

제주연안 큰열매모자반의 생장과 성숙패턴 분석을 위한 생식배분 지수의 적용

고신자, 김유경, 홍성완¹, 강민수¹, 황은경^{2,*}, 이영돈

제주대학교 해양과학연구소, ¹제주해양수산연구원, ²국립수산과학원 수산식품종관리센터

Application of reproductive allocation index to the analysis of growth and maturation patterns of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in Jeju Island, Korea

Shin Ja Ko, Yoo Kyung Kim, Seong Wan Hong¹, Min Su Kang¹, Eun Kyoung Hwang^{2,*} and Young Don Lee

Marine Science Institute, Jeju National University, Jeju 63333, Republic of Korea

¹Ocean and Fisheries Research Institute, Jeju 63629, Republic of Korea

²Aquatic Plant Variety Center, National Institute of Fisheries Science, Mokpo 58746, Republic of Korea

*Corresponding author

Eun Kyoung Hwang
Tel. 061-280-5300
E-mail. ekh215@korea.kr

Received: 8 November 2019

Revised: 4 December 2019

Revision accepted: 16 December 2019

Abstract: The ecological characteristics of *Sargassum macrocarpum*, an ecologically and commercially valuable brown alga, were investigated from May 2018 to June 2019 in Jeju Island, Korea. The *S. macrocarpum* population formed patches at depths of 3–5 m. Growth in the length of the alga reached a maximum of 135.3 ± 20.0 cm in June. The weight of the alga reached a maximum of 3.6 ± 2.1 kg · wet-wt in May. The mean density and biomass of *S. macrocarpum* was 4.5 individuals · m⁻² and 4.6 kg · wet-wt · m⁻² in their habitat. Receptacles were observed from April to August and egg release was detected from June to July when the seawater temperatures were 19.3–22.9°C. The developmental initiation of thalli occurred at temperatures above 14.1°C and maturation required approximately 726.3 degree-days. The reproductive allocation of this alga, calculated from the reproductive frond length (RFL) and reproductive frond weight (RFW) indices to the whole length and weight, reached a maximum of 69.3% in June. The growth and maturation patterns of *S. macrocarpum* could be divided into vegetative growth (October–January), maturity preparation (February–April), maturation (May–June), egg release (June–July), and resting period (August–September). This was the first study to examine an *S. macrocarpum* population throughout the entire year in a natural habitat in Jeju Island, Korea.

Keywords: *Sargassum macrocarpum*, growth, maturation, degree-days, reproductive allocation

서 론

모자반은 온대해역에 주로 서식하며 전 세계에는 약 400여 종 그리고 한국에는 30종이 분포하고 있다(Oak and Lee 2005, 2006). 큰열매모자반(*Sargassum macrocarpum* C. Agardh)은 한국(Oak and Lee 2006)과 일본(Murase *et al.* 2000a, b) 등 동부 아시아지역에 광범위하게 분포한다. 이 종은 조하대에서 자라며 수관층을 형성함으로써, 바다숲을 형성하는 종들 중 하나이다. 모자반 숲은 대규모 바이오 매스와 높은 생산성으로 인해 연안에서 중요한 생태적 역할을 한다(Murase and Kito 1998). 또한 모자반 숲은 상업적으로 중요한 어종에게 은신처, 서식지 및 산란장을 제공해 주고, 연안환경을 유지하는 데 큰 역할을 담당한다(Yoshida *et al.* 1963; Murase *et al.* 2000a). 따라서 생태학적 및 산업적 관점에서 모자반류에 대한 생장, 성숙시기 및 양식 기술에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다(Yoshida *et al.* 2001; Hwang *et al.* 2006; Pang *et al.* 2009).

과거 모자반류는 주로 식용, 사료용 및 비료용 등 간단한 가공과정을 거쳐 이용되어 왔다. 그러나 최근 모자반류가 terpenoids, polysaccharides, polyphenols, sargachromenol, steroids와 plastoquinones 등을 함유하여(Yende *et al.* 2014) 항산화제(Kim *et al.* 2007), 콜린에스테라제 억제제(Choi *et al.* 2007), 항암제(Zandi *et al.* 2010), 해열제(Kang *et al.* 2008), 항염증제(Kim *et al.* 2019), 면역조절제(Chandraraj *et al.* 2010) 등의 생물학적 활성을 나타내는 특성이 밝혀지고 있다. 또한 큰열매모자반으로부터 추출된 화합물은 골수 유래 대식 세포 및 유도된 수지상 세포에서 CpG 유도 염증 반응을 억제하고(Manzoor *et al.* 2014), 신경 돌기의 성장을 촉진하는(Kamaei and Tsang 2003) 역할을 하는 등, 고부가가치 창출이 가능한 대상으로 자리매김하고 있다.

모자반류의 다양한 유용성에도 불구하고 현재 대량양식을 통해 식용 및 바다숲 조성용 종묘생산에까지 이용되고 있는 모자반류는 모자반(*S. fulvellum*)이 유일하며, 큰열매모자반의 경우 생장과 성숙 주기의 파악도 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 큰열매모자반과 같은 대형 모자반류는 연령에 따라 엽체의 길이와 무게의 차이가 크고, 해마다 재생되는 주축 가지의 변화폭이 크게 나타나는 등(Murase 2001; Endo *et al.* 2013), 일반적인 방형구법에 의한 정량 조사를 통해 일정한 생장 및 성숙패턴을 분석하기에 어려움이 있었다.

따라서 이 연구에서는 제주 연안에 서식하는 큰열매모자반 자연개체군의 생태학적 시계열성 분석에 생식엽 길이와 무게 지수를 도입하여, 큰열매모자반의 생장과 성숙패턴을 명확히 밝힘으로써, 인위적인 증식 및 자연개체군의 효율적인 보호와 보전 관리의 과학적 근거를 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 분포 및 환경조사

큰열매모자반의 분포조사는 제주특별자치도 제주시 조천읍 조천리(33°32'23"N, 126°37'44"E)의 조하대 암반지역을 대상으로 정성 및 정량조사에 의해 실시하였다(Fig. 1). 서식지의 환경은 수온, 염분 및 용존산소농도를 YSI-85(YSI Inc., USA)로 매월 정성조사 시 현장에서 측정하였다. 또한 큰열매모자반 군락 서식지의 수중수온자료는 Hobo UA-002-64 data logger를 서식지역 수중에 설치하고, 1시간 간격으로 모니터링된 데이터를 이용하여 분석하였다. 일조시간은 한국천문연구원의 자료를 기준으로 하였다.

2. 개체군 생태조사

큰열매모자반의 생장 및 성숙 주기는 2018년 5월부터 2019년 6월까지 잠수조사를 통해 매월 방형구법을 이용한 정량조사법으로 실시하였으며, 시료 채취는 매월 방형구(1m×1m)를 사용하여, 최소한 3반복구에서 실시하였다. 현존량 분석은 방형구별 큰열매모자반의 출현 개체수 및 중량을 단위면적당 밀도(individuals·m⁻²) 및 습중량(kg·wet-wt·m⁻²)으로 환산하였다.

3. 형태형질, RFL과 RFW 지수

채집된 시료는 아이스박스에 넣어 즉시 실험실로 운반하고 유수식 저온수조(가로 2m×세로 3m×깊이 2m)에서 보관한 후 개체별 엽장(thallus length), 중량(thallus wet weight)과 생식기탁 형성 유무 및 출현 비율을 월별로 분석하였다.

개체별 생식엽과 영양엽의 구분은 Fig. 2와 같이 엽체 전체를 고르게 펼친 상태에서 생식기탁이 형성된 부분과 형성되지 않은 부분을 나누어 횡단으로 절제하여 이루어졌

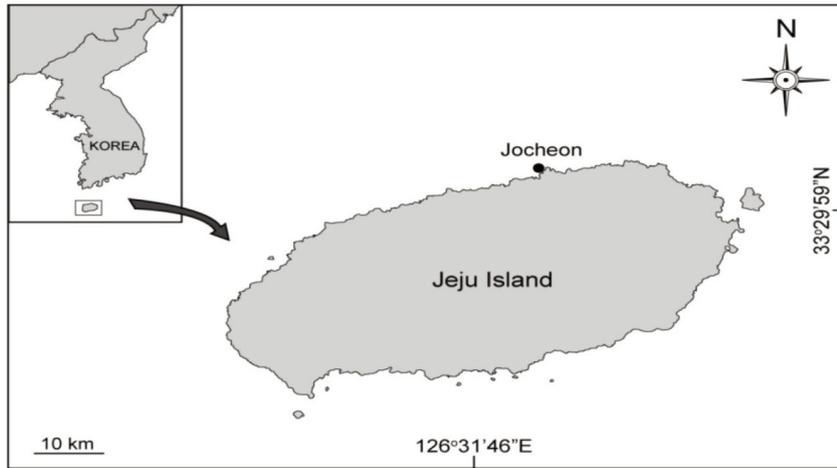


Fig. 1. Map of the sampling site at Jocheon, Jeju Island, Korea. Closed circles represent the population distribution of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh.

다. 또한, 생식기탁이 형성되기 전이지만 주지가 성장하여 생식기탁을 형성할 수 있는 가지들이 분지된 부분도 생식엽으로 구분하였다.

개체별 생식엽의 중량은 전체 엽체 중 생식기탁, 이를 지지하는 가지와 주지, 그리고 잎과 기낭을 모두 합하여 측정하였고, 생식엽의 길이는 생식기탁이 존재하는 가장 긴 주지 부분의 길이로 나타내었다. 영양엽의 중량은 생식엽을 제외한 기존의 주지, 새롭게 만들어진 주지 그리고 잎, 기낭과 부착기를 포함하여 측정하였고, 길이는 생식엽 부분을 제외하고 부착기를 포함한 영양엽 부분을 측정하였다(Fig. 2).

생식엽 길이지수 (Reproductive Fronds Length Index; RFL)와 생식엽 무게지수 (Reproductive Fronds Weight Index; RFW)는 다음과 같이 환산하였다.

$$RFL = (\text{reproductive fronds length} / \text{total fronds length}) \times 100$$

$$RFW = (\text{reproductive fronds weight} / \text{total fronds weight}) \times 100$$

생식엽의 자원배분 (Reproductive allocation; RA) 및 영양엽의 자원배분 (Vegetative allocation; VA)은 다음과 같이 환산하였다.

$$RA (\%) = (RFL + RFW) / 2$$

$$VA (\%) = 100 - RA$$

4. 성숙 유효 적산온도

큰열매모자반의 성숙 유효 적산온도 추정은 생장 및 현

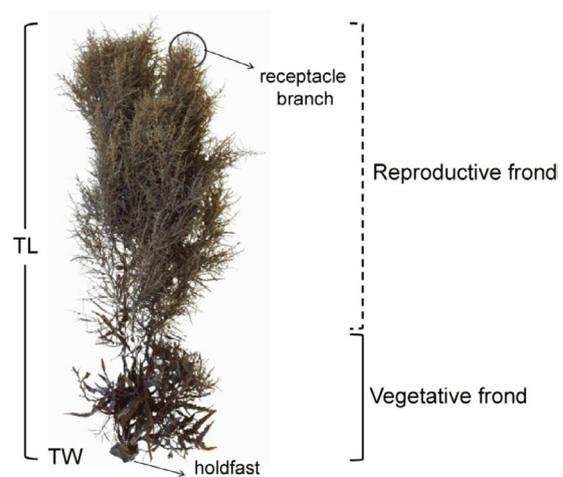


Fig. 2. Diagram of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh. TL, total length; TW, total weight.

장수온 자료를 근거로 하여 큰열매모자반의 생물학적 영점온도를 14°C로 설정하였고(Fig. 3), 조사기간동안 조사해역의 수중에 설치한 수온센서 (Hobo UA-002-64 data logger)의 측정치와 제주 지역의 연안수온 관측치(2013년부터 2019년까지 6년간 큰열매모자반의 주생장기인 9월부터 6월까지의 누적치를 평균한 값)를 근거로 하여 1일 평균 생육수온에서 성숙 유효 하한수온(14.1°C)을 뺀 값을 누적하여 구하였다(Hwang *et al.* 2010, 2015).

5. 통계분석

생장 자료의 통계 분석은 분산분석법(one-way ANOVA)

Table 1. Morphological data of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea from May 2018 to June 2019

Month	Growth and maturation				
	Length (cm)	Weight (kg)	Density (individuals m ⁻²)	Biomass (kg·wet-wt·m ⁻²)	Receptacle formation
May 2018	104.6±32.2 ^{abc}	1.9±2.5 ^{abc}	3.3±2.3	6.3±1.7	++
June	135.3±20.0 ^a	2.5±1.2 ^{ab}	2.3±1.2	5.7±1.2	+++
July	99.8±26.9 ^{abc}	0.9±0.5 ^{cd}	3.0±1.0	2.6±0.5	+++
August	77.9±25.4 ^{abc}	0.3±0.2 ^d	4.7±1.5	1.3±0.2	+
September	68.6±15.1 ^{abc}	0.3±0.2 ^{cd}	5.0±1.0	1.5±0.2	-
October	53.1±4.7 ^d	0.6±0.1 ^{cd}	4.7±1.2	3.0±0.1	-
November	65.9±14.7 ^{cd}	1.0±0.7 ^{cd}	4.3±3.1	4.5±0.7	-
December	81.4±21.8 ^{abc}	0.7±0.4 ^{cd}	3.7±0.6	2.6±0.4	-
January 2019	70.4±13.0 ^{abc}	0.3±0.2 ^{cd}	5.7±0.7	1.9±0.2	-
February	108.3±24.2 ^{abc}	1.1±0.3 ^{cd}	4.7±1.4	5.3±0.3	-
March	74.4±31.1 ^{abc}	0.5±0.5 ^{cd}	7.0±1.0	3.8±0.5	-
April	84.7±35.8 ^{abc}	0.5±0.5 ^{cd}	7.7±4.2	4.0±0.5	+
May	132.3±29.4 ^{ab}	3.6±2.1 ^a	5.0±2.6	17.8±2.1	++
June	106.8±14 ^{abc}	1.7±0.9 ^{abc}	1.7±1.2	2.8±0.9	+++

Values (mean±SD) in the same column having different superscript letters are significantly different ($p < 0.05$) a posteriori Scheffe test -, sterile; receptacle formation represented as follows: +, less than 30%, ++, 30~50%, +++, more than 50%

을 이용하여 실시하였고, 사후검정은 Scheffe test를 이용하였다. 생식엽 및 영양엽 길이 및 중량지수의 검정을 위하여, 엽장 및 중량과 Pearson's 상관분석을 실시하였다. 통계 프로그램은 SPSS ver 21을 이용하여 이루어졌다.

결 과

1. 분포환경

큰열매모자반이 서식하는 조사해역은 수심 3~5 m 구간 의 암반 지역으로 큰열매모자반 이외에도 큰잎모자반, 톱니모자반과 팽생이모자반 등이 혼재하여 서식하고 있었으며, 조간대 지역에는 지충이, 툫, 파래, 우뚝가사리, 도박류 등이 서식하는 등 해조상이 잘 발달되어 있었다.

조사 기간 동안 평균수온은 18.7°C였고, 최고수온은 2018년 8월에 25°C였으며, 이후 점차 하강하여 2019년 2월에 최저수온인 14.1°C를 기록하였다(Fig. 3). 일조시간은 2018년 5~7월은 14시간으로 장일, 2018년 11월부터 2019년 1월까지 10~11시간으로 단일시기에 속하였다.

2. 형태형질과 성장 및 성숙

큰열매모자반의 엽장은 2018년 6월에 135.3 cm로 최고값을 보였으며, 2018년 10월에 53.1 cm로 최저값을 나타내

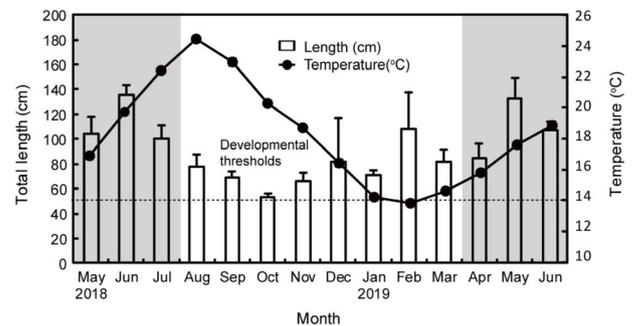


Fig. 3. Relationship between seawater temperature and the length of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea from May 2018 to June 2019. The vertical bar represents standard deviations. The shaded area indicates the receptacle branch formation in the habitat. The dotted line indicates developmental thresholds.

었다. 엽장의 길이생장은 6월 이후 점차 감소하였다가 11월부터 다시 증가하는 패턴을 가졌다(Fig. 3). 엽체의 중량은 2019년 5월에 3.6 kg·wet-wt으로 최고값을 보였으며, 8~9월에 0.3 kg·wet-wt으로 최저값이었다(Table 1). 중량의 증가는 6월 이후 점차 감소하여 8~9월에 최저에 도달하였다가 10월부터 다시 증가하였다. 단위면적당 엽체의 평균밀도는 2019년 4월에 7.7 individuals·m⁻²로 최고값이었고, 2019년 6월에 1.7 individuals·m⁻²로 최저값을 보였다(Table 1). 단위면적당 현존량은 2019년 5월 17.8 kg·wet-wt·m⁻²로 최고값이었고, 2018년 8월에 1.3 kg·wet-

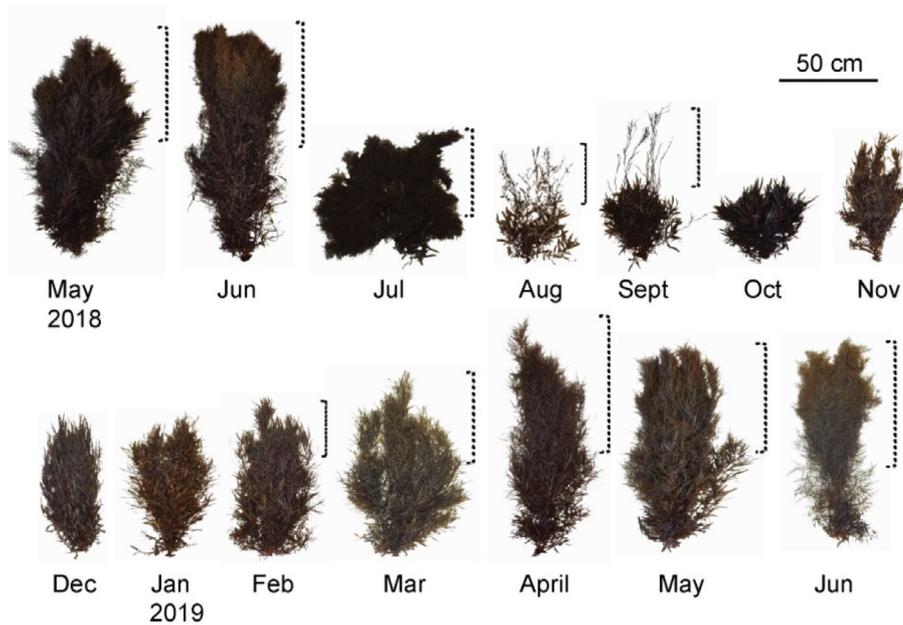


Fig. 4. Monthly morphological features of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh at Jocheon, Jeju Island, Korea from May 2018 to June 2019. The dotted lines indicate reproductive fronds.

Table 2. Pearson's correlation coefficient analysis between the total length, total weight, vegetative frond length, vegetative frond weight, reproductive frond length, and reproductive frond weight of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea

	Total length	Vegetative length	Reproductive length	Total weight	Vegetative weight	Reproductive weight
Total length	1					
Vegetative length	0.352**	1				
Reproductive length	0.797***	-0.284**	1			
Total weight	0.713***	0.228*	0.584***	1		
Vegetative weight	0.561***	0.509***	0.246**	0.813***	1	
Reproductive weight	0.677***	0.012	0.686***	0.933***	0.548***	1

*, $p < 0.1$; **, $p < 0.05$; ***, $p < 0.01$

wt·m⁻²로 최저값이었다(Table 1). 큰열매모자반의 생식기탁 형성은 2018년 4월부터 형성되기 시작하여, 6~7월에 최대에 달하였다가 8월 이후 소실되었고, 2019년 4월부터 다시 생식기탁이 형성되었다(Table 1, Fig. 4).

큰열매모자반의 엽장, 영양엽 길이, 생식엽 길이, 중량, 영양엽 중량 및 영양엽 길이 간의 상관관계를 분석한 결과 엽중량과 생식엽 중량($r=0.933, p < 0.01$), 엽장과 생식엽 길이($r=0.797, p < 0.01$) 및 엽장과 중량($r=0.713, p < 0.01$)의 순으로 0.7 이상의 매우 높은 양의 상관관계를 보였으나, 나머지 조합 조건에서는 이보다 낮은 상관관계를 보였다(Table 2).

3. RFL과 RFW 지수

큰열매모자반 생식엽 길이지수(RFL)는 2019년 6월에 62.3로 최고값을 보였으며, 2018년 10월부터 2019년 1월까지 생식엽이 출현하지 않은 기간을 제외하면, 2018년 9월(평균수온 23.5°C)에 32.6로 최저값을 보였다(Fig. 5). 생식엽 길이지수는 8월 이후 점차 감소하였다가 10월부터 1월까지 0이었으며, 2월부터 다시 증가하기 시작하여 6월에 최대값을 보였다.

생식엽 중량지수(RFW)는 2019년 6월에 76.4로 최고값을 보였으며, 2018년 10월부터 2019년 1월까지 생식엽이 출현하지 않은 기간을 제외하면, 2019년 9월에 3.0으로 최

저값을 보였다(Fig. 5). 생식엽 증량지수는 2018년의 경우 7월(평균수온 22.9°C)에 최고값을 보인 반면 2019년의 경우 6월(평균수온 19.3°C)에 최고값을 보였다.

큰열매모자반의 영양엽 자원배분은 2018년 10월부터 2019년 1월까지 100%를 나타내었으며, 2월부터 점차 감소하여 6월에 최저값을 보인 이후 다시 증가하는 경향이 었다(Fig. 6). 큰열매모자반의 생식엽 자원배분은 2019년

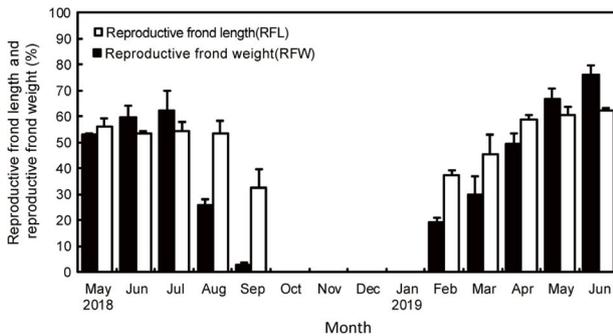


Fig. 5. Percentage of reproductive frond lengths and weights to the total length and weight of thalli of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea from May 2018 to June 2019. The vertical bar represents standard deviations.

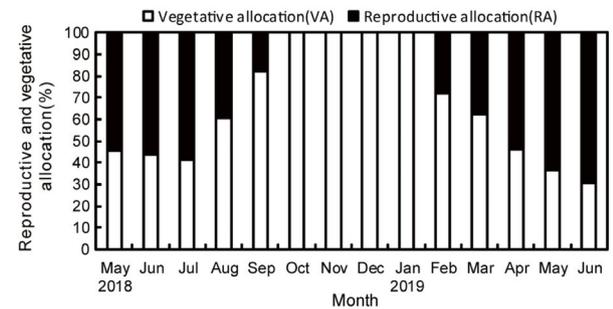


Fig. 6. Reproductive and vegetative allocations of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea from May 2018 to June 2019.

6월에 69.3%로 최고값을 보였으며, 2019년 1월까지 생식엽이 출현하지 않은 기간을 제외하면, 2018년 9월에 17.8%로 최저값을 보였다(Fig. 6). 생식엽 자원배분은 2018년의 경우 7월에 58.4%로 최고값을 보인 이후, 점차 감소하였다가, 2월부터 다시 증가하는 경향을 보였다(Fig. 6).

4. 성숙 유효 적산온도

본 조사지역의 큰열매모자반의 개체군의 생물학적 영점온도는 14.1°C로 나타났으며, 성숙 유효 적산온도는 726.3 ± 105.6 degree-days로 나타났다(Table 3).

고찰

조간대 및 조하대에서 해조류의 서식 위치는 종종 적정 서식대에 분포하는 종들의 상호경쟁에서 성장, 생존 및 번식에 영향을 미치게 된다(Wright *et al.* 2004). 이러한 서식 환경차이는 해조류에서 나타나는 현저한 서식지역별 형태 변이의 원인이 되기도 한다(Fowler-Walker *et al.* 2006). Endo *et al.* (2013)는 일본 Goshiki-hama 연안 큰열매모자반의 연령과 크기를 기반으로 한 수심별 형태 비교연구에서 연령과 전체길이 및 무게에서 유의한 차이가 있었고, 약 6m 수심의 개체는 10m 수심의 개체보다 짧고 무성한 형태적 차이를 보고하였다. 큰열매모자반이 서식하는 본 조사지역의 수심은 3~5m였고, 큰열매모자반의 최대길이는 135cm로, 일본 Fukawa bay의 수심 8m에 서식하는 큰열매모자반의 최대길이 196.5cm보다 작았고, 정성조사를 통하여 분석한 결과 수심별 엽체의 성장형태는 수심이 깊어질수록 신장형을 보인다는 점에서 Endo *et al.* (2013)의 결과와 유사한 경향을 보였다.

본 조사지역 큰열매모자반의 단위면적당 현존량은 8월에 최소값, 5월에 최고값을 보이는 성장패턴을 보여, 일

Table 3. Calculation of degree-days for the maturation of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea from September 2013 to June 2019

Periods (seawater temperature)	Degree days (°C day)	Remark
1st Oct 2013 (24.3°C) – 30th Jun 2014 (21.16°C)	784.4	Developmental thresholds: 14.1°C
1st Oct 2014 (22.62°C) – 30th Jun 2015 (18.1°C)	518.8	
1st Oct 2015 (22.24°C) – 30th Jun 2016 (19.9°C)	755.8	
1st Oct 2016 (22.5°C) – 30th Jun 2017 (19.5°C)	737.4	
1st Oct 2017 (23.8°C) – 30th Jun 2018 (22.2°C)	746.4	
1st Oct 2018 (22.6°C) – 30th Jun 2019 (20.9°C)	815.2	
Mean	726.3 ± 105.6	

Step	I	II	III	IV	V							
Phase	Vegetative growth	Maturity preparation	Maturation	Egg release	Resting							
Seawater temperature(°C)	20.7~14.5	14.1~16.1	17.3~20.2	19.3~22.9	25.0~23.5							
Daylength (hrs)	11~10	11~13	14	14	13~12							
Degree-days	392.1±24.8	470.0±63.8	726.3±105.6	991.6±126.1	-							
Reproductive allocation(%)	0	28.3~54.1	54.5~69.3	56.4~69.3	39.7~17.8							
Morphology												
Month	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	April	May	Jun	Jul	Aug	Sept

Fig. 7. Diagrammatic schedule of the reproduction steps of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in the natural population in Jocheon, Jeju Island, Korea according to environmental conditions, degree-days and reproduction allocation. The dotted lines indicate reproductive fronds.

본 Fukawa bay에 서식하는 큰열매모자반 (Murase and Kito 1998)과 유사한 현존량 증감 경향을 보였다. 그러나 큰열매모자반 엽체의 서식밀도는 본 조사지역이 일본 Fukawa bay보다 약 8배 이상 낮게 나타났다. 이와 같이 큰열매모자반의 경우 현존량의 증감 패턴은 유사할지라도 서식지의 환경에 따라 단위면적당 현존량 및 서식밀도가 크게 달라질 수 있음을 보여준다.

모자반의 성장과 성숙시기는 수온, 광량 및 광주기 등 환경요소의 크게 영향을 받으며 (Umezaki 1983; Uchida 1993), 수심 (depth), 파도에 대한 노출 (wave exposure) 정도 등 서식장소에 따라 다양한 패턴을 나타낸다 (Wernberg and Thomsen 2005; Endo et al. 2013). Umezaki (1983)는 계절에 따라 모자반류의 성숙패턴을 구분하였는데, *S. patens*와 *S. serratifolium*는 수온이 11~18°C로 상승하는 4~5월의 봄철에 최대엽장에 도달한 후 성숙 및 난을 방출하는 봄형 식물 (spring plants)로, *S. thunbergii*와 *S. miyabe*는 6~7월에 최대 엽장에 도달한 후 7~8월의 여름철에 난을 방출하는 여름형 식물 (summer plants)로 각각 구분하였다. 이와 같은 연구결과에 의하면 본 조사 대상인 큰열매모자반은 계절에 따른 성숙패턴이 5~6월에 최대엽장을 갖고 6~7월에

산란하는 여름형 식물로 구분된다.

적산온도는 생물학적 영점온도를 적용하여 종별 성장과 성숙 등 각 발달단계에 따라 누적된 온도의 총합 (Baskerville and Emin 1969; Allen 1976)으로 해조류에 분야에서도 적용되고 있다 (Dring 1974; Rietma 1982; Hwang et al. 2003, 2010, 2015). 큰열매모자반은 다년생 부착기와 줄기 (stem)로부터 주지 (main branch)가 해마다 생성되며, 난 방출 후에는 생식기탁을 달고 있던 주지들은 퇴화되지만, 새로운 주지가 지속적으로 성장하여 다음해에 다시 생식기탁을 형성하는 특징을 보였다. 또한, 휴지기인 8~9월을 제외하고 모든 시기에 엽체의 생장이 관찰되었으며, 2018년 7월과 2019년 6월에 난 방출이 이루어지는 것으로 나타났다. 큰열매모자반의 경우 개체군 조사에서 생물학적 영점 온도는 14.1°C로 추정되었으며 (Table 3), 성숙 유효 적산온도 726.3 degree-days에 이르면 생식엽 형성의 피크를 나타내었다. 이는 옥덩굴 270 degree-days (Hwang et al. 2003), 뽕미역 236 degree-days (Hwang et al. 2010) 및 뜰부기 196 degree-days (Hwang et al. 2015)보다 매우 높은 값으로, 다년생이며 여름형 식물인 큰열매모자반의 생태적 특성이 반영된 결과로 보여졌다. 본 조사에서 큰열매모

자반의 난 방출 시기는 2018년도보다 2019년이 보다 빠른 것으로 나타났는데, 이는 2018년도의 적산온도가 2018년보다 68.8 degree-days 높았던 것이 영향을 미쳤던 것으로 판단되었다.

해조류의 성장 (growth), 유지 (maintenance)와 번식 (reproduction)을 위한 생존전략으로서 자원배분(resource allocation)에 대한 개념은 해조류 개체의 생리적 특성과 생활사를 이해하는 방법으로 적용될 수 있을 것이다. 해조류 분야에서도 이를 이용한 연구가 이루어지고 있는데 (Arenas *et al.* 1995; Gillespie and Critchley 2001; Chu *et al.* 2011), 갈조류에서는 일반적으로 전체 엽중량 중 생식기탁의 건중량 또는 수를 생식자원 배분량 추산에 이용하고 있다 (Arenas *et al.* 1995; Gillespie and Critchley 2001). 하지만 생식자원 배분을 정의하기 위한 해조류의 종별 구조와 기능에 관해서는 여전히 밝혀져야 할 부분들이 많다.

본 조사지역 큰열매모자반의 생식엽에 대한 자원배분 패턴은 2월부터 4월까지의 길이와 중량에 균일한 자원 배분이 이루어지면서 성장하지만, 5월부터 난 방출기인 6~7월까지는 52.8~76.4로 RFW만 증가하여, 생식엽 길이보다 중량에 자원배분이 집중되는 것으로 나타났다. 또한 RFL의 상승이 멈추었던 4월은 생식기탁이 생성되는 시기였고, RFW가 최고값을 보인 '18년 7월(RFW 62.3)과 '19년 6월(RFW 76.4)은 각각의 난 방출시기와 일치하였다 (Fig. 5). RFL과 RFW는 수온과 일조시간이 증가하는 7월(22.9°C, 14L)까지 피크에 도달하였고, 일장이 짧아지기 시작하고 최고수온 시기인 8월(25°C, 13L)부터 낮아지기 시작하였다. 이러한 큰열매모자반 생식엽의 자원배분 패턴은 번식을 위한 생식기탁의 생성, 성숙 및 소실과 관련이 깊은 것으로 보여진다. RFL과 RFW를 기반으로 산출한 큰열매모자반의 연평균 자원배분은 영양엽 65.7%, 생식엽 34.3%으로 영양엽이 우세하였다 (Fig. 6). 또한 큰열매모자반의 성장 및 성숙단계는 성숙에 요구되는 환경조건과 생식배분과의 관계에 따라 5단계로 구분되었다 (Fig. 7). 1단계는 10~1월(수온 20.7~14.5°C)까지의 영양생장단계, 2단계는 2~4월(수온 14.1~16.1°C)까지의 생식엽 성장단계, 3단계는 5~6월(수온 17.3~20.2°C)까지 성숙단계, 4단계는 6~7월(수온 19.3~22.9°C)까지의 난 방출단계 그리고 5단계는 8~9월(수온 25.0~23.5°C)까지의 휴지기단계였다 (Fig. 7). 이와 관련하여 Arenas *et al.* (1995)은 *S. muticum*의 길이가 2~5월까지 증가하였고, 전체 현존량은 5월에 최고치를

보였으며, 생식구조의 현존량은 6월에 최고에 달하였음을 보고하여 본 연구결과와 생장단계와 유사한 경향을 나타내었다.

해조류의 최대 성숙 시기의 중량에 대한 생식엽 중량의 자원배분은 *S. fusiforme*에서 14% (Yoshida and Shimabukuro 2017), *S. muticum*에서 20~24% (Arenas and Fernández 1998)인 반면에, 일본 Fukawa bay의 큰열매모자반은 34%로 보고되었다 (Murase *et al.* 2000a). 본 조사결과에서도 큰열매모자반의 생식자원 배분량은 62%로 높게 나타났는데, 생식엽에 딸린 부속조직들을 감안하더라도, 큰열매모자반의 생식에 대한 배분이 높다는 것을 알 수 있었다. 큰열매모자반은 *F. serratus*에 비하여 생식배분 비율은 높지만 번식에 소요되는 기간은 1개월 내에 난 방출이 종결되어, *F. serratus*의 난 방출기간 5~9월 (Brenchley *et al.* 1996)보다 짧은 것으로 나타났다. 이는 다년생 식물의 경우 생식에 사용하는 에너지를 최소화하고 해마다 생식에 자원을 적절히 분배하려고 하는 경향이 있기 때문 (Bogdanowicz *et al.* 2011)일 것으로 보인다. 또한 큰열매모자반은 수명이 9년 이상으로 보고되었고 (Murase and Kito 1998), *F. serratus*는 3~4년으로 알려져 있어 (Araújo *et al.* 2014), 해조류가 생식에 투자하는 자원배분량뿐만 아니라 난 방출 기간의 차이는 해조류 종의 번식과 수명에 영향을 미치는 중요한 요인이 될 수 있을 것으로 보여진다.

이 연구에서는 제주연안에 서식하는 큰열매모자반 자연 개체군의 생태학적 조사에 적산온도뿐만 아니라 생식엽 길이와 중량지수 등의 생식자원 배분량 개념을 적용하여, 제주 연안 큰열매모자반의 성장과 성숙패턴을 규명하였다. 즉, 적산온도를 통한 큰열매모자반의 난 방출 시기는 6~7월이며, 적산온도는 747.4~815.2 degree-days 그리고 생식자원배분량은 58.4~69.8%로 나타났다. 이들 생식특성 정보를 이용하여 큰열매모자반의 성숙모조의 적절한 확보시기를 인공종묘생산에 적용할 수 있으므로, 이를 통해 큰열매모자반의 대량양식을 통한 인위적인 증식 및 자연 개체군의 효율적인 보호와 보전 관리에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

적 요

큰열매모자반은 제주도 연안 생태계에서 수관층을 형

성하는 중요한 다년생 갈조류이다. 이 연구는 2018년 5월부터 2019년 6월까지 제주연안에서 큰열매모자반 개체군의 성장 및 생식패턴을 밝히기 위하여 수행되었다. 큰열매모자반 개체군의 정량조사를 통해 월별 형질분석, 밀도 및 현존량 분석을 실시하였다. 또한 큰열매모자반의 생식자원 배분 특성을 조사하기 위하여 전체 엽체길이 및 엽중량에 대한 생식엽길이와 중량비율을 측정하였다. 조사지역에서 큰열매모자반의 최대 엽장은 6월에 135.3 ± 20.0 cm, 최대 엽중량은 5월에 평균 3.6 ± 2.1 kg·wet-wt., 평균밀도는 4.5 individuals·m⁻² 및 평균현존량은 4.6 kg·wet-wt.·m⁻²였다. 생식기탁의 형성은 4~8월(수온 16.1~25.0°C)까지 관찰되었으며, 난 방출 시기는 6~7월(수온 19.3~22.9°C)이었다. 엽체의 발달은 수온 14.1°C 이상의 조건에서 이루어졌으며, 성숙에 요구되는 유효 적산온도는 726.3 degree-days였다. 큰열매모자반의 생식배분은 6월에 최대 69.3%로 나타났다. 큰열매모자반의 성장과 성숙패턴은 생장기(10~1월), 생식시작기(2~4월), 성숙기(5~6월), 난 방출기(6~7월) 및 휴지기(8~9월)로 구분되었다.

사 사

이 연구는 해양수산부 연구교습어장운영사업 및 국립수산물과학원 연구비지원(R2019009, P2019028)으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Allen JC. 1976. A modified sine wave method for calculating degree-days. Environ. Entomol. 5:388-396.
- Araújo RM, EA Serrão, I Sousa-Pinto and P Åberg. 2014. Spatial and temporal dynamics of fucoid populations (*Ascophyllum nodosum* and *Fucus serratus*): A comparison between central and range edge populations. PLoS One 9:1-10.
- Arenas F, C Fernández, JM Rico, E Fernández and D Haya. 1995. Growth and reproductive strategies of *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt and *Cystoseira nodicaulis* (Whit.) Roberts. Sci. Mar. 59:1-8.
- Arenas F and C Fernández. 1998. Ecology of *Sargassum muticum* (Phaeophyta) on the North Coast of Spain: III. Reproductive ecology. Bot. Mar. 41:209-216.
- Baskerville GL and P Emin. 1969. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. Ecology 50:514-517.
- Bogdanowicz AM, P Olejniczak, M Lembic and W Żukowski. 2011. Costs of reproduction in life history of a perennial plant *Carex secalina*. Cent. Eur. J. Biol. 6:870-877.
- Brenchley JL, JA Raven and AM Johnston. 1996. A comparison of reproductive allocation and reproductive effort between semelparous and iteroparous fucoids (Fucales, Phaeophyta). Hydrobiologia 326:185-190.
- Chandraraj S, B Prakash and K Navanath. 2010. Immunomodulatory activities of ethyl acetate extracts of two marine sponges *Gelliodes fibrosa* and *Tedania anhelans* and brown algae *Sargassum ilicifolium* with reference to phagocytosis. Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci. 1:302-307.
- Choi BW, GS Ryu, SH Park, ES Kim, JH Shin, SS Roh, HC Shin and BH Lee. 2007. Anticholinesterase activity of Plastoquinones from *Sargassum sagamianum*: Lead compounds for Alzheimer's disease therapy. Phytother. Res. 21:423-426.
- Chu SH, QS Zhang, SK Liu, SB Zhang, YZ Tang, ZC Lu and YQ Yu. 2011. Trade-off between vegetative regeneration and sexual reproduction of *Sargassum thunbergii*. Hydrobiologia 678:127-135.
- Dring MJ. 1974. Reproduction. pp. 814-837. In Algal Physiology and Biochemistry, WDP Stewart (ed.). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Endo H, T Nishigaki, K Yamamoto and K Takeno. 2013. Age- and size-based morphological comparison between the brown alga *Sargassum macrocarpum* (Heterokonta; Fucales) from different depths at an exposed coast in northern Kyoto, Japan. J. Appl. Phycol. 25:1815-1822.
- Fowler-Walker MJ, T Wernberg and SD Connel. 2006. Differences in kelp morphology between wave sheltered and exposed localities; morphology plastic or fixed traits? Mar. Biol. 148:755-767.
- Gillespie RD and AT Critchley. 2001. Reproductive allocation and strategy of *Sargassum elegans* Suhr and *Sargassum incisifolium* (Turner) C. Agardh from Reunion Rocks, KwaZulu-Natal, South Africa. Bot. Mar. 44:231-235.
- Hwang EK, CS Park and JM Baek. 2006. Artificial seed production and cultivation of the edible brown alga, *Sargassum fulvellum* (Turner) C. Agardh: Developing a new species for seaweed cultivation in Korea. J. Appl. Phycol. 18:251-257.
- Hwang EK, CS Park, JW Han, WJ Shin, CG Choi and CH Sohn. 2003. Growth and maturation of a green alga, *Caulerpa okamurae* Weber van Bosse. Algae 18:217-223.
- Hwang EK, HC Yoo, DS Ha and CS Park. 2015. Growth and maturation period of *Silvetia siliquosa* in the natural population in Jindo, South Korea. Korean J. Fish. Aquat. Sci. 48:745-751.
- Hwang EK, YG Gong and CS Park. 2010. Ecological characteris-

- tics of the endangered brown alga, *Undariopsis peterseni* (Kjellman) Miyabe et Okamura, at Jeju Island, Korea: growth and maturation. Korean J. Fish. Aquat. Sci. 43:63–68.
- Kamei Y and CK Tsang. 2003. Sargaquinoic acid promotes neurite outgrowth via protein kinase A and MAP kinases-mediated signaling pathways in PC12D cells. Int. J. Devel. Neurosci. 21:255–262.
- Kang J, M Khan, N Park, J Cho, M Lee, H Fujii and Y Hong. 2008. Antipyretic, analgesic, and anti-inflammatory activities of the seaweed *Sargassum fulvellum* and *Sargassum thunbergii* in mice. J. Ethnopharmacol. 116:187–190.
- Kim EA, SY Kim, JS Kim, JY Oh, HS Kim, WJ Yoon, DH Kang and SJ Heo. 2019. Tuberatolide B isolated from *Sargassum macrocarpum* inhibited LPS-stimulated inflammatory response via MAPKs and NF- κ B signaling pathway in RAW264.7 cells and zebrafish model. J. Funct. Food 52:109–115.
- Kim SH, DS Choi, Y Athukorala, YJ Jeon, M Senevirathne and CK Rha. 2007. Antioxidant activity of sulfated polysaccharides isolated from *Sargassum fulvellum*. J. Food. Sci. Nutr. 12:65–73.
- Manzoor Z, VB Mathema, DB Chae, ES Yoo, HK Kang, JW Hyun, NH Lee, MH Ko and YS Koh. 2014. Extracts of the seaweed *Sargassum macrocarpum* inhibit the CpG-induced inflammatory response by attenuating the NF- κ B pathway. Food Sci. Biotechnol. 23:293–297.
- Murase N and H Kito. 1998. Growth and maturation of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh in Fukawa Bay, the Sea of Japan. Fish. Sci. 64:393–396.
- Murase N, H Kito, Y Mizukami and M Maegawa. 2000a. Productivity of a *Sargassum macrocarpum* (Fucales, Phaeophyta) population in Fukawa Bay, Sea of Japan. Fish. Sci. 66:270–277.
- Murase N, H Kito, Y Mizukami and M Maegawa. 2000b. Relationships between critical photon irradiance for growth and daily compensation point of juvenile *Sargassum macrocarpum*. Fish. Sci. 66:1032–1038.
- Murase N. 2001. Ecological study of *Sargassum macrocarpum* C. Agardh (Fucales, Phaeophyta). J. Shimonoseki Univ. Fish. 49:131–212.
- Oak JH and IK Lee. 2005. Taxonomy of the Genus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Korea I. Subgenus *Bactrophy-cus* Section *Teretia*. Algae 20:77–90.
- Oak JH and IK Lee. 2006. Taxonomy of the Genus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from Korea II. subgenus *Bactrophy-cus* section *Halochloa* and *Repentia*. Algae 21:393–405.
- Pang SJ, F Liu, TF Shan, SQ Gao and ZH Zhan. 2009. Cultivation of the brown alga *Sargassum horneri*: sexual reproduction and seedling production in tank culture under reduced solar irradiance in ambient temperature. J. Appl. Phycol. 21:413–422.
- Rietema H. 1982. Effects of photoperiod and temperature on macrothallus initiation in *Dumontia contorta* (Rhodophyta). Mar. Ecol. Progr. Ser. 8:187–196.
- Uchida T. 1993. The life cycle of *Sargassum horneri* (Phaeophyta) in laboratory culture. J. Phycol. 29:231–235.
- Umezaki I. 1983. Ecological studies of *Sargassum miyabei* Yendo in Maizuru Bay, Japan Sea. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 49:1825–1834.
- Wernberg T and MS Thomsen. 2005. The effect of wave exposure on the morphology of *Ecklonia radiata*. Aquat. Bot. 83:61–70.
- Wright JT, SL Williams and MN Dethier. 2004. No zone is always greener: variation in the performance of *Fucus gardneri* embryos, juveniles and adults across tidal zone and season. Mar. Biol. 145:1061–1073.
- Yende SR, UN Harle and BB Chaugule. 2014. Therapeutic potential and health benefits of *Sargassum* species. Pharmacogn. Rev. 8:1.
- Yoshida G and H Shimabukuro. 2017. Seasonal population dynamics of *Sargassum fusiforme* (Fucales, Phaeophyta), Suo-Oshima Is., Seto Inland Sea, Japan-development processes of a stand characterized by high density and productivity. J. Appl. Phycol. 29:639–648.
- Yoshida G, K Yoshikawa and T Terawaki. 2001. Growth and maturation of two populations of *Sargassum horneri* (Fucales, Phaeophyta) in Hiroshima Bay, the Seto Inland Sea. Fish. Sci. 67:1023–1029.
- Yoshida T, T Sawada and M Higaki. 1963. *Sargassum* vegetation growing in the Sea around Tsuyazaki, North Kyushu, Japan. Pac. Sci. 17:135–144.
- Zandi K, S Ahmadzadeh, S Tajbakhsh, Z Rastian, F Yousefi, F Farshadpour and K Sartavi. 2010. Anticancer activity of *Sargassum oligocystum* water extract against human cancer cell lines. Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci. 14:669–673.