

유해 적조 피해 발생과 대책



김 학 군 >>
부경대학교 해양학과

1. 서 언

최근 우리나라 뿐만 아니라 전 세계연안에서 유해 적조가 발생하여 해양생태계와 공중위생에 많은 피해를 야기하고 있다. 유해적조란 바다의 식물성 또는 동물성 플랑크톤이 일시에 대량번식 하거나 집적함으로써 바다물의 색이 적조를 일으키는 생물의 종류에 따라서 붉은 색, 황갈색 또는 적갈색 등으로 바뀌어 수중의 용존산소를 소비함으로써 해양생물에 나쁜 영향을 미치거나, 또는 수중의 미생물의 밀도가 낮아 수색을 변화시키지 않더라도 독소(toxin)를 생성하고 그것을 포식한 어패류가 독화됨으로서 사람에게 피해를 가하는 소위 마비성 식중독과 같은 현상을 말한다. 이와 같은 유해적조는 지금까지의 보고에 의하면 기원전부터 유해적조가 발생하였다는 기록을 찾아볼 수 있으며 우리나라의 삼국시대에도 적조현상이 발생했다는 역사 기록들이 있으며 이조시대에는 비교적 상세한 기록들이 많다. 한 예로서 약 500년 전 이조

대종 때의 기록을 소개하면; “경상도 機張의 林乙浦에서부터 加乙浦에 이르기까지 물이 黃. 黑. 赤色으로 변하였는데 농도가 粥과 같고 鰻魚와 雜魚가 모두 죽어서 물위로 떠올라왔다” 라는 기록이 있다. 이 기록으로 볼 때 이조시대에도 수색이 붉고 죽과 같은 고밀도 적조가 발생하여 수산생물을 폐사시키는 유해성 적조도 발생하였음을 알 수 있다.

이와 같은 적조현상이 최근 우리나라 동·서·남해안의 대부분의 연안에서 발생하여 수산 피해는 물론 공중위생상의 심각한 문제를 야기하고 있다. 특히 1995년도에는 유해성 적조가 남해, 동해연안에서 광역적으로 장기간 발생하여 764억원의 막대한 양식 피해를 일으킴으로서 양식 산업이 송두리째 흔들렸었다. 그리고 최근에는 유해적조생물이 어·패류를 독화시켜 사람이 그것을 먹으면 신체가 마비되는 마비성 식중독현상을 일으키는 종이 있어 양식 산업은 물론 사람의 건강까지도 위협을 주고 있기 때문에 유해적조현상이 심각한 사회경제적인 문제로 대두되었다. 이와 같은 유해적조에 의한 수산피해가 급격히 증가함으로써 우리나라에서는 1990년 제정된 “농어업재해대책법” 제2조(정의)에서 “어업재해”라 함은 이상조류·적조현상, 태풍·해일 기타 어업재해대책심의 위원회가 인정하는 자연현상으로 인하여 발생하는 수산양식물 및 어업용 시설의 피해를 말한다.” 로 규정함으로써 유해적조에 의한 피해를 자연재해로 간주하

고 있으며 동 법에 따라서 유해적조에 의한 피해가 발생하였을 때 국가에서는 복구비나 종묘구입대와 같은 형태의 지원을 하고 있다.

지금까지의 보고에 의하면 이와 같은 유해적조 현상이 거의 매년 전 세계 연안에서 발생하여 양식 산업을 중심으로 각종 해양산업에 피해를 일으키는 물론 식중독과 같은 인간의 건강에 미치는 피해가 급격히 증가함으로써 유해적조 피해예방, 즉 적조재해를 방지하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이미 일본, 노르웨이, 미국 및 프랑스 등 해양 중시국가들은 상당한 어업 해뿐 만 아니라 인명 피해를 경험한 국가에서는 유해적조를 예방하고 피해를 경감시키기 위한 연구와 대책을 강구하기 위하여 많은 노력을 하고 있다. 그러나 유해적조 발생을 조기에 예보하고, 실용적인 방제대책은 개발하기 어렵고, 게다가 유해적조 발생은 앞으로 더욱 증가할 것으로 예측됨으로서 문제의 심각성을 깊이 이해할 수 있다. 설상가상으로 최근에 유해적조를 일으켜 어패류의 대량폐사를 초래하거나 어패류를 독화하여 식중독을 일으키는 유해성 해양 플랑크톤의 경우 ballast water 등으로 인하여 다른 해역으로 확산되고 있음이 밝혀짐으로서 유해 및 유독종의 국제적인 문제로 부각되었다. 따라서 UNESCO, UNEP, IOC, SCOR, APEC, IMO, ICES, PICES 등 국제기구에서도 유해적조의 국제적인 전파와 피해 상습발생 등의 당면 문제의 심각성을 고려하여 유해적조의 발생원인 규명과 실시간 예보기술 개발을 역점사업으로 추진하고 있다. 아울러 유해적조 정보와 대책기술의 상호 교류 등 국제협력을 증진할 수 있는 방안을 강구하는데도 많은 노력을 기울이고 있다.

2. 유해적조의 발생 상황

우리나라연안에서 적조가 발생하였다는 기록은 앞에서 언급한 바와 같이 삼국유사, 고려사 등에서 찾아볼 수 있으나(한, 1997) 이들이 유해적조인가에 대

해서는 정확히 알 수 없다. 그러나 역사적인 기록이 매우 잘 되어있는 이조시대의 기록을 보면 이미 앞에서 언급한바와 같이 유해적조가 발생하여 수산생물이 폐사했다는 기록이 많이 있다. 비교적 과학적인 적조에 관한 조사보고는 1960년대 이후에 이루어졌고 최초의 과학적인 연구보고는 1967년 박과 김(1967)에 의하여 이루어졌다. 이후 우리나라 연안에서 적조조사는 1970년대 후반부터 국립수산과학원을 중심으로 진행되었으며 1990년 이후에는 적조의 발생원인과 피해방지 대책기술개발 등 다양한 연구가 비교적 활발하게 실시되었다.

한편 지금까지의 보고에 의하면 서식하고 있는 미소조류(marine microalgae)는 약 5,000여종인데 이 중에서 피해를 일으키는 유해성 또는 유독종의 수는 현재까지는 2% 미만이나 점점 증가하고 있는 실정이다. 현재 약 150여종이 피해를 일으키고 있으며 학자들에 따라서 차이가 있으나 와편모조류가 80여종, 규조류가 40여종, Prymnesiophytes가 15종, Raphidophytes가 10종으로 알려졌다. 이들 유해적조생물은 해양환경이나 해양생물에 유해한 영향을 일으키는 조류독소(phycotoxin)을 생산하는 남조류와 와편모조류가 중요하다. 한편 굴, 홍합 등의 어패류의 먹이생물로서 가장 중요한 규조류도 기억상실성 독소를 생산하거나 또는 아가미를 폐쇄(clog)시키기도 하며 *Coscinodiscus*는 과도한 유지류를 생산하여 해수표면을 덮어 바다 새(sea bird)가 죽게 되었다는 보고도 있다. 우리나라에서는 규조류가 주로 적조를 일으킨 1970년대까지는 규조류 분해시의 용존 산소 소비에 의한 피해가 주류였으나 1980년대부터는 유해적조가 발생하여 양식어패류를 폐사시켜 수산생물에 피해를 일으키고 있다.

우리나라에서는 어패류를 폐사시키는 종은 *Cochlodinium polykrikoides*, *Karenia mikimotoi*, *Gyrodinium* sp. nov. 등이고 다른 나라의 연안 해역에서 유해적조를 일으켜 수산생물의 폐사를 초래하는 적조원인생물을 보면 일본연안에서는 *Karenia mikimotoi*, *Noctiluca scintillans*,

표 1. 해양 어패류 식중독 독소의 증상과 건강 위해

독소(독소의수)	식중독 증상	용해성	신체작용 부위
Brevetoxin (10)	신경성 패독(NSP)	지용성	신경, 근육, 뇌, 폐
Ciguatoxin(다수)	시콤파테라 어류독(CFP)	지용·수용성	신경, 근육, 심장, 뇌
Domoic acid(11)	기억상실성 패독(ASP)	수용성	뇌
Okadaic acid(3)	설사성 패독(DSP)	지용성	효소
Saxitoxin(18)	마비성 패독(PSP)	수용성	신경, 뇌

Chattonella antiqua, *Heterosigma akashiwo*, 그리고 최근에는 *Heterocapsa circularisquama* 종이 굴과 진주조개를 *C. polykrikoides* 종이 어패류를 폐사시키고 있다. 동남아시아 연안수역에서는 *Pyrodinium bahamense*, 유럽 연안에서는 *Gymnodinium aureolum*, 그리고 북아메리카 연안에서는 *Gymnodinium breve*, *G. sanguineum*, *Aureococcus anophagefferens*, *Heterosigma akashiwo* 등이 고밀도 적조를 일으킴으로서 수산 피해를 일으키고 있다. 특히 1988년 스웨덴과 노르웨이의 Skagerrak해협 연안에서는 Haptophyceae에 속하는 *Chrysochromulina polylepsis*종에 의한 적조가 발생하여 양식연어 수백톤이 폐사하였다. 그리고 캐나다 동해안에서도 최근에 *H. akashiwo*가 어류양식 피해를 일으키고 있다. 한편 일본에서는 최근 *H. circularisquama* 종이 새로운 적조생물로서 출현하여 굴과 진주조개를 치사시키는 수산 피해를 일으키고 있으며 미국에서는 최근 외형적 특성으로 인해 유령 와편모조류(Phantom dinoflagellate)라고 불리는 *Pfiesteria piscicida*라는 소형 와편모조 적조생물이 어류뿐만이 아니고 사람의 건강까지도 위협을 입히는 등 새로운 유해성 적조생물이 출현하여 매년 많은 피해를 야기하고 있다.

최근에는 전 세계연안에서 마비성(PSP; paralytic shellfish poisoning), 설사성(DSP; diarrhetic shellfish poisoning), 기억상실성(ASP; amnesic shellfish poisoning), 신경성(NSP; neurotoxic shellfish poisoning), 시콤파테라(CFP; ciguatera fish poisoning) 패독현상을 일으키는 유해적조생물이 출현하여 공중위생상 심각한 문제를 일으키고

있다.

지금까지의 보고에 의하면 와편모조류에 속하는 Alexandrium종은 마비성 식중독(PSP)을, Dinophysis종은 설사성 식중독(DSP)을 그리고 규조류인 Pseudonitzschia 에 속한 종은 기억상실성 식중독(ASP) 을 일으킨다. 세계적으로 가장 자주 발생하는 마비성 식중독을 일으키는 종은 유럽, 북 남미, 한국, 일본 등지에서는 대부분이 Alexandrium spp. 이고, 필리핀 등 동남아시아 아열대 수역에서는 Pyrodinium banamense종이다. 한편 북미와 유럽 연안에서는 Gymnodinium catenatum과 Prorocentrum lima종도 마비성 패독을 일으키고 있다. 한편 열대와 아열대 지방에서 발생하는 Ciguatera독소는 Gambierdiscus toxicus종이다. 이와 같이 어패류를 대량으로 폐사시키거나 식중독과 같은 공중위생상의 문제를 야기하는 유해적조에 관한 관심이 매우 높아 국가간, 국제기구간에 연구와 대책을 수립하기 위한 활동이 활발히 진행되고 있다.

3. 유해적조의 피해 발생 상황

3.1. 유해 적조 피해 발생 양상

최근에 전 세계에서 발생하는 적조현상은 광역화, 상습화, 고밀도화, 유독화 및 장기화되어가고 있으며 어떤 연안 해역에서는 새로운 종(novel species)이 유해적조현상을 일으키고 있다. 이와 같은 유해적조 현상으로 인하여 수산생물이 대량으로 폐사할 뿐만 아니라 일부의 적조생물은 매우 낮은 생물밀도에서도

표 2. 유해적조에 의한 사회경제적인 직 간접 피해

피해의 형태	사람 피해	어패류 피해	형태
공중위생	식중독, 작업감소, 치료비	어패류 채취, 판매 금지	직·간접
수산업	수산물 소비위축	대량폐사, 어장폐쇄	직접
관광과	스포츠관광, 숙박		간접
감시와 관리	감시 및 관리비		간접

어패류를 독화하여 식중독을 일으키고 있어 사회경제적으로 큰 문제를 일으키고 있다. 일반적으로 유해적조가 발생하여 사회경제적으로 야기할 수 있는 피해는 사람의 건강위해 등 공중위생 피해, 어패류의 폐사, 어촌관광과 해양 레저 활동의 피해, 그리고 유해적조를 감시하고 관리하는데 필요한 경비 등 직간접적인 피해를 들 수 있다.

이와 같이 유해적조가 발생하면 우리나라에서는 양식 어패류가 대량으로 폐사하는 직접적인 수산 피해가 발생하므로 여기서는 주로 수산피해를 중점적으로 설명하겠다.

일반적으로 적조현상이 발생하여 일어나는 피해는 수중의 산소소비에 의한 양식생물 폐사와 어패류를 독화하여 발생하는 식중독 현상을 들 수 있다. 유해

적조의 피해양상은 인체건강 위해, 해양생물 피해와 생산성감소, 생태계 구조와 기능변형, 연안환경의 미적가치 손상, 식중독에 의한 인체 건강 피해 등을 들 수 있다. 이와 같은 적조 피해는 경제적 손실을 초래할 뿐만 아니라 인간의 해양활동을 위축시키고 있다. 특히 고밀도 적조현상이 장기간 발생하면 플랑크톤의 양이 많아짐으로서 해수의 밀도, 탁도 및 광선의 입사량 등에 영향을 미친다. 또한 적조가 발생한 해역에서는 해양세균의 조성과 분포가 달라지고 많은 유기물질의 분해 할 때 일어나는 산소 소비로 인하여 해저에 빈산소(hypoxia) 또는 무산소(anoxia) 현상을 초래하는 등 해양 생태계를 변형시킬 뿐만 아니라 수려한 연안의 수색을 변형시키고, 바다의 냄새를 변형시키는 등 미적 손상을 야기한다. 그러나 한편으로

표 3. 유해 적조발생에 의한 해양생물 피해

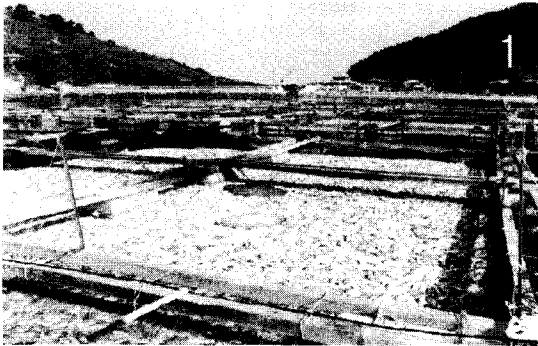
구분	피해양상	피해원인	초래현상
직접 피해	중독사	○ 적조생물의 독성물질 생산	Biotoxin 생산
		○ 세균이 생산하는 독성물질	
		○ 적조생물 등 유기물 분해시 유독성분 생성	독성분해산물
	질식	○ 활성산소(ROS) 생성	효소변형, DNA 손상, 세포손상
		○ 동식물 부유생물의 호흡작용	수중용존산소 소비
		○ 생물사체 분해시의 저층용존산소 소비	무산소수괴 형성
		○ 아가미 폐색(Gill clogging)으로 호흡장애	Gas교환기능저하
		○ pH상승과 수중탄소의 증가로 생리장애	
		○ 상대적 산소부족과 수질악화	
		○ 적조생물 돌기물이 아가미에 손상 피해 야기간접 피해	
간접 피해	생산성감소	○ 회유어 도피, 자원 가입량 감소, 재생산 부진	가입량 감소
		○ 부착생물과의 경쟁, 해수교환 불량	성장둔화
		○ 유기물→ 퇴적저서생물상 변화	갑각류, 패류→ 다모류
		○ 환경질의 변화(점도, 탁도, 조도)	광합성 저하
	2차 피해	○ 수산식품 가격하락, 해역이용행위 감소	Halo effect
		○ 식중독 [마비성 및 설사성 식중독] 유발	건강 피해

는 적조현상이 발생함으로써 육상의 유기오염물질이 일차생산으로 연결되어 패류의 생산량이 증가함으로써 오염물질을 처리하고 어민소득도 올리는 효과가 있다는 보고도 있다.

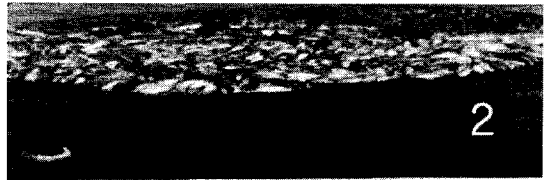
비교적 지금까지는 적조현상에 의한 피해는 어패류 폐사발생과 어패류의 독화에 의한 식중독발생이 주류였으며 피해원인을 제공하는 생물은 한쪽에만 영향을 미치는 사례가 대부분이었다. 그러나 미국 동부

의 North Carolina에서 *P. picicida*란 종은 어류를 치사시킬 뿐만 아니라 사람의 건강을 위협하는 양면 피해를 일으키는 적조생물이 발견되어 보고됨에 따라서 적조 피해를 방지하기 위한 노력에 더욱 많은 연구 인력과 경비를 지출해야 한다.

표 3에서 본 바와 같이 직접피해는 그래도 어느 정도 추정이 가능하지만 간접피해는 추정하기가 매우 어렵다. 우리나라의 경우 해양수산부가 주관이 되어



1. 어류폐사(한국, 2002)



2. 어패류폐사



3. 어류폐사(남아프리카, 1994)



4. 어류폐사(미국)



5. 가축 피해



6. Humpback고래(미국, 1987))

그림 1. 유해적조 피해(출처:1(한국 2002); 2, 3, 4 5(GEOHAB, 2001); 6(Anderson, 1994).

해양오염방지사업을 지속적으로 추진하고 있으며 유해적조 피해를 최소화하기 위한 연구와 기술개발에 상당한 노력을 기울이고 있어 현재 수준의 유해적조가 발생할 경우엔 직접적인 수산피해가 대폭적으로 증가하지는 않을 것으로 보인다. 그러나 유해적조를 일으키는 원인생물이 보다 유독한 종으로 바뀌거나 최근에 보고된 바와 같이 사람의 건강에 직접적으로 피해를 일으키는 유해적조생물이 우리나라의 연안에서도 출현할 경우에는 사람의 건강피해가 크게 증가할 것으로 보인다. 한편 적조현상이 알려진 것처럼 반드시 환경과 생물에 나쁜 영향을 미치는 부정적인 것만이 있는 것이 아니라 연안의 부영양화현상을 생산을 통하여 안정시키는 등 해양 생태계내 물질순환의 균형을 이루고 해양의 항상성(homeostasis)을 유지하는데 필요한 긍정적인 면도 있다.

3.2. 유해 적조 피해 사례

적조현상이 해양생물에 미치는 직접적인 피해는 크게 양식생물의 대량폐사와 어패류의 독화현상이다. 적조에 의한 수산피해는 양식 산업이 발달한 일본에서 1950년대부터 발생하기 시작하였고 우리나라에서는 1970년대 후반부터 발생하였다. 그러나 최근에는 표 5와 같이 중국(홍콩포함), 노르웨이, 프랑스, 영국, 미국 및 캐나다 등 전 세계연안에서 발생하고 있다.

우리나라의 유해 적조피해에 대한 관심은 양식생물에 대한 피해가 발생하여 사회경제적인 문제를 야기함으로써 고조되었다. 비교적 큰 피해는 1978년 및 1981년에 일어났으며 특히 1981년 진해만에서 *Gymnodinium* type ,65(현재는 *Karenia mikimotoi*)유해적조가 발생하여 17억원의 피해를 일으켰다. 이후 1992년 *Gyrodinium* sp. nov. 에 의

한 양식 피해가 발생하여 94억원의 수산 피해를 일으켰고 급기야 1995년 미증유의 대규모 *C. polykrikoides*적조가 남해와 동해연안에서 약 2개월간 지속하면서 지금까지 최고액인 764억의 수산 피해를 일으켰다.

한편 일본에서도 1969년 이후부터 *Chattonella* 적조가 상습적으로 발생하는 세토내해에서 어업 피해가 발생하기 시작하였으며 1972년 방어가 대량으로 폐사하여 71억엔의 수산피해를 일으켰다. 최근에는 새로운 종인 *Heterocapsa circularisquama* 적조로 인하여 히로시마만 등에서 굴 폐사가 대량으로 발생하고 있다. 특히 최근에는 우리나라에서 매년 피해를 일으키는 *C. polykrikoides* 종이 2000년 7월에 일본 규슈(九州)의 구마모도현(熊本縣) 八代海에서 적조를 일으켜 잣방어 16억5200만엔, 방어 13억5천만엔, 참복 5억1천만엔 등 약 35억8300만엔, 우리 돈으로 환산하면 약 42억원의 수산피해를 일으켰으며 이것은 1972년 일본 紀伊水道에서 발생한 약 71억엔의 수산피해 다음으로 발생한 두 번째로 큰 규모이다. 또한 이종은 남미의 칠레에서도 금년 8-9월에 적조를 일으켜 어류폐사를 일으키고 있다.

이외에도 1988년 스웨덴, 노르웨이, 미국, 1998년 홍콩, 1999년 캐나다 등 세계 각국에서 대규모의 수산피해가 발생하였으며 1999년 페르시아만의 쿠웨이트 연안에서도 *Gymnodinium*적조에 의해 양식피해가 발생하였다. British Columbia에 있는 연어가두리 양식장에서는 구조류인 *Chaetoceros convolutus*, *C. concavicornis* 종의 적조밀도가 5,000cells/l 이상일 때 이 들 구조류의 수염이 난 긴 가시가 연어의 아가미를 손상시켜 아가미의 가스교환에 장애를 일으키고 과도한 점액질을 생산함으로써 어류가 죽었다고 보고하였다.

미국에서는 1987-1992년의 6년간의 유해적조로

표 4. 1995-2005년 유해적조 발생에 의한 수산피해(억원)

구분	합계	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
적조	1,191	764	21	15	1.34	3.2	2.6	88.1	49	236	1.2	10

인한 공중건강(public health), 상업적 어업(commercial fishery), 여가 관광(recreation/tourism), 및 감시와 관리(monitoring/ management)에 대한 4개 분야별 피해를 추정하였다. 동 보고에 의하면 6년간의 총 피해액 범위는 최저 33백만불(US\$), 최대 81백만불로서 평균 49백만불이었다(Anderson et al., 2000). 좀 더 상세히 살펴보면 ASP, NSP, PSP 등의 식중독에 의한 공중건강 피해 범위가 미화(US\$) 18백만불에서 25백만불로서 평균 22백만불에 총 피해액의 45%였다. 그리고 상업적인 어업피해액은 피해범위가 13백만불에서 25백만불로서 평균 18백만불로서 전체의 37%를 점유하였다. 여가와 관광피해액은 최대 29백만불로서 평균 6.6백만불로 전체의 13%를 점유하였고 모니터링과 관리에 대한 경비는 최저 2백만불에서 2.1백만불로서 평균 2백만불로서 전체의 4%이하였다.

이상 설명한바와 같이 적조현상으로 인한 수산생물 피해가 전 세계의 연안에서 경년 증가하고 있으며 최근에는 유해적조의 출현빈도가 증가하고 적조발생해역이 광역화됨으로서 수산피해도 거의 전 연안에서 수시로 발생하여 지역경제에 심한 타격을 주고 있다.

게다가 유해적조의 직·간접적 피해영향을 받고 있는 대상해역들은 생산성이 높고, 시공간적으로 다양하게 이용하고 있는 연안해역임으로 유해적조가 경제적으로뿐만 아니라 인간 해양 이용활동을 위축시키는 악재로서 작용하고 있다.

그러나 유해적조의 이동확산성, 발생 예측 어려움, 해저 잠복성, 새로운 유해종의 출현, 시공간적 대규모 발전성, 적극적 대처수단의 미개발 등으로 인하여 문제해결에 큰 어려움을 겪고 있다.

이외에도 매년 봄철에 어패류를 독화시켜 마비성 식중독(PSP)을 일으키는 *Alexandrium tamarense* 종과 설사성 식중독을 일으키는 *Dinophysis* spp. 및 기억상실성 식중독을 일으키는 *Pseudonitzschia* spp.도 출현하고 있다. 이와 같이 한반도 주변해역에서는 최근에 유해적조가 상습적으로 발생하여 해양생태계와 식품안전에 많은 문제를 야기하고 있다. 이와 같은 수산피해를 동반하는 유해적조가 상습적으로 발생함에 따라 해양수산부 산하의 국립수산과학원, 지방해양수산청, 해양경찰청이 지방자치단체와 공조하면서 매우 체계적인 유해적조 모니터링 시스템을 운영하면서 이들 유해적조로 인한 환경훼손과 수산피해

표 5. 적조발생과 주요 수산피해(어류 폐사) 발생실적(김, 2005)

발생해역		일시	적조생물	해대상	피해액	비고
한국	진해만	1981	<i>Karenia mikimotoi</i>	어패류	17億원	조, 1981 / 박, 1982
	남.동해안 연안	1995	<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	어패류	764億원	김 등, 1997
	사량도	1992	<i>Gyrodinium</i> sp. nov.	어류	94億원	국무총리실, 1999
일본	碓磨灘	1972	<i>Chattonella</i>		71億엔	岡市友利, 1997
	熊野灘	1984	<i>Gymnodinium</i>		46億엔	
		2000	<i>Cochlodinium polykrikoides</i>		39億엔	
	廣道灣		<i>Heterocapsa circularisquama</i>	패류		Matsuyama et al., 1995
홍콩	Tolo항	1998	<i>Gymnodinium</i>		40million	Kueh 등, 1999
미국			어패류, 포유류	50million/yr	Burkholder et al., 1992	
캐나다	British columbia		<i>Heterosigma</i> sp.	어류		Whyte, 2000
노르웨이	발틱해	1988	<i>Chrysochromulina polylepsis</i>	연어류		Lindahl and Dahl, 1990
뉴질랜드	Big Glory Bay, Stuart Island	1989	<i>Heterosigma akashiwo</i>	양식연어 chinook	NZ\$12 million	Chang et al., 1990
호주	South Australia	1998	<i>Chattonella marina</i>	양식 bluefin tuna	Aus\$45 million	Hallegraeff et al., 1998

를 최소화하려고 노력하고 있다.

3.3 금후의 수산 피해 전망

앞으로도 유해적조가 지속적으로 발생하여 해양생태계를 훼손시키고 해양생물을 폐사시키며 어떤 유독종은 식중독을 일으킴으로서 사람의 건강에 위해를 미칠 것이라는 사실은 쉽게 인정할 수 있다. 그러나 그 피해의 정도와 가치를 예상하는 일은 매우 어려운 일이다. 일반적으로 유해적조와 같은 해양 이상 현상으로 인한 피해를 예상하기 위해서는 해양 이상 현상이 언제 어디서 어떤 규모로 발생하고 또한 직접 피해대상이 되는 환경과 수산업이 어떻게 변화되고 이들이 갖는 경제적인 가치가 얼마인가를 예측해야 한다. 또한 유해적조가 발생함으로써 발생할 수 있는 간접적인 피해 예를 들면 수산물의 소비기피, 연안 관광수입의 감소 등 비교적 피해추정이 어려운 간접 피해에 대해서도 많은 객관적인 정보와 자료가 확보되었을 때 비교적 현실적인 피해범위를 예측할 수 있다.

지금까지 피해에 관한 연구가 비교적 많지 않다. 이와 관련하여 2000년 미국에서 유해적조의 연간 피해액 추정에 관한 Woods Hole 해양연구소의 Sea Grant 보고서가 비교적 많은 부분을 설명하고 있어 여기에 언급 하고 이를 근거로 우리나라의 금후 유해적조의 예상 피해를 추정하여 보고저 한다. 미국에서 앞에서 언급한바와 같이 유해적조에 의하여 발생할 수 있는 피해로서, 냄새를 수반하는 적조의 발생 등 환경의 미적훼손(aesthetic), 양식 어패류와 해양 포유류-조류 등 폐사, 식중독 등 공중위생건강 피해, 자치어 훼손 등 먹이망 피해 등은 직접적인 피해에 속하고 연안의 여가, 스포츠 활용 제한 등은 간접적인 피해에 속한다. 이와 같은 관점에서 미국에서 지난 1987-1992년간의 측정 가능한 유해적조 해를 집계하였다(Anderson et al., 2000). 그러나 동 피해액은 자료수집의 한계로 인하여 과소평가할 가능성이 있음을 지적하고 있다. 그리고 여기서 피해를 야기하

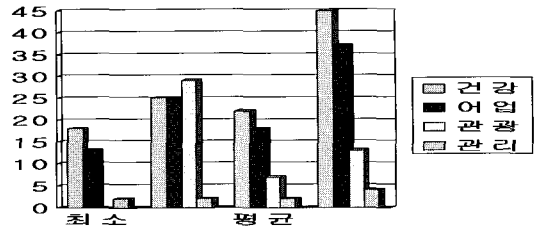


그림 2. 미국에서 1987-1992년 발생한 유해적조 피해 추정액(Anderson et al., 2000)

는 경제적인 영향(economic impacts)은 생산과 시장요소에 미치는 손실, 환경감시와 관리에 필요한 경비, 기타 적조가 발생하지 않았을 때에 부과하지 않아도 될 경비들 포함하고 있다.

미국의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 공중위생 피해가 45%, 상업어업 피해가 37%, 관광, 스포츠 피해가 13%, 기타 적조관리에 필요한 경비가 4% 범위였다. 한편 미국의 경우 한국 사람들 보다 수산물 소비가 적고 또한 고가로 판매되는 횡감의 소비가 적어 상업어업 피해가 우리나라에 비하여 현저하게 적은 액이 될 것으로 생각된다. 그러나 여기서는 참고자료로 활용하기 위하여 미국의 기준에 의하여 1995년부터 2005년까지의 기존 보고된 표 4의 우리나라 수산 피해를 근거로 1995년부터 2005년까지 11년 동안의 피해범위를 추정하였다. 이에 따르면 상업어업 피해가 최대로 큰 해는 1995년 764억원을 그리고 가장 작은 해는 2004년 1억2천만원의 피해를 그리고 11년간 평균 108억을 기준으로 하여 산정한 다른 산업에 대한 피해는 다음 표 6과 같다.

이상 설명한 바와 같이 유해적조의 출현빈도가 증가하고 적조발생해역이 광역화됨으로서 수산 피해도 거의 전 연안에서 수시로 발생하여 지역경제에 심한 타격을 주고 있으며 앞으로도 그 피해는 현재보다 더욱 증가할 것으로 전망하고 있다. 게다가 유해적조의 직·간접적 피해영향을 받고 있는 대상해역들은 생산성이 높고, 시공간적으로 다양하게 이용하고 있는 연안 해역들이어서 유해적조가 경제적으로뿐만 아니라 인간 활동을 위축시키는 악재로서 작용하고 있으며 앞으로도 계속될 것으로 보인다. 특히 유해적조의 이

표 6. 미국에서 추정한 유해적조 피해에 근거하여 1995-2005년 한국에서 발생한 유해 적조피해 중의 수산피해를 근거로 한 다른 산업의 피해 추정액

구분	1995-05년 수산피해 근거로 추정된 피해액(억원)				금후의 추정	
	비율(%)	최소	최대	평균	자생 적조	외래종유입
총액	100	3.2	2,044	289	증가	증가
공중위생	45	1.5	929	131	증가	대폭 증가
산업어업	37	1.2	764	108	증가	증가
관광,스포츠	13	0.4	268	38	대폭 증가	증가
적조관리	4	0.1	83	12	증가	증가

동화산성, 발생 예측 어려움, 해저 잠복성, 새로운 유해종의 출현, 시공간적 대규모 발전성, 적극적 대처수단의 미개발 등으로 인하여 문제해결에 큰 어려움을 겪고 있는 현실적인 어려움을 고려할 때 만약 직접적으로 사람의 건강에 위해를 가할 수 있는 유독종이 우리나라의 연안 해역에서 출현한다면 그 피해는 실로 예측하기 어렵다.

4. 유해적조 피해예방과 방지 대책

1995년 이래 유해적조현상으로 인한 수산 피해가 우리나라에서는 매년 발생하고 있다. 특히 최근에 유해적조의 출현빈도가 증가하고 적조발생해역이 광역화됨으로서 수산피해도 광역적으로 발생하여 지역경제에 심한 타격을 주고 있다. 게다가 유해적조 피해영향을 받고 있는 대상해역들은 생산성이 높고, 시공간적으로 다양하게 이용하고 있는 연안 해역들이어서 유해적조가 경제적으로 뿐 만아니라 인간 활동을 위축시키는 악재로서 작용하고 있다. 현재까지도 유해적조의 발생 예측이 어렵고 새로운 유해종의 출현하면 문제를 해결할 수 있는 대책을 찾기 몹시 힘들게 된다. 현재까지 알려진 유해 적조대책은 근본적으로 적조현상이 발생하지 않도록 하는 유해적조 발생 방지대책과 적조현상이 이미 발생한 후에는 피해를 최소화시키는 유해적조 피해 방지대책으로 나눌 수 있으며 적조 피해 방지대책은 다시 적조 조기 예보, 적조 피해경감 대책 및 적조제어기술로 나눌 수 있다.

4.1. 유해적조 발생 방지대책

유해적조가 발생할 수 있는 환경조건이 될 수 없도록 환경을 만들어 주는 방법이다. 이미 적조현상이 일어나는 가장 큰 원인은 영양염이 풍부한 부영양화 현상이라는 사실이 규명되었으므로 적조발생을 방지하는 가장 근본적인 방법은 먼저 연안 어장이 부영양화 되었나를 판정하고 이미 수질이 부영양화 현상이 진행 중인 어장이라면 더 이상의 진행을 막아야 한다. 일반적으로 부영양화현상이 일어난 어장에 대한 방지대책으로는 첫째, 육상에서 들어오는 산업폐수와 생활하수의 유입을 철저히 막고 오물이나 기타 폐수를 해양에 버릴 때는 영양염류를 정화처리한 뒤 배출해야 한다. 정부에서는 이와 관련해서 각종 폐수에 대한 배출허용기준과 해역별 수질기준을 제정하여 연안 수질을 관리함은 물론 진해만, 광양만 등 인근공업단지로부터 오염물질의 유입이 많은 곳은 해양오염 방지법에 의거 연안오염특별관리 해역으로 지정, 특별 관리를 하고 있다. 아울러 수하식 양식시설이 과도하게 설치된 곳에서는 양식생물의 배설물에 의한 자가오염도 부영양화를 일으키는데 상당한 작용을 함으로서 양식생물의 배설물의 양이 자정작용 범위를 초과하지 않도록 양식밀도를 적정한 수준으로 해야 한다. 즉 주변에 오염물질을 유출시키는 공장이나 목장 등이 없더라도 앞에서 언급한 판정에 의거 부영양화 현상이 일어났다고 판정되면 양식 시설물량을 대폭 줄이거나 운반제, 격년양식을 해야 하고 바닥청소를 해 주어야 지속적인 생산을 올릴 수 있다. 또한 적

조발생을 사전예찰하고 예보하여 피해를 경감시킬 수 있는 조치를 취해야 한다.

최근 연안수역의 부영양상태를 국립수산과학원에서 실시한 환경오염조사결과로 평가해보면 남.서해 연안 수질은 부영양화현상이 진행 중이거나 상당히 심각한 수준에 도달한 어장이 많았다. 진해만, 광양만, 인천연안 등은 이미 상당한 부영양상태이고 일부의 외측해역도 거의 부영양상태를 나타내고 있는 곳이 많다. 이들 해역에는 육지로부터의 산업 또는 가정폐수의 유입이 많고 옛부터 집약적 양식이 성행하는 곳이다. 한편 어장에서 부영양화현상이 일어났는가를 판정하기 위한 간편한 방법으로는 어장 내에서 최근 적조가 자주 발생하고 있는지 해수 색택이 비정상적인지 저층 빨의 색이 흑색인지, 매년 단위면적당 수확량이 줄어들고 있는지 등을 조사하면 된다. 이와 같은 조사결과 앞에 열거한 현상들이 발견되면 부영양화 된 어장이라고 할 수 있다. 보다 과학적인 방법으로는 6~9월 식물성 플랑크톤의 양과 몇 가지 물리화학적 환경요인을 분석하여 보면 알 수 있다. 즉 식물성 부유생물의 개체수 1ml당 1000개체 이상이거나 화학적 산소 요구량이 1ppm 이상, 총질소가 0.03 ppm 이상이면 부영양수역으로 판정 할 수 있다.

4.2. 유해 적조 피해방지대책

4.2.1. 유해 적조 조기 예보

현재의 기술로 어장이 많이 분포하고 있는 연안 어장에서 유해적조가 언제 발생할 것인가를 정확히 예보할 수 있다면 수산 피해를 대폭적으로 경감시킬 수 있다. 유해적조가 발생하는 시기를 정확히 예보하기 위해서는 해양환경, 해양기상 및 적조생물의 생리생태를 규명해야 한다. 특히 최근에는 기후변화가 해양에 미치는 영향이 크고 해양이 연결되어 있어 전 지구적 기상연계 관측망(Global marine/climatic network)과 첨단 관측기술인 원격탐사(NOAA, SeaWiFs, MODIS)정보도 적극적으로 활용함으로써 상당히 정확성이 높은 수준의 적조예보가 가능하다.

현재 각국은 유해적조 발생예보의 정확성을 높이기 위하여 보다 많은 연구 인력과 예산을 투자함은 물론 국가 간 협력과 국제기구를 통한 공동연구를 활발히 추진하고 있다. 최근에 적조예측기술(prediction)을 정확성을 높이기 위하여 미국 유럽을 중심으로 한 국가에서는 유해적조생물의 환경생리와 적응전략, 적조 발생해역에서의 환경의 이화학적 특성과 적조생물과의 상호관계, 먹이생물과 포식자와의 관계를 구명하고 이것을 수치 Model화하는 연구를 집중적으로 추진하고 있다. 아울러 광학기술을 활용한 위성원격탐사 기술을 예보에 활용하기 위하여 해양식물과 광선 흡수 특성을 파악하기 위한 연구도 최근에 활발히 진행되고 있다.

4.2.2. 유해 적조 피해 방지 기술

지금까지 유해적조 피해를 예방 또는 최소화하기 위하여 이미 활용하거나 또는 실용화 연구가 진행 중인 유해적조 피해 방지기술은 크게 유해적조 발생 전 예방적 관리(precautionary management)와 유해적조 발생 후의 긴급관리(emergent management)로 나누어서 설명할 수 있다. 유해적조 발생 전 예방적 수단은 다시 피해경감 기술과 유해적조 제어 기술로 나눌 수 있는데 유해적조가 발생하기 전에 유해적조를 감시할 수 있는 상시 예찰망을 운영하여 신속하게 유해적조 발생을 예보할 수 있도록 준비하고 유해적조의 밀도와 발생해역이 확산하는 것을 제어하기 위하여 영양염류의 유입을 차단할 수 있는 방법을 강구하는 일들이 여기에 속한다.

유해적조 발생 후의 긴급관리 수단으로는 적조이동과 확산예보, 양식생물의 적조해역 도피 등의 적조 피해 경감기술과 유해적조생물을 제거시키기 위하여 황토를 살포하는 적조생물 제거기술로 나눌 수 있다.

1) 유해적조 발생 전 피해예방 수단

유해적조가 발생하기 전에 유용수산 생물자원을 보호하고 해양생태계의 파괴와 손상을 최소화하기 위한 조치로서는 적조예찰 감시망 구축, 적조발생 예

표 7. 유해적조 피해방지 기술의 구분

구 분	유해적조 발생 전 예방적 수단	유해적조 발생 후 긴급관리수단
피해경감기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 적조예찰감시망 구축 ○ 발생 신속 예보 ○ 조기 피해 발생예측 예보 ○ 어류 방양밀도 조절 ○ 사료 공급량의 감축 ○ 예비 비축해수 확보 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 적조이동확산 예보 ○ 적조주의보 경보운영 ○ 적조어장유입 차단과 액화산소 공급 ○ 가두리 이동외해 대피 ○ 저층수 펌핑 표층살포 ○ 생사료 공급 중단 ○ 황토살포(흙착침강)
유해적조제어기술	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해류순환 촉진 ○ 영양염류 유입 차단 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 적조생물 제거(생물제거기) ○ 생물보호막 설치(적조방지막)

측, 적조 피해 발생 조기 예보, 어류 방양밀도 조정, 사료 공급량의 감축, 및 육상수조 양식장에서의 예비 비축해수의 확보를 들 수 있다.

적조예찰 감시망은 적조발생해역의 환경 지형적 특성, 양식어업의 분포, 조사인력과 조사 기자재 등을 고려하여 조사점점과 조사 빈도를 정해야 한다. 우리나라에서는 현재 3~11월까지 조사 정점에서 적조생물 시료와 환경요인 분석 시료를 채집하고 조사 주기는 적조의 과거발생 기록에 따라서 매일, 주간, 월간 조사의 3단계로 나누어서 실시하고 있다. 이와 같은 방법으로 얻어진 정보와 자료에 의거하여 유해 적조가 발생하는 시기와 장소를 예측하여 어민들에게 통보하면 유해 적조가 발생하더라도 어업 피해를 대폭적으로 경감시킬 수 있다. 우리나라에서는 매년 수산 피해를 일으키는 *Cochlodinium* 유해적조가 발생하는 시기를 가급적 정확히 예보하기위하여 동 유해적조가 발생할 것으로 예상되는 해역에서 6월부터 정밀조사를 실시하고 있다.

이상과 같은 적조감시예찰과 예보와 함께 양식어장에서는 적조발생 후에 피해를 최소화할 수 있도록 사육어류의 방양밀도를 적정수준으로 낮추고 사료의 공급량을 감소시켜서 적조발생시의 내성을 강화시킨다. 특히 생사료 중의 분해가 쉬운 유기물질은 와편 모조류가 직접적으로 이용할 수 있기 때문에 적조발생 예상 해역에서는 생사료 공급은 중지해야 한다. 한편 적조발생시 피해를 최소화하기 위하여 관련부서에

적조대책본부를 설립하여 운영하고 있다.

2) 유해적조 발생 후 긴급관리 수단

유해적조가 발생하였을 때 육상이나 해상가두리 어류양식장에서는 피해를 최소화시킬 수 있는 긴급조치를 취해야 한다. 현재 국내에서는 적조예찰을 담당하고 있는 국립수산과학원과 각 지방 해양수산청 및 시도에서는 매일 매일 적조예찰 결과를 적조상황실로 통보하고 적조상황실에서는 적조의 정도에 따라서 적조주의보나 경보를 발령하여 유해적조가 야기할 수 있는 수산 피해를 최소화하고 있다.

적조주의보가 발령되면 육상 수조식 양식장에서는 사육밀도를 조정하고 상품성이 있는 것은 조기 출하하도록 권고한다. 또한 먹이공급량을 감소 또는 중단 시키도록 한다. 조피블락의 경우 어종 크기, 건강상태, 수온이나 수질조건에 따라서 다르나 최소 2개월 간의 절식으로서는 폐사하지 않는 것으로 나타났다. 한편 사육수의 관리와 산소공급량을 증대시키기 위해서 액화산소나 산소공급기를 가동해야 한다. 해상가두리 양식장에서는 수용된 양식어류에 대한 긴급관리 요령은 육상수조식 양식장의 경우와 같다. 다만 가두리 주변에 황토를 살포하거나 가두리를 이동 또는 침하시켜서 적조생물에 노출되지 않도록 해야 한다. 그리고 일부 저층 수질이 양호하거나 적조생물이 낮 동안에 표층에 머무를 경우 저층해수를 뽑아 올려서 표층에 살포하면 적조생물의 분산되어 밀도가 낮아짐으로

서 적조 피해를 경감시킬 수 있다.

이상 설명한 것들은 유해적조발생시 양식생물을 보호함으로서 수산 피해를 최소화시킬 수 있는 방법들이다.

4.3 유해적조 제어 기술

4.3.1 적조생물의 직접 제어 기술

1) 물리학적 제어기술

물리학적 기법을 이용하여 적조를 제어하는 수단은 적조와 격리시키는 방법과 적조생물을 치사, 제거, 침강, 응집시키는 방법이 있으며 이들 방법들은 해양에서의 환경과 생물에 미치는 영향을 평가한 다음 경제성이 있다고 판단될 때 실용화 할 수 있다. 현재까지 적조생물을 구제하기 위하여 활용하거나 실용화 연구가 진행 중인 제어수단과 방법은 표 8과 같이 정리할 수 있다.

물리적인 방법에 속하는 적조와의 격리방법은 양식생물이 적조생물에 노출되지 않도록 적조해역 대피, 양식시설물 저층 침하, 및 적조 방지막과 같은 시설을 사용하는 경우이다. 적조 방지막은 해상에 설치

한 가두리에 적조생물이 유입되지 않도록 설치하는 차단막과 같은 것이다. 국립수산진흥원에서 제작한 것은 해상가두리에 건착망어구처럼 전개하여 적조생물이 가두리안으로 유입되지 않도록 설계를 제작되어 있으나 해수의 교환이 원활하지 못하고 방지막에 부착생물이 부착하는 문제를 해결해야 한다. 한편 전력 발전소에서 부착생물의 냉각설비에 부착하는 생물을 제거하기 위하여 전기분해로 만들어진 차아염소산나트륨(NaOCl)은 적조생물을 치사시킬 수 있으나 독성이 강하여 수산생물을 치사시킬 수 있을 뿐만 아니라 죽은 적조생물의 사체가 표면에 부유함으로서 2차적인 피해를 일으킬 가능성도 있다.

한편 육상수조식 양식장에서는 적조의 유입을 차단하기 위해서는 해수인입을 중단해야 한다. 이를 위해서 적조경보기가 보급 중에 있다. 적조경보기는 적조가 접근했을 때 적조생물의 농도가 일정 기준을 초과하면 낮에는 경보음으로 밤에는 경보음과 경광등으로 적조의 접근을 관리인에게 경보하고 육상양식장의 경우 자동적으로 해수의 인입을 차단시키고 액화산소를 공급할 수 있도록 만들어졌다. 그리고 해상가두리 양식장에 설치한 것은 경보를 울림과 동시에 저층해수를 퍼 올려 표층으로 분사하도록 제작되었다. 그리

표 8. 해양 적조생물의 제어 방법과 원리

방법		원리	응용물질
물리적 방법	- 적조와 격리	- 적조도피, 차단	- 적조방지막
	- 초음파처리법	- 세포파괴	- 초음파(160-400KHz)
	- 오존처리법	- 독성중화	- 오존
	- 적조생물제거법	- 제거, 여과, 원심분리	- 원심분리기
	- 전기분해법- 원심분리기	- 세포치사	- 산성수, 차아염소산나트륨
화학적 방법	- 화학약품살포법	- 세포치사, 파괴	- 황산등, 유기화합물
	- 황토살포법	- 응집, 침강	- 황토, 점토
	- 응집제살포법	- 응집, 침강	- 철염, 계면활성제등
생물학적 방법	- 포식압(천적)	- 먹이망(grazer)	- 요각류, 섬모충류
	- 살조물질	- 세포파괴, 용해	- 폴리유로나이드등
	- 세균, 비루스	- 분해	- Cytophaga sp.
	- 기생생물	- 기생	
	- 생물효소	- 세포막파괴, 용해	- 만노시다제

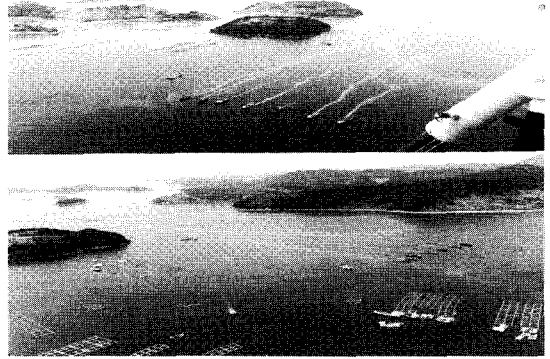
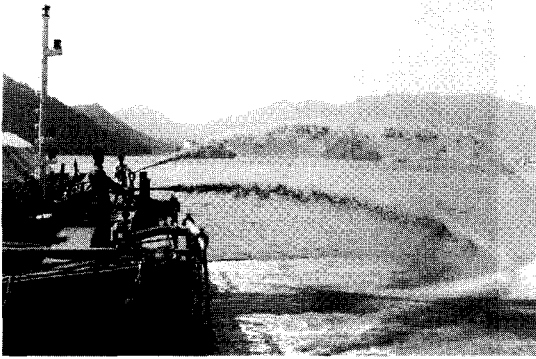


그림 3. 한국 남해안의 유해종 *Cochlodinium polykrikoides* 발생시의 황토살포 현장

나 적조가 장기간 지속되거나 비축해수가 충분하지 못할 때는 해수를 보충해야 하는데 이때는 적조제거기를 설치하거나 또는 여과설비를 준비하면 양식생물 피해를 대폭적으로 경감시킬 수 있다.

2) 화학적 제어기술

화학적 방법에는 적조생물을 치사 또는 응집시키는 효능을 갖고 있는 화학물질을 투입하여 적조밀도를 감소 또는 제거시키는 방법이다. 황토는 1995년 대규모가 적조가 발생하여 적조 피해가 사회경제적인 문제로 대두된 다음해인 1996년부터 중요한 적조제어 수단으로 점토의 일종인 황토를 적극적으로 살포하고 있다.

황토 및 점토 살포법은 황토의 콜로이드 입자가 적조생물과 응집 흡착하는 성질을 활용하여 적조를 구제하는 방법이다. 황토의 주요성분은 규소, 알루미늄, 철 등으로서 구제효능은 금속화합물의 구성비에 따라서 큰 차이를 나타내었는데 일반적으로 알루미늄과 철의 함량이 높은 황토의 적조구제효율이 높았다. 또한 황토의 입자별 크기에 따라서도 구제 효율에 차이가 있었는데 50 μ m이하로 분쇄한 황토의 구제효율이 높게 나타났으며, 적조생물의 밀도가 높을수록 구제효율이 높게 나타났다.

한편 황토는 해수 중에 살포시 질소와 인의 흡착효과가 인정되고 피조개 어장에 살포할 경우 해로글로빈의 농도가 증가하는 등 생리기능을 향상시키기도 하나 과도한 황토살포는 생태계에 다소나마 영향을

미칠 수도 있기 때문에 주의가 필요하여 이에 대한 연구가 추진되고 있다.

3) 생물학적 제어기술

유해 적조생물을 포식하는 천적생물을 이용하거나 적조생물을 분해할 수 있는 미생물을 이용하여 유해 적조생물을 제거하는 방법이다. 또한 생물이 생산하는 생리활성 물질을 이용하여 적조생물의 세포를 파괴, 용해, 또는 분해시켜 적조생물을 제어하는 기술도 최근에 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 생물학적 방법은 환경친화성이 높아 주목을 받고 있다.

최근에 실용화를 위한 천적생물 활용방법은 생물 먹이망 구조에서 상위 소비자가 하위의 생산자를 포식하는 (top-down control)작용을 이용하는 기법으로서 요각류나 섬모충류로서 외편모조류를 포식하게 하는 방법이다. 우리나라 연안에 서식하는 *Oxyrrhis marina* 종은 *Prorocentrum minimum*을 *Strombidinopsis* sp.는 *Gymnodinium sanguineum*과 *Cochlodinium polykrikoides*를 먹이로 하는 동물성 플랑크톤으로서 이들이 적조생물의 천적생물로서 이용가능하다는 결과가 보고되었으며 특히 *Cochlodinium* 적조의 포식압이 인정되는 *Strombidinopsis*종의 실용화는 대량배양기술이 확립되면 국부적인 해역에서 실용 가능할 것으로 예상된다(정 등, 1999).

프랑스의 Brittany 연안에서는 *Alexandrium minutum*에 공생하는 *Parvilucifera*속이 숙주인

*Alexandrium*종을 사멸시킨다고 보고(Erard-Le Denn et al., 2000)하였다. 이와 같이 동물성 플랑크톤을 이용하여 적조생물을 포식하게 하여 방제효과를 얻는 tod-down control 방식의 적조구제와 세균이나 비루스를 이용하여 적조생물을 사멸시키는 bottom-up control 방식의 구제기술이 중점적으로 연구되고 있다. 동시에 갈조류 등의 해산식물이나 미생물에서 적조생물을 치사시킬 수 있는 능력을 갖고 있는 물질을 추출하여 사멸시키거나 적조생물에 기생하는 기생생물을 이용한 적조구제기술도 연구되고 있다.

4.3.2 유해적조생물의 간접제어 기술

유해적조를 일으키는 해양식물성 플랑크톤은 앞장에서 설명한바와 같이 생물의 내재적 특성과 환경조건의 영향을 받아 증식 또는 소멸한다. 따라서 생물 자체에 또는 환경조건에 자극을 가하여 적조생물의 증식을 억제하는 수단이 곧 적조생물의 증식을 제어하는 간접적인 수단이다.

지금까지는 생물자체의 내재적 특성 변이를 일으키는 생리연구 보다는 환경자극의 크기를 조절하여 적조생물의 계군을 제어하려는 연구가 보다 활발하다. 따라서 적조발생 양상에 따라 대응 전략적 연구를 수행해야 한다. 일반적으로 적조생물의 수온과 빛의 자극에 대한 생물 반응은 복잡하지만 비교적 많은 연구가 진행되었다. 그러나 환경조건, 특히 영양염류의 자극 크기에 대한 생물 반응 연구는 상당히 많이 되었으나 아직도 부족한 실정이다. 또한 적조가 발생하는 해역의 특성에 따라서도 저층용승 영향을 받는 스페인, 페루연안 용승역(upwelling system), 육지의 영향을 받는 한국, 일본, 미국 등지의 연안 하구역(estuaries & embayment), 및 일본 세토내해, 홍콩, 진해만, 발틱해 등과 같이 이미 부영양화가 진행된 해역에서의 적조발생 원인은 큰 차이가 있으므로 이들 해역에 대한 적조발생 예방적 수단은 각각 다를 수밖에 없다. 그러나 기원이 명확하지 않더라도 질소와 인 및 희귀원소 함량이 적조발생과 깊은 정의 상관관계를 나타내고 있

으므로 이들 물질의 연안유입을 차단하거나 또한 이들 물질의 해수 또는 해저퇴적물층의 농도를 감소시키기 위하여 해류순환을 추진하고 각종 영양염류가 풍부하게 존재하고 있는 해저 퇴적물(nutrient pool)을 제거 또는 준설해야 한다. 아울러 최근 연안에 집약적 양식장이 많아 자가 오염에 의한 유기물질 부하량이 증가하고 있어 해역의 환경용량을 감안한 친환경양식을 적극적으로 권장해야 한다.

5. 결 론

앞으로도 유해적조현상은 지속적으로 발생하여 해양산업 발전을 방해하고 인간의 건강까지도 위협할 것으로 예측된다. 특히 우리나라는 인접국가와의 가격경쟁 등을 감안할 때 경제성이 있는 양식 산업을 육성시켜야 하는 시대적인 사명을 안고 있다. 따라서 어떤 기술을 어떻게 개발해야하고 관련되는 해양 환경보존 정책을 어떻게 추진해야 할 것인가를 결정하는 일은 매우 중대한 문제이다. 이 문제를 풀기 위해 세계적으로 적조대책 성공사례로 자주 인용되고 있는 미국, 일본, 및 한국의 3개의 사례를 설명하고 그 해법을 찾아본다.

미국 남부 연안 N.Y.주에 있는 Long Island에서는 1950년대에 녹조가 상습적으로 발생하여 굴 산업에 피해를 일으키고 미적 손상을 초래함으로써 사회적으로 문제가 되었다. 따라서 주정부에서는 이와 같은 적조의 발생을 근본적으로 방지하기 위하여 외해 확산을 촉진할 수 있는 만구 확장조치를 취하고, 육상으로부터 유입되는 오염부하를 감소시키기 위하여 주변의 오리 사육장을 감소시키고 오염규제 조치를 철저히 취한 결과 1960년대이후 적조발생이 급속히 감소하였다.

또한 日本의 瀬戸内海는 1970년대 연간 약 300여건의 적조가 발생하는 상습적인 적조발생해역이었으며 특히 *Chattonella* 적조에 의한 수산 피해가 71억쪽에 이르렀다. 따라서 적조발생을 감소시키기 위

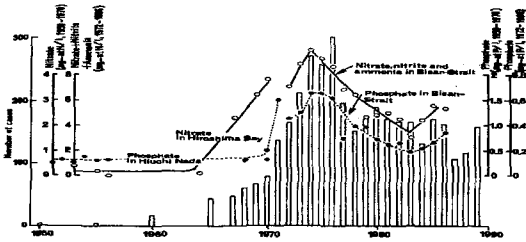


그림 4. 일본 세토 내해의 경년 적조발생 건수 및 1978년 이후 감소경향(Honjo, 1993).

하여 1977년 세토나이가이(瀬戸内海) 특별조치법을 제정하여 적조발생을 근본적으로 방지하는데 필요한 총량규제제도와 이 법에 의한 COD 삭감목표제를 도입 적용하였으며 해역이용행위도 엄격히 억제한 결과 1990년대 이 해역의 적조발생건수는 70년대의 농수준인 100여건으로 감소하였다.

한편 한국 남해와 동해남부연안에서는 1995년부터 *Cochlodinium polykrikoides* 종에 의한 적조 피해가 매년 가을에 발생하여 사회경제적으로 큰 문제를 야기하였다. 이와 같은 수산 피해를 방지하기 위하여 1996년도부터 적조해역에 황토를 살포하여 적조생물을 침강 제거시키고 적조발생과 이동확산상태를 신속하게 감시하여 어업인들에게 통보하는 조기경보system을 운영하였다. 그 결과 1995년 764억원이었던 수산 피해가 2000년도에는 약 2억원으로 감소하였다.

위의 3개의 사례 중 미국과 일본의 사례는 육상오염물질의 해양유입을 차단 또는 현저히 감소시켜 적조발생을 근본적으로 예방하는 조치를 취하여 성공한 사례이고 한국의 사례는 적조발생 후에 적조 피해를 최소화시킨 사례이다. 유해적조에 의한 사회경제적인 피해는 앞으로도 계속 발생할 것으로 예상되며 피해대상도 점차 많아질 것으로 보인다. 특히 우리나라에서는 적조피해는 자연재해로 취급하고 있다. 사실 자연재해를 방제한다는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나 유해적조는 인간에 의한 오염행위가 가장 큰 원인이 되어 발생하는 자연재해임으로 오염을 경감시키는 행위는 적조피해 즉 자연재해를 감소시키는 일이다. 따라서 그 방법은 가장 효율적이고 경제적이어야 한

다. 이와 같은 점을 감안할 때 결국 적조대책은 육상과 해상의 오염 부하량을 최소화하는 근본적인 방향으로 나아가야 한다.

참고문헌

金鶴均 (1987). 赤潮被害와 防止對策. 赤潮現象과 漁場保全. 赤潮 및 漁場保全에 關한 심포지움 結果報告書, pp. 115~128.

김학균 (2005). 해양적조. 다솜출판사. p.466

金鶴均, 韓相復, 鄭海鎮 등 (1999). 赤潮被害對策 연구, 海洋水産部 水産特定 研究 開發事業 報告書. p. 527

朴 周錫, 金 種斗 (1967). 鎮海灣의 赤潮現象에 關한 研究. 水振研究報告, 1, pp.63-79.

한상복 (1997). 삼국시대 (BC 57-935)의 적조현상. 한수당 자연환경연구원. p.18

Erard Le-Denn, E., M.J. Chretiennot-Dinet, I. Probert (2000). A parasite of *Alexandrium minutum* in French Coastal Waters. Abstracts of Ninth International Conference on Harmful Algal Blooms. 7~11, Hobart, Tasmania

Imai I, T. Sunahara, T. Nishikawa, and Y. Hori (2000). Relationship between the population dynamics of *Chattonella* spp. (Raphidophyceae) and the algicidal bacterium *Cytophaga* sp. in the Seto Inland Sea, Japan Abstracts of Ninth International Conference on Harmful Algal Blooms. 7~11, Hobart, Tasmania p. 23.

Honjo (1993). Overview on bloom dynamics and physiological ecology of *Heterosigma akashiwo*. Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea. T.J.Smayda and Y. Shimizu(eds.). Elsevier Science Publishers B.V.