Appl. Chem. Eng., Vol. 35, No. 1, February 2024, 54-60
https://doi.org/10.14478/ace.2023.1104

Article

해파리의 특성을 활용한 하수처리장 처리수 내 미량오염물질 제거 기술

박혁진*,† · 김은진* · 추경실 · 심주은*** · 여민경**,***

*싸이스트 주식회사, **경희대학교 환경학 및 환경공학과, ***경희대학교 환경응용과학과
(2023년 12월 28일 접수, 2024년 1월 24일 수정, 2024년 1월 25일 채택)

Technology to Remove Trace Pollutants in Sewage Treatment Water Using Jellyfish Characteristics

Hyeok Jin Park*,†, Eun Jin Kim*, Kyung Sil Choo, Joo Eun Shim*** and Min-Kyeong Yeo**,***

*SCIST Inc., Suwon-si 16681, Republic of Korea
**Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si 17104, Republic of Korea
***Department of Applied Environmental Science, Graduate School, Kyung Hee University, Yongin-si 17104, Republic of Korea
(Received December 28, 2023; Revised January 24, 2024; Accepted January 25, 2024)

초 록

본 연구에서는 자포동물인 보름달물해파리의 면역반응을 유도하여 추출한 점액물질(jellyfish extract at immunity reaction, JEI)을 활용하여 하수처리장 처리수 내 잔존하는 미량오염물질(중금속과 미세플라스틱)의 제거 가능성에 대해 평가하였다. 실험은 자-테스터(jar-tester)를 이용한 lab 규모와 자체 개발한 관접속형 혼화반응 시스템과 농축일체형 분리장치를 연계한 pilot system 규모의 두 방법으로 수행하였다. 모든 실험 조건에서 JEI는 기존 음이온 고분자에 비해 미량오염물질 제거효율이 유사하거나 높은 것으로 분석되었다. 특히 pilot system 규모로 JEI를 하수처리장의 방류수와 혼합하여 사용하면 두 번의 혼합과정에 의해 JEI와 미량오염물질의 결합이 극대화되고 이로 인해 미량오염물질 제거율이 매우 향상됨을 확인하였다. 이러한 실험 결과를 토대로 본 기술을 기존의 방식에서 벗어나 생태계 위해성이 적고 무기성 폐기물 발생을 최소화할 수 있는 미량오염물질 제거 방법으로 제안하는 바이다.

Abstract

The present study was aimed to evaluate the removal of the trace pollutants (heavy metals and microplastics) in the sewage treatment plant by using the jellyfish Extract at Immunity reaction (JEI) of *Aurelia coerulea*. The experiment was conducted on two different scales: the lab scale using a Jar-tester and the Pilot system scale equipped with two newly developed devices in the laboratory, the active tube connection mixed system and the concentration integrated separation device. Compared to anionic polymers currently used in the field, JEI showed similar or higher efficiency to remove the trace pollutants. When JEI was added to the effluent through the Pilot system, the combination of JEI and the trace pollutants was maximized through two mixing processes, and as a result, the removal rate of the trace pollutants was greatly improved. Based on these results, we propose the present technology as an alternative to removing trace pollutants that can reduce ecosystem risk and minimize the generation of inorganic waste, away from the existing method.

Keywords: *Jellyfish, Trace pollutant, Microplastics, Heavy metal, Advanced processing*

1. 서 론

최근 수환경에서 관심이 조명되고 있는 CECs (contaminants of emerging concern)는 기존의 규제 대상이 아니었던 물질들 중 환경적으로 문제를 야기할 수 있는 오염물질들을 포괄적으로 지칭한다[1]. CECs는 신규물질을 의미하는 것은 아니다. 다만 분석 기술의 발달로 말미암아 과거에 주목받지 않던 물질들이 하천 등에서 검출 가능해진 것으로 이 물질들에 대한 생태독성, 잠재적인 건강 위해성, 사회적 인식, 환경 중의 검출 빈도 등에 이목이 쏠리고 있다. 이러한 CECs 중에는 미세플라스틱, 중금속, 항생제 등이 포함되어 있다[1,2].

수중의 중금속은 다양한 물리화학적 방법과 생물학적 처리로 제거가 가능하다[3]. 하지만 산업의 발달과 생활수준의 향상으로 인해 폐수를 통한 중금속의 생태계 유출이 점차 가속화되고, 인체에 흡수되면 쉽게 배출되지 않고 축적되는 문제로 인해 보다 효율적인 제거 기술의 개발이 요구되고 있다[4]. 미세플라스틱의 경우 하수처리장으로 유입된 후 1차와 2차 처리과정을 통해 많은 양이 제거되지만 처리수에는 여전히 미세플라스틱이 존재하고 수계로 배출된다[5-6]. 수계로

† Corresponding Author: SCIST Inc.
Suwon-si 16681, Republic of Korea
Tel: +82-31-546-8799 e-mail: scist@scist.co.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2024 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

유입된 미세플라스틱은 강과 하천을 따라 최종적으로 바다로 이동하며, 이동 과정 중 유속이 느린 구역에서 침전하므로 퇴적층에서 미세플라스틱이 고농도로 검출되기도 한다[7]. 이러한 미세플라스틱은 결국 먹이사슬의 상단까지 이동하여 인간이 섭취하는 식품(굴, 홍합, 통조림 등)에서도 발견되고 있다[8-11].

하수처리장에서 현재 사용하고 있는 고도처리기술의 경우 중금속과 미세플라스틱 같은 미량오염물질을 제거하기 위해 과량의 응집제 혹은 약품을 투입하며 이로 인해 2차 오염 발생이 가능하다[12]. 또한 기존 처리 시설에서 미량오염물질을 추가 제거하기 위해 여과설비를 설치할 경우 이에 따른 부지의 확보·시설 설치 및 운영으로 인한 추가 비용 발생 등의 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 2차 오염의 우려가 없으며 저렴한 운영비용으로 미량오염물질을 제거할 수 있는 기술의 개발이 필요한 실정이다[13].

자포동물인 해파리는 선천면역만 존재하고 환경변화나 직접적인 접촉과 같은 스트레스를 받으면 면역반응이 유도되어 점액 물질을 방출한다[14]. 그 중 보름달물해파리(*Aurelia coerulea*)는 4월 말부터 초겨울인 11월~12월 초까지 우리나라 연안에서 대량 발생하여 수산물의 어획량을 감소시키거나 발전소 가동을 중지시키는 등의 피해를 입히는 것으로 보고되고 있다[15]. 이에 정부에서는 해파리를 유해해양생물로 지정하고 구제사업을 위해 매년 예산을 편성하고 있는 실정이다[16].

하지만 최근 연구에 따르면 보름달물해파리에서 추출한 면역물질이 수중 내 미량오염물질을 제거하고 오염물질의 독성을 감소시킨다고 알려지고 있다[17-20]. 예를 들어 은나노물질은 1시간 이내 96% 이상이 해파리 면역물질과 결합하고 그 결과 나노물질의 생물독성이 현저히 감소함을 본 연구의 공동연구진인 경희대학교 연구팀이 실험적으로 증명하였다[18]. 또한 미세플라스틱의 일종인 폴리스티렌(polystyrene)에 대해서도 유사한 결과를 도출하여 해파리 면역물질의 생물유래재료로서의 가능성을 확인하였다[19,20].

그러므로 본 연구에서는 우리나라 연안에 대량 서식하는 유해해양생물인 보름달물해파리의 면역반응을 유도하여 점액물질을 추출하고, 이 물질이 중금속 및 미세플라스틱과 결합한다는 경희대학교 연구팀의 생태모방기술을 활용하였다. 특히 본 기술이 하수처리장 현장에 실제 적용하는 실용화 단계로 도약하기 위한 가능성을 알아보기 위해 자체 개발한 pilot system 규모의 후속공정을 통해서 처리수 내 미량오염물질의 제거효율을 검토하고자 하였다.

2. 실 험

2.1. 해파리 배양 및 점액물질(jellyfish extract at immunity reaction, JEI) 추출

본 연구에서는 대한민국 남해안에서 포획한 보름달물해파리(*A. coerulea*)를 제공받거나 한국해파리연구소(서울, 한국)에서 동일 종을 구입하여 사용하였다. JEI를 추출하기 전까지는 실험실 내 아크릴 수조에서 32 ± 1 practical salinity unit (psu), 수온 25 ± 1 ℃ 조건으로 배양하였고, 먹이는 *Artemia sp.*를 하루 한 번 제공하였다[18].

JEI는 Guem *et al.* (2022)의 방법에 따라 추출하였다[19]. 해파리를 구멍 크기 150 mesh인 망에 넣고 물리적 마찰을 주어 면역반응을 유도하였고 이때 생성된 점액물질을 수집하였다. 수집한 점액물질은 16,200 x g에서 10 분간 원심분리한 후 생성된 침전물은 3차 증류수로 3회 세척하여 염분을 제거한 후 - 80 ℃에서 보관하였고, 사용 직전에 해동하여 최종농도 0.1 g/mL가 되도록 한 후 초음파 분쇄기로 균일하게 분산하여 사용하였다.

2.2. 미량오염물질과 인공폐수의 준비

중금속 제거 실험을 위해 $Cu(NO_3)_2$, $Pb(NO_3)_2$ 그리고 $AgNO_3{\cdot}HNO_3$을 사용하였으며 세 물질 모두 표준용액(Kanto chemical, Tokyo, Japan)을 구입한 후 각각 1% (v/v)의 농도로 희석하여 실험하였다. 중금속의 농도는 분광광도계(Spectrophotometer, DR3900, HACH, Colorado, USA)를 이용하여 Cu 560 nm, Pb 520 nm 그리고 Ag 560 nm의 파장에서 측정하였다.

미세플라스틱 제거 실험은 폴리스티렌(polystyrene, PS)과 폴리에틸렌(polyethylene, PE)으로 수행하였다. PS의 경우 입자 크기 0.051 μm인 1% (w/v) 농도의 형광물질이 부착된 thermo scientific (Massachusetts, USA)의 제품을 사용하였고, PE의 경우 입자 크기 27 μm인 0.995 g/ml 농도의 형광물질이 부착된 Cospheric (California, USA)의 제품을 사용하였다. PS와 PE는 0.01% (w/v)의 농도로 희석하여 사용하였으며, 이때 PE는 시료 내에 균일한 입자 분산을 위해 Cospheric (California, USA)에서 판매하는 비이온성 계면활성제인 Tween80 (polysorbate)을 첨가하여 분산시켰다. 두 미세플라스틱의 농도는 형광분광광도계(fluorescence spectrophotometer, F-7000, HITACHI, Tokyo, Japan)를 이용해 PS 542 nm, PE 575 nm 파장에서 여기시킨 후 PS 612 nm, PE 607 nm에서 형광 세기를 측정하였다.

Lab 규모의 실험은 3차 증류수를 이용하여 인공폐수를 제조하였고, pilot system 규모의 실험에는 Y시 G 하수처리장의 방류수를 사용하여 인공폐수를 제조하였다.

2.3. Lab 규모의 실험

Lab 규모의 실험을 위해 자-테스터(jar-tester) (SF6, 미성과학, Seoul, Korea)를 수행하였다. 선행연구에 따라 중금속 또는 미세플라스틱이 혼합된 인공폐수와 JEI를 자-테스터에서 200 rpm, 3 min 교반 후 60 min의 방치 시간을 거쳐 상등수를 채취하여 분석하였다[17-20]. JEI의 중금속 또는 미세플라스틱 제거 효능을 평가하기 위해 비교 물질로 음이온 고분자를 선택하였으며, 시중에 판매하는 음이온 고분자(MS3000, Cheong san Chem Tech, Korea)를 3차 증류수로 0.1%가 되도록 준비한 후 중금속 제거실험의 대조군으로 사용하였다.

2.4. 관접속형 혼화반응시스템 개발

본 연구에서는 하수처리장에 3차 고도처리기술에 사용되는 응집제를 혼화시키기 위해 설치한 종래의 인라인 혼화시스템[21]과 탱크 혼화시스템과 다르게 고속으로 회전하는 베인(vane)을 통해 해파리 점액물질의 분사를 진행하였고, 이때 형성된 강력한 혼화강도를 통해 분사된 저항물질과 미량오염물질의 혼합을 극대화시키는 관접속형 혼화반응 시스템을 개발하여 사용하였다(Figure 1).

2.5. Pilot system 규모의 실험

공기주입, 버블펌프, 가압조, 부상조로 구성된 10 L/min 규모의 농축일체형 분리장치를 배치하여 1.5 L/min으로 유입된 중금속 인공폐수를 관접속형 혼화반응 시스템을 통해 JEI와 혼합한 후 가압조로 이송시키면서 미세 버블이 발생되는 버블펌프를 활용해 혼합물이 처리수와 부상 분리될 수 있는 후속 공정(농축일체형 분리장치)을 제작하여 pilot system 실험에 사용하였다(Figure 2). 이때 분리된 처리수를 채집하여 중금속 농도를 측정하여 그 제거율을 산출하였다. JEI의 중금속 제거 효능과 비교하기 위한 물질로는 음이온 고분자 A (MS3000,

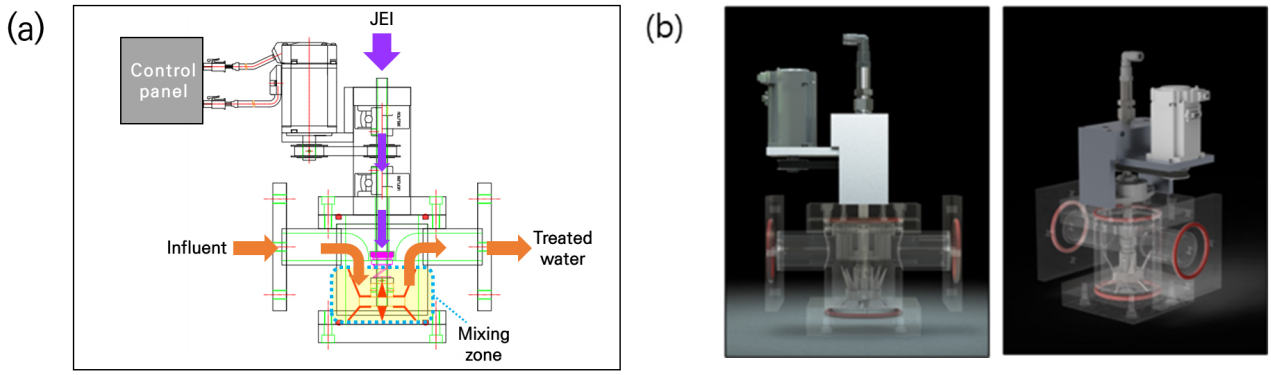


Figure 1. Design drawing of the active tube connection mixed system. (a) two-dimensional drawing and (b) three-dimensional drawings.

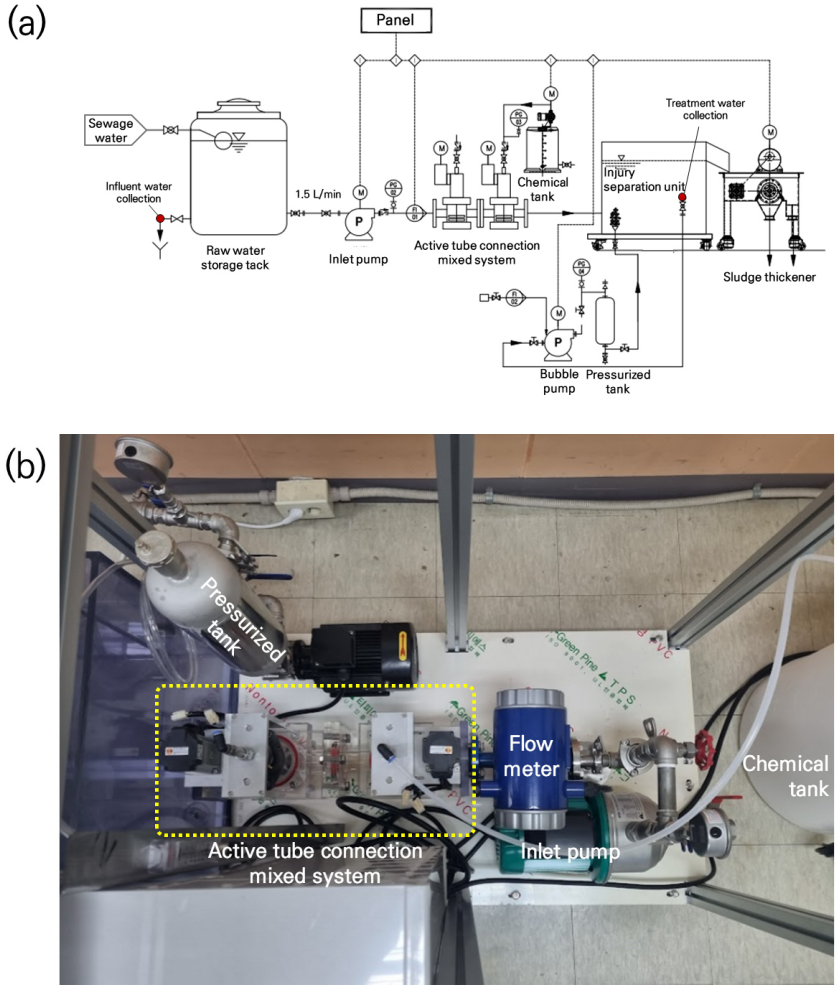


Figure 2. The subsequent process (integrated concentration separation device) in the pilot system. (a) design drawing and (b) the real implement system.

Cheong san Chem Tech, Korea)와 B (MS3100, Cheong san Chem Tech, Korea)를 사용하였으며, 그 외 부분은 lab 규모의 실험방법과 동일하게 수행하였다.

2.6. 공인인증기관 분석

JEI의 미세오염물질 제거효율을 확인하기 위해 중금속 분석에는 한국화학융합시험연구원(Korea Testing & Research Institute, KTR), 미세플라스틱 분석에는 세스코(CESCO) 이물전문 분석센터에 의뢰하여 분석을 진행하였다. KTR에서는 수질오염공정시험방법을 이용하여 중금속 농도를 분석하였으며[22], CESCO에서는 PE와 PS 모두 적외선 분광광도계(infrared spectrophotometer, FT-IR, Nicolet IN10MX, Thermo Fisher Scientific, Massachusetts, USA)을 이용하여 입자를 계

수하는 방식으로 분석하였다.

2.7. 결합 표면 분석

JEI와 미세플라스틱의 결합을 확인하기 위해 전계 방출형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscopy, FE-SEM, S-4700, HITACHI, Tokyo, Japan)을 사용하여 표면 분석을 진행하였으며, 인공폐수를 자연 건조하여 Pt 코팅 후 10만배 배율로 관찰하였다.

2.8. 통계분석

음이온 고분자와 해파리 점액물질의 미세오염물질 제거효율을 비교하기 위하여 일원 배치법으로 분산분석을 수행하였고 수치는 평균 ± 표준편차로 나타내었다. 모든 실험은 3회 반복하였으며, 값은 p-value < 0.001에서 통계적으로 유의하다고 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Lab 규모 실험

3.1.1. 중금속 제거효율

해파리 점액물질의 중금속 제거 효능을 평가하기 위해 인공폐수에 JEI를 다양한 비율로 혼합한 후 60 min이 경과한 후 상층액에 남아있는 중금속의 양을 측정하여 제거율을 산출하였다(Figure 3). 인공폐수와의 혼합비율이 높아질수록 음이온 고분자와 JEI 모두 중금속 제거효율이 증가하는 것을 확인하였다. 특히 비율이 1:0.25일 경우, 음이온 고분자가 Cu 4.23%, Pb 8.12%, Ag 12.55%를 제거한 반면 JEI는 Cu 47.13%, Pb 52.36%, Ag 51.34%로 높은 제거효율을 나타내었다. 인공폐수 1:1 비율로 혼합하였을 경우에도 음이온 고분자가 Cu 44.76%, Pb 38.22%, Ag 40.33%의 제거율을 나타낸 반면 JEI는 세 중금속 모두 70% 이상의 높은 제거율을 나타내었다. 이러한 결과를 통해 해파리 점액물질의 중금속 제거효율이 뛰어나고 특히 낮은 비율로 사용하였을 때 시중에서 판매되는 음이온 고분자에 비해 10배 이상 효과가 높은 것으로 분석되었다.

JEI의 중금속 제거율 분석을 공인인증기관인 KTR에 의뢰한 결과, Cu와 Ag는 자체 실험결과보다 높은 83.4%와 84.7%의 제거율이 나타나는 것으로 인증되었다(Table 1).

3.1.2. 미세플라스틱 제거효율

JEI의 미세플라스틱 제거 효능을 평가하기 위해 인공폐수에 JEI를 다양한 비율로 혼합한 후 60 min이 경과한 후 상층액에 남아있는 미세플라스틱의 형광 세기를 측정하여 제거율을 산출하였고, 대조군으로 음이온 고분자를 사용하여 동일한 방법으로 실험하였다(Figure 4). 인공폐수와의 혼합비율이 높아질수록 음이온 고분자와 JEI 모두 미세플라스틱 제거율이 증가하는 것으로 확인되었다. 비율이 1:0.25일 경우, 음이온 고분자가 PS 3.55%, PE 7.76%를 제거한 반면 JEI는 PS 26.22%, PE 12.09%를 제거하였다. 인공폐수와 1:1 비율로 혼합하였을 경우에도 음이온 고분자가 PS 20.58%, PE 24.63%의 제거율을 나타낸 반면 JEI는 PS 63.11%, PE 43.22% 제거율을 나타내었다. 이러한 결과를 통해 JEI가 음이온 고분자보다 미세플라스틱 제거에 효율적으로 작용하는 것을 확인하였으며, 특히 PS를 제거할 때 최대 7배 이상의 효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

일반적으로 사용되는 상업용 응고제는 단순히 흡착(abosorption) 및 전하중화(charge neutralization) 작용으로 미량오염물질과의 결합을 유도한다. 하지만 JEI는 다양한 당단백질이 그물 구조를 이루는 구조적

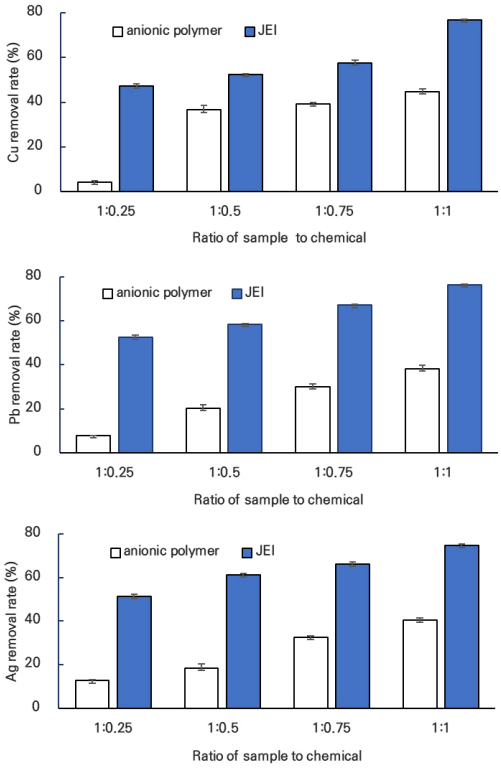


Figure 3. Removal rates of heavy metals (Cu, Pb and Ag) by anionic polymer and jellyfish extract at immunity reaction (JEI) in lab-scale research.

Table 1. Results of the Accredited Agency Report on Heavy Metal Removal Efficiency Using Jellyfish Extract at Immunity Reaction (JEI) in Lab-Scale Research

Heavy metal Items	Concentration of influent water	Concentration of treated water	Removal efficiency (%)
Cu (mg/L)	5.04	0.84	83.41
Pb (mg/L)	4.45	1.06	76.18
Ag (mg/L)	6.04	0.92	84.77

특성으로 인해 그물 메시에 의한 필터 효과와 당단백질과 미세플라스틱 간의 결합 메커니즘이 추가적으로 작용하여 미세플라스틱을 높은 효율로 제거한다고 설명할 수 있다[19,23].

JEI에 의한 미세플라스틱 제거 효능을 공인인증기관인 세스코에 의뢰한 결과는 Table 2와 같이 도출되었고, PS, PE 두 항목 모두 자체 실험결과보다 높은 각각 80.00%와 97.58% 제거되는 것으로 인증되었다. 하지만 JEI에 의한 제거효율이 자체실험에서는 PS가 높고, 공인인증기관에서는 PE가 높은 것으로 분석되었는데, 이는 PE 입자 크기(27 μm)가 비교적 커서 분석 시 용액 내 균등한 분산이 어렵고 이로 인해 정확한 양적 측정의 한계가 있다는 것이 원인 중 하나이며 정확한 원인 파악을 위해서는 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

3.1.3. FE-SEM 측정

JEI가 미세플라스틱 특히 PS 제거에 효율적임을 확인한 후 FE-SEM을 활용하여 JEI를 투입하기 전과 후의 PS 입자 표면을 살펴보았

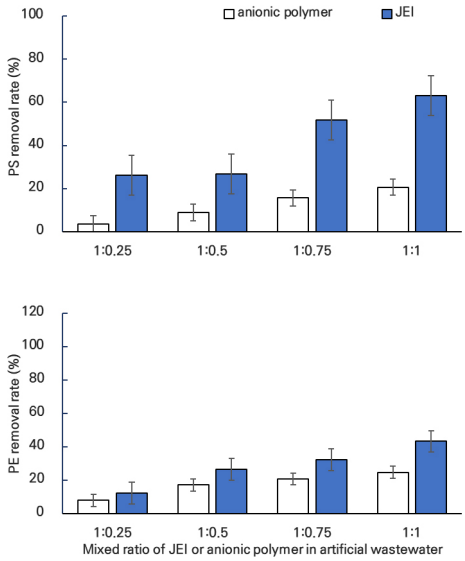


Figure 4. Removal rates of microplastics (polystylene (PS) and polyethylene (PE)) by anionic polymer and jellyfish extract at immunity reaction (JEI) in Lab-scale research.

Table 2. Results of the Accredited Agency Report on Microplastic Removal Efficiency Using Jellyfish Extract at Immunity Reaction (JEI) in LAb-Scale Research

Items	Concentration of influent water (particle/sample)	Concentration of treated water (particle/sample)	Removal efficiency (%)
PS	35	7	80.00
PE	124	3	97.58

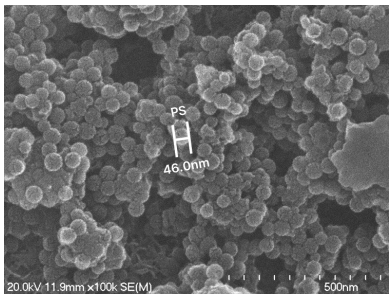
다(Figure 5). JEI 투입 전 PS는 독립된 형태의 입자로 관찰되나, JEI를 혼합하면 PS 입자가 마치 돌기처럼 JEI 표면에 부착되는 것이 관찰되었다. 당단백질이 풍부한 JEI의 구조적 특징을 고려하면 첨가된 미세플라스틱은 JEI의 표면을 이루는 당단백질과 결합한 것으로 분석된다[19,23].

3.2. 관접속형 혼화반응 시스템을 이용한 pilot system 규모의 실험

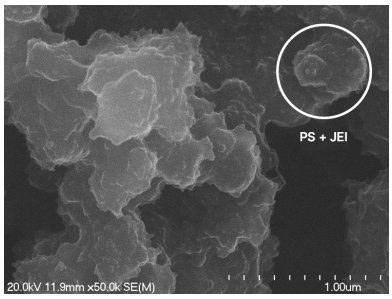
3.2.1. 중금속 제거효율

Lab 규모 실험을 통해 도출된 결과를 바탕으로 관접속형 혼화반응 시스템을 연계하여 JEI의 중금속 제거 효능을 평가하였다. 평가를 위해 Y시 G 하수처리장의 방류수에 중금속 표준용액을 넣어 인공폐수를 제조한 후 관접속형 혼화반응 시스템을 통해 JEI와 혼합되도록 하였다. 이 때 인공폐수와 JEI의 혼합비율은 1:0.05, 1:0.10, 1:0.13 그리고 1:0.20으로 진행하였다(Figure 6).

인공폐수와의 혼합비율이 높아질수록 음이온 고분자 A와 B 그리고 JEI 모두 중금속 제거효율이 증가하는 것으로 확인되었다. 특히 가장 높은 비율인 1:0.20일 경우, 음이온 고분자 A가 Cu 53.89%, Pb 9.79%, Ag 12.03%를 음이온 고분자 B가 Cu 44.57%, Pb 8.95%, Ag 8.20%를 제거한 반면 JEI는 Cu 100.00%, Pb 93.88%, Ag 95.21%를 제거하였다. 앞선 Lab 규모에서 사용하였던 자-테스터기와 달리 pilot system 규모 실험에서는 관접속형 혼화반응을 사용하여 강력한 혼화강도를



(a) PS



(b) PS + JEI mixture

Figure 5. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) analysis of (a) polystylene (PS) and (b) PS + jellyfish extract at immunity reaction (JEI) mixture.

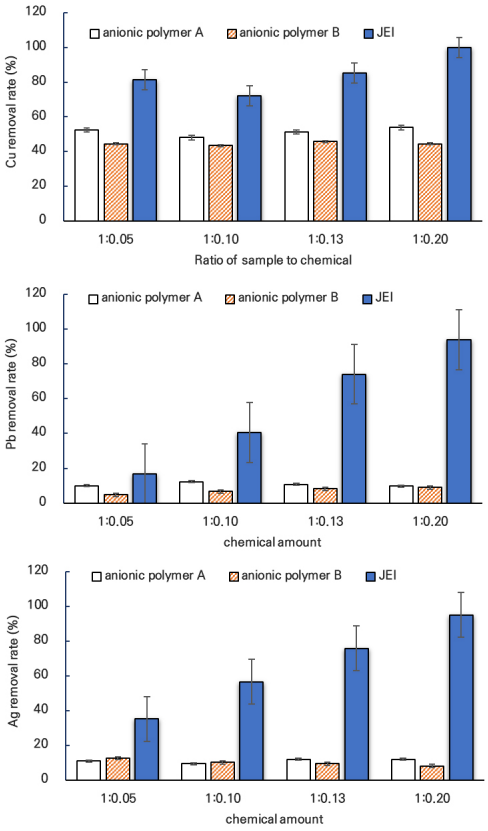


Figure 6. Removal rates of heavy metals (Cu, Pb and Ag) by anionic polymer A, anionic polymer B and Jellyfish Extract at Immunity reaction (JEI) in Pilot system-scale research using the active tube connection mixed system.

Table 3. Results of the Accredited Agency Report on Heavy Metal Removal Efficiency Using Jellyfish Extract at Immunity Reaction (JEI) in Pilot System-Scale Research

Heavy metal Items	Concentration of influent water	Concentration of treated water	Removal efficiency (%)
Cu (mg/L)	0.881	0.141	84.00
Pb (mg/L)	1.110	0.090	91.89
Ag (mg/L)	1.140	0.033	97.11

Table 4. Results of the Accredited Agency Report on Microplastic Removal Efficiency Using Jellyfish Extract at Immunity Reaction (JEI) in Pilot System-Scale Research

Items	Concentration of influent water (particle/sample)	Concentration of treated water (particle/sample)	Removal efficiency (%)
PS	580	61	89.48
PE	251	1	99.60

통해 분사된 JEI와 오염물질의 혼합을 극대화하므로 시중에 판매되는 음이온 고분자 A와 B에 비해 오염물질을 제거하는 효율이 월등히 높음을 확인하였다.

JEI와 같은 점액물질의 중금속 제거 기작에 대해서는 아직까지 정확히 알려진 바가 없다. 하지만 수분을 제외한 JEI의 주요 구성분이 당단백질이고 생물체 유래 당단백질이 중금속과 결합한다는 타 연구결과를 바탕으로 본 연구에서도 JEI의 당단백질이 인공폐수 내 미세플라스틱 뿐 아니라 중금속 제거에도 관여한 것으로 판단된다[23,24]. 그러나 정확한 메커니즘의 이해를 위해서는 후속 연구가 필요하다.

관접속형 혼화반응 시스템 상에서 JEI에 의한 중금속 제거 효능을 공인인증기관(한국화학융합시험연구원, KTR)에 의뢰한 결과 Table 3과 같은 결과가 도출되어 본 연구기관의 자체 실험결과와 유사한 것으로 판명되었다.

3.2.2. 미세플라스틱 제거효율

Pilot system 규모에서의 미세플라스틱 제거효율 실험은 JEI 물질공급의 애로사항 등으로 인해 자체 실험이 수행되지 않았으나, 공인인증기관 의뢰 결과 PS 제거효율은 약 89.48%, PE 제거효율은 99.60%로 나타났다(Table 4). Lab 규모 결과와 마찬가지로 pilot system 규모 실험에서도 JEI의 제거효율이 PE가 높은 것으로 도출되었으며 이는 Lab 규모 자체실험 결과와 상반되는 현상으로 조사되었다. 이는 인공폐수 내에서 고르게 분산되지 않는 PE 특성에 의해 분석에 오차가 발생하였을 가능성이 있으나 보다 정확한 원인 파악을 위해서는 반복적인 측정과 후속연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

최근 보고에 따르면 국내 폐수종말처리장에서의 단순 생물학적 처리 혹은 흡착공정 연계 처리만으로는 미량오염물질이 90% 이상 제거되기 어렵다고 한다[25]. 하지만 Talvitie *et al.* (2017)은 하수처리장에 고도처리기술인 급속모래여과, 가압부상분리법 그리고 디스크필터법을 적용하면 미세플라스틱과 같은 미량오염물질이 2차 유출수 처리기준 각각 97%, 95% 그리고 40~98.5% 제거 가능하다고 실험적으로 증명한 바 있다[26]. 이러한 선행 연구를 토대로 하수처리의 최종단계에 향상된 고도기술을 적용한다면 최종 방류수에서 수계로 유입되는 오염물질의 대부분을 제거가 가능할 것으로 예측할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 유해해양생물인 보름달물해파리의 면역반응 유도로 분비된 JEI와 고도처리기술을 함께 연계하여 미량오염물질 중 중금속(Cu, Pb, Ag)과 미세플라스틱(PS, PE)의 제거 성능 실험을 수행하였다.

실험 결과, JEI는 비교 물질인 음이온 고분자보다 중금속과 미세플라스틱 제거 능력이 탁월한 것으로 분석되었다. 특히 자-테스터를 통한 JEI 단순 투입보다는 투입 후 고도처리기술 단계를 거치는 pilot system 규모의 실험에서 JEI에 의한 중금속 제거율이 더 높아짐을 확인하였다. 본 연구에서 활용한 pilot system은 자체 개발한 관접속형 혼화반응시스템과 농축일체형 분리장치를 포함하는 10.0 L /min 규모의 하수처리 후속 공정이다. 시스템을 통과하며 두 차례의 혼합과정(1차 : 고속으로 회전하는 베인을 통한 혼합, 2차 : 농축일체형 분리장치에 존재하는 가압탱크를 활용한 혼합)을 통해 JEI와 유입수 내 미량오염물질의 혼합이 극대화되고, 그 결과 중금속 제거율이 향상되는 것으로 분석된다[27]. 하지만 기존 공정시설의 가압부상조 또한 본 연구의 농축일체형 분리장치와 유사한 원리로 JEI와 유입수의 혼합작용이 가능하므로, 현재 하수처리 시설에 혼화반응시스템을 통한 JEI 첨가 공정만 도입된다면 방출수 내 미량오염물질의 농도가 기존 시스템에 비해 현저히 낮아질 것으로 예측된다.

그러므로 본 기술은 수처리 분야의 문제를 해결뿐 아니라 연안역에서 문제를 야기하고 있는 보름달물해파리를 활용함으로써 해양 분야의 문제 또한 해결하는 일석이조의 대안기술이 될 수 있을 것으로 판단된다. 더불어 화학약품이나 분리막 등을 활용한 기존의 방식에서 벗어나 생물로부터 추출되는 물질을 활용하여 생태계 위해성이 적고 무기성 폐기물 발생을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생태모방 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2021002800019).

References

1. J. Lim, H. Cho, H. Kim, C. Cho, S. Kim, C. Shin, W. Pyo, S. Koo, Y. Shim, M. Heo, S. Kim, H. Kim, and W. Kwon, *Development of Analytical Method and Study of Exposure of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Environment*, Ministry of Environment, Korea (2006), https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201200011478.
2. D. Jeong, S. Ham, W. Lee, H. Chung, and H. Kim, Study on occurrence and management of organic micropollutants in sewer systems, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **31**, 551-566 (2017).
3. J. Hea and J Cho, Utilization of microorganisms for treating wastewater polluted with heavy metals, *J. Appl. Biol. Chem.*, **13**, 83-83 (1994).
4. Hanyang University Erica Industry-Academic Cooperation Foundation, *Research on Specific Water Quality Hazardous Substances in the Aquatic Ecosystem of Ansan Region*, Ansan Green Environment Center, Korea (2015), https://www.agec.or.kr/data/study/5cde122e2687b.pdf.
5. K. Tang and H. Tony, Microplastics removal through water treat-

ment plants: Its feasibility, efficiency, future prospects and enhancement by proper waste management, *Envrion. Challenges*, **5**, 100264 (2021).
6. KICT, Development of Micro-Plastic Removal Technology in Urban Stormwater Runoff, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (2018), https://www.codil.or.kr/filebank/original/RK/OTKCRK190419/OTKCRK190419.pdf.
7. Ministry of Environment, *Microplastic Removal Technology*, Ministry of Environment, Korea (2021), https://kiast10.tistory.com/40.
8. A. Mathalon and P. Hill, Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia, *Mar. Pollut. Bull.* **81**, 69-79 (2014).
9. X. Qu, L. Su, H. Li, M. Liang, and H. Shi, Assessing the relationship between the abundance and properties of microplastics in water and in mussels, *Sci. Total Environ.*, **621**, 679-686 (2018).
10. S. Zeytin, G.agner, N. ckay-Roberts, G. rdts, E. Schuirmann, S. Klockmann and M. Slater, Quantifying microplastic translocation from feed to the fillet in European sea bass Dicentrarchus labrax, *Mar. Pollut. Bull.*, 156, 111210 (2020).
11. A. Karam, A. Golieskardi, C. Choo, V. Larat, S. Karbalaei, and B. Salamatinia, Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats, *Sci. Total Environ.*, **612**, 1380-1386 (2018).
12. J. Kang, Y. Choi, S. Kwon, and Y. Yu, Assessment of micro organic pollutants removal using advanced water treatment process and nanofiltration process, *J. Korean Soc. Environ. Eng*, **36**, 579-587 (2014).
13. A. Jang, Effective removal of micro-pollutants from wastewater using forward osmosis membrane process: Removal mechanism by charged pollutants, *2018 The Membrane Society of Korea Fall Meeting*. November 8-9, Daejeon, Korea (2018).
14. A. Patwa, A. Thiéry, F. Lombard, M. Lilley, C. Boisset, J. Bramard, J. Bottero, and P. Barthélémy, Accumulation of nanoparticles in "jellyfish" mucus: A bio-inspired route to decontamination of nano-waste, *Sci. Rep.*, **5**, 11387 (2015).
15. B. Choi, B. Kim, S. Kim, H. J., and M. Kim, *A Study on the Establishment of the Basic Plan for Nuclear Power Plant Ocean Monitoring to Secure Marine Safety*, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Korea (2015), https://sciwatch.kiost.ac.kr/handle/2020.kiost/42939.
16. M. Chung, S. Youn, and W. Yoon, Research Trends of the Jellyfish Blooms, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **17**, 25-31 (2012).
17. H. Lee, J. Shim, I. Park, K. Choo, and M. Yeo, Physical and biomimetic treatment methods to reduce microplastic waste accumulation, *Mol. Cell. Toxicol.*, **19**, 13-25 (2023).
18. J. Ha, E. Kim, B. Lee, and M. Yeo, Capture and toxicity assessment of Ag citrate nanoparticles using jellyfish extract, *Mol. Cell. Toxicol.*, **16**, 431-439 (2020).
19. S. Guem and M. Yeo, Reduction in toxicity of polystyrene nanoplastics combined with phenanthrene through binding of jellyfish mucin with nanoplastics, *Nanomaterials*, **12**, 14-27 (2022).
20. I. Park, S. Geum and M. Yeo, Reduced cellular process and developmental process genotoxicity of polystyrene nanoplastics in zebrafish embryogenesis using Aurelia aurita proteins, *Mol. Cell. Toxicol.*, **19**, 829-842 (2023).
21. D. Kim, S. Park, and H. Yang, Performance characteristics of in-line mixing and coagulation system, *J. Adv. Mar. Eng. Technol.*, **38**, 269-275 (2014).
22. Ministry of Environment, Water Pollution Process Test Standards, Korea (2022), https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EC%88%98%EC%A7%88%EC%98%A4%EC%97%BC%EA%B3%B5%EC%A0%95%EC%8B%9C%ED%97%98%EA%B8%B0%EC%A4%80-.
23. E. Ben-David, M. Habibi, E. Haddad, M. Sammar, D. Angel, H. Dror, H. Lahovitski, A. Booth and I. Sabbah, Mechanism of nanoplastics capture by jellyfish mucin and its potential as a sustainable water treatment technology, *Sci. Total Environ.*, **869**, 161824 (2023).
24. H. Callahan and S. Beverley, Heavy metal resistance: a new role for P-glycoproteins in Leishmania, *J. Biol. Chem.*, **266**, 18427-18430 (1991).
25. S, Park, J. Jung, J. Kim, and W. LEE, Sampling survey of hazardous water pollutants in industrial wastewater treatment plants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**, 590-595 (2015).
26. J. Talvitie, A. Mikola, A. Koistiene, and O. Setälä, Solutions to microplastic pollution– Removal of microplastic from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies, *Water Res.*, **123**, 401-407 (2017).
27. D. Kim, S. Lee, and E. Jung, The treatment of sewage using DAF pump system with micro bubble and non-powered flotation tank, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **25**, 659-666 (2011).

Authors

Hyeok Jin Park; Ph.D. Candidate, CEO, SCIST Inc., Suwon-si 16681, Republic of Korea; scist@scist.co.kr

Eun Jin Kim; B.Sc., Manager, SCIST Inc., Suwon-si 16681, Republic of Korea; eunjin.kim@scist.co.kr

Kyung Sil Choo; Ph.D., Research Professor, Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si 17104, Republic of Korea; kslchoo@khu.ac.kr

Joo Eun Shim; Master's Completion, Student, Department of Applied Environmental Science, Graduate School, Kyung Hee University, Yongin-si 17104, Republic of Korea; shim2616@khu.ac.kr

Min-Kyeong Yeo; Ph.D., Professor, Department of Environmental Science and Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yongin-si 17104, Republic of Korea; bioclass@khu.ac.kr