

한국 제주 연안의 조하대 해조상 및 군집구조 모니터링(2016–2018)

김보연 · 한송헌 · 김정년¹ · 고준철*

국립수산과학원 아열대수산연구소, ¹국립수산과학원 수산자원연구센터

Monitoring of Marine Algal Flora and Community Structure in Subtidal Zone around Jeju Coasts, Korea (2016–2018)

Bo Yeon Kim, Song-Hun Han, Jung Nyun Kim¹ and Jun-Cheol Ko*

Subtropical Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Jeju 63068, Republic of Korea

¹Fisheries Resources Research Center, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53064, Republic of Korea

This study examined the seasonal variations of subtidal marine algal community structures along four sites in Jeju Island, Korea, from February 2016 to November 2018. A total of 147 marine algal species were identified, including 13 green (8.84%), 26 brown (17.69%), and 108 red algae (73.47%). During the study period, the number of species was highest in Sagye (116 species) followed by numbers in Sinheung (98 species), Bukchon (90 species) and Sinchang (73 species). *Ecklonia cava*, *Peyssonnelia caulifera*, *Synarthrophyton chejuense*, *Corallina aberrans* and *Corallina crassissima* occurred at all study sites and in all seasons. The average annual biomass of marine algal flora was 746.29±88.85 g wet wt./m² and ranged from 652.25 g/m² at Sinheung to 979.91 g/m² at Sagye. The brown alga *E. cava* was the most dominant species, occupying 42.85% (319.80 g/m²) of the total seaweed biomass. Subdominant species were *C. crassissima* and *Undaria pinnatifida*, comprising 10.22% (76.29 g/m²) and 9.66% (72.13 g/m²), respectively. A similarity analysis showed that there were regional differences in the algal communities, with three distinct groups.

Keywords: Macroalgae, Community structure, Biomass, Dominant species, Jeju

서론

해조류 군집은 연안 생태계에서 다양한 해양생물의 서식처, 산란장 및 먹이망의 기능을 수행하고 있으며, 먹이망에서는 일차생산자로서 연안의 생물 다양성과 자원량 증감에 크게 기여한다고 알려져 있다(Whitaker et al., 2010; Janiak and Whitlatch, 2012; Liang et al., 2014). 해조류는 부영양화된 연안이나 인간의 직·간접적인 활동으로 인해 오염된 해역에서 갈파래류(*Ulva* spp.)와 대마디말류(*Cladophora* spp.)와 같은 일부 녹조류가 번무하여 종다양성이 감소한다고 알려져 있는데(Wells et al., 2007), 이렇게 영양염 변화, 연안 오염 등 다양한 환경·물리적 변화에 민감하게 반응하는 해조류는 연안 환경을 모니터링하는 생물지시자(biological indicator)로 사용되고 있다(Wells et al., 2007; Chakraborty et al., 2014; Vale et al., 2021). 해조류는 다양한 환경요인에 의해 종조성 및 군집구조가 변화하는데,

그 중 수온의 변화 특히 수온의 상승은 일부 엽상해조류의 소실 및 산호조류의 확산 등 해조류 군집구조의 변화를 일으킨다고 알려져 있다(Carballo et al., 2002; Fujita, 2010; Hwang et al., 2017). 일본 Tosa만에서 서식했던 감태(*Ecklonia cava*) 군락의 소멸, 울진 왕돌초 해역의 감태 군락 등이 수온 상승에 의한 군집구조 변화의 사례로 볼 수 있다(Kim et al., 1977; Serisawa et al., 2004; Kim, 2006). 제주 연안은 지난 86년 간(1924–2009년) 표층 수온은 약 1.94°C, 동계 수온은 약 4.75°C 상승하였으며(Suh et al., 2011), 한반도 해역 중 가장 빠른 수온 상승폭을 보인다고 알려져 있어(Lee et al., 2011; Cho et al., 2022) 제주 연안의 수온 변화에 따른 해조류 종조성 및 군집구조의 변화가 예상된다. 제주도 연안의 해조상은 Kang (1960)에 의해 최초로 보고된 이후 주로 조간대 해조군집에 대한 연구가 수행되었다(Lee and Lee, 1976, 1982; Lee, 1976; Yoon, 1985; Boo, 1988; Kim, 1991). 최근에는 SCUBA diving을 해야 하는 어려움에도

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 750. 4375 Fax: +82. 64. 743. 5883E-mail address: kjc3410@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0691>

Korean J Fish Aquat Sci 56(5), 691-700, October 2023

Received 28 July 2023; Revised 14 September 2023; Accepted 11 October 2023

저자 직위: 김보연(인턴연구원), 한송헌(해양수산연구소), 김정년(해양수산연구소), 고준철(해양수산연구소)

불구하고 조간대에 비해 상대적으로 환경이 안정되어 높은 종 다양성과 생물량을 보이는 조하대 해조류 군집에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Kim et al., 2013, 2015, 2018; Kang et al., 2015; Jung et al., 2019; Cho et al., 2022). 하지만, 앞서 언급한 선행연구는 단기간(1년 미만-3년)에 한해 수행되어 장기적인 환경 변화, 특히 수온 상승으로 인한 해조상 변화를 파악하기에는 어려운 점이 있으며, 이를 위해서는 지속적인 모니터링 자료의 축적이 필요하다.

따라서, 본 연구는 Kim et al. (2018)이 수행한 연구 정점과 동일한 해역(북촌, 신창, 사계, 신흥)에서 조하대에 서식하는 해조상 및 군집구조를 분석하여 이전 연구와 비교를 통해 변화 양상을 밝히고, 누적된 자료를 바탕으로 기후변화에 따른 연안 생태계의 변화를 예측하며, 해조 자원의 보존 및 관리 방안 등을 확립하기 위한 근거자료를 제공하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

본 연구를 수행하기 위해 해조류 채집은 제주도의 북촌, 신창, 사계, 신흥 해역의 조하대 5, 10, 20 m 수심에서 2016년부터 2018년까지 3년간 계절별(2, 5, 8, 11월)로 SCUBA Diving에 의해 실시하였으며(Fig. 1), 채집 정점은 Kim et al. (2018)에 의해 수행된 연구 정점과 동일하였다(Table 1). 연구 해역의 저층 수온 및 염분은 Niskin 채수기로 채수한 후, YSI (6600-V2; YSI Incorporated, Yellow Springs, OH, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였다.

해조류 채집

각 연구 해역의 조하대 정점(수심 5, 10, 20 m)에서 10×10 cm로 구획된 방형구(50×50 cm) 3개를 무작위로 놓고 방형구 내에 출현하는 해조류를 끌갈을 이용하여 전량 채집하였으며, 채집 후 10% 포르말린(해수) 용액으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 채집한 해조류는 실험실에서 담수로 수 회 세척한 후 종별로 무게(습중량)를 전자저울(CB-300; AND, Seoul, Korea)로 0.01 g 수준까지 측정하였으며, 단위 면적당 생물량(g wet wt./m²)으로 환산하였다. 해조류의 동정은 Lee (2008), Choi et al. (2016)과 AlgaeBase (<http://www.algaebase.org>, Guiry and Guiry, 2023)의 분류체계를 참고하였으며, 소형 해조류는 광학현미경(BX43; Olympus, Tokyo, Japan)을 사용하여 분류 및 동정하였다.

군집지수

연구 기간 동안 해역별 해조 군집의 우점도 지수(dominance index, DI)는 높은 생물량을 보이는 종을 우점종으로 정하여 전체 생물량에 대한 제 1, 2 우점종의 생물량 합에 비로 산출하였으며(McNaughton, 1967), 출현종과 생물량 자료를 이용하여 풍도지수(richness index, R), 균등도 지수(evenness index, J')와 종다양도 지수(diversity index, H')

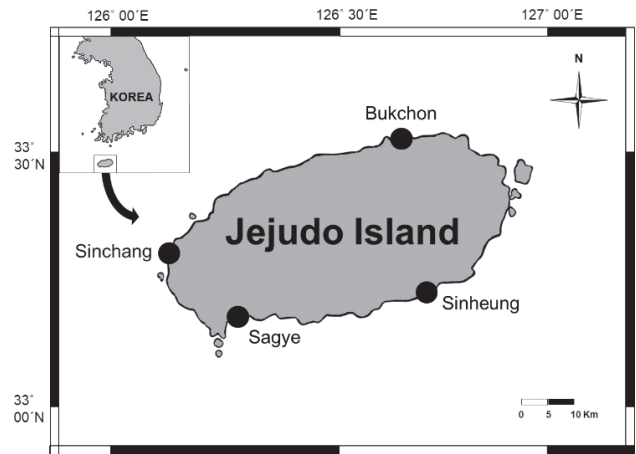


Fig. 1. A map of sampling sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018.

non and Weaver, 1949; Margalef, 1958; Fowler and Cohen, 1990). 또한, 출현한 해조류의 연평균 생물량을 사용하여 K-dominance 곡선으로 해역별 우점도를 비교하였고(Lambhead et al., 1983), 연도별, 해역별 유사도(similarity)를 분석하였으며(Bray and Curtis, 1957), 그룹 간 유의차는 SIMPROF (similarity profile) tests를 실시하여 검정하였다. 군집지수의 산출 및 유사도 분석은 PRIMER version 6 (Clarke and Gorley, 2006) 프로그램을 사용하였다.

결 과

수온과 염분

연구 기간 동안 4개 해역의 평균 저층 수온은 17.8–19.9°C

Table 1. Latitude, longitude of study sites and depth of coastal water in Jeju Island, Korea

Study site	Depth (m)	Latitude	Longitude
Bukchon	5	33°33.422'	126°41.480'
	10	33°33.655'	126°41.254'
	20	33°33.752'	126°41.153'
Sinchang	5	33°20.863'	126°10.047'
	10	33°20.837'	126°09.949'
	20	33°20.852'	126°09.808'
Sagye	5	33°13.298'	126°18.394'
	10	33°13.283'	126°18.618'
	20	33°12.982'	126°19.045'
Sinheung	5	33°17.689'	126°46.058'
	10	33°17.653'	126°46.167'
	20	33°17.380'	126°46.397'

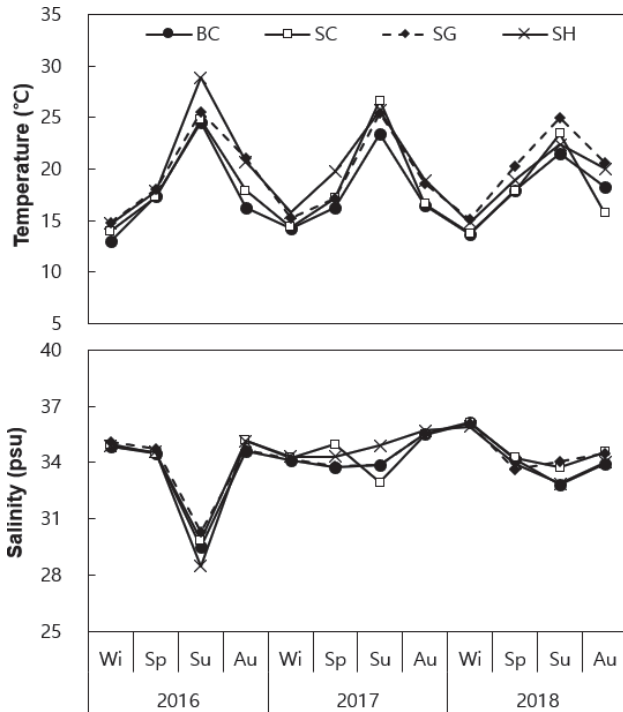


Fig. 2. Seasonal variations in bottom water temperature and salinity at four study sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018. BC, Bukchon; SC, Sinchang; SG, Sagye; SH, Sinheung

($18.9 \pm 0.53^\circ\text{C}$, mean \pm SE)로 신흥 해역에서 가장 높았고, 북촌 해역에서 가장 낮은 값을 보여 제주 남부와 북부 해역의 수온이 1°C 이상 차이가 나는 것을 확인하였다(Fig. 2). 연도별로는 2016년에 $14.1\text{--}25.9^\circ\text{C}$ (평균 19.2°C), 2017년에 $14.9\text{--}25.3^\circ\text{C}$ (평균 18.9°C), 2018년에는 $14.4\text{--}23.1^\circ\text{C}$ (평균 18.7°C)로 다소 감소하는 경향을 보였다. 연구기간 동안의 평균 저층 염분은 $34.0\text{--}34.2$ (34.1 ± 0.06 , mean \pm SE)의 범위로 해역별 차이는 없었다(Fig. 2). 연도별 평균 염분은 2016년에 33.5 ($29.5\text{--}34.9$), 2017년에 34.5 ($33.9\text{--}35.6$), 2018년에 34.4 ($33.4\text{--}36.1$)로 2016년이 1정도 낮게 나타났다. 염분의 계절 변화는 동계와 추계에 높고, 하계에 낮은 유사한 패턴을 보이는데, 2017년과 2018년에는 계절별 차이가 없으나 2016년에는 하계에 저염분수의 영향으로 모든 해역에서 염분이 $28.5\text{--}30.3$ 로 낮은 값

을 보였다.

종조성

본 연구 기간 동안 제주도 4개 해역에서 출현한 해조류는 총 147종으로 녹조류 13종(8.84%), 갈조류 26종(17.69%), 홍조류 108종(73.47%)이었으며, 홍조류의 출현 비율이 가장 높았다(Table 2). 해역별 해조류 출현종수는 73–116종으로 신창에서 최소, 사계에서 최대로 나타났다. 모든 해역에서 연중 출현한 해조류는 감태(*E. cava*), 자루바다표고(*Peyssonnelia caulifera*), 낭과떡(*Synarthrophyton chejuense*), 방황혹산호말(*Corallina aberrans*), 돌레혹산호말(*Corallina crassisima*)로 갈조류 1종, 홍조류 4종으로 총 5종이었다.

연도별 종조성을 보면, 2016년에 녹조류 10종, 갈조류 14종, 홍조류 82종으로 총 106종의 해조류가 출현하였으며, 해역별로는 51–84종이 출현하여 신창에서 최소, 사계에서 최대를 보였고, 계절별로는 50–81종으로 추계에 최소, 동계에 최대였다(Table 2). 2016년 4개 해역에서 모든 계절에 출현한 종은 감태, 자루바다표고, 낭과떡, 넓은계발(*Amphiroa anceps*), 눈썹마디계발(*Amphiroa foliacea*), 방황혹산호말, 돌레혹산호말, 붉은뼈까막살(*Grateloupia angusta*)로 총 8종이었다. 2017년에는 녹조류 10종, 갈조류 22종, 홍조류 78종으로 총 110종이 출현하였으며, 해역별로는 43–80종이 출현하여 신창에서 최소, 사계에서 최대를 보였고, 계절별로는 56–70종으로 추계에 최소, 춘계에 최대였다. 2017년의 연구 기간 동안 4개 해역의 모든 계절에 출현한 종은 감태, 자루바다표고, 낭과떡, 넓은계발, 긴가지산호말(*Ellisolandia elongata*), 방황혹산호말, 돌레혹산호말, 붉은뼈까막살로 총 8종이었다. 2018년에는 총 112종(녹조류 10종, 갈조류 21종, 홍조류 81종)의 해조류가 출현하였으며, 연간 점차 증가하는 경향을 보였다. 해역별로는 47–78종으로 2016–2017년과 마찬가지로 신창에서 최소, 사계에서 최대였으며, 계절별로는 56–84종으로 하계와 추계에 최소, 춘계에 최대 출현종수를 보였다. 2018년 동안 모든 해역에서 출현한 해조류는 감태, 자루바다표고, 낭과떡, 눈썹마디계발, 방황혹산호말, 돌레혹산호말로 6종이었다.

해역별 출현종수를 보면, 북촌에서는 녹조류 8종, 갈조류 13종, 홍조류 69종으로 총 90종의 해조류가 출현하였으며, 연간 62–67종으로 점차 증가하는 경향을 보였고, 계절별로는 49–70

Table 2. Annual variations in the number of macroalgal species occurred at the four study sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018

	2016				2017				2018			
	BC	SC	SG	SH	BC	SC	SG	SH	BC	SC	SG	SH
Chlorophyta	7	2	6	7	6	4	5	7	7	3	6	6
Ochrophyta	6	5	13	2	10	9	16	6	9	5	18	6
Rhodophyta	49	44	65	54	49	30	59	50	51	39	54	59
Total	62	51	84	63	65	43	80	63	67	47	78	71

BC, Bukchon; SC, Sinchang; SG, Sagye; SH, Sinheung.

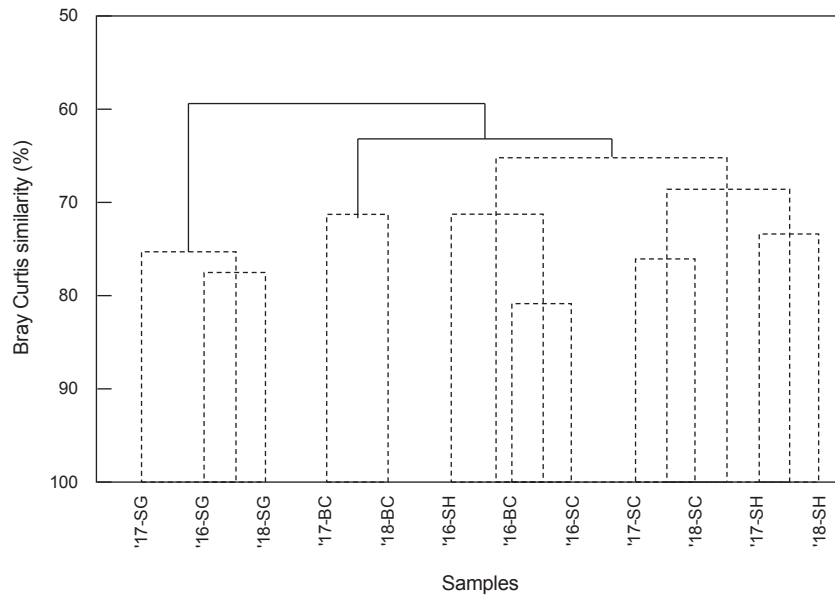


Fig. 3. Results of cluster analysis performed on Bray Curtis similarity from standardized species biomass transformed data. The dotted lined indicate no significant difference among four sites and three years (SIMPROF test). BC, Bukchon; SC, Sinchang; SG, Sagye; SH, Sinheung.

종으로 추계에 최소, 춘계에 최대였다. 본 연구 기간동안 북촌에 서만 관찰된 해조류는 바다깃꼐(*Halopteris filicina*), 줄의관말(*Carpomitra costata*), 청각비단풀(*Ceramium codii*), 명주비단망사(*Martensia albida*), 다홍나래풀(*Ardissonula regularis*)로 총 5종이었으며, 바다깃꼐는 매년 출현하였다. 신창에서는 본 연구 기간 동안 총 73종(녹조류 6종, 갈조류 9종, 홍조류 58종)이 출현하였으며, 2016년에 51종으로 가장 많았고, 2017년에 43종, 2018년에 47종으로 2016년에 비해 다소 감소하였다. 계절별 해조류 출현종수는 29-55종으로 북촌과 마찬가지로 추계에 최소, 춘계에 최대를 보였다. 신창에서만 출현한 해조류는 담배잎산말(*Desmarestia dudresnayi* subsp. *tabacooides*), 주걱가시그물바탕말(*Spatoglossum latum*), 장다리붉은실(*Melanothamnus porrectus*)로 3종이며, 총 12회 조사 중 1-2회 출현하였다. 사계에서는 녹조류 9종, 갈조류 22종, 홍조류 85종으로 총 116종의 해조류가 출현하였으며, 연도별로는 78-84종으로 매년 감소하였고, 계절별로는 52-85종의 범위로 추계에 최소, 동계에 최대였다. 사계에서만 출현한 해조류는 총 22종(녹조류 1종, 갈조류 9종, 홍조류 12종)이며, 이 중 두켜부채(*Distromium decumbens*), 부채말(*Padina arborescens*), 팽생이모자반(*Sargassum homeri*), 엔도오모자반(*Sargassum yendoi*)은 매년 출현하였다. 신흥에서는 녹조류 9종, 갈조류 8종, 홍조류 81종으로 총 98종이 출현하였고, 연간 출현종수는 63-71종으로 2018년에 증가하였으며, 계절별로는 51-70종으로 하계에 최소, 동계에 최대였다. 신흥해역에서만 출현한 해조류는 총 14종(녹조류 3종, 홍조류 11종)이며, 12회 조사 중 1-2회 출현하였다.

유사도 분석

해조류 출현종의 생물량으로 유사도 분석을 실시한 결과, 통계학적으로 유의차를 보이는 3개 그룹 즉, 그룹 A (2016-2018년의 신창, 신흥 해역, 2016년 북촌 해역), 그룹 B (2017-2018년의 북촌 해역), 그룹 C (2016-2018년의 사계 해역)로 구분되었다(Fig. 3). 그룹 A와 B의 유사도는 63.07%로 유의차를 나타냈으며(SIMPROF test, P<0.05), 제주 남부에 위치한 사계 해역(그룹 C)은 다른 그룹과 59.29%의 가장 낮은 유사도를 보여 해조 군집이 지역적인 차이가 있음을 확인하였다. 구분된 3개 그룹 간의 비유사성(dissimilarity)에 기여하는 종을 알아보기 위해 SIMPER 분석을 실시한 결과, 그룹 A와 B는 36.93%의 비유사도를 보이며, 누운청각(*Codium coactum*, 11.03%), 감태(7.54%), 몽우리청각(*Codium contractum*, 7.38%), 미역(*Undaria pinnatifida*, 6.72%), 톱니모자반(*Sargassum serratifolium*, 6.06%)의 기여도가 높게 나타났다. 그룹 A와 C간의 비유사도는 39.78%이며, 비유사도에 기여하는 종은 감태가 9.28%로 가장 높았고, 그 다음으로 엔도오모자반, 넓은계발, 미역, 톱니모자반이었다. 그룹 B와 C의 비유사도는 43.98%였으며, 감태, 누운청각, 엔도오모자반, 넓은계발, 몽우리청각 등이 두 그룹간 생물량의 차이를 보여 비유사도에 기여하는 종으로 확인되었다.

생물량

연구 기간 동안 제주도 4개 해역의 조하대 해조류 평균 생물량은 746.29±88.85 g wet wt./m²이며, 분류군별로는 녹조류

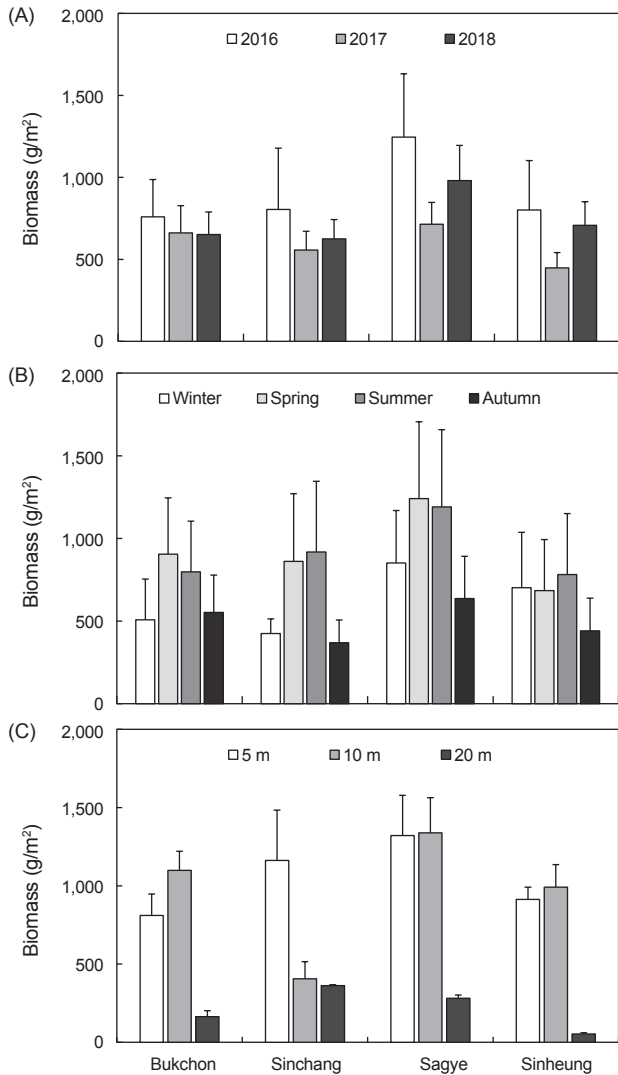


Fig. 4. Annual (A), seasonal (B) and vertical (C) variations in average seaweed biomass (g wet wt./m²) at four study sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018. Vertical bars represent standard errors. BC, Bukchon; SC, Sinchang; SG, Sagye; SH, Sinheung.

43.37 g/m² (5.81%), 갈조류 433.31 g/m² (58.06%), 홍조류가 269.61 g/m² (36.13%)로 갈조류의 생물량이 최대였다. 해역별로 비교하면, 652.25–979.91 g/m²로 신항에서 최소, 사계에서 최대를 보였으며, 계절별로는 499.83–922.88 g/m²로 추계에 최소, 춘계에 최대 생물량을 나타냈다(Fig. 4).

연도별로 비교해보면, 2016년에 출현한 해조류의 연평균 생물량은 902.71±114.69 g/m²였고, 분류군별로는 녹조류 36.90 g/m² (4.09%), 갈조류 617.79 g/m² (68.44%), 홍조류 248.02 g/m² (27.47%)로 확인되었다. 해역별로는 759.72–1,245.42 g/m²로 북촌에서 최소, 사계에서 최대 생물량을 보였으며, 계절

별로는 372.13–1,418.58 g/m²로 추계에 최소, 하계에 최대였다(Fig. 4A). 2017년 4개 해역에서 출현한 해조류의 연평균 생물량은 595.04±58.90 g/m²로 2016년에 비해 감소하였고, 분류군별로는 녹조류 40.65 g/m² (6.83%), 갈조류 299.37 g/m² (50.31%), 홍조류 255.02 g/m² (42.86%)로 확인되었다. 해역별로는 448.14–713.95 g/m²의 범위로 신항 해역에서 최소, 사계 해역에서 최대였고, 계절별로는 446.40–795.92 g/m²로 추계에 가장 낮았고, 춘계에 가장 높은 생물량을 보였다. 2018년에는 741.13±81.60 g/m²로 전년도에 비해 증가하였으며, 분류군별로는 녹조류 52.56 g/m² (7.09%), 갈조류 382.78 g/m² (51.65%), 홍조류 305.79 g/m² (41.26%)로 2016, 2017년과 마찬가지로 갈조류의 생물량이 가장 높았다. 해역별 해조류 생물량은 연평균 624.83–980.36 g/m²의 범위로 신항에서 최소, 사계에서 최대였고, 계절별로는 624.39–927.58 g/m²로 동계에 최소, 춘계에 최대 생물량을 보였다.

해역별로 비교해보면, 북촌에서는 연구 기간 동안 평균 690.94±34.52 g/m²의 생물량을 보였고, 연간 651.50–759.72 g/m²로 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4A). 계절별로는 508.05–904.59 g/m²로 동계에 최소, 춘계에 최대였고(Fig. 4B), 수심별로는 163.94–1,098.35 g/m²로 수심 10 m에서 가장 높은 값을 보였다(Fig. 4C). 신항 해역에서 출현한 해조류의 평균 생물량은 662.07±74.09 g/m²로 나타났고, 연도별로는 556.49–804.90 g/m²로 2017년에 최소, 2016년에 최대였다. 계절별로는 368.48–918.07 g/m²로 추계에 최소, 하계에 최대였으며, 수심별로는 361.53–1,161.97 g/m²로 수심 5 m에서 최대였다. 사계에서 출현한 해조류의 평균 생물량은 979.91±153.42 g/m²였고, 연도별로는 713.95–1,245.42 g/m²의 범위로 연간 변화 패턴이 신항과 유사하였다. 계절별로는 636.70–1,240.71 g/m²로 추계에 최소, 춘계에 최대였으며, 수심별로는 280.73–1,337.93 g/m²로 수심 5 m와 10 m에서 높은 생물량을 보였다. 신항 해역에서는 평균 652.25±105.53 g/m²의 생물량을 보였고, 연도별로는 448.14–800.79 g/m²로 신항, 사계 해역과 마찬가지로 2017년에 가장 낮은 값을 보였다. 계절별로는 441.31–781.51 g/m²로 추계에 최소, 하계에 최대였고, 수심별로는 52.73–990.94 g/m²로 수심 5, 10 m와 20 m 사이에 큰 차이를 확인하였다.

우점종 및 수직분포

본 연구 기간 동안 제주 해역에 출현한 해조류 중에서 평균 생물량이 가장 높은 종은 감태(319.80 g/m², 42.85%)였으며, 그 다음은 돌레혹산호말(76.29 g/m², 10.22%), 미역(72.13 g/m², 9.66%), 방황혹산호말(46.50 g/m², 6.23%) 순으로 전체 생물량의 5% 이상을 차지하며 우점하였다. 북촌(690.94 g/m²)에서는 감태(217.19 g/m², 31.43%)와 돌레혹산호말(99.70 g/m², 14.43%), 누운청각(87.34 g/m², 12.64%)이 우점하였고, 수심별로는 돌레혹산호말·미역(5 m) - 감태·누운청각(10 m) - 감태·자루바다표고(20 m)로 확인되었다(Table 3). 신항(662.07

g/m²)에서는 감태(284.15 g/m², 42.92%), 둘레혹산호말(93.47 g/m², 14.12%), 방황혹산호말(74.46 g/m², 11.25%)이 우점하였으며, 수심 5 m와 10 m에서의 우점종은 유사하게 나타났고, 수심 20m에서는 감태와 자루바다표고가 우점하였다. 사계(979.91 g/m²)에서는 감태 1종이 전체 생물량의 53.57%를 차지하였으며, 전 수심에서 우점하였다. 이외에도 미역·둘레혹산호말(5 m) - 넓은게발·엔도오모자반(10 m) - 자루바다표고·넓은게발(20 m)이 수심별 우점종으로 확인되었다. 신흥(652.25 g/m²)에서는 감태(252.96 g/m², 38.78%), 미역(118.61 g/m², 18.18%), 둘레혹산호말(69.01 g/m², 10.58%)이 높은 생물량을 보이며 우점하였고, 수심별로는 감태, 미역, 둘레혹산호말, 붉

은뼈까막살이 수심 5–10 m에서, 넓은게발은 수심 10–20 m에서, 자루바다표고는 수심 20 m에서 우점하였다.

군집지수

전체 생물량에 대한 제 1, 2 우점종의 생물량 합의 비로 산출된 DI는 0.31–0.75로 2017년의 북촌에서 최소, 2016년의 사계에서 최대로 확인되었다(Table 4). 연도별로는 0.43–0.69로 2016년에 감태와 둘레혹산호말의 생물량이 전체 생물량의 69.26%를 차지하여 최대였고, 2017년과 2018년에는 유사한 값을 보여 2016년과의 차이가 크게 나타났다. 해역별로는 0.46–0.62로 북촌에서 최소, 사계에서 최대였다. R는 6.64–12.02의 범위로

Table 3. Vertical distribution of dominant macroalgae (>5%) based on mean biomass (g wet wt./m²) at four study sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018

Study sites	5 (m)	10 (m)	20 (m)
Bukchon	<i>Corallina crassissima</i> (260.57)	<i>Ecklonia cava</i> (521.75)	<i>Ecklonia cava</i> (65.59)
	<i>Undaria pinnatifida</i> (99.42)	<i>Codium coactum</i> (261.77)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (57.83)
	<i>Corallina aberrans</i> (79.34)	<i>Codium contractum</i> (82.05)	<i>Grateloupia angusta</i> (8.46)
	<i>Lithophyllum okamurae</i> (77.37)		
	<i>Ecklonia cava</i> (64.22)		
Sinchang	<i>Ecklonia cava</i> (480.77)	<i>Ecklonia cava</i> (137.26)	<i>Ecklonia cava</i> (234.43)
	<i>Corallina aberrans</i> (197.05)	<i>Corallina crassissima</i> (83.08)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (91.45)
	<i>Corallina crassissima</i> (193.86)	<i>Undaria pinnatifida</i> (58.17)	
	<i>Undaria pinnatifida</i> (91.41)	<i>Corallina aberrans</i> (26.22)	
		<i>Codium coactum</i> (24.44)	
Sagye	<i>Ecklonia cava</i> (628.20)	<i>Ecklonia cava</i> (855.45)	<i>Ecklonia cava</i> (91.05)
	<i>Undaria pinnatifida</i> (225.60)	<i>Amphiroa anceps</i> (192.40)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (73.95)
	<i>Corallina crassissima</i> (89.53)	<i>Sargassum yendoi</i> (67.62)	<i>Amphiroa anceps</i> (45.73)
	<i>Sargassum yendoi</i> (75.01)		<i>Grateloupia angusta</i> (24.95)
Sinheung	<i>Ecklonia cava</i> (373.73)	<i>Ecklonia cava</i> (385.14)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (21.50)
	<i>Undaria pinnatifida</i> (150.27)	<i>Undaria pinnatifida</i> (205.56)	<i>Amphiroa anceps</i> (15.05)
	<i>Corallina crassissima</i> (108.30)	<i>Corallina crassissima</i> (96.27)	<i>Synarthrophyton chejuense</i> (5.64)
	<i>Grateloupia angusta</i> (74.35)	<i>Corallina aberrans</i> (85.95)	<i>Champia expansa</i> (3.46)
	<i>Lithophyllum okamurae</i> (50.61)	<i>Grateloupia angusta</i> (70.33)	
	<i>Amphiroa anceps</i> (68.27)		

Table 4. Various community indices of macroalgal flora for mean biomass (g wet wt./m²) at four study sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018

	2016				2017				2018			
	BC	SC	SG	SH	BC	SC	SG	SH	BC	SC	SG	SH
Dominance index (DI)	0.66	0.73	0.75	0.73	0.31	0.49	0.52	0.43	0.48	0.49	0.63	0.57
Richness index (R)	9.20	7.47	11.65	9.27	9.85	6.64	12.02	10.16	10.19	7.15	11.18	10.67
Evenness index (J')	0.45	0.37	0.33	0.35	0.64	0.59	0.53	0.57	0.55	0.55	0.46	0.47
Diversity index (H')	1.84	1.46	1.48	1.46	2.68	2.21	2.31	2.38	2.33	2.13	2.00	2.00

BC, Bukchon; SC, Sinchang; SG, Sagye; SH, Sinheung.

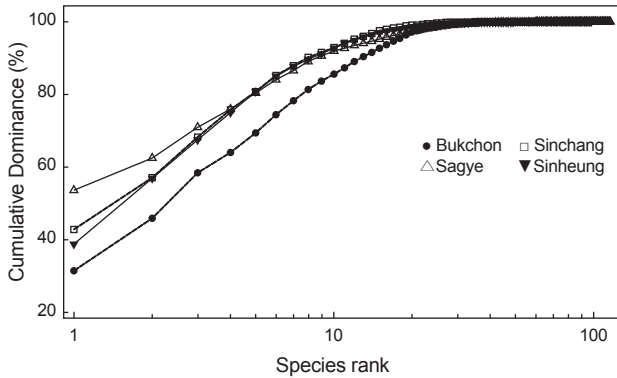


Fig. 5. K-dominance curves (x-axis logged) for mean biomass at four study sites in Jeju Island, Korea, from 2016 to 2018.

로 2017년의 신창에서 최소, 사계에서 최대였으며, 연도별로는 15.43–17.06으로 2016년에 가장 낮았고, 2017년에 가장 높았다. 해역별로는 11.08–16.70으로 출현종수가 가장 적은 신창에서 최소를 보였고, 사계에서 최대였다. J' 는 0.33–0.64로 2016년의 사계에서 최소, 2017년의 북촌에서 최대를 나타냈고, 연도별로는 0.36–0.57로 2016년에 최소, 2017년에 최대였으며, 해역별로는 0.41–0.55의 범위로 사계에서 최소, 북촌에서 최대를 보여 DI와 반대의 결과를 확인하였다. H' 는 1.46–2.68의 범위로 나타나 2016년의 신창과 신흥에서 최소, 2017년의 북촌에서 최대였으며, 연도별로는 1.67–2.66으로 풍도, J' 와 마찬가지로 2016년에 가장 낮았고, 2017년에 가장 높은 값을 보였다. 해역별로는 1.93–2.46의 범위로 나타나 사계에서 최소, 북촌에서 최대인 J' 와 같은 결과를 보였다.

해역별로 출현한 종의 연평균 생물량을 K-dominance 곡선으로 비교하면, 사계에서는 우점종 2종(감태, 넓은게발)의 생물량이 전체 생물량의 60% 이상을 차지하였고, 북촌에서는 감태, 둘레혹산호말, 누운청각 3종, 신창에서는 감태, 둘레혹산호말 2종, 신흥에서는 감태, 미역 2종의 생물량이 전체 생물량의 60% 이하를 차지하여 종다양성은 북촌, 신창, 신흥, 사계 순으로 북촌에서 가장 높게 나타났다(Fig. 5).

고찰

본 연구에서 출현한 해조류는 총 147종(녹조류 13종, 갈조류 26종, 홍조류 108종)이고 해역별로는 69–116종으로 제주 남부에 위치한 사계 해역에서 가장 많은 종이 출현하였으며, 연도별로는 2016년에 106종, 2017년에 110종, 2018년에 112종이 출현하여 연간 다소 증가하는 경향을 보였다. 이러한 연간 출현종수는 제주 북부에 위치한 삼양의 62종(Yoo, 2003), 동부에 위치한 성산포 해역의 19종(Oak et al., 2004), 남부에 위치한 신흥의 68종(Kim et al., 2016), 제주 남부 4개 해역의 87종(Kang et al., 2015), 제주 동·서·남·북 4개 해역의 71종(Kim et al., 2013),

제주 6개 해역의 101종(Cho et al., 2022)에 비해 높게 나타났으나, 제주 8개 해역 조하대의 169종(Lee et al., 1998), 제주 남부와 동부의 8개 해역에서 출현한 121종(Jung et al., 2019)보다는 낮게 확인되었다. 이는 정점 수와 상대적으로 종 다양성이 높게 나타나는 제주 주변 도서 해역이 포함되어 출현종수의 차이가 나타나는 것으로 보인다. 본 연구에서 출현한 해조류의 연평균 생물량은 746.29 g wet wt./m²였으며, 사계 해역에서 979.91 g/m²로 가장 높았고 다른 3개 해역은 652.25–690.94 g/m²로 유사한 값을 보였다. 제주 연안에 서식하는 해조 군집에 대한 선행 연구와 비교해보면, 제주 4개 해역(북촌, 신창, 온평, 토평)에서 991.84 g/m² (Kim et al., 2013), 제주 남부해역(대포, 월령, 위미)에서 1,451.9 g/m² (Kang et al., 2015), 신흥 해역에서 1,024.99 g/m² (Kim et al., 2016), 제주 남·동부 6개 해역(사계, 법환, 하효, 하례, 표선, 하도)에서 914.7 g/m² (Jung et al., 2019)로 확인되어 본 연구보다 높은 생물량을 보였으며, 제주 8개 해역의 총 생물량(735.24 g/m²; Kim et al., 2015)과는 유사하였다. Kim et al. (2018)은 본 연구와 동일한 해역에서 해조 군집 연구를 수행하였으며, 이 기간(2013–2015년)의 해조류 출현종수는 169종, 생물량은 1,043.38 g/m²로 보고되어 본 연구에서 출현종수 및 생물량이 감소한 것으로 확인되었다. 이는 환경오염뿐만 아니라 갯녹음, 기후변화 등 다양한 환경요인의 복합적 작용이 시간이 지남에 따라 누적된 결과로 판단되며, 앞서 언급된 요인들이 앞으로도 지속적으로 연안 환경에 영향을 미칠 것이므로 해조 자원의 관리를 위해 군집 변화 파악 등 지속적인 모니터링 연구가 요구된다.

제주 연안에서 해중림을 형성하는 주요종은 감태와 모자반류이며, 방황혹산호말, 둘레혹산호말과 같은 산호조류도 생물량이 높게 나타난다고 알려져 있다(Oak et al., 2004; Kang et al., 2011, 2015; Kim et al., 2018). 본 연구에서도 감태가 전체 생물량의 42.85%를 차지하여 출현종 중 가장 높은 생물량을 보였고 그다음으로 둘레혹산호말, 미역, 방황혹산호말로 나타나 이전의 연구 결과와 일치하였다. 이러한 주요종들의 생물량 변화를 보면, 2013년 제주 연안에서 검둥감태(*E. cava* subsp. *kurome*)가 포함된 감태류의 생물량 및 비율은 각각 489.51 g/m², 48.52%였고(Kim et al., 2018), 동일 정점에서 2018년에는 각각 230.41 g/m², 31.09%로 생물량은 약 50% 정도, 생물량 비율은 약 17% 정도 감소한 것을 확인하였다. 반면, 유·무절산호조류의 생물량 비율은 2013년에는 22.65% (Kim et al., 2018)이었으나 2018년에는 34.17%로 확인되어 10% 이상 증가하여 제주 연안에서 엽상형 해조류와 산호말류의 피도가 음의 상관관계를 보인다고 한 Cho et al. (2022)의 결과와 유사하였다. 또한, Hwang et al. (2017)은 제주 연안에서 무성했던 감태 군락이 감소하고 그 자리를 유절산호말류가 차지하였다고 보고하였으며, 이는 수온 상승에 의한 식생변화 특히, 동계 수온의 상승이 대형 갈조류 유엽에 상당한 영향을 미쳤을 것이라고 설명하였다.

수온의 상승은 내열종 증가, 엽상해조류 감소 등 해조류 군집 구조의 변화를 초래하고 이들의 지리적 분포에도 영향을 미친다고 알려져 있으며(van den Hoek, 1982; Breeman and Parkker, 1994; Carbollo et al., 2002; Fulton et al., 2014), Tenger and Dayton (1987)은 기후변화에 따른 지속적인 수온의 상승이 해중림 파괴에 중요한 요인으로 작용하였다고 지적하였다. 제주 주변 해역은 대마난류수와 양자강 유출수의 영향으로 다른 해역에 비해 수온이 빠르게 상승하고 있으며, 이로 인해 해조 군집이 변하고 있다(Han et al., 2008; Belkin, 2009; Suh et al., 2011). 한 예로, 과거에 제주 연안에 서식했던 매생이(*Cap-sosiphon fulvescens*), 쇠꼬리산말(*Desmarestia viridis*), 석목(*Campylaeophora hypnaeoides*), 참국수나물(*Nemalion vermiculare*)과 같은 냉수성 해조류가 소멸하였고(Lee and Ko, 1991; Kang et al., 2011), 반면, 아열대성 해조류는 약 60년 전에 10%였던 출현율이 2010년대 연구에서는 30-38%로 증가하였다(Kang, 1966; Kang et al., 2011; Kim et al., 2013). Hwang et al. (2017)은 제주 연안의 2개 해역 중 수온의 상승폭이 높게 나타난 법환 해역(0.038°C)에서 갯녹음 현상이 심하게 나타나 수온의 상승이 갯녹음 확산에 상당한 영향을 미친다 하였다. 이처럼 수온의 상승은 해조상 및 해조 군집의 변화를 초래하며, 본 연구에서도 감태와 같은 대형갈조류의 감소, 산호조류의 증가 등 주요종들의 변화가 확인되었다. 주름뼈대그물말(*Dictyopteris undulata*), 여린두가닥바닷말(*Dichotomaria falcata*), 갈래곰보(*Meristotheca papulosa*), 두줄거미줄(*Herposiphonia subdisticha*)등과 같은 아열대성 해조류는 상대적으로 수온이 높은 사계, 신흥 해역에서 출현율이 높게 나타났다. 아열대성 해조류의 생물량 변화를 보면, 대마디불이(*Acrocladus herpesticus*)의 경우 0.46 g/m² (Kim et al., 2018)에서 2.73 g/m²로, 엔도모조자반은 30.48 g/m² (Kim et al., 2018)에서 47.93 g/m²로 본 연구에서 생물량이 다소 증가하였으며, 이 두 종 모두 제주 북·서부 해역보다 남·동부 해역에서 생물량이 높게 확인되었다. 또한, 2013-2015년에 제주 사계 해역에서만 관찰되던 민가락말(*Tricleocarpa cylindrica*; Kim et al., 2018)이 2017년 이후 신흥 해역에서도 출현하여 제주 남·동부 해역에서 해조상의 아열대화가 더 빠르게 진행되고 있다고 할 수 있다. 이외에도 2016년에 비해 수온이 낮게 나타난 2017-2018년에 *Dictyota* spp., *Spatoglossum* spp.와 같은 갈조류의 출현율이 증가하였는데 이것이 일시적인 현상인지, 수온의 변화와 관계된 것인지는 좀 더 세밀한 연구가 필요할 것으로 보인다. 앞으로도 제주 연안 환경 및 해조상의 장기적인 모니터링을 통해 해조 군집의 변화 및 상호관계를 파악하고, 감소하는 자원을 보존 및 관리하는 방안을 수립하기 위한 연구가 요구된다.

결론적으로 본 연구가 수행된 제주 4개 해역에서 서식하는 해조류는 총 147종이고, 연평균 생물량은 746.29 g wet wt./m²였으며, 출현종수와 생물량 모두 사계 해역에서 높게 나타났다. 생물량을 기준으로한 우점종은 감태로 확인되었으며, 그 다음

으로는 돌레혹산호말, 미역, 방황혹산호말 순이었다. 본 연구는 Kim et al. (2018)이 수행한 제주 연안 해조상 모니터링 연구의 연속선상에 있으며, 2013-2015년과 비교하여 생물량의 변화가 현저하게 나타나는 것은 아니지만 감태 군락의 감소, 유·무질산호조류의 증가 등 제주 연안 주요종들의 변화가 확인되었다. 이처럼 동일한 정점에서의 지속적인 연구를 통해 해조상 및 해조 군집의 변화를 모니터링하는 것은 중요하며, 향후 기후변화와 수온 상승에 의한 해조류 생물상 변화 연구의 중요한 기초 자료로 활용되길 기대한다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 아열대수산연구소 「제주 주변 연근해 어업 및 환경생태조사, R2023012」 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Belkin IM. 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Prog Oceanogr* 81, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2009.04.011>.
- Boo SM. 1988. Distribution of marine algae from shore area of Chejudo. *J Cheju Studies* 5, 97-114.
- Bray JR and Curtis JT. 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol Monogr* 27, 325-349. <https://doi.org/10.2307/1942268>.
- Breeman AM and Parkker H. 1994. Temperature ecotypes in seaweeds: Adaptive significance and biogeographic implications. *Bot Mar* 37, 171-180. <https://doi.org/10.1515/botm.1994.37.3.171>.
- Carballo JL, Olabarria C and Osuna TG. 2002. Analysis of four macroalgal assemblages along the Pacific Mexican coast during and after the 1997-98 El Niño. *Ecosystems* 5, 749-760. <http://doi.org/10.1007/s10021-002-0144-2>.
- Chakraborty S, Bhattacharya T, Singh G and Maity JP. 2014. Benthic macroalgae as biological indicators of heavy metal pollution in the marine environments: A biomonitoring approach for pollution assessment. *Ecotoxicol Environ Saf* 100, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.12.003>.
- Cho SH, Noh YS, Won SH, Kim SK and Jung SM. 2022. Ecological evaluation using seaweed distribution characteristics along the coast of Jeju Island. *Korean J Environ Ecol* 36, 627-638. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2022.36.6.627>.
- Choi HG, Kim YS, Kim CS, Park JW and Nam KW. 2016. A Photographic Guide to Marine Botany in Hallyeohaesang National Park. Hallyeohaesang National Park Office, Sacheon, Korea, 1-288.
- Clarke KR and Gorley RN. 2006. PRIMER V6: User Manual/tutorial. PRIMER-E Ltd., Plymouth, U.K., 1-190.
- Fowler J and Cohen L. 1990. *Practical Statistics for Field Biology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, U.S.A., 1-227.

- Fujita D. 2010. Current status and problems of iosyake in Japan. *Bull Fish Res Agen* 32, 33-42.
- Fulton CJ, Depczynski M, Holmes TH, Noble MM, Radford B, Wernberg T and Wilson SK. 2014. Sea temperature shapes seasonal fluctuations in seaweed biomass within the Ningaloo coral reef ecosystem. *Limnol Oceanogr* 59, 156-166. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.01.0156>.
- Guiry MD and Guiry GM. 2023. AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, Ireland. Retrieved from <http://www.algaebase.org> on Jul 24, 2023.
- Han IS, Suh YS, Seong KT and Go WJ. 2008. Long-term change in temperature in relation to climate-induced conditions in the Korean Waters. *Proc 4th PEACE Ocean Science Workshop*, 24-25.
- Hwang SI, Kim DK, Sung BJ, Jun SK, Bae JI and Jeon BH. 2017. Effects of climate change on whitening event proliferation the coast of Jeju. *Korean J Environ Ecol* 31, 529-536. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2017.31.6.529>.
- Janiak DS and Whitlatch RB. 2012. Epifaunal and algal assemblages associated with the native *Chondrus crispus* (Stackhouse) and the non-native *Grateloupia turuturu* (Yamada) in eastern Long Islands Sound. *J Exp Mar Biol Ecol* 413, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.11.016>.
- Jung SW, Jeon BH and Choi CG. 2019. Characteristics of summer marine algal community and barren ground in the southern coast of Jeju, Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 25, 212-219. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.2.212>.
- Kang GS, Ko YD and Kim YS. 2015. Flora and community structure of subtidal zone in South Jeju, Korea. *J Fish Mar Sci Edu* 27, 273-283. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.1.273>.
- Kang JC, Choi HG and Kim MS. 2011. Macroalgal species composition and seasonal variation in biomass on Udo, Jeju Island, Korea. *Algae* 26, 333-342. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2011.26.4.333>.
- Kang JW. 1960. The summer algal flora of Cheju Island (Quelpart Island). *Bull Pusan Fish Coll* 3, 17-23.
- Kang JW. 1966. On the geographical distribution of marine algae in Korea. *Bull Busan Fish Coll* 7, 1-125.
- Kim BY, Ko JC and Choi HG. 2016. Rock type difference and benthic community structures in the coast of Jeju, Korea. *Korean J Environ Ecol* 30, 996-1008. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2016.30.6.996>.
- Kim BY, Ko JC and Choi HG. 2018. Monitoring of macroalgal flora and community structure in the subtidal zone around Jeju Coasts and Gapado Island, Korea (2013-2015). *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 262-277. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0262>.
- Kim BY, Ko JC, Kim JB and Choi HG. 2015. Spring macroalgal flora and community structure in subtidal zone around coasts of Jeju Island, Korea. *Korean J Nat Conserv* 9, 92-104. <http://dx.doi.org/10.11624/KJNC.2015.9.2.092>.
- Kim BY, Ko JC, Ko HJ, Park SE, Cha HK and Choi HG. 2013. Seasonal variation in community structure of subtidal seaweeds in Jeju Island, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 607-618. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0607>.
- Kim DK. 2006. A study on the restoration of marine forests using artificial reef in the barren grounds along the coast of Jeju. Ph. D. Thesis, Jeju National University, Jeju, Korea.
- Kim YH. 1991. Marine algal resources in Cheju Island. *J Cheju Studies* 8, 137-156.
- Kim YK, Chang SI and Chang CH. 1977. Fishing Ground Survey of the Wangdol Reef. Technical report 38, National Fisheries Research and Development Institute, Busan, Korea, 50-51.
- Lambshad PJD, Platt HM and Shaw KM. 1983. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity. *J Nat Hist* 17, 859-874. <https://doi.org/10.1080/00222938300770671>.
- Lee KW. 1976. Survey of the algal flora of Jeju Island. *Bull Mar Biol Stat Cheju Univ* 1, 21-42.
- Lee KW and Ko SJ. 1991. Algal flora of four islets without inhabitants along the coast of Cheju Island. *Cheju Inhabited of the Research Report*, 239-269.
- Lee KW, Shon CH and Chung SC. 1998. Marine algal flora and grazing effect of sea urchins in the coastal waters of Cheju Island. *J Aquac* 11, 401-419.
- Lee YJ, Song YM and Yoon JH. 2011. An exploratory research on the Jeju tourism adaptation strategies according to the climatic change: Focused on serious leisure, specialization theory and locus of control. *Int J Tour Hosp Res* 25, 313-328.
- Lee YP. 2008. *Marine Algae of Jeju*. Academy Books Inc., Seoul, Korea, 1-477.
- Lee YP and Lee IK. 1976. On the algal community in the intertidal belt of Jeju Island. 1. Algal community of spring season. *Korean J Bot* 4, 111-118.
- Lee YP and Lee IK. 1982. Vegetation analysis of marine algae in Jeju Island. *Proc Coll Nat Sci SNU* 7, 73-91.
- Liang Z, Wang F, Sun X, Wang W and Liu F. 2014. Reproductive biology of *Sargassum thunbergii* (Fucales, Phaeophyceae). *American J Plant Sci* 5, 2574-2581. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.517271>.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *Gen Syst* 3, 36-71.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* 216, 168-169. <https://doi.org/10.1038/216168b0>.
- Oak JH, Keum YS, Hwang MS and Oh YS. 2004. Subtidal algal community of Supseom and Seongsanpo in Jeju Island. *Underwater Sci Tech* 5, 3-9.
- Serisawa Y, Imoto Z, Ishikawa T and Ohno M. 2004. Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperature in Tosa Bay, southern Japan. *Fish Sci* 70, 189-191.

9268.2004.00788.x.

- Shannon CE and Weaver W. 1949. *The Mathematical Theory of Information*. University of Illinois Press, IL, U.S.A.
- Suh YS, Hwang JD, Pang IC, Han IS, Jo JD and Lee NK. 2011. Long-term variations of sea surface temperature in inshore and offshore waters of Jeju Island. *Korean J Nat Con* 5, 135-140.
- Tenger MJ and Dayton PK. 1987. El Niño effects on southern California kelp forest communities. *Adv Ecol Res* 17, 243-279. [http://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60247-0](http://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60247-0).
- Vale CG, Arenas F, Barreiro R and Piñeiro-Corbeira C. 2021. Understanding the local drivers of beta-diversity patterns under climate change: The case of seaweed communities in Galicia, North West of the Iberian Peninsula. *Divers Distrib* 27, 1696-1705. <http://doi.org/10.1111/ddi.13361>.
- Van den Hoek C. 1982. Phytogeographic distribution groups of benthic marine algae in the North Atlantic Ocean. A review of experimental evidence from life history studies. *Helgol Meeres* 35, 153-214. <http://doi.org/10.1007/BF01997551>.
- Wells E, Wilkionson M, Wood P and Scanlan C. 2007. The use of macroalgal species richness and composition on intertidal rocky seashores in the assessment of ecological quality under the European water framework directive. *Mar Pollut Bull* 55, 151-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.031>.
- Whitaker SG, Smith JR and Murray SN. 2010. Reestablishment of the southern California rocky intertidal brown alga, *Silvetia compressa*: An experimental investigation of techniques and abiotic and biotic factors that affect restoration success. *Restor Ecol* 18, 18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00717.x>.
- Yoo JS. 2003. Community dynamics of benthic marine algae in the intertidal and subtidal rocky shore of Samyang, Jeju Island. *Algae* 18, 301-309. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2003.18.4.301>.
- Yoon CT. 1985. *Flora of marine algae in Cheju Island*. M.S. Thesis, Jeju National University, Jeju, Korea, 1-31.