

수영만 지역의 미세조류로부터 ToxY-PAM을 이용한 조류 대번식 예측을 위한 예코-모니터링

이동규¹, 김무상², 프라사드 비노드², 조만기^{1*}

¹부산광역시 사상구 주례2동 산69-1번지 동서대학교 대학원, 생명화학공학과

²부산광역시 사상구 주례2동 산69-1번지 동서대학교, 베를린공대 미생물 생명공학 연구소

Abstract Phytoplankton forms the base of sea ecosystems. Various environmental factors and anthropogenic pollution, primarily, affect the concentration and photosynthetic activity algal cells, and the changes in the phytoplankton photosynthesis influence other elements of aquatic ecosystems. The increase in anthropogenic pollution markedly damages natural aquatic ecosystems, particularly, in the coastal zones, where an intense blooming of microalgae occurs, including the release of highly dangerous ecotoxic substances of various chemical natures (red tides). In this study, we tried to apply as a parameter for the algal blooming prediction in the ocean from fluorescence values in the taken samples around Busan coastal area. F0 value was almost constant but Fv/Fm value showed the irregular pattern. We presume that these results are due to the changes of the ocean environment and climate. To predict or give early warning the algal blooming, we need to investigate the specific area or fixed area through real-time monitoring. Especially, algal blooming prediction or warning can be achieved via continuously monitoring and interpretation of fluorescence changes.

Key words : Phytoplankton, Microalgae, ToxY-PAM, Ecosystem

서 론

적조현상(red-tide)이란 바다의 식물 플랑크톤이 일시에 대량번식 하거나 집적됨으로써 바닷물의 색이 붉은색, 적갈색과 황녹색으로 변하는 현상으로서 오랜 옛날부터 자연적으로 발생하였으며, 최근에는 적조로 인한 직·간접적 피해가 다발하고 있어 적조를 유해조류의 대번식(Harmful Algal Blooms: HAB)의 의미로 사용하기도 한다. 그러나 최근에는 연안 도시와 임해공업단지 등 임해산업의 발달과 여기서 발생된 각종 오염물질이 연안 해역으로 유입되어 적조현상의 발생빈도가 늘어나거나 그 기간도 길어짐으로써 연안의 어민에게 대량 피해를 주고 있는 현상을 말한다 [1].

1990년부터 거의 매년 우리나라 연안에는 유해성 적조의 발생으로 양식어장 피해가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 유해성 적조 생물은 기온, 수온, 염분,

일사량, 일조시수, 영양염류, 강수량, 바람, 조류 등의 주요한 해양 환경 인자에 의해 그 발생과 소멸이 영향을 받게 된다[2].

우리나라 연안의 적조 생물은 60여종의 적조생물이 있으며, 이 중에는 마비성, 설사성, 신경성 패독 등을 가진 독성 종이 수종 있다. 하지만 우리나라에서 독성 종에 의한 적조 발생은 수년에 1-2건 정도로 매우 적은 편이며, 그 유해성 적조는 대부분 코클로디늄(*Cochlodinium polykrikoides*)에 의한 것이 대부분이다[3].

우리나라 8-10월 중 유해성 적조 발생 이유로는 높은 수온뿐 만 아니라, 적조생물 성장에 알맞은 환경 조성, 적조 플랑크톤의 광합성에 필요한 풍부한 일조량, 장마로 육지의 영양 염류가 연안에 대량 유입 등 적조 발생 환경이 우선적으로 조성 되어야 발생하며, 적조는 자연현상이므로 그 발생을 인위적으로 조절하는 것은 대단히 어렵다. 따라서, 적조의 발

* Corresponding author

Phone: +82-51-320-2662, Fax: +82-51-320-1547

E-mail: mgcho@gdsu.dongseo.ac.kr

생과 진행을 연구하는 해양학자는 이러한 적조 발생에 관한 다양한 환경 인자를 조사하고 이들 자료에 의해 적조의 생물학적 활동을 분석하며, 또한, 적조 생물의 종을 분류하고 이들의 생활사를 분석하는 연구에서부터 적조의 번성과 이동을 예측하는 모델, 적조를 긴급히 방제하는데 효과적인 방안의 연구 등 다양한 연구가 추진되어 왔다.

이에, 본 연구에서는 부산 수영만 요트 경기장과 같이 많은 인구가 밀집하는 지역을 시료 수집 지역으로 정하고, Eco-monitoring 실험을 위하여 우선 채집지역의 부산 연안 수온을 측정하고, 또 그 지역의 시료를 채집하여, ToxY-PAM (Walz, Germany)으로 시료에 포함된 미세조류의 세포수와 상관있는 최소형광값(F0)을 측정하였으며, 그리고 동시에 광계2의 최대 양자수율(Fv/Fm)을 측정하여, 그 형광값 변화를 통하여 Algal Blooming을 조기 예측 가능성을 타진하기 위하여 본 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

부산 연안 시료 채집 지역

부산 연안의 수영 요트 계류장을 중심으로 수영 요트 계류장 (그림 1에서 ①), 수영 요트 계류장의 방파제로부터 30m(그림 1에서 ②), 현대 아이파크 아파트 앞 50m (그림 1에서 ③) 그리고 현대 아이파크 아파트로부터 직선 거리로 150m (그림 1④) 정도 떨어진 해수를 주기적으로 채집하여 분석하였다.

시료 채집

그림 1에 보이는 4지역에 요트를 이용하여 해당지역으로 이동하여 각 해당 지역의 시료를 채집하였으며, 시료 채집은 로프가 달린 비커를 이용하여 일정량의 샘플을 채취하고 미리 준비한 새 용기에 담아 빠른 시간 내에 실험실로 옮겨 실험을 실시하였다.

ToxY-PAM을 이용한 시료 측정

본 실험에서는 미세조류의 농도와 상관관계를 보이는 최소형광값과 동시에 측정되는 광계2의 최대 양자수율을 측정할 수 있는 ToxY-PAM (Heinz Walz GmbH)이라는 이중 채널 펄스 진폭 변조 엠평소 형광측정기 [dual-channel pulse amplitude-modulated

(PAM) chlorophyll fluorometer]를 사용하여 실험을 실시하였으며[4], 실험을 할 때는 최대한 어두운 조건을 갖추기 위해 가능하면 암실로 유지하여 실험을 하였다. 채집한 시료를 암 조건에서 5분간 방치한 후, 샘플 1ml을 ToxY-PAM 장치에 사용하는 cuvette에 담고 ToxY-PAM 기기의 Channel 1 (S) 위치에 넣어 뚜껑을 닫은 후, F0 (minimum fluorescence level, 최소형광값), Fm (maximum fluorescence level, 최대형광값), Fv/Fm (maximum quantum yield of photosystem II, 광계2의 최대 양자수율)을 차례대로 측정하여 미세조류의 농도와 상관관계를 보이는 최소형광값과 동시에 측정되는 광계2의 최대 양자수율을 측정하였으며, 각 시료들은 각각 3번씩 반복 측정하여 그 평균값들을 최종 분석 자료로 사용하였다.

결 과

우리나라의 적조 발생은 1년 중 5-10월 사이에 많이 발생하고 가장 무더운 8-9월에는 유해한 적조가 많이 발생한다. 알려진 다른 연구 결과에 의하면 적조의 발생은 바다 환경 요소로 해수 온도, 염분, 일사량, 강수량 등이 주요 원인이다. 그리고 산업과 생활 폐수의 배출로 바다 해안으로의 영양분의 공급 때문에 부영양화가 가속화 되어 인근 해안과 만에 수질, 영양물과 중의 천이, 유해 조류의 대번식 (Algal Blooms) 등 부자연스러운 변화가 광범위 하게 일어나게 된다. 특히 Algal blooms는 인근의 양식 농장과 근해 생태계의 생태학적 균형에 영향을 미치므로 많은 피해가 발생하게 된다. 이러한 피해를 막기 위해서는 Algal blooms 발생이 이루어지는 시점을 미리 예측하고 그에 대한 피해를 최소한으로 줄이기 위한 노력이 필요하다. 따라서 주기적으로 바닷물을 채취하여 환경적 요소인 해수 온도, 염분, 일사량, 강수량 등을 모니터링하여 적조가 발생하기 전에 미리 예측할 수 있는 시스템이 반드시 필요하다. 이에 수영만 근처의 해수를 측정하여 적조 발생 모니터링을 측정하여 algal bloom을 예측하기로 하였다.

각 시료 채집 지점의 실험 결과 그래프를 보면 미세조류의 세포수와 상관관계를 가지는 F0(최소형광값)의 변화량은 겨울에서 봄까지는 큰 변화를 발견할 수 없었다 (그림 2-5). 대체로, 우리나라의 적조가 발생하는 시기는 5월부터 시작하여 7월과 8월에

많이 발생하며, 길게는 10월까지 적조가 발생 한다. 그림 2-5까지의 실험결과를 보면 적조가 발생하기 시작하는 5월부터 10월까지 미세조류의 세포수와 상관관계를 가지는 F0(최소 형광값)의 값이 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 어떤 요소의 작용에 의하여 미세조류가 짧은 시간 동안 대량 번식을 했다는 것을 보여준다. 그리고 그래프 사이에 세로로 그어져 있는 선은 실제로 적조가 발생한 지점을 표시하였다. 여기에서 주목할 점은 적조가 발생한 시점 전후로 F0(최소 형광값)의 값 변동이 크다는 것이다.

또한, 이들 결과에서, 온도가 상승함에 따라 세포수와 상관관계를 가지는 F0(최소 형광값)이 상승하는 것을 확인할 수 있으며 동시에 측정이 가능한 Fv/Fm(광계2의 최대 양자수율) 또한 상승하였다. 적조가 발생하는 우리나라의 수온을 보면 대체로 연평균 가장 무더운 달인 8월은 23-27°C, 5월은 16-19°C이고, 부산에서 적조가 발생할 때의 수온은 8-9월은 21-26.5°C, 5-6월은 16-23°C이다. 따라서 적조 및 조류의 대번식(Algal Blooms)에는 온도의 상승이 큰 부분을 차지하는 것을 실험 결과로 확인할 수 있었다. 그리고 수영만의 경우 산업, 생활 폐수의 유입으로 다른 인근 해안의 샘플 지점 보다 높은 F0(최소 형광값)과 Fv/Fm(광계2의 최대 양자수율)값을 나타냈으며, 실험 결과 적조 발생 가능성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 2-5의 자료 분석 그래프에서 표시한 세로선은 실제로 적조가 발생한 날 또는 적조가 발생하기 7일전과 후의 날짜 안에 시료 채집 하여 얻은 실험 결과이며, 같은 날에 여러 지점에서 샘플링을 하여 실험을 진행하였다. 여기서, 특이하게도 시료 채집 지점은 다른 지점 보다 전반적으로 모든 데이터가 높게 나타났다. 그리고 또 다른 점은 위의 ①, ②, ③와 ④지점이 반경 500m 내에서 동일한 지역이라는 것이다. 동일한 지역임에도 서로 차이가 큰 실험값을 나타내었는데, 우리는 여기에 다른 이유가 있을 것이라고 추측된다.

알려진 많은 연구에 의하면 만의 구조를 가진 해안 부근에서 적조 및 조류의 대번식(Algal Blooms)이 유독 많이 발생을 하는데, 산업, 생활폐수의 유입과 여름철 일사량과 장마로 인한 강수량의 증가 그리고 높아지는 해수 온도 등의 여러 가지 조건이 잘 갖추

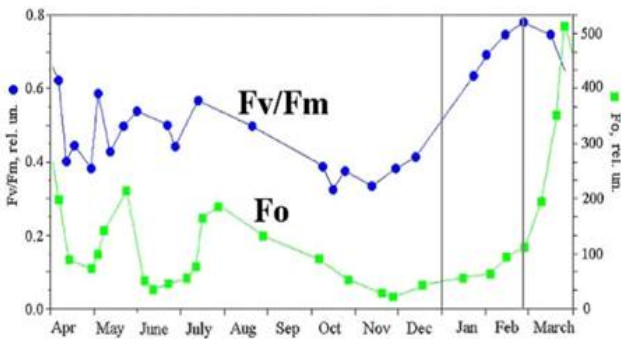
어진 곳이 바로 만이기 때문이다[5]. 다른 알려진 연구 결과에 의하면 Algal Blooms의 발생 조절 요소는 지역 또는 원인 유기체에 의존하는 거와 달리, 이들 유기체가 사는 환경의 차이점이라는 보고도 있다[6]. 본 실험에서는 위와 같은 조건이 갖추어져 있는 수영만 요트경기장 일대를 포함하고 있다. 그리고 시료 채집 지점 ②는 만과 바다가 만나는 지점으로 다른 지점보다 높은 세포수의 F0(최소 형광값)값을 나타내었다. 따라서 시료 채집 지점 ②의 경우 다른 지점보다 조류의 대번식 환경의 조건이 알맞아 Algal Blooms가 발생 가능성이 높음을 예측 할 수 있다.

그림 2-5의 자료 분석 그래프에서 표시한 세로선은 실질적으로 적조가 발생한 시점을 표시하였고, 그 지점을 중심으로 7일 전후로도 시료를 채집하여 실험을 하였다. 그 결과 ToxY-PAM을 통해 측정되는 F0(최소 형광값)과 Fv/Fm(광계2의 최대 양자수율)값으로 실제 적조가 발생한 시점에 형광값 변화가 이루어졌고, 이 결과에 따라 적조가 발생하는 시점을 예측할 수 있을 것으로 확인 되었다. 다른 알려진 연구 결과에 의하면 매년 blooms전 10일 동안 강수량이 평균값을 유지하거나 커지면, 모든 지역에서 Algal Blooms가 발생한다고 보고가 있다[7]. 또한 해수 온도가 평균보다 높은 상황이 유지되면 역시 Algal Blooms의 발생 가능성이 높다고 한다[8,9]. 그림 2-5의 결과를 보면 적조가 발생했을 때 5-10일전 최소 형광값이 서서히 증가하기 시작하며, 적조가 발생하기 직전에 최대 양자수율은 최대값을 나타내고, 적조가 발생하면 최소 형광값이 최대값에 이르는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 적조가 발생하기 5-7일 전에 비가 오고 최소 형광값이 상승하기 시작하면 그 이후 5-7일 이후에 적조 및 Algal Blooms가 발생할 것 이라는 예측이 충분히 가능하였다. 그러기 위해서는 강수량에 대한 데이터 또한 필요할 것으로 판단되며 이 후의 연구에서는 강수량에 대한 자료를 접목한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

고 찰

본 실험에서는 부산 인근 해안에서 채취된 샘플의 형광값을 측정하여 해양에서의 Algal Blooming 예측

을 위한 parameters로서 활용하고자 하였다. Algal Blooming의 현상은 F0값이 거의 변함이 없는 상태에서 발생한다. 이러한 상태에서 주위 환경의 영향으로 Fv/Fm의 값이 최대값에 도달한 경우, F0값은 증가하기 시작하고 Fv/Fm이 감소와 동시에 F0값은 대수증가기에 접어들게 된다. 아래 그림은 A.B. Rubin 등의 러시아 생물물리연구소가 1997년 바이칼호에서 Fv/Fm 거동으로부터 미세조류의 양(F0) 대수증가기 시점을 예측한 결과이며, 그 결과 F0(최소 형광값)과 Fv/Fm(광계2의 최대 양자수율)값이 Algal Blooming의 예측을 위한 중요한 parameters로서 활용될 수 있다고 보고하였다[not published].



본 실험에서는 위의 예와 같은 경향의 결과와 유사한 상황을 확인할 수 있었다. 시료 채집 지점 ①, ②, ③과 ④에서는 ToxY-PAM을 통해 측정되는 F0(최소 형광값)과 Fv/Fm(광계2의 최대 양자수율)값으로 Algal Blooming 예측이 가능하였다. 실험 결과 12월에서 4월까지의 낮은 수온에서 최대 양자수율과 최소 형광값이 낮은 값을 나타내었다. 5월 이후로 수온이 상승하기 시작하면서 최대 양자수율도 서서히 증가하여 적조가 발생하였을 때 최대값이 되고 세포수와 관련이 있는 최소 형광값도 상승하는 것을 4개 지점에서 확인 할 수 있었다. 7월 이후로 수온은 더 증가하였고, 8월에 적조가 발생하기 이전에는 최소 형광값은 낮은 값을 유지하였다. 최대 양자수율은 높은 값을 계속 유지하다가 적조가 발생한 시점에서 세포수와 관련이 있는 최소 형광값은 급격히 상승하였는데, 우리는 이것이 조류가 대량번식에 알맞은 환경이 되어 Algal Blooming이 발생한 것으로 판단된다.

따라서 우리는 적조가 발생하기 이전에 온도가 상승하면서 최대 양자수율이 최대값으로 상승하게

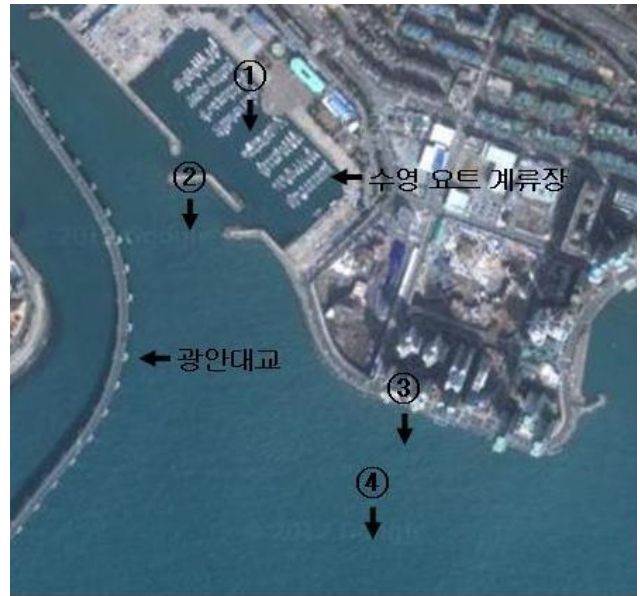


그림 1. 부산 연안 중의 수영 요트 계류장 근처 시료 채집 지역

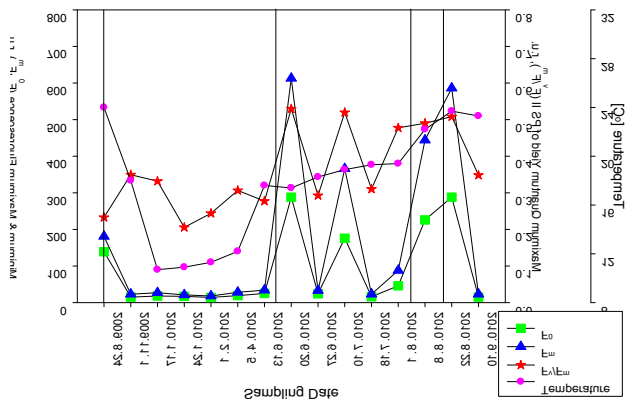


그림 2. 지점 ①에서의 날짜별 F0, Fm, Fv/Fm, 수온 등의 자료 분석 그래프

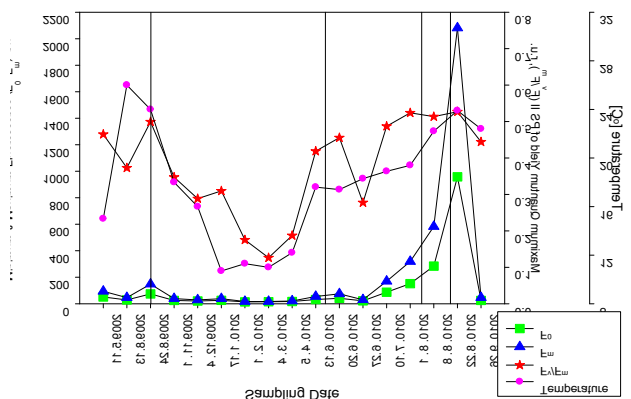


그림 3. 지점 ②에서의 날짜별 F0, Fm, Fv/Fm, 수온 등의 자료 분석 그래프

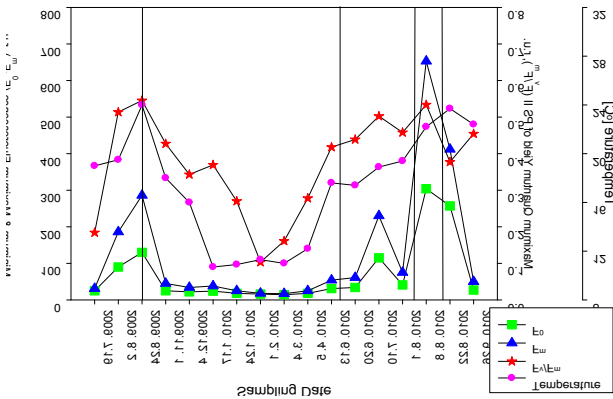


그림 4. 지점 ③에서의 날짜별 F0, Fm, Fv/Fm, 수온 등의 자료 분석 그래프

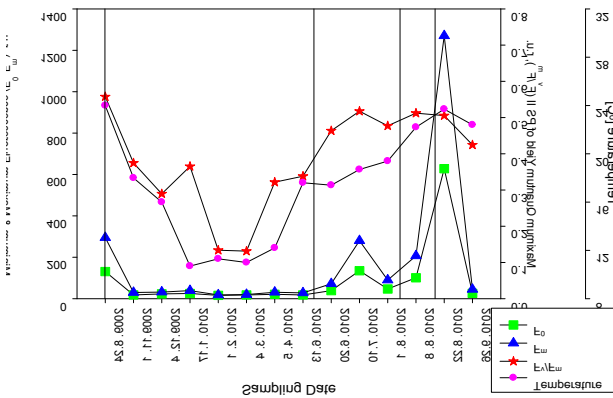


그림 5. 지점 ④에서의 날짜별 F0, Fm, Fv/Fm, 수온 등의 자료 분석 그래프

되고 적조발생에 알맞은 환경이 되면 대량 번식하여 세포수와 관련이 되는 최소 형광값이 상승하는 것을 실험 결과 확인하였고, 형광값 변화를 통해 Algal Blooming 예측 가능성을 제시할 수 있다고 사료된다.

References

1. 송병호, 정민아, 이성로, 2010. 사례 기반 추론을 이용한 적조 예측 모니터링 시스템 구현 및 설계. *한국통신학회논문지* **35**, 1819-1826.
2. 윤홍주, 서영상, 정종철, 남광우, 2004. 한국 연안의 적조형성과 기상인자간의 통계적 해석. *한국해양정보통신학회* **8**, 9261-932.
3. 정상옥, 안경호, 2011. 우리나라 연안의 코클로디니움 적조 발생 변동 연구. *한국환경생태학회 학술대회논문집* **21**, 57-58.
4. U. Schreiber, J.F. Mueller, A. Haugg, R. Gademann, 2002. New type of dual-channel PAM chlorophyll fluorometer for highly sensitive water toxicity biotests. *Photosynth. Res.*, **74**, 317 - 330.
5. C.K. Lee, W.L. Lim, 2006. Variation of Harmful Algal Blooms in Masan-Chinhae Bay. *ScienceAsia*, **32**, .51-56.
6. M.D. Lee, J.K. Kim, 2008. Characteristics of algal blooms in southern coastal waters of Korea. *Marine Environmental Research*, vol.**65**, 128-147.
7. Y.S. Lee, S.Y. Lee, 2006. Factors affecting outbreaks of *Cochlodinium polykrikoides* blooms in coastal areas of Korea. *Marine Pollution Bulletin*. **52**, 626-634.
8. E.S. Cho, Y.K. Choi, 2005. The characteristics of the marine environment and phytoplankton community around southwestern waters for ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* monitoring programme. *J. Environ. Sci.***14**.177-184.
9. H.G. Kim, S.G. Lee, 1997. Red Tides in the Korean Coastal Waters - Its Causes and Countermeasures. *National Fisheries Research and Development Institute. Seoul*, 1-288, 1997.
10. D.N. Matorin, N. Vuksanoich, A.B. Rubin, P.S. Venediktov, 2002. Application of chlorophyll fluorescence in studies of phytoplankton in the Mediterranean Sea. *Studia Marina* **23**, 79-86.