

법정보호종, 흰발농게(*Austruca lactea*) 서식 개체수 추정에 대한 검토와 대안

유재원*·김창수*·박미라*·정수영*,*****·이채린*,*****·김성태*,*****·안동식*·이창근**,
한동욱***·백용해****·박영철*****†

* (주)한국연안환경생태연구소
** 한국어촌어항공단
*** PGA생태연구소
**** (사)녹색습지교육원
***** (주)뉴워터텍
***** 인하대학교 생물학과
***** 경희대학교 생물학과
***** 인하대학교 해양학과

Considerations and Alternative Approaches to the Estimation of Local Abundance of Legally Protected Species, the Fiddler Crab, *Austruca lactea*

Yoo, Jae-Won*·Kim, Chang-Soo*·Park, Mi-Ra*·Jeong, Su-Young*,*****·Lee, Chae-Lin*,*****·Kim, Sungtae*,*****·
Ahn, Dong-Sik*·Lee, Chang-Gun**·Han, Donguk***·Back, Yonghae****·Park, Young Cheol*****†

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

**Korea Fisheries Infrastructure Public Agency, Seoul 08588, Korea

***PGA Eco&bio Diversity Institute, Goyang 10456, Korea

****Wetland Korea Institute, Incheon 23050, Korea

*****New Water Tec Co. Ltd., Incheon, 22689, Korea

*****Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

*****Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Korea

*****Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received : 08 March 2021, Revised : 02 April 2021, Accepted : 02 April 2021)

요약

본 연구에서는 우리나라의 갯벌에서 조사대상으로 삼는 멸종위기야생생물이자 해양보호생물, 흰발농게(*Austruca lactea*)의 전체 개체수 추정 방법을 검토하였다. 일반적으로 무한모집단에 대한 전수조사는 불가능하며 이는 갯벌 내 제한된 서식처에서 개체수를 추정하더라도 마찬가지이다. 표본으로부터 추정되는 서식 밀도 역시 다양한 생물학적, 생태학적 요인들로 인해 높은 변동성을 보인다. 서식처 경계와 면적은 측정 오차뿐만 아니라 생물의 주기성이나 리듬 활동(주야, 간만 주기 등)에 따라 달라진다. 따라서 밀도와 서식처 면적으로 산출되는 전체 개체수는 일시적인 것으로 간주되어야 한다. 이 같은 추정은 인천 송도 갯벌에서 3년 간 관찰된 흰발농게(*A. lactea*)의 평균 밀도와 표준오차 범위 그리고 공간분포의 시공간적 변동성에

† To whom correspondence should be addressed.
New Water Tec Co. Ltd., Incheon, 22689, Korea
E-mail: ypark115@naver.com

- Yoo, Jae-Won Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea / CEO (jwyoo@coastkorea.com)
- Kim, Chang-Soo Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea / Chief Operating Officer (csk@coastkorea.com)
- Park, Mi-Ra Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea / Senior Researcher (blue2033@coastkorea.com)
- Jeong, Su-Young Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea
Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea / Senior Researcher (syjeong@coastkorea.com)
- Lee, Chae-Lin Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea
Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Korea / Researcher (blueseal@coastkorea.com)
- Kim, Sungtae Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea
Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea / Researcher (stkim@coastkorea.com)
- Ahn, Dong-Sik Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Bucheon 14449, Korea / Principal Researcher (ahndongsik@coastkorea.com)
- Lee, Chang-Gun Korea Fisheries Infrastructure Public Agency, Seoul 08588, Korea / Research Manager (lcg013@fipa.or.kr)
- Han, Donguk PGA Eco&bio Diversity Institute, Goyang 10456, Korea / Director (ecoguideuk@gmail.com)
- Back, Yonghae Wetland Korea Institute, Incheon 23050, Korea / Director (getga@naver.com)
- Park, Young Cheol New Water Tec Co. Ltd., Incheon, 22689, Korea / Senior Researcher (ypark115@naver.com)

근거하면 타당한 것으로 볼 수 있었다. 본 연구에서는 로지스틱 회귀모형의 출현 확률인 50%를 기준으로, 서식처 보존 가치의 중요성을 반영하는 잠재적 서식처 면적을 전체 개체수 추정의 대안으로 제시하였다. 보편성을 갖춘 모형으로부터 예측되는 잠재적 서식처는 대상종의 주요 환경조건이 급격하게 변하지 않는다면 시간에 따라 일정한 모습을 유지할 것이다. 특정종을 대상으로 개발되는 모형은 추후 서식처 복원/조성 사업에서도 원하는 생물의 정착을 유도하는데도 활용이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어 : 갯벌, 서식처면적, 전체 개체수, 멸종위기종, 해양보호생물, 흰발농게

Abstract

We reviewed the methods employed in Korean tidal flat surveys to measure the local abundance of the endangered wildlife and marine protected species, the fiddler crab, *Austruca lactea*. A complete census for infinite population is impossible even in a limited habitat within a tidal flat, and density estimates from samples strongly vary due to diverse biological and ecological factors. The habitat boundaries and areas shift with periodicities or rhythmic activities of organisms as well as measurement errors. Hence the local abundance calculated from density and habitat areas should be regarded as transient. This conjecture was valid based on the spatio-temporal variations of the density averages, standard error ranges, and spatial distribution of the crab, *A. lactea* observed for 3 years (2015–2017) in Songdo tidal flat in Incheon. We proposed the potential habitat areas using the occurrence probability of 50% from logistic regression model, reflecting the importance of habitat conservation value as an alternative to local abundance. The spatial shape of potential habitat predicted from a generalized model would remain constant over time unless the species' critical environmental conditions change rapidly. The species-specific model is expected to be used for the introduction of desired species in future habitat restoration/creation projects.

Key words : Endangered Species, Fiddler Crab, Habitat Area, Local Abundance, Marine Protected Species, Tidal Flat

1. 서 론

생물군집을 구성하는 여러 종간 또는 개체군의 밀도 분포가 나타내는 높은 불확실성 또는 복잡성은 군집의 본질이며, 이에 대해 해양생태학자들은 오랜 기간 관심을 가져왔다(Ludwig and Reynolds, 1988). 밀도의 복잡성에 대한 수학적 이해와 기술(description)로부터 군집 안정성(community stability; Hutchinson, 1959)이나 다차원 서식처 또는 지위 초공간(m- or n'-dimensional habitat or niche hyperspace; Whittaker et al., 1973) 등을 포함하는 많은 모델들이 제시되었다. 관찰된 밀도 분포를 적합(fitting)하기 위하여 제안된 broken stick 분포(Giller, 1984)나 대수정규분포(log-normal distribution; May, 1975) 등과 같은 다양한 분포 모델 역시 그러한 사례에 해당한다(Ludwig and Reynolds, 1988).

Preston(1948)은 개체수의 풍부함을 나타내는 용어로 (1) 주어진 종의 살아있는 모든 개체수(global abundance)와 (2) 특정 시각에 주어진 장소에서 관찰되는 일정 면적 내 전체 개체수(local abundance), (3) 종 간 비율로 나타낼 수 있는 상대적인 개체수(relative abundance) 그리고 (4) 표본으로부터 관찰되는 표본 개체수(sample abundance) 등을 구분하였다. 그는 조사를 통해 위와 같은 분포를 결정하는 법칙을 밝혀내기 위해서는 앞서 언급한 (1)이나 적어도 (2)에 대한 전수 조사(complete census)가 필요하나, 극히 드문 예외적 상황을 제외하면 이는 불가능하며, 따라서 (4)의 표본 개체수에 의존할 수밖에 없다고 하였다.

KNPRI(2017)와 NIE(2019)는 각각 경남 남해 이락사 갯벌과 전북 군산 선유도 갯벌에 서식하는 멸종위기야생생물이자

해양보호생물인 흰발농게(*A. lactea*)의 개체수 조사를 실시하였다. 전자에서는 개체수를 추산하고 이 값의 증가에 근거하여 보호구역 지정의 긍정적 효과를, 그리고 후자에서는 당시 기준의 기록적인 개체수 추산으로 흰발농게(*A. lactea*)의 국내 최대 분포지를 찾아내어 보고한 바 있다.

최근 국립해양생물자원관과 국립생태원에 의해 조사 발표된 '흰발농게 203만마리.. 영종도에 최대 서식'이라는 제목의 기사(Kyunghyang, 2020)에 따르면, 2020년 7월 6일부터 10일 까지 매립 예정지역인 인천 중구 영종도 갯벌(영종 2지구) 293만 5,000㎡에 대한 정밀조사로부터, 9만 5,209㎡에 흰발농게(*A. lactea*)가 203만 9,104마리 서식하는 것으로 추정되었다. 이는, 앞서 소개한, 기존 최대 서식처인 전북 군산 선유도의 1만 914㎡보다 약 8배 넓고 개체수 역시 39만 9,340마리보다 약 5배 많은 것으로 나타나 새로운 국내 최대 서식처인 것으로 드러났다. 국립해양생물자원관과 국립생태원은, 위와 같은 조사를 통해, 법정 보호종의 국내 최대 개체수가 추정된 이곳의 중요성이 확인되었음에도 불구하고 각종 개발압력 및 매립 계획 등에 노출되어 있다며, 해양보호구역 지정 등의 대책이 필요하다고 주문하였다.

국내 해양 생태계 분야에서는 다소 생소하나, 자연 서식처의 분류나 생태계의 질적 상태/생태학적 가치 평가의 대상은 이미 오래전부터 환경요인 위주에서 개체군이나 또는 군집 등의 생물 구성원으로 이동하고 있다(Diaz et al., 2004). 물질의 독성이나 위해성에 대한 평가에 있어서, 과거 실험실 차원의 개체 단위 평가의 한계를 인식하고 개체군이나 생태계에 대한 영향 추정을 목표로 설정하며 종별로 차별화된 생태학적 형질(ecological traits)을 고려하는 것의 중요성이 강조되고 있다(De Lange et al., 2009). 해양생태계 서비스를 종합적으로 평

가하는 시스템의 하나인 Ocean Health Index(Halpern et al., 2012) 역시 해양이 인간에게 제공하는 혜택이 다양한 생물의 대사활동에 기인한다는 것을 전제로 하며 총 10개 지시자의 평가에서 절반 가까이가 생물 구성원의 상태와 변화의 추정에 초점이 맞추어져 있다. 생태계 및 서식처의 평가에서 나타나는 환경에서 생물 구성원으로서의 평가대상의 이동 또는 변화는 보다 현실적이고 정확한 평가를 지향하는 생태학적 적절성(ecological relevance)이나 적합성(suitability)에 대한 중시 때문이다(Stalmans et al., 2002).

생태학적 조사 결과는 과학적 연구로서의 중요성뿐만 아니라 연구 성과와 이를 활용한 교육과 대중인식 증진 등의 과학 정보 확산 측면에서의 파급 효과 그리고 관리 및 보전 정책 마련의 근거로 활용되는 확장성 등을 가진다. 비록 위에서 인용한 국내 조사가 엄격한 리뷰를 거쳐 과학적 저널에 게재된 것은 아니나, 생태학적 조사 결과에 대한 활용성이 점차 확대되어 나가는 추세를 고려한다면 과학적으로도 평가가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구는 보고서나 관련 보도자료의 근거가 되는 연구방법론의 검토와 추정된 수치가 제시하는 대중성과 상징성에 버금가는 과학적 의미나 신뢰성에 대한 논의의 필요성에서 출발한 것이라 할 수 있으며, 이를 통해 문제를 진단하고 조사 방법의 가능한 대안을 탐색해 제안하는 것을 목적으로 하였다.

2. 조사 및 분석방법

현재까지 국내에서 사용되고 있는 흰발농게(*A. lactea*)의 서식면적과 전체 개체수의 추정과 관련하여 알려진 방법은 Fig. 1과 같다(NIE, 2019). Fig. 1은 해당 보고서의 조사대상 공간으로 선유도 해수욕장 배후 갯벌에서의 흰발농게(*A. lactea*) 서식 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 빨간색 점선은 조각 분포(patchy distribution)를 나타내는 경계면 표시이며, 노랑색 X 표시는 1, 2개체가 분포하는 곳을 나타낸 것이다. 분포도는 육안 또는 망원경으로 분포 범위를 확인 후 깃발 등을 활용하여 분포 지역과 조각을 표시하고 현장 지도에 기록하여 작성되었다. 이후 확인된 조각집단의 서식밀도를 산정하기 위해 서식처 중앙으로 조사선을 설정한 후, 방형구(50×50 cm)를 활용하여 5m 또는 10m 간격으로 밀도를 계측하였다. 각 패치의 면적은 거리측정기 및 GPS를 이용하거나 무인항공기로 항공사진 촬영 후 이미지 분석 프로그램을 사용하여 산출하였다. 전체 개체수는 산출된 패치의 면적과 서식 밀도를 곱하여 구하였다. 영종도의 영종2(중산)지구에서 측정된 방법 역시 무인항공기를 이용한 항공사진 촬영, 조사대상 표본지 지정, 표본지의 단위면적당 흰발농게 개체수 추정 등의 단계를 거쳐 위의 방법과 동일하게 처리하였다.

본 연구는 위와 같이 알려진, 흰발농게(*A. lactea*)의 전체 개체수 조사 방법을 통계적, 생태학적 측면에서 검토하고 문제를 파악하였으며, 이와 연관된 생태학적 연구 사례들에 대한 분석을 거쳐 기존 방식을 대체할 수 있는 방법을 대안으로 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 통계적 측면의 검토

일반적으로 생태학적 연구에서 대상종에 대한 서식밀도의 추정은 적절하게 고안된 표본 채집 디자인을 통해 표본을 채집하고 평균이나 분산과 같은 통계량을 구하며 이를 통해 모집단의 특성을 추정하는 추론을 행한다. 이와 같은 표본 조사와 달리, 모집단을 대상으로 전수 조사(complete census)를 실시하는 방법도 있으나 이는 모집단 전체 개체들을 남김없이 계수(counting)하여 조사하는 것이며 생태학 분야에서 가능한 경우는 매우 드물다(Preston, 1948).

모집단의 전체 개체수를 추정하는 전수 조사의 예로 한국에 거주하는 인구나 같은 모집단의 규모를 측정하기 위해 실시되는 인구 조사가 있으며 이 경우 단위면적당 인구수의 표본 평균을 추정해서 산출하지는 않는다. 산림청의 실태조사의 경우도 마찬가지이다. 정해진 수종의 재배자수, 재배가구수, 재배면적, 재배본수 등에 대한 전수조사를 실시하며 가구당 평균 본수(개체수)를 추정하긴 하나 이는 표본 평균을 통해 추정하는 것이 아니다(KFS, 2003). 환경부 국립생물자원관은 매년 전국의 조류서식처를 정해진 시각에 일시 방문하여 조사하는 겨울철 조류동시센서를 진행하고 있으며, 이를 통해 당해연도 월동하는 조류의 전체 종수와 개체수를 기록하고 매년 변동추이를 비교하고 있다(NIBR, 2020). 이것 역시 전수 조사에 포함되는 사례라 할 수 있다.

흰발농게(*A. lactea*)의 서식처 내 전체 개체수를 추정하는 방법은 표본 조사를 통해 단위면적당 평균을 추정하고 육안으로 측정된 서식처 면적을 적용한 것이다. 이러한 방법은 기본적으로 서식처 내 모든 개체수를 조사하는 것이 불가능한 여건에서, 표본 조사에 기반한 개체군 크기(population size, the number of individuals)나 연령구조의 측정에서 활용하는 것이다. 이동성이 강한 포유류나 조류, 어류 등을 대상으로는 표식-재포획 방법(mark-recapture method)을 통해 개체군 크기를 측정하며, 식물과 같은 부동성 개체들을 대상으로는 흰발농게(*A. lactea*)의 것과 동일하게 채집 격자로부터의 밀도와 서식처 면적을 적용하여 계산한다.

따라서 기본적으로 이동성이 낮은 무척추동물은 대상으로 이와 같은 방법을 적용한 것은 큰 무리가 없는 것으로 볼 수 있다. 그러나 지표에 노출된 수목과 달리, 무척추동물을 대상으로 하는 경우 이들의 잠입성으로 인해 개체수와 서식처 면적에 대한 측정 오차가 발생할 수 있으며 아래에 언급하는 모집단의 유형까지 고려하면 단순한 문제가 아니다.

우리가 모집단의 모수를 추정할 때 우선적으로 고려하는 것이 모집단의 유형이다. 모집단은 이들을 구성하는 관측 대상 개체들의 한정 여부에 따라 유한모집단(finite population)과 무한모집단(infinite population)으로 분류한다. 전자는 모집단의 구성 개체들이 제한되어 있는 것으로 집단 전체를 파악할 수 있는 유형의 모집단이다. 입학생들의 학부 GPA(grade-point average)와 LSAT(law school admission test)의 평균치나 2019년 4년제 대학 신입생 수 등과 같은 한정된 자료가 이에



Fig. 1. A case study drawing habitat boundary map of the fiddler crab (*A. lactea*) in Sunyudo, Gunsan, Jeonbuk Province (red dotted lines, patch boundaries; Yellow X, 1~2 individuals of the crab) (National Institute of Ecology, 2019).

해당한다. 반면 후자는 개체나 관찰치가 무한하거나 비록 제한적이더라도 전체에 대한 조사가 불가능한 모집단이다. 제품의 수명이나 같은 공정으로 생산되는 제품의 개수, 은하계의 별의 수와 같이 경계나 조건이 없는 사물이나 개체, 인체 내 미생물의 총 개체수와 같이 점유 또는 거주하는 영역이 있더라도 전체 개체수를 셀 수 없는 경우가 이에 해당한다. 그러나 이러한 무한모집단의 경우에도 구성 단위를 구분하는 기준이나 조건 유무(특정 순간의 특정 공간 등)에 따라 유한모집단이 될 수 있으며, 2020년 3월에 같은 공정으로 생산된 제품의 개수가 이와 같은 사례에 속한다고 할 수 있다.

흰발농게(*A. lactea*)나 엽낭게(*Scopimera globosa*), 달랑게(*Ocypode stimpsoni*) 등과 같은 연성기질 조건대 상부에 서식하는 게류는 기본적으로 기질 내 갯도를 만들어 잠입하는 무척추동물로 조건대가 대기 중에 노출되었을 때 호흡이 가능하여 표면에서 활동하는 생물이다. *Austruca*나 *Gelasimus* 등과 같은 과(family)에 속하는 농게류는 종류에 따라 대기 노출시 갯도나 표면활동 빈도에 통계적으로 유의한 차이를 보이며 (Shin et al., 2004), 수일간 행해지는 짝짓기와 산란 그리고 포식자의 접근 등과 같은 요인들도 이러한 습성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Nakasone and Murai, 1998; Hemmi, 2005). 따라서 조사자가 접근하여 현장에서 개체수를 계수할 때에는 달랑게과(Ocypodidae)에 속하는 농게류나 달랑게류의 신속한 도피나 잠입으로 인해 버려지거나 실제 점유

되었는지의 여부와 상관없이 갯도 입구를 계수하여 추정치의 정확성에 의문이 제기되기도 한다(개인적 의견 교환, 백용해, 녹색습지교육원).

위와 같은 행동 습성을 감안하면, 현장에서 조사자가 채집 격자를 놓고 눈에 띄는 흰발농게(*A. lactea*)를 계수한 것로부터 추정된 서식밀도는 퇴적물을 통째로 드러내고 채집물 내에 잠입한 개체까지 계수하여 얻은 값보다 정확성이 높지 않을 것이다. 정확한 추정을 방해하는 행동 습성과 어려운 조사 여건 등에 근거하면, 흰발농게(*A. lactea*)는 비록 점유 영역의 경계선이 설정이 될 수 있긴 하더라도 현실적으로 전체 개체수를 계수하기 어려운 무한모집단에 속하는 것으로 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 사례와 같이 조건을 특정하지 않은 경우의 제품의 수명처럼 전체를 조사하기 불가능하고 모집단의 크기는 무한대로 향한다고 할 수 있다. 1m²의 격자 내에서 관찰되는 흰발농게의 개체수 역시 시간과 공간의 제약이 없다면 이 역시 무한대로 향한다. 유한모집단 내 모집단의 크기는 N이나 무한모집단의 것은 무한이며 불가산이다. 이를 의미있는 추정치로 제시하기 위해서는 ‘2020년 7월 6일부터 10일의 기간에 측정된 영종2지구 흰발농게 집단 크기’로 명명해야 할 것이다.

무한모집단 대상의 추정과 관련한 주요 관심사는 사전 조사나 예비조사를 통해 확보된 표준편차와 표준오차로부터 구해지는 신뢰구간 그리고 이것으로부터 결정되는 적절한 표본의 개수와 이를 통한 모평균의 추정이다. 유한모집단의 경우 표준편차(s)와 표본크기(n)로부터 표준오차(SE)를 추정할 때 발생하는 편의를 보정하기 위해 유한한 모집단의 크기(N)와 표본 크기(n)로 구성된 유한모집단 보정(finite population correction, FPC)을 실시한다. 생태학자들이 다루는 대상은 대부분 무한모집단이기에 때문에 이와 같은 보정을 하지 않는 데 익숙하나 유한모집단으로 간주한다면 흰발농게 개체수 추정과 같이 구획을 정하고 겹치지 않는 공간에서 개체수를 측정하는 비복원 추출(sampling without replacement) 시에는 분산, 오차와 같은 통계량 계산 시 편의 보정이 뒤따라야 한다.

3.2 생태적 측면의 검토

3.2.1 서식밀도의 변동성

흰발농게(*A. lactea*)의 서식밀도와 같은, 대형저서동물 군집/개체군에 대한 측정치는 시공간적으로 높은 변동성을 나타낸다. Pearson and Rosenberg(1978)는 대형저서동물 군집 생태량을 지역과 지역 간 비교하는 것이 패러미터 특유의 높은 본질적 변동성(inherent variability)으로 인해 상당히 어렵다고 언급하였다. 일정 조건을 통제된 현장 실험적 접근(field experimental approach)이 아닌, 통상적인 시공간적 분포 연구에서 연구자가 무척추동물 군집이나 개체군 서식밀도의 변동성을 이해하고 그 원인을 파악하는 경우가 드물다는 점에서 본 저자 등은 밀도 역시 동일한 속성을 갖는다고 본다. 갯벌에 말뚝으로 정점을 표시하고 8년 또는 12년 이상 2개월의 등간격으로 채집된 서식밀도, 생체량, 생물 다양성 등이 계절성(season), 추세(trend) 그리고 주기성(cyclical variation) 등과

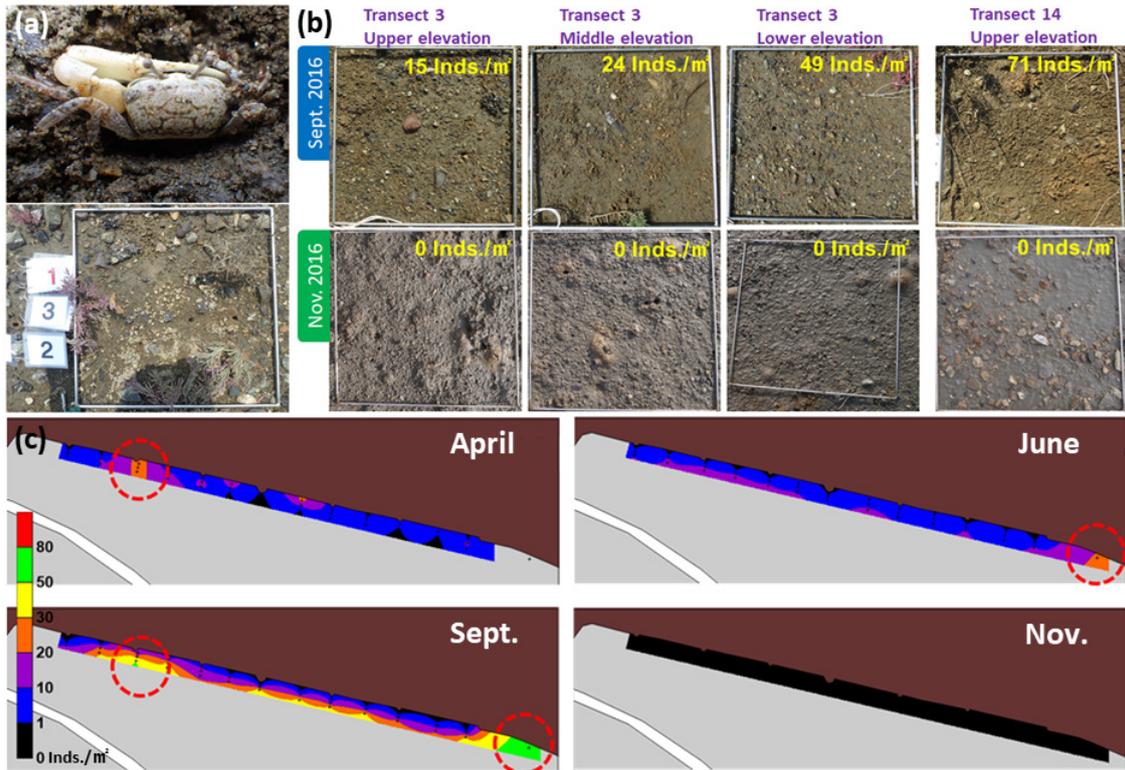


Fig. 2. A case study seasonally investigating density of the fiddler crab, *A. lactea* in Songdo tidal flat Wetland Protected Area in Incheon in 2016 (YGO, 2016). (a) the crab and its burrows, (b) example photos of the density estimation process of the crab with quadrat samplings (0.25m²), (c) the spatio-temporal distribution of the crab density.

맞물려 체계적인 시계열 변동 양상을 나타내는 사례(Yoo, 1998; Yoo et al., 2016)가 없는 것은 아니다. 그러나, 이러한 동일장소에서 행해진 장기생태연구(long-term ecological research)의 예외적인 사례를 제외하면, 시공간적으로 높은 변동성을 갖는 서식밀도를 대상으로 장소와 시기 등의 채집 조건이 다른 측정치를 비교하는데는 신중함이 따라야 한다.

본 연구진은 2015년도부터 2017년까지 계절별로 인천 송도 11공구 주변에 위치한, 약 50m 내외 너비의 습지보호지역 갯벌 상부에서 흰발농게(*A. lactea*)의 서식 밀도를 측정하였다(YGO, 2015, 2016, 2018). Fig. 2는 2016년 4월부터 11월까지 4회에 걸쳐 흰발농게(*A. lactea*) 서식밀도의 측정 방법과 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 밀도 측정 대상인 흰발농게(*A. lactea*)와 채집 격자 내 갯도 입구의 모습을 보여준다. Fig. 2(b)는 2016년 9월과 11월 측정 결과의 일부이며, 당시 총 14개의 조사 정선을 설정하고 각 정선 상, 중, 하부 정점으로 구분, 각 정점 내 0.25m² 격자를 3회 반복하여 평균 밀도(단위면적당 밀도, 개체/m²)를 측정하였다. 2016년 11월에는 니질 퇴적물이 표면을 덮어 14개 조사 정선에서 이 종이 모두 사라지는 현상이 나타났다. 이는 2015년부터 2017년까지 수행된 계절별 조사에서 이 시기에만 유일하게 관찰되었다. Fig. 2(c)는 조사 갯벌 내 흰발농게(*A. lactea*) 서식밀도의 2016년 계절별 분포를 나타낸 것이다. 흰발농게(*A. lactea*)는 습지보호지역 내에서 고른 분포를 보였으나 정점별 평균 서식밀도의 분포는 9월의 노란색-연두색 밴드(30~80 개체/m²)만 보더라도 계절

별로 밀도의 차이가 크고, 각 시기별 고밀도를 나타낸 분포의 중심도 현저한 차이를 보여 시공간적 이질성이 분명하였다.

Fig. 3은 조사 시기별 흰발농게(*A. lactea*) 서식밀도의 총 평균과 그 평균의 99.7%(3×SE; SE, standard error of the mean) 신뢰구간을 함께 나타낸 것이다. 신뢰구간 99.7%는 조사자들이 현장에서 측정하는 평균의 분포 범위를 이해하기 위하여 제시한 것이다. 우선 Fig. 3의 평균은 2016년 11월의 0 개체/m²부터 2017년 6월의 19 개체/m²까지의 변동 범위를 보였으며, 최소 서식밀도를 0이 아닌 1로 가정할 경우 조사 시기에 따라 19배 차이도 가능한 것으로 볼 수 있었다. 각 시기별로 추정된 평균의 99.7% 신뢰구간에 근거하면, 다른 서식밀도 평균이 추정될 수 있는 범위도 시기별 평균의 최소 ±35%(2016년 4월)에서 최대 ±231%(2017년 4월) 범위인 것으로 나타났다. 예를 들어 어떤 시기에 추정된 서식밀도 평균이 10 개체/m²인 것으로 가정한다면 적게는 7~14 개체/m², 크게는 0~23 개체/m²의 평균이 추정될 수 있다는 의미이다.

일정 면적 내 무척추동물, 특히 개류에 대한 개체수 추정에는 동일 서식처에서 초, 분 단위의 짧은 시간적 규모로 반복되는 잠입과 노출성뿐만 아니라 좀 더 긴 시간이나 주기성의 서식처 이입/이출도 고려해야 한다. 후자의 영향에 대한 검토는 아래 서식면적의 변동성 관련 부분에서 기술하였다. 이외에도 무척추동물 개체군을 대상으로는 무엇보다도 상대적으로 긴 수명을 갖는 포유류에 비해 비교할 수 없을 정도로 짧은 세대 기간과 사망, 피식, 가입 등의 영향을 반영하는 개체군 역학을

고려해야 한다. 예를 들어 최대 수명 3년인 무척추동물 개체군이 10만 개체 서식하고 YOY(young-of-the year)를 포함한 이들의 연평균 사망률을 90%로 가정하여 선형적으로 적용한다면 조사 시점의 하루 차이에 따라 250개체, 계절을 달리하여 조사한 경우에는 약 2만 3천 개체 수준의 차이가 사망 요인 하나로만 달라질 수 있다. 즉, 사망률만 적용하더라도 개체수는 일별로도 달라질 수 있다는 것이며, 서식처 조건이 열악한 곳이나 사망률의 연간, 연중 계절에 따른 불균질성까지 감안하면 조사 시기 간에는 더 큰 편차가 발생할 수 있다.

3.2.2 서식면적의 변동성

KNPRI(2017), NIE(2019) 그리고 관련 기사 등을 통해 알려진 흰발농게 전체 개체수 추정의 또 다른 변수는 서식처 면적이다. 서식처는 생물 개체 또는 개체군이 사는 곳으로 생물에게 직접적, 근접적인 모든 생활 조건을 제공해 주는 장소이며 생활사에 따라 변화하는 시공간적 변동성을 나타낸다. 서식처는 위치적 장소이며, 비생물적(환경적) 요인과 생물적 요인으로 구성되나 경쟁과 같은 생물적 요인을 배제한, 물리적, 화학적 요인만으로 구성되는 것이라는 견해도 있다(KAOBS, 1998). 앞서의 Fig. 1로부터 이와 같은 서식처의 공간적 변동성 또는 이질성을 확인할 수 있으며 Fig. 2C는 공간뿐만 아니라 시간에 따른 높은 변동성도 보여주는 것이다.

흰발농게(*A. lactea*)는 갯벌 서식처에서 활발한 이동성을 가지며, 대기 중 노출과 잠입을 반복하는 습성을 지닌다. 이 종뿐만 아니라 퇴적물에 서식하는 대부분의 무척추동물들이 앞서 언급한 밀도 측정이 어려운 개체군의 전형에 해당한다. 이와 같은 특성의 흰발농게(*A. lactea*)를 대상으로 1-2개체가 출현한 공간까지 표시한 Fig. 1은 매우 정밀한 조사 작업을 거쳐 경계를 표시한 도면이라고 할 수 있다. 서식처 면적이 정밀하게 측정되었다는 것을 전제로 NIE(2019)와 같은 보고서 내에서 인용한 2017년의 조사 결과(미발간자료)를 비교하면 2019년의 평균 서식밀도는 2017년의 것에 비해 오히려 2배 이상 늘었으나(2017년 3 vs. 2019년 7 개체/0.25m²), 밀도의 경향과 정반대로, 서식처 면적은 2019년의 것에 비해 2017년에 약 2.5배 이상 넓었다(2017년 2.7 vs. 2019년 1.1 ha)는 것이 언급할 만하다. 이와 같은 현상에 대해 NIE(2019)는 주변 도로의 영향으로 인한 개체의 이주(migration)나 육안으로 관찰된 지형 변화(갯벌 고도 감소)와 니질 성분의 증가 등이 원인인 것으로 기술하였다. 환경요인 미측정으로 인과관계에 대한 분석은 추정에 그쳤으나 관찰된 면적 변화는 서식 환경의 변화에 기인한 것이며, 앞서 Fig. 2에서 예시한 YGO(2016)의 극단적인 서식처 면적 변화를 상기하면 충분히 가능한 것으로 볼 수 있다.

연성 조건대의 대형저서동물은 계절적 반응과 활동 리듬(activity rhythms)을 포함하는 시간에 따른 변동(temporal variability)이 현저하며, 생물의 이동을 수반하는 이러한 변화는 조건대의 특징인 대상분포의 변화까지 유발할 수 있는 정도의 영향으로 알려졌다(McLachlan and Jaramillo, 1995). 계절적 반응으로는 겨울 폭풍이나 계절성 강우 또는 따뜻한 시기에 조건대 내 육지나 바다 방향(onshore or offshore)으로의 이동,

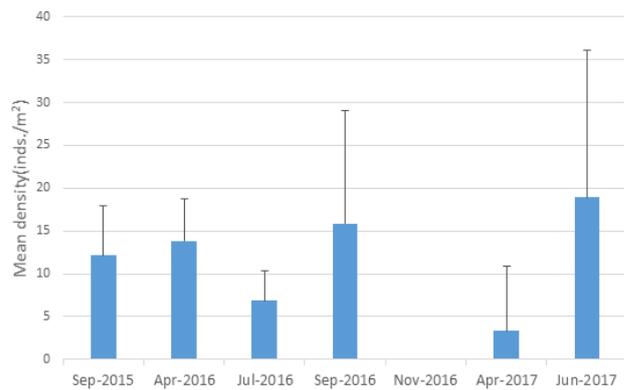


Fig. 3. Seasonal variation of density averages (Inds./m²) and 99.7% confidence interval (3×SE; SE, standard error of the mean) of the fiddler crab, *A. lactea* in Songdo tidal flat Wetland Protected Area in Incheon between 2015 and 2017 (Yeonsu-gu Office, 2015, 2016, 2018).

계절풍에 따른 대, 소조 시기 간 이동 등이 알려져 있다. 내인성 리듬(endogenous rhythm)에 따른 행동으로는 간만, 주야 일주기, 그리고 반월 주기(semi-lunar cycle)에 따른 수직(예를 들어, 만조 시 수층으로의 출현), 수평 이동 사례 등이 알려져 있다(McLachlan and Jaramillo, 1995). 서식처의 공간적 범위 변화는 인위적인 요인을 포함한 환경의 변화에 의한 것일 수도 있으나 위와 같은 다양한 규모의 주기적 요인에 의한 계절적 반응이나 활동 리듬으로 발생할 수도 있는 것이다. 이와 같은 복합적인 요인들 간 상호작용까지 고려하면, 조건대에 서식하는 흰발농게(*A. lactea*)의 서식처 경계나 공간적 범위는 수시로 달라지는 것이라고 결론지어도 무리가 아니라 할 수 있다.

기존 조사로부터 제시된 전체 개체수는, 관찰시점마다 다른 변동성의 평균 개체수 추정치(Fig. 3)와 위 정의나 실험(Fig. 1과 2C)로부터 확인된 변동성의 서식처 면적 추정치 간 곱셈으로 산출되는 것이다. 이러한 점에서, Lee and Lee(2012)와 같이, 일개 연구 내 측정치들 간 일치성을 의미하는 반복성(repeatability)과 다른 연구자나 바뀐 조건으로부터의 동일한 측정치들 간 일치정도를 나타내는 재현성(reproducibility)마저 담보되기 어려운 값이라고 할 수 있다. 굳이 추정을 행해야 한다면 점 추정(point estimation)보다는 구간 추정(interval estimation)이 보다 타당한 선택이라고 볼 수 있다.

3.3 연구 사례

생태학 분야에는 오래 전부터 많은 연구자들이 이동성이거나 잠입성인 생물을 대상으로 개체수를 측정하는 것에 어려움을 겪어 왔으며, 이것의 대안으로 공간분포를 추정하고 분포 범위 추정의 난제를 극복하기 위한 통계 모형을 활용하고 있다(Efford and Dawson, 2012). 이때 활용되는 모형의 패러미터는 점유율(occupancy) 또는 서식/발생확률(probability of occurrence)이다. 점유율은 어떤 종이 해당 조건의 서식처에 존재할 확률을 가리키며 현재 대규모 모니터링 프로그램을 포함한 많은 연구들에서 밀도나 개체수를 대체하는 패러미터로 여겨지고 있다(Efford and Dawson,

2012). 이와 같은 패러미터를 활용한 국내외 연구 사례들을 다음과 같이 소개한다.

3.3.1 황해 냉수괴 서식 빗살거미불가사리류

국내 해양생태계 연구에서도 해양 대형저서동물물을 대상으로 이미 90년대부터 서식처 추정 통계모형 연구가 수행되어 왔다. 예를 들어, Hong et al.(1995)은 중국 측 연구(Liu et al., 1983; Liu, 1990)로부터 황해 저층 냉수괴(Yellow Sea Bottom Cold Water Mass) 지시종으로 알려진 빗살거미불가사리류, *Ophiura sarsi vadicola*의 서식확률 예측모형을 추정하였다. 모형으로부터 70% 이상의 서식확률이 계산된 수온-염분 범위는 황해 냉수괴의 특징적 수온-염분 범위와 일치하는 것으로 나타나 이 종이 황해 냉수괴 지시종이라는 중국측의 가설이 정량적으로 입증된 것으로 볼 수 있었으며, 이러한 모형은 기후변화에 따른 해당종의 서식처 이동 및 면적 변화의 계산에도 활용 가능한 것으로 기대할 수 있었다(Fig. 4)

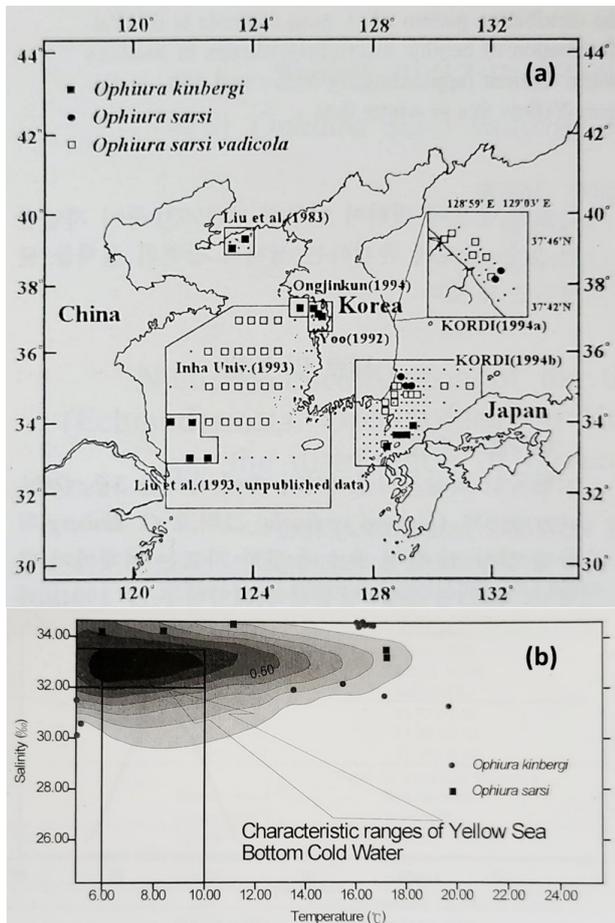


Fig. 4. A case study of probability-based optimum habitat prediction for three ophiuroids, *Ophiura kinbergi*, *O. sarsi* and *O. sarsi vadicola*. (a) nationwide sampling stations in Yellow Sea, Southern and East Sea around Korean Peninsula, (b) prediction of optimal habitat ranges of the Yellow Sea bottom cold water (YSBCW) indicator species, *O. sarsi vadicola*, based on the occurrence probability of 70% and the correspondence between the prediction and the characteristic temperature-salinity ranges of YSBCW (Hong et al., 1995).

3.3.2 부유 생태계, 해파리류

동일한 방법에 따른 서식확률 계산은 대형저서동물뿐만 아니라 부유 생태계의 점액질 동물플랑크톤(gelatinous zooplankton)에 속하는 해파리류를 대상으로도 실시된 사례가 있다. 해파리류 대상 서식처 모델은 염분과 수온 등의 변수를 통해 이들 개체군의 실시간 위치 추적을 위한 목적으로 구축되었다(Decker et al., 2007). 이러한 연구는 시시각각 달라질 수 있는 개체군을 대상으로 분포 공간에 대해 경계선을 긋고 면적을 계산하는 것보다는 결정적인 서식처 조건을 이해하는 것이 중요하며, 이를 통해 실시간으로 공간적 분포 범위를 예측하는 것이 가능함을 보여주는 것이다. 이동성이 강한 개체군일수록 위와 같은 접근 방식을 통한 이해는 더욱 중요하다.

3.3.3 고창 갯벌 복원지역, 흰발농게

2019-2020년 전북 고창의 갯벌 복원 사업지역(만돌리 일원)에서 흰발농게(*A. lactea*)의 서식이 확인되었으며, 이 종의 서식에 미칠 부정적 영향을 최소화하는 방안 마련이 이슈가 되었다(GGO, 2020). 해당 보고서에서는, 위의 사례들과 같이, 판별분석으로 유의한 변수를 선택(정분류 비율=88%)하고 이항 로지스틱 회귀분석으로 흰발농게(*A. lactea*)의 서식확률을 예측하는 모형($p < 0.001$)을 진단하였다. 이로부터 제시된 주요 환경요인과 서식확률 간의 관계는 Fig. 5와 같다. 같은 조건의 서식처에서 두 번 중 한 번 출현할 확률을 나타내는 50%를 기준으로 하면 흰발농게(*A. lactea*)의 채집지점 서식고도는 당시의 조사 갯벌에서 평균해수면 0m를 기준으로 2.0m 이상부터 가장 높은 고도에 해당하는 3.5m까지의, 예상외로 넓은 1.5m 범위였다. 이는 2019년 5월 인근에 위치한 동호항의 평균고조위(MHW), 203.9cm와 약최고고조위(HHW), 341.3cm의 범위와 대략 일치한다. 퇴적물 평균입도는 3ϕ 이하의 가는 모래에서 중간 모래와 굵은 모래를 구분하는 기준인 1ϕ 로 갈수록 증가하는 양상을 나타내었다.

고창 갯벌 복원 연구에서 추정된 흰발농게(*A. lactea*)의 서식처 범위는 인천 송도습지보호지역의 흰발농게(*A. lactea*) 서식처(11공구 동측 염생식물 서식처) 범위와 비교 가능하다. 인천 송도 습지보호지역에서 서식하는 이들의 표층 퇴적물 평균입도 범위는 5ϕ 가 관찰된 최하부 정점 한 곳을 제외하면 $-0.25 \sim 2.83\phi$ 의 범위였다. 갯벌 상부가 제방으로 이루어져 있는 염생식물 식생대의 일부에서 측정된 고도는 약 815~870cm로 상대적으로 좁은 범위의 고도차를 나타내었으며, 인천 송도의 이용 가능한 2010년 9월부터 2011년 9월 기간의 평균해수면 458.4cm 기준, 평균고조위(MHW), 736.9cm와 약최고고조위(HHW), 916.8cm의 범위 내에 포함되었다(YGO, 2015). 이항 로지스틱 회귀분석 모형에 의해 서식확률 50%를 기준으로 추정된 고창 갯벌 흰발농게(*A. lactea*)의 평균입도 그리고 고도 범위는 인천에 서식하는 흰발농게(*A. lactea*)의 것과 유사한 것으로 볼 수 있었다. 따라서 지역 간 동종의 서식 범위 비교 또는 타 지역의 동종 개체군 크기나 서식처 변동성을 이해하고자 할 경우에도 이러한 접근은 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

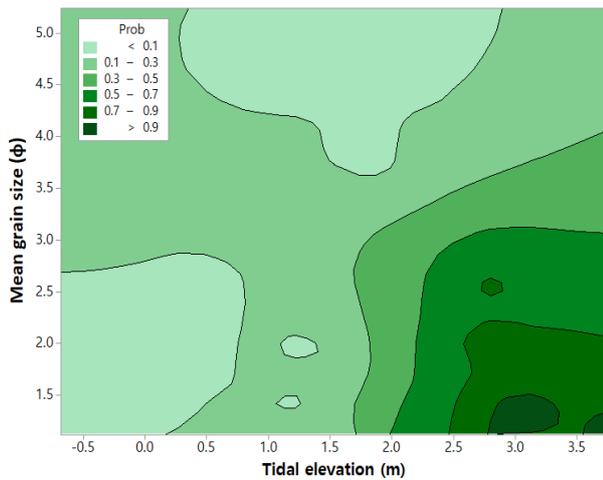


Fig. 5. Predicted occurrence probability of the fiddler crab, *A. lactea*, with given sediment mean grain size and tidal elevation from binomial logistic regression model observed in Gochang tidal flat, Jeonbuk Province.

Sakai(1976)는 농게(*Tubuca arcuata*)의 서식이 펄 기질에 집중된 반면 일본에 서식하는 흰발농게(*A. lactea*)의 경우 조간대 상부의 펄 서식처와 모래 해변에서 모두 관찰되는 것으로 보고하였다. 이러한 기술은 흰발농게(*A. lactea*)의 서식 가능 범위 내 분포의 중심이 펄 기질에 있는지 또는 모래 기질에 있는지 명확하지 않다는 것을 의미한다. 개발사업 관련하여 서식처 이전까지 옵션으로 고려될 수 있는 범정보호생물 임에도 불구하고 아직까지 국내에서도 이와 같은 정보가 부족하다. 그러나 Fig. 5와 같은 모형에서 제시된 50% 확률에 해당하는 입도 분포 범위와 가장 높은 확률이 형성되는 범위 그리고 인천 송도 습지보호지역에서 관찰된 범위들을 고려하면 흰발농게(*A. lactea*)의 분포의 중심은 모래 기질에 있음을 추정할 수 있다. 서식확률 예측 모형은 관심 대상종의 서식 가능 분포 범위뿐만 아니라 대상종이 보다 선호하는 최적 분포 중심을 파악하며 갯벌 복원 사업에서 복원 대상종(desired species)의 유입(introduction)을 기대할 수 있는 서식처 조성 작업에서도 활용이 가능하다(Palmer et al., 1997; Fischer et al., 2013).

3.4 개체수 추정의 대안, 서식확률

본 연구는 특정종의 특정 서식처 내 전체 개체수, 즉 절대적인 의미의 개체수가 갖는 문제점에 대해 기술하고 있다. 대형저서동물의 단위면적당 서식밀도 추정은 일상적인 조사 연구에서 행해지고 있다. 예를 들면, McLachlan and Jaramillo(1995)와 같이 계절별로 kite diagram을 도식화하고 상대적인 차원에서 밀도를 비교하여 조고에 따른 수직적인 변화를 관찰하고 변동의 원인 및 효과를 추론한다. 더욱 정확한 추정치를 구하고 불확실성을 파악하기 위해 다양하고 세련된 반복 채집 디자인을 적용(Colpo and Negreiros-Fransozo, 2016)하기도 하나, 수직적 환경 구배가 존재하는 갯벌에서 상부부터 하부까지 연속적으로 측정된 자료 하나하나에 의미있는 해석을 하지 않는다.

대신 밀도가 나타내는 전반적인 패턴을 관찰하며 이러한 패턴과 상이한 정점 간 변동을 적합선을 벗어난 잡음(noise) 정도로 간주한다. 이는 보다 정확한 효과를 탐색하기 위하여 저서동물 밀도 추정치에 기반하여 행해지는 다양한 현장의 간섭 실험(예를 들어, Reise, 1985)의 경우에도 마찬가지이다.

범정보호생물에 속하는 흰발농게(*A. lactea*)의 전체 개체수 추정 방법을 다양한 통계적 그리고 생태학적 측면에서 검토한 결과, 현장에서 맨눈으로 측정하는 서식처 면적과 서식밀도를 통해 산출되는 추정치는 시공간적인 변동성이 매우 높고, 이러한 추정치에 의존하여 서식처의 중요성을 평가하고 보전 정책을 수립하거나 실행하기에는 무리가 있음을 알 수 있었다. 서식처의 보전과 관리에 주안점을 둔 대안으로 다음과 같은 다양한 유형의 서식처 정량화 또는 서식처 질(habitat quality) 평가 기법을 고려해볼 수 있다. 기존에 알려진 기법에는 출현/서식 여부(presence-absence), 서식확률, 서식처 질, 밀도 또는 개체군 생존력 예측 등에 사용 가능한 통계 모형이 있다. 이 가운데 밀도 예측은 제한된 개체군 크기를 갖는 육상 야생동물(조류 등)에 대한 다양한 지역의 밀도 측정자료가 갖춰져야 하며 그 측정 결과가 정확하다는 것을 중요한 전제로 한다(Roloff and Haufler, 1997; Larson et al., 2009). 출현/서식 여부나 확률의 예측은, 본 연구에서 사례로 제시한 바와 같이, 밀도에 비해 상대적으로 단순하며 간편한 이항 자료를 종속변수 또는 목표변수로 하는 로지스틱 회귀분석이나 인공지능 신경망 모형 등을 활용한다(Larson et al., 2009).

위에 열거한 기법들은 대상 생물에 대한 정확한 밀도 측정 자료뿐만 아니라 다양한 환경조건에서의 동물 적합성(animal fitness) 관계나 서식처 질과 조건 간 함수관계 구축을 위한 정보들이 요구되며 늘어가는 정보의 종류나 양 만큼이나 데이터의 정확성에 대한 의존도 또한 높아지고 모형의 복잡성도 증가하게 된다. 특히 적합성의 추정은 주로 넓은 분포 범위를 갖는 야생동물을 대상으로 하며, 이동의 기본 단위이자 주변 생태계와의 상호작용을 나타내는, 개체 단위에서의 위치 정보 등을 활용한다(Cagnacci et al., 2010). 반면 이항 로지스틱 회귀분석 모형의 구축은 현장에서 측정된 출현 여부와 환경요인 자료로 충분하다. 또한, 연구 사례에서 본 바와 같이, 이동성이 강한 야생동물뿐만 아니라 부유생물을 대상으로도 활용되며 특히 정주성인 대형저서동물을 대상으로는 실시간 관측이나 GPS 기반 위치추적 전파발신기로부터의 정보가 필요하지 않다.

서식확률은 비록 모집단의 정량적 특성(평균이나 분산 등)을 반영하는 것은 아니나, 개체군의 서식처 공간 범위와 이와 관련된 서식처 지위의 이해 그리고 이에 기반한 서식 공간의 변화 등을 예측하는 데에 활용되고 있다. Larson et al. (2009), Rho (2009), Efford and Dawson (2012) 등의 국내외 연구 결과에 따르면, 서식확률은 자연자원 관리에 매우 유용한 정보를 제공하며 주요 생물자원의 서식처 지도화나 중간 상호작용 평가 등의 분야에서 매우 성공적으로 활용되는 것으로도 알려져 있다.

본 연구에서는 이해와 적용이 쉬운 이항 로지스틱 회귀분석

모형으로 추정되는 서식 여부나 확률 예측 결과를 바탕으로 서식치 중요성에 대해 평가하는 것을 전체 개체수 추정 작업의 대안으로 제시한다. '특정 지점의 서식 밀도나 일정 면적의 서식치 전체 개체수가 국내 몇 위 수준이라거나 몇 개체'라는 표현은 다양한 이유로 신뢰하기 어려운 추정으로 볼 수 있었다. 반면 대상 종의 서식치 면적은, 이로부터 알 수 있는, 큰 규모의 공급 개체군(source population) 부양 가능성, 서식치 손실(habitat loss)의 영향, 조각화/연결성(fragmentation/connectivity) 등만 고려하더라도 서식치 보존의 중요성이나 가치를 반영하기에 충분하며 장단기적인 기후 변화나 환경요인 변화(예를 들어, 연안 압착 등)에 대한 완충 역할을 결정하므로 경관 생태측면에서도 주요 지역을 식별하는 데에 활용되어야 할 중요한 속성이다(Hodgson et al., 2011; Pontee, 2013).

이항 로지스틱 회귀모형을 통해 계산되는 서식확률의 공간적 구배를 바탕으로 서식치의 공간적인 범위와 적정 서식치를 파악할 수 있다. 일정 확률을 기준으로 하면 타 지역과도 비교할 수 있는 잠재적 서식치의 위치와 면적 역시 추정이 가능하다. 본 연구진은 영향이나 사건 발생 또는 서식 유무를 결정하는 확률 50%를 기준으로 Fig. 6과 같은 등고선으로 공간을 표시하고 이를 대상종의 잠재적 서식처로 간주하여 면적을 산출할 것을 제안한다. 충분히 넓은 시공간적 범위의 자료를 사용한다면 다양한 시기와 공간에 적용 가능한 강건한 모형의 추정은 어렵지 않다. 강건한 모형이 구축되면 계절적으로 퇴적물 입도나 고도와 같은 주요 환경조건이 급변하지 않는 이상 연중 1회의 조사만으로도 잠재적 서식치 면적을 추정할 수 있으며, 추후 원하는 생물의 유도를 위한 서식처 조성에서도 활용 가능하다.

Fig. 6에서 볼 수 있는 서식치 경계는 마치 지적경계선이 표시된 지도와 같은 Fig. 1과 달리 세밀하지 않으며 확률에 따라 여러 경계선을 보여준다. 본 연구진이 Fig. 6의 확률적 추정에 기반하여 작성한 서식치 지도가 Fig. 1보다 타당하다고 생각하는

이유는 다음과 같다. 첫째, 환경특성의 측면에서 흰발농게(*A. lactea*)의 서식처는 주로 갯벌 상부의 염생식생대에 발달하므로 수심cm에서 1m 이상의 급격한 고도 변화가 나타나는 갯골이 형성되기 어려운 지역이다. Fig. 1의 서식처 경계면이 위와 같은 규모의 고도 차이에 의해 결정된 것이 아니고 퇴적상역시 돌연 펄 퇴적상으로 바뀌는 것이 아니라면 경계면 밖은 언제든지 이들의 서식처로 활용될 수 있다. 둘째로, 앞서 언급한 흰발농게(*A. lactea*)의 도피나 주기성, 리듬에 따른 활동 또는 잠입성 등을 고려해도 이들의 서식 범위가 관찰된 경계면에 머물지 않을 것이라는 예상이 가능하며, 이는 Fig. 2에서 관찰된 서식밀도 중심의 계절 변화만 보더라도 그 가능성은 충분하다. 이와 같은 비교는 궁극적으로 서식처를 순간의 관찰보다는 잠재적 서식처 측면에서 보아야 한다는 견해가 더 타당하다는 것이며 결과의 신뢰성 측면에서도 본 연구가 제안한 방법을 택할 수밖에 없다.

4. 결 론

국내에서는 멸종위기야생생물이자 해양보호생물인 흰발농게(*A. lactea*)의 보전가치가 있을 것으로 예상되는 갯벌을 대상으로 전체 개체수(local abundance)를 추정하여 보고하고 있다. 보고서와 신문 기사를 통해 대중들에게 전달되는 이와 같은 결과는 교육과 과학적 정보의 교류 측면뿐만 아니라 서식처 보전 정책 수립의 근거로도 활용되고 있어 중요도가 높은 정보라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 잠입과 노출, 이동을 반복하는 무척추동물의 특성을 감안할 때 이들에 대한 전체 개체수 추정의 방법적 타당성과 내재된 부정확성의 평가에 대한 검토가 필요한 것으로 판단되었다. 이에 따라서 본 연구진은 국내에서 실시되어 왔던 흰발농게(*A. lactea*) 전체 개체수 측정치와 방법을 검토하였다. 검토 결과에 의하면 기존 방법은 제한된 공간을 대상으로 추정되는 조사작업이긴 하나 통계적, 생태학적 측면에서 그리고 보전 정책 수립의 근거로 활용하기에는 불확실성이 높은 추정치임을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구진은 몇몇 연구사례를 검토하였으며 기존 조사방법 및 측정치의 대안으로 이항 로지스틱 회귀모형의 서식확률 50%에 해당하는 잠재적 서식치 면적을 제안하였다. 다양한 시기와 공간으로부터 수집된 자료를 바탕으로 구축되는 강건한 모형은 이들의 분포를 결정하는 주요 환경조건이 급변하지 않는 이상 연중 1회의 조사만으로도 잠재적 서식치 면적을 추정할 수 있다. 개발된 모형을 다양한 갯벌에 적용하여 추정되는 잠재적 서식치 면적은 중요한 서식처의 발굴 및 보전뿐만 아니라 추후 서식처 복원 분야에서 원하는 생물의 유도를 위한 서식처 조성에서도 활용가능하다.

감사의 글

본 연구는 2019년 한국어촌어항공단 고창 갯벌생태계복원사업 실시설계 수립 용역사업(계약번호 2019080A9D0-01)의 지원에 의해 이루어진 것임을 알려드립니다.

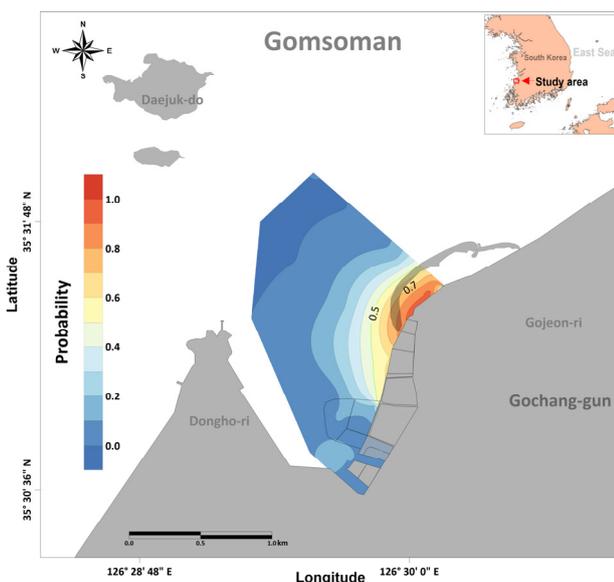


Fig. 6. Spatial representation of the occurrence probability of the fiddler crab, *A. lactea* in Gochang tidal flat in Jeonbuk Province (FIPA, 2020).

References

- Cagnacci, F, Boitani, L, Powell, RA and Boyce, MS (2010). Animal ecology meets GPS-based radiotelemetry: a perfect storm of opportunities and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, pp. 2157–2162. [DOI: 10.1098/rstb.2010.0107]
- Colpo, KD and Negreiros-Fransozo, ML (2016). Sampling technique affects the population structure assessments of fiddler crab *Minuca vocator* (Herbst, 1804)(Ocypodidae: Gelasiminae). *Nauplius*, 24, e2016015. [DOI: 10.1590/2358-2936e2016015]
- De Lange, HJ, Lahr, J, Van der Pol, JJ, Wessels, Y and Faber, JH (2009). Ecological vulnerability in wildlife: an expert judgment and multicriteria analysis tool using ecological traits to assess relative impact of pollutants. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 28(10), pp. 2233–2240. [DOI <https://doi.org/10.1897/08-626.1>]
- Decker, MB, Brown, CW, Hood, RR, Purcell, JE, Gross, TF, Matanoski, JC, Bannon, RO and Setzler-Hamilton, EM (2007). Predicting the distribution of the scyphomedusa *Chrysaora quinquecirrha* in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 329, pp. 99–113. [DOI: 10.3354/meps329099]
- Diaconis, P and Efron, B (1983). Computer-intensive methods in statistics. *Scientific American*, 248, pp. 116–130.
- Diaz, RJ, Solan, M and Valente, RM (2004). A review of approaches for classifying benthic habitats and evaluating habitat quality. *Journal of environmental management*, 73(3), pp. 165–181. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.06.004>]
- Efford, MG and Dawson, DK (2012). Occupancy in continuous habitat. *Ecosphere*, 3(4), pp. 1–15. [DOI <http://dx.doi.org/10.1890/ES11-00308.1>]
- Fischer, LK, von der Lippe, M and Kowarik, I (2013). Urban grassland restoration: which plant traits make desired species successful colonizers? *Applied Vegetation Science*, 16(2), pp. 272–285. [DOI: 10.1111/j.1654-109X.2012.01216.x]
- Giller, PS (1984). Community structure and the niche. Chapman and Hall, London.
- Gochang-gun Office (GGO) (2020). *Implementation planning report of Gochang tidal flat ecosystem restoration project*. Gochang-gun Office. [Korean Literature]
- 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 and Zeller, D (2012). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 488(7413), pp. 615–622. [DOI: 10.1038/nature11397]
- Hemmi, JM (2005). Predator avoidance in fiddler crabs: 1. Escape decisions in relation to the risk of predation. *Animal Behaviour*, 69(3), pp. 603–614. [DOI: 10.1016/j.anbehav.2004.06.018]
- Hodgson, JA, Moilanen, A, Wintle, BA and Thomas, CD (2011). Habitat area, quality and connectivity: Striking the balance for efficient conservation. *Journal of Applied Ecology*, 48(1), pp. 148–152. [DOI: 10.1111/j.1365-2664.2010.01919.x]
- Hong, JS, Yoo, JW and Park, HS (1995). Niche characterization of the three species of genus *Ophiura* (Echinodermata, Ophiuroidea) in Korean waters, with special emphasis on the distribution of *Ophiura sarsi vadicola* Djakonov. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 30(5), pp. 442–457. [Korean Literature]
- Hutchinson, GE (1959). Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals? *The American Naturalist*, 93(870), pp. 145–159.
- Korea Forest Service (KFS) (2003). *Study on the chestnut cultivation and government policy*. Korea Forest Service. [Korean Literature]
- Korea National Park Research Institute (KNPRI) (2017). *Investigation on the distribution characteristics of the endangered wildlife*. Korea National Park Research Institute. [Korean Literature]
- Korean Association of Biological Sciences (KA OBS) (1998). *Dictionary of biology*. Academy Book. [Korean Literature]
- Kyunghyang (2020). http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?art_id=202008102105015
- Larson, MA, Millsbaugh, JJ, and Thompson III, FR (2009). A review of methods for quantifying wildlife habitat in large landscapes. *Models for Planning Wildlife Conservation in Large Landscapes*, JJ Millsbaugh and FR Thompson III (eds.), Elsevier, pp. 225–250.
- Lee, TJ and Lee, SK (2012). Repeatability and reproducibility in effective porosity measurements of rock samples. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 15(4), pp. 209–218. [Korean Literature] [DOI <http://dx.doi.org/10.7582/GGE.2012.15.4.209>]
- Liu, R (1990). Studies on marine ecology of the Yellow Sea in China. *Yellow Sea Research*, 3, pp. 45–71. [Korean Literature]
- Liu, R, Cui, Y, Xu, F and Tang, Z (1983). Ecology of macrobenthos of the East China Sea and adjacent waters. *Proceeding of International Symposium on the sedimentation on the continental shelf, with special reference to the East China Sea*, Acta Oceanologica Sinica,

- China Ocean Press, Beijing, pp. 795–818.
- Ludwig, JA, and Reynolds, JF (1988). *Statistical ecology: a primer in methods and computing*. John Wiley and Sons.
- May, RM (1975). Patterns of species abundance and diversity. *Ecology and evolution of communities*, ML Cody and JM Diamond (eds.), Belnap Press, Cambridge, MA, pp. 81–120.
- McLachlan, A and Jaramillo, E (1995). Zonation on sandy beaches. *Oceanography and Marine Biology: an annual review*, 33, pp. 305–335.
- Nakasone, Y and Murai, M (1998). Mating behavior of *Uca lactea perplexa* (Decapoda: Ocypodidae). *Journal of Crustacean Biology*, 18(1), pp. 70–77. [DOI <https://doi.org/10.1163/193724098X00089>]
- National Institute of Biological Resources (NIBR) (2020). *2019–2020 Winter Waterbird Census of Korea*. National Institute of Biological Resources. [Korean Literature]
- National Institute of Ecology (NIE) (2019). *Survey of geographic distribution of the fiddle crab, *Austruca lactea* (Class II endangered wildlife) in Seonyudo Beach*. National Institute of Ecology. [Korean Literature]
- Palmer, MA, Ambrose, RF and Poff, NL (1997). Ecological theory and community restoration ecology. *Restoration ecology*, 5(4), pp. 291–300. [DOI <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00543.x>]
- Pearson, TH and Rosenberg, R (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: An annual review*, 16, pp. 229–311.
- Pontee, N (2013). Defining coastal squeeze: A discussion. *Ocean and coastal management*, 84, pp. 204–207. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.07.010>]
- Preston, FW (1948). The commonness, and rarity, of species. *Ecology*, 29(3), pp. 254–283.
- Reise, K (1985). *Tidal flat ecology – An experimental approach to species interactions*. Springer-Verlag.
- Rho, P (2009). Use of GIS to develop a multivariate habitat model for the leopard cat (*Prionailurus bengalensis*) in mountainous region of Korea. *Journal of Ecology & Field Biology*, 32, pp. 229–236. [DOI <https://doi.org/10.5141/JEFB.2009.32.4.229>]
- Roloff, GJ and Haufler, JB (1997). Establishing population viability planning objectives based on habitat potentials. *Wildlife Society Bulletin*, 25(4), pp. 895–904.
- Sakai, T (1976). *Crabs of Japan and the adjacent seas*. Kodansha, Tokyo, Japan.
- Shin, PKS, Yiu, MW and Cheung, SG (2004). Behavioural adaptations of the fiddler crabs *Uca vocans borealis* (Crane) and *Uca lactea lactea* (De Haan) for coexistence on an intertidal shore. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 37(3), pp. 147–160. [DOI <https://doi.org/10.1080/10236240400006117>]
- Stalmans, ME, Witkowski, ET and Balkwill, K (2002). Evaluating the ecological relevance of habitat maps for wild herbivores. *Journal of Range Management Archives*, 55(2), pp. 127–134. [DOI: [10.2458/azu_jrm_v55i2_stalmans](https://doi.org/10.2458/azu_jrm_v55i2_stalmans)]
- Whittaker, RH, Levin, SA and Root, RB (1973). Niche, habitat, and ecotone. *The American Naturalist*, 107(955), pp. 321–338.
- Yeonsu-gu Office (YGO) (2015). *Final report of monitoring program of Songdo tidal flat, wetland protected area, 2015*. Yeonsu-gu Office. [Korean Literature]
- Yeonsu-gu Office (YGO) (2016). *Final report of monitoring program of Songdo tidal flat, wetland protected area, 2016*. Yeonsu-gu Office. [Korean Literature]
- Yeonsu-gu Office (YGO) (2018). *Final report of monitoring program of Songdo tidal flat, wetland protected area, 2017*. Yeonsu-gu Office. [Korean Literature]
- Yoo, JW (1998). *The spatial distribution and long-term variation of macrofaunal communities on macrotidal flats in the west central coast of Korea*. Ph.D. Thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Yoo, JW, Lee, HJ and Hong, JS (2016). Long-term variations in macrobenthic community diversity (species number) in the Chokchon macrotidal flat, Incheon, Korea. *Ocean Science Journal*, 51(3), pp. 435–445. [DOI <https://doi.org/10.1007/s12601-016-0039-3>]