

해양 적조발생과 피해방지 대책

적조발생 근본원인과 처방과약이 급선무

김 학 균 / 국립수산진흥원 어장환경부장

적조발생과 경제활동

21세기 첫해인 금년도에도 유해적조가 8~9월에 남해안과 동해안에서 발생 42일간동안 지속하여 약 88억원에 이르는 수산피해를 일으킴으로써 사회경제적으로 커다란 문제를 야기하였다. 이와같은 적조현상은 우리나라에서는 1980년대 후반부터 상습적으로 발생하고 있으며 최근에는 매년 남해안과 동해안의 여름바다를 붉은색으로 또는 짙은갈색으로 변화시키고 있다. 한편 우리나라의 바다는 국민 단백질 공급량의 절대적인 수산물 생산장으로서, 수출상품을 운송하는 해운무역로로서, 그리고 모든 국민들의 문화와 여가활용장으로서의 기능을 담당하고 있으며 앞으로의 그 기능은 더욱 증대할 것으로 예상된다.

이와같이 중요한 세계의 바다 면적은 $3.6 \times 10^8 \text{km}^2$ 이고 그 용적은 $1.37 \times 10^9 \text{km}^3$ 이며 이 중 적조가 주로 발생하는 대륙붕과 기수역 및 조간대 해역은 $28 \times 10^6 \text{km}^2$ 로서 바다의 약 8%가량을 차지하고 있다. 우리나라도 전체 어업이 이루어지고 있는 바다 면적은 약 90만 km^2 이나 적조발생이 가능한 대륙붕과 연안내만 해역의 면적도 약 250~450천 km^2 로서 국토의 3~4배에

이르고 있다. 한편 적조발생이 가능한 이들 연안해역의 생태적 가치는 해양생태계의 가치평가 추정액 17~23조 달러의 약 43%나 되고 지구상 인류의 60%가 이곳 연안역에 살고 있다. 특히 세계 국가중 129개 국가는 바다와 접해있고 31개 국가만이 육봉 내륙 국가이므로 거의 모든 국가의 생활, 경제, 문화가 바다와 관련이 있고 또한 적조발생과 관계가 있다고 볼 수 있다.

따라서 연안역이 인류건강과 경제생활에 미치는 유형 무형의 영향이 지대하다고 볼 수 있으며 앞으로 그 힘은 더욱 커질 것으로 생각된다. 특히 반도국가인 우리나라의 경제와 문화에 미치는 연안역의 영향은 매우 지대하므로 우리들은 이곳을 위협하는 유해적조발생에 깊은 관심을 갖고 있어야 한다.

해양 적조의 정의와 종류

적조현상에 대하여 1900년대 초기 일본에서는 '적조란 현미경적 미생물이 일시에 다량으로 출현하여 해수의 색깔을 변색시키는 현상으로서 어패류를 폐사시키는 현상'이라고 정의하였고, 브리테니카 백과사전과 Webster사전은

‘seawater discolored by the presence of large numbers of dinoflagellates in a density fatal to many forms of marine life’이라고 정의하고 있으나 최근에는 적조의 발생양상이 복잡해지고 또한 해수의 수색을 변화시키지 않더라도 어패류의 독화현상을 일으키고 있어 다음과 같이 정의하고 있다. 즉 적조현상이란, 해양의 미세한 또는 거대해조류가 대량으로 번식하여 해수를 변색시키고, 향취를 나쁘게 하며, 어패류의 물리적 손상을 입히거나, 용존산소의 부족과 저서생물의 변화 등과 같은 생태계내의 이상현상을 일으켜 사람과 다른 생물에 나쁜 영향을 나타내는 현상이라고 정의하고 있다.

이와같은 적조현상을 우리나라에서는 일반적으로 적조라고 부르며 유럽과 아메리카에서는 harmful algal blooms (HABs), red tide, water bloom, dinoflagellate bloom 등으로 부르고 있으며 이웃 일본에서는 적조(赤潮), 수화(水華), 고조(苦潮), 청조(靑潮), 백조(白潮) 등으로 그리고 중국에서는 유해적조로 부르다가 최근에는 유해조화로 부르고 있다.

한편 적조현상은 편의상 구

성하고 있는 생물의 종류에 따라 규조적조, 편모조적조, 세균적조, 수색에 따라 청조, 적조, 녹조, 백조 그리고 적조의 모양에 따라 피상 적조와 반점 적조 등으로 부르기도 한다. 또한 최근에는 발생수역에 따라 내만성 적조, 연안성 적조 및 외양성로 구분하며 생물피해여부에 따라서도 무해성 적조와 유해성 적조로 구분하는데 무해성적조는 주로 규조류에 의한 적조로서 직접적으로 어류폐사나 인체건강에 위해를 일으키지 않는 적조로서 어떤 경우에는 어류의 근접을 막고 간접적인 피해를 일으키기도 하지만, 그 수괴 주변에서는 호어장이 형성되기도 하여 유익한 점도 있다. 그리고 유해성 적조는 생물 폐사를 일으키는 적조로서 내만 또는 연안성 적조에 많이 나타나고 최근에 단독종에 의한 외편모조 적조가 대표적이다. 여기에는 해양생물을 독화시키고 독화된 수산물을 사람이 섭취하면 식중독을 일으키는 유독성 적조를 포함하고 있다.

최근 해양 적조의 발생 동향

세계연안의 적조 발생 상황 적조발생에 관한 기록은 기

원전 나일강하구나 고대 그리스 연안에서도 찾아볼 수 있으며 Darwin의 1931부터 5년간 실시한 비글호의 남아메리카-오스트랄리아-아프리카항해에서도 적조현상을 관찰하였다고 보고하였다. 그러나 18세기 현미경이 출현하면서 적조에 관한 관찰과 연구가 활발해졌다. 이와같은 적조현상은 인구집중, 개인별 평균물질소모량의 증가, 에너지 자원의 과다사용 등 육상 오염부하량 증가로 연안수질환경이 부영양화되면서 적조발생의 빈도, 주기 및 규모가 증대되었다.

지금까지의 연구보고에 의하면 전 세계연안에서 발생하는 적조현상은 1960년 이후부터 주로 공업이 발달되고 인구가 많이 분포하고 있는 선진 또는 개발도상국가의 연안역인 북위 30~40°N 해역에서 주로 발생하였으나 최근에는 수온이 낮은 러시아의 캄차카 반도에서 적도의 아프리카 에콰도르 연안까지 전 세계 대부분의 연안수역에서 매년 발생하고 있다. 아시아 대륙 연안에서는 일본의 세토(瀬)내해, 한국 남해안과 동해 및 황해, 중국연안의 발해만과 동중국해, 뱅갈만, 아라비아 바다, 홍해등 대부분의 해역에서 적조가 발생하고 있다고 보고하였다.

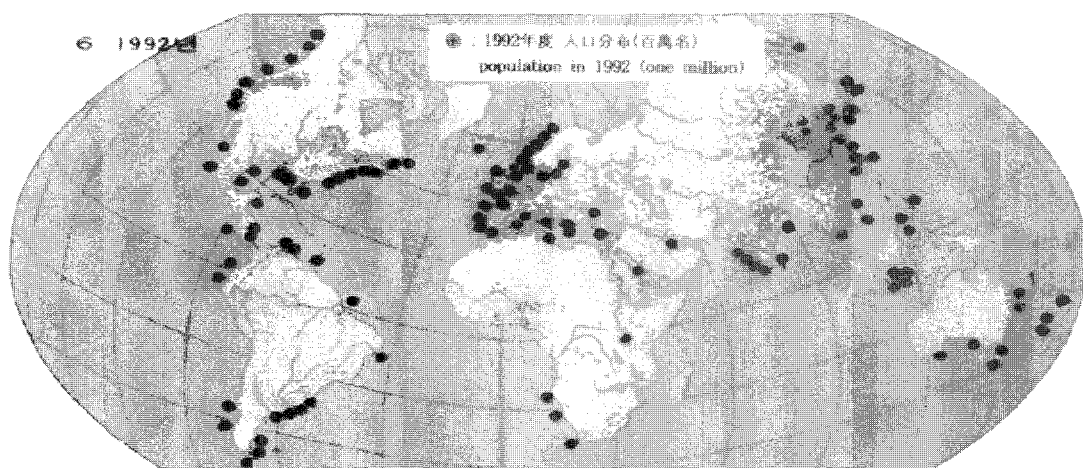
한편 유럽에서는 지중해, 북해 및 스칸디나비아 연안에서도 적조가 자주 발생하고 있으며 북아메리카 대륙의 대서양 연안 멕시코만과 플로리다연안 및 태평양연안인 캘리포니아 연안에서도 거의 매년 적조현상이 발생하고 있다. 특히 최근에는 비교적 깨끗한 대륙인 오스트레일리아와 뉴질랜드 연안에서도 적조가 발생하고 있다. 한편, 적조를 일으키는 생물중에는 패류를 독화시키는 종이 출현하고 있는데 마비성 패독(PSP: paralytic shellfish poison)을 일으키는 종은 *Alexandrium*속, 설사성 패독(DSP: diarrhetic shellfish poison)을 일으키는 종은 *Dinophysis*속 그리고 기억상실성 패독(ASP, amnesic

Shellfish Poisoning)을 일으키는 종은 *Pseudonitzschia*속에 속하는 종으로 밝혀졌으며 이들 종은 전세계 연안에서 출현하고 있다.

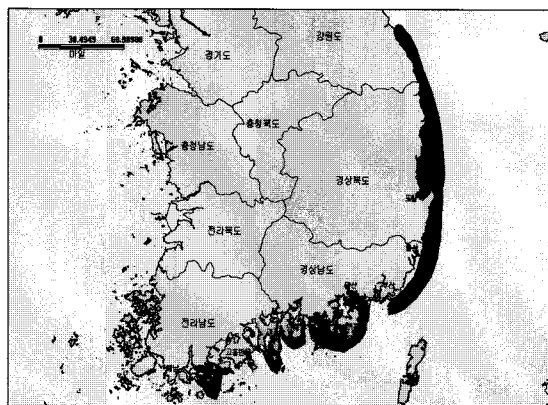
우리나라 연안의 적조 발생 상황

우리나라 연안에서는 1980년대까지는 주로 남해안을 중심으로 하여 봄철부터 가을철까지 발생하였으나 최근에는 대부분의 연안에서 거의 매년 발생하고 있다. 적조를 일으키는 해양생물은 주로 식물성 플랑크톤이며 그외 원생동물인 섬모충류 1종이 간헐적으로 적조를 일으키고 있으나 혐기성 박테리아에 의한 적조기록은 아직까지는 없다. 최근에 자주 발생하는 코클로디니움

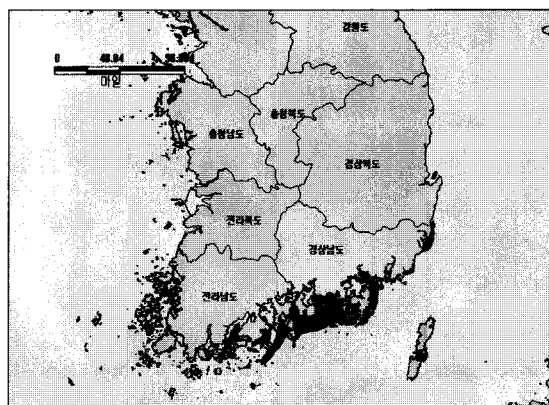
종에 의한 유해적조는 거의 매년 여름 8월 우리나라 연안어장에서 발생하고 있으며 금년에도 8월 14일 남해안 나로도 연안에서 처음 발생하여 남해안은 물론 동해안의 울진군 죽변연안까지 확산하여 약 88억 원의 수산피해를 냈다. 이 종은 1995년 남해와 동해안에서 대규모로 적조를 일으켜 약 2천6백만마리의 어류를 폐사시켜 764억원에 이르는 수산피해를 일으킨바 있으며 작년 7월에 일본의 구마모도현에서 양식 잭방어 등 약 39억엔(8천3백만엔, 우리 돈으로 약 420억원에 이르는 수산피해를 일으켰으며, 또한 칠레와 캐나다에서도 양식생물에 막대한 피해를 일으키고 있는 유해종이다.



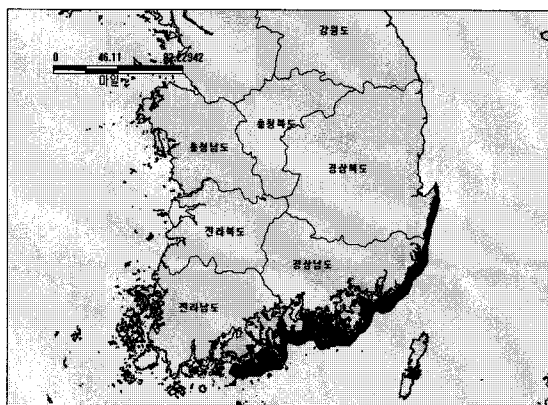
〈그림-1〉 전 세계 연안의 적조발생 수역의 분포



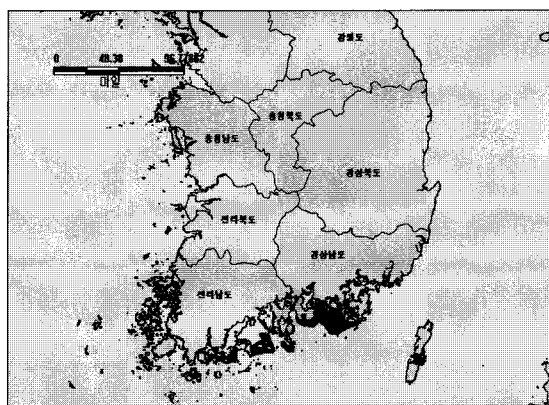
1995년



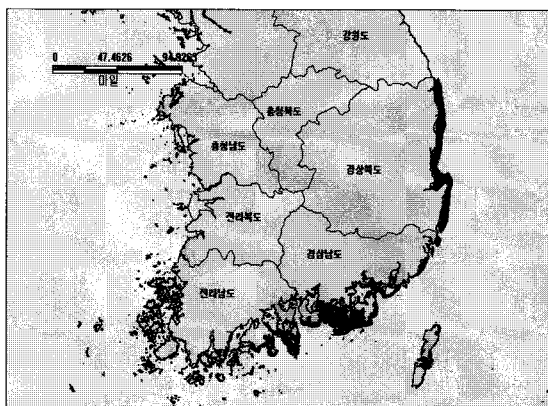
1996년



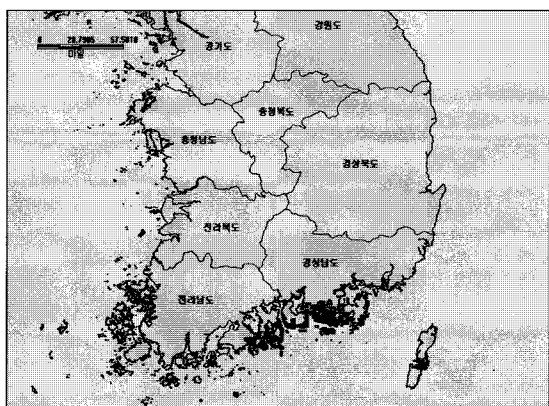
1997년



1998년



1999년



2000년

〈그림-2〉 우리나라 연안의 유해성 코클로디니움 적조 발생해역도

이와같은 유해적조는 우리나라의 연안수역에서는 1980년대 들어 간헐적으로 발생하였으나 1990년대 후반이후에는 대규모로 발생하여 양식생물뿐만 아니라 자연서식생물에도 피해를 일으키고 있으며 그 피해는 앞으로도 지속될 것으로 보인다. 특히 최근에는 수질 부영양화, 휴면포자의 출현 및 해저퇴적물의 오염으로 상습적으로 발생하여 천해 양식산업에 대량 피해를 일으킴으로써 기르는 어업을 육상하고 자하는 우리의 수산정책에 큰 위협을 주고 있다.

해양 적조의 당면 문제점

해양생물의 대량 폐사, 어패류 독화 및 인체 건강 위해 대부분의 적조현상은 전 세계 연안에서 여러 종류의 형태로 피해를 일으키고 있어 세계적인 관심을 끌고 있다. 피해를 일으키는 형태는 유해성 적조생물이 어패류를 폐사시키는 등의 직·간접적으로 해양생물과 환경에 나쁜 영향을 미치는 적조피해와 또 하나는 유독성 플랑크톤이 어패류를 독화시키고 독화된 어패류를 사람이 먹으면 식중독을 일으키는 건강피해를 들 수

있다.

새로운 유독성 플랑크톤과 어패류 식중독 독소의 출현

특히 괄목할 만한 것은 미국에서 발견된 신종으로서 어류를 대량 폐사시키는 *Pfiesteria piscicida*란 종에 관한 보고이다. 이 종은 크기가 5~20 μ m의 소형 종으로서 생활사가 매우 복잡하며 아메바형, 휴면포자형 등으로 형태변이를 하고 영양식성은 타가영양이다. 한편 일본에서도 최근에는 *Heterowcapsa circularisquama*라는 새로운 적조생물로 인하여 히로시마만등에서 굴폐사가 대량으로 발생하고 있다. 이외에는 1988년 스웨덴, 노르웨이, 미국, 1998년 홍콩, 1999년 캐나다 등 세계각국에서 서로 다른 유해성 적조생물종이 대규모의 수산피해를 일으키고 있으며 페르시아만의 쿠웨이트 연안에서도 *Gymnodinium*적조에 의해 양식 피해가 1999년도에 발생하였다.

유해 적조 상습발생해역과 연안어장의 공존성

유해적조가 거의 매년 상습적으로 발생하고 또한 이들 해역이 양식장으로 이용하고 있는 어장이라는 점이다. 바

뀌말하면 유해적조가 발생하는 해역이 양식생산을 대부분을 책임지고 있는 해역이다. 예를 들면 우리나라의 남해안은 옛부터 서부역에 해조류 양식이 동부역에는 패류 또는 어류양식산업이 발달되어 있다. 이웃 일본에서도 세토내해, 오무라만 등 생산성이 높은 해역에서 적조가 상습적으로 발생하고 있으며 미국에서도 캘리포니아 연안, 동부의 메인주 등 사람과 수산생물의 이용도가 높은 해역에서 주로 발생하고 있다. 따라서 연안 어장의 생산성이 저하되어 지속적인 생산성의 확보가 어려워지고 있다.

유해 적조 사전예측과 방제 기술개발의 어려움

적조로 인한 경제적인 피해를 최소화하기 위해서는 신속하게 적조발생을 예보하고 피해를 경감할 수 있는 산업적 이용기술을 개발해야 한다. 그러나 최근의 유해적조현상은 발생 조건이 복잡, 다양하여 적조발생을 사전에 예측하기는 매우 어렵다. 게다가 실시간으로 적조발생을 사전에 예측할 수 있는 기법을 개발하기가 매우 어렵다. 유럽과 미국 및 일본 등에서는 적조 또는 식중독발생을 사전에 예보하

“
 환경오염과 관련해 볼 때
 ‘국민’ 들은 오염물질을
 버리고 ‘국가’ 는 국민들이
 버린 쓰레기와 오물을
 치우는 임무를
 수행하고 있다. 따라서
 국민들이 오염물질의
 생산을 대폭적으로 줄이고
 국가는 버린 오염물질을
 효율적으로
 정화처리 해야 한다.
 아울러 환경보전의식도
 지금까지의 ‘네탓이야’
 하는 사고방식을
 ‘내탓이야’ 하는
 책임의식으로, 그리고
 현재의 환경은
 미래세대와 공유해야
 한다는 사명감으로
 방향 전환해야
 환경선진국으로
 발돋움 할 수 있다.

”

기 위한 기술을 개발하기 위하여 많은 노력을 했으나 아직까지 실용화할만한 기술을 개발하지 못하고 있다.

한편 국내에서는 유해적조 발생시 황토를 살포하여 상당한 수산피해방지효과를 얻고 있으며 중국에서도 2000년도에 교주만에서 황토의 일종인 점토를 살포하여 적조 방제효과를 인정하였고 미국과 캐나다 등에서도 상당히 높은 관심을 보이고 있다. 다행히 황토는 화학물질 중에서 해양생태계에 미치는 독성영향이 상대적으로 적은 가장 친환경적이고 친인간적인 물질로 평가를 받고 있으나 과다한 황토 살포는 친해 생태계에 다소나마 영향을 미칠 수도 있기 때문에 주의가 필요하고 황토의 지속적인 양적확보도 문제이다. 이외에 천적, 생물효소, 식물 추출물질을 이용한 생물학적인 적조방제기술을 개발하기 위하여 세계의 많은 과학자들이 노력하고 있으나 실용화에 필요한 대량생산성과 경제성 문제를 해결하지 못하고 있다.

적조 및 유독종의 이동과 전파

최근에는 선박의 입출항시 Ballast water(선박 안정용

해수)에 의해 유독 플랑크톤이 국제적으로 전파되고 이동됨으로 인하여 국제적인 문제를 일으키고 있다. 이와같은 사유로 인하여 구미 선진국뿐만 아니라 아시아 태평양 국가에서도 유독성 플랑크톤의 분포 및 이동확산 연구에 많은 관심을 기울이고 있다. 미국의 Scholin박사 등은 Alexandrium group의 DNA 분자 구조에 관한 특성으로서 각국에서 수집한 48개 Strains으로 이들의 분포 상황을 연구한 결과 종의 지역적 상관성을 찾아냈다. 예를 들면 일본의 *Alexandrium catenella* 종이 최근에 호주로 이동되었다는 것이다. 이와같이 적조생물이 이동 확산됨으로써 외국의 유해종이 국내에 유입될 우려가 커지고 있다.

해양 적조발생방지와 피해방지 대책

주요 국가의 적조방제 대책
 일본의 적조방제 대책은 적조피해예방 대책의 일환으로서 방양어 절식, 가두리 침하, 점토의 살포, 긴급출하 권고 등을 실시하고 있으며 적조피해 방제기술로는 1970년대 점토살포를 개인사업자

중심으로 실시했으나 대량 활용하지 못하였고 화학약품, 초음파, 해면회수, 응집흡착제(철분)에 의한 적조생물구제기술은 실용화에 실패하였다. 최근에도 천적과 미생물 이용한 기술 개발 연구는 계속 추진중에 있다. 중국의 발해만, 동중국연안(상해부근), 홍콩연안에서 대규모 적조가 자주 발생하고 있으며 2000년도에 교주만에서 발생한 적조를 방제하기 위하여 우리나라의 황토와 비슷한 점토를 살포하여 효과가 있음을 입증하였다.

미국의 경우 일본에서 활용한 예를 따라 황산동(CuSO₄)을 살포하였으나 환경오염문제로 사용을 금지하였고 1959~1970년간의 2000여종의 화학 물질을 이용한 방제 연구결과 해양에서 산업화 할 수 있는 물질을 개발하는데 실패하였다. 최근에는 한국에서 활용중인 황토에 의한 적조 방제기술개발에 상당한 연구와 투자를 하고 있다. 캐나다의 브리티시 콜롬비아연안에서 자주 발생하고 최근에 *Cochlo-dinium* 종에 의한 적조 피해가 발생하고 있으나 특별한 대책 없으며 한국의 황토살포에 깊은 관심을 갖고 있다. 그리고 호주 남부에 있

는 타스마니아섬 주변해역에서 *Gymnodinium cate-natum*이 자주 식중독을 일으키고 있어 외국으로부터의 유독종의 호주 유입을 방지하는데 노력하고 있다. 노르웨이에서는 1988년도 적조에 의한 양식 연어 피해가 발생시 연안에서는 어장양식시설물을 대피시키고, 육상양식장에서는 해수순환여과시스템을 활용한 양식방법을 채택함으로써 적조피해를 해결하고 있다. 최근에는 유기물질(Cysteine 류)을 이용한 구제기술을 연구중이나 아직까지 산업화 할 만한 물질 개발을 못하고 있다.

근본적 적조발생 방지 대책 추진 전략

앞으로도 적조현상은 지속적으로 발생하여 해양생산활동을 방해하고 인간의 건강까지도 위협할 것으로 예측된다. 특히 우리나라는 기르는 어업을 육성시켜야 하는 시대적인 사명을 안고 있다. 따라서 어떤 기술을 어떻게 개발해야 하고 관련되는 해양 환경보존 정책을 어떻게 펼쳐야 할 것인가를 결정하는 일은 매우 중대한 문제이다. 이 문제를 풀기 위해 세계적으로 적조대책 성공사례로 알려진 미국, 일본, 및 한국의 3개의

사례를 설명하고 그 해법을 찾아보고자 한다.

미국 남부연안 N.Y.주에 있는 Long Island에서는 1950년대에 녹조가 상습적으로 발생하여 굴 산업에 피해를 일으키고 미적 손상을 초래함으로써 사회적으로 문제가 되었다. 따라서 정부에서는 이와같은 적조의 발생을 근본적으로 방지하기 위하여 외해확산을 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 일본의 瀬戸内해는 1970년대 연간 약 300여건의 적조가 발생하는 상습적인 적조발생해역이었으며 특히 *Chattonella* 적조에 의한 수산피해가 71억엔에 이르렀다. 따라서 적조발생을 감소시키기 위하여 1977년 瀬戸内해 특별조치법을 제정하여 적조발생을 근본적으로 방지하는데 필요한 총량규제제도와 이법에 의한 COD 삭감목표제를 도입 적용하였으며 해역이용행위도 엄격히 억제한 결과 1990년대 이 해역의 적조발생건수는 70년대의 1/3수준인

100여건으로 감소하였다.

한국 남해와 동해남부연안에서는 1995년부터 *Cochlodinium polykrikoides* 종에 의한 적조피해가 매년 가을에 발생하여 사회경제적으로 큰 문제를 야기하였다. 이와같은 수산피해를 방지하기 위하여 1996년도부터 적조해역에 황토를 살포하여 적조생물을 침강 제거시키고 적조발생과 이동 확산상태를 신속하게 감시하여 어업인들에게 통보하는 조기경보시스템을 운영하였다. 그 결과 1995년 764억원이었던 수산피해가 2000년도에는 약 2억원으로 감소하였다.

위의 3개의 사례중 미국과 일본의 사례는 육상오염물질의 해양유입을 차단 또는 현저히 감소시켜 적조발생을 근본적으로 예방하는 조치를 취하여 성공한 사례이고 한국의 사례는 적조발생 후에 적조피해를 최소화시킨 사례이다. 현재 미국과 일본의 경우 2001년의 적조 발생예측을 보면 미국은 적조발생이 거의 없을 것으로 예측하고 일본은 약 1/3 이하수준일 것으로 예측하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 2002년도도 남해안과 동해남부연안에서는 금년도 보다 규모가 같거나 다소

큰 적조가 발생할 것으로 본다. 결국 적조대책은 육상과 해상의 오염부하량을 최소화하는 근본적인 방향으로 나가지 않으면 안된다고 본다. 아울러 기르는 어업발전방향도 환경을 고려한 환경양식산업, 예를 들면 남해안의 해조류 양식산업의 추진, 어류양식물량의 환경용량내 허용 및 연작 양식장의 휴식년제 도입 등은 반드시 추진해야 할 과제들이다. 이와같은 사업들이 효율적으로 이루어져야만이 연안해역에서의 기르는 양식산업을 안정적으로 유지할 수 있다.

결론

전세계의 연안바다는 환경오염이 날로 심해져 빈번한 유해적조발생과 빈산소 수괴를 형성함으로써 천혜 양식산업발달을 위축시키고 있을 뿐만 아니라 인간의 건강까지도 위협하고 있다. 이에따라 세계는 연안환경오염으로 야기된 적조와 마비성 패독 등의 바다 이상현상을 연구하고 문제를 해결하는데 더욱 많은 인력과 예산을 투자하고 있다. 우리나라는 어업생산의 지속성 및 국민건강과 안전을 확보할 수 있는 연구와 대책기술개발사업

을 적극적으로 추진해 나가지 않으면 안된다. 특히 해양 환경질과 불가분의 관계가 있는 해양수산업을 발전시키기 위해서는 적조발생을 근본적으로 차단할 수 있는 처방이 무엇인가를 파악하여 효율적인 국가대책을 시행해야 한다. 특히 우리나라의 경우 국민들의 수산식품 기호성과 소비량이 많고 경제의 해양에 대한 의존도가 높기 때문에 연안 환경을 보전해야 한다. 환경오염과 관련해 볼 때 '국민' 들은 오염물질을 버리고 '국가'는 국민들이 버린 쓰레기와 오물을 치우는 임무를 수행하고 있다. 따라서 국민들이 오염물질의 생산을 대폭적으로 줄이고 국가는 버린 오염물질을 효율적으로 정화처리 해야 한다. 아울러 환경보전의식도 지금까지의 '내탓이야' 하는 사고방식을 '내탓이야' 하는 책임의식으로, 그리고 현재의 환경은 미래세대와 공유해야 한다는 사명감으로 방향 전환해야 환경선진국으로 발돋움 할 수 있다. 