

서남해 해상풍력 실증단지에서 조류의 분포, 비행고도 그리고 서식지 이용

임재균* · 김정수** · 진승종***

Distribution, flight altitude, and habitat use of birds
at the Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern
Part of the West Sea

Jae-Gyun Lim^{*}, Jung-Soo Kim^{**} and Seung-Jong Jin^{***}

Key Words : Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea (서남해 해상풍력 실증단지), Flight height (비행 높이), Habitat use (서식지 이용), Collision risk (충돌위험)

ABSTRACT

We observed five species and 163 individuals of birds in the Demonstration Offshore Wind Farm in the southern part of the West Sea in Korea, and 33 species and 4,023 individuals from Gusipo to Dongho Beach. The most dominant bird in both areas was the black-tailed gull, *Larus crassirostris*. The flight height of birds for collision risk (wind turbine and bird) was divided into two groups. First, the safe height was from sea level to 20 m (< 20 m), with no effect from the action of revolving blades. Second, the danger height was more than 20 m from sea level (> 20 m), with a collision risk from the action of revolving blades. Birds flying a safe height (< 20 m) were 83.9% (271 individuals) and danger height (> 20 m) were 16.1% (52 individuals). Also, 11.7% of birds (35 individuals) used the inside of the Demonstration Offshore Wind Farm as a habitat for foraging and resting, and 88.3% birds used the outside. We suggest that the risk of collision with the wind farm was low due to the relatively low flight height of birds and distance between wind turbines (> 800 m).

기호설명

H' : Species Diversity Index
 S : Species richness

P_i : Relative abundance of species
 N : All species total value
 n_i : Species i th proportion

1. 서론

대한민국은 2030년까지 생산되는 전체 에너지의 20 %를 재생에너지(약 48.7 GW)로 생산하고 그 중 해상풍력으로 10 GW 이상 생산할 계획이다. 서남해 해상풍력 실증단지를 포함한 서남해 해상풍력 발전단지에서 2.5G W를 생산하기 위하여 해상풍력발전단지를 지자체가 지정하는 공공주도형 해상풍력발전단지로 추진 중이다[1, 2]. 서남해 해상풍력 발전단지의 일부인 실

* ㈜세광종합기술단, 해상풍력사업부 (교신저자)

** 경희대학교, 환경학 및 환경공학과, 연구교수

*** 한국해상풍력(주)

E-mail : worbs@hanmail.net

DOI : <https://www.doi.org/10.33519/kwea.2023.14.4.009>

Received : November 24, 2023, Revised : December 27, 2023

Accepted : December 28, 2023

증단지는 전라북도 부안군과 고창군 해역 일대(넓이 약 14 km²)에 2017년 5월에 착공하여 2020년 1월에 준공하였고 3 MW 풍력발전기 20기를 설치하여 전체 발전용량은 60 MW이다. 또한, 서남해 해상풍력 실증단지는 육지에서 10 km 떨어진 해상에 만들어진 우리나라 최초의 해상풍력발전단지이다.

해상에 조성되는 풍력발전단지는 바다를 서식지역으로 이용하는 갈매기류를 포함한 다양한 조류의 서식에 부정적인 영향을 미칠 수 있고 가장 많이 언급되는 문제는 풍력발전기와 조류의 충돌로 인한 사망 사고이다. 조류 충돌 이외에 풍력발전단지 개발지역에서 서식지역 훼손 및 파괴로 인한 감소, 장벽효과 그리고 풍력발전기 설치 및 작동으로 인한 안정적인 서식의 방해와 교란 등 직접적 또는 간접적인 영향 등이다[3].

서남해 해상풍력 실증단지 인근의 칠산도와 남대기(섬)에는 범정보호종인 노랑부리백로 *Egretta eulophotes*, 저어새 *Platalea minor* 그리고 빨제비갈매기 *Thalasseus bernsteini*를 포함하여 꿩이갈매기 *Larus crassirostris* 등의 다양한 조류가 번식한다. 이들은 매년 번식지역에 도래하여 월동지역으로 이동하기 전(4월에서 11월 정도)까지 구시포, 명사십리 그리고 동호 해변 등을 취식 및 휴식지역으로 이용한다.

조류의 비행 높이는 인간이 만든 구조물과 충돌 위험성 등의 문제로 활발한 연구가 진행되었다[4, 5]. 특히, 비행 높이는 비행하는 조류와 풍력발전기 사이의 충돌위험을 평가할 수 있는 중요한 지표이다[6, 7, 8, 9]. 조류의 비행 높이에 대한 자세하고 정확한 자료는 구조물과 조류의 충돌 등의 영향을 평가하는 데 필수적이다. 우리나라의 풍력발전단지에서 조류 연구는 제주도 풍력발전단지 예정지역의 조류분포[10], 해상풍력개발지역에서 조류 모니터링의 필요성[3] 그리고 전라남도 영광군 백수면 일대 내륙 풍력발전단지에서 조류분포와 충돌[11] 등에 관한 연구가 있다.

본 연구는 서남해 해상풍력 실증단지와 인근지역에서 조류의 분포, 비행고도 그리고 서식지 이용 등을 조사 및 분석하였다. 본 연구의 목적은 첫째, 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해안지역의 조류의 분포를 파악하고, 둘째, 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해상에서 관찰되는 조류의 비행고도를 조사하여 풍력발전기와 조류의 충돌위험을 평가하고, 셋째, 서남해 해상풍력 실증단지 내부를 서식지역으로 이용하는 조류 현황을 파악하였다. 이를 통하여 서남해 해상풍력 실

증단지 건설이 실증단지와 인근 해상의 조류분포와 서식에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 조사지역 및 조사방법

2.1 조사지역

조류분포 조사는 전라북도 고창군 구시포 인근 서남해 해상풍력 실증단지와 구시포에서 동호 해수욕장까지 일대에서 실시하였다(Fig. 1).



Fig. 1. Study sites.

2.2 조사방법

서남해 해상풍력 실증단지와 인근지역에서 조류의 분포, 비행 높이 그리고 서식지 이용에 관한 조사는 2021년 6회(3, 5, 6, 8, 11 그리고 12월) 실시하였다.

조류 분포, 비행고도 그리고 서식지 이용은 4계절 조사를 원칙으로 하고 봄과 여름에 각 2회 조사하였다. 이는 조사지역 인근 칠산도와 남대기(섬) 등에서 번식하는 꿩이갈매기 *Larus crassirostris*가 번식지역으로 도래하는 3월, 번식시기인 5월, 번식 이후 개체수가 증가하는 6월 그리고 8월의 꿩이갈매기 개체수 변화와 이동 특성 등을 고려하여 조사시기를 결정하였다. 조류조사는 계절별 조사를 기본으로 한다. 조사지역의 꿩이갈매기 *Larus crassirostris*를 포함한 해양성 조류의 번식, 분포, 개체수 그리고 내륙으로의 이동 등을 고려하여 총 6회 조사하였다.

2.2.1 조류분포 조사

조류분포 조사는 쌍안경(Zeiss 8×32)과 Field

scope(Zeiss 30×60)를 이용하여 선조사법과 정점조사법을 병행하여 조사지역 내에서 관찰되는 모든 조류의 종과 개체수를 기록하였다[12]. 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해상지역은 보트를 이용하여 조사하였고, 구시포에서 동호 해수욕장까지 일대는 차량과 도보로 정점조사법과 선조사법을 병행하였다.

선상조사는 해양 조류조사에 주로 이용하는 방법이다[13, 14, 15]. 비교적 많은 시간이 소요되지만 조사대상과의 거리가 가까워서 선상조사는 조류의 행동 패턴까지 확인할 수 있다.

조사시기별 조류군집을 비교하기 위하여 조류 종다양도(H')[16]와 균등도(J')[17] 지수를 구하였다[16, 17].

[16] 종다양도 지수(Species diversity: H') :

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i (\log/P_i)$$

H' : 다양도, S: 전체 종수, P_i: i 번째에 속하는 개체수의 비율 (n_i/N)로 계산 (N: 군집내의 전체 개체수, n_i: 각 종의 개체수).

[17] 균등도 지수(Evenness Index: J') :

$$J' = H' / \ln(S)$$

J': 균등도, H': 다양도, S: 전체 종수.

2.2.2 비행 높이

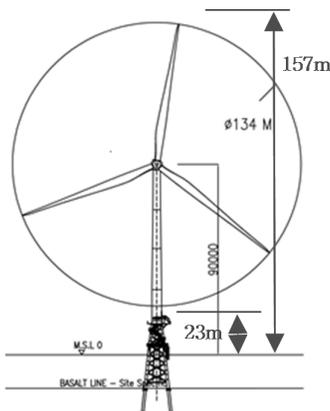


Fig. 2. Size of wind turbine in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea.

조류의 비행 높이를 측정하는 방법은 1) 배에서 거리측정기[13] 또는 직접 관찰[6, 19] , 2) 육지에서 바다를 직접 관찰[20, 21] , 3) 레이더(radar)를 이용[21], 4) 디지털 항공 측량[22] 그리고 5) 조류에게 GPS를 부착하는 방법[23] 등이다.

풍력발전기의 설치가 조류의 비행과 충돌에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서남해 해상풍력 시범단지와 인근 해상에서 관찰되는 조류의 비행 높이를 조사하였다. 조류의 비행 높이 측정은 이용하는 배와 풍력발전기 등 인근의 구조물 높이와 비교하거나 거리측정기를 이용하였다. 서남해 해상풍력 실증단지의 풍력발전기가 작동할 때 수면에서 가장 낮은 높이는 23 m 정도이고 가장 높은 높이는 157 m 정도이다(Fig. 2). 서남해 해상풍력 발전단지 풍력발전기의 높이와 크기를 고려하여 조류의 비행고도를 1) 해수면~20 m(20 m 이하), 2) 20 m 이상으로 나누었다. 서남해 해상풍력 실증단지에서 풍력발전기가 작동하더라도 조류의 비행고도가 20 m 이하는 조류 충돌이 발생하지 않는 안전한 높이(safe height)이고 20m 이상은 조류 충돌이 발생할 수 있는 위험한 높이(danger height)이다.

비행 높이는 조류가 확인되면 2~3초 정도 비행을 관찰 또는 시야에서 사라질 때 까지 비행을 관찰한 후 고도를 기록하였다. 조류가 관찰 시간 내에 급격하게 비행고도를 변경하는 경우는 높은 비행고도를 기록하였다. 조류의 비행고도는 두 가지 방법으로 실시하였다. 첫째, 매 조사시기에 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해상에서 2~3개 지점을 설정하여 각 지점에서 일정시간 머무르면서, 둘째, 선박으로 이동 중에 관찰되는 모든 조류의 비행 높이를 기록하였다.

비행 높이 조사는 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 지역의 세 지점에서 2021년 3월과 5월은 약 60분 그리고 6월, 8월, 11월 그리고 12월은 약 15분 실시하였다.

한 지점에서 60분 조사를 15분 조사로 변경한 사유는 첫째, 중복 개체, 둘째, 다양한 지점에서 조사 그리고 셋째, 다양한 지점에서 조사가 조사지역의 조류 비행고도를 잘 반영할 수 있을 것으로 판단했다.

2.2.3 서남해 해상풍력 실증단지 조류의 서식지 이용

서남해 해상풍력 실증단지 내부와 인근에 배를 정박하여 관찰되는 조류를 대상으로 서남해 해상풍력 실증단지 내부 또는 외부로 서식지역(비행, 휴식 그리고 취식 등)으로 이용하는 조류를 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조류 분포

3.1.1 서남해 해상풍력 실증단지 조류분포

서남해 해상풍력 실증단지에서 관찰된 조류는 모두 5종 163개체였다(Table 1). 우점종은 꿩이갈매기 *Larus crassirostris* 74.2 %(121개체), 가마우지 *Phalacrocorax capillatus* 12.9 %(21개체), 청둥오리 *Anas platyrhynchos* 9.20 %(15개체) 그리고 재갈매기 *Larus vagae* 2.45 %(4개체)의 순이었다(Fig. 3). 종다양도와 균등도 지수는 각 0.850과 0.528이었다(Table 1).

관찰된 조류의 종수는 1차와 5차 조사에서 각 4종이었고 2차 조사에서 3종 그리고 4차 조사에서 2종이었다. 개체수는 2차 조사에서 123개체, 5차 조사에서

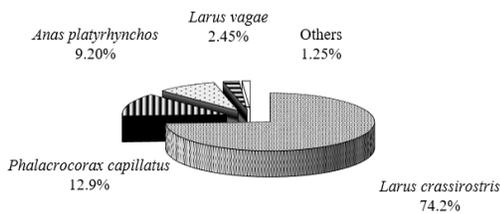


Fig. 3. Dominant species in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea.

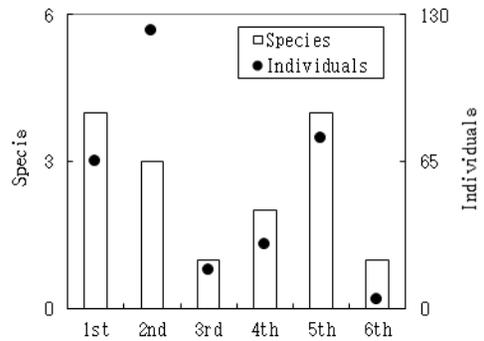


Fig. 4. The fluctuation of species and individuals of bird in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea.

75개체, 1차 조사에서 65개체 그리고 4차 조사에서 28개체였다(Fig. 4).

종다양도지수는 1차 조사에서 1.212, 5차 조사에서 0.494, 4차 조사에서 0.469 그리고 2차 조사에서 0.094였으며, 균등도지수는 1차 조사에서 0.874, 4차 조사에서 0.677, 5차 조사에서 0.356 그리고 2차 조사에서 0.096이었다(Table 1).

3.1.2 구시포에서 동호 해수욕장 구간의 조류분포

구시포에서 동호 해수욕장 구간에서 관찰된 종과 개체수는 모두 33종 4,023개체였다(Table 2). 최우점종은 꿩이갈매기 *Larus crassirostris* 79.2 %(3,188개체)

Table 1. Bird distribution in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea.

Species	1st (Mar)	2nd (May)	3th (Jun)	4th (Aug)	5th (Nov)	6th (Dec)	Max.	Dom. (%)
오리과 ANATIDAE								
1. 청둥오리 <i>Anas platyrhynchos</i>	15						15	9.20
가마우지과 PHALACROCORACIDAE								
2. 가마우지 <i>Phalacrocorax capillatus</i>	21	1		5	3		21	12.9
갈매기과 LARIDAE								
3. 꿩이갈매기 <i>Larus crassirostris</i>	26	121	17	23	65	4	121	74.2
4. 재갈매기 <i>Larus vagae</i>	3	1			4		4	2.45
바다오리과 ALCIDAE								
5. 바다쇠오리 <i>Synthliboramphus antiquus</i>					2		2	1.23
미동경 조류								
기러기류(Goose species)					13			
Number of species	4	3	1	2	4	1	5	
Number of individuals	65	123	17	28	75	4	163	
Species diversity(H')	1.212	0.094	-	0.469	0.494	-	0.850	
Evenness Index(J')	0.874	0.086	-	0.677	0.356	-	0.528	

Table 2. Bird distribution from Gusipo to Dongho Beach

Species	1th (Mar)	2nd (May)	3th (Jun)	4th (Aug)	5th (Nov)	6th (Dec)	Max.	Dom. (%)
오리과 ANATIDAE								
1. 청둥오리 <i>Anas platyrhynchos</i>					17	133	133	3.31
2. 흰뺨검둥오리 <i>Anas poecilorhyncha</i>	25				112		112	2.78
가마우지과 PHALACROCORACIDAE								
3. 가마우지 <i>Phalacrocorax capillatus</i>	1		1		23		23	0.57
저어새과 THRESKIORNITHIDAE								
4. 노랑부리저어새 <i>Platalea leucorodia</i>					6	6	6	0.15
5. 저어새 <i>Platalea minor</i>		3	1		1		3	0.07
백로과 ARDEIDAE								
6. 왜가리 <i>Ardea cinerea</i>	3		5	13	10	4	13	0.32
7. 중대백로 <i>Ardea alba</i>	1	1	1	40	20	3	40	0.99
8. 쇠백로 <i>Egretta garzetta</i>		2					2	0.05
9. 노랑부리백로 <i>Egretta eulophotes</i>			2				2	0.05
검은머리물떼새과 HAEMATOPODIDAE								
10. 검은머리물떼새 <i>Haematopus ostralegus</i>	1		2				2	0.05
물떼새과 CHARADRIIDAE								
11. 개평 <i>Pluvialis squatarola</i>			8				8	0.20
도요과 SCOLOPACIDAE								
12. 청다리도요 <i>Tringa nebularia</i>		1					1	0.02
13. 민물도요 <i>Calidris alpina</i>	340			7	7		340	8.45
갈매기과 LARIDAE								
14. 꿩이갈매기 <i>Larus crassirostris</i>	1,832	3,188	749	2,380	80	35	3,188	79.2
15. 재갈매기 <i>Larus vagae</i>	50	60		13	15	2	60	1.49
비둘기과 COLUMBIDAE								
16. 멧비둘기 <i>Streptopelia orientalis</i>				4			4	0.10
딱따구리과 PICIDAE								
17. 쇠딱따구리 <i>Dendroscopus kizuki</i>			1				1	0.02
때까치과 LANIIDAE								
18. 때까치 <i>Lanius bucephalus</i>		2			1		2	0.05
직박구리과 PYCNONOTIDAE								
19. 직박구리 <i>Hypsipetes amaurotis</i>		2	6			4	6	0.15
오목눈이과 AEGITHALIDAE								
20. 오목눈이 <i>Aegithalos caudatus</i>			2				2	0.05
꼬리치레과 SYLVIIDAE								
21. 붉은머리오목눈이 <i>Sinosuthora webbiana</i>		4					4	0.10
까마귀과 CORVIDAE								
22. 어치 <i>Garrulus glandarius</i>			1				1	0.02
23. 물까치 <i>Cyanopica cyanus</i>			1				1	0.02
24. 까치 <i>Pica pica</i>	3	3		1			3	0.07
25. 큰부리까마귀 <i>Corvus macrorhynchos</i>		3					3	0.07

Table 2. Bird distribution from Gusipo to Dongho Beach(continued)

Species	1th (Mar)	2nd (May)	3th (Jun)	4th (Aug)	5th (Nov)	6th (Dec)	Max.	Dom. (%)
박새과 PARIDAE								
26. 진박새 <i>Periparus ater</i>			2				2	0.05
27. 박새 <i>Parus major</i>	4	3	2				4	0.10
제비과 HIRUNDINIDAE								
28. 제비 <i>Hirundo rustica</i>		1					1	0.02
29. 귀제비 <i>Cecropis daurica</i>			1				1	0.02
할미새과 MOTACILLIDAE								
30. 알락할미새 <i>Motacilla alba</i>			2				2	0.05
되새과 FRINGILLIDAE								
31. 방울새 <i>Carduelis sinica ussuriensis</i>	3	3	12		6		12	0.30
참새과 PLOCEIDAE								
32. 참새 <i>Passer montanus</i>		24	39	5			39	0.97
멧새과 EMBERIZIDAE								
33. 노랑턱멧새 <i>Emberiza elegans</i>						2	2	0.05
Number of species	11	15	19	8	12	8	33	
Number of individuals	2,263	3,300	838	2,463	298	193	4,023	
Species diversity(H')	0.638	0.203	0.557	0.198	1.811	1.008	0.936	
Evenness Index(J')	0.266	0.075	0.189	0.095	0.729	0.485	0.268	

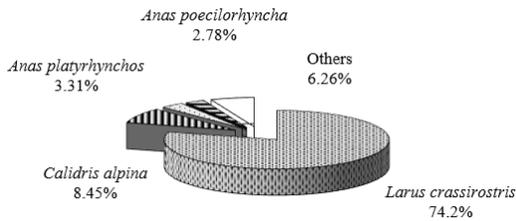


Fig 5. Dominant species from Gusipo to Dongho Beach.

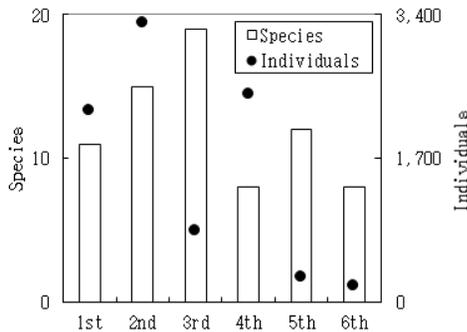


Fig 6. The fluctuation of species and individuals of bird in Dominant species from Gusipo to Dongho Beach.

였고 우점종은 민물도요 *Calidris alpina* 8.45%(340개체), 청둥오리 *Anas platyrhynchos* 3.31%(133개체) 그리고 흰뺨검둥오리 *Anas poecilorhyncha* 2.78%(112개체)의 순이었다(Fig. 5). 종다양도와 균등도 지수는 각 0.936과 0.268이었다(Table 2).

관찰된 조류의 종수는 3차 조사에서 19종, 2차 조사에서 15종, 5차 조사에서 12종 그리고 1차 조사에서 11종이었다. 개체수는 2차 조사에서 3,300개체, 4차 조사에서 2,463개체, 1차 조사에서 2,263개체 그리고 3차 조사에서 838개체였다(Fig 6).

종다양도지수는 5차 조사에서 1.811, 6차 조사에서 1.008, 1차 조사에서 0.638 그리고 3차 조사에서 0.557이었으며, 균등도지수는 5차 조사에서 0.729, 6차 조사에서 0.485, 1차 조사에서 0.266 그리고 3차 조사에서 0.189이었다(Table 2).

3.2 서남해 해상풍력 실증단지과 인근 해상에서 관찰된 조류의 비행고도

서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해상 그리고 이동 중에 비행고도를 확인한 조류의 모두 5종(미동정 조류 제외) 323개체였다. 이 중에서 풍력발전기가 작동했을 때 충돌의 영향이 없을 것으로 생각되는 해수

면에서 20 m까지 높이(< 20 m)로 비행한 조류는 83.9 %(271개체)였고 풍력발전기가 작동했을 때 충돌 등의 영향이 발생할 수 있는 20m 이상에서 비행한 조류는 16.1 %(52개체)였다(Table 3). 그리고 풍력발전기 높이인 157m 이상 비행하는 조류는 확인되지 않았다. 조사 시기에 따라 해수면에서 20m까지 높이로 비행한 조류는 64.7~100 %였고, 20 m 이상은 0~35.3 %였다(Table 3).

가장 많이 관찰된 꿩이갈매기 *Larus crassirostris*는 85.1 %(217개체)가 안전한 높이(< 20 m)로 비행하였고 14.9 %(38개체)가 위험한 높이(> 20 m)로 비행하였다(Table 4). 재갈매기 *Larus vagae*의 87.5 %(7개체)는 안전한 높이로 비행하였고 12.5 %(1개체)는 위험한 높이로 비행하였다(Table 4). 청둥오리 *Anas platyrhynchos* (15개체), 가마우지 *Phalacrocorax capillatus* (30개체) 그리고 바다쇠오리 *Synthliboramphus antiquus* (2개체)는 모두 안전한 높이로 비행하였다(Table 4). 기러기류(13개체)는 모두 위험한 높이로 비행하였다(Table 4).

조류의 비행 높이는 여러 요인에 따라 달라지며, 특히, 눈과 비 등의 기후 조건[24], 낮의 길이[25] 그리고 바람의 방향에 따라 달라진다[26]. 해양에서 관찰되는 조류의 비행 높이는 비교적 낮은 것으로 알려져 있다. 미국 알래스카에서 이동하는 eiders의 비행 높이는 평균 12.1±0.8 m였고 이들의 비행 높이는 비행 방향과 맞바람일 때 옆바람 또는 뒷바람일 때 보다 비교적 낮았다[27]. 덴마크의 Tunø Knob 풍력단지에서 Common eiders *Somateria mollissima*의 비행

높이는 해수면에서 10m 이하가 91 %, 10~20m에서 7% 그리고 20m 이상이 2 %였으며, Common eiders *Somateria mollissima*는 선박 또는 풍력발전기 등과 같은 비행에 방해가 되는 물리적인 요인이 나타나면 충돌을 피하기 위해 더 높이 비행하였다[18]. 영국과 유럽의 바다 32개 지점에서 오리류와 갈매기류 등 해양성 조류 25종의 비행 높이는 모두 해수면에서 20 m 이하였다[8]. 독일의 연구에서 Lesser black-backed gull *Larus fuscus*의 89 %가 20 m 이하로 비행하였으며[28], 대부분 갈매기[6]와 바닷새[29]도 20 m 이하로 비행하였다. 영국에서 GPS를 부착한 Lesser black-backed gull *Larus fuscus*와 Great skua *Stercorarius skua*의 해양에서 비행 높이는 해수면에서 20 m까지가 각 61.4 %와 94.2 %였다[30]. 그리고 우리나라 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해양에서 관찰된 조류 5종(미동정 조류 제외)의 비행 높이는 해수면에서 20 m 이하에서 83.9 %였고 20 m 이상에서

Table 3. Flight height of bird in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea.

Flight height	1th (Mar)	2nd (May)	3th (Jun)	4th (Aug)	5th (Nov)	6th (Dec)	Sum
< 20m	51 (79.7%)	109 (88.6%)	11 (64.7%)	22 (78.6%)	74 (85.1%)	4 (100%)	271 (83.9%)
> 20m	13 (20.3%)	14 (11.4%)	6 (35.3%)	6 (21.4%)	13 (14.9%)	-	52 (16.1%)
Sum	64 (100%)	123 (100%)	17 (100%)	28 (100%)	87 (100%)	4 (100%)	323 (100%)

Table 4. Flight height of bird in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea.

Flight height	<i>Larus crassirostris</i>	<i>Larus vagae</i>	<i>Anas platyrhynchos</i>	<i>Phalacrocorax capillatus</i>	<i>Synthliboramphus antiquus</i>	goose species	sum
< 20m	217 (85.1%)	7 (87.5%)	15 (100%)	30 (100%)	2 (100%)	-	271 (83.9)
> 20m	38 (14.9%)	1 (12.5%)	-	-	-	13 (100%)	52 (16.1%)
Sum	255 (100%)	8 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	2 (100%)	13 (100%)	323 (100%)

16.1 %였다. 해양에서 서식하거나 이동하는 조류의 비행 높이가 낮은 이유는 첫째, 해수면과 거의 같은 높이로 비행하면서 먹이를 빠르게 취식하고, 둘째, 바람이 불면 높이 나는 것보다 낮게 나는 게 에너지 소비를 줄이는 데 도움이 되기 때문이다[31].

우리나라를 포함하여 여러 나라의 해상풍력발전단지 건설지역에서 조류의 비행고도는 해수면에서 20 m 이하에서 61.4~98.0 %였다. 여러 연구에서 해양에서 조류의 비행 높이는 비교적 낮은 것으로 나타났다. 고니류와 기러기류를 포함한 수금류와 풍력발전기의 충돌은 거의 없지만 송진선로와 충돌은 가끔 보고되었다[32, 33, 34]. 대한민국 전라남도 영광군 백수면 일대 해안가 인근 내륙의 풍력발전단지에서도 풍력발전기와 조류의 충돌은 확인되지 않았다[11]. 따라서 서남해 해상풍력 실증단지에서 조류의 낮은 비행 높이와 풍력발전기 사이의 거리(약 800 m) 등을 고려하면 서남해 해상풍력 실증단지에서 풍력발전기와 조류의 충돌위험은 비교적 낮은 것으로 사료된다.

3.3 서남해 해상풍력 실증단지 일대에서 관찰된 조류의 서식지 이용

서남해 해상풍력 실증단지에서 관찰된 조류는 모두 5종(미동정 조류 제외) 298개체였다. 관찰된 조류 중에서 서남해 해상풍력 실증단지 내부를 서식지로 이용한 개체는 11.7 % (35개체)였고 외부에서 관찰된 개체는 88.3 % (263개체)였다(Table 4). 서남해 해상풍력 실증단지 내부를 서식지역으로 이용한 종은 켈리갈매기 *Larus crassirostris* 1종 35개체였다. 외부지역을 서식지역으로 이용한 종은 켈리갈매기 *Larus crassirostris* 75.3 % (198개체), 가마우지 *Phalacrocorax capillatus* 11.4 % (30개체), 청둥오리 *Anas platyrhynchos* 5.70 % (15개체) 그리고 기러기류 4.94 % (13개체)의 순이었다(Table 5).

조사시기별로 서남해 해상풍력 시범단지 내부를 서식지역으로 이용한 조류는 0~66.7 %였고 외부를 서식지역으로 이용한 조류는 33.0~100 %였다(Fig. 7).

대규모 해상풍력발전단지 나타나는 대표적인 조류의 서식지 방해요인은 그 지역을 서식지역(취식 및 휴식 등)으로 이용하는 조류의 개체수와 이용 빈도(landing frequency)의 감소이다[18]. 덴마크의 Tunø Knob 풍력발전단지 건설 이후 인근지역에서 Common eiders *Somateria mollissima*의 비행 및 내

려 앉는(landing) 빈도는 현저히 감소하였으며[18], 이는 풍력발전단지 개발로 인한 조류의 서식지 감소 현상을 보여주는 것이다. 하지만 해상풍력발전단지 개발로 나타나는 서식지 방해요인(비행 및 내려 앉는 빈도 감소 등)은 풍력발전단지 내부에 조류를 유인할 수 있는 후리새(decoy)를 이용하여 조류의 개체수와 서식지 이용 빈도를 증가시킬 수 있다[18]. 그리고 풍력발전단지에서 후리새를 이용하면 풍력발전기가 작동하더라도 비행 중인 조류들이 후리새에 반응하여 풍력발전단지 내부를 취식 및 휴식 등의 서식지역으로 이용하였다[18]. 서남해 해상풍력 발전단지 내부와 외부에 설치된 부표는 비행 또는 취식 중인 갈매기를 포함한 조류에게 휴식지역을 제공해 주었다(Fig. 8).

해상풍력발전단지에서 조사시기에 따라 관찰되는 조류의 종과 개체수는 변동은 비교적 크게 나타난다[18, 본 연구]. 이는 조사지역에서 풍력발전기의 작동과 이로 인한 소음 등의 이유보다는 그 지역의 먹이량과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 그리고 해상풍력발전단지에서 풍력발전기 하부에 서식하는 저서생물의 증가하고 이를 먹이로 하는 어류의 다양성과 풍부도가 증가한다[35, 36]. 그리고 다양한 바닷새들은 이렇게 풍부해진 먹이를 취식하기 위해 종종 풍력발전기 인근을 취식 및 휴식지역으로 이용하는 데 이를 ‘암초 효과(reef effect)’라고 한다[35, 37]. 본 연구의 2차(5월)와 5차(11월) 조사에서 켈리갈매기 *Larus crassirostris*의 급격한 개체수 증가는 ‘암초 효과’의 결과로 사료된다.

Common eiders *Somateria mollissima*를 포함한 다양한 물새류는 풍력발전단지과 풍력발전기에 적응하여 발전기 사이를 비행하거나 풍력발전기 주변을 비행하면서 그들의 비행경로를 조정하였다[18, 21, 34, 38]. 이를 통하여 여러 조류는 풍력발전단지의 장벽효과를 최소화 또는 회피하였다.

바다오리류(Guillemots)는 해상풍력발전단지 가까이 접근하지만 발전단지 내부로 들어가지 않았다. 바다오리류가 서식지역으로 이용하거나 이용하지 않는 해상풍력발전단지 내부와 외부는 이들이 이용할 수 있는 먹이 풍부도는 다르게 나타났다. 그러나 지역에 따라 다른 먹이 풍부도는 바다오리류가 서식지역으로 이용하는 데 영향을 미치지 않았다. 따라서 바다오리류가 풍력발전단지 내부를 서식지역으로 이용하지 않는 이유는 먹이 풍부도가 아닌 풍력발전기에 대한 두려움의 영향이 큰 것으로 생각된다[39]. 그리고 풍력

Table 5. Habitat use of bird species in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea

	1th (Mar)		2nd (May)		3th (Jun)		4th (Aug)		5th (Nov)		6th (Dec)		Sum	
	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside	Inside	Outside
<i>Anas platyrhynchos</i>		15 (36.6%)												15 (5.70%)
<i>phalacrocorax capillatus</i>		21 (51.2%)		1 (0.90%)				5 (20.8%)		3 (3.94%)				30 (11.4%)
<i>Larus crassirostris</i>		5 (12.2%)	9 (100%)	112 (98.2%)	10 (100%)	5 (100%)	4 (100%)	19 (79.2%)	11 (100%)	54 (71.1%)	1 (100%)	3 (100%)	35 (100%)	198 (75.3%)
<i>Larus vegae vagae</i>				1 (0.90%)						4 (5.24%)				5 (1.90%)
<i>Synthliboramphus antiquus</i>										2 (2.63%)				2 (0.76%)
Goose species										13 (17.1%)				13 (4.94%)
Sum		41 (100%)	9 (100%)	114 (100%)	10 (100%)	5 (100%)	4 (100%)	24 (100%)	11 (100%)	63 (100%)	1 (100%)	3 (100%)	35 (100%)	263 (100%)

발전기의 작동 여부는 eiders의 먹이 이용과 연관성이 없었다[18]. 그 이유는 바닷새들이 풍력발전기 작동 등의 이유로 풍력발전단지 내부 또는 인근지역이 아닌 먼 지역에 내려 앉아도 수영으로 풍력발전단지 내부로 이동하여 그 지역의 먹이를 이용할 수 있기 때문이다[16]. 본 연구에서 서남해 해상풍력 실증단지 내부를 서식지역으로 이용하는 비율(11.7 %)이 서식지 외부를 이용하는 비율(88.3 %)보다 현저히 낮았다.

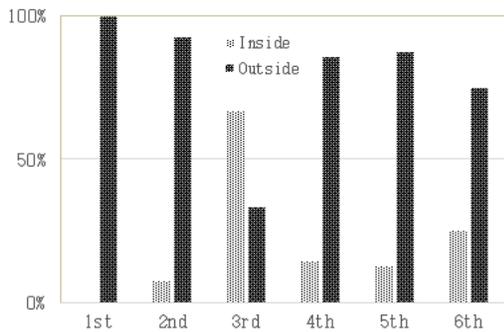


Fig. 7. Habitat use of birds in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea.



Fig. 8. A buoy for resting of birds in Demonstration Offshore Wind Farm in the Southern Part of West Sea, Korea.

4. 결론

서남해 해상풍력 실증단지에서 관찰된 조류는 5종 163개체였고, 구시포에서 동호 해수욕장 구간에서 관찰된 조류는 33종 4,023개체였다. 서남해 해상풍력 실증단지와 인근 해상 그리고 이동 중에 비행 높이를 확인한 조류는 모두 5종(미동정 조류 제외) 323개체였다. 이 중에서 풍력발전기가 작동했을 때 충돌의 영향이 없는 안전한 높이(< 20 m)로 비행한 조류는 83.9%(271개체)였고 풍력발전기가 작동했을 때 충돌 등의 영향이 발생할 수 있는 위험한 높이(> 20 m)에서 비행한 조류는 16.1%(52개체)였다. 그리고 풍력발전기 높이인 157 m 이상 비행하는 조류는 확인되지 않았다. 그리고 서남해 해상풍력 실증단지에서 다양한 조류의 비행 높이, 비교적 낮은 가동시간 그리고 풍력발전기 사이 거리(약 800 m) 등을 고려하면 풍력발전기와 조류의 충돌 위험은 비교적 낮을 것으로 사료된다.

서남해 해상풍력 실증단지에서 관찰된 조류는 모두 5종(미동정 조류 제외) 298개체였다. 관찰된 조류 중에서 서남해 해상풍력 실증단지 내부를 서식지로 이용한 개체는 11.7%(35개체)였고 외부에서 관찰된 개체는 88.3%(263개체)였다. 해상풍력발전단지 개발로 인한 조류의 서식지 감소의 문제는 첫째, 조류에게 휴식지역을 제공해 주는 다양한 형태의 부표 설치, 둘째, 풍력발전단지 내부와 인근지역 수중의 저서생물과 어류의 다양성을 향상하여 조류에게 안정적인 먹이 제공(암초 효과) 등으로 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

그리고 향후 조류의 분포, 비행 높이 그리고 서식지 이용 등에 대한 지속적인 조사를 실시하여 풍력단지개발이 조류의 분포, 조류와 풍력발전기와의 충돌 그리고 서식에 미치는 영향을 모니터링 하여야 한다.

후기

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No. 2023030020080, 해상풍력 단지 해양공간 환경 영향 분석 및 데이터베이스 구축)입니다.

참고문헌

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017. 8th Electricity Supply and Demand Plan (2017-2031) (in Korean).
- [2] Relevant Ministries, 2019. Reinforcement of Renewable Energy Industry (in Korean).
- [3] Hong, M., Choi, J., Kim, J., Yun, S., Kang, K., Bae, G., Lee, W. and Yoo, J., 2019, Necessity of bird monitoring for assessing impacts of offshore wind farms on birds. *Journal of Wind Energy*, Vol. 10, No. 3, pp. 31~41 (in Korean).
- [4] Bevanger, K., 1994. Bird interactions with utility structures: collision and electrocution, causes and mitigating measures. *IBIS* Vol. 136, pp. 412-425.
- [5] Shamoun-Baranes, J., van Loon, E., van Gasteren, H., van Belle, J., Boujten, W. and Buurma, L., 2006. A comparative analysis of the influence of weather on the flight altitudes of birds. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 87, pp. 47~61.
- [6] Garthe, S. and Huppopp, O., 2004. Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 41, pp. 724~734.
- [7] Desholm, M. and Kalthert, J., 2005. Avian collision risk at an off-shore wind farm. *Biology Letters* Vol. 1, pp. 296~298.
- [8] Johnston, A., Cook, A.S., Wright, L.J., Humphreys, E.M. and Burton, N.H., 2014. Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *Journal of Applied Ecology* Vol. 51, pp 31~41.
- [9] Furness, R.W., Wade, H.M. and Masden, E.A., 2013. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *Journal of Environmental Management*, Vol. 119, pp. 56~66.
- [10] Kim, S., Kim, B., Chang, M., Kyong, N., and Oh, H., 2007, Research on status of waterfowl

- of Gujwa Region where offshore wind farm was planned in Jeju Island. *Korean Journal of Ornithology* Vol. 14, No. 2, pp 67~75
- [11] Kim, J., Nangung, H., Jin, S., Lim, J., Kim Y., Jeon J. and Kim D., 2021, Effects of Wind Power Plants on Bird Distribution. *Journal of Wind Energy*, Vol. 12, No. 2, pp. 21~29 (in Korean).
- [12] Wunderle, Jr. J.M., 1994. *Census Methods for Caribbean Land Birds*. United States Department of Agriculture.
- [13] Camphuysen, C.J., Fox, A.D., Leopold, M.F. and Petersen, I.K., 2004. Towards standardised seabirds at sea census techniques in connection with environmental impact assessments for offshore wind farms in the UK: a comparison of ship and aerial sampling methods for marine birds and their applicability to offshore wind farm assessments, COWRIE-BAM-02-2002.
- [14] Dierschke, V., Garthe, S. and Mendel, B., 2006. Possible conflicts between offshore wind farms and seabirds in the German sectors of North Sea and Baltic Sea, In Köller, J., Köppel, H. and Peter, W.(Eds). *Offshore wind energy: Research on environmental impacts*, 121-143. Springer, Berlin, Germany.
- [15] Johansen, K.L., Boertmann, D., Mosbech, A. and Hansen, T.B., 2012. *Manual for seabird and marine mammal survey on seismic vessels in Greenland*. Danish Centre for Environment and Energy, Roskilde, Denmark.
- [16] Shannon, C. E. and Weaver, E., 1949, *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana. pp. 1~117.
- [17] Pielou EC (1975) *Ecological Diversity*. Wiley, pp 1-165. New York.
- [18] Larsen, J.K. and Guillemette, M., 2007. Effect of wind turbines on flight behaviour of wintering common eiders: implications for habitat use and collision risk. *Journal of Applied Ecology* Vol. 44, pp. 516~522.
- [19] Krüger, T. and Garthe, S., 2001. Flight altitudes of coastal birds in relation to wind direction and speed. *Atlantic Seabirds* Vol. 3, pp. 203~216.
- [20] Cook, A., Johnston, A., Wright, L. and Burton, N., 2012. A review of flight heights and avoidance rates of birds in relation to offshore windfarms. *British Trust for Ornithology*, Thetford, Norfolk
- [21] Desholm, M. and Kahlert, J., 2005. Avian collision risk at an offshore wind farm. *Biology Letters* Vol. 1, pp. 296~298.
- [22] Buckland, S.T., Burt, M.L., Rexstad, E.A., Mellor, M., Williams, A.E. and Woodward, R., 2012. Aerial surveys of seabirds: the advent of digital methods. *Journal of Applied Ecology* Vol. 49 pp. 960~967.
- [23] Bouten, W., Baaij, E.W., Shamoun-Baranes, J. and Camphuysen, C.J., 2013. A flexible GPS tracking system for studying bird behaviour at multiple scales. *Journal of Ornithology* Vol. 154, pp. 571~580.
- [24] Liechti, F., 2006. Birds: blowin' by the wind? *Journal of Ornithology* Vol. 147, pp. 202~211.
- [25] Cooper, B.A. and Ritchie, R.J., 1995. The altitude of bird migration in east-central Alaska: a radar and visual study. *Journal of Field Ornithology* Vol. 66, pp. 590~608.
- [26] Kahlert, J.A., Leito, A., Laubek, B., Luigujoe, L., Kuresoo, A., Aaen, K. and Luud, A., 2012. Factors affecting the flight altitude of migrating waterbirds in Western Estonia. *Ornis Fennica* Vol. 89, pp. 241~253.
- [27] Day, R.H., Rose, J.R., Prichard, A.K., Blaha, R.J. and Copper, B.A., 2004. Environmental effects on the fall migration of eiders at Barrow, Alaska. *Marine Ornithology* Vol. 32, pp. 13~24.
- [28] Corman, A. and Garthe, S., 2004. What flight heights tell us about foraging and potential conflicts with wind farms: A case study in Lesser Black-backed Gulls (*Larus fuscus*). *Journal of Ornithology* Vol. 155, pp. 1037~1043.
- [29] Mendel, B., Kotzerka, J., Sommerfeld, J., Schwenmer,

- H., Sontag, N. and Garthe, S., 2014. Effects of the alpha ventus offshore test site on distribution patterns, behaviour and flight heights of seabirds. *Ecological Research at the Offshore Wind Farm Alpha Ventus—Challenges, Results and Perspectives* (eds Federal Maritime and Hydrographic Agency and Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety), pp. 95 - 110. Springer Fachmedien, Wiesbaden, Germany.
- [30] Ross-Smith, V.H., Thaxter, C.B., Masden, E.A., Shamoun-Baranes, J., Burton, N.H.K., Wright, L.J., Rehfish, M.M. and Johnston, A., 2016. Modelling flight heights of lesser black-backed gulls and great skuas from GPS: a Bayesian approach. *Journal of Applied Ecology* Vol. 53, pp. 1676~685.
- [31] Withers, P.C. and Timko, P.L., 1977. The significance of ground effect to the aerodynamic cost of flight and energetics of the black skimmer (*Rhyncops nigra*). *Journal of Experimental Biology* Vol. 70, pp. 13~26.
- [32] Brown, M., Linton, E. and Rees, E.C., 1992. Causes of mortality among wild swans in Britain. *Wildfowl* Vol. 43, pp. 70~79.
- [33] Rees, E.C., 2006. *Bewick's Swan*. T. & A.D. Poyser, London, UK.
- [34] Fijn R.C., Krijgsveld, K.L., Tijssen, W., Prinsen, H.A.M. and Dirksen, S., 2012. Habitat use, disturbance and collision risks for Bewick's Swans *Cygnus columbianus bewickii* wintering near a wind farm in the Netherlands. *Wildfowl* Vol. 62, pp. 97~116.
- [35] Stenberg, C., Støttrup, J.G., van Deurs, M., Berg, C.W., Dinesen, G.E., Mosegaard, H., Grome, T.M. and Leonhard, S.B., 2015. Long-term effects of an offshore wind farm in the North Sea on fish communities. *Marine Ecology Progress Series* Vol. 528, pp. 257 - 265.
- [36] Vandendriessche, S., Derweduwen, J. and Hostens, K., 2015. Equivocal effects of offshore wind farms in Belgium on soft substrate epibenthos and fish assemblages. *Hydrobiologia* Vol. 756, pp. 19~35.
- [37] Vanermen, N., Onkelinx, T., Courtens, W., van Dewalle, M., Verstraete, H. and Stienen, E.W.M., 2015. Seabird avoidance and attraction at an offshore wind farm in the Belgian part of the North Sea. *Hydrobiologia* Vol. 756, pp. 51 ~61.
- [38] Masden, E.A., Haydon, D.T., Fox, A.D., Furness, R.W., Bullman, R. and Desholm, M., 2009. Barriers to movement: impacts of wind farms on migrating birds. *ICES Journal of Marine Science* Vol. 66, pp. 746~753.
- [39] Peschko, V., Mercker, M. and Garthe, S., 2020. Telemetry reveals strong effects of offshore wind farms on behaviour and habitat use of common guillemots (*Uria aalge*) during the breeding season. *Marine Biology* Vol. 167, pp. 118~131.