

## 광양만 해양환경 연구의 현황과 앞으로의 과제

이문옥<sup>1</sup> · 김종규<sup>2,†</sup> · 김병국<sup>3</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 조선해양공학과 명예교수

<sup>2</sup>전남대학교 조선해양공학과 교수

<sup>3</sup>한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장

### Marine Environmental Studies in Gwangyang Bay, Korea: Past, Present, and Future Direction

Moon Ock Lee<sup>1</sup>, Jong Kyu Kim<sup>2,†</sup>, and Byeong Kuk Kim<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>*Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong, 53007, Korea*

#### 요 약

본 연구에서는 광양만과 관련하여 지난 40여년간 한국학술지인용색인(KCI) 및 과학인용지수(SCI)에 게재된 105편의 학술논문을 분석하여 광양만 해양 환경의 과거와 현재의 모습을 진단하고, 앞으로 광양만의 환경 보전과 회복을 위해 필요한 연구과제를 모색하였다. 광양만은 만내 매립으로 인한 수면적의 축소로 만내 조위는 증가한 반면, 유속과 해수 교환율은 대체로 감소한 것으로 나타났다. 한편 만내 수질은 2등급 내지 3등급을 유지하고 있으나, 용존성 중금속과 입자성 미량금속, 지속성 유기오염물질 등의 농도가 공단 주변 해역에서는 상대적으로 높았다. 특히 POSCO 건설 후 섬진강 삼각주의 사질 퇴적상은 파괴되었고, 개발이 진행됨에 따라 퇴적물은 더욱 세립화하는 경향을 나타내었다. 이에 더하여 무산소환경의 출현과 중금속 및 내분비계 교란물질이 저층퇴적물과 서식생물에서도 발견되고 있다. 한편 만에 출현하는 어류도 과거에 비해 개체수나 출현종수가 전체적으로 감소하였고, 저서동물의 군집분포에 기초한 광양만의 저서환경은 다소 유기오염된 상태에 있는 것으로 나타났다. 이상에서 살펴본 바와 같이, 광양만의 해양환경은 개발 이전인 1980년대 초기에 비해 2020년 현재 물리 환경을 비롯한 수질환경, 저질-저서환경, 생물-생태환경 등에서 볼 때 전반적으로 악화된 것으로 나타났다. 따라서 앞으로의 광양만 연구는 이러한 환경 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방안을 찾는 데 집중해야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 광양만의 해양생태계를 고려한 환경친화적 개발과 보전방안, 즉, 지속가능한 개발 방안을 마련하기 위한 연구를 조속히 수행해야 할 것으로 생각된다.

**Abstract** – We diagnosed the past and present of Gwangyang Bay’s marine environments on a basis of analyzing academic articles quoted by Korea Citation Index as well as Science Citation Index over the last four decades and suggested for a solution to the preservation and restoration of the bay in the future. Gwangyang Bay proved that tidal levels increased but currents and seawater exchange rates decreased overall because of reclamations in the bay. On the other hand, the water quality kept the second or third class but concentrations of dissolved heavy metal, particulate trace metal, and persistent organic pollutant were relatively high near the industrial complex. In particular, a sandy delta facies of Seomjin River was destroyed after the construction of POSCO, and the sediments showed a tendency to be more fine grains with time. Furthermore, anoxia, high concentrations of heavy metal, and endocrine-disrupting chemical were also found in the seabed as well as inhabiting organisms. On the other hand, fish turned out to decrease in its number and species of appearance, and benthic environments were also in organic contaminated state, in terms of the distributions of benthos population. As a result, we realized that marine environments of Gwangyang Bay were generally deteriorated at present as of 2020. Therefore, it is judged that we will

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



have to focus on seeking for some measures able to fundamentally solve these environmental issues in the future. In addition, it is urgent to perform the research for an environmentally-friendly development, i.e. a sustainable development in consideration of marine ecosystems of Gwangyang Bay.

**Keywords:** Gwangyang Bay(광양만), Water quality(수질), Sedimentary environment(저서환경), Landfill site(매립지), Environmentally-friendly development(환경친화적 개발)

## 1. 서 론

한국 남해안의 중부에 위치하는 광양만은 동서의 길이가 약 27 km, 남북 방향의 폭이 약 15 km인 반폐쇄적인 만으로서(Park *et al.*[1984], Bae *et al.*[2014]), 묘도를 중심으로 만의 서쪽은 해저지형이 비교적 평탄한 반면 남쪽과 북쪽은 해저지형의 변화가 급하고 불규칙하다(Park and Lee[2008]). 또한 광양만은 지리적으로 남동쪽으로는 여수해만을 통해 남해상과 연결되고 동쪽은 노랑해협을 통해 진주만과 연결되어 있으며, 북서쪽은 서천과 동천, 그리고 북동쪽은 섬진강 하구와 연결되어 연간 약  $5.8-8.7 \times 10^8$ 톤의 담수(반면, Lim *et al.*[2003a]에 의하면  $28.8 \times 10^8$ 톤)와  $0.8 \times 10^6$ 톤의 부유물질이 만 내로 유입되고 있다(Park *et al.*[1984]). 만내 조석은 반일주조가 탁월하며, 창조시 여수해만으로 유입한 해수는 광양만의 내만과 섬진강 하구 및 노랑수도를 향해 분기되고, 낙조시는 반대방향으로 흘러나와 여수해만을 빠져 나가는 왕복성 유동특성을 보인다(KHOA, <https://www.khoa.go.kr>). 한편, 광양만내의 기수역인 섬진강 하구에 형성된 약 55 km<sup>2</sup>의 대사주를 중심으로 한 인근 해역은 오래전부터 김양식장과 자연산 패류 양식장으로 유명하였으며, 1965년에는 이 일대에서 백합, 꼬막, 굴 양식이 시작되었다(Won and Go[1975]). 광양제철소가 건설되기 전인 1980년대 초기와 2020년 현재의 광양만의 모습을 Fig. 1은 나타낸다. 약 40년전 광양만내 섬진강과 수어천의 하류에는 넓게 발달한 사주와 천해역이 묘도 우측까지 뻗어 있고 또한 묘도 좌측으로는 수심 5 m 이하의 천해역이 동천 하류역을 중심으로 넓게 자리하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 광양만에서는 1969년 호남정유공장의 가동을 시작으로 1970년대에는 여천화학단지, 1980년대(1982-1992)에는 광양제철소, 1990년대부터 2000년대에는 울촌산업단지 및 광양컨테이너부두, 그리고 2010년대에 들어 최근의 묘도 준설토 투기장 등의 개발과 시설확장에 따른 매립과 준설이 다수 이루어졌다(Won and Go[1975], Chung[2006], Yeosu Regional Office of Oceans and Fisheries (<https://yeosu.mof.go.kr>)). 그 결과, 광양만의 면적은 1973년에 233 km<sup>2</sup> 이었으나 2004년 현재 약 145 km<sup>2</sup>로 만 전체의 약 40%가 감소하였으며(Ryu[2003a], Kim and Lee[2004]), 이에 따른 퇴적환경도 변화되었을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 매립으로 인해 만내의 흐름이 저하하고 각종 산업시설로부터 나오는 배수나 생활하수로 인한 수질오염이 가중되어 해양생태계도 상당한 위협을 받았을 것으로 판단된다(Wui *et al.*[1993], Lee *et al.*[1998]). 이와 같은 상황에서 해양수산부는 2000년 2월에 광양만을 특별관리해역으로 지정하였다(<https://www.meis.go.kr>).

지금까지 광양만과 관련하여 수질 및 저질, 수치모델링, 매립지,

동식물 플랑크톤, 어류, 해조류, 저서동물, 해양미생물, 조류(새), 경제적 가치 평가, 바다벌레 등 다양한 분야에 걸친 연구가 이루어졌다(Table 1). 그러나 이들 연구의 대부분은 만의 개발로 인해 발생한 환경문제의 현상 규명에만 집중했을 뿐, 광양만의 보다 나은 환경을 위한 개선 대책이나 대안을 제시하지는 못하였다. 특히, 지속 가능한 개발을 위해 광양만을 환경친화적으로 보전하거나 회복하기 위한 방안을 제시한 연구는 거의 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서는 먼저, 지난 40여년간 수행된 기존의 광양만 연구 결과에 기초하여 광양만 환경의 실상을 진단, 평가하였다. 다음으로 지금까지 이루어진 광양만 연구의 한계와 문제점을 파악하고 앞으로 광양만 해양환경의 개선과 보전을 위해 필요한 과제가 무엇인가에 대하여 검토하였다.

## 2. 자료 및 방법

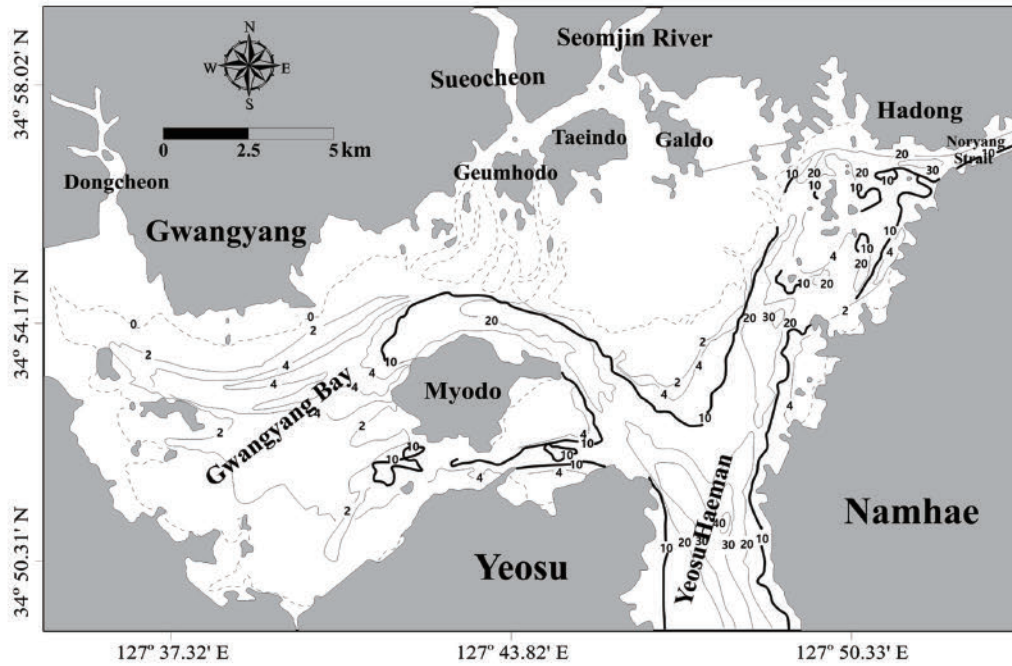
본 연구에서는 1975년부터 2019년까지 광양만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI) 및 과학인용지수(Science Citation Index; SCI)에 게재된 105편의 논문을 분석자료로 사용하였다. 학술지 검색시는 논문의 주제어로 “광양만”, 또는 “Gwangyang Bay (Kwangyang Bay)”가 포함되는 문헌을 선택하였다. 이들 자료로부터 언제 어떤 주제로 광양만의 연구가 이루어져 왔는지 그 변천과정을 조사하고, 이들 조사결과에 근거하여 광양만 환경의 현재 모습을 평가하였다. 또한, 지금까지 이루어진 광양만 연구의 한계와 문제점을 진단하여 광양만의 해양 환경을 개선하고 보전하기 위해 앞으로 해야 할 과제가 무엇인가에 대하여 검토하였다.

## 3. 결과 및 고찰

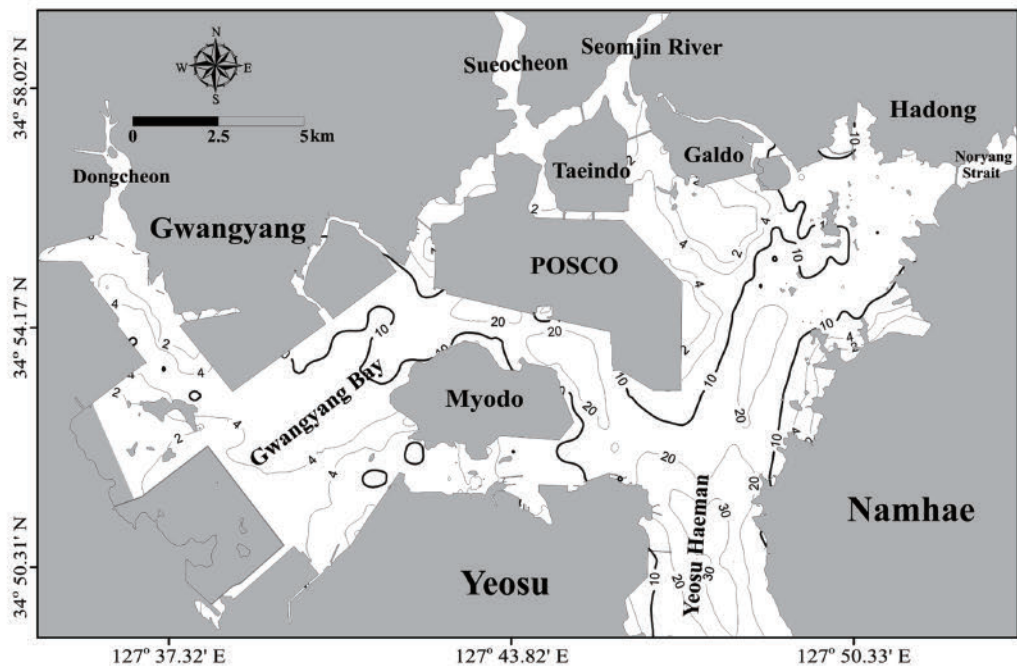
### 3.1 지금까지 수행된 광양만 연구의 개요

Table 1은 1975년 이래 수행된 광양만 연구의 주제와 각 연대별 논문의 발표건수를 나타낸다. 이 결과에 따르면, 광양만 연구는 만내에서 각종 개발사업이 진행된 1990년대 초부터 2010년대 초기까지 가장 활발히 이루어진 것을 알 수 있다. 이것은 이 기간 중 발생한 해양환경적 문제에 대처하기 위한 연구 활동의 산물로 생각된다. 이들 연구를 주제별로 살펴보면, 어류에 관한 연구가 27건으로 가장 많았고, 다음으로 퇴적환경(또는 퇴적상) 23건, 수치모델링 14건, 수질 12건, 동식물 플랑크톤 10건, 매립지 6건, 해조류 5건, 해양미생물 3건 등으로 나타났다. 그 밖에도 개발사업과 관련





(a) Before the development (1983)



(b) After the development (2020)

Fig. 1. Sketch of Gwangyang Bay when (a) before the development and (b) after the development.

한 경제적 가치 평가가 2건, 조류(새)가 2건, 저서동물과 바다벌레 연구가 각각 1건이었다. 이들 연구 중 퇴적환경이나 수치모델링, 수질, 또는 매립지의 환경과 관련한 연구가 비교적 많은 것은 광양만의 개발에 따른 매립과 준설이 환경에 미치는 영향 검토가 중요하였기 때문으로 생각된다. 또한 광양만에서는 어류에 관한 연구가

가장 많이 이루어진 것을 알 수 있다. 이것은 광양만내 대도 주변의 잘피밭(*Zostera marina* bed)에 서식하고 있는 다양한 어종의 식성과 관련한 연구가 특정 연구그룹에 의해 집중적으로 이루어진 것에 기인한다(Huh and An[1997], Huh and Kwak[1997a], Huh and Kwak[1997b], Huh and Kwak[1997c], Huh and An[1998], Huh

**Table 1.** Themes of the research related to Gwangyang Bay

Theme	Year	1975 -1980	1981 -1985	1986 -1990	1991 -1995	1996 -2000	2001 -2005	2006 -2010	2011 -2015	2016 -2020	Total
Numerical modelling	Nutritional structure						1				14
	Water quality pollution				2		1		1	1	
	Seawater behavior		1		1		3	3			
References: Park <i>et al.</i> [1984]; Choi <i>et al.</i> [1992]; Koo <i>et al.</i> [1993]; Han[1995]; Choo[2002]; Choo <i>et al.</i> [2002]; Lim <i>et al.</i> [2003b]; Kim and Lee[2004]; Kang[2005]; Chung[2006]; Chung[2008]; Park and Lee[2008]; Chung and Lee[2014]; Kim[2016]											
Water quality based on field observations	General information/pollution	1				2	4	1	1		11
	Ecosystem impact	1				1					
References : Won and Go[1975]; Lee <i>et al.</i> [1976]; Yu <i>et al.</i> [1998]; Joo <i>et al.</i> [1999]; Chin <i>et al.</i> [2000]; Lim <i>et al.</i> [2003a]; Choi <i>et al.</i> [2004]; Kim <i>et al.</i> [2004]; Lee <i>et al.</i> [2004]; Lee and Kim[2009]; Son <i>et al.</i> [2011]											
Sedimentary environment	Heavy metal pollution						1	3			25
	Sediment contamination							7	3	1	
	Sedimentary facies				2	2	3	1			
	Suspended sediments				1		1				
References : Cho[1991]; Kim and Kang[1991]; Kim and Kim[1991]; Kang and Lee[1996]; Lee <i>et al.</i> [1996]; Lee <i>et al.</i> [1999]; Kim and Park[2001]; Kwak <i>et al.</i> [2001]; Choi <i>et al.</i> [2003]; Ryu[2003a], Ryu[2003b]; Cho <i>et al.</i> [2004]; Chung <i>et al.</i> [2004]; Hong <i>et al.</i> [2004]; Hyun <i>et al.</i> [2004]; Jeong <i>et al.</i> [2003]; Kim <i>et al.</i> [2004]; Kim and Lee[2004]; Kwon <i>et al.</i> [2004]; Li <i>et al.</i> [2004]; Chung <i>et al.</i> [2006]; Han and Park[2006]; Ryu and Sin[2006]; Yoon and Seo[2007]; Jeong <i>et al.</i> [2011]											
Fish	Feeding habits				1	9	6				26
	Maturation/spawning						2				
	Species composition/resources distribution				1	5				2	
References : Cha and Park[1994]; Park and Cha[1995]; Park <i>et al.</i> [1996]; Cha and Park[1997]; Huh and An[1997]; Huh and Kwak[1997a]; Huh and Kwak[1997b]; Huh and Kwak[1997c]; Huh and An[1998]; Huh and Kwak[1998b]; Huh and Kwak[1998c]; Huh and Kwak[1998d]; Huh and Kwak[1998e]; Huh <i>et al.</i> [1998a]; Huh <i>et al.</i> [1998b]; Huh and Kwak[1999]; Cha and Park[2001a]; Cha and Park[2001b]; Kwak and Huh[2002]; Kwak and Huh[2003a]; Kwak and Huh[2003b]; Baeck and Huh[2004]; Baeck <i>et al.</i> [2004]; Jeong <i>et al.</i> [2004]; Chu <i>et al.</i> [2019]; Han <i>et al.</i> [2019]											
Landfill site	Soil environment						4	1			5
References : Kim <i>et al.</i> [2001]; Kim <i>et al.</i> [2002]; Kim and Park[2004]; Kim and Kim[2005]; Kim[2006]											
Phytoplankton	Cyst						1				4
	Community				1		1		1		
References : Cho <i>et al.</i> [1994]; Kim <i>et al.</i> [2003]; Lee <i>et al.</i> [2004]; Bae <i>et al.</i> [2014]											
Zooplankton	Community				1	1	1		2	1	6
References : Soh and Suh[1993]; Cha and Park[2000]; Jang <i>et al.</i> [2004]; Baek <i>et al.</i> [2011]; Baek <i>et al.</i> [2013]; Lee <i>et al.</i> [2017]											
Benthos	Community						1				1
References : Choi <i>et al.</i> [2003]											
Microbial population	Ecosystem impact				1	1					3
	Species distribution				1						
References : Wui <i>et al.</i> [1993]; Hong <i>et al.</i> [1994]; Park <i>et al.</i> [1998]											
Algae/Seaweed	Flora	1		1		1					5
	Community							1			
	Laver production			1							
References : Lee <i>et al.</i> [1977]; Song[1986]; Hong <i>et al.</i> [1987]; Huh and Kwak[1998a]; Choi and Huh[2008]											
Arenicola marina							1				1
References : Yun <i>et al.</i> [2002]											
Evaluation of economic value for development projects								2			2
References : Kang <i>et al.</i> [2006]; Choi <i>et al.</i> [2007]											
Bird						2					2
References : Hahm[1999]; Kim and Hwang[1999]											
Total		3	1	2	12	25	40	12	6	4	105



and Kwak[1998a], Huh and Kwak[1998b], Huh and Kwak[1998c], Huh and Kwak[1998d], Huh and Kwak[1998e], Huh *et al.*[1998a], Huh *et al.*[1998b], Huh and Kwak[1999], Kwak and Huh[2002], Kwak and Huh[2003a], Kwak and Huh[2003b], Baeck and Huh [2004]).

전술한 이들 연구 주제는 광양만이 가진 특유의 생물환경(예를 들면 잘피류의 서식), 물리 환경(예를 들면 매립지 준설로 인한 흐름과 지형의 변화), 산업 환경(예를 들면 광양제철소, 광양컨테이너 터미널, 각종 산업단지 등을 갖춘 물류산업단지)이 서로 공존하고 있다는 사실과 밀접한 관련을 가지고 있다. 이하에서는 Table 1에 제시된 지금까지의 연구결과를 광양만의 물리환경(해수유동, 물질 확산, 조석, 조류, 해수교환 등), 수질환경(해수, 부유물질 등), 저질·저서환경(퇴적상, 해저 퇴적물 등), 생물·생태환경(어류, 해조류, 동식물 플랑크톤, 저서동물, 해양미생물, 해양바이러스, 바다벌레류, 생태계 모형 등) 및 기타 환경(매립지 식재 지반 환경, 조류(새), 개발사업의 경제적 가치 평가 등)으로 분류(categorizing)하여 광양만의 개발에 따른 해양환경의 변화와 그 특징을 고찰하였다. 단 이 경우 두 가지 이상의 복합적인 조사 연구가 이루어진 경우 또는 연구 내용상 어느 범주에 넣을 것인가 그 경계가 불명한 경우도 있으므로 여기서는 편의상 연구자가 임의로 분류하였음을 밝혀 둔다.

### 3.2 물리환경

Choi *et al.*[1992]은 수심 적분한 2차원 조석방정식 수치모형을 사용하여 부두건설에 따른 광양만내의 유황변화를 검토하였다. 그 결과, 광양만내의 수면적의 감소로 인해 만내로 유입하는 조석량이 작아졌고, 이로 인해 묘도를 중심으로 한 만외측에서는 조차가 약간 증가한 반면, 만내측에서는 전반적으로 수위가 하강하는 것으로 나타났다. 또한 유속은 전체적으로 건설 전에 비해 작아졌으나, 광양 동천에서 만으로 유입하는 수로에서는 수로단면의 축소로 유속이 증가한 것으로 나타났다. 한편 대조기시 광양만으로 유입하는 수어천, 광양 동천, 그리고 만의 외부경계인 섬진강으로부터의 홍수량을 100년 빈도로 계산한 결과, 섬진강하구에서는 약 1.2 m, 그리고 광양만 내측의 수면이 약 0.3 m 상승하였다. Choo[2002]와 Choo *et al.*[2002]은 진단다중 수치모형을 이용하여 매립에 따른 광양만내의 유동변화를 수치모의하였다. 이들의 결과에 따르면, 앞으로 10년 후 광양만 개발계획이 완료되면 조류에너지는 약 10%, 마찰손실은 약 50%, 조석잔차류는 약 35%가 각각 감소하는 것으로 예측하였다. 특히 이 때가 되면 성층강화와 잔차류 유속의 감소로 오염이 크게 진행될 가능성이 있다고 이들은 주장하였다. 한편, 이들 결과에서는 만의 서쪽 천해역과 남쪽 만구에서의  $3\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  및  $5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  크기의 밀도류와 표층(수심 0-3 m)에서의 취송류, 그리고 그 아래 수층에서 역류하는 보충류가 형성되는 것으로 나타났다. Chung[2008]은 광양만 수면적의 약 40%가 매립되어 해역이 축소된 이후 만내 수리현상의 변화를 유한수치모형 RMA2에 의해 검토하였다. 그 결과, 만내 조위는 광양만 매립 후 증가한 반면 유속은 크게 감소한 것으로 나타났다. Park and Lee[2008]는 수심 적분

한 2차원 수치모형(DIVAST)을 사용하여 광양만내의 해수유동을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 섬형태 매립지 건설전후에 있어서 광양만 거의 전역에 걸쳐  $\pm 5\text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$  이상의 유속 변화가 나타났으며, 해수교환율은 매립 전에 비해 감소하는 경향을 보였다. Kim and Lee[2004]는 2003년 9월 12일에 태풍 “매미”가 남해안으로 상륙하면서 발생한 광양만의 해일고를 산정한 결과, 고조위 편차는 93-108 cm이고, 최대 조위편차는 176-196 cm로 나타났다. 이 최대조위편차는 기압강하에 의한 해면상승이 59 cm, 섬진강 홍수로 인한 수위 상승이 4.5 cm, 그리고 외해로부터 해일과의 전파 및 강풍에 의한 해면 상승이 113-132 cm으로 각각 분석되었다. 한편 Han[1995]은 조류에 관한 2차원 수치모형인 Eulerian-Lagrangian model을 사용하여 1993년 9월 27일 광양만에서 발생한 유류 유출사고에 의한 유류의 확산을 수치모의하여 현장의 관측자료와 유사한 결과를 얻었다. 또한 Chung[2006]과 Chung and Lee[2014]는 유한요소 수치모형인 RMA2, RMA4를 사용하여 섬진강을 통해 광양만으로 유입한 SS의 확산과 수역의 축소에 따른 만내에서의 COD의 확산변화를 각각 검토하였다. 그 결과, SS와 COD의 확산은 광양만 개발 전에 비해 그 범위가 크게 감소한 것으로 나타났다.

이상의 결과에 따르면, 광양만의 물리환경은 만내 매립으로 인한 수면적의 축소로 만내 조위는 증가하는 반면, 유입하는 조석량과 유속, 해수교환율 등은 전반적으로 감소(곳에 따라서는 부분적으로 증가)하였고, 또한 만내에서의 물질(SS, COD)의 확산은 위축되는 것으로 나타났다. 특히 Choo[2002]는 앞으로 광양만 개발계획이 완료되는 10년 후는 성층강화와 잔차류 유속의 감소로 만내 오염이 심화될 가능성을 주장하였다.

### 3.3 수질환경

먼저, 광양만 해수 수질의 일반항목과 관련한 내용을 살펴보면 다음과 같다. Won and Go[[1975]는 광양만내 호남정유공장으로부터 누출되는 유류와 배수로 인한 백합양식장의 피해를 입증하기 위해 1973년 8월-10월에 걸쳐 유동 및 수질의 현장조사를 실시하였다. 그 결과, 백합양식장에서 화학적산소요구량(COD)과 n-핵산가용물질량의 농도가 각각  $0.68\text{-}2.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 와  $0.7\text{-}2.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 로, 공장에 가까운 수역일수록 이들의 농도가 증가하고 있어서, 호남정유공장의 폐수 및 누출류(COD와 n-핵산가용물질량의 농도는 각각  $12.68\text{-}25.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  및  $5.5\text{-}42.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 이었음)가 그 원인인 것으로 추정하였다. 또한 Lee *et al.*[1976]은 1974년 5월부터 1975년 5월에 걸쳐 광양만내 섬진강 하구부근의 양식장에 있어서의 수질, 저질토, 백합 중 유기염소계 농약잔류량을 조사하였다. 그 결과, 수질 중 잔류농약의 양은  $0\text{-}48\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 로, 계절 및 위치에 따라 변화하였고, 저질토 중의 잔류농약은 상층토보다 하층토에 더 많았다. 반면, 백합 중 잔류농약은  $0.1\text{-}18\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로, 3년생에서 최고치에 달한 후 4년째에는 급감하였다. 한편 Koo *et al.*[1993]은 광양만을 3개의 BOX로 분할하여 Box내의 각 농도는 완전혼합으로 가정하여, 수질을 분석한 결과, 화학적산소요구량(COD) 농도는 전 해역이 환경기준치 2등급( $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  이하)을 초과(예를 들면 여름: 4.5-



8.0 mg·L<sup>-1</sup>, 가을: 5.5-8.2 mg·L<sup>-1</sup>)하고 있는 것으로 나타났다. 반면, Yu *et al.*[1998]은 1996년 7월부터 1997년 4월에 걸쳐 광양만내 17개 정점에서 채집된 말뚝성게(*Hemicentrotus pulcherrimus*)를 이용한 생물검정시험을 통해 수질관정을 시도하였다. 그 결과, 광양만의 해수수질은 COD, TN, TP, 생물학적 검정결과 등을 종합하여, 광양만의 수질등급을 2등급 내지 3등급(4.0 mg·L<sup>-1</sup>이하)에 해당한다고 판단하였다. 또한 Lim *et al.*[2003a]과 Lim *et al.*[2003b]은 국립수산과학원의 조사자료 및 수치모형(WASP5)을 사용하여 광양만의 수질현황과 주요 유입오염원을 조사하였다. 그 결과, 광양만의 주요 오염원은 섬진강, 수어천, 광양서천 등이며, COD 농도의 경우는 난분해성 오염물질의 증가로 이에 대한 대책마련이 필요한 것으로 나타났다. 또한 광양만의 수질 개선에는 섬진강의 수질을 개선하는 것이 그 효과가 가장 크지만 동시에 여천공단이나 광양제철소의 폐수처리장의 처리효율을 개선한다면 수질의 개선효과는 더 커질 것으로 예측하였다. Kim *et al.*[2004] 또한 2003년 9월 25일부터 1주일간 광양만 유역의 오염실태와 원인을 조사한 결과, 여수산단 및 광양제철소 주변해역에서의 COD의 농도는 각각 1.19-3.09 mg·L<sup>-1</sup>(평균: 2.20 mg·L<sup>-1</sup>)와 1.23-2.76 mg·L<sup>-1</sup>(평균: 2.02 mg·L<sup>-1</sup>)로 나타났다. 그러나 이들 공장의 하수나 배출수가 유입하는 수역에서의 농도는 상대적으로 높았고, 또한 광양만에서의 Cu, Cd, Pb 등 중금속의 평균 농도는 78.99 µM로, 배출기준인 20.0 µM를 상회하였다. 한편 Lee *et al.*[2004]이 2003년 4월부터 2004년 5월까지 광양만의 식물플랑크톤 증식의 제한영양염에 대한 장기적 계절변동을 조사한 결과에 따르면, 용존무기질소(DIN)의 농도는 섬진강 하구에서 가장 높았고, 용존무기인(DIP)의 농도는 8-12월에 비교적 높았다. 이것은 광양만에서의 DIN과 DIP의 농도의 지배적 인자가 섬진강임을 시사한다. 또한 식물플랑크톤 증식의 제한 영양염은 4월-9월 사이와 이듬해 5월까지는 인으로서, DIN/DIP는 16 이상이 될 가능성이 많고, 그 외 시기에는 질소로서, DIN/DIP는 16 이하가 될 가능성이 많은 것으로 추론되었다. 다음은 만내에서의 입자성 또는 용존성 부유물질의 동태와 관련한 내용을 살펴보면 다음과 같다. Park *et al.*[1984]은 수심 적분한 2차원 수치모형을 사용하여 여수해만을 포함한 광양만내의 부유퇴적물의 수송률을 예측하였다. 그 결과, 1 조석주기 동안의(수심 적분한) 순간이동률은 섬진강 상류방향으로 0.9×10<sup>3</sup>kg·m<sup>-1</sup>, 여수해만 방향으로 5.6×10<sup>3</sup>kg·m<sup>-1</sup>, 진주만 방향으로 4.0×10<sup>3</sup>kg·m<sup>-1</sup>로 각각 유출하는 것으로 나타났다. 따라서 이들의 결과에 의하면 광양만내에서 발생한 부유물질의 50% 이상이 여수해만 쪽으로 유출하는 것을 알 수 있는데 이것은 아마 광양만내의 조류의 주류 방향을 따라 물질이 가장 많이 수송되고 있기 때문으로 생각된다. 반면 섬진강 상류방향으로의 퇴적물의 수송률이 상대적으로 적은 것은 남하하는 섬진강 하천수의 영향 때문일 것으로 추정된다. 반면, Kim and Kang[1991]은 여수해만과 광양만 입구에서 측정된 조류와 부유퇴적물의 분석을 통해 만내의 부유퇴적물의 수치균형을 조사하였다. 그 결과, 조류에 의한 만내로의 세립퇴적물의 순유입량은 약 5.66×10<sup>5</sup>kg·day<sup>-1</sup>로서, 이것이 만의 서쪽에 퇴적할 경우의 퇴적률은 약 0.115 cm·year<sup>-1</sup>로 추산

되었다. 한편 Kim and Lee[2004]은 섬진강하구, 여수해만 입구, 남해대교 등 광양만의 3개 유출입구에 RCM9(Aanderra Co.) 유속계를 설치하여 대조기인 2003년 3월 18일부터 20일까지 각 단면에서 13시간 연속관측(30분 간격으로 표, 중, 저층)을 실시하여 부유퇴적물의 수지교환을 조사한 결과, 1조석주기 동안 이들 3개 단면에서의 유출량은 섬진강 상류로 0.09×10<sup>3</sup>kg·m<sup>-1</sup>, 여수해만으로 5.6×10<sup>3</sup>kg·m<sup>-1</sup>, 진주만으로 4.0×10<sup>3</sup>kg·m<sup>-1</sup>이 각각 유출되어, 세 정점 모두 광양만 외부로의 유출이 우세한 것으로 나타났다. 결과적으로 부유퇴적물의 이동 방향과 표층퇴적물 조직과의 연관성으로 볼 때 상대적으로 조립하고 분급이 불량한 만내로부터 세립하고 분급이 양호한 만외로 부유퇴적물의 이동이 예상되었다. 또한 Lee and Kim[2009]은 2006년 8월 광양만 입구의 3개 단면에서 측정된 부유입자의 입도특성과 ADV의 유속계의 유속성분을 분석한 결과, 광양만과 여수해만에서의 부유물질은 동쪽으로의 이동에 비해 서쪽으로의 이동이 약 3배가 더 빠른 것으로 나타났다. 또한 부유물질은 만의 남쪽, 즉 여수해만을 통해 교환되는 이동률이(POSCO를 중심으로 한) 만의 동쪽과 서쪽을 통해 교환되는 이동률에 비해 상대적으로 우세하였다. 한편 Joo *et al.*[1999]은 1996년 7월부터 1997년 4월까지 광양만내 17개 정점에서 계절별 채수를 통해 19종의 휘발성 유기화합물(VOCs)을 분석한 결과, 농도가 각각 0.6-49.9 µg·L<sup>-1</sup>와 0.42-48.3 µg·L<sup>-1</sup>인 chloroform과 toluene을 검출하였으며, 이들 물질의 검출빈도는 다른 VOCs에 비해 높게 나타났다. 또한 toluene은 수온과 높은 상관을 보인 반면, benzene은 toluene, *m*, *p*-xylene, ethylbenzene 등과 높은 상관을 보였다. 이러한 결과는 광양만에서 VOCs의 배출이 같은 시기에 이루어지고 있음을 시사하였다. 또한 Chin *et al.*[2000]은 1997년 8월부터 1998년 5월까지 4회에 걸쳐 채수한 시료를 통해광양만의 용존성 및 입자성 미량금속의 거동과 분포를 조사한 결과, 표층수 중의 용존성의 Co와 Fe는 섬진강을 통한 유입이 많은 반면, 용존성의 Zn와 Cd는 모든 계절에 여천공단 주변의 해역에서 현저히 높았다. 또한 Cu, Ni, Pb 등도 담수로부터의 유입보다는 만내의 지역적인 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 반면, 해수 중 입자성 미량금속의 농도는 여천공단에 인접한 지역과 수어천 입구에서 높았으며, 부유물질 농도와 미량금속의 함량과는 대체로 양(+)의 상관을 보였다. 따라서 이들의 결과로부터, 광양만에서 발견되는 Co와 Fe와 같은 일부 중금속을 제외한 대부분의 용존성 중금속은 여천공단이나 광양제철소와 같은 각종 산업시설에서 유래되었을 가능성을 배제하기 어렵다. Son *et al.*[2011]은 2010년 광양만내 20개 정점에서 4계절에 걸쳐 COD, 클로로필 *a* (Chl *a*), 대장균 *Escherichia coli*를 조사한 결과, COD와 Chl *a*의 농도는 춘계와 하계에 높았고, 특히 Chl *a* 농도는 섬진강 가까운 곳이나 수계의 혼합이 적은 지역이나 산업단지, 또는 대도시가 인접한 지역에서 높은 것으로 나타났다. Kim[2016]은 3차원 생태수치모형을 사용하여 광양만에서의 지속성 유기오염물질 중의 하나인 PFOA(Ammonium Perfluorooctane)의 거동을 수치모의한 결과, 육상으로부터의 유입부하가 집중하고 있는 POSCO와 여천공단 주변해역에서 PFOA의 농도가 높았다. 또한 육지로부터



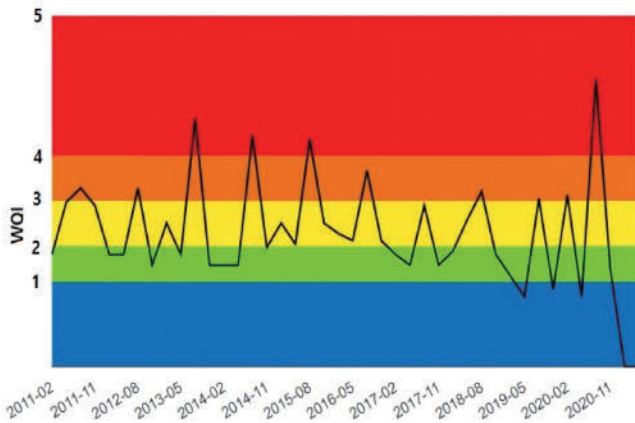


Fig. 2. WQI variations of Gwangyang Bay with year (<https://www.meis.go.kr>).

터의 PFOA의 오염 부하를 30%와 50%를 줄이면, 만의 중앙부에 있어서의 용존성 PFOA의 농도를 각각  $4 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 와  $2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 한편, Fig. 2는 해양환경포털(<https://www.meis.go.kr>)에 공개된 지난 10년간의 광양만의 수질평가등급(WQI)을 연변화를 보여준다. 이 결과에 의하면, 광양만의 수질은 하계인 8월에는 나빠지고 추계나 동계인 11월과 2월에는 좋아지는 등 계절변화를 보이지만, 전체적으로는 2등급내지 3등급을 유지한 채 여전히 수질은 개선되지 않은 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 광양만의 수질환경은 COD, TN, TP, 생물학적 및 수질 등급평가 등으로 볼 때, 2등급 내지 3등급의 수질을 유지하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 이들 수질의 일반항목을 비롯하여 Zn, Cd, Cu, Ni, Pb 등과 같은 용존성 중금속과 입자성 미량금속, 지속성 유기오염물질(PFOA)의 농도가 공단 주변 해역에서 상대적으로 높게 나타나 앞으로 만내 수질개선을 위한 종합적인 대책이 필요할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 Lim *et al.*[2003a]의 결과에서 알 수 있듯이, 여전히 광양만의 주요 오염원은 섬진강을 비롯한 수어천이나 서천 등으로 나타나고 있으므로 육수 유입에 의한 오염부하의 삭감을 위한 대책도 함께 마련되어야 할 것으로 생각된다.

### 3.4 저질 저서환경

광양만의 퇴적상을 규명하기 위해 Cho[1991]는 미고결 퇴적층의 코어시료를 채취하여 실험과 수치적 해석을 통해 퇴적물의 입도분포 및 역학적 특성을 조사하였다. 먼저 그의 실험 결과에서는 퇴적물의 공극율이 퇴적층의 깊이에 따라 불규칙한 변화를 보였는데, 이는 자체하중에 의한 자연 압밀이 크지 않음을 의미하였다. 또한 공극수압이 해수의 압력에 의한 역학적 응력보다 커서 일정 깊이에서는 퇴적층의 유효응력이 인장력으로 반전되어 퇴적물 조직이 내부적으로 재구성될 가능성을 시사하였다. 또한 Lee *et al.*[1996]은 1995년 광양만과 여수해만의 94개 정점에서 퇴적물을 채취하여 퇴적환경을 조사한 결과, 광양만의 퇴적환경은 퇴적물과 점토광물의

분포 특성에 따라 묘도서측지역과 묘도동측·여수해만역의 두 해역으로 구분되었다. 즉, 광양제철소의 건설 후 섬진강 삼각주의 사질 퇴적상은 파괴되어 광양제철소 건설 전에 비해 세립화하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 광양제철소의 건설이 섬진강에서 운반되어 온 퇴적물의 확산 및 퇴적작용에 영향을 미친 것을 반증하였다. 한편 Lee *et al.*[1999]은 광양만 해저에서 채취한 점성토 시료를 분석하여 광양만 점토의 자연함수비가 38.3-84.6%, 액성지수가 0.71-0.98, 과압밀비가 1.06-1.60로 각각 나타나, 광양만의 저질은 실질적인 정규압밀상태에 있는 것으로 판단되었다. 또한 Kim and Kim[1991]은 만내 17개 정점에서 깊이 0.7 m까지 코어를 채취하여, 미고결 퇴적물의 음향학적 특성을 조사한 결과, 깊이 0.4 m 이하에서 광양만 퇴적물의 음파전달속도는 평균  $1,521 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 로서, 북태평양 대륙붕 퇴적물보다 약 20-40  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 정도가 더 느렸다. 이 결과는 Hamilton [1970]이 모형으로 사용한 북태평양 대륙붕 및 대륙사면 지역과는 퇴적환경이 다르고 또한 세립질 퇴적물의 함량도 더 많았기 때문으로 판단되었다. 한편 Choi *et al.*[2003]은 수심, 표층퇴적물 및 탄성과 자료들을 바탕으로, 광양만의 최근 지형변화와 후기 제4기 퇴적층의 발달양상을 조사한 결과, 만의 서쪽지역에는 펄질의 표층퇴적물이 분포하는 반면, 동쪽지역에는 모래질의 펄 퇴적물이 분포하였다. 또한 탄성과 단면도상에서 광양만의 퇴적층은 기반암위에 두 개의 퇴적층서, 상부(Unit 1)와 하부(Unit 2)로 구성되어 있으며, 이들 퇴적층서는 중간반사면(reflector-M)에 의해 부정합적인 경계를 이루고 있었다. 즉, 상부 층서는 섬진강하구에서 여수해협을 향해 전진하는 퇴적양상을 보인 반면, 하부 층서는 광양만의 수로지역에 집중 분포하며, 저해수면 동안 쌓인 하천기원 퇴적층으로 판단되었다. 또한 Ryu[2003a; 2003b]는 광양만의 표층퇴적물과 부유퇴적물을 조사한 결과에 의하면, 표층퇴적물은 광양만이 개발되기 이전에는 섬진강 삼각주를 중심으로 서쪽에서는 세립해지며 동-서 방향의 분포를 보였으나, 광양제철소 건설 이후는 섬진강 삼각주가 파괴되고 동-서 방향의 분포로 변화한 것으로 나타났다. 또한, 광양 컨테이너부두와 각종 산업단지가 조성된 최근에는 동-서 방향의 분포가 파괴되고 남-북 방향의 분포로 변화하였으며, 만의 남서쪽을 중심으로 평균입도가 뚜렷하게 세립해지는 경향을 보였다. 그는 이와 같은 퇴적상의 변화가 광양만 개발에 따른 조류에너지의 감소 때문이며, 이러한 세립화는 만의 개발이 진행됨에 따라 더욱 가속화할 것으로 판단하였다. 또한 그는 광양만 조간대의 퇴적물이 여름에는 침식되고, 다른 계절에는 퇴적되는 것으로 판단하였으며, 이러한 결과는 만내에서는 파랑발달이 억제되고 창조류가 상대적으로 우세한 조류 때문이라고 주장하였다. 한편 Hyun *et al.*[2004]은 2001년부터 2003년에 걸쳐 광양만 및 여수해만의 총 110개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 퇴적학적, 지화학적 특성을 조사하였다. 이들의 결과에 따르면, 이들 두 해역의 퇴적상은 5개 퇴적상, 즉 니질, 사니질, 사질, 니사질, 역사질로 분류되었으나, 광양만은 니질이 상대적으로 우세하였다. 또한 유기물의 C/N, C/S에 근거하면, 이들 해역 중 일부지역이 무산소 환경에 있으며, 특히 총유기탄소(TOC)와 황화수소의 함량이 높고 산화환원에 민감한 원소가



농축된 퇴적물이 묘도 안쪽에서 나타나, 이 지역이 유기 오염된 지역임을 나타내었다. 한편 Ryu and Sin[2006]이 호안 건설후 광양만내 조간대에서의 퇴적물의 분포와 그 변화를 조사한 결과에 의하면, 퇴적물의 평균 입도는 가을에는 조립하나, 타 계절에는 세립해지는 등 입도의 계절변화를 보였다. 그 결과, 봄에는 퇴적하고 여름과 가을에는 주로 침식되어 호안 건설 전인 2001-2003년 동안 관측된 퇴적 형태와 유사하게 나타났다. 그들은 이러한 퇴적상의 변화가 호안건설에 따른 수류의 변화 때문인 것으로 추론하였다. 한편 Kang and Lee[1996]가 광양만내 공단 연안에서의 미량금속에 의한 오염을 조사한 결과에 따르면, Pb의 평균 퇴적률은  $0.68 \text{ cm} \cdot \text{year}^{-1}$ 였으며, 또한 퇴적물 조성은 점토질 실트가 우세한 것으로 나타났다. 이들이 측정한 Pb의 퇴적률은 전술한 Kim and Kang(1991)이 추산한 세립퇴적물(부유퇴적물)의 퇴적률  $0.115 \text{ cm} \cdot \text{year}^{-1}$ 에 비해 훨씬 큰데, 이것은 아마 두 물질간의 중량의 차이 때문으로 판단된다. 또한 Co, Cu, Zn 등의 미량금속의 농도는 표층에 가까울수록, 그리고 내만일수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 Kim and Park[2001]은 1996년 2월부터 7월에 걸쳐 만내 12개 정점에서 채취한 해수와 퇴적물의 시료를 분석한 결과에 따르면, 양식장이 밀집한 지역이나 선박의 출입이 빈번한 곳, 또는 해수교환이 원활치 못한 곳 등에서 해수와 퇴적물, 생물체내의 유기주석화합물(TBT)의 농도가 높았다. 특히, 퇴적물내에 서식하는 바지락에서 TBT의 농축 정도는 약 20%정도 더 높았다. 뿐만 아니라, 잠골과 바지락에 있어서의 TBT 농도의 계절변화는 이들의 산란시기와 일치하였는데, 이것은 방란, 방정이 생물체내 유기주석화합물의 제거 기작의 하나의 요인임을 암시하였다. 반면, Kwak et al.[2001]은 1999년 3월부터 2000년 1월까지 4회에 걸쳐 광양만 조간대 10개 정점에서 퇴적토와 바지락 근육조직내의 중금속(As, Pb, Cd, Hg)의 농도를 조사한 결과, 전체적으로 여천공단 연안의 퇴적토내 중금속의 함량은 광양제철소 인근 연안에 비해 높았다. 이것은 여천공단이 POSCO에 비해 가동이 훨씬 앞서기 때문이다. 그러나 광양제철소 인근 연안의 중금속 함량은 통계적으로 대조구와 유의한 차이는 없었으며, 또한 조간대 퇴적토와 그곳에 서식하는 바지락 근육 조직간의 중금속(As, Pb, Cd)의 분포는 서로간에 유의한 상관성을 보이지는 않았다. 한편 Jeong et al.[2003]은 2002년 12월부터 2003년 5월에 걸쳐 광양만내 12개 정점에서 해수와 퇴적물의 물리화학적 성질을 조사한 바에 의하면, 해수와 저질환경은 통영 주변의 양식장 환경과 거의 유사하였다. 또한 Kwon et al.[2004]이 2000년 3월과 8월의 2회에 걸쳐 광양만 퇴적토의 다환 방향족 탄화수소(PAHs)의 농도와 미생물 군집을 조사한 결과, PAHs 오염도가 높을수록 미생물 다양도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 미생물 군집구조는 계절에 따라 달랐으며, 그들은 미생물 군집구조를 결정하는 요인으로 수온, 입도, 유기물 함량 등으로 추정하였다. 반면, Hong et al.[2004]은 2001년 6-11월에 광양만내 23개 정점에서의 표층퇴적물 채취와, 12개 정점에서의 생물시료(자연산 굴과 홍합)의 채집을 통해 지속성 유기염소계화합물(PCBs)의 잔류현황을 조사하였다. 그 결과, 광양만내 퇴적물 및 생물에 잔류하는 PCBs의 농도는

전반적으로 낮아 독성학적인 관점에서 볼 때 생태계에 미치는 영향은 낮은 것으로 판단되지만, 만 안쪽에서의 농도는 상대적으로 높았다. Cho et al.[2004]은 1999년 10월-2000년 8월 사이 4회에 걸쳐 광양만과 여수해만의 15개 정점에서의 채수와 퇴적물 채집을 통해 nonylphenol(NP, 계면활성제로서 내분비계 장애물질의 하나로 알려져 있음)에 의한 오염을 조사한 결과, NP의 농도는  $7-203 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dry wt.}$ 의 범위에서 계절적인 변화를 보였으며, 또한 여수해만에 비해 광양만에서의 농도가 다소 높았다. 한편 퇴적물에서는 여수산단의 폐수와 연등천에서의 NP의 농도가 높았으며, 그들은 이것을 도시하수와 산업폐수 때문으로 주장하였다. 또한 Chung et al.[2004]은 2003년 9월 광양만내 20개 정점에서 퇴적토를 채취하여 PAHs를 조사한 결과, 광양만 유역의 퇴적토는 PAHs에 의해 심각하게 오염되어 있었으며, 그 주된 발생원은 열분해에 의한 산물인 것으로 밝혀졌다. 한편 Kim et al.[2004]이 2001년 6월부터 10월에 걸쳐 광양만내 18개 정점에서 채취한 표층퇴적물과 섬진강 하구의 8개 정점에서의 표층 해수 및 퇴적물을 채취하여 내분비계 장애물질의 일종인 프탈레이트 화합물의 분포를 조사한 결과에서는 Di-butyl phthalate(DBP)와 di-2-ethylhexyl phthalate(DEHP)가 가장 높은 빈도와 농도로 검출되었다. 또한 광양만의 표층 퇴적물에서 DBP와 DEHP의 평균 농도는 각각  $33.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 과  $67.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 이었으며, 이들은 공단 일대와 생활하수가 배출되는 하천 주변부에서 높았고 외해로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 이것은 따라서 DBP와 DEHP가 하천을 통해 만내로 유입되고 있음을 시사하였다. 한편 Li et al.[2004]은 2001년 6월과 11월에 광양만내 표층수와 표층퇴적물을 채취하여 페놀류 화합물과 스테롤 화합물의 분포를 조사한 결과, 공단 경유의 하천퇴적물에서는 NP의 농도가 높았고, 주민 거주지역을 경유하는 하천퇴적물에서는 dihydrocholesterol 화합물의 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 또한 Chung et al.[2006]은 2004년 3월 광양만내 23개 정점에서 표층 퇴적토를 채취하여 PAHs 화합물의 특성조사와 모니터링을 실시하였다. 그 결과, PAHs의 농도는  $0.01-171.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (평균  $8.13 \pm 24.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )의 범위로서, PAHs의 주요 유입원은 광양제철소 옆 태인도, 수어천, 여수산단내의 월래천으로 밝혀졌다. 또한 저서생태계에 미치는 독성영향평가에서는 발암가능성이 높은 PAHs가 주로 축적된 태인도가 ERM(effects range median), 수어천과 월래천은 ERL(effects range low) 수준인 것으로 밝혀졌다. 한편 Han and Park[2006]은 2004년 9월과 12월의 2회에 걸쳐 광양만내 12개 정점에서 표층퇴적물의 시료를 채취, 다 성분 동시분석법에 의해 저질 중 미량오염물질의 분포특성을 조사하였다. 그 결과, 최소 1종 최대 17종의 미량오염물질이 검출되었으며, 이들은 CH, CHN(O), pesticides의 화학적 구조를 가지고 있었다. 또한 이들 미량오염물질의 농도는 담수유입의 영향을 가장 많이 받는 섬진강 입구에서는 높았으나, 여수해만 입구에서는 검출되지 않았다. 반면, 저질에서 내분비계 교란물질인 pesticides, phenols, phthalates, polycyclic compounds 등 4종이 검출되었으며, 이들 물질은 만내 공장을 비롯하여 섬진강 등 담수유입에 기인하고 있는 것으로 추론되었다(이들 내분비계 교란물질의 농도는 2,4-



dichlorophenol이  $3.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , endosulfan이  $5.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , benzo(a)pyrene이  $0.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 로, 총 농도  $10.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 내분비계 교란물질이 검출되었음). 또한 Yoon and Seo[2007]은 광양만 퇴적물의 강열감량, 화학적산소요구량, 황화수소, 암수율, 입도를 분석한 결과, 산업단지가 밀집한 주변하천의 유기물 오염원이 만내 퇴적물의 오염에 일부 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 한편 Jeong *et al.*[2011]은 2009년 8월 광양만내 해수와 표층퇴적물의 tributyltin chloride(TBTCl) 내성세균의 개체수를 조사하여 TBTCl 내성세균의 개체수는 해수에서  $2.5\text{-}3.8\times 10^3\text{cfu}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 표층퇴적물에서  $3.2\text{-}9.1\times 10^6\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ 인 것으로 나타났다. 특히, TBTCl 내성세균의 가장 높은 우점종은 *Vibrio spp.*이었으며, 11개 대표적 TBTCl 내성균주는 여러 중금속(Cd, Cu, Hg, Zn)에도 내성을 보였다.

이상의 결과로부터, 광양만의 퇴적상은 5개의 퇴적상, 즉 니질, 사니질, 사질, 니사질, 역사질 등으로 구성되어 있으나, 상대적으로 니질이 우세하였다(Hyun *et al.*, 2004). 특히 이러한 니질 즉, 펄 퇴적물은 해수교환이 원활치 못한 내만에서 높았고 만의 개발이 진행될수록 퇴적물은 더욱 세립화되고 경향을 나타내었다(Kim and Park[2001]; [Ryu[2003a]; [2003b]). 이것은 개발로 인한 매립이 만내의 해수유동을 약화시켰기 때문으로 생각된다. 또한 이러한 결과로서, POSCO 건설 후 섬진강 삼각주의 사질 퇴적상이 파괴된 것은 물론, 무산소환경(아마도 빈산소수괴)의 출현, As, Cd, Co, Cu, Pb, Zn 등의 중금속, TBT, PAHs, NP, DBP, DEHP, TBTCl 등의 각종 유기오염물질과 내분비계 교란물질이 저층퇴적물과 굴, 바지락, 홍합 등 생물에서도 나타났다(Kim and Park[2001]; Kwak *et al.*[2001]; Jeong *et al.*[2003]; Hong *et al.*[2004]; Chung *et al.*[2004]; Kim *et al.*[2004]; Li *et al.*[2004]; Chung *et al.*[2006]; Park[2006]; Jeong *et al.*[20114]). 또한 이들 물질의 농도는 내만과 공장 주변에서 더 높았고 증가하였다. 따라서 광양만은 앞으로 개발이 진행됨에 따라 상당한 지형의 변화가 예상되며 또한 퇴적상도 사질에서 니질로의 세립화하는 과정이 더욱 심화되어 저질 저서환경의 악화는 물론 저서생물의 환경도 큰 변화를 겪을 것으로 예상된다.

### 3.5 생물 생태환경

먼저 어류, 새우류, 게류의 종조성 또는 식성과 관련한 내용을 살펴보면, Cha and Park[1994]은 1990년 2월부터 12월까지 6회에 걸쳐 광양만의 부유성 난자치어의 종조성과 분포를 조사하였다. 그 결과, 출현 분류군 수는 8월에, 출현량은 6월에 가장 많았으며, 또한 부유성 난 중에는 멸치, 주둥치, 전어, 보구치가 99.1%로 가장 우점하였고, 자치어 중에는 멸치, 망둑어과, 전어, 보구치, 주둥치가 85.3%로 가장 우점하였다. 반면, 이들의 출현종수는 과거에 비해 감소하였으며, 특히 겨울 산란종인 까나리와 흰배도라치의 감소로 인해 겨울의 출현량은 현저히 감소하였다. 한편, Park and Cha[1995]는 1990년 6월 광양만에서 채집한 멸치의 장 내용물을 조사하여 멸치의 초기 먹이생물을 조사한 결과, 멸치는 난황의 흡수를 끝낸 척색장 3.0 mm부터 먹이를 먹기 시작하였고, 자어 때는 요각류의 난과 naulius 유생, 유충류 등을 먹는 것으로 밝혀졌다. 또한 Park

*et al.*[1996]은 1990년 6월 광양만에서 채집한 전어(*Konosirus punctatus*)의 후기 자어의 먹이생물을 조사한 결과, 자어의 장에서 요각류의 난과 nauplius 유생, 유충류의 *Tintinnopsis*, *Codonellopsis* 등이 관찰되었다. 한편 Cha and Park[1997]은 1990년 2월부터 12월까지 광양만내 5개 정점에서 저인망을 사용하여 총 32과 54종, 9,497 개체, 총 생물량 65,838g의 어류를 채집하였다. 이들 중 어종으로는 주둥치(*Leiognathus nuchalis*)가 총 개체수의 64.9%였으나, 생물량으로는 주둥치와 전어(*Konosirus punctatus*)가 각각 총 생물량의 28.3%와 22.3%를 차지하였다. 또한 출현종수, 개체수, 생물량은 모두 2월에 가장 낮은 반면, 개체수는 10월에, 생물량은 4월에 가장 높았다. 한편, Huh and An[1997], Huh and Kwak[1997a], Huh and Kwak[1997b], Huh and Kwak[1997c], Huh and An[1998], Huh and Kwak[1998a], Huh and Kwak[1998b], Huh and Kwak[1998c], Huh and Kwak[1998d], Huh and Kwak[1998e], Huh and Kwak[1999], Kwak and Huh[2002], Kwak and Huh[2003a], Kwak and Huh[2003b], Baeck and Huh[2004], Baeck *et al.*[2004], Jeong *et al.*[2004] 등은 1994년 1월부터 12월까지 매월 소형 트롤을 이용하여 광양만 대도 주변의 잘피밭에서 채집한 새우류단각류 포함, 어류, 게류의 종조성 및 식성을 조사하였다. 그 결과, 잘피밭에는 6과 26종의 새우가 서식하고 있었으며, 출현한 새우류의 대부분은 갑각장이 25 mm이하의 작은 크기로 밝혀졌다. 또한 새우류의 개체수와 생체량은 늦겨울과 봄에 많고, 가을에는 적었으며, 출현하는 새우류는 주겨중, 계절중, 일시방문중 등으로 출현형태가 달랐고, 종수는 중간에 비해 야간에 더 많고 다양하였다. 한편 잘피밭에서 서식하고 있는 어류는 주둥치, 실고기, 배도라치, 가시망둑, 감성돔, 복섬, 날개망둑, 볼락, 문절망둑, 양태, 문치가자미, 썸치 등 총 57종으로 나타났다. 이들 중 실고기, 배도라치, 가시망둑, 주둥치, 볼락, 날개망둑 등이 전체의 69.9%를 차지하였고, 다음으로 줄망둑, 문절망둑, 복섬, 그물코쥐치, 농어, 붕장어, 감성돔, 썸치, 쥐치, 실비늘치, 쥐노래미, 청보리멸 등의 순이었다. 이들 어류 군집은 뚜렷한 계절변동을 보였으며, 어종수는 가을에, 개체수 및 생체량은 봄에 높았고 겨울에는 어종수 및 개체수 모두 낮았다. 따라서 이들 어류의 출현 개체수와 생체량은 전술한 새우류와 마찬가지로 봄에 많은 것을 알 수 있다. 한편 이들 어류 군집은 수온이나 잘피의 현존량, 그리고 먹이생물의 양에 따라 영향을 받고 있는 것으로 판단되었다. 반면, 잘피밭에서 채집된 어류의 식성 조사에서는, 주둥치는 주로 요각류와 유생을 먹었으며, 그 외 갯지렁이류, 단각류, 곤쟁이류, 새우류 등을 먹는 것으로 나타났다. 그러나 주둥치의 체장이 증가하면서 먹이생물 중 요각류가 차지하는 비율이 점차 낮아진 반면 갯지렁이류의 비율이 점차 증가하였다. 한편 실고기는 요각류와 잘피의 열상체에 부착하여 서식하는 단각류의 일종인 옆새우류를 주로 섭이하였으며 그 외 카프텔라류, 주걱벌레붙이류, 곤쟁이류 등을 섭이하는 것으로 나타났다. 또한 어린 실고기는 요각류를 주로 섭이하였으나 체장이 증가하면서 옆새우류를 주로 섭이하였다. 게류의 경우는 총 12과 21종이 채집되었고, 우점종은 *Charybdis japonica*, *Telmessus acutidens*, *Hemigrapsus penicillatus*, *Pugettia quadridens*로



나타났다. 이들의 출현종수는 겨울에는 적은 반면 나머지 계절에는 비교적 많았으며, 채집 개체수 및 생체량은 수온이 높은 시기에 많은 반면, 수온이 낮은 시기에는 적었다. 계류 또한 전술한 새우류와 마찬가지로 출현형태는 주거종, 계절종, 일시방문종으로 분류할 수 있었으며, 종수도 주간에 비해 야간에 더 많고 다양하였다. 줄망둑의 주요 먹이생물은 단각류(특히 옆새우류), 갯지렁이류 및 복족류였으며, 그 외 요각류, 주걱벌레붙이류, 게류, 이매패류 등이 위 내용물로서 검출되었다. 또한 성장에 따라 먹이생물의 조성도 점차 변하여, 옆새우류에서 갯지렁이류나 복족류의 비율이 점차 증가하였으며, 계절에 따라 먹이생물의 조성도 변하였다. 감성돔(체장 1-7 cm)의 주요 먹이생물은 단각류(옆새우류 및 카프렐라류), 게류 및 새우류였으며, 그 외 복족류, 갯지렁이류, 히드라류, 주걱벌레붙이류, 요각류, 등각류 등이었다. 또한 성장함에 따라 감성돔의 먹이생물의 조성도 점차 변하여, 옆새우류, 카프렐라류, 갯지렁이류, 복족류에서 게류 및 새우류의 비율이 점차 증가하였다. 복섬 유어(체장 2-8 cm)의 식성 조사에서는 주요 먹이생물은 단각류(옆새우류, 카프렐라류), 게류, 새우류(갑각류와 복족류)와 그 외 갯지렁이류, 요각류, 주걱벌레붙이류, 등각류 등으로, 성장함에 따라 먹이생물의 조성도 점차 변하였다. 날개망둑의 주요 먹이는 단각류(특히 옆새우류), 갯지렁이류, 게류, 요각류이며, 그 외 복족류, 이매패류, 등각류 등으로, 성장함에 따라 먹이생물의 상대적인 조성도 요각류에서 갯지렁이류, 게류로 점차 변하였다. 볼락(체장 1-9 cm)의 주요 먹이는 단각류(옆새우류, 카프렐라류), 요각류이며, 그 외 새우류, 게류, 복족류, 어류 등이었고, 성장함에 따라 요각류에서 점차 단각류로, 다시 새우류, 어류로 그 먹이 조성도 변하였다. 한편 Huh et al.[1998b]은 1990년 9월부터 1991년 8월까지 1년간 매월 광양만 대도 주변 잘피밭에서 소형 기선저인망을 이용하여 총 37과 64종 8,696개체, 104,349g의 어류를 채집하였다. 이들 중 주둥치, 꼼치, 민태, 풀반댕이, 청멸, 보구치, 실양태 등 7종이 전체 개체수의 76.4%와 생체량의 57.1%를 차지하였다. 다음으로 배도라치, 문치가자미, 줄망둑, 쌍둥가리, 봉장어, 도화망둑 순으로 나타났다. 이들 어류군집은 봄과 가을에 어종수와 개체수가 많았고, 생체량은 봄에 높게 나타났는데, 이는 전술했던 1994년의 어류나 새우류의 계절적인 출현 양상과 유사하였다. 그러나 수온이 낮은 겨울에는 출현 어종수, 개체수, 생체량 모두 낮았고, 가을에는 주둥치, 겨울에는 문치가자미와 배도라치, 봄에는 꼼치, 여름에는 청멸, 쌍둥가리, 민태 등으로 나타났다. 문절망둑의 주요 먹이생물은 갯지렁이류, 게류, 새우류, 옆새우류, 어류이었고, 그 외 거미불가사리류, 복족류, 이매패류, 카프렐라류, 집게류, 등각류, 주걱벌레붙이류 등이었다. 또한 성장함에 따라 문절망둑의 먹이의 조성은 갯지렁이류나 단각류에서 새우류, 게류, 어류의 점유 비율이 점차 증가하였으며 계절적인 변화를 보였다. 한편 Cha and Park([2001a]; [2001b])은 1995년 6월에서 8월에 걸쳐 광양만에서 봉고네트로 채집한 보구치(*Argyrosomus argentatus*)와 주둥치 후기자의 먹이생물은 요각류의 난과 nauplius 유생, 유충섭모충류인 *Codonellopsis* sp.와 *Tintinnopsis* spp.등으로 서로 유사하였다. 그러나 상대중요성지수에 따른 보구치 후기자의

가장 중요한 먹이생물은 요각류 nauplius 유생인 반면, 주둥치의 경우는 *Tintinnopsis* spp.로 나타났다. 양태의 주요 먹이생물은 어류였으며, 다음으로 새우류가 많았고, 그 외 단각류, 공쟁이류 및 게류 등으로, 성장함에 따라 먹이생물의 조성이 점차 변하였다. 꼼치의 경우는 육식성으로서, 주로 단각류와 새우를 먹이로 소비하였고, 그 외 요각류, 갯지렁이류, 소형어류를 먹이로 취하였다. 문치가자미 또한 육식성으로서, 주로 갯지렁이를 소비하였으며, 그 외 많은 양의 단각류, 복족류, 거미불가사리를 먹이로 취하였다. 반면, Jeong et al.[2004]은 2002년 1월부터 12월에 걸쳐 광양만 잘피밭에 서식하는 단각류의 식성과 계절변동을 조사한 결과, 탁월종은 5개 단각류와 1개 카프렐라류(바다벌레과)로 구성되어 있었으며, 단각류의 평균밀도는 5월에 최대 63,148개체·m<sup>2</sup>, 9월에 최소 1,247개체·m<sup>2</sup>로 변화하였다. 또한 *Gammaropsis japonicus*와 *Jassa slatteryi*는 여름에 탁월한 반면, *Ceinina japonica*는 가을과 겨울에 탁월하였다. 또한 *Ceinina japonica*는 육식성 섭이자인 반면, *Gammaropsis japonicus*와 *Jassa slatteryi*, *Caprella tsugarensis*는 식물플랑크톤과 쇄설물을 각각 소비하였다. 한편 단각류 밀도의 계절적 변화는 잘피류와 착생식물의 현존량과 관련이 있는 것으로 나타나, 잘피류와 단각류간의 생물학적인 상호작용을 시사하였다. 한편 Baeck and Huh[2004], Baeck et al.[2004]는 1999년 1월부터 12월까지 소형 기선저인망을 이용하여 잘피밭에 서식하는 실양태와 줄망둑을 채집하여 성숙과 산란을 조사하였다. 그 결과, 실양태의 산란시기는 4월부터 6월(성기는 5월)까지로, 암컷은 체장 5 cm에서부터 성숙하여 산란에 참가하였으며, 체장 9 cm 이상에서는 모든 개체가 성숙에 도달하여 산란에 참가하여 1년 동안 2회 이상의 산란을 하는 것으로 추정되었다. 한편 줄망둑은 암컷의 생식선 성숙지수(GSI)가 5월에 가장 높았으며, 산란은 5월부터 7월까지 지속되었다. 또한 수컷과 암컷 사이의 성비는 1:0.59로 차이가 컸다. Chu et al.[2019]은 2014년부터 2016년까지 광양만내 8개 정점에서 12회에 걸쳐 부유성 난 및 자치어의 종조성과 양적 변동에 관하여 조사한 결과, 출현한 부유성 난은 14개 군으로 주둥치가 가장 우점하였고, 다음으로 멸치와 전어가 우점하였다. 또한 자치어는 총 7목 22과 32개 군이 출현하였으며, 주둥치, 멸치, 망둑어과 어류가 우점하였다. Han et al.[2019]은 2018년 6월 광양만 주변 총 4개 정점(광양만내 1, 여수연안 2, 남해연안 1)에서 새우조망 빔 트롤을 이용하여 총 38종, 3,594 개체, 무게 65,415 g의 해양생물을 채집하였다. 또한 음향조사를 통해 생물량은 2,634.9톤으로 추정되었으며, 그들은 이러한 음향 탐사 방법이 샘플링 검사 방법에 비해 더 많은 어군을 탐지할 수 있다고 주장하였다.

이상에서 살펴본 광양만에 출현하는 부유성 난과 자치어, 성어(특히 잘피밭에 서식하는 어종) 등의 어획된 결과로 볼 때(Cha and Park[1997]; Huh et al.[1998b]; Han et al.[2019]), 우점종은 멸치, 주둥치, 전어, 보구치로 판단된다. 또한 이들 어류 군집은 수온이나 잘피의 현존량, 그리고 먹이생물의 양에 따라 변동하고 있으며 성장단계에 따라 먹이의 종류가 다소 변화하는 것으로 나타났다. 한편 출현하는 어종의 개체수나 출현종수는 과거에 비해 전반적으로



감소하고 있는 것으로 드러났다(Park[1994]; Cha and Park[1997]; Huh *et al.*[1998b]; Han *et al.*[2019]). 이러한 어류의 개체수나 출현량 또는 종수의 감소 원인이 구체적으로 일 수는 없으나, 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 광양만에서는 광양제철소의 건설공사가 1982년부터 1992년 사이에 이루어진 점을 감안한다면, 이것이 어류의 출현에 영향을 미쳤을 것으로 추론된다. 반면, 잘피밭에 서식하고 있는 어류의 주요 먹이원은 요각류, 갯지렁이류, 단각류 등이었으며, 새우류나 게류의 경우는 출현형태가 주거종, 계절종, 임시방문종 등으로 분류되었다.

한편 Lee *et al.*[1975], Lee *et al.*[1977], Hong *et al.*[1987], Huh *et al.*[1998a], Choi and Huh[2008] 등은 광양만내에 서식하는 해조류와 관련한 연구를 수행하였다. 먼저 Lee *et al.*[1975]은 1974년 5월부터 1975년 5월에 걸쳐 광양만의 해조류 계절변화를 조사하고 염분, 흐름, 해조류의 식생 등을 고려하여 광양만을 3개 그룹으로 구분하였다. 또한 Lee *et al.*[1977]은 1974년 5월부터 1975년 3월에 걸쳐 광양만의 해조류의 유기염소계 농약잔류량을 조사한 결과, 농약잔류량은 7월에 가장 높은 반면 3월과 1월에 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면, Song[1986]은 광양만 조간대의 대형조류를 조사하여 171종의 해양저서조류(청록조류 8종, 녹조류 24종, 갈조류 31종, 홍조류 108종)를 동정하였으며, 상부조간대에서는 *Gelidium divaricatum*, *Ulva conglobata*, and *Enteromorpha compressa*, 중부조간대에서는 *Sargassum thunbergii* and *Ectocarpus confervoides*, 하부조간대에서는 *Ulva pertusa*, *Corallinaceae*, *Chondria crassicaulis*, and *Undaria pinnatifida*가 각각 분포하고 있는 것을 확인하였다. 또한 이들은 조류의 피복에 기초한 군집분석을 통해 조류의 식생을 3개 그룹, 즉 봄, 여름, 가을로 구분하였다. 이에 대하여, Choi and Huh[2008]는 2006년 2월부터 2007년 1월에 걸쳐 광양만의 10개 정점에서 해양조류군집을 조사하여 홍조류 48종, 갈조류 17종, 녹조류 13종을 동정하였다. 또한 상부조간대에서는 *Gelidium divaricatum*이, 하부 조간대에서는 *Ulva pertusa*가 우점하였으며, 군집분석에서는 조류 구성이 2개 그룹, 즉 내만역과 외만역의 종으로 구성되어 있음을 확인하였다. 따라서 전술한 Song[1986]의 결과와 비교해 볼 때, 광양만내 서식하는 대형조류의 종수는 지난 20년 사이 감소하였으며, 이것은 아마도 만내에서 이 기간 중 이루어진 각종 개발행위의 영향 때문으로 추정된다. 한편 Hong *et al.*[1987]은 1986년 1월부터 4월까지 광양만내 20개 정점과 2개 대조 정점에서 김양식 어장 주변의 어장환경과 김생산과의 관계를 조사하였다. 그 결과, 양식초기의 월평균기온, 풍속, 강수량, 상대습도 등은 김의 생산과 강한 +의 특이성을 나타낸 반면 일조량은 -의 특이성을 보이는 것으로 나타났다. 반면, 탁도나 저질 중의 중금속 함량 등은 김의 생육에 직접적인 영향을 주지는 않았으나 공사 중 저질에 침적된 부니와 유속의 감퇴로 인한 김 엽체 위의 부니침적이 김 생육에 영향을 준 것으로 추론되었다. 따라서 1985과 1986년도에 있어서의 광양만내 하동 김양식 어장의 작황 부진은 양식초기의 과도한 강수량에 더하여 해저에 침적된 부니, 유속의 감퇴에 따른 심진강으로부터의 빈약한 질소공급 등이 그 원인일 것으

로 추정하였다. 반면, Huh *et al.*[1998a]은 1994년 1월부터 12월까지 광양만 대도주변 잘피밭에서 잘피 및 착생 해조류의 계절변동을 조사한 결과, 잘피의 잎 길이는 수온이 낮은 겨울에는 100 cm 이하였으나, 봄부터 증가하여 여름에는 최고치인 200 cm에 달하였다가 가을에는 다소 감소하였다. 또한 잘피의 현존량은 봄부터 증가하여 여름에는 200 gDW·m<sup>2</sup>(여기서 DW는 Dry Weight)로 최고치에 달하며 잎 길이의 계절변화와 유사한 양상을 보였다. 한편 잘피에 부착하여 서식하는 착생 해조류는 봄과 여름에는 *Calliophyllis rhynchocarpa*, *Champia* sp. 등이, 가을과 겨울에는 *Polysiphonia japonica*, *Lomentaria hakodatensis* 등으로, 다른 종들에 비해 우점하였다. 이들 착생 해조류의 현존량은 잘피밭 식물 현존량의 15-20%를 차지하였다. 또한 잘피의 현존량은 수온과는 양(+)의 상관관계를, 착생 해조류의 현존량은 수온과는 역(-)의 상관관계를 각각 나타내었다. 이상의 결과로부터, 광양만내의 양식김은 인위적 요인에 의해 발생하는 부니의 영향을 받고 있으며, 또한 만내에 서식하는 해조류와 잘피류는 수온의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 Song[1986]과 Choi and Huh[2008]의 결과로부터 해조류의 종수는 지난 20년 사이 감소한 것으로 드러났다.

한편 Cho *et al.*[1994], Kim *et al.*[2003], Lee *et al.*[2004], Bae *et al.*[2014]은 광양만의 식물플랑크톤에 관련한 연구를 수행하였다. 먼저 Cho *et al.*[1994]은 1986년 9월부터 1987년 6월까지 광양만내 5개 정점에서 식물플랑크톤의 종조성 및 현존량을 조사하였다. 그 결과, 식물플랑크톤은 137 분류군으로, 4문, 10강, 24목, 24과, 11종을 동정하였으며, 계절에 따라 11월에 *Chaetoceros curvisetes*, 2월에 *Eucampia zoodiacus*, 4월에 *Stephanopyxis nipponica*, 6월에 *Rhizosolenia stolterforthii*가 각각 출현하는 종의 천이를 관찰하였다. 또한 식물플랑크톤 현존량은 71-1,521×10<sup>5</sup>cells·L<sup>-1</sup>로(연평균: 333×10<sup>5</sup>cells·L<sup>-1</sup>)인 것으로 나타났다. Kim *et al.*[2003]은 2001년 8월 24일 3개 정점에서 외편모조류 휴면포자(cyst)의 분포를 퇴적물을 채집하여 조사한 결과, 전체 휴면포자 밀도는 퇴적물 표면에 서부터 깊이에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 살아있는 휴면포자는 퇴적물의 바다까지 관측되었으며, 휴면포자의 비율의 증가로 보아 부영양화 과정이 최근에 더욱 가속화하고 있는 것으로 추론되었다. Lee *et al.*[2004]은 2001년부터 2003년에 걸쳐 총 23개 정점에서 광양만 부유생태계의 환경요소와 식물플랑크톤의 시공간적 분포를 조사하였다. 그 결과, 식물플랑크톤의 현존량 및 환경요인의 뚜렷한 계절변동은 없었으나 현존량은 평균 4.56×10<sup>5</sup>cells·L<sup>-1</sup>로, 외만에 비해 내만에서 높았다. 또한 우점종인 규조류가 전체 현존량의 90%이상을 차지하였으며, 영양염이 식물플랑크톤의 현존량 분포에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 추론되었다. Bae *et al.*[2014]은 2010년부터 2011년에 걸쳐 광양만내 20개 정점에서 식물플랑크톤 군집구조와 그들의 성장에 미치는 환경요인을 조사하였다. 그 결과, Chl<sub>a</sub> 농도가 낮은 해역에서 극미소(nano, pico) 식물플랑크톤의 생물량이 상대적으로 증가하였으며, 우점하는 은편모조류를 비롯하여 *Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp. 등의 규조류가 다수 출현한 것을 확인하였다.



한편 Soh and Suh[1993], Cha and Park[2000], Jang *et al.*[2004], Baek *et al.*[2011], Baek *et al.*[2013], Lee *et al.*[2017] 등은 광양만에 출현하는 동물플랑크톤에 관련한 연구를 수행하였다. 먼저, Soh and Suh[1993]는 1990년 2월부터 12월까지 격월 간격으로 총 6회에 걸쳐 광양만내 4개 정점에서 동물플랑크톤 분포에 관한 주년조사를 실시하여 *Calanus sinicus*, *Paracalanus* sp., *Pseudodiaptomus marinus*, *Corycaeus affinis*, *Acartia omorii*, *Centropages abdominalis* 등의 우점종으로 구성된 요각류의 계절변동을 관찰하였다. 이 중 *C. sinicus*, *A. omorii*, *C. abdominalis*는 수온 6.0-13.0°C 이었던 겨울에 우점한 반면, *P. sp.*, *C. affinis*, *P. marinus*는 수온 20.2-27.4°C 인 여름에 우점하는 것으로 나타났다. 또한 Cha and Park[2000]은 1995년 5월부터 8월까지 6회에 걸쳐 광양만에서 하계에 소형플랑크톤을 채집한 결과, *Tintinnopsis* spp., *Codonellopsis* sp., 요각류의 난과 nauplii 유생 등이 전체 소형동물플랑크톤의 83.8%를 차지하고 있었다. 또한 이들 소형동물플랑크톤의 출현량과 종조성은 자어에 의한 포식의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 한편 Jang *et al.*[2004]은 2001년 6월부터 2003년 6월에 걸쳐 광양만의 9개 정점에서 총 13회 동물플랑크톤을 채집하여 계절변동을 조사하였다. 그 결과, 47종의 동물플랑크톤이 평균밀도 6,205 cells·m<sup>-3</sup>로 출현하였고, 그 중 요각류가 평균 38.2%로 가장 많았다. 또한 적조를 유발하는 *Noctiluca scintillans*는 2002년 6월부터 2003년 2월까지 출현하였으며, 조석주기에 따라 출현 동물플랑크톤의 개체수도 큰 차이를 보였다. 또한 Baek *et al.*[2011]은 2010년 4계절에 걸쳐 광양만 20개 정점에서 야광충의 시공간적 변동과 생태학적 특성을 조사하여 야광충 개체수의 밀도는 춘계와 하계에는 높으나, 동계와 추계는 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 수온의 증가와 더불어 야광충의 증식이 더욱 활발해지는 것을 의미하지만, 먹이생물의 지표인 Chl\_a 농도와 야광충 개체수와의 유의한 관계는 확인하지 못하였다. 그러나 Chl\_a 농도가 높은 춘계와 하계에 야광충의 개체수의 밀도가 높은 것으로 보아 식물플랑크톤의 현존량이 야광충의 개체수 증감을 제어하는 인자의 하나로 추론되었다. 한편 Baek *et al.*[2013]은 2010년부터 2012년까지 3년간 광양만의 20개 정점에서 야광충의 동태를 조사한 결과, 야광충은 수온범위가 15-22°C, 염분이 25.0-30.0 psu 사이에서 높은 농도로 출현한 반면, 수온이 27°C 이상으로 높거나 염분이 12.0 psu 이하로 낮은 경우에는 야광충은 사멸로 이어졌다. 또한 Chl\_a 농도와 야광충 개체수와의 관계는 동계, 춘계, 추계에는 양의 상관관계를, 하계에는 음의 상관관계를 각각 나타낸다고 주장하였으나, 이것은 전술한 Baek *et al.*[2011]의 결과와는 다소 상반된다. 반면, Lee *et al.*[2017]은 2015년 11월부터 2016년 5월까지 광양만의 11개 정점에서 채집한 동물플랑크톤의 출현 개체수는 평균 544-19,753 cells·m<sup>-3</sup>로, 여름에 최대, 가을에 최소로 나타났다. 또한 여름에 출현한 동물플랑크톤은 수온과 먹이에 의해 영향을 받는 반면, 겨울에 출현한 동물플랑크톤은 염분과 *N. scintillans* 밀도에 의해 좌우되는 것으로 나타났다. 따라서 그들은 광양만의 동물플랑크톤 군집이 수온, 염분, *N. scintillans* 밀도, 규조류의 밀도 등에 영향을 받는 것으로 판단하였다.

이상의 결과로부터, 광양만에 출현하는 소형동물플랑크톤의 출현량과 종조성은 자어에 의한 포식의 영향을 받고 있으며, 또한 동물플랑크톤 군집은 수온, 염분, *N. scintillans* 밀도, 규조류의 밀도 등에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 한편 만내에 출현하는 야광충의 개체수는 수온과 유의한 상관관계가 있으며, 식물플랑크톤의 현존량 즉, Chl\_a의 농도는 야광충의 개체수를 제어하는 인자의 하나로 추론되었다.

한편 Choi *et al.*[2003]은 2001년 6월에 광양만의 38개 정점에서 대형저서동물의 분포를 조사한 바에 따르면, 총 154종의 대형저서동물 중 다모류가 출현종수와 개체수에서 가장 우점한 것으로 나타났다. 이중 주요 우점종은 다모류 *Tharyx* sp가 44.8%, *Lumbrineris longifolia*가 14.0%, 이매패류 *Mytilus edulis*가 6.5%, 단각류 *Corophium sinense*가 4.5%, 다모류 *Heteromastus filiformis*가 3.6%, *Sigambra tentaculata*가 1.7% 등이었다. 이들 대형저서동물은 광양만의 묘도 서측에서는 그 종수와 개체수가 적은 반면, 주수로 부근에서는 풍부하였다. 한편 저서오염지수와 생물계수에 의한 저서군집의 건강도지수에서는 주수로 부근의 일부 정점을 제외한 전 정점이 현재 정상상태이거나 약간 오염된 상태인 것으로 나타났다. 특히 광양만 입구에서는 유기물 오염에 잘 적응한 다모류가 대량 출현하였다. 반면 Yun *et al.*[2002]은 1994년 6월부터 1995년 5월에 걸쳐 광양만 대도 주변의 잘피밭에서 표서동물 채집장치(epifaunal sampler)를 이용하여 매달 바다벌레류를 채집하여 종조성과 계절변동을 조사하였다. 그 결과, 총 1과 1속 6종의 바다벌레류가 출현하였고, 그 중에 짧은 팔 바다대벌레와 허리갈고리 바다대벌레가 각각 53.9%와 32.1%로 우점하는 것으로 나타났다. 또한 출현종수와 개체수는 모두 여름에 높은 반면, 가을과 겨울에는 낮았는데, 이것은 잘피류의 생체량 변동과 어류의 포식압 등과 밀접한 상관성이 있는 것으로 판단되었다. 이상의 저서동물의 군집분포가 나타내는 저서오염지수와 생물계수에 의한 광양만의 저서환경은 다소 유기오염된 상태에 있으며, 또한 대도 주변의 잘피밭에는 잘피류의 생체량과 어류의 포식압을 받고 있는 바다벌레류가 출현하고 있음을 알 수 있다. 한편 Choi *et al.*[2004]은 2001년 6월-2002년 6월까지 광양만내 51개 정점에서의 지질조사와 15개 정점에서의 2개월 간격의 채수를 통해 바이러스를 조사한 결과, 평균 바이러스 양은 2.0×10<sup>8</sup> particles·ml<sup>-1</sup>로, 여름에 최대치, 겨울에 최소치를 보였다. 또한 전체 숙주와 바이러스의 밀도로 볼 때, 이들의 먹이사슬은 바이러스에 의한 숙주의 사멸에 의해 평형상태를 유지하고 있는 것으로 추론되었다. Wui *et al.*[1993]은 1990년 2월부터 12월에 걸쳐 광양만의 15개 정점에서 계절에 따른 미생물 군집의 조사 결과에 근거하여, 담수유입, 질소성 무기영양염류, 수온상승 등이 미생물군집에 영향을 주고 있는 것으로 판단하였다. 또한 Hong *et al.*[1994]은 1982년 3월부터 12월까지 광양만의 15개 정점에서 계절에 따른 해양미생물 개체군의 변동을 조사하였다. 그 결과, 일반균류의 연평균 출현밀도는 18 cells·ml<sup>-1</sup>이어서, 봄에 높은 반면, 일반세균의 개체군 밀도는 1.8×10<sup>3</sup>-1.4×10<sup>5</sup> cells·ml<sup>-1</sup>로, 봄에 높고 수심과 함께 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 분변성 대장균의 계절별 평균치는 0-33 cells·ml<sup>-1</sup>으로,



수온이 높은 여름에 높았다. Park *et al.*[1998]은 1996년 8월부터 1997년 5월까지 광양만의 17개 정점에서 생물 및 무생물 환경요인을 조사하여 광양만의 미생물군집 및 생태계의 계절 변화를 조사하였다. 그들은 관측 결과, 광양만의 생태계는 5개의 주요인, 특히, 담수유입, 질소성 무기영양염류, 부유물질, 수온상승 등에 크게 영향을 받는 것으로 추정하였다. 반면, Kang[2005]은 생태계모형(ECOPATH)을 광양만에 적용하여 생물량(biomass), 먹이 스펙트럼, 영양적인 상호작용, 해양생태계의 주요 영양적 경로를 해석하였다. 그는 광양만의 모형을 9개 그룹의 저서 일차 생산자, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 저서동물, 이매패류, 유영어류, 저서어류, 물고기를 먹는 어류 등으로 구성되어 있는 것으로 가정하였다. 그는 수치모형의 해석결과에 기초하여, 시스템내 영양물질의 총에너지량(생태계의 처리량)은 41%의 소비와, 9%의 수출, 24%의 호흡류, 26%의 폐기물(배설물)을 포함하여  $2.4 \text{ kgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ 로 추정하였다. 이 값은 프랑스의 Somme Bay의  $2.3 \text{ C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ 와 유사하지만, 미국의 Delaware Bay의  $2.3 \text{ C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ , Chesapeake Bay의  $4.5 \text{ C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ , 또는 프랑스의 Seine Estuary의  $3.6 \text{ C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}^{-1}$ 보다는 작았다. 그는 또한 총에너지량 중 일차생산자로부터 순환되는 양이 유기체설물(detritus)보다 많기 때문에 광양만의 주요에너지원은 일차생산자이며, 유기체설물의 순환경로는 만의 물리적 특성에 크게 영향을 받는 것으로 추론하였다.

### 3.6 기타 환경

Kim *et al.*[2001], Kim *et al.*[2002], Kim and Park[2004], Kim and Kim[2005], Kim[2006] 등은 광양만내 임해매립지 식재지반의 토양환경과 관련한 연구를 수행하였다. 먼저, Kim *et al.*[2001]이 조사한 식재지반의 결과에 따르면, 조경식물의 생육에 유리한 식재지반은 지반의 높이가 높은 성토지역이었으며, 불리한 토양성질들은 표토보다는 지하의 근권부에 주로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 그들은 임해매립지 식재지반 조성시에는 토양의 성질이 교란되지 않도록 해야 한다고 주장하였다. 또한 Kim *et al.*[2002]은 광양만 임해매립지의 곰솔 식재 이후 연륜생장에 영향을 미치는 식재환경과 기후요인을 조사한 결과, 곰솔은 수목의 이식과 가뭄에 의해 연륜생장이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 연륜생장의 감소는 특히 토양 경도가 높은 식재지반에서 급격하였으며, 성토지역에서는 크지 않았다. 즉, 곰솔은 이식과 가뭄에 대하여 성토지반에서는 수목 자체적으로도 양호하게 성장하지만 토양 경도가 높은 지역에서는 생장이 불량하였다. 한편 Kim and Park[2004]은 광양만 바다매립지의 느티나무 식재지반에서 토양의 종류, 식재지반의 높이, 식재지반 유형별 물리화학적 특성을 조사한 바에 따르면, 느티나무 생장에 있어서는 객토가 준설토보다 유리하였으며, 대성토 정상지반은 강한 산성 때문에 느티나무 생장에 불리한 것으로 예측되었다. 또한 Kim and Kim[2005]은 광양만 준설 매립지의 느티나무 식재지반에서 토양의 종류, 식재지반의 높이, 토심이 깊어짐에 따른 토양성질의 수직적 특성을 조사하였다. 그 결과, 식재지반의 높이가 낮은 지반이 높은 지반에 비해 토양의

물리적 화학적 변화가 더 컸고, 객토보다 준설토에서 그 변화는 더 크게 나타났다. 따라서 식재지반의 토양으로서는 준설토보다는 객토를 더 많이 사용하는 것이 유리할 것으로 판단되었다. 이에 대하여, Kim[2006]은 느티나무 이식 이후의 연륜생장에 영향을 미치는 식재환경요인과 기후요인을 조사한 결과, 식재지반의 높이가 높은 성토지역에서의 성장량은 큰 반면, 토양이 교란된 대성토 정상에서는 성장량이 저조하였다. 또한 수목 이식충격의 회복이 빠르고, 가뭄 발생에도 생육이 안정된 식재지반은 식재지반의 높이가 낮은 경우보다 높이가 높은 경우가 더 양호한 것으로 나타났다. 즉, 객토 매립지반이나 객토 피복지반보다 성토지반이 더 양호하였다. 이상의 결과로부터, 광양만 임해매립지 식재지반의 토양환경으로서 조경 식물의 생육상 유리한 식재지반은 느티나무의 경우는 첫째 지반의 높이가 높고, 둘째 토양이 교란되지 않으며, 셋째 객토 매립지반이나 객토피복지반이 아닌 성토지반인 것으로 밝혀졌다. 반면, 곰솔의 경우는, 이식과 가뭄에 의해 연륜생장이 급격히 감소하였고, 특히 토양의 경도가 높을수록 이러한 현상이 큰 것으로 나타났다.므로 식재 이후의 유지관리가 중요한 것으로 판단되었다.

한편, Kang *et al.*[2006]은 광양항 컨테이너 전용 안벽구조물의 축조에 따른 환경공생시설을 대상으로 CVM(Contingent Valuation Method)에 의한 경제적 가치를 평가한 결과, 개발시 환경저감화의 개념에 의해 고안된 환경공생형 호안시설 사업비에 대한 B/C가 4 배 정도로 나타나, 비용대비 몇 배 이상에 달하는 환경배려 효과가 있음을 확인하였다. 또한 Choi *et al.*[2007]은 글로벌 및 국지적 공간자기상관 통계를 광양만 해양환경 관측자료에 적용하여 시공간적 분포패턴을 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 일반 해양수질, 영양염, Chl\_a 농도 및 식물플랑크톤은 여름에 강한 군집패턴을 보였으며, 글로벌 지수는 연구지역 전체 군집 패턴의 강도와 시계열 변화의 탐지에, 국지적 지수는 hot spot과 cold spot의 위치 추적에 각각 유용한 것으로 나타났다. 한편 광양만 일대에 도래하는 조류(새)와 관련하여 Hahm[1999], Kim and Hwang[1999] 등이 1996년 10월부터 1997년 9월까지 격자조사법(mesh count method)으로 조사한 결과에 따르면, 총 7-9목 14-16과 44-55종 11,674-32,931개체의 조류가 관찰되었다. 이들 중 우점종은 흰물떼새, 민물도요, 청둥오리, 흰쪽지, 팽이 갈매기, 붉은 부리갈매기 등이었고, 천연기념물인 흑기러기, 큰고니, 고니, 황조롱이, 재두루미, 검은머리물떼새 등 6종도 관찰되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 1975년부터 2019년까지 광양만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인 및 과학인용지수에 게재된 105편의 논문을 분석하여 시대에 따른 광양만 연구의 성과를 진단, 평가하고 앞으로 광양만의 환경회복과 보전을 위해 필요한 연구 과제를 모색하였다.

광양만의 물리환경은 만내 매립으로 인한 수면적의 축소로 만내 조위는 증가하는 반면, 유입하는 조석량과 유속, 해수교환율 등은 전반적으로 감소(곳에 따라서는 부분적으로 증가)하였고, 만내에서



의 물질(SS, COD)의 확산은 위축된 것으로 나타났다. 한편 수질환경은 수질등급평가기준으로 2등급 내지 3등급의 수질을 유지하고 있으나, 용존성 중금속과 입자성 미량금속, 지속성 유기오염물질 등의 농도가 공단 주변 해역에서 상대적으로 높았다. 또한 만의 주요 오염원인 섬진강을 비롯한 육수 유입에 의한 오염부하의 삭감을 위한 대책이 마련되어야 할 것으로 판단되었다. 퇴적상은 니질이 상대적으로 우세하며, 만내 개발이 진행될수록 퇴적물은 더욱 세립화되고 경향을 나타내었다. 또한 그 결과, POSCO 건설 후 섬진강 삼각주의 사질 퇴적상은 파괴되었고, 무산소환경의 출현과 중금속 및 내분비계 교란물질이 저층퇴적물과 서식생물에서도 발견되고 있다. 따라서 광양만은 앞으로도 개발이 진행됨에 따라 저질·저서환경의 악화와 저서생물의 환경에 큰 변화를 겪을 것으로 예상된다. 한편 광양만에 출현하는 어류의 우점종은 멸치, 주둥치, 전어, 보구치로서, 수온이나 질피의 현존량, 그리고 먹이생물의 양에 따라 이들의 출현량은 변동하고 있으며, 개체수나 출현종수는 과거에 비해 전반적으로 감소하고 있는 것으로 드러났다. 또한 질피발에 서식하고 있는 어류의 주요 먹이원은 요각류, 갯지렁이류, 단각류 등이었으며, 새우류나 게류는 출현형태에 따라 주거종, 계절종, 임시방문종 등으로 분류되었다. 광양만에 출현하는 소형동물 플랑크톤의 출현량과 종조성은 자어에 의한 포식의 영향을 받고 있으며, 또한 동물플랑크톤과 야광충 군집은 수온, 염분, *N. scintillans* 밀도, 규조류의 밀도 등에 영향을 받는 것으로 추론되었다. 한편 저서동물의 군집분포에 기초한 광양만의 저서환경은 다소 유기오염된 상태에 있으며, 또한 대도 주변의 질피발에는 질피류의 생체량과 어류의 포식압을 받고 있는 바다벌레류가 출현하고 있는 것으로 나타났다. 또한 광양만 임해매립지 식재지반의 토양환경으로서 조경 식물의 생육상 유리한 식재지반은 느티나무의 경우는 지반의 높이가 높고, 토양이 교란되지 않은 성토지반인 것으로 밝혀진 반면, 곰솔의 경우는 이식과 가뭄에 의해 연륜생장이 급격히 감소하므로 식재 이후의 유지관리가 중요한 것으로 판단되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 광양만의 해양환경은 개발 이전인 1980년대 초기에 비해 2020년 현재 물리 환경을 비롯한 수질환경(해수, 부유물질 등), 저질·저서환경(퇴적상, 해저 퇴적물 등), 생물·생태환경(어류, 해조류, 동식물 플랑크톤, 저서동물, 해양미생물, 해양바이러스, 바다벌레류, 생태계 모형 등) 등에서 볼 때 전반적으로 악화된 것으로 나타났다. 반면, 지금까지 이루어진 광양만의 연구는 대부분 광양만 개발에 따른 매립과 준설이 환경에 미치는 영향 검토가 중요한 과제로서, 광양만이 안고 있는 해양환경의 근본적인 문제에 대한 해결책을 제시하지는 못하였다. 따라서 앞으로의 광양만 연구는 이러한 환경 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방안을 찾는 데 집중해야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 광양만의 해양생태계를 고려한 환경친화적 개발과 보전방안, 즉, 지속가능한 개발 방안을 마련하기 위한 연구를 조속히 수행해야 할 것으로 생각된다. 특히 중요한 것은 광양만이 가진 생물학적인 가치(역할과 위상)를 어떻게 되살릴 수 있을 것인가에 초점을 두어야 하

며 또한 학제간의 종합적이고도 체계적인 연구가 이루어지도록 하여야 함은 두말할 필요가 없을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2021년 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(장기해양생태계연구(III) : 대마난류 영향권역의 환경변화와 생태계 반응)

## References

- [1] Bae, S.W., Kim, D.S., Kim, Y.O., Moon, C.H. and Baek, S.H., 2014, "The influence of additional nutrients on phytoplankton growth and horizontal phytoplankton community distribution during the autumn season in Gwangyang Bay, Korea", *Korean J. Environ. Biol.*, 32(1), 35-48.
- [2] Baek, G.W. and Huh, S.H., 2004, "Maturation and spawning of *Repomucenus valenciennesi* collected in Gwangyang Bay, Korea", *Korean J. Ichthyol.*, 16(1), 87-93.
- [3] Baek, G.W., Kim, J.W. and Huh, S.H., 2004, "Maturation and spawning of striped goby (*Acentrogobius pflaumi*) (Teleostei; Gobiidae) collected in the Gwangyang Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 37(3), 226-231.
- [4] Baek, S.H., Kim, D.S., Choi, H.W. and Kim, Y.O., 2013, "Hydrographical and bio-ecological characteristics of heterotrophic red tide dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in semi-enclosed Gwangyang Bay, Korea", *Korean J. Environ. Biol.*, 31(4), 308-321.
- [5] Baek, S.H., Shin, H.H., Kim, D.S. and Kim, Y.O., 2011, "Relationship between distributional characteristics of heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* and environmental factors in Gwangyang Bay and Jinhae Bay", *Korean J. Environ. Biol.*, 29(2), 81-91.
- [6] Cha, S.S. and Park, K.J., 1994, "Distribution of the ichthyoplankton in Kwangyang Bay", *Korean J. Ichthyol.*, 6(1), 60-70.
- [7] Cha, S.S. and Park, K.J., 1997, "Seasonal changes in species composition of fishes collected with a bottom trawl in Kwangyang Bay, Korea", *Korean J. Ichthyol.*, 9(2), 235-243.
- [8] Cha, S.S. and Park, K.J., 2000, "Abundances and species composition of microzooplankton during summer in Kwangyang Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 33(4), 361-366.
- [9] Cha, S.S. and Park, K.J., 2001a, "Feeding selectivity of postlarvae of white croaker (*Argyrosomus argentatus*) in Kwangyang Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 34(1), 27-31.
- [10] Cha, S.S. and Park, K.J., 2001b, "Food organisms and feeding selectivity of postlarvae of slimy (*Leiognathus nuchalis*) in Kwangyang Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 34(6), 666-671.
- [11] Chin, Y.H., Kim, K.T., Kim, S.H., Yang, D.B., Hong, G.H. and Lee, K.W., 2000, "Distribution characteristics of dissolved and particulate trace metals in Kwangyang Bay, Korea", *J. Korean*



- Soc. Water Quality, 16(4), 421-430.
- [12] Cho, H.S., Kim, Y.O., Seol, S.W. and Horiguchi, T., 2004, "A study on the pollution of nonylphenol in surface sediment in Gwangyang Bay and Yeosu Sound", J. Environ. Sci., 13(6), 561-570.
- [13] Cho, K.A., Wui, I.S. and Choi, C.I., 1994, "Ecological study of phytoplankton in the Kwang-Yang Bay", Korean J. Environ. Biol., 12(2), 137-150.
- [14] Cho, T.C., 1991, "Effect of the tidal sea level change on the unconsolidated sediment in Gwangyang Bay", Bull. Korean Fish. Soc., 24(1), 9-20.
- [15] Choi, C.G. and Huh, S.H., 2008, "Composition of marine algal community at the intertidal zone in Gwangyang Bay, south sea, Korea", J. Korean Fish. Soc., 41(3), 201-207.
- [16] Choi, D.L., Hyun, S.M. and Lee, T.H., 2003, "Recent geomorphological changes and late quaternary depositional sequence of Gwangyang Bay, southern coast of Korea", J. Korean Soc. Oceanogr., 8(1), 35-43.
- [17] Choi, E.S., Kim, S.J., Oh, R.R., Yun, H.Y., Shin, K., Chang, M., Lee, S., Lee, S.S. and Lee, T.K., 2004, "Correlations and seasonal variations of marine viral abundances, bacterial abundances and concentration of chlorophyll-*a* in Gwangyang Bay", Korean J. Environ. Biol., 22(special issue), 86-92.
- [18] Choi, H.W., Kim, K.H. and Lee, C.Y., 2007, "Application of spatial autocorrelation for the distribution pattern analysis of marine environment - Case of Gwangyang Bay -", Korean Assoc. Geographic Info. Studies, 10(4), 60-74.
- [19] Choi, J.W., Hyun, S. and Chang, M., 2003, "The summer benthic environmental conditions assessed by the functional groups of macrobenthic fauna in Gwangyang Bay, southern coast of Korea", Korean J. Environ. Biol., 21(2), 101-113.
- [20] Choi, S.Y., Cho, W.C. and Lee, W.H., 1992, "The flow variation due to pier construction at Kwangyang Bay", KSCE J. Civil and Environ. Eng. Res., 12(3), 115-125.
- [21] Choo, H.S., 2002, "Numerical experiments for the changes of currents by reclamation of land in Kwangyang Bay", J. Environ. Sci., 11(7), 637-650.
- [22] Choo, H.S., Lee, B.G. and Lee, G.H., 2002, "Numerical simulation of residual currents by diagnostic multi-level model in Kwangyang Bay, Korea", J. Environ. Sci., 11(1), 41-56.
- [23] Chu, B.R., Lee, S.H., Yu, T.S., Hwang, T.Y. and Han, K.H., 2019, "Quantitative fluctuation and species composition of ichthyoplankton in Gwangyang Bay, Korea", J. Korean Soc. Fish Ocean Technol., 55(3), 233-242.
- [24] Chung, H.H., Jeong, H.S. and Choi, S.W., 2006, "Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of Kwangyang Bay in Korea", J. Korean Ind. Eng. Chem., 17(2), 210-216.
- [25] Chung, H.H., Jeong, H.S., Kim, E.Y., Cho, H.I., Hwang, J.C. and Choi, S.W., 2004, "Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of Kwangyang Bay on Korea", J. Environ. Sci., 13(6), 543-549.
- [26] Chung, M., 2006, "The diffusion change of SS in the Kwangyang Bay reduced", J. Korean Soc. Environ. Tech., 7(4), 293-298.
- [27] Chung, M., 2008, "A variation of tidal flow in Gwangyang-bay by Seomjin-River outflows and wastes reduction", J. Korean Soc. Environ. Tech., 9(3), 165-170.
- [28] Chung, M. and Lee, I.H., 2014, "A numerical experiments on the diffusion changes of COD by the waters reduction of the Gwangyang Bay", J. Korean Soc. Environ. Tech., 15(4), 309-314.
- [29] Hahm, K.H., 1999, "A study on the distribution of winter birds throughout Kwangyang Bay in Chollanam-do", J. Basic Sci. Inst. Kyungnam Univ., 13, 139-150.
- [30] Hamilton, E.I., 1970, "Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific", J. Geophys. Res., 75(23), 4423-4446.
- [31] Han, I., Oh, W., Park, G., Yoon, E. and Lee, K., 2019, "Biomass estimation with a hydroacoustic survey and the shrimp beam trawl fishery in Gwangyang Bay in summer", Korean J. Fish. Aquat. Sci., 52(3), 288-297.
- [32] Han, S.D., 1995, "Simulation of oil spread in Kwangyang Bay by Eulerian-Lagrangian transport model", J. Korean Soc. Environ. Engineers, 17(8), 735-747.
- [33] Han, S.K. and Park, J.Y., 2006, "A study on distribution property of micropollutants in Kwang-Yang Bay sediment", J. Environ. Sci., 15(7), 643-651.
- [34] Hong, J.S., Song, C.B., Kim, N.G., Kim, J.M. and Huh, H.T., 1987, "Oceanographic conditions in relation to laver production in Kwangyang Bay, Korea", Bull. Korean Fish. Soc., 20(3), 237-247.
- [35] Hong, S.W., Hah, Y.C., Ahn, T.S., Ahn, T.Y. and Kwon, O.S., 1994, "On the variation of microbial populations in Kwangyang Bay", Korean J. Environ. Biol., 2(1), 41-57.
- [36] Hong, S.H., Yim, U.H., Shim, W.J. and Oh, J.R., 2004, "Environmental occurrence of persistent organochlorines in Kwangyang Bay", Korean J. Environ. Biol., 22(special issue), 30-37.
- [37] Huh, S.H. and An, Y.R., 1997, "Seasonal variation of shrimp (crustacea: decapoda) community in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay, Korea", J. Korean Fish. Soc., 30(4), 532-542.
- [38] Huh, S.H. and An, Y.R., 1998, "Seasonal variation of crab (crustacea: decapoda) community in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangayng Bay, Korea", J. Korean Fish. Soc., 31(4), 535-544.
- [39] Huh, S.H., Kim, N.U. and Choo, H.G., 1998a, "Seasonal variations in species composition and abundance of fish collected by an otter trawl around Daedo Island in Kwangyang Bay", Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 34(4), 419-432.
- [40] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1997a, "Species composition and seasonal variations of fishes in eelgrass (*Zostera marina*) bed in



- Kwangyang Bay”, Korean J. Ichthyol., 9(2), 202-220.
- [41] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1997b, “Feeding habits of *Leiognathus nuchalis* in eelgrass(*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, Korean J. Ichthyol. 9(2), 221-227.
- [42] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1997c, “Feeding habits of *Syngnathus schlegeli* in eelgrass(*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 30(5), 896-902.
- [43] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1998a, “Feeding habits of *Acentrogobius pflaumii* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, Korean J. Ichthyol., 10(1), 24-31.
- [44] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1998b, “Feeding habits of juvenile *Acanthopagrus schlegeli* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, Korean J. Ichthyol., 10(2), 168-175.
- [45] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1998c, “Feeding habits of *Conger myriaster* in the eelgrass(*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, J. Korea Fish. Soc., 31(5), 665-672.
- [46] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1998d, “Feeding habits of *Favonigobius gymnauchen* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 31(3), 372-379.
- [47] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1998e, “Feeding habits of *Sebastes inermis* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 31(2), 168-175.
- [48] Huh, S.H. and Kwak, S.N. and Nam, K.W., 1998b, “Seasonal variations of eelgrass (*Zostera marina*) and epiphytic algae in eelgrass beds in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 31(1), 56-62.
- [49] Huh, S.H. and Kwak, S.N., 1999, “Feeding habits of *Acanthogobius flavimanus* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 32(1), 10-17.
- [50] Hyun, S., Paeng, W.H. and Lee, T., 2004, “Characteristics of surficial sediment and environments based on geochemical data in Kwangyang Bay, Korea”, Korean J. Environ. Biol., 22(special issue), 93-102.
- [51] Jang, M.C., Jang, P.G., Shin, K.S., Park, D.W. and Chang, M., 2004, “Seasonal variation of zooplankton community in Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Biol., 22(special issue), 11-29.
- [52] Jeong, S.J., Yu, O.H. and Suh, H.L., 2004, “Seasonal variation and feeding habits of amphipods inhabiting *Zostera marina* beds in Kwangyang Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 37(2), 122-128.
- [53] Jeong, S.Y., Son, H.J. and Jeoung, N.H., 2011, “Isolation and degradation activity of a TBTCI(Tributyltin chloride) resistant bacteria in Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Agric., 30(4), 424-431.
- [54] Jeong, W.G., Cho, S.M., Kim, Y.S. and Kim, M.C., 2003, “Physiochemical characteristics of Kwangyang Bay in winter and spring”, J. Inst. Mar. Industry, 16, 193-199.
- [55] Joo, H.S., Lee, W.B. and Park, J.C., 1999, “Temporal and spatial distribution of VOCs in seawater of Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Biol., 17(4), 513-519.
- [56] Kang, H.S. and Lee, G.W., 1996, “Trace metal concentrations and sedimentation rates of Kwangyang, Masan and Ulsan Bay sediments”, J. Korean Soc. Wat. Quality, 12(4), 455-461.
- [57] Kang, H.Y., Jung, S.J., Kim, K.H. and Pyun, C.K., 2006, “Benefit cost analysis on mitigation of environmental impacts using contingent valuation method: the Kwangyang harbor case”, J. Korean Civil Eng., 26(2B), 217-223.
- [58] Kang, Y.H., 2005, “A preliminary trophic flow model for Kwangyang Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc. 38(3), 184-195.
- [59] Kim, D.C. and Kang, H.J., 1991, “Suspended sediment budget in Kwangyang Bay through the Yeosu Sound”, Bull. Korean Fish. Soc., 24(1), 31-38.
- [60] Kim, D.C. and Kim, G.Y., 1991, “Physical and acoustic properties for unconsolidated sediment in the Kwangyang Bay: In comparison with the continental terrace sediment in the North Pacific”, Bull. Korean Fish. Soc., 24(5), 289-302.
- [61] Kim, D.G., 2006, “Tree-rising growth characteristics of *Zelkova serrata* Makino after replanting on the reclaimed land from the sea in Kwangyang Bay”, J. Korean Inst. Landscape Architecture, 33(6), 40-50.
- [62] Kim, D.G. and Kim, Y.S., 2005, “Property changes of vertical soil layers planted with *Zelkova serrata*(Thunberg) Makino on the reclaimed land from the sea in the Kwangyang Bay, Korea”, J. Korean Inst. Landscape Architecture, 33(2), 60-70.
- [63] Kim, D.G., Kim, Y.S., Kim, M.S. and Oh, K.K., 2001, “Vertical soil environmental characteristics at landscape planning sites of *Pinus thunbergii* Parlature in reclaimed land from the sea on Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Eco., 15(2), 186-192.
- [64] Kim, D.G. and Park, J.M., 2004, “The physico-chemical properties of the soil at the grounds of replanted *Zelkova serrate* (Thunberg) Makino in reclaimed land from the sea, Kwangyang Bay”, J. Korean Inst. Landscape and Architecture, 31(6), 85-94.
- [65] Kim, D.G., Park, W.K. and Seo, J.W., 2002, “Tree-ring growth characteristics of *Pinus thunbergii* Parl. after replanting on the reclaimed land from the sea in Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Eco., 16(1), 1-9.
- [66] Kim, D.M., 2016, “Numerical simulation of PFOA in Kwangyang Bay”, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 49(5), 665-670.
- [67] Kim, E.Y., Chung, H.H., Jeong, H.S., Cho, H.I., Hwang, J.C. and Choi, S.W., 2004, “Physiochemical characteristics of Kwangyang Bay-Effect of inputting rivers after rainy season in summer?”, J. Environ. Sci., 13(9), 789-798.
- [68] Kim, G.Y. and Park, M.O., 2001, “Evaluation of butyltin compounds and its distribution among seawater, sediment and biota from the Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 34(4), 291-298.
- [69] Kim, H.S. and Lee, S.W., 2004, “Storm surge caused by the typhoon ”Maemi“ in Kwangyang Bay in 2003”, Korean Soc. Oceanol., 9(3), 119-129.
- [70] Kim, M.S., Shim, W.J. and Oh, J.B., 2004, “Distribution of phthalate compounds in Kwangyang Bay and Seomjin River estuary”, Korean J. Environ. Biol., 22(special issue), 47-53.
- [71] Kim, S.Y. and Lee, B.K., 2004, “A study on the sediment flux



- in Gwangyang Bay during spring tide, March 2003”, J. Kor. Fish. Soc., 37(6), 511-516.
- [72] Kim, S.Y., Moon, C.H. and Cho, H.J., 2003, “Vertical distribution of dinoflagellate cysts in sediments from Gwangyang Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 36(3), 290-297.
- [73] Kim, T.J. and Hwang, H.K., 1999, “A study on the distribution of summer irids throughout Kwangyang Bay in Chollanam-do”, Bull. Basic Sci. Inst., Gyeongnam University, 127-137.
- [74] Koo, J.K., Kim, Y.R., Mun, H.B. and Lee, W.B., 1993, “The estimation of unit COD discharge rate from non-point source by the BOX model in Kwangyang Bay basin”, J. Korean Soc. Wat. Quality, 9(2), 122-130.
- [75] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA), <http://www.khoa.go.kr> (accessed 2021. 8. 8)
- [76] Kwak, S.N. and Huh, S.H., 2002, “Feeding habits of *Platycephalus indicus* in eelgrass (*Zostera marina*) beds in Kwangyang Bay”, Korean J. Ichthyol., 14(1), 29-35.
- [77] Kwak, S.N. and Huh, S.H., 2003a, “Feeding habits of juvenile *Liparis tanakai* in the eelgrass, *Zostera marina* bed in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 36(4), 372-377.
- [78] Kwak, S.N. and Huh, S.H., 2003b, “Feeding habit of *Limanda yokohamae* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 36(5), 522-527.
- [79] Kwak, Y.S., Hwangbo, J.K., Lee, C.I., 2001, “Heavy metal concentrations of sediment and *Ruditapes philippinarum* inhabited in the intertidal zone of Kwangyang Bay”, Korean J. Ecol., 24(5), 297-301.
- [80] Lee, B.K. and Kim, S.Y., 2009, “Characteristics of in-situ suspended particulate matter at the Kwangyang Bay using LISST-100 and ADCP”, J. Environ. Sci., 18(11), 1299-1307.
- [81] Lee, E.H., Seo, M.H., Yoon, Y.H., Choi, S.D. and Soh, H.Y., 2017, “Environmental factors affecting zooplankton community in Kwangyang Bay”, Korea J. Environ. Biol., 35(4), 631-639.
- [82] Lee, I.K., Kim, Y.H., Lee, J.H. and Hong, S.W., 1975, “A study on the marine algae in the Kwangyang Bay-1. the seasonal variation of algae community-”, Korean J. Botany, 18(3), 109-121.
- [83] Lee, I.K., Lee, J.H., Kang, S.Y., Lee, S.R., 1977, “A study on the marine algae in the Kwangyang Bay-2. The residues of organochline pesticides in marine algae-”, Korea J. Botany, 20(1), 53-57.
- [84] Lee, M.O., Lee, S.N. and Park, I.H., 1998, “Environmental change by a water front development”, Proc. Conf. Water Resources Eng., 98, ASCE, 856-861.
- [85] Lee, S.R., Kang, S.Y., Park, C.K., Lee, J.H. and Rho, C.S., 1976, “A survey on the residues of organochlorine pesticides in water, mud and clam samples from the Kwangyang Bay, Korea”, J. Korean Agricultural Chemical Soc., 19(3), 112-119.
- [86] Lee, W.J., Park, N.J., Noh, J.H., Lee, J.D., Jang, P.G., Chang, M. and Shin, K.S., 2004, “Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Kwangyang Bay”, Environ. Res. Institute, Kyungnam Univ., 27, 105-127.
- [87] Lee, Y.G., Hwang, J.Y., Jung, K.K. and Choi, J.M., 1996, “Sedimentary environment change in Kwangyang Bay and Yosou Sound-Based on sediment characteristics and clay minerals-”, J. Korean Earth Sci. Soc., 17(5), 407-416.
- [88] Lee, Y.H., Kim, Y.J. and Kim, D.K., 1999, “Analysis of consolidation and shear characteristics for Kwangyang Bay clay”, J. Korean Geotech. Soc., 15(1), 151-160.
- [89] Lee, Y.S., Yu, J., Kwon, K.Y., Choi, Y.K. and Cho, E.S., 2004, “Temporal and spatial variations of limiting nutrient on phytoplankton growth in the Gwangyan Bay, Korea”, J. Korean Soc. Environ. Eng., 26(8), 890-895.
- [90] Li, D.H., Kim, M.S., Shim, W.J., Yim, U.H., Hong, S.H. and Oh, J.R., 2004, “Distribution of nonylphenol in Kwangyang Bay and the surrounding streams”, Korean J. Environ. Biol., 22(special issue), 71-77.
- [91] Lim, Y.M., Lee, E.H., Choi, J.H., Oh, J.S. and Seo, D.I., 2003a, “A study on the estimation of waste loading into the Kwangyang Bay”, J. Korean Soc. Environ. Tech., 4(4), 343-351.
- [92] Lim, Y.M., Lee, E.H., Choi, J.H., Oh, J.S. and Seo, D.I., 2003b, “Water quality modeling of Kwangyang Bay for the management plan”, J. Korean Soc. Environ. Tech., 4(4), 323-334.
- [93] Marine Environment Information Portal, <http://www.meis.go.kr> (accepted 2021. 8. 8).
- [94] Park, I.H. and Lee, M.O., 2008, “Tidal flow and tidal exchange around an island type reclamation area in Kwangyang Bay”, J. Korean Island, 20(1), 89-107.
- [95] Park, J.C., Lee, W.B. and Joo, H.S., 1998, “Factor analysis of the environmental impact on microbial populations in ecosystem of Kwangyang Bay”, Korea J. Environ. Biol., 16(2), 143-150.
- [96] Park, K.J. and Cha, S.S., 1995, “Food organisms of postlarvae of Japanese anchovy(*Engraulis japonica*) in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 28(3), 247-252.
- [97] Park, K.J., Cha, S.S. and Huh, S.H., 1996, “Food organisms of the postlarval shad (*Konosirus punctatus*) in Kwangyang Bay”, J. Korean Fish. Soc., 29(4), 450-455.
- [98] Park, Y.A., Lee, C.B. and Choi, J.H., 1984, “Sedimentary environments of the Kwangyang Bay, southern coast of Korea”, J. Oceanol. Soc., Korea, 19, 82-88.
- [99] Ryu, S.O., 2003a, “Spatial and temporal variation of grain size of the surface sediments in Kwangyang Bay, south coast of Korea”, Korean Sc. Oceanol., 8(3), 340-348.
- [100] Ryu, S.O., 2003b, “Seasonal variation patterns of tidal flat sediments in semi-enclosed Hampyong and Kwangyang Bays, west and south coasts of Korea”, J. Korean Earth Sci. Soc., 24(6), 578-591.
- [101] Ryu, S.O. and Sin, Y.S., 2006, “Sedimentologic characteristics of tidal flat sediments after the construction of sea dyke in Kwangyang Bay, south coast of Korea”, J. Korean Earth Sci. Soc., 27(6), 659-669.
- [102] Soh, H.Y. and Suh, H.L., 1993, “Seasonal fluctuation of the



- abundance of the plankton copepods in Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Biol., 11(1), 26-34.
- [103] Son, M.H., Baek, S.H., Joo, H.M., Jang, P.G. and Kim, Y.O., 2011, “Distribution characteristics of *Escherichia coli* and water pollution in Kwangyang Bay and Jinhae Bay, Korea”, Korean J. Environ. Biol., 29(3), 162-170.
- [104] Song, C.B., 1986, “An ecological study of the intertidal macroalgae in Kwangyang Bay, southern coast of Korea”, Algae, 1(1), 203-223.
- [105] Won, J.H. and Go, N.P., 1975, “Water quality of the culture beds of hard clam and adjacent sea of the Yeosu Refinery of Honam Oil Refinery Co. in Kwangyang Bay”, Bull. Korean Fish. Soc., 8(2), 73-84.
- [106] Wui, I.S., Chun, S.B., Lee, J.B. and Ra, M.S., 1993, “Factor analysis of the environmental impact on microbial population in Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Biol., 11(1), 11-16.
- [107] Yeosu Regional Office of Oceans and Fisheries, <https://yeosu.mof.go.kr> (accessed 2021. 8. 8).
- [108] Yoon, H.S. and Seo, S.G., 2007, “The contamination evaluation for the sediment of stream around industrial complex near Kwangyang Bay”, J. Korean Soc. Environ. Tech., 8(1), 40-47.
- [109] Yu, C.M., Joo, H.S., Park, J.C., Lee, W.B. and Lee, W.K., 1998, “Biological evaluation of seawater quality using sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*) gametes in Kwangyang Bay”, Korean J. Environ. Biol., 16(4), 319-327.
- [110] Yun, S.G., Byun, S.H., Kwak, S.N. and Huh, S.H., 2002, “Seasonal variation of caprellids (crustacea: amphipoda) on blades of *Zostera marina* in Kwangyang Bay, Korea”, J. Korean Fish. Soc., 35(2), 105-109.

---

Received 30 August 2021

1st Revised 27 September 2021, 2nd Revised 19 November 2021

Accepted 22 November 2021