

바다숲 조성 해조류의 생물량과 서식지적합지수 비교

황성일, 신봉균, 곽용성¹, 최한길^{1,*}

(주)수중생태기술연구소, ¹원광대학교 생명과학부

Comparison between the biomass and habitat suitability index (HSI) of marine forest forming seaweeds

Sung Il Hwang, Bong Kyun Shin, Yong Sung Kwak¹ and Han Gil Choi^{1,*}

Underwater Ecology Institute, Yeosu 59769, Republic of Korea

¹Faculty of Biological Science and Institute of Basic Natural Sciences, Wonkwang University, Iksan 54538, Republic of Korea

*Corresponding author

Han Gil Choi

Tel. 063-850-6579

E-mail. hgchoi@wku.ac.kr

Received: 15 February 2021

Revised: 25 February 2021

Revision accepted: 3 March 2021

Abstract: The seasonal and vertical biomass of marine forest seaweeds were examined to select a suitable species at 12 sites of the South Sea in Korea between 2018 and 2019. The Habitat Suitability Index (HSI) was also calculated in terms of biomass for six species (three kelp and three *Sargassum* species). A total of 16 marine forest-forming species including four kelp and 12 *Sargassum* species were observed at the 12 sites. The average annual seaweed biomass by season and depth ranged from 843.73–2,925.85 g wet wt. m⁻² at the eastern South Sea and from 343.87–4,580.10 g wet wt. m⁻² at the western South Sea. In the kelp species, the *Ecklonia cava* biomass was predominant, followed by *E. stolonifera*. The macroalgal species with the greatest biomass was *Sargassum macrocarpum*, followed by *S. horneri*. The HSI values of *E. stolonifera* were between 0.76–1.0 at eight sites and those of *E. cava* were 0.58–0.92 at four sites, indicating that *E. stolonifera* was more suitable than *E. cava*. In the HSI values of the *Sargassum* species, *S. horneri* ranged between 0.84–1.0 at all 12 sites and the *S. macrocarpum* values were between 0.68–0.99. The results indicate that *E. cava* and *S. macrocarpum* were the most suitable for the marine forest construction in terms of the seaweed biomass, and *E. stolonifera* and *S. horneri* in terms of the HSI values. Thus, we suggest that seaweed biomass and HSI values should be considered when choosing suitable forest-forming species.

Keywords: biomass, habitat suitability index, kelp, *Sargassum*, marine forest

서 론

연안생태계에서 바다숲은 종다양성과 생산성이 높은 곳 중의 하나로서, 바다숲을 구성하는 해조류는 켈프종(kelp species)과 모자반류(*Sargassum* spp.)로 알려져 있다(Choi

et al. 2020). 이들은 생태학적으로 다양한 무척추 및 척추 생물의 산란장, 먹이장과 생육장으로서 중요한 역할을 하고 있다(Lindstrom 2009; Akita et al. 2014; Park et al. 2014; Gao et al. 2019). 해조류의 경제적 가치는 약 11조 원(110 억 달러)이라고 하였으며, 바다숲 중에서 켈프숲의 생산성

은 육상의 경작지에 비해 4배 이상이라고 하였다 (Millar 2011). Kang (2018)은 한국 연안 바다숲의 이득은 수산자원 증가(약 58,512천 원)와 조절 서비스(기후조절, 오염정화, 침식방지 등)의 이득인 29,547천 원을 합한 생태계서비스는 약 7억 7천만 원 ha⁻¹라고 평가하였다.

이처럼, 바다숲은 생태적 가치와 경제적 가치가 높음에도 불구하고 인간 활동(환경오염, 부영양화 등), 기후변화(수온상승과 해양산성화), 조식동물의 과다섭식 등 다양한 무생물적 및 생물적 요인에 의해 지속적으로 감소되고 있으며 (Gao *et al.* 2019), 점차 무절석회조류(*crustose coralline algae*)가 우점하는 갯녹음 해역으로 변화하고 있다 (Serisawa *et al.* 2002, 2004). 즉, 엽상형 해조류가 없는 갯녹음 해역은 생물 환경(성계 등)과 무생물 환경(기후변화, 환경오염 등)에 의해 확대되고 있으며, 이로 인하여 연안생태계의 안정성은 파괴되고 연안 어업의 쇠퇴에 따른 어업인의 소득 감소와 식량자원의 감소 등이 연쇄적으로 발생하고 있다 (Choi *et al.* 2019; Hwang *et al.* 2020).

갯녹음 해역에 대한 바다숲 조성 및 복원은 연안 생태계의 생산성과 종다양성 회복을 통한 건강한 생태계 회복으로, 수산자원 증대, 다양한 생리활성물질을 가진 해조류를 활용하는 식품, 화장품, 의약품 등 다양한 산업발전을 기폭제로 활용할 수 있으므로 바다숲 조성은 선택이 아니라 필수 불가결한 과제이다. 하지만, 바다숲 복원 및 조성을 위해서는 대상 해역의 갯녹음 발생 원인, 복원 대상 해조류의 선택, 복원된 바다숲의 생태학적 기능 등에 대한 입체적인 전략이 필요하다. 한국과 일본에서는 황폐화된 연안에 바다숲을 복원하기 위하여 많은 경제적인 투자를 하고 있으며, 국내에서는 한국수산자원공단(FIRA)를 중심으로 다양한 방법(포자백 고정법, 해조류가 부착된 로프이식법, 섭식자 제거법 등)으로 바다숲 복원을 추진하고 있다 (Kim *et al.* 2013; Kwak *et al.* 2014; Hwang *et al.* 2020). 해조류를 이용한 인위적인 바다숲 조성에 사용된 해조류는 감태 (*Ecklonia cava* Kjellman), 모자반 (*Sargassum fulvellum* (Turner) C. Agardh), 대황 (*Ecklonia bicyclis* Kjellman = *Eisenia bicyclis* Kjellman), 곰피 (*Ecklonia stolonifera* Okamura), 다시마 (*Saccharina japonica* (Areschoug) C.E. Lane, C. Meyers, Druehl & G.W. Saunders)와 같은 켈프종과 모자반류였다 (Kim *et al.* 2007; Kim *et al.* 2013; Hwang *et al.* 2020).

한국수산자원공단(FIRA)에서는 남해안 동부 4개 해역(안장섬, 내도, 갈도, 우도)과 서부의 5개 해역(황제도, 덕우

도, 소거문도, 역만도, 대삼부도·동도)에서의 갯녹음 현황을 조사하였다 (FIRA 2015a, b). 갯녹음 현황은 도서별 전체 암반 면적에서 정상, 진행, 심각의 3단계로 구분되었는데, 남해 동부에서는 도서별 암반면적(5.59~67.19 ha)에 대하여 정상이 20.04~91.09% (최소 내도, 최대 안장섬), 진행단계가 2.72~65.74% (우도, 내도), 심각 단계인 암반은 2.57~31.46% (안장섬, 우도)로 확인되었다. 한편, 남해 서부 5개 해역에서는 도서별 암반의 전체면적은 17.36~249.31 ha였으며, 정상이 40.06~96.33% (역만도, 덕우도), 진행 단계가 2.72~65.74% (덕우도, 역만도), 심각 단계인 곳이 1.06~12.71% (황제도, 소거문도)였다 (FIRA 2015a, b). 본 연구에서는 남해안 12개 정점(동부 6, 서부 6)에서 바다숲 조성의 대상 해조류와 복원 대상지역을 선정하기 위하여 각 정점에서 해조류의 수심별 생물량을 조사 및 켈프종과 모자반류 6종에 대한 서식지적합지수를 계산하여 비교 분석하였다.

재료 및 방법

1. 해조류 생물량 조사

해조류의 생물량을 확인하기 위하여 현장 조사는 남해안에서 2018년~2019년에 걸쳐 2년간 12개 정점(남해 서부 6개, 남해 동부 6개)에서 수행되었으며, 2018년에는 남해 서부(역만도, 동도, 대삼부도)와 남해 동부(사이도, 우도, 갈도)의 6개 정점에서, 그리고 2019년에는 남해 서부(덕우도, 황제도, 소거문도)와 남해 동부(안장섬, 울포리, 내도)의 6개 정점에서 실시되었다 (Fig. 1A). 해조류 생물량은 2018년과 2019년에 계절별(5, 8, 11, 2월)로 각 정점의 자연 암반에 해안선에 수직으로 4~5개의 조사지선(line transect)을 설정하고 4개 수심(3, 5, 7, 15 m)에서 스쿠버 다이빙 방법으로 조사하였으나, 일부 수심에서는 자연 암반이 없어 해조류가 없어서 채집이 불가하였다. 해조류의 생물량은 수심별로 방형구(50×50 cm) 1개씩을 무작위로 놓고 파괴적 방법(destructive method)으로 전량 채집하여 분석하였다.

2. 서식지적합지수 평가

본 연구에서 남해안 바다숲 선정지역에 이식시킬 해조류를 선정하기 위하여 남해안 바다숲 조성예정지 12개 정

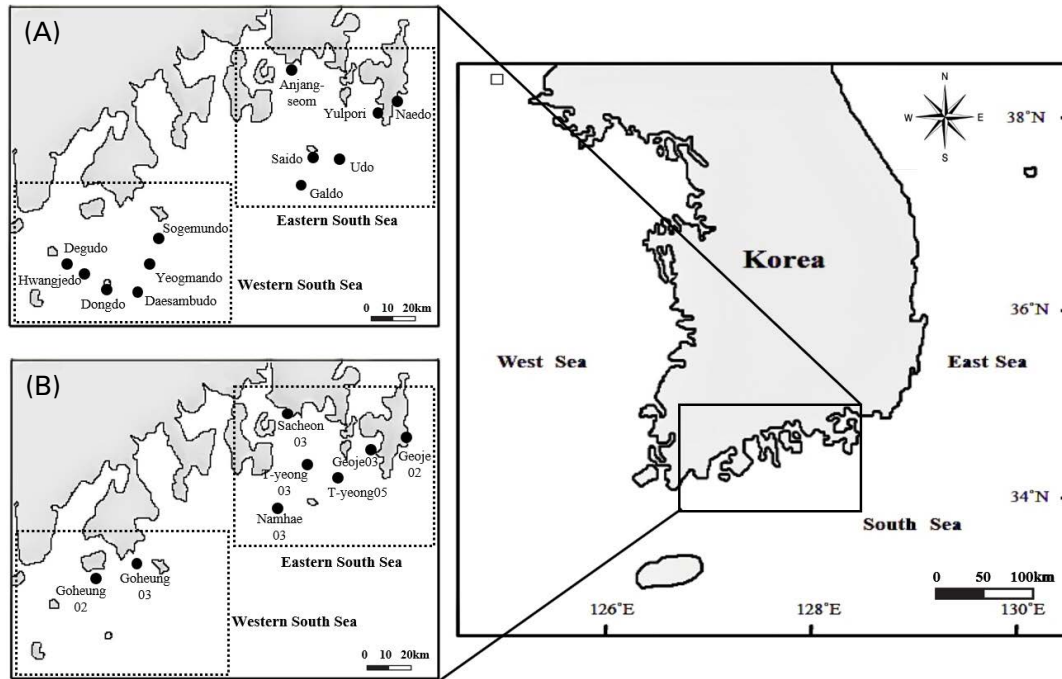


Fig. 1. Sampling sites (A) and environmental data collection sites (B) of the eastern and western South Sea in Korea. T-yeong represents Tongyeong.

점(동부 6개, 서부 6개)에서 2018년~2019년에 조사된 켈프종과 모자반류의 생물량 자료를 근거로 하여, 생물량이 높은 켈프종 3종(다시마, 감태, 곰피), 모자반류 3종(모자반, 팽생이모자반, 큰열매모자반)을 대상으로 서식지적합지수(Habitat Suitability Index; HSI)를 평가하였다.

바다숲 조성에 적합성은 HSI로 판단할 수 있는데, HSI는 해조류 종별로 개별 환경요인(수온, 염분, 광도 등)의 단위 적합지수(Suitability Index; SI)의 합에 대한 평균값이다(Oh *et al.* 2010). HSI 값은 0.0~1.0 범위로서 부적합(0)에서 적합(1.0)까지 서식지(habitat)의 질(quality)을 평가할 수 있으며, 온도와 광도 같은 개별적 환경요인에 대해서 SI 값을 계산한다(Oh *et al.* 2010).

본 연구에서 대상 해조류 서식지의 환경요인에 대한 SI 값을 계산하기 위하여, 환경자료는 해양환경정보포털(<https://www.meis.go.kr/potal/main.do>)에서 확보하였다. 해양환경 자료는 2018~2019년 남해안 바다숲 조성사업 대상 후보지에 대한 해조류 생물량 조사가 수행된 12개 정점 인근 해역의 8개 정점(남해 서부 2개, 남해 동부 6개)에서 확보된 자료를 활용하였으며, 남해 서부 2개 정점(고흥02, 고흥03)과 남해 동부의 6개 정점(사천03, 통영03, 통

영05, 거제03, 거제02, 남해03)의 10년간(2008~2017년)의 수온(2월), 염분, 수소이온농도(pH), 화학적산소요구량(COD), 용존 무기질소(DIN)과 용존 무기인(DIP) 자료를 정리 및 분석하였다(Fig. 1B).

결 과

1. 해조류 생물량

남해안 동부와 서부의 12개 해역에서 바다숲 조성 대상 종은 켈프종 4종(감태, 검등감태, 곰피, 다시마)과 모자반류 12종으로 총 16종이 확인되었다(Table 1). 정점별 해조류 생물량의 합계는 343.87~4,580.10 g wet wt. m⁻²를 보였으며, 완도군의 덕우도에서 생물량이 최소였으며, 여수시 동도에서 최대였다(Table 1).

남해안 동부해역에서는 감태가 6개 정점에서 생물량이 많았으며, 검등감태(*E. kurome*)와 곰피의 생물량도 4개 정점에서 높게 나타났다(Table 1). 다시마는 3개 정점에서 출현하였으나 생물량은 다른 켈프종에 비해 낮았다. 모자반과(*Sargassaceae*)에 속하는 종으로는 외톨개모자

Table 1. Macroalgal list and average biomass (g wet wt. m⁻², n=4 line transects) of marine forest species including kelp and Sargassaceae observed at twelve study sites of the eastern and western South Sea in Korea (*, n=3, **, n=5 line transects)

Species	Eastern South Sea						Western South Sea					
	Anjangseom	Yulpori*	Naedo	Saido	Udo**	Galdo	Degudo**	Hwangjedo	Sogemundo**	Yeogmando	Dongdo	Daesambudo
<i>Ecklonia cava</i>	1,161.45	27.13	518.73	428.36	92.47	394.27	24.32	2.30	71.41	507.49	1,595.20	
<i>E. kurome</i>	122.30	20756	295.42		480.08							
<i>E. stolonifera</i>	289.79	271.68	234.25	6798					32.84	18.02	4.02	
<i>Saccharina japonica</i>	1.25		12.80			2.01	225.41				6.94	
<i>Myagropsis myagroides</i>	1.54	73.93				474.00	29.03					
<i>Sargassum confusum</i>		98.11		43.79		250.70					20.20	
<i>S. coreanum</i>	10.15							274.31	8.86		226.50	
<i>S. fulvellum</i>	351.72	66.04	138.15	1.76			45.54		109.63	0.55		
<i>S. fusiforme</i>				45.12								
<i>S. hemiphyllum</i>			91.15									
<i>S. horneri</i>	660.35	31.32	580.23	10.34	0.07	131.35	14.43		51.54	87.14	404.56	
<i>S. macrocarpum</i>	45.02	28.29	1.18	403.68	1,141.10	1,491.49		722.50	628.46	52.29	3,318.93	
<i>S. micracanthum</i>			1.57	114.58		182.03			8.08	330.55	86.03	
<i>S. patens</i>		2763		0.11					138.50			
<i>S. serratifolium</i>								511.46				
<i>Sargassum</i> sp.		12.04		0.09			5.14			96.64	9.50	
Total	2,643.57	843.73	1,873.48	1,115.81	1,713.72	2,925.85	343.87	1,510.57	701.76	588.45	4,580.10	3,547.14

반(*Myagropsis myagroides*)과 10종의 모자반류(*Sargassum* spp.)가 관찰되었으며, 4개 정점에서 출현한 종은 모자반이었고 6개 정점 모두에서 출현한 종은 팽생이모자반(*S. horneri*)과 큰열매모자반(*S. macrocarpum*)으로 확인되었다(Table 1). 동부해역에서 정점별 해조류 생물량의 합계는 843.73~2,925.85 g wet wt. m⁻²를 보였으며, 거제시 울포리에서 최소였고 통영시 갈도에서 최대였다(Table 1). 생물량을 근거로 선정한 바다숲 대상종 켈프종은 감태(1위), 곰피(2위), 검둥감태(3위), 그리고 다시마(4위)의 순서로 나타났다으며, 모자반류에서는 큰열매모자반(1위)과 팽생이모자반(2위)의 순서를 보였다(Table 1).

남해 서부해역에서는 켈프종 3종(감태, 곰피와 다시마)이 출현하였으며, 감태가 소거문도를 제외한 5개 정점에서, 곰피는 3개 정점, 그리고 다시마는 2개 정점에서 생물량이 높게 나타났다(Table 1). 모자반과에 속하는 종으로는 외톨개모자반과 9종의 모자반류가 서식하였으며, 4개 정점에서 출현한 종은 모자반이었고 팽생이모자반과 큰열매모자반이 5개 정점에서 출현하였다(Table 1). 서부해역에서 정점별 해조류 생물량의 합계는 343.87~4,580.10 g wet wt. m⁻²

를 보였으며, 완도군의 덕우도에서 생물량이 최소였으며, 여수시 동도에서 최대였다(Table 1). 생물량을 토대로 한 바다숲 조성용 켈프종은 감태(1위), 곰피(2위)였고, 모자반류는 큰열매모자반(1위), 팽생이모자반(2위)과 모자반(3위)의 순서를 보였다(Table 1).

2. 서식지적합지수 평가를 위한 환경자료

해조류 서식지 평가를 위하여, 2018~2019년 남해안 바다숲 조성사업 대상 후보지 인근 해역 8개 정점(동부 6개, 서부 2개)의 10년(2008년~2017년)의 환경자료 6종류를 분석한 결과를 정리하였다(Table 2).

해양환경측정망 데이터에서 2월 평균 수온은 남해 동부의 사천03에서 6.39~8.19°C으로 최저였고 거제03(10.51~12.61°C)과 거제02(10.45~12.80°C)로 상대적으로 높게 나타났다(Table 2). 남해 서부에서는 고흥02에서 7.16~10.77°C와 고흥03에서 6.06~9.12°C로서 남해 동부해역에 비해서 낮은 수온을 보였다. 해수의 염분은 남해 동부의 사천03에서 30.09~34.68 psu(평균 33.00 psu)로 가장 낮았으나, 남해03에서는 25.12~34.41 psu(평균 33.19 psu)

Table 2. Environmental data of eight sites positioned at the eastern and western South Sea in Korea. The value in parentheses is the average of environmental data for ten years (from 2008 to 2017) obtained from Marine Environmental Information System (MEIS). T-yeong represents Tongyeong

Site	Temp.(°C) (Feb.)	Salinity (psu)	pH	COD ^a (mg L ⁻¹)	DIN ^b (mg L ⁻¹)	DIP ^c (mg L ⁻¹)
Eastern South Sea						
Sacheon 03	6.39-8.19 (7.20)	30.09-34.68 (33.00)	7.18-8.48 (8.13)	0.20-3.17 (1.07)	0.000-0.214 (0.044)	0.000-0.060 (0.011)
Geoje 03	10.51-12.61 (11.33)	29.82-35.02 (33.62)	7.51-8.42 (8.10)	0.05-2.12 (0.84)	0.002-0.248 (0.079)	0.000-0.076 (0.013)
Geoje 02	10.45-12.80 (11.69)	29.88-34.84 (33.58)	7.77-8.34 (8.14)	0.18-3.19 (0.99)	0.002-0.247 (0.073)	0.000-0.033 (0.011)
T-yeong 03	7.70-10.34 (9.37)	30.79-34.75 (33.36)	6.78-8.53 (8.13)	0.14-3.21 (1.00)	0.000-0.226 (0.049)	0.000-0.061 (0.010)
T-yeong 05	9.59-11.88 (10.45)	30.75-34.76 (33.52)	7.53-8.34 (8.11)	0.07-3.29 (0.84)	0.001-0.263 (0.073)	0.000-0.064 (0.013)
Namhae 03	8.28-11.76 (10.04)	25.12-34.41 (33.19)	7.76-8.62 (8.14)	0.04-3.31 (0.86)	0.001-0.257 (0.063)	0.000-0.028 (0.009)
Western South Sea						
Goheung 02	7.16-10.77 (8.56)	31.33-34.36 (33.08)	7.93-8.32 (8.15)	0.02-1.93 (0.86)	0.005-0.202 (0.068)	0.000-0.024 (0.010)
Goheung 03	6.06-9.12 (7.16)	31.16-34.33 (32.96)	7.94-8.38 (8.15)	0.24-1.90 (0.92)	0.004-0.206 (0.060)	0.000-0.023 (0.009)

^aChemical oxygen demand

^bDissolved inorganic nitrogen

^cDissolved inorganic phosphorus

로 염분의 변화폭이 컸다. 남해 서부의 염분은 고힘02에서 31.33~34.36psu였고 고힘03에서 31.16~34.33psu로 확인되었다(Table 2).

또한, 해수의 pH는 남해 동부해역의 거제03에서 7.51~8.42(평균 8.10)로 가장 낮았고, 남해 서부의 고힘02와 고힘03에서 7.93~8.32와 7.94~8.38로 상대적으로 높은 값을 보였다(Table 2). 남해 동부 해역의 10년간의 평균 COD 값은 사천03에서 1.07 mg L⁻¹으로 최대였고 거제03과 통영05에서 0.84 mg L⁻¹로 최소값을 보였다. 남해 서부에서 COD 값은 고힘02에서 평균 0.86 mg L⁻¹, 그리고 고힘03에서 0.92 mg L⁻¹를 보였다(Table 2).

남해 동부 지역에서 과거 10년간의 평균 DIN 값은 사천03에서 0.044 mg L⁻¹로 최소였고, 거제03에서 0.079 mg L⁻¹로 최대였다. 남해 서부에서 평균 DIN 값은 고힘02에서 0.068 mg L⁻¹, 고힘03에서 0.060 mg L⁻¹로 확인되었다. 남해 동부지역에서 평균 DIP 값은 남해03에서 0.009 mg L⁻¹로 최소였고 거제03과 통영05에서 0.013 mg L⁻¹으로 최대였으며, 남해 서부에서는 고힘02에서 0.010 mg L⁻¹과 고힘03에서 0.009 mg L⁻¹를 보였다(Table 2).

3. 서식지적합지수

켈프종에 대한 HSI 분석 결과를 보면, 감태는 거제도 지역에서 상대적으로 높은 HSI 값을 보였다. 이는 감태가 서

식 가능한 동계 수온이 10~16°C이지만, 사천, 완도, 고힘 지역의 수온은 7.16~9.90°C로 다른 해역에 비해 다소 낮기 때문에 겨울철 수온에 의한 영향으로 판단된다(Table 3). 곰피는 부유사로 인하여 탁도가 높은 고힘03 지역을 제외한 대부분 해역에서 서식지로 적합한 HSI 값인 0.7 이상을 나타냈다(Table 3).

다시마는 안장섬 인근의 사천03 지역을 제외한 대부분 해역에서 0의 값을 보였는데, 이러한 이유는 겨울철 수온과 광량에 의한 영향이다. 다시 말하면, 다시마가 생장 가능한 수온이 -1~8°C인데, 사천과 고힘을 제외한 지역의 관측 수온은 8.56~12.30°C이었고 고힘에서는 부유사 등으로 인한 탁도가 높아서 광량이 낮았기 때문이다(Table 3).

모자반류(*Sargassum* spp.)의 HSI 값을 보면, 모자반은 고힘02와 고힘03의 지역을 제외한 대부분 해역에서 생장이 가능한 HSI 값을 나타냈으나, 사천03 지역에서는 2월 수온이 다른 지역에 비해 다소 낮게 나타났다. 고힘02, 03 지역은 부유사가 많아 탁도가 높아서 다른 지역에 비해 곰피의 서식지로 부적합한 것으로 보였다(Table 3). 팽생이모자반의 HSI 값은 환경자료를 가진 8개 해역에서 모두 0.86 이상으로 확인되어 남해안 동부와 서부의 모든 지역에서 서식이 가장 적합한 종이었으며, 큰열매모자반의 HSI 값은 모두 0.68 이상으로 남해안 모든 정점에서 서식이 적합한 것으로 확인되었다(Table 3).

Table 3. HSI values for six marine forest-forming species at 12 study sites located at the eastern and western South Sea in Korea. The environmental data were obtained from eight stations of Marine Environmental Information System (MEIS). T-yeong represents Tongyeong

Region/Site	Data collection	<i>Ecklonia cava</i> (3, 5, 7 m)	<i>Ecklonia stolonifera</i> (3 m)	<i>Saccharina japonica</i> (3, 5 m)	<i>Sargassum fulvellum</i> (3, 5, 7 m)	<i>Sargassum horneri</i> (3 m)	<i>Sargassum macrocarpum</i> (3 m)
Eastern South Sea							
Anjangseom	Sacheon 03	0.00	0.76	0.52	0.44	0.84	0.68
Yulpori	Geoje 03	0.89	0.84	0.00	1.00	0.92	0.98
Naedo	Geoje 02	0.92	0.78	0.00	1.00	0.95	0.99
Saido	T-yeong 03	0.00	1.00	0.00	0.89	0.95	0.87
Udo	T-yeong 05	0.75	0.96	0.00	1.00	0.95	0.93
Galdo	Namhae 03	0.58	1.00	0.00	0.97	1.00	0.91
Western South Sea							
Degudo	Goheung 02	0.00	0.96	0.00	0.00	0.90	0.82
Hwangjedo	Goheung 02	0.00	0.96	0.00	0.00	0.90	0.82
Sogemundo	Goheung 03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.68
Yeogmando	Goheung 03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.68
Dongdo	Goheung 03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.68
Daesambudo	Goheung 03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.68

고 찰

국내에서 바다숲 조성에 사용되는 해조류는 다년생 인 감태가 56%, 모자반 31%, 대항 7%와 곰피 6%였으며 (Hwang *et al.* 2020), 이전에는 다시마도 사용되었다 (Kim *et al.* 2007). 현재까지 바다숲 조성은 종묘생산이 가능한 다년생 해조류인 감태, 대항, 곰피와 모자반의 유배 (juvenile) 가 부착 및 성장한 폴리에틸렌 로프 (일명 친승줄)를 해중 립초에 이식하는 형태로 이루어진다 (Hwang *et al.* 2009). 최근에는 바다숲 조성을 위한 신품종 개발을 위해 다년생 인 큰열매모자반과 탁도가 높은 서해안에서 빠른 성장을 보이는 위다년생인 지층이 (*S. thunbergii*)의 종묘생산 기술에 대한 연구가 수행되었다 (FIRA 2017b). 이외에도, 건강한 연안 바다숲 생태계를 만들기 위하여, 덩불형 해조류 인 꼬시래기 (*Agarophyton vermiculophyllum*)와 우뚝가사리 (*Gelidium elegans*)의 포자 방출, 초기 성장, 채묘기술 개발에 대한 연구가 일부 수행되었다 (FIRA 2017b).

한국 남해안은 갯녹음 발생원인에 따라 2개 해역, 즉 남해 동부 해역 (통영~부산, 성계의 섭식활동)과 남해 서부 해역 (통영~여수, 탁도와 퇴적물)으로 구분되었다 (FIRA 2017a). 남해 서부 해역의 갯녹음은 유기성 및 무기성 퇴적물 입자의 암반 침적으로 인한 해조류 포자의 착생과 부착 감소, 해수의 유동에 따른 암반 표면의 퇴적물 입자의 마찰로 인한 배아와 유배의 탈락, 마지막으로 부유성 입자로 인하여 광합성에 필요한 광 부족으로 생장이 저해되기 때문에 발생한다 (Devinny and Volsse 1978; Arakawa 2005). 퇴적물 입자의 3가지 부정적인 이유와 더불어 인간 활동 증가로 인한 환경오염과 기후변화는 바다숲을 구성하는 켈프와 모자반류의 개체군 감소와 소멸로 진행된다 (Serisawa *et al.* 2003, 2004). 갯녹음으로 단순화 및 황폐화된 연안을 종 다양성과 수산자원이 증가된 건강한 생태계로 회복시키는 것이 바다숲 조성의 최종 목표이므로 미래의 바다숲은 생태학적 기능이 다른 덩불형 (turf-forming) 해조류 (우뚝가사리와 꼬시래기 등)와 수관형 (canopy forming) 해조류 (켈프와 모자반류)의 혼합형으로 복원되어야 한다. 또한, 해조류의 생활사를 고려하여 빠른 성장과 성숙을 보이는 r-선택종 (r-selection species)과 다양한 2차 대사산물을 함유한 다년생의 K-선택종 (K-selection species)이 혼합된 바다숲, 그리고 적당한 초식동물이 공존하는 건강한 바다숲의 조성이 추진되어야 할 것이다. 따라서, 다양한 덩불형 해조류 (꼬시래기, 우뚝가사리, 지누아리 등)와 바다숲 구성종인

일년생 (괭생이모자반)과 다년생 모자반류 (큰열매모자반 등)의 종묘생산 기술개발에 적극적인 노력과 투자가 동반되어야 할 것이다. 이외에도, 종묘생산이 가능한 r-선택종의 일년생 쇠미역, 다시마, 미역 등도 바다숲 조성해역의 환경특성을 고려하여 바다숲 대상종으로 활용 가능성을 분석해야 한다.

한국 남해안의 동부와 서부의 12개 해역에서 바다숲 조성 대상종은 켈프종 4종 (감태, 검둥감태, 곰피, 다시마)과 모자반류 12종으로 총 16종이 확인되었다. 바다숲 조성용 해조류의 생물량 합계는 남해 동부에서 843.73~2,925.85 g wet wt. m⁻²였으며, 남해 서부에서는 343.87~4,580.10 g wet wt. m⁻²를 보였다. 생물량을 근거로 선정한 바다숲 대상종은 남해안 동부와 서부에서 모두 켈프종은 감태 (1위)와 곰피 (2위)였고, 모자반류에서는 큰열매모자반 (1위)과 괭생이모자반 (2위)으로 나타났다. 해조류의 생물량은 서식지 환경에 대한 적합도로 치환하여 볼 수 있으므로 생물량이 많은 켈프종과 모자반류를 바다숲 대상종으로 선정하는 것이 적절할 것으로 사료된다. 선행 연구에서, 한국 남해 동부 해안에서 곰피는 수심 2~10m의 조하대에서 서식하며 (Park *et al.* 1994; Hwang *et al.* 2009), 수심 5m 이하의 천해에서 생물량이 적은 것은 다른 저서생물의 경쟁 배제의 결과라고 하였다 (Kang *et al.* 2005). 한편, 감태는 한국과 일본의 지역종 (endemic species)이며 한국의 쓰시마난류의 영향을 받아 수온이 상대적으로 높고 탁도가 낮은 제주도, 울릉도와 독도에서 우점하고 있으며 (Kang *et al.* 1993, 2001; Park *et al.* 2014; Choi *et al.* 2015), 일본에서는 혼슈의 중앙에서 규슈의 서쪽 해안에서 번무하는 것으로 알려져 있다 (Terawaki and Arai 2004).

본 연구에서 바다숲 조성 해조류의 생물량과 서식지 적합지수 (HSI) 값으로 선정한 바다숲 조성 대상종을 비교하면, 생물량은 감태가 1위였으나, HSI 값은 곰피가 1위로서 순위가 바뀌었다. 또한, 가장 뚜렷한 차이는 고성군 안장섬의 현장 조사에서 감태 평균 생물량이 507.49 g wet wt. m⁻²를 보였으나, 사천03의 환경자료를 이용한 HSI 값은 안장섬에는 감태의 서식이 불가능한 것으로 나타났다. 이러한 현장조사와 HSI 값에서 차이점은 일본 연안에서 바다숲을 구성하는 감태와 곰피 등 해조류의 종별 환경 내성 범위에 관한 선행 연구결과를 한국 연안에 서식하는 종에 그대로 적용하는 것이 적합하지 않을 수 있다는 합리적인 추론을 할 수 있다 (Table 4). Suto (1992)는 일본의 바다숲 조성의 대상 갈조류인 다시마, 미역, 감태, 모자반류 등의 온도

Table 4. Habitat environmental factors and tolerance ranges of three kelp and three *Sargassum* species. The table was revised based on the results of Suto (1992) and Seki *et al.* (1975)

Factors	<i>Ecklonia cava</i>	<i>Ecklonia stolonifera</i>	<i>Saccharina japonica</i>	<i>Sargassum fulvellum</i>	<i>Sargassum horneri</i>	<i>Sargassum macrocarpum</i>
Temp. (°C) February	10-16	6-13	-1-8	7-15	4-19	6-19
Salinity (psu)	>30.9	-	-	-	>26.6	>30.9
pH	<8.9	<8.9	<8.9	<8.9	<8.9	<8.9
COD (mg L ⁻¹)	<1.3	-	-	-	2.2	1.4
DIN (μmol L ⁻¹)	0.36-13.20	-	0.1-26.0	-	0.30-785	-
Irradiance (mol m ⁻² day ⁻¹)	>1.4	>1.5	>2.5	>2.6	-	-

-, no data

성 해조류의 성장과 겨울과 여름의 한계 수온과 염분, COD와 파고의 관계 등을 기록하였다 (Table 4). 즉, Suto (1992)의 연구결과에 따르면, 감태의 생존을 위한 2월 수온 범위는 10~16°C, 염분은 30.9 psu 이상, pH는 8.9 이하, COD는 1.3 mg L⁻¹ 이하, DIN은 0.36~13.20 μmol L⁻¹, 최저 광량은 1.4 mol m⁻² day⁻¹ 이상이 요구되며, 팽생이모자반은 COD 농도가 2.2 mg L⁻¹에서 서식한다고 하였다. 한편, Seki *et al.* (1975)은 pH가 8.9 이상일 때는 해조류의 서식이 어렵다고 보고하였다 (Table 4). 따라서, 바다숲 조성종 선택을 위해서 HSI 값을 사용하려면, 국내 연안에 서식하는 켈프종과 모자반류의 종별 생활사 단계별 환경요인(수온, 염분, 광량 등)에 대한 내성범위와 자연상태에서의 서식한계에 대한 생리, 생태학적 연구가 선행되어야 하며, 정점별 해양환경에 대한 자료의 축적이 필요하다는 것을 확인하였다. 결론적으로, 켈프종과 모자반류와 같은 바다숲 구성종에 대한 생리 및 생태적 연구와 바다숲 조성해역의 해양 환경자료가 부족한 상태에서 HSI 값은 현장 조사에 따른 종별 생물량 자료의 보조자료로 활용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

적 요

남해안의 바다숲을 구성하는 종을 확인하고 바다숲 조성에 적합한 종을 파악하기 위하여 남해안 12개 정점에서 계절별로 4개 수심에서 2018년~2019년에 걸쳐서 해조류의 생물량을 조사하였다. 해조류 생물량을 근거로 켈프종 3종과 모자반류 3종에 대해서 서식지적합지수를 계산하여 생물량과 비교하였다. 본 연구에서 바다숲을 구성하는 종은 켈프종 4종과 모자반류 12종으로 총 16종이 관찰되었다. 정점별로 해조류의 평균 생물량(계절별, 수심별 포함)

은 남해 동부에서 843.73~2,925.85 g wet wt. m⁻²였고 남해 서부에서 343.87~4,580.10 g wet wt. m⁻²였다. 모든 정점에서 생물량 기준으로 볼 때, 켈프종에서는 감태가 가장 우점하였고 다음으로 곱피였으며, 모자반류에서는 큰열매모자반이 1위였고 팽생이모자반이 2위로 나타났다. 서식지지수는 곱피가 8개 정점에서 0.76~1.00이었으며, 감태는 4개 정점에서 0.58~0.92의 범위를 보임으로써 곱피가 감태에 비해 적합한 종으로 나타났다. 모자반류의 서식지적합지수는 팽생이모자반이 12개 모든 정점에서 0.84~1.00의 값을, 그리고 큰열매모자반이 0.68~0.99을 보였다. 본 연구의 결과 바다숲 조성에 적합한 켈프종과 모자반종은 생물량과 서식지적합지수와 약간의 차이를 보였는데, 생물량으로는 감태와 큰열매모자반이, 서식지적합지수로 보면, 곱피와 팽생이모자반이 가장 적합한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구를 통해서 바다숲 조성을 위한 적합종의 선택을 위해서는 해조류의 생물량과 서식지적합지수를 모두 고려해야 할 것으로 사료되며, 서식지적합지수 계산을 위해서는 향후 더 많은 연구가 필요한 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2019R1F1A1062459)의 지원을 받아서 수행되었습니다.

REFERENCES

- Akita S, H Yamada, M Ito, M Kobayashi and D Fujita. 2014. Phenology of annual kelp *Eckloniopsis* (Phaeophyceae, Laminariales) forest on a *Diadema* barren in Uchiura Bay, Central

- Pacific Coast of Honshu, Japan. J. Appl. Phycol. 26:1141-1148.
- Arakawa H. 2005. Lethal effects caused by suspended particles and sediment load on zoospores and gametophytes of the brown alga *Eisenia bicyclis*. Fish. Sci. 71:133-140.
- Choi DM, YW Ko, RS Kang and JH Kim. 2015. Morphological and genetic variability among *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyceae) populations in Korea. Algae 30:89-101.
- Choi HG, DV Jeon, SK Park and X Gao. 2019. Physiological differences in the growth and maturation of *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cava* gametophytes in Korea. J. Ocean. Limnol. 37:657-664.
- Choi SK, YH Kang and SR Park. 2020. Growth responses of kelp species *Ecklonia cava* to different temperatures and nitrogen sources. Korean J. Environ. Biol. 38:404-415.
- Devinny JS and LA Volse. 1978. Effects of sediments on the development of *Macrocystis pyrifera* gametophytes. Mar. Biol. 48:343-348.
- FIRA. 2015a. Survey of Barren Ground Areas using Hyper-Spectral Image Method along the Coasts of Eastern South Sea. Korea Fisheries Resources Agency. Busan, Korea. p. 264.
- FIRA. 2015b. Survey of Barren Ground Areas using Hyper-Spectral Image Method along the Coasts of South Sea. Korea Fisheries Resources Agency. Busan, Korea. p. 169.
- FIRA. 2017a. Cause and Solution of Barren Grounds. Current State of Barren Grounds in Korean Coastal Area. Korea Fisheries Resources Agency. Busan, Korea. p. 67.
- FIRA. 2017b. Development and Production of New Seaweed Species for Marine Forest Construction. Korea Fisheries Resources Agency. Busan, Korea. p. 166.
- Gao X, HG Choi, SK Park, JH Kim, OH Yu and KW Nam. 2019. Sporophytic photosynthesis and gametophytic growth of the kelp *Ecklonia stolonifera* affected by ocean acidification and warming. Aquac. Res. 50:856-861.
- Hwang EK, JM Baek and CS Park. 2009. The mass cultivation of *Ecklonia stolonifera* Okamura as a summer feed for the abalone industry in Korea. J. Appl. Phycol. 21:585-590.
- Hwang EK, HG Choi and JK Kim. 2020. Seaweed resources of Korea. Bot. Mar. 63:395-405.
- Kang RS, JG Je and CH Sohn. 1993. Summer algal communities in the rocky shore of the South Sea of Korea. II. Subtidal communities. Bull. Korean Fish. Soc. 26:182-197.
- Kang RS, KS Won, KP Hong and JM Kim. 2001. Population studies on the kelp *Ecklonia cava* and *Eisenia bicyclis* in Dokdo, Korea. Algae 16:209-215.
- Kang RS, HS Park, KS Won, JM Kim and C Levings. 2005. Competition as a determinant of the upper limit of subtidal kelp *Ecklonia stolonifera* Okamura in the southern coast of Korea. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 314:41-52.
- Kang SK. 2018. Economic value of marine forests in Korea. J. Fish. Bus. Adm. 49:17-35.
- Kwak CW, EY Chung, TY Kim, SH Son, KY Park, YS Kim and HG Choi. 2014. Comparison of seaweed transplantation method to reduce grazing pressure by sea urchin. Korean J. Nat. Conserv. 8:32-38.
- Kim YD, JP Hong, HI Song, CY Jeon, SK Kim, YS Son, HK Han, DS Kim, JH Kim, MR Kim, YG Gong and DK Kim. 2007. Growth and maturation of *Laminaria japonica* transplanted for seaforest construction on barren ground. J. Korean Fish. Aquat. Sci. 40:323-331.
- Kim YD, JM Shim, MS Park, JP Hong, HI Yoo, BH Min, HJ Jin, C Yarish and JK Kim. 2013. Size determination of *Ecklonia cava* for successful transplantation onto artificial seaweed reef. Algae 28:365-369.
- Lindstrom SC. 2009. The biogeography of seaweeds in south-east Alaska. J. Biogeogr. 36:401-409.
- Millar A. 2011. Macroalgae. New South Wales Department of Primary Industries. Sydney. http://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0009/378774/Macroalgae-Primefact-947.pdf.
- Oh TG, YC Kim, YS Yang, CG Kim and MO Lee. 2010. A suitability selection for marine afforestation using habitat evaluation procedure. J. Korean Soc. Mar. Eng. 34:369-380.
- Park SK, JR Lee, JS Heo, DS An, HP Lee and HG Choi. 2014. Marine algal flora and ecological role of *Eisenia bicyclis* in Dokdo, East Sea, Korea. Korean J. Environ. Ecol. 28:613-626.
- Seki S, I Zen, T Abe and T Hukuzawa. 1975. A experimental study on seawater mixed by concrete ash. Rep. Harbor Tech. Res. Inst. 14:113-132.
- Serisawa Y, Y Yokohama, Y Aruga and J Tanaka. 2002. Growth of *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyta) sporophytes transplanted to a locality with different temperature conditions. Phycol. Res. 50:201-207.
- Serisawa Y, M Aoki, T Hirata, A Bellgrove, A Kurashima, Y Tsuchiya, T Sato, H Ueda and Y Yokohama. 2003. Growth and survival rates of large-type sporophytes of *Ecklonia cava* transplanted to a growth environment with small-type sporophytes. J. Appl. Phycol. 15:311-318.
- Serisawa Y, Z Imoto, T Ishikawa and M Ohno. 2004. Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperatures in Tosa Bay, southern Japan. Fish. Sci. 70:189-191.
- Suto S. 1992. A trial to relate marine benthic floras more precisely to their environmental conditions. Jpn. J. Phycol. 40:289-305.
- Terawaki T and S Arai. 2004. *Eisenia* and *Ecklonia*. pp. 133-157. In: Biology and Technology of Economic Seaweeds (Ohno M ed.). Uchida Rokakuho Publishing Co. Ltd. Tokyo.