

<총 설>

한국연안에 있어서 적조발생과 식물플랑크톤 독성에 관한 개관

이진환

(상명대학교 자연과학대학 생물학과)

적 요 - 본 총설은 우리나라에서 발생하고 있는 적조현상을 정리하여 적조의 정의, 명칭, 년도별 연구상황, 적조발생 원인 및 생물, 독성, 인명 및 수산물의 피해, 피해지감 및 방제기술에 대하여 소개하였다. 우리나라의 초기의 적조는 돌말류에 의해 발생되었으나, 해양오염이 심각한 1970년대 말부터 무독성 와편모조류에 의해 그리고 1980년대 말에는 유독성 편모조류에 의해 발생되고 있다. 적조발생 규모는 초기에는 국지적이었으나 근래에는 광역화이기 때문에 수산업에 막대한 지장을 초래하고 있다. 따라서 적조에 따른 피해지감 및 방제대책의 연구가 절실히 요구된다.

서 론

인간이 지구상에 출현하기 시작하면서 초래된 환경오염은 초기에는 자연의 자정작용을 통하여 충분히 해결될 수 있었으나, 산업혁명이후 인구가 급속히 증가하여 대량생산 및 소비사회가 형성되면서 파생된 오염물질은 자정작용의 한계를 넘어 인위적인 처리에도 많은 문제점이 대두되고 있다. 현재 전 세계 인구는 약 60억명에 육박하고 있으며 이들의 경제활동이나 다양한 생활방식에 따라 필연적으로 발생하는 오염물질은 궁극적으로 바다에 도달하게 된다. 지구표면의 71%를 차지하는 바다는 무한한 자원이 내재되어 있어 인간의 꿈과 미래를 약속할 수 있는 최후의 터전인데 육지로부터 유입되는 각종 오염원으로 몸살을 앓고 있다.

우리나라도 1970년대이후 중공업의 발달, 임해공업단지의 조성, 인구의 도시집중화, 축산농가의 급증, 농약 및 비료사용의 증가, 교통량의 증가 등 고도성장에 따른 오염물질의 부하량이 증가하고 있으며, 이와같은 물질은 강과 하천을 따라 연안으로 유입되어 해양오염이 되어 급기야 바다의 암(癰)이라 불리는 적조가 크게 발생하고 있는 실정이다. 이와 같이 적조는 단순히 생물학적 현상뿐만 아니라 사회문제로 발전하여 어업피해, 국민건강 및 레저에 이르기까지 다방면에 걸쳐 피해를 주고 있다.

1998년 한국환경생물학회에서는 현 시대상황으로 보아 환경문제가 무엇보다 중요하고 오염에 따른 독성문제가 사회적으로 문제시되어 추계 학술발표시 “환경과 독성”을 주제로 특별강연을 하기에 이르렀으며, 본 고(稿)는 당시 특별강연 세 번째 “한국연안의 적조원인 생물과 식물플랑크톤 독성”을 보완·정리하였기에 보고하는 바이다.

적조의 정의

지구표면의 71%를 차지하고 있는 바다는 육지의 각종 자원이 고갈됨으로서 풍부한 공간자원, 광물자원, 생물자원, 석유자원 등을 무한하게 갖고 있는 인류의 마지막 안식처로서 각광받고 있다. 그러나 육상에서의 도시하수, 농업용수, 산업폐수, 산업활동에서 얻어지는 각종 부산물 등 많은 폐기물이 궁극적으로 바다로 유입되어 해양오염(marine pollution)이 되고 있다. 즉, 해양생태계는 오랜 세월을 거쳐 진화해 왔으며, 각 시기마다 주어진 환경조건에 가장 적당한 상태를 유지해 오고 있었다. 해양생태계는 진화과정을 통하여 과거에 질적으로 또는 양적으로 경험해 보지 못한 폐기물 유입에 의해 오염(pollution)이 되며, 특히 영양염류가 많이 유입되면 부영양화(eutrophication) 현상이 초래되는 것이다. 이와같은 해양에서는 적당한 물리·화학적 환경의 영향으로 기초생산자인 식물플랑크톤 특정종이 대량증식하여 해수색을 변색시켜 이른바 적조(red tide)를 유발시킨다.

적조의 정의는 학자마다 약간씩 다르게 표현하고 있어, Sverdrup *et al.* (1947)은 “Discoloration can be observed when large quantities of finely suspended mineral particles are carried into the sea after heavy rainfall, or when very large populations, several million cells per liter, of certain species of algae or dinoflagellates are present very near the surface”로 정의하였으며, Nybakken (1982)은 “Extreme concentrations, or blooms, of dinoflagellates are called **red tides** and are responsible for the massive localized mortality seen in fish and invertebrates in various places”로 각각 정의하였다. 또 일본의 岡村 (1916)은 “현미경적 미생물이 일시에 다량으로 출현하여 해수의 색깔을 변색시키는 현상으로서 어패류를 폐사시키는 현상”이라고 하였으며, 入江 (1970)은 “여름부터 가을에 걸쳐서 큰 비가 내린 뒤 바다가 잠잠하고 햇빛이 계속된 후에 플랑크톤성 생물의 이상 증식으로 바다색이 변하는 현상”이라고 설명했다. 이와 같이 적조의 정의를 학자에 따라 다양하게 정의하고 대발생 (bloom)과 적조 (red tide)를 혼용하여 사용하고 있으나, Lerman (1986)은 “dramatic increase in population density are called **blooms**”, “blooms of toxic phytoplankton are **red tides**”라고 정리하였다. Sumich (1992)도 “cell concentrations in **blooms** are often so dense that they color the water red, brown, or green, -dinoflagellates produce toxins that in bloom conditions are known as **red tides**-”와 같이 설명하였다. 그러나 실제로 해양생태계에서 독성이 없는 돌말류, 외편모조류 및 기타 편모조류도 대발생을 일으키면 해수색이 변색되므로 적조라고 할 수 있다. 따라서 적조란 “해양생태계에서 식물플랑크톤, 원생생물, 미생물 등이 다량으로 일시에 증식되거나 生物·物理적으로 집적되어 해수의 색을 변색시키며 다른 생물에 해를 끼치는 현상”이라고 정리할 수 있다. 우리나라의 고전이라 할 수 있는 李朝實錄에 묘사된 적조는 “적조(그 당시는 해수의 색으로 표현)가 일어났을 때 해수를 손에 잡으면 붉은 색이 없어지며, 끓여도 없어지지 않으며, 작은 배에서 노를 젓기 힘들 정도로 해수가 뻑뻑하며, 붉은 덩어리가 쌀알에서 콩알만한 크기까지 있다”고 서술하였다.

적조의 명칭과 역사

적조의 정의가 다양한 것처럼 적조의 명칭도 동·서양이나 나라마다 다양하게 불리기도 하고, 지역마다 다른 이름이나 속어로서 일컬어지고 있다. 미국과 유럽에서는 적조를 red tide, water bloom, dinoflagellate bloom, algal bloom, red water, brown water, yellow water,

green water, discolored water, stinking water, baccy juice, weedy water, la malattia del mar, phenomone de l'eau coloree 등이라고 하며, 일본에서도 적조 및 관련현상에 따라서 여러 가지로 불리는데 (柳田 1976), 먼저 색조에 의한 명칭은 綠潮, 靑潮, 靑粉, 白潮 (しらげじお), 白潮 (しろつちお), 褐水 (brown water), 綠水 (green water), 黃水 (yellow water), 變色した水 (discolored water), 직관적인 명칭은 苦潮, 腐潮, 濁水, 菜つ, 葉水, すすみず, 星の汁, 乙姫の經水, 臭い水 (king water), たばこの汁 (baccy juice), 藻類の水 (weedy water) 그리고 어업상의 명칭은 厄水, 役水, 藥水 등의 다양한 용어를 사용하여 왔다. 우리나라에서는 해양적조를 구죽물, 적조 또는 갈조 (褐潮)라고 하고, 특히 담수적조는 색깔에 따라 녹조 (綠潮)라고 불리우나 학자들 사이에 용어의 타당성을 검토하고 있다. 연구결과에 의하면 해수의 색은 적조원인종에 따라 다르게 나타나기 때문에 위와같이 다양한 명칭이 부여된 것으로 판단된다. 즉 해수의 색이 연두색으로 변하는 것은 *Eutroptiella*속과 *Gyrodinium*속의 종들에 의해, 흑갈색은 *Chaetoceros*속, *Skeletonema*속, *Gymnodinium*속, *Prorocentrum*속의 종들에 의해, 황토색은 *Heterosigma*속과 *Chattonella*속의 종들에 의해 그리고 적갈색은 *Noctiluca*속과 *Alexandrium*속의 종들에 의해 이루어진다. 한편 최근에는 적조라는 용어 대신에 인간을 비롯한 여러 생물체에 유해하게 작용하는 식물플랑크톤이 대량증식하는 현상을 HABs (Harmful Algal Blooms)란 말을 많이 사용하고 있다.

적조는 언제 처음으로 발생되었을까? 과거에는 적조라는 학문적인 용어를 사용하지 않고 다만 바다에 나타난 현상만을 사실적으로 기록해 놓았다. 따라서 그와같은 현상을 현대의 지식으로 유추하여 보면 아주 오래전부터 적조가 발생되었음을 알 수 있다. 즉 역사적으로 가장 오래전에 적조를 언급한 것은 성경의 출애굽기 제 7장 20~21절에 “...그 물이 다 피로 변하고, 하천의 물고기가 죽고 물에서는 악취가 나니...”로 기록되어 있다. 日本에서는 “續 日本記” 731년 (奈良時代 초기)에 和歌山縣연안의 해수가 피처럼 붉게 변해 5일간 지속되었으며, 875년 (平安時代)에는 神奈川縣 大住郡의 강물이 붉게 변하였으며, 1312년 (鎌倉時代 後期)에도 相模, 伊豆 등 5개 연안의 해수가 붉게 변하여 그 범위가 1,200 km이 달했다고 기록되어 있다. 서양에서도 태평양 주변 해역에서 1770년 James Cook과 1802년 Matthew Flinders가 호주연안에서, 1803년 Alexander Humbolt는 남미 태평양 연안에서 그리고 1831년부터 1836년까지 Charles Darwin은 브라질, 칠레, 호주연안에서 각각 적조현상을 기록하고 있다 (Hahn 1998).

우리나라의 적조는 역사적으로 상당히 오래전부터 발생되었다. Hahn(1998)에 의하면 161년 8월 신라 아달라왕때 많은 물고기가 폐사되었으며, 639년 8월 신라 선덕여왕 시대에도 동해에서 해수가 변색되어 물고기 폐죽을 당했으며, 660년 3월 백제 의자왕 시대에도 서해 연안에서 물고기가 폐죽을 당했다고 한다. 1176년 4월 고려 명종때 동해의 해수색이 황색 또는 혈색으로 변색되었으며, 1399년(정종 1년) 9월 13일과 10월 17일에 울주에서 기장연안까지 어족이 모두 죽어 통도사에서 제사를 지냈으며, 1403년(태종 3년) 8월 7일, 8월 27일, 10월 9일에 경상남도 기장연안, 고성연안, 진해만에서 해수가 황색, 흑색, 적색으로 변하여 물고기가 폐죽을 당했다고 기록하고 있다. 1412년부터 1820년까지 7, 8, 9월에 26회에 걸쳐 순천만, 부산, 동래, 통영, 진해, 고성, 거제도 일대에서 해수색이 적색, 흑색, 황색으로 변하여 물고기가 폐죽음을 당했다고 기록하고 있다.

우리나라의 담수적조는 1394년 7월 26일 기탄지방(경기지방의 개울?)에서, 1395년 11월 16일 개성의朴淵, 大井, 德津에서, 1406년 6월 18일 의정부의 연못에서 물이 붉게 변하였음을 기록하였다. 1512년부터 1742년까지 12회에 걸쳐 한강, 임진강, 평양의 연못, 온산의 연못, 황해도 금천, 양주의 광진, 낙동강 등의 물이 붉게 변하였음을 각각 기술하고 있다.

년대별 적조연구

1960년대: 우리나라의 적조에 대한 과학적인 연구는 지금부터 약 40여년 전인 1960년대부터 시작하였다. 즉 1961년 10월 11~13일 진동만에서 약 3km² 규모의 적갈색 적조를 관찰하였으며, 적조원인종으로는 돌말류의 *Chaetoceros* spp.와 *Nitzschia* sp.였다. 적조발생 원인은 예년에 비하여 높은 수온과 강우에 기인한 저염분이었던 것으로 판단되었으며, 이것이 처음으로 과학적인 적조 연구가 시작된 셈이다(박과 김 1967).

1970년대: 유와 이(1976)는 1974년 9월부터 1975년 6월까지 매월 마산만 조사에서 *Leptocylindrus danicus*가 5, 9, 12월에 7×10^6 cell/l까지 대발생을 보였으며 염분과 상관관계가 있다고 하였다. 조(1978)는 1977년 7월 중순 진해만에서 *Gonyaulax* sp.에 의한 갈색 적조를, 이듬해 8월초에도 *Ceratium fusus*와 *Chaetoceros* spp.에 의한 적조로 양식물의 대량폐사가 있었다고 보고하였다(조 1979). 이(1978)는 1976년 7, 9, 11월 진해만 일대에서 *Skeletonema costatum*이 최고 10^7 cell/l에 이르는 대폭발을 관찰하였다.

1980년대: 박(1980)은 1979년 6월 행암만(진해만)에서 *Prorocentrum micans*에 의한 1.1×10^7 cell/l의 고농

도 적조가 발생하였고, 한산만과 거제만에서도 적조가 발생하여 어류, 굴이 폐사하여 수산생물의 많은 피해가 있었음을 보고하였으며, 원인을 도시하수 및 산업폐수라고 하였다. 이 등(1981)은 1979년 8월부터 1980년 9월까지 진해만에서 적조원인생물 8종류에 관하여 생태학적으로 규명하였다. 진해만에서 1981년 7월부터 9월까지 미증유의 *Gymnodinium nagasakiense*에 의한 적조가 3개월간 지속되어 어패류 및 양식 수산생물 등 피해액이 약 17억원에 달하였으며, 원인은 부영양화, 고온, 염분 등으로 판단하였다(Cho 1981; 박 1982; Lee & Kwak 1986). Yang et al.(1983)은 진해만에서 4년간 적조와 수질지수와의 상관관계를 규명하였으며, 김(1989a)은 마산만에서 1979년부터 1988년까지 편모조류에 의한 적조와 환경특성을 규명하였다. 이와 허(1983)는 1980년 8월 득량만에서 높은 강우량에 의한 주변생태계로부터 영양염류 유입으로 *Ceratium furca*에 의한 적조가 발생되었다고 보고하였다. 이외에도 장생포항에서 1982년 5월과 1983년 3월에 각각 *Prorocentrum micans*와 *Peridinium trochoideum*이 1.0×10^7 cell/l, 1.1×10^8 cell/l의 심한 적조가 있었고, 인천만에서 1984년과 1986년 7월에 *Noctiluca scintillans*가, 영일만에서는 1986년 6월 *Prorocentrum* spp., *Heterosigma akashiwo*가, 그리고 가막만, 여자만, 진주만에서도 *Noctiluca scintillans*, *Cochlodinium* sp., *Skeletonema costatum*에 의한 적조가 발생하였다(Park 1991). 따라서 1979년부터 1980년대 말까지 대부분 외편모조류에 의한 고밀도 적조가 발생되었고, 일부 해역에서는 돌말류와 함께 혼합적으로 발생되었다. 1980년대부터 진해만을 포함한 오염해역에서 적조원인종에 관한 분류학적 연구(Yoo 1982; 한과 유 1983a, b; 유 1984; 유와 이 1985; Yoo & Lee 1986; 이 1987; 이 1991; Lee 1994a), 생태학적 연구(이 1984; 김 1986; Kim 1986; 이 1987; 김 1989b; 이 1991; Lee 1994b), 생리학적 연구(조 등 1998; 장 등 1998; Chang et al. 1999) 등이 이루어지고 있다.

한편 독성을 생성하는 적조원인생물을 여과 섭식한 이매패류의 독성을 정량분석 하였으며(전 등 1987; 전 등 1988; 전과 허 1989; 김 등 1994), 특히 마비성 패독을 분비하는 *Alexandrium tamarense*의 출현과 독성을 규명하였다(이 1990; Han et al. 1992; Han et al. 1993; Lee et al. 1992). 또한 적조에 관한 국제간 학술교류가 1982년 10월 21일 처음으로 이루어져 “한-일 적조 세미나”가 한국해양연구소 주최로 열렸다.

1990년대: 이와 변(1991)은 인천항 선거에서 1990년 8월 4일 *Skeletonema costatum*에 의한 황갈색 적조를 보고하였다. 우리나라 연안에서 출현하는 유독 편모조류

의 분류 및 종합고찰을 하였으며(한 1990; 이 등 1993), 남해안에서 1974년부터 1994년까지 신경독을 생성하는 *Pseudonitzschia pungens* f. *multiseries*의 출현, 형태 및 독성을 규명하였다(Lee 1994a; 이와 백 1997). Lee (1994b)는 진해만의 적조에 대한 주변생태계의 오염부하량, 수질, 원인생물, 적조농도, 종별 생태적 특성 등을 종합적으로 규명하였으며, Chang *et al.* (1995)은 마산만과 진해만의 기존의 연구결과를 종합하였다. 윤 등 (1991)은 제주해역의 적조원인생물의 분포 및 농도를 규명하였으며, 1990년 8월 4일 인천항 선거에서 *Skeletonema costatum*에 의한 적조가 매우 심하였을 때의 원인을 풍부한 아질산염과 높은 수온에 기인한다고 보고하였다(이 등 1997). 1992년부터 1998년까지 전라남도 와 경상남도 연안에서 *Cochlodinium polykrioides*에 의한 대규모 적조가 발생하여 부산연안을 거쳐 강원도 연안까지 확대되는 양상을 보였다. 이 과정에서 해류의 이동에 따라 크고 작은 만(灣)으로 확산되어 완도, 나로도, 득량만, 여자만, 광양만, 한산만, 자란만, 고성만, 당동만, 진동만, 진해만, 행암만, 부산연안, 울산만, 포항연안에서 강원도 연안까지 이동되었다(Kim 1998). 1998년 7월 득량만에서는 *Prorocentrum minimum*, *Chaetoceros curvisetus*, *Ceratium furca*에 의한 적조가 발생되었으며, 높은 영양염류가 주원인이었다고 보고하였다(이와 이 1999). 유 등(1998)은 적조를 발생시키는 섬모충류 *Mesodinium rubrum*에 대하여 미세구조, 분류학적 문제, 적조와 생태학적 문제 등을 종합적으로 서술하였다. 한편 국립수산진흥원 주관으로 한-불 적조 세미나를 개최하여 한국의 적조현황, 외편모조 시스트의 분포와 역할, 마비성패독, 적조의 해류에 의한 이동문제 등을(Park & Kim 1991), 또한 HABs을 주제로 한-중 심포지움을 통하여 적조 발생년도, 어류폐사, 방제기법, 천적, 패류독성 등을 심도있게 논의하였다(Kim *et al.* 1998).

따라서 1970년대의 적조는 규모도 작고 돌말류와 무독성 외편모조류에 의해 발생되었고, 1980년대에는 유독성 외편모조류에 의해 피해 대규모의 피해가 있었으며, 1990년대의 적조특성은 발생규모도 크고 특정한 종에 의해 대량 발생되고 있었다. 적조발생해역도 임해공업단지가 있는 연안에서 빈발하며 특히 양식장이 과밀한 남해안을 중심으로 발생빈도가 잦아 피해가 큰 편이었고, 외양역에서도 발생하여 광역화 되고 있는 실정이다. 또한 우리나라의 적조연구는 1980년대에 비로소 시작하여 주로 원인종을 밝혀내고 생태적인 특징을 규명하는데 노력하였으며, 최근에는 독성문제 및 생리적인 특성을 연구하고 있다.

적조원인종

우리나라 연안에서 1961년 이후 현재까지 적조를 일으킨 원인종은 돌말류, 외편모조류, 유우글레나조류, 남조류, 규질편모조류, 은편모조류, 원생생물 등으로 구성되어 있다. 특히 진해만에서 적조원인생물의 목록에 관한 연구가 많이 이루어져, 이 등(1981)은 1979년 8월부터 1980년 9월까지 8종류를, Yoo(1982)는 1980년 5월부터 11월까지 20종류를, 유(1984)는 1981년 8월부터 1982년 7월까지 29종류를, 유와 이(1985)는 1982년 1월부터 12월까지 19종류를, 김(1989a)은 1979년부터 1988년까지 22종류의 적조원인 생물을 각각 보고하였다. 한편 박(1980)은 1972년부터 1979년까지 진해만을 포함한 남해안에서 적조원인생물 17종류를, 이와 허(1983)은 1980년 8월부터 1981년 6월까지 득량만에서 2종의 적조발생 원인종을, 윤 등(1991)은 1989년 6월부터 10월까지 제주연안에서 17종류를, 이 등(1996)은 1996년 4월부터 10월까지 목포, 여수, 통영, 제주연안에서 23종류를, 이 등(1997)은 1990년 1월부터 1991년 12월까지 인천항 선거에서 33종류의 적조원인생물을 각각 보고하였다. Park(1991)은 한국연안에서 돌말류 11종류, 편모조류 22종류, 섬모충류 1종 등 총 34종류의 적조원인 생물을 발표하였으며, Lee(1994b)는 1974년 9월부터 1994년 10월까지 진해만에서 적조를 유발시킨 생물을 돌말류 13종, 외편모조류 11종, 유우글레나조류 1종 등 총 25종을 보고하였다. 김 등(1997)은 우리나라 연안에서 적조를 일으키는 원인생물을 43종류로 보고하였으며, Kim(1998)은 1981년부터 1996년까지 우리나라 연안에서 적조를 유발시킨 생물을 조사·정리한 결과 돌말류 13종, 외편모조류 19종류, 남조류 3종류, 라피도조강 3종 그리고 은편모조류, 섬모충류, 유우글레나조류, 규질편모조류 각 1종 등 총 42종류로 정정하였다. 현재까지 기존의 문헌을 정리하면 우리나라의 적조원인 생물은 돌말류가 21종류, 외편모조류 31종류, 원생생물 2종류, 규질편모조류 2종류, 유우글레나조류 2종, 남조류 1종 그리고 기타 편모조류가 6종류 등 총 65종류로 집계되었다(김 등 1997; 이 등 1997; Kim 1998). 한편 이(1999)는 한국연안에서 출현하는 적조원인생물 72종류에 대하여 문헌, 이명, 기재, 사진, 분포지, 생태적 특성을 밝혔다. 따라서 위에 열거한 문헌과 1970년대부터 한국해양연구소, 서울대학교, 한양대학교, 상명대학교, 제주대학교, 군산대학교, 인하대학교 등 기타대학 및 연구소에서 조사한 적조원인생물을 총 정리하면 Table 1과 같았다. 즉 황갈색편모조 식물문에 57종류, 외편모조 식물문에 31종류, 남조 식물문 3종류, 유우글레나조 식물문, 은편모

Table 1. Checklist of the causative organisms of red tide in the coastal waters of Korea

Division Chrysophyta
Class Bacillariophyceae
Order Centrales
Suborder Coscinodiscineae
Family Thalassiosiraceae Lebour 1930, emend. Hasle 1973
<i>Lauderia annulata</i> Cleve
<i>Skeletonema costatum</i> (Grev.) Cleve
<i>Thalassiosira allenii</i> Takano
<i>T. anguste-lineata</i> (Schmidt) Fryxell and Hasle
<i>T. binata</i> Fryxell
<i>T. conferta</i> Hasle
<i>T. eccentrica</i> (Ehrenb.) Cleve
<i>T. leptopus</i> (Ehrenb.) Fryxell and Hasle
<i>T. lundiana</i> Fryxell
<i>T. mala</i> Takano
<i>T. minima</i> Gaarder
<i>T. nordenskioldii</i> Cleve
<i>T. weissflogii</i> (Grunow) Fryxell and Hasle
Family Melosiraceae Kutzing 1844
<i>Corethron criophilum</i> Castracane
<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve
<i>Stephanophyxis palmeriana</i> (Grev.) Grunow
Family Coscinodiscaceae Kutzing 1844
<i>Coscinodiscus jonesianus</i> (Ehrenb.) Ostenfeld
Family Heliopeltaceae H. L. Smith 1872
<i>Actinoptychus senarius</i> Ehrenberg
<i>A. splendens</i> (Shadb.) Ralfs
Suborder Rhizosoleniineae
Family Rhizosoleniaceae Petit 1888
<i>Guinardia flaccida</i> (Castr.) Peragallo
<i>Rhizosolenia alata</i> Brightwell
<i>R. delicatula</i> Cleve
<i>R. fragilissima</i> Bergon
<i>R. hebetata</i> f. <i>semispina</i> (Hensen) Gran
<i>R. imbricata</i> Brightwell
<i>R. indica</i> (Perag.) Ostenfeld
<i>R. robusta</i> Norman
<i>R. setigera</i> Brightwell
<i>R. stolterfothii</i> Peragallo
<i>R. styliformis</i> Brightwell
Suborder Biddulphiineae
Family Biddulphiineae Kutzing 1844
Subfamily Hemiauloideae Jouse, Kiselev & Poretskii 1949
<i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenberg
Family Chaetoceraceae H. L. Smith 1872
<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder
<i>C. atlanticus</i> Cleve
<i>C. brevis</i> Schutt
<i>C. compressus</i> Lauder
<i>C. curvisetus</i> Cleve
<i>C. debilis</i> Cleve
<i>C. decipiens</i> Cleve
<i>C. didymus</i> Ehrenberg
<i>C. lauderi</i> Ralfs
<i>C. similis</i> Cleve
<i>C. socialis</i> Lauder
<i>C. vanheurckii</i> Gran
Family Lithodesmiaceae H. & M. Pergallo 1897~1908

Table 1. Continued

	<i>Ditylum brightwellii</i> Grunow
Family	Eupodiscaceae Kutzing 1849
Subfamily	Eupodiscoideae (Kutzing 1849)
	<i>Odontella mobiliensis</i> (Bailey) Grunow
	<i>O. sinensis</i> Greville
Order	Pennales
Suborder	Araphidineae
Family	Fragilariaceae Greville 1833
	<i>Asterionellopsis gracialis</i> (Castracane) Round in Round <i>et al.</i> 1990
Family	Nitzschiaceae Grunow 1860
	<i>Bacillaria paxillifer</i> (Muller) Hendey
	<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenb.) Reiman and Lewin
	<i>Nitzschia delicatissima</i> Cleve
	<i>Pseudonitzschia multiseries</i> Hasle
	<i>Pseudonitzschia pungens</i> Hasle
	<i>P. seriata</i> Cleve
Class	Chrysophyceae
Order	Dictyochales
Family	Dictyochaceae Ehrenberg 1837
	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg
Class	Rhaphidophyceae
Order	Raphidomonadales
Family	Vacuolariaceae
	<i>Chattonella antiqua</i> (Hada) Ono
	<i>C. marina</i> (Subrahmanyam) Y. Hara et Chihara
	<i>Fibrocapsa japonica</i> Toriumi et Takano
Division	Dinophyta
Class	Dinophyceae
Order	Prorocentrales
Family	Prorocentraceae Stein 1883
	<i>Prorocentrum balticum</i> (Lohmann) Loeblich III
	<i>P. dentatum</i> Stein
	<i>P. lima</i> (Ehrenb.) Dodge
	<i>P. micans</i> Ehrenberg
	<i>P. minimum</i> (Pavillard) Schiller
	<i>P. triestinum</i> Schiller
Order	Dinophysiales
Family	Dinophysiaceae Pavillard 1916
	<i>Dinophysis acuminata</i> Claparede and Lachmann
	<i>D. caudatum</i> Savillekent
	<i>D. fortii</i> Pavillard
Family	Heterosigmaceae
	<i>Heterosigma akashiwo</i> (Hada) Hada
Family	Amphisoleniaceae Kofoid 1928
	<i>Oxyphysis oxytoxoides</i> Kofoid
Order	Gymnodiniales
Family	Gymnodiniaceae Lankester 1885
	<i>Cochlodinium polykrikoides</i> Margalef
	<i>Gymnodinium mikimotoi</i> Miyake et Kominami ex Oda
	<i>G. sanguineum</i> Hirasaka
	<i>Gyrodinium fissum</i> (Levander) Kofoid et Swezy
Family	Polykrikaceae Lindemann 1928
	<i>Pheopolykrikos hartmanii</i> (Zimmermann) Matsuosa et Fukuyo
Order	Noctiucales
Family	Noctilucaeae Kent 1881
	<i>Noctiluca scintillans</i> (Macartney) Ehrenberg
Order	Peridinales

Table 1. Continued

Family Protoperidiniaceae F. J. R. Taylor 1987
<i>Heterocapsa triquetra</i> (Ehrenb.) Stein
<i>Protoperidinium bipes</i> (Paulsen) Balech
<i>P. depressum</i> (Bailey) Balech
Family Calciodinellaceae F. J. R. Taylor 1987
<i>Scrippsiella trochoidea</i> (Stein) Loeblich III
Family Goniodomataceae Lindemann 1928
<i>Alexandrium affine</i> (Inoue & Fukuyo) Balech
<i>A. fraterculus</i> (Balech) Balech
<i>A. tamarense</i> (Lebour) Balech
Family Gonyaulacaceae Lindemann 1928
<i>Gonyaulax polygramma</i> Stein
<i>Lingulodinium polyedra</i> (Stein) Dodge
Family Ceratiaceae Lindemann 1924
<i>Ceratium furca</i> (Ehrenb.) Cleporede et Lachman
<i>C. fusus</i> (Ehrenb.) Dujarden
<i>C. lineatum</i> (Ehrenb.) Cleve
<i>C. trichoceros</i> (Ehrenb.) Kofoid
<i>C. tripos</i> (Muller) Schiller

Division Euglenophyta

Class Euglenophyceae

Order Eutreptiales

Family Eutreptiaceae

Eutreptiella gymnastica Throndsen

Division Cyanophyta

Class Cyanophyceae

Order Chroococcales

Family Nostocaceae

Anabaena flos-aquae (Lyngbye) Brebisson*A. spiroides* Klebahn*Microcystis aeruginosa* Kutzing

Division Cryptophyta

Class Cryptophyceae

Order Cryptomonadales

Family Cryptomonadaceae Butcher 1967

Chroomonas salina Wislouch

Phylum Protozoa

Class Ciliata

Subclass Holotricha

Order Gymnostomatia

Family Didiniidae

Mesodinium rubrum (Lohmann) Hamburger et Buddenbrock

조 식물문, 원생 생물문에 각각 1종등 총 94종류로 구성 되어 있었다.

적조발생 원인

적조발생 원인은 우선 연안역에 각종 오염원이 유입 되어 부영양화가 이루어져야 하며, 적조원인생물이나 또는 그의 휴면포자가 있어야 하고, 이들이 대량증식하기

위하여 수온, 염분 등과 같은 물리적 환경이 알맞아야 한다. 먼저 연안역의 부영양화는 지형에 따라 큰 차이가 있어 해안선이 단조로운 연안이나 해류가 빠른 곳에서는 확산이 빠르게 이루어지나, 해안선이 복잡하고 반폐쇄적인 만(灣)을 이루는 곳에서는 해류의 유동이 원활하지 않아 부영양화는 상대적으로 오랜동안 지속된다. 실제로 연안역에 임해공업 단지나 대도시가 있는 울산

만, 온산만, 마산만, 진해만, 광양만 등에서는 각종 오염원이 유입되어 부영양화가 진행되며 반폐쇄적인 지형 때문에 적조가 빈번하게 발생하는 해역이다. 한편 적조 원인생물이나 그들의 휴면포자는 원래부터 해당 해역에 있었을까? 아니면 다른 해역에서 유입되는 것일까? 이 문제는 적극적으로 연구하지도 않았고 연구접근도 사실상 어려워 규명하지 못하고 있다. 기본적으로 해수는 해류나 조석에 따라 끊임없이 움직이고 있어 외양수로부터 유입되는 경우가 많을 것이다. 또한 산업이 발달하면서 선박을 이용한 물동량의 이동이 활발해지면서 국가간, 항구간, 선박 이출입시 블라스트 킬에 의한 해수의 이동도 한 몫할 것으로 판단된다. 마지막으로 적조원인생물이 대량증식 하기 위해서는 광합성에 필요한 일조량이 충분하고 해수의 온도가 일맞아야 한다. 온대지방에서는 수온이 15~25°C인 봄철부터 가을철까지 적조가 발생한다. 특히 와편모조류는 이보다 약간 높은 수온 20~27°C인 여름철에 집중적으로 적조를 발생시킨다. 한편 염분농도도 적조발생에 깊이 관계하는데 장마후 염분농도가 낮아진 경우 많은 적조가 발생한다. 즉 부영양화 현상이 없었던 조선시대나 근래에도 공통적으로 긴 장마후에 집중적으로 적조가 발생하는 것으로 보아 담수의 유입으로 염분농도에 영향이 있음을 알 수 있다. 다만 염분농도가 독립적으로 영향을 미치지 보다는 장마시 강과 하천을 통하여 퇴비 및 비료가 함유된 농업용수, 미량원소나 적조생물의 성장 필수원소가 포함된 산업폐수 및 도시하수 등이 동시에 유입되어 영양원이 풍부해지고 수층이 안정되고 일조량이 좋으면 적조가 가장 발생하는 것으로 판단된다. 한편 해양의 저질에 있던 각종 영양염류들이 계절적으로 수괴의 수직혼합(vertical mixing)으로 표층으로 공급되면 여러 환경요인과 더불어 적조발생의 한 원인이 되기도 한다.

대표적인 적조원인종의 농도 및 발생해역

우리나라 연안역에서 기록된 적조원인생물 94종류 중에서 대표적으로 적조를 발생시킨 21종에 대한 발생시기, 해역 및 적조생물의 밀도를 보면 Table 2와 같았다. 적조원인종 중 가장 높은 밀도를 보인 것은 1981년 8월 7일 경상남도의 웅동만에서 *Gymnodinium mikimotoi*로 4.1×10^8 cell/l의 농도를 나타내었으며(김 등 1997), 본 종은 1981년 7월부터 9월까지 3개월간 진해만 일대에서 짙은 갈색의 대규모 적조를 나타내었다(Lee & Kwak 1986). 한편 가장 규모가 크고 장기적으로 적조를 발생시킨 종은 *Cochlodinium polykrikoides*로, 1984년 9월 14일부터 10월 2일까지 당동만에서, 1990년 9월에 남해군 연안과 삼천포에서, 1993년에는 10월 5일부터 10월

25일까지 전라남도 여천군에서 통영연안에 이르기까지, 1995년과 1996년에는 공히 9월에 시작하여 약 한달간 전라남도 해역으로부터 강원도 해안에 이르기까지 3.0×10^7 cell/l에 육박하는 대규모 적조가 발생되었다(김 등 1997). *Noctiluca scintillans*는 1981년 4~5월, 1982년 8~9월, 1983년 4월 진해만에서 37회에 걸쳐 $1.15 \sim 6.70 \times 10^5$ cell/l의 농도가 유지되었다(이 미발표 자료). 한편 1986년 6월 인천연안의 팔미도 해역에서는 1.0×10^7 cell/l의 농도 높은 적조가 발생한 것을 비롯하여 충청남도의 홍성, 비인도, 보령연안과 남해의 미조면과 앵강만에서도 1.0×10^6 cell/l 이상의 농도가 관찰되었다. *Ceratium furca*는 전라남도 득량만과 여자만에서(이와 허 1983; 이와 이 1999), 경상남·북도 연안에서 7월과 8월에 한하여 농도 높은 적조를 발생시키고 있다(김 등 1997). 한편 돌말류 중 *Skeletonema costatum*은 우리나라 전 해역에서 계절에 상관없이 대발생 및 적조를 발생시키며, 단위체적당 세포의 농도가 10^7 cell/l 이상 되는 경우가 많았다. 나머지 적조원인종의 단위체적당 세포밀도는 Table 2와 같다.

적조원인종의 독성

우리나라연안에서 적조를 유발시킨 종 중에서 독성을 분비하는 식물플랑크톤을 독성의 종류와 관련하여 구분하면 다음과 같다. 첫째로 마비성 패독(痲痺性 貝毒, Paralytic Shellfish Poisons, PSP)을 분비하는 것은 와편모조류의 *Alexandrium catenella*, *A. tamarense*, *A. affine*, *A. fraterculus*, *Gymnodinium catenatum*, 둘째로 설사성 패독(下痢性 貝毒, Diarrhetic Shellfish Poisons, DSP)을 분비하는 것은 와편모조류의 *Dinophysis acuminata*, *D. caudata*, *D. fortii*, *D. rotundata*, *Prorocentrum lima*, 셋째로 기억상실성 패독(記憶喪失性 貝毒, Amnesic Shellfish Poisons, ASP)을 분비하는 돌말류의 *Pseudonitzschia multiseries*가 있다. 이외에도 돌말류의 *Thalassiosira mala*, 와편모조류의 *Cochlodinium polykrikoides*, *Gymnodinium mikimotoi*, *G. sanguineum*, *Heterosigma akashiwo*, *Prorocentrum micans*, *P. minimum* 등이 있다. 우리나라에서는 독성을 분비하는 종에 의한 다른 수산생물의 독화현상, 유독성분의 조성, 정량실험 등이 아직 초보적인 단계로 그리 활발하지 않다(전 등 1987; 전 등 1988; 전과 허 1989; Lee et al. 1992; 이와 백 1997). 1987년 4월부터 1988년 2월 사이에 국내산 이매패류 28종류의 독화현상을 조사한 결과 양식 진주담치의 마비성패독은 gonyautoxin 1-4 (GTX₁₋₄)가 주성분이었으며 일부가 미량으로 saxitoxin (STX)과 proto-gonyautoxin 1-2 (PX1-2)가 함유되어 있었다(전 등

Table 2. Cell density of the causative organisms of red tides in the coastal waters of Korea

Species	Date	Site	Cell density (cells/l)
<i>Ceratium furca</i>	July 19, 1993	Dunduk Bay, Gujora	$4.4 \sim 8.2 \times 10^6$
	Aug. 10, 1995	Ulsan-Pohang	$1.0 \sim 1.5 \times 10^7$
	July 19, 1996	Chojun, Namhae	$1.9 \sim 2.7 \times 10^6$
	July 30, 1997	Gohyun Bay	$1.5 \sim 1.7 \times 10^6$
	July 7-8, 1998	Yeoja-Deukryang Bay	$2.0 \sim 3.5 \times 10^5$
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	July 23, 1981	Haengam Bay	$2.9 \sim 3.1 \times 10^7$
	July 28, 1981	Gajo Is.	$2.6 \sim 33.3 \times 10^6$
	Aug. 7, 1981	Ungdong Bay	$1.5 \sim 4.1 \times 10^8$
	Sept. 11, 1981	Wonmun Bay	$5.3 \sim 26.6 \times 10^6$
	Aug. 14-15, 1986	Haengam Bay	$1.5 \sim 4.0 \times 10^6$
	July 31, 1990	Aewol, Cheju Is.	$5.0 \sim 2.0 \times 10^7$
<i>Heterosigma akashiwo</i>	May 23, 1983	Haengam Bay	$0.7 \sim 12.0 \times 10^7$
	May 23, 1983	Masan Bay	$0.2 \sim 12.0 \times 10^7$
	May 17, 1984	Masan Bay	$0.2 \sim 18.0 \times 10^7$
	June 9, 1985	Onsan Bay	$0.2 \sim 11.0 \times 10^7$
	May 31, 1986	Masan Bay	$1.0 \sim 14.5 \times 10^7$
	June 10, 1989	Jangmok, Geoje	$8.0 \sim 10.0 \times 10^7$
	July 13, 1991	Jinhae Bay	$5.0 \sim 6.0 \times 10^7$
	July 1, 1996	Gamag Bay	$1.3 \sim 11.5 \times 10^6$
June 16, 1997	Onsan Bay	$7.0 \sim 10.0 \times 10^6$	
<i>Prorocentrum micans</i>	June, 1979	Haengam Bay	$1.2 \sim 11.3 \times 10^7$
	June 24, 1982	Masan-Haengam Bay	$1.0 \sim 4.5 \times 10^7$
	1988.	Masan Bay	$3.0 \sim 3.5 \times 10^7$
	June 2, 1998	Masan Bay	$3.2 \sim 5.5 \times 10^6$
<i>Mesodinium rubrum</i>	May 23, 1985	Masan Bay	$7.0 \sim 80.0 \times 10^6$
	July 30, 1990	Palmi Is.	$1.4 \sim 2.8 \times 10^7$
	Agu. 24, 1992	Kwangyang Bay	$4.4 \sim 4.7 \times 10^6$
	July 6, 1994	Chonsu Bay	$1.5 \sim 1.7 \times 10^6$
	May 24, 1995	Kunsan Harbour	$7.0 \sim 8.7 \times 10^6$
	July 6-10, 1986	Palmi Is.	1.0×10^7
	July 16, 1997	Boryung coast	$0.5 \sim 1.8 \times 10^6$
<i>Eutreptiella gymnastica</i>	May 10, 1989	Masan Bay	$3.2 \sim 4.5 \times 10^6$
	April 7, 1994	Masan Bay	$2.0 \sim 4.5 \times 10^7$
	May 6, 1996	Masan-Haengam Bay	3.6×10^7
	April 18, 1997	Masan Bay	$4.4 \sim 7.0 \times 10^6$
<i>Leptocylindrus danicus</i>	May, 1974	Masan Bay	$5.7 \sim 8.5 \times 10^6$
	April 8, 1996	Kwangyang Bay	$2.5 \sim 3.2 \times 10^6$
	Mar. 27, 1997	Kangjin Bay	$8.2 \sim 12 \times 10^6$
<i>Cochlodinium polykrikoides</i>	Oct. 5, 1993	Jindong, Mijo(Namhae)	$6.9 \sim 9.8 \times 10^6$
	Sept. 11, 1995	Changsun, Namhae	$2.3 \sim 30 \times 10^6$
	Sept. 25, 1995	Masan Bay	$4.5 \sim 7.2 \times 10^6$
	Oct. 8, 1995	Samchuk, Kangwon	1.3×10^6
<i>Pseudonitzschia pungens</i>	May 24, 1978	Jinhae Bay	$0.8 \sim 1.0 \times 10^6$
	May 16, 1981	Jinhae Bay	$7.8 \sim 8.6 \times 10^5$
	April 25, 1982	Jinhae Bay	$6.8 \sim 8.3 \times 10^5$
	April 30, 1993	Sujungri, Masan	2.2×10^6
	July 9, 1997	Sarangdo-Taedo	1.6×10^7
	April. 30, 1983	Masan Harbour	$1.8 \sim 1.9 \times 10^6$
<i>Pseudonitzschia seriata</i>	Oct. 15-23, 1985	Jindong Bay	$0.1 \sim 3.7 \times 10^7$
	Oct. 15-23, 1985	Wonmun Bay	$0.8 \sim 1.4 \times 10^7$
	July 30, 1986	Jindong-Dangdong	$2.0 \sim 3.0 \times 10^6$
	July 23, 1992	Puksin Bay, Bupsungpo	1.2×10^7

Table 2. Continued

Species	Date	Site	Cell density(cells/l)
<i>Gymnodinium splendens</i>	May 9~11, 1985	Masan Harbour	3.0~42.0 × 10 ⁶
	Oct. 15~23, 1985	Jindong Bay	1.2~37.0 × 10 ⁶
	July 7~10, 1986	Jindong Bay	3.0~5.0 × 10 ⁶
	June 23~28, 1986	Onsan Bay	1.0~8.0 × 10 ⁷
	June 1, 1987	Masan Harbour	9.0~9.7 × 10 ⁶
	Nov. 9, 1989	Jindong Bay	1.7~2.5 × 10 ⁶
<i>Prorocentrum dentatum</i>	June 26, 1985	Masan-Chilchon Is.	1.5~13.0 × 10 ⁷
	June 26, 1985	Haengam Bay	8.0~12.0 × 10 ⁷
	July 1~3, 1986	Masan Bay	1.4 × 10 ⁸
	July 1~3, 1986	Haengam Bay	1.0 × 10 ⁸
	July 1~3, 1986	Jinju Bay	6.0~8.0 × 10 ⁷
	July 30, 1995	Dunduk, Geoje Is.	2.0~3.0 × 10 ⁷
<i>Prorocentrum minimum</i>	June 26, 1985	Jindong Bay	8.0~9.0 × 10 ⁷
	June 27, 1986	Masan Bay	0.3~9.7 × 10 ⁷
	Aug. 3, 1988	Masan Bay	1.0~1.2 × 10 ⁷
	June 1, 1990	Masan Bay	1.2~5.0 × 10 ⁷
	Aug. 6, 1997	Tongyung coast	1.2~2.1 × 10 ⁷
<i>Alexandrium affine</i>	Aug. 18, 1990	Yundaedo-Sarang	1.2 × 10 ⁷
	Aug. 21, 1990	Jinju Bay	3.0 × 10 ⁶
<i>Protoperdinium</i> sp.	Mar. 29, 1983	Jangsaengpo Harbour	1.0~11.2 × 10 ⁷
<i>Alexandrium tamarensense</i>	April 7, 1997	Jindong Bay	4.8 × 10 ⁶
	April 17, 1997	Haengam Bay	8.8 × 10 ⁵
<i>Skeletonema costatum</i>	Dec. 1974	Jinhae Bay	1.3 × 10 ⁶
	July 1976	Jinhae Bay	5.6 × 10 ⁶
	Sept. 1976	Jinhae Bay	1.1 × 10 ⁶
	Nov. 1976	Jinhae Bay	2.0 × 10 ⁶
	Sept. 1978	Jinhae Bay	9.2 × 10 ⁶
	Nov. 1978	Jinhae Bay	8.2 × 10 ⁶
	Aug. 1979	Jinhae Bay	6.3 × 10 ⁶
	Feb. 1980	Jinhae Bay	3.1 × 10 ⁶
	May 1980	Jinhae Bay	5.8 × 10 ⁶
	Sept. 1980	Jinhae Bay	10.9 × 10 ⁶
	July 1981	Jinhae Bay	1.2 × 10 ⁶
	Sept. 1981	Jinhae Bay	4.4 × 10 ⁶
	Oct. 1981	Jinhae Bay	4.7 × 10 ⁶
	Oct. 1982	Jinhae Bay	3.6 × 10 ⁶
	Aug. 29, 1984	Onsan Bay	5.0~9.2 × 10 ⁶
	Aug. 23~26, '85	Jinhae Bay	1.0~9.0 × 10 ⁷
	July 1~3, 1986	Jinju Bay	6.0~8.0 × 10 ⁷
June 30, 1992	Pohang Harbour	1.0~5.0 × 10 ⁷	
May 28, 1996	Yeochon coast	7.5~8.9 × 10 ⁶	
May 20, 1997	Yeosu-Gamag Bay	2.7~8.5 × 10 ⁶	
<i>Dictyocha fibula</i> <i>Microcystis</i> sp.	Sept. 1 1982	Wonmun Bay	1.0~5.0 × 10 ⁶
	Aug. 19~20, 1987	Yeosu	2.0~3.0 × 10 ⁷
	Aug. 26~27, 1987	Yongwon, Jinhae	3.0 × 10 ⁷
	July 8~13, 1988	Kwangyang Bay	1.2~1.4 × 10 ⁸
<i>Thalassiosira</i> sp.	July 12, 1984	Masan Bay	1.2 × 10 ⁸
	Sept. 23, 1987	Masan Bay	6.0~30 × 10 ⁶
	July 5, 1994	Gamag Bay	6.9 × 10 ⁷

1988; 전과 허 1989). Lee et al. (1992)은 1989년 3~4월 진해만에서 진주담치와 *Alexandrium tamarensense*를 대상

으로 독성을 조사한 결과 마비성패독인 GTX₁₋₄, GTX₅, epi-GTX, STX, neo-STX 등이 검출되었다.

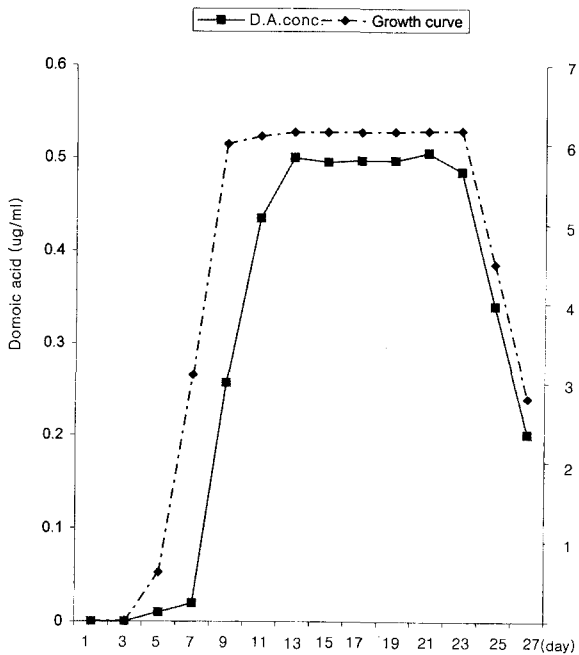


Fig. 1. A relationship between Logistic growth curve and domoic acid concentration of cells in the whole culture, *P. multiseriis* (이와 백 1997).

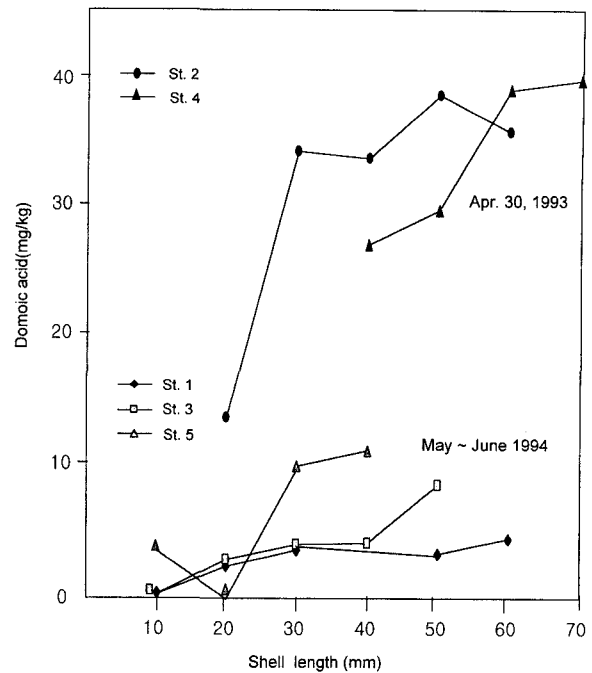


Fig. 2. Concentrations of domoic acid according to length of blue mussel on April 30, 1993 and May~June 1994 in Jinhae Bay (이와 백 1997).

돌말류의 기억상실성 독성

우리나라에서 기억상실성 독성인 domoic acid를 생성하는 식물플랑크톤 돌말류 *Pseudonitzschia multiseriis*는 해마다 진해만에서 봄철(4~6월)에 대량증식하는 것으로 알려져 있다(Lee 1994a). 이 조사에서는 1993년 4월부터 1995년 6월까지 진해만에서 순수분리한 *P. multiseriis*를 순수 배양하여 성장곡선(growth curve)에 따라 시기별로 독성을 추출하여 정성 및 정량화 연구를 하였으며, 본종과 식성관계에 있는 진주담치(*Mytilus edulis*)에서 독성을 추출하였다. 실험결과 *P. multiseriis*의 Logistic 성장곡선에서 접종 후 11일째에 정지기에 도달하여 22일까지 유지되다가 사멸기로 접어들었다

(Fig. 1). 또한 독성인 domoic acid는 접종 후 7일째부터 검출되기 시작하여 13일째부터 21일까지 최고치가 유지되었으며 이후 급격하게 감소되었다. 1993년 4월 30일 진해만에서 돌말류와 식성관계에 있는 진주담치의 각장 크기에 따라 독성 생성을 관찰한 결과 각각 20.2~29.9 mm에서는 13.48 mg/kg이었으나, 각각 70.0~79.9 mm에서는 39.57 mg/kg으로 각장이 길면 길수록 독성인 domoic acid의 농도가 높았고 1994년 5월과 6월에도 같은 경향이였다(Fig. 2).

패독에 의한 인명피해

독성을 분비하는 식물플랑크톤을 섭취한 어패류를 먹은 사람들이 중독되거나 사망한 경우를 보면 Table 3과

Table 3. Numbers of death and poisons caused by shellfish fed on toxic phytoplankton in the coastal waters

Date	Site	Cause	Death (persons)	Poisons (persons)
1450. 3. 06	Okpo, Geoje Is.	<i>M. coruscus</i>	7	-
1755. 4. 24	?	Fishes	18	-
1820. 6. 15	Unchonhyun	Oyster	12	-
1976. spring	?	Bivalves	-	26
1986. 4. 01	Pusan coast	<i>M. edulis</i>	2	11
1992. 6. 26	Puchon	<i>M. coruscus</i>	-	83
1995. 4. 01	Geoje Is.	<i>M. edulis</i>	1	3
1996. 4. 18	Geoje Is.	<i>M. coruscus</i>	2	-

총합: *Mytilus coruscus*, 진주담치: *Mytilus edulis*

같았다. 발생 시기는 봄철에 국한되었으며, 해역은 전부 진해만을 중심으로 한 경상남도 연안이었고, 대상생물은 홍합, 진주담치 및 어류를 먹은 경우에 사고가 있었다. 즉 1450년부터 1820년 조선시대의 37명의 인명피해 사건은 모두 봄철에 어패류를 먹고 사망하였으며 (Hahn 1998), 원인은 알길이 없으나 진해만을 중심으로 남해안에서 해마다 봄철에 패독을 발생시키는 식물플랑크톤이 대량 증식하는 점으로 유추해 볼 때 이의 가능성이 높다고 판단된다. 1976년 봄철에도 패류를 먹은 주민 26명이 중독된 사고가 있었다. 1986년 3월에는 부산 감천만에서 배에 부착되어 있던 담치류를 먹고 2명이 사망하고 11명이 중독되어, 이의 원인을 조사한 결과 마비성 패독으로 독성은 GTX1-4, neo-STX와 PX1,2로 밝혀졌다(전 등 1987). 1986년~1987년 4월과 5월에 진해만의 진동만과 칠천도에서 진주담치, 홍합, 큰가리비, 비단가리비를 대상으로 독성여부를 조사한 결과 마비성 패독이 있었으며, 1988년 4월에 거제도 연안에서 양식 진주담치도 마비성 패독의 독성인 GTX₁₋₄, STX와 PX₁₋₂가 검출되었다(전과 허 1989). 1989~1990년 3월과 4월에 진해만에서 채취한 홍합에서도 마비성 패독이 검출되었으며, 이때 독성을 분비하는 와편모조류 *Alexandrium tamarense*가 대량 증식되었다(Lee et al. 1992). 1992년 6월 부천시의 한 시장에서 홍합을 사먹은 주민 83명이 설사, 구토 및 복통 등의 문제로 역학조사를 한 결과 부패된 패류때문이라고 관계당국의 발표가 있었다. 그러나 홍합 및 진주담치의 양식장으로 유명한 진해만에서는 독성을 유발하는 돌말류와 와편모조류가 봄철에 대량으로 출현하는 점으로 미루어보아 식물플랑크톤에 의한 독화현상이 아닌가 한다. 한편 1993~1995년 3월부터 6월까지 진해만 일대에서 양식 홍합 및 담치에서 돌말류 *Pseudonitzschia multiseries*가 원인이 된 기억상실성 패독이 검출되어 급기야 이들 생물을 채취 금지시켰다. 1998년 3월 14일과 4월 17일 진해만 웅천연안과 진해, 마산, 고성 각각의 자연산 홍합에서 높은 농도의 패독이 검출되었다.

적조의 피해

적조현상으로 인한 수산생물 및 기타 생물의 피해 원인을 몇가지로 구분할 수 있다. 첫째로 적조원인생물이 대량 발생한 후 일시에 죽게되면 사체가 부패되는 과정에서 미생물에 의한 용존산소를 전량 소모하여 산소결핍으로 수산생물이 질식사하는 경우가 있다. 두번째로 적조원인생물이 독성물질을 분비하여 생물을 독화시켜 먹이연쇄의 상위 생물군에 치명적인 피해를 주는 경우가 있을 수 있다. 마지막으로 위의 두 가지가 복합적

으로 작용하는 경우가 있다. 우리 나라에서 이 세가지 피해를 명확하게 구분한 자료는 사실상 없다. 다만 1979년 6월과 1981년 6~9월의 사상 유례없는 대규모 적조와 남해안의 각 만(灣)에서 발생하는 무독성 와편모조류에 의한 적조 그리고 *Pseudonitzschia multiseries*를 제외한 대부분의 돌말류에 의한 적조는 용존산소의 결핍으로 수산생물을 질식사킨 것으로 판단되며, 1990년대부터 전라남도과 경상남도 연안에서 발생한 전국 규모의 적조는 독성분비와 산소결핍이 동시에 작용한 것으로 판단된다. 과거 수산청 또는 국립수산진흥원의 통계에 의하면 1978년 피해물량 5,774톤에 약 27억원, 1981년에는 *Gymnodinium nagasakiense* (*G. mikimotoi*)에 의한 적조로 굴, 피조개 등 6,020톤에 약 17억원, 1988년, 1989년, 1990년에도 통영해역을 중심으로 굴, 어류, 축양의 피해에 의해 각각 1천 3백만원, 약 6억원, 약 4억원의 피해가 있었다. 1992년에는 *Cochlodinium polykrikoides*가 원인종으로 어류가 폐사하여 194억원, 1995년에도 1992년과 똑같은 종에 의한 대규모 적조로 764억원의 막대한 경제적 손실이 있었다. 이와같은 경우도 산소 고갈에서 오는 질식과 독화에서 오는 생리적 변화에 의해 치명적인 피해를 입은 것으로 판단된다.

Table 4. Marine natural enemy on the causative organisms of red tides

Causative organisms of red tides	Natural enemy organisms
<i>Chroomonas</i> sp.	<i>Oxyrrhis marina</i>
<i>Prorocentrum minimum</i>	<i>Oxyrrhis marina</i>
<i>Prorocentrum triestinum</i>	<i>Gymnodinium</i> spp.
<i>Heterosigma akashiwo</i>	<i>Gymnodinium</i> spp.
<i>Ceratium</i> spp.	<i>Protoperidinium</i> spp.
<i>Gymnodinium sanguineum</i>	<i>Strombidinopsis</i> spp.
<i>Alexandrium</i> spp.	<i>Strombidinopsis</i> spp.
<i>Scrippsiella trochoidea</i>	<i>Favella</i> spp.
<i>Cochlodinium</i> sp.	<i>Strombidinopsis</i> spp.

자료: 정해진 교수

적조의 구제 및 방제기술

우리나라에서는 1980년대까지 적조현상에 대한 연구로 원인종의 규명과 생태적 특성을 밝히는데 역점을 두어 원인생물의 분류는 어느정도 규명되어 있으나 이들의 생리·생태학적 연구는 아직 초보적인 수준이어서 효과적인 방제기술을 수행하기 어려운 실정이다. 그러나 1990년대부터 대규모 적조가 발생되고 수산생물의 피해가 막대하여 적조의 구제 및 방제기술에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다.

화학약품 살포법

적조발생시 원인생물을 치사시키기 위하여 황산동(CuSO_4) 또는 유기화합물을 살포하거나, 유독성 적조생물의 독성을 중화시키기 위하여 오존(O_3)을 처리하는 방법이 있다. 다만 적조발생시 이와같은 물질을 살포하였을 때 다른 수산생물에 피해가 없어야 한다.

천적을 이용한 적조 방제기술

천연해수에서 분리한 천적을 대량 배양한 뒤 적조발생 초기에 투입하여 적조를 예방 또는 방제하는 기술이다. 미국 해안에서 실시된 연구에 의하면 천연상태의 천적들이 적조발생 전 단계에서 적조 원인생물을 효과적으로 잡아 먹는 경우에는 적조발생이 억제되었으나 천적의 수가 상대적으로 적은 경우는 관계없이 적조가 발생됨을 알았다. 따라서 천적생물을 대량 배양하여 적기에 투입하는 것이 바람직하다. 우리나라에서 적조원인생물과 천적생물과의 관계는 군산대학교 해양학과 정해진 교수에 의하여 연구되고 있으며, "수산특정연구과제" 중 연구결과는 Table 4와 같았다.

미생물을 이용한 적조제어기술

적조원인생물에 대한 살조능력이 있는 세균을 이용하여 적조를 제어하는 방법으로 일본에서는 1990년부터 활발하게 연구되었다. 우리나라에서도 간헐적인 연구가 있었으며, 최근에 부경대학교 미생물학과 이원재교수와 한국해양연구소 이홍금박사팀은 1996년부터 3년간 "수산특정 연구과제"로 미생물을 이용하여 적조를 제거하는 기술을 연구하였다. 연구결과에서 1995년 이후 남해안에서 대규모 적조를 유발시킨 원인종 *Cochlodinium polykrikoides*에는 균주 *Micrococcus* sp. LG-1과 4 그리고 *Pseudomonas* sp. LG-4가 살조능력이 우수하였으며, 우리나라 연안에서 대발생 또는 적조를 일으키는 *Skeletonema costatum*, *Cochlodinium polykrikoides*에는 균주 OT-1(*Cytophaga*속)의 살조기작이 뛰어났다.

생물제어법

해양생물 상호간의 작용을 이용하여 적조현상을 제어하는 방법으로 해양생물에서 물질을 추출하거나 합성하여 이를 이용하는 방법이다. 적조원인생물 특히 유해성 적조종의 막구성 성분인 mannose를 분해시킬 수 있는 생물효소 α -mannosidase를 개발하여 유해 적조발생시 투입하는 방법이다. 적조원인생물은 해양생태계내에서 일차생산자이므로 이들의 양적 변동은 이차생산자인 동물플랑크톤에 의해 직·간접적으로 영향을 받는다. 따라

Table 5. Removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* by clay and yellow loess (%) in the coastal waters of Korea

	2 g/l	4 g/l	6 g/l	8 g/l	10 g/l
10	46	78	85	89	89
20	67	92	98	99	99
30	74	98	-	-	-
60	90	-	-	-	-

자료: 김 등 1997

서 적조원인생물에 대한 동물플랑크톤의 포식압 원리가 적조생물의 구제기법의 하나로 연구되고 있다 (Uye 1986; Uye and Kayano 1994).

점토(황토)의 살포

점토가 해수중의 크기가 작은 플랑크톤과 같은 현탁 물질을 응집하거나 흡착하는 성질에 착안하여 적조발생시 이를 사용한다. Montmorillonite계 점토에는 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO 등의 성분이 있으며, 이를 살포하였을 때 적조생물은 침강되거나 유영정지 또는 형태변화가 된다. 점토에 효과적인 적조원인생물에는 *Mesodinium rubrum*, *Prorocentrum micans*, *P. triestinum*, *P. sigmoides*, *Gyrodinium instriatum*, *Heterosigma akashiwo*, *Scrippsiella trochoidea*, *Alexandrium catenella*, *Gymnodinium T-' 65*, *Noctiluca scintillans*, *Cochlodinium '78* 등이 있다 (Shirota 1976). 우리나라에서도 *Cochlodinium polykrikoides*를 대상으로 점토를 투입한 결과 구제효율이 Table 5와 같이 높아 적조발생시에 널리 사용하고 있다(김 등 1997)

적조원인생물의 기계적 제거

적조발생시 대상생물의 세포를 초음파로서 파괴시키는 방법이 있고, 해수중의 적조생물을 수리역학적인 방법으로 제거하는 적조생물 제거기(RTS-K)를 한국해양연구소 장 만박사팀이 개발했다. 한편 국립수산진흥원에서는 육상 및 해양양식장의 적조를 예방해 줄 수 있는 적조경보장치(Red Tidal Alarm System, Blue Sea-98)를 개발하여 상품화 하였다.

참 고 문 헌

- 김학균(1986) 적조와편모조의 생태학적 연구 1. *Prorocentrum triestinum* Schiller의 증식과 구제. 수진원 연구보고 39: 1-6.
 김학균(1989a) 마산만의 편모조적조의 발생과 환경특성. 수진원 연구보고 43: 1-40.
 김학균(1989b) 진해만의 편모조적조의 발생과 환경특성. 부

- 산수산대학교 대학원 박사학위 청구논문 pp. 1-85.
- 김학균, 박주석, 이삼근, 김성준, 장동석, 이종수, 이필용, 이태식, 이삼석, 안경호, 심정민, 박종수, 최희구, 김차겸, 김평중, 강창근, 강청미, 김지희, 이희정, 홍채규, 박영철, 임월에 (1994) 폐독플랑크톤의 분포생태 및 독성에 관한 연구. 과학기술처 pp. 1-154.
- 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중(1997) 한국연안의 적조-최근 적조의 발생원인과 대책-. 국립수산진흥원 pp. 1-280.
- 박주석(1980) 한국 남해안의 식물성 Plankton의 출현량 및 조성과 이들이 먹이와 적조로서 양식생물에 미치는 영향. 국립수산진흥원 연구보고 23 : 6-92.
- 박주석(1982) 진해만 적조의 특성과 환경변화. 수진원 연구보고 28 : 55-86.
- 박주석, 김종두(1967) 진해만의 적조현상에 관한 연구. 수진원 연구보고 1 : 65-79.
- 유광일(1984) 연안역에 있어서의 적조생물 군집의 동태에 관한 연구. 한양대학교 환경과학연구소 논문집 5 : 57-63.
- 유광일, 이종화(1976) 마산만의 환경학적 연구 2. 식물플랑크톤의 년변화. 한국해양학회지 11 : 34-38.
- 유광일, 이준백(1985) 마산만의 환경학적 연구 3. 쌍편모조류 군집의 동태에 대하여. 한양대학교 환경과학연구소 논문집 6 : 117-127.
- 유종수, 이진환, 福代康夫(1998) 적조 원인종 섬모충류 *Mesodinium rubrum* (Lohmann) Hamburger et Buddenbrock에 관하여. 한국조류학회지 13 : 143-149.
- 윤양호, 노홍길, 김영기(1991) 제주도 연안해역에 출현하고 있는 적조생물. 제주대학교 해양연구소 논문집 15 : 1-14.
- 이삼근(1990) 진해만에 출현하는 *Alexandrium*속 중 3종의 동태에 관한 연구. 수진원 연구보고 44 : 1-8.
- 이삼근(1991) 진해만에 출현하는 유독 편모조류의 분류 및 분포에 관한 연구. 경성대학교 대학원 박사학위 청구논문 pp. 1-151.
- 이삼근, 박주석, 김학균(1993) 한국 남해연안해역에서 출현하는 유독 편모조류의 분류. 수진원 연구보고 48 : 1-23.
- 이준백(1987) 마산만일대 쌍편모조류 군집의 구조와 동태에 관한 연구. 한양대학교 대학원 박사학위 청구논문 pp. 1-133.
- 이진환(1978) 진해만일대의 식물성플랑크톤군집과 이의 환경지표성에 관한 연구. 한양대학교 대학원 석사학위 논문 pp. 1-62.
- 이진환(1984) 진해만 식물플랑크톤 군집의 구조와 동태에 관한 연구. 한양대학교 대학원 박사학위 청구논문 pp. 1-111.
- 이진환(1999) 한국의 식물. 식물플랑크톤 1. 적조원인생물. 생명공학연구소. pp. 174.
- 이진환, 변정신(1991) 인천항 선거내의 식물플랑크톤 구조류의 주년동태에 대하여. 한국조류학회지 6 : 69-82.
- 이진환, 백정현(1997) 남해안에서 독성을 생성하는 돌말류 *Pseudonitzschia multiseries* (Hasle) Hasle II. Domoic Acid의 생성. 한국조류학회지 12 : 31-38.
- 이진환, 송현숙, 이은호(1997) 인천항 선거내의 식물플랑크톤 돌말류의 적조. 환생지 15 : 119-129.
- 이진환, 이은호(1999) 득량만의 수질과 식물플랑크톤 적조. 환생지 17 : (투고중)
- 이진환, 한명수, 허형택(1981) 진해만의 적조원인생물에 관한 연구. 한국해양연구소보 3 : 97-105.
- 이진환, 허형택(1983) 득량만에 있어서 식물 플랑크톤과 적조 발생에 관한 연구. 한국해양연구소 소보 5 : 21-26.
- 이필용, 강영실, 박종수, 김형오, 김성수, 최정일, 최우정, 박영철, 김대권, 임현식(1996) 남해 연안어장 환경오염 및 적조조사. 남해수업사업보고서 pp. 417-459.
- 장 만, 조진하, 신경순, 이우성, 이택건(1998) 적조원인종인 *Prorocentrum minimum*의 온도에 따른 생화학적 조성의 변화. 환생지 16 : 397-401.
- 전중균, 野口玉雄, 黄登 福, 荒川 修, 長島裕二, 橋本周久, 허형택(1987) 담치류의 유독성분에 관한 연구. 한국해양학회지 22 : 271-278.
- 전중균, 이순길, 허형택(1988) 한국산 주요 이매패류의 마비성패독 독화상황. 한국해양학회지 23 : 123-129.
- 전중균, 허형택(1989) 양식 진주담치의 마비성패독. 한국해양학회지 24 : 79-83.
- 조진하, 이택건, 신경순, 이우성, 장 만(1998) 적조원인종인 *Prorocentrum minimum*의 광도에 따른 생화학적 조성의 변화. 환생지 16 : 391-396.
- 조창환(1978) 진해만의 *Gonyaulax* 적조에 관하여. 한국수산학회지 11 : 111-114.
- 조창환(1979) 1978년 진해만 적조와 양식굴의 대량폐사. 한국수산학회지 12 : 27-33.
- 한명수(1990) 유독플랑크톤(와편모조류를 중심으로)에 관한 고찰. 한국수산학회지 23 : 51-60.
- 한명수, 유광일(1983a) 진해만의 쌍편모조류에 관한 분류학적 연구. 제 1보: 유각류와 무각류. 해양연구소보 5 : 37-47.
- 한명수, 유광일(1983b) 진해만의 쌍편모조류에 관한 분류학적 연구. 제 2보: 페리디니움목. 해양연구소보 5 : 49-67.
- 入江春彦(1970) 赤潮-その歴史, 地理および季節. 海洋科學 2 : 399.
- 柳田友道(1976) 赤潮. 講談社, 東京, 日本.
- Chang M, CW Park & JH Cho (1999) Acclimation of *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae) to prolonged darkness by use of an alternative carbon source from Triacylglycerides and Galactolipids. *J. Phycol.* 35 : 287-292.
- Chang M, WS Kim & JH Lee(1995) Phytoplankton blooms in the coastal waters of Korea-Red tides in Masan and Chinhae Bays. *Ocean Res.* 17 : 137-156.
- Cho CH(1981) On the *Gymnodinium* red tide in Jinhae Bay. *Bull. Korean Fish. Soc.* 14 : 227-232.
- Hahn SD(1998) History of algal blooms records in Korean

- coastal waters. In Harmful Algal blooms in Korea and China. Proceed. Korea-China Joint Symposium on Harmful Algal Blooms hosted by NFRDI and CAFS, Pusan Korea, 5-7 Dec. 1997.
- Han MS, JK Jeon & YH Yoon (1993) Distribution and toxin profiles of *Alexandrium tamarense* (Lebour) Balech (Dinoflagellate) in the south-eastern coastal waters, Korea. *Korean J. Phycol.* **8** : 7-13.
- Han MS, JK Jeon & YO Kim (1992) Occurrence of dinoflagellate *Alexandrium tamarense*, a causative organism of paralytic shellfish poisoning in Chinhae Bay, Korea. *J. Plankton Res.* **14** : 1581-1592.
- Kim HG (1986) Ecological study of dinoflagellates responsible for red tide 2. The population growth of *Prorocentrum minimum* (Pav.) Schiller. *Korean J. Phycol.* **1** : 103-106.
- Kim HG (1998) Harmful algal blooms in Korean coastal waters focused on three fish-killing dinoflagellates. In Harmful Algal blooms in Korea and China. Proceed. Korea-China Joint Symposium on Harmful Algal Blooms hosted by NFRDI and CAFS, Pusan Korea, 5-7 Dec. 1997.
- Lee JH (1994a) Neurotoxin-producing diatom, *Pseudonitzschia pungens* Grunow f. *multiseries* Hasle, off the coastal waters of southern Korea I. Morphological features. *Korean J. Phycol.* **9** : 125-134.
- Lee JH (1994b) Environmental factors affecting red-tide blooms in Jinhae Bay, Korea. Proceed. Korea-Japan joint seminar for collaborative researches on biological sciences pp. 361-402.
- Lee JH, HS Kwak (1986) A study on the *Gymnodinium nagasakiense* red-tide in Jinhae Bay of Korea. *Korean J. Ecol.* **9** : 149-160.
- Lee JS, JK Jeon & MS Han (1992) Paralytic shellfish toxins in the mussel *Mytilus edulis* and dinoflagellate *Alexandrium tamarense* from Jinhae Bay, Korea. *Bull. Korean Fish. Soc.* **25** : 144-150.
- Lerman M (1986) Marine biology-Environment, diversity, and ecology-. The Benjamin/Cummings Publ. Com. Inc.
- Nybakken JW (1982) Marine biology-An ecological approach-. Harper & Row.
- Park JS (1991) Red tide occurrence and countermeasure in Korea. In Recent approaches on red tides. Proceedings of "1990 Korean-French Seminar on Red Tides" held Nov. 9-10, 1990 at NFRDA, Korea.
- Park JS & HG Kim (1991) Recent approaches on red tides. Proceedings of "1990 Korean-French Seminar on Red Tides" held Nov. 9-10, 1990 at NFRDA, Korea.
- Shirota A (1976) Meeting on control of red tide with clay. *Seikai Reg. Fish. Res. Lab.* **24** : 2-5.
- Sumich JL (1992) An introduction to the biology of marine life. 5th ed. Wm. C. Brown Publ. pp. 449.
- Sverdrup HU, MW Johnson, RH Fleming (1947) The oceans, their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall.
- Uye S (1986) Impact of copepod grazing on the red-tide flagellate *Chattonella antiquae*. *Mar. Biol.* **92** : 35-43.
- Uye S & Y Kayano (1994) Predatory feeding of the planktonic copepod *Tortanus forcipatus* on three different prey. *Bull. Plankton Soc. Jpn* **40** : 173-176.
- Yang DB, ES Kim & KW Lee (1983) Seawater quality and red tides in Jinhae Bay in 1979~1982. *Bull. KORDI* **5** : 15-20.
- Yoo KI (1982) Taxonomic study on the causative organisms of red tide. *Bull. Environ. Sci., Hanyang Univ., Seoul Korea* **3** : 25-31.
- Yoo KI, JB Lee (1986) Taxonomical studies on the dinoflagellates in Masan Bay 1. Genus *Prorocentrum* Ehrenberg. *J. Oceanol. Soc. Korea* **21** : 46-55.

A Review on Red-tides and Phytoplankton Toxins in the Coastal Waters of Korea

Jin Hwan Lee

(Department of Biology, Sangmyung University, Seoul 110-743, Korea)

Abstract - The author made a special review on red-tides from the following points: definition, terms, yearly progress of researches, causative organisms, searching the causes, toxins, a loss of lives, damages of aquatic products, reducing aquacultural damages and removal efficiency. Red-tides in Korea were caused by diatoms in the early 1960's, in the end of 1970's it was caused by non-toxic dinoflagellates when marine pollutions were growing more and more serious. In the end of 1980's, red-tides were caused by toxic dinoflagellates. Red-tide was only found in selected areas at first, but recently large-scaled red-tides are frequently found in the southern coastal waters of Korea, causing huge losses of marine life. A plan is greatly needed to reduce the damaging red-tides, and removal systems need to be developed. [Red-tide, Causative organisms, Cell density, Toxins, Control of red-tides].