

진해만 연구의 변천과 앞으로의 과제

이문옥¹ · 김중규^{2,†} · 김병국³ · 김명원⁴

¹전남대학교 조선해양공학과 명예교수

²전남대학교 조선해양공학과 교수

³한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 대리

⁴주지오시스템리서치 연안관리부 책임연구원

Past, Present, and Future Directions in the Study of Jinhae Bay, Korea

Moon Ock Lee¹, Jong Kyu Kim^{2,†}, Byeong Kuk Kim³, and Myeong Won Kim⁴

¹*Emeritus Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

²*Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

³*Deputy Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong 53007, Korea*

⁴*Principal Researcher, Dept. of Oceanographic Survey, Geosystem Research Corporation, Gunpo 15807, Korea*

요 약

본 연구에서는 진해만 연구가 지난 40년간 어떻게 변천해 왔는가를 진단, 평가하기 위하여 한국학술지인용색인(KCI) 및 과학인용지수(SCI)에 게재된 80여편의 논문을 분석하였다. 진해만 연구의 주제로서는 적조, 수질과 저질, 해수유동, 저서동물과 어장환경 등이 가장 많이 다루어졌다. 또한 1990년대 이전에는 진해만의 연구가 북부해역에 집중되었으나, 그 이후에는 서부해역 또는 진해만 전역에 집중되었다. 이것은 진해만의 연구 중심이 북부해역에서 양식에 의한 자가 오염이 심각한 서부해역으로 이동하였음을 의미하였다. 한편, 진해만에서의 적조는 발생빈도가 과거에 비해 현저히 감소하였으나, 소내만에서는 여전히 유해성 적조가 발생하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 진해만의 전 해역을 대상으로 한 유해적조생물의 생태학적 조사와 물리적 집적과정, 생물학적 증식과정 등에 대한 학제간의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 진해만의 수질과 저질 환경 또한 2000년대에 들어서부터 상당히 개선되어 북부해역에서의 빈산소수괴의 출현빈도는 감소하였다. 그러나 패류양식장이 밀집한 서부 해역에서는 여전히 빈산소수괴의 출현빈도가 높고, 육수나 생활하수 유입의 영향을 계속 받고 있는 것으로 나타났다. 따라서 북부해역과 서부해역에 대한 유기물 오염부하를 억제하여 적조는 물론, 패류 독성이나 빈산소수괴의 발달 등의 제반 환경 문제를 해결할 방안을 시급히 찾아야 할 것으로 생각된다.

Abstract – We extensively reviewed articles published in relation to the research for Jinhae Bay, Korea over the last four decades in order to diagnose and evaluate how it has been changed with time. Algal blooms, water quality and sediments, seawater behavior, and benthic animals appeared to be mostly often dealt with themes of the study. In addition, researches seemed to be densely conducted around the northern area of Jinhae Bay until the 1990s but since then, the researches were conducted at the western area or the whole area of the bay. This suggested that a center of the study moved from the northern area to the western area of the bay where a self-contamination is serious by shellfish farming. Algal blooms in Jinhae Bay significantly decreased compared to the past but still occur in the small inner bays. Therefore, interdisciplinary researches are necessary for elucidating not only ecological investigation of causative organisms but also the processes of physical accumulation and biological proliferation in the entire area of the bay. Water quality and sedimentary environment were also improved since the 2000s, and as a result, the appearance of oxygen-deficient water masses decreased. However, the western area of the bay is still suffering from oxygen-deficient water masses and exposed to domestic sewage from the land. Consequently, we will have to find a solution to current environmental issues such as harmful algal blooms, oxygen-deficient water masses, and shellfish toxicity by controlling pollution load in the northern and western areas of the bay.

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

[†]Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

1. 서 론

우리나라 남해안의 동쪽에 위치하고 있는 진해만은 남북방향의 길이가 25 km, 동서방향의 폭이 25 km, 만내 수심이 5-20 m 정도로 약 637 km²의 수면적을 가진 반폐쇄성 해역이다. 특히 6개의 소내만 해역을 포함한 만내에서의 흐름은 10 cm·s⁻¹ 이하로 미약하고 해수순환은 제한적이며 수심이 비교적 깊은 동쪽 수로에서의 유속은 약 100 cm·s⁻¹ 정도이다(Kang[1991]). 또한 평균조차는 대조시가 180 cm, 소조시가 45 cm이며, 내만에서의 창낙조시의 조류는 대소조기 모두 미약하다.

진해만은 예로부터 수산생물의 생산성이 높은 우리나라의 주요 어장 중의 하나이지만, 1960년대 이후 주변지역에 조성되기 시작한 마산창원공업단지를 비롯한 각종 산업단지과 인구의 집중, 여기에 더하여 만내의 양식장 밀집 등으로 인해 산업폐수와 생활하수는 물론 양식생물로 인한 유기물의 유입이 지난 50년 이상 계속되어 왔다. 따라서 진해만은 국내에서 가장 부영양화된 해역이라고 말할 수 있다(Lim et al.[2005]).

그 결과, 진해만은 하계를 중심으로 한 유해적조의 발생과 빈산소수괴의 형성 등으로 수산생물의 서식환경의 악화가 문제가 되고

있는 해역이다(Park[1975a]). 따라서 진해만의 환경을 재건하고 보전하기 위한 노력이 절실한 실정이다.

지금까지 진해만 환경의 실태를 파악하고 이에 따른 회복 방안을 모색하기 위해 다양한 연구가 있었다(Choi et al.[1994], Kim et al.[1995a], Kim et al.[1995b], Lee and Baek[1998], Lee et al.[2003], Hong et al.[2007], Son et al.[2011], Huh et al.[2011], Bae et al.[2017], Shin et al.[2018]). 그 결과, 수질과 저질 환경을 비롯하여 해수유동, 동식물상, 적조 기작의 해명 등 상당한 연구성과가 있었고, 이에 따른 대책 마련 등으로 진해만의 환경도 어느 정도 개선효과가 있었다고 생각된다. 예를 들면, Fig. 2는 지난 약 40년간 진해만내의 마산만, 행암만, 당동만, 진동만, 원당만 등 주로 소내만에 있어서의 적조 발생 건수의 변화를 나타내는데, 해와 더불어 현저히 감소를 보이고 있는 것이 이를 반증한다.

그러나 이러한 노력에도 불구하고 진해만의 환경이 제대로 해명되고 또한 우리가 만족하는 수준에 와 있는가는 여전히 의문이다. 왜냐하면, 1995년 이래 2014년까지도 이들 소내만에서는 *Karenia mikimotoi*와 *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 유해성 적조가 계속 발생하고 있기 때문이다(www.nifs.go.kr/red/news_2.red). 뿐만 아니라 그 동안의 진해만 연구는 연구자의 관심사에 집중하여 이

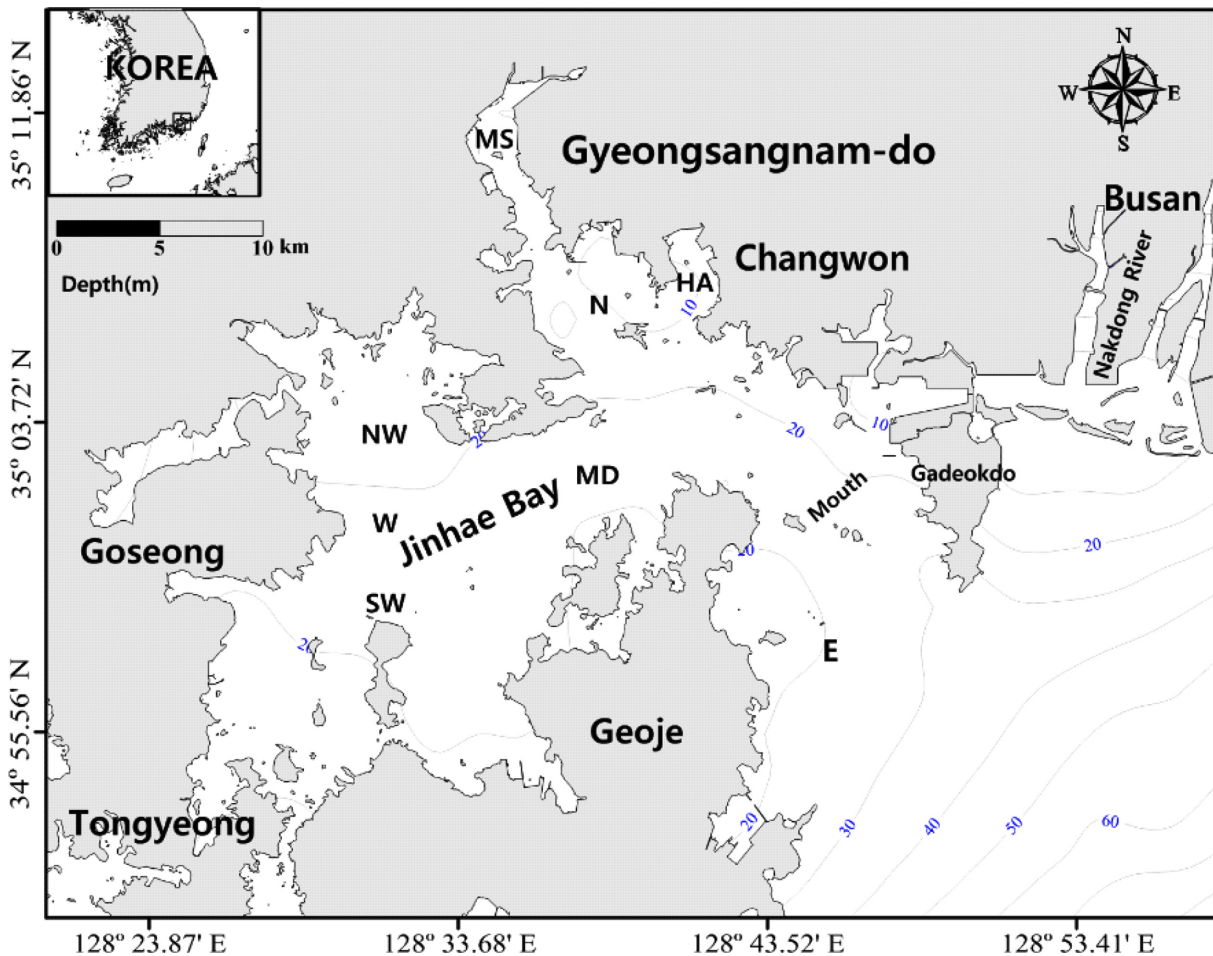


Fig. 1. Jinhae Bay for study area.

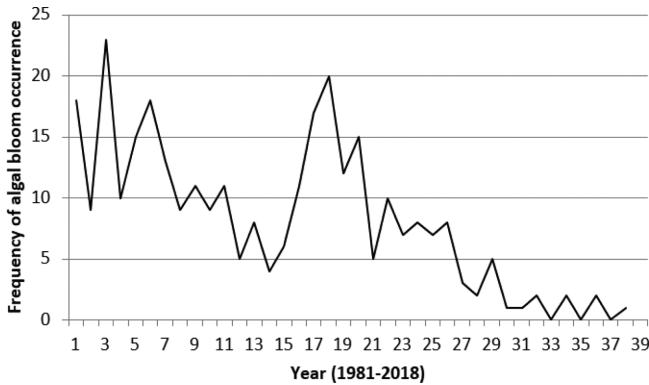


Fig. 2. Transition of algal bloom occurrence with time in Jinhae Bay.

루어진 경우가 대부분으로, 진해만 전체의 미래상을 염두에 둔 환경적 측면에서의 종합연구는 매우 미흡하다고 생각된다. 다시 말해, 현재까지 수행된 진해만 연구가 아직도 미치지 못한 부분이 있어서 진해만 환경 실상을 제대로 파악하지 못했다고 생각한다. 그러므로 앞으로 우리가 해야 할 일은 현재까지 수행된 연구결과를 분석하여 진해만 환경의 바람직한 미래상을 실현하기 위해 필요한 연구가 무엇인가를 찾는 일이라고 생각한다.

이상과 같은 배경하에, 본 연구는 기존의 진해만 연구가 시대에 따라 어떻게 변천해왔는가를 진단, 평가하고 앞으로 진해만의 보다 쾌적하고 건강한 환경을 지키기 위해 필요한 연구과제를 모색하는데 그 목적이 있다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1975년부터 2018년까지 진해만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI) 및 과학인용지수(Science Citation Index; SCI)에 게재된 85편의 논문을 분석자료로 사용하였다. 검색시는 논문의 주제어로 “진해만”, 또는 “Jinhae Bay (Chinhae Bay)”가 포함되는 문헌을 선택하였다. 또한 수산과학원(<http://www.nifs.go.kr>), 국가해양환경정보통합시스템(<http://www.meis.go.kr>) 및 해양조사원 개방해(<http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>)에 공개된 적조정보, 해양환경측정망자료 및 어장정보 등을 참고하였다. 먼저 이들 자료로부터 진해만내 어떤 해역(소내만 또는 전역)에서 연구가 집중적으로 이루어졌는가를 판단하기 위해, 전술한 Fig. 1에서 보는 바와 같이 진해만을 동부(E), 입구(Mouth), 마산만(MS), 행암만(HA), 북부(N), 중부(MD), 북서(NW), 서(W), 남서(SW) 등 8개 소해역으로 구분하였다. 다음으로 연제(계절 또는 연도), 어떤 주제로 연구가 이루어져 왔는지 그 변천과정을 조사하고, 이들 조사결과에 근거하여 진해만 환경의 현재 모습을 평가하였다. 또한, 지금까지 이루어진 진해만 연구의 한계와 문제점을 진단하여 진해만의 환경을 보전하기 위해 앞으로 해야 할 과제가 무엇인가에 대하여 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 진해만 연구의 변천과정

Fig. 3에 1975년 이래 수행된 진해만 연구에 따른 논문의 발표 건수를 나타내었다. 이 결과에 따르면, 진해만 연구는 1990년대부터 왕성하게 이루어지기 시작한 것을 알 수 있다. 또한, Table 1은 진해만 연구 주제의 시대에 따른 변화를 나타내는데, 이 표에 따르면, 유해성 적조에 관한 연구가 21건으로 가장 많았고, 다음이 저질, 즉 퇴적물 연구가 16건, 수질이 14건, 해수유동, 저서동물, 어장환경 등이 각각 9건의 순으로 나타났다. 단, 여기서 1990년대에는 적조 생물과 관련한 연구가 전혀 없었다는 점이 주목된다. 또한 마비성 패독에 관한 연구 및 난치자어를 포함한 어류 관련 연구가 각각 6건, 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤 연구가 각각 5건, 해양생태계 및 빈산소수괴 연구가 각각 3건, 해양세균 및 기생충 연구가 2건으로 나타났다. 따라서 진해만에서의 적조연구, 특히 적조발생기작의 해명과 관련하여 적조를 일으키는 원인생물과 그 환경인자인 물리적, 생물학적 조건에 대한 연구는 2000년대에 들어서면서 활발히 이루어지기 시작하였고 그 결과, 수질과 저질(퇴적물), 해수유동 등에 관한 연구도 더불어 활성화한 것으로 생각된다.

한편, Table 2는 진해만내의 연구대상해역(소해역 또는 내만)이 시대에 따라 어떻게 변화해 왔는지, 그리고 그 해역에서 어떤 계절에 조사연구가 이루어졌는가를 보여준다. 이 표에 따르면, 먼저, 1990년대 이전에는 연구가 주로 하계에 진해만의 북부해역인 마산만과 행암만을 중심으로 이루어졌다. 그러나 1990년 이후부터 4계절에 걸쳐 진해만 전역을 대상으로 한 연구가 이루어졌고, 특히, 진해만의 동부나 입구, 또는 중앙부에 비해 북서부와 남서부를 포함한 서부해역을 대상으로 한 조사연구가 집중적으로 이루어진 것을 알 수 있다. 즉, 1990년대 이전에는 마산만이나 행암만과 같은 폐쇄성이 강한 소내만 해역에서는 유기물과 중금속에 의한 오염으로 수질과 저질 환경이 악화되고 만성적으로 적조가 발생하여 대부분의 진해만 연구가 이들 해역에 집중한 것으로 생각된다. 또한 이들 해역에서의 연구가 주로 하계에 집중하고 있는 것은 하계에 발생하는 적조와 밀접한 관련이 있음을 반증한다. 그러나 1990년대 이후 이들 소내만에서는 유기오염의 제거를 위한 준설과 보다 강화

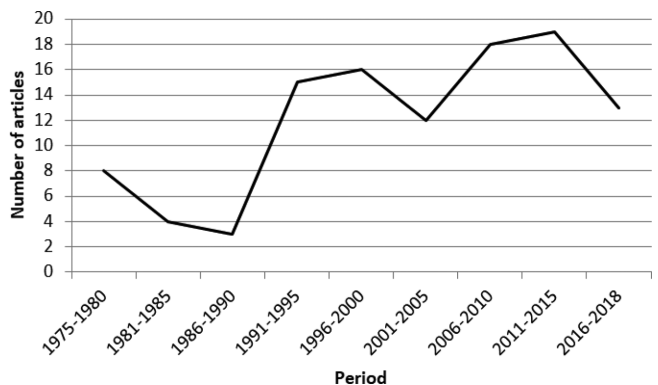


Fig. 3. Number of articles presented during the research period.

Table 1. Variation of study themes with period

Item	Period	1975	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	Total
		-1980	-1985	-1990	-1995	-2000	-2005	-2010	-2015	-2018	
Water quality	General distribution	2	1			2	1	2	3		11
	Pollution					1	1		1		3
Sediments	Sedimentary facies				1	2	1				4
	Pollution			1	1	1	2		2	2	9
	Toxic substance (HBCDs/PAHs/PFASs)								2	1	3
Seawater movement	Field observation				1						1
	Numerical experiments				5	1	1	1			8
Marine ecosystem	Numerical experiments				1			1			2
	Healthiness evaluation							1			1
Phytoplankton		1				1		2	1		5
Harmful algal blooms (HABs)	Causes/conditions	1					1	3	2	1	8
	Causative organisms	2	1	1				4	1	1	10
	Cysts									1	1
	Prediction of occurrence					1					1
	Effect of loess scattering					1					1
Benthos	Fauna				1	3	1			1	6
	Farming organisms				1		1			1	3
Fish	Ichthyofauna							1	1	1	3
	Egg/larvae								1	2	3
Marine bacteria/parasite				1					1		2
Paralytic shellfish toxins		2			2			1		1	6
Oxygen deficient water masses					2				1		3
Zooplankton						2	1	1	1		5
Fishing grounds environments	Resources/productivity							1			1
	Management platforms						1				1
	Graphical User Interface(GUI)						1				1
	Pollution of sediments/heavy metal		2			1			1	1	5
	Underwater noise								1		1
Total		8	4	3	15	16	12	18	19	13	

된 환경기준을 지키기 위한 노력에 힘입어 수질과 저질환경이 현저히 개선된 것으로 판단된다. 한 예로서, Lee and Kwak[1986]이 1981년 실시한 하계의 현장조사에 따르면, 마산만 표층의 COD농도는 $7.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 이었으나, 해양환경측정망자료(<http://www.meis.go.kr>)의 최근 21년간(1997-2017)의 마산만 저층에서의 하계 COD농도는 $1.6\text{-}3.9 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (평균 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$)로 나타나, 수질 개선효과를 반증한다. 또한 Table 3은 상기한 연구 주제가 진해만내의 어떤 해역을 대상으로 이루어졌는가를 나타내는데, 이 표에 따르면, 진해만 전역을 대상으로 한 연구가 52건으로 가장 많았고, 다음으로 진해만의 북서부, 남서부를 포함한 서부해역에서의 연구가 25건, 그리고 마산만이 17건, 북부해역이 11건으로 나타났다. 이것은 마산만이나 행암만의 수질환경이 1990년대 이후 개선됨에 따라 연구 중심해역이 진해만 전역으로 확대되거나 오히려 진해만의 서부해역으로 이행된 것을 의미한다.

한편, 진해만 전역을 대상으로 한 연구 주제는 수질 및 저질을 포함하여 해수유동, 해양생태계, 적조, 저서동물, 어류, 빈산소수괴, 동식물플랑크톤, 어장환경 등 모든 연구 주제를 망라하고 있음을

알 수 있다. 반면에, 진해만의 북서부, 남서부를 포함한 서부해역에서는 퇴적상과 저질오염, 적조, 저서동물, 동물플랑크톤, 중금속오염 관련 연구가 주로 이루어진 것으로 나타났다. 이들 결과로부터, 진해만 전역을 대상으로 한 연구를 제외하고, 현재 진해만내에서 가장 연구 중심이 되고 있는 해역은 북서부 및 남서부를 포함한 서부해역으로 판단된다. 이들 해역은 Fig. 4에서 보는 바와 같이, 패류양식장이 밀집한 해역으로서, 양식생물에 의한 자가오염은 물론 해수유동도 타 해역에 비해 상대적으로 미약하여 수질과 저질의 오염이 가중될 위험에 노출되어 있는 해역이기 때문이다.

3.2 진해만 환경의 어제와 오늘

전술한 바와 같이 지금까지 수행된 진해만 연구의 주제로서는 유해성 적조, 수질 및 저질, 해수유동, 그리고 저서동물 및 어장환경 등이 가장 많이 다루어졌다. 그것은 바로 이들 주제가 진해만 환경에서 해결해야 할 가장 시급한 과제인 것을 의미하며, 따라서 이들 주제와 관련된 연구성과를 고찰하면 현재 진해만 환경의 모습을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Variation of study area with period

Study area	1975-1980			1981-1985			1986-1990			1991-1995			1996-2000			2001-2005			2006-2010			2011-2015			2016-2018			Total															
	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A		S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A	S	S	A
Masan Bay	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3			2			1	1	1	1	1	1	2			2	1	1	1	1	1	3	3	4	3			3			33			
Haengam Bay	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1																		1									12
Whole area	2			1	1	1	1	1	1	7	5	5	5	5	5	6	5	5	5	5	5	7	7	7	7	5	6	6	6	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	134
Mouth											1		3	2	3	3									1	1	1	1	1	1	3	3	2	2						26			
Northeastern part							1			2	2	2	1	1	1	1															1	1	1	1	1	1	1	1	1				17
Eastern part											1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1										1	1	1	1	1	1				13
Middle part																																					1	1	1				8
Northwestern part	1			1	1		3	1	1	1	2	1																			2	2	2	2	2	1							19
Southwestern part	1																					1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1				12
Western part	1	2	1	1												1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	2				27
Total	1	4	1	4	2	2	1	3	3	1	17	11	9	8	15	8	10	10	12	12	12	12	12	13	8	10	10	10	10	9	16	16	16	16	16	16	16	16	16				

S, S, A, and W in the column denote spring, summer, autumn, and winter, respectively.

Table 3. Study themes for each small area in Jinhae Bay

Theme Area		Jinhae Bay									
		Masan Bay	Haengam Bay	whole area	mouth	north	east	middle	north-west	south-west	west
Water quality	General distribution	2	2	4							
	Pollution			3							1
Sediments	Sedimentary facies			1		1	1		1	2	
	Pollution	4	3	4	1	2	1	1	1	1	2
	Toxic substance (HBCDs/PAHs/PFASs)	1		2							
Seawater movement	Field observation			1							
	Numerical experiments			8							
Marine ecosystem	Numerical experiments			2							
	Healthiness evaluation			1							
Phytoplankton			1	3		1					
Harmful algal blooms (HABs)	Causes/conditions			3							2
	Causative organisms	1	1	1					2	1	
	Cysts	2		1					1		
	Prediction of occurrence	1	1						1		
	Effect of loess scattering	1			1		1				
Benthos	Fauna			2	1	1	1	1		1	2
	Farming organisms			2							
Fish	Ichthyofauna			1	1	1		2			
	Egg/larvae	1			2		1				1
marine bacteria/parasite				3							
Paralytic shellfish toxins		3				4		1		1	
Oxygen deficient water masses				3							
Zooplankton		1		2	1	1	1		1	1	
Fishing grounds (farms) environments	Resources/productivity			1							
	Management platforms										1
	Graphical User Interface(GUI)			1							
	Pollution of sediments/heavy metal			3					1	1	
	Underwater noise				1						
Total		17	8	52	8	11	6	5	8	8	9

3.2.1 적조 (부영양화)

Park[1975a]는 진해만의 부영양화 해역의 기초생산 및 환경에 미치는 영향을 규명하기 위해 1974년 하계에 진해만 전역의 21개 정점에서의 채수를 통해 클로로필_a (식물플랑크톤 현존량)와 영양염류 및 용존산소(DO) 농도의 분포를 조사하였다. 그 결과, 클로로필_a 양은 마산만이 4.1-25.2 mg·m⁻³ (평균 13.3 mg·m⁻³)으로 가장 높았고, 낙동강 하구가 3.1-5.7 mg·m⁻³ (평균 4.5 mg·m⁻³), 거제만(굴양식장이 밀집하고 있음)이 0.7-5.0 (mg·m⁻³ 평균 2.2 mg·m⁻³)로 나타났으나, 영양염류의 양과 클로로필_a 양과는 유의성이 발견되지 않았다. 또한 마산만에서는 부영양화로 인해 적조가 발생하여 저층에서는 빈산소수괴를 형성하고 있었다. Cho[1978]는 1977년 하계 진해만의 서부해역인 진동만과 견내량 일대에서 외편모조 *Gonyaulax* sp.에 의한 적조를 조사하였다. 그 결과, 1주일간 지속된 *Gonyaulax* sp.에 의한 적조의 소멸 후 굴의 피해가 나타났으나 이들간의 상관관계는 확인되지 않았다. 반면, Cho[1979]는 1978년 하계 진해만에서 발생한 굴양식장(진해만 서부 해역으로 추정됨)에서의 굴 폐사의 원인을 대규모 적조(원인종은 외편모조인 *Ceratium*

fuscus)와 빈산소수괴 때문으로 추정하였다. 한편, 이때 클로로필_a 양은 최고 50 mg·m⁻³이었다. Cho[1981]는 1981년 하계 진해만을 포함한 남해안에 막대한 어업피해를 준 *Gymnodinium* sp. 적조에 대하여 조사하였다. 그 결과, 클로로필_a 농도는 약 1,000 mg·m⁻³로 나타났고, 용존산소농도는 2-3 ml·l⁻¹ (최저 1.0 ml·l⁻¹)로 빈산소수괴의 존재를 시사하였다. 또한 이 적조로 인해 양식굴과 홍합 등이 폐사하였다. Cho *et al.*[1982]은 1981년 하계 진해만내 패류양식장의 87개 정점에서 채취한 저니로부터 그 오염원을 추적 조사하였다. 그 결과, COD농도는 9.7-38.5 mg·g⁻¹로, 진해만 입구인 잠도에 서 견내량쪽으로 갈수록 그 농도가 증가하였고, 저니의 오염도는 패류양식장이 많은 가조도 서부해역이 가장 높았다. 이것은 가조도 서부해역의 대부분이 COD와 유기물량은 부영양화 해역의 상한치를 초과하였음을 보여주었다. 또한 그들은 이러한 양식장 저니의 오염원이 양식 생물, 즉 패류와 부착생물의 배설물인 유기물 축적(내부오염)으로 추정하였다. Cho and Park[1983]은 1981년 하계 진해만내 소해역인 고성만 및 자란만의 패류양식장의 17개 정점에서 저니의 부영양화 정도를 조사하였다. 그 결과, 저니 표층의 COD양은

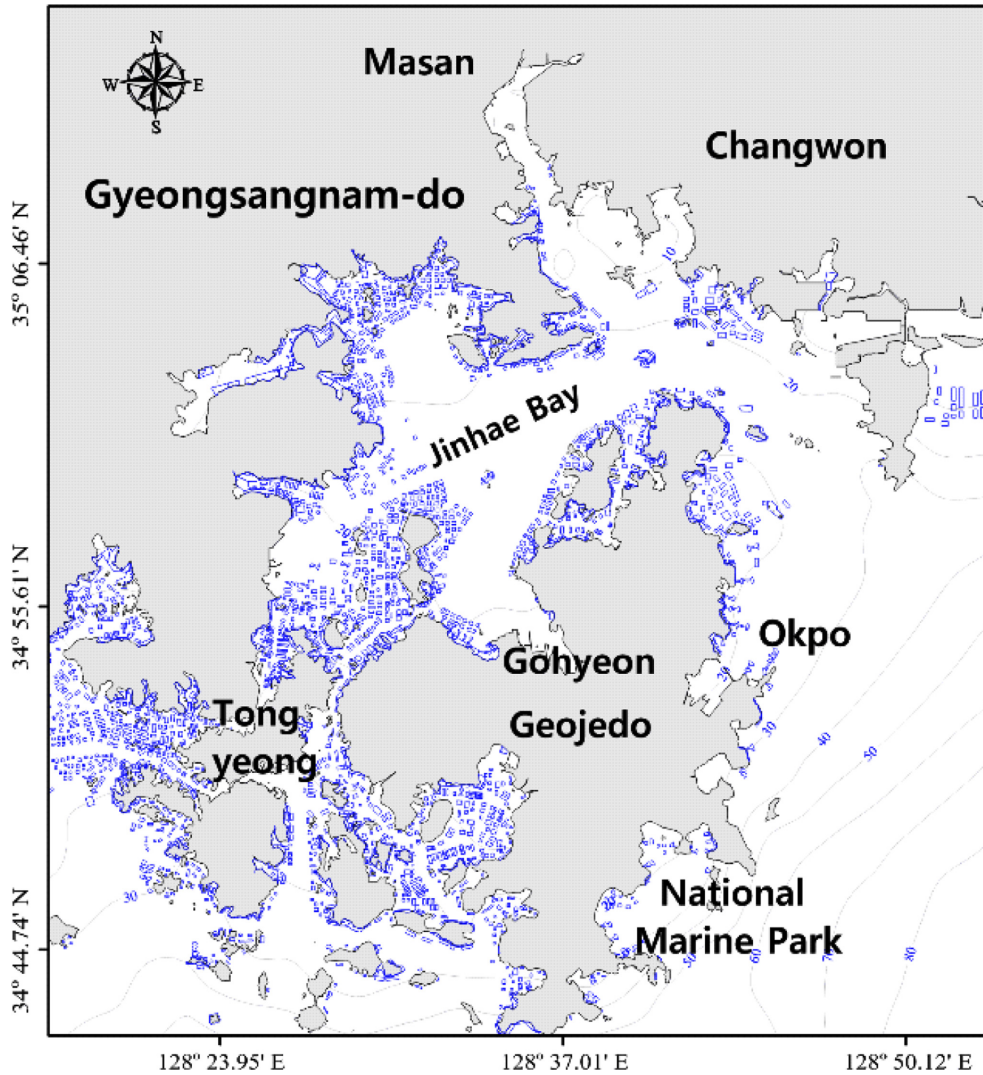


Fig. 4. Distribution of shellfish farms (black color) around Jinhae Bay as of 2019 (<http://www.khoa.go.kr/oceammap/main.do>).

12.5-19.5 mg·g⁻¹(평균 15.3 mg·g⁻¹)이었고, 유화물양은 0.18-0.64 mg·g⁻¹(평균 0.36 mg·g⁻¹)로 특히 유화물양은 부영양화의 상한인 0.3mg·g⁻¹을 다소 상회하였다. Lee and Kwak[1986]은 1981년 하계 진해만의 7개 정점에서 와편모조류인 *Gymnodinium nagasakiense*에 의한 적조의 생태학적 조사를 행하였다. 그 결과, 적조발생시 COD농도는 2.1-8.96 mg·l⁻¹, 클로로필_a농도는 2.18-290.46 mg·l⁻¹이었다. 또한 그들은 *G. nagasakiense*에 의한 대규모 적조는 영양염류가 풍부한 육수유입과 고수온, 낮은 염분 등 때문으로 추정하였다. Lee et al.[1990]이 1989년 하계 진해만의 서부해역과 마산만에서 행한 조사 결과에 따르면, 이들 해역에서는 우점종인 *Gymnodinium sanguineum*와 *Prorocentrum micans*에 의한 적조가 발생하였고, 이때 저층수는 빈산소상태인 것으로 나타났다. 또한 Yeo and Park[1997]이 1994년 10월부터 1년간 진해만 동부해역의 17개 정점에서 식물플랑크톤 군집과 수질을 조사한 결과에 따르면, 4월부터 7월까지 식물플랑크톤 생물량의 대발생(적조)이 있었으며, 이 기간중 *Alexandrium*

*tamarense*와 *Prorocentrum triestinum* 등의 쌍편모조류가 적조 원인으로 출현하였다. Lee and Baek[1998]은 1981년부터 1995년까지 진해만내의 4개 해역(마산만, 행암만, 당동만, 원문만)에서 관측된 현장자료와 기상자료를 통계처리하여 판별함수(discriminant function)를 구하고 이를 해석하였다. 그 결과, 이들 해역에서는 각각 서로 다른 요인에 의해 적조가 발생한다는 사실을 밝혔다. 한편, Kim et al.[2001]은 1982년부터 2000년까지 우리나라 연안에서 발생한 *Cochlodinium polykrikoides*적조의 발생현황과 그 변화추이에 대하여 고찰하였다. 그 결과, *C. polykrikoides*적조는 초기에는 진해만과 그 부근해역에서 발생하였으나, 1989년이후는 진해만을 제외한 충무, 거제, 남해, 여수 등 남해안 중부에서 주로 발생하였고, 이후 1995년부터는 동해안, 1998년, 1999년에는 서해안까지도 그 발생해역이 확대된 것으로 나타났다. 또한 *C. polykrikoides*적조는 초기에는 규조류, 편모조류 등과 함께 출현하였으나 이후에는 단독 적조로 출현하는 경향을 보였다. Oh et al.[2008]는 2007년 7월 진

해만 서부 연안에서 채수로부터 분리한 클론 세포 *Skeletonema costatum*(4계절 우점종임)의 성장에 미치는 광학적 특성에 대하여 조사하였다. 그 결과, *S. costatum*은 표층에서 잘 성장하지만 그 최적수심은 상당히 제한적이며 황색과장대가 우점하는 폐쇄성 연안역에서 잘 성장할 수 있는 것으로 나타났다. Lee and Kim[2008]은 수산과학원이 장기관측한 적조관련자료와 기상청의 기상자료를 이용하여, 적조발생과 해양환경과의 관계를 규명하였다. 그 결과, 그들은 진해만과 가막만에서 발생하는 적조는 빈산소수괴의 발달과 관련이 있다고 지적하였다. 또한 이들 해역의 탁월종인 *S. costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp.에 의한 적조는 장기간의 평균 강수보다 더 많은 강수가 있는 10일후에 발생한다고 주장하였다. Lee et al.[2013]는 우리나라 남해안에서 발생한 지난 40년간 발생한 적조원인종의 친이(규조류에서 외편모조류), 발생회수, 발생 해역의 추이 및 시기 등에 대하여 조사하였다. 그 결과, 적조원인종은 초기의 규조류에서 점차 외편모조류로 친이하였고, 적조의 발생회수도 1990년대에 5-21회(평균 10.3회)였던 것이 2000년대에는 2-13회(평균 8.9회)로 줄었으며, 특히 진해만은 타 연안역에 비해 그 발생회수가 현저히 적었다. Shin et al.[2014]은 진해-마산만에서 2011년부터 1년간 채집한 퇴적물에서 분리, 배양하여 만들어진 *Alexandrium insuetum*의 휴면포자를 형태학적, 계통발생적으로 분석하였다. 그 결과, *Alexandrium insuetum*은 수온 25 °C, 염분 25일 때 최대 성장률을 보였으며, 따라서, 하계에 증식이 가장 활발히 이루어진다는 사실을 밝혔다.

3.2.2 수질(빈산소수괴 등) 및 저질(퇴적물)

Park[1975b]은 1972년 행암만에 위치한 비료공장의 폐수로 인한 인산염의 분포를 조사한 결과, 비료공장이 설립된 1967년에 비해 행암만 입구에서의 인산염의 농도는 약 10배 정도 높은 값을 보였다. Cho et al.[1982], Cho and Park[1983]은 1981년 하계 87개 정점에서 채취한 패류 양식장의 저니를 분석하였다. 그 결과, COD, IL(강열감량), 황화물 등의 농도는 진해만 입구로부터 만내(견내랑 쪽)로 들어갈수록 증가하였고, 저니오염도는 패류양식장이 많은 진해만 서부해역에서 가장 높았다. 그들은 이러한 저니의 오염이 양식생물인 패류와 부착생물에 기인한 것으로 추정하였다. 특히, 이들 항목 중 황화물양은 부영양화의 상한(0.3 mg·g⁻¹)을 초과하고 있는 것으로 나타났다. Hong et al.[1985]은 1976년부터 1982년까지 진해만의 6개 정점에서의 65회에 걸친 현장 조사를 바탕으로 수질과 생태계와의 상관성을 검토하였다. 그 결과, 그들은 진해만의 수질과 생태계 변동의 주요인은 적조이며, 2차요인은 담수유입이라고 주장하였다. Yang and Hong[1988]은 1983년 9월 진해만 표층 퇴적물의 유기물 분포를 조사하였다. 그 결과, 진해만 북동부 해역인 마산만과 북서부 해역인 고현성만, 원문만의 저층수는 용존산소 농도가 1.0 ppm이하인 빈산소 상태를 보였다. 또한 이들 해역 중 마산만은 유기물을 다량 함유한 생활하수와 산업폐수의 유입으로 인해 거의 매년 적조가 발생하고 있는 반면, 고현성만과 원문만은 패류 양식장 기원의 유기물이 퇴적하여 생물분해로 인한 산소소비가

가 진행되고 있음을 시사하였다. Lim et al.[1992]은 양식장이 밀집한 해역에서의 저서동물상의 변동을 파악하기 위하여 소내만을 포함한 진해만 전역의 13개 정점에서 1990년부터 1991년까지 각 조사정점당 3회씩 저서퇴적물을 채취, 분석하였다. 그 결과, 그들은 만내에서 하계에는 수온약층의 형성과 함께 저층에서는 용존산소농도가 2.0 ppm 이하인 빈산소수괴로 인해 저서군집이 파괴되어 추계에 출현하는 저서생물의 종과 개체수가 감소한 것을 발견하였다. 그들은 이러한 저서생물의 출현종 구성에 따라 진해만 전 해역을 3개 정점군으로 구분하였으며, 이 결과는 표층퇴적물내의 유기물 함량분포와 연관성을 보인다고 주장하였다. Lim and Hong[1994]은 대형저서동물군집에 관한 연구를 위해 1987년부터 1990년까지 12개 정점에서 22회에 걸쳐 표층퇴적물을 채취, 분석하였다. 그 결과, 진해만은 만내로 갈수록 퇴적물내의 유기탄소량이 높고 또한 세립질 퇴적물이 우세한 경향을 보여주었다. 또한 그들은 진해만내에서는 5월부터 빈산소수괴가 발달하기 시작해 점차 만외로 확산하면서 9월경에 극에 달하며 만의 절반이 산소결핍으로 영향을 받고 있다고 하였다. Yang et al.[1995]은 마산만, 행암만, 진해만의 중서부 등 4개 해역에서 주상 퇴적물 시료를 채취하여 지난 80년간의 중금속(Fe, Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Co)에 의한 오염 실태를 조사한 결과, Zn과 Cu는 서로 높은 상관성이 있음을 밝혔다. Kim et al.[1995a]은 3차원 생태계 수치모형을 사용하여 오염부하량의 제어에 의한 수질관리대책(식물플랑크톤 농도의 변화 예측)을 제시하였다. 그들의 결과는 하천으로부터의 오염부하량을 100% 저감한 경우 식물플랑크톤의 농도는 적조발생이 가능한 농도인 10 mg·m⁻³로 이하로 개선되었으나, 진해만 서부해역은 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Kim and Cho[1999]는 한국의 연안어장에 대한 환경오염 조사결과(NFRDI[1996])에 기초하여 진해만내에서의 COD의 시공간적인 변화를 조사하였다. 그 결과, COD 농도는 1990년을 제외하고는 전반적으로 감소 추세를 보였고, 또한 담수유입으로 인한 염분 변동이나 영양염류의 농도 변화에 따라 계절적 변동을 보였다. Lee et al.[2001]은 2000년 2월과 5월에 진해만내 37개 정점에서 입자성유기물(suspended particulate matter, SPM)을 채집, 분석하였다. 그 결과, SPM 농도는 대체로 춘계와 하계에 높고 추계와 동계에 낮았으며, 식물플랑크톤의 생물량과 밀접한 상관성이 있음을 보여주었다. 또한, SPM 농도는 육수유입의 영향을 받는 수역에서 높은 반면, 양식장이 밀집한 수역에서 상대적으로 낮았다. Kim and Ha[2001]는 1998년 2월부터 1999년 9월까지 진해만 입구를 포함한 해역의 40개 정점에서 표층퇴적물을 채취, 분석한 결과, 가덕도 서쪽의 진해만 입구에서는 니질퇴적물이 우세한 것으로 나타났다. Lee et al.[2003]는 하계 진해만 서부해역의 16개 정점에서 1999년 8월 수질 및 저질의 오염도와 그 공간 분포를 조사하였다. 그 결과, 패류양식장이 밀집한 서부해역에서 표층의 DO농도는 8.19-13.14 mg·L⁻¹(포화상태 이상)이었으나, 저층 DO농도는 0.09-5.08 mg·L⁻¹로, 무산소 내지 빈산소 상태를 보였다. 또한 퇴적물내의 황화수소(H₂S), COD, 총유기탄소(TOC) 등의 함량이 높은 것으로 보아 퇴적물에 고농도의 유기물이 존재하고 있음을 시사하였다, 이

것은 양식생물의 배설물 등이 침강하여 무기화되어 저층 영양염류를 높이고 DO를 소모한 결과, 저질의 유기물과 황화물 함량을 높이는 것으로 판단되었다. Hyun *et al.*[2003]은 진해만 입구의 74개 정점에서 2001년과 2002년에 걸쳐 표층퇴적물을 채취하였다. 그 결과, 조사해역은 생물기원과 육지기원의 유기물을 함유한 뿔 퇴적물(muddy sediment)이 우세하였고, 또한 일부 정점에서는 황화수소(H_2S) 농도가 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 을 초과하여 대형저서동물의 서식처로서 부적합한 환경임을 시사하였다. Hong *et al.*[2007]은 유동수치모형과 생태계 수치모형을 이용하여 진해만내의 COD 거동특성을 규명하였다. 그 결과, 진해만의 저층 중앙부에서 만의 북부에 이르는 해역에서는 COD의 물리적 축적과 생물, 화학적 분해가 탁월한 것으로 나타났다. Lee *et al.*[2008]는 수산과학원이 지난 18년간 하계에 조사한 DO, COD, 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP)의 농도 측정자료를 사용하여 진해만 수질의 경년변동을 해석하였다. 그 결과, 진해만 수질은 2000년대에 들어서부터 개선된 것으로 나타났다. 또한 수질분포에 따른 군집분석(cluster analysis)결과에 따라 진해만은 남서부, 중앙부, 북부, 동부 해역 등 4개권으로 구분되었다. 한편, 빈산소수괴(Oxygen Deficient Water mass)는 남서부 해역에서는 조사기간 중 거의 매년 출현한 반면, 북부해역에서는 그 출현빈도가 감소하였는데, 이것은 1994년의 하수처리장의 건설이후 수질이 개선되었기 때문으로 판단되었다. Son *et al.*[2011]은 2010년 4계절에 걸쳐 진해만내 23개 정점에서 수질오염특성을 조사하였다. 그 결과, 부영양화된 수역인 마산만과 행암만에서는 타 해역에 비해 대장균 *Escherichia coli*의 군수가 높게 나타났다. Kim *et al.*[2015]은 2010년 하계와 추계에 진해만의 남서부해역, 북부해역(마산만 및 행암만을 포함한 수역) 및 만입구의 31개 정점에서 매월 수질과 저질을 조사하였다. 그 결과, 하계에 출현하는 빈산소수괴는 수온전선의 분포와 밀접한 상관을 보였고, 이로 인해 저층에서는 영양염 농도가 증가하였다. Al-Odaini *et al.*[2015]는 2010년 마산-진해만의 19개 정점에서 표층퇴적물을 채취, HBCDs(Hexabromocyclodecanes; 1960년대 이래 생산되고 있으며 지금은 가장 넓게 사용되고 있는 지방족화합물 첨가제 브롬화난연제(BFRs)의 하나임)의 오염상태와 잠재적 근원을 조사하였다. 그 결과, HBCDs의 농도는 양식장 부근의 퇴적물에서 상대적으로 높았고, 하수처리장이 HBCDs의 부가적인 공급원임이 밝혀졌다. Choi *et al.*[2017]는 2013년 춘계와 하계에 굴양식장이 밀집한 진해만내 24개 정점에서 표층퇴적물과 공극수 시료를 채취하여 COD, TOC, IL, 산화발성 황화물(AVS) 등을 분석하였다. 그 결과, 진해만의 퇴적물 오염은 인근의 거제-한산만 해역에 비해 매우 심각하였고, 또한, 패류양식장에서 채취한 주상퇴적물의 총유기탄소량은 2000년부터 현저히 증가한 것으로 나타났다. Bae *et al.*[2018]는 2013년부터 2016년까지 진해만내 10개 정점에서의 조간대 퇴적물(subtidal sediment) 채취와 CTD관측 결과를 바탕으로 대형동물군집의 시공간적 변화를 검토하였다. 그 결과, 대형동물군집은 세 개의 그룹으로 나눌 수 있었으며, 이러한 저서군집구조는 동적인 환경요인에 잘 반응한 결과로 판단되었다. Shen *et al.*[2018]은 2011년 진해만내의 마산만, 행암만, 고힌만, 진

동만 등 4개 해역에서 core 퇴적물을 채취하여 PFASs(perfluoroalkyl substances, 화학물질에 기반을 둔 인조 합성탄화수소)의 오염 실태를 조사하였다. 그 결과, 이들 해역에서는 고농도의 PFASs가 퇴적물의 표층 또는 아표층에서 발견되어, PFASs에 의한 오염이 진행되고 있다는 것을 시사하였다. 또한 PFASs는 1980년대 이래 꾸준한 증가를 보였으며, 이는 전 세계적인 PFASs의 소비 패턴과도 일치하였다.

3.2.3 해수유동

Kang[1991]은 마산만을 포함한 진해만에서의 물질순환을 규명하기 위해 2차원 유한요소법에 의한 수치실험과 수로학적 현장조사(수위, 흐름, 수온, 염분, COD 등 관측)를 행하였다. 그 결과, 만내로 유입한 오염물질은 거의 정체상태인 내만수로 인하여 외해수와의 혼합과 분산이 매우 느리다는 사실을 보여주었다. Chang *et al.*[1993]은 3차원 수리모형실험(모형축척은 수평방향 1/2000, 연직방향 1/159임)과 현장에서의 유동조사를 통해 진해만내의 조류와 조석잔차류를 조사하였다. 그 결과, 진해만 중앙수로에서의 조류의 유속은 대조시 $90 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 소조시 $30 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 나타났고, 또한 만중앙부에서는 시계방향의 조석잔차류가 출현하였다. 또한, 진해만 서부에 위치한 가조도 북부 해역에서는 북향류의 조석잔차류가 탁월한 반면, 남부 해역은 남향류가 우세하였다. 한편, 만내의 표층류는 바람과 하천류에 의한 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. Kim and Lee[1994]는 2차원 조류수치모형실험(M, 분조만 고려)과 현장조사 자료에 기초하여 진해만내의 수괴 분포, 특히 저산소수괴의 형성규모를 파악하였다. 그 결과, 진해만내의 용존산소분포는 조석전선($\log(H \cdot U^2$, 여기서 H는 임의 해역의 수심, U는 평균 유속)의 형성과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 또한 저산소(또는 무산소) 수괴는 유동이 미약하고 양식장이 밀집한 만의 서부해역 및 오폐수 유입이 많은 북부해역에서 출현하였다. Jung[1996]은 κ - ϵ 난류방정식에 연직 운동량 확산계수를 도입한 3차원 수치모형을 사용하여 마산-진해만의 조류계산을 수행하였다. 그 결과, 난류모형에 사용된 상수가 공간적인 불균형을 가지고 있어서 난류모형이 조류의 예측수단으로 활용될 수 있음을 보여주었다. Choi *et al.*[2004]는 GIS 기법을 연계하여 진해만의 3차원 해수유동모형이 WINDOWS환경에서 구현이 가능한 GUI(Graphical User Interface)를 구축하였다.

3.2.4 저서동물 및 어장환경

Paik[1980]은 굴 수하연에 부착하여 굴패각, 양식시설 등에 석회질의 집을 형성하여 피해를 주는 다모환충류(갯지렁이류)의 분류학적 연구를 수행하였다. 그 결과, 짧은 수술갯지렁이(*Loimia medusa*), 미끈 꽃갯지렁이(*Myxicola infundibulum*), 우산관 덮개 꽃갯지렁이(*Hydroides ezoensis*), 둥근 구멍관 덮개 꽃갯지렁이(*Dexiospira alveolatus*) 등 7과 12속 13종을 확인하였다. Lim and Hong[1996]은 1987년부터 1990년까지 총 22회에 걸쳐 진해만에서 채집한 저서동물 중 오투기갯지렁이(*Sternaspis scutata*)의 생태를 조사하였다. 그 결과, 이 종은 유기오염도가 낮고 외해수의 영

향을 받는 만입구에 주로 분포하고 있었으며, 퇴적물내의 유기물 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. Lim and Hong[1997]은 1987년부터 1990년까지 진해만내의 주요 우점종의 분포를 조사하였다. 그 결과, 우점종은 다모류가 11종(85%), 연체동물 2종(15%)으로 나타났다. 또한, 이들 우점종은 유기물 함량이 높은 내만역에 서식하는 종과, 외해수 영향을 받는 만입구에 서식하는 종, 만중앙부에 우점하는 종 등으로 구분이 가능하여 유기물 오염지표종으로 활용할 수 있는 가능성을 시사하였다. Lee and Kim[2000]은 1995년 진해만내 14개 정점에서 퇴적물을 채취하여 참굴(*Crasostrea gigas*)의 중금속 오염을 조사하였다. 그 결과, 해저퇴적물내에는 인간의 산업활동과 관련한 Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn 등이 함유되어 있었다. 또한, 참굴의 중금속 농축계수(BCF)는 Zn, Cu, Cd, Pb, Co, Ni 등의 순으로 높았고, 다른 이때패류에 비하여 강한 중금속 축적종인 것으로 나타났다. Paik and Yun[2000]은 진해만내의 대형저서동물 군집구조 파악을 위해 8개 조하대 해역에서 1998년 2개월 간격으로 총 6회에 걸친 현장조사(주로 진해만 동북부 해역)를 실시하였다. 그 결과, 총 237종의 대형저서동물이 출현하였으며, 이중 환형동물이 80종으로 33.8%를 차지하였다. 또한 집괴분석결과 이 지역은 2개 정점군과 2개 정점으로 구분되었다. Kim et al.[2003]은 2001년 매월 진해만내에서 채집한 개조개(*purpurish* Washington clam, *Saxidomus purpuratus*)의 자원생태학적 특성을 조사하였다. 그 결과, 개조개의 최대연령은 9세였고 산란시기는 5-10월이며 주 산란시기는 7월임이 밝혀졌다. 또한 이들 결과에 근거하여 Bertalanffy의 성장곡선을 산정하였다. Park et al.[2004]은 GIS에 기반을 둔 양식장 관리시스템을 개발, 구축하는 것을 목적으로, 진해만을 대상으로 한 어장정보관리시스템을 제작하였다. 그들은 이러한 어장정보관리시스템을 사용하면 어장분포 등을 신속하게 검색하여 효과적인 어장관리와 정책수립이 가능하다고 주장하였다. Lim and Shin[2005]은 2002년부터 2003년까지 3회에 걸쳐 진해국가산업단지 인근 해역의 27개 정점에서 저서동물군집의 저서환경을 조사하였다. 그 결과, 총 9개 동물군이 확인되었으며, 우점종인 다모류가 전체 출현종의 74%를 차지하였다. Bae et al.[2017]은 2013년부터 2014년까지 진해만의 10개 정점에서 표층 퇴적물을 채취하여 퇴적물의 성상과 대형저서동물군집과의 관계를 검토하였다. 그 결과, 진해만의 저질은 니질이 탁월하였고, 퇴적물에서는 상당한 유기물이 관찰되었다. 또한, 이러한 유기물은 진해만으로 유입되는 중금속에 의한 오염과 인접한 양식장으로부터 공급되며 이것이 저서군집에 악영향을 주는 것으로 판단되었다. Lee et al.[2018]은 2017년 진해만에서 잠수기 어업으로 어획된 364개 표본의 개조개(*Saxidomus purpuratus*)에 대하여 각장 크기증가에 따른 성장특성을 규명하였다. 그 결과, 그들은 von Bertalanffy의 성장방정식에 따른 개조개의 성장곡선을 얻었다.

3.3 진해만 연구의 한계와 해결과제

앞서 살펴본 바에 따르면, 진해만에서의 적조는 수질과 저질의 유기물 오염이 심하고 부영양화된 해역인 북부해역과 서부해역에

서 주로 발생한 것으로 나타났다. 그것은 진해만 입구나 중앙부 해역에 비해 이들 해역은 유동이 미약하여 유기물에 의한 오염이 가중되었기 때문으로 생각된다. 그 결과, 저층은 환원상태가 되거나 황화물 농도의 증가 또는 하계에 빈산소수괴가 형성되는 등 불리한 생물환경의 모습을 보여주었다. 또한, 진해만에서의 적조는 마산만 등 북부해역에서 발생하는 경우와, 진동만 등 서부해역에서 발생하는 경우는 유기물의 공급원에 있어서 서로 차이를 보였다. 즉, 북부해역은 적조발생의 원인이 되는 유기물이 육지로부터 공급되는 외부오염인 반면 서부해역은 양식생물에 의한 내부오염이라는 점에서 차이가 있었다.

한편, 진해만에서의 적조는 발생빈도가 과거에 비해 현저히 감소하였다(Fig. 2 참조). 이것은 진해만의 환경이 과거에 비해 개선된 결과이지만, 소내만에서는 여전히 *Cochlodinium polykrioides* 등 유해성 적조가 발생하고 있는 실정이다. 이것은 진해만에서는 적절히 호조건만 주어지면 언제든지 적조가 발생할 수 있다는 것을 의미한다(Oh et al.[2008], Shin et al.[2014]). 따라서 진해만에서의 적조 발생을 억제하고 예방하기 위해서는 근본적인 해결책이 필요하다. 그러나 지금까지 진해만에서 수행된 연구자 개인의 뛰어난 연구 성과에도 불구하고 진해만 적조 문제 나아가 진해만 전체의 환경 문제를 해결하는 데는 한계가 있다고 생각된다. 그것은 이들 연구 성과간의 연결고리가 결여되어 있기 때문이다. 그 결과, 진해만에서 발생하는 적조 중의 하나인 *Cochlodinium polykrioides* 적조의 발생기작조차 아직 밝혀져 있지 않다. 따라서 앞으로 진해만의 적조 연구는 연구자간의 협력체제를 구축한 학제간의 연구가 절실히 요구된다. 이를 통해 진해만의 전 해역을 대상으로 한 유해적조생물(또는 패독을 일으키는 종)의 생태학적 조사(cyst의 분포와 발아 조건 등)와 물리적 집적과정, 생물학적 증식과정 등에 대한 종합적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

한편, 진해만내에서 수질은 물론 저니오염이 가장 심각하고 빈산소수괴가 빈번히 출현하는 수역은 마산만 등의 북부해역과, 또한 패류양식장이 밀집한 원문만 등 서부해역임이 밝혀졌다(Park[1975b], Yang and Hong[1988], Lim et al.[1992]). 그 결과, 적조 또한 이들 해역에서 빈번히 발생하였으며, 따라서 수질과 저질환경의 악화는 적조 발생과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 반면, 진해만의 수질과 저질 환경은 2000년대에 들어서부터 상당히 개선되어(Kim and Cho[1999], Lee et al.[2008]), 마산만 등 북부해역에서의 빈산소수괴의 출현빈도 또한 감소하였다(1994년의 하수처리장의 건설 이후 수질이 개선되었기 때문). 그러나 패류양식장이 밀집한 남서부 해역에서는 여전히 빈산소수괴의 출현빈도가 높을 뿐만 아니라(Lee et al.[2003], Hyun et al.[2003], Lee et al.[2008]), 북부해역과 서부해역은 육수 또는 생활하수 유입의 영향을 받고 있는 실정이다(Son et al.[2011], Al-Odaini et al.[2015], Choi et al.[2017]). 특히, 이들 해역은 유동이 미약한 내만역으로 외해수와 혼합과 분산도 매우 느려(Kang[1991]), 앞으로도 계속 오염이 가중될 소지가 있다(Kim and Lee[1994]). 물론 이들 해역의 수질과 저질환경의 현상은 지금까지의 연구를 통해 어느 정도 밝혀졌으나, 환경

개선을 위한 연구는 Kim *et al.*[1995b]을 제외하고는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 이들 두 해역의 수질과 저질환경에 주어지는 유기물 오염부하를 억제할 수 있는 종합적이고 체계적인 연구를 통해 적조, 패류 독성, 빈산소수괴의 발달 등 제반 환경 문제를 해결할 방안을 시급히 찾아야 할 것으로 생각된다. 이를 위해서 진해만의 북부해역은 지금 시행하고 있는 오염총량제의 철저한 관리를 통해 더 이상 환경이 악화되지 않도록 하여야 할 것이다. 또한, 진해만의 서부해역은 스마트 양식기술의 도입에 의해 어장환경을 합리적으로 관리함은 물론 환경수용력(또는 환경용량)을 넘지 않는 범위내의 적절한 시설관리나 노후화 어장의 정화 등이 필요할 것으로 생각된다.

한편, 진해만내 저서생물 우점종의 하나인 오투기갯지렁이(*Sternaspis scutata*)는 유기오염도가 낮은 만입구에 다수 분포한 반면, 유기물 함량이 높은 내만에서는 그 개체수가 감소하는 경향을 보였다(Lim and Hong[1996]). 또한, 내만 양식생물인 참굴(*Crasostrea gigas*)내에는 인간의 산업활동과 관련한 중금속의 농축계수가 다른 이매패류에 비하여 더 높은 것으로 나타났다(Lee and Kim[2000]). Paik and Yun[2000], Bae *et al.*[2017] 등은 이와 같은 유기물이나 중금속에 의한 퇴적환경은 양식생물은 물론 저서군집에도 악영향을 준다고 주장하였다. 따라서 저서생물 군집의 호적한 환경 조성을 위해서는 무엇보다 저질환경의 개선(예를 들면 퇴적한 오니의 제거 등)이 시급하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1975년부터 2018년까지 진해만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(KCI) 및 과학인용지수(SCI)에 게재된 85편의 논문을 분석하여 진해만 연구가 시대에 따라 어떻게 변천해왔는가를 진단, 평가하고, 앞으로 진해만의 환경 회복을 위해 필요한 연구과제를 모색하였다.

지금까지의 연구 주제로서는 적조, 수질과 저질, 해수유동, 저서동물과 어장환경 등이 많이 다루어졌다. 또한 1990년대 이전에는 연구가 진해만의 북부해역인 마산만에 집중하였으나, 1990년 이후부터 진해만 전역 또는 서부해역에 집중하였다. 이것은 진해만내에서 북부해역과 서부해역이 가장 오염이 심각하기 때문으로 생각된다. 진해만에서의 적조는 발생빈도가 과거에 비해 현저히 감소하였으나, 소내만에서는 여전히 유해성 적조가 발생하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 앞으로 진해만의 전 해역을 대상으로 한 유해적조생물의 생태학적 조사와 물리적 집적과정, 생물학적 증식과정 등에 대한 학제간의 연구가 절실히 요청된다.

진해만의 수질과 저질 환경은 2000년대에 들어서부터 상당히 개선되어 북부해역에서의 빈산소수괴의 출현빈도는 감소한 것으로 나타났다. 반면, 패류양식장이 밀집한 서부 해역에서는 여전히 빈산소수괴의 출현빈도가 높고, 육수나 생활하수 유입의 영향을 계속 받고 있었다. 따라서 앞으로의 연구는 진해만의 북부해역과 서부해

역에 대한 유기물 오염부하를 억제하면서 적조는 물론, 패류 독성이나 빈산소수괴의 발달 등 환경 문제의 해결에 집중되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2019년 한국가스공사의 연구비 지원으로 수행한 과제입니다.

References

- [1] Al-Odaini, N.A., Shim, W.J., Han, G.M., Jang, M., 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] Bae, H.N., Lee, J.H., Song, S.J., Park, J., Kwon, B.O., Hong, S., Ryu, J., Choi, K., Khim, J.S., 2017, "Impact of environmental and anthropogenic stresses on macrozoobenthic communities in Jinhae Bay, Korea", *Chemosphere*, 171, 681-691.
- [3] Bae, H.N., Lee, J.H., Song, S.J., Ryu, J.S., Noh, J.S., Kwon, B.O., Choi, K.S., Khim, J.S., 2018, "Spatiotemporal variations in macrofaunal assemblages linked to site-specific environmental factors in two contrasting nearshore habitats", *Environ. Pollut.*, 241, 596-606.
- [4] Chang, S.D., Kim, C.K., 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] Cho, C.H. and Park, K.Y., 1983, "Eutrophication of bottom mud in shellfish farms, the Goseong-Jiran Bay", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 16(3), 260-264.
- [9] Cho, C.H., Yang, H.S., Park, K.Y., Youm, M.K., 1982, "Study on bottom mud of shellfish farms in Jinhae Bay", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 15(1), 35-41.
- [10] Choi, M.K., Lee, I.S., Hwang, D.W., Kim, H.C., Yoon, S.P., Yun, S.R., Kim, C.S., 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.
- [11] Choi, W.J., Park, C.K., Lee, S.M., 1994, "Numerical simulation of the formation of oxygen deficient water-masses in Jinhae Bay", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 27(4), 413-433.
- [12] Choi, W.J., Park, S.E., Lee, W.C., Koo, J.H., Suh, Y.S., Kim, T.H., 2004, "GUI implementation for 3D visualization of ocean

- hydrodynamic models”, J. Korean Assoc. of Geogr. Inf. Studies, 7(3), 99-107.
- [13] Hong, S.J., Lee, W.C., Jung, R.H., Park, S.E., Jang, J.H., Kim, H.C., Kim, D.M., 2007, “Estimation of a transport and distribution of COD using eco-hydrodynamic model in Jinhae Bay”, J. Env. Sci., 16(12), 1369-1382.
- [14] Hong, S.W., Hah, Y.C., Ahn, T.S., 1985, “Factors analysis of water quality and ecosystem in Jinhae Bay”, J. Kor. Water Pollut. Res. and Control, 1(1), 9-17.
- [15] Huh, S.H., Han, M.I., Hwang, S.J., Park, J.M., Baek, G.W., 2011, “Seasonal variation in species composition and abundance of larval fish assemblages in the southwestern Jinhae Bay, Korea”, Korean J. Ichthyol., 23(1), 37-45.
- [16] Hyun, S.M., Choi, J.W., Choi, J.S., 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.
- [17] Jung, T.S., 1996, “Three-dimensional numerical modelling of tidal currents in Masan-Jinhae Bay”, J. Korean Civ. Eng., 16(2-1), 63-72.
- [18] Kang, S.W., 1991, “Circulation and pollutant dispersion in Masan and Jinhae Bay of Korea”, Mar. Pollut. Bull., 23, 37-40.
- [19] Kim, C.K. and Lee, J.S., 1994, “A three-dimensional PC-based hydrodynamic model using an ADI scheme”, Coast. Eng., 23(3-4), 271-287.
- [20] Kim, H.K., Jung, C.H., Lim, W.A., Lee, C.K., Kim, S.Y., Youn, S.H., Cho, Y.C., 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.
- [21] Kim, J.G., Park, C.K., Shin, S.G., 1995a, “The eutrophication modelling for Jinhae Bay in summer-Simulation of phytoplankton distribution by ecosystem model-”, J. Korean Soc. Environ. Eng., 17(2), 121-135.
- [22] Kim, J.G., Park, C.K., Shin, S.G., 1995b, “The eutrophication modelling for Jinhae Bay in summer-the countermeasures against eutrophication in Jinhae Bay-”, J. Korean Soc. Environ. Eng., 17(3), 215-223.
- [23] Kim, J.K. and Cho, E.I., 1999, “The determining factors and temporal and spatial characteristics of chemical oxygen demand in Jinhae Bay”, J. Korean Environ. Sci. Soc., 8(2), 189-195.
- [24] Kim, S.Y. and Ha, J.S., 2001, “Sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong River estuary and adjacent coastal area”, J. Kor. Fish. Soc., 34(3), 268-278.
- [25] Kim, Y.H., Ryu, D.K., Chang, D.S., Kim, J.B., Kim, S.T., 2003, “Age and growth of purplish Washington clam (*Saxidomus purpuratus*) in Jinhae Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 36(5), 495-499.
- [26] Kim, Y.S., Lee, Y.H., Kwon, J.N., Choi, H.G., 2015, “The effect of low oxygen conditions on biogeochemical cycling of nutrients in a shallow seasonally stratified bay in southeast Korea (Jinhae Bay). Mar. Pollut. Bull., 95, 333-341.
- [27] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Open sea (<http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>).
- [28] Lee, C.K., Park, T.G., Park, Y.T., 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.
- [29] Lee, I.C., Oh, Y.J., Kim, H.T., 2008, “Annual variation in oxygen-deficient water mass in Jinhae Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 41(2), 134-139.
- [30] Lee, D.I., Cho, H.S., Lee, M.O., 2003, “A study on the environmental characteristics of the western Chinhae Bay in summer-spatial variation of water quality in water column and sediment environment-”, J. Korean Soc. Water Qual., 19(6), 723-730.
- [31] Lee, I.S. and Kim, E.J., 2000, “Distribution of heavy metals in sediments, seawater and oysters(*Crassostrea gigas*) in Jinhae Bay”, Korean J. Ecol., 23(1), 59-64.
- [32] Lee, J.H. and Kwak, H.S., 1986, “A study on the *Gymnodinium nagasakiense* redtide in Jinhae Bay of Korea”, Korean J. Ecol., 9(3), 149-160.
- [33] Lee, M.H., Kim, Y.H., Cha, B.Y., Yoon, B.S., Ryu, D.K., Kim, S.T., 2018, “Assembling the age and growth of the butter clam *Saxidomus purpuratus* in Jinhae Bay using transmitted light”, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 51(5), 556-565.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Lee, P.Y., Kang, C.K., Choi, W.J., 2001, “Temporal and spatial variations of particulate organic matter in the southeastern coastal bays of Korea”, J. Korean Fish. Soc., 34(1), 57-69.
- [37] Lee, W.J., Kim, H.G., Park, Y.T., 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.
- [38] Lim, H.S., Choi, J.W., Je, J.G., Lee, J.H., 1992, “Distribution pattern of macrozoobenthos at the western part of Chinhae Bay, Korea”, Bull. Korean Fish. Soc., 25(2), 115-132.
- [39] 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.
- [40] Lim, H.S. and Hong, J.S., 1996, “Distribution and growth pattern of *Sternaspis scutata* (polychaeta: sternaspidae) in Chinhae Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 29(4), 537-545.
- [41] Lim, H.S. and Hong, J.S., 1997, “Ecology of the macrozoobenthos in Chinhae Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 30(2), 175-187.
- [42] Lim, K.H. and Shin, H.C., 2005, “Temporal and spatial distribution of benthic polychaetous community in the northern Jinhae Bay”, Kor. J. Environ. Biol., 23(3), 238-249.

- [43] Ministry of Oceans and Fisheries, (<https://www.meis.go.kr/pro-tal/main.do>).
- [44] National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), 1996, "Final report of environmental pollution investigation on Korean coastal fishing grounds", 140-167.
- [45] National Institute of Fisheries Science, (www.nifs.go.kr/red/news_2.red).
- [46] Oh, S.J., Kang, I.S., Yoon, Y.H., 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.
- [47] Paik, E.I., 1980, "Polychaetous annelids growing in oyster farms", Bull. Korean Fish. Soc., 13(1), 33-44.
- [48] Paik, S.G. and Yun, S.G., 2000, "Community structure of the macrobenthos in Chinhae Bay, Korea", J. Korean Fish. Soc., 33(6), 572-580.
- [49] Park, C.K., 1975a, "Eutrophication and chlorophyll content in the seawater of Jinhae Bay area", Bull. Korean Fish. Soc., 8(3), 121-126.
- [50] Park, C.K., 1975b, "Study on the characteristic distribution of phosphate in Jinhae Bay", Bull. Korean Fish. Soc., 8(2), 68-72.
- [51] Park, S.E., Choi, W.J., Lee, W.C., Koo, J.H., Jung, R.H., Park, J.S., 2004, "Construction of the fishing grounds information management system using GIS", J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Studies, 7(3), 90-98.
- [52] Shen, A.H., Lee, S.G., Ra, K.T., Suk, D.W., 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.
- [53] Shin, H.H., Baek, S.H., Li, Z., Han, M.S., Oh, S.J., Youn, S.H., Kim, Y.S., Kim, D.K., 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.
- [54] Shin, H.H., Li, Z., Lim, D., Lee, K.W., Seo, M.H., Lim, W.A., 2018, "Seasonal production of dinoflagellate cysts in relation to environmental characteristics in Jinhae-Masan Bay, Korea: one-year sediment trap observation", Estuarine, Coast. Shelf Sci., 215, 83-93.
- [55] Son, M.H., Baek, S.H., Joo, H.M., Jang, P.K., Kim, Y.H., 2011, "Distributional characteristics of *Escherichia coli* and water pollution in Gwangyang Bay and Jinhae Bay, Korea", Korean J. Environ. Biol., 29(3), 162-170.
- [56] Yang, D.B. and Hong, J.S., 1988, "On the biogeochemical characteristics of surface sediments in Chinhae Bay in September 1983", Bull. Korean Fish. Soc., 21(4), 195-205.
- [57] Yang, H.S., Kim, S.S., Kim, G.B., 1995, "Pollution of heavy metals and sedimentation rates in sediment cores from the Chinhae Bay, Korea", J. Korean Environ. Sci. Soc., 4(5), 489-500.
- [58] Yeo, H.G. and Park, M.O., 1997, "Seasonal variations of phytoplankton community and water quality in the east area of Chinhae Bay", J. Korean Environ. Sci. Soc., 6(3), 231-238.

Received 9 March 2020

Revised 6 April 2020

Accepted 9 April 2020