

드론을 활용한 갯벌 서식 바닷새의 시공간 분포 변화 연구

Changes in Spatial Distributions of Shorebirds in Tidal Flats by Drones Observation

이나리* · 이무준** · 이정호*** · 류종성****

Nari Lee · Moo Joon Lee · Jung-Ho Lee · Jongseong Ryu

요약 갯벌에서 조석에 따른 바닷새의 시공간 분포와 바닷새 조사의 최적 시간대를 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 2021년 4월에서 7월까지 사리 기간 총 12일에 걸쳐, 1일 9시간 동안 1시간 간격으로 쌍안경과 망원경을 이용한 지상 육안관측과 무인항공기를 이용한 드론 항공관측 방법을 병행하여 조사하였다. 조사지역에서 관찰된 바닷새는 총 8개 과(Family)로, 갈매기과(Laridae), 가마우지과(Phalacrocoracidae), 검은머리물떼새(*Haematopus ostralegus*), 백로과(Ardeidae), 오리과(Anatidae), 저어새(*Platalea leucorodia*), 도요·물떼새과(Scolopacidae and Charadriidae)였으며, 가장 우점하는 갈매기과는 전체 개체수의 90% 이상을 차지하였다. 4월에서 7월로 가면서 서식밀도가 높아졌으며, 드론 항공관측보다 지상 육안관측 결과가 약 22% 높은 서식밀도를 보였다. 조석에 따라 갯벌과 바다 경계선의 위치가 변하면 바닷새의 공간분포가 변하는 것을 확인하였는데, 특히 경계선의 위치가 육지에서 200-300 m 떨어졌을 때 육지로부터 100-200 m 떨어진 갯벌 위에서 가장 높은 서식밀도를 보여 만조 전후 2시간이 가장 많은 개체수를 관찰할 수 있는 시간대로 나타났다. 분류군에 따라 선호하는 서식공간이 상이하였는데, 도요물떼새과, 검은머리물떼새, 백로과는 조석 전주기 동안 경계선 근처 갯벌 위에서 주로 출현하였으며, 가마우지과는 바다 위를 선호하였다. 도요물떼새과, 가마우지과, 저어새는 드론 항공관측과 지상 육안관측 방법 간에 서식밀도 평균이 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 바닷새 분포를 정확하게 파악하기 위해서는 개별 종에 따른 무인항공기에 대한 회피반응, 크기의 차이, 선호하는 먹이 등을 고려하여 조사방법을 개선할 필요가 있다.

키워드 바닷새, 무인항공기, 갯벌, 시공간분포, 조석주기

Abstract This study aims to track down changes in spatio-temporal distribution of shorebirds along tidal change in order to determine the best timing to observe shorebirds during a tidal cycle. Hourly observations using a drone and a fieldscope were performed during nine hours a day for twelve days in spring tides between April and July in 2021. A total of seven families of shorebirds were found and total density increased from April to July among which family Laridae (seagulls) accounts for about 90% in abundance. Drone-based observations showed higher density of shorebirds by about 22% than fieldscope ground observations. Spatial distribution of shorebirds changed along with change of waterline location during the tidal cycle. Shorebirds density showed the highest value on tidal flats with the distance of 100-200 m from the land. It implies that about two hours before and after high tide would be the best appropriate chance to observe as many as number of shorebirds. Location of preferred habitat was diverse with shorebirds taxa, and Scolopacidae and Charadriidae, *Haematopus ostralegus*, Ardeidae occurred in/near the waterline during the entire tidaly cycle. Phalacrocoracidae preferred habitat on the sea. Density of Scolopacidae plus Chradriidae, and that of Platalea leucorodia showed a significant different by the observation method (i.e., drone-based vs. fieldscope-based). Shorebirds distribution on tidal flats depended on avoiding behavior of shorebirds against drones, body size, and diet preference, which would be carefully considered in order to improve monitoring methods.

Key words Shorebirds, Drones, Tidalflats, Spatio-temporal Distribution, Tidal Cycle

Received: 2022.06.28, Revised: 2022.07.11, Accepted: 2022.07.11

* (주)오션사이텍 연구원(Researcher, Oceanscitech Inc., Ganghwa-gun, Korea, narionbo@gmail.com) (주저자)

** 안양대학교 해양바이오시스템공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Ganghwa-gun, Korea, mjoon@anyang.ac.kr)

*** 안양대학교 해양바이오시스템공학과 조교수(Assistant Professor, Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Ganghwa-gun, Korea, leejh@anyang.ac.kr)

**** 안양대학교 해양바이오시스템공학과 교수(Professor, Department of Marine Biotechnology, Anyang University, Ganghwa-gun, Korea, jsryu@anyang.ac.kr) (교신저자)

1. 서론

우리나라 서해 갯벌은 동아시아-대양주 철새이동경로(EAAF)상의 16개 핵심 지역(Important Bird Area, IBA) 중 하나(IBA 5)로 지정되어 있으며, 높은 생물다양성을 지닌 지역이다(Mackinnon *et al.*, 2012). 철새에게 에너지 보충과 안정적인 휴식지의 확보는 생존과 번식에 있어 중요하며, 갯벌은 이러한 철새가 안전하게 장거리를 이동하는데 중요한 역할을 담당한다(Kim *et al.*, 2004). 특히, 강화갯벌은 저어새(*Platalea minor*), 검은머리갈매기(*Larus saundersi*), 알락꼬리마도요(*Numenius madagascariensis*) 등 범정보호종 6종이 도래하는 곳으로 자연연구가 위치하여 보존의 가치가 매우 높은 곳으로 알려져 있다(MOF, 2019).

국내에서는 여러 기관에서 다양한 목적을 갖고 조류 조사를 수행중이지만, 조사지역의 환경과 조사방법이 다르고, 특히 지상 육안관측 시 조사자의 주관적 판단이 개입될 수 있어 관측자료의 편차가 발생할 수 있으며(MOE, 2020), 조사횟수와 시기 등에 따라서도 영향을 받을 수 있다(Lee *et al.*, 2004).

최근 들어 조류를 객관적이고 정량적으로 모니터링하기 위한 방법의 일환으로 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 드론을 이용하여 시간과 공간 분포 자료를 동시에 확보할 수 있는 연구가 각광을 받고 있다. 조류뿐만 아니라 코끼리(Vermeulen *et al.*, 2013)나 해양포유류(Sykora-Bodie *et al.*, 2017; Adame *et al.*, 2017; Colefax *et al.*, 2019; Goebel *et al.*, 2015) 등 다양한 생물에 적용한 연구사례가 보고되고 있다. 드론을 이용하면 연구자의 시야가 차단된 곳을 파악할 수 있고(Chabot & M. Bird, 2012), 기존 조사방식에 비하여 장비휴대가 간편하며, 관측된 자료를 이미지로 저장하여 객관적인 자료 확보가 가능하다는 장점을 갖고 있다(Nam *et al.*, 2018). 하지만 드론이 지나치게 낮게 비행하게 되면 바닷새가 날아갈 수 있으며, 새와 드론이 충돌할 수 있는 위험이 있다(Nisbet, 2000). 그렇기 때문에 조사대상 종과 생태계에 미치는 영향을 평가하고 그 영향을 최소화하기 위해, 신중히 고려할 필요가 있다(Grémillet *et al.*, 2012; Francis *et al.*, 2020).

드론을 이용한 조류 개체수 모니터링은 지상 육안관측에 비해 정확성이 높기 때문에 지상관측을 보완하기 위해 드론 항공관측이 점차 확대되고 있는 추세이다(Chabot & M. Bird, 2012; Hodgson *et al.*, 2016; Borrelle & Fletcher, 2017). 국내의 조류의 서식범위와 이동경로 등을 파악하기 위하여 조류에 위치추적기를 부착(Hong *et al.*, 2019)하거나, 카메라 트래핑

(Camera-Trapping)(Kim *et al.*, 2018), 무인센서카메라(Park *et al.*, 2019), 무인모니터링시스템(Nam *et al.*, 2018) 등(Park *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2020)을 이용한 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존 조사방법인 지상 육안관측을 보완하고 개선할 수 있는 드론 항공관측을 이용한 갯벌 바닷새의 시공간 분포에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 지상 육안관측의 한계를 보완하여 갯벌에서 바닷새를 정량적으로 모니터링할 수 있는 드론 항공관측의 방법을 새롭게 제시하였다. 갯벌에 서식하는 바닷새의 공간분포가 조석주기에 따라 변하는 양상을 분석하여 갯벌에서 바닷새의 서식밀도를 잘 관찰할 수 있는 적절한 시간대를 찾고자 하였다. 또한 드론 항공관측과 지상 육안관측을 병행하여 두 방법간의 관측결과를 비교하여 적절한 바닷새 관측법을 제안하였다.

2. 재료 및 방법

인천광역시 강화군 석모도 매음리 갯벌에서 1,000 m × 800 m, 총 면적 80 ha (0.8 km²)의 조간대를 조사 지역으로 설정하였다. 석모도 매음리 갯벌은 최대 간조시 육지에서 석모수로까지 약 800 m 거리로, 1시간 간격의 드론 항공관측 조사에 적합하여 선정하였다. 조사지역을 100 m × 100 m 넓이의 사각형 80개로 세분하고, 전체 80개 사각형을 대상으로 드론을 이용하여 바닷새를 관찰하였다(Fig. 1).

조사 시기는 2021년 4월 25-28일, 6월 22-25일, 7월 6-9일 총 12일로, 매일 10시부터 19시까지 1시간 간격으로 드론을 이용하여 조사지역 전체를 관찰하였다. 관측에 필요한 충분한 조간대 면적을 확보하기 위해 사리 기간인 음력 13-17일과 음력 27-30일 기간에 조사 일자를 맞추었다.

지상 육안관측과 드론 항공관측을 동시에 수행하여, 총 12일간 98시간(드론 항공관측)과 102시간(지상 육안관측) 자료가 확보되었다(Table 1).

드론은 DJI의 MAVIC 2 Pro를 사용하였고, 드론에 장착된 카메라의 각도를 지표면과 수직인 90°로 맞추고, 고도 60 m에서 4 m/sec의 속도로 관측을 수행하였다. 고도와 속도, 경로를 미리 GPS Pro 앱에 설정하여, 매번 동일한 방법으로 조사하였다. 지상조사는 매시간 드론이 이륙한 이후 쌍안경(Swarovski CL POCKET 10×25)과 필드스코프(Swarovski ATS 80)를 이용하여 동일 구역을 조사하였다.

사전에 고도 60 m 드론 영상 화면의 실제 길이와 면적을 파악한 뒤, 이를 통해 화면상의 바닷새, 바다와

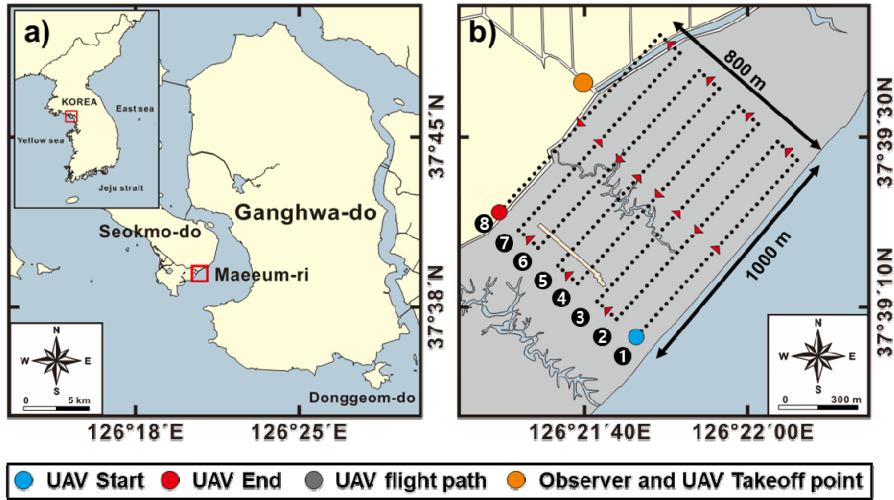


Figure 1. (a) Map showing the study area of tidal flat in Ganghwa island, Korea. (b) A scheme of line transect survey with drone in the study area, and colored dots showed the location of drones takeoff (orange), start (blue), and end (red)

Table 1. Number of 1-hr observation during the study period

	Number of 1-hr observation											
	Method		Height from lowtide waterline using drone (m)									total
	Drone	Ground	0	100	200	300	400	500	600	700		
April	32	33	7	2	1	1	3	1	13	4	32	
June	31	33	0	10	0	3	3	4	6	5	31	
July	35	36	0	3	3	6	7	7	9	0	35	
Total	98	102	7	15	4	10	13	12	28	9	98	

갯벌의 경계선(이하 바다-갯벌 경계선으로 명명함) 등의 정확한 위치를 산정하였다. 조사지역을 80개의 1 ha 격자로 구분한 후 각 격자마다 위치를 표시하였다. 바다-갯벌 경계선의 위치는 육지에서 떨어진 거리(m)로 나타냈으며 매회 조사할 때 측정된 바다-갯벌 경계선의 위치를 평균하여 해당 조사 회차의 바다-갯벌 경계선 위치로 하였고 이를 바닷새 공간분포 자료와 연계하여 분석에 활용하였다. 바다-갯벌 경계선은 100 m 단위로 만조선 0 m에서 간조선 800 m까지 표시하였다. 이러한 방법으로 해당 조사회차의 바다-갯벌 경계선 위치를 정하였고, 이에 따른 바닷새의 공간분포를 해석하였다. 영상에서 관찰된 바닷새가 휴식 및 먹이 활동 중인 경우를 행동유형 1, 비행 중인 경우를 행동유형 2로 정의하였다.

관찰된 바닷새들은 갈매기과(Laridae, LAR), 가마우지과(Phalacrocoracidae, PHA), 검은머리물떼새(*Haematopus ostralegus*, HAE), 백로과(Ardeidae, ARD), 오리과(Anatidae, ANA), 저어새(*Platalea minor*, PLA)로 분류하였다. 도요새과(Scolopacidae)와 물떼새과(Charadriidae)는 한 개의 분류단위로 하여 SCH로 표

시하였다.

드론 항공관측과 지상 육안관측의 평균 서식밀도의 차이를 비교하기 위해 T-검정(양측검정)을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바닷새 공간분포

드론 항공관측 결과, 7개로 구분한 바닷새 분류군(갈매기과, 가마우지과, 검은머리물떼새, 백로과, 오리과, 저어새, 도요·물떼새과)의 공간분포가 바다-갯벌 경계선 위치 변화에 따라 해상과 갯벌에서 어떻게 변하는지 구분하여 나타내었다(Fig. 2). 바닷새들의 공간분포 유형은 전 지역 분포, 해상 분포, 갯벌 분포, 바다-갯벌 경계선 분포 등 4가지로 구분되었다.

조사구역 전체를 이용하는 분류군은 갈매기과(LAR)였다. 드론으로 조사된 바닷새 전체 개체수의 90% 이상을 차지하는 갈매기과는 조사구역 전체에서 고르게 분포하였다. 특히 경계선이 육지로부터 200m 떨어져 있을 때, 육지에서 100-200 m 떨어진 갯벌에서 가장

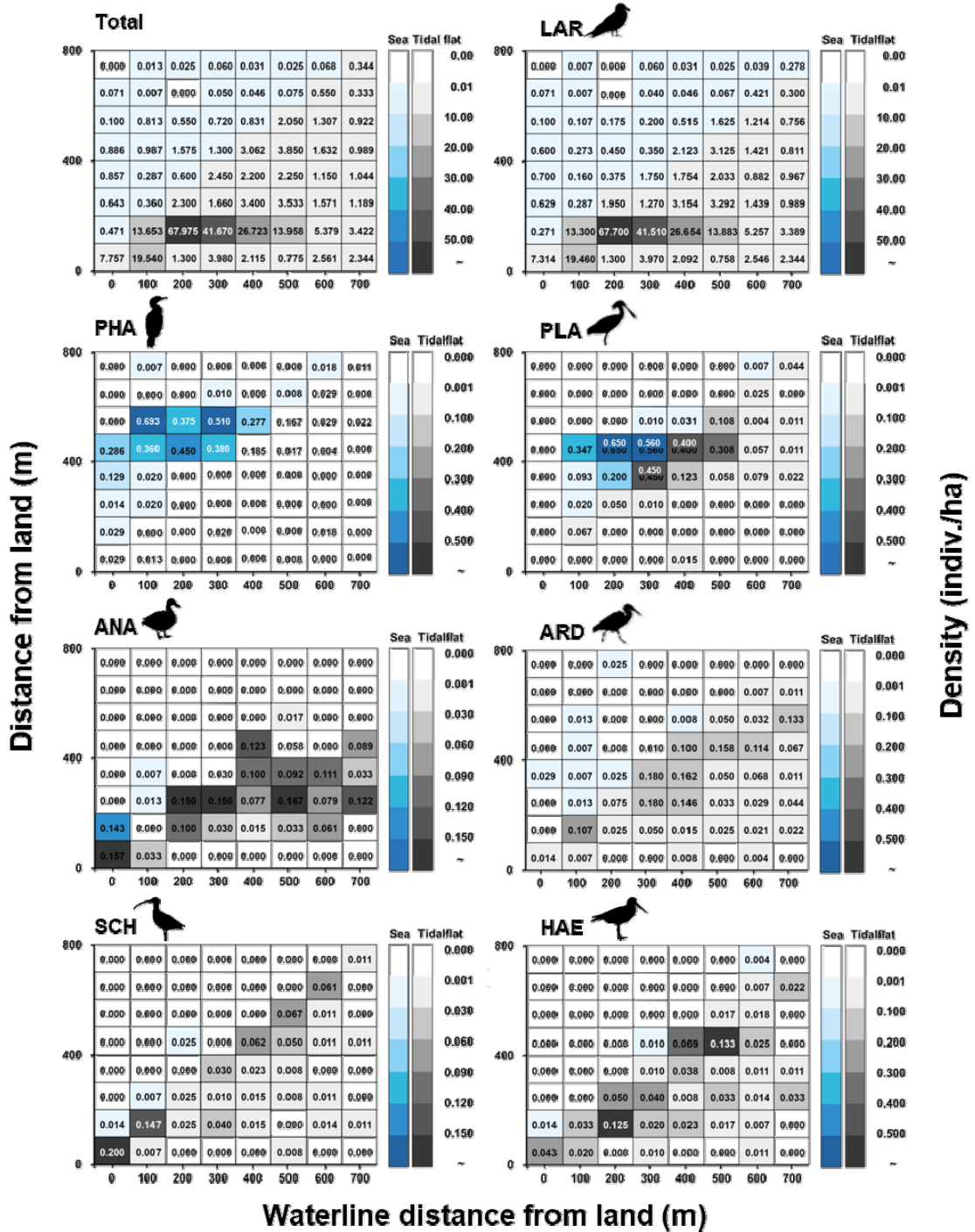


Figure 2. Distribution of shorebirds in the study area by the location of waterline: Family Laridae (LAR), Family Phalacrocoracidae (PHA), *Haematopus ostralegus* (HAE), Family Scolopacidae and Family Charadriidae (SCH), Family Ardeidae (ARD), Family Anatidae (ANA), *Platalea minor* (PLA).

높은 서식밀도(67.700 ind./ha)가 관찰되었다. 가마우지과(PHA)와 저어새(PLA)는 바다-갯벌 경계

선이 육지에서 100-300 m 떨어져 있을 때, 갯벌보다 해상에서 더 높은 밀도로 관찰되었다. 가마우지과(평

Table 2. Comparison of shorebirds mean density between drone-based aerial survey and fieldscope-based ground survey by T-test

Taxa	UAV		Ground		p
	Mean	SE	Mean	SE	
Total	3.49	3.22	4.47	3.30	0.04
Laridae indet.	3.29	3.13	4.05	3.07	0.09
Phalacrocoracidae indet.	0.06	0.06	0.08	0.08	0.04
<i>Haematopus ostralegus</i>	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
Scolopacidae and Charadriidae indet.	0.01	0.02	0.10	0.20	<0.001
Ardeidae indet.	0.03	0.03	0.08	0.06	<0.001
Anatidae indet.	0.03	0.04	0.07	0.07	<0.001
<i>Platalea minor</i>	0.05	0.06	0.08	0.08	0.004

* p<0.05

균 서식밀도 0.06 ± 0.06 ind./ha)는 바다-갯벌 경계선이 육지에서 100 m, 300 m 떨어져 있을 때 육지에서 500-600 m 떨어진 해상에서 각각 높은 서식밀도를 보였다(100 m: 0.693 ind./ha, 300 m: 0.510 ind./ha). 저어새는 평균 서식밀도 0.05 ± 0.06 ind./ha를 보였으며, 바다-갯벌 경계선이 육지로부터 200 m 지점에 위치할 때, 육지에서 400 m 떨어진 해상에서 0.650 ind./ha의 높은 서식밀도를 나타냈다. 바다-갯벌 경계선이 육지로부터 300 m에 위치할 때 경계선 근처 갯벌에서 0.450 ind./ha, 경계선 위치가 400 m 일 때 경계선 근처 갯벌에서 0.400 ind./ha의 높은 서식밀도가 관찰되었다(Fig. 2). 저어새는 갯벌이나 논, 강 하구 등 수심이 얕은 물가에서 긴 다리와 부리를 이용하여 동물성 먹이를 섭식하기 때문에, 수심이 얕은 바다-갯벌 경계선 근처에서 많이 발견된 것으로 보인다(Swennen & Yu, 2005). 또한 저어새는 육지로부터 300 m 이상 떨어진 곳에서 주로 먹이활동을 하는 것으로 보아 사탐에 대한 경계심이 높은 것으로 판단된다.

백로과(ARD), 오리과(ANA)의 평균 서식밀도는 해상보다 갯벌에서 높게 나타났다. 백로과(ARD)는 바다-갯벌 경계선이 육지로부터 300-700 m에 위치할 때 경계선 부근에서 높은 서식밀도를 보였다. 오리과는 조사 전체기간 동안 육지에서 100-500 m 떨어진 갯벌에서 높은 서식밀도가 관찰되었다.

바다-갯벌 경계선 부근에 주로 분포하는 바닷새는 검은머리물떼새(HAE)와 도요물떼새과(SCH)였다. 검은머리물떼새는 평균 서식밀도가 0.014 ± 0.026 ind./ha였으며, 바다-갯벌 경계선이 육지로부터 200-500 m에 위치하는 시기에 모두 바다-갯벌 경계선 부근에서 많이 발견되었다. 특히, 바다-갯벌 경계선의 해상지역 (0.001 ± 0.003 ind./ha) 보다는 갯벌지역(0.024 ± 0.031 ind./ha)에서 높은 서식밀도를 보였다. 검은머리물떼새는 갯골과 조수 경계부를 따라다니며 이매패류를 섭식하는 것을 선호한다고 알려져 있으며 본 연구와 일치

된 결과를 보여주었다(Lee *et al.*, 2018; Schwemmer & Garthe, 2011). 도요물떼새과(SCH)의 평균 서식밀도는 갯벌 지역에서 0.024 ± 0.042 ind./ha, 해상 지역에서 0.002 ± 0.005 ind./ha로 나타났다. 바다-갯벌 경계선이 육지로부터 0, 100, 400, 500 m에 위치할 때의 서식밀도가 전체 평균(0.014 ± 0.033 ind./ha)보다 높았다.

몸길이 16cm 이하의 소형 도요류와 알락꼬리마도요의 경우 드론 항공관측보다 지상 육안관측의 서식밀도가 약 10배 가량 높았다(Table 2). 이는 도요물떼새의 작은 크기와 갯벌과 유사한 색으로 인해 드론 영상에서 개체 식별이 어려웠고, 드론이 접근하면 회피하는 행동을 보이기 때문이며, 이 분류군을 대상으로 드론 항공관측을 수행할 경우에는 더욱 세심한 주의를 기울일 필요가 있다.

3.2 바닷새 행동유형

드론 항공관측 조사자료를 바탕으로 바다-갯벌 경계선의 위치에 따른 바닷새들의 행동유형을 분석하였다(Fig. 3). 바닷새 전체에서 행동유형 1(먹이섭식과 휴식)과 행동유형 2(비행)의 비율은 바다-갯벌 경계선이 육지에서 200 m 떨어져 있을 때 95:5로 가장 높았고, 바다-갯벌 경계선이 육지에서 700 m 떨어져 있을 때 78:22로 가장 낮은 값을 보였다. 행동유형 별로 서식밀도가 가장 높았을 때 바다-갯벌 경계선의 위치는 행동유형1(먹이섭식과 휴식)의 경우 육지로부터 200 m, 행동유형 2(비행)는 육지로부터 400 m 떨어져 있을 경우였다. 행동유형 별로 서식밀도가 가장 낮았을 때 바다-갯벌 경계선의 위치는 행동유형 1(먹이섭식과 휴식)의 경우 경계선이 육지로부터 700 m, 행동유형 2(비행)의 경우 경계선이 육지로부터 0 m에 떨어져 있었다(Fig. 3). 이러한 결과는, 저조에 가까울수록 먹이활동과 휴식 행동이 적고 비행활동이 많아지며, 만조에 가까울수록 먹이활동과 휴식 행동이 많아지고 비행활동이 적어짐을 보여준다.

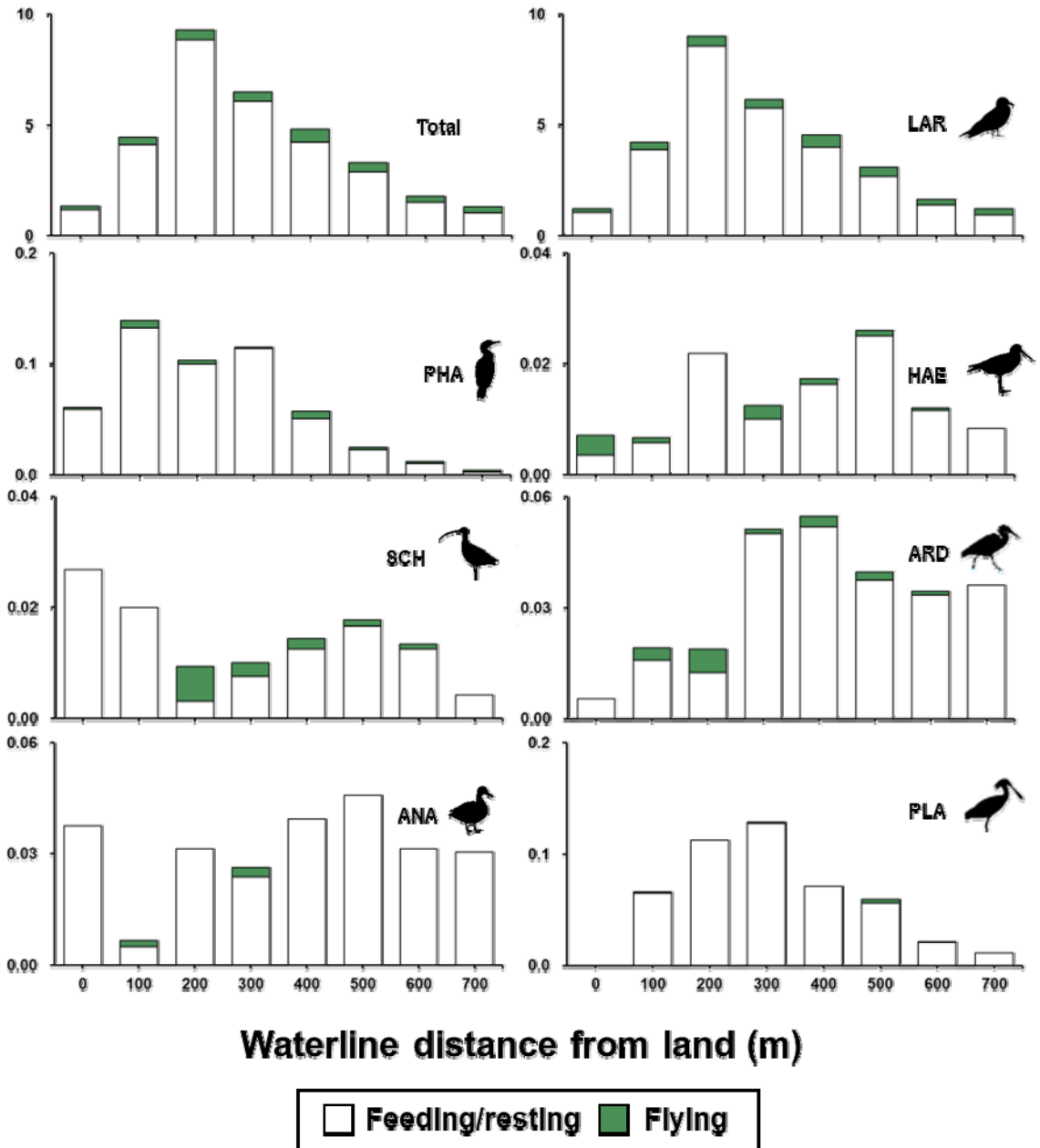


Figure 3. Comparison of shorebirds behavior across eight variation mean waterline(between water and tidal flat) during a tidal cycle: Family Laridae (LAR), Family Phalacrocoracidae (PHA), *Haematopus ostralegus* (HAE), Family Scolopacidae and Family Charadriidae (SCH), Family Ardeidae (ARD), Family Anatidae (ANA), *Platalea minor* (PLA).

각 분류군 별로 바다-갯벌 경계선의 위치에 따른 행동양상의 변화가 다르게 나타났다. 갈매기과(LAR)의 경우 바다-갯벌 경계선이 육지로부터 200 m에 위치할 때 먹이섭식과 휴식 행동이 가장 많은 빈도수를 보였다. 도요물떼새과(SCH)는 바다-갯벌 경계선 위치가

200 m 일 때 먹이섭식과 휴식행동이 비행보다 높은 비율을 보였으며, 가장 높은 서식밀도를 보인 경계선 위치 0 m 에서는 비행은 관찰되지 않았다. 가마우지과 (PHA)의 먹이섭성과 휴식 행동은 바다-갯벌 경계선이 300 m에 위치할 때 가장 높게 나타났는데, 이는 잠수

하여 먹이를 사냥하는 종의 고유 행동습성때문인 것으로 판단된다(Kato *et al.*, 2001). 경계선이 700 m에 위치할 때 서식밀도가 가장 낮았고, 먹이섭식과 휴식 행동의 빈도 역시 가장 낮았다. 저어새(PLA)는 행동유형 1(먹이 섭식과 휴식)과 행동유형 2(비행)의 비율이 전체 시간대에서 95% 이상으로 나타났다. 백로과(ARD)는 이 비율이 경계선 위치 200 m일 때 가장 낮았으며 (67:33), 경계선이 100 m 일 때 83:17, 0 m 일 때 100:0로 점차 높아졌다. 검은머리물떼새(HAE)는 경계선 위치가 0 m일 때 행동유형 1과 2의 비율이 50:50으로 나타났는데, 이는 만조시기에 휴식공간이 없어 새들이 주로 비행한 것으로 여겨진다. 오리과(ANA)는 행동유형 1과 2의 비율이 경계선 위치 100 m 일 때 75:25, 300 m 일 때 90:10으로 나타났으며, 나머지 경계선 이치에서는 행동유형 1만 관찰되었다. 각 과별 바닷새들의 행동유형은 바다-갯벌경계선의 위치에 따라 독특한 특성을 보였으며, 독특한 행동특성을 보이는 이유를 설명하기 위해서는 추가 연구가 필요하다.

3.3 조사 방법에 따른 평균 밀도 분석

드론 항공관측과 지상 육안관측에 따른 바닷새 전체의 평균 서식밀도 차이는 유의하였다($p=0.04$). 분류군 별로는 갈매기과만 유의한 차이를 보이지 않았고($p=0.09$), 가마우지과($p=0.04$), 검은머리물떼새($p=0.02$), 도요물떼새과($p=0.02$), 백로과($p<0.001$)와 오리과($p<0.001$), 저어새($p=0.004$)는 유의한 차이를 보였다(Fig. 4, Table 2).

과거 연구결과를 살펴보면 드론 항공관측이 지상 육안관측보다 번식쌍이 약 5% 정도 많이 출현한 사례(Valle & Scarton, 2019), 개체수가 약 5배 높은 사례(Colefax *et al.*, 2019), 그리고 두 조사 방법에서 관찰되는 개체수가 유사한 사례(Nam *et al.*, 2018)가 있었다. 본 연구는 지상 육안관측(4.47 ± 3.30 ind./ha)이 드론 항공관측(3.49 ± 3.22 ind./ha)보다 약 22% 높은 서식밀도를 보였다. 관측값의 편차는 지상 육안관측에서 상대적으로 높게 나타나는데(Nam *et al.*, 2018), 이는 지상 육안관측의 방법이 조사자의 역량에 의존하기 때문에 조사자가 변경될 경우 조사결과와 편차나 왜곡될 가능성이 높음을 시사한다. 이에 반해 지상 조사자가 관측할 수 없는 사각지대, 즉 갯골이나 거리가 먼 갯벌에서는 드론 항공관측이 훨씬 효과적이었다. 하지만 본 연구에서 사용한 드론 모델 특성상 약 20분마다 배터리를 교환하는 동안 데이터의 차이가 발생하였다. 바닷새의 분포를 보다 정확하고 객관적으로 모니터링하기 위해서 선택하는 드론 모델의 성능을 함께 고려하여, 활용도를 높일 필요가 있다.

논을 이용하는 조류(백로과, ARD)를 대상으로 지상 육안관측과 드론 항공관측 방법을 비교한 연구에서는 결과가 유사하게 나타났다(Nam *et al.*, 2018). 이는 백로가 다른 조류에 비해 큰 크기와 쉽게 식별이 가능하고, 논이 갯벌에 비해 사각지대가 적기 때문으로 판단된다. 본 연구에서도 전체 서식밀도의 각 90% 이상 차지하고 식별이 비교적 용이한 갈매기과는 두 조사방식의 평균 서식밀도 차이가 유의하지 않았다($p=0.09$). 갈

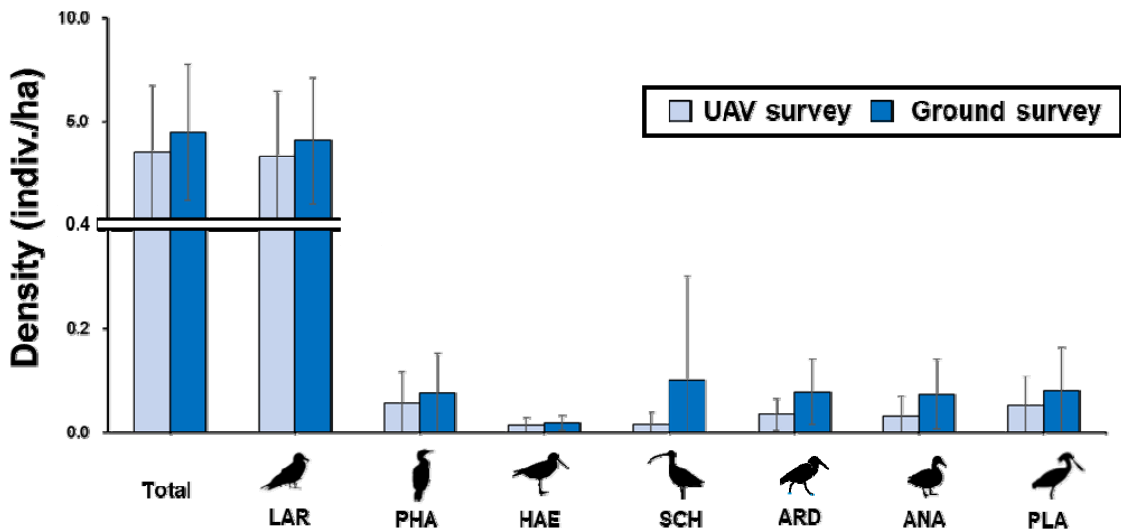


Figure 4. Comparison of shorebirds mean density by two survey methods: Family Laridae (LAR), Family Phalacrocoracidae (PHA), *Haematopus ostralegus* (HAE), Family Scolopacidae and Family Charadriidae (SCH), Family Ardeidae (ARD), Family Anatidae (ANA), *Platalea minor* (PLA).

매기과는 지상 육안관측 조사자에 따른 편차가 크지 않은 것으로 알려져 있다(Nisbet, 2000). 가마우지과의 경우, 만조 시(경계선 위치 0 m) 지상 육안관측 (0.011 ± 0.076 ind./ha)보다 드론 항공관측(0.061 ± 0.056 ind./ha)에서 더 높은 평균 서식밀도를 보였다. 이는 해상에서 쉽게 접근할 수 있는 부표나 양식장을 휴식지로 이용하는 가마우지과의 습성때문인 것으로 판단된다(Choi, 2009).

3.4 드론 항공관측에 적절한 카메라 해상도

동일 지역에서 해상도가 높은 드론을 이용한 기존 연구에서는 관측 고도에 따른 평균 개체수 차이가 나타나지 않았다(Park *et al.*, 2019). 고도 50 m에서 픽셀 당 약 7.2 mm(McEvoy *et al.*, 2016), 혹은 최소 5 mm 해상도로 조사하거나(Dulava *et al.*, 2015), 줌 렌즈를 장착하여 고도 20-30 m에서 최소 20M 픽셀 카메라를 가진 중간 크기의 회전의 드론을 사용한다면(Valle, 2018), 드론에 대한 바닷새의 반응이 적으면서 종 식별에 적합한 이미지를 획득할 수 있을 것이다.

본 연구의 MAVIC 2 Pro는 20M 픽셀 카메라로, 고도 60 m에서 촬영하여 크기가 작은 새를 식별하기 어려웠다. 특히 소형인 도요물떼새과(SCH)의 경우, 지상 육안관측의 서식밀도(0.01 ± 0.02 ind./ha)가 드론 항공관측의 서식밀도(0.10 ± 0.20 ind./ha)에 비하여 10배 가량 높게 나타났다. 따라서 크기가 작은 바닷새의 경우에는 카메라 해상도 성능이 더 높은 드론을 이용하여 연구할 필요가 있다.

4. 결론

지상 육안관측과 드론 항공관측 조사를 통하여 조석에 따른 갯벌에서 바닷새의 시공간 분포를 연구하고, 바닷새 평균 서식밀도를 알아낼 수 있는 최적의 관측 시간대를 찾고자 하였다.

2021년 4월부터 7월까지 총 98시간 동안 매음리 갯벌에서 관찰된 바닷새는 지상 육안관측 결과 총 35,053 개체이며, 평균 서식밀도는 4.47 ± 3.30 ind./ha로 나타났다. 드론 항공관측에서는 총 27,375 개체, 평균 서식밀도는 3.49 ± 3.22 ind./ha로 나타났다. 두 조사 방법 모두 4월에서 7월로 갈수록 밀도가 높아졌다. 갈매기과는 개체수 기준 90% 이상 차지하여, 갈매기과의 출현이 전체 밀도에 큰 영향을 주었다. 조사방식에 따른 서식밀도의 차이는 갈매기과를 제외한 모든 분류군에서 유의한 차이를 보였다.

갯벌과 바다의 경계선 위치가 변함에 따라 바닷새의 공간분포가 변하는 것을 확인하였다. 경계선 위치가

육지에서 200-400 m 떨어졌을 때 육지에서 100-200 m 떨어진 갯벌에서 가장 많은 개체수가 발견되었다. 검은머리물떼새, 도요물떼새과, 저어새는 바다-갯벌 경계선을 따라 높은 밀도로 관찰되었다. 이는 분류군에 따라 드론에 대한 회피반응이 다르고, 크기가 작은 개체 식별이 어려우며, 선호하는 먹이에 따라 분포가 다르게 나타난 것으로 볼 수 있다. 휴식/먹이활동 행동과 비행 행동의 비율은 갯벌과 바다 경계선이 육지로부터 200 m 떨어졌을 때 95:2로 가장 높게 나타났고, 경계선 위치가 육지로부터 700 m 일 때 78:22로 가장 적은 값을 보였다.

향후, 정확한 바닷새 관찰을 위해서는 각 과(Family)의 생태습성과 조사지역의 환경을 고려한 정교한 조사 방법이 요구되며, 지상 육안관측과 드론 항공관측의 방법을 표준화하는 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 ‘과학기술기반 해양환경영향평가 기술개발(2021-0427)’, ‘블루카본 기반 기후변화 적응형 해안조성 기술개발(2022-0526)’의 연구사업의 지원을 받아 수행하였습니다. 논문을 세심하게 검토해 주신 심사위원 두 분에게 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Adame, K., Pardo, M.A., Salvadeo, C., Beier, E., Elorriaga-Verplancken, F.R., 2017. Detectability and categorization of California sea lions using an unmanned aerial vehicle. *Marine Mammal Science* 33(3), 913-925.
2. Borrelle, S.B. and Fletcher, A.T., 2017. Will drones reduce investigator disturbance to surface-nesting seabirds? *Marine Ornithology* 45, 89-94.
3. Chabot, D., Bird D.M., 2012. Evaluation of an off-the-shelf Unmanned Aircraft System for Surveying Flocks of Geese. *Waterbirds* 35(1), 170-174.
4. Choi, C.Y., 2009. Diurnal Time-activity Budget of Wintering Temminck's Cormorants (*Phalacrocorax capillatus*) on Hongdo Island, Korea. *The Korean Society of Phycology* 16(2), 133-140.
5. Choi, H.I., Nam, H.K., Yoon, J.M., 2020. Testing the potential of lightweight drones as a tool for monitoring the status of colonially breeding

- Saunders's gulls(*Saundersilarus saundersi*). Korean Journal of Ophthalmology 27, 10-16.
6. Colefax, A.P., Butcher, P.A., Pagendam, D.E. and Kelaher, B.P., 2019. Reliability of marine faunal detections in drone-based monitoring. Ocean & coastal management 174, 108-115.
 7. Dulava, S., Bean, W.T., Richmond, O.M.W., 2015. Environmental Reviews and Case Studies: Applications of Unmanned Aircraft Systems (UAS) for Waterbird Surveys. Environmental Practice, 17(3), 201-210.
 8. Francis, R.J., Lyons, M.B., Kingsford, R.T., Brandis, K.J., 2020. Counting Mixed Breeding Aggregations of Animal Species Using Drones: Lessons from Waterbirds on Semi-Automation. Remote Sensing, 12(7), 1185.
 9. Goebel, M.E., Perryman, W.L., Hinke, J.T., Krause, D.J., Hann, N.A., Gardner, S., LeRoi, D.J., 2015. A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. Polar Biology 38(5), 619-630.
 10. Grémillet, D., Puech, W., Garçon, V., Boulinier, T., Le Maho, Y., 2012. Robots in ecology: welcome to the machine. Open Journal of Ecology 2(2), 49-57.
 11. Hodgson, J.C., Baylis, S.M., Mott, R., Herrod, A., Clarke, R.H., 2016. Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles. Scientific reports 6(1), 1-7.
 12. Hong, M.J., Kim, M.R., Lee, H., Cho, S.M., 2019. First Report of Annual Habitat Ranges in Black-tailed Gulls (*Larus crassirostris*) Breeding on Dokdo Island. Ocean and polar research 41(2), 99-105.
 13. Kato, A., Watanuki, Y., Naito, Y., Foraging and breeding performance of Japanese cormorants in relation to prey type. Ecological Research, 16(4), 745-758.
 14. Kim, J.S., Park, S.K., Lee, D.P., Koo, T.H., Won, P.O., 2004. Heavy Metal Concentration in Liver and Kidney of Shorebirds Migrating to Yeongjong and Sammok Islands. The Korean Journal of Ecology 27(4), 193-198.
 15. Kim, W.Y., Lee, H.J., Ha, J.W., Park, S.J., Choi, S.S., Cha, J.Y., 2018. Is Camera Trapping Applicable to Bird Monitoring? The Korean Journal of Ornithology 25(1), 23-32.
 16. Lee, K.S., Kim, M.R., Lee, S.W., Lee, H S., 2004. The study for grading of the mudflat by birds. Journal of Korean Wetlands Society 6(1), 105-115.
 17. Lee, S.Y., Choi, Y.S., Joo, S., Jeong, G., You, Y.H., 2018. Foraging Behavior and Preys in Relation to Feeding Site Types of the Eurasian Oystercatcher (*Haematopus ostralegus osculans*) during the Breeding Season in Yubu Island, Korea. Korean Journal of Ecology and Environment 51(2), 184-191.
 18. MacKinnon, J., Verkuil, Y.I., Murray, N., 2012. IUCN situation analysis on East and Southeast Asian intertidal habitats, with particular reference to the Yellow Sea (including the Bohai Sea). Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission, 47, 5-9.
 19. McEvoy, J.F., Hall, G.P., McDonald, P.G., 2016. Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowlsurveys: disturbance effects and species recognition. PeerJ 4, 1831.
 20. Ministry of Environment(MOE), 2020. The 5th National monitoring of natural environment.
 21. Ministry of Oceans and Fisheries(MOF), 2019. National Marine Ecosystem Monitoring Program.
 22. Nam, H.K., Kim, M.H., Kwon, S.I., Eo, J., Song, Y.J., 2018. Study of Population Dynamics of Birds Using Unmanned Monitoring System in Rice Paddy. Journal of Wetlands Research 20(2), 124-130.
 23. Nisbet, I.C., 2000. Disturbance, habituation, and management of waterbird colonies. Waterbirds 23(2), 312-332.
 24. Park, H.C., Kil, S.H., Seo, O.H., 2019. The Use of Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Individuals of Ardeidae Species in Breeding Habitat: A Case Study on Natural Monument in Sinjeop-Ri, Yeosu, South Korea. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 22(1), 73-84.
 25. Park, J.H., Lee, K.S., Kwon, I.K., Chung, H., 2019. Factors Affecting Incubation Rhythm of the Black-faced Spoonbill (*Platalea minor*) Breeding in Gyeonggi Bay, Korea. Ocean and polar research 41(3), 147-157.
 26. Schwemmer, P., Garthe, S., 2011. Spatial and

- temporal patterns of habitat use by Eurasian oystercatchers (*Haematopus ostralegus*) in the eastern Wadden Sea revealed using GPS data loggers. *Marine biology* 158(3), 541-550.
27. Sykora-Bodie, S.T., Bezy, V., Johnston, D.W., Newton, E., Lohmann, K.J., 2017. Quantifying nearshore sea turtle densities: applications of unmanned aerial systems for population assessments. *Scientific reports* 7(1), 1-7.
28. Swennen, C. & Y, Yu., 2005. Food and feeding behavior of the Black-faced Spoonbill. *Waterbirds* 28(1), 19-27.
29. Valle, R. G., Scarton, F., 2019. Effectiveness, efficiency, and safety of censusing Eurasian Oystercatchers *Haematopus ostralegus* by unmanned aircraft. *Marine Ornithology* 47, 81-87.
30. Vallery, A. C., 2018. Assessment of shorebirds and wading birds in Galveston Bay using conventional and UAV techniques. PhD Thesis.
31. Vermeulen, C., Lejeune, P., Lisein, J., Sawadogo, P., Bouché, P., 2013. Unmanned aerial survey of elephants. *PloS one* 8(2), e54700.