

## 영일만 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 Yeongil 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 영일만 해양환경과 관련하여 지난 50여년간 발표된 한국학술지인용색인 및 과학인용지수 논문 96편을 분석하여 영일만 해양환경의 시대에 따른 변천과정과 특징을 파악하였다. 영일만은 형산강과 냉천 등 하천수 유출과 하층의 해수 유입에 의한 밀도류가 형성되거나 쓰시마난류와 동해 고유수가 유입하여 2층류가 형성되었다. 또한 이들 하천수와 해류가 만내 염분과 수온에 미치는 영향은 큰 것으로 나타났다. 특히 만내 표층 흐름은 바람과 해류의 영향을 크게 받으며, 조석잔차류는 반시계방향의 순환을 나타내었다. 만내는 포항신항의 고유주기와 유사한 항만 부진동이 존재하고, 특히 영일만 신항 건설 후 일부 구간에서는 파의 진폭이 더욱 증가한 것으로 나타나, 부진동 저감 대책이 시급한 것으로 판단되었다. 영일만은 포항시와 포항공단, 그리고 형산강 하천수를 통한 질산 질소의 유입 등에 의해 내만을 중심으로 수질 오염이 심화되고 있었다. 퇴적물은 대부분 사질로서 입도 조성은 해안선 부근은 조립질인 반면, 만 중앙부는 세립질이었으며, 이러한 분포는 해저지형과 반시계 방향의 해류 패턴에 의한 것으로 추론되었다. 포항 구항 주변 퇴적물은 중금속 오염이 매우 심각하였으며, 일부 미량 유기화합물질 농도는 저질 가이드라인을 초과하여 저서 생물에 잠재적으로 부정적 영향을 줄 수 있는 것으로 판단되었다. 식물플랑크톤 종조성은 규조류가 우세하였으며, 우점종은 *Thalassionema nitzschioides*와 *Leptocylindrus danicus*이었다. 식물플랑크톤 출현종수와 현존량, 해조류 종수 등은 해에 따라 다소 기복은 있었으나 큰 변화는 없었다. 출현한 부유성 난이나 자치어를 포함한 어류 중 우점종은 멸치와 가나리이며, 패류 중 우점종은 피조개와 아담스백합이었다. 식물플랑크톤을 비롯한 해조류, 어류 등 생물상(종수, 밀도, 어종 등)은 과거에 비해 큰 변화는 없었으나, 일부 퇴적물에서 해조류나 어류 성장을 저해하는 다이옥신 유사활성과 발정성의 활성을 나타내는 유기화합물과 내분비계교란물질이 발견되었다. 이들 오염물질 농도는 주로 인간활동에 의해 영향을 받는 산업단지와 만내 대도시 주변에서 높았다. 따라서 영일만 생물자원 보전을 위해서는 형산강과 냉천 등 하천수에 의한 오염부하는 물론, 산업시설과 생활하수 유래의 오염물질 유입을 적극 차단해야 할 것으로 판단된다.

**Abstract** – We reviewed 96 academic essays issued for the past fifty three years to find out the marine environmental characteristics of Yeongil Bay, located at the eastern part of Korea. Water temperature and salinity of Yeongil Bay appeared to be affected by outflows of the freshwater from Hyeongsan River or Naengcheon and inflows of Tsushima Warm Current and East Sea Proper Water. As a result, density currents or two-layered flows were established in the bay. The surface flows largely received the influence of winds and currents, and in particular, residual currents indicated anti-clockwise circulations in the bay. There existed secondary undulations similar to natural period of Pohang New Port in the bay, and in particular, the amplitude of wave turned out to be increased after the completion of Yeongil Bay New Port. Thus, it was judged that some measures are urgently required for

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

seiche phenomena. The water quality of the bay has been deteriorated around the inner bay such as Pohang ports due to Pohang city, industrial complex, and nitric acid nitrogen from Hyeongsan River. Sediments consisted of mainly sand and the grain was coarse near the coast while it was fine in the middle of the bay presumably due to bottom topography and anti-clockwise circulation of seawater. In particular, the neighborhood of Pohang old port was seriously contaminated by heavy metals, and part of the concentrations of trace-organic pollutant exceeded the sediment quality guideline, suggesting a negative effect on benthos. Diatoms prevailed in species of phytoplankton and *Thalassionema nitzschioides* and *Leptocylindrus danicus* dominated among them. The appearance and its standing crop of phytoplankton as well as algae did not reveal a big difference even though there were slight fluctuations with years. Most dominant species were *Engraulis japonicus* and *Ammodytes personatus* among floating eggs and juvenile of fish while *Scapharca broughtonii* and *Callithaca adamsi* dominated among shellfish. These biota (number and its density of species for fish and algae), including phytoplankton, did not fairly change compared to the past. However, organic compound and endocrine disrupting chemicals have been found in some sediments, indicating dioxin-like activity and estrogenic activity which are known to hinder the growth of fish or algae. In particular, concentrations of these pollutants appeared to be higher in the vicinity of industrial complex and large cities in the bay. Therefore, it is judged that we should positively obstruct inflows of the pollutants that originated from the freshwater of Hyeongsan River or Naengcheon as well as industrial or domestic sewage in order to preserve marine biological resources.

**Keywords:** Yeongil bay(영일만), Marine environments(해양환경), CCS(이산화탄소 포집 및 저장시설), Marine logistics(항만 물류)

## 1. 서 론

한국 동해안의 남부에 위치하는 영일만은 포항시 달만갑과 장기갑을 연결하는 내만으로, 북동쪽으로 만구가 열려있는 개방형 만이다(Lee et al.[1995]). 만의 표면적은 115-200 km<sup>2</sup> (Park and Song[1972]; Lee[1999]; Kim[2001]; Lee et al.[2004]; Yoon et al.[2005]; Shim et al.[2013] 등 연구자에 따라 다소 차이가 있음), 만구 폭은 약 10 km, 길이는 12-13 km (Lee et al.[1995]; Kim et al.[2001]; Yoon et al.[2005])인 직사각형에 가까운 형상을 하고 있다(Fig. 1). 영일만은 동해에서 북상하는 쓰시마 난류의 영향을 받고 있으며(Lee and Oh[1986]), 또한 내륙으로부터 형산강, 냉천, 여남천 등을 통해 담수와 토사 유입의 영향도 받고 있다(Kim[2001]). 이들 중, 형산강은 총연장 62.2 km, 유역면적 1,166 km<sup>2</sup>인 하천으로서, 평수기 유량은 17.4 m<sup>3</sup>·sec<sup>-1</sup>, 갈수기 유량은 4.3 m<sup>3</sup>·sec<sup>-1</sup>, 연평균 유출량은 약 6억 m<sup>3</sup>정도로 알려져 있다(Yoon et al.[2003]; Lee et al.[2004]). 그 결과, 만내는 수운약층(또는 염분약층)이 뚜렷하게 분포하고 있어서 수괴의 다양성을 보여준다(Kim[1983]; Lee[1999]; Jo et al.[2000]). 특히, 형산강은 태백산맥의 동쪽에 위치한 한국 10대 하천의 하나로서 유역면적은 1,166.8 km<sup>2</sup>이고, 유로연장이 62.2 km이다(Suh and Park[1986]). 그 결과, 동해안의 회유성 어족이 서식하기 좋은 자연적 조건을 갖추고 있으며 또한 양식장의 적지로서 각종 어패류의 서식 및 산란장으로서 수산업상 중요한 위치를 점하고 있다(Han et al.[2003]; Cha et al.[2012]; Lee et al.[2012]). Fig. 2는 2021년 현재 영일만내 연안 또는 주변에 산재한 어장(정치망을 비롯한, 마을어업, 양식장 등)의 분포를 보여주는데, 만내는 항만으로서의 기능 확보를 위해 어장은 거의 존재하지 않는다. 그러나 최근 들어 만내의 포항 구항 및 신항은 물론 POSCO(Pohang Iron and Steel Co., Ltd.)를 비롯한 주변 산업단지로부터의 생활폐수나 산업폐수의 유입으로 인해 만내 수질은 점차 악화하고 있는

실정이다(NIFS[1989]; Kim et al.[1988]; Kang et al.[2002]; Kim and Kim[2004]). 일례로서, 영일만 저서동물의 서식밀도는 2,500 개체·m<sup>2</sup> 이상으로, 한국의 다른 연안역이나 내만에 비해 매우 높으나(Shin et al.[1992]), 전 세계적으로 오염지시종으로 알려진 *Capitella capitata*(버들갯지렁이과 다모류의 일종)가 영일만 형산강 입구에서 1,300 개체·m<sup>2</sup> 이상의 높은 밀도로 서식하는 것으로 밝혀졌다(Lim et al.[1991]). 이러한 해양환경 변화로 인해 Lee [1999]는 저서동물의 종조성과 현존량 변화 등 해양생태계에도 전반적인 변화가 뚜렷하다고 보고하였다.

영일만의 조석은 일조부등이 커서 반일주조가 우세한 혼합조 또는 일주조가 우세한 혼합조이며, 조차는 0.3-0.4 m로 조석보다는 외해의 영향을 직접 받아 해면상승이 더 크다(Hwang et al.[1972]; Lee[1999]). 그 결과, 조류는 오염물질의 수송에 중요한 역할을 하지 못하며 또한 영일만은 강한 해류의 경로에서 벗어나 있으므로 만내에서의 흐름은 주로 바람이나 연안류, 하천유출수에 의한 영향을 받는다(Park and Song[1972]; Kwak[1976]). 또한 영일만은 동해 저층냉수대의 계절변화가 민감하게 나타나는 해역 중의 하나이기도 하다(Kwak and Lee[1977]).

한편, 영일만의 내만쪽에는 포항 구항 및 신항이 있으나, 여기에 더하여 1997년에 제정된 항만건설촉진법에 의거, 2020년 개항한 포항 신항(영일만항)은 대구와 경북 유일의 해양통로인 동시에 극동러시아 및 일본을 잇는 환동해권 국제물류의 중심항만으로서의 위상을 자랑하고 있다(Ha and Cho[2009]). 이와 같은 영일만 해안 지형의 인위적인 변화는 물론 도시화와 산업화는 해양환경이나 생태계의 변화를 초래할 가능성이 있음을 Hong et al.[2008]은 일찍이 제기한 바 있다. 특히 최근에는 온실가스 감축을 위한 방안의 하나로서, 포항분지와 장기분지에서 각각 해상 중소규모 CO<sub>2</sub> 지중 저장 실증과 육상 소규모 CO<sub>2</sub> 지중 저장 파일럿 실증 연구가 수행되고 있다(KIGAM[2014a]; [2014b]; [2014c]; Choi et al.[2015];

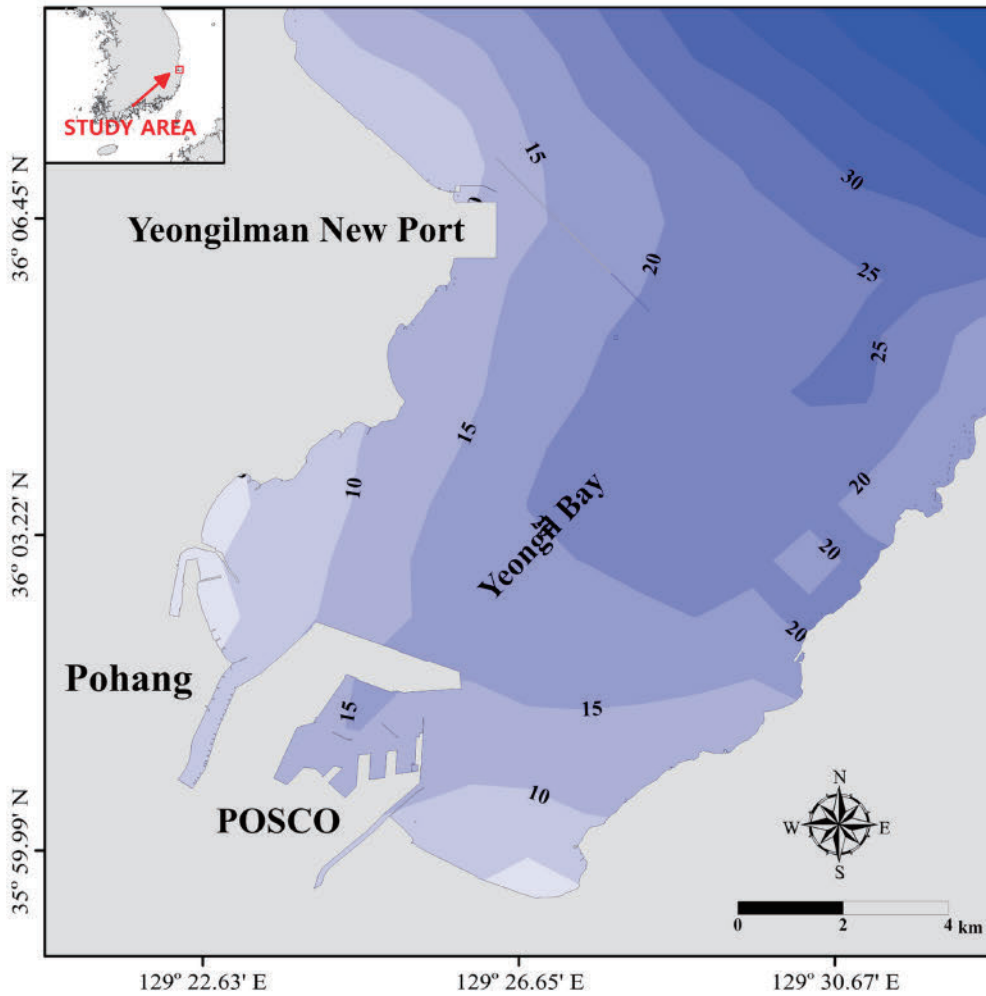


Fig. 1. Yeongil Bay for study area.

Kim *et al.*[2015]; KNU[2016a]; [2016b]; [2017a]; [2017b]). 포항분지 중규모 해상 CO<sub>2</sub> 실증 프로젝트는 영일만에 위치하는 심부 저장층에 포집된 CO<sub>2</sub>를 주입, 저장하는 저장 실증 연구로서, 1만 톤 이상의 주입된 CO<sub>2</sub>를 탐지하고 거중을 분석하기 위하여 지구물리-지화학 복합 모니터링 분야의 연구가 이루어지고 있다 (Kwon[2017]; Park *et al.*[2018]).

이상에서 살펴본 바와 같이, 영일만은 수산생물의 산란과 서식에 좋은 자연 조건을 갖추고 있어서 한국 수산업상 중요한 위치를 차지하고 있으며 또한 산업과 물류의 중심항만으로서의 기능도 겸하고 있는 해역이다. 뿐만 아니라 최근에는 온실가스 저감을 위한 CO<sub>2</sub> 포집 및 지중 저장 시설(CCS; carbon capture and storage)의 설치를 위한 실증연구가 수행되고 있는 해역이기도 하다. 한편 영일만에서는 포항 구항 및 신항과 더불어 최근 개항한 영일신항만의 운영에 따른 만내 수질의 악화와 선박 운항상 안전사고의 위험성이 점차 증대하고 있는 실정이다. 따라서 영일만의 수질을 더 이상 악화하지 않도록 개선하여 어장으로서의 기능을 보전함은 물론 물류 항만으로서의 기능도 원활히 수행하기 위해서는 영일만의 균형 있는 이용과 개발계획의 수립이 절실하다고 판단된다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 지난 53년간 영일만의 해양환경과 관련하여 수행된 연구의 광범위한 리뷰를 통해 연구 주제의 시대적 변화와 해양환경의 특징을 고찰하고 영일만의 균형 있는 이용과 개발에 필요한 사항에 관하여 검토하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 1969년부터 2022년까지 영일만의 해양환경 연구와 관련하여 발표된 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI) 논문 72편, 과학인용지수(Science Citation Index; SCI) 논문 24편 등, 총 96편의 논문을 분석하였다. 학술지 검색시는 논문의 주제어로 “영일만” 또는 “Yeongil Bay”가 포함된 문헌을 선택하였다. 또한 국립해양조사원 개방해(<http://www.khoa.go.kr/oceanmap/main.do>)에 공개된 어장정보를 참고하였다. 이들 자료로부터 시대에 따른 영일만 해양환경 연구 주제의 변화와 영일만 해양환경의 특징을 진단·평가하고 영일만의 지속가능한 이용과 개발에 필요한 사항에 관하여 검토하였다.

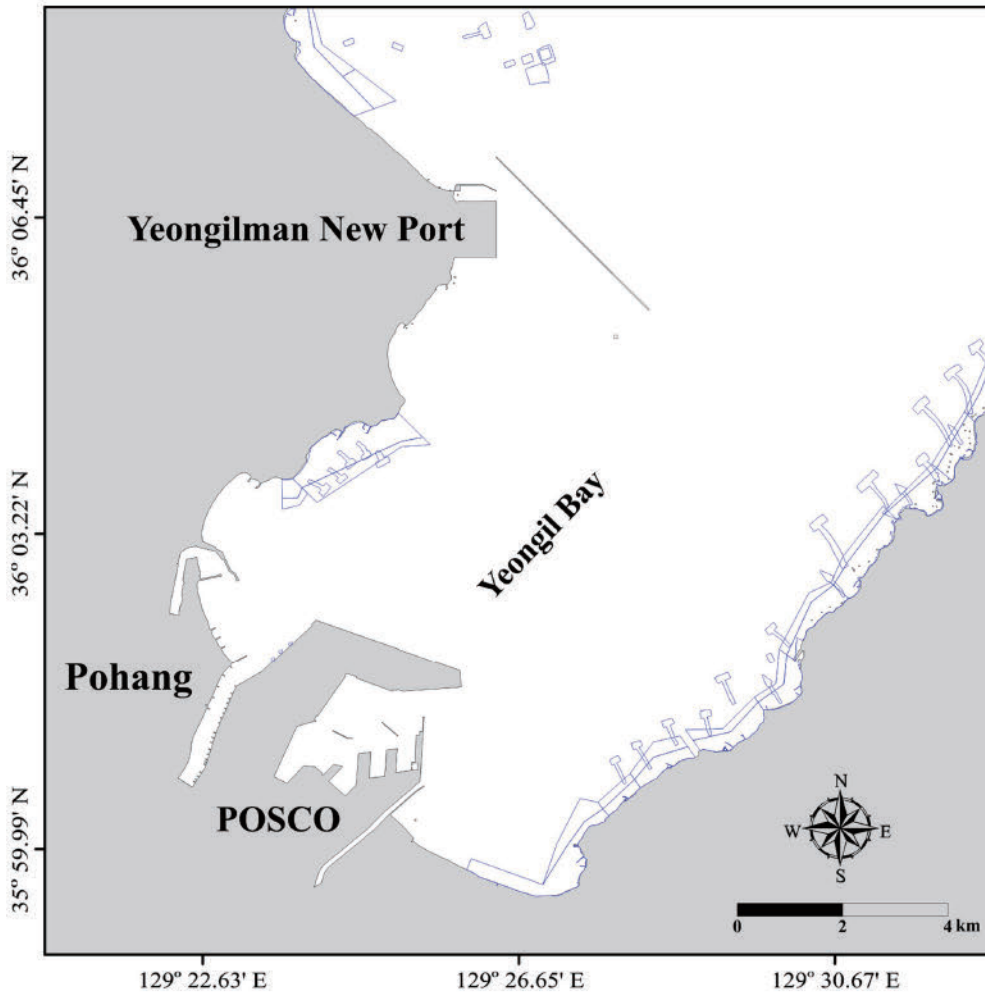


Fig. 2. Distribution of maricultural farms in the neighborhood of Yeongil Bay (<http://www.mof.go.kr>).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 영일만 연구의 개요

1969년 이래 영일만의 해양환경과 관련하여 수행된 연구 주제와 각 연대별 논문의 발표건수를 Table 1에 나타내었다. 영일만 연구는 전체 96건 중 생물환경(어류, 패류, 동·식물플랑크톤, 저서생물, 해조류 등) 관련 주제가 26건(27.1%)으로 가장 많았고, 다음으로 물리환경(조석·조류, 파랑, 밀도류, 수온·염분, 수중소음, 조도 등) 및 퇴적물·저서환경 관련 주제가 각각 16건(16.7%), CCS 관련 주제가 12건(12.5%), 수질환경 관련 주제가 11건(11.5%), 지질환경 및 항만 물류 관련 주제가 각각 6건(6.3%), 그리고 미세플라스틱과 해양쓰레기 관련 주제가 2건(2.1%)로 나타났다. 이들 연구 주제를 살펴보면, 물리환경이나 생물환경에 관해서는 1969년 이래 최근까지 비교적 꾸준히 연구가 이루어진 반면, 수질환경이나 퇴적물·저서환경에 관해서는 2000년대에 들어서부터 연구가 다소 활발해진 것으로 나타났다. 한편 항만 물류에 관해서는 2000년대 중반부터 2010년대 초반까지 집중적인 연구가 이루어진 것으로 판단된다. 즉, 수질환경을 비롯한 퇴적물·저서환경, 항만 물류와 관련한 연구가 2000

년대부터 2010년대 초반까지 집중하고 있는 것은 포항 신항만(영일신항)의 개발 행위와 관련이 있으며, 또한 CCS에 관해서는 극히 최근의 연구로 정부가 추진하고 있는 온실가스의 감축정책과 무관하지 않은 것으로 판단된다.

이하에서는 Table 1에 나타난 지금까지의 연구결과에 기초하여 영일만의 물리환경, 수질환경, 지질환경, 퇴적물·저질환경, 생물환경, CCS, 항만 물류, 미세플라스틱과 해양쓰레기 문제에 관하여 각각 고찰하였다.

#### 3.2 물리환경

Yang[1969]은 1968년 5월에서 8월에 걸쳐 영일만내 10개 정점에 방사성 추적자인  $^{60}\text{Co}$ 을 투하하여 신항만 건설에 따른 시설물의 배치계획과 관련한 표사이동실험을 실시하여 방사성 코발트 유리 모래( $^{60}\text{Co}$ )의 이동 방향과 분포 범위, 표류 속도 등을 산출하였다. 또한 Hahn[1974]은 1971년 5월 영일만 입구에서 수중조도계로 조도를 측정하여 해수 중에서의 광선의 소산계수(평균  $0.045\cdot\text{m}^{-1}$ )는 투명도판(Secchi disc)에 의한 투명도와는 역의 관계가 있음을 밝혔다. Ha and Yoon[1983]은 1979년 8월 영일만 부근 해역의 2개 정

**Table 1.** Variation of research themes with time in relation to the marine environments of Yeongil Bay

Year	Theme of research								Total
	Physical	Water Quality	Deposits/Sediments	Geological	Biological	CCS	Microplastic/Marine litter	Harbor Logistics	
1969	1				1				2
1970									
1971									
1972			1	1					1
1973									
1974	1								1
1975									
1976	2								2
1977		1			1				2
1978									
1979					1				1
1980									
1981					2				2
1982									
1983	1								1
1984									
1985	1								1
1986	2				1				3
1987									
1988									
1989									
1990									
1991									
1992					1				1
1993				1					1
1994				1					1
1995	1	1			1				3
1996	1			1	1				3
1997					2				2
1998					1				1
1999					1				1
2000					1		1		2
2001	2								2
2002		1							1
2003		4	1		2				7
2004	2	1	2	1					5
2005	1							1	2
2006	1		1					1	3
2007	1								1
2008		1			1			1	3
2009			1		1			1	3
2010		1			1				2
2011								1	1
2012					3				2
2013					1			1	2
2014			3						3
2015					1				1
2016			1	1	1				3
2017									
2018						8			8
2019	1		1			2			4
2020									
2021		1	3			1	1		6
2022			2			1			3
Total	18	11	16	6	25	12	2	6	96

점에서 수중청음기(hydrophone)로 수중소음을 측정하고 스펙트럼을 분석한 결과, 영일만 연안의 수중소음은 거의 전 주파수대에서 통항선의 소음에 의한 영향을 받고 있으며, 수면 부근에서 발생한 음파는 구면확산손실을 일으키며 하층으로 전파하는 것을 확인하였다. Kwak[1976]은 1973년 10월 영일만의 11개 정점에서 수온, 염분, pH, 용존산소 등을 측정하여 만내는 상·하 두 개의 수층이 존재하는데, 상층에는 가을에 퇴조하는 쓰시마난류가, 하층에는 동해고유의 저층냉수대가 각각 존재한다고 하였다. 이와 같이 쓰시마난류가 영일만내의 수온변화에 미치는 영향은 Yang[1985]의 결과에서도 알 수 있다. 그는 영일만에서 1962년부터 1981년까지 국립수산물학원이 수집한 해양관측자료를 분석한 결과, 표층의 평균 수온이 높은 달은 10월과 11월로 나타났는데, 그는 이러한 표층 수온의 주기적 변화가 쓰시마난류의 변화와 밀접한 관계를 갖는다고 추론하였다. Chu[1976]는 1973년부터 1974년까지 기록된 매일의 조석관측자료로부터 진폭 20 cm 이상의 부진동을 발체하여 이를 통계적으로 분석하였다. 그 결과, 부진동의 관측주기는 20-24분이 가장 많았고, 다음으로 60-84분 주기의 부진동이 많았다. 이들의 관측주기 20-24분은 포항 신항의 계산주기인 12.3분보다 약간 길지만, 주기 60-84분은 영일만의 계산주기인 83.5분보다는 짧았다. 또한 부조위(負潮位)의 발생빈도는 부진동의 발생빈도보다 많았으며, 부조위현상이 있을 때 현저한 부진동이 발생하면 부조위는 더욱 증가하는 것으로 나타났다. Park *et al.*[1986]은 영일만과 포항 신항으로 입사하는 장파에 의해 발생하는 강제 부진동 현상을 밝히기 위해 2차원 수치모형을 적용하였다. 그 결과, 영일만의 제1 고유주기는 약 70분, 제2 고유주기는 약 25분이며, 포항 신항의 제1 고유주기는 약 25분, 제2 고유주기는 약 7.5분으로 각각 나타났다. 한편 영일만내로 25분 주기의 장파가 들어올 경우에는 영일만의 제2 고유주기와 포항신항의 제1 고유주기가 거의 동일하므로 포항 신항내의 해면 부진동은 강하게 증폭될 가능성을 암시하였다. 이들의 수치모형에 의한 실험결과는 전술한 Chu[1976]의 조석관측에 의한 부진동의 관측주기와 유사하였다.

한편 Suh and Park[1986]은 형산강 유역에서의 수위관측자료, 유량관측자료 및 포항측후소의 기상관측자료 등을 사용하여 형산강 하구에서의 밀도류 현상을 분석하였다. 그 결과, 만조시는 영일만내로의 해수 침입이 탁월하여 뚜렷한 성층밀도류가 형성되었으며, 간조시는 염수쐐기(saline wedge)가 후퇴하면서 하층 염분이 상층의 담수와 혼합·확산하면서 유하여 잘 혼합된 하구(well-mixed estuary)를 형성하는 것을 밝혔다. Lee *et al.*[1995]은 1989년부터 1990년에 걸쳐 영일만내 9개 정점에서의 연속측류, 측류관 추적실험, 염료(Rhodamine-B) 확산실험, 형산강 유출수의 항공사진 등의 자료를 바탕으로, 영일만의 해수유동구조와 확산특성을 조사하였다. 이들의 결과는 영일만의 표층 흐름은 조류보다 바람과 해류의 영향을 크게 받으나, 중층 흐름은 해류의 영향이 지배적임을 보여 주었다. 또한 표층에서의 항류는 만의 동쪽에서는 바람 영향에 관계없이 만외로 유출하며, 만의 서쪽에서는 바람과 형산강 유출수에 의한 영향이 크다는 사실을 확인하였다. 반면, 중층에서의 항류는

만의 서쪽 해안을 따라 만내로 유입하여 좌선화하면서 만의 동쪽 해안을 따라 만외로 유출하는 것으로 나타났다. Kim[2001]은 수심적분된 2차원 수치모형을 이용하여 영일만의 북쪽 달만갑 연안으로부터 포항 신항을 거쳐 장기갑 연안을 따라 외해로 빠져나가는 조석잔차류의 거동을 재현하였다. 그는 영일만 잔차류에 대한 조류의 영향은 미약하지만, 파랑이나 바람에 의한 영향이 상대적으로 크고 또한 형산강 하천수가 조석잔차류의 거동에 미치는 영향이 지배적이라고 주장하였다. 그의 결과는 전술한 Lee *et al.*[1995]의 결과와 정성적으로 일치하였다. Kim *et al.*[2001]은 1994년 7월과 1995년 1월 2회에 걸쳐 현장을 조사하고 또한 3차원 해수유동 수치모형실험을 행하여 영일만내의 유동 구조, 하천수 및 발전소 냉각수의 확산 특성을 구명하였다. 그 결과, 하천수 및 발전소 냉각수의 유량은 영일만내의 해수유량에 비하여 매우 적어서 영일만 전체의 해수유동 및 밀도 구조에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 또한 영일만에서는 하천수 및 발전소로부터의 온배수에 의해 밀도성층이 형성되어 만내수는 표층을 통해 유출되고 만외수는 저층을 통해 유입되는 유동구조를 보였다. Yoon *et al.*[2004]은 3차원 해수유동모형을 사용하여 형산강을 통한 담수유입과 영일만로의 동해고유수의 유입시 만내 수괴의 거동특성을 조사하였으며, 그들은 수치실험에 의해 영일만의 단면별 net-flux water값을 다음과 같이 계산하였다. 형산강 하구에서는 중층에서 만의 내측 방향으로  $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ , 표층에서 만의 외측 방향으로 약  $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ , 냉천과 포항 신항 해역에서는 중층에서 만의 내측 방향으로 약  $1.7 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ , 표층에서 만의 외측 방향으로 약  $1.1 \sim 1.7 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ , 영일만 전 해역에서는 중층에서 만의 내측 방향으로 약  $90.0 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ , 표층에서 만의 외측 방향으로 약  $15.0 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ . 또한 이들의 계산결과, 영일만내의 흐름은 표층에서는 외해 유출, 중층과 저층에서는 만내 유입의 2층 구조로 이루어져 있음이 판명되었다. 따라서 만내로 오염물질이 유입될 경우는 외해로의 유출뿐만 아니라 만내 침강 및 저층의 고염 해수의 육지방향으로의 흐름에 의해 영양염의 집적구간(nutrients trap zone)이 형성될 가능성이 큰 것으로 판단되었다. Yoon and Lee[2005]는 영일만내의 연안수와 외해 고유수의 상호관련성 및 만내 해수순환류의 발생기구에 대하여 고찰하였다. 스펙트럼 분석결과, 만내 연안수와 동해고유수는 서로 일정한 주기성을 가지고 있으며, 표층과 저층은 각각 약 0.84-0.91년과 1.84년의 주기를 나타내었다. 또한 영일만에서는 표층에서 형산강 담수의 외해로의 유출과 저층에서 저온·고염의 동해고유수가 유입되어 하구순환류가 형성되며, 이러한 현상은 수괴가 안정되는 봄부터 여름에 걸쳐 가장 뚜렷하였고, 그 발생주기는 약 10일 정도로 평가되었다.

Jeong *et al.*[1996]은 다양한 관측기기(directional waverider, PUV, wave gauge 등)를 사용하여 영일만의 파랑을 현장관측하고, 또한 Chae and Jeong[1992]의 타원형 모형을 이용하여 불규칙파 변형에 대한 수치모형실험을 실시하였다. 이들의 수치실험결과는 현장조사결과와 유사하였으며, 따라서 천해에서 파랑스펙트럼을 수치모형에 의해 간접적으로 구하는 이들의 분석 및 해석방법은 타

당하다고 주장하였다. Kim *et al.*[2004]은 확장환경사방정식 파랑 모형을 구성하여 영일만 신항만 건설 전후의 해변변동과 신항만 개발에 따른 정온도 변화를 비교·분석하였다. 그 결과, 쇄파-비선형 분산조건을 적용할 경우, 포항 구항의 항내 파고비가 영일만 신항 건설전보다 신항 건설후에 더 높았다. 또한 포항 신항의 항내 파고비는 건설전인 건설후보다 더 높은 반면, 외항에서는 건설 후가 건설 전에 비해 더 높았다. Jeon *et al.*[2006]은 확장환경사방정식을 사용하여 영일만 입구의 방파제 건설과 신항만 계획을 반영할 경우, 이들이 항만 부진동에 어떠한 영향을 미치는지 수치실험에 의해 검토한 결과, 영일만 신항 건설 후에는 포항 신항과 구항의 공진주기가 변하며, 몇몇 구간에서는 건설전에 비해 진폭이 증가하는 구간이 있는 것으로 나타났다. 따라서 이들은 부진동 저감을 위해 진동주기를 변경시키거나 증폭비를 감소시킬 수 있는 방안 마련의 필요성을 제기하였다. Chun *et al.*[2007]은 파랑수치모형인 WAM(WAVE Model)에 쇄파와의 상호작용을 추가하여 모형 적용을 천해역으로 확장하였다. 그들의 수치모의결과는 영일만으로 입사파가 내부로 진입하는 과정에서 바닥에 의한 에너지 감쇠와 쇄파작용에 의해 점진적으로 파고가 감소하고 연안 부근에서는 굴절 효과로 인해 해안에 대하여 연직 방향으로 진행하는 경향을 보여 주었다. Kim *et al.*[2019]은 2017년 11월 15일에 발생한 규모 5.4의 포항지진을 대상으로 영일만항 안벽 및 배면에서 발생한 피해 메커니즘을 조사한 결과, 영일만항의 케이슨은 5-15 cm 정도 수평 변위가 발생하였고, 뒤채움 지반에서는 10 cm 이상의 침하가 발생하였다. 또한 2차원 유효응력해석결과, 배후지의 뒤채움 지반내 국부적으로 과잉간극수압이 증가하고 유효응력이 감소한 것이 침하 발생의 원인으로 밝혀졌다.

이상의 결과로부터, 영일만은 만조시 상층에서의 형상강이나 냉천 등 하천수의 유출과 하층의 해수 유입에 의한 밀도류가 형성되며, 또한 상층은 고온·저염의 쓰시마난류가, 하층은 저온·고염의 동해 고유수가 유입하여 2층류가 형성되는 등 만내 염분과 수온에 미치는 하천수와 해류의 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있다. 만내 표층 흐름은 조류보다 바람과 해류의 영향을 크게 받으나, 중층 흐름은 해류 영향이 지배적이며, 조석잔차류는 북쪽 달만갑 연안으로부터 포항 신항을 거쳐 장기갑 연안을 따라 외해로 빠져나가는 형태, 즉 반시계방향의 순환을 나타내었다. 특히, 만내 연안수와 저층의 동해고유수는 각각 일정한 주기(0.84-0.91년과 1.84년)를 가진 하구순환류를 형성하고 있는 것으로 나타났다. 만내는 주기 20-24분의 부진동이 존재하며, 이것이 포항신항의 고유주기와 거의 동일하여 항만 부진동이 증폭될 위험성이 존재하였다. 특히, 영일만 신항 건설 후, 포항 신항과 구항의 공진주기가 변하였고, 일부 구간에서는 건설 전에 비해 파의 진폭이 증가하는 것으로 나타나, 부진동 저감을 위한 방안 마련의 필요성이 제기되고 있다.

### 3.3 수질환경

Kwak[1977]은 1973년 10월 하순 영일만 해수중의 철분 함유량을 조사한 결과, 만입구나 중앙부에 비해 내만은 입자성 철분이 약 5

배, 용해성 철분이 약 2배 가량 높은 것으로 나타났다. 또한 어항 입구부터 해수욕장에 걸쳐 용해성 철분의 함량이 높았는데 이것은 오염원 존재 가능성을 암시하였다. Suh *et al.*[1995a]은 1993년 8월 영일만내 3개 정점에서 채집한 해수, 플랑크톤, 어류내의 천연 방사성 핵종  $^{210}\text{Po}$  농도를 조사한 결과, 해수 중의  $^{210}\text{Po}$  평균농도는  $1.9 \text{ mBq}\cdot\text{l}^{-1}$ 로 나타났다. 또한 식물플랑크톤의 우점종인 규조류 *Skeletonema costatum*의 농축계수는  $7.6\times 10^4$ , 동물플랑크톤 중의 요각류와 곤쟁이류의 농축 평균농도는  $210\text{-}584 \text{ mBq}\cdot\text{g}^{-1}$ (건조중량)이었으나, 특히 요각류 *Labidocera bipinnata*의 농축 평균농도는  $2,070 \text{ mBq}\cdot\text{g}^{-1}$ 로, 예외적으로 높았다. 반면 어류 유문맹낭(幽門盲囊)의  $^{210}\text{Po}$  농도와 농축계수는 각각  $2,979\text{-}3,810 \text{ mBq}\cdot\text{g}^{-1}$ 와  $3.4\text{-}4.3\times 10^4$ 이었다. 따라서 생물체내의  $^{210}\text{Po}$ 의 농축계수는 식물플랑크톤 < 여과섭식 요각류 < 잡식성 곤쟁이류 < 육식성 요각류 < 부어류 순으로 나타났다. 한편 전술한 Kim *et al.*[2001]의 현장조사결과에 따르면, 만내 영양염류 농도는 표층보다 저층에서 높았고, 또한 저층 중에서도 만의 북쪽에 비해 남쪽에서 더 높았다. 이것은 영일만의 지형 및 유동 특성에 의해 정체성 해역이 형성된 결과로 판단되며, 따라서 영일만내 수질 분포는 유동 특성과 밀접한 관련성을 가지고 있는 것으로 나타났다. Kang *et al.*[2002]은 1990년부터 1998년까지 9년간 영일만의 13개 정점에서 수질을 계절별로 조사하였다. 그 결과, 염분은 강수량과 하천수가 다량 유입하는 8월에는 낮았으나, 만외로 갈수록 점차 증가하였다. 또한 염분은 질산 질소와 유의적인 음의 상관을 보여 형산강, 냉천 등의 하천수 유입이 질산 질소의 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 영일만의 주요 오염원은 하천수 유입에 의한 질산 질소인 것으로 판단되었다. 또한 주성분분석결과, 영일만 수질 변화를 일으키는 주 요인은 하천수 유입에 따른 질산 질소의 증가에 있는 것으로 나타나, 이를 개선하여 만내에서의 적조 발생을 예방하는 것이 중요하다고 이들은 역설하였다. Yoon *et al.*[2003]은 국립수산과학원이 실시한 1987년(포항신항 건설전) 15개 정점, 1993년부터 2000년까지(9년간) 14개 정점에서의 수질관측자료를 이용하여 영일만 수질의 경년변동과 수질인자간의 상관성을 고찰하였다. 그 결과, 화학적산소요구량(COD) 농도는 2월과 5월에는 낮고 8월에는 높은 반면, 총질소(TN)과 총인(TP) 농도는 모두 11월에 가장 높았다. 반면 TN 농도는 5월에 낮고 TP 농도는 8월에 가장 낮았으며, 영양염(TN, TP)의 농도가 증가하면 COD 농도도 증가하는 높은 상관성을 나타내었다. 또한 포항 신항 개발후 신항을 중심으로 고농도의 영양염 수괴가 출현하였으며, 인구밀집지역인 포항 구항과 포항 신항 해역을 중심으로 만내 수질은 전반적으로 악화된 것으로 나타났다. Son *et al.*[2003]은 2000년 3월 영일만 형산강 지역의 8개 정점에서 수층별로 해수를 채수하여 COD 농도와 총유기탄소량(TOC)을 측정하였다. 그 결과, 형산강 지역에서 TOC는  $1.60\text{-}12.64 \text{ mgC}\cdot\text{l}^{-1}$ , COD 농도는  $0.96\text{-}33.12 \text{ mgO}_2\cdot\text{l}^{-1}$ 의 범위로 나타났다. 한편 형산강에서 이들 TOC와 COD 농도의 수평적인 분포는 육지쪽에서 해양쪽으로 갈수록 점차 감소하였고, 또한 염분이 증가할수록 TOC와 COD 모두 감소하는 경향을 보였다. Lee[2003]는 유역유출모형(강우-유출모형)인 tank

모델을 구축하여 형산강 유역의 일별 하천유량과 오염부하량을 산정하였다. 그의 결과에 의하면, 영일만으로 유입하는 형산강의 연평균 하천유량은  $878.34 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$ 이며, COD, 부유물질(SS), TN, TP는 각각  $15.11 \text{ ton} \cdot \text{year}^{-1}$ ,  $23.24 \text{ ton} \cdot \text{year}^{-1}$ ,  $10.65 \text{ ton} \cdot \text{year}^{-1}$ ,  $0.54 \text{ ton} \cdot \text{year}^{-1}$ 로 나타났다. 또한 영일만으로 유입하는 주 오염원은 형산강 하구 부근에 위치한 포항시와 포항공단인 것으로 밝혀졌다. Yoon *et al.*[2003]은 4개의 tank가 직렬로 배치된 cascade 수치모형을 사용하여 형산강을 비롯한 영일만으로 유입하는 육상오염부하량의 정량적 평가를 시도하였다. 그 결과, 일별 오염발생 총량은 생물학적산소요구량(BOD), SS, TN, TP가 각각  $202 \text{ ton} \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $620 \text{ ton} \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $42 \text{ ton} \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $16 \text{ ton} \cdot \text{day}^{-1}$ 이며, 영일만내에서는 형산강으로부터 발생하는 오염부하량이 가장 많은 것으로 나타났다. 또한 영일만내에서 발생하는 전체 오염부하량 BOD, SS, TN, TP 중 형산강이 차지하는 비율은 각각 78.2%, 88.5%, 62.5%, 73.1%로 산정되었다. Kim and Kim[2004]은 1998년부터 2000년까지 영일만과 형산강의 5개 정점에서 수질변화를 조사하였다. 그 결과, 표층수온은 5월과 8월은 저층에 비해 높았고, 염분은 형산강 담수의 영향으로 만내에서 낮았으며, 표층과 저층간 염분차는 만외나 만중앙부에 비해 만내에서 컸다. 한편 COD는 8월과 11월에 높았고, 2월이 가장 낮았으며, 표층과 저층 모두 만내에서 만외로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 한편 영일만에서는 Redfield ratio가 평균 6.4로 낮았으며, 전 해역에서 DIN이 인산염( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) 농도에 비해 상대적으로 낮았는데, 이는 형산강 담수의 영향 때문으로 판단되었다. Kim *et al.*[2008]은 2004년 8월과 2005년 2월에 영일만의 해수, 하천수, 연안 지하수의 영양염( $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ )의 농도를 측정하여 해저지하수배출(submarine groundwater discharge; SGD, 또는 담지하수 유출량)과 SGD 유래의 영양염류를 추정하였다. 그 결과, SGD는 2004년 8월에 수심 9 m이하의 천해에서 대략  $6 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ (침투율  $= 0.2 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$ )로 추정되었으며, 이 값은 세계적으로 다른 연안역에서 발견되는 전형적인 SGD 수준에 비해 훨씬 컸다. 한편 하계 동안 영일만에 있어서의 SGD 유래의 영양염은 각각 DIN, 용존무기인(DIP), 규산염(DSi)에 대하여 전체 유입량의 98%, 12%, 76%를 기여하였다. Hwang *et al.*[2010]은 한국 주변해역에서 수행된 해저지하수 연구자료와 물수지 방법을 이용하여 영일만을 포함한 한국 연안의 4개 해역(즉, 제주도, 여자만, 마산만, 영일만)에 대하여 해안을 통해 해양으로 유입되는 SGD를 산정하였다. 그 결과, 조사 및 계산된 SGD는 영일만의 경우 해안선 1 km당  $1,500 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ 로, 제주도, 마산만, 여자만의  $16,200 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $8,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$ ,  $107,000 \text{ m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$  등에 비해 상대적으로 적었다. 또한 이 양은 영일만의 경우 이 지역의 주변 하천으로부터의 유출량의 약 50%에 해당하는 반면, 제주도, 마산만, 여자만은 각각 57%, 89%, 420%에 해당하여 지역적으로 큰 차이를 보였다. 이들 값은 여전히 SGD를 평가하는데 있어서 방법적인 문제가 많이 제기되고 있는 만큼 앞으로 수리역학적인 방법이나 seepage meter를 이용한 실제 측정 등을 통한 상호비교의 필요성을 이들은 역설하였다. Jung *et al.*[2021]은 형산강으로 유입하여 영일만으로 배수되는 구무 셋강의 인위적 Hg 오

염원에 대한 위치 정보를 구축하였다.

이상의 결과로부터, 영일만내 수질은 포항시와 포항공단, 그리고 형산강 하천수를 통한 질산 질소의 유입 등에 의해 포항 구항과 신항 등 주로 내만을 중심으로 오염이 심화되고 있는 것으로 판단되었다. 특히, 영일만에서는 전 해역에서 DIN 농도가 인산염 농도에 비해 상대적으로 낮았는데, 이것은 형산강 하천수의 영향 때문으로 판단되었다. 한편 영일만에 있어서의 SGD 유래의 영양염은 여전히 논란의 여지는 있으나 DIN, DIP, 규산염 각각에 대하여 전체 유입량의 98%, 12%, 76%로 추정되었다.

### 3.4 지질환경

Choi *et al.*[1993]은 영일만에서 획득한 고해상 천부탄성과 탐사 자료의 정밀분석을 통해 지질구조의 특성을 분석하여 영일만 내해와 구룡반도 인근해역은 하부에는 제4기 하천성 퇴적물이, 상부에는 빨질 퇴적층의 평탄한 해저면이 각각 형성되어 있으며, 제3기 퇴적층에는 단층 및 습곡구조가 매우 잘 발달해 있는 것을 확인하였다. 이들은 영일만에 발달한 지질구조들은 후기 마이오세 초 동서 내지 북서-남동 방향으로부터 압축-응력작용을 받은 결과로 해석하였다. Yun *et al.*[1994]은 영일반도의 지질분포 및 층서를 기초로 하여 이 일대 분포하는 화산암류에 대한 암석학적, 지화학적 특성을 조사하였다. 그 결과, 이 지역은 백악기의 퇴적암층 및 화강암, 고제3기 에오세의 두일포안산암, 강사리옹회암, 구만리유문암, 암맥류, 신제3기 마이오세의 장기역암, 놀대리옹회암, 후동리옹회암, 공개산테이사이트, 구룡포안산암, 구룡포유문암질각력암, 연일현무암, 임곡층 및 충적층으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. Choi[1996]는 영일만 해안 및 만내에 발달한 후기갱신세 해성단구의 대비와 편년(編年)을 행하였다. 그 결과, 구정선고도(汀線高度) 18 m인 저위해성단구 1면은 최종간빙기의 극상기, 10 m인 저위해성단구 2면은 최종간빙기 후기의 상대적 온난기에 형성되었음이 밝혀져, 이 두 해성면을 연구지역 부근에 있어서 제4기 해성면의 대비와 편년을 위한 기준시간면으로서의 이용이 가능하게 하였다.

Kim[1972]은 영일만 주변 지역에서 산출되는 bentonite를 처리 시간을 달리 하여 처리한 시료에 대한 메틸렌블루 흡착력을 조사하였다. 그 결과,  $\text{NaHSO}_4$  용액으로 처리했을 경우 메틸렌블루 흡착력은 거의 개선되지 않았으나,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  용액으로 처리했을 경우에는 1 N 용액으로 100°C에서 2시간 처리했을 경우가 가장 좋았으며, 원시료의 3배의 흡착력을 보였다. Noh and Koh[2004]는 영일만 주변 지역에서 산출되는 zeolite(비석(沸石))이라고도 하며 알루미늄 산화물과 규산화합물의 결합으로 생겨난 음이온에 알칼리 금속 및 알칼리 토금속이 결합하고 있는 광물을 총칭함)과 bentonite(대부분 montmorillonite(점토광물의 일종)로 구성된 점토로서, 보통은 해수의 화산재의 풍화작용을 통해 형성되며 재 안의 화산유리가 점토광물로 변환된다. Bentonite는 다량의 물을 흡수하는 능력이 있어서 최대 8배까지 부피를 키울 수 있음)의 생성 환경의 차이를 해석하였으며, Kim *et al.*[2007]은 영일만산의 분말로 된 천연 zeolite를 토양 개량제나 폐수 처리제의 활용성을 증대시키기 위해 포틀랜드



시멘트를 접착제로 혼합하고 열처리하여 재입단화를 시도하였다. 그들은 미분(微粉)의 천연 zeolite에 25%의 포틀랜드 시멘트를 접착제로 혼합하고 토련기로 성형한 후 입단화하였으며, 이 시료는 25°C에서 30일간 양생하고 400°C에서 3시간 동안 열처리하였을 때 가장 효율적인 것으로 나타났다. Choi and Jeon[2016]은 영일만 해안에 수평적으로 층상의 해빈 퇴적물을 가진 해식동굴을 발견하고 동굴 퇴적물의 층서학적인 구조를 조사한 결과, 해식동굴 해안 퇴적물이 4 m 용기한 것은 가장 높은 지진활동도와 1600년대의 3개의 가장 큰 역사적인 지진 때문이라고 그들은 주장하였다.

이상의 결과를 살펴보면, 영일만은 그 하부는 제4기 하천성 퇴적물, 상부는 빨질 퇴적층의 평탄한 해저면이 각각 형성되어 있으며, 또한 영일만 주변 지역에서 산출되는 bentonite와 zeolite 등을 효율적으로 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다.

### 3.5 퇴적·저서환경

Park and Song[1972]은 1971년 5월 영일만내 64개 정점에서 퇴적물을 채취하여 분석한 결과, 영일만 퇴적물은 대부분 사질로서, 분급도는 1.0~3.5, 왜곡도는 각각 -1~2, 침도값은 -1.5~21.9의 범위로 나타났다. 퇴적물 입도분포는 대체로 만내 해류에너지 영향을 크게 받고 있으며, 이 해류는 풍향의 영향을 받는 취송류로 판단되었다. Um *et al.*[2003]은 영일만내 27개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 입도 조성, 유기탄소, 금속원소들의 함량을 분석한 결과, 퇴적물 입도는 전반적으로 해안선 부근에서 조립하고 만 중앙부에서 세립한 것으로 나타났는데, 그들은 이것을 해저지형과 반시계 방향의 해류 패턴에 의한 것으로 해석하였다. 한편 유기탄소와 금속원소들의 함량은 대부분 퇴적물 입도변화에 수반되어 니질함량이 높은 만 중앙부에서 높고, 사질함량이 높은 해안선쪽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 Ca, Sr, K 함량은 조립 퇴적물이 우세한 해안선 부근 퇴적물에서 높았고, Cu, Zn, Cd 함량 또한 유기물 함량이 높은 구항과 형산강 입구 퇴적물에서 높은 특징을 보였다. 이들에 대한 상관관계 및 요인분석결과에 의하면, 대부분의 금속원소 함량과 공간변화는 퇴적물 입도에 의해 조절되지만, Cd, Cu, Zn, Sn 등은 퇴적층 무산소 환경에서 일어나는 지화학적 메커니즘이 이들 함량과 공간변화를 조절하는 요인으로 나타났다. Lee *et al.*[2004]은 2002년 7월과 2001년 12월 각각 영일만 27개 정점에서 표층퇴적물 시료를 채취하여 중금속 오염도를 조사한 결과, 퇴적물 입도와 유기탄소 함량 사이에는 세립토일수록 유기탄소의 농도가 높아지는 경향을 보였다. 한편 영일만 전체에서의 중금속 Zn, Cu, Cd, Sn의 평균 농도(단위:  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )는 각각 87, 11, 0.4, 3.0 인 반면, 포항 구항주변에서의 이들의 평균 농도는 370, 115, 4.0, 6.0로 상대적으로 높았다. 그 결과, 이들 중금속에 의한 상대적 오염정도를 나타내는 지퇴적학적 지수  $I_{\text{geo}}$ (geoaccumulation index)는 구항 주변을 제외한 영일만내 타 지역에서는 0 이하였으나, 구항 주변에서는 1~3으로, 중금속 오염이 심각한 것으로 판단되었다.

Koh *et al.*[2004]은 형산강의 퇴적물, 공극수, 물을 채취하여 다

환방향족 탄화수소(PAHs)를 분석하고, 또한 *in vitro* H4IIE-*luc* 생물검정을 사용하여 다이옥신 유사활성(dioxin-like activity)을 평가하였다. 그 결과, 6개 정점에서 채취한 퇴적물에서 PCDDs (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins), RCDFs(dibenzofurans), PCBs (polychlorinated biphenyl)의 평균 농도는 각각  $2.8\times 10^2 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $190 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $61.4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (in dry weight)로 나타났다. 또한 이들 퇴적물과 물은 상류로부터 하류를 따라 농도 경사를 나타내었으며, 이것은 주요 오염원이 하수처리장과 인접한 폐수 저수지(reservoir)임을 암시하였다. 이들의 다이옥신 당량(TEQs)은  $4.3\times 10^{-1} - 1.1\times 10^3 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$  (in dry weight)의 범위로, 6개 정점에서 얻은 raw Soxhlet 추출물은 H4IIE-*luc* 생물검정에서 현저한 다이옥신 유사 반응을 나타내었다. H4IIE-*luc* 생물검정으로부터 유도된 TCDD-EQs (tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin equivalents)는  $7\times 10^{-3} - 1.5\times 10^3 \text{ pg}\cdot\text{g}^{-1}$  (in dry weight)의 범위로, TEQs과 현저한 상관을 가지고 있었다. Koh *et al.*[2006]은 2000년 3월 영일만 26개 정점에서 퇴적물 표본을 채취하여 다이옥신 유사 및 발정성 오염물질의 분포와 발생을 조사하였다. 그 결과, 퇴적물 표본 중 85%가 H4IIE-*luc* 생물검정에서 현저한 다이옥신 유사 활성을 나타낸 반면, 50%가 MVLN 생물검정에서 현저한 발정성의 활성을 나타내었다. 또한 영일만 퇴적물에서 다양한 농도의 유기 오염물질이 탐지되었으며, 이들 풍도는 PAHs(polycyclic aromatic hydrocarbons), APs(alkylphenols), PCBs (polychlorinated biphenyls), OCs(organochlorines) 살충제의 순으로 높았다. Choi *et al.*[2009]은 2006년부터 2007년에 걸쳐 영일만을 포함한 한국 연안의 35개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 도시와 산업 폐수, 특히 NPs(nonylphenolic compounds; 기름과 물을 섞어 오염물질을 제거하는 데 도움을 주는 계면활성제로서 내분비계 장애 추정물질의 하나로 알려져 있음)와 Cop(coprostanol; 환경에서 인간 배설물의 존재에 대한 biomarker)에 의한 오염을 평가하였다. 그 결과, Table 2에 나타낸 바와 같이, 영일만은 TOC를 비롯하여 NPs와 Cop 농도는 인천항이나 부산만, 울산만과 더불어 비교적 높았다. 이들 해역은 모두 산업화되고 도시화된 지역으로서, 오염물질들은 주로 인간활동에 의한 산물임을 의미하였다.

Kim *et al.*[2014]은 2010년 6월과 2011년 2월에 영일만을 포함한 형산강에서 15개 퇴적물과 17개 해수 표본을 수집하여 수생 환경에 미치는 산업의 오염 영향력을 조사·분석하였다. 그 결과, POSCO와 인구 밀집 지역 부근에서 채취한 퇴적물 표본에서는 가장 큰 성호르몬의 변화를 보여주었고, 이러한 변화는 APs와 bisphenols A(BPA)의 함유량에 의해 설명이 가능하였다. Hong *et al.*[2014]은 2010년 2월 영일만 오염실태 파악을 위해 형산강을 따라 총 8개 정점에서 16개 퇴적물 표본을 채취하여 화학 분석과 *in vitro* H4IIE-*luc* 생물학적 정량분석을 실시하였다. 그 결과, 현저한 다이옥신 유사 활성이 산업 및 도시지역 퇴적물에서 관측되었는데, 이것은 다이옥신 유사 화학물질의 대부분은 주위의 인위적인 배출원과 관련되어 있음을 보여주었다. 또한 H4IIE-*luc* 분석 결과는 dioxins, furans, co-planar PCBs, 다이옥신 유사 PAHs를 포함하는 화합물 농도와 현저한 상관을 가지고 있음을 보여주었다. 한편 다

**Table 2.** Concentrations of fecal sterols and nonylphenolic compounds in sediments from Korean coastal waters (Choi *et al.*[2009])

Sampling station	Concentration (ng·g <sup>-1</sup> in dry weight)					
	TOC(%)	Coprostanol	Cholestanol	Nonylphenol	NP <sub>12</sub> EO	ΣNP
Sokcho Harbor	0.21	10.7	11.7	3.13	<LOD	2.27
<b>Yeongil Bay</b>	<b>2.11</b>	<b>264</b>	<b>469</b>	<b>40.1</b>	<b>99.0</b>	<b>139</b>
Gwangyang Bay	0.84	11.8	154	8.49	<LOD	8.49
Gamak Bay	0.35	41.5	354	7.93	<LOD	7.93
Mokpo coast	0.44	12.6	25.1	4.58	<LOD	4.58
Cheonsu Bay	0.67	40.1	189	2.74	5.11	7.86
Incheon Harbor	0.73	300	266	18.8	32.9	51.7
Ulsan Bay	1.58	500	368	19.8	23.1	42.9
Busan Bay	1.10	1080	845	87.0	368.6	456
Masan Bay	3.42	523	1859	21.1	30.3	51.4
Shihwa Lake	1.68	66.9	408	227	54.2	281

\*NP<sub>12</sub>EO=nonylphenol mono- and di-ethoxylates, ΣNP=sum of nonylphenol and NP<sub>12</sub>EO, <LOD=less than limit of detection

이옥신 유사 활성의 오염원과 화학물질을 분석한 결과, 이들이 주로 철과 강철 산업과 같은 지역 활동으로부터 유래된 것으로 밝혀졌다. Khim and Hong[2014]은 영일만을 포함한 한국 22개 연안역에서 채취한 1,700개 이상 퇴적물의 POPs(persistent organic pollutants)와 EDCs(endocrine disrupting chemicals) 농도와 관련하여 1990년대 후반 이래 발표된 66편의 논문을 리뷰, 오염물질 분포를 조사한 결과, Fig. 3에 나타난 바와 같이 영일만(그림 중 East Sea의 17번 지역)에서 높은 농도의 POPs와 EDCs가 발견되었다. 이들 결과에서는 한국 연안 퇴적물에서의 POPs와 EDCs 분포와 그 오염원은 지역 특유의 오염원 의존적인 모습을 보이는 것으로 나타났다. 한편 PCDD/Fs, PCBs, PAHs 농도는 산업단지 부근 퇴적물에서 가장 높았고, 또한 BTs(butyltin compounds)는 대규모 조 선소에서 발견되었으며, NPs는 주로 산업단지와 대도시를 둘러싸고 있는 내만에서 탐지되었다. 영일만을 비롯한 한국 연안 퇴적물에서 몇 가지 미량 유기화학물질 농도는 기존의 저질 가이드라인 SQGs(sediment quality guideline)을 초과하였으며, 저서 생물에 잠재적으로 부정적인 영향을 줄 수 있는 것으로 판단되었다. 특히, 영일만 퇴적물에서는 내분비계교란물질로 알려진 TCDD-EQ(2,3,7,8-TCDD; 다이옥신 유사 활성)와 E2-EQ(17-β-estradiol; 발정성의 활성)가 각각 관찰되었다.

Hwang *et al.*[2016]은 2004년부터 2010년에 걸쳐 영일만(3개 정점)을 비롯한 한국 연안 71개 정점(서해 18개 정점, 남해 31-34개 정점, 동해 19개 정점)에서 채집된 총 491개 퇴적물이 함유하고 있는 7개 미량 금속(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)의 시공간적 분포와 변화를 조사하였다. 그 결과, Table 3에 나타난 바와 같이, 영일만은 같은 해역인 동해안의 울산에 비해서는 강열감량(LOI; loss of ignition)이나 미량금속 농도가 전반적으로 낮은 반면, 제주해역과 서해안 해역은 물론, 남해안의 다른 해역에 비해서는 높았다. 미량금속 농도는 도시와 산업단지가 밀집한 남부 연안에서 상대적으로 높는데, 따라서 연안퇴적물 금속농도는 도시화 또는 산업화와 관련한 인간활동에 의해 현저히 영향을 받고 있음을 의미하였다. 그러나 퇴적물 금속농도의 시간 변화는 크지 않았으며, 이것은 연안이

지속적으로 관리되고 있기 때문으로 판단되었다. SQGs와 I<sub>geo</sub>에 의하면, 한국 연안 퇴적물은 Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn에 의한 오염은 거의 없으나, As에 의한 오염은 어느 정도 되어 있는 것으로 나타났다. Lee *et al.*[2019]은 2016년 2월과 3월에 걸쳐 한국 연안을 따라 영일만을 포함하는 50개 정점에서 채집한 퇴적물 표본으로부터 paraben, 이들의 신진대사물질, TCS(triclosan), TCC(triclocarban) 등에 의한 잠재적 건강위험, 공간분포, 오염상황 등을 조사하였다. 그 결과, 모든 퇴적물에서 methylparaben, 하이드록시벤조산(4-hydroxybenzoic acid)이 탐지되어 광범위한 오염을 암시하였다. 퇴적물에서 측정된 파라벤과 TCS의 농도는 위험지수(HQ; hazard quotient)를 초과하지는 않았는데, 이것은 이들 오염물질에 대한 노출과 관련하여 잠재적 건강 위험이 낮음을 의미하였다. Kim *et al.*[2021]은 2017년부터 2018년에 걸쳐 영일만을 포함한 한국 연안의 34개 정점(황해 18개점, 남해 10개점, 동해 6개점)에서 총 71개 퇴적물을 채취하여 PTSs의 공간분포와 그 기원을 조사하였다. 이들의 조사결과에 따르면, Fig. 4에 나타난 바와 같이 PCBs, PAHs, APs의 평균 농도는 모두 동해안이 황해(즉 서해안)나 남해안에 비해서 현저히 높았고, 특히 영일만의 PAHs와 APs 평균 농도는 동해안의 울산만이나 온산만에 비해 상대적으로 높았다. PMF(positive matrix factorization receptor) 분석결과에 의하면, 이들 오염물질은 황해에서는 주로 코커스 생산, 남해에서는 선박 배출(68%), 동해에서는 화석연료의 연소(49%) 등에서 각각 기원한 것으로 밝혀졌다.

An *et al.*[2021]은 2018년 5월 구무(Gumu) 갯강과 형산강을 포함한 영일만 6개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 산업지역으로부터 유래한 유기독성물질(PTSs; persistent toxic substances)에 의한 퇴적물의 오염과 미세조류(microalgae)의 잠재적 독성을 조사하였다. 이들은 퇴적물의 유기 추출물에 대한 잠재적 독성물을 평가하기 위하여 3종의 미세조류(녹조류 *Dunaliella tertiolecta*, 착편모조류 *Isochrysis galbana*, 규조류 *Phaeodactylum tricorutum* 등)의 체형, 세포벽 존재, 사망률과 같은 세포의 다양한 특징을 개별적으로 검사하였다. 그 결과, 퇴적물의 생유기추출물(raw organic extracts)의 초기 선별(screening)은 전통적인 종점(endpoint)인 성장 억제에 있

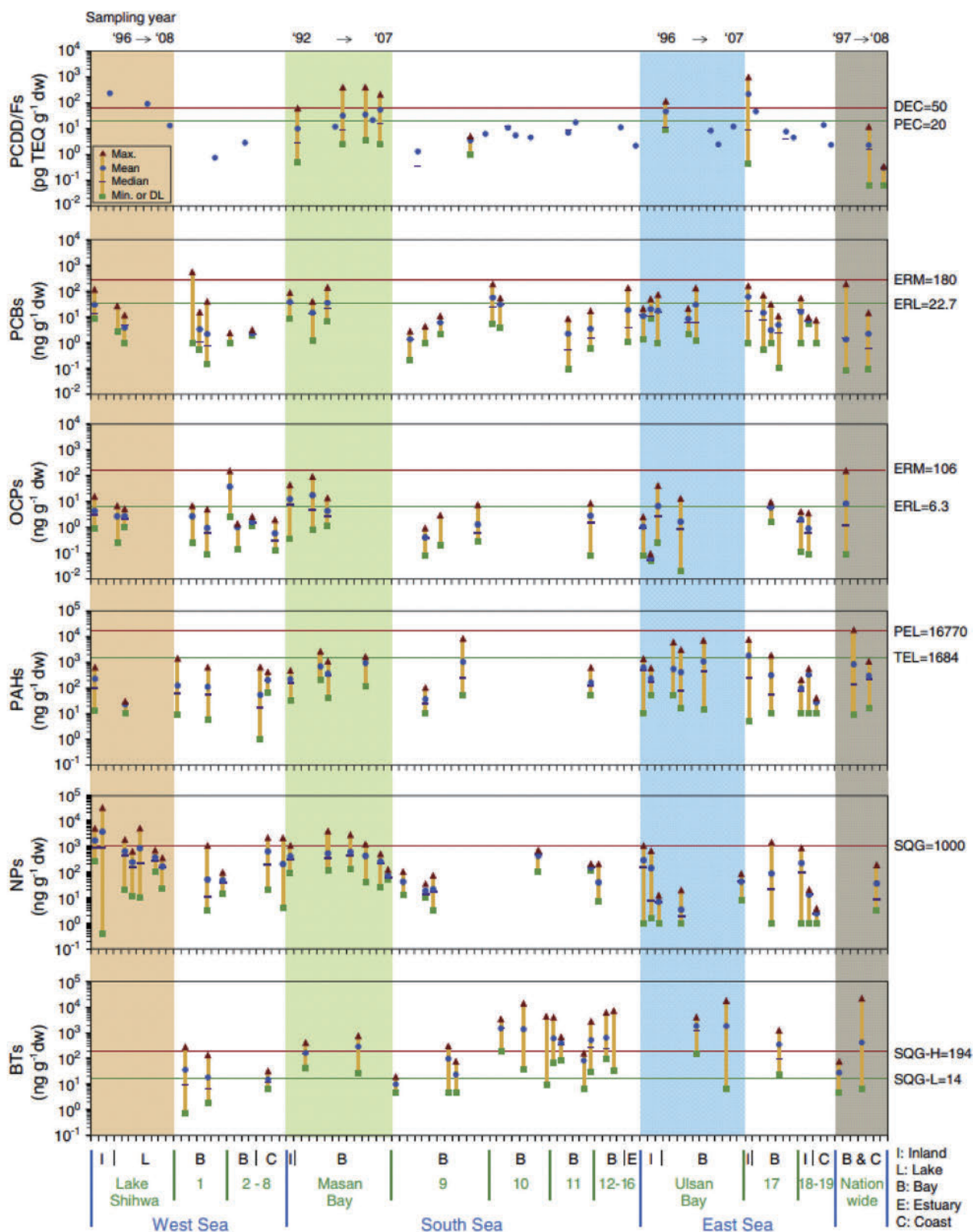


Fig. 3. Concentrations and distributions of compounds of PCDDs/Fs, PCBs, OCPs, PAHs, NPs, and BTs in sediments from the Korean coastal waters. Horizontal solid lines indicate the existing sediment quality guidelines for chemical groups (red: probable effect concentrations (DEC, ERM, PEL, SQGs-H); green: threshold effect concentrations (PEC, ERL, TEL, SQGs-L), where DEC: disrupting effect concentration, ERM: effect range median, PEL: possible effect low, PEC: possible effect concentration, ERL: effect range low, TEL: threshold effect low)(Khim and Hong[2014]).

**Table 3.** Composition, the content of LOI, and the mean of metal concentrations in coastal sediments collected from Korean coastal waters between 2004 and 2010 (Hwang *et al.*[2016])

Station	Composition (%)				LOI(%)	Trace metal (mg·kg <sup>-1</sup> )						
	Gravel	Sand	Silt	Clay		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
Sokcho	0.00	91.44	7.02	1.54	0.94	4±4	22±10	37±24	0.07±0.07	20±18	0.008±0.007	5.9±2.0
Gangneung	0.00	97.30	2.70	0.00	1.42	9±10	30±12	76±54	0.11±0.12	44±32	0.015±0.014	8.3±3.7
Jukbyeon	0.03	96.41	2.74	0.82	1.42	16±10	35±15	98±46	0.17±0.15	59±39	0.014±0.015	10.1±2.9
Ganggu	0.25	53.18	34.13	12.45	5.83	18±8	38±14	121±46	0.26±0.14	39±10	0.045±0.019	13.0±4.4
<b>Yeongil Bay</b>	<b>0.00</b>	<b>1.80</b>	<b>64.13</b>	<b>34.08</b>	<b>6.79</b>	<b>20±6</b>	<b>44±18</b>	<b>135±38</b>	<b>0.29±0.13</b>	<b>50±10</b>	<b>0.042±0.024</b>	<b>12.1±3.2</b>
Ulsan	0.00	0.85	51.15	48.00	7.32	42±11	38±13	157±36	0.41±0.38	63±25	0.086±0.032	17.0±12.3
Busan	0.00	1.38	53.58	45.04	6.81	41±12	32±10	136±32	0.14±0.08	56±21	0.072±0.018	8.8±2.4
Masan Bay	0.00	0.63	27.11	72.26	10.77	75±31	62±28	304±112	1.15±0.58	62±26	0.120±0.040	11.8±5.5
Jinhae Bay	0.00	1.99	39.08	58.93	8.03	32±7	34±8	154±34	0.54±0.31	57±17	0.058±0.026	8.1±2.2
Gwangyang Bay	0.00	0.36	53.18	46.46	6.27	24±4	37±7	143±12	0.10±0.03	85±20	0.025±0.006	10.4±3.4
Yeosu	0.00	3.22	60.04	36.74	5.05	21±4	34±8	121±23	0.10±0.07	73±27	0.020±0.006	7.5±3.1
Deukryang Bay	0.00	0.71	56.30	42.99	4.41	14±1	33±15	96±15	0.05±0.01	67±7	0.011±0.003	6.1±1.9
Jeju	2.67	94.46	0.92	1.95	1.98	15±9	15±7	88±41	0.19±0.18	46±25	0.017±0.017	8.6±3.4
Seogwipo	13.39	83.88	0.93	1.80	2.23	9±5	18±8	64±25	0.13±0.08	42±25	0.009±0.007	9.1±3.5
Hampyeong Bay	0.88	3.66	84.97	10.50	3.85	15±6	36±13	91±33	0.06±0.05	79±21	0.009±0.003	7.2±2.3
Gunsan	0.90	97.76	1.34	0.00	1.52	4±2	24±8	47±36	0.04±0.03	27±14	0.015±0.019	5.6±2.3
Cheonsu Bay	0.00	14.82	57.79	27.42	5.82	15±5	27±7	72±27	0.08±0.04	54±19	0.028±0.017	8.1±4.4
Incheon	23.30	38.81	28.93	8.96	2.58	14±8	28±4	67±37	0.07±0.02	43±19	0.015±0.010	6.5±2.0

어서 정점 위치와 종에 따라 큰 변화를 나타내었다. 반면, 분할 후에는 성장 억제제가 특히, F2.6(여기서, F1: 비극성(non-polar), F2: 방향족(aromatics), F3: 극성(polar)을 의미함)인 방향족을 포함하는 일부에서 현저히 증가하였다. 한편 ECOSAR(ecological structure activity relationships program; 수생생물에 대한 산업 화학물질의 생태독성을 추정함에 있어서 구조활성상관관계(structure activity relationships)를 사용하기 위해 설계된 프로그램)에 의해 예측된 이들 화학물질의 독성 잠재력에 따르면, 원인 물질 중의 하나인 1-phenylpyrene, dibenz[*a,c*]anthracene, picene이 암시되었다. Choi *et al.*[2021]은 비행시간형 질량분석기(time-of-flight Mass Spectrometer (GCxGC/ToF-MS)) 분석, 미발달 기형(embryonic malformation)과 고속처리 시퀀싱(high-throughput sequencing) (RNA-seq) 분석, 그리고 여기에 2차원 gas chromatography를 포함하는 화학적, 생물학적 (비)표적 분석 등을 결합하여 성장 중인 넙치(olive flounder; *Paralichthys olivaceus*)에 아치사효과(sub-lethal effect)를 일으키는 유기 오염물질을 조사하였다. 그 결과, 가막만이나 진해만에 비해 영일만 퇴적물 추출물에서 PAHs가 더 풍부하였으며, 넙치의 심장 주위의 부종(edema)의 비율 또한 영일만에 노출된 초기 넙치에서 가장 높았다. 따라서 영일만에서의 높은 PAHs 농도가 관찰된 넙치의 심장중후군을 일으킬 가능성이 있으며, 이들 연구는 표적과 비표적 분석이 특별한 퇴적물의 독성을 일으키는 주요 화학물질군을 정확하게 확인하는 데 유용한 도구임을 시사하였다. Lee and Khim[2022]은 SQT(sedimentary quality triad; 수생 환경에 있어서 존재하는 인간 활동 때문에 방출되는 오염물질로부터 결과하는 퇴적물 저하 정도를 평가하기 위한 도구) 방법을 사용하여 영일만을 포함한 한국 연안 26개 해역에서 수집된 과거 퇴적물 자료를 메타분석하고 PTSs의

잠재적 위험을 평가하였다. 그 결과, 이들은 SQT 평가 기술이 3단계(1단계: 1995-2008, 2단계: 2009-2015, 3단계: 2016-2020)에 걸쳐 진화하였다는 사실을 발견하였다. 즉, 전통적인 SQT 방법은 화학적 노출(화학 LOE), 독성적 효과(독성학 LOE), 저서 군집 건강(생태학)이라는 3개의 기본적인 성분인 lines of evidence(LOEs)로 구성되는데, 이때 특히 정량적인 방법에서 대상 PTSs의 독성적 설명 능력이 초기의 1단계에 비해 단계 3에서는 약 10% 증가한 것으로 밝혀졌다. 현재 SQT 평가는 증가된 LOEs를 채용하여 일반적으로 보다 나은 평가를 할 수 있으며, 따라서 해양생태계에 부정적인 영향을 일으키는 원인 독성물질의 확인과 관리에 있어서 그 유용성을 재확인하였다. Gwak *et al.*[2022]은 효과유도분석 EDA(effect-directed analysis)를 사용하여 2018년 5월 영일만 6개 정점에서 채취한 표층 퇴적물로부터 주요 아릴 탄화수소 수용체(AhR; aryl hydrocarbon receptor) 작용약을 발견하였다. 미국 환경보호국(EPA)의 positive matrix factorization modeling(양의 행렬 인수분해 모델링) 결과, 퇴적물의 AhR-활성 방향족 화합물은 주로 석탄연소와 차량배출로부터 유래했음을 보여주었다.

이상의 결과로부터, 영일만 퇴적물은 대부분 사질이지만, 입도는 해안선 부근에서 조립하고 만 중앙부에서 세립한 것으로 나타났는데, 이러한 퇴적물 분포는 해저지형과 반시계 방향의 해류 패턴에 의한 것으로 판단되었다. Ca, Sr, K 함량은 조립한 퇴적물이 우세한 해안선 부근에서 높은 반면, Cu, Zn, Cd 함량은 유기물 함량이 높은 포항 구항과 형산강 입구에서 높았다. 또한 세립토일수록 유기탄소의 농도가 높아지는 경향을 나타내었으며, 포항 구항 주변해역은 중금속 오염이 매우 심각하였다. 특히 영일만 퇴적물 표본 중 상당수가 생물검정에서 내분비계교란물질, 즉 다이옥신 유사 활성

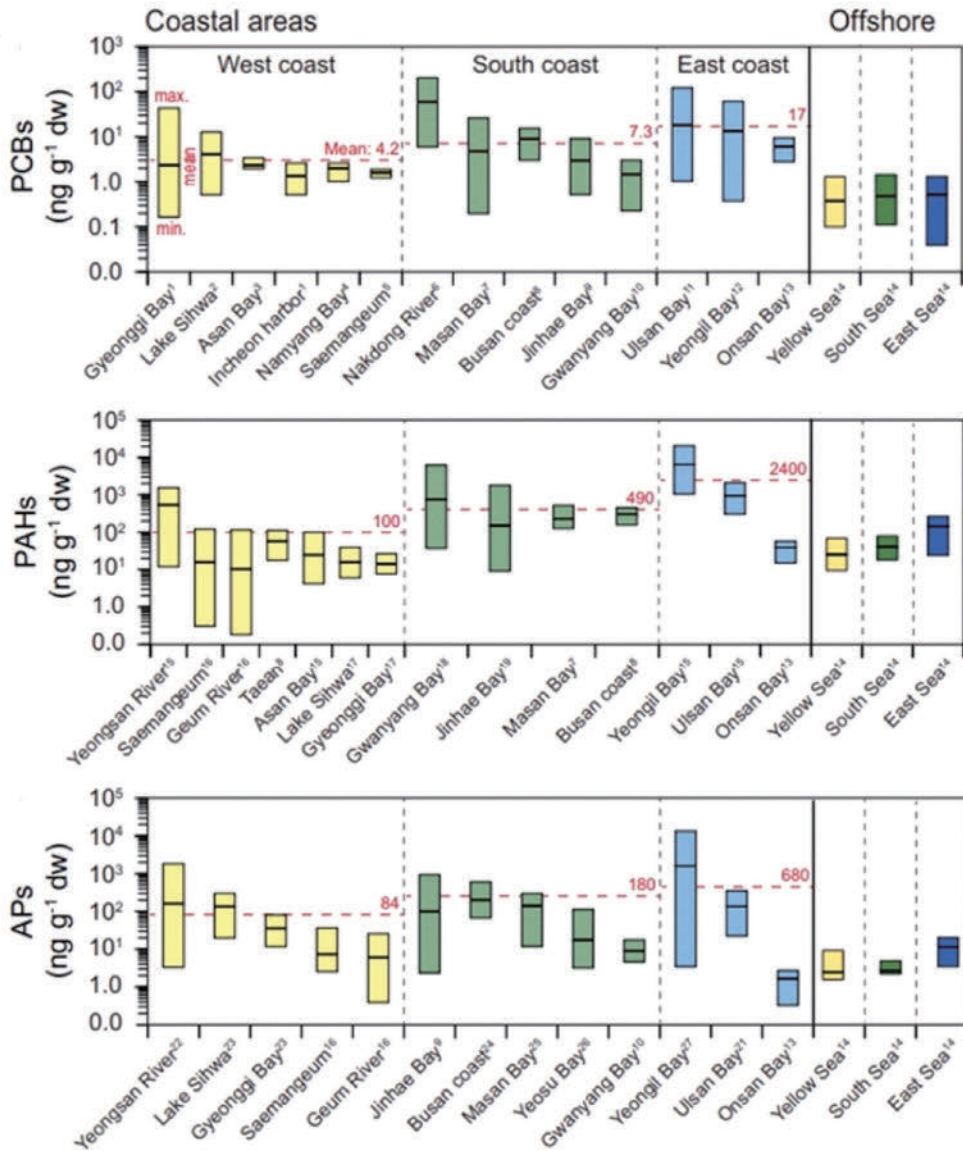


Fig. 4. Comparison between concentrations of PCBs, PAHs, APs in sediments of coastal areas and three seas of Korea (Kim *et al.*[2021]).

과 발정성 활성을 나타내는 물질에 의해 유기 오염된 것으로 판명되었으며, 이들은 주로 철강산업과 같은 지역 활동에서 유래된 것으로 밝혀졌다. 또한 영일만은 TOC, NPs, Cop, PCDD/Fs, PCBs, PAHs, BTs, APs, PTSs 등 다양한 오염물질들의 농도가 주로 인간 활동에 의해 영향을 받는 산업단지과 대도시 주변 해역에서 높았으며, 특히 POSCO와 인구 밀집 지역 부근에서 채취한 퇴적물 표본은 가장 큰 성호르몬의 변화를 보여주었다. 일부 미량 유기화학 물질 농도는 저질 가이드라인을 초과하여 저서 생물에 잠재적으로 부정적 영향을 줄 수 있는 것으로 판단되었다.

### 3.6 생물 생태환경

#### 3.6.1 식물플랑크톤

Chae[1981]는 1979년 3월부터 5월까지 영일만 10개 정점에서 식물성플랑크톤 조성과 분포 특성을 조사하여 3문, 14과, 25속, 65

종의 식물플랑크톤을 동정하였으며, 그 중 녹조류가 3종, 황적조류가 8종, 규조류가 54종으로 나타났다. 조사기간 중 우점종은 *Eucampia zodiacus* ( $624 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *Nitzschia seriata* ( $554 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *Thalassionema nitzschioides* ( $188 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *Dityium brightwelli* ( $176 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ )의 4종이었으며, 이들은 scallop (*Patinopecten yessoensis*) D형 유생의 먹이가 되는 것으로 추론되었다. 희소 출현종으로는 *Guinardia flaccida* ( $4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *Chaetoceros siamensis* ( $5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *C. compactum* ( $6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *Thalassira pacifica* ( $6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), *Ceratium masciliense* ( $6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 등 세포밀도  $51 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$  미만의 종이 23종 출현하였다. Lee *et al.*[1998]은 1994년 9월 영일만에서 부산 외해에 이르는 해역에서 on-line system을 이용하여 수온, 염분 및 Chl\_a 농도를 연속관측하고, 포항, 감포, 울산, 고리 앞 4개 단면상 12개 정점에서의 채수를 통해 수괴 분포와 식물플랑크톤 군집구조를 조사하였다. 조사기간 중 포항-영일만에 출현한 식물플랑크톤은

규조류가 23-34종, 외편모조류가 4-7종으로, 울산 지역에 비해서는 종수가 적었으나 감포나 고리 지역에 비해서는 상대적으로 많았다 (예를 들면, 감포: 규조류 15-32종, 외편모조류 5-9종, 울산: 규조류 30-40종, 외편모조류 3-5종, 고리: 14-30종, 외편모조류 1-6종). 출현한 식물플랑크톤 중 *Leptocylindrus danicus*은 포항-영일만을 포함한 모든 조사 해역에서 우점하는 대표종이었다. 이들 해역의 식물플랑크톤 현존량은  $2.7 \times 10^3$ - $141.6 \times 10^3$  cells·l<sup>-1</sup>의 범위로, 규조류가 양적으로 우세하였다. Jo et al.[2000]은 1998년 5월부터 1년간 영일만 연안의 8개 정점에서 식물플랑크톤 종조성과 군집을 조사하였다. 그 결과, 출현한 식물플랑크톤의 분류군은 4문, 6강, 10목, 3아목, 26과, 200종으로, 규조류가 149종, 외편모조류가 31종, 규질편모류가 4종, 녹조류가 11종, 유글레나류가 1종, 청색조류가 4종이었다. 종수는 8월에 66종으로 가장 높았고, 가장 빈번히 출현한 종은 *Licmophora abbreviata* AGARDH(51%), *Thalassionema nitzschioides* HUSTEDT(39%), *Ceratium furca* (EHRENBERG) CLAPAREDE et LACHMANN(29%)이었다. 한편 조사기간 중 식물플랑크톤의 세포밀도는  $1,218 \times 10^3$  cells·l<sup>-1</sup>로, 형산강 하류지역에서 가장 높았고, 환호동에서  $70 \times 10^3$  cells·l<sup>-1</sup>로 가장 낮았다. Chl\_a 농도는 1988년 5월에  $4.6 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 가장 높았고, 1999년 2월에  $0.4 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ 로 가장 낮았다. Kwak and Lee[1977]는 1973년 10월 영일만 내 3개 단면상 11개 정점에서 해수 중 식물플랑크톤 색소량을 조사한 결과, 색소량은 만 입구에서 내만쪽으로 갈수록 증가하였으며, 이것은 풍부한 영양염 공급에 기인한 것으로 판단되었다. 색소량 분포는 만중앙부나 외해쪽에서는 연직 분포가 뚜렷하였으며, 이것은 수괴의 이질성에 의한 것으로 추론되었다. Shim et al.[2013]은 2010년 5월부터 11월까지 영일만 내 3개 정점에서 매월 수질환경과 식물플랑크톤 군집의 시공간적 변화를 조사하였다. 조사기간 중 출현한 식물플랑크톤은 규조강 33종, 외편모조강 23종, 유글레나조강 1종, 황색편모조강 2종 및 은편모조강 1종으로 분류되었다. 현존량은 9월에 가장 높았고, 표층 용존무기인 농도는 강우 후 가장 높았으며, 영양염, Chl\_a와 식물플랑크톤 현존량은 만내에서 만외로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 수질환경과 식물플랑크톤의 상관관계를 분석한 결과, 염분은 Chl\_a와는 높은 음의 상관을 나타내었고, 용존무기인과 pH와도 높은 음의 상관을 보였다.

이상의 결과로부터, 영일만 식물플랑크톤의 종조성에서는 규조류가 우세하며, 특히 *Thalassionema nitzschioides*와 *Leptocylindrus danicus*은 이 해역의 우점종으로 출현하였다. 식물플랑크톤의 출현 종수는 1979년 3월에 65종, 1998년 200종, 2010년 5월에 60종이었으며, 현존량은 1994년 9월에  $2.7 \times 10^3$  -  $141.6 \times 10^3$  cells·l<sup>-1</sup>, 1998년 5월에  $1,218 \times 10^3$  cells·l<sup>-1</sup>, 2010년 5월에  $10$ - $3,240 \times 10^3$  cells·l<sup>-1</sup> (평균 566 cells·l<sup>-1</sup>)로, 군집 조성에 다소 기복은 있었으나 큰 변화는 없는 것으로 판단되었다.

### 3.6.2 동물플랑크톤

Suh and Yu[1996]는 1993년 8월 13일부터 14일까지 영일만 내 북부해수욕장 쇄파대에 우점하는 부유성 요각류 7종(*Acartia*

*hudsonica*, *Pseudodiaptomus marinus*, *Paracalanus indicus*, *Calanus sinicus*, *Oithona similis*, *Sinocalanus tenellus*, *Labidocera bipinnata*)의 주야 수평이동 현상을 관찰하였다. 그 결과, 쇄파대 요각류의 약 90%가 주야 수평이동하는 것으로 밝혀졌다. 요각류는 상대조도의 변화에 따라 광반응 행동을 하며 야간에 쇄파대에 모였다가 주간에 흩어지는 주야 수평이동을 함으로써 시차 포식자와 마주칠 기회를 줄이는 것으로 판단되었다. 이들 중 *A. hudsonica*, *Paracalanus indicus*, *Oithona similis*, *Sinocalanus tenellus* 등 4종은 20 m·h<sup>-1</sup> 이상의 유영속도를 한 시간 이상 유지할 수 있는 것으로 나타났다. Song et al.[2010]은 영일만 내 2개 정점의 연안(저조선) 저층에서 phytal harpacticoid copepod(저서 요각류의 일종)의 생식 상태와 군집구조의 변화를 1996년 10월부터 1997년 9월까지 월별로 조사하였다. 총 36종의 harpacticoid가 확인되었고 수적으로 우세한 요각류는 Porcellidiidae와 Tisbidae의 과(family)로 구성되어 있었다. 다선형적 회귀분석결과, 이들 요각류의 밀도, 군중도, 다양성과 같은 변량 지수는 어떤 환경변수와 밀접한 연관되어 있음을 보여주었다(예를 들면, 풍도와 최대 밀도에 있어서 계절적으로 변동하는 우세종(*Porcellidium ofunatense*)은 수온과 정(+), 영양염류의존적인 *Scutellidium longicauda acheloides*와 *Zaus unisetosus*는 영양염류와 정(+), 상관, *P. wandoensis*는 음(-), 상관임이 발견되었다). 우세종은 연중 새끼를 낳으며 이들의 생식 지수는 수온(-), pH(+), 인산염(+)과 같은 환경 변수와 각각 음(-), 정(+), 정(+), 상관이 있는 것으로 나타났다.

### 3.6.3 해조류

Lee and Oh[1986]는 1984년 7월 14일부터 16일까지 영일만 일대 8개 지역에서 하계 해조류와 군집을 조사하여 녹조류 20종, 갈조류 35종, 홍조류 79종 등 총 134종의 해조류를 채집하였다. 해조류의 현존량은  $246.7$ - $540.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 으로, 만내가 만외보다 약간 높았다. 한편 *Eclocarpus flocculiformis* Setchell et Gardner(고리솜털)은 본 연구에서 처음으로 밝혀진 한국산 미기록종이었다. 하계 해조류는 *Ulva pertusa* alliance와 Green-red type로 대표되는 군집을 이루고 있음이 밝혀졌다. Lee et al.[1997]은 1996년 5월부터 1997년 2월까지 영일만과 그 주변해역 생물상과 해양 조류를 계절별로 조사하여 총 114종(녹조류 14종, 갈조류 26종, 홍조류 76종)을 동정하였다. 해조류는 봄에 67종, 여름에 63종, 가을에 59종, 겨울에 64종이 각각 출현하였다. 만내 해조류 종조성은 주변 해역에 비해 단순하였으며, 85종은 만 안에서 출현하였고, 103종은 만외에서 출현하였다. 식생의 R/P값과 (R+C)/P의 비(여기서, R: Rhodophyta(홍조식물), P: Phaeophyta(갈조식물), C: Chlorophyta(녹조식물))는 만의 안과 밖에서 각각 2.9와 3.4로 나타나, 이 해역 해양 조류 생물상은 온대지방 생물상에 가까운 혼합상으로 판단되었다. 이 결과를 과거 10년전의 결과와 비교하면, 녹조류 6종, 갈조류 10종, 19종의 홍조류를 포함하여 4개 지역에서의 공통적인 35종의 수는 과거의 31종과 크게 변하지 않은 것으로 밝혀졌다. Yoo[2003]는 2003년 5월 방형구를 사용하여 영일만 조하대 해조류상과 저서 해양해

조류의 군집구조를 조사한 결과, 해조류 종수는 총 78종으로, 남조류 2종, 녹조류 10종, 갈조류 19종, 홍조류 47종의 해조류를 확인하였다. 생물량에 기초한 탁월종은 *Sargassum hornerii*, *Undaria pinnatifida*, *Sargassum thunbergii*로 나타났다. 해조류는 상부 조하대에서는 *Undaria pinnatifida*, *Sargassum thunbergii*, *Sargassum hornerii*, *Corallina* spp., 중부 조하대에서는 *Undaria pinnatifida*, *Sargassum hornerii*, *Caulerpa okamurae*, 하부 조하대에서는 *Dictyopteris divaricata*가 대표종으로 출현하였다. Park and Choi[2009]는 2003년 2월부터 2009년 1월까지 영일만내 조간대 5개 정점에서 해조상 및 군집조사를 실시하여 해조류 152종(녹조류 25종, 갈조류 38종, 홍조류 89종)을 동정하였다. 조사해역에서의 탁월종은 *Ulva* spp.를 포함한 23종으로, 해조류의 연직분포는 세 개의 대역으로 구분되었다. 즉, 상부 조간대는 *Porphyra* spp., *Ulva* spp., 중부 조간대는 *Ulva* spp., *Ulva pertusa*, 하부 조간대는 *Sargassum* spp., *Gelidium amansii*, *Grateloupia* spp., *Chondrus ocellatus*, *Chondria crassicaulis*로 특징화되었다. 생태 지수인 R/P, C/P, (R+C)/P값은 각각 2.34, 0.66, 3.00로, 과거의 조사결과(Lee and Oh[1986]; Lee et al.[1997]; Yoo[2003])와 비교해 볼 때 분류군별 출현비율에는 큰 차이를 보이지 않았으며, 해조상은 온대성의 특징을 가지고 있는 것으로 판단되었다.

이상의 결과로부터, 영일만 해역의 해조류 종수는 1984년 134종(녹조류 20종, 갈조류 35종, 홍조류 79종), 1996년 114종(녹조류 14종, 갈조류 26종, 홍조류 76종), 2003-2009년 사이 152종(녹조류 25종, 갈조류 38종, 홍조류 89종)으로 나타나, 종수는 과거에 비해 큰 변화가 없는 것으로 판단되었다. 또한 영일만 해조상은 온대성의 특징을 나타내었다.

### 3.6.4 저서동물

Shin et al.[1992]은 1991년 1월, 5월, 7월, 10월 등 4계절 동안 영일만내 10개 정점에서 다모류 군집을 조사하였다. 그 결과, 다모류는 전체 저서동물 개체수의 71.3%를 차지하는 가장 우점종으로서 총 72종이 채집되었고, 평균 서식밀도는 1,485 indiv.·m<sup>-2</sup>이었다. 종수와 개체수는 여름에 54종, 3,207 indiv.·m<sup>-2</sup>로 가장 높았고, 가을에 35종, 755 indiv.·m<sup>-2</sup>로 가장 낮았다. 우점종은 *Spiophanes bombyx* (37.5%), *Pseudopolydora* sp. (8.4%), *Lumbrineris longifolia* (7.0%), *Maldane cristata* (6.5%), *Polydora ciliata* (4.9%) 등이었다. 겨울에는 *Maldane cristata*, 봄에는 *Polydora ciliata*, 그리고 여름과 가을에는 *Spiophanes bombyx*가 우점하였다. 다모류는 영일만 남동쪽 해역에서 풍부하였고, 형산강 입구에서 빈약하였다. 종조성에 기초한 집괴분석결과, 영일만은 3개 지역으로 구분되었으며, 각 지역에는 특징적인 동물군집이 형성되어 있는 것으로 판단되었다. 형산강 입구에서 포항항까지는 유기물 오염 지시종인 *Pseudopolydora-Polydora-Capitella* 군집이 우점하고 있었다. Paik[1997]은 1995년 영일만내 4개 정점에 분포하는 말잘피의 뿌리 사이에 쌓인 니사질에 서식하는 생물상을 조사하여 국내 미기록종인 채찍상모갯지렁이(*Cossura brunnea* Fauchaid, 1972)의 자세한 형태적 구조를 밝

혔다. 이 종은 한국 연안에서 처음으로 갯지렁이 과로 알려지게 되었으며, 이 종이 보고됨에 따라 한국산 상모갯지렁이과는 1속 1종이 되었다. Koh et al.[1999]은 1991년 4월과 5월에 영일만 조하대와 인천 송도 갯벌의 각각 1개 정점에서 퇴적물을 채취하여 조하대와 연성저질 갯벌에 서식하는 저서동물 출현종수와 생태 지수(다양성, 종풍부도, 균등도, 우점도지수), 종조성과 유사성(유사도 지수) 등을 조사하였다. 그 결과, 저서동물 모집단으로 설정한 5 m<sup>2</sup>에 대하여 출현종수 75%가 출현하는 채집면적은 영일만 조하대와 송도 갯벌에서 각각 1.5 m<sup>2</sup>, 1.6 m<sup>2</sup>이었으며, 종조성과 유사성 75%를 반영하는 면적은 영일만이 0.6 m<sup>2</sup>, 송도가 0.3 m<sup>2</sup>로 나타났다. 따라서 이들 지수의 채집면적에 따른 변화를 추적하여 유사성 75%에 기준을 둔 채집면적으로서 이들은 영일만 조하대에서는 1.2 m<sup>2</sup>, 송도 갯벌에서는 1.5 m<sup>2</sup>를 각각 제안하였다. 그들은 이러한 채집면적을 사용하면, 영일만 조하대에서는 상위 우점 6종의 서식밀도를, 송도 갯벌에서는 상위 우점 7종의 서식밀도를 정밀도 0.2이내에서 각각 추정할 수 있다고 주장하였다.

이상의 결과로부터, 1991년 현재 영일만 다모류는 전체 저서동물 개체수의 71.3%를 차지하는 우점종으로서 72종이 채집되었고 평균 서식밀도는 1,485 indiv.·m<sup>-2</sup>이었다. 다모류는 만의 남동쪽에서 풍부하였고, 형산강 입구에서 빈약하였다. 다모류 군집의 종조성에 기초하여, 영일만은 3개 해역으로 구분되었으며, 형산강 입구에서 포항항까지는 유기물 오염지시종인 *Pseudopolydora-Polydora-Capitella* 군집이 우점하고 있는 것으로 나타났다.

### 3.6.5 난자치어·어패류

Han et al.[2003]은 2001년 2월부터 11월까지 영일만 연안에서 계절별로 채집한 부유성 난과 자치어의 종조성을 조사하였다. 그 결과, 부유성 난은 총 9개 분류군으로 멸치가 출현량의 63.4%로 가장 우점하였고, 다음으로 까나리가 23.7%를 차지하였으며, 나머지 7개 분류군이 12.9%를 차지하였다. 자치어는 총 7목 28과 37개 분류군으로서, 2월에 2목 7과 12종, 5월에 3목 5과 7종, 8월에 6목 18과 21종, 11월에 6목 14과 16종이 출현하였다. 주요 출현종으로서 까나리가 자치어 출현량의 22.7%를 차지하여 가장 우점하였고, 다음은 멸치가 16.7%, 동갈양태속 어류가 14.1%, 노래미와 쥐노래미가 각각 5.7%와 5.5%를 차지하였다. Suh et al.[1995a]은 1993년 8월 영일만내 해빈 쇄파대에서 두 종류의 곤쟁이류(*Archaeomysis kokuboi* and *Acanthomysis* sp.)에 대한 1주야 수평 회유를 관찰한 결과, 이들은 서로 다른 모습으로 주야 수평이동을 하고 있음을 확인하였다. 즉, *Acanthomysis* sp.는 어두워지면 수심 1 m의 저층에서 많이 채집되었으나 해가 뜨면 수심 1 m보다 깊은 곳으로 이동하였으며, 이때 생긴 빈자리를 *A. kokuboi*가 차지하였다. 반면 *A. kokuboi*는 파도가 강한 노출형 모래 해안의 조간대에 서식하는 곤쟁이류로 알려져 있으나, 영일만 모래 해안의 조간대에는 서식하지 않았다. 이것은 *A. kokuboi*가 파도가 약한 차폐형 모래 해안에 적합한 결과 때문으로 생각되며, 쇄파대의 풍부한 먹이환경도 서식지를 바꾸는 데 기여한 것으로 판단되었다. Jo et al.[2012]은

1995년 5월 영일만의 쇄파대에 서식하는 두 종의 곤쟁이, *Archaeomysis kokuboi*와 *Acanthomysis nakazatoi*를 채집하여 이들의 성장단계에 따른 공간분포에 대하여 조사하였다. 그 결과, *A. kokuboi*와 *A. nakazatoi* 유어 모두 주야간에 출현개체수가 없거나 매우 적어 주야간의 차이가 불명하였으나, *A. nakazatoi* 유어는 저면에서 가장 높은 밀도로 분포하였다. 쇄파대에서 *A. nakazatoi*의 개체 밀도는 주야간 모두 *A. kokuboi*보다 훨씬 높았으며, 유어에서 성어에 이르기까지 높은 밀도로 주로 모래 바닥에 서식하였다. 이것은 *A. nakazatoi*가 유어단계에서부터 모래 저층으로의 잠입 능력이 *A. kokuboi*보다 더 뛰어나며 동해안 쇄파대에서 매우 잘 적응한 종임을 의미하였다. Lee[1999]는 1991년 1월부터 10월에 걸쳐 영일만 3개 정점에서 otter trawl을 이용하여 계절별로 어류를 채집하여 종 조성 변화를 관찰하였다. 이들은 총 59종의 어류를 채집하였고, 개체 중 우점종은 돛양태, 두줄망둑, 춤양태, 까나리, 청보리멸이었다. 출현종수와 채집량은 겨울에는 적었고 봄과 여름에 많았으며, 종 조성은 정점간 차이는 적었으나 계절에 따른 변화를 보였다. 저어류의 출현종수, 평균개체수( $630 \text{ ind.} \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ ) 및 평균 생물량( $13,131 \text{ g} \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-2}$ )은 서해나 남해 내만에 비해 높았고, 종다양도지수도 2.0-2.54로 높았다. Hong et al.[2008]은 2001년 1월부터 2002년 12월까지 영일만에서 자망으로 채집한 어류의 종조성과 변화를 조사하였다. 이들은 2001년에 총 63종, 31과, 10목과, 2002년에 총 40종, 26과, 8목의 어류를 채집하였으나, 이들 중 Pleuronectidae 9종, Scorpaenidae 8종, Cottidae 5종은 2001년에 탁월한 반면, Pleuronectidae 4종, Cottidae 3종, Hexagrammidae 3종은 2002년에 탁월하였다. 회복된 종수는 2001년 8월 34종, 2002년 1월과 9월에 각각 14종으로 가장 높았고, 2001년 5월 6종, 2002년 12월에 5종으로 가장 낮았다. 주성분분석결과, 같은 지역내에서도 시간에 따라 종조성에 차이를 보였으며, 주성분 점수와 수온 사이에는 2001년에는 정(+)의 상관관계를 나타낸 반면, 2002년에는 음(-)의 상관관계를 나타내었다. Lee et al.[2012]은 2009년 영일만내 3개 정점에서 자망과 통발을 사용하여 계절별로 표영성 어류와 저층에 서식하는 생물을 채집·조사하였다. 조사 결과, 총 67과 106종, 7개 분류군이 출현하였으며, 11과 22종의 갑각류, 5과 5종의 극피동물, 3과 6종의 두족류, 7과 12종의 복족류, 38과 57종의 어류, 2과 2종의 이매패류, 2과 2종의 해초류가 각각 출현하였다. 어획된 종수는 겨울에 36종으로 가장 적었으며, 봄에 41종, 여름에 42종, 가을에 65종이었다. 종다양도지수는 겨울에 2.11로 가장 낮았고, 가을에 2.63으로 가장 높았다. 기존의 연구결과와 비교해 볼 때, 어류군집은 경년변동 내지 장기변동이 우세하였고 동일어구에서는 계절변동이 있는 것으로 판단되었다. An et al.[2015]은 2015년 6월 영일만에서 기존 형망과 혼획저감장치를 부착한 형망어구를 각각 사용하여 어획된 생물의 종조성과 혼획율을 조사·분석하였다. 그 결과, 영일만 해역에서 형망에 어획된 종은 총 19목 27과 32종으로 척삭동물 10종, 연체동물 8종, 절지동물 6종, 극피동물 5종, 성구동물 1종, 자포동물 1종, 환형동물 1종으로 나타났다. 또한 형망어구에 어획된 주요 종은 피조개, 아담스백합으로 전체 어획량의 79.9%로 나타났으며,

이중 피조개가 69.6%를 차지하였고 다음으로 아담스백합이 10.4%였다. 기타 종의 혼획은 20.1%로 관찰되었으며, 극피동물이 13.0%로 불가사리류가 많았고, 다음으로 척삭동물이 3.62%로 많았다. 기존 형망과 혼획저감장치를 설치한 어구간의 어획비교시험에서는 기존 형망에서 27종 1,307개체, 85,052 g이 어획되었고, 혼획저감장치를 부착한 어구에는 21종 1,690개체, 91,648 g이 어획되어 혼획저감장치를 설치한 형망으로 어획한 경우 종수는 적었으나 어획량은 상대적으로 많았다. 결과적으로 혼획저감장치를 설치한 형망이 비목표종의 혼획을 줄이는 데 효과가 있는 것으로 나타났다. Hong et al.[2016]은 2015년 2월부터 11월까지 영일만에서 형망어구로 어획한 수산생물 종조성과 계절변동을 조사한 결과, 총 35과 44종으로, 10개 분류군이 출현하였으며, 어류 10과 13종, 갑각류 6과 10종, 극피동물 5과 5종, 복족류 4과 5종, 두족류 3과 4종, 이매패류 3과 3종을 어획하였다. 우점종은 피조개, 아담스백합, 별불가사리로 나타났고, 형망어구의 주 어획생물인 패류는 겨울에서 봄까지 피조개의 어획량이 증가한 반면, 아담스백합은 여름에 어획량이 증가하였고 가을에 감소하였다. 반면, 복족류는 봄에 어획량이 증가하다가 여름에 어획량이 줄어드는 경향을 보였다. 형망으로 어획한 생물의 종조성과 군집분석에 따르면, 여름과 가을에 아담스백합이 극우점하면서 기타 어종의 출현이 적어 종풍부도 지수와 종다양도 지수가 낮았다.

한편 Yoo and Park[1979]은 1973년, 1978년, 1979년 등 3년에 걸쳐 영일만에서 가리비 부유유생의 분포를 조사하였다. 그 결과, 가리비가 서식하고 있는 저층수온은 10-19°C, 저층 염분은 32.58-34.55%의 범위로 나타났으나, 부유유생은 4월 중순부터 5월 중순까지 가장 많이 출현하였다. 가리비 유생의 부유생활기간은 약 1개월로서, 부유생활이 끝나고 부착생활로 들어가는 기간은 4월 초순부터 6월 하순까지이며, 그 성기는 5월 중순부터 6월 초순사이로 밝혀졌다. 또한 가리비 부유유생은 저층에 많았으며 표층으로 가면 급격히 줄어들었다. Yoo et al.[1981]은 가리비의 채묘에서부터 성장과정까지의 양식과정 중 성장추이를 파악하기 위해 영일만에서 1980년 4월, 그리고 1981년 4월부터 5월까지 채묘를 하여 1981년 7월까지 가리비 양성한 결과를, 1979년 11월에 자연산을 수집하여 1981년 7월까지 영일만에서 양성한 결과와 서로 비교하였다. 그 결과, 양성 가리비는 채묘 후 1년 3개월 후에 각장이 6 cm, 3년 7개월 후에 11.3 cm로 성장하였으며, 4월에 채묘한 것은 5월에 채묘한 것에 비해 각장이 7월 중순까지 약 2배 정도 더 컸다. 더구나 9월 초에 중간 육성망에 옮겨 양성한 종패는 채묘망에서 관리를 하지 않고 양성한 것에 비해 성장이 훨씬 양호한 것으로 나타났다. 한편 종패부터 수하식으로 양성하는 것이 바닥에서 양성한 것 또는 자연산을 수집하여 수하 양성한 가리비에 비해 약 1년 성장이 빨랐다. Cha et al.[2012]은 2010년 5월과 8월에 영일만내 6개 정점에서 형망을 이용하여 패류를 채집, 조사하여 피조개와 떡조개 두 종을 확인하였다. 채집된 패류의 총 개체수는 1,703마리, 총 생체량은 140.9 kg이었으며, 이중 떡조개가 1,198마리(생체량 76.1 kg), 피조개가 505마리(생체량 64.8 kg)이었다. 채집된 주요 패류의 각



장 범위는 딱조개가 25.76-67.88 mm(평균 58.08 mm), 피조개가 46.82-113.74 mm(평균 76.86 mm)로, 성숙한 개체들이었다. 이들 패류의 해역별 채집량에서는 항외 지역이 항내의 개체수 1,332마리(생체량 35.5 kg)보다 많았으며, 패류의 크기도 항외 지역의 패류가 항내 지역보다 더 컸다.

이상의 결과로부터, 영일만에 출현한 어류는 1991년 59종, 2001년 63종, 2002년 40종, 2009년 106종(저서생물 포함)으로, 종수는 다소 경년변동이 있는 것으로 판단되었다. 출현한 부유성 난이나 자치어를 포함한 어류 중 우점종은 멸치와 까나리이며, 만에 서식하는 패류로서는 딱조개, 피조개, 가리비 등이 있으나 우점종은 피조개와 아담스백합으로 나타났다.

### 3.7 Carbon capture and Storage (CCS)

Park *et al.*[2018]은 3차원 지질 모델링과 그리드 기반의 몬테칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 사용하여 영일만 포항 분지에서의 복수유체상(multi-fluid-phase)인 CO<sub>2</sub>의 저장용량을 추정하기 위해 일련의 확률적 평가를 수행하였다. 그 결과, 포항 분지는 두 개의 쇄설성 염류 형성물, 즉 하천성 역암과 사암(fluvial conglomerate and sandstone; FCSS), 천해성 해양 사암(shallow marine sandstone; SMSS)을 포함하는 여섯 개 지질학적 형성으로 세분되었다. 3차원 지질 모델링 결과, 여섯 개 지질학적 염류 형성물이 불규칙한 수심과 두께를 가지고 연안과 외양에 매우 복잡하게 분포하고 있음을 보여주었다. 그리드 기반의 몬테칼로 시뮬레이션 결과는 다음과 같은 세 가지 주요 내용을 보여주었다: 첫째, 두 개의 쇄설성 염류 형성물 SMSS와 FCSS에서 CO<sub>2</sub>는 깊이에 따른 온도와 압력에 의존하며, 기체, 액체, 초임계상(supercritical phase)으로 존재하였다. 둘째, SMSS와 FCSS의 이론적인 복수유체상(multi-fluid-phase)의 CO<sub>2</sub> 저장 용량(수용력)은 모두 비대칭 정규분포를 보여주었다. 셋째, SMSS에서 복수 유체상의 CO<sub>2</sub> 저장 용량은 확률적으로 지역 1(주로 초임계적이고 액체상)에서는 더 높고, 지역 2(주로 액체와 가스상)에서는 중간이며, 지역 3(주로 가스상)에서는 더 낮았다. 이들은 상기한 3차원 지질 모델링과 그리드 기반의 몬테칼로 시뮬레이션 결과에 근거하여 최적의 CO<sub>2</sub> 저장 위치를 선정하기 위한 네 개 주요 매개변수, 즉, 분해성 염류 형성물의 형성 체적, 유효 복수유체상의 CO<sub>2</sub> 저장 용량, 유효 복수유체상의 CO<sub>2</sub> 저장 밀도, 주요 단층의 존재 등을 결정하였다. Kim *et al.*[2018a]은 영일만을 대상으로 한 두 가지 CO<sub>2</sub> 주입 시나리오에서 각 일일 주입량(20 톤, 40 톤, 100 톤)별 예측주입량 및 안정성을 평가하였다. 그 결과, 일일 주입량이 20 톤일 경우, 주입기간 동안 그 주입량을 유지하였으나, 일일 주입량이 40 톤일 경우에는 주입 초기 12일 동안만 BHP(bottom hole pressure) 허용한계에 도달하여 원하는 주입량을 주입하지 못하였다. 일일 주입량이 100 톤일 경우, 첫 번째 주입기간 동안 최대허용압력에 도달하여 100 톤의 주입량을 유지하지 못하였으며, 두 번째 주입기간에서도 최대허용압력을 유지하는 기간이 길었다. 즉, 20 톤과 40 톤의 경우 원하는 CO<sub>2</sub> 주입량을 유지할 수 있으나, 100 톤의 경우 BHP 최대허용한계에 도달하여 계획한 기

간 동안 원하는 주입량으로 주입하기 어려웠다. 일일 주입량이 20 톤과 40톤일 경우, 두 가지 주입시나리오에서 계획대로 주입할 수 있었으나, 일일 주입량을 100 톤까지 증가시킬 경우 원하는 주입량을 주입하지 못하지만, 대수층내 단층의 재활성에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. Park *et al.*[2018]은 2016년 9월 한국지질연구원 탐해 2호와 OBS(Ocean Bottom Sensor)설치 선박을 이용하여 포항분지 해상 중규모 CO<sub>2</sub> 주입 실증사이트에 주입되는 CO<sub>2</sub>를 모니터링하기 위해 물리적, 지화학 복합모니터링 연구를 수행하였다. 그들은 지구물리 탐사에서는 한국형 Hydro-Geophone OBS 탐사장비 개발현황과 3D 탄성과 탐사 결과를, 천부지화학 탐사에서는 주입사이트 주입 전의 지화학 베이스라인 탐사(퇴적물 공극수의 음이온)에 대한 예비결과를 각각 제시하였다. Chen *et al.*[2018]은 CCS를 위한 적절한 환경 모니터링 입지 선정을 위해 2016년 영일만내 5개 정점에서 피스톤 코어를 사용하여 채취한 코어퇴적물 공극수의 생지화학적 특징을 조사하였다. 그 결과, 매우 높은 용존 유기탄소(~36 mg·L<sup>-1</sup>)와 담색기의 선명한 용존유기물, 영양염류, 알칼리성이 단층과 하천의 영향을 받은 소음지역(acoustic blanking site)에서 관찰되었다. 깊이에 따라 관측한 용존유기물(DOM; dissolved organic matter)의 매개변수, 영양염, 알칼리성의 일반적인 증가하는 하부코어(downcore) 경향은 매개변수 중에서 하천유출류에 의해 영향을 받은 음소거지역에서 발견되었다. 이것은 하부코어 생지화학적 성질에 미치는 외부 요인과 지질학적 특성을 보여주었다. 이러한 결과는 DOM이 강력하고 상호보완적인 생지화학적 변수로서 이용될 수 있다는 것을 암시하였다. Kwon *et al.*[2018]은 영일만에서 본격적인 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증이 수행될 경우, 지진유발 가능성이나 누출 가능성에 대하여 면밀한 평가를 수행하였다. 그 결과, 포항 분지에서의 중규모 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증 연구사업은 2017년에 발생한 포항지진의 진앙지와 약 10 km 떨어진 영일만 해역에 저장소가 위치하며 CO<sub>2</sub> 저장층의 심도는 해저면 아래 약 750-800 m 정도로, 포항 지진의 심도와는 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 지중저장 실증연구사업은 2017년 1월 12일부터 3월 12일까지 약 3개월간 CO<sub>2</sub> 시험주입을 수행한 후, 수송체계 구축과 주입공 격상을 위해 CO<sub>2</sub> 주입행위가 중지된 상황에 놓여 있으며, 2017년 11월 15일에 발생한 포항지진과 직접적인 관련성을 찾기는 어려웠다. 한편 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증사업이 장기적으로 수행될 경우 지진유발 가능성과 누출 가능성에 대하여 평가한 결과, 저장층 상부의 덮개층이 파쇄되거나 주변단층의 재활성화가 발생하지 않도록 정해진 범위에서 압력을 조절하면서 CO<sub>2</sub> 스트림을 주입한다면 지진유발이나 단층재활성화를 초래할 가능성이 매우 희박한 것으로 분석되었다. 결론적으로 포항분지 해상 중규모 CO<sub>2</sub> 지중저장 실증연구사업은 인간이 감지할 정도의 지진 유발 및 주입된 CO<sub>2</sub> 스트림의 누출 가능성은 크지 않은 것으로 판단되었다. Moon *et al.*[2018]은 대규모 CO<sub>2</sub> 배출원에서 포집된 CO<sub>2</sub>를 대상으로 국내최초로 해상에서 지중저장을 하기 위한 고압 주입설비의 설계 및 구축에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 2017년초 CO<sub>2</sub> 지중 주입설비를 구축하여 영일만 해상 플랫폼에서 CO<sub>2</sub> 시험주입을

국내 최초로 성공하였다. Won *et al.*[2018]은 영일만에 설치된 해상 플랫폼에서 CO<sub>2</sub> 주입실증을 위한 주입정 시추 및 완결을 수행하였다. 이들은 최종심도 816.5 m까지 공경  $\Phi$  124 mm 규격으로 굴진하여 심도 746.5-816.5 m 구간에 유공 케이싱을 설치하여 주입구간을 형성하였으며, CO<sub>2</sub> 주입을 위한 주입공의 완결을 위하여 주입관, 패커, 주입탑을 설치하였다. 이들은 주입공을 완결하고 주입 플랫폼 설비를 설치하여 CO<sub>2</sub> 시험주입을 성공적으로 수행하였다. Kim *et al.*[2019]은 영일만 포항 분지의 속성 역사(diagenetic history)를 이해하기 위해 중신세(miocene)의 동해 개방기 동안 포항 분지의 구조론적 진화에 초점을 맞추어 광물학적으로 미세구조를 분석하였다. 이들은 CO<sub>2</sub> 저장의 대상층으로 고려되고 있는 두 개 단면에서 채취한 55개 시추 코어 표본을 분석하였다. 그 결과, 주요 광물성분은 석영, 장석, 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 방해석이며, 또한 미량광물성분은 황철석(pyrite), 능철석(siderite), 산화철(iron oxide), 산화티타늄(titanium oxide)으로 밝혀졌다. 화학적 분석 결과, 대상층은 초기 속성(eogenesis)부터 후기 속성(mesogenesis), 그리고 용기와 관련된 속성 과정을 겪은 것으로 나타났다. 이들은 CO<sub>2</sub> 저장소 압반내에 있어서의 교결과 용해와 같은 속성 영향은 탄소 포획과 저장 계획, 또는 주입 후 잠재적인 충전을 예측하기 위한 적절성 평가의 중요한 요소임을 주장하였다. Jun *et al.*[2019]은 영일만 포항 분지의 CO<sub>2</sub> 주입정(injection well)의 저장용량을 향상하기 위하여 대수층(aquifer)내의 압력 증가를 모니터링하면서 다양한 주입정의 형식과 이들의 최적화된 위치 및 유체의 주입율을 적용·검토하였다. 그 결과, 이들은 네 가지 형식의 주입정을 채용하였다: 1) 단일 수직 주입정(SVI), 2) 두 개의 수직 주입정(TVI), 3) 단일의 수평 주입정(SHI), 4) 소금물 추출과 CO<sub>2</sub> 주입을 위한 두 개의 수직 주입정(TVEI). 그 결과, 최적 위치와 유체 속도에서 염분 추출과 CO<sub>2</sub> 주입을 할 수 있는 두 개의 수직 주입정(two vertical wells for brine extraction and CO<sub>2</sub> injection; TVEI)이 단일 수직 주입정(single vertical injection; SVI)에 비해 CO<sub>2</sub> 저장용적이 8배나 더 컸고, 안전성 이내의 압력을 유지하는 것을 확인하였다. 단일 주입정(single vertical injection; SVI, single horizontal injection; SHI)을 사용할 경우에는 SVI는 126 톤의 CO<sub>2</sub>를 주입할 수 있어서 SHI에 비해서는 저장 용량이 더 커지만, SHI의 저장 안전성은 SVI에 비해 더 양호하였다. Park *et al.*[2021]은 기존 연구에서 활용되지 않았던 해저면 탄성과 탐사자료를 영상화하여 영일만 CO<sub>2</sub> 지중 저장 부지의 구조적 적합성을 재확인하였다. 그들은 기존의 스트리머(streamer) 탐사자료를 이용한 영상화 결과에 비해, 해저면 탄성과 탐사자료에 역시간 구조보정기법(reverse time migration; RTM)을 적용한 영상에서 지층의 연속성이 보다 개선되는 것을 확인하였다. Kim[2022]은 영일만내에 설치 예정인 CO<sub>2</sub> 지중저장시설 CCS의 입지 결정과 관련한 주민참여절차 및 주민들과의 의사소통을 통한 공감대 형성 방안(개선방안)을 제안하였다. Kim *et al.*[2018b]은 영일만 해상에서 진행중인 CO<sub>2</sub> 지중저장 시험 현장에 대한 지질역학적 특성을 분석한 결과, 대상 저류층은 750 m 심도에 존재하는 다공질, 투수성의 사암/역암층, 상부의

두꺼운 이암층 등을 발견하였다. 그들의 탄성과 탐사 결과에서는 저류층 심도에서 정수압보다 추가로 3.5-5.9 MPa의 공극압 증가가 단층 인근에서 발생해야만 단층이 재활성화되는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터, 영일만 포항 분지에서는 CO<sub>2</sub>의 저장용량을 추정하고, CO<sub>2</sub>의 해상 또는 지중저장 실증사업에 따른 지진 유발과 누출의 가능성에 대한 물리적, 지화학적 모니터링 연구가 현재 진행되고 있음을 알 수 있다. 그 결과, 저장층 상부의 덮개층이 파쇄되거나 주변단층의 재활성화가 발생하지 않도록 정해진 범위에서 압력을 조절하면서 CO<sub>2</sub> 스트림을 주입할 경우에는 지진유발이나 단층재활성화를 초래할 가능성은 희박한 것으로 분석되었다. 반면, 이러한 CO<sub>2</sub> 지중저장시설인 CCS의 입지 결정에 있어서는 주민참여와 주민들과의 의사소통을 통한 공감대 형성의 필요성이 제기되고 있다.

### 3.8 미세플라스틱/해양쓰레기

Kim *et al.*[2000]은 1998년 8월부터 2000년 1월까지 하계와 동계에 영일만내 해수욕장을 비롯한 7개 지역의 해양쓰레기를 조사한 결과, 합성수지 pellet(알갱이), 플라스틱 파편, 스티로폼 및 담배 필터 등을 채집하였고, 그 외 부유성 자연고형물인 목편과 솟을 공통적으로 채집하였다. 해수욕장별 수지 알갱이 개수·m<sup>2</sup>는 0.8-12.9로, 장소에 따라 큰 차이를 보였으며, 부유고형물은 하계가 동계에 비해 분포밀도가 높았다. 미세플라스틱 중 resin pellet(수지알갱이)의 재질은 PE와 PP가 대부분을 차지하였다. Jung *et al.*[2021]은 2016년부터 2017년까지 영일만을 포함한 9개 연안역 46개 정점에서 수집한 163개 해수 표본과 또한 Song *et al.*[2018] 등에 의한 미세플라스틱 풍도 자료를 바탕으로 한국 연안에 있어서의 미세플라스틱에 의한 생태적 위험성을 평가하였다. 이들은 생태적 위험도 평가를 위한 영향(효과)과 노출 분석에 있어서 미세플라스틱의 크기와 형태를 고려하였으며, 종 민감도 분포방법(species sensitivity distribution approach)을 채용하여 예측되는 비영향농도(predicted no-effect concentration; PNEC)인 12 particles·L<sup>-1</sup>를 유도하여 그 결과를 각정점에서 관측한 현장 농도와 비교하였다. 그 결과, 관측한 미세플라스틱 농도는 Table 4에서 나타낸 바와 같이, 영일만을 비롯한 9개 연안역 모두 유도된 PNEC를 초과하지는 않았다. 따라서 크기 20-300  $\mu$ m인 섬유질 미세플라스틱과 파편에 의한 현재의 오염농도 수준은 해양생태계에 대한 심각한 위협을 제기하지는 않을 것으로 판단되었다. 그러나 이들 시나리오는 미세플라스틱에 의한 오염이 현재 속도로 2100년까지 50배로 증가하여 해양생태계에 있어서 유도된 PNEC를 훨씬 초과할 것으로 예측되었다.

### 3.9 항만 물류(Harbor logistics)

Song *et al.*[2005]은 2006년 영일만 신항 개발될 경우 예상되는 선박 통항량의 증가와 중대형 선박들의 입출항에 따른 안전성을 파악하기 위해 해상교통조사를 실시하였다. 이들은 해상교통조사 결과를 선종별 및 톤수별로 통계처리하고 통항 선박의 항적 분포 등을

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

Region	No. of data	Abundance (particles·L <sup>-1</sup> )		
		Min	Max	Mean
Incheon Harbor	15	0.22	4.28	1.57
Cheonsu Bay	15	*ND	0.62	0.29
Hampyeng Bay	15	0.04	1.34	0.38
Deukryang Bay	15	0.06	1.18	0.43
Gwangyang Bay	15	0.11	2.36	0.79
Masan Bay	40	0.06	2.64	0.50
Busan Harbor	18	0.02	1.18	0.44
Ulsan Harbor	15	0.06	3.08	0.67
Yeongil Bay	15	0.08	2.24	0.78

\*ND: not detected

토대로 통항 선박의 주요 통항로 및 통항 특성을 분석하였다. Na *et al.*[2006]은 항만관련제도의 개선, 배후시설의 인프라 구축강화, 마케팅 개념의 적극적인 도입 등을 통한 포항 영일만 신항의 국제 경쟁력 제고방안을 제시하였다. 이들은 마케팅 전략개념의 적극적인 도입은 배후시설 확충과 같은 하드웨어적인 측면이 아니라 항만 민영화와 같은 소프트웨어적인 측면의 강화에 영향을 미칠 것으로 판단하였다. Koh *et al.*[2008]은 항만별 예측방법으로서 시스템 분석을 적용하여 포항 영일만항을 경유하는 수출화물 물동량을 전망하였다. 그들은 포항 영일만항을 배후권역으로 하는 수출화물의 기종점인 배후산업단지의 소요면적에 대한 자료를 참고하여 산단별 분양률, 업종비중, 수출비중을 적용하였다. 그 결과, 기존의 연구결과에 비해 수출화물 물동량이 상당히 적어 해당 항만의 물동량 수요가 부족할 것으로 전망되었다. Ha and Cho[2009]는 영일만항 배후지역의 산업특성, 교역구조, 지역경제의 파급효과, 물동량 창출, 발전 잠재력 등의 분석을 통해 배후단지에 우선적으로 유치해야 할 산업을 중심으로 배후단지의 개발방향을 제시하였다. Cho[2011]는 SWOT분석을 통해 환동해권 거점항만으로서의 영일신항만의 물류 클러스터화 전략을 제시하였다. 그들은 영일신항만의 물류 클러스터 전략으로서 항만 배후 산업단지과 같은 하드웨어의 적극 활용은 물론, 물류와 운송의 네트워크 구축과 같은 공간적 네트워크 구축을 강조하였다. Hwang *et al.*[2013]은 eLoran 시스템의 주요 오차 요인인 항만에서의 ASF(Additional Secondary Factor)를 효율적으로 생성하고 이를 보완하기 위해 ASF 예측모델과 실측치를 이용한 ASF 맵 생성기법에 대해 연구하였다. 이들은 영일만 해상 12개 정점에서 ASF 실측값과 ASF 모델링을 통해 획득한 예측값의 유효성을 보정하여 영일만의 ASF맵을 생성하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1969년 이래 지난 50여년간 영일만의 해양환경 연구와 관련하여 학술지에 게재된 96편을 논문을 분석하여 시대에 따른 연구 주제의 변천과 영일만 해양환경의 특징을 검토하였다.

영일만 연구는 생물환경(어류, 패류, 동·식물플랑크톤, 저서생물, 해조류 등) 관련 주제가 가장 많았고, 다음으로 물리환경(조석·조류, 파랑, 밀도류, 수온·염분, 수중소용, 조도 등), 퇴적물·저서환경, 수질환경, 지질환경, 항만·물류, 미세플라스틱, 해양쓰레기 순으로 나타났다. 물리환경과 생물환경에 관해서는 1969년 이래 최근까지 비교적 꾸준히 연구가 이루어진 반면, 수질환경이나 퇴적물·저서환경에 관해서는 2000년대에 들어서부터 연구가 활발해진 것으로 나타났다. 또한 항만·물류에 관해서는 2000년대 중반부터 2010년대 초반까지 집중적인 연구가 이루어진 것으로 판단된다. 이러한 연구 주제의 시대적 변화는 2000년대부터 2010년대 초반까지 이루어진 포항 신항만(영일신항)의 개발 행위와 관련이 있으며, 또한 CCS 관련 연구는 최근 정부가 추진하고 있는 온실가스의 감축정책과 무관하지 않은 것으로 판단된다.

영일만내의 주기 20-24분의 부진동이 존재하며, 이것이 포항신항의 고유주기와 거의 동일하여 항만 부진동이 증폭될 위험성이 있는 것으로 나타났다. 특히, 영일만 신항 건설 후, 포항 신항과 구항의 공진주기가 변하였고, 일부 구간에서는 건설 전에 비해 파의 진폭이 증가한 것으로 나타나, 부진동 저감을 위한 대책이 필요한 것으로 판단된다. 한편 영일만 수질은 포항시와 포항공단, 그리고 형산강 하천수를 통한 질산 질소의 유입 등에 의해 포항 구항과 신항 등 주로 내만을 중심으로 오염이 심화되고 있었다. 또한 포항 구항 주변은 중금속 오염이 매우 심각하였으며, 영일만 퇴적물 중 상당수는 내분비계교란물질, 즉 다이옥신 유사 활성과 발정성 활성을 나타내는 물질에 의해 유기 오염된 것으로 판명되었다. 특히, TOC를 비롯하여 PCDD/Fs, PCBs, PAHs 등 다양한 오염물질의 농도가 주로 인간활동에 의해 영향을 받는 산업단지와 대도시 주변 해역에서 높았으며, 일부 미량 유기화학물질 농도는 저질 가이드라인을 초과하여 저서생물에 잠재적으로 부정적 영향을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 여기에 더하여 형산강 입구에서 포항항까지는 유기물 오염지시종인 *Pseudolydora*-*Polydora*-*Capitella* 군집이 우점하고 있었다. 이와 같은 영일만의 수질과 저질(퇴적물)은 형산강과 냉천 등 하천수를 통해 유입된 유기오염물질, 연안의 산업시설 및 생활하수로부터 유래한 다양한 오염물질 등에 의해 악화된 것으로 것으로 밝혀졌다. 따라서 수산생물자원 보전을 위해서는 하천수에 의한 오염부하를 물론, 산업시설과 생활하수 유래의 유해물질 유입을 적극 차단해야 할 것으로 판단되었다.

#### References

[1] An, H., Park, H., Park, J., Hong, S., Yoon, B., Park, C. and Bae, J., 2015, "Catch and bycatch of dredge in the Yeongil Bay, Pohang", *J. Korean Soc. Fish. Technol.*, 51(4), 493-503.  
 [2] An, S., Hong, S., Lee, J., Cha, J., Lee, S., Moon, H., Giesy, J.P. and Khim, J.S., 2021, "Identification of potential toxicants in sediments from an industrialized area in Pohang, South Korea: Application of a cell viability assay of microalgae using flow cytometry", *J. Hazardous Materials*, 405, 124230.

- [3] Cha, B., Lee, C., Moon, T. and Park, M., 2012, "A study on bivalves in Yeongil Bay of Gyeongsangbuk-Do province, Korea", *Korean J. Malacol.*, 28(2), 101-108.
- [4] Chae, J.W. and Jeong, S.T., 1992, "Current-depth refraction and diffraction model for irregular waves, Proc. 23th Int. Coast. Engineering Conf., ASCE, Venice, Italy, 129-141.
- [5] Chae, Y.T., 1981, "Studies on phytoplanktons of Yeongil Bay, I., The constitution and distribution of phytoplanktons in spring", *Korean J. Botany*, 24(2), 95-105.
- [6] Chen, M., Park, M., Kim, J., Shim, Y.J., Lee, Y.K. and Hur, J., 2018, "Exploring pore water biogeochemical characteristics as environmental monitoring proxies for a CO<sub>2</sub> storage project in Pohang Basin, South Korea", *Mar. Pollut. Bull.*, 137, 331-338.
- [7] Cho, S., 2011, "A study on port cluster strategy of Youngilman new port for the Hwan Dong hae era", *J. Shipping and Logistics*, 27(1), 57-78.
- [8] Choi, B.Y., Park, Y.C., Shinn, Y.J., Kim, K.Y., Chae, K.T. and Kim, J.C., 2015, "Preliminary results of numerical simulation in a small-scale CO<sub>2</sub> injection pilot site: 1. Prediction of CO<sub>2</sub> plume migration", *J. Geological Soc. Korea*, 51(5), 487-496.
- [9] Choi, D., Kim, S., Suk, B. and Oh, J., 1993, "Shallow geological structure of the Yongil Bay, southeast coast of Korea", *Korean J. Petrol. Geol.*, 1(1), 53-62.
- [10] Choi, M., Moon, H., YU., J., Kim, S., Pait, A.S. and Choi, H., 2009, "Nationwide monitoring of nonylphenolic compounds and coprostanol in sediments from Korean coastal waters", *Mar. Pollut. Bull.*, 58, 1078-1095.
- [11] Choi, S., 1996, "Chronological study of late Pleistocene marine terraces around Pohang area, southern coast of Korea", *J. Korean Geomorphological Assoc.*, 3(1), 29-44.
- [12] Choi, S. and Jeon, J., 2016, "Possibility of the Late Holocene uplift in the southern coast of Yeongil Bay, Korean Peninsula: Evidence from an exposed cave", *J. Asian Earth Sci.*, 130, 256-264.
- [13] Choi, Y., Kim, M., Ha, S.Y., Han, G.M., Yim, U.H. and Jung, J.H., 2021, "Sediment quality assessment combining chemical and biological (non) target analysis", *Aquatic Toxicology*, 238, 105883.
- [14] Chu, K., 1976, "The seiches at Pohang harbor", *J. Oceanological Soc. Korea*, 11(2), 51-56.
- [15] Chun, J., Ahn, K. and Yoon, J.T., 2007, "Wave simulation on Youngil Bay by WAM extended to shallow water", *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers*, 19(6), 511-520.
- [16] Gwak, J., Cha, J., Lee, J., Kim, Y., An, S., Lee, S., Moon, H., Hur, J., Giesy, J.P., Hong, S. and Khim, J.S., 2022, "Effect-directed identification of novel aryl hydrocarbon receptor-active aromatic compounds in coastal sediments collected from a highly industrialized area", *Sci. Total Environ.*, 803, 149969.
- [17] Ha, K.L. and Yoon, G.D., 1983, "The under water ambient noise at Young-il Bay", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 16(3), 197-201.
- [18] Ha, Y. and Cho, H., 2009, "Inducement of firms in container port hinterland: A case of Pohang-Youngil port", *J. Shipping and Logistics*, 25(1), 123-143.
- [19] Hahn, S.D., 1974, "Some optical properties at the mouth of Yeong-il Bay", *J. Oceanol. Soc. Korea*, 9(1-2), 59-64.
- [20] Han, K.H., Hong, J.S., Kim, Y.S., Jeon, K.A., Kim, Y.S., Hong, B.K. and Hwang, D.S., 2003, "Species composition and seasonal variations of ichthyoplankton in coastal waters of Yeongil Bay, Korea", *Korean J. Ichthyol.*, 15(2), 87-94.
- [21] Hong, B.K., Kim, J.K., Park, K.D., Jeon, K.A., Chun, Y.Y., Hwang, K.S., Kim, Y.S. and Park, K.Y., 2008, "Species composition of fish collected in gill nets from Youngil Bay, east sea of Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 41(5), 353-362.
- [22] Hong, S., Bae, J., Park, C., Park, J., Yoon, B. and An, H., 2016, "Species composition and distribution property of dredge fishery in Yeongil Bay, Korea", *J. Korean Soc. Fish. Technol.*, 52(1), 48-55.
- [23] Hong, S., Khim, J.S., Park, J., Kim, S., Lee, S., Choi, K., Kim, C., Choi, S., Park, J., Ryu, J., Jones, P.D. and Giesy, J.P., 2014, "Instrumental and bioanalytical measures of dioxin-like compounds and activities in sediments of the Pohang Area, Korea", *Sci. Total Environ.*, 470-471, 1517-1525. 1-32.
- [24] Hwang, D., Kim, G. and Lee, J.Y., 2010, "Submarine discharge of fresh groundwater through the coastal area of Korea Peninsula: Importance as a future water resource", *J. Korean Soc. Oceanography*, 15(4), 192-202.
- [25] Hwang, D., Kim, S., Choi, M., Lee, I., Kim, S. and Choi, H., 2016, "Monitoring of trace metals in coastal sediments around Korean Peninsula", *Mar. Pollut. Bull.*, 102, 230-239.
- [26] Hwang, J.P., Choo, S.G., Huh, Y.S., Hyun, D.O. and Jung, N.G., 1972, "Technical report of oceanographic observation in 1972", Hydrographic Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 51-80.
- [27] Hwang, S., Shin, M.Y., Choi, Y.S., Yu, D., Park, C., Yang, S., Lee, C. and Lee, S.J., 2013, "A generation method of ASF mapping by the predicted ASF with the measured one in the Yeongil Bay", *J. Navig. Port Res.*, 37(4), 375-381.
- [28] Jeon, M., Lee, J., Jeong, J., Yang, S. and Jeong, Y., 2006, "Variation of harbor oscillations in Yeongil Bay", *J. Korean Navig. Port Res.*, 30(6), 533-539.
- [29] Jeong, S.T., Chae, J.W. and Lee, D.Y., 1996, "Irregular wave model for Youngil Bay", *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers*, 8(2), 146-150.
- [30] Jo, E., Cha, J., Kim, M. and Kim, K., 2000, "Studies on the ecosystem in the Yeong-il Gulf of Korea: I. Species composition and diversity of phytoplankton communities", *Algae*, 15(1), 49-59.
- [31] Jo, S., Kim, C. and Suh, H., 2012, "Diel and tidal distributions of the sand-burrowing Mysids *Archaeomysis kokuboi* and *Acanthomysis nakazatoi* on a sandy shore surf zone of Yongil Bay, eastern Korea, in relation to growth stages", *J. Korean Soc. Oceanography*, 17(2), 112-119.
- [32] Jun, C., Kim, M. and Shin, H., 2019, "Optimization of well placement and operating conditions for various well patterns in CO<sub>2</sub> sequestration in the Pohang Basin, Korea", *International J.*

- Greenhouse Gas Control, 90, 102810.
- [33] Jung, J., Park, J., Eo, S., Choi, J., Song, Y.K., Cho, Y., Hong, S.H. and Shim, W.J., 2021, "Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape", *Environ. Pollut.*, 270, 116217.
- [34] Jung, S., Kwon, S.Y., Hong, Y., Yin, R. and Motto, L.C., 2021, "Isotope investigation of mercury sources in a creek impacted by multiple anthropogenic activities", *Chemosphere*, 282, 130947.
- [35] Kang, Y.S., Kim, K.Y., Shim, J.M., Sung, K.T., Park, J.I. and Kong, J.Y., 2002, "Spatiotemporal variations of water quality in Yongil Bay", *J. Korean Fish. Soc.*, 35(4), 431-437, 130947.
- [36] KIGAM, 2014a, "Site selection for pilot-scale CO<sub>2</sub> geologic storage in the Korean Peninsula", Annual Report 2012-0008916, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea.
- [37] KIGAM, 2014b, "Management of the demonstration project for 10,000 ton CO<sub>2</sub> geologic storage in onshore sedimentary basin", Annual Report 2012-0008915, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea.
- [38] KIGAM, 2014c, "Characterization of storage strata and development of basis design technology for demonstration of CO<sub>2</sub> geological storage", Final Report GP2012-030-2014(2), Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Korea, 1-441.
- [39] Kim, J.S. and Hong, S., 2014, "Assessment of trace pollutants in Korean coastal sediments using the triad approach: A review", *Sci. Total Environ.*, 470-471, 1450-1462.
- [40] Kim, G., Ryu, J.W., Yang, H.S. and Yun, S.T., 2005, "Submarine groundwater discharge(SGD) into the Yellow Sea revealed by <sup>228</sup>Ra and <sup>226</sup>Ra isotopes: Implications for global silicate fluxes", *Earth Planet. Sci., Lett.*, 237, 156-166.
- [41] Kim, H., Kim, J. and Ryu, C., 2001, "Study on current and water quality characteristics in Yongil Bay", *J. Ocean Eng.& Tech.*, 15(4), 28-37.
- [42] Kim, H., Park, C., Park, M. and Song, Y., 2019, "Diagenetic study on the Neogene sedimentary basin as paleoenvironmental proxy data for an offshore CO<sub>2</sub> storage project in Pohang Basin, South Korea", *Marine Geology*, 416, 105977.
- [43] Kim, J., 2001, "The characteristics of tidal residual current in Youngil Bay", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 4(1), 14-23.
- [44] Kim, J., 2022, "A study on the site selection for the CO<sub>2</sub> geologic storage facility and guarantee of resident participation in procedures", *Ilkam Real Estate Law Review*, 24, 51-114.
- [45] Kim, J., Lee, J., Lee, H. and Yang, S., 2004, "Variation of harbor response due to construction of a new port in Yeongil Bay", *J. Korean Navigation and Port Res.*, 28(5), 421-428.
- [46] Kim, K.T., 1983, "Contribution a l'etude de la production pelagique primaire et de la pollution dan le Gulf de Yeong-il", Report Korean Traders Scholarship Foundation, 1-60.
- [47] Kim, K.T., Lee, H.C., Yoo, K.I., Park, E.L., Lim, K.B., Park, S.R., Lee, D.C., Yoon, Y.Y., Kim, I.G., Kim, Choi, E.J. and Ahn, Y.H., 1988, "Ecosystem on the gulf of Yongil in the East Sea of Korea. 1. Introduction of physio-chemical and biological studies", *Mar. Nat.*, 1, 59-67.
- [48] Kim, M.C., Gihm, Y.S., Son, E.Y., Son, M., Hwang, L.G., Shinn, Y.J. and Choi, H., 2015, "Assessment of the potential for geological storage of CO<sub>2</sub> based on structural and sedimentologic characteristics in the Miocene Janggi Basin, SE Korea", *J. Geological Soc. Korea*.
- [49] Kim, M.S., 1972, "On improvement of the adsoption by chemical treatments on Yeong-il bentonite", *J. Korean Chemical Soc.*, 16(4), 241-248.
- [50] Kim, N., Jung, H., Kim, G., Jeong, H., Shin, H., Kwon, Y. and Choe, J., 2018a, "The stability assessment of an aquifer in Pohang Yeongil Bay due to CO<sub>2</sub> injection", *J. Engineering Geology*, 28(2), 183-192.
- [51] Kim, S., Hwang, W., Kim, T. and Kang, G., 2019, "A case study on earthquake-induced deformation of quay wall and backfill in Pohang by 2D-effective stress analysis", *J. Korean Geotech. Soc.*, 35(7), 15-27.
- [52] Kim, S.J., Zhang, Y., Yang, J.E., Ok, Y.S. and Oh, S., 2007, "Granulation of natural zeolite powder using portland cement", *Korean J. Environ., Agriculture*, 26(3), 259-266.
- [53] Kim, S.K., Chang, C., Shinn, Y. and Kwon, Y., 2018b, "Characteristics of Pohang CO<sub>2</sub> geological sequestraion test site", *J. Engineering Geology*, 28(2), 175-182.
- [54] Kim, S.K., Kim, J.H., Kim, M.S., Cheong, S.B. and Lee, J.T., 2000, "A study on the distribution and composition of plastic debris in the coastal beaches of Youngil Bay", *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 12(2), 30-41.
- [55] Kim, S., Lee, S., Kim, C., Liu, X., Seo, J., Jung, H., Ji, K., Hong, S., Park, J., Khim, J.S., Yoon, S., Lee, W., Park, J. and Choi, K., 2014, "In vitro and in vivo toxicities of sediemnt and surface water in an area near a major steel industry of Korea: Endocrine disruption, reproduction, or survival effects combined with instrumental analysis", *Sci. Total Environ.*, 470-471, 1509-1516.
- [56] Kim, Y., Hong, S., Lee, J., Yoon, S.J., An, Y., Kim, M., Jeong, H. and Khim, J.S., 2021, "Spatial distribution and source identification of traditional and emerging persistent toxic substances in the offshore sediment of South Korea", *Sci. Total Environ.*, 789, 147996.
- [57] Kim, Y.S. and Kim, Y.S., 2004, "The effect of freshwater inflow on the spatio-temporal variation of water quality of Yeongil Bay", *Korea J. Environ. Biol.*, 22(1), 57-65.
- [58] KNU, 2016a, "Small-scale CO<sub>2</sub> injection-demonstration project in offshore Pohang Basin, Korea", Final Report 20132010-201760, Kongju National University, Gongju, Korea.
- [59] KNU, 2016b, "Demonstration-scale offshore CO<sub>2</sub> storage project in Pohang Basin, Korea", Annual Report 20162010-201980(1), Kongju National University, Gongju, Korea.
- [60] KNU, 2017a, "Demonstration-scale offshore CO<sub>2</sub> storage project

- in Pohang Basin, Korea”, Annual Report 20162010-201980(2), Kongju National University, Gongju, Korea.
- [61] KNU, 2017b, “Upgrading and improvement of injection well for small-scale CO<sub>2</sub> storage demonstration in Pohang Basin”, Plan 20172010202040, Kongju National University, Gongju, Korea. 51(3), 253-271.
- [62] Koh, Y., Shin, J. and Kim, T., 2008, “Forecasting export loaded container throughput of Pohang Yeongil New Port”, Journal of Distribution and Management Research, 11(4), 107-132.
- [63] Koh, C.H., Kang, S.G. and Lee, C.B., 1999, “Determination of the optimum sampling area for the benthic community study of the Songdo tidal flat and Yeongil Bay subtidal sediment”, J. Korean Soc. Oceanogr., 4(1), 63-70.
- [64] Koh, C.H., Khim, J.S., Kannan, K., Villeneuve, D.L., Senthilkumar, K. and Giesy, J.P., 2004, “Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), biphenyls (PCBs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and 2,3,7,8-TCDD equivalents (TEQs) in sediment from the Hyeongsan River, Korea”, Environ. Pollut., 132, 489-501.
- [65] Koh, C., Khim, J.S., Villeneuve, D.L., Kannan, K. and Giesy, J.P., 2006, “Characterization of trace organic contaminants in marine sediment from Yeongil Bay, Korea: 2. Dioxin-like and estrogenic activities”, Environ. Pollut., 142, 48-57.
- [66] Kwak, H., 1976, “General oceanographic factors in Yeongil Bay of Korea, late October 1973”, J. Oceanological Soc. Korea, 11(2), 89-95.
- [67] Kwak, H., 1977, “The concentration and distribution of iron in Yeongil Bay water of Korea, late October”, J. Oceanological Soc. Korea, 12(1), 48-53.
- [68] Kwak, H. and Lee, K., 1977, “Distribution of phytoplankton pigments in Yeongil Bay water of Korea, late October”, J. Oceanol. Soc. Korea, 12(2), 57-66.
- [69] Kwon, Y.K., Chang, C. and Shinn, Y., 2018, “Security and safety assessment of the small-scale offshore CO<sub>2</sub> storage demonstration project in the Pohang Basin”, J. Engineering Geology, 28(2), 217-246.
- [70] Kwon, Y.K., 2017, “Demonstration-scale offshore CO<sub>2</sub> storage project in Pohang Basin, Korea”, Kongju National University, Project Plan Report, 1-316.
- [71] Lee, H.B. and Oh, Y.S., 1986, “A summer algal vegetation in Yeongil Bay, eastern coast of Korea”, Korean J. Phycol., 1(1), 225-240.
- [72] Lee, T.W., 1999, “Seasonal variation in species composition of demersal fish in Yongil Bay, east coast of Korea”, J. Korean Fish. Soc., 32, 512-519.
- [73] Lee, I., 2003, “Seasonal variation estimation of inflow pollutant loads of Yeong-il Bay by using tank model”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineering, 6(3), 63-71.
- [74] Lee, J.B., Shin, Y.J., Lee, S.J., Lee, J.H., Choi, Y.M., Lee, D.W., Kim, S.W. and Yang, J.H., 2012, “Seasonal variations of fisheries resources composition in the coastal ecosystem of the Yeongil Bay, Korea”, J. Environ. Sci., 21(10), 1275-1285.
- [75] Lee, J., Han, M. and Yang, H., 1998, “The ecosystem of the southern coastal waters of the East Sea, Korea, 1. Phytoplankton community structure and primary productivity in September, 1994”, J. Korean Fish. Soc., 31(1), 45-55.
- [76] Lee, J. and Khim, J.S., 2022, “Revisited a sediment quality triad approach in the Korean coastal waters: Past research, current status, and future directions”, Environ. Pollut., 292, 118262.
- [77] Lee, J., Kim, C., Kim, J. and Lim, K., 1995, “Current structures and diffusion characteristics in Yeongil Bay”, J. Korean Soc. Oceano., 30(5), 467-479.
- [78] Lee, J., Lee, H. and Moon, H., 2019, “Contamination and spatial distribution of parabens, their metabolites and antimicrobials in sediment from Korean coastal waters”, Ecotoxicology and Environ. Safety, 180, 185-191.
- [79] Lee, M., Bae, W., Um, I. and Jung, H., 2004, “Characteristics of heavy metal distribution in sediments of Yeongil Bay, Korea”, J. Korean Soc. Environ. Engineers, 26(5), 543-551.
- [80] Lee, S.Y., Lee, J.W. and Lee, H., 1997, “Marine benthic algal flora of Yongil Bay and its adjacent areas, the eastern coast of Korea”, Algae, 12(4), 303-311.
- [81] Lee, T.W., 1999, “Seasonal variation in species composition of demersal fish in Yongil Bay, east coast of Korea”, J. Korean Fish. Soc., 32(4), 512-519.
- [82] Lim, H.C., Je, J.G., Choi, J.W. and Lee, J.H., 1991, “Distribution pattern of the macrozoobenthos at Yoja Bay in summer”, Ocean Res., 13, 31-46.
- [83] Moon, H., Kim, H., Shin, S., Lee, Y., Kwon, S. and Kwon, Y., 2018, “Design and construction study of an injection facility for CO<sub>2</sub> offshore storage”, J. Engineering Geology, 28(2), 207-215.
- [84] Na, J., Jeon, O. and Park, Y., 2006, “A study on the strategies to increase Young-il Man new container port’s international competitiveness”, J. Distribution and Management Res., 9(2), 29-57.
- [85] NIFS (National Institute of Fisheries and Science), 1989, “A research study of environmental contamination for the preservation of coastal fishing grounds of Korea”, Business Repeort, No.84, 1-347.
- [86] Noh, J.H. and Koh, S., 2004, “Mineralogical characteristics and genetic environment of zeolite bentonite in Yeongil area”, J. Miner. Soc. Korea, 17(2), 135-145.
- [87] Paik, E., 1997, “New record of *Cossura brunnea* (Polychaeta: Nereidae) in Korean coastal waters”, J. Korean Fish. Soc., 30(1), 148-151.
- [88] Park, B.K. and Song, M.Y., 1972, “Grain size analysis of bottom sediments of Yeongil Bay, Korea”, J. Oceanol. Soc. Korea, 7(2), 74-85.
- [89] Park, G.J. and Choi, C.G., 2009, “A study on the community structure of intertidal benthic marine algae in Yeongil Bay, eastern coast of Korea”, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 42(6), 664-673.

- [90] Park, H., Chung, J. and Oh, I.S., 1986, "Numerical experiments of the seiche in Young-il Bay and Pohang new harbor, Korea", *J. Ocenol. Soc. Korea*, 21(4), 245-258.
- [91] Park, J., Lee, S., Khim, J., Kim, J. and Lee, Y.I., 2018, "Probabilistic evaluation of multi-fluid-phase carbon dioxide storage capacities of saline formations in the Pohang Basin, Korea using three-dimensional geologic modeling and grid-based Monte Carlo simulation", *Intn. J. Greenhouse Gas Control*, 79, 289-312.
- [92] Park, M., Lee, C.S., Kim, B., Kim, J., Kim, K.J. and Shinn, Y.J., 2018, "Preliminary results of the pre-injection monitoring survey at an offshore CO<sub>2</sub> injection site in the Yeongil Bay", *J. Engineering Geology*, 28(2), 247-258.
- [93] Park, S., Li, X., Kim, B.Y., Oh, J., Min, D. and Kim, H., 2021, "Seismic imaging of ocean-bottom seismic data for finding a carbon capture and storage site: Two-dimensional reverse-time migration of ocean-bottom seismic data acquired in the Pohang Basin, South Korea", *Geophysics and Geophysical Exploration*, 24(3), 78-88.
- [94] Shim, J., Kwon, K., Jeong, H., Choi, Y. and Kim, S., 2013, "Spatial and temporal variability of phytoplankton in relation to environmental factors in Youngil Bay", *J. Environ. Sci. International*, 22(12), 1683-1690.
- [95] Shin, H., Choi, S. and Koh, C., 1992, "Seasonal and spatial variation of polychaetous community in Youngil Bay, southern Korea", *J. Oceanological Soc. Korea*, 27(1), 46-54.
- [96] Son, J.W., Park, Y.C. and Lee, H.J., 2003, "Characteristics of total organic carbon and chemical oxygen demand in the coastal waters of Korea", *J. Korean Soc. Oceanol.*, 8(3), 317-326.
- [97] Song, O., Lee, Y., Park, Y., Kang, J., Jung, M. and Jung, C., 2005, "A study on the traffic flow and navigational characteristics for the ship's routing of Po-hang port", *J. Korean Navigation and Port Res.*, 29(10), 821-826.
- [98] Song, S.J., Ryu, J., Khim, J.S., Kim, W. and Yun, S.G., 2010, "Seasonal variability of community structure and breeding activity in marien phytal harpacticoid copepods on *Ulva pertusa* from Pohang, east coast of Korea", *J. Sea Res.*, 63, 1-10.
- [99] Song, Y.K., Hong, S.H., Eo, S., Jang, M., Han, G.M., Isobe, A. and Shim, W.J., 2018, "Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters, *Environ. Sci., Technol.*, 52, 12188-12197.
- [100] Suh, H., Jo, S. and Kim, K.Y., 1995a, "Diel horizontal migration of the two mysids *Archaeomysis kokuboi* and *Acanthomysis* sp. in the sandy shore surf zone of Yongil Bay, eastern Korea", *J. Korean Soc. Oceanography*, 30(6), 523-528.
- [101] Suh, H., Kim, S., Go, Y., Nam, K.W., Yun, S.G., Yoon, Y., Jo, S. and Hong, J., 1995b, "<sup>210</sup>Po accumulation in the pelagic community of Yongil Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 28(2), 219-226.
- [102] Suh, H. and Yu, O., 1996, "Diel horizontal migration of planktonic copepods in the surf zone of Yongil Bay, Korea", *J. Korean Fish. Soc.*, 29(4), 527-536.
- [103] Suh, S.D. and Park, S.B., 1986, "Analysis of density current in the tidal river", *Agric. Res. Bull. Kyungpook Natl. Univ.*, 4, 70-76.
- [104] Um, I.K., Lim, D.I., Lee, M.K., Jeon, S.K. and Jung, H.S., 2003, "Spatial variability and contents of metals in the surficial sediments of Youngil Bay, east coast of Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 24(5), 477-490.
- [105] Won, K., Lee, D., Kim, S. and Choi, S., 2018, "Drilling and completion of CO<sub>2</sub> injection well in the offshore Pohang basin, Yeongil Bay", *J. Engineering Geology*, 28(2), 193-206.
- [106] Yang, K.R., 1969, "The determination of the sand drift movement using radioactive tracer at Young il Bay", *J. Oceanological Soc. Korea*, 4(1), 9-16.
- [107] Yang, S.S., 1985, "Secular variations of surface water temperature in Youngil Bay", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 21(1), 62-66.
- [108] Yoo, J.S., 2003, "Structural characteristics of benthic algal community in the subtidal zone of Yeongil inner and outer bay", *Algae*, 18(4), 365-369.
- [109] Yoo, S.K. and Park, K.Y., 1979, "Distribution of drifting larvae of scallop, *Patinopecten yessoensis*, in the Yeong-il Bay", *J. Oceanol. Soc. Korea*, 14(2), 54-60.
- [110] Yoo, S.K., Ryu, H. and Park, K., 1981, "The growth of the cultured scallop, *Patinopecten Yessoensis*", *Bull. Korean Fish. Soc.*, 14(4), 221-226.
- [111] Yoon, H., Lee, I. and Ryu, C., 2003, "Spatial and temporal variation characteristics between water quality and pollutant loads of Yeong-il Bay(I)-Seasonal variation of river discharge and inflowing pollutant loads-", *J. Ocean Engineering and Technology*, 17(4), 23-30.
- [112] Yoon, H., Lee, I. and Ryu, C., 2003, "Spatial and temporal variation characteristics between water quality and pollutant loads of Yeong-il Bay(II)-Mutual variation between inflowing pollutant loads and water quality-", *J. Ocean Engineering and Technology*, 17(5), 32-38.
- [113] Yoon, H., Lee, I. and Ryu, C., 2004, "Numerical prediction of tidal current due to the density and wind-driven current in Yeong-il Bay", *J. Ocean Engineering and Technology*, 18(5), 22-28.
- [114] Yoon, H. and Lee, I., 2005, "Development mechanism of circulation current and oceanographic characteristics in Yeongil Bay", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineering*, 8(3), 140-147.
- [115] Yun, S.H., Kim, J.S., Ock, S.S., Hong, H.G. and Kim, H.S., 1994, "Petrology of volcanic rocks in the Yeongil peninsula, southern Korea", *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 15(2), 126-138.

---

Received 13 October 2022

Revised 24 November 2022

Accepted 5 December 2022