

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

김 장 균 · 한 태 준*

인천대학교 생물학과

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

Jang-Kyun Kim and Taejun Han*

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

Abstract – Growth optima and tolerance ranges of marine algae species may vary greatly during the developmental stage. The establishment stage is clearly of great importance for each generation, affecting the performance of the adult population. The present study was aimed to determine the effect of various concentrations of inorganic nutrients and heavy metals on germination and germlings of *Ulva pertusa* Kjellman (Chlorophyta). Percent germination increased rapidly as irradiance level increased, reaching the maximum at $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in both east and west seawater. Percent germination in the east seawater was higher than that in the west seawater at irradiances lower than $30 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, and there was no difference in percent germination between the two different seawaters at irradiances higher than $60 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Germling growth increased in the both cases with increasing irradiances but no growth was found in the dark. Overall germling area was larger in the east seawater than in the west seawater. Number of cell increased with increasing irradiance and became light-saturated at $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in the both cases. Germlings grown in the east seawater had more cells than those cultivated in the west seawater at irradiances lower than $60 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. In various combinations of nitrate and phosphate, percent germination increased with increasing nitrate concentrations irrespective of phosphate concentrations. At 3 days after inoculation, nitrate concentration of 2.5 ppm with all phosphate concentrations promoted germination. Area and number of cell of germlings increased with increasing nitrate concentrations in all phosphate concentrations. In various combinations of copper and lead, germination was delayed as copper concentrations increased in all lead concentrations. Percent germination was severely reduced at 1 ppm Cu^{2+} . Area and number of cell of germlings decreased with increasing copper concentrations in all lead concentrations. The highest copper concentration (1 ppm) clearly suppressed the germling growth in *U. pertusa*.

Key words : germination, heavy metals, nutrients, *Ulva pertusa*

서 론

* Corresponding author: Taejun Han, Tel. 032-770-8245, Fax. 032-770-8240, E-mail : hanalgae@lion.incheon.ac.kr

환경인자가 해조류에 미치는 영향에 대한 연구는 주

로 성체를 이용해 왔다. 그러나 포자가 저질에 부착하고 발아하는 과정은 성체로 자라고 군집에 정착하는데 매우 중요한 생활사의 부분이다 (Kain 1964; Chapman 1986). 조류는 발달단계에 따라 최적성장조건과 내성범위가 다르게 나타날 수 있다 (Fain and Murray 1982; Fei and Neushul 1984). 해조류군집에서 초기 정착은 일반적으로 성체 주변에서 일어나는데, 이곳은 생활사 중 성숙한 단계의 개체가 경험하는 것과 매우 다른 환경조건일 수 있다 (Han and Kain 1996). 몇몇 갈조류에서 성장단계에 따라 광요구량이 다르게 나타나는데 (Fei and Neushul 1984), 갈조 *Laminaria* 종들의 경우 성장을 위한 최적광량이 발아체 보다 성숙한 식물체에서 높은 것으로 나타났다 (Lüning 1980, 1981). 이것은 생활사 단계에서 개별적으로 나타나는 환경요인에 대한 생리적 반응의 결과로써 이에 대한 연구의 중요성이 강조되고 있다.

생물이 성장하는데 있어서 질소는 세포내 단백질, amino acid, purine, pyrimidine, 핵산 등의 합성에 필요한 요인이고 효소와 대부분의 기질에 있어서 중요한 구성요소이다 (Fogg 1959). 반면, 인은 광합성, 해당작용, 인산화, 단백질 합성, 핵산 합성 등 세포의 기능에 필수불가결하게 관여하고 있다 (Katchman 1961). 이것은 질소와 인의 농도가 해조류의 성장과 밀접한 관계를 갖고 있다는 것을 시사해 주는 것으로서 한 예로 질소가 결핍되었을 때 세포분화와 광합성, 단백질 합성 등이 억제되고, 지방과 탄수화물이 축적된다고 보고되었으며 (Fogg 1959; Trunkhin 1968; Maslov 1969), 인의 결핍상태에서는 세포분화의 중단, 단백질 합성 억제, 광합성 억제 그리고 많은 양의 지방이 축적되는 것이 관찰되었다 (Maslov 1969; Bezlyudnyi and Belenkevich 1970). 갈조 *Laminaria saccharina*의 경우 질소와 인의 농도가 증가함에 따라 발아율이 증가하고, 발아 후에도 배우체 성장과 세포수는 질소와 인에 절대적인 영향을 받는다 (Hsiao and Druhl 1973).

연안으로 대량 유입된 영양염류로 인해 부영양화 수역이 발생하고 영양염류의 빠른 흡수와 저장능력을 가진 종들의 대발생이 일어난다. 이러한 대발생은 용존 유기물의 양을 증가시키고 이로 인해 산소소비량을 증가시켜 저산소 또는 무산소 환경을 만들게 되며 중국에는 해조류 군집 구성의 변화는 물론이고 저서동물의 종조성과 생물량에 큰 변화를 일으키기까지 한다 (Norkko and Bonsdorff 1996).

금속성분은 살아있는 유기체에서 다양한 기능을 수행하는데, 특히 생물학적 구조의 안정제, 조절대사의 성분 그리고 대부분의 효소활성제 또는 redox system의 구성요소로 작용한다 (Huntsman and Sunda 1980). 또한 일

부 중금속은 필수요소로서 결핍시 생물학적 기능을 제한하는 것으로 알려져 있다 (Thomas *et al.* 1980; Lee *et al.* 1989). 그러나 고농도의 중금속은 유기체의 성장과 광합성, 미토콘드리아 호흡 등 일반적인 대사작용을 억제하는 요소로 작용하며, 심지어 조류를 치사시키기까지 한다 (Thomas *et al.* 1980; Lee *et al.* 1989). 일반적으로 조류에서 나타나는 중금속의 독성 효과는 세포생장과 세포분화 억제 (Davies 1976), 세포질의 파괴, 엽록체 구조의 붕괴 (Thomas *et al.* 1980), 형태 변화 (Sunda and Guillard 1976), 그리고 변칙적인 성장패턴 등이 있다 (Brinkhuis and Chung 1986). 이러한 중금속의 독성은 궁극적으로 수계내 군집구조의 변화나 천이 등의 원인이 되기도 한다 (Thomas and Siebert 1977). 중금속 중 구리는 적은 양일 경우 조류에게 필수요소로서 특히 plastocyanin에 중요한 작용을 하는 것으로 알려져 있다 (Huntsman and Sunda 1980). 자연상태에서는 구리가 제한요소로 작용한다는 어떠한 증거도 밝혀지지 않았지만 많은 실험실 연구를 통해 높은 농도의 구리는 조류에 독성영향을 끼칠 수 있음이 보고되었다 (Brinkhuis and Chung 1986; Lee *et al.* 1989; Kim and Han 1999). 갈조 미역 (*Undaria pinnatifida*)의 경우 최적광량 및 최적온도의 조건에서 Cu^{2+} 의 농도가 증가함에 따라 발아율이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다 (Lee *et al.* 1989). 또한 갈조 다시마류의 일종인 *Laminaria saccharina*의 경우 배양액 내의 Cu^{2+} 농도가 증가함에 따라 생식과 부착 후 발달이 심하게 억제되었으며 고농도의 Cu^{2+} 를 첨가했을 때 모든 세포들이 죽었다 (Chung and Brinkhuis 1986). 홍조 *Platythamnion*과 *Pleoroprium*, *Platysiphonia*를 고농도의 Pb^{2+} 에 노출시켰을 때 세포가 색을 잃게 되고 결국에는 죽었다 (Stewart 1977).

최근 구멍갈파래 성체를 대상으로 무기영양염류 및 중금속의 영향을 평가하는 연구가 이루어진 바 있는데 인산염에 상관없이 질산염 농도에 비례하여 성장율이 증가되었고, 1 ppm의 구리 농도는 구멍갈파래의 성장 및 광합성 색소에 치명적인 손상을 입히는 것으로 나타났다 (Kim and Han 1999). 본 연구에서는 구멍갈파래의 초기 발달단계에 초점을 두어 무기염 및 중금속에 대한 반응성을 조사함으로써 이러한 환경인자가 성체 군집의 확립과정에 미칠 수 있는 영향을 예측하고자 한다.

재료 및 방법

우리나라 동해안에 생육하는 녹조 구멍갈파래 (*Ulva pertusa* Kjellman)의 건강한 엽체 가장자리 부위에서 직

경 18 mm의 원형질판(disk)을 뽑아내어 깨끗이 씻어준 후 1,000 ml의 배양액이 담긴 flask에 넣어 배양하였다. 식물체로부터 생식을 유도하기 위해 $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 의 온도 하에서 12:12LD의 광주기로 유도배양하였다. 질판의 가장자리에서 생식세포가 방출되면 이를 취하여 각각의 실험구에 주입하였는데, 실험구인 각 petridish에 cover slip을 넣었고 40 ml의 배양액에서 2일간 암배양하여 포자부착을 유도하였다.

1. 동해와 서해해수에서의 발아

배양액은 강원도 안인군 인천광역시 월미도에서 각각 채수한 자연해수를 이용하였으며 cover slip에 부착된 생식세포는 암흑상태 및 10, 30, 60, 100, 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 8일동안 배양되었다.

2. 무기영양염류 농도에 따른 발아

증류수 1l에 비가공 천일염 35 g을 녹여 pore size 0.45 μm 의 membrane filter (Millipore Co.)로 여과하여 사용하였다. 무기영양염류는 지난 5년간 측정된 동해와 서해의 해수질현황 (1989~1994 Ministry of Environment Republic of Korea; 1995~1998 Ministry of Environment Republic of Korea)을 기초로 하여 KNO_3 0.5, 2.5, 5, 10 ppm과 K_2HPO_4 0.002, 0.02, 0.2, 0.8 ppm을 복합 처리하였으며, 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 8일동안 배양하였다.

3. 중금속 농도에 따른 발아

Han (1992)의 영양염류 조성법에 따라 만든 배지에 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 를 농도별로 첨가하였다. 본 연구에서 사용한 Cu^{2+} 와 Pb^{2+} 의 농도설정은 지난 10년간의 자료를 기초로 하여 (Cho 1999) $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.001, 0.01, 0.1, 1 ppm과 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 0.001, 0.01, 0.1, 1 ppm을 복합 처리하였으며, 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 8일동안 배양하였다.

4. 발아율 측정

각 실험구별로 매일 2개의 cover slip을 취하여 광학현미경 (Olympus BX40) 하에서, 2개의 세포로 완전히 분열된 발아체를 발아한 것으로 판단하여 측정하였다.

5. 발아체의 면적 및 세포수 측정

각 조건별로 매일 2개의 cover slip을 취하여 영상분석장치 (Samsung Co., MW-200B)에서 발아체의 면적과 세포수를 Han (1994)이 제안한 방법에 따라 측정하였다.

결 과

1. 동해와 서해해수에서의 발아

우리나라 연안의 해수는 지형 및 지리적인 차이와 밀집된 대도시, 활발한 개발사업 등으로 인해 서해연안의 해수가 동해연안의 해수에 비해 매우 오염된 것으로 조사되었는데, 특히 부유물질과 질산염, 인산염 등의 농도가 두 배 이상 높은 것으로 나타났다 (1989~1994 Ministry of Environment Republic of Korea; 1995~1998 Ministry of Environment Republic of Korea).

본 연구에서 구멍갈파래의 생식세포를 동해와 서해의 자연해수에 넣어 배양하였을 때 암상태를 제외한 모든 광량 조건에서 배양 3일 후부터 발아가 시작되었으며, 광량이 증가함에 따라 발아율이 높게 나타났다 (Fig. 1). 해수조건에 따른 발아율은 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 낮은 광량에서는 서해해수조건보다 동해해수조건에서 높았고 ($P < 0.05$), 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서는 두 해수조건에서 유사한 값을 보였다 (Fig. 1; $P > 0.05$). 발아율에 있어서 최적광량은 두 해수조건 모두 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었으며 배양 5일 후에 100%에 이르는 발아율을 보였다 (Fig. 1). 발아체 면적에 있어서, 암상태에서는 면적의 변화가 전혀 일어나지 않았으나, 광량이 증가함에 따라 동해와 서해해수조건 모두에서 면적이 증가하였다 (Fig. 2). 해수조건에 따른 발아체의 면적은 서해해수조건보다 동해해수조건에서 활발한 면적생장을 하였는데 ($P < 0.05$), 동해해수조건에서는 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 광량에서 완만한 생장을 하다가 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 배양 4일 후부터 빠른 생장을 보이는데, 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 가장 활발한 생장을 나타내었다 (Fig. 2). 서해해수조건에서는 30 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 동해해수조건에 비하여 상대적으로 완만한 생장을 보였으며 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 가장 활발하게 성장하였다 (Fig. 2). 발아체의 세포수는 두 해수조건 모두에서 광량이 증가함에 따라 그 수가 증가하였으며, 60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 서해해수조건보다 동해해수조건에서 많은 세포수를 보였고 ($P < 0.05$), 두 조건 모두 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 세포분열이 가장 활발하게 일어나는 것으로 나타났다 (Fig. 3).

2. 무기영양염류 농도에 따른 발아

질산염 KNO_3 와 인산염 K_2HPO_4 의 형태로 복합처리하여 100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 배양한 결과 배양 1일 후부터 모든 영양염류 농도에서 일정하게 발아가 시작되었으며, 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 높아

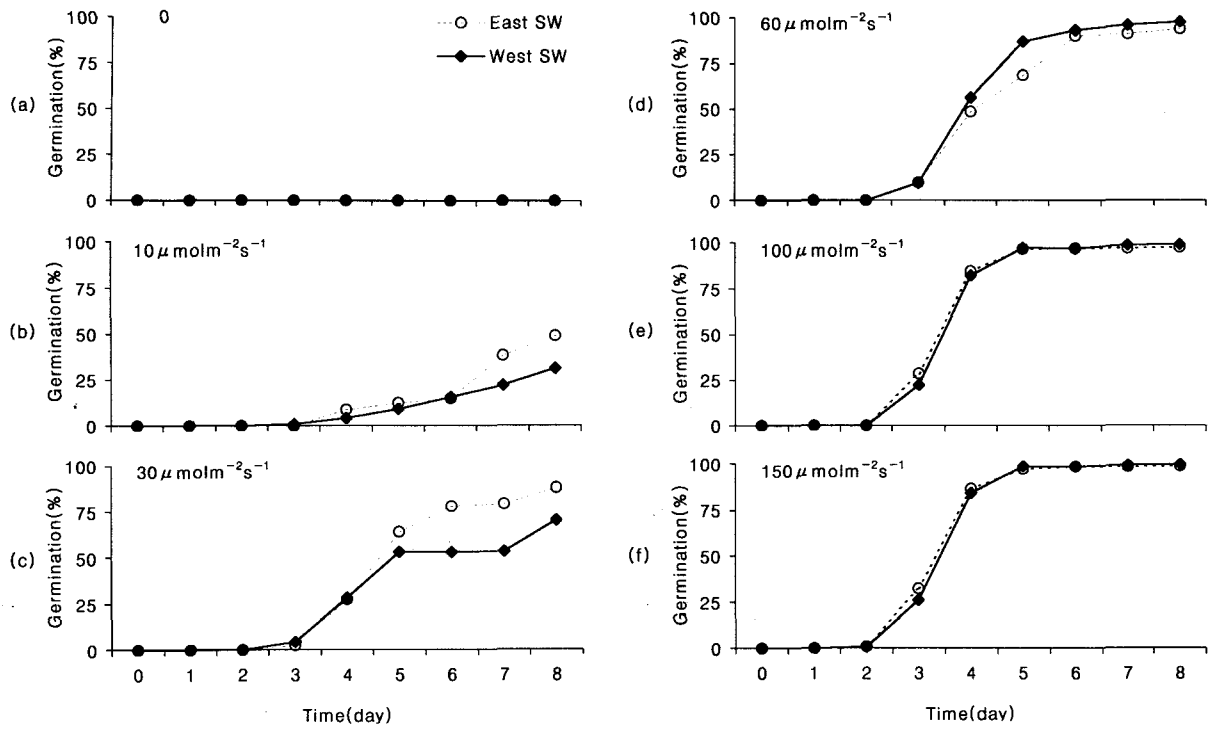


Fig. 1. Effects of photon irradiances on germination of *Ulva pertusa* spores, grown either in the east seawater or the west seawater collected from the corresponding coasts in Korea. (a) 0 (b) 10 (c) 30 (d) 60 (e) 100 (f) 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 500).

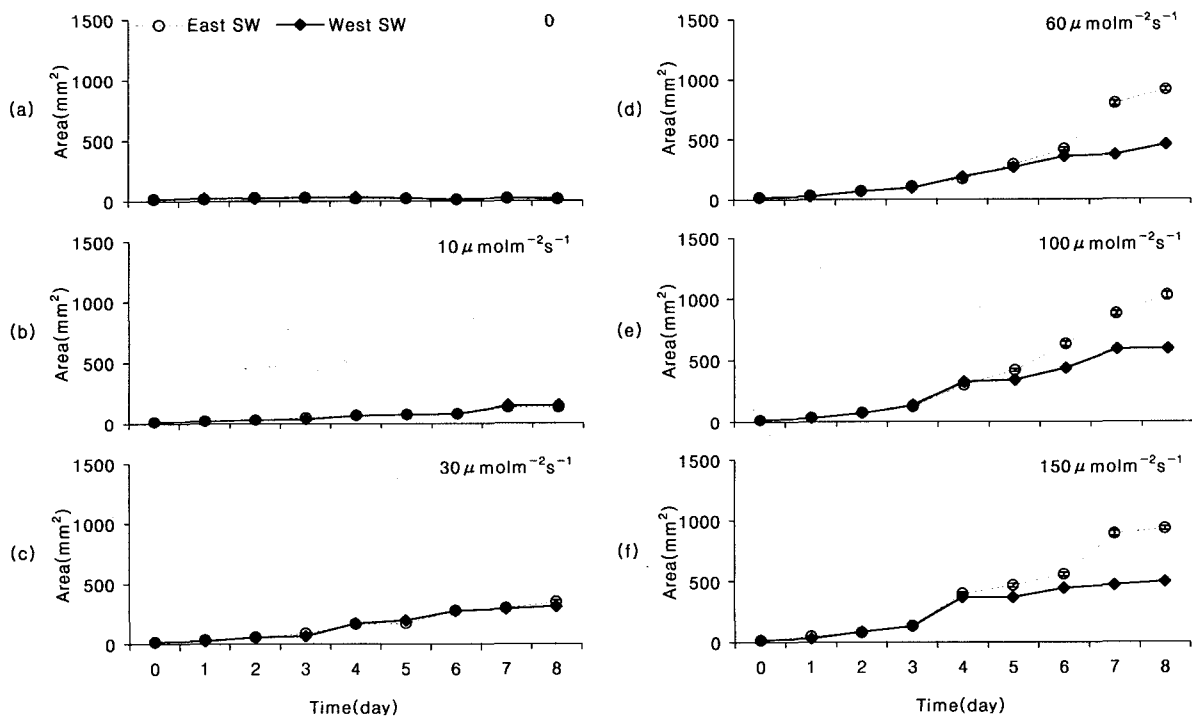


Fig. 2. Effects of photon irradiances on area of young gametophytes of *Ulva pertusa*, grown either in the east seawater or the west seawater collected from the corresponding coasts in Korea. (a) 0 (b) 10 (c) 30 (d) 60 (e) 100 (f) 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 50).

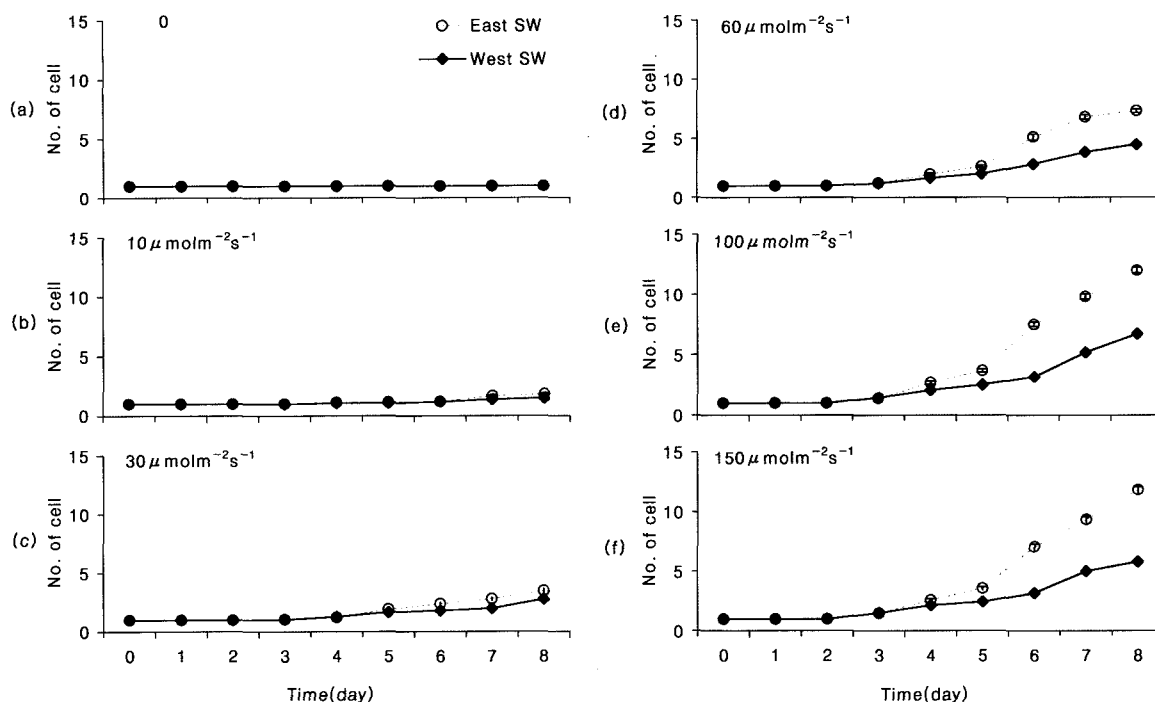


Fig. 3. Effects of photon irradiances on the number of cell of young gametophytes of *Ulva pertusa*, grown either in the east seawater or the west seawater collected from the corresponding coasts in Korea. (a) 0 (b) 10 (c) 30 (d) 60 (e) 100 (f) 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 50).

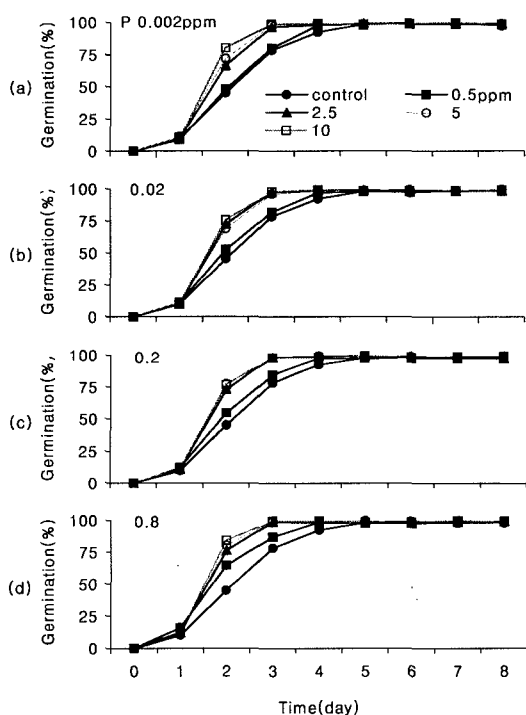


Fig. 4. Effects of nitrate and phosphate on germination of *Ulva pertusa* spores. (a) 0.002 (b) 0.02 (c) 0.2 (d) 0.8 ppm of phosphate. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 500).

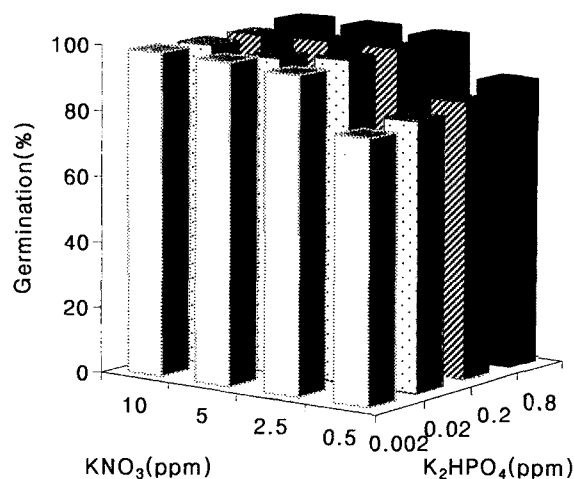


Fig. 5. Effects of nitrate and phosphate on germination of *Ulva pertusa* spores on day 3.

집에 따라 발아가 빨리 진행되었다(Fig. 4). 특히 배양 3 일 후에는 2.5 ppm 이상의 질산염 농도에서 인산염 농도에 상관없이 거의 100%에 이르는 발아율을 나타냈으며, 질산염 농도 0.5 ppm에서는 약 80% 정도의 발아율을 보였다(Fig. 5). 발아체의 면적 역시 인산염 농도에 상관없이 질산염의 농도가 증가함에 따라 증가하는 것

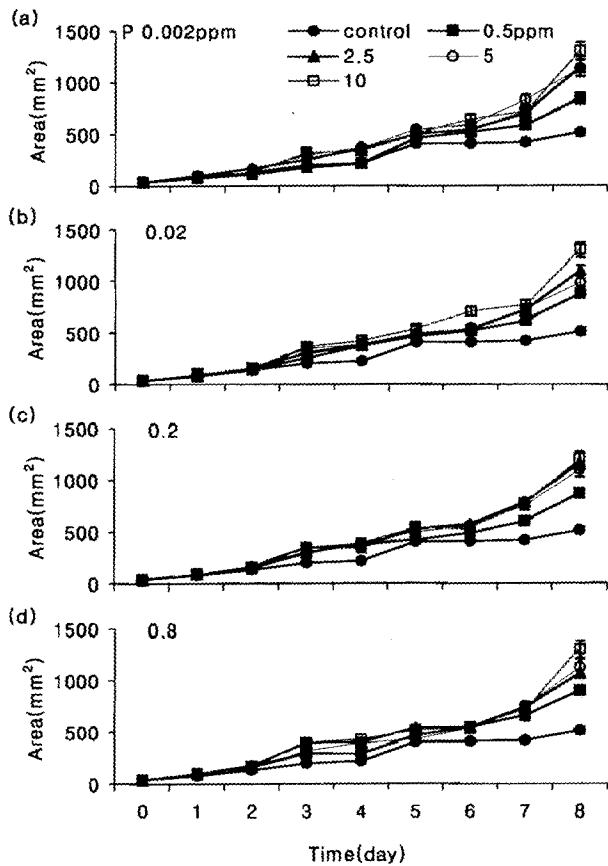


Fig. 6. Effects of nitrate and phosphate on area of young gametophytes of *Ulva pertusa*. (a) 0.002 (b) 0.02 (c) 0.2 (d) 0.8 ppm of phosphate. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 50).

으로 나타났으며, 배양 8일 후의 면적을 보면 역시 질산염 농도 0.5 ppm에서 뚜렷하게 면적생장이 더디게 일어났다(Fig. 6). 발아체의 세포수 또한 대체로 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 보아 높은 질산염 농도에서 세포분열이 활발하게 일어나는 것을 알 수 있었다(Fig. 7).

3. 중금속 농도에 따른 발아율

구리 $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ 와 납 $Pb(NO_3)_2$ 의 형태로 복합처리하여 $100 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 의 광량에서 배양한 발아율은 Pb^{2+} 농도에 상관없이 Cu^{2+} 농도가 증가함에 따라 발아가 더디게 일어났는데, Cu^{2+} 농도 0.01과 0.001 ppm에서는 배양 2일 후부터 발아가 시작되었고 Cu^{2+} 농도 0.1 ppm에서는 배양 3일 후, 그리고 Cu^{2+} 농도 1 ppm에서는 배양 8일 후까지 발아가 거의 일어나지 않았다(Fig. 8). 특히 배양 3일 후의 발아율은 Cu^{2+} 농도의 증가에 따라서 뚜렷하게 감소하였는데, Pb^{2+} 농도에 상관없이

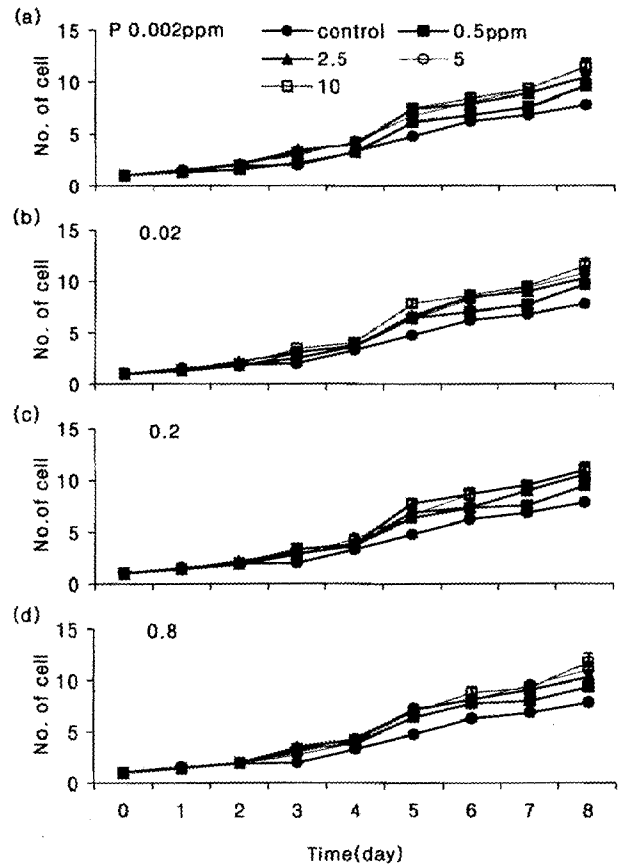


Fig. 7. Effects of nitrate and phosphate on the number of cell of young gametophytes of *Ulva pertusa*. (a) 0.002 (b) 0.02 (c) 0.2 (d) 0.8 ppm of phosphate. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 50).

Cu^{2+} 농도 0.001 ppm에서 거의 100%에 이르는 높은 발아율을 보인 반면, 0.01 ppm에서는 약 80%, 0.1 ppm에서는 약 60%, 그리고 1 ppm에서는 거의 발아가 일어나지 않았다(Fig. 9). 발아체의 면적 역시 Pb^{2+} 농도에 상관없이 Cu^{2+} 농도가 증가함에 따라 감소하였고, Cu^{2+} 농도 1 ppm에서는 거의 면적생장이 일어나지 않았다(Fig. 10). 발아체의 세포수 또한 Pb^{2+} 농도에 상관없이 Cu^{2+} 농도가 증가함에 따라 그 수가 감소하였다(Fig. 11).

고 찰

조류의 생식세포의 발아와 발아체의 생장은 환경조건에 따라 다양하게 나타난다(Woodhead and Moss 1975). 어떤 조류의 생식세포는 매우 제한된 환경조건에서도 발아할 수 있는 능력을 가지고 있는데, 극한 상황에서의 발아능력은 조건대 해조군집에서 종의 수직분포를 결정할 수 있다(Kim et al. 1992).

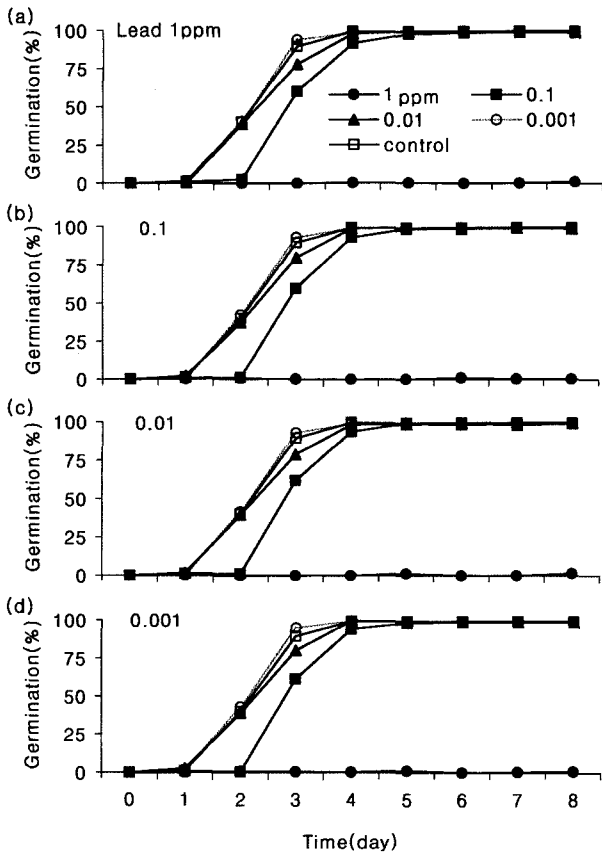


Fig. 8. Effects of heavy metals on germination of *Ulva pertusa* spores. (a) 1 (b) 0.1 (c) 0.01 (d) 0.001 ppm of phosphate. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 500).

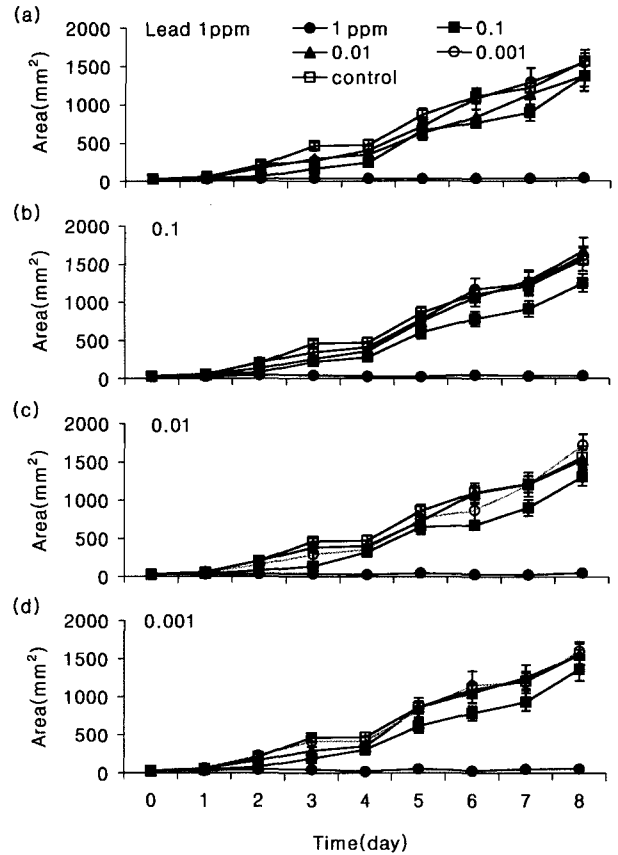


Fig. 10. Effects of heavy metals on area of young gametophytes of *Ulva pertusa*. (a) 1 (b) 0.1 (c) 0.01 (d) 0.001 ppm of phosphate. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 50).

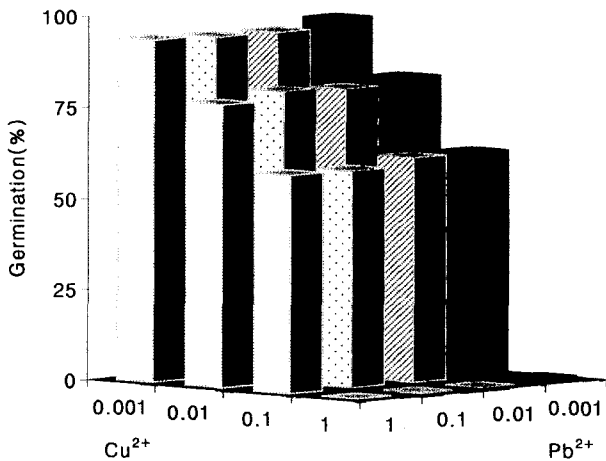


Fig. 9. Effects of heavy metals on germination of *Ulva pertusa* spores on day 3.

본 연구에서 구멍갈파래는 광량이 증가함에 따라 발아율과 발아체 성장율이 증가하고 최적광량은 해수조건

에 관계없이 모두 $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광량에서 나타났으며 광보상점은 $10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 광량에서 존재하는 것으로 보인다. 구멍갈파래와 생육범위가 비슷한 창자파래 (*Enteromorpha intestinalis*)의 발아율은 $125 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 까지 광량에 비례하여 증가하였으며, 광보상점은 $10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하에서 존재하는 것으로 나타났다 (Kim et al. 1992). 본 연구와 비교하여 볼 때 발아를 위한 최적광량은 구멍갈파래보다 창자파래가 높으며 광보상점은 두 종이 유사한 것으로 보인다. 성체와 어린 개체 사이의 최적성장조건 및 내성범위는 다르게 나타날 수 있는데, 갈조 *Laminaria saccharina*는 생활사 단계에 따라 최적성장광량이 성체는 14Wm^{-2} 이고 발아체는 $4 \sim 6 \text{Wm}^{-2}$ 인 것으로 보고되었다 (Lüning 1980, 1981). 반면, 갈조 *Eisenia bicyclis*와 *Ecklonia cava*의 경우 포화광량, 성장보상점 및 호흡율이 성체와 어린 개체 사이에 유사한 값을 나타냈다 (Sakanishi et al. 1988a, b). 최근 한국산 구멍갈파래의 성체를 대상으로 실험한 결과 최적성장광량은 $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 보상점은 $10 \sim 30$

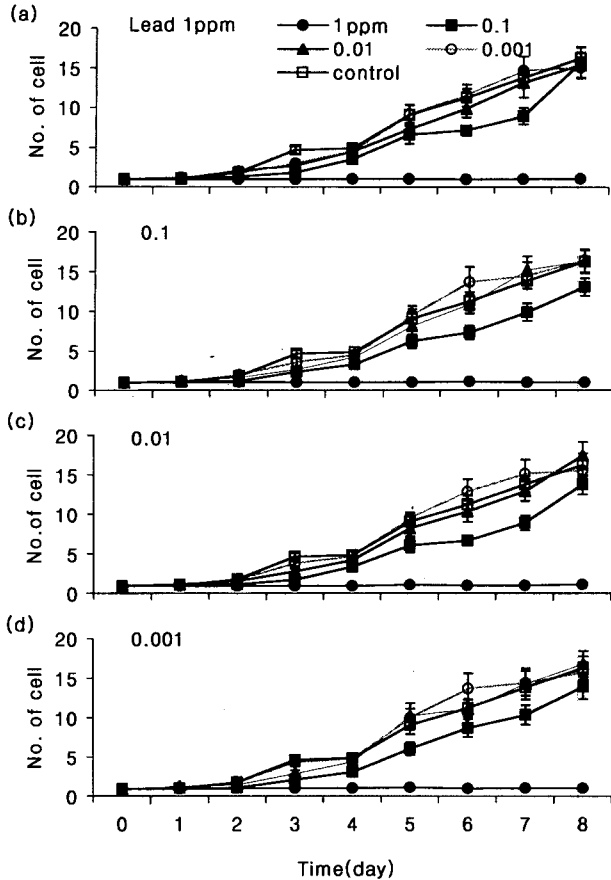


Fig. 11. Effects of heavy metals on the number of cell of young gametophytes of *Ulva pertusa*. (a) 1 (b) 0.1 (c) 0.01 (d) 0.001 ppm of phosphate. Mean \pm 95% confidence intervals are shown (n = 50).

$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 나타났는데 (Kim and Han 1999), 본 연구와 비교해 볼 때 구멍갈파래의 발아체와 성체의 최적 성장광량은 두 발달단계에서 동일하게 $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 에서 존재하지만, 광보상점은 성체보다 발아체가 낮은 것으로 보인다. 성체보다 어린 개체에서 보다 더 낮은 광보상점을 갖는 이유는 환경에 대한 생리적 적응과 관련되는 것으로 사료되는데, 어린 시기의 개체들은 수층이나 어린 엽체를 덮고 있는 성체들에 의해 빛의 대부분이 흡수되어서 성체에 비하여 상대적으로 매우 낮은 광조건에 놓이게 된다 (Maegawa *et al.* 1988).

Lüning (1980)은 *L. saccharina*의 암배우체를 대상으로 수질상태에 따른 primary cell의 면적변화를 비교하였는데 Jerlov (1968)의 Water type 5와 7, 9 간에 차이가 없었다. 반면 최근 한국산 구멍갈파래의 성체를 대상으로 수행된 연구에서 배양해수에 따라 성장과 색소함량에 차이가 나타나는 것으로 밝혀졌는데 (Kim and Han 1999), 본 연구에서 발아율 역시 $60 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의

광량에서 서해해수조건보다 동해해수조건에서 뚜렷하게 높게 나타났으며, 발아체의 면적 및 세포수는 $60 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상의 광량에서 서해해수조건보다 동해해수조건에서 매우 높게 나타나 구멍갈파래는 해역에 따라 성체와 발아체 모두에서 성장, 색소함량, 발아율, 세포수 등의 차이를 나타낼 것으로 사료된다.

영양염류는 해조류의 발아와 성장에 영향을 미치는 중요한 요인으로 알려져 있다. 특히 질산염과 인산염은 조류의 발아, 성장 그리고 세포의 발달에 필수적인 영양염류로 간주된다 (Hsiao and Druehl 1973; Adamich *et al.* 1975; Lapointe 1987). 갈조 *L. saccharina*는 질산염과 인산염의 농도가 증가함에 따라 발아율이 높아지는데 최적농도는 질산염 0.588 ppm, 인산염 0.015 ppm인 것으로 보고되었고, 발아체의 세포수 또한 같은 농도에서 가장 많았으며, 발아체의 생장은 질산염과 인산염의 농도가 각각 1.176 ppm, 0.028 ppm이 될 때까지 빠르게 증가하는 것으로 나타났다 (Hsiao and Druehl 1973). 본 연구결과 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 증가함에 따라 발아가 촉진되었고 발아체의 성장과 세포수 또한 인산염보다는 질산염에 의해 제한되는 것으로 나타났다 (Figs. 4~7). 특히 질산염 0.5 ppm에서는 모든 인산염 농도범위에서 발아율, 발아체의 성장 및 세포수가 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타나 0.5 ppm 이하의 질산염 농도는 구멍갈파래의 초기발달시기에 제한요인으로 작용할 수 있음을 시사하였다. Littler and Littler (1980)에 의하면 구멍갈파래는 얇은 잎모양 (thin sheet-like) 부류이고 *Laminaria saccharina*는 혁질의 잎모양 (leathery blade-like) 부류에 해당하는데 이러한 형태적 특성으로 인하여 영양염 이용율에 차이가 날 수 있을 것으로 예측된다. 그러나, 본 연구와 Hsiao and Druehl (1973)의 연구 결과를 비교하여 볼 때, 구멍갈파래와 *Laminaria saccharina*의 성장에 요구되는 질산염 농도 사이에는 큰 차이가 없는 것으로 보이는데 이는 두 종 공히 어린시기의 형태적 특성이 사상형으로 동일하다는 점으로 설명될 수 있다고 사료된다. 한편, 구멍갈파래의 발아체 성장율은 질산염 2.5 ppm에서 포화를 보인 반면 성체에서는 10 ppm까지 성장포화가 일어나지 않았다. 이는 발달단계에 따라 질산염 요구량이 변화됨을 나타내준다고 할 수 있다.

수동적이든 혹은 능동적이든 중금속이 흡수되면 조류는 다양한 반응을 나타내는데 어떤 농도에서는 성장율이 증가되기도 하고, 일정 농도까지 적응력을 가지기도 하지만 (Huntsman and Sunda 1980), 어느 농도 이상이 될 때에는 해조류에 심한 성장저해가 일어난다 (Brinkhuis and Chung 1986; Lee *et al.* 1989; Kim and Han 1999).

특히 구리는 미세영양소로서 생물체 내에서 중요한 기능에 이용되는데, 조류와 고등식물에서 엽록체와 plastocyanin의 전자전달계에 필수요소로 작용하는 등 광합성기구에 결정적인 영향을 미친다고 알려져 있다 (Walker 1953; Katoh *et al.* 1962). 미세조류 *Scenedesmus acutus*는 구리 0.1~1 μM 에서 최적생장이 이루어지고 구리가 결핍되었을 때 엽록소가 표백된다 (Sandmann and Böger 1980). 반면, *Chlorella vulgaris*는 0.1 μM 이상의 Cu^{2+} 농도에서 치명적인 독성피해를 입는 것으로 보고된 바 있다 (Greenfield 1942). 구리의 독성효과는 특히 발아와 초기 발달단계에서 잘 나타나는데 갈조 미역 (*Undaria pinnatifida*)의 경우 0.05 ppm의 Cu^{2+} 농도에서 저조한 발아율을 보였으며 (Lee *et al.* 1989), *Macrocystis pyrifera*는 Cu^{2+} 농도 0.054 ppm에서 발아가 억제되기 시작하여 0.180 ppm에서는 10% 미만의 발아율을 보였다 (Anderson *et al.* 1990). 또한 발아체의 생장을 보면 미역의 경우 Cu^{2+} 농도 0.005 ppm에서부터 거의 생장이 일어나지 않았으며, 0.100 $\mu\text{g/l}$ 에서는 치사 현상이 나타났다 (Lee *et al.* 1989). *Macrocystis pyrifera*의 경우 마찬가지로 Cu^{2+} 농도 0.018 ppm에서부터 발아체의 생장이 억제되었으며, 0.180 ppm에서는 생장이 이루어지지 않았다 (Anderson *et al.* 1990). 본 연구에서도 Pb^{2+} 농도에 상관없이 0.01 ppm의 Cu^{2+} 농도에서부터 구멍갈파래의 발아가 제한받기 시작해 1 ppm의 Cu^{2+} 농도에서는 전혀 발아가 일어나지 않았으며 면적생장도 일어나지 않았는데 (Figs. 8-11), 이는 낮은 Cu^{2+} 농도에서 구멍갈파래의 발아와 발아체 생장이 억제된다는 사실을 확인할 수 있었다.

Ras Beirut 연안수에서 0.23 ppm에 이르는 구리농도 값이 보고된 바 있고 (Shiber and Shatila 1979) 우리나라 서해 경기만에서 평균 Cu^{2+} 농도 약 0.004 ppm이 보고된 바 있다 (Cho 1999). 해조류는 이러한 연안지역에 생육하기 때문에 중금속 오염에 항상 노출되어 있다. 특히 구멍갈파래는 우리나라 연안의 조건대에 광범위하게 생육하므로 육상폐수로부터 유입되는 높은 구리농도에 직접적인 영향을 받을 수 있고 본 연구에서 보여진 바와 같이 한국 연안수의 농도만으로도 경우에 따라서는 치명적인 손상을 입을 수 있을 것으로 판단된다. 실험실 결과를 자연생태계에 직접 적용시키기에는 다소 무리가 있지만 이와 같이 해조의 발달단계에 따른 해수내 오염물질의 영향을 평가하는 작업은 해조류를 해양 중금속 오염의 지표종으로 이용할 수 있는 가능성을 열어주는 시도라고 할 수 있다.

적 요

해조류의 최적생장 조건과 내성범위는 그 발달단계에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 특히 초기 정착단계에서의 생장은 성체로의 성공여부를 결정하는데 있어 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 본 연구는 녹조 구멍갈파래 (*Ulva pertusa*)의 생식세포와 발아체를 이용하여 무기영양염류와 중금속이 발아와 발아체 생장에 미치는 영향을 알아보고 이들의 내성범위 및 최적조건을 구하고자 하였다. 먼저 광량에 따른 발아율은 동해와 서해해수 조건 모두에서 광량이 증가함에 따라 빠르게 증가하였으며 최적광량은 $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었다. $30 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 광량에서 동해수에서의 발아율은 서해수에서 보다 높았으며 $60 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이상의 경우 두 해수조건에서 유사하게 나타났다. 발아체의 생장 또한 광량이 증가함에 따라 증가하였으며, 서해수보다 동해수에서 빠르게 성장하였다. 또한 광량이 증가함에 따라 발아체의 세포수가 증가하였으며 최적광량은 $100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이었고, $60 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이하의 광량에서 서해수보다 동해수에서 발아체의 세포수가 빠르게 증가하였다. 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 증가함에 따라 발아율이 증가하였으며 배양 3일 후에 질산염 2.5 ppm에서 발아율이 가장 빠르게 증가하였다. 발아체의 생장과 세포수 또한 인산염 농도에 상관없이 질산염 농도가 증가함에 따라 증가하였으며, 배양 8일 후에는 질산염 0.5 ppm에서 발아체의 생장이 늦춰지는 것으로 나타났다. 구리의 농도가 증가함에 따라 발아율, 발아체의 생장 및 세포수 모두 급격하게 감소하였으며, 납농도에 상관없이 구리 1 ppm은 구멍갈파래의 생식세포와 발아체 생장 또는 생존에 치명적으로 작용하는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 인천지역환경기술개발센터 현안기술개발연구사업과제 (과제번호 2000-1-4-4)의 지원을 받아 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Adamich M, A Gibor and BM Sweeney. 1975. Effects of low nitrogen levels and various nitrogen sources on growth and whole development in *Acetabularia* (Chlorophyta). *J. Phycol.* 11:364-367.
- Anderson BS, JW Hunt, SL Turpen, AR Coulom and M

- Martin. 1990. Copper toxicity to microscopic stages of giant kelp *Macrocystis pyrifera*: interpopulation comparisons and temporal variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 68:147-156.
- Bezlyudnyi NN and OA Belenkevich. 1970. Dependence of nitrogen metabolism on conditions of phosphorus nutrition and the form of nitrogen fertilization in winter rye plants. *Sov. Plant Physiol.* 17:827-831.
- Brinkhuis BH and IK Chung. 1986. The effects of copper on the fine structure of the kelp *Laminaria saccharina* (L.) Lamour. *Mar. Environ. Res.* 19:205-223.
- Chapman ARO. 1986. Population and community ecology of seaweeds. *Adv. Mar. Biol. Ecol.* 23:1-161.
- Cho KD. 1999. *Master plan for environment conservation.* Incheon Metropolitan City. Incheon.
- Chung IK and BH Brinkhuis. 1986. Copper effects in early stages of the kelp, *Laminaria saccharina*. *Mar. Pollut. Bull.* 17:213-218.
- Davies AG. 1976. An assesment of the basis of mercury tolerance in *Dunaliella tertiolecta*. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* 56:39-57.
- Fain SR and SN Murray. 1982. Effects of light and temperature on net photosynthesis and dark respiration of gametophytes and eubryonic sporophytes of *Macrocystis pyrifera*. *J. Phycol.* 18:92-98.
- Fei XG and M Neushul. 1984. The effect of light on the growth and development of giant kelp. *Hydrobiologia* 116:456-462.
- Fogg GE. 1959. Nitrogen nutrition and metabolic patterns in algae. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 13:106-125.
- Greenfield SS. 1942. Inhibitory effects of inorganic compounds on photosynthesis *Chlorella*. *Am. J. Bot.* 29:121-131.
- Han T. 1992. Effect of visible light and UV radiation on early sporophytes of species of the Laminariales. Ph. D. Thesis. University of Liverpool, UK.
- Han T. 1994. Sample size determination for estimating growth rate of early sporophytes of *Laminaria hyperborea* (Phaeophyta). *Kor. J. Phycol.* 9:107-110.
- Han T and JM Kain. 1996. Effect of photon irradiance and photoperiod on young sporophytes of four species of the Laminariales. *Eur. J. Phycol.* 31:233-240.
- Hsiao SIC and LD Druehl. 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.
- Huntsman SA and WG Sunda. 1980. The role of trace metals in regulating phytoplankton growth. pp. 285-328. In: Morris I. (ed), *The physiological ecology of phytoplankton.* Univ. of California Press, Berkeley.
- Jerlov NG. 1968. *Optical Oceanography.* Elsevier Publishing Company. Amsterdam. 194p.
- Kain JM. 1964. Aspects of the biology of *Laminaria hyperborea*. III. Survival and growth of gametophytes. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 44:415-433.
- Katchman BJ. 1961. Phosphate in life processes. In: Van Wazer J.R. *Phosphorus and its compounds. Vol. II. Technology, biological functions and applications.* Interscience Publishers, New York. pp. 1281-1343.
- Katoh S, I Shiratori and A Takamura. 1962. Purification and some properties of spinach plastocyanin. *J. Biochem.* 51:32-40.
- Kim JK and T Han. 1999. Effects of inorganic nutrients and heavymetals on growth and pigmentation of the green alga, *Ulva pertusa* Kjellman. *Kor. J. Environ. Biol.* 17:427-438.
- Kim KY, IK Lee and CI Choi. 1992. The combined effects of irradiance and salinity, and temperature and salinity on germination and zoosporegenesis of *Enteromorpha intestinalis* (L.) Link. *Kor. J. Env. Biol.* 10:56-65.
- Lapointe BE. 1987. Phosphorus- and nitrogen-limited photosynthesis and growth of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyceae) in the Florida Keys: an experimental field study. *Mar. Biol.* 93:561-568.
- Lee JA, YI Sunwoo, HJ Lee, IH Park and IK Chung. 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.
- Littler MM and Littler DS. 1980. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: Field and laboratory tests of a functional form model. *American Naturalist* 116:25-44.
- Lüning K. 1980. Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three *Laminaria* species (Phaeophyceae). *J. Phycol.* 16:1-15.
- Lüning K. 1981. Light. In: Lobban C.S. and Wynne M.J. (eds), *The biology of the seaweeds.* Blackwell Scientific Publications, Oxpord. pp. 326-355
- Maegawa M, W Kida, Y Yokohama and Y Aruga. 1988. Comparative studies on critical light conditions for young *Eisenia bicyclis* and *Ecklonia cana*. *Jpn. J. Phycol.* 36:166-174.
- Maslov YI. 1969. Influence of lack of some mineral nutrients on biochemical composition of *Chlorella vestn.* Leningr. Univ. Ser. Biol. 1969:145-151.
- Ministry of Environment Republic of Korea. 1989-1994. *Korea Environmental Yearbook*, Seoul.
- Ministry of Environment Republic of Korea. 1995-1998.

- Environmental Statistics Yearbook, Seoul.
- Norkko A and E Bonsdorff. 1996. Rapid zoobenthic community responses to accumulations of drifting algae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 131:143-157
- Sakanishi Y, Y Yokohama and Y Aruga. 1988a. Photosynthesis measurements with blade segments of brown algae, *Ecklonia cana* Kjellman and *Eisenia bicyclis* Setchell. *Jpn. J. Phycol.* 36:24-28.
- Sakanishi Y, Y Yokohama and Y Aruga. 1988b. Seasonal changes of photosynthetic activity of a brown alga *Ecklonia cana* Kjellman. *Bot. Mag. Tokyo.* 101.
- Sandmann G and P Böger. 1980. Copper deficiency and toxicity in *Scenedesmus*. *Z. Pflanzenphysiol.* 98:53-59.
- Sieber JG and T Shatila. 1979. Certain metals in three coastal algae from Ras Beirut waters. *Hydrobiol.* 63: 105-112
- Stewart JG. 1977. Effect of lead on the growth of the four species of red algae. *Phycologia* 16:31-36.
- Sunda W and RRL Guillard. 1976. The relationship between cupric ion activity and the toxicity of copper to phytoplankton. *J. Mar. Res.* 34:511-529.
- Thomas WH and DLR Siebert. 1977. Effects of copper on the dominance and the diversity of algae: Controlled ecosystem pollution experiment. *Bull. Mar. Sci.* 27:23-33.
- Thomas WH, JJ Hollibaugh, DLR Seibert and GT Wallace Jr. 1980. Toxicity of a mixture of ten metals to phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2:213-220.
- Trunikhin NV. 1968. Growth and chemical composition of *Chlorella pyrenoidosa* in absence of nitrogen. *Sov. plant Physiol.* 15:703-709.
- Walker JB. 1953. Inorganic micronutrient requirements of *Chlorella*. I. Requirements for calcium (or strontium), copper, and molybdenum. *Arch Biochem. Biophys.* 46:1-11.
- Woodhead P and B Moss. 1975. The effects of light and temperature on settlement and germination of *Enteromorpha*. *Br. Phycol. J.* 10:269-272.

(Received 4 December 2000, accepted 15 January 2001)