pISSN 1229-1153 / eISSN 2465-9223 *J. Food Hyg. Saf.*
Vol. 41, No. 1, pp. 55~64 (2026)
https://doi.org/10.13103/JFHS.2026.41.1.55

Journal of Food Hygiene and Safety
Available online at http://www.foodhygiene.or.kr

해조류 유래 바이오흡착제를 활용한 인 제거 특성 분석 및 적용성 평가

손승대[1] · 김건일[1] · 박준원[1] · 김은식[1]* · 정선희[2]*
[1]전남대학교 환경시스템공학과, [2]전남대학교 해양바이오식품학과

Phosphorus Removal Characteristics and Adsorption Behavior of Seaweeds as Natural Absorbents

Sueng-Dae Son[1], Geon-Il Kim[1], Jun-Won Park[1], Eun-Sik Kim[1]*, Sun Hee Cheong[2]*
[1]*Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Korea*
[2]*Department of Marine Bio-Food Sciences, Chonnam National University, Yeosu, Korea*

(Received Decmeber 10, 2025/Revised January 7, 2026/Accepted January 7, 2026)

ABSTRACT - This study evaluated the potential of two unmodified seaweeds, *Sargassum fulvellum*and *Ishige okamurae*, as low-cost adsorbents for aqueous phosphate removal under low phosphorus conditions. Batch tests (25±1°C; initial phosphorus concentration, approximately 0.67 mg/L) were performed for up to 72 h at adsorbent doses of 1.0, 5.0. and 10.0 g/L, and time-series concentration profiles showed a rapid decrease within the first 12-24 h, followed by an approach to equilibrium. The removal efficiency increased with the seaweed dose; after 72 h, the maxima were approximately 12.0% for *I. okamurae*and 12.4% for *S. fulvellum*, the mass-specific adsorption capacity (*q*) was relatively higher for *I. okamurae*at the lowest dose. The adsorption data were obtained at a single initial concentration, equilibrium isotherm analysis was performed on an exploratory basis. The Freundlich and Langmuir isotherms yielded low coefficients of determination, establishing the basic performance of unmodified seaweeds at low phosphate levels. Overall, these results indicate the need forkinetic analysis using time-dependent models, together with material optimization (i.e., surface modification), to enhance the capacity and practical applicability of seaweeds for phosphorus adsorption.

Key words: Phosphorus removal, *Sargassum fulvellum*, *Ishige okamurae*, Adsorption isotherm, Langmuir and Freundlich model

산업화와 도시화가 급속도로 진행되면서 산업폐수 배출량과 오염물질의 종류가 기하급수적으로 증가하고 있다. 특히 인(phosphorus, P)은 농업 활동, 공업 폐수, 생활 하수 등 다양한 경로를 통해 자연 수계로 유입된다. 화학 비료는 농업 생산성을 높이기 위해 널리 사용되지만, 과잉 사용된 인 성분이 토양에 남거나 강우 때문에 하천과 호수로 유입되는 문제점을 야기한다. 특히 식품 가공, 제조, 제약 공업 등은 폐수 중에 고농도의 인을 포함하고 있으며, 이러한 폐수가 적절히 처리되지 않으면 수체로 유입되어 수중의 인 농도를 높인다. 고농도의 인으로 인한 문제점 중 가장 큰 악영향을 유발하는 것은 부영양화(eutrophication)이다. 부영양화는 하천과 호소에서 조류 증식을 촉진해 용존 산소를 감소시키고, 어류와 수생 생물의 생존을 위협하며 생태계를 교란한다[1]. 결과적으로 물의 투명도를 낮추고, 수생 생태계를 교란하며, 생물 다양성을 감소시키고, 식수 공급과 농업용수 사용에도 부정적인 영향을 미치는 등 생태계와 인간 활동 모두에 부정적인 영향과 경제적 손실까지 초래하는 환경 문제로 대두되고 있다.

기존 인 제거 기술은 주로 화학적 및 생물학적 방법에

*Correspondence to: Eun-Sik Kim, Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea
Tel: +82-61-659-7266, Fax: +82-61-659-7269
E-mail: eskim@jnu.ac.kr
*Correspondence to: Sun Hee Cheong, Department of Marine Bio-Food Sciences, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea
Tel: +82-61-659-7215, Fax: +82-61-659-7219
E-mail: sunny3843@jnu.ac.kr

Copyright © The Korean Society of Food Hygiene and Safety. All rights reserved. The Journal of Food Hygiene and Safety is an Open-Access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의존해 왔다. 예를 들어, 화학적 침전법은 알루미늄염이나 철염과 같은 화학 물질을 이용해 인을 불용성 화합물로 침전시키는 기술로 인을 제거하는 효과적인 기술이지만, 처리 비용이 높고 침전 과정에서 2차 오염이 발생할 가능성이 있다[2]. 또한, 침전 과정에서 pH가 낮아져 알칼리 보정이 요구되며, 운영 비용을 더욱 증가시키는 원인이 된다. 생물학적 처리는 미생물의 대사를 이용하여 인을 제거하는 환경친화적 공정으로, 현재 하수처리장을 포함한 다양한 규모의 처리 시설에서 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 미생물은 pH, 온도, 영양소 농도 등 환경 조건에 민감하여, 인 농도가 과도하게 높거나 급격한 환경 변화가 발생할 경우 처리 효율이 저하되는 문제점이 있다. 이러한 이유로, 다양한 환경 조건에서도 안정적이며 비용 효율적인 인 제거 기술 개발이 요구된다.

수질오염 문제를 해결하기 위한 기존의 화학적, 생물학적 처리 기술은 높은 처리 비용과 부수적인 환경 문제를 동반하는 한계가 있다. 이에 따라, 천연자원을 활용한 흡착 기술이 주목받고 있다. 천연 흡착제는 자연에서 쉽게 얻을 수 있는 재료를 기반으로 하며, 비용 효율성이 높고 환경친화적인 장점이 있다. 특히, 천연 흡착제는 화학 약품 사용을 최소화하면서 다양한 환경 조건에서도 안정적인 성능을 발휘할 수 있으며, 생태계에서 쉽게 얻을 수 있고 저비용과 친환경적인 특성으로 인해 연구의 주목을 받고 있다. 특히 해조류(seaweed)는 다공성 구조와 표면에 다양한 작용기를 포함하고 있어 흡착제로서의 가능성을 보여준다[3].

모자반(*Sargassum fulvellum*)은 한국 연안에 풍부하게 분포하는 갈조류로, 표면에 카복실기(-COOH)와 수산기(-OH) 같은 작용기가 다량 포함되어 있어 중금속과 인과 같은 오염물질을 효과적으로 흡착할 수 있는 가능성을 보여준다[4]. 또한, 현재 대량으로 발생하는 해양 폐기물로 분류되어 효율적으로 처리하지 못하면 환경적, 경제적 피해를 일으킬 수 있어서 적절한 활용도를 찾고 있다. 패(*Ishige okamurae*) 또한 흡착제로서 잠재력이 높은 갈조류 중 하나다. 패는 고유의 화학적 성질과 물리적 구조로 인해 이온 교환과 표면 흡착에서 우수한 성능을 보이며, 중금속 및 인 제거 연구에서 중요한 소재로 평가받고 있다[5].

본 연구에서는 모자반과 패를 흡착제로 활용해 수중의 인 제거 가능성을 평가하고, 특정 조건에서 흡착 성능을 비교 분석하였다. 모자반과 패의 주요 작용기를 활용한 흡착 메커니즘을 규명하고, 실험 결과를 통해 천연자원의 활용 가능성과 지속할 수 있는 수질 정화 기술을 판단하고자 한다. 연구 결과를 통해 모자반과 패를 활용하여 기존 화학적 처리 방식의 한계를 보완하고, 해양 폐기물을 자원으로 전환함으로써 환경 순환 기술을 구현할 가능성을 제시하고자 한다.

Materials and Methods

Chemicals

본 연구에 사용된 모든 시약은 별도의 추가 정제 과정 없이 사용하였다. Ammonium molybdate tetrahydrate (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA), potassium antimony (III) tartrate hydrate (≥99%, Merck, Darmstadt, Germany), sulfuric acid (Thermo Fisher Scientific), ammonium sulfamate (Merck), L-ascorbic acid (Merck), potassium phosphate dibasic anhydrous (≥99%, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)가 본 실험을 위해 사용하였다. 실험을 위해 혼합용액 A, B 및 표준원액을 조제하여 흡착 실험을 수행하였다. 혼합용액 A는 ammonium molybdate tetrahydrate 6.0 g 및 potassium antimony (III) tartrate hydrate 0.24 g을 증류수 300 mL에 완전히 용해한 후, sulfuric acid 120 mL 및 ammonium sulfamate 5.0 g을 첨가하였으며, 최종적으로 정제수를 가하여 총부피를 500 mL로 조정하였다. 혼합용액 B는 L-ascorbic acid 7.2 g을 정제수 100 mL에 용해하여 7.2% (w/v) 농도로 조제하였다. 표준원액(100 mg/L P)은 potassium phosphate dibasic anhydrous 0.439 g을 증류수에 용해한 후, 총부피를 1.0 L로 맞추어 제조하였다. 이후, 표준용액은 이 표준원액 25 mL를 취하여 정제수를 첨가하고 총부피를 500 mL로 희석함으로써 조제하였다[6].

시료의 준비 및 전처리

본 연구에서 사용된 모자반(Sargassum, 이하 Sar)과 패(Ishige, 이하 Ish)는 대한민국 제주도 연안 및 해안에서 채취하였다. 수거된 시료는 실험 전처리를 위해 증류수로 여러 번 세척하여 해수유래 염분, 모래 및 표면 부착 불순물을 제거하였다. 세척된 시료는 50°C의 밀폐형 항온 건조기에서 24 h 동안 건조하였으며, 건조 완료 후 균질한 입도를 확보하기 위해 분쇄기를 사용하여 미세 분말 형태로 가공하였다. 모든 실험에 동일한 전처리 조건을 적용하여 결과의 재현성과 정량적 비교 가능성을 확보하였으며, 분쇄된 시료는 밀폐 용기에 보관하여 흡착 실험에 활용하였다[7].

흡착 실험

본 연구에서는 Sar과 Ish를 흡착제로 활용하여 인의 제거 효율을 비교 분석하였다. 각 흡착제는 건조 후 균질화된 상태에서 각각 0.5 g, 2.5 g, 5.0 g의 중량으로 계량되어, 초기 인 농도가 약 0.67 mg/L로 설정된 500 mL의 인 인공폐수에 첨가하였다. 실험은 상온(25±1°C)에서 5.24 RCF (g Force)의 교반 속도로 72 h 동안 수행되었으며, 이는 흡착제의 용액 내 균일한 분산 및 흡착 평형 도달을 위한 최적 조건으로 설정되었다[8]. 흡착 반응의 시간에 따른 인

제거 효율을 분석하기 위해, 반응 시작 후 12 h 간격(12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 60 h, 72 h)으로 일정량의 시료를 채취하였다. 용액 부피의 변화를 최소화하고 희석 효과를 방지하기 위해, 시료 채취 직후 동일한 부피의 증류수를 보충하여 전체 반응을 위한 용액의 부피를 일정하게 유지하였다.

시료 중 총인(total phosphorus, TP) 농도는 몰리브덴 청(molybdenum blue) 분광광도법을 활용하여 정량 분석하였다. 이를 위해, 각 시료에 몰리브덴산암모늄-아스코르브산 혼합 시약 0.4 mL를 첨가하고, 실온에서 15분간 반응시켜 몰리브덴 블루 착화합물을 생성하였다. 생성된 착화합물의 흡광도(absorbance)는 파장 880 nm에서 UV-Vis 분광광도계를 이용해 측정되었으며, 이는 표준곡선에 따라 인 농도로 환산하였다. 측정된 흡광도 값은 사전에 구축된 인산염 표준곡선을 기반으로 하여 인 농도로 환산하였다. 인 제거 효율(removal rates, %) 및 단위 질량당 흡착량(specific adsorption capacity, q_t, mg/g)은 각각 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$\text{Removal rates (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (2)$$

여기서, C_0는 초기 인 농도(mg/L), C_t는 시간 t에서의 인 농도(mg/L), V는 용액의 부피(L), m은 흡착제의 투입량(g)을 나타낸다.

Sar 및 Ish의 흡착 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 Freundlich (식 (3)) 및 Langmuir (식 (4)) 등온식(isotherm)을 적용하였다. 각각의 등온식은 다음과 같이 정의된다.

$$q_e = \frac{x}{m} = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

여기서, q_e는 단위 질량의 흡착제에 흡착된 흡착질의 양(mg/g), q_m은 단층(monolayer) 흡착 용량(mg/g), C_e는 평형 상태에서의 용액 중 흡착질의 농도(mg/L), K_F와 K_L은 각각 등온선에 대한 흡착 계수, n은 흡착 강도 또는 표면 이질성 지수이다. 실험 결과로부터 도출한 평형 농도(C_e) 및 흡착량(q_e) 값을 기반으로 Langmuir 등온식 계수와 로그 변환하여 선형 회귀 분석을 통해 Freundlich 등온식 계수를 도출하였다.

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{\mathrm{n}} \log C_e \quad (5)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (6)$$

모든 실험은 동일한 조건에서 3회 반복 수행되었으며, 각 측정값에 대한 평균값을 산출하여 분석에 활용하였다. 이를 바탕으로 흡착제의 종류 및 투입량에 따른 인 제거 특성과 흡착 성능 간의 상관관계를 비교·분석하였다.

해조류의 물리화학적 특성 분석

해조류 표면 미세구조 특성을 관찰하기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, CZ/Axia ChemiSEM System, Thermo Fisher Scientific) 분석을 시행하였다. 건조 및 분쇄된 시료를 Everhart-Thornley Detector (ETD)로 검출하였으며, 분석 조건은 Secondary Electron (SE) 모드의 가속전압 10-15 kV, 빔 전류 33-38 pA, 이격 거리(working distance)는 10.8-11.1 mm로 조정하여 다양한 배율의 이미지를 획득하였다.

화학적 표면 작용기 특성을 분석하기 위해 푸리에변환 적외선 분광법(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR을 적용하였다. 시료의 특성을 고려하여 감쇠전반사(Attenuated Total Reflectance, ATR)모드를 활용하였으며, 분석에는 Spectrum 3 FT-IR spectrometer (Spectrum IR software ver. 10.7.2, PerkinElmer, Shelton, CT, USA)와 MIRacle™ Single Reflection ATR (PIKE Technologies, Fitchburg, WI, USA)을 사용하였다. 측정은 중적외선(Mid-Infrared, MIR) 광원, OptKBr 빔스플리터, $LiTaO_3$ 검출기 조건에서 스펙트럼 범위 4000-650 cm^{-1}, 분해능 4 cm^{-1}, 스캔 횟수 32회로 수행하였다. 시료는 흡착 처리 전 건조 및 분쇄한 분말 상태로 ATR에 밀착시켜 단층 접촉으로 측정하였다.

해조류 시료의 비표면적 및 기공 특성은 비표면적 분석기(ASAP 2460 ver. 3.01, Micromeritics, Norcross, GA, USA)를 이용하여 질소 흡·탈착 등온선(77K, liquid nitrogen)을 측정함으로써 분석하였다. 시료는 50°C에서 15 h 동안 전처리하여 건조 분말 상태로 분석 셀에 장입하였으며, 사용된 시료의 질량은 Sar 0.908 g, Ish 1.691 g을 사용하였다. 상대압(P/P_0) 범위는 0.01-0.99에서 데이터를 취득하였고, equilibration interval은 10 s로 설정하였다. 비표면적은 다점 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 방법을 이용하여 계산하였으며, 회귀 분석 구간은 장비의 기본 설정값을 적용하였다. Total pore volume은 P/P_0 0.99에서 single-point 방식으로 산정하였고, average pore diameter는 BET 결과를 기반으로 한 계산식을 적용하였다. 또한, 기공 크기 분포(pore size distribution) 분석은 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 방법을 사용하여 측정하였다.

Results and Discussion

ATR FT-IR 분석

해조류 시료의 ATR FT-IR 스펙트럼은 표면의 주요 화학 작용기 구성을 나타내고 있으며, 분석 결과는 Fig. 1에

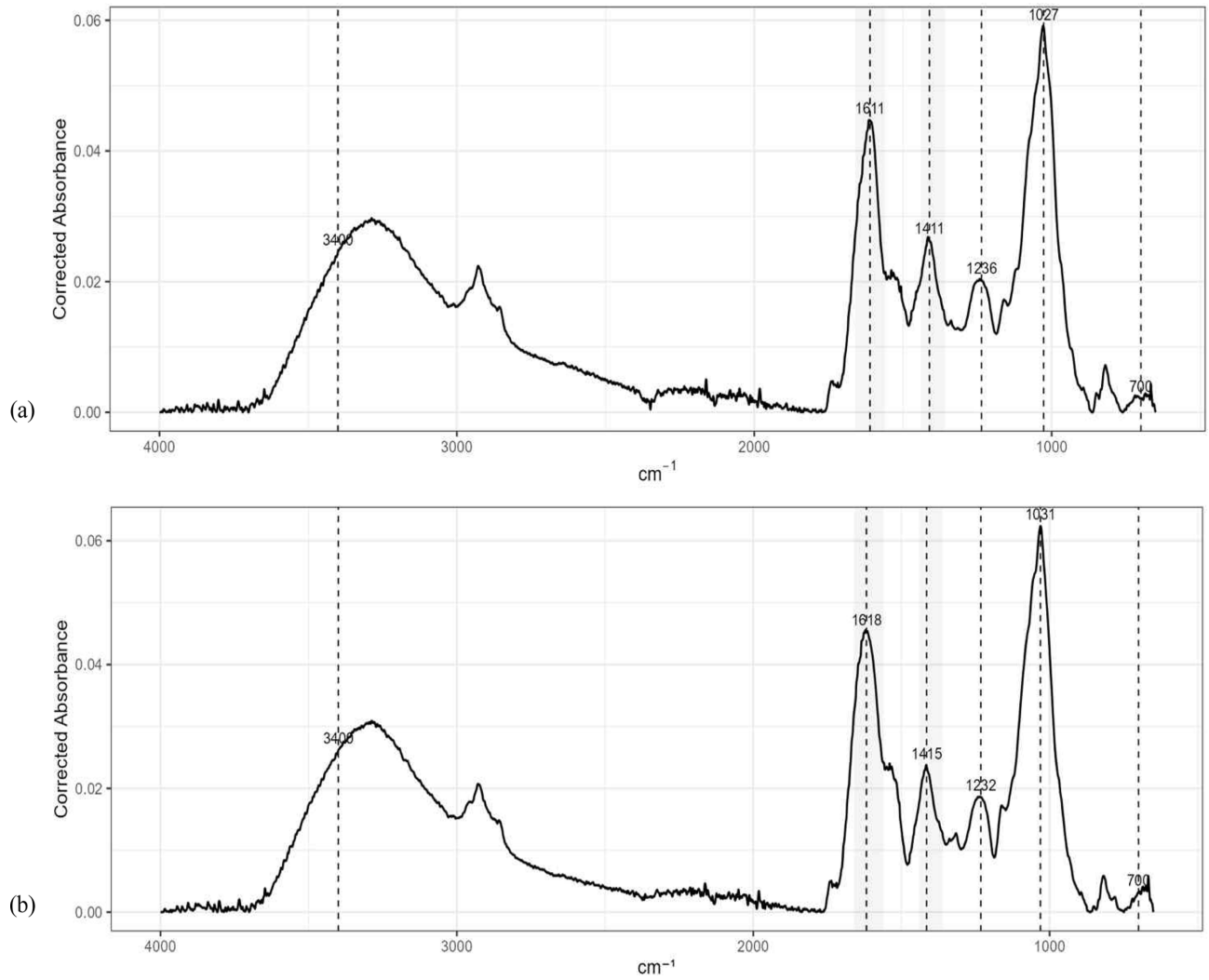

Fig. 1. FT-IR spectrum of (a) Ish, and (b) Sar.

제시하였다. 두 해조류 시료 모두 약 3400 cm^{-1} 부근에서 넓고 강한 밴드가 관찰되었으며, 이는 hydrogen bonding에 의해 결합된 hydroxyl group의 O-H stretching으로 해석할 수 있다. 또한, 2930-2950 cm^{-1}의 peak는 해조류 고유의 다당류 구조 내 pyranose ring에서 기원한 methyl group의 C-H stretching에 해당하는 것으로 판단된다. 두 시료에서 carboxylate 대역에 해당하는 두 개의 band가 확인되었으며, 이는 각각의 시료에서 $-COO^-$ 작용기의 asymmetric and symmetric stretching에 해당한다. Ish는 1611과 1411 cm^{-1}, Sar는 1618과 1415 cm^{-1}에서 관찰되었으며, 이는 갈조류 세포벽의 주요 구성 성분인 alginate 내 uronic acid에 의한 결과로 해석된다. 또한, 1236 cm^{-1} (Ish) 및 1232 cm^{-1} (Sar)에서 관찰된 band는 sulfate ester의 S=O stretching에 해당하며, 이는 fucoidan과 같은 sulfated polysaccharide의 특징적인 스펙트럼으로, 갈조류에서 보편적으로 보고되어 온 구조적 지표이다. 1027 cm^{-1} (Ish) 및 1031 cm^{-1} (Sar) 부근의 밴드는 polysaccharide backbone의 C-O stretching 및 glycosidic C-O-C의 vibration에 기인하는 것으로 볼 수 있다. Low-frequency region인 700 cm^{-1} 부근의 weak band는 문헌에 따라 C-O-S stretching in sulfated sugars 또는 out-of-plane bending vibration에 해당할 수 있다[9]. 갈조류 세포벽은 alginate 및 fucoidan 등으로 구성되며, $-COO^-$ (carboxylate)와 -OH (hydroxyl) 등 음전하성 작용기가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 관찰된 carboxylate 대역(1611-1618 및 1411-1415 cm^{-1})과 -OH 대역(-3400 cm^{-1})은 인산염 제거 과정에서 작용 가능한 표면 결합자리로 해석될 수 있다[10]. 또한 인산염은 수중에서 음이온($H_2PO_4^-$/HPO_4^{2-} 등)으로 존재하므로, 비개질 바이오매스에서의 제거는 표면전하에 따른 정전기적 상호작용, Ca^{2+}/Mg^{2+} 등 다가 양이온에 의한 bridging 또는 이온교환, 조건에 따른 인산염 침전 동반 등 복합 기전으로 설명되는 경우가 많다[11,12].

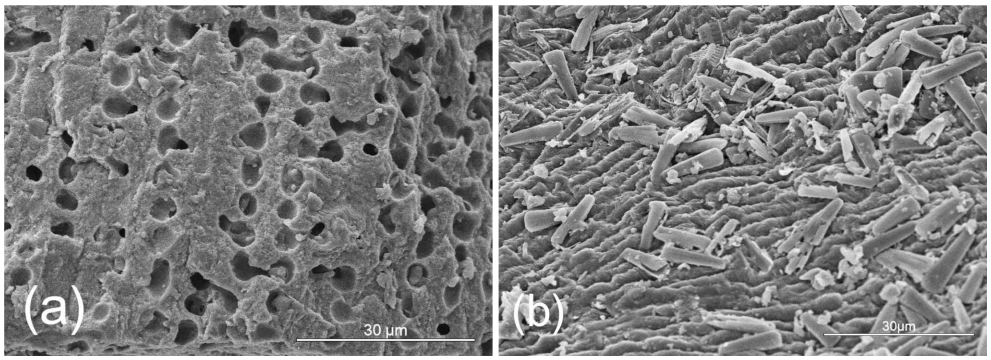

Fig. 2. The SEM images of (a) Ish, and (b) Sar.

Table 1. BET surface area and pore-structure metrics of Sar and Ish determined by N_2 adsorption

Sample name	Specific surface area (m^2/g)	Total pore volume (cm^3/g)	Average pore width (nm)	*t*-plot external area (m^2/g)	*t*-plot micropore volume (cm^3/g)
Sar	0.76	2.61×10^{-3}	11.66	1.18	-0.000263
Ish	0.20	3.65×10^{-4}	9.25	0.28	-0.000049

SEM 분석

SEM을 이용하여 해조류 표면의 형태학적 차이를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 제시하였다. Ish 시료(Fig. 2a)의 표면은 porous structure를 보여주며, 다양한 크기의 불규칙한 macro pores가 분포된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 기공 분포는 물질 내에서의 확산 경로 형성과 흡착물질의 침투 가능성이 있으며 매끄럽고 균일한 질감의 표면은 미세 입자나 결정의 부착이 관찰되지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면, Sar 시료(Fig. 2b)는 섬유상과 유사한 층상 패턴의 matrix에 주상형(columnar) crystalline particles가 분포된 구조를 보인다. 이러한 particles는 표면에 밀착되어 있으며, 일부는 다량의 응집(aggregation)을 형성하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 해조류의 표면은 Ish에 비해 상대적으로 비정질적(irregular)이며, 기공보다는 입자성 돌출 구조가 주요 특징으로 나타난다. 이러한 형태학적 차이는 흡착 특성의 차이를 유도하는 주요 인자 중 하나로 Ish는 확산형 반응, Sar는 표면 반응의 흡착 특성의 형태학적 근거를 보여준다.

BET 분석

N_2 physisorption 분석 결과, Ish와 Sar 모두 specific surface area는 일반적인 흡착제와 비교하여 낮은 수준이며, 비활성 또는 밀집된 기공 구조를 가진 biomass-derived material에서 관찰되는 특징을 보여준다. *t*-plotting에 의한 micropore volume은 두 시료 모두에서 음의 값으로 나타났으며, 이는 측정 가능한 microporosity가 거의 존재하지 않음을 의미한다. 또한 average pore width는 Ish와 Sar 모두 9-12 nm 범위이며 이는 mesopore (2-50 nm) 범주에 해당하는 구조이며[13], 두 해조류 모두 mesoporous 또는 macroporous 구조를 지니고 micropore에 의한 흡착의 기여도는 상대적으로 낮은 것을 보여준다.

Sar 시료는 Ish 보다 average pore width와 total pore volume이 높은 값을 나타냈다. 이는 SEM에서 보이는 porous structure와 별개로, 내부적으로 발달한 기공 구조를 지닌 것으로 판단된다. Sar 표면에 부착된 결정성 입자 사이의 간극이 기공 부피에 기여했을 가능성을 의미하며, 화학적 또는 물리적 변화 없이 사용된 원생 갈조류(brown macroalgae)의 특성으로, 기존 문헌에서도 경향이 보고된 바 있다[14].

인 농도의 시간 경과에 따른 변화

Fig. 3은 Ish와 Sar를 흡착제로 활용하여 수행한 흡착 실험에서 시간에 따른 용액 내 인산염(PO_4^{3-}) 농도의 변화를 나타낸 것이다. 모든 조건에서 시간의 경과에 따라 인 농도가 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 초기 12-24 h의 인 농도는 조건별로 0.018-0.032 mg/L 감소하여, 전체 감소분의 약 31-83%를 차지하였다. 이후 36 h부터는 추가로 0.001-0.014 mg/L 수준으로 감소하였다.

이와 같은 거동은 해조류 표면의 고에너지 활성 부위에서 인산염에 대한 우선 흡착이 일어나고 잔여의 저에너지 활성 부위 흡착이 일어나는 것으로 설명할 수 있는 표면 이질성계의 특성으로 해석된다[15]. 다만, 시간 경과에 의한 인산염 농도의 감소된 결과로만 물리 또는 화학 흡착을 단정할 수는 없으며, 평균 흡착에너지, 온도에 따른 등온식 상수의 변화 등 열역학 지표와 등온식 기반 비선형 회귀의 동시 해석이 필요한 것으로 판단된다[15].

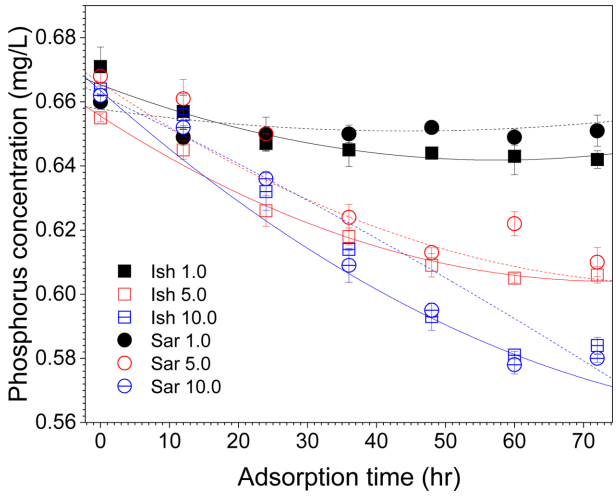

Fig. 3. The changes in phosphorus concentration over time. The solid line represents Ish, and the dashed line represents Sar.

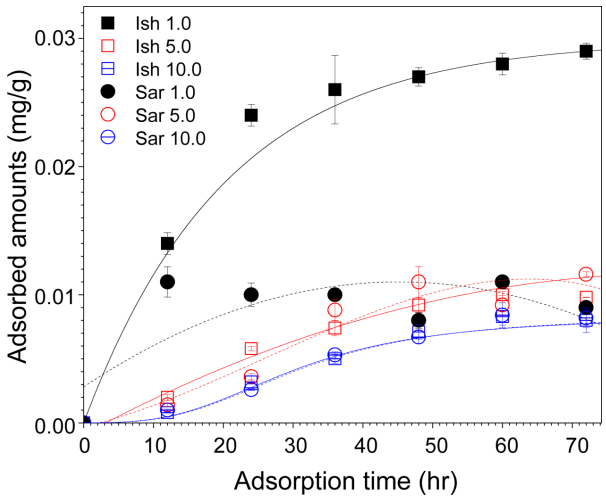

Fig. 4. Phosphorus adsorption per unit mass over time. The solid line represents Ish, and the dashed line represents Sar.

흡착물질 투입량에 따른 인 제거 효율의 변화를 분석한 결과, 10.0 g/L의 농도에 대한 실험군에서 Ish는 12.05%, Sar은 12.39%의 인 제거율을 나타내어, 두 물질 사이의 오차범위 내의 제거율과 투입량 증가에 따라 제거 효율이 향상되는 경향을 보였다. 이는 농도 증가에 따른 흡착 표면적 및 활성 흡착 부위의 증가에 기인한 것으로 판단된다[16]. 반면, 최소 투입 조건인 1.0 g/L에서는 Ish가 4.32%의 제거 효율을 보여 Sar의 1.36%보다 높은 제거율을 보여주었다. 이러한 결과는 Ish의 기본적인 porous structure에서 기인된 활성 작용기의 특성이 초기 흡착 단계에서 인산 이온과의 우선 반응했을 가능성을 보여준다. 시간 경과에 따른 인 제거율 분석에서는 대부분 조건에서 흡착 반응은 36 h 이후부터 현저하게 제거율이 낮아졌으며, 72 h 시점에서는 흡착 평형을 보여주었다. 흡착제 표면의 활성 부위가 포화 상태에 도달함과 동시에 용액 내 인산염 농도의 감소로 인해 흡착 속도가 제한되었다고 해석할 수 있다[8].

시간 경과에 따른 단위 질량당 인 흡착량의 변화

인의 흡착 동역학을 정량적으로 평가하기 위하여, 단위 질량의 흡착제 당 흡착된 인의 양(흡착량, q_t, mg/g)을 시간의 함수로 계산하였다. 흡착량 q_t는 식 (2)를 통해 산정하였다. 시간에 따른 흡착량의 변화는 Fig. 4에 도시하였다. 초기 흡착 속도가 빠르게 증가한 후 점차 포화 상태에 도달하는 일반적인 흡착 동역학의 경향을 보였으며, 이는 초기에는 흡착제 표면의 가용 활성 부위가 충분하나, 시간이 지남에 따라 점차 감소하기 때문으로 해석된다. 이러한 경향은 외부 표면 흡착 이후, 점차 입자 내부로의 확산 지배 단계로 전이되는 것으로 확인할 수 있다.

흡착 반응 초기(24-36 h) 동안 모든 조건에서 단위 질량당 흡착량(q_t, mg/g)이 증가하는 경향을 보였으며, 이후 대부분 실험 조건에서 흡착 속도가 점차 감소하며 평형 상태에 접근하였다. Ish 1.0 g/L 조건에서는 72 h까지 q값이 지속해서 증가하여 완전한 평형 상태에 도달했다고 판단할 수 없었다. 이러한 경향은 흡착제 표면의 가용 활성 흡착 부위가 점차 포화됨에 따라 흡착 속도가 제한되는 일반적인 흡착 동역학 특성과 일치한다[7]. Ish의 경우, 1.0 g/L 투입 조건에서 단위 질량당 흡착량이 가장 높게 나타났으며, 이는 소량의 투입량에서도 상대적으로 높은 흡착 효율을 나타낼 수 있음을 보여준다. 이는 특정 해조류의 흡착 부위 특성과 표면 특성이 수중의 이온과의 상호작용에서 높은 친화성을 나타낼 수 있음을 보여준다[17]. Sar은 5.0 g/L 조건에서 가장 우수한 흡착량을 보였으나, 해당 수치는 다른 조건과 비교했을 때 표준편차 범위 내에 포함되어 있다고 판단할 수 있다.

고투입량 조건(예: 10.0 g/L)에서는 총흡착량이 증가하였으나, 단위 질량당 흡착량(q_t, mg/g)은 평형값에 수렴하며 포화 상태에 근접하는 경향을 보였다. 이는 흡착제 투입 시 가용 표면적 대비 흡착 가능 이온 농도의 감소로 인해 흡착 효율이 저하되는 현상으로 해석할 수 있다[8]. 이와 같은 결과는 실질적인 이온 제거 효율뿐만 아니라 경제성과 자원 활용 측면에서 흡착제의 최적 투입량 결정이 중요하다는 것을 의미한다. 따라서 흡착제의 성능 비교 시 단순한 총흡착량보다는 단위 질량당 흡착능을 기준으로 하는 정량적 평가가 필요하다. 한편, 본 연구에서는 시간에 따른 C_t 및 q_t 변화를 제시하여 흡착 거동의 전반적인 경향을 확인하였으나, 본문에서 속도론(kinetic) 모델을 이용하지 않았다. Fig. 4에서 초기에는 흡착량이 비교적 빠르게 증가하고 이후 증가 폭이 둔화되는 양상이 나타났는데, 이는 초기에는 표면의 가용 활성점에서 흡착이 우선 진행된 뒤 시간이 경과하면서 확산 저항 또는 활성점 포화 등의

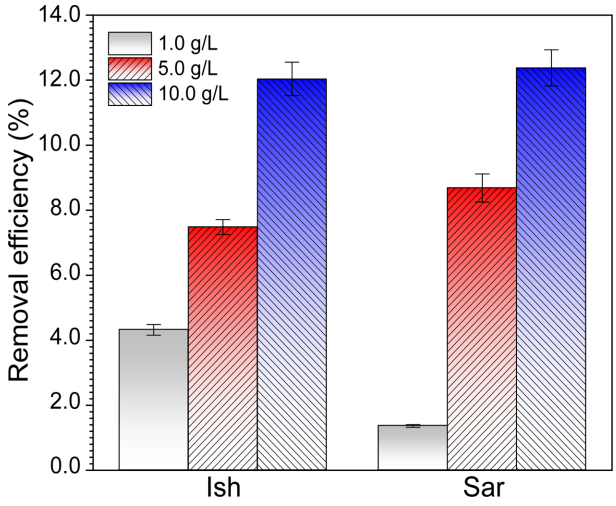

Fig. 5. The phosphorus removal efficiency by the weight of adsorbent.

영향으로 속도가 제한되는 과정이 개입했을 가능성을 시사한다[8].

해조류 흡착물질 투입량에 따른 인 제거 효율 최종 제거율 비교

해조류 흡착물질의 제거 성능을 정량적으로 평가하기 위하여, 흡착 평형에 도달한 시점으로 판단되는 72 h 이후의 인 농도를 기준으로 제거율을 산정하였다(식 (1)). 흡착 반응 종료 시점에서 각 해조류 흡착물질의 성능을 비교한 결과는 Fig. 5에 제시되어 있으며, Ish 및 Sar 모두 투입량 증가에 따라 인 제거율이 증가하는 양상을 나타냈다. 특히, Sar의 경우 투입량 10.0 g/L 조건에서 12.39%의 제거율을 보였으며, 이는 중량 증가에 따라 단위 질량당 유효 흡착 표면적이 증가함으로써 전체 흡착 용량이 확장된 결과로 해석된다. 또한, Sar는 투입 중량 증가에 따른 제거율 상승 폭이 상대적으로 뚜렷하게 나타나, 고중량 조건에서의 적용 가능성이 큰 흡착물질로 평가된다. 반면, Ish는 비교적 낮은 중량 조건에서도 일정 수준 이상의 인 제거율을 유지하는 특성을 보였으며, 이는 초기 투입량 대비 흡착 효율이 우수함을 시사한다. 이러한 결과는 각 흡착제의 물리화학적 특성인 비표면적, 표면 전하 및 표면 작용기 존재 여부에 의해 결정될 수 있으며, 흡착 메커니즘에 대한 규명이 필요한 것으로 판단된다[18].

Freundlich 및 Langmuir 등온식을 활용한 Sar 및 Ish 기반 흡착제의 흡착 특성 분석

본 연구에서는 Sar 및 Ish의 인산염 흡착 특성을 정량적으로 분석하기 위하여 Linearized Freundlich 등온식과 Linearized Langmuir 등온식을 적용하여 회귀 분석의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

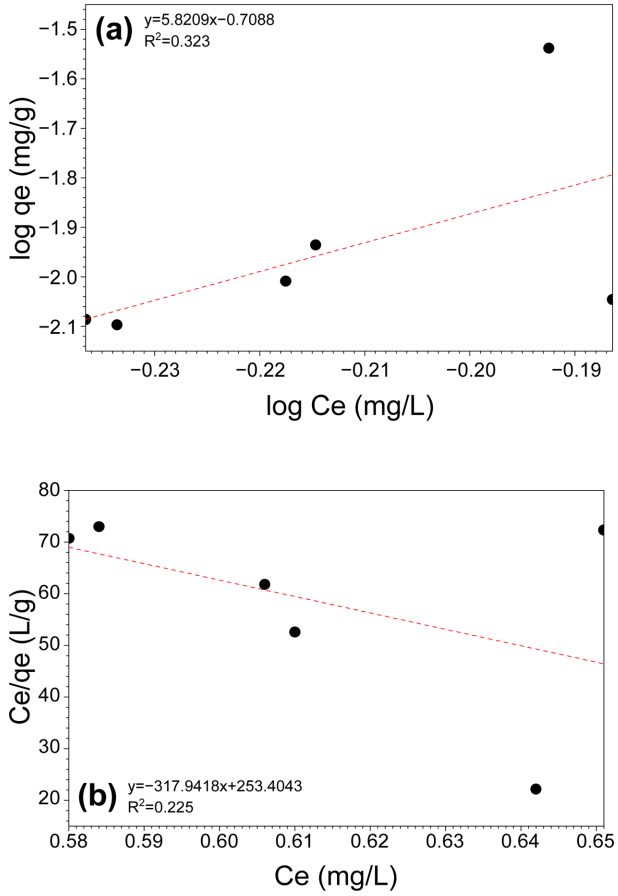

Fig. 6. Linearized adsorption isotherm plots for phosphate removal by the seaweeds adsorbent: (a) Freundlich isotherm, and (b) Langmuir isotherm.

Linearized Freundlich 등온식의 선형 회귀 분석 결과(Fig. 6a), 기울기($1/n$)는 5.820, 절편($\log K_f$)은 -0.7088, 결정계수(R^2)는 0.323으로 나타나 모델 적합도가 비교적 낮은 상관성을 보여준다. 이를 기반으로 산정된 흡착 계수는 n≈0.172, K_f≈0.195로 이는 Sar 및 Ish 흡착제가 일반적인 고성능 흡착물질(예: 활성탄 등)에 비해 상대적으로 낮은 흡착 친화력을 가지는 것으로 판단된다. 또한, $1/n$ 이 1보다 큰 경우는 흡착제가 느리게 포화되는 성질을 나타내며, 이는 흡착 과정에서 일정 수준의 제거 효율성은 기대할 수 있으나 강한 흡착 친화력은 확보되지 않는 것으로 해석할 수 있다[19].

본 연구에서는 Langmuir 선형 등온식의 C_e/q_e와 C_e 관계를 선형화하여 Linearized Langmuir 회귀 분석을 시행하였으며(식 (6)), 결과는 Fig. 6b에 나타내었다. Langmuir 등온식의 특징은 단분자층 흡착, 균질 표면, 등가 활성 부위를 가정하는 할 수 있으며, 회귀 기울기인 $1/q_m$은 -317.94, 결정계수 R^2는 0.225로 Langmuir 등온 모델 역시 본 흡착계에 대해 모델로 성립하지 않음을 보여준다. 이와 같은

낮은 적합도는 본 연구의 실험 조건, 즉 단일 초기 농도(C_0)와 좁은 평형 농도 범위(C_e≈0.58-0.65 mg/L), 낮은 평형 흡착량(q_e) 등과 Ish 및 Sar의 흡착능에 대한 한계로 판단된다. 위 결과에서 보여주는 계수의 조건은 Langmuir 모델이 적용되는 범위 보다는 Henry 영역에 가까운 선형적 거동을 보였을 가능성이 있으므로 Langmuir 결과를 비교 참고값으로 제시하되, 이와 함께 신뢰도 높은 q_m, K_L 및 분리계수 등의 산정을 위해서 비선형 회귀 분석과 오차함수 기반 모델 적합도 평가, 그리고 넓은 C_0/C_e 범위의 평형 데이터 확보가 필수적임을 보여준다[20].

흡착 특성에 대한 고찰 및 실험적 한계 분석

본 연구에서는 Sar과 Ish를 활용하여 실험실 조건에서 인산염 제거 성능을 평가하였다. 다양한 투입량 조건에서 수행된 흡착 실험 결과, 흡착제의 투입량이 증가함에 따라 천연 흡착재료인 해조류에 의해 인 제거율 또한 증가하는 경향을 보였다. 이는 투입량 증가에 따라 해조류 표면의 활성점(active sites)이 증가하여 흡착할 수 있는 표면적이 확장되었기 때문으로 해석된다[21].

다만, 흡착제 투입량을 증가시키는 경우에도 실제 유효 표면적이 항상 선형적으로 증가하는 것은 아니며, 바이오매스 흡착제에서는 고농도 조건에서 입자 간 aggregation 또는 agglomeration이 발생하여 표면적 감소로 이어질 수 있음이 보고되어 있다[22]. 따라서 본 연구에서도 특정 구간에서 투입량 효과가 과대 또는 과소평가 되었을 가능성을 배제하기 어렵다고 판단된다. 그러나 Linearized Freundlich 등온식과 Linearized Langmuir 등온식 분석에서 도출된 낮은 결정계수 및 흡착 계수는 해조류에 의한 흡착 평형 데이터가 충분하게 부합하지 않음을 보여준다. 이러한 결과는 해조류 흡착제가 갖는 비균일한 표면 구조 및 낮은 표면적, 흡착 강도의 이질성에 의해 나타날 수 있고, 일부 실험 설계상의 변수 통제가 미흡했던 점에서 나타난 것으로 판단된다. 이외의 용존 인산염 초기 농도의 적정값, 정량적 민감도 등 천연물질이 가질 수 있는 균질성에 대한 신뢰도 확보에 결론 도출이 어려운 점 등이 영향을 끼쳤을 것으로 생각된다. 이와 관련해, 해조류 바이오매스 표면에는 아미노기(-NH_2), 수산기(-OH), 카복실기(-COOH) 등 다양한 작용기가 존재하여 결합 자리가 단일 및 균일하다고 보기 어렵다고 보고되어 있다[23]. 또한 Sargassum 기반 바이오흡착 연구에서는 용액 pH 변화에 따라 표면 전하가 달라지고, 작용기의 양성자화 및 탈양성자화에 의해 흡착 거동이 달라질 수 있음을 보여준다[22]. 따라서, 이처럼 표면이 불균일할 경우 균일 표면을 전제로 하는 Langmuir 계열 모델이 데이터에 잘 맞지 않을 수 있다는 점을 확인할 수 있다[24]. 동일한 해조류라도 조건(예: pH)에 따라 결합할 수 있는 자리의 종류와 결합 강도가 달라질 수 있다. 예를 들어, 인산염 제거는 용액 pH에 따라 인산염의 해리 형태($H_2PO_4^-$/HPO_4^{2-})와 흡착제 표면 전하가 함께 변할 수 있어 흡착 거동이 달라질 수 있다. 인산의 pKa는 25°C에서 약 7.12로 보고되며, pH가 증가할수록 HPO_4^{2-}의 상대적 비율이 증가한다[25]. 또한 일반적으로 pH가 증가해 흡착제 표면이 음전하를 띠는 조건에서는 음이온성 인산염과의 정전기적 반발 및 OH^- 경쟁 흡착으로 제거 효율이 감소할 수 있다고 보고되어 있다[26]. 이와 함께 조건에 따라서는 이온교환이나 침전(chemical precipitation) 등 복합 기전이 동반될 수 있다[27]. 또한, 문헌에서는 해조류가 실제 수계에서 영양염 저감에 기여할 수 있음이 보고되었다. 양식수에서 해조류 동시배양(co-culturing) 조건으로 인산염 제거가 약 28.6%(20일) 또는 총인 기준 46.2%(28일)까지 보고되었고, 기수 조건에서도 해조류 밀도 3.5 g/L에서 인산염-인 제거가 2시간 이내에 20% 이상 나타난 사례가 있다. 다만 이는 생체 해조류의 영양염 동화 및 생장과 흡착이 함께 작동하는 조건이 포함될 수 있어, 본 연구의 건조 및 분쇄 바이오매스 흡착(예: 저농도 인 조건) 결과와 직접적인 성능 비교에는 한계가 있다[28]. 하지만, 이러한 실험적 제약에도 불구하고, Sar 및 Ish를 기반으로 한 해조류 흡착제가 일정 수준 이상의 인 제거 효율을 나타낸다는 점은, 해조류 폐기물을 활용한 친환경적이고 비용 효율적인 자연 유래 소재로써 활용 가능성이 있다는 점을 시사한다. 기존 연구 결과에서도 해조류는 패수 내 질소 및 인과 같은 영양염 저감에 적용할 수 있으며, 해조류 기반의 인산염 제거에 기여 가능성을 뒷받침하고 있다[29]. 또한 해조류 바이오매스는 세척, 건조, 분쇄, 체거름 등 비교적 간단한 전처리 후 흡착 실험에 투입되는 사례가 제시되고 있어, 표면 개질한 흡착제의 대체재라기보다는 공정 전처리 및 보조 단계에서의 활용 가능성을 나타내는 근거로 볼 수 있다[28]. 향후 연구에서는 초기 농도, pH, 온도 등 주요 실험 변수를 보다 정밀하게 제어하여 실험 조건을 표준화하고, 반복 실험을 통해 통계적 신뢰도를 확보할 계획이다. 이와 함께 표면 개질을 통해 탈착 효율 평가 및 회수 실험을 시행하여 흡착제의 재사용 가능성에 대한 검토 등에 대한 실험 데이터를 확보하고 오차에 대한 개선할 수 있다고 판단된다.

Conclusion

본 연구에서는 해조류 유래 천연 흡착제인 모자반과 패를 활용하여 수중 인산염 제거 가능성을 평가하고, 흡착 특성 및 제거 효율을 실험적으로 분석하였다. 다양한 투입량 조건에서 수행된 흡착 실험 결과, 두 흡착제 모두 투입량 증가에 따라 인 제거율이 향상되는 경향을 보였으며, 이는 표면의 활성 흡착 부위 증가에 기인한 것으로 해석된다. 시간 경과에 따른 인 농도 및 단위 질량당 흡착량 분석을 통해, 초기 24-36 h 동안 빠른 흡착 반응이 진행된

후 대부분 조건에서 증가 속도가 완만해지며 평형에 접근하는 양상을 보였다. 이는 초기에는 흡착제 표면의 가용 활성 부위에 인산이온이 빠르게 결합하였으나, 시간이 경과함에 따라 점차 포화되어 흡착 속도가 제한된 결과로 해석된다. 특히, Ish는 저투입량 조건에서도 우수한 단위 질량당 흡착량을 나타내었으며, Sar은 고투입량 조건에서 비교적 높은 총 흡착량을 기록하여 각 흡착제의 활용 방향에 차별적 특성이 존재함을 시사하였다.

Linearized Freundlich 등온식 모델과 Linearized Langmuir 등온식 분석을 적용한 흡착 특성 분석 결과, 낮은 결정계수 및 흡착 계수는 해조류가 가지고 있는 흡착 시스템에서의 한계를 보여주었다. 이는 흡착제의 표면 이질성, 흡착 강도의 불균일성, 그리고 실험 조건의 통제 한계에서 기인한 것으로 판단된다. 또한, 인의 초기 농도 편차 및 분석기기의 정량 민감도 한계, 반복 실험의 재현성 부족 등도 실험 결과의 신뢰성에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 하지만, 본 연구는 Sar과 Ish가 각각의 물리화학적 특성을 바탕으로 일정 수준 이상의 인 제거 성능을 보였다는 점에서 환경친화적이고 비용 효율적인 천연 흡착제로서의 가능성을 입증하였다. 특히, 해양 폐기물로 분류되는 해조류를 자원화함으로써 수질 개선과 자원순환이라는 두 가지 환경적 가치를 동시에 실현할 수 있는 기초자료를 제공한다는 데에 의의가 있다.

국문요약

본 연구에서는 비변형 갈조류인 모자반(*Sargassum fulvellum*)과 패(*Ishige okamurae*)를 저농도 인 조건에서 수계 인산염 제거를 위한 저비용 흡착제로의 활용 가능성에 대해 평가하였다. 초기 인 농도 약 0.67 mg/L, 25±1°C 조건에서 흡착제 주입량을 1.0, 5.0, 10.0 g/L로 달리한 배치 실험을 72 h까지 수행하였으며, 시간에 따른 농도 변화를 모니터링하였다. 실험 결과, 두 갈조류 모두 실험 시작 후 12-24 h 이내에 인 농도가 빠르게 감소한 뒤 평형에 근접하는 양상을 보였고, 인 제거율은 주입량 증가에 따라 상승하여 72 h 기준 최대 제거율은 *S. fulvellum*이 약 12.4%, *I. okamurae*가 약 12.0%로 나타났다. 반면 단위 질량당 흡착량(q)은 가장 낮은 주입량(1.0 g/L)에서 *I. okamurae*가 *S. fulvellum*보다 높게 나타나 시료 간 흡착 성능 특성이 상이함을 시사하였다. 단일 초기 농도에서 획득한 평형 자료를 탐색적으로 Linearized Freundlich 등온식과 Linearized Langmuir 등온식에 적용한 결과, 결정계수(R^2=0.323, 0.225)가 낮아 모델 적합성이 제한적인 것으로 확인되었으나, 본 연구의 결과는 비변형 갈조류가 저농도 인산염 조건에서 나타내는 기본적인 흡착 성능을 제시하는 기초자료로서의 의의가 있다고 판단할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 흡착제로써 활용을 위해서는 시간 거동을 반영한 흡착 속도론적 분석과 함께 표면 개질 등을 통해 흡착능 및 공정 적용성을 향상시킬 필요가 있음을 제시한다.

Acknowledgement

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도 RISE 센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-14-007).

Conflict of interests

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Sueng-Dae Son https://orcid.org/0009-0004-2433-5988
Geon-Il Kim https://orcid.org/0009-0008-5855-3536
Jun-Won Park https://orcid.org/0009-0001-1128-3718
Eun-Sik Kim https://orcid.org/0000-0003-3831-0242
Sun Hee Cheong https://orcid.org/0000-0001-9120-1892

References

1. Lee, S., Joo, J., Song, H., Kim, B., Ahn, H., Ahn, C., Status of dissolved oxygen in eutrophic rivers and its effects on fish. *Water for Future*, **45**, 33-38 (2012).
2. Lee, S., Park, M., Yeon, S., Park, D., Optimization of chemical precipitation for phosphorus removal in domestic wastewater. *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **30**, 663-671 (2016).
3. Yang, X., Jiang, D., Cheng, X., Yuan, C., Wang, S., He, Z., Esakkimuthu, S., Adsorption properties of seaweed-based biochar with the greenhouse gases (CO_2, CH_4, N_2O) through density functional theory (DFT). *Biomass Bioenergy*, **163**, 106519 (2022).
4. Lee, M.G., Lim, J.H., Kam, S.K., Biosorption characteristics in the mixed heavy metal solution by biosorbents of marine brown algae. *Korean J. Chem. Eng.*, **19**, 277-284 (2002).
5. Lim, H., Hwang, E.K., Park, C.S., Growth and maturation period of a brown alga, Ishige okamurae Yendo, in a habitat of the southwestern coast of Korea. *Korean J. Environ. Biol.*, **42**, 483-491 (2024).
6. Murphy, J., Riley, J.P., A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, **27**, 31-36 (1962).
7. Foo, K.Y., Hameed, B.H., Preparation and characterization of activated carbon from pistachio nut shells via microwave-induced chemical activation. *Biomass Bioenergy*, **35**, 3257-3261 (2011).
8. Ho, Y.S., McKay, G., Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem.*, **34**, 451-465 (1999).
9. Lutfia, F.N., Isnansetyo, A., Susidarti, R.A., Nursid, M.,

Chemical composition diversity of fucoidans isolated from three tropical brown seaweeds (Phaeophyceae) species. *Biodiversitas*, **21**, 3170-3177 (2020).
10. Davis, T.A., Volesky, B., Mucci, A., A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Res.*, **37**, 4311-4330 (2003).
11. Eltaweil, A., El-Monaem, E.M.A., Elshishini, H., El-Aqapa, H., Hosny, M., Abdelfatah, A.M., Ahmed, M.S., Hammad, E., El-Subruiti, G., Fawzy, M., Omer, A., Recent developments in alginate-based adsorbents for removing phosphate ions from wastewater: a review. *RSC Adv.*, **12**, 8228-8248 (2022).
12. Nadagouda, M.N., Varshney, G., Varshney, V., Hejase, C.A., Recent advances in technologies for phosphate removal and recovery: a review. *ACS Environ. Au*, **4**, 271-291 (2024).
13. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K.S.W., Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, **87**, 1051-1069 (2015).
14. Lee, Y.E., Jeong, Y., Shin, D.C., Ahn, K.H., Jung, J.H., Kim, I.T., Fabrication of Mg-doped Sargassum biochar for phosphate and ammonium recovery. *Sustainability*, **13**, 12752 (2021).
15. Foo, K.Y., Hameed, B.H., Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chem. Eng. J.*, **156**, 2-10 (2010).
16. Kurniawan, T.A., Chan, G.Y.S., Lo, W.H., Babel, S., Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chem. Eng. J.*, **118**, 83-98 (2006).
17. Mwangi, I.W., Ngila, J.C., Removal of heavy metals from contaminated water using ethylenediamine-modified green seaweed (Caulerpa serrulata). *Phys. Chem. Earth*, **50-52**, 111-120 (2012).
18. Wan Ngah, W.S., Hanafiah, M.A.K., Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review. *Bioresour. Technol.*, **99**, 3935-3948 (2008).
19. Freundlich, H., Über die Adsorption in Lösungen. *Z. Phys. Chem.*, **57**, 385-470 (1906).
20. Al-Ghouti, M.A., Da'ana, D.A., Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: a review. *J. Hazard. Mater.*, **393**, 122383 (2020).
21. Crini, G., Badot, P.M., Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: a review of recent literature. *Prog. Polym. Sci.*, **33**, 399-447 (2008).
22. Tabaraki, R., Heidarizadi, E., Simultaneous multidye biosorption by chemically modified Sargassum glaucescens: doehlert optimization and kinetic, equilibrium, and thermodynamic study in ternary system. *Sep. Sci. Technol.*, **52**, 583-595 (2017).
23. Barah, M.A., Shaban, I.S., AI-Amari, K.M., Yahia, K.A., Removal of lead (II) from aqueous solutions by biosorption on brown seaweed, *Sargassum baccularia. Libyan. J. Ecol. Environ. Sci. Technol*., **3**, 1-9 (2021).
24. Alvarez-Galvan, Y., Minofar, B., Futera, Z., Francoeur, M., Jean-Marius, C., Brehm, N., Yacou, C., Jauregui-Haza, U.J., Gaspard, S., Adsorption of hexavalent chromium using activated carbon produced from Sargassum ssp.: comparison between lab experiments and molecular dynamics simulations. *Molecules*, **27**, 6040 (2022).
25. USDA Agricultural Marketing Service (AMS), 2021. Phosphoric acid handling/processing: technical evaluation report, USDA AMS, Washington, D.C., USA.
26. Zhang, Q., Ding, Y., Lu, L., Li, J., Liang, M., Zhu, Y., Phosphate adsorption onto bagasse iron oxide biochar: parameter optimization, kinetic analysis, and study of mechanisms. *BioResources*, **16**, 1335-1357 (2021).
27. An, W., Wang, Q., Chen, H., Liu, Y., Hu, X., Di, J., Efficient recovery of phosphate from water media by iron-magnesium functionalized lignite: adsorption evaluation, mechanism revelation and potential application exploration. *Molecules*, **29**, 1252 (2024).
28. Farghali, M., Mohamed, I.M.A., Osman, A.I., Rooney, D.W., Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. *Environ. Chem. Lett.*, **21**, 97-152 (2023).