

## 천수만 해양환경의 특징

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

<sup>1</sup>전남대학교 조선해양공학과 명예교수

<sup>2</sup>전남대학교 조선해양공학과 교수

<sup>3</sup>한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장

## Marine Environmental Characteristics of Cheonsu Bay, Korea

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

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

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

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

### 요 약

본 연구에서는 지난 45년간 천수만의 해양환경과 관련하여 발표된 64편의 학술논문을 분석하여 시대 변화에 따른 해양 환경의 특징을 고찰하였다. 천수만은 1985년 서산방조제에 의한 물막이공사가 완료됨에 따라 만의 북부에는 인공호(간월호와 부남호)가 만들어졌고, 이후 2000년도에는 보령방조제와 홍성방조제의 완공과 이와 관련한 간척사업으로 인하여 수산자원보전지역은 물론 수면적도 이전의 약 절반으로 줄어들었다. 그 결과, 창조시 조류 유속이 낙조류에 비해 상대적으로 더 빨라지고, 조간대의 노출시간대가 변화하였다. 퇴적물의 오염정도는 남해안이나 외국에 비해 상대적으로 낮거나 중간정도이지만, 방조제 건설 후 납과 유기탄소의 농도가 높은 퇴적물이 발견되었다. 특히 퇴적물과 이매패류에서 유기오염물질의 하나인 PCDD/Fs의 농도가 NOAA가 제시한 역치의 영향 수준(threshold effect level)에서 높게 나타나 생태독성학적으로 위험성을 예고하였다. 퇴적물의 입도 조성은 만구에서 북쪽의 방조제 부근으로 갈수록 세립화하고 유기물 함량도 상대적으로 증가하였다. 식물플랑크톤은 서산 방조제의 건설시기인 1985년을 전후하여 규조류의 주요 우점종이 변화하였으며, 특히 인공호 건설 후 우점하던 규조류 대신 편모조류, 남세균, 담수 녹조류로의 종 조성의 변화는 물론 규조류의 현존량도 감소하였다. 어류 또한 방조제 건설 전에는 64종이 출현하였으나, 6년 내지 25년 후에는 25-26종의 어류가 출현하였으며, 어종의 풍도와 군집구조가 변화하였다. 저서동물은 1990년대에는 311종, 서식밀도 769 indiv.·m<sup>2</sup>로 출현하였으나 2010년대에는 224-252종, 서식밀도 681-1,940 indiv.·m<sup>2</sup>로 출현하여, 과거에 비해 출현종수가 감소하였다. 특히, 저서동물 중 우점종인 다모류의 긴자락송곳갯지렁이(*Lumbrineris longifolia*)는 천수만내의 유기물의 함량과 깊은 관계가 있어 오염지시종으로 이용되었다. 저서생물의 건강도는 중간 상태 또는 양호한 상태로 평가되었으나, 유기오염은 만구에서 만내로 갈수록 증가하였다. 이상을 종합해 볼 때, 천수만의 해양환경은 방조제 건설 이후 전반적으로 나빠진 것으로 판단되었다. 따라서 천수만의 환경을 개선하고 수산생물자원의 회복을 위해서는 무엇보다 만 북부의 인공호에 대한 적절한 수질과 배수의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 더 나아가 양식시설의 적절한 배치를 비롯하여, 치폐나 어류의 종묘 생산과 방류, 폐어구의 회수 및 리사이클링 기술 개발 등이 앞으로 해결해야 할 과제로 생각된다.

**Abstract** – This study was carried out to find out the marine environmental characteristics of Cheonsu Bay, located in the western coastal waters of Korea, based on the sixty four academic essays issued for the last forty five years. Seasan Dikes has been completed in Cheonsu Bay in 1985 so that artificial lakes named Ganweolho and Bunamho have been made at the north of the bay. After that, Boryeong and Hongseong dikes have been completed Dike in 2000 with some other reclamation projects. As a result, the real area of the bay has been reduced almost half of its original water surface, including Fishery Resources Protection Area. Thus, flood currents became faster

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

than ebb currents and exposure time slots of intertidal zones also varied. Excessive level of Pb as well as high concentration of organic carbon were found inside of the bay after although the contamination level of sediments appeared lower or intermediate compared to the southern coastal areas or overseas level. In particular, it ecotoxicologically gave warning since concentrations of PCDD/Fs, known as one of organic pollutants, appeared higher in the sediments and bivalves compared to those of a threshold effect level suggested by NOAA. Phytoplankton indicated a transition of diatom from one dominant species to other dominant species such as dinoflagellates and freshwater green alga especially since the construction of artificial lakes in 1985. Fishes and benthic animals also appeared differently in their abundance (or the density of inhabitation) and community composition 6 to 25 years after the construction of dikes. In particular, Polychaeta *Lumbrineris longifolia* turned out to be an indicator of pollution as it correlated with the content of organic matter. On the other hand, health index of the bay indicated intermediate or good states but organic pollution tended to increase towards the inside of the bay from the mouth. Consequently, marine environments of Cheonsu Bay were judged to be deteriorated than those before the construction of dikes overall. Therefore, it will need to take proper actions such as the management of the water quality and freshwater discharge of artificial lakes in order to improve marine environments of the bay and restore fishery resources. Furthermore, proper deployments of farming facilities, production and release of the seedling of fish and shellfish, and retrieval of waste fishing tools (or nets) and its recycling will be necessary for a sustainable ecosystem of Cheonsu Bay.

**Keywords:** Cheonsu Bay(천수만), Marine environments(해양환경), Seosan Dikes(서산 방조제), Microplastics(미세플라스틱), Ecosystem(해양생태계)

## 1. 서 론

천수만은 한국 서해안에 위치하며 수심이 대략 20 m 이하의 반폐쇄성 해역으로서, 서쪽으로는 태안군 안면도, 북쪽으로는 서산 방조제 A와 B, 동쪽으로는 홍성군과 보령시, 남쪽으로는 효자도, 원산도 등으로 둘러싸여 있다(Fig. 1). 천수만은 방조제 건설 이후 방조제를 따라 10 m 이상의 수심을 유지하고 있으며 해안선 부근에는 간석지가 많이 형성되어 있다(Fig. 2). 만의 폭은 8.0-13.0 km, 남북 방향의 길이는 37 km에 달한다(Kim[1989]). 반면, Kim and Kang[1986]은 천수만은 동서의 폭이 최대 7.4 km, 남북의 길이는 33 km라고 기술하고 있으며, Kwon *et al.*[2013]은 천수만이 남북으로 약 40 km, 만 중앙부의 최대폭은 약 10 km, Park *et al.*[2006]은 만 입구의 폭이 5.5 km, 길이가 40 km, 평균 수심이 10-25 m로 각각 기술하고 있어서 연구자마다 정의에 대한 의견 차이를 보였다.

천수만의 저질은 대부분 사니질이며, 석영이 30%, 정장석이 20%, 사장석이 4-10%로 구성되어 있으며, 홍성군 연안측은 미사장석이 14%로 좋은 대조를 이루고 있다(KORDI[1980]). 또한 홍성군측 양식장 주변은 잘피군락이 잘 서식하는 사니질이 형성되어 있다. 한편 만의 내측에는 하천(덕문천, 해미천, 대사천, 영곡천, 외룡천 및 저수지(삼성, 산수)에서 다량의 담수가 유입되었으나, 간척공사에 따라 축조된 방조제로 인해 담수 유입이 차단되었다. 그러나 만의 동쪽 홍성군 서부면 남당리 하부 2 km 지점에서는 금리천이 만내로, 만구역인 보령군 오천면에서 오천과 염성저수지의 담수가 각각 유입하고 있으나, 안면도측에서는 호저수지와 춘산저수지의 지류가 유일한 담수 유입원이다(Kim and Kang[1986]; Kim[1989]).

천수만의 조석은 반일주조가 탁월하고 평균 조차는 4.59 m(대조차: 6.33 m, 소조차: 2.86 m)로서, 주 수로에서 조류의 최강 유속은 창조류시 1.0 m·sec<sup>-1</sup>, 낙조류시 0.7 m·sec<sup>-1</sup>이다(KORDI[1974]; KEPCO

[1985]; Ryu *et al.*[2005]; Kim and Kim[1996]; Lee *et al.*[2013]). 천수만은 방조제 건설 이전에는 만 입구에서 2-3 m·sec<sup>-1</sup>의 강한 조류가 발생하였으나(KORDI[1978]; KORDI[1994]), 방조제 건설 후는 유속이 현저히 감소하여 만내에서 창조류는 0.6 m·sec<sup>-1</sup>, 낙조류는 0.95 m·sec<sup>-1</sup>로, 방조제 건설이 천수만내 조류 소용에 중요한 변화를 야기시켰다(KORDI[1994]; OHA[1991]). 특히, 낙조류시에는 해안선에 평행한 남향류를 보이다가 창조류시에는 만의 입구쪽에서 북동 방향으로 편향을 보이는데, KMSTI[1981]에 의하면 이것은 최대수심의 수로가 이 방향으로 향하고 있기 때문이다. 또한 천수만 북부의 부남 및 간월 호수의 방조제 전면에 위치한 황도 주변의 조간대는 그 중앙에 있는 복잡한 수로가 특징이며, 이곳은 폭이 1.65 km, 길이가 5.15 km로, 퇴적상은 만조선으로부터 간조선에 향해 mud flats, mixed flats, sand flats으로 구성되어 있다(Lee and Park[1998]). 특히, mud flats 퇴적상은 완만한 경사와 상방향으로 오목한 기복을 가지고 있다(Choi *et al.*[2010]; Choi *et al.*[2011c]; Kim *et al.*[2019]). 그러나 이러한 퇴적상은 저서생물에 의해 많이 교란되었으며 지속적인 매립과 제방 건설로 인해 해안선에도 많은 변화를 겪었다(Kim and Ryu[2020]). 또한 배수갑문을 통한 간헐적인 담수 배수로 인해 육상기원 유기물이 유입되고 있어서 북쪽에 위치한 방조제 주변에서는 이를 이용한 가두리 양식이 성행하고 있다. 특히 담수 배수시에는 표층에 염분이 낮은 수괴가 형성되어 담수성 플랑크톤이 관찰되기도 하며, 하계 수온 상승시에는 적조도 발생한다(KORDI[1992]).

한편 천수만 방조제는 1979년 8월 착공되어 1983년 10월에 사장포 해역(서산 A 지구), 1985년 3월에 적동강 해역(서산 B 지구)에 물막이 공사가 완료됨으로써 만의 북부에는 간월호(서산 A 지구)와 부남호(서산 B 지구)라는 두 개의 인공호가 각각 조성되었다(Jung *et al.*[2014]). 특히 간월호 삼각주는 간월호가 형성된 이후 도당천

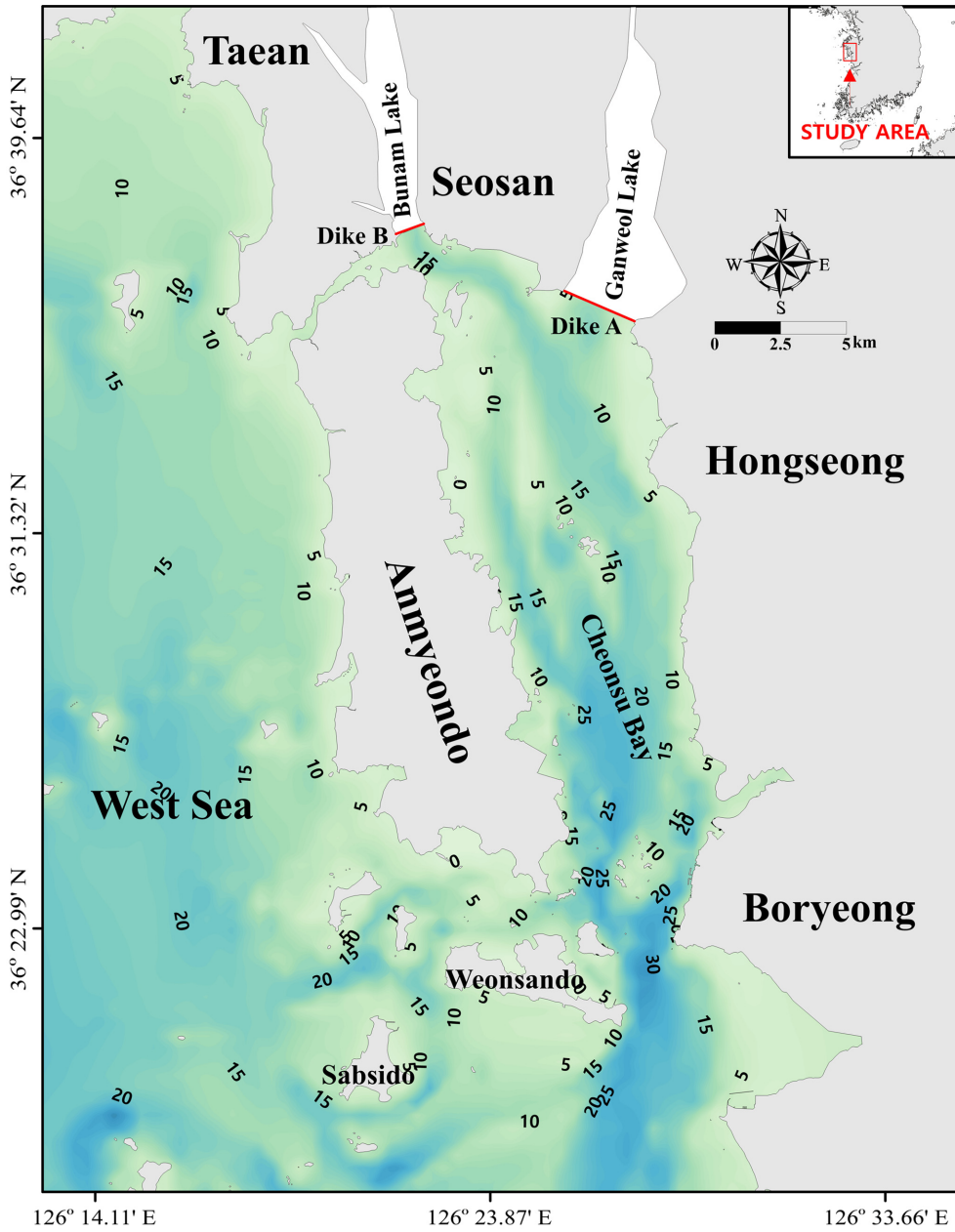


Fig. 1. Cheonsu Bay for study area.

의 하구 부분에 퇴적물이 쌓이면서 발달하였다(Son[2019]). 또한 1999년에는 충남 보령시 천북면 하만리와 오천면 소성리를 연결하는 보령방조제(오천만), 또한 2000년에는 충남 홍성군 서부면 신리와 보령시 천북면 장은리를 연결하는 홍성방조제(모산만) 등의 물막이 공사가 완공되어 천수만의 해역 면적은 이전의 380 km<sup>2</sup>에서 절반 정도가 감소한 약 180 km<sup>2</sup>로 줄어들었다(So et al.[1998]). 방조제 건설 이전에는 큰 도시나 산업시설이 거의 없고 흘러들어오는 큰 하천도 없어 육상 오염물질이 거의 유입되지 않아 청정한 수질이 유지되어 여러 수산생물의 서식처와 산란장이었으며, 특히 꽃게와 대하의 주 산란장이었다(NIFS[1985]). 또한 만내의 간석지에서는 굴양식이, 그리고 빠른 조류를 이용한 정치망 어업이 성행하

였으며, 김을 비롯하여 바지락, 낙지, 농어, 도미류, 민어, 송어 등 어류가 대량 생산되는 곳이었다(KORDI[1978]; KEPCO[1985]; Lee and Seok[1984]). 또한 마을어업, 양식장, 정치망 어업 등 다양한 어장이 연안이나 섬 주변의 간석지를 따라 집중적으로 분포하고 있다(Fig. 2). 천수만의 수산생물 서식 환경을 지키기 위해 1978년에 이 지역 248.8 km<sup>2</sup>를 수산자원보전지역으로 고시하였으나, 1980년부터 1984년까지의 서산 A, B지구 간척공사(1982년에 착공, 1989년에 완공)로 인해 1986년에는 27.24 km<sup>2</sup>가 감소한 221.56 km<sup>2</sup>가 보전지역으로 변경고시되었고, 이후 1998년에는 8.079 km<sup>2</sup>가 감소한 213.481 km<sup>2</sup>가 보전지역으로 변경·지정되었다(Park et al. [2006]). 그러나 이러한 수산생물의 보전 노력에도 불구하고 방조제

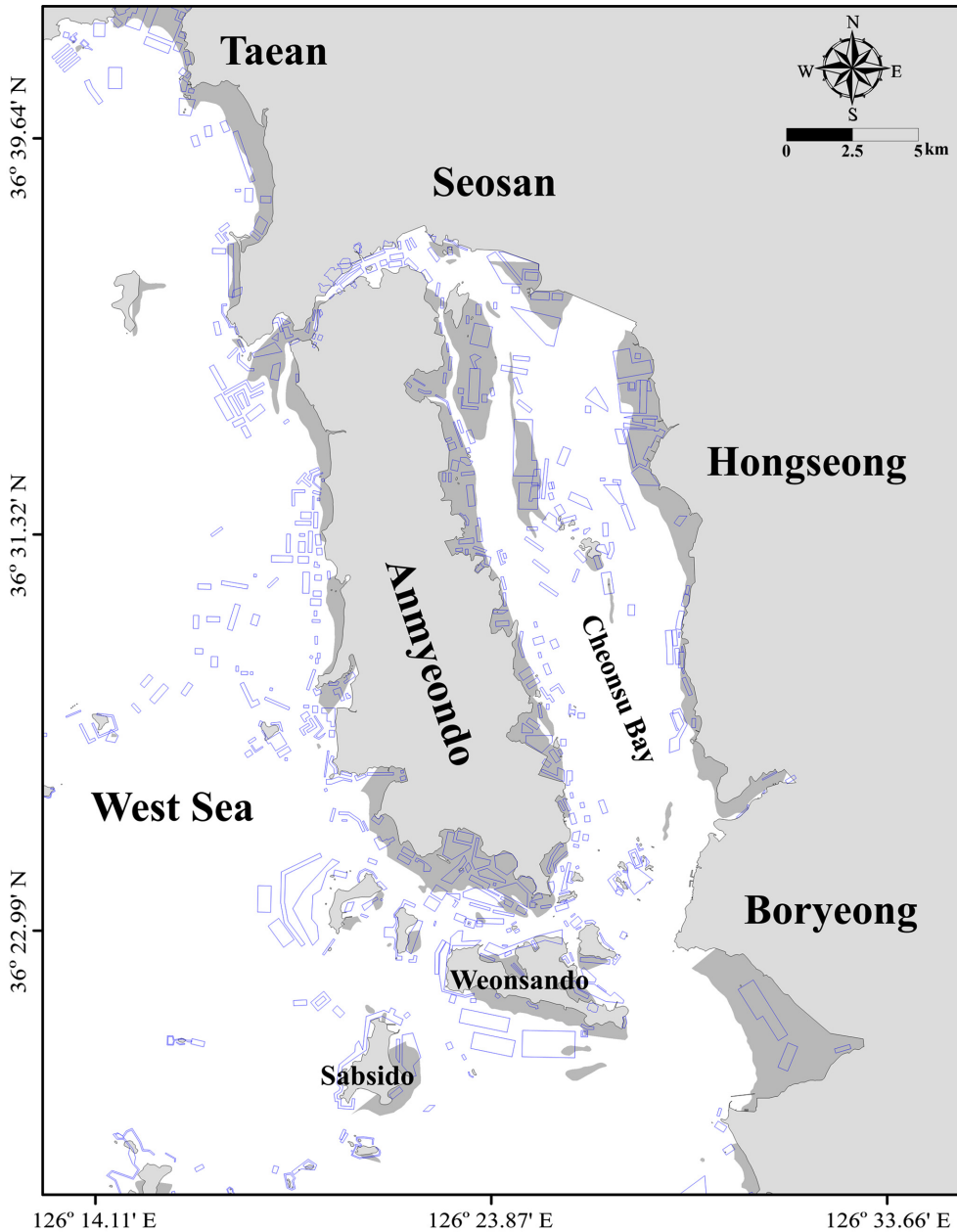


Fig.2. Distribution of maricultural farms in the neighborhood of Cheonsu Bay (<https://www.mof.go.kr>).

건설 이후 조석의 변화로 인해 수산생물의 생산량은 감소 추세를 보이고 있으며(Lee[1983]; Lee and Seok[1984]), 급격히 약해진 조류의 영향으로 퇴적상도 변화하여(KORDI[1994]), 저서생물의 군집뿐만 아니라 우점종의 서식밀도도 변화한 것으로 나타났다(Lee and Park[1998]; Park *et al.*[2000]). 이러한 환경변화에 대처하기 위해 최근 홍성군에서는 새조개를 비롯한 대하, 쭈꾸미, 꽃게, 바지락 등의 방류사업을 통해 천수만에서의 지속적인 수산자원의 회복과 조성에 힘을 쏟고 있다(<https://hongseong.go.kr>; <https://m.khan.co.kr>).

이상에서 살펴본 바와 같이, 천수만은 예로부터 청정한 수질과 만내에 발달한 간석지에 힘입어 다양한 수산생물의 서식처와 산란장 뿐만 아니라 지역 주민들의 삶의 터전이었다. 그러나 최근 들어

서산방조제를 비롯한 보령방조제, 홍성방조제의 건설과 이에 따른 간척사업 등으로 인해 어장이 축소되고 또한 물리 환경과 퇴적 환경이 급변하여 수산생물의 서식 환경은 예전에 비해 상당히 악화 된 것으로 나타났다. 따라서 천수만이 당면한 과제는 생물생산성의 향상과 환경회복이며, 이를 위해서는 먼저 천수만 현재의 해양환경이 어떤 상태인가를 진단하고 확인할 필요가 있다고 판단된다. 이러한 관점에서, 본 연구에서는 지난 45간 천수만의 해양환경과 관련하여 수행된 연구의 광범위한 리뷰를 바탕으로 연구 주제의 시대적 변화와 해양 환경의 특징을 고찰하고, 환경 개선을 위해 필요한 사항에 관하여 검토하였다.

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

Theme	Year	1976	1981	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	Total
		-1980	-1985	-1990	-1995	-2000	-2005	-2010	-2015	-2020	-2025	
Physical environment	Tides and tidal currents					1		1	1			5
	Variations of water temperature				1						1	
Water quality	Water quality indicator					1				1		2
Depositional environment/ Benthic environment	Depositional environment	2		1		1	4	1				14
	Benthic environment								2	2	1	
Biological environment/ Ecological environment	Plankton	1		5								
	Fish		2	5		3			2			
	Benthos					2		1	6			
	Bacteria/Seaweed		1	1								
Microplastics	Distribution									2	1	4
	Hazard evaluation										1	
Others	Ecotourism							3				
	Economic feasibility									1		
	Regional identity						1			2		
	Birds/Influenza						1	1	1			
Total		3	3	12	1	8	6	7	12	8	4	64

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1976년부터 2021년까지 천수만 연구와 관련하여 발표된 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI) 논문 47편, 과학인용지수(Science Citation Index; SCI) 논문 17편 등, 총 64편의 논문을 분석하였다. 또한 국립해양조사원 개방해(<http://www.khoa.go.kr/oceasmap/main.do>)에 공개된 어장정보를 참고하여 이들 자료로부터 시대에 따른 연구 주제의 변화와 천수만 해양환경의 특징을 진단·평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 천수만 연구의 개요

1976년 이래 천수만의 해양환경과 관련하여 수행된 연구 주제가 각 연대별 논문 발표건수를 나타내었다(Table 1). 천수만 연구는 전체 64건 중 생물 및 생태 환경과 관련한 주제가 많았고, 다음으로 퇴적 및 저서 환경, 물리 환경, 기타 환경(생태관광, 조류(새), 지역 경제 등), 물리 환경, 미세플라스틱, 그리고 수질 환경의 순으로 나타났다. 특히 주목할 만한 것은 1985년 서산 A, B 방조제에 의한 체질이 완료된 이후인 1986-1990년 동안 생물환경(어류와 플랑크톤)에 관한 연구가 상대적으로 많았다(Fig. 3). 이것은 아마도 천수만 북부 지역의 간척이 해양환경이나 생태계에 미쳤을 영향 파악이 필요하였기 때문으로 생각된다. 이러한 경향은 1999년 보령방조제와 2000년 홍성방조제에 의한 물막이공사가 완료된 시기 전후에도 생물환경 및 퇴적 환경에 관한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다는 사실에서 알 수 있다. 또한 물리환경에 비해 생물 환경이나 퇴적 환경에 관한 연구 주제가 상대적으로 더 많이 다루어진 것은 천수만이 가진 생물학적인 가치가 그만큼 중요하며 동시에 방조제 건

설 후 야기되는 퇴적 환경의 변화 추이를 관찰하는 것 또한 중요하기 때문이라 판단된다. 반면, 적조, 빈산소수괴 및 미세플라스틱에 관한 연구 주제가 거의 전무한 것은 천수만이 가지고 있는 차별성, 즉 해양환경적 특성 중의 하나라고 생각된다(Lee *et al.*[2020a]; Lee *et al.*[2020b]; Lee *et al.*[2021]). 이것은 천수만이 남해안의 다른 만(예를 들면, 광양만, 가막만, 진해만, 득량만 등)에 비해 수질이나 저질 환경이 상대적으로 양호한 것으로 판단된다.

지금까지의 연구 주제와 관련하여 천수만의 해양환경 즉, 물리 환경, 수질 환경, 퇴적 및 저질환경, 생물 및 생태환경, 미세플라스틱 문제, 기타 환경에 관하여 각각 고찰하고자 한다(Table 1).

### 3.2 물리환경

Park[1995]은 천수만에서 현장조사(1993년 부표추적실험에 의한 확산계수의 추정 및 수온관측)와 주위 환경수 조건을 고려한 보령 화력발전소의 온배수 확산을 수치모의하여 온배수의 최대확산거리와 발전소의 배수구를 기점으로 위쪽으로 8.6 km, 아래쪽으로 10.8 km로 각각 추정하였다. 또한 So *et al.*[1998]은 Flather and Heaps[1975]가 개발한 수치모형을 KORDI가 개량한 수심적분 2차원 수치모형을 사용하여 서산 A, B지구 방조제의 축조가 야기한 천수만내 조석현상의 변화를 조사하였다. 그들의 결과에 따르면, 대조기 최강 창조류를 기준으로, 천수만의 북부지역, 백사수도, 중부지역, 남부지역 순으로 방조제의 축조 전에 비해 유속이 크게 감소한 것으로 나타났다. 또한 방조제 건설 후 천수만의 북부지역에서의 조간대 노출 시각이 51분 정도 빨라진 반면, 노출시간은 23분 정도 길어진 것으로 나타났다. 한편 Lee *et al.*[2008]은 조석과 조류의 현장관측자료 및 2차원 수치실험결과를 바탕으로 서산방조제 축조후의 천수만의 해수유동특성을 파악하였다. 현장관측결과, 조석형태수는 0.20-0.21로 반일주조류가 우세하였으며, 남쪽 만구부근에서의 조류의 주방

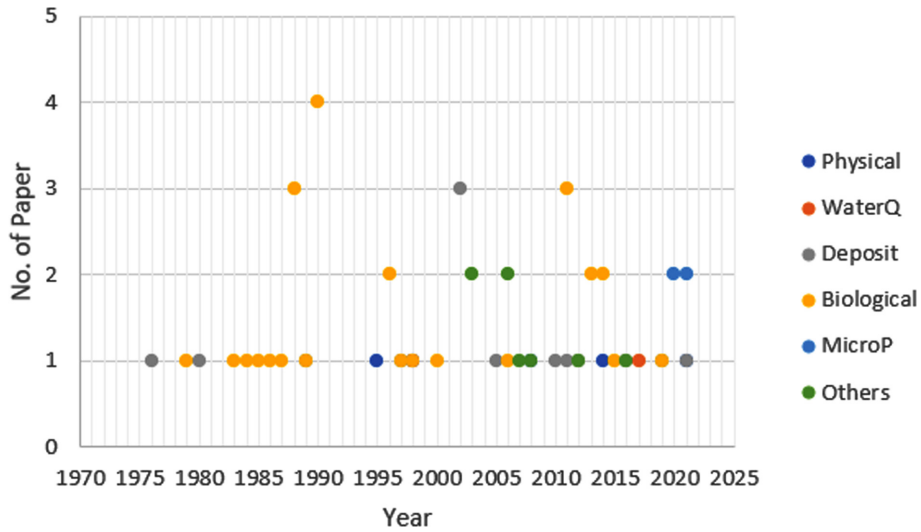


Fig. 3. Number of the papers issued in relation to the marine environmental of Cheonsu Bay during the past 45 years.

향은 남북방향으로서 창조류 최강유속은  $130 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ (평균유속은  $52.3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ ), 낙조류 최강유속은  $59.4 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ (평균유속은  $34.6 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )로 나타났다. 또한 만의 북쪽에서의 조류의 주방향은 동서 방향으로 창조류 최강유속은  $87.7 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ (평균유속은  $40.3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ ), 낙조류 최강유속은  $51.3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ (평균유속은  $28.3 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ )로, 창조류가 낙조류에 비해 약 2배 정도 유속이 더 컸다. 한편 조류는 창조류시 만의 남쪽 개구부에서 유입한 후 점차 북상하여 북쪽의 백서 수로를 통해 안면도 북단에서 유출하는 형태를 보이며, 낙조류시 안면도 북단 백서수로를 통해 유입하여 남하한 후 만의 남쪽 개구부를 통해 유출하는 형태를 보였다. 반면, 수치모형에 의해 조류는 창조류가 낙조류보다 전반적으로 우세하였고, 창조류는 북향류, 낙조류는 남향류로 나타났다. 또한 조류는 만의 중앙수로를 따라 남북방향으로 강한 왕복성 형태를 보였으며, 남쪽 만 개구부에서는 유속이  $1.5 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$  이상의 빠른 흐름을 보이다가 북쪽 간월도 부근에서는 흐름이 다소 정체하는 경향을 나타내었다. Choo[2021]는 2011년 8월부터 2012년 5월까지 4개월간 각 1개월씩 천수만내 50개 정점에서 수온관측을 실시한 결과, 만의 북쪽과 북동쪽에서는 표층수온의 단기 변동이 큰 반면, 만의 남쪽에서는 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 또한 표층수온은 만의 북쪽이 남쪽에 비해 봄과 여름에는 더 높았고, 가을과 겨울에는 더 낮았다. 한편 수온의 변동은 가을과 겨울에는 조석과 위상이 일치하였으나, 봄과 여름에는 조석과 역의 위상을 나타내었다. 특히, 반일과 1일 주기의 수온 변동은 대기온도 및 바람의 변동과 높은 상관을 보여주었다. Suh et al.[2014]은 1970년대 이후 한국 서해안을 따라 시작된 육지 매립과 독 건설로 인해 조간대가 거의 50% 정도 감소하여 이것이 시공간적인 수력학을 왜곡시켰다고 판단하고, 이것을 정량화하기 위해  $M_2$ (주태음반일주조)와  $M_4$ (1/4일주조)의 위상차에 의한 조석비대칭을 분석·평가하였다. 이를 위해 그들은  $\gamma$  매개변수, 조석 에너지 플럭스, 소산율을 사용하였고, 또한 조석 변화에 미치는 근

역과 원역의 영향을 조사하기 위해 FEM (Finite Element Model)인 ADCIRC (ADvanced CIRCulation) 모형(Luettich et al.[1992])을 적용하였다. 그 결과, 천수만에서는 서산 A, B 방조제로 인한 조간대 면적의 축소 때문에 조석 왜곡(tidal distortion)이 더 강한 창조류 우세 환경이 만들어진 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 천수만내의 흐름 환경은 만의 북부에 축조된 서산 A, B 방조제에 의한 영향이 큰 것으로 확인되었다(So et al.[1998]; Lee et al.[2008]; Suh et al.[2014]). 수온의 변동은 가을과 겨울에 조석과 위상이 일치하지만, 봄과 여름에 조석과 역의 위상을 나타내었다(Choo[2021]). 이것은 축조된 서산 방조제로 인해 천수만의 북쪽은 거의 폐쇄된 반면, 남쪽 만구쪽으로만 개방되어 있어서, 하계는 저열효과로 인해 표층수온이 상승하고 동계는 냉각효과로 인해 수온이 하강하는 전형적인 반폐쇄적 수역임을 반영하였다. 한편 하계는 만내수의 표층수온이 외만수의 표층수온에 비해 더 따뜻하고 동계는 역으로 만내수의 표층수온이 외만수의 표층수온에 비해 더 차가울 것으로 예상된다. 따라서 하계의 만조시(또는 창조시)는 차가운 외만수의 유입으로 표층수온이 내려가는 반면, 동계의 만조시(또는 창조시)는 따뜻한 외만수의 유입으로 표층수온은 보다 상승할 것으로 판단된다.

### 3.3 수질환경

Yu[1998]는 1996년 1월과 2월에 걸쳐 한국 전 해역(천수만을 포함한 서해권 해역 23개 정점, 남해권 해역 24개 정점, 동해권 해역 20개 정점)의 총 67개 정점에서 채집한 말뚝성게(*Hemicentrotus pulcherrimus*)의 배우체 및 배아와 초기 발생계를 이용한 생물검정 시험을 통해 연안 해수의 수질을 평가하였다. 그 결과, 서해권 해역은 대체로 수질 2등급을 유지하고 있었으나, 반폐쇄적 해역인 천수만은 아산만이나 군산항, 또는 목포 연안 등과 마찬가지로 말뚝성게의 수정막 형성률과 정상적인 유생 형성률이 아주 낮은 수준

으로, 말뚝성계의 초기 배 발생에 큰 저해를 주는 수질 3등급 수준이었다. 한편 Kim *et al.*[2017]은 천수만을 포함한 한국 서해 연안의 10개 해역(경기만, 안산만, 태안 해안, 천수만, 보령 해안, 서천 해안, 새만금 방조제, 고창 해안, 목포만, 완도 해안)에 대하여 2002년 7월부터 2014년 12월까지 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)로부터 유도된 장기간의 수질지표(Sea Surface Temperature (SST), Total Suspended Solids (TSS), Chlorophyll\_a (Chl\_a))를 조사하였다. 그 결과, 그들은 수질이 공간적으로 계절에 따라 불균질(heterogeneity)해지는 경향이 있음을 발견하였다. 특히, 태안 해안과 천수만에서는 Chl\_a 농도가 다른 해역에 비해 상대적으로 높았으며, 이들 해역에는 외양으로부터 확장된 조석 전선(tidal front)이 있는 것으로 나타났다.

한편 천수만을 포함한 10개 해역에서는 수온의 영향을 받는 Chl\_a 농도와 국지적 조석력 및 해저지형의 영향을 받는 TSS 사이에는 6개월의 지각(phase-lag), 즉 시간차가 존재하는 것으로 나타났다. 이것은 수심이 10-20 m로 수심이 얇고 반폐쇄성 수역인 천수만의 경우, 하계는 높은 수온에 의해 Chl\_a 농도는 높으나 바람 응력은 비교적 약하여 TSS 농도는 높지 않은 반면, 동계는 낮은 수온으로 Chl\_a 농도는 낮으나 TSS 농도는 강한 바람 응력으로 높아지기 때문에 6개월의 시차가 생길 수 있을 것으로 추론된다. 또한 천수만 해역의 Chl\_a 농도가 타 해역에 비해 상대적으로 높은 것은 그 외양역에 조석전선이 존재하기 때문으로 생각된다.

### 3.4 퇴적·저서환경

#### 3.4.1 퇴적 환경

Park[1976]은 Landsat 영상자료(구름이 없는 1972년 10월 31일 오전 10:45, 1973년 2월 15일 오전 10:40)와 항공사진에 의한 자료를 이용하여 천수만내 간석지의 지형을 조사하는 방법에 관한 비교 연구를 수행하였다. 그 결과, 그는 간석지 지형의 판독에 유리한 단파장대는 band 5, 7 혹은 band 4, 5, 7의 색복합 영상이며, Landsat 영상의 해상력은 최소한 그 축적이 1:50,000 정도의 영상이 생산되지 않으면, 그 유용성은 감소될 것이라고 주장하였다. 또한 Landsat 영상은 해안 단구, beach, spit 등과, 식생으로 피복된 곳까지도 판독이 가능하므로 항공사진보다 훨씬 유리하며, 퇴적물은 그 기원에 따라 육성 퇴적물, 해상 퇴적물 그리고 혼성 퇴적물로 세분화할 수 있는데, 이러한 세분화는 항공사진상에서는 어렵지만 Landsat 영상에서는 용이하게 행할 수 있다고 주장하였다. Jo and Jo[1997]는 1910년대 지형도와 지형도 및 위성영상을 기본도로 하여 천수만을 포함하여 한국의 각 지역별 간석지 분포와 간척 현황을 GIS로서 계량한 결과, 한국의 간석지는 1910년대 이후 간척된 것을 포함하여 약 3,800 km<sup>2</sup>에 이르는 것으로 나타났다. 또한 간석지 면적은 전남 서해안, 경기만, 아산만, 전남 남해안, 군산만, 천수만, 경남 및 부산 해안 순으로 넓게 형성되어 있으나, 면적의 증가율은 20세기 전반부에는 비교적 높은 데 비해 후반부에는 훨씬 낮아져 거의 정체상태에 있다고 보고하였다. Jang *et al.*[2002a]은 1996년 9월 1일에 관측한 Landsat TM의 다중분광 위성자료와 분광반사 측정자

료를 이용하여 천수만 간석지 표층퇴적물의 조성을 분석한 결과, 퇴적물의 수분 함수율에 따라 반사율이 달랐고, 함수비가 0%에 가까울수록 반사율은 지속적인 증가를 보였다. 또한 퇴적물의 입자 크기가 클수록 반사율은 낮아지는 경향을 보였으며, 입도 분석결과 천수만 간석지 만 내측은 점토질 간석지, 중간은 혼성 간석지, 바깥쪽은 사질 간석지가 분포하는 것으로 나타났다. 한편 위성자료를 이용한 간석지 조성물질의 분류에는 무감독분류(unsupervised classification) 방법인 ISODATA (Iterative Self Organizing Analysis Technique) 분류기법이 유용하며, 해안선과 연안지형의 변화뿐만 아니라 퇴적물의 퇴적과 침식의 분포양상을 파악하는 데에 효과적임을 확인하였다. 이들의 결과로부터 그들은 다중분광 위성자료가 간석지의 조성물질 분류는 물론 대규모 간척사업에 따른 환경영향 평가 및 지속적인 모니터링에도 활용될 수 있다고 주장하였다. 또한 Jang *et al.* [2002b]은 전술한 Jang *et al.* [2002a]과 동일한 방법을 천수만 간석지 퇴적물 조성물질의 분류에 적용한 결과, 해안선과 연안지형 변화뿐만 아니라 퇴적물의 퇴적과 침식의 분포양상을 파악하는 데에 있어서 이 방법이 효과적임을 확인하였다. 그들의 분석결과에 따르면, 천수만의 가장 안쪽에는 점토질 간석지, 중간에는 혼성 간석지, 바깥쪽에는 사질 간석지가 각각 분포하고, 또한 안면도 남단의 섬웃섬 주변과 바람 아래 해수욕장을 중심으로 동쪽 사질 간석지의 분포가 우세하지만 서쪽으로는 혼성 및 점토질 간석지가 우세한 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, Jang *et al.* [2002c] 또한 간월도 주변지역은 방조제 공사후 퇴적환경이 우세하여 지속적으로 간석지의 면적이 확대된 것으로 보고하였다. 안면도 남단의 섬웃섬 주변과 바람 아래 해수욕장을 중심으로 동쪽으로는 퇴적환경이 우세한 반면, 서쪽으로는 침식환경이 우세하였다. 한편 간석지 퇴적물의 공급원은 연안의 침식물질과 퇴적물질이 큰 비중을 차지하며 모래, 자갈 등 조립물질이 풍부하였다. 또한 이들 퇴적물은 원마도가 극히 낮고 표토는 적황-적색계통의 색깔을 띠었는데, 이것은 오랜기간 동안의 평탄화 작용과 함께 풍화작용을 받은 결과로, 선캄브리아기 태안층군에 속하는 변성퇴적암류가 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 또한 Choi *et al.*[2010]은 고해상도의 공간 분해능을 가진 위성자료(IKONOS; 세계 최초의 상업용 고해상도 위성)를 현장관측자료와 결합하여 천수만내 황도 조간대의 특징적 공간 분포를 추정한 결과, 위성자료가 현장관측자료보다 90.7%의 높은 정확도(accuracy)를 보여 그 유용성을 확인하였다. 확률 모형에 기초한 GIS 해석에 의해 각 표층 퇴적상과 분광 반사율간의 관계를 정량적으로 추정된 결과에 의하면, 백 퇴적상은 높은 정(+)의 상관성을 나타낸 반면, 모래 퇴적상은 높은 음(-)의 상관성을 나타내었다. 이들 퇴적상과 DEM 사이에는 이 지역의 지형적 특징과 높은 상관성을 보여 주어, 고분해능의 원격 탐사 영상과 현장 자료를 사용하는 것에 의해 조간대의 형태와 분포를 정량적으로 결정할 수 있는 가능성을 나타내었다.

한편 Park and You[1980]는 현재 및 과거의 하천에 의해서 영향을 전혀 받지 않고 형성되었다고 판단되는 천수만내 북부의 창리와 간월도리 사이 갯골의 형태적 특성을 조사하였다. 이들은 Horton-

Strahler 방식과 Woldenburg 등이 개발한 방식을 이용하여 갯골들의 형태적 특성을 계량적으로 조사하여 외국의 하천 형태를 포함한 조사결과와 비교 분석하였다. 그 결과, 갯골수(number of creeks)는 하천과 비슷한 형태적 특성을 가지고 있었으나 갯골의 길이는 그렇지 않았다. 또한 지수합수를 이용한 연구지역의  $R_w/R_b$ ( $R_w$ : 폭율,  $R_b$ : 분기율) 값은 0.5-0.6으로, 하천과 하구의 중간 값을 나타내었으나, 하구의 값보다는 하천의 값에 더 근사하였다. 한편 분기율(分岐率)은 ~0.4로, 하천보다 낮고 하구보다 높았으며, 이 값 또한 갯골이 담수 하천과 하구의 점이적(漸移的) 특성을 가지고 있었다. 결론적으로 조사지역인 천수만 갯골의 형태는 담수 하천과 하구의 중간적 형태임을 알 수 있었다. 또한 Kim [1989]은 천수만의 조간대에서 만조선과 간조선을 잇는 20개의 시료 채취선을 설정하여 250 m간격으로 98개의 표층퇴적물 시료를 채취 분석하여 이들의 퇴적구조를 니질퇴적상, 혼합퇴적상, 사질퇴적상으로 분류하였다. 또한 이들 퇴적상은 조류와 파랑에너지에 대한 노출도와 퇴적물의 기원(source)에 따라 두 가지 유형이 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 만조선에서 저조선 방향으로 서부 조간대에서는 니질-혼합-(사질)이, 동부 조간대에서는 (니질)-혼합-(사질)의 순서로 해안선과 평행하게 대상분포를 보였다. 한편 조간대층은 2  $\mu\text{m}$  이하의 세립질 퇴적물을 구성하는 점토광물 중에는 일라이트가 가장 풍부하였고(52-62%), 다음으로 고령석(14-21%), 녹니석(18-29%), 스�멕타이트(0.2-5%)의 순으로 나타났다. 이러한 점토광물의 성분 중 일라이트의 대부분은 황해로부터 운반되어 왔고, 고령석과 녹니석은 천수만 주변의 육지에서 공급되었으며, 스�멕타이트는 천수만내에 분포하는 소규모의 화산섬들로부터 공급된 것으로 추론하였다. 한편 Ryu and Chang[2005]은 1993년 8월부터 1994년 5월까지 4회에 걸쳐 천수만내 총 21개 정점에서 퇴적물을 채취 분석하여 해안선의 변화 및 조간대의 해빈 특성을 조사하였다. 천수만 해안은 심하게 풍화된 퇴적암과 풍화토층으로 구성되어 있으며, 해안선은  $-58.9 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1} \sim -73.3 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$  후퇴한 것으로 나타났다. 이를 뒷받침하는 증거로

서 해안침식을 지시하는 톱날 모양의 해안선, 고조선 해빈의 전석, 침식되지 못하고 남아 있는 잔류암맥, 그리고 바위섬 모양의 island stack 등의 여러 가지 특징들이 발견되었다. 또한 해빈 퇴적물의 조성은 돌출부에서 만의 중앙으로 갈수록 성숙된 경향을 보였는데, 이는 해빈을 구성하는 사질 퇴적물의 기원이 남측과 북측의 돌출부에 있으며, 따라서 침식된 퇴적물은 파랑이 야기한 연안류에 의해 만입된 중앙으로 이동한 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 천수만 북쪽의 간석지(간월호 전면)는 서산 A 방조제 축조 후 그 면적이 확대되었고, 천수만 해안선은 파랑이 야기한 연안류에 의해 침식이 진행되고 있는 것으로 나타났다(Jang *et al.*[2002c], Ryu and Jang[2005]).

3.4.2 저서환경

Choi *et al.*[2011a]은 국내 환경(수분함량, TOC, 지속성 유기오염물질, silt + clay 등)의 모니터링 프로그램을 통해 천수만을 비롯한 25개 한국 연안(서해안 7개소, 남해안 11개소, 동해안 7개소)에서의 퇴적물 유기오염물질의 시공간적인 변화를 추적한 결과, 퇴적물의 유기오염 농도는 외국의 연구와 비교하여 상대적으로 낮거나 중간 정도로 나타났다. 또한 조사기간 중 유기오염물질의 평균 탐지 빈도는 PCDD/Fs (PolyChlorinated Dibenzo-*p*-Dioxins and dibenzoFurans)가 가장 높았고, 다음으로 PCBs (PolyChlorinated Biphenyls), DDTs (Dichloro-Diphenyl-Trichloroethanes), TBT (Tributyltin), HCHs (HexaChlorocyclohexanes)의 순이었다. 한편 한국 연안에서 퇴적물의 지속성 유기오염물질에 의한 생태적 위험은 주문진-울산 연안에서 DDTs가 ERL (Effects-Range-Low)을 초과, 부산 남항-목포 연안에서 PCDD/Fs가 TEL (Threshold-Effect-Level)을 초과했음에도 불구하고 낮은 농도 수준이었다. 또한 Hwang *et al.*[2016]은 2004년부터 2010년까지 천수만을 비롯한 71개 정점에서 채취한 퇴적물에 있는 7개의 금속(Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg, As)을 결정하여 한국 연안 퇴적물 미량 금속 시공간적 분포와 변화를 조사하였다

**Table 2.** The mean of metal concentrations in coastal sediments collected between 2004 and 2010 (Hwang *et al.*[2016])

Station name	Trace metals (mg·kg <sup>-1</sup> )						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
Sokcho	4 ± 4	22 ± 10	37 ± 24	0.07 ± 0.07	20 ± 18	0.008 ± 0.007	5.9 ± 2.0
Samcheok	17 ± 9	29 ± 13	96 ± 34	0.15 ± 0.12	69 ± 36	0.028 ± 0.025	13.5 ± 3.1
Yeongil Bay	21 ± 11	38 ± 9	148 ± 50	0.30 ± 0.17	53 ± 12	0.040 ± 0.031	11.4 ± 2.9
Ulsan	42 ± 11	38 ± 13	157 ± 36	0.41 ± 0.38	63 ± 25	0.086 ± 0.032	17.0 ± 12.3
Busan	41 ± 12	32 ± 10	136 ± 32	0.14 ± 0.08	56 ± 21	0.072 ± 0.018	8.8 ± 2.4
Masan Bay	75 ± 31	62 ± 28	304 ± 112	1.15 ± 0.58	62 ± 26	0.120 ± 0.040	11.8 ± 5.5
Jinhae Bay	64 ± 18	35 ± 9	158 ± 27	0.43 ± 0.15	69 ± 40	0.063 ± 0.013	14.9 ± 3.8
Gwangyang Bay	24 ± 4	37 ± 7	143 ± 12	0.10 ± 0.03	85 ± 20	0.025 ± 0.006	10.4 ± 3.4
Gamak Bay	28 ± 4	39 ± 9	119 ± 29	0.07 ± 0.03	73 ± 8	0.025 ± 0.006	6.4 ± 1.9
Deukryang Bay	14 ± 1	33 ± 15	96 ± 15	0.05 ± 0.01	67 ± 7	0.011 ± 0.003	6.1 ± 1.9
Jeju	15 ± 9	15 ± 7	88 ± 41	0.19 ± 0.18	46 ± 25	0.017 ± 0.017	8.6 ± 3.4
Hampyeong Bay	15 ± 6	36 ± 13	91 ± 33	0.06 ± 0.05	79 ± 21	0.009 ± 0.003	7.2 ± 2.3
<b>Cheonsu Bay</b>	<b>24 ± 6</b>	<b>31 ± 7</b>	<b>93 ± 33</b>	<b>0.16 ± 0.05</b>	<b>74 ± 19</b>	<b>0.041 ± 0.021</b>	<b>7.8 ± 3.3</b>
Incheon	10 ± 6	27 ± 10	57 ± 25	0.06 ± 0.04	36 ± 22	0.024 ± 0.023	5.6 ± 3.3



Table 2). 높은 금속 농도는 도시와 산업 단지가 많은 남동부 해안(부산, 울산, 마산만, 진해만, 광양만 등)에서 발견되었고, 이는 한국 연안 퇴적물의 금속 농도가 도시화 및 산업화와 관련된 인간의 활동에 크게 영향을 받고 있음을 보여주었다. 반면, 천수만은 비교적 도시화가 덜 된 해역(속초, 삼척, 가막만, 득량만, 제주 등)보다 미량금속 농도가 낮았으며, 인간활동이 상대적으로 많은 인천에 비해 다소 높은 수치를 보였다.

그러나 퇴적물 금속 농도의 시간적인 변화는 없었으며, 이는 해안의 지속적인 관리와 퇴적환경의 특성 때문으로 판단된다. 한편 저질 가이드라인과 지리적 축적 지수에 의하면, 한국 해안 퇴적물들은 Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn에 의해서는 거의 오염되지 않았으나 As 오염은 어느 정도 진행이 되고 있는 것으로 나타났다. Lee et al.[2012b]은 유기탄소( $C_{org}$ )에 미치는 천수만 인공독(제방)의 영향을 평가하기 위하여 퇴적물속의 과잉  $^{210}Pb$  활성,  $C_{org}$ 와 질소의 함유량을 측정하였으며, 또한 표층퇴적물과 저서 영양염류 플럭스에 대한  $C_{org}$ 의 산화율( $C_{ox}$ )을 정량화하였다. 천수만 부근에서 채취한 코어퇴적물에서 보다 높은 과잉의  $^{210}Pb$  양,  $C_{org}$  및 질소 농도가 발견되었는데, 이것은 인공독 건설에 의해 변경된 조석 순환으로 인한 입자성 물질의 국지적이고 막대한 퇴적과 축방향의 수송을 보여주었다. 또한 천수만 독 부근에서의 퇴적물의  $C_{ox}$ 는 만의 바깥에 비해 약 2배 더 높으며, 이것은 유기물의 저서성 광물성분 제공급의 중요성을 암시하였다. 반면, Kim et al.[2019]은 2001년부터 2012년에 걸쳐 천수만을 포함한 한국 연안의 25개 정점에서 채취한 퇴적물과 이매패에 함유된 polychlorinated dibenzo-para-dioxins and dibenzofurans (폴리염화디벤조-p-다이옥신; PCDD/Fs)의 농도를 측정하였다. 그 결과, 퇴적물과 이매패의 PCDD/Fs 농도는 각각 0.15-18.9 pg TEQ/g dry weight와 0.06-7.70 pg TEQ/g wet weight의 범위를 보였으며, 높은 PCDD/F 농도는 가장 큰 산업단지와 상업항 가까운 정점에서 발견되었다. 또한 퇴적물에서의 PCDD/Fs 농도의 현저한 감소는 PCDD/Fs에 대한 강한 규제와 관련이 있는 것으로 판단되었으나, 이매패에서의 농도 감소의 경향은 나타나지 않았다. 한편 퇴적물 표본의 거의 절반(46%)은 미국 NOAA가 제시한 역치 영향 수준(threshold effect level)을 초과하였으며, 이것은 저서생물에 대한 생태 독성학적인 위험성을 의미하였다. 또한 Hwang et al.[2021]은 천수만을 비롯한 황해와 발해 연안의 총 125개 정점에서 채취한 표층 퇴적물로부터 추출된 지속적인 유독 물질(Persistent Toxic Substances; PTSs)에 의한 오염을 생물검정시험(*Vibrio fischeri*를 이용)을 통해 평가하였다. 이들의 결과는 현장의 존성의 독성을 나타내었으나 대부분의 정점은 *Vibrio fischeri*에 대하여 비독성인 것으로 확인되었다. 한편 표본에서 측정된 여러 PTSs는 관측된 *Vibrio fischeri* 독성에 대하여 기여를 나타내었으며, PAFs (polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), styrene oligomers, alkylphenols 등은 관측된 박테리아 억제에 대하여 연관성을 보여주었다.

이상의 결과로부터, 천수만 퇴적물의 유기오염 정도는 외국에 비해 상대적으로 낮거나 중간정도였으나, 미량금속 As에 의한 오염이

어느 정도 진행되고 있음을 알 수 있다(Hwang et al.[2016]). 또한 방조제 건설에 의한 조석순환의 변화로 인해 과잉의 납과 유기탄소의 농도가 높은 퇴적물이 발견되었다(Lee et al.[2012]). 특히 천수만의 퇴적물과 이매패에서 유기오염물질의 하나인 PCDD/Fs의 농도가 NOAA가 제시한 역치의 영향 수준(threshold effect level)보다 높게 나타나 생태독성학적으로 위험성을 예고하였다(Kim et al.[2019]). 또한 천수만 퇴적물의 입도 조성은 만구에서 만내(특히, 방조제 부근)로 갈수록 세립화하는 반면, 유기물 함량은 상대적으로 증가하는 것을 알 수 있는데(Park et al.[2000]), 이것은 만내가 그만큼 더 많이 유기 오염이 되어 있음을 의미하였다. 또한 퇴적물의 입경과 천수만 저서동물 탁월종의 밀도 사이에는 정(+)의 상관성이 있음을 보여주었다(Park et al.[2006]).

### 3.5 생물-생태환경

#### 3.5.1 부유생물

Shim and Lee[1979]는 1977년 10월부터 1978년 8월까지 천수만의 4개 정점에서 해수의 물리적 화학적 성질과 식물플랑크톤의 계절변동을 관측하여 식물플랑크톤(규조류와 편모조류) 141 분류군(17과, 40속)을 동정하였으며, 이들 중 11 분류군은 한국에서 새로이 발견된 종이였다. 또한 *Nitzschia longissima*, *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Biddlphia sinensis*는 천수만에서 식물플랑크톤의 주요 군집으로 밝혀졌다. 특히 조사기간 중 탁월종의 하나인 *Leptocylindrus danicus*의 풍도는 1978년 6월에 전체의 89.05%에서 1.67%로 나타났다. 하계에 식물플랑크톤 현존량은 25,492-129,459 cells·l<sup>-1</sup>의 범위로 나타났으며 종다양도지수는 0.648에서 3.597로 변하였다. 또한 Shim and Yeo[1988]는 1985년 9월부터 1986년 8월까지 천수만에서의 식물플랑크톤 군집의 시공간적 변화를 조사한 결과, 식물플랑크톤 현존량은 만조시보다 간조시에 더 높았고, 또한 3월과 8월에 1차 및 2차 대발생을 보였다. 한편 천수만은 수온 및 염분 등의 물리적 요인과 식물플랑크톤의 분포양상으로 볼 때 수괴혼합이 활발한 외만과 정체역인 내만의 두 수역으로 구분되었다. 특히 만의 북부는 방조제 수문을 통한 비정기적인 담수유입에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 한편 천수만에서는 *Paralia sulcata*와 *Skeletonema costatum*가 연중 우점종으로 출현하며, 일시성 부유 규조류인 *Paralia sulcata*는 만의 북단에서 6월에 우점하여, 이는 만 북단 수역이 외만에 비해 수괴혼합이 덜 이루어지는 비교적 정체된 수역이기 때문으로 추론되었다. 또한 주성분분석(PCA) 결과, 천수만은 환경조건이 연중 순환되고 있는 정상적인 연안 생태계로서, 이러한 환경조건을 주도하는 주 요인은 수온과 질소계 영양염( $NO^3-N$ ,  $NO^2-N$ ,  $NH^4-N$ )인 것으로 판단된다. 한편 Shim and Shin[1989]은 1985년 9월부터 1986년 8월까지 월별로 채집된 식물플랑크톤의 체적으로부터 탄소량을 계산한 결과, 탄소량은 26.7-960.7  $\mu g \cdot l^{-1}$ 이며, 월 평균 탄소량은 58.6-684.7  $\mu g \cdot l^{-1}$ (연평균 208.5  $\mu g \cdot l^{-1}$ )로 나타났다. 또한 식물플랑크톤 탄소량, 개체수, Chl\_a 농도의 상호관계를 분석한 결과, net plankton(>20  $\mu m$ )에서 탄소량, 개체수 및 Chl\_a 농도간의 상관관계가 밀접하게 나타나 이들은 주로 net

plankton에 의해 좌우됨을 보여주었다. 반면, nanoplankton(<20  $\mu\text{m}$ )은 이들의 상관관계가 낮게 나타났는데, 이는 nano-fraction이 제거하지 않은 picoplankton(<2  $\mu\text{m}$ )을 상당량 포함하고 있기 때문으로 추론된다. 중회귀분석 결과 또한 식물플랑크톤 탄소량, 개체수, Chl\_a 농도의 상관관계는 주로 net plankton에 좌우되고 있는 것으로 나타났다. 결론적으로 이들은 C·Chl\_a의 값은 변화폭이 크기 때문에 Chl\_a 농도에 일정비율을 적용하여 탄소량을 추정하는 방법은 연안 생태계에서 적절치 못한 것으로 판단하였다. Shin *et al.*[1990]은 1985년 9월부터 1986년 8월까지 천수만에서 월별로 미세식물플랑크톤(nanoplankton)의 시료를 채집 분석하여 6문 8강 13목 17과 25속 33종의 미세플랑크톤을 동정하였다. 그 결과, *Micromonas pusilla*, *Pedinomonas mikron*, *Pyraminonas grosii*, *chroomonas lateralis*, *Pyrenomonas salina* (=Chroomonas salina), *Chroomonas sp.*, *Cyclotella sp.*, *Gonyaulax sp.*, 그리고 신원이 불명한 구형과 주형 등이 보편종으로 나타났다. 또한 미세플랑크톤의 현존량은 시간적, 공간적으로 큰 변동을 보였다. 이들 미세플랑크톤의 Chl\_a 농도는 0.81-4.78  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 의 범위로, 미세플랑크톤에 의해 일차 생산은 16.4-767.2  $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 이었다. 한편 전체 플랑크톤 세포 중의 미세(nano) 부분은 38-93%(평균 66%)이며, 미세플랑크톤의 Chl\_a 농도와 일차 생산은 각각 25-87% (평균 64%)와 9-87% (평균 53%)이었다. 따라서 이러한 결과는 미세플랑크톤이 천수만의 식물성 플랑크톤 군집에서 식물성 플랑크톤의 생물량과 일차 생산에 상당한 기여를 할 수 있음을 의미하였다. 한편 Lee *et al.*[2019]은 천수만 북부의 간월호와 부남호로부터 방류되는 담수의 영향을 조사하기 위하여 담수방류 전(2017년 8월 5일), 방류 중(2017년 8월 18일과 25일) 및 방류 후(2017년 8월 30일, 9월 15일)에 있어서 식물플랑크톤 군집구조의 변화와 환경요인을 분석하였다. 이들의 결과에 따르면, 규조류가 극우점하던 천수만의 식물플랑크톤 군집은 담수 방류에 따른 인위적 환경교란으로 염분 변화는 물론, 용존무기영양염류의 공급에 의해 규조류를 비롯한 편모조류, 남세균과 담수 녹조류로 구성된 군집으로 조성변화를 나타내었다. 즉, 담수방류 초기에는 담수산 식물플랑크톤의 유입으로 현존량이 증가하였으나, 지속되는 담수방류로 인하여 식물플랑크톤의 사멸 및 급격한 현존량 감소가 이어졌다. 이후 환경 적응종 및 해류를 따라 새로 유입된 종들에 의해 방류종류 3일 후부터 담수방류 이전의 식물플랑크톤 종 조성 및 현존량을 보였으나, 담수방류시 만나로 유입된 육상기인 오염원으로 인해 생태환경 변화를 초래할 것으로 판단되었다. Shim and Yun[1990]은 1985년 9월부터 1986년 8월까지 천수만의 6개 정점에서 NOR-PAC net(WP-2 type)로 동물플랑크톤을 채집하여 종조성과 풍도의 계절변화 및 요각류(copepoda)의 연간 생산량을 규명하였다. 그 결과, 동물플랑크톤 종조성과 풍도의 현저한 계절변동과 함께 하계부터 추계까지는 *Paracalanus indicus*와 *Corycaeus affinis*가 우점하였으나, 봄에는 *Centropages abdominalis*와 *Acartia omorii*가 우점하는 것으로 나타났다. 또한 동물플랑크톤의 풍도는 3월에 최소치를 나타내고 이어서 점차 증가하여 8월에 최대치에 도달하여, 동물플랑크톤 풍도의 계절변화는 식물플랑크톤의 크기와

양의 변화 및 수온에 의해 영향을 받는 것으로 판단되었다. 한편 요각류의 연간 총 생산량은 건조 중량으로 134  $\text{g}\cdot 100\text{m}^{-3}$ 으로 추정되었으며, 타 해역에 비해 높은 생산성을 보였다.

이상의 결과로부터, 천수만내 식물플랑크톤은 서산 방조제의 건설(1985년)을 전후하여 *Nitzschia longissima*, *Coscinodiscus ocellus-iridis*, *Biddlphia sinensis*, *Leptocylindrus danicus* 등에서 *Paralia sulcata*, *Skeletonema costatum* 등으로 주요 우점종의 변화가 있었던 것으로 판단된다(Shim and Lee[1979], Shim and Yeo[1988]). 또한 천수만내 우점하던 규조류 대신 인위적 환경교란으로 인해 편모조류, 남세균, 담수 녹조류로 종조성의 변화는 물론 현존량도 감소한 것으로 나타났다. 이것은 인공호(간월호, 부남호)로부터 간헐적으로 방출되는 유기오염된 담수의 영향 때문으로 밝혀졌다(Lee *et al.*[2019]).

### 3.5.2 어류

Lee[1983]는 1981년 5월부터 1982년 12월까지 소형 정치망으로 천수만에 서식하는 어류인 전어와 청어를 채집하여 체장, 연령 및 성숙도(번식기)를 분석한 결과, 전어는 봄에 수온이 8°C 정도로 상승하였을 때 만으로 들어와 여름 동안 이곳에서 자란 후, 가을에 수온이 8°C 이하가 되기 전에 만을 빠져나가는 것으로 나타났다. 또한 전어는 태어난 첫해에 가장 빨리 자라며, 1세부터 4세까지의 어군의 평균체장은 각각 12.2 cm, 15.8 cm, 17.6 cm 및 20.9 cm이었으나, 가장 크고 연령이 많은 어류는 4세군으로 체장이 22.0 cm이었다. 반면, 청어류는 체장이 14 cm 이상으로 2세 때 성숙에 이르며, 성숙은 크기에 의존하고 연령에는 의존하지 않음을 보여주었다. 또한 청어의 산란은 수온이 8°C와 15°C 사이인 늦은 4월부터 5월 사이에 발생하였다. Lee and Seok[1984]는 1981년 9월부터 1982년 9월까지 천수만 입구에서 소형정치망(주목망)으로 수집한 어류 군집의 종조성과 양적변동을 계절별로 분석하였다. 그들이 채집한 어류는 총 64종으로, 베도라치(*Enedias fangi*)와 까나리(*Ammodytes personatus*)가 우점하였다. 한편 어류의 종수, 개체수 및 어획량은 늦봄에 연중 최대값을 보였으며, 이것은 어류들이 겨울을 외해에서 보낸 후 산란 혹은 섭이를 위하여 만으로 회유하여 들어오기 때문인 것으로 판단하였다. 또한 회유종(혹은 온난 계절종)인 밴댕이, 멸치, 전어의 풍도가 탁월하였으며, 이때는 야간 어획이 종수, 풍도, 어획량에 있어서 주간 어획보다 많았다. 반면, 가을 어획은 주간 어획과 야간 어획간 차이가 없었다. 하계에는 어종과 풍도에 있어서 현저한 감소를 보였는데 이것은 사망에 따른 산란어의 손실이나 산란 후의 넓은 분산 때문으로 추론되었다. Lee[1988]는 1986년 3월부터 11월에 걸쳐 천수만의 입구와 만나 등 2개 정점에서 격월로 소형트롤을 사용하여 저서성 어류를 채집하여 32종을 동정하였다. 수조기(*Nibea argentatus*), 쉬쉬망둑(*Chaturichthys stigmatias*), 실망둑(*Cryptocentrus filifer*), 참서대(*Cynoglossus joyneri*), 민태(*Johnius belengeri*) 등의 풍도가 탁월하였고, 또한 주성분분석(PCA) 결과, 이들 어류는 주거종, 회유종, 일시방문종으로 구분이 가능하였다. 한편 주거종은 만의 깊은 수심에서 겨울을 나고, 추운 달 동

안은 생물량이 최대를 보였으며, 봄에는 수조기와 기름민태의 성어가 산란을 위해 만으로 회유하는 것으로 나타났다. Cha *et al.*[1987], Cha and Shim[1988], Cha *et al.*[1990] 등은 1985년 7월부터 1986년 6월에 걸쳐 천수만에서 금강 하구에 이르는 13개 정점에서 붕고 네트를 이용하여 부유성 난과 자치어를 채집하였다. 채집한 부유성 난은 19개 분류군으로, 자치어는 8목, 28과에 속하는 45개 분류군을 동정하였다. 특히, 부유성 난에 대해서 유구의 수, 난의 형태, 난막의 돌기, 난경, 유구경 등의 형질에 따라 19개 분류군의 검색표를 작성하고, 자치어에 대해서는 체형, 항문의 위치, 색소의 패턴 등과 같은 형태적 특징에 기초하여 동정을 하였다. 멸치(*Engraulis japonica*)가 전체 난 출현량의 89.5%, 청보리멸(*Sillago japonica*)이 2.5%, 전어(*Culpanodon punctatus*)가 2.4%, 밴댕이(*Herklotsichthys zunasi*)가 1.7%, *Callionymidae* spp.가 1.6%였다. 한편 자치어의 개체수에서는 흰베도라치가 전체 출현량의 45.2%, 멸치가 27.5%, 밴댕이가 10.6%, 돛양태류가 4.6%, 청보리멸이 3.0%, 날개망둑이 1.9%, 줄망둑이 1.8%였다. 풍도는 7월과 1월에 각각 최대치를 보였고, 종다양도는 흰베도라치가 탁월한 1월과 4월 사이에 매우 낮았다. Im and Lee[1990]는 1984년 9월부터 1986년 8월까지 천수만의 천해역에서 저인망을, 수심이 깊은 곳에서는 otter trawl을 각각 사용하여 망둑어류(얼룩망둑, 날개망둑, 풀망둑, 쉬쉬망둑)를 채집하여 계절에 따른 종조성 변화와 생태를 추정하였다. 조사기간 중에는 총 14종의 망둑어류가 출현하였고, 필질과 모래질의 쇄파대에서 망둑어류의 39%와 66%가 각각 채집되었다. 이들 망둑어류는 베지너리미가 흡반 모양으로 변형되고 세조골도 발달하여 다른 어류가 서식하기 어려운 해수 유동이 크고 높은 쇄파대의 환경에도 잘 적응하여 우점하는 것으로 추정되었다. Lee[1996]는 1991년 5월부터 1992년 2월에 걸쳐 otter trawl을 사용하여 천수만에서 저서어류를 채집하여 종조성, 풍도, 군집구조를 조사하고, 이를 서산 방조제 매립 직후인 1986년의 자료와 비교하였다. 현재의 저서어류의 종조성은 이전의 자료와 유사한 계절적 변화를 보여주었으나, 몇 종의 풍도는 변화한 것으로 나타났다. 즉, 실망둑, 쉬쉬망둑, 풀망둑(*Acanthogobius hasta*) 등과 같은 망둑어류는 사라진 반면, 돛양태(*Repomucenus lunatus*), 주둥치(*Leignathus nuchalis*), 청보리멸 등은 증가하였다. 이러한 어류 풍도의 변화는 저수지로부터 만으로 유입되는 고농도의 유기물을 가진 담수의 불규칙적인 유입과 세립자의 퇴적과 관련이 있는 것으로 추론하였다. 또한 종조성의 계절적 변화는 매립시기인 1986년과 유사한 반면, 군집구조는 차이를 보였다. 즉, 필질을 선호하는 돛양태는 증가하였고, 주둥치는 인위적 변화가 큰 천수만을 포함한 서남 연안에서 증가하였다. 그는 이러한 군집구조의 변화는 방조제 건설 이후 비주기적으로 유입되는 방조제 내부의 부영양화된 밀도가 낮은 민물이 천해역 어류에 영향을 준 것으로 판단된다. Lee *et al.*[1997] 또한 1995년 6월부터 1996년 5월까지 천수만의 대천 해변 쇄파대에서 어류를 채집하여 종조성, 양적변동 및 군집구조를 분석하고, 이를 1984년과 1985년의 결과와 비교·고찰하였다. 이들의 조사에서는 총 26종의 어류가 출현하였고, 날개망둑(*Favonigobius gymnauchen*), 주둥치

(*Leignathus nuchalis*), 청보리멸(*Sillago japonica*), 돌가자미(*Kareius bicoloratus*)가 우점하는 것으로 나타났다. 즉, 봄에는 주둥이인 날개망둑의 성어가 우점하였고, 6월부터는 내만성 부어류와 저어류의 유어들이 대량 출현하여 하계동안 높은 생물량을 보였으나, 11월 이후 수온이 낮아져 소수종만 출현하였다. 한편 1984년과 1985년에 계절에 따른 종조성 변화 양상은 유사하였으나 군집구조에 차이를 보였다. 돌가자미, 돛양태(*Repomucenus lunatus*), 흰베도라치(*Enedrias fangi*), 참서대(*Johnius belengerii*), 두줄망둑(*Tridentiger trionocephalus*), 주둥치와 민태(*Johnius belengerii*)는 1984-1985년에 비해 1995-1996년에 수적으로 증가한 반면, 곤어리(*Thrisa koreana*), 밴댕이(*Sardinella zunasi*), 학꽂치(*Hyporhampus sajori*), 승어(*Mugil cephalus*), 얼룩망둑(*Chanogobius mororana*), 전어(*Konasirus punctatus*), 줄꽂치(*Hyporhampus intermedius*) 및 은어(*Plecoglossus altivelis*)는 감소하였다. 이것은 방조제 건설 후 해수유동이 약해지며 세립퇴적물이 증가하여 세립퇴적물을 선호하는 어류는 증가한 반면, 쇄파대에는 탁도가 증가하여 일부 어과식자에게 부적합한 환경이 조성되어 부어류들이 감소한 것으로 추정되었다. 한편 Lee[1998]는 1992년 3월부터 1993년 1월까지 천수만 입구에 설치된 소형정치망 어획자료를 수집하여 부어류 종조성의 계절변동을 분석하고, 이를 1981년부터 1982년 자료와 비교하였다. 조사기간 중 63종의 어류가 출현하였고, 멸치, 까나리, 흰베도라치, 밴댕이가 우점하였다. 또한 봄에는 흰베도라치의 치어와 멸치, 까나리, 밴댕이 등의 성어가 대량 가입되었으나, 이른 여름에는 그 수가 감소하였다. 그러나 8월부터 봄에 산란 부화한 부어류들의 유어가 가입하여 높은 생체량을 보였으며, 늦가을부터 이 어류들이 월동하기 위하여 외해로 빠져나가 생체량이 감소하였다. 한편 어류의 종조성 계절 변동은 1981년부터 1982년까지 유사하였으나, 1981년보다 1982년이 더 많았다. 이것은 1992년 봄과 가을에는 평년에 비하여 수온이 약 2°C 정도 높았기 때문으로 판단된다. 또한 Kwon *et al.*[2013]은 2010년 4월부터 2011년 3월까지 천수만 조건대에서 저인망으로 어류를 채집하여 이를 방조제 건설 후 1985년부터 1986년까지, 그리고 1993년에 같은 방법으로 조사된 자료와 비교하여 어류의 종조성 변화와 그 요인을 분석하였다. 그들은 조사기간 중 총 25종 2,194마리, 16,762g 어류를 채집하였고, 그 중 가송어(*Chelon haematocheilus*)가 개체수의 68.5%를 차지하여 우점종으로 나타났다. 또한 1985년부터 1986년까지, 그리고 1993년 사이에는 세립질 퇴적물을 선호하는 얼룩망둥어가 증가하였으나 채집량과 서식처별 어종조성은 큰 차이를 보이지 않았다. 반면, 2010년부터 2011년까지 이전의 두 시기에 비해 출현종수와 채집량이 감소하였고, 종조성도 부어류와 저서어류는 감소하였으나 반저어류인 가송어는 오히려 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 방조제 건설 후 해수순환이 악화되어 세립퇴적물이 점차 증가하고, 우기에 부영양화된 담수 유입으로 수질이 점차 나빠지면서 천수만이 어류 보육장으로서 기능은 악화되어 저서어류가 살기에 부적합한 환경으로 변했기 때문이다. 한편 Seo *et al.*[2014]은 2013년 5월부터 2014년 4월까지 총 5회에 걸쳐 천수만 일대의 6개 정점에

서 조피볼락의 상피 조직에 대한 선충에 의한 감염현황을 조사하였다. 선충은 지느러미, 측란 두경, 콧구멍, 주둥이, 머리 등을 포함한 다양한 외부 기관의 상피조직을 감염시킨 것으로 드러났다. 1년에 걸친 조피볼락의 전체 선충 감염률은 대략 55%로, 이 기간 중 2013년 8월에 조피볼락이 대량폐사하였다. 이때는 그들의 숙주로 부터 탈출한 선충에 의해 야기된 조피볼락의 피부 상처가 그 원인으로 확인되었다. 또한 여러 병원성 박테리아는 빈사 상태의 조피볼락으로부터 격리되었으며, 이들은 선충에 의해 야기된 피부 상처를 통하여 전파되었을 것으로 판단되었다.

이상의 결과로부터, 천수만의 어류는 방조제 건설 전에는 64종이 채집되었고, 베도라치와 까나리를 비롯하여 회유종인 밴댕이, 멸치, 전어 등이 우점하였으나, 방조제 건설 직후에는 32종이 채집되었고, 멸치, 흰베도라치를 비롯하여 수조기, 쉬쉬망둑, 실망둑, 참서대, 기름민태 등의 풍도가 탁월하였다. 한편 Lee[1996], Lee *et al.*[1997], Kwon *et al.*[2013] 등에 의한 방조제 건설 6년 내지 25년 후의 조사결과에서는 25-26종의 어류가 출현하였고, 실망둑, 풀망둑 등과 같은 망둥어류는 사라진 대신, 주둥치, 청보리멸, 가숭어 등은 증가한 것으로 나타났다. 어류 풍도의 변화는 방조제 건설 후 저수지로부터 만으로 유입하는 고농도의 유기물을 가진 담수의 불규칙적인 유입과 세립자의 퇴적과 관련이 있는 것으로 추론하였다. 또한 1985년부터 1986년까지, 그리고 1993년 사이에 세립질 퇴적물을 선호하는 얼룩망둥어가 증가하였으나 채집량과 서식처별 어종조성은 큰 차이를 보이지 않았다. 반면, 2010년부터 2011년까지는 이전의 두 시기에 비해 출현종수와 채집량이 감소하였고, 종조성도 부어류와 저서어류는 감소하였으나 반 저어류인 가숭어는 오히려 증가한 것으로 나타났다. 그들은 이러한 결과를 방조제 건설 후 해수순환의 악화와 세립퇴적물의 증가, 부영양화된 담수 유입으로 인한 수질의 악화 등, 천수만이 저서어류가 살기에 부적합한 환경으로 변했기 때문이라고 보고하였다. 결과적으로 천수만의 어류는 인위적인 서산방조제, 보령방조제, 홍성방조제의 건설과 이에 따른 간척 사업 등에 의해 그 출현종수와 현존량의 감소는 물론 군집구조도 상당한 영향을 받은 것으로 판단된다.

### 3.5.3 저서생물

Kim and Kim[1996]은 천수만내 황도 해안의 조간대에 서식하고 있는 갑각류의 분포 및 갑각류가 형성한 생물퇴적구조의 특징을 조사하였다. 칠게, 농게, 두드러기밤게 및 딱총새우는 조위와 퇴적물 유형의 제한을 받아 대상(帶狀)분포를 하면서, 퇴적물을 교란시켜 독특한 생물퇴적구조를 형성하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 농게는 조간대 상부의 함수량이 적은 사질 실트에 주로 서식하며, 둥근 형의 굴 입구 주위에 굴착과 섭식에 의한 퇴적물 덩어리와 발자국 흔적이 풍부하였고, 굴뚝구조가 흔하게 발견되었다. 서식굴의 형태는 J형, J형에서 한번 더 굽은 형 또는 뒤틀린 형으로, 굴의 직경은 1-6 cm 정도였다. 한편 칠게는 주로 소조시 평균 간조면과 평균 해수면 사이의 함수량이 높은 사질 실트와 실트질 모래에 서식하고 있었으며, 퇴적물 표면에 넓은 타원형의 입구와 퇴적물 더

미를 형성하였다. 또한 칠게의 서식굴 형태는 대부분 J형이고 일부는 U자형으로, 비대칭의 깔대기 형태를 보였으며, 두드러기밤게와 딱총새우는 저조전 부근의 실트질 모래에 국부적으로 서식하고 있었다. 한편 두드러기밤게는 퇴적물 표면에 직경이 큰 타원형 입구와 퇴적물 더미를 형성하고 서식굴은 얇은 비대칭의 웅덩이 형태를 나타낸 반면, 딱총새우는 초승달 형태의 퇴적물 더미를 입구 주위에 쌓으며 굴의 형태는 거의 수평으로 길게 발달한 Y형이나 역전된 Y형, 또는 지그재그형으로, 직경은 1-3 cm 정도였다. 또한 Park *et al.*[2000]은 저서동물의 군집구조를 파악하기 위해 1993년 4월부터 1998년 11월까지 총 11회에 걸쳐 천수만내 21개 정점에서 반반 채수기로 퇴적물을 채집, 분석하였다. 퇴적물 입도 조성은 만입구보다 방조제 부근에서 더욱 세립화된 것으로 나타났으며, 유기물 함량은 만입구에서 감소하였다. 조사기간 중 총 311종, 서식밀도 769 indiv.·m<sup>-2</sup>의 저서동물이 채집되었고, 다모류가 개체수와 서식밀도에서 높은 비중을 차지하였다. 저서동물의 개체수는 방조제 부근에서 만입구로 갈수록 증가하였으며, 하계에는 긴자락송곳지렁이(*Lumbrineris longifolia*), 아기반투명조개(*Theora fragilis*) 등의 기회종이 대규모로 가입되었다. 집괴분석결과, 저서동물은 5개 군집으로 나누어졌으며, 방조제 부근은 주로 기회종, 만 중앙부는 오투기갯지렁이(*Sternaspis scutata*), 모자예쁜얼굴갯지렁이(*Paraprionospio pinnata*), 만 입구는 버들갯지렁이(*Mediomastus californiensis*), 남방백금갯지렁이(*Nephtys polybranchia*) 등 각각 우점종으로 나타났다. 결과적으로 천수만에서의 계절적 환경변화와 공간적 차이가 저서동물의 종조성과 저서생태계의 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 한편 Park *et al.*[2006]은 천수만에서 5년간(1993-1998)의 21개 정점에서 채집된 저서동물의 정량적 자료를 사용하여 발생주기를 고려한 3가지의 다른 방법, 즉 밀도, 생물량 및 LeBris의 방법 등에 기초하여 탁월종을 분석하였다. 밀도에 기초한 방법에 의해 결정된 탁월종의 순서가 생물량에 기초한 방법에 비해 오히려 LeBris방법에 의한 결과와 더 유사한 것으로 나타났다. 또한 시간적 변화를 고려하면, LeBris의 방법이 천수만의 탁월종을 결정하는 데 있어서 다른 두 방법보다 더 효율적이었다. 긴자락송곳지렁이, 아기반투명조개, 분홍접시조개(*Moerella jadoensis*) 등은 세 가지 방법 모두에서 인식되었으며, 이들 중은 퇴적물의 평균 입경과 정(+)의 상관을 나타내었다. 한편 아기반투명조개, 오투기갯지렁이, 작은수염갯지렁이(*Glycinde gurjanovae*) 등은 천수만의 저서생태계를 장기간 모니터링함에 있어서 유용한 저서지시자(benthic indicator)임이 판명되었다. 반면, Choi *et al.*[2011b]은 천수만내의 황도 조간대에 있어서 다모류(환형동물) 서식처의 지도 제작(mapping)을 위해 확률적 모형을 적용하였다. 이를 위해 그들은 두 종류의 다모류(매끈예쁜얼굴갯지렁이(*Prionospio japonica*)와 긴아가미예쁜얼굴갯지렁이(*Prionospio pulchra*))와 대형저서동물의 분포와 관련한 8가지 제어요소(조간대의 디지털 수위모형(Digital Elevation Model; DEM), 경사, 측면(방향), 조석의 노출기간, 조석 수로부터의 거리, 조석 수로의 밀도, 근적외(NIR; Near InfraRed) 밴드의 공간 반사율, 위성영상으로부터 퇴적상 등)

를 선택하였다. 빈도비 모형(frequency ratio model)은 매끈예쁜얼굴갯지렁이와 긴아가미예쁜얼굴갯지렁이에 대하여 각각 77.71%와 74.87%의 예측 정도를 나타낸 반면, weights-of-evidence(WOE) model에 의한 예측 정도는 64.05%와 62.95%이었다. 따라서 빈도비 모형은 WOE model에 비해 더 정확한 예측을 제공하였으며, 빈도비 모형과 GIS해석에 기초한 WOE 모형은 조간대에서 다모류종의 서식처 잠재력 지도(map)를 생산하는 데 유효하다는 것을 보여주었다. 또한 Choi *et al.*[2011c]도 Choi *et al.*[2011b]와 마찬가지로 WOE model(확률적 방법)에 기초하여 천수만의 황도 조간대에서의 대형동물상 서식처의 잠재력 지도의 생산 방법을 제안하고 이를 검증하였다. 그들은 현장 조사에서 대형저서동물물 채집하여 서식처의 도면제작을 위해 5개의 연체동물 종을 고려하였다. 그들은 대형저서동물의 서식처에 영향을 주는 10개 제어요소의 상대적인 가중치를 계산하기 위해 WOE model을 사용하였다. 또한 이들 10개 제어요소는 GIS 해석과 결합한 원격탐사자료로부터 공간 데이터베이스로서 편집되었다. 한편 각 요소의 상대적인 가중치는 종 잠재력지수(SPI; species potential index)로 적분되어 서식처의 잠재력 지도를 생산하였다. 잠재력 지도와 종 위치간에 강한 상관성을 보였다. 따라서 GIS기반의 WOE model과 원격탐사 기술의 결합은 조간대에 있어서 대형저서동물의 서식처 잠재력의 지역을 결정하는 데 있어서 효과적인 방법이라고 주장하였다. 이에 더하여 Choi *et al.*[2011d]은 대형동물상(갑각류)의 서식처 잠재력 지도를 만들기 위해 천수만의 황도 조간대에서 생태적 변수의 공간적 분포를 조사하였다. 이때 공간 변수는 전술한 Choi *et al.*[2011c]와 동일한 방법을 사용하였으며, 갑각류 중 털콩게(*Ilyoplax dentimerosa*)에 대한 대형동물상 잠재력 지역의 지도 제작을 위해 빈도비(Frequency Ratio; FR)와 로지스틱 회귀(Logistic Regression; LR) 모형이 사용되었다. 조간대 대형동물상 분포에 영향을 주는 공간 변수는 풍도와 생물량에 기초하여 선정되었으며, 다양한 형태의 원격탐사자료로부터 유도된 공간적 데이터베이스가 사용되었다. 공간 변수는 전술한 Choi *et al.*[2011b]와 마찬가지로 조간대의 DEM 등 8개 제어요소가 포함되었다. 이들이 제작한 잠재적 서식처의 지도는 검증 자료와 같은 종 서식처 위치 등과 비교한 결과, LR모형(정도 85.28%)은 FR모형(정도 78.96%)보다 더 예측이 좋은 것으로 나타났다. 또한 LR은 종의 잠재적인 서식처에 대한 변수의 정량적인 영향을 제공하는 반면, FR은 각 변수에 있어서 한 무리(class)의 정량적인 영향을 보여주었다. 따라서 GIS에 기초한 FR과 LR모형, 원격탐사와 현장조사와 결합은 조간대에서 대형동물종의 적합한 장소를 결정하는 데 있어서 효과적인 방법으로 나타났다. 반면, Lee *et al.*[2013]은 인공신경망(Artificial Neural Network)에 기초하여 천수만내 황도 조간대에서 대형저서동물의 서식처 잠재력 지도를 제작하는 방법을 제안하고 이를 시험하였다. 이들은 대형저서동물의 표본을 현장조사-채집하고, Choi *et al.*[2011b], Choi *et al.*[2011d]와 동일한 방법으로 공간적인 데이터베이스를 편집하였다. 이때 대형저서동물인 길게(*Macrophthalmus dilatatus*), 비틀이고둥(*Cerithideopsis cingulata*), 침보석요갯지렁이(*Armandia*

*lanceolata*)에 대한 서식처 잠재력 지도가 인공신경망 모형을 사용하여 만들어졌다. 그 결과, 조사된 대형저서동물의 서식처 위치와 제작된 잠재적 지도간에 강한 상관성이 있었다. 즉, *M. dilatatus*, *C. cingulata*, *A. lanceolata*에 대하여 각각 74.9%, 78.32%, 73.2%의 평균 정도(accuracy)를 보여주어 원격탐사기술과 결합된 GIS 기반의 인공신경망 모형은 조간대에 있어서 대형저서동물 서식처의 잠재적인 지역을 mapping하는 데 있어서 유용한 도구임이 밝혀졌다. Jung *et al.*[2014]은 2012년 5월(춘계)과 7월(하계)에 천수만 13개 정점에서 대형저서동물을 채집하여 생물다양성, 개체수, 군집구조를 조사한 결과, 총 224종·(5.2 m<sup>2</sup>)과 서식밀도 1,940 indiv·m<sup>2</sup>의 대형저서동물이 출현하여 다모류가 11종(평균 22 ± 11종), 서식밀도 31,525 indiv. (평균 1,213 ± 1,080 indiv·m<sup>2</sup>)로 우점하였다. 또한 천수만의 주요 우점종은 이매패류의 아기반투명조개(*Theora fragilis*), 다모류의 버들갯지렁이(*Heteromastus filiformis*), 긴자락송곳지렁이(*Lumbrineris longifolia*), 버들갯지렁이류(*Mediomastus californiensis*) 및 열새우류의 멜리타열새우류(*Eriopisella(sechllensis)*) 등이었다. 한편 다변량 분석(집괴분석과 다차원 배열법) 결과, 천수만의 대형저서동물 군집은 크게 두 개의 그룹, 즉 죽도를 중심으로 만내 정점군과 만구 정점군으로 구분되었다. 또한 천수만의 건강도를 BPI(Benthic Pollution Index)와 AMBI(ATZI's Marine Biotic Index) 지수를 사용하여 평가한 결과, BPI 지수는 11(가장 불량한 상태) - 92(가장 양호한 상태)의 범위, AMBI 지수는 1.34(양호한 상태) - 4.39(불량한 상태)의 범위로 나타났다. 천수만의 건강도 지수의 평균값에 있어 BPI 지수와 AMBI 지수가 각각 중간 상태(불량과 양호한 상태의 전이단계)와 양호한 상태를 반영하였다. 한편 Han *et al.*[2015]은 2009년 추계(11월)부터 2010년 하계(7월)까지 천수만 조하대의 24개 정점에서 서식하는 대형저서동물의 군집을 분석하여 방조제 건설에 따른 저서생태계의 변화(대형저서동물의 분포, 우점종, 시공간적인 변화, 유기물 오염)를 조사하였다. 그 결과, 천수만에는 총 252종이 출현하였고, 출현빈도는 681 indiv·m<sup>2</sup>이었으며, 종다양도는 모든 계절에 방조제를 기준으로 만구 지역으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 천수만내 연중 우점한 대형저서동물은 긴자락송곳지렁이로 나타났으며, 우점종의 출현은 종다양도 및 퇴적물의 유기물 함량과 상관관계를 갖는 것으로 판단되었다. 한편 BPI(Benthic Pollution Index) 지수는 방조제 인근 정점에서 4-5등급으로, 유기물 오염이 확인되었으며, 만구 지역에서 1-3등급으로, 상대적으로 유기물 오염이 덜 된 것으로 나타났다. 또한 SAB(Species, Abundance, and Biomass)-curve의 분석 결과, 방조제를 기준으로 만구로 갈수록 생태계 전이지역이 감소하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 천수만에서는 1990년대 중반과 후반에는 311종의 저서동물이 서식밀도 769 indiv·m<sup>2</sup>로 출현하였으나, 2010년대 초기에는 224-252종, 서식밀도 681-1,940 indiv·m<sup>2</sup>로, 출현 개체수와 밀도에 변화가 있었다(Park *et al.*[2000], Jung *et al.*[2014], Han *et al.*[2015]). 저서동물의 채집방식과 장소가 다소 차이가 있어서 단정적으로 말하기는 어려우나 저서동물의 출현종수는 과거에

비해 다소 감소한 것으로 판단된다. 한편 이들 저서동물 중 다모류가 그 출현종수나 서식밀도에 있어서는 1990년대나 2010년대 모두 다수를 차지하였으며, 만내에서 만구로 갈수록 저서동물의 개체수와 종다양도는 증가하는 경향을 보였다. 특히 연중 우점종으로 출현하는 기회종인 긴자락송곳갯지렁이는 천수만내의 유기물의 함량과 상관이 있는 것으로 나타나, 만내 오염지시자로서 추정된다. 또한 Park *et al.*[2006], Choi *et al.*[2011b], Choi *et al.*[2011c], Choi *et al.*[2011d], Lee *et al.*[2013] 등은 천수만내 저서동물의 탁월종의 결정 방법이나 조건대에 서식하는 저서동물 서식처의 잠재력 지도 제작(mapping)과 관련한 연구를 각각 수행하였다. 탁월종을 결정함에 있어서는 LeBris의 방법이 생물량(biomass)에 기초한 방법에 비해 보다 효율적이며, 또한 서식처 정보 제공을 위한 mapping에는 GIS에 기초한 WOE 모형이나 인공신경망 모형이 유효한 방법임을 확인하였다. 한편 천수만에서 저서생물의 건강도를 평가하는 BPI 지수와 AMBI 지수는 각각 중간 상태(불량과 양호한 상태의 전이단계)와 양호한 상태였으나, 만구에서 만내로 갈수록 유기오염은 증가하였다(Jung *et al.*[2014], Han *et al.*[2015]).

3.5.4 기타 생물환경

Kim *et al.*[1985]은 천수만에서 Most-Probable-Number 방법으로 석유 분해 세균을 조사하여, *Enterobacteriaceae*, *Vibrio*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Micrococcus*, *Aerococcus*, *Aeromonas*를 분리·동정하였다. 이들의 세균 밀도는  $3.6 \times 10^4 - 1.1 \times 10^5$  cells·l<sup>-1</sup> 범위로, 개체수는 가을에 최고치를 보였으며, *Enterobacteriaceae*, *Vibrio*, *Pseudomonas*가 우점종을 확인하였다. 이러한 결과는 천수만과 같이 오염이 안된 해역에서 미생물이 갖는 석유분해능력을 이해하는 데 기여할 수 있다고 보고하였다. Kim and Kang[1986]은 1985년 1월부터 6월까지 해양환경과 기상요인 및 유입 하천수가 천수만의 김양식장에 미치는 영향을 검토하였다. 양식기간 중 기상요인의 특이성은 확인할 수 없었으며, 수온은 1, 2월의 저온현상을 제외하고는 김양식에 안정적으로 나타났다. 그물발 10 cm당의 총 착생 개체수는 565-2,880으로, 하천수 유입이 없는 지역에서 밀식하는 경향이 있었으며, 엽장, 엽폭, 엽면적은 하천수 유입지역이 유입이 없는 지역보다 높았다. 또한 엽형(葉形)은 만의 안쪽에서 선형(線形), 장엽형(長葉形)인 반면, 유입 하천수의 영향이 있는 만구에서 도란형(倒卵形), 역피침형(逆皮針形), 환엽형(丸葉形)이었다.

3.6 미세플라스틱 분포 현황

Kwon *et al.*[2020]은 2015년부터 2017년까지 천수만을 포함한 한국의 6개 반폐쇄적인 만과 2개 연안에서 Manta trawl을 사용하여 채취한 표층수 중 미세플라스틱(크기 0.33-5 mm)의 국지적 특징과 공간 분포를 검토하였다. 8개 조사 해역에서 미세플라스틱의 평균 풍도는 1.12-4.74 particles·m<sup>-3</sup>의 범위, 도시지역(부산, 인천, 광양만, 영일만, 울산만)의 평균 풍도(2.85 particles·m<sup>-3</sup>)가 그 외 지역(특량만, 함평만, 천수만)의 평균 풍도(1.86 particles·m<sup>-3</sup>)에 비해

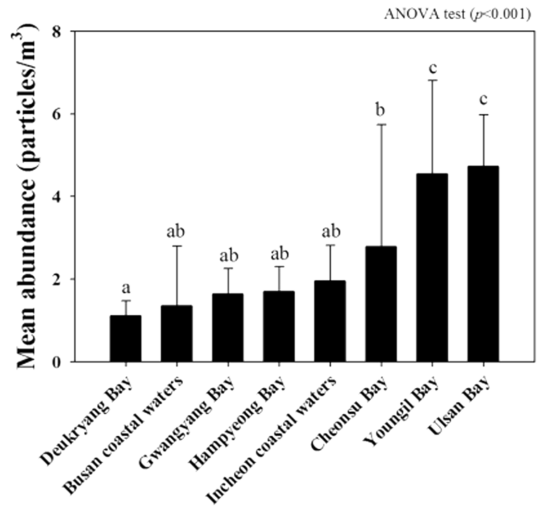


Fig. 4. Mean abundance of microplastics collected with a Manta trawl in sampling sites, Korea (Kwon *et al.*[2020]).

높았다(Fig. 4). rm 외 지역 중 천수만이 2.79 particles·m<sup>-3</sup>로, 함평만(1.70 particles·m<sup>-3</sup>) 및 특량만(1.12 particles·m<sup>-3</sup>)에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 반면 도시지역에서는 인천이 1.96 particles·m<sup>-3</sup>, 광양만이 1.65 particles·m<sup>-3</sup>, 부산이 1.35 particles·m<sup>-3</sup>, 영일만이 4.54 particles·m<sup>-3</sup>, 울산이 4.73 particles·m<sup>-3</sup>의 평균 풍도를 보였다. 미세플라스틱의 평균 풍도는 그 외 지역보다 도시지역에서 높게 나타나 연안 주변의 인구활동과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 각 해역에서 조사된 전체 미세플라스틱의 크기에 따른 상대적 비율은 천수만에서 크기가 0.33-0.5 mm는 20.4%, 0.5-1 mm는 40.9%, 1-5 mm는 38.7%를 각각 차지하였다(Fig. 5). 한편 미세플라스틱은 그 양이나 형태에 있어서 점유율이 전 지역에 걸쳐 분포하고 있었으나 지역-특유의 미세플라스틱의 발생은 도시와 rm 외 지역간의 인간활동의 차이와 관련이 있는 것으로 보고된 바 있다.

또한 Zhang *et al.*[2020]은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 천수만을 포함한 한국 연안의 8개 수역(인천, 함평, 특량, 광양, 부산, 울산,

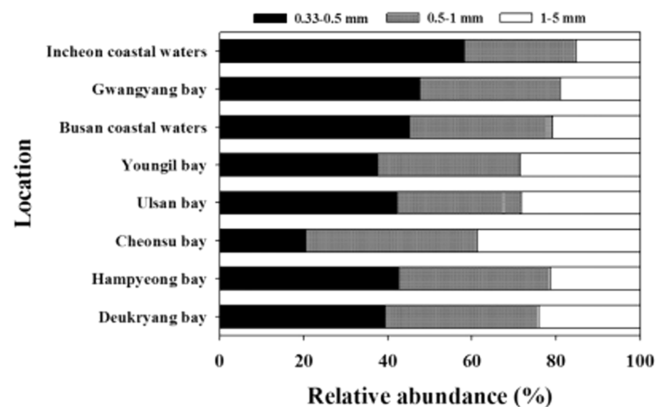


Fig. 5. Relative abundance of microplastic sizes collected with a Manta trawl in the study sites, Korea (Kwon *et al.*[2020]).

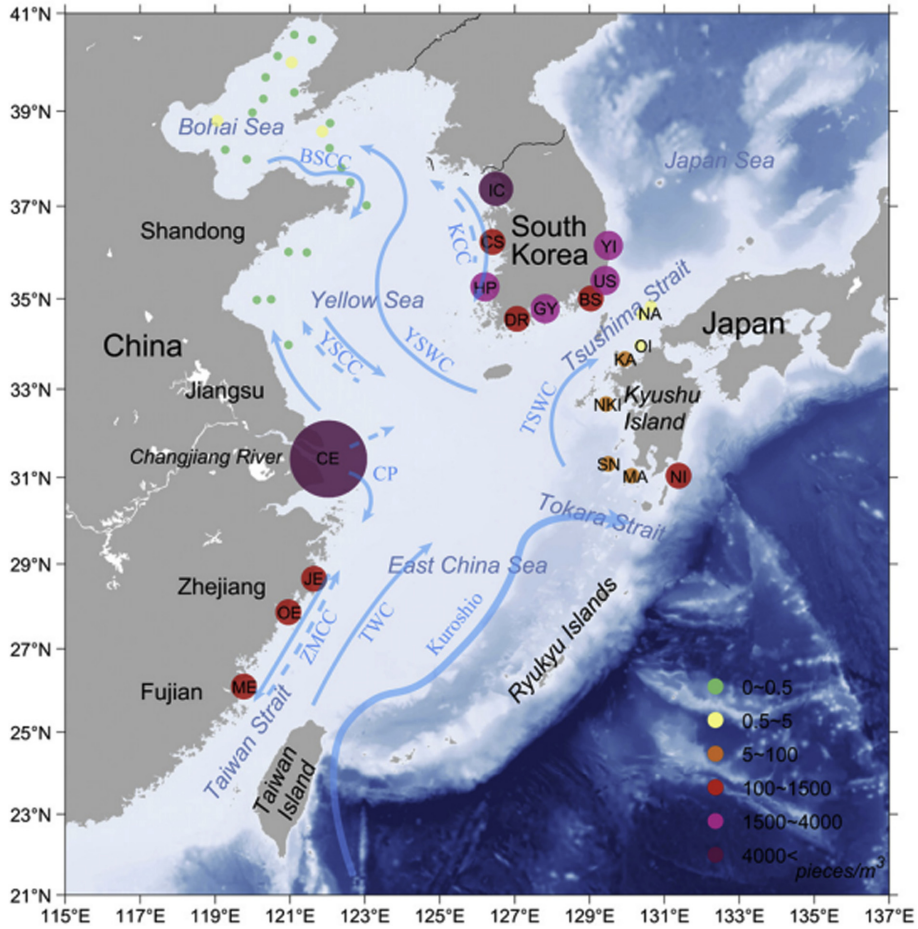


Fig. 6. Schematic map of Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and adjacent seas (Zhang *et al.*[2020]).

Table 3. Concentration (mean ± standard deviation) of microplastics in bivalves and seawater from the coastal regions, Korea (Cho *et al.*[2021])

Station	Concentration					
	Oyster/Mussel		Manila clam		Seawater	
	(n·g <sup>-1</sup> wet weight)	(n·indiv. <sup>-1</sup> )	(n·g <sup>-1</sup> wet weight)	(n·indiv. <sup>-1</sup> )	(n·m <sup>-3</sup> )	(n·L <sup>-1</sup> )
Iccheon	0.26 ± 0.17	0.72 ± 0.44	NA	NA	910 ± 260	0.91 ± 0.26
<b>Cheonsu</b>	<b>0.05 ± 0.04</b>	<b>0.20 ± 0.20</b>	<b>0.49 ± 0.23</b>	<b>3.27 ± 1.53</b>	<b>630 ± 250</b>	<b>0.63 ± 0.25</b>
Gochang	NA	NA	0.16 ± 0.08	1.00 ± 0.40	NA	NA
Hampyeong	0.33 ± 0.18	1.00 ± 0.53	1.03 ± 0.36	2.87 ± 0.61	1400 ± 1900	1.40 ± 1.91
Deukryang	0.22 ± 0.10	1.07 ± 0.50	0.30 ± 0.13	1.53 ± 0.64	1000 ± 380	1.03 ± 0.38
Gwangyang	0.15 ± 0.11	1.00 ± 0.80	NA	NA	1600 ± 910	1.59 ± 0.91
Tongyeong	0.11 ± 0.08	0.76 ± 0.57	0.15 ± 0.03	0.87 ± 0.23	2000 ± 1100	2.02 ± 1.11
Masan	0.26 ± 0.23	1.33 ± 1.31	0.42 ± 0.08	3.60 ± 0.92	2200 ± 760	2.24 ± 0.76
Busan	0.53 ± 0.06	1.87 ± 0.12	NA	NA	1200 ± 1000	1.25 ± 1.04
Ulsan	0.55 ± 0.32	2.20 ± 1.78	NA	NA	1900 ± 680	1.92 ± 0.68
Pohang	0.31 ± 0.43	1.00 ± 1.40	NA	NA	1400 ± 500	1.36 ± 0.50
Sokcho	0.83 ± 0.56	2.45 ± 1.75	NA	NA	520 ± 130	0.52 ± 0.13
Average	0.33 ± 0.23	1.21 ± 0.68	0.43 ± 0.32	2.19 ± 1.20	1400 ± 560	1.35 ± 0.56

NA: not available.

영일)과 Changjiang River Estuary(CRE)를 포함한 동중국해(East China Sea; ECS)의 4개 연안, 일본의 7개 연안역을 대상으로 라그랑지적인 입자 추적의 수치모형을 사용하여 부유 상태와 현탁 상

태의 미세플라스틱 입자의 분산을 검토하였다. 동중국해 연안으로부터 방류되는 부유 상태의 미세플라스틱과 현탁 상태의 미세플라스틱의 이동 경로(즉, 입자의 분산)는 조석의 고려 유무나 하계 또

는 통계에 따라 천수만을 비롯한 한국 연안에 미치는 범위 등에 있어서 현저한 차이를 보였다. 또한 다양한 발생원으로부터 기원한 미세플라스틱의 유입 경로에는 차이가 있으나, 이들은 모두 타이완 해협, 토카라 해협, 쓰시만난류 등이 주요 이동 통로인 것으로 밝혀졌다. 특히, 타이완 해협은 동중국해로부터 표면 부근의 부유상태의 미세플라스틱을 내보내는 데 있어서 가장 중요한 역할을 수행하는 것으로 나타났다. 한편 Cho *et al.*[2021]은 미세플라스틱에 의해 해역의 오염 정도와 그 특징을 확인하기 위해 생물지시자로서 굴, 홍합(진주담치), 마닐라 조개(clam)와 같은 여과섭식 이매패를 이용하여 천수만을 비롯한 한국 연안의 12개 수역에서 미세플라스틱을 모니터링하였다.

이 결과 중 천수만의 미세플라스틱 평균 농도는 굴이  $0.20 \pm 0.20 \text{ n}\cdot\text{g}^{-1}(\text{wet weight})$ ,  $0.49 \pm 0.23 \text{ n}\cdot\text{indiv.}^{-1}$ , 진주담치가  $0.49 \pm 0.23 \text{ n}\cdot\text{g}^{-1}(\text{wet weight})$ ,  $3.27 \pm 1.53 \text{ n}\cdot\text{indiv.}^{-1}$ , 해수에서  $630 \pm 250 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $0.63 \pm 0.25 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 범위로, 타 해역(광양만, 부산 연안, 득량만, 함평만)에 비해 상대적으로 낮았다. 이들 결과는 이매패가 서식하는 주변 수역의 미세플라스틱에 의한 오염의 특징을 잘 반영하고 있는 것으로 판단되었다. Jung *et al.*[2021]은 2016년과 2017년의 7월(또는 8월)에 천수만을 포함한 6개 만(함평만, 득량만, 광양만, 마산만, 영일만)과 3개 연안 해역(인천, 부산, 울산) 등 9개 해역의 총 46개 정점에서 해수(표층 및 아표층)를 채수하여 미세플라스틱에 의한 생태학적 위험성을 평가하였다. 이들은 종 민감도 분포 접근법(species sensitivity distribution approach)을 채용하여 12 particles·L<sup>-1</sup>의 predicted no-effect concentration(PNEC)를 유도하고, 그 결과를 각 정점에서 관측된 현장농도와 비교하였다. 각 해역별 미세플라스틱 농도는 PNEC를 초과하지 않았으며(Table 4), 크기 20-300 μm 범위의 파편조각과 섬유질 미세플라스틱으로 의한 현재의 오염은 한국의 해양생태계에 현저한 위협을 일으키지는 않은 수준이었다. 그러나 이들은 미세플라스틱에 의한 오염이 현재 속도로 20100년까지 50배가 증가한다면, 그 농도가 해양생태계에 대하여 PNEC를 초과할 것으로 예측되어 앞으로 미세플라스틱 오염을 줄이기 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

**Table 4.** Non-spherical microplastic (20-300 μm) abundance in surface and sub-surface seawater from coastal areas, Korea (Jung *et al.*[2021])

Region	No. data	Abundance		
		Min	Max	Mean
Incheon	15	0.22	4.28	1.57
<b>Cheonsu Bay</b>	<b>15</b>	<b>ND</b>	<b>0.62</b>	<b>0.29</b>
Hampyeong Bay	15	0.04	1.34	0.38
Deukryang Bay	15	0.06	1.18	0.43
Gwangyang Bay	40	0.11	2.36	0.79
Masan Bay	18	0.06	2.64	0.50
Busan	15	0.02	1.18	0.44
Ulsan	15	0.03	3.08	0.67
Yeongil Bay	41	0.08	2.24	0.78

ND: not detected

### 3.7 기타 환경

Yoon and Lee[2006], Lee[2006], Kim and Lee[2007] 등은 철새 도래지로서의 천수만의 역할에 관하여 논의하였다. 이들은 도래하는 철새를 관찰하기 위해 방문하는 관광객을 지속적으로 유치하여 지역경제를 활성화하기 위해 방문객을 만족시킬 수 있는 보다 구체적인 생태교육프로그램의 개발과 시설 개선, 친철도의 향상 등이 필요할 것으로 판단하였다. 한편 Cho[2003]는 천수만의 서산 A, B 방조제에 의한 물막이 공사 이래, 만의 북부에 형성된 인공호수(간월호와 부남호)와 매립된 농지 등 환경변화에 따른 조류(새)상의 변화를 조사하였다. 그 결과, A 지역에서는 *Pica pica*(유라시아 까치)를 포함한 21종이 주거종, *Cuculus canorus*(뺨꾸기)를 포함하여 20종이 여름 회유종, *Platalea leucorodia*(노랑부리저어새)는 겨울 회유종, *Limosa limosa*(흑꼬리도요)를 포함한 17종이 간헐적으로 출현하는 종으로 각각 밝혀졌다. B 지역에서는 *Falco tinnunculus*(황조롱이)를 포함한 15종이 주거종, *Ixobrychus sinensis*(담불헤오라기)를 포함한 18종이 여름 회유종, *Ciconia boyciana*(황새)가 겨울 회유종, *Tringa glareola*(섬금류)를 포함한 13종이 간헐적으로 출현하는 종으로 각각 밝혀졌다. 따라서 서로 인접한 두 방조제 A, B 사이의 조류상에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 Yoo *et al.*[2008]은 천수만 일대에 서식하는 조류(새)상과 먹이량에 대하여 조사한 결과, 조류개체군의 수는 추수 후 잔존 낙곡량과 강한 상관성을 보였다. 한편 간월호와 부남호간에 종개채수, 종다양도는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으나, Cho[2003]에서 보고한 바와 같이 두 호수간의 조류상에는 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 Lee *et al.*[2012a]은 2006년부터 2009년까지 3년간 천수만을 포함한 한국내 13개 정점에서 조사한 H3N2형 인플루엔자 바이러스(canine influenza virus; CIV)의 유전학적, 생물학적인 특징을 비교하였다. 그 결과, 닭에 적응한 H9N2 바이러스(CK/Kor/96006-like)는 산업적인 가금류보다 작은 가금류 중에서 더 빈번하게 검출되었고, 특히 가정 오리가 야생의 수생 조류보다 H3N2 CIV의 8개 유전자에 가까운 친척(relatives)을 품고 있는 것으로 나타났다. 이것은 H3N2 CIV가 조류 수용기와 결합을 선호한다는 점이며, 따라서 양방향성의 바이러스 전파가 육지에 있는 가금류와 수생의 가금류 사이에서 발생할 수 있음을 의미하였다. 따라서 이들은 종간의 전파(전염)를 할 수 있는 다른 재조합체(reassortants)를 예방하기 위해서 비산업적 가금류계에 있어서 유전자 이동의 해명과 관리가 필요하다고 주장하였다. 한편 Kim[2003]은 14개 지표를 바탕으로 천수만 지역 어촌의 지속가능한 발전 잠재력을 평가하였으며, Kwon *et al.*[2020]은 천수만의 하구 환경을 자연생태계로 복원과 관련하여 부남호의 해수 유통 사업의 경제성을 분석하였다. 그 결과, 이들은 천수만내 부남호의 하구복원 사업을 위한 연간 가구당 평균 지불의향(Willingness To Pay; WTP)을 3,055원으로 추정하였으며, 이 편익값을 활용한 부남호의 하구복원 사업은 편익(B)비용(C)값이 1.05로, 경제적으로 사업의 타당성이 있다고 판단하였다. 반면, Choi[2016]는 천수만 주변 지역인 홍성군 결성면을 대상으로 전통적 촌락지역의 지역정체성을 파악한 결과, 이 지역의 정체성은



역사, 지리, 문화, 이상 등에 관한 것들이 주류를 이루고 있는 것으로 나타났다. 또한 Son[2019]은 천수만내로 유입하는 하천 중의 하나인 도당천 유역에서 도시화로 불투수면적비율이 증가함에 따른 간월호 삼각주의 규모변화를 분석하였다. 그 결과, 1996년부터 2016년까지 도당천 유역내의 용지 비율은 4.45에서 8.74%로 증가하였으며, 특히 삼각주는 천수만 간척사업을 준공한 이후 규모가 대체로 증가 추세인 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1976년부터 2021년까지 천수만 연구와 관련하여 한국학술지인용색인과 과학인용지수 논문에 게재된 64편의 논문을 분석하였다.

천수만은 방조제 축조와 간척 사업 등의 영향으로 창조시 조류 유속이 낙조류에 비해 상대적으로 더 빨라지고, 조간대의 노출시간 대도 더 빨라지거나 길어지는 등의 변화가 있었으며, 또한 표층 수온은 가을과 겨울에는 조석과 위상이 일치하지만, 봄과 여름에는 조석과 위상이 일치하지 않았다.

천수만의 수질은 3등급 수준이었다. 천수만에서의 Chl a 농도와 TSS사이에는 6개월의 시차(phase-lag)를 보였으며, 특히 Chl a의 평균 농도는 서해안의 다른 해역에 비해 상대적으로 높았다. 천수만의 퇴적물은 그 오염정도가 외국에 비해 상대적으로 낮거나 중간정도이지만, 방조제 건설 후 과잉의 납과 유기탄소의 농도가 높은 퇴적물이 발견되었다. 특히 천수만의 퇴적물과 이매페에서 유기오염물질의 하나인 PCDD/Fs의 농도가 NOAA가 제시한 역치의 영향 수준(threshold effect level)보다 높게 나타나 생태독성학적으로 위험성을 예고하였다. 또한 천수만 퇴적물의 입도 조성은 만구에서 만내, 특히, 방조제 부근으로 갈수록 세립화하는 반면, 유기물 함량은 상대적으로 증가하였다.

천수만내 식물플랑크톤은 서산 방조제의 건설시기인 1985년을 전후하여 *Nitzschia longissima*, *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Biddulphia sinensis*, *Leptocylindrus danicus* 등에서 *Paralia sulcata*, *Skeletonema costatum* 등으로 규조류 중 주요 우점종이 변화하였으며, 또한 인공호(간월호, 부남호)의 건설 후 우점하던 규조류 대신 편모조류, 남세균, 담수 녹조류로의 종조성의 변화는 물론 현존량도 감소하였다. 한편 천수만의 어류는 방조제 건설 전에는 64종이 채집되었고, 베도라치와 까나리를 비롯하여 회유종인 밴댕이, 멸치, 전어 등이 우점하였으나, 방조제 건설 직후에는 32종이 채집되었고, 어종에서는 멸치, 흰베도라치를 비롯하여 수조기, 쉬쉬망둑, 실망둑, 참서대, 기름민태 등의 풍도가 탁월하였다. 뿐만 아니라, 방조제 건설 6년 내지 25년 후는 25-26종의 어류가 출현하였고, 실망둑, 풀망둑 등과 같은 망둥어류는 사라진 대신, 주둥치, 청보리멸, 가슴어 등은 증가하였다. 즉, 서산방조제, 보령방조제, 홍성방조제 건설과 이에 따른 간척사업 후 어류의 출현종수와 현존량이 감소하였고 군집구조도 변화하였다. 한편 저서동물은 1990년대에는 311종, 서식밀도 769 indiv.·m<sup>2</sup>로 출현하였으나 2010년대에는 224-252종, 서식밀도 681-

1,940 indiv.·m<sup>2</sup>로 출현하여, 과거에 비해 출현종수는 다소 감소하였다. 이들 저서동물 중 우점종은 다모류로서, 특히 연중 우점종으로 출현하는 기회종인 긴자락송곳갯지렁이는 천수만내의 유기물의 함량과 상관을 나타내었다. 천수만에서의 저서생물의 건강도는 중간 상태 또는 양호한 상태로 평가되었으나, 유기오염은 만구에서 만내로 갈수록 증가하였다.

천수만의 서식생물과 해수에서의 미세플라스틱의 평균 농도는 도시화된 평양만이나 부산에 비해서는 물론, 비도시화된 득량만이나 함평만에 비해서도 상대적으로 낮았다.

천수만은 철새도래지로서의 지역적 특성을 가지고 있어서 생태 관광을 위한 지역소득원로서의 활용가치가 매우 높은 것으로 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 천수만은 1985년도의 서산방조제에 의한 물막이공사가 완료됨에 따라 만의 북부에는 간월호와 부남호라는 인공호가 만들어졌고, 이후 2000년도에는 보령방조제와 홍성방조제의 완공과 이와 관련한 간척사업으로 인하여 수산자원보전 지역은 물론 수면적도 이전의 약 절반으로 줄어들었다. 그 결과, 만내 흐름은 예전에 비해 상대적으로 미약해졌고, 만의 북부는 인공호로부터 유출되는 담수로 인해 세립질 유기오염물이 퇴적하는 등의 문제가 발생하였다. 또한 이에 따라 흐름 환경의 변화는 물론, 수질과 퇴적 환경의 변화로 인해 부유생물과 어류상, 저서동물상도 방조제 건설 이전에 비해 변화(또는 감소)한 것으로 나타났다. 따라서 천수만의 환경을 개선하고 수산생물자원의 회복을 위해서는 첫째, 만 북부의 인공호에 대한 적절한 수질과 배수의 관리가 무엇보다도 절실한 과제로 생각된다. 이를 위해서는 담수호 자체의 체계적인 수질관리는 물론, 배수시기나 배수량의 조절도 필요할 것으로 생각된다. 둘째, 천수만내의 흐름을 원활히 하고 수질 및 퇴적 환경을 개선하기 위해서는 양식시설(예를 들면 굴과 김 등의 양식시설이나 정지망 등)의 적정한 배치(즉, 설치장소와 시설량)와 어장정화사업(예를 들면 저질개량)이 필요할 것으로 판단된다. 즉, 천수만의 경우 남북방향인 주 흐름에 가능한 한 지장을 주지 않는 위치를 선정(양식시설물이 유수저항을 일으키기 때문)하여 환경용량을 초과하지 않는 범위의 시설량(즉, 시설대수와 시설 밀도)을 배치하여야 할 것으로 판단된다. 셋째, 천수만을 둘러싼 지역사회에 경제적으로 유용하고 잠재력이 있는 수산생물의 품종을 선정, 체계적인 자원관리(예를 들면, 치패나 종묘 생산, 자치어의 방류 등)가 필요하다고 판단된다. 또한 앞으로 천수만이 지속가능한 해양생태계를 유지하기 위해서는 지역 수산인의 적극적인 참여를 유도하여 미세플라스틱의 발생원의 하나인 페어구의 회수 및 리사이클링(재활용)을 위한 기술 개발도 필요할 것으로 생각된다.

#### References

- [1] Cha, S.S., Shim, J.H., 1988, "Seasonal variation of the pelagic fish egg community in the mid-east coastal waters of the Yellow Sea", J. Oceanogr. Soc. Korea, 23(4), 184-193.

- [2] Cha, S.S., Yoo, J.M., Kim, J.M., 1990, "Seasonal variation of the fish larval community in the coastal waters of the mid-east Yellow Sea", *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 25(2), 96-105.
- [3] Cha, S.S., Yoo, J.M., Kim, J.M., Huh, H.T., 1987, "Key for the identification of the ichthyoplankton in the mid-east coastal waters of the Yellow Sea", *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 22(4), 236-245.
- [4] Cho, S.R., 2003, "The avifauna at Chunsoo bay(season A and B area)", *J. Environ. Sci.*, 12(2), 163-170.
- [5] Cho, Y., Shim, W.J., Jang, M., Han, G.M., Hong, S.H., 2021, "Nationwide monitoring of microplastics in bivalves from the coastal environment of Korea", *Environ. Pollut.*, 270, 116175.
- [6] Choi, J.K., Ryu, J.H., Lee, Y.K., Yoo, H.R., Woo, H.J., Kim, C.H., 2010, "Quantitative estimation of intertidal sediment characteristics using remote sensing and GIS", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88, 125-134.
- [7] Choi, H.G., Moon, H.B., Choi, M., Yu, J., 2011a, "Monitoring of organic contaminants in sediments from the Korean coast: Spatial distribution and trends (2001-2007)", *Mar. Pollut. Bull.*, 62, 1352-1361.
- [8] Choi, J.K., Oh, H.J., Koo, B.J., Ryu, J.H., Lee, S., 2011b, "Spatial polychaeta habitat potential mapping using probabilistic models", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93, 98-105.
- [9] Choi, J.K., Oh, H.J., Koo, B.J., Lee, S., Ryu, J.H., 2011c, "Macrobenthos habitat mapping in a tidal flat using remotely sensed data and a GIS-based probabilistic model", *Mar. Pollut. Bull.*, 62, 564-572.
- [10] Choi, J.K., Oh, H.J., Koo, B.J., Ryu, J.H., Lee, S., 2011d, "Crustacean habitat potential mapping in a tidal flat using remote sensing and GIS", *Ecol. Modelling*, 222, 1522-1533.
- [11] Choi, W.H., 2016, "The preliminary study on regional identity of traditional rural areas: A case study of Gyeongseong-myeon, Hongseong-gun, Korea", *J. Assoc. Korean Geographers*, 5(2), 155-180.
- [12] Choo, H.S., 2021, "Spatiotemporal fluctuation of water temperature in Cheonsu Bay, Yellow Sea", *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, 54(1), 90-100.
- [13] Flather, R.A., Heaps, N.S., 1975, "Tidal computations for Morecambe Bay", *Geophys. J. R. Astronom. Soc.*, 42, 480-517.
- [14] Han, H.S., Ma, C.W., Choi, M.S., 2015, "Ecological variations of macrobenthos in subtidal at Cheonsu bay in Chungcheongnam-do, Korea", *Korean J. Environ. Ecol.*, 29(3), 421-430.
- [15] Hongseong-gun Homepage, <https://hongseong.go.kr> (accessed 2021. 7. 16)
- [16] Hwang, D.W., Kim, S.G., Choi, M., Lee, I.S., Kim, S.S., Choi, H.G., 2016, "Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula", *Mar. Pollut. Bull.*, 102, 230-239.
- [17] Hwang, K., Lee, J., Kwon, I., Park, S.Y., Yoon, S.J., Lee, J., Kim, B., Kim, T., Kwon, B.O., Hong, S., Lee, M.J., Hu, W., Wang, T., Choi, K., Ryu, J., Khim, J.S., 2021, "Large-scale sediment toxicity assessment over the 15,000km of coastline in the Yellow and Bohai seas, East Asia", *Science of the Total Environment*, 792, 148371.
- [18] Im, Y.J., Lee, T.W., 1990, "Species composition and biology of major species of gobiid fish in Cheonsu Bay of the Yellow Sea, Korea", *Korean J. Ichthyol.*, 2(2), 182-202.
- [19] Jang, D.H., Chi, K.H., Lee, H.Y., 2002a, "Classification of tidal flat deposits in the Cheonsu-bay using multi-spectral satellite data and measurement data of spectral reflectance", *J. Geomorphological Association of Korea*, 9(1), 1-14.
- [20] Jang, D.H., Chi, K.H., Lee, H.Y., 2002b, "Classification of tidal flat deposits in the Cheonsu-bay using landsat TM data and surface sediment analysis", *J. Environ. Impact Assessment*, 11(4), 247-258.
- [21] Jang, D.H., Chi, K.H., Lee, H.Y., 2002c, "A study on the environment change of tidal flat in the Cheonsu Bay using remotely sensed data", *J. Environ. Impact Assessment*, 11(1), 51-66.
- [22] Jo, M.H., Jo, W.R., 1997, "Spatial distribution of tidal flats in Korea", *J. Korean Assoc. Regional Geographers*, 3(2), 195-208.
- [23] Jung, J.W., Park, J.W., Eo, S., Choi, J., Song, Y.K., Cho, Y., Hong, S.H., Shim, W.J., 2021, "Ecological assessment of microplastics in coastal shelf, and deep sea waters with a concentration of environmentally relevant size and shape", *Environ. Pollution*, 270, 116217.
- [24] Jung, R.H., Seo, I.S., Lee, W.C., Kim, H.C., Park, S.R., Kim, J.B., Oh, C.W., Choi, B.M., 2014, "Community structure and health assessment of macrobenthic assemblages at spring and summer in Cheonsu Bay, west coast of Korea", *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 19(4), 272-286.
- [25] Kim, B., 2003, "Introduction of integrated coastal management program and sustainable development of fishing villages in Cheonsu Bay region", *J. Korean Geographical Soc.*, 38(2), 184-205.
- [26] Kim, E.K., Barghi, M., Choi, M., Moon, H.B., 2019, "Spatial and temporal trends of PCDD/Fs in sediment and bivalves along the Korean coasts during 2001-2012", *Mar. Pollut. Bull.*, 146, 183-189.
- [27] Kim, H.C., Son, S., Kim, Y.H., Khim, J.S., Nam, J., Chang, W.K., Lee, J.H., Lee, C.H., Ryu, J., 2017, "Remote sensing and water quality indicators in the Korean West coast: Spatio-temporal structures of MODIS-derived chlorophyll-a and total suspended solids", *Mar. Pollut. Bull.*, 121, 425-434.
- [28] Kim, I.S., Lee, S.Y., 2007, "A study on the way to develop the ecological tourism for the activity of rural community", *J. Korea Assoc. Local Administration*, 4(1), 27-72.
- [29] Kim, K.L., Ryu, J.H., 2020, "Generation of large-scale map of surface sedimentary facies in intertidal zone by using UAV data and object-based image analysis (OBIA)", *Korean J. Remote Sensing*, 36(2-2), 277-292.
- [30] Kim, N.G., Kang, J.W., 1986, "Effect of inflowing river-water on the farming of laver in Chonsu Bay", *J. Korean J. Phycology*, 1(1), 259-279.
- [31] Kim, S.J., Jahng, K.Y., Lee, G.H., Rhie, Y., 1985, "Abundance

- and distribution of petroleum-degrading bacteria in coastal waters of Korea”, Korean J. Environ. Biol., 3(1), 21-28.
- [32] Kim, Y.S., 1989, “The sedimentology of Holocene intertidal deposits in Chenonsu Bay, west coast of Korea”, J. Korean Earth Sci. Soc., 10(1), 134-151.
- [33] Kim, Y.S., Kim, J.N., 1996, “Biogenic sedimentary structures of crustaceans at the intertidal flat of Whang Island, Cheonsu Bay”, J. Korean Earth Sci. Soc., 17(4), 357-364.
- [34] KEPCO(Korea Electric Power Corporation), 1985, “Influence investigation on marine products of coastal aquaculture due to T/P coolant of Boryeong Samcheonpo (II)”, KRC-84C-J01, 1-443.
- [35] KMSTI(Korea Marine Science Technology Institute), 1981, “Report of tidal current observations for 5ojeong Thermal Power Plant”, Rental Service Co. Ltd., 1-17.
- [36] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1978, “Marine ecological fundamental study on neighboring seas of the construction site of Gojeong-ri Thermal Power Plant”, BSPI00014-14-3, 1-138.
- [37] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1974, “Pre-feasibility study of power plant at Cheonsu Bay”, 1-171.
- [38] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1978, “A preliminary marine ecological study for Gojeon-Ri Power Plant site”, BSPI 00014-14-3, 1-138.
- [39] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1980, “Marine geology resources of the Yellow Sea”, BSPE 00023-42-5, 1-244.
- [40] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1992, “A study of the marine ecosystem on the effects of coastal zone development – first year –, BSPG 00158-464-3, 1-93.
- [41] KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute), 1994, “A study of the marine ecosystem on the effects of coastal zone development”, BSPN 00239-737-3, 1-306.
- [42] Kwon, O.Y., Kang, J.H., Hong, S.H., Shim, W.J., 2020, “Spatial distribution of microplastic in the surface waters along the coast of Korea”, Mar. Pollut. Bull., 155, 110729.
- [43] Kwon, S.Y., Lee, J.H., Hong, J.M., Hwang, H.B., Lee, T.W., 2013, “Changes in species composition of shallow water fish at the Namdang beach after dike construction in Cheonsu Bay”, Korean J. Ichthyology, 25(2), 106-118.
- [44] Kwon, Y.J., Park, S.H., Jin, S.J., 2020, “Economic feasibility analysis of restoration project of the Bunam Lake in Cheonsu Bay”, Korea Environ. Policy and Admin. Soc., 28(1), 163-183.
- [45] Lee, H.J., Lee, D.H., Lee, Y.N., Kwon, J.S., Lee, Y.J., Lee, J.B., Park, S.Y., Choi, I.S., Song, C.S., 2012a, “Generation of reassortant influenza viruses within the non-industrial poultry system”, Infection, Genetics and Evolution, 12, 933-946.
- [46] Lee, J.H., 2006, “Motivations and preferred birdwatching facilities and settings among Korean birdwatchers: An empirical study on a sample of Chunsuman birdwatching tourists”, J. Tourism Sci. Soc. Korea, 30(3), 161-181.
- [47] Lee, J.H., Park, H.S., 1998, “Community structures of macrobenthos in Cheonsu bay, Korea”, J. Korean Soc. Oceanogr., 33, 18-27.
- [48] Lee, J.S., Kim, K.H., Shim, J.H., Han, J.H., Choi, Y.H., Khang, B.J., 2012b, “Massive sedimentation of fine sediment with organic matter and enhanced benthic-pelagic coupling by an artificial dyke in semi-enclosed Chonsu Bay, Korea”, Mar. Pollut. Bull., 64, 153-163.
- [49] Lee, M.O., Kim, J.K., Kim, B.K., Kim, M.W., 2020a, “Past, present, and future directions in the study of Jinhae Bay, Korea”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 23(2), 57-69.
- [50] Lee, M.O., Kim, J.K., Kim, B.K., Kim, M.W., 2020b, “Past, present, and future for the study of Gamak Bay, Korea”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 23(3), 148-164.
- [51] Lee, M.O., Kim, J.K., Kim, B.K., Kim, M.W., 2021, “Marine environmental studies in Gwangyang Bay, Korea: Past, present and future direction”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 24(4), 1-18.
- [52] Lee, M.O., Kim, J.K., Kim, B.K., 2022, “Marine environmental characteristics of Deukryang Bya, Korea”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 25(1), 63-77.
- [53] Lee, M.O., Park, I.H., Kim, B.K., 2008, “The characteristics of tidal currents in Chonsu Bay around Anmyeondo”, J. Korean Island, 20(2), 145-162.
- [54] Lee, S., Park, I., Koo, B.J., Ryu, J.H., Choi, J.K., Woo, H.J., 2013, “Macrobenthos habitat potential mapping using GIS-based artificial neural network models”, Mar. Pollut. Bull., 67, 177-186.
- [55] Lee, S.M., Chang, S.J., Heo, S., 2019, “Changes in phytoplankton community structure by freshwater input in the Cheonsu Bay, Korea”, J. Environ. Sci. International, 28(11), 1005-1017.
- [56] Lee, T.W., 1983, “Age composition and reproductive period of the Shad, *Konosirus punctatus*, in Cheonsu Bay”, J. Korean Soc. Oceanogr., 18(2), 161-168.
- [57] Lee, T.W., 1988, “Seasonal fluctuation in abundance and species composition of demersal fishes in Cheonsu Bay of the Yellow Sea, Korea”, Bull. Korean Fish. Soc., 22(1), 1-8.
- [58] Lee, T.W., 1996, “Change in species composition of fish in Chonsu Bay, 1. demersal fish”, J. Korean Fish. Soc., 29(1), 71-83.
- [59] Lee, T.W., 1998, “Change in species composition of fish in Chonsu Bay, 3. pelagic fish”, J. Korean Fish. Soc., 31(5), 654-664.
- [60] Lee, T.W., Moon, H.T., Choi, S.S., 1997, “Changes in species composition of fish in Chonsu Bay(II), surf zone fish”, Korean J. Ichthyol., 9(1), 79-90.
- [61] Lee, T.W., Seok, K.J., 1984, “Seasonal fluctuations in abundance and species composition of fishes in Cheonsu Bay using trap net catches”, J. Korean Soc. Oceanogr., 19(2), 217-227.
- [62] Luettich, R.A., Westerink, J.J., Scheffner, N.W., 1992, “ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL”, Dredging research pro-

- gram technical report DRP-92-6, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1-137.
- [63] NIFS(National Institute of Fisheries Science), 1985, "Ecology and fishing grounds for inshore major fishes", Fisheries Technical Report, 1-219.
- [64] OHA(Office of Hydrographic Affairs), 1991, "Observation and research of mean sea level in Korea", Annual Report, 1-211.
- [65] Park, D.W., 1976, "A geomorphological study of the tidal flat of Chonsu\_Bay, western coast of Korea, by means of remote sensing techniques", J. Assoc. Korean Geographers, 15, 1-15.
- [66] Park, D.W., You, K.B., 1980, "A quantitative analysis of the patterns of the tidal creeks of the Chonsu-Bay, South Korea", J. Assoc. Korean Geographers, 22, 1-9.
- [67] Park, H.S., Kang, R.S., Lee, J.H., 2006, "Distribution patterns of the dominant macrobenthos and the benthic environments on subtidal soft-bottom in Chonsu Bay, Korea", J. Korean Fish. Sci. Soc., 39(special issue), 214-222.
- [68] Park, H.S., Lim, H.S., Hong, J.S., 2000, "Spatio- and temporal patterns of benthic environment and macrobenthos community on subtidal soft-bottom in Chonsu Bay, Korea", J. Korean Fish. Soc., 33(3), 262-271.
- [69] Park, Y.K., 1995, "Application of thermal discharge dispersion model on Cheonsu Bay", J. Korean Environ. Sci. Soc., 4(2), 169-180.
- [70] Ryu, S.O., Chang, J.H., 2005, "Characteristics of tidal beach and shoreline changes in Chonsu Bay, west coast of Korea", J. Korean Earth Sci. Soc., 26(6), 584-596.
- [71] Seo, H.G., Seo, J.S., Ryu, M.K., Lee, E.H., Kwon, S.R., Kang, J.S., No, Y.S., Choi, H.S., Jung, S.H., Han, H.J., 2014, "A Nematode infection in the epithelial tissue of cultured rockfish *Sebastes schlegeli* in Cheonsu Bay, western Korea", Korean J. Fish. Aquat. Sci., 47(5), 603-610.
- [72] Shim, J.H., Lee, W.H., 1979, "On phytoplankton of the Cheonsu Bay, west coast", J. Oceanological Soc. Korea, 14(1), 6-14.
- [73] Shim, J.H., Shin, Y.K., 1989, "Biomass of primary producer in the Chonsu Bay – Relationships between phytoplankton carbon, cell number and chlorophyll –", J. Oceanological Soc. Korea, 24(4), 194-205.
- [74] Shim, J.H., Yeo, H.G., 1988, "Spatial and temporal variations of phytoplankton in Chonsu Bay", J. Oceanological Soc. Korea, 23(3), 130-145.
- [75] Shim, J.H., Yun, K.H., 1990, "Seasonal variation and production of zooplankton in Chonsu Bay, Korea", J. Oceanological Soc. Korea, 25(4), 229-239.
- [76] Shim, W.J., Song, Y.K., Hong, S.H., Jiang, M., 2016, "Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining", Mar. Pollut. Bull., 113, 469-476.
- [77] Shin, Y.K., Shim, J.H., Jo, J.S., Park, Y.C., 1990, "Relative significance of nanoplankton in Chonsu Bay: Species composition, abundance, Chlorophyll and primary productivity", J. Korean Soc. Oceanogr., 25(4), 217-228.
- [78] So, J.G., Jeong, G.T., Chae, J.W., 1998, "Numerical modelling of changes in tides and tidal currents caused by embankment at Chonsu Bay", J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 10(4), 151-164.
- [79] Son, M.W., 2019, "The land use change in Seosan-si area and the evolution of Ganwolho delta", J. Assoc. Korean Photo Geographers, 29(3), 57-68.
- [80] Suh, S.W., Lee, H.Y., Kim, H.J., 2014, "Spatio-temporal variability of tidal asymmetry due to multiple coastal constructions along the west coast of Korea", Estuarine, Coastal and Shelf Science, 151, 336-346.
- [81] The Kyunghyang Shinmun, <https://m.khan.co.kr> (accessed 2022. 2. 16).
- [82] Yoo, S.H., Kim, I.K., Kang, T.H., Yu, J.P., Lee, S.W., Lee, H.S., 2008, "Wintering bird community in Cheonsu Bay and the relationship with food resources", Korean J. Environ. Ecol., 22(3), 301-308.
- [83] Yoon, J.H., Lee, S.E., 2006, "Visitors' behavior and satisfaction of Seosan Chunsuman International Birdwatching Fair", J. Regional Development Assoc., 18(3), 189-208.
- [84] Yu, C.M., 1998, "Evaluation of offshore water quality by bio-assay using the gametes and embryos of sea urchins", J. Korean Soc. Oceanogr., 3(3), 170-174.
- [85] Zhang, Z., Wu, H., Peng, G., Xu, P., Li, D., 2020, "Coastal ocean dynamics reduce the export of microplastics to the open ocean", Science of the Total Environ., 713, 136634.

---

Received 11 April 2022

1st Revised 27 June 2022, 2nd Revised 19 August 2022

Accepted 22 August 2022