

미세먼지 및 미세플라스틱 관련 건강위해성 저감을 위한 생리활성 해양 거대조류: 총설

고주영^{1,2,#} · 강복윤^{3,#} · 옥민호^{1,2} · 김현정^{1,2*}

¹국립목포대학교 약학대학, ²국립목포대학교 친환경노화제어융합연구소,

³전남대학교 약학대학

Bioactive Marine Macroalgae for Mitigating Health Risks Associated with Particulate Matter and Microplastics: A Review

Ju-Young Ko^{1,2,#}, Bok Yun Kang^{3,#}, Min-Ho Oak^{1,2}, and Hyun Jung Kim^{1,2*}

¹College of Pharmacy, Mokpo National University, 1666 Youngsan-ro, Muan-gun, 58554, Korea

²Convergence Center for Green Anti-Aging Research, Mokpo National University, 1666 Youngsan-ro Muan-gun, 58554, Korea

³College of Pharmacy, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Gwangju, 61186, Korea

Abstract – Recently, particulate matter (PM) and micro-/nanoplastics (MP/NP) have emerged as significant environmental risk factors that disrupt molecular homeostasis in the human body. These pollutants have been revealed to accelerate diseases and the aging process by causing oxidative damage, inflammation, cellular aging, and metabolic abnormalities, going beyond being mere sources of environmental pollution. There is a great deal of interest in researching the physiological and molecular effects of these pollutants, identifying effective interventions that can mitigate their toxicity, and exploring associated protective mechanisms. For this reason, numerous experimental studies have been performed to unearth potentially active natural products that could mitigate the toxic effects or dysfunctions caused by exposure to and accumulation of these pollutants. Among various natural biological sources, marine macroalgae has attracted increasing interest as a considerable alternative source of bioactive compounds with antioxidant and anti-inflammatory properties that counteract the potential health risks posed by PM and MP/NP. Algal bioactive compounds, including sulfated polysaccharides (fucoxanthin, alginic acid, and κ -carrageenan), polyphenols (phlorotannin), carotenoids (fucoxanthin), steroids (fucosterol), mycosporine-like amino acids (porphyra 334), exhibited the protective advantages against PM or MP/NP-induced damage. This study reviews the current approaches to using marine macroalgae and explores their potential effectiveness against PM and MP/NP in experimental models.

Keywords – Marine macroalgae, Environmental pollution, Particulate matter, Micro-/nanoplastics

급속한 산업화와 도시화, 화석 연료의 과도한 사용, 그리고 플라스틱 산업의 급격한 발전은 인류의 생산성과 생활 수준을 향상시켰지만, 동시에 대기, 수계, 토양 등 환경 전반에 걸쳐 복합적인 환경오염 문제를 심화시켰다. 산업혁명 이후 화석 연료 기반의 에너지 시스템과 석유화학 중심의 제조업 확장은 이산화탄소 (CO₂), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x) 및 휘발성 유기화합물 등의 배출을 급격히 증가시켜 기후 변화와 대기오염 문제를 가속화시켰다.¹⁾ 특히 인구 밀집 지역

에서는 교통, 발전소, 산업시설 등에서 배출되는 오염물질의 농도가 높아 인체 건강과 생태계 안정성을 심각하게 위협하고 있다.²⁾ 플라스틱 산업 또한 지난 수십 년간 폭발적인 성장을 보여왔으며, 전 세계 플라스틱 생산량은 1950년 약 200만 톤에서 2023년 4억 톤을 초과하였으며, 이 중 약 9%만이 재활용되고 나머지는 매립, 소각 또는 환경에 방출되어 환경에 축적되고 있다.³⁾ 이러한 축적된 플라스틱 폐기물은 물리적 마모와 자외선, 산화적 풍화 작용에 의해 점차 미세플라스틱(microplastics, MP)과 더 작게는 나노플라스틱(nanoplastics, NP)으로 분해되어 해양, 담수, 토양 및 대기 환경으로 확산된다.⁴⁾ 마이크로 및 나노 크기의 플라스틱 입자는 높은 화학적 안정성과 소수성 특성으로 인해 환경 중에

#J.-Y. Ko and B. Y. Kang contributed equally to this work.

*교신저자(E-mail): hyunkim@mokpo.ac.kr

(Tel): +82-61-450-2686

서 쉽게 분해되지 않으며, 생물 농축을 통해 생체 내에 축적되어 잠재적 독성을 유발할 수 있다. 이러한 추세는 인간 활동으로 생성된 인위적 오염물질이 대기 및 생물권 순환에 장기적 영향을 미치고 있음을 보여준다.

산업화 및 교통량의 증가는 화석연료의 연소 및 산업 배출을 가속화하여 대기 중 미세먼지(particulate matter, PM) 농도를 지속적으로 증가시켰으며, 전 지구적 수준에서 심각한 건강 위협요인 중 하나로 이미 대두되었다.^{5,6)} 미세먼지(PM)는 대기 중에 부유하는 직경 10 μm 이하의 입자상 물질로, 특히 PM_{2.5} (직경 2.5 μm 이하)는 매우 작아 호흡기를 통해 폐포까지 침투하여 인체 건강에 심각한 영향을 미친다. 주요 발생원은 연료의 불완전 연소, 자동차 배기가스, 산업 배출 및 가정용 연소 등 인위적 요인에서 기인하며,⁷⁾ 화학적으로는 황산염(sulfate), 질산염(nitrate), 중금속 및 유기탄소 화합물을 포함한다고 보고되었다.⁸⁾ 세계보건기구(WHO)는 미세먼지를 주요 건강 위해 요인으로 규정하고 2021년 대기질 가이드라인에서 PM_{2.5}의 연간 권고 농도를 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제시하였으며,⁹⁾ 산하 기관인 국제암연구기관(International Agency for Research on Cancer, IARC)은 PM_{2.5}를 1급 발암물질로 분류하였다.⁹⁾ 또한 역학 연구에 따르면 PM 노출은 산화적 스트레스(oxidative stress), 염증 반응(inflammation), 내피세포 기능장애(endothelial dysfunction), 자율신경계 불균형(autonomic imbalance) 및 혈액 응고 이상(coagulation abnormalities)을 유발하여 심혈관계 질환 및 조기 사망률을 증가시키는 것으로 보고되었으며,¹⁰⁾ 이러한 병리학적 반응은 활성 산소종(reactive oxygen species, ROS)의 과생성 및 항산화 방어체계 약화,¹¹⁾ DNA 손상, 세포자멸사(apoptosis), 자가포식(autophagy), 후성유전적(epigenetic) 변화 등을 수반한다고 보고되었다.¹²⁾ 동물실험에서도 미토콘드리아 구조 변화, 항산화 효소(superoxide dismutase, SOD) 활성 감소, 지질 과산화의 증가, 염증성 사이토카인(IL-6, IL-1 β , TNF- α 등)의 발현 증가 등이 보고되었으며,¹³⁾ 결과적으로 내피 기능 저하, 혈관 수축 및 혈전 형성을 초래함으로써 심혈관 질환의 병태생리를 촉진하는 것으로 나타났다.⁸⁾ 나아가 장기적인 PM_{2.5} 노출은 뇌졸중, 심부전, 부정맥뿐 아니라 폐암,¹⁴⁾ 알츠하이머병(Alzheimer's disease), 파킨슨병(Parkinson's disease) 등 다양한 신경퇴행성 질환의 발병 위험을 높이는 것으로 보고되었다.¹⁵⁾

최근에는 미세먼지 외에도 미세 및 나노 크기의 플라스틱 입자가 새로운 환경성 위해인자로 주목받고 있다. 플라스틱은 높은 내구성과 저비용으로 인해 폭넓게 사용되어 왔으나, 폐기 후 자연적으로 분해되지 않고 물리, 화학적 작용을 통해 미세한 입자로 쪼개지면서 미세플라스틱(MPs, < 5 mm) 및 나노플라스틱(NPs, < 1 μm)으로 분해되어 환경에 장기간 잔존한다.¹⁶⁾ 이들은 공기, 수계, 토양을 통해 인체로 유입되며, 생체 장벽을 통과하여 조직에 축적될 수 있다.¹⁷⁾ 작은 크기와 높은 표면 반응성으로 인해 호흡, 식품 섭취, 피부 접촉 등

다양한 경로를 통해 쉽게 체내로 유입될 수 있으며,¹⁸⁾ 혈액, 장, 태반 등 인체조직에서 검출된 사례도 보고되고 있다.^{19,20)} 세포 수준에서 NP는 세포막에 부착하거나 세포 내로 침투하여 ROS 생성을 유도하고, 미토콘드리아 기능 장애, 염증성 사이토카인 분비를 촉진하여,²¹⁾ 간, 신장, 심혈관계, 생식계 등 여러 장기에 산화적 손상과 대사 이상을 초래한다.²²⁾ 또한, NP 표면은 중금속, 다환성 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH), 살충제 등의 오염물질을 흡착하여 독성을 증폭시키는 것으로 보고되었다.²³⁾ 또한, 최근 연구에 따르면 NP 노출은 p53 및 p16 신호 경로의 이상조절을 통해 세포 노화(cellular senescence)를 촉진하고, 조직 기능 저하 및 노화 관련 질환의 발병에 기여함을 보고하였다.²⁴⁾

결과적으로, PM과 MP/NP는 단순한 환경오염원을 넘어 인체의 분자 항상성(molecular homeostasis)을 교란하고, 산화적 손상, 염증, 세포 노화, 대사 이상 등을 통해 만성 질환 및 노화 과정을 촉진하는 중요한 환경적 위험 요인으로 부상하고 있다. 그러한 이유로 최근에는 이들 오염물질의 생리적, 분자적 영향을 이해하고 그 독성을 완화할 수 있는 천연물 유래 생리활성물질을 발굴하고 연관 보호 기전을 탐색하는 연구가 활발하게 진행되고 있으며 또한 환경보건학의 주요 과제로 대두되고 있는 상태이다.

여러 천연자원 가운데 조류(藻類, algae)는 수생환경에서 서식하는 광합성 생물로서 지구상에서 가장 다양하고 풍부한 생물군 중 하나이며, 먹이사슬의 기초이면서 산소 생성과 탄소 격리에 크게 기여하여 생태계 유지에 필수적인 역할을 맡고 있다.^{25,26)} 일반적으로 크기에 따라 단세포인 미세조류(microalgae)와 육안으로 볼 수 있는 큰 다세포 조류는 거대조류(macroalgae)로 분류되며, 서식 환경에 따라 담수 조류(freshwater algae)와 해조류(marine algae)로도 구분된다.²⁷⁾ 보통 해조류(海藻類) 또는 해초(海草, seaweeds)로 불리는 해양 거대조류(marine macroalgae)는 오래전부터 인류의 주요 식용자원 및 의약 소재로 이용되어져 왔다. 최근에 이르러서는 광범위한 화학적·생물학적 가치를 지닌 다수의 생리활성 고분자 및 대사산물을 획득할 수 있는 탁월한 공급원으로 부각되어 이에 대한 연구 관심이 증가하고 있어 식품, 사료, 제약, 기능성 식품 및 화장품 산업에서 큰 응용 가능성을 기대 받고 있다.^{28,29)} 이런 연유로 환경오염인자로 인한 손상으로부터 보호효과를 나타내는 생리활성 해양 거대조류에 대한 연구 결과가 상당수 도출되었으며, 이를 종합하여 검토한 종설이 일부 보고된 바 있으나, 그 대상이 미세먼지의 건강 위해성에만 제한되거나, 호흡기계 손상 및 피부에 대한 보호 효능으로 한정되어 있다.^{30,31)} 이에 미세먼지뿐만 아니라 미세플라스틱으로 유발될 수 있는 건강 위해성에 대응하여 잠재적 효능을 나타낸 해조류 및 연관 생리활성 화합물에 대한 현재까지의 연구 결과를 종합하여 통찰하고 응용과 관련된 과제 및 한계점을 다루고자 한다.

Table I. A representative sample of edible marine macroalgae (seaweed) that is grown in Korea

Classification	Family	Species
홍조류(Red algae)	김과래과(Bangiaceae)	참김(<i>Pyropia tenera</i>)
		방사무늬김(<i>Pyropia yezoensis</i>)
		잇바디돌김(<i>Pyropia dentata</i>)
		모무늬돌김(<i>Neoporphyra seriata</i>)
		등근돌김(<i>Pyropia suborbiculata</i>)
	우뭇가사리과(Gelidiaceae)	우뭇가사리(<i>Gelidium elegans</i>)
		애기우뭇가사리(<i>Gelidiophycus freshwater</i>)
	개우무과(Pterocladiaaceae)	개우무(<i>Pterocladia capillacea</i>)
	풀가사리과(Endocladiaaceae)	불등풀가사리(<i>Gloiopeltis furcata</i>)
		참풀가사리(<i>Gloiopeltis tenax</i>)
	꼬시래기과(Gracilariaceae)	애기풀가사리(<i>Gloiopeltis complanate</i>)
		꼬시래기(<i>Gracilaria vermiculophylla</i>)
		잎꼬시래기(<i>Gracilaria textorii</i>)
		개꼬시래기(<i>Gracilariopsis chorda</i>)
	돌가사리과(Gigartiniaceae)	진두발(<i>Chondrus ocellatus</i>)
	지누아리과, 도박과(Halymeniaceae)	참도박(<i>Grateloupia elliptica</i>)
		개도박(<i>Pachymeniopsis lanceolata</i>)
		지네지누아리(<i>Grateloupia asiatica</i>)
		참지누아리(<i>Grateloupia filicina</i>)
		뼈지누아리(<i>Grateloupia divaricate</i>)
		털지누아리(<i>Polyopes lancifolius</i>)
열매가지과(Cystocloniaceae)		가시우무(<i>Hypnea asiatica</i>)
		갈고리가시우무(<i>Hypnea japonica</i>)
끈적살과(Solieriaceae)	갈래곰보(<i>Meristotheca papulosa</i>)	
비단풀과(Ceramiales)	단박(<i>Ceramium boydenii</i>)	
	석목(<i>Campylaephora hypnaeoides</i>)	
빨간검둥이과(Rhodomelaceae)	큰서실(<i>Hypnea asiatica</i>)	
	새고들서실(<i>Chondrophycus kangjaewonii</i>)	
	개서실(<i>Chondria crassicaulis</i>)	
갈조류(Brown algae)	패과(Ishigeaceae)	패(<i>Ishige okamurae</i>)
		넓패(<i>Ishige sinicola</i>)
	고리매과(Scytosiphonaceae)	잘록이고리매(<i>Scytosiphon lomentaria</i>)
		미역쇠(<i>Petalonia binghamiae</i>)
	미역과(Alariaceae)	넓미역(<i>Undaria peterseniana</i>)
		미역(<i>Undaria pinnatifida</i>)
	감태과(Lessoniaceae)	감태(<i>Ecklonia cava</i>)
		곰피(<i>Ecklonia stolonifera</i>)
		대황(<i>Eisenia bicyclis</i>)
	쇠미역과(Costariaceae)	쇠미역(<i>Costaria costata</i>)
		구멍쇠미역(<i>Agarum clathratum</i>)
	다시마과(Laminariaceae)	다시마(<i>Saccharina japonica</i>)
		개다시마(<i>Saccharina sculpera</i>)
	모자반과(Sargassaceae)	툇(<i>Sargassum fusiforme</i>)
		모자반(<i>Sargassum fulvellum</i>)
팽생이모자반(<i>Sargassum horneri</i>)		
알숭이모자반(<i>Sargassum confusum</i>)		
지층이(<i>Sargassum thunbergii</i>)		

Table I. (continued)

Classification	Family	Species
녹조류(Green algae)	초록실과(Ulotrichaceae)	매생이(<i>Capsosiphon fulvescens</i>)
	갈파래과(Ulvaceae)	가시파래(<i>Ulva prolifera</i>)
		납작파래(<i>Ulva compressa</i>)
		창자파래(<i>Ulva intestinalis</i>)
		잎파래(<i>Ulva linza</i>)
		구멍갈파래(<i>Ulva australis</i>)
	홀파래과(Monostromataceae)	참홀파래(<i>Monostroma nitidum</i>)
		넓은홀파래(<i>Monostroma latissimum</i>)
	옥덩굴과(Caulerpaceae)	옥덩굴(<i>Caulerpa okamurae</i>)
	청각과(Codiaceae)	청각(<i>Codium fragile</i>)
깃털말과(Bryopsidaceae)	참깃털말(<i>Bryopsis plumosa</i>)	

국내 해조류 자원 및 양식 현황

유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)의 2024년 보고에 따르면, 2022년 세계 해조류(해초 및 미세조류) 양식 생산량은 습중량 기준 3,650만 톤(170억 달러 상당)을 차지했으며, 연평균 성장률(2000~2022년) 5.8%로 매년 증가 추세에 있다. 우리나라는 주요 해조류 양식 국가 중 하나로 2022년 기준 중국(2,240만 톤, 61.4%), 인도네시아(920만 톤, 25.2%)에 이어 170만 톤(4.6%)을 생산하여 세계 3위에 이르고 있으며,³²⁾ 주요 수출국 중 하나이지만 식용 해조류 무역에 거의 전적으로 집중되어 있는 실정이다.³³⁾ 해양수산부 통계에 의하면, 2024년 기준 국내 해면양식업 생산량 총 224.9만 톤 중 주요 양식품목으로 미역 57.2만 톤, 김 55.1만 톤, 다시마 54.2만 톤 등 해조류 생산량이 74%에 이르고 있고,³⁴⁾ 해조류 품목 별로는 갈조류인 미역류, 톳, 다시마류, 모자반류와 홍조류인 김류, 우뚝가사리, 꼬시래기류, 도박류, 녹조류인 파래류, 청각, 매생이 등 약 10 여종이 거의 점유하고 있으며, 식용 및 전복 먹이용으로 대부분 사용된다.³⁵⁾ 우리나라에서 양식 또는 식용으로 활용되고 있거나 기능성 소재로의 높은 활용 가능성으로 인해 주목받고 있는 주요 해조류 자원을 Table I에 나타내었다.³⁶⁾

미세먼지 유해성 대응 활성 해조류에 대한 연구 동향

미세먼지의 인체 유해성이 급속도로 대두되면서 육상식물 외에 해조류 기원의 추출물 또는 함유 성분의 잠재적 효능 및 관련 분자생물학적 기전에 대한 탐색 연구 결과 보고가 2018년 이후 본격적으로 증가되고 있으며 주로 식용 가능한 해조류를 우선 대상으로 하고 있다(Table II).

갈조류는 다당류(fucoidan, alginate, laminarin 등), 페놀성 화합물(phlorotannin류), 식물색소(fucoxanthin류)와 같은 주요 생리활성 성분들을 함유하고 있으며 항균, 항암, 항산화, 항염증, 항당뇨 등 기존에 이미 알려진 다양한 생물활성으로 인해 관심의 초점이 되고 있다.³⁷⁾ 우선 모자반속(*Sargassum*) 식용 조류인 팽생이모자반(*Sargassum horneri*)의 에탄올 및 물 추출물은 미세먼지로 자극된 RAW 264.7 대식세포, HaCaT 각질세포에서 interleukin (IL)-1 β , IL-6, tumor necrosis factor (TNF)- α 등의 염증성 사이토카인(proinflammatory cytokines) 및 inducible nitric oxide synthase (iNOS), cyclooxygenase (COX)-2, prostaglandin E₂ (PGE₂)를 포함한 여러 염증 매개체의 생성을 저해하여 nitric oxide (NO)의 생성을 용량 의존적으로 하향 조절하였다. 또한 미세먼지를 통해 유발된 산화 스트레스에 대하여 세포 보호 효과가 확인되었고, 항산화와 관련된 nuclear factor erythroid-2-related factor 2 (Nrf2)와 heme oxygenase-1 (HO-1)의 신호 전달 활성을 유도하였다.³⁸⁾ 연관 항염증 및 항산화 활성 화합물로는 다당류 alginate (1)이 규명되었으며, 같은 속의 해조류 *S. binderi*로부터 분리된 갈조류 대표 phytosterol 성분인 fucosterol (3)도 A549 세포주에서 유사한 작용과 기전을 나타내는 효능 성분으로 규명되었다.^{39,40)} 이 해조류 기원의 상업용 70% 에탄올 추출물이 MH-S 폐포 대식세포에서 미세먼지로 자극된 염증 반응의 toll-like receptors (TLR), nuclear factor-kappa B (NF- κ B) 및 mitogen-activated protein kinases (MAPKs) 신호전달 경로를 차단함으로써 폐 내 미세먼지 유발 만성 염증을 억제할 수 있는 기능성제품 개발을 위한 천연소재가 될 수 있음을 보여 주었고,⁴¹⁾ 그 잠재적 효능물질로 3-hydroxy-5,6-epoxy- β -ionone (6)이 보고되었다.⁴²⁾ 미세먼지에 노출된 생쥐 천식모델을 이용한 동물실험에서도 에탄올 추출물 투여군에서 전염증성 사이토카인의 생성 증가가 억제되었으며 폐 내 항산

Table II. Protective effects of macroalgae against particulate matter-induced damage

Algae species	Active materials/Compounds	Experimental model	Activities/Underlying mechanism	References
참김 (<i>Pyropia tenera</i>)	Water extract 80% EtOH extract Mix. Ext. (8:2 ratio) [Containing sulfated galactan, mycosporine-like amino acids (MAAs; porphyra 334 isomers, palythene, palythenic acid), and chlorophyll derivatives (pheophorbide a)] (200 mg/kg <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> Attenuating PM_{2.5}-induced learning and memory impairment Oxidative stress (↓) / Inflammatory cytokine levels (↓) in brain tissue Inhibition of neuroinflammation by regulating TLR-initiated NF-κB signaling Improving mitochondrial function Aβ production (↓) / tau phosphorylation (↓) by inhibiting the JNK phosphorylation 	73)
	Water extract 80% EtOH extract	nasal epithelial (RPMI-2650), lung epithelial (A549), brain neuroblastoma (MC-IXC) cells	<ul style="list-style-type: none"> Intracellular ROS production (↓) 	
	Water extract	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> MDA production (↓) TLR-2, TLR-4, p-JNK and pro-inflammatory cytokines (IL-1β, TNF-α, IL-6) expression (↓) in lung tissue Expressions of TLR-2, TLR-4, IL-1β (↓) in the brain tissue 	72)
방사무늬김 (<i>Pyropia yezoensis</i>)	Porphyra 334 (15) (1, 10, 100 μM)	human keratinocyte cells (HaCaT)	<ul style="list-style-type: none"> Cell Proliferation (↑) by inhibiting ROS production AhR-induced ROS production (↓) Nuclear translocation (↓) of AhR TRPV1 activity (↓) 	74)
참지누아리 (<i>Grateloupia filicina</i>)	κ-Carrageenan (16) (MW. 94 kDa, a linear backbone composed of 4- <i>O</i> -sulfated-β-D-galactose and 3,6-anhydro-α-D-galactose) Topically eye drop (1 mg/mL)	C57BL/6 mice	<ul style="list-style-type: none"> Intraocular pressure (IOP) elevation induced by PM_{2.5} exposure (↓) 	
		human trabecular meshwork cells (HTMCs) angular aqueous plexus (AAP) cells	<ul style="list-style-type: none"> Cell viability (↑) Inhibiting NLRP3 / caspase-1 / GSDMD / IL-1β axis PM_{2.5}-induced transendothelial electrical resistance (TEER) (↓) 	76)
다시마 (<i>Saccharina japonica</i>)	Fucoidan (2) (MW. 8~500 kDa; Fuc 72.80%, Glc 4.59%, Gal 3.55%)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> ROS production (↓) IL-6, IL-8, IL-13, IL-25, IL-33, TNF-α, IFN-γ, TSLP, MDC, TARC (↓) 	52)
		human dermal fibroblasts (HDF)	<ul style="list-style-type: none"> TSLP, IL-6, IL-8, IL-13, TNF-α, MDC, TARC (↓) 	
괘 (<i>Ishige okamurae</i>)	Diphlorethohydroxycarmalol (DPHC, 8) (6.25 ~ 25 μg/mL)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> COX-2, PGE₂, IL-1β, IL-6 (↓) Cell viability (↑) 	
		RAW 264.7	<ul style="list-style-type: none"> NO production (↓) Expression of COX-2, iNOS, PGE₂, TNF-α, IL-1β, IL-6 (↓) Cell viability (↑) 	54)
		Zebrafish larvae	<ul style="list-style-type: none"> NO (↓), ROS production (↓) Cell death (↓), 	
	Diphlorethohydroxycarmalol (DPHC, 8) (25, 50, 100 μM)	HDF	<ul style="list-style-type: none"> Intracellular ROS production (↓) Collagen synthesis (↑), collagenase activity (↓) Expression of MMPs (↓) through NF-κB, AP-1, MAPKs activation (↓) 	55)

Table II. (continued)

미역 (<i>Undaria pinnatifida</i>)	Fucoidan (2) (Commercially obtained. 100, 400 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • PM-induced lipid peroxidation (↓) • Infiltration (↓) of inflammatory cells (F4/80⁺ macrophages, Gr-1⁺ granulocytes, and CD4⁺ lymphocytes) • Level of PM-exacerbated IL-4 • IL-4, IL-33 secretion (↓) in the BALF and lungs • Mast cell number and degranulation (↓) • IgE synthesis (↓) • Mucus hypersecretion (↓) • Goblet cell hyperplasia (↓) 	56)
	Dieckol (9) (31.3 ~ 62.5 µg/mL)	RAW 264.7	<ul style="list-style-type: none"> • NO, PGE₂, IL-1β, IL-6, TNF-α production (↓) • iNOS, COX-2 expression (↓) • ROS generation (↓), SOD activity (↑), cell damages (↓), Nrf2, HO-1 expression (↑) 	63)
	80% EtOH extract Dieckol (9) Eckol (7)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> • Cell viability (↑), lipid peroxidation (↓) • Expression of TNF-α, IL-1β, IL-6, IL-8 (↓) (dieckol, eckol) 	59)
	80% EtOH extract Dieckol (9)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> • Cell viability (↑) • Expression of COX-1, COX-2, mPGES-2 stimulated by PM₁₀ (↓) (extract) • PGE₂ production, gene expression of COX-1, COX-2, mPGES-1 stimulated by PM₁₀ (↓) (dieckol) 	60)
	Eckol (7) 30 µM	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> • ROS generation (↓) • Ensuring the stability of molecules • Maintaining steady mitochondrial state • PM_{2.5}-induced cell apoptosis through MAPK signaling pathway (↓) 	61)
감태 (<i>Ecklonia cava</i>)	Water extract 80% EtOH extract	RPMI-2650, A549, MC-IXC cells.	<ul style="list-style-type: none"> • ROS production (↓) • Cell protection (↑) 	62)
	Water extract (200 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • Beneficial effect on the gut microbiota; abundance of Lactobacillaceae (↑), abundance of Rikenellaceae (↓) • Neuroprotective metabolite (kynurenic acid) (↑) 	66)
	Water extract (200 mg/kg, <i>p.o.</i> ; polysaccharide, phlorotannin detected)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • Prevention of the learning and memory decline • NF-κB/inflammasome formation signaling pathway (↓) • Pro-inflammatory cytokines (IL-6, IFN-γ) (↓) • PM_{2.5}-induced oxidative damage (↓) of the lungs and brain • MDA production (↓) • Activation of mitochondrial activity; ROS content (↓), membrane potential (↑), ATP level (↑), mitochondria damage (↓) • APP and p-Tau expression (↓) • Brain-derived neurotrophic factor (BDNF) expression (↑) • AChE activity (↓), ACh level (↑) • ChAT (↑), AChR-α3 expression (↑) 	65)
	Phlorofucofuroeckol-A (10, 10 µM)	RAW 264.7	<ul style="list-style-type: none"> • PM-induced inflammatory responses (↓) • IL-1β expression by modulating the NF-κB/ MAPK signal pathway (↓) • Expression of pro-inflammatory and apoptosis-related genes (↓) • Expression of Bmp gene families (↑) 	64)

Table II. (continued)

투스 (<i>Sargassum fusiforme</i>)	Fucoidan (2) [MW. 102.67 kDa; carbohydrate/sulfate (71.79:28.22); Fuc 79.20%, Man 18.13%, Rha 2.09%, Ara 0.38%, Glc 0.19%] (12.5 ~ 50 µg/mL)	HaCaT HDF	<ul style="list-style-type: none"> • Cell viability (↑) • Intracellular ROS (↓) • Pro-collagen content (↑) • MMPs-1, 2, 8, 9, 13 expressions (↓) 	51
	Fucoxanthin (5)-rich fraction	HaCaT	• PGE ₂ , COX-2, IL-1β, IL-6 (↓)	49
		RAW 264.7 Zebrafish larvae	• NO, TNF-α, iNOS, PGE ₂ (↓) • NO, ROS levels (↓), cell death (↓)	
	75% EtOH extract [rich in fucoidan and bioactive fatty acids (α-linolenic acid, eicosatetraenoic acid, and palmitic acid)] (50, 100, 200 µg/mL)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> • ROS level (↓) • Enhancing antioxidant enzyme activity • PM-induced cytotoxicity (↓) • Modulating NF-κB, MAPK pathways • Stabilizing membranes • Cell apoptosis (Bcl-2, Bax, and caspase-3) (↓) 	50
팽생이모자반 (<i>Sargassum horneri</i>)	70% Ethanol extract (62.5, 125 µg/mL)	RAW 264.7	<ul style="list-style-type: none"> • iNOS, COX-2, PGE₂ production (↓) • IL-1β, IL-6, TNF-α (↓) • NO production (↓) • HO-1 and Nrf2 activity (↑) 	38
	Alginic acid (1) (50~350 kDa; 25, 50, 100 µg/mL)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> • PGE₂ levels (↓), ROS (↓) • COX-2, IL-1β, IL-6, TNF-α (↓) by suppression of NF-κB, MAPK pathways • Pb²⁺ and Ca²⁺ levels (↓) 	39
		RAW 264.7	• NO, iNOS, COX-2, PGE ₂ , and pro-inflammatory cytokines (↓)	
	70% EtOH extract (200, 400 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • Phosphorylation levels of MAPKs (↓) • iNOS and COX2 expression levels (↓) • mRNA expression of TNF-α, IL-1β, IL-6 (↓) • Antioxidant gene expression (Nrf2 and HO-1) (↑) 	43
	Mojabanchromanol (4)	MLE-12 cells	<ul style="list-style-type: none"> • MDA, 8-hydroxydeoxyguanosine (8-OHdG) (↓) • TLR2/4/7 activation, Erk1/2, JNK (↓) • IL-6, IL-1β, IL-33 (↓) 	44
	EtOH extract	MLE-12 cells	<ul style="list-style-type: none"> • Anti-inflammatory potential • Inhibition of PM-triggered TLR2/4/7–MyD88–TRAF6 axis of MAPK signaling 	45
	70% EtOH extract (mojabanchromanol contained) (200, 400 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • Dendritic cell activation (↓) • Th2 polarization; GATA3, STAT5 expression (↓), IL-4, IL-5, IL-13 (↓) • Eosinophil infiltration in the lung, trachea, and BALF (↓) • Mast cell activation and the IgE level in serum (↓) • Th17 cell response; RORγT, STAT3 expression (↓), IL-17a expression (↓) • Neutrophil infiltration in the lung (↓) 	47
	70% EtOH extract [polyphenol-rich, 67.58 mg of gallic acid equivalents (GAE)/g] (200, 400 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB /c mice	<ul style="list-style-type: none"> • PM–aggravated granulocytes infiltration into the airway (↓) • mRNA expression of TLR2/4/7 (↓) • MyD88 dependent NF-κB activation (↓) in lungs of asthmatic mice. • IL-1β, TNF-α, TGF-β, IL-6 expression (↓) • Pro-allergic cytokines (TSLP, IL-25, IL-33), IL-8 in lungs (↓) 	46
	Commercial grade 70% EtOH extract	MH-S	<ul style="list-style-type: none"> • Inflammatory cytokines production and expression (PGE₂, TNF-α, IL-6, IL-1β, NF-κB, MAPKs) (↓) • PM-induced mRNA expression levels of TLR2/3/4/7 (↓) 	41
3-Hydroxy-5,6-epoxy-β-ionone (6) (31.3, 125 µg/mL)	MH-S	<ul style="list-style-type: none"> • NO, PGE₂, and pro-inflammatory cytokine production (↓) • Blocking the signal transduction of NF-κB and MAPKs. • mRNA expression levels of TLR2/4 	42	

Table II. (continued)

<i>Sargassum binderi</i>	Fucosterol (3) (12.5, 25, 50 µg/mL)	A549	<ul style="list-style-type: none"> • ROS level (↓), cell viability (↑) • Apoptotic body formation and DNA damage (↓) • Antioxidant protein (CAT, HO-1, Nrf2) expression levels (↑) • Nuclear translocation of P65, P50 (↓) • Phosphorylation of p38 MAPK, ERK1/2, JNK (↓) • COX-2, PGE₂, pro-inflammatory cytokines (TNF-α, IL-6) (↓) 	40
대황 (<i>Eisenia bicyclis</i>)	95% EtOH extract (containing phlorotannins, including dieckol (9) and phlorofucofuroeckol A (10), sulfated polysaccharides, lipid and amino acid derivatives. (20, 40 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • PM_{2.5}-induced lung damage (↓) • Restoring antioxidant defense systems, GSH, SOD levels (↑), MDA (↓) • Serum levels of inflammatory cytokines (IL-1β, IL-6, IFN-γ) (↓) • Mitochondrial dysfunction (↓); ROS (↓), MMP and ATP contents (↑) • Apoptotic signaling (↓); BAX/BcL-2, caspase-3 expression (↓) • Expression of inflammatory markers (TLR2, TLR4, MyD88, p-JNK, TNF-α, IL-1β, COX-2) (↓) • Activation of fibrotic signaling pathways via the TGF-β/ Smad axis (↓); MMP-2, MMP-9, p-Smad-3, p-Smad-2, TGF-β1 expression (↓) 	67
	95% EtOH extract (20 µg/ mL) / phlorotannin components [dieckol (9), 6,6'-bieckol (12), and 6,8'- bieckol (14), 5 µM]	A549	<ul style="list-style-type: none"> • Cell viability (↑) • Inflammatory cytokines (↓) • Modulating Nrf2/HO-1 pathway; PTEN, cytosol/nuclear Nrf2 (↑), GPx4, SOD1(↑) • Fibrotic genes and proteins (↓); p-Smad-3, p-Smad-2, TGF-β1, fibronectin, Col1A1, α-SMA (↓) 	
	Water extract (palmitic acid, stearic acid, oleamide identified) (50, 100 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • Improvement of lung damage • SOD, GSH contents (↑), MDA (↓) • Pulmonary mitochondrial dysfunction (↓); ROS contents (↓), MMP levels (↑) • Inflammatory protein levels (TLR4, MyD88, p-JNK, p-NF-κB, iNOS, caspase-1, TNF-α, IL-1β) (↓) • Apoptotic protein expression of BCL-2 (↑), BAX and Caspase-3 (↓) • Fibrous protein expression (TGF-β1, p-Smad-2, p-Smad-3, MMP-1, MMP-2) (↓) 	70
청각 (<i>Codium fragile</i>)	Water extract (identified hexadecanamide, oleamide, octadecanamide, stearidonic acid, and linolenic acid) (100 mg/kg, <i>p.o.</i>)	BALB/c mice	<ul style="list-style-type: none"> • SOD (↓), GSH (↑), MDA (↓) in colon and brain tissues • Improving intestinal myeloperoxidase (MPO) activity • Abundance of the gut microbiome (↑), SCFAs contents (↑), tight junction protein expression (↑) • Prevention of inflammatory and apoptotic expression via TLR-4/MyD88 pathway in colon and brain tissues • Mitochondrial function (↑); MMP (↑), ROS contents (↓) in brain tissues • ACh contents (↑), AChE activity (↓), Expression of AChE (↓) and ChAT (↑) in brain tissues • Spatial learning and memory, short-term memory, long-term learning and memory function (↑) 	71
	Water extract 40% EtOH extract (1, 5, 10, 20, 100 µg/mL)	RPMI2650, A549, MC-IXC, hippocampus (HT-22), microglia (BV-2) cells	<ul style="list-style-type: none"> • ROS production (↓), MDA contents (↓) • Cell viability (↑) 	68
	70% EtOH extract (80 µg/mL)	HaCaT	<ul style="list-style-type: none"> • ROS (↓), cell viability (↑) • MMP-1, MMP-9 (↓) 	69

화 유전자 발현 수준이 상향 조절됨이 확인되었다.⁴³⁾ 또한 Herath 등은 PM_{2.5}에 노출된 MLE 12 폐 상피세포에서 에탄올 추출물의 항염증 효과가 tumor necrosis factor[TNF] receptor associated factor (TRAF) 6에 의한 myeloid differentiation primary response 88 (MyD88) 및 TNF 단백질의 활성화를 약화시켜 MAPK 의존성 신호전달 경로를 억제함으로써 나타남을 보고하였으며, 이러한 염증반응을 완화시킬 수 있는 활성 화합물로 mojabanchromanol (4)을 보고하였다.^{44,45)} Ovalbumin (OVA)으로 감작한 BALB/c 생쥐 천식모델에서 TLR2/4/7 매개 MyD88 의존성 NF-κB 경로를 조절하여 미세먼지 노출로 인해 악화된 천식 마우스의 기도 염증 반응이 완화됨을 밝혀내었으며, 악화된 수지상 세포의 활성화, Th2 사이토카인의 발현, 호산구 침윤, 비만세포 활성화, 혈청 IgE 수치를 현저히 완화시키고, Th17 세포반응을 추가로 억제하여 폐 내 호중구의 침윤을 완화시키는 것을 보여주었다. 이는 미세먼지로 인해 악화된 천식에 대한 팽생이모자반의 잠재적 효력을 시사하는 결과이다.^{46,47)}

툃(*Sargassum fusiforme*, *Hizikia fusiformis*)은 모자반속의 영양가가 높은 대표 식용자원으로 한국, 중국, 일본에서 널리 활용되며, 오랜 역사를 지닌 천연 약재로 변비, 복부팽만, 부종 등의 치료효과가 기록되어 있다. 최근에는 다양한 화합물과 생리활성으로 집중 연구되어 농업, 환경, 의학, 기능성 식품 분야에서 광범위한 관심을 끌고 있는 갈조류이다.⁴⁸⁾ 툃 추출물 유래의 fucoxanthin (5)이 풍부한 비극성 CHCl₃ 분획물은 미세먼지에 노출된 HaCaT 각질세포에서 PGE₂, COX-2, IL-1β, IL-6 등의 염증 인자 생성을 억제하였다. 또한 미세먼지에 노출된 HaCaT 세포의 배양액을 처리한 RAW264.7 대식세포에서 NO, iNOS, PGE₂ 및 IL-1β, IL-6, TNF-α 등 염증성 사이토카인의 발현이 증가되었으나, 해당 활성 분획물은 이러한 염증 반응을 용량 의존적으로 현저히 억제하였으며, 미세먼지에 노출된 제브라피쉬 배아에서 NO, ROS의 생성과 세포 사멸을 현저히 감소시켰다.⁴⁹⁾ Fucoïdan (2)과 지방산이 풍부한 75% 에탄올 추출물은 HaCaT 세포에서 HO-1, SOD-1 등 항산화 효소 활성을 증진시키고 NF-κB 및 MAPK 염증 경로를 조절하는 효능을 보여주었고, 미세먼지 노출로 상향된 Bcl-2 associated X protein (Bax) 및 caspase-3의 발현을 억제하였다.⁵⁰⁾ 또 다른 연구에서는 툃 유래 fucoïdan (2)이 미세먼지로 자극된 인간 진피 섬유아세포(human dermal fibroblast, HDF)에서 항산화, 항염증 및 세포사멸 억제 효과와 더불어 matrix metalloproteinases (MMPs) 발현 증가를 하향 조절하고 procollagen의 생성을 촉진하는 결과를 보고하였다.⁵¹⁾ 이는 툃 추출물과 함유 다당류가 미세먼지에 의해 유발된 표피 및 진피 손상으로부터 피부를 보호할 잠재적 효과가 있다는 것을 입증한다.

다시마(*Saccharina japonica*) 유래 fucoïdan (2) 또한 미세먼지로 자극된 HaCaT 각질세포에서 NF-κB/MAPK 신호전

달 경로를 조절하여 IL-6, IL-8, IL-13, IL-25, IL-33, TNF-α, IFN-γ, thymic stromal lymphopoietin (TSLP) 같은 염증성 사이토카인 및 macrophage-derived chemokine (MDC), thymus and activation-regulated chemokine (TARC)의 발현과 생성을 억제하였으며, 이 fucoïdan이 처리된 HaCaT 각질세포 배양액은 HDF에서 TSLP, IL-6, IL-8, IL-13, TNF-α와 같은 염증 매개체 및 TARC, MDC의 생성을 또한 현저히 억제하였다.⁵²⁾

패(*Ishige okamurae*)는 갈조강, 패속에 속하는 해조류로 우리나라 서남해안과 제주도 전역에 서식하는데, polysaccharides, bieckol, fucoxanthin 등 외에도 항종양, 항바이러스 및 방사선 보호활성의 diphlorethohydroxycarmalol (DPHC, 8)이 보고되어 의학적으로 소재로의 활용 가능성으로 주목받고 있다.⁵³⁾ DPHC (8) 성분은 HaCaT 각질세포 및 RAW 264.7 대식세포를 이용한 *in vitro* 실험에서 강한 항염증 활성으로 미세먼지로 자극된 세포의 생존율을 증가시켰으며, 제브라피쉬 배아를 이용한 *in vivo* 실험에서도 NO 및 ROS의 생성을 감소시켜 염증으로 인한 세포 사멸을 억제하였다.⁵⁴⁾ 또한 HDF 세포에서 collagen 합성을 유의하게 유도하고 collagenase 활성을 억제했으며, NF-κB의 활성을 저해하고 activator protein 1 (AP-1) 인산화의 감소 및 MAPK 신호전달 경로 조절을 통해 MMP 발현을 현저히 감소시키는 것이 밝혀졌다.⁵⁵⁾

국내 대표 양식 갈조류인 미역(*Undaria pinnatifida*)의 미역귀에서 얻은 시판 fucoïdan (2)이 염증 반응 및 점액 분비와 같은 천식 증상에 미치는 영향을 조사한 결과, OVA 및 Al(OH)₃로 감작된 생쥐 천식모델에서 7일 연속으로 미세먼지 노출과 병행하여 fucoïdan을 경구로 투여했을 때 미세먼지로 유발된 지질 과산화 및 F4/80⁺ 대식세포, Gr-1⁺ 과립구, CD4⁺ T 림프구와 같은 염증 세포의 침윤과 IL-4 수치를 감소시켰다. 또한 비만세포의 활성화, 탈과립 및 IgE 합성을 억제하고 점액 과다 분비 및 배상세포(goblet cell) 증식을 완화시켜 미세먼지에 의해 악화된 알레르기성 천식 증상을 완화하는 데 효과적임을 시사했다.⁵⁶⁾

갈조강 다시마목 감태과(Lessoniaceae)에 속하는 해조류 *Ecklonia*와 *Eisenia*는 특히 phlorotannin이라 분류되는 해조류 polyphenol 성분(eckol, 6,6'-bieckol, 8,8'-bieckol, dieckol, phlorofucofuroeckol-A 등)으로 인해 나타나는 여러 생리활성으로 잘 알려져 있다.^{57,58)} 감태(*Ecklonia cava*) 추출물 및 함유 phlorotannin을 적용하여 미세먼지로 유발되는 유해성을 완화시키는지 여부가 *in vitro* 및 *in vivo*에서 진행되었다. PM₁₀으로 감작된 HaCaT 각질세포에서 에탄올 추출물 및 dieckol (9)이 지질 과산화를 저해하고 악화된 염증성 사이토카인과 COX, microsomal prostaglandin E synthase type 2 (mPGES-2)의 발현을 억제하였으며,^{59,60)} eckol (7) 또한 PM_{2.5}로 인한 ROS 생성을 감소시키고 미토콘드리아 상태를 안정적으로 유지하며 MAPK 신호전달 경로를 억제하여 HaCaT 세포를 세포사멸로부터 보호하였다.⁶¹⁾ 이 외 물 추출물과 에탄올 추

출물 모두 PM_{2.5} 처리한 RPMI-2650 코점막 상피세포, A549 폐 상피세포, MC-IXC 뇌 신경모세포종 세포에서 ROS 생성을 억제하여 세포 보호 효과를 나타내었다.⁶²⁾ 미세먼지에 노출된 대식세포에서 dieckol (9)은 염증 반응과 관련된 매개체 및 염증성 사이토카인의 생성과 발현이 증가되는 것을 억제하였고, SOD 생성 유도 및 HO-1/Nrf2 항산화 신호 전달 경로 활성화를 통해 ROS의 생성을 감소시켜 세포의 손상을 완화하였다.⁶³⁾ 다른 연구에서는 동일한 세포에서 phlorofucofuroeckol-A (10)가 미세먼지로 활성화된 NF-κB/MAPK 신호 경로를 조절하여 IL-1β 발현을 억제하고, 미세먼지에 의해 조기 자극되었던 염증 촉진 및 세포사멸 관련 유전자의 발현 수준이 현저히 줄어드는 것이 유전자 프로파일링을 통해 밝혀졌다.⁶⁴⁾ 또한 Park 등은 PM_{2.5} 노출 생쥐 모델의 행동 검사 실험을 바탕으로 감태 물 추출물을 섭취했을 때 학습 및 기억력 저하가 효과적으로 개선된다고 보고하였다. 섭취 실험동물의 폐와 뇌 조직에서는 NF-κB/inflammasome 형성 신호전달 경로와 IL-6, IFN-γ의 억제를 통해 TLR-4에 의해 유발된 염증 반응이 완화되었으며, malondialdehyde (MDA) 생성 억제와 미토콘드리아 기능 활성화를 통해 PM_{2.5}로 인한 폐 및 뇌의 산화 손상이 효과적으로 개선되었다. 더하여 인지 기능 장애와 관련된 amyloid precursor protein (APP) 및 p-Tau를 감소시키고 brain-derived neurotrophic factor (BDNF)을 증가시켰으며, 뇌 조직에서 acetylcholine (ACh)의 합성 및 방출이 비활성화되는 것을 방지한다는 사실이 드러났다. 해당 추출물의 주요 성분으로는 다당류(평균 분자량 160.13 kDa)와 2-phloroekol (11)을 위시한 eckol (7), dieckol (9), phlorofucofuroeckol-A (10), 6,6'-bieckol (12), 2,7''-phloroglucinol,6,6'-bieckol (13) 등 phlorotannin류가 검출되었다.⁶⁵⁾ 또한 물 추출물이 장내 미생물 군집과 대사산물에 미치는 영향을 평가한 결과, PM_{2.5}의 장기 노출로 인한 결장 길이 변화가 개선되었고, 감소되었던 장내 유익균(*Lactobacillus*)이 다시 풍부해지고 단쇄지방산(short-chain fatty acids, SCFAs)의 수치가 효과적으로 증가되는 것이 드러났으며, 장-뇌 축(gut-brain axis)의 신경보호 대사산물인 kynurenic acid가 감태 추출물 투여로 인해 증가되는 것으로 확인되었다.⁶⁶⁾

대황(*Eisenia bicyclis*)은 울릉도, 독도가 원산지인 감태과의 다년생 해조류로, 예부터 식용 및 약용으로 활용되어 왔으며 phlorotannin 등의 생리활성 물질을 다량 함유하고 있어 최근 해양 바이오 소재로서의 가치가 높아지고 있다. 아주 최근에는 dieckol (9) 및 다양한 phlorotannin류, 황산화 다당류, 지질 및 아미노산 유도체가 함유되어 있는 95% 에탄올 추출물이 PM_{2.5} 노출로 유발된 만성 폐 독성에 대응하는 유망한 기능성 물질 후보가 될 수 있음을 시사하는 연구 결과가 보고되었다.⁶⁷⁾ 수컷 BALB/c 생쥐를 12주 반복 투여 기간 동안 매일 5시간 에어로졸화 된 PM_{2.5}에 노출시키면서 대황 추출물을 경구 투여하였을 때, PM_{2.5}로 유발된 폐 손상이 항산화

방어 체계의 회복 및 염증성 사이토카인 혈청 농도 감소를 통해 유의미하게 개선됨을 확인하였다. 또한 미토콘드리아 기능 장애 및 세포사 신호전달을 억제하였고, TLR4, TNF-α, IL-1β, COX-2 등 염증 인자 발현을 감소시키고 TGF-β/Smad 축을 통한 섬유화 신호전달 경로의 활성화를 억제하는 효능을 나타내었다. 해당 추출물 및 주요 성분으로 검출된 dieckol (9), 6,6'-bieckol (12), 6,8'-bieckol (14)을 각각 처리한 A549 세포는 세포 생존율이 회복되고, 염증성 사이토카인이 감소되며, Nrf2/HO-1 경로, 섬유화 연관 유전자와 단백질의 발현이 개선되었다.

녹조류 중에서는 청각과에 속하는 식용 해조류인 청각(*Codium fragile*)이 그 유용성으로 인해 미세먼지의 유해성에 대한 보호 효능 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 청각의 물 추출물과 40% 에탄올 추출물의 세포 보호 효능이 RPMI2650, A549, MC-IXC 세포들과 HT-22 해마 신경세포, BV-2 미세아교세포를 이용한 *in vitro* 실험에서 확인되었으며,⁶⁸⁾ HaCaT 세포에서는 미세먼지로 유발된 ROS 생성 증가와 MMP-1 및 MMP-9의 발현이 억제되어 청각의 피부 항노화 잠재력이 확인되었다.⁶⁹⁾ 최근에 Kim 등은 청각이 생쥐 모델에서 PM_{2.5}에 의해 유발된 폐 기능 장애와 인지 기능 장애를 개선하는지 여부를 평가하였다. 그 결과, 청각 유래 물 추출물은 ROS 함량과 미토콘드리아 막 전위 수준 조절을 통해 폐 미토콘드리아 기능 장애를 억제하고, 염증 및 세포사멸 연관 단백질, 섬유화 단백질의 발현을 개선함이 드러났으며, 결국에는 TLR/TGF-β1 신호전달 경로를 통해 산화 스트레스, 염증, 세포 독성 및 섬유화를 조절함으로써 폐 손상을 개선할 수 있음이 확인되었다. 또한 물 추출물은 대장 및 뇌 조직에서 PM_{2.5}에 의한 항산화 시스템의 불균형을 유의하게 개선하고 염증 및 세포사멸 연관 단백질의 발현을 방지하였다. 더하여 장내 미생물 군집을 풍부하게 개선하였으며 SCFAs의 함량을 높이고 장 투과성에 영향을 미치는 claudin-1, occludin 같은 접합 단백질의 발현을 촉진하여 장 기능을 개선하였다. 또한 뇌 조직에서 미세먼지로 악화된 콜린성 시스템을 조절함이 확인되었고, 행동 검사를 통해 공간 학습 및 기억, 단기 기억, 장기 학습 및 기억 기능이 개선됨이 입증되어 청각 물 추출물이 장-뇌 축 개선을 통해 PM_{2.5}로 유발된 인지 기능 장애를 개선할 수 있는 잠재적 후보가 될 수 있음을 보여주었다.^{70,71)}

홍조류 소속 김(*Pyropia*)은 얇은 엽상체로서 우리나라에서 양식하는 주요 종은 참김(*P. tenera*)과 방사무늬김(*P. yezoensis*)으로 알려져 있다.³⁶⁾ 참김의 물 추출물 및 에탄올 추출물은 RPMI-2650, A549 및 MC-IXC 세포에서 PM_{2.5}에 의한 세포 독성 유발 시 세포 내 ROS 함량을 낮추어 세포보호 효과를 나타내었고, 물 추출물이 더 효과적이었다. 또한 PM_{2.5}에 노출된 생쥐 모델의 폐 및 뇌 조직에서 MDA 생성이 현저히 억제되는 것이 관찰되었고, TLR-2, TLR-4 및 IL-1β 등 염증 매개체의 발현을 조절하여 항염증 효과를 나타내었다.⁷²⁾ 더

하여 참김의 물 추출물 및 물/80% 에탄올 추출물 혼합(8:2) 시료를 PM_{2.5}로 유발된 인지기능 저하 생쥐 모델에 각각 투여했을 때, 미토콘드리아 기능과 TLR/NF-κB 신호전달을 조절하여 나타나는 항산화 및 항염증 효과를 통해 PM_{2.5}로 유발된 학습 및 기억 장애를 완화시켰으며, c-Jun N-terminal kinase (JNK) 인산화를 억제함으로써 amyloid β 및 p-Tau의 발현을 조절, 완화시켜 인지기능 개선을 위한 소재로서의 활성을 보여주었다. 해당 효능 추출물의 주요 성분으로는 sulfated galactan, mycosporine-like amino acids (porpyra-334 등), 엽록소 유도체 등이 UPLC/MS Q-TOF 분석으로 규명되었다.⁷³⁾

방사무늬김 (*P. yezoensis*)의 물 추출물과 활성 성분으로 분리된 porphyra 334 (15)는 HaCaT세포에서 미세먼지로 활성화된 xenobiotic response element (XRE) 활성을 감소시켰고, 이어진 연구에서 미세먼지는 aryl hydrocarbon receptor (AhR)의 핵 내 이동을 증가시켜 cytochrome P450 1A1 (CYP1A1)의 mRNA 수준을 상승시키고 ROS 생성을 유도하고 세포 증식을 억제했으나, 이러한 현상은 porphyra 334 (15)에 의해 감소되었으며, ROS 증가로 인해 유도되는 피부 노화 및 염증 반응 관련 transient receptor potential vanilloid 1 (TRPV1) 활성을 감소시켜 미세먼지로부터 표피를 보호할 수 있는 효과를 보여주었다.⁷⁴⁾

홍조류 도박과의 참지누아리(*Grateloupia filicina*)는 우리나라 동해안에 주로 서식하는 식용 해조류로 최근 화장품 등 유용 소재 개발을 위한 해조류 원료 중 하나로 주목받고 있다.⁷⁵⁾ Shi 등은 참지누아리로부터 추출, 분리한 κ-carrageenan (16)이 PM_{2.5} 노출로 유발된 고인압을 가진 생쥐 모델에서 인압을 유의하게 완화시켰으며, human trabecular meshwork cells

(HTMC)의 생존율이 PM_{2.5} 노출된 대조군에 비해 27.7% 증가하였고, angular aqueous plexus (AAP) 세포의 내피세포 관통 전기저항(transendothelial electrical resistance, TEER)이 35.8% 감소됨을 확인하였다.⁷⁶⁾

미세플라스틱에 대한 해조류의 보호 활성

미세플라스틱(microplastics, MP), 특히 100 nm 이하 크기의 나노플라스틱(nanoplastics, NP)은 작은 크기와 일상생활 속 광범위한 분포로 인해 흡입, 섭취, 피부 접촉 등 다양한 경로를 통해 인체에 침투할 수 있는 능력과 잠재적인 건강위험으로 우려를 낳고 있다.^{22,77)} 미세플라스틱과 여러 질환과의 연관성이 제기되면서 이로 인해 유발되는 인체 유해성 및 관련 기전에 대한 연구가 근래 들어서야 본격화되고 있으며, 이러한 손상을 개선할 수 있는 생리활성 소재 및 화합물 탐색 연구 결과는 아직까지 아주 제한적이다.⁷⁸⁾ 미세플라스틱 및 나노플라스틱의 유해성과 이에 대응할 수 있는 활성 해조류에 대한 연구로는 심혈관계 및 생식계 손상을 대상으로 최근 이루어졌으며(Table III), 그 결과 갈조류 두 종에서 유래한 2,7-phloroglucinol-6,6'-bieckol (13) 및 fucoidan (2)의 활성이 각각 보고되었다.

NP는 다양한 경로로 인체에 유입되어 심혈관계에 산화 스트레스를 유발하며, 내피세포(endothelial cells, ECs)의 노화와 기능 장애를 초래할 수 있다. Sim 등은 돼지 관상동맥 및 돼지 관상동맥 내피세포를 NP 단독 또는 감태(*E. cava*)의 EtOAc 분획물과 병용 노출시킨 결과, NP에 의해 유발되었던 노화 관련 β-galactosidase (SA-β-gal) 활성을 완화시켜 내

Table III. Protective effects of macroalgae against micro-/nanoplastics-induced damage

Algae species	Active materials/ Compounds	Experimental model	Activities/ Underlying mechanism/	References
감태 (<i>Ecklonia cava</i>)	70% EtOH extract, EtOAc fraction (100 μg/mL) 2,7'-Phloroglucinol-6,6'-bieckol (PHB, 13) (3, 10, 30 μM)	Porcine coronary artery (PCA) / Porcine coronary endothelial cells (PCAECs)	<ul style="list-style-type: none"> • SA-β-gal activity (↓) • Vascular response (↑) • Oxidative stress level (↓) • Restoration of cell proliferation • p53, p21, p16, AT1 expression (↓) • eNOS expression (↑) • Restoration of endothelium-dependent vasorelaxation 	79)
큰실말 (<i>Cladosiphon okamuranus</i>)	Fucoidan (2) (6.25, 12.5, 25, 50, 100 μg/mL)	Leydig cell (LC540)	<ul style="list-style-type: none"> • NO level (↓) • ROS content (↓) 	80)
	Fucoidan (2) (50, 100, 200 mg/kg, p.o.)	Sprague-Dawley rats, male	<ul style="list-style-type: none"> • Enzymatic antioxidant activities (GPx, SOD, G6PD, GR) (↑) • MDA and NO production (↓) • TNF-α, IL-6, caspase-3 expression (↓) • Testosterone levels (↑) • Preventing the reduction of epithelium thickness • Reducing the area of the seminiferous tubule lumen 	

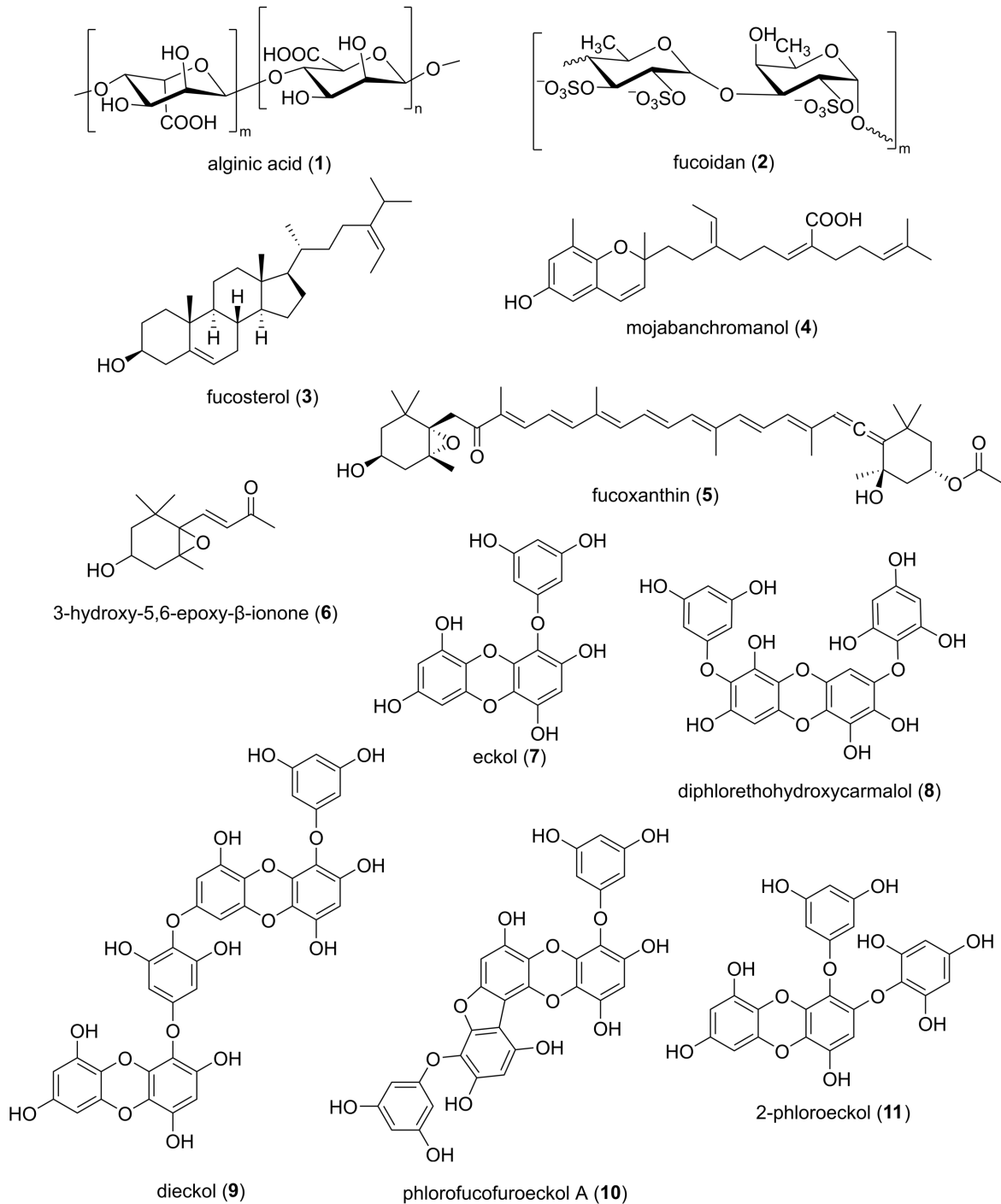


Fig. 1. Structures of active compounds derived from seaweeds alleviating damage caused by fine dust and microplastics.

피세포의 이온 노화를 예방하고 혈관 기능 장애를 개선함을 확인하였으며, 분획물에서 분리된 phlorotannin류 중 2,7'-phloroglucinol-6,6'-bieckol (13)이 핵심적인 역할을 하는 것을 보고하였다. 이 성분의 처리는 SA- β -gal 활성을 개선하고, 산화 스트레스를 감소시키며, 세포 증식을 회복시키고, 내피 세포 노화 유발인자인 p53, p21, p16 및 angiotensin type 1 receptor

(AT1)의 발현을 감소시켰다. 또한 2,7'-phloroglucinol-6,6'-bieckol (13)은 내피형 산화질소 합성효소(endothelial nitric oxide synthase, eNOS) 발현을 상향 조절하고 내피의존성 혈관 이완을 회복시켜 NP에 의해 유발된 혈관 기능 장애를 개선하는 것이 확인되었다.⁷⁹⁾

Hwang 등은 polystyrene 미세플라스틱(PS-MP) 노출로 인한

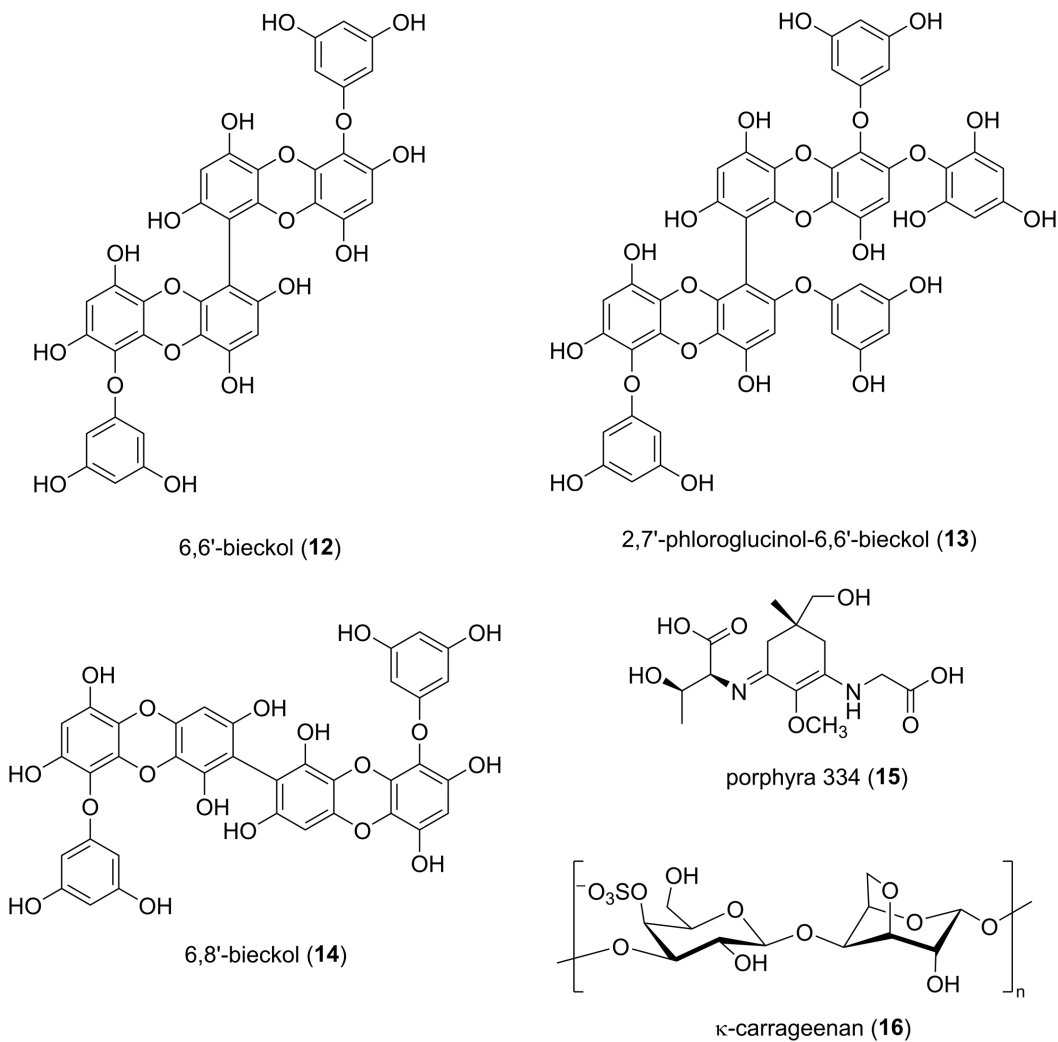


Fig. 2. Structures of active compounds derived from seaweeds alleviating damage caused by fine dust and microplastics (continued).

생식 기능 손상에 대하여 실험한 결과, 큰실말(*Cladosiphon okamuranus*)에서 유래한 황산화 다당류 fucoidan (2)이 PS-MP에 의해 유발된 Leydig 세포(LC540)의 산화 스트레스를 억제하였고, 수컷 쥐를 이용한 동물실험에서도 SOD, glutathione peroxidase (GPx), glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PD), glutathione reductase (GR) 등 여러 항산화 효소의 활성을 향상시키고 MDA 및 NO 생성을 감소시켰으며, TNF- α , IL-6, caspase-3 발현을 하향 조절함을 보고하였다. 또한 fucoidan은 testosterone 수치를 상향 조절하고 PS-MP 노출로 인한 고환의 상피 두께 감소와 정세관 내강 면적의 증가를 개선하여 생식 기능 또는 고환 손상 관리를 위한 식품보조제 또는 기능성 식품 원료로의 활용 가능성이 있음을 보여주었다.⁸⁰⁾

고 찰

해조류는 지속가능한 식량공급원이자 의약·바이오 및 친

환경 산업 소재를 얻기 위한 원료로서 활용 가치가 높은 천연자원이며, 환경 보존과 생물 다양성 증진에도 중요한 역할을 맡고 있어 전세계적으로도 관심과 수요가 증가하고 있다. 특히 해조류 양식업 및 수출 주력 국가로서 수위를 달리고 있는 우리나라에서는 해양 거대조류를 이용한 고부가가치 산업화 전략과 해조류 바이오산업 가능성 분석에 대한 필요성이 나 날이 높아지고 있다.⁸¹⁾ 해조류는 특히 sulfated polysaccharides, polyphenols, carotenoids 등 화학적, 생물학적 활성이 높은 대사산물과 비타민, 미네랄, 식이섬유 등의 함량과 영양가치가 높아 기능성 식품 및 의약소재로서 연구 및 산업적 가치가 널리 인정되고 있다.

미세먼지 및 미세플라스틱에 의해 유발되거나 악화될 수 있는 여러 건강 위해 및 질환 관련 손상에 대해서도 fucoidan, phlorotannin, fucoxanthin, amino acid derivatives 등 다양한 구조의 성분이 심혈관계, 생식계, 호흡기계, 피부, 신경계 및 장관계와 연계된 여러 *in vivo*, *in vitro* 및 *ex vivo* 모델에서

예방/보호 또는 저감 효능을 나타냄을 볼 수 있으며, 이러한 효능과 관련된 주요 기전으로는 활성 추출물 또는 화합물의 항산화 및 항염증 작용이 일부 깊게 연관되어 있음을 확인할 수 있다. 다만 이러한 해양 거대조류 유래 활성 화합물 소재의 지속가능한 활용을 위해서는 임상시험 등을 통한 효능 검증 외에도 추가 연구가 더 필요한 실정이다. 먼저, 미세먼지에 대한 활성을 보인 갈조류 유래의 대표 황산화 다당류 성분인 fucoidan (2)은 종, 원료, 채취 조건에 영향을 받는 구조적 복잡성이 매우 두드러지며 이러한 특성이 생물학적 활성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 원료, 추출 및 정제기술, 구조적 변이, 생물학적 활성에 대한 심도 있는 추가 연구가 이루어져야 한다.⁸²⁾ 또한, 해양 거대조류의 생태환경으로 인해 필수적으로 발생할 수밖에 없는 시급한 문제 중 하나는 해조류에서 발견되는 미세플라스틱이다. 2020년 이후에 들어서야 비로소 해조류의 플라스틱 오염에 대한 연구가 대부분 이루어지고 있어 이의 섭취가 인체 건강에 미치는 영향에 대한 체계적 평가와 함께 인체 노출에 대한 정량화 연구의 필요성이 급속도로 떠오르고 있다.^{83,84)} 해면양식업에 집중되어 있으며 원물 자체 또는 단순가공 섭취로 식용 해조류의 거의 대부분을 소비하는 우리나라 또한 더 이상 간과할 수 없는 문제로 사료된다.

결 론

미세먼지와 미세플라스틱은 단순한 환경오염원이 아닌 건강위해성을 일으키거나 또는 가속화할 수 있는 유해인자로 이미 인식되고 있으며 중요한 환경적 위협요인으로 부상해 있다. 이들로 인한 위해성을 완화 또는 저감할 수 있는 기능성 소재를 발굴하고 관련 작용기전을 밝혀내는 연구가 주요 당면 과제 중 하나로 대두되고 있는 현 시점에서, 해양 거대조류는 이미 알려진 식용자원, 산업원료 및 생물다양성 증진 측면에서의 단순 중요성을 넘어 환경보건학적 측면에서도 의약품, 건강기능성 식품, 화장품 개발을 위한 유용한 자원으로써 응용 가능성과 가치를 보여주고 있다.

사 사

본 논문은 2025년 국립목포대학교 글로컬대학 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

인용문헌

1. Asghar, U. Rafiq, S., Anwar, A., Iqbal, T., Ahmed, A., Jamil, F., Khurram, M. S., Akbar, M. M., Farooq, A., Shah, N. S. and Park, Y. K. (2021) Review on the progress in emission control technologies for the abatement of CO₂, SO_x and NO_x from fuel combustion. *J. Environ. Chem. Eng.* **9**: 106064.
2. Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope III, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., Lim, C. C., Turner, M. C., Jerrett, M., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Ostro, B., Goldberg, D., Crouse, D. L., Martin, R. V., Peters, P., Pinault, L., Tjepkema, M., Van Donkelaar, A., Villeneuve, P. J., Miller, A. B., Yin, P., Zhou, M., Wang, L., Janssen, N. A. H., Marra, M., Atkinson, R. W., Tsang, H., Thach, T. Q., Cannon, J. B., Allen, R. T., Hart, J. E., Laden, F., Cesaroni, G., Forastiere, F., Weinmayr, G., Jaensch, A., Nagel, G., Concin, H. and Spadaro, J. V. (2018) Global estimates of mortality associated with longterm exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **115**: 9592-9597.
3. Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* **3**: e1700782.
4. Thacharodi, A., Meenatchi, R., Hassan, S., Hussain, N., Bhat, M. A., Arockiaraj, J., Ngo, H. H., Le, Q. H. and Pugazhendhi, A. (2024) Microplastics in the environment: A critical overview on its fate, toxicity, implications, management, and bioremediation strategies. *J. Environ. Manage.* **349**: 119433.
5. WHO (2021) WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide carbon monoxide. WHO European Centre for Environmental and Health, Bonn.
6. WHO (2024) Ambient air quality database -Metadata. 6th edition (V6.1). Released on 31, Jan 2024.
7. Wang, Y.-L., Lin, Y.-C., Liu, W.-C., Lee, Y.-H. and Chiu, H.-W. (2025) Air pollution and its impacts on health: Focus on microplastics and nanoplastics. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **299**: 118402.
8. Krittanawong, C., Qadeer, Y. K., Hayes, R. B., Wang, Z., Thurston, G. D., Virani, S. and Lavie, C. J. (2023) PM_{2.5} and cardiovascular diseases: State-of-the-Art review. *Int. J. Cardiol. Cardiovasc. Risk Prev.* **19**: 200217.
9. Straif, K., Cohen, A. and Samet, J. M. (2013) Air pollution and cancer. IARC Scientific Publication No. 161, WHO Press, Geneva.
10. Pope III, C. A. and Dockery, D. W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *J. Air Waste Manag. Assoc.* **56**: 709-742.
11. Miller, M. R. (2020) Oxidative stress and the cardiovascular effects of air pollution. *Free Radic. Biol. Med.* **151**: 69-87.
12. Li, T., Yu, Y., Sun, Z. and Duan, J. A. (2022) A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence. *Part. Fibre Toxicol.* **19**: 67.
13. Li, R., Kou, X., Geng, H., Xie, J., Tian, J., Cai, Z. and Dong, C. (2015) Mitochondrial damage: An important mechanism of ambient PM_{2.5} exposure-induced acute heart injury in rats. *J. Hazard. Mater.* **287**: 392-401.

14. Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F. and Wang, X. (2016) The health effects of ambient PM_{2.5} and potential mechanisms. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **128**: 67-74.
15. Shi, L., Wu, X., Yazdi, M. D., Braun, D., Abu Awad, Y., Wei, Y., Liu, P., Di, Q., Wang, Y., Schwartz, J., Dominici, F., Kioumourtzoglou, M. A. and Zanobetti, A. (2020) Long-term effects of PM_{2.5} on neurological disorders in the American Medicare population: a longitudinal cohort study. *Lancet Planet. Heal.* **4**: e557-e565.
16. Yee, M. S.-L., Hii, L.-W., Looi, C. K., Lim, W.-M., Wong, S.-F., Kok, Y.-Y., Tan, B.-K., Wong, C.-Y. and Leong, C.-O. (2021) Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials* **11**: 496.
17. Chen, G., Li, X., Wang, Z., Li, M., Wang, W., Lu, R., Wang, S., Li, Q., Hu, Z., Wu, Y., Li, Z., Wang, P. and Cao, Y. (2024) Human exposure to micro(nano)plastics: Health risks and analysis methods. *Trends Anal. Chem.* **178**: 117835.
18. Jahedi, F. and Fard, N. J. H. (2025) Micro- and nanoplastic toxicity in humans: Exposure pathways, cellular effects, and mitigation strategies. *Toxicol. Reports* **14**: 102043.
19. Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J. and Lamoree, M. H. (2022) Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environ. Int.* **163**: 107199.
20. Feng, Y., Tu, C., Li, R., Wu, D., Yang, J., Xia, Y., Peijnenburg, W. J. G. M. and Luo, Y. (2023) A systematic review of the impacts of exposure to micro- and nano-plastics on human tissue accumulation and health. *Eco-Environment Heal.* **2**: 195-207.
21. Liu, H., Li, H., Yao, X., Yan, X. and Peng, R. (2025) Environmental nanoplastics induce mitochondrial dysfunction: A review of cellular mechanisms and associated diseases. *Environ. Pollut.* **382**: 126695.
22. Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G. and Song, M. (2023) Potential health impact of microplastics: A review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environ. Health* **1**: 249-257.
23. P., S. P. and Tanushree, P. (2025) Synergistic human health risks of microplastics and co-contaminants: A quantitative risk assessment in water. *J. Hazard. Mater.* **491**: 137809.
24. Shiwakoti, S., Dhakal, B., Ok, Y., Gong, D. S., Ko, J.-Y., Kim, P.-G. and Oak, M.-H., et al. (2025) Nanoplastics: An emerging environmental concern in age-related diseases. *Environ. Pollut.* **384**: 126972.
25. Sarwer, A., Hamed, S. M., Osman, A. I., Jamil, F., Al-Muhtaseb, A. H., Alhajeri, N. S. and Rooney, D. W. (2022) Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: A review. *Environ. Chem. Lett.* **20**: 2797-2851.
26. Raven, J. (2018) Blue carbon: Past, present and future, with emphasis on macroalgae. *Biol. Lett.* **14**: 1-5.
27. Pakan, P. D., Siu, A. C. W., Lee, H., Singh, M., De Rubis, G., Yeung, S., Kulkarni, M. P., Goh, B. H., Hsu, A. C., Chellappan, D. K., Gupta, G., Yow, Y. -Y., Oliver, B. G. G., Paudel, K. R. and Dua, K. (2025) Algal bioactives: Unlocking future frontiers in respiratory therapeutics. *Food Biosci.* **69**: 106778.
28. Xie, C., Lee, Z. J., Ye, S., Barrow, C. J., Dunshea, F. R. and Suleria, H. A. R. (2024) A review on seaweeds and seaweed-derived polysaccharides: Nutrition, chemistry, bioactivities, and applications. *Food Rev. Int.* **40**: 1312-1347.
29. Bouafir, Y., Bouhenna, M. M., Nebbak, A., Belfarhi, L., Aouzal, B., Boufahja, F., Bendif, H. and Bruno, M. (2025) Algal bioactive compounds: A review on their characteristics and medicinal properties. *Fitoterapia* **183**: 106591.
30. Tan, P. X., Thiyagarasaiyar, K., Tan, C.-Y., Jeon, Y.-J., Nadzir, M. S. M., Wu, Y.-J., Low, L.-E., Atanasov, A. G., Ming, L. C., Liew, K. B., Goh, B.-H. and Yow, Y.-Y. (2021) Algae-derived anti-inflammatory compounds against particulate matters-induced respiratory diseases: A systematic review. *Mar. Drugs* **19**: 317.
31. Jeayeng, S., Kwanthongdee, J., Jitreeprasert, R., Rungnantchai, K., Naksavasdi, K., Rirkkrai, R., Wongcharoenthavom, V., Mahikul, W. and Chatsirisupachai, A. (2025) Natural products as promising therapeutics for fine particulate matter-induced skin damage: A review of pre-clinical studies on skin inflammation and barrier dysfunction. *PeerJ* **13**: 19316.
32. FAO (2024) The state of world fisheries and aquaculture 2024. Blue transformation in action. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
33. FAO (2024) Globefish: Special features - Seaweed trade and market potential. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
34. 해양수산부(2025) 2024년 우리나라 수산물 생산량은 전년 보다 2.2%, 연근해 생산량은 11.6% 감소. 해양수산부 보도 자료(2025. 3. 5. 배포), 부산.
35. 해양수산부(2023) 2023년 수산물 생산 및 유통산업 실태조사. 해양수산부, 부산.
36. 김형근, 김선진(2023) 생물분류 현장종사자 역량강화 교재: 해조류. 국립생물자원관, 인천.
37. Remya, R. R., Samrot, A. V., Kumar, S. S., Mohanavel, V., Karthick, A., Chinnaiyan, V. K., Umopathy, D. and Muhibbullah, M. (2022) Bioactive potential of brown algae. *Adsorpt. Sci. Technol.* **2022**: 9104835.
38. Jayawardena, T. U., Sanjeeva, K. K. A., Fernando, I. P. S., Ryu, B. M., Kang, M.-C., Jee, Y., Lee, W. W. and Jeon, Y. -J. (2018) *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh ethanol extract inhibits the fine dust inflammation response via activating Nrf2/HO-1 signaling in RAW 264.7 cells. *BMC Complement. Altern. Med.* **18**: 249.
39. Fernando, I. P. S., Jayawardena, T. U., Sanjeeva, K. K. A., Wang, L., Jeon, Y.-J. and Lee, W. W. (2018) Anti-inflammatory potential of alginic acid from *Sargassum horneri* against urban aerosol-induced inflammatory responses in keratinocytes and macrophages. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **160**: 24-31.
40. Fernando, I. P. S., Jayawardena, T. U., Kim, H.-S., Lee, W. W., Vaas, A. P. J. P., De Silva, H. I. C., Abayaweera, G. S., Nanayakkara, C. M., Abeyunga, D. T. U., Lee, D.-S. and Jeon,

- Y.-J. (2019) Beijing urban particulate matter-induced injury and inflammation in human lung epithelial cells and the protective effects of fucosterol from *Sargassum binderi* (Sonder ex J. Agardh). *Environ. Res.* **172**: 150-158.
41. Sanjeeva, K. K. A., Jayawardena, T. U., Kim, S.-Y., Lee, H. G., Je, J.-G., Jee, Y. and Jeon, Y.-J. (2020) *Sargassum horneri* (Turner) inhibit urban particulate matter-induced inflammation in MH-S lung macrophages via blocking TLRs mediated NF- κ B and MAPK activation. *J. Ethnopharmacol.* **249**: 112363.
 42. Asanka Sanjeeva, K. K., Kim, H.-S., Lee, H.-G., Jayawardena, T. U., Nagahawatta, D. P., Yang, H.-W., Udayanga, D., Kim, J.-I. and Jeon, Y.-J. (2021) 3-Hydroxy-5,6-epoxy- β -ionone isolated from invasive harmful brown seaweed *Sargassum horneri* protects MH-S mouse lung cells from urban particulate matter-induced inflammation. *Appl. Sci.* **11**: 10929.
 43. Sanjeeva, K. K. A., Jayawardena, T. U., Lee, H. G., Herath, K. H. I. N. M., Jee, Y. and Jeon, Y.-J. (2019) The protective effect of *Sargassum horneri* against particulate matter-induced inflammation in lung tissues of an *in vivo* mouse asthma model. *Food Funct.* **10**: 7995-8004.
 44. Herath, K. H. I. N. M., Kim, H. J., Jang, J.-H., Kim, H.-S., Kim, H. J., Jeon, Y.-J. and Jee, Y. (2020) Mojabanchromanol isolated from *Sargassum horneri* attenuates particulate matter induced inflammatory responses via suppressing TLR2/4/7-MAPK signaling in MLE-12 cells. *Mar. Drugs* **18**: 355.
 45. Herath, K. H. I. N. M., Kim, H. J., Lee, J. H., Je, J. G., Yu, H.-S., Jeon, Y.-J., Kim, H. J. and Jee, Y. (2021) *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh containing polyphenols attenuates particulate matter-induced inflammatory response by blocking TLR-mediated MYD88-dependent MAPK signaling pathway in MLE-12 cells. *J. Ethnopharmacol.* **265**: 113340.
 46. Herath, K. H. I. N. M., Mihindikulasooriya, S. P., Kim, H. J., Kim, A., Kim, H. J., Jeon, Y.-J. and Jee, Y. (2020) Oral administration of polyphenol-rich *Sargassum horneri* suppresses particulate matter exacerbated airway inflammation in murine allergic asthma: Relevance to the TLR mediated NF- κ B pathway inhibition. *J. Funct. Foods* **71**: 103991.
 47. Herath, K. H. I. N. M., Kim, H. J., Mihindikulasooriya, S. P., Kim, A., Kim, H. J., Jeon, Y.-J. and Jee, Y. (2020) *Sargassum horneri* extract containing mojabanchromanol attenuates the particulate matter exacerbated allergic asthma through reduction of Th2 and Th17 response in mice. *Environ. Pollut.* **265**: 114094.
 48. Wang, X., Huang, C., Fu, X., Jeon, Y.-J., Mao, X. and Wang, L. (2023) Bioactivities of the popular edible brown seaweed *Sargassum fusiforme*: A review. *J. Agric. Food Chem.* **71**: 16452-16468.
 49. Dai, Y.-L., Jiang, Y.-F., Lu, Y.-A., Yu, J.-B., Kang, M.-C. and Jeon, Y. J. (2021) Fucoxanthin-rich fraction from *Sargassum fusiformis* alleviates particulate matter-induced inflammation *in vitro* and *in vivo*. *Toxicol. Reports* **8**: 349-358.
 50. Ahn, J. W., Kim, H. S., Kim, S. H., Yang, H. S., Damodar, K., Yoo, Y.-M., Hong, J. T. and Joo, S. S. (2025) Amelioration of particulate matter-induced oxidative stress by a bioactive *Hizikia fusiformis* extract: A functional biomaterial for cosmeceutical applications. *Mar. Drugs* **23**: 135.
 51. Wang, X., Huang, C., Yang, F., Wang, K., Cha, S.-H., Mao, X., Jeon, Y.-J. and Wang, L. (2024) Fucooidan isolated from the edible seaweed *Sargassum fusiforme* suppresses skin damage stimulated by airborne particulate matter. *Algal Res.* **77**: 103339.
 52. Kirindage, K. G. I. S. Jayasinghe, A. M. K., Cho, N.-K., Cho, S.-H., Yoo, H.-M., Jung, K., Kim, J.-S. and Ahn, G. (2024) Fucooidan refined from *Saccharina japonica* ameliorates ambient particulate matter-induced inflammation in keratinocytes, underlying fibroblasts, and 12-*O*-tetradecanoylphorbol 13-acetate-induced ear edema in mice. *Int. J. Biol. Macromol.* **277**: 134324.
 53. Lim, H., Hwang, E. K. and Park, C. S. (2024) Growth and maturation period of a brown alga, *Ishige okamurae* Yendo, in a habitat of southwestern coast of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* **42**: 483-491.
 54. Fernando, I. P. S., Kim, H.-S., Sanjeeva, K. K. A., Oh, J.-Y., Jeon, Y.-J. and Lee, W. W. (2017) Inhibition of inflammatory responses elicited by urban fine dust particles in keratinocytes and macrophages by diphlorethohydroxycarmalol isolated from a brown alga *Ishige okamurae*. *Algae* **32**: 261-273.
 55. Wang, L., Kim, H. S., Je, J.-G., Oh, J. Y., Kim, Y.-S., Cha, S.-H. and Jeon, Y.-J. (2020) Protective effect of diphlorethohydroxycarmalol isolated from *Ishige okamurae* against particulate matter-induced skin damage by regulation of NF- κ B, AP-1, and MAPKs signaling pathways *in vitro* in human dermal fibroblasts. *Molecules* **25**: 1055.
 56. Herath, K. H. I. N. M., Kim, H. J., Kim, A., Sook, C. E., Lee, B.-Y. and Jee, Y. (2020) The role of fucoidans isolated from the sporophylls of *Undaria pinnatifida* against particulate-matter-induced allergic airway inflammation: Evidence of the attenuation of oxidative stress and inflammatory responses. *Molecules* **25**, 2869.
 57. Thomas, N. V. and Kim, S.-K. (2011) Potential pharmacological applications of polyphenolic derivatives from marine brown algae. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* **32**: 325-335.
 58. Sugiura, Y., Katsuzaki, H., Imai, K. and Amano, H. (2021) The anti-allergic and anti-inflammatory effects of phlorotannins from the edible brown algae, *Ecklonia* sp. and *Eisenia* sp. *Nat. Prod. Commun.* **16**: 1-15.
 59. Lee, J.-W., Seok, J. K. and Boo, Y. C. (2018) *Ecklonia cava* extract and dieckol attenuate cellular lipid peroxidation in keratinocytes exposed to PM₁₀. *Evid. -based Complement. Altern. Med.* **2018**: 8248323.
 60. Ha, J. W., Song, H., Hong, S. S. and Boo, Y. C. (2019) Marine alga *Ecklonia cava* extract and dieckol attenuate prostaglandin E₂ production in HaCaT keratinocytes exposed to airborne particulate matter. *Antioxidants* **8**: 190.
 61. Zhen, A. X., Hyun, Y. J., Piao, M. J., Fernando, P. D. S. M.,

- Kang, K. A., Ahn, M. J., Yi, J. M., Kang, H. K., Koh, Y. S., Lee, N. H. and Hyun, J. W. (2019) Eckol inhibits particulate matter 2.5-induced skin keratinocyte damage via MAPK signaling pathway. *Mar. Drugs* **17**: 444.
62. Park, S. K., Kang, J. Y., Kim, J. M., Yoo, S. K., Han, H. J., Shin, E. J. and Heo, H. J. (2019) Cellular protective effect of *Ecklonia cava* extract on ultra-fine dust (PM_{2.5})-induced cytotoxicity. *Korean J. Food Sci. Technol.* **51**: 503-508.
63. Sanjeeva, K. K. A., Fernando, I. P. S., Kim, H.-S., Jayawardena, T. U., Ryu, B. M., Yang, H.-W., Ahn, G., Lee, W. W. and Jeon, Y.-J. (2020) Dieckol: an algal polyphenol attenuates urban fine dust-induced inflammation in RAW 264.7 cells via the activation of anti-inflammatory and antioxidant signaling pathways. *J. Appl. Phycol.* **32**: 2387-2396.
64. Lee, E. G., Yim, S.-K., Kang, S.-M., Ahn, B. J., Kim, C.-K., Lee, M., Tark, D. and Lee, G.-H. (2025) Phlorofucofuroeckol-A: A natural compound with potential to attenuate inflammatory diseases caused by airborne fine dust. *Medicina* **61**: 165.
65. Park, S. K., Kang, J. Y., Kim, J. M., Kim, H.-J. and Heo, H. J. (2021) *Ecklonia cava* attenuates PM_{2.5}-induced cognitive decline through mitochondrial activation and anti-inflammatory effect. *Mar. Drugs* **19**: 131.
66. Park, S. K., Kang, J. Y., Kim, J. M., Kim, M. J., Lee, H. L., Moon, J. H., Jeong, H. R., Kim, H.-J. and Heo, H. J. (2022) Water extract of *Ecklonia cava* protects against fine dust (PM_{2.5})-induced health damage by regulating gut health. *J. Microbiol. Biotechnol.* **32**: 927-937.
67. Kim, J. M., Kim, T. Y., Lee, H. L. and Heo, H. J. (2025) Bioactive polysaccharides and phlorotannins from *Eisenia bicyclis* alleviate particulate matter (PM)_{2.5}-induced chronic lung injury by regulating inflammatory and fibrotic pathways. *J. Microbiol. Biotechnol.* **35**: e2510053.
68. Kim, G. H., Park, S. K., Kang, J. Y., Kim, J. M., Shin, E. J., Moon, J. H., Kim, M. J., Lee, H. L., Jeong, H. R. and Heo, H. J. (2021) Protective effect of *Codium fragile* extract on fine dust (PM_{2.5})-induced toxicity in nasal cavity, lung and brain cells. *Korean J. Food Sci. Technol.* **53**: 223-229.
69. Kim, B. A. (2023) Anti-aging effect of *Codium fragile* extract on keratinocytes damaged by fine dust PM₁₀. *Kor. J. Herbol.* **38**: 45-52.
70. Kim, T. Y., Kim, J. M., Lee, H. L., Go, M. J., Joo, S. G., Kim, J. H., Lee, H. S., Jeong, W. M., Lee, D. Y., Kim, H.-J. and Heo, H. J. (2023) *Codium fragile* suppressed chronic PM_{2.5}-exposed pulmonary dysfunction via TLR/TGF- β pathway in BALB/c mice. *Antioxidants* **12**: 1743.
71. Kim, T. Y., Kim, J. M., Lee, H. L., Go, M. J., Joo, S. G., Kim, J. H., Lee, H. S., Lee, D. Y., Kim, H.-J. and Heo, H. J. (2023) *Codium fragile* suppresses PM_{2.5}-induced cognitive dysfunction by regulating gut-brain axis via TLR-4/MyD88 pathway. *Int. J. Mol. Sci.* **24**: 12898.
72. Park, S. K., Kang, J. Y., Kim, J. M., Han, H. J., Shin, E. J. and Heo, H. J. (2020) Improving effect of *Porphyra tenera* extract on ultra-fine dust-mediated inflammation. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* **49**: 295-303.
73. Park, S. K., Kang, J. Y., Kim, J. M., Kim, M. J., Lee, H. L., Moon, J. H., Jeong, H. R., Kim, H.-J., Chung, M.-Y. and Heo, H. J. (2022) *Porphyra tenera* protects against PM_{2.5}-induced cognitive dysfunction with the regulation of gut function. *Mar. Drugs* **20**: 439.
74. Choi, S., Lee, J. H., Oh, S. W., Yu, E., Kwon, K., Jang, S. J., Shin, D. S., Moh, S. H. and Lee, J. (2023) Anti-pollutant activity of *Porphyra yezoensis* water extract and its active compound, porphyra 334, against urban particulate matter-induced keratinocyte cell damage. *Mar. Drugs* **21**: 121.
75. Yu, M. Y. and Lee, S. H. (2022) Antioxidant and anti-inflammatory activity of *Grateloupia filicina* extract. *J. Conver. Inf. Technol.* **12**: 119-126.
76. Shi, S., Liu, J., Gao, Y., Sun, X., Chen, W., Zhang, W., Wang, H., Wang, S. and Lei, Y. (2025) κ -Carrageenan from *Grateloupia filicina* protects against PM_{2.5}-induced intraocular pressure elevation. *Int. J. Biol. Macromol.* **306**: 141299.
77. Xu, J.-L., Lin, X., Wang, J. J. and Gowen, A. A. (2022) A review of potential human health impacts of micro- and nanoplastics exposure. *Sci. Total Environ.* **851**: 158111.
78. Cheng, J., Li, J., Xiong, R.-G., Zhou, D.-D., Huang, S.-Y., Wu, S.-X., Shang, A., Tang, G.-Y., Li, H.-B. and Gan, R.-Y. (2025) Potentially harmful effects of micro-/nanoplastics on humans as well as protective actions of dietary natural products. *Trends Food Sci. Technol.* **156**: 104841.
79. Sim, H.-H., Shiwakoti, S., Lee, J.-H., Lee, I.-Y., Ok, Y. Lim, H.-K., Ko, J.-Y. and Oak, M.-H. (2024) 2,7-Phloroglucinol-6,6'-bieckol from *Ecklonia cava* ameliorates nanoplastics-induced premature endothelial senescence and dysfunction. *Sci. Total Environ.* **949**: 175007.
80. Hwang, Y. Y., Sudirman, S., Wei, E. Y., Kong, Z. L. and Hwang, D. F. (2024) Fucoidan from *Cladosiphon okamuramus* enhances antioxidant activity and prevents reproductive dysfunction in polystyrene microplastic-induced male rats. *Biomed. Pharmacother.* **170**: 115912.
81. 박은옥(2024). JNI Issue Report -해조류산업 생태계 육성을 위한 전남의 과제. 전남연구원, 나주.
82. Hamouda, H. I., Li, T., Shabana, S., Hashem, A. H. and Yin, H. (2025) Advances in fucoidan and fucoidan oligosaccharides: Current status, future prospects, and biological applications. *Carbohydr. Polym.* **358**: 123559.
83. Podbielska, M. and Szyrka, E. (2023) Microplastics – An emerging contaminants for algae. Critical review and perspectives. *Sci. Total Environ.* **885**: 163842.
84. Xiao, X., Liu, S., Li, L., Li, R., Zhao, X., Yin, N., She, X., Peijnenburg, W., Cui, X. and Luo, Y. (2024) Seaweeds as a major source of dietary microplastics exposure in East Asia. *Food Chem.* **450**: 139317.