

적조 다발 지역인 진동만의 해양환경 특성

김 동 선 · 조 규 대 · 박 청 길*

부경대학교 해양산업개발연구소 · 부경대학교 해양학과 · 부경대학교 환경공학과
(2000년 1월 8일 접수)

The Oceanic Environmental Property in the Jindong Bay of the Red-Tide Appearance Area

Dong-Sun Kim, Kyu-Dae Cho* and Chung-Kil Park**

Research Center for Ocean Industrial Development(RCOID), Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

*Dept. of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737 Korea

**Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737 Korea

(Manuscript received 8 January 2000)

We studied the appearance and proliferation of red tide organisms from March, 1998, to February, 1999, in the Jindong Bay. There were two red tide events during investigation, and we found that the dominant species *Ceratium furca* in May and *Gymnodinium sanguineum* in September, 1998.

At surface, temperature and salinity showed 18.3~19.7°C and 30.6~30.9 psu in May and 25.6~27.0°C, 28.0~28.5 psu in September, respectively. When the red tide occurred, the water mass was stable.

Dissolved inorganic nitrogen(DIN) and dissolved inorganic phosphate(DIP) in Jindong Bay showed seasonal variability. In May, the nitrogen was a limited nutrient in which the ratio of DIN versus DIP was less than 16 (Redfield ratio), while in September phosphate. During June to September, 1998, phosphate acted as a limited nutrient due to the increased river run-off from land.

In May, chlorophyll-a, dissolved oxygen(DO) and chemical oxygen demand(COD) showed higher than 20µg/l, 10mg/l and 5.0mg/l, respectively. In September, they showed in turns 100µg/l, 10mg/l and 10mg/l, respectively.

Key words: red tide, *Ceratium furca*, *Gymnodinium sanguineum*, DIN, DIP, limited factor

1. 서 론

적조(red tide)란 수중의 미소생물 즉, 식물플랑크톤의 이상 번식에 의한 착색 현상을 말하는 것으로 우리나라를 포함한 세계각지에서 발생하여 해양환경의 악화를 초래하고 양식 어패류의 대량폐사 등으로 수산양식업에 큰 피해를 주고 있다. 우리나라에서는 1980년대 이후 한국 남해안을 중심으로 주로 여름철에 발생하던 적조 현상이 최근에는 계절과 해역에 관계없이 전국 연안해역으로 확산되고 있는 실정이다. 또한 이러한 적조 현상은 해가 거듭할수록 대규모화, 장기화, 무독종에서 유독종으로 변천되고 있다. 특히 남해안 일대에서 발생하는 마비성폐독(paralytic shellfish poisoning; PSP)에 의하여 홍합을 비롯한 이매패류의 유독화 현상과 적조생물에 의한 양식 어류의 대량 폐사가 가장 문제시되고 이로 인한 수산피해도 증가하고 있기 때문에 심각한 사회적, 경제적 문제로 대두되고 있는 실정이다.

우리나라의 적조 연구는 1960년대 박·김¹⁾에 의해 최초로 진해만의 적조 현상 및 특성에 관한 보고를 시작으로 하여, 1970년대에는 적조생물 분류에 대한 연구(유 등²⁾, 조³⁾)가, 1980년대에는 적조생물 군집 및 변동 기구에 관한 연구(유⁴⁾, 유 등⁵⁾, 박⁶⁾, 박 등⁷⁾)가, 1990년대에 들어와서 유독 적조대책 연구(이 등⁸⁾, Lee et al.⁹⁾, Han et al.¹⁰⁾, 김¹¹⁾, Kim¹²⁾)등이 있다. 한편, 현재 적조 피해 방지 대책으로는 적조 현상이 부영양화된 해역에서 자주 발생하므로 이러한 부영양화를 방지하는 대책과 적조 현상이 발생했을 때 양식생물을 적조 발생 해역 밖으로 대피시키거나 적조생물을 직접 제거하는 방지 대책이 있다(서¹³⁾). 또한 최근에는 생태계모형을 이용하거나 원격탐사에 의해서 해양환경에 대한 예측 및 적조 조기 탐색 기술개발에 대한 연구(김¹⁴⁾; 해양수산부¹⁵⁾) 및 살조세균이나 천적미생물을 이용한 적조 방제 기술개발에 대한 연구(해양수산부¹⁵⁾; 김 등¹⁶⁾)가 활발히 진행되고 있다. 그러나

아직까지 이러한 적조생물에 대한 예측이나 적조생물의 성장을 억제하는 연구는 기초단계에 놓여있는 실정이다. 또한 적조가 발생하고 있는 해역에 대한 보다 상세한 해양 환경 특성과 적조 발생에 대한 기초연구가 부족하기 때문에 적조 발생의 적절한 방지대책이 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 매년 적조가 상습적으로 발생하고 있는 진해만의 북서쪽에 위치한 진동만에서 적조의 발생기간과 비발생기간동안 적조생물의 발생과 증식에 영향을 미치는 물리·화학적 인자의 해양기초자료를 1년간 계절별로 동시 관측하여 적조 발생 예보와 대책 수립을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 해양관측자료

본 연구는 진동만의 관측정점(Fig. 1)에서 1998년 3월부터 1999년 2월까지 다음과 같은 해양기초자료를 조사하였다. 먼저, 물리환경조사로써 매일 1회 이상 선박을 이용하여 수온 및 염분을 수심 0.5 m 간격으로 Seabird-19 CTD 및 Alec Electronic ACT20-D를 사용하여 측정하였고, 밀도는 수온과 염분의 관측값으로부터 계산하였다. 화학환경조사로는 DIN(dissolved inorganic nitrogen), DIP(dissolved inorganic phosphate), chlorophyll-a, DO(dissolved oxygen), COD(chemical oxygen demand)를 표층, 중층 및 저층에서 채수하여 표준방법으로 정량 분석하였다.

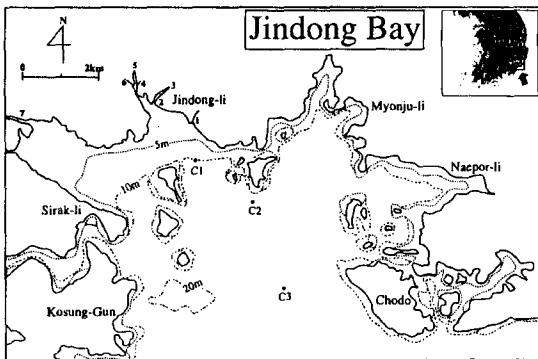


Fig. 1. The oceanographic observation points in the Jindong Bay. Depths are in meters. Numbers shows rivers around the Jindong Bay(1: Jindong 1, 2: Jindong 2, 3: Jindong 3, 4: Tabongchun, 5: Jindongchun, 6: Ingokchun, 7: Jinjunchun).

2.2. 연구방법

Table 1은 1990년부터 1998년까지 진동만에서 적조발생현황을 나타낸 것이다. 여기서 적조생물이 발생한 계절을 보면 주로 춘계(4월, 5월)와 하계(7, 8월 및 9월)에 집중적으로 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 적조 발생기간 및 비발생기간의 계절적 환경 특성을 알아보기 위하여 각 계절별로 춘(1998년 5월)·하(1998년 8월)·추

(1998년 11월)·동계(1999년 2월)에 육상 하천이 인접하고 있는 만안쪽(C1)에서 바깥쪽(C3)(Fig. 1)까지 객관적인 보간법을 이용하여 연직구조의 해양환경인자를 추정하였다. 객관적보간법(objective interpolation)은 관측점간에 거리가 있는 공간적인 관측자료에 대하여 예상하는 영역의 각 격자점 상에서의 일정한 분포를 갖는 공간적 자료로 처리하는 방법으로, 본 연구에서는 해역을 수평방향으로는 250m로 분할하고 연직방향으로는 관측수심의 각 점을 기준으로 하였다. 쌍곡선함수를 이용한 객관보간법은 식(1)과 같이 관측값에 대하여 거리의 역수값을 취하여 사용하였다.

Table 1. The appearance organism of red tide in the Jindong Bay from 1990 to 1998

Date(year/month/day)	Organism of Red-Tide
1990/07/05	<i>Prorocentrum dentatum</i>
1991/04/01	<i>Noctiluca scintillans</i>
/07/23	<i>Chaetoceros</i> spp.
/08/05	<i>Gymnodinium sanguineum</i>
/09/03	<i>Prorocentrum minimum</i>
1993/07/19	<i>Prorocentrum</i> sp.
/07/28	<i>Noctiluca scintillans</i>
1995/07/12	<i>Ceratium furca</i>
1998/05/26	<i>Ceratium furca</i>
/09/11, 12, 15	<i>Gymnodinium sanguineum</i>

$$V_{i,j} = \sum_s \frac{V_{ms}}{L_s} / \sum_s \frac{1}{L_s} \quad (1)$$

여기서 $V_{i,j}$ 는 구하고자하는 격자점 (i,j) 의 환경인자, V_{ms} 는 관측점 s 의 환경인자의 관측값, L_s 는 값을 구하고자하는 격자점으로부터 관측점 s 까지의 거리를 나타내고 있다. 보간을 수행한 영향범위는 3km로 하였다. 그리고 격자점을 중심으로하여 반경 3km이내에 관측점이 3점 이상 존재하지 않을 경우에는 반경을 1km씩 증가하여 1점의 보간에는 적어도 주위 3점의 관측점을 포함하도록 하였다.

또한 1998년 9월에 유해성 적조생물인 *Gymnodinium sanguineum*이 만 중앙부(C2)에 출현하였으며, 적조 발생기간 만 중앙부에서 환경 요인의 일일 변동 구조를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수온, 염분과 밀도(sigma-t)의 계절변동

Fig. 2는 만 안쪽(C1)에서 바깥쪽(C3)까지의 수온의 계절변동을 나타낸 연직구조이다. 춘계(5월)의 표층에서는 약 18.3~19.7°C의 고수온의 분포를 하고 있으며, 저층수온(약 16.0°C 이하)과는 약 2°C 이상의 차를 보이고 있다. 또한 수심 5m 부근에 수온약층 현상이 서서히 나타나고 있으며 일반적으로 만 안쪽의 수온이 높고 바깥쪽이 낮은 경향이 있음을 볼 수 있다. 하계(8월)에는 만 안쪽의 표층에서는 최고 28.3°C, 만 외측의 저층에서는 최저 21.1°C의 수온분포를 나타내면서 그 수온차는 약 7°C

이상으로써 수심 5m 부근에서 춘계(5월)에 형성되기 시작한 수온약층 현상이 보다 강하게 나타나고 있다. 그러나 추계(11월)에 접어들수록 이러한 수온약층의 효과는 파괴되기 시작하면서, 동계(2월)에는 표층과 저층이 완전히 혼합되어 약 6.4℃의 수온분포를 보이고 있다.

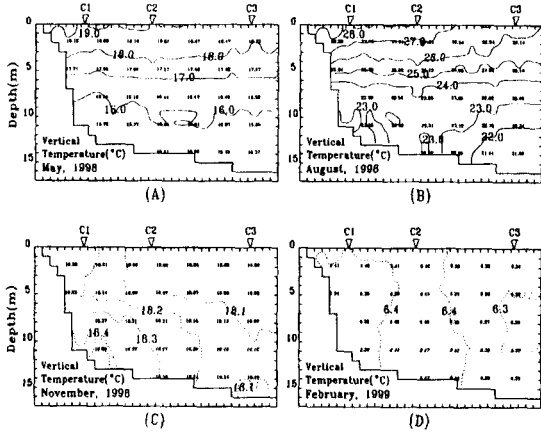


Fig. 2. Vertical distributions of temperature(°C) in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

염분의 계절분포는 Fig. 3과 같이 춘계(5월)의 표층 염분은 30.0~30.9psu, 만바깥쪽인 C3지점의 저층에 32.5 psu 이상의 고염분이 존재하고 있다. 하계(8월)에는 만안쪽인 C1지점부근의 표층에 하천이 인접하고 있는(Fig. 1) 육상에서 담수유입의 효과로 보이는 저염분(26.00 psu 이하)현상이 나타나고 만바깥쪽 C3지점의 저층에 존재하는 고염분(32.0psu 이상)과는 약 7.0psu 이상의 큰 염분차가 나타나고 있다. 그러나, 추계(11월)와 동계(2월)에는 표층에서 나타나는 저염화현상이 사라지고, 특히 동계에는 표층과 저층의 염분차가 0.1psu로 아주 작게 나타나는 특성을 보이고 있다.

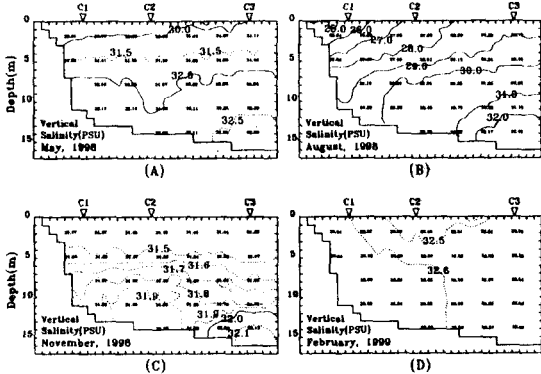


Fig. 3. Vertical distributions of salinity(psu) in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

수온과 염분으로부터 산출한 밀도(sigma-t)의 연직구조는 Fig. 4와 같다. 춘계(5월)에 수심 약 5 m 부근에서 성층 효과가 나타나기 시작하여, 하계(8월)에 접어들면서 C1지점 표층에서 저밀도 현상과 저층에서의 고밀도화 현상으로 인하여 강한 밀도성층이 형성되고 있다. 그러나, 추계(11월) 만 안쪽인 C1지점은 밀도성층 현상이 사라지고 있으나 C2지점 외측에서는 성층현상이 남아있다. 이와같은 현상은 하계에 형성된 육상 유출수로 인한 표층의 저염화현상이 사라지기 때문으로 사료된다. 동계(2월)에는 표층과 저층이 거의 균일한 밀도 분포로 혼합층을 나타내고 있다.

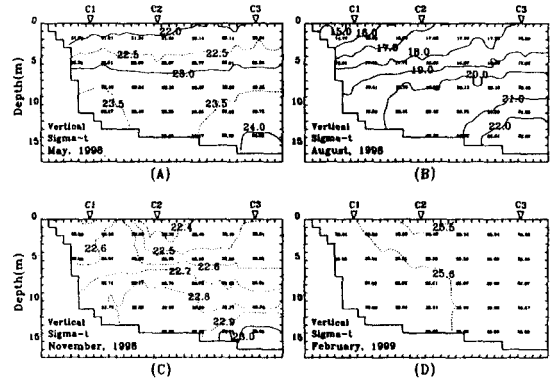


Fig. 4. Vertical distributions of sigma-t in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

3.2. 영양염 및 Chlorophyll-a, DO, COD의 계절변동

DIN(dissolved inorganic nitrogen)의 분포는, 춘계(5월)에 만중앙부 C2 부근의 수심 5m 이천에서 $10 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 이상의 고농도가, 만안쪽과 바깥쪽인 C1과 C3의 저층에 $10 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 이상의 고농도역이 각각 형성되었다(Fig. 5). 하계(8월)에는 만의 전 해역이 $13.5 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 이상으로 고농도 분포를 하고 있으며, 특히, 만안쪽 C1지점의 저층에 $30 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 이상으로 고농도의 DIN분포를 나타내고 있다. 추계(11월)는 하계에 비하여 DIN값이 2~4배정도 작게 분포하고, 그 분포양상은 만안쪽은 약 $7 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 이상의 고농도에서 바깥쪽으로 갈수록 저농도의 분포를 보여 C3에서는 $4 \sim 7 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 정도 나타났다. 동계(2월)는 다른계절에 비하여 가장 낮은 농도 분포를 하고 있으며, 전반적으로 $5 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 전후의 값을 보이고 있다. 또한 표층과 저층의 농도차는 $0.8 \mu\text{g} \cdot \text{at} / \ell$ 이하로 적은 것이 특징이다. 따라서 진동만에서의 DIN분포는 뚜렷한 계절변동을 보이고 있으며, 이것은 춘계(5월)에는 국지적인 차이(표층: 만 중앙부의 고농도 분포)는 있으나, 일반적으로 표층보다 만안쪽과 만바깥쪽의 저층에서 고농도 분포를 하고 있다. 한편 하계(8월)에는 육상기원에 의한 영양염 유입의 결과로 인하여 만안쪽이 만바깥쪽보다 고농도 분포를 하고 있으며, 추계(11월)와 동계(2월)로 갈수록 표층과 저층의 농도차는 적게 나타나고 특히, 동계(2월)의 DIN분포는 표층과 저층의 농도차가 거의 나타

나지 않는 균일한 분포를 나타내었다. 한편, 하계(8월) C1과 C2지점 사이의 저층에 존재하고 있는 DIN의 고농도현상은 Table 2에서 보는 바와 같이 이 지역의 DIN은 저층에서는 대부분 NH_4^+ 성분으로 구성되어 있는 반면에, 표층에서는 상대적으로 NO_3^- 나 NO_2^- 성분이 큰 값으로 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 門谷¹⁷⁾가 일본 세토 내해 하리마나다의 *Chattonella* 적조발생환경에 대한 연구에서 하계 DIN분포는 표층에서는 담수기원에 의한 것이며, 저층에서의 고농도 분포는 NH_4^+ -N의 산화에 의한 것으로 설명할 수 있다.

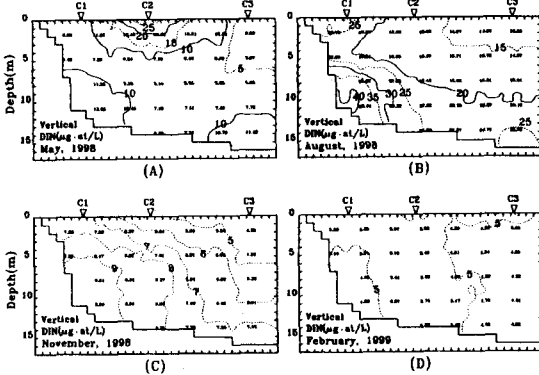


Fig. 5. Vertical distributions of DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen) in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

Table 2. The value of the DIN(NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- -N), DO(Dissolved Oxygen) and Chl.a at C1 and C2 of the Jindong Bay in August, 1998

C1	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	DO	Chl.a
	($\mu g \cdot at/l$)	($\mu g \cdot at/l$)	($\mu g \cdot at/l$)	(mg/l)	($\mu g/l$)
0m	1.647	24.947	0.736	9.49	11.06
5	7.980	10.563	0.682	4.91	2.43
10	43.892	5.137	0.735	1.28	1.82
C2	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	DO	Chl.a
	($\mu g \cdot at/l$)	($\mu g \cdot at/l$)	($\mu g \cdot at/l$)	(mg/l)	($\mu g/l$)
0m	1.213	14.688	0.614	10.07	9.74
5	5.317	8.224	0.687	6.25	4.36
10	14.633	7.774	1.471	2.65	2.15

Fig. 6은 DIP(dissolved inorganic phosphate)의 계절 분포를 나타낸 것으로, 춘계(5월)에는 C1과 C3의 저층에서 $0.5 \mu g \cdot at/l$ 이상의 값을 나타내었고, 하계(8월)에는 표층에서 $0.2 \mu g \cdot at/l$ 이하의 저농도, 저층에서는 $1.0 \mu g \cdot at/l$ 이상의 고농도분포를 하고 있으나, 추계(11월)에 접어 들면서 그 값은 작아져서 만안쪽은 $0.7 \mu g \cdot at/l$ 이상의 고농도, 만바깥쪽은 $0.4 \mu g \cdot at/l$ 저농도 분포를 보였다. 한편 동계(2월)에는 만의 전해역에 걸쳐서 DIP의 농도차가 $0.1 \mu g \cdot at/l$ 이하로써 가장 작게 나타났으며 전역이 $0.5 \sim 0.6 \mu g \cdot at/l$ 이었다. 이와같이 DIP의 계

절분포를 보면 춘계(5월)와 하계(8월)는 추(11월)·동계(2월)에 비하여 표층보다 저층에서 고농도 분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 1984년 秋月¹⁸⁾이 일본 하리마나다 남부해역의 대규모 적조발생환경에 관한 연구에서 지적하였듯이 춘·하계에 저층에 축적된 영양염이 오염된 퇴적층에서의 활발한 용출작용으로 인하여 저층의 DIP가 표층의 DIP보다 고농도의 분포를 나타냈다.

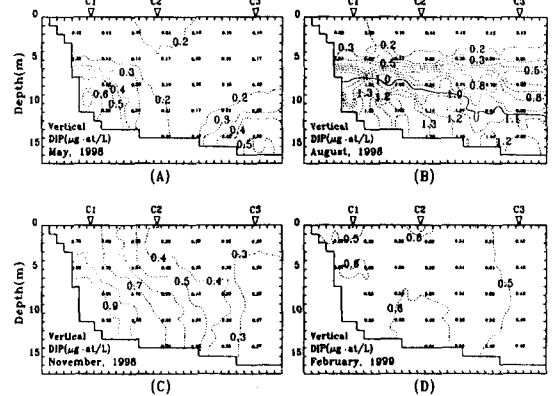


Fig. 6. Vertical distributions of DIP(Dissolved Inorganic Phosphate) in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

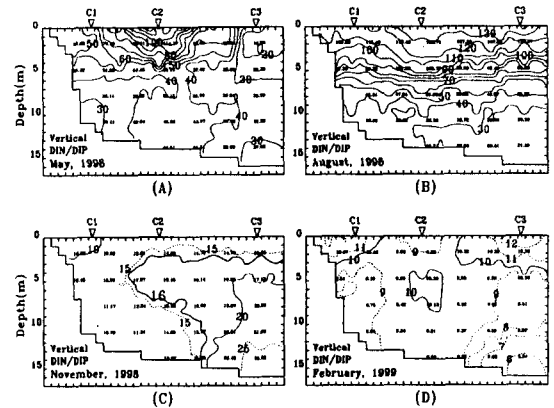


Fig. 7. Vertical distributions of DIN/DIP in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

한편, 적조생물(식물플랑크톤)증식에 영향을 미치는 영양염에 의한 부영양화를 효율적으로 제어하기 위해서는 제한영양염을 파악할 필요가 있다. 일반적으로 DIN:DIP(Redfield ratio 16:1)가 16이상일 때 인(phosphate)이 제한영양염으로 역할을 하며, 16이하 일때는 질소(nitrogen)가 제한영양염으로 작용한다(Redfield et al.¹⁹⁾. 진동만에서 춘(5월)·하계(8월)에는 전 해역이 16이상으로 인(P)이 제한영양염으로 작용하고 있으며, 추계(11월)는 표층과 만안쪽에서 16이하로 질소(N)가 제한영양염이나 C2지점의 중층에서 만바깥쪽에서는 16이

상으로 인(P)이 제한영양염으로 작용하고 있다(Fig. 7). 또한 동계(2월)는 전해역이 16이하로 질소(N)가 제한영양염으로 작용하고 있다. 따라서 육상의 하천수나 저질로부터 영양염의 영향을 받고 있는 해역에서는 그 제한영양염을 단순히 질소(N)나 인(P)성분으로 한정 지을 수 없으며, 공간적 또는 시간적으로 변동한다는 것을 시사하고 있다.

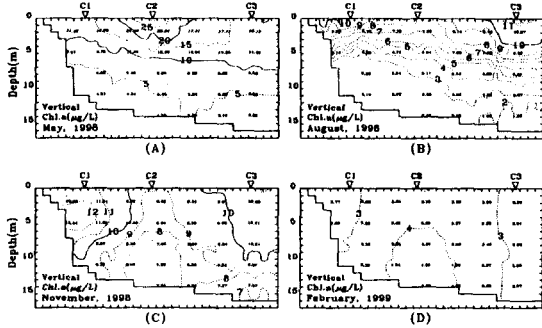


Fig. 8. Vertical distributions of chlorophyll-a in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

Fig. 8은 chlorophyll-a의 계절분포로서 $10 \mu\text{g}/\ell$ 이상 고농도가 춘계(5월)에 수심 5m 이천에서 나타났으며, 특히 C2의 표층에서는 $20 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\ell$ 이상으로 나타났다. 하계(8월)에는 C1과 C3지점의 표층에서, 추계(11월)에는 C1과 C3의 수심 10m 이천에 걸쳐 $10 \mu\text{g} \cdot \text{at}/\ell$ 이상이 각각 분포하고 있었다. 1999년 동계(2월)에는 전 해역이 $3 \sim 4 \mu\text{g}/\ell$ 범위의 저농도현상을 나타내고 있다. 따라서 식물플랑크톤의 추이를 추적할 수 있는 chlorophyll-a의 계절변동을 보면 춘계(5월)에는 수심 5m 이천에 고농도 분포를 보이고 있으며, 태양복사열이 강하여 표·저층이 성층화되어 있는 하계(8월)에는 C1과 C3지점의 표층에서 고농도의 chlorophyll-a가 분포하고, 추계(11월)와 동계(2월)로 갈수록 표층과 저층의 chlorophyll-a농도 차가 작게 나타났다.

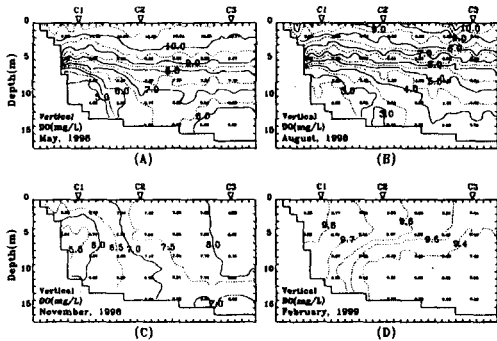


Fig. 9. Vertical distributions of DO(Dissolved Oxygen) in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

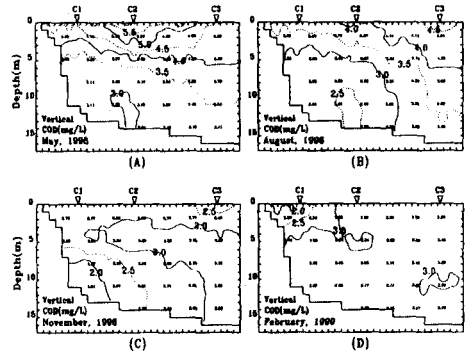


Fig. 10. Vertical distributions of COD(Chemical Oxygen Demand) in May(A), August(B), November(C) of 1998 and February(D) of 1999 from C1 to C3.

Chlorophyll-a와 용존산소(DO: dissolved oxygen) 및 화학적산소요구량(COD: chemical oxygen demand)의 상관성을 알아보기 위하여 Fig. 9와 10에 각각의 계절분포를 나타내었다. 먼저 DO의 분포를 보면, 춘계(5월)에는 수심 5m이천에서, 하계(8월)에는 C1과 C3지점의 표층에서 $10 \text{ mg}/\ell$ 이상 고농도분포를 하고 있으며, 8월 C1과 C2의 저층에서는 $3.0 \text{ mg}/\ell$ 이하의 저산소수층을 형성하고 있다. 이와같은 현상은 이 지역에서의 DIN의 구성성분(Table 2)중 표층에서의 NO_3^- 나 NO_2^- 성분은 식물플랑크톤(chlorophyll-a)에 의해 소모되는 양이 많아서 용존산소(DO)가 높게 나타나고 있으나, 광합성이 적은 저층에서는 식물플랑크톤의 NH_4^+ 성분의 소모량이 작고 고농도의 DIN이 형성되어 저농도의 용존산소층이 형성되고 있음을 나타내었다. 또한 추계(11월)에서 동계(2월) 갈수록 저층의 저산소층이 사라지고, 전 수층에 걸쳐서 용존산소가 $5.5 \sim 8.0 \text{ mg}/\ell$ (11월), $9.4 \sim 9.8 \text{ mg}/\ell$ (2월)로 높게 나타났으나, 11월에는 C1의 5~10m층에서 최소층이 나타나고 2월에는 C2와 C3의 5m이심의 저층에서 $9.4 \text{ mg}/\ell$ 보다 적은 분포를 하고 있다. 한편 COD의 분포를 보면, 춘(5월)·하계(8월)의 표층에서 고농도, 저층에서는 저농도의 분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 표층이 저층보다 유기물이 많다는 것을 나타내고 있으며, 이것은 육상기원에 의한 유기물 유입이 표층을 통하여 이루어지고 있음을 뜻한다. 추계(11월)는 C2에서 만바깥쪽으로 $3.0 \text{ mg}/\ell$ 이상의 고농도 분포를 나타내고 있으며, 이와 같은 고농도의 분포는 만중앙부에서는 수심 5m에 형성되어 있으나, 만바깥쪽에서는 저층까지 분포되어 있다. 또한 동계(2월)의 COD는 만안쪽(C1)이 다른 지역에 비하여 저농도분포를 나타냈다.

3.3. 계절별 적조발생 현황과 물리·화학적인자와의 관계
Table 3(NFRDI²⁰)은 본 연구의 조사기간중 1998년 5월과 9월, 진동만에서 발생한 *Ceratium furca*와 *Gymnodinium sanguineum*종에 대한 1991년부터 1997년까지의 발생 현황을 나타낸 것이다.

Table 3. The appearance of red tide around the Jindong Bay during 1991~1998 (1997, NFRDI)

Date (year/month/day)	<i>Gymnodinium sanguineum</i>	<i>Ceratium furca</i>	Sea area of appearance
1991/08/05	○		Jindong Bay
1993/09/14		○	Masan Bay
1994/05/10	○		Masan-Hangam Bay
/06/07	○		Masan-Hangam Bay
1995/07/12		○	Outside of Jindong Bay
/09/25		○	Dangdong Bay
1996/04/26	○		Weonmun Bay
1998/05/26	○	○	Jindong Bay
/09/11, 12, 15	○		Jindong Bay

이 해역에서 *Ceratium furca* 와 *Gymnodinium sanguineum*의 발생시기는 5월~9월 및 4월~9월에 걸쳐 각각 출현하였다. 따라서 *Ceratium furca*가 출현한 시기는 1998년 5월 이므로 이 종의 표층 수온과 염분은 약 18.3~19.7°C, 30.6~31.0psu였으며, 9월에 발생한 *Gymnodinium sanguineum*은 약 25.6~27.0°C, 28.0~28.5psu의 범위로 나타났기 때문에 *Ceratium furca*가 *Gymnodinium sanguineum* 보다 고온, 저염시에 나타남을 알 수 있었다. 또한 수온·염분·밀도가 연속적으로 안정된 성층(stratification)구조를 갖는 수피에서 적조생물이 출현한 것을 알 수 있다. 한편 성층이 파괴되는 시기에는 저층수에 축적되어 있는 고농도의 영양염과 같은 증식촉진물질이 생산층인 유광층지역에 공급되어지고, 花岡²¹⁾·西條²²⁾ 등이 지적한 것과 같이 한계심도(critical depth)보다 연직혼합의 범위가 깊어지면 식물플랑크톤은 빛이 없는 저층에까지 이동하게 되므로 전 수층에 걸쳐서는 식물플랑크톤생산은 일어나지 않게 된다. 따라서 표·저층의 물이 혼합되어 저층의 영양염이 표층에까지 공급되고 안정된 성층이 형성되면 상층수는 안정된 영양염의 많은 공급을 받게 되고 이러한 경우에 대규모의 적조가 일어나기 쉬운 가장 적합한 환경조건을 제공하게 되는 것이다.

3.4. 환경인자의 일일변동

적조발생 전후의 종합적인 해양변동 구조를 파악하기 위하여 1998년 8월 30일부터 9월 22일까지 만중앙부 C2에서 연속관측을 실시하였다. 이 시기의 수온, 염분, 밀도, chlorophyll-a, DIN, DIP, DO 및 COD의 수심에 따른 일일변동은 Fig. 11에 나타내었다.

Gymnodinium sanguineum 적조생물이 출현한 1998년 9월 11일, 12일과 15일(Table 1)의 수온, 염분 및 밀도(sigma-t)의 분포를 보면 이 시기에는 성층을 이루는 안정된 수피를 형성하고 있으나, 9월 17일 이후에는 성층 현상이 파괴되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 고농도의 chlorophyll-a(100 µg/l 이상)이 분포하고 있는 시기의 표층에서의 영양염 분포를 보면 DIN은 10 µg·at/l 이상의 고농도분포, DIP는 0.2~0.3 µg·at/l의 분포를 보이고 있으며, DO와 COD는 10 ml/l ER이상의 고농도분포를 나타내고 있다. Fig. 12는 1998년 8월 30일부터 9월 22일까지 만중앙부 지역인 C2에서 DIN:DIP의 일일변동

구조를 나타낸 것으로 유해 적조생물인 *Gymnodinium sanguineum*이 출현한 9월 11일, 12일 및 15일의 표층 DIN:DIP의 비가 16이상으로 인(phosphate)에 의해서 제한영양염으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

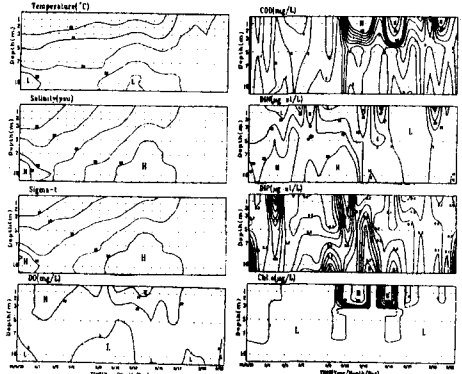


Fig. 11. Temporal variation of vertical distribution of temperature, salinity, sigma-t, DO, COD, DIN, DIP and chlorophyll-a at C2 of the Jindong Bay from 30 August to 22 September, 1998.

수²³⁾는 일본 히로시마만에서 식물플랑크톤의 증식에 영향을 미치는 제한영양염의 변동이 염분이 20psu 이하에서는 DIN:DIP비가 16보다 높아서, 특히 하계에 하천수 유입에 따른 인(phosphate)이 제한영양염으로 작용한다고 보고한바가 있다. 본 연구해역의 1998년 3월부터 1999년 2월까지 표층의 5개 관측정점(Fig. 1)에서 염분과 DIN:DIP의 분포를 Fig. 12에 나타내었다.

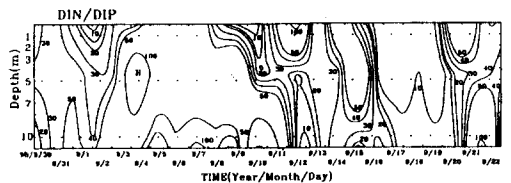


Fig. 12. Daily variation of vertical distribution of DIN:DIP at C2 of the Jindong Bay from 30 August to 22 September, 1998.

여기서 DIN:DIP는 염분농도의 감소에 따라 증가하고 있고, 하계(6~9월) 염분이 29psu 이하(Fig. 12에서 □로 표시)의 저농도에서는 DIN:DIP가 16보다 높아서 인(phosphate)에 의한 제한영양염이 작용하고 있지만, 다른 계절(Fig. 12에서 △로 표시)에서는 인(P)이나 질소(N)에 의한 제한영양염의 변동이 있음을 알 수 있다. 따라서 DIN:DIP비의 변동, 즉 제한영양염은 계절에 따라 변동하고 있으며 특히, 하계에는 인근 육상에서 유입되고 있는 하천수의 부하에 따라 변동이 크다는 것을 시사하고 있다.

4. 결 론

진동만을 대상으로 1998년 3월부터 1999년 2월까지 적조생물의 발생과 증식에 영향을 미치는 물리·화학적 인자의 해양환경조사를 실시하였다. 이 기간동안에 적조는 1999년 5월과 9월에 발생하였으며, 우점종으로는 각각 *Ceratium furca*와 *Gymnodinium sanguineum*으로써 해양환경조사결과와는 다음과 같다.

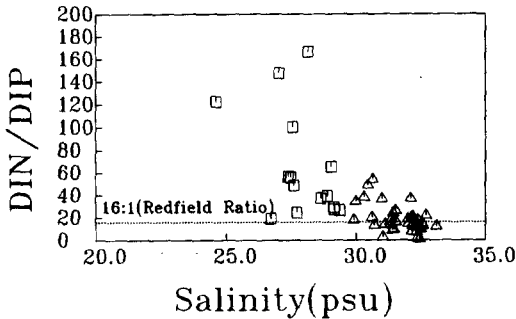


Fig. 13. Relationship between salinity and DIN/DIP at surface in the Jindong Bay from 17 March, 1998 to 5 January, 1999. □: summer (June~September, 1998), △: other seasons. Dotted line: Redfield ratio (DIN:DIP=16:1).

5월(우점종: *Ceratium furca*) 적조는 수온과 염분이 표층에서 각각 약 18.3~19.7°C, 30.6~31.0psu, 9월에 발생한 적조(우점종: *Gymnodinium sanguineum*)는 각각 약 25.6~27.0°C, 28.0~28.45psu의 범위에서 출현하였다. 또한 이시기는 성층의 안정된 수피에서 적조가 발생하였고, 성층이 형성되지 않은 불안정한 수피형성 시기에는 발생하지 않았다.

일반적으로, 영양염인 DIN(dissolved inorganic nitrogen)과 DIP(dissolved inorganic phosphate)는 계절에 따른 변동을 나타내고 있으며, 제한영양염으로는 5월의 적조 발생시에는 질소(nitrogen)성분이, 9월에는 인(phosphate)성분이 제한영양염으로 작용하고 있다. 또한 육상의 하천수 유입에 의한 담수의 영향을 많이 받고 있는 하계(6~9월)의 표층에서는 인(phosphate)이 제한영양염으로 작용하고 있다.

한편, 5월의 적조생물(우점종: *Ceratium furca*)이 출현했을 때 표층에서의 chlorophyll-a, DO(dissolved oxygen) 및 COD(chemical oxygen demand)는 각각 20 µg/l ER 이상, 10 mg/l ER 및 5 mg/l ER 이상의 고농도분포를 하고 있으며, *Gymnodinium sanguineum*이 발생한 9월에는 고농도의 chlorophyll-a(100 µg/l 이상) 및 10mg/l 이상의 DO와 COD의 분포를 나타내고 있다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단지정 부경대학교 해양산업개발연구소(ERC)의 국제공동연구사업(과학기술부)의 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 박주석, 김중두, 1967, 진해만의 적조현상에 대한 연구, 국립수산진흥원 연구보고, 43, 63-79.
- 2) 유광일, 이종화, 1976, 마산만의 환경학적 연구(2) 식물플랑크톤의 년변화, 한국해양학회지, 11(1), 34-38.
- 3) 조창환, 1978, 진해만의 *Gonyaulax* 적조에 관하여, 한국수산학회지, 제11권 2호 11-114.
- 4) 유광일, 1984, 연안역에 있어서의 적조생물의 군집동태에 관한 연구, 한양대학교 환경과학 연구논문집.
- 5) 유광일, 이준백, 1985, 마산만의 환경학적 연구, 쌍편모조류의 군집의 동태에 대하여, 한양대학교 환경과학연구보고, 제6집, 117-127.
- 6) 박주석, 1987, 적조 발생 현황의 변천과 대책, 적조현상과 어장보존, 국립수산진흥원, pp. 7-17.
- 7) 박주석, 김학균, 이삼근, 1988, 진해만의 적조현상과 원인생물의 천이, 국립수산진흥원 연구보고, 제41권, 1-26.
- 8) 이삼근, 박주석, 김학균, 1993, 한국 남해 연안해역에서 출현하는 유독편모조류의 분류, 국립수산진흥원 연구보고, 제48권, 1-23.
- 9) Lee, J. S., J. K. Jeon, M. S. Han, Oshima, Y and Yasumoto, T. 1992, Paralytic shellfish toxins in the mussel *Mytilus edulis* and dinoflagellate *Alexandrium tamarense* from Jinhae Bay, J. Korean Fish. Soc. Vol. 25, 144-150.
- 10) Han, M. S., J. K. and Y. O. Kim, 1992, The first record of the occurrence of *A. tamarense*, a causative organism of paralytic shellfish poisoning in Chinhae Bay, Korean J. Plankton Research, 173-187.
- 11) 김창훈, 1994, 유독 와편모조류 *Alexandrium* 속의 출현에 미치는 휴면포자의 발아율, 한국양식학회지, 제7권 4호, 251-262.
- 12) Kim, C. H., 1995, Paralytic shellfish toxin profiles of the dinoflagellate *Alexandrium* species isolated from benthic cysts in Jinhae Bay, Korea, J. Korean Fish. Soc. 28-3, 364-372.
- 13) 서봉수, 1987, 마산만의 오염물질 부하와 대책, 적조현상과 어장보존, 19-26.
- 14) 김종구, 1994, 진해만 해역의 하계 부영양화 모델링, 부산수산대학교 박사학위논문.
- 15) 해양수산부, 1999, 적조피해대책연구, 국립수산진흥원.
- 16) 김무찬, 유홍식, 옥미선, 김창훈, 장동석, 1999, 진동만의 살조세균의 동태와 살조특성, J. Korean Fish. Soc., 32(3), 359-367.
- 17) 門谷 武, 1993, 沿岸海域における水質變化の化學過程, 沿岸海洋研究ノート, 30周年記念特別号, 147-159.
- 18) 秋月友治, 北角 至, 吉田正雄, 齋浦耕二, 1984, はりまなだ南部海域における *Chattonella* 赤潮發生環境に関する研究, 大規模赤潮の形成及び赤潮被害抑止に関する研究 5年間の研究成果, 南西水産研究所 ほか, 3-12.

- 19) Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards, 1963, The influence of organism on the composition of sea-water, 26-77, In *The Sea*, 2, (Hill, M. N. ed.), Wiley Interscience, New York.
- 20) NFRDI(National Fisheries Research & Development Institute), 1997, Recent Red Tides in Korean Coastal Waters.
- 21) 花岡 資, 1972, 海における異常發生, 生物の異常發生(巖俊一・花岡 資編, 生態學講座 32), 公立出版, 85-124.
- 22) 西條八束, 1973, 海洋の基礎生産, 海洋生化學(海洋學基礎講座 11), 東海大學出版社, 285-366.
- 23) 李英植, 1996, 廣島灣における植物プランクトン増殖の機構, 廣島大學, 工學博士學位論文.