

## 동해안 중부 대진연안의 해조 군집 계절 변화

한표일 · 노현수<sup>1</sup> · 박주면<sup>1</sup> · 박종원 · 김범식 · 이충일\*

강릉원주대학교 해양생태환경학과, <sup>1</sup>한국해양과학기술원 동해연구소

## Seasonal Changes in the Marine Algal Community of the Daejin Coast, Mid-eastern Coast of Korea

Pyo Il Han, Hyun Soo Rho<sup>1</sup>, Joo Myun Park<sup>1</sup>, Jong Won Park, Beom-Sik Kim and Chung Il Lee\*

Department of Marine Ecology and Environment, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Republic of Korea  
<sup>1</sup>East Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Uljin 36315, Republic of Korea

The mid-eastern coast of Korea is located at the boundary between cold and warm currents, which causes changes in the distribution and composition of marine organisms in response to fluctuations in the marine environment. To understand the seasonal changes in the seaweed community, we investigated its species composition, biomass, coverage, and frequency from November 2022 to August 2023. A total of 45 species (7 green, 18 brown, and 20 red algae) were found in the study area. In the intertidal zone, the number of species decreased from autumn to summer; the biomass peaked during winter (471.94 g wet weight m<sup>-2</sup>). Seaweed groups were the dominant functional groups, which were coarsely branched, filamentous, and sheet-like during autumn, winter, spring, and summer. The morpho-functional group was dominated by turf species. In the subtidal zone, the number of species increased during autumn to spring, whereas the biomass peaked during spring (655.27 g wet weight m<sup>-2</sup>). The functional group was dominated by coarsely branched species throughout all four seasons, whereas the morpho-functional group was dominated by canopy species. Consequently, changes in the biomass of brown and red algae are recognized as key drivers of seasonal changes in seaweed communities.

Keywords: Seaweed community, Functional group, Morpho-functional group, Canopy, Turf

### 서론

연안역은 외양에 비해 생물들이 경험할 수 있는 환경변화가 크기 때문에, 생물 종 다양성과 풍부도가 높다(McQuaid, 1985; Kiirikki, 1996; Reichert et al., 2008). 또한 연안생태계에서 해조 군집은 다양한 해양생물에게 은신처와 먹이를 제공할 수 있다(Gattuso et al., 1998; Harley et al., 2012). 따라서, 해조 군집의 변화는 해양생물의 종조성 및 생물량에 영향을 줄 수 있기 때문에, 환경에 따른 해조 군집의 변화를 파악하는 것은 연안생태계를 이해하고 예측하는데 중요하다. 해조류는 고착성(sessile) 특징을 가지기 때문에, 이동성이 있는 생물에 비해 더 큰 환경변화를 경험하게 된다(Lobban and Harrison, 1997; Oh et al., 2013). 수온은 해조류의 성장과 성숙에 영향을 주는 주요 환

경 인자로 작용할 수 있다(Lüning, 1980; Dring, 1982; Gerard and Du Bois, 1988; Tom, 1992). 예를 들면, 수온이 높아지는 여름철에는 미역(*Undaria pinnatifida*), 다시마(*Saccharina japonica*)와 같은 갈조류가 최대 성장과 성숙을 나타내고, 수온이 낮아지는 겨울철에는 어린 엽체들이 생장하는 계절성이 있다(Serisawa et al., 2004; Thornber et al., 2004; Ateweberhan et al., 2006; Fernández et al., 2011; Wernberg et al., 2011; Díez et al., 2012; Moy and Christie, 2012; Tuya et al., 2012). 이처럼 해조류는 환경변화에 따라 우점종과 생물량 변화가 뚜렷하기 때문에 생물학적 지표(biological indicator)로 활용될 수 있다(Orfanidis et al., 2001; Arévalo et al., 2007; Orfanidis et al., 2011; Song et al., 2011). 해조류는 엽체 형태, 세포 조직 구조 등에 차이를 가지며(Steneck and Dethier, 1994), 형태학적

\*Corresponding author: Tel: +82. 33. 640. 2340 Fax: +82. 33. 640. 2470

E-mail address: leeci@gnu.ac.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.2024.0262>

Korean J Fish Aquat Sci 57(3), 262-277, June 2024

Received 12 March 2024; Revised 18 April 2024; Accepted 3 June 2024

저자 직위: 한표일(대학원생), 노현수(책임연구원), 박주면(책임연구원), 박종원(대학원생), 김범식(대학원생), 이충일(교수)

특징에 따라 성긴분기형(coarsely branched, CB), 사상형(filamentous, F), 엽상형(sheet, S), 다육질형(thick leathery, TL), 유절산호말형(jointed calcareous, JC), 각상형(crustose, Cr)과 같은 기능형군(functional form)으로 구분된다(Littler and Littler, 1984). 기능형군은 환경에 따라 구성비율이 변하며, CB, F, S는 오염도나 교란(disturbance)이 높은 환경에서 우점하는 반면에, 교란이 낮은 환경에서는 TL, JC, Cr이 우점한다(Orfanidis et al., 2001). 예를 들면, 오염도가 높은 환경에서는 CB의 청각(*Codium* spp.)이나 S의 파래(*Ulva* spp.)가 빈번하게 출현하고(Brown et al., 1990; Díez et al., 1999), 오염도가 낮은 환경에서는 다육질형 종이나 산호말류(*Corallina* spp.)가 높은 피도를 가진다(Piazzi and Cinelli, 2001). 이처럼 기능형군은 서식지의 환경변화에 따라 우점하는 비율이 변할 수 있다.

해조류는 생장 크기 차이로 인해 형성된 계층구조에 따라서 canopy, sub-canopy, turf, encrusting coralline으로 구분된다(Arenas et al., 2006). Canopy나 subcanopy 중은 대부분 상대적으로 낮은 수온에서 성장하며(Thorner et al., 2004), 온난화에 의한 수온 상승은 이들 종의 서식 범위를 감소시킬 수 있다(Raven and Geider, 1988; Lobban and Harrison, 1997). 온난한 해역에서 canopy 종인 모자반류(*Sargassum* spp.)의 서식 분포 범위가 수온이 비교적 낮은 해역으로 이동하고 있다(Tuya et al., 2012; De Bettignies et al., 2018). Turf나 encrusting coralline 중은 canopy 종에 비해 높은 수온에서 성장할 수 있으며(Steneck et al., 2002; Mieszkowska et al., 2006; Vergés et al., 2016; Jung et al., 2022), 온난한 해역에서 소멸한 canopy 또는 subcanopy 종들의 자리를 대체하고 있다(Serisawa et al., 2004; Ateweberhan et al., 2006; Fernández et al., 2011; Rubal et al., 2011; Wernberg et al., 2011; Díez et al., 2012; Moy and Christie, 2012).

연안역(coastal water)은 조석의 영향으로 조간대와 조하대로 구분되며, 조간대는 대기에 노출되기 때문에 조하대에 비해 상대적으로 큰 환경변화가 발생한다. 따라서, 해조류는 조하대에 비해 조간대에서 더 강한 환경 스트레스를 받게 된다(Dring, 1982; Rubal et al., 2011; Chappuis et al., 2014). 조간대에서는 환경 스트레스에 대한 내성을 가지거나 빠른 회복 능력을 가진 종들이 주로 군집을 이룬다(Orfanidis et al., 2001). 예를 들면, 파래류(*Ulva* spp.)는 빠른 성장속도를 지니기 때문에 조간대에서 연중 출현하며 넓은 면적을 차지한다(Burrows, 1991; Cabioch et al., 1997; Harlin and Villar-Bohnsack, 2001; Rubal et al., 2011). 조하대에서 해조류는 빛, 해류, 기질(substratum) 및 계절변동의 영향을 받으며(Neushul, 1967), 수심이 깊어질수록 안정적인 해조 군집을 이루는 특징을 가진다(Lamb and Zimmermann, 1964; Sears and Wilce, 1975). 온대 해역에서 canopy나 각상형(crustose) 종이 수심이 깊은 조하대에서 우점한다(Boudouresque, 1973; Littler and Murray, 1978; Piazzi et al., 1999, 2002).

우리나라 동해 중부 연안은 동한난류와 북한한류가 교차하며(Lee and Whang, 1981; Cho and Kim, 2000; Kim and Min, 2008; Kim et al., 2022; Park et al., 2024), 서해나 남해에 비해 조차가 작기 때문에 협소한 조간대를 가지고 있다(Lee and Oh, 1986; Choi and Rho, 2010). 조간대 상부에서 우점종은 해역마다 달리 출현하였는데, 서해에서 홍조류에 속하는 불등플가사리(*Gloiopeltis furcata*), 남해에서 녹조류인 구멍갈파래(*Ulva australis*), 동해에서는 홍조류인 김류(*Porphyra* spp.)가 우점하였다(Oh et al., 2005; Baek et al., 2007; Choi et al., 2008; Kim et al., 2013b; Na et al., 2015). 반면에, 조간대 하부에서 갈조류 지층이(*Sargassum thunbergii*)가 전 연안에서 우점하는 것을 쉽게 접할 수 있다(Boo, 1987; Lee et al., 1993; Kim et al., 1997; Sohn et al., 2007). 조하대에서 해조 군집은 서해와 남해에서 미역(*Undaria pinnatifida*), 팽생이모자반(*Sargassum horneri*) 등의 대형 갈조류 위주로 형성되었고(Baek et al., 2007; Kim et al., 2013a), 동해 조하대에서는 대형 갈조류 모자반류(*Sargassum* spp.)와 하층식생(understory)을 이루는 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*) 및 무절산호말류(Melobesiodae algae) 등이 넓게 분포하여 유사한 군집구조를 보였다(Koh, 1983; Koh and Sung, 1983; Koh et al., 1989; Chung et al., 1991; Shin et al., 2008a, 2008b; Choi et al., 2009; Bae et al., 2014).

해조류 우점종과 군집 구조는 비교적 환경 변화가 큰 조간대에서 더 다양한 변화를 가지며, 조하대에서는 유사한 군집 구조를 가질 수 있는 것으로 나타난다. 하지만 종에 따른 분류만으로는 해조류의 어떤 특성에 의해 군집구조에 차이가 생기는지 파악하기 어렵다. 기능형군과 morpho-functional group은 환경 변화에 따라 구성 비율에 차이를 가지기 때문에, 해조 군집 구조를 파악하는데 중요하다. 따라서, 본 조사는 동해 중부 연안에서 계절에 따른 해조 군집의 변화를 기능형군으로 분석하여 파악하였다.

## 재료 및 방법

동해 중부 연안(강원특별자치도 고성군 대진 연안)의 계절에 따른 해조류 군집 변화를 분석하기 위해서 해조 채집 조사를 조간대와 조하대로 구분하여 2022년 11월부터 2023년 8월까지 계절에 맞춰 총 4회 수행했다. 조간대는 썰물시기를 기준으로 해수면 위로 대기 중에 드러난 부분을 조사하였고, 조하대는 해수면 아래 수심이 1 m 되는 깊이에서 조사하였다. 해조 조사는 군집을 이루는 종의 피도와 빈도를 계산하여 우점도 변동을 나타내기 위해 25개의 격자(0.1×0.1 m)로 구획된 방형구(0.5×0.5 m)를 조간대와 조하대에서 각각 3회씩 무작위로 놓고 디지털카메라(TG-6; OLYMPUS, Tokyo, Japan)를 사용해 수중사진으로 기록했다(Fig. 1).

출현 종 동정 및 생물량(biomass) 변동 측정을 하기 위해 각 방형구에서 나타나는 해조류를 끝갈(헤라)을 이용해 채집하여

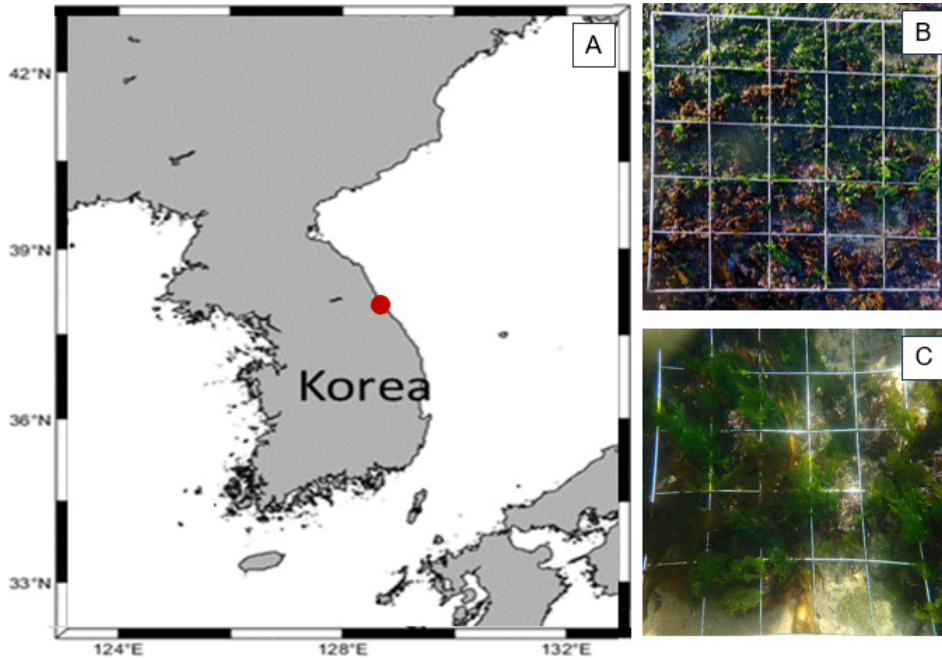


Fig. 1. Materials and methods for the survey of seaweed community. A, Study site (red dot); B, Intertidal zone in the study site; C, Subtidal zone in the study site.

아이스박스에 담아 실험실로 운반하였고, 채집 당일 측정이 어려운 경우에는 냉동 보관하였다. 채집한 해조류는 동일한 관찰자에 의해 외형과 세포 조직 특징을 육안과 현미경으로 관찰하여 동정했고, 국명과 학명은 Lee and Kang (2002)를 참고하였다. 무질산호말류와 같이 형태학적인 동정이 어려운 종은 속(genus)으로 나타냈으며, 이후 분류군 및 기능형군으로 구분하여 군집 변화를 분석하였다.

생물량 측정은 채집 당일에 GF/F로 여과한 해수를 이용해 모래와 부착동물과 같은 이물질을 세척하고 와이퍼타올로 겉표면의 해수를 제거하여 전자저울을 이용해 습중량을 0.01 g까지 측정하였다. 냉동했던 시료들은 해동하여 이후 앞에서 기술한 방법과 동일하게 측정하였다. 습중량은 단위면적당 중량으로 환산하여 생물량을 구하였으며, 각 시기별로 최대 생물량을 가진 종은 우점종으로 표시하였다.

우점도는 방형구(0.25 m<sup>2</sup>)를 이용해 피도와 빈도를 측정하여 중요도값으로 표현하였다. 종 *i*의 피도는 “image j” (version 1.54h software; NIH, Bethesda, MD, USA)를 이용해 방형구의 총 면적에서 *i*종이 차지하고 있는 면적의 비로 계산하였고, 빈도는 방형구를 이루는 격자 수 중에서 *i*종이 출현한 격자 수의 비로 계산하였다(1).

$$C_i = \frac{S_i}{S_j} \times 100, F_i = \frac{N_i}{N_j} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

*C<sub>i</sub>*, 종 *i*의 피도; *S<sub>i</sub>*, 방형구에서 *i*종이 차지하고 있는 면적; *S<sub>j</sub>*, 방형구의 총 면적; *F<sub>i</sub>*, *i*종의 빈도; *N<sub>i</sub>*, 방형구에서 *i*종이 출현한 격자 수; *N<sub>j</sub>*, 방형구를 이루는 총 격자 수

(1)에 따라 계산한 피도와 빈도는 각각 종에 대한 상대피도와 상대빈도로 나타냈으며, Saito and Atohe (1970)의 방법을 따랐다(2).

$$RC_i(\%) = \frac{C_i}{\sum_z C} \times 100, RF_i(\%) = \frac{F_i}{\sum_z F} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

*RC<sub>i</sub>*, *i*종의 상대피도;  $\sum_z C$ , 방형구에서 출현한 모든 종의 피도 합계; *RF<sub>i</sub>*, *i*종의 상대빈도;  $\sum_z F$ , 방형구에서 출현한 모든 종의 빈도 합계

상대피도와 상대빈도를 평균하여 중요도 값을 구하였으며 (Mueller-Dombois and Ellenberg, 1974; Barbour et al., 1987), 중요도 값에 따른 우점종을 파악하는데 식 (3)을 사용하였다.

$$RC_i(\%) = \frac{C_i}{\sum_z C} \times 100, RF_i(\%) = \frac{F_i}{\sum_z F} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

IV. *i*종의 중요도값

군집 구조 분석은 방형구에서 나타난 종들을 기능형군과 계층

군으로 구분하였는데, 기능형군(functional group)은 종이 가지는 성장속도, 번식주기 등과 같은 서로 다른 생존전략과 조직 구조의 특징 및 외형적인 차이에 따라 총 6개로 나눌 수 있다(Littler and Littler, 1984). 조직 분화가 이루어져 줄기부가 뚜렷하고 세포층이 두터운 종들은 TL, 조직 세포 층이 매우 얇고 넓은 엽상체를 이루는 종들은 S, 조직이 피층부와 수층부로 나뉘며 가지의 분지가 다양하게 나타나는 종들은 CB, 직립 성장하는 산호말류는 JC, 마디를 지닌 세포 또는 조직열을 이루어 성장하는 종들은 F, 무절산호말류를 포함하여 암반에 피복하는 종들은 Cr으로 Littler and Littler (1984)의 방법에 따랐다(Table 1).

Morpho-functional group은 종이 가지는 외형적인 크기와 성장 형태에 따라 형성되는 군집 내의 역할을 기준으로 총 4개로 나누었으며, canopy forming species는 1차적으로 그늘을 형성하는 종이고(C), canopy보다 작지만 1 m 내외로 직립 성장하여 2차적인 그늘을 형성하는 종들은 subcanopy forming species, 유절산호말류를 포함하여 직립 성장한 크기가 매우 작거나 엽체가 포복 성장하여 subcanopy의 아래에서 하층식생을 이루는 종들은 turf forming species, 포복하여 성장하는 종 중에서 석회질을 가지는 무절산호말류는 encrusting coralline species로 Arenas (2006)의 분류법을 참고하였다(Table 2). 표층 수 온 변화는 현장 조사 지점에서 CT (Duo-3; RBR Ltd., Kanata,

Canada)를 이용해 측정하였고, 국립수산과학원, 어장환경 모니터링을 통해 고성 봉포의 부이 자료(38.2267°N, 128.6260°E)를 활용하여 월별 수온 변동을 확인하였다(Fig. 2). 계절에 따라 나타난 해조류의 생물량과 종수가 조간대와 조하대로 구분됨에 따라 달라짐을 판단하기 위해 대응표본 T 검정(paired samples t-test)를 진행하였고, Shapiro-Wilk으로 정규성을 확인하였다.

**결 과**

**계절별 출현 종수와 생물량 변화**

해조류의 출현 종수는 고성 대진에서 총 45종(녹조류 7종, 갈조류 18종, 홍조류 20종)이 관찰되었다. 계절에 따른 출현 종수는 봄에 31종으로 가장 많았으며, 여름에 18종으로 가장 적었고, 가을과 겨울에는 각각 25종, 26종으로 나타났다. 녹조류와 갈조류 종수는 봄에 각각 6종과 14종으로 가장 많았고, 홍조류는 가을에 13종으로 가장 많이 나타났다. 가장 적은 출현 종수를 보인 시기로 녹조류와 홍조류는 겨울과 여름에 각각 4종과 10종으로 나타났고, 갈조류는 여름에 4종으로 가장 적게 나타났다. 그리고 사계절 동안 모두 출현한 종으로 녹조류는 대마디말류(*Cladophora* sp.), 파래류(*Ulva* sp.), 염주말(*Chaetomorpha moniligera*)와 갈조류는 그물바탕말류(*Dictyota* sp.), 바위딱지

Table 1. Characteristics and examined species of functional group of macroalgae

Functional group <sup>1</sup>	Anatomy <sup>1,2</sup>	Morphology <sup>1,2</sup>	Living and growth <sup>2</sup>	Examined species <sup>2</sup>
Thick leathery	Thick cortex and medulla	Thick blades branches	Long living and slowly growth	<i>Sargassum</i> spp. <i>Undaria</i> spp.
Jointed calcareous	Calcified cortex	Articulated, calcified, upright	Long living and slowly growth	<i>Corallina</i> spp. <i>Halimeda</i> spp.
Coarsely branched	Thin cortex and thick medulla	Branched, upright	Short living and faster growth	<i>Chondrus</i> spp. <i>Gigartina</i> spp.
Sheet	Single layer or, thin cortex and medulla	Thin tubular, foliose	Short living and faster growth	<i>Ulva</i> spp. <i>Porphyra</i> spp.
Filamentous	Uniseriate or, multiseriate	Delicately branched	Short living and faster growth	<i>Cladophora</i> spp. <i>Bangia</i> spp.
Crustose	Calcified or, uncalcified cortex	Epilithic, prostrate, encrusting	Long living and slowly growth	<i>Ralfsia</i> spp. <i>Lithothamnion</i> spp.

<sup>1</sup>Littler and Littler (1984). <sup>2</sup>Steneck and Dethier (1994).

Table 2. Characteristics and examined species of morpho-functional group of macroalgae

Morpho-functional group <sup>1</sup>	Vegetation <sup>1</sup>	Growing progress	Erect length or size <sup>1,2,3</sup>	Examined species
Canopy	1st canopy (floating canopy)	Erect frond has floating canopy	>1 m	<i>Sargassum</i> spp.
Sub-canopy	2nd canopy	Erect frond has canopy	5 cm–1 m	<i>Undaria</i> spp. <i>Saccharina</i> spp.
Turf	Understory	Short erect frond or prostrate	Erect length <5 cm	<i>Ulva</i> spp. <i>Cladophora</i> spp.
Encrusting coralline	Understory	Cover on substratum	Non erect form, crustose	Melobesiodean algae

<sup>1</sup>Arenas et al. (2006). <sup>2</sup>Miller et al. (2009). <sup>3</sup>Connell et al. (2014).

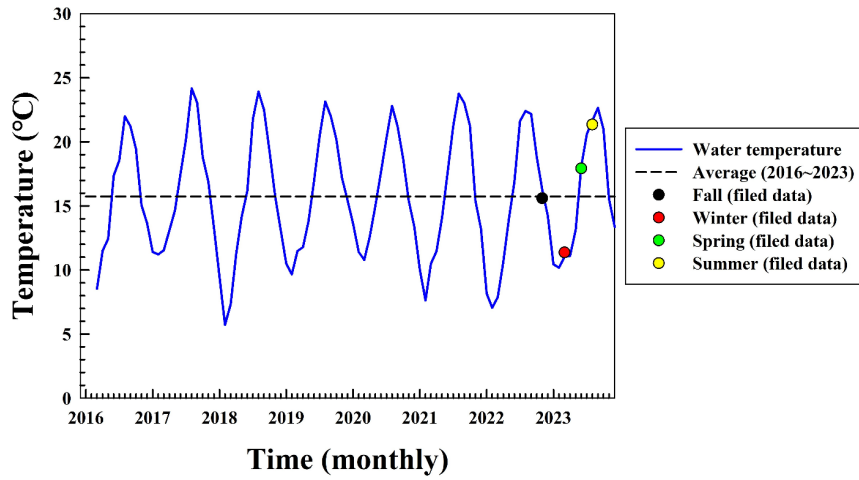


Fig. 2. Sea surface temperature in the Goseong, eastern coast of Korea from 2016 to 2023.

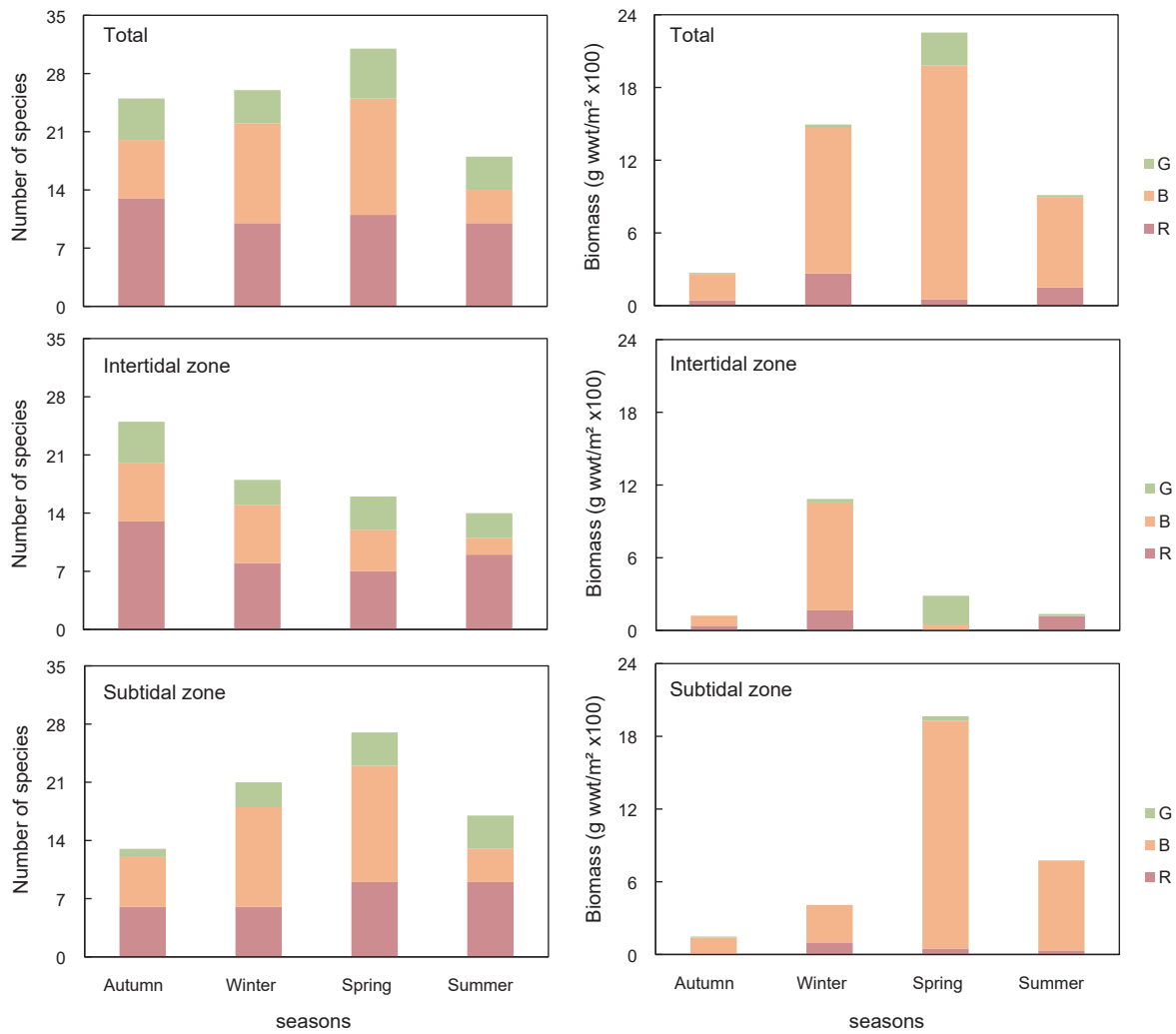


Fig. 3. Seasonal variation of the number of species and biomass macroalgae in study area. G, Green algae; B, Brown algae; R, Red algae.

Table 3. Seasonal variations of biomass within seaweed community

Species	Intertidal				Subtidal			
	Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su
Chlorophyta								
<i>Chaetomorpha moniligera</i>	0.09	+	+	+		+		+
<i>Cladophora</i> sp.	+	+	+					+
<i>Codium fragile</i>							+	
<i>Lychaete sakaii</i>						+		
<i>Ulva</i> spp.	+	27.84	+	+	8.40	+	+	+
<i>Ulva australis</i>	0.04						1.44	
<i>Ulva intestinalis</i>	0.10		235.04	15.64			34.80	0.36
Ochrophyta								
<i>Coccolophora langsdorfii</i>	9.17		11.04		+		23.08	
<i>Colpomenia sinuosa</i>	+	38.53	18.36			7.70	0.56	
<i>Dactylosiphon bullosus</i>		54.24				8.70		
<i>Desmarestia viridis</i>						+	23.00	
<i>Dictyopteris divaricata</i>							+	
<i>Dictyota dichotoma</i>	+		1.64	1.68	+	+	+	+
<i>Mutimo cylindricus</i>							+	
<i>Petalonia binghamiae</i>		14.60				+		
<i>Ralfsia verrucosa</i>	+					+	+	+
<i>Saccharina japonica</i>						+	395.04	+
<i>Sargassum fulvellum</i>			19.92				410.60	+
<i>Sargassum confusum</i>					+		18.88	433.20
<i>Sargassum fusiforme</i>	+							
<i>Sargassum horneri</i>					+	+	+	
<i>Sargassum nigrifolium</i>	31.54	623.72			98.97	102.54	40.92	
<i>Sargassum thunbergii</i>	42.62	77.79	+	1.16	37.12	180.36	+	309.24
<i>Scytosiphon lomentaria</i>		20.86				5.29		
<i>Undaria pinnatifida</i>		60.24				5.63	967.96	
Rhodophyta								
<i>Acrosorium</i> sp.							0.08	0.20
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	2.88		0.48	+	3.14		42.24	+
Articulated coralline algae	18.05	0.64	+	2.32	+	+	3.92	+
<i>Botryocladia wrightii</i>			+			+		
<i>Champia recta</i>			+	0.24			1.56	+
<i>Chondracanthus tenellus</i>	+	1.40	+	0.28	+			
<i>Chondria crassicaulis</i>	+		+	1.44	+		+	+
<i>Chondrus ocellatus</i>	6.53				+			
Melobesiodean algae	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gelidium elegans</i>	+							
<i>Gloiopeltis tenax</i>	+	+						
<i>Grateloupia divaricata</i>					+			

+, Values <0.01 g wet wt. m<sup>2</sup>; Au, Autumn; Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer.

Table 3. Continued

Species		Intertidal				Subtidal			
		Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su
<i>Grateloupia angusta</i>		0.51			21.68				19.12
<i>Grateloupia asiatica</i>					3.72				+
<i>Grateloupia elliptica</i>		+	124.72				99.32		
<i>Lomentaria catenate</i>		10.92	+		87.92	+	+	+	13.96
<i>Polysiphonia</i> sp.				+					
<i>Polysiphonia morrowii</i>		+				+	+	1.48	
<i>Porphyra</i> sp.		+	39.64				0.13		
<i>Symphyclocladia latiuscula</i>		+	0.32					0.24	
Number of species	Chlorophyta	5	3	4	3	1	3	4	4
	Ochrophyta	7	7	5	2	6	12	14	4
	Rhodophyta	13	8	7	9	6	6	9	9
Sum of biomass	Chlorophyta	0.22	27.84	235.04	15.64	8.40	+	36.24	0.36
	Ochrophyta	83.33	889.98	50.96	2.84	136.09	310.23	1,880.04	742.44
	Rhodophyta	38.90	166.72	0.48	117.60	3.14	99.45	49.52	33.28

+, Values <0.01 g wet wt. m<sup>-2</sup>; Au, Autumn; Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer.

(*Ralfsia* sp.), 지층이(*S. thunbergii*)가 있으며, 홍조류는 마디잘록이(*Lomentaria catenata*), 산호말류(Coralline algae)가 나타났다(Fig. 3, Table 3).

조간대 해조류는 총 35종(녹조류 14.29%, 갈조류 34.29%, 홍조류 51.43%)이 발견되었고 계절에 따라서는 가을에 총 25종으로 가장 많았고, 여름에 14종으로 가장 적게 나타났다. 분류군에 따라서 가장 많은 출현 종수를 가진 시기가 녹조류, 홍조류는 가을에 각각 5종(20.00%), 13종(52.00%)로 나타났고, 갈조류는 가을-겨울에 7종(각각 28.00%, 38.89%)으로 가장 많았다. 출현 종수가 가장 적은 시기는 녹조류가 겨울과 여름에 3종(각각 16.67%, 21.43%)로 나타났고, 갈조류는 여름에 2종(14.29%)으로 가장 적었으며, 홍조류는 봄에 7종(43.75%)로 가장 적은 출현 종수를 보였다(Fig. 3, Table 3).

조하대에서는 총 41종(녹조류 17.07%, 갈조류와 홍조류 41.46%)이 발견되었고 계절에 따라서는 봄에 총 27종으로 가장 많았고, 가을에 총 13종으로 가장 적게 나타났다. 분류군에 따라서 출현 종수가 가장 많은 시기가 녹조류는 봄과 여름에 4종(각각 14.81%, 23.53%)으로 나타났고, 홍조류의 경우도 녹조류와 마찬가지로 봄과 여름에 9종(각각 33.33%, 52.94%)을 보였다. 갈조류는 가을에 6종(46.15%)을 보인 후로 종수가 증가하여 봄에 14종(51.85%)으로 가장 많았다. 출현 종수가 가장 적은 시기가 녹조류는 가을에 1종(7.69%)을 보였고, 갈조류는 여름에 4종(23.53%)로 나타났다. 그리고 홍조류는 가을과 겨울에 6종(각각 46.15%, 28.57%)로 가장 적은 종수를 보였다(Fig. 3, Table 3).

계절에 따른 종수 변화에 영향을 주는 주요 종을 보면, 수온이

감소하는 가을-겨울 시기에는 조간대에서 참도박(*Grateloupia elliptica*), 김류(*Porphyra* sp.), 산호말류(Coralline algae)를 제외한 대부분의 홍조류가 출현하지 않았고 갈조류는 겨울부터 잘록이고리매(*Scytosiphon lomentaria*), 미역(*U. pinnatifida*), 미역취(*Petalonia binghamiae*), 긴불레기말(*Dactylosiphon bullosus*)이 조간대와 조하대에 걸쳐 출현하기 시작하였다. 수온이 증가하는 봄-여름 시기에는 조간대와 조하대에서 모자반류(*Sargassum* spp.)이나 그물바탕말(*Dictyota dichotoma*)을 제외한 대부분의 갈조류 종이 출현하지 않았다. 조간대와 조하대에서 나타난 녹조류, 갈조류, 홍조류 종수에 유의한 차이는 나타나지 않았다(Student's t-test, 각, P=0.547, P=0.177, P=0.623).

조간대와 조하대에서 나타나는 생물량을 보면, 가을부터 봄까지 갈조류의 생물량(219.43–1,931 g wet wt. m<sup>-2</sup>)이 증가하면서 전체 생물량(270.09–2,252 g wet wt. m<sup>-2</sup>)의 80.32–85.74%를 차지하였다. 이후 여름(912.16 g wet wt. m<sup>-2</sup>)에 다시 감소하여 81.7%를 차지했다. 최대 생물량을 보인 봄에 녹조류의 생물량(271.28 g wet wt. m<sup>-2</sup>)이 최대를 보였고, 봄을 제외한 다른 시기에는 갈조류나 홍조류에 비해 낮은 생물량(8.62–27.84 g wet wt. m<sup>-2</sup>)으로 전체 생물량의 1.75–12.04%를 차지하였다. 홍조류의 생물량은 가을(42.04 g wet wt. m<sup>-2</sup>)과 봄(50.00 g wet wt. m<sup>-2</sup>)에 낮게 나타나고 겨울(266.17 g wet wt. m<sup>-2</sup>)과 여름(150.88 g wet wt. m<sup>-2</sup>)에 높아지는 변화를 보이며, 전체 생물량의 2.22–17.81%를 차지했다. 이러한 계절에 따른 생물량의 변화는 조간대와 조하대에서 다르게 나타났는데, 조간대에서 갈조류의 생물량이 가을부터 겨울(83.33–889.98 g wet wt. m<sup>-2</sup>)

에 증가하면서 조간대의 전체 생물량이 증가하였다가 봄과 여름에 갈조류의 생물량(50.96–2.84 g wet wt. m<sup>2</sup>)이 크게 감소하여 조간대의 전체 생물량(286.48–136.08 g wet wt. m<sup>2</sup>)도 낮아진 모습을 보였다. 갈조류의 생물량이 감소한 봄과 여름에는 각각 녹조류(235.04 g wet wt./m<sup>2</sup>)와 홍조류(117.6 g wet wt. m<sup>2</sup>)가 높은 생물량을 보였으며, 홍조류는 다른 시기에 비해 겨울(166.72 g wet wt. m<sup>2</sup>)에 가장 높은 생물량을 보였으나 겨울철 갈조류의 생물량(889.98 g wet wt. m<sup>2</sup>)에 비해 낮게 나타났다. 조간대에서 가을과 겨울에 각각 갈조류 지층이(*S. thunbergii*)와 검둥모자반(*S. nigrifolium*)이 우점하였고, 봄에는 녹조류 창자파래(*U. intestinalis*), 여름에는 홍조류 마디잘록이(*L. catenata*)가 우점하였다. 조사기간 동안에 조간대와 조하대에서 나타난 녹조류, 갈조류, 홍조류 생물량은 유의한 차이가 없었다(Student's t-test, 각 P=0.305, P=0.395, P=0.328).

조하대에서는 모든 시기에 전체 생물량을 차지하는 비율이 갈조류, 홍조류, 녹조류 순으로 높게 나타났으며, 가을에서 봄까지 갈조류의 생물량(136.09–1,880.04 g wet wt. m<sup>2</sup>)이 증가하면서 조하대의 전체 생물량이 높아졌다. 여름(776.08 g wet wt. m<sup>2</sup>)에는 조하대 전체 생물량이 감소하였으나 가을(147.63 g wet wt. m<sup>2</sup>)과 겨울(409.68 g wet wt. m<sup>2</sup>)에 비해 높은 생물량을 나타냈다(Fig. 2, Table 3). 조하대에서는 가을과 겨울에 검둥모자반(*S. nigrifolium*), 봄에 미역(*U. pinnatifida*), 여름에 알송이모자반(*S. confusum*)의 갈조류가 우점하였다.

계절별 해조 군집의 기능형군 비율

조간대에서 기능형군별 피도와 빈도를 기준으로 나타난 중요도값을 차지하는 비율은 S (33.43%), CB (29.19%), F (20.49%), JC (11.73%), Cr (5.04%), TL (0.12%) 순으로 나타났다. 계절에 따라 높은 중요도값을 보이는 기능형군에 변화가 있었는데, S는 가을(5.37%)에 가장 낮은 뒤로 증가하여 여름(63.75%)에 최대를 보였으며, CB는 가을(46.27%)에 최대였다가 감소하여 봄(16.50%)에 최소를 보인 후, 여름(20.75%)에 다시 증가하는 양상을 보였다. F는 겨울(38.38%)에 가장 높았고, 여름(1.18%)에 가장 낮게 나타났다. JC은 가을(19.16%)과 봄(18.09%)에 높았고, 겨울(6.22%)과 여름(3.47%)에 낮게 나타났다. Cr은 겨울에 나타나지 않았고, 여름(10.86%)에 최대를 보였다. TL은 가을(0.49%)을 제외한 다른 계절에는 관찰되지 않았다(Fig. 4, Table 4).

조하대에서 기능형군별 중요도값을 차지하는 비율은 CB (58.41%), Cr (17.71%), S (13.04%), TL (6.26%), JC (2.94%), F (1.65%) 순으로 나타났으며, CB는 가을(72.82%)과 여름(70.17%)에 높았고 겨울(35.34%)에 가장 낮았다. Cr은 가을(19.44%)과 겨울(20.48%)에 높았고 봄(14.16%)에 가장 낮았다. S는 겨울(27.99%)에 가장 높았고, 봄(9.49%)과 여름(9.82)에 비슷했으며, 가을(4.84%)에 가장 낮았다. TL은 겨울(13.97%)과 봄(11.07%)에만 관찰되었다. JC는 봄(7.38%)

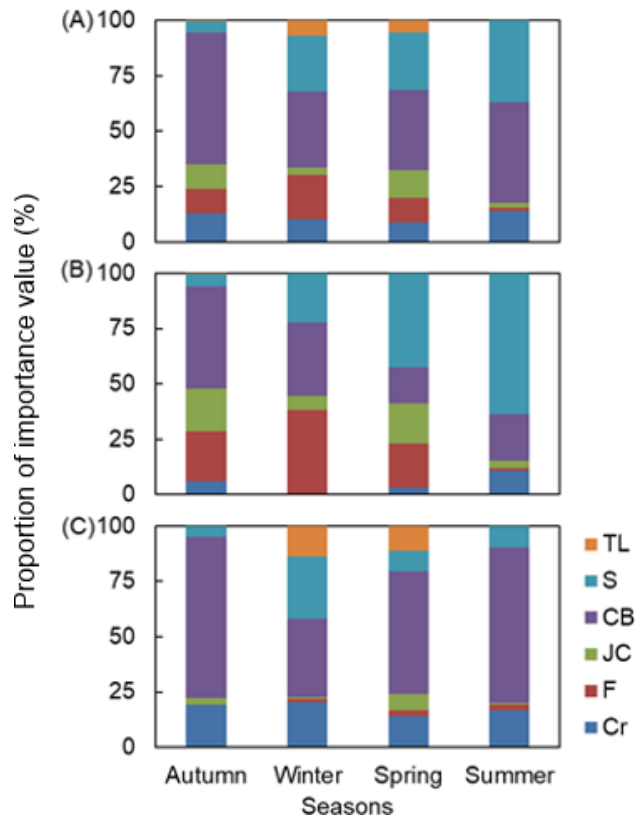


Fig. 4. Proportion of importance value of functional group into macroalgae community in study area. A, Total; B, Intertidal; C, Subtidal; Cr, Crustose; F, Filamentous; JC, Jointed calcareous; CB, Coarsely branched; S, Sheet; TL, Thick leathery.

에 가장 높았고 겨울(0.64%)과 여름(0.83%)에 낮게 나타났다. F는 가을엔 관찰되지 않았으며, 겨울(1.59%)에 최소로 봄(2.59%)과 여름(2.42%)에 증가하였다(Fig. 4).

계절별 해조 군집의 morpho-functional group 비율

조간대에서 morpho-functional group의 중요도값에 대한 비율은 turf (67.02%)가 가장 높았고, 그 다음으로 subcanopy (26.22%), encrusting (5.04%), canopy (1.73%) 순으로 나타났다. Turf는 겨울(80.68%)에 가장 높았으며, 봄(55.11%)에 가장 낮았다. Subcanopy는 봄(40.95%)에 가장 많았고, 겨울(19.32%)에 가장 낮았다. Encrusting은 여름(10.86%)에 가장 높았고 겨울에는 관찰되지 않았으며, 봄(3.06%)에 낮게 나타났다. Canopy는 겨울과 여름에 나타나지 않았고, 가을(6.04%)과 봄(0.88%)에만 출현했다(Fig. 5, Table 4).

조하대에서 morpho-functional group의 중요도값에 대한 비율은 canopy (34.01%)가 가장 높았고, 그 다음으로 subcanopy (26.01%), turf (24.27%), encrusting (15.70%) 순으로 나타났다. Canopy는 가을(40.27%)에 가장 높고 겨울(24.74%)에 최소



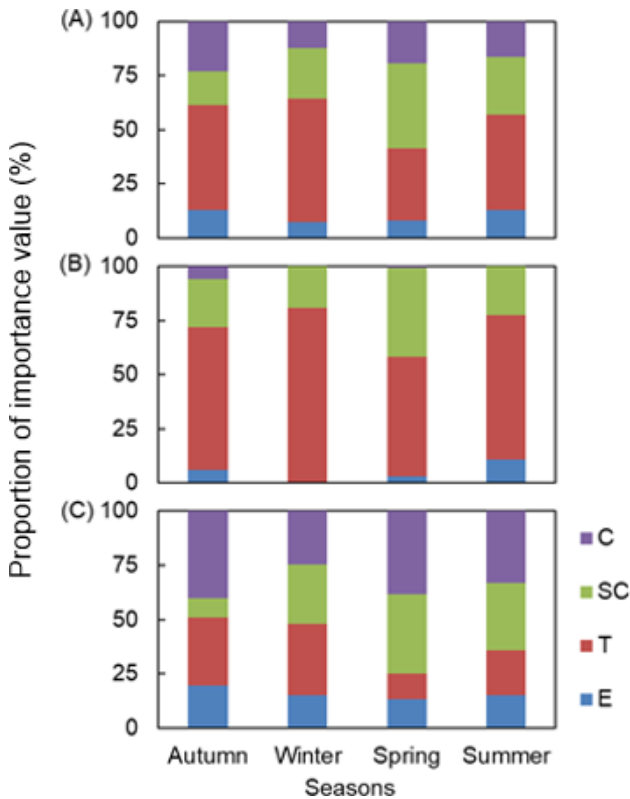


Fig. 5. Proportion of importance value of morpho-functional group into macroalgae community in study area. A, Total; B, Intertidal; C, Subtidal; E, Encrusting; T, Turf; SC, Subcanopy; C, Canopy.

로 감소하였다가 다시 증가하여 봄(38.09%)과 여름(32.94%)을 보였다. Subcanopy는 봄(36.94%)과 여름(31.03%)에 높았고, 가을(8.82%)에 최소를 나타냈다. Turf는 가을(31.48%)과 겨울(33.00%)에 높았고, 봄(11.61%)에 최소를 나타냈다. Encrusting은 가을(19.44%)에 최대 봄(13.36%)에 최소를 보였고, 겨울(14.99%)과 여름(15.02%)에 유사하였다(Fig. 5).

## 고 찰

본 연구는 한류와 난류가 교차하는 동해 중부 연안에서 계절에 따른 해조 군집 변화를 분석하였다. 연구기간 동안에 강원 고성 대진에서 발견된 해조류 종 조성의 계절별 종수는 조하대에서 봄에 최대로 출현하였는데, 해조류 종수는 2007년 고성 대진과 초도 조하대에서 5-6월(봄)에 최대였고, 고성 저도에서 겨울에 최대로 출현하며(Kim et al., 2010, 2012a; Han et al., 2021), 고성 대진에서 종수가 최대를 보이는 시기가 이전에 조사된 결과와 유사하였다. 겨울과 봄에 최대 출현 종수를 가지는 것은 강원 속초 해역의 해조 군집이 가을, 겨울-봄, 여름으로 구분되는 계절성과 일치하였다(Boo and Lee, 1986). 이처럼 출현 종수에 대한 계절 변화는 온대 해역에서 대부분의 해조류가 겨울-봄

에 성장하기 때문에 가을과 여름에 비해 겨울과 봄에 종수가 더 많은 것으로 여겨진다(Chihara, 1970; Round, 1984). 하지만 고성 대진 조간대에서는 해조 종수는 가을에 가장 높았으며, 2014년 고성 거진 조간대나 2006년 고성 초도 조하대에서 종수가 5월(봄)에 비해 8월(여름)에 더 많이 출현하여 최대 출현 종수를 나타내는 시기에 차이가 있었다(Jeong et al., 2014; Han et al., 2021).

종 구성 비율을 인접 지역과 비교하면, 강원 고성 대진 보다 북쪽에 위치한 저도를 제외한 인접 지역에 비해 본 연구 결과에서 갈조류의 구성 비율이 비교적 높았고 홍조류는 구성비율이 낮았으며, 이러한 구성비율의 차이는 계절에 따라 출현하는 주요 종과 연관이 있을 것으로 여겨진다. 2007년 고성 대진에서 주요 출현 종 중에서 아한대성 종은 갈조류의 다시마(*Saccharina japonica*)와 홍조류의 참빛풀(*Odonthalia corymbifera*)이 기록되었으나(Kim et al., 2010), 본 연구 결과에서 아한대성 종은 갈조류의 다시마(*S. japonica*), 삼나무말(*C. langsdorffii*) 이외에 홍조류는 발견되지 않았다. 따라서, 과거와 비교해서 동해 중부(강원 북부) 연안은 아한대성 갈조류는 유지되었으나 홍조류가 감소한 것으로 여겨진다. 다만, 조사 방법, 시기 및 분류자에 따라서도 출현 종수가 달라질 수 있기 때문에 정성자료만으로 군집 특성을 분석하는데 한계를 나타냈다(Oh et al., 2002; Kim et al., 2008).

생물량의 계절변화는 특정 우점종에 따라 발생하였으며, 2014년 고성 거진 조간대에서 5월(봄)과 8월(여름)에 나타나는 종 중에서 봄철에 우점종인 파래류(*Ulva* spp.)를 제외하고 공통된 우점종은 없었다(Jeong et al., 2014). 2007년 고성 대진 조하대와 비교하여 팽생이모자반과 쇠미역을 제외한 알송이모자반, 미역, 다시마가 공통적으로 우점하였다(Kim et al., 2010). 따라서, 조간대는 비교적 우점종의 변화가 쉽게 발생할 수 있는 환경이었고, 조하대는 갈조류에 의한 우점종이 안정적으로 유지된 것으로 파악되었다. 조하대에서 미역(*U. pinnatifida*)과 다시마(*S. japonica*)는 겨울부터 출현하여 봄에 가장 높은 생물량을 가지며, 해조 군집의 생물량 변화에 높은 기여도를 나타냈다. 미역(*U. pinnatifida*)이나 다시마(*S. japonica*)의 생물량이 3월(겨울)부터 증가하여 6월(봄)에 최대를 나타내는 것은 업체의 성장시기와 유사하였다(Morita et al., 2003; Hwang et al., 2018). 이처럼, 대부분의 온대성 해조류들은 이들이 처한 환경 변화에 따라서 뚜렷한 번식 주기(reproductive cycles)와 계절생장을 지닌다(Dring, 1988; Brawley and Johnson, 1992; Lüning, 1993; Moring et al., 2013). 이와 같은 계절 생장은 조사 지역에서 나타난 표층 수온은 가을( $15.57 \pm 0.03$ )부터 겨울( $11.37 \pm 0.14$ )까지 감소하고 봄( $17.93 \pm 0.01$ )에 증가하면서 여름( $21.35 \pm 0.05$ )에 고수온기를 가지게 되는 것과 상관을 보인다. 따라서, 출현 종수와 생물량이 계절에 따라 변화한 것은 우점종 생활사하고 관련이 있는 것으로 나타났다.

강원 고성 대진의 조간대에서 중요도값을 차지하는 비율이 높

Table 4. Proportion of importance value of functional groups within seaweed community

(unit, %)

Species	Fu	Mf	Intertidal				Subtidal			
			Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su
Chlorophyta										
<i>Chaetomorpha moniligera</i>	F	T	16.31	27.11	5.21	0.78		0.27		0.68
<i>Cladophora</i> sp.	F	T	6.18	11.27	3.84					0.34
<i>Codium fragile</i>	CB	SC							0.81	
<i>Lychaete sakaii</i>	F	T						0.17		
<i>Ulva</i> spp.	S	T	3.15	19.44	15.64	52.29	0.41	16.20	0.85	6.09
Ochrophyta										
<i>Coccophora langsdorfii</i>	CB	C	4.82				5.11		0.33	
<i>Colpomenia sinuosa</i>	CB	T	1.41	6.85				5.25		
<i>Dactylosiphon bullosus</i>	CB	SC						1.57		
<i>Desmarestia viridis</i>	CB	C						0.58	0.53	
<i>Dictyopteris divaricata</i>	CB	SC							5.72	
<i>Dictyota dichotoma</i>	S	SC	2.14		26.79	11.45	4.43	5.24	8.65	3.73
<i>Mutimo cylindricus</i>	CB	C							0.23	
<i>Petalonia binghamiae</i>	S	SC						2.71		
<i>Ralfsia verrucosa</i>	Cr	T						5.48	0.79	1.73
<i>Saccharina japonica</i>	TL	SC						5.66	4.01	
<i>Sargassum fulvellum</i>	CB	C			0.88				31.83	
<i>Sargassum confusum</i>	CB	C					0.47			32.94
<i>Sargassum fusiforme</i>	CB	SC	4.98							
<i>Sargassum horneri</i>	CB	C					14.14	7.61	3.25	
<i>Sargassum nigrifolium</i>	CB	C	1.21				20.55	16.55	1.92	
<i>Sargassum thunbergii</i>	CB	SC	7.00	11.48	6.56	2.88	1.76		2.66	19.08
<i>Scytosiphon lomentaria</i>	CB	SC		5.60				3.44		
<i>Undaria pinnatifida</i>	TL	SC						8.31	7.06	
Rhodophyta										
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	CB	T	2.14		1.46	9.82	27.89			9.94
<i>Botryocladia wrightii</i>	CB	SC			0.58			0.34		
<i>Champia recta</i>	F	T			1.56	0.39			2.59	1.39
<i>Chondracanthus intermedia</i>	CB	T	3.47				0.26			
<i>Chondria crassicaulis</i>	CB	SC	2.50		7.02	0.65				1.47
<i>Chondrus ocellatus</i>	CB	SC	0.19				0.89			
<i>Corallina officinalis</i>	JC	T	1.94	6.22			0.61		3.68	
<i>Corallina pilulifera</i>	JC	T	17.22		18.09	3.47	2.30	0.64	3.70	0.83
Melobesiodean algae	Cr	E	6.22		3.06	10.86	19.44	14.99	13.36	15.02
<i>Gloiopeltis tenax</i>	CB	T	13.63	7.07						
<i>Grateloupia asiatica</i>	CB	SC								3.81
<i>Grateloupia elliptica</i>	TL	SC	0.49							
<i>Lomentaria catenata</i>	CB	SC	4.90	2.24		7.40	1.75		8.02	2.94

Fu, Functional group; Mf, Morpho-functional group; TL, Thick leathery; CB, Coarsely branched; JC, Jointed calcareous; S, Sheet; F, Filamentous; Cr, Crustose; C, Canopy; SC, Subcanopy; T, Turf; E, Encrusting coralline; Au, Autumn; Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer.

Table 4. Continued

(unit, %)

Species	Fu	Mf	Intertidal				Subtidal			
			Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su
<i>Polysiphonia</i> sp.	F	T			9.30					
<i>Polysiphonia morrowii</i>	F	T					1.15			
<i>Porphyra</i> sp.	S	T	0.09	2.73			3.84			
Sum of functional group	Cr		6.22	0	3.06	10.86	19.44	20.48	14.16	16.76
	F		22.49	38.38	19.92	1.18	0	1.59	2.59	2.42
	JC		19.16	6.22	18.09	3.47	2.91	0.64	7.38	0.83
	CB		46.27	33.24	16.50	20.75	72.82	35.34	55.31	70.17
	S		5.37	22.17	42.43	63.75	4.84	27.99	9.49	9.82
	TL		0.49	0	0	0	0	13.97	11.07	0
Sum of morpho-functional group	E		6.22	0	3.06	10.86	19.44	14.99	13.36	15.02
	T		65.53	80.68	55.11	66.76	31.48	33.00	11.61	21.01
	SC		22.22	19.32	40.95	22.38	8.82	27.26	36.94	31.03
	C		6.04	0	0.88	0	40.27	24.74	38.09	32.94

Fu, Functional group; Mf, Morpho-functional group; TL, Thick leathery; CB, Coarsely branched; JC, Jointed calcareous; S, Sheet; F, Filamentous; Cr, Crustose; C, Canopy; SC, Subcanopy; T, Turf; E, Encrusting coralline; Au, Autumn; Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer.

있던 기능형군과 주요 종은 가을에 CB의 갈조류인 지층이(*S. thunbergii*)와 홍조류인 풀가사리(*Gloiopeltis tenax*) 등이 있으

며, 겨울에는 F 녹조류인 염주말(*C. moniligera*), 봄과 여름에는 S 녹조류인 파래류(*Ulva* spp.)가 높은 중요도값을 차지하였

Table 5. Comparison of number of species investigated at the mid-eastern coast of Korea

Depth range	Period	Site	Number of species			
			G	B	R	Total
Intertidal, subtidal 1, 5, 10 m	Aug. 2006–May 2009	Daejin, DongHae <sup>1</sup>	12	26	68	106
Intertidal, subtidal 1, 5, 10 m	Jul. 2006–Apr. 2008	Daejin, DongHae <sup>2</sup>	11	26	57	94
Intertidal, subtidal 1, 5, 10 m	Jul. 2006–Apr. 2007	Daejin, DongHae <sup>3</sup>	4	15	32	51
	May and Aug. 2014	Geojin, Goseong <sup>4</sup>	6	10	17	33
Intertidal	Aug.–May 1995	Jumunjin, Gangneung <sup>5</sup>	10	22	44	76
	Jan.–Oct. 1990	Sokcho <sup>6</sup>	7	12	36	55
Subtidal 10–15 m	May–Dec. 2015	Sagunjin, Gangneung <sup>7</sup>	5	20	50	75
Subtidal–10 m	Jan. 1982–Aug. 1983	Ohori, Goseong <sup>8</sup>	6	19	36	61
Subtidal 5, 10, 15, 20 m	Feb.–Nov. 2011	Jeodo, Goseong <sup>9</sup>	2	17	19	38
		Imwon, Samchok <sup>9</sup>	2	6	4	12
Subtidal–24 m	Mar.–Sep. 2010	Ohori, Goseong <sup>10</sup>	13	24	57	94
Subtidal 5, 10, 20 m	Oct. 2008–Dec. 2009	Hujin, Samchok <sup>11</sup>	6	16	29	51
Subtidal 3, 5, 10 m	Oct. 2008–Dec. 2009	Sagunjin, Gangneung <sup>11</sup>	7	22	62	91
Subtidal 5, 10, 15 m	Feb.–Nov. 2007	Daejin, Goseong <sup>12</sup>	5	25	43	73
Subtidal 5, 10, 15 m	May and Aug. 2006~2007	Chodo, Goseong <sup>13</sup>	4	20	33	57
Subtidal 5, 10, 20 m	Feb.–Nov. 2007	Gisamun, Yangyang <sup>12</sup>	5	12	33	50
Intertidal, Subtidal–1 m	Nov. 2022–Aug. 2023	Daejin, Goseong <sup>14</sup>	7	18	20	45

<sup>1</sup>Shin et al. (2011). <sup>2</sup>Shin et al. (2008b). <sup>3</sup>Shin et al. (2008a). <sup>4</sup>Jeong et al. (2014). <sup>5</sup>Kim et al. (1997). <sup>6</sup>Lee et al. (1993). <sup>7</sup>Park et al. (2017). <sup>8</sup>Koh et al. (1989). <sup>9</sup>Kim et al. (2012a). <sup>10</sup>Bae et al. (2014). <sup>11</sup>Kim et al. (2013b). <sup>12</sup>Kim et al. (2010). <sup>13</sup>Han et al. (2021). <sup>14</sup>This study. G, Green algae; B, Brown algae; R, Red algae.

다. 조하대에서는 사계절 동안 모자반류(*Sargassum* spp.)에 의해 CB가 다른 기능형군에 비해 구성 비율이 높았으며, Cr은 조간대에 비해 조하대에서 비율이 높았다. 조간대에서 S의 중요도값이 봄과 여름에 다른 기능형군에 비해 높았으며, 포르투갈 조수웅덩이나 미국동부와 프랑스 연안 조간대에서 S를 이루는 녹조류 파래류(*Ulva* spp.)나 홍조류 미끌지누아리(*G. turuturu*)가 봄과 여름에 높은 생물량을 보인 것과 유사한 결과로 나타났다(Burrows, 1991; Cabioch et al., 1997; Harlin and Villar-Bohnsack, 2001). 동해안 조하대에 대한 해조상은 삼척 비화에서 미역(*U. pinnatifida*)과 팽생이모자반(*S. homeri*)이 우점하였고(Kim et al., 2012b), 동해 대진에서 모자반류(*Sargassum* spp.), 무절산호말류, 작은구슬산호말(*C. pilulifera*)이 우점하면서(Shin et al., 2011), 지역에 따라 우점종이 변화했지만 주로 모자반류(*Sargassum* spp.)에 의해서 나타나고 있었으며, 고성 대진에서 높은 구성 비율을 가진 것과 유사하였다. 조간대에서 해양생물은 파랑에 대한 노출이나 건조에 의한 영향 등을 받을 수 있는데(Tuya and Haroun, 2006; Schagerl and Möstl, 2011), 이와 같은 물리적 교란으로 인해 해조 군집의 피도와 빈도의 변화가 급변하는 것으로 여겨진다. 조하대에서는 비교적 안정적인 서식 환경을 유지하는 것으로 나타났다. 또한, JC가 조하대보다 조간대에서 더 높은 비율을 보였고, Cr 조류는 반대로 조하대에서 더 높게 나타났는데, 조간대에서 발생하는 물리적 교란 정도에 따라 해조류의 피도가 변할 수 있으며(Piazzi and Cinelli, 2001), 이와 같은 영향이 군집을 이루는 종마다 다르게 작용한 결과로 여겨진다.

강원 고성 대진의 조간대에서 morpho-functional group은 다른 기능형군에 비해 turf의 중요도값이 높았는데, turf 종은 물리적 교란이나 섭식으로 인한 손실에 대한 회복 능력이 높고(Littler and Littler, 2013), 저영양 환경에서 높은 영양 흡수와 증식율을 가질 수 있기 때문에 교란이 높은 조간대 환경에서 우점할 수 있었던 것으로 여겨진다(Rosenberg and Ramus, 1984; Fujita et al., 1988). 고성 대진의 조하대에서는 canopy 또는 subcanopy 종인 모자반류(*Sargassum* spp.) 및 다시마(*S. japonica*)와 미역(*U. pinnatifida*) 등의 생물량과 중요도값이 높게 나타났는데, 제주도와 남서해안 조하대에서 모자반류(*Sargassum* spp.)나 감태(*Ecklonia cava*) 등의 대형 갈조류가 번무하며(Oak et al., 2004; Kim et al., 2008, 2013a; Ko et al., 2008; Kang et al., 2011), 지역이 다름에도 조하대에서 canopy 또는 subcanopy 종이 우점하는 것으로 파악되었다. 그리고 고성 대진에서 encrusting을 형성하는 무절산호말류가 조간대에 비해 조하대에서 중요도값이 높았는데, 동해안 조하대에서 모자반류와 무절산호말류가 넓은 피도를 가지는 것과 유사한 결과로 파악하였다(Kim et al., 1997, 2014; Choi and Rho, 2010). 조하대에서 군집 구조가 단순화된 것은 해조 생물량의 변화가 빛의 증감을 수반한 수심과 조식동물에 의한 영향을 비롯하여 용승, 퇴적 등과 같은 영향이 작용한 것으로 해석된다(Lamb and

Zimmermann, 1964; Neushul, 1967; Sears and Wilce, 1975; Mathieson, 1979; Nam, 1986; Sangil et al., 2011). Canopy 종은 turf 종에게 그늘을 형성하여 생장에 필요한 광량을 감소시키게 되고 서로 공간 경쟁하는 것으로 나타나는데(O'Brien and Scheibling, 2018), 이러한 영향이 연구 지역에서도 나타났을 것으로 여겨진다.

해조 군집의 생물량 변화는 계절에 따라 바뀌는 우점종 영향으로 여겨지며, 조간대에서는 수온이 낮아지는 가을-겨울 시기에 갈조류의 영향이 컸으며, 수온이 증가하는 봄과 여름에는 갈조류가 급격하게 감소하고 녹조류와 홍조류의 영향이 커졌다. 조하대는 사계절 동안에 갈조류에 의한 영향이 나타났다. 강원 고성 대진의 해조 군집은 주로 조간대와 조하대에서 turf를 이루는 우점종의 변화가 있었던 것으로 파악되며, 동해안 환경 변화에 따라 구성 비율에 변화를 가져온 것으로 여겨진다. 따라서, 해당 지역에 대한 지속적인 모니터링 연구가 수행될 필요성이 있다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 “기후변화에 따른 동해연안 갯녹음 유발요인 검증 원천기술 개발”과제(PEA0205)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- Arenas F, Sánchez I, Hawkins SJ and Jenkins SR. 2006. The invasibility of marine algal assemblages: Role of functional diversity and identity. *Ecology* 87, 2851-2861. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2851:TIOMAA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2851:TIOMAA]2.0.CO;2).
- Arévalo R, Pinedo S and Ballesteros E. 2007. Changes in the composition and structure of Mediterranean rocky-shore communities following a gradient of nutrient enrichment: Descriptive study and test of proposed methods to assess water quality regarding macroalgae. *Mar Pollut Bull* 55, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.marpollbul.2006.08.023>.
- Ateweberhan M, Bruggemann JH and Breeman AM. 2006. Effects of extreme seasonality on community structure and functional group dynamics of coral reef algae in the southern Red Sea (Eritrea). *Coral Reefs* 25, 391-406. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0109-6>.
- Bae EH, Oak JH and Lee EY. 2014. Marine algal flora of Oho-ri, Gosung-gun, Gangwon-do, Korea. *J Species Res* 3, 79-94. <https://doi.org/10.12651/JSR.2014.3.1.079>.
- Baek JM, Hwang MS, Lee JW, Lee WJ and Kim JI. 2007. The macroalgal community of Bagryoungdo Island in Korea. *Algae* 22, 117-123. <https://doi.org/10.4490/AL-GAE.2007.22.2.117>.
- Barbour MG, Burk JH and Pitts WD. 1987. *Terrestrial Plant Ecology*. 2nd edition. Benjamin/Cummings Publishing

- Company, San Francisco, CA, U.S.A.
- Boo SM. 1987. Distribution of marine algae from shore area of Kangwon province. *Korean J Phycol* 2, 223-235.
- Boo SM and Lee IK. 1986. Studies on benthic algal community in the east coast of Korea. 1. Floristic composition and periodicity of a Sokcho rocky shore. *Korean J Phycol* 1, 107-116.
- Boudouresque CF. 1973. Etude in situ de la réinstallation d'un peuplement sciaphile de mode battu après sa destruction expérimentale, en Méditerranée. *Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen* 24, 202-218. <https://doi.org/10.1007/BF01609512>.
- Brawley SH and Johnson LE. 1992. Gametogenesis, gametes and zygotes: An ecological perspective on sexual reproduction in the algae. *Eur J Phycol* 27, 233-252. <https://doi.org/10.1080/00071619200650241>.
- Brown VB, Davies SA and Synnot RN. 1990. Long-term monitoring of the effects of treated sewage effluent on the intertidal macroalgal community near Cape Schanck, Victoria, Australia. *Bot Mar* 33, 85-98. <https://doi.org/10.1515/botm.1990.33.1.85>.
- Burrows EM. 1991. Seaweeds of the British Isles: Chlorophyta, Volume 2. Natural History Museum, London, U.K.
- Cabioch J, Castric-Fey A, L'Hardy-Halos MT and Rio A. 1997. *Grateloupia doryphora* et *Grateloupia filicina* var. *luxurians* (Rhodophyta, Halymeniaceae) sur les côtes de Bretagne (France). *Cryptogamie Algologie* 18, 117-137.
- Chappuis E, Terradas M, Cefali ME, Mariani S and Ballesteros E. 2014. Vertical zonation is the main distribution pattern of littoral assemblages on rocky shores at a regional scale. *Estuar Coast Shelf Sci* 147, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.05.031>.
- Chihara M. 1970. Common Seaweeds of Japan in Color. Hoiku-sha Publishing Company, Osaka, Japan, 1-173.
- Cho YK and Kim K. 2000. Branching mechanism of the Tsushima Current in the Korea Strait. *J Phys Oceanogr* 30, 2788-2797. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2000\)030<2788:BMOTTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2000)030<2788:BMOTTC>2.0.CO;2).
- Choi CG and Rho HS. 2010. Marine algal community of Ulsan, on the eastern coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 43, 246-253. <https://doi.org/10.5657/kfas.2010.43.3.246>.
- Choi CG, Kim JH and Chung IK. 2008. Temporal variation of seaweed biomass in Korean coasts: Yokjido, Gyeongnam Province. *Algae* 23, 311-316. <https://doi.org/10.4490/AL-GAE.2008.23.4.311>.
- Choi CG, Lee HW and Hong BK. 2009. Marine algal flora and community structure in Dokdo, East Sea, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 42, 503-508. <https://doi.org/10.5657/kfas.2009.42.5.503>.
- Chung HS, Lee HJ and Lee IK. 1991. Vertical distribution of marine algae on a Gallam rocky shore of the mid-east coast of Korea. *Korean J Phycol* 6, 55-67.
- Connell SD, Foster MS and Airoldi L. 2014. What are algal turfs? Towards a better description of turfs. *Mar Ecol Prog Ser* 495, 299-307. <https://doi.org/10.3354/meps10513>.
- De Bettignies T, Wernberg T and Gurgel CFD. 2018. Exploring the influence of temperature on aspects of the reproductive phenology of temperate seaweeds. *Front Mar Sci* 5, 218. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00218>.
- Dieck I. 1992. North Pacific and North Atlantic digitate *Laminaria* species (Phaeophyta): Hybridization experiments and temperature responses. *Phycologia* 31, 147-163. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-31-2-147.1>.
- Díez I, Muguerza N, Santolaria A, Ganzedo U and Gorostiaga JM. 2012. Seaweed assemblage changes in the eastern Cantabrian Sea and their potential relationship to climate change. *Estuar Coast Shelf Sci* 99, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.12.027>.
- Díez I, Secilla A, Santolaria A and Gorostiaga JM. 1999. Phytobenthic intertidal community structure along an environmental pollution gradient. *Mar Pollut Bull* 38, 463-472. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(98\)90161-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(98)90161-8).
- Dring MJ. 1982. Photosynthesis of intertidal brown algae during and after periods of emersion: A renewed search for physiological causes of zonation. *Mar Ecol Prog Ser* 8, 301-308.
- Dring MJ. 1988. Photocontrol of development in algae. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 39, 157-174.
- Fernández PV, Ciancia M and Estevez JM. 2011. Cell wall variability in the green seaweed *Codium Vermilara* (Bryopsidales Chlorophyta) from the argentine Coast I. *J Phycol* 47, 802-810. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2011.01006.x>.
- Fujita RM, Wheeler PA and Edwards RL. 1988. Metabolic regulation of ammonium uptake by *Ulva rigida* (Chlorophyta): A compartmental analysis of the rate-limiting step for uptake. *J Phycol* 24, 560-566. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1988.tb04262.x>.
- Gattuso JP, Frankignoulle M and Wollast R. 1998. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annu Rev Ecol Syst* 29, 405-434. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.405>.
- Gerard VA and Du Bois KR. 1988. Temperature ecotypes near the southern boundary of the kelp *Laminaria saccharina*. *Mar Biol* 97, 575-580. <https://doi.org/10.1007/BF00391054>.
- Han SJ, Kim YR, Kim HJ and Hwang CH. 2021. Ecological evaluation of the spring and summer subtidal marine algal communities along the East Coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 1007-1016. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.1007>.
- Harley CD, Anderson KM, Demes KW, Jorve JP, Kordas RL, Coyle TA and Graham MH. 2012. Effects of climate change on global seaweed communities. *J Phycol* 48, 1064-1078. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>.
- Harlin MM and Villalard-Bohnsack M. 2001. Seasonal dynamics and recruitment strategies of the invasive seaweed

- Grateloupia doryphora* (Halymeniaceae, Rhodophyta) in Narragansett Bay and Rhode Island Sound, Rhode Island, USA. *Phycologia* 40, 468-474. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-40-5-468.1>.
- Hwang EK, Ha DS and Park CS. 2018. The influences of temperature and irradiance on thallus length of *Saccharina japonica* (Phaeophyta) during the early stages of cultivation. *J Appl Phycol* 30, 2875-2882. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1565-4>.
- Jeong HD, Hong SE, Kim SW, Han MS and Jang SH. 2014. Community structure and biological indicator species of marine benthic algal at intertidal zone in the three areas of the east coast of Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 20, 609-618. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2014.20.6.609>.
- Jung SW, Rho HS and Choi CG. 2022. Seaweed beds and community structure in the East and South Coast of Korea. *J Mar Sci Eng* 10, 689. <https://doi.org/10.3390/jmse10050689>.
- 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. <https://doi.org/10.4490/algae.2011.26.4.333>.
- Kiirikki M. 1996. Mechanisms affecting macroalgal zonation in the northern Baltic Sea. *Eur J Phycol* 31, 225-232. <https://doi.org/10.1080/09670269600651421>.
- Kim BY, Ko JC, Ko HJ, Park SE, Cha HK and Choi HG. 2013a. Seasonal variation in community structure of subtidal seaweeds in Jeju Island, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 607-618. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0607>.
- Kim C, Kim YS, Choi HG and Nam KW. 2014. Variations of seaweed community structure and distribution of crustose coralline algae at Gallam, Samchuk, eastern coast of Korea. *Korean J Environ Ecol* 28, 10-23. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2014.28.1.10>.
- Kim MS, Kim MR, Chung MH, Kim JH and Chung IK. 2008. Species composition and biomass of intertidal seaweeds in Chuja Island. *Algae* 23, 301-310. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.4.301>.
- Kim YD, Ahn JK, Park MS, Kim HG, Min BH, Yeon SY and Kim YH. 2013b. Characteristics of subtidal marine plant community structure at Gangneung Sageunjin in the east coast of Korea. *J Environ Sci Int* 22, 761-771. <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.6.761>.
- Kim YD, Gong YG, Jeon CY, Song HI, Park MS, Lee CS and Kim YH. 2010. Marine algal flora and community structure in Daejin on the mid-east coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 43, 532-539. <https://doi.org/10.5657/kfas.2010.43.5.532>.
- Kim YD, Park MS, Yoo HI, Kim SW, Jeong HD, Hwa MB and Jin HJ. 2012a. Characteristics of seasonal variations of subtidal seaweed community structure at three areas in the East Coast of Korea. *J Environ Sci* 21, 1407-1418. <https://doi.org/10.5322/JES.2012.21.11.1407>.
- Kim YD, Park MS, Yoo HI, Min BH and Jin HJ. 2012b. Seasonal variations of seaweed community structure at the subtidal zone of Bihwa on the East coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 45, 262-270. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2012.0262>.
- Kim YH and Min HS. 2008. Seasonal and interannual variability of the North Korean cold current in the east sea reanalysis data. *Ocean Polar Res* 30, 21-31. <https://doi.org/10.4217/OPR.2008.30.1.021>.
- Kim YH, Nam KW and Sohn CH. 1997. Intertidal benthic marine algae at Chumunjin on the east coast Korea: Flora, distribution and community structure. *Algae* 12, 117-130.
- Kim YY, Kang YK, Lee ST, Jung HK, Lee CI, Kim S, Jeong KY, Byun DS and Cho YK. 2022. Potential impact of late 1980s regime shift on the collapse of walleye pollock catch in the western east/Japan Sea. *Front Mar Sci* 9, 802748. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.802748>.
- Ko YW, Sung GH, Yi CH, Kim HH, Choi DM, Ko YD, Lee WJ, Koh HB, Oak JH, Chung IK and Kim JH. 2008. Temporal variations of seaweed biomass in Korean coasts: Munseom, Jeju Island. *Algae* 23, 295-300. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.4.295>.
- Koh CH. 1983. Community structure and productivity of phytobenthos in Juckdo (eastern coast of Korea) II. Seasonal changes of algal vegetation in relation to annual growth of larger brown algae. *Korean J Bot* 26, 181-190.
- Koh CH and Sung N. 1983. Community structure and productivity of phytobenthos in Juckdo (Eastern Coast of Korea). I. Benthic marine algal vegetation and its environment. *Korean J Bot* 26, 119-130.
- Koh CH, Oh SH, Sung N, Ahn I and Kang YC. 1989. Algal zonation and seasonality in subtidal area of a wave-exposed coast at Ohori, east coast of Korea. *Korean J Phycol* 4, 171-182.
- Lamb IM and Zimmermann MH. 1964. Marine vegetation of Cape Ann, Essex County, Massachusetts. *Rhodora* 66, 217-254.
- Lee HB and Oh YS. 1986. A summer algal vegetation in Youngil Bay, eastern coast of Korea. *Korean J Phycol* 1, 225-240.
- Lee JC and Whang C. 1981. On the seasonal variations of surface current in the eastern sea of Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 16, 1-11.
- Lee JW, Lee HB and Lee IK. 1993. A study on the community structure of intertidal marine benthic algae in the east coast of Korea. I. An intertidal marine benthic algal community at Sokcho. *Korean J Phycol* 8, 67-75.
- Lee YP and Kang SY. 2002. A Catalogue of the Seaweeds in Korea. A Publishing Department of Jeju National University, Cheju, Korea, 1-662.
- Littler MM and Littler DS. 1984. Relationships between macroalgal functional form groups and substrata stability in a subtropical rocky-intertidal system. *J Exp Mar Biol Ecol* 74,

- 13-34. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(84\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0022-0981(84)90035-2).
- Littler MM and Littler DS. 2013. The nature of turf and boring algae and their interactions on reefs. In: Proceedings of the 2013 AAUS/ESDP Curaçao Joint International Scientific Diving Symposium. American Academy of Underwater Sciences, Dauphin Island, AL, U.S.A., 213-217.
- Littler MM and Murray SN. 1978. Influence of domestic wastes on energetic pathways in rocky intertidal communities. *J App Ecol* 15, 583-595. <https://doi.org/10.2307/2402612>.
- Lobban CS and Harrison PJ. 1997. *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Lüning K. 1980. Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three *Laminaria* species (Phaeophyceae) 1. *J Phycol* 16, 1-15. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1980.tb02992.x>.
- Lüning K. 1993. Environmental and internal control of seasonal growth in seaweeds. In: Fourteenth International Seaweed Symposium. Chapman ARO, Brown MT and Lahaye M, eds. *Dev Hydrobiol* 85, 1-14. Springer, Dordrecht, Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1998-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1998-6_1).
- Mathieson AC. 1979. Vertical distribution and longevity of subtidal seaweeds in northern New England, USA. *Bot Mar* 22, 511-520. <https://doi.org/10.1515/botm.1979.22.8.511>.
- McQuaid CD. 1985. Seasonal variation in the ash-free calorific value of nine intertidal algae. *Bot Mar* 28, 545-548. <https://doi.org/10.1515/botm.1985.28.12.545>.
- Mieszkowska N, Kendall MA, Hawkins SJ, Leaper R, Williamson P, Hardman-Mountford NJ and Southward AJ. 2006. Changes in the range of some common rocky shore species in Britain—a response to climate change?. In: *Marine Biodiversity*. Martens K, Queiroga H, Cunha MR, Cunha A, Moreira MH, Quintino V, Rodrigues AM, Serodio J and Warwick RM, eds. *Dev Hydrobiol* 183, 241-251. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4697-9\\_20](https://doi.org/10.1007/1-4020-4697-9_20).
- Miller RJ, Reed DC and Brzezinski MA. 2009. Community structure and productivity of subtidal turf and foliose algal assemblages. *Mar Ecol Prog Ser* 388, 1-11. <https://doi.org/10.3354/meps08131>.
- Mohring MB, Wernberg T, Kendrick GA and Rule MJ. 2013. Reproductive synchrony in a habitat-forming kelp and its relationship with environmental conditions. *Mar Biol* 160, 119-126. <https://doi.org/10.1007/s00227-012-2068-5>.
- Morita T, Kurashima A and Maegawa M. 2003. Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol Res* 51, 154-160. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1835.2003.t01-1-00305.x>.
- Moy FE and Christie H. 2012. Large-scale shift from sugar kelp (*Saccharina latissima*) to ephemeral algae along the south and west coast of Norway. *Mar Biol Res* 8, 309-321. <https://doi.org/10.1080/17451000.2011.637561>.
- Mueller-Dombois D and Ellenberg H. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, U.S.A., 1-547.
- Na YJ, Kim JH, Kwon CJ, Choi HG and Nam KW. 2015. Ecological status evaluation using seaweed community structures of Taean Coastal Areas in Korea. *Ocean Polar Res* 37, 317-325. <https://doi.org/10.4217/OPR.2015.37.4.317>.
- Nam KW. 1986. On the marine benthic algal community of Chuckdo in eastern coast of Korea. *Korean J Phycol* 1, 185-202.
- Neushul M. 1967. Studies of subtidal marine vegetation in western Washington. *Ecology* 48, 83-94. <https://doi.org/10.2307/1933420>.
- 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.
- O'Brien JM and Scheibling RE. 2018. Turf wars: Competition between foundation and turf-forming species on temperate and tropical reefs and its role in regime shifts. *Mar Ecol Prog Ser* 590, 1-17. <https://doi.org/10.3354/meps12530>.
- Oh BG, Lee JW and Lee HB. 2002. Monthly changes of marine benthic algae and community structure at Gahakri, Southern Coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 35, 64-70. <https://doi.org/10.5657/kfas.2002.35.1.064>.
- Oh BG, Lee JW and Lee HB. 2005. Summer marine algal vegetation of uninhabited islands in Sinangun, Southwestern coast. *Algae* 20, 53-59. <https://doi.org/10.4490/AL-GAE.2005.20.1.053>.
- Oh JC, Park SK, Choi HG and Nam KW. 2013. Seasonal variation in biomass and community structure of intertidal seaweeds at Heuksando and Hongdo, Southwestern coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 878-885. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0878>.
- Orfanidis S, Panayotidis P and Stamatis N. 2001. Ecological evaluation of transitional and coastal waters: A marine benthic macrophytes-based model. *Mediterr Mar Sci* 2, 45-66. <https://doi.org/10.12681/mms.266>.
- Orfanidis S, Panayotidis P and Ugland K. 2011. Ecological evaluation index continuous formula (EEI-c) application: A step forward for functional groups, the formula and reference condition values. *Mediterr Mar Sci* 12, 199-231. <https://doi.org/10.12681/mms.60>.
- Park GJ, Ju H, Choi OI and Choi CG. 2017. Community structure and distribution of natural seaweed beds on the Eastern Coast of Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 23, 338-346. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2017.23.4.338>.
- Park JW, Yoo HK, Jung HK, Park HJ, Bae KM, Kang CK and Lee CI. 2024. Effects of water temperature changes on the early life stages (egg and larvae) of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) - Laboratory experiments and field applications. *J Exp Mar Biol Ecol* 571, 151980. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2023.151980>.
- Piazzini L and Cinelli F. 2001. Distribution and dominance of two

- introduced turf-forming macroalgae on the coast of Tuscany, Italy, northwestern Mediterranean Sea in relation to different habitats and sedimentation. *Bot Mar* 44, 509-520. <https://doi.org/10.1515/BOT.2001.057>.
- Piazzzi L, Pardi G and Cinelli F. 1999. Algal vertical zonation and seasonal dynamics along a subtidal cliff on Gorgona Island (Tuscan Archipelago, Italy). *Plant Biosyst* 133, 3-13. <https://doi.org/10.1080/11263509909381528>.
- Piazzzi L, Pardi G, Balata D, Cecchi E and Cinelli F. 2002. Seasonal dynamics of a subtidal north-western Mediterranean macroalgal community in relation to depth and substrate inclination. *Bot Mar* 45, 243-252. <https://doi.org/10.1515/BOT.2002.023>.
- Raven JA and Geider RJ. 1988. Temperature and algal growth. *New Phytol* 110, 441-461. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1988.tb00282.x>.
- Reichert K, Buchholz F and Giménez L. 2008. Scale-dependent patterns of variability in the abundance of macroalgae and invertebrates of the rocky intertidal at Helgoland (German Bight, North Sea). *J Mar Biol Assoc UK* 88, 1319-1329.
- Rosenberg G and Ramus J. 1984. Uptake of inorganic nitrogen and seaweed surface area: Volume ratios. *Aquat Bot* 19, 65-72. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(84\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0304-3770(84)90008-1).
- Round FE. 1984. *The Ecology of Algae*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Rubal M, Veiga P, Vieira R and Sousa-Pinto I. 2011. Seasonal patterns of tidepool macroalgal assemblages in the North of Portugal. Consistence between species and functional group approaches. *J Sea Res* 66, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2011.07.003>.
- Saito Y and Atobe S. 1970. Phytosociological Study of Intertidal Marine Algae. 1. Usujiri Benten-Jima, Hokkaido. *Bull Fac Fish Hokkaido Univ* 21, 37-67.
- Sangil C, Sansón M and Afonso-Carrillo J. 2011. Spatial variation patterns of subtidal seaweed assemblages along a subtropical oceanic archipelago: Thermal gradient vs herbivore pressure. *Estuar Coast Shelf Sci* 94, 322-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.07.004>.
- Schagerl M and Möstl M. 2011. Drought stress, rain and recovery of the intertidal seaweed *Fucus spiralis*. *Mar Biol* 158, 2471-2479. <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1748-x>.
- Sears JR and Wilce RT. 1975. Sublittoral, benthic marine algae of Southern Cape Cod and adjacent island: Seasonal periodicity, associations, diversity, and floristic composition. *Ecol Monogr* 45, 337-365. <https://doi.org/10.2307/1942411>.
- Serisawa Y, Imoto Z, Ishikawa T and Ohno M. 2004. Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperatures in Tosa Bay, southern Japan. *Fish Sci* 70, 189-191. <https://doi.org/10.1111/j.0919-9268.2004.00788.x>.
- Shin JD, Ahn JK and Kim YH. 2011. Structure of the subtidal marine plant community on the east coast of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 85-94. <https://doi.org/10.5657/kfas.2011.44.1.085>.
- Shin JD, Ahn JK, Kim YH, Lee SB, Kim JH and Chung IK. 2008a. Community structure of benthic marine algae at Daejin and Jukbyeon on the Mid-East Coast of Korea. *Algae* 23, 231-240. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.3.231>.
- Shin JD, Ahn JK, Kim YH, Lee SB, Kim JH and Chung IK. 2008b. Temporal variations of seaweed biomass in Korean coasts: Daejin, Gangwondo. *Algae* 23, 327-334. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.4.327>.
- Sohn CH, Choi CG and Kim HG. 2007. Algal communities and useful seaweed distribution at Gangneung and its vicinity in East Coast of Korea. *Algae* 22, 45-52. <https://doi.org/10.4490/ALGAE.2007.22.1.045>.
- Song JN, Park SK, Heo JS, Kim BY, Yoo HI and Choi HG. 2011. Summer seaweed flora and community structure of uninhabited islands in Goheung, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 524-532. <https://doi.org/10.5657/kfas.2011.0524>.
- Steneck RS and Dethier MN. 1994. A functional group approach to the structure of algal-dominated communities. *Oikos* 69, 476-498. <https://doi.org/10.2307/3545860>.
- Steneck RS, Graham MH, Bourque BJ, Corbett D, Erlandson JM, Estes JA and Tegner MJ. 2002. Kelp forest ecosystems: Biodiversity, stability, resilience and future. *Environ Conserv* 29, 436-459. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000322>.
- Thornber CS, Kinlan BP, Graham MH and Stachowicz JJ. 2004. Population ecology of the invasive kelp *Undaria pinnatifida* in California: Environmental and biological controls on demography. *Mar Ecol Prog Ser* 268, 69-80. <https://doi.org/10.3354/meps268069>.
- Tuya F and Haroun RJ. 2006. Spatial patterns and response to wave exposure of shallow water algal assemblages across the Canarian Archipelago: A multi-scaled approach. *Mar Ecol Prog Ser* 311, 15-28. <https://doi.org/10.3354/meps311015>.
- Tuya F, Cacabelos E, Duarte P, Jacinto D, Castro JJ, Silva T, Bertocci I, Franco JN, Arenas F, Coca J and Wernberg T. 2012. Patterns of landscape and assemblage structure along a latitudinal gradient in ocean climate. *Mar Ecol Prog Ser* 466, 9-19. <https://doi.org/10.3354/meps09941>.
- Vergés A, Doropoulos C, Malcolm HA, Skye M, Garcia-Pizá M, Marzinelli EM, Campbell AH, Ballesteros E, Hoey AS, Vila-Concejo A, Bozec YM and Steinberg PD. 2016. Long-term empirical evidence of ocean warming leading to tropicalization of fish communities, increased herbivory, and loss of kelp. *PNAS* 113, 13791-13796. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610725113>.
- Wernberg T, Russell BD, Thomsen MS, Gurgel CFD, Bradshaw CJ, Poloczanska ES and Connell SD. 2011. Seaweed communities in retreat from ocean warming. *Curr Biol* 21, 1828-1832. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.09.028>.