Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 301-306, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.301

Original article

전자선 조사를 활용한 고흡수성 섬유 제조 및 특성 분석

손민호[1,2] · 전준표[1,*] · 박종석[1] · 정성린[1] · 최재학[2,3,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]충남대학교 신소재공학과, [3]충남대학교 고분자공학과

Preparation and Characterization of Superabsorbent Fibers using Electron Beam Irradiation

Minho Son[1,2], Joon-Pyo Jeun[1,*], Jong-Seok Park[1], Sung-In Jeong[1], and Jae-Hak Choi[2,3,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup 56212, Korea
[2]Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea
[3]Department of Polymer Science and Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

ABSTRACT Superabsorbent polymers are capable of storing and retaining a significant amount of water relative to their weight. They are used in a wide range of industries, including sanitation, agriculture, and construction, and are experiencing ever-increasing demand. Superabsorbent polymers, particularly in fiber form, are being actively researched due to their advantages in both processing and absorption. However, conventional manufacturing methods have certain drawbacks, such as the need for initiators and crosslinkers, complex processes, and difficulties in achieving uniform polymerization. In this study, we produced superabsorbent fibers with varying absorption levels using PAN fbiers and electron beam irradiation technology and analyzed the resulting chemical structure changes using XPS and FTIR. We also compared the absorption performance of fibers prepared under different solvent conditions and prepared superabsorbent fibers with a high yield of hydrophilic groups.

Key words: Electron beam, Hydrolysis, Polyacrylonitrile fibers, Absorbent

1. 서 론

고흡수성 고분자(superabsorbent polymer, SAP)는 자체 질량에 비해 매우 많은 양의 물과 수용액을 저장하는 매체를 의미한다. SAP는 기저귀, 생리대, 마스크팩, 의료용 드레싱 및 흡수 패드, 농·원예용 보수제, 건축용 동결방지재료, 시멘트·콘크리트 혼화제 등의 제품으로 위생, 농업, 의류, 건설 등에 이르기까지 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다[1]. 이러한 SAP는 다양한 제품만큼이나 SAP 분말, SAP 과립(granule), SAP 섬유 등 여러 형태로 사용된다. 특히 섬유 형태는 가공시 취급이 용이하고 표면적이 넓은 마이크로 또는 나노 크기로 제조가 가능하여 분말과 과립 형태 보다 더 빠른 흡수 속도로 더 많은 물을 흡수할 수 있다[2]. 이러한 특성으로 섬유 형태를 갖는 SAP 소재가 새로이 제안되고 있다. 하지만, 기존 SAP의 제조 방법은 흡수성 단분자나 고분자에 개시제 및 가교제를 첨가하여 중합하는 방법으로 흡수성 단분자 및 고분자 이외에도 추가적인 화학물질이 필요하다는 단점과 균일한 섬유상의 형태로 중합하기 어려운 문제점이 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 방사선 그라프트(grafting) 기술을 이용하여 친수성을 갖는 관능기를 고분자에 도입하는 방법이 개발되어 있지만, 동시조사(simultaneous radiation) 그라프트 기술 특성상 원재료의 함량에 의해 관능기를 갖는 고분자의 함량을 높이는데 한계가 있고, 제조 공정이 복잡하며, 그라프트 수율(grafting yield)을 제어하는데 어려움이 존재한다[3,4].

이를 개선할 수 있는 방안으로 먼저 불활성 기체 또는 산소 존재 하에 방사선 조사한 후, 단량체와 반응을 하는 전조사(pre-irradiation) 기술이 있다[5,6]. 또한 소재 부분에서는 고흡수성의 관능기로 변성화가 용이한 폴리아크릴로니트릴 (polyacrylonitrile, PAN) 섬유가 제시된다[7,8]. PAN 섬유는 우수한 기계적

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Joon-Pyo Jeun, Jae-Hak Choi
Tel: +82-63-570-3063, E-mail: jpjeun@kaeri.re.kr
Tel: +82-42-821-6664, E-mail: jaehakchoi@cnu.ac.kr

Received 30 September 2024 **Revised** 30 September 2024 **Accepted** 9 December 2024

특성과 높은 내화학성이 특징으로 탄소 섬유의 전구체로 많이 사용되며, 니트릴기(nitrile group)의 변성화로 금속 흡착과 같은 다양한 기능성을 도입하기 유리한 특징 때문에 기능성 고분자의 전구체로 많이 활용된다[9-11]. 하지만, PAN 섬유의 니트릴기는 탄소와 질소 사이의 삼중 결합으로 높은 결합 해리 에너지(bond dissociation energy) (>100 kcal mol^{-1})를 가진다[12,13]. 때문에 PAN 섬유는 높은 화학적 안정성으로 반응성이 낮은 단점이 있지만, 이를 해결하기 위해 전자선 조사(electron beam irradiation, EBI) 기술을 활용할 수 있다.

EBI는 높은 투과성과 분해력을 가지고 있어 고분자 내부의 분자 간 결합을 유도하여 중합 반응을 일으키거나 결합을 끊을 수 있는 간편하고 효과적인 기술로 다양한 산업군에서 활용되고 있다. PAN 섬유에 전자선을 조사하면 부분적으로 삼중결합이 깨지고 다른 분자와 중합되거나 고리화 구조를 형성하며, 대기 중 산소로 산화 반응이 일어나게 된다[14,15]. 이 과정에서 이중결합과 카르보닐기(carbonyl group)로 공액구조(conjugation structure)가 형성된다[16]. 때문에 EBI로 구조가 변화된 PAN 섬유의 중간체는 기존 PAN 섬유보다 더 높은 반응성을 가질 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구는 EBI를 활용한 PAN 섬유의 친수화 과정으로 원재료의 수율이 낮아지는 단점을 극복하고 높은 수율의 친수성기를 갖는 고흡수성 섬유를 개발하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약 및 재료

PAN 섬유(타입:F6, 아크릴로니트릴 87%, 비닐아세테이트 13% 함유, denier 5.6)는 태광산업에서 구입하였다. 가성소다(sodium hydroxide, pellets, 98.0%), 에탄올(ethyl alcohol, anhydrous, 99.9%)는 삼전순약공업에서 구입하여 정제 과정 없이 그대로 사용하였다.

2.2. PAN 섬유의 전자선 조사

PAN 섬유의 EBI처리는 ELV-8 전자선 가속기(2.5 MeV, 한국원자력연구원)를 사용하여 상온 공기중 분위기에서 전자선 조사를 진행하였다. 빔 전류는 10 mA로 스캔당 25 kGy로 각각 100, 200, 300, 400 kGy로 조사하였다.

2.3. 가수분해 반응

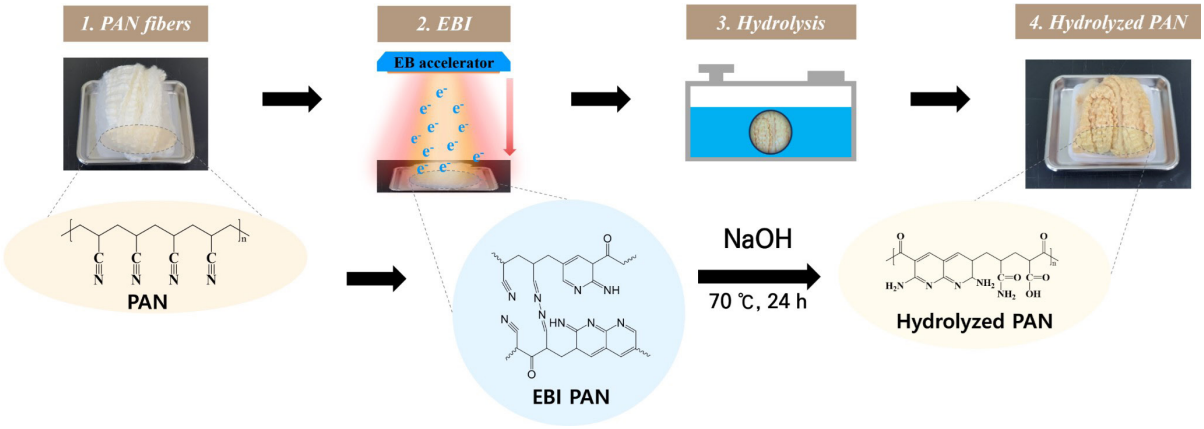
PAN 섬유는 가성소다와 몰 비율 1:10으로 하여 수용액에서 가수분해 반응을 진행하였다. 반응은 항온수조에서 70°C에서 24시간 동안 진행하였고, 반응을 마친 PAN 섬유는 잔류한 가성소다를 제거하기 위해 증류수로 3회 이상 충분히 세척 후 50°C 건조 오븐에서 중량 변화가 없을 때까지 완전히 건조하였다. 가수분해된 PAN 섬유의 수율은 다음과 같은 공식으로 계산하였다.

$$\text{Yield (\%)} = \frac{W_h - W_0}{W_0} \times 100\,(\%)$$

W_h는 가수분해 반응 후 PAN 섬유 무게이고, W_0는 반응 전 PAN 섬유의 무게이다. EBI와 친수화 반응 과정에 대한 모식도는 Scheme 1에 나타내었다. 또한 가수분해에 미치는 용매 영향을 확인하기 위해 에탄올의 함유량에 따른 반응 수율을 비교하였다.

2.4. 특성분석

EBI를 통한 PAN 섬유의 가교도(degree of crosslinking, DC)는 *N,N*-디메틸포름아미드(*N,N*-dimethylformamide, DMF)에 섬유를 24시간 함침 후 무게를 측정하여 확인하였다. PAN 섬유의 화학구조 변화는 X선 광전자 분광계(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, K-alpha, Thermo Scientific)와 푸리에 변환 적외선 분광계(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR,



Scheme 1. Schematic representation of the synthesis and molecular structure of absorbent materials

Varian, 640-IR)를 사용하여 확인하였다. 변성화된 PAN 섬유의 흡수/흡습 성능은 다음과 같은 공식으로 계산하여 평가하였다.

$$\text{Absorption capacity (\%)} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100\,(\%)$$

W_w는 흡수/흡습 후 섬유의 무게, W_d는 흡수/흡습 전 섬유의 무게이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PAN 섬유의 전자선 조사 영향

3.1.1. EBI 처리된 PAN 섬유의 가교도 측정

EBI는 물체의 분자구조에 변형을 통해 가교구조 또는 사슬절단을 유도하는 효과를 지닌다. PAN 섬유에 EBI를 처리했을 때 나타나는 효과를 확인하기 위해 DMF를 사용하여 PAN 섬유의 DC를 측정하였다. 함침 전후의 PAN 섬유 모습은 Fig. 1로 나타내었다. 측정 결과 EBI 처리하지 않은 PAN 섬유는 DMF으로부터 섬유 형태를 유지할 수 없게 되었고 EBI 처리된 PAN 섬유는 흡수선량이 증가할수록 섬유의 형태를 더 온전히 유지하였다. PAN 섬유의 DC 또한 Fig. 2와 같이 흡수선량이 증가할수록 높게 나타났다. 이를 통해 EBI는 PAN 섬유의 분자구조에 가교구조를 형성하는 것임을 알 수 있다. DC는 다음과 같은 공식으로 계산하였다.

$$\text{DC (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\,(\%)$$

W_0는 DMF 함침 전 PAN 섬유 무게, W_1는 DMF 함침 후 PAN 섬유 무게이다.

3.1.2. EBI 처리된 PAN 섬유의 XPS 분석

EBI 처리된 PAN 섬유의 구조 변화를 확인하기 위해 XPS 분석을 하였다. 각 PAN 섬유의 흡수선량별 C1s 피크 결과는 Fig. 3에 나타내었다. EBI 미처리 PAN 섬유의 경우 탄소 단일 결합과 니트릴기가 각각 284.8, 286 eV에서 나타났다[17,18]. EBI 처리된 PAN 섬유에서는 탄소 이중결합과 산소로 인한 카르보닐기가 각각 284.1, 288 eV에서 나타났다. 이러한 피크 변화를 통해서 EBI 처리는 PAN 섬유에 있는 니트릴기의 삼중결합을 깨뜨리고 분자간의 가교와 고리화 구조 형성으로 탄소의 이중결합과 공기중 산소로 인한 카르보닐기가 함께 형성된 것을 확인하였다[19]. 따라서 EBI 처리된 PAN 섬유의 화학구조의 변화는 기존 PAN 섬유보다 가수분해 반응에 더 효과적으로 작용할 것을 기대할 수 있다.

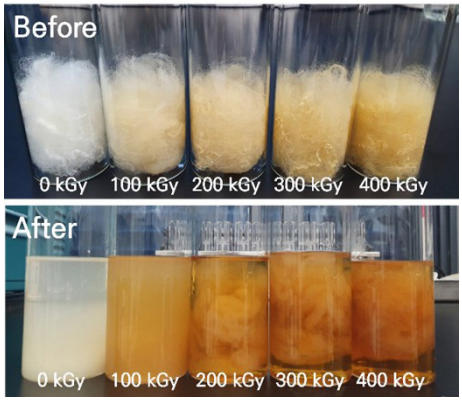


Fig. 1. Photos of PAN fibers before and after impregnation.

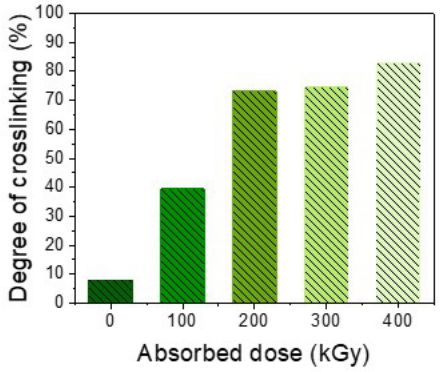


Fig. 2. Crosslinking degree of PAN fibers as a function of absorbed dose.

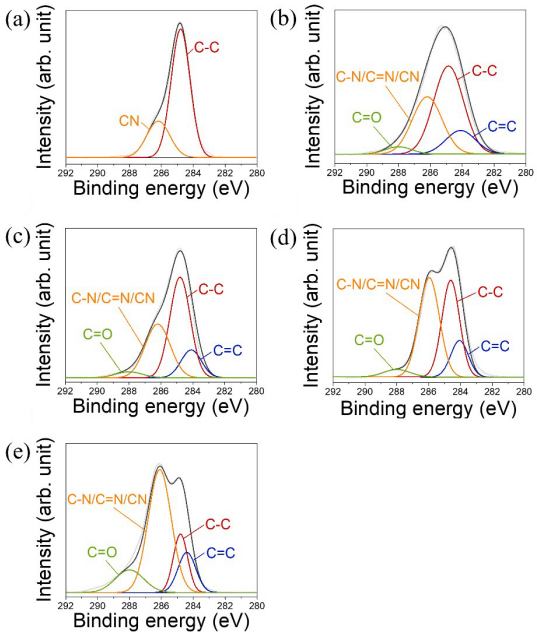


Fig. 3. Deconvoluted C1s XPS spectra of (a) pristine PAN fiber, (b) EBI 100 kGy PAN fiber, (c) EBI 200 kGy PAN fiber, (d) EBI 300 kGy PAN fiber, and (e) EBI 400 kGy PAN fiber.

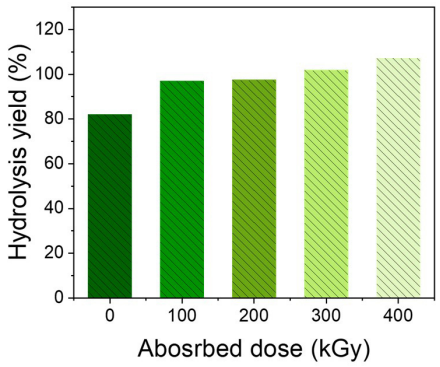


Fig. 4. Comparison of hydrolysis yield as a function of absorbed dose.

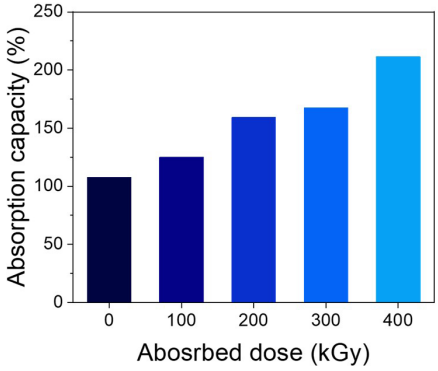


Fig. 6. Comparison of the water absorption capacity as a function of absorbed doses of hydrolyzed PAN fibers.

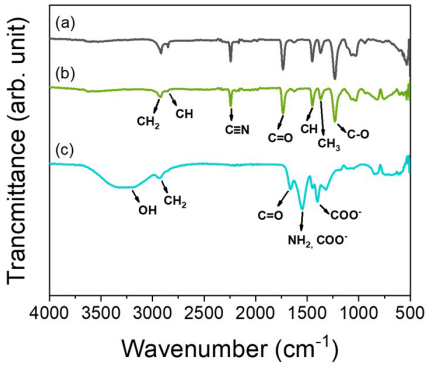


Fig. 5. FTIR spectra of (a) pristine PAN fiber, (b) EBI 400 kGy PAN fiber, and (c) hydrolyzed PAN fiber.

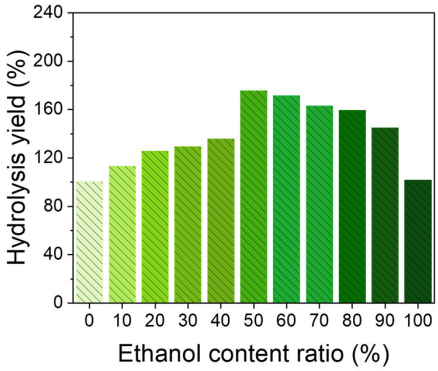


Fig. 7. Comparison of hydrolysis yields as a function of ethanol content.

3.2. PAN 섬유의 가수분해

3.2.1. EBI 흡수선량별 가수분해 수율 비교

EBI 처리로 PAN 섬유의 화학구조 변형이 가수분해 반응효율에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 PAN 섬유와 가성소다와의 반응을 통해 수율을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 결과적으로 EBI 처리는 미처리 PAN 섬유의 가수분해 반응 보다 더 높은 수율을 가지며, 400 kGy에서 수율이 107.18%로 EBI 미처리 시료의 82.03%보다 약 30.6% 반응 효율을 향상시켰다.

3.2.2. 가수분해 된 PAN 섬유 FTIR 분석

PAN 섬유의 가수분해 반응 전후의 화학구조 변화를 확인하기 위해 분석한 FTIR 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었다. 반응 전의 PAN 섬유는 2923 cm^{-1} (CH_2), 2873 cm^{-1} (CH), 2243 cm^{-1} (C≡N), 1451 cm^{-1} (CH)에서 특성 피크가 나타났다[20-22]. 또한 PAN 섬유에 함유된 비닐아세테이트로 인해 1735 cm^{-1} (C=O), 1365 cm^{-1} (CH_3), 1230 cm^{-1} (C-O)의 특성 피크가 나타났다[23]. 가성소다와의 반응으로 니트릴기가 가수분해되어 해당 피크는 사라지고 3282 cm^{-1} (OH)와 1563, 1406 cm^{-1} (COO^-)의 피크가 새로 나타나는 것을 확인하였다[24,25]. 이를 통해 PAN 섬유가 정상적으로 가수분해 되었음을 알 수 있다.

3.2.3. 가수분해 된 PAN 섬유의 흡수 성능 비교

EBI 흡수선량별 가수분해된 PAN 섬유의 물에 대한 흡수 성능을 Fig. 6에 나타내었다. 미처리 PAN 섬유를 가수분해한 경우는 흡수용량이 약 107%였으며, 400 kGy EBI 처리된 PAN 섬유의 경우 흡수용량이 약 211%로 나타났다. 이를 통해 PAN 섬유는 흡수선량이 높아질수록 더 많은 구조적 변형으로 가수분해 수율이 비례적으로 상승하여 더 많은 흡수용량으로 나타내는 것을 확인하였다.

3.2.4. 가수분해에 미치는 용매 영향

에탄올의 OH-는 PAN과 가성소다의 가수분해 반응을 활성화시키는 역할을 한다. 따라서, 에탄올 혼합 용액을 사용하면 더 효과적인 가수분해 반응이 가능할 것으로 보인다. 이를 확인하기 위해, 400 kGy EBI 처리된 PAN 섬유를 물과 에탄올의 비율을 달리한 가성소다 용액과 반응시켰다. 이에 대한 반응 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 반응 수율은 에탄올 함량과 비례하게 증가하다가 에탄올 함량 50%에서 최대 약 175%로 나타났으며, 함량 60%에서부터 점차 감소하였다. 이는 에탄올이 혼합되면서

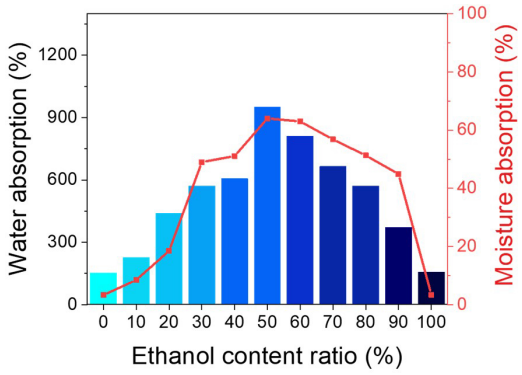


Fig. 8. Comparison of water and moisture absorption capacity of hydrolyzed PAN fibers.

PAN 섬유와 가성소다의 가수분해 반응성을 향상시키지만, 에탄올에 대한 PAN 섬유의 회전반경(radius of gyration) 값이 낮기 때문에 일정 농도 이상의 에탄올 혼합 용매는 PAN 섬유를 접힌(fold) 구조 또는 압축 형태로 유도한다[26]. 때문에 PAN 섬유의 반응 표면적이 줄어들어 가수분해 반응이 감소하게 된다.

Fig. 8는 에탄올 용매에 따른 가수분해된 PAN 섬유의 흡수성능과 흡습성능을 함께 나타낸 것이다. 에탄올 함량이 0%일 때 최대 흡수용량은 약 212%이지만, 에탄올 함량이 50%에서는 최대 약 952%의 흡수 성능이 나타내었다. 또한 공기중 수분에 대한 흡습성능도 살펴보았을 때, 에탄올 함량이 50%에서 약 64%로 가장 높은 흡습 성능을 보이다가 에탄올 함량이 60% 이상부터 흡습 성능이 감소하는 것으로 확인하였다. 따라서 EBI 처리는 PAN 섬유의 가수분해 반응 수율을 향상시키는데 효과적이며, 특히 400 kGy일 때 가장 높은 반응 수율이 나타났다. 또한 가수분해 반응을 위한 용매에서 에탄올의 혼합 사용은 더 높은 흡수 및 흡습 성능을 부여할 수 있으며 최적의 조건은 에탄올 함량이 50%인 혼합 용매임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 PAN 섬유를 다양한 흡수선량의 EBI 처리를 통해 가성소다와 가수분해 반응에서 원재료의 반응 수율이 낮아지는 단점을 극복하고 높은 반응 수율을 갖는 전자선 조사 조건이 400 kGy임을 확인하였다. 또한, 가수분해 반응에서 용매내 에탄올의 함량에 따라 PAN 섬유의 가수분해 반응성이 달라지는 것을 확인하였으며 50%의 에탄올을 함유한 용매에서 최적의 가수분해 반응으로 최고 성능의 흡수성 섬유를 제조할 수 있는 조건임을 확인하였다.

EBI는 PAN 섬유의 화학구조에 가교 반응과 더불어 니트릴기의 삼중결합을 깨뜨리고 이중결합을 생성하고 공기중 산소와 반응하여 카르보닐기 생성을 통해 공액구조를 부분적으로 형성함으로써 PAN 섬유의 가수분해 반응성을 향상시키는 효과가 있음을 고흡수성 섬유 제조 과정에서 증명하였다. 이는 전자선을 단순히 제품의 멸균이나 재료의 물성 향상을 위한 가교 반응에 국한하지 않고, PAN 섬유의 가수분해와 같은 반응을 촉진하는 전처리 기술로도 활용할 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 한국 정부의 재원으로 한국원자력연구원의 기초연구 프로그램(523330-24)의 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. Cen RF, Wang KY, and Shu WW. 2015. Preparation and swelling properties of organoclay/super-absorbent resin using polyacrylonitrile fiber wastes. *Adv. Mater. Res.* **1120**:635-638. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1120-1121.635.
2. Ucar N, and Kayaoğlu BK. 2020. Handbook of fibrous materials, Superabsorbent fibers. 1th ed. 315 pp. Wiley-VCH, N.p. https://doi.org/10.1002/9783527342587.ch12.
3. Khan F, and Ahmad SR. 1997. Graft copolymerization reaction of water-emulsified methyl methacrylate with preirradiated jute fiber. *J. Appl. Polym. Sci.* **65**:459-468. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970718)65:3<459::AID-APP5>3.0.CO;2-G.
4. Kabanov VY, and Kudryavtsev VN. 2003. Modification of polymers by radiation graft polymerization (State of the Art and Trends). *High Energy Chem.* **37**:1-5. https://doi.org/10.1023/A:1021919224451.
5. Dong Z, Wang Y, Wen D, Peng J, Zhao L and Zhai M. 2022. Recent progress in environmental applications of functional adsorbent prepared by radiation techniques: A review. *J. Hazard. Mater.* **424**:126887. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126887.
6. Barsbay M, and Güven O. 2019. Surface modification of cellulose via conventional and controlled radiation-induced grafting. *Radiat. Phys. Chem.* **160**:1-8. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.03.002.
7. Pérez-Álvarez L, Ruiz-Rubio L, Moreno I, and Vilas-Vilela JL. 2019. Characterization and optimization of the alkaline hydrolysis of polyacrylonitrile membranes. *Polymers* **11**:1843. https://doi.org/10.3390/polym11111843.
8. Martín DM, Faccini M, Garcia MA, and Amantia D. 2018. Highly efficient removal of heavy metal ions from polluted water using ion-selective polyacrylonitrile nanofibers. *J. Environ. Chem. Eng.* **6**:236-245. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.073.
9. Nataraj SK, Yang KS, and Aminabhavi TM. 2012. Polyacrylonitrile-based nanofibers—A state-of-the-art review. *Prog. Polym. Sci.* **37**:487-513. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001.
10. Deng S, Wang P, Zhang G, and Dou Y. 2016. Polyacrylonitrile-based fiber modified with thiosemicarbazide by microwave irradiation and its adsorption behavior for Cd (II) and Pb (II). *J. Hazard. Mater.* **307**:64-72. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.002.
11. Sruthi PR, and Anas S. 2020. An overview of synthetic modification of nitrile group in polymers and applications. *J. Polym. Sci.* **58**:1039-1061. https://doi.org/10.1002/pol.20190190.
12. Nakao Y. 2020. Metal-mediated C–CN bond activation in organic synthesis. *Chem. Rev.* **121**:327-344. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00301.

13. Wen Q, Lu P, and Wang Y. 2014. Recent advances in transition-metal-catalyzed C–CN bond activations. *RSC Adv*. **4**:47806-47826. https://doi.org/10.1039/C4RA08675A.
14. Park S, Yoo SH, Kang HR, Jo SM, Joh HI, and Lee S. 2016. Comprehensive stabilization mechanism of electron-beam irradiated polyacrylonitrile fibers to shorten the conventional thermal treatment. *Sci. Rep.* **6**:27330. https://doi.org/10.1038/srep27330.
15. Dietrich J, Hirt P, and Herlinger H. 1996. Electron-beam-induced cyclisation to obtain C-fibre precursors from polyacrylonitrile homopolymers. *Eur. Polym. J.* **32**:617-623. https://doi.org/10.1016/0014-3057(95)00185-9.
16. Clough RL, Malone GM, Gillen KT, Wallace JS, and Sinclair MB. 1995. Discoloration and subsequent recovery of optical polymers exposed to ionizing radiation. *Polym. Degrad. Stabil.* **49**:305-313. https://doi.org/10.1016/0141-3910(95)87013-X.
17. Shi H, Ouyang Q, Wang JY, Zhu PL, Hao JW, and Huang XB. 2020. Accelerating the formation of the conjugated ladder structure of Poly (acrylonitrile-co-vinyl acetate) by cross-linked poplar lignin doped with boron phosphate. *Mater. Res. Express* **7**:055309. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7a8d.
18. Bai G, and Liu Y. 2010. Antistatic property of polyacrylonitrile fiber by plasma-grafting treatment. *Text. Res. J.* **80**:1658-1664. https://doi.org/10.1177/0040517510363195.
19. Lee BM, Choi BS, Lee JY, Hong SK, Lee JS, and Choi JH. 2021. Fabrication of porous carbon beads from polyacrylonitrile as electrode materials for electric double-layer capacitors. *Carbon Lett.* **31**:67-74. https://doi.org/10.1007/s42823-020-00150-0.
20. Chaúque EFC, Dlamini LN, Adelodun AA, Greyling CJ, and Ngila JC. 2017. Electrospun polyacrylonitrile nanofibers functionalized with EDTA for adsorption of ionic dyes. *Phys. Chem. Earth* **100**:201-211. https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.10.008.
21. Jin SY, Kim MH, Jeong YG, Yoon YI, and Park WH. 2017. Effect of alkaline hydrolysis on cyclization reaction of PAN nanofibers. *Mater. Des.* **124**:69-77. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.066.
22. Ji L, and Zhang X. 2008. Ultrafine polyacrylonitrile/silica composite fibers via electrospinning. *Mater. Lett.* **62**:2161-2164. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.051.
23. Füllbrandt M, Purohit PJ, and Schönhals A. 2013. Combined FTIR and dielectric investigation of poly (vinyl acetate) adsorbed on silica particles. *Macromolecules* **46**:4626-4632. https://doi.org/10.1021/ma400461p.
24. Pal D, Neogi S, and De S. 2018. Hydrophilic surface modification of polyacrylonitrile based membrane: effect of low temperature radio frequency carbon dioxide plasma. *Polym. Bull.* **75**:3567-3586. https://doi.org/10.1007/s00289-017-2230-9.
25. Lim JW, Lee JM, Yun SM, Park BJ, and Lee YS. 2009. Hydrophilic modification of polyacrylonitrile membranes by oxyfluorination. *J. Ind. Eng. Chem.* **15**:876-882. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.09.016.
26. Pires JM, de Oliveira OV, Freitas LC, da S Filho EA, and Prado AR. 2012. Molecular dynamic simulations of polyacrylonitrile in ethanol and water solvents. *Comput. Theor. Chem.* **995**:75-78. https://doi.org/10.1016/j.comptc.2012.06.032.