

산업폐수 처리용 흡착 소재 연구 동향

김상훈^{*,**} · 최석순^{***,†}

*한국과학기술연구원 극한소재연구센터, **과학기술연합대학원대학교 나노융합전공(키스트 스쿨),
***세명대학교 바이오환경공학과
(2024년 8월 21일 접수, 2024년 8월 28일 수정, 2024년 8월 28일 채택)

A Review on Adsorbent Materials for Industrial Wastewater Treatment

Sang Hoon Kim^{*,**} and Suk Soon Choi^{***,†}

**Extreme Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 02792, Korea*
***Nanoscience and Technology (KIST school), University of Science and Technology, Seoul 02792, Korea*
****Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University, Jecheon 271236, Korea*
(Received August 21, 2024; Revised August 28, 2024; Accepted August 28, 2024)

초 록

산업폐수는 다양한 유해 오염물질을 포함하고 있으며, 이를 효과적으로 처리하는 것은 환경 보호와 쾌적한 환경 유지에 매우 중요한 과제이다. 본 리뷰 논문은 산업폐수 처리에 사용되는 활성탄, 제올라이트, 나노소재, 바이오 흡착제와 같은 주요 흡착 소재의 특성과 적용 사례를 소개하고, 각 소재의 장단점을 논의하였다. 또한, 흡착 소재의 개선 방향과 미래 연구 방향을 제시하였다. 아울러 흡착 모델링 고도화 및 공정 최적화, 지속 가능한 소재 개발과 나노기술을 활용하는 것을 중요한 미래 연구 과제 주제로 강조하였다. 최종적으로 본 리뷰 논문은 산업폐수 처리에 있어 흡착 소재의 중요성 및 향후 연구에 대한 방향성을 제시하고자 했다.

Abstract

Industrial wastewater contains various harmful pollutants, and effectively treating these pollutants is crucial for environmental protection and public health. This review paper examines various adsorbent materials used in industrial wastewater treatment. The characteristics and applications of key adsorbents, such as activated carbon, zeolite, nanomaterials, and bioadsorbents, are introduced, and the advantages and disadvantages of each material are discussed. Furthermore, the paper suggests directions for the improvement of adsorbent materials and future research, emphasizing the importance of developing sustainable materials and utilizing nanotechnology. The need for modeling and optimization of adsorption processes is also highlighted. This paper underscores the significance of adsorbent materials in industrial wastewater treatment and provides a guide for future research directions.

Keywords: Industrial wastewater, Activated carbon, Zeolite, Nanomaterials, Bioadsorbents

1. 서 론

산업 현장에서 발생하는 폐수는 다양한 유해물질을 포함하고 있으며, 그 종류도 다양해지고 있다. 산업폐수에는 납, 수은, 카드뮴 등의 중금속, 페놀류, 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 등의 유기오염물, 합성 염료, 계면활성제 등 다양한 오염물질이 포함될 수 있으며, 이러한 물질들이 산업 현장에서 무방비로 방류될 경우, 토양과 수질에 치명적인 오염을 일으킬 수 있어 방류 전 적

절한 폐수 처리가 필수적이다[1].

폐수 처리는 기본적으로 물리적, 화학적, 생물학적 처리 방법을 거치는데, 이러한 기존 방법으로는 처리가 안되는 물질들이 늘어가면서 그 한계가 명확해지고 있다[2]. 예를 들어, 화학적 응집이나 침전법은 주로 입자성 부유물질 제거에는 유용하지만, 수중에 녹아 있는 유기 물질이나 이온 형태의 중금속 제거에는 적합하지 않은 방법이다. 유기물질 분해에 생물학적 처리 방법은 비교적 친환경적이고 비용적 측면에서 유리할 수 있지만, 생체 독성이 있는 유독성 화합물이나 난분해성 유기 오염물에는 적용이 어려운 문제가 있다.

이러한 배경에서 볼 때, 흡착 기술은 폐수 처리에서 점점 더 중요한 역할을 맡고 있다고 할 수 있다. 흡착 공정에서는 고체상의 흡착제가 폐수 내 오염물질을 선택적으로 포집, 고정하는 과정을 통해 다양한 오염물질을 제거한다[3]. 특히, 흡착 기술은 중금속 이온, 유기 화합물, 염료, 그리고 난분해성 미량 오염물질과 같은 다양한 오염물질에 대

† Corresponding Author: Semyung University
Department of Biological and Environmental Engineering, Jecheon 271236, Korea
Tel: +82-43-649-1337 e-mail: sschoi@semyung.ac.kr

해 높은 제거 효율을 보이며, 물리적, 화학적 특성을 조절하여 특정 오염물질에 대한 선택성을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다[4]. 또한, 흡착 기술은 비교적 단순한 공정으로도 효과적인 처리가 가능하며, 재생 및 재사용이 가능하다는 점에서 경제적이다.

이러한 장점들로 인해 흡착 소재의 개발과 응용은 고도화되는 산업 폐수 처리에 있어 중요한 위치를 차지하고 있으며, 기존 흡착 소재의 개량은 물론 다양한 종류의 새로운 흡착 소재가 연구되고 있다. 이들 소재는 자연에서 직접 얻어진 천연 흡착제부터, 특별한 기능성을 의도한 합성 소재 기반 흡착제, 그리고 바이오매스를 활용한 바이오 흡착제 등 다양한 재료들이 연구되고 있다[5].

본 총설에서는 이러한 흡착 소재들을 중심으로, 산업폐수 처리에 사용되는 흡착제의 종류, 특성, 장단점, 실제 응용 사례 등을 개괄하고, 현재 연구 동향에서 나타난 문제점과 한계점을 분석한다. 그리고 이를 해결하기 위해서 어떠한 방향으로 새로운 연구가 진행되고 있는지를 살펴본다.

2. 흡착소재 개요

흡착 현상은 고체 표면에 어떤 물질이 고정되는 현상으로, 물리적 흡착(Van der Waals 힘에 의한 약한 결합)과 화학적 흡착(강한 화학 결합에 의한 고정)으로 구분된다. 물리적 흡착은 약한 결합으로 발생하는 현상으로 가역적이며 온도와 압력의 변화에 따라 흡착량이 달라진다. 물리적 흡착으로는 다중층 흡착이 가능하며, 주로 저온에서 진행된다. 반면, 화학적 흡착은 강한 화학결합을 통해 이루어 지는 까닭에 비가역적이며, 단일층으로 흡착이 이루어진다. 화학적 흡착은 일반적으로 활성화 에너지가 요구되어 높은 온도와 반응성이 있어야 일어난다. 흡착소재의 효율성은 흡착제의 비표면적, 기공 구조, 표면의 화학적 성질 등에 따라 좌우된다.

흡착 현상을 설명하는 주요 이론으로는 랑뮤어 등온식(Langmuir isotherm)과 프로인트리히 등온식(Freundlich isotherm)이 있다[6]. 랑뮤어 등온식에서는 단일층 흡착을 가정하며, 흡착제 표면의 흡착점(adsorption sites)들은 서로 상호작용이 없이 동일한 성질을 가지며 독립적이라는 가정 아래에서 도출된 이론식이다. 랑뮤어 등온식은 다음과 같이 표현된다;

$$q = q_{\max} KC / (1 + KC) \tag{1}$$

여기서 q 는 흡착량, q_{\max} 는 최대 흡착량, K 는 랑뮤어 상수, C 는 흡착물질의 농도이다. 랑뮤어 등온식은 흡착제가 포화될 때까지 흡착량을 설명할 때 우선 적용해보는 이론식이다. 프로인트리히 등온식은 다층 흡착을 가정하며 경험적으로 고안된 식이며, 다음과 같이 표현된다.

$$q = FC^{1/n} \tag{2}$$

여기서 q 는 흡착량, F 는 프로인트리히 상수, C 는 흡착물질의 농도, n 은 흡착 강도를 나타내는 지수이다. F 와 n 값을 조절해서 실험 흡착량을 설명한다. 프로인트리히 등온식은 경험적으로 고안된 식이기 때문에 일반적으로는 우선 랑뮤어 등온식으로 실험적 흡착 현상을 설명하고, 설명이 잘 안되는 경우 프로인트리히 등온식으로 설명한다.

흡착 소재는 천연 소재, 합성 소재, 그리고 생물학적 소재 등으로 분류할 수 있다. 천연 소재는 활성탄, 천연 제올라이트, 점토질(clay minerals) 등과 같이 자연에서 직접 채취한 재료로, 환경친화적이고

비용이 저렴하다는 장점이 있다[7-9]. 특히 활성탄은 그 뛰어난 흡착 능력으로 인해 오래전부터 가장 널리 사용되고 있는 흡착 소재이다. 합성 소재는 특정 오염물질 제거를 목표로 하는 물리적, 화학적 특성을 갖춘 소재로, 고분자 기반 흡착제, 나노 소재, 합성 제올라이트, 금속유기구조체(metal organic frameworks, MOFs) 등이 있다[10]. 합성 소재는 높은 흡착 선택성, 재사용 가능성, 그리고 맞춤형 제작이 가능하다는 장점을 가지지만, 합성에 소요되는 높은 비용과 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있다는 점이 단점으로 작용할 수 있다. 생물학적 소재는 해조류, 목재 부산물 등 바이오매스나 미생물에서 유래한 재료로, 재생 가능하고 폐기 시 환경에 미치는 영향이 적다. 바이오매스 기반 흡착제는 중금속이나 염료 제거에 효과적인 것으로 알려져 있으며, 경제적인 측면에서도 경쟁력이 있어 최근 각광받고 있는 재료이다[11].

3. 산업폐수 처리에 사용되는 주요 흡착 소재

3.1. 활성탄(activated carbon)

활성탄은 다공성 구조와 1000 m²/g 이상의 높은 비표면적을 특징으로 하며, 물리적 흡착과 화학적 흡착이 모두 가능하다. 주로 석탄, 코코넛 껍질, 목재 등을 원료로 고온 처리로 제조되며, 고온에서 활성화 과정을 거친다. 활성탄은 염료, 페놀, 유기 화합물 및 중금속과 같은 다양한 오염물질에 대해 뛰어난 흡착 성능을 보여 산업 전반에서 오래 전부터 이미 널리 사용되고 있다. 활성탄의 주요 장점은 높은 흡착 용량과 재생 가능성이며, 기공 구조가 흡착 용량을 결정짓는 중요한 요소로 작용한다. 다양한 물리적, 화학적 개질 방법을 통해 특정 오염물질에 대한 선택성을 강화할 수도 있다. 단점이라면 제조 과정에서 고온을 만들기 위한 높은 에너지 소모량과 재생 시 발생하는 추가적인 비용과 성능 저하, 일반 활성탄의 경우 비선택적 흡착성질 등이 있다.

활성탄은 이미 산업 현장에서 널리 사용되고 있기 때문에 활성탄에 대한 연구는 주로 물리적, 화학적 개질을 통한 선택성 부여에 집중되어 있다. 물리적 개질은 주로 주변 분위기를 질소상태, 산소상태 또는 다습한 상태 등으로 유지하면서 승온속도와 활성화 시간 등을 조절하는 것으로 이루어진다[12]. 화학적 개질은 불활성 기체 분위기에서 KOH, ZnCl₂, H₃PO₄ 등의 다양한 첨가제를 투입해서 이루어진다[13]. Figure 1은 쌀겨를 이용한 활성탄 제조에 있어서 flash pyrolysis를 용한 물리적 활성화를 통해 쌀겨에 포함된 silica를 제거하는 활성화 공정을 보여준다[12]. 이러한 물리적 활성화를 통해 쌀겨에서 생산되는 활성탄의 흡착 성능을 향상시킬 수 있었다. 또한, 활성탄의 재생 과정에서 발생하는 성능 저하를 최소화하기 위한 물리적, 화학적 방법도 연구되고 있다. Ma 등은 6가 크롬 흡착에 적용하기 위한 활성탄을 연구하였는데, biochar를 이용한 활성탄 제조과정에서 polyethylenimine

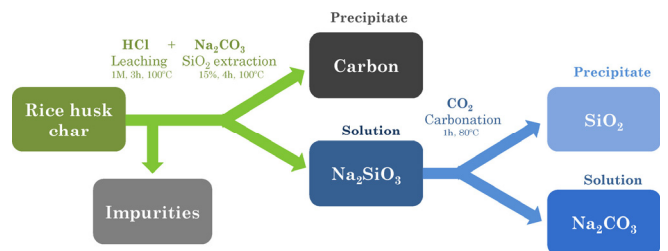


Figure 1. Experimental procedure followed for the production of amorphous silica and carbonaceous precursor (Reprinted with permission from [12]. Copyright by 2015 American Chemical Society).

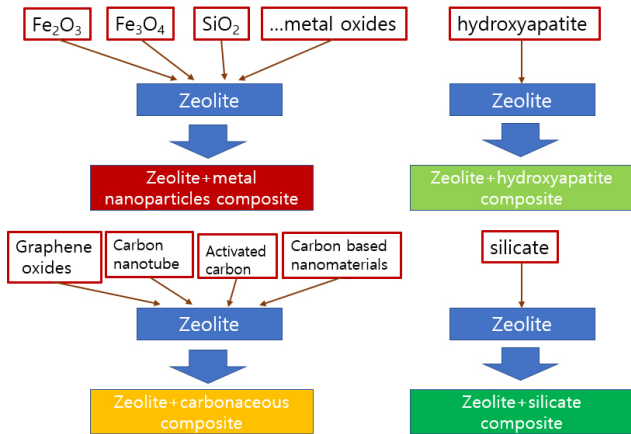


Figure 2. Schematic of the various zeolite-based composites prepared from zeolite and inorganic materials.

(PEI)를 첨가제로 투입하여 amino group을 활성탄 표면에 많이 만들어 6가 크롬 흡착에 대한 선택성을 부여했다[14].

3.2. 제올라이트(zeolite)

제올라이트는 알루미늄, 규소, 산소로 구성된 다공성 결정 구조를 가지는 천연 광물로, 촉매, 흡착제, 양이온교환제, 세제 첨가제, 사료 첨가제, 토질 개량제 등 다양한 분야에 적용되고 있다[15]. 특히 이온 교환 및 흡착 능력이 뛰어나며, 중금속 이온 제거에 탁월한 성능을 보인다[16]. 암모니아, 인과 같은 영양물질 제거에도 사용할 수 있다[17]. 규칙적인 미세 기공 구조 덕분에 특정 이온에 대해 높은 선택성을 가질 수 있으며, 높은 이온 교환 성능과 열적 안정성은 제올라이트의 장점이다. 또한 제올라이트는 높은 온도에서도 안정해서, 400 °C를 넘어서면 연소되어버리는 활성탄과는 다르게, 열처리를 통해서 쉽게 흡착된 물질을 탈착시켜 재생할 수 있다. 천연 제올라이트의 종류가 한정적인 한계가 있어서 합성 제올라이트에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔고, 현재 약 200여 종류의 합성 제올라이트가 알려져 있다. 천연이나 합성 제올라이트 모두 중금속 흡착제로서 연구가 많이 되어왔으며, 특히 산업폐수에서 발견되는 Cu^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} 등의 중금속 양이온 제거 연구가 많이 보고되고 있다[8].

제올라이트는 또한 다양한 소재와 복합화하여 흡착 성능을 향상시킨 흡착제로도 자주 연구되고 있다[18]. Figure 2는 산화물 나노입자, 활성탄, 탄소나노튜브, 산화그래핀 등 탄소계열 재료, 수산화인회석(hydroxyapatite), 규산염(silicate) 등 다양한 무기물과 제올라이트 사이에 복합화 가능성을 보여주고 있다.

한편, 제올라이트 복합화는 무기물뿐만 아니라 polypyrrole 등 고분자, 유기물과도 가능하다. 최근 연구에서는 중금속 이온 외에도 유기 오염 물질을 제거할 수 있도록 기능화된 제올라이트의 개발이 활발히 진행되고 있으며, 제올라이트와 다른 나노소재를 결합하여 물리적 안정성과 흡착 효율을 동시에 높일 수 있는 복합소재에 대한 연구도 주목받고 있다.

3.3. 나노소재(nanomaterials)

나노소재는 나노미터 크기의 입자로 구성된 흡착 소재로, 큰 비표면적 덕분에 높은 흡착 성능을 가진다. 나노영가철(nano-sized zero valent iron, nZVI), 산화물 나노입자(nano-sized metal oxides), 그래핀

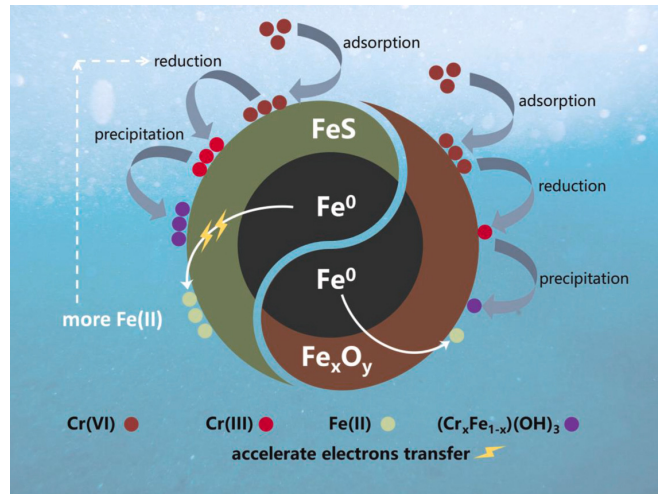


Figure 3. Proposed mechanism for Cr(VI) removal by FeS/Fe(0) (Reprinted with permission from [21]. Copyright by 2021 Elsevier Ltd.).

(graphene), 산화 그래핀(graphene oxide, GO), 환원된 산화 그래핀(reduced graphene oxide, rGO), 이산화티타늄(TiO_2) 등 다양한 나노소재가 개발되어 산업폐수 흡착 처리에 적용되고 있다. 이들 소재는 주로 중금속이나 유기 오염물, 병원성 미생물 제거 분야에서 연구되고 있다[19]. 나노소재는 뛰어난 흡착 능력과 합성 방법에 따라 특정 오염 물질에 대한 높은 선택성을 가질 수 있으며, 다양한 형태로 개질될 수 있어 원하는 특정 용도에 맞는 성질을 보유하도록 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 다만 나노소재는 성능을 유지하면서 대량으로 생산하기가 쉽지 않으며, 제조비용도 일반적으로 높다. 또한 나노 크기의 인위적 물질이 생태와 환경에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서도 연구가 충분하지 않아, 생태독성 관점에서 주의를 기울여야 한다. 또한, 나노소재는 회수 및 재사용이 일반적으로 어렵다고 알려져 있다[20].

나노영가철은 강력한 환원 능력을 가지고 있어 중금속 이온을 환원시켜 침전시키거나 흡착해서 제거하는 연구에 많이 보고되고 있는데, 주변 환경에 따라 쉽게 산화되는 단점을 지닌다. Zhu 등은 나노영가철을 황화 처리하여 황화철 겹질로 나노영가철 핵을 감싸는 방식으로 환원 능력을 유지하면서도 쉽게 산화되지 않는 core-shell 구조의 나노영가철을 보고하였고, 이 재료를 6가 크롬 환원 제거에 효과적으로 적용하여 그 우수한 성능을 확인했다(Figure 3)[21].

3.4. 바이오 흡착제(bioadsorbents)

바이오 흡착제는 천연 바이오매스나 미생물을 활용한 흡착 소재로, 환경친화적으로 생분해성을 가지며 재생 가능하고 비용적으로 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 화학적 변형을 통해 흡착 성능을 높일 수도 있다[22]. 해조류, 쌀겨, 톱밥, 계 껍질에서 추출되는 키틴(chitin) 등의 바이오매스는 중금속 흡착제로 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히, 해조류 기반 흡착제는 다량의 황산기(-OSO₃⁻)를 포함하고 있어 중금속 이온과 강하게 결합하는 특징을 가지고 있다[23]. 미생물 기반 흡착제는 폐수 내 특정 오염물질에 대해 높은 선택성을 보이며, 생물학적 처리 공정과 결합하여 폐수 처리 효율을 극대화할 수 있다. 그러나 바이오 흡착제는 흡착 속도가 느리고, 반복 사용 시 효율이 저하되며 물리적/화학적 내구성이 낮다는 단점이 있다.

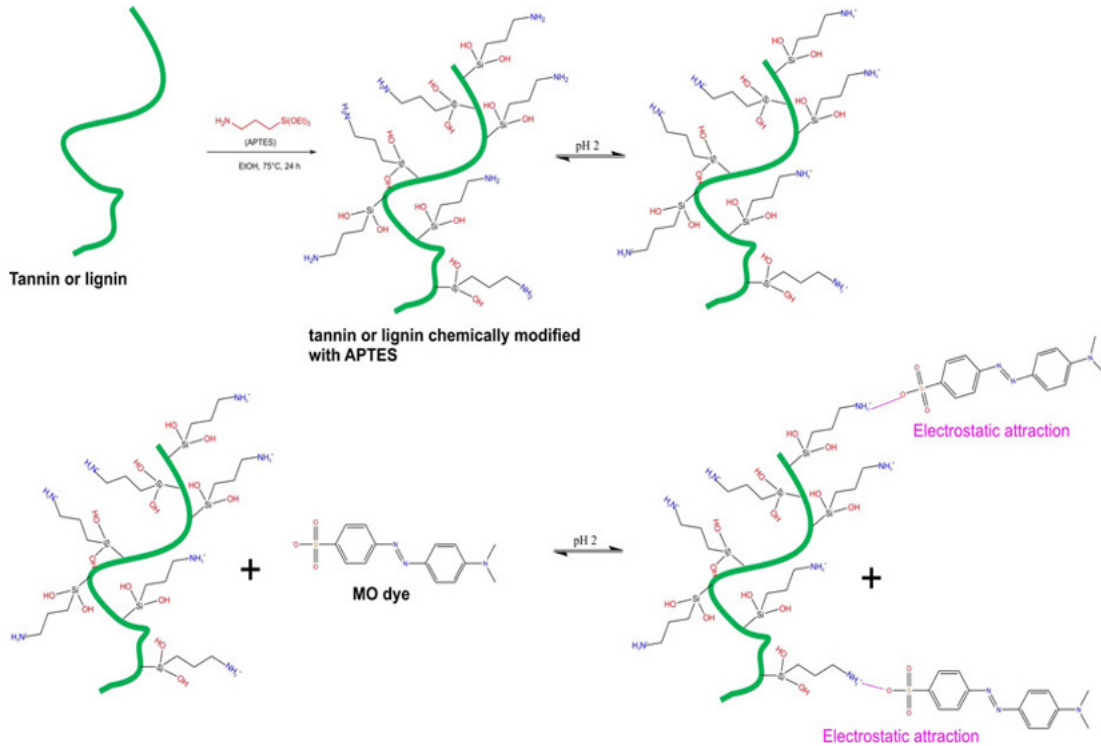


Figure 4. Schematic of Grafting of APTES with lignin and tannin parts (top), Adsorption of MO dye with the bioadsorbent (bottom) (Reprinted from [24]. Copyright by 2022 American Chemical Society, CC-BY4.0).

Cavalcante 등은 포도밭에서 나오는 부산물에 친수성을 높이는 데 사용되는 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES)을 적용하여 실레인 표면처리하고, 염료인 methyl orange 흡착 제거에 적용하였다(Figure 4)[24]. APTES 처리를 통해 흡착제 표면의 암모니아 그룹과 methyl orange의 황산 그룹 간에 정전기적 인력을 통해 흡착량을 높일 수 있었다. 그 밖에 다른 기능기들 간의 van der Waals, $\pi - \pi$ 결합, 수소 결합 등도 확인되었다.

바이오 흡착제의 최근 연구 동향에서는 특히 자연에서 발견되는 생체 구조를 모방하여 흡착 성능을 극대화하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 예를 들어, 특정 해조류의 구조를 모방한 흡착제는 중금속 이온 제거에서 탁월한 성능을 보여준다. 또한, 바이오 흡착제의 물리적, 화학적 특성을 개선하기 위한 개질 방법도 활발히 연구되고 있다.

Table 1은 위에서 설명한 네 가지 흡착 소재 들을 산업폐수 처리에 적용하고자 할 때 기대할 수 있는 성능 및 장단점을 정리한 것이다. 실제 산업 현장에서 이들 흡착 재료가 보이는 성능은 구체적인 폐수의 성상 및 종류, 오염물질의 농도, 투입 조건 등에 따라 달라질 것이나, 일반적으로 저 정도의 성능을 예상하고 각각의 장단점을 염두에 두는 것이 좋다.

3.5. 흡착소재에 대한 미래 연구 방향

기존에 보고된 흡착 소재들은 각각 연구를 통해 나름대로의 장점과 단점을 가지고 있는 것이 확인되었다. 장점을 더 늘리고 단점을 보완하고자 하는 미래 연구 방향은 크게 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 표면 개질: 흡착 소재의 성능을 향상시키기 위한 대표적인 방법

Table 1. Comparison and Pros and Cons of Adsorbent Materials in Terms of Their Adsorption Capacity and Efficiency

| Materials | Absorption capacity (mg/g) | Removal efficiency (%) | Pros | Cons |
|------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Activated carbon | 10~1000 | 70~95 | *Can be applied to various contaminants *Easy to regenerate | *Relatively expensive *Less efficient when regenerated |
| Zeolite | 1~300 | 60~90 | *Inexpensive if natural *Selective adsorption possible for specific contaminants | *Can be very inefficient for specific contaminants *Adsorption kinetics can be very slow due to small pore size |
| Bio-adsorbent | 1~200 | 50~80 | *Inexpensive and environment friendly *Recycle of various bio-byproduct | *Poor selectivity for contaminants *Not so stable, physically and chemically |
| Nanomaterials | 10~3000 | 80~99 | *High adsorption capacity and removal rate possible through artificial synthesis *Various shapes and selectivity control possible | *High production cost *Synthesis processes can be environment unfriendly *Less efficient when mass produced |

으로 기존에 알려진 소재들에 대해 다양한 표면 개질 기술이 시도되고 있다. 활성탄의 표면에 산화제나 환원제를 도입하여 화학적 결합을 유도하거나, 나노소재의 표면에 기능성 그룹을 도입하여 특정 오염물질에 대한 선택성을 높이는 방법 등이 사용된다. 이러한 개질을 통해 흡착 소재의 표면 반응성을 높이고, 다양한 환경 조건에서 효율적인 흡착을 가능하게 한다[25].

2) 복합 소재 개발: 서로 다른 흡착 소재의 장점을 결합하여 복합 흡착제를 개발하는 연구가 활발하다. 예를 들어, 활성탄과 나노소재를 결합한 복합 소재는 큰 비표면적과 높은 반응성을 동시에 제공하여 중금속과 유기 오염물의 동시 제거를 가능하게 할 수 있다. 제올라이트와 바이오 흡착제를 결합하여 처리 효율과 비용 효율성을 동시에 달성하려는 시도도 있다. 이렇게 복합 소재는 다양한 오염물질에 대해 맞춤형 폐수 처리 솔루션을 제공할 수 있다[26].

3) 재사용 및 재생 기술: 흡착 소재의 경제성을 높이기 위해 재사용 가능한 흡착제를 개발하고, 이를 재생하는 기술은 필수적으로 요구되고 있다. 열적 재생, 화학적 재생, 생물학적 재생 방법을 통해 흡착제를 재사용할 수 있으며, 이로써 비용을 절감하고 환경적 영향을 최소화해야 한다.

4) 지속 가능한 소재 개발: 실험실에서 행하는 기초 연구가 실제 현장에 적용 가능한 흡착제에 도달하기 위해서는 점점 더 환경 친화적이고 지속 가능한 방법을 통한 흡착 소재 개발이 요구되고 있다. 예를 들어, 재생 가능한 바이오매스를 이용한 흡착제는 폐기 시 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있다. 또한, 폐기물로부터 유용한 소재를 재활용하여 흡착제로 활용하는 방안에 대한 연구 필요성도 점점 더 높아지고 있다[27,28].

5) 새로운 나노소재 탐색: 나노기술을 이용하여 지금까지 알려지지 않았던 새로운 흡착 소재를 탐구하는 것도 계속적으로 중요하다고 할 수 있다. 예를 들어, 그래핀 기반 나노소재, 금속유기구조체(MOFs), 나노복합체 등이 기존 흡착제 보다 높은 흡착 능력과 효율성을 가지는 새로운 흡착제가 될 수 있다. 이러한 새로운 나노소재의 특성과 응용 가능성에 대한 더 넓은 탐구 및 산업적으로 실용성을 높이는 연구가 필요하다[29].

6) 모델링 및 최적화: 흡착 공정에 대한 모델링 고도화를 통해 처리 효율을 높이는 연구가 필요하다. 앞에서 소개한 Langmuir isotherm 모델과 Freundlich isotherm 모델을 넘어서는 수학적 모델링 또는 수치 계산을 통한 시뮬레이션을 이용해 흡착 공정에 대한 매개변수를 최적화하고, 실시간 모니터링 결과와 비교하여 흡착 공정의 효율성을 극대화하는 연구가 필요하다. 이러한 연구를 통한 공정 최적화는 경제적 효율성을 높이고, 처리 성능을 향상시키는 데 중요한 요소로 작용할 것이다[30].

4. 결 론

본 리뷰 논문은 산업폐수 처리에 적용되는 다양한 흡착 소재를 소개하고, 각 소재의 특성과 응용 분야를 다루었다. 활성탄, 제올라이트, 나노소재, 바이오 흡착제와 같은 다양한 흡착제는 각각 고유한 물리적, 화학적 특성을 가지고 있으며, 다양한 유형의 오염물질에 대해 효과적인 제거 성능을 보인다. 활성탄은 높은 표면적과 다공성 구조를 통해 유기 오염물과 중금속 제거에 효과적이며, 제올라이트는 이온 교환 능력과 규칙적인 기공 구조 덕분에 중금속과 같은 이온성 오염물질 처리에 탁월한 성능을 보인다. 나노소재는 나노 크기와 높은 반응성으로 인해 기존 소재들보다 더욱 효율적인 처리 성능을 제공할

수 있으며, 바이오 흡착제는 경제성과 환경 친화성 측면에서 지속 가능한 대안으로 주목받고 있다. 이렇게 다양한 흡착 소재들은 각기 다른 장점과 한계를 가지고 있으며, 실제 산업폐수 처리 공정에서 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 개별적인 특성을 고려한 맞춤형 접근이 필요하다. 예를 들어, 복합 오염물질이 포함된 폐수의 경우, 하나의 흡착 소재만으로 모든 오염물질을 효과적으로 제거하기 어려우므로, 여러 흡착제를 결합하거나 복합 소재를 개발하여 다기능성을 갖는 흡착제가 요구된다. 또한, 특정 용도에 대해 흡착 소재를 선택하고 적용함에 있어 경제성, 재생 가능성, 생태 독성, 환경 영향 등을 종합적으로 고려해야 하며, 이는 지속 가능한 산업폐수 관리에 매우 중요한 요소가 될 것이다. 향후 흡착제 연구는 흡착 소재의 성능 향상과 새로운 소재 개발에 중점을 두게 될 것이다. 특히, 나노기술을 활용한 고성능 흡착 소재의 개발은 흡착 효율성과 선택성을 극대화할 수 있는 중요한 연구 방향이 될 것이다. 또한, 흡착 공정의 모델링 및 최적화 연구는 산업 현장에서 실질적인 적용성을 높이고, 처리 공정의 경제성을 개선하는 데 기여할 수 있을 것이다. 최종적으로는 지속 가능한 소재 개발과 재사용 가능성을 고려한 흡착제 연구가 환경 친화적인 산업폐수 처리 기술의 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신사업(산업폐수 처리용 석유계 잔사유 기반 다공성 흡착소재 개발: 20012763)의 지원 및 한국과학기술연구원 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Y. J. Choe, J. Kim, I.-S. Choi, and S. H. Kim, Metal oxides for Fenton reactions toward radical-assisted water treatment: A review, *J. Ind. Eng. Chem.*, Doi.org/10.1016/j.jiec.2024.08.006.
2. T. T. Le, M. Lee, K. H. Chae, G.-H. Moon, and S. H. Kim, Control of copper element in mesoporous iron oxide photocatalysts towards UV light-assisted superfast mineralization of isopropyl alcohol with peroxydisulfate, *Chem. Eng. J.*, **451**, 139048 (2023).
3. A. A. Aryee, F. M. Mpatani, R. Han, X. Shi, and L. Qu, A review on adsorbents for the remediation of wastewater: Antibacterial and adsorption study, *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**, 106907 (2021).
4. L. N. Pincus, A. W. Lounsbury, and J. B. Zimmerman, Toward realizing multifunctionality: Photoactive and selective adsorbents for the removal of inorganics in water treatment, *Acc. Chem. Res.*, **52**, 1206-1214 (2019).
5. Faheem, J. Du, S. H. Kim, M. A. Hassan, S. Irshad, and J. Bao, Application of biochar in advanced oxidation processes: supportive, adsorptive, and catalytic role, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **27**, 37286-37312 (2020).
6. S. A. Obaid, Langmuir, Freundlich and Tamkin adsorption isotherms and kinetics for the removal artichoke tournefortii straw from agricultural waste, *J. Phys. Conf. Ser.*, **1664**, 012011 (2020).
7. K. Azam, N. Shezad, I. Shafiq, P. Akhter, F. Akhtar, F. Jamil, S. Shafique, Y.-K. Park, and M. Hussain, A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes, *Chemosphere*, **306**, 135566 (2022).
8. M. Irannajad and H. Kamran Haghghi, Removal of heavy metals

- from polluted solutions by zeolitic adsorbents: A review, *Environ. Process.*, **8**, 7-35 (2021).
9. H. Najafi, S. Farajfaed, S. Zolgharnian, S. H. Mosavi Mirak, N. Asasian-Kolur, and S. Sharifian, A comprehensive study on modified-pillared clays as an adsorbent in wastewater treatment processes, *Process Saf. Environ. Prot.*, **147**, 8-36 (2021).
 10. A. Saravanan, P. S. Kumar, R. V. Hemavathy, S. Jeevanantham, M. J. Jawahar, J. P. Neshaanthini, and R. Saravanan, A review on synthesis methods and recent applications of nanomaterial in wastewater treatment: Challenges and future perspectives, *Chemosphere*, **307**, 135713 (2022).
 11. I. Anastopoulos, J. O. Ighalo, C. Adaobi Igwegbe, D. A. Giannakoudakis, K. S. Triantafyllidis, I. Pashalidis, and D. Kalderis, Sunflower-biomass derived adsorbents for toxic/heavy metals removal from (waste) water, *J. Mol. Liq.*, **342**, 117540 (2021).
 12. J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, and M. Olazar, Physical activation of rice husk pyrolysis char for the production of high surface area activated carbons, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **54**, 7241-7250 (2015).
 13. M. J. Prauchner, K. Sapag, and F. Rodríguez-Reinoso, Tailoring biomass-based activated carbon for CH₄ storage by combining chemical activation with H₃PO₄ or ZnCl₂ and physical activation with CO₂, *Carbon*, **110**, 138-147 (2016).
 14. Y. Ma, W.-J. Liu, N. Zhang, Y.-S. Li, H. Jiang, and G.-P. Sheng, Polyethylenimine modified biochar adsorbent for hexavalent chromium removal from the aqueous solution, *Bioresour. Technol.*, **169**, 403-408 (2014).
 15. M. Nascimento, P. S. M. Soares, V. P. de Souza, Adsorption of heavy metal cations using coal fly ash modified by hydrothermal method, *Fuel*, **88**, 1714-1719 (2009).
 16. A. Khaleque, M. M. Alam, M. Hoque, S. Mondal, J. B. Haider, B. Xu, M. A. H. Johir, A. K. Karmakar, J. L. Zhou, M. B. Ahmed, and M. A. Moni, Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review, *Environ. Adv.*, **2**, 100019 (2020).
 17. X. Ji, M. Zhang, Y. Wang, Y. Song, Y. Ke, and Y. Wang, Immobilization of ammonium and phosphate in aqueous solution by zeolites synthesized from fly ashes with different compositions, *J. Ind. Eng. Chem.*, **22**, 1-7 (2015).
 18. L. Roshanfekr Rad and M. Anbia, Zeolite-based composites for the adsorption of toxic matters from water: A review, *J. Environ. Chem. Eng.*, **9**, 106088 (2021).
 19. S. Zahmatkesh, M. Hajiaghahi-Keshteli, A. Bokhari, S. Sundaramurthy, B. Panneerselvam, and Y. Rezakhani, Wastewater treatment with nanomaterials for the future: A state-of-the-art review, *Environ. Res.*, **216**, 114652 (2023).
 20. M. Nasrollahzadeh, M. Sajjadi, S. Irvani, and R. S. Varma, Green-synthesized nanocatalysts and nanomaterials for water treatment: Current challenges and future perspectives, *J. Hazard. Mater.*, **401**, 123401 (2021).
 21. X. Zhu, T. T. Le, J. Du, T. Xu, Y. Cui, H. Ling, and S. H. Kim, Novel core-shell sulfidated nano-Fe(0) particles for chromate sequestration: Promoted electron transfer and Fe(II) production, *Chemosphere*, **284**, 131379 (2021).
 22. A. I. Osman, E. M. A. El-Monaem, A. M. Elgarahy, C. O. Aniagor, M. Hosny, M. Farghali, E. Rashad, M. I. Ejimofor, E. A. López-Maldonado, I. Ihara, P.-S. Yap, D. W. Rooney, and A. S. Eltaweil, Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: A review, *Environ. Chem. Lett.*, **21**, 2337-2398 (2023).
 23. H. S. Kim, S. S. Jeong, J. G. Lee, J.-H. Yoon, S.-P. Lee, K.-R. Kim, S. C. Kim, M. B. Kirkham, and J. E. Yang, Biologically produced sulfur as a novel adsorbent to remove Cd²⁺ from aqueous solutions, *J. Hazard. Mater.*, **419**, 126470 (2021).
 24. E. H. M. Cavalcante, I. C. M. Candido, H. P. de Oliveira, K. B. Silveira, T. Victor de Souza Álvares, E. C. Lima, M. Thyrel, S. H. Larsson, and G. Simões dos Reis, 3-Aminopropyl-triethoxysilane-functionalized tannin-rich grape biomass for the adsorption of methyl orange dye: Synthesis, characterization, and the adsorption mechanism, *ACS Omega*, **7**, 18997-19009 (2022).
 25. K. G. Akpomie and J. Conrardie, Advances in application of cotton-based adsorbents for heavy metals trapping, surface modifications and future perspectives, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **201**, 110825 (2020).
 26. H. Li, X. Zhu, J. Zhao, G. Ling, and P. Zhang, Emerging adsorbents: Applications of sodium alginate/graphene oxide composite materials in wastewater treatment, *J. Water Process Eng.*, **59**, 105100 (2024).
 27. D. A. Gkika, A. C. Mitropoulos, and G. Z. Kyzas, Why reuse spent adsorbents? The latest challenges and limitations, *Sci. Total Environ.*, **822**, 153612 (2022).
 28. M. Faheem, M. Azher Hassan, J. Du, and B. Wang, Harnessing potential of smart and conventional spent adsorbents: Global practices and sustainable approaches through regeneration and tailored recycling, *Sep. Purif. Technol.*, **354**, 128907 (2025).
 29. F. Karimi, A. Ayati, B. Tanhaei, A. L. Sanati, S. Afshar, A. Kardan, Z. Dabirifar, and C. Karaman, Removal of metal ions using a new magnetic chitosan nano-bio-adsorbent; A powerful approach in water treatment, *Environ. Res.*, **203**, 111753 (2022).
 30. M. H. Dehghani, S. Gholami, R. R. Karri, E. C. Lima, A. H. Mahvi, S. Nazmara, and M. Fazlzadeh, Process modeling, characterization, optimization, and mechanisms of fluoride adsorption using magnetic agro-based adsorbent, *J. Environ. Manage.*, **286**, (2021) 112173.

Authors

Sang Hoon Kim; Dr.rer.nat., Principal Research Scientist, Extreme Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 02792, Korea; kim_sh@kist.re.kr
 Suk Soon Choi; Ph.D., Professor, Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University, Jecheon 271236, Korea; sschoi@semyung.ac.kr