

## 연안역에서의 저층 빈산소수의 용승현상(청조현상)에 관한 연구

윤 종 성  
인제대학교 토목공학과  
(1997년 7월 15일 접수)

### A Study on the Upwelling Phenomena of Anoxic Bottom Water (Blue Tide Phenomena) in the Coastal Areas

Jong-Sung Yoon

Dept. of Civil Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea  
(Manuscript received 15 July 1997)

Recently, upwelling of anoxic bottom water mass have been frequently observed in northeast part of Tokyo Bay in Japan during summer to autumn. Since the colour of water surface becomes milky-blue or milky-green, the upwelling phenomenon is called 'Blue Tide'. The data analysis of field surveys during 'Blue Tide' appearance have been performed for understanding the physical features of the 'Blue Tide' phenomena in Tokyo Bay. It becomes clear that (1) the formation of the anoxic bottom water correlates well with the temperature difference between the surface and bottom waters, (2) there are two necessary conditions for generating 'Blue Tide'; that is, strong stratification and off-shore wind. The strong southwest(on-shore) wind before the 'Blue Tide' appearance may play an important role to make the stratification strengthen. When these conditions are larger and the northeast or east-northeast (off-shore) wind stronger than 5 m/s blows in succession, the 'Blue Tide' upwelling appears at the head of Tokyo Bay.

Key words : upwelling, anoxic bottom water, Tokyo Bay, Blue Tide, stratification, wind

#### 1. 서 론

하천, 호수, 바다(해양, 연안역) 등의 자연수역 및 그 주변역은 인간의 생활장으로, 인간의 생산활동에 대한 식생활과 에너지의 공급장으로, 또한 인간의 생산에 의해 발생하는 배출물의 정화장으로서 이용되어 왔다. 그러나 근대화가 진행됨에 따라 연안역에는 많은 산업이 진출하여 항만시설과 공업지역이 조성되고 건설되었으며, 이러한 개발에 의해 주변지역의 인구조밀화도 동시에 진행되었다. 공업지역, 주택지역에서 배출되는 산업 폐기물과 생활배수등은 증가일로를 걷고 있으며, 수역으로 배출되는 오탁수의 양도 마찬가지로 경향을 나타내고 있다. 특히 유체의 순환성이 빈약한 폐쇄성 수역에서는 유기오탁물질에 의한 부하의 증가, 질소와 인 등의 영양염부하의 인위적인 증가, 어패류 등에 의한 수역내 부하의 증가에 의해 수역의 오탁이 한층 더 진행되어 왔다. 그 결과로서 식물 플랑크톤 등의 藻類가 엄청나게 증식하게 되어 수질악화에 따른 부영양화가 진행되었다. 부영양화는 천해역의 풍부한 어패류와 수산물에 영향을 미치는데, 특히 고차수산생물의 소멸과 관련성이 있다고 보고되어 있다. 해역의 부영양화는 이러한 영향에 머무르지않고 여러 가지 수질오탁현상을 부수적으로

발생시킨다. 그 중에서 수산생물이나 해역의 수질에 영향을 미치는 대표적인 수질환경현상으로 『적조(red tide)』, 『저층수의 빈산소화(anoxidation of bottom water)』, 『靑潮(Aoshio, or blue tide)』을 들 수 있다. 그러나 더욱 더 문제가 심각한 것은 이러한 현상이 각각 독립적으로 발생하는 것은 드물고 상호 연쇄적으로 발생한다는 점이다.

적조는 질소와 인 등의 영양염의 유입에 의해 부영양화가 진행하여, 해수중의 부유성 미소생물의 이상증식에 의해 해수면이 붉은색으로 변하는 현상이다. 최근 마산만 및 진해만을 대표로 하는 남해안에서는 매년 적조가 발생하여 사회적으로 크나큰 문제가 되고 있으며 그 빈도와 규모도 증가하는 추세에 있다. 적조현상은 우리나라뿐만 아니라 세계 여러 나라의 폐쇄성수역에서도 빈번히 관측되고 있는 실정이다. 적조는 생물학적, 화학적, 물리적인 요인이 밀접하게 관련되어 있는데, 저니의 부상이 적조조류의 활성화에 직접적인 변화를 일으키거나 해수중의 염분농도, 용존산소, 유기물농도, 영양염농도 등의 변화가 적조를 발생시키는 원인이 된다고 알려져 있다.

그에 반해 靑潮현상은 해수표면이 靑白色 혹은 乳白

色을 띠는 현상으로, 이러한 색의 차이로부터 적조에 대해 청조라는 이름으로 불려지고 있다. 일본 동경만의 북동부에서는 초여름에서 초가을에 걸쳐 청조현상이 발생하고 있으며, 악취와 저생생물의 폐사 등의 피해를 일으키고 있다.

수역에서 성층화가 발달하는 여름철에 해저부의 해수의 용존산소는 평상시보다 낮아지고 때로는 무산소상태가 되기도 한다. 이러한 조건하에서는 혐기성 硫酸還元菌의 증식이 활발해져서 다량의 유화물이온이 생성된다. 청조는 해저부의 유화물이온이 함유된 貧(無)산소수괴가 여러 가지 물리적 요인에 의해 수표면까지 용승하여 발생하는 현상이다. 청조현상 특유의 海水色은 저층수에 함유되어 있는 유화물이온이 표층의 有酸素水와 접촉하여 산화됨으로서 생성되는 유황입자나 다유황이온 등의 중간생성물에 기인하는 것으로 추정되고 있다(鈴木등(1983), 鬼塚등(1987)). 결국 청조현상은 무(빈)산소상태의 저층수의 湧昇(upwelling)에 의해 생기는 현상, 즉 물리적 요인이 관여하여 중요한 역할을 하는 현상이라 말할 수 있다. 그러나 청조현상 발생의 물리적(수리학적) 메카니즘에 관한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수역에서의 부영양화에 기인하는 몇 가지 수질환경문제에 관하여 논하고, 이러한 현상의 발생기구 및 상호관련성에 대하여 고찰하고자 한다. 그리고 일본의 동경만에서 빈번히 발생하는 靑潮(빈산소수의 용승현상)에 관한 기존의 연구·보고서를 고찰함과 동시에, 동경만에서의 관측데이터의 분석을 통해 청조현상의 발생 메카니즘, 특히 물리적 메카니즘을 밝히는 것을 목적으로 한다.

## 2. 부영양화에 기인하는 수질문제에 관한 고찰

### 2.1 적 조

적조(Photo 1)는 「해수 중에서 미소한 생물(주로 플랑크톤)이 급격히 이상증식하여 플랑크톤의 개체수가 증가하여 해수의 색을 변화시키는 현상」이라고 정의되고 있다(山岡(1986)). 일본에서는 1960년부터 해수교란이 불량하고 해수가 정체가 쉬운 瀬戸内海(岡市(1983), 鈴木(1988)), 大阪灣(Yamochi(1983)), 동경만(環境廳(1988)) 등의 부영양화된 폐쇄성 연안역에서 鞭毛藻類를 중심으로한 적조에 의한 어업피해가 발생하는 것으로 보고되어 있다. 陸水域에서는 琵琶湖 등의 호수에서 생활배수 등의 유입에 의해 부영양화되어 「靑湖」라 불리는 적조현상이 관찰되고 있다.

해역에서 발생하는 적조는 해역생태계 중에서 일어나는 영양염의 순환에 의해 크게 지배되기 때문에, 물질순환의 개념으로 해석하는 것이 중요하다고 생각된다. 특히 폐쇄성 연안역의 적조에는 하천수중의 영양염에 기인하는 하구역에서의 강우적조와 정체수역의 저층수의 빈산소화에 따른 적조가 있는데, 전자는 표층에 「矽藻」에 의한 적조, 후자는 중층에 「鞭毛藻」에 의한 적조라고 알려져있다(岡市(1983)).

일반적으로 온도성층이 발달하여 빈산소화된 하층에 영양염이 풍부하게 존재하고 있는 해역에서 鞭毛藻 적

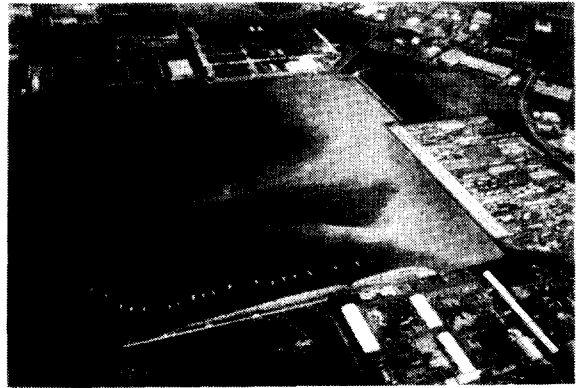


Photo 1. Red tide appeared in Harimanada(Seto Naikai in Japan).

조가 자주 관측된다. 적조의 원인이 되는 鞭毛藻類인 *chattonella*는 꼬리모양의 鞭毛를 가지고 있기 때문에 遊泳이 가능하여 晝間에는 광합성을 위해 상층부로 모이고 야간에는 영양염을 섭취하기 위해 하층부로 이동하는 것으로 여겨지고 있다. 일반적인 플랑크톤은 상층부의 영양염을 모두 섭취하여 상층부에 영양염이 없다면 번식력이 감소하여 서서히 감소한다. 그러나 *chattonella*는 이러한 경우에 상층부와 풍부한 영양염이 존재하는 하층부를 오르내리면서 번식하여 적조를 발생시키는 것으로 알려져있다.

한편 「矽藻 적조」는 배수가 유입하는 만의 국부에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 공장배수중의 어떤 물질은 적조 플랑크톤의 증식을 저해하지만 일정 농도로 희석되면 특정 플랑크톤에 대해서는 증식을 촉진시키기 때문에 적조가 발생하는 것으로 알려져있다.

결국 적조현상은 식물 플랑크톤의 이상증식에 의해 발생하는데 이러한 의미에서는 생물학의 연구대상이 되는 현상이라고 말할 수 있지만, 적조가 발생하기까지의 환경형성과정에는 기상학적, 물리학적, 화학적 계요인이 복잡하게 관여하고 있는 현상이라 할 수 있다.

### 2.2 저층수의 빈산소화

夏期에는 태양열에 흡수에 의한 수면부근의 온도상승, 대량의 하천수의 유입 등에 의해 해역에서는 성층화가 강화된다. 성층상태의 부영양화된 연안역이나 호수에서는 여름철에 저층수의 빈산소화가 빈번히 발생한다. 일본을 예를 들면 동경만(鈴木등(1988)), 三河灣(Suzuki et al.(1987)), 大阪灣(城(1986)) 등의 폐쇄성이 강한 연안역과 湯の湖(高崎등(1983)) 등의 부영양화된 호수 및 저수지에서 빈산소수괴의 형성이 보고되어있다.

빈산소수괴가 진행되는 원인으로는 ① 저층수에서의 호흡 및 분해량이 증가하는 생물학적 영향과, ② 성층의 발달에 의해 수괴가 안정화되는 관계로 용존산소(DO)의 연직확산 플럭스가 감소하는 물리적영향의 두가지를 들 수 있다. 결국 夏期의 성층상에서는 부영양화에 의해 적조가 표층에서 발생하고 대량의 식물플랑크톤의 死骸

와 배설물등이 침강한다. 하층에서는 박테리아의 작용에 의해 유기물이 DO를 소비하여 용존산소량을 감소시키고 동시에 분해되어 영양염을 재생시킨다. 그러나 밀도성층이 강화되어 있는 관계로 연직혼합에 의한 표층으로부터의 DO의 공급이 줄어들어 공급이 소비를 충족시키지 못하게 되므로 결과적으로 빈산소수괴가 형성된다.

저층수의 빈산소화는 저생생물에 직접적인 피해를 입힐뿐 만 아니라, 여러 가지 2차적인 영향을 불러일으켜 생태계에 중대한 영향을 미친다. 예를들면 무산소화된 해역에서는 硫酸還元에 의해 유화물이 생성되고, 천수역에서는 메탄이 생성됨으로서 동시에 수질을 악화시킨다고 알려져있다. 鈴木(1988)에 의하면, 빈산소수괴의 형성에 의해 동물플랑크톤이 감소하거나 종류가 변화하였으며, 그로인해 식물플랑크톤의 섭취가 감소하였다. 결과적으로 식물플랑크톤의 증식이 우세하여 적조가 만성화될 가능성이 있다고 지적하였다. 그리고 빈(무)산소화된 저층수는 바람등의 외력의 작용에 의해 용승(upwelling)하여 海遊性的의 어류에도 피해를 입히는 것으로 알려져있다. 그 전형적인 예중의 하나가 본 연구에서 취급하는 일본 동경만의 『청조』현상이다.

현재까지 『청조현상』이 국내에서 발생하였다고 보고된 예는 없다. 그러나 최근 남해안의 거제도 일대에서 청조와 유사한 현상이 발생된 것으로 보고(부산일보, 1997.8)된 바가 있는데, 저자가 확인한 바로는 『청조현상』이 틀림없는 것으로 판단된다. 앞으로 보다 세밀한 조사와 관측이 이루어져야 할 것으로 생각한다. 적조현상을 비롯한 저층수의 빈산소수가 국내뿐 만 아니라 전세계적으로 해역에서 빈번히 발생하고 있는 것으로부터 판단해 볼 때 『靑潮』는 지구상의 어느 灣에서도 발생 가능성이 잠재하고 있는 것으로 생각된다. 이는 물의 『質』의 중요성을 시사하는 경중으로서 엄숙히 받아들이지 않으면 안될 것이다. 따라서 『靑潮』의 발생원인과 메카니즘을 규명하여 그에 따른 대비책을 수립할 수 있도록 하는 것이 필요할 것으로 생각된다. 이것은 해안 환경수리학적 견지에서 해역의 보다 나은 수질환경의 창조를 위한 조그마한 노력의 출발이라고 믿고싶다.

### 2.3 청조현상에 관한 고찰

일본 동경만 안쪽의 千葉港에서 幕張, 船橋로 이어지는 연안역에서는 여름철에 해변색이 청백색 혹은 유백색으로 변하는 현상이 빈번히 발생한다(Photo 2). 이러한 현상을 청조현상이라 부른다. 동경만에서는 1955년 이후 청조현상의 발생에 대한 기록이 있으며, 1985년에는 대규모의 청조가 발생하여 연안역의 저생생물에 막대한 피해를 입혔다. 그로인해 인근해역의 양식조개 및 어류가 약 3만톤 폐사하였는데, 피해총액이 약 300억원에 달했다. 이와같이 靑潮가 수산업에 막대한 영향을 미칠뿐 만 아니라 이로인한 2차적인 영향을 통해 해역의 생태계에 중대한 영향을 미치는 관계로 많은 조사와 연구가 이루어지고 있다. Table 1은 동경만에서의 청조에 대해 보고된 기존의 문헌을 조사하여 청조발생시의 수질 및 생물학적 특성을 정리한 것이다.

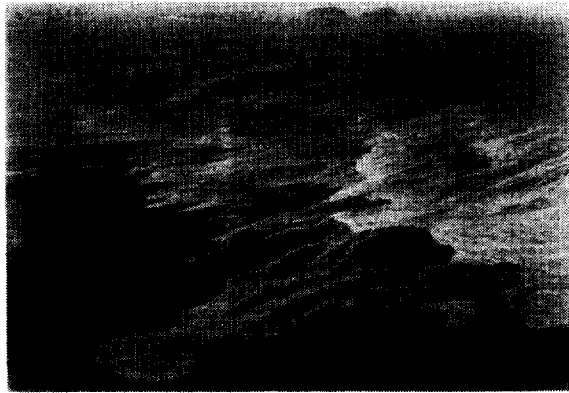
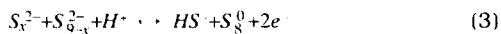
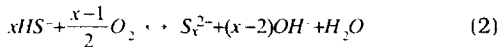


Photo 2. Blue tide appeared in Funabashi Port located in the head of Tokyo Bay in Japan (8th September, 1988).

菅原등(1966)은 청조현상을 다음과 같이 설명하고 있다. 동경만에서는 여름철의 장기간에 걸친 성층기에 생긴 플랑크톤의 死骸의 침강부패, 有機浮泥의 침강부패 및 저니에 의한 산소소비 등에 의해 무산소수괴가 형성되는 것이 일반적이다. 이러한 조건하에서 육지로부터 불어오는 편북풍에 의한 취송류에 의해 표층수가 외해로 이동하고 아마도 저층에서 부패상태의 플랑크톤 死骸(저층의 부패물질)나 유기오니가 콜로이드상으로 부상함으로써 이러한 색깔을 띠는 것으로 추측하고 있다.

風呂田등(1985)은 1984년 9월에 동경만에서 발생한 靑潮의 해수중에 포함되어있는 플랑크톤의 출현상황에 대하여 조사하여 청조현상이 수중에 존재하는 플랑크톤과는 직접적인 관계가 없다는 사실을 확인하였다. 그리고 柿野등(1987)은 청조가 발생하여 청백색으로 착색된 해역에서 유화수소 냄새가 나는 사실로부터, 청조가 海産綠藻類 등의 동식물 플랑크톤에 유래하는 해변착색현상이 아니라 유화물이 청조현상과 관계있다고 시사하였다. 鬼塚등(1987)은 청조발생시의 해수의 영양염분식 및 광학특성을 통해 수표면에 출현한 靑潮는 貧(無)酸化된 저층에 존재하는 유화물이온이 용승(upwelling)하여 산소를 다량 함유하고 있는 표층수와 접촉하는 과정에서, 산화작용에 의해 생성된 중간생성물(유황입자, 다유화물 이온 등)에 기인한다는 사실을 확인하였다. 따라서 청조현상의 발생 및 水色변화에 대한 화학반응식은 다음과 같이 쓸수 있다.



여기서,  $S_x^{2-}$ 와  $S_{2n}^0$ 는 각각 다유화물 이온 및 유황분자 이온이다.

한편, 柿野등(1987)은 1979년~1980년에 걸친 실측 조사를 기초로 하여 동경만에서의 청조발생 前後의 海象에 대해 조사하여, 청조의 발생과 이안풍과의 상관관

Table 1. Water quality and biological characteristics when 'Blue Tide' appeared

항 목		특 성	비 고
외 관		· 유백색, 유청백색 · 청녹색	菅原등 (1966) 田村 (1970)
냄새		硫化水素 냄새를 동반하는 경우가 있다.	菅原등 (1966)
동식물 플랑크톤		양적으로 매우 작다.	菅原등 (1966) 田村 (1970) 風呂田등(1985)
박테리아		유황세균, 특히 녹색유황세균, 硫酸還元을 포함하고 있다.	菅原등 (1966) 平石등 (1987) 鬼塚등 (1987)
수 질 특 상	수 온	· 上層, 底層의 차는 거의 없다.	菅原등 (1967)
	염 분	· 低水溫, 高鹽分	柿野등 (1986)
	용존산소	無酸素~低酸素	柿野등 (1986)
	P H	上層, 底層의 차는 거의 없다.	菅原등 (1967)
	영양염류	암모니아염이 많고, 고영양상태이다.	菅原등 (1967) 寒川등 (1987)
	유화물	검출되고 있다.	風呂田등(1985) 柿野등 (1986)
생물에의 작용		해양생물에 악영향을 미치거나 폐사시킨다.	菅原등(1966) 田村(1970) 風呂田등(1985) 柿野등 (1986)

계를 처음으로 지적하였다. 즉, 柿野등(1987)의 조사결과에 의하면, 청조발생의 물리적조건으로서 이안풍의 발달과 깊은 관계가 있으며, 靑潮가 이안풍이 계속됨으로서 저층의 빈산소수가 용승하는 현상이라고 추론하였다.

이상으로부터 적조현상이 식물성 플랑크톤이 발생의 주된 요인인 생물학적 현상인 것에 반해, 청조현상은 물리적 작용을 동반한 화학적현상이라고 결론지을수 있다. 그러나 청조발생시의 외관적 성상과 수산업에 미치는 영향이 학문적입장에도 크게 반영되어, 청조현상에 관한 연구는 생물학적·화학적건지에서 연구가 거의 대부분을 차지하여 왔다. 유체역학적 접근방법에 의한 청조의 발생에 대한 연구가 거의 이루어져 있지 않은 관계로, 청조의 발생을 위해 필수적으로 형성되어야 하는 제반 물리적 조건과 발생메카니즘에 대해서는 아직 명확히 해명되어있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 동경만에서 靑潮現象이 발생한 전후의 기상 및 해상 데이터를 입수하여, 관측데이터의 분석을 통해 청조현상의 발생조건 및 발생 메카니즘, 특히 물리적 메카니즘을 밝히고자 한다.

### 3. 동경만에서 관측된 청조발생시의 실측데이터의 해석

#### 3.1 관측의 개요

일본의 환경청은 동경만의 청조발생 예측수법의 확립을 위해 동경만 안쪽의 4지점(Fig. 1)에서 1992년 9월 1일~10월 5일의 약 1개월간에 걸쳐 유황을 연속측정함과 동시에 수온의 다층연속측정 및 염분·DO의 연속관측을 실시하였다. 관측은 각 항목에 대하여 10분간격으로 연속적으로 실시하였으며, 측정항목 및 측정내용

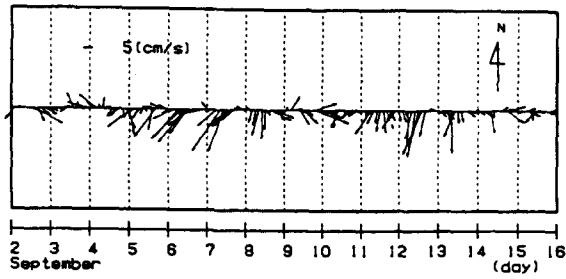
의 개요에 대해서는 Table 2에 나타낸 바와 같다. 그리고 Fig. 1에 나타나있듯이 동경만내의 11측점에서 수온, 염분, DO의 연직분포를 정기적으로 측정하였다. 측정시기는 1992년 7월 22일, 8월 4일, 8월 18일, 9월 8일, 9월 17일, 10월 1일, 10월 10일, 10월 22일의 8회에 걸쳐 이루어졌으며, 측정기간중인 8월 3일~8월 6일 및 9월 7일~9월 12일에 청조가 발생하였다. 본 연구에서는 이들의 관측 데이터를 입수하여 데이터 분석을 통해 청조발생에 관한 물리적 메카니즘에 관하여 조사하였다.

#### 3.2 관측결과와 고찰

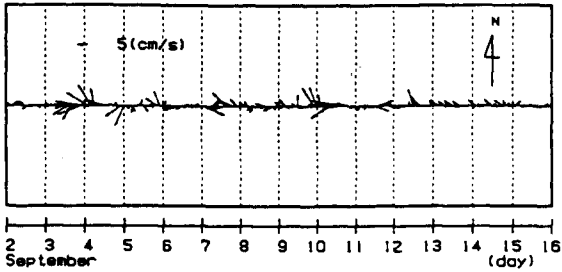
Fig. 2는 1992년 9월 2일~9월 16일에 걸쳐 千葉測候所에서 관측된 풍속분포를 나타내고, Fig. 3은 동일한 기간중의 측정 D점(Fig. 1)에서의 수온분포의 연속관측결과를 나타낸다. Fig. 4는 측정 A~D지점의 해면하 2m지점의 유속분포를 나타낸다. Fig. 2의 풍속분포를 보면 청조가 발생하기 전의 9월 5일까지는 남서풍(向岸風 혹은 海風)이 연속적으로 강하게 불고있으며, 9월 5일 이후에는 북동풍으로 변하여 청조가 발생한 9월 12일까지 강한 북동풍(離岸風 혹은 육풍)이 계속되고 있음을 알 수 있다. 따라서 청조가 발생하기 위해서는 강한 이안풍이 해면상으로 연속적으로 작용해야한다는 물리적인 외력조건이 필요하다는 사실을 알 수가 있다.

그런데 Fig. 4의 유속분포를 보면, 9월 5일~9월 12일의 북동풍에 대하여 측정 A 및 측정 C에서 약간의 위상차를 가지면서 유속 20cm/s이상의 남쪽방향(외해방향)의 강한 흐름이 탁월한 것을 알 수 있다. 이 지점에서 외해방향의 흐름은 바람응력에 대한 Ekman수송

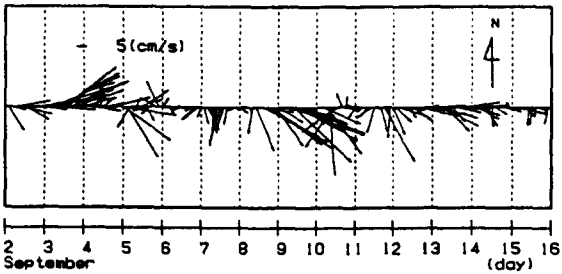




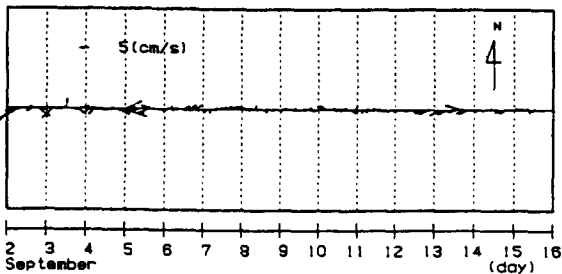
(a)



(b)



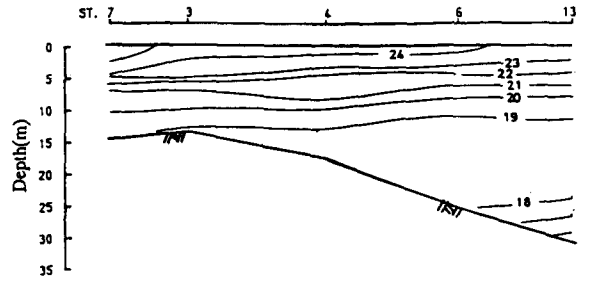
(c)



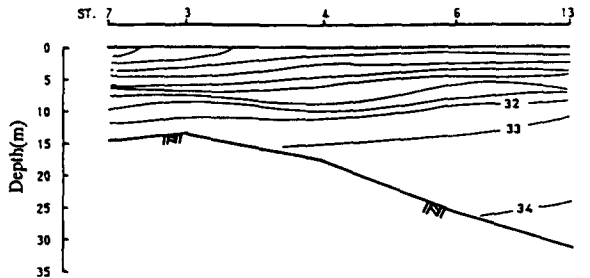
(d)

Fig. 4. Time variation of current velocity observed at 2m depth under the water surface (9. 2~ 9. 16, 1992).

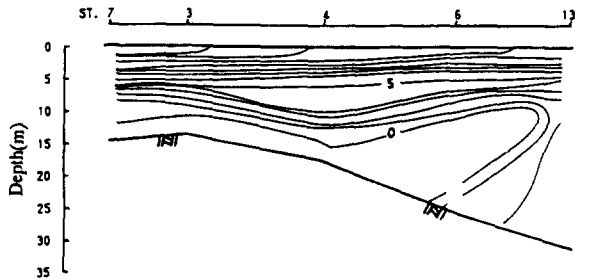
층의 유향 및 수질 데이터가 거의 결측인 관계로 유동 및 성층장과 바람응력의 상관관계를 명확히 밝히기가 어려웠다. 따라서 청조발생의 물리적기구를 명확히하기 위해서는 성층장에서의 바람 응력과 용승기구(upwelling mechanism)의 관련성에 대한 보다 면밀한



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Distributions of water temperature( $^{\circ}\text{C}$ ), salinity(%), DO( $\text{mg}/\text{l}$ ) on 22th July, 1992 along the vertical section from St.7 to St.13 as shown in Fig. 1.

검토가 요구된다.

Fig. 3의 수온분포의 연속관측결과를 보면, 9월 5일까지는 상하층의 수온차가 약  $8^{\circ}\text{C}$ 가 되는 현저한 수온성층상태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그런데 9월 6일 오후부터 계속된  $5\text{m/s}$ 이상의 강한 북동풍(이안풍)에 의해 상층에서의 수온저하가 발생하여 9월 7일에는 하루에  $4^{\circ}\text{C}$ 의 수온이 저하하였음을 알 수 있다. 그리고 9월 11일부터는 풍속이 보다 강해져 전 수심에 걸쳐 수온분포가 일정하게 나타나고 있는것이 특징적이다. 9월 11일에는 수 水深의 수온이 전일의 하층의 수온과 거의 동일한 사실로부터, 이러한 성층과괴는 상·하층수의 혼합에 의한 영향보다 바람의 작용에 따른 수온이 낮은 하층수의 용승(upwelling)이 주원인일 것으로 판단된다. 수리실험 및 수치실험을 통하여 바람응력에 의한 용승

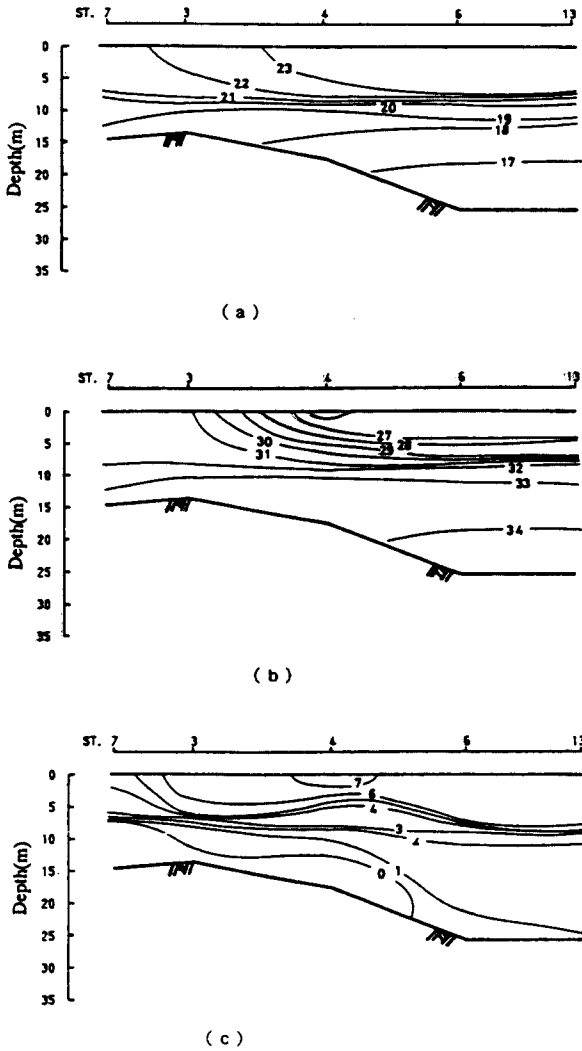


Fig. 6. Distributions of water temperature(°C), salinity(‰), DO(mg/l) on 4th August, 1992 along the vertical section from St.7 to St. 13 as shown in Fig. 1.

기구과 상·하층수의 혼합기구의 상호관련성에 관하여 밝히고 있는 본 저자의 연구결과(尹鍾星등, 1995)에 비추어볼 때, 위의 사실을 뒷받침하고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 1992년 7월 22일과 8월 4일의 정기관측에 의해 얻어진 수온, 염분, DO의 단면도를 나타내고, 그림중의 상단의 ST. 수치는 Fig. 1에서의 관측지점을 나타낸다. Fig. 7은 7월 20일~8월 10일의 풍속분포를 나타낸다. 관측기간중의 8월 3일~8월 6일에 걸쳐 靑潮가 발생하였다. 앞서 서술한 9월 7일~9월 12일의 청조발생시와 마찬가지로, 청조가 발생하기 전인 8월 1일까지는 남서풍(해풍)이 연속적으로 불고 8월 1일 오후부터 5m/s이상의 강한 북동풍(이안풍)이 불고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 경우도 청조가 발생하기

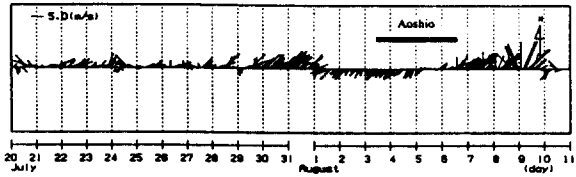


Fig. 7. Time variation of wind velocity and direction at the Chiba Meteorological Observatory (7. 20~8. 10, 1992).

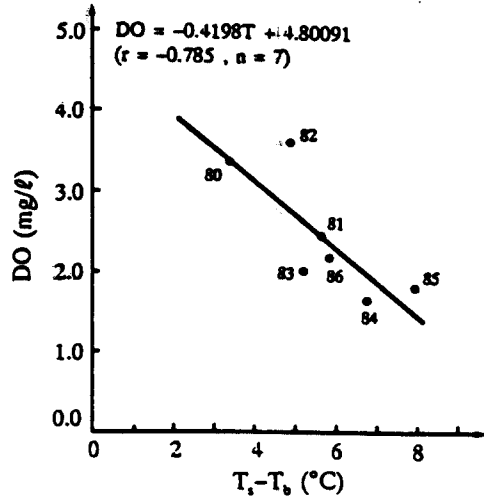


Fig. 8. Relations of water temperature difference between the surface and bottom layers ( $T_s - T_b$ ) with DO at bottom layer observed at Tokyo Bay.

위해서는 강한 이안풍이 해변상으로 연속적으로 작용해야한다는 물리적인 외력조건을 만족하고 있다고 할 수 있다.

7월 22일에는 상·하층의 수온차 약 6°C의 수온성층 상태를 나타내고(Fig. 5(a)), 수심 10m아래에서는 무산소상태(Fig. 5(b))인 것을 알 수 있다. 계속되는 북동풍(Fig. 7 참조)에 의해 청조가 발생한 8월 4일에는 22°C의 등온선이 내만부의 수표면까지 도달해 있으며(Fig. 6(a)), 5mg/l의 빈산소수의 등농도선이 내만부의 수표면까지 도달해 있는 것을 알 수 있다(Fig. 6(b)). Fig. 5과 Fig. 6의 단면도로부터 판단하면, 청조발생시의 내만부의 수표면에서의 저온수와 빈산소수의 출현은 상·하층수의 혼합에 의한 기여율에 대해서는 불명확한 점은 있으나 하층수의 용승에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 1981년~1986년에 하기의 동경만에서 관측된 저층의 용존산소량(DO)과 상·하층의 수온차와의 관계를 나타낸 것이다. 그림중의 수치는 연도를 나타내고 매년 8월의 평균치를 이용하였다. 그림에 나타나 있듯이 동경만에서의 빈산소수화가 수온성층의 형성과 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 3의 수온분포의 연속측정 결과에서도 청조가 발생하기전에는 강한 수온성층구조가 형성되고 있음을 알 수 있다. 청조가 발생하는 하기에는 태양열의 흡수에 의한 수면부근의

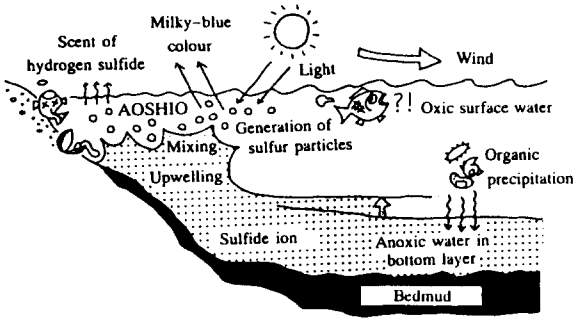


Fig. 9. Conceptual sketch of 'Blue tide' appearance.

온도상승과 더불어, 대량의 하천수의 유입 등에 의해 해역에서 성층화가 강화된다. 아울러 부영양화된 내만에서는 하기의 성층안정효과에 의해 하층에서는 박테리아의 작용에 의해 유기물이 DO를 소비하여 용존산소량을 감소시키고 동시에 분해되어 영양염을 재생시킨다. 그러나 성층구조가 강화되어 있는 관계로 연직혼합에 의한 표층으로부터의 DO의 공급이 줄어들어 공급이 소비를 충족시키지 못하게 되므로, 결과적으로 빈산소수괴가 형성되는 것으로 생각된다. 이상으로부터 대표적인 폐쇄성해역인 동경만에서는 하기의 강한 수온성층의 형성이 저층의 빈산소수화를 조장하는데 크게 기여하고 있는 것으로 판단된다.

위에서 서술한 관측결과에 기초하여 청조발생전후의 해황에 대하여 정리하면, 다음과 같은 특징을 들 수 있다. 靑潮는 주로 6월~9월의 夏期에 집중해서 발생하고 있다. 여름철은 표층수의 수온상승과 하천수의 유입 등의 여러 가지 요인이 중복되어 성층이 강화된다. 청조발생시의 수온과 염분농도의 연직분포의 관측결과로부터 판단하면, 대체로 수심 10m전후의 위치에 밀도약층의 존재가 확인되고 있으며, 연직혼합이 생기기 힘든 상태가 되고 있다. 그 결과 1ppm이하의 빈산소수괴(anoxic bottom water)가 저층에 형성되어 있는 것이 관측된다. 이와같은 상태하에 離岸風(동경만에서는 주로 북동풍을 나타낸다)이 1일 또는 2~3일간 계속해서 불면 빈산소수괴가 저층에서 연안역의 수면으로 용승하여 청조가 발생하는 것으로 추정된다. 이러한 결과에 기초하여 청조의 발생기구의 개념도를 2차원적으로 나타낸 것이 Fig. 9이다. 즉 이안풍이 연속적으로 불면 표층수가 외해방향으로 이동하고 이를 보상하기 위한 형태로 빈산소수괴를 포함한 저층수가 內岸방향으로 移流되어 해저면을 따라서 용승하는 기구를 생각할 수 있다. 그러나 동경만과 같은 해역에서의 성층류는 지구자전 및 지형적인 영향 뿐 만 아니라, 조류, 밀도류, 취송류의 영향이 복합적으로 작용하고 있기 때문에, 보다 세밀한 조사와 3차원적인 접근이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 일본의 동경만에서의 청조(빈산소수의 용승현상)에 관한 기존의 연구 및 문헌조사를 통해 해안

환경 수리학적 관점을 중시하여 고찰을 실시하였다. 또한 1992년의 청조발생시의 氣象 및 海象의 관측데이터를 해석함으로써 청조의 수리학적의미의 분석을 토대로 하여 청조발생에 관한 물리적기구에 관하여 고찰하였다. 본 연구에서는 수역에서의 부영양화에 기인하는 수질환경현상의 발생기구 및 상호관련성에 대하여 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 아래와 같다.

(1) 청조현상은 底層水의 빈산소수화에 기인하고, 동경만과 같은 폐쇄성해역에서의 빈산소수화는 수온성층의 형성에 강하게 의존하고 있음을 알았다.

(2) 1992년 8월 3일~8월 7일 및 9월 7일~9월 12일의 동경만에서의 청조발생시 해상 및 기상특성을 조사한 결과, 청조가 발생하기 약 1주일전부터 강한 남서풍(육지방향으로 부는 바람)이 계속적으로 불고난 후, 청조가 발생하기 1일 혹은 2~3일전부터 북동풍(외해쪽으로 부는 바람)이 계속적으로 불고있음을 알았다. 따라서 청조현상의 발생은 성층상에서의 취송밀도류 현상과 밀접한 관련이 있으며, 하기에 저층에 형성된 빈산소수가 이안풍의 작용에 의하여 용승하여 발생하는 것으로 추정된다.

(3) 청조발생시의 바람 및 유동장의 관측데이터의 해석결과, 동경만에서의 바람에 의한 용승역의 폭은 3~4km 정도이며, 그 유역내에서는 바람과 역방향의 유동이 형성되고 있음을 알았다. 그러나 관측 데이터가 불충분한 관계로 바람장과 유동장의 상호관계에 의한 용승기구를 상세하게 밝히기는 어렵다.

이상으로부터, 청조발생의 물리적기구를 밝히기 위해서는 수온성층의 형성기구, 바람의 작용에 의한 밀도계면의 용승(upwelling)과 상하층의 혼합기구 등을 고려한 종합적이고 상세한 해석이 필요할 것으로 생각된다. 아울러, 최근 거제도에서 발생한 청조와 유사한 현상에 대하여 자료 및 관측결과를 입수하여 청조현상과의 관련성을 밝히고자 한다.

#### 참 고 문 헌

- 부산일보, 1997. 8. 12.  
 高崎みつる·佐久·杉原隆一·岡田光正: 湖の溶存酸素收支に関する研究, 土木學會論文集 報告集, 제 340호, pp.97-105, 1983.  
 菅原兼男·佐勝正春: 東京灣の赤潮, 千葉縣内灣水試調報, 第8號, pp. 57-95, 1966.  
 菅原兼男·海老原天生·川名順之·飯田健二: 東京灣奥部のアサリ被害原因について, 千葉縣内灣水試調報, 第9號, pp. 74-88, 1967.  
 鬼塚生光·太田一之·寒川強·富永衛·木村明·北村傳·平石明: 東京灣の靑潮に関する研究 その1~4, 日本海洋學春季大會講演要旨集, pp. 241-248, 1987.  
 山岡到保: 赤潮と靑潮, 環境と測定技術, Vol. 13, No. 1, pp78-82, 1986.  
 城久: 大阪灣における富栄養化の構造と富栄養化が漁業産業におよぼす影響について, 大阪府水産試験



- 所研究報告, 第7號, 1986.
- 鈴木輝明 : 貧酸素水塊と赤潮, 水質汚濁研究, 第11巻7號, pp. 422-424, 1988.
- 尹鍾星, 中十啓二, 村岡浩爾, 1995, 風應力作用下の成層水域における密度界面の舉動および混合特性 - 水理實驗數値實驗 -, 水工學論文集, 34, 811~818.
- 田村靜夫 : 東京内灣海域の水質變動と漁業生産, 海洋科學, Vol. 2, pp. 751-759, 1970.
- 柿野 純・松村皐月・佐勝善徳・加勝信明 : 風による流れと青潮との關係, 日本水産學會誌, Vol. 53, No. 8, pp.1475-1481, 1987
- 風呂田利夫・吉池雄藏 : 東京灣奥部における青潮形成時の沿岸水の2・3の生物・化學的特性, 日本海洋學春李大會講演要旨集, pp. 304-305, 1985.
- 環境廳 : 青潮の發生機具の解明等に關する調査報告書 (概要版), 1988.
- Suzuki, T. and Y. Matsukawa : Hydrography and budget of dissolved total nitrogen and dissolved oxygen in the stratified season in Mikawa Bay, Japan, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 43, pp.37-48, 1987
- Yamochi, S. : Mechanisms for outbreak of heterosigma akashio red tide in Osaka Bay, Japan, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 39, pp. 267-278, 1983.
- Yoshida, K. : Coastal upwelling off the California coast, Rec. Oceanogr. Wks. Japan, New Ser., Vol. 2, No. 2, pp. 8-20, 1955