

# 한국 제주 연안 및 가파도 해역의 조하대 해조상 및 군집구조 모니터링 (2013-2015)

김보연 · 고준철 · 최한길<sup>1\*</sup>

국립수산과학원 제주수산연구소, <sup>1</sup>원광대학교 생명과학부/환경과학연구소

## Monitoring of Macroalgal Flora and Community Structure in the Subtidal Zone around Jeju Coasts and Gapado Island, Korea (2013-2015)

Bo Yeon Kim, Jun-Cheol Ko and Han Gil Choi<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup>Faculty of Biological Science and Institute for Environmental Science, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

We seasonally examined marine macroalgal community structures and ocean environmental characteristics in subtidal zones at five sites on and around Jeju Island, Korea, from February 2013 to November 2015. A total of 186 macroalgal species were identified, including 18 green, 33 brown, and 135 red algae. During the study period, the number of species was highest at Gapado Island (125 species) followed by Bukchon (123 species), Sagye (122 species), Sinheung (122 species) and Sinchang (97 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 seaweed was 1,125.10 g wet wt./m<sup>2</sup> and ranged from 899.77 g/m<sup>2</sup> at Sinheung to 1,452.00 g/m<sup>2</sup> at Gapado. A brown alga *E. cava* was the most dominant species, accounting for 49.84% (560.78 g/m<sup>2</sup>) of the total seaweed biomass. Subdominant species were *C. aberrans* and *C. crassissima*, comprising 6.83% (76.79 g/m<sup>2</sup>) and 5.98% (67.28 g/m<sup>2</sup>) of total biomass, respectively. Cluster analysis revealed three distinct groups: the Sagye/Sinheung group (group A), the Bukchon/Sinchang group (group B), and the Gapado group (group C), indicating significant differences in macroalgal communities between sites.

Key words: Macroalgae, Community structure, Biomass, Gapado, Jeju

### 서론

해양생태계에서 해조류는 다양한 해양생물의 산란, 생육 및 은신처로서의 역할을 수행하며, 먹이사슬에 있어서는 일차생산자로서 산소, 이산화탄소 및 영양염 순환자로서 기능을 가진다(Terawaki et al., 2001; Williams and Smith, 2007; Satheesh and Wesley, 2012; Liang et al., 2014). 경제학적 측면에서 해조류는 과거에 식용과 약용으로만 이용되었으나 최근에는 이들의 이차산물인 아가, 카라기난, 알긴산 등이 건강식품, 의약품 및 화장품의 원료 등 다양한 형태로 이용되고 있다(Oh et al., 1990; Cha et al., 2006). 또한, 해조류는 인간의 직·간접적인 활동에 의해 군집구조가 변화하는 특징 때문에 연안 환경을 모니터링하는 생물지시자(bio-indicator)로 사용되어왔으며, 해양

에 유입된 무기 및 유기 오염물과 중금속을 제거하는 생물정화자(bio-filter)로 알려져 있다(Orfanidis et al., 2001; Arévalo et al., 2007; Wells et al., 2007; Scherner et al., 2013).

해조류 군집 구조 및 종조성은 수온, 광, 기질 종류 등 다양한 환경요인에 의해 영향을 받으며(Shepherd and Womersley, 1981; Breeman and Pakker, 1994; Agrawal, 2012), 특히, 수온은 해조류의 생장과 성숙에 영향을 미치는 제한요인으로서 이들의 수평분포를 결정한다고 알려져 있다(van den Hoek, 1982). 기후변화에 의한 수온 상승은 아열대 및 열대성 해조류의 출현종과 생물량의 증가를 초래하며, 소수종의 번무에 따른 종다양성 감소 등 해조류 군집구조의 변화를 일으키고(Carballo et al., 2002), 이들의 지리적 분포 범위에 영향을 미친다(Tenger and Dayton, 1987; Serisawa et al., 2004). 예를 들

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0262>



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.

Korean J Fish Aquat Sci 51(3) 262-277, June 2018

Received 29 March 2018; Revised 14 April 2018; Accepted 10 May 2018

\*Corresponding author: Tel: +82. 63. 850. 6579 Fax: +82. 63. 857. 8837

E-mail address: hgchoi@wku.ac.kr

면, 일본 Tosa만에서 70년대 이전에 서식했던 감태 군락은 지속적인 수온상승으로 2000년대에 완전히 소멸되었다고 하였으며 (Serisawa et al., 2004), 한국의 울진 앞바다 왕돌초 해조상 연구에서 1976년에 출현하지 않았던 감태가 2002년에 군락을 형성하였다고 기록하였고, 이는 수온 상승과 관련이 있다고 하였다 (Kim et al., 1977; Kim, 2006). 제주 주변 해역은 기후변화에 의해 수온이 점차 상승하고 있는 대마난류수와 중국 양자강 유출수의 영향을 받고 있으며 (Han et al., 2008; Belkin, 2009), Suh et al. (2011)는 연안정지 관측자료 분석 결과 1924년부터 2009년까지 86년 동안 표층 수온이 1.94°C 상승하였다고 밝혀 제주 연안에 서식하고 있는 해조류 군집의 변화가 예견된다.

제주도 연안의 해조상 연구는 1960년에 시작되었으며 (Kang, 1960), 그 이후로 암반 조건대의 해조류 군집구조에 대한 연구가 많이 수행되었다 (Lee and Lee, 1976; Lee, 1976; Lee and Lee, 1982; Yoon, 1985; Boo, 1988; Kim, 1991). 제주도 연안의 조하대 해조상과 군집구조에 대한 연구는 2000년대 이후에 주로 수행되었으며 (Yoo, 2003; Oak et al., 2004; Kim et al., 2013; Kang et al., 2015; Kim et al., 2015), 제주도 인근 도에서 서식하는 해조류에 대해서도 활발한 연구가 진행되었다 (Kim et al., 2008; Ko et al., 2008; Kang et al., 2011; Kang and Kim, 2012). 선행연구는 연구기간이 1년인 경우가 대부분으로 이는 장기적으로 변화하는 해양환경 특히 수온이 상승함으로써 해조상에 미치는 영향을 파악하기에는 어려운 점이 있으며, 동일 해역에서 지속적인 모니터링을 통해 해조 군집의 변화를 파악하는 것이 향후 기후 변화에 따른 생태계의 변화를 예측할 수 있는 가장 중요한 자료가 될 것이다.

따라서, 본 연구는 제주도의 동·서·남·북 연안과 유인도인 가파도 연안의 해양환경 특성과 조하대에 서식하는 해조상 및 군집구조를 분석함으로써 향후 환경변화에 따른 연안 생태계의 변화를 예측하고, 자원의 보존 및 관리방안 등을 확립하기 위한 기초자료를 제공하기 위해 수행되었다.

## 재료 및 방법

본 연구를 수행하기 위해 해조류 채집은 제주도의 북촌, 신창, 사계, 신흥 해역과 제주 남부에 위치한 유인도인 가파도 해역에서 2013년 2월부터 2015년 11월까지 계절별(3개년간 총 12회)로 SCUBA diving에 의해 실시하였으며 (Fig. 1), 연구 해역의 수온 및 염분은 YSI (6600-V2, YSI Incorporated, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

### 해조류 채집

2013년 동계 조사 때 각 연구 해역의 조하대 수심이 5, 10, 20 m가 되는 정점을 선정하였으며, 좌표를 저장하여 매회 같은 정점에서 10×10 cm로 구획된 방형구(50×50 cm) 3개를 무작위로 놓고 방형구 내에 출현하는 해조류를 끌칼을 이용하여 전량 채집하였다 (Table 1). 채집된 해조류는 현장에서 포르말린-해

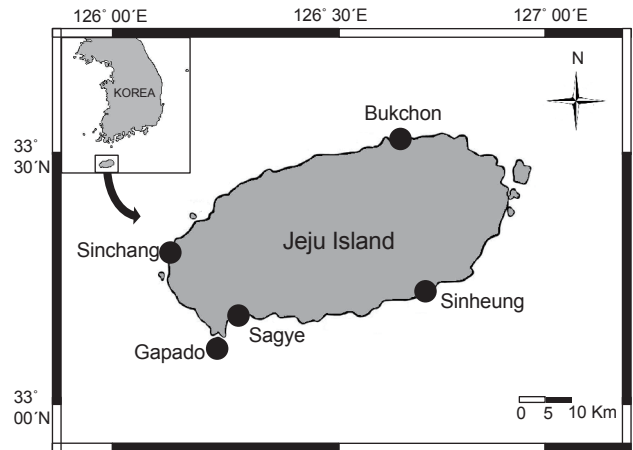


Fig. 1. A map of sampling sites in Jeju Island, Korea, from 2013 to 2015.

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

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"
Gapado	5	33°09'855"	126°16'455"
	10	33°09'746"	126°16'736"
	20	33°09'746"	126°17'172"

수 용액(10%)으로 고정하여 실험실로 운반한 후 현미경을 사용하여 동정하였으며 (Lee, 2008; Choi et al., 2016), 출현종 학명 및 국명은 algaebase (<http://www.algaebase.org>; Guiry and Guiry, 2018)와 Lee and Kang (2002)의 분류체계를 따랐다. 정량 채집된 해조류는 담수로 수 회 세척하여 종 별로 무게(습중량)를 측정하였으며, 단위 면적당 생물량(g wet wt./m<sup>2</sup>)으로 환산하였다.

### 군집지수

연구 정점별 출현종과 생물량으로 Margalef (1958)의 풍도지수 (richness index, R), Fowler and Cohen (1990)의 균등도 지

수(evenness index, J')와 Shannon's 다양도 지수(diversity index, H')를 계산하였다. 우점도 지수(dominance index, DI)는 방형구내 전체 생물량에 대한 제 1, 2 우점종의 생물량 합비의 비로 산출하였다(McNaughton, 1967). 또한, 각 연구 해역별 해조류의 우점도는 연평균 생물량을 사용하여 K-dominance 곡선으로 비교하였고(Lambshhead et al., 1983), 해조류의 출현종 유·무로 해역별 유사도(similarity)를 분석하였으며(Bray and Curtis, 1957), 그룹 간 유의차는 SIMPROF (similarity profile) tests를 실시하여 검정하였다. 군집분석을 위해 사용된 프로그램은 primer version 6 (PRIMER-E Ltd, UK)이었다(Clarke and Gorley, 2006).

**결 과**

**수온과 염분**

연구기간 동안 5개 연구해역의 저층 수온은 18.7-19.7℃ (19.1 ± 0.19℃, mean ± SE)로 남부에 위치한 사계 해역에서 가장 높았고, 북부에 위치한 북촌 해역에서 가장 낮았다(Fig. 2). 연도별로는 2013년에 19.3℃ (18.7-20.5℃), 2014년에 19.0℃ (18.3-19.8℃), 2015년에 19.1℃ (18.5-20.0℃)로 저층 수온의 연간 변화는 없었으며, 계절별 저층 수온은 2013년에 14.3-27.1℃, 2014년 14.0-25.0℃, 2015년 13.9-25.4℃로 모두 동계에 최소, 하계에 최대였다. 5개 연구해역의 연평균 저층 염분은 33.5-33.9 psu (33.7 ± 0.08 psu, mean ± SE)였으며, 해역별 차이는 없었다(Fig. 2). 연도별로는 2013년에 33.9 psu (33.7-33.9 psu), 2014년에 33.7 psu (33.5-33.9 psu), 2015년에 33.5 psu (33.2-33.8 psu)로 모든 해역에서 2013년에 비해 염분이 감소하는 경향을 보였으나, 그 값은 유사하였다. 계절별 저층 염분은 2013년에 31.7-35.0 psu, 2015년 32.4-34.8 psu로 하계에 최소, 동계에 최대였고, 2014년에는 33.1-34.5 psu로 하계에 최소, 춘계에 최대값을 나타냈다.

**종 조성**

본 연구기간 동안 제주도 5개 해역에서 출현한 해조류는 녹조류 18종(9.68%), 갈조류 33종(17.74%), 홍조류 135종(72.58%)으로 총 186종이었으며, 홍조류의 출현비율이 가장 높았다(Table 2). 해역별로 본 연구기간 동안 출현한 해조류는 97-125종으로 신창에서 최소, 가파도에서 최대로 나타났다. 모든 해역에서 연중 출현한 해조류는 감태(*Ecklonia cava*), 자루바다표고(*Peyssonnelia caulifera*), 낭과쩍(*Synarthrophyton chejuense*), 방황혹산호말(*Corallina aberrans*), 둘레혹산호말(*Corallina crassisima*)로 갈조류 1종, 홍조류 4종으로 총 5종이었다.

연도별 종조성을 보면, 2013년에 총 154종(녹조류 15종, 갈조류 28종, 홍조류 111종)의 해조류가 출현하였으며, 계절별로는 84-121종으로 추계에 최소, 춘계에 최대였고, 해역별로

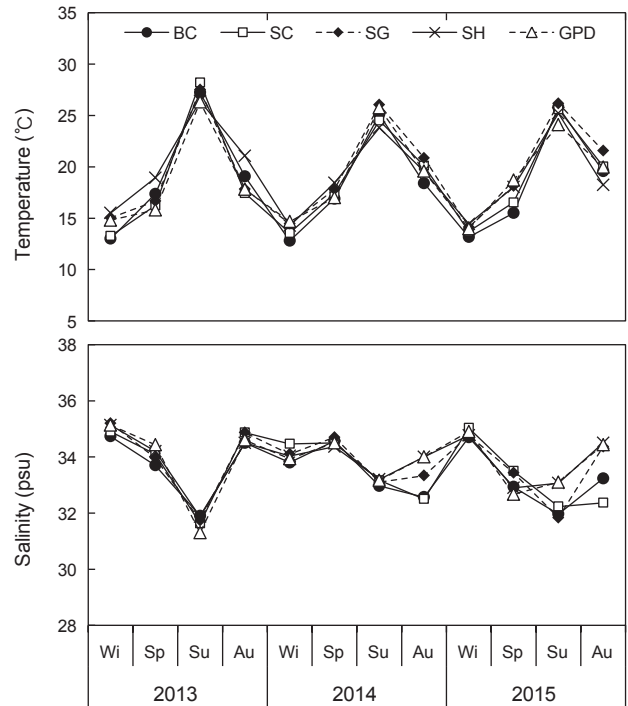


Fig. 2. Seasonal variations of temperature and salinity at five study sites in Jeju Island, Korea, from 2013 to 2015. BC, Bukchon; SC, Sinchnag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

는 71-109종으로 신창에서 최소, 가파도에서 최대였다(Table 2). 2013년에 5개 해역의 모든 계절에 출현한 종은 감태, 자루바다표고, 낭과쩍, 방황혹산호말, 둘레혹산호말, 붉은뼈까막살(*Grateloupia angusta*), 좁은붉은잎(*Callophyllis adhaerens*), 각시잇바디가지(*Herpochondria elegans*)로 8종이었다. 2014년에는 총 141종(녹조류 12종, 갈조류 24종, 홍조류 105종)이 출현하였으며, 계절별로는 72-114종으로 하계에 최소, 동계에 최대였고, 해역별로는 69-82종으로 신창에서 가장 적었고, 북촌에서 가장 많은 해조류가 출현하였다. 2014년의 연구기간 동안 5개 해역에서 모두 출현한 종은 녹조류인 갈색대마디말(*Cladophora wrightiana*), 갈조류인 감태, 홍조류인 자루바다표고, 낭과쩍, 넓은게발(*Amphiroa anceps*), 눈썹마디게발(*Amphiroa foliacea*), 방황혹산호말, 둘레혹산호말, 붉은뼈까막살, 참곱슬이(*Plocamium telfairiae*)로 총 10종이었다. 2015년에는 총 107종(녹조류 8종, 갈조류 19종, 홍조류 80종)의 해조류가 출현하였으며, 연간 계속 감소하였다. 계절별로는 51-82종으로 하계에 최소, 동계와 춘계에 최대 출현종수를 보였으며, 해역별로는 50-67종으로 2014년과 마찬가지로 신창에서 최소, 북촌에서 최대로 나타났다. 2015년 동안 모든 해역에서 출현한 해조류는 갈색대마디말, 감태, 자루바다표고, 낭과쩍, 넓은게발, 방황혹산호말, 둘레혹산호말, 참곱슬이로 8종이었다.

해역별 종조성을 보면, 북촌에서는 총 123종(녹조류 11종, 갈

Table 2. Annual variations in macroalgal species biomass (g wet wt./m<sup>2</sup>) at the five study sites in Jeju Island, Korea, from 2013 to 2015

	2013					2014					2015				
	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD
Chlorophyta															
<i>Collinsiella cava</i>	0.10														
<i>Monostroma nitidum</i>															
<i>Umbraulva japonica</i>	+	0.02	+	0.01											
<i>Ulva australis</i>			0.10	0.05	0.79					0.01					+
<i>Ulva lactuca</i>						0.06	0.09	0.01	0.02						
<i>Lychaete dotyana</i>	0.32	0.19	0.04	0.11	0.15	+	0.09			0.01			0.15	0.02	0.05
<i>Lychaete herpestica</i>		+	0.44	0.67	0.02	0.05	+	0.48	0.25					0.96	0.01
<i>Lychaete japonica</i>	0.65														
<i>Lychaete sakaii</i>										+					
<i>Cladophora hutchinsiae</i>										+					
<i>Cladophora wrightiana</i>	10.44	38.60	1.14	14.04	48.92	16.08	9.11	1.39	2.59	60.95	18.20	23.62	3.02	7.10	55.83
<i>Bryopsis hypnoides</i>			0.05												
<i>Codium arabicum</i>	13.56			0.72		7.17			0.97		2.87	0.25	0.24		
<i>Codium coactum</i>	175.91	79.06	3.50	2.30		102.48	122.89		1.45	4.50	71.59	0.83			
<i>Codium contractum</i>				0.69		2.67			0.20		16.78				
<i>Codium minus</i>			0.17	20.48	0.28			0.36	15.38		0.31	+	1.69	19.79	
<i>Derbesia marina</i>			+	0.03	+					+					
<i>Derbesia tenuissima</i>							0.03	0.06	0.11						
Pheophyta															
<i>Acinetospora crinita</i>															
<i>Chordaria flagelliformis</i>															0.07
<i>Colpomenia peregrina</i>	3.10	0.59	11.09	5.92	13.40	1.17	0.04	1.10	0.51		2.63	1.37	0.09	0.06	
<i>Colpomenia tuberculata</i>										0.32					
<i>Petalonia fascia</i>				+	+										
<i>Punctaria latifolia</i>				+	+										
<i>Sphacelaria californica</i>															0.01
<i>Halopteris filicina</i>	0.05		0.04		3.61	0.06				0.36	0.11				+
<i>Desmarestia dudresnayi</i>	0.43				3.10	0.89					1.54				
<i>Carpomitra costata</i>					0.77										0.11
<i>Undaria pinnatifida</i>	42.03	17.51	33.70	12.23	52.49	112.38	144.92	211.01	0.98	25.24	35.84	35.00	95.78		

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchnag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

Table 2. Continued

	2013					2014					2015				
	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD
<i>Ecklonia cava</i>	422.22	197.26	630.80	552.61	589.19	585.06	493.51	849.37	243.47	907.86	272.50	284.16	1010.23	709.70	663.70
<i>Ecklonia kurome</i>	7.73	65.90	35.55	45.98											
<i>Dictyopteris divaricata</i>									0.46	0.58					
<i>Dictyopteris prolifera</i>			0.12	2.93				1.89		0.22					
<i>Dictyopteris undulata</i>				1.44	10.86				0.22	0.15			3.67	2.54	0.01
<i>Dictyota coriacea</i>						2.26									
<i>Dictyota dichotoma</i>				1.20		+	0.10			0.18	0.02	2.60			0.02
<i>Dictyota friabilis</i>	0.01	+		0.02	0.04										
<i>Rugulopterix okamurae</i>	0.81	6.72	10.87	0.17	3.66	3.22	24.65	12.73	0.01	1.32	0.15	41.69	0.68	0.01	0.13
<i>Distromium decumbens</i>				2.46						0.09			0.13		0.59
<i>Padina arborescens</i>			1.05	4.95				3.00	0.05	0.52			0.87		6.01
<i>Padina gymnospora</i>															0.08
<i>Spatoglossum latum</i>				+	+			0.02							
<i>Spatoglossum solieri</i>		0.02	0.01	+	0.05					+					
<i>Sargassum confusum</i>				14.82											
<i>Sargassum coreanum</i>						1.57				1.57			0.26		
<i>Sargassum filicinum</i>			0.41	31.55						8.66					
<i>Sargassum horneri</i>			97.40	55.52		0.10	+	6.60		49.53	0.79		2.18		69.10
<i>Sargassum macrocarpum</i>	7.96		2.65	40.23			1.27			28.38		1.70	2.89		109.06
<i>Sargassum serratifolium</i>				23.64		11.31		2.19		49.49			2.49		12.49
<i>Sargassum yendoi</i>	29.82		35.63	21.28				11.45		48.55			44.37		74.43
<i>Sargassum</i> sp.	0.71			0.20		5.64		2.35		0.23			0.37		0.49
Rhodophyta															
<i>Erythrotrichia camea</i>				+	+										
<i>Colaconema codicola</i>							+								
<i>Grania efflorescens</i>		+		+	+		+								
<i>Helminthocladia australis</i>									0.06						
<i>Dichotomaria apiculata</i>															
<i>Dichotomaria falcata</i>	1.18	0.34	0.51	1.51	0.22	0.15	0.17	0.76	10.31		4.31	1.48	2.89	24.89	0.14
<i>Tricleocarpa cylindrica</i>			1.93					+					0.39		

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchmag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

Table 2. Continued

	2013					2014					2015				
	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD
<i>Scinaia flabellata</i>					0.04										
<i>Asparagopsis taxiformis</i>		+			1.79										
<i>Bonnemaisonia hamifera</i>	0.40				0.70										
<i>Acanthopeltis longiramulosa</i>	0.11		0.62				0.12			+			0.16	0.16	
<i>Gelidium elegans</i>			+	0.01					0.04	0.01					
<i>Gelidium yoshidae</i>	0.11		0.15	0.84	0.38	0.09	0.39	0.16	0.50	+	0.02		0.95	2.07	
<i>Gelidiophycus divaricatus</i>										+					
<i>Pterocladia capillacea</i>			0.01	0.03	+				0.11				0.05		
<i>Dudresnaya japonica</i>			0.13		+						0.28				
<i>Peyssonnelia boergesenii</i>					0.01										
<i>Peyssonnelia caulifera</i>	20.27	47.38	7.82	9.37	3.39	17.20	42.60	9.81	11.28	2.89	31.96	28.35	23.02	20.88	5.08
<i>Peyssonnelia dubyi</i>											0.16				
<i>Peyssonnelia orientalis</i>			0.01	0.06											
<i>Lithophyllum okamurae</i>	16.70	81.04	1.97	27.65	6.04	22.07	19.20	1.07	10.28		38.19	15.14	1.53	14.28	2.52
<i>Lithothamnion corallioides</i>		2.52					0.38					0.21			
<i>Synarthrophyton chejuense</i>	7.39	8.57	1.37	6.96	1.71	6.56	5.95	1.90	5.00	1.59	17.61	5.91	2.17	7.13	1.57
<i>Alatocladia modesta</i>	10.72	10.76	1.66	1.15	3.81	9.79	14.27			3.37	6.83	17.81		0.40	8.17
<i>Amphiroa anceps</i>	15.37	4.49	67.06	79.93	48.33	18.68	3.27	71.60	85.06	62.26	10.20	4.81	114.72	67.99	137.34
<i>Amphiroa beauvoisii</i>	1.62	0.48	7.79	10.26	1.64	3.29	1.77	4.49	3.45	0.43	14.64	0.49	0.16	2.31	1.63
<i>Amphiroa ephedrae</i>	2.03	0.04	7.65	3.48	21.19	1.04	0.99	5.07	0.74	13.58	2.79	0.31	21.76	0.84	6.58
<i>Amphiroa foliacea</i>	4.40	2.11	5.49	14.79	26.24	7.01	2.96	9.60	5.60	4.40	15.76	1.44	5.94	5.42	5.11
<i>Amphiroa galapagensis</i>	0.57			2.38		0.12									
<i>Amphiroa misakiensis</i>	1.45	0.91	4.82	8.93	5.06										
<i>Amphiroa pusilla</i>	0.26		+	0.13											
<i>Amphiroa zonalis</i>	0.59			0.07	2.42			1.22	0.37	0.03				0.08	
<i>Corallina aberrans</i>	105.19	98.97	98.59	90.29	74.65	70.63	126.19	77.93	35.78	83.84	34.38	104.33	54.91	52.26	43.96
<i>Corallina crassissima</i>	23.09	80.91	32.49	50.09	32.69	64.00	114.15	87.10	45.05	47.33	145.07	128.26	56.04	72.57	30.30
<i>Corallina confusa</i>	0.79	1.86		2.48	0.53		1.23	1.22	0.07	0.03	0.35		0.62	1.01	
<i>Corallina officinalis</i>	5.56			2.20	1.04				1.85	0.89				6.14	2.52
<i>Corallina pilulifera</i>	0.98		2.59	0.69	5.14		0.03	0.18		0.02					

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchnag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

Table 2. Continued

	2013						2014						2015					
	BC	SC	SG	SH	GPD		BC	SC	SG	SH	GPD		BC	SC	SG	SH	GPD	
<i>Ellislandia elongata</i>	6.46	5.03	1.88	3.80	4.43		7.48	35.89	5.56	3.02	7.72		14.00	20.13	5.62	6.86	5.51	
<i>Hydroolithon gardineri</i>						3.25												
<i>Jania arborescens</i>			0.28	0.71	3.04	0.30	0.07	0.32	0.21	0.10	0.55		0.01	0.08	1.08	0.12	0.47	
<i>Jania rubens</i>											0.62						0.18	
<i>Jania unguolata</i>						0.03												
<i>Jania yenoshimensis</i>			0.53	0.24	0.83		0.02		0.10	0.01	0.19					0.05	0.03	
<i>Grateloupia angusta</i>	27.52	52.99	19.05	50.15	3.03	0.01	6.98	38.59	20.54	58.72	5.60	18.31	19.49	18.39	73.84	4.86		
<i>Grateloupia asiatica</i>																		
<i>Grateloupia imbricata</i>	+		0.07					+				0.50			0.01			
<i>Grateloupia kurogii</i>			0.81					0.06										
<i>Grateloupia turuturu</i>			+	+														
<i>Gloiopeltis tenax</i>	+	+	0.01	0.01	+				+	0.01					+	+		
<i>Callophyllis adhaerens</i>	1.14	0.11	2.80	0.30	0.70		0.41	0.07	0.41	0.19	0.02	0.33	+	0.35	0.13	0.03		
<i>Callophyllis adnata</i>	0.06	0.02	0.07	0.01	+		0.03	0.37	0.69	0.05	+	0.04	0.02	0.56	0.03	+		
<i>Callophyllis crispata</i>	0.30		0.06	0.01	0.45		0.17	0.01	0.06	+	0.01	0.49	0.01	0.01	0.01	+		
<i>Callophyllis japonica</i>						0.25												
<i>Polycoelia harveyana</i>														0.18				
<i>Schizymenia dubyi</i>							0.86				0.06	0.45						
<i>Predaea bisporifera</i>	2.62	0.16	0.12	0.02	6.24		0.65		0.22									
<i>Predaea tokidae</i>				+			0.01											
<i>Portieria japonica</i>	2.38	0.14		0.08			0.23			0.11		1.31	0.52		+			
<i>Meristotheca papulosa</i>			47.72		2.99				1.26	0.01				0.62	0.01			
<i>Plocamium cartilagineum</i>	0.01	0.05	0.35	4.77					2.42						2.04			
<i>Plocamium telfairiae</i>	6.80	6.32	11.05	10.54	237.42		8.88	7.84	5.90	1.96	125.29	2.22	2.63	7.08	1.33	124.03		
<i>Hypnea charoides</i>																0.01		
<i>Phacelocarpus japonicus</i>		1.27		0.12				0.25										
<i>Gracilaria cuneifolia</i>	0.38				0.02		0.03	0.03		0.02		0.06				+		
<i>Gracilaria textorii</i>					0.06		0.10			0.12		0.03						
<i>Chondrus ocellatus</i>						0.02												
<i>Halichrysis micans</i>	0.38	0.14	0.03	0.38	0.10		0.02	4.30	4.55	0.73		0.13	0.04	0.05	0.04			

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchmag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

Table 2. Continued

	2013					2014					2015				
	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD
<i>Gloiocladia iyoensis</i>															
<i>Halopeltis adnata</i>	0.01	+		+				+							
<i>Champia compressa</i>	0.15	0.02	0.04	+		0.83	0.02	0.01			2.12				
<i>Champia expansa</i>			2.10	4.11	0.84			2.33	7.06		0.10		1.62	1.85	
<i>Champia parvula</i>	0.01	+	0.03	0.07	0.01	+		0.12		0.01			+		
<i>Gloiocladia leptophylla</i>		0.04	0.04	0.02	0.30	0.18		0.06	0.04	0.03	0.09		0.01	+	0.02
<i>Gloiocladia spinulosa</i>			0.10	0.02	0.21				0.04					0.05	
<i>Anotrichium tenue</i>							+								
<i>Anotrichium yagii</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+					
<i>Antithamnion pectinatum</i>						+			+						
<i>Antithamnion densum</i>	+					+		+	+					+	
<i>Antithamnion nipponicum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	
<i>Antithamnionella glandifera</i>			+	+		+	0.11	+			+		+		
<i>Antithamnionella spirographidis</i>															+
<i>Baliella subcorticata</i>								+		+					
<i>Aglaothamnion callophylicicola</i>	+	+	+	+	+	+									
<i>Callithamniella pacifica</i>	+		+	+	+			+							
<i>Callithamnion pinnatum</i>			+				+	+	+	+			+	+	
<i>Ceramium borneense</i>									+						
<i>Ceramium cimbrium</i>	+	+	+		+	+	+	+		+	0.01			+	
<i>Ceramium codii</i>	+	+				+	+			+			+		
<i>Ceramium kondoi</i>	+		+	+	+										
<i>Ceramium tenerimum</i>	+	0.24	+	+	+			+							
<i>Gayliella flaccida</i>	0.01	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+
<i>Griffithsia japonica</i>		+	+	0.01	+	+	+	+	0.01	+		+	+	+	+
<i>Griffithsia venusta</i>	+	0.05	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+	+
<i>Herpochondria dentata</i>	+		+	+	0.05				+						
<i>Herpochondria elegans</i>	0.01	+	0.01	0.01	+	0.01	+	0.01	+	+	+	+	+	+	+
<i>Herpochondria pygmaea</i>	0.01			+											+
<i>Pterothamnion yezoense</i>	+							+							

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchmag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.



Table 2. Continued

	2013						2014						2015					
	BC	SC	SG	SH	GPD		BC	SC	SG	SH	GPD		BC	SC	SG	SH	GPD	
<i>Pleonosporium venustissimum</i>	1.34																	
<i>Spongoclonium yagii</i>	+		+	+	+				+	+								
<i>Plumariella yoshikawae</i>	+		+	+	+			+					0.03		+	+		
<i>Wrangelia tanegana</i>				+	+													
<i>Acrosorium flabellatum</i>	0.02		0.01		0.03		0.02	+	+	+	+		0.13	0.42		+	0.01	
<i>Acrosorium polyneurum</i>	0.01	0.01	+	+	+		+	0.34	+			+			+			
<i>Acrosorium ciliolatum</i>	+	0.02					+	0.08	+			0.05	0.01				0.12	
<i>Acrosorium yendoi</i>	0.08	0.08	0.01	+	+		0.04	0.08	+	+	+							
<i>Acrosorium</i> sp.	0.01	+	+		+		+			+								
<i>Cryptopleura ramosa</i>	0.26	+	+	+	0.03		0.10	0.02	+	0.15		0.06	0.04				+	
<i>Erythrogllossum minimum</i>	+		+	+												+		
<i>Wynneophycus geminatus</i>	+	+	+	+			+	+	+									
<i>Martensia albida</i>												0.96						
<i>Martensia australis</i>							0.71						7.97					
<i>Martensia elegans</i>	0.96																	
<i>Martensia fragilis</i>																		
<i>Phycodrys australasica</i>	+	+	+	+	+		+	0.01	+	+	+				+	+	+	
<i>Dasya villosa</i>																		
<i>Dasydiphonia japonica</i>	+	+										1.54						
<i>Heterosiphonia pulchra</i>	0.06	+	0.01	+	0.02		0.01	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
<i>Artissonula regularis</i>	+	0.02			0.01		0.19	0.58				+						+
<i>Herposiphonia fissidentoides</i>							+											
<i>Herposiphonia nuda</i>				+														
<i>Herposiphonia parca</i>	0.01		+	+	+				+									
<i>Herposiphonia subdisticha</i>			0.02	+	0.03				+	+	+							+
<i>Chondria expansa</i>	+														+			
<i>Laurencia okamurae</i>					0.02													
<i>Laurencia pinnata</i>	0.02	0.02	0.07	0.07	0.05		0.01	0.03	0.02	0.06	0.01	0.21	0.66				+	
<i>Laurencia</i> sp.					+		+	+	0.05	0.06								
<i>Melanothamnus decumbens</i>	+	+	0.01	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchmag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

Table 2. Continued

	2013						2014						2015					
	BC	SC	SG	SH	GPD		BC	SC	SG	SH	GPD		BC	SC	SG	SH	GPD	
<i>Melanothamnus porrectus</i>																		
<i>Melanothamnus savatieri</i>	+	+	+	+														
<i>Melanothamnus simplex</i>		+																
<i>Melanothamnus sphaerocarpus</i>																		
<i>Polysiphonia atlantica</i>	+	+	+	+	+													
<i>Polysiphonia morrowii</i>																		
<i>Symphocladia marchantioides</i>	0.01			0.05		0.01												
<i>Symphocladia pumila</i>	0.02	+	+	0.04	0.01													
Chlorophyta	7	5	9	11	7	7	6	5	8	6	6	6	6	5	5	4	3	+
Pheophyta	11	9	14	11	26	12	7	11	8	19	11	11	6	6	13	4	15	
Rhodophyta	76	57	75	78	76	63	56	64	64	51	50	39	50	39	48	50	37	
Total	94	71	98	100	109	82	69	80	80	76	67	50	67	50	66	58	55	

+, present; BC, Bukchon; SC, Sinchmag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

조류 16종, 홍조류 96종)의 해조류가 출현하였으며, 2013년에 94종, 2014년에 82종, 2015년에 67종으로 점차 감소하는 경향을 보였고, 계절별로는 60-88종으로 추계에 최소, 춘계에 최대였다. 북촌에서 본 연구기간 동안 모두 출현한 해조류는 갈색대마디말, 누운청각(*Codium coactum*), 감태, 자루바다표고, 흑돌잎(*Lithophyllum okamurae*), 낭과적, 넓은게발, 방황흑산호말, 둘레흑산호말, 붉은뼈까막살로 총 10종이었다. 신창에서는 본 연구기간 동안 97종(녹조류 9종, 갈조류 12종, 홍조류 76종)의 해조류가 출현하였고, 연간 51-71종으로 점차 감소하는 추세였으며, 계절별로는 46-72종으로 추계에 최소, 동계에 최대 출현종수를 보였다. 신창에서 모든 계절에 출현한 해조류는 갈색대마디말, 감태, 자루바다표고, 흑돌잎, 낭과적, 방황흑산호말, 둘레흑산호말, 붉은뼈까막살, 참곱슬이로 9종이었고, 잔가지적(*Lithothamnion corallioides*)은 신창에서만 매년 출현하였다. 사계에서는 총 122종(녹조류 13종, 갈조류 20종, 홍조류 89종)의 해조류가 출현하였으며, 연도별로는 매년 감소하였고(2013년 98종, 2014년 80종, 2015년 66종), 계절별로는 63-98종의 범위로 하계와 추계에 최소, 동계에 최대였다. 사계에서 본 연구기간 동안 모두 출현한 종은 감태, 자루바다표고, 낭과적, 넓은게발, 에페드라게발(*Amphiroa ephedraea*), 눈썹마디게발, 방황흑산호말, 둘레흑산호말, 긴가지산호말(*Ellisolandia elongata*), 붉은뼈까막살, 좁은붉은잎, 참곱슬이로 총 12종이었으며, 민가락말(*Tricleocarpa cylindrica*)은 사계에서만 매년 출현하였다. 신홍에서는 총 122종(녹조류 13종, 갈조류 14종, 홍조류 95종)이 출현하였고, 연간 출현종수는 58-100종으로 점차 감소하는 경향을 보였으며, 계절별로는 57-87종으로 하계에 최소, 동계에 최대였다. 신홍해역에서 모든 연구기간 동안 출현한 종은 갈색대마디말, 감태, 자루바다표고, 흑돌잎, 낭과적, 넓은게발, 눈썹마디게발, 방황흑산호말, 둘레흑산호말, 붉은뼈까막살, 참곱슬이로 총 11종이었다. 가파도에서는 총 125종(녹조류 9종, 갈조류 31종, 홍조류 85종)의 해조류가 출현하였고, 다른 해역에 비해 갈조류의 비율(24.80%)이 높게 나타났다. 출현종수의 연간 변화는 55-109종으로 다른 해역과 마찬가지로 매년 감소하고 있으며, 계절별로는 58-91종으로 추계에 최소, 동계에 최대를 보였다. 가파도에서 모든 연구기간 동안 출현한 해조류는 갈색대마디말, 감태, 팽생이모자반(*Sargassum horneri*), 낭과적, 넓은게발, 에페드라게발, 방황흑산호말, 둘레흑산호말, 긴가지산호말, 참곱슬이로 총 10종이었으며, 붉은애기산호말(*Jania rubens*)은 가파도에서 매년 출현하였다.

유사도 분석

해조류 출현종의 유·무로 유사도 분석을 실시한 결과, 통계학적으로 유의차를 보이는 3개 그룹 즉, 그룹 A (사계, 신홍), 그룹 B (북촌, 신창), 그룹 C (가파도)로 구분되었다(Fig. 3). 그룹 A와 가파도의 유사도는 74.90%로 유의차를 나타냈으며(SIM-PROF test, P<0.05), 제주 북·서부에 위치한 북촌과 신창은 다

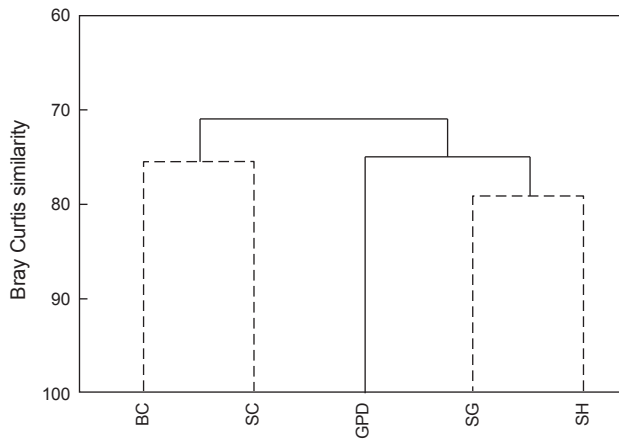


Fig. 3. Results of cluster analysis performed on Bray Curtis similarity from standardized species presence/absence transformed data. The dotted lined indicate no significant difference among five sites (SIMPROF test). BC, Bukchon; SC, Sinchang; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

른 그룹과 70.83%의 가장 낮은 유사도를 보여 해조류 종조성이 지역적인 차이를 보이는 것을 확인하였다.

### 생물량

제주도 5개 해역의 조하대 해조류 연평균 생물량은 1,125.10 g wet wt./m<sup>2</sup>이며, 분류군별로는 녹조류 65.76 g/m<sup>2</sup> (5.85%), 갈조류 704.23 g/m<sup>2</sup> (65.59%), 홍조류가 355.11 g/m<sup>2</sup> (31.56%)으로 갈조류의 생물량이 최대였다. 2013년부터 2015년까지의 평균 생물량을 해역별로 비교하면, 899.77-1,452.00 g/m<sup>2</sup>으로 신흥에서 최소, 가파도에서 최대였다(Fig. 4).

연도별로 비교해보면, 2013년에 출현한 해조류의 연평균 생물량은 1,092.85 g/m<sup>2</sup>였고, 분류군별로 녹조류 82.71 g/m<sup>2</sup> (7.57%), 갈조류 631.36 g/m<sup>2</sup> (57.77%), 홍조류 378.78 g/m<sup>2</sup> (34.66%)로 갈조류의 생물량이 가장 높았으며, 이는 감태의 생물량이 많았기 때문이었다. 계절별로는 658.66-1,456.38 g/m<sup>2</sup>으로 동계에 최소, 춘계에 최대였고, 해역별로는 812.94-1,429.45 g/m<sup>2</sup>으로 신흥에서 최소였고 가파도에서 최대였다(Fig. 4A). 2014년에는 1,169.66 g/m<sup>2</sup>의 연평균 생물량을 보였고, 녹조류 69.89 g/m<sup>2</sup> (5.98%), 갈조류 771.70 g/m<sup>2</sup> (65.98%), 홍조류 328.06 g/m<sup>2</sup> (28.05%)로 2013년과 마찬가지로 갈조류의 생물량이 가장 높게 나타났다. 계절별로는 780.32-1,550.71 g/m<sup>2</sup>의 범위로 추계에 최소, 춘계에 최대였고, 해역별로는 554.49-1,551.89 g/m<sup>2</sup>으로 신흥에서 최소, 가파도에서 최대를 보였다. 2015년에는 1,112.80 g/m<sup>2</sup>으로 연간 평균 생물량의 차이는 없었으며, 분류군별로는 녹조류 44.69 g/m<sup>2</sup> (4.02%), 갈조류 709.61 g/m<sup>2</sup> (63.77%), 홍조류 358.49 g/m<sup>2</sup> (32.22%)로 다른 연구기간과 마찬가지로 갈조류의 생물량이 가장 높았다. 계절별로는 700.03-1,566.69 g/m<sup>2</sup>으로 동계에 가장 낮았고, 춘계

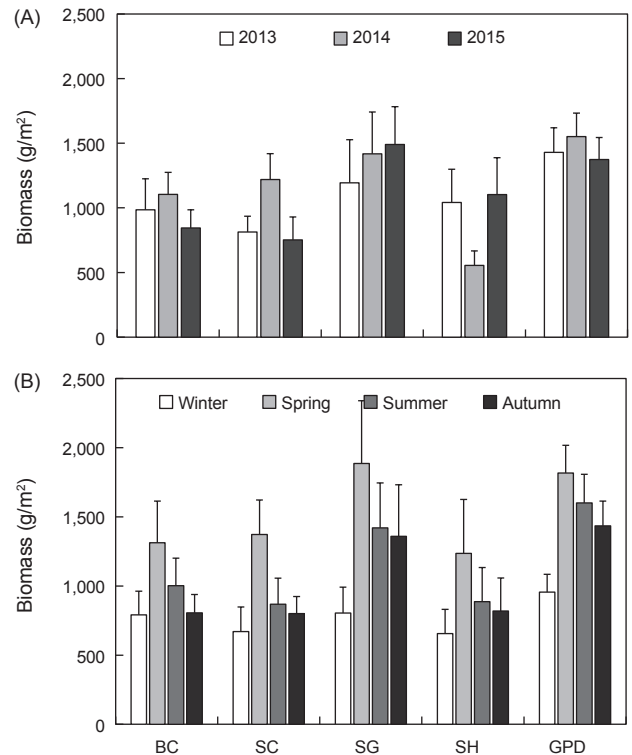


Fig. 4. Annual (A) and seasonal (B) variations in average seaweed biomass (g wet wt./m<sup>2</sup>) at five study sites in Jeju Island, Korea, from 2013 to 2015. Vertical bars represent standard errors. BC, Bukchon; SC, Sinchnag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

에 가장 높은 값을 보였으며, 해역별로는 752.36-1,489.73 g/m<sup>2</sup>으로 신흥에서 최소, 사계에서 최대 생물량을 보였다.

해역별로 비교해보면, 북촌에서는 계절별로 791.71-1,312.38 g/m<sup>2</sup> (연평균 978.09 g/m<sup>2</sup>)로 동계에 최소, 춘계에 최대였고(Fig. 4B), 수심별로는 391.55-1,597.05 g/m<sup>2</sup>으로 수심 10 m에서 가장 높았다. 신흥에서는 연평균 928.16 g/m<sup>2</sup>의 생물량으로 나타났고, 계절별로는 671.17-1,372.06 g/m<sup>2</sup>으로 북촌과 마찬가지로 동계에 최소였고 춘계에 최대였으며, 수심별로는 642.90-1,460.03 g/m<sup>2</sup>으로 수심 5 m에서 최대였다. 사계에서는 연평균 생물량이 1,367.50 g/m<sup>2</sup>이었고, 연간 1,194.41-1,489.73 g/m<sup>2</sup>으로 매년 증가하는 경향을 보였으며, 이는 감태의 생물량 증가에 기인하였다. 계절별로는 804.37-1,886.16 g/m<sup>2</sup>으로 다른 두 해역과 마찬가지로 동계에 최소, 춘계에 최대였으며, 수심별로는 351.25-1,966.64 g/m<sup>2</sup>으로 수심 5 m에서 최대 생물량을 보였다. 신흥에서 출현한 해조류의 연평균 생물량은 899.77 g/m<sup>2</sup>이었고, 계절별로는 655.91-1,235.75 g/m<sup>2</sup>으로 동계에 최소, 춘계에 최대였고, 수심별로는 130.72-1,360.89 g/m<sup>2</sup>으로 수심 10 m에서 가장 높았다. 가파도에서는 연평균 생물량이 1,452.00 g/m<sup>2</sup>이었고, 계절별로는 955.65-1,816.62 g/m<sup>2</sup>으로 동계에 최소, 춘계에 최대로 모든 해역에서 같은 계절 패턴

을 보였으며, 수심별로는 1,074.11-1,742.77 g/m<sup>2</sup>으로 수심 20 m에서 최소, 5 m에서 최대였다.

**우점종 및 수직분포**

본 연구기간 동안 제주 해역에 출현한 해조류 중에서 평균 생물량이 가장 높은 종은 감태(560.78 g/m<sup>2</sup>, 49.84%)였으며, 그 다음은 방황혹산호말(76.79 g/m<sup>2</sup>, 6.83%), 둘레혹산호말(67.28 g/m<sup>2</sup>, 5.98%) 순으로 나타나 감태 1종의 생물량이 높은 비율을 차지하였다. 북촌(978.09 g/m<sup>2</sup>)에서는 감태(426.59 g/m<sup>2</sup>, 43.61%)와 누운칭각(116.66 g/m<sup>2</sup>, 11.93%)이 우점하였으며, 둘레혹산호말·미역·방황혹산호말(5 m)-감태·누운칭각(10 m)-감태·자루바다표고(20 m)가 각 수심별 우점종으로 확인되었다(Table 3). 신창(928.16 g/m<sup>2</sup>)에서는 감태(324.98 g/m<sup>2</sup>, 35.01%), 방황혹산호말(109.83 g/m<sup>2</sup>, 11.83%), 둘레혹산호말(107.78 g/m<sup>2</sup>, 11.61%)이 우점하였고, 수심별로는 감태가 전 수심에서, 누운칭각이 수심 10 m에서, 자루바다표고가 수심 20 m에서 우점하였다. 사계(1,367.50 g/m<sup>2</sup>)에서는 감태 1종이 전체 생물량의 60.70%를 차지하면서 가장 우점하는 종으로 확인되었고, 수심별로는 감태·미역(5 m)-감태·넓은게발(10 m) - 감태·넓은게발·붉은뼈까막살·자루바다표고(20 m)가 우점종으로 나타났다. 신홍(899.77 g/m<sup>2</sup>)에서도 사계와 마찬가지로 감태 1종의 생물량이 높은 비율(55.78%)을 차지하며 우점하였다. 우점종의 수심별 분포를 보면, 감태는 5-10 m에서 우점하였고, 넓은게발은 10-20 m에서, 자루바다표고, 붉은뼈까막살, 넓은사슬

풀은 수심 20 m에서 우점하였다. 가파도(1,452.00 g/m<sup>2</sup>)에서는 감태(780.26 g/m<sup>2</sup>, 49.60%)와 참곱슬이(162.25 g/m<sup>2</sup>, 11.17%)가 전체 생물량의 10% 이상을 차지하였고, 수심별로는 감태가 전 수심에서, 참곱슬이는 수심 5 m에서, 넓은게발이 수심 20 m에서 우점하였다.

**군집지수**

전체 생물량에 대한 제 1, 2 우점종 생물량 합 의 비로 산출된 우점도지수(DI)는 0.36-0.76으로 2013년의 신창에서 최소, 2015년의 사계에서 최대로 확인되었다(Table 4). 연도별로는 0.52-0.61로 2013년에는 감태와 방황혹산호말의 생물량이 전체 생물량의 52.34%를 차지하여 최소였고, 2014년에 감태와 미역의 생물량이 전체 생물량의 61.11%를 차지하여 최대로 나타났다. 해역별로는 0.47-0.69로 신창에서 최소, 사계에서 최대였다. 풍도지수(R)는 7.40-14.87의 범위로 2015년 신창에서 최소, 2013년 가파도에서 최대였으며, 연도별로는 15.11-22.01로 출현종수가 가장 많은 2013년에 최대로 나타났고, 매년 감소하였다. 해역별로는 14.05-17.86으로 신창에서 최소, 북촌에서 최대값을 보였다. 균등도지수(J')는 0.33-0.58로 2015년의 사계와 북촌에서 각각 최소와 최대를 나타냈고, 연도별로는 0.41-0.48로 2014년에 최소, 2013년에 최대였으며, 해역별로는 0.35-0.50의 범위로 사계에서 최소, 신창에서 최대를 보여 우점도지수와 반대의 결과를 확인하였다. 출현종수와 생물량의 분포인 균등도지수에 의해 결정되는 다양도지수(H') 또한, 1.38-2.42

Table 3. Vertical distribution of dominant seaweed based on mean biomass (g wet wt./m<sup>2</sup>) at five study sites in Jeju Island, Korea, from 2013 to 2015

	5 m	10 m	20 m
Bukchon	<i>Corallina crassissima</i> (203.53)	<i>Ecklonia cava</i> (919.78)	<i>Ecklonia cava</i> (271.74)
	<i>Undaria pinnatifida</i> (181.32)	<i>Codium coactum</i> (347.03)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (53.22)
	<i>Corallina aberrans</i> (154.58)		
Sinchang	<i>Ecklonia cava</i> (349.19)	<i>Codium coactum</i> (201.29)	<i>Ecklonia cava</i> (442.79)
	<i>Corallina aberrans</i> (294.19)	<i>Ecklonia cava</i> (182.95)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (113.10)
	<i>Corallina crassissima</i> (239.04)	<i>Corallina crassissima</i> (81.40)	
	<i>Undaria pinnatifida</i> (197.44)		
Sagye	<i>Ecklonia cava</i> (1,098.75)	<i>Ecklonia cava</i> (1,211.78)	<i>Ecklonia cava</i> (179.86)
	<i>Undaria pinnatifida</i> (330.72)	<i>Amphiroa anceps</i> (196.48)	<i>Amphiroa anceps</i> (40.39)
			<i>Grateloupia angusta</i> (37.86)
			<i>Peyssonnelia caulifera</i> (36.42)
Sinheung	<i>Ecklonia cava</i> (750.28)	<i>Ecklonia cava</i> (755.47)	<i>Amphiroa anceps</i> (55.43)
		<i>Amphiroa anceps</i> (146.70)	<i>Peyssonnelia caulifera</i> (32.35)
			<i>Grateloupia angusta</i> (15.85)
			<i>Champia expansa</i> (13.02)
Gapado	<i>Ecklonia cava</i> (791.46)	<i>Ecklonia cava</i> (800.63)	<i>Ecklonia cava</i> (568.67)
	<i>Plocamium telfairiae</i> (261.58)		<i>Amphiroa anceps</i> (116.16)

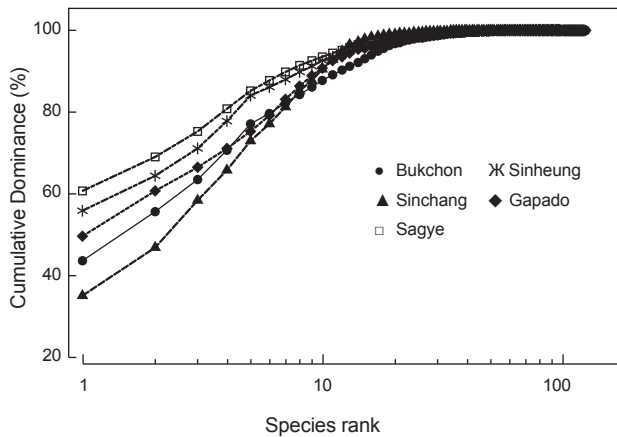


Fig. 5. K-dominance curves (x-axis logged) for mean biomass at five study sites in Jeju Island, Korea.

의 범위로 나타나 2015년의 사계와 북촌에서 각각 최소와 최대였으며, 연도별(2.01-2.44), 해역별(1.69-2.28)로도 균등도지수와 같은 결과를 보였다.

해역별로 출현한 종의 연평균 생물량을 K-dominance 곡선으로 비교하면, 사계에서는 우점종 2종(감태, 미역)의 생물량이 전체 생물량의 70% 이하를 차지하였고, 북촌에서는 우점종 4종(감태, 누운청각, 둘레혹산호말, 방황혹산호말)이, 신창에서는 감태, 방황혹산호말, 둘레혹산호말, 누운청각, 미역(*Undaria pinnatifida*) 5종이, 신흥에서는 3종(감태, 넓은게발, 붉은뼈까막살), 가파도에서는 4종(감태, 참곱슬이, 넓은게발, 방황혹산호말)의 생물량이 전체 생물량의 70% 이상을 차지함으로써 종 다양성은 사계, 신흥, 북촌, 가파도, 신창 순으로 신창에서 가장 높게 나타났다(Fig. 5).

## 고 찰

제주 해역은 다양한 수괴들(대마난류수, 중국대륙연안수, 황해저층냉수, 한국남해연안수 등)의 영향으로 복잡한 해양환경을 가지며(Yang et al., 2007), 특히 쿠로시오 해류에서 분기되어 동중국해에서 북상하는 대마난류수의 직접적인 영향으로

인해 다양한 열대 및 아열대성 생물들이 서식하고 있어 다른 해역에 비해 종 다양성이 높은 특성을 보인다(Ko et al., 2011; Kim et al., 2013). 본 연구에서 해조류는 총 186종(녹조 18종, 갈조 33종, 홍조 135종)이 출현하였으며, 이는 제주 8개 해역의 조하대에서 출현한 169종(Lee et al., 1998), 삼양해역의 62종(Yoo, 2003), 숲섬과 성산포의 43종(Oak et al., 2004), 문섬의 46종(Ko et al., 2008), 제주 동·서·남·북 4개 해역의 71종(Kim et al., 2013), 제주 남부해역의 87종(Kang et al., 2015)에 비해 높게 나타났다. 제주 부속 섬에 서식하는 해조류는 가파도에서 125종이 출현하였고(본 연구), 추자도 162종(Kim et al., 2008), 우도 262종(Kang et al., 2011), 마라도 144종(Kang and Kim, 2012)이 출현하여 본 연구의 출현종수가 낮게 나타났으나 이는 선행 연구와는 다르게 조하대에 서식하는 종만 채집되어 차이가 나타난 것으로 판단된다. 본 연구에서 출현한 해조류의 연평균 생물량은 1,125.10 g wet wt./m<sup>2</sup>이었으며, 제주 연안의 4개 해역(북촌, 신창, 사계, 신흥)에서는 1,043.38 g/m<sup>2</sup>, 가파도에서는 1,452.00 g/m<sup>2</sup>로 가파도에서 생물량이 높게 나타났다. Kang et al. (2015)은 제주 남부해역(1,451.9 g/m<sup>2</sup>)보다 지귀도(3,222.5 g/m<sup>2</sup>)에서 생물량이 2배 이상 높게 나타났음을 보고하였고, 이전의 연구에서도 제주 본섬의 4개 해역에서 991.84 g/m<sup>2</sup> (Kim et al., 2013)의 해조류 생물량을 보인데 반해 주변 도서인 문섬(2,784 g/m<sup>2</sup>; Ko et al., 2008), 우도(2,934.6 g/m<sup>2</sup>; Kang et al., 2011), 마라도(2,932.3 g/m<sup>2</sup>; Kang and Kim, 2012)에서 출현하는 해조류의 생물량이 현저히 높게 나타났다. 이처럼 제주 본섬의 해조류 출현종수 및 생물량이 제주 주변 도서에 비해 낮게 나타나는 것은 다양한 인간 활동으로 인한 결과(부영양화, 생태계 교란, 양식장에서 유입되는 유기물 등) 때문인 것으로 판단되며, 최근에는 제주 주변 도서에 관광객 및 해양레저(SCUBA diving 등) 이용객들이 점차 증가됨에 따라 해양오염으로 인한 해조군집의 변화가 예상되어 제주 연안 뿐만 아니라 주변 도서에 서식하고 있는 해조 자원의 관리를 위해 지속적인 모니터링 연구가 요구된다.

제주 연안의 조하대 해조군집은 대형 갈조류 중에서도 감태와 모자반류가 우점하고 있으며(Ko et al., 2008; Kim et al., 2013), 홍조류인 유·무절산호조류가 암반의 상당부분을 점유하며 생육하고 있다고 보고되었다(Oak et al., 2004; Kim et al., 2015).

Table 4. Various community indices of macroalgal flora for mean biomass (g wet wt./m<sup>2</sup>) at five study sites in Jeju Island, Korea, from 2013 to 2015

	2013					2014					2015				
	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD	BC	SC	SG	SH	GPD
Dominance index (DI)	0.61	0.36	0.61	0.62	0.53	0.63	0.52	0.75	0.59	0.67	0.49	0.55	0.76	0.71	0.58
Richness index (R)	13.64	10.45	13.69	14.25	14.87	11.56	9.57	10.89	12.50	10.21	9.79	7.40	8.90	8.14	7.47
Evenness index (J')	0.47	0.56	0.43	0.42	0.50	0.42	0.48	0.35	0.45	0.40	0.58	0.53	0.33	0.37	0.48
Diversity index (H')	2.12	2.40	1.95	1.95	2.34	1.87	2.03	1.53	1.97	1.74	2.42	2.09	1.38	1.49	1.91

BC, Bukchon; SC, Sinchnag; SG, Sagye; SH, Sinheung; GPD, Gapado.

본 연구에서 제주 5개 해역의 연평균 생물량을 근거로 한 최우점종은 약 50%의 점유율을 보인 감태(560.78 g/m<sup>2</sup>)로 나타났으며, 그 다음으로는 방황혹산호말, 돌레혹산호말로 산호조류가 우점하여 이전의 연구 결과와 일치하였다. 해조류의 수직분포는 건조에 대한 내성, 빛의 노출, 중간 경쟁 등 다양한 환경요인에 의해 결정된다(Dring, 1982). 특히, 조하대 생물상은 빛의 증감을 수반하는 수심에 의해 영향을 받는다고 알려져 있다(Neushul, 1967). 본 연구에서도 수심별 우점종의 차이를 보였으며, 감태와 산호조류는 전 수심에서 우점하였고, 누운청각은 수심 10 m에서, 수심 20 m에서는 조하대의 그늘진 암반과 같은 약한 광에서 생육하는 것으로 알려진 자루바다표고(가)가 우점하여 Kim et al. (2013)의 결과와 일치하였다.

수온은 해조류의 분포 및 군집구조를 결정하는 다양한 환경요인 중 하나이며(Fulton et al., 2014), 수온의 증가로 인해 내열종이 증가하고 종 다양성이 감소한다고 알려져 있다(Breeman and Parkker, 1994; Carbollo et al., 2002). 최근 기후변화로 인해 제주도 연안의 표층 수온은 지난 86년간(1924-2009년) 약 1.94℃ 상승하였으며, 이는 전 세계 평균 수온의 상승 정도인 0.67℃보다 훨씬 높게 나타난 것으로 제주도가 아열대 해역으로 빠르게 변하고 있다는 것을 보여주고 있다(Belkin, 2009; Suh et al., 2011). 제주 동부에 위치한 우도에서는 24년 전에 냉수성 해조류인 매생이(*Capsosiphon fulvescens*), 쇠꼬리산말(*Desmarestia viridis*), 석목(*Campylaeophora hypnaeoides*), 참국수나물(*Nemalion vermiculare*)이 출현했으나(Lee and Ko, 1991) 2010년에는 출현하지 않았다고 보고되었고(Kang et al., 2011), 남방계 해조류의 출현율이 약 50년 전에는 10%였으나(Kang, 1966) 최근 연구에서는 30-38%로 아열대성 해조류가 점차 증가하고 있다(Kang et al., 2011; Kim et al., 2013). 본 연구에서는 아열대성 남방계 해조류인 대마디붙이(*Cladophoropsis javanica*)와 얇은잎바위주걱(*Gloiocladia leptophylla*)이 5개 해역 모두에서 출현하였고, 엔도모자반(*Sargassum yendoi*)은 사계와 가파도뿐만 아니라 제주 북부에 위치한 북촌에서도 출현하여 제주 전역에서 아열대성 해조류가 출현하고 있음을 확인하였다. 하지만, 붉은애기산호말은 가파도에서만, 민가락말은 사계에서만 출현하였으며, 주름뼈대그물말(*Dictyopteris undulata*), 갈래곰보(*Meristotheca papulosa*), 갈래잎바위주걱(*Gloiocladia spinulosa*), 두줄거미줄(*Herposiphonia subdisticha*)은 사계, 가파도, 신흥 측, 상대적으로 수온이 높게 나타난 제주 남·동부 해역(평균 19.4℃)에서 출현하여 북·서부 해역(평균 18.8℃)에 비해 남방계 해조류의 출현율이 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 수온 변화만으로 이와 같은 해조상의 변화를 해석하는 것은 무리가 있으나, 수온이 해조류 생태에 영향을 주는 중요한 요인인 만큼 제주 연안에서도 상대적으로 수온이 높은 남·동부 해역에서 해조상의 아열대화가 더 빨리 진행되고 있다고 판단된다. 앞으로 기후변화로 인해 지속될 수온 상승에 따른 해조류 군집구조의 변화가 예견되며, 이에 따라 남방

계 해조류의 탐색 및 해조 자원의 보존, 관리방안 수립을 위해 장기적인 모니터링 연구가 요구된다.

결론적으로 본 연구가 수행된 제주 5개 해역에서 서식하는 해조류는 총 186종이며, 가파도에서 출현종수가 가장 많았고, 해조류의 연평균 생물량은 1,125.10 g wet wt./m<sup>2</sup>이었으며, 가파도에서 1,452.00 g/m<sup>2</sup>으로 가장 높게 나타났다. 5개 해역에서 생물량이 가장 높게 나타난 감태가 제주도 연안의 대표 주요종이라 할 수 있으며, 그 다음으로는 방황혹산호말, 돌레혹산호말 등 산호조류가 우점하였다. 본 연구는 제주 연안과 부속섬인 가파도 해역을 대상으로 하여 동일 해역에서 3개년의 해조상 및 해조 군집을 모니터링하였으며, 향후 기후변화에 따른 해조류 생물상 변화 연구의 중요한 기초 자료로써 활용될 것이다.

## 사 사

본 연구는 국립수산과학원 제주수산연구소「제주주변 연근해어업 및 환경생태조사, R2018031」 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Agrawal SC. 2012. Factors controlling induction of reproduction in algae-review: the text. *Folia Microbiol* 57, 387-407. <http://dx.doi.org/10.1007/s12223-012-0147-0>.
- 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 Poll Bull* 55, 104-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.023>.
- Belkin IM. 2009. Rapid warming of large marine ecosystems. *Prog Oceanogr* 81, 207-213. <http://dx.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. <http://dx.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. <http://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>.
- Cha SH, Lee KW and Jeon YJ. 2006. Screening of extracts from red algae in Jeju for potentials marine angiotensin-I converting enzyme (ACE) inhibitory activity. *Algae* 21, 343-348. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2006.21.3.343>.

- 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, UK, 1-190.
- Dring MJ. 1982. The Biology of Marine Plants. Edward Arnold, London, UK, 1-208.
- Fowler J and Cohen L. 1990. Practical Statistics for Field Biology. John Wiley & Sons Inc., New York, NY, U.S.A., 1-227.
- 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. <http://dx.doi.org/10.4319/lo.2014.59.01.0156>.
- Guiry MD and Guiry GM. 2018. AlgaeBase. National University of Ireland, Galway, Ireland. Retrieved from <http://www.algaebase.org> on Jan 3, 2018.
- 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 4<sup>th</sup> PEACE Ocean Science Workshop, Vladivostok, Russia, 24-25.
- 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. <http://dx.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 JC and Kim MS. 2012. Seasonal variation in depth-stratified macroalgal assemblage patterns on Marado, Jeju Island, Korea. *Algae* 27, 269-281. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2012.27.4.269>.
- 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, Kim JB and Choi HG. 2015. Spring macroalgal flora and community structure in subtidal zone around coasts of Jeju Island, Korea. *Kor 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, University of Jeju, Jeju, Korea.
- Kim MS, Kim M, Chung MH, Kim JH and Chung IK. 2008. Species composition and biomass of intertidal seaweeds in Chuja Island. *Algae* 23, 301-310. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2008.23.4.301>.
- 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. NFRDI technical report 38, 50-51.
- Ko JC, Koo JH, Lee SJ, Chang DS and Jo SH. 2011. Community structure of macrobenthic invertebrates of fishing grounds in the coastal waters of Jeju Island. *Korean J Malacol* 27, 229-246. <http://dx.doi.org/10.9710/kjm.2011.27.3.229>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.4490/algae.2008.23.4.295>.
- Lambhead 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. <http://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 Aquaculture* 11, 401-419.
- Lee YP. 2008. Marine Algae of Jeju. Academy Books Inc., Seoul, Korea, 1-477.
- Lee YP and Kang SY. 2002. A Catalogue of the Seaweeds in Korea. Jeju National University Press, Jeju, Korea, 1-662.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1038/216168b0>.
- Neushul M. 1967. Studies of subtidal marine vegetation in western Washington. *Ecology* 48, 83-94. <http://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.
- Oh YS, Lee IK and Boo SM. 1990. An annotated account of Korean economic seaweeds for food, medical and industrial

- uses. Kor J Phycol 5, 57-71.
- Orfanidis S, Panayotidis P and Stamatis N. 2001. Ecological evaluation of transitional and coastal and water; A marine benthic macrophytes-based model. *Medit Mar Sci* 2, 45-65.
- Satheesh S and Wesley SG. 2012. Diversity and distribution of seaweeds in the Kudankulam coastal waters, South-Eastern coast of India. *Biodiversity J* 3, 79-84.
- Scherner H, Horta PA, de Oliveira EC, Simonassi JC, Hall-Spencer JM, Chow F, Nunes JMC and Pereira SMB. 2013. Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. *Mar Pollut Bull* 76, 106-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.09.019>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0919-9268.2004.00788.x>.
- Shepherd SA and Womersley HBS. 1981. The algal and sea-grass ecology of Waterloo Bay, South Australia. *Aquat Bot* 11,305-371. [http://doi.org/10.1016/0304-3770\(81\)90069-3](http://doi.org/10.1016/0304-3770(81)90069-3).
- 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. *Advances 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).
- Terawaki T, Hasegawa H, Arai S and Ohno M. 2001. Management-free techniques for restoration of *Eisenia* and *Ecklonia* beds along the central Pacific coast of Japan. *J Appl Phycol* 13, 13-17. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008135515037>.
- 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>.
- Williams SL and Smith JE. 2007. A global review of the distribution, taxonomy, and impacts of introduced seaweeds. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 38, 327-359. <http://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095543>.
- Yang MH, Moon TS, Yu JT, Ko JC and Chang DS. 2007. Species appearance and seasonal variation of microbenthic invertebrate in the coastal water of Chagwi-do, Jeju-Island. *Korean J Malacol* 23, 235-243.
- 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. MSc Thesis, Jeju National University, Jeju, Korea, 1-31.