

한국 연안에서의 적조형성과 기상인자간의 상관성에 대한 통계학적 해석 및 위성에 의한 적조 모니터링

윤홍주[†] · 김형석

부경대학교

Statistical Analyses on the Relationships between Red Tide Formation and Meteorological Factors in the Korean Coasts, and Satellite Monitoring for Red Tide

Hong-Joo YOON[†] and Hyung-Seok KIM

Pukyong National University

The aim of our study understands the influence of meteorological factors relating to the formation of the red tide, and monitors the red tide by satellite remote sensing. The meteorological factors have directly influenced on red tide formation. Thus, it was possible to predict and apply to red tide formation from statistical analyses on the relationships between red tide formation and meteorological factors, and also to realize the near real time monitoring for red tide by satellite remote sensing.

Key words : red tide(적조), meteorological factors(기상인자), remote sensing(원격탐사), GIS(지리 정보시스템)

서 론

우리나라 연안에서 발생하는 유해성 적조생물(harmful algae)인 코클로디니움(*Cochlodinium polykrikoids*)은 1990년부터 거의 매년 수산업에 막대한 피해를 가져다주고 있는데(Hahn, 1998; Iizuka and Mine, 1979; Kim, 1998; NFRDI, 1996; Park, 1991), 이 종은 우리나라를 포함해서 일본, 캐나다, 중국 등지에서 빈번하게 발생하는 유해성 적조생물의 대표적인 종이다. 증식과 피해발생 기구를 보면, 이 종은 와편모조류(flagellate)로서 몸을 빙글빙글 돌리면서 이동을 하며 크기는 30~40 μm 정도이다(Fig. 1).

한국 연안에서 유해종인 코클로디니움의 증식 조

건에 알맞은 수질환경을 조성하는 주요한 인자로는 기온, 수온, 염분, 일사량, 일조시수, 영양염류, 강수량, 바람, 조류 등이 있다. 이때 물론 기상조건이 좋아야하는데, 청명한 날씨(calm weather)가 호조건이 되며 흐린 날씨나 높은 파도 혹은 태풍 등은 적조생물이 증식하는데 악조건으로 작용한다. 특히 기상인자(기온, 강수량, 일조시수, 일사량, 바람) 등은 사전에 적조 발생을 예측하는데 매우 중요한 인자로 작용한다. 따라서 본 연구는 이러한 적조생물의 발생기작에 대하여 기상인자(기온, 수온, 강수량, 일조시수, 일사량, 바람)는 어떠한 관계를 가지면서 영향을 미치는 가를 알아보고, 위성원격탐사 기법을 통하여 적조를 감시(감지)하고 그리고 GIS 기술에 의한 적조 발생지역의 공간을 분석하고자

[†]Corresponding author : yoonhj@pknu.ac.kr



Fig. 1. Harm algae in Korean Coastal Waters (*Cochlodinium polykrikoids*).

한다. 기상인자는 적조형성에 직접적인 영향을 미치는데(Yanagi et al., 1992; Yamamoto, 1996; Yamamoto et al., 1997; Yoon, 2001), 상호 상관성에 대한 통계학적 특성을 파악하여 사전에 적조 발생을 예측하는데 활용하고자 한다. 또한 향후 위성 원격탐사 기법의 개발로 실시간 적조를 감시하고 GIS 기술에 의한 적조정보와 기상정보를 D/B화 하여 적조정보관리시스템으로 통합 모델을 구축하기 위하여 현재 초기 단계의 연구가 진행 중에 있다(Yoon et al., 2003; Yoon and Kim, 2003).

자료 및 방법

본 연구에서 사용한 자료는 기상청의 기상자료(기상관측자료, 기상월보 및 기상연보)와 수산과학원의 해양자료(연안관측자료, 적조발생상황표)를 사용했으며, 조사기간은 기상자료는 13년(1990년 1월 1일~2002년 12월 31일)을 해양자료는 22년(1981년 1월 1일~2002년 12월 31일)의 자료들을 각각 사용하였다. 기상자료는 AWS(Automatic Weather System) 자료로서 일평균 기온, 일누적

일조시수, 누적 강우량을, 해양자료는 일일 간격의 오전 11시에 연안에서 관측한 수온과 바람(풍향, 풍속)의 자료를 각각 사용하였다. 조사대상 해역은 적조가 주로 발생하는 남해안과 동해 남부 연안을 중심으로 하였다(Fig. 2). 그리고 2002년 7~9월에서 걸쳐서 적조가 발생한 기간을 중심으로 사례 연구를 수행하였다. 통계적 처리에서는 다중회귀분석 방법을 이용하여 실제로 각각의 기상인자들이 적조형성에 어느 정도의 크기로 관계성을 유지하면서 기여하는가를 알아보았다. 본 연구의 통계처리 결과는 앞으로 사전에 적조발생을 예측하는 기초 자료로서 사용 될 것이다.

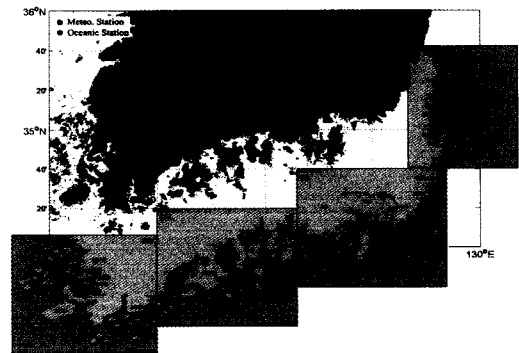


Fig. 2. Field observation stations and studied areas.

결과 및 고찰

적조발생과 기상인자간의 관계를 규명하기 위한 13년간의 자료를 이용한 다중회귀분석의 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 다중상관계수 R이 0.856으로 높은 값을 보고 절편은 '+' 값인 8.277을

Table 1. Results of multiple regression analyses for testing the contribution of four meteorological factors on the red tide formation of *Cochlodinium polykrikoids* during 1990~2002 in Korean Coastal Waters, (a) for over 13 years, (b) August and (c) September, respectively

Periods	Water Temp.	Rainfall	Sunshine duration	Wind Velocity	Constant	R	n	F value
(a) 13 years	-0.370 (-2.291)	0.002 (2.115)	0.019 (8.715)	0.302 (1.260)	8.277 (0.045)	0.856	38	22.632
(b) August	-0.319	0.019	0.141	0.119	8.089	0.897	14	9.263
(c) September	-0.327	0.027	0.208	0.208	7.531	0.894	18	12.998

R : Multiple correlation coefficient, value in parentheses shows t value. Significant at 1% level.

나타낸다. 즉, 기상인자들은 대체로 적조발생에 직접적인 영향을 미친다. 각각의 기율기 값을 보면, 강수량(0.002)과 일조시수(0.019)는 수온(-0.370)과 풍속(0.302)에 비해서 낮은 기율기 값을 보이는데, 이는 적조발생에 어느 정도 기여한다는 것을 의미한다.

한편 ‘+’의 높은 기율기를 가지는 풍속은 적조발생에 높은 기여를 하는 것으로 나타났다. 그러나 높은 기여도를 보이는 수온은 ‘-’ 상관성을 보이는데, 이것은 수온이 어느 정도 높은 온도에 도달하면 적조생물의 발생을 억제하는 제한 인자로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 이때 수온의 범위는 15~30℃의 범위에 한정된다. 다시 말하면 온도가 30℃ 이상 지속적으로 증가한다고 해서 적조발생건수가 비례하여 많아지는 것은 아니다. 따라서 높은 수온은 적조의 증식을 억제한다는 것을 알 수 있다. 즉, 7월과 8월의 적도빈도가 높은 달에 대한 각각의 다중회귀분석의 결과(p>0.01)들도 거의 유사한 결과들을 보여준다(Fig. 4). 따라서 월별 다중회귀식에서 7월과 8월 모두 기여율(coefficient of determination × 100)은 75% 이상이며, 식으로 표현하면 다음과 같다.

8월의 적조발생건수 :

$$NO_{Aug.} = 8.089 - 0.319WT + 0.019RF + 0.141SD + 0.119WV$$

(R = 0.897)

9월의 적조발생건수 :

$$NO_{Sep.} = 7.531 - 0.327WT + 0.027RF + 0.208SD + 0.208WV$$

(R=0.894)

여기서 NO(number of occurrence for red tide)는 적조발생건수, WT(water temperature, ℃)는 일평균 수온, RF(rainfall, mm)는 일누적 강수량, SD(sunshine duration, hour)는 일누적 일조시수, WV(wind velocity, m/sec)는 일평균 풍속을 각각 나타낸다. 단, 수온은 15~30℃의 범위에 한정된다. 이때 변수들은 모두 1% 수준의 유의성을 가진다.

Fig. 3은 적조밀도와 수온과의 관계를 나타내었는데, 4개 해역간의 비교에서 적조밀도의 경우는 동해남부해역 (포항)이 가장 큰 편차 값(std. = 3638

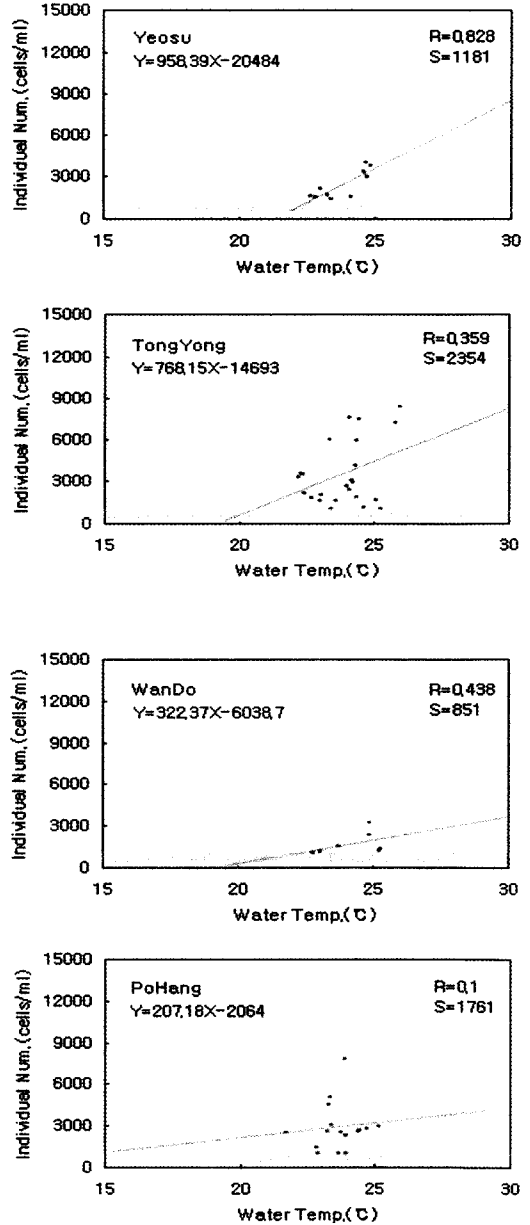


Fig. 3. Relationships between density and water temperature.

mg/l)을 그리고 온도의 경우는 남해중부해역(여수)이 가장 큰 편차 값(std. = 1.15℃)을 각각 보였다. 이때 적조밀도와 수온간의 상관관계는 동해남부해역을 제외하고는 대체로 양호한 상관관계를 보였다. 동해남부해역의 낮은 상관관계(R = 0.10)

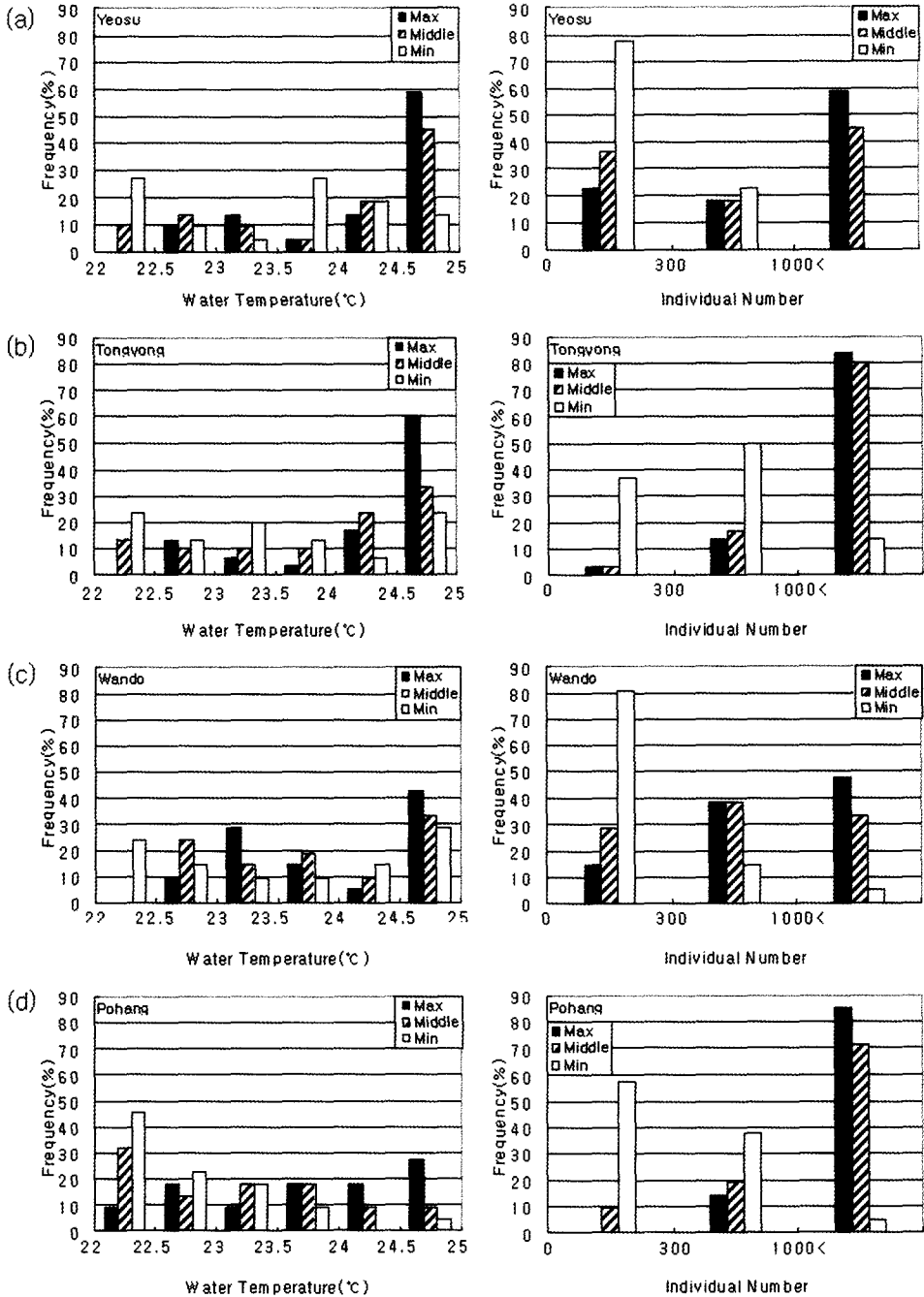


Fig. 4. Frequency of water temperature and density for red tide occurrence.

는 이 해역 주변의 복잡한 해양학적 현상들에 기인 하는 것으로 보여 진다. 반면에 남해중부해역은 상

관관계가 가장 높았는데, 선형회귀식으로 나타내면 다음과 같다.

남해중부해역의 적조밀도 :

$$IN = 958.39WT - 20484 (R = 0.828)$$

여기서 IN(individual number, cells/ml)은 적조밀도, WT(water temperature, °C)는 수온을 각각 나타낸다.

일반적으로 적조발생과 관련하여 적조주의보와 적조경보는 적조생물의 밀도로 구분하는데, 적조밀도가 300~1000 cells/ml 이면 적조주의보, 1000 cells/ml 이상이면 적조경보라 한다.

Fig. 4는 4개 해역에 대한 적조발생 시의 수온과 적조밀도의 빈도수를 나타내었다. 수온의 경우는 동해남부해역을 제외한 나머지 전 해역에서 대체로 수온 24.5~25°C에서 적조발생이 높았다. 한편 적조밀도의 경우는 4개 해역 모두 1000mg/l 이상에서 높은 빈도 값을 보였다. 따라서 우리나라 연안해역에서의 적조는 수온 22~25°C 범위에서 발생을 하고 발생시 주로 적조경보의 범주에 포함된다는 것을 알 수 있다.

NOAA 위성의 열적외선 자료를 이용한 한국 연근해 적조발생 해역 해황특성과 적조분포 상호간의 관계성을 보면(1995~2002), 냉수대의 발달 유무에 따라서 적조의 분포와 이동이 달라진다는 것을 잘 알 수 있다. 우리나라 동해남부 해역의 울산-포항 앞바다에서 형성되는 강한 냉수대의 형성은 남해안에서 형성된 적조를 머무르게 하다가(Fig. 5a), 이어서 냉수대의 세력이 약화되어 소멸됨에 따라 적조가 동해남부해안을 따라서 북상 이동한다(Fig. 5b).

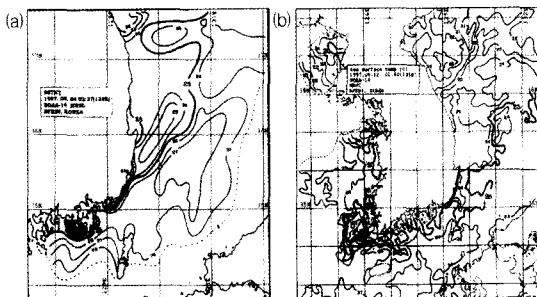


Fig. 5. Appearance of cold waters and stay of red tide(a) and disappearance of cold waters and movement of red tide(b).

Fig. 6은 북상난류의 흐름분포에 따라 적조생물이 이동하면서 발생하는 전형적인 특성을 잘 보여 준다.

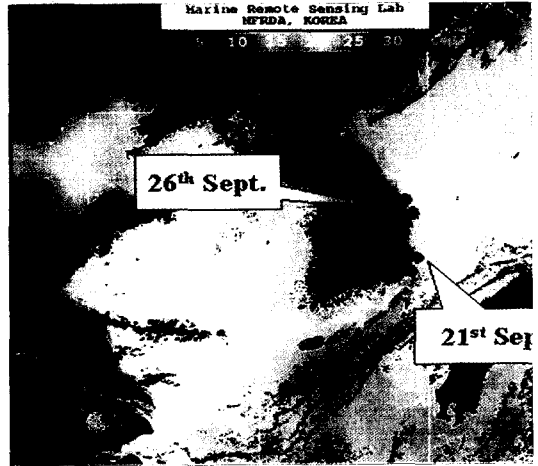


Fig. 6. Relationship between northward warm current and development of red tide(●: area of red tide occurrence).

SeaWiFS 위성자료 분석으로 식물성플랑크톤의 농도 변화를 이용한 적조분포 해역 감지 기법과 관련하여, 적조발생에 대한 적조 농도 값의 전후차를 보면 2001년 현장 적조분포도(Fig. 7a, 유해적조발생 해역도)와 위성추적 적조생물분포도(Fig. 7b, 클로로필 a의 농도차 값) 간에 적조발생 해역이 대단히 잘 일치했다.

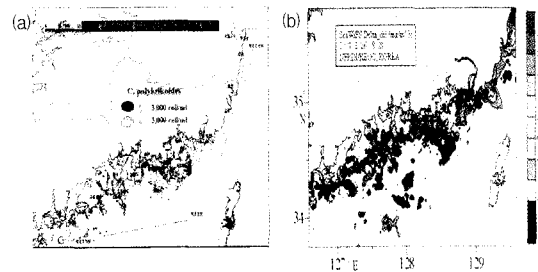


Fig. 7. Distributions of red tide by in-situ in 2001(a) and distributions of red tide by satellite in 2001(deviation between 26 August and 20 August for concentration of chlorophyll(b)).

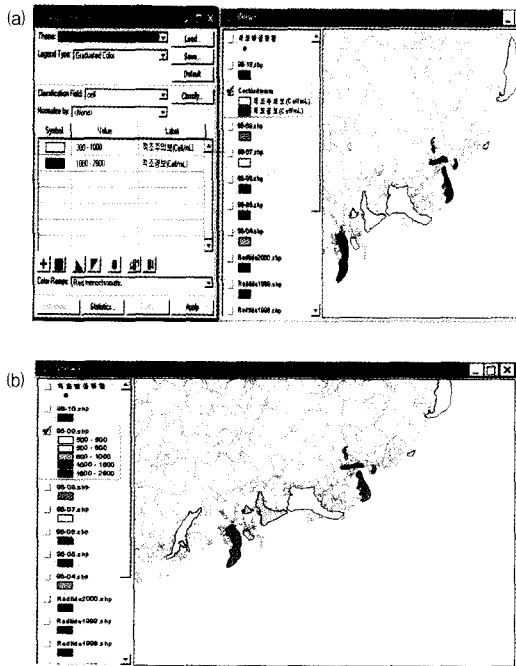


Fig. 8. Red tide Analysis System(attention and warning) (a) and red tide Analysis System(distribution of concentration of red tide) (b).

향후 하계 한국 연근해의 적조 주요 종인 코클로 디니움의 발생해역에 대한 해수색 및 적외선 위성 원격탐사 기법의 개발로 적조를 작·간접 감지하고, 실시간 해황분석으로 적조 이동해역 조기 예측기술을 개발할 예정이다.

GIS 기술에 의한 적조 주의보와 적조 경보지역의 구분화를 1995년부터 2000년까지 D/B화 하였다. 각 시기별 적조발생지역의 공간분포를 속성정보와 그래픽정보로 연계하여 적조정보관리시스템(Fig. 8. a,b)을 구축하였다. 이 시스템은 적조의 발생시기, 발생범위, 발생한 적조의 생물 종 구분 및 밀도 등을 현장조사 자료로부터 획득하여 적조정보로 제공한다. 또한 인공위성에 의한 적조발생지역의 조사를 통해 적조발생의 공간범위를 시기별로 벡터 자료화 하였다.

결 론

한국 연안 전 해역에 걸쳐서 매년 적조생물이 발

생 한다(1995년부터). 남해 중부 및 동부해역은 상습발생 지역이다(7, 8월). 따라서 육상오염으로 인한 해양오염의 방지가 중요하다. 기상인자(기온, 수온, 강수량, 일사량, 일조시수, 바람)는 적조형성에 기여하며, 특히 수온(기온)은 적조발생의 제한 인자로 작용한다. 수온 15℃가 되는 날을 기점으로 적조발생에 소요되는 시간은 78~104일 정도 걸리며, 누적일조시수, 누적수온, 누적강우량의 비교로부터 적조발생 해역을 구분할 수 있다. 즉, 남해중부 및 남해동부 해역은 고밀도 적조발생 해역이며 남해서부 해역, 동해남부 해역은 저밀도 적조발생 해역이다. 복잡 다양한 기후에 따른 해양환경의 변화로 적조의 발생 해역과 형태도 복잡 다양하게 되었다. 동해남부 해역을 제외한 나머지 해역은 수온 24.5~25℃의 범위에서 1000mg/l 이상의 밀도를 보이는데, 적조생물이 발생하면 대체로 수산 피해를 가져다주는 적조경보의 범주에 든다. 적조발생기구와 관련해서, 기온(수온), 강수량, 일사량(일조시수)의 향후변동에측기법을 개발하여 적조발생을 예측하는 것이 필요하다. 위성원격탐사 기술로부터 우리나라 연근해 적조발생 해역의 해황특성과 적조분포 상호간의 관계성으로부터 적조의 머무름과 이동은 냉수대의 발달 및 소멸 그리고 복상난류의 흐름과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 식물성플랑크톤의 농도의 변화를 이용하여 적조분포해역의 감지가 위성원격탐사 기술로 가능하였다. GIS 기술을 통한 적조정보관리시스템의 구축으로 적조정보를 통한 공간분석이 가능하게 되었다. 향후 적조유발 기상요소 및 RS/GIS와 연계한 적조정보통합관리시스템을 구축할 예정이다.

사 사

이 논문은 2003학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Hahn, S. D.(1998) : History of algal records in Korean coastal waters, In Harmful algal blooms in Korea and China(ed. Kim, H. G., S. G. Lee and C. K. Lee), NFRDI, Korea, 34-43.

- Iizuka, S. and K. Mine(1979) : Maximum growth rate of *Gymnodinium sp.*(Type-'65), a red tide dinoflagellate, expected under culture condition, Bull. Plankton Soc. Japan, 30, 139-146.
- Kim, H. G.(1998) : Harmful algal blooms in Korean coastal waters focused on three fish-killing dinoflagellates(ed. Kim, H. G., S. G. Lee and C. K. Lee), NFRDI, Korea, 1-20.
- NFRDI(National Fisheries Research and Development Institute).(1996) : Marine pollutions and red tide, 191p.
- Park, J. S.(1991) : Red tide occurrence and countermeasure in Korea, In Recent approacher on red tides(ed. Park, J. S. and H. G. Kim), NFRDI, Korea, 1-24.
- Yamamoto, T. and Okai M.(1996) : Statistical analyses on the relationships between red tide formation and meteorological factors in Mikawa bay, Japan, Fisheries and Marine Research, 60(4), 348-355.
- Yamamoto, T., Okai M., Takeshita K. and Hashimoto T.(1997) : Characteristics of meteorological conditions in the years of intensive red tide occurrence in Mikawa bay, Japan. Fisheries and Marine Research, 61(2), 114-122.
- Yanagi, T., Asai Y. and Koizumi Y.(1992) : Physical conditions for red tide outbreak of *Gymnodinium mikimotoi*, Fisheries and Marine Research, 56(2), 107-112.
- Yoon, Y. H.(2001) : A summary on the red tide mechanisms of the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waterts, Bull. Plankton Soc. Japan, 48(2), 113-120.
- Yoon, H. J. and Y. S., Kim(2003) : Satellite monitoring and prediction for the occurrence of red tide in the middle coastal area in the South Sea of Korea, Korean Journal of remote Sensing, 19(1), 21-30.
- Yoon, H. J., S. C. Kim, and Park, I. H.(2003) : Characteristics of meteorological and marine environments for the red tide occurrence of Mid-South Sea in Korea, Korean Ins. of Marine Information and Communication Sciences, 7(4), 845-852.

2005년 2월 4일 접수
2005년 2월 23일 수리