

## 진해만 적조의 발생 실태와 특징

이문옥<sup>1</sup> · 김종규<sup>2,†</sup> · 김병국<sup>3</sup><sup>1</sup>전남대학교 조선해양공학과 명예교수<sup>2</sup>전남대학교 조선해양공학과 교수<sup>3</sup>한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장

## Outbreaks and Characteristics of Microalgal Blooms in Jinhae Bay, Korea

Moon Ock Lee<sup>1</sup>, Jon Kyu Kim<sup>2,†</sup>, and Byeong Kuk Kim<sup>3</sup><sup>1</sup>*Emeritus Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*<sup>2</sup>*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*<sup>3</sup>*Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong 53007, Korea*

## 요 약

본 연구에서는 국립수산물품질관리원(NAQ)이 지난 40년간 조사한 적조정보자료를 바탕으로 진해만 적조의 발생 실태를 분석하였고, 또한 지금까지 수행된 타 연구자의 연구성과로부터 진해만 적조의 발생 특징을 고찰하였다. 조사기간 중 진해만에 출현한 적조 원인생물은 *Chaetoceros* sp.를 비롯한 규조류가 10종, 편모조류가 33종, 황금색조류가 2종, 야광충이 3종, 섬모류가 1종 등, 총 49종으로, 상대적으로 편모조류가 많았다. 진해만 적조의 발생해역은 수심이 얇고 반폐쇄적 정체 수역인 소내만(inner bay)이라는 공통점을 가지고 있었다. 특히, 마산만과 행암만은 진해만내에서 발생한 전체 적조의 67%를 점하였다. 그러나, 1990년대 중반 이후 진해만 적조 발생은 현저히 감소하였으며, 이것은 마산만을 비롯한 진해만 전역에 대한 수질개선 노력의 결과로 판단된다. 진해만 적조는 대개 춘계에 최초로 발생하여 하계 또는 늦은 하계에 소멸하였으며, 이것은 진해만에서의 성층의 형성시기 또는 빈산소수괴의 발달과 관련이 있는 것으로 추론되었다. 진해만 적조는 빈산소수괴 발달 및 형성과 밀접한 관련을 가지고 있었으며, 이것은 진해만 저질의 유기 오염이 여전히 개선되지 않았음을 의미하였다. 결론적으로 진해만 적조는 외해수나 소내만을 통한 영양염류의 유입, 그리고 남서부 해역에 밀집한 양식생물로부터 유래하는 유기오염물질에 의한 빈산소수괴의 형성 등에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

**Abstract** – We analyzed situations of the algal blooms occurred in Jinhae Bay, Korea, based on the red tide information data of NIFS (National Institute of Fisheries Science) and then examined occurrence characteristics by means of comprehensive reviews of previous studies on algal blooms in Jinhae Bay. During the investigation period, 49 species appeared as causative organisms of the algal blooms, which consisted of 10 diatoms, 33 flagellates, 2 crysophyceae, 3 noctiluca, and 1 cibes, and as a result, flagellates were relatively predominant. Algal blooms in Jinhae Bay turned out to commonly occur in the area where the depth is shallow as well as the flow is stagnant, such as semi-enclosed inner bays. In particular, algal blooms of more than 67% in total occurred in Masan and Haengam bays. However, since the mid-1990s, the occurrence of algal blooms in Jinhae Bay remarkably decreased, thanks to the efforts of water quality improvement over the entire Jinhae Bay including Masan Bay. On the other hands, algal blooms tended to first occur in spring and then extinct in summer or the late summer, indicating that it relates to the formation time of stratification or the development of oxygen-deficient water mass. As a result, that explains a sedimentary environment of Jinhae Bay is not still improved from organic contamination. Consequently, algal blooms in Jinhae Bay appeared to occur by means of the nutrient inflows through the outer seawater or small inner bays, and the formation of oxygen-deficient water mass that originates from dense farming organisms at the southwest of the bay.

**Keywords:** Jinhae Bay(진해만), Algal blooms(적조), Marine environment(해양환경), Oxygen-deficient water mass(빈산소수괴)

---

<sup>†</sup>Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

## 1. 서 론

한국 남해안의 동쪽에 위치하고 있는 진해만은 동서방향의 폭이 25 km, 남북방향의 길이가 25-35 km, 만내 수심이 5-20 m, 수면적은 약 637 km<sup>2</sup>에 이르는 반폐쇄성 해역이다(Fig. 1). 진해만은 창원시, 고성군, 통영시, 거제시 등으로부터 유입되는 약 40여 개의 하천과 개방된 동쪽의 가덕수도를 통해 낙동강 하천수의 영향을 받고 있으며 남쪽으로는 외해(남해)와 연결되어 있다(Oh[2008]). 한편, Fig. 2는 2020년 현재 진해만 주변에 산재하고 있는 어장(양식장, 정치망, 마을어업 등)의 분포를 나타내는데, 예로부터 진해만은 피조개

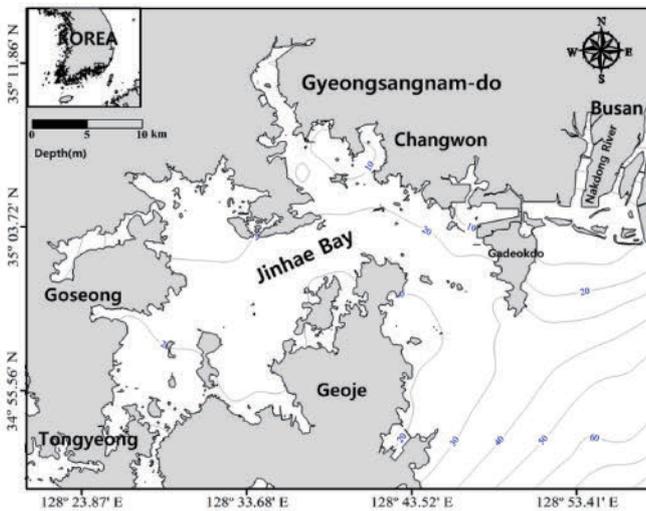


Fig. 1. Jinhae Bay as the study area.

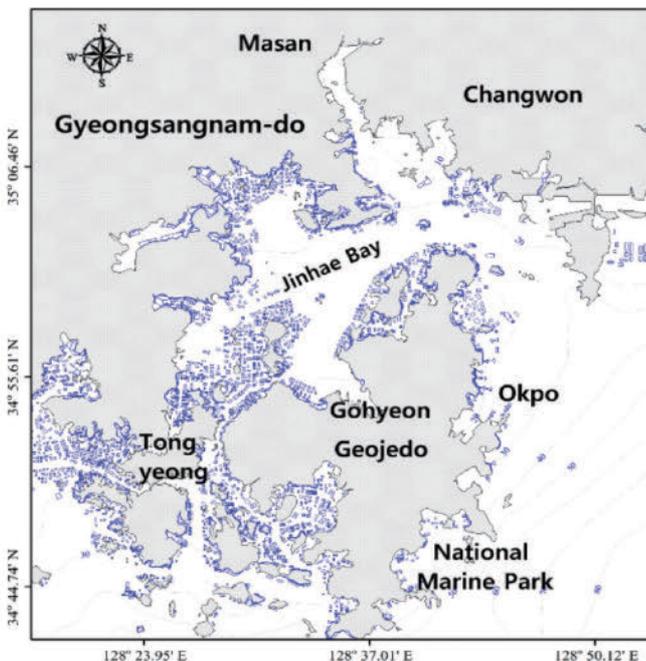


Fig. 2. Distribution of farms (blue color) around Jinhae Bay (<http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>).

(*Scapharca broughtonii*), 홍합(mussel), 굴(*Crassostrea gigas*)의 양식이 성행하였고(Jin *et al.*[2019]), 멸치(*Engraulis japonicus*)와 대구(*Gadus macrocephalus*)의 산란장과 성육장으로서도 널리 알려져 있다(Kim and Kim[2009]; Lee *et al.*[2008]). 뿐만 아니라, 붕장어(*Conger myriaster*)나 볼락(*Sebastes inermis*) 등 다양한 어종이 서식하고 있어서 어장으로서의 가치도 높은 해역이다(An and Huh[2002]). 그러나, 1960년대 이후 마산창원공업단지를 비롯한 각종 산업단지가 조성되기 시작하면서 산업폐수와 생활하수의 유입은 물론, 과밀한 양식시설로 인한 유기오염이 지난 50년 이상 지속되어 왔다. 그 결과, 진해만은 하계를 중심으로 한 유해적조의 발생과 빈산소수괴(oxygen deficient water mass; ODW)의 형성 등으로 수산생물의 서식환경 악화가 문제가 되어 왔다(Park[1975]; Paik and Yun[2000]; Lim and Shin[2005]). 이에 따라 마산만은 해양오염방지를 위해 2000년 특별관리해역으로 지정되었으며, 이후 2007년에는 1단계, 2012년에는 2단계 오염총량제가 시행되어 COD(chemical oxygen demand), 질소, 인에 대한 배출 총량이 규제되고 있다(Kwon *et al.*[2014]).

한편, 진해만의 빈산소는 2000년대 이후 일반적으로 5월에 발생하기 시작하여 9월에 소멸하기 시작하지만, 최근에는 빈산소의 발생 시기가 길어져 10월 중순까지 관측되고 있다(Lee[2020]). 이러한 빈산소수괴는 1978년 진해만에서 발생한 굴의 대량 폐사 원인으로 Cho[1979]에 의해 처음으로 제기된 이래, 매년 하계를 중심으로 그 발생규모와 지속시간이 증가하는 추세에 있다(NFRDI[2009]). 저층에 빈산소수괴가 형성되면 식물플랑크톤의 영양염 이용가능성에 영향을 주게 된다. 빈산소수괴가 형성되는 하계에 수온이 증가하게 되면 수층과 퇴적물에서는 유기물 분해가 활발하게 된다. 그 결과, 영양염의 재생산이 증가하게 되는데, Herbert[1999], Hopkinson and Smith[2005] 등에 따르면, 이때 특히 많은 양의 인산염이 퇴적물로부터 용출된다고 하였다. 또한 Belias *et al.*[2007]; Villnå *et al.*[2012]; Danielsson[2014] 등도 빈산소 환경은 다량의 암모늄, 인산염, 규산염을 퇴적물로부터 방출시킨다고 하였다. 특히, Park[2016], Nunnally *et al.*[2014]은 빈산소수괴의 발달에 따른 영양염 농도 변화가 수층 혼합과 확산을 통해 유폴층으로 전달되거나 성층 아래에서 식물플랑크톤의 일차생산에 이용될 수 있다고 주장하였다. 한편, 빈산소 또는 빈산소수괴는 해저에 퇴적된 유기물이 분해되어 형성되는데, Kim[2005]은 빈산소수괴가 형성되면 해수의 pH가 낮아지고 철(Fe), 망간(Mn) 등의 금속과 분해 부산물로서 amine, amino acid 등의 염기성 유기물의 생성이 활발해진다고 주장하였다. 또한 그는 적조발생의 환경조건으로서, 적조원인생물의 존재, 일조량, 수온, 영양염류, 비타민류와 미량원소, 흐름이 정체된 수역 등을 제시하였다.

한편, 진해만은 연안을 따라 마산만을 비롯한 행암만, 진동만, 당동만, 원문만, 용동만, 당항만 등 수심이 비교적 얇은 여러 소내만이 자리하고 있는데, 이들 소내만에서의 흐름은 10 cm·s<sup>-1</sup> 이하로 미약하고 해수순환도 제한적이다([Kang 1991]). 이들 소내만은 모두 연안으로부터의 육수유입에 의해 영양염류는 물론, 비타민류나

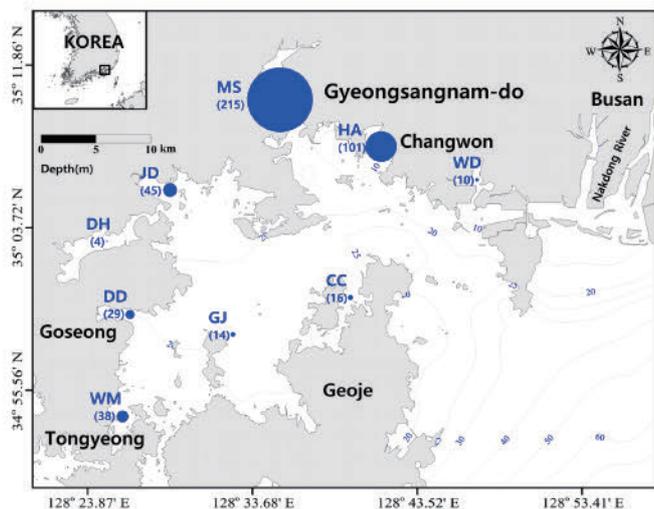


Fig. 3. Jinhae Bay of the study area (MS: Masan Bay, HA:Haengam Bay, JD: Jindong Bay, Weonmun Bay, DD: Dangdong Bay, CC: Chilcheondo, GJ: Gajodo, WD: Wungdong Bay, DH: Danghang Bay).

철, 망간, 아연 등의 미량원소도 공급받고 있어서 하계 저열효과로 인해 수온이 상승하면 적조가 발생할 가능성이 있다. 그 한 예로서, 진해만에서의 적조는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 지금까지 모두 마산만을 비롯한 소내만에서 발생하였다(여기서, 그림의 괄호 속의 숫자는 1981년부터 2022년까지 해당지역에서의 적조의 누적발생 건수를 나타낸다). 따라서, 진해만의 적조는 수심이 얕고 흐름이 정체한 수역에서 적조생물의 증식에 호적한 수온과 영양염류의 공급에 의해 야기되고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 국립수산물과학원(NIFS)이 공개하고 있는 지금까지의 진해만 적조발생자료로부터 진해만 적조의 발생 실태를 분석하였다. 또한 진해만 적조와 관련하여 수행된 타 연구자의 연구 성과를 광범위하게 리뷰하여 진해만 적조의 발생 특징을 고찰하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 국립수산물과학원(NIFS[2023])의 적조정보시스템(<https://www.nifs.go.kr/red>)이 제공하는 1981년부터 2022년까지의 적조발생자료 및 해양환경공단(KOEM[2023])의 해양환경정보포털(<https://www.meis.go.kr>)의 해양환경측정망자료, 해양조사원(KHOA[2020])의 개랑해(<https://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>)의 자료를 각각 참고하여, 진해만 적조의 발생 실태를 분석하였다(참고로 국립수산물과학원에서는 유해성적조생물의 세포밀도가 10 cells·mL<sup>-1</sup> 이상일 경우를 적조로 정의하고 있음). 또한 진해만 적조연구와 관련한 학위논문, 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI), 과학인용지수(Science Citation Index; SCI)에 게재된 논문을 분석하여 마산만을 포함한 진해만 적조의 발생 특징을 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 진해만 적조 발생역사와 실태

Table 1은 1981년 7월 17일 진해만내 소내만인 당동만(DD)에서 *Chaetoceros* sp.(세포밀도: 1,396-1,421 cells·mL<sup>-1</sup>)에 의한 적조가 발생한 이래 2022년 현재까지의 적조발생상황을 나타낸다. 이 결과에 따르면, 이기간 중 최초로 적조를 일으킨 원인종은 총 20종으로, 규조류가 4종(*Chaetoceros* sp., *Pseudonitzschia pungens*, *Nitzschia* sp., *Skeletonema costatum*), 편모조류가 14종(*Prorocentrum micans*, *P. sp.*, *P. minimum*, *Chattonella* sp., *Heterosigma akashiwo*, *Eutreptiella gymnastica*, *Alexandrium tamaranse*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Akashiwo sanguinea*, *Ceratium furca*, *Heterocapsa triquetra*, *H. sp.*, *Gymnodinium mikimotoi*, *G. sanguineum*), 섬모충류가 1종(*Mesodinium rubrum*), 야광충이 1종(*Noctiluca sp.*)이었다. 따라서 진해만 적조는 2001년 이전에는 규조류에 의해 간헐적으로 발생하였으나, 그 이후에는 편모조류에 의해 다발적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 반면, 2022년 현재까지 진해만 적조시 출현한 원인종은 규조류가 10종(*Chaetoceros* sp., *Skeletonema costatum*, *Leptocylindrus* sp., *Nitzschia* sp., *N. seriata*, *Thalassiosira* sp., *T. nordenskiöldii*, *Biddulphia* sp., *Rhizosolenia* sp., *Pseudonitzschia pungens*), 편모조류가 33종(*Chattonella* sp., *Gymnodinium* T-65, *G. splendens*, *G. nagasakiense*, *G. mikimotoi*, *G. sanguineum*, *Prorocentrum* spp., *P. micans*, *P. dentatum*, *P. triestinum*, *P. minimum*, *P. sp.*, *Alexandrium tamaranse*, *Ceratium furca*, *Gonyaulax* sp., *G. fratercula*, *G. polygrammer*, *Cochlodinium* (=Margalefidinium) sp., *C. polykrikoides*, *Protogonyaulax* sp., *P. fratercula*, *Peridinium* sp., *Heterosigma* sp., *H. akashiwo*, *Akashiwo sanguinea*, *Polykrikoides hartmannii*, *Heterocapsa triquetra*, *H. sp.*, *Exuviaella compressa*, *Gyrodinium* sp., *G. masasatiense*, *Eutreptiella* sp., *E. gymnastica*), 황금색조류가 2종(*Dictyocha* sp., *D. fibula*), 야광충이 3종(*Noctiluca scintillans*, *N. sp.*, *N. miliaris*), 섬모충류가 1종(*Mesodinium rubrum*)으로 총 49종이었으며, 편모조류가 우세하였다.

### 3.2 진해만 적조의 발생해역

전술한 Fig. 3에 따르면, 조사기간(1981년부터 2022년까지) 중 진해만 적조는 소내만인 당동만에서 최초로 발생한 이래, 지금까지 총 472회 적조가 발생하였다. 이들을 소내만(inner bay)별로 살펴보면, 마산만(MS)이 215회(45.6%)로 가장 많았고, 다음으로 행암만(HA)이 101회(21.4%), 진동만(JD)이 45회(9.5%), 원문만(WM)이 38회(8%), 당동만(DD)이 29회(6.1%), 칠천도(CC)가 16회(3.4%), 가조도(GJ)가 14회(3.4%), 웅동만(WD)이 10회(2.1%), 당항만(DH)이 4회(1%)의 순이었다. 진해만 적조는 만내의 가조도나 칠천도를 제외하고는 모두 소내만에서 발생하였으며, 이들 해역은 모두 흐름이 미약한 반폐쇄적인 정체수역을 알 수 있다(Fig.4). 특히 마산만과 행암만은 진해만내에서 발생한 전체 적조의 67%를 점하고 있는 점이 주목된다.

Table 1. Occurrence situations of algal blooms in Jinhae Bay

Algal blooms occurrence situations					
	First Causative organism	Cell density (cells·mL <sup>-1</sup> )	Occurrence date First/Final	First occurrence area	Cumulative occurrence frequency
1981	<i>Chaetoceros</i> sp.	1,396-1,421	Jul 17/Sep 30	DD	23
1982	<i>Prorocentrum micans</i>	16,500	Jun 17/Sep 13	MS/HA	10
1983	<i>Chattonella</i> sp.	200-1,100	Apr 20/Sep 26	JD	19
1984	<i>Heterosigma akashiwo</i>	2,000-180,000	May 17/Oct 14	MS	10
1985	<i>Eutreptiella gymnastica</i>	4,700	Apr 2/Oct 23	MS	16
1986	<i>Heterosigma akashiwo</i>	3,000-10,000	May 12/Sep 26	MS	18
1987	<i>Skeletonema costatum</i>	15,000-20,000	Feb 18/Oct 5	MS	12
1988	<i>Prorocentrum micans</i>	520-580	Jul 4/Aug 24	MS	10
1989	<i>Heterocapsa triquetra</i>	2,000-30,000	Mar 17/Nov 9	MS	14
1990	<i>Heterocapsa triquetra</i>	56,000	Mar 22/Sep 7	MS	11
1991	<i>Heterocapsa triquetra</i>	1,000-2,000	Mar 27/Dec 17	MS	10
1992	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	1,200	May 18/Aug 4	MS	5
1993	<i>Heterosigma akashiwo</i>	10,000-50,000	May 24/Sep 14	MS	7
1994	<i>Eutreptiella gymnastica</i>	20,000-45,000	Apr 7/Aug 29	MS	5
1995	<i>Gymnodinium sanguineum</i>	1,100-1,600	May 1/Jul 12	MS	4
1996	<i>Nitzschia</i> sp.	7,000	Apr 1/Aug 23	MS	10
1997	<i>Alexandrium tamaranse</i>	4,840	Apr 7/Sep 12	JD	14
1998	<i>Heterocapsa</i> sp.	1,000-4,000	Mar 17/Sep 15	MS/HA	26
1999	<i>Prorocentrum</i> sp.	15,400-19,800	Apr 23/Sep 27	MS	14
2000	<i>Heterocapsa triquetra</i>	150-1,350	Mar 20/Aug 8	MS/HA	10
2001	<i>Pseudonitzschia pungens</i>	900-1,250	Apr 20/Aug 4	MS	7
2002	<i>Heterosigma akashiwo</i>	4,000-8,000	May 17/Sep 10	MS/HA	14
2003	<i>Prorocentrum minimum</i>	23,000-32,000	Apr 28/Sep 17	MS	8
2004	<i>Prorocentrum</i> sp.	9,500-33,000	Apr 13/Aug 12	MS	7
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	40-80	Aug 29	WM	1
	<i>Mesodinium rubrum</i>	6,000-7,000			
2005	<i>Pseudonitzschia pungens</i>	1,600-3,800	May 16/Sep 13	MS	8
	<i>Heterosigma akashiwo</i>	200-300			
2006	<i>Noctiluca</i> sp.	200-9,500	Apr 17/Jun 30	MS	9
2007	<i>Heterosigma akashiwo</i>	13,400-22,000	Jun 4/Jun 19	MS	2
2008	<i>Heterosigma akashiwo</i>	2,210-12,500	May 23/Aug 28	MS	2
2009	<i>Mesodinium rubrum</i>	2,500-5,500	Mar 12/Aug 24	MS	5
2010	<i>Alexandrium tamaranse</i>	2,500-3,800	Apr 12/Jun 9	JD	3
2011	<i>Heterosigma</i> sp. <i>Akashiwo sanguinea</i>	60-2,300 60-200	May 28	MS	1
2012	<i>Heterosigma akashiwo</i>	15,000-45,000	Jun 1/Sep 26	MS	5
2013	<i>Heterosigma akashiwo</i>	5,000-35,000	Jun 3	MS	1
2014	<i>Akashiwo sanguinea</i>	1,000-2,000	May 8/Jun 3	MS	3
2015	-	-	-	-	-
2016	<i>Akashiwo sanguinea</i>	100-200	Nov 16/Nov 23	GJ	3
2017	-	-	-	-	-
2018	<i>Akashiwo sanguinea</i>	50	May 10	MS	1
2019	-	-	-	-	-
2020	<i>Ceratium furca</i>	500-2,100	Jul 10	MS	1
2021	<i>Akashiwo sanguinea</i>	4,000-4,500	Apr 29/May 21	MS	2
2022	-	-	-	-	-

또한, Fig. 5는 해에 따른 적조의 발생빈도를 나타내는데, 마산만에서는 지난 1980년까지는 적조가 빈번히 발생하였으나, 1990년대 들어서부터 현저히 그 발생빈도가 줄었다. 그러나 다시 1990년 중

반부터 2000년대 중반까지 다시 적조의 발생빈도가 증가하였다가 2000년대 후반 들어 현저히 감소하였다. 한편, 행암만의 경우도 마산만과 마찬가지로 1980년대에는 적조가 빈번히 발생하다가 점차

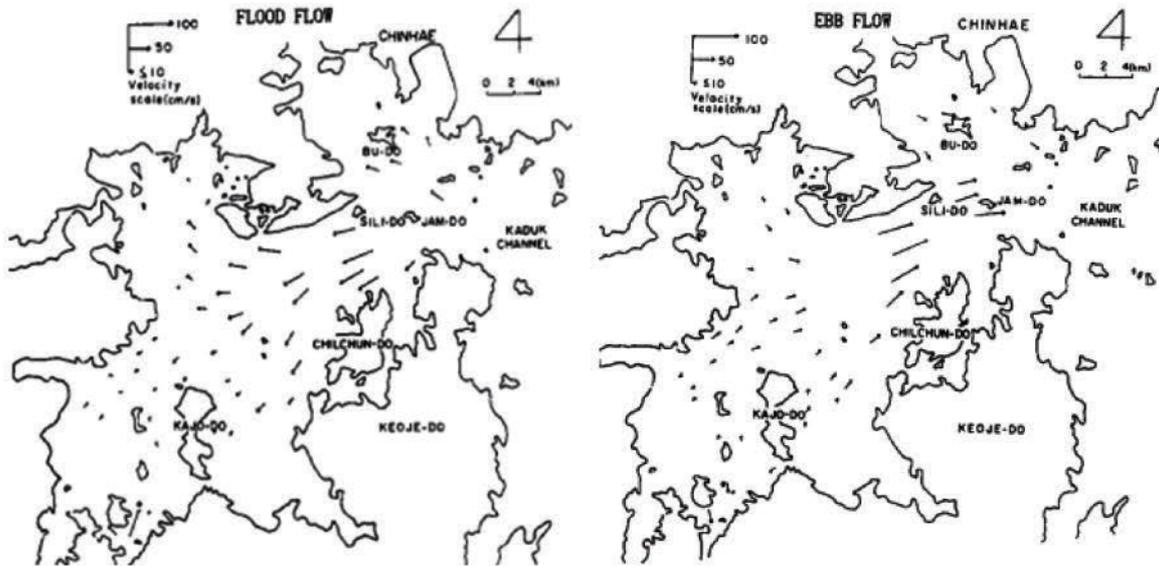


Fig. 4. Flow patterns at the spring tide in Jinhae Bay (Hydraulic experiment results by Chang *et al.*[1993]).

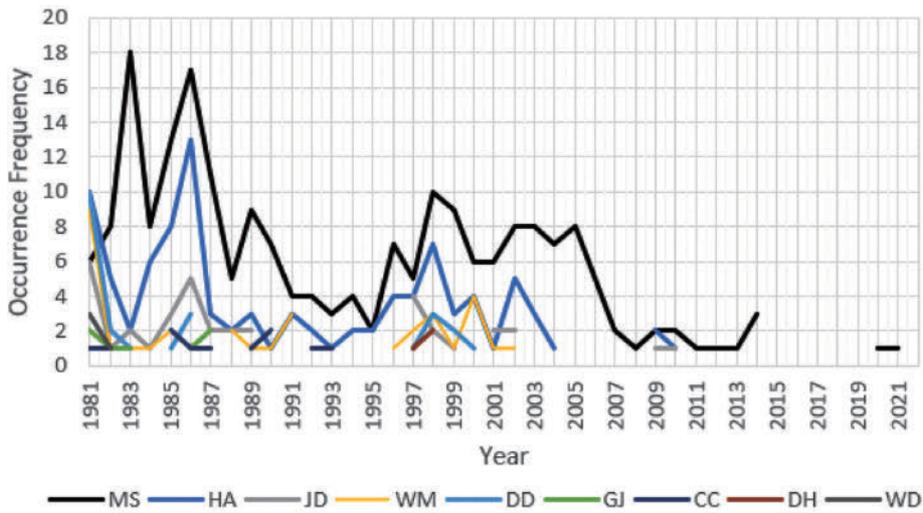


Fig. 5. Occurrence frequency of algal blooms for small inner bays inside of Jinhae Bay.

감소하였으나 1990년대 중반부터 다시 발생빈도가 증가하여 2000년대 초까지 적조는 간헐적으로 발생하고 있다. 반면, 마산만과 행암만을 제외한 다른 소내만에서는 2000년 이후 거의 적조는 발생하지 않았다.

### 3.3 진해만 적조 발생과 소멸시기

한편, Fig. 6은 조사기간 중 진해만에서의 최초 적조발생월을 나타내는데, 전체 발생건수 47건 중에 4월이 12건(25.5%)으로 가장 많았고, 다음으로 5월이 11건(23.4%), 3월이 6건(12.8%), 6월과 7월이 각각 3건(6.4%), 11월이 1건(2.1%)로 나타났다. 반면, 적조의 최종 발생월은 전체 36건 중에 9월이 13건(36.1%)로 가장 많았고, 다음으로 8월이 9건(25%), 6월이 5건(13.9%), 7월과 10월이 각각 3건(8.3%), 11월이 2건(5.6%), 12월이 1건(2.8%)으로 나타났다. 따

라서, 진해만에서 춘계(3-5월)에 발생하기 시작한 적조는 하계(6-7월) 또는 늦은 하계(8-9월)에 이르기까지 적조가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이것은 진해만에서의 성층의 형성시기는 물론 빈산소 수괴의 발달과 관련이 있는 것으로 판단된다(Lee and Kim[2008]; Lim and Hong[1994]). 또한 진해만에서의 최초 적조는 거의 대부분이 마산만에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히, Fig. 5에 따르면, 마산만에서는 1980년도 초기에 연 최대 18회까지 적조가 발생하였으나 1990년도 중반에는 연 2회로 감소하였다. 이것은 1994년 하수처리장의 건설 이후 마산만의 수질이 전반적으로 개선되었기 때문으로 판단된다(Lee *et al.*[2008]). 그 일례로서, Fig. 7은 지난 20년간(2003-2022) 마산만의 총질소(TN)과 총인(TP) 농도의 모니터링 결과를 보여주고 있는데, 이들 농도는 해에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 진해만 적조의 발생회수는 2000년대 초

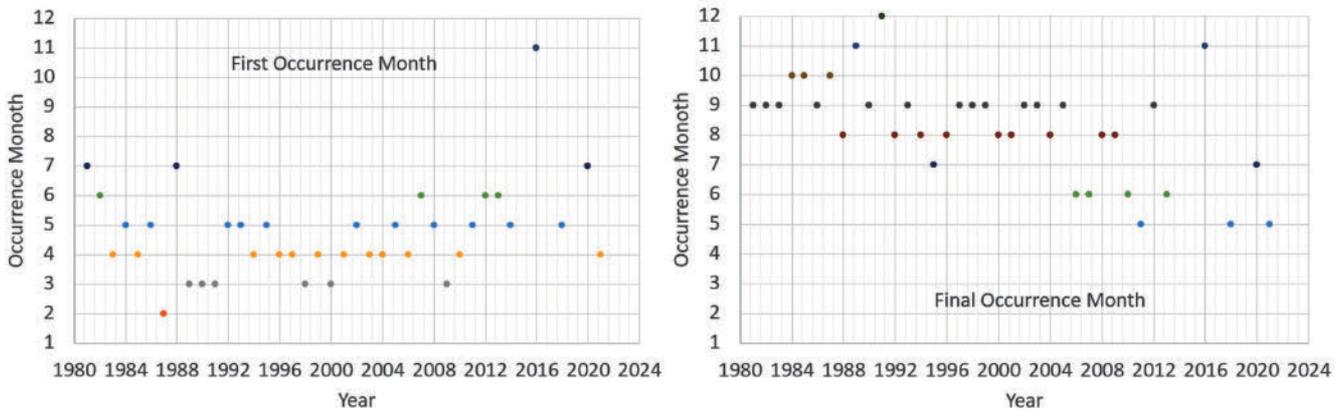


Fig. 6. First occurrence month and final occurrence month of algal blooms in Jinhae Bay.

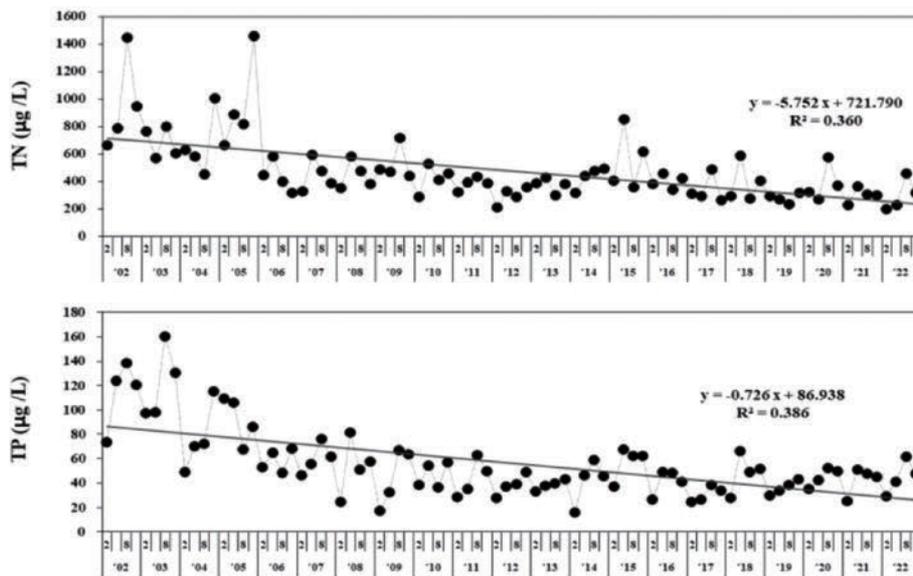


Fig. 7. 마산만의 총질소(TN)과 총인(TP) 농도의 모니터링 결과(https://www.meis.go.kr).

기에는 연 6-10회로 다시 증가하였다가, 이후 연 1-3회로 급격히 줄었으며, 2015년 이후에는 간헐적으로 적조가 발생하였다. 이러한 적조 발생회수의 변화는 2007년부터 시작된 마산만 해역에 대한 오염총량관리제 (COD 농도 규제) 시행과 관련이 있는 것으로 생각된다(Kwon *et al.*[2014]).

### 3.4 진해만 적조의 연구 개요

Cho[1978]는 1977년 하계 진해만 서부해역의 진동만과 견내량 일대에서 발생한 와편모조 *Gonyaulax* sp.에 의한 적조를 조사하였다. 그 결과, 1주일간 지속된 *G* sp.에 의한 적조의 소멸 후 굴의 피해가 나타났으나 이들간의 상관관계는 확인하지 못하였다. 반면, Cho[1979]는 1978년 하계 진해만 서부해역의 굴양식장에서 발생한 굴의 폐사 원인을 와편모조인 *Ceratium fusus*에 의한 대규모적인 적조와 빈산소수괴 때문이라고 주장하였으며, Cho[1981]는 1981년 하계 진해만과 남해안 일대에서 발생한 굴과 홍합의 폐사 원인은 *Gymnodinium* sp.에 의한 적조 때문으로 판단하였으나, 이때

DO(dissolved oxygen) 농도는 2-3 ml·l<sup>-1</sup>(최저 1.0 ml·l<sup>-1</sup>)로, 빈산소 수괴의 존재를 시사하였다. Lee and Kwak[1986]은 1981년 하계 진해만의 7개 정점에서 와편모조인 *G nagasakiense*에 의한 적조의 생태학적 조사를 수행하여 영양염류가 풍부한 육수유입과 고수온, 그리고 낮은 염분 등을 적조의 발생의 원인으로 추정하였다. Lee *et al.* [1990]은 1989년 하계 진해만 서부해역과 마산만에서 *G sanguineum* 와 *Prorocentrum micans*에 의한 적조가 발생하였을 당시 이들 해역의 저층수가 빈산소상태에 있음을 관측을 통해 확인하였다. 또한 Kim and Lee[1994]은 1990년, 1991년, 1993년 하계(8-9월)에 진해만 적조 동안 실시한 현장관측결과에 따르면, Fig. 8에서 보는 바와 같이, 오.폐수 유입이 많은 진해만 북부의 마산만 주변과 양식장이 밀집한 가조도 주변의 서부 해역은 DO 농도 2.0 mg·l<sup>-1</sup>의 빈산소 수괴가 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

Lee and Baek[1998]은 지난 14년간(1981-1995)의 수질 및 기상 자료를 통계처리하여 구한 판별함수(discriminant function)에 기초하여 진해만내 4개 소내만(마산만, 행암만, 당동만, 원문만)에 해석

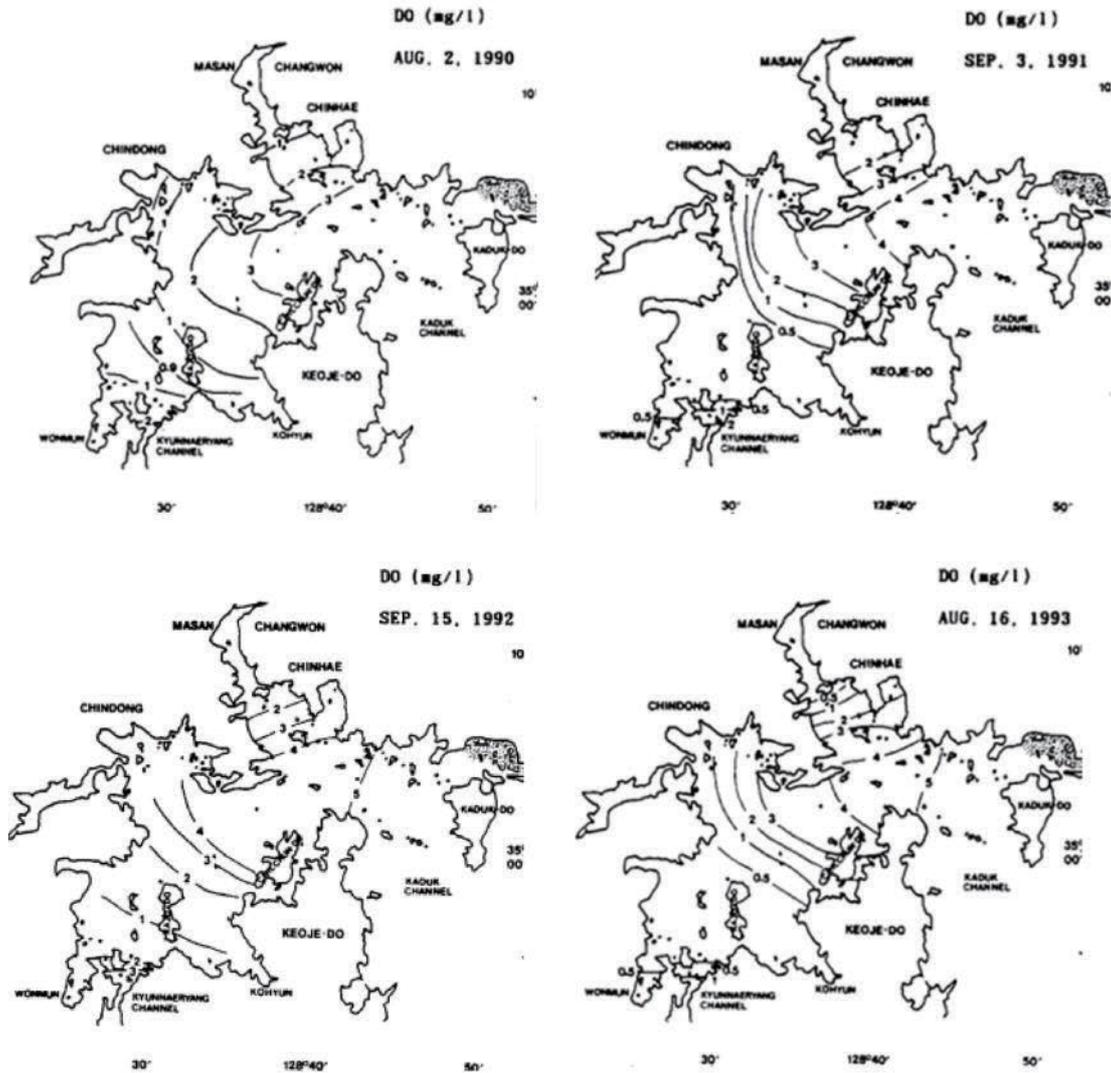


Fig. 8. Horizontal distribution of DO concentration at the bottom in the summer (Kim and Lee[1994]).

하였다. 그 결과, 이들 4개 소내만에서는 영양염류, DO, 일사량, 수온, 염분 등 서로 다른 요인에 의해 적조가 발생한다는 사실을 밝혔다. 또한 Kim et al.[2001]은 18년간(1982-2000) 한국 연안에서 발생한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생현황과 그 추이를 고찰한 결과, *C. polykrikoides* 적조는 초기에는 주로 진해만과 그 부근해역에서 발생하였으나, 1989년 이후는 진해만을 제외하고 충무, 거제, 남해, 여수 등 남해안의 중부에서 주로 발생하였다. 특히, 1995년 이후는 동해안, 1998년과 1999년에는 서해안으로 점차 적조의 발생해역이 확대된 것으로 나타났다. 또한 *C. polykrikoides* 적조는 초기에는 규조류, 편모조류 등과 함께 출현하였으나 점차 단독적으로 출현하는 경향을 보였다. Oh et al.[2008]는 2007년 7월 진해만 서부 연안에서 채수한 해수에서 분리한 클론 세포 *Skeletonema costatum* (4계절 우점종임)의 성장에 미치는 광학적 특성에 대하여 조사한 결과, *S. costatum*은 황색과장대가 우점하는 폐쇄성 연안역에서 잘 성장하는 것으로 나타났다. Lee and Kim[2008]은 적조발생과 해양환경과의 관계를 규명한 결과, 진해만과 가막만

에서 발생하는 적조는 빈산소수괴의 발달과 관련이 있음을 밝혔다. 이들은 이들 해역에서의 *S. costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp.에 의한 적조는 장기간의 평균 강수보다 더 많은 강수가 있는 10일 후 발생한다고 주장하였다. Kong[2008]은 물질순환 생태계모형을 이용하여 연안오염총량관리가 진해만 빈산소수괴를 어느 정도 저감시킬 수 있는가를 수치모형실험을 통해 검토하였다. 그 결과, COD(chemical oxygen demand)만을 삭감한 경우에 비해 TN(total nitrogen), TP(total phosphate)의 유입부하량을 추가적으로 삭감한 경우가 빈산소수괴에 대한 감소효과가 더 큰 것으로 예측되었다. Oh[2008]는 1989년부터 2006년까지 국립수산과학원이 조사한 자료에 기초하여 진해만의 빈산소수괴(oxygen deficient watermass; ODW) 발생에 영향을 미치는 인자를 조사한 결과, 진해만 동부해역과 중부해역에서는 ODW가 발생하지 않은 데 반해, 남부해역에서는 ODW가 빈번하게 발생한 것으로 나타났다. 또한 주성분분석 결과, 빈산소수괴 형성에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 COD, DIN(dissolved inorganic nitrogen), DIP(dissolved

inorganic phosphate) 농도 등으로 나타났다.

한편 Lee *et al.*[2013]는 진해만을 비롯한 한국 남해안에서 지난 40년간 발생한 적조의 원인종과 발생에 대하여 조사한 결과, 초기에는 규조류가 적조 원인종이었으나 최근에는 와편모조류로 천이하였고, 적조는 1990년대에는 연 5-21회(평균 10.3회) 발생하였으나, 2000년대에는 연 2-13회(평균 8.9회)로 과거에 비해 현저히 감소한 것으로 나타났다. Shin *et al.*[2014]은 진해-마산만에서 2011년부터 1년간 채집한 퇴적물에서 분리, 배양한 *Alexandrium insuetum*의 휴면포자를 형태학적 및 계통발생적으로 분석하였다. 그 결과, *A. insuetum*은 수온 25°C, 염분 25일 때 최대 성장률을 보였고, 하계에 증식이 가장 활발히 이루어진다는 사실을 밝혔다. 또한 Youn *et al.*[2021]은 마산-진해만의 표층퇴적물로부터 수집된 타원형 *Alexandrium* 휴면포자의 분포와 발아를 조사한 결과, 타원형 휴면포자로부터 발아된 영양세포 *A. catenella*(group 1) 및 *A. tamarense* 종 복합체내에 둥지(nest)를 틀고 있는 *A. paciifcum*(group 4)를 확인하였다. 또한 *A. catenella*(group 1)의 휴면포자는 단지 10°C에서 발아하는 반면, *A. paciifcum*(group 4)의 휴면포자는 10-25°C의 범위에서 발아하는 것으로 나타났다. 이것은 마산-진해만의 수온변화가 *A. catenella* (group 1)와 *A. paciifcum*(group 4)의 휴면포자 발아를 계절적으로 제어할 수 있음을 의미하였다. Park[2016]은 2015년 8회에 걸쳐 진해만내 소내만인 당동만과 당동만에서 현장조사(수온, 염분, DO, 영양염류, 클로로필 a (Chl\_a) 농도)를 수행하여, 진해만에서 빈산소 발달에 따른 식물플랑크톤의 일차생산과 영양염 거동에 대해 조사하였다. 그 결과, 저층에서 공급되는 영양염 중 특히 규산염의 공급이 진해만에서의 일차생산을 조절하며 하계에 저층의 빈산소를 야기하고 유지하는 데 필요한 유기물을 제공하고 있는 것으로 판단되었다.

### 3.5 진해만 적조의 발생 특징

이상에서 살펴본 바와 같이, 진해만 적조는 주로 흐름이 정체되고 상대적으로 수심이 얕으며, 따라서 하계 저열효과가 큰 만내의 소내만에서 주로 발생한 것으로 나타났다. 이들 소내만에서는 적조 원인생물의 집적과 증식에 필요한 적절한 수온과 영양염류, 비타민류가 공급되면 적조가 발생하며, 바람이나 조류에 의해(빈산소수괴를 포함한) 그 발생 영역이 점차 진해만 전체로 확대되는 것으로 추론된다(Lim and Hong[1994]). 반면 진해만 적조는 마산만을 비롯한 소내만으로 유입되는 오염원에 대한 적절한 관리와 대책의 결과로 과거에 비해 현저히 감소하였다(Kwon *et al.*[2014]). 그러나 진해만은 개방된 동쪽의 가덕수도를 통해 낙동강 하천수는 물론, 남해로부터 외해수의 영향을 받고 있어서 단순히 마산만 등 소내만으로부터 유입되는 육수의 수질을 개선하는 것만으로는 적조 발생을 억제하는 데 한계가 있는 것으로 판단된다. 여기에 더하여 진해만 적조 발생시는 빈산소수괴도 동반하여 발달, 형성되어 그 결과, 적조와 빈산소수괴에 의한 만내 서식생물의 피해가 발생하였다. 이것은 진해만 환경, 특히 저질환경이 유기물에 의한 오염으로부터 그다지 개선되어 있지 않았음을 의미한다(Hyun *et al.*[2003]; Lim

and Shin[2005]; Al-Odaini *et al.*[2015]; Choi *et al.*[2017]; Shen *et al.*[2018]). 따라서 진해만 적조는 외해수 또는 마산만 등 소내만으로의 육수 유입에 따른 영양염류, 그리고 남서부 해역에 밀집한 양식장 생물로부터 유래하는 유기오염물질에 의한 빈산소수괴 형성과 영양염류의 공급 등에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 국립수산과학원이 공개하고 있는 지난 40년간(1981-2022)의 적조 발생자료에 기초하여 진해만 적조의 발생 실태를 분석하였고, 또한 진해만 적조와 관련하여 지금까지 수행된 타 연구자의 연구성과로부터 진해만 적조의 발생 특징을 고찰하였다.

조사기간 중 진해만에 출현한 적조 원인생물은 *Chaetoceros* sp.를 비롯한 규조류가 10종, 편모조류가 33종, 황금색조류가 2종, 야광충이 3종, 섬모충류가 1종 등, 총 49종으로, 상대적으로 편모조류가 많았다. 진해만 적조는 2001년 이전에는 규조류에 의해 간헐적으로 발생하였으나, 그 이후에는 편모조류에 의해 다발적으로 발생하였다.

진해만 적조는 소내만(inner bays)인 당동만에서 1981년 최초로 발생한 이래 지금까지 총 472회 적조가 발생하였으며, 발생해역은 수심이 얕고 반폐쇄적 정체수역인 소내만이라는 공통점을 가지고 있었다. 특히, 마산만과 행암만은 진해만내에서 발생한 전체 적조의 2/3를 점하였으며, 이는 이들 해역이 산업폐수나 생활하수 등에 의한 유기오염이 상대적으로 심각함을 의미하였다. 그러나, 1990년대 중반 이후 이들 해역은 물론 진해만에서의 적조 발생은 현저히 감소하였는데, 이것은 마산만 해역에 대한 오염총량관리제 시행을 비롯한 진해만 전역에 대한 수질개선 노력의 결과로 판단된다.

진해만 적조는 대개 춘계에 최초로 발생하여 하계 또는 늦은 하계에 소멸하였으며, 이것은 진해만에서의 성층의 형성시기 또는 빈산소수괴의 발달과 관련이 있는 것으로 판단되었다. 한편, 진해만 적조는 빈산소수괴 발달 및 형성과 밀접한 관련을 가지고 있었으며, 이것은 진해만 저질의 유기 오염이 여전히 개선되지 않았음을 의미하였다. 따라서 진해만 적조는 외해수 또는 마산만 등 소내만으로의 육수 유입에 따른 영양염류, 그리고 남서부 해역에 밀집한 양식장 생물로부터 유래하는 유기오염물질에 의한 빈산소수괴 형성과 영양염류의 공급에 의해 발생하는 것으로 판단되었다.

한편, 진해만의 해양환경은 2000년대 이후 현저히 개선된 것으로 나타났으나, 패류양식장이 밀집한 만의 서부해역에서는 여전히 *C. polykrikoides* 등 유해성 적조가 발생하였다. 이것은 적절한 호조건만 주어지면 진해만에서는 언제든지 적조가 발생할 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 진해만 적조 발생을 억제하고 예방하기 위해서는 보다 적극적인 해결방안, 예를 들면, 준설이나 복사(覆砂; 모래로 덮음), 작령(作潑; 물길을 만듦) 등을 통한 저질 개선, 육상오염부하의 유입 차단, 어장정화 등이 필요할 것으로 판단된다.

## References

- [1] Al-Odaini, N.A., Shim, W.J., Han, G.M., Jang, M. and Hong, S.H., 2015, "Enrichment of hexabromocyclododecanes in coastal sediments near aquaculture areas and a wastewater treatment plant in a semi-enclosed bay in South Korea", *Sci. Total Environ.*, 505, 290-298.
- [2] An, Y.R. and Huh, S.H., 2002, "Species composition seasonal variation of fish assemblage in the coastal water off Gadeok-do, Korea: 3. Fishes collected by crab pots", *J. Korea Fish. Soc.*, 35, 715-722.
- [3] Belias, C., Dassenakis, M. and Scoullou, M., 2007, "Study of the N, P and Si fluxes between fish farm sediment and seawater. Results of simulation experiments employing a benthic chamber under various redox conditions", *Marine Chemistry*, 103(3), 266-275.
- [4] Chang, S.D., Kim, C.K. and Lee, J.S., 1993, "Field observations and hydraulic model experiments of tidal currents in Chinhae Bay", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 26(4), 346-352.
- [5] Cho, C.H., 1978, On the *Gonyaulax* red tide in Jinhae Bay. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 11(2), 111-114.
- [6] Cho, C.H., 1979, Mass mortalities of oyster due to red tide in Jinhae Bay. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 12(1), 27-33.
- [7] Cho, C.H., 1981, On the *Gymnodinium* red tide in Jinhae Bay. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 14(4), 227-232.
- [8] Choi, M.K., Lee, I.S., Hwang, D.W., Kim, H.C., Yoon, S.P., Yun, S.R., Kim, C.S. and Seo, I.S., 2017, "Organic enrichment and pollution in surface sediments from Jinhae and Geoje-Hansan bays with dense oyster farms", *Korean Soc. Fish. Aquat. Sci.*, 50(6), 777-787.
- [9] Danielsson, Å., 2014, "Influence of hypoxia on silicate concentrations in the Baltic Proper (Baltic Sea)", *Boreal Environ. Res.*, 19, 267-280.
- [10] Herbert, R.A., 1999, "Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. FEMS microbiology reviews", 23(5), 563-590.
- [11] Hopkinson, C.S. and Smith, E.M., 2005, "Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic, and whole system respiration", *Respiration in Aquatic Ecosystems*, 122-146.
- [12] Hyun, S.M., Choi, J.W., Choi, J.S. and Lee, T.H., 2003, "Surface sediment characteristics and benthic environments in the mouth of Jinhae Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 36(6), 700-707.
- [13] Jin, S., Ryu, S., Lee, I. and Kim, K., 2019, "Estimation of oyster farming water quality index (OWQI) in Jinhae Bay, Korea", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22, 246-252.
- [14] Kang, S.W., 1991, "Circulation and pollutant dispersion in Masan and Jinhae Bay of Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 23, 37-40.
- [15] Kim, C.K. and Lee, J.S., 1994, "A three-dimensional PC-based hydrodynamic model using an ADI scheme", *Coastal Engineering*, 23(3-4), 271-287.
- [16] Kim, H.G., 2005, "Harmful algal blooms in the sea", Dasom Publisher, 1-466.
- [17] Kwon, J.N., Lee, J.H., Kim, Y.S., Lim, J.H., Choi, T.J., Ye, M.J., Jun, J.W. and Kim, S.M., 2014, "Long-term variations of water quality in Jinhae Bay", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 17, 324-332.
- [18] Kim, H.K., Jung, C.H., Lim, W.A., Lee, C.K., Kim, S.Y., Youn, S.H., Cho, Y.C. and Lee, S.G., 2001, "The spatio-temporal process of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the coastal waters of Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 34(6), 691-696.
- [19] Kim, T.K. and Kim, E.S., 2009, "Seawater quality of Jinhae Bay and adjacent sea of Gaduk Island, Korea", *J. Korea Soc. Mar. Environ. Safety*, 6, 137-143.
- [20] Kong, H.H., 2008, "Variation prediction of oxygen deficient water masses according to reduction of inflowing pollutant loads in Jinhae bay", MSc. thesis, Pukyong National University, 1-74.
- [21] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA), <https://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do> (accessed: 2020. 1. 20).
- [22] Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM), <https://www.meis.go.kr> (accessed: 2023. 6. 13).
- [23] Lee, C.K., Park, T.G., Park, Y.T. and Lim, W.A., 2013, "Monitoring and trends in harmful algal blooms and red tides in Korean coastal waters, with emphasis on *Cochlodinium polykrikoides*", *Harmful Algae*, 30S, S3-S14.
- [24] Lee, I.C., Oh, Y.J. and Kim, H.T., 2008, "Annual variation in oxygen-deficient water mass in Jinhae Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 41(2), 134-139.
- [25] Lee, J.H. and Kwak, H.S., 1986, "A study on the *Gymnodinium nagasakiense* red-tide in Jinhae Bay of Korea", *Korean J. Ecology*, 9(3), 149-160.
- [26] Lee, M.O. and Baek, S.H., 1998, "The prediction of red tides in Jinhae Bay using a discriminant function", *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, 7(1), 8-19.
- [27] Lee, M.O. and Kim, J.K., 2008, "Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea", *Mar. Environ. Res.*, 65, 128-147.
- [28] Lee, S.M., 2020, "Statistical characteristics of oxygen deficient water mass in Jinhae Bay", Pukyong National University, MSc Thesis, 1-77.
- [29] Lee, W.J., Kim, H.G., Park, Y.T. and Seong, H.K., 1990, "The role of marine bacteria in the dinoflagellate bloom. 1. distribution of marine bacteria and dinoflagellate in Chinhae Bay, *Bull. Korean Fish. Soc.*, 23(4), 303-309.
- [30] Lim, H.S. and Hong, J.S., 1994, "Ecology of the macrobenthic community in Chinhae Bay, Korea", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 27(2), 200-214.
- [31] Lim, K.H. and Shin, H.C., 2005, "Temporal and spatial distribution of benthic polychaetous community in the northern Jinhae Bay", *Korean J. Environ. Biol.*, 23(3).
- [32] National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), 2009, "Hypoxia in the coast of Korea", Technical report.
- [33] National Institute of Fisheries Science (NIFS), Red tide infor-

- mation system, <https://www.nifs.go.kr/red> (accessed: 2023. 2. 17).
- [34] Nunnally, C.C., Quigg, A., DiMarco, S., Chapman, P. and Rowe, G.T., 2014, "Benthic-pelagic coupling in the Gulf of Mexico hypoxic area: Sedimentary enhancement of hypoxic conditions and near bottom primary production", *Continental Shelf Research*, 85, 143-152.
- [35] Oh, S.J., Kang, I.S., Yoon, Y.H. and Yang, H.S., 2008, "Optical characteristic on the growth of centric diatom, *Skeletonema costatum* (Grev.) cleve isolated from Jinhae Bay in Korea", *J. Korean Environ. Biol.*, 26(2), 57-65.
- [36] Oh, Y.J., 2008, "Analysis of the annual variation and occurrence probability of oxygen deficient water mass in Jinhae Bay", MSc. thesis, Pukyong National University, 1-73.
- [37] Paik, S.G. and Yun, S.G., 2000, "Community structure of the macrobenthos in Chinhae Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.* 33, 572-580.
- [38] Park, C.K., 1975, "Eutrophication and chlorophyll content in the seawater of Jinhae Bay area", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 8(3), 121-126.
- [39] Park, S.Y., 2016, "Organic matter and nutrient dynamics with the development of hypoxia in Jinhae Bay, Korea", MSc. thesis, Pusan National University, 1-97.
- [40] Seo, J.Y., Lim, H.S. and Choi, J.W., 2015, "Spatio-temporal distribution of macrobenthic communities in Jinhae Bay, Korea", *Ocean Polar Res.*, 37, 295-315.
- [41] Shen, A.H., Lee, S.G., Ra, K.T., Suk, D.W. and Moon, H.B., 2018, "Historical trends of perfluoroalkyl substances (PFASs) in dated sediments from semi-enclosed bays of Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 128, 287-294.
- [42] Shin, H.H., Baek, S.H., Li, Z., Han, M.S., Oh, S.J., Youn, S.H., Kim, Y.S., Kim, D.K. and Lim, W.A., 2014, "Resting cysts, and effects of temperature and salinity on the growth of vegetative cells of the potentially harmful species *Alexandrium insuetum* Balech (Dinophyceae)", *Harmful Algae*, 39, 175-184.
- [43] Villnäs, A., Norkko, J., Lukkari, K., Hewitt, J., Norkko, A., 2012, "Consequences of increasing hypoxic disturbance on benthic communities and ecosystem functioning", *PLoS One*, 7(10), e44920.
- [44] Youn, J.Y., Kwak, K.Y., Seo, M.H., Kim, D., Son, M.H., Kim, D., Shin, K., Lim, W., 2021, "*Alexandrium catenella* (Group I), and *A. pacificum* (Group IV) cyst germination, distribution, and toxicity in Jinhae-Masan Bay, Korea", *Harmful Algae*, 110, 102122.

---

Received 3 July 2023

1st Revised 16 August 2023, 2nd Revised 4 September 2023

Accepted 11 September 2023