

한국해역 *Cochlodinium*의 이상증식에 대한 사고 실험

이 동 섭
부산대학교 해양과학과

A thought experiment on the *Cochlodinium* bloom in Korean waters

TONGSUP LEE

Department of Marine Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

최근 10여년 동안 적지 않은 경제적 손실을 가져온 만성적인 남해안 *Cochlodinium* 이상 증식의 발생 메커니즘과 구제 방안에 대해 물질보존과 수리생태학적 관점에서 사고실험을 시도 하였다. 그 동안 과학적인 해석의 대상에서 빠져 있었던 몇 가지 현장 정황에 대한 해석과 식물플랑크톤의 보존식에 대한 논의를 통하여 적어도 지금까지 통설로 여겨왔던 것과는 다른 해석이 가능하였다. 부영양화 유발 주장의 과학적 근거는 취약한 것으로 판단되었고, 목표 생물을 박멸하는데 기초한 구제 방안은 환경친화적인 경쟁 부양으로 대체하는 것이 이론적 관점에서 바람직한 것으로 드러났다. 적조 발생 메커니즘에 대해서는 수렴-부상-결집 가설을 제시하고자 한다.

Chronic *Cochlodinium* blooms in the southern waters of Korea have brought about considerable economic losses for about a decade. This paper aims to reframe current perspectives on the outbreak mechanism and the remediation schemes through a thought experiment in a context of mass balance and mathematical ecology. Far different explanations emerge from a careful examination of the scientifically unnoticed clues and a through discussion on the phytoplankton conservation equation. Logic of the eutrophication-induced red tide subjects to criticism. It is strongly recommended that the current remediation scheme to exterminate the target species should be rerouted to an environmentally sound competition enhancement tactics. Finally a novel convergence-float-aggregation hypothesis is proposed as an outbreak mechanism.

Key words: *Cochlodinium*, Outbreak Mechanism, Eutrophication, Remediation, Hypothesis

서 론

남해역에서 1990년대 중반부터 만성적으로 발생하여 적지 않은 피해를 입혀 온 *Cochlodinium* 이상증식의 발생 원인과 구제 방안으로 제시되고 있는 부영양화 유발, 포자 발아, 황토 살포를 패러다임으로 보기에는 과학적 검토가 더 필요하다고 판단된다. 아직 학술적 합의에 이르지 못한 데에는 이상증식이 일어나는 시간과 장소를 예측하기 어렵다는 짐이나 연구투자의 제약은 비롯한 여러 가지 이유가 있겠지만, 문제의 본질에 대한 시각차가 융합되지 못한 것 또한 걸림돌이 되고 있다고 여겨진다. 예를 들어 플랑크톤의 이상변식을 생물의 내재적인 문제로 볼 것인지, 아니면 해양과정이 주도하는 문제로 볼 것인지에 대해 한쪽에서만 바라보게 되면 시야를 제한할 것이다. 또한 기존 패러다임의 울타리를 선불리 벗어나지 못할 것이다. 한편으로는 지금까지 전통학문의 범주에 속하는 가설들은 그나마 검토된 반면에 전통학문들 경계를 넘나드는 학제적인 가설들, 특히 공동연구를 필요로 하는 가설들은 상대적으로 가볍게 다루어졌다고 생각된다.

지금은 *Cochlodinium* 이상증식에 대한 연구가 시작된 지 10년이 되어가는 시점이다. 따라서 그 동안의 연구를 되돌아 보기도 하고 앞으로 할 연구의 방향을 개선하는 작업이 필요한 때라고 본다. 이 논문은 특히 후자에 관심을 둔 것으로 *Cochlodinium* 이상증식을 바라보는 시야를 넓히고자 하는데 목표를 두고 있다.

Cochlodinium 이상증식의 발생 원인과 메커니즘, 현장의 특이한 상황과 구제 방안에 대해서는 다양한 의견이 제시되고 있으므로 아직도 검토중인 과학적 현안이라고 주장해도 그리 지나치지 않다고 본다. 그렇지만 하나하나 따져보는 것은 한 편의 논문이 다룰 수 있는 범위를 크게 벗어나므로 여기서는 가장 자주 인용되고 있는 주장- 부영양화 유발, 포자 발아, 황토 살포-을 다른 학문의 견지에서 보면 얼마나 다른 주장이 가능한지를 대비시켜 보고자 하였다. 예를 들어 비교하자면 지금까지 우리나라에서 수행한 연구가 주로 전통학문의 방식에 근거한, 요소환원주의적인 시각에 기반을 두고 있다면 이 논문에서는 정량적이고, 학제적이며, 전일주의적 시각에 바탕을 두고 보고자 하였다. 주로 생지화학적 관점에서 지금까지 크게 주목 받지 못했지만 한번쯤 깊고 넘어가야 할 당위성이 큰 주제들을 골라 논의 하였다.

뒤 부분에서는 적조의 발생 원인과 메커니즘에 대해 앞으로 검

*Corresponding author: tlee@pusan.ac.kr

증이 가능한 새로운 가설을 제시하면서 앞으로는 학제적인 접근이 반드시 필요함을 제삼 강조하고자 하였다.

재료 및 방법

이 연구의 내용과 주제는 실제 실험이나 현장 조사로 자료를 얻고 분석하여 얻은 결과를 토의하는 전형적인 과학 논문과는 달리 이미 발표된 사실과 자료를 이용해서 주로 사고 실험에 준하는 방법으로 결과를 이끌어 내서 앞으로 더 비중을 두고 다루어져야 할 연구 주제들을 제안하고자 하였다. 구체적으로는 *Cochlodinium* 이상증식에 대한 소주제들은 Perkins(2000)가 제시한 혁신적인 사고법을 따랐다.

Perkins(2000)는 사람들이 혁신적인 사고를 성공적으로 이끌어내는 과정에서 사람들은 통상 네 단계의 어려움에 부딪히게 된다고 소개하고 있다. 그 각각은 가능성이 너무 여럿이어서 막막한 상황; 해결의 실마리를 찾기 어려운 상황; 편협한 시각에 사로잡힌 상황; 오답에 현혹된 상황이다. 이런 상황은 아주 흥미롭게도 정답 또는 정설이 아직 부재한 *Cochlodinium* 이상증식에 대해 적용시켜 보기에 적절하다고 판단되었다. 그래서 네 가지 어려움에 각각에 상응하는 적조 문제의 예를 찾아내서 정확과 해결책에 대해서 논의하였다.

이상증식의 메커니즘을 찾는 것은 가능성이 너무 여럿인 경우에 해당하는 어려움으로 비추어 보았다. 그리고 외양역에서 적조 때가 발견되는 이유를 아직 명확하게 설명하지 못하고 있는 이유는 해결의 실마리를 놓친 상황에 비견하였다. 그 밖에 현행 구제방안이 모두 영양세포를 죽여 없애려는 방식을 택하고 있는 것은 이론적 측면에서 편협한 시각이라 지적하고자 하였다. 특히 부영양화가 *Cochlodinium* 이상증식의 주원인이라는 주장은 연목구어적인 오류가 될 수도 있음을 논리적으로 짚어 보았다.

결과 및 토의

적조 발생 메커니즘

지난 10년에 걸친 노력으로 *Cochlodinium* 이상증식이 거의 매년 고흥반도 외해역인 북동 바다에서 처음으로 나타나는 것으로 확인되었다(국립수산과학원, 2002a; 국립수산과학원 적조 속보). 이와 관련된 중요한 질문은 *Cochlodinium* 적조때가 처음 발견되는 곳이 왜 이곳인가와 동일한 장소에서 자주 일어나는 것이 지니는 의미가 무엇인가이다. 이 두 가지 질문은 이상증식 발생 메커니즘에 대한 열쇠를 쥐고 있는 것으로 판단된다.

우선 이상증식 발생지역의 퇴적물 표층에 고밀도로 산포되어 있던 휴면포자가 환경의 자극을 받아 발아했을 가능성이 점쳐진다. 아직 우리 연구진에 의해 현장에서 휴면포자의 실체가 확인되지 못한 상태에서 몇 연구실에서 휴면포자 발견을 발표하여(Matzuoka, 2003과 여기에 인용된 문헌들) 휴면포자 발아설이 명백을 유지하고 있는 상태이다. 한편으로는 다른 곳에서 살던 영양세포(vegetative cell)가 해류를 따라 공급되어서 일어날 수도 있는데 이 설은 집적 과정에 대한 물리 메커니즘을 추가로 설명해야 하는 부담을 안고 있다. 집적의 더 극단적인 경우로서 우리가 통상적으로 이해하고 있는 고밀도 변성에 따른 이상증식이 아니면

서도 적조처럼 보이게 할 수도 있다는 점도 지적되어야 한다. 즉 단위 부피 (1 ml)의 해수에 적조로 보기 어려운 수십에서 수백 개체 정도의 밀도로 들어 있던 *Cochlodinium*이 해수의 유동 또는 자체 유영 능력으로 표층에 몰려 띠처럼 모이게 되면 적조로 보이게 된다.

하지만 이 띠에 몰려있는 *Cochlodinium*을 표층 혼합층에 고르게 분산시켰을 경우를 계산해 보면 통제되지 않은 이상증식이란 개념을 바로 적용하기에 부적절하다. 이밖에도 발아와 집적, 유영에 의한 집적들 여러 요인이 모두 일정 부분씩 기여한다는 혼합설을 내세울 수도 있다.

이런 문제는 답으로 제시될 수 있는 가능성이 너무 여러 가지여서 연구자의 입장에서는 어디에다 투자하는 것이 좋을지를 고르는데 어려움을 주게 된다. Perkins(2000)는 이런 상황에서는 중복된 것을 찾아내면 경우의 수를 줄일 수 있으므로 이런 어려움을 헤쳐 나가는데 도움이 된다고 지적하였다. 이상증식 발생 메커니즘의 경우에는 휴면포자발아설에 근거한 가설들을 기각시킬 수 있는 정확을 제시할 수 있다.

휴면포자는 이상증식이 크게 일어났던 곳이면 어디에나 충분한 밀도로 존재하게 된다. 만일 휴면포자를 깨우는 환경 요인이 기상학적 요인이라면 지난 10년간 최소한 몇 번은 북동바다가 아닌 다른 해역에서 시작되었어야 논리적으로 설득력을 지니게 된다. 그렇지 않고 바다의 휴면포자를 발아시키는 환경 요인이 해류를 따라 이동하고 있다면 발아에 걸리는 시간 때문에 충분한 지연시간을 두고 이상증식이 나타나야 하는데, 최근의 연구 결과를 보면 북동바다에서 시작된 적조가 전파하는 속도는 해류의 이동 속도와 같다고 주장하고 있어서(김 등, 2004) 발아설에 대해 의문을 제기하고 있다.

식물플랑크톤의 개체 밀도(P)의 시간에 따른 변동은 다음과 같은 질량보존식으로 나타낼 수 있다:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -U \cdot \nabla P + \nabla \cdot (D \cdot \nabla P) + J - \omega \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1)$$

식의 오른쪽 첫번째 항은 이류에 의해 흘러나가는 것, 두번째 항은 확산에 따른 변화로 이들은 해수의 유동에 지배를 받는 것을 나타낸다. J 항은 식물플랑크톤의 생물학적 특성에 따른 증감 요인을 나타내고 마지막 항은 물기둥 안에서 침강하는 것을 표시한 것이다. 상당한 유영능력을 지닌 *Cochlodinium*의 경우에 침강 항은 별 의미를 지니지 않게 된다. 그리고 해수의 유동에 의한 동적 확산도 늘 농도(개체밀도)가 높은 곳에서 낮은 곳으로만 일어나므로 적조원인생물을 분산시킬 뿐 모아주지는 않는다.

이제 남은 가능성은 이류와 고유한 증감요인 항에서 찾아야 한다. 먼저 식물플랑크톤의 증감 속성을 대변하는 J 항은 광합성을 지배하는 환경요인과 초식과 그 밖의 감소 요인의 함수로 나타낼 수 있다:

$$J(P) = \mu(T) \cdot \gamma(I, N) \cdot P - G(P) - \text{sinks} \quad (2)$$

식에 나타나있는 식물플랑크톤의 인자 P 는 개체밀도, μ 는 성장속도, γ 는 차원이 없는 계수이다. 그리고 T 는 수온, I 는 빛의 세기, N 은 영양염 농도, G 는 (초식에 의한) 포식이다. 끝에 있는 유출 항은 식물플랑크톤 고유의 삼출(exudation)과 세포 분해(lysis)를

함께 고려한 항이다. 이 식을 생물학적 용어로 바꾸어 다시 쓰면 다음과 같다.

$$J(P) = \text{specific growth rate} \cdot P - \text{grazing} - \text{sinks} \quad (3)$$

이 식은 식물플랑크톤이 억제되지 않은 번식 때문에 적조를 일으키려면 개체성장속도가 포식을 비롯한 감소 속도를 압도해야 함을 지적하고 있다. 그런데 외편모조류에 속하는 *Cochlodinium*의 경우에 개체의 성장률은 공존하고 있는 다른 식물플랑크톤 종들, 그 가운데 특히 규조에 비해 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다(김 등, 2001). 따라서 식 (2)는 다른 조건이 일정하게 유지되는 여건에서 영양염(N)의 농도를 높여주면, 즉 부영양화 사건이 벌어지면, 우리는 성장률이 높은 규조가 우점한 식물플랑크톤 군집을 보게 될 것이라 말해 주고 있다. 그러므로 현장 부영양화가 적조를 발생시키는 원인이라 주장은 이론적인 반박에 부딪히게 된다.

부영양화 원인설

앞 절에서 살펴 본 바와 같이 부영양화가 *Cochlodinium* 적조를 일으킨다는 주장은 참인 듯 보이지만 실제로는 그렇지 못한 오답에 현혹된 상황으로 비추어진다. 이를 뒷받침 하는 자료가 있다. 2002년도 8월 29에서 9월 1일 사이에 태풍 루사가 *Cochlodinium* 적조 상태 이던 외나로도 해상을 강타하여, 성층을 깨뜨렸고 동반했던 호우로 강수 유입이 크게 늘었다. 따라서 종합적으로 부영양화된 상태로 바뀌었는데, 태풍 내습이 있는 지 일주일 뒤에 실시한 해양 조사에서는 규조인 *Skeletonema*가 적조를 이루는 상황으로 변했다(구와 이, 2002). 이는 위의 식 (3)이 예상한 것과 일치하는 결과이다. 최근 실험실 배양 결과도 질산염과 인산염에 대한 반포화 기질농도(K_s)가 상대적으로 작은 값이어서 부영양화 해역에 적용한 식물이 아닌 것으로 드러났다(김 등, 2004a).

결론적으로 부영양화는 *Cochlodinium* 적조를 일으킨다기 보다는 성장 잠재력이 높은 경쟁 관계에 있는 다른 식물플랑크톤의 성장에 더 유리하다는 정반대의 결론에 이르게 된다. 구체 방안을 논의하면서 다시 언급하겠지만 이를 다른 각도에서 해석하면 적절한 부영양화는 *Cochlodinium* 적조를 억제하는 수단으로 사용될 수 있음을 뜻한다.

양자강 배출수에 의한 영양염 공급설도(양 등, 2000) 부영양화 원인설과 맥락을 같이 하는 주장으로 연안 전선 바깥의 외양역에서 일어나고 있는 *Cochlodinium* 적조를 설명하기 위해 제안된 것으로 보이지만 식물플랑크톤이 요구하는 영양염이 양자강 하구에서는 쓰이지 않은 채로 우리나라 연안까지 이동할 것이라는 전제에 바탕을 두고 있어서 동의하기 어렵다. 실제로 요즈음 중국 연안에서 적조 최빈발 해역은 장강하구역을 포함한다. 그렇지만 이것이 장강이 *Cochlodinium* 적조와 전혀 무관할 것이라는 주장으로 확대 해석하지 말아야 할 것이다. 어쨌거나 이론적으로는 부영양화 원인설을 일단 포기하게 되면 성장속도도 느린 편이고 영양염의 반포화농도도 상대적으로 낮은 *Cochlodinium*이 적조를 일으키는 이유를 다른데서 찾아 보게 될 것이다. 실제로 부영양화 유발이 참이 아니라면 이처럼 다른 곳으로 눈을 돌리도록 하는 것보다 문제 해결에 있어 더 낫은 처방도 없다는 점을 짚고 넘어갈 필요가 있다.

앞에 제시한 식물플랑크톤 보존식에서 이제 가능성을 찾아 볼

곳이라고는 이류항(J)만 남았다. 다시 말해, 지금까지의 논의가 옳다면 *Cochlodinium* 적조와 가장 관련이 큰 것은 이류와 관련된 아직 모르는 어떤 프로세스가 후보가 된다. “아직 모르는”이란 단서를 붙이게 된 이유는 이류는 식물플랑크톤의 개체 밀도의 기울기와는 독립적이기 때문에 이류가 식물 플랑크톤의 개체 밀도를 늘이기도 하고 줄이기도 할 수 있기 때문이다. 따라서 이류를 통해 *Cochlodinium*이 집적될 수 있는지에 대한 가능성에 대해 꼼꼼히 따져 볼 필요가 있다.

이류에 의한 집적 가능성을 논의하기에 앞서서 이전의 연구가와 이론적으로는 참일 확률이 낮은 발생 원인을 선택하거나 거기에 집착하게 되었는지에 대한 원인을 캐물어 볼 필요가 있다고 본다. 이것은 처음에 사건의 중요한 실마리를 잡지 못한데 기인한 것으로 판단된다. 현장에는 필경 중요한 단서가 어디엔가 있기 마련인데, *Cochlodinium* 적조의 경우에는 현장 관측자들에 의해 몇 가지 특이한 상황이 보고되기는 했지만(나기환, personal communication) 이를 연구에 중요하게 반영하지 않은 점에 비추어 실마리를 잡지 못했다가 보다는 등한시 했다고 보아야 할 것이다. 중요한 실마리를 놓치게 되면 결과적으로 미궁을 헤매게 된다. 매년 여름철에 집중적인 현장 관찰에도 불구하고 적조 발생 원인을 아직까지 제대로 파악하지 못한 데에는 나름대로 이유가 있었을 것이다.

외양역 적조의 특이 사항

적조는 내만과 같은 연안역에서 자주 나타나기 때문에 적조라 하면 수중에서 광합성에 알맞은 조건이 갖추어지면 일어나는 것으로 알려져 있다. 대표적인 것이 장마가 끝난 다음에 해가 나고 바람이 잦아들면 대략 한 주 뒤에 내만 적조가 일어나는 경우이다. 육상에서 영양염 공급이 식물플랑크톤 성장을 좌우하기 때문에 맑은 물에서 적조가 뜨는 것을 예상 할 수 없다. 하지만 붓돌 바다에서 관찰되는 *Cochlodinium* 적조는 발생 며칠 전에 평소의 연안역 해수와 달리 일시에 맑아진다고 관찰된 바 있다. 또한 외나로도 현지 주민이 목도한 것에 따르면 적조 띠의 이동 속도는 아주 빠른 편으로 하루 정도면 붓돌 바다를 횡단하기도 한다. 한편 양식 가두리 피해 어민의 말에 따르면 사람 눈으로 적조 띠가 확인되기 몇 시간 전부터 물고기들은 이미 과민한 반응을 보이기 시작한다고 알려져 있다. 또한 누구의 제안으로 시작되었는지는 모르지만 적조띠가 몰려 올 때 양식장 주위를 배로 빙글빙글 돌면 피해를 줄일 수 있다고 믿는 어민들이 있다(나기환, personal communication). 이러한 사항들이 외양역 *Cochlodinium* 적조와 결부된 특징들로서, 각별한 과학적 관심을 받았어야 마땅하다고 생각되는데 실제로는 그렇지 못했다.

앞에서 언급한 특이점의 바탕에 자리잡고 있는 공통 요소를 추출해 보면 “이류”로 모아진다. 그런데 이류는 식물플랑크톤 보존식에서 마지막으로 남은 적조 유발 요인이었음을 상기할 필요가 있다. 이류의 가장 중요한 속성은 속도로서, 현장 관측에 어려움을 더해주는 요인이기도 하다. 넓은 바다에서 언제 어디서 적조가 나타날지를 예측하기란 불가능에 가깝다고 해야 할 것이다. 게다가 적조 이전 상황 감시가 적조 발생 과정을 과학적으로 밝히는 데 필수적이라는 생각이 들지만 언제 어디서 생길지 모르는 상황에서 무턱대고 사전 예찰을 한다는 것도 얼마나 도움이 될지 회의적이다. 지금까지 현장에서의 적조 연구 결과가 발생과정이나

원인에 대해 그다지 커다란 기여를 하지 못한 이유도 예측불허한 속성에 기인한다고 판단된다.

그래서 이 논문에서는 적조의 발생 과정과 원인에 대해서 자연 과학의 전통적인 방법은 아니지만 적시적소에 현장을 관측하기 어려운 점을 감안하여 실측 자료를 분석한 것이 아니라 지금까지 논의하였던 여러 가지 정황을 종합한 사고실험 결과를 제시하고자 한다. 아직 이런 주장을 뒷받침할 관측 자료는 제시할 수 없다. 하지만 가설로 제기해서 지금까지 진행된 연구들의 틈새를 좁히는 데 기여하고자 한다.

외양역 적조 발생에 대한 새 가설

적조가 일어나기 직전에 물이 맑아지고 그로부터 길지 않은 시일이 흐른 다음에 적조가 관찰되는 것은 전자는 *Cochlodinium*이 외양수에서 공급됨을 뜻하고, 후자는 번식보다는 집적이 주도하는 것을 지시하는 것으로 해석할 수 있다. 적조 이전 시기에 제주도 일대의 해수에서 *Cochlodinium*이 낮은 개체 밀도로 살고 있는 것은 이미 확인된 바 있다(임월애, 미발표자료). 집적이 주도하는 것으로 보는 근거는 지금까지 발표된 *Cochlodinium*의 성장속도(최대, 0.5 d⁻¹ 미만: 김 등 2001)로는 짧은 시간 안에 적조를 일으킬 수 없기 때문이다.

새 가설에 필요한 것은 집적이 일어날 수 있는 물리적 체계가 현실적으로 존재 가능하다는 것을 보여주고 추후에 현장에서 검증하는 일이 될 것이다. 결론적으로 말해 이러한 물리적 여건은 가능한 것으로 해수덩이의 수렴(convergence)에 의한 침강 조건과 (Franks, 1992) *Cochlodinium*의 유영능력이 결합되면(Fig. 1) 고밀도 *Cochlodinium*의 띠를 만들게 된다(임, 2004). 이는 검증 가능한 측면도 지니고 있다. 해수덩이들이 충돌하면 연안과 외양역 해수가 가진 물리 특성의 차이로 인해 상당히 안정한 또는 세력이 강한 전선(coastal front)이 만들어 질 것이다. 수온과 염분은 물론

탁도에서 크게 차이가 예상되므로 이들의 존재는 확인 가능하다. 특히 탁도는 실색(true-color)-원격탐사로 관찰할 수 있는 좋은 인자이다(Fig. 2). 해상 현장에서는 연직 수온-염분 단면에서 바닥의 수온이 올라가고 염분이 내려가는 현상이 관측될 것이다(양 등, 2000). 그리고 현장에서는 표층혼합층이 두꺼워질 것이다.

여름철에 외양에 존재하는 염분이 낮은 물은 장강 희석수에 근원을 두고 있는 것으로 판단되므로 장강과 *Cochlodinium* 적조와는 여하튼 관련이 있다고 보아야 한다. 여름철 남해연안에서 중층에 고온-저염한 물이 끼어드는 경우가 자주 관측되는데, Lee and Kang(2003)은 연안에 평행한 북풍 계열 바람에 의한 에크만 수송으로 설명하였다.

구제 방안

구제 방안은 현장에 적용해야 하는 것으로 과학기술적인 측면 외에도 경제성이나 현장 특성이 크게 고려되기 마련이다. 지금까지 *Cochlodinium*의 구제 방안으로 가장 효과가 좋았던 것은 황토살포이다(Sengco and Anderson, 2003). 하지만 많은 학자들은 이 방법도 임시 방편에 지나지 않는다고 보고 있으며 새로운 방법을 찾아 내는 연구가 활발하다(국립수산과학원, 2002b). 그런데 이에 관련해서 이 논문에서 깊고 넘어 가고자 하는 것은 현재 또는 개발 중인 구제 방안이 여러 가능성에 대해 충분히 검토하였는가 하는 점이다. 특히 현실적인 제약을 많이 받는 기술적인 분야는 그렇다 치더라도 과학 분야의 시각은 어떠한지 검토하고자 한다.

기존 구제 방안은 어느 방법을 막론하고 지금까지 목표 생물인 *Cochlodinium*을 죽이는 방법을 택하고 있다. 지금까지는 이미 경험한 바와 같이 황토살포가 현장에서 실효성이 가장 높게 평가된 방안이다. 하지만 황토 살포에 따른 부차적인 문제는 비록 이것이 선택성이 높아(Sengco and Anderson, 2003) 다른 방안에 비해 환경부담이 적다 하더라도 탁도 유발이나 저층 교란 등으

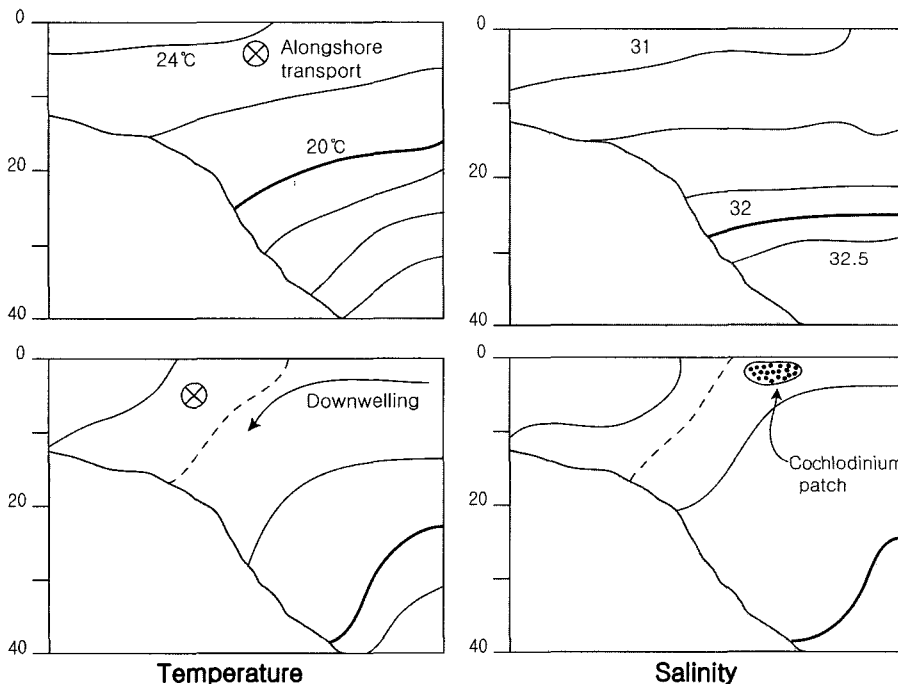


Fig. 1. Conceptual vertical profiles of temperature and salinity of normal (upper panels) versus down-welling situation by convergence (lower panels) proposed to explain coincidence of *Cochlodinium* red tide outbreak and hydrographic change. Reference temperature and salinity of 20°C and 32 are drawn in bold line for clear comparison.

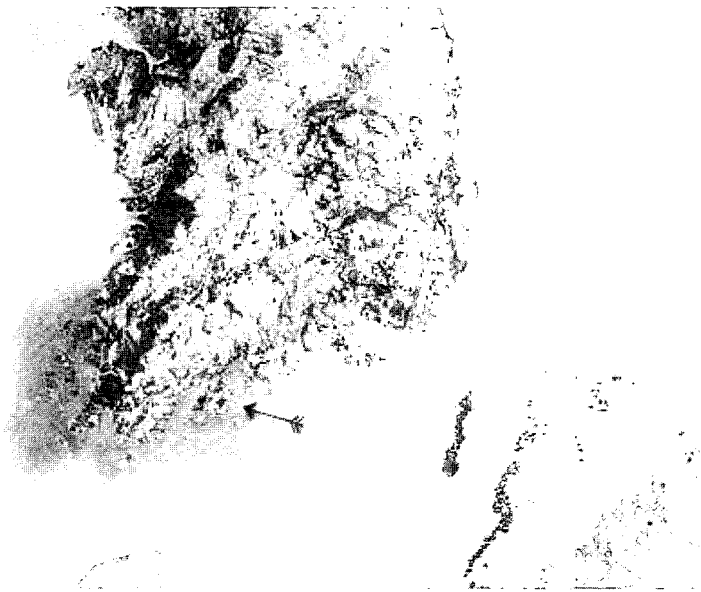


Fig. 2. A modified MODIS image of the Southern part of Korea taken on April 6, 2000(Courtesy of NASA): Turbid waters seen grey around the southwestern province is a persistent feature maintained by tidal mixing. It is expected that the *Cochlodinium* red tide outbreaks when offshore waters somehow penetrate into turbid coastal zone. Arrow indicates the location of Botdol Bada, where often the first incidence of *Cochlodinium* red tides was observed recently.

로 인해 응급처치라는 한계를 벗어날 수 없다. 따라서 환경친화적인 선택적 구제방법이 개발되어야 하는데 여기서 선택적 사멸을 이끌어내는 방법에 대한 탐색이 좁은 시각에 갇혀 있었음을 지적하고자 한다.

이론적인 개체군 역학에서 포식자(N_2)-피식자(N_1) 관계를 간략하게 나타낸 Lotka-Volterra 식에서 피식자 부분만 쓰면 다음과 같다 (Vandermeer, 1981).

$$\frac{dN_1}{N_1 dt} = b - \alpha N_2 \quad (4)$$

식에서 b 는 출생률, 즉 성장속도이고, α 는 피식자와 포식자가 만났을 때 잡아 먹히는 확률이다. 식은 가장 간단한 경우를 가정해서 피식자(*Cochlodinium*) 각 개체의 시간에 따른 개체수 변화는 성장분에서 잡아 먹히는 부분을 뺀 것으로 나타내고 있다. 구제 방안은 인위적으로 식 오른쪽의 피식항을 높여주는 것으로, 예를 들어 친척을 방류하는 경우는 직접 N_2 를 높여주는 경우가 되고, 황토를 뿌리는 것과 같이 자연에 존재하지 않는 방법을 쓰는 것은 새로운 피식항을 추가시켜 주는 것과 같게 된다. 궁극적으로 모든 구제 방법은 식 오른쪽에 마이너스 항으로 표현된다는 점에 주목할 필요가 있다.

여기서 주장하고자 하는 것은 개체군 역학에서 보면 마이너스 개체 증식항이 반드시 사망이어야 할 필요가 없다는 점이다. 다음 식은 중간 경쟁을 벌이고 있는 두 종류의 식물플랑크톤을 가상한 예를 보여주는 식이다.

$$\frac{dN_1}{N_1 dt} = r_1 - \frac{(N_1 + \alpha_2 N_2)}{K_1} \quad (5)$$

식을 보인 목적이 경쟁의 수식 표현이 아니므로 자세한 소개는 생략하고(자세한 내용은 Vandermeer, 1981 7장 참조), 경쟁이 마이너스 항으로 표현된다는 점을 부각시키고자 한다. 즉 구제 방안이 피해를 입히는 생물을 죽이는 것 말고도 또 있으며 나아가 더 훌륭한 방안이 여럿 있을 가능성을 열어 놓는데 있다. 매번 구제물

질을 살포하는 방안과 종다양성을 강화시켜 적조 발생을 아예 원천 봉쇄하는 방안 가운데 궁극적으로 어느 방법이 좋을지에 대해서는 이견이 없을 것이다.

우리가 역사를 공부하는 이유 가운데 하나는 미래를 대비하기 위함이다. 따라서 남해와 이웃한 동중국해에서 적조에 관련된 기록을 살피는 일은 나름대로 의미있다고 할 수 있다. 중국학자의 분석에 따르면(Chen and Shen, 1999; East China Sea and Harmful Algal Bloom) 동중국해 적조는 시대별로 셋으로 구분할 수 있다. 첫번째 시기는 질소고정 남조세균에 속하는 *Trichodesmium*이 주도한 시기로 1960년대와 70년대였다. 80년대에는 아광충(*Noticluca*)과 규조에 속하는 *Skeletonema*가 주도하는 시기였다. 그러던 것이 1990년대에 이르러서는 독성을 지닌 와편모조인 *Prorocentrum*으로 바뀌었다고 보고하고 있다.

적조를 일으키는 종이 대략 10년마다 바뀌는데 그 이유는 무엇인가? 첫번째 시기는 질소가 제한 영양염이었던 빈영양 시기에 벌어진 사건이다. 두번째 시기는 부영양화의 진행 정도가 질소, 인과 함께 규소가 규소가 자라기에 넉넉하게 공급되던 시기로 짐작할 수 있다. 세번째 시기는 부영양화가 과도하게 진행되어 인간의 활동과 비교적 무관하게 공급되는 규소가 제한 영양염으로 작용하기 시작한 조건에서 일어나고 있다고 해석된다. 즉, 영양염의 질적 조성에 따라 적조 생물종이 천이한다고 추정할 수 있다. 따라서 삼협법의 예에서 보듯 중국의 산업구조 개편이 동중국해의 영양염 조성을 어떻게 바꾸어 놓을지는 적조와도 관련이 깊은 문제로 떠오른다.

동중국해와 남해의 생태 환경을 불안정하게 하는 다른 요인으로는 남획, 유령 어획(ghost fishing), 기후변동을 들 수 있는데, 여기에 덮쳐져서 배를 타고 전래되는 외래종의 전파는 마치 언제 터질지 모르는 시한폭탄을 지고 있는 형국이다. 적조 생물이 10년 이상 버티지 못하고 바뀌는 이유는 무엇인가? 이들이 외래종이어서 시간이 흐르면 순치되기 때문인가? 그렇다면 *Cochlodinium*은 머지않아 다른 종으로 대체될 것인가? 이러한 과학적인 질문에 대한 해답을 찾기 전까지는 앞으로도 피해 입고 난 뒤에 사후처방

에 급급할 수밖에 없을 것이다. 학제적 접근을 시도하는 기초과학 연구에 대한 투자가 반드시 안정적으로 이루어져야 한다.

사 사

이 연구는 부산대학교 학술조성비의 지원으로 이루어진 것입니다. 박사학위논문 심사과정에서 임월에 박사님과 토론이 이 논문의 주제로 발전되었고 부산대학교의 이동규 교수님, 국립수산과학원의 김학균 박사님, 이창규 박사님과 토론도 사고실험에 큰 도움이 되었음을 밝힙니다. 논문을 심사하여 주신 두 분의 심사위원께 사의를 표합니다.

참고문헌

- 구준석, 이동섭, 2002. 남해와 동중국해의 계절별 영양염 분포 특성. 2003년도 춘계 심포지엄 및 학술발표대회 요약집, p 221.
- 국립수산과학원, 2002a. “적조방제기술”에 관한 국제 심포지엄, 2002 11.8-9. 132 pp.
- 국립수산과학원, 2002b. 적조연구편람, 172 pp.
- 국립수산과학원 적조속보: <http://www.nfrdi.re.kr/intra/service/readsea.php>
- 김대일, 윤양호, 혼조 쓰네오, 2004a. 유해적조생물의 성장에 미치는 질소와 인의 영향과 성장동력학. 2004년도 춘계 심포지엄 및 학술발표대회 요약집, 279-280.
- 김영숙, 외 7인, 2004b. 우리나라 동해연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생기작에 관한 연구. 2004년도 춘계 심포지엄 및 학술발표대회 요약집, pp 278.
- 김형철, 이창규, 이삼근, 김학균, 박청길, 2001. *Cochlodinium polykrikoides*의 성장에 미치는 물리·화학적인 요인과 영양염 이용. 한국수산학회지, **34**: 445-456.
- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규, 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: I. 물리·화학적 특성. 한국해양학회지 바다, **5**: 16-26.
- 임월에, 2004. 한국 남해안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과정에 관한 연구. 부산대학교 박사학위논문, 119 pp.
- Chen, Y.Q. and X.Q. Shen, 1999. Changes in the Biomass of the East China Sea Ecosystem. In Kenneth Sherman and Qisheng Tang (eds), Large Marine Ecosystems of the Pacific Rim-Assessment, Sustainability, and Management. (Blackwell Science) 221-239.
- East China Sea and Harmful Algal Bloom: <http://ehab.nease.net/>.
- Franks, P.J.S., 1992. Sink or swim: accumulation of biomass at fronts. Mar. Ecol. Prog. Ser., **82**: 1-12.
- Lee, D.-K, and Y.-H. Kang, 2003. The physical environments and *Cochlodinium polykrikoides* bloom in the sea near Naro-Do. Ocean Polar Res., **25**: 303-314.
- Matsuoka, K., 2003. Present status in study on a harmful unarmored dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* MARGALEF. Workshop on Red Tide Monitoring in Asian Coastal Waters. March 10-12, 2003. The University of Tokyo, Japan. <http://fol.fs.a.u-tokyo.ac.jp/rtw/TOP/EXabst/031KMatsuoka.pdf>.
- Perkins, D., 2000. Archimedes' Bath tub: The art and logic of breakthrough thinking. W.W. Norton & Company Ltd., London. 292 pp.
- Sengco, M.R., and D. M. Anderson, 2003. Controlling harmful algal blooms through clay flocculation. J. Phycol., **39**, Suppl. **1**: 51-51.
- Vandermeer, J., 1981. Elementary Mathematical Ecology. John Wiley & Sons, INC. 291 pp.

2004년 6월 14일 원고접수

2004년 10월 11일 수정본 채택

담당편집위원: 서해립