

제 출 문

LG전자 귀하

본 보고서를 “LG전자 친환경 기능성 소재 [미네랄 세제/수용성유리] 제품의 극지환경 적용 가능성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2025. 05. 12

연구책임자 : 도 학 원

참여연구원 : 이 준 혁

“ : 김 기 태

“ : 김 보 미

“ : 남 예 원

“ : 황 지 섭

“ : Hoang Thi Ngoc Trang

<보고서 초록>

과제명	국문	LG전자 친환경 기능성 소재 [미네랄 세제/ 수용성유리] 제품의 극지환경 적용 가능성 연구			
	영문	Research on the Applicability of LG Electronics' Eco-friendly Functional Materials [Mineral Detergent/Soluble Glass] in Polar Environments			
과제성격 (기초, 응용, 개발)		기초			
주요연구영역		극지 생물 환경			
주관연구기관		한국해양과학기술원 극지연구소			
연구책임자 참여연구자		도학원	부서/전공	생명과학연구본부/생화학	
		이준혁	부서/전공	생명과학연구본부/구조생물학	
		김기태	부서/전공	빙하지각연구본부/환경공학	
		김보미	부서/전공	생명과학연구본부/독성학	
		남예원	부서/전공	생명과학연구본부/생명공학	
		황지섭	부서/전공	생명과학연구본부/극지과학	
		Hoang Thi Ngoc Trang	부서/전공	생명과학연구본부/극지과학	
			부서/전공		
연구기간 및 연구비					
년 도	연구기간	연구비 (단위: 원)			
		직접비	외부인건비	간접비	합계
2024	01.18 ~ 12.31	60,250	26,000	13,750	100,000
2025	01.01 ~ 04.30				
총연구기간		2024. 01. 18 - 2025. 04. 30 (16 개월)			
당해연도연구기간		2024. 01. 18 - 2025. 04. 30 (16 개월)			
참여기업(해당시)	기업명	연구비(현금/현물)	기타		
국제공동연구(해당시)	상대국연구기관수	상대국연구개발비	상대국연구책임자수		
본 보고서는 관계 규정과 지침을 준수하여 수행된 연구개발 과제의 결과를 바탕으로 작성되었으며, 아래와 같이 제출합니다. 2025년 05월 12일 연구책임자 : 도 학 원 주관연구기관장 : 신 형 철 (직인) LG 전자 귀하					

<한글 요약문>

연구목표	극지 생태계는 환경오염 물질에 가장 민감하게 반응하게 지역으로 인간의 활동으로 다양한 환경 오염 물질이 배출되고 있음. 이러한 환경 오염물질로 극지 생태계의 환경 불균형이 초래할 가능성이 높음. LG전자 HS 기능성 소재 사업실에서 개발 중인 유리를 베이스로 하는 <u>미네랄 세제, 항균 소재 및 수용성 유리를 이용하여 극지 환경에 적용 가능성을 모색</u>하고자 함.		
연구내용	청정지역이라고 알려진 극지역도 관광 및 인간 활동 증가 또는 장거리 오염물질 수송 (long range transport; LRT)에 의해 오염물질이 증가하고 있는 실정임. 특히, 상주 과학기지 주변에서 배출되는 다양한 생활 용수는 극지 생태계의 주요 오염원이며, 이러한 오염물질은 비생물학적인(abiotic factors)에 민감하게 반응하는 극지 생물종에게 치명적으로 작용할 가능성이 높음. 본 연구에서는 LG전자 HS 기능성 소재 사업실에서 개발한 기능성 소재를 이용한 오염물질의 배출을 저감 그리고 활용 가능성에 중점을 두고 아래와 같은 연구를 진행할 예정임. <미네랄 세제> 미네랄 세제는 기존의 일반세제를 대체하여 반복 사용할 수 있는 기능성 제품으로 일반 세제의 주요 구성 성분인 계면활성제 및 탄산염의 사용을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 예상됨. 사전 조사로 <u>생태계 변화나 위험 상황을 모니터링 할 수 있는 오염 물질에 대한 지표종을 조사</u>하고 실제로 이러한 <u>지표종을 대상으로 일반 세제 혹은 미네랄 세제의 영향 평가</u>를 실시할 예정임. <항균 소재> 항균 소재는 병원균을 포함한 미생물의 집락형성(colonization)을 막는 물질임. 기능성 소재 사업실에서 개발한 항균 소재를 이용하여 <u>극지 미생물을 대상으로 항균 소재의 항균 활성 검증</u>을 실시할 예정이며, 결과를 바탕으로 <u>항균 소재를 극지 생물 실험실에 적용</u>할 예정임. <수용성 유리> 수용성 유리는 물에 녹으면 무기질 이온 상태로 변하는 소재로 생물에 필요한 영양 공급원으로 작용할 수 있을 것으로 보임. 수용성 유리의 극지 환경 적용 가능성에 대한 사전 조사로 <u>해수 성분분석</u>을 진행할 예정이며 수용성 유리의 독성/안전성 실험을 수행할 예정임. 또한, 환경 적용을 위해 수용성 유리가 물의 결정화에 주는 영향에 대해 연구할 예정임.		
기대효과 (응용분야 및 활용범위 포함)	- 극지 과학기지로부터의 생활 오염물질의 배출 저감 - 수용성 유리를 이용한 극지 유래 미생물 대량 배양 및 유용물질 대량 생산 플랫폼 구축 - LG전자 HS 기능성 소재의 다양한 활용 홍보 효과		
중심어	미네랄 세제	항균 소재	수용성 유리
	극지 미생물	환경오염	

<영문 SUMMARY>

Purpose	The discharge of various pollutants from human activities in the polar ecosystems poses a high potential for causing imbalances due to their high sensitivity to environmental contaminants. The purpose of the research is to address the <u>applicability of mineral detergents, antibacterial materials, and soluble glass being developed by LG Electronics' HS Functional Materials Business Division in the polar environment.</u>		
Contents	The polar regions, which are considered untouched areas, are facing a rise in pollution levels as a result of tourism, human activity, and the long-distance transportation of pollutants. In particular, the discharge of domestic water around polar research stations serves as a significant contributor to contamination in polar ecosystems. These pollutants pose a grave threat to organisms in these regions that are sensitive to abiotic factors. This research aims to reduce pollutant emissions and investigate the feasibility of using functional materials developed by LG Electronics' HS Functional Materials Business Division. <Mineral Detergent> Instead of traditional detergents, the mineral detergent is a functional product designed for repeated use. It's expected to reduce the use of surfactants and carbonates, which are the main components of conventional detergents. The initial investigation involves studying <u>indicator species that can monitor ecosystem changes or hazardous situations caused by pollutants</u>. Afterward, an assessment will be conducted to <u>compare the effects of conventional detergents and mineral detergents on these indicator species</u>. <Antibacterial Material> Microbial clusters, including pathogenic bacteria, can be prevented by using antibacterial materials. The Functional Materials Business Division has developed materials with <u>antibacterial properties that will be tested on polar microorganisms</u>. After analyzing the results, <u>the possibility of using antibacterial materials in polar biology laboratories will be explored</u>. <Soluble Glass> The soluble glass can transform into inorganic ions when it dissolves in water, potentially providing nutrients for organisms. To test its <u>applicability in polar environments</u>, a preliminary study will be conducted analyzing seawater components. Furthermore, experiments will be conducted to ensure its <u>safety and understand the impact on water crystallization for environmental adaptation</u>.		
Expected Contribution (응용분야 및 활용범위 포함)	- Reducing emissions of domestic pollutants from polar research stations - Establishing a growth condition and a mass production platform for polar-derived valuables using soluble glass - Promoting diverse applications of the functional materials		
Keywords	Mineral Detergent	Antibacterial Material	Soluble Glass
	Polar Microorganism	Environmental Pollutant	

<목 차>

<제출문>	2
<보고서 초록>	3
<한글 요약문>	4
<영문 SUMMARY>	5
<목 차>	6
1. 연구의 배경	8
가. 극지활동에 따른 환경 오염물질 배출 증가	8
나. 극지 실험실에서 멸균을 위한 다양한 화학물질 사용	8
다. 극지 생물자원의 높은 부가가치 및 다양한 의학적 유용물질	8
라. LG전자 HS 기능성 소재 개발 및 높은 활용 가능성	9
2. 연구 필요성	10
가. 극지 지역 환경 오염 물질에 대한 환경규제 강화 및 배출 제한과 감축 방안 필요10	
나. 유용물질 생산을 위한 최적화된 극지 미생물 배양 시스템 구축 필요 ..	10
3. 연구 목표 및 달성도	11
가. 연구 목표	11
4. 연구 상세 내용	13
<세부 1. 미네랄 세제 영향>	13
4-1-1. 미네랄 세제(Mineral wash)가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (단일 종)	13
4-1-2. 미네랄 세제(Mineral wash)가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (극지 미생물)	23
4-1-3. 미네랄 세제(Mineral wash)가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (마이크 로바이옴 연구)	26
4-1-4. 미네랄 세제(Mineral wash)의 독성 /안정성 테스트	36
<세부 1. 동결 시 나타나는 미네랄 세제(Mineral wash)의 물성 변화 연구> ..	40
4-1-5 동결 시 나타나는 미네랄 세제(Mineral wash)의 물성 변화 관찰	40
<세부 2. 극지 미생물을 대상으로 하는 기능성 소재의 항균 활성 측정>	44
4-2-1 LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증 I (세균 생장에 LG 항생물질이 미치는 영향)	44
4-2-2 LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증 II (세균의 biofilm 형성에 LG 항생물 질이 미치는 영향)	52
<세부 3. 남극 해수 성분 분석>	54
4-3-1 세종과학기지 및 킹조지섬 주변의 남극 해수 성분분석	54

<세부 3. 수용성 유리의 독성/안전성 테스트>	58
4-3-2 수용성 유리 마린 글래스가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (극지 미세조류 단일 종)	58
4-3-3 수용성 유리 마린 글래스가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (극지 해양미생물 전체)	62
4-3-4. 수용성 유리의 독성/ 안전성 테스트 (얼음 미세구조 영향 테스트) .	74
5. 연구 결과 요약	80
6. 기타 활동 사항	82
7. 목표 달성도	84
가. 연구개발 목표 / 내용	84
나. 월 단위 추진계획	84
8. 연구개발의 우수성	87
9. 연구비 집행실적	87
10. 연구인원의 구성	88
11. 기타 조건	88
12. 참고문헌	88



1. 연구의 배경

가. 극지활동에 따른 환경 오염물질 배출 증가

- 극지 생태계는 환경오염 물질에 가장 민감하게 반응하게 지역으로 인간의 활동으로 극지 생태계의 환경 불균형이 초래되고 있음. 남극의 세종 과학기지 그리고 장보고 과학 기지는 1년 내내 연구원 및 월동 대원이 생활하는 상주기지로써 생활용수가 많이 배출되어 주변의 생태계에 영향을 주는 상황임. 실제로 남극 세종과학기지 주변의 생물에서 높은 농도의 미세플라스틱이 발견됨 (그림 1, 2) (Kim *et al.*, 2023).
- 인간 활동으로 남극 대륙의 수직을 조사한 결과 담수 및 해수에서 신흥 우려오염물질 Contaminants of emerging concern (CECs): citalopram, clarithromycin, nicotine, venlafaxine, hydrochlorothiazide 이 검출됨(그림 3). 이러한 결과는 극지 연구 활동 동안 지속적으로 환경오염 물질이 극지 환경으로 유출되고 있다는 증거임.

나. 극지 실험실에서 멸균을 위한 다양한 화학물질 사용

- 세종과학기지 및 장보고과학기에는 생물 실험을 위한 WetLab이 구성되어 있으며 여러 생물실험을 하기 전 환경 표면의 오염을 줄이기 위하여 에탄올 등 소독제를 이용하여 소독을 매번 실시. 하지만, 이러한 소독제는 세균의 아포에는 작용하지 못하며 지속적인 소독제의 사용은 연구원의 건강에 해로울 뿐만 아니라 환경에도 부정적인 영향을 줌

다. 극지 생물자원의 높은 부가가치 및 다양한 의학적 유용물질

- 극지 생물은 강렬한 자외선, 극심한 추위, 강풍 등 극지의 혹독한 환경 조건 생존을 이어가고 있음. 극지생물은 이러한 극한의 조건에 적응 및 생존하기 위해 독특하고 다양한 2차 대사산물을 생산함. 이러한 대사산물은 항생제, 항암제, 항노화제 등 다양한 의약적으로 유용한 물질로 개발될 수 있음. 특히,

미세조류는 바이오 디젤 생산을 위한 잠재적인 생명자원임. 북극 녹조류인 *Chlorella* sp.는 북극 해빙에서 분리되었으며 4~32° C의 넓은 온도 범위에서 더 빠른 성장을 보임. 질소 결핍 조건에서 높은 수준의 총 지방산을 축적하여 바이오디젤 생산을 위한 유망한 후보를 발견함 (그림 4) (Ahn *et al.*, 2012).

라. LG전자 HS 기능성 소재 개발 및 높은 활용 가능성

- LG전자 HS 기능성 소재 사업실에서는 유리를 베이스로 하는 세제 개발하여 계면활성제의 행굼시 물 사용을 최소화하는 세제를 개발 중에 있음. 또한, 유리 첨가를 통해 항균 활성이 증가된 소재를 개발 중에 있음. LG전자 HS 기능성소재 사업실에서 개발 중인 미네랄 세제, 항균 활성 소재 및 수용성 유리에 대한 극지 현장 적용 가능성이 높음.



2. 연구 필요성

가. 극지 지역 환경 오염 물질에 대한 환경규제 강화 및 배출 제한과 감축 방안 필요

- 기후 변화와 함께 극지의 환경 오염 문제는 사회적으로 큰 이슈임. 특히 북극이사회 워킹 그룹 중 AMAP(Arctic Monitoring and Assessment Program) 및 ACAP (Arctic Contaminants Action Program)는 북극 환경오염 관리 및 대응, 배출 제한과 감축 방안 마련에 대한 규제를 강화하고 있기 때문에 극지연구소에서도 과학기지 운영 및 과학 연구 활동을 하는 동안에 이러한 오염물질 배출 최소화에 대한 압박을 받고 있기 때문에 새로운 형태의 친환경 신소재에 대한 개발이 시급한 상황임.

나. 유용물질 생산을 위한 최적화된 극지 미생물 배양 시스템 구축 필요

- 극지에는 알려지지 않은 많은 생물종이 존재함. 특히, 극지미생물이 만들어내는 다양한 2차 대사산물은 의학적으로 유용하게 사용될 것으로 예상됨 (그림 5). 하지만 극지방의 독특한 abiotic factors에 적응된 생물종은 실험실에서 배양이 어려운 실정임. 그러므로 유용물질에 대한 생물학적 기능 및 구조를 해석하기 위해 극지 미생물에 특화된 배양 시스템의 구축이 시급한 상황임.

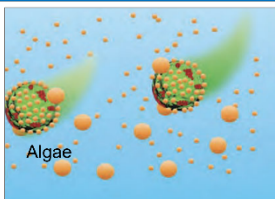
환경규제 강화 및 오염물질 배출 제한과 감축 방안 필요



- 기후 변화와 함께 극지의 환경 오염 문제는 사회적으로 큰 이슈
- 남 북극 환경오염 관리 및 대응, 배출 제한과 감축 방안 마련에 대한 규제를 강화

극지에서 이용 가능한
친환경 신소재에 대한 개발
시급

극지 미생물 배양 시스템 구축 필요



- 극지미생물이 만들어내는 다양한 2차 대사산물은 산업, 의학적으로 유용하게 이용
- 유용물질 생산을 위한 극지 미생물의 배양 최적화 필요

극지 미생물을 위한 배양
최적화 시스템 구축 필요

3. 연구 목표 및 달성도

가. 연구 목표

- ▶ 본 과제는 LG전자에서 개발한 친환경 기능성 소재인 미네랄 세제(Mineral wash), 항균 활성 소재, 수용성 유리를 활용하여, 이들 소재의 제품 기능을 확인하고 극지 환경에서도 적용 가능성을 평가하는 것을 목표로 함.

성과목표	성과지표	목표치	평가기준
LG전자 기능성 세제의 극지 적용 가능성 검증	극지 생물/미생물 지표종 검색 및 미네랄 세제의 독성 실험 결과	1건 이상	결과 보고서 제출
LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증	극지 생물/미생물을 이용한 항균활성 실험 결과	1건 이상	결과 보고서 제출
LG전자에 개발한 기능성 수용성 유리가 극지 바다 등 환경에 미치는 영향 연구	극지 해양 성분 기초 문헌 조사 및 성분 조사	1건 이상	결과 보고서 제출

<연구 계획 요약>

연구개발 목표	연구수행방법 (이론적 실험적 접근방법)
미네랄 세제가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구	- 단일 미세조류 종을 이용한 미네랄 세제(Mineral wash)의 독성 평가 - 일반 세제와의 독성 비교 분석
동결 시 나타나는 미네랄 세제의 변화	- 미네랄 세제(Mineral wash)의 극지 해양 환경 유입 시 나타날 수 있는 미네랄 세제 변화 연구 - 다양한 동결 조건에 따른 물질 변화 연구
극지 미생물을 대상으로 하는 기능성	- 극지에서 서식하는 미생물 선정 및 배양 조건 확립 - MIC 및 MBC 방법을 이용한 기능성 소재의 항균 활성

소재의 항균 활성 측정	정도 측정 - 반복 실험을 통한 통계적 유의성 검증
㉠ 기능성 소재를 다양한 물건 형태로 만들어 극지 과학기지 실험실 및 생활관에 적용	- LG항균 소재의 극지 세종과학기지 적용 - 항균 필름, 항균 매트, 항균 손잡이 적용 - LG가전 제품 극지 과학기지 적용 및 테스트
㉡ 납극 해수 성분 분석	- 납극 근거리 및 원거리 해수 채수 - 납극 해수 성분 조사. 음이온 양이온 성분조사 - 성분조사를 통한 극지 맞춤형 수용성 유리 제작의 기초 자료 제공
㉢ 수용성 유리의 독성 테스트	- 극지 요각류(Tigriopus kingsejongensis)를 대상으로 미네랄 세제의 독성 평가 예정 -미네랄 세제와 타사제품을 동일 농도로 처리한 후 극지 요각류의 항산화 관련 유전자의 발현양을 분석
㉣ 수용성 유리에 의한 물의 결정화 변화 연구	- 물을 수용성 유리와 함께 동결 - 동결 온도 및 동결 속도를 달리하여 얼음의 미세 구조 관찰 - 수용성 유리가 동결과정 및 얼음 미세구조의 변화에 영향을 주는지 현미경을 통한 관찰.

4. 연구 상세 내용

<세부 1. 미네랄 세제 영향>

4-1-1. 미네랄 세제(Mineral wash)가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (단일종)

▶ 목적: LG전자 HS 기능성 소재 사업실에서는 유리를 베이스로 하는 세제 개발하여 세탁 시 계면활성제 사용과 행구면 시 물 사용을 최소화하는 세제를 개발 중임. 이 LG전자 미네랄 세제의 극지 과학기지에서 사용과 관련하여 세제 효용성을 알아보기 위한 기초 실험으로 극지 미생물에 대한 영향 평가를 실시하는 게 목적임.

▶ 방법:

1. 기초 배양을 실시하여 세포 배양에 필요한 온도 및 조도 확인
2. 미세조류의 Chlorophyll a을 바탕으로 생물량 측정 (430nm (blue) and 662nm (red) wavelength)
3. 배양 시간에 따른 생물량 증감 측정
4. 미네랄 세제 (Mineral wash) 농도 별 조류 생물량을 측정하여 미네랄 세제가 조류에 미치는 영향을 날짜별로 측정
5. 일반세제를 대조군으로 사용하여 생물량 증감 측정

○ 담수 미세조류 (KSF0090 and KSF0100)

- 온도: 4° C
- 배지: Bold Modified Basal Freshwater Nutrient Solution
(BBM)

○ 해수 미세조류 (KSM0088 and KSM0102)

- 온도: 4° C

- 배지: Guillard's (F/2) Marine Water Enrichment Solution

표 1. 실험에 사용한 미세조류 및 세제 정보

종명	채집정보	Note	Annotation
<i>Chloromonas deceptionensis</i>	Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica (62° 58' 36.50" S, 60° 39' 57.50" W; Jan 24, 2014)	담수 미세조류	KSF0090
<i>Micractinium simplicissimum</i>	Nelson Island, South Shetland Islands, Antarctica (62° 18' 17.53" S, 59° 11' 55.77" W; Jan 19, 2014)	담수 미세조류	KSF0100

극지연구소

- 미네랄 세제 파우더 (mineral wash) ~ 500ppm
- 유한젠 (유한양행) 권장 사용량 10g/40L,
- 브라이트 (무궁화) 권장 사용량 1g/1L
- 비트 Ex Clean (라이온 코리아)
- 테크 3 in 1 (LG생활건강) 권장 사용량 1g/1L







Mineral wash

▶ 결과: 극지미생물 <*Chloromonas deceptionensis* KSF0090>

- *Chloromonas deceptionensis* KSF0090를 20일간의 배양 후 실험 결과는 실험에 사용된 모든 세제가 1 mg/mL와 같은 낮은 농도부터 해당 미세조류 균주의 성장에 부정적인 영향을 미쳤음을 나타냈으며, 그 정도는 세제의 종류에 따라 달랐음.
- Mineral wash가 0.5-2 mg/mL인 농도에서는 20일 후 클로로필 수치가 대조군보다 약 6배 낮은 1.0-1.4 µg/mL 수준이었고, 이러한 클로로필의 함량은 시간이

지나도 거의 같은 양이 유지되었음. 더 높은 농도(5-10 mg/mL)에서는 10일까지는 같은 클로로필 수치를 유지하다가 10일 이후부터는 양이 줄어들어 20일이 되었을 때 0.01-0.06 $\mu\text{g/mL}$ 수준에 그쳤음. 이는 Mineral wash가 낮은 농도에서도 미세조류의 성장을 억제할 수 있음을 의미함.

- BIT의 경우, 가장 낮은 실험 농도인 0.5 mg/mL에서도 클로로필이 대조군 대비 3.3배 낮게 감소하는 현상이 나타남(20일 기준 3.3 $\mu\text{g/mL}$ vs. 10.8 $\mu\text{g/mL}$). 1 mg/mL부터 10 mg/mL까지의 농도에서는 10일 이후 클로로필 수치가 급격히 감소하여 약 1.0 $\mu\text{g/mL}$ 수준으로 떨어졌음. 농도가 2 mg/mL 이상부터는 시간이 지남에 따라 미세조류의 성장을 억제하는 것으로 나타남.
- TECH가 포함된 배지에서는 0.5-1 mg/mL 농도에서 3일 차에 클로로필이 약간 증가했으나, 10일 이후에는 모든 실험 농도(0.5-10 mg/mL)에서 클로로필 수치가 크게 감소하였고, 거의 검출되지 않을 정도로 줄어들어 미세조류의 성장이 완전히 억제되었음을 보여주었음.

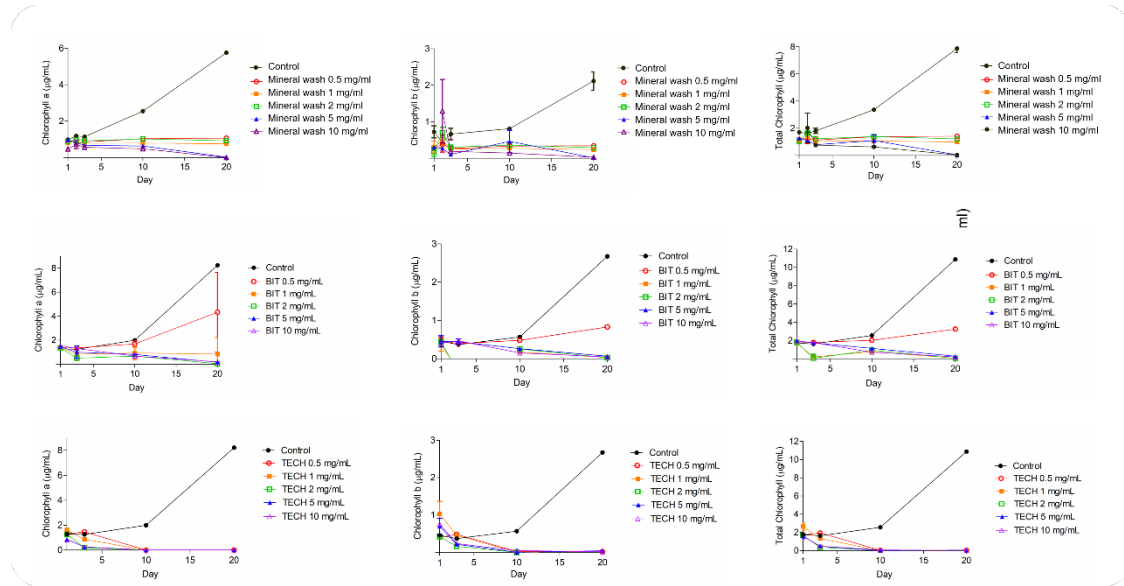


Figure 1. Comparative effects of detergents on chlorophyll-based growth of polar microalga KSF0090. Detergent solutions at concentrations of 0.5, 1, 2, 5, and 10 mg/mL were individually added to separate T-flasks containing BBM medium and microalgae. The cultures were incubated at 4 °C under continuous light. Samples were collected on days 1, 3, 10, and 20. Chlorophyll was extracted using DMF, and absorbance was measured at specific 664.5 nm, 647 nm, and 750 nm wavelengths using a microplate reader. The data were analyzed using equation (Catarina Osório, 2020) and visualized with Prism software. Each measurement was performed in triplicate. (A) Chlorophyll a concentration (µg/mL), (B) Chlorophyll b concentration (µg/mL), (C) Total chlorophyll concentration (µg/mL)

- 10일차 관찰(그림 2A): Mineral wash는 여러 세포에서 형태 변화, 색소 손실, 또는 초기 용해 징후를 보여 중간 정도의 세포 스트레스나 용해가 관찰되었음. BIT 세제는 미세한 손상을 유발했으며, 일부 세포가 약간 변형되었고 배지가 더 탁해져 세제에서 용출된 물질의 영향을 받은 것으로 보임. TECH 세제는 가장 심각한 손상을 나타냈고, 많은 세포가 색을 잃거나 변형되거나 이미 용해된 상태였음.

- 20일차 관찰(그림 2B): 대조군은 여전히 세포 분열이 활발했으나, 세제 처리군에서는 모두 활발한 분열이 관찰되지 않았음. BIT와 Mineral wash 처리군에서는 세포 손상이 심해지고 세포 잔해가 증가하여 점진적인 손상이 확인되었음. TECH는 거의 모든 세포가 파괴되어 온전한 세포가 거의 보이지 않았으며, 시간이 지남에 따라 미세조류에 미치는 높은 것으로 판단됨.
- 5 mg/mL 농도의 모든 세제 처리는 세포 형태에 뚜렷한 영향을 미쳤음. BIT와 Mineral wash 처리는 세포 손상이 더 심각했으며, 세포 잔해가 증가하고 세포 구조의 뚜렷한 변화를 보여 세포 무결성에 점진적인 영향을 미쳤음을 알 수 있음. TECH 세제의 경우 가장 두드러진 손상이 관찰되었으며, 많은 세포가 변형되고 색소가 손실되며 세포 용해의 징후를 보였음. 결론적으로, 5 mg/mL 세제에 장기간 노출되면 세제 종류와 관계없이 미세조류 집단이 전반적으로 크게 손상되어 광범위한 세포 사멸이 유발됨을 알 수 있음 (그림 2 그리고 3).

극지연구소

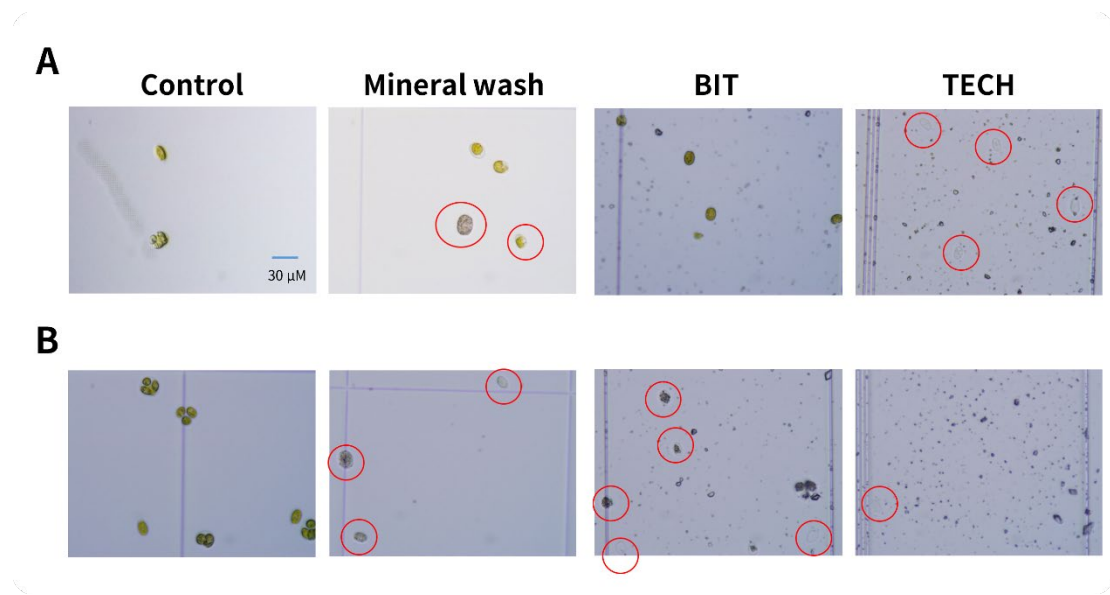


Figure 2. Microscopic images of microalgae. Microscopic view of microalgae cultured with 5 mg/mL detergent. The Control sample was maintained without any treatment. A 10 μ L aliquot of microalgal culture (collected from T-flasks) was mounted on a DHC-N01 C-Chip disposable hemacytometer for microscopic observation using an Olympus BX53 microscope with an SLMPlan N 50x/0.35 objective. Images were acquired using an Olympus DP71 digital camera and processed with DP Controller software. The red circle indicates non-viable or lysed cells. (A) Microalgae after 10 days of cultivation, (B) Microalgae after 20 days of cultivation.

Polar microalga KSF0090

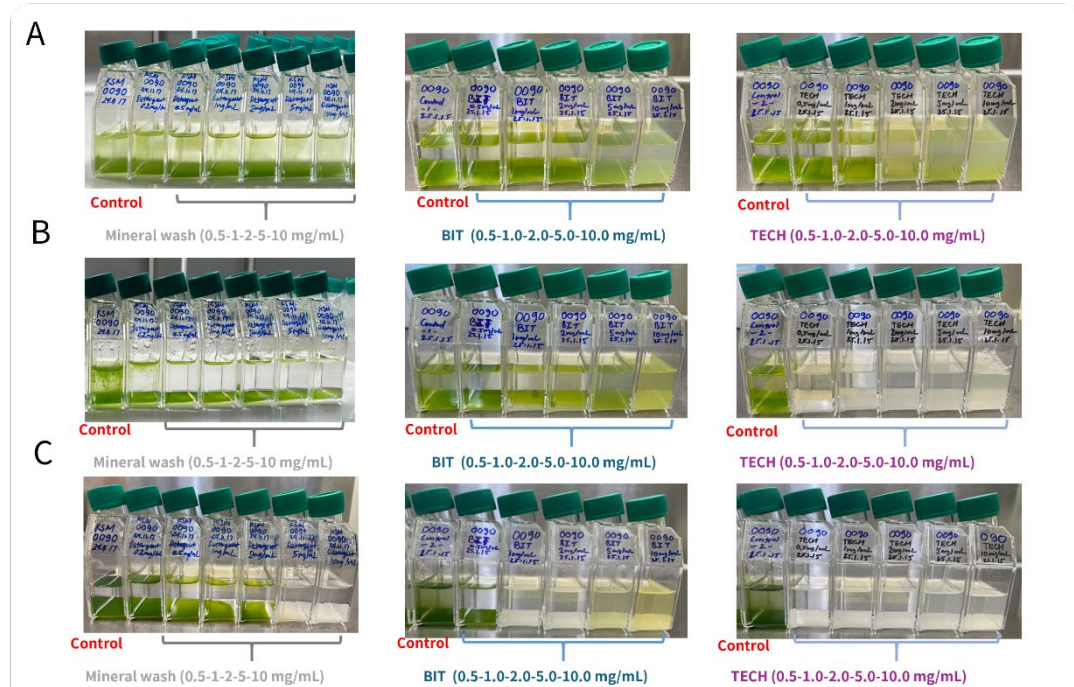


Figure 3. Microalga KSF0090 cultured in T-flasks with different detergents at various concentrations from 1 to 20 days. Visual images of microalga under the effect of detergents on day 3, day 10, and day 20. (A) Culture image of microalga on day 3 of cultivation. (B) Culture image of microalga on day 10 of cultivation. (C) Culture image of microalga on day 20 of cultivation.

<극지 미세조류 *Micractinium simplicissimum* KSF0100>

- Mineral wash, BIT, TECH는 모두 극지 미세조류 *Micractinium simplicissimum* KSF0100의 성장에 부정적인 영향을 미쳤으며, 농도에 따라 클로로필 축적이 크게 감소하는 양상을 보였음. Mineral wash A는 0.5 mg/mL 농도부터 클로로필 축적이 매우 제한적이었고, 1-2 mg/mL에서는 클로로필 함량이 절반 수준으로 감소했으며, 5 mg/mL 이상에서는 거의 검출되지 않았음. 이는 Mineral wash가 낮은 농도에서도 미세조류의 성장과 광합성 능력을 크게 억제함을 보여줌.
- BIT는 0.5-1 mg/mL에서도 대조군의 절반 수준인 3.3-3.6 $\mu\text{g/mL}$ 의 클로로필 수치를 보였으며, 2 mg/mL에서는 1.3 $\mu\text{g/mL}$ 로 감소해 약 1/6 수준으로 떨어졌음.

5-10 mg/mL에서는 클로로필이 거의 검출되지 않았음. TECH는 0.5-1 mg/mL에서 다소 높은 클로로필 수치를 보였으나(4.5-5.0 $\mu\text{g/mL}$), 2 mg/mL 이상에서는 3일차부터 20일차까지 급격한 감소가 나타나 최종적으로 클로로필이 거의 검출되지 않았음. 이로써 TECH 또한 고농도에서 미세조류 성장을 강하게 억제함을 확인할 수 있었음 (그림 4).

- TECH는 0.5-1 mg/mL 농도에서 20일차 기준 총 클로로필 함량이 4.5-5.0 $\mu\text{g/mL}$ 로 측정되었으며, 시간이 지남에 따라 소폭 증가하는 경향을 보였음. 이는 같은 날 기준 대조군(6.2 $\mu\text{g/mL}$)의 약 1.2배 수준으로, 저농도에서는 미세조류의 광합성 활성이 비교적 유지되었음을 시사함. 그러나 2-10 mg/mL의 고농도에서는 3일차부터 20일차까지 클로로필 함량이 급격히 감소하였고, 최종적으로는 거의 검출되지 않을 정도로 감소하였음. 이는 TECH가 고농도에서 극지성 미세조류의 성장과 광합성을 강하게 억제함을 나타내며, 그 독성이 시간에 따라 누적적으로 작용했음을 보여줌 (그림 4 그리고 5).

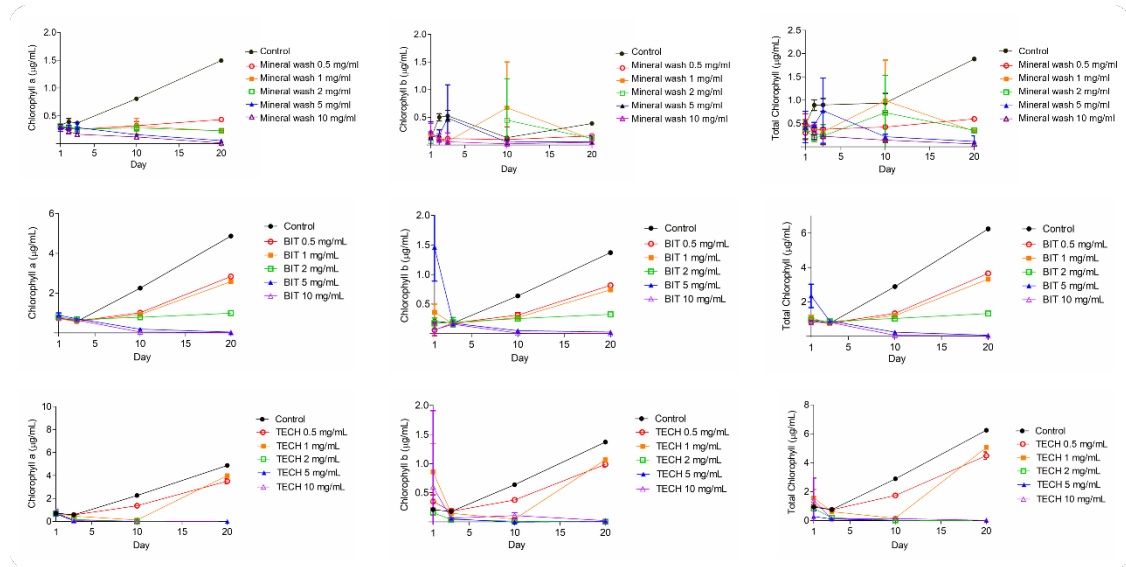


Figure 4. Effects of detergents on the chlorophyll-dependent growth of polar microalga KSF0100. Individual amounts of detergent at concentrations of 0.5, 1, 2, 5, and 10 mg/mL were added to separate T-flasks containing BBM medium and microalgae and cultured at 4 °C under light conditions. Samples were collected on days 1, 3, 10, and 20. Chlorophyll was extracted from the samples using DMF, and absorbance was measured at 664.5 nm, 647 nm, and 750 nm wavelengths using a microplate reader. The data were then analyzed using equation (Catarina Osório, 2020) and plotted using Prism software. Each sample was measured in triplicate. (A) Chlorophyll a concentration (µg/mL), (B) Chlorophyll b concentration (µg/mL), (C) Total chlorophyll concentration (µg/mL)

Polar microalga KSF0100



Figure 5. Microalgae strain KSF0100 was cultured in T-flasks with different detergents at various concentrations over 20 days. Visual observation of microalgae cultures under detergent exposure at three time points: day 3, day 10, and day 20. (A) Culture image on day 3 of cultivation, (B) Culture image on day 10 of cultivation, (C) Culture image on day 20 of cultivation.

4-1-2. 미네랄 세제(Mineral wash)가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (극지 미생물)

▶ 방법:

1. 근거리(세종 과학기지 주변)에서 해수 채수
2. PALL 4815 MicroFunnel™ Filter (0.45um)를 이용하여 미생물을 농축 (그림 6)
3. Mineral wash를 0 mg/ml, 0.1 mg/ml, 0.2 mg/ml, 0.5 mg/ml, 1mg/ml의 농도로 4 ℃로 정치 배양
4. 아세톤과 물을 9:1 비율로 혼합하여 준비
5. 미세조류의 Chlorophyll a을 바탕으로 생물량 측정 (647nm and 664nm wavelength)
6. Chlorophyll a ($\mu\text{g/mL}$)= $12.25 \times A_{664} - 2.55 \times A_{647}$ 공식을 이용하여 Chlorophyll a 측정
7. A_{600} 을 이용하여 박테리아 양 측정
3. 배양 시간에 따른 생물량 증감 측정
4. 미네랄 세제 농도 별 조류 생물량을 측정하여 미네랄 세제가 조류에 미치는 영향을 날짜별로 측정
5. 일반세제를 대조군으로 사용하여 생물량 증감 측정



Figure 6. Initial set-up for toxicity testing of microorganisms from the polar ocean.

▶ **결과:**

- 일반세제와 미네랄 세제(mineral wash) 농도에 따른 미세조류의 엽록소 a 농도 변화를 날짜별로 분석한 결과, 대조군(No chemical)은 1일차 0.4 $\mu\text{g/mL}$ 에서 시작해 5일차 0.3 $\mu\text{g/mL}$, 10일차 0.3 $\mu\text{g/mL}$ 로 유지되었으나, 미네랄 세제(mineral wash) 0.1 mg/mL 농도에서는 0일차 0.4 $\mu\text{g/mL}$ 에서 1일차 0.2 $\mu\text{g/mL}$ 로 감소, 2일차 부터는 약 0.3 $\mu\text{g/mL}$ 로 증가한 후, 5일차부터 서서히 감소하는 패턴을 보임. 이러한 패턴은 모든 농도에서 동일하게 보임 (그림 7).
- 일반 세제에서도 모든 농도에서 1일차 0.4 $\mu\text{g/mL}$, 5일차 0.25 $\mu\text{g/mL}$, 10일차 0.2 $\mu\text{g/mL}$ 로 점진적 감소, 0.2 mg/mL에서는 5일차 0.25 $\mu\text{g/mL}$, 10일차 0.2 $\mu\text{g/mL}$ 로 감소하였음.

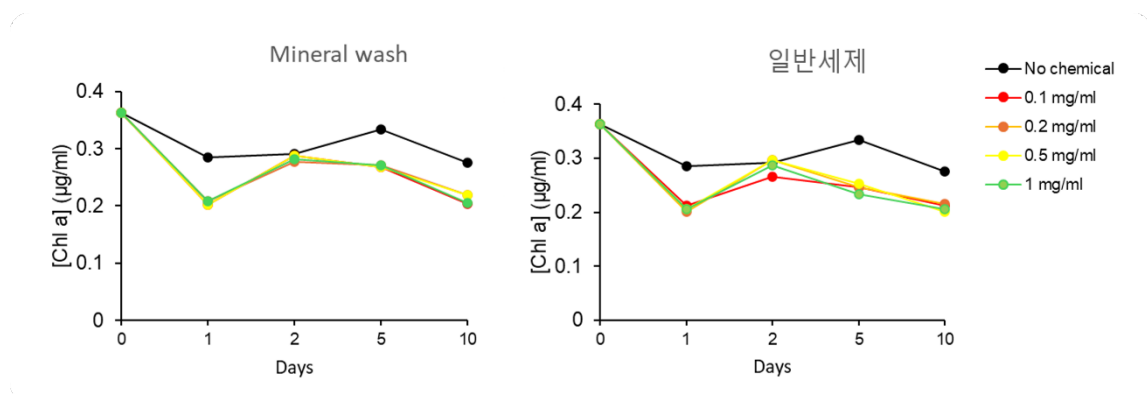


Figure 7. Time-course analysis of chlorophyll a concentration ([Chl a], $\mu\text{g/mL}$) in marine microalgae under different concentrations of mineral wash (left) and general detergent (right) over 10 days. The concentrations tested include 0 mg/mL (no chemical, black), 0.1 mg/mL (red), 0.2 mg/mL (orange), 0.5 mg/mL (yellow), and 1 mg/mL (green). Data points represent the chlorophyll a levels measured at 647 nm and 664 nm wavelengths, indicating the impact of detergents on microalgal biomass.

- 미네랄 세제(mineral wash)와 일반 세제를 대조군(No chemical)과 비교하여 해수의 박테리아 생물량(OD A600)을 날짜별로 분석한 결과, 대조군은 0일차

0.077에서 5일차 0.093, 10일차 0.080로 유지되었으나, 미네랄 세제 0.1 mg/mL 농도에서는 1일차 0.077에서 5일차 0.073, 10일차 0.065로 초기 생물량을 유지함.

- 하지만 일반세제의 경우 0.1 mg/mL 농도에서는 1일차 0.077에서 5일차 0.055, 10일차 0.048로 감소하였음. 0.2 mg/ml 그리고 0.5 mg/ml 농도에서도 비슷한 양상을 보임. 1 mg/ml 농도에서는 조금 성장이 증가하지만 여전히 10일차에는 0.059로 낮은 생물량을 보임 (그림 8).
- 미네랄 세제가 대조군 및 일반 세제에 비해 모든 농도에서 박테리아 생물량에 약한성장 억제 효과를 나타냄.

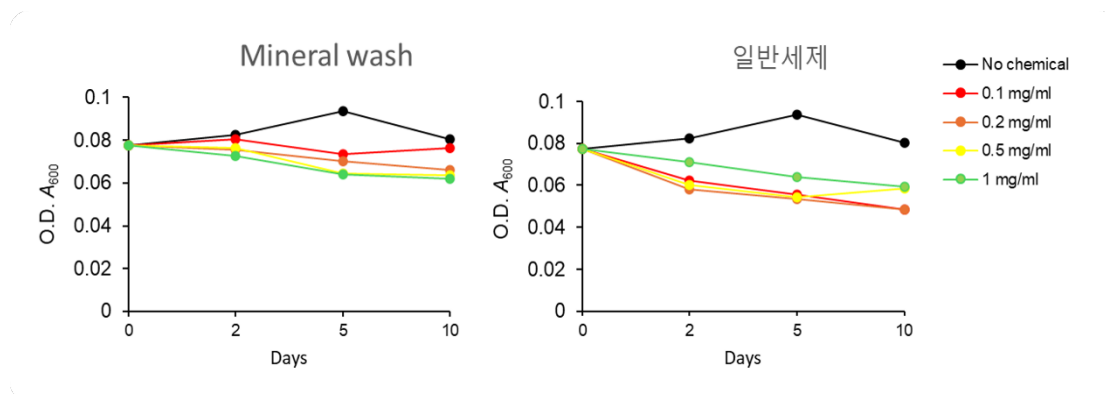


Figure 8. Time-course analysis of bacterial biomass (OD A_{600}) under different concentrations of mineral wash (left) and general detergent (right) over 10 days. The concentrations tested include 0 mg/mL (no chemical, black), 0.1 mg/mL (red), 0.2 mg/mL (orange), 0.5 mg/mL (yellow), and 1 mg/mL (green). Data points represent the optical density (OD) at 600 nm, indicating bacterial growth in response to detergent exposure.

4-1-3. 미네랄 세제(Mineral wash)가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (마이크로바이옴 연구)

▶ 방법:

1. 위 실험에서 샘플링한 생물을 이용하여 DNA 추출 (DNeasy PowerSoil Pro kit)
2. DNA를 이용하여 샘플 메타지노믹스 분석

박테리아용 primer

(16S V3-4)(5' - CCTACGGGNGGCWGCAG - 3')

(16S V3-4)(5' - GACTACHVGGGTATCTAATCC - 3')

미세조류용 primer.

TAReuk454FWD1 (5' -CCAGCA(G/C)C(C/T)GCGGTAATTCC- 3')

TAReukREV3 (5' -ACTTTCGTTCTTGAT(C/T)(A/G)A-3')

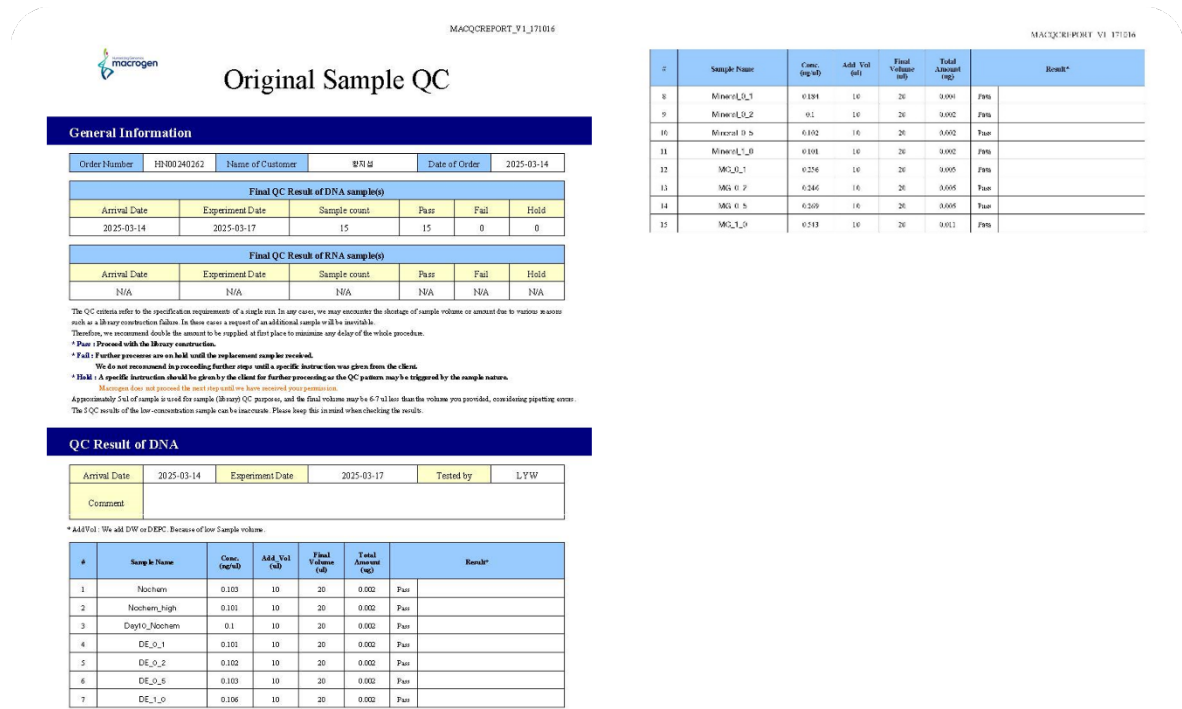
(Stoeck et al., 2010)

표 2. 마이크로 바이옴 연구에 사용한 시료 및 정보

시료 종류	수량	분석내용
남극 해양 미생물	15개	Meta Amplicon Seq & Anlaysis(16S)
남극 해양 미생물	15개	Meta Amplicon Seq & Anlaysis(18S)
번호	샘플이름	On tube
1	Day0, no chemical	Nochem
2	Day0, no chemical, high	Nochem, high
3	Day10 no chemical	Day10, Nochem
4	Detergent 0.1mg/ml	DE,0.1
5	Detergent 0.2mg/ml	DE,0.2

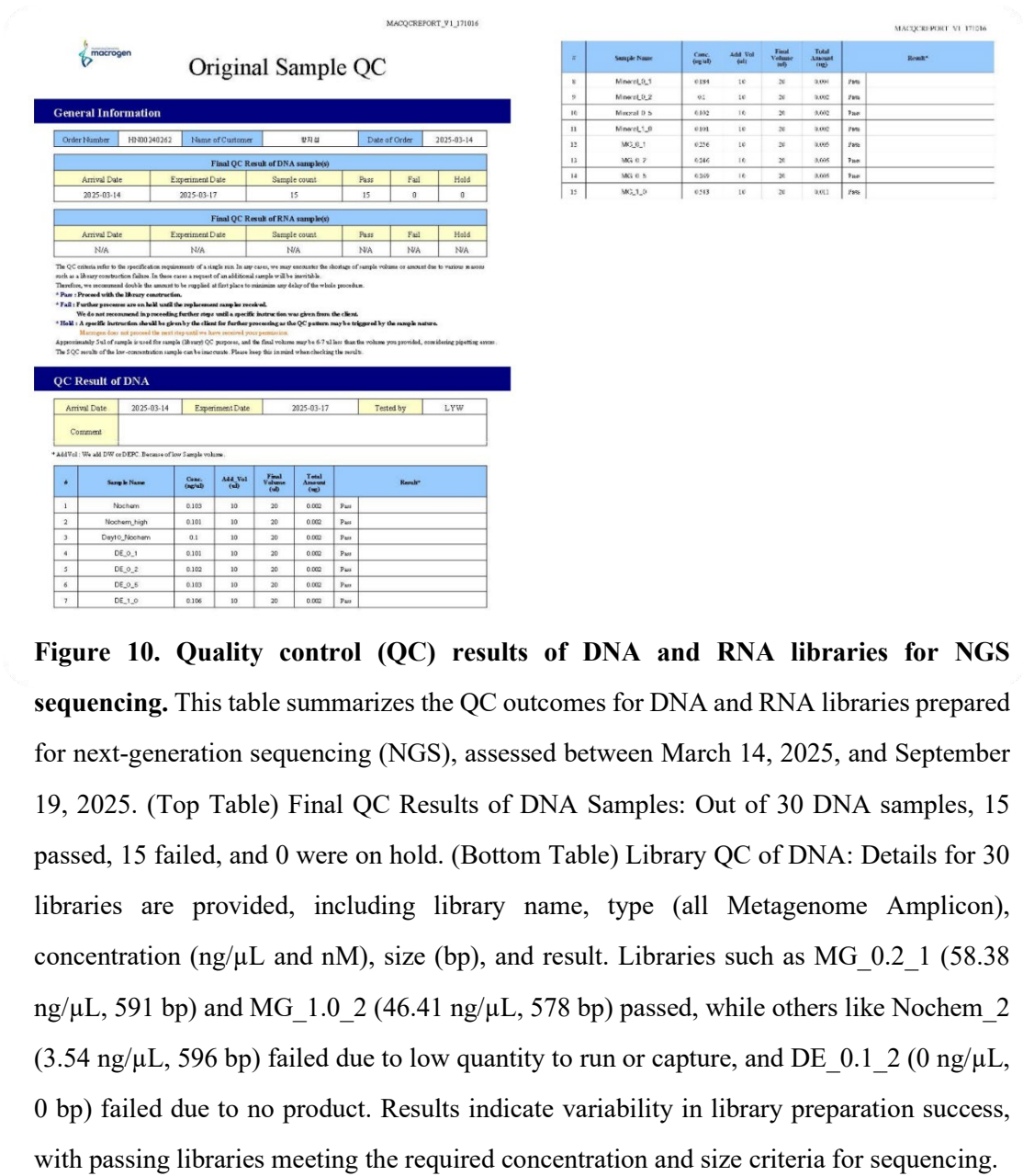
6	Detergent 0.5mg/ml	DE,0.5
7	Detergent 1mg/ml	DE,1.0
8	Mineral 0.1mg/ml	Mineral,0.1
9	Mineral 0.2mg/ml	Mineral,0.2
10	Mineral 0.5mg/ml	Mineral,0.5
11	Mineral 1mg/ml	Mineral,1.0
12	Marine Glass 0.1mg/ml	MG,0.1
13	Marine Glass 0.2mg/ml	MG,0.2
14	Marine Glass 0.5mg/ml	MG,0.5
15	Marine Glass 1mg/ml	Mineral,1.0





#	Sample Name	Conc. (ng/ul)	Add Vol (ul)	Final Volume (ul)	Total Amount (ng)	Result*
8	Mineral_0_1	0.134	10	20	0.004	Pass
9	Mineral_0_2	0.1	10	20	0.002	Pass
10	Mineral_0_5	0.102	10	20	0.002	Pass
11	Mineral_1_0	0.101	10	20	0.002	Pass
12	MG_0_1	0.256	10	20	0.005	Pass
13	MG_0_2	0.246	10	20	0.005	Pass
14	MG_0_5	0.209	10	20	0.005	Pass
15	MG_1_0	0.513	10	20	0.011	Pass

Figure 9. Quality control (QC) report for DNA samples from marine microalgae treated with mineral wash and general detergent, detailing order information (HN00240262, 2023-03-14), experiment date (2023-03-17), and QC results for 15 DNA samples (Mineral_0.1 to DE_1.0, Nochem, etc.), all passing with concentrations of 0.101–0.126 µg/µL, additional volumes of 10 µL, total volumes of 20 µL, and amounts of 0.002–0.005 µg, tested by LYW.



▶ 결과: (박테리아 균집 분석, 16S 분석)

- 추출한 DNA를 이용하여 NGS 분석 의뢰 (Macrogen)한 결과, sample Quality control (QC)에서도 모든 샘플이 통과되었으나 Library Quality control에서는 15개의 샘플만 통과함 (그림 4 그리고 5).

- 16S를 이용한 박테리아의 분석 결과, 남극 세종과학기지의 해수에는 주요 박테리아 문(Phylum)에서 *Cyanobacteriota*가 46.7%로 가장 우세한 문이고 *Pseudomonadota*가 37%로 두번째 군집을 지배함. *Bacteroidota* 약 10% 비교적 소량 존재하며 *Bacillota*는 약 3%를 차지함. 나머지 소수 문에는 *Verrucomicrobiota*, *Actinomycetota* 등이 포함됨.
- 어떤 물질도 넣지 않은 해수를 이용한 배양 시 10일이 지난 후에도 해수에 생존하는 박테리아의 차이는 크게 나타나지 않았음 (그림 6). 다만, *Bacillota* 비율이 16%로 크게 증가함.



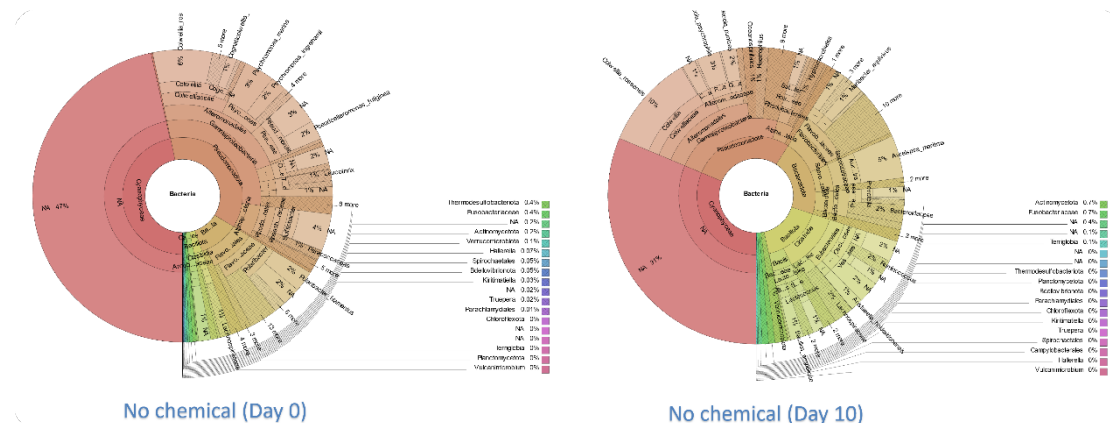


Figure 11. Comparative taxonomic distribution of bacterial communities under no chemical treatment at Day 0 and Day 10. Circular diagrams illustrate the relative abundance of bacterial taxa at the genus level in samples with no chemical exposure. (Left) Day 0: The bacterial community prior to incubation was dominated by *Collella* (47%), followed by *Pseudomonas* (8%) and *Bacillus* (5%). (Right) Day 10: After 10 days of incubation, the community shifts, with *Collella* decreasing to 37%, while *Pseudomonas* increases to 10%, and *Bacillus* remains at 5%. Other genera such as *Thermosulfobacteria* (2.4%) and *Actinomycetota* (0.7%) emerge or change in abundance over time. The "NA" category represents unclassified taxa, and "4 or more" indicates genera with less than 1% abundance grouped together. Percentages next to each genus reflect their relative abundance in the respective sample.

mg/mL 농도 그리고 0.5 mg/mL의 농도까지 균집의 다양성이 크게 변하지 않는 것으로 나타남 (그림 10). 이는 Mineral Wash를 0.5 mg/mL의 농도까지 높게 사용하더라도 극지 해양 박테리아의 균집에 영향이 최소로 나타날 것이라는 것을 의미함.

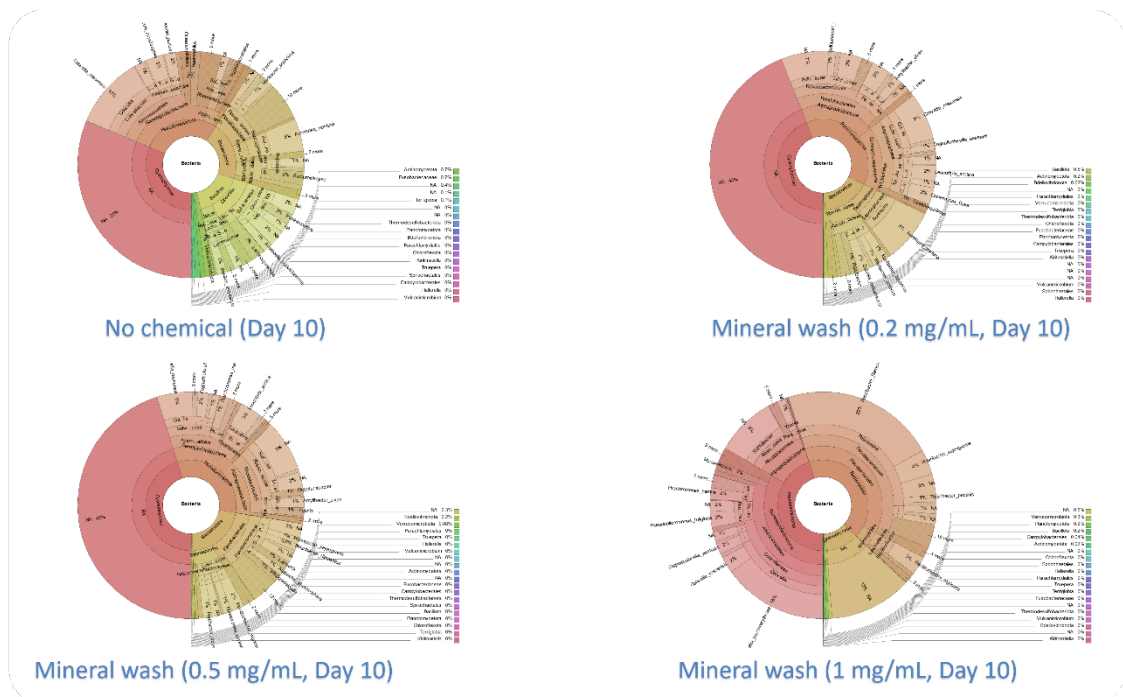


Figure 13. Taxonomic distribution of bacterial communities under varying conditions at Day 10. Circular diagrams illustrate the relative abundance of bacterial taxa at the genus level across four conditions at Day 10. (Top Left) No Chemical (Day 10) (Top Right) Mineral Wash (0.2 mg/mL, Day 10), (Bottom Left) Mineral Wash (0.5 mg/mL, Day 10), (Bottom Right) Mineral Wash (1 mg/mL, Day 10).

- 이러한 결과를 누적 막대 그래프로 나타내 보면, 아무것도 처리하지 않은 샘플의 경우 균집의 차이가 10일이 지나도록 많이 차이가 없음을 알 수 있음, 하지만, 일반세제의 경우 1 mg/mL의 농도에서 10일간 배양했을 경우 박테리아 균집의 차이가 확연히 달라짐을 알 수 있음. 하지만 mineral wash의 경우 0.5 mg/mL

농도에서 나타나는 군집은 화학물질을 넣지 않은 조건과 비슷한 분포를 보여주지만 1.0 mg/mL *Polaribacter* 종의 분포가 현저하게 늘어남 (그림 9.)

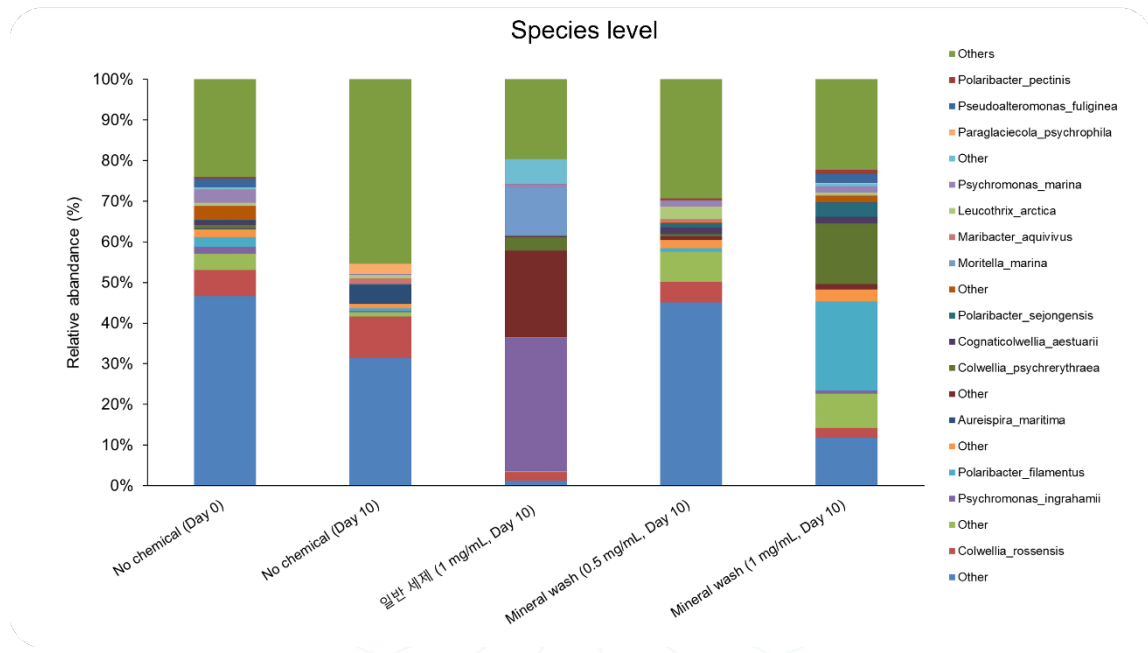


Figure 14. Species-level relative abundance of bacterial communities under different conditions at Day 0 and Day 10. Stacked bar charts display the relative abundance (%) of bacterial species across five conditions: No Chemical (Day 0), No Chemical (Day 10), General Detergent (1 mg/mL, Day 10), Mineral Wash (0.5 mg/mL, Day 10), and Mineral Wash (1 mg/mL, Day 10). Key species include *Colwellia_rossensis* (red), *Polaribacter_sejongensis* (dark blue), *Aureispira_maritima* (light blue), *Psychromonas_ingrahamii* (purple), and *Colwellia_psychrerythraea* (green), among others.

□ 결과: (18S 분석)

- 본 연구에서는 No Chemical (Day 0 및 Day 10), 일반 세제 (0.1 mg/mL, Day 10), Mineral Wash (0.1 mg/mL, Day 10) 조건에서 미세조류 군집의 종 수준 변화를 분석한 결과, No Chemical (Day 0)에서 *Pseudo-nitzschia_turgidula* (약 33%)와 *Thalassiosira_nordenskioeldii* (약 20%)가 우세했으나, Day 10에서는 *Fragilaria*

famelica (약 30%)가 우세종으로 바뀔.

- 일반세제와 Mineral wash를 비교 분석한 결과 군집의 큰 변화는 나타나지 않았음.

3 샘플 모두에서 *Fragilaria famelica* 종이 우점종으로 나타남. 2번째로 많이 차지하는 종은 *Thalassiosira nordenskioldii*임 (그림 10).

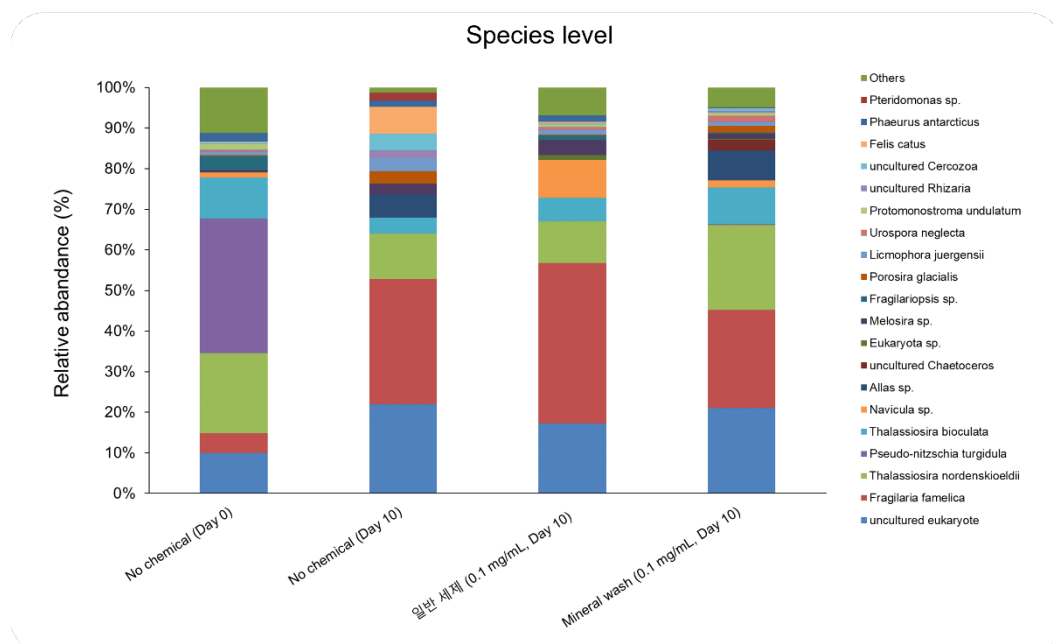


Figure 15. Species-level relative abundance of bacterial communities under different conditions at Day 0 and Day 10. Stacked bar charts display the relative abundance (%) of bacterial species across five conditions: No Chemical (Day 0), No Chemical (Day 10), General Detergent (0.1 mg/mL, Day 10), Mineral Wash (0.1 mg/mL, Day 10), and Mineral Wash (0.5 mg/mL, Day 10). Key species include *Fragilaria famelica* (red), *Thalassiosira nordenskioldii* (green), *Pseudo-nitzschia turgidula* (purple), *Navicula* sp. (orange), and *Allas* sp. (blue), among others.

4-1-4. 미네랄 세제(Mineral wash)의 독성 /안정성 테스트

▶ 목적:

요각류는 성적이형성을 가지며 실험실 내 배양이 용이하고 생식주기가 짧아 분자생물학 및 유전학 등의 다양한 분야에서 연구모델로써 활용됨. 남극 전역에 서식하는 *Tigriopus kingsejongensis*는 요각류가 갖는 연구모델로써의 장점을 모두 가지며 2017년 공개된 표준유전체 정보를 활용할 수 있어 환경위해성평가를 위한 지표종으로 활용 가능성이 높음

▶ 방법:

1. 남극 요각류 50마리를 500 mL 해수에 배양하여 각 실험군을 구성
2. 처리 시약은 각기 1 g/L의 stock solution으로 준비
3. 각 실험군 해수에 stock solution 500 μ L를 첨가하여 최종 농도가 1 mg/L가 되도록 처리
4. Control 군은 동일한 조건에서 처리 시약 없이 배양
5. 처리 후, 모든 실험군과 Control 군은 24시간 동안 노출. 노출이 완료된 후, 모든 개체를 회수하여 즉시 total RNA를 추출
6. RNA 추출은 TRIzol reagent와 ethanol 침전법을 이용하여 제조사 지침에 따라 수행
7. 추출한 RNA를 주형(template)으로 하여 RT-PCR (역전사 중합효소 연쇄반응)을 실시
8. RT-PCR을 통해 항산화 관련 유전자의 발현량을 측정
9. 결과 분석 시, 모든 유전자 발현량은 18s 유전자(housekeeping gene)을 기준으로 하여 상대적 발현량으로 분석

표 3. RT-PCR에 사용한 프라이머 정보 유전자의 기능

Gene	GenBank acc. no.	Primer sequences (5'–3')	
		Forwards	Reverse
Antioxidant genes			
<i>GST-Delta-E</i>	KX695143	CAA GGA AAC CTT GGA GAC GTT C	GCC AGT GGC CTC AAT GGA G
<i>GST-Mu3</i>	KX695144	GCT GAG TTT GTC CGC TTC CTC	GGG CGT GGCATTGATGATC
<i>GST-Zeta</i>	KX695145	CAT GAA GAT GGC ACG CGA TG	CGG CGT TGT AGA TTT GAG GGA C
<i>mGST1</i>	KX695146	GAT GCA TCT GAA CGA CAT CGA G	TGT AAG TCA TGG TGT GGC CAA G
<i>mGST3</i>	KX695147	AAT TGC GTC CAG CGA GCA C	TCC CAA GCC GTA GAC GAT G
<i>Catalase</i>	KX695148	CCC ACG AAC TAC TTT GCC GAG	AAT TGG CCA CTT TGG TCC TG
<i>MnSOD</i>	KX695149	AGA CCA TGC AAG AAA GGC TCT C	CAG ACG TCG ATG CCG AAA AG
<i>CuZnSOD</i>	KX695153	AAG AAC CAT GGC AAT CCC TTC	AGC TGT ATG AGC TTG TCC ATG
<i>GR</i>	KX695150	CAA AAC ACG AGC TCC AAG AAC AC	TCC TGG TCA AAC AAG CGA TGA G
<i>GPx</i>	KX695151	GAA CTG CGC AGG AAA TCA AGG	CGT GCT TCA GAT AAG TGA ACA AGG
Chaperone genes			
<i>Hsp10</i>	KX695152	CGT TGT TCG ACC GCG TG	AAT GGC GCC CGT ACC CAC
<i>Hsp20</i>	KX695139	CAA ATG GAG TCC GAT GCT CAC	TTA TTG TTG GTC GTG ACC TTC AG
<i>Hsp40</i>	KX695140	GTG TTC AAA CGC AAC GGC AC	AAC TTC ACC AGG GAT GGT CTG
<i>Hsp70</i>	KX695141	TAT CGA AAC TGC CGG TGG TG	AGA TGG TTG TCC TTG GTC ATG G
<i>Hsp90</i>	KX695142	CAG CTT TGC CGA CTA CGT GTC	TTC TTG CCG TCG AAC TCC TTG
Housekeeping gene			
<i>18S rRNA</i>	KX695154	CAC CGA ACC ACT GGC AAT G	AAA AGT CAG CTC GCA CGG AC

Gene	Function
GPX	과산화물(H ₂ O ₂ 등)을 글루타티온을 이용해 제거
GSTd	글루타티온과 독성물질 결합해 해독
GSTmu	위와 동일 (mu는 특정 isoform)
mGST1	세포막 부착형 GST, 해독 · 항산화
mGST3	위와 유사, 특정 조직에 발현
CAT	과산화수소(H ₂ O ₂)를 물과 산소로 분해

▶ 결과:

- 본 연구에서는 동일 농도(1mg/L)로 처리한 세제 조건(No Chemical, Mineral Wash, 일반 세제 (BIT, TECH, 유한젠, 브라이트(무공화))에서 항산화 유전자 발현 분석하였음 (그림 15).
- Mineral Wash를 제외한 비트, 테크 등의 세제 처리군에서는 대부분 항산화 유전자의 발현이 control 대비 감소하는 양상을 보임.

- mGST1: Mineral Wash 처리군에서 약 2.5배 수준으로 가장 강한 발현 증가가 관찰됨. 다른 처리군 대비 유의미한 발현 상승이 있는 것으로 보임.
- CAT & mGST3: 역시 Mineral Wash 처리군에서 상대적으로 높은 발현을 보여, Mineral Wash가 전반적인 항산화 반응을 유도했을 가능성 있음.
- GPX: 브라이트(무궁화) 처리군에서 발현이 가장 높았고, 그 외에는 큰 차이가 없거나 오히려 감소함 (그림 15).
- GSTd, GSTmu: 비트, 테크, 유한젠 처리군에서 전반적인 발현 억제 양상이 관찰됨 (그림 15).
- Mineral Wash 와 브라이트(무궁화)를 제외한 비트, 테크, 유한젠 처리군에서 GPX, GSTd, GSTmu, mGST1, mGST3, 그리고 CAT의 발현이 control 대비 감소했음. 특히, mGST1은 Mineral Wash 처리군에서 약 2.5배 발현 증가를 보였고, CAT과 mGST3도 Mineral Wash에서 높은 발현을 나타냈으나, GPX는 브라이트(무궁화) 처리군에서만 발현이 높았고, GSTd와 GSTmu는 비트, 테크, 유한젠 처리군에서 발현 억제가 관찰되었음. 이는 Mineral Wash가 비교적 낮은 독성으로 항산화 반응을 유도한 반면, 다른 세제는 높은 독성으로 세포 손상을 유발해 항산화 시스템이 억제되었을 가능성을 시사함.
- 이 결과는 일반적으로 독성 물질 노출 시 활성산소종(ROS) 증가로 항산화 유전자 발현이 증가하는 경향과 달리, 비트, 테크, 유한젠 처리군에서 발현 감소가 두드러진 점에서 주목할 만하다. 이는 해당 세제들이 생물체가 극복하기 어려운 수준의 세포 손상을 유발해 항산화 시스템이 기능하지 못하거나, 생존 유전자 전사 우선순위로 인해 항산화 유전자 전사가 억제되었을 가능성을 나타냄. 반면, Mineral Wash 처리군은 control과 유사하거나 발현 증가를 보이며, 비교적 낮은 독성으로 인해 항산화 반응이 활성화되었을 것으로 보임.

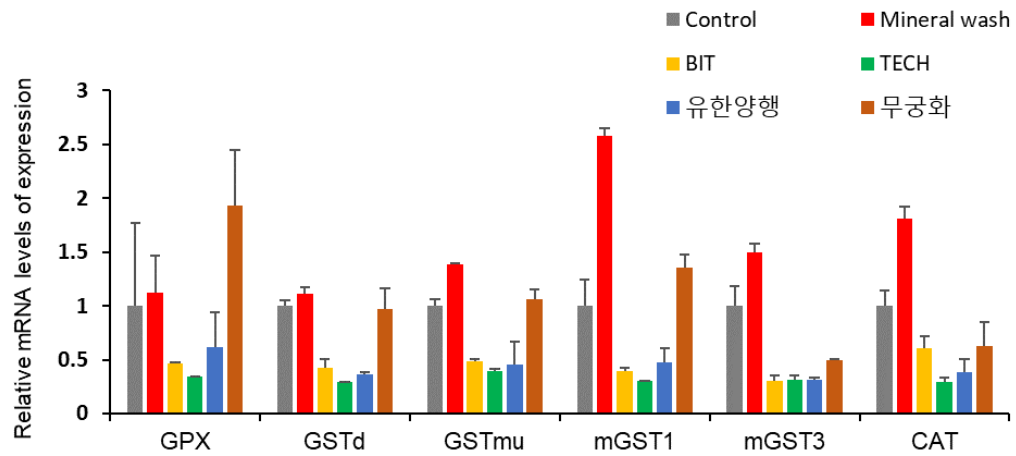


Figure 16. Relative mRNA levels of expression (mean $\pm$ 1 SEM, n = 4) of antioxidant-related genes (GPX, GSTd, GSTmu, mGST1, mGST3, CAT) in polar *Tigriopus kingsejongensis* exposed to different detergent treatments: Control (gray), BIT (yellow), TECH (green), 유한양행 (blue), Mineral wash (red), and 브라이트(무공화) (brown). Data represent expression levels normalized to the control group. Bars with different heights indicate variations in gene response under detergent-induced stress conditions.

<세부 1. 동결 시 나타나는 미네랄 세제(Mineral wash)의 물성 변화 연구>

4-1-5 동결 시 나타나는 미네랄 세제(Mineral wash)의 물성 변화 관찰

▶ **목적:** 동결 시 용액 속 용질은 물리적 혹은 화학적 변화를 겪음. 특히, 동결 시 용액 속 용질은 고농도로 농축되어(동결 농축 현상) 화학적 변화를 일으킬 것으로 예상됨. 미네랄 세제의 사용은 극지 해양으로 흘러들어 동결과 해동을 거칠 것으로 예상됨. 이러한 반복적인 동결 동 시 나타나는 미네랄 세제의 물성 변화를 연구하는 것이 목적임.

▶ **방법:**

- 1) 다양한 농도의 해수에 녹인 미네랄 세제 준비 (일반 세제 1 20g (control1)(유한젠), 일반 세제 2 20g (control2)(브라이트(무궁화)),
- 2) Linkam THM 600 stage (Linkam Scientific Instruments, UK)를 활용하여 미네랄 세제를 포함한 인공해수를 1-10℃/min 속도로 -10℃ 또는 -20℃까지 동결시킴
- 3) 현미경 및 라만 분광기(Renishaw inVia Qontor, UK)를 이용하여 세제의 물성 변화 관찰 및 동결 특성 분석
 - 샘플 특성 파악을 위한 광학 이미징
 - 샘플 특성 파악을 위한 라만 측정
 - 동결 시 얼음 미세구조 내의 분포 확인 및 얼음 미세구조 변화 관찰

▶ **결과:**

- 라만 분광법(Raman Spectroscopy)을 이용해 Mineral Wash, 유한젠, 브라이트, TECH, BIT 조건의 화학적 특성을 분석한 결과, Mineral Wash는 700~800 cm^{-1} 구간에서 강한 피크를 보였으나 전체적인 Raman activity가 낮아 주로 무기물로 구성된 것으로 확인되었음. 이를 통해 surfactant의 Raman 신호를 활용한

감지가 가능할 것으로 판단됨.

- 반면, 유한젠과 브라이트는 높은 Raman activity를 보이는 유기물로 구성되어 있어 신호가 쉽게 saturation되는 경향을 보였고, 정확한 측정을 위해 들어오는 신호 강도를 낮추는 조절이 필요하며 동결 관측 시에도 주의가 요구됨.
- TECH와 BIT는 Raman activity가 낮은 물질로 구성되어 유기물보다 무기물의 비중이 높음을 알 수 있었으며, 이는 Mineral Wash와 유사한 특성을 나타냄 (그림 17).

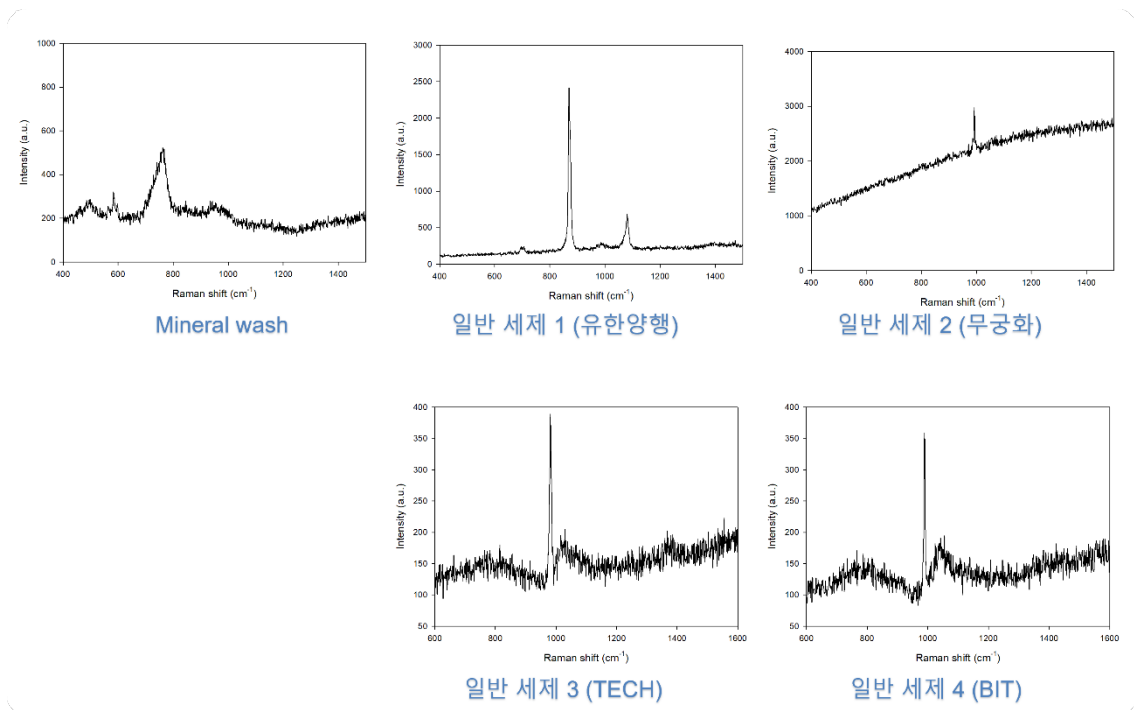


Figure 17. Raman spectroscopy analysis of chemical compositions under different detergent conditions. Raman spectra display the intensity (a.u.) as a function of Raman shift (cm^{-1}) for five conditions: (Top Left) Mineral Wash, (Top Middle) General Detergent 1 (유한젠), (Top Right) General Detergent 2 (브라이트(무궁화)), (Bottom Left) General Detergent 3 (TECH), and (Bottom Right) General Detergent 4 (BIT).

- Mineral Wash, 유한젠, 브라이트, TECH, BIT 조건에서 얼음 미세구조와 세제의

상호작용을 분석한 결과, Mineral Wash는 얼음 표면에 다량 존재하며 얼음 미세구조 내에 내입 및 농축이 확인되었으나, 미세구조의 변성 특성은 크게 나타나지 않았음. 또한, 20 μm 이상 크기의 버블이 다수 관찰되었으며, 이는 세제의 micelle 특성에 기인한 것으로 추정됨. 반면, TECH는 얼음 미세구조 변조 특성이 약하게 나타났으나 얼음 내에서 버블 형성이 다량 관찰되었고, BIT는 높은 solubility로 인해 얼음 계면 내 농축 경향이 두드러졌으며, 얼음 표면에서 버블 형성은 관찰되었으나 라만 신호 상 micelle 구조는 확인되지 않아 버블 내 농축이 약한 것으로 파악되었음.

- 유한젠과 브라이트(무궁화) 조건에서는 얼음 미세구조의 변성이 뚜렷이 확인되었으며, 작은 크기의 ice crystal과 에너지적으로 선호되지 않는 사각형 얼음 결정이 관찰되었음. 유한젠은 얼음 표면에서도 일부 유기물 신호가 관찰되었고, 미세구조 내에서 강한 신호가 확인되어 solubility에 의한 미량 석출로 추정되며, 브라이트(무궁화)는 얼음 표면에는 거의 존재하지 않고 대부분 준액체층에 수화되어 내입된 것으로 파악되었음. 두 조건 모두 계면활성제의 얼음 표면 binding 특성으로 변성이 유도된 것으로 보이나, 유한젠은 동일 농도의 브라이트(무궁화) 세제 대비 변성 정도가 약하게 나타났음 (그림 18).

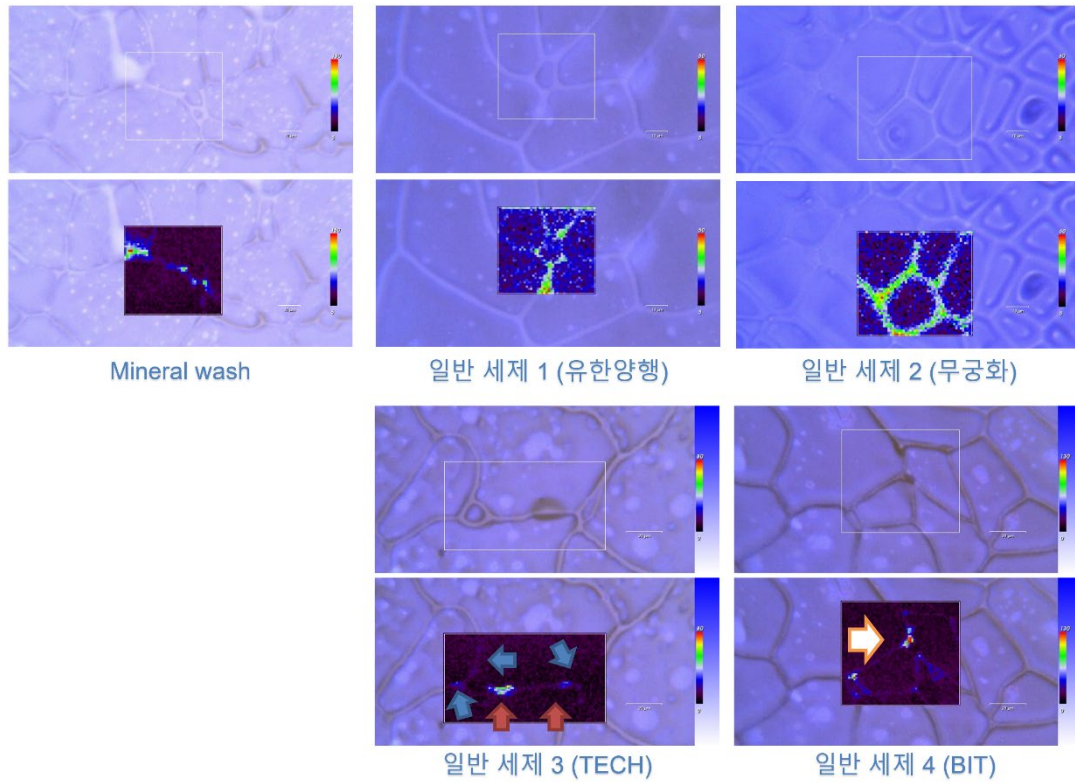


Figure 18. Raman images showing the distribution and intensity of chemical signals in ice microstructures under different detergent conditions. Raman images depict the distribution and intensity (a.u.) of chemical signals within ice microstructures across five conditions, with color scales ranging from blue (low intensity) to red (high intensity). Scale bars indicate 10 μm.

<세부 2. 극지 미생물을 대상으로 하는 기능성 소재의 항균 활성 측정>

4-2-1 LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증 I (세균 생장에 LG 항생물질이 미치는 영향)

▶ **목적:** 항균소재는 미생물의 생물막(biofilm) 및 집락형성 (colonization)을 억제하는 물질로 이 기능성 소재의 극지 실험실 적용 가능성을 알아보기 위해 극지 미생물을 대상으로 항균 활성을 측정하는게 목적임 (그림 19).

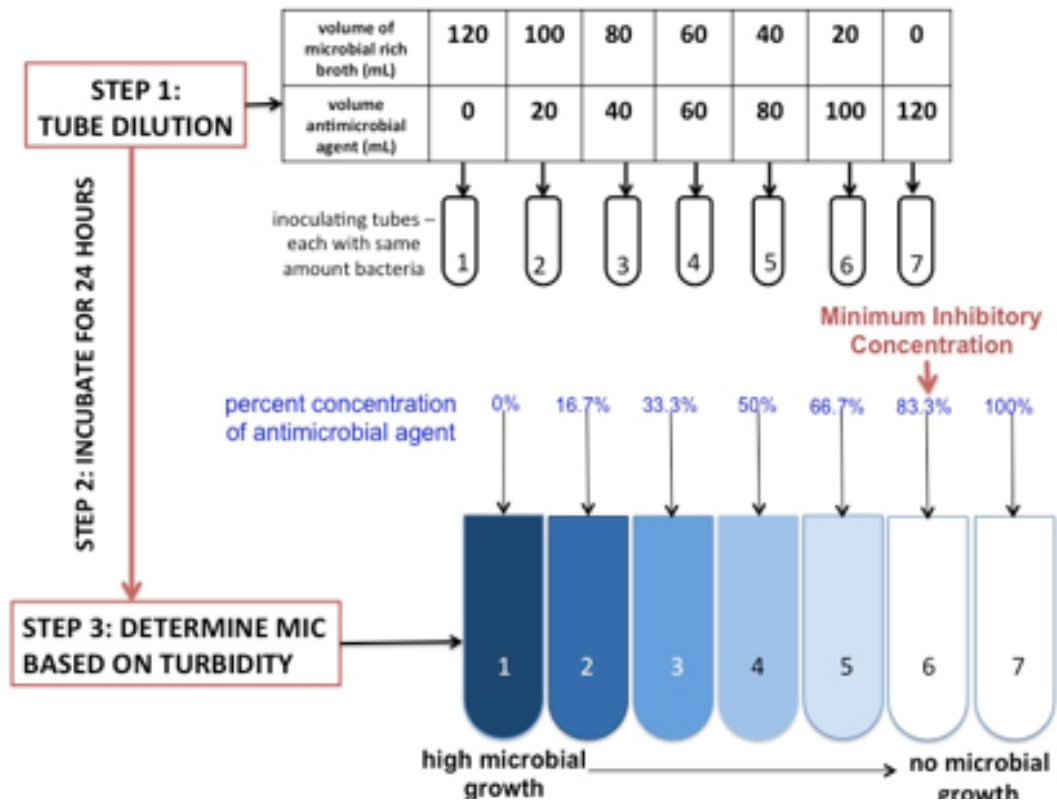


Figure 19. Method for minimum inhibitory concentration (MIC)

▶ **방법:**

균 정보: *Bacillus proteolyticus* TD42

Bacillus proteolyticus TD42는 태평양 해저 퇴적물에서 분리된 세균으로, 호기성이면서도 통성 혐기성 성질을 가진 포자 형성, 그람 양성 박테리아 임.

- 1) 배양된 극지 박테리아를 1/100 농도로 희석
- 2) 항균 물질을 다양한 농도로 준비하여 배양 plate에 준비
- 3) 1번 배양액과 혼합
- 4) 20° C에서 48시간 배양 (LB media)
- 5) LB plate에 200ul 도말 후 24시간 배양
- 6) 박테리아가 자라지 않은 plate를 확인 후 MIC 결정샘플

▶ 결과:

<*Bacillus proteolyticus* TD42 결과>

- LG 항생물질이 *Bacillus proteolyticus* TD42의 생장에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실험을 계획함. (A) Control LB agar plate 및 LG 항생물질을 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5 mg/ml을 넣은 LB agar plate를 준비. 30 ° C에서 overnight seed culture 한 cell culture 1 mL을 cell down 하여 LB 1 mL로 두 번 wash. LB broth 이용하여 OD₆₀₀을 0.05로 맞추는 다음, 0.85% NaCl로 10⁻¹, 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵, 10⁻⁶, 10⁻⁷, 10⁻⁸ dilution 함. Plate에 dilution sample 5 µL spotting 후 30 ° C에서 16h incubation 한 뒤 colony size 확인. (B) 10⁻¹ colony의 가로 및 세로 사이즈를 측정하여 평균 낸 결과. LG 항생물질의 농도가 높아질수록 colony size가 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 실험은 세 번 반복하였음 (그림 20).

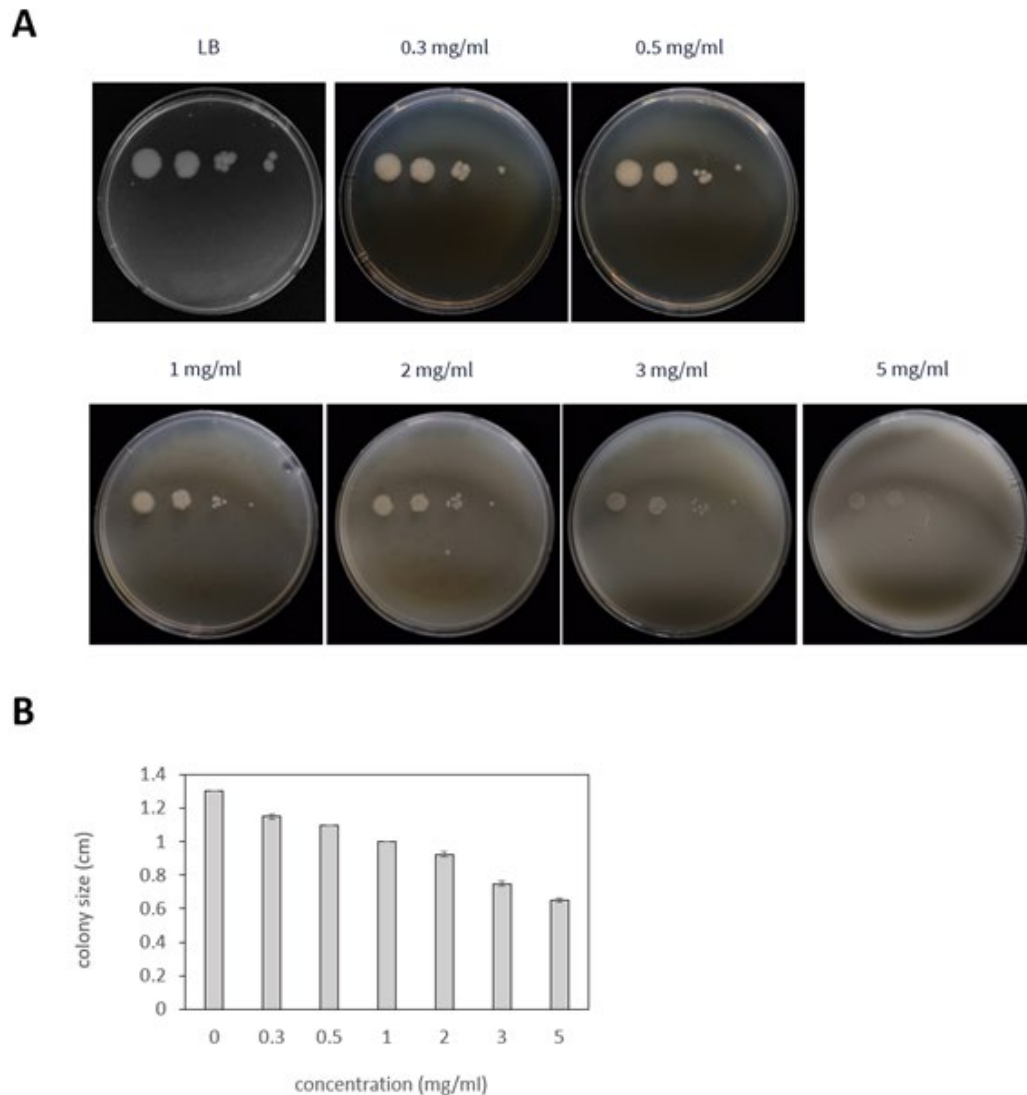


Figure 20. Colony size of *Bacillus proteolyticus* TD42 in response to different concentrations of LG antimicrobial substance. (A) Visual observation of colony size of *B. proteolyticus* TD42 on LB plates supplemented with LG antimicrobial substance at concentrations ranging from 0.3 to 5 mg/ml. *B. proteolyticus* TD42 was serial diluted in 0.85% NaCl from 10^{-1} to 10^{-8} . (B) Comparison of the average horizontal and vertical colony size of *B. proteolyticus* TD42 diluted to 10^{-1} .

○ LG 향생물질이 *B. proteolyticus* TD42의 생장에 미치는 영향을 보기 위해

optical density, OD = 600 nm에서 growth curve를 확인함. 30 ° C에서 overnight seed culture 한 *B. proteolyticus* TD42 cell culture 1 mL을 cell down 하여 LB 1 mL로 두 번 wash. LB broth 이용하여 OD₆₀₀을 0.05로 맞춘 다음 96 well plate에 200 µL씩 분주, microplate reader 기기를 이용하여 30 ° C에서 36 h 동안 OD를 확인하였음. LG 항생물질이 침전되는 시간이 있기 때문에 1 h 이후부터 결과를 측정하였으며, 항생물질 농도에 따라 OD 값의 차이를 보이기 때문에 첫 시작점의 OD를 수치 상으로 계산하여 맞춘 다음 그래프를 그렸음. 실험 결과를 보면, *B. proteolyticus* TD42 wt과 LG 항생물질 0.3, 0.5 mg/ml 첨가한 샘플은 성장하는 모습을 보이지만, 1 mg/ml은 wt의 절반 정도로 생장률이 떨어지며, 2 mg/ml 이상은 자라지 못하는 것을 확인할 수 있음 (그림 21).



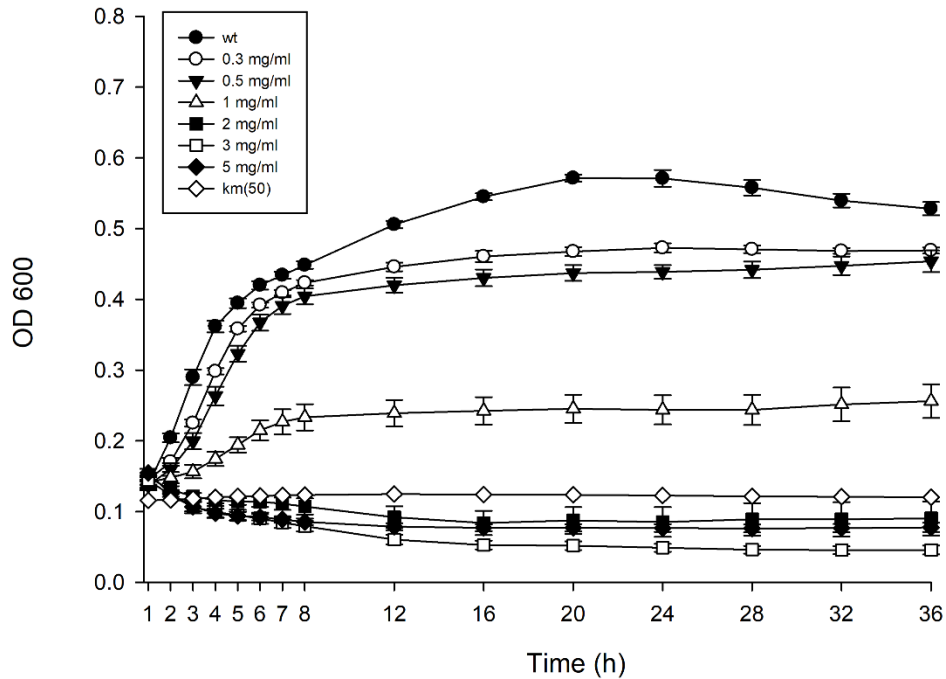


Figure 21. Growth curve (optical density, OD = 600 nm) of *Bacillus proteolyticus* TD42 at 30 °C in response to different concentrations of LG antimicrobial substance.

▶ *Bacillus mycoides* PAMC29538 실험 결과

○ LG 항생물질이 극지 세균 *Bacillus mycoides* PAMC29538의 생장에 미치는 영향을 확인하기 위하여 동일한 실험을 계획함. (A) R2A agar plate 및 LG 항생물질 0.5, 1, 2, 3, 5 mg/ml을 넣은 R2A agar plate를 준비. 20 ° C에서 overnight seed culture 한 cell culture 1 mL을 cell down 하여 R2A 1 mL로 두 번 wash. R2A broth 이용하여 OD₆₀₀을 0.05로 맞추는 다음, 0.85% NaCl로 0, 10⁻¹, 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵, 10⁻⁶, 10⁻⁷dilution 함. Plate에 dilution sample 5 µL spotting 후 20 ° C에서 24 h incubation 한 뒤 colony size 확인. (B) 희석하지 않은 culture의 colony 가로 및 세로 사이즈를 측정하여 평균 낸 결과. LG

항생물질을 1 mg/ml 이상 첨가한 경우에는 균이 거의 자라지 못하는 것을 확인할 수 있음(그림 22).

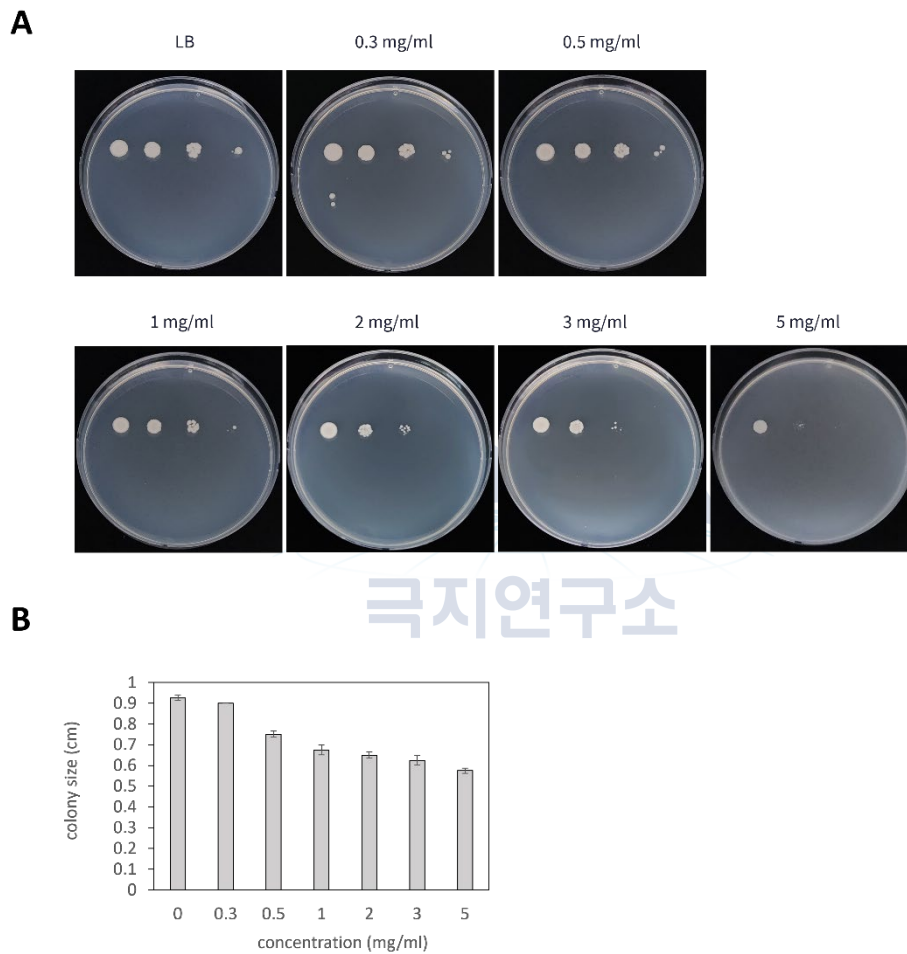


Figure 22. Colony size of *Bacillus mycoides* PAMC29538 in response to different concentrations of LG antimicrobial substance. (A) Visual observation of colony size of *B.mycoides* PAMC29538 on R2A plates supplemented with LG antimicrobial substance at concentrations ranging from 0.3 to 5 mg/ml. *B.mycoides* PAMC29538 was serial diluted in 0.85% NaCl from 10^{-1} to 10^{-8} . (B) Comparison of the average horizontal and vertical colony size of *B.mycoides* PAMC29538 diluted to 10^{-1} .

- LG 항생물질이 극지 세균 *B. mycooides* PAMC29538의 생장에 미치는 영향을 보기 위해 optical density, OD = 600 nm에서 growth curve를 확인함. 20 ° C에서 overnight 하여 seed culture 한 *B. mycooides* PAMC29538 cell culture 1 mL을 cell down 하여 R2A 1 mL로 두 번 wash. R2A broth 이용하여 OD₆₀₀을 0.05로 맞추는 다음 96 well plate에 200 µL씩 분주, microplate reader 기기를 이용하여 25 ° C에서 36 h 동안 OD를 확인하였음. *B. mycooides* PAMC29538는 37 ° C까지 생장 가능함. LG 항생물질이 침전되는 시간이 있기 때문에 1 h 이후부터 측정하였으며, 항생물질 농도에 따라 OD 값의 차이를 보이기 때문에 첫 시작점의 OD를 수치 상으로 계산하여 맞추는 다음 그래프를 그렸음. 실험 결과를 보면, *B. mycooides* PAMC29538는 LG 항생물질에 *B. proteolyticus* TD42 보다 더 영향을 많이 받는 것으로 보이는데, 0.3 mg/ml부터 급격히 성장이 낮아지는 것을 확인할 수 있음 (그림 23).

극지연구소

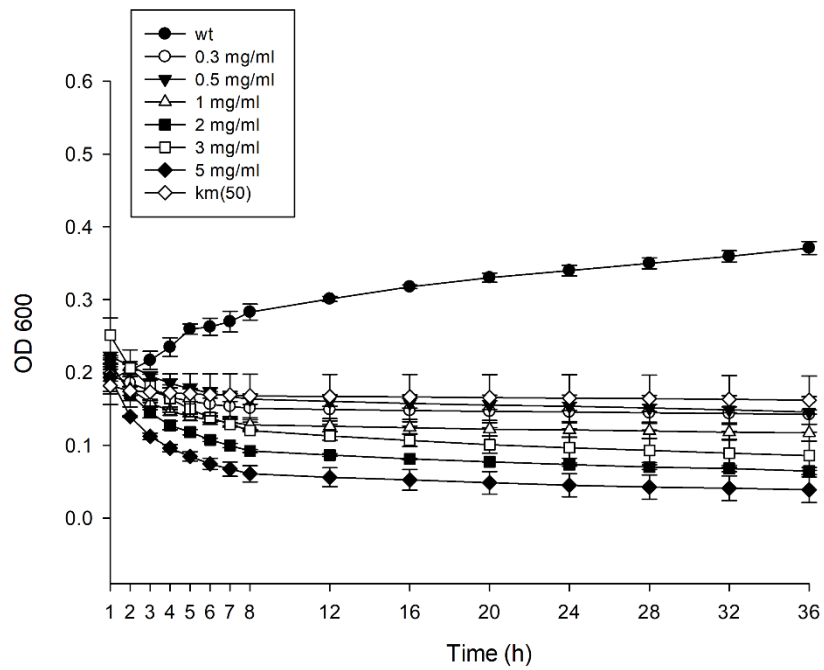


Figure 23. Growth curve (optical density, OD = 600 nm) of *Bacillus mycoides* PAMC29538 at 25 °C in response to different concentrations of LG antimicrobial substance.

4-2-2 LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증 II (세균의 biofilm 형성에 LG 항생물질이 미치는 영향)

▶ *Bacillus proteolyticus* TD42 and *Bacillus mycoides* PAMC29538

- LG 항생물질이 세균의 biofilm 형성에 영향을 미치는지 확인하기 위하여 *Bacillus proteolyticus* TD4와 극지 세균 *Bacillus mycoides* PAMC29538의 biofilm 염색 실험을 진행하였음. Biofilm staining을 위하여 crystal violet 시약을 이용했으며, 이는 세포 표면에 있는 negatived charge molecules과 biofilm있는 extracellular matrix와 결합함.
- Biofilms staining 실험은 위에서 설명한 growth curve 실험에 사용한 96 well plate를 이용하였음. 30 °와 25 °에서 36 h culture 한 각각의 sample을 well에서 제거한 후, 96 well plate에 DPBS 200 μ L씩 분주하여 well wash 진행. 이후 biofilm staining을 위해서 1% crystal violet 200 μ L을 넣고 30 min staining. Crystal violet solution 제거 후 DPBS 200 μ L로 wash 한 다음, EtOH 200 μ L을 분주하고 15 min waiting 하여 elution 진행함. 이후 microplate reader 기기 이용하여 590 nm 파장으로 확인하였음.
- LG 항생물질의 경우 침전물이 많이 생기기 때문에, 세균을 배양시킨 broth culture와 세균을 배양시키지 않은 negative control broth culture을 같이 staining 했고, 이후 측정 결과에서 negative control 값을 base line으로 설정하고 데이터를 분석하였음. 그 결과, 두 균주 모두 LG 항생물질과 biofilm 사이의 상관관계를 알기 힘든 것을 확인 (그림 24).

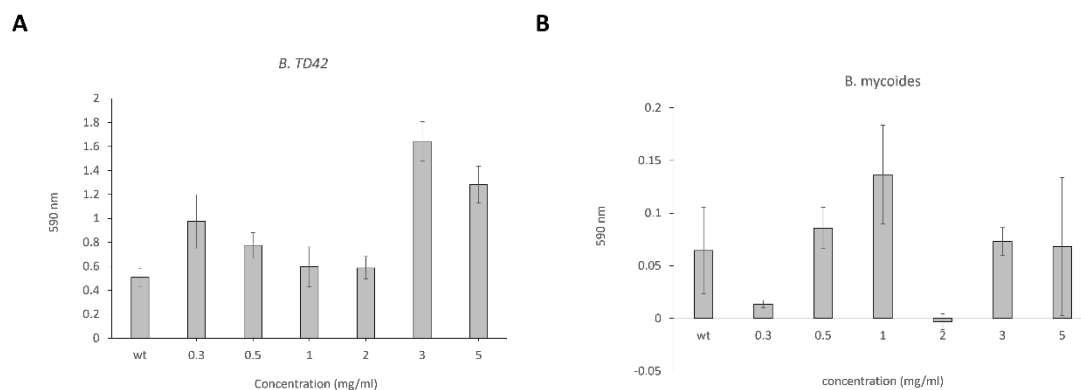


Figure 24. Biofilm formation assay at different concentrations of LG antimicrobial substance. Crystal violet staining was performed, and OD at 590 nm was measured in (A) *B. proteolyticus* TD42 and (B) *B. mycoides* PAMC29538.



<세부 3. 남극 해수 성분 분석>

4-3-1 세종과학기지 및 킹조지섬 주변의 남극 해수 성분분석

▶ 서론:

- 남극 킹조지섬(King George Island)은 남셰틀랜드 제도(South Shetland Islands)에 위치하며, 많은 국제 연구 기지가 자리잡고 있는 중요한 연구 지역임. 그 중 세종과학기지(King Sejong Station)는 극지연구소(KOPRI)에서 1988년에 설립한 연구 기지로, 맥스웰 베이(Maxwell Bay)와 마리안 소만(Marian Cove) 주변의 해양 환경을 둘러싸고 있음.
- 남극 해양 환경에서 수용성 유리(e.g. Marine glass) 등의 물질이 미세조류와의 상호작용을 통해 생태계를 변화시킬 가능성이 크므로, 남극 해수의 미네랄 및 이온 성분 분석은 해양 환경 개선 및 극지 미세조류 배양 조건을 최적화하는 데 중요한 기초 데이터를 제공. 본 보고서는 세종과학기지 및 킹조지섬 주변의 해수 성분에 대한 문헌 조사와 성분 분석을 통해 이 지역의 해양 환경 특성을 이해하고, 이를 바탕으로 최적화된 수용성 유리를 만들기 위한 기초 연구를 다룸.

▶ 성분 분석:

- 본 연구에서는 세종과학기지 주변의 해수 성분을 분석하기 위해 중금속 오염, 산소 동위원소 조성, 그리고 수문지질학적 특성에 대해 기존 문헌을 통해 조사하였음.

○ 중금속 오염

- Ahn et al. (1996)의 연구에 따르면, 세종과학기지 주변 해수는 납(Pb), 구리(Cu), 아연(Zn), 카드뮴(Cd) 등의 중금속 농도가 상대적으로 높으며, 이는 인간 활동(연료 사용, 폐기물 처리 등) 및 자연적 요인(바위 침식 등)에 의해 영향을 받은 것으로 예상.

- 또한, Trevizani et al. (2016)의 연구에서는 어드미럴티 베이(Admiralty Bay)에서 해양 생물과 퇴적물의 무거운 금속 생물축적을 분석하여 구리와 아연이 퇴적물에서 높은 농도를 보인다고 언급.

○ 산소 동위원소 조성

- Khim et al. (1997)의 연구는 맥스웰 베이와 마리안 공에서 해수의 산소 동위원소 조성 ($\delta^{18}O$)을 분석하여 해수의 형성과 분포를 이해하는 데 중요한 역할을 했음. 이는 해양 순환 패턴과 기후 변화의 영향을 분석하는 데 중요한 기초 데이터를 제공.

○ 수문지질학적 특성

- Lee et al. (2020)의 연구는 바턴 반도(Barton Peninsula)의 지하수와 표층수의 수문지질학적 특성을 조사하여 해수와의 상호작용이 염분 농도와 화학적 조성에 미치는 영향을 분석. 이 연구는 빙하 용출수가 해수에 미치는 영향을 고찰하였으며, 이는 해양 생태계의 물리적·화학적 특성을 이해하는 데 중요한 정보를 제공.

▶ 성분 분석:

▶ 다른 해양과의 비교

- 세종과학기지 근처의 해수 성분을 다른 해양 지역과 비교한 결과, 남극 해수는 다른 지역보다 철 성분이 부족한 특성이 있음. 예를 들어, Ahn et al. (1996)의 연구는 남극 해수에서 철(Fe)의 농도가 낮음을 보여주었고, 이는 남극 해양 환경이 특수한 화학적 특성을 가지고 있다는 것을 시사. 또한, 해양 미세조류와 박테리아 활동은 철이 부족한 환경에서 성장에 제한을 받을 수 있음을 시사하며, 이는 수용성 유리와 같은 물질을 활용한 극지 미생물 배양 조건 최적화에 중요한 정보를 제공.

표 4. 남극 지역 해수·생물·퇴적물 내 중금속 및 수질 변화 연구 주요 동향

연구자 및 연도	분석 대상	주요 발견
Ahn et al., 1996	해수 중금속	납, 구리, 아연, 카드뮴 농도 분석, 인간 활동과 자연적 요인 영향 시사
Khim et al., 1997	해수 산소 동위원소	맥스웰 베이와 마리안 공의 $\delta^{18}O$ 분석, 해양 순환과 기후 변화 이해
Trevizani et al., 2016	해양 생물 및 퇴적물	어드미럴티 베이의 금속 생물축적, 구리와 아연 농도 높음
Lee et al., 2020	지하수 및 표층수	해수와의 상호작용, 용존 이온과 영양분 농도 변화 분석

▶ 참고문헌

1. Ahn et al. (1996), Heavy metal pollution monitoring at King Sejong Station, King George Island, Antarctica
2. Khim et al. (1997), Oxygen isotopic compositions of seawater in the Maxwell Bay of King George Island, West Antarctica
3. Trevizani et al. (2016), Bioaccumulation of heavy metals in marine organisms and sediments from Admiralty Bay, King George Island, Antarctica
4. Lee et al. (2020), Hydrogeological characteristics of groundwater and surface water associated with two small lake systems on King George Island, Antarctica



<세부 3. 수용성 유리의 독성/안전성 테스트>

4-3-2 수용성 유리 마린 글래스가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (극지 미세조류 단일 종)

▶ 방법:

○ 배양배지 및 세제 준비

1. 각 미세조류 균주에 적합한 배양배지를 준비
2. 사용된 배지는 총 두 종류로, 50× Bold Modified Basal Freshwater Nutrient Solution(BBM 배지, Sigma, St. Louis, MO, USA)를 사용
3. 50× BBM은 증류수에 희석하여 최종 농도가 1× BBM이 되도록 제조한 후, 멸균하여 4° C에서 보관
4. 미세조류에 대한 세제의 영향을 조사하기 위해 사용된 세제는 LG사에서 제조한 Marine Glass를 이용

○ 현미경 관찰 및 클로로필 분석

1. 미세조류의 형태 및 생장을 관찰하기 위해, T-플라스크에서 신선하게 채취한 배양액 10 μL를 DHC-N01 C-Chip 일회용 혈구계수판(INCYTO, 충남, 대한민국)에 옮긴 후, Olympus BX53 현미경과 SLMP1an N 50x/0.35 대물렌즈(Evident Corporation, Tokyo, Japan)를 사용하여 관찰.
2. 이미지는 Olympus DP71 카메라로 촬영하고, DP Controller 소프트웨어(Olympus Corporation, Tokyo, Japan)로 처리.
3. 클로로필 분석을 위해 1, 3, 10, 20일차에 각각 1 mL씩 시료를 채취하였다. 각 시료는 5분간 원심분리 후 바이오매스를 수집하고, N,N-dimethylformamide(DMF, Sigma, USA) 1 mL를 첨가한 뒤 37° C 암실에서 40분간

4. 데이터는 Prism 소프트웨어를 이용하여 그래프로 시각화

▶ 결과:

- 극지 유래 미세조류 KSF0090 균주를 대상으로 다양한 농도의 마린 글래스 세제가 클로로필 축적 및 생장에 미치는 영향을 평가를 진행함. 그래프 A-C는 각각 클로로필 a, b 및 총 클로로필 함량을 시간 경과에 따라 나타내며, D는 배양 3, 10, 20일차에서의 시각적 변화를 보여줌. Control 및 마린 글래스 0.5-1 mg/mL 농도에서는 클로로필 함량이 지속적으로 증가함에 따라 미세조류 생장이 비교적 잘 유지되었으나, 2 mg/mL에서는 증가가 둔화되었고, 5 mg/mL에서는 클로로필 축적이 현저히 억제되었음. 특히, 5 mg/mL 처리군은 10일차부터 녹색이 급격히 퇴색되었으며, 20일차에서는 거의 무색에 가까운 상태로 변화하였음. 이러한 결과는 마린 글래스가 고농도에서는 미세조류 생장을 억제하지만, 저농도(0.5-1 mg/mL)에서는 비교적 생장에 큰 영향을 주지 않음을 시사함 (그림 25).

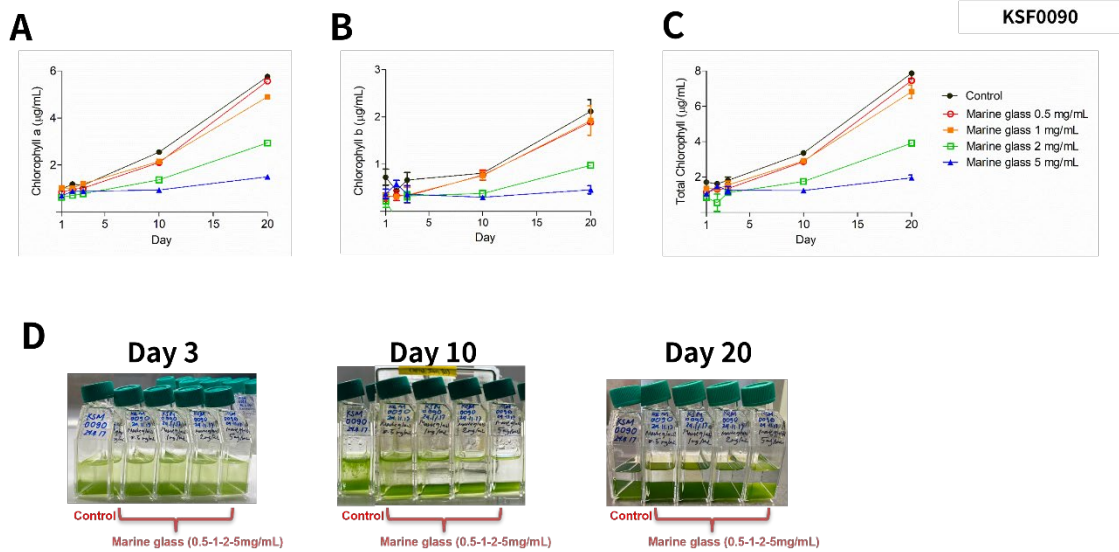


Figure 25. Effects of marine glass on chlorophyll-based growth of polar microalga KSF0090. Detergent solutions at concentrations of 0.5, 1, 2, 5, and 10 mg/mL were individually added to separate T-flasks containing BBM medium and microalgae. The cultures were incubated at 4 °C under continuous light. Samples were collected on days 1, 3, 10, and 20. Chlorophyll was extracted using DMF, and absorbance was measured at specific 664.5 nm, 647 nm, and 750 nm wavelengths using a microplate reader. The data were analyzed using equation (Catarina Osório, 2020) and visualized with Prism software. Each measurement was performed in triplicate. (A) Chlorophyll a concentration (µg/mL), (B) Chlorophyll b concentration (µg/mL), (C) Total chlorophyll concentration (µg/mL)

- 해양 미세조류 KSF0100 균주를 대상으로 다양한 농도의 marine glass가 클로로필 축적 및 생장에 미치는 영향을 분석한 결과를 나타냄. 그래프 A-C는 각각 클로로필 a, b 및 총 클로로필 함량의 시간 경과에 따른 변화를 보여주며, D는 배양 3, 10, 20일차에서의 배양액 색 변화 사진임. 실험 결과, 0.5-2 mg/mL 농도의 marine glass 처리군은 클로로필 함량이 control보다 오히려 증가하는 경향을 보였으며, 특히 1-2 mg/mL에서 가장 높은 총 클로로필 수치를 기록했다. 반면 5 mg/mL에서는 초기 클로로필 수치가 일시적으로 높았으나 이후 증가가 둔화되었음. 시각적 관찰 결과 또한 1-2 mg/mL 처리군은 20일까지 선명한 녹색을 유지하였으며, 고농도 처리군에서도 생장 저해는 크지 않았음. 이는

KSF0100 균주가 상대적으로 세제에 대한 내성이 높고, 적정 농도에서는 오히려
생장 촉진 효과가 나타날 수 있음을 시사함 (그림 26).

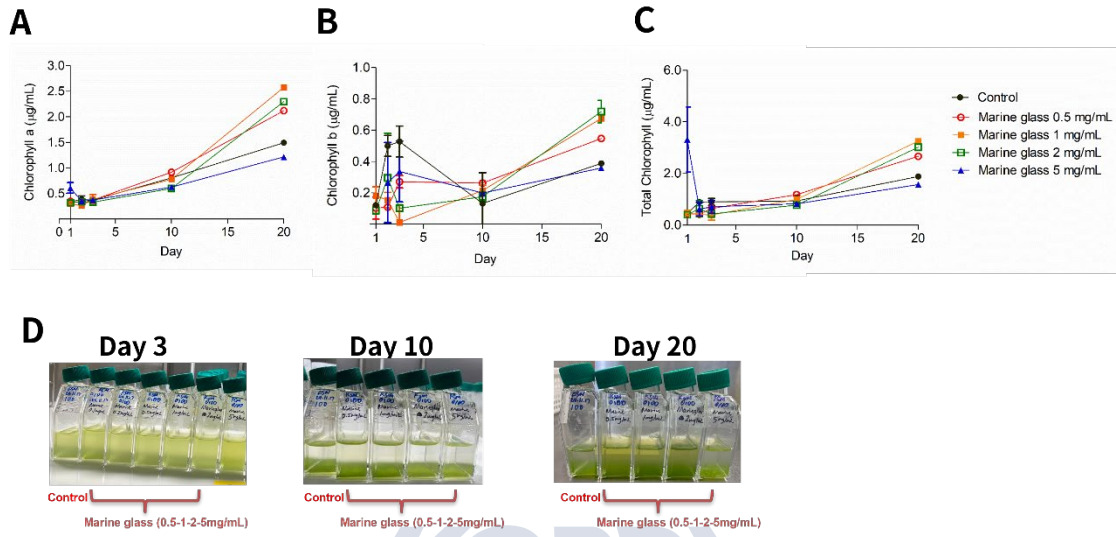


Figure 26. Effects of marine glass on chlorophyll-based growth of polar microalga KSF0100. Detergent solutions at concentrations of 0.5, 1, 2, 5, and 10 mg/mL were individually added to separate T-flasks containing BBM medium and microalgae. The cultures were incubated at 4 °C under continuous light. Samples were collected on days 1, 3, 10, and 20. Chlorophyll was extracted using DMF, and absorbance was measured at specific 664.5 nm, 647 nm, and 750 nm wavelengths using a microplate reader. The data were analyzed using equation (Catarina Osório, 2020) and visualized with Prism software. Each measurement was performed in triplicate. (A) Chlorophyll a concentration (µg/mL), (B) Chlorophyll b concentration (µg/mL), (C) Total chlorophyll concentration (µg/mL), (D) Microalga strain KSF0100 was cultured in T-flasks with different detergents at various concentrations over 20 days

4-3-3 수용성 유리 마린 글래스가 극지 미세조류에 미치는 영향 연구 (극지 해양 미생물 전체)

▶ **목적:** Marine glass가 극지 해양 미생물의 성장에 미치는 영향을 분석하는 것.
구체적으로, Marine glass의 농도가 미세조류와 박테리아의 성장에 어떻게 영향을 미치는지를 평가하고, 이를 통해 극지 해양 환경에서의 최적화된 미생물 배양 조건을 이해하고자 함.

▶ **방법:**

○ **샘플 준비**

1. 세종 과학기지 주변에서 해수 채수
2. PALL 4815 MicroFunnel™ Filter (0.45um)를 이용하여 미생물을 농축
3. Mineral wash를 0 mg/ml, 0.1 mg/ml, 0.2 mg/ml, 0.5 mg/ml, 1mg/ml의 농도로 4 °C로 정지 배양
4. Chlorophyll a/, OD600을 바탕으로 생물량 측정 (647nm and 664nm wavelength)

▶ **결과:**

- Marine glass의 농도별로 극지 해양 미생물의 반응을 분석하기 위해 수행되었음. 실험에서는 미세조류의 Chlorophyll a 농도와 박테리아의 OD600 값을 측정하였음. Marine glass 농도는 No chemical (control), 0.1, 0.2, 0.5, 1 mg/mL로 설정하여, 5일 동안 각각의 반응을 관찰했음. 미세조류의 경우 Chlorophyll a 농도를, 박테리아는 OD600 값을 통해 성장 속도를 평가하였음.
- 미세조류 실험에서는 Chlorophyll a 농도가 2일 차에서 잠시 감소한 후 회복되었으며, 이후에는 서서히 감소하는 경향을 보였음. 특히 5일 차에 가장

낮은 농도에서 Chlorophyll a 농도가 증가하는 이상 현상이 나타났음. 반면, 박테리아 실험에서는 Marine glass 농도가 증가할수록 OD600 값이 증가하였으며, 이는 박테리아 생장이 증가했음을 의미함. 특히 높은 농도에서 박테리아의 생장이 더 강하게 나타났음.

- 실험 결과는 Marine glass가 미세조류보다는 박테리아 성장에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 시사함. 미세조류는 Marine glass의 농도 증가에 따라 제한적인 영향을 받는 반면, 박테리아는 농도가 높을수록 생장이 촉진되는 경향을 보였음 (그림 27).

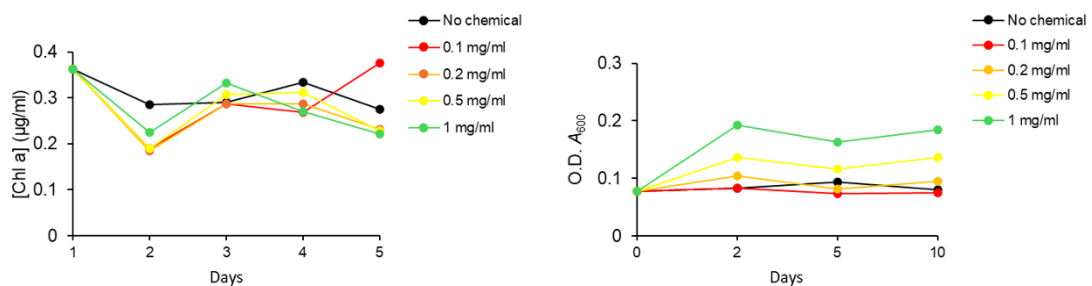


Figure 27. Effects of various concentrations of chemical treatment on microalgal growth and chlorophyll a content. (Left) Changes in chlorophyll a concentration ($\mu\text{g/mL}$) over 5 days. (Right) Changes in optical density at 600 nm (OD_{600}) over 10 days. Each line represents a different treatment group: black (no chemical), red (0.1 mg/mL), orange (0.2 mg/mL), yellow (0.5 mg/mL), and green (1 mg/mL). Data indicate variable responses in chlorophyll accumulation and growth depending on the concentration of the chemical.

▶ 군집 분석 결과 (미세조류 군집, 18S)

- Marine glass의 농도 증가에 따른 미생물 군집 구조의 변화를 살펴본 결과, Bacillariophyta 문의 상대적 생물량은 marine glass의 농도가 증가할수록

점진적으로 감소하였고, 반면 Chlorophyta 문은 모든 농도 조건에서 증가하는 경향을 보임. 특히 Chlorophyta는 1.0 mg/mL 농도에서 가장 높은 상대적 풍부도를 기록하며, 농도에 민감하게 반응하는 양상을 나타냄. 이러한 결과는 Marine glass가 Bacillariophyta의 성장을 억제하고, 상대적으로 Chlorophyta의 성장을 촉진하거나 그에 유리한 생태 조건을 제공한다는 것을 시사 (그림. 28).

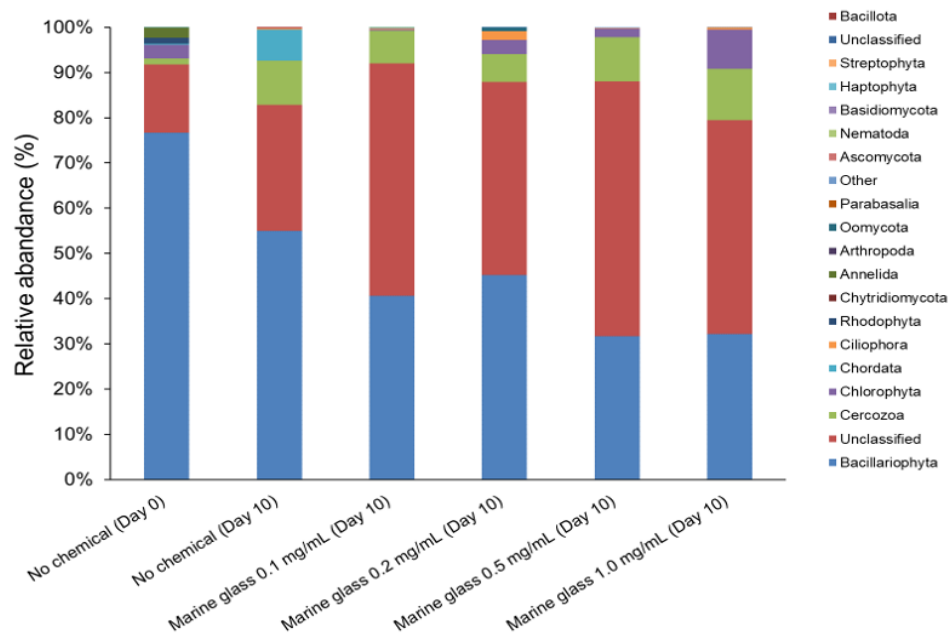


Figure 28. Figure X. Relative abundance of eukaryotic phyla in response to different concentrations of Marine glass over a 10-day exposure period. Stacked bar plots represent the relative abundance (%) of detected eukaryotic phyla at Day 0 and Day 10 across treatments with no chemical (control) and increasing concentrations of Marine glass (0.1, 0.2, 0.5, and 1.0 mg/mL). A notable decrease in the abundance of Bacillariophyta and a concentration-dependent increase in Chlorophyta were observed, indicating that Marine glass selectively inhibits diatoms while promoting green algae. Minor phyla are grouped under "Other."

○ 표 4에 따르면 Marine glass의 농도 증가에 따라 Bacillariophyta 문은 지속적으로 감소하는 경향을 보임(76.72% → 32.14%), 특히 0.5 mg/mL에서 31.75%로 가장 낮은 비율을 기록하였음. 반면, Chlorophyta 문은 처리 전후 크게 증가하였으며, 1.0 mg/mL 조건에서 8.62%로 가장 높은 상대 풍부도를 나타냄. 이와 함께 Unclassified와 Cercozoa 문도 농도에 따라 상대적 풍부도가 증가하는 양상을 보였음. 이러한 결과는 Marine glass가 Bacillariophyta의 상대 생물량을 억제하고 Chlorophyta를 비롯한 일부 문을 선택적으로 증진시키는 환경적 영향을 미칠 수 있음을 시사함. 특히 Chlorophyta의 농도 의존적 증가 양상은 이 문이 Marine glass 처리 환경에 잘 적응하거나 경쟁에서 유리할 수 있음을 보여줌.

표 4. Marine glass 농도에 따른 미세조류 군집 변화 (Phylum level)

Phylum	No chemical (Day 0)	No chemical (Day 10)	Marine glass 0.1 mg/mL (Day 10)	Marine glass 0.2 mg/mL (Day 10)	Marine glass 0.5 mg/mL (Day 10)	Marine glass 1.0 mg/mL (Day 10)
Bacillariophyta	76.72%	55.02%	40.59%	45.15%	31.75%	32.14%
Unclassified	15.08%	27.79%	51.45%	42.79%	56.33%	47.35%
Cercozoa	1.33%	9.84%	7.16%	6.08%	9.73%	11.38%
Chlorophyta*	3.01%	0.00%	0.28%	3.15%	1.92%	8.62%

○ Marine glass 처리에 따른 종 수준의 군집 반응을 분석한 결과, *Navicula* sp. (*Bacillariophyta*)는 가장 뚜렷한 농도 의존적 성장 증가를 보였으며, 농도 상승에 따라 0%에서 13.56%까지 지속적으로 증가하였음. *Urospora neglecta* (*Chlorophyta*) 역시 Chlorophyta 중 유일하게 농도에 따라 명확히 증가한

종으로, 0%에서 7.91%까지 풍부도가 상승하며 Marine glass 에 대한 적응성이 높은 것으로 나타났음. 이와 함께 *Fragilariopsis* sp.는 불규칙하나 전반적인 증가 추세를 보였고, *Eukaryota* sp. (Unclassified)는 낮은 수준에서 완만하게 증가하였음 (표 5).

- 반면, *Fragilaria famelica* (Bacillariophyta)는 Marine glass 처리 시 현저한 감소를 보인 종으로, No chemical 조건에서 30.85%였던 상대 풍부도가 1.0 mg/mL 처리 후 5.94%로 급감하였음. 이러한 결과는 Marine glass 가 종별로 상반된 생장 반응을 유도하며, 특히 *Navicula* sp.와 *Urospora neglecta*의 생장을 촉진하는 반면, *Fragilaria famelica*의 생장은 억제하는 선택적 생태적 압력으로 작용할 수 있음을 시사함.

표 5. Marine glass 농도에 따른 미세조류 군집 변화 (Species level)

Phylum	Species	No chemical (Day 0)	No chemical (Day 10)	Marine glass 0.1 mg/mL (Day 10)	Marine glass 0.2 mg/mL (Day 10)	Marine glass 0.5 mg/mL (Day 10)	Marine glass 1.0 mg/mL (Day 10)
Unclassified	uncultured eukaryote	9.94%	21.98%	48.70%	38.08%	52.06%	41.52%
Bacillariophyta	<i>Fragilaria famelica</i>	4.95%	30.85%	29.11%	22.29%	12.37%	5.94%
Bacillariophyta	<i>Thalassiosira nordenskioldii</i>	19.75%	11.22%	0.52%	0.33%	0.30%	0.60%
Bacillariophyta	<i>Pseudo-nitzschia</i>	33.07%	0.00%	0.57%	0.42%	0.36%	0.20%

	<i>turgidula</i>						
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Thalassiosira</i>	10.04%	3.94%	0.32%	0.17%	0.35%	0.41%
	<i>bioculata</i>						
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Navicula</i> sp.*	1.32%	0.00%	1.74%	5.36%	9.43%	13.56%
<i>Cercozoa</i>	<i>Allas</i> sp.	0.00%	5.70%	5.61%	5.04%	7.68%	9.99%
<i>Bacillariophyta</i>	<i>uncultured</i>	0.00%	0.00%	3.29%	9.63%	3.81%	3.51%
	<i>Chaetoceros</i>						
<i>Unclassified</i>	<i>Eukaryota</i> sp.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.29%	1.55%
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Melosira</i> sp.	0.54%	2.65%	1.56%	2.99%	1.12%	1.85%
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Fragilariopsis</i>	3.51%	0.00%	0.06%	0.14%	0.32%	2.37%
	sp.*						
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Porosira</i>	0.27%	3.04%	1.18%	0.53%	0.50%	0.78%
	<i>glacialis</i>						
<i>Bacillariophyta</i>	<i>Licmophora</i>	0.92%	3.31%	1.03%	1.80%	2.31%	2.46%
	<i>juergensii</i>						
<i>Chlorophyta</i>	<i>Urospora</i>	0.40%	0.00%	0.20%	2.33%	1.60%	7.91%
	<i>neglecta</i>						

▶ 군집 분석 결과 (박테리아 군집, 16S)

○ Marine glass 가 박테리아 군집에 미치는 영향을 문(Phylum) 수준에서 분석한 결과, *Pseudomonadota* 문은 처리 전후 및 농도 증가 시에도 상대적 풍부도가 일정하거나 소폭 증가하는 경향을 보여, Marine glass 에 대한 내성 및 안정적인 군집 구조 유지 능력을 시사함. 반면 *Cyanobacteriota* 문은 0.1-0.2 mg/mL 저농도 조건에서 상대적 풍부도가 높았으나, 1.0 mg/mL 고농도에서는 감소, 이는 일정 농도 이상에서 억제 효과가 나타날 가능성을 암시.

- 한편, *Bacteroidota* 문은 Marine glass 농도 증가에 따라 점진적으로 풍부도가 증가하는 뚜렷한 경향을 보였으며, 이는 해당 문이 농도 의존적 성장 촉진 효과를 받았을 가능성을 나타냄. 이에 반해 *Bacillota* 문은 0.1 mg/mL 저농도 조건에서도 군집이 거의 형성되지 않아, Marine glass 에 매우 민감하게 반응하며 생존이 어려운 환경으로 해석됨. 이러한 결과는 Marine glass 가 문 수준에서 선택적인 생태적 압력으로 작용하며, 특정 문(*Bacteroidota* 등)에 대해서는 자극 요인, 다른 문(*Bacillota* 등)에 대해서는 억제 요인으로 기능할 수 있음을 보여줌.



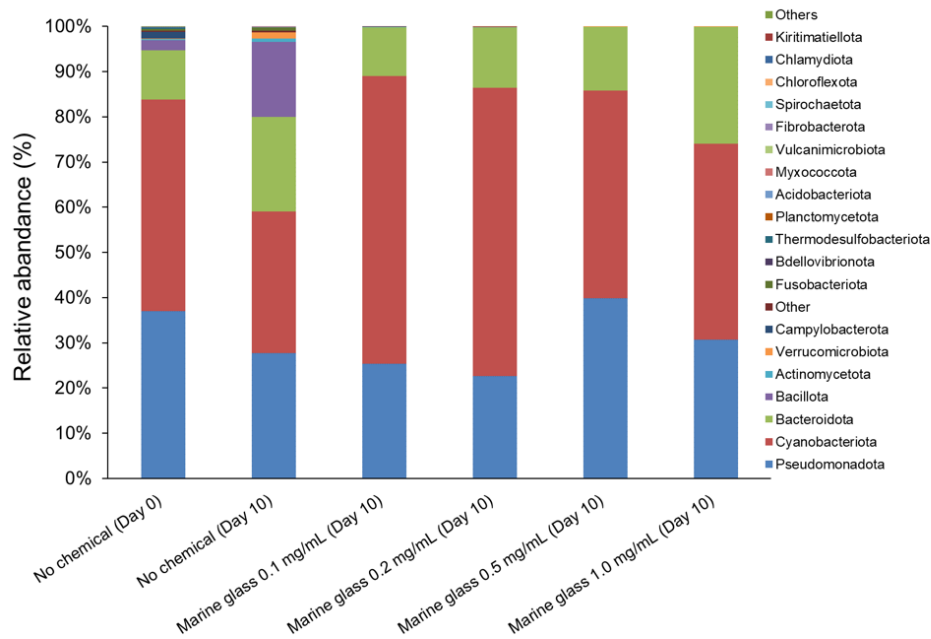


Figure 29. Changes in bacterial community composition at the phylum level in response to Marine glass exposure over 10 days. Stacked bar plots show the relative abundance (%) of bacterial phyla under different concentrations of Marine glass (0.1, 0.2, 0.5, and 1.0 mg/mL) and no chemical control conditions, both at Day 0 and Day 10. While Pseudomonadota maintained a stable relative abundance regardless of treatment, Cyanobacteriota showed increased abundance at low concentrations (0.1–0.2 mg/mL) but declined at higher levels, suggesting potential inhibition. Bacteroidota displayed a dose-dependent increase, indicating possible stimulation by Marine glass. In contrast, Bacillota was markedly suppressed even at low concentrations, suggesting high sensitivity to the compound

○ 표에 나타난 종 수준 데이터를 분석한 결과, *Pseudomonadota* 문에 속한 *Colwellia rossensis*는 Marine glass 농도 증가에 따라 6.43% → 10.27% → 14.76% → 12.23% → 36.14% → 22.10%의 상대 풍부도 변화를 보이며, 0.5 mg/mL에서 최고치를 기록한 뒤 감소하는 양상을 나타냄. 이는 중간 농도에서 생장이 촉진되다가 고농도에서는 억제 가능성이 있음을 시사함. 반면, 같은 문에 속한 *Pseudomonadota*_Other는 처리 후 빠르게 풍부도가 감소하며 Marine glass에 민감하게 반응하는 종일 수 있음을 보여줌.

- 한편 *Bacteroidota* 문에서는 *Polaribacter sejongensis*와 *Bacteroidota_Other*가 눈에 띄게 증가하였음. 특히 *Bacteroidota_Other* 는 1.0 mg/mL 에서 9.42%, *Polaribacter sejongensis* 는 4.80%까지 증가, 농도 의존적으로 성장 촉진된 대표 종으로 보임. 이와 달리 *Cyanobacteriota* 는 초기(46.61%)에서 1.0 mg/mL 처리 후 42.71%로 감소, 다소 억제되는 경향을 나타냄. 이러한 결과는 Marine glass 가 종 특이적으로 상반된 성장 반응을 유도하며, *Pseudomonadota* 일부와 *Bacteroidota* 종은 증식 촉진, *Cyanobacteriota* 는 억제 효과를 받을 수 있음을 의미함.

표 6. Marine glass 농도에 따른 극지 해양 박테리아 군집 변화 (Species level)

Phylum	Species	No chemical (Day 0)	No chemical (Day 10)	Marine glass 0.1 mg/mL (Day 10)	Marine glass 0.2 mg/mL (Day 10)	Marine glass 0.5 mg/mL (Day 10)	Marine glass 1.0 mg/mL (Day 10)
<i>Cyanobacteriota</i>	Other	46.61%	31.31%	63.48%	63.28%	45.72%	42.71%
<i>Pseudomonadota</i>	<i>Colwellia_rossensis</i>	6.43%	10.27%	14.76%	12.23%	36.14%	22.10%
<i>Pseudomonadota</i>	Other	4.07%	1.10%	1.86%	1.61%	0.18%	0.18%
<i>Pseudomonadota</i>	<i>Psychromonas_ingrahamii</i>	1.73%	0.43%	0.14%	0.08%	0.08%	0.29%

<i>Bacteroidot a</i>	Polaribacter_fi lamentus	2.29%	0.51%	0.43%	0.46%	0.78%	0.66%
<i>Bacteroidot a</i>	Other	1.99%	1.10%	0.87%	2.81%	3.51%	9.42%
<i>Bacteroidot a</i>	Aureispira_ma ritima	0.19%	4.63%	0.08%	0.08%	0.00%	0.00%
<i>Pseudomon adota</i>	Other	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.05%	0.00%
<i>Pseudomon adota</i>	Colwellia_psy chrerythraea	0.82%	0.00%	0.22%	1.15%	0.23%	0.87%
<i>Pseudomon adota</i>	Cognaticolwell ia_aestuarii	1.05%	0.00%	0.13%	0.21%	0.07%	1.11%
<i>Bacteroidot a</i>	Polaribacter_s ejongensis	0.25%	0.23%	0.26%	0.60%	0.99%	4.80%
<i>Pseudomon adota</i>	Other	3.42%	0.00%	0.06%	0.17%	0.03%	0.12%
<i>Pseudomon adota</i>	Moritella_mari na	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%
<i>Bacteroidot a</i>	Maribacter_aq uivivus	0.02%	1.41%	0.83%	2.21%	2.19%	1.56%
<i>Pseudomon</i>	Leucothrix_arc	0.71%	0.83%	0.21%	0.22%	0.17%	0.13%

<i>adota</i>	tica						
<i>Pseudomon</i> <i>adota</i>	Psychromonas _marina	3.31%	0.24%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%
<i>Pseudomon</i> <i>adota</i>	Other	0.47%	0.00%	0.01%	0.02%	0.02%	0.00%
<i>Pseudomon</i> <i>adota</i>	<i>Paraglaciecol</i> <i>a_psychrophil</i> <i>a</i>	0.14%	2.55%	1.22%	0.88%	0.14%	0.44%
<i>Pseudomon</i> <i>adota</i>	<i>Pseudoalterom</i> <i>onas_fuliginea</i>	2.13%	0.00%	0.11%	0.15%	0.06%	0.14%
<i>Bacteroidot</i> <i>a</i>	<i>Polaribacter_p</i> <i>ectinis</i>	0.38%	0.00%	0.16%	0.97%	1.41%	3.62%
Others	Others	23.99%	45.37%	15.17%	12.82%	8.22%	11.85%

▶ 결과 요약:

- 첫째, 18S rRNA 분석 결과 미세조류 중 일부 종은 수용성 유리 농도 증가에 따라 생존 비율이 유의하게 증가. 대표적으로 *Navicula* sp., *Eukaryota* sp. (미분류), *Fragilariopsis* sp., *Urospora neglecta* 등의 상대적 풍부도는 농도 증가에 따라 점진적으로 증가하거나 유지되는 양상을 보였음. 반면, *Fragilaria famelica*는 농도가 높아질수록 상대적 풍부도가 급격히 감소하는 패턴을 보여, 수용성 유리에 대한 민감성을 나타냈음 (그림 30).

- 둘째, 16S rRNA 기반 분석에서는 박테리아 중 *Polaribacter filamentus* 와 *Colwellia rossensis*가 농도 의존적으로 뚜렷한 생존률 증가를 나타냄. 특히 *Colwellia* 는 농도 0.6 mg/mL 에서 최대 풍부도(약 37%)를 기록한 뒤 고농도에서는 감소하는 경향을 보여, 특정 농도에서의 성장 최적점을 시사함. 이는 수용성 유리가 일부 극지 해양 박테리아의 성장을 선택적으로 유도할 수 있음을 보여주는 결과로 해석됨(그림 30).



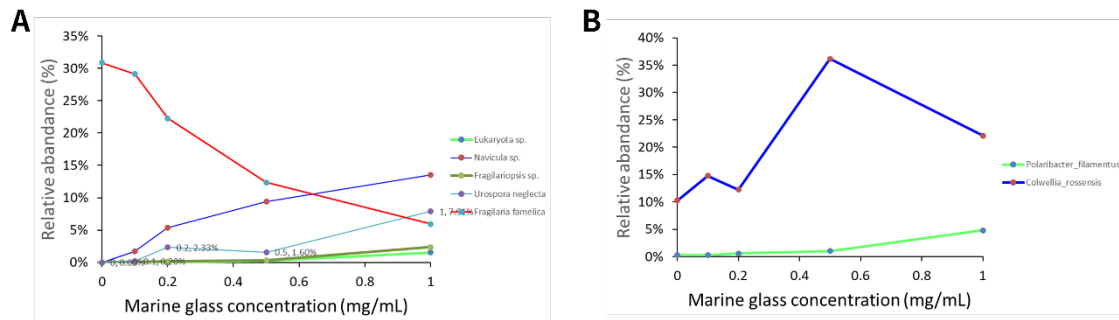


Figure 30. Effect of marine glass concentration on microbial community composition.

Relative abundance (%) of dominant (A) eukaryotic microalgae (based on 18S rRNA gene sequences) and (B) bacterial taxa (based on 16S rRNA gene sequences) across different concentrations of water-soluble marine glass (0 to 1 mg/mL). (A) *Navicula* sp., *Eukaryota* sp. (unclassified), *Fragilariopsis* sp., and *Urospora neglecta* showed concentration-dependent increases in relative abundance, while *Fragilaria famelica* sharply declined with increasing marine glass concentration. (B) *Polaribacter filamentus* and *Colwellia rossensis* exhibited enhanced growth at higher concentrations, indicating selective stimulation of certain bacterial taxa.

4-3-4. 수용성 유리의 독성/ 안전성 테스트 (얼음 미세구조 영향 테스트)

▶ **목적:** 물의 동결을 통한 결정화 시 얼음 핵을 형성하는 과정 (nucleation) 이후 이 얼음 핵이 얼음 결정으로 성장하며 동결이 이루어짐. 동결 후 얼음은 물 분자가 수소결합을 통한 고체 결정을 이룬 얼음 결정 부분과 얼음 결정 사이 준액체층이라 불리는 얼지 않는 부분으로 공간적 분리가 일어남. 전체 얼음 대비 준액체층의 비율이 동결 농축 현상에 직접 관련됨. 또한, 물은 동결 시 용질의 농도 및 종류에 따라 동결 속도 및 동결 온도, 준액체층의 형성 부피와 형태가 달라짐. 이번 연구는 수용성 유리가 물의 동결 시 결정화 변화에 미치는 영향을 알아보고 수용성 유리의 활동 가능 분야 탐색을 목적으로 함.

▶ 방법:

○ 샘플 준비

1. 수용성 유리를 포함한 수용액을 다양한 농도 조건에 따라 준비
2. 수용성 유리가 포함된 수용액을 저온 스테이지(Linkam THMS 600 stage (Linkam Scientific Instruments, Tadworth, UK))에서 동결 (100℃/min at -20℃)
3. 저온 스테이지가 부착된 공초점 현미경(LSM-800; Zeiss)에서 수용성 유리의 농도에 따른 얼음 미세 구조 관찰 및 결과 이미지 획득)

▶ 결과:

- 현미경 이미지 분석 결과, 수용성 유리는 대부분 크기 1-2 μm 의 구형(spherical) 입자로 구성되어 있으며, 이는 미네랄 성분을 기반으로 한 세제 유사 물질의 특징과 일치하는 것으로 보임 (그림 31). 특히 오른쪽 이미지에서 관찰되는 입자들은 개별적으로 흩어져 있으며 크기와 형태가 균일한 반면, 왼쪽 이미지에서는 다수의 입자가 응집(agggregation)되어 덩어리 형태를 이루고 있거나 불규칙하고 큰 크기의 입자들도 혼재되어 있어 비정형적이고 이질적인 구조의 존재를 시사함.
- 이러한 관찰 결과는 수용성 유리는 주로 미세하고 구형의 미네랄 입자들로 이루어져 있으면서도, 일부는 불완전한 분쇄나 응집으로 인해 큰 입자 상태로 존재함을 의미. 따라서 이 수용성 유리는 다성분으로 구성된 이질적 입자 분포를 가지며, 입자 간 상호작용 또는 투입 조건에 따라 물리적 분산 상태가 변화할 수 있는 특성을 지닌 것으로 평가됨

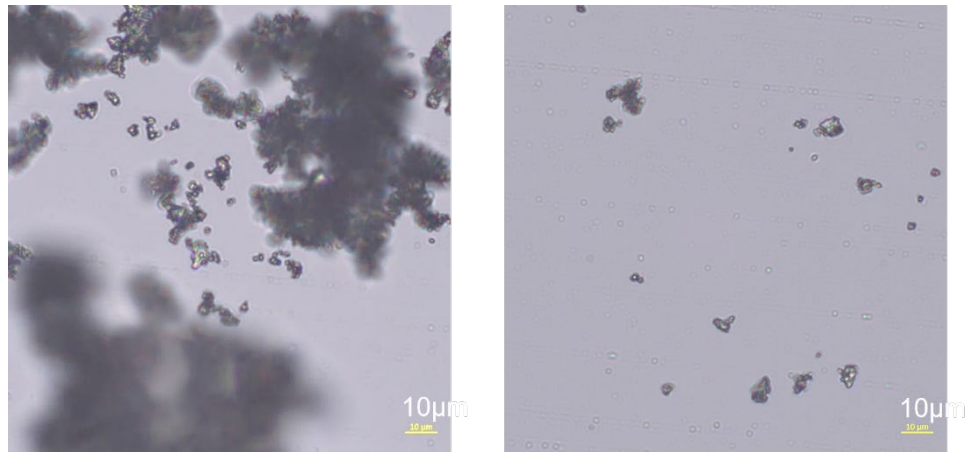


Figure 31. Microscopic images of the mineral-based particulate sample (scale bar = 10 μm). The left panel shows a dense aggregation of particles, including both spherical microparticles (1–2 μm in diameter) and irregularly shaped larger particles. The right panel depicts more isolated spherical particles, revealing their predominant morphology and uniform size distribution. These observations suggest that the sample consists mainly of mineral-based spherical particles with heterogeneous physical properties, including occasional large and amorphous aggregates likely resulting from incomplete dispersion or clumping.

- 수용성 유리의 스펙트럼 분석 결과, Static 영역에서는 무기 결정성 성분에 해당하는 피크들($600\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$)이 공통적으로 나타났고, Scan 영역에서 대체적으로 intensity가 낮게 관찰되는 것으로 보아 샘플이 무기질로 구성되어 있는 것으로 판단됨. (그림 32).

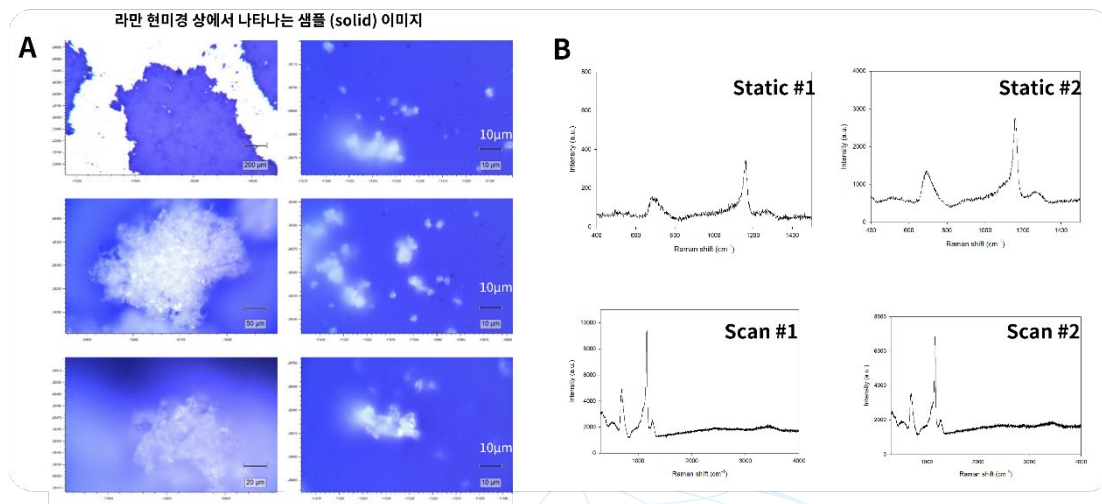


Figure 32. Solid-phase sample characterization by Raman microscopy and spectroscopy.

(A) Representative Raman microscopy images showing various particle morphologies and sizes in the solid-phase marine glass. Aggregated or irregularly shaped particles ranging from ~10 to 200 μm are observed, with both densely clustered and sparsely distributed areas.

(B) Raman spectra collected from static points (Static #1, #2) and scan regions (Scan #1, #2) of the marine glass. Static spectra show prominent peaks around $600\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$, characteristic of inorganic or crystalline mineral components. Scan spectra reveal strong peaks near 1000 cm^{-1} and additional broad bands in the $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ region, indicating the presence of organic C–H stretching vibrations—suggesting a heterogeneous composition of mineral and organic matter

- 라만 매핑 분석을 통해 관찰된 결과에 따르면, 수용성 유리(Marine glass)는

얼음 표면에 넓게 분포하며, 미세구조 내로 침투하거나 특정 영역에 농축되는 경향을 보였음. 특히 일부 영역에서는 강한 라만 신호의 집중 분포가 나타났으며, 이는 Marine glass가 얼음의 미세기공 또는 결빙 중 형성된 틈새에 물리적으로 흡착 혹은 포집되었을 가능성을 시사함 (그림 33).

- 그러나 전체적인 얼음의 미세구조 자체에는 뚜렷한 변형이나 붕괴 현상은 관찰되지 않았으며, 구조적 안정성이 유지되는 모습이었음. 동시에 이미지 상에서는 불규칙한 크기의 bubble(기포)이 광범위하게 형성되어 있었지만, 이는 화학적 반응보다는 결빙 과정에서 Marine glass 와 물 간 물리적 상호작용에 따른 것으로 해석됨.
- 종합적으로 볼 때, Marine glass 는 얼음과의 직접적인 구조 변형을 유도하지는 않으며, 표면 흡착 및 공간 채움 정도의 상호작용만이 나타나는 것으로 판단됨.



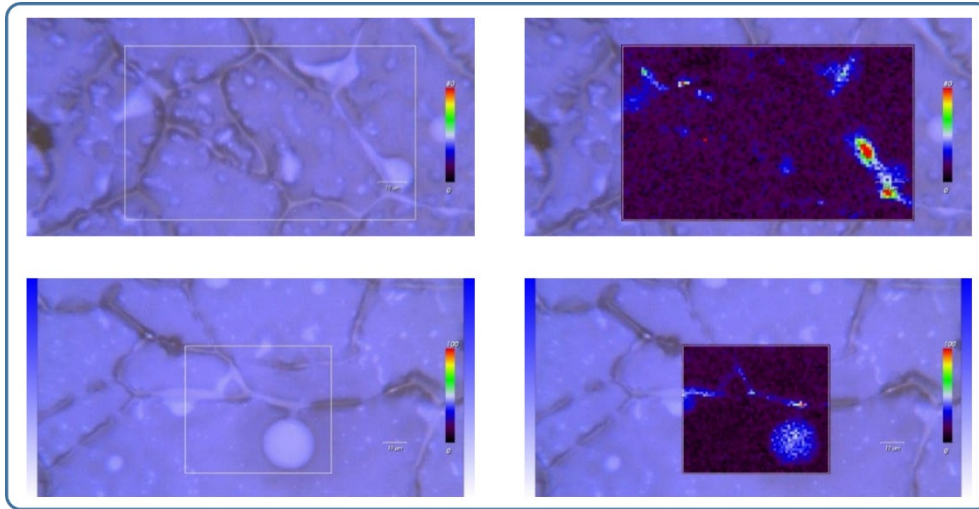


Figure 33. Raman chemical mapping of mineral-based particles on a substrate. Overlay images show the spatial distribution of Raman signal intensity overlaid on optical microscopy of the sample. (Top row): Raman mapping of a selected region reveals localized signal hotspots (red/yellow areas), indicating chemically distinct regions within an otherwise uniform surface. (Bottom row): A spherical particle shows concentrated signal intensity, particularly at the core and surrounding areas, suggesting chemical heterogeneity or core-shell structure. Color scales represent relative Raman intensity levels, with red indicating high intensity and blue indicating low or no signal.

5. 연구 결과 요약

세부 연구개발목표	세부 연구 결과 요약
1-1. Mineral wash의 미세조류 독성	➤ 모든 세제가 미세조류 독성 유발 (미세조류마다 감도 다름) ➤ Mineral wash는 일반세제와 비교 시 상대적으로 독성이 약함 ➤ Mineral wash의 사용 가능 최대 농도 2 mg/mL
1-2. Mineral wash의 극지 미생물 독성 비교 평가	➤ 일반세제와 비교 시 mineral wash는 미세조류에 보다는 박테리아종에 대해 상대적 독성이 약함. ➤ Mineral Wash를 0.5 mg/mL의 농도까지 높게 사용하더라도 극지 해양 박테리아의 군집에 영향이 최소로 나타남.
1-3. Mineral wash에 의한 극지 미생물 군집 변화	➤ 0.1mg/mL 농도의 mineral wash조건에서 해양 미세조류의 군집 변화는 일반세제에 비해 적게 일어남.
1-4. Mineral wash의 요각류 독성 평가	➤ Mineral wash가 비교적 낮은 독성으로 항산화 반응을 유도한 반면, 다른 세제는 높은 독성으로 세포 손상을 유발해 항산화 시스템이 억제되었을 가능성이 있음.
1-5. Mineral wash의 얼음 미세구조 영향	➤ (일반세제) 얼음 미세구조의 변성이 뚜렷이 확인되었으며, 작은 크기의 ice crystal과 에너지적으로 선호되지 않는 사각형 얼음 결정이 관찰되었음. ➤ (Mineral Wash) 얼음 표면에 다량 존재하며 얼음 미세구조 내에 내입 및 농축이 확인되었으나, 미세구조의 변성 특성은 크게 나타나지 않았음
2-1. 항균 활성 소재 특성 연구 I	➤ (<i>Bacillus proteolyticus</i> TD42) 1 mg/ml은 wt의 절반 정도로 생장률이 떨어지며, 2 mg/ml 이상은 자라지 못하는 것을 확인할 수 있음 ➤ 농도가 높아질수록 colony size가 줄어드는 것을 확인할 수 있는 항균 활성은 있지만, 멸균 효과는 나타나지 않음.
2-2. 항균 활성 소재 특성 연구 II	➤ (<i>Bacillus mycoïdes</i> PAMC29538) 농도가 증가함에 따라 CFU 값이 감소함. ➤ 물질 농도 2 mg/ml 이상 첨가한 샘플에서 급격히 박테리아 성장이 억제됨.

3-1. 극지 미세조류 단일종 성장 분석	➤ (극지 미세조류 KSF0090) Marine glass 농도 증가 → 극지 미세조류 성장 속도 감소, 최고 농도(5 mg/mL) → 성장 정지 확인 ➤ (극지 미세조류 KSF0100) Marine glass 농도 증가 시 성장 속도 증가, 최고 농도(5 mg/mL)에서도 성장 속도가 대조군(control)과 유사 ➤ 미세조류 성장을 위한 적정 농도는 0.5 ~ 2 mg/mL
3-2. 수용성 유리의 극지 미생물 영향 평가	➤ Chlorophyll a 농도에는 뚜렷한 농도 의존적 감소 또는 증가는 보이지 않음. ➤ 수용성 유리 농도가 높아질수록 OD600 값이 증가, 즉 박테리아 생물량이 증가함. 이는 수용성 유리가 박테리아에 영양원이 되거나, 특정 박테리아의 성장을 촉진하는 역할을 할 수 있음을 시사함.
3-3. 수용성 유리의 농도에 따른 성장 변화를 나타내는 미세조류	➤ 수용성 유리 농도 의존적 생존 비율 증가 미세조류 • <i>Navicula</i> sp. (Bacillariophyta), <i>Eukaryota</i> sp. (Unclassified), <i>Fragilariopsis</i> sp. (Bacillariophyta), <i>Urospora neglecta</i> (Chlorophyta) ➤ Marine glass 농도 증가에 따라 비율 급감 • <i>Fragilaria famelica</i> ➤ 수용성 유리 농도 의존적 생존 비율 증가 박테리아 • <i>Polaribacter filamentus</i>, <i>Colwellia rossensis</i>

6. 기타 활동 사항

<2024 해양주간 참여 (5.28)>

- 2024년 5월 28일 부산 벡스코에서 열린 ‘2024 해양주간’ 해양환경 콘퍼런스에서 LG전자는 자사의 수용성 유리파우더를 활용한 해양생태계 복원 방안을 발표했다. LG전자의 수용성 유리는 해수에 녹으면 무기질 이온으로 변환되어 미세조류와 해조류의 성장을 촉진하는 기능이 있으며, 이는 해양 생태계 복원에 기여할 수 있는 잠재력을 가진다. 또한 황토를 대체할 수 있는 친환경 소재로서 적조 대응에도 활용 가능성이 제시되었다. LG전자는 울산과학기술원(UNIST), 포항산업과학연구원(RIST) 등과 함께 수용성 유리의 해양 적용에 대한 안정성과 효과를 공동 연구하고 있으며, 극지연구소와의 협력을 통해 극한 해양 환경에서의 실증 가능성도 탐색하고 있다. 이처럼 LG전자는 수용성 유리파우더를 포함한 기능성 소재 사업을 ESG 전략과 연계해 해양 생태계 복원 분야로 확장하고 있다.

2025.4.23(수)
16.3°C 부산
미세먼지 좋음 / 초미세먼지 좋음

국제신문

≡ 사회 정치 경제 해양수산 국제 문화 주말엔 스포츠 기획 인터뷰

“이산화탄소 흡수 미세조류 성장 촉진...우리가 바다 살려”

2024 해양주간 해양환경 콘퍼런스- 수용성 유리 활용 생태계 복원

이유진 기자 eeuu@kookje.co.kr | 입력 : 2024-05-28 19:04:13 | 본지 6면

글자 크기 + -



- 극지 환경보호 해결사 전망도
- 수과원·기업 등 공동사업 상담



28일 부산 해운대구 벡스코에서 열린 ‘2024 해양주간’ 둘째 날 ‘해양환경 콘퍼런

<LG전자 - 극지연구소 연구 협약 체결 (6.17)>

- 2024년 6월 17일, LG전자와 극지연구소는 서울 금천구 LG전자 가산 R&D 캠퍼스에서 극지 환경 보호 및 기능성 유리 소재의 적용·개발을 위한 업무협약(MOU)을 체결했다. 이번 협약을 통해 LG전자는 자체 개발한 항균 및 수용성 기능성 유리 소재를 제공하고, 극지연구소는 극지 현장에서 해당 소재의 성능을 시험·검증하는 공동 연구를 수행할 계획이다. 해당 유리 소재는 물리·화학적 안정성이 높고, 인체 및 환경 친화성이 뛰어나며, 특히 수용성 유리는 무기질 이온으로 전환되어 극지의 미세조류 및 해조류 성장을 유도함으로써 해양 생태계 복원에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이번 협력은 극지 환경의 오염 저감뿐 아니라, 기후변화 대응 및 지속가능한 해양 생태계 관리 기술 개발의 기반이 될 것으로 전망된다.

 국제신문

극지역 환경보호와 기능성유리소재 적용 및 개발 위한 업무협약

극지연구소(소장 신형철)는 LG전자(대표이사 조주완)와 17일(월) 서울 금천구의 LG전자 가산 R&D 캠퍼스에서 업무협약을 체결했다.

Jun 19, 2024



 뉴스;트리

극지연구소-LG전자 '기능성 유리소재' 극지에서 성능시험한다

LG전자가 독자개발한 항균기능성 유리소재를 남극에서 성능을 시험한다. 극지연구소와 LG전자는 이를 위해 지난 17일 서울 금천구의 LG전자 가산 R&D...

Jun 18, 2024



 한국일보

남극 세종·장보고 기지에서 LG전자의 유리 소재 써본다

LG전자와 극지연구소가 극지역 환경 보호를 위해 환경오염 저감 소재를 함께 연구하기로 했다. LG전자가 개발한 항균 기능성 유리 소재와 수용성 유리...

Jun 18, 2024



7. 목표 달성도

가. 월 단위 달성도

연구개발 목표 / 내용		월 단위 추진계획												달성 도 (24/ 12기 준)
		24/ 5	24/6	24/7	24/8	24/9	24/10	24/11	24/12	25/1	25/2	25/3	25/4	
미네랄 세제	극지 미생물을 이용한 미네랄 세제의 독성 테스트 및 일반 세제와의 비교 연구													100%
	미네랄 세제의 물성 변화 연구													100%
항균 활성 소재	기능성 소재(항균 소재)의 항균 활성 검증													100%
	기능성 소재(항균 소재)의 과학기지 실험실 적용*													0%
수용성 유리 파우더	극지방 해수 성분분석*													0%
	수용성 유리의 독성/안전성 테스트													100%
	수용성 유리가 물의 결정화에 주는 영향 연구													100%

나. 달성도 성과지표

구분	%	성과지표			성과지표	특기사항 (우수성 또는 부진사유 등)
		부진	정상	우수		

목표 달성도					극지 생물/미 생물 지표종 검색 및 미네랄 세제의 독성 실험 결과	1건 이상
					극지 생물/미 생물 을 이용한 항균활성 실험 결과	1건 이상
					극지 해양 성분 기초 문헌 조사 및 성분 조사	1건 이상

*. 자체 평가



1) 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도	증빙자료 설명/제출
○ LG전자 HS 기능성 소재 사업실에서는 유리를 베이스로 하는 세제 개발하여 계면활성제의 사용 감소 효과	➢ Mineral wash와 일반세제의 극지 매세조류 독서 평가 완료 ➢ 극지 해양 미생물 군집 연구 및 종별 영향 평가 완료 ➢ Mineral wash의 얼음 미세구조 영향 평가 완료	100	결과 보고서
○ LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증	➢ 해양 및 극지 병원균을 대상으로 항균 활성 평가 완료	100	결과 보고서
○ LG전자에서 개발한 기능성 소재가 극지 바다 등 환경에 미치는 영향 연구	➢ 수용성 유리의 극지 생물 영향 평가 완료 ➢ 수용성 유리 동결 시 얼음 미세구조 관찰 실시	100	결과 보고서

2) 정량적 성과

구분		당해영도 목표(건)	달성 실적(건)	주저자 실적	달성도		증빙자료 (제출)	비고
논문	SCI(E)		부진	정상	100	%		
특허출원		해당사항 없음						
기타		해당사항 없음						

▶ 연구 미흡 사항

1) 미흡 사항 1

- 계획: 기능성 소재를 다양한 물건 형태로 만들어 극지 과학기지 실험실 및 생활관에 적용
- 원인: 다양한 항균 소재를 확보하는 과정이 미흡하여, 계획했던 세종과학기지 내 실험실 적용이 이루어지지 못함

1) 미흡 사항 2

- 계획: 남극 해수 성분 분석
- 원인: 극지 해수 샘플을 국내로 반입하는 과정에서 장기 이동 및 저장 중 해수 변질 (precipitant)가 발생함. 이로 인해 분석 결과의 재현성 확보가 어려웠고, 반복 실험 간 오차가 발생하여 신뢰도에 영향을 줌.

8. 연구개발의 우수성

○ LG전자 HS 기능성 소재 사업실에서는 유리를 베이스로 하는 세제 개발하여 계면활성제의 사용 감소 효과
○ LG전자 기능성 소재 항균 활성 검증
○ LG전자에서 개발한 기능성 소재가 극지 바다 및 극지 미생물에 미치는 영향 연구

9. 연구비 집행실적

재원출처	연구비목	예산액	예산집행		잔액
	세세목	실행예산	원인행위	집행	예산잔액
엘지전자 (주)	내부인건비	0	0	0	0
엘지전자 (주)	외부인건비	6,000,000	0	6,000,000	0
엘지전자 (주)	학생인건비	20,000,000	0	20,000,000	0
엘지전자 (주)	연구활동비	29,836,735	390,500	29,446,235	0
엘지전자 (주)	연구재료비	27,440,901	3,028,142	24,412,759	0
엘지전자 (주)	연구수당	2,000,000	0	1,999,990	10
엘지전자 (주)	회의비	972,364	254,543	717,821	0
엘지전자 (주)	연구실안전관리비	260,000	0	260,000	0
엘지전자 (주)	연구개발준비금	0	0	0	0
엘지전자 (주)	간접비	8,061,000	0	8,061,000	0
엘지전자 (주)	과학문화활동비(홍보)	80,000	0	80,000	0
엘지전자 (주)	연구개발능률성과급	1,375,000	0	1,375,000	0
엘지전자 (주)	지식재산권출원등록비	0	0	0	0
엘지전자 (주)	인력지원비	3,924,000	0	3,924,000	0
엘지전자 (주)	연구보안관리비	30,000	0	30,000	0
엘지전자 (주)	연구윤리활동비	20,000	0	20,000	0
합계		100,000,000	3,673,185	96,326,805	10

10. 연구인원의 구성

구분	성명	소속	전공 (학부/박사)	과학기술인 등록번호	비고
1	도학원	극지연구소 / 생명과학연구본부	생화학/극지과학	1126 6086	
2	이준혁	극지연구소 / 생명과학연구본부	유전공학/구조생물학	1108 1779	
3	김기태	극지연구소 / 빙하지각연구본부	환경공학/열음화학	1126 6089	
4	황지섭	극지연구소 / 생명과학연구본부	생명공학/극지과학	1181 1633	
5	Hoang Thi Ngoc Trang	극지연구소 / 생명과학연구본부	생화학/극지과학	1266 4794	
6	정현영	극지연구소/빙하지각연구본부	극지과학		본 과제 초기에 업무 분담에 따라 참여하였으며, 이후 과제 진행 과정에서 제외
7	김보미	극지연구소 / 생명과학연구본부	생화학/극지과학		독성평가를 위한 실험 수행을 위해 과제 중반 이후 합류
8	남예원	극지연구소 / 생명과학연구본부	생명공학		항균활성 실험 수행을 위해 과제 중반 이후 합류

11. 기타 조건

가. 사업기간(안): 2024년 3월 1일 ~ 2025년 04월 30일

나. 사업예산(안): 당해연도 1억원, 추가 연구 필요시 차년도 계약 연장

12. 참고문헌

Ahn, J. W., Hwangbo, K., Lee, S. Y., Choi, H. G., Park, Y. Il, Liu, J. R. &

- Jeong, W. J. (2012). *Bioresour. Technol.* **125**, 340-343.
- Kang, S.-H. K. and J.-S. (1998). 17-35.
- Kim, B. K., Hwang, J. H. & Kim, S. K. (2023). *Mar. Pollut. Bull.* **186**, 114441.
- Rowlands, E., Galloway, T. & Manno, C. (2021). *Sci. Total Environ.* **754**, 142379.
- Zingone, A., Forlani, G., Percopo, I. & Montresor, M. (2011). *Phycologia*. **50**, 650-660.



뒷 면

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 용역 사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 LG전자 용역 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.