

살조물질과 황토를 이용한 적조생물 제어에 따른 광합성 효율 및 전자전달율의 차이

손문호^{1,2}, 백승호^{2*}

¹부산대학교 해양학과, ²한국해양과학기술원 남해연구소

The difference of photosynthetic efficiency and electron transport rate by control of the red tide organism using algicidal substance and yellow clay

Moonho Son^{1,2}, Seung Ho Baek^{2*}

¹Department of Oceanography, College of Natural Science, Pusan National University

²South Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology

요약 유해 유독 적조생물의 대발생은 해양생물 건강성과 수산어족자원에 심각한 피해를 입힌다. 본 연구에서는 미세조류의 대발생을 억제하기 위해 개발된 Thiazolidione 유도체(TD49)와 현장에서 적조생물을 제어하기 위하여 살포되는 황토에 대한 살조능을 조사하였다. 아울러 적조생물 생사판별과 관련된 자가영양생물의 광합성에 영향을 미칠 수 있는 활성엽록소(activity Chl. a), 광합성효율(F/F_m), 전자 전달율(electron transport rate, ETR)등을 평가하였다. 대상적조생물은 유해조류 3종과 비유해조류 1종을 선택하였으며, 유해조류는 침편모조류 *Heterosigma akashiwo*, *Chattonella marina*와 더불어 외편모조류 *Heterocapsa circularisquama*를 비교하였고, 비유해조류는 은편모조류 *Rhodomonas salina*에 대하여 평가하였다. 유해조류 3종은 살조물질(TD49)에 의하여 빠른 시간에 세포가 파괴되어 우수한 살조 효과(>80%)를 보인 반면, 황토에 관해서는 살조효율이 30%이하로 낮게 나타났다. 또한 TD49에 대한 유해조류 3종의 살조효율은 *H. circularisquama*> *C. marina*> *H. akashiwo* 순으로 높게 나타났으며, 광합성 효율 및 전자전달율 또한 극히 낮게 나타나, 광합성에 치명적인 영향을 미치는 것으로 사료되었다. 반면, 유해조류 3종에 관해서 황토에 대한 광합성 효율과 전자전달율은 대조군과 유의한 차이를 보이지 않았다($p>0.01$). 비유해종 *R. salina*은 대조군에 비하여 TD49와 황토의 살조 효과, 광합성효율 및 전자전달율의 차이는 명확하게 나타나지 않았고, 오히려 TD49물질에서 성장에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 결과적으로 본 연구에서 TD49물질은 유해적조 생물을 선택적으로 제어 할 수 있으며, 현장 적용시 우수한 살조 효과를 가질 수 있을 것으로 판단된 반면, 황토는 적조생물 제어에 적합하지 않을 것으로 사료되었다.

Abstract The development of worldwide harmful algal blooms(HAB) is a serious problem for public health and fisheries industries. To evaluate the algicidal impact on the HAB species, algicide thiazolidinedione derivative (TD49) and yellow clay were examined, which is focus on assess the algicidal effects and inhibition to photosynthesis of HAB species. To obtain the detailed information, we analyzed the viability of target species related to activity Chl. a, photosynthetic efficiency(F/F_m), and electron transport rate(ETR). Culture experiment was conducted to evaluate the algicidal effects of three harmful species(raphidophyceae *Heterosigma akashiwo*, *Chattonella marina*, and dinophyceae *Heterocapsa circularisquama*) and one non-harmful species (cryptophyceae *Rhodomonas salina*). Our experiments revealed that three HAB species were easily destroyed of the cell walls after TD49 dosing. Also, they had significantly reducing values of active Chl. a, F/F_m , and ETR, due to the damage of photosystem II by inter-cellular disturbance. As a result, the algicidal effect(%) for the three HABs were as follows, in the order of greatest to the least: *H. circularisquama*> *C. marina*> *H. akashiwo*. However, the algicidal effect for yellow clay remained to be <30% ($p>0.01$), implying that it may not have damaged the photosystem II. On the other hand, non-HAB *R. salina* was promoted at both TD49 and yellow clay treatments. Our results demonstrated that the TD49 is a good agent for the control of HABs *H. akashiwo*, *C. marina*, and *H. circularisquama*, whereas the yellow clay would not be suitable for the field application based on our experimental results.

Key Words : harmful algal blooms; thiazolidinedione derivative (TD49); yellow clay; photosynthesis;algicidal effect

본 논문은 한국해양과학기술원의 연구과제 [남해특별관리해역의 관리를 위한 해양 생태계 건강지수 개발(PE99316]과 미래창조과학부의 미래유망 융합기술 과이오니어 사업(M1071118001-08 M1118-00110)으로 수행되었음.

화학물질을 제공해 주신 조선대학교 조훈교수님과 연구에 많은 협조를 해 주신 김시욱교수님, 김영옥박사님께 진심으로 감사를 드립니다.

*Corresponding Author : Seung Ho Baek (Korea Institute of Ocean Science & Technology)

Tel: +82-55-639-8513 email: baeksh@kiost.ac

Received January 6, 2015

Revised March 9, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

1. 서론

우리나라에서 유해조류의 대증식(Harmful Algal Blooms)은 해마다 발생하여 수산업에 심각한 피해를 초래하고 있다. 이와 같은 유해 적조생물을 제어하기 위하여 생물학적, 화학적 방법 등의 다양한 연구가 진행되고 있다[1-4]. 그 중 황토살포는 자연에서 얻은 친환경 소재로서 국민 정서적 반감을 가지지 않는다는 이유로 1990년 이후 적극 활용되어 왔다. 일부 과학자들 사이에서 황토살포는 저서생물 및 쿨 양식에 부정적인 영향을 미치고 있다는 지적이 있었으나[5], 황토를 대체할 수 있는 경제성이 뛰어난 대량의 물질이 발굴되고 있지 않는 실정이라 우리나라에서는 황토를 지속적으로 활용하게 되었다. 하지만, 2013년 적조발생시 황토살포에 의한 적조 구제가 원활하게 이루어지지 않아, 남해안뿐만 아니라 동해해역까지 광범위하게 적조가 확산되어 막대한 수산피해를 입혔다. 일부 지방자치단체에서는 황토살포에 의한 적조구제 효율은 낮은 반면 친환경적이지 않다는 이유로 사용을 금지하고 있는 실정이고, 실제 피해를 본 어민들 사이에서도 황토의 구제효율에 대한 의구심이 증폭되고 있다. 결과적으로 황토에 대한 구제효율에 관한 명확한 과학적 근거를 제시해 주는 것과 아울러 적조생물을 효과적으로 제거하면서 해양생태계에 미치는 2차 문제를 최소화하는 친환경적인 제어방법을 개발하는 것이 무엇보다 시급하다고 하겠다.

PAM(pulse-amplitude modulation)장비는 엽록소내 전자전달 및 에너지 손실 관계를 이용한 생물정량과 더불어 광합성 전자 전달율(electron transport rate: ETR)에 의한 생물활성을 측정할 수 있다[6]. 식물의 엽록소에는 엽록체 내 틸라코이드막(명반응)에서 단백질과 비공유 결합 상태로 엽록소-단백질 복합체(chlorophyl-protein complex, CP 복합체)를 구성한다. 특히 광 흡수에 의한 들뜬 상태의 CP 복합체 엽록소에서 일부 분자 에너지는 광합성에 이용되고 나머지 일부는 형광, 인광, 또는 열로 방출된다. 이때 방출되는 형광은 주로 제2광계에서 이루 어지며, 방출된 형광스펙트럼은 식물플랑크톤의 광합성 활성에 대한 많은 정보를 PAM 장비로 수치화 시킬 수 있다[7, 8]. 따라서 PAM 장비를 이용하여 생물세포 내 미세한 변이 및 엽록소활성에 관한 정보는 제2광계를 통하여 방출되는 형광 스펙트럼 분석으로 에너지 손실여부를 판단할 수 있는 방법으로 생물의 광합성 활성여부를 파

악할 수 있다.

적조구제물질은 대상생물만 선택적으로 살조 할 수 있으며, 양식 수산생물에 피해를 주지 않으면서 해양생태계에도 부정적인 영향을 미치지 않는 친환경소재가 요구된다. 당뇨병 치료 보조제로 활용되는 살조물질 Thiazolidinedione 유도체 (TD49)에 관해서 기 수행된 선형연구에 의하여 선택적 살조능이 있는 것으로 나타나 있으나[9], 이에 대한 구체적인 살조효능 및 살조 기작에 관여할 수 있는 광저해, 광합성 활성엽록소의 손상유부에 관한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 현재 적조 생물을 제거하기 위해 살포되는 황토에 대한 살조효율의 과학적 근거를 제시함과 더불어 새롭게 개발된 살조물질 TD49에 대한 선택적 살조효능 및 살조기작에 관여할 수 있는 광합성능을 평가하기 위하여 적조생물(유해종 3종과 비유해종 1종)을 대상으로 황토와 TD49물질 첨가 후 종별 살조효율 비교분석, 광합성 효율, 전자 전달율과 관련된 생물활성을 각각 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 살조물질과 황토

화학적 합성물질 TD49 (Thiazolidinedione 유도체)는 조선대학교 조훈교수로부터 제공받았다. 제공받은 물질에 대한 구체적인 합성과정은 선행 연구에서 상세하게 언급이 되었다[9]. 황토는 2013년 통영시에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생 당시 유해적조생물을 구제하기 위하여 부두에 적재해 둔 황토를 이용하였다.

2.2 실험 대상생물과 처리조건

본 실험에 사용한 미소생물은 선택적 살조유무를 파악하기 위해서 침편모조류 2종(*Heterosigma akashiwo*, *Chattonella marina*)과 와편모조류 1종(*Heterocapsa circularisquama*)을 포함한 유해조류 3종과 더불어 비유해성종 은편모조류 1종(*Rhodomonas salina*)을 선정하였다. *H. akashiwo*, *C. marina* 그리고 *R. salina*는 한국해양과학기술원 남해연구소에서 보유하고 있는 분리 배양주를 이용하였고, *H. circularisquama*는 일본 세토 수산과학원(National Research Institute of Fisheries and

Environment of Inland Sea)에서 분양 받았다. 적조생물 4종에 관한 높은 밀도의 개체수를 확보하기 위한 사전 배양은 F/2 배지조건하에서, 수온 20°C, 광량 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 광주기 12L:12D에서 수행하였다. 일정기간 동안 고농도의 밀도가 유지 될 때까지 배양 한 후, 뚜껑이 달린 70mL의 실험관(ø22 mm x 200 mm, PYREX)에 4종의 생물을 균일하게 50mL씩 분주하였다. 살조물질에 대한 각 생물에 대한 영향을 파악하기 위해 TD49 처리군의 물질농도는 0.5 μM , 황토는 0.8 g L⁻¹의 농도로 맞추었고, 모든 실험은 3개 반복구(triplicate)로 평가하였다.

2.3 생물영향평가를 위한 광합성활성 분석

생물의 활성반응 정도를 파악하기 위해서 모든 실험군에서 1시간, 24시간, 48시간 후에 Phyto-PAM(phytoplankton analyzer; PHYTO-ED, S/N EDEF0139, Germany)장비로 광량에 대한 양자수율(quantum yield)과 전자전달율(electron transport rate), 이로부터 광합성 광곡선을 추정하여 상대적인 광합성 변수(rETRmax' initial slope)는 송의 논문[10]에 근거하여 산출하였다. 아울러 광합성과 관련된 지표의 산출방법은 다음과 같다. 각 생물에 대한 대조군을 포함한 살조물질과 황토 처리군에서 광곡선은 0~1364 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 범위의 11단계 광 구배를 설정하였고, 각 단계별로 10초간 광도(actinic light)에 노출한 후 포화광(saturation pulse)을 조사하여 유도된 형광 변화로부터 매개 변수들을 구하였다. 광합성 명반응의 반응중심 중 하나인 광계II(photosynthesis system II, PSII)의 광화학 반응에 대한 양자수율 또는 양자효율(quantum efficiency; ϕ_p^0)은 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_p^0 = (F_m - F_0)/F_m = F_v/F_m$$

여기서 F_0 는 암적응 상태에서의 최저 형광 또는 초기 형광, F_m 는 암적응된 시료에서 포화광에 의한 최대 형광, F_v/F_m 는 암적응된 시료의 광계II 광화학 반응에 대한 최대 또는 잠재적 양자수율을 의미하며 광합성 효율(photochemical efficiency)을 측정하는데 중요한 단서를 제공한다. 광계II에 있어서 광화학적인 에너지 전환의 양자수율(quantum yield)은 측정된 형광값으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi_p = (F_m' - F_t)/F_m' = dF/(F_t + dF)F_v/F_m$$

여기서, F_m' 는 명적응 상태에서 포화광에 의해 유도된 최대 형광(maximum fluorescence)을 의미하며, F_t 는 명적응 후에 매우 낮은 광도에서 초기형광(minimum fluorescence)을 의미한다. 결과적으로 구해진 광계II의 광화학 양자수율(PSII quantum yield; ϕ_p)에 photon flux density(PFD)를 곱하여 아래와 같은 식에 대입하여 전자전달속도(electron transport rate, ETR)를 산출할 수 있다.

$$\text{ETR} = \phi_p \times \text{PFD} \times 0.84 \times \phi_{\text{PSII}}$$

여기서, ϕ_p 는 PSII의 양자수율, PFD는 광량 (photon flux density; $\mu \text{ mol quanta} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ϕ_{PSII} 는 광계II에 흡수된 빛을 의미한다. 보통 엽록소에 흡수된 빛은 광계I과 광계II에 똑같은 비율로 나눠진다고 가정하기 때문에 ϕ_{PSII} 는 보통 0.5를 사용한다. 고등 식물의 빛 흡수율은 보통 0.84이며, 이를 식물플랑크톤에 적용하여 상대적인 전자전달속도(rETR: relative electron transport rate)를 산출하였다.

결과적으로 본 연구에서는 유해성 적조생물과 비유해성 적조생물의 살조여부를 파악하기 위해서, Phyto-PAM 장비를 이용하여 각 파장별(470nm, 520nm, 640nm, 665nm) 엽록소 형광을 측정함으로 활성 엽록소(Activity Chl. a), 광합성효율, 광합성 전자 전달율 및 생물량을 산출하여, 세포내 광계에 영향을 미치는 생물활성정도를 파악하였다. 아울러 TD49물질과 황토처리군의 살조효율(%)은 활성엽록소(activity Chl. a)를 이용하여 $(1-Tt/Ct) \times 100$ 식에 대입하여 구하였다. 여기서 T와 C는 각각 처리군과 대조군의 activity Chl. a 값이며, t는 접종 후 시간으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 처리물질에 따른 생물의 형태적변화

우리나라에서 적조 발생시 살포하는 황토와 살조물질 TD49에 대한 영향을 유해종 3종과 비유해종 1종을 대상으로 평가하였다. Figure 1에 제시한 사진은 대조군과 황토와 TD49물질을 첨가하고 1시간 경과 후의 세포 변화 양상이다. 침편모조류 *H. akashiwo*와 *C. marina*, 와편모

조류 *H. circularisquama*는 TD49 처리군에서 명확하게 세포가 파괴되는 것을 알 수 있었다[Fig. 1 (e), (f), (g)]. 특히 TD49 물질 처리군에서는 3종 모두 세포 외벽을 중심으로 세포형태가 매끄럽게 팽창된 후 시간의 경과와 더불어 세포벽이 파괴 및 분해되는 양상을 관찰하였다. 반면 황토 처리군에서는 3종 모두 세포파괴가 일어나지 않았고, 처리하지 않은 대조군과 세포 외형상 차이를 보이지 않았다[Fig. 1(i), (j), (k)]. 은편모조류 *R. salina*는 모든 실험군에서 세포형태 변화 및 파괴가 일어나지 않았을 뿐만 아니라, 활발하게 유영하였다[Fig. 1 (d), (h), (l)]. 결과적으로 세포의 외형상 평가에서 유해종 3종은 명확하게 TD49 처리군에서 영향을 받았고, 황토 처리군에서는 그다지 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 반면 비유해종 은편모조류 *R. salina*는 황토 및 TD49 처리군에서도 전혀 영향을 받지 않았고, 오히려 생물의 움직임이 활발하였다.

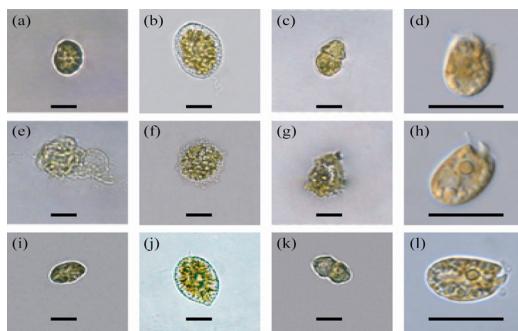


Fig. 1. Light microscopic observation of *Heterosigma akashiwo*(a, e, i), *Chattonella marina*(b, f, j), *Heterocapsa circularisquama*(c, g, k) and *Rhodomonas salina*(d, h, l) in control(above panel), TD49 inoculation(middle panel) and yellow clay(below panel). Scale bar: 20 μm .

3.2 처리물질에 따른 대상생물의 광합성활성 변화

3.2.1 활성엽록소(active Chl. a)

살조물질에 대한 적조 대상생물의 생존여부는 자가영양생물일 경우 광합성에 의하여 생성되는 고유엽록소의 활성정도로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 TD49와 황토를 접종 후 4종에 대한 Chl. a와 활성엽록소(activity Chl. a)를 측정하였다[Fig. 2]. *H. akashiwo*는 대조군에 시간의 경과에 따라 Chl. a와 activity Chl. a가 증가하였고 48시간 경과 후 각각 446.95와 206.38 μgL^{-1} 로 최대치를 보였

다. TD49 처리군에서는 시간의 경과에 따라 Chl. a와 activity Chl. a가 점차 감소하여 48시간 후 각각 363.88과 86.28 μgL^{-1} 로 감소하였다. 반면, 황토 처리군에서는 대조군과 유사한 경향을 보였다. *C. marina*는 TD49 처리군에서 물질침가 1시간 후 대조군대비, activity Chl. a의 1/3 수준인 43.34 μgL^{-1} 를 보였고, 접종 48시간 후에는 5.39 μgL^{-1} 로 낮게 나타났다. 반면, *C. marina*의 황토 처리군에서는 *H. akashiwo*의 황토 처리군과 유사한 경향을 관찰되었고, 접종 후 activity Chl. a가 다소 감소하였으나, 시간의 경과와 더불어 점차적으로 증가하는 양상을 보였다. *H. circularisquama*는 대조군과 황토 처리군이 비슷하게 시간의 경과와 더불어 Chl. a와 activity Chl. a값이 점차적으로 증가하는 경향을 관찰하였으나, TD49 처리군

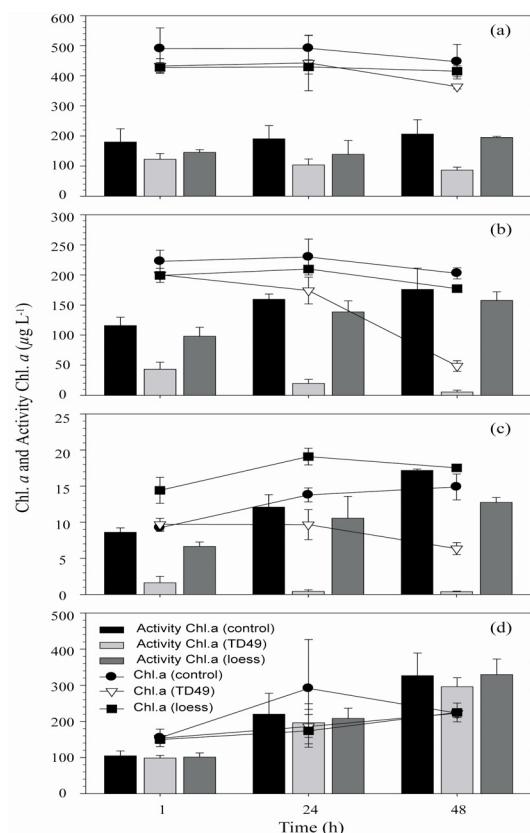


Fig. 2. Changes in the activity Chl. a and Chl. a concentration of *Heterosigma akashiwo* (a), *Chattonella marina* (b), *Heterocapsa circularisquama* (c) and *Rhodomonas salina* (d) after TD49 and yellow clay inoculation. Error bar represent the standard deviation of triplicate samples

에서는 앞선 2종의 적조생물종과 유사하게 접종 1시간 후 activity Chl. *a*가 급격하게 감소하였다. 특히 비유해종 *R. salina*는 황토와 TD49 처리군에서 시간경과와 더불어 대조군과 유사하게 activity Chl. *a*가 소폭 증가하는 양상을 보였다. 이는 TD49와 황토의 처리에도 불구하고 성장의 저해를 받지 않았고, 오히려 성장의 촉진제역할을 한 것을 의미한다. 살조 효율에서도 TD49 물질 첨가 후 유해조류 3종은 시간의 경과와 더불어 증가하는 양상을 보였고, 특히 이들 3종의 살조 효율은 *H. circularisquama*>*C. marina*>*H. akashiwo* 순으로 높게 나타났다. 반면, 황토 첨가군에서 살조 효율의 명확한 차이는 보이지 않았고, 30%이하로 낮게 관찰되는 것을 알 수 있었다(Table 1). 미세조류의 세포벽의 구성 성분은 각각 다르며, 섬유소의 독특한 각(theeca)의 뚜껑으로 구성된 와편모조류와 무각인 침편모조류의 세포벽은 규조류와 같은 견고한 세포벽 보다 TD 물질이 세포내에 쉽게 침투되어, 선택적인 효과를 나타낸 것으로 판단된다[11]. 본 연구에서도 세포벽이 없는 침편모조류와 섬유소로 세포벽이 구성된 와편모조류에 TD49가 더욱 민감하게 반응한 연구 결과와 일치하였다. 따라서 미세조류의 세포벽에 따른 TD49의 반응은 실제 적조 발생시 TD49의 살포 농도를 결정할 수 있는 요인으로 사료된다.

Table 1. Algicidal efficiency (%) of TD49 and yellow clay against harmful (*Heterosigma akashiwo*, *Chattonella marina* and *Heterocapsa circularisquama*) and non-harmful species (*Rhodomonas salina*) during 1hr, 24hrs and 48hrs. (mean \pm S.D., n=3)

Species	Time(h)	Algicidal efficiency(%)	
		TD49	Yellow clay
<i>Heterosigma akashiwo</i>	1	31.90 \pm 10.65	19.21 \pm 5.08
	24	45.52 \pm 10.34	27.16 \pm 24.16
	48	58.19 \pm 4.94	5.62 \pm 1.80
<i>Chattonella marina</i>	1	62.59 \pm 10.12	15.43 \pm 12.95
	24	87.64 \pm 4.19	13.14 \pm 11.58
	48	96.93 \pm 1.76	10.37 \pm 8.09
<i>Heterocapsa circularisquama</i>	1	81.19 \pm 10.29	22.90 \pm 7.09
	24	96.45 \pm 1.77	12.73 \pm 24.91
	48	97.71 \pm 0.45	25.82 \pm 3.97
<i>Rhodomonas salina</i>	1	5.80 \pm 7.37	3.15 \pm 11.07
	24	10.79 \pm 24.07	5.38 \pm 12.86
	48	9.40 \pm 7.60	6.67 \pm 1.43

3.2.2 광합성 효율 (F_v/F_m)

본 연구에서 조사한 4종에 대한 광합성 효율은 상대적으로 대조군과 황토 처리군에서 높게 나타났다[Fig. 3].

H. akashiwo 의 광합성 효율은 대조군과 황토 처리군에서 시간경과에 따른 유의한 차이는 나타나지 않았으나 ($p>0.01$), 시간 경과와 더불어 소폭 증가하는 경향을 보였다. 반면, TD49 처리군에서는 처리 24시간(*t*-test; *t* value: 4.72, $p<0.001$)과 48시간(*t*-test; *t* value: 7.80, $p<0.001$)후에 대조군과 유의한 차이를 보였다. *C. marina*의 대조군과 황토 처리군은 *H. akashiwo* 의 대조군과 황토 처리군과 유사한 광합성 효율을 보였으나, TD49 처리군에서는 2종 모두 대조군과 보다 광합성 효율이 유의하게 낮게 나타났다($p<0.001$). *H. circularisquama*에서는 대조군 대비 TD49 처리군과 황토 처리군에서 광합성 효율이 유의하게 낮게 나타났다($p<0.001$). 이는 앞서 언급한

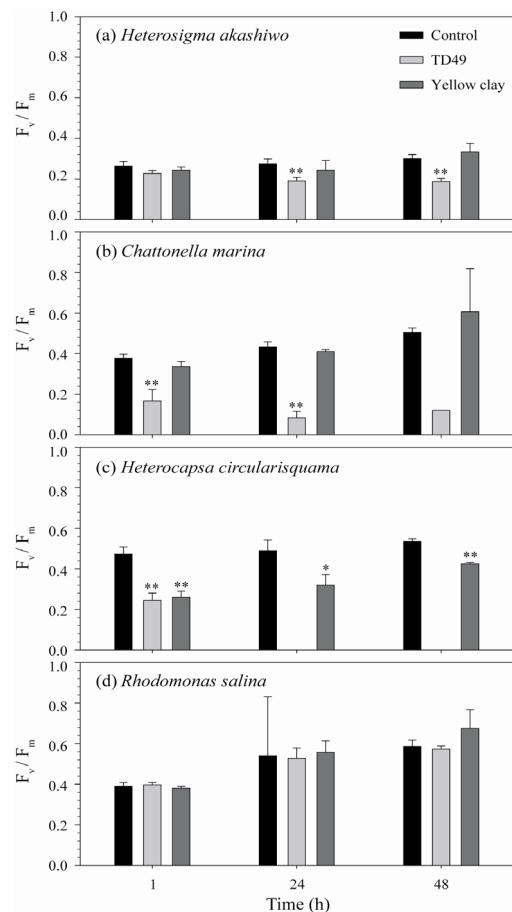


Fig. 3. Photosynthetic efficiency(F_v/F_m) of *Heterosigma akashiwo* (a), *Chattonella marina* (b), *Heterocapsa circularisquama* (c) and *Rhodomonas salina* (d) related with exposure time in the control, TD49 and yellow clay treatment (mean \pm S.D., n=3).

황토 처리군에서 activity Chl. *a*은 유의하게 떨어지지 않았음에도 불구하고, 광합성 효율은 유의하게 낮게 나타났다는 것은 황토 살포로 인하여 광합성 효율에 미미한 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미할 수 있다. *R. salina*의 광합성 효율은 황토와 TD49 처리군에서 대조군과 유사하게 관찰되었다. 이는 앞서 언급한 activity Chl. *a*값의 변화 양상과도 유사하게 나타났다.

3.2.3 전자전달율 (relative ETR)

제어 대상 생물이 살조물질에 반응하여 변화하는 전자전달율의 차이를 [Fig. 4]에 제시하였다. *H. akashiwo*는 대조군과 황토 처리군에서 광량(PAR)에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 광량의 증가에 따라 상대적인 전자 수용체의 전달율이 증가한 것을 의미할 수 있다. 반면 TD 49 처리군에서는 대조군과 황토 처리군보다 낮은 전

자전달율이 관찰되었다. *C. marina*와 *H. circularisquama*는 TD49 처리군의 전자전달율이 나타나지 않았고, 이는 광계Ⅱ에서 광합성을 할 수 있는 전자 전달과정에 치명적인 영향을 미쳐서 결과적으로 세포의 사멸로 이어지는 것으로 파악되었다. *R. salina*는 전체 실험군의 전자 전달율 곡선이 대조군과 유사하게 나타났으며, TD49와 황토에 대한 영향은 관찰되지 않았다. 결과적으로 Fig. 3에 제시한 광합성 효율(F_v/F_m)이 낮게 나타난 실험군에서 전자 전달율 또한 낮게 나타나는 것을 파악 할 수 있었고, 이는 살조물질의 투입 후 시간의 경과에 따라서 광합성을 하는 광계Ⅱ에 일차적으로 스트레스를 받아 생물사멸에 관여하는 직접적 영향일 가능성이 높다. 결과적으로 살조물질 TD49는 유해 적조생물의 광합성 능력을 저해시켜 세포를 사멸시킬 수 있는 선택적 제어 물질로서 우수한 기능을 발휘할 것으로 판단된다.

4. 결론

유해조류 3종 *H. circularisquama*, *C. marina*, *H. akashiwo* 및 비유해종 1종 *R. salina*에 대하여, 황토와 살조물질 TD49에 대하여 살조 효과를 살펴본 결과, TD49 물질은 유해종에 대하여 광합성 효율 및 전자 전달율이 낮게 나타났고, 이는 광계Ⅱ에서 광합성을 할 수 있는 전자 전달 과정에 치명적인 영향을 미쳐 결과적으로 살조 효과를 극대화 한 것으로 파악되었다. 반면 비유해 은편모조류에 속하는 *R. salina*는 TD49 물질에 대한 살조 효과를 보이지 않았고, 오히려 증식에 긍정적인 영향을 미친 것으로 파악되었다. 반면, 황토처리군의 광합성 효율 및 전자 전달율의 차이는 대조군과 큰 차이를 보이지 않아, 살조효과가 미미한 것으로 판단되었다. 결과적으로 TD49 물질은 적조 대상생물에 따라서 부분적으로 제어되는 선택적 살조능을 시사할 수 있었다. 반면, 황토는 유해종에 대한 살조 효과가 그다지 높지 않았으므로 황토를 계속적으로 현장에 적용해야 할지 심각하게 고민해야 할 것이다.

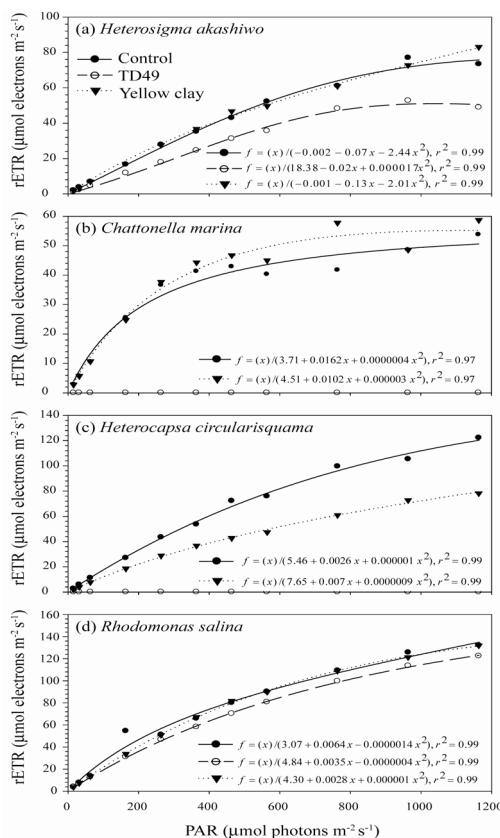


Fig. 4. Light response curves of *Heterosigma akashiwo* (a), *Chattonella marina* (b), *Heterocapsa circularisquama* (c) and *Rhodomonas salina* (d) in the control and in the treatments, TD49 and yellow clay treatments.

References

- [1] Y. T. Park, W. J. Lee, "Change of bacterial population during the decomposition process of red tide dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in the marine sediment addition of yellow loess". *J. Korean fish. Soc.*, 31, 920-926, 1998.
- [2] W. J. Lee, Y. T. Park. "Isolation of marine bacteria killing red tide microalgae II. Isolation and algicidal properties of *Pseudomonas* sp. LG-2 possessing killing activity for dinoflagellate, *Prorocentrum micans*". *J. Korean Fish Soc.*, 31, 852-858, 1998.
- [3] I. Imai, Y. Ishida, S. Sawayama, Y. Hata, "Isolation of a marine gliding bacterium that kills *Chattonella antiqua*(Raphidophyceae)". *Nippon suisan Gakk.*, 57, 1409, 1991.
- [4] I. Imai, T. Sunahara, T. Nishikawa, Y. Hori, R. Kondo, S. Hiroshi, "Fluctuations of the red tide flagellates *Chattonella* spp. (Raphidophyceae) and the algicidal bacterium *Cytophaga* sp. in the Seto Inland Sea, Japan". *Mar. Biol.*, 138, 1043-1049, 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s002270000513>
- [5] C. H. Park., "Effects of loess application in coastal benthic ecosystem". *J. Environment Soc.*, 15, 1035-1043, 2006.
- [6] E. P. Morris, J. C. Kromkamp, "Influence of temperature on the relationship between oxygen and fluorescence based estimates of photosynthetic parameters in a marine benthic diatom (*Cylindrotheca closterium*)". *Eur. J. Phycol.*, 38, 133 – 142, 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/0967026031000085832>
- [7] H. H. Lichenthaler, "Application of chlorophyll fluorescence", Kluwer Academic Press, Dordrecht., 1988.
- [8] P. Eullaffroy, G. Vernet, "The F684/F735 chlorophyll fluorescence ratio; a potential tool for rapid detection and determination of herbicide phytotoxicity in algae", *Water Res.*, 37, 1983-1990, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00621-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00621-8)
- [9] S. H. Baek, M. H. Son, S. W. Jung, D. H. Na, H. Cho, M. Yamaguchi, S. W. Kim, Y. O. Kim, "Enhanced species specific chemical control of harmful and non-harmful algal bloom species by the thiazolidinedione derivative TD49", *J. Appl. Phycol.*, 26, 311-321, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-013-0046-z>
- [10] I. J. Song, "The phytoplankton biomass, primary productivity and photosynthesis characteristics at surf zone of a protected sandy beach", Department of oceanography graduate school Chonnam National University., 2002.
- [11] Y. Wu, Y. Lee, S. G. Jung, M. J. Kim, C. Y. Eom, S. W. Kim, H. Cho, E. S. Jin, "A novel thiazolidinedione derivative TD118 showing selective algicidal effects for red tide control", *World J. Microbiol Biotechnol.*, 30, 1603-1614, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11274-013-1584-x>
- [12] K. Suresh Kumar, H. U. Dahms, J. S. Lee, H. C. Kim, W. C. Lee, K. H. Shin, "Algal photosynthetic responses to toxic metals and herbicides assessed by chlorophyll a fluorescence", *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 72, 1063-1075, 2014.

손 문 호(Moonho Son)

[정회원]



- 2005년 2월 : 인제대학교 환경학과 (이학석사)
- 2008년 8월 : 부산대학교 해양학과 (박사수료)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구사업인력

<관심분야>

해양생물학, 식물플랑크톤 생태학

백 승 호(Seung Ho Baek)

[정회원]



- 2004년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학석사)
- 2007년 3월 : 요코하마국립대 환경정보학과 (환경학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양환경오염, 수질, 해양생물학, 식물플랑크톤 생태학