

Note

서해 해상풍력단지 조성 예정해역의 대형저서동물 군집 생체량에 대한 생태학적 평가

정수영^{1,2} · 이채린¹ · 김성현¹ · 김성태¹ · 명정구³ · 오승용³ · 박진우³ · 진승주⁴ · 유재원^{1*}

¹(주)한국연안환경생태연구소
(14449) 경기도 부천시 오정구 석천로 397
²인하대학교 자연과학대학 생명과학과
(22212) 인천광역시 미추홀구 인하로 100
³한국해양과학기술원 해양생물자원연구단
(49111) 부산광역시 영도구 해양로 385
⁴광운대학교 공과대학 환경공학과
(01897) 서울특별시 노원구 광운로 20

Ecological Evaluation on the Biomass of Macrobenthic Communities Observed from a Planned Offshore Wind Farm Area, West Coast of Korea

Su-Young Jeong^{1,2}, Chae-Lin Lee¹, Seong-Hyun Gim¹, Sungtae Kim¹, Jung-Goo Myoung³, Sung-Yong Oh³, Jin Woo Park³, Sung-Joo Jin⁴, and Jae-Won Yoo^{1*}

¹*Korea Institute of Coastal Ecology, Inc.
Bucheon 14449, Korea*

²*Department of Biological Sciences, College of Natural Sciences, Inha University
Incheon 22212, Korea*

³*Marine Bio-Resources Research Unit, Korea Institute of Ocean Science & Technology
Busan 49111, Korea*

⁴*Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Kwangwoon University
Seoul 01897, Korea*

Abstract : We analyzed the preliminary survey data (2014–2016) of macrobenthic community biomass ($n = 112$) from the wind farm area located in the southern part of the west coast of Korea and compared this data with data from the entire west coast ($n = 369$; 2006–2008). Modal classes from frequency distributions were 6 times higher in the latter (5 vs. 32 g/m^2). The mean and median values of the latter were 1.3 and 1.7 times higher (mean, 20.7 vs. 27.8 g/m^2 ; median, 17.1 vs. 29.5 g/m^2), and the maximum value was 3.4 times higher. Mood's median test showed significant difference at p -value = 0.01. We estimated the biomass-to-depth relationships from each data set by using Akaike Information Criterion and regarded the non-overlap of the 95% confidence intervals as indicating significant difference. The biomass was different from a 10 m depth below, and 3 times higher in the west coast at around 20 m compared with the maximum depth of the wind farm area. A local event of catastrophic sedimentation ranging from 1 to 2 m was observed in the wind farm during winter surveys. This could be a probable source of the lower biomass, but information on biomass seasonality and a natural experimental approach seem to be needed for the conduct of further

*Corresponding author. E-mail : jwyoo@coastkorea.com

studies. This study is meaningful in that it provided the background to assess future changes by understanding the lower level of benthic productivity in the area. We expect this study will contribute to the preparation of measures that can remove or mitigate the source of the lower biomass and improve the productivity of fishery resources in the area.

Key words : macrobenthos, biomass, offshore wind, sediment burial, natural disturbance

1. 서론

생태계 서비스는 자연이 인간에게 베푸는 혜택을 의미한다. 전 세계적으로 그리고 전통적으로 해양은 식량공급이나 탄소저장, 수질정화 기능, 레크리에이션 활동을 위한 장소 제공 등을 포함하는 다양한 생태계 서비스를 직·간접적으로 인간들에게 제공하여 왔다. 그럼에도 불구하고 무분별한 남획이나 개발, 육상으로부터의 각종 오염물질 유입 등으로 해양생태계에 변화가 발생하고 해양이 인간에게 제공하는 혜택과 수용력은 점차 줄어들게 되었다. 오늘날 생계는 물론 웰빙 그리고 심지어는 기후 변화의 조절 등을 통해 인간의 삶을 지탱하는 데에 중요한 역할을 수행하는 해양 생태계는 지속 가능한 이용과 관리가 필요한 대상으로 인식되고 있다(Halpern et al. 2012; Lange and Jiddawi 2009).

최근 국내에서 이슈가 되고 있는 해양 생태계 서비스 가운데 하나가 해상풍력에너지이며 이는 기존의 어업활동(어업, 양식 등), 항만, 군사활동, 해양보호구역 등의 기존 이용양상과 상호 간에 제약조건으로 작용한다. 공간이용의 중복이나 확장은 조정과 협력적인 대안의 제시를 요구한다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 국외에서 활발하게 이용되고 있는 생태계 기반의 연안-해양 공간계획(ecosystem-based coastal and marine spatial planning, MSP)이나 국내에서 제안된 해상풍력 단지 해수공간의 융복합적 활용(동일한 공간 내 전력 생산뿐만 아니라 수산물 생산성 향상) 등이 가능하다. 위의 두 가지 방안은 현재보다 더 나은 미래의 개선 상태에 대한 예측과 타당한 근거를 필요로 하며 이를 위해서는 해역의 생태계 현황에 대한 배경 지식과 정확한 이해가 확보되어야 한다.

대형저서동물의 군집 생체량은 밀도와 함께 저서생태계의 생산성을 가늠하는 중요한 매개변수이다(Weisberg et al. 1997). 특히 생체량에는 상수(생산량/생체량 전환율, P/B ratio)를 곱하여 생산량을 추정하기도 하므로 생산성과 보다 밀접한 관계를 갖는다. 게다가 밀도의 경우에는 변동성이 매우 높아 교란이 심한 경우를 제외하면 대부분의 경우 해석이 어렵다. 반면 군집 생체량은 교란이 심한 상태부터 안정적인 상태에 이르기까지 단조적이며 예측 가능한 변동성을 갖는 것으로 알려져 있다(Odum 1969). 높은 생체량이 관찰되는 것은 큰 몸체의 생물이

오랜 기간동안 수명을 유지해야 가능한 것이기 때문이다(Robertson 1979).

국외의 경우 대형저서동물 군집의 생체량은 이미 지구적 스케일에서의 분포 패턴에 대한 연구가 이루어졌다. 조간대를 대상으로는 암반, 퇴적물 기질 등과 같은 유형의 서식처 간 현저한 차이가 있는 것으로 밝혀졌으며(Ricciardi and Bourget 1999), Brey and Gerdes (1997)의 경우, 남극의 대형저서동물 군집 생체량이 극지방을 제외한 나머지 해역의 것에 비해 높다는 가설을 검증한 바 있다. 법적으로 해양생태계를 모니터링하는 우리나라의 경우에도 서해부터 남해 그리고 제주의 공간적 범위에서 이상치의 범주에 해당할 정도로 낮은 수준의 생체량이 관찰되는 특징적 해역이 존재하며, 해상풍력 단지 주변 해역 역시 이러한 범주에 해당하는 것으로 국토해양부 (2012)에서 언급되었다. 그러나 현재까지 해당 관찰기록에 대한 보고는 물론 다른 연구진의 조사연구를 통해 이와 유사한 수준의 특징적 분포 현상이 국내 학계에 보고된 바 역시 전무하다.

본 연구는 조사해역의 대형저서동물 군집 생체량이 다른 해역의 것과 비교하여 차이가 존재하는 지에 대한 질문에 답하는 것을 목적으로 설정하였다. 현재까지는 대형저서동물 군집 생체량의 해역 간 차이를 규명하는 데에 있어서 타당성이 확보된 방법은 없다. 이를 위해 본 연구는 (1) 조사해역(풍력단지 주변) 생체량 자료로부터 추정된 기술 통계량(descriptive statistics)을 이 해역이 포함된 서해 전 연안의 것과 비교하여 차이 유무를 확인하고 (2) 조사 시기에 따른 변화가 상대적으로 적은 요인이자 풍력단지의 특징적 차이를 대변하는 물리적 조건 가운데 하나인 수심을 기준으로 생체량과의 관계를 살펴보고 해역 간 비교 가능한 범위를 탐색하여 생체량의 차이를 검토하였다.

2. 재료 및 방법

자료 수집

본 연구는 해상풍력단지에서 수행된 2개 프로젝트의 조사결과를 활용하였다. 먼저 해상풍력단지 환경영향조사 프로젝트는 위도 남단에 배치된 19개 정점을 대상으로 구조물 설치 이전인 2014년 11월, 2015년 1월과 5월 그리고

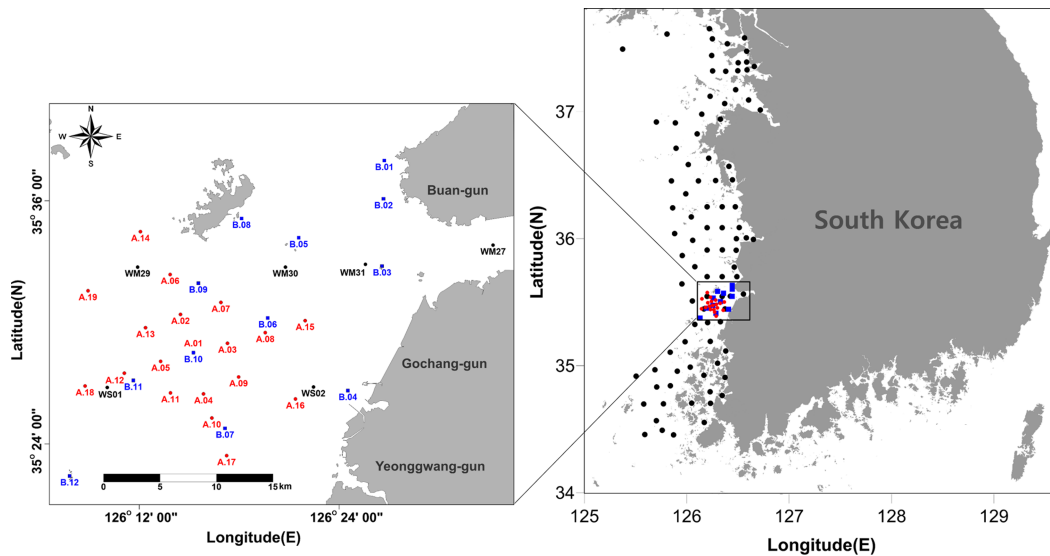


Fig. 1. Index map showing the location of sampling stations of the national investigation of marine ecosystem (2006–2008, black circle), the wind farm impact assessment (2014–2015; blue square) and the marine environmental survey for industrial convergence facilities (2015–2016; red circle)

7월에 조사하였다(Fig. 1). 정점별로 van Veen 채니기 (0.1 m²)를 사용하여 2회 채집하였다. 현장에서 그물눈 크기 1 mm인 체를 이용하여 저서생물을 분리하고 농도 10%의 중성 포르말린으로 고정한 후 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 동물군별로 선별한 후 종별로 생체량을 측정하고 단위 면적당 (1 m²) 값으로 환산하였다.

산업융합설비 관련 해양환경조사 프로젝트는 역시 구조물 설치 이전이라 할 수 있는 2015년 12월, 2016년 1월과 3월에 조사하였으며 총 12개 정점(위도남단과 고창, 부안군 주변)에서 실시되었다(Fig. 1). 채집기는 같으나 정점당 채집 면적은 0.3 m²이었고, 같은 방법으로 선상에서 생물을 분리, 운반한 후 종별 생체량 측정하고 단위 면적당 값으로 환산하였다. 해상풍력단지 환경영향조사 자료와 융합설비 해양환경조사 자료는 병합하여 활용하였으며 이하 풍력단지(wind farm)로 명명하였다. 이상과 같은 조사를 통해 풍력단지에서 2014년부터 2016년까지 획득된 대형저서동물 군집 표본은 총 112개였다.

조사해역의 생체량과 비교하기 위한 문헌 자료로는 2006년 서해 북부(백령도-아산만), 2007년 서해 중부(아산만-곰소만) 그리고 2008년 서해 남부(영광-진도)의 범위에서 계절별로 조사된 해양생태계 기본조사 프로그램(해양수산부, 국토해양부 해양생태계 법정 조사 프로그램)의 대형저서동물 군집 조사자료를 활용하였다(국토해양부 2007, 2009; 해양수산부 2006). 자료의 개수는 정점별 0.3 m² 채집 면적을 갖는 표본 총 369개였다. 이 자료는 이하 서해연안(West Coast)으로 명명하였다.

분석 방법

분석 이전에 먼저 자료의 비대칭성(왜도)을 고려하여 정점별 단위면적당 생체량(습중량, g/m²) 측정 자료를 대수변환(log₁₀(biomass + 1))하였다. 서해 전 연안과 풍력단지 대형저서동물 군집 생체량의 분포 특성을 이해하기 위하여 각 해역 별 생체량 자료를 대상으로 Anderson-Darling 정규성 검정을 실시하고 표본 백분율 빈도분포의 차이를 관찰하였다. 귀무가설은 ‘자료가 정규성 분포를 따른다’였다. 각 해역별 자료로부터 평균, 중위수, 사분위수 등과 같은 기술적인 통계량을 추정하였으며, 해역 간 생체량 중위수 차이의 유의성을 검정하기 위하여 두 자료의 분포의 형태가 유사한 지의 여부에 상관없이 적용할 수 있는 비모수 검정 방법인 Mood의 중위수 검정을 실시하였다. 귀무가설은 ‘모집단의 중위수가 모두 같다’로 하였다.

대수변환된 생체량 자료와 수심 간 선형/비선형 관계를 탐색하기 위하여 단순회귀 모형부터 2차함수, 지수함수, Gaussian 그리고 Gompertz model에 이르는 다양한 비선형 모형을 해역별 생체량 자료에 적합시킨 후 모형 선택 기준(model selection criterion)에 따라 가장 적절한 모형을 선정하였다. 일반적으로 추정할 모수의 개수 또는 차수가 증가하면 모형의 복잡성이 증가하고 추정의 효율성이 떨어지는 것으로 알려져 있다(최 1992). 본 연구에서는 간결한 모형(추정할 모수의 개수가 적은 모형)을 식별하는데에 활용되는 Akaike (1973)의 정보 판별 기준(Akaike Information Criterion, AIC)을 선택 기준으로 하였다. AIC는 낮을수록 손실되는 정보의 양이 적은 적합한 모형으로

간주한다. 본 연구에서는 다수의 모형 간에 AIC가 유사한 수준인 경우 모수의 개수가 작은 저차 모형을 택하였으며, 모수의 개수가 동일하면 비선형보다 덜 복잡한 선형을 택하고 선택된 모형의 유의성과 결정계수를 추정하였다. 최종적으로 적합선의 95% 신뢰구간이 겹치지 않는 것을 해석별 생체량 간 유의한 차이로 간주하였고, 적합선 간의 차이를 근거로 동일 수심 조건의 생체량 수준의 차이를 비교, 진단하였다.

3. 결 과

해역 간 생체량 빈도분포의 차이

풍력단지 대형저서동물군집 생체량의 백분율 빈도분포를 서해연안의 것과 비교한 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 정규분포를 보인 서해연안의 것(Anderson-Darling 정규성 검정, $p = 0.305$)과 달리, 풍력단지의 대수변환 생체량의 빈도분포는 정규분포와 거리가 먼 것으로 나타났고($p < 0.005$), 양봉형으로 볼 수 있는 패턴이 관찰되었다. 풍력단지의 생체량 최빈계급구간은 0.8이었고 서해연안의 것은 1.5였으며, 따라서 최빈계급구간(modal class)은 서해연안의 것에 비해 낮은 범위에 위치한 것으로 확인할 수 있었다. 이 값을 원래의 스케일로 환원하면 풍력단지의 최빈계급구간은 약 5 g, 서해연안의 것은 약 32 g/m^2 인 것으로 나타나 6배 이상의 차이가 존재하는 것으로 볼 수 있었다.

해역 간 기술통계량의 차이

생체량의 분포특성(로그정규분포)을 고려하여 대수변

Table 1. Comparisons of descriptive statistics of macrobenthos community biomass (g/m^2) between the west coast and wind farm areas. Statistics were estimated based on log-transformed data and then converted to normal scale

Description	West Coast	Wind Farm
N	369	112
Mean (untransformed)	91.9	79.7
Mean	27.8	20.7
SE Mean	0.08	0.17
StDev	3.74	4.30
Minimum	0.08	0.13
Q1	9.10	4.86
Median	29.5	17.1
Q3	76.09	69.37
Maximum	2,234.63	664.89
Mood's median test	p-value=0.010	

환자료로부터 추정한 기술통계량을 산술평균으로 전환하여 Table 1에 제시하였다. 먼저, 자료변환 전 서해연안과 풍력단지 생체량의 산술평균은 각각 91.9와 79.7 g/m^2 로 약 1.2배의 차이를 보였다. Table 1의 대수변환 자료로부터 추정된 값을 normal scale로 환원시킨 평균과 중위수는 27.8 vs. 20.7 g/m^2 , 29.5 vs. 17.1 g/m^2 로 각각 1.3, 1.7배 차이를 보였다. 표준편차와 최소값의 서해연안과 풍력단지 간 차이는 크지 않으나 3사분위수는 1.1배, 1사분위수와 최대치의 비율은 각각 1.9부터 3.4의 범위를 나타내었다.

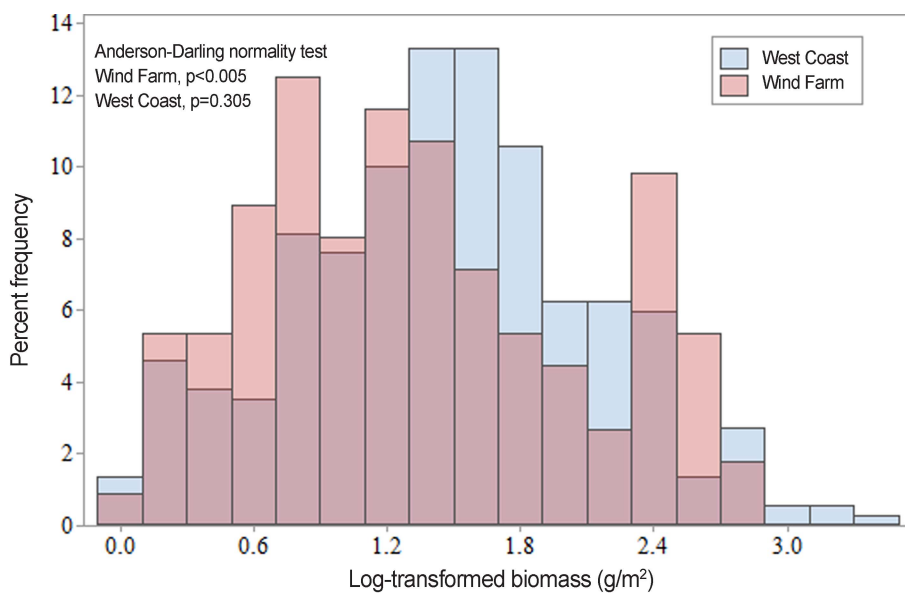


Fig. 2. Frequency distributions of the macrobenthic community biomass (log-transformed, g/m^2) in the west coast and wind farm areas

서해연안과 달리, 풍력단지 생체량이 나타낸 비정규성 ($p < 0.005$)을 고려할 때 분포특성의 비교에는 평균보다 중위수나 최빈수 또는 사분위수와 같은 통계량을 활용하는 것이 타당하다. 서해연안과 풍력단지 간 중위수의 차이는 $p = 0.01$ 수준에서 유의한 것으로 나타났으며, 이와 함께 최빈수나 사분위수의 차이를 고려하면 풍력단지의 저서동물군집 생체량(즉, 생산성)은 서해연안의 것에 비해 전반적으로 낮은 수준인 것으로 볼 수 있었다.

해역 간 수심-생체량 관계

Table 2에 선형/비선형 모형 선택 과정에서 추정된 AIC 값을 제시하였다. 서해연안 자료의 경우 선형 모형이 가장 낮은 AIC 값을 보였다. 풍력단지의 경우 비선형 모형인 Michaelis 함수와 선형 모형이 낮은 AIC 값을 나타내었으나, 비슷한 값을 보이는 두 모형 가운데에서는 비선형보다는 선형 모형이 적절한 것으로 선택하였다.

모형의 적합 결과는 모형식과 함께 Fig. 3에 제시하였다. 서해연안의 경우 수심과 생체량 간 모형은 p -value = 0.02 수준에서 유의한 것으로 추정되었다. 생체량은 수심이 증가함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 풍력단지 조성 예정 해역의 경우, 선택된 모형의 p -value = 0.064($p < 0.1$)로 경계 수준의 값을 나타내었으며, 본 연

구에서는 유의한 것으로 판단하였다. 모형이 나타낸 경향은 수심이 감소함에 따라 상대적으로 급격하게 감소하는

Table 2. Linear and nonlinear models fitted to macrobenthic community biomass from the west coast and wind farm areas. AIC (Akaike's Information Criterion) was used to identify most parsimonious model

Function type	Equation	Akaike's Information Criterion	
		West Coast	Wind Farm
Linear	$y = ax + b$	169.55	60.483
Quadratic	$y = ax^2 + bx + c$	171.40	62.306
Power	$y = ax^b + c$	172.34	62.229
Exponential	$y = ae^{bx} + c$	171.58	62.225
Von Bertalanffy	$y = a(1 - be^{-cx})$	171.41	62.598
Michaelis	$y = \frac{ax}{b+x}$	171.45	60.244
Logistic	$y = \frac{a}{1 + be^{cx}}$	171.41	62.496
Gompertz	$y = ae^{be^{cx}}$	171.41	62.516

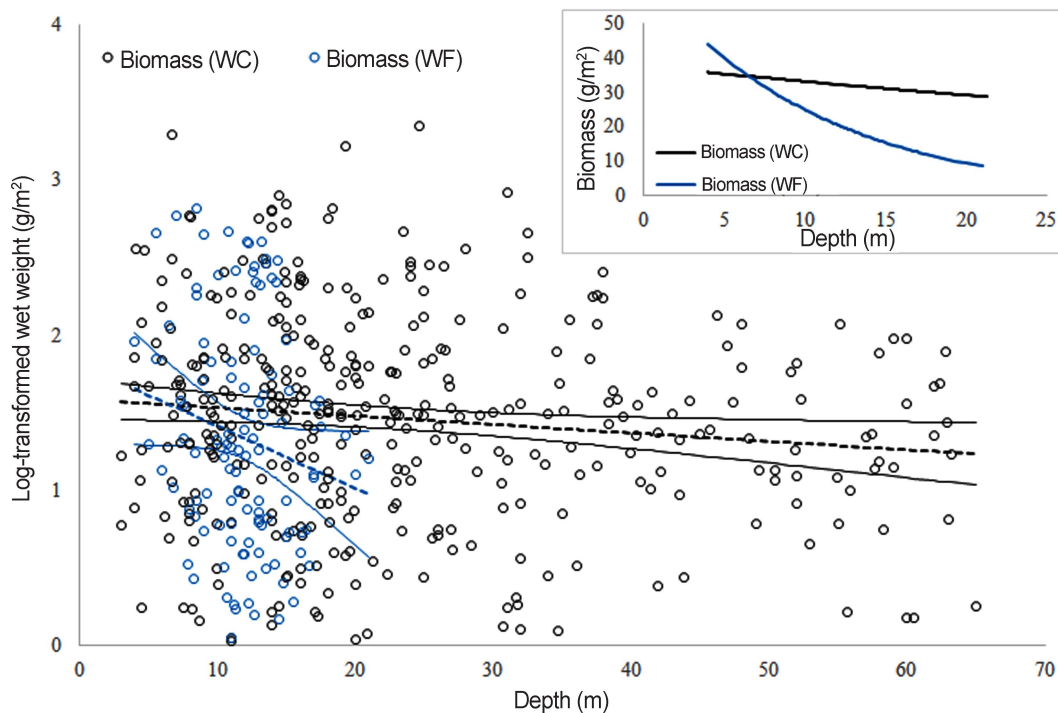


Fig. 3. Depth and log-transformed macrobenthic community biomass (wet weight) relationship in the west coast of Korea (WC, black circle) and wind farm (WF, blue circle). Superimposed are the fitted lines (dotted) and the 95% confidence intervals (solid). West coast, Biomass = 1.587 - 0.005437 Depth, $R^2 = 0.015$, p -value = 0.02; Wind farm, Biomass = 1.812 - 0.03991 Depth, $R^2 = 0.031$, p -value = 0.064

것으로 볼 수 있었다. 각 해역별 적합선의 95% 신뢰구간은 10 m 이내에서는 겹치나 10 m 이하에서는 구분되는 것으로 나타나 해역간 생체량에 차이가 있는 것으로 볼 수 있었다.

동일한 수심 조건 하에서 생체량의 차이를 알아보기 위하여 선형 모형이 나타난 경향을 20 m 이내의 범위 내에서 Fig. 3의 우측 상단과 같이 나타내고 비교하였다. 그 결과 풍력단지 내 얕은 수심의 해역 일부를 제외한 나머지 대부분의 해역에서 서해연안의 것과 뚜렷한 차이가 있으며, 앞서 전체 수심 자료를 비교한 Table 1의 것과 달리, 수심 20 m 주변에서는 3배 가까운 생체량 수준 차이가 존재하는 것으로 추정할 수 있었다.

4. 고 찰

현재까지 국내에서 관찰된 빈약한 생물상에 대한 보고는 주로 계절적으로 관찰되는 현상이었으며, 대형저서동물 군집의 생물 다양성에 대한 보고로는 인천 연안의 갯벌과 조하대 대상의 연구 결과가 있다(Hong and Yoo 1996; Yoo and Hong 1996; Yoo et al. 2016). 갯벌의 경우 여름에 현저하게 빈약한 생물상이 해마다 반복적으로 관찰되는 것은 이 시기에 집중되는 강우에 기인하는 것으로 추정되었으며, 조하대의 경우에도 강우가 집중되는 풍수기에 강을 통해 바다로 유입되는 토사에 의한 매몰이 저서생물 군집에서 나타나는 뚜렷한 계절 변화의 원인인 것으로 추정되었다.

이와 같이 단기간 집중적으로 발생한 강우로 인해 연안역에서 발생하는 퇴적 현상을 “oceanic floods”로 칭하는데(Wheatcroft 2000), 이 같은 현상이 전형적으로 발생하는 뉴질랜드 기수지역에서는 간헐적으로 5-10 cm 두께의 퇴적층이 관찰되며 대형저서동물 군집에 즉각적인 부정적 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Thrush et al. 2003). 2014년 11월과 2015년 2월 풍력단지의 해저면에서는 1-2 m 변동폭에 달하는 대규모 매몰 현상이 관찰되었는데 이것의 원인은 같은 시기에 발생한 4 m 이상의 크기에 달하는 유의파고로 추정되고 있다(한국해상풍력 2015). 추후의 분석에서 대형저서동물 군집 생체량의 계절성 여부, 특히 위의 인천 연안 사례와 상반되는 계절성의 존재가 관찰된 현상의 원인 규명에 중요한 단서가 될 것이다. 생태학 연구에서 현황 조사의 역할은 가설 제안이며, 가설 검증은 실험을 필요로 한다. 위와 같은 스케일의 가설 검정을 위해서는 (Diamond 1983)가 제시한 것과 같은 의미의, 자연실험(natural experiment) 유형의 접근 방식에 의한 검정이 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 대형저서동물 군집 생체량은 연안역에서 교란 이외에도 다양한 원인에 따라 변동하는 것으로 알려져

있다. 물리적으로는 평균입도나 연안의 경사, 수온 그리고 파랑 등과 연관성이 높은 것으로 알려져 있으며(Ricciardi and Bourget 1999), 생물학적으로는 용승이 발생하는 해역의 높은 기초생산력과 같은 요인과의 관계가 있는 것으로 보고되었다(Conlan et al. 2013). 북극을 제외한 북반구부터 남극까지, 수심 0에서 약 6,200 m 수심 범위 내의 전 지구적인 규모의 비교에서는 대형저서동물 군집 생체량은 수심 증가에 따라 감소하는 관계를 갖는 것으로 알려져 있으며(Brey and Gerdes 1997), 생체량을 예측 변수로 활용한 2차 생산량 예측 모형(예를 들어 Tumbiolo and Downing 1994)에서도 이 같은 관계가 추정된 바 있다.

물론 위와 같은 연구들에 비하면 본 연구 지역인 서해의 수심 범위(< 70 m)는 매우 좁은 편이라고 할 수 있다. 그러나 (1) 국내의 연구에서도 수심이 생체량을 조절하는 주요한 변수 중 하나에 해당하는 것으로 보고된 바 있고(국토해양부 2012), (2) 각 해역 별로 추정된 모형 역시 유의한 것으로 추정되었으며, (3) 앞서 약 400여개의 표본을 활용한 Brey and Gerdes (1997)의 것에 비해, 본 연구가 좁은 공간에서 보다 많은 수(약 500여개)의 표본을 활용하여 편의 가능성이 상대적으로 낮을 수 있다는 점 등을 감안하면 다양한 연구에서 추정된 수심-생체량 관계는 서해 연안에 적용 가능하며, 본 연구에서 추정된 관계 역시 타당한 것으로 볼 수 있다.

풍력단지과 서해 전 연안 간 대형저서동물군집 생체량의 빈도분포와 중위수의 차이 그리고 각 해역별로 추정된 모형 적합선의 95% 신뢰구간이 수심 10 m 이하부터 겹치지 않는 것으로부터 본 연구진은 풍력단지의 생체량이 낮은 수준에 해당하는 것으로 판단하였다. 풍력단지 해역은 본 연구에서 활용한 서해 전 연안 자료의 획득을 위한 조사에서도 특이하게 낮은 수준의 생체량과 건강도를 보인 해역인 것으로 나타났으며 그 원인에 대해서는 불분명하나 교란의 영향 하에 놓인 서식처인 것으로 보고서에 기술된 바 있다(국토해양부 2012). 비록 원인을 찾을 수는 없었으나 이곳의 생체량이 낮은 수준을 나타낸 것은 오랜 기간에 걸쳐 지속적으로 관찰된 현상인 것으로 간주할 수 있다.

전통적으로, 특이한 수준이거나 대비되는 군집 패러미터/개체군 등의 분포 패턴, 자연교란 사건(natural disturbance events)에 노출된 서식처 또는 현저한 생물학적 상호작용 등에 대한 관찰 결과를 설명하기 위해 만들어진 모델은 생태학의 발전을 도모하는 계기를 마련해왔다(Paine 1966, 1980; Pearson and Rosenberg 1978; Stephenson and Stephenson 1949; Thistle 1981). 국토해양부 (2012)는 우리나라 서, 남해 및 제주 연안에서 채집된 약 1,100개의 표본 가운데 7%에 해당하는 73개의 표본이 특이적으로 낮은 값을 보였다. 그 가운데 절반가량이

제주-이어도 해역에서 관찰된 반면, 본 조사 해역은 백령도, 흑산도 해역 등과 함께 나머지의 일부에 해당하였으므로 주어진 자료의 범위 내에서는 1-2%의 관찰빈도에 그치는 희귀한 현상이라 할 수 있다. 풍력단지 해역 내에서는 광범위하고 현저하게 발생하는 현상이긴 하나 우리나라 연안에서 극히 일부에 해당하는 풍력단지 해역이 나타내는 생체량의 유의한 특성을 식별한 것의 의미는 적지 않다. 자연적 변동성의 이해와 변동성을 비중있게 설명하는 요인을 찾는 데에는 특징적 현상의 인식과 유발 요인의 파악이 중요하므로 이러한 관점에서 풍력단지는 앞으로도 매우 중요한 연구대상이 될 것이다.

앞서 서론에서 언급한 바와 같이, 풍력단지의 연구자료는 효율적, 균형적인 해양공간의 활용에 기여하기 위한 목적으로 실시된 조사로부터 획득된 것이다. 본 연구진이 이 자료에 대한 분석을 통해 확인한 것은 이 해역의 저서생태계 생산량이 결코 높은 수준이 아니라는 것이었다. 이는 풍력단지 조성 이전의 배경 정보에 해당하는 것으로 개발 이후 조사결과와의 비교를 통해 생태계 변화를 논하는 데 있어 매우 중요한 근거로 활용될 수 있다. 또한, 장기적 관점에서, 본 연구 결과는 해역 공간의 수산물 생산성 향상을 기하고자 하는 우리나라 해상풍력 사업의 융복합적 활용 방향성을 고려, (1) 낮은 생산 수준의 이해, (2) 이를 유발하는 자연적/인위적 요인의 추정 그리고 (3) 원인의 제거(예를 들어 파랑이 원인일 경우 소파제 도입 제한)를 통한 생산성의 제고 등과 같은 일련의 프로세스의 마련과 실천에 있어 중요한 단초가 될 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 세광종합기술단의 “해양환경 및 생태 기초 조사 용역” 중 해양생태계(어류 및 수산자원 제외) 조사 그리고 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20163010024660, KIOST project no. PN67850)입니다. 연구에 도움을 주신 여러 관계자 및 익명의 심사위원 분들께 감사드립니다.

참고문헌

- 국토해양부 (2007) 해양생태계 기본조사: 35.5° 곰소만 입구-37° 아산만. 국토해양부, 861 p
- 국토해양부 (2009) 해양생태계 기본조사: 서해 남부(35.5°N 영광-34.5°N 진도). 국토해양부, 692 p
- 국토해양부 (2012) 해양생태계 기본조사: 제주도-이어도해역 (이어도 125.1°E-우도 129.2°E). 국토해양부, 919 p
- 최병선 (1992) 단변량시계열분석. 세경사, 서울, 736 p
- 한국해양풍력 (2015) 서남해해상풍력 개발사업 해양환경 및 생태기초조사보고서. 한국해양풍력, 서울, 723 p
- 해양수산부 (2006) 해양생태계 기본조사: 37° 아산만-38° 최북단. 해양수산부, 687 p
- Akaike H (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Petrov BN, Csáki F (eds) Proceedings of 2nd international symposium on information theory. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp 267-281
- Brey T, Gerdes D (1997) Is antarctic benthic biomass really higher than elsewhere? *Antarct Sci* **9**(3):266-267
- Conlan K, Hendrycks E, Aitken A, Williams B, Blasco S, Crawford E (2013) Macrofaunal biomass distribution on the Canadian beaufort shelf. *J Marine Syst* **127**:76-87
- Diamond JM (1983) Ecology: Laboratory, field and natural experiments. *Nature* **304**(5927):586-587
- Halpern BS, Longo C, Hardy D, McLeod KL, Samhouri JF, Katona SK, Kleisner K, Lester SE, O'Leary J, Ranelletti M, Rosenberg AA, Scarborough C, Selig ER, Best BD, Brumbaugh DR, Chapin FS, Crowder LB, Daly KL, Doney SC, Elfes C, Fogarty MJ, Gaines SD, Jacobsen KI, Karrer LB, Leslie HM, Neeley E, Pauly D, Polasky S, Ris B, St Martin K, Stone GS, Sumaila UR, Zeller D (2012) An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature* **488**(7413):615-622
- Hong JS, Yoo JW (1996) Salinity and sediment types as sources of variability in the distribution of the benthic macrofauna in Han Estuary and Kyonggi Bay, Korea. *Ocean Sci J* **31**(4):217-231
- Lange GM, Jiddawi N (2009) Economic value of marine ecosystem services in Zanzibar: Implications for marine conservation and sustainable development. *Ocean Coast Manage* **52**(10):521-532
- Odum EP (1969) The strategy of ecosystem development. *Science* **164**(1969):262-270
- Paine RT (1966) Food web complexity and species diversity. *Am Nat* **100**(910):65-75
- Paine RT (1980) Food webs: linkage, interaction strength and community infrastructure. *J Anim Ecol* **49**:667-685
- Pearson TH, Rosenberg R (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr Mar Biol* **16**:229-311
- Ricciardi A, Bourget E (1999) Global patterns of macro-invertebrate biomass in marine intertidal communities. *Mar Ecol-Prog Ser* **185**:21-35
- Robertson AI (1979) The relationship between annual production: Biomass ratios and lifespans for marine macrobenthos. *Oecologia* **38**(2):193-202
- Stephenson TA, Stephenson A (1949) The universal features

- of zonation between tide-marks on rocky coasts. *J Ecol* **37**(2):289–305
- Thistle D (1981) Natural physical disturbances and communities of marine soft bottoms. *Mar Ecol-Prog Ser* **6**(2):223–228
- Thrush SF, Hewitt JE, Norkko A, Cummings VJ, Funnell GA (2003) Macrobenthic recovery processes following catastrophic sedimentation on estuarine sandflats. *Ecol Appl* **13**(5):1433–1455
- Tumbiolo ML, Downing JA (1994) An empirical model for the prediction of secondary production in marine benthic invertebrate populations. *Mar Ecol-Prog Ser* **114**(1/2):165–174
- Weisberg SB, Ranasinghe JA, Dauer DM, Schaffner LC, Diaz RJ, Frithsen JB (1997) An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for Chesapeake Bay. *Estuaries* **20**(1):149–158
- Wheatcroft RA (2000) Oceanic flood sedimentation: a new perspective. *Con Shelf Res* **20**(16):2059–2066
- Yoo JW, Hong JS (1996) Community structures of the benthic macrofaunal assemblages in Kyonggi Bay and Han Estuary, Korea. *Ocean Sci J* **31**:7–17
- Yoo JW, Lee HJ, Hong JS (2016) Long-term variations in macrobenthic community diversity (species number) in the Chokchon macrotidal flat, Incheon, Korea. *Ocean Sci J* **51**(3):435–445
- 국문참고자료의 영문표기
English translation / Romanization of references originally written in Korean
- MLTM (2007) National investigation of marine ecosystem: 35.5° Gomso Bay Mouth–37° Asan Bay. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 861 p
- MLTM (2009) National investigation of marine ecosystem: Southern part of the West Sea (35.5°N Yeonggwang–34.5°N Jindo). Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 692 p
- MLTM (2012) National investigation of marine ecosystem: Jeju-Ieodo (Ieodo 125.1°E–Woodo 129.2°E). Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 919 p
- Choi BS (1992) Univariate time series analysis. Sekyungsa, Seoul, 736 p
- KOWP (2015) A basic survey report on the marine environment and ecosystem of the offshore wind power development project in the Southwestern Sea. Korea Offshore Wind Power Co. Ltd., Seoul, 723 p
- MOMAF (2006) The General investigation of marine ecosystem: 37° Asan Bay–38° Northernmost part. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 687 p

Author's Information

Su-Young Jeong

Researcher, Korea Institute of Coastal Ecology, Inc
 Ph.D. Candidate, Inha University

Chae-Lin Lee

Researcher, Korea Institute of Coastal Ecology, Inc

Seong-Hyun Gim

Researcher, Korea Institute of Coastal Ecology, Inc

Sungtae Kim

Researcher, Korea Institute of Coastal Ecology, Inc

Jung-Goo Myoung

Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Sung-Yong Oh

Principal Research Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Jin Woo Park

Post-Doctoral Scientist, Korea Institute of Ocean Science & Technology

Sung-Joo Jin

Ph.D. Candidate, Kwangwoon University

Jae-Won Yoo

CEO, Korea Institute of Coastal Ecology, Inc

Received Jun. 10, 2019

Revised Oct. 4, 2019

Accepted Oct. 22, 2019