Check for updates

JFMSE, 35(4), pp. 761~769, 2023.
수산해양교육연구, 제35권 제4호, 통권124호, 2023.
www.ksfme.or.kr
https://doi.org/10.13000/JFMSE.2023.8.35.4.761

넓미역(*Undariopsis peterseniana*)과 대황(*Eisenia bicyclis*)의 초기 생활사에 미치는 pH 및 염분 영향

윤 성 진†
†한국해양과학기술원(책임연구원)

Effects of pH and Salinity on the Early Life Cycle of Brown Algae (*Undariopsis peterseniana and Ecklonia bicyclis*)

Sung-Jin YOON†
†Korea Institute of Ocean Science & Technology(principal research scientist)

Abstract

It is insufficient to investigate ecophysiological response in the early life cycle of two brown alge, *Undariopsis peterseniana* and *Ecklonia bicyclis* exposed on environmental stress such as various pH ad salinities. Marine ecotoxicological assessment of *U. peterseniana* and *E. bicyclis*, which have different habitats was conducted to identify the effects of pH and salinity on the early life cycle. 48 hours of pH and salinity germination revealed linear concentration-response relationship from treatment groups. Germination of *U. peterseniana* and *E. bicyclis* zoospores exposed to pH was decreased rapidly at concentrations lower than pH 5.5 for 48 hours. Test organisms exposed to salinity germinated rapidly at a concentration higher than 15.0 psu. And the number of germinated individuals and germination was relatively low at lower than 15.0 psu. These results can be interpreted as exceeding the tolerance range in which normal metabolism can be performed in the case of *U. peterseniana* and *E. bicyclis* at concentrations below pH 5.5 and 15.0 psu. In conclusion, it can be predicted that the tolerance of *U. peterseniana* and *E. bicyclis* to environmental stress such as pH or salinity varies somewhat depending on habitat depth, freshwater inflow from land, or stress intensity.

Key words : *Undariopsis peterseniana*, *Ecklonia bicyclis*, pH and salinity, Ecological effect, Marine ecotoxicologcal assessment

Ⅰ. 서 론

생물검정은 기존의 화학적 분석에 의한 농도 개념에 추가적으로 다양한 물질 또는 환경조건에 대한 영향을 직·간접적으로 평가함으로써 미지의 물질이나 스트레스 발생 요인이 공존할 때 발생하는 독성 상승 또는 길항효과에 대하여 위해성을 통합적으로 평가할 수 있는 기능적 평가 방식으로 보고되었다(Rand and Petrocelli, 1985; Hooten and Carr, 1998; Park et al., 2008). 이와 같은 시험법은 “생태독성평가”라는 개념으로 미국과 EU 국가를 포함한 많은 국가에서 각 나라의 실정에 적합한 다양한 독성시험방법을 개발하였으며, 이를 공정시험법으로 제정하여 유해물질의 위해성 평가에 이용하고 있다(APHA, 1995; ISO, 1995; ASTM, 1996; NIWA, 1998; USEPA, 2002).

† Corresponding author : 054-791-8404, sjyon@kiost.ac.kr/orcid.org/0000-0002-5670-6745
※ 이 논문은 한국해양과학기술원 기관목적사업(PEA0116)의 연구비 지원으로 수행하였슴

표준시험방법은 생태계를 대표하는 분해자, 기초생산자 및 소비자 그룹별로 개발되고 있으며, 연중 공급이 가능하도록 배양하거나 키트 형태로 유지 가능한 생물을 시험생물로 선정하고 있다. 최근 국내에서는 건강한 해양생태계 구현에 따른 수산자원회복이라는 국가적 패러다임의 변화에 부합하여 환경평가 및 물질의 위해성 평가방법으로 다양한 분류군을 해양생물공정시험기준으로 등록하여 연안 환경의 평가도구로 활동되고 있다 (MOF, 2018).

현재 해양생물공정시험법에 등재된 대형 갈조류 미역(*Undaria pinnatifida*)과 다시마(*Saccharina japonica*) 시험방법의 측정요소(endpoint)는 유주자 발아율, 배우체성장률 및 아포체 성장률의 관찰이다(MOF, 2018). 두 종은 봄철부터 초여름까지 실험생물로 이용할 수 있기 때문에 연중 생태독성평가에 활용하는 것은 제한적이다(Lee, 2021). 생태독성평가에 이용되는 단년생 갈조류는 특정 시기에만 채집할 수 있기 때문에 생물의 배우체를 배양하여 실험에 사용하고 있다. 이와 관련하여 Lee et al. (2022)은 암·수 배우체를 분리하여 통제된 환경에서 계대배양을 함으로써 암배우체 생존 및 상대성장률을 측정요소로 하여 연중 평가가 가능한 해조류 생태독성평가 방법의 최적 환경조건 연구를 수행하였다. 배우체를 이용한 평가방법은 실험실에서 배양된 생물을 대상으로 하기 때문에 전문적인 분석기술이 필요하다. 이와 반면 유주자의 발아율이나 아포체 성장률은 현미경 상에서 관찰이 용이한 장점이 있어 현장 채집이 가능하고 표준시험물질 실험결과와 큰 차이가 없는 종들로 대체 가능하다면 실험생물로써 적용 가능할 것으로 판단된다.

해양에 서식하는 갈조류 중 넓미역(*Undariopsis peterseniana*)은 단년생 종으로써 수심 20 m 이하에서 주로 서식하며 8월경까지 성숙한 유주자가 방출되는 종이다(Yoon, 2015). 본 종의 자연군락은 해마다 감소하여 제주도를 포함한 남해안 일부 지역에서만 이용할 수 있는 한정된 자원으로 보호종으로 관리되고 있었으나 최근에는 동해안 울릉도 연안 조하대 수심 20m 이하에서 군락지가 발견되었으며, 넓은 지역에 서식하는 것으로 보고되었다(Yoon, 2015). 본 종은 따뜻한 물에서도 내성을 지닌 종으로써 미역이 생장하지 않은 여름철에 생태독성용 실험생물로 활용 가능한 것으로 판단되었다(Hwang et al., 2010a). 한편 대황(*Ecklonia bicyclis*)은 다년생 종으로써 경상북도 영덕, 울릉도와 독도 연안 저조선 부근에서 수심 10 m 전후의 조하대 지역에 분포하는 것으로 보고되었다(Kang et al., 2001). 본 종은 11월경부터 성숙한 유주자를 방출하여 겨울철 위해성 평가 생물로서 가치가 있으며, 이형세대교번을 하는 다시마목 해조류와 같이 배우체 세대에서 암·수 배우체를 분리되는 생활사를 가지고 있어 실험실 내에서도 배우체의 배양이 가능한 종이다(Lüning, 1980; Primo et al., 2010; FIRA, 2018; Lee and Kim, 2020).

한편 국내에서 갈조류를 대상으로 수행된 생물검정 연구는 대황과 미역 배우체와 아포체의 생존 및 상대성장률이 미치는 환경인자의 영향을 규명한 바 있으나(Lee et al., 2022) 초기 생활사 중 유주자 단계에서 배아 형성 및 성장과 관련된 연구는 수행된 바 없다. 특히 20 m 이하 수심에 서식하는 넓미역은 대량생산을 위한 자원 활성화 연구가 일부 수행된 바 있으나 초기 생활사에 미치는 환경인자의 영향을 규명한 연구는 미흡한 상황이다(Hwang et al., 2011, 2012). 따라서 본 연구는 향후 자원조성에 필요한 기초자료를 확보하기 위하여 해양생태독성평가를 통해 서식환경이 다른 두 종의 초기 생활사 중 자낭반에서 방출된 유주자의 배아 생장에 미치는 pH 및 염분의 영향을 규명하고자 하였다.

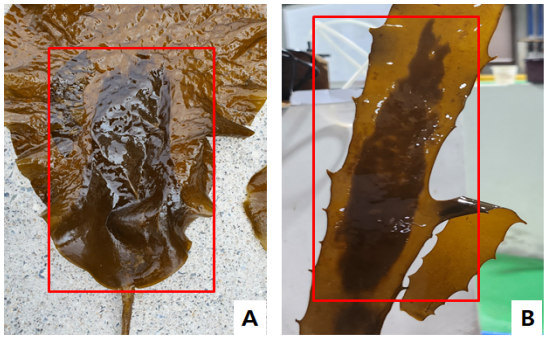
Ⅱ. 연구 방법

1. 실험생물 채집 및 관리

본 연구에 사용된 실험생물은 경상북도 울릉군 북면 현포리(37°31′N, 130°49′E)의 조하대에서 넓미역은 수심 25 m, 대황의 경우 5m 이내 수심에서 채집하였다. 실험생물은 채집 즉시 30분 이내에 실험실로 옮겨 12.0±1.0℃, 31.0±1.0 psu, pH 8.1±0.5, DO 10.0 mg/L 이상의 자연 해수 및 어두운 상태를 유지하면서 실험 전까지 유주자 방출을 최소화하였다.

2. 유주자 방출 유도

넓미역과 대황의 유주자는 0.45 ㎛ GF/C로 여과한 자연 해수를 멸균 처리한 후 수온을 15.0±1.0℃로 유지시키며 방출을 유도하였다. 유주자 방출은 자낭반이 형성된 성숙한 개체의 엽체를 잘라내어 멸균 해수로 부착물질을 세척하고, 거즈(gauze)로 감싸 물기를 제거한 후 1시간 동안 음건한 상태로 건조 스트레스를 주었다. 건조된 엽체는 다시 멸균 해수에 넣고 막대로 약하게 저어 유주자 방출을 유도하였으며, 10분 후 영상처리장치가 부착된 광학현미경(CKX41, Olympus, Japan)으로 100 개체/㎕ 이상 방출된 유주자 개체를 확인한 후 시험에 사용하였다[Fig. 1].



[Fig. 1] Mature sporophytes of *Undariopsis peterseniana* (A) and *Ecklonia bicyclis* (B) used in the experiment.

3. 실험생물의 pH 및 염분 노출 실험

실험은 정수방식(static test)으로 실시하였다. 수소이온농도(pH) 및 염분 노출 실험은 항온실 내에서 수행하였으며, 실험과정 중 시험구 내 배양액의 수온 차이를 최소화하기 위하여 배양용기(24-well plate)를 무작위로 배치하였다. 실험용수의 pH는 수질측정기(HQ400, HACH company, USA)를 사용하여 멸균 해수에 염산(HCl)을 넣어 단계적으로 희석하여 pH 8.0(대조구), 7.5, 7.0, 6.5, 6.0, 5.5, 5.0, 4.5 농도로 조제하였다. 염분은 염분측정기(YSI 3100, YSI Inc., USA)를 사용하여 멸균 해수에 1차 증류수를 넣어 가장 높은 농도인 대조구(31.0±1.0 psu)를 기준으로 25.0, 20.0, 15.0, 10.0, 5.0 psu로 조절하였다. 수온은 15.0±1.0℃ 범위를 유지하였다. 실험은 총 72시간 동안 수행되었으며, 광도는 50 ㎛mol photon $m^{-2}s^{-1}$ 상태를 유지하였다. 실험용액은 24-well plate에 노출 농도별로 2 mL를 채웠으며, 각각의 용기에 유주자 용액 10 ㎕씩을 넣고 실험하였다. 반복구는 농도별로 4개를 두었으며, 광주기는 12시간 낮과 밤(12L:12D)으로 조절하였다. 각각의 처리구에서 관찰된 생물의 노출 영향 평가는 영상처리 시스템이 부착된 광학현미경(×20)으로 48시간과 72시간 발아한 개체(최소 100개체)를 촬영한 후 계수하여 발아율(%, 발아한 개체수/총 개체수)을 산출하였다. 또한 발아한 후 성장한 배아는 분지되지 않은 상태를 유지하고 있었기 때문에 발아체 실험과 동일하게 배아를 촬영하여 길이를 측정하여 대조구와 비교하였다.

4. 통계처리

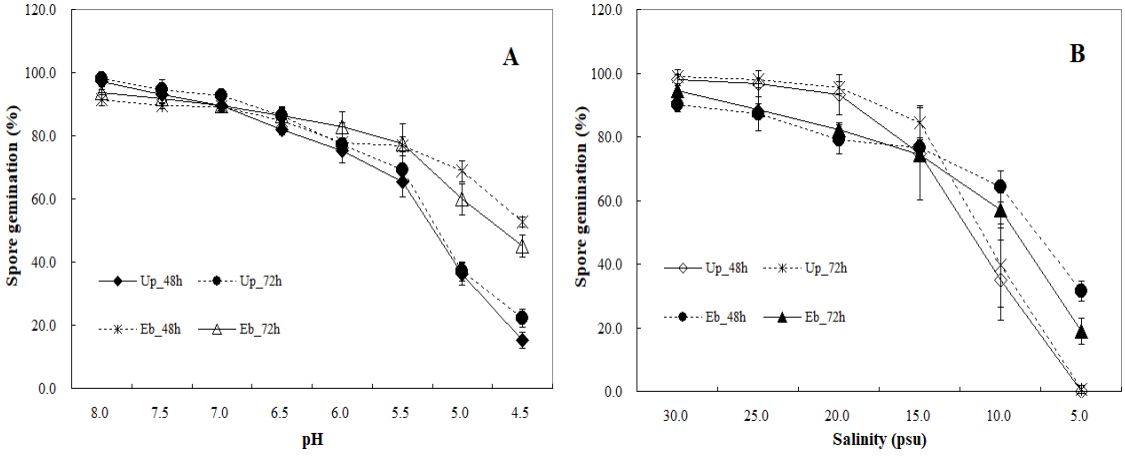
pH 및 염분 농도별 실험생물의 발아율 분석은 USEPA (1993)에서 제시한 분석 과정을 따라 Toxical 5.0 (Tidepool Scientific Software, USA) 프로그램을 이용하여 Dunnett's test와 maximum likelihood probit analysis 과정을 거쳐 산출하였다. 또한 pH와 염분에 대한 각각의 실험생물별 민감도는 통계처리 후 반수영향농도(EC50, 50% effective concentration), 무영향농도(NOEC, no

observed effective concentration) 및 최저영향농도 (LOEC, lowest observed effective concentration)를 산출한 후 비교 분석하였다.

Ⅲ. 연구 결과

본 연구에서 pH 농도별 넓미역과 대황의 발아 과정을 관찰한 결과, 48시간 동안 관찰한 넓미역의 발아율은 대조구에서 pH 6.5까지 80.0%를 유지하였으나 pH 5.5 부근에서는 50.0% 이하로 감소하였다. 대황의 발아율은 pH 6.5 보다 높은 농도에서 80.0%가 넘게 발아율이 산출되었으며 pH 4.5에서는 50% 이상의 개체가 발아하였다. 72시간 노출된 넓미역의 발아율은 pH 6.0에서 82.9%, pH 5.0에서는 40% 이하로 분석되었으며, 대황은 pH 5.0 이하 농도에서 50.0% 보다 낮게 산출되었다([Fig. 2A]). 염분 노출에 따른 실험생물의 발아율을 비교한 결과 48시간 노출된 경우 넓미역의 발아율은 대황과 비교하여 상대적으로 높았는데, 넓미역은 15.0 psu 이하 농도에서 발아율이 50.0%보다 낮은 반면에 대황은 10.0 psu 이하 농도에서 발아율이 급격하게 감소하였다. 한편 72시간 염분 노출 실험결과 넓미역은 15.0 psu에서 발아율이 급감하였으며 대황은 10.0 psu 보다 낮은 농도에서 20.0% 이하의 낮은 발아율이 산출되었다([Fig. 2B]).

pH 노출에 따른 넓미역 유주자의 발아율 산출 자료를 근거로 EC50을 산출한 결과, 48시간 및 72시간 EC50은 각각 pH 5.3과 5.2로 산출되었으며, LOEC는 노출 시간과 상관없이 각각 pH 7.5로 분석되었다. 대황의 경우 48시간 및 72시간 EC50은 각각 pH 4.2와 4.5로 조사되었으며, LOEC는 각각 pH 6.0과 pH 7.0으로 분석되었다. 염분 노출에 따른 넓미역의 48시간 및 72시간 EC50은 각각 11.6 psu와 10.9 psu로 분석되었으며 NOEC는 각각 20.0 psu로 산출되었다. 또한 대황의 48시간 및 72시간 EC50은 각각 6.7 psu와 8.7 psu로 산출되었으며 LOEC는 20.0 psu와 25.0 psu로 분석되었다(<Table 1>). 조사기간 동안 pH에 노출된 넓미역과 대황의 발아율 실험결과 EC50은 노출 시간과 관계없이 넓미역이 비교적 높게 산출되어 대황보다 pH 농도변화에 대한 민감도가 높은 것으로 판단되었다. 또한 염분에 노출된 생물은 pH 노출 결과와 유사하게 대황의 EC50이 낮게 산출되어 넓미역 보다 상대적으로 낮은 염분에서도 발아가 가능한 것으로 해석되었다.

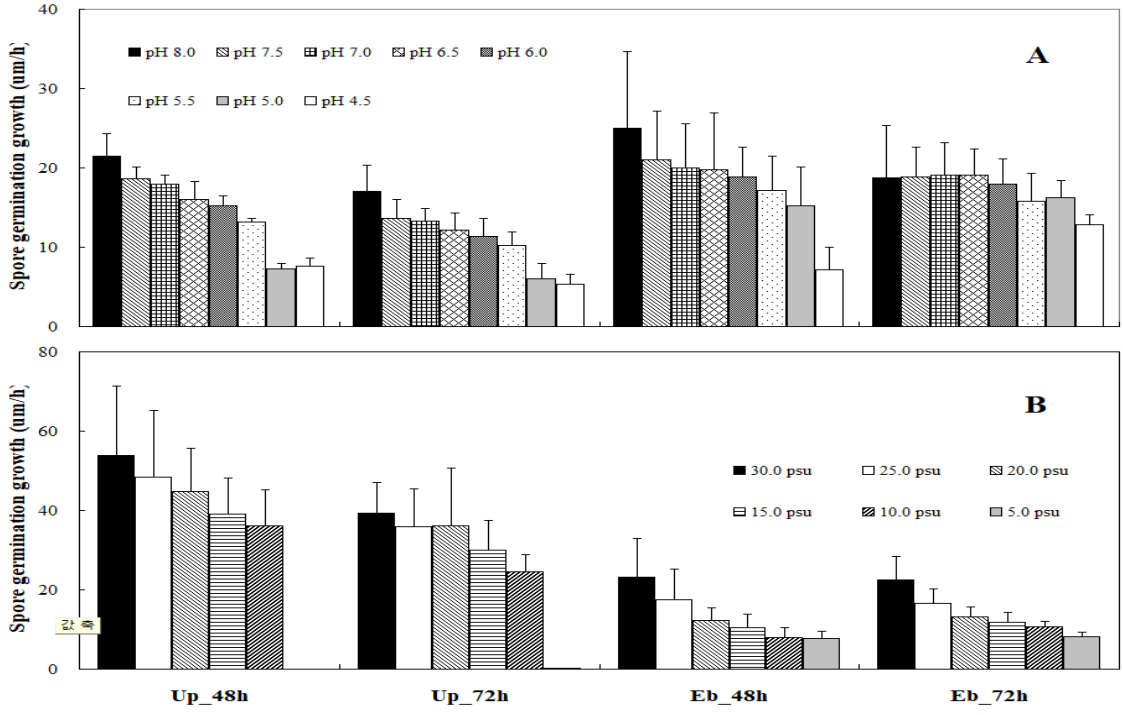


[Fig. 2] Changes in spore germination (%) in *Undariopsis peterseniana* and *Ecklonia bicyclis* exposed pH (A) and salinity (B) during 48 h and 72 h.

<Table 1> Toxicological estimation of *Undariopsis peterseniana* and *Ecklonia bicyclis* exposed to pH and salinity during 48 h and 72 h

		Undariopsis peterseniana		*Ecklonia bicyclis*	
	Duration (h)	pH	Salinity (psu)	pH	Salinity (psu)
NOEC*	48	<7.5	20.0	6.5	25.0
	72	<7.5	20.0	7.5	<25.0
LOEC**	48	7.5	15.0	6.0	20.0
	72	7.5	15.0	7.0	25.0
EC_{50}***	48	5.3	11.6	4.2	6.7
	72	5.2	10.9	4.5	8.7
95% FL****	48	5.1-5.4	11.2-11.9	4.0-4.4	6.1-7.3
	72	5.0-5.3	10.5-11.2	4.4-4.6	8.2-9.2

* NOEC : no observed effective concentration
** LOEC : lowest observed effective concentration
*** EC_{50} : 50% effective concentration
***** FL : fiducial limits



[Fig. 3] Growth rate of spore germination (㎛/h) of *Undariopsis peterseniana* and *Ecklonia bicyclis* exposed pH (A) and salinity (B) during 48 h and 72 h.

본 연구에서 pH 노출에 따른 발아체의 성장률을 산출한 결과 48시간 동안 넓미역과 대황은 대조구에서 각각 21.46±2.91 ㎛/h와 25.04±9.66 ㎛/h로 산출되었다. 또한 넓미역 발아체의 성장률은

pH 5.0에서 7.00 ㎛/h 이하로 급격하게 감소하였으며, 대황은 pH 4.5에서 7.19±2.84 ㎛/h로 낮게 분석되었다. 72시간 동안 실험한 넓미역의 발아체 성장률은 pH 8.0에서 17.02±3.33 ㎛/h, 대황은 18.70±6.64 ㎛/h로 분석되었다. 한편 72시간 노출된 넓미역의 발아체의 성장률은 pH 5.5에서 10.21±1.67 ㎛/h까지 성장한 후 급격히 감소하였으며 대황은 pH 4.5에서 12.81±1.29 ㎛/h의 높은 성장률 값이 산출되었다. 염분 노출에 따른 발아체 성장률은 실험 종 및 노출 시간에 따라 다소 차이를 보였는데, 성장률은 넓미역이 대황보다 높았다([Fig. 3A]).

한편, 본 실험에서 발아체의 성장은 실험 시작 후 48시간 동안 개체의 성장 속도가 빠르게 진행되었으며, 72시간 후에는 성장률이 감소하는 경향을 보였다. 넓미역의 48시간 성장률은 대조구에서 53.89±17.40 ㎛/h로 가장 높았으며, 5.0 psu에서는 발아한 개체가 관찰되지 않았다. 대황은 대조구에서 23.09±9.81 ㎛/h 이었으며, 5.0 psu에서는 7.68±1.88 ㎛/h로 성장률이 낮았다. 대조구에서 넓미역의 72시간 발아체 성장률은 39.32±7.73 ㎛/h으로 분석되었으며, 5.0 psu에서 0.13±0.01 ㎛/h로 조사되었다. 대황의 경우 성장률은 대조구에서 22.52±5.84 ㎛/h, 5.0 psu에서 8.27±1.06 ㎛/h로 산출되어 저염분 환경에서 발아체 성장률이 낮은 것으로 분석되었다([Fig. 3B]).

Ⅳ. 결 론

본 연구에서 pH와 염분 별 넓미역과 대황의 발아율은 노출 시간에 따른 농도-반응의 기울기 변화 패턴이 유사하였으나 각각의 노출항목에 대한 생물의 반응성은 노출 시간과 상관없이 넓미역이 대황보다 높은 것으로 분석되었다. 이와 같은 생물의 반응성은 담수 유입과 같이 육지로부터 유입되는 다양한 물질에 의해 영향받는 생물의 서식환경 또는 서식 수심에 따라 구분되는 것으로 해석할 수 있다. 예를 들면, 기수역(brackish water)에 서식하는 해조류 *Gracilaria changii*는 건기(dry season)의 증발량 증가로 인해 고염분 환경에서는 성장이 이루어지지 않으나 7.0~115.0 psu 범위까지 생존이 가능한 것으로 보고되었는데(Tresnati et al., 2021), 본 연구의 염분 범위와 다소 차이를 보였지만 염분 변동 폭이 큰 조간대 서식생물의 경우 *Gracilaria changii*와 유사하게 체내 대사조절을 통해 염분 변화에 대한 높은 적응력을 갖는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 서식지 특성상 조간대 하부에서 5 m 부근까지 서식하며 육상으로부터 유입되는 다량의 담수 영향을 빈번하게 받는 다년생 종인 대황은 낮은 농도의 pH와 염분에 대한 적응력이 높지만 20 m 이하의 깊은 수심에 서식하는 넓미역은 상대적으로 저농도의 pH와 염분에 대한 적응능력이 약한 것으로 판단되었다.

조사기간 동안 pH에 노출된 넓미역과 대황의 발아율 실험결과 EC_{50}은 노출 시간과 관계없이 넓미역이 높게 산출되어 대황보다 pH 농도변화에 대한 민감도가 높은 것으로 판단되었다. 또한 염분에 노출된 대황은 pH 결과와 유사하게 EC_{50}이 낮게 산출되어 넓미역 보다 상대적으로 낮은 염분에서도 발아가 가능한 것으로 해석되었다.

갈조류 대황의 초기 생활사에 미치는 환경인자와의 상관관계는 배우체와 아포체 생장에 미치는 수온과 광 조건을 대상으로 수행한 연구 중 대황의 경우 최적 성숙 온도는 15.0~20.0℃ 범위이며, 아포체는 장일조건(14L:10D) 하의 광도 80 μmol photon $m^{-2}s^{-1}$, 수온은 20.0℃에서 가장 생장이 높은 것으로 조사되었다(Lee and Kim, 2020). 또한 생태독성평가를 위한 미역의 암배우체 생존율과 상대성장률의 최적 조건은 평균값을 기준으로 수온 15.0℃, 염분 30.0 psu, pH 8.0, 광도 60 μmol photon $m^{-2}s^{-1}$로 분석되었다(Lee et al., 2022). 본 연구에서 대조구의 환경조건은 15.0℃±1.0℃, 31.0℃±1.0 psu, pH 8.0, 50 μmol photon $m^{-2}s^{-1}$를 기준으로 하였는데, 대황의 광도를 제외하고 기존

의 실험조건과 큰 차이가 없었다.

한편 넓미역 암수배우체의 성숙 및 생장은 10.0~15.0℃, 10~20 μmol photon $m^{-2}s^{-1}$, 14L:10D 또는 10L:14D 조건에서 촉진되어 감태(*Ecklonia cava*), 곰피(*Ecklonia stolonifera*) 및 대황의 초기 생활사 단계별 최적 광 조건은 다소 차이 나는 것으로 분석되었다(Wi 2008; Hwang et al., 2010b). 이와 같은 결과는 Lüning and Müller (1978)와 Hwang et al.(2011)이 보고한 바와 같이 이형생활사를 가진 갈조류의 아포체 형성율을 높이기 위한 생존전략으로써 성장단계별로 유리한 수온과 광 조건에서 생물의 활성 변화를 인식하는 생체리듬이 존재할 것으로 판단된다. 또한 녹조 구멍갈파래(*Ulva australis*)의 포자 형성률 실험은 광량 100 μmol photon $m^{-2}s^{-1}$, 수온은 15.0~20.0℃, pH 7.0~9.0, 염분 25.0~35.0 psu 범위를 최적 조건으로 규정하고 있다(Han et al., 2008). 이와 같이 해조류의 초기 생활사 연구는 실험종, 광량(또는 광주기), 생장 단계에 따라 적절한 실험조건을 적용할 필요가 있으며, 각각의 단일 노출 인자에 대한 생태 영향뿐만 아니라 2개 요인 이상의 복합적인 요인에 대한 평가의 필요성을 시사한다고 볼 수 있다. 한편, 본 연구는 동일한 환경조건을 유지하면서 유주자의 단기간 발아 과정을 관찰하였으나 기존 연구들은 아포체나 배우체 성장과 같이 비교적 장기간의 노출 실험을 수행한 바 있다(Hwang et al., 2010b; Lee and Kim, 2020). 이에 시험물질에 대한 생물의 영향은 환경조건보다 노출 시간 및 강도에 따라 생물의 민감도가 차이를 보일 수 있는데, 본 연구와 같이 대조구에서 24시간 이내에 90.0% 이상 발아체가 형성되었기 때문에 심각한 실험의 오류가 발생하는 경우를 제외하면 생태독성평가 시 각각의 농도별 시험구의 발아율을 비교함에 충분한 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다.

pH와 염분 변화에 따른 넓미역과 대황의 발아체 성장은 농도-반응의 기울기 변화가 뚜렷하였으며, 각각의 노출항목에 대한 실험생물의 민감도는 노출 시간과 상관없이 넓미역이 대황보다 높은 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 넓미역과 대황의 서식환경을 고려해 볼 때 20 m 이하 수심에 서식하는 넓미역이 5 m 수심 이내에 주로 서식하는 대황보다 외부의 다양한 환경변화에 노출되는 빈도 또는 강도가 적기 때문에 상대적으로 높은 농도에서 민감하게 반응하는 것으로 판단되었다. 또한 생활사 측면에서 볼 때 다년생 갈조류인 대황은 조간대 낮은 수심에서 다양한 환경변화를 겪으면서 이에 저항할 수 있는 대사능력이 발달한 것으로 해석되며, 넓미역은 대황보다 서식환경이 안정된 깊은 수심에서 대사활동을 유지하기 때문에 환경변화에 대한 민감도가 높은 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에 사용된 넓미역과 대황을 대상으로 pH나 염분 등의 환경 스트레스 노출에 따른 생태 영향을 조사한 연구는 미흡한 상황이다. 이와 관련하여 최근 기후변화 및 갯녹음화에 따른 연안 해조숲 생태계 변동 원인을 규명하기 위한 연구는 진행되고 있으나 이들의 초기 생활사에 미치는 환경요인의 노출 강도 및 내성 한계를 파악한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 조사 기간 중 pH에 노출된 넓미역과 대황의 발아체 성장은 pH 5.5 보다 낮은 농도에서 급속히 감소하였으며, 노출 초기 48시간 동안 성장률의 차이가 큰 것으로 분석되었다. 또한 염분에 노출된 실험생물의 발아는 15.0 psu 보다 높은 농도에서 활발하게 진행되었으며, 15.0 psu 이하 농도에서는 발아한 개체수 및 발아 속도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 넓미역과 대황의 경우 pH 5.5, 염분 15.0 psu 이하 농도에서 정상적인 대사작용이 교란됨으로써 생리-생태적 대사활동을 수행할 수 있는 내성 범위를 벗어나는 것으로 해석할 수 있다. 결론적으로 pH나 염분 등의 환경 스트레스에 노출된 넓미역과 대황의 내성은 생물 종, 서식 수심, 해수의 증발량, 육상으로부터 유입되는 담수량과 같은 스트레스의 강도에 따라 직, 간접적으로 차이를 보이는

것으로 예측할 수 있다. 더불어 서식생태가 상이한 해조류 2종을 대상으로 본 연구에서 수행한 해양생태독성평가 방법은 기후변화와 갯녹음 발생에 따른 해조 생태 및 분포의 변화, 해조숲 조성을 서식환경별 적정 종 선정 및 해조류 자원 활성화 연구에 기초자료로써 그 활용가치가 기대된다.

References

APHA(1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th edition, American Public Health Association Inc., New York.

ASTM(1996). Standard Guide for Acute Toxicity Test with rotifer *Brachinonus*, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.

FIRA(2018). Study on the seaweed growth promotants for the extension of natural seaweed beds. Report, Busan, ROK. 1-66.

Han TJ, Han YS, Park GS and Lee SM(2008). Development of marine ecotoxicological standards methods for *Ulva* sporulation test. <The sea> Journal of the Korean Society of Oceanography 13(2), 121~128.
https://koreascience.kr/article/JAKO200822179194024.pdf

Hooten RL and Carr RS(1998). Development and application of a marine sediment pore-water toxicity test using Ulva *fasciata* zoospores. Environmental Toxicology and Chemistry 17(5), 932~940.
https://doi.org/10.1002/etc.5620170524

Hwang EK, Gong YG and Park CS(2010a). Ecological charateristic of the endangered brown alga, *Undariopsis peterseniana* (Kjellman) Miyabe et Okamura, at Jeju Island, Korea: growth and maturation. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science 43, 63~68.
https://doi.org/10.5657/kfas.2010.43.1.063

Hwang EK, Gong YG, Ha DS and Park CS(2010b). Inducing the regeneration and maturation of free-living gametophytes of *Eklonia stolonifera* Okamura (Laminariales, Phaeophyta). Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology 43, 231~238.
https://doi.org/10.5657/kfas.2010.43.3.231

Hwang EK, Shim CH, Ha DS, Gong YG and Park CS(2011). Regeneration and maturation induction of free-living gametophytes of *Undariopsis peterseniana* for their mass production. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science 44, 155~161.
https://doi.org/10.5657/KFAS.2011.44.2.155

Hwang EK, Gong YG and Park CS(2012). Cultivation of a hybird of free-living fametophytes between *Undariopsis peterseniana and Undaria pinnatifida*: morphological aspects and cultivation period. Journal of Applied Phycology 24, 401~408.
https://doi.org/10.1007/s10811-011-9727-7

ISO(1995). Water quality-marine algal growth inhibition test with *Skeletonema costatum and Phaeodactylum tricornutum*. the International Organization for Standardization, ISO 10253, 7pp.

Kang RS, Won KS, Hong KP and Kim JM(2001). Population studies on the kelp *Ecklonia cava and Eisenia bicyclis* in Dokdo, Korea. Algae 16, 209~215.

Lee JW(2021). *Toxicity assessment of eight antifouling booster biocides on spore and female gametophyte of brown alga Undaria pinnatifida*. Pukyong National University. 116p.
http://www.riss.kr/link?id=T15896631&outLink=K

Lee JW, Park YH, Sim BR, Jeon HJ, Heo S and Hwang UK(2022). A study of environmental conditions of survival rate and relative growth rate in female gametophyte of *Undaria pinnatifida* for toxicity assessment. Journal of Marine Life Science 7(2), 86~93.
https://doi.org/10.23005/ksmls.2022.7.2.86

Lee MJ and Kim NG(2020). Effects of environmental factors on the growth of gametophytes and young sporophytes of *Eisenia bicyclis* (Kjellman) Setchell. Journal of Marine Bioscience and Biotechnology 12(2), 115~122.
https://doi.org/10.15433/ksmb.2020.12.2.115

Lüning K(1980). Critical levels of light and temperature regulation the gametogenesis of three *Laminaria* species (Phaeophyceae). Zeitshrift für Pflanzenphysiologie 89, 333~341.
https://doi.org/10.15433/ksmb.2020.12.2.115

Lüning K and Müller DC(1978). Chemical interaction in sexual reproduciton of several Laminariales (Phaeophyceae): release and attraction of spermatozoids. Zeitshrift für Pflanzenphysiologie 89, 333~341. https://doi.org/10.1016/S0044-328X(78)80006-3

MOF(2018). Marine Environmental Standard Method, Part 3 Marine Organism Standard Method. Ministry of Oceans and Fisheries Sejong, Korea. pp 115~123.

NIWA(1998). Marine Algae (*Dunaliella tertiolecta*) Chronic Toxicity Test Protocol. National Institute of Water and Atmospheric Research, New Zealand, 30pp.

Park GS, Lee SM, Han TJ and Lee JS(2008). Establishment of standard methods for marine ecotoxicological test. <The Sea> Journal of the Korean Society of Oceanography 13(2), 106~111. https://koreascience.kr/article/JAKO200822179194020.pdf

Primo C, Hewitt CL and Campbel ML(2010). Reproductive phenology of the introduced kelp *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae, Laminariales) in Port Phillip Bay (Victoria, Australia). Biological Invasions 12, 3081~3092. https://doi.org/10.1007/s10530-010-9700-4

Rand GM and Petroceilli SR(1985). Fundamentals of aquatic toxicology. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, 65p.

Tresnati J, Yasir I, Bestari AD, Yanti A, Aprianto R and Tuwo A(2021). Effect of salinity on the growth of seaweed *Gracilaria changii* (Xia and Abbot, 1987). Earth and Environmental Science 763, 1~7. https://doi.org/10.1088/1755-1315/763/1/012030

USEPA(2002). Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluents and Receiving Water to Freshwater and Marine Organisms. United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, USA.

Wi MY, Hwang EK, Kim SC, Hwang MS, Baek JM and Park CS(2008). Regeneration and maturation induction for the free-living gametophytes of *Ecklonia cava* Kjellman (Laminariales, Phaeophyta). Journal of the Korean Fisheries Society 41(5), 381~388. https://doi.org/10.5657/kfas.2008.41.5.381

Yoon SJ(2015). Inhabit features of a brown alga *Undaria peterseniana* in coastal area of Ulleung Island. Journal of Fisheries and Marine Sciences Education 27(3), 747~756. https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.3.747

• Received : 19 July, 2023
• Revised : 12 August, 2023
• Accepted : 18 August, 2023