
한국 연안의 적조형성과 기상인자간의 관계에 대한 통계적 해석

윤홍주* 서영상** 정종철*** 남광우****

Statistical Analyses on the Relationships between Red Tide Formation and Meteorological Factors in the Korean Coastal Waters

Hong-Joo Yoon* Yeong-Sang Suh** Jong-Cheol Jeong*** Kwang-Woo Nam****

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 「국지기상 예측기술개발/연안기상 및 기후자료 이용기술 개발」 및 한국과학재단 특정기초연구(R01-2002-000-00369-0)의 지원으로 수행 되었습니다.

요 약

1981년부터 2002년까지의 적조 발생에 대한 변화를 보면, 1995년 이후로 매년 적조가 발생했으며 특히 강우량이 많은 7~8월에 집중하였다. 다중회기분석에서 적조발생건수와 기상인자 (수온, 강우량, 일조시수 그리고 풍속) 간의 상관성은 대체로 높게 나타났다 ($R = 0.856$). 단, 수온은 15~30℃의 범위 내에서 적조 성장에 제한 인자로 작용한다는 것을 알 수 있었다. 수온이 15℃되는 날로부터 적조가 발생하는 날까지 걸리는 일수는 78~104일 정도이며, 해역에 따라 다소 약간의 차이를 보였다. 일반적으로 남해중부 및 남해동부해역이 남해서부 및 동해남부해역에 비해서 적조 발생 빈도가 높게 나타났는데, 주로 적조경보의 범주에 들어간다. 이때 대체로 두 해역은 24.5℃~25℃의 높은 수온과 1000 cells/ml 이상의 높은 밀도를 보였다.

ABSTRACT

This study deals with the statistical analyses on the relationship between the red tide formation and the meteorological factors in the Korean coastal waters. From 1995 to 2002, the red tide was observed every year and the number of occurrences increased as well. The red tide mostly occurred in July, August, September and October. From multiple linear regression, the meteorological factors governing the mechanisms of the increase in the number of red tide occurrences are found to be a water temperature, rainfall, sunshine duration and wind velocity. But water temperature as the limited factor controlling the growth of phytoplankton (*Cochlodinium polykrikoids*) in 15~30℃.

$NO = 8.089 - 0.319WT + 0.019RF + 0.141SD + 0.119WV$ ($R = 0.897$) in August

$NO = 7.531 - 0.327WT + 0.027RF + 0.208SD + 0.208WV$ ($R = 0.894$) in September

Here, NO is the number of occurrence for red tide, WT is water temperature, RF is rainfall, SD is sunshine duration and WV is wind velocity, respectively. The necessary times till the day of red tide occurrence verse the day when water temperature reaches 15℃ are 78~104 days, then it should be divided the coastal waters into 4 areas by the comparison among the accumulated sunshine duration, water temperature and rainfall as follows; the South West Coast (SW), South Middle Coast (SM), South East Coast (SE) and East South Coast (ES). The coastal areas that red tide occurs were complicated and various by change of marine environments. Usually red tide with a high concentrations (individual number, cells/ml) appeared in SM and SE. It was found that the general situations for the frequencies of red tide formation are mainly concentrated to 24.5~25℃ (high water temperature) and over 1000 cells/ml (high individual number) such as the category of red tide warning.

키워드

Red Tide, Meteorological factors, Multiple linear regression

*부경대학교 위성정보과학과

**국립수산과학원 해양환경부

***남서울대학교 지리정보시스템공학

****경성대학교 도시공학과

1. 서론

1990년부터 거의 매년 우리 나라 연안에서 발생하는 유해성 적조생물 (harmful algae)인 코클로디니움 (*Cochlodinium polykrikoids*)은 수산업에 막대한 피해를 가져다 주고있는데, 이 종은 우리나라를 포함해서 일본, 캐나다, 중국 등지에서 빈번하게 발생하는 유해성 적조생물의 대표적인 종이다[1-3]. 증식과 피해발생기구를 보면, 이 종은 와편모조류 (flagellate)로서 몸을 빙글빙글 돌리면서 이동을 하며 크기는 30~40 μm 정도이다 (Fig. 1).

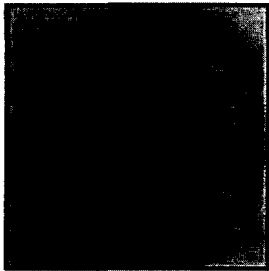


Fig. 1. Harmful algae in Korean Coastal Waters (*Cochlodinium polykrikoids*).

세포의 표면에 점액물질이 있어서 어류의 아가미에 부착하여 호흡관란으로 어류가 질식사할 한다. 그러나 유해한 독소는 없으므로 인체건강에는 피해를 주지는 않는다. 수온 24~26 $^{\circ}\text{C}$, 염분농도 32~34‰, 영양염류인 질산염 0.264~0.683 mg/l , 인산염 0.013~0.034 mg/l 의 범위에서 증식이 활발한 것으로 알려져 있다. 코클로디니움은 유기물질을 흡수하므로 햇빛이 없는 비가 오는 날이라도 약 80%의 증식이 가능하다. 강우가 지속될 경우에 내만이나 하구역에서는 염분농도가 25%이하이고 탁도가 낮으면 증식이 활발하지 못하다. 외해측에서는 수온과 염분이 강우의 영향을 크게 받지 않기 때문에 증식활동이 가능하다. 또한 적당한 조도를 찾아 표면으로 부상할 가능성이 높아 바람과 조류에 의하여 이동 및 확산 (집적 및 분산)을 한다 [4-6].

한국 연안에서 유해종인 코클로디니움의 증식 조건에 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 적조가 증식하는데 악조건으로 작용한다. 특히 기상인자 (기온, 강수량, 일조시수, 일사량, 바람) 등은 사전에 적조가 발생하는데 매우 중요한 인자로 작용한다 [7-10]. 따라서 본 연구는 이러한 적조생물의 발생기작에 대하여 기상인자들은 어떠한 관계를 가지면서 영향을 미치는 가를 알아보고자 하는데 있다. 기상인자는 적조형성에 직접적인 영향을 미치는데, 상호 상관성에 대한 통계학적 특성을 파악하여 사전에 적조발생을 예측하는데 활용하고자 한다. 또한 향후 위성자료를 이용한 준실시간 감시시스템 (near real time monitoring system) 개발을 위하여 현재 초기 단계의 연구가 계속 진행 중에 있다[11-12].

II. 현장 관측점과 연구대상 지역

본 연구에서 사용한 자료는 기상청의 기상자료 (기상관측자료, 기상월보 및 기상연보)와 수산과학원의 해양자료를 (연안관측자료, 적조발생상황표) 사용했으며, 조사기간은 기상자료는 13년 (1999년 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, 일누적 강수량을, 해양자료는 일 간격의 11시에 연안에서 관측한 수온과 바람 (풍향, 풍속)의 자료를 각각 사용하였다. 조사대상 해역은 적조가 주로 발생하는 남해안과 동해 남부연안을 중심으로 하였다. 이때 연안의 해양환경학적 특성을 고려하여 (남해안은 해안선이 복잡하고 수심이 대체로 낮은 지역이며 동해안은 해안선이 단순하고 수심이 깊은 지역임), 남해 서부해역 (SW; South West Coast)은 완도를, 남해 중부해역 (SM; South Middle Coast)은 여수를, 남해 동부해역 (SE; South East Coast)은 통영을 그리고 동해 남부해역 (ES; East South Coast)은 포항을 각각 중심으로 하여 각 해역을 구분하여 연구를 수행하였다 (Fig. 2). 그리고 2002년 7~9월에서 걸쳐서 적조가 발생한 기간을 중심으로 사례연구를 수행하였다. 통계적 처리에서는 다중회기분석 방법을 이용하여 실제로 각각의 기상인자들이 적조형성에 어느 정도의 크기로 관계성을 유지하면서 기여하는가를 알아보았다. 본 연구의 통계처리 결과는 앞으로 사전에 적조발생을 예측하는 기초자료로서 사용 될 것이다.

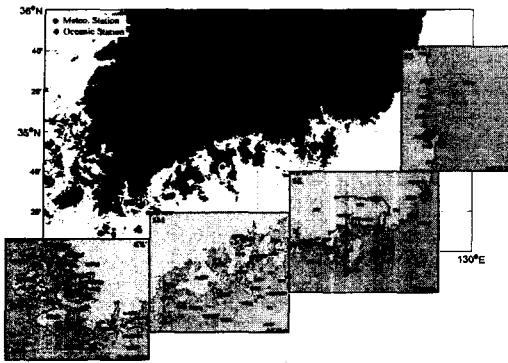


Fig. 2. Field observation stations and studied areas.

III. 결과 및 고찰

조사기간에 대한 코클로디니움의 연간 적조 발생 건수를 보면 (Fig. 3), 1990년대 초반을 기점으로 증가 추세를 나타낸다. 이것은 육지에서의 활발한 산업 및 인간활동에 의한 각종 오염물질의 해양으로의 유입에 따른 연안역의 부영양화가 원인이 된다. 또한 1995년 이후부터는 한국연안 전지역에 걸쳐서 적조가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 월별 적조발생 건수인데, 7, 8, 9, 10월에 걸쳐서 주로 발생한다. 즉, 기온(수온)이 증가하고 일사량(일조시수)이 높아지고 강우량이 많은 계절에 적조가 발생한다는 것을 알 수 있다. 특히, 상대적으로 다른 달에 비해서 기온(수온)이 높고 강우량이 집중하는 하계인 8, 9월에 빈번하게 적조가 발생한다. 따라서 적조발생은 기상인자와 밀접한 관계를 가진다는 것을 의미한다. 또한 해역별 적조발생을 보면, 7월과 8월에 4개 해역에서 모두 적조가 발생하지만 주로 남해 동부해역(SE)과 남해 중부해역(SM)이 나머지 두 해역(SW, ES)에 비해서 매우 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 따라서 매년 적조피해를 크게 받는 지역이 남해 중부와 남해 동부지역이라는 것을 알 수 있다.

적조발생과 기상인자간의 관계와 관련한 13년간의 다중회기분석의 결과($p < 0.01$)를 보면 (Table 1), 다중상관계수 R가 0.856로 높은 값을 보고 절편은 '+' 값인 8.277을 나타낸다. 즉, 기상인자들은 대체로 적조발생에 직접적인 영향을 미친다. 각각의 기울기 값을 보면, 강수량(0.002)과 일조시수(0.019)는 수온(-0.370)과 풍속(0.302)에 비해서 낮은 기울기 값을 보이는데, 이는 적조발생에 어느 정도

기여한다는 것을 의한다.

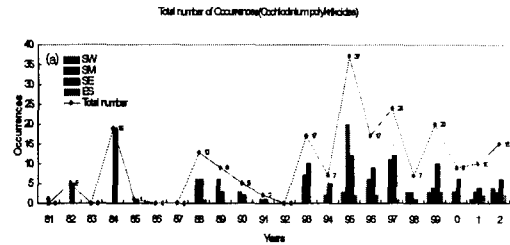


Fig. 3. Annual variations of red tide occurrence.

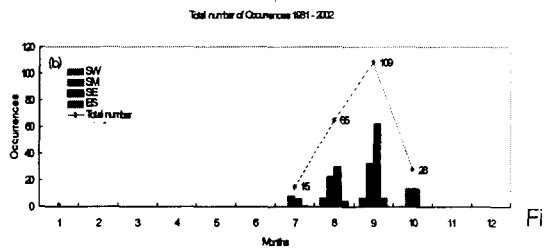


Fig. 4. Monthly variations of red tide occurrence.

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

8월의 적조발생건수

$$: NO = 8.089 - 0.319WT + 0.019RF + 0.141SD + 0.119WV \quad (R = 0.897)$$

9월의 적조발생건수

$$: NO = 7.531 - 0.327WT + 0.027RF + 0.208SD + 0.208WV \quad (R=0.894)$$

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

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) for each August and (c) for 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.

사해연구로서 2002년의 경우에 적조는 전남 여수시에서 최초 발생 (8월 2일, 전남 북돌바다)하여 다음날 남해도 까지 확산하였다. 8월 5일부터 약 10일간의 집중호우에도 확산과 성장을 계속하여 경남 거제도까지 고밀도 발생하여 수산피해를 입혔다. 장마 후 기상이 회복되어 작은 규모의 고밀도 덩어리들이 조류를 따라서 이동하다가 8월 20일에 완도, 장흥, 경주, 포항 해역에 고밀도적조가 출현하였다. 이러한 일련의 과정 동안에 대한 적조 발생과 기상인자간의 관계를 구체적으로 파악하기 위하여, 수온 15°C에서 적조발생일까지의 누적일사량, 누적수온, 누적강수량간의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이때 일반적으로 적조생물은 15°C 이상에서 증식이 활발하게 일어나는 것으로 알려져 있다. 적조발생에 걸리는 시간은 95~104일 정도 걸리며 남해동부와 남해중부(누적일조시수: 4600~4700h, 누적수온: 1500~1750°C, 누적강수량: 6000~6700mm), 남해서부(누적일조시수: 5500h, 누적수온: 1900°C, 누적강수량: 11200mm) 그리고 동해남부(누적일조시수: 4600~4700h, 누적수온: 1560°C, 누적강수량: 6000mm)로 각각 구분되어 기상인자와 관련해서 해역별로 다소간의 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

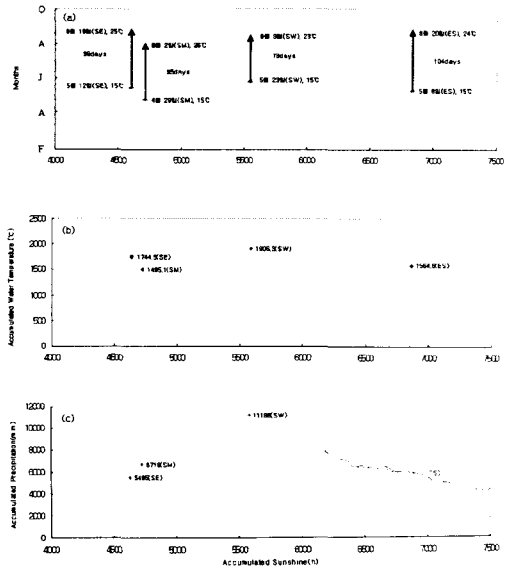


Fig. 5. Accumulated sunshine duration from the day when water temperature is 15°C till the day of red tide occurrence versus (a) total days (b) accumulated water temperature and (c) accumulated precipitation.

Fig. 6는 적조밀도와 수온과의 관계를 나타내는데, 4개 해역간의 비교에서 적조밀도의 경우는 동해남부해역 (포항)이 가장 큰 편차 값 (std. = 3638 mg/l)을 그리고 온도의 경우는 남해중부해역 (여수)이 가장 큰 편차 값 (std. = 1.15°C)을 각각 보였다. 이때 적조밀도와 수온간의 상관관계는 동해남부해역을 제외하고는 대체로 양호한 상관관계를 보였다. 동해남부해역의 낮은 상관관계 (R = 0.10)는 이 해역 주변의 복잡한 해양학적 현상들에 기인하는 것으로 보여진다. 반면에 남해중부해역은 상관관계가 가장 높았는데, 선형회귀식으로 나타내면 다음과 같다.

남해중부해역의 적조밀도

$$: IN = 958.39WT - 20484 \quad (R = 0.828)$$

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

일반적으로 적조발생과 관련하여 적조주의보와 적조경보는 적조밀도로 구분하는데, 적조밀도가

300~1000 cells/ml 이면 적조주의보, 1000 cells/ml 이상이면 적조경보라 한다. Fig. 7은 4개 해역에 대한 적조발생 시의 수온과 적조밀도의 빈도수를 나타낸다. 수온의 경우는 동해남부해역을 제외한 나머지 전 해역에서 대체로 수온 24.5~25℃에서 적조발생이 높다. 한편 적조밀도의 경우는 4개 해역 모두 1000mg/l 이상에서 높은 빈도값을 보였다. 따라서 우리 나라 연안해역에서의 적조는 수온 22~25℃ 범위에서 발생을 하고 발생 시 주로 적조경보의 범주에 포함된다는 것을 알 수 있다.

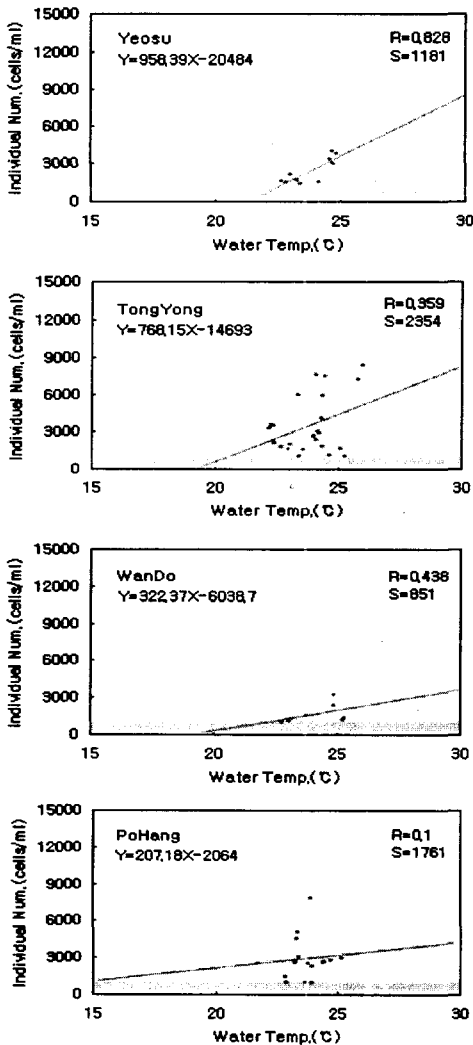


Fig. 6. Relationships between density and water temperature.

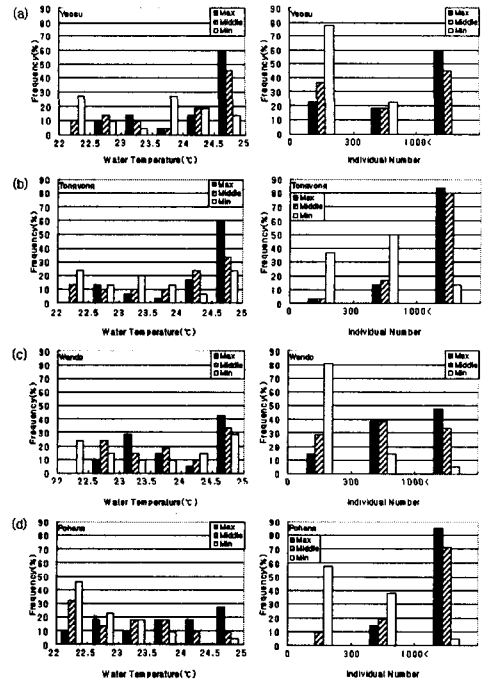


Fig. 7. Frequency (%) of water temperature and density for red tide occurrence.

IV. 결 론

한국 연안 전 해역에 걸쳐서 매년 적조생물이 발생한다 (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 제한인자로 작용한다. 수온 15℃가 되는 일을 기점으로 적조발생에 소요되는 시간은 78~104일 정도 걸리며, 누적일조시수, 누적수온, 누적강수량의 '비교'로부터 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 발생의 해역과 형태도 복잡 다양하게 되었다. 동해남부 해역을 제외한 나머지 해역은 수온 24.5~25℃의 범위에서 1000mg/l 이상의 밀도를 보이는데, 적조생물이 발생하면 대체로 수산피해를 가져다주는 적조경보의 범주에 든다. 적조발생기구와 관련해서, 기온 (수온), 강수량, 일사량

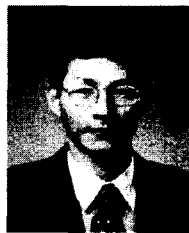
(일조시수)의 향후변동예측기법을 개발하여 적조 발생을 예측하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] NFRDI(National Fisheries Research and Development Institute), 1996. Marine pollutions and red tide, 191p.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Tester, P. A., R. P. Stumpf, F. M. Vukovich, P. K. Flower, and J. T. Turner, 1991. An expatriate red tide bloom: transport, distribution, and persistence, Limnol. Oceanogr., 36, 1053-1061.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Yoon, Y. H., 2001. A summary on the red tide mechanisms of the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in Korean coastal waters, Bull. Plankton Soc. Japan, 48(2), 113-120.
- [11] Yoon, H. J., Y. S., Kim, Y. H., Yoon and Kim, S. W., 2002. Study on satellite monitoring and prediction for the occurrence of red tide in the middle coastal area in the South Sea of Korea- I. The relationship between the occurrence of red tide and the meteorological factors, Korean Ins. of Marine Information and Communication Sciences, 6(6), 843-848.
- [12] 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.

저자소개

윤홍주(Hong-Joo Yoon)

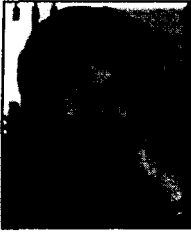


부경대학교 환경해양시스템공학부 위성정보과학과
위성원격탐사공학 박사(프랑스 Grenoble I 대학, 1997)
※ 관심분야 : 위성해양학, 위성기상학, GIS, GPS

서영상(Young-Sang Suh)



국립수산과학원 해양환경부 해양연구팀
이학박사(부경대 해양학과 대학원)
※ 연구분야 : 위성해양학, GIS



정종철(Jong-Chul Jeong)

남서울대학교 지리정보공학과
공학박사
※연구분야 : 환경GIS, 해양환경
원격탐사



남광우(Kwang-Woo Nam)

경성대학교 도시공학과
Virginia Tech, GIS&CAD Appli-
-cation Post Doc.
※관심분야 : GIS Applicati-
on/UIS