

적조의 이해와 고찰 Red tide and its problems in Korea

장 동 석
Dong-Suck Chang

부경대 명예교수
Professor Emeritus, Pukyong National University

1. 적조의 정의

적조(harmful algal bloom, red tide) 현상이란 “해양에 서식하는 동 식물성 플랑크톤, 원생동물 및 박테리아와 같은 미생물이 일시에 다량으로 증식되거나 또는 물리적으로 집적되어 바닷물의 색깔을 변화시키는 현상”이라고 정의할 수 있다. 또한, 적조발생은 플랑크톤 증식이라고 하는 생물 고유의 특성 외에도, 유동하는 수중에서 일어나는 점에서, 적조생물의 집적과 같은 역학적 물리 환경작용도 직접 관여하고 있다. 따라서 수중에서 부유생활을 영위하는 여러 다른 종류의 플랑크톤 중에서, 어느 종이 적조현상을 일으키는가 하는 문제는 물리적 작용 외에도 성장, 사망, 포식 등의 생물적 요인에도 큰 영향을 받는다. 이와 같은 적조 현상은 우리나라에서는 구름물 또는 적조(赤潮)로 부르고 있고, 유럽과 아메리카에서는 red tide, water bloom, dinoflagellate bloom, harmful algal bloom 등 다양하게 표현되며, 일본에서는 적조, 수화(水華), 중국에서는 유해적조 또는 유해조화(有害藻花) 등으로 불리고 있다. 그

러나 최근에는 수색을 변화시키지 않는 낮은 농도에서도 수산생물 및 사람에게 피해를 주는 적조현상을 유해적조(harmful algal bloom, HAB)라고 부르는 것이 세계적인 추세이다. 한편 적조현상이 발생했을 때의 바닷물의 색은 적조생물에 따라 다르지만 일반적으로 규조류인 *Chaetoceros* 와 *Skeletonema* 는 황갈색을, 그리고 편모조류인 *Heterosigma*, *Prorocentrum*, *Eutreptiella*는 적갈색 또는 황록색을 띤다.

보통 적조현상은 편이상 구성하고 있는 생물의 종류에 따라 규조적조, 편모조적조, 세균적조, 수색에 따라 청조, 적조, 백조 그리고 적조의 모양에 따라 락상적조와 반점적조, 발생해역에 따라 연안성적조, 외양성적조 등으로 불리고 있다.

2. 적조의 종류

1) 발생수역에 따른 적조의 종류

(1) 하구형 : 강하구에서 일어나는 적조현상으로서 강우 등에

의한 육지 오염 물질의 영향을 크게 받는다. 주로 기수종이 적조를 일으킨다.

- (2) 내만형 : 반폐쇄의 작은 만에서 발생하는 적조현상으로 천해 증양식 어장에 피해를 준다. 내만의 해황이 육지영향과 기상조건에 크게 지배되는 것처럼 적조 발생도 강우 등 육지영향과 기상조건에 영향을 받는다. 대부분의 규조류와 원생동물의 적조가 이에 해당된다.
- (3) 연안형 : 외양에 면한 연안수역 즉 연안수의 영향권에 속하는 수역에서 발생하기 쉽고 시기적으로 용승 후 약층형성 또는 수직혼합 후 수직 안정도가 증대하는 봄에 잘 발생한다, *Cochlodinium polykrikoides*, 아광층 적조 등이 잘 알려져 있다. 즉 연안에서 수직혼합, 용승, 호우 등이 필요한 조건이다.
- (4) 외양형 : 대양의 용승이 일어나는 해역 또는 지형적인 상승류가 존재하는 해역에 발생하고 그 범위가 광대하다. 이러한 적조는 어황과 매우 밀접한 관계가 있으므로 사람에게 가장 유익한 적조종의 하나이다.

2) 유해성 여부에 따른 적조의 종류

- (1) 무해적조 : 적조를 일으키는 생물이 어패류 등 해양생물이나 사람에게 직접적인 생리장애나 치사 등을 일으킬 수 있는 독성물질을 생성하지 않는 종에 의한 적조로서, 주로 규조류에 의한 적조가 여기에 속한다.
- (2) 유해적조 : 적조를 일으키는 생물이 어패류를 폐사시킬 수 있는 물질을 생산하는 종에 의한 적조로서, 최근 어패류 대량 폐사를 초래하고 있는 *Cochlodinium polykrikoides*, *Gymnodinium mikimotoi* 및 *Chattonella sp.* 에 의한 적조가 여기에 속한다.
- (3) 유독적조 : 부유생물이 생산하는 독소물질이 어패류를 독화시키고 독화된 어패류를 사람이 섭취하면 식중독을 일으키는 적조이다. 여기에는 설사성 식중독을 일으키는 *Dinophysis*와 같은 종이 여기에 속한다.

3) 생물군집의 우점도에 따른 종류

- (1) 단독종 적조(Monospecific bloom) : 단일 종이 적조군집

의 우점종으로 출현하는 적조로서 외편모조류에 속하는 (*Noctiluca*, *Cochlodinium*) 종 등이 이 범주에 속한다.

- (2) 혼합성 적조(Multispecific bloom) : 2종 또는 그 이상의 여러종이 적조를 일으키는 경우이다.

3. 적조발생 원인

우리나라에서 적조현상에 관한 기록은 삼국시대부터 찾아볼 수 있으며 1960년대부터 시작된 공업입국과 경제발달에 따라 연안수역이 부영양화됨으로써 1980년대 이후부터 적조현상이 자주 발생하게 되었다.

지금까지 적조현상이 왜 발생하는가에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나 적조원인생물이 매우 다양하고 생물의 환경·생리적 특성이 복잡하여 정확한 적조발생 메커니즘이 아직까지도 완전하게 구명되지는 않았다. 지금까지의 연구결과 적조현상이 발생하는데 필요한 환경조건으로는

첫째 일정 영양염류 농도를 유지할 수 있도록 지형적으로 외양과의 해수 교환이 적은 폐쇄성 내만해역.

둘째 육지로부터의 강우와 해저퇴적물 용출에 의하여 적조생물의 성장과 번식에 필요한 영양염류와 성장을 촉진시키는 비타민류, 철, 망간 등의 미량원소가 공급되어 바닷물 속에 풍부하게 녹아 있어야 한다.

규산염은 규조류의 증식에, 질산염과 인산염은 편모조류의 증식에 제한인자로서 작용한다.

셋째 적조생물의 광합성 활동에 필요한 일조량이 충분하고 해수의 온도가 증식에 알맞아야 한다. 온대지방에서는 해수온도가 15~25℃인 봄철에서 가을철까지 적조가 발생한다. 그리고 안정된 수괴가 형성되어야 하는 것도 한 조건이 된다.

또한 적조현상이 생물적인 현상이기 때문에 적조생물의 환경생리적 특성이 고찰되어야 한다. 적조생물의 생리특성이 종에 따라 다르므로 발생 메커니즘에도 차이가 있다. 규조류의 경우 영양염류인 규산염, 질산염 및 인산염의 용존량이 풍부하고 일조량 등의 환경조건이 적당하여 최대증식속도로 번식, 바닷물 색깔을 변색시킬 수 있는 밀도가 되면 해수는 규조류가 갖고 있는 색소체의 색

상에 따라 황갈색 또는 적갈색을 띠게 되어 적조현상이 일어난다.

반면에 편모조류에 의한 적조의 발생양상은 다량의 규산염을 필요로 하지 않으며 일반적 성장제한요인 외에 육지로부터 유입되는 비타민류, 미량금속, 특수유기물 등 증식촉진 물질의 영향을 크게 받으며 2~4개의 편모를 가지고 있기 때문에 이동하는 능력이 있으며 이동방향은 빛 또는 특수한 화학물질의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

그리고 적조를 일으키는 대부분의 편모조류는 휴면포자를 형성하는 겨울철과 같은 부적당한 시기를 해져 퇴적물 중에서 보내다가 적당한 환경이 되면 이들 포자가 발아하여 표층에 올라와서 급격히 번식함으로써 적조를 일으킨다. 최근 유기물질이 많이 퇴적된 해역에서 계절에 관계없이 같은 해역에서 같은 종에 의한 적조가 매년 발생하므로 휴면포자가 적조발생에 깊이 관여하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 편모조적조의 경우에는 어떤 해역의 특수한 환경에 적응할 수 있는 생물만이 번식되기 때문에 단독 종에 의한 고밀도 적조로 발달하게 되는 경우가 많다. 이상 설명한 바와 같이 우리나라의 적조현상은 봄철에서 가을철까지, 특히 고수온기인 여름철에 육지로부터 영양염류와 성장을 촉진하는 물질의 유입량이 많은 곳에서 주로 발생한다.

4. 적조생물의 종류

적조를 일으키는 원인생물로는 홍색유황세균이나 원생동물 외에도 藍藻(Cyanophyceae), 크립토탄(Cryptophyceae, 일명 褐色鞭毛藻), 渦鞭毛藻(Dinophyceae), 珪藻

(Bacillariophyceae), 라피도藻(Raphidophyceae), 黃金色藻(Chrysophyceae), 하프토탄(Haptophyceae), 유글레나조藻(Euglenophyceae), 프라시조藻(Prasinophyceae) 및 綠藻(Chlorophyceae)의 10분류군에 속하는 다양한 조류가 알려져 있다. 이러한 조류 중에서 남조와 규조를 제외한 조류는 편모를 가지고 활발히 운동할 수 있기 때문에, 편모충으로서 동물계의 일원으로 분류시키기도 한다. 세계적으로 보고된 적조발생 종은 약 150여종으로 우리나라에서 적조를 일으키는 종은 약 40종이다. 이 중에서 4종은 담수 내지 기수종이고 해산 종으로는 규조류가 13종, 라피도조가 3종 그리고 편조류가 20종이며, 특히 편모조류 중 3종은 수산생물에 직접적으로 피해를 줄 수 있다.

주요 적조생물에는 *Cochlodinium polykrikoides*, *Gymnodinium mikimotoi*, *Gymnodinium sanguineum*, *Alexandrium tamarense*, *Heterocapsa triquetra*, *Prorocentrum micans* 등이 있다.

5. 적조발생 현황 및 전망

1) 적조발생 현황

2006년에도 무해성 적조발생은 1월 25일 경북 포항 형산강 하구에서 *Cryptomonas* sp.에 의한 적조가 최초로 기록되었으며, 5월 이후에는 보령 연안에서 *Prorocentrum* sp. 적조가 고밀도로 발생하고 있으며, 마산/진해/거제/통영 등에서 적조가 발생하였고 7월에는 태안 연안에서도 혼합적조가 발생하였다. 적조가 발생하며 양식어패류의 집단 폐사로 인한 경제적 손

표 1. 유해적조 발생 소멸 및 피해규모

연도	구분	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년
	최초발생일(음력)	8.14 (6.25)	8.2 (6.24)	8.13 (7.16)	8.5 (6.20)	7.19 (6.14)
	소멸일(음력)	9.24 (윤8.8)	9.27 (8.21)	10.13 (9.18)	9.3 (7.19)	9.14 (8.11)
	지속기간	42일	57일	62일	30일	58일
	발생범위	완도~강릉	완도~울진	진도~강릉	완도~거제	완도~거제
	발생건수	56건	59건	45건	65건	39건
	최고밀도(개체수/ml)	29,000	30,000	48,000	5,800	25,000
	수산피해	84억원	49억원	215억원	1.2억원	10.6억원

실이 막대하며 최근에는 적조생물 중 유독외편모 조류에 의한 마비성패독, 설사성패독, 기억상실성 패독 등이 문제되고 있어서 수산피해뿐만 아니라 국민의 건강에 큰 피해를 주고 있어서 그 피해는 심각하다. 적조 예방은 수산업 분야에서만 노력한다고 목적이 달성될 수 없으며 육지로부터 오염발생 원인이 되는 유기물이 풍부한 폐수 저감대책이 범정부적으로 세워져야 할 것이다.

적조발생으로 인한 피해규모는 1995년에는 총 65건이 발생하여 764억원의 피해를 정점으로 조금씩 줄어드는 경향이 있으나 그 피해액은 여전히 심대하다. 2001년부터 2005년까지 우리나라 적조발생현황을 살펴보면 표 1과 같다.

2) 적조발생 전망

장마나 강우량이 많을 때에는 육지영양염의 연안유입으로 인해 동서남해안의 내만해역에서는 규조류나 편모조류에 의한 적조가 발생할 것으로 예상되며, 이러한 적조는 해역에 따라 국지적으로 11월까지 지속될 것으로 전망되고 있다.

6. 적조에찰과 예보

1) 적조 예찰

적조예찰이란 적조 발생상황을 사전에 파악하기 위한 일련의 조사활동을 말한다. 적조발생상황을 조기에 파악하여 이를 신속히 예보하고 적조 발생시 수산피해 방지를 위한 대책수립에 필요한 사항을 정함으로써 적조 대책업무의 원활한 추진을 목적으로 해양수산부 훈령을 제정 공포하였다(훈령 53호:1997년 5월 29일).

2) 적조 예보

적조 예보란 수산피해를 최소화하기 위하여 적조 발생상황, 유해성 적조생물 출현여부 및 적조의 진행, 전망 등을 미리 알리는 것이다. 적조발생 상황 신속통보를 위해서 적조예보 자동화 시스템, 적조화상 통신망 구축, 적조 상황실 운영, 항공기나 인공위성을 이용한 관측과 기술이 이용되고 있다.

7. 적조생물 구제

1) 생물, 물리 화학적 적조구제법

적조의 제어 대책으로는 적조의 발생, 그 자체를 방지하기 위한 적조발생방지 조치와 발생된 적조의 피해를 줄이기 위한 적조피해 경감 조치로 크게 구분된다. 적조발생 억제대책으로는 질소, 인 등의 영양염류의 부하규제와 유기오염 퇴적물의 제거, 그리고 적조발생 자극물질인 유기물 및 중금속 등을 제거하는 퇴적물 정화가 요구된다. 한편, 발생된 적조는 물리, 화학 및 생물학적 관계로서 억제시킬 수 있는데 구체적인 사항은 다음과 같다.

(1) 생물학적 방법

생물학적인 방제기법은 해양생물간의 상호작용을 이용한 방법으로서 적조생물의 포식자와 천적미생물에 관한 연구가 대부분을 차지하나, 적조생물을 치사시키는 생리활성물질을 해양생물에서 추출, 합성 이용하거나, 영양경쟁관계에 의하여 저독성 적조유발 방법 등도 연구되고 있다.

(2) 물리 화학적 구제방법

적조생물 구제 및 제거방법은 표 17-1과 같이 적조생물을 파괴, 치사시키는 화학약품 살포법, 가압부상분리(여과 또는 원심분리) 장치에 의한 적조생물 회수법, 초음파를 이용한 초음파처리법, 오존으로 적조의 독성을 중화시키는 오존처리법, 황토(점토) 및 고분자 응집제를 이용하여 적조생물을 흡착, 응집시키거나 회수하는 방법이 알려져 있다. 그러나 이들 구제효과가 있는 물질들은 연안해역에 투입, 또는 살포하였을 경우 수산생물에 피해를 주지 않고 환경변화(생태교란)를 초래하지 않아야만 한다. 또한 산업적으로 이용하기 위해서는 대량생산과 사용, 운송 및 취급이 용이하여야 하고 가격도 저렴하여야 한다. 이와같은 여러조건들을 만족시키는 적조생물 구제제는 현재까지 개발되어 있지 않은 실정이며, 황토살포에 의한 긴급 구제방법이 이루어지고 있을 뿐이다.

표 2. 적조생물 밀도별 시간별 구제효과(구제물질 투입량 : 10 g/L)

황토처리후 시간 적조생물 밀도(cells/ml)	살포직후	30분	60분
100~500	40~50%	74~76%	80~83%
500~1000	50~55%	76~78%	85~88%
1000~3000	55~65%	74~85%	84~92%

2) 황토 살포

(1) 적조생물 구제효과

황토의 주 구성성분인 규소, 알루미늄, 철 등의 금속화합물은 무기이온에 대한 강한 친화력 때문에 자연계와 수처리 공정에 흡착제로 이용되고 있다. 그러나 황토의 토취장별로 이러한 금속화합물의 구성비에는 큰 차이가 있으며, 이에 따라 적조구제효율도 19~98%범위로서 큰 폭으로 변화되고 있다. 특히 알루미늄 및 철의 구성비가 높은 점토가 적조생물의 구제효율이 탁월하였다. 특히 철의 함량이 구제효과에 중요한 역할을 하였다.

(2) 적조농도별 구제효율

적조생물이 저농도일 때에도 황토를 살포할 경우 구제효율이 높았으며 적조생물의 밀도가 높을수록 구제효율도 높았다.

(3) 황토입자크기별 적조구제 효율

황토입자크기별 적조생물 구제효율은 황토입자 50 μ m 이하에서 가장 구제효율이 높았고 입자가 클수록 구제효율이 낮았으나 입자크기별로 그다지 큰 차이는 보이지 않았다. 자연황토의 경우 입자크기는 지역에 따라 다소 차이가 있었으며 50 μ m 이하의 입자가 16~29% 범위이었다. 50 μ m 이하로 분쇄한 황토가 자연상태의 황토에 비하여 구제효율은 다소 높았으나 자연황토보다 분쇄경비 및 포장비용이 과다 소요되는 등 경제성 측면에서 문제가 예상된다. 또한 실험에 사용한 적조생물밀도에 따라서도 구제효율에 차이가 많았다.

(4) 황토의 수주내 N, P 흡착 제거율

황토 10 g/L를 살포후 1시간 뒤의 수주내 질산질소와 인산인

의 흡착율을 조사한 결과 인산인의 경우 85~96%, 질산질소의 경우 16~43%의 흡착율을 보였으며, 인산인의 흡착효율이 질산질소보다 월등한 것으로 나타났다. 또한 시험수의 영양염 농도가 높을수록 흡착효율이 다소 증가하였다.

(5) 황토 피복에 따른 퇴적물로부터의 N, P 용출 억제 효과

황토 피복에 따른 NH₄-N 및 PO₄-P의 용출 억제효과는 대조구(황토 미피복구)에 비하여 황토 피복구가 실험기간 경과에 따라 뚜렷한 효과가 나타났으며, 적조해역에 황토살포시 황토 자체로부터 NH₄-N의 용출량을 줄이기 위하여는 장기간 공기 노출층의 황토사용은 주의가 필요한 것으로 나타났다.

(6) 황토살포가 양식생물에 미치는 영향

피조개와 굴의 성패는 전 실험기간(40일) 동안 생존율이 95%이상으로서 양호한 생육상태를 나타내었으며, 피조개 치패의 경우 생존율은 황토살포구가 92~100%이상으로서 황토 미살포구의 88%보다 오히려 생존율이 높았다. 또한 실험생물의 활력상태는 전 실험기간동안 일반적으로 양호한 상태였다.

피조개 성패의 생리적인 영향을 조사하기 위하여 실험 개시 후 약 10일 간격으로 총 4회에 걸쳐 시료를 채취하여 생체내 헤모글로빈 농도를 측정하고 결과 황토살포구가 대조구(황토 미살포구)보다 다소 높은 농도를 나타내었다.

전복 치패의 황토 농도별 영향 실험에서 전 시험구와 전 시험기간 동안 100%의 생존율을 보였으며 전복치패 장내용물 조사에서는 적조생물 시험구를 제외한 전 시험구에서 24시간 후 전복 치패의 장에서 황토섭취가 관찰되었으나, 회복시험 48시간 후 장내용물 관찰시 황토 전량 배설을 관찰할 수 있었다.

8. 국내외 연구동향

1) 국내 연구 동향

- (1) 적조 조기 탐색 및 예측 기술 연구
- (2) 적조생물의 생리·고생태적 특성 연구
- (3) 해수의 전기분해 물질인 전해수와 황토 혼합액에 의한 적조 구제기술연구 등 적조구제 및 피해 최소화 기술 연구를 수행 중에 있다.

2) 국외 적조 연구 동향

- (1) 적조원인 생물에 관한 연구
미국, 일본, 동남아, 유럽연안 등에서 발생하는 적조 원인 생물에 관한 연구를 계속하고 있는데 주 원인생물이 나라마다 다르며 피해 또한 다양하다.
- (2) 원인 생물인 *Cochlodinium*을 낮은 농도에서 신속하게 검출하기 위해서 분자유전학 방법과 remote sensing을 이용하는 방법 연구
- (3) 황토 살포나 폭기 등 물리적 방법과 세균, 섬모충 등을 이용하여 적조원인 생물을 제거하여 수산피해 최소화를 위한 연구 등을 수행하고 있다.

3) 적조와 관련된 국가기구

- (1) 한·중·일 적조전문가 협의체(EASTHAB) : 동아시아 유해적조 공동감시 네트워크 구축 및 적조연구 정보와 자료 교환, 적조발생에 대한 공동대응
- (2) 국제 적조생태 해양학적 연구계획(GEOHAB) : 적조문제에 대한 연구, 개발 프로그램으로 국제적인 적조정보 교류와 상호분석을 통한 공동연구를 추진중
- (3) 그 외 국제해양학위원회(IOC), 국제해사기구(IMO), 아태 경제기구(APEC), 선진국 경제협력개발기구(OECD), 국제 해양개발 위원회(ICES), 북태평양해양과학위원회(PICES), 해양과학위원회(SCOR) 등이 있다.

9. 맺는 말

적조는 어떤 원인 미생물이 비이상적으로 대량 번식하여 물속의 산소를 결핍시켜 수산생물의 대량 폐사로 경제적 손실을 가져오고, 한편으로는 유독생물의 출현으로 마비성패독을 비롯하여, 설사성 또는 기억상실성패독 발생으로 산업피해는 물론 인명피해까지 초래하는 크나큰 자연 재앙으로 연결되기 때문에 적조 피해방지는 큰 의의를 가지게 된다. 적조피해를 최소화하기 위해서 적조 원인 생물의 발육저지나 적조예보 등 대책을 세우고 있으나 근본적인 대책은 못되는 것이다.

왜냐하면 적조 발생의 원인을 제거하지 않고는 황토 살포나 적조 예보 등은 임시방편에 불과한 것이다. 연안 해역의 매립으로 넓은 갯벌이 없어지니까 육지에서 흘러 들어오는 유기물질들을 분해 청소하는 생물의 서식지가 없어지는 것도 문제지만 연안 공장이나 양돈장, 양계장, 도축장 등으로부터 흘러 들어오는 유기물질들은 적조원인 생물의 대량번식으로 연결되어 적조 피해는 매년 연례 행사처럼 되어 버렸다.

따라서 적조 원인 생물의 생태 연구, 원격 탐사, 적조 예보나 퇴치 방법연구 등도 중요하지만 친환경적인 산업의 육성, 폐수 종말처리장의 획기적인 확충 등 수질오염 방지대책을 확립하여 적조 원인 생물의 blooming을 막을 수 있는 범국가적인 대책을 요망하는 바이다. ¶