원인 중 하나는 옷과 신발 등에 묻어있는 미세먼지가 재비산되는 것이다⁸⁾.

실외 및 실내 공기 중에 존재하는 미세먼지가 사람의 피부에 닿는 것을 방지하는 데에는 사람이 입고 있는 의류가 크게 도움 되므로, 의류 표면에 미세먼지가 쉽게 부착되거나 침투하지 않을수록 바람직하다고 할 수 있다. 또한 사람이 실내에 들어가기 전에 의류에 묻은 미세먼지를 쉽게 털어낼 수 있으면 실내에서 미세먼지 발생을 줄이기 위한 방안이 될 것이다. 이러한 관점에서, 미세먼지가 의류 표면에 부착되거나 의류 안으로 침투하는 것을 저감하고 부착된 미세먼지를 쉽게 떨어내기에 용이한 기능성 의류들이 속속 개발되었다⁹⁻¹¹⁾. 미세먼지가 통과하지 못할 정도로 기공이 작은 멤브레인이나 라미네이팅한 원단 및 정전기 발생을 방지하는 성분을 함유한 원단에 대한 연구도 이루어졌다¹²⁾. 부착된 미세먼지를 효과적으로 떨어내기 위해 코팅막 처리를 한 원단에 대한 연구도 이루어졌다¹³⁾.

이처럼 국내·외에서 미세먼지의 부착과 침투를 저감하기 위한 기능성 섬유 소재와 이를 활용한 의류 제품이 활발히 개발되고 있으나, 정작 섬유 소재의 미세먼지 차단 성능을 정량적으로 평가하는 표준화된 방법은 없는 실정이다. 미세먼지는 공기 흐름을 따라 이동하여 사람이 입고 있는 의류에 부착 또는 침투할 수 있으므로, 일반적인 생활환경에서의 미세먼지 농도와 바람 속도와 같은 주요 인자들의 범위를 고려하여 기능성 섬유 소재를 미세먼지에 오염시키는 방법의 개발이 필요하다. 이에 더하여 섬유 소재가 미세먼지에 오염된 정도를 정량적으로 비교할 수 있는 측정 기법 또한 개발되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기능성 섬유 소재의 미세먼지 차단 성능을 정량적으로 비교 평가할 수 있는 방법을 개발하였다.

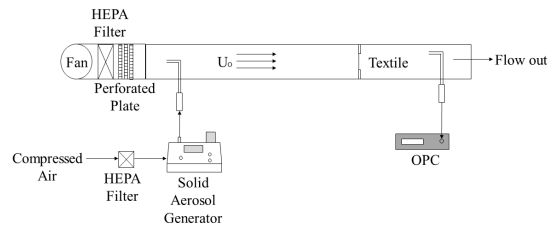


Fig. 1 Schematic of experimental setup

2. 실험 방법

Fig. 1은 섬유 원단 표면에 미세먼지를 부착시키기 위한 풍동과 실험 장치의 개략도를 보여주는 것이다. Fan과 High Efficiency Particulate Air (HEPA) 필터를 사용하여 입자가 없는 깨끗한 공기를 풍동 안으로 유입시켰다. 풍동은 아크릴을 사용하여 제작되었다. 풍동의 길이는 1.5 m이며 단면적은 0.1 m × 0.1 m이었다. 파우더 형태의 silicate 입자를 Solid Aerosol Generator (SAG 410, TOPAS, Dresen, Saxony, Germany)를 사용하여 공기 중에 비산시켜 에어로졸을 발생하였다. 이렇게 발생된 silicate 에어로졸은 풍동 내부로 유입되었는데, 이때 풍동 내 바람의 진행 방향과 반대 방향으로 분사하여 silicate 입자가 풍동 단면에 걸쳐서 고르게 퍼지도록 하였다. 풍동의 하류에서 아크릴로 제작된 틀을 사용하여 섬유 원단이 평평하게 퍼진 채로 유동에 수직하게 풍동 단면의 한가운데에 고정되도록 하였다. 섬유 원단의 종류로는 면 100%로 이루어진 원단과 나일론 100%로 이루어진 원단을 사용하였다. 나일론 원단으로는 미세먼지 차단 성능이 있는 원단과 미세먼지 차단 성능이 없는 원단의 2가지를 고려하였다. 실험에 사용된 모든 원단의 단면적은 0.05 m × 0.05 m이었다. 섬유 원단보다 상류의 위치에서 Optical Particle Counter (OPC; Model 1.109, GRIMM, Ainring, Bayern, Germany)를 사용하여 입자의 농도를 측정하였다. 풍동 내 입자 농도 조건을 국내 미세먼지 농도 ‘매우 나쁨’ 수준인 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정하였다. 풍동 내 바람의 속도는 전세계 평균 풍속인 3.3 m/s로 설정하였다¹⁴⁾. 섬유 원단이 오염되는 정도를 다르게 하기 위해서 섬유 원단을

silicate 에어로졸에 노출시키는 시간을 1, 3, 6, 9, 12시간의 총 5단계로 설정하였다. 또한, 원단 별로 오염도 차이를 확인하기 위해 동일한 조건에서 3 시간동안 오염을 진행하였다.

Fig. 2는 섬유 원단이 silicate 입자에 오염된 정도를 정량적으로 비교하기 위해 사용된 측정 장치의 개략도를 보여주는 것이다. 외부로부터의 빛을 차단하고 내부 조명으로 부터의 빛이 반사되는 것을 최소화할 수 있도록 제작된 light viewing box를 사용하였다. 섬유 원단 표면에 부착된 silicate 입자를 관찰할 수 있도록 분해능이 10 μm이고 해상도가 5472 pixel × 3648 pixel인 카메라(acA5472-5gc, Basler, Ahrensburg, Germany)와 렌즈(V5028-MPY, Computar, North Carolina, U.S.A.)를 사용하였다. 조명장치로는 450 nm 파장의 UV 광원을 설치하여 silicate 입자의 흡·발광 파장에 대한 광량의 조절이 가능하도록 하였다. 이미지 촬영에는 Basler 社의 Pylon Viewer 프로그램을 사용하였고, image quality control 분석을 통해 촬영된 사진이 이미지 프로세싱에 더욱 적합하도록 화질을 조정하였다. Silicate 입자로 오염된 섬유 원단에서 오염 부위의 이미지 처리에는 NI 社의 영상 분석 프로그램인 Image Assistant를 사용하였다. UV 조명하에서 형광 특성을 나타내는 silicate 입자를 섬유 원단과 구분하기 위하여 color threshold 분석을 통해 silicate 입자가 부착되어 있는 섬유 원단 부분은 검은색 픽셀로 변환하였고, 입자가 부착되어 있지 않은 섬유 원단 부분은 흰색 픽셀로 변환하였다. 이후 아래의 식을 이용하여 섬유 원단이 silicate 입자에 의해 오염된 정도를 나타내었다.

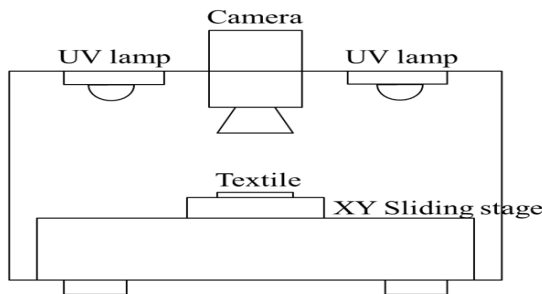


Fig. 2 Schematic of fabric surface imaging system

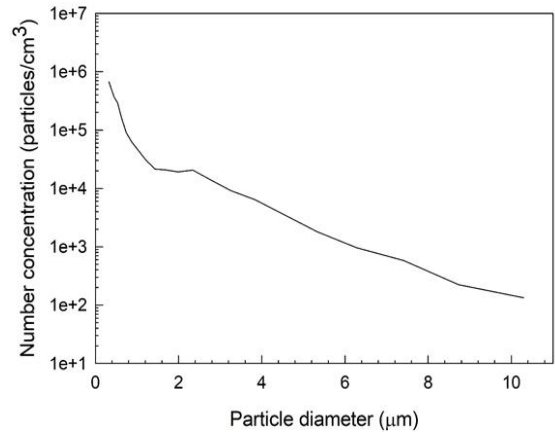


Fig. 3 Size distribution of silicate aerosol particles

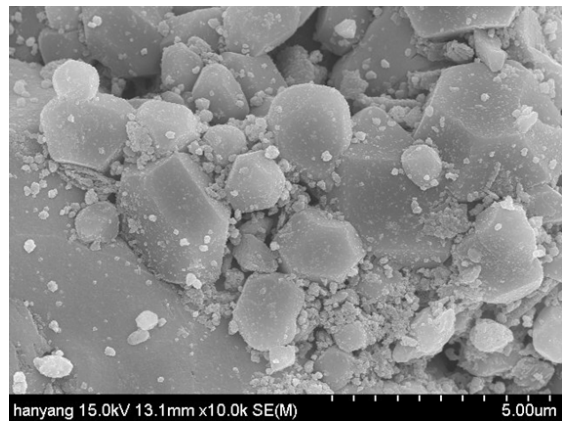


Fig. 4 SEM image of silicate particles

$$Fabric\ contamination(\%) = \frac{N_{silicate}}{N_{total}} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, $N_{silicate}$ 는 silicate 입자에 의해 오염된 섬유 원단 부분에 해당하는 픽셀 수이고, N_{total} 은 촬영된 섬유 원단의 전체 픽셀 수이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 OPC로 측정된 silicate 입자 에어로졸의 크기 분포를 보여주는 것이다. 한편, Fig. 4는 에어로졸 상태의 silicate 입자를 Mini Particle

Sampler (MPS, Domaine Technologique, France)를 사용하여 TEM grid에 포집한 뒤 Scanning Electron Microscope (SEM, S4800, HITACHI, Japan)를 사용하여 silicate 입자의 형상을 촬영한 이미지를 보여주는 것이다. 대부분의 silicate 입자가 수십 μm 보다 작고 특히 10 μm 보다 작은 입자(PM₁₀)의 수가 많아서 미세먼지를 모사하는 데 적합한 크기 분포를 가진 것으로 확인되었다. 또한, silicate 입자는 형광 특성이 있어 다양한 색상(비형광)의 원단에서 디지털 이미지 분석에 적합하기 때문에, 섬유 원단의 미세먼지 오염도를 비교 평가하기 위한 실험에 사용할 미세먼지 모사체로 silicate 입자를 선정하였다.

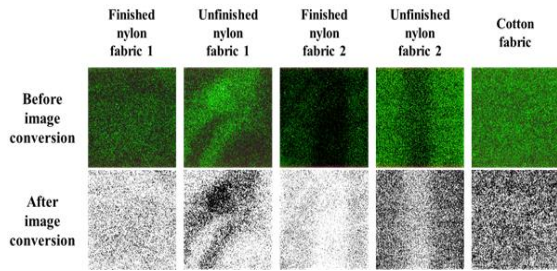


Fig. 5 Scanned images of fabric surfaces before and after image processing

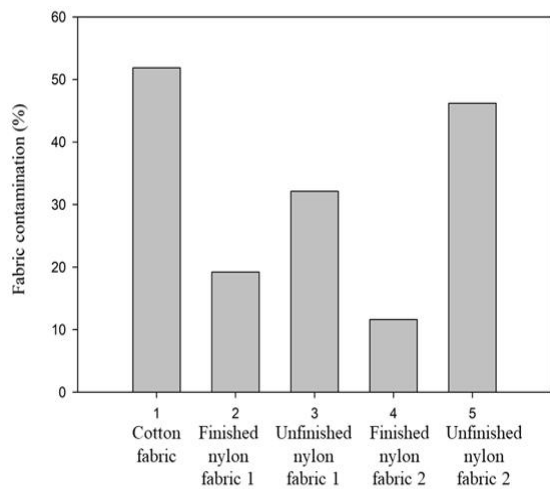


Fig. 6 Comparison of the degree of particle contamination of fabric surfaces

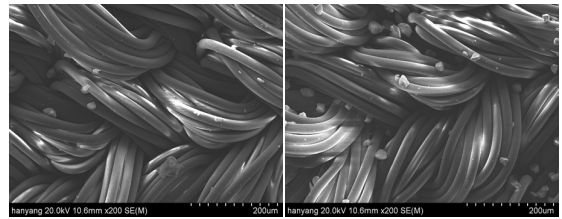


Fig. 7 SEM images of nylon fabrics contaminated by silicate particles (left: finished nylon, right: unfinished nylon)

Fig. 5는 면 원단과 나일론 원단에 대해 silicate 입자를 사용하여 동일한 실험조건(입자 농도, 풍속, 오염 시간)에서 오염시킨 뒤 이미지 촬영 분석 기법을 사용하여 얻은 결과를 보여주는 것이다. 나일론의 경우에는, 서로 다른 제조사의 2가지 원단에 대해 미세먼지 차단성능 가공처리 여부에 따라 미세먼지 차단성능이 있는 원단과 미세먼지 차단성능이 없는 원단을 고려하였다. 따라서 총 5가지의 서로 다른 원단에 대한 오염 실험을 진행하였다. Fig. 5에 보이는 각각의 흑백 변환 이미지로부터 픽셀 수를 측정 후 Eq. (1)을 사용하여 구한 오염도를 Fig. 6에 나타내었다. 고려된 5가지의 원단 중에서 면 원단이 가장 많이 오염된 것으로 나타났다. 각 제조사별 나일론 원단의 경우에는, 2곳의 제조사 원단 모두 미세먼지 차단성능이 있는 원단이 미세먼지 차단성능이 없는 원단에 비해 오염도가 더 낮은 것으로 확인되었다. 미세먼지 차단성능이 있는 나일론 원단끼리 비교하면, 제조사 2의 나일론 원단이 제조사 1의 나일론 원단보다 더 적게 오염된 것으로 나타났다. 미세먼지 차단성능이 없는 나일론 원단끼리 비교하면, 제조사 2의 나일론 원단이 제조사 1의 나일론 원단보다 더 많이 오염된 것으로 나타났다.

한편, Fig. 7은 제조사 2의 나일론 원단에 대해 미세먼지 차단 성능 유무에 따라 silicate 입자에 의해 오염된 원단 표면을 비교하여 보여주는 SEM 이미지이다. 미세먼지 차단 성능이 있는 나일론 원단(왼쪽 사진)의 경우에 있어서 미세먼지 차단 성능이 없는 나일론 원단(오른쪽 사진)에 비해 같은 오염 조건에서 표면에 부착된 입자의 개수가 더 적은 것을 확인할 수 있다. 이 결과는

Fig. 5 및 Fig. 6의 이미지 촬영 분석 기법에 의한 결과와 정성적으로 경향성이 일치하므로, 본 연구에서 정립한 섬유 원단 오염도 비교 기법을 활용하면 섬유 원단별로 미세먼지에 의한 오염도를 비교하는 것이 가능함을 뒷받침해 준다.

Fig. 8은 미세먼지 농도와 풍속은 동일하게 유지한 채 먼 원단을 오염시키는 시간에 따른 오염도를 측정된 결과를 보여준다. 오염 시간이 증가할수록 silicate 입자가 더 많이 부착되면서 오염도가 증가하는 경향성이 나타났다. Fig. 9에서와 같이, 오염 시간이 6시간 이하인 경우에는 먼 원단의 오염도가 대략적으로 오염 시간에 비례하여 증가하였으나, 오염 시간이 6시간보다 더 길어지면 오염도가 100%에 도달하여 더 이상 오염 시간에 따른 먼 원단 오염도의 차이를 구분할 수 없는 결과가 나타났다. 이로부터, 특정한 입자 농도와 풍속 조건에 대하여 섬유 원단을 오염시키는 시간을 적절하게 설정해야 함을 확인하였다.

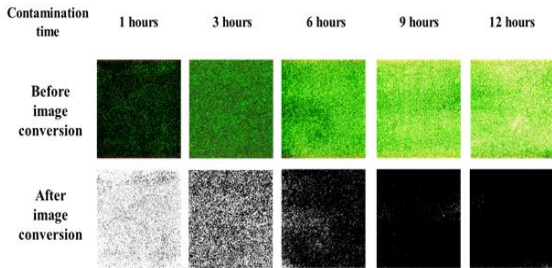


Fig. 8 Scanned images of cotton fabric surfaces according to exposure time

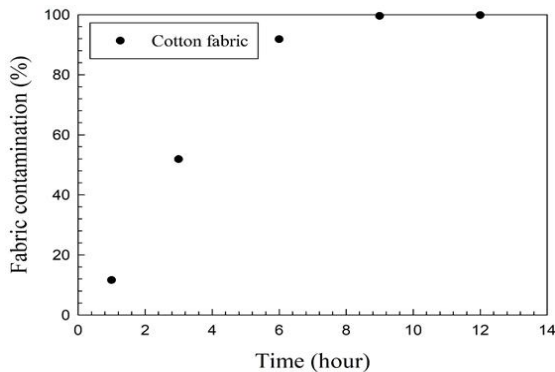


Fig. 9 Fabric contamination according to exposure time

4. 결 론

본 연구에서는 의류의 미세먼지 차단 성능을 비교 평가하기 위한 의류 오염 방법 및 이미지 촬영 분석 기법을 개발하였다. 대부분의 원단에 대하여 원단 색의 영향을 배제하기 위하여 형광 발현을 하는 silicate 입자를 미세먼지 모사체로 선정하였다. 실제 환경과 유사한 환경을 구현하기 위한 실험용 풍동을 제작하였고, 일정한 미세먼지 농도와 풍속 조건에서 오염 시간에 따라 섬유 원단을 오염시키는 실험을 진행하였다. 본 연구에서 정립된 미세먼지 오염도 평가 기법을 활용하여 섬유 원단의 종류에 따라 미세먼지에 의한 오염도를 비교하는 것과 또한 섬유 원단의 미세먼지 차단 성능 처리 유무에 따른 오염도의 차이를 분별할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구의 미세먼지 오염도 평가 기법은 기능성 섬유 소재의 미세먼지 차단 성능을 정량적으로 비교 평가하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

“이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20011726).”

REFERENCES

- Guarnieri, M., Balmes, J. R., “Outdoor air pollution and asthma”, *Lancet*, Vol. 383, pp. 1581-1592, 2014.
- Stanek, L. W., Sacks, J. D., Dutton, S. J., Dubois, J. B., “Attributing health effects to apportioned components and sources of particulate matter: An evaluation of collective results”, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, pp. 5655-5663, 2011.
- Zhao, J., Gao, Z., Tian, Z., Xie, Y., Xin, F., Jiang, R., Kan, H., Song, W., “The biological effects of individual-level PM_{2.5} exposure on systemic immunity and inflammatory response in

- traffic policemen”, *Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 70, pp. 426-431, 2013.
4. Kim, K. E., Cho, D., Park, H. J., “Air pollution and skin diseases: adverse effects of airborne particulate matter on various skin diseases”, *Life Sciences*, Vol. 152, pp. 126-134, 2016.
 5. Kappos, A. D., Bruckmann, P., Eikmann, T., Englert, N., Heinrich, U., Höppe, P., Koch, E., Krause, G. H. M., Kreyling, W. G., Rauchfuss, K., Rombout, P., Schulz-Klemp, V., Thiel, W. R., 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.
 6. Piao, M. J., Ahn, M. J., Kang, K. A., Ryu, Y. S., Hyun, Y. J., Shilnikova, K., Zhen, A. K., Jeong, J. W., Choi, Y. H., Kang, H. K., Koh, Y. S., Hyun, J. W., “Particulate matter 2.5 damages skin cells by inducing oxidative stress, subcellular organelle dysfunction, and apoptosis”, *Archives of Toxicology*, Vol. 92, pp. 2077-2091, 2018.
 7. Liu, Q., Xu, C., Ji, G., Liu, H., Shao, W., Zhang, C., Gu, A., Zhao, P., “Effect of exposure to ambient PM_{2.5} pollution on the risk of respiratory tract diseases: a meta-analysis of cohort studies”, *Journal of Biomedical Research*, Vol. 31, pp. 130-142, 2017.
 8. Ferro, A. R., Kopperud, R. J., Hildemann, L. M., “Elevated personal exposure to particulate matter from human activities in a residence”, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, Vol. 14, pp. 34-40, 2004.
 9. Gupta, D. “Functional clothing – definition and classification”, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, Vol. 36, pp. 321-326, 2011.
 10. Bhardwaj, N., Kundu, S. C., “Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique”, *Biotechnology Advances*, Vol. 28, pp. 325-347, 2010.
 11. Kadam, V. V., Wang, L., Padhye, R., “Electrospun nanofibre materials to filter air pollutants – A review”, *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 47, No. 8, pp. 2253-2280, 2018.
 12. Wang, N., Raza, A., Si, Y., Yu, J., Sung, G., Ding, B., “Tortuously structured polyvinyl chloride/polyurethane fibrous membranes for high-efficiency fine particulate filtration”, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 398, pp. 240-246, 2013.
 13. Yang, K. H., Mun, J. H., Lee, J. U., “Removal rates of NO_x, SO_x, and fine dust particles in textile fabrics coated with zeolite and coconut shell activated carbon”, *Applied Sciences*, Vol. 10, pp. 8010, 2020.
 14. Zeng, Z., Ziegler, A. D., Searchinger, T., Yang, L., Chen, A., Ju, K., Piao, S., Li, L. Z. X., Ciais, P., Chen, D., Liu, J., Azorin-Molina, C., Chappell, A., Medvigy, D., Wood, E. F., “A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production”, *Nature Climate Change*, Vol. 9, pp. 979-985, 2019.