

Article

2006-2007 기간 중 신생 새만금호 ‘만경대교’ 정점에서 식물플랑크톤 군집 급변에 대한 연구

장건강 · 박종우 · 박장호 · 하 나 · 이원호*

군산대학교 해양과학대학
(573-701) 전라북도 군산시 미룡동 산 68

Drastic Change of Phytoplankton Community at the Station ‘Mankyeong Bridge’ of the New Saemankeum Lake during 2006-2007

Keon Gang Jang, Jong Woo Park, Jang Ho Park, Na Ha, and Wonho Yih*

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

Abstract : Drastic changes in the water quality and phytoplankton community of the new Saemankeum Lake during the first decade following the construction of the Saemankeum Sea Wall has been considered to be unavoidable. Input of eutrophicated water through the Mankyeong River and Dongjin River might produce more direct effects on the water quality and phytoplankton community, which lead us to launch a long-term semi-weekly investigation at the “Mankyeong Bridge” monitoring point to resolve its short-term effect as well as long-term stabilization of the ecosystem in the new Saemankeum Lake. During 15 months starting from June 2006, the water temperature varied in accordance with the typical seasonal variations in temperate on the coasts, and no significant daily variations evoked by tidal cycle could be detected. However, there was an inverse relationship between seasonal precipitation and salinity even though the range in annual variation was drastically reduced right after the construction of the Saemankeum Sea Wall. Species richness in the phytoplankton community was also reduced due to the narrowed annual range of salinity, which would eliminate the mid-high salinity species from the Mankyeong Bridge monitoring point. Similarly, species diversity was decreased with increased dominance of the phytoplankton community after the construction. Between the two summer seasons during the present study, species diversity was higher in 2007 than in 2006, which might indicate the early stage of a gradual stabilization in the ecosystem including the phytoplankton community at the monitoring station. The phytoplankton community thus needs to be monitored on a long-term basis to identify indirect signals that can be used to assess the stability of the ecosystem in the young Saemankeum Lake.

Key words : Saemankeum Lake, community index, phytoplankton, temporal variation, semi-weekly sampling

1. 서 론

새만금 방조제는 1991년 11월에 시작하여 2006년 4월 제2호 방조제 끝물막이 공사에 성공하여 완공되었다. 방

조제 완공 이후 초기 수년 간, 방조제 내측과 외측의 급격한 환경변화가 예상된다. 이와 관련된 기존의 연구로는, 새만금 사업 추진에 따라 담수호인 새만금호 조성 시 우려되는 수질부영양화에 따른 식물플랑크톤 대번식(algal bloom) 등에 대비하기 위한 사전 조사(문 등 2002), 새만금 담수계의 수질관리, 해양환경 변화연구, 환경복원 기술

*Corresponding author. E-mail : ywonho@kunsan.ac.kr

개발 및 환경계측과 환경친화적 자원 활용 기술 개발에 중점을 둔 연구(새만금환경연구센터 2000, 2001), 새만금 해양환경보전 대책을 위한 연구(김 등 2003), 그리고 새만금수역 수질환경조사 및 관리 연구(농업기반공사 2004) 등이 있다. 이전의 연구 결과, 방조제가 완공될 경우 새만금호의 식물플랑크톤 군집은 급변할 것이며, 특히 주요 담수 유입 하천인 만경강·동진강을 통해 유입된 육상기원 영양염의 체류시간이 증가하고, 이에 따라 신생호 내부에 유해성 적조생물이 대번식할 가능성 등이 제기된 바 있다(김 등 2003). 따라서, 방조제 완공을 전후한 수년에 걸쳐 식물플랑크톤 군집의 장주기적인 변동을 파악하여, 새만금호 생태계 변화양상에 대한 지시인자로 활용할 필요가 있다. 본 연구에서는 신생 새만금호 내의 “만경대교” 정점에 대한 매주 1~2회씩의 현장조사를 통해 식물플랑크톤 군집의 단주기적인 변동을 정밀하게 파악하여, 향후 지속적으로 진행될 신생 새만금호 및 향후 유사하게 조성될 수 있는 신생호 생태계 천이 연구를 위한 초기 기준자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

식물플랑크톤 종조성 및 현존량 분포

신생 새만금호로 만경강 수가 유입되는 지점인 “만경대교”에 고정점을 설정하여(Fig. 1), 2006년 6월부터 2007년 8월까지 매주 1~2회씩 현장조사를 수행하였다. 식물플랑크톤 군집분석을 위해, 표층수를 500 ml 채취하여 Lugol's 고정액으로 고정한 시료를 확보하고, 염분과 수온의 현장 측정에는 수온-염분 측정기(YSI, Model 30)를 이용하였다. 고정된 식물플랑크톤 시료를 일주일 이상 암실에서 정치한 후, 미세 siphon으로 상등액을 제거하여 시료를 침전-농축하였다. 정량 분석은 Sedgwick-Rafter 계수판에 시료

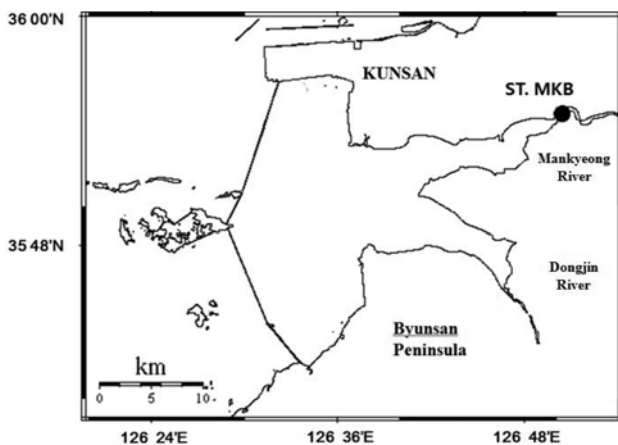


Fig. 1. Map showing the location of Station Mankyeong Bridge (ST. MKB).

1 ml를 담고, 광학현미경(Olympus BH-2)의 저배율(200배)에서 구한 값을 단위 체적 당 세포 수(cells ml⁻¹)로 환산하여 수행하였다.

식물플랑크톤 군집 분석

식물플랑크톤의 군집분석은 출현 종수와 현존량을 근거로 Shannon-Wiener(1963) 종다양성 지수(H', species diversity index)와 Pielou(1966)의 우점도지수(C, dominance index)를 계산하여 수행하였으며, 이 때 사용된 식은 각각 다음과 같다.

$$H' = -\sum P_i \times \log P_i$$

$$C = \sum n_i(n_i - 1) / N(N - 1)$$

여기서, P_i는 전체 개체 수(N)에서 i번째 종이 차지하는 비율(n_i/N)이며 n_i는 i번째 종의 개체수를 의미한다.

3. 결과 및 토의

수온 및 염분

수온은 연평균 18.9°C이었으며, 연중 29.5°C의 연고차를 보이며 하계에 높고 동계에 낮아지는 온대역의 전형적인 계절적 주기성을 나타내었다. 하계의 최고치는 8월에 32.8°C와 동계의 최저치는 1월에 3.3°C를 기록하여, 전체적으로 수온의 감소 기간(8월-1월)이 수온의 증가기간(1월-8월)에 비해 짧은 편이었다(Fig. 2). 따라서 방조제 완공 이전과 비교하여 완공 후에 일평균 수온의 연중 변화는 변동이 없으나(Fig. 2), 일중 조석주기의 영향에 의한 주기적인 일중 수온변동 요인은 거의 100% 제거되었다 하겠다(김 등 2009). 따라서 저염을 선호하는 혐염성의 식물플랑크톤 종들의 급격한 천이가 예상된다. 염분은 평균 0.7 psu로, 0~8.6 psu 범위를 기록하였다. 전체 조사기간을 통하여, 2006년 추계-동계에 나타난 3회의 예외적으로 높은 염분을 제외한 모든 경우에 2.5 psu 이하의 염분임을 확인하였다(Fig. 3). 본 연구를 통해 확인된 염분의 연중 변동 경향은 새만금 방조제 완공 직후 나타난 초기의 결과로서, 생태적으로 매우 중요한 의미를 갖는다. 방

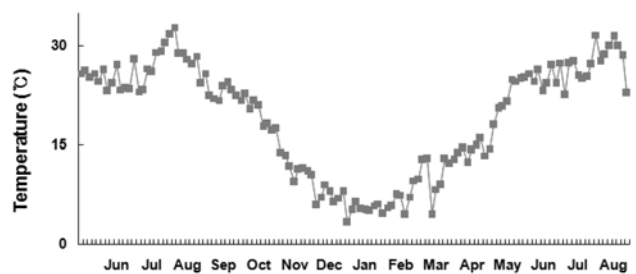


Fig. 2. The variation of water temperature (°C) at ST. MKB from June 2006 to August 2007.

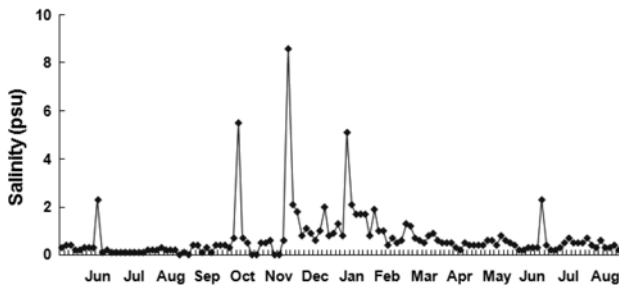


Fig. 3. The variation of salinity (psu) at ST. MKB from June 2006 to August 2007.

조제 전체 구간의 60%가 축조된 시점에서 조사한 “만경대교 정점”의 염분(김 등 2009)은 연간 0.8~23.9 psu의 범위에서 강수량과 역의 관계를 나타내며 계절적으로 변동하였다. 하루 중의 변화폭도 최대 24.9 psu까지 기록되어(김 등 2009; 2000년 7월 조사에서, 24시간 동안의 7회 연속 측정결과 0.6~25.5 psu의 범위로 변동함), 방조제 공사가 60% 진행된 상황에서도 조사정점에는 계절 주기적인 연중변화와 조석주기에 따른 일중변화가 뚜렷하였다. 방조제 완공 이전의 주기적이고 대폭적인 염분의 변동성이 완공 이후 크게 위축됨에 따라, 연중 저염-담수성의 식물플랑크톤 군집으로 주요군이 대체되고, 일중의 염분변동이 거의 없는 혐염성 환경을 선호하는 종들이 우세하게 될 것으로 예상된다. 종합하면, 만경대교 정점에서는 염분과 수온 변동성의 급변에 따라 하구역 식물플랑크톤 군집의 특징이 전혀 없는 저염-담수 신생호의 군집으로의 변화가 불가피하게 되었다.

식물플랑크톤 종조성

연구기간 중 새만금호 담수 유입 지점인 만경대교 정점에서 출현한 식물플랑크톤은 118종류로 나타났다. 출현종을 분류군별로 살펴보면 녹조류 52종(43%), 규조류 34종(29%), 남조류 21종(18%)이 높은 종조성 비율을 나타냈으며, 이외에도 외편모류 6종(5%), 갈색편모류 3종(3%), 유글레나류 2종(2%)이 차지하였다. 방조제 착공 이전, 심 등(1991)에 의하면 만경강 하구역 식물플랑크톤 종수는 160종, 정 등(1992)은 만경강 상류에서 식물플랑크톤을 214종으로 분류하였으며 다른 분류군에 비해 녹조류를 다양하게 보고하였다. 또한 방조제의 60%가 구축된 시점인 1999~2000년도의 만경대교 정점에서 식물플랑크톤의 주기적인 변동을 연구한 김 등(2009)은 377종류를 보고하였다. 이전의 연구에 비해 종수가 급감한 것은 연구지점인 만경대교 정점의 염분 변동 폭(연간 0.8~23.9 psu 범위 및 일중 24.9 psu 변동; 김 등 2009)이 담수-기수-해수 종들의 시공간적 분포를 허용하던 조건에서, 본 연구기간에는 담수-저염 종만이 서식할 수 있는 조건으로 제한된 때문이

다. 즉, 광염성의 중-고염분 식물플랑크톤 종이 서식할 수 없는 평균 염분 0.7 psu의 수역으로 급변하여, 연중 출현종수가 격감하게 된 것으로 판단된다. 일례로서, 새만금 방조제 총 연장의 60%가 축조된 시점인 1999-2000년도에 조사된 만경대교 정점의 식물플랑크톤 우점종은 *Skeletonema costatum*(김 등 2009의 Fig. 14 참조) 및 *Thalassiosira* sp.(김 등 2009의 Fig. 11 참조) 등이었으나, 본 연구에서는 각각 0.63%(*Skeletonema costatum*) 및 0.004%(*Thalassiosira* sp.) 등의 극도로 격감한 연평균 우점도로서, 대부분의 시료에서 전혀 관찰되지 않았다. 수년 후, 안정적인 담수 환경으로 점차 진화하게 되면, 만경대교 정점의 담수 식물플랑크톤 군집이 안정되고, 그에 따라 출현종 수가 오히려 증가할 것으로 예상된다. 계절적으로는, 동계를 제외한 모든 시기에 남조류와 녹조류의 출현 비율이 높았고, 동계에는 담수성 규조류가 높은 비율로 출현하였다. 이와는 대조적으로, 방조제 완공 이전에는 동계와 춘계에 연안성 규조류와 외편모류가 우점하고, 하계와 추계에는 담수성 녹조류와 남조류가 주 우점군이었다(김 등 2009).

식물플랑크톤의 현존량

식물플랑크톤의 현존량은 365 cells ml⁻¹~33,000 cells ml⁻¹의 범위(평균±SE: 7,100±448 cells ml⁻¹, n=130)로 나타났다(Fig. 4). 이는 방조제 완공 이전에 조사된 값보다 평균 1.6배 높은 현존량으로서, 방조제 완공 이후 만경대교 정점이 상대적으로 소수 종에 의한 대량성장이 가능한 환경으로 변화되었음을 반증한다. 주요 우점종으로는 규조류인 *Cyclotella* spp.가 최대 11,000 cells ml⁻¹(평균±SE: 1,400±169 cells ml⁻¹, n=130)로 출현하여, 고수온 시기 이외의 모든 기간에 우점하였다(Fig. 5). 다음으로, 남조류인 *Microcystis* spp.가 최대값은 5,200×10³ cells ml⁻¹로 우점종으로 확인되었고, 특히 저수온기를 제외한 모든 다른 시기에 우점하였다(Fig. 5). 사상체 남조류인 *Oscillatoria* spp. 또한 최대 9,500 cells ml⁻¹(449±113 cells ml⁻¹, n=130)로 고수온기에 우점하였다(Fig. 5). 그리고 녹조류 *Micractinium pusillum* 및 *Actinastrum fluviatile* 등은 저수온기를 제외한 모든 시기에 우점하였다

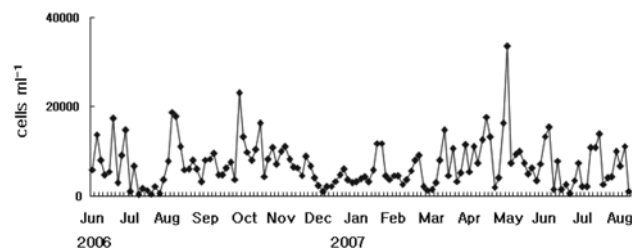


Fig. 4. The variation of phytoplankton abundances (cells ml⁻¹) at ST. MKB.

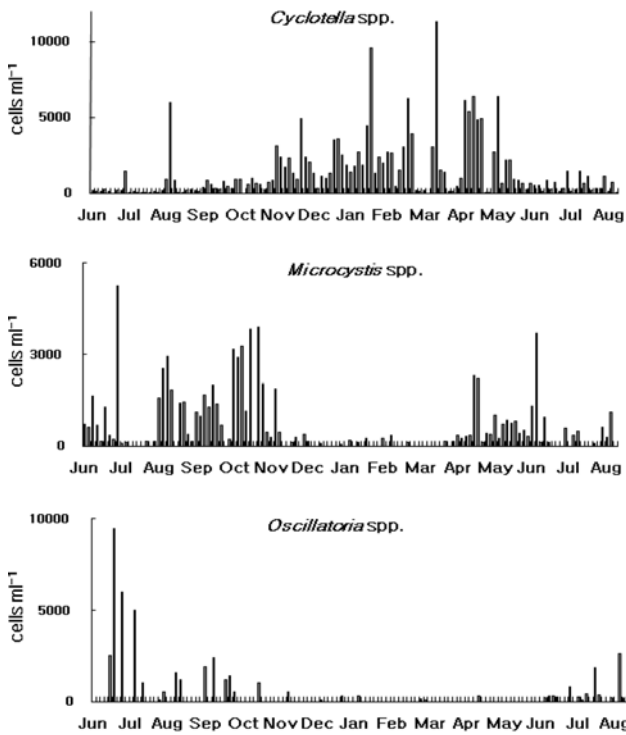


Fig. 5. Weekly variation of abundances of the first three dominant phytoplankton species at ST. MKB.

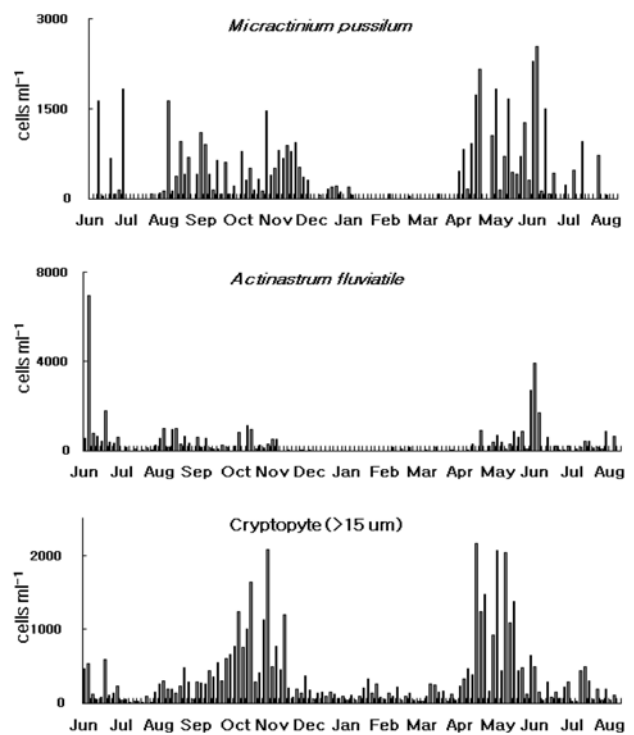


Fig. 6. Weekly variation of abundances of three other dominant phytoplankton species at ST. MKB.

(Fig. 6). 크기 15 μm 이상의 은편모조류(Cryptophyceae)는 최대 2,100 cells ml^{-1} (352 ± 39 cells ml^{-1} , $n=130$)로서, 춘·추계에 우점하였다(Fig. 6). 최대 우점종 6종류 가운데, *Cyclotella* 종류만이 동계에도 춘계와 비슷한 수준의 높은 현존량을 나타내어, 다른 종류들과 분명한 대조를 보였다(Figs. 5, 6).

이러한 결과는 1999-2000년도의 만경대교 정점 식물플랑크톤 우점종들이 나타낸 특징(김 등 2009)과는 판이하게 달라진 것이다(Table 1). 즉, 방조제 완공 이전에는 광염성 규조류에 속하는 *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp. 등이 전체 연구기간 평균의 세포농도에서 거의 절대 우점하던 상태에서, 완공 이후에 담수성 규조류에 속하는 *Cyclotella* sp. 및 담수 남조류인 *Microcystis* sp. 등이 거의 절대 우점하는 상태로 급변하였다(Table 1).

식물플랑크톤의 종다양성

만경대교 정점에서 분석한 식물플랑크톤 군집의 종다양성 지수는 0.32~1.30(평균 \pm SE: 0.92 ± 0.019 , $n=130$) 범위로, 우점도 지수는 0.06~0.71(0.23 ± 0.013 , $n=130$) 범위로 나타났다(Fig. 7). 방조제 공사가 60% 진행된 시점에 조사한 만경대교 정점에서의 종다양성 지수는 평균 1.82로 1.1~2.49 범위를 기록하였으며, 우점도 지수는 0.17~0.59의 범위로 평균 0.33이었다(김 2005). 따라서 방조제 완공 후, 종다양성 지수는 0.5배 수준으로 낮아지고, 우점도 지수는 1.5배 수준으로 높아져서, 상대적으로 소수종이 더욱 높은 밀도로 출현함을 나타내었다. 계절적으로는 겨울과 초봄(1월~4월)에는 소수종이 높은 우점도 지수를 나타내어 종다양성이 더 낮았으며, 여름과 가을철에는 종다양성이 상대적으로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 7). 방조

Table 1. Annual mean abundance (cells ml^{-1}) of the first four dominant phytoplankton species at ST. MKB before (left column, during 1999-2000) and after (right column, during 2006-2007) the completion of the Saemankeum Seawall

Dominant species	Abundance	Dominant species	Abundance
<i>Skeletonema costatum</i>	726	<i>Cyclotella</i> sp.	1419
<i>Thalassiosira</i> sp.	720	<i>Microcystis</i> sp.	631
<i>Actinastrum fluviatile</i>	174	<i>Merismopedia tenuissima</i>	398
<i>Scenedesmus</i> sp.	148	<i>Micractinium pusillum</i>	379
1999-2000 (Kim, unpublished data)		2006-2007 (present study)	

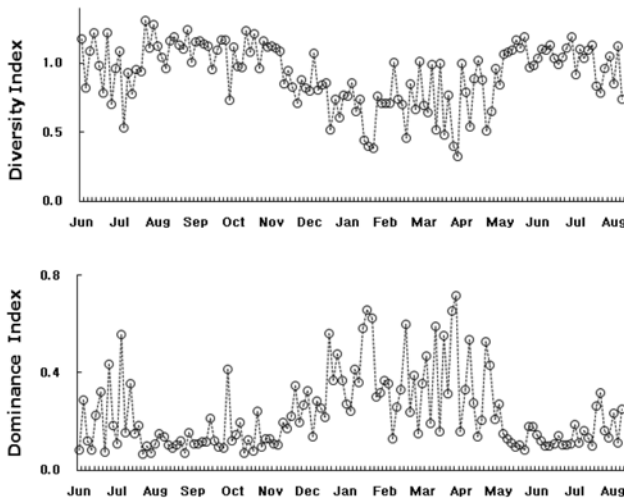


Fig. 7. The variation of diversity index and dominance index of phytoplankton community at ST. MKB from June 2006 to August 2007.

제 착공 이전의 연구에서 만경강 하구역의 종다양성 지수는 0.26~2.55의 범위로 보다 변화폭이 크며 하계와 가을에는 다양성지수가 높고, 동계과 봄에는 낮으며 저염분 수역(0.5~7 psu)에서 낮은 종다양성 지수를 보였다(하정 등 1991) 이를 담수성 식물플랑크톤이 염분변화에 적응하지 못한 결과로 해석하였다.

2006년과 2007년 하계 식물플랑크톤 군집의 변화

1년간의 시차를 둔 2006년과 2007년 6, 7, 8월의 식물플랑크톤 군집을 서로 비교하여, 변동성을 분석하였다. 조사 정점에서 2006년 하계 우점종은 남조류 *Oscillatoria* spp.(15.0%), *Microcystis* sp.(12.9%)와 녹조류 *Actinastrum fluviatile*(9.8%), *Scenedesmus* spp.(6.0%), 규조류인

Table 2. Dominant phytoplankton species and community diversity in summers (from June to August) of 2006 and 2007

	2006	2007
Dominant species (mean %)		
	<i>Oscillatoria</i> spp. (15.0)	<i>Merismopedia tenuissima</i> (10.4)
	<i>Microcystis</i> sp. (12.9)	<i>Actinastrum fluviatile</i> (8.9)
	<i>Actinastrum fluviatile</i> (9.8)	<i>Cyclotella</i> spp. (8.4)
	<i>Cyclotella</i> spp. (6.3)	<i>Microcystis</i> sp. (7.5)
	<i>Scenedesmus</i> spp. (6.0)	<i>Scenedesmus</i> spp. (7.0)
Diversity index	0.53~1.31 (1.03 ± 0.04)	0.74~1.19 (1.02 ± 0.02)
Dominance index	0.06~0.56 (0.17 ± 0.02)	0.08~0.32 (0.15 ± 0.01)

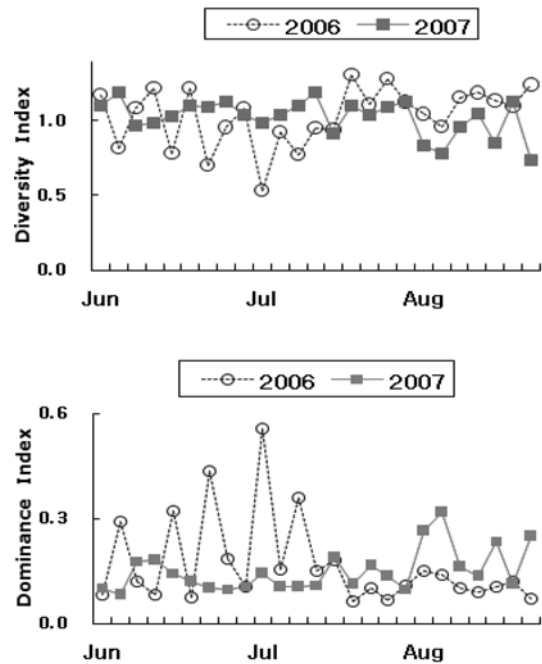


Fig. 8. The variation of diversity index (top) and dominance index (bottom) of phytoplankton community at ST. MKB in summers (from June to August) of 2006 and 2007.

Cyclotella spp.(6.2%)로 나타났다(Table 2). 이에 비해, 2007년 하계에는 남조류 *Merismopedia tenuissima*(10.4%), *Microcystis* sp.(7.5%)와 녹조류 *Actinastrum fluviatile* (8.9%), *Scenedesmus* spp.(7.0%), 규조류인 *Cyclotella* spp.(8.4%) 순으로 우점을 나타내어, 1년 사이에 제1 우점종이 다른 종으로 바뀌게 되었다(Table 1). 또한 5대 우점종의 누적 우점율도 50%에서 42%로 감소하여, 1년 사이에 군집 다양성이 다소 증가하는 경향을 나타내었다(Table 2). 2006년과 2007년 하계의 종다양성 지수는 서로 다른 시간적 변동 양상을 나타내었다(Fig. 8). 즉, 종다양성 지수가 2006년에는 6월에는 낮았다가 8월에 높아진 변동을 나타낸 반면, 2007년에는 전반적으로 유사한 수준에 머물러 있어(Fig. 8), 2007년의 종다양성이 상대적으로 더 안정된 특성을 보여주었다. 이러한 경향은 우점도 지수에도 동일하게 반영되어, 2006년 6월에는 8월에 비해 뚜렷한 차이를 보이며 높게 나타났으며, 2007년에는 우점도 지수의 시간적 변동 폭이 상대적으로 더 작게 나타났다(Fig. 8). 이러한 결과는 두 하계 기간에 측정된 수온(Fig. 2)과 염분(Fig. 3)의 변동성이 2007년도에 더 작았던 것과, 새만금호의 완공에 따른 저염수역의 점차적 확장 등이 그 일부의 원인이라고 판단하였다.

결론적으로, 새만금 방조제 완공 직후 조사한 “만경대교” 정점의 식물플랑크톤 군집은 1) 방조제 공사가 60% 진행된 1999-2000년도의 군집에 비해 뚜렷한 출현종수의

감소, 현존량의 증가 추세를 나타내었다. 2) 2006년과 2007년도 하계의 군집 간에도 주요 우점종이 교체되는 정도의 변화를 보였다. 3) 따라서, 신생 새만금호 내 조사점의 식물플랑크톤 군집은 급격한 경년변화를 겪고 있으며, 이는 일중 조석 및 연중 해수 교환 등이 급격히 감소한 새로운 호소적 환경에 해양생물 군집이 적응해 나가는 수년간에 걸친 생태과정의 초기단계로 해석할 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부 국가장기생태연구사업(KLTER, Korean Long Term Ecological Research)과 농촌공사의 2007-2008 새만금해역 적·녹조 대책 현장적용 시험사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

김영길, 이원호, 신윤근, 허우명 (2003) 만경강 하구역의 염분 변동과 식물플랑크톤 군집분포. In: 한국해양학회 2003년도 춘계 학술발표대회 요약집, pp 148
 김영길 (2005) 만경강 하구·용담호·부안호 식물플랑크톤의

생리·생태학적 연구. 박사학위논문, 군산대학교, 172 p
 김영길, 박종우, 장건강, 이원호 (2009) 새만금 방조제 완공 이전 만경강 하구역 식물플랑크톤 군집의 주기적인 변동. *Ocean and Polar Res* **31**(1):63-70
 농업기반공사 (2004) 새만금 수질예측 모델연구(II). 농업기반공사 농어촌연구원, pp 232-254
 문동연, 김병용, 박경수, 채수천, 유두철, 유재연, 강기화, 강인숙, 유재용, 백원섭 (2002) 만경강 조류 특성에 관한 연구. 보건환경연구원보, 제 14호, 287 p
 새만금환경연구센터 (2000) 1999년도 군산대학교 새만금환경연구센터 연구보고서. 새만금환경연구센터, 253 p
 새만금환경연구센터 (2001) 2000년도 군산대학교 새만금환경연구센터 연구보고서. 새만금환경연구센터, 330 p
 심재형, 신윤근, 이원호 (1991) 만경강 하류의 환경과 식물플랑크톤 군집. *한국육수학회지* **24**(1):45-54
 정현태, 최민규, 김백호, 위인선 (1992) 만경강 하계의 담수조류군집에 대한 생태학적 연구. *한국육수학회지* **25**(4): 257-283

Received Oct. 22, 2008

Revised Nov. 14, 2008

Accepted Jan. 7, 2009