

Original Article

가막만 연구의 변천과 앞으로의 과제

이문옥¹ · 김종규^{2,†} · 김병국³

¹전남대학교 조선해양공학과 명예교수

²전남대학교 조선해양공학과 교수

³한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 대리

Past, present, and future for the study of Gamak Bay, Korea

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

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

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

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

요 약

본 연구에서는 지난 40여년간 발표된 88편의 학술논문과 기타 학위논문, 기술연구보고서 등의 자료를 분석하여 가막만 환경의 과거와 현재의 모습을 진단, 평가하고, 앞으로 가막만의 환경 회복을 위해 필요한 연구과제를 모색하였다. 가막만에서는 해양 및 어장의 환경 또는 수질과 관련한 연구가 가장 많이 이루어졌고, 다음으로 적조, 해양생태계 모델링, 양식생물(주로 굴 등의 패류), 해수유동 등의 순이었으며, 이들 조사연구는 하계에 이루어진 경우가 가장 많았다. 이와 같이 가막만 조사가 타 계절에 비해 하계에 많은 것은 적조나 굴의 폐사 등이 주로 하계를 중심으로 발생하고 있다는 사실과 무관하지 않은 것으로 판단되었다. 또한 가막만의 수질은 현재 굴 양식에는 큰 지장이 없는 COD 환경기준을 유지하고 있으나, 수질을 보다 더 개선하기 위해서는 만내로 유입되는 육상기인 오염물질의 부하를 삭감할 필요가 있는 것으로 나타났다. 한편, 가막만에서는 빈산소 수괴의 발생과 어패류의 폐사가 앞으로 해결해야 할 주요 과제인 것으로 밝혀졌다. 따라서 가막만 환경문제의 극복을 위해서는 우선 가막만내로 유입하는 육상 오염원을 철저히 차단하고 빈산소 수괴의 발달을 억제하기 위한 공학적인 접근(예를 들면 작령공(作濬工) 또는 aeration)이 필요할 것으로 판단되었다. 뿐만 아니라 가막만의 환경용량에 적절한 양식시설의 배치와 어장관리, 나아가 양식생물에 의한 자가오염의 방지를 위한 어장정화사업도 필요할 것으로 생각되었다. 이러한 관점에서 앞으로 가막만의 환경을 위해 필요한 연구과제는 연구자와 지역사회 구성원들이 함께 지혜를 모아 발굴하여야 하며, 연구는 체계적이고도 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

Abstract – We extensively reviewed 88 scientific journals, including some doctoral dissertations, and technical reports that have been published in relation to the research of Gamak Bay, Korea over the last four decades, in order to find what we should do for a restoration of the marine environment of Gamak Bay in the future. It proved that studies on marine environment or fishing ground environment, algal blooms, marine ecosystem modelling, farming organisms, and seawater behaviors were much more dealt with a theme than any other ones. In particular, most of the studies were densely conducted in the summer, since algal blooms or mortalities of shellfish often occur around the summer. Water quality of Gamak Bay is judged not to be so bad for oyster farming but it indicated that we need to reduce loads of the pollutant out of the land for better water quality of Gamak Bay. As a result, developments of oxygen-deficient water mass and mortalities of fish and shellfish appeared the major issues to be solved in Gamak Bay. Therefore, it was required that we should thoroughly cut off the land-originated pollution sources and also approach technically such as making waterways or aeration in order to obstruct the development of oxygen-deficient water mass in Gamak Bay. In addition, it was required that we should do the deployment of farming facilities suitable for an environmental capacity, and a fishing ground management for prevention from

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

self-contaminations. From this point of view, it was judged that we should gather our wisdom to discover topics needed for the systematic as well as sustainable study on the environment of Gamak Bay in association with a local community.

Keywords: Gamak bay(가막만), Marine environment(해양환경), Water quality(수질), Oxygen-deficient water mass(빈산소 수괴), Mortality of shellfish(패류의 폐사)

1. 서론

한국 남해안의 남단에 위치하는 가막만은 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 오른쪽으로는 돌산도와 여수해만, 북쪽으로는 광양만과 섬진강, 왼쪽으로는 여자만, 그리고 남쪽으로는 외해인 남해와 맞닿아 있는 내만이다. 가막만은 해수 표면적이 약 112 km², 동서방향의 길이가 약 15 km, 남북방향의 길이가 약 15 km, 평균 수심이 약 9 m 인 폐쇄성이 강한 해역이다(International Emex Center[2001])이 정의한 폐쇄도 지표에 따르면, 폐쇄도 지표가 1.0이상이면 폐쇄성 해역이며, 가막만의 경우 폐쇄도 지표는 1.21임. 대조차는 약 3.5 m로, 창조시와 낙조시 해수는 만의 북동측과 남측의 두 개의 만구를 통하여 거의 동시에 유출입하지만, 북동측에서 13%, 만의 남측에서 87%의 해수가 교류하고 있다(Hydrographic Bureau[1978], Lee and Chang[1982], Lee[1992]). 또한 만의 지형은 북측에서 수심이

DL(-)7 m 정도까지 오목한 모양의 형상으로 이루어져 있으며, 만 중앙에는 수심이 DL(-)4 m 정도로 얕아지다가 만의 남측으로 갈수록 다시 깊어지면서 수심이 DL(-)20 m까지 이른다(Park[2012]). Kunishi and Unoki [1977]는 대기의 상대나 육수의 유입, 외해수의 영향뿐만 아니라 만의 지리적 조건(만의 형태나 만구의 크기, 수심 등)에 의해서 만의 해양학적 특성이 결정된다고 하였다. 한편, 1969년 가막만의 북서부 해역에서 꾀목을 사용하여 처음으로 시작한 참굴(*Crassostrea gigas*)양식은 1975년에 지금과 같은 수하식 굴양식으로 변모하였으며(Park and Choi[2002]), 그간의 시설대수의 증대와 양식기술의 진보에 힘입어 2007에는 굴 생산량이 23,000ton에 이르렀다(Kim et al.[2009]). 그러나 2019년 현재는 굴 양식 면적 585.7 ha, 시설대수 17,174대에서 알굴 생산량이 3,900톤으로 현저히 줄었다(특히 이 해는 3번의 태풍 등으로 작황부진이었음)(www.oyster-suhyp.co.kr). 만내에서의 굴 생산은 해에 따라 상당

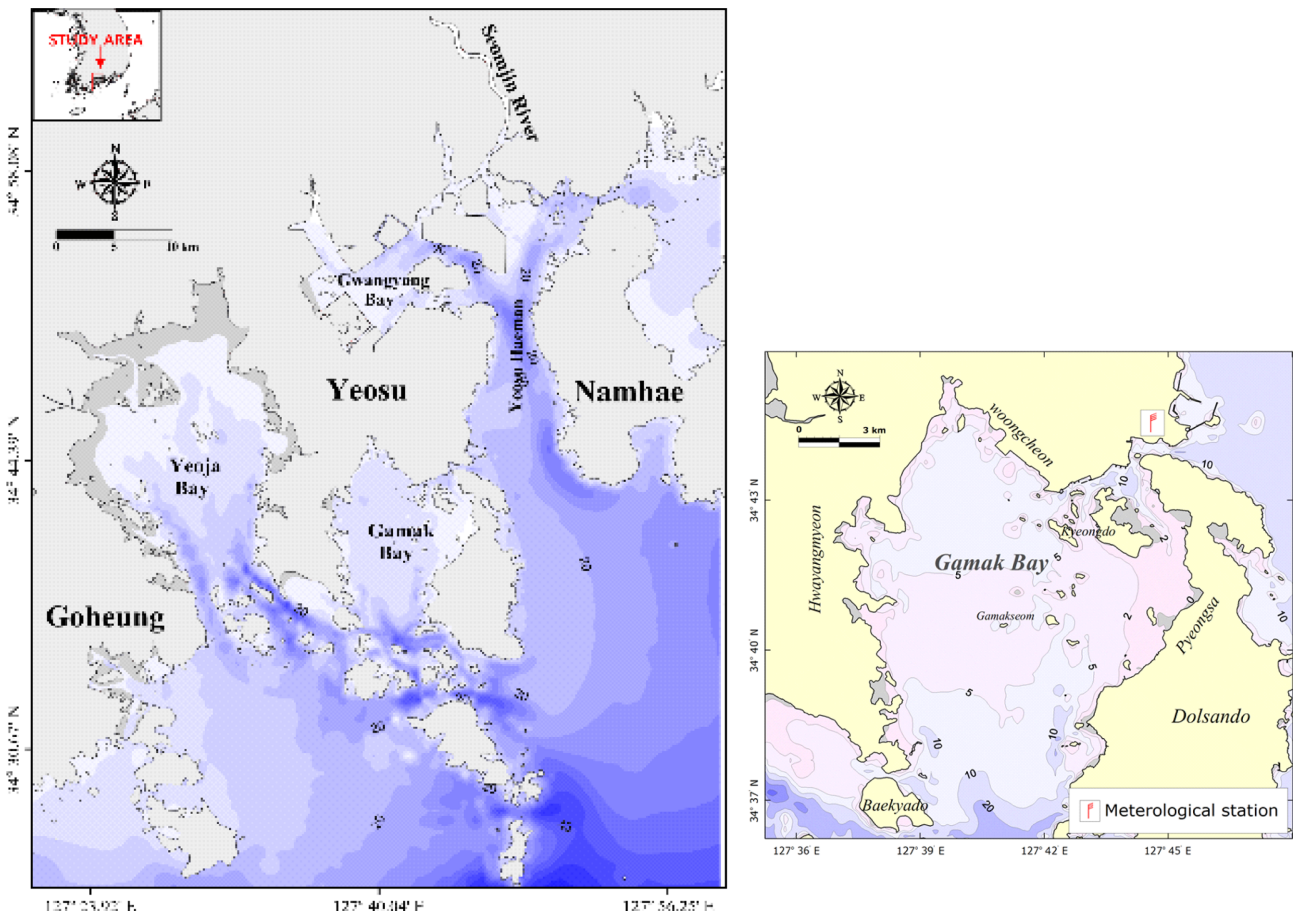


Fig. 1. Gamak Bay and its bathymetric feature (unit: m).

한 변동과 회복을 겪고는 있으나, 여전히 전국 굴생산량의 30%를 점할 정도로 가막만은 굴 주산지로서 주요한 위치를 점하고 있다 (Kang and Kim[2006], Lee and Kim[2008], Kim *et al.*[2009]). 그러나 1960년대 이후 여수시의 도시화와 인근의 여천국가산업단지나 오천농공단지의 조성으로 인한 생활하수와 산업 오폐수의 만 내 유입과 과밀한 수하식 및 가두리 양식장의 부적절한 어장관리에 따른 자가 오염 등으로 인하여 가막만의 생태환경은 점차 악화되었다(Park[2003], Noh *et al.*[2006]). 그 결과, 가막만은 하계를 중심으로 유해성 적조와 빈산소 수괴의 발생, 이매패류(특히 굴)의 대량 폐사 등의 환경문제를 안고 있다(Lee *et al.*[1999], Lee and Kim[2008], Kim *et al.*[2011], Shin *et al.*[2012], Kim *et al.*[2013]). 이것은 전술한 바와 같이 가막만의 해양학적 특성과 만 중앙부의 동서를 가로지르는 얇은 지형적 특성(淺瀨, shoal) 때문에 만내 흐름, 특히 남북방향의 흐름이 원활치 못하며, 또한 양식을 위한 과도한 해역이용으로 수질과 저질의 자가오염이 상당히 심각함을 말해 주고 있는 것으로 생각된다. 따라서 가막만 수질과 저질환경을 개선하고 수산생물의 서식에 적합한 환경의 회복이 절실히 요청된다. 이와 같이 수심이 비교적 얇은 폐쇄성 수역내에서의 과도한 해역이용으로 인한 적조와 빈산소 수괴의 발생 등의 수질 환경문제를 야기하고 있는 곳은 일본의 아라이케해(有明海)이나 아고만(英虞灣), 오사카만(大阪灣) 등을 대표적으로 들 수 있다(Ecosystem Engineering Research Group[1987], Yamamoto and Furuya[2008]). 이들 수역의 경우는 광범위하고 체계적으로 수집한 물리적, 화학적, 생물적, 사회적 자료를 바탕으로 환경문제를 과학적으로 진단하고 여기에 필요한 개선대책을 수립하고 실제로 이를 현장에 적용하여 수질환경 개선효과를 본 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 먼저 지난 40여년간 수행된 가막만 연구결과에 기초하여 가막만 환경의 실상을 진단, 평가하였다. 다음으로, 지금까지 이루어진 가막만 연구의 한계와 문제점을 파악하고 가막만 해양 환경의 개선을 위해 앞으로 해야 할 과제가 무엇인가에 대하여 검토하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1977년부터 2018년까지 42년간 가막만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI) 및 과학인용지수(Science Citation Index; SCI)에 게재된 88편의 논문과, 일부 학위논문, 기타 공공기관에서 발행한 기술연구보고서 등의 자료를 분석하였다. 학술지 검색시는 논문의 주제어로 “가막만”, 또는 “Gamak Bay (Kamak Bay)”가 포함되는 문헌을 선택하였다. 또한 본 연구에서는 국립수산과학원(<http://www.nifs.go.kr>)의 적조발생 정보, 한국해양자료센터(Korea Oceanographic Data Center; KODC)의 연안정지관측자료, 해양환경정보포털(<http://www.meis.go.kr>)의 해양환경측정망(CTD)자료, 해양조사원의 개방해(<http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>)의 어장정보 등도 참고자료로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가막만 연구 현황

Table 1은 1977년 이래 수행된 가막만 연구의 주제와 각 연대별 논문의 발표 건수를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 가막만 연구는 1990년대 후반부터 왕성하게 이루어지기 시작하였고, 특히 2000년대 후반부터 약 10년간 가장 많은 연구가 이루어진 것을 알 수 있다. 이것은 가막만의 수질개선사업으로서 2002년부터 2005년까지 시행된 준설과 하수처리장 건설 전후의 환경변화를 조사하기 위한 다양한 연구활동과 관련이 있었을 것으로 생각된다(Kwon *et al.*[2012]). 이들 연구를 주제별로 살펴보면, 해양 및 어장환경 또는 수질과 관련한 연구가 12건으로 가장 많았고, 다음으로 적조 11건, 해양생태계 모델링 11건, 양식생물(주로 굴 등의 패류) 10건, 해수 유동에 관한 연구가 8건으로 나타났다. 또한 저서동물 6건 (Shin[1995], Kim *et al.*[2000], Yoon *et al.*[2007], Yoon *et al.*[2008], Lee *et al.*[2016a], Lee *et al.*[2016b]), 퇴적물(또는 퇴적환경) 6건

Table 1. Variation of research theme with period

Category	Period	1976	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	Total
	-1980	-1985	-1990	-1995	-2000	-2005	-2010	-2015	-2018		
Water quality		1	0	0	0	0	2	4	4	0	11
Sediments/Sedimentary environment		0	0	0	1	0	0	0	5	0	6
Seawater movement	field observation	0	1	0	2	0	1	0	1	0	5
	numerical experiments	0	0	0	0	1	0	0	1	1	3
Numerical experiments for marine ecosystem		0	0	0	0	3	3	5	0	0	11
Phytoplankton		0	0	0	0	0	1	3	1	0	5
Zooplankton		0	0	0	0	0	1	2	0	0	3
Algal blooms (including HABs)		0	0	0	0	1	1	5	2	2	11
Benthos		0	0	0	1	1	0	2	0	2	6
Fish		0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
Marine and fishing ground environments		0	1	1	1	3	1	4	1	0	12
Farming animals (shellfish)		0	0	1	0	2	1	2	3	1	10
Marine microbe		0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Seaweed		0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
Total		1	2	2	5	11	12	30	19	6	88

Table 2. Investigation season of conducted researches

Category	Period	1976-1980				1981-1985				1986-1990				1991-1995				1996-2000				2001-2005				2006-2010				2011-2015				2016-2018			
		S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W	S	S	A	W
Water quality		1															1	1		1	2	3	3	3	3	3	3	3	4								
Sediments/Sedimentary environment																																		1		1	
Seawater movement	field observation					1	1						1	1	1					1													1	1	1	1	
	numerical experiments																																				
Numerical experiments for marine ecosystem																																					
Phytoplankton																		1		1	1	3	3	3	3												
Zooplankton																		1	1	1	1			2													
Algal blooms (including HABs)																1		1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		
Benthos													1				2	2	2	2						1	2										
Fish																				1													1	1	1	1	
Marine and fishing ground environments																		1	3	1															1		
Farming animals (shellfish)																	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1					
Marine microbe																									1		1										
Seaweed																																					
Total		1				1	2			1	1	1	2	1	3	1	4	7	5	3	5	5	6	5	11	17	12	12	9	8	7	9			1		

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

(Lee *et al.*[1995], Kim *et al.*[2012], Cho *et al.*[2013], Kim and Kim [2014], Kim *et al.*[2014a], Kim *et al.*[2014b]), 식물플랑크톤 5건 (Noh *et al.*[2002], Park *et al.*[2009], Oh *et al.*[2009], Noh *et al.*[2010], Lee *et al.*[2011]) 등의 연구가 많은 것으로 나타났다. 그밖에도 동물플랑크톤 3건(Seo *et al.*[2002], Yong *et al.*[2006], Moon *et al.*[2009]), 어류 2건(Yoo *et al.*[2003], Kim *et al.*[2015]), 해초류 2건(Kim *et al.*[2008], Kim *et al.*[2010a]), 해양미생물 1건(Lee *et al.*[2008]) 등의 연구가 이루어졌다.

한편, Table 2는 가막만 조사 연구가 어떤 계절에 이루어졌는가를 주계별로 보여준다. 이들 결과에 따르면, 현장 조사는 춘계에 33회, 하계에 44회, 추계에 32회, 동계에 31회로, 하계에 이루어진 조사가 가장 많았다. 또한, 적조와 양식생물(주로 굴)의 경우는 2000년 대에 들어서부터 집중적이고도 지속적인 조사가 이루어져 온 것을 알 수 있다. 이와 같이 가막만 조사가 타 계절에 비해 하계에 많은 것은 적조나 굴의 폐사 등이 주로 하계를 중심으로 발생하고 있다는 사실과 무관하지 않은 것으로 판단된다.

3.2 가막만 환경의 과거와 현재

전술한 바와 같이 지금까지 가막만에서는 해양 및 어장환경, 수질, 적조, 해양생태계 모델링, 양식생물(주로 굴 등의 패류), 해수유동 등과 관련한 조사연구가 가장 많이 이루어진 것으로 나타났다. 이들 연구 주제는 가막만이 가지는 수산학적 역할이나 물리적 특성상 독립적인 것이 아니라 서로 밀접히 연관되어 있음을 알 수 있다. 그것은 가막만이 통영에 이어 국내 굴지의 굴 생산지로서 뿐만 아니라 청정해역으로서의 위상을 유지하고 있기 때문이다. 또한, 평균 수심 9 m이내의 반 폐쇄성 수역인 가막만내의 흐름은 북동쪽과 남쪽의 두 개의 만구부근을 제외하고는 매우 미약하고, 특히 만의 북부 수역은 하계를 중심으로 빈산소 수괴가 자주 출현하고 있기 때문이다(Lee and Cho[1990], Lee[1992], Lee *et al.*[2005], Kim *et al.*[2006], Kim *et al.*[2010b], Kim *et al.*[2011]). 이러한 관점에서, 가막만에 있어서의 해양 및 어장 환경의 합리적인 관리는 필수적이라 할 수 있다. 동시에 굴 등 패류 양식시설의 적정화(예를 들면 환경용량을 초과하지 않는 범위)와 양식생물에 의한 자가오염, 어장의 노후화, 적조 또는 빈산소 수괴 발생의 예방 등의 환경문제도 해결해야 할 과제를 안고 있다. 따라서 지금까지 다수의 연구가 이루어진 주제들은 가막만이 그 시대에 당면하였던 주요한 환경문제를 다루었을 것으로 판단된다. 그러므로 여기서는 지금까지 이루어진 가막만 연구 중 다수를 차지하고 있는 해양 및 어장환경, 수질, 적조, 해양생태계 모델링, 양식생물(주로 굴 등의 패류), 해수유동 등에 관한 연구 결과를 바탕으로 가막만 환경 변화의 발자취를 살펴보고자 하였다.

3.2.1 해수유동

앞서 서론에서 언급하였듯이 가막만은 폐쇄성의 천해역으로서, 흐름도 북동쪽과 남쪽의 두 개의 협수로로 제외하고는 미약하다. 게다가 만의 중앙을 동서로 가로지르는 평균 수심 5m 전후인 천퇴

의 존재로 인해 남북간의 해수의 소통이 지장을 받고 있는 것이 특징이다. 따라서 가막만내의 흐름은 바로 이러한 지형적 조건에 의한 지배를 받고 있다고 말할 수 있다(Kunishi and Unoki [1977]).

Lee and Chang[1982]은 1981년 5월부터 6월까지 가막만에서 실시한 측류관 추적실험 및 측류자료를 바탕으로 가막만의 해수교환량을 구한 결과, 가막만의 남쪽 만구를 통한 해수교류량을 창조시 77%, 낙조시 88%로 각각 추정하였다. Lee *et al.*[1991]는 M2분조만을 고려한 2차원 수치모형을 이용하여 가막만내 조류 패턴의 재현 가능성을 검토하였다. Lee[1992]는 가막만에서 1989년 춘계와 동계, 1990년 춘계에 걸쳐 측류관 추적실험과 유속계에 의한 측류를 실시하였다. 그 결과, 그는 밀물때 북측 협수로(여수항)에서 유입한 해수가 대경도의 동남쪽으로 남하하여 항대리 부근까지 진입하는 동안 남쪽만구에서 유입한 해수는 군내리를 중심으로 시계 방향의 환류를 형성하면서 북상하는 것을 확인하였다. 한편, 썰물때 만내 해수는 북측과 남측의 양쪽 만구로 나누어져 각각 유출하지만, 그 대부분은 남쪽 만구를 통해 유출하는 것으로 나타났다. 또한 그는 오목한 지형을 가진 북서 내만역은 유동이 미약하고 약취성 오니와 흑색 침전물이 분포하고 있으며, 하계에는 강한 북서풍에 의한 용승현상이 나타날 가능성을 언급하였다. Lee *et al.*[1995]은 1994년 7월부터 8월까지 가막만 남쪽과 북쪽 만구, 만중앙부 등에 3대의 유속계와 2대의 조위계를 각각 장기 계류하여 해수유동을 조사하였다. 그 결과, 여수항과 남쪽 만구에서의 최대조차는 각각 357 cm와 352 cm로, 조석 형태수는 0.25 미만으로 반일주조가 지배적이었으며, 양쪽 만구를 통해서 들어오는 주요 분조의 위상차는 없는 것으로 나타났다. 또한 남쪽 만구에서 조류는 주로 북서-남동 방향으로 반시계 방향의 회전류를 동반하였고, 조석잔차류는 남서방향으로 17 cm·sec⁻¹이었다. 반면, 만내에서는 북동-남서 방향의 조류성분이 지배적이었고 시계방향의 회전류를 동반하였고, 조석잔차류는 남동방향으로 0.9 cm·sec⁻¹이었다. 그러나 만내의 잔차류는 시간적으로 바람의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. Park *et al.*[1999]은 2차원 천해수치모형을 사용하여 가막만의 해수유동(특히 잔차류)에 미치는 바람효과를 조사한 결과, 만내 유동장이 동서방향의 바람에 민감하게 반응하는 것을 확인하였다. 특히, 이때 유동은 서풍에 민감하여 미약하던 북서내만역에서 반시계방향의 강한 와류가 형성되는 것을 보여주었다. Lee *et al.*[2005]은 2004년 10월부터 11월까지 가막만에서 약 1개월간 조석, 조류 및 수온을 연속관측하고 그 결과를 분석하였다. 그 결과에 따르면, 조석은 가막만의 북동 수로와 남쪽 만구를 통해 거의 동시에 같은 크기로 유출입하지만, 북서 내만역은 진폭과 위상에 있어서 약간의 차이를 보였다. 또한 만내에 존재하는 3개의 수괴를 구분 짓는 전선 부근에서 측정된 수온의 시계열은 북서 내만역을 제외하고는 조석에 따라 만조시에는 상승하고 간조시에는 하강하는 매우 민감한 반응을 나타내었다. 한편, 정체수역으로 알려진 만의 북서 쪽에서는 바람에 의한 영향으로 저층 부근에서 표층 흐름에 역류하는 상당한 크기의 유속을 가진 흐름의 존재가 확인되었다. Kim *et al.*[2012]은 가막만의 북동쪽과 남쪽의 두 개의 만구에서 2010년 11월부터 2011

년 7월에 걸쳐 하계와 동계에 수온과 염분, 15일간의 연속 조류 관측을 실시하였다. 그 결과, 만내 흐름은 바람과 비교적 밀접한 상관관계를 보였으며, 수온은 조석보다는 기온의 영향을 더 크게 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 염분의 농도변화에 기초한 해수교환율은 하계에 북동쪽만구에서 0.5-29.9%(평균 11.6%), 남쪽만구에서 1.3-62.6%(평균 18.6%)였으며, 동계에는 북동쪽만구에서 0.3-28.5%(평균 8.9%), 남쪽만구에서 0.1-97.9%(평균 31.2%)로 각각 나타났다. 한편, 가막만의 해수교환율은 하계에는 북동쪽만구, 동계에는 남쪽 만구의 해수교환율이 각각 타 계절에 비해 증가하는 것으로 나타나, 계절에 따른 풍향변화가 가막만의 해수교환율에 영향을 미치고 있음을 반증하였다. Seo and Kim[2014]은 3차원 해수유동 수치모형(POM)을 사용하여 가막만에서의 유해적조생물의 이동과 확산실험을 수행하였다. 이때, 본 수치모형에서는 먼저 조석 효과, 수온과 염분, 바람 효과 및 쓰시마난류를 고려한 잔차류를 계산하였다. 그 결과, 가막만 남부해역에서 적조가 발생한 경우, 발생지점으로부터 서쪽에 위치한 나로도 주변해역과 여자만으로 주로 이동 확산하는 것으로 나타났다. Kim et al.[2016]은 EFDC 수치모형(입자추적방식)을 사용하여 가막만의 체류시간과 교체시간을 산정하였다. 그 결과, 가막만 내만역의 평균체류시간은 55일, 가막만의 교체시간은 44.8일로 계산되었다. 이러한 결과는 육역 내지는 내만의 양식에 의해 생산되는 입자가 가막만의 밖으로 유출되는 것을 의미하며, 그 사이 만내에 이러한 물질이 축적될 수 있음을 의미하였다.

이상의 연구결과에 따르면, 가막만에서는 조류가 북동쪽과 남쪽 두 개의 수로를 통해 거의 동시에 유출입하고, 해수교환의 약 80%가 수로폭이 더 넓은 남쪽 만구를 통해 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한, 만내의 흐름은 북동-남서방향의 조류가 지배적이며 바람의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다. 특히, 주목할 것은 가막만에는 유기오염이 심하고 전체수역인 북서내만수, 북동쪽 수로를 통해 유출입하는 여수항수, 그리고 남쪽만구를 통해 유출입하는 외만수 등 크게 3개의 수괴가 존재한다는 사실이다. 이들 수괴는 전술한 바와 같이 가막만의 지형적 조건 때문에 생겨 난 것이며, 창조시 유입하여 만의 중앙부에서 서로 만난 후 낙조시 북서내만수의 일부와 여수항수는 북동쪽 수로를 통해, 외만수는 남쪽 수로를 통해 각각 유출한다(Lee[1992], Kim et al.[2012]).

3.2.2 해양환경 및 어장환경

Fig. 2는 2019년 현재 가막만내에 산재하고 있는 어장 분포를 보여주는데, 주로 만의 북부는 혼합 양식, 중앙부는 굴 양식, 만의 남쪽 만구부근은 어류 양식 등이 성행하며, 연안 가까이는 마을어업 어장이 각각 자리하고 있다. 이와 같은 어장 분포를 통해 가막만 수역은 현재 매우 밀도 높게 이용되고 있음을 알 수 있다. 이러한 가막만내 현재 상태의 해역 이용 실태와 상기한 환경적 특성을 염두에 두고, 지난 30여년간 해양환경 및 어장환경에 관한 연구의 변화 과정을 이하에서 살펴보기로 하였다.

Lee and Choe[1985]는 가막만의 어장환경관리에 필요한 기본자

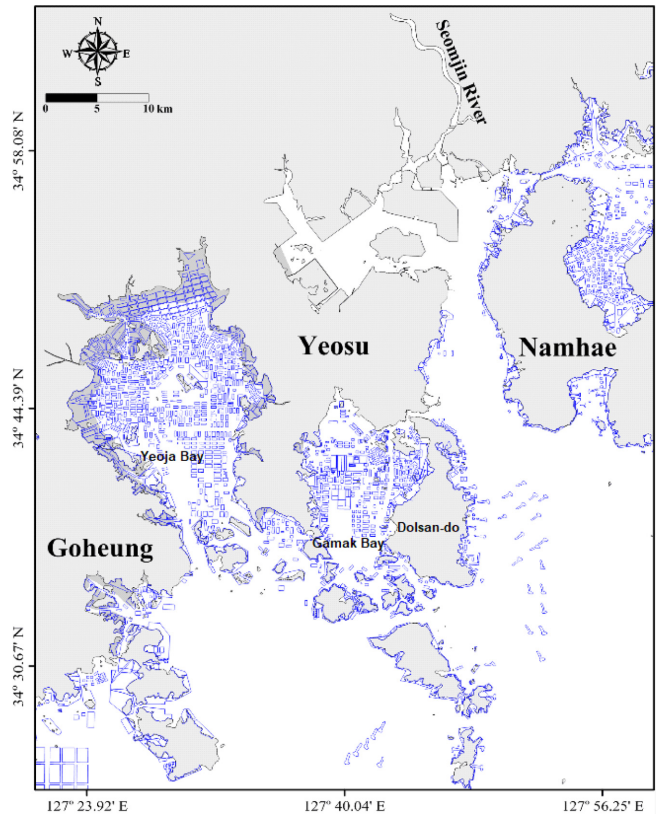


Fig. 2. Distribution of fishing grounds (village fishing, shellfish farms, and fixed shore net) around Gamak Bay(<http://www.khoa.go.kr/oceammmap/main.do>).

료를 얻기 위해 1984년 6월 수온과 염분, 투명도를 조사한 결과, 가막만내에는 4개의 수괴, 즉 내만수, 여수항수, 외만수, 중간수가 출현한다고 하였다. Lee and Cho[1990] 또한 가막만내 어장 관리를 위한 기초 자료를 얻기 위해 1988년 5월부터 1989년 12월까지 밀물과 썰물때 수온, 염분, 투명도, 수색 등을 관측한 결과, 내만역에서는 하계에 강한 약층이 형성되나, 동계에는 내만역과 외만역 사이에 약한 전선이 형성되는 것을 확인하였다. Lee and Kim[1998]은 1995년 8월부터 9월까지 여수 연안 멸치 들망 어장의 환경 요인(수온, 염분, chl_a 농도)이 멸치 어획량에 미치는 영향을 조사하여 수온과 chl_a 농도가 어획량의 변동에 영향을 끼치고 있음을 밝혔다. Seo and Kim[1999a] 또한 가막만에서의 멸치 들망 어장의 분포 및 이동 경로에 미치는 환경 요소의 영향을 파악하기 위해 1997년 6월 16일부터 8월 31일까지 만내 24개 정점에서 수온 및 염분을 관측하고, 멸치 들망을 사용하여 어획량을 조사하였다. 그 결과, 멸치 어군의 분포와 이동에 영향을 끼치는 것은 수온이며, 염분은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Seo and Kim [1999b]은 1997년 6월 16일부터 8월 31일까지 가막만의 24개 정점에서 멸치 들망에 의한 어획량에 미치는 chl_a 농도와 탁도의 영향을 조사하였다. 그 결과, chl_a 농도가 높은 곳에서 멸치 어획량이 많았고, 탁도가 높은 곳에서도 전반적인 경향은 어획량이 높은 것으로 나타났다. 그러나 멸치 들망 어장은 chl_a 농도뿐만 아니라,

수온이나 탁도가 복합적으로 작용하여 형성되는 것으로 추론하였다. 따라서 전술한 Lee and Kim[1998], Seo and Kim[1999a], Seo and Kim[1999b] 등의 결과로부터, 가막만에서의 멸치의 어획량에 영향을 주는 주요인은 수온과 chl_a 농도인 것은 분명해 보인다. 한편, Yoon[2000]은 1990년 4월부터 1991년 11월까지 가막만 북부해역의 물리적, 화학적, 생물학적 해양환경을 조사하였다. 그 결과, 그는 가막만 북부해역에 있어서의 영양염류와 COD 농도가 계절 변화보다는 만내로 유입하는 각종 물질과 조석 등에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 추정하였다. 또한 그는 그의 관측결과에 근거하여 가막만의 북부 해역은 다량의 유기물이 축적되어 있어 부영양화해역으로 이행되고 있는 것으로 판단하였다. Jung *et al.*[2002]은 1998년 11월 가막만에서 저서동물을 채집하여 밀집한 가두리양식이 해양 생태계에 미치는 영향을 조사한 결과, 양식장 인접해역 30 m 이내에서 저서동물의 종수, 서식밀도, 다양도의 급격한 변화를 관찰하였다. 또한 그들은 유기물 오염지표종인 *Capitella capitata*가 가두리 양식장 인근 해역에서 우점하고 있다는 사실로부터 유기물에 의한 자가오염이 해양 저서생태계에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단하였다. Kim *et al.*[2006]은 2005년 6월부터 9월까지 가막만에서 발생하는 빈산소 수괴의 형성과정과 그 특성을 주 간격으로 조사하였다. 그 결과, 그들은 성층의 발달에 따라 수심 3-5 m에 형성된 수온약층을 관측하였으며, 이때 저층의 빈산소 수괴는 7월초 만안쪽에서 출현하기 시작하여 8월초에는 만 중앙부까지 확대되는 것을 발견하였다. 또한 그들은 빈산소 수괴의 형성시기 동안 용존산소(DO) 농도가 저층의 영양염 농도와 역(-)의 상관관계를 나타내어, 빈산소 수괴는 퇴적물에서의 산소 소모의 증가와 저서 미생물의 유기물 분해로 인해 형성되는 것으로 판단하였다. Kim *et al.*[2008]은 2002년부터 2006년까지 가막만의 12개 정점에서 계절별 조사를 통해 가막만의 물리적·화학적 환경이 이매패류 군집에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 그들은 가막만의 수질등급이 3등급에서 2등급 수준으로 개선되고 있으며, 또한, 이매패류의 종 구성에 근거한 집괴분석결과, 3개의 군집으로 구성되어 있는 것을 확인하였다. Hwang *et al.*[2010]은 가막만의 패류 양식장에서의 1차 생산에 필요한 주요 영양염류를 평가하기 위하여, 2006년 5월과 8월, 2007년 11월에 하천수, 표층해수, 연안 지하수의 라듐 동위원소와 영양염류의 농도를 측정하였다. 그 결과, 그들은 ^{226}Ra 평형모델을 사용하여, 가막만으로 들어가는 해저 지하수 배출량(SGD)은 $1.2-1.8 \times 10^7 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (여기서, d는 day를 나타냄)인 것으로 추정하였다. 또한 그들이 추정된 모든 지하수 유래의 영양염류는 만내에서 이용되고 있으며, 패류 양식장에 있어서의 생물학적인 생산은 주로 SGD 유래의 영양염류에 의해 지베되고 있다고 주장하였다. Kim *et al.*[2010a]은 2007년 가막만에서 하계에 발생한 빈산소 수괴 소멸기의 이화학적 특성을 조사하였다. 그 결과, 그들은 만의 북서부 연안에서 표층수와 저층수의 용존산소(DO)농도가 $1.3-2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 이하인 빈산소 수괴를 확인하였다. 또한 그들은 가막만에서의 빈산소 수괴는 3가지 형태로 발생하는 것으로 추정하였다.: 첫째, 북서부 연안에서는 빈산소 수괴가 전 수층에서 발생하여 어패류의 폐

사가 발생하는 경우와, 둘째, 저층에서부터 빈산소가 발생하는 경우와, 셋째, 수온 역전 현상이 일어나면서 중층에서는 빈산소 수괴가 발생하지만, 저층에서는 빈산소 수괴가 발생하지 않는 경우로, 구분하였다. 한편, 빈산소 발생 해역에서는 주로 해저에 서식하는 문절망둑 무리들은 수면위로 올라와 산소 결핍에 따른 입 올림을 하며, 게류 및 고둥류 등은 갯가로 올라오는 등 이상행동을 하는 것을 관찰하였다. Kim *et al.*[2011]은 2006년 하계에 가막만에서의 빈산소 수괴와 관련한 환경변화를 조사하였다. 그 결과, 그들은 만의 북부해역에서 6월말에 출현한 빈산소 수괴를 9월 중순까지 관찰하였고, 이러한 빈산소 수괴의 출현은 만의 지형과 밀접한 관련이 있다고 주장하였다. 특히, DIN와 DIP농도는 빈산소 수괴가 발생한 수역의 저층에서 매우 높았고, 퇴적물로부터 방출 가능성이 있는 인(불안정한 인)이 70%이상 발견되었다. 따라서 그들은 가막만의 북부해역의 DIP는 빈산소 수괴가 형성된 만의 북부해역의 저층으로부터 용출된 용해성의 인이 주 공급원일 가능성이 있다고 하였다.

이상의 연구결과로부터, 가막만의 북서부 해역은 유기오염이 심각하며 이로 인해 하계를 중심으로 빈산소 수괴가 빈번히 출현하는 해역으로서, 경우에 따라서는 그 영향역이 만의 중앙부까지 미칠 수 있는 것으로 판단된다. 또한 그 결과 가막만의 저서생태계가 악영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Lee *et al.*[2016]이 만의 북서쪽 통합양식장의 퇴적물로부터 채취한 저서성 유공충류의 해석에서 12%를 넘는 높은 유기물과 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 이하의 용존산소농도(DO)를 가진 빈산소 수괴로 이루어진 환원적 상태를 확인한 것에 의해서도 증명되었다.

3.2.3 수질

Ahn *et al.*[1977]은 1977년 3월부터 4월까지 가막만의 수질을 조사한 결과, 가막만내의 수질은 전반적으로 외해수에 가깝게 비교적 양호하였으나, 연안부두 인접한 곳에서는 분변 등으로 인한 세균수의 유의한 증가를 관찰하였다. Lee and Cho[2002]는 가막만의 수질관리를 위해 만으로 유입하는 외부부하인 유달부하량과 내부부하인 퇴적물로부터의 용출량을 실측, 분석하여 오염부하의 특성과 수질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 그들은 풍수기 이후인 2000년 10월 3일부터 4일까지, 또한 갈수기를 고려한 2001년 1월 26일부터 27일까지 2회에 걸친 하천조사와, 2000년 6월 14일 가막만내 4개 정점에서 해저퇴적물의 용출조사를 행하였다. 그 결과, 오염물질 부하량은 1일 중 인위적 활동이 큰 오후 8시와 12시 사이 및 정오에 최대를 나타내었고, 퇴적물로부터 용출되는 영양염의 평균 농도는 질소계가 $16.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$, 인계가 $7.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ 로 각각 나타났다. Han *et al.*[2005]은 310종의 다성분 동시분석법을 활용하여 가막만에서의 미량유기오염물질에 의한 오염특성을 규명하였다. 그 결과, 채수지점에서 검출된 주요 미량유기오염물질은 aliphatic, polycyclic compounds와 같은 CH기의 화합물질과 aromatic amines, nitro compounds와 같은 CHN(O)기의 화학적 구조를 갖는 물질로 밝혀졌다. 또한 가막만에서는 살충제와 제초제의 검출이 집중적으로 관찰되었으며, 남해 연안 해역에

서 환경호르몬성 물질은 총 6종이 검출되었다. Lee and Moon[2006]은 가막만의 북부 해역(소호 연안)에서의 태풍 발생 전후의 수질변동에 대하여 조사하였다. 그 결과, 저층의 용존산소 포화도는 수온과 염분 약층이 형성된 시기에는 54%이하였으나, 태풍의 통과 직후에는 88%로 높았다. 또한 Chl_a 농도는 태풍 통과 후 최고 311.0 mg·L⁻¹가 관측되었고, 그 원인 생물은 *Scrippsiella trochoidea* (42,000 cells·ml⁻¹)로 밝혀졌다. 따라서 조류(algae)의 성장잠재력은 태풍발생 후에 아주 높은 것으로 나타났고, 이때 질소가 부족한 것으로 조사되었다. 반면, 태풍에 의해 저층 퇴적물로부터 부유되는 유기 오탁 물질이 화학적 산소요구량 증가에 미치는 기여도는 크지 않은 것으로 판단되었다. An *et al.*[2009]은 2002년 11월부터 2008년 6월까지 가막만내의 모자반 군락이 수질에 미치는 영향을 조사한 결과, 용존산소(DO) 농도는 모자반 군락 지역에서는 10.45 mg·L⁻¹, 모자반이 없는 대조지역에서는 9.23 mg·L⁻¹로, 모자반 군락 지역에서의 용존산소 농도가 다소 높았다. 또한 Chl_a 농도는 모자반 군락 지역에서는 3.90 µg·L⁻¹, 모자반 군락이 없는 대조지역에서는 2.21 µg·L⁻¹로, 모자반 군락 지역에서의 Chl_a 농도가 더 높았다. 화학적산소요구량(COD)은 모자반 군락지역에서는 1.14 mg·L⁻¹, 대조지역에서는 1.43 mg·L⁻¹이었다. 한편, 총질소(TN)는 모자반 군락 지역에서는 0.038 mg·L⁻¹, 대조지역에서는 0.067 mg·L⁻¹이었고, 총인(TP)은 모자반 군락 지역에서는 0.043 mg·L⁻¹, 대조지역에서는 0.072 mg·L⁻¹이었다. 즉, 모자반 군락은 용존산소와 Chl_a의 농도를 증가시키는 한편, 영양염의 농도는 감소시키는 것으로 나타나, 전체적으로 수질 개선에 긍정적인 영향을 주고 있는 것으로 생각된다. Kim *et al.*[2008]은 2002년부터 2006년까지 가막만의 12개 정점에서 계절별 조사를 통해 가막만의 물리적·화학적 환경이 이매패류 군집에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 그들은 가막만의 수질이 3등급에서 2등급 수준으로 개선되고 있으며, 또한 이매패류가 수질의 영향으로 3개의 군집으로 구성되어 있음을 확인하였다. Kwon *et al.*[2010]은 2009년 9월부터 2009년 12월까지 총 4회에 걸쳐 가막만 북부해역의 해양환경 및 APase(알칼리성 포스파타아제) 활성의 변동 특성을 파악하였다. 그 결과, 대부분의 관측 기간 동안 용존무기질소(DIN)와 용존무기인(DIP)은 점차 감소하였고, DIN/DIP의 값은 Redfield ratio(=16)보다 더 높았다. 또한 전체 APase(T-APase) 활성은 DIP의 농도가 감소하면 증가하였다. 즉 T-APase와 DIP간의 관계는 높은 마이너스(-)적인 상관관을 보였는데, 이것은 APase 활성이 Redfield ratio를 제한하는 DIP의 좋은 지시자인 것을 의미하였다. Kwon *et al.*[2011]은 가막만 북부 해역에서 알칼리성의 포스파타아제(Alkaline Phosphatase, APase)와 알칼리성의 포스파타아제를 가수분해할 수 있는 인(Alkaline Phosphatase Hydrolyzable Phosphorus, AHPH)의 생태적 의미(중요성)를 조사하였다. 그 결과, APase의 활성은 전체 1년 동안 탐지할 수 있었고, DIP 농도와 APase 활성은 높은 상관관을 보여 그들은 이것이 DIP 제한 조건의 지시자로서 간주될 수 있다고 주장하였다. 또한 그들은 APase 활성과 Chl_a 농도간에는 선형적 양의 상관관계를 나타내므로 APase 활성의 주요 부분이 식물플랑크톤에 의해 유기되었을

가능성을 보인다고 하였다. Eom *et al.*[2011]은 Simple Box Model (SBM)을 이용하여 2006년 가막만의 담수, 염분, 영양염 등 물질수지를 산정한 결과, 담수유출량은 72.5-174.2×10³·m³·day⁻¹, 개방경계에서의 해수 교환에 의한 혼합량은 2.4×10⁷-4.9×10⁷·m³·day⁻¹로 각각 추산하였다. 또한 그들이 산정한 육상기인 DIN과 DIP의 유입량은 각각 397.0-1,158 mole·day⁻¹, 1,750-8,328 mole·day⁻¹로, 타 해역에 비해 상대적으로 낮았으며, 이들 중 DIP의 생성 또는 소멸은 물수지의 변동에 의해 좌우되는 특징을 보였다. Kwon *et al.*[2012]은 가막만 북부 해역의 수질환경 개선사업(준설 및 하수처리장 건설(2002년-2005년))이 가막만 해역의 세균학적 수질에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 만의 북부해역은 준설과 하수처리장 건설이 완료되어 가동되기 시작한 이후, 분변계대장균수가 준설 및 하수처리장 건설 전보다 현저히 감소한 것으로 나타났으나, 남부해역에서의 분변계대장균수의 변화는 크지 않았다. 그러나 미생물학적 지표세균의 농도 및 개체수 증가 요인으로 알려진 오염 퇴적물의 제거와 육상기인 오염물질의 유입 차단은 가막만 북부해역의 세균학적 수질개선을 위한 직접적인 수단이 될 수 있음이 확인되었다. Cho *et al.*[2013]은 2007년 2월 남해연안의 총 25개 해역, 131개 정점을 대상으로 각 해역의 표층 퇴적물의 입도조성, 광합성 색소, 총유기탄소, 총질소, 생화학적 조성(단백질, 탄수화물, 지질) 등을 분석하였다. 그들의 다차원 분석 결과, 가막만은 득량만, 여자만 등과 같은 중영양 상태로 평가되었다.

이상의 결과로부터, 가막만의 수질은 인위적 활동이 잦은 일부 해역에서는 분변에 의한 세균(아마 대장균)이나 환경호르몬이 검출되는 등 다소 문제가 있으나 대체로 외양수에 비해 그다지 나쁘지 않은 것으로 판단된다. 특히 북부해역에서의 준설에 의한 유기오니의 제거와 하수처리장 시설 가동 후 수질은 상당히 개선된 것으로 나타났다.

3.2.4 적조

Fig. 3은 지난 35년간 가막만내 및 가막만을 제외한 여수 연안해역(돌산도의 동쪽 해안, 오동도, 가막만 남쪽 만구 밖의 화태도, 금오도, 개도, 백야도 등)에서의 적조의 발생 건수를 각각 나타낸다.

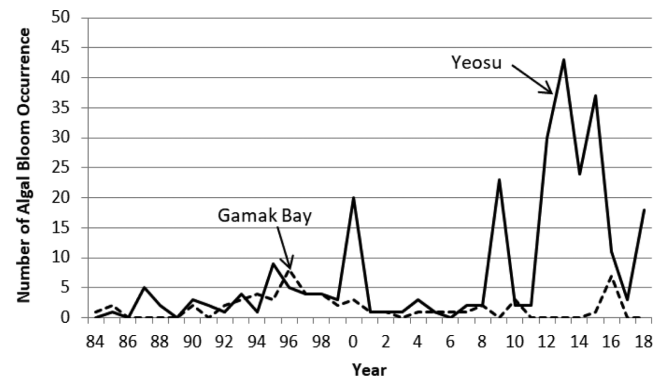


Fig. 3. Transition of algal bloom occurrence with year in Yeosu and Gamak Bay.

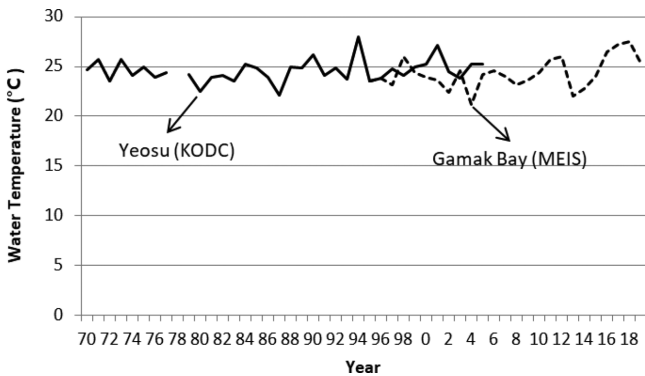


Fig. 4. Variation of mean surface water temperature in Yeosu and Gamak Bay.

이 결과에 따르면, 적조는 가막만에 비해, 여수 연안해역에서는 2000년대 초기와 2010년대에 들어서부터 급격히 발생 건수가 증가하고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 4는 한국해양자료센터(KODC)가 35년간(1970-2005) 연안정지관측정점에서 관측한 (가막만을 제외한) 여수 연안해역의 수온과, 또한 해양조사원이 25년간(1995-2019) 해양환경측정망(CTD)을 통해 조사하여 해양환경정보포털(MEIS)에 공개한 가막만의 8월의 표층 수온을 각각 나타낸다. 이들 관측기간 중 여수 연안역과 가막만의 수온은 그 평균이 각 24.3 °C와 24.6 °C로 거의 유사하며, 또한 그림에서 보는 바와 같이 동일 기간 중 수온의 변화 추이도 서로 다르지 않음을 알 수 있다. 즉, 가막만과 여수 연안의 수온은 서로 유사함에도 불구하고, 여수 연안해역에서는 *Karenia*나 *Cochlodinium polykrikoides* 등에 의한 유해성 적조가 여전히 빈번히 발생하고 있는 점으로 보아, 이들 두 해역은 적조 원인생물의 증식에 필요한 영양염류 공급에 뚜렷한 차이가 있을 가능성을 시사한다. 이하에서는 이러한 점을 감안하여 지금까지 가막만의 적조에 관하여 연구한 결과를 살펴보기로 하였다.

Lee et al.[1999]은 1997년 5월부터 1998년 6월까지 가막만의 적조원인생물인 편모조류의 군집구조와 휴면포자의 동태를 조사하여 *Prorocentrum dentatum*, *Prorocentrum minimum*, *Ceratium furca* 등 탁월종과, 외편모조류의 휴면포자 31속과, 라피드조류의 *Chattonella* 휴면포자 1속 등을 확인하였다. 특히, 이들 중 살아있는 휴면포자의 풍도는 수온 및 수주 중의 플랑크톤의 풍도의 계절 변화와 밀접한 관계를 보여주었다. 한편, 출현한 17종의 종속영양생물인 외편모조류의 휴면포자는 전체 휴면포자 종의 54.8%로, 이들 중 50.4-54.6%가 내만역에, 29%가 외만역에 출현하였는데, 이들은 이와 같은 외편모조류 휴면포자의 구성비는 적조가 빈발하는 해역의 부영양화 정도와 밀접히 관련되어 있다고 주장하였다. 또한 그들은 *Chattonella* 휴면포자의 계절 변화는 살아있는 휴면포자와 빈 휴면포자의 발생주기의 관점에서 볼 때 수온과 관련이 있는 것으로 추정하였다. Park et al.[2004]은 2000년 6월부터 2001년 4월까지 격월간으로 총 6회에 걸쳐 가막만 주상 퇴적물층의 유기물농도와 외편모조류 휴면포자의 분포특성을 조사하였다. 그 결과, 유

기물 농도 중 강열감량(LOI)은 3.21~11.18%, 화학적산소요구량(COD)은 12.25~99.26 mg·O₂·g⁻¹·dry, 황화물량은 0~10.29 mg·S·g⁻¹·dry, 입자성 유기탄소가 2.91~116.18 mg·C·g⁻¹·dry, 입자성 유기질소가 0.53~2.82 mg·N·g⁻¹·dry, 식물색소량이 2.49~116.18 μg·g⁻¹·dry로 각각 나타났다. 또한 외편모조류 휴면포자는 총 38종이 출현하였고, 세포수는 18~3,836 cysts·g⁻¹·dry의 범위를 보였으며, 만내 주상 퇴적물층의 유기물과 외편모조류 휴면포자의 농도는 표층 퇴적층에서 아래로 향해 감소 경향을 보였다. 특히, 그들은 외편모조류 휴면포자 중 종속영양종의 휴면포자 분포가 유기물량과 밀접한 관련성을 보여, 가막만 북서부 해역은 1980년대 이후부터 부영양화가 급속히 진행되고 있는 것으로 판단하였다. Noh et al.[2006]은 가막만에서 분리한 유해성 조류(*Chattonella marina*)의 성장에 미치는 수온, 염분, 일사량 등의 영향을 조사한 결과, *C. marina*는 수온 15~30 °C, 염분 10~35 psu일 때 성장하였고, 최대성장율(0.64/day)은 수온 25 °C, 염분 25psu일 때 얻어졌다. 그들의 이러한 결과는 *C. marina*가 높은 수온의 협온성, 광염성 생물로서, *C. marina*는 하계 한국 남해와 서해의 연안역에서의 중간 경쟁에서 생리적인 특징을 잘 이용하고 있음을 보여주었다. Lee and Kim[2008]은 1981-2006년까지 국립수산과학원이 조사한 적조발생자료를 분석하여 한국 남해안에 있어서의 적조의 특징을 조사하였다. 그 결과, 조사기간 중 적조는 마산만과 더불어 가막만에서 가장 빈번하게 발생하였고, 그 원인이 빈산소 수괴의 발달과 관련하고 있음을 시사하였다. 또한 해양 환경은 해역에 따라 차이가 있었으나, *Skeletonema costatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum* sp.등이 공통적으로 적조를 일으키는 탁월종으로 나타났다. 그러나 가막만에서의 적조 발달에 관련한 환경요인은 적조종에 관계없이 대개 유사하였다. Park and Yoon[2003]은 2000년 4월부터 2001년 4월까지 가막만내 6개 정점에서 월별로 외편모조류 휴면포자의 시공간적 분포를 조사하였다. 그 결과, 그들은 22속 37종의 외편모조류 휴면포자를 확인하였고, 매년 평균 8종의 시간적 변화를 관측하였다. 또한 외편모조류 휴면포자의 탁월종은 전 해역에 걸쳐 분명하지 않았으나, 만의 북서해역에서는 *Brigantidium* spp.와 *Protoperidinium americanum*가 탁월한 것으로 나타났다. 한편, 종속영양생물종은 표층 퇴적물에서 독립영양생물종보다 더 풍부하였고, 1년 내내 북서해역에서 75-94%를 점하였다. 그 결과, 북서해역은 외편모조류 휴면포자의 풍부도, 탁월종, 종수 등에 있어서 타 해역과는 큰 차이를 보였는데, 이것은 북서해역이 부영양화한 것을 의미하였다. 또한 가막만에 있어서의 외편모조류 휴면포자의 계절적 풍부도는 수온과 역의 상관을 나타내었다. Noh et al.[2010]은 2005년 9월에서 2006년 5월까지 가막만내 30개 정점을 대상으로 4회에 걸쳐 여수와 돌산도 사이에 위치하는 협수로의 해양환경과 식물플랑크톤 군집의 계절변동을 조사하였다. 그 결과, 그들은 총 51속 99종의 식물플랑크톤의 출현을 확인하였으며, 하계와 추계는 종이 다양한 반면, 동계와 춘계는 상대적으로 빈약한 것으로 나타났다. 또한 계절별 우점종은 하계는 *Skeletonema costatum*과 *Chaetoceros curvisetus*, 추계와 동계는 *Eucampia zodiacus*, 춘계는 *Chaetoceros affinis*와 *Thalassionema*

*nitzschoides*로 각각 나타났다. 한편, 주성분 분석 결과, 돌산도 북부해역은 해양환경과 식물플랑크톤 군집특성으로부터 2개 또는 3개의 해역으로 세분되는 것으로 나타났다. Lee *et al.*[2010]은 유해성 적조가 최초로 발생하는 해역인 나로도 해역에서의 현장조사와 국립수산과학원이 1995-2008년까지 조사한 해양환경인자 자료를 바탕으로, 가막만을 비롯한 한국 남해안에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 원인을 검토하였다. 그 결과, *C. polykrikoides* 적조는 나로도 주변해역에서의 수온이 대략 25.0~26.0 °C, 염분은 대략 31.00일 때 발생하는 것으로 나타났으며, 또한 *C. polykrikoides* 적조는 하계에 한국남해연안수와 쓰시마난류 사이에 형성되는 수온전선의 영향을 받는 것으로 나타났다. Shin *et al.*[2010]은 가막만과 일본의 아리아케만에 있어서의 역사적인 영양염류의 수준을 재구성하기 위하여 퇴적물 코어로부터 획득한 외편모조류의 휴면포자(cyst)를 분석하였다. 그 결과, 가막만의 외편모조류의 휴면포자는 *Brigantidium spp.*, *Protoperidinium americanum*, *Polykrikos*와 같은 종속영양생물의 휴면포자 군집의 비율이 높은 반면, 아리아케만에서의 외편모조류의 휴면포자 군집은 상대적으로 *Lingulodinium machaerophorum*, *Spiniferites spp.* 등이 풍부하였다. 따라서, 이들 두 만에 있어서의 환경 변화를 반영하는 외편모조류의 휴면포자 군집은 대조적인데, 이것은 서로 다른 영양염류의 농축 기작에 의한 것으로 그들은 추론하였다. Lee[2011]는 국립수산과학원이 조사한 17년간의 해양환경관측망 자료에 근거하여, 광양만에서 고흥연안에 이르는 한국 남해 중부의 6개 수역의 수질환경과 적조발생상황을 분석하였다. 그 결과, 이들 해역의 표층 수온(특히 8월은 거의 연변화가 없었으나 저층 수온은 점차 하강하는 반면, 염분은 표층 모두 상승하는 경향을 보였으며, 적조는 전 해역에서 1990년대 중반을 정점으로 이후는 발생회수와 출현종수가 점차 감소하였다. 한편, 이들 해역에서 고르게 출현한 탁월종은 *C. polykrikoides*으로서, 이 종에 의한 가막만에서의 적조는 평균 수온과 염분이 각각 26 °C 전후, 31.0~31.5 psu일 때 발생하는 것으로 나타났다. 또한 *C. polykrikoides* 적조발생시 DO를 비롯한 DIN 및 DIP, TN 및 TP 농도를 조사한 결과, 적조는 이들 수질항목의 변동과 거의 관계없이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 즉, *C. polykrikoides* 적조 발생에 있어 가장 지배적인 요인은 수온으로 판단되었다. Shin *et al.*[2012]은 2005년 6월부터 2006년 6월까지 가막만에서 퇴적물 트랩을 사용하여 *polykrikos*종의 생태학적인 특징과 외편모조류의 휴면포자의 종조성 및 생산을 조사하였다. 그 결과, 32종의 외편모조류의 휴면포자 군집이 동정되었으며, *Polykrikos kofoidii*, *Scrippsiella trochoidea*, *Protoperidinium spp.*, *Polykrikos schwartzii*, *Gymnodinium catenatum*, *Ensiculifera carinata* 등의 휴면포자가 우세한 것으로 나타났다. 한편, *polykrikos*종의 휴면포자의 생산 시기는 먹이인 *G. catenatum*의 출현과 관련이 있는 것으로 판단되었다. Park and Yoon[2017]은 가막만 표층 퇴적물에서 채집한 외편모조류 휴면포자의 발아실험을 통해, 외편모조류 휴면포자와 영양세포와의 관계를 조사하였다. 그 결과, 표층 퇴적물에 있던 외편모조류 휴면포자 중 약 57%가 발아하여, 영양세포와 휴면포자와의 관계를 확인하

였다. 또한, *Votadinium carvum*은 세 가지 형태의 휴면포자 중 다른 형태의 영양세포를 나타내었으며, *C. polykrikoides*의 휴면포자로 알려진 종은 *Cochlodinium sp.*인 것으로 밝혀졌다. Oh *et al.*[2018]은 가막만 표층 해수의 용존유기탄소(DOC, Dissolved Organic Carbon)의 농도 분포가 유해성 적조에 미치는 영향을 파악하기 위해 2007년 8월 가막만 부근의 지하수와 DOC의 농도를 측정하였다. 그 결과, 적조가 발생한 지점에서의 DOC의 평균 농도($157 \pm 25 \mu\text{M}$)는 비적조 지점에서의 DOC농도보다 1.6배 정도 더 높았다. 또한 지하수와 외해수의 DOC농도는 적조 지점의 DOC농도에 비해 현저히 낮았고 비 적조지점과 유사한 값을 보여주었다. 한편, DOC는 외편모조류의 생물학적인 지시자(biomarker)와 강한 관련성을 보여준 반면 규조류의 생물학적인 지시자(biomarker)와는 어떤 관련성도 보여주지 않았다. 이들 결과는 가막만에 있어서의 DOC 분포가 규조류보다는 오히려 외편모조류에 의한 현장의 식물플랑크톤에 의해 지배되고 있음을 시사하였다.

이상에서 살펴본 바에 따르면, 가막만에서의 적조(주로 외편모조류에 의한 유해적조)는 하계에 유기오염 해역으로서, 따라서 빈산소 수괴가 빈번히 형성되는 만의 북서부에서 촉발되어 점차 만의 남쪽으로 확산될 가능성이 큰 것으로 생각된다. 그것은 첫째, 적조 원인생물은 수온에 가장 민감한 혐온성의 종속영양생물이라는 점, 둘째, 북서부 해역은 부영양화된 정체수역으로서 하계에 저열효과에 의한 수온 상승과 함께 살아있는 외편모조류의 휴면포자의 발아를 촉진, 증식(즉, 세포밀도의 증가)시킬 수 있다는 점, 셋째, 적조 발생이 빈산소 수괴의 형성(환원상태에 따른 영양염의 용출)과 관련이 있다는 점 등을 그 이유로 들 수 있기 때문이다.

3.2.5 해양생태계 모델링

Cho *et al.*[1996a]은 해수유동과 생태계의 수치모형을 사용하여(양식기간동안 양식장이 없는 조건하에) 가막만의 식물플랑크톤에 의한 기초생산력을 산정하였다. 그 결과, 가막만에서의 기초생산력은 $0.99 \sim 10.20 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (평균 $4.43 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)로서, 6월부터 급격히 증가하여 8월에 가장 높았고, 이후 12월까지 급격히 감소하다가 1월 이후 3월까지 다시 서서히 증가하는 경향을 보였다. Cho *et al.*[1996b]은 생태계 수치모형을 이용, 가막만의 굴 양식장 환경용량을 산정하기 위해 월별 기초생산력과 연간 식물플랑크톤의 생산량을 구하고, 알곡로서의 전환 계수를 사용하여 굴의 최대 생산 가능량, 즉 환경용량을 산정하였다. 그 결과, 1994년 6월부터 1995년 3월까지 굴양식 기간 동안의 가막만 전 해역에서의 식물플랑크톤 생산량은 181,594 ton·C, 최대 알곡 생산가능량은 287,033 ton, 단위 용적당의 생산가능량은 $0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{year}^{-1}$ 로 각각 나타났다. 이 결과를 근거로 그들은 굴 양식장 관리조건만 허용된다면 가막만은 굴 양식 시설대수를 증가시키면 굴의 생산량이 더 증가할 수 있는 해역으로 평가하였다. Lee *et al.*[1999]은 생태계모형을 이용하여 가막만의 기초생산력을 산정하고, 수질악화를 일으키지 않고 최대 수용할 수 있는 유입부하(즉, 수질측면의 환경용량으로서, 빈산소 수괴를 형성시키지 않는 범위를 의미함)를 파악하였다. 그 결과, 하

천부하를 4배로 증가시키면 전체 양식장 평균 기초생산력은 현재의 기초생산력 평균 $2.27 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 에 비해 약 두배인 $4.02 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ 로 증가되는 것으로 나타났다. 또한, 그들은 양식시설 단위 대수당의 최대 알굴 생산가능량은 현 환경조건하에서 약 0.93 ton정도로 추산하였다. Kim[2003]은 생태-유체역학모델을 이용하여 가막만에 대한 영양염의 물리과정량 및 순섭취 또는 재생율을 산정하였다. 가막만의 DIN 및 DIP의 물리과정량 산정 결과, 표층에서는 중앙 일부를 제외한 지역에서 이송현상이 탁월하였고, 저층으로 갈수록 축적현상이 일어나는 지역이 증가하는 경향을 보였다. 한편, 용존무기질소는, 표층에서는 대부분의 지역에서 $0 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 정도의 순섭취를 나타내었으며, 중층의 경우는 여수와 여천항 인근을 제외한 대부분의 지역에서 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 순재생을 나타내었다. 용존무기인은, 표층에서는 만 대부분의 지역에서 $0.0 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 정도의 순재생이 일어난 반면, 중층과 저층에서는 만 전역에서 각각 $0.5 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 및 $1.0 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 순재생을 나타내었다. 이들 결과로부터, 그는 표층에서 유입되어 저층으로 이동된 오염물질들은 외해로 희석·확산되지 않고 가막만의 오염을 가중시킬 가능성이 높은 것으로 판단하였다. Kim *et al.* [2003]은 생태계 수치모형을 사용하여 가막만에서의 육상 축양장 배출수 처리에 의한 수질개선 효과를 검토하였다. 그 결과, 육상 축양장 배출수의 오존처리 시스템 처리효율을 DIP 90%, DIN 80%, 그리고 COD 60%로 적용할 경우, DIP와 DIN 농도는 각각 평균 46.4%와 8.4%로 나타나, 수질 개선효과를 확인하였다. 또한, COD는 만 전체적으로 농도가 감소하여 수질환경기준 1등급 영역이 확장되어 평균 22.7%의 수질 개선효과를 보였다. Kim[2005]은 생태-유체역학적 수치모형을 사용하여 가막만에 대한 COD의 물리과정량 및 순증가 또는 감소율을 산정하였다. 그 결과, COD는 표층에서는 이송현상이 주로 일어나고, 저층에서는 축적현상이 탁월한 것으로 나타나, 그는 다른 오염물질들의 거동도 이와 같은 패턴을 보일 가능성이 높은 것으로 추론하였다. 또한 그는 이러한 계산결과에 근거하여, 이 지역에서는 유기물의 지속적인 공급과 활발한 분해가 일어나 용존산소의 소비도 클 것으로 판단하였다. Kang and Kim[2006]은 생태계 모델을 이용하여 수질 인자의 농도 분포를 재현하고, 가막만으로 유입되는 하천부하량을 단계적으로 증가시켜 해역의 유기 오염도의 지표인 COD의 변화를 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 가막만내의 COD 농도는 하천수가 많이 유입되는 북서부 지점에서 높은 값을 보였다. 또한 그들의 계산결과에 의하면, 가막만을 COD에 의한 해역의 수질 환경기준 2급수 유지를 위해 수용 가능한 오염부하량(즉, 환경용량)은 현재의 유입부하량의 30배에 해당하는 것으로 나타났다. Oh *et al.* [2008a]은 1990년대 개발된 CHEMTAX 프로그램을 활용하여 2005년 2월부터 2006년 11월까지 조사한 가막만내 식물플랑크톤의 군집조성 특성을 분석함으로써 기존의 현미경 관찰을 통한 군집조성 연구의 한계를 보완하고자 하였다. 그들의 결과에 따르면, 가막만내의 영양 단계는 동계에는 빈영양 내지 중영양을 상태, 춘계에는 만의 북부의 하수처리장 및 북동쪽 만구 부근에서는 중영양상태인 것으로 나타났다.

반면, 하계에는 남쪽 만구 및 북동쪽 만구에서는 부영양상태($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)를, 추계에는 만의 중앙부에서는 부영양상태, 남쪽 만구 부근에서는 중영양 상태를 각각 나타내었다. 따라서 굴의 성장 생리의 특성상 하계부터 추계까지의 풍부한 먹이생물을 필요로 하는 기간에는 적합한 영양상태를 보이는 것으로 판단되었다. Oh *et al.* [2008]은 시스템 생태학적 접근법(에머지(EMERGY))을 이용하여, 가막만내 굴을 비롯한 패류 양식 생산 활동에 기여하는 자연환경의 실질적인 가치와 인간경제 시스템에 대한 기여도를 평가하였다(에머지(EMERGY)는 “Energy Memory”의 의미로서, 이것은 자연환경이 우리 인간에게 주는 서비스를 시장경제의 재화와 용역 등과 동일한 관점에서 평가하는 시스템임). 가막만의 에머지 분석 결과, 재생 불가능한 에너지의 사용에 대한 의존도가 높았고, 환경에 대한 스트레스는 낮았다. 또한 하수처리장의 시설용량이 현재의 일 5만 톤의 수준에서는 처리전후의 영향이 크지 않았으며, 이것은 앞으로 하수처리장의 시설용량의 확대 및 처리시설의 고도화가 필요하다는 사실을 의미하였다. Oh *et al.* [2008b]은 시스템 생태학적 접근법(EMERGY)을 이용하여, 가막만내 굴을 비롯한 패류양식 생산 활동에 기여하는 자연환경의 실질적인 가치와 인간경제 시스템에 대한 기여도를 평가하였다. 그 결과, 가막만 패류생산활동에 기여하는 자연환경에너지원의 경우 조석이 가장 높은 비율을 나타내었고, 다음으로 강우, 하천, 바람, 태양의 순으로 기여도가 높은 것으로 나타났다. 또한 외부로부터 유입된 자원으로는 양식활동을 위한 재화와 용역에 의한 기여도 및 유류사용의 기여도가 높게 평가되었다. 한편 자연환경으로부터 유입된 에머지량이 모두 현재의 에머지 생산 비율로 생산이 된다고 가정할 경우, 현재의 연간 패류 생산량 8,300 ton보다 많은 10,845 ton이 생산 가능할 것으로 나타났다. Oh *et al.* [2008c]은 시스템 생태학적 접근법(EMERGY)을 사용하여, 가막만에서의 굴 양식 산업의 지속성에 대한 변화를 예측하였다. 그 결과, 가막만의 굴 양식업은 현재 경제상황에서는 단기적으로 성장하지만, 에너지 자원의 고갈에 따른 물가상승에 의해서 서서히 쇠퇴할 것으로 예측되었다. 이를 극복하기 위해서는 굴의 판매가격을 물가상승율과 유사한 수준으로 유지해야만 가능한 것으로 나타났다. 한편, 그들은 굴의 지속적인 생산을 위해서는 화석연료에 의존해 온 기존의 양식 산업으로부터 탈피하여 환경수용능력 범위내에서 자연환경자원을 지속가능하게 이용할 수 있는 양식기법으로 전환해야만 가능하다고 판단하였다.

이상의 해양생태계 수치모형의 결과를 종합해 보면, 현재의 가막만의 수질은 굴 양식에는 큰 지장이 없는 수질환경기준(COD) 2등급을 유지하고 있으나, 수질을 보다 더 개선하기 위해서는 만내로 유입되는 육상기인 오염물질의 부하를 삭감할 필요가 있다고 판단된다. 특히, 전술한 Cho *et al.* [1996b]은 현재의 굴 양식장을 잘 관리하고 시설대수를 증가시키면 가막만은 굴의 생산량이 더 증가할 수 있는 해역으로 평가하였다. 이 경우, 그들은 가막만에서의 양식시설 단위 대수당의 최대 알굴 생산가능량을 현 환경조건하에 약 0.93 ton정도로 추산하였다. 따라서 2019년 현재 가막만내 굴양식의 시설대수가 17,174 이므로, 이들의 결과에 의거한 알굴 생산 가능

량은 약 16,000 ton으로 추산되므로 장차 가막만에서의 굴 생산량의 증대를 기대할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 관점에서 볼 때, 향후 가막만에서의 굴을 비롯한 양식생물의 지속가능한 생산을 위해서는 지금까지 연구된 해양생태계 수치모형과 ICT기술을 접목하여 환경수용력을 넘지 않는 범위에서의 스마트 양식기술의 도입이 필요한 시점이라고 생각된다.

3.2.6 양식생물

전술한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 가막만에서의 양식생물은 굴, 지중해 담치(또는 홍합), 피조개, 바지락 등의 패류와 광어, 참돔, 조피볼락 등의 어류를 들 수 있는데, 이들을 대상으로 한 다양한 연구가 1990년대부터 시작되었다. Lee[1995]는 1989년 11월부터 1990년 1월까지 가막만에서 채취한 양식 굴 및 이를 원료로 제조된 통조림 제품에서 나타난 쓴맛의 원인을 분석하여 쓴맛의 원인 물질은 6-7개의 아미노산으로 이루어진 환상의 peptide로 추정하였다. Choi *et al.*[1996]은 1995년 4월부터 10월까지 가막만의 양식 어류인 조피볼락에 기생하는 아가미흡충(*Microcotyle sebastisci*)의 기생을 변동 및 병리조직학적 변화를 조사하였다. 그 결과, *M. sebastisci*는 주로 새엽에 기생하였으나 6-7월에는 나타나지 않았다. 또한 기생된 부위는 미세한 출혈과 함께 점액이 다량 분비되었으며, 감염률, 상대적 감염 밀도, 평균 감염강도는 각각 46.0%, 40.5%, 88.0%로, 조사기간 중 10월에 가장 높았다. 병리조직학적으로는 호흡상피세포의 증생, 비후, 새박관 간상피세포의 증생과 새번의 곤봉화가 일어났으며, 2차적으로 세균의 감염에 의한 아가미 부식도 관찰되었다. Kang *et al.*[2000]은 가막만내 양성장의 바지락 성장을 타 해역인 진해만과 비교하기 위해 이들 두 해역에서 채취한 바지락 치패를 12개월간 양성한 결과, 가막만내 송도 앞바다의 바지락 양성장이 진해만내 수도 앞바다의 바지락 양성장에 비하여 조건이 좋은 것으로 판단하였다. Park and Choi[2002]는 가막만 양식 참굴의 성장을 모델화하기 위해 1997년 3월부터 1998년 5월까지 양식장에서 무작위 채집된 총 9,208개체의 각장 및 증중량을 조사하고, 또한 참굴 양식장의 환경용량을 추정하기 위하여 1985년부터 2000년까지의 단위면적 당 생산량과 시설대수를 각각 조사하였다. 그 결과, 추정된 참굴의 길이 성장모델은 Bertalanffy 모델을 적용하였을 때 보다 일반화된 Schnute and Richards 성장식을 적용했을 때 적합도가 높은 것으로 나타났다. 또한 추정된 참굴의 환경용량은 Schaefer 모델에서 21.17 ton·ha⁻¹, Fox 모델에서는 19.7 ton·ha⁻¹로, 2000년 현재의 단위면적당 생산량 26.1 ton·ha⁻¹ 보다 낮았으나 환경용량을 생산하는 시설대수는 8대 (ha⁻¹)로 2000년 현재의 7.8대 (ha⁻¹)와 유사한 값을 보였다. Cho and Jeong[2008]은 2007년 3월 가막만에서 양식하고 있는 참굴 34마리를 대상으로 미토콘드리아 COI gene 염기서열분석을 통하여 유전자 집단을 조사했다. 유전자 배열 결과, 가막만 참굴 집단에서 CR1, CR2, CR3, CR4 4개의 haplotype이 나타났다. 한편, 계층구조에서 가막만산 참굴은 남해안산과 유전적으로 서로 연관을 보이는 반면, 유전적 거리는 남해안 및 서해안과 마이너스 값을 보여 유전적, 통계적으로 하나

의 집단임을 보여주었다. Kim *et al.*[2009]은 가막만내 양식굴의 대량 사멸을 예방하기 위한 조치의 하나로 현존 굴 생체의 조성비와 산란의 변화를 조사하였다. 그 결과, 양식굴의 주 산란기는 8-9월이며, 굴 생체 조성(protein and glycogen)과 상태 지수는 굴의 산란 활동에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 한편, 그들은 2007년 발생한 가막만내 양식굴의 대량 폐사의 원인을 굴의 건강과 산란 활동의 저하, 고수온에 의한 스트레스, 먹이원의 감소 등에 의한 것으로 추정하였다. Shin *et al.*[2012]은 2008년 12월부터 2009년 11월까지 가막만에서 양식되고 있는 피조개를 대상으로 근육, 내장낭 및 몸체의 생화학적 조성비의 변동과 생식주기 계절변화를 조사하였다. 그 결과, 피조개의 주 산란기는 7-8월이었고, 겨울에는 생식소가 불활성 상태를 보였다. 또한 체성분 가운데 가장 큰 변화는 내장낭내 지질과 탄수화물이었으며, 기관별 단백질은 연중 거의 변화가 없었다. 한편, 내장낭은 생식주기 동안 가장 큰 변화를 보였으며, 내장낭내 수분과 지방의 함량은 다소 역의 상관관계를 나타내었다. 이들 결과로부터 그들은 내장낭의 탄수화물, 지방 단백질은 생식소 발달과정 동안 에너지원으로서 주요한 역할을 하며, 먹이가 부족한 시기에 기초대사유지를 위해 이용되고 있는 것으로 추론하였다. Kim *et al.*[2013]은 2007년 발생한 가막만 양식 굴의 대량폐사 문제와 관련하여 수온과 염분, 먹이 등의 대량 폐사 요인을 조사하였다. 그 결과, 굴의 대량 폐사 시 가막만은 빈영양 상태에 있었으며, 폐사율은 43.6%로 나타났다. 따라서 그들은 가막만에서 양식 굴의 대량 폐사의 원인은 고수온으로 인한 바이오 리듬의 파괴와 영양염류의 제한으로 인한 먹이원의 감소 때문으로 판단하였다. Jeon *et al.*[2013]은 2010년 5월 가막만에서 채집한 지중해 담치, *Mytilus galloprovincialis*의 체내 중금속 농도, 이성생식세포 발현과 소화선의 조직학적 지표 변화를 이용하여 이들의 안정성을 조사하였다. 그 결과, 금속 이온의 체내 축적 농도는 분석된 10가지 중 알루미늄(Al)이 가장 높았으며, 두번째로 아연(Zn)이 높았고, 코발트(Co)가 가장 낮았다. 또한 이성생식세포 발현율은 26.4%로 나타났으며, 수컷에서 더 높았고, 이성생식세포 발현 형태는 네 가지 형태가 관찰되었다. Kim *et al.*[2016]은 가막만의 대표적인 양식종인 패류인 참굴(*Crassostrea gigas*)과 지중해 담치(*Mytilus galloprovincialis*)의 서식환경에 따른 스트레스 정도를 파악하였다. 이를 위해 그들은 각 종의 체중량, 각장과 각고, 양식장 사육기간을 조사하고 이들 종의 계통학적 HSP 70(Heat Shock Protein 70) sequence를 비교한 후, HSP 70 유전자 발현을 분석하였다 (여기서, HSP 70은 HSPs 중 단백질의 접합에 기여하는 중요한 샤페론(Chaperones) 단백질로서, 유전자 발현 차이를 통해 환경스트레스를 살펴보는 지표유전자로 활용되고 있음). 그 결과, 참굴과 지중해 담치의 체중량, 각장과 각고는 물론, HSP 70 유전자 발현은 양식장의 지리적 위치에 따라 차이를 보였다. 또한 참굴과 지중해 담치는 HSP 70 sequence 분석을 통해서 다른 해양 종들과 높은 유사성이 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과는 HSP 70이 서식환경에 따라 생물의 외부적 형질뿐만 아니라 내부적 스트레스를 평가하는 지표 유전자로서 활용할 수 있음을 보여주었다.

이상의 연구결과를 종합해 보면, 가막만에서의 대표적인 패류인 굴, 피조개 등은 주 산란기인 하계의 수온 상승과 먹이원인 영양염류의 감소가 서식환경을 악화시키고 폐사를 일으키는 주요인으로 판단된다. 또한 Jeon *et al.*[2013]의 결과에서 보듯이 지중해 담치는 체내에 인간의 건강에 유해한 중금속을 축적하여 이성생식세포를 발현하는 것으로 나타났다. 따라서 가막만의 양식생물의 피해를 줄이기 위해서는 고수온기의 대책(예를 들면 고수온기에는 어장을 보다 심해로 이동시키는 등)과 중금속으로 인한 수질오염을 근원적으로 차단하기 위한 방안 마련이 필요하다고 생각된다.

3.3 가막만 연구의 한계와 해결과제

지금까지 가막만에서는 해양 및 어장환경, 수질, 적조, 해양생태계 모델링, 양식생물(주로 굴 등의 패류), 해수유동 등에 관한 다수의 연구는 물론, 저서동물, 퇴적환경, 동식물플랑크톤, 어류, 해초류, 해양미생물 등 다양한 연구가 이루어졌다. 그 결과, 가막만의 해양 환경의 전체 모습은 물론 빈산소 수괴의 발달과정(Kim *et al.*[2006], Kim *et al.*[2010a], Kim *et al.*[2011]이나 굴의 폐사원인 등(Kim *et al.*[2009], Kim *et al.*[2013])이 상당히 규명되었다고 판단된다. 여기에 더하여 유기 오염이 극심한 북서내만역에서는 지난 2002년부터 2005년까지 준설작업에 의해 오니가 제거되었고 하수종말처리장도 완공되어 가동을 시작하였다. 그러나 이러한 연구 성과와 인위적인 노력에도 불구하고 가막만에서는 여전히 빈산소 수괴의 발생이나 굴 또는 어류의 대량 폐사 등 환경적 문제가 야기되고 있다. 한 예로서, 2019년 8월에도 북서내만역의 저층에서는 DO 농도가 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (표층에서의 DO 농도는 $9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 이었음)인 빈산소 수괴가 출현하였다(<http://www.nifs.go.kr>). 이것은 이와 같은 원인의 규명에도 불구하고 아직도 원인 그 자체가 해소되지 않고 상존하고 있음을 의미한다. 따라서 앞으로 가막만의 연구는 바로 이러한 환경문제를 일으키는 근본 원인의 제거와 해결방안을 찾는 데 있다고 말할 수 있다. 이러한 관점에서, 그간의 다양한 물리적, 생물학적 연구에도 불구하고 가막만의 현안 문제 해결을 위한 공학적 연구가 거의 전무한 것은 매우 유감스럽다.

전술한 Table 1, Table 2에 따르면, 지금까지 가막만 연구의 다수를 차지하고 있던 해양 및 어장환경, 양식생물, 수질, 해양생태계, 해수유동은 물론, 수질, 퇴적환경, 동식물 플랑크톤, 저서생물 등 적조를 제외하고는 최근에 들어 연구가 전반적으로 부진한 것을 알 수 있다. 이것은 지금까지의 연구가 가막만 환경문제의 해결에 초점을 맞추어 이루어진 것이 아니라 시대적 사회적 요구에 맞추어 이루어져 왔기 때문이 아닌가 하는 의구심을 갖게 한다. 가막만은 전술한 바와 같이 주요 수산생물이 굴, 진주담치, 피조개 등의 패류와 광어, 조피볼락, 참돔 등의 어류, 그리고 톳, 모자반 등 해초류이므로 앞으로는 이들 생물의 생산성을 높이는 방향으로 가막만의 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

이러한 관점에서, 가막만 환경문제의 극복을 위해서는 우선 가막만내로 유입하는 18개 이상의 소규모 육상 오염원을 철저히 차단하여야 한다. 그리고 만의 북부해역은 외해수의 유입을 촉진하기

위해 작령(作濬, making waterways)을 하거나 폭기(暴氣, aeration)시켜 빈산소 수괴의 발달을 억제하여야 한다. 예를 들면, 작령은 수심이 얕은 만이나 간석지에 국소적으로 물길을 파서, 이 부분의 유속 또는 유량을 증가시켜 균일한 평면 흐름을 파괴하는 것에 의해 수질개량을 도모하는 공법이다. 이 공법을 이용하여 일본 아이치현(愛知縣)의 토요가와(豊川)하구의 수질 개선사업이 이루어졌다(Nakamura[1991]). 또한 폭기는 수중에 기포를 송입하여 연직 대류를 발생시켜 수중의 산소량을 증대시키는 공법으로서, 일본 오사카 북항 처분지 매립시 수질정화대책으로서 실용화된 바 있다(Japan Ocean Development and Construction Association[2006]). 따라서 이러한 수질개선을 위한 공학적인 연구는 물론 어업인의 소득증대를 위해 모자반이나 잘피류 등의 서식처를 확대하는 노력도 필요하다. 이와 동시에 가막만의 환경용량에 적절한 양식시설의 배치와 어장관리, 나아가 양식생물에 의한 내부오염의 방지를 위한 어장정화사업도 필요할 것으로 생각된다. 따라서 앞으로 가막만의 환경을 위해 필요한 연구과제는 연구자와 지역사회 구성원들이 함께 지혜를 모아 발굴되어야 하며, 연구는 체계적이고도 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 다시 말해, 가막만 연구는 연구자의 입장이 아니라 수역을 이용하고 있는 수요자의 입장, 즉 어업인과 지역사회의 입장에서 이루어져야 함은 말할 필요가 없을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 1977년부터 2018년까지 가막만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(KCI)과 과학인용지수(SCI)에 게재된 88편의 논문, 기타 학위논문과 기술연구보고서 등의 자료를 분석하여 시대에 따른 가막만 연구의 변천과정을 진단, 평가하고, 앞으로 가막만의 환경 회복을 위해 필요한 연구과제를 모색하였다.

지금까지 가막만에서는 해양 및 어장환경 또는 수질과 관련한 연구가 가장 많이 이루어졌고, 다음으로 적조, 해양생태계 모델링, 양식생물(주로 굴 등의 패류), 해수유동 등의 순이었으며, 이들 조사 연구는 하계에 이루어진 경우가 가장 많았다. 가막만의 북서부 해역은 유기오염이 심각하며 이로 인해 하계를 중심으로 빈산소 수괴가 빈번히 출현하는 해역으로서, 경우에 따라서는 그 영향역이 만의 중앙부까지 미칠 수 있으며, 또한 그 결과 가막만의 저서생태계가 악영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 반면, 가막만의 수질은 인위적 활동이 잦은 일부 해역에서는 분변에 의한 세균(아마 대장균)이나 환경호르몬이 검출되는 등 다소 문제가 있으나 대체로 외양수에 비해 그다지 나쁘지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 현재의 가막만 수질은 굴 양식에는 큰 지장이 없는 COD 환경기준 2등급을 유지하고 있으나, 수질을 보다 더 개선하기 위해서는 만내로 유입되는 육상기인 오염물질의 부하를 삭감할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 가막만에서의 대표적인 패류인 굴, 피조개 등은 주 산란기인 하계의 수온 상승과 먹이원인 영양염류의 감소가 서식환경을 악화시키고 폐사를 일으키는 주요인인 것으로 밝혀졌다. 가막만 내에서는 조류가 북동쪽과 남쪽 두 개의 수로를 통해 거의 동시에

유출입하고, 해수교환의 약 80%가 수로폭이 더 넓은 남쪽 만구를 통해 이루어지고 있으며, 만내 흐름은 바람의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다. 특히, 가막만내에는 북서내만수, 여수항수, 외만수 등 3개의 수괴가 존재하며 이들 수괴는 가막만의 지형적 조건에 의해 형성되는 것으로 밝혀졌다.

이상의 연구 결과, 가막만에서는 빈산소 수괴의 발생과 어패류의 폐사가 앞으로 해결해야 할 주요 과제로 파악되었으며, 이러한 환경문제를 해결하기 위해서는 구체적인 실행계획, 즉 해결방안을 마련해야 할 것으로 생각되었다. 따라서 앞으로는 가막만 수역을 이용하고 있는 수요자, 즉 어업인과 지역사회의 입장에서 필요한 과제를 발굴하여 실제적이고도 지속적인 연구가 가능하도록 연구자가 협력하고 함께 지혜를 모아야 할 것으로 판단되었다.

References

- [1] Ahn, Y.G., Jhoo, H.K., Sheo, H.J., 1977, "Physical and chemical study on the water quality of Gamak Bay", Korean J. Limnology, 10(3-4), 11-17.
- [2] An, Y.K., Cho, J.H., Yoon, H.S., Park, I.W., Kim, Y.S., Kim, H.J., Choi, S.D., 2009, "Influence of *Sargassum* beds on the water quality characteristics in Gamak Bay, Korea", Korean J. Fish. Aquat. Sci. 42(3), 284-289.
- [3] Cho, E.I., Park, C.K., Lee, S.M., 1996a, "Estimation of carrying capacity in Kamak Bay(I) —estimation of primary productivity using the ecohydrodynamic Model—", J. Korean Fish. Soc. 29(3), 369-385.
- [4] Cho, E.I., Park, C.K., Lee, S.M., 1996b, "Estimation of carrying capacity in Kamak Bay(II)- estimation of carrying capacity of oyster culture ground", J. Korean Fish. Soc. 29(5), 709-715.
- [5] Cho, E.S., Jeong, H.D., 2008, "The population genetic structure of the oyster *Crassostrea gigas* (Bivalvia: Ostreidae) from Gamak Bay in Korea", J. Life Sci. 18(7), 1015-1018.
- [6] Cho, Y.S., Kim, Y.B., Lee, W.C., Hong, S.J., Lee, S.M., 2013, "The trophic state assessment using biochemical composition in the surface sediments, the southern coast of Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 19(2), 101-110.
- [7] Choi, S.D., Sim, D.S., Gong, Y.G., Paek, J.M., Bang, I.C., 1996, "Ecological study on *Microcotyle sebastisci* of parasiting of cultured rockfish, *Sebastes schlegeli* in Korea", J. Fish Pathol. 9(2), 119-126.
- [8] Ecosystem Engineering Research Group, 1987, Osaka Bay-Transition and creation of the environment", Koseisha-Koseigaku, Tokyo.
- [9] Eom, K.H., Lee, W.C., Park, S.E., Hong, S.J., Kim, H.C., Cho, Y.S., 2011, "Dissolved nutrient balance and net ecosystem metabolism using a simple box model in Gamak Bay, Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 14(4), 257-263.
- [10] Han, S.K., Park, J.Y., Lee, J.S., 2005, "Quantitative assessment of micro pollutants in the southern coastal waters of Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 8(4), 213-219.
- [11] Hwang, D.W., Kim, G.B., Lee, W.C., Oh, H.T., 2010, "The role of submarine groundwater discharge (SGD) in nutrient budgets of Gamak Bay, a shellfish farming bay, in Korea", J. Sea Res. 64, 224-230.
- [12] Hydrographic Bureau, 1978, "Tidal observation results in the neighborhood of Yeosu Harbor in 1977", Tech. Report of Hydro. 91-122.
- [13] International Emax Center, 2001, Closed seas in Japan (88 seas), A guide book for environment, Tokyo.
- [14] Japan Ocean Development and Construction Association, 2006, Ocean Civil Engineering Technology in the 21st century, Sankaido, Tokyo.
- [15] Jeon, M.A., Kang, J.C., Lee, J.S., 2013, "Concentration of heavy metal and alteration of reproductive and histological biomarker of *Mytilus galloprovincialis* in Gamak Bay of the southern coast of Korea", Korean J. Malacol. 29(1), 33-41.
- [16] Jung, R.H., Lim, H.S., Kim, S.S., Park, J.S., Jeon, K.A., Lee, Y.S., Lee, J.S., Kim, K.Y., Go, W.J., 2002, "A study of the macrozoobenthos at the intensive fish farming grounds in the southern coast of Korea", J. Korean Soc. Oceanogr. 7(4), 235-246.
- [17] Kang, H., Kim, J.G., 2006, "The estimation of environmental capacity in the Gamak Bay using an eco-hydrodynamic model", J. Environ. Sci. 15(10), 951-960.
- [18] Kang, K.H., Chang, J.Y., Kim, Y.H., 2000, "Growth comparison of short neck clams, *Tapes philippinarum* between the two culturing areas", Korean J. Malacol. 16(1), 49-54.
- [19] Kim, B.K., Lee, M.O., Park, S.J., 2012, "Characteristics of water temperature and salinity variations, and seawater exchange in Gamak Bay", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 15(2), 101-110.
- [20] Kim, B.K., Park, S.J., Lee, M.O., Lee, Y.G., Kim, J.K., 2014a, "Characteristics of sedimentary environments in Gamak Bay based on numerical experiments", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 17(2), 70-80.
- [21] Kim, C.W., Kim, E.O., Jeong, H.D., Jung, C.G., Park, M.W., Son, S.G., 2009, "Variation of body composition and survival rate according to spawning of Pacific Oyster; *Crassostrea gigas* in Gamak Bay", Korean J. Fish. Aquat. Sci. 42(5), 481-486.
- [22] Kim, C.W., Oh, H.J., Shin, Y.K., 2013, "Effects of water temperature on the mass mortality of Pacific oyster, *Crassostrea gigas* in Gamak Bay", Korean J. Malacology, 29(3), 245-250.
- [23] Kim, D.M., 2003, "Estimation of nutrients transport in Kamak Bay using the eco-hydrodynamic model", J. Environ. Sci. 12(7), 745-751.
- [24] Kim, D.M., 2005, "Ecological modeling for estimation of a transport and distribution of COD in Kamak Bay", J. Environ. Sci. 14(9), 835-842.
- [25] Kim, D.M., Chang, J.H., Cho, H.S., 2003, "A simulation on water quality improvement by the effluent treatment of land-base-seawater culture system in the Kamak bay", J. Korean Soc.

- Mar. Environ. Eng. 6(1), 44-59.
- [26] Kim, D.S., Je, J.G., Shin, S.H., 2000, "Utilization of meiobenthos for pollution monitoring in the Gamak Bay, Korea", J. Korean Fish. Soc., 33(4), 307-319.
- [27] Kim, I.T., Kim, G.B., 2014, "Submarine groundwater discharge as a main source of rare earth elements in coastal waters", Mar. Chemistry, 160, 11-17.
- [28] Kim, J.B., Lee, S.Y., Yu, J., Choi, Y.H., Jung, C.S., Lee, P.Y., 2006, "The characteristics of oxygen deficient water mass in Gamak Bay", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 9(4), 216-224.
- [29] Kim, J.B., Park, J.I., Jung, C.G., Choi, W.J., Lee, W.C., Lee, Y.H., 2010a, "Physicochemical characteristics of seawater in Gamak Bay for a period of hypoxic water mass disappearance", J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 16(3), 241-248.
- [30] Kim, J.H., Lee, W.C., Hong, S.J., Park, J.H., Kim, C.S., Jung, W.S., Kim, D.M., 2016, "A study on temporal, spatial water exchange characteristics in Gamak Bay using a method for calculating residence time and flushing time", J. Environ. Sci. 25(8), 1087-1095.
- [31] Kim, J.K., Ryu, J.H., Kim, J.B., Lee, W.C., Kim, H.C., Moon, S.Y., Kim, H.Y., 2015, "Growth of young sea bass *Lateolabrax japonicus* in the eelgrass beds of Gamak and Yeoja Bays in relation to environmental variables", Korean J. Fish. Aquat. Sci. 48(6), 920-928.
- [32] Kim, P.J., Park, S.Y., Kim, S.S., Jang, S.J., Jeon, S.B., Ju, J.S., 2012, "Biogeochemistry of alkaline and alkaline earth elements in the surface sediment of the Gamak Bay", J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 18(1), 1-13.
- [33] Kim, S.R., Lee, G.S., Choi, D.L., Kim, D.C., Lee, T.H., Seo, Y.K., 2014b, "Development of the Holocene sediments in Gamak Bay of the south sea, Korea", J. Korean Soc. Oceanogr. 19(2), 131-146.
- [34] Kim, S.Y., Jun, S.H., Lee, Y.S., Lee, Y.H., Kim, B.M., 2011, "Characteristics of phosphate flux at the sediment-water interface in Gamak Bay during the hypoxic water mass", J. Environ. Sci. 20(9), 1069-1078.
- [35] Kim, T.H., Park, S.R., Kim, Y.K., Kim, J.H., Kim, S.H., Kim, J.H., Chung, I.K., Lee, K.S., 2008, "Growth dynamics and carbon incorporation of the seagrass, *Zostera marinal* I, in Jingtong Bay and Gamak Bay on the southern coast of Korea", Algae, 23(3), 241-250.
- [36] Kim, W.S., Park, K.Y., Kim, J.K., Kwak, I.S., Kwak, I.S., 2016, "Expression of the heat shock protein 70 gene and external developmental traits of two bivalvia species, *Crassostrea gigas* and *Mytilus galloprovincialis* under aquaculture environments", Korean J. Ecol. Environ. 49(1), 22-30.
- [37] Kim, Y.S., Yoon, H.S., Park, I.W., An, Y.K., Choi, S.D., 2010b, "Species composition and monthly variation of the organisms attached to *Sargassum* beds in Gamak Bay, Korea", Korean J. Fish. Aquat. Sci. 43(4), 345-350.
- [38] Kim, Y.S., Yoon, H.S., Park, I.W., Lee, W.B., Joo, S.Y., Choi, S.D., 2008, "Annual variation of water quality and bivalvia communities in Gamak Bay", Korean J. Environ. Biol. 26(4), 279-291.
- [39] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Open sea, <http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>, 2020 (accessed 2020. 3. 13).
- [40] Kunishi H., Unoki, S., 1977, Science of Marine environments, Tokyo University Press, Tokyo.
- [41] Kwon, H.K., Oh, S.J., Yang, H.S., 2010, "Distribution characteristics of alkaline phosphatase activity and phosphatase hydrolyzable phosphorus in northern Gamak Bay in autumn and winter, 2009", Korean J. Fish. Aquat. Sci. 43(5), 540-546.
- [42] Kwon, H.K., Oh, S.J., Yang, H.S., 2011, "Ecological significance of alkaline phosphatase activity and phosphatase-hydrolyzed phosphorus in the northern part of Gamak Bay, Korea", Mar. Pollut. Bull. 62, 2476-2482.
- [43] Kwon, J.Y., Park, K., Song, K.C., Oh, E.G., Lee, H.J., Kim, J.H., Son, K.T., 2012, "The bacteriological quality of seawater in Kamak Bay, Korea", Korean J. Fish. Aquat. Sci. 45(5), 460-464.
- [44] Lee, D.I., Cho, E.I., Park, C.K., 1999, "The ecosystem modelling for enhancement of primary productivity in Kamak Bay", J. Environ. Sci. 8(5), 575-586.
- [45] Lee, D.I., Cho, H.S., 2002, "A study on the characteristics of pollutant loads in Kamak Bay watershed", J. Environ. Sci. 11(9), 945-954.
- [46] Lee, D.S., Kim, Y.S., Jeong, S.Y., 2008, "Environmental characteristics and distributions of marine bacteria in the surface sediments of Kamak Bay in winter and summer", J. Environ. Sci. 17(7), 755-765.
- [47] Lee, G.H., 1983, "Self-purification capacity of Gamak Bay", Research Report, Yeosu Fisheries Junior College, 4, 19-25.
- [48] Lee, G.H., 1992, "The Pattern of seawater circulation in Kamak Bay", Bull. Korean Fish. Tech. Soc. 28(2), 117-131.
- [49] Lee, G.H., Chang, S.D., 1982, "Tidal exchange of seawater exchange in Gamag Bay", J. Oceanogr. 17(1), 12-18.
- [50] Lee, G.S., Lee, Y.S., Lee, S.N., 1991, "Numerical simulation on tidal currents in a bay- application to Gamag Bay-", J. Korea Water Resources Assoc. 24(4), 41-48.
- [51] Lee, H.G., Min, W.G., Rho, H.S., Oh, J.H., Kim, D.S., 2016a, "Distributional characteristics of the meiobenthic community in Gamak Bay in the south sea, Korea", Korean J. Environ. Biol. 34(2), 79-90.
- [52] Lee, I.W., Kim, D.S., 1998, "Environmental condition of sea areas for anchovy lift net in Kamak Bay", Bull. Korean Soc. Fish. Tech. 34(1), 67-73.
- [53] Lee, J.C., Choo, H.S., Lee, K.H., Cho, K.D., 1995, "Tides and currents of Kamag Bay in July-August 1994", J. Korean Fish. Soc. 28(5), 624-634.
- [54] Lee, J.S., 1995, "Isolation and some properties of bitter taste compounds from cultured oyster, *Crassostrea gigas*", Bull. Korean Fish. Soc. 28(1), 98-104.

- [55] Lee, K.H., Choe, K.J., 1985, "Distributions of water temperature, salinity and transparency in Kamak Bay on June", Bull. Korean Fish. Soc. 18(2), 157-165.
- [56] Lee, K.H., Cho, K.D., 1990, "Distributions of the temperature and salinity in Kamak Bay", Bull. Korean Fish. Soc. 23(1), 25-39.
- [57] Lee, M.C., Chang, S.D., 1982, "Tidal exchange of seawater in Gamak Bay", J. Korean Soc. Oceanogr. 17(1), 12-18.
- [58] Lee, M.H., Lee, J.B., Lee, J.A., Park, J.G., 1999, "Community structure of flagellates and dynamics of resting cysts in Kamak Bay, Korea", Algae, 14(4), 255-266.
- [59] Lee, M.O., 2011, "Characteristics of long-term water quality variations and *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the mid-southern coastal waters of Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 14(1), 19-31.
- [60] Lee, M.O., Choi, J.H., Park, I.H., 2010, "Outbreak conditions for *Cochlodinium polykrikoides* blooms in the southern coastal waters of Korea", Mar. Environ. Res. 70, 227-238.
- [61] Lee, M.O., Kim, B.K., Park, S.J., Kim, J.K., 2005, "Some physical characteristics of Gamak Bay observed in October and November of year 2004", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 8(4), 165-173.
- [62] Lee, M.O., Kim, J.K., 2008, "Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea", Mar. Environ. Res. 65, 128-147.
- [63] Lee, Y.G., Hwang, J.Y., Jung K.K., 1995, "Surface sediment characteristics and clay minerals in Kamag Bay", J. Korean Earth Sci. Soc. 16(6), 477-488.
- [64] Lee, Y.G., Jeong, D.U., Lee, J.S., Choi, Y.H., Lee, M.O., 2016b, "Effects of hypoxia caused by mussel farming on benthic foraminifera in semi-closed Gamak Bay, South Korea", Mar. Pollut. Bull. 109, 566-581.
- [65] Lee, Y.S., Moon, S.Y., 2006, "The water quality in the Soho coastal sea waters of Gamak Bay before and after a typhoon", J. Korean Soc. Oceanogr. 11(3), 117-123.
- [66] Lee, Y.W., Park, M.O., Kim, Y.S., Kim, S.S., Kang, C.K., 2011, "Application of photosynthetic pigment analysis using a HPLC and CHEMTAX program to studies of phytoplankton community composition", J. Korean Soc. Oceanogr. 16(3), 117-124.
- [67] Ministry of Oceans and Fisheries, Marine environment information portal, <https://www.meis.go.kr/prortal/main.do>, 2020, (accessed 2020. 3. 14).
- [68] Moon, S.Y., Oh, H.J., Kim, S.Y., 2009, "Short-term variations of mesozooplankton related to the environmental factors in Gamak Bay during summer, 2006", J. Environ. Sci. 18(1), 21-32.
- [69] Nakamura, M., 1991, Fisheries Civil Engineering, INA, Tokyo.
- [70] National Institute of Fisheries Science, Red tide occurrence information, <https://www.nifs.go.kr/red/news2.red>, 2020 (accessed 2020. 3. 14).
- [71] Noh, I.H., Yoon, Y.H., Kim, D.I., Oh, S.J., 2006, "Effects of water temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful algae *Chattonella marina* (Subrahmanyn) Hara et Chihara (Raphidophyceae) Isolated from Gamak Bay, Korea", J. Korean Fish. Soc. 39(6), 487-494.
- [72] Noh, I.H., Yoon, Y.H., Park, J.S., Kang, I.S., An, Y.K., 2002, "Seasonal fluctuations of marine environment and phytoplankton community in the southern part of Yeosu, southern sea of Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 13(3), 151-164.
- [73] Noh, I.H., Yoon, Y.H., Park, J.S., Kang, I.S., An, Y.K., Kim, S.H., 2010, "Seasonal fluctuations of marine environment and phytoplankton community in the southern part of Yeosu, southern sea of Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 13(3), 151-164.
- [74] Oh, H.T., Kim, D.J., Lee, W.C., Jung, R.H., Hong, S.J., Kang, Y.S., Lee, Y.W., Tiburg, C., 2008a, "Composition of phytoplankton in Gamak Bay by CHEMTAX Analyses", J. Environ. Sci. 17(10), 1155-1167.
- [75] Oh, H.T., Lee, S.M., Lee, W.C., Jung, R.H., Hong, S.J., Kim, N.K., Tilburg, C., 2008c, "Sustainability evaluation of shellfish production in Gamak Bay based on systems ecology", J. Environ. Sci. 17(9), 969-980.
- [76] Oh, H.T., Lee, W.C., Jung, R.H., Hong, S.J., Kim, N.K., Tilburg, C., 2008, "Sustainability evaluation for shellfish production in Gamak Bay based on the systems ecology 1. EMERGY evaluation for shellfish production in Gamak Bay", J. Environ. Sci. 17(8), 841-856.
- [77] Oh, H.T., Lee, W.C., Jung, R.H., Hong, S.J., Kim, N.K., Tilburg, C., 2008b, "Sustainability evaluation for shellfish production in Gamak Bay based on the systems ecology 2. environmental accounting for the improvement of the natural environment based on the EMERGY evaluation", J. Environ. Sci. 17(8), 857-869.
- [78] Oh, S.J., Park, J.S., Yoon, Y.H., Yang, H.S., 2009, "Variation analysis of phytoplankton communities in northern Gamak Bay, Korea", J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 15(4), 329-338.
- [79] Oh, Y.H., Lee, Y.W., Kim, T.H., 2018, "In situ production of dissolved organic carbon (DOC) by phytoplankton blooms (*Cochlodinium polykrikoides*) in the southern sea of Korea", J. Sea Res. 138, 19-23.
- [80] Oyster Hanging Culture Fisheries Corporatives, Oyster production statistics, <https://www.oyster-suhup.co.kr>, 2020 (accessed 2020. 4. 8).
- [81] Park, J.S., Yoon, Y.H., 2003, "Marine environmental characteristics by distribution of dinoflagellate cysts in the southwestern coastal waters of Korea 1. spatio-temporal distribution of dinoflagellate cysts in Gamak Bay", J. Korean Fish. Soc. 36(2), 151-156.
- [82] Park, J.S., Yoon, Y.H., 2017, "The relationship between germination of dinoflagellate cysts and vegetative cells in Gamak Bay", Korean J. Environ. Biol. 35(4), 501-514.
- [83] Park, J.S., Yoon, Y.H., Noh, I.H., 2004, "Estimation on the variation of marine environment by the distribution of organic mat-

- ter and dinoflagellate cyst in the vertical sediments in Gamak Bay, Korea”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng. 7(4), 164-173.
- [84] Park, J.S., Yoon, Y.H., Oh, S.J., 2009, “Variational characteristics of phytoplankton community in the mouth parts of Gamak Bay, southern Korea”, Korean J. Environ. Biol. 27(2), 205-215.
- [85] Park, S.E., Cho, K.D., Hong, C.H., Kim, D.S., Cho, K.W., 1999, “An effect of wind on circulation in Kamak Bay”, J. Korean Fish., Soc., 32(5), 674-679.
- [86] Park, S.J., 2003, “Wind effect on marine environment and oyster farms in Gamak Bay”, Master’s thesis, Chonnam National University, 1-80.
- [87] Park, S.J., 2012, “Sediment pollution and sedimentary environments characteristics in Gamak Bay determined by numerical experiments“, A doctoral dissertation, Chonnam National University, 1-121.
- [88] Park, Y.C., Choi, K.S., 2002, “Growth and carrying capacity of Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Kamak Bay, Korea”, Korean J. Environ. Biol. 20(4), 378-385.
- [89] Seo, H.S., Kim, D.S., 2014, “Numerical experiment on the drift diffusion of harmful algal bloom”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety, 20(4), 335-344.
- [90] Seo, H.Y., Lee, I.T., Yoon, Y.H., Choi, S.D. Lee., S.N., Han, M.I., Kim, B.S., Kang, Y.H., Lee, W.B., 2002, “Species composition and occurrence patterns of zooplankton in Gamag Bay”, Korean J. Environ. Biol. 20(2), 118-129.
- [91] Seo, Y.J., Kim, D.S., 1999a, “Distribution of anchovy school caught by the lift net and environmental factors in the Kamak Bay 1, relation between distribution of anchovy school and temperature and salinity”, Bull. Korean Soc., Fish., Tech., 35(3), 267-276.
- [92] Seo, Y.J., Kim, D.S., 1999b, “Distribution of anchovy school caught by the lift net and environmental factors in the Kamak Bay 2, relation between distribution of anchovy school and chlorophyll-a“, Bull. Korean Soc. Fish. Tech. 35(4), 377-385.
- [93] Shin, H.C., 1995, “Benthic polychaetous community in Kamak Bay, southern coast of Korea”, J. Korean Soc. Oceanogr. 30(4), 250-261.
- [94] Shin, H.H., Mizushima, K., Oh, S.J., Park, J.S., Noh, I.H., Iwat-aki, M., Matsuoka, K., Yoon, Y.H., 2010, “Reconstruction of historical nutrient levels in Korean and Japanese coastal areas based on dinoflagellate cyst assemblages”, Mar. Pollut. Bull. 60, 1243-1258.
- [95] Shin, H.H., Park, J.S., Kim, Y.O., Baek, S.H., Lim, D.I., Yoon, Y.H., 2012, “Dinoflagellate cyst production and flux in Gamak Bay, Korea: A sediment trap study”, Mar. Micropaleontology, 94-95, 72-79.
- [96] Shin, Y.K., Lim, J.H., Son, M.H., Kim, E.O., 2012, “Seasonal variation in biochemical composition and gonadal development of ark shell, *Scapharca broughtonii* (Bivalvia: Arcidae) from Gamag bay of Southern coast, Korea”, Korean J. Malacology, 28(1), 73-79.
- [97] Yamamoto, T., Furuya, K., 2008, Environmental restoration in the semi-enclosed waters, Koseisha-Koseigaku, Tokyo.
- [98] Yong, M.S., Soh, H.Y., Choi, S.D., Jung, C.S., Kim, S.Y., Lee, Y.S., 2006, “Effect of a low-oxygen layer on the vertical distribution of zooplankton in Gamak Bay”, Korean J. Environ. Biol. 24(3), 240-247.
- [99] Yoo, J.H., Hwang, D.J., Yoon, Y.H., Jeong, G.S., Go, H.J., 2003, “Initial adaptation of released black sea bream, *Acanthopagrus schlegeli* in Gamak Bay, southern coast in Korea”, J. Korean Fish. Soc. 36(4), 365-371.
- [100] Yoon, S.P., Jung, R.H., Kim, Y.J., Kim, S.S., Lee, J.S., Park, J.S., Lee, W.C., Choi, W.J., 2007, “Characteristics of benthic environment and polychaete communities of Gamak Bay, Korea”, J. Korean Soc. Oceanogr. 12(4), 287-304.
- [101] Yoon, S.P., Kim, Y.J., Jung, R.H., Moon, C.H., Hong, S.J., Lee, W.C., Park, J.S., 2008. “Benthic environments and macrobenthic polychaete community structure in the winter of 2005-2006 in Gamak Bay, Korea”, J. Korean Soc. Oceanogr. 13(1), 67-82.
- [102] Yoon, Y.H., 2000, “Variation characteristics of water quality and chlorophyll a concentration in the northern Kamak Bay, southern Korea“, J. Korean Environ. Sci. Soc. 9(5), 429-436.

Received 14 May 2020

Revised 6 July 2020

Accepted 9 July 2020