

요 약 문

I . 제 목 : 녹색성장을 위한 식물환경복원의 기법 활용에 따른 부산 지역 오염해역의 정화 기술 개발

II . 연구의 목적 및 필요성

연안해역은 항만 및 주변공간시설의 개발이용도가 높은 반면, 육지로부터 대량으로 유입되는 생활하수와 공장 폐수 등의 오염부하가 축적되기 쉬워 부영양화, 빈산소 수괴 및 적조현상 등으로 어장환경이 점점 악화되고 있다. 최근 연안 및 내만해역의 부영양화 및 빈산소 수괴와 같은 환경문제를 개선하기 위해 준설과 같은 공학적 방법을 실시하고 있다. 하지만 이러한 방법은 일시적으로 환경을 개선시키는 효과를 얻을 수 있을지 모르나 그 효과는 지속되기 힘들며 2차 오염을 발생시킬 가능성이 존재한다. 따라서 자연 시스템이 가지고 있는 자정능력을 최대로 발굴하는 친환경적인 방법이 필요하다. 따라서 본 연구는 녹색성장을 위하여 식물환경복원(phytoremediation) 기법에 따른 오염해역의 정화 기술을 개발하는 데 있다.

III . 연구의 내용 및 범위

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용
1차년도 (2010.4-2010.12)	▷수정만/가덕도의 해양환경 파악 ▷부착기질에 대한 저서미세조류의 성장 특이성 파악 ▷저서미세조류와 유해·유독 적조조류에 대한 광량 및 파장에 따른 성장 특이성 파악 ▷저서미세조류의 파장에 따른 영양염 이용성 파악	▷수정만의 환경 모니터링을 통한 빈산소 및 부영양화 정도 파악 ▷부착기질 제공을 위한 glass bead의 크기별 성장 특이성 평가 ▷저서미세조류와 유해·유독 적조조류의 성장에 미치는 광파장 특성 -가시광선대 9 개파장 및 복수파장 -청색(450 nm), 황색(590 nm), 적색(650 nm)의 3개의 파장 ▷ 파장에 따른 저서미세조류의 영양염 동력학 실험 및 성장 실험

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용
2차년도 (2011.1-2011.12)	▷수정만/가덕도의 해양환경 파악 ▷저서미세조류에 대한 파장별 산소생산능력 파악 ▷저서미세조류 대량배양장치 고안 ▷현장에 응용 가능한 LED 주사 장치 고안 ▷현장 적용 실험	▷2차년도는 실제 오염된 저층환경을 개선을 시험하는 실용화 단계 ▷파장에 따른 저서미세조류의 산소생산 속도를 파악 ▷적은 광량으로 보다 넓은 면적을 주사할 수 있는 LED장치를 고안 ▷빈산소 또는 부영양화가 된 수정만의 양식장 부근 저층에 LED 주사장치를 계류하고 여러가지 환경변수 모니터링

IV. 연구결과

1. 수정만과 가덕도의 해양환경 특성

발광다이오드(LED)를 이용한 저서미세조류의 성장에 따른 부산지역 오염해역 정화를 위해서 모델만으로 수정만과 거덕도를 선택하여, 현장관측을 수행하였다. 2010년 4월부터 10월까지 7개월 동안 현장관측을 수행한 결과, 조사지역의 COD 및 AVS는 일본 수산자원보호협회의 오염저질 기준보다 높았으며, chlorophyll *a*는 남해안 및 서해안의 대표적인 해역의 농도보다 크게 낮았다. 또한 공극수 중에 영양염 또한 빈산소수괴의 출현에 따라 인산염과 암모니아염이 상대적으로 높게 나타

났다. 이러한 해역의 퇴적물을 정화하기 위해서는 지금까지 경운, 폭기, 복사, 준설 등을 수행하였지만, 수질의 오탉물질확산, 수산물 생산작업 중지 그리고 준설로 인한 준설퇴적물의 처리 등 많은 문제점을 수반한다. 따라서 식물환경복원의 기법을 이용하여 자연 시스템이 가지는 자정능력을 최대로 활용하는 친환경적 접근 방식이 필요하다.

2. 부착기질 크기에 따른 저서미세조류의 성장 특이성

미세조류의 배양실험을 위해 수정만 인근 해역에서 유독와편모조류 *Alexandrium tamarense* 그리고 저서미세조류 *Navicula* sp., *Nitzschia* sp.(JH-01, JH-02)를 분리하였다. 저서미세조류인 *Navicula* sp., *Nitzschia* sp.(JH-01, JH-02)를 대상으로 성장에 미치는 부착기질의 영향을 평가한 결과, 부착기질은 성장속도 뿐만 아니라 세포밀도에도 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 부착미세조류의 생리실험을 위해서는 예비실험으로 부착기질의 유무 및 대상 종에 적합한 부착기질의 크기의 고려가 필요할 것으로 보인다.

3. 복수파장의 광조건에서 미세조류의 성장속도 변화

복수파장의 광조건에 따른 미세조류의 성장속도는 10, 30, 50, 70, 100, 150, 300, 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 총 8단계 조도 하에서 수행하였다. 그 결과 유도된 성장식은 *A. tamarense*가 $\mu=0.64 (1-19.22)/(1+135.4)$ 로, μ_m 가 0.64 /day, I_0 가 19.22 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 나타났다. *Navicula* sp.는 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이상에서 광저해현상이 있었으며, 유도된 성장식은 $\mu = -0.67\exp(1-I/12.17)+0.67-0.00032I$ 로, μ_m 은 0.67 /day, I_{opt} 는 60.48 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이었다. *Nitzschia* sp.(JH-01)는 $\mu = 0.50 (1-7.96)/(1+35.55)$ 이며 μ_m 은 0.50 /day, I_0 는 7.96 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이었다 그리고 *Nitzschia* sp.(JH-02)는 $\mu=1.08 (1-1.78)/(1+49.24)$ 이며, μ_m 은 1.08 /day, I_0 는 1.78 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 가 나타났다. 따라서 *A. tamarense*는 다른 저서 미세조류보다 성장을 위해서는 보다 많은 광에너지가 필요로 하며, 저서미세조류는 부유성 편모조류보다 낮은 광조건에 잘 적응되어 있는 것을 알 수 있다.

4. 단일파장의 광조건에서 미세조류의 성장속도 변화

파장별 미세조류의 성장 특성을 알아보기 위해서 15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 조도에 405 nm, 470 nm, 505 nm, 525 nm, 568 nm, 590 nm, 623 nm, 644 nm 그리고 660 nm 그리고 50, 75, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 청색(450 nm), 황색(590 nm), 적색(650 nm)의 3개 대표파장에서 미세조류 배양을 수행하여 비교하였다. 15 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 *A.*

*tamarense*가 405 nm에서 525 nm에서만 성장이 가능하였다. *Navicula* sp.와 *Nitzschia* sp.(JH-01, JH-02)는 전 파장대에서 성장이 가능하였으며, 그 중 청색파장대에서 높은 성장속도를 보였고, 황색파장대에서는 비교적 낮은 성장속도를 보였다. 청색파장의 50, 75, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 *A. tamarense*, *Navicula* sp., *Nitzschia* sp.(JH-01, JH-02)에서 복수파장보다 높은 성장속도를 보였다. 황색파장대에서는 50, 75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 *A. tamarense*의 세포밀도는 초기접종밀도와 유사하게 성장을 하지 못했으며, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 복수파장보다 5배 낮은 성장속도를 보였다. *Navicula* sp., *Nitzschia* sp.(JH-01, JH-02)는 *A. tamarense*와 달리 50, 75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서 성장이 가능하였으며, 복수파장보다 성장속도가 1.1-2.9배 정도 낮았다. 적색파장대에서도 광량이 50, 75 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 일 때 *A. tamarense*는 성장을 하지 못하였으며, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 에서는 복수파장보다 2.5배 낮은 성장속도를 보였다. *Navicula* sp., *Nitzschia* sp.(JH-01, JH-02)는 복수파장보다 1.2-1.7배 정도로 황색파장보다는 그 차이가 적었다. 따라서 저서미세조류는 부유성 미세조류와는 달리 거의 모든 가시광선대를 효율적으로 흡수할 수 있는 것으로 보이며, 성장속도는 청색파장에서 촉진효과를, 황색과 적색파장에서는 유독 와편모조류의 성장이 억제되는 효과가 나타났다.

5. 파장에 따른 미세조류의 영양염 이용성 파악

미세조류의 파장에 따른 성장동력학적 특성을 알아보기 위해 복수파장, 청색(450 nm), 황색(590 nm), 적색(650 nm) 파장대에서 인산염(0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 μM), 질산염(1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 μM)의 농도에 따른 성장특성을 살펴보았다. 성장실험결과 파장별 K_s (반포화상수)값의 범위는 *A. tamarense*는 인산염에서 1.16-1.84 μM , 질산염에서 3.44-4.58 μM 의 범위를 *Navicula* sp.는 인산염에서 1.52-1.84 μM , 질산염에서 4.36-6.88 μM 의 범위를 *Nitzschia* sp.(JH-01)은 인산염에서 1.16-1.75 μM , 질산염에서 4.72-7.73 μM 의 범위를 보였으며, *Nitzschia* sp.(JH-02)는 인산염에서 0.33-0.79 μM , 질산염에서 1.09-1.74 μM 의 범위를 보였다. 파장별 최대성장속도는 달랐지만, K_s 는 큰 차이가 없어 전 파장대에서 영양염에 대한 친화성은 차이가 없는 것으로 보인다. 저서미세조류의 K_s 는 와편모조류나 침편모조류보다 높거나 비슷하였지만 부유성 규조류 보다는 매우 높았다. 따라서, 저서미세조류는 영양염 요구량이 높은 종으로 생각되며, 높은 영양염 환경에 적응되어 있는 것으로 보인다.

6. 파장에 따른 미세조류의 영양염 흡수속도

미세조류의 파장에 따른 영양염 흡수속도를 알아보기 위해 복수파장, 청색(450 nm), 황색(590 nm), 적색(650 nm) 파장대에서 인산염(0.5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 μM), 질산염(1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 μM)의 농도에 따른 흡수속도를 살펴보았다. 흡수실험결과 파장별 ρ_m (최대흡수속도)값의 범위는 *A. tamarense*는 인산염에서 0.32–1.32 pmol/cell/h, 질산염에서 2.06–4.83 pmol/cell/h의 범위를 *Navicula* sp.는 인산염에서 0.20–0.30 pmol/cell/h, 질산염에서 0.86–1.17 pmol/cell/h의 범위를 *Nitzschia* sp.(JH-01)은 인산염에서 0.21–0.32 pmol/cell/h, 질산염에서 0.84–1.07 pmol/cell/h의 범위를 보였으며, *Nitzschia* sp.(JH-02)는 인산염에서 0.14–0.19 pmol/cell/h, 질산염에서 0.73–0.97 pmol/cell/h의 범위를 보였다. 파장에 따른 흡수속도는 성장속도와 유사하게 청색, 복수파장, 적색, 황색 순으로 높은 흡수속도를 보였다. 파장에 따른 저서미세조류의 영양염 흡수는 *Navicula* sp.는 인산염을 약 30–35배, 질산염을 약 4–6배 흡수하며, *Nitzschia* sp.의 경우는 인산염을 약 42–59배, 질산염을 약 4–7배 흡수하는 것으로 나타났다. 그리고 수정만에서 *Navicula* sp.와 *Nitzschia* sp.의 출현개체수와 영양염 흡수속도를 바탕으로 한 단위면적당 영양염 제거율은 *Navicula* sp.는 인산염을 약 4.51 $\mu\text{M}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$, 질산염은 약 19.58 $\mu\text{M}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 제거가능 하고, *Nitzschia* sp.의 경우는 인산염을 약 9.72 $\mu\text{M}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$, 질산염은 약 33.75 $\mu\text{M}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 제거가능 한 것으로 계산되었다. 따라서, LED를 이용하여 저서미세조류의 성장을 촉진시키면 부영양화된 저질의 영양염을 효과적으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 연구결과의 활용계획

본 연구는 부영양화와 빈산소수괴가 형성되는 오염된 폐쇄성 해역에서 본래 가지고 있는 자정 효과를 최대로 이용하여 환경을 수복하는 친환경적인 방법이다. 이는 순수한 기초과학으로서도 중요한 의미를 가질 뿐만 아니라 화학해양학, 지질해양학, 환경학 등의 다양한 학문분야에 직·간접으로 기여 가능할 것으로 생각된다. 또한 해양환경개선 기술개발에도 유용하게 사용되어 해양 생산력의 증대와 유지에 크게 도움이 될 수 있을 것이다. 만약 우수한 연구결과가 도출될 경우, 해양 관련한 국내 대학 및 연구소뿐만 아니라 일반 기업체에서도 이 연구 결과를 사용하여 오염된 해역의 정화 기술에 기초 자료로 활용 가능할 것이다.