

춘계 금강 하구에서 혼합영양 섬모류인 *Myrionecta rubra* (= *Mesodinium rubrum*) 개체군의 단주기 변동

이원호* · 명금옥 · 김형섭¹ · 정해진²

(군산대학교 해양학과, ¹군산지방해양수산청, ²서울대학교 지구환경학부)

Semiweekly Variation of Spring Population of a Mixotrophic Ciliate *Myrionecta rubra* (= *Mesodinium rubrum*) in Keum River Estuary, Korea

Wonho Yih*, Geumok Myung, Hyung Seop Kim¹, Hae Jin Jeong²

Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701,

¹Kunsan Regional Maritime Affairs and Fisheries Office, MOMAF, Kunsan 573-030 and

²School of Earth and Environmental Science, Seoul National University, Seoul 151-747 Korea

Myrionecta rubra, a mixotrophic ciliate, is a cosmopolitan red tide species which is commonly found in neritic and estuarine waters. *M. rubra* had long been listed as an “unculturable protist” until 2 different laboratory strains were finally established in 2 research groups at the beginning of this century, enabling us to perform initiative investigation into various aspect of the live *M. rubra* strains (Gustafson *et al.* 2000; Yih *et al.* 2004b; Johnson and Stoecker 2005). Field sampling was carried out on high tide at 2 fixed stations around Kunsan Inner Harbor (St.1 near the Estuarine Weir and St.2 off Kunsan Ferry Station) every other day for 4 months from mid-February 2004 to understand detailed figure of the recurrent spring blooms of *M. rubra* following the onset of the water gates operation of the Keum River Estuarine Weir on August 1994.

With its maximum abundance of 272 cells mL⁻¹ in St.1, fluctuation pattern of the *M. rubra* population at the 2 stations was strikingly similar. Notable growth of *M. rubra* population started on late April, to cause *M. rubra* red tides during one month from mid-May in which “exceptionally low salinity days” without its red tide were intermittently inserted. High abundance of *M. rubra* over 50 cells mL⁻¹ was recorded at samples with their water temperature and salinity higher than 15°C and 4.0 psu, respectively. During pre-bloom period when salinity fluctuation is moderate and the water temperature is cooler than 15°C, *Skeletonema costatum*, a chain-forming centric diatom, was most dominant. Cyanobacterial species such as *Aphanizomenon flos-aquae* and *Phormidium* sp. replaced other dominant phytoplankters on the days with “exceptionally low salinity” even during the main blooming period of *M. rubra*. To summarize, *M. rubra* could form spring blooms in Keum River Estuary when the level of salinity fluctuation was more severe than that for the dominant diatom *Skeletonema costatum* and milder than that for the predominance by freshwater cyanobacteria. Therefore, optimal control of the scale and frequency of freshwater discharges might lead us to partially modify the fluctuation pattern of *M. rubra* populations as well as the period of spring blooms by *M. rubra* in Keum River Estuary. Sampling time interval of 2 days for the present study or daily sampling was concluded to be minimally required for the detailed exploration into the spring blooms by *M. rubra* populations in estuaries with weirs like Keum River Estuary.

Key Words: Estuarine Weir, freshwater discharge, Keum River, laboratory strain, mixotrophic ciliate, *Myrionecta rubra*, salinity change, spring bloom

서 론

혼합영양 섬모류 *Myrionecta rubra* Jankowski 1976

(= *Mesodinium rubrum* Lohmann 1908)에 대한 분류학적 연구가 시작된 이래(Lohmann 1908), 지난 100여 년간 외국에서는 이 종의 생물학 및 생태학적 특성에 관한 연구가 지속적으로 수행되어 왔으며(Lindholm 1985), 다양한 해역에서 적조를 형성하는 범세계적 종이라는 관점에서의 연구 사례도

*Corresponding author (ywonho@kunsan.ac.kr)

많았다(Proenca 2004; Kyewalyanga *et al.* 2002). 최근에는, 색소체 탈취(kleptoplastidy) 능력을 가진 다양한 원생생물 가운데에서(Janson 2004; Takishita *et al.* 2002; Gustafson *et al.* 2000), *M. rubra*는 먹이를 전혀 먹지 않고서도 광합성만으로 성장할 수 있는 유일한 “기능적 광영양 생물(functional phototroph)” 종으로 평가되어(Stoecker *et al.* 1988; Putt 1990), 원생생물의 진화적 과정을 반영할 수 있다는 측면에서 크게 주목받고 있다(Johnson and Stoecker 2005; Johnson *et al.* 2004; Yih *et al.* 2004b). 이와는 대조적으로, 한국해역에서는 1982년 낙동강 하구에서 기록된 *M. rubra* 적조가 그 첫 번째 연구 사례이다(국립수산과학원 2005). 1990년 이후, 해역별 생물량 보고(김 등 1998; Yih and Shim 1997; 유 1994; 윤 등 1991; 최 등 1991), 실험배양 연구(Yih *et al.* 2000; Choi and Noh 1993; 최 등 1991) 등을 통하여(유 등 1998), 최근에는 실험실 종주를 이용한 선도적 연구를(Yih *et al.* 2005; 명 2004; Yih *et al.* 2004a, 2004b; 김 등 2004a; 김 등 2003a; 김 2002) 수행할 수 있게 되었다(김 등 2003b).

한국해역의 *M. rubra* 개체군의 주별 변동과 관련된 첫 연구에서(김 등 2004b), 저자들은 서해의 두 연안역에서 0.5-2 주일 간격으로 현장 조사를 실시하여, *M. rubra* 개체군이 곰소만에 비하여 금강 하구역에서 공존하는 우점 규조종들에 대해 더욱 높은 상대적 우위를 차지하게 됨을 보고한 바 있다. 그러나 춘계 대변식 기간 중에 금강 하구인 수문의 조작으로 인한 불규칙한 염분 변화와 관련하여(이 등 2001; 최 등 1995), *M. rubra* 개체군의 격일 별 변동을 연구한 예는 아직 없는 실정이다. 금강 하구역이 반일 구조의 영향을 받고, 하구인 수문의 개폐에 따라 극심한 염분 및 무기영양염 농도의 변화가 불가피한 해역임을 감안할 때(양 등 1999; 이와 양 1997), 해양생태계 먹이망 내의 기초생산자인 적조형성 생물군집의 구조와 기능을 규명하려면, 적어도 1-2일 간격의 조사가 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 매년 4-6월 금강 하구역에서 대변식하는 혼합영양 섬모류인 *M. rubra*의 단주기적 변동을 조사하여, *M. rubra*와 공존하는 기타 우점 식물플랑크톤 종 및 주 환경요인들과의 관련성을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

2004년 춘계 금강 하구역에서 *Myrionecta rubra* 개체군의 단주기적 변동 특성을 연구하기 위해, 하구인(St. 1) 및 도선장(St. 2) 인근의 두 고정 관측 정점에서 현장조사를 실시하였다(Fig. 1). 즉, 2004년 2월 중순부터 6월 중순까지 53회에 걸쳐 약 2일 간격으로, 만조 때에 환경특성치를 측정하고 분석용 시료를 채취하였다. 수온과 염분은 calibrator solution(YSI 3161, 1000 mS/cm)을 사용하여 염분을 보정한 YSI 온도·염

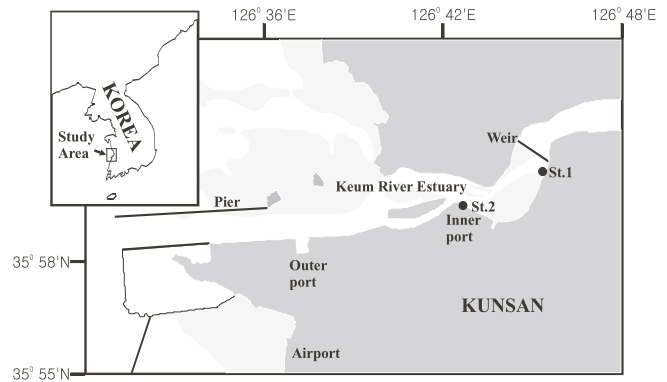


Fig. 1. Map showing Keum River Estuary, Weir, and the sampling sites.

분계(Model 30, Handheld Salinity, Conductivity and Temperature System, USA)로 현장에서 측정하였다. 해수 시료는 Niskin 채수기를 이용하여 0.5 m(표층) 및 2.5-3 m(저층) 수심에서 채취하였다. 화학 분석용 해수시료를 산세척한 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 용기에 옮겨 담은 후, 드라이아이스로 동결하여 실험실로 운반하고, 분석하기 전까지 -4°C 이하의 냉장실에 보관하였다. 무기영양염($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, 및 $\text{SiO}_2\text{-Si}$) 분석에는 흡광도법을 적용하였다(Grasshoff *et al.* 1999). 영양염 분석을 위해 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우에는 예외적으로 Auto-analyzer(Bran-Luebbe TRAACS 2000)를, 다른 무기영양염 분석에는 분광광도기(SHIMADZU Spectrophotometer Mini 1240)를 이용하였다.

현장에서 플랑크톤 분석용 시료를 고정하기 위해, Lugol 용액을 사용하였다(심 등 2003). 알루미늄 종이로 차광한 플랑크톤 시료를 실험실로 운반하여, 보관소에 24시간 이상 정지한 후, 상등액을 미세사이폰으로 천천히 흘러나오게 하여 시료를 농축하였다. 농축된 시료를 100여 회 흔들어 혼합한 다음, 1 mL을 Sedgwick-Rafter 계수판에 담고, 광학현미경(Olympus BH-50) 시야에서 *M. rubra* 및 식물플랑크톤의 세포수를 세었다. 정밀한 종의 동정이 필요한 경우에는 1,000 배율의 현미경 시야에서 추가적인 관찰을 실시하였다. 각 시료의 수온, 염분, 용존산소, 부유입자물질, 무기영양염 농도와 *M. rubra* 및 식물플랑크톤의 종별 생물량 자료를 기초로 하여, *M. rubra* 개체군의 시·공간적 분포특성을 파악하고, 공존 식물플랑크톤 우점종 및 이화학적 환경요인과의 관련성을 규명하고자 하였다.

결과 및 토의

수온 염분의 변동

조사기간 중 수온은 시간에 따라 지속적으로 상승하였으며, 염분은 매우 불규칙하고 극심한 변동을 나타내었다(Fig.

Table 1. Water temperature and salinity measurements of surface and bottom samples collected at Keum River Estuary

	sampling point	number of samples	range	mean	vertical difference
water temperature (°C)	St.1-surface	16	6.2 - 24.4	17.01	
	St.1-bottom	16	5.2 - 23.9	16.38	0.63
	St.2-surface	16	4.8 - 23.4	15.78	
	St.2-bottom	16	4.9 - 23.9	15.80	-0.02
salinity (psu)	St.1-surface	16	1.3 - 21.3	10.56	
	St.1-bottom	16	2.8 - 22.4	13.27	-2.71
	St.2-surface	16	8.3 - 25.1	18.91	
	St.2-bottom	16	9.2 - 25.3	19.18	-0.27

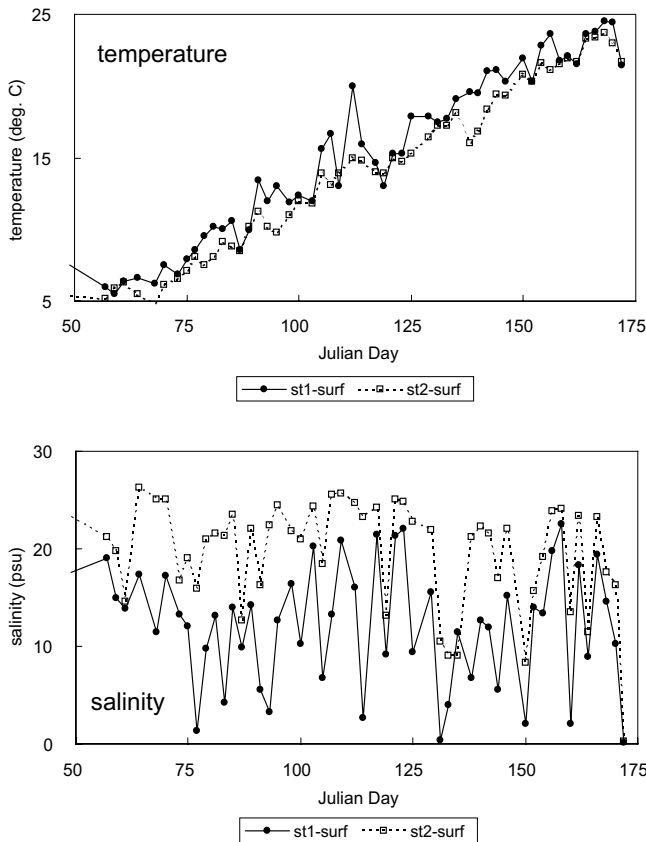


Fig. 2. Time course of temperature and salinity at the surface of St.1 and St.2 in Keum River Estuary.

2). 정점 1과 정점 2 간에 평균 수온의 차이는 1.08°C로서 미미하였으나, 평균 염분은 7.45 psu의 큰 차이를 나타내어 명확한 대조를 이루었다(Fig. 2). 16회에 걸쳐 표층과 저층에 대해 동시 측정된 수온 및 염분 평균값의 층간 차이는 정점 1에 비해 정점 2에서 상대적으로 작아(Table 1), 고조시에도 정점 1의 염분 성층은 유지되나 정점 2에서는 수직적인 혼합이 우세함을 알 수 있다.

무기영양염 농도의 변동

조사 대상 5종류 무기영양염 농도의 평균값은 1995년과

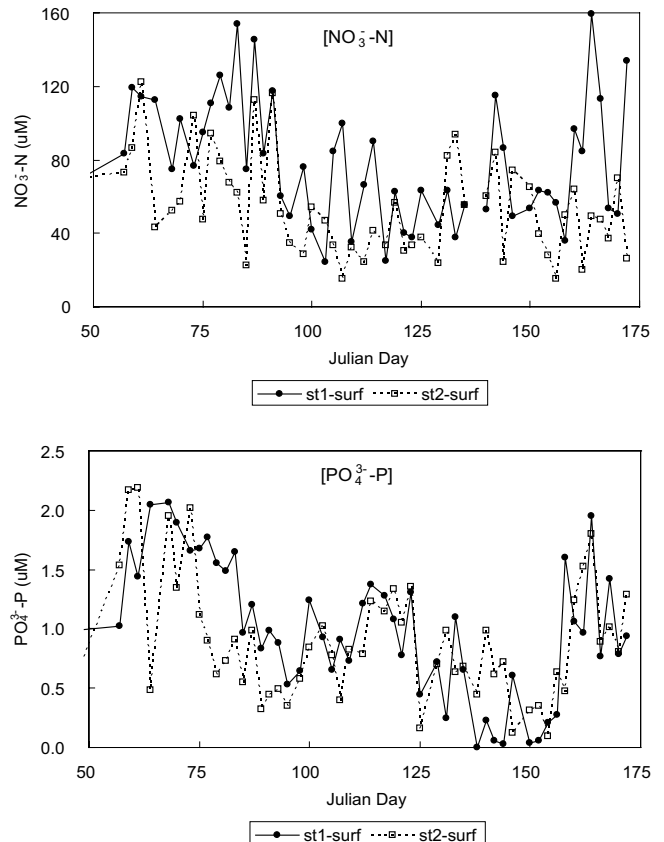


Fig. 3. Time course of nitrate-N and phosphate-P concentration at the surface of St.1 and St.2 in Keum River Estuary.

1998년 사이의 측정치(양 등 1999; 이와 양 1997)에 상당하는 수준이다(Table 2). 조사기간 중 정점 1과 정점 2 표층의 질산염 농도의 변동(Fig. 3)은 염분의 변동(Fig. 2)과 유사한 수준의 부정기적인 급변을 나타내었으며, 대부분의 경우 정점 2에 비해 정점 1에서 높은 값을 기록하였다(52개 시료 평균, 정점 1: 78.7 μM, 정점 2: 54.4 μM). 질산염의 경우와는 달리, 정점 1과 정점 2 표층의 인산염 농도는 비교적 정점간의 차가 작고(52개 시료 평균, 정점 1: 1.01 μM, 정점 2: 0.90 μM), 시간적 변동도 상대적으로 완만하였다(Fig. 3). 또한 질산염과 더불어 아질산염 및 암모늄염 역시 정점 1에서의

Table 2. Inorganic nutrient measurements of surface and bottom samples collected at Keum River Estuary

nutrients (μM)	sampling point	number of sample	range	mean	station average
[NO ₃]	St.1-surface	16	40.2 - 159.3	87.19	89.42
	St.1-bottom	16	41.8 - 183.1	91.65	
	St.2-surface	16	15.0 - 116.5	54.29	
	St.2-bottom	16	24.3 - 100.2	48.34	
[NO ₂]	St.1-surface	16	0.94 - 11.89	5.02	4.99
	St.1-bottom	16	2.00 - 11.16	4.95	
	St.2-surface	16	0.06 - 7.45	1.82	
	St.2-bottom	16	0.03 - 4.31	1.38	
[NH ₄]	St.1-surface	16	3.3 - 216.4	46.95	41.67
	St.1-bottom	16	2.1 - 103.0	36.39	
	St.2-surface	16	3.1 - 62.8	31.84	
	St.2-bottom	16	2.9 - 58.9	22.31	
[PO ₄ ³⁻]	St.1-surface	16	0.04 - 2.06	0.95	0.91
	St.1-bottom	16	0.15 - 1.83	0.86	
	St.2-surface	16	0.31 - 1.95	0.89	
	St.2-bottom	16	0.04 - 1.62	0.67	
[SiO ₂]	St.1-surface	16	0.2 - 7.2	2.16	2.13
	St.1-bottom	16	0.3 - 8.4	2.10	
	St.2-surface	16	0.2 - 10.2	2.36	
	St.2-bottom	16	0.2 - 6.3	1.39	

정점 평균치가 정점 2에서 보다 크게 높아(Table 2), 이들 세 가지 무기질소 영양염의 주된 공급원이 하구언 방류수라고 판단하였다(이와 양 1997). 16회에 걸쳐 표층과 저층에 대해 동시 측정된 무기영양염 5종의 층별 평균값을 보면, 정점 1에서 질산염 농도의 경우를 제외한 모든 경우에 표층의 값이 저층에서보다 더 높았다(Table 2). 특히, 각 정점에서 암모늄염 농도는 저층에 비해 표층에서 1.3-1.4배의 높은 값을 나타내어(Table 2), 연구 해역의 암모늄염의 순 이동은 표층에서 저층 방향으로 이루어지는 것으로 판단된다.

Myrionecta rubra 개체군의 시간적 변동과 수온-염분

조사기간 중 *M. rubra* 개체군은 최고 272 cells mL⁻¹의 밀도를 기록하며, 정점 1과 정점 2에서 서로 매우 유사한 시간적 변동 양상을 나타내었다. 즉, 각 정점에서 4월 하순부터 개체군의 성장이 시작되어(20-40 cells mL⁻¹) 5월에 최대의 밀도에 이르고, 6월 초순에 극히 낮은 밀도를 유지하다가 중순부터 또 한 차례의 대번식을 나타내었다(Fig. 4). *M. rubra* 개체군의 성장이 시작되는 4월 하순 이후의 기간 중에(서양구력 95-172일), 시료 채취점 별 *M. rubra*의 평균 밀도는 8-35 cells mL⁻¹의 범위를 나타내었으며, 정점 1에서 정점 2에 비해 평균적으로 2.6배 높은 밀도를 기록하였다(Table 3). 또한 정점 1에서는 표·저층 간의 평균 개체군밀도 차가 매우 작은 반면, 정점 2에서는 저층에서 표층의 2배가 넘는 높은 평

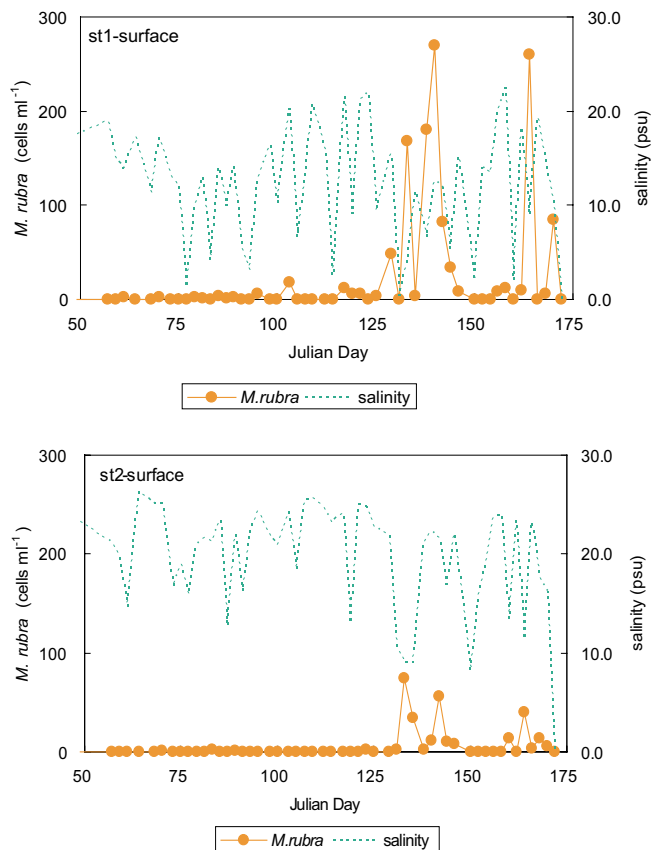


Fig. 4. Time course of *M. rubra* abundance and salinity at the surface of St.1 and St.2 in Keum River Estuary.

Table 3. Basic statistics of *Myrionecta rubra* abundance during its spring bloom period (from Julian day 95 to 172) in Keum River Estuary

	sampling point	number of sample	range	mean
<i>Myrionecta rubra</i> (cells mL ⁻¹)	St.1-surface	35	0-270	35.0
	St.1-bottom	12	0-272	32.4
	St.2-surface	35	0-74	7.9
	St.2-bottom	12	0-132	18.4

균 개체군 밀도를 기록하였다(Table 3).

전체 시료 중, *M. rubra*의 개체군 밀도가 50 cells mL⁻¹ 이상인 시료의 수온과 염분은 각기 15.0-24.4°C와 4.0-25.3 psu 범위 안에 분포하였다(Fig. 5). 이는 *M. rubra*가 적조를 형성하기 위한 적정 수온 및 염분의 범위로 해석할 수 있는데, 금강하구와 곰소만을 대상으로 한 이전의 연구(김 등 2004b)에서 논의된 고밀도의 *M. rubra* 개체군 형성을 위한 적정 수온(15-20°C) 및 염분(11-26 psu) 범위와 크게 다르지 않았다. *M. rubra* 종주의 염분에 따른 성장반응을 측정한 명(2004)은 "10-30 psu 범위에서는 지수성장이 이루어지지만 5 psu에서는 오히려 개체군이 감소함"을 확인한 바 있어, 본 현장분포 연구에서 밝혀진 적정 염분범위의 하한인 4 psu와 종주를 이용한 배양실험에서 구한 한계치가 서로 잘 일치함을 알게 되었다. 결론적으로, 춘계 금강하구역의 수온은 시간이 지남에 따라 점진적으로 상승하므로(Fig. 2), 수온이 15-25°C 범위인 시기에 담수방류의 규모와 빈도에 따라 염분이 5-25 psu 범위 내에서 점차적으로 변동하는(주요 무기영양염의 공급을 의미함; Cloern et al. 1994) 짧은 기간(수일-1주일 정도) 동안 *M. rubra* 개체군이 적조를 형성할 수 있음을 추론할 수 있다(김 등 2004b).

***Myrionecta rubra* 개체군의 대번식 기간 중 환경급변 스트레스**

M. rubra 생물량이 정점 2에 비하여 상대적으로 염분의 변화가 더욱 극심한 정점 1(Fig. 2)에서 2.6배나 많다는 사실은(Table 3; Fig. 4) *M. rubra*가 염분이 급변하는 환경에서 공존하는 하구역의 전형적인 식물플랑크톤 종들보다 더 잘 적응하는 생물임을(Lindholm 1985) 의미한다. 그러나, *M. rubra* 개체군의 대번식 기간 중에도, 극히 낮은(< 10 cells mL⁻¹) 밀도를 기록한 시료점들이 단속적으로 포함되어 있어, 대번식 시기에도 *M. rubra* 개체군의 변동이 매우 불규칙한 양상을 나타내었다(Fig. 4). 이와 같이, 초 저밀도의 *M. rubra* 개체군이 대번식 기간 중에도 단속적으로 관찰되는 것은, 하구연 수문을 통해 대량의 담수가 일시에 방류되어 *M. rubra*가 거의 소멸될 정도의 염분급변 환경을 조성하기 때문이라고 판단된다. 보다 구체적으로는, 1) 염분급변 환경에서 *M. rubra* 개

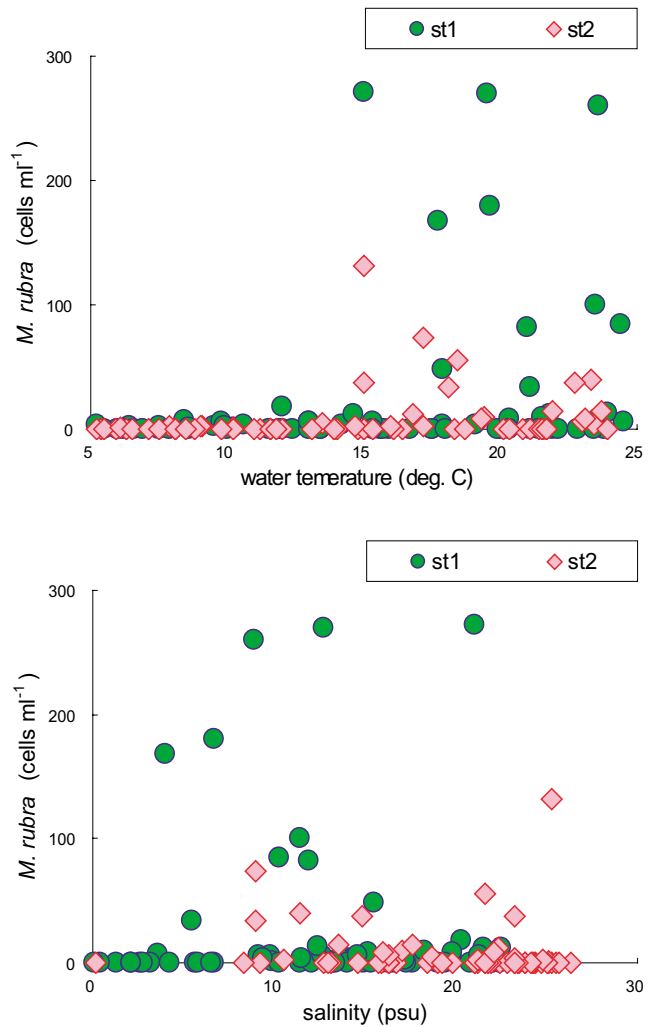


Fig. 5. Scatter plot of all samples on temperature-*M. rubra* abundance plane (upper) and salinity-*M. rubra* abundance plane (lower).

체군의 위축된 성장(명 2004) 또는 2) 새로 유입된 담수와 고밀도의 *M. rubra* 개체군이 들어있는 하구수가 섞여 형성된 저밀도의 *M. rubra* 개체군이 다시 고밀도로 성장하는데 필요한 time-lag의 미경과 등 두 가지 원인을 제시할 수 있다. 급변 조사에서 측정된 염분의 하한은 명(2004)이 제시한 *M. rubra* 성장 억제 염분인 5 psu에 비해 훨씬 낮은 0.1-0.2 psu 정도의 극저염이다(Fig. 2). 따라서 위의 두 가지 원인이 복합적으로 작용한 결과로서, *M. rubra* 대번식 기간 중에 일시적으로 초저밀도의 개체군이 기록되었을 가능성이 있다.

***Myrionecta rubra* 개체군의 대번식 환경**

이상과 같이, *M. rubra* 개체군은 수온과 염분이 적정한 범위를 유지하면서도(수온 15-25°C, 염분 5-25 psu; Fig. 5; 김 등 2004b) 시간에 따라 염분이 천천히 변동할 때(Cloern et al. 1994), 크게 성장할 수 있는 것으로 판단된다. 이와 같이 비교적 안정된 동적 환경은 *M. rubra*뿐만 아니라 공존하는 식물

Table 4. Mean abundance (cells mL⁻¹) of *Myrionecta rubra* and 4 most dominant phytoplankton species during the 3 sub-periods of spring bloom by *M. rubra* at Keum River Estuary

Species\Sub-period	Pre-Bloom (JD 95-125)	Bloom (JD 129-144)	Inter-Bloom (JD 146-162)
<i>Myrionecta rubra</i>	3.7	98.3	4.8
<i>Skeletonema costatum</i>	1215.3	19.9	74.1
<i>Phormidium</i> sp.	278.6	1913.8	319.9
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	529.1	835.9	38.4
<i>Guinardia delicatula</i>	0.2	1.4	1072.7

플랑크톤 일부 종들(전형적인 광염성 하구 식물플랑크톤 종)에게도 동시에 적절한 성장 조건이 될 수 있다(Shim and Yang 1982; 김 등 2004b). 다음 단계로, 하구엔 수문을 통해 금강 하구역으로 담수를 불규칙하게 방류하면, 염분 및 질소계 무기영양염 농도 역시 격렬히 변동하여(Figs 2, 3), 매우 불안정한 동적 환경에 대한 적응력이 높은 종류들이 선택적으로 우점하게 될 것이다. 즉, 전반적으로는 용존 무기영양염이 충분하여 영양염 제한이 나타날 수 없는 금강 하구역에서도 단주기적으로 반복되는 이종적 환경 급변 스트레스(염분, 질소계 영양염 농도 및 영양염 종류간 비율의 변화 등; Justić et al. 1995; Lohrenz et al. 1999)에 의하여 환경 적응력이 뛰어나지 못한 일부 종류들은 성장의 제한을 받게 될 것이다. 혼합영양의 *M. rubra*는 매우 광범한 수온, 염분(Lindholm 1985), 광도(Johnson and Stoecker 2005) 및 영양염 농도(Owen et al. 1992; Yih and Shim 1997; 김 2002) 조건에서 잘 적응하는 종으로서, 안정적인 동적 환경에 적응해 온 전형적인 하구역의 고유종들에 비해 생태학적 경쟁 우위를 차지하게 될 것이다(김 등 2004b). 보다 극단적인 단계로, 하구엔 수문을 통해 대량의 담수가 방류되어 일시적인 극저염 환경을 조성하는 정도의 환경급변 스트레스에서는 *M. rubra*도 적응하지 못하고 거의 소멸될 정도로 위축된다(Fig. 4). 이 경우에는, 남세균류인 *Phormidium* sp.와 *Aphanizomenon flos-aquae* 등과 같은 담수에서 우점하는 개체군들이 극저염 수괴의 염분이 염분적용 한계치에 도달하기 전까지 일시적으로 잔존하게 될 것이다(이 등 2005).

담수방류에 따른 *Myrionecta rubra* 개체군의 선택적 우점

정점 1 표층에서 *M. rubra* 개체군의 성장이 시작되는 4월 하순 이후의 기간(서양구력 95-172일; Fig. 4)을 세분하여, 1) 대번식 직전의 초기 저밀도(< 20 cells mL⁻¹) 시기(서양구력 95-125일), 2) 고밀도를 나타낸(> 30 cells mL⁻¹) 전반 대번식 시기(서양구력 129-144일), 3) 전반 대번식기와 후반 대번식기 중간의 저밀도(최고 12 cells mL⁻¹) 시기(서양구력 146-162일) 및 4) 후반 대번식 시기(서양구력 164-170일)로

Table 5. Mean and CV (% coefficient of variation in parenthesis) of salinity (psu) and concentration of inorganic nutrients (μM) during the 3 sub-periods of spring bloom by *Myrionecta rubra* at Keum River Estuary

Envir. Factors\ Sub-period	Pre-Bloom mean (CV)	Bloom mean (CV)	Inter-Bloom mean (CV)
Salinity	14.4 (43)	8.5 (60)	13.4 (57)
[NH ₄ ⁺]	37.6 (43)	6.6 (115)	11.9 (59)
[NO ₃ ⁻]	56.8 (43)	65.0 (42)	62.8 (31)
[PO ₄ ³⁻]	0.9 (33)	0.4 (106)	0.6 (93)

명명하였다. 이 가운데, 해당 시료 수가 작은 후반 대번식 시기를 제외한 나머지 3개 시기 각각에서 *M. rubra* 개체군과 식물플랑크톤 우점종들(이 등 2005)의 평균 세포 밀도(Table 4)와 주요 환경요인의 평균값(Table 5)들을 서로 비교하여 *M. rubra* 대번식 시기의 특징을 분석하였다. *M. rubra* 개체군과 공존하는 식물플랑크톤 우점종 가운데, 규조 *Skeletonema costatum*는 *M. rubra* 대번식 시기 직전에, 규조 *Guinardia delicatula*는 대번식 시기 직후에 각각 최고 우점하였다(Table 4). 이와는 대조적으로, *M. rubra* 대번식 시기에는 규조 종들의 밀도가 급감하고, 전체 조사기간 중 최고의 밀도를 나타낸 *Phormidium* sp.(평균 1910 cells mL⁻¹)와 *Aphanizomenon flos-aquae*(평균 840 cells mL⁻¹) 등 담수성 남세균 2종이 절대 우점하였다(Table 4). 염분은 *M. rubra* 대번식 시기에 현저히 낮았으며(평균 8.5 psu), 그 직전과 직후 시기에는 13-15 psu 수준이었다(Table 5). *M. rubra* 대번식 시기에 [NH₄⁺]과 [PO₄³⁻]는 현저히 낮은 평균값과 110% 내외의 높은 변동계수를 기록하였으나, [NO₃⁻] 평균값은 위의 세 시기 간에 차이가 작고 변동계수 역시 모두 30-40% 수준으로 작은 편이었다(Table 5). 종합하면, 불규칙하게 담수를 방류하여 낮아진 염분(Table 4)과 [PO₄³⁻]/[NO₃⁻] 값이 심하게 변동하는 환경(Table 5)에서 *M. rubra* 개체군이 *Skeletonema costatum*나 *Guinardia delicatula* 등의 연안성 규조보다 더 잘 적응하여 선택적인 우점종의 지위를 갖게 될 것이다. *M. rubra* 대번식 시기에 높은 밀도로 함께 나타난 *Phormidium* sp.와 *Aphanizomenon flos-aquae* 등의 담수성 남세균은 염분이 급변하는 상황에서 짧은 기간 동안 유지되는 극저염 수괴 내에서 잔존하다가 염분이 임계치 이상으로 상승하면 소멸하게 될 것이다(이 등 2005의 Fig. 4 참조).

Myrionecta rubra 개체군 변동을 좌우하는 염분의 수준과 변동 양상

M. rubra 개체군 변동을 좌우하는 염분은 그 수준과 변동의 역동성에 따라 다양한 결과를 초래할 수 있다. 우선, 염분이 적절한 범위를 유지하면서(5-25 psu; Fig. 5) 시간에 따라 천천히 변동할 때에는 *M. rubra* 개체군이 크게 성장할 수 있

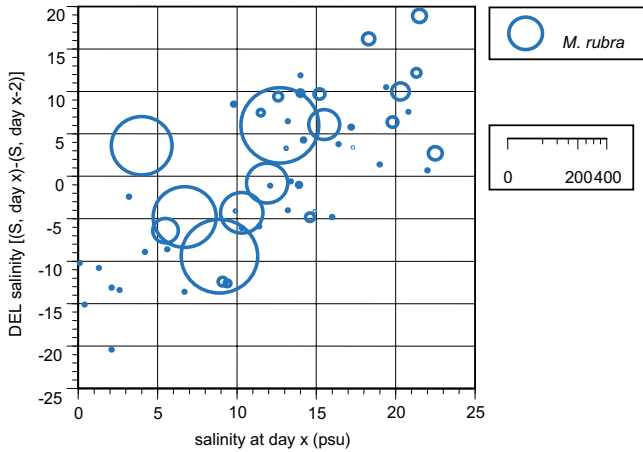


Fig. 6. Bubble chart of *M. rubra* abundance at the surface of St.1 on salinity-DELSalinity plane where DELSalinity means salinity difference between the two samples with 2 days apart. Small closed circles represent samples with no observed *M. rubra* cells.

으나(Cloern et al. 1994), 이러한 준 안정적 염분 변동 환경에서는 공존하는 규조류도 동시 우점할 수 있다(김 등 2004b). 염분 변동의 역동성이 한 단계 높아져 5 psu 미만의 수괴가 자주 형성되면 공존하던 규조류가 점차 배제되어 *M. rubra*가 선택적으로 크게 우점하게 되나(김 등 2004b), 염분 변동이 극도로 심해지면 *M. rubra*마저 배제되고, 담수성 남세균만이 절대 우점하게 될 것이다. 비록 동일한 크기의 염분 변동이 일어난 경우에도, 평균 염분의 고·저와 변동의 방향(염분 증가 또는 염분 감소)에 따라 *M. rubra* 개체군에 대한 영향은 크게 달라질 수 있다(Figs 6, 7). 즉, Fig. 6에서 *M. rubra* 개체군의 높은 밀도(> 30 cells mL⁻¹)는 DELSalinity(현재 염분과 2일전 염분의 차) 값이 -10과 +7 사이에 분포한다. 이는 2일 동안 염분이 10 이상 감소하거나 7 이상 증가하는 경우에는, *M. rubra* 개체군이 30 cells mL⁻¹ 이상의 밀도로 성장하지 못하였음을 의미한다. 같은 크기의 염분이 증가 또는 감소하더라도(Fig. 7 우측 상단의 두 화살표 참조; 왼쪽 화살표는 염분 6.0 psu 증가, 오른쪽 화살표는 염분 6.1 psu 증가함을 나타냄), 변동 결과인 최종 염분의 고저에 따라 *M. rubra* 개체군이 성장이 크게 다름(Fig. 7 우측 상단의 두 화살표 참조; 왼쪽 화살표의 최종 염분은 12.7 psu이고 오른쪽 화살표의 최종 염분은 15.5 psu이며, *M. rubra* 개체군 밀도는 각각 270 및 48 cells mL⁻¹임)을 재확인하였다.

정점 1 표층에서 *M. rubra* 개체군 밀도가 증가하기 시작하여 후반 대번식기에 이르는 기간(서양구력 120-170일)의 염분 변동(Fig. 8A-8B), 염분 변동 정도에 따라 예측되는 *M. rubra* 개체군의 성장 잠재력(Fig. 8B-8C) 및 현장의 실제 *M. rubra* 개체군 밀도 변화(Fig. 8D)를 각 시료점 단위끼리 서로 비교하여 보았다. *M. rubra* 성장이 억제되거나 밀도가 극히

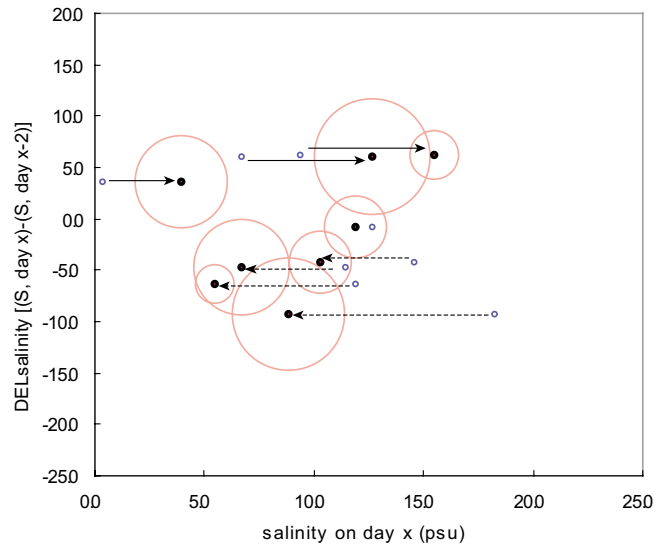


Fig. 7. Bubble chart of *M. rubra* abundance (>30 cells mL⁻¹) at the surface of St.1 on salinity-DELSalinity plane where DELSalinity means salinity difference between the two samples with 2 days apart. Arrows represent the salinity shift (increase: solid arrow, decrease: dashed arrow) during 2 days.

낮아지게 되는 수준의 급격한 변동(2일 동안 염분이 10 이상 감소하거나 7 이상 증가하는 변동)을 보인 염분을 제외한 나머지 염분(Fig. 8A에서 두 점선 사이의 구간에 분포한 염분) 측정치의 변동 경향은 대체로 여현(cosine curve) 모양을 나타내었다(Fig. 8B). 이에 상응하는 *M. rubra* 개체군의 변동 경향을 예측하고(Fig. 8C) 이를 현장의 실제 *M. rubra* 개체군 밀도 변화 경향과 비교하여, 급격한 염분 변동을 보인 예외적인 시점에서만 그 편차가 매우 크다는 사실을 확인할 수 있었다(Fig. 8D). 따라서, 현장에서 하구연 수문을 적절하게 작동하여 염분의 극심한 변동을 피할 수만 있다면, 정점 1 표층에서는 *M. rubra* 개체군 밀도 변화 경향이 염분 변동 경향과 상응하는 양상을 띠게 될 것으로 판단된다.

금강 하구역 *Myrionecta rubra* 개체군 변동 연구를 위한 현장조사의 적정 주기 및 빈도

춘계 금강 하구역에서 *M. rubra* 개체군의 단주기적 변동을 조사하여, *M. rubra* 개체군의 시·공간적 분포특성을 파악하고 공존 식물플랑크톤 우점종 및 비생물 환경요인과의 관련성을 규명하기 위해 본 연구를 수행하였다. 춘계 4개월 동안 53회에 걸친 약 2일 간격의 만조 시 현장조사를 통해 연구한 결과, 세 가지 무기질소 영양염(질산염, 아질산염 및 암모늄염)의 주된 공급원인 금강호 담수의 방류 규모와 빈도에 따라(절대 염분 농도 범위 및 영양염-염분 변동 역동성의 정도에 따라) 광염성 규조류, *M. rubra* 또는 담수성 남세균 등이 서로 배타적인 우점적 지위를 차지할 수 있음을 확인하였다.

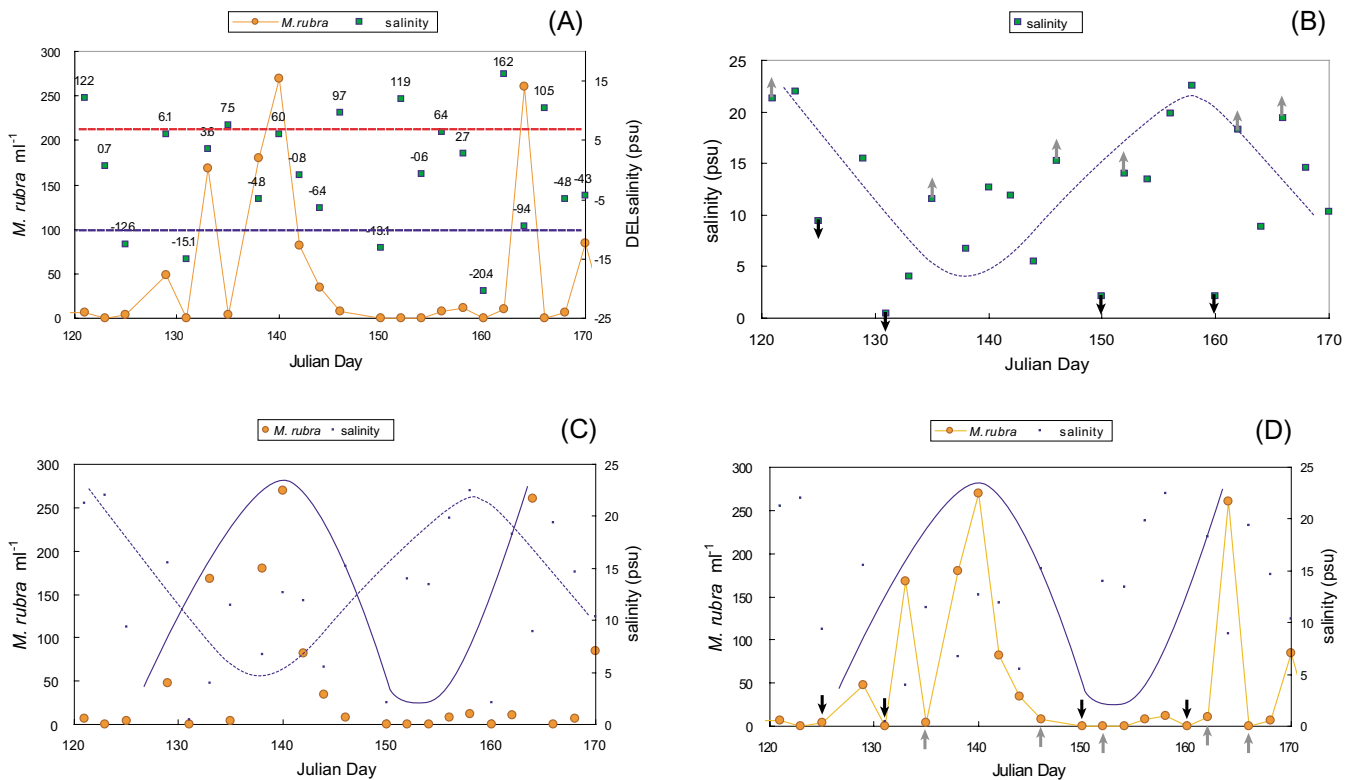


Fig. 8. Point by point analysis of fluctuating *M. rubra* population (closed circle) and salinity (closed square) at the surface of St.1 and St.2 in Keum River Estuary. (A) Points of severe salinity shift during 2 days (increase > 7psu or decrease > 10psu) was delimited by two dotted lines. (B) Time course of the salinity measurements except the “delimited” salinity (with arrows) exhibited a cosine curve. (C) A sine curve represents ideal fluctuation pattern of *M. rubra* population in response to the “cosine curve” of salinity change. (D) Major offsets of the actual *M. rubra* abundance from the “ideal sine curve” (pointed by arrows) were found in samples with the “delimited salinities”.

염분 급변을 초래하는 대량의 담수를 불규칙적으로 방류하는 하구역 환경에서(이는, *M. rubra* 개체군조차 성장하기 어려운 여건이 단속적으로 나타나는 환경임) 약 2일 간격의 현장조사를 통해 *M. rubra* 개체군의 단기적 변동을 상세히 파악하고, 이를 전후한 시기의 *M. rubra* 개체군의 변동을 좌우하는 요인들을 시료점 단위별로 이해할 수 있게 되었다(Fig. 8).

그러나 정점 1 표층에서 *M. rubra* 개체군 밀도가 증가하기 시작하여 후반 대번식기에 이르는 기간(서양구력 120-170 일)에 수행된 23회의 현장조사 결과 자료 가운데서, 약 1주일 간격으로 분포한 9회분의 현장조사 결과 자료만을 이용하여 Fig 8과 같은 자료 분석을 시도해 본 결과(본 논문에서는 구체적인 자료를 제시하지 않음), 염분의 변동 경향과 *M. rubra* 개체군 변동 경향을 시료점 단위로 설명하기에는 크게 미흡함을 알게 되었다. 따라서, 대상 연구 해역에서 *M. rubra* 개체군의 분포특성과 이들의 공존 식물플랑크톤 우점종 및 비생물 환경요인과의 관련성을 규명하려면, 최소한 본 연구에서 적용한 2일 간격의 주기 또는 1일 1회 주기로 현장 조사를 수행할 필요가 있다.

사 사

군산대학교 해양개발연구소의 “연구진흥을 위한 2003 특별연구사업비”와 과학기술부-과학재단의 “국가지정연구실 사업비”(M1-0500-00-0174) 지원을 받아 본 연구를 수행하였습니다. 본 연구를 위해 기술적인 도움을 주신 한국수권환경 연구센터 김영길 박사님과 군산대학교 대학원 해양학과 유영두 동학에게 감사드립니다.

참고문헌

국립수산과학원, 2005. 한국의 적조. 국립수산과학원 홈페이지: 주요기술정보 편, 해양환경정보 란.
 김학균, 이삼근, 안경호, 윤성화, 이필용, 이창규, 조은섭, 김정배, 최희구, 김평중, 1998. 한국 연안의 적조(개정판). 국립수산진흥원. 292 p.
 김형섭, 명금옥, 조수근, 이원호, 2004a. 광합성 섬모류 *Mesodinium rubrum* MR-MAL01의 응용성. (1) 이매패류 종묘생산을 위한 먹이생물 유용성. 한국양식학회지 17: 115-121.
 김형섭, 김영길, 양재삼, 이원호, 2004b. 곰소만과 금강하구역에서 광합성 섬모류 *Mesodinium rubrum* 개체군의 변동. 한국해양학

- 회지 "바다" **9**: 164-172
- 김형섭, 명금옥, 조수근, 이원호. 2003a. 광적응된 은편모조류를 섭취한 해양 광합성 섬모류 *Mesodinium rubrum* MR-MAL01의 흡광 스펙트럼. 한국해양학회지 "바다" **8**: 29-34.
- 김형섭, 이원호, 심재형. 2003b. 적조 원인생물 광합성 섬모류 *Mesodinium rubrum*의 생태·생리적 특성. pp. 321-336. "韓國의 生物海洋學 — 韓國沿岸海域의 플랑크톤 生態學 — (曉山 沈載亨 教授 停年退職記念 獻呈 단행본: 최중기 엮음)". 동화기술. 서울.
- 김형섭. 2002. 서해연안 광영양 섬모류 *Mesodinium rubrum*의 개체군 동태 및 지속성장 조건. 박사학위논문, 군산대학교 대학원. 159 p.
- 명금옥. 2004. 해양광합성 섬모류 *Mesodinium rubrum* 종주와 먹이생물인 은편모류 종주간의 상호작용을 조절하는 생태학적 요인. 석사학위논문, 군산대학교 대학원. 60 p.
- 심재형, 김용서, 노일, 박용철, 박종규, 박철, 신윤근, 양성렬, 양재삼, 여환구, 유신재, 이동섭, 이원호, 장만, 정해진, 조병철, 차성식, 최중기. 2003. 제2장 제2절 채집과 처리. 플랑크톤 생태학. 서울대학교 출판부, 서울. 382 p.
- 양재삼, 정주영, 허진영, 이상호, 최진용. 1999. 금강하구의 물질수지 1. 영양염의 계절적 분포. 한국해양학회지 "바다" **4**: 71-79.
- 유종수. 1994. 인천항 선거 해양생태계 생물군집의 구조와 생산성 및 탄소순환. 박사학위논문, 서울대학교 대학원. 255 p.
- 柳宗秀, 李晋煥, 福代康夫. 1998. 적조원인종 섬모충류 *Mesodinium rubrum* (Lohmann) Hamburger et Buddenbrock에 관하여. *Algae* **13**: 143-149.
- 윤양호, 노홍길, 김영기. 1991. 제주도 연안해역에 출현하고 있는 적조생물. 제주대 해양연보 **15**: 1-14.
- 이상호, 최현용, 권효근. 2001. 하구인 수문 작동으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경 변화: III. 저염수의 조석동조. 한국해양학회지 "바다" **6**: 115-125.
- 이용혁, 양재삼. 1997. 금강하구역에서 영양염류, 염도소, 부유물질과 염분변화에 대한 500일간의 연속관측. 한국해양학회지 "바다" **2**: 1-7.
- 이원호·명금옥·유영두·김영길·정해진. 2005. 금강하구인 담수방류와 춘계 식물플랑크톤 군집의 단주기 변동. 한국해양학회지 "바다" **10**: 154-163.
- 최진용, 최현용, 서만석. 1995. 하구인 갑문폐쇄 후 금강하구역의 물리, 퇴적학적 특성 변화. 한국해양학회지 **30**: 262-270.
- 최중기, 노재훈, 신경순, 박경철. 1991. 적조원인 섬모충류 *Myrionecta rubra*에 관한 고찰. 한국해양학회지 **26**: 371(요약).
- Choi J.K. and Noh J.H. 1993. The culture conditions and dimorphism of *Mesodinium rubrum*, redtide ciliate. *Abstracts of 9th International Congress of Protozoology*. July 25-31. Berlin, Germany p. 24.
- Cloern J.E. Cole B.E. and Hager S.W. 1994. Notes on a *Mesodinium rubrum* red tide in San Francisco Bay (California, USA). *J. Plankton Res.* **16**: 1269-1276.
- Grasshoff K., Kremling K. and Ehrhardt M. (Eds.), 1999: *Methods of Seawater Analysis*, 3rd Ed., Weinheim; New York: Wiley-VCH. 600 pp.
- Gustafson D.E.Jr., Stoecker D.K., Johnson M.D., Van Hukelem W.F. and Sneider K. (2000) Cryptophyte algae are robbed of their organelles by the marine ciliate *Mesodinium rubrum*. *Nature* **405**: 1049-1052.
- Janson S. 2004. Molecular evidence that plastids in the toxin-producing dinoflagellate genus *Dinophysis* originate from the free-living cryptophyte *Teleaulax amphioxeia*. *Environmental Microbiology* **6**: 1102-1106.
- Johnson M.D., Tengs T., Oldach D., Delwiche C.F. and Stoecker D.K. 2004. Highly divergent SSU rRNA genes found in the marine ciliates *Myrionecta rubra* and *Mesodinium pulex*. *Protist* **155**: 347-359.
- Johnson M.D. and Stoecker D.K. 2005. Role of feeding in growth and photophysiology of *Myrionecta rubra*. *Aquat. Microb. Ecol.* **39**: 303-312.
- Justić D., Rabalais N.N., Turner R.E. and Dortch Q. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Coastal and Shelf Science* **40**: 339-356.
- Kywalyanga M., Sathyendranath S. and Platt T. 2002. Effect of *Mesodinium rubrum* (*Myrionecta rubra*) on the action and absorption spectra of phytoplankton in a coastal marine inlet. *J. Plankton Res.* **24**: 687-702.
- Lindholm T. 1985. *Mesodinium rubrum* - a unique photosynthetic ciliate. *Advances in Aquatic Microbiology* **3**: 1-48.
- Lohmann H. 1908. Untersuchung zur Feststellung des vollständigen Gehaltes des Meeres an Plankton. *Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen, Kiel* **10**: 129-370.
- Lohrenz S.E., Fahnenstiel G.L., Redalje D.G., Lang G.A., Dagg M.J., Whitledge T.E. and Dortch Q. 1999. Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume. *Continental Shelf Research* **19**: 1113-1141.
- Owen R.W., Giancesella-Galvao S.F. and Kunter M.B.B. 1992. Discrete, subsurface layers of the autotrophic ciliate *Mesodinium rubrum* off Brazil. *J. Plankton Res.* **14**: 97-105.
- Proenca L.A.O. 2004. A red water caused by *Mesodinium rubrum* on the coast of Santa Catarina, Southern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography* **52**: 153-161.
- Putt M. 1990. Metabolism of photosynthate in the chloroplast-retaining ciliate *Loboea strobila*. *Marine Ecology Progress Series* **60**: 271-282.
- Shim J.H. and Yang J.S. 1982. The community structure and distribution of phytoplankton of the Kum River Estuary. *J. Oceanol. Soc. Korea* **17**: 1-11.
- Stoecker D.K., Silver M.W., Michaels A.E. and Davis L.H. 1988. Obligate mixotrophy in *Loboea strobila*, a ciliate which retains chloroplasts. *Marine Biology* **99**: 415-423.
- Takishita K., Koike K., Maruyama T. and Ogata T. (2002) Molecular evidence for plastid robbery (kleptoplastidy) in *Dinophysis*, a dinoflagellate causing diarrhetic shellfish poisoning. *Protist* **153**: 292-302.
- Yih W., Myung G.O., Kim H.S., Park J.S. and Cho B.C. 2005. Ingestion of bacteria by the marine photosynthetic ciliate *Mesodinium rubrum*. *Abstracts of IMBC2005 (International Marine Biotechnology Conference 2005)*, June 7-12, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada. p. 110.
- Yih W., Kim H.S., Myung G.O. and Kim Y.G. 2004a. Rapid feeding on live organisms of the phototrophic ciliate, *Mesodinium rubrum* by Farrer's scallop *Chlamys farreri*. *Mar. Biotechnol.* **6**: S142-S145.

- Yih W., Kim H.S., JeongH.J., Myung G.O. and Kim Y.G. 2004b. Ingestion of cryptophyte cells by the marine photosynthetic ciliate *Mesodinium rubrum*. *Aquat. Microb. Ecol.* **36**: 165-170.
- Yih W., Soung K.A., Kim H.S. and Park Y.M. 2000. Toward the establishment of routine laboratory culture of *Mesodinium rubrum*, a phototrophic marine ciliate. *Bulletin of Coastal Research, Kunsan National University* **12**: 61-69.

- Yih W. and Shim J.H. 1997. The planktonic phototrophic ciliate, *Mesodinium rubrum*, as a useful organism for marine biotechnologica applications. *J. Mar. Biotechnol.* **5**: 82-85.

Received 13 September 2005

Accepted 23 September 2005