

한국 남해안 패류생산해역의 독성 플랑크톤 분포 특성

윤민철, 김동욱, 원동재, 신순범, 하광수, 유홍식, 목종수¹, 박태규², 김근용³, 이가정

국립수산과학원 식품안전가공과, ¹국립수산과학원 기후환경연구부, ²국립수산과학원 기후변화연구과, ³아쿠아진텍(주)

Characteristics of Toxic phytoplankton Distribution in Shellfish Growing Areas of Southern Coast in Korea

Minchul Yoon, Dong Wook Kim, Dong Jae Won, Soon Bum Shin, Kwangsoo Ha, HongSik Yu, Jong-Soo Mok¹, Tae Gyu Park², Keun Yong Kim³ and Ka Jeong Lee

Food Safety and Processing Research Division, NIFS, Busan 46083, Republic of Korea

¹Ocean Climate and Environment Research Department, NIFS, Busan 46083, Republic of Korea

²Ocean Climate and Ecology Research Division, NIFS, Busan 46083, Republic of Korea

³AquaGenTech Co., Ltd, Busan 46083, Republic of Korea

ABSTRACT

The spatio-temporal distribution of toxic phytoplankton was investigated in seven designated shellfish growing areas along the southern coast of Korea from April 2021 to March 2022. Vegetative cells of eight toxic phytoplankton species were monitored using the Utermöhl method, and additional environmental DNA analysis and resting cyst surveys were conducted at nine sampling stations in Hansan-Geojeman area (Designated Area No. 1). Results revealed that *Pseudo-nitzschia* spp. occurred most frequently in all areas, while *Alexandrium* spp., *Dinophysis* spp., and *Prorocentrum cordatum* were identified as the predominant toxic phytoplankton. In Hansan-Geojeman area, vegetative cells of *Alexandrium* spp. increased during February-March 2022, and environmental DNA analysis identified *A. catenella* and *A. pacificum* as the dominant species. A significant correlation was observed between the paralytic shellfish toxin-producing gene *sxtA* and *A. catenella* in the environmental DNA analysis, while resting cyst surveys demonstrated high occurrence frequencies at specific stations (stations 1 and 9). This study provides fundamental data for monitoring toxic phytoplankton in shellfish growing areas along the southern coast of Korea, validates the appropriateness of the existing monitoring stations, and suggests the necessity of additional monitoring stations.

Key words : Toxic phytoplankton, Shellfish toxin, Environmental DNA, Resting cyst, Monitoring

서론

해양 식물플랑크톤 중 일부 종들은 독소를 생성하여 패류의 체내에 축적되고, 이를 섭취한 인간에게 심각한 건강 위협을 초래할 수 있다 (Anderson *et al.*, 2012). 주요 패류독소로는

마비성패류독소 (Paralytic Shellfish Poisoning, PSP), 설사성패류독소 (Diarrhetic Shellfish Poisoning, DSP), 신경성패류독소 (Neurotoxic Shellfish Poisoning, NSP) 등이 있으며, 이들은 *Alexandrium* spp., *Dinophysis* spp., *Pseudo-nitzschia* spp. 등의 독성 식물플랑크톤에 의해 생성된다 (Hallegraeff, 2003).

한국 남해안은 주요 패류 양식지로서 경제적 가치가 높으며, 패류독소 발생으로 인한 어업인의 피해와 소비자 건강을 보호하기 위해 패류생산해역에 대한 체계적인 모니터링이 필요하다 (Ha *et al.*, 2018). 이에, 우리나라에서는 주요 패류생산해역에 대한 위생관리를 위하여 1974년 한산·거제만 해역을 시작으로 2004년 강진만 해역까지 7개 수출용 패류생산 지정해역을 지정한 바 있으며 (NIFS, 2019), 한국패류위생계

Received: March 11, 2025; Revised: March 18, 2025;
Accepted: March 26, 2025

Corresponding author: Ka Jeong Lee

Tel: +82 (051) 720-2620, e-mail: kajlee@korea.kr
1225-3480/24890

This is an Open Access Article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License with permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproducibility in any medium, provided the original work is properly cited.

획 (KSSP, 2024) 에 따라 1980년부터 마비성패류독소, 1991년부터 설사성패류독소, 1993년부터 기억상실성패류독소 등에 대하여 지속적으로 관리하여 오고 있다. 또한, 독성 식물플랑크톤의 시공간적 분포 파악은 패류독소 발생 예측 및 관리에 중요한 기초자료가 되기 때문에 2008년 유럽연합 식품수의사무국 (FVO) 의 권고에 따라, 한국패류위생계획에 유독 플랑크톤에 대한 모니터링 계획을 수립하고 주의 수준 (alert level) 설정하여 관리하고 있다.

최근에는 전통적인 현미경 검경과 함께 환경 DNA (eDNA) 분석과 같은 분자생물학적 기법을 활용한 독성 식물플랑크톤 모니터링 방법이 주목받고 있다 (Medlin *et al.*, 2017). 또한 퇴적물 내 휴면포자 분포 조사는 향후 독성 식물플랑크톤 대발생의 잠재적 위험성을 예측하는 데 유용한 정보를 제공한다 (Anderson *et al.*, 2014).

본 연구는 한국 남해안의 7개 패류생산해역에서 독성 식물플랑크톤의 시공간적 분포를 파악하고, 한산·거제만 해역에서 독성 식물플랑크톤의 휴면포자 분포와 환경DNA 분석을 통해 패류독소 (마비성패류독소, 설사성패류독소, 기억상실성패류독소) 의 잠재적발생을 예측하고 독성 식물플랑크톤 모니터링을 위한 최적의 조사지점 선정에 관한 기초자료를 제공하고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 조사해역 및 조사시기

한국 남해안의 7개 패류생산해역 (한산·거제만, 자란만사량도, 미륵도, 가막만, 나로도, 창선, 강진만) 에서 총 16개 조사지점을 선정하여 2021년 4월부터 2022년 3월까지 월 2회 (4월에는 주 1회) 조사를 실시하였다 (Table 1). 특히 한산·거제만 해역 (1호 지정해역) 에서는 9개 조사지점을 선정 (Fig. 1) 하여 수층의 독성 식물플랑크톤 영양세포, 저질의 휴면포자, 그리고 수층의 환경DNA에 대한 상세 조사를 실시하였다.

2. 수층 독성 식물플랑크톤 영양세포 조사

수층의 독성 식물플랑크톤 영양세포 조사는 영국 NRL (National Reference Laboratory) 의 표준운영절차 (Standard Operating Procedure) 에 따라 Utermöhl 분석법을 이용하여 수행하였다. 조사 대상 독성 식물플랑크톤은 *Alexandrium* spp., *Dinophysis* spp., *Pseudo-nitzschia* spp., *Prorocentrum lima*, *Prorocentrum cordatum*, *Lingulodinium polyedra*, *Protoceratium reticulatum*, *Protoperidinium crassipes/curtipes* 총 8종이었다.

3. 저질 독성 식물플랑크톤 휴면포자 조사

한산·거제만 해역 9개 조사지점의 표층 퇴적물을 채취하여 Manual on Harmful Marine Microalgae (Hallegraeff, 2003) 에 따라 휴면포자 분석을 실시하였다. 조사 대상은 *Alexandrium*

Table 1. Information on the sampling areas to survey bloom dynamics of toxin-producing phytoplanktons

Sampling area	Sampling site	WGS-84	
		Latitude	Longitude
Hansan-Geojeman area (Designated area No.1)	HA-10-O	34°46'16"N (34°46.2667'N)	128°31'25"E (128°31.4167'E)
	HA-12	34°49'36"N (34°49.6000'N)	128°33'41"E (128°33.6833'E)
	HA-10-1	34°45'34"N (34°45.5667'N)	128°30'24"E (128°30.4000'E)
Jaranman-Saryangdo area (Designated area No. 2)	JA-1	34°55'04"N (34°55.0667'N)	128°14'11"E (128°14.1833'E)
	JA-3-O	34°49'58"N (34°49.9667'N)	128°15'06"E (128°15.1000'E)
Mirukdo area (Designated area No. 3)	MI-6	34°48'38"N (34°48.6333'N)	128°20'55"E (128°20.9167'E)
	MI-6-O	34°46'42"N (34°46.7000'N)	128°20'56"E (128°20.9333'E)
Kamakman area (Designated area No. 4)	KA-54	34°38'26"N (34°38.4333'N)	127°38'39"E (127°38.6500'E)
	KA-55	34°38'02"N (34°38.0333'N)	127°42'03"E (127°42.05'E)
Narodo area (Designated area No. 5)	NA-71	34°30'47"N (34°30.7833'N)	127°25'52"E (127°25.8667'E)
	NA-73	34°28'40"N (34°28.6667'N)	127°26'10"E (127°26.1667'E)
Changseon area (Designated area No. 6)	CH-61	34°51'12"N (34°51.2000'N)	128°04'23"E (128°04.3833'E)
	CH-62	34°50'21"N (34°50.3500'N)	128°05'21"E (128°05.3500'E)
Gangjinman area (Designated area No. 7)	GA-85	34°50'35"N (34°50.5833'N)	127°57'52"E (127°57.8667'E)
	GA-86	34°55'44"N (34°55.7333'N)	127°57'08"E (127°57.1333'E)
	GA-88	34°56'00"N (34°56.0000'N)	127°59'16"E (127°59.2667'E)

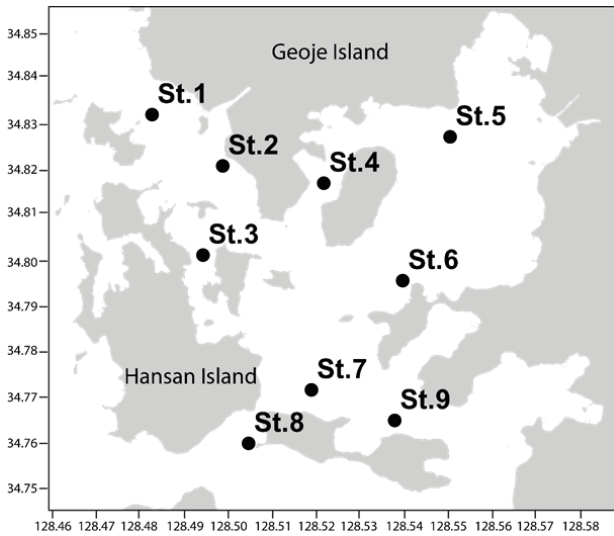


Fig. 1. Sampling sites of the nine sampling stations with GPS coordinates at Hansan-Geojema area (Designated area No. 1).

spp., *Lingulodinium polyedra*, *Protoceratium reticulatum*, *Protoperidinium crassipes/curtipes* 등 4종과 추가로 *Gymnodinium* spp.를 포함하였다.

4. 수층 독성 식물플랑크톤 환경 DNA 분석

한산·거제만 해역 9개 조사지점에서 해수 1 L를 채수하여 공극 0.45 μm, 직경 47 mm의 나이트로셀룰로스 막여과지 (Sartorius, Goettingen, Germany) 로 여과 후 DNeasy® Blood & Tissue Kit (Qiagen, Hilden, Germany) 를 이용하여 환경 DNA를 추출하였다. 추출된 환경 DNA는 *Alexandrium tamarense* 복합군에 속하는 5종 (*A. catenella*, *A. pacificum*, *A. tamarense*, *A. australiense*, *A. mediterraneum*) 과 *A. affine*, *Gymnodinium*

catenatum 그리고 마비성패류독소 생성 유전자인 *sxtA*에 대한 실시간 PCR 분석을 실시하였다. 환경 DNA 분석은 AquaAmp® PSP Planktons Triplex qPCR Kit (Auagentech Co. Ltd, Busan, Korea) 를 사용하여 제조사의 방법에 따라 수행하였으며 QuantStudio5 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) 를 이용하여 qPCR을 수행하였다.

qPCR 증폭반응을 통해 도출된 결과 (C_q 값) 를 독성 식물플랑크톤의 DNA 단편수 (copy number) 로 환산하기 위해, 양성대조물질 (각 종의 Plasmid DNA 100,000 copies/μL) 를 멸균증류수로 10배 희석하여 qPCR증폭반응을 수행하였다. 이를 통해 얻은 C_q 값과 양성대조물질의 예상되는 단편수를 바탕으로 검량선 (상관계수 r^2 , 0.9 이상) 을 작성하였다.

5. 통계분석

통계분석은 R프로그램 (<http://cran.r-project.org>, version 4.2.2) 환경에서 95% 신뢰수준으로 수행하였다. PSPEARMAN package를 이용해 스피어만 상관계수 (Spearman's rank correlation coefficients) 를 분석하였다.

결 과

1. 수층 독성 식물플랑크톤 영양세포 출현 현황

2021년 4월부터 2022년 3월까지 7개 패류생산해역에서 총 518건의 시료를 분석한 결과, *Pseudo-nitzschia* spp.가 452건으로 가장 높은 출현 빈도를 보였으며, *Dinophysis* spp. (121건), *Alexandrium* spp. (91건), *Lingulodinium polyedra* (26건), *Prorocentrum cordatum* (12건), *Prorocentrum lima* (10건), *Protoceratium reticulatum* (10건), *Protoperidinium crassipes/curtipes* (8건) 순으로 나타났다 (Table 2).

Table 2. Sum of observed samples and number of detected samples (> alert level) according to toxin-producing phytoplanktons at all designated shellfish growing areas around Korean coasts

Toxin-producing phytoplankton	Sum of observed samples	No. of detected samples (> alert level) ¹⁾	Alert level
<i>Alexandrium</i> spp.	91	3	> 100 cells/L
<i>Dinophysis</i> spp.	121	20	> 100 cells/L
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.	452	13	> 100,000 cells/L
<i>Prorocentrum lima</i>	10	4	No alert level
<i>Prorocentrum cordatum</i>	12	8	No alert level
<i>Lingulodinium polyedra</i>	26	-	No alert level
<i>Protoceratium reticulatum</i>	10	2	No alert level
<i>Protoperidinium crassipes/curtipes</i>	8	-	No alert level

¹⁾ Counted when above 100 cells/L for toxin-producing phytoplanktons without alert levels

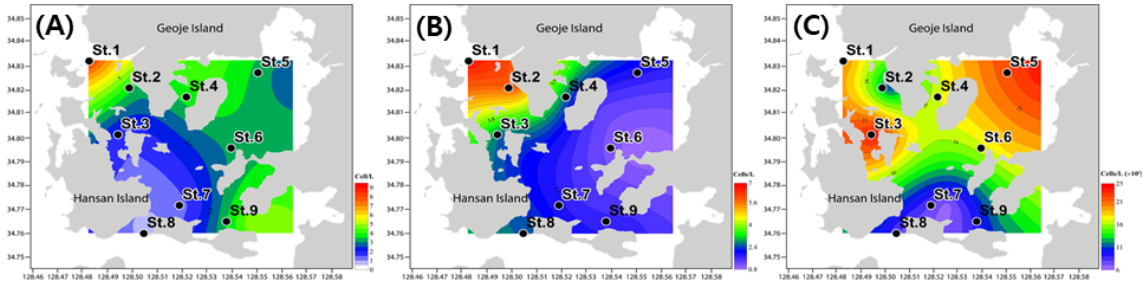


Fig. 2. A contour map showing spatio-temporal presences of the vegetative cells (cells/L) in water column samples of the nine sampling stations at Hansan-Geojeman area (Designated area No. 1) from Apr 2021 to Mar 2022; A, *Alexandrium* spp.; B, *Dinophysis* spp.; C, *Pseudo-nitzschia* spp.

주의 수준 (alert level) 을 초과한 시료는 *Dinophysis* spp.가 20건으로 가장 많았으며, *Pseudo-nitzschia* spp. 13건, *Alexandrium* spp. 3건이었다. 주의 수준이 설정되지 않은 독성 식물플랑크톤 중에서는 *Prorocentrum cordatum* (8건), *Prorocentrum lima* (4건), *Protoceratium reticulatum* (2건)이 100 cells/L 이상으로 검출되었다.

해역별로는 한산·거제만에서 *Pseudo-nitzschia* spp.가 89건, *Dinophysis* spp.가 23건, *Alexandrium* spp.가 17건 검출되었으며, 자란만·사량도 해역에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 78건, *Dinophysis* spp.가 27건, *Alexandrium* spp.가 17건 검출되었다. 미륵도 해역에서는 *Pseudo-nitzschia* spp.가 63건, *Dinophysis* spp.가 20건, *Alexandrium* spp.가 16건 검출되었다.

2. 한산·거제만 해역의 독성 식물플랑크톤 시공간적 분포

한산·거제만 해역 9개 조사지점에서 수층의 독성 식물플랑크톤 영양세포 분포를 조사한 결과, *Pseudo-nitzschia* spp.가 모든 정점에서 높은 빈도로 출현하였으며, 특히 2021년 7

월 20일에는 모든 정점에서 alert level (100,000 cells/L) 을 초과하였다. *Alexandrium* spp.는 주로 늦겨울에서 봄철 (2022년 2월3일) 에 증가하는 경향을 보였으며, 정점 1에서 가장 높은 출현량 (100 cells/L) 을 나타냈다. *Dinophysis* spp.는 주로 봄철과 초여름 (2021년 5월-7월) 에 출현하였으며, 정점 1과 2에서 상대적으로 높은 빈도로 관찰되었다. *Prorocentrum cordatum*은 2021년 7월 20일에 모든 정점에서 검출되었으며, 정점 3에서 가장 높은 농도 (97,180 cells/L) 를 보였다 (Fig. 2).

정점별 출현 빈도를 분석한 결과, 정점 1에서 총 38회로 가장 많은 출현이 관찰되었으며, 다음으로 정점 2 (34회), 정점 3 (31회), 정점 4 (30회) 순이었다. 추가 조사지점인 정점 1과 9에서도 독성 식물플랑크톤이 비교적 높은 빈도로 출현하였다 (Table 3).

3. 저질 독성 식물플랑크톤 휴면포자 분포

한산·거제만 해역 9개 조사지점의 저질에서 휴면포자 분포를 조사한 결과, *Gymnodinium* spp. 휴면포자가 가장 높은

Table 3. Spatio-temporal occurrence frequencies of eight toxin-producing phytoplankton vegetative cells in water column samples across the sampling stations at Hansan-Geojeman area (Designated area No. 1) during the survey period

Species	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9
<i>Alexandrium</i> spp.*	5	3	2	4	2	3	2	1	3
<i>Dinophysis</i> spp.**	5	5	3	1	1	1	2	3	1
<i>Pseudo-nitzschia</i> spp.***	24	24	23	24	22	23	23	20	23
<i>Prorocentrum lima</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Prorocentrum cornutum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Lingulodinium polyedra</i>	2	1	1	-	-	1	1	-	-
<i>Protoceratium reticulatum</i>	1	-	1	-	-	-	-	-	-
<i>Protoperidinium crassipes/curtipes</i>	-	-	-	-	-	-	-	1	1
* + ** + ***	34	32	28	29	25	27	27	24	27
Total	38	34	31	30	26	29	29	26	29

Table 4. Spatio-temporal distribution frequencies of five producing phytoplankton resting cysts in sediment samples across the sampling stations at Hansan-Geojeman area (Designated area No. 1) during the survey period

Species	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9
<i>Alexandrium</i> spp.	5	2	4	7	2	6	1	4	9
<i>Lingulodinium polyedra</i>	3	-	1	1	-	-	-	2	-
<i>Prorocentrum reticulatum</i>	-	-	1	-	-	1	1	2	1
<i>Protoperidinium crassipes/curtipes</i>	2	-	-	1	-	2	-	-	1
<i>Gymnodinium</i> spp.	18	15	18	17	16	16	15	17	18
Total	28	17	24	26	18	25	17	25	29

밀도와 빈도로 관찰되었으며, 정점 1, 3, 9에서 가장 빈번하게 출현하였다 (각각 18회). *Alexandrium* spp. 휴면포자는 주로 정점 9 (9회), 정점 4 (7회), 정점 6 (6회) 에서 높은 빈도로 관찰되었으며, 정점별 최대 농도는 0.2-1.5 cells/g의 범위를 보였다. *Lingulodinium polyedra*, *Protoceratium reticulatum* 휴면포자는 낮은 빈도와 농도로 일부 정점에서만 출현하였으며, *Protoperidinium crassipes/curtipes* 휴면포자는 전혀 관찰되지 않았다 (Table 4).

휴면포자의 계절적 출현 양상을 분석한 결과, 겨울철에서 봄철까지 자주 관찰되는 경향을 보였으며, 특히 2022년 2월 22일과 3월 8일에 가장 높은 출현 빈도를 나타냈다 (Fig. 3).

4. 수층 독성 식물플랑크톤 환경 DNA 분석 결과

한산·거제만 해역 9개 조사지점의 환경 DNA 분석을 위하여 Walker 등 (2021) 의 방법에 따라 세포당 ITS 영역의 copy 수를 고려하여 환산한 결과, *A. catenella*가 가장 높은 빈도와 농도로 검출되었으며, 특히 2022년 2월-3월에 모든 정

점에서 높은 농도를 보였다. 2022년 3월 17일에 정점 7에서 최대 1,618.37 cells/L, 정점 1에서 1,321.67 cells/L의 농도로 검출되어 alert level (100 cells/L) 을 크게 초과하였다.

*A. pacificum*은 주로 봄철과 겨울철에 높은 농도로 검출되었으며, 정점 1 (10회), 정점 3 (10회), 정점 2 (9회) 에서 빈번하게 출현하였다. *A. affine*은 주로 정점 1 (6회) 에서 높은 빈도로 검출되었으며, *A. australiense*는 정점 6과 7 (각각 4회) 에서 비교적 자주 검출되었다. *A. mediterraneum*과 *G. catenatum*은 일부 정점에서 간헐적으로 검출되었으며, *A. tamarensis*는 모든 정점에서 검출되지 않았다 (Table 5).

마비성패류독소 생성 유전자인 sxtA는 주로 겨울철에서 초봄철 (2022년 2월-3월) 에 검출되었으며, 정점 7에서 가장 높은 빈도 (4회) 로 관찰되었다. sxtA 유전자와 독성 식물플랑크톤 환경 DNA의 상관관계 분석 결과, *A. catenella*와 통계적으로 유의한 양의 상관관계를 보였다 ($p < 0.05$)(Fig. 4).

고 찰

본 연구는 한국 남해안 패류생산해역의 독성 식물플랑크톤 시공간적 분포에 대한 종합적인 정보를 제공하였다. 조사 결과, *Pseudo-nitzschia* spp.가 모든 해역에서 가장 빈번하게 출현하였으며, 특히 여름철 (7월) 에 alert level을 초과하는 높은 농도로 관찰되었다. 이는 여름철 남해안에서 *Pseudo-nitzschia* spp.에 의한 기억상실성패류독소 (Amnesic Shellfish Poisoning, ASP) 위험성이 상대적으로 높을 수 있음을 시사한다.

Alexandrium spp.는 주로 겨울철에서 봄철로 전환되는 시기 (2-3월) 에 증가하는 경향을 보였으며, 환경 DNA 분석 결과 *A. catenella*가 주요 종으로 확인되었다. *A. catenella*는 마비성패류독소 (Paralytic Shellfish Poisoning, PSP) 의 주요 원인종으로 알려져 있으며 (Anderson *et al.*, 2012), 본 연구에서도 sxtA 유전자와 유의한 상관관계를 보여 한국 남해안에서 마비성패류독소 발생의 주요 원인종을 확인하였다. 특히 2022년 2-3월에 alert level을 크게 초과하는 농도로 검

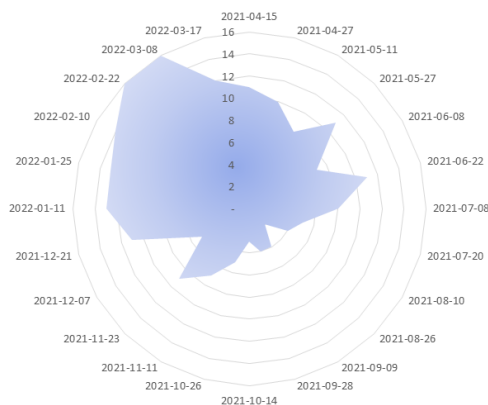


Fig. 3. Spatio-temporal distribution frequencies of five producing phytoplankton resting cysts in sediment samples throughout the survey period at Hansan-Geojeman area (Designated area No. 1) across the nine sampling stations.

Table 5. Spatio-temporal presences of 3 species plankton eDNA (cells/L) in water column samples of the nine sampling stations at Hansan-Geojeman area (Designated area No. 1) from Apr 2021 to Mar 2022

Species	Detection	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9
<i>A. affine</i>	Maximum (cell/L)	3.45	0.87	15.11	7.89	0.86	6.55	10.25	98.28	146.27
	Frequency (n)	6	1	3	3	1	4	4	4	4
	> alert level (n)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>A. catenella</i>	Maximum (cell/L)	1,321.67	746.08	555.93	388.67	376.85	751.19	1,618.37	387.67	490.34
	Frequency (n)	9	6	8	9	10	9	7	6	8
	> alert level (n)	3	3	2	2	3	2	3	3	3
<i>A. pacificum</i>	Maximum (cell/L)	34.82	27.19	15.54	7.72	35.40	47.92	11.29	25.36	33.89
	Frequency (n)	10	9	10	8	6	8	7	5	4
	> alert level (n)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

출되어 이 시기에 마비성패류독소 위험성이 높음을 시사한다.

Dinophysis spp.는 주로 봄철 (4-6월) 에 높은 출현 빈도를 보였으며, 일부 해역에서 alert level을 초과하는 농도로 관찰되었다. *Dinophysis* spp.는 설사성패류독소 (Diarrhetic Shellfish Poisoning, DSP) 의 주요 원인종으로 (Reguera et al., 2014), 봄철 한국 남해안에서 설사성패류독소 위험성에 대한 주의가 필요함을 의미한다.

휴면포자 조사 결과, *Alexandrium* spp. 휴면포자가 일부 정점 (특히 정점 9, 4, 6) 에서 높은 빈도로 관찰되었으며, 이는 해당 정점이 *Alexandrium* spp.의 시드 बैं크 (seed bank) 역할을 할 수 있음을 시사한다. Anderson (2014) 에 따르면, 퇴적물 내 휴면포자는 적합한 환경 조건에서 발아하여 수층으로 이동해 대발생을 일으킬 수 있으므로, 이들 정점은 향후 *Alexandrium* spp. 모니터링에 중요한 지점이 될 수 있다.

한산·거제만 해역의 9개 조사지점 중, 기존 7개 정점 (St. 2-8) 은 독성 식물플랑크톤 모니터링에 적합한 것으로 확인되었다. 그러나 추가 조사지점인 정점 1과 9에서도 독성 식물플랑크톤 영양세포와 휴면포자가 높은 빈도로 출현하였으며, 특히 정점 1은 영양세포 출현 빈도가 가장 높았고, 정점 9는 휴면포자 출현 빈도가 높게 나타났다. 따라서 이들 정점을 기존 모니터링 체계에 추가하는 것이 독성 식물플랑크톤의 유입과 해역 내 휴면포자 발아를 효과적으로 모니터링하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

환경 DNA 분석은 전통적인 현미경 검경 방법보다 더 높은 민감도와 종 특이성을 제공하였다. 특히 현미경 검경에서

Alexandrium 속 수준까지만 동정이 가능했던 것과 달리, 환경 DNA 분석은 종 수준까지의 동정과 정량이 가능하였다. 또한 sxtA 유전자 검출을 통해 마비성패류독소 생성 잠재력을 직접적으로 평가할 수 있었다. 이는 환경DNA 분석이 독성 식물플랑크톤 모니터링의 효과적인 보완 도구가 될 수 있음을 보여준다.

요 약

본 연구는 한국 남해안 패류생산해역의 독성 식물플랑크톤 시공간적 분포에 대한 종합적인 정보를 제공하였다. 조사 결과, *Pseudo-nitzschia* spp.가 여름철에, *Alexandrium* spp.는 겨울철에서 봄철로 전환되는 시기에, *Dinophysis* spp.는 봄철에 높은 출현 빈도와 농도를 보였다. 환경DNA 분석을 통해 *A. catenella*가 한국 남해안 마비성패류독소 발생의 주요 원인종임을 확인하였으며, 휴면포자 조사를 통해 특정 정점이 독성 식물플랑크톤의 시드 बैं크 역할을 함을 확인하였다.

한산·거제만 해역의 기존 조사지점 체계는 독성 식물플랑크톤 모니터링에 적합한 것으로 평가되었으나, 추가 조사지점인 정점 1과 9를 모니터링 체계에 포함시키는 것이 해역 내 독성 식물플랑크톤 동태를 더 효과적으로 파악하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 한국 남해안 패류생산해역의 패류독소 관리를 위한 효과적인 모니터링 전략 수립에 중요한 기초자료가 될 것이며, 향후 기후변화에 따른 독성 식물플랑크톤 분포 변

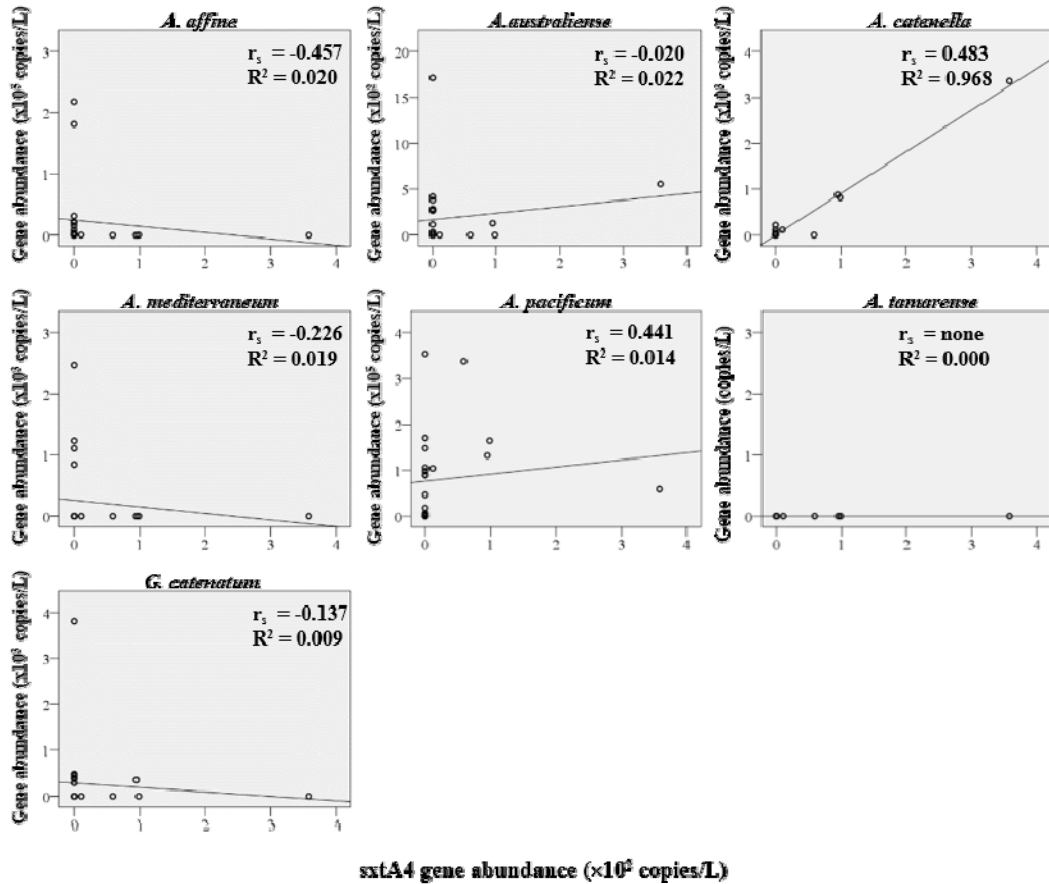


Fig. 5. Scatter plots between presences of six *Alexandrium* species (*A. tamarense* complex and *A. affine*)/*G. catenatum* and *sxtA* gene eDNA (copies/L) and their associated linear regressions (black solid line) with the linear regression coefficient, r^2 in water column samples at Hansan-Geojeman area (Designated area No. 1) during the survey period. Spearman's rank correlation coefficients (r_s , $*P < 0.05$) of each species were presented.

화 연구에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 2025년도 국립수산과학원 수산과학연구사업 (R2025055) 의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Anderson, D. M., Cembella, A. D., Hallegraeff, G. M. (2012) Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, **4**: 143-176.

Anderson, D. M., Keafer, B. A., Kleindinst, J. L., McGillicuddy Jr, D. J., Martin, J. L., Norton, K.,

Pilskaln, C. H., Smith, J. L., Butman, B. (2014) *Alexandrium* fundyense cysts in the Gulf of Maine: long-term time series of abundance and distribution, and linkages to past and future blooms. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **103**: 6-26.

European Commission (2015) Commission Regulation (EU) 2015/2285 amending Annex II to Regulation (EC) No 854/2004 of the European parliament and of the council laying down specific rules for the organisation of official controls on products of animal origin intended for human consumption as regards certain requirements for live bivalve molluscs, echinoderms, tunicates and marine gastropods and Annex II to Regulation (EC) No 466/2001. *Official Journal of the European Union*.

Ha, K. S., Lee, K. J., Jeong, Y. J., Mok, J. S., Kim, P. H., Kim, Y. K., Lee, H. J., Kim, D. W., Son, K. T. (2018) Evaluation of Sanitary Safety for Shellfish in Hansan · Geojeman, Korea. *Journal of Food Hygiene*

- and Safety*, **33**: 404-411.
- Hallegraeff, G. M. (2003) Harmful algal blooms: a global overview. *Manual on Harmful Marine Microalgae*, **33**: 1-22.
- Medlin, L. K., Orozco, J. (2017) Molecular techniques for the detection of organisms in aquatic environments, with emphasis on harmful algal bloom species. *Sensors*, **17**(5): 1184.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) (2024). Korean Shellfish Sanitation Program, Manual of Operation. Chapter 5. Marine Biotoxin Control.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). (2019) History of Korean Seafood Processing and Safety Research, pp.459-463.
- Reguera, B., Riobó, P., Rodríguez, F., Díaz, P. A., Pizarro, G., Paz, B., Franco, J. M., Blanco, J. (2014) *Dinophysis* toxins: causative organisms, distribution and fate in shellfish. *Marine Drugs*, **12**(1): 394-461.
- UK NRL(National Reference Laboratory). Phytoplankton Enumeration SOP (Standard operating procedure for the identification and enumeration of potential toxin-producing phytoplankton species in samples collected from UK coastal waters using the Utermöhl method, Version 6)
- Walker, L., M., Hoppe, T., Silliker, M. E. (2021) Myxomycetes, Chapter 6. Molecular techniques and current research approaches, Second edition, pp.195-229.