

적조발생특성과 제어대책



남 귀 숙 |
한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원
nguisook@hanmail.net

1. 서론

적조(red tides)는 해양에 서식하는 식물 플랑크톤이 대량 번식하여 해수의 색깔을 붉게 변화시키고 해양생태계를 파괴시키는 심각한 해양오염이다. 일반적으로 물이 붉게 바뀌는 경우가 많아서 “적조”라고 하지만 실제 물색깔은 원인이 되는 플랑크톤 고유의 색에 좌우된다. 따라서, 원인생물에 따라 오렌지색이나 적갈색, 갈색 등이 되기도 하며 이는 적조 원인 생물이 엽록소 이외에도 카로테노이드(carotenoid)류의 붉은색, 갈색 색소를 가지고 있기 때문이다.

적조는 자연현상의 하나이며, 이미 구약성서에도 관련된 기록이 있다(출애굽기 7장 20~21절; “강물이 전부 피로 변하여 고기가 죽었고 물은 냄새가 나서 마실 수가 없게 되었다”). 또한, 북미에 백인들이 이주하기 훨씬 이전부터 인디언 원주민들은 “바다에 빨간 줄무늬 모양이 나타났다”고 주장이 홍합을

잡는 것을 금하였다고 한다. 또한 영국의 Charles Darwin은 1831~36년의 비이글호 세계일주 해양학 연구 항해 중에, 칠레 앞 바다의 해면이 붉게 변하는 것을 보고 자세한 돋보기 관찰 기록을 남겼는데, 이것은 아마도 광합성 섬모충인 *Myrionecta rubra*에 의한 적조로 여겨진다. 그러나 이러한 적조현상을 학문적으로 연구하기 시작한 것은 구미에서는 1850년대, 아시아에서는 1900년 이후로 지금까지 그 연구 역사가 매우 오래되었으나 아직도 적조를 예방하고 제어하는 데는 많은 한계를 보이고 있는 실정이다(김학균 2005, 김 등 1998).

적조는 해양생물의 대량폐사와 인명 피해를 일으켜 영해를 가진 거의 모든 나라의 수산업과 관광산업에 해마다 천문학적인 액수의 피해를 끼치고 있다(Anderson 1995). 우리나라의 경우 적조로 인하여 해마다 100억대의 직접적인 어민 피해가 발생하고 있으며(김 등 1998), 적조로 인하여 국민들의 수산물에 대한 소비 격감으로 요식업 및 관광업계에 막대한 간접적인 피해를 끼치게 되어 국가에서는 매년 적조 발생으로 인한 재해선포를 하고 있는 실정이다.

따라서 본고에서는 적조의 발생특성과 원인에 대한 이해와 다양한 방제대책 적용시 적조방제효과를 제시하여 향후 적절한 적조 방제 대책 수립에 도움이 되고자 한다.

2. 적조발생특성

1) 적조의 원인생물

연안역에서 주로 적조를 일으키는 생물종은 와편모류(Dinoflagellate), 규조류(Diatom), 은편모류(Cryptophyta), 섬모충류(Ciliate), 침편모조류(Rhaphidophyceae), 유글레나류(Euglenophyte) 등이다. 전 세계적으로 적조를 일으키는 종은 100 여 종이 넘고 우리나라의 경우 30-40종에 이르고 있다. 현재 대규모 피해를 끼치고 있는 *Cochlodinium polykrikoides* 외에 유독·유해성 적조생물도 10 여종 이상이다. 이러한 종들은 서로 다른 생리, 생태적 특성(성장율, 피식율, 규조류와의 경쟁력 등)을 가지고 있다(표 1, 정 등 2000, 농식품부 등 2008).

와편모조류는 온대 및 아열대 수역에서 중요한 위치를 차지하며 일반적으로 두개의 편모를 가지고 있고, 연안수역에서는 규조류와 편모조류가 주로 적조를 일으키고 있다. 특히 온대 지방에서는 저 수온기에는 규조류가 그리고 고 수온기에는 와편모조류가 적조를 일으키고 있다. 이중 우리나라 연안에서 자주 출현하는 종류는 규조류에서는 *Skeletonema* 속, *Chaetoceros* 속, *Nitzschia* 속 등이 있고 편모조류에서는 *Gymnodinium* 속, *Prorocentrum*

속, *Heterosigma* 속, *Noctiluca* 속 등이 있다. 과거에는 해역별로 비교하여 보면 서해에서는 *Noctiluca* 속, 동해남부에서는 *Prorocentrum* 속, *Heterosigma* 속에 의한 적조가 자주 관찰되었고, 남해안에서는 적조생물이 매우 다양한 양상을 보였으나, 최근의 적조발생현황은 해역별 차이를 거의 찾아볼 수 없을 만큼 다양한 생물종이 모든 연안 해역에서 출현하고 있다(정 등 2000, 농식품부 등 2008).

특히 연도별 적조생물의 변화를 보면 해가 갈수록 편모조류의 출현 빈도가 높아지고 있다. 이와 같이 적조생물이 편모조류로 이행됨과 아울러 최근 단독종 조류가 발생하면서 직접 피해를 일으키는 사례가 있다. 이는 오래 전에 깨끗한 연안에서는 해수의 구성성분이 안정적이었으나 해가 갈수록 오염이 증대되면서 환경이 악화되어 직접 피해를 줄 수 있는 종의 번식이 가능한 해수의 성질로 바뀌었음을 의미하고 있다(정 등 2000, 농식품부 등 2008).

2) 적조 발생원인

적조의 발생은 빛, 영양염류, 수층의 안정성, 난류(turbulence)의 세기, 물리적 집적, 포식자의 포식력, 물리적 이동, 종간의 경쟁 등 다양한 환경요

표 1. 적조를 일으키는 생물종의 특성

생물종	특성			
	영양형태	조직	편모의 특성	서식환경
와편모류	광합성(독립영양성), 종속영양성, 혼합영양성	단세포성이며, 군체를 이루기도 함	2개의 이형 편모를 이용, 이동 가능	해수~담수, 부유성, 부착성, 공생~기생
규조류	광합성(독립영양성)	단세포성이며, 흔히 군체를 이룸	편모 없음(운동성 없음, 하지만 웅성 배우세포에만 있음)	해수~담수, 얼음 속~온천, 토양내~공기중, 생물체내~체표면
은편모류	광합성(독립영양성), 혼합영양성	납작한 공 모양의 단세포성	2개의 이형 편모를 이용, 이동 가능	해수~담수 부유성
섬모충류	종속영양성, 혼합영양성	단체포성	섬모를 가지고 있으며 이동과 포식에 이용	해수~담수, 부유성, 부착성, 공생~기생
침편모조류	광합성(독립영양성) 혼합영양성	세포 형태의 변형이 쉬운 단체포성	2개의 편모를 이용, 이동 가능	해수~담수, 부유성
유글레나류	광합성(독립영양성) 혼합영양성	세포 형태의 변형이 쉬운 단체포성	2개의 편모를 이용, 이동 가능	해수~담수, 부유성

인의 영향을 받는 것으로 알려져 있고 해역마다 시기마다 적조의 발생기작(mechanism)이 다를 수 있다. 적조 원인생물들의 성장은 첫째 그 적조생물이 어떠한 방식으로 영양분을 섭취하느냐(영양방식-trophic mode)에 따라 달라진다. 적조생물의 영양방식은 자가영양(autotrophy), 타가영양(heterotrophy), 혼합영양(mixotrophy)으로 나누는데 자가영양은 광합성을 통하여 영양분을 스스로 만들고(식물처럼), 타가영양은 동물플랑크톤과 같이 다른 생물을 잡아먹음으로써 영양분을 얻는다. 혼합영양은 광합성을 하기도 하고 다른 생물을 포식하기도 한다. 최근에 유해성 적조의 90%를 차지하고 있는 와편모류(dinoflagellates)의 대부분은 혼합영양성이라는 것이 밝혀졌다(Hansen and Nielsen 1997; Jeong et al. 1997; Stoecker et al. 1997). 적조원인생물이 순수한 자가영양일 경우(규조류 등) 빛과 영양염류(질소, 인, 규소 등) 조건이 좋아야 한다. 그런데 한 해역에서 보통 규조류의 종류는 약 50-150종이 되므로 어떤 종이 우점하여 결국 적조를 일으킬 것인가는 서로의 경쟁에서 어느 것이 제일 빨리 분열할 수 있느냐에 달려있다(양 등, 2000). 대부분의 해역에서는 규조류 중 *Skeletonema costatum*이 가장 많이 적조를 일으키는데 이 종은 하루에 4번 분열할 수 있어 만일 비가 많이 오거나 부영양화가 되어 표층에 질소, 인, 규소 농도가 높으면 이 종이 항상 먼저 우점한다.

적조원인생물이 타가영양일 경우(야광충, 피스테리아/유사종 등), 먹이의 종류와 양이 가장 중요하다(Jeong et al. 2005). 주로 이들의 먹이는 다른 적조생물이다. 이들은 다른 적조생물이 적조를 일으켰을 때 포식을 하면서 스스로의 양을 꾸준히 증가시켜 결국 적조를 발생시킨다(그림 1).

3. 적조 제어 대책

1) 적조방제 기술

세계적으로 볼 때 적조가 발생했을 때 적조를 적극적으로 방제하는 나라는 우리나라 등 극소수에 불과하다. 그러나 1990년대 후반부터 미국, 유럽 등에서 고부가가치 첨단기술인 적조방제기술 개발에 박차를 가하고 있다. 적조방제기술에는 크게 물리적 방법, 생물학적 방법, 화학적 방법 등으로 구분하여 개발 중이며, 그 중 화학적 방법은 시급하게 적조를 제거해야 할 때 매우 효과적이다. 그러나 화학적 방법은 높은 농도로 투입할 경우 다른 해양생물에도 피해를 줄 수 있으므로 적조생물을 죽이지만 다른 해양생물에는 피해를 최소화 할 수 있는 '최적농도'를 찾아내는 것이 가장 중요한 일이다.

적조를 제어하는 물질과 장비는 농림수산식품부의 「적조구제 물질 및 장비의 사용승인에 관한 고



그림 1. 미국 캘리포니아 샌디에이고 앞 해역에서 발생한 야광충 적조(좌)와 새만금호의 야광충 적조(우)

시」(2012.08.20개정) 기준에 의해 사용이 인정되고 있으며, 고시된 적조제어물질에는 황토, 적조구제장비는 황토살포기, 전해수 황토살포기 등이 있다. 현재 개발되고 있는 적조방제기술은 황토살포법, 원생동물성 천적을 이용한 적조방제기술, 해수 전기분해시 발생하는 NaOCl을 이용한 적조방제기술, 물리적 적조제거기, 다시마 등 천연물질 이용법, 미생물제제 적용법, 전기응집을 이용한 적조제어방법 등 다양하다. 우리나라에서 적조를 일으키는 유해·유독성 적조종이 10여종(*Alexandrium tamarense*, *A. catenella*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gymnodinium catenatum*, *G. impudicum*, *Heterocapsa triquetra*, *H. rotundata*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum donghaiense*, *P. minimum* 등)에 이르고 있는데 이들은 세포학적 특성이나 생태, 생리적 특성을 볼 때 상당한 차이가 있어 방제를 효과적으로 하기 위해서는 각 적조 종에 가장 효과적인 적조 방제 기술을 평가하고 실용화시킬 수 있는 시스템이 절실하다(농식품부 등 2008).

적조방제에 있어서 중요한 요소는 효능, 경제성, 부작용 최소화 등이다. 적조방제에 이용되는 거의 모든 물질(생물, 무생물 모두 포함)은 투입 농도가 높을수록 효과가 좋지만 이 경우 경비가 많이 들고 다른 연안생태계에 큰 피해를 줄 가능성이 높다. 또한 해역에 따라 해수의 유동(mixing, advection 등) 등 물리적 특성이 다르므로 일정한 농도의 물질을 투입하였을 때 그 농도가 유지되어 적조생물과 접촉하는 시간이 크게 다를 수 있다. 즉 적조방제물질의 효능과 경제성이 해역에 따라 크게 달라질 수 있으므로 이에 따른 최적 방제기술을 잘 선정해야 한다(농식품부 등 2008).

2) 적조 방제 물질 성능 시험

본 실험은 2006년 방조제 체절이후 폐쇄수역으로 변한 새만금호에서 적조를 일으키는 원인종에 대해

효과적으로 제거할 수 있는 물질을 제안하여 최적의 적조제어대책을 수립하기 위해 실시하였다. 먼저 한 물질에 대하여 2~4종의 적조생물을 투입한 후, 방제 물질 농도에 따른 적조생물의 생존율을 측정하였다. 이 때 실내실험 및 2~3회 반복 현장시험(pilot test)을 실시하였고, 새만금 현장에 소형 mesocosm을 설치한 후 각 적조 원인종에 대한 최적물질을 투입하여 적조제어 실험을 실시하였다. 이를 통하여 각 물질의 현장적용 가능성을 검토하고, 고효율, 저비용, 친환경 방제물질을 선정하고자 하였다.

적조방제 시험대상 물질은 분말황토, 미생물제제(마잘), Mg(OH)₂(세프레마), 갯벌, 차아염소산 나트륨(NaOCl), 천적생물 등 6종류이며, 실험에 사용된 적조원인 생물은 새만금호에서 자주 출현하는 적조생물로서 *Amphidinium caterae*와 *Prorocentrum minimum* 등 몇종을 이용하였다.

현장 메조크즘 시험에서 1ppm의 농도로 NaOCl을 투입한 결과 적조 원인생물인 *Amphidinium carterae*, *cryptophyte*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum minimum*, *Scrippsiella trippodea* 등을 모두 제거하는 것으로 나타났으며, Mg(OH)₂(세프레마) 투입결과 *Amphidinium carterae*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum minimum*, *Scrippsiella trochoidea* 등을 완전 제거하는 것으로 나타났다.

분말황토는 유해성 적조생물인 *Heterosigma akashiwo*와 *Scrippsiella trochoidea*에게는 영향을 줬지만, 유독성 적조생물인 *Amphidinium carterae*와 유해성 적조생물인 *Prorocentrum minimum*에게는 별다른 영향이 없는 것으로 나타나는 등 일부 적조 원인종에만 영향을 주었다.

미생물제제(마잘)를 이용한 현장메조크즘 실험 결과 적조 원인생물인 *Amphidinium carterae*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum minimum*, *Scrippsiella trochoidea* 등을 단 시간 내에 모두 제거하는 것으로 나타났으며, 천적생물은 시간이 다소 소요되지만 지속적인 제어효과를

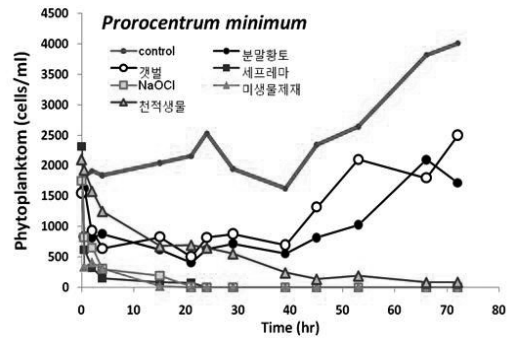
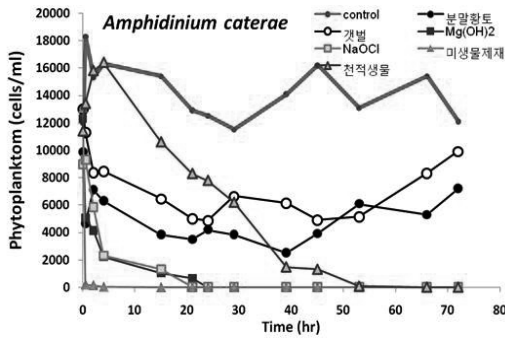


그림 2. 6가지 방제물질 적용시 시간에 따른 적조생물 생존율(메조코즘 실험)

보여주었다.

갯벌(자연퇴적물)은 거의 모든 적조 원인종에 방제효과를 보이지 않았다.

현장 메조코즘에서 NaOCl, Mg(OH)₂(세프레마), 미생물제제(마잘), 천연생물, 분말황토, 자연퇴적물(갯벌) 등의 적조생물 생존율을 측정할 결과, NaOCl, 미생물제제, Mg(OH)₂의 경우는 30분안에 사망율이 50%이상, 하루 지난 후에는 거의 모든 생물이 사멸하여 효과가 큰 것으로 나타났으며, 분말황토는 30분안에 생존율이 50%였으나 그 후에는 별다른 영향이 없는 것으로 나타났고 자연퇴적물의 경우 별다른 영향이 없는 것으로 나타났다. 천연생물의 경우 모든 적조생물이 제거되는데 50시간 이상의 시간이 소요되지만 생태학적으로 안전한 방법으로 사료된다.

3) 방제물질의 안정성 및 현장적용성 평가

해수의 전기분해시 발생하는 차아염소산(NaOCl)은 다양한 적·녹조 원인종을 단시간내에 방제하는데 효과가 있다. 이 차아염소산은 햇빛을 받을 경우 단시간내에 NaCl로 바뀌기 때문에 안전한 기술이다. 하지만 적조가 발생한 수역에 NaOCl을 이용하여 방제를 할 경우 일정 수준 농도이상에서는 적조 원인종 뿐만 아니라 다른 플랑크톤 군집(원생동물, 후생동물플랑크톤, 어류, 패류, 대형해조류 등)에게도 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 이

방법은 단시간내에 대규모의 적조를 방제할 경우에만 사용하여야 하며, 또한, 다른 플랑크톤 군집에 영향을 주지 않는 농도로 사용을 하여야 한다.

해수에서 이온교환방식으로 제조된 수산화마그네슘을 원료로 사용해서 유해물질이 없는 것으로 알려져 있는 Mg(OH)₂(세프레마)의 경우 여러종류의 적조 원인종을 제어하는데 효과가 있는 것으로 나타났지만, 구입비용이 큰 단점을 가지고 있다.

미세분말황토의 경우 농립수산식품부의 「적조구제 물질 및 장비의 사용승인에 관한 고시」(2012.08.20개정)에서 승인된 적조 구제물질로써 안정성과 현장적용성을 인정받았지만, *Cochlodinium polyhrikoides*, *Heterosigma akashiwo* 등 일부 적조 원인종에만 효과가 있는 것으로 나타났기 때문에 분말황토를 효과적으로 적용하기 위해서는 적조를 일으킨 원인종을 사전에 파악한 후 적용여부를 판단해야 한다. 또한, 분말황토의 경우 저층에 쌓여 저서생물 및 해조류에 피해를 줄 수 있는 등 2차적인 문제가 발생할 수 있어 주의해야 한다.

천적생물의 경우 주요 유해성 또는 유독성 적조생물을 효과적으로 포식하여 방제하는 원생생물을 이미 확보한 상태이며, 적조 원인종을 사전에 분석한 후 적용가능한 방법이다.

적조생물을 방제하는데 소요되는 시간은 다른 방제물질에 비해 긴 단점이 있으나, 지속성이 높고, 해당수역의 생태계내 피식-포식 관계를 적극 활용하는 방법으로 생태 안전성은 가장 높다고 본다.

4. 결론

현재 적조가 발생했을 때 적조를 적극적으로 방제하는 나라는 우리나라 등 극소수에 불과하다. 지금까지 적조를 구제하기 위한 많은 방제물질과 방제기술이 개발되고 있지만 대부분의 경우가 적조 발생 후 대책으로 수산 양식 피해를 막을 수가 없는 상황이다. 또한, 단기간 방제효과를 보이는 방제물질의 경우 대부분 수생태계에 미치는 영향이 커서 2차오염의 우려를 배제할 수 없는 상황이다.

따라서, 가장 이상적인 적조제어 대책은 적조발생기작을 더욱 잘 규명하여 정확한 예측기술의 개발과 적조발생을 사전에 예방할 수 있는 사전예방대책의 수립이다.

결과적으로 적조 예측단계부터 사전예방, 적조방제 완료 단계까지 각 단계별 행동지침을 포함하는 국가적 적조방제 시스템의 구축과 이를 위한 실행의지가 갖추어질 때 효과적인 적조제어가 가능하다고 본다. 매년 되풀이되는 적조 피해와 양식어민의 실의에 빠진 눈물이 이제는 더 이상 없기를 기대한다. ☹

참고문헌

1. 김학균 (2005), Harmful Algal Blooms in the Sea 해양적조 다솜출판사 제 2장 : 27-83
2. 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중 (1998), 한국연안의 적조. 국립수산진흥원. 292 pp.
3. Anderson DM (1995), Toxic red tides and harmful algal blooms: a practical challenge in coastal oceanography: Rev. Geophysics, Suppl. US National Report to the Int. Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994. pp. 1189-1200.
4. 농림수산식품부, 한국농어촌공사 (2008), 새만금수역 적녹조대책 현장적용시험(Ⅱ) 보고서
5. 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경제 (2000a), 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 2. 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지 [바다] 5: 27-36.
6. 정해진, 박종규, 김재성, 김성택, 윤주이, 김수경, 박용민 (2000b), 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 3. 1997년도 종속영양성 와편모류와 섬모류의 시공간적 변화. 한국해양학회지 [바다] 5: 37-46.
7. 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규 (2000), 전남고흥해역의 유해성 적조의 발생연구. 1. 1997년도 물리, 화학적인 특성. 한국해양학회지 [바다] 5: 10-26.
8. Stoecker DK, A Li, DW Coats, DE Gustafson, MK Nannen (1997), Mixotrophy in the dinoflagellate *Prorocentrum minimum*. Mar Ecol Prog Ser 152: 1-12.
9. Jeong HJ, YD Yoo, JY Park, JY Song, ST Kim, SH Lee, KY Kim, WH Yih (2005), Feeding by the phototrophic red-tide dinoflagellates: five species newly revealed and six species previously known to be mixotrophic. Aquat Microb Ecol 40:133-155.
10. Hansen PJ, PK Bjornsen PK, Hansen BW (1997), Zooplankton grazing and growth: scaling within the 2~2,000 μm body size range. Limnol Oceanogr 42: 687-704
11. Jeong HJ, CW Lee, WH Yih, JS Kim (1997), *Fragilidium* cf. *mexicanum*, a thecate mixotrophic dinoflagellate, which is prey for and a predator on co-occurring thecate heterotrophic dinoflagellate *Protoperdinium* cf. *divergens*. Mar Ecol Prog Ser 151: 299-305.