

Cochlodinium polykrikoides 적조의 최초발생해역인 나로도 주변 해역의 해양환경

이문옥^{1,*} · 문진한²

¹전남대학교 해양기술학부(교신저자)

²전남대학교 대학원 박사과정

Marine Environments in the Neighborhood of the Narodo as the First Outbreak Region of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms

Moon Ock Lee^{1,*} and Jin Han Moon²

¹Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, Jeollanam-do 550-749, Korea

²Department of Ocean Engineering, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu, Jeollanam-do, 550-749, Korea

요 약

유독성 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생해역으로 알려져 있는 나로도 주변 해역의 해양환경적 특징을 조사하기 위해서 1992년부터 2007년까지 국립수산과학원이 실시한 해양환경측정망 자료 및 적조정보자료와 고흥 지방의 기후자료 등을 분석하였다. *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 8월에 나로도 주변 해역에서 최초로 발생한 경우가 가장 많았고, 그 발생시기는 해마다 빨라지고 있는 경향을 보였다. 또한 나로도 주변 해역에서의 표층 염분도 계속 증가하는 추세를 보여, *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생시기의 빨라짐과의 어떤 관련성을 시사하였다. 한편 나로도 주변 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 최초로 발생할 때는 동일한 시기의 가막만 또는 진해만 해역에 비해 상대적으로 일사량은 많았고 강수량은 적었다. 8월의 나로도 주변 해역의 평균 수온 및 염분은 동일한 시기의 가막만 및 진해만에 비하여 평균 수온은 0.2~0.6 °C, 염분은 1.84~3.91 psu 각각 더 높았으며, 두 해역에 비해 상대적으로 고온, 고염을 나타내었다. 또한 나로도 주변 해역은 부영양화 해역으로 알려진 진해만에 비해서는 영양염이나 식물플랑크톤의 농도가 현저히 낮았으나, 전체적인 수질환경은 가막만과 크게 다르지 않은 것으로 판단되었다. 주성분 분석결과, 나로도 주변 해역에서 최초로 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 요인으로서 기상인자와 물리적 환경인자인 일사량과 수온이 가장 중요하며, 부차적으로 수질요소인 COD와 용존산소의 농도가 여기에 관여하고 있음을 보여주었다. 태풍 또한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생에 있어 중요한 요인 중의 하나로 생각되었다.

Abstract – We have analyzed a long term data of marine environments, red tide information and meteorology acquired by NFRDI and KMA, in order to understand the characteristics of marine environments in the Narodo coastal waters which is known to be the first outbreak region of *Cochlodinium polykrikoides* blooms. During the period of from 1992 to 2007, *Cochlodinium polykrikoides* blooms have first occurred more often in August. However, the outbreak time of the blooms tended to be earlier annually, and in addition, the surface salinity also had a tendency to increase. Consequently, it suggested that there might be a relationship between the transition of the outbreak time of the blooms and salinity. On the other hand, insolation was relatively rich but precipitation was relatively scarce in Gohung Province, compared to Yeosu or Tongyeong, when *Cochlodinium polykrikoides* blooms first occur in Narodo coastal waters. Average water temperature and salinity in August in Narodo coastal waters were all higher than those in Gamak and Jinhae bays, suggesting that Narodo coastal waters are a region of relatively high water temperature and high salinity. Also, concentrations of nutrients and chlorophyll_a were significantly low than those in Jinhae Bay, which is known to be a eutrophicated region,

*Corresponding author: leeo@chonnam.ac.kr

while the overall water quality seemed to be similar to Gamak Bay. The results of PCA(Principal Component Analysis) proved that insolation and water temperature are the most important factors for the outbreak of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in Narodo coastal waters while concentrations of COD and dissolved oxygen are secondly important. Furthermore, typhoons also appeared to be one of most important factors for the outbreak of *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

Keywords: *Cochlodinium polykrikoides* blooms(코클로디니움 적조), Marine Environments(해양환경), First Outbreak Region(최초발생해역), PCA(주성분분석), Narodo Coastal Waters(나로도 연안해역)

1. 서 론

1995년부터 2007년까지 우리나라 연안 해역에서 발생한 유독성 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초 발생 해역은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 나로도 주변 해역이 11회, 여수 연안 해역이 10회, 거제도 연안 해역이 각각 1회로서, 최초의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 대부분 나로도(붓돌바다)를 중심으로 한 고흥 연안역 또는 가막만(돌산도)을 중심으로 한 여수 연안역에서 발생하였다. 즉, 유독성 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 나로도 주변 해역 또는 가막만 주변 해역에서 8월경에 최초로 발생한다고 말할 수 있다.

한편, 1995년 이래 *Cochlodinium polykrikoides* 적조에 의한 남해안에서 발생한 어업피해는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 어업피해는 주로 참돔, 광어, 우럭 등의 양식어류나 굴, 홍합 등의 이매

패류가 입은 피해가 대부분을 차지하는데 1995년에 약 800만 US 달러, 2003년에 약 300만 US 달러의 어업피해가 발생하였다. 최근 들어서는 국내에서의 현저한 피해는 없었으나, 여전히 이 적조의 유독성에 의한 수산생물체에의 피해는 전 세계적으로 계속 보고되고 있다(Zhou *et al.*[2007], Gobler *et al.* [2007], Kudela *et al.* [2008], Anton *et al.*[2008]).

지금까지 외편모조류인 *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 적조발생기작의 해명과 확산범위의 예측, 독성, 또는 생활사와 관련하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 중에, 특히 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생기작과 관련한 연구의 주요 결과를 살펴보면 다음과 같다.

양 등[2000]은 나로도 인근 해역에서 실시한 해수 물성 및 영양염 조사결과로부터, 이 해역에서의 적조 발생과 소멸에 양자강 하천수와 같은 외해수 유입(특히 용존무기질소의 공급)이 밀접히

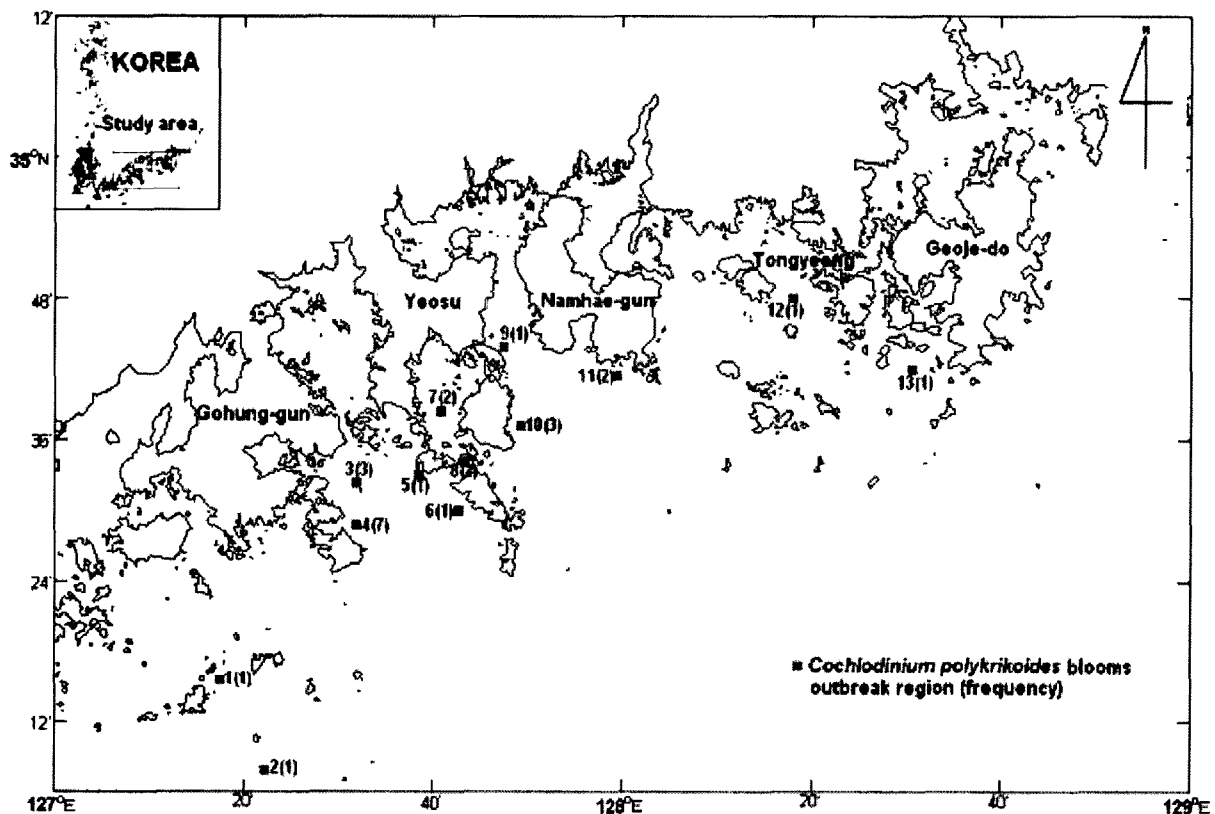


Fig. 1. Yearly initial outbreak region for *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

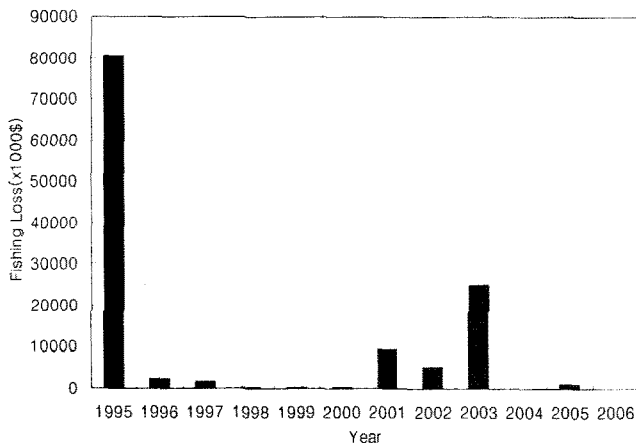


Fig. 2. Fishing loss by *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

관여하고 있을 가능성을 시사하였다. 김 등[2001]은 남해 사랑도 해역에서 채취한 *Cochlodinium polykrikoides* 시료의 배양실험을 통해 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 질소 및 인의 농도 증가에 의한 부영양화 해역에서 발생할 가능성이 높음을 지적하였다. 이 등[2001]은 남해안에서 채취한 *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 3종에 대한 출현과 생리적 특성을 조사하였다. 그 결과, 이들 3종의 최초 출현은 수온이 22.8~26.5°C로 서로 거의 비슷한 시기에 출현하였고, 유영세포의 소멸은 특히 *Cochlodinium polykrikoides*의 경우 수온이 23°C 이하로 하강하는 시기로 나타났다. 또한 *Cochlodinium polykrikoides*는 DIN과 DIP 농도가 낮은 환경하에서도 나로도 및 남해 외측에서 왕성한 증식을 보였다. 곽 등[2001]은 남해안에서 적조를 일으키는 *Cochlodinium polykrikoides*를 포함한 주요 8종에 대한 광합성과 광에 대한 적응력을 조사한 결과, *Cochlodinium polykrikoides*가 최적조건(20°C 또는 25°C)에서 생장율이 0.26으로 가장 낮다고 하였다. 최[2001]는 남해안 나로도 및 소리도 사이의 해역에서 1998년 5월부터 9월까지 7회에 걸쳐 수온 및 염분을 관측한 결과, *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 초기발생시기나 진행시기 또는 소멸시기에는 염분분포에 차이가 있음을 확인하였다. 특히, 그는 적조의 소멸시기에 성층구조가 혼합구조로 변화하는 것은 남쪽의 외해역으로부터의 저염분수의 유입에 따른 결과라고 주장하였다. Lee et al.[2001]은 고흥반도와 돌산도 사이의 해역에서 수온 및 적조생물을 조사한 결과, *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 태풍 또는 기타 외부 환경요인에 의해 수온약층이 소멸할 경우에 발생한다고 주장하였다. 또한, 그들은 나로도 주변 해역에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 이러한 환경변화에 의해 휴면포자로부터 발아한 유영세포나 이미 저농도로 표층에 존재하던 유영세포가 대량증식에 관여하는 물질이 유입하고 난 후, 일사량 및 염분이 호적조건일 경우 발생하는 것으로 추론하였다. 임 등[2002]은 2000년 여수해만에서 최초로 발생한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 진행과 소멸과정을 NOAA 위성 표층수온자료에 근거하여 해석하였다. 그들은 이 시기의

Cochlodinium polykrikoides 적조의 초기 발생과 소멸에 태풍의 통과와 또한 대마난류와 남해연안수 사이에 형성된 수온전선(22°C)이 관여하고 있음을 확인하였다. 서 등[2003]은 최근 7년간의 위성영상자료와 해양관측자료를 분석하여 나로도 주변해역에서 최초로 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 고온고염의 열염전선대와 관련이 있다고 추정하였다. 조와 최[2005]는 2003년에 실시한 11차례의 현장조사결과에 기초하여, *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생하는 완도 해역은 외양수 유입에 의해 각각 영양염 공급을 받을 수 있는 해역으로 평가하였다. 오 등[2006]은 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 미치는 광량과 파장에 관한 실내실험결과를 통해 *Cochlodinium polykrikoides*는 폐쇄된 수역에서보다는 청록색 파장이 우세한 외양에서 적조를 일으킬 가능성이 더 크다는 사실을 지적하였다. Lee and Lee[2006]는 AGP(Algal Growth Potential) 실험과 현장관측결과에 기초하여, *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 나로도나 거제도 주변 해역에서 최초로 발생하는 이유는 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장을 촉진하는 해수가 쓰시마 난류의 영향에 의해 이들 해역으로 수송되기 때문이라고 추정하였다. 또한 이들은 *Cochlodinium polykrikoides*의 성장을 촉진하는 해수의 기원은 나로도, 남해도 및 거제도의 남해안 지역의 남쪽 단면인 것으로 가정하였다. 이 등[2007]은 여수반도를 중심으로 한 남해안에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생에 기여하는 담수의 영향을 조사하였다. 그 결과, 집중 호우시 인근 섬진강 및 동천으로부터 유입하는 다량의 질산염을 확인하였으며, 이것이 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생에 영향을 미치는 것으로 결론지었다. Zhou et al.[2007]은 양쯔강 중, 하류역에서 지난 40년간 식물플랑크톤의 군집변화를 조사한 결과, 식물플랑크톤의 현존량은 증가한 반면, 전체 플랑크톤에서 차지하는 규조류의 비율은 감소한 것으로 나타났다. 또한, 이에 따라 동중국해에서 유독성 적조가 대규모적으로 빈발하는 경향을 확인하였다. Gobler et al.[2007]은 2000년부터 2006년까지 미국 Long Island의 Peconic Estuary와 Shinnecock Bay에서 발생한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 출현특성을 조사하였다. 그 결과, *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 늦여름 수온이 20~25°C, 염분이 22~30 psu 일 경우 발생하였으며, 이들 중은 동남아시아에서 출현하는 종과 유사함을 밝혔다. Kudela et al. [2008]은 태평양, 대서양, 인도양 등에서 광범위하게 발생하고 있는 *Cochlodinium* 속에 의한 적조의 생태생리학(ecophysiology)에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 *Cochlodinium* 속이 가진 연직 방향의 회유능력이 유기질 및 무기질의 질산염 뿐만 아니라 혼합영양물(mixotrophy)을 이용가능하게 한다고 하였다. 또한, 이러한 특성이 새로이 개방되는 생태적인 지위(niche)에도 빠르게 적응할 수 있도록 하므로 수온이 11~30°C, 염분이 30~34 psu인 범위에서 전세계에 걸쳐 폭넓게 생존하며, 적조 빈도도 높다고 하였다. Lee[2008]는 수온과 염분관측자료, 위성 영상 및 해상풍 자료를 이용하여 나로도 인근 해역에서 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 개시와 종료에 관한 생리물리적 연구를 수행

하였다. 그는 나로도 인근에 존재하는 해저협곡(submarine canyon)이 북동풍에 의해 유기되는 외해수의 표층수 침입에 있어서 중요한 역할을 한다고 주장하였다. 또한, 그는 8월말에 계절풍이 남서풍으로부터 북서풍으로 바뀔 때, 나로도 인근 해역으로 양쯔강 하천수가 에크만 수층으로 유입하게 되고, 그 결과 나로도 연안수와 양쯔강 하천수 사이에 전선(front)이 형성된다고 하였다. 그래서 이 전선을 따라 양쯔강 하천수에 있는 *Cochlodinium polykrikoides* 세포의 집적과 침강이 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 형성에 유리한 생태물리적 환경을 조성한다고 하는 가설을 제안하였다. 이후 태풍과 북동풍에 의해 연직적으로 잘 혼합된 동중국해 해수가 9월에 나로도 인근 해역으로 다시 유입하면 규조류 성장에 유리한 생태물리학적 조건이 만들어지면서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 종료한다고 하였다. Azanza et al.[2008]은 2005년 3월 필리핀 Palawan 서해안에서 발생한 고밀도($2.5 \times 10^5 \sim 3.2 \times 10^6 \text{ cells l}^{-1}$)의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 고농도(최대 50 mg m^{-3})의 Chl_a의 유출수에 의해 발생하였다는 사실을 위성 영상자료자료에 의해 확인하였다. Lee and Kim[2008]은 지난 25년간 가막만과 진해만에서 발생한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생요인에 대하여 통계분석을 실시하였다. 그 결과, 가막만에서는 수온과 일사량이, 진해만에서는 염분과 강수량이, 각각 제 1주성분으로 나타났다. 이것은, 적조원인생물이 동일종이라 하더라도 해역에 따라 그 발생요인, 즉 물리적 요인과 기상학적 요인이 다를 수 있음을 말해 준다.

본 연구는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초 발생 해역의 하나로 알려져 있는 나로도 주변 해역의 환경적 특성을 파악함으로써, 왜 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 매년 이곳에서 최초로 발생하는지 그 이유를 밝히는 데 목적이 있다.

2. 자료 및 방법

나로도 주변 해역을 비롯한 가막만, 진해만의 해양환경 및 적조 자료는 1995년부터 2007년까지 매 2~3개월 마다 국립수산과학원에서 실시하고 있는 각 해역별 해양환경측정망자료 및 적조정보자료(NFRDI Website: <http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>)를 참고하였으며, 기상자료는 기상청의 기후자료(KMA; Website: http://www.kma.go.kr/gw.jsp?to=weather_main.jsp)를 각각 참고하였다. 또한, *Cochlodinium polykrikoides* 적조발생의 원인 파악을 위해 Window version 12.0의 SPSS 통계 프로그램을 사용하여 해양환경 및 기상 자료를 분석하였다. 분석 기법은 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)으로서, 다수의 양적 변수가 존재할 경우 그들 변수가 가지고 있는 정보를 하나 또는 소수의 종합지표의 값으로 바꾸어 만들어 주는 분석법이다. 즉, 자료가 가지고 있는 정보를 요약하는 것에 상당하며, 이때 사용되는 종합지표를 주성분이라고 한다. 주성분은 각 변수에 가중치를 주어 합성하는 것에 의해 구하여진다. 그때 원래의 변수가 가지고 있는 정보를 최대한 이용하여 개체간의 분산이 최대가 되도록 가중치를 붙인다. 복수의 주성

분이 존재하는 경우에는 각각의 주성분은 서로 독립이다. 이들의 관계는 다음의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \\ z_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n \\ z_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n \\ &\vdots \\ z_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $z_1 \sim z_m$ 은 주성분, $z_1 \sim z_n$ 은 원래의 변수, $a_{11} \sim a_{mn}$ 은 가중치이다. 분석결과에 의해, 각각의 주성분의 고유치가 1 이상 또는 누적 기여율이 80%를 넘는 것을 기준으로 하여 주성분을 선택한다. 한편, 분석에 사용한 자료에 대한 표준 형성의 적절성의 Kaiser-Meyer-Olkin 측도는 0.231~0.305, Barlett의 구형성 검정에서의 유의확률은 0.03~0.083이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초 발생시기

Fig. 3은 나로도 주변 해역에서 1995년 이래 2007년까지 최초로 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생한 시기의 년변화를 나타낸다. 적조의 발생시기는 7월이 2회, 8월이 10회, 9월이 1회로서 대개 성층이 강화되는 8월이 가장 많았다. 또한, *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생시기는 지난 13년 동안 9월에서 7월로 약 2개월이 빨라진 것을 알 수 있다. 발생시기가 이렇게 빨라지고 있는 원인을 밝히기 위하여, *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생빈도가 가장 많은 8월에 관측한 고히 지방의 평균기온과 나로도 주변 해역의 표층(그림 중의 surface WT) 및 저층(그림 중의 bottom WT) 평균 수온의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 나로도 주변해역의 표층 및 저층 수온은 각각 $23.1 \sim 27.8^\circ\text{C}$ 및 $22.0 \sim 26.7^\circ\text{C}$ 로, 이 등[2001], Gobler et al.[2007], Kudela et al.[2008] 등에 의한 타 해역에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생시의 수온과 유사하였다. 또한, 표층 및 저층 수온은 다소 기복은 있으나 지난 15년 동안 전반적으로 낮아지는 경향을 보이고 있는

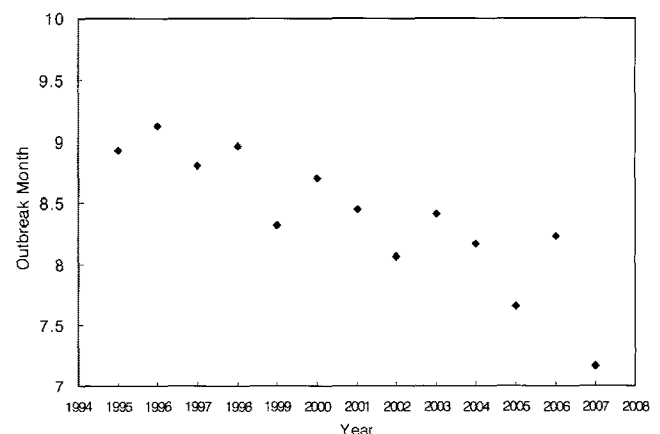


Fig. 3. Transition of initial outbreak time for *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

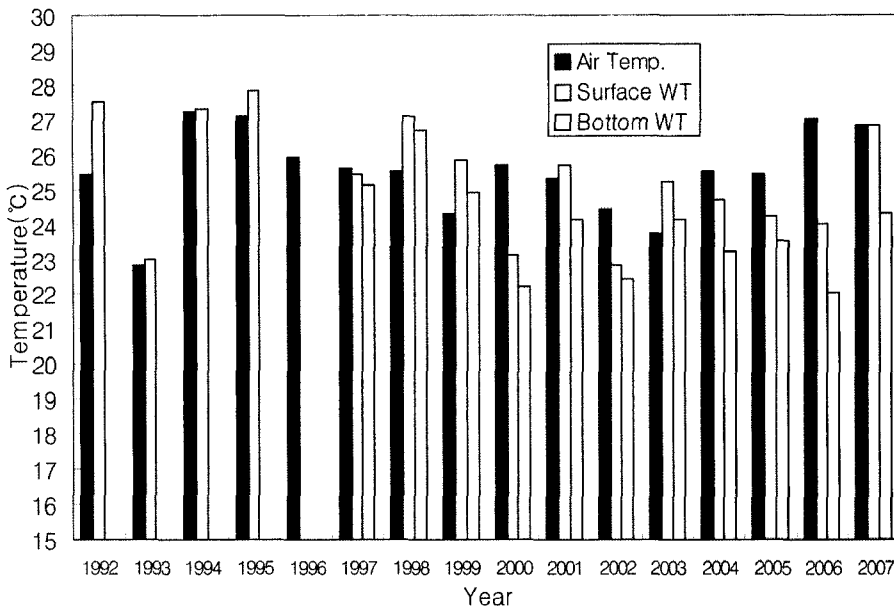


Fig. 4. Yearly variations of air and water temperatures in August in Gohung and Narodo coastal waters.

반면, 고흥 지방의 기온은 2003년까지 낮아지다가 최근 들어서 다소 높아지는 경향을 나타내었다. 그러나, 이와 같은 최근 몇 년 간에 걸친 고흥 지방의 기온 상승으로 적조 발생시기의 전체적인 빨라짐을 설명하기는 어렵다. 더구나, 나로도 주변 해역에서의 수온은 표·저층 모두 하강하는 추세를 보이고 있으므로 이들 만으로는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생시기가 빨라지고 있는 사실을 설명하기 곤란하다고 생각된다.

한편, Fig. 5는 8월의 고흥 지방의 강수량 및 일사량의 년변화를 나타내는데, 강수량은 2002년에 720.0 mm를 넘는 최대치를 기점으로 하여 증가 추세에서 최근에는 감소 추세로 돌아선 듯한 경향을 보였다. 반면, 일사량은 1999년까지는 감소 추세를 보이다가 2002년부터 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 진술한 Fig. 4의 결과와 비교하면, 최근의 일사량 증가는 기온 상승에 상당한 기여를 하고 있으나 나로도 주변 해역의 수온에는 별다른 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 따라서, 이들 결과 또한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생시기가 점차 빨라지는 현상을 뒷받

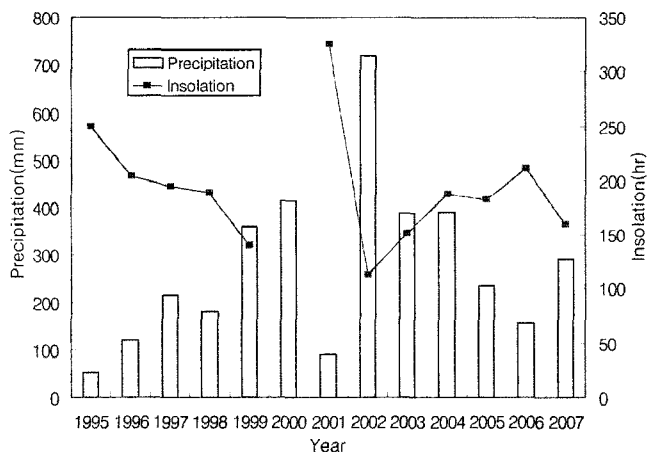


Fig. 5. Yearly variations of precipitation and insolation in August in Gohung Province.

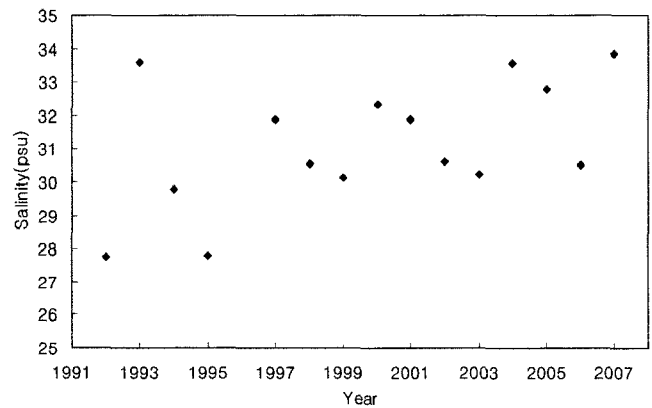


Fig. 6. Yearly variations of surface layer salinity in August in Narodo coastal waters.

침하기에는 부족하다고 생각된다. 반면, Fig. 6은 나로도 주변 해역에서의 8월의 표층 염분의 년변화를 보여준다. 나로도 주변 해역의 8월 염분은 미국 Peconic Estuary에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 출현할 당시의 염분범위인 22~30 psu는 물론, 태평양, 대서양, 인도양 등 타 해역에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 출현범위인 30~34 psu와도 유사하였다(Gobler et al.[2007], Kudela et al.[2008]). 그러나, 1992년에 27.75 psu이던 염분은 전반적으로 증가 추세를 유지하여 2007년에 33.83 psu로, 지난 15년 동안 5.08 psu가 상승하였다. 따라서, *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초발생시기가 점차 빨라지고 있는 것은 나로도 주변 해역에 있어서의 표층 염분의 점진적인 증가와 관련이 있는 것으로 판단된다.

3.2 나로도 주변 해역의 환경특성

3.2.1 고흥 지역의 강수량과 일사량

Fig. 7은 1995년부터 2007년까지 나로도 주변 해역에서 7~9월에 발생한 10회의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 당시의 고흥

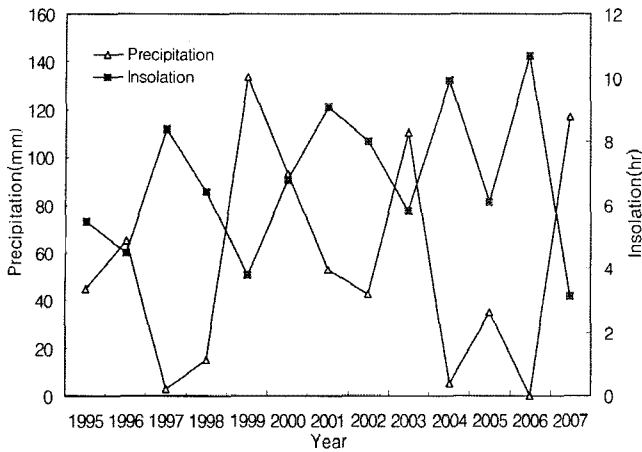


Fig. 7. Precipitation and insolation in Gohung Province during *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

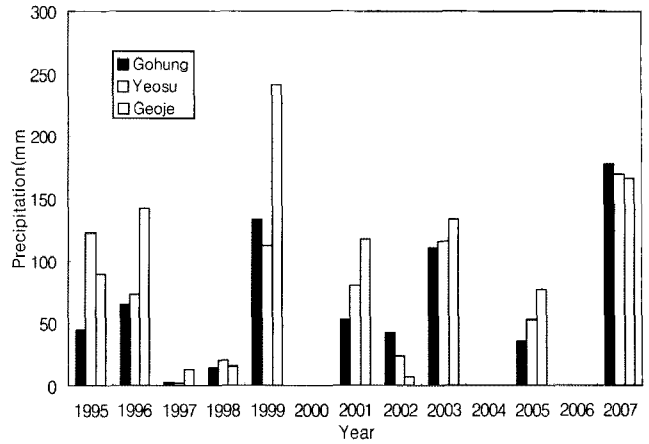


Fig. 8. Comparison of cumulative precipitation during the ten days before *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

지역의 강수량과 일사량을 나타낸다. 여기서 강수량 및 일사량은 적조 발생 10일전부터 적조발생일까지의 누적 강수량 및 이 기간 중의 1일 평균 일사량을 각각 말한다. 적조 발생전 10일 동안의 강수량 및 일사량에 주목하는 데에는 다음과 같은 가정에 근거를 두고 있다. 즉, 적조원인생물은 종에 따라 성장율이 다르지만(예: *Cochlodinium polykrikoides*는 2일에 1회 2분열을 하며, *Heterosigma akashiwo*는 1일 1회 내지 3회 2분열을 하는 것으로 알려져 있음), 대개의 규조류나 편모조류가 1일 2분열 한다고 가정할 경우 10일 이면 개체수가 1,000개체 이상으로 증식하여 적조밀도에 이를 수 있기 때문이다.

먼저, 고흥 지역에서는 일사량이 많은 해에는 강수량이 적은 반면, 일사량이 적은 해에는 강수량이 상대적으로 많아 이들 두 변량간에는 역의 상관성이 있는 것으로 생각된다. 또한, 강수량은 3~4년, 일사량은 2~3년의 주기로 기복을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편, 강수량은 1999년, 2003년 및 2007년이 다른 해에 비해 많았고, 일사량은 1997년, 2001년, 2004년 및 2006년이 다른 해에 비해 많았다. 특히, 주목할 점은 강수량과 일사량이 적당하였던 2000년과 상대적으로 강수량이 적었던 2004년에는 나로도 주변 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 최초로 발생하지 않았으며, 2000년 8월에는 여수지역에서, 2004년 8월에는 여수 및 거제 지역에서 각각 최초로 발생하였다는 사실이다. 이것은 나로도 주변 해역에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초 발생이 강수와 일사의 복합적 상호 작용에 의해 결정되고 있음을 시사한다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 나로도 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생할 당시의 고흥 지역의 강수량과 일사량을, 가막만 및 진해만에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생할 당시의 여수 및 거제 지역의 강수량 및 일사량과 비교한 것이다. 이들 결과에 따르면, 고흥의 강수량은 2002년과 2007년을 제외하고는 여수나 거제에 비해 현저히 적은 반면, 일사량은 여수나 거제에 비해 2003년, 2005년 및 2006년을 제외하고는 현저히 많았다. 즉, 전반

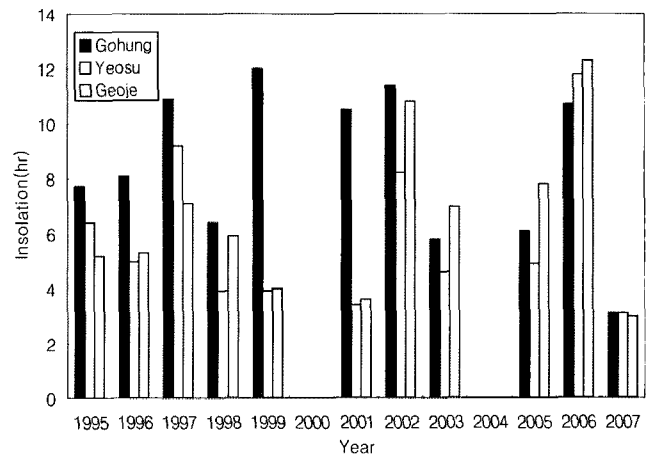


Fig. 9. Comparison of insolation for three regions during *Cochlodinium polykrikoides* blooms.

적으로 나로도 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 최초로 발생할 당시는 동일한 시기의 가막만 또는 진해만에 비해 일사량은 상대적으로 많은 반면 강수량은 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 나로도 주변 해역의 수온과 염분

1995년부터 2007년까지 나로도 주변 해역에서 발생한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 당시의 표층 수온은 23.1~27.8 °C (평균 25.4 °C), 표층 염분은 27.75~33.83 psu(평균 29.12 psu)이었다. 이것은 나로도 주변해역이 이 등[2001]이 남해안에서 조사한 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초출현시기의 수온인 22.8~26.5 °C나, 또는 광 등[2001]이 실내 배양실험을 통해 밝힌 남해안에서 적조를 일으키는 *Cochlodinium polykrikoides*의 최적 성장조건인 25 °C와 유사한 환경조건을 가지고 있음을 말해 준다. 또한 나로도 주변 해역의 염분도 전술한 바와 같이 세계의 다른 연안 해역의 염분과 크게 다르지 않음을 알 수 있다(Gobler et al.[2007], Kudela et al.[2008]). 그러나, 나로도 주변 해역에서 발

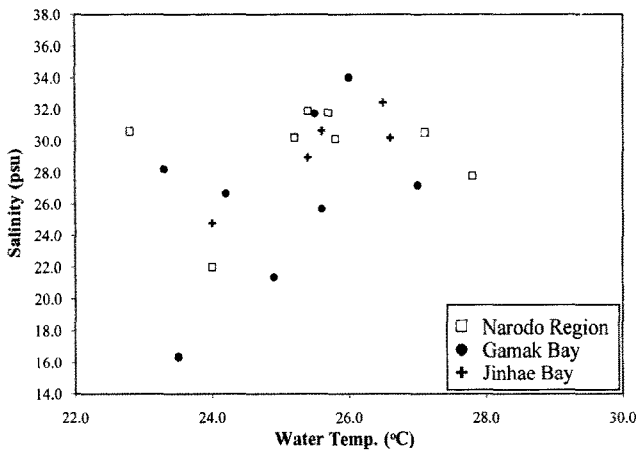


Fig. 10. Outbreak conditions of *Cochlodinium polykrikoides* blooms by water temperature and salinity.

생한 10회의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 중 8회(즉, 1995, 1997, 1998, 1999, 2001, 2002, 2003, 2006년)가 8월에 발생하였으므로, 대표적으로 8월에 발생한 적조만을 대상으로 하여, 이들 값을 가막만 및 진해만에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생한 당시의 8월의 값들과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 나로도 주변 해역에서의 8월의 표층 수온은 22.8~27.8 °C(평균 25.6 °C), 염분은 27.80~33.83 psu(평균 30.71 psu)의 범위를 보인 반면, 가막만의 8월의 표층 수온은 23.3~27.0 °C(평균 25.0 °C), 염분은 16.34~34.02 psu(평균 26.80 psu), 진해만의 8월의 표층 수온은 24.0~26.6 °C(평균 25.4 °C), 염분은 24.79~31.45 psu(평균 28.87 psu)로 나타났다. 따라서, *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 발생한 8월의 나로도 주변 해역에서의 평균 수온 및 염분은 가막만 및 진해만에 비하여 각각 평균 수온은 0.2~0.6 °C, 염분은 1.84~3.91 psu가 더 높았다. 즉, *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생 당시의 8월의 나로도 주변 해역은 두 해역에 비해 상대적으로 고온, 고염 해역임을 알 수 있다.

3.2.3 나로도 주변 해역의 수질환경

전술한 바와 같이 1995년부터 2007년까지 나로도 주변 해역에서 8월에 발생한 8회의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 당시의 수질환경을 이 기간 중 가막만(즉, 2004, 2005, 2006년) 및 진해만(즉, 2001, 2002, 2003년)에서 발생한 8월의 수질환경과 비교한 것을 Table 1에 나타내었다.

이 결과에 따르면, 나로도 주변 해역의 수소이온농도(pH) 농도는 가막만이나 진해만에 비해 다소 낮은 반면, 용존산소(DO) 농도는 다소 높았다. 또한, 나로도 주변 해역의 화학적 산소요구량(COD) 농도는 가막만보다는 다소 높으나 진해만보다는 다소 낮았다. 한편, 용존무기질소(DIN) 및 용존무기인(DIP) 농도는 가막만보다는 다소 높으나 진해만에 비해서는 현저히 낮았다. 또한, 나로도 주변 해역의 클로로필 a(Chl_a) 농도는 가막만이나 진해만에 비해서는 현저히 낮았다. 즉, 나로도 주변 해역은 유기물(즉, COD)이나 영양염(즉, DIN, DIP)의 농도는 가막만과 유사하지만 식물플랑크톤(즉, Chl_a)의 농도는 가막만에 비해 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 특히 나로도 주변 해역은 부영양화 해역으로 알려진 진해만에 비해서는 영양염이나 식물플랑크톤의 농도가 현저히 낮지만, 전체적인 수질환경은 가막만과 크게 다르지 않은 것으로 판단된다. 한편, 세 해역 모두 DIN/DIP의 비는 평균 3.89~8.42로서, 질소가 식물플랑크톤의 성장에 제한요인으로 작용할 가능성을 보이고 있다.

3.2.4 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 초기발생 원인분석

나로도 주변 해역에서 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조에 관여하는 환경인자의 특성을 대표적으로 가막만의 경우와 비교, 검토하기 위하여 이들 두 해역의 기상 및 해양환경자료의 주 성분분석을 실시하였다. 주 성분분석에 사용된 주요환경인자를 Tables 2a~2b에, 또한 이들에 대한 분석결과를 Tables 3a~5b에 각각 나타내었다.

Table 1. Comparison of water quality factors in August when *Cochlodinium polykrikoides* blooms

Factor Region	pH (mg L ⁻¹)	DO (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	DIN (mg L ⁻¹)	DIP (mg L ⁻¹)	Chl_a (µg L ⁻¹)
Narodo Region	7.81~8.23 (8.01)	5.79~10.56 (7.93)	1.10~2.39 (1.75)	0.02~0.15 (0.07)	0.04~0.043 (0.018)	1.01~2.80 (1.87)
Gamak Bay	8.14~8.18 (8.16)	6.59~7.78 (7.22)	0.94~1.87 (1.36)	0.03~0.05 (0.04)	0.006~0.015 (0.010)	1.91~4.33 (3.10)
Jinhae Bay	7.93~8.23 (8.11)	6.34~8.62 (7.64)	2.11~2.85 (2.40)	0.05~0.60 (0.303)	0.009~0.066 (0.036)	2.04~10.78 (7.80)

Table 2a. Environmental conditions associated with the appearance of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in Narodo region

Case	Outbreak	Insolation (hr)	Precipitation (mm/10days)	Water Temp. (°C)	Salinity (psu)	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIN (mg/L)	DIP (mg/L)
1	Sept., 5, 1996	5.4	62.7	23.2	31.68	6.10	0.86	0.10	0.028
2	Aug., 11, 1999	4.7	112.4	25.8	29.61	8.00	2.45	0.19	0.002
3	Aug., 22, 2000	6.8	93.2	25.7	30.83	5.35	1.25	0.05	0.024
4	Aug., 14, 2001	3.4	80.3	25.1	31.56	6.50	2.19	0.09	0.040
5	Aug., 2, 2002	7.7	24.2	22.9	29.36	7.86	0.37	0.23	0.047
6	Aug., 13, 2003	4.6	116.0	25.3	29.25	10.89	2.08	0.04	0.009
7	Aug., 5, 2004	8.4	6.3	23.4	33.58	6.59	0.94	0.04	0.010
8	July, 20, 2005	4.9	53.0	26.0	32.31	7.30	1.87	0.05	0.018
9	Aug., 7, 2006	11.8	0.0	27.8	29.28	7.78	1.27	0.03	0.006

Table 2b. Environmental conditions associated with the appearance of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in Gamak Bay

Case	Outbreak	Insolation (hr)	Precipitation (mm/10days)	Water Temp. (°C)	Salinity (psu)	DO (mg/L)	COD (mg/L)	DIN (mg/L)	DIP (mg/L)
1	Aug., 29, 1995	6.0	44.0	27.8	27.80	8.12	1.10	0.04	0.014
2	Sept., 5, 1996	5.9	35.5	22.7	31.87	6.71	0.44	0.08	0.011
3	Aug., 25, 1997	9.6	3.0	25.4	31.90	5.79	2.39	0.07	0.020
4	Aug., 31, 1998	6.3	15.0	27.1	30.55	7.60	1.91	0.03	0.007
5	Aug., 11, 1999	3.8	133.5	25.8	30.15	7.59	1.83	0.12	0.002
6	Aug., 14, 2001	10.0	48.0	25.7	31.80	7.53	2.33	0.04	0.038
7	Aug., 2, 2002	5.2	233.5	22.8	30.62	7.49	1.94	0.15	0.019
8	Aug., 13, 2003	4.0	242.0	25.2	30.23	10.56	1.32	0.02	0.004
9	July, 20, 2005	6.1	35.0	24.2	32.81	7.24	0.46	0.08	0.014
10	Aug., 7, 2006	10.5	0.0	24.0	30.52	8.73	1.18	0.09	0.043

Table 3a. Statistical quantities for PCA in Narodo region

Variables	Mean	Standard Variation	Number of Data
Insolation	6.74	2.4341	10
Precipitation	78.95	91.6132	10
Water Temperature	25.07	1.6767	10
Salinity	30.825	1.38682	10
DO	7.736	1.26222	10
COD	1.49	0.70321	10
DIN	0.072	0.04131	10
DIP	0.0172	0.013653	10

Table 4a. Total variance for PCA in Narodo region

Component	Initial eigen value		
	Total	Variance (%)	Cumulative value (%)
1	2.746	34.320	34.320
2	2.080	26.000	60.320
3	1.190	14.881	75.201
4	1.125	14.061	89.261
5	0.686	8.570	97.831
6	0.107	1.339	99.170
7	0.055	0.685	99.855
8	0.012	0.145	100.000

Table 3b. Statistical quantities for PCA in Gamak Bay

Variables	Mean	Standard Variation	Number of Data
Insolation	6.411	2.5833	9
Precipitation	60.900	43.6039	9
Water Temperature	25.022	1.5920	9
Salinity	30.8289	1.56351	9
DO	7.3744	1.59134	9
COD	1.4756	0.70374	9
DIN	0.0911	0.07201	9
DIP	0.02044	0.015621	9

Table 4b. Total variance for PCA in Gamak Bay

Component	Initial eigen value		
	Total	Variance (%)	Cumulative value (%)
1	2.821	35.257	35.257
2	2.131	26.632	61.888
3	1.599	19.986	81.874
4	0.682	8.527	90.402
5	0.437	5.461	95.862
6	0.297	3.709	99.571
7	0.026	0.330	99.902
8	0.008	0.098	100.000

먼저, Tables 4a~4b에 따르면, 고유치가 1보다 크거나 누적기여율이 80%가 넘는 경우를 만족하는 주성분은 나로도 주변 해역이 4개, 가막만이 3개로서, 이들 두 해역에 대한 각각의 주성분을 Tables 5a~5b에 나타내었다. 여기서 주성분은 그 절대값이 1.0에 가까울수록 그만큼 기여도가 큰 것을 의미한다. 이들 결과에 의하면, 나로도 주변 해역에서 최초로 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 요인으로서 제 1주성분은 일사량이며, 제 2주성분은 수온, 제 3주성분은 COD 농도, 제 4주성분은 용존산소 농도로 나타났다. 이것은 기상인자와 물리적 환경인자인 일사량과 수온이 나로도 주변 해역에서의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생에 가장 중요하며, 부차적으로 수질요소인 COD와 용존산소 농도가 여기에 관여하고 있음을 보여 준다. 특히, 일사량과 수온이 제 1 및 제 2주성분으로 나타난 것은 상기한 Fig. 9 및 Fig. 10

에서 보는 바와 같이 나로도 주변 해역이 가막만이나 진해만에 비해 일사량과 수온이 각각 상대적으로 높았다는 사실을 반영하고 있다. 반면, 가막만에서 최초로 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 요인으로서 제 1주성분은 COD 농도이며, 제 2주성분은 일사량, 제 3주성분은 염분으로 나타났다. 즉, 가막만에서는 수질인자인 COD 농도가 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생요인으로서 가장 중요하며, 다음으로 기상인자인 일사량과 물리적 환경요인인 염분이 여기에 기여하고 있음을 보여 준다. 특히, 가막만에서 유기물질 농도의 간접적인 지표가 되는 COD 농도가 제 1주성분으로 나타난 것은 하계에 만대로 유입하는 육수는 물론 섬진강 하천수 등에 의한 영향을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

Table 5a. Component matrix for PCA in Narodo region

Component Variable	Principal Component			
	1	2	3	4
Insolation	0.901	0.320	0.136	0.239
Precipitation	-0.722	-0.382	0.484	0.157
Water temperature	-0.233	0.894	0.000	-0.323
Salinity	0.581	-0.496	-0.231	-0.080
Dissolved Oxygen	-0.624	0.238	0.107	0.702
COD	0.196	0.315	0.801	-0.381
DIN	0.104	-0.783	0.372	-0.150
DIP	0.763	0.133	0.304	0.522

Table 5b. Component matrix for PCA in Gamak Bay

Component Variable	Principal Component			
	1	2	3	-
Insolation	-0.437	-0.797	0.338	-
Precipitation	0.739	0.551	-0.142	-
Water temperature	0.619	-0.611	-0.003	-
Salinity	-0.433	-0.001	-0.850	-
Dissolved Oxygen	0.603	-0.043	0.526	-
COD	0.900	0.111	-0.287	-
DIN	-0.161	0.646	0.579	-
DIP	-0.559	0.622	0.104	-

3.2.5 태풍의 통과와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과의 관계
 Table 6은 1995년부터 2007년 사이에 우리나라 남해안을 통과한 태풍과 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 발생 현황을 나타낸다. 이 표에 의하면, 이 기간 중 나로도 주변 해역에서 발생한 총 11차례 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 중 대략 6회 정도가 태풍의 통과 후 2일 내지 20여일 사이에 발생하였다. 이것은 태풍이 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생의 중요한 요인 중의 하나임을 보여 주며, 특히 8월의 성층 파괴에 따른 저층으로부터의 영양염 공급과 휴면포자의 발아 촉진 등에 태풍이 기여하고 있음을 암시한다(Lee et al.[2001]).

Table 6. Relationship between the passage of Typhoon and outbreak of *Cochlodinium polykrikoides* blooms

Year	Date and name of Typhoon passed through the Korea Peninsula	First outbreak date and location of <i>Cochlodinium polykrikoides</i> blooms
1995	26-27 August, Janis	29 August, Gohung coast
1996	14 August, Kirk	5 September, Gohung and Yesou coasts
1997	18-20 August, Winnie	25 August, Gohung coast
1998		31 August, Gohung coast
1999	3-4 August, Olga; 7-8 August, Paul	11 August, Gohung coast
2000		22 August, Yeosu coast
2001		14 August, Gohung and Yeosu coasts
2002	26-27 July, Fengshen	2 August, Gohung and Yeosu coasts
2003	8-9 August, Eta	13 August, Gohung and Yeosu coasts
2004	1-2 August, Namtheun	5 August, Yeosu and Geoje coasts
2005		20 July, Gohung and Yeosu coasts
2006		7 August, Gohung and Yeosu coasts
2007		4 July, Gohung and Yeosu coasts

4. 결론 및 향후의 과제

유독성 편모조류인 *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 적조가 왜 거의 매년 고흥 연안, 즉 나로도 주변 해역에서 발생하는가를 밝히기 위하여 1992년부터 2007년까지 국립수산과학원이 실시한 해양환경측정망 자료와 적조정보자료, 기상청에 의한 고흥 지방의 기후자료 등을 분석하고 이를 타 해역과 비교하였으며, 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) *Cochlodinium polykrikoides* 적조는 8월경에 나로도 주변 해역(또는 가막만)에서 최초로 발생한 경우가 가장 많았으나, 그 발생시기는 해마다 빨라지고 있는 경향을 나타내었다. 이와 같이 *Cochlodinium polykrikoides* 적조의 최초 발생시기가 점차 빨라지고 있는 것은 나로도 주변 해역에 있어서의 표층 염분의 증가와 관련이 있을 것으로 생각된다.

(2) 조사 기간 중의 고흥 지역의 강수량은 3~4년, 그리고 일사량은 2~3년의 주기로 상당한 기복을 보였다. 또한, 나로도 주변 해역에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 최초로 발생할 때는 동일한 시기의 가막만 또는 진해만 해역에 비해 상대적으로 일사량은 많았고 강수량은 적었다

(3) *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생이 빈번한 8월의 나로도 주변 해역의 평균 수온 및 염분은 동일한 시기의 가막만 및 진해만에 비하여 평균 수온은 0.2~0.6 °C, 염분은 1.84~3.91 psu 각각 더 높았다. 즉, 8월의 나로도 주변 해역은 두 해역에 비해 상대적으로 고온, 고염을 나타내었다.

(4) 나로도 주변 해역은 부영양화 해역으로 알려진 진해만에 비해서는 영양염이나 식물플랑크톤의 농도가 현저히 낮았으나, 전체적인 수질환경은 가막만과 크게 다르지 않은 것으로 판단되었다. 또한 DIN/DIP의 비는 평균 3.89로서, 질소가 식물플랑크톤의 성장에 제한요인으로 작용할 가능성을 보였다.

(5) PCA 분석결과, 나로도 주변 해역에서 최초로 발생하는 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 요인으로서의 기상인자와 물리

적 환경인자인 일사량과 수온이 가장 중요하며, 부차적으로 수질 요소인 COD와 용존산소의 농도가 여기에 관여하고 있음을 보여 주었다. 특히, 일사량과 수온이 제 1 및 제 2 주성분으로 나타난 것은, 나로도 주변 해역이 가막만이나 진해만에 비해 일사량과 수온이 각각 상대적으로 높았던 관측사실을 반영하였다.

(6) 태풍은 나로도 주변 해역에서의 *Cochlodinium polykrioides* 적조 발생에 있어 중요한 요인 중의 하나로 생각된다.

참고문헌

- [1] 강양순, 권정노, 손재경, 정창수, 홍석진, 공재열, 2003, “2002년 통영 연안의 적조발생전후의 식물플랑크톤 군집구조의 특성”, 한국수산학회지, Vol. 36, No. 5, 515-521.
- [2] 박승국, 이옥희, 조정제, 2001, “적조원인조류의 광합성과 광적용”, Algae, Vol. 16, No. 2, 295-302.
- [3] 권철휘, 조규대, 2002, “한국남해안에서 *Cochlodinium* 적조 확산모델”, 한국해양환경공학회지, Vol. 35, No. 6, 568-577.
- [4] 김진기, 2007, “GIS를 이용한 적조발생지의 공간결정 연구”, 한국지형공간정보학회지, Vol. 15, No. 2, 51-57.
- [5] 김학균, 정창수, 임월애, 이창규, 김숙양, 윤성화, 조용철, 이삼근, 2001, “한국 연안의 *Cochlodinium polykrioides* 적조 발생과 변천”, 한국수산학회지, Vol. 34, No. 6, 691-696.
- [6] 김형철, 김동명, 이대인, 박칭길, 김학균, 2001, “조류성장 잠재력 시험에 의한 사랑도 연안 *Cochlodinium polykrioides* 적조의 제한 영양염”, 한국수산학회지, Vol. 34, No. 5, 457-464.
- [7] 서영상, 장이현, 김학균, 2003, “*C. polykrioides* 적조의 시공간적 분포와 중규모 해양환경 변동간의관계성”, 한국지리정보학회지, Vol. 6, No. 3, 139-150.
- [8] 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000, “전남 고흥해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리화학적인 특성”, 한국해양학회지, Vol. 5, No. 1, 16-26.
- [9] 오석진, 윤양호, 김대일, 島崎洋平, 大嶋雄治, 本城凡夫, 2006, “유해성 적조생물, *Cochlodinium polykrioides* Margalef (Dinophyceae) 성장에 영향을 미치는 광량과 파장”, Algae, Vol. 21, No. 3, 311-316.
- [10] 이영식, 박영태, 김영숙, 김귀영, 박중수, 고우진, 조영조, 박승윤, 2001, “*Cochlodinium polykrioides* 적조 발생기작과 대책, 1. *Cochlodinium polykrioides* 적조발생과 소멸의 환경특성”, 한국해양학회지, Vol. 6, No. 4, 259-264.
- [11] 이영식, 임월애, 이삼근, 2007, “*Cochlodinium polykrioides* 적조가 발생하는 해역에서 호우에 의한담수유입 범위와 질소, 인의 농도변화”, 한국환경과학학회지, Vol. 16, No. 10, 1119-1125.
- [12] 이창규, 김형철, 이삼근, 정창수, 김학균, 임월애, 2001, 남해안 연안에서 적조생물, *Cochlodinium polykrioides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 출현상황과 온도, 염분, 조도 및 영양염류에 따른 성장”, 한국수산학회지, Vol. 34, No. 5, 536-544.
- [13] 임월애, 정창수, 이창규, 조용철, 이삼근, 김학균, 정익교, 2002, “2000년 여름 남해안에 나타난 *Cochlodinium polykrioides* 우점 적조의 발생 특징”, 한국해양학회지, Vol. 7, No. 2, 68-77.
- [14] 정종철, 2001, “AVHRR과 Landsat TM 자료를 이용한 적조 패취 관측”, 환경영향평가, Vol. 10, No. 1, 1-8.
- [15] 조은섭, 최용규, 2005, “남서 해역의 유해성 적조생물 *Cochlodinium polykrioides* Margalef 모니터링을 위한 환경특성과 식물플랑크톤 군집 동태”, 한국환경과학학회지, Vol. 14, No. 2, 177-184.
- [16] 최현용, 2001, “한국 남해 나로도와 소리도 사이 해역의 1998년 하계 해황 및 적조소멸과의 관계”, 한국해양학회지, Vol. 6, No. 2, 49-62.
- [17] Ahn, Y. H., Shanmugam, P., Ryu, J. H. and Jeong, J. C., 2006, “Satellite detection of harmful algal bloom occurrences in Korean waters”, Harmful Algae, Vol. 5, 213-231.
- [18] Anton, A., Teoh, P. L., Mohd-Shaleh, S. R. and Mohammad-Noor, N., 2008, “First occurrence of *Cochlodinium* blooms in Sabah, Malaysia”, Harmful Algae, Vol. 7, 331-336.
- [19] Azanza, R. V., David, L. T., Borja, R. T., Baula, I. U. and Fukuyo, Y., 2008, “An extensive *Cochlodinium* bloom along the western coast of Palawan, Philippines”, Harmful Algae, Vol. 7, 324-330.
- [20] Gobler, C. J., Berry, D. L., Anderson, O. R., Burson, A., Koch, F., Rodgers, B. S., Moore, L. K., Goleski, J. A., Allam, B., Bowser, P., Tang, Y. and Nuzzi, R., 2008, “Characterization, dynamics, and ecological impacts of harmful *Cochlodinium polykrioides* blooms on eastern Long Island, NY, USA”, Harmful Algae, Vol. 7, 293-307.
- [21] Kim, C. J., Kim, H. G., Kim, C. H. and Oh, H. M., 2007, “Life cycle of the ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrioides* in Korean coastal waters”, Harmful Algae, Vol. 6, 104-111.
- [22] Kim, C. S., Lee, S. G. and Kim, H. G., 2000, “Biochemical responses of fish exposed to a harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrioides*”, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 254, 131-141.
- [23] Kim, D. K., Oda, T., Muramatsu, T., Kim, D. I., Matsuyama, Y. and Honjo, T., 2002, “Possible factors responsible for the toxicity of *Cochlodinium polykrioides*, a red tide phytoplankton”, Comparative Biochemistry and Physiology, Part C, Vol. 132, 415-423.
- [24] Kudela, R. M., Ryan J. P., Blakely, M. D., Lane, J. Q. and Peterson, T. D., 2008, “Linking the physiology and ecology of *Cochlodinium* to better understand harmful algal bloom events: A comparative approach”, Harmful Algae, Vol. 7, 278-292.
- [25] Lee, D. K., 2008, “*Cochlodinium polykrioides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea”, Harmful Algae, Vol. 7, 318-323.
- [26] Lee, M. O. and Kim, J. K., 2008, “Characteristics of algal blooms in the southern coastal waters of Korea”, Marine Environmental Research, Vol. 65, No. 2, 128-147.
- [27] Lee, S. G., Cho, E. S., Lim, W. A. and Lee, Y. S., 2007, “Effects of oil and dispersant on the red tide organism *Cochlodinium polykrioides*”, Journal of the Environmental Sciences, Vol. 16,

No. 7, 799-804.

[28] Lee Y. S. and Lee, S. H., 2006, "Factors affecting outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in coastal areas of Korea", Marine Pollution Bulletin, Vol. 52, 626-634.

[29] Zhou, M. J., Shen, Z. L. and Yu, R. C., 2007, "Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input

from the Changjiang (Yangtze) River", Continental Shelf Research (in press).

2007년 6월 12일 원고접수

2008년 7월 22일 수정본 채택