제이티에코비즈 회사 및 기술 소개

충북대학교 김정태

목차

1. 회사 개요
2. 기술 요약
3. 연구의 배경
4. 연구의 목적
5. 이론적 고찰
6. 실험장치 및 실험방법
7. 실험 결과
8. 흡착 메커니즘
9. 미세플라스틱 대응 방안
10. 결론
11. 한계 및 후속연구

1. 회사개요 : 창업자

연락처

- 010-2442-7533
- 개인메일 kimoono@naver.com

학력사항

- 서울과학기술대학교 환경공학과 / 박사
- 아주대학교 경영대학원 / MBA (재무)
- 미국 USDL / LLM
- Meta B Business School / MBA (경영)
- 대만 Kaoshiung University 경영학과
- 명지대학교 토목환경공학과

자격사항

- CP³P (PPP사업전문가)
- CMP (건설사업관리사)
- PMP (프로젝트관리기술사)
- OCS (해외건설전문가)
- 토목시공 특급기술자
- 품질관리 특급기술자
- TRIZ Specialist 외

주요경력

- 충북대학교 EID 대학원 교수
- DL 에너지 SMR TF장 / DL그룹 에너지 사업
- 미주엔비켐 대표 / 한국 환경, 신재생 에너지 기업
- 리클린홀딩스 대표 / 호주 맥쿼리 그룹 에너지 투자 지주사
- 베올리아코리아 에너지 사업본부장 / 프랑스 베올리아 그룹
- 두산중공업 EPC BG (현 두산 에너빌리티) 부장 / 발전, WTE
- I Squared Capital 한국대표 / 미국 투자사 ISQ Group

❖ 전문 분야 : 에너지, 환경 (폐기물)

❖ Business Scope : 사업개발, 투자, 건설, 운영

전문분야 활동

- 전) 중앙대학교 / 명지대학교 겸임교수
- 해외 프로젝트 투자평가 심의위원 (국토부)
- 온실가스 국제감축사업 자문위원 (국토부)
- 충청생태산업개발센터 고문 (산자부)
- 프로젝트 경영협회 전문위원 (PM협회)
- 벤처기업 경영지도 위원 (중기부)
- 한국수처리공업조합 이사 외

1. 회사개요 : 회사소개

배경

- 박사과정 연구과제의 사업화를 위해 창업
- 주제 : 바이오매스 기반 바이오차 개발

기업개요

- 회사명 : ㈜제이티에코비즈
- 사업자번호 : 419-81-03527
- 소재지 : 충북 청주시 청원구 오창읍 충북대학교 오창캠퍼스 오창기술원 내 입주
- 종업원수 : 대표자 외 1인
- 창업일 : 2024.11.29
- '24 매출 : 1억5백만원
- '24 손익 : 순이익 1백만원
- 자본금 : 2천만원
- 외부자금조달 : 없음
- 주요성과 : ㈜바이오나노코리아와 특허이전 계약 체결 및 에코스타트업 과제 1차 선정

사업계획

[아이템]

- 농업부산물인 바이오매스 폐기물을 활용, 유무기 복합 흡착제 제조기술 및 제품 개발
- 수계 미세플라스틱 및 미량오염물질(의약품, 중금속) 제거
- 수질정화용 활성탄 대체제로 유무기 복합 흡착제 활용
- 하수도 재이용 처리 시설, 상수도 및 정수시설 등에 활용

[수익모델]

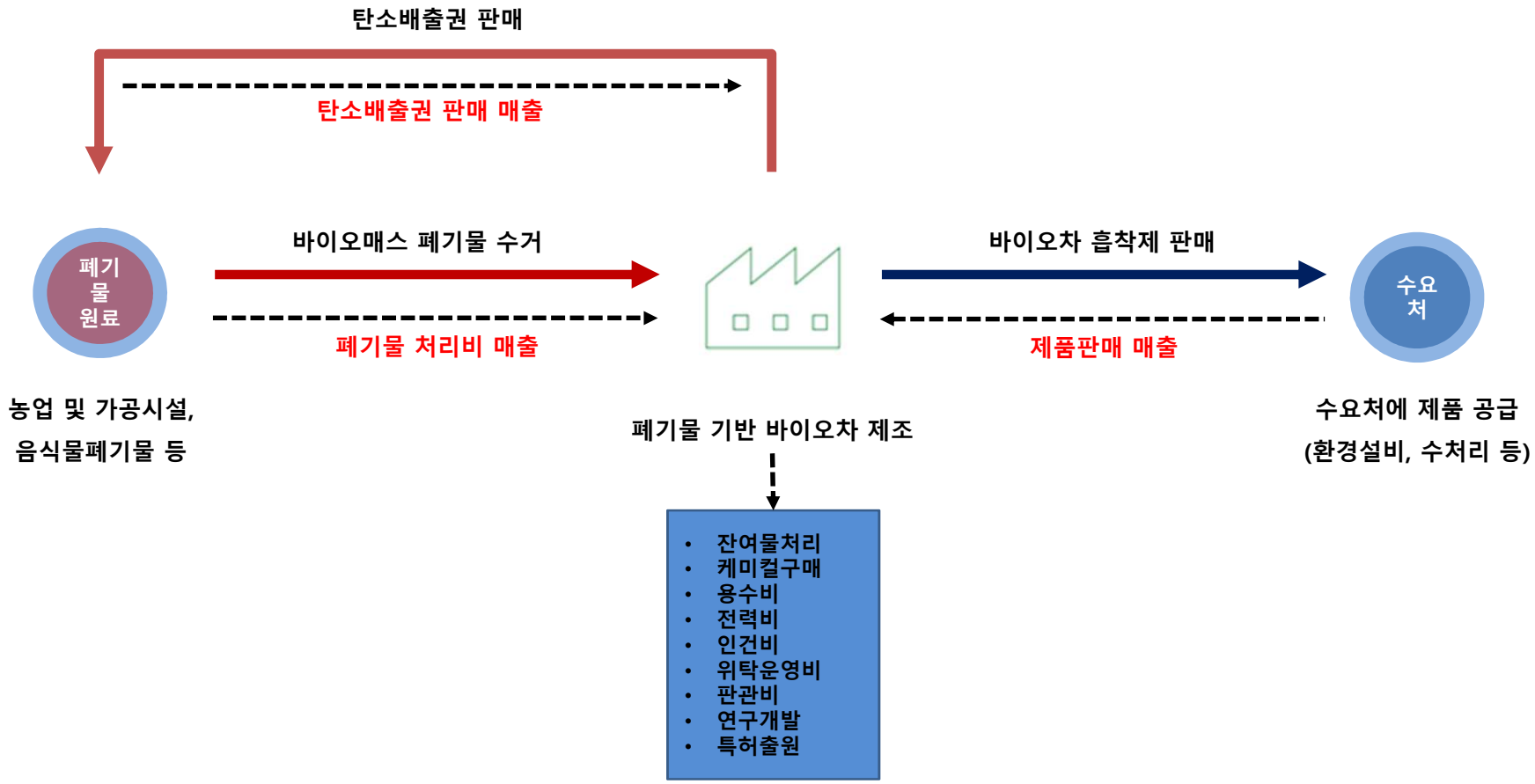
- 농업부산물 폐기물 처리비용 수취 (원료)
- 바이오차 판매 매출 발생 (제품)
- 폐기물 기반 제품 생산으로 수익성 우수

[강점 및 차별화]

- 기존 활성탄 대비 30% 이상 제조비용 절감
- 기존 활성탄 대비 20% 이상 성능 향상
- 폐자원 순환으로 탄소저감 및 환경오염 방지
- 고객과 초기 파트너링 및 고객별 니즈 맞춤형 다양한 흡착제 생산 (분말형, 입상형)

1. 회사개요 : 사업모델

바이오매스 폐기물을 기반으로 바이오차를 제조하는 사업임



1. 회사개요 : 참여인력

상시 협업 전문인력

김희중 / 사내이사
. 성균관대 환경공학박사
. 한국생산기술연구원 / 연구원
. 일본 오우라코리아 /선임연구원
. 일본계 쿠리타한수 / 책임연구원
. 미주엔비켐 / 신사업개발팀장
. 퓨리사이클솔루션㈜ / CTO
. 강원대 환경기술 선임연구원

주영일
. 서강대 경영학과
. 공인회계사, 세무사
. 두산에너빌리티 해외사업 재무관리 팀장
. VC 투자사 심사역 및 관리본부장 역임
. 현 중견 벤처기업 CFO

이용구
. 성균관대 환경공학박사
. 강원대학교 환경연구소 교수
. 퓨리사이클솔루션㈜ CEO

최영민
. 동국대 정치외교학과
. 두산에너빌리티 환경사업 개발 30년
. 맥쿼리 투자 환경사업 14년

협력 자문단

김종길 / 사내이사
. 한양대학교 대학원 신소재화학 이학박사
. 한국공학대 대학원 탄소중립 공학박사
. 한양대 ERICA 교수 / 공학기술연구소
. BioNanoKroea / CTO 회장/한양대계열사
. 한국화학공학회 /미립자 부문위원장
. 한국공업화학회 / 중장기 발전위원
. 한국여과분리학회 부회장
. 산자부 기술사업화협회 추진위원장 외

박성권
. 아주대 에너지 공학석사
. 국가 온실가스종합정보센터 사무관
. ㈜기후환경연구소 CTO

김영관
. U. Wisconsin-Madison 공학박사
. 강원대학교 환경공학과 명예교수

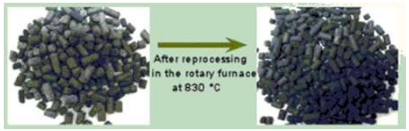
국명수
. 고려대 법학
. 변호사
. 투자자산운용사
. 법무법인비트 파트너 변호사
. 트러스톤자산운용 PE 본부장
. 주요 대기업 및 글로벌 기업 법무팀장 역임

1. 회사개요 : 제품분석

분말활성탄의 환경오염 정화 적용시 문제점

1. 분말활성탄 회수의 어려움

- 분말활성탄의 경우 입자가 작아 회수하기가 어려움
- 회수되지 않은 분말활성탄은 2차 환경오염 유발 할 수 있음



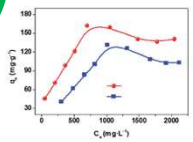
2. 분말활성탄 재생의 어려움

- 고온의 증기, 화학적 재생을 통해 재생이 가능 > 높은 비용 발생
- 활성탄 회수 및 재설치 비용이 추가로 필요함

분말
활성탄

3. 농축수 처리 비용 발생

- 물리화학적 재생시 농축수가 발생하여 후처리 필요
- 환경오염 정화 시설의 운전비용 증가



4. 분말 활성탄 수명 저하

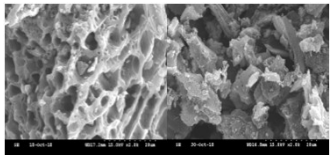
- 기존 물리화학적 세정시 활성탄의 표면 기능기 손상
- 재생 절차 반복시 효율 저감 발생

1. 회사개요 : 제품분석

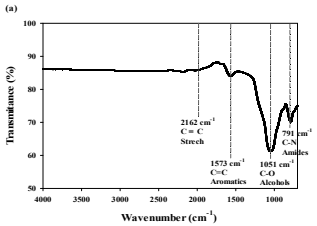
고객맞춤형 솔루션 제공

바이오차 제조기술

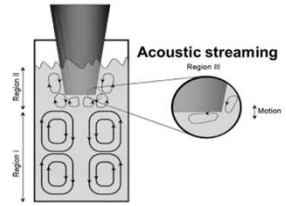
바이오차 개질기술



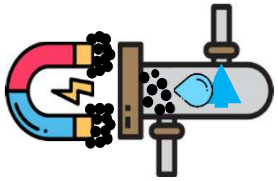
바이오차 특성분석 기술



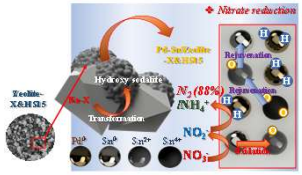
초음파 기반 개질 기술



유기흡착제 회수 기술



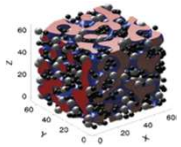
기능성 부여 기술



- 흡착제 다공성 표면 형성 및 다기능성 부여 → 특정오염물질 흡착효율 향상
- 흡착제 회수 및 재생 기술 확보 → 2차 환경오염 방지/운영비용 저감

흡착기반 환경오염정화 고도처리 원천기술 확보

01. 흡착제 다기능성 부여

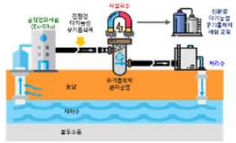


- 환원 기능 부여
- 산화 기능부여
- 자력회수 기능부여

02. 흡착제 재생 기술

- 친환경 재생기술 개발을 통한 운영 비용 저감
- 2차 환경오염 방지

03. 환경오염정화 흡착 공정 컨설팅



- 환경 오염 정화 고도처리 기술 확보

2. 기술 요약

- 기술제목 : 철 함침 폐호두껍질 바이오차를 활용한 미세플라스틱 흡착능 평가

  Evaluation of microplastic adsorption capacity using Fe-rich waste walnut shell biochar
- 연구자 : 김정태

- 폴리스티렌 설폰산으로 만들어진 **미세 플라스틱**(PSMPs)은 수생 생태계에서 이동성이 매우 높으며 결과적으로 인간의 건강에 바람직하지 않은 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 처리하지 않은 호두껍질을 열분해하여 제조한 바이오차(WSB)와 철광산 부산물에서 얻은 철(Fe)을 함침하여 열분해한 **호두껍질 바이오차** (Fe-WSB)를 사용하여 PSMPs의 흡착 제거 능력을 종합적으로 분석하여 WSB와 Fe-WSB의 흡착 잠재력과 흡착 메커니즘의 변화를 탐색하였다. Fe-WSB에 대한 PSMP의 흡착(흡착 용량(Qe = 0.77–6.75 mg/g)은 특히 낮은 pH 조건에서 WSB(Qe = 0.27–0.79 mg/g) 에 대한 흡착보다 최대 8.5배 이상 높았으며 이는 **Fe의 함침**이 Fe-WSB와 PSMPs 사이의 정전기적 상호작용을 발생시켜 수용액 내 PSMPs의 제거에 상당한 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 흡착 동역학 및 등온선에 대한 R2값은 **화학적 흡착**이 수용액에서 WSB 및 Fe-WSB를 사용하는 PSMPs의 흡착제거에서 중요한 역할을 한다는 것을 보여주었다. 또한 열역학적 평가에서는 PSMP210(210Da), PSMP10K(10,000Da), 그리고 PSMP32K(32,000Da)가 발열적으로 흡착되었으며 고온에서 반데르발스 힘이 약해짐에 따라 흡착 효율이 감소하는 것으로 나타났다. PSMPs 흡착 전후 WSB 및 Fe-WSB에 대해 수행된 X선 광전자 분광학 결과는 Fe-산화물이 WSB 표면에 함침한 후 수환경에서 PSMPs의 주요 흡착 메커니즘(정전기 상호작용, 기공 충진 효과, π-π와 H-결합 상호 작용)이 향상되었다는 개념을 뒷받침하였다.

3. 연구의 배경

[미세플라스틱]

- 세계적으로 연간 4억톤 이상 플라스틱 생산, 국내 연간 200만톤 이상 플라스틱 폐기
- 미세플라스틱의 발생 및 자연환경, 수질 생태계 오염 이슈 대두 (MP : 지름 1nm ~ 5mm)
- 해양생물의 미세플라스틱 섭취 및 상위 단계로의 축척 등 부정적 영향 발생

▶ ① **수생태계 내 MP 제거를 위한 수처리 공정 필요성 대두**

[바이오차 / 폐호두껍질]

- 응결, 응집 및 분리막 여과 수처리 공정 : 슬러지 발생, 고 비용 단점
- 활성탄 : 높은 경제성으로 수처리 흡착 공정에 널리 사용

▶ ② **미세다공성 물질인 호두껍질 폐기물로 바이오차를 제조하여 활성탄 대체 (무산소 열분해)**

- 국내 연간 1.4천톤 발생, 폐기물 처리 (피부미용 용도 등 극히 일부만 활용)

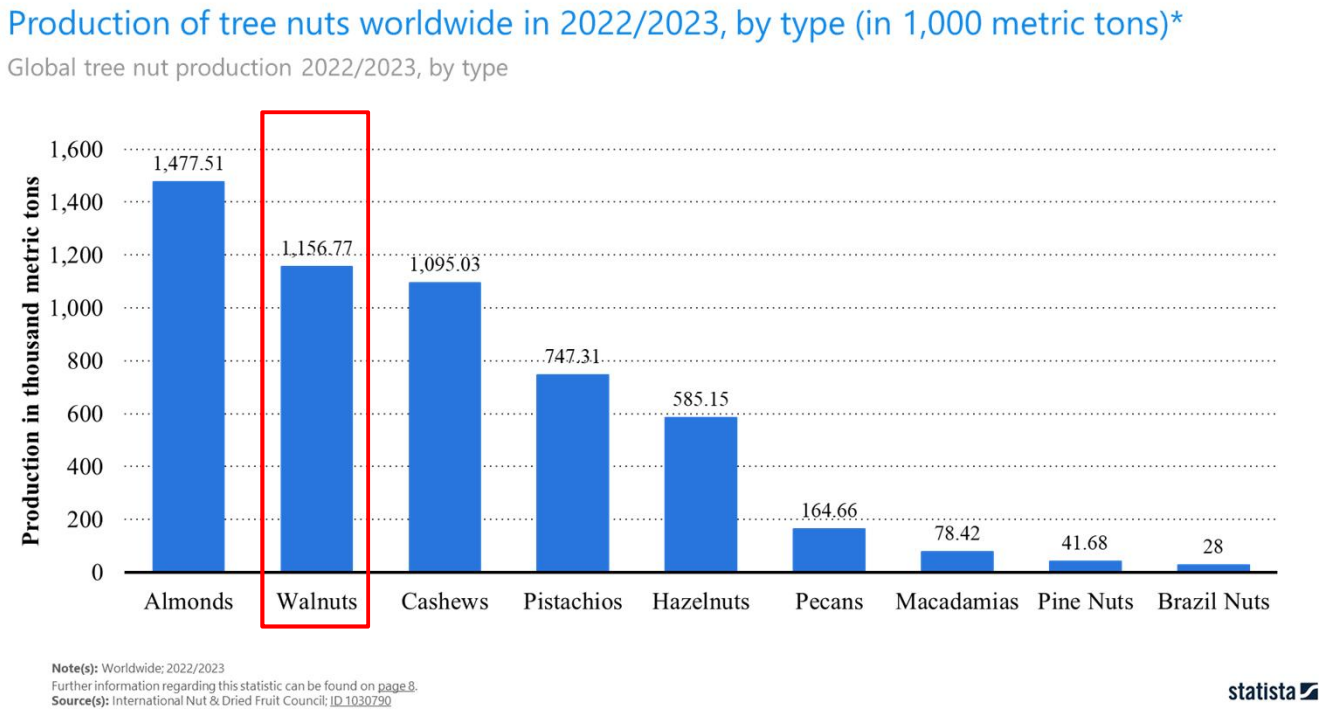
- 호두껍질 바이오차의 MP 제거능력 향상을 위해 철광석 부산물 활용

- 철광석 부산물 세계적으로 연간 140억톤 국내 200만톤 발생, 토양 및 수질오염 야기

▶ ③ **바이오차 성능 향상 및 철광석 폐기물 재활용 목적 "철 함침 호두껍질 바이오차" 특성 연구**

Ref. 폐호두껍질 발생 현황

연간 폐 호두껍질 발생량 세계 약 775천톤, 국내 1.4천톤



▶ 호두 : 전세계 견과류 중 생산량 2위 (2022/2023 기준)

▶ 호두껍질 부산물 비중은 67%로, 바이오차 등 활용가능성 높음 / 국내에서는 견과류 중 최다 배출

※ 호두껍질(Walnut Shell)은 호두 식품의 부산물이며, 호두의 67%를 차지 (Song et al., 2022, Scientific Reports)

▶ 우리나라의 경우 호두껍질은 일반쓰레기로 분류되어 폐기물 소각되거나 매립 처리됨

4. 연구의 목적

호두껍질 분말을 이용한 바이오차 제조, 수용액 내 폴리스티렌 미세 플라스틱 흡착 특성 및 흡착 매커니즘에 대한 철 함침의 영향 분석

1. 호두껍질 바이오차(WSB : Walnut Shell Biochar)와 철이 함침된 호두껍질 바이오차(Fe-WSB)의 물리화학적 특성 비교

2. WSB 및 Fe-WSB와 관련하여 폴리스티렌 미세 플라스틱(PSMPs : Polystyrene Sulfonate Microplastics)의 흡착 동역학, 등온선, 그리고 열역학적 특성 분석

3. 다양한 반응 매개 변수 하에서 WSB 및 Fe-WSB와 상호 작용할 때 PSMPs의 흡착 용량과 경향의 변화를 식별

4. WSB 및 Fe-WSB에 대한 PSMPs의 가능한 흡착 메커니즘을 규명하여 바이오차의 흡착능을 향상시키는데 있어 Fe의 함침의 영향과 중요성 확인

5. 이론적 고찰

5.1. 플라스틱의 종류와 특성

구분	폴리에틸렌 (PE)	폴리프로필렌 (PP)	폴리스틸렌 (PS)	폴리염화비닐 (PVC)
Monomer 분자량	28	42	104	62.5
비중	0.91-0.96	0.902-0.906	1.04-1.10	1.30-1.40
내열온도 (℃)	90-120	121-160	50-70	60-70
내산성	O	O	O	O
내알칼리성	O	O	O	O
열분해온도 (℃)	290-360	220-250	330-400	190-300
착화온도	350	389	495	454
발열량 (kcal/kg)	11,040	11,040	9,680	4,230
비염소계 및 염소계	비염소계	비염소계	비염소계	염소계

5. 이론적 고찰

5.2. 미세플라스틱 제거 기술

1. 응집/응결 (Coagulation/Flocculation)

- 침전이 어려운 콜로이드성 부유물질을 물이 가진 전하의 성질을 이용하여 침전이 쉬운 큰 입자로 만듬
- 입자간의 부착을 돕는 응집제를 사용하여 반응을 촉진 (Alum, PCA, Fe-SO4 등)
- 응집 : 용수나 폐수에서 입자상 물질을 불안정하게 만들어 만날 수 있게 하는 응집제(Coagulant) 사용
- 응결 : 저속 교반을 통해 불안정화된 물질들이 빨리 침전할 수 있도록 큰 입자를 만드는 물리적 기작

2. 분리막 여과 (Membrane Filtration)

- 이동하는 유체에 저항을 가하여 물질을 선택적으로 분리 (분리하고자 하는 물질의 성상에 따라 분리막 결정)

Advantages	Disadvantages
- High performance	- High capital cost
- Compact units: less space needed than conventional treatment schemes	- Maintenance and Repair
- Simple operation	- Membrane Fouling
- Membranes available can be used to separate many kinds of contaminants	- harmful chemicals for cleaning

5. 이론적 고찰

5.2. 미세플라스틱 제거 기술 – 계속

3. 생물학적 분해 (Biodegradation)

- 생물열화(Biodeterioration) : 미생물이 화학적 물리적 작용을 통해 플라스틱의 표면을 분해하고 변질시킴
- 생물절단(Biofragmentation) : 생물열화 단계를 거친 플라스틱이 미생물에의 해 중합체에서 단량체로 전환
- 동화작용(Assimilation) : 미생물이 생물 절단 단계에서 형성된 저분자 물질들을 세포 내로 흡수
- 광물화(Mineralization) : 동화작용을 통해 미생물 세포 내로 흡수된 플라스틱이 효소 반응을 통해 무기 대사물로 전환

4. 흡착 (Adsorption)

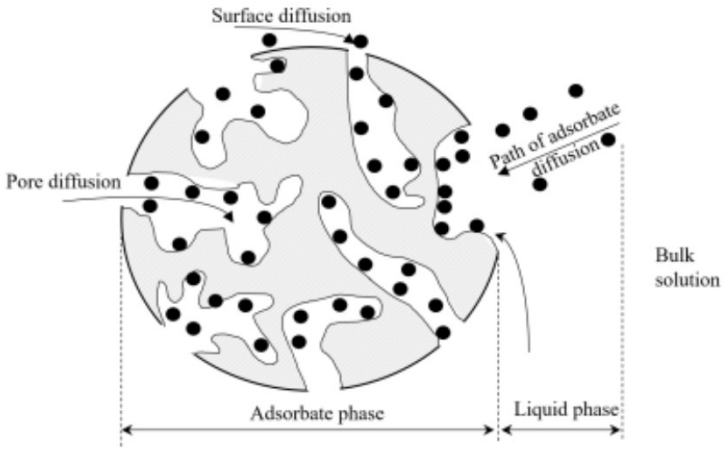
- 흡착제로 사용하는 물질 표면과 기공을 통해 다른 물질이 물리.화학적으로 결합하는 현상 및 과정
- 확산-흡착-포화-탈착의 단계로 진행
- 물리적 흡착과 화학적 흡착이 있음
- 물리적 흡착 : Van der walls 인력에 의해 일어나는 반응. 흡착열이 많이 발생하지 않고 빠른 메커니즘
- 화학적 흡착 : 자유전자에 의한 이온결합과 공유결합. 흡착열이 많이 발생하고 표면 막 형성
- 탈착 방법 : 열처리, 진공처리, 역전하처리 등

5. 이론적 고찰

5.2. 미세플라스틱 제거 기술

4. 흡착 (Adsorption) – 계속

Schematic diagram of adsorption



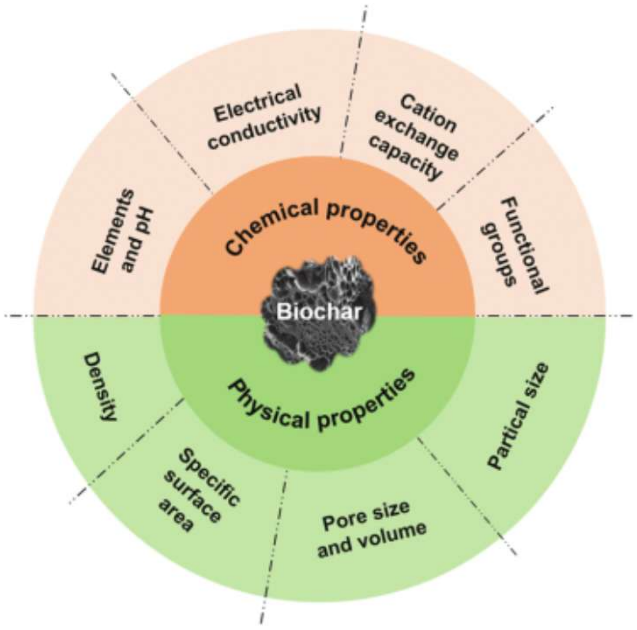
	Physical	Chemical
Heat of adsorption	Low	High
Adsorption and adsorbate	Non specific	Highly specific
Adsorption rate	Rapid	Slow
Temperature	Relatively low temperature	Over a wide temperature range
Reversibility	Reversible	Irreversible
Coverage	Mono-layer or multi-layer	Mono-layer
Activation	Non activated	Activated
Electron transfer	No electron transfer although polarization of sorbate, may occur	Electron transfer leading to bond formation between sorbate and surface

5. 이론적 고찰

5.3. 바이오매스의 활용과 바이오차

1. 바이오매스 (Biomass)
   - 식물, 동물, 미생물에서 비롯된 생분해성 유기물
   - 대체 에너지원으로서의 잠재력 보유
   - 연간 전 세계적 약 8천만톤, 국내 약 12백만톤 발생 (작물 기반)
   - 목재폐기물, 에너지작물, 농업잔류 폐기물, 도시 고형 폐기물, 산업폐기물 등에서 유래

2. 바이오차 (Biochar)
   - 바이오매스를 산소가 없는 환경에서 열분해 생성 고형물
   - 400~600도의 고온 무산소 조건에서 유기 구조가 분해됨
   - 폐기물의 양을 줄이고 유용자원을 생성하는 장점
   - 재생 가능 지속 가능한 에너지원
   - 생성 과정에서 탄소를 배출하지 않음
   - 기공구조, pH, 비표면적, 활성관능기, 무기염류 등 특성 다양



5. 이론적 고찰

5.4. 바이오차를 이용한 미세플라스틱 제거

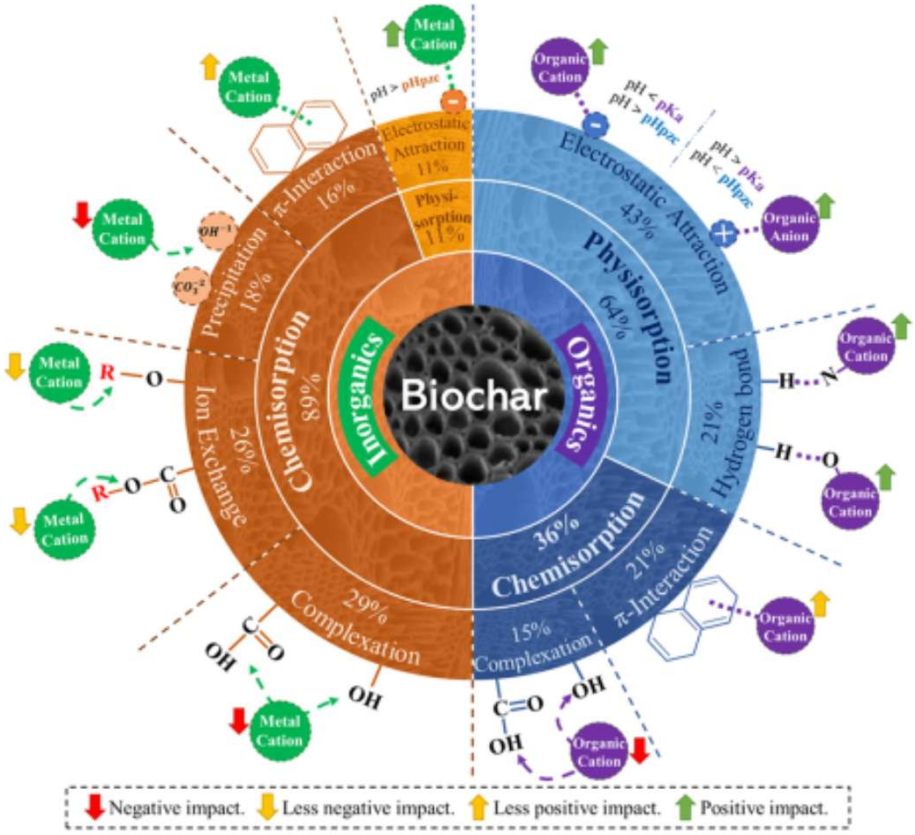
1. 물리적 흡착
   - 반데르발스 힘이 주요 기작으로, 오염물질과 흡착제 분자 간의 상호 작용으로 발생
   - 주로 분자간의 힘에 의해 발생하므로 가역적임
   - 바이오차를 사용한 MP 흡착은 비표면적, 공극부피, 표면에너지에 의해 영향을 받음
   - 옥수수 속대 바이오차의 폴리스틸렌 플라스틱 흡착 제거에 물리적 흡착이 기여한다고 보고

2. 정전기적 상호작용
   - 표면개질을 통한 바이오차의 강한 양하전이 MP의 정전기적 상호작용 촉진, 이동성을 저하
   - 금속성분으로 표면개질한 바이오차 적용시 정전기적 인력이 강화됨
   - 왕겨와 철을 함침하여 개질한 바이오차는 수환경에서 MP에 대한 반응성이 더 높음

3. 표면 착화
   - 바이오차의 표면에 존재하는 다양한 산소 함유 관능기는 MP와의 결합에 안정한 착물을 형성
   - 금속성 무기물로 개질 제조된 바이오차는 표면에 많은 산소 함유 관능기를 보유, MP를 효과적으로 안정화

5. 이론적 고찰

5.4. 바이오차를 이용한 미세플라스틱 제거 - 계속



The dominant adsorption mechanisms of biochar for removal of organic and inorganic pollutants

5. 이론적 고찰

5.4. 바이오차를 이용한 미세플라스틱 제거 - 계속

Microplastics adsorptive removal via biochars and their interaction mechanisms

Microplastic types	Biochar	Preparation conditions	Removal efficiency	Potential mechanisms
Polyethylene microbeads	Activated pine and spruce bark biochar	Steam activation	~100 %	Physisorption
Polystyrene (1 μm)	Magnetic-modified biochar	Magnesium/zinc modifications; pyrolyzed at 550℃	94.81 % (magnetic biochar) 98.75 % (Mg-magnetic biochar) 99.46 % (Zn-magnetic biochar)	Chemical bonding and electrostatic attraction
Nanoplastics: 30 nm 1000 nm (carboxyl), 1000 nm (amine)	Modified biochar derived from *prosopisjuliflora*	Using Fe_3O_4, pyrolyzed at 850℃	~100 % at 850℃	Electrostatics attraction and formation of surface complexation
Polystyrene nanoplastics	Corncob raw and oxidized biochar	HNO3-H2SO4 was used as oxidizing agent; pyrolyzed at 500 °C, 700 °C, and 900 °C	>90 %	Hydrophobic interaction and hydrogen bonding

6. 실험장치 및 실험방법

6.1. 재료 및 시약

1. 시약 (폴리스틸렌 미세플라스틱; PSMPs) : 미국 미주리주 세인트루이스 소재 Sigma-Aldrich 사의 210Da, 10,000Da, 32,000Da 시약 사용

2. WSP (바이오차 생산에 사용된 호두껍질 분말) : 대한민국 경기도 안산시 허브테라피에서 구매

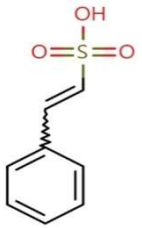
3. 철광석 부산물 (Fe 함침을 위해 사용) : 대한민국 강원도에 위치한 광산으로부터 공급

4. NaOH 및 Hcl (pH 조정을 위해 사용) : 대한민국 경기도 시흥시 대정화금의 extra pure 등급 시약을 정제 없이 사용

6. 실험장치 및 실험방법

6.1. 재료 및 시약

Physicochemical properties of PSMPs

Compounds		Polystyrene sulfonate microplastics(PSMPs)
Formula		$C_8H_8NaO_3S$
Structure		
MW (Da)		210 / 10,000 / 32,000
Charge a	pH 3.0	-0.99
	pH 7.0	-1.00
	pH 11.0	-1.00
Log Da	pH 3.0	-0.99
	pH 7.0	-1.00
	pH 11.0	-1.00
pKa		-0.83
Water solubility (g/L)		0.028

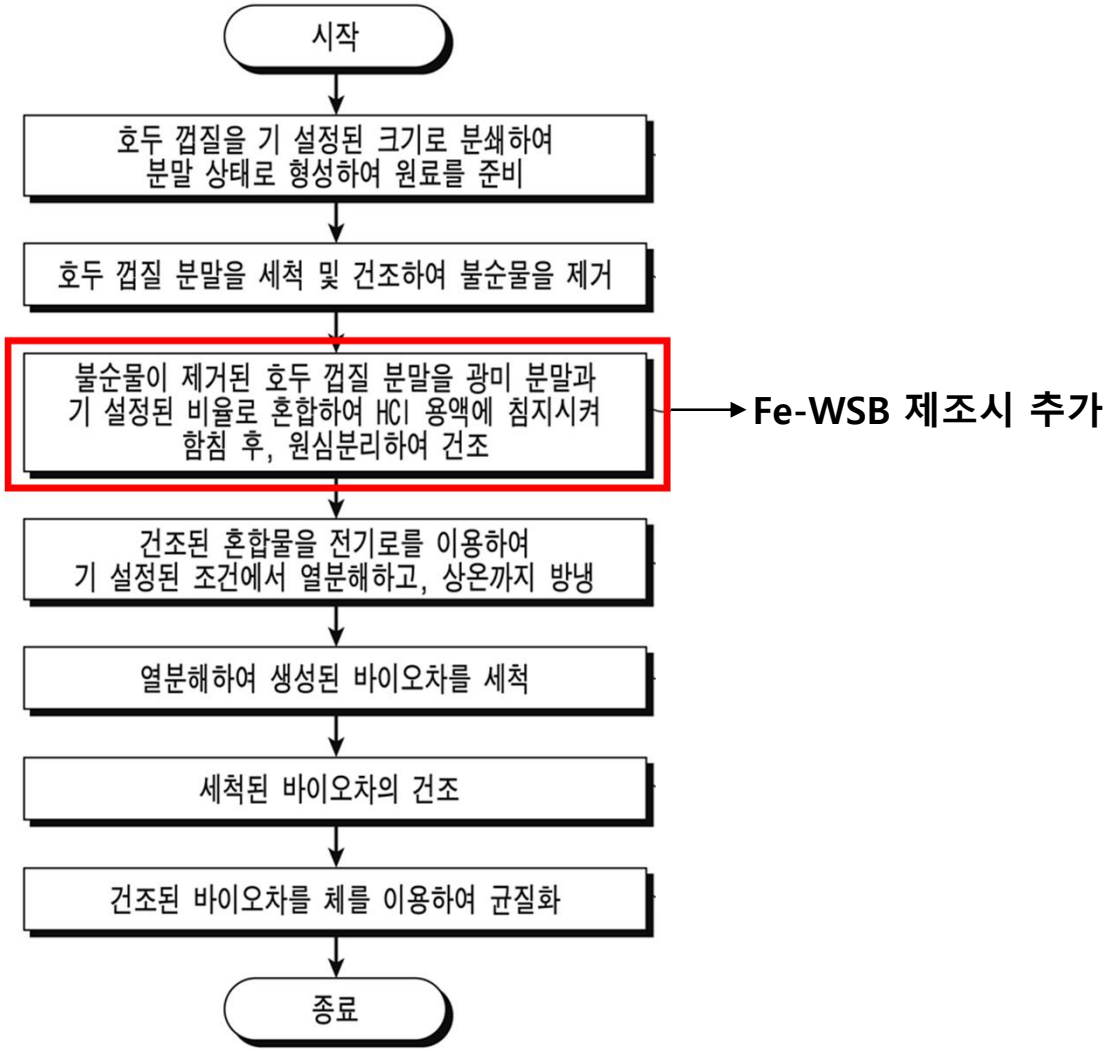
6. 실험장치 및 실험방법

6.2. WSB와 Fe-WSB의 제조 방법

1. 호두껍질분말(WSP)은 여러 번의 탈이온수(3차 증류수) 세척을 거친 후 80℃의 오븐에서 24시간 동안 건조
2. 건조를 마친 후 100g의 WSP와 100g의 철광산 부산물을 7.0N HCl의 용액 1L에 넣어 24시간 동안 교반하여 반응
3. 반응이 끝난 WSP/철광산 부산물 슬러리는 원심분리기를 사용하여 분리한 다음 다시 80°C의 오븐에서 48시간 동안 건조
4. WSP와 Fe-광산 폐기물로 합성된 Fe-WSP는 전량 PyroTech(경기도 남양주시, 대한민국)에서 제작된 전기 가열로를 사용하여 열분해
5. 열분해 과정에서 산소에 의한 산화를 막기 위하여 질소를 주입, 목표온도 700℃까지 온도상승은 10℃/min의 일정하게 상승 및 최종적으로 2시간동안 가열을 진행
6. 열분해 후, 시료들은 상온(25℃)까지 자연 방냉. WSB와 Fe-WSB 시료는 잔류 오염물을 제거하기 위해 연속적으로 탈이온수로 세척한 후 추가적으로 24시간 동안 80℃의 오븐에서 건조
7. WSB와 Fe-WSB 시료는 균일성을 위해 150μm(100 mesh) 필터를 이용해 거른 다음 데시케이터(desiccator)에 보관하여 흡착 실험에 사용

6. 실험장치 및 실험방법

6.2. WSB와 Fe-WSB의 제조 방법



6. 실험장치 및 실험방법

6.3. WSB와 Fe-WSB의 분석 방법

1. WSB와 Fe-WSB의 원소 구성 중, C, H, N, O는 원소 분석기(Vario MAX cube, Elementar, Langenselbold, Germany)를 사용하여 분석을 실시
2. 표면특성 분석은 BELSORP-mini II 분석기(MicrotracBEL, Osaka, Japan)를 사용하여 분석
3. 평균 기공과 표면적 분석은 Burnauer Emmett Teller (BET) 방법으로 확인, 또한 Barrett-Joyner-Halenda 방법을 이용하여 기공 크기 분포와 총 부피를 추정
4. 초고해상도 스케닝 전자 현미경(UHR-SEM; S-4800, Hitachi, Tokyo, Japan)과 에너지 분산 X-선 분광법(EDX)는 WSB와 Fe-WSB의 표면 형태학과 원소 구성을 평가하는 분석방법으로 사용
5. WSB와 Fe-WSB의 표면 기능 단위는 FTIR 분석기(Fourier transform infrared spectroscopy, Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts, USA)를 통해 4000 cm−1에서 400 cm−1의 분광 범위에서 분석을 실시
6. 표면 구성과 결정질 성질은 각각 X-선 광전자 분광법(XPS) (Nexsa, Thermo Fisher Scientific, USA)과 X-선 회절계(XRD) (D/Max-2500, Rigaku, Tokyo, Japan)을 통해 분석을 실시
7. WSB와 Fe-WSB의 영전하 지점(pHPZC)은 Zetasizer Nano ZSP (zeta potential analyser, Malvern, UK)를 사용

6. 실험장치 및 실험방법

6.4. 회분식 흡착 분석

6.4.1. 최적 주입량 결정

1. PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K의 최적 흡착에 대한 흡착제 사용량을 확인하기 위해, 다양한 용량의 WSB와 Fe-WSB(0.2–1.0 g/L 범위)를 회분 흡착 실험에 사용
2. 각 실험은 PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K의 초기 농도를 4 mg/L로 설정하였으며, 각각의 용액 25 mL를 Erlenmeyer 플라스크에 각각 나눠 실험을 실시
3. 이 용액들은 흡착제와 혼합된 후, 25℃ 온도에서 150 rpm의 속도로 24시간 동안 진탕 과정(VS-8480, Vision Scientific Co., Ltd., Daejeon, Republic of Korea)을 실시
4. 진탕 후, 용액들은 유리 섬유 필터(GF/F, nominal pore size 0.7 μm, Whatman, Maidstone, UK)를 사용하여 혼합 상태인 흡착제와 액상을 분리
5. PSMPs의 농도 측정을 위해 UV-Vis 분광광도계(UV-1280, Shimadzu, Kyoto, Japan)의 221 nm 파장을 이용하였으며, 흡광도는 PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K의 용액 내 농도를 정량분석 하는데 사용 (Fan et al.(2023)의 정량법을 참고)

5. 실험장치 및 실험방법

6.4.2. 흡착 속도

1. 흡착 동역학 실험을 위해 PSMP210, PSMP10K, PSMP32K 용액의 초기 농도는 4 mg/L로 설정
2. 25 mL의 용액이 담긴 Erlenmeyer 플라스크는 WSB 및 Fe-WSB의 최적량인 각각 0.6 g/L씩 주입
3. 혼합된 흡착제와 PSMP는 25 °C에서 교반기에서 15분에서 24시간 까지 150 rpm으로 교반
4. 흡착제의 양의 경우는 (PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K 당 흡착된 양), Qe (mg/g)로 표시되며, 최종적으로 제거 효율(%)은 식 1, 2의 공식을 사용하여 산출

$$Qe = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \qquad (1)$$

$$\text{Removal efficiency}\ (\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \qquad (2)$$

*M(g)*는 사용된 흡착제의 무게를 의미하며, C_0 (mg/L)과 C_e (mg/L)는 각각 $PSMP_{210}$, $PSMP_{10K}$, 그리고 $PSMP_{32K}$의 초기 상태 및 평형 상태를 나타낸다. V(L)는 용액의 부피를 나타낸다

6. 실험장치 및 실험방법

6.4.3. 등온 흡착

1. 등온흡착선의 물질 거동을 알아보고자, WSB와 Fe-WSB 양을 0.6 g/L를 사용하였으며, PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K의 농도를 0 – 10 mg/L 범위 내에서 조절하여 평가를 수행

2. 혼합된 물질들은 흡착평형에 도달하기 위하여 상온(25°C)에서 24시간 동안 150 rpm으로 교반기에서 교반을 실시

3. 등온흡착에서 파생된 데이터는 Langmuir 및 Freundlich 등온선 모델을 기반으로 계산

6. 실험장치 및 실험방법

6.4.4. 흡착에서 온도의 영향

1. 흡착 대상인 PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K이 온도에 어떤 영향을 받는가에 대한 연구를 하기 위해 온도 288, 298, 308K에서 실험을 진행

2. 각 용액의 초기 농도는 4 mg/L로 설정하였고, 흡착 물질이 들어있는 용액을 25mL 에를렌마이어 플라스크에 추가

3. 흡착제를 추가한 후, 플라스크를 밀봉한 후 24시간 동안 세 가지 다른 온도와 150 rpm에서 진탕 교반

4. 흡착 과정에 대한 온도의 영향을 조사하기 위해 열역학 파라미터 계산

6. 실험장치 및 실험방법

6.4.5. 흡착에서 pH와 이온 결합력의 영향

1. pH에 대한 흡착 실험은 WSB와 Fe-WSB를 사용하여 PSMP210, PSMP10K, 그리고 PSMP32K를 흡착하여 제거할 때, 용액의 pH의 대한 영향을 평가하기 위해 진행

2. 용액의 초기 pH는 3.0-11.0 사이로 변화. 실험 조건은 다음과 같이 설정
   - PSMP210, PSMP10K, PSMP32K의 초기 농도는 4 mg/L
   - 교반 속도는 150 rpm으로 고정하였으며 온도는 25 ℃로 유지
   - 흡착제인 WSB와 Fe-WSB는 0.6 g/L을 사용하였고, 반응은 24시간 동안 진행
   - 용액의 pH 조정은 0.1 N HCl과 0.1 N NaOH를 사용

3. SB와 Fe-WSB에 의한 PSMPs의 흡착에 대한 이온 강도(IS)의 영향을 판단하기 위해, 다양한 NaCl 농도(0에서 0.1 M까지)에서 흡착 실험을 진행

4. 정확성과 실험적 오류를 최소화하기 위해, 모든 실험은 세 번에 걸쳐 진행

7. 실험 결과

7.1. WSB와 Fe-WSB의 물리화학적 분석

[원소 성분과 표면 형태]

- 주 성분 C : WSB 및 Fe-WSB 공통
- Fe-WSB : 광미의 특징 (ash) 보유
- Fe-WSB : 친수성 (O/C 비율)
- 기공의 지름 : 유사
- 비표면적 : Fe-WSB가 WSB의 1.74배
- 기공의 크기 : Fe-WSB가 WSB의 5.57배

▶ **광미 기반 전처리가 WSB의 물리화학적 특성을 향상** 시켜 PSMPs의 제거 효율 증대 시킬 것으로 판단됨

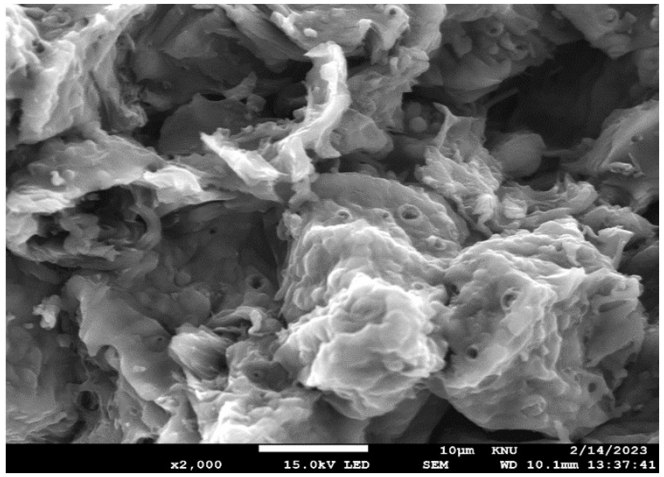
Properties	WSB	Fe-WSB
C (%)	86.44	59.27
H (%)	2.29	1.90
O (%)	2.09	**7.00**
N (%)	0.37	0.25
S (%)	0.09	0.18
Ash (%)	8.72	**31.40**
H/C	0.32	0.38
O/C	0.02	**0.09**
N/C	0.004	0.006
Specific surface area (m2/g)	512.18	**892.64**
Total pore volume (cm3/g)	0.07	**0.39**
Average pore size (nm)	3.23	3.17

7. 실험 결과

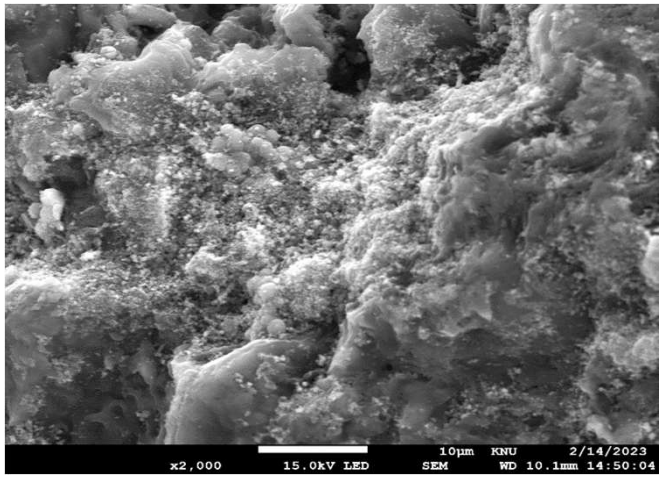
7.2. WSB와 Fe-WSB의 물리화학적 분석

[표면 SEM Image]

(a) WSB (magnification =2000×)



(b) Fe-WSB (magnification =2000×)



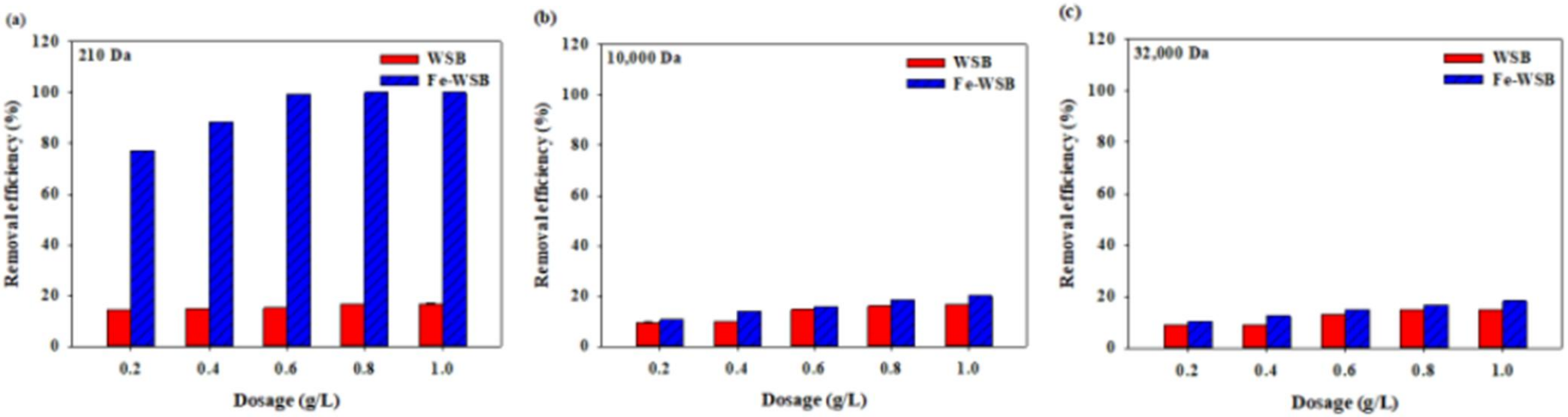
- Fe-WSB의 표면 형태가 WSB에 비해 더 다양하고 거칠며, 미세 기공 구조가 눈에 띄게 증가됨
- 원광 분석 결과 Fe-WSB의 Fe 함량 21.7Wt.% (철광미 잔여물 함침 안착)

▶ 개질을 통해 Fe-WSB의 표면 개선, 흡착 기능 향상될 것으로 기대됨

7. 실험 결과

7.3. WSB와 Fe-WSB의 최적 주입량 평가

[PSMP 210, 10K, 32K 흡착 용량 비교]



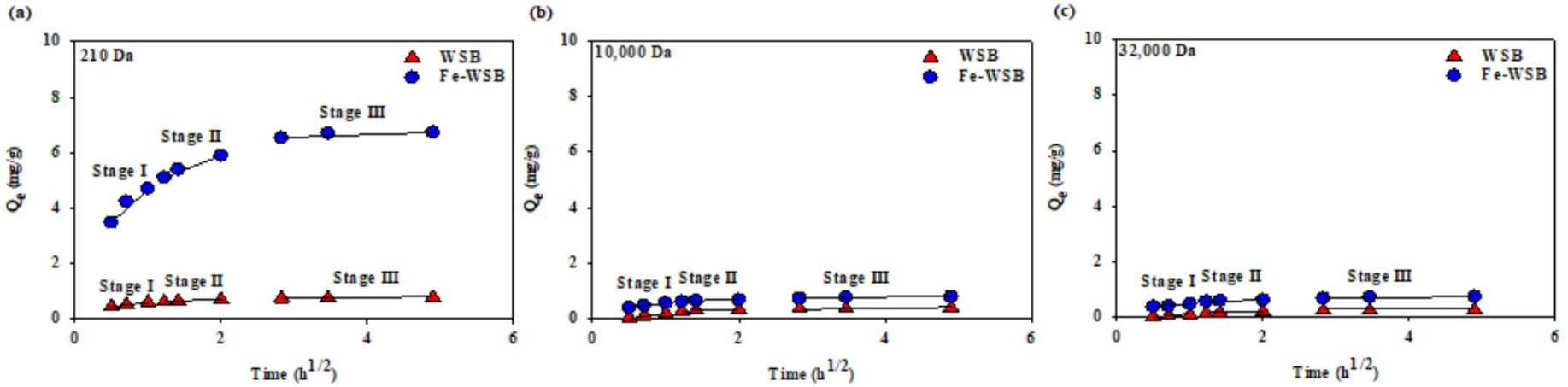
- WSB 대비 광미함침 Fe-WSB의 흡착 효율 우수
- Fe-WSB 활성 흡착면적 증가 및 높은 표면 양전하 효과
- 흡착제 농도가 0.6g/L 초과시 흡착 효율 크게 증가하지 않음 (일정한 제거 효율)

▶ 최적 흡착 효율 달성을 위한 주입량은 0.6g/L임

7. 실험 결과

7.4. 흡착 동역학

[PSMP 210, 10K, 32K 흡착 속도 비교]



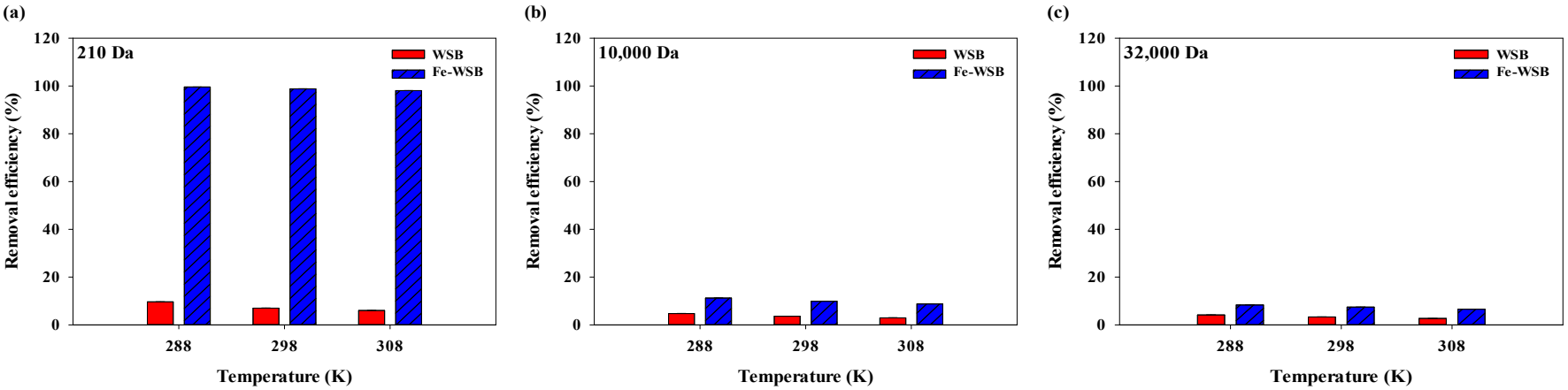
- PSMP의 흡착은 빠르게 진행되어 8시간 후 평형에 도달
- Stage 1 액체막 확산단계, Stage 2 입자 내 확산 단계를 거쳐 Stage 3 흡착 평형 단계에 도달
- Fe-WSB는 넓은 표면적, 높은 수소 결합력, 산소포함 기능기 그룹으로 흡착 용량이 WSB 대비 훨씬 높음

▶ PSMP 흡착은 일정 시간 후 효율 평형에 도달하며 흡착의 핵심속도 결정 단계는 내부 입자 확산 단계임

7. 실험 결과

7.5. 등온흡착과 열역학

[PSMP 210, 10K, 32K 흡착 온도조건 비교] *14.85~34.85c



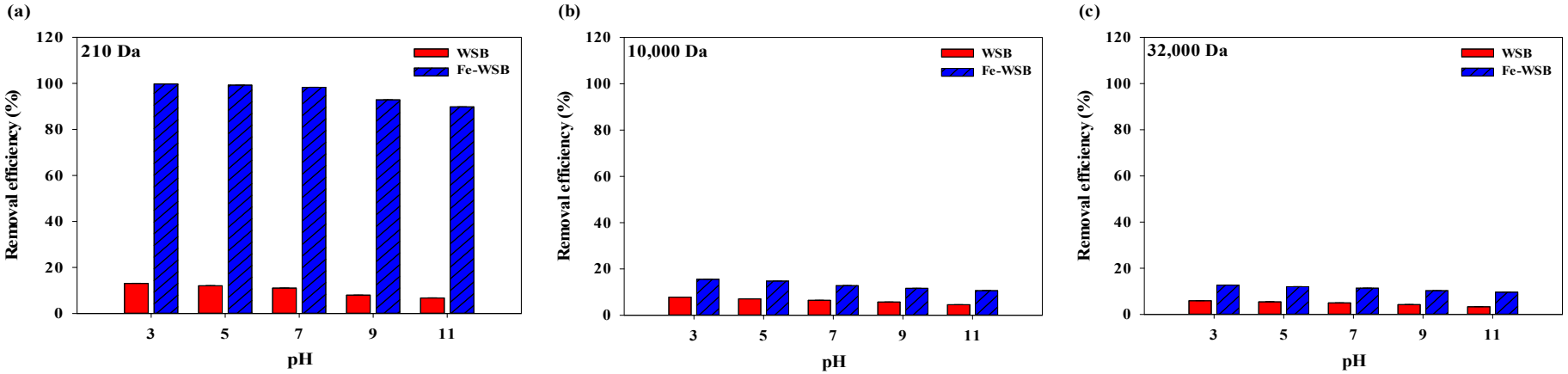
- 다른 온도 하에서 흡착의 상호 작용 비교 : Langmuir와 Freundlich 의 비선형 흡착 등온 모델을 사용
- 온도가 증가함에 따라 PSMP의 제거 효율 감소 (발열 반응)
- 온도와 관계없이 WSB 대비 광미함침 Fe-WSB의 흡착 효율 우수
- 작은 분자 크기의 MP 제거에서 광미함침 Fe-WSB 바이오차 사용이 효율적임

▶ **저온 환경에서 흡착 효과상승, 작은 분자의 MP 대상 흡착 효율 우수**

7. 실험 결과

7.6. pH와 IS(Ionic Strength)의 관계

[PSMP 210, 10K, 32K 흡착 pH조건 비교] *pH 3 ~ pH 11



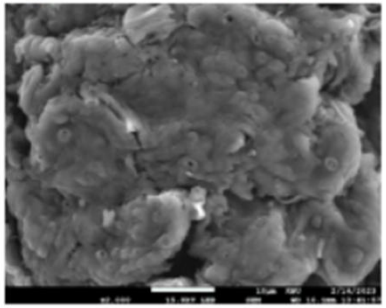
- pH가 증가함에 따라 WSB와 Fe-WSB 모두 PSMP 제거 효율이 감소
- 용액의 pH 낮아짐 → WSB와 Fe-WSB의 표면 전하가 양의 성질을 얻으려 하는 경향 증가
  → 음전하 표면을 지닌 PSMP에 대한 정전기적 흡착능을 향상 (제타 전위 데이터로도 확인)

▶ **낮은 pH 조건에서 흡착 효율이 상승함**

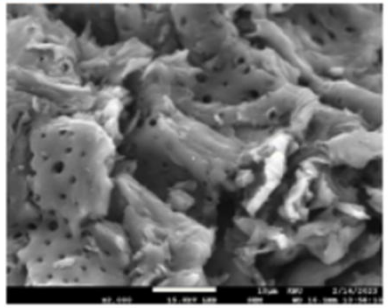
8. 흡착 메커니즘

8.1. 흡착 전후 표면상태 UHR-SEM 이미지

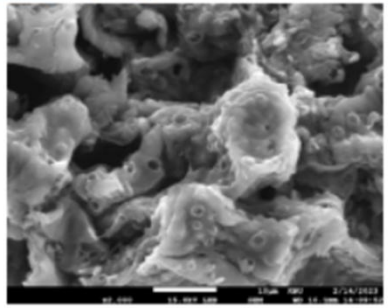
(a) WSB (magnification = 2000)



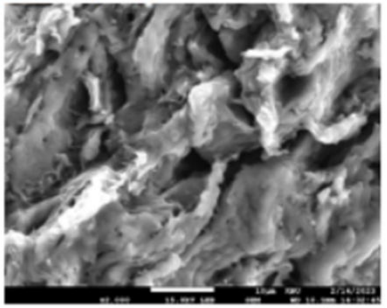
(b) WSB after adsorption of $PSMP_{210}$(magnification = 2000)



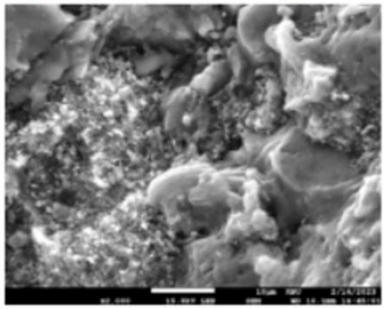
(c) WSB after adsorption of $PSMP_{10K}$(magnification = 2000)



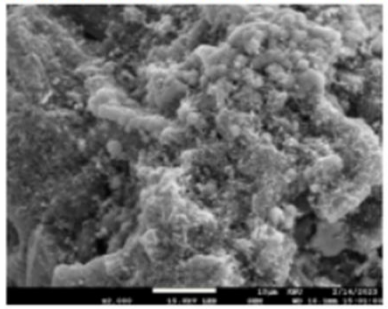
(d) WSB after adsorption of $PSMP_{32K}$(magnification = 2000)



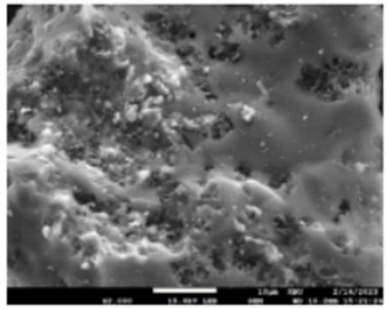
(e) Fe-WSB (magnification = 2000)



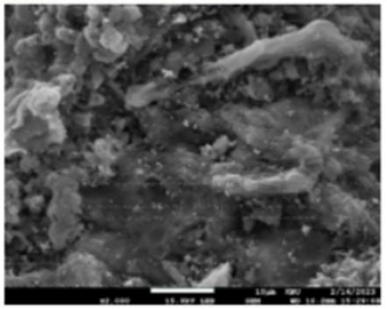
(f) Fe-WSB after adsorption of $PSMP_{210}$(magnification = 2000)



(g) Fe-WSB after adsorption of $PSMP_{10K}$(magnification = 2000)



(h) Fe-WSB after adsorption of $PSMP_{32K}$(magnification = 2000)



- PSMP 흡착에 따라 표면적과 기공 부피가 눈에 띄게 감소
- PSMP와 WSB / Fe-WSB 간 표면 전하, PF 효과, π-π 및 수소 결합에 의한 상호 작용이 핵심 메커니즘

8. 흡착 메커니즘

8.2. 흡착 전후 바이오차의 성상 분석

Properties	Specific surface area (m^2/g)		Total pore volume (cm^3/g)
WSB (흡착 전)	512.18		0.07
WSB after adsorption of PSMP210	118.22 23%		0.031
WSB after adsorption of PSMP10K	228.25	상대적 성상 우수	0.045
WSB after adsorption of PSMP32K	325.93 63%		0.062
Fe-WSB (흡착 전)	892.64		0.39
Fe-WSB after adsorption of PSMP210	80.40 8.9%		0.008
Fe-WSB after adsorption of PSMP10K	391.31		0.11
Fe-WSB after adsorption of PSMP32K	413.44 46%		0.19

높은 제거 효과

9. 미세플라스틱 대응 방안

9.1. 미세플라스틱 저감 기술

[본 연구의 의의]

- Fe-광산폐기물을 이용하여 WSB와 Fe-WSB를 제조, PSMP의 특정 분자 크기에 대한 흡착 능력 실험을 실시
- 다양한 분석 방법을 통해 각 분자량 별로 MP가 바이오차 종류별로 흡착되는 메커니즘을 분석

▶ Fe-WSB는 WSB보다 두 배 이상의 PSMP 제거 효율을 달성

▶ 저온 환경, 작은 분자의 MP 대상, 낮은 pH 조건 하에서 PSMP 흡착 효율 상승

▶ 연구를 통해 수계 환경에서 바이오차의 MP 제거 능력 입증

▶ 다양한 조건에서 PSMP의 제거 효율은 평균 20% 전후 달성

▶ 특히 저분자량 PSMP의 경우 제거 효율은 100%에 육박

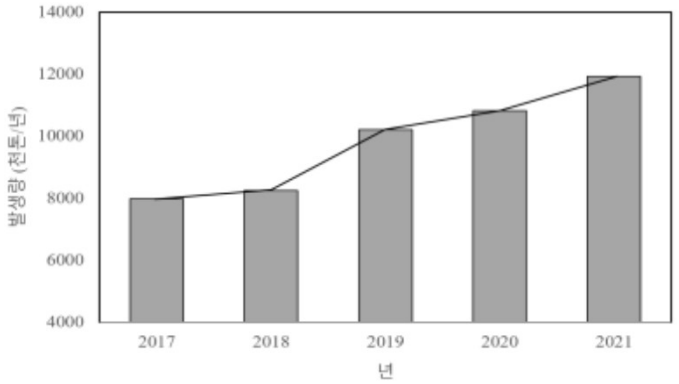
"철광석 부산물을 함침하여 제조한 바이오차를 수처리 공정에 적용,
미세플라스틱 저감에 활용할 수 있음"

9. 미세플라스틱 대응 방안

9.2. 미세플라스틱 저감시 고려 사항

- 폐 플라스틱의 발생량은 지속적 증가
  ▶ 5년간 발생 증가율 약 50%
- 폐 플라스틱 발생량 중 87.8%만 재활용 또는 에너지 회수
  ▶ 잔여 12.8%는 매립 또는 해양/육상 유출되어 환경오염 우려

- 상당량의 MP가 수질환경에서 검측됨
  ▶ m3 당 10,000개 이상 (인천, 경기 해안, 낙동강 하구 측정 결과)
- MP가 식수원으로 사용되어 인체에 유입될 가능성 충분히 있음
  ▶ 신체 건강에 부정적 영향 우려



- MP의 발생과 수생태계 유입을 막을 방법은 현실적으로 없음
- MP의 하수 처리 중 제거는 높은 CAPEX와 OPEX로 도입 어려움
  ▶ Ultra Filter, RO, MBR (membrane) 등으로 기술적 처리는 가능

"경제성이 높은 바이오차 흡착제를 하수나 상수처리 공정에 적용 활용"

9. 미세플라스틱 대응 방안

9.3. 미세플라스틱 흡착제 경제성 평가

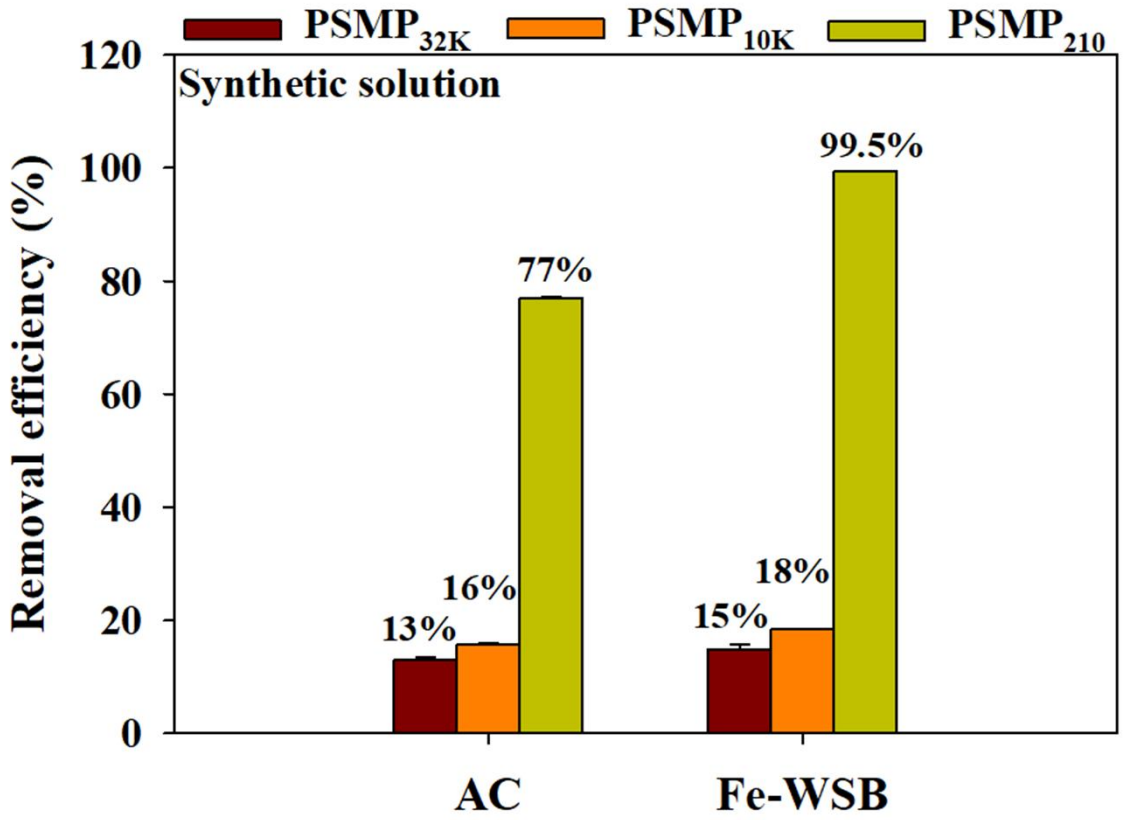
품명 (입자 크기)	규격	가격 (원/Kg)	비고
활성탄	석탄계 (요오드가 900 이상)	3,990	한국물가정보지(사단법인) (KPI, 2022년 12월 기준)
호두껍질 바이오차 (Walnut shell Biochar, WB)	바이오매스 비용: 8원 전기비: 2280원	2,288	활성탄 대비 **42.7%** 생산단가 **저감**
철광산 광미 함침 호두껍질 바이오차 (Magnetic Walnut shell Biochar, MWB)	바이오매스 비용: 8원 철광석 광미: 무료 전기비: 2280원 약품비: 396원	2,684	활성탄 대비 **32.7%** 생산단가 **저감**

- 물가정보지(KPI)와 온라인 판매처(www.alibaba.com)를 기준으로 생산 단가를 산정하였으며, WB와 MWB는 실험실 규모에서 제조했을 경우의 약품비와 전기비를 토대로 산정함(공통 인건비 제외).

단가	산출 내역
1. 바이오매스 비용: 8원 2. 전기사용 비용: 2,280원 3. 7 N 염산으로 제조: 396원 (35% 염산 비용: 660원/Kg) 4. WB 생산단가: 1+2 = 2,288원/kg 5. MWB 생산단가: 1+2+3 = 2,684원/kg	1. 온라인마켓 가격 (www.alibaba.com) (1) 호두껍질 구입가격: 4원/kg (2kg 필요) (2) WB 1 kg 생산가격 : 8원/kg = 호두껍질 8원(2 kg) x 50%(수율) 2. Rotary kiln 열분해 시 전기사용 비용 = 2,280원 3. 35% 염산 가격: 660원/Kg (0.6 kg 필요) 7N 염산 제조 가격 = 660원/kg x 0.6 kg = 396원

"활성탄 대비 30% 이상 경제성 우수, 활성탄 대체재로 활용 가능"

Ref. 활성탄 대비 Fe-WSB의 흡착 효율 비교



"활성탄 대비 Fe-WSB의 흡착 효율이 2%p ~ 22.5%p 높음"

10. 결론

- 수생태계에서 미세플라스틱 저감을 위한 방안 모색 필요
- 폐기물로 버려지는 호두껍질의 재활용 환경오염 저감
- 광미 폐기물을 활용 높은 MP 제거 효율을 가진 흡착제를 개발
- 다양한 실험을 통해 수계 환경에서 흡착제의 효율을 검증함
- 바이오차 흡착제를 하수나 상수처리 공정에 적용 MP 제거
- 본 흡착제는 활성탄 대비 높은 효율과 경제성 보유 대체재로 사용 가능

11. 한계 및 후속연구

▶ **210 Da의 저분자 PSMP 대상 제거 효율 우수 (~100%)**

- 10K, 32K Da PSMP 대상 제거 효율 ~20% 에 불과

▶ **제거 효율 높은 210 Da 와 낮은 10K Da 사이의 Threshold 여부**

▶ **210 Da 수준 저 분자 PSMP 제거의 현실적 효과 여부 (수처리 공정에 도입시)**

▶ **온도 변화에 따른 제거 효율의 변화는 유의미하지 않을 수 있음**

▶ **분말 상태의 바이오차 현장 적용에 대한 제약 극복 (코팅 등 가공기술 개발)**

▶ **활성탄 대비 바이오차 흡착제의 경제성과 효율에 대한 후속 연구 (운영비 포함)**