

녹조 구멍갈파래 (*Ulva pertusa* Kjellman) 의 생식에 미치는 무기영양염류 및 중금속의 영향

김장균 · 한태준*

(인천대학교 생물학과)

Effects of Inorganic Nutrients and Heavy Metals on Reproduction of the Green Alga, *Ulva pertusa* Kjellman

Jang-Kyun Kim and Taejun Han*

Department of Biology, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea

Recent concern over marine pollution has developed great attention on likely alteration of ecosystems thereof. Considering that distributional ranges of seaweed species are governed by their success or failure of reproduction, intertidal green alga, *Ulva pertusa*, was studied to evaluate reproductive responses to environmental pollutants.

Percent of sporulation and spore release of *U. pertusa* grown in the east seawater were higher than those in the west seawater at irradiances higher than $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. In the east seawater medium, optimal photon irradiance for reproduction was found to be at $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ whereas in the west seawater, that was $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Total quantum requirements for sporulation and spore release were much lower in the east seawater than the west seawater, which suggests that reproduction may be influenced by water turbidity.

When *U. pertusa* was exposed in batch cultures to various concentrations of nitrate and phosphate at $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ of white light, the rate of reproduction was markedly higher in nutrient-added conditions compared with controls with no nutrients. As nitrate concentration increased, the reproductive rate of *U. pertusa* increased in all cultures of phosphate concentrations indicating that nitrate but not phosphate plays an important role in reproductive process. When copper and lead in combination were added to *U. pertusa*, percent sporulation and spore release were solely dependent on copper concentration. Sporulation and spore release at 0.01 ppm of copper reached about 80% which was similar to that in control, but no sign of reproduction was found at 0.1 ppm of copper. It can therefore be speculated that reproduction is more sensitive to copper than growth in *U. pertusa* in view of the previous report that 0.1 ppm of copper was not inhibitive to growth.

Key Words: copper, lead, nitrate, phosphate, spore release, sporulation, *Ulva pertusa*

서 론

성공적인 생식은 생물종의 생존과 번성에 있어 매우 중요한 요인이다. 해조류의 생식은 광선, 온도, 염분도, 영양염류 등 매우 다양한 환경요인의 복합적인 영향을 받으며 종별로 조절인자에 차이가 있는 것으로 보고되어 왔다 (Lobban *et al.* 1985). 이중 광선은 독립적으로 혹은 다른 요인들과의 상호작용을 통하여 해조류의 생식에 결정적인

영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, 예를 들어 녹조 *Chlamydomonas reinhardtii*의 경우 암상태에서는 생식이 일어나지 않는 개체를 광선에 노출시켜 배양했을 때 배우자가 형성되었으며 (Beck and Acker 1992), 또한 녹조 *Enteromorpha intestinalis*와 홍조 *Rhodochorton purpureum*에서도 역시 생식율이 광량에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다 (West 1968; Kim *et al.* 1992).

최근 인간산업활동의 부산물로 인하여 연안지역이 오염됨에 따라 주변지역의 해산생물군집이 악영향을 받게 되었다. 특히 육상으로부터 과다유입되는 생활하수로 해수 내의 영양염류 농도가 일정 농도 이상으로 증가되는 부영

*Corresponding author (hanalgae@lion.inchon.ac.kr)

양화 현상이 등장함에 따라 해조류가 이상과다번식함과 동시에 그 지역의 구성종이 변화되어 최종적으로 종다양성이 감소되는 결과를 가져오게 되었다(Stirn 1994). 부영양화 지역에서 빈번하게 과다번식하는 해조류로는 주로 녹조 *Ulva*와 *Enteromorpha*가 있는데(Lavery et al. 1991; Fletcher 1996), 그 이유는 이 종들이 형태적으로 단순하고 매우 빠른 성장능력을 가지며 영양염류의 흡수능력과 저장능력이 커서 영양염류의 공급변화에 잘 적응하고 영양생장과 생식이 광범위한 환경범위에서 큰 제한없이 일어날 수 있기 때문인데 이로써 또한 다른 종과의 경쟁에서 매우 유리한 위치를 점유할 수 있기 때문인 것으로 사료된다(Littler and Littler 1980; Kim et al. 1991; Hein et al. 1995). 무기영양염류 중 특히 질산염과 인산염은 해조류의 생식에 매우 다양한 형태로 영향을 미치는 것으로 알려져 왔는데, 녹조 *U. fasciata*의 경우 질산염이 고갈되었을 때 배우자 형성이 촉진되었으나 고농도에서는 영양생장과 무성생식을 하는 것으로 나타났으며(Mohsen et al. 1974), Nasr 등(1968)은 배양액에 질산염을 첨가해 주었을 때 녹조 *U. lactuca*의 유주자 형성이 매우 활발하게 이루어진다고 보고하였다. 갈조 *Laminaria longicruris*의 경우 체내의 질소농도가 높은 겨울동안에 영양생장을 하며 질소농도가 낮은 여름동안에 생식이 활발하게 진행되는 것으로 관찰되었다(Egan et al. 1989).

최근 Kim과 Han(1999)은 구멍갈파래의 경우 그 생육장소가 육상오염물질이 직접적으로 투입되는 조간대라는 점 때문에 높은 농도의 중금속에 노출되기 쉬우며, 이 때 생장과정은 물론 생존에 결정적인 피해를 받을 수 있다고 지적하였다. 해수중의 중금속은 월별, 계절별로 다양한 농도를 나타내는 것으로 보고된 바 있는데(Cho 1999), 수계에서 해산식물들은 특히 구리와 납에 대하여 종간에 서로 다르게 반응하므로 이러한 중금속은 군집구조의 변화나 천이의 원인이 되기도 한다(Thomas and Siebert 1977). 구리와 납같은 중금속들은 원형질막의 투과에 영향을 끼쳐서 세포내에서 칼륨이온을 상실하게 하는 결과를 가져오며 과도한 농도의 중금속은 광합성 색소를 파괴하는 작용까지 한다(De Felippis 1979). 해조류에 미치는 중금속의 독성에 대해 지금까지 많은 연구가 진행되었는데 대부분의 연구가 생장 및 생존에 국한되었고 생식에 끼치는 영향에 대해서는 극히 제한적인 연구만이 이루어졌다.

본 연구는 우리나라 해안 조간대 상부에 광범위하게 분포하고 단순한 형태구조를 가지고 있으며, 배양이 용이한 녹조 구멍갈파래를 대상으로 영양염류(질산염과 인산염)와 중금속(구리와 납)이 생식에 미치는 영향을 조사함으로써 이들 환경요인의 최적농도 및 독성농도를 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 우리나라 동해안에 자연서식하는 녹조 구멍갈파래(*Ulva pertusa* Kjellman)를 재료로 사용하였다. 갈파래속 식물의 생식세포 형성은 주로 엽체의 가장자리 부위에서 이루어지므로(Nordby and Hoxmark 1972) 구멍갈파래의 건강한 엽체의 가장자리 부위에서 직경 14 mm의 원형절편(disc)을 뽑아내어 사용하였다. 원형절편은 250 ml의 배양액이 담긴 플라스크에 넣고, $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 온도 하에서 12:12LD의 광주기로 유동배양하였으며 배양액은 2 일 간격으로 전량 교체해 주었다.

동해와 서해에서 채수된 자연해수에서의 생식

배양액은 강원도 안인과 인천광역시 월미도에서 각각 채수한 자연해수를 이용하였으며 암흑조건과 10, 30, 60, 100, 150 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 14일동안 배양하였다.

무기영양염류 농도에 따른 생식

무기영양염류 농도는 지난 10년간 동해와 서해에서 측정된 해수질현황자료(1989-1994 Ministry of Environment Republic of Korea(ME); 1995-1998 Ministry of Environment Republic of Korea(MOE))를 기초로 하여 KNO_3 (99.0%) 0.5, 2.5, 5, 10 ppm과 K_2HPO_4 (99.0%) 0.002, 0.02, 0.2, 0.8 ppm으로 설정하였으며, 이 때 해수는 가공해수로서 증류수 1l에 비가공 천일염 35 g을 녹여 pore size 0.45 μm 의 membrane filter(Millipore Co.)로 여과하여 사용하였다. 배양시 광량은 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이었으며 배양기간은 14일이었다.

중금속 농도에 따른 생식

Han(1992)의 영양염류 조성법에 따라 만든 배지에 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (99.0%)와 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (99.0%)을 농도별로 첨가하였다. 본 연구에서 사용한 Cu^{2+} 와 Pb^{2+} 의 농도설정은 지난 12년간의 동해와 서해해수질현황자료(Cho 1999)를 기초로 하여 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.01, 0.1, 1 ppm과 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 0.01, 0.1, 1 ppm을 복합 처리하였으며, 광량과 배양기간은 무기영양염류에서의 처리방식과 동일하였다.

포자형성을 및 포자방출을 측정

포자형성시 엽체의 색깔이 녹색에서 연한갈색 혹은 백색으로 변화되는 것이 시각적으로 분명하게 나타나는데 이 때의 면적을 영상분석장치(Samsung Co., MW-200B)를 사용하여 측정하였으며, 포자방출율은 현미경하에서 포자가 방출된 세포를 확인한 후 그 면적을 측정하여 나타

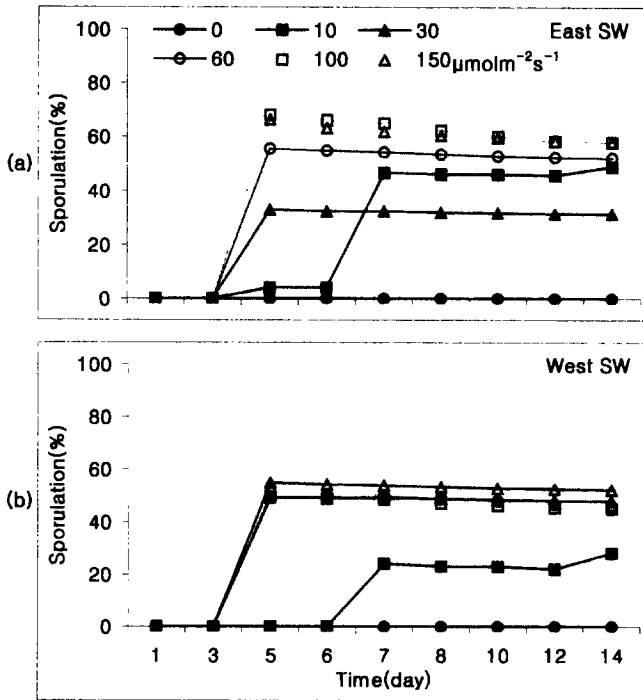


Fig. 1. Effects of photon irradiances on sporulation of *Ulva pertusa*, grown in the seawater collected from (a) east (b) west coasts in Korea.

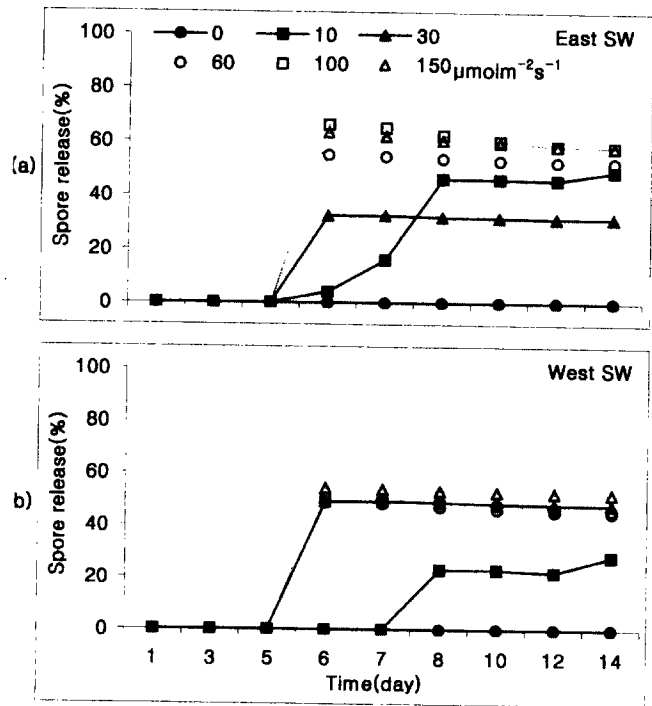


Fig. 2. Effects of photon irradiances on spore release of *Ulva pertusa*, grown in the seawater collected from (a) east (b) west coasts in Korea.

내었다. 포자형성율은 전체 엽체면적에 대한 포자형성면적의 상대비율로 계산하였고, 포자방출을 또한 전체 엽체면적에 대한 포자방출면적의 상대비율로 계산하였다.

결 과

동해와 서해 자연해수에서의 생식

동해와 서해의 자연해수를 사용하여 구멍갈파래의 원형 절편을 광량별로 14일동안 배양하였을 때 나타난 생식양상은 Figs 1-2와 같다. 포자형성율은 두 해수조건 모두 암상태를 제외한 모든 광조건에서 배양 4일 후에 포자가 형성되기 시작했으며 광량이 증가함에 따라 포자형성율이 높게 나타났다(Fig. 1). 동해해수조건에서는 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 배양 5일 후에 70%에 이르는 최대포자형성율을 보인 반면, 서해해수조건에서는 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 일정하게 55% 정도의 포자형성율을 나타냈다(Fig. 1). 포자방출율의 경우 모든 광조건에서 포자형성시점으로부터 24시간 경과 후 포자방출이 관찰되기 시작하였으며 포자형성율과 마찬가지로 광량 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상의 광량조건에서는 동해해수조건에서 배양된 엽체의 포자형성율 및 방출율이 서해해수조건에서 배양된 엽체에서 보다 높게 나타났다(Figs 1, 2).

무기영양염류 농도에 따른 생식

1988년부터 1997년 사이에 측정된 동해해수와 서해해수 내의 무기영양염류의 변화동태 자료를 근거(1989-1994 ME; 1995-1998 MOE)로 하여 질산염과 인산염의 농도를 설정하고 KNO_3 와 K_2HPO_4 의 영양염류를 복합처리하여 구멍갈파래의 최적생식광량인 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 14일간 배양한 결과 나타난 생식율 양상은 Figs 3-4와 같다. 배양 3일째부터 포자가 형성되기 시작했으며 영양염류를 첨가하지 않은 대조군에 비하여 복합처리된 모든 영양염류 조건에서 뚜렷하게 높은 포자형성율을 보였고 0.2 ppm 이하의 인산염 농도에서 질산염 농도가 증가함에 따라 포자형성이 신속하게 이루어지는 것으로 나타났다(Fig. 3). 포자방출의 경우 배양 3-5일 사이에 일어났으며 포자형성율과 마찬가지로 모든 영양염류 조건에서 대조군보다 높은 방출율을 보였고 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 증가함에 따라 방출이 보다 빠르게 나타났다(Fig. 4).

중금속 농도에 따른 생식

1985년부터 1997년 사이의 서해 경기만에서의 중금속 농도변화를 근거(Cho 1999)로 Cu^{2+} 와 Pb^{2+} 의 농도를 설정하고 두 원소를 복합처리하여 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 구멍갈파래를 14일간 배양한 결과 나타난 생식율은 Pb^{2+} 농도에 상관없이 Cu^{2+} 농도 0.01 ppm에서 배양 4일째부

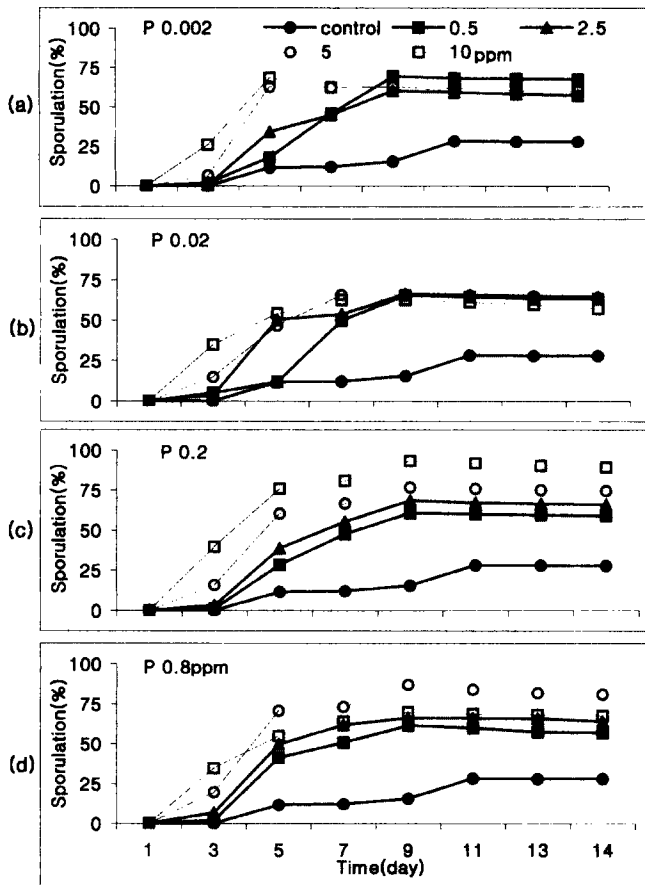


Fig. 3. Effect of different concentrations of nitrate on sporulation of *Ulva pertusa* at (a) 0.002 ppm (b) 0.02 ppm (c) 0.2 ppm (d) 0.8 ppm of phosphate.

터 중금속을 첨가하지 않은 대조군과 마찬가지로 포자가 형성되기 시작하여 90%에 이르는 포자형성율을 보인 반면, Cu^{2+} 0.1과 1 ppm 농도에서는 생식현상을 볼 수 없었다(Fig. 5). 포자방출은 포자형성이 시작된 후 24시간이 경과했을 때 시작되었으며 대조군과 Cu^{2+} 0.01 ppm에서 90%에 이르는 포자방출율을 나타냈다(Fig. 6).

고 찰

광선은 생식에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 왔는데, 본 연구에서 구멍갈파래의 포자형성율과 방출율이 광량이 증가함에 따라 높게 나타난 것은 이러한 경향성을 잘 반영해 준다고 할 수 있다(Figs 1, 2). 다른 연구에서도 구멍갈파래와 같은 갈파래목에 속한 *Enteromorpha intestinalis*의 경우 유주자 형성율이 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서는 약 10%에 머물렀으나 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서는 80%까지 이르는 높은 값을 나타낸다고 보고된 바 있다(Kim et al. 1992). 또한 잘피류 *Zostera navazelandica*

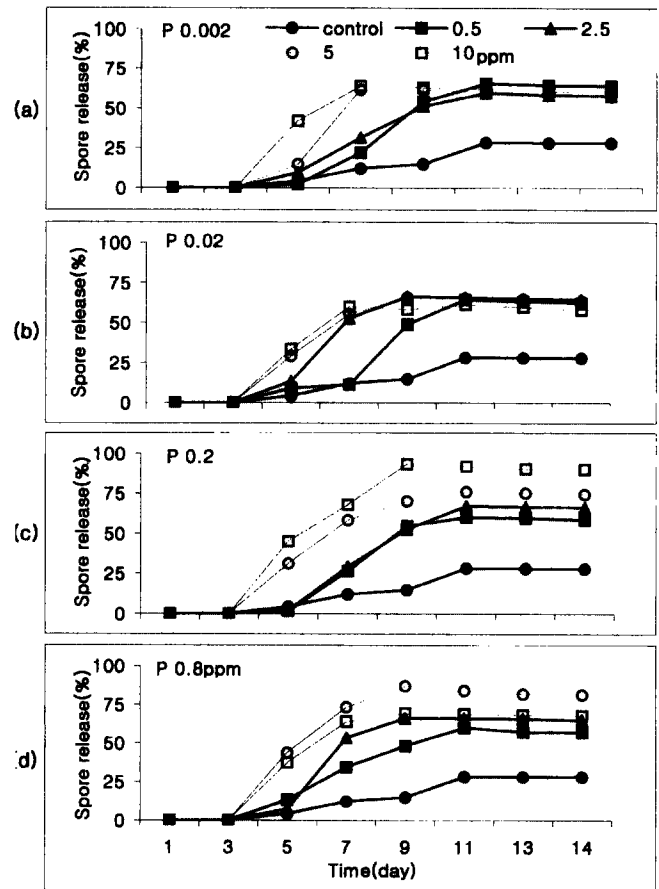


Fig. 4. Effect of different concentrations of nitrate on spore release of *Ulva pertusa* at (a) 0.002 ppm (b) 0.02 ppm (c) 0.2 ppm (d) 0.8 ppm of phosphate.

는 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 비교적 높은 생식율을 보였고, $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서는 생식율이 낮은 것으로 보고된 바 있다(Ramage and Schiel 1998). 한편, 홍조 *Rhodochorton purpureum*도 낮은 광량($3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)에서 배양했을 때에 포자형성이 거의 일어나지 않았지만, 광량 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서는 100%의 포자형성율을 보였다(West 1968). 일반적으로 녹조류와 잘피류는 홍조류에 비해 수심 얇은 곳에 서식하면서 상대적으로 높은 광에 적응하고 있는 것으로 알려져 있다(Kamermans et al. 1998; Ramage and Schiel 1998). 따라서 생식포화광량은 종의 주서식처에서 관찰되는 광분포적 특성과 관련되어 있음을 추정할 수 있다.

모든 광조건에서 구멍갈파래의 생식은 배양 4일 후부터 시작되었고 이 때까지 생장은 유의성 있는 변화를 보이지 않았다(Fig. 1). $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광량의 경우 배양 5일 째에 생식이 포화된 후부터는 배양기간동안 더 이상 생식율이 증가하지 않은 반면 엽체의 면적은 빠르게 증가하는 것이 관찰되었는데, 이는 구멍갈파래가 생식과정

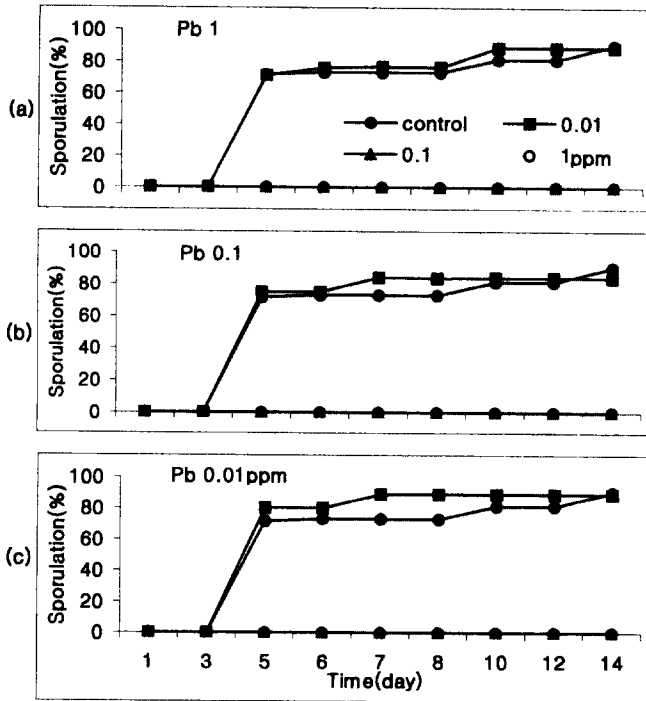


Fig. 5. Effect of different concentrations of copper on sporulation of *Ulva pertusa* at (a) 1 ppm (b) 0.1 ppm (c) 0.01 ppm of lead.

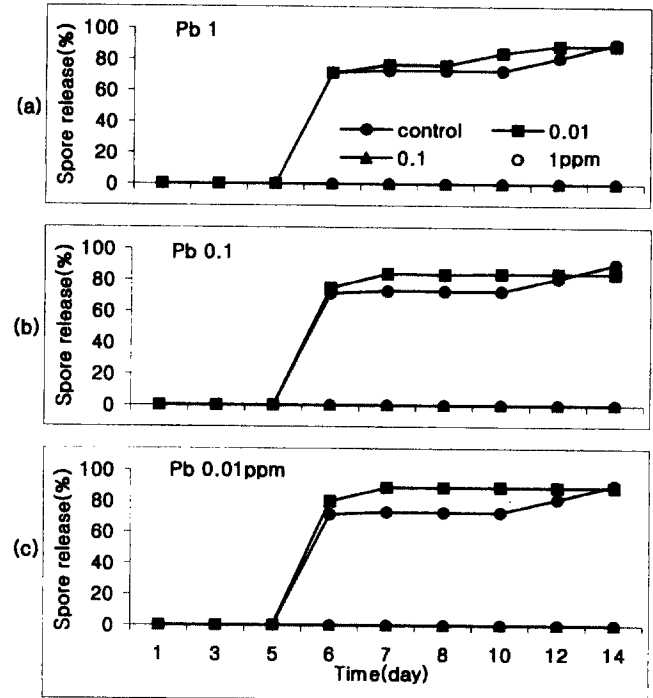


Fig. 6. Effect of different concentrations of copper on spore release of *Ulva pertusa* at (a) 1 ppm (b) 0.1 ppm (c) 0.01 ppm of lead.

Table 1. Comparisons of growth and reproduction of *Ulva pertusa* in response to inorganic nutrients and heavy metals.

	Growth	Reproduction
Responses to water body	East seawater > West seawater	East seawater > West seawater
Optimal photon irradiance	100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Compensating photon irradiance	10-30 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	below 10 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Determinant nutrient	Nitrate	Nitrate
Optimal concentration of nutrients	N: 10 ppm P: 0.8 ppm	N: 10 ppm P: 0.2 ppm
Determinant heavy metal	Copper	Copper
Inhibiting concentration of heavy metals	0.1-1 ppm	below 0.1 ppm
Reference	Kim and Han (1999)	this study

동안에는 생장이 정지되는 것을 의미하며 생장과 생식이 서로 반복적으로 일어나는 현상을 제시해 주는 것이다 (Fig. 1). 본 연구결과 한국산 구멍갈파래의 생식최적광량은 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 인 것으로 나타났는데 이는 동종의 생장최적광량과 동일하다는 점에서 흥미롭다(Kim and Han 1999; Table 1). 반면 구멍갈파래의 생식임계광량은 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하의 광량에서 존재하는 것으로 판단되는데 (Figs 1, 2), 최근 Kim 등(1992)은 *Enteromorpha intestinalis*의 생식을 위한 임계광량이 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하라고 보고하였으며, Knaggs(1966)는 홍조 *Rhodochorton purpureum*의 연구를 통해 포자형성을 유도하는 임계광량이 $2-18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 사이라고 언급한 바 있다. 동종의 엽체 중간부위에서의 생장보상점이 $10-30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 인

것을 감안한다면(Kim and Han 1999), 구멍갈파래의 생식은 영양생장에 비하여 광량에 민감한 반응을 보인다는 것을 시사해 준다(Table 1). 이러한 현상은 조간대 상부에서 구멍갈파래가 다른 종들에 비해 종번식에 있어서 생태적 우위를 차지할 수 있도록 해주는 기작이 될 수 있을 것으로 사료된다.

Lüning(1980)은 3종의 갈조 다시마속 식물(*Laminaria hyperborea*, *L. digitata*, *L. saccharina*)을 대상으로 수체별 생식율을 비교하여 해수의 물리적 성격이 광분포에 영향을 줌으로써 결국 생식율의 차이를 가져올 수 있다고 하였는데 연안수 water type 5의 조건에서는 100%의 생식율에 필요한 광량이 $1-1.5 \text{ nEcm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 인 반면, 연안수 water type 9에서는 $2 \text{ nEcm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 인 것으로 보고하였다. 본 연구

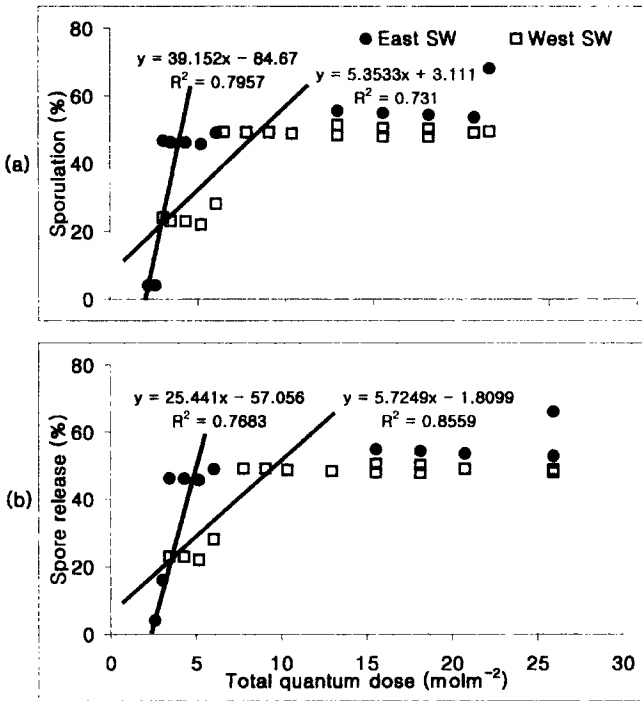


Fig. 7. Total quantum requirements for (a) sporulation (b) spore release of *Ulva pertusa*.

에서 총광량과 포자형성율과의 관계를 살펴본 결과 50% 포자형성율을 위한 총광량은 동해해수조건에서 3.4 mol·m⁻²이었고 서해해수조건에서는 8.8 mol·m⁻²으로서 일반적으로 탁한 것으로 알려진 서해해수에서의 생식요구 광량이 동해해수에서보다 두배 이상 높은 것으로 나타났으며, 포자방출율 역시 비슷한 경향(동해 4.2 mol·m⁻², 서해 9.0 mol·m⁻²)을 보여 한국산 구멍갈파래 역시 수체의 물리적 성격에 의하여 생식율의 차이를 나타내는 것으로 사료된다(Fig. 7). 본 연구에서는 이상과 같은 물리적인 환경요인뿐 아니라 환경오염인자 중 무기영양염류(질산염과 인산염)와 중금속(구리와 납)을 선택하여 이들이 각각 구멍갈파래의 생식에 미치는 영향에 대해 조사함으로써 동해와 서해해수 사이에서 관찰된 생식율 차이를 규명하고자 했다.

무기영양염류 특히 질산염과 인산염은 해조류의 성장과 생식에 제한요소로 작용할 수 있다고 알려져 있지만 자연상태의 해수에는 그 양이 충분하기 때문에 영양염류 단독으로 성장과 생식을 제한하는 요인으로 작용하는 경우가 드물다(Hsiao and Druehl 1973; Chapman and Craigie 1977). Hsiao와 Druehl (1973)은 실험실 배양과 자연상태에서의 배양을 통해 갈조 *Laminaria saccharina*의 배우자형성에 필요한 질산염의 최소농도는 5 μg·l⁻¹라고 보고한 바 있는데, 실제 실험 대상지역(Lumberman's Arch Burrard Inlet British Columbia Canada)에서 자연상태 해

수내의 질산염의 농도도 연중 5 μg·l⁻¹를 초과하는 것으로 나타났다. 반면, Hsiao와 Druehl(1973)은 동종의 생식이 비교적 넓은 영양염류 범위에서 일어나고, 질산염과 인산염의 농도가 증가함에 따라 생식율이 증가하여 질산염 588.3 μg·l⁻¹과 인산염 15 μg·l⁻¹에서 최적의 생식율을 나타낸다고 하였다. 본 연구에서 구멍갈파래는 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 증가함에 따라 높은 포자형성율과 방출율을 나타내었다(Figs 3, 4). 최근 Kim과 Han (1999)은 동종을 대상으로 수행한 연구에서 인산염보다는 질산염이 성장제한 요인으로 작용한다고 보고하였는데 생식현상도 마찬가지로 질산염이 제한요인으로 작용하는 것으로 판단된다(Table 1). 또한 자연상태의 해수를 사용한 실험실 연구결과 서해해수조건에서 배양한 것보다 상대적으로 영양염류의 농도가 낮은 동해해수조건에서 배양한 염체의 생식율이 높게 나타난 반면(Figs 1, 2), 인공해수를 이용하여 영양염류의 농도를 분배하였을 때 동해해수를 대표하는 농도(질산염 0.5 ppm, 인산염 0.002-0.02 ppm)에서 보다 서해해수를 대표하는 농도(질산염 2.5 ppm 이상, 인산염 0.02 ppm 이상)에서 생식율이 높게 나타난 것은 자연상태에서 서해해수에 질산염과 인산염 이외에 구멍갈파래의 생식을 제한하는 요인이 존재할 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

본 연구에서 구멍갈파래는 Pb²⁺ 농도에 상관없이 Cu²⁺ 농도 0.01 ppm 상태에서 90%에 이르는 포자형성율과 방출율을 보였는데 이는 중금속을 첨가하지 않은 대조구와 유사한 결과였으나, 포자형성이 전혀 일어나지 않은 다른 두 농도 조건과는 대조적인 것이라고 할 수 있다(Figs 5, 6). 철, 망간, 구리 등을 비롯한 일부 중금속은 극미량일 경우 해조류에 긍정적인 영향을 주지만 농도가 높을 경우 심각한 피해를 끼칠 수 있다(Dring 1996). 그 예로 갈조 *Laminaria saccharina*의 경우 Cu²⁺를 첨가하지 않았을 때보다 10 μg·l⁻¹의 Cu²⁺를 첨가했을 때 더 높은 생식율을 보였으나 50 μg·l⁻¹ 이상의 Cu²⁺ 농도에서는 생식율이 눈에 띄게 감소하였다(Chung and Brinkhuis 1986). Leland와 Carter (1984)는 22종의 다양한 해조류를 대상으로 여러 Cu²⁺ 농도에서 개체수의 증감을 연구한 결과 Cu²⁺ 농도 10 μg·l⁻¹에 노출시켰을 때 그 중 16종이 개체수 감소를 나타내었으나 *Achnanthes minutissima*와 *Calothrix* spp.는 동일한 Cu²⁺ 농도에서 오히려 꾸준한 증번식을 하여 그 지역의 우점종이 되는 것을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서 한국산 구멍갈파래도 이와 같은 농도범위에서 활발한 생식활동을 하는 것으로 나타나 구멍갈파래 역시 강한 생식능력에 의한 높은 경쟁력을 갖는 종임을 입증하였다(Figs 5, 6). 조류의 생식은 중금속의 독성에 매우 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있는데 특히 구리의 경우 매우 낮은

농도에서 생식을 억제한다(Anderson *et al.* 1990). 구리에 대한 해조류의 생리적 민감성을 살펴보면 대체로 발아나 영양생장보다 생식시기가 더욱 민감함을 알 수 있다. Smith와 Harrison(1978)은 갈조 *Macrocystis pyrifera* 배우체의 영양생장이 Cu^{2+} 농도 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 에서 억제되는 반면, 생식은 $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 농도에서 억제된다고 보고하였다. 또한 동종의 포자체를 대상으로 한 연구결과 영양생장은 $32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 발아는 $90.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 생식은 $10.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 Cu^{2+} 농도에서 억제되었으며(Anderson *et al.* 1990), 갈조 *Laminaria saccharina* 포자체의 경우 영양생장은 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 생식은 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 Cu^{2+} 농도에서 억제현상이 관찰되었다(Thomas and Burrows 1984). 최근 Kim과 Han(1999)은 Cu^{2+} 농도 1 ppm의 조건이 구멍갈파래의 생장에 치명적인 영향을 미친다고 보고하였는데, 본 연구에서 생식과정은 0.1 ppm의 Cu^{2+} 농도에서 완전히 억제되는 것으로 보아 구멍갈파래에서도 생장보다 생식과정이 Cu^{2+} 에 민감하게 반응하는 것으로 사료된다(Table 1). 이상의 결과 Cu^{2+} 는 구멍갈파래의 생장뿐 아니라 생식에도 절대적인 제한요인으로 작용하여 생육에 막대한 영향을 줄 수 있다고 할 수 있다. 자연상태에서는 Cu^{2+} 농도가 구멍갈파래에 독성효과를 나타낼 만큼 높은 농도로 존재하지 않지만 간헐적으로 자연상태에 나타나는 농도(0.23 ppm)만으로도 구멍갈파래의 생식력에 심각한 피해를 입힐 수 있을 것으로 사료된다(Lee *et al.* 1989).

사 사

익명의 심사위원들의 조언에 깊이 감사드립니다. 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-1-202-001-3) 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Anderson B.S., Hunt J.W., Turpen S.L., Coulom A.R. and Martin M. 1990. Copper toxicity to microscopic stages of giant kelp *Macrocystis pyrifera*: interpopulation comparisons and temporal variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **68**: 147-156.
- Beck C.F. and Acker A. 1992. Gametic differentiation of *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiol.* **98**: 822-826.
- Chapman A.R.O. and Craigie J.S. 1977. Seasonal growth in *Laminaria longicruris*: relations with dissolved inorganic nutrients and internal reserves of nitrogen. *Mar. Biol.* **40**: 197-205.
- Cho K.D. 1999. *Master plan for environment conservation*. Incheon Metropolitan City, Incheon.
- Chung I.K. and Brinkhuis B.H. 1986. Copper effects in early stages of the Kelp, *Laminaria saccharina*. *Mar. Pollut. Bull.* **17**: 213-218.
- De Filippis L.F. 1979. The effect of heavy metal compounds on the permeability of *Chlorella* cells. *Z. Pflanzenphysiol.* **92**: 39-49.
- Dring M.J. 1996. *The Biology of Marine Plants*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Egan B., Vlasto A. and Yarish C. 1989. Seasonal acclimation to temperature and light in *Laminaria longicruris* de la Phl. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **129**: 1-16.
- Fletcher R.L. 1996. The occurrence of "green tides" — a review. In: Schramm W. Nienhuis PH (eds), *Marine benthic vegetation in Europe: recent changes and the effects of eutrophication*. Springer, Heidelberg.
- Han T. 1992. *Effect of visible light and UV radiation on early sporophytes of species of the Laminariales*. Ph. D. Thesis. University of Liverpool, U.K.
- Hein M., Pedersen M.F. and Sand-Jensen K. 1995. Size-dependent nitrogen uptake in micro- and macro-algae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **118**: 247-253.
- Hsiao S.I.C. and Druehl L.D. 1973. Environmental control of gametogenesis in *Laminaria saccharina*. II. Correlation of nitrate and phosphate concentrations with gametogenesis and selected metabolites. *Can. J. Bot.* **51**: 829-839.
- Kamerians P., Malta E.J., Verschuure J.M., Lentz L.F. and Schrijvers L. 1998. Role of cold resistance and burial for winter survival and spring initiation of an *Ulva* spp. (Chlorophyta) bloom in a eutrophic lagoon (Veerse Meer lagoon, The Netherlands). *Mar. Biol.* **131**: 45-51.
- Kim J.K. and Han T. 1999. Effects of inorganic nutrients and heavy metals on growth and pigmentation of the green alga, *Ulva pertusa* Kjellman. *Kor. J. Environ. Biol.* **17**: 427-438.
- Kim K.Y., Ahn Y.S. and Lee I.K. 1991. Growth and morphology of *Enteromorpha linza* (L.) J. Ag. and *E. prolifera* (Müller) J. Ag. (Ulvales, Chlorophyceae). *Kor. J. Phycol.* **6**: 31-45.
- Kim K.Y., Lee I.K. and Chung I.C. 1992. The combined effects of irradiance and salinity, and temperature and salinity on germination and zoosporogenesis of *Enteromorpha intestinalis* (L.) Link. *Kor. J. Env. Biol.* **10**: 56-65.
- Knaggs F.W. 1966. *Rhodochorton purpureum* (lightf.) Rosenvings observations on the relationship between reproduction and environment. I. The relationship between the energy of incident light and tetrasprangium production. *Nova Hedwigia* **11**: 405-411.
- Lavery P.S., Lukatelich R.J. and McComb A.J. 1991. Changes in the biomass and species composition of macroalgae in a eutrophic estuary. *Estuar. costal. Shelf. Sci.* **33**: 1-22.
- Lee J.A., Sunwoo Y.I., Lee H.J., Park I.H. and Chung I.K. 1989. The effects of copper on the early stages of *Undaria pinnatifida* (Harv.) Suringar (Laminariales, Phaeophyta) under temperature-irradiance gradient. *Kor. J. Phycol.* **4**: 41-53.
- Leland H.V. and Carter J.L. 1984. Effects of copper on species composition of periphyton in a Sierra Nevada, California, stream. *Freshwater Biology* **14**: 281-296.
- Littler M.M. and Littler D.S. 1980. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *Am. Nat.*

116: 25-44.

- Lobban C.S., Harrison P.J. and Duncan M.J. 1985. *The Physiological Ecology of Seaweeds*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lüning K. 1980. Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three *Laminaria* species (Phaeophyceae). *J. Phycol.* **16**: 1-15.
- Ministry of Environment Republic of Korea. 1989-1994. Korea Environmental Yearbook, Seoul.
- Ministry of Environment Republic of Korea. 1995-1998. Environmental Statistics Yearbook, Seoul.
- Mohsen A.F., Khaleafa A.F., Hashem M.A. and Metwalli A. 1974. Effect of different nitrogen sources on growth, reproduction, amino acid, fat and sugar contents in *Ulva fasciata* Petite. *Bot. Mar.* **17**: 218-222.
- Nasr A.H., Bekheet I.A. and Ibrahim R.K. 1968. The effects of different nitrogen and carbon sources on amino acid synthesis in *Ulva*, *Dictyota* and *Pterocladia*. *Hydrobiologia* **31**: 7-16.
- Nordby Ø. and Hoxmark R.C. 1972. Change in cellular parameters during synchronous meiosis in *Ulva mutabilis* Føyn. *Exptl. Cell Res.* **75**: 321-328.
- Ramage D.L. and Schiel D.R. 1998. Reproduction in the seagrass *Zostera novazelandica* on intertidal platforms in southern New Zealand. *Mar. Biol.* **130**: 479-489.
- Smith B.M. and Harrison F.L. 1978. Sensitivity of *Macrocystis* gametophytes to copper. Final report to US Nuclear Regulatory Commission, Lawrence National Laboratory, Livermore, California. NRC FIN No. A0119: 1-34.
- Stirn J. 1994. Man-made eutrophication in the Mediterranean Sea. *Mediterranean* **4**: 8-23.
- Thomas R.S. and Burrows E.M. 1984. The toxicity of copper, zinc and mercury to the brown macroalga *Laminaria saccharina*. In: Persoone, G., Jaspers, E., Claus, C., (eds), *Ecotoxicological testing for the marine environment*. Vol. 2. State Univ. Ghent and Inst. Mar. Science. Res., Brendene.
- Thomas W.H. and Siebert D.L.R. 1977. Effects of copper on the dominance and the diversity of algae: Controlled ecosystem pollution experiment. *Bull. Mar. Sci.* **27**: 23-33.
- West J.A. 1968. The morphology and reproduction of the red alga, *Acrochaetium pectinatum*. *J. Phycol.* **4**: 89-99.

Accepted 31 May 2000