

Research Paper

서남해 해상풍력 실증단지 해역의 해양 환경 특성

서진성* · 맹준호* · 임은표** · 진승주** · 김현민*** · 김태윤*
한국환경정책·평가연구원*, (주)세광종합기술단**, 에스케이엔디(주)

Marine Environmental Characteristics around the Test Phase of Offshore Wind Farm in the Southwestern Coast of Yellow Sea

Jinsung Seo* · Junho Maeng* · Eunpyo Lim** · Seungjoo Jin** ·
Hyunmin Kim*** · Taeyun Kim*

Korea Environment Institute*
Sekwang Engineering Consultants Co., LTD.**
SK D&D Co., LTD.***

요약: 서남해 해상풍력 실증단지 해역을 중심으로 구축된 모니터링 자료를 분석하여 해양물리, 해양수질, 해저퇴적물의 환경 특성을 파악하고 현황을 제시하였다. 파고와 부유사 농도, 유속과 부유사 농도의 상관관계를 분석하여 연구 해역 토사의 부유 특성을 고찰하였다. 춘계 시(1개월) 파고와 부유사 농도 사이에는 상관계수 0.61~0.69의 상관성을 보였으며, 1 m 이상의 높은 파고가 발생하면 75 mg/L 이상의 부유사 농도가 관측되었다. 수질평가지수 산정 시 필요한 항목을 중심으로 수질 현황을 분석하였으며 대부분의 정점에서 1등급(매우 좋음)을 보이고 있었다. 클로로필-a의 변동폭이 다른 항목에 비해 상대적으로 높게 나타나 수질평가지수에 영향을 주는 중요 인자로 파악되었다. 해저퇴적물 내 중금속 현황은 모든 항목의 평균값이 해양환경 주의기준 이하로 검출되었으며 강열감량과 입도분포는 높은 연관성을 보였다.

주요어: 해상풍력단지, 해양환경, 부유사, 수질환경지수, 퇴적물 환경 기준

Abstract: This study aims to present the characteristics of marine physics, water quality, and sediment quality around offshore wind farm near the Gochang and Buan sea areas through the analysis of monitoring data. The relationships between suspended solid and wave height as well as suspended solid and flow velocity were analyzed. We found that Correlation Coefficient values of 0.61~0.69 between wave height and suspended solid, and suspended solid concentration reaches 75 mg/L or higher when wave height of more than 1m occurred in the spring (1 month). The water quality index (WQI) was used to identify the status of the water quality in the study area. Most of the

Fist Author: Jinsung Seo, Tel: +82-44-415-7437, E-mail: jsseo@kei.re.kr, ORCID: 0000-0003-3873-1282

Corresponding Author: Taeyun Kim, Tel: +82-44-415-7415, E-mail: tykim@kei.re.kr, ORCID: 0000-0001-6575-8689

Co-Authors: Junho Maeng, Tel: +82-44-415-7653, E-mail: jhmaeng@kei.re.kr, ORCID: 0000-0001-8283-1385

Eunpyo Lim, Tel: +82-2-851-2005(4101), E-mail: eplim01@nate.com, ORCID: 0000-0002-5046-0211

Seungjoo Jin, Tel: +82-2-851-2005(2783), E-mail: hopy0502@naver.com, ORCID: 0000-0003-4551-6505

Hyunmin Kim, Tel: +82-2-6553-3423, E-mail: hmkim0107@sk.com, ORCID: 0000-0002-4034-3548

Received: 25 June, 2019. Revised: 3 September, 2019. Accepted: 25 September, 2019.

measured points were rated first grade (very good). The variation of chlorophyll-a was relatively high compared to the other criteria, indicating that it is a major factor affecting the quality index. In the sediment column, all heavy metals were detected below the Threshold Effects Level (TEL), and ignition loss and grain size show a positive correlation.

Keywords : Offshore wind farm, Marine environment, Suspended solid, Water Quality Index (WQI), Sediment Quality

I. 서론

우리나라는 ‘재생에너지 3020 이행계획’을 바탕으로 ‘제4차 신재생에너지 기본계획’을 수립하였으며 신규 재생에너지 발전설비의 95 % 이상을 태양광(63 %), 풍력(34 %) 중심의 청정에너지로 보급하는 것을 계획하고 있다. 아울러 생산 및 발전 실적과 설비용량의 월별 비중·증감률 및 기여도 역시 매년 증가하고 있는 추세이다(Ministry of Trade, Industry and Energy 2017). 해상풍력의 경우는 13 GW 보급을 목표로 하고 있어 향후 해상풍력발전 규모가 점차 확대될 전망이다(Lee et al, 2019). 해양으로 둘러싸인 우리나라는 해상풍력을 활용할 수 있는 잠재에너지가 풍부하며 다른 해양에너지(조류발전, 파력발전 등)보다 기술 개발이나 실증단지 운영 측면에서 앞서 있다(Ministry of Oceans and Fisheries 2014). 하지만 해상풍력발전단지의 입지선정을 위한 의사결정 지원 모델(Kim et al, 2015) 등의 연구는 수행된바 있으나 해상풍력발전단지의 건설에 따른 사회·환경분야의 연구는 많이 부족한 실정이다. 특히, 대규모 해상풍력발전단지가 해양환경에 미치는 영향에 대한 국내 데이터 및 사례가 전무하여 새로운 환경이슈에 대한 막연한 불신으로 사회수용성 문제가 해상풍력사업의 걸림돌로서 작용하고 있다.

해상풍력발전단지의 건설로 야기되는 환경적 이슈는 크게 공사 시 기초구조물의 항타로 인한 수중소음과 해저케이블 포설 작업 시 발생하는 부유사의 영향 그리고 운영 시 전력 공급에 따른 전자기장의 영향이 있다(DONG Energy 2006). 또한 해상풍력 발전장치의 상부구조물(나셀, 블레이드 및 타워)을 지지하는 하부 기초가 설치되는 지점이나 송전 케이블이 매설하는 지점은 인위적인 훼손이 발생한다. 공

사 시에 발생하는 부유물질이나 부유사는 간접적으로 주변 해역의 생물 및 여과섭식을 하는 생물에 영향을 미친다. 그러나 시공 기간이 단기에 마무리되고 나면 시설물이 들어서는 일부 공간을 제외하고는 특별히 해저 환경이 훼손된 사례는 많지 않다(Shin and Yook 2011). 국내에서는 아직 해상풍력발전단지의 공사 시와 운영 시 부유사 이동으로 야기된 환경영향에 대한 정량적인 연구 결과는 없지만 일반적으로 공사 시 발생하는 환경영향이 운영 시 발생하는 환경영향보다 큰 것으로 예상하기도 한다(Maeng et al, 2012).

기존 연구에서는 국외 모니터링 사례 조사를 통하여 해상풍력발전의 환경적 영향을 고찰하였으며 해양수질 및 해저면의 저질에 미치는 영향을 정리하였다(Maeng et al, 2013). 해상풍력으로 야기될 수 있는 해양환경영향에 대한 평가 사례를 살펴보면 영국의 경우, 파랑과 조류 및 해저퇴적물의 침전에 대한 직접적인 영향과 저서생물, 어획, 해안보호, 수질 등에 대한 간접적인 영향을 평가하고 있다. 퇴적 환경의 경우 해저퇴적물의 재부유, 이동경로, 패턴 등의 조사를 수행하고 있다(Department for Communities and Local Government 2006). 덴마크의 경우, 기존의 자료를 토대로 수리 모델링을 실시하여 해저면의 굴착에서 발생하는 부유사 농도 및 조류 변화가 수질 악화에 기여하는 바를 예측하고 있다. 부유사 농도는 10 mg/L 이상이 되면 어류에 영향을 미치는 것으로 판단하고 있으며, BOD와 DO를 측정하여 수질 악화 정도를 평가하도록 제안하고 있다(Danish Energy Authority 2006). 하지만 부유물질의 농도가 10 mg/L 이상 초과하더라도 조류(새)에 대한 위험은 적을 것으로 판단하고 있다(Danish Center for Environment and Energy et al, 2015). 네델란

드는 풍력발전기 아래 해저 케이블을 위한 굴착, 부식, 침전 등이 지질 및 지형에 미치는 영향과 건설 중 발생하는 해양환경에 대한 영향을 조사하고 있다(The Ministry of Infrastructure and Environment of the Netherlands 2014). 독일의 경우 수질, 토양 기후에 대한 종합적인 조사와 함께 부유사 샘플링 조사를 수행하고 건설 중 해저층이 받는 영향을 평가하였다(Federal Environment Agency 2010). 스코틀랜드의 환경평가서(Beatrice Offshore Wind Farm Ltd 2012)에서는 해상풍력 건설 시 케이블 설치 중 발생하는 부유토사의 영향으로 해양 포유류의 포식 능력에 영향을 줄 수 있는 먹이 서식지의 일시적인 손실 또는 먹이 종의 손실이 발생할 것으로 판단하고 있다. 국내에서는 해상풍력발전단지 건설로 야기되는 환경적 이슈를 파악하고 해양환경 관리 및 보전정책 수립의 기초 환경자료를 제공하고자 서남해 해상풍력발전단지를 대상으로 중장기 해양환경 모니터링을 수행하고 있다. 환경모니터링을 통하여 건설 전·중의 해양환경자료가 구축되고 있는 상황이며, 운영 중의 모니터링에 대한 논의도 진행 중에 있다.

본 연구에서는 서남해 해상풍력발전단지 해역을 중심으로 구축된 모니터링 자료를 활용하여 동 해역의 해양물리, 해양수질, 해저퇴적물 환경의 특성을 파악하고자 한다. 파랑, 유속, 부유사의 연속 시계열 자료를 토대로 물리적 외력의 현황을 이해하고 외력으로 인한 부유사의 침·퇴적 현상을 분석할 계획이다. 공간적 수질평가지수(WQI, Water Quality Index)을 토대로 해역의 수질 현황을 파악하고 민감도 분석을 실시하여 수질에 영향을 미치는 중요 인자를 고찰하고자 한다. 그리고 해저 저질에서 관측된 자료를 바탕으로 연구 해역의 퇴적물 환경을 분석하였다. 연구 결과는 대규모 해상구조물을 설치함으로써 발생하는 해양환경 변동특성을 파악하기 위한 기초자료로 사용될 수 있다. 아울러, 동 지역에 해상풍력발전단지가 확장될 경우에는 환경영향평가 및 사후환경영향조사계획 등에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구 해역의 선정 및 현황

해상구조물의 영향으로 야기된 해양환경의 변동특성을 파악하기 위하여 해상풍력발전단지가 건설 중인 전라북도 부안군 위도면 및 고창군 해역 일원을 연구 해역으로 정하였다(Figure 1). 부안군 위도 및 고창군 해역 일원에 위치한 서남해 해상풍력 실증단지는 장기간 동안 국내의 많은 중공업사, 건설사와 연구기관에서 개발한 해상풍력산업의 기술이 집약된 발전단지이기도 하다(Choi et al. 2018). 서남해 해상풍력 발전사업은 실증단지, 시범단지, 확산단지의 총 3단계의 계획으로 사업이 진행되고 있으며, 실증단지의 기초구조물 건설은 완료된 상태이다(2019년 기준). 서남해 해상풍력 실증단지는 부안군과 고창군의 관할 해역 경계에 위치하고 있으며 주변 해역에는 위도항, 격포항, 구시포항 등의 국가어항이 위치한다. 북동방향으로 줄포만이 위치하고 있으며 반경 10 km 이내에는 실증단지에 영향을 미칠만한 섬 또는 천퇴 등의 수심 변화가 존재하지는 않는다. 실증단지는 연안에서부터 약 10 km 떨어져 있으며 수심은 10 ~ 11 m이다. 전체 면적은 289,608 m²이며 총 20기의 블레이드가 약 800 m 간격으로 설치되었다. 일반적으로 해상공사에서 환경변화의 주요 발생요인으로 판단하고 있는 해저케이블 매설공사는 2018년부터 진행되었다. 연안에서부터 해상변전소가 위치한 해역까지 해상부의 전체 매설길이는 약 9.0 km이며 최대 매설깊이는 약 2.0 m 로 공사가 완료된 상황이다(해상부의 외부망 기준). 해상풍력발전단지의 기초 구조물의 시공은 자켓형식의 구조물을 해저면에 안착시킨 다음 암반표면까지 항타 및 암반 내부로 드릴링을 하여 구조물을 설치한 후 내부 공간에 콘크리트를 채우는 공법을 적용하였다. 해양조사(2015년 5월 및 8월, 2018년 4월 및 7월) 기간 동안의 해상풍력 발전기의 기초구조물 항타기록을 살펴보면 Suction 공법이 적용된 1기(7호기)를 제외한 19기에 대한 항타 시공이 2017년 6월부터 2018년 10월까지 진행되었으며 2017년 이전은 해상공사의 착공 전으로서 평상시 해양 상태이다(Korea Offshore Wind Power 2019).

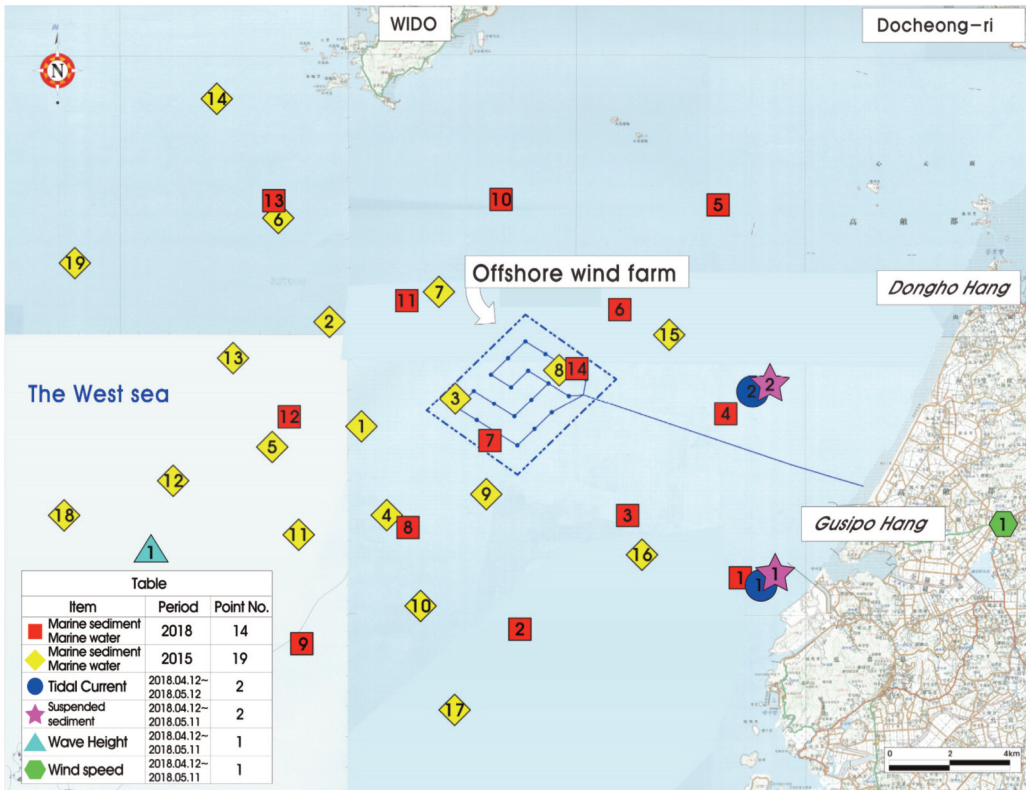


Figure 1. A Location map of observation point for wave, currents, sampling point.

III. 관측내용 및 방법

1. 해양물리조사

연구 해역의 층별 연속조류 특성을 파악하기 위하여 정점 PC-1, PC-2(Figure 1, Table 1)에서 층별 연속조류 관측 결과를 사용하였으며 조사 시기는 2018년 4월 12일부터 5월 12일까지이다. 각각의 정점에 설치한 FlowQuest-600 DCP와 SeaGuard-II

는 음파의 도플러 효과를 이용하여 수직 1 m 간격으로 층별 유속 및 유향을 측정할 수 있는 장비이다. 해저면을 기준으로 1.0 m 간격으로 매 10분 간격의 유향과 유속을 관측한 후 표층(H_{2/10}), 중층(H_{6/10}) 및 저층(H_{8/10})의 자료를 추출하였다.

층별 연속부유사는 연속조류 관측 지점의 인근해역에서 조사하였으며 수층별(표층(H_{2/10}), 중층(H_{6/10}) 및 저층(H_{8/10}))로 관측하였다(Figure 1, Table 1).

Table 1. Observation overview of tidal current and suspended sediment (SS)

Item	Period (2018)	Station	Location (WGS-84)	
			latitude	longitude
Tidal Current	2018.04.12 ~ 2018.05.12.	PC-1	35°25'35.2"	126°23'37.4"
		PC-2	35°29'17.0"	126°23'33.4"
Suspended Sediment	2018.04.12 ~ 2018.05.11.	SS-1	35°25'34.9"	126°23'43.1"
		SS-2	35°29'15.1"	126°23'33.5"
Wave Height	2018.04.12 ~ 2018.05.11.	-	35°26'08.9"	126°10'35.0"
Wind Speed		-	35°26'32.5"	126°29'18.0"

Table 2. Results of analysis on the correlation between turbidity and SS

Station	Layer	Correlation Coefficient
SS-1	Surface	0.77
	Middle	0.80
	Bottom	0.74
SS-2	Surface	0.71
	Middle	0.75
	Bottom	0.72

관측에 사용한 탁도계는 0~750 NTU의 관측 범위와 $\pm 2\%$ 의 정확도를 가지고 있다. 부유사 농도는 각 정점에서 10분 간격으로 탁도(turbidity)를 관측하고 탁도계의 탁도값을 실제의 부유사 농도로 환산하였다. 환산에 필요한 검·보정 자료를 얻기 위해 각 정점에서 니스킨 채수기를 이용하여 수층별로 1 L의 해수시료를 채수하였으며, 채수시료의 부유사 농도는 해양환경공정시험기준(Ministry of Oceans and Fisheries 2013)을 적용하여 도출하였다. 탁도 센서로 관측된 탁도값을 부유사 농도로 환산하기 위하여 직접 해수를 채수하여 측정된 부유사 농도와 탁도값의 상관관계식을 도출하고 산출한 상관관계식을 이용하여 탁도값을 부유사 농도로 환산하여 연속부유사 관측 자료를 산출하였다(Table 2).

2. 해양수질 및 해저퇴적물 조사

서남해 해상풍력발전단지 인근의 수질환경을 알아보기 위해 2015년도에는 19정점(ST-1~19), 2018년도에는 14정점(SW-1~14)에 대해 조사를 수행하였다(Figure 1). 각 정점별 표층과 저층의 2개 층에서 시료를 세척한 채수병에 채수하였으며 냉장 또는 냉동 상태에서 실험실로 운반하여 해양환경공정시험기준에 준하여 분석하였다(Table 3). 분석 자료의 정확도를 검증하기 위해 캐나다 NRC (National Research Council, Canada)의 표준인증물질(CRM)인 MOOS-3과 CASS-6를 사용하였으며 회수율은 95~106%의 범위를 보였다. 해저퇴적물 환경은 2018년도 14정점에 대한 조사 결과를 분석하였으며 해양수질 측정 정점과 동일한 지점에서 시료를 채취하였다(Figure 1). 해저퇴적물 시료는 드라이아이스로 냉동 보관한 다음, 실험실로 옮겨 분석 전까지 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하에서 동결 보관하였으며, 해양수질과 마찬가지로 해양환경공정시험기준에 준하여 분석하였다(Table 3). 중금속 분석 자료 정확도를 검증하기 위하여 캐나다 NRC의 해저퇴적물 표준 시료 MESS-4를 사용하였으며 회수율은 96~106%의 범위를 보였다.

Table 3. Analysis method of water quality and sediment quality item

Item	Analysis method and equipment
Temperature, Salinity, DO, pH	YSI-600QS
Secchi depth	Secchi disk
Suspended solids	Filter Equipment
Chlorophyll-a	UV-Vis Spectrophotometer
NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P	Quattro SFA Analyzer (Seal Analytical)
Trace minerals (Cr ⁶⁺ , Cu, Ni, Zn, Cd, Pb)	ICP-MS (Thermo, iCAP RQ)
As, Hg	Millennium Excalibur (PSA)
Water content	Weight method
Ignition loss	Weight method
Acid volatile sulfides (AVS)	Detectop Tube NO. 201H, GASTEC
Chemical oxygen demand (COD)	Potassium permanganate method
Heavy metals (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, Li)	ICP-MS (Thermo, iCAP RQ)
Hg	Atomic Absorption Spectrometer (AAS)
As	ICP-MS (Thermo, iCAP RQ)

IV. 해양물리 환경

서해안에 영향을 주는 주요 물리적인 외력은 조석에 의한 조력과 바람에 의한 파력으로 볼 수 있다. 그리고 밀도에 의한 압력경사력이 있으며 이는 해수와 담수가 만나는 하구에서 크게 발생한다. 조석에 의해 발생하는 조류는 주기성을 가지며, 4월 12일에서 5월 12일까지 두 개의 관측 지점(PC-1, PC-2)에서 연속 조사한 자료에 따르면 최대 유속은 각각 1.08 m/s, 1.17 m/s를 보였다. 층별 분포도를 보면 정점 PC-1에서 관측된 최대 유속은 표층, 중층, 저층에서 각각 1.02 m/s, 1.08 m/s, 0.98 m/s이고, 평균유속은 각각 0.36 m/s, 0.35 m/s, 0.36 m/s로 나타났다. 정점 PC-2에서의 최대 유속은 표층, 중층, 저층에서 각각 1.14 m/s, 1.17 m/s, 0.96 m/s이고, 평균유속은 각각 0.39 m/s, 0.37 m/s, 0.33 m/s를 보이고 있다. 조사 정점의 수심이 10 m 내외인 지점으로 층별 유속 변화는 크지 않았으며 PC-1 정점과 PC-2 정점과의 유속 크기도 유사하였다. 바람에 의해 발생하는 내습파랑의 파고를 살펴보기 위해 연구 해역 인근에 위치한 영광파고부이와 상하 기상관측소의 자료를 시계열로 나타내었다(Figure 2). 영광파고부이 지점에서 연구 해역까지는 지형적 장애물이 없으며 파의 에너지가 보전될 정도의 수심을 유지하고 있다(Korea Meteorological Administration 2019). 따라서 영광파고부이 자료를 활용하여도 연구 해역의 파랑 특성을 이해할 수 있을 것으로 판단된다. 관측 기간 동안의 유의파고는 최대 3.4 m, 최대파고 및 평균파고는 각각 4.5 m, 2.2 m, 파주기는 2.3~11.7 sec로 나타났다. 5월 2일 19:00 부터 5월 3일 1:00 까지 2 m 이상의 파고가 지속적으로 내습하였으며 동일한 시기 해발고도 10.8 m에 위치한 상하 기상관측소에서 9 m/s 이상의 풍속이 관측되었다. 아울러 최대 유의파고의 관측 시 태풍, 지진, 너울성 고파랑 등의 장주기 파랑이 발생될 수 있는 외력은 발생하지 않았다. 일반적으로 연안으로 내습하는 파랑의 파고는 풍속, 취송거리, 취송시간의 3가지 요인의 복합적인 작용으로 인해 결정된다. 너울성 파랑이 발달하기 위해서는 충분한 풍역과 취송거리가 필요하지만 서

해는 지형적 여건 상 이러한 조건이 충족되지 못하는 특성이 있다(Oh et al. 2015).

연속 관측된 부유사 농도 현황을 보면, 정점 SS-1에서 최대 부유사 농도는 표층, 중층, 저층에서 각각 147.8 mg/L, 191.7 mg/L, 251.2 mg/L이고, 평균 부유사 농도는 각각 28.7 mg/L, 31.4 mg/L, 39.1 mg/L로 조사되었다. 그리고 정점 SS-2에서 관측된 최대 부유사 농도는 표층, 중층, 저층에서 각각 142.2 mg/L, 193.7 mg/L, 219.0 mg/L이고, 평균 부유사 농도는 각각 28.6 mg/L, 33.5 mg/L, 35.3 mg/L로 조사되었다. 2개의 정점 모두 최대 및 평균 부유사 농도는 표층에서 저층으로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 대부분의 부유사 농도는 50 mg/L 이하를 나타내고 있으며 간헐적으로 부유사 농도가 크게 증가함을 보이고 있다. 부유사는 퇴적토의 입도, 외력, 전단응력 등에 따라 퇴적토의 부유 및 침전의 특성이 결정되며 수직적 혼합 및 수평적 이동을 한다. 그리고 파고에 의한 원운동 및 저층의 강한 유속이 퇴적토의 주요 외력으로 고려되고 있다. 따라서 유속 및 부유사, 파고 및 부유사에 대한 상관관계를 분석하여 연구 해역의 물리적 특성을 파악하였다(Table 4).

관측 기간 동안 유속과 부유사의 상관계수는 $-0.02 \sim 0.15$ 의 범위로 매우 약한 상관성을 보이고 있으며, 1 m/s 이하의 유속에서는 해저퇴적물의 부유에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(Figure 3). 하지만 유속이 클수록 부유된 물질이 멀리 이동할 수 있을 것으로 판단되며 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 파고와 부유사의 상관계수는 $0.61 \sim 0.69$ 의 범위로 뚜렷한 양의 상관성을 보였으며, 특히 75

Table 4. Results of analysis on the correlation between SS and wave height as well as SS and tidal current

Station (sediment)	Layer	Correlation coefficient	
		Tidal current	Wave Height
SS-1	Surface	0.11	0.67
	Middle	0.13	0.67
	Bottom	0.15	0.69
SS-2	Surface	-0.02	0.67
	Middle	0.04	0.63
	Bottom	0.01	0.61

mg/L 이상의 부유사 농도가 관측되었을 때 1 m 이상의 높은 파고를 보이고 있었다(Figure 4). 이를 통하여 관측 기간 동안 연구 해역의 고농도 부유사의 요인이 파랑에 의해 결정되는 것으로 추정할 수

있다. 그리고 1 m 이상의 높은 파고가 지속될수록 부유사의 농도도 지속적으로 높은 값을 유지하고 있었다(Figure 7).

연구 해역의 파고와 부유사 농도, 유속과 부유사

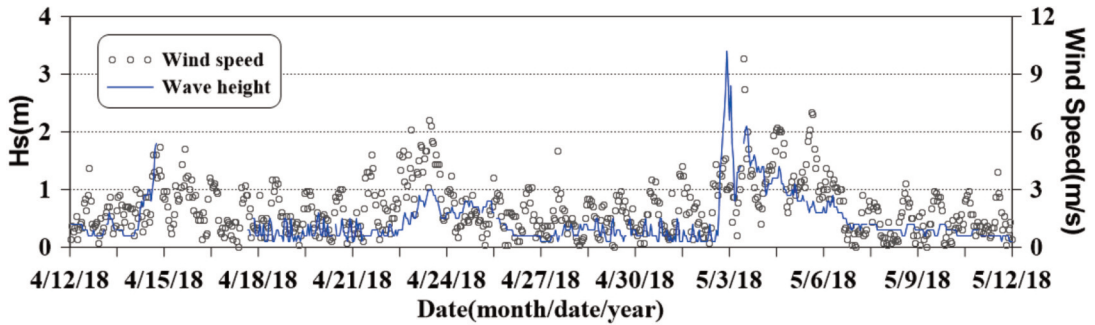


Figure 2. Time series of the wave height and wind speed.

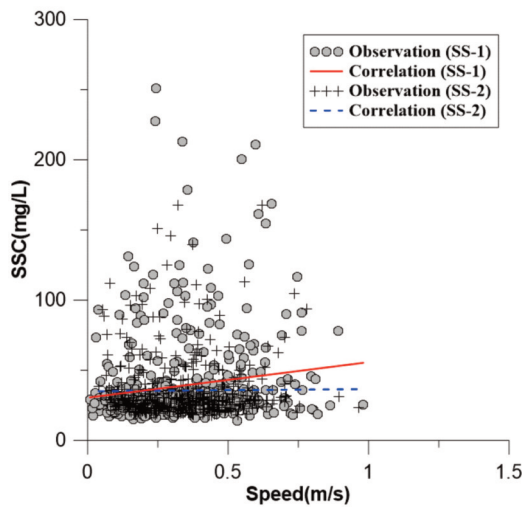


Figure 3. Correlation between tidal current and suspended sediment (Bottom).

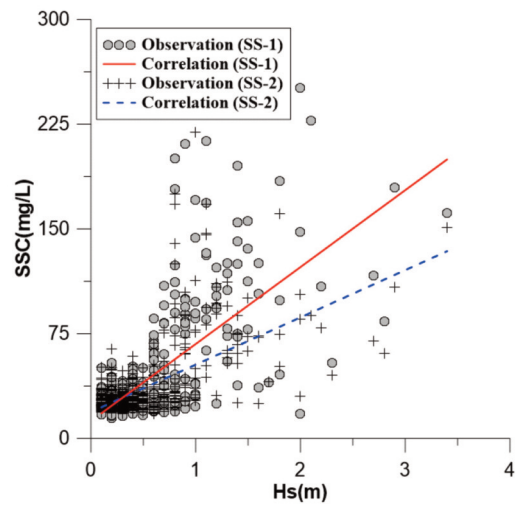


Figure 4. Correlation between wave height and suspended sediment (Bottom).

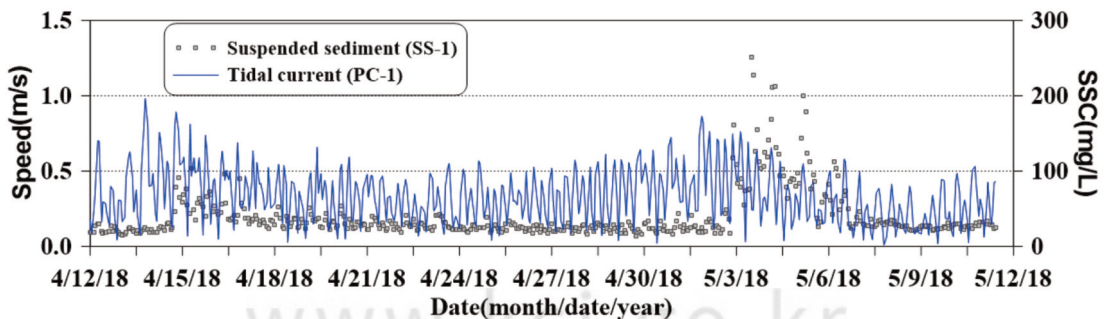


Figure 5. Time series of the tidal current and suspended sediment (SS-1, Bottom).

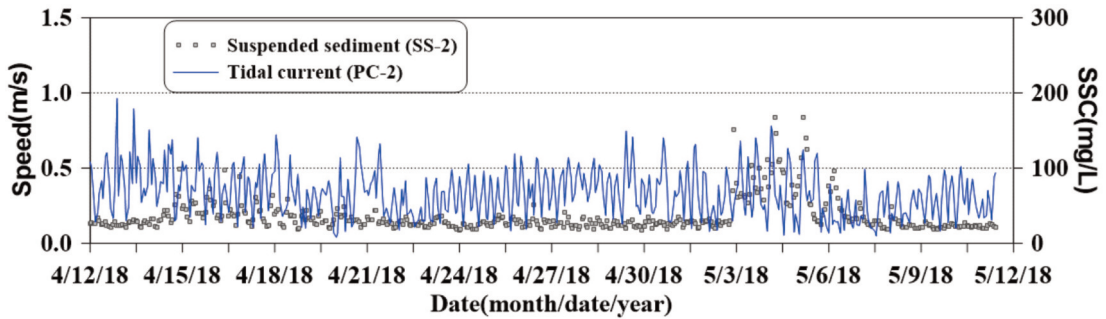


Figure 6. Time series of the tidal current and suspended sediment (SS-2, Bottom).

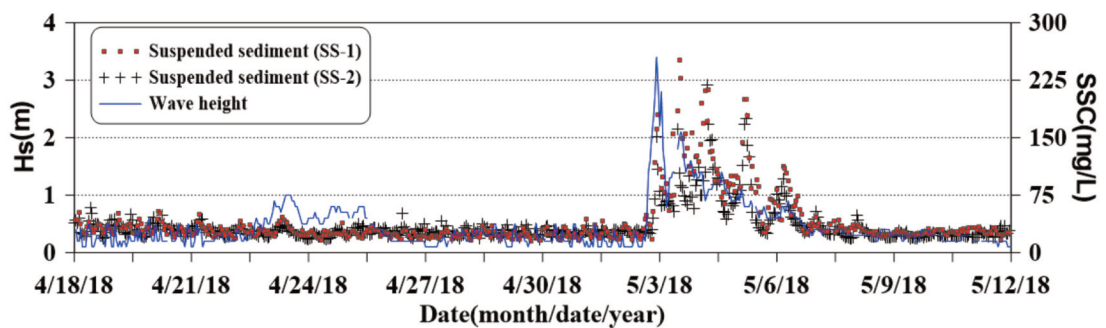


Figure 7. Time series of the wave height and suspended sediment (Bottom).

농도의 상관관계를 분석하여 연구 해역의 부유사 부유 특성을 고찰하였다. 관측 기간 동안 풍파의 영향으로 비교적 높은 파랑이 내습하였던 시기에 부유사의 농도가 급격히 증가하는 것을 확인하였으며 유속의 영향은 비교적 적은 것을 알 수 있었다.

우리나라 서해안에 도달하는 고파 발생 시에는 언제나 중국 내륙 지방에서 발생한 온대성 저기압이 급속하게 발달하여 서해상에 진출하는 기상현상이 수반되었으며 이로 인해 겨울철에 고파가 발생될 가능성이 큰 해역이다. 또한 서해안의 파랑 특성은 너울(swell)보다는 풍파(wind wave)의 성격이 지배적인 지역이다(Oh et al, 2015). 파랑의 경우 파고가 중요한 인자이기는 하지만 특정 해역의 부유사 거동과 파랑의 상관성을 검토하기 위해서는 주기와 파향에 대한 분석도 포함되어야 한다. 본 연구에서는 2018년 춘계 시(1 개월) 조사된 자료에 대해서만 분석을 수행하였다. 동일한 시기의 파향 정보를 확인할 수는 없었으며, 유속과 내습파랑의 파고만으로 부유사 농도의 상관성을 살펴보았다. 향후 해상풍력발전단지 건

설 시 파랑, 유속, 부유사 농도에 대한 중장기적인 모니터링이 필요하다.

V. 해양수질 환경

연구 해역의 수질평가지수는 23이하(1등급, 매우 좋음)에서 60 이상(V등급, 아주나쁨)으로 구분되며 항목별(저층 용존산소, 클로로필-a, 투명도, DIN, DIP) 점수를 식 (1)에 대입하여 산출하였다. 아울러 연구 해역은 서남해 생태구역의 범위 내에 있으며 서남해역 생태구역의 기준값은 Chl-a 3.7 µg/L, 저층 산소포화도 90 %, 투명도 0.5 m, DIN 230 µg/L과 DIP 25 µg/L에 해당한다(Ministry of Oceans and Fisheries 2018).

$$\begin{aligned}
 WQI &= 10 \times \text{저층용존산소포화도(DO\%)} \\
 &+ 6 \times \left[\frac{\text{식물성플랑크톤농도(Chl-a)} + \text{투명도(SD)}}{2} \right] \\
 &+ 4 \times \left[\frac{\text{용존규기질소농도(DIN)} + \text{용준무기인농도(DIP)}}{2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

연구 해역의 수질현황 분포를 통하여 시·공간적 특성을 파악하고자 정점별·계절별 수질자료를 분석하였다. 수질조사는 2015년에는 총 19정점에 대한 5월(춘계)과 8월(하계), 2018년도에는 총 14정점에 대한 4월(춘계)과 7월(하계)에 각각 수행하였다. 수질평가지수 산정 시 필요항목인 저층 용존산소(DO), 투명도, 클로로필-a, 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP)을 중심으로 분석을 실시하였다. 저층(해저바닥으로부터 최대 1 m 수층) 용존산소는 모든 시기 및 정점에서 저층보다 표층에서 상대적으로 높은 포화도를 보였으며 전체수층에서 수질평가지수의 기준값(90%)보다 상회하고 있었다. 저층의 용존산소 포화도는 2015년 5월, 8월에 각각 104~125%(평균 109%), 100~119%(평균 108%)의 범위를 보였으며, 2018년 4월, 7월 조사에서는 91~97%(평균 93%), 94~112%(평균 103%)의 값을 가지고 있었다. 투명도의 경우에도 저층 용존산소 포화도와 같이 모든 시기 및 정점에서 투명도 기준값(0.5 m)보다 상회하는 것으로 조사되었다. 투명도는 2015년 5월, 8월에는 각각 1.0~3.0 m(평균 2.3 m), 1.0~3.0 m(평균 2.5 m)의 범위를 보였으며, 2018년에는 4월, 7월 각각 0.8~2.5 m(평균 1.3 m), 1.1~3.1 m(평균 2.2 m)로 관측되었다. 조사결과에 따르면 2018년도의 저층 용존산소 포화도 및 투명도가 2015년도보다 낮은 양상을 보이고 있으나 조사 시기에 따라 차이가 발생할 수 있으므로 지속적인 관측이 필요한 것으로 판단된다.

클로로필-a는 조사 시기 및 정점별로 차이를 보이고 있다. 2015년 5월에 관측된 클로로필-a농도에 따르면 해안과 인접한 정점(ST-16, ST-17)에서 상대적으로 높은 값(4.13~4.77 $\mu\text{g/L}$, 평균 1.27 $\mu\text{g/L}$)을 보였다. 2015년 8월에는 정점(ST-16)에서 최대 3.24 $\mu\text{g/L}$ 가 관측되었으나 수질평가지수의 기준값(3.7 $\mu\text{g/L}$)보다 낮아 수질평가등급으로는 '매우 좋음' 등급을 유지하였다. 2018년도 4월에는 평균값(3.71 $\mu\text{g/L}$) 자체가 수질평가지수의 기준값을 초과하였다. 초과된 정점은 SW-3, 4, 5, 6, 9, 14이며 최대 7.74 $\mu\text{g/L}$ 까지 관측되었다. 2018년 7월에는 정점 SW-4에서만 기준값을 초과(4.44 $\mu\text{g/L}$) 하였으며

전반적으로 낮은 농도 분포를 보였다. 연구 해역의 클로로필-a의 농도 변화는 식물플랑크톤의 군집 및 군집의 계절적 천이와 연관된 것으로 판단된다.

국가 해양생태계 종합조사 결과를 살펴보면 서해 해역의 식물플랑크톤은 2015년 춘계 시 구조류 56%, 와편모류 43%, 기타 1%로 분포하였으며, 하계 시 구조류 58%, 와편모류 40%, 기타 2%의 분포로 조사되었다. 2019년도 자료는 아직 공개되지 않았으나 2017년도 조사에 의하면 춘계 시 구조류 72%, 와편모류 28%로 분포하였으며, 하계 시 구조류 65%, 와편모류 34%, 기타 2%의 식물플랑크톤 군집이 관측되었다(Ministry of Oceans and Fisheries 2015 & 2017). 서해 중심부에서는 4월에 구조류(Diatoms)에 의한 증식이 발생하고 8월에는 남조류(Cyanobacteria)의 농도가 높아지며 상대적으로 황금색 조류(Chrysophytes)가 10월에 많아진다. 이와 같이 군집별로 계절적인 변동을 보이고 있으며 물리적-화학적-생물학적인 종합적인 특성으로 기인하는 것으로 판단하고 있다(Liu et al. 2015). 서해 연안에서도 유사한 플랑크톤 군집 변화 양상을 보이고 있다. 천수만에서는 2월에 구조류 증식이 발생하며 여름철인 7~8월에 와편모류의 증식이 일어난다. 계절에 따라 변하는 일사량, 수온, 영양염 공급 등에 의하여 식물플랑크톤의 군집 조성이 변화하는 것으로 제시하고 있다(Lee et al. 2012).

용존무기질소(DIN)는 암모니아 질소, 아질산 질소, 질산 질소의 총합으로 시기별로 평균값의 차이가 많이 발생하였다. 2015년 5월에는 평균 0.108 mg/L이었으나 2015년 8월에는 평균 0.067 mg/L으로 감소하였으며, 2018년도에는 평균 0.021~0.025 mg/L로 2015년 5월과 비교하여 농도가 1/4로 줄어들었다. 따라서 DIN의 지속적인 변화 양상을 파악하기 위한 조사가 진행될 필요성이 있으며, 관측된 DIN값 자체가 수질평가지수의 기준값(0.23 mg/L)보다 크게 하회하여 수질평가에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보인다. 용존무기인(DIP)의 경우에는 2015년 춘계 시 표층 0.007~0.012 mg/L(평균 0.009 mg/L), 하계 시 0.005~0.020 mg/L(평균 0.011 mg/L)의 범위가 조사되었다. 2018년 춘계 조사에서는 0.001~0.008

Table 5. Maximum, minimum and mean values taken from the study area for analysis of water quality index*

Sampling time		Chl-a ($\mu\text{g/L}$)		DIN ($\mu\text{g/L}$)		DIP ($\mu\text{g/L}$)		Total	
		Result	Score	Result	Score	Result	Score	WQI	Grade of water quality
2015.5.6 (Spring)	Min.	0.45	1	83.11	1	7.00	1	20	I
	Max.	4.77	4	127.74	1	12.00	1	29	II
	Avg.	1.27	1	108.16	1	9.16	1	20	I
2015.8.28 (Summer)	Min.	0.67	1	44.13	1	4.71	1	20	I
	Max.	3.24	1	89.26	1	19.92	1	20	I
	Avg.	1.47	1	62.66	1	10.81	1	20	I
2018.4.26 (Spring)	Min.	0.84	1	7.00	1	1.00	1	20	I
	Max.	7.74	5	67.00	1	8.00	1	32	II
	Avg.	3.71	2	21.07	1	3.21	1	23	I
2018.7.18 (Summer)	Min.	1.52	1	9.00	1	1.00	1	20	I
	Max.	4.44	3	56.00	1	9.00	1	20	I
	Avg.	2.38	1	25.44	1	5.11	1	20	I

* : DO saturation at bottom and Secchi Depth were surveyed to be above the reference value at all times and vertices

mg/L(평균 0.003 mg/L), 2018년 하계 시 표층 0.001~0.009 mg/L(평균 0.005 mg/L)의 범위를 보였다. 용존무기인(DIN) 역시 수질평가지수의 기준값(0.025 mg/L)보다 낮은 수준으로 나타났으며 유의한 변화는 발생하지 않았다.

연구 해역에서 수질평가지수에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하기 위하여 항목별 최소, 최대, 평균값으로 구분하여 수질평가지수를 산정하였다(Table 5). 산정된 결과에 따르면 대부분의 시기 및 정점에서 I 등급(매우 좋음) 이상의 수질평가지수가 나타났다. 시공간적 분포 특성을 검토하였을 때 연구 해역의 중장기 및 단기간 동안의 해양환경변화는 발생하지 않

았으나 연안에서 클로로필-a의 변동폭이 다른 항목에 비해 상대적으로 높게 나타나 수질평가지수에 영향을 주는 것을 확인하였다. 클로로필-a의 경우에는 군집별로 계절적 특성이 있으며 그로 인하여 타 항목보다 계절적 변동폭이 큰 것으로 파악된다.

수질평가지수와 관련된 항목 이외에 6가크롬(Cr^{6+}), 구리(Cu), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 비소(As), 수은(Hg)의 시공간적 분포 특성을 보면 일부 정점을 제외하고 수층간의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다. 반면 비소(As)와 수은(Hg)은 2018년 조사에서 2015년 자료와 비교하였을 때 2배 이상 증가한 것으로 나타났으나 해양생태계 보호 기준 및

Table 6. Mean dissolved heavy metal concentrations in sea waters

Sampling time		Cr^{6+}	Cd	Cu	Pb	Zn	As	Hg
		$(\mu\text{g/L})$						(ng/L)
Base (short period)		200.00	19.00	3.00	7.60	34.00	9.40	1.80
2015.5.6 (Spring)	Surface	0.05	0.06	0.72	0.32	0.75	0.62	0.46
	Bottom	0.06	0.06	0.71	0.40	0.77	0.58	0.45
2015.8.28 (Summer)	Surface	0.06	0.06	0.70	0.07	0.66	0.39	0.39
	Bottom	0.06	0.04	0.75	0.12	0.67	0.40	0.36
2018.4.26 (Spring)	Surface	0.11	0.04	0.82	0.06	0.56	1.16	1.04
	Bottom	0.11	0.04	0.91	0.05	0.87	1.22	0.94
2018.7.18 (Summer)	Surface	0.09	0.03	0.49	0.04	0.66	1.24	1.05
	Bottom	0.08	0.03	0.61	0.08	0.70	1.29	0.99

생활환경 기준 이하로 조사되었다(Table 6). 따라서 비소(As)와 수은(Hg)에 대한 지속적인 관측이 이루어질 필요가 있다.

VI. 해저퇴적물 환경

해저퇴적물 환경에 대한 환경기준은 관리의 대상 및 적용 범위에 따라 다르게 설정될 수 있다. 우리나라는 해저퇴적물 기준을 저서생물 보호 및 오염 여부 판정을 위하여 중금속 중심의 관리기준을 설정하고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries 2018). 주요 중금속 항목은 비소(As), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 수은(Hg), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 등의 8개 항목이 있으며, 주의기준(Threshold Effects Level, TEL)과 관리기준(Probable Effects Level, PEL)으로 구분하여 설정하고 있다. 주의기준은 부정적인 생태 영향이 거의 없을 것으로 예측되는 농도이며 관리기준은 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도를 의미한다. As, Cd, Pb, Hg은 측정된 해저퇴적물 내 중금속 농도를 직접 얻을 수 있으나 Cu와 Zn은 입도보정이 필요한 중금속으로 보존성 원소인 리튬(Li)으로 표준화하여 산정하고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries 2013). 해저퇴적물 내의 중금속은 일반적으로 수계(aquatic system)에 유입된 중금속 원소가 수중에 용해되어 이온 상태로 존재하기보다는 대부분 고체상(solid phase)으로 변환되어 해저퇴적물이나 부유물에 흡착되어 있다. 이러한 해저퇴적물의 중금속은 오염물

질의 유입 형태 변화에 따른 정보 또는 수계 내에서 진행된 다양한 생지화학적 과정에 관한 정보를 기록하고 있기 때문에 유용하게 이용되고 있으며, 환경 내에서 지속성을 가지고 축적되므로 환경 변화를 이해하는데 매우 유용한 것으로 알려져 있다(Forstner 1981; Ministry of Oceans and Fisheries 2013).

해저퇴적물 내 중금속의 기준은 국가별로 상이하며 미국, 캐나다, 호주, 홍콩에서는 중금속 항목 이외에 PAHs, PCBs, DDTs, Dieldrin, Endrin에 대한 해저퇴적물 환경기준도 설정하고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries 2013). 특히 캐나다는 CHLs, PCDDs/DFs에 대한 기준도 설정하여 나라별 특성을 반영한 해저퇴적물 환경기준을 가지고 있다. 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 환경기준은 연안퇴적물 중 미량금속 자료를 바탕으로 지각물질의 주요 원소인 Al과 Fe를 제외한 총 9개의 원소에 대하여 해저퇴적물 내 미량금속에 의한 생물영향을 고려하고 있다(Buchman 2008; Ministry of Oceans and Fisheries 2013). 2018년 4월과 7월에 관측된 연구해역의 조사 자료에 따르면 계절별 중금속 농도의 변화가 거의 없으며 모든 항목의 평균값이 해양환경 주의기준 이하로 검출되었다. 반면 4월 조사 시 아연(Zn)의 경우 SW-12 정점에서 해양환경기준의 주의기준 이상이 검출(85.8 mg/kg)되어 향후 해당 항목에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다(Table 7).

해저퇴적물의 입도 조성은 2018년 4월과 7월 모두 모래와 실트가 우세한 실트질사(zS)와 사질실트(sZ)

Table 7. Heavy metal concentrations in the study area (sediment)

Sampling time		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	As	Hg
		(mg/kg)						
Base	TEL	0.75	116	20.6	44.0	68.4	14.5	110
	PEL	2.72	181	64.4	119	157	75.5	62
2018.4.26 (Spring)	Min.	0.05	40.8	4.7	12.9	35.4	2.7	4.9
	Max.	0.11	77.7	15.5	22.7	85.8	4.9	14.7
	Avg.	0.07	58.1	8.5	18.3	54.9	4.0	8.3
2018.7.18 (Summer)	Min.	0.04	40.3	5.3	12.6	35.2	2.5	5.1
	Max.	0.11	72.8	14.4	23.2	68.4	4.7	13.9
	Avg.	0.06	54.5	8.1	17.6	50.4	3.7	8.4

Table 8. Grain size parameters and ignition loss in the study area

Sampling time		Sediment composition			Textural parameters		Ignition loss (%)
		Sand	Silt	Clay	Mean diameter	Degree of sorting	
		(%)			(Φ)		
2018.4.26 (Spring)	Min.	10.20	25.80	1.70	3.73	0.93	1.83
	Max.	72.60	78.50	12.20	5.95	1.82	5.68
	Ave.	35.90	57.60	6.50	4.81	1.47	3.30
2018.7.18 (Summer)	Min.	18.30	32.30	3.40	4.07	1.26	2.90
	Max.	63.70	71.20	10.60	5.60	1.87	5.60
	Ave.	39.40	54.40	6.20	4.78	1.54	3.70

로 조사되었다. 모래의 함량은 정점 중 가장 외해에 위치한 SW-13에서 가장 높게 나타났으며 모든 정점에서 자갈은 나타나지 않았다. 2018년 4월 조사 시 평균 입도는 3.96~5.43 Φ (0.023~0.064 mm)의 범위였으며 7월 조사 시 평균 입도는 4.07~5.60 Φ (0.021~0.060 mm)의 범위로 나타났다. 강열감량은 전반적으로 입도가 세립 할수록 강열감량이 증가하는 경향을 보였다. 2018년 4월 조사에서 1.8~5.7 % (평균 3.3 %) 범위로 조사되었으며, 2018년 7월 조사에서 2.9~5.6 % (평균 3.7 %) 범위로 조사되었다 (Table 8). 강열감량(Ignition loss)은 해저퇴적물 내 유기물 오염도를 나타내는 지표성분이며, 입도와 관련성은 국내·외 여러 연구를 통해 알려진 형상이다. 본 연구에서 조사된 강열감량과 실트와 점토의 함량

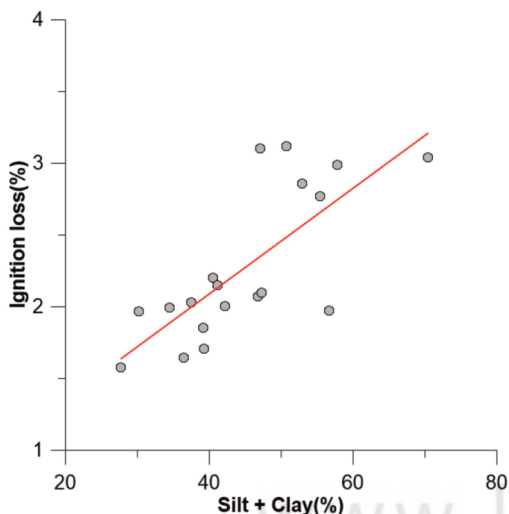


Figure 8. Correlation between Ignition loss and Grain size.

의 상관관계를 분석한 결과, 0.74의 상관계수가 산출되어 높은 상관성이 나타났으며 연구 해역의 해저퇴적물은 유기물 함량이 입도에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다(Figure 9).

VII. 결론 및 시사점

서남해 해상풍력발전단지 해역을 중심으로 구축된 모니터링 자료를 분석하여 해양물리, 해양수질, 해저퇴적물 환경의 특성을 파악하고 현황을 제시하였다. 해양물리는 파랑, 유속, 부유사의 연속 시계열 자료를 토대로 외력조건으로 기인한 부유사의 침·퇴적 현상을 분석하였다. 해양수질에서는 공간적 수질평가지수(WQI)를 기반으로 해역의 수질 현황을 파악하고 민감도 분석을 실시하여 수질에 영향을 미치는 중요 인자를 고찰하였다. 해저퇴적물 환경은 연구 해역에서 채취한 해저퇴적물 조사를 통하여 중금속 함유량을 파악하고 국내·외 환경기준 자료와 비교하였다.

해양물리 환경은 춘계 시 파고와 부유사 농도, 유속과 부유사 농도의 상관관계를 분석하여 연구 해역 토사의 부유 특성을 고찰하였다. 춘계 기간(1 개월)에 유속과 부유사의 상관계수는 $-0.02 \sim 0.15$ 의 범위로 매우 약한 상관성을 보이고 있으며, 1 m/s 이하의 유속에서 해저퇴적물이 부유하지 않는 것으로 나타났다. 파고와 부유사는 상관계수는 0.61~0.69의 범위로 뚜렷한 양의 상관성을 보였으며, 특히 75 mg/L 이상의 부유사 농도가 관측되었을 때 1 m 이상의 높을 파고가 출현하였다. 이를 통하여 고농도의 부유사의 발생이 파랑과 연관되어 있는 것으로 추정할 수

있었다. 하지만 본 연구에서는 2018년도 봄철 조사 자료에 대한 분석만이 수행되었으며 추가적인 조사와 분석이 필요하다.

해양수질 환경은 수질평가지수 산정에 필요한 항목을 중심으로 분석을 하였으며 해양에 함유된 미량 금속의 농도를 제시하였다. 연구 해역의 저층 용존산소 포화도(DO), 투명도, 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP)은 모든 정점에서 1등급에 해당되었다. 반면 클로로필-a는 조사 시기 및 정점별 차이가 뚜렷이 나타났으며 이는 군집별로 계절적 특성이 있기 때문인 것으로 파악된다. 따라서 클로로필-a의 변동폭이 다른 항목에 비해 상대적으로 높게 나타나 수질평가지수에 영향을 주는 것을 확인하였다. 아울러 암모니아 질소, 아질산 질소, 질산 질소의 총합으로 산정되는 용존무기질소(DIN)은 시기별로 평균값의 차이가 많이 발생하였으나 DIN값 자체가 수질평가지수의 기준값(0.23 mg/L)보다 크게 하회하여 수질평가에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이외 6가크롬(Cr⁶⁺), 구리(Cu), 니켈(Ni), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 납(Pb), 비소(As), 수은(Hg)은 일부 정점을 제외하고 수층간의 뚜렷한 차이는 없었다.

해저퇴적물 내 중금속 현황은 모든 항목의 평균값이 해양환경 주의기준 이하로 검출되었다. 그리고 해저퇴적물의 강열감량은 전반적으로 입도가 세립에 가까울수록 강열감량이 증가하는 경향을 보였다. 강열감량과 실트와 점토의 함량의 상관관계를 분석한 결과, 0.74의 상관계수가 산출되어 높은 상관성이 나타났다. 이를 토대로 본 연구 해역의 해저퇴적물은 유기물 함량이 입도에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

본 연구의 대상 해역은 2020년부터 실증 단지의 운영이 예상되며 향후 대규모 발전단지(확산 및 시범단지) 건설이 계획되어 있다. 따라서 동 연구에서 제시된 연구 결과는 해상풍력단지 운영으로 인하여 야기될 수 있는 해양 환경 이슈사항을 검증하는 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20163010024660).

References

- Beatrice Offshore Wind Farm Ltd (BOWL). 2012. Beatrice Offshore Wind Farm Environment Statement.
- Buchman MF. 2008. NOAA screening quick reference tables. NOAA OR&R Report 08-1. Seattle WA, Office of response and restoration division. National Oceanic and Atmospheric Administration. 34.
- Choi JY, Kim DJ, Kim HI, Choi YH. 2018. Offshore Wind Turbine Technology R&D and Construction of Southwest Offshore Demonstration. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 66(1): 22-29. [Korean Literature]
- Federal Environment Agency (Umweltbundesamt). 2010. Concept development for an environmental impact assessment for offshore wind parks in the Baltic States.
- Danish Center for Environment and Energy (DCE), Aarhus University, Danish Hydraulic Institute (DHI), NIRAS. 2015. Kriegers Flak Offshore Wind Farm - Birds and Bats EIA - Technical Report.
- Danish Energy Authority. 2006. Offshore Wind Farms and the Environment - Danish Experience from Horns Rev and Nysted.
- Department for Communities and Local Government. 2006. Environment Impact Assessment: A Guide to good Practice and Procedures.
- Dong Energy, Vattenfall, Danish Energy Authority and Danish Forest And Nature Agency. 2006.

- Danish offshore wind, Key environmental issues.
- Kim TY, Kim CK, Maeng JH, Jang SJ. 2015. A Study on Strategic Environmental Assessment Guideline for Site Selection of Offshore Wind Farm Project. Korea Environment institute. [Korean Literature]
- Korea Offshore Wind Power (KOWP). 2019. The report of Marine Environmental Survey in the Southwest Offshore Wind Farm Proof Phase. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration. 2019. <https://data.kma.go.kr/tmeta/stn/selectStnList.do>(Searching: 2019. 6. 20.)
- Lee JP, Kim CH, Choi NYH, Park SW. 2019. A Study on the Utilization of Port and Backyard Complex for the Construction of Offshore Wind Power Cluster. Korea Maritime Institute. [Korean Literature]
- Lee JK, Park C, Lee DB, Lee SW. 2012. Variations in Plankton Assemblage in a Semi-Closed Chunsu Bay, Korea. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 17(2):95-111. [Korean Literature]
- Liu X, Huang BQ, Huang Q, Wang L, Ni XB, Tang QS, Sun S, Wei H, Liu SM, Li CL, Sun J. 2015b. Seasonal phytoplankton response to physical processes in the southern Yellow Sea. *Journal of Sea Research*, 95: 45-55.
- Ministry of Oceans and Fisheries. 2018. Marine Environment Management Act. [Korean Literature]
- Ministry of Trade, Industry and Energy. 2017. Renewable Energy 3020 Implementation Plan (“RE3020”). [Korean Literature]
- Ministry of Oceans and Fisheries. 2017. National Comprehensive Investigation into Marine Ecosystems. [Korean Literature]
- Ministry of Oceans and Fisheries. 2015 National Comprehensive Investigation into Marine Ecosystems. [Korean Literature]
- Ministry of Oceans and Fisheries, Korea Institute of Ocean Science & Technology. 2014. State of the Seas of Republic of Korea. [Korean Literature]
- Ministry of Oceans and Fisheries. 2013. A Study on setting the Environmental Standards and its Improvement. [Korean Literature]
- Maeng JH, Cho BJ, Lim OJ, Seo J. 2013. A Study on the Environmental Impact of Offshore Wind Farms Through Monitoring Case in Overseas Country. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*. 16(4): 276-289. [Korean Literature]
- Maeng JH, Sun HS, Joo YJ, Cho BJ, Lim OJ, Seo J. 2012. A Study on the Environmental Impact Assessment of Offshore Wind Farm Projects II. Korea Environment institute. [Korean Literature]
- Oh SH, Jeong WM, Kim SI. 2015. Analysis of the Observation Data for Winter-Season High Waves Occurred in the West Sea of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 27(3): 168-174. [Korean Literature]
- Shin CO, Yook KH. 2011. Environmental and Economic Impacts of Offshore Wind Power. Korea Maritime Institute. [Korean Literature]
- The Ministry of Infrastructure and Environment of the Netherlands. 2014. White Paper on Offshore Wind Energy.
- U Forstner. 1981. Metal concentrations in river, lake and ocean water. U Forstner, G.T.W Wittmann (Eds.), *Metal Pollution in the Aquatic Environment* (2nd ed.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 71-109.