

<Note>

RCP 시나리오에 따른 해양교란생물 유령명게 (*Ciona robusta*)의 서식지 분포 예측

박주언 · 홍진솔³ · 김동진¹ · 윤태중² · 신숙*

삼육대학교 생명과학과, ¹삼육대학교 스미스교양대학,
²삼육대학교 해양생명자원연구소, ³고려대학교 환경생태공학부

Prediction of the Suitable Habitats of Marine Invasive Species, *Ciona robusta* based on RCP Scenarios

Ju-Un Park, Jinsol Hong³, Dong Gun Kim¹, Tae Joong Yoon² and Sook Shin*

Department of Life Science, Sahmyook University, Seoul 01795, Republic of Korea

¹Smith Liberal Arts College, Sahmyook University, Seoul 01795, Republic of Korea

²Institute of Marine Life Resources, Sahmyook University, Seoul 01795, Republic of Korea

³Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

Abstract - The active development of the global marine trade industries has been known to increase the inflows of marine invasive species and harmful organisms into the ecosystem, and the marine ecological disturbances. One of these invasive species, *Ciona robusta*, has now spread to the Korea Strait, the East Sea, and Jeju Island in connection with the climate change but not the Yellow Sea in Korea. Currently, the spread and distribution of *C. robusta* is increasingly damaging aquaculture and related facilities. Therefore, this study aims to identify the spread of *C. robusta* and potential habitats and to secure a data for the prevention of effective management measures due to climate change as well as damage the reduction in future through the prediction of spread. We used environmental variables in BioOracle. Also, the potential habitat and distribution of *C. robusta* was predicted using MaxEnt, a species distribution model. Two different RCP scenarios (4.5 and 8.5) were specified to predict the future distributions of *C. robusta*. The results showed that the biggest environmental factor affecting the distribution of *C. robusta* was the salinity as well as the highest distribution and potential habitats existent in the East Sea and around Jeju Island.

Keywords : *Ciona robusta*, invasive species, Species Distribution Model (SDM), MaxEnt

전 세계적으로 기후변화로 인한 환경의 변화와 해양 무역
과 레저 산업 등의 발달은 지역, 국가 또는 대륙 간 해양생물

의 이동을 촉진하여 해양생태계에서 외래종의 확산이 급격
히 증가하고 있다(Dukes and Mooney 1999; Yoo *et al.* 2006;
Beaugrand *et al.* 2008). 새로운 환경에 유입된 외래종은 우세
한 적응력을 바탕으로 유사한 생태적 지위 (ecological niche)
를 가지는 자생종과의 경쟁을 통하여 해양 환경에 교란을 야

* Corresponding author: Sook Shin, Tel. 02-3399-1717,
Fax. 02-3399-1729, E-mail. shins@syu.ac.kr

Table 1. Collected regions of *Ciona robusta*

Sites	GPS	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gangwon-do	Daejin	38°29'59.3"N 128°25'33.9"E					*				*
	Geojin	38°26'52.0"N 128°27'46.1"E						*	*		*
	Gonghyeonjin	38°21'14.7"N 128°30'42.6"E						*	*	*	*
	Ayajin	38°16'23.7"N 128°33'22.6"E					*		*		*
	Jangsa	38°13'36.0"N 128°35'19.9"E					*				*
	Gisamun	38°00'28.2"N 128°43'50.0"E					*			*	
	Namae	37°56'39.7"N 128°47'14.5"E					*		*	*	*
	Jumunjin	37°53'32.4"N 128°49'48.8"E					*		*	*	*
	Gangneung	37°46'14.0"N 128°56'49.0"E					*		*		*
	Anmok	37°46'11.9"N 128°57'15.4"E									*
	Eodal	37°33'42.3"N 129°07'12.0"E							*		*
	Mukho	37°33'05.7"N 129°06'54.5"E						*	*	*	*
	Donghae	37°29'26.2"N 129°07'32.5"E		*					*	*	*
	Chogok	37°18'38.4"N 129°17'38.9"E							*		
Imwon	37°13'45.1"N 129°20'45.0"E									*	
Gyeongsangbuk-do	Hupo	36°40'48.0"N 129°27'16.7"E					*	*	*		*
	Chuksan	36°30'33.5"N 129°26'54.4"E					*	*	*	*	
	Ganggu	36°21'31.6"N 129°23'26.3"E				*			*	*	
	Guryongpo	35°59'21.3"N 129°33'18.8"E	*	*	*	*	*		*	*	*
	Yangpo	35°52'49.5"N 129°31'10.4"E			*	*	*	*	*	*	*
	Gampo	35°48'31.2"N 129°30'21.7"E		*	*	*	*	*	*	*	*
Ulsan	Bangeojin	35°29'05.3"N 129°25'42.6"E			*	*	*		*	*	*
	Ulsan	35°31'25.4"N 129°22'22.5"E	*		*		*	*	*	*	*
	Jangsaengpo	35°30'09.5"N 126°08'11.0"E				*		*			
Busan	Deabyeon	35°13'28.7"N 129°13'42.1"E		*	*	*	*		*	*	*
	Songjeong	35°10'48.8"N 129°12'22.8"E			*	*	*	*		*	*
	Busan	35°06'15.2"N 129°02'21.6"E	*		*	*	*	*	*	*	*
	Dadeapo	35°03'24.8"N 128°58'45.2"E		*	*	*	*	*	*	*	*
Gyeongsangnam-do	Jangseungpo	34°51'51.6"N 128°43'26.3"E		*							
	Tongyeong	34°50'21.3"N 128°25'12.9"E	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Samcheonpo	34°55'33.4"N 128°04'10.8"E	*				*	*	*	*	
	Mijo	34°42'35.7"N 128°02'48.5"E					*	*			
Jeollanam-do	Gwangyang	34°55'30.5"N 127°41'52.4"E		*	*	*		*	*	*	
	Wando	34°19'02.1"N 126°45'50.4"E								*	
	Seomang	34°21'55.8"N 126°08'11.0"E								*	*
	Mokpo	34°46'49.9"N 126°23'01.0"E			*	*		*	*	*	*
Jeollabuk-do	Gunsan	35°58'15.2"N 126°37'07.0"E				*		*	*	*	*
	Bieung	35°56'07.2"N 126°31'38.2"E				*		*	*	*	*
Jeju-do	Gimnyeong	33°33'30.98"N 126°44'12.8"E							*		*
	Seongsanpo	33°13'30.98"N 126°55'30.9"E						*	*		*
	Seogwipo	33°14'20.9"N 126°33'50.2"E		*	*	*		*	*		*
	Moseulpo	33°12'58.1"N 126°15'01.9"E						*	*		*
	Hallim	33°24'46.1"N 126°15'20.9"E						*	*		*
	Aewol	33°28'07.9"N 126°19'28.2"E						*			*

기하고 결과적으로 해양생태계의 생물다양성에 영향을 주고 있다 (Shin *et al.* 2013; Januario *et al.* 2015; Park *et al.* 2017).

유령멍게 (*Ciona robusta*)는 척삭동물문 (phylum Chordata), 피낭동물아문 (subphylum Tunicata)에 속하는 부착성 해양저 서동물로써, 1967년 일본의 혼슈에서 처음 보고되었으며 (Hoshino *et al.* 1967), 국내에서는 같은 해에 부산 영도에서 처음 발견된 이후, 선박 평형수 또는 선박 바닥에 부착하여

(Kim 2005; Kim *et al.* 2018) 남해안, 동해안 및 제주도 연안으로 확산되었다 (Shin *et al.* 2013).

침입 외래종 (invasive alien species)인 유령멍게 (*C. robusta*)의 확산은 자연생태계에 서식하는 자생종과의 직접 또는 간접적인 자원 (먹이, 공간 등) 경쟁을 통하여 생물다양성의 감소를 초래하고 있으며, 인공 시설물, 특히 양식장 시설물에 정착하여 굴 또는 가리비와 같은 양식산업에 경제적 피해를 주

Table 2. Environmental variables used in this study

Data	Environmental variables (/year)
1	Temperature (max)
2	Temperature (mean)
3	Temperature (min)
4	Salinity (mean)
5	Chlorophyll (max)
6	Chlorophyll (mean)
7	Chlorophyll (min)

Table 3. Contribution analysis and permutation importance of environmental variables for the prediction of potential habitat of *Ciona robusta*

Variable (/year)	Percent contribution (%)	Permutation importance
Salinity (mean)	57.6	57.6
Chlorophyll (mean)	15.7	18.3
Temperature (max)	10.5	11.7
Chlorophyll (max)	9.7	4.4
Temperature (mean)	4.9	3.5
Temperature (min)	1.4	0.2
Chlorophyll (min)	0.3	4.2

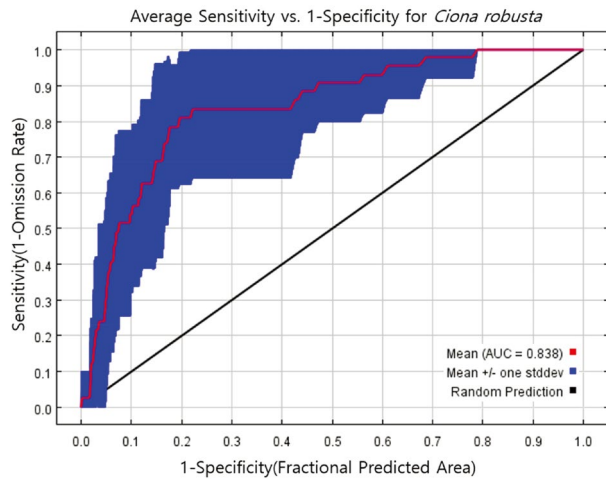


Fig. 1. Area under curve (AUC) obtained by the receiver operating characteristic (ROC) curve of the species distribution model of *Ciona robusta*.

고 있다 (Daigle and Herbinger 2009; Park *et al.* 2017). 따라서 해양수산부는 유령멍게 (*C. robusta*)를 「해양생태계교란생물」로 지정하여 지속적인 관리를 요하고 있다 (해양수산부, 2017). 현재까지 유령멍게 (*C. robusta*)에 대한 지속적인 서식지 및 분포 조사가 이루어지고 있으나 해양생태계라는 특수성으로 인하여 밀도가 낮은 경우 육안 조사로 정확한 서식지를 확인하는데 어려움이 있다.

본 연구는 국내에 유입되어 확산하고 있는 교란생물인 유령멍게 (*C. robusta*)의 야외 조사 자료를 바탕으로 종분포모형 (Species Distribution Model)을 활용하여 잠재적 서식지 분포도를 작성하고, 향후 서로 다른 두 가지 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오를 통해 기후변화에 따른 미래의 잠재 서식지 및 분포를 예측하여 유령멍게 (*C. robusta*)의 확산 방지 및 효율적 관리를 위한 기본 자료를 확보하고자 수행되었다.

유령멍게 (*C. robusta*)의 분포 지역에 관한 자료는 2008~2017년까지 서해안, 남해안, 동해안 및 제주도를 직접 조사하여 기록한 출현 자료와 기존 문헌 조사를 통하여 확인된 서식 지역의 자료를 종합하여 이용하였다 (Pyo *et al.* 2012; Lee

and Shin 2014) (Table 1).

본 연구에서는 Kim *et al.* (2018)의 연구를 바탕으로 염도 (PSU)와 수온 (°C)을 환경변수로 설정하였으며, 먹이와 관련된 엽록소 (chlorophyll) 농도 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)를 추가하였다. 환경변수 자료로 BioOracle database (Tyberghein *et al.* 2012)의 연중 평균 염도 (PSU)와 연중 최대, 최소 및 평균 엽록소 농도를 활용하였다 (Table 2). 또한 유령멍게 (*C. robusta*)는 주로 수심 2~6 m에 서식하는 것으로 보고되며 (Shin *et al.* 2013), 해수표면온도부터 수심 10 m까지는 수온이 유사한 것으로 보고되어 (Choi *et al.* 1995; Park *et al.* 2000; Park *et al.* 2017), 해수표면온도 (SST)의 연중 최대, 최소 및 평균 자료를 분석에 이용하였다 (Table 2). 또한 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서를 바탕으로 RCP 4.5 (온실가스 저감 정책이 상당히 실현된 경우)와 RCP 8.5 (현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우)의 서로 다른 2가지 시나리오를 설정하여 2040~2050년과 2100년에 대한 잠재적 서식지 및 분포를 예측하였다 (Suppiah *et al.* 2007).

QGIS 프로그램 (version 2.18.16) (QGIS Development Team 2018)을 사용하여 분포도를 작성하였으며, 최대 엔트로피 접근법을 활용하여 잠재적 서식지 분포를 확률적으로 제시하고 출현 좌표만으로 종분포를 예측할 수 있는 모형인 MaxEnt 프로그램 (version 3.4.1) (Phillips *et al.* 2006, 2017)을 사용하여 분포 및 확산 모델을 추정하였다. 정확도는 ROC (Receiver Operating Characteristic)의 AUC (Area Under Curve) 값을 통하여 추정하였으며, 모델의 신뢰도를 높이기 위하여 10차 교차검증을 통해 결과의 평균을 최종 모형으로 도출하였으며, 반응곡선 (Response curve)을 통해 각각의 환경변수와 분포의 관계를 파악하였다.

MaxEnt 분석 결과, 모형의 정확성과 신뢰도를 결정하는 AUC는 0.838로 나타났다 (Fig. 1). AUC는 0.8~1.0이면 모형의 설득력이 있다고 판단된다 (Franklin 2009). 유령멍게 (*C. robusta*)의 분포 및 잠재 서식지와 관련된 환경변수에서 평균 염도가 57.6%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 다음으

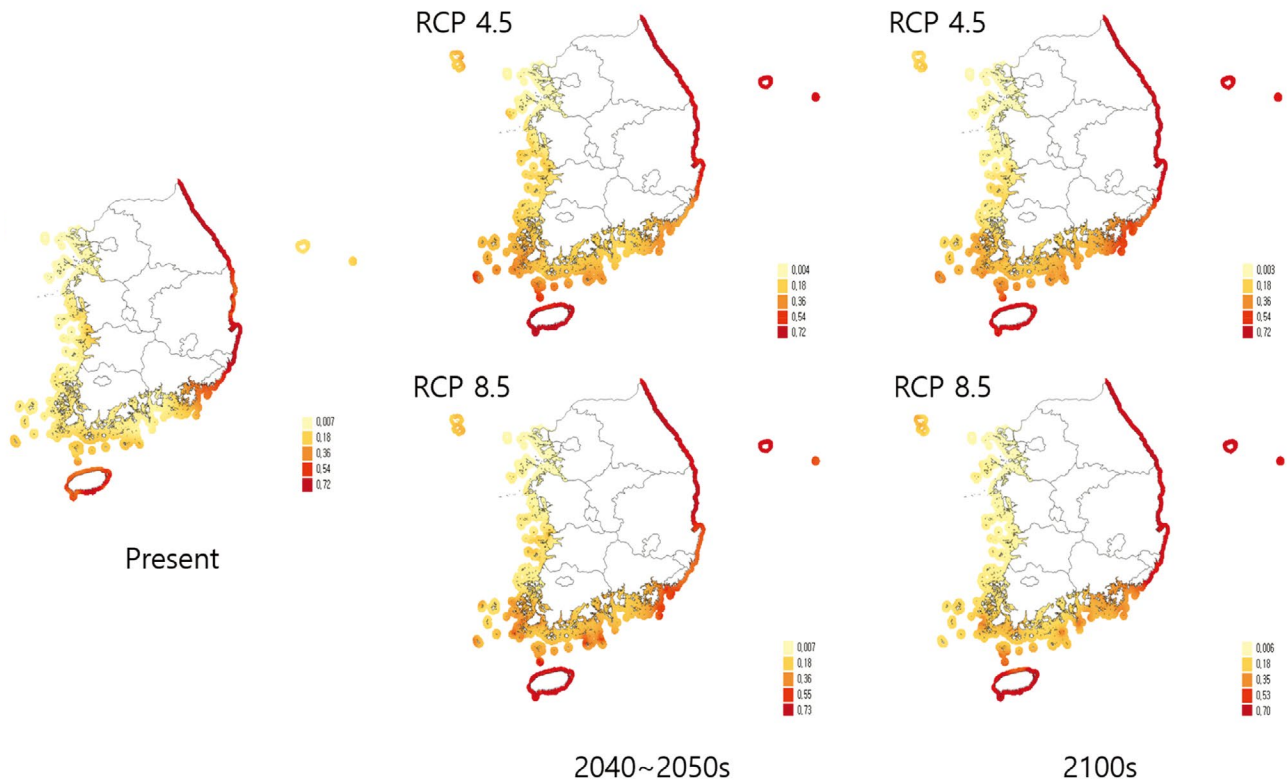


Fig. 2. Potential habitats and distribution of *Ciona robusta* predicted by RCP scenario (4.5 and 8.5).

로 평균 엽록소가 15.7%, 최대 수온이 10.5%의 기여도를 보였다. 평균과 최소 수온이 각각 4.9%와 1.4%의 기여도를 보였으며, 최대 및 최소 엽록소는 각각 9.7%와 0.3%의 기여도를 보였다(Table 3).

유령멍게(*C. robusta*)의 잠재 서식지 및 분포는 동해안과 제주도 연안 지역 그리고 남해안 일부 지역이 가장 높았으며, 서해안이 가장 낮았다(Fig. 2). 이와 같은 모형의 예측 결과는 현재 야외조사에서도 서해안 지역에서 유령멍게(*C. robusta*)의 서식이 확인되고 있지 않은 것과 일치하였다. 동해(32~34 psu), 남해(31~34psu), 그리고 서해(28~32psu)의 연중 염도 변동을 고려할 때 서해의 낮은 염도 조건이 유령멍게(*C. robusta*)가 분포 및 확산하는데 적합하지 않은 것으로 판단되며, Kim *et al.* (2018)의 유령멍게(*C. robusta*)의 알 발육 실험에서도 유사한 결과를 보여주었다.

RCP 4.5와 RCP 8.5 각각의 시나리오에 따른 분석 결과, 염도는 현재와 2040~2050년, 2100년에 차이를 보이지 않았으며, 또한 최대, 평균, 최소 해수표면온도의 경우도 모두 RCP 4.5의 2040~2050년과 2100년에 차이가 없었다. 그러나 RCP 8.5에서 최대, 평균, 최소 해수표면온도는 2100년이 2040~2050년 보다 각각 약 2°C 높아지는 경향을 보였다(Tyberghin *et al.* 2012). RCP 8.5에서 수온의 차이를 보였지만 유

령멍게(*C. robusta*)의 분포에는 큰 영향을 주지 않았으며, 유령멍게(*C. robusta*)는 현재와 유사하게 동해안과 제주도 연안 그리고 남해안 일부에 분포할 것으로 예상된다. 또한 2040~2050년 그리고 2100년에는 RCP 4.5와 RCP 8.5 모두 공통적으로 울릉도까지 잠재적 서식지가 확대되는 것을 확인할 수 있었으나 서해로는 유령멍게(*C. robusta*)가 서식할 수 있는 잠재적 서식지가 확대되지 않을 것으로 예상된다. 분포 및 잠재 서식지는 동해안의 모든 연안과 제주도의 모든 연안에 및 남해안의 일부 연안에서 가장 높게 확인되었으며, 서해안은 연안 중 제일 낮게 확인되었다. 각각의 환경변수에 대한 반응곡선(Response curve) 결과 수온이 높아짐에 따라 유령멍게(*C. robusta*)의 분포가 확대될 것으로 나타났으며, 염도는 Kim *et al.* (2018)의 연구에서 밝힌 최적 염도(32~34psu)와 유사한 결과를 나타내어 최적 염도일 때 분포가 확대될 것으로 나타났다(Fig. 3).

결과적으로 유령멍게(*C. robusta*)의 분포 및 잠재서식지에는 염도가 가장 중요한 환경 변수로 작용하였으며, 2040~2050년과 2100년의 유령멍게(*C. robusta*)의 분포 및 잠재 서식지는 분포에 가장 큰 기여도를 보이는 염도의 변화가 없어 현재와 유사하게 동해안 모든 연안과 제주도 전 연안에 분포할 것으로 분석되었다.

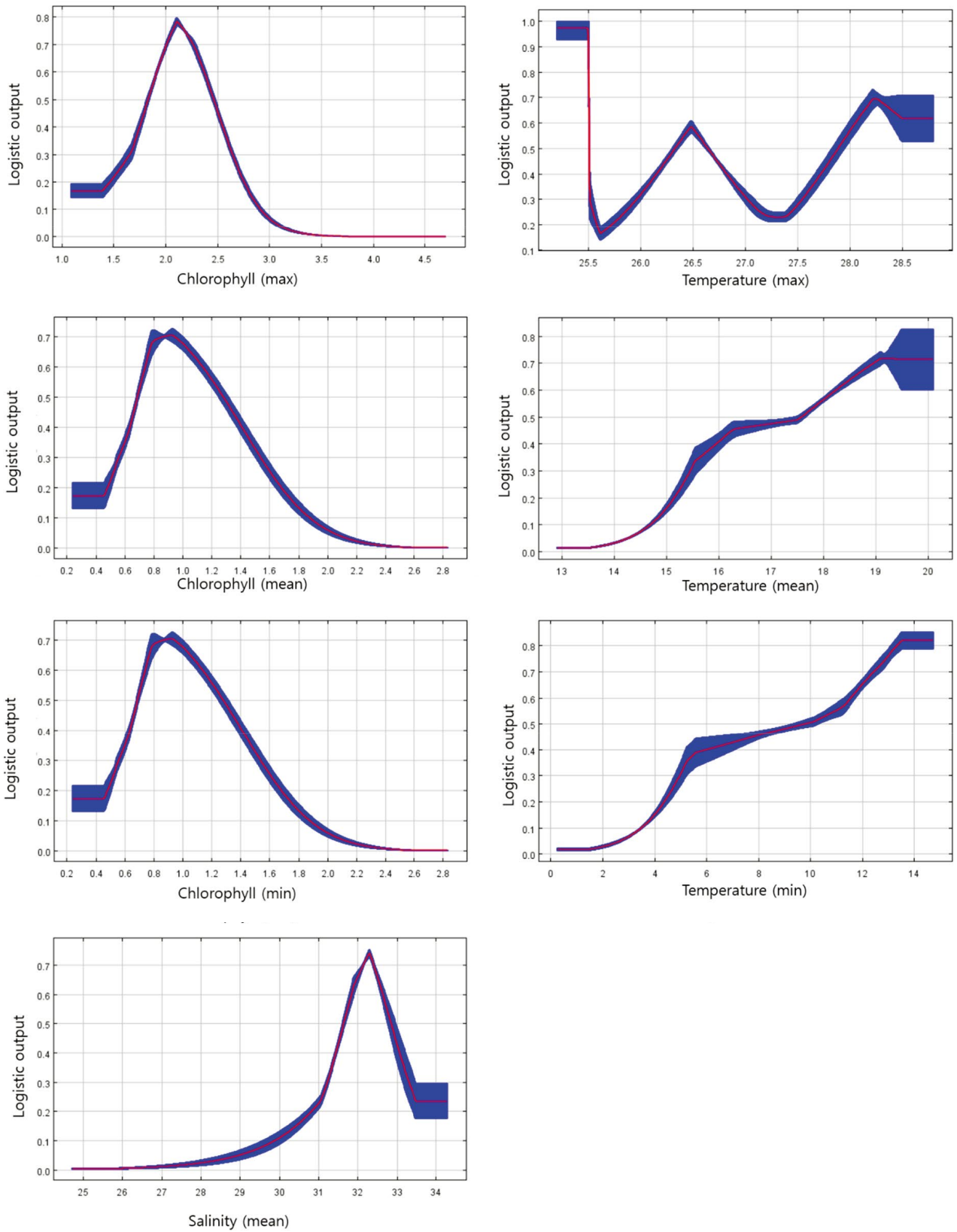


Fig. 3. Response curves of *Ciona robusta* for present environmental variables.

본 연구에서는 MaxEnt 종분포 모형을 통해 유령명게(*C. robusta*)의 분포 및 잠재 서식지를 확인하였으며, RCP 시나리오에 따른 미래에도 현재와 유사한 분포 양상을 보이는 것으로 추정되었다. 현재 유령명게(*C. robusta*)는 서해안을 제외한 동해안 및 남해안 연안 그리고 제주도는 이미 분포하고 있어 동해안, 남해안 및 제주도는 확산에 대한 방제 및 관리가 어려운 실정이다. 그러나 아직 분포가 확인되지 않은 서해안 또는 울릉도 지역에 대한 유령명게(*C. robusta*)의 분포 및 잠재 서식지의 대한 지속적인 모니터링과 현장 조사가 필요하며, 확산하는데 영향을 미치는 매개체들에 대한 관리 방안이 필요할 것으로 생각된다. 더불어 유령명게(*C. robusta*)뿐만 아니라 다른 기타 해양 외래 침입 교란 생물의 지속적인 모니터링과 관리 방안이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2018년 해양수산부 재원으로 한국해양과학 기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(2018년도 해양생태계 교란생물과 유해해양생물의 관리기술개발-20130265).

REFERENCES

- Beaugrand G, M Edwards, K Brander, C Luczak and F Ibanez. 2008. Causes and projections of abrupt climate-driven ecosystem shifts in the North Atlantic. *Ecol. Lett.* 11:1157-1168.
- Choi YK, KD Cho, BG Lee and CH Hong. 1995. Environmental characteristics according to the depth in Deukryang Bay, culturing ground of pen shell (*Atrina pectinata*). *Korean Soc. Fish. Tech.* 31:127-141.
- Daigle RM and CM Herbinger. 2009. Ecological interactions between the vase tunicate (*Ciona intestinalis*) and the farmed blue mussel (*Mytilus edulis*) in Nova Scotia, Canada. *Aquat. Invasions* 4:177-187.
- Dukes JS and HA Mooney. 1999. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends Ecol. Evol.* 14:135-139.
- Franklin J. 2009. Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press, UK. 44:613-615.
- Hoshino ZI and T Tokioka. 1967. An unusually *Ciona robusta* from the northeastern coast of Honsyu Island, Japan. *Seto. Mar. Biol. Lab.* 15:275-290.
- Januario SM, SA Estay, FA Labra and M Lima. 2015. Combining environmental suitability and population abundances to evaluate the invasive potential of the tunicate *Ciona intestinalis* along the temperate South American coast. *PeerJ* 3:e1357; DOI 10.7717/peerj.1357.
- Kim DG, JU Park, DH Kim, TJ Yoon and S Shin. 2017. The effect of temperature on early growth of *Ciona intestinalis* (Ascidiacea, Phlebobranchia, Cionidea). *Korean J. Environ. Biol.* 35:1-5.
- Kim DH. 2005. International management of introduced marine pests and Korea's strategic response. *J. Environ. Pol. Admin.* 13:143-168.
- Kim MK, DH Kim, JU Park JU, DH Kim, TJ Yoon, DG Kim and S Shin. 2018. Effects of temperature and salinity on the egg development and larval settlement of *Ciona robusta* (Ascidiacea, Phlebobranchia, Cionidae). *Ocean Sci. J.* 1-10.
- Lee TJ and S Shin. 2014. Morphological and molecular identification of an introduced alien sea squirt (Tunicata: Ascidiacea) in Korea. *Proc. Biol. Soc. Wash.* 127:284-297.
- Park HS, JH Lee and JW Choi. 2000. Spatio-temporal distributions of macrobenthic community on subtidal area around Mokpo, Korea. *The Sea* 5:169-176.
- Park HJ, WG Park, JW Choi and BR Lee. 2017. Variation of community structure of decapods by season and depth near Oryuk Islets off Busan, Korea. *J. Fish. Mar. Sci. Educ.* 29:257-269.
- Park JU, TJ Lee, DH Kim, PJ Kim, DH Kim and S Shin. 2017. Monitoring and impact of marine ecological disturbance causing organisms on an oyster and sea squirt farm. *Korean J. Environ. Biol.* 35:677-683.
- Phillips SJ, RP Anderson and RE Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190:231-259.
- Phillips SJ, M Dudk and RE Schapire. 2017. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/.
- Pyo JH, TJ Lee and S Shin. 2012. Two newly recorded invasive alien ascidians (Chordata, Tunicata, Ascidiacea) based on morphological and molecular phylogenetic analysis in Korea. *Zootaxa* 3368:211-228.
- QGIS Development Team. 2018. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Available from <https://www.qgis.org/en/site/>.
- Shin S, JH Park, JS Lee, IH Kim, JE Seo, HS Kim, GS Min and SH Kim. 2013. Marine introduced benthos of Korea. *Min. Oceans Fish. Korea.* pp. 1-102.
- Suppiah R, KJ Hennessy, PH Whetton, K McInnes, I Macadam, J Bathols and CM Page. 2007. Australian climate

- change projections derived from simulations performed for the IPCC 4th Assessment Report. *Aust. Meteorol. Mag.* 56: 131–152.
- Tyberghein L, Verbruggen, K Pauly, C Troupin, F Mineur and OD Clerck. 2012. Bio-Oracle: a global environmental dataset for marine species distribution modelling. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 21:272–281.
- Yoo JK, TY Song, HP Hong, KM Jeong and CS Myung. 2006. Marine plankton in ballast water of ship entering Korea. *Ocean. Polar Res.* 28:57–65.

Received: 3 December 2018

Revised: 20 December 2018

Revision accepted: 21 December 2018