

## 2003년 하계 장목만 단일정점에서 종속영양 와편모류와 광합성 와편모류 현존량의 시간적 변화

이원제\* · 양운진

경남대학교 환경공학과

(2010년 2월 4일 접수; 2010년 3월 10일 수정; 2010년 3월 31일 채택)

### Temporal Variations of Heterotrophic- and Photosynthetic Dinoflagellates at a Single Station in Jangmok Bay in Summer 2003

Won Je Lee\*, Un-Jin Yang

Department of Environment of Engineering, Kyungnam University, 449 Wolyong-dong, Masan 631-701, Korea

(Manuscript received 4 February, 2010; revised 10 March, 2010; accepted 31 March, 2010)

#### Abstract

We investigated the temporal variations of heterotrophic dinoflagellates (hereafter HDNF) and photosynthetic dinoflagellates (hereafter PDNF) from 14 June to 4 September 2003 at a single station in Jangmok Bay. We took water samples 47 times from 2 depths (surface and bottom layers) at high tide. A total of 63 species were encountered and in general the most abundant genera were *Prorocentrum* and *Protoperidinium*. The abundance of PDNF and HDNF was in the range of  $0.04\sim 55.8\times 10^4$  cells/L and in the range of  $0.01\sim 4.35\times 10^4$  cells/L, respectively. The mean abundance of PDNF was approximately 7 times higher than that of HDNF, and was higher in the surface layer where has enough irradiance for photosynthesis than in the bottom layer. The total dinoflagellate abundance was higher in the NLP (nitrogen limitation period) than in the SLP (silicate limitation period), and the abundance in the hypoxic conditions was similar to that in the normal conditions. The Shannon-Weaver species diversity index were slightly higher in the bottom layer, the SLP and the hypoxic conditions. The PDNF abundance were correlated with temperature, DO, total inorganic nitrogen and phosphate in the whole water column, and the HDNF abundance was significantly correlated with temperature, salinity and DO. This study shows that the dinoflagellate abundance might be affected by abiotic factors such as irradiance, temperature, salinity, DO and the concentrations of inorganic nutrients, and provides baseline information for further studies on plankton dynamics in Jangmok Bay.

**Key Words :** Jangmok Bay, Heterotrophic dinoflagellates, Photosynthetic dinoflagellates, Inorganic nutrients, Hypoxia

#### 1. 서론

와편모류(dinoflagellates)는 황적조식물문에 속하는 진핵생물로 이들의 독특한 외형과 대규모 적조발

생에 따른 피해 때문에 오래 전부터 이들의 형태, 독성 및 생태에 관한 많은 연구가 이루어 졌다. 또한 광합성 와편모류(photosynthetic dinoflagellates, PDNF)는 적조를 일으키는 원인생물로 많이 알려져 있기 때문에 와편모류는 기본적으로 식물플랑크톤으로 분류되어 연구되어져 왔으나 형광현미경의 발달 및 많은 연구를 통하여 와편모류의 50 % 이상이 종속영양 와편모류(heterotrophic dinoflagellates, HDNF)이고 광합성

\*Corresponding author : Won Je Lee, Department of Environmental Engineering, Kyungnam University, Masan 630-701, Korea  
Phone: +82-55-249-2212  
Email: wonje@kyungnam.ac.kr

와편모류의 대부분이 혼합영양 와편모류(mixotrophic dinoflagellates)로 알려졌다(Gaines와 Elbrächter, 1984; Hallegraeff와 Jeffrey, 1984; Jeng 등, 2004; Lessard, 1984; Lessard와 Swift, 1986; Schnepf와 Elbrächter, 1992; Stoecker, 1999). 따라서 이들은 먹이망 상호작용의 관점에서 볼 때 매우 중요한 부유생물로 인식되고 있다. 수서생태계 내에서 이러한 와편모류의 역할을 이해하기 위해서는 이들의 생물량과 종 조성(species composition)을 조절하는 요인이 무엇인지 파악해야만 한다. 이러한 요인으로 수온, 염분, 용존산소, 광도, 수소이온지수, 무기염류와 생물학적 작용(경쟁, 포식) 등을 들 수 있으며 일반적으로 동·식물플랑크톤의 성장과 현존량은 자원의 제한(resource limitation) 또는 포식(predation)에 의해서 조절되는 것(Gasol과 Vaqué, 1993)으로 알려졌다.

최근까지 국내에서 와편모류는 주로 식물플랑크톤으로 분류되어 연구가 이루어졌다(예, 한과 유, 1983a, 1983b; 한국해양연구소, 1998, 1999; Han 등, 1991; Lee와 Yoo, 1990, 1991). 예로, 종속영양 와편모류인 *Noctiluca scintillans*는 최근까지 동물플랑크톤이 아닌 식물플랑크톤으로도 분류되어 연구가 되기도 하였다. 1990년대 중반 이후부터 와편모류는 박(1995), Jeong 등(2004)과 여러 연구자들(정 등, 2000, 2002; Kim과 Jeong, 2004)에 의해서 종속영양 와편모류와 광합성 와편모류로 구분되어 연구가 이루어졌고 이들에 의해 다양한 해역에서 비교적 많은 생태학적 연구가 이루어졌지만 본 연구수역에서는 많은 연구가 이루어지지 않았다(Kim과 Jeong, 2004; Lee, 2007; Lee 등, 2002).

본 연구의 목적은 마산만 내 장목만에서 하계 종속영양 와편모류와 광합성 와편모류의 현존량을 파악하는 것이다. 또한 현존량의 시간적 변동양상에 영향을 주는 요인을 파악하기 위하여 염록소-a, 수온, 염분, 용존산소, 수소이온지수와 무기영양염류를 측정하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구는 거제 장목만에 위치하고 있는 한국해양연구원 남해연구소의 연구부두에서 2003년 7월 14일

부터 2003년 9월 4일까지 총 47회에 걸쳐서 수행되었다(Fig. 1). 장목만의 최대조차(maximal tidal range)는 약 2.2 m이고 조사정점의 평균수심은 약 8.5 m이었다. 장목만 내로 유입되는 강과 하천은 없지만 강우 시 토사가 인근 산으로부터 직접 유입되는 특성을 갖으며 조사 시기 동안에 다소 잦은 강우가 있었다(Lee 등, 2005). 시료는 고조시(day time)에 표층과 저층(바닥 위 0.5 m 지점)에서 각각 버킷(bucket)과 펌프(pump)를 이용하여 채취하였다.

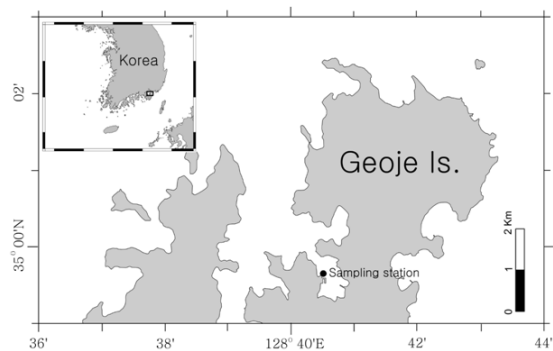


Fig. 1. Map showing the sampling station in Jangmok Bay.

수온과 염분은 현장에서 Ocean Seven 319 CTD (Idronaut)를 이용하여 현장에서 측정하였으며 용존산소는 DO 측정기(YSI, Model 58)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 무기영양염류는 Whatman GF/F로 해수시료를 여과하여 분석하기 전까지 -20 °C의 암 상태에서 보관하였으며 분석은 Solozano(1969)와 Parsons 등(1984)의 방법에 따라 UV Spectrophotometer (HP 8354)와 자동영양염류 측정기기인 UV Recording Spectrophotometer (LACHAT, Quick Chem 8000)을 이용하여 측정하였다.

염록소-a 농도를 측정하기 위하여 해수시료 500~1000 ml을 Whatman GF/F로 거른 후 산화 방지를 위해 MgCO<sub>3</sub>를 첨가하였다. 여과 후 GF/F를 15 ml 원심분리용 튜브에 넣어 냉동 보관하였으며 냉동 보관한 시료는 실험실로 옮겨서 90 % 아세톤을 주입하고, 냉장 보관 상태에서 24시간 동안 용출 시켰다(Parsons et al., 1984). 추출된 용액은 3000 rpm으로 원심분리시킨 다음 상등액만을 취하여 10AU (Turner Design)와

UV spectrophotometer (HP 8354)를 이용하여 농도를 측정하였다. 엽록소-a는 두 개의 크기 군(>20  $\mu\text{m}$ , <20  $\mu\text{m}$ )으로 나누어 측정하였다.

와편모류의 현존량을 파악하기 위하여 해수시료 500 ml를 포르말린으로 고정(최종농도 0.5 %)하여 실험실로 운반하였다. 고정된 시료는 냉장실에서 24 시간 이상 침전시킨 후 상등액은 버리고 침전액은 50 ml 원심분리용 튜브로 옮겨졌다. 튜브로 옮겨진 침전액은 다시 한 번 더 냉장실에서 10~15 ml로 농축되었다. 종속영양 와편모류와 광합성 와편모류를 구분하기 위하여 농축시료 0.5 ml와 DAPI 0.5 ml (최종농도 5  $\mu\text{g/ml}$ )를 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣어 염색시킨 후, UV와 G excitation filters가 장착된 형광현미경 (Leica DMR 2500)을 이용하여 와편모류를 계수하고 동정하였다.

Minitab 통계분석 프로그램을 이용하여 직접상관 분석(direct correlation analysis)을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

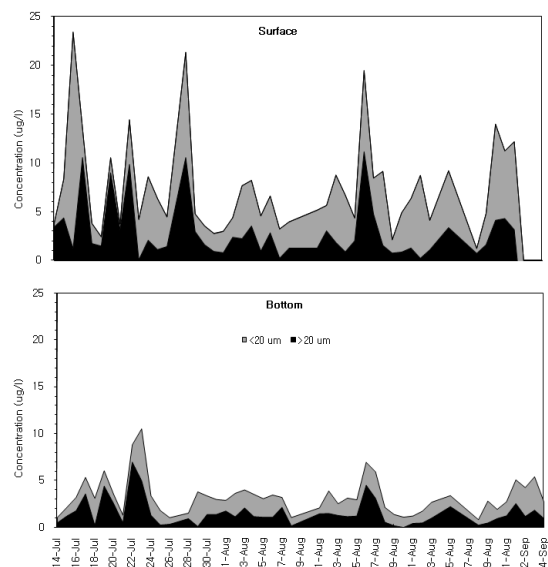
#### 3.1. 물리화학적 환경요인

수온은 18.2~28.8  $^{\circ}\text{C}$  (평균 22.5  $^{\circ}\text{C}$ )의 범위를 보였으며 표층과 저층은 각각 평균 24.5  $^{\circ}\text{C}$ 와 20.5  $^{\circ}\text{C}$ 로 4  $^{\circ}\text{C}$ 의 차이를 보였다. 염분은 18~31 psu (평균 26.0 psu)의 범위를 보였고 표층과 저층에서 각각 23.4 psu와 28.7 psu를 보였다. 본 조사정점으로 유입되는 하천이나 강이 없는 관계로 표층에서 저층 보다 낮은 염분 농도를 보인 것은 조사 시기에 잦은 강우로 인한 담수유입의 영향이었던 것으로 판단된다. 용존산소농도는 0.75~13.1 mg/L (평균 5.87 mg/L)의 범위를 보였으며, 표층과 저층에서 각각 평균 8.48 mg/L와 3.26 mg/L을 보였다. 저층에서 더 낮은 농도를 보였던 이유는 8월 초부터 9월 초까지 저층에서 빈 산소 수괴가 빈번히 형성되었기 때문이었다. 총 무기질산염은 1.48~51.4  $\mu\text{M}$  (평균 14.1  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였고 표층과 저층에서 각각 평균 10.9  $\mu\text{M}$ 와 17.3  $\mu\text{M}$ 의 농도를 보였다. 인산염은 0.15~2.74  $\mu\text{M}$  (평균 0.98  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였고 표층과 저층에서 각각 0.49  $\mu\text{M}$ 와 1.47  $\mu\text{M}$ 을 보였다. 0.96~33.2  $\mu\text{M}$  (평균 11.7  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보인 규산염도 표층과 저층에서 각각 8.57  $\mu\text{M}$ 과 14.9  $\mu\text{M}$

을 보여 무기영양염류는 모두 저층에서 표층보다 높은 농도를 보였다.

#### 3.2. 엽록소-a 분포

조사 시기 동안 측정된 엽록소-a 농도의 분포는 Fig. 2와 같다. 총 엽록소-a 농도는 0.87~23.4  $\mu\text{g/L}$  (평균 5.87  $\mu\text{g/L}$ )의 범위로 조사기간 동안 변동 폭이 상당히 크게 나타났으며, 표층과 저층에서 각각 평균 7.39  $\mu\text{g/L}$ 와 3.33  $\mu\text{g/L}$ 을 보여 표층에서 2배 이상의 높은 농도를 보였다. 총 엽록소-a 농도에서 20  $\mu\text{m}$  이상 크기의 소형 식물플랑크톤 엽록소-a는 1.8~89.0 % (평균 40.4 %)를 차지하였고 20  $\mu\text{m}$  이하 크기의 식물플랑크톤 엽록소-a는 11.0~98.2 % (평균 59.6 %)이었다. 소형 식물플랑크톤의 엽록소-a는 표층에서 평균 38.2 %로 저층(42.6 %)에서 보다 다소 낮았지만 20  $\mu\text{m}$  이하 크기의 엽록소-a는 표층에서 다소 높았다.



**Fig. 2.** Daily variations of size fractionated Chl-a concentrations during the study. <20  $\mu\text{m}$ : Chl-a concentration of phytoplankton less than 20  $\mu\text{m}$ , >20  $\mu\text{m}$ : Chl-a concentrations of phytoplankton larger than 20  $\mu\text{m}$ .

국내 연안 수역에서 20  $\mu\text{m}$  이하 크기 식물플랑크톤 (엽록소-a)의 점유율은 마산만 내 옥계만에서 4.89~71.2 % (Lee, 2007), 황해에서 46 % (Chang et al.,

1987)와 68~83 % (최 등, 1988), 경기만에서 28~92 % (정과 박, 1988; Lee and Choi, 2002), 천수만에서 39~93 % (신 등, 1990)와 영광 연안 수역에서 35~92 % (강과 최, 2002)가 보고되었다. 본 연구 결과 값도 기 보고된 값들의 범위 내에 포함되었지만 이러한 값들은 단기 및 장기 조사를 포함하고 있어 단편적으로 서로를 비교하기는 어려운 것으로 판단된다.

### 3.3. 외편모류 분포 및 종 다양성

조사기간 동안 총 63종의 외편모류가 동정되었으며 조사 시기별 총 외편모류 현존량의 10 % 이상 차지한 종은 표층에서 19종과 저층에서 21종으로 나타났다(Table 1).

총 외편모류의 현존량 분포는  $0.01\sim 55.8 \times 10^4$  cells/L (평균  $3.71 \times 10^4$  cells/L)의 범위를 보였고 가장 우점한 속(genus)은 *Prorocentrum*과 *Protoperidinium*이었다. 수층별로는 표층과 저층에서 각각 평균  $6.83 \times 10^4$  cells/L과  $0.45 \times 10^4$  cells/L의 현존량을 보여 표층에서 약 15배 이상 높은 현존량을 보였고 이러한 수층 간 현존량 차이는 표층에서 광합성 외편모류의 대량 출현에 의한 것으로 나타났다(Fig. 2). 조사기간 중 단 한 시기라도 10,000 cells/L 이상의 비교적 높은 현존량을 보인 종은 표층에서 6종(*Alexandrium* sp., *Ceratium fusus*, *Heterocapsa triquetra*, *Prorocentrum micans*, *Prorocentrum minimum*, *Prorocentrum triestium*)이 출현하였으나 저층에서는 전혀 없었다. *Alexandrium* sp.는 주로 7월 중에 지속적으로 나타났으나 8월에 들어서서는 출현이 없었고 *Heterocapsa triquetra*도 *Alexandrium* sp.와 유사한 분포양상을 보였다. *Ceratium fusus*의 경우는 8월 16일~8월 19일 사이에만 10,000 cells/L 이상 집중적으로 출현하였다. *Prorocentrum micans*는 7월 26일부터 출현하기 시작하여 8월 초 약 1주일간 관찰되지 않았다가 8월 8일 이후 다시 지속적으로 출현하였다. 조사기간 동안 지속적으로 출현한 종은 *Prorocentrum minimum*과 *P. triestium*으로 나타났으며 가장 우점한 종들이었다.

#### 3.3.1. 광합성 외편모류와 종속영양 외편모류

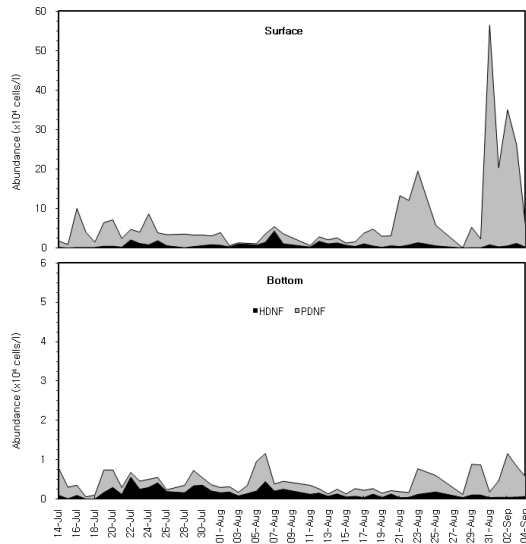
본 연구에서는 외편모류를 영양 섭취 방법에 따라 광합성 외편모류(PDNF)와 종속영양 외편모류(HDNF)

**Table 1.** Dominant species over 10 % of total dinoflagellate abundance during the study

Species	Surface	Bottom	
	>10 %	>10 %	Hypoxia
<i>Akashiwo sanguinea</i>	*		
<i>Alexandrium</i> sp.	*	*	*
<i>Ceratium furca</i>		*	*
<i>Ceratium fusus</i>	*	*	*
<i>Dinophysis acuminata</i>	*		
<i>Gonyaulax</i> sp1	*		
<i>Gonyaulax</i> sp2		*	
<i>Gyrodinium</i> sp.		*	*
<i>Heterocapsa triquetra</i>	*		
<i>Katodinium</i> sp.		*	
<i>Mesocena</i> sp.	*	*	
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>		*	*
<i>Polykrikos swarzii</i>		*	
<i>Prorocentrum micans</i>	*	*	*
<i>Prorocentrum minimum</i>	*	*	*
<i>Prorocentrum triestium</i>	*	*	*
<i>Protoperidinium acutum</i>		*	
<i>Protoperidinium bipes</i>	*	*	*
<i>Protoperidinium breve</i>		*	
<i>Protoperidinium brevipes</i>		*	
<i>Protoperidinium claudicans</i>	*		
<i>Protoperidinium leonis</i>		*	
<i>Protoperidinium nipponicum</i>	*		
<i>Protoperidinium pellucidum</i>	*	*	*
<i>Protoperidinium roseum</i>	*		
<i>Protoperidinium steinii</i>		*	
<i>Protoperidinium</i> sp.1		*	*
<i>Protoperidinium</i> sp.2	*	*	*
<i>Protoperidinium</i> sp.3	*		
<i>Pyrophacus horologicum</i>	*		
<i>Scrippsiella trichoidea</i>	*		
Total	19	21	12

로 구분하였다. PDNF와 HDNF의 현존량은 각각  $0.04\sim 55.8 \times 10^4$  cells/L (평균  $3.26 \times 10^4$  cells/L)과  $0.01\sim 4.35 \times 10^4$  cells/L (평균  $0.45 \times 10^4$  cells/L)을 보여 PDNF가 약 7배 높은 현존량을 보였다(Fig. 3). 수층별로는 표층에서 PDNF가 평균  $6.08 \times 10^4$  cells/L를 보여 HDNF에 비해 약 8배 높았고 저층에서는 약 3배 높았다. 표층에서 우점그룹이 규조류에서 외편모류로 전환되는 시기인 8월 21일 이후에는 PDNF가 100,000 cells/L 이상의 높은 현존량을 보였으며 우점

종으로는 *Prorocentrum minimum*과 *Prorocentrum triestium*이 출현하였다. PDNF는 광량이 풍부한 표층에서 총 와편모류 현존량에 높은 기여율(표층 76.4%, 저층 62.4%)을 보였다.

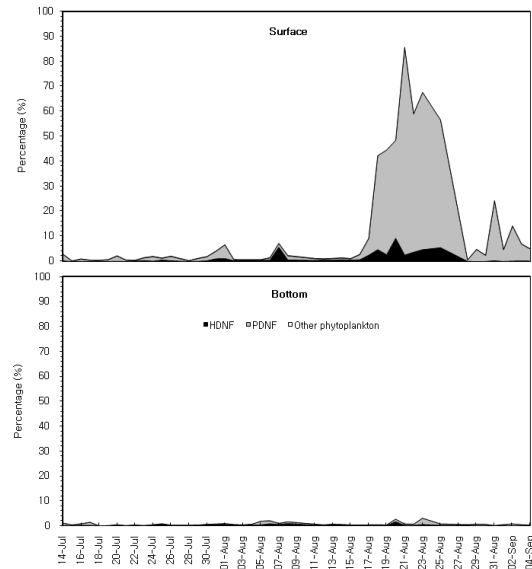


**Fig. 3.** Daily variations of PDNF and HDNF in abundance during the study. PDNF: photosynthetic dinoflagellates, HDNF: heterotrophic dinoflagellates.

박(1995)은 하계에 국내 7개 만에서 본 조사결과에 비해 높은 PDNF 현존량 범위( $0.01 \sim 1,399 \times 10^4$  cells/L)를 보고하였다. 박(1995)의 조사 시기에는 와편모류에 의한 적조가 발생했던 관계로 적조 발생 시기의 현존량을 제외하면  $0.01 \sim 57.7 \times 10^4$  cells/L의 현존량 범위를 보이게 되어 본 연구결과와 유사하였다.

국내 연안해역에서 HDNF 현존량은 마산만 속천항에서  $0.66 \sim 16 \times 10^4$  cells/L (평균  $7.9 \times 10^4$  cells/L) (Lee et al., 2002), 마산만 내 옥계만  $0 \sim 55.8 \times 10^4$  cells/L (평균  $1.20 \times 10^4$  cells/L) (Lee, 2007), 경기만  $0.01 \sim 4.75 \times 10^4$  cells/L (평균  $0.90 \times 10^4$  cells/L) (양과 최, 2003), 인천항 평균  $25 \times 10^4$  cells/L (Lee et al., 2002), 새만금 지역  $0.10 \sim 1.1 \times 10^4$  cells/L (정 등, 2002)과 전남 고흥지역에서  $0.2 \sim 4.5 \times 10^4$  cells/L (정 등, 2000)이 보고되었다. 본 연구결과도 이러한 기존의 연구결과와 유사한 범위 내에 있는 것으로 나타났다.

와편모류가 전체 식물플랑크톤 현존량에서 차지하는 비율은 0.11~83.2%의 범위를 보였으며 수층별로는 표층에서 0.17~85.9% (평균 11.3%)의 비율을 보였고 이중 PDNF와 HDNF는 각각 0.15~83.2% (평균 10.1%)와 0~9.31% (평균 1.18%)을 보였다(Fig. 4). 조사 전반기에는 규조류에 의한 우점으로 와편모류가 차지하는 비율이 현저히 낮았으나 8월 중순이후 규조류의 감소와 PDNF의 증가로 인해 와편모류가 차지하는 비율이 증가하였다. 저층에서는 0.11~5.12% (평균 0.82%)의 비율을 보였고 PDNF와 HDNF는 각각 0.01~5.05% (평균 0.55%)와 0~1.65% (평균 0.27%)를 보여 표층에 비해 상당히 낮은 점유율을 보였다.



**Fig. 4.** Composition of phytoplankton community during the study.

### 3.3.2. 영양염 제한시기에 따른 분포

본 조사와 동일한 시기에 이루어진 Lee 등(2005)의 연구에서 표층수의 무기영양염류 비(ratio)를 분석하여 조사 시기를 규산염 제한시기(SLP, silicate limitation period, 7월14일~8월12일)와 질산염 제한시기(NLP, nitrogen limitation period, 8월13일~9월4일)로 구분하였다. SLP 시기에 PDNF의 현존량은 평균  $2.79 \times 10^4$  cells/L로 나타났으며 다른 뚜렷한 분포

양상은 관찰되지 않았다. 반면 NLP 시기에 PDNF의 현존량은 평균  $9.70 \times 10^4$  cells/L을 보여 SLP 시기에 비해 높은 현존량을 보였다. 이는 PDNF가 NLP 시기에 저층으로 수직이동하여 영양염류를 섭취하고 생장함으로써 나타난 현상으로 사료된다. 기존의 연구 (Anderson과 Stolzenbach, 1985; Olli, 1999; Park 등, 2001)에 의하면 와편모류는 수직이동을 통하여 무기 영양염류를 취할 수 있어 질소가 제한된 환경에서도 우점 할 수 있는 것으로 알려졌다. 또한 이러한 결과는 무기영양염류의 농도와 비가 식물플랑크톤의 생물량 및 군집을 조절하고 우점종을 결정할 수 있다는 기존 연구결과(Dederen, 1992; Del Amo 등, 1997; Diaz 등, 2001; Hecky와 Kilham, 1988; Howarth 등, 1988; Ryther와 Dunstan, 1971)를 일부 뒷받침 하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 무기영양염류의 농도가 저층에서 표층보다 상당히 높게 측정되었지만 PDNF의 현존량은 상당히 낮게 나타났다. 이는 저층에서는 무기 영양염류가 풍부한 관계로 표층에서와 같이 PDNF의 성장 제한요소로 작용하지 않고 표층에 비해 낮은 광도와 수온과 같은 환경요인이 성장 제한요소로 작용하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.

### 3.3.3. 빈 산소 수괴 형성에 따른 분포

조사기간 동안 저층에서 빈 산소 수괴(3 mg/L 이하)가 두 차례 장기간 형성되었다(1차: 8월 5일~8월 16일과 2차: 8월 25일~9월 3일). 총 와편모류 현존량은 1차와 2차 시기에 각각 평균  $0.44 \times 10^4$  cells/mL (HDFN  $0.18 \times 10^4$  cells/mL, PDNF  $0.26 \times 10^4$  cells/mL)와  $0.54 \times 10^4$  cells/mL (HDFN  $0.08 \times 10^4$  cells/mL, PDNF  $0.56 \times 10^4$  cells/mL)을 보였다. 빈 산소 수괴가 형성되지 않았던 시기에는 평균  $0.40 \times 10^4$  cells/mL (HDFN  $0.17 \times 10^4$  cells/mL, PDNF  $0.23 \times 10^4$  cells/mL)을 보여 빈 산소 수괴 형성시보다 약간 낮은 생물량을 보였지만 현저한 차이는 보이지 않았다.

빈 산소 수괴 형성 시에 총 12종의 와편모류가 현존량의 10% 이상을 점유하였다(Table 1). 1차 시기에 가장 빈번하게 출현하였던 종은 *Oxyphysis oxytoxoides*로 최대 72% (평균 25.4%)의 점유율을 보였으며, 이 종은 7월 31일부터 높은 점유율을 보였다가 1차 빈 산소 수괴 형성이 끝난 이후 점유율이 다

시 낮아졌다. 이러한 양상은 2차 시기에도 영향을 미치었지만 1차 시기에 비해 낮은 점유율을 보였다. 2차 시기에는 우점종이 *Ceratium fusus*, *Prorocentrum minimum*과 *Prorocentrum triestium*으로 대체되었으며 이들은 각각 평균 14.1%, 26.6%와 26.8%의 점유율을 보였다. 이러한 우점종과 용존산소농도와 유의성 있는 상관성은 보이지 않았지만 이러한 종들은 넓은 용존산소농도 범위 내에서 서식할 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.3.4. 종 다양성 지수

와편모류의 종 다양성 지수는 전반적으로 표층보다는 저층에서 높게 나타났다(Table 2). 이러한 원인은 표층에서는 현존량이 높았지만 소수 종들이 우점하여 출현하였기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 SLP 시기에서 NLP 시기로 전환될 때 식물플랑크톤 우점그룹이 규조류에서 와편모류로 전환되면서 소수 종에 의한 와편모류 현존량의 증가로 낮은 종 다양성 지수를 보였다. 저층에서 와편모류 다양성지수는 빈 산소 수괴시기에 평상시 보다 다소 높게 나타났다. 따라서 저층에서 용존산소농도는 현존량 보다는 와편모류 군집의 종 조성 변화에 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다.

**Table 2.** Species diversity of dinoflagellates during the study. TDNF: total dinoflagellates, PDNF: photosynthetic dinoflagellates, HDFN: heterotrophic dinoflagellates

	TDNF	PDNF	HDFN
Surface layer	1.50±0.49	1.04±0.39	1.13±0.66
Bottom layer	2.06±0.63	1.17±0.44	1.99±0.57
Silicate Limitation Period	1.60±0.38	1.13±0.43	0.93±0.61
Nitrogen Limitation Period	1.37±0.59	0.93±0.30	1.40±0.63
Normal condition	2.02±0.74	1.13±0.48	1.92±0.70
Hypoxia	2.12±0.40	1.24±0.38	2.10±0.27

### 3.4. 와편모류 현존량과 환경요인과의 관계

일반적으로 동·식물플랑크톤의 분포나 성장은 물리·화학적 환경요인뿐만 아니라 먹이원의 제한(resource

**Table 3.** Pearson's correlation coefficients between organisms and environmental factors. Significant correlations were defined as \*P<0.05, \*\*P<0.01, \*\*\*P<0.001. TIN: total inorganic nitrogen

	Whole water column		Surface layer		Bottom layer	
	PDNF	HDFN	PDNF	HDFN	PDNF	HDFN
Temp.	0.283**	0.488***	-	0.300*	-	-0.435**
Salinity	-	-0.476***	0.365*	-	-	-
DO	0.253*	0.404***	-	-	-	-
pH	-	0.417***	-	-	-	-0.317*
Chl-a	0.310**	-	-	-	-	-
TIN	-0.231*	-	-	-	-	0.480***
Phosphate	-0.258**	-0.382***	-	-	-	-
Silicate	-	-0.237*	-	-	-	0.468**

limitation)과 포식(top-down control)에 의해서 영향을 받는 것으로 알려졌다. 본 연구에서는 포식실험을 수행하지 않은 관계로 환경요인과의 연관성을 분석하였으며 분석된 상관계수(Pearson's correlation coefficients) 값은 Table 3에 제시하였다. 전반적으로 수층별 상관계수 값과 수괴전체를 이용한 상관계수 값이 다소 상이하게 나타났다. 수괴전체의 상관분석 결과 총 외편모류, HDFN와 PDNF의 현존량은 수온과 양의 상관성을 보였고 염분과는 HDFN만이 음의 상관성을 보였다. 총 외편모류는 용존산소농도와도 양의 상관성을 보였고 HDFN는 저층에서 수소이온지수와 음의 상관성을 보였다. 수괴전체에서 PDNF는 무기 영양염류(TIN과 P)와 음의 상관성을 보였던 반면 수층별로는 특별한 상관성을 보이지 않았다. 또한 본 연구에서 출현한 대부분의 PDNF는 20  $\mu\text{m}$  이상 크기의 식물플랑크톤이었던 관계로 20  $\mu\text{m}$  이상의 엽록소-a 농도와 높은 상관성을 보일 것으로 기대하였지만 유의한 상관성은 보이지 않았다. 이는 조사 시기 동안 지속적으로 출현한 규조류와는 달리 PDNF는 특정시기에만 우점 출현하여 엽록소-a 농도와 시간적 변화 양상이 일치하지 않았기 때문이었던 것으로 판단된다.

HDFN는 박테리아와 식물플랑크톤의 포식자, 다른 동물플랑크톤의 알이나 유생의 포식자, 부유후생동물의 먹이, 다른 외편모류의 포식자 또는 중간 상호 포식하는 것으로 알려져 있다(Fenchel과 Larsson, 1988; Jeong, 1994; Jeong 등, 1997; Latz와 Jeong, 1996;

Stoecker와 Sanders, 1985). 따라서 먹이생물인 식물플랑크톤(엽록소-a)과 유의한 상관성을 기대하였지만 유의한 값을 보이지 않았다. 따라서 이러한 결과로 판단할 때 본 연구수역에서 HDFN는 소형 및 극미소 식물플랑크톤의 주 포식자로서 작용하지는 않았을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2008년 경남대학교 부설연구소 지원 연구비를 통해 수행되었습니다. 본 연구에 많은 도움을 준 한국해양연구원 남해연구소의 신경순 박사와 팀원들에게도 감사를 전합니다.

### 참고 문헌

- 강연식, 최중기, 2002, 고리, 월성, 울진 및 영광 연안해역에서 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 II. 현존량 분포 및 환경요인들 (1992-1996), 한국해양학회지 '바다', 7, 108-128.
- 박남주, 1995, 한국 연안의 미세생물 먹이망 내에서 종속 영양 외편모류의 역할에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교.
- 신윤근, 심재형, 조준성, 박용철, 1990, 천수만 식물플랑크톤의 상대적 중요성: 종조성, 개체수 및 일차생산력, 한국해양학회지, 25, 217-228.
- 양은진, 최중기, 2003, 경기만 수역에서 미세생물 군집의 계절적 변동 연구 II. 미소형 및 소형 동물플랑크톤,

- 한국해양학회지 '바다', 8, 78-93.
- 정경호, 박용철, 1988, 서해 경기만이 기초생산력과 질소계 영양염의 재생산에 관한 연구, 한국해양학회지, 23, 194-206.
- 정해진, 박종규, 김재성, 김성택, 윤주이, 김수경, 박용민, 2000, 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 3. 1997년도 종속영양성 외편모류와 섬모류의 시공간적 변화, 한국해양학회지 '바다', 5, 37-46.
- 정해진, 유영두, 김재성, 2002, 전북 새만금 남쪽해역의 유해성 적조 연구 발생연구 2. 1999년도 여름-가을 종속영양성 외편모류와 섬모류의 시간적 변화, 한국해양학회지 '바다', 7, 140-147.
- 최중기, 박용철, 김용철, 이영철, 정창수, 손승규, 황학진, 한범석, 1988, 서해 연안어장의 생산력 조사, 수진연구보고, 42, 143-168.
- 한국해양연구소 1998, 진해 마산만 수질환경 관리모델 개발 (II), BSPE 98703-01-1147-2.
- 한국해양연구소, 1999, 진해 마산만 수질환경 관리모델 개발 (III), BSPE 99750-00-1238-2.
- 한명수, 유광일, 1983a, 진해만의 쌍편모조류에 관한 분류학적인 연구. 제1보: 유각류, 해양연구소보, 5, 37-47.
- 한명수, 유광일, 1983b, 진해만의 쌍편모조류에 관한 분류학적인 연구. 제2보: 페르디니움목, 해양연구소보, 5, 49-67.
- Anderson, D. M., Stolzenbach, K. D., 1985, Selective retention of two dinoflagellates in a well-mixed estuarine embayment the importance of diel vertical migration and surface avoidance, Mar. Ecol. Prog. Ser., 25, 39-50.
- Chang, M., Shim, J. H., Huh, H. T., 1987, Nanoplankton of the Korean coastal waters, Ocean Res., 9, 7-14.
- Dederen, L. H. T., 1992, Marine eutrophication in Europe: similarities and regional differences in appearance, Sci. Tot. Environ. (Suppl.), 6, 663-672.
- Del Amo, Y., Pape, O. L., Treguer, P., Queguiner, B., Menesguen, A., Aminot, A., 1997, Impacts of high-nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. I. Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom-dominated phytoplankton of the Bay of Brest (France), Mar. Ecol. Prog. Ser., 161, 213-224.
- Diaz, F., Raimbault, P., Boudjellal, B., Garcia, N., Moutin, T., 2001, Early spring phosphorus limitation of primary productivity in a NW Mediterranean coastal zone (Gulf of Lions), Mar. Ecol. Prog. Ser., 211, 51-62.
- Fenchel, T., Larsson, P. R., 1988, The functional biology of *Strombidium sulcatum*, a marine oligotrich ciliate (Ciliophora, Oligotrichina), Mar. Ecol. Prog. Ser., 48, 1-15.
- Gaines, G., Elbrächter, M., 1984, Heterotrophic nutrition, in: Taylor, F. J. R. (ed.), The biology of dinoflagellates, Blackwell, Oxford, 224-268.
- Gasol, J. M., Vaqué, D., 1993, Lack of coupling between heterotrophic nanoflagellates and bacteria: a general phenomenon across aquatic systems? Limnol. Oceanogr., 38, 657-665.
- Hallegraeff, G. M., Jeffrey, S. W., 1984, Tropical phytoplankton species and pigments of continental shelf waters of North and North-west Australia, Mar. Ecol. Prog. Ser., 20, 59-74.
- Han, M. S., Kim, S. W., Kim, Y. O., 1991, Influence of discontinuous layer on plankton community structure and distribution in Masan Bay, Korea, Bull. Korean Fish. Soc., 24, 459-471.
- Hecky, R. E., Kilham, P., 1988, Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment, Limnol. Oceanogr., 33, 796-802.
- Howarth, R. W., Marino, R., Cole, J. J., 1988, Nitrogen fixation in freshwater, estuarine and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls, Limnol. Oceanogr., 33, 688-701.
- Jeong, H. J., 1994, Predation effects of the calanoid copepod *Acartia tonsa* on a population of the heterotrophic dinoflagellate *Proto-peridinium* cf. *divergens* in the presence of co-occurring red-tide dinoflagellate prey, Mar. Eco. Prog. Ser., 111, 87-97.
- Jeong, H. J., Lee, C. W., Yih, W. H., Kim, J. S., 1997, *Fragilidium* cf. *mexicanum*, a thecate mixotrophic dinoflagellate which is prey for and a predator on co-occurring thecate heterotrophic dinoflagellate *Proto-peridinium* cf. *divergens*, Mar. Ecol. Prog. Ser., 151, 299-305.
- Jeong, H. J., Yoo, Y. D., Kim, J. S., Kim, T. H., Kim, J. H., Kang, N. S., Yih, W., 2004, Mixotrophy in the phototrophic harmful alga *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae): prey species, the effects of prey concentration, and grazing impact, J. Eukary.



- Microbiol., 51, 563-569.
- Kim, J. S., Jeong, H. J., 2004, Feeding by the heterotrophic dinoflagellates *Gyrodinium dominans* and *G. spirale* on the red-tide dinoflagellate *Prorocentrum minimum*, Mar. Ecol. Prog. Ser., 280, 85-94.
- Latz, M. I., Jeong, H. J., 1996, Effects of red tide dinoflagellate diet and cannibalism on the bioluminescence of the heterotrophic dinoflagellates *Protoperidinium* spp, Mar. Ecol. Prog. Ser., 132, 275-285.
- Lee, J. B., Yoo, K. I., 1990, Dynamics and seasonal succession of dinoflagellate community in Masan Bay, Korea, J. Korean Soc. Oceanogr., 25, 106-116.
- Lee, J. B., Yoo, K. I., 1991, Distribution of dinoflagellate cysts in Masan Bay, Korea, J. Korean Soc. Oceanogr., 26, 304-312.
- Lee, W. J., 2007, Temporal distribution of pico- and nanoplankton at a station in Okkye Bay, J. Environ. Sci., 16, 855-863.
- Lee, W. J., Choi, J. K., 2000, The role of heterotrophic protists in the planktonic community of Kyeonggi Bay, Korea, J. Korean Soc. Oceanogr., 35, 46-55.
- Lee, W. J., Park, N. J., Choi, J. K., 2002, Abundance of heterotrophic- and photosynthetic dinoflagellates and factors controlling their abundance in Korean coastal waters during summer 1994, J. Korean Soc. Oceanogr., 37, 201-211.
- Lee, W. J., Shin, K., Jang, P. G., Jang, M. C., Park, N. J., 2005, Summer pattern of phytoplankton distribution at a station in Jangmok Bay, Ocean Science Journal, 40, 109-117.
- Lessard, E. J., 1984, Oceanic heterotrophic dinoflagellates: distribution, abundance and role as microzooplankton, Ph. D. Dissertation, University of Rhode Island, USA.
- Lessard, E. J., Swift, E., 1986, Dinoflagellates from the North Atlantic classified as phototrophic or heterotrophic by epifluorescence microscopy, J. Plankton Res., 8, 289-296.
- Olli, K., 1999, Diel vertical migration of phytoplankton and heterotrophic flagellates in the Gulf of Riga, J. Mar. Syst., 23, 145-163.
- Park, J. G., Jeong, M. K., Lee, J. A., Cho, K. J., Kwon, O. S., 2001, Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae), during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea, Phycologia, 40, 292-297.
- Parsons, T. R., Maita, Y., Lalli, C. M., 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press.
- Ryther, J. H., Dunstan, W. M., 1971, Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment, Science, 171, 1008-1013.
- Schnepf, E., Elbrächter, M., 1992, Nutritional strategies in dinoflagellates: a review with emphasis on cell biological aspects, Eur. J. Protistol., 28, 3-4.
- Solozano, L., 1969, Determination of ammonia in natural waters by the phenylhypochlorite method, Limnol. Oceanogr., 14, 799-801.
- Stoecker, D. K., 1999, Mixotrophy among dinoflagellates, J. Euk. Microbiol., 46, 397-401.
- Stoecker, D. K., Sanders, N. K., 1985, Differential grazing by *Acartia tonsa* on a dinoflagellate and a tintinnid, J. Plankt. Res., 7, 85-100.