

전기방사에 의한 PAN/FA 나노 복합재의 제조 및 휘발성 유기 화합물에 대한 흡착효과

갈준총¹, 왕자건¹, 윤삼기², 최낙정^{*}

¹전북대학교 기계설계공학과, ²한국지엠

Fabrication of Electrospun PAN/FA Nanocomposites and Their Adsorption Effects for Reducing Volatile Organic Compounds

Jun Cong Ge¹, Zi Jian Wang¹, Sam Ki Yoon², Nag Jung Choi^{*}

¹Division of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University

²GM Korea Company

요약 휘발성 유기 화합물(VOCs: volatile organic compounds)은 대기 오염 물질 중 하나로 주로 화석연료 연소, 도료를 사용하는 건축물 자재 등에서 발생한다. VOCs를 흡입하면 두통, 메스꺼움, 구토 등을 발생시켜 인체에 유해하며 심한 경우에는 기억상실을 유발하고, 백혈병의 발병율을 증가시킨다. 따라서 대기 중의 VOCs를 저감하기 위한 방법의 하나로 우리는 전기방사를 이용하여 폴리아크릴로니트릴과 플라이 애쉬 (PAN/FA: polyacrylonitrile/fly ash) 나노복합재를 성공적으로 제조하였다. 또한 이 복합재의 VOCs에 대한 흡착능력을 관찰하기 위해서 주사형 전자현미경(FE-SEM)을 통해 PAN/FA 나노 매트들의 형태학적 구조 관찰과 클로로폼, 벤젠, 톨루엔, 자일렌 (chloroform, benzene, toluene and xylene) 등 VOCs 성분에 대한 흡착력 실험을 수행한 후 정성 및 정량 (chromatography/mass spectrometry: GC/MS)적으로 분석하였다. 그 결과 40wt%의 FA가 들어있는 PAN 나노섬유가 가장 작은 섬유 지름을 가지고 있었으며, 그 크기는 약 283nm인 것을 확인할 수 있었고, 다른 복합 멤브레인들과 비교하여 VOCs에 대한 흡착력이 우수하다는 것을 실험적으로 규명하였다.

Abstract Volatile organic compounds (VOCs), as a significant air pollutant, is generated mainly from the burning of fossil fuels, building materials using painting, etc. The inhalation of a certain amount of VOCs can be deleterious to human health, e.g., headaches, nausea and vomiting. In addition, it can also cause memory loss and even increase the rate of leukemia. Therefore, as one of the methods for reducing VOCs in air, polyacrylonitrile/fly ash (PAN/FA) composite nanofibrous membranes were fabricated by electrospinning. To observe their VOCs adsorption capacity, the morphological structure of PAN/FA nanofibrous mats was investigated by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), and the VOCs (chloroform, benzene, toluene, and xylene) adsorption capacity of PAN/FA membranes were tested by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). The results indicated that the PAN nanofiber containing 40 wt. % FA powder had the smallest fiber diameter of 283 nm; they also showed the highest VOCs adsorption capacity compared to other composite membranes.

Keywords : Nanocomposites, Volatile organic compounds, Fly ash, Polyacrylonitrile, Electrospinning

1. 서론

휘발성 유기 화합물(VOCs: volatile organic compounds)

은 비점이 낮아서 대기 중에 쉽게 증발되는 액체 및 기체상 물질의 총칭으로서, 대기 오염물질 중 하나로 화석연료의 연소, 도료를 사용하는 건축물 자재 등에서 발생

본 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(Project no. 2016R1D1A1B03931616)의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Nag Jung Choi(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-4765 email: njchoi@jbnu.ac.kr

Received April 2, 2018

Accepted June 1, 2018

Revised (1st April 24, 2018, 2nd May 14, 2018)

Published June 30, 2018

한다[1-3]. 또한 산업체에서 많이 사용되고 있는 용매와 화학 및 제약공장 플라스틱의 건조공정에서 배출되는 유기가스 등까지 다양하며, 화학구조에 따라 알카인, 방향족 탄화수소, 에스테르, 알데히드, 알콜, 에테르, 아미드 등을 포함하여 여러 종류가 있다. 가장 문제가 되는 화합물은, 방향족 화합물이다 [4-6]. VOCs는 인체와 생태계에 미치는 영향이 매우커서 대기 유해 물질로 분류되고 있으며, 사람의 건강과 동식물의 생태계에 피해를 줄 수 있다. 특히 인체 내에 VOCs의 농도가 일정한 수준에 도달하게 되면 짧은 시간에 두통, 메스꺼움, 구토, 무기력 등 불쾌한 기분을 느끼게 된다. 인체 농도가 더욱 높아지면 경련, 혼미 등 보다 심각한 증상을 일으킬 수 있으며 간장, 신장, 뇌 및 신경 계통에 큰 피해를 입히게 되어, 기억력이 빨리 감퇴하는 증상을 초래할 수도 있다. 벤젠과 같은 물질은 발암성 물질로서 인체에 매우 유해하며, 스티렌을 포함하여 대부분의 VOCs는 악취를 일으킬 수 있다 [7,8]. 그리고 대기 중에서 질소산화물(NOx)과 함께 광화학 반응을 통해, 오존 등과 같은 2차 광화학 환경 오염물질을 유발할 수 있다. 또한 VOCs는 지구 온난화에도 영향을 미치는 물질이며 낮은 농도에서 자극성을 가지고 있고, 스모그의 주요 원인이 되기도 한다 [9,10]. 현재 VOCs를 저감하기 위한 방법으로는 소각, 흡착, 흡수, 응축, 촉매산화와 같은 처리 기술로 VOCs를 줄이고 있다. 이러한 처리 기술 중 하나인 멤브레인의 흡착 성능과 효과를 확인하기 위한 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다[2,5,6]. 나노 섬유 복합재인 멤브레인을 제조하는 기술로는 전기방사법이 많이 사용되고 있다. 전기방사는 간단한 제조 장비, 낮은 비용, 다양한 섬유 제조 및 제어 가능한 공정의 장점을 가지고 있기 때문에 나노 사이즈와 고 비표면적 섬유를 만드는데 효과적인 제조 방법으로 알려져 있다 [11,12]. 본 연구의 복합재 제조의 재료로 사용되고 있는 플라이 애쉬(FA: fly ash)는 산업 폐기물로서 주로 석탄 발전소에서 발생한다. FA 입자는 다공성 허니 콧 구조로 비표면적이 크기 때문에 이산화황(SO₂), 질소산화물(NOx), 이산화탄소(CO₂), 중금속 등에 대한 흡착 효과가 있다고 연구자들에 의하여 보고되고 있다[13,14]. 그러나 이러한 FA를 이용하여 VOCs를 저감하는 연구는 아직 활성화 되어 있지 않고, 특히 FA로 나노 복합재를 만드는 연구자들은 거의 없는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 전기방사법으로 PAN/FA 나노 복합재를 제조하여 PAN과 FA 나노

입자들의 결합 특성을 관찰하였다. 또한 제조된 멤브레인들의 VOCs에 대한 최대 저감 효과를 얻을 수 있는 PAN과 FA의 최적 조성비를 산출하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 중 사용된 재료

본 연구에 사용된 폴리아크릴로니트릴 (PAN)은 미국에서 (Sigma-Aldrich, USA)제조되었고, 플라이 애쉬 (FA)는 한국에서 (Won Engineering Company Ltd. Gunsan, Korea) 생산된 분말을 사용하였다. FA는 Table 1에 나타냈고, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O 등으로 조성 되었다. FA의 비표면적(BET area), 기공의 총 면적(total pore area), 기공의 평균 사이즈(average pore), 공극율(porosity)은 각각 2.13m²/g, 3.01m²/g, 21nm, 63.67%이다. 이러한 특징을 가지고 있기 때문에 전기 방사한 나노복합재(PAN/FA)는 VOCs에 대하여 흡착능력의 측진이 가능하다. 용기(N, N-디메틸 포름아미드, DMF)는 일본 (Showa Chemical Co., Ltd., Tokyo, Japan)에서 제조된 제품을 사용하였다.

Table 1. The main chemical composition of fly ash

Components	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
Range	1.30-65.76	1.59-40.12	1.50-6.22	1.44-16.80

Components	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Range	1.20-3.72	1.00-6.00	1.10-4.23	1.02-2.14

2.2 전기방사 및 VOCs의 흡착 실험

실험에 사용될 방사 용액을 제조하기 위해, DMF 솔루션에 10wt%의 PAN을 혼합하여 상온에서 12시간 교반하였다. 완전히 용해된 PAN 솔루션에 PAN:FA의 중량비 각각 5:0, 5:1, 5:2, 5:3, 5:4, 5:5의 FA를 첨가하고, 12시간 동안 추가로 교반한 후 2시간 초음파 처리를 하여 방사 용액을 제조하였다. PAN솔루션은 FA의 첨가량에 따라 각각 FA0, FA2, FA4, FA6, FA8, FA10으로 표시하였다. 전기 방사법을 이용한 나노 멤브레인의 제조 방법 및 VOCs 실험 공정을 Fig. 1에 나타냈다. 전압은 18 kV로 설정 되었으며, 배출구와 수신 부사이의 거리

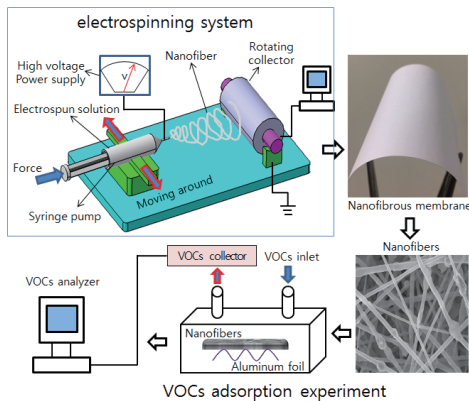


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

는 18cm로 설정되었다. 제조된 방사액을 토출구가 있는 용기에 넣고, 용액 수송 속도를 1ml/h로 설정하였다. 멤브레인 안에 들어있는 유기 용기를 제거하기 위해, 전기 방사한 멤브레인을 오븐에서 60℃로 12시간 진공 건조하였다. 실험에 사용된 VOCs는 benzene, xylene, toluene, chloroform 등을 각 100ug의 VOCs를 자석 교반기로 12시간 충분히 서로 혼합한 후에 메탄올을 이용하여 희석해서 실험용 VOCs를 만들었다. 다음에 시린지 펌프로 2ug의 VOCs를 멤브레인(10×10cm) 들어있는 밀폐 용기에 주입한 후 실온 상태에서 VOCs를 2시간 충분히 흡착시켰다. 이때 미 흡착된 VOCs는 질소를 불어 넣어 Tedlar bag(5L)에 포집하였다. 마지막으로 포집된 VOCs는 휘발성 물질 분석장치(JDT-505II, 20 10GC, QP2010MS)를 이용하여 휘발성 유기화합 물질에 대한 정성 및 정량 분석을 수행하였다. 자세한 측정방법은 VOCs를 포집하기 위하여 공기 포집기(MP-S30; SIBATA, Tokyo, Japan)를 이용하였다. VOCs의 포집은 실온에서 0.065 L/min의 속도로 Tenax GR 흡착관 ((Japan Analytical Industry, Tokyo, Japan)에 흡착시켰으며 총 흡착량은 1L 이다. 흡착관에 흡착된 시료를 280℃에서 30분 동안 탈착시키는 동시에 curio pointer(-40℃)에서 재흡착 시켰으며, 재흡착이 끝난 후 280℃로 pyrolysis시켜 시료를 컬럼에 주입하였다. 시료의 분석은 GC/MS QP 2010 plus (Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하여 진행하였다. 컬럼은 DB-624 column (30 m × 0.251 mm × 1.40 mm; Agilent Technologies, Wilmington, DE, USA)를 사용하였으며, oven temperature program은 40℃ for 3 min hold, 10ml/min up to 260℃, 5 min hold의 조건으로 분석하였다. 질량

분석기의 ion source 온도는 200℃로 사용하였으며, transfer line은 250℃, EM voltage은 70 eV를 사용하였다. Database는 NIST database(Wiley 9.1v)를 이용하여 정성분석을 진행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 물리적 특성 분석

방사 용액의 점도와 전기 전도도는 전기 방사에 의해 제조되는 나노 복합체의 조직 결합 상태와 입자의 직경에 크게 영향을 미친다[4,6]. Table 2는 전기 방사 용액과 PAN/FA 멤브레인들의 물리적 특성을 나타낸 것이다. Table 2에 나타난 바와 같이 용액의 점도는 FA의 첨가량의 증가에 따라 증가하였다. FA의 첨가량이 20wt% 부터 40wt%로 증가될 때 FA0와 비교하여 조금 증가하였으며, 섬유 직경은 40wt%의 FA가 첨가 되었을 때 약 283nm로 가장 얇게 나타났다. 그리고 비표면적은 13m²/g 으로 가장 크게 나타났다. 섬유의 직경과 비표면적은 VOCs의 흡착력에 많은 영향을 준다고 알려져 있다[3,4,6-8]. Fig. 2와 Fig. 3은 전기 방사법을 이용하여 제조된 PAN/FA 복합 멤브레인의 형태학적 구조를 알아보기 위하여 FE-SEM 이미지를 고찰 및 분석한 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 FA분말의 FE-SEM을 통해 FA 분말들의 크기와 직경이 서로 다른 불규칙한 모양을 확인할 수 있었으며, EDS를 통하여 분석한 결과, FA분말은 주로 O, Si, C, Ca으로 조성 되어져 있고, 소량의 Na, Mg, Al, Cl, Ti 등이 첨가 되어있는 것으로 확인되었다.

Table 2. Physical characteristics of the spinning solution and electrospun membrane

Spinning solution/fiber	Viscosity (cP)	Fiber diameter (nm)	BET area (m ² /g)
FA0	465.2	308	10.21
FA2	469.6	301	12.32
FA4	502.1	283	13.00
FA6	542.6	343	10.32
FA8	635.4	610	11.62
FA10	667.8	529	9.78

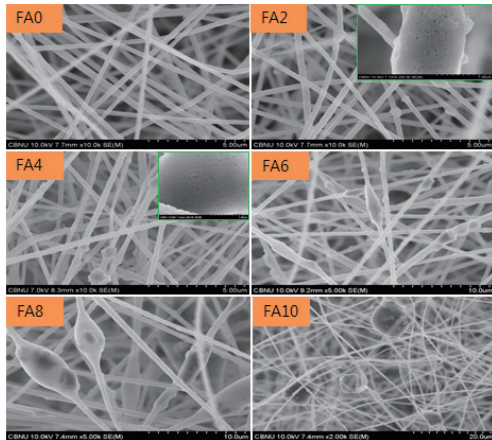


Fig. 2. FE-SEM images of FA0, FA2, FA4, FA6, FA8, FA10

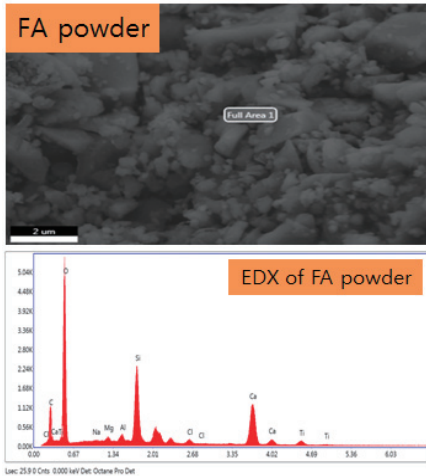


Fig. 3. FE-SEM image of FA powder and its EDX analysis

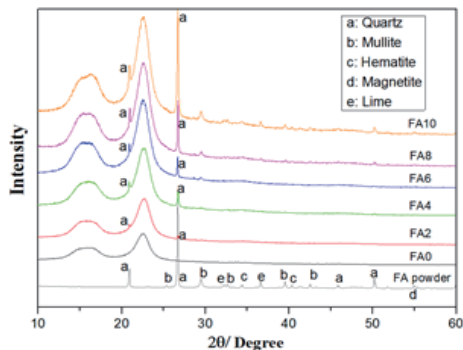


Fig. 4. XRD patterns of FA0, FA2, FA4, FA6, FA8, FA10 and FA powder

FA 분말이 첨가되지 않은 경우(FA0)에는 FAN 섬유들이 불규칙하게 교차하여 배열되었으며, FA 입자들이 없기 때문에 FAN 섬유 표면이 매끄럽게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면에 FA 첨가량이 증가함에 따라 FAN 섬유표면에 입자들이 점차 증가하는 모습을 Fig. 2에서 알 수 있으며, 이 입자들이 FA 나노 입자이고 확대 사진(FA2와 FA4 위에 오른 쪽)을 통해 확인한 결과, 입자 표면에 많은 기공들이 들어 있음을 알 수 있다. 이것은 FA가 다기공성이라는 물리적 특성과 일치한다. FA 첨가량이 40%인 경우에는 PAN과 FA 입자들이 잘 결합되었으며, FA 첨가량이 60%일 때에는 PAN 섬유에 큰 덩어리가 몇 개 들어있는 것을 확인하였다. FA 첨가량이 FA8, FA10으로 더 증가하면, 이러한 덩어리들이 더 많이 나타났다. Fig. 2에서 FA 첨가량에 따른 FA0, FA2, FA4, FA6, FA8, FA10의 섬유 직경은 308nm, 301nm, 283nm, 343nm, 610nm, 529nm로 나타났으며, FA4 섬유 직경이 제일 작게 나타났다. 따라서 40wt%의 FA가 최적 비율이라는 알 수 있었다. PAN과 FA의 결합 정도를 자세히 확인하기 위하여 XRD(X-Ray Diffraction)을 촬영하여, 분석했고 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 순수한 FA분말에는 여러 가지 광물질(quartz, mullite, hematite, magnetite and lime)이 들어있기 때문에 XRD 실험을 통하여 분석한 결과 많은 피크들이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 FA의 첨가량의 증가에 따라 이러한 피크들의 상대 크기도 증가하였다. 그 중에 quartz의 변화가 제일 뚜렷하게 나타난 것은 FA분말에 quartz가 많이 들어있기 때문인 것으로 보인다[4,6]. 따라서 PAN과 FA가 전기방사로 잘 결합한 것을 확인하였다.

3.2 기계적 강도 분석

본 연구에서 제조된 VOCs에 대한 흡착력이 우수한 PAN/FA 멤브레인을 공기 필터로 사용하기 위해서는 일정한 기계적 강도가 요구된다. 따라서 본 연구에 사용된 PAN/FA 멤브레인들에 대한 인장 강도를 측정 하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 FA0의 인장강도가 약 4.5MPa로서 가장 높게 나타났으며, FA첨가량이 증가함에 따라 PAN/FA의 인장 강도는 감소하였다. FA2와 FA4의 인장 강도는 약 2MPa로 비슷하게 나타났으며, 이와 같은 결과는 선행 연구자들의 연구 결과와 유사하다. 따라서 PAN/FA 멤

브레인은 공기 필터로 사용 될 수 있음을 확인하였다[6].

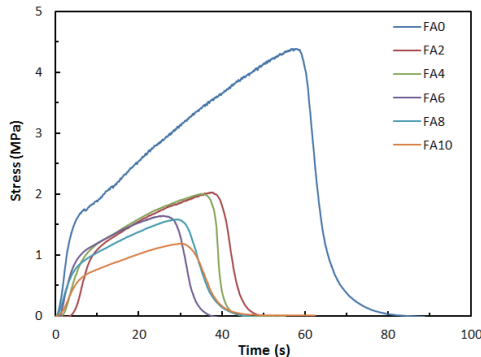


Fig. 5. Tensile strength of electrospun PAN membranes with different amounts of FA

3.3 VOCs 흡착 능력 분석

제조된 여러 가지 PAN/FA 나노 멤브레인들의 VOCs 흡착 능력은 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 FA의 첨가량이 증가함에 따라 PAN/FA 멤브레인 4종의 VOCs에 대한 흡착 능력은 다양하게 나타났다. 전반적으로 전기방사로 제조한 PAN/FA 멤브레인들은 VOCs에 대한 흡착 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 PAN/FA 멤브레인들의 VOCs에 대한 흡착력은 xylene에서 높게 나타났으며, 순차적으로 chloroform, toluene, benzene순 이었다. 이것은 VOCs가 가지고 있는 이온화 전위와 밀접한 관계가 있다[4]. 일반적으로 이온화 전위가 낮을수록 더 쉽게 흡착될 수 있다. xylene, chloroform, toluene, benzene이 가지고 있는 이온화 전위는 각각 8.56eV, 11.42eV, 8.82eV, 9.24eV이다. 이온화 전위 값 중에서 chloroform의 전위가 제일 높는데 VOCs의 흡착력은 xylene보다 조금 낮게 나타났다. 그 이유는 chloroform이 벤젠 고리가 없어서 벤젠 고리가 있는 VOCs(xylene, toluene, benzene)보다 이동하기 좋은 구조를 가지고 있어서, 용이하게 흡착된 것으로 판단된다. 선행 연구자들도 이러한 비슷한 연구 결과를 보고하였다 [4,6]. 또한 전체적으로 보았을 때 FA의 첨가량이 40wt%일 때 PAN/FA 멤브레인의 VOCs에 대한 흡착력이 가장 우수하게 나타났다. 위와 같은 결과는 전기 방사한 섬유와 비표면적이 VOCs 흡착력에 영향을 미치고 있기 때문이다. FA4 섬유의 평균 직경은 283nm로 제일 낮게 나타났으며, BET 비표면적은 13m²/g로 제일 높게 나타났다. 또한 섬유들이 만든 망상 기공이 다

른 멤브레인들 보다 많아 VOCs를 더 많이 흡착할 수 있다는 것을 알 수 있다.

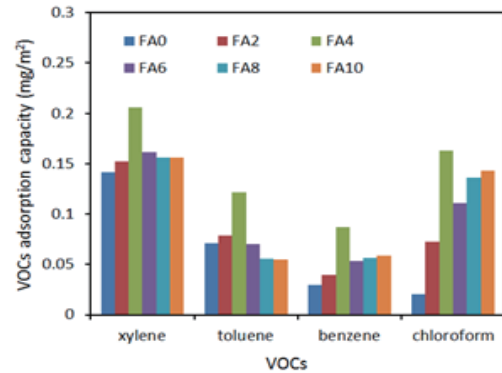


Fig. 6. VOCs absorption capacity of different PAN/FA nanofibrous membranes

4. 결론

본 연구에서는 전기 방사법을 이용하여 PAN과 산업 폐기물인 FA 분말을 전기 방사법을 이용하여 PAN/FA 나노 복합 멤브레인을 제조 하였으며, 이 멤브레인의 VOCs 흡착력에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PAN/FA 나노 복합 멤브레인을 전기 방사법으로 제조할 수 있었으며, FA 나노 입자들이 PAN 나노 섬유와 잘 결합될 수 있음을 확인 하였다.
2. FA의 중량비가 PAN에 대해 40%일 때 나노 복합 멤브레인 섬유의 직경이 제일 작고(283nm) 비표면적이 제일 크게(13m²/g) 나타났다.
3. VOCs에 대한 흡착력은 FA의 첨가량이 40%일 때 가장 우수하게 나타났다.
4. VOCs 흡착력이 제일 높은 멤브레인의 인장강도는 약 2MPa로서 공기필터로 사용될 수 있음을 실험적으로 규명하였다.

References

- [1] G. H. Baek, J. S. Kim, H. T. Jang, H. W. Kim, H. J. Kim, W. S. Cha, "Adsorption/Desorption Properties of VOCs on Activated Carbon Fiber", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 12, no. 5, pp. 2439-2444, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.5.2439>

- [2] S. C. Jung, S. H. Lee, "Practical Usage of Low-Temperature Metal Catalyst for the Destruction of Volatile Organic Compounds (VOCs)", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, vol. 34, no. 6, pp. 397-405, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.4491/KSEE.2012.34.6.397>
- [3] J. C. Ge, H. Y. Kim, S. K. Yoon, N. J. Choi, "Reducing volatile organic compound emissions from diesel engines using canola oil biodiesel fuel and blends", *Fuel*, vol. 218, pp. 266-274, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.045>
- [4] H. J. Kim, H. R. Pant, N. J. Choi and C. S. Kim, "Composite electrospun fly ash/ polyurethane fibers for absorption of volatile organic compounds from air", *Chem. Eng. J.*, vol. 230, pp. 244-250, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.090>
- [5] E. Scholten, L. Bromberg, G. C. Rutledge and T. A. Hatton, "Electrospun polyurethane fibers for absorption of volatile organic compounds from air," *ACS Appl. Mater. Inter.*, vol. 3, pp. 3902-3909, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1021/am200748y>
- [6] J. C. Ge, N. J. Choi, "Fabrication of Functional Polyurethane/Rare Earth Nanocomposite Membranes by Electrospinning and Its VOCs Absorption Capacity from Air", *Nanomaterials*, vol. 7, no. 3: 60, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.3390/nano7030060>
- [7] J. C. Ge, M. S. Kim, N. J. Choi, "Effects of PU/LP Nanofiber Thin Films Composite Produced from Electrospun for Absorption VOCs", *J. Korean Soc. Mech. Technol.*, vol. 19, pp. 15-20, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.19.1.201702.15>
- [8] J. C. Ge, N. J. Choi, "Fabrication of Polyurethane/Rare Earth Nanofiber Composite by Electrospinning and Its VOCs Reduction Characteristics", *J. Korean Soc. Mech. Technol.*, vol. 19, pp. 484-489, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.19.4.201708.484>
- [9] Y. K. Seo, S. H. Chung and S. O. Baek, "Current Status and Prospective of Hazardous VOC in Ambient Air", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, vol. 27, no. 6, pp. 734-745, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.734>
- [10] J. C. Kim, "Trends and Control Technologies of Volatile Organic Compound", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, vol. 22, no. 6, pp. 743-757, 2006.
- [11] R. Purwar, K. S. Goutham, C. M. Srivastava, "Electrospun Sericin/PVA/Clay nanofibrous mats for antimicrobial air filtration mask", *Fibers Polym.* vol. 17, pp. 1206 - 1216, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-016-6345-7>
- [12] S. Jin, K. Kim, S. W. Baek, H. S. Kim, H. Kang, W. Choi and J. Kim, "Characterization of Layered Perovskite Nanofibers using Electrospinning for Cathode Materials of Low Temperature-operating Solid Oxide Fuel Cell", *New & Renewable Energy*, vol. 13, no. 2, pp. 50-58, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2017.6.13.2.050>
- [13] Z. T. Yao, X. S. Ji, P. K. Sarker, J. H. Tang, L. Q. Ge, M. S. Xia, Y. Q. Xi, "A comprehensive review on the applications of coal fly ash", *Earth-Science Reviews* vol. 141, pp. 105-121, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- [14] A. Arenillas, K. M. Smith, T. C. Drage, C. E. Snape, "CO₂ capture using some fly ash-derived carbon materials", *Fuel*, vol. 84, pp. 2204-2210, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.04.003>

갈 준 총(Jun Cong Ge)**[정회원]**

- 2014년 2월 : 전북대학교 기계설계 공학부(공학학사)
- 2014년 1월 ~ 2014년 4월 : 한국 델파이
- 2014년 7월 ~ 2014년 8월 : 한국 LG화학
- 2016년 8월 : 전북대학교 기계설계 공학과(공학석사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학과(박사과정)

<관심분야>

전기방사, 나노복합소재, 나노섬유 미세먼지, 자동차 배출가스, VOCs(휘발성 유기 화합물)

왕 자 건(Zi Jian Wang)**[정회원]**

- 2016년 8월 : 전주대학교 기계자동차공학과(공학학사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학과(석사과정)

<관심분야>

전기방사, 나노복합소재, 나노섬유 VOCs(휘발성 유기 화합물)

윤 삼 기(Sam-Ki Yoon)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전북대학교 기계설계 공학부(공학박사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 한국지엠

<관심분야>

자동차 내연기관 성능 개발 및 대체연료 미세먼지, 자동차 배출가스, VOCs(휘발성 유기 화합물)

최 낙 정(Nag-Jung Choi)

[정회원]



- 1995년 8월 : 한양대학교 기계공학 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부

<관심분야>

자동차 내연기관 성능 개발 및 대체연료, 나노복합재 미세먼지, 자동차 배출가스, VOCs(휘발성 유기 화합물)