김속식물 3종의 생장과 단포자방출에 미치는 해양심층수의 영향

김승오¹ · 김남길^{2*}

¹국립수산물관리원 수산식품품질관리센터

²경상대학교 해양생명과학과/해양산업연구소

Effects of Deep Sea Water on the Liberation of Monospore and Growth in three species *Porphyra* (Rhodophyta, Bangiales)

SEUNG-OH KIM¹ AND NAM-GIL KIM^{2*}

¹Aquatic Plant Variety Center, NFRDI, Mokpo 530-831, Korea

²Department of Marine Biology and Aquaculture/Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

본 연구는 김속식물 3종의 생장과 단포자방출에 미치는 해양심층수의 영향을 구명하기 위하여 수행하였다. 해양심층수와 표층수는 각각 강원도 고성군 근해와 연안의 수심 600 m와 표층에서 채수하였으며, 김속식물은 강원 연곡에서 오카무라돌김(*Porphyra okamurae*), 경남 통영과 남해에서 각각 넓은둥근돌김(*P. suborbiculata* f. *latifolia*)과 큰방사무늬돌김(*P. yezoensis* f. *narawaensis*)을 채집하였고, 이들 재료로부터 단포자를 채묘하여 실험에 사용하였다. 3종 가운데 넓은둥근돌김의 생장이 가장 빨랐으며 이때의 배양조건은 심층수구의 15 °C, 단일조건(10L:14D)으로 나타났다. 김속식물 3종의 생장은 심층수와 혼합구의 단일 및 10 °C와 15 °C 조건에서 빠르게 나타났다. 배양중인 엽체로부터의 단포자는 배양 3주 이내에 양광주기하의 10-25 °C에서 모두 방출이 이루어졌다. 이상의 결과로부터 김속식물의 생장과 단포자방출은 표층수보다 심층수에서 빠른 것으로 나타났고, 이 결과를 심층수를 이용한 재배종 개발에 활용할 수 있을 것으로 판단되며 특히 심층수를 방출된 단포자의 배양에 활용할 경우 여름철에도 실내재배가 가능할 것으로 판단된다.

The objective of the present study was carried out to clarify the effects of deep sea water on the growth and maturation of *Porphyra* (Rhodophyta, Bangiales). Foliose thalli for indoor culture were collected from Yeongok (*P. okamurae*) in Gangwon Prefecture, Tongyeong (*P. suborbiculata* f. *latifolia*) and Namhae (*P. yezoensis* f. *narawaensis*) in Gyeongnam Prefecture respectively. Monospores were cultured at five temperatures (5, 10, 15, 20 and 25 °C) with a photon irradiance of 80 $\mu\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ under photoperiods of 14L:10D and 10L:14D in surface, deep and mixed seawater in respectively. The fast growth of foliose thalli were observed in *P. suborbiculata* f. *latifolia* cultured at deep seawater under 15 °C and 10L:14D. In three species, the optimum growth occurred at 10 and 15 °C under deep and mixed seawater and short day-length. In general, monospores from the cultured thalli were liberated within three weeks after incubation under 10-25 °C and both photoperiods. From the result of this study, deep seawater is considered that the natural species of the genus *Porphyra* can be useful for the development as the new cultivars.

Key words: *P. okamurae*, *P. suborbiculata* f. *latifolia*, *P. yezoensis* f. *narawaensis*, Deep seawater, Growth, Monospore

서론

해양심층수라 함은 광합성에 의한 유기물생산이 일어나지 않고 동계의 연직혼합 도달심도 이심의 해수를 말하며 수산관계자의 입장에서는 수심 약 200-300 m 이심의 해수를 심층수라 하고 있으나(Takahashi, 2001a; Takano, 2001), 해양학자는 바다를 연직적으로 3층으로 나누고 수심 약 1000 m 이심의 해수를 심층수라 한

다(Tsunogai, 2001). 이러한 해양심층수의 환경은 저수온으로서 질산염이나 인산염 등의 무기염류가 표층수에 비해 높은 농도로 용존해 있으며 장기간에 걸쳐 표층수와 혼합하지 않기 때문에 유기물이나 미생물이 표층수에 비해 적은 것이 일반적이다(山口等, 1994; 한국해양연구원, 2001).

해양심층수의 일반적 특성은 보통 저온 안정성, 부영양성, 청정성 그리고 미네랄 특성을 가지고 있다(Takahashi, 2001b; 한국해양연구원, 2003). 심층수를 이용하여 저수온 관리에 의한 질병방지와 고밀도 사육이 가능하며, 부영양성을 이용한 먹이용 해조류

*Corresponding author: ngkim@gnu.ac.kr

의 생산이나 해역의 생산력 강화를 위한 해중 조립기술에도 적용할 수 있을 뿐만 아니라 청정성을 이용하여 병원균이나 유해물질이 적은 양질의 사육수를 확보하는 데에도 활용할 수 있다(中島, 2000). 일반적으로 해조류의 바이오매스 대량생산 및 메탄이나 기타 연료로 이용하기 위해 수성콜로이드나 폐수를 이용하여 꼬시래기를 대량으로 배양한 예는 30년 전부터 알려져 왔으나(Ryther *et al.*, 1979), 해양심층수를 활용하여 해조류의 배양, 양식, 갯녹음 및 해조장 조성에 적극적으로 적용한 예는 1990년대 중반부터 2000년대 중반까지 이어지고 있다(山口 等, 1994; Fujita, 2001, 2003; Ohno *et al.*, 2001; 藤田, 2002; Matsumura and Fujita, 2002; 大野, 2006).

해양 심층수에 대한 초기연구는 심층수의 제어기술 및 운용기술과 관련한 분야와 심층수의 자원성 해명이나 이용법 및 기술에 관하여 집중되어 왔다(Quinby-Hunt, 1979; Quinby-Hunt *et al.*, 1986). 그 후 심층수의 유효성이 입증되면서부터 수산분야, 에너지 분야, 유용물질 생산 분야 등 그 응용범위가 광범위해지고 있다(中島, 2000; 阿部 等, 2003; 김, 2004a).

국내의 해양심층수의 해양생물 이용관련 연구는 2000년대에 들어서 한국해양연구원을 중심으로 다양한 연구가 이루어져 왔는데 심층수개발 초기에는 해양심층수를 이용한 종묘생산 및 양식(김 등, 2001), 중간축양(이 등, 2001) 및 한해성 바다목장화(명 등, 2001) 등에 대한 이론적 연구를 시작으로 심층수의 환경영향에 대한 연구에 집중되어 왔으나(한국해양연구원, 2001, 2003, 2004), 그 후 심층수 개발해역의 생물환경 및 방류수 재활용 방안(김, 2004a), 심층수의 다목적 개발과 다단계 이용(김, 2004b) 등의 활용방안 연구로 이어져 왔다.

국외에서의 해양심층수 이용과 관련한 연구로서 미국은 1974년 세계최초로 해양심층수를 개발한 국가로서 당시 해양온도차 발전(OTEC)을 개발하는 과정에서 해양심층수를 개발하게 되었으며(Quinby-Hunt, 1979; Quinby-Hunt, *et al.*, 1986), 노르웨이에서는 냉수성어류인 대구, 연어, 넙치 등의 사육에 심층수를 활용하고 있는 것으로 알려져 있다(中島, 1988). 일본은 해양과학기술센터 주관으로 1976년부터 해양심층수의 수질특성 등 이용기술의 개발개념을 정리한 후 1986년부터 3년에 걸쳐 고치현에 취수관을 건설하여 수심 320 m로부터 해양심층수를 취수한 것이 해양심층수 개발의 시작이다(장, 2008). 이후 해양 심층수를 이용한 미세조류의 대량배양에 관한 연구(丸山 等, 1994)와 심층수에서의 플랑크톤의 증식에 관한 연구(Roels *et al.*, 1975; 中島, 1988, 1992)가 보고된 바 있으며, 해조류에 있어서는 산업적으로 유용한 대형해조인 다시마(*Laminaria japonica*), 미역(*Undaria pinnatifida*), 감태(*Ecklonia cava*) 등을 전복과 같은 조식성동물의 먹이용 해조로서 활용하는 방법 등에 많은 연구가 집중되어 왔다(船野, 1986; 明神 等, 1991; 山口 等, 1994). 이러한 심층수를 이용한 연구는 2000년대 들어서 해양생물의 양식이나 해조류 배양분야에 집중되었는데 해양심층수를 이용한 조류의 효율적 배양법(西島 等, 2000), 홍조류 갈래곰보의 수조배양(Ohno *et al.*, 2001), 미역 배우체의 성숙속도와 옥외양식(岡 等, 2002), 심층수를 이용하여 배양한 다시마를 이용한 전복양식(Matsumura and Fujita, 2002), 심층수와 표층수를 이용한 애기다시마의 대량배양(岡 等, 2003), 해양심층수를 이용한 갯녹음 지대의 식생회복(Fujita, 2001, 2003) 등을 비롯해 최근에

는 해양심층수를 이용한 대형 해조류의 대량배양 시스템 개발 등으로 연구가 이루어지고 있다(大野, 2006).

그러나 국내에서는 2000년 심층수 개발의 타당성조사 및 개념정리를 시작으로 수산동물의 양식이나 축양 등에 적용하는 연구는 부분적으로 이루어져 왔으나 해양심층수를 이용한 해조류의 생장이나 생육조건 등에 대한 연구는 거의 없는 실정이고, 특히 해조류에 있어서 산업적으로 유용한 종들의 생리특성 및 재배 가능성에 관하여는 아직까지 보고된 바가 없다.

본 연구는 동해안에 서식하는 자생돌김으로서 인근 주민들에게 의해 채취되어 지역 소비자들로부터 각광을 받고 있는 오카무라돌김, 그리고 남해안 산으로 현재 양식종으로 활용되고 있지 않지만 대형 종으로 알려진 넓은등근돌김과 재배종으로서 각광받고 있는 큰방사무늬돌김에 대하여 심층수를 활용할 경우의 양식가능성에 대하여 검토하고자 하였다. 또한 단포자 방출에 의한 채묘로서 김이 생산되지 않는 여름철에도 심층수를 이용하여 양식이 가능할 것인가를 구명하고 양질의 김을 생산해 낼 수 있다는 가설 하에 우선 실내배양실험을 통해 생리특성을 구명하고 재배종으로서의 생산 가능성을 검토할 목적으로 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 3종의 김속식물을 선정하여 실내배양 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 3종의 김속식물 중 오카무라돌김(*Porphyra okamurae*)의 단포자는 2003년 10월 강릉시 연곡면 영진리(Fig. 1A) 조간대에서 채집된 유엽으로부터 채묘하였고, 넓은등근돌김

Fig. 1. A map showing the sampling sites of *Porphyra*. A: Gangwon, Yeongok (*okamurae*); B: Gyeongnam, Tongyeong (*P. suborbiculata* f. *latifolia*); C: Gyeongnam, Namhae (*P. yezoensis* f. *narawaensis*).

(*P. suborbiculata* f. *latifolia*)은 2003년 3월 경남 통영시 산양면 척포리(Fig. 1B) 연안의 조간대에 생육하던 성숙엽체로부터 단포자를 채묘하여 계대배양을 해왔던 유엽으로부터 단포자를 얻어 실험에 사용하였다. 또한, 큰방사무늬김(*P. yezoensis* f. *narawaensis*)은 2003년 3월 경상남도 남해 지족리(Fig. 1C)에서 채집한 엽체를 10 °C에서 약 1주일 정도 배양한 후 단포자를 채묘하여 실험에 사용하였다.

단포자 채묘는 3종의 김 엽체를 각각 직경 4.5 mm로 절취한 후 원형플라스크에 각 5개의 엽편과 모노필라멘트를 넣고 단일 20 °C에서 이루어졌다.

단포자가 부착한 필라멘트를 각각의 조건에 4개씩 넣어 통기 배양하였으며 배양 1주일 후 단포자의 방출 부착을 확인하기 위하여 각 조건에 1개의 모노필라멘트를 추가하여 배양하였다. 배양해수는 2003년 7월 28일 강원도 고성연안에서 각각 3톤의 심층수와 표층수를 채수한 후, 야간을 이용 황어수송용 트럭으로 경상대학교 해조자원실험실로 운반하여 옥외의 대형 저수탱크에 저장, 보관한 후 실내배양을 위한 원해수로 사용하였다. 배양해수는 해조류 생육에 필요한 영양염류의 파괴나 성분변화를 고려하여 고압 멸균 처리하지 않고 자외선만 조사하여 배양실험에 사용하였다.

실내배양은 심층수와 표층수를 각각 원수로 한 실험구, 심층수와 표층수를 1:1로 혼합한 혼합해수 실험구로 나누어 배양하였다.

엽상체의 배양은 온도 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 광주기는 장일조건(14L:10D)과 단일조건(10L:14D), 광량 80 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 하에서 이루어졌으며 배양해수는 매 1주일마다 배양엽체의 엽장과 엽폭을 측정하고 새로운 필라멘트에 부착한 단포자의 방출을 확인한 후 환수하였다.

결과 및 고찰

엽체의 생장

오카무라돌김(*P. okamurai*)으로부터 단포자를 채묘한 후, 온도와 광주기를 달리하여 표층수, 심층수 및 혼합해수에서 각각 배양한 오카무라돌김 엽상체의 생장결과는 Fig. 2, 3과 같다.

표층수에서 엽체의 생장은 단일하의 20 °C에서 생장이 가장 빠르게 나타나 배양 10주 동안 엽장 8.7 mm, 엽폭 4.5 mm로 생장하였다. 장일하에서는 25 °C에서 최대생장을 나타내어 배양 6주 만에 엽장과 엽폭이 각각 5.9 mm와 2.6 mm로 생장하였다. 그러나 배양 7주째부터 20 °C 이상에서는 모든 엽체가 고사, 유실하였다. 심층수에서의 생장은 장일조건하의 15 °C에서 엽장과 엽폭의 평균이 각각 20.0 mm 및 12 mm로 나타나, 단일하의 10 °C에서 최대로 생장한 엽장 평균 12.5 mm와 엽폭 평균 8.3 mm에 비해 각각 7.5 mm 및 3.7 mm 이상 빠른 성장을 나타내어 오카무라돌김의 생장에 미치는 광주기는 단일조건보다도 장일조건이 유리한 것으로 나타났다. 그러나 장일하의 5 °C에서는 배양 8주 만에 고사, 유실하는 특성을 나타내었다. 혼합수에서도 심층수와 마찬가지로 단일보다도 장일하에서 생장이 빠르게 나타나 장일하의 10 °C에서 엽장과 엽폭의 평균이 각각 8.1 mm와 5.6 mm로 최대로 생장한 반면, 단일하에서는 20 °C에서 엽장과 엽폭이 각각 4.1 mm와 1.6 mm로 나타나 엽장에서 약 2배 엽폭에서 약 3.5배의 성장차이를 나타내었다. 표층해수를 채수하여 배양을 할 경우 오카무라돌

Fig. 2. Growth of foliose thalli of *P. okamurai* at different temperatures, photoperiods and media under 80 $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Blade length).

Fig. 3. Growth of foliose thalli of *P. okamurai* at different temperatures, photoperiods and media under 80 $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Blade width).

김의 생장은 장일보다는 단일하의 광주기에서 생장이 빠르며 10주 이상 장기간 배양할 경우 5 °C에서는 거의 생장을 하지 않으나

30°C에서는 유이상태로 단포자의 방출을 계속하며 살아남고, 10°C와 15°C의 수온에서 빠르게 성장한다. 또한 20°C 이상의 고온하에서는 단일조건보다도 장일조건하에서 빠르고 크게 성장하는 것으로 알려져 있다(Kim, 2002).

본 연구에서는 표층수를 제외한 심층수와 혼합해수 실험구에서 이러한 장일 성장형을 나타내며 양광주기 모두 20°C 이상에서 생장이 지속되는 것으로 나타나 Kim(2002)의 결과와 유사성을 나타내었다. 또한, 모든 배양조건에서 배양해수에 따라 엽체의 성장에 차이를 나타내었으며 심층수, 혼합수 및 표층수의 순으로 생장이 빠르며 엽체도 크게 성장하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 심층수가 오카무라돌김의 성장에 유리하게 작용한 것으로 판단되지만 장기간 배양할 경우 고사하는 문제가 대두되었다.

넓은둥근돌김(*P. suborbiculata* f. *latifolia*)로부터 단포자를 채묘한 후, 온도와 광주기를 달리하여 표층수, 심층수 및 혼합해수에서 각각 배양하여 얻어진 넓은둥근돌김의 성장결과는 각각 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 표층수에서 엽체의 생장은 단일하의 15°C와 20°C에서 생장이 가장 빨라 배양 10주 동안 각각 엽장 61.1 mm, 엽폭 28.8 mm로 최대를 나타내었고 장일하에서는 20°C에서 생장이 가장 빨라 배양 10주 동안 엽장과 엽폭이 각각 30.5 mm, 30.2 mm 크기로 성장하였다. 그러나 단일하의 25°C에서는 배양 8주 후부터 단포자를 대량으로 방출하면서 급격하게 유실하는 현상을 나타내었다. 심층수에서는 단일하의 15°C에서 최대로 성장하여 10주간의 배양기간동안 엽장 156.5 mm 및 엽폭 33.4 mm에 달했다. 반면 장일하에서는 10°C에서 엽장 68.0 mm로 최대로 성장하였으나, 엽폭은 20°C에서 8주 만에 46.0 mm로 최대에 달한 후 단포

Fig. 4. Growth of foliose thalli of *P. suborbiculata* f. *latifolia* at different temperatures, photoperiods and media under $80 \mu\text{mol}^2\text{s}^{-1}$ (Blade length).

Fig. 5. Growth of foliose thalli of *P. suborbiculata* f. *latifolia* at different temperatures, photoperiods and media under $80 \mu\text{mol}^2\text{s}^{-1}$ (Blade width).

자의 방출에 따른 엽폭의 증감현상이 나타났다. 혼합해수에서는 단일하의 10°C에서 가장 크게 성장하여 배양 10주 동안 엽장 163.8 mm로 다른 어느 조건에서 성장한 엽체 보다 빠른 성장결과를 나타냈으나 엽폭은 15°C에서 17.5 mm로 성장하여 장일하의 같은 조건에서 자란 엽체의 엽폭 24.4 mm에 비해 작게 나타나 다소 느린 성장을 보였다. 반면 장일하의 엽장은 15°C에서 배양 9주만에 65.7 mm로 최대에 이른 후 단포자를 방출하며 지속적으로 엽체생장과 단포자 방출을 반복하며 엽장이 증감하는 현상을 나타내었다. Kim(2002)의 한국산 김속식물의 생리특성에 관한 보고에 의하면 넓은둥근돌김은 장일 및 단일의 양광주기 조건 모두 15°C에서 생장이 빠르게 나타나고 단일의 경우 16주의 배양 결과에서는 10°C에서 가장 크게 성장하는 것으로 보고하였으며, 20°C 하에서도 다른 김에 비하여 엽체가 비교적 빠르고 크게 성장하는 것으로 보고하였다. 이러한 경향은 본 연구 결과에서도 거의 유사하게 나타났으며, 특히 엽폭의 경우 장일하의 20°C에서 더욱 빠른 성장을 나타내었다. 또한 장일하에서는 단일하의 조건에 비해 일반적으로 초기생장이 빠르게 나타나고 장기간 배양할 경우 10°C 이하의 저온하에서 가장 크게 성장하였다. Kim (2000)은 넓은둥근돌김에서 나타나는 이러한 생리적 특징은 고온으로 갈수록 단포자의 방출이 빠르게 나타나고, 엽체가 크게 성장함과 동시에 성숙이 이루어짐으로써 단포자의 대량방출이나 생식세포의 형성 및 방출에 기인한 결과로 나타난다고 하였다. 이와 같은 김의 생식생리에 대한 현상은 생식세포인 암수배우자낭만을 형성하여 방출하는 잇바디돌김이나 긴잎돌김(Kim, 1999)에서도 나타나고, 단포자와 생식세포를 동시에 방출하는 비단잎돌김에서도 나타나는데(Kim

Fig. 6. Growth of foliose thalli of *P. yezoensis* f. *narawaensis* at different temperatures, photoperiods and media under $80 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ (Blade length).

Fig. 7. Growth of foliose thalli of *P. yezoensis* f. *narawaensis* at different temperatures, photoperiods and media under $80 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ (Blade width).

and Notoya, 2003), 본 연구결과에서도 기존의 연구결과(Kim, 1999; Kim and Notoya, 2003)와 유사한 경향성을 나타내었다.

큰방사무늬김(*P. yezoensis* f. *narawaensis*)의 단포자를 채묘한 후 온도와 광주기를 달리하여 표층수, 심층수 및 혼합해수에서 배양한 성장결과를 각각 Fig. 6, 7에 나타내었다. 표층수에서 엽장의 생장은 장일조건의 경우 8주째 까지는 10°C와 15°C에서 각각 39.7 mm, 47.7 mm로 가장 좋은 성장을 보였으나 9주째부터는 엽체가 유실 또는 고사되면서 엽체의 길이가 10주째에는 28.6 mm와 22.3 mm로 감소하였다. 그러나 5°C의 경우 초기 생장은 늦게 일어났지만 10주 동안 꾸준한 성장을 보여 다른 온도 조건에 비해 안정적인 성장을 나타내었다. 단일조건에서 또한 장일조건과 비슷하여 10주째에 10°C와 15°C에서 각각 33.3 mm, 42.1 mm로 비교적 좋은 성장을 보였다. 5°C의 경우 10주째에 평균생장이 43.6 mm로 단일조건에서는 가장 좋은 결과를 나타냈다. 엽폭의 생장은 10주 동안 배양한 결과 장일조건의 경우 10°C에서 20.4 mm, 단일조건의 경우 15°C에서 25.5 mm로 엽폭의 성장 또한 비교적 저온에서 좋은 것으로 나타났다. 심층수에서는 엽장의 생장이 장일조건에서는 5°C와 10°C에서 38.6 mm와 51.3 mm로 가장 좋게 나타났으며, 단일조건에서는 10°C와 15°C에서 69.9 mm와 50.3 mm의 결과를 나타내어 단일조건, 10°C에서 가장 좋은 결과를 보였다. 엽폭의 성장 또한 엽장의 성장과 유사하게 장일조건에서는 비교적 저온인 5°C와 10°C에서 11.0 mm, 13.6 mm로서 가장 좋은 결과를 보였다. 단일조건에서는 비교적 고온인 15°C와 20°C에서 각각 19.6 mm와 20.3 mm로 성장하여 20°C에서 엽폭의 생장이 가장 좋았다.

혼합해수에서는 엽장의 생장이 장일조건과 단일조건 모두 10°C에서 각각 38.6 mm와 83.4 mm로서 가장 좋은 성장을 보였으나 단일조건의 경우 엽체는 장일조건에 비해 2배 이상 빠른 성장을 나타내었다. 엽폭의 경우에는 장일조건의 경우 10°C에서 28.6 mm, 단일조건에서는 20°C에서 25.6 mm로 가장 좋은 성장을 보여 장일조건에서는 비교적 저온, 단일조건에서는 비교적 고온에서 생장이 좋은 것으로 나타났다.

단포자 방출

표층수, 혼합수, 심층수를 이용하여 김속식물 3종을 10주간 배양하여 얻어진 단포자방출 결과는 Table 1과 같다. 오카무라돌김의 경우 장일하의 5°C를 제외한 모든 실험구에서 단포자가 방출되었다. 5°C 이하에서는 대체로 3-4주 만에 단포자를 방출하였고 10°C 이상에서는 거의 모든 실험구에서 배양 2주 만에 단포자를 방출하였으나 배양해수에 따른 특이성은 나타나지 않았다. 단포자는 매년 엽체를 선발하거나 사상체의 배양 없이 모조로부터 직접 채묘할 수 있다는 점에서 생활사 단축형 채묘기법에 이용되어지는 포자이다. 따라서 하절기에 김을 재배할 경우 이러한 단포자를 채묘하는 방법으로 심층수를 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

넓은둥근돌김에서는 장일하의 5°C 및 표층수의 10°C 배양조건을 제외한 모든 실험구에서 단포자가 방출되었다. 15°C 이상에서는 대체로 1-2주 만에 단포자를 방출하였고 10°C 이하에서는 대부분 실험구에서 배양 3-6주 만에 단포자를 방출하였다. 배양해수별로는 큰 차이는 없었으나 표층수 배양구 보다 심층수와 혼합수 배양구에서 단포자가 다소 빠르게 방출되는 경향을 나타내었

Table 1. Liberated time of monospores on three species at different temperatures, photoperiods and media under $80 \mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$. ※ W : Age (weeks)

Species	Media	Conditions		14L:10D					10L:14D				
		5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C		
<i>Porphyra okamurai</i>	SSW	None	2W	2W	2W	2W	3W	2W	2W	2W	2W		
	DSW	4W	2W	2W	2W	2W	3W	2W	2W	2W	2W		
	MSW	4W	2W	2W	2W	2W	4W	3W	2W	2W	2W		
<i>P. suborbiculata</i> <i>f. latifolia</i>	SSW	None	None	2W	2W	2W	None	None	2W	2W	2W		
	DSW	None	5W	2W	1W	1W	5W	5W	2W	1W	1W		
	MSW	None	5W	3W	2W	2W	6W	3W	2W	1W	1W		
<i>P. yezoensis</i> <i>f. narawaensis</i>	SSW	3W	3W	2W	2W	2W	3W	3W	2W	2W	2W		
	DSW	3W	2W	2W	2W	2W	3W	2W	2W	2W	2W		
	MSW	3W	3W	2W	2W	2W	3W	3W	2W	2W	2W		

SSW: Surface Sea-Water, DSW: Deep Sea-Water, MSW: Mixed Sea-Water

으며 광주기에 따른 차이는 없었다.

큰 방사무늬김의 경우 3주 만에 모든 실험구에서 단포자가 방출하였지만, 심층수의 경우 장일조건과 단일조건 모두 5 °C를 제외한 모든 조건에서 2주 만에 단포자가 방출되었다. 표층수와 혼합해수의 경우 15 °C 이상의 조건에서 단포자가 방출되었고 5 °C와 10 °C 두 조건에서는 3주째에 단포자가 방출되었다.

엽체의 형태

오카무라돌김의 경우 엽체의 생장 결과(Fig. 2와 3)에서도 이미 나타난 바와 같이 단일하에서 생장이 빨랐던 표층수를 제외하면 심층수와 혼합수 모두 장일조건에서 엽체가 크고 빠르게 생장하는 것으로 나타났다. 위 그림에서 배양 10주 동안 가장 빠르게 생장한 것으로 나타났던 장일하의 15 °C에서 생장한 엽체가 왜소형으로 나타난 것은 배양 11주 후부터 단포자를 급격하게 대량으로 방출하면서 나타난 결과로 김속식물에서 일반적으로 나타나는 현상이다(Kim, 2002).

넓은둥근돌김의 실내에서 배양된 조체는 자연의 조체와 달리 둥근형, 장엽형 엽체와 불규칙한 형태의 엽체도 많이 출현하였다. 일반적으로 천연의 조건에 암반에 서식하는 넓은둥근돌김의 모조는 엽장이 작고 엽폭이 큰 타원형이지만 실내에서 배양된 조체는 장타원형 또는 장엽형 엽체의 형태를 가지며 같은 품종이라고 할 수 있는 둥근돌김에서도 그대로 나타나는 것으로 알려져 있다(김과 능등국, 1997). Kim(2000)과 Kim(2002)은 이러한 현상은 둥근돌김이나 넓은둥근돌김을 같은 온도와 광량 및 광주기 조건하에서 반복적으로 실내배양 할 경우 같은 결과를 가져오며 이는 실험실의 배양조건이라는 제한된 환경에서 일어나는 종 특이적 재현성으로 해석하였다.

자연상태에서 큰방사무늬김의 일반적인 형태는 유엽의 경우 상하가 거의 같은 일자형의 형태를 가지며, 더 자라게 되면 가장자리에 주름이 생기고 약간 역삼각형의 형태를 가지는 것으로 알려져 있다(강과 고, 1977). 이번 실험 결과에서도 비교적 생장이 늦은 5 °C의 조건에서는 장일조건과 단일조건 그리고 표층수, 심층수, 혼합해수 모두 일자형의 형태를 보였으며, 초기생장이 비교적 좋았던 고온조건의 엽체에서는 역삼각형의 형태를 보이며 가장자리에 주름이 생기는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6과 7). 또한 고온인 20 °C와 25 °C의 경우에는 많은 단포자의 방출, 부착으로 인

하여 엽체상의 생장이 제한을 받아 단포자 방출 후 엽장의 크기가 감소하였다.

지금까지의 결과를 종합적으로 고찰하면 오카무라돌김, 넓은둥근돌김 및 큰방사무늬김의 모조로부터 단포자를 채묘한 후 광량 $80 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 하에서 온도와 광주기 및 배양해수를 각각 달리하여 김의 엽상체를 배양한 결과 3종 모두 심층수에서 엽체의 생장이 가장 빠르게 나타났다. 또한 심층수와 표층수를 1:1의 비율로 혼합한 혼합수에서도 생장이 빠르게 나타나 심층수가 김의 생육에 유리한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 초기에는 고온인 20 °C에서 엽장과 엽폭의 생장이 모두 좋았지만 시간이 경과함에 따라 비교적 저온인 10 °C나 15 °C에서 엽장과 엽폭의 생장이 가장 좋게 나타났으며 엽장은 단일조건, 엽폭은 장일조건에서 생장이 좋았다. 黒木(1961)는 초기 단포자에서 유엽으로의 생장은 고온 쪽이 유리하나 고온, 장일조건 쪽의 조건에서는 단포자의 방출 등에 의해 엽체의 생장이 잘 이루어지지 않는 것으로 보고하고 있다. 또한 생장함에 따라 비교적 저온에서 잘 생장하는 김의 특성(Kim, 2002)으로 볼 때, 이러한 현상은 엽체의 끝부분이 단포자 방출로 인해 유실되기 때문에 나타난 결과로 판단되었다. 岡等(2002)도 심층수를 이용한 미역의 육외실험에서 해면양식에 비해 심층수에서의 생장율이 5-10%정도 높았다고 하여 심층수의 유효성을 입증한 바 있고, 이는 심층수의 유효성분이 엽체에 그대로 반영된다고 하는 보고에서도 입증되었다(岡等, 2003). 또한 엽폭의 생장에 대한 3종의 생육특성을 보면 10주간의 배양기간 동안 오카무라돌김에서는 대체로 생장이 느린 것으로 나타난 반면 넓은둥근돌김에서는 동해안의 표층수뿐만 아니라 일반 해수에 MGM 배지를 첨가하여 배양한 엽체(Kim, 2000)보다 오히려 엽체가 크고 생장도 빠른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 3종 가운데 생장이 가장 좋게 나타나 새로운 양식종으로 개발가치가 높은 것으로 판단되었다. 또한 큰방사무늬김에 있어서도 표층수에 비해 심층수와 혼합해수에서의 생장이 약 2-3배 빠르게 나타났다. 또한 엽성이 낮아 생식세포의 형성능력이 떨어지는 종으로 알려진(강과 고, 1977) 큰방사무늬김의 경우 심층수를 이용하여 배양할 경우 생식능력을 향상시켜 질적으로나 양적으로도 더욱 우수한 김을 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

특히 지금까지의 실험결과로 보아 이들 3종이 각각의 배양해수에 대한 종 특이성을 가지고 있기 때문에 심층수를 활용한 고급

김 생산이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 근거로는 일반적으로 김 양식이 이루어지거나 자연 상태에서 김이 대량으로 생육하는 동, 서, 남해안의 수질환경에 편차가 심하다고 하는 것을 들 수 있다. 2003년 8월에 조사한 강원도 동해안 고성 심층수 채수 예상 지역의 일반수질 분석결과(한국해양연구원, 2003), 김의 생육에 영향을 미치는 요인 중 수심 100-500 m에서 채수한 심층수의 염분은 33.9-34.0 ppt, 총 질소(T-N)는 0.118-0.174 mg/L, 인($\text{PO}_4\text{-P}$)은 0.024-0.054 mg/L로 나타났다. 반면, 직접적인 비교는 어려우나 우리나라 주요 김 생산지인 낙동강하구에서는 총 질소가 0.449 mg/L, 인이 0.011 mg/L를 나타냈고, 경남 진해시 용원리 김 양식장에서는 총 질소가 0.599 mg/L, 인이 0.033-0.076 mg/L로 나타났으며, 완도에서는 총 질소가 0.106-0.210 mg/L, 인이 0.013-0.017 mg/L로 나타났다(국립수산물과학원, 2003). 이는 계절적인 차이를 감안하더라도 지역의 편차가 클 뿐만 아니라 유·무기오염이 심했던 낙동강 하구역과 진해만을 제외하면 대체로 고성 심층수에서 김의 생육에 필요한 영양염류가 높게 나타났다. 또한 김의 최적생육에 필요한 질소와 인의비가 7:1 및 10:1이 가장 좋다고 한 연구보고(武居와 宮澤, 1959)를 고성 심층수 해역에 적용시켜 보면 230 m에서는 10:3.6이 되고 330 m에서는 10:3이 되어 질소와 인의 비가 김의 생리에 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한, 김의 생육은 김의 품질을 좌우하는 미량금속인 아연(Zn)과 마그네슘(Mg)의 함량(이 등, 1974)과도 깊은 관련이 있는 것으로 생각된다. 강원 고성 심층수의 미량금속 분석결과, 마그네슘은 자료가 없어 직접 비교하기가 어려웠으며 아연의 농도는 검출되지 않았거나 최소 0.7 ppb에서 최대 260 ppb까지 검출되었고, 이러한 원소 및 기타 미량원소의 농도도 김의 생육에 어떤 형태로든 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 그러나 이것은 어디까지나 추론일 뿐이며 김속 식물의 종류뿐만 아니라 미역, 다시마, 파래 등 기타 유용해조류의 배양 및 재배실험에도 적용시켜 그 결과로부터 심층수에 대한 해조류 생육의 특이성을 밝혀야 할 것으로 생각된다. 그 이유는 阿部 等(2004)이 심층수와 표층수의 성장차이와 동일한 대상종에 따른 심층수의 유효성을 구명할 필요가 있다고 보고한 것에서도 논의의 가치가 있는 것으로 판단된다. 그러므로 심층수에 대한 해조류의 생육 특성에 대한 다양한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 반면 심층수 활용의 다양성과 관련하여 大野(2006)는 심층수에 철 이온을 첨가하여 유우큐마, 가시파래, 김을 수조에서 재배한 결과 생산이 높아졌고 기능성 성분이 함유된 해조류를 생산할 수 있었다고 보고함으로써 심층수를 다양하게 이용할 수 있음을 시사하였다. 이러한 결과를 바탕으로 양식 대상 해조류의 연중생산이나 기능성 제품생산 등에 심층수를 다양하게 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 사용 후 방류되는 심층수를 항만의 수질정화나 갯녹음 해역에 대한 해조장 조성사업 등에도 다양하게 활용할 수 있을 것으로 생각된다(Fujita, 2001; 2003; 김, 2004b). 이는 阿部 等(2003)이 심층수의 방류가 대형 해조류에 미치는 영향검토에서 심층수가 표층수에 희석되면서 감태유체의 성장률이 좋게 나타나 심층수 방류가 해조장 조성에 유리하게 작용한다는 연구결과에서도 알 수 있다.

이상의 결과에서 해조재배에 있어 심층수의 이용가치는 높은 것으로 판단되며, 특히 김의 경우 단포자를 활용하면 해조류가 유실, 고사하는 여름철에도 심층수를 활용한 김을 생산할 수 있을 것

로 생각된다. 그러나 심층수로 배양한 해조의 생리, 생태의 연구가 빈약하기 때문에 차후 심층수를 이용한 해조류의 대량 배양기술을 개발하고 구축할 필요가 있는 것으로 생각된다.

참고문헌

- 강제원, 고남표, 1977. 해조양식. 태화출판사 부산 pp. 294.
국립수산물과학원. 2003. http://www.nfrda.re.kr/korea/tech/areadata/area-stat/statyy3_areastat.
김남길, 능등곡정호, 1997. 둥근돌김(*Porphyrha suborbiculata* Kjellman)의 실내배양. 1997년 추계한국수산물학회 발표논문 요약집, p. 132-133.
김병기, 김형배, 명정구, 김종만, 2001. 해양 심층수를 이용한 종묘생산 및 양성. 제2회 동해심층수자원의 다목적 개발을 위한 제3회 동해심층수 개발·이용 심포지움 요지집, 고성, pp. 33-34.
김병기, 2004a. 고성 해양심층수 개발해역의 생물환경 및 방류수 재활용 방안. 동해심층수자원의 다목적 개발을 위한 제3회 동해심층수 개발·이용심포지움 요지집, 서울, pp. 44-53.
김현주, 2004b. 고성 해양심층수 개발해역의 생물환경 및 방류수 재활용 방안. 제3회 동해심층수자원의 다목적 개발을 위한 제3회 동해심층수 개발·이용 심포지움 요지집, 서울, pp. 54-65.
명정구, 박용주, 박철원, 김종만, 2001. 해양 심층수를 이용한 한해성 바다목장화. 제2회 동해심층수자원의 다목적 개발을 위한 제3회 동해심층수 개발·이용 심포지움 요지집, 고성, pp. 45-49.
이 주, 문영봉, 전임기, 2001. 심층수를 이용한 중간축양 및 유통 방안. 제2회 동해심층수자원의 다목적 개발을 위한 제3회 동해심층수 개발·이용 심포지움 요지집, 고성, pp. 35-44.
이종호, 한성민, 이강호. 1974. 견해대(김)의 아연 및 마그네슘 함량과 품질과의 관계. 한수지. 7: 63-68.
장학봉, 2008. 해양심층수 자원의 산업화. 한국해양수산개발원 해양수산동향, 1285: 1-7.
한국해양연구원, 2001. 해양심층수개발의 환경영향 조사연구(1), 145 pp.
한국해양연구원, 2003. 해양심층수개발의 환경영향 조사연구(2), 157 pp.
한국해양연구원, 2004. 해양심층수개발의 환경영향 조사연구(3), 101 pp.
岡 直宏, 平岡雅規, 西島敏隆, 2002. ワカメの配偶體成熟誘導と室戸海洋深層水を用いた屋外養殖. 第6回 海洋深層水研究会全國大會講演要旨集, p. 51-52.
岡 直宏, 平岡雅規, 西島敏隆, 四ツ倉典滋, 2003. 室戸海洋深層水と表層水を用いたホソメコンブ大量培養藻体成分比較. 第7回 海洋深層水研究会全國大會 講演要旨集, p. 34-35.
大野正夫, 2006. 海洋深層水による海藻の大量培養システムの開発. 産學官連携ジャーナル, 2: 25-27.
藤田大介, 2002. 海洋深層水と磯焼け研究. 海苔と海藻. 64: 27-32.
明神慶一, 山中弘雄, 田島健司, 1991. 深層水中の海洋生物の成長. 深層水國際ブオーラム發表要旨. pp. 101-102.
武居 薫, 宮澤 正, 1959. アサクサノリの施肥に關する研究-I. 主として無機態窒素の吸収について. 水産講習所報. 279: 20-28.
山口光明, 田島健司, 山中弘雄, 岡村雄吾, 1994. 海洋深層水による大型海藻類の培養. 月刊海洋, 285: 156-158.
西島敏隆, 木苺 豊, 深見公雄, 足立眞佐雄, 2000. 海洋深層水を用いた藻類の効率的培養法について. 4回 海洋深層水研究会全國大會

- 講演要旨集, p. 31.
- 船野 隆, 1986. 鹿部沖におけるホソメコンブとマコンブ, リシリコンブ, オニコンブとの養殖による比較. 北水試報, **28**: 46–61.
- 阿部祐子, 荻田淑彦, 森山貴光, 内村眞之, 2003. 室戸海洋深層水の放流による大型藻類への影響の検討. 第7回 海洋深層水利用研究会 2003 焼津大会. 講演要旨集, p. 37.
- 阿部祐子, 荻田淑彦, 川北浩久, 浜田英之, 2004. 室戸海洋深層水を用いた海藻培養に関する研究. 第8回 海洋深層水利用研究会 2004 入善大会. 講演要旨集, p. 56.
- 中島敏光, 1988. 海産珪藻 *Skeletonema costatum* の増殖に及ぼす海洋深層水の影響. 日本プランクトン學會報, **35**: 45–55.
- 中島敏光, 1992. 海養深層水中での珪藻 *Skeletonema costatum* の誘導期を解消する諸因子 I. 有機物質による解消. 日本プランクトン學會報, **38**: 93–104.
- 中島敏光, 2000. 21世紀の資源海洋深層水を利用する. 微細藻類・海藻類の培養. 養殖, **7**: 74–79.
- 丸山 功, 松林恒夫, 安藤洋太郎, 1994. 深層水を利用した微細藻類の大量培養. 月刊海洋, **26**: 145–149.
- 黒木宗尙, 1961. 養殖アマノリの種類とその生活史(アマノリ類の生活史の研究 2報). 東北水研研報, **18**: 1–115.
- Fujita, D., 2001. Algal recovery on coralline-covered cobbles collected from an urchin-dominated barren ground in flowing deep-sea water. Deep Ocean Water Res., **2**: 57–64.
- Fujita, D., 2003. Algal recovery on coralline-covered cobbles collected from an urchin-dominated barren ground in flowing deep-sea water II. Deep Ocean Water Res., **4**: 1–9.
- Kim N.G., 1999. Culture studies of *Porphyra dentata* and *P. pseudolinearis* (Bangiales, Rhodophyta), two dioecious species from Korea. Hydrobiologia, **398/399**: 127–135.
- Kim, N.G., 2000. Effect of temperature, photon flux density and photoperiod on the life history of *Porphyra suborbiculata* Kjellman f. *latifolia* Tanaka (Bangiales, Rhodophyta). Aquaculture, **13**: 295–301.
- Kim, N.G., 2002. Geographical distribution, physiological characteristics and life history of the genus *Porphyra* (Bangiales, Rhodophyta) from Korea. Ph.D. Thesis, Tokyo University of Fisheries, Tokyo, 268 pp.
- Kim, N.G. and M. Notoya, 2003. Life history of *Porphyra koreana* (Bangiales, Rhodophyta) from Korea in culture. Proc. of the 17th Intl. Seaweed Symp. Oxford University Press. pp. 435–442.
- Matsumura, W. and D. Fujita, 2002. Proposal of a self-sustainable abalone culture system based on kelp intercalary growth in deep-sea water. Deep Ocean Water Res., **3**: 53–63.
- Ohno, M., M. Yano, M. Hiraoka, N. Oka and M. Taniguchi, 2001. Tank culture of *Echeuma serra* and *Meristotheca papulosa* using with deep sea water. Bull. Mar. Sci. Fish. Kochi. Univ., **20**: 35–40.
- Quinby-Hunt, M.S., 1979. Comparison of nutrient data from four potential OTEC sites. Report LBL-9052, Lawrence Berkeley Lab., Univ. Calif., Berkeley, p. 6.
- Quinby-Hunt, M.S., P. Wilde and A.T. Dengler, 1986. Potential environmental impacts of open-cycle ocean thermal energy conversion. Environ. Impact Assess. Rev, Elsevier Science Pub. Co., Inc., New York, pp. 77–93.
- Roels, O.A., K.C. Haines and J.B. Sunderlin, 1975. The potential yield of artificial upwelling mariculture. 10th European Symposium on Marine Biology. Ostend, Belgium, **1**: 381–390.
- Ryther, J.H., J.A. DeBoer and B.E. Lapointe, 1979. Cultivation of seaweeds for hydrocolloids, waste treatment and biomass for energy conversion. In: Proceedings of the Ninth International Seaweed Symposium, edited by Jensen, A. and J.R. Stein, Santa Barbara, pp. 1–16.
- Takahashi, M.M., 2001a. What is “deep ocean water”? Aquabiology, **135**: 326–331.
- Takahashi, M.M., 2001b. Cleanliness of deep ocean water. Aquabiology, **135**: 350–357.
- Takano, K., 2001. Physical properties of deep sea waters. Aquabiology, **135**: 337–342.
- Tsunogai, S., 2001. Chemical nature of the oceanic deep water. Aquabiology. **135**: 343–349.

2011년 9월 30일 원고접수

2011년 11월 19일 수정본 접수

2011년 11월 24일 수정본 채택

담당편집위원: 김광용