

방조제 체절이후 새만금호의 장기적인 수질변화

정용훈 · 양재삼[†]
군산대학교 해양학과

The Long-term Variations of Water Qualities in the Saemangeum Salt-Water Lake after the Sea-dike Construction

Yong Hoon Jeong and Jae Sam Yang[†]

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

요 약

새만금 방조제 건설로 조성된 새만금호의 장기적인 수질의 변화를 조사하기 위해 2002년부터 2010년까지 총 40회에 걸쳐 현장조사를 수행하였다. 호 내 표층수의 염분은 방조제 끝물막이 직후 감소하여 장기간 감소된 상태를 유지하였다. 방조제 끝물막이 직후에 표층수의 SPM은 감소하였으나, 이후 호 내 수위 변동과 관련하여 증가하다 다시 감소하는 경향을 보였다. 표층수의 Chl-*a*는 방조제 끝물막이 직후부터 증가하여 장기간 동안 계속 증가된 상태를 유지하였다. 표층수의 DIN 항목들은 방조제 끝물막이 직후에는 변화가 없었으나, 이후 NH₄-N은 증가(90%)하였다. 표층수의 DIP는 방조제 끝물막이 직후에는 감소하였으나, 이후 증가(264%)하였다. NH₄-N과 DIP의 증가는 새만금호의 장기적인 유기물의 축적과 관련된 것으로 판단된다. 표층수의 NO₃-N은 방조제 끝물막이 이후 변화가 없는 반면, DISi는 방조제 끝물막이 직후부터 증가하여 계속 증가된 상태를 유지하고 있어 담수 기원 이외의 다른 유입원으로부터 공급되고 있는 것으로 판단된다. 한편, 새만금 방조제 끝물막이 이후 호 내의 수질은 공간적으로 강하구와 나머지 지역들로 뚜렷하게 구분되는 특징을 보이고 있으며, 성층은 방조제 쪽보다 강하구 쪽에서 더 강하게 관측되었다. 특히 하계에 강하구 쪽에서 강한 염분 성층과 함께 표층에서 약 1 m 이하로 저산소 상태가 관측되었다. 저산소층의 형성은 퇴적물로부터 영양염 및 중금속 등의 용출을 유발시킴으로서 수질악화를 가속화시킬 우려가 있으므로 이에 대한 대책이 시급하게 필요하다.

Abstract – In order to investigation long-term variations of water qualities in the Saemangeum Salt-Water Lake formed after the sea-dike construction, the survey has carried out over 40 time from 2002 to 2010. The decreased salinity in surface water immediately after the dike construction has maintained on equal terms for years. After the dike construction, the early concentration of SPM in surface water has decreased but then it showed the tendency to move up and down due to the changes of water level in the lake. The elevated concentration of Chl-*a* in surface water initially after the dike construction was kept at the same conditions for years. The concentration of DIN in surface water has not changed before and shortly after the dike construction. However, the concentration of NH₄-N in surface water has increased steadily after the dike construction. Consequently the concentration of DIN in the lake water after years has raised compared to pre-dike construction. The reduced concentration of DIP in surface water soon after the dike construction has increased after years as well as NH₄-N due to the accumulation of organic matter to inside lake. Unlike with the unvaried NO₃-N, the concentration of DISi in surface water after the dike construction has immediately increased and maintained the enhanced level indicating the supply from other sources except the freshwater. Since the dike construction, the spatial characteristics of water quality was divided river sides and rest of the lake markedly. Stratification of river sides was more strong than the dike sides. In the warm seasons, hypoxia causing the release of nutrients and metals from sediment was observed downward about 1 m from surface of river sides. We strongly suggest to make some urgent measure to prevent low dissolved oxygen condition in the bottom layer of the river sides.

Keywords: Saemangeum Salt-Water Lake(새만금호), water quality(수질), stratification(성층), hypoxia(저산소)

[†]Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

1. 서 론

하구는 육상으로부터 해양으로 이동하는 물질의 순환에 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 우리나라의 하구역은 1990년대 이후 금강, 낙동강, 영상강, 새만금 지역 등에서 하구언과 방조제의 건설로 인하여 원형을 가진 하구는 한강과 섬진강을 제외하고는 거의 없는 실정이다(Lee *et al.*[2001]). 국내의 연안에 건설된 방조제는 총 1,322개에 이르며(MOMAF[2007]), 일본에서도 수백 개의 방조제가 연안에 건설되었다(Sawaragi[1988]). 이러한 방조제 건설 이후 호수의 내측에서 염분성층과 영양염 증가(Ohtake *et al.*[1982]; Mori *et al.*[1987]), 외측에서 유기물질 증가와 저산소 환경 발생(Hodoki and Murakami[2006]), 그리고 내·외측에서 저서생물의 군집변화(Sato[2006]) 등이 관측되었다. 국내에서는 시화호의 저층에서 염수가 외해로 배출되지 못해 강한 염분성층으로 인한 2층 구조의 수괴가 형성되었고, 저층으로 유기물이 축적되어 그 결과 무산소 환경이 형성되어 증식속과 암모늄염의 용출현상이 관측된 바 있다(Han *et al.*[1997]; Park *et al.*[1997]).

새만금사업은 1991년 11월에 착공하여, 2006년 4월에 방조제 끝물막이 공사가 완료되었고, 이로 인해 방조제 내측으로 반폐쇄성 수역인 새만금호가 조성되었다. 새롭게 조성된 새만금호는 현재까지 신시배수갑문과 가력배수갑문을 통해 외측의 해수가 왕래하고 있는 해양환경의 특성을 가지고 있다. 2006년 새만금방조제 끝물막이 공사가 완료된 이후 새만금호의 해수교환은 이전에 비하여 44% 감소할 것으로 예측되었고(Kim *et al.*[2007]), 이러한 해수교환율의 감소는 호 내에서 담수의 체류시간을 증가시킴으로서 염분이 감소하고, 엽록소-*a*(Chl-*a*)와 영양염이 방조제 체절 이전에 비하여 1.4~3배 이상 증가하였다(Yang *et al.*[2008]). 또한 방조제 공사로 인해 호 내에서 조석의 영향이 감소하여 이전에 비하여 수층이 안정화 되어 부유물질의 농도는 1.5배 감소하였다(Yang *et al.*[2008]).

정부는 새만금호의 수질개선을 위해 제1단계 수질개선 종합대책(2001~2010년)에서 1조 1,368억원의 예산을 투자해 새만금호로 유

입되는 상류지역에 하수처리장 및 하수관거 확충 사업 등을 수행하였으나, 만경강과 동진강으로 유입되는 수질은 뚜렷한 개선효과를 보이지 않고 있으며, 새만금호의 수질도 마찬가지다. 현재 제2단계 수질개선 종합대책(2011~2020년)은 상류지역의 점오염원과 비점오염원을 저감하기 위한 사업을 중심으로 수행되고 있다. 이러한 가운데 최근 Kim *et al.*[2009]과 Jeong *et al.*[2014]은 새만금 방조제 끝물막이 이후 호 내에서 과잉으로 영양염이 생산됨을 보고하였고, 이러한 원인으로 내부부하(internal load)의 중요성을 강조한 바 있다.

이 연구는 Yang *et al.*[2008] 이후 새만금호의 장기적인 수질변화를 조사하고, 호 내의 성층 특성과 표층수, 저층수, 퇴적물의 상호관계를 분석하여 새만금호의 수질변화를 이해하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료 채취

시료 채취는 2002~2007년까지 방조제 내측의 6~16개 정점의 표층수에 대해 13회 수행되었고(Yang *et al.*[2008]), 2008~2010년까지 방조제 내측의 6~10개 정점의 표층수와 저층수에 대해 27회 수행하였다. 또한 2010년도에는 방조제 내측의 6개 정점에서 퇴적물 시료도 채취하였다(Fig. 1).

시료 채집은 방조제 끝물막이 이전에는 만조시를 전후로 선박을 이용하여 빠르게 이동하며 표층수를 채수하였고, 방조제 끝물막이 이후에는 조석작용과 상관없이 선박을 이용하여 빠르게 이동하며 표층수와 저층수를 측정하였다. 이때 저층수는 미리 산세척된 호스에 연동펌프를 연결하여 저층퇴적물이 채부유되지 않도록 주의하면서 채수하였다. 채집된 시료는 1 L 폴리에틸렌병에 담아 즉시 드라이아이스 또는 얼음이 담긴 아이스박스에 보관한 후 실험실로 옮긴 다음 분석 전까지 -20 °C 이하에서 동결 보관하였다. 퇴적물 시료는 Grab 채니기로 채집하여 미리 산세척된 지퍼팩에 담아 해수시료와 마찬가지로 실험실로 이동시켜 분석 전까지 동결 보관하였다.

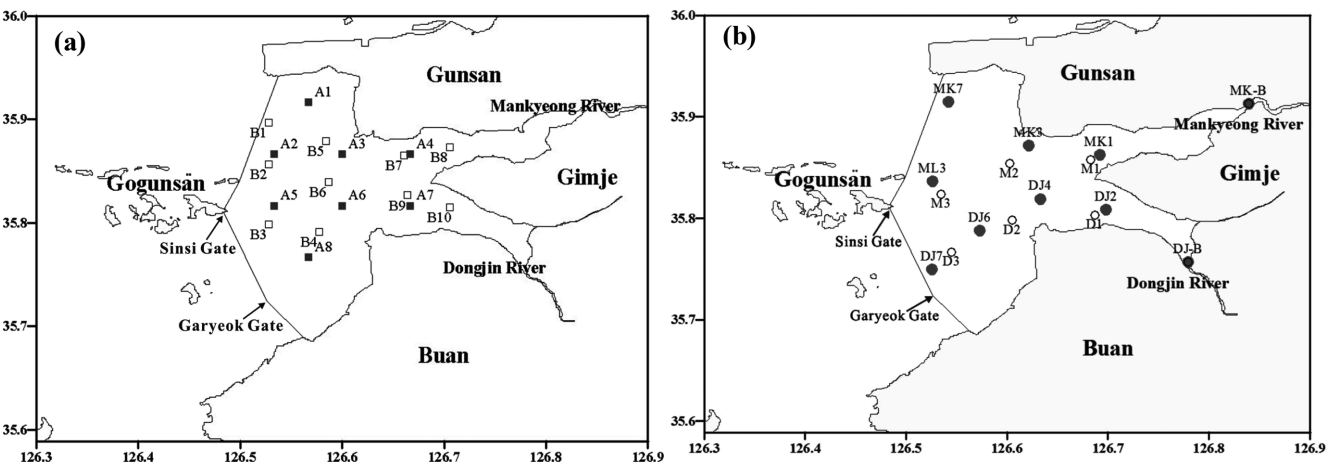


Fig. 1. Investigated stations for survey (a: 2002-2003 (□), 2006-2007 (■), b: 2008-2009 (●), 2010 (○)).

2.2 분석방법

수은, 염분, 용존산소는 염분측정기(YSI 30, YSI) 또는 수질다항 측정기(YSI 556MPS, YSI)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 2010년 조사에서는 각 정점에서 수직으로 0.3~1 m 간격으로 측정하였다. 부유물질(SPM)은 시료 500 mL를 GF/C 여과지로 여과한 후 건조기로 105 °C에서 항량으로 건조하여 건조전과 건조후의 무게 차이로 측정하고, SPM 분석과정에서 여과지를 통과한 여과수에 대하여 DIP(Dissolved Inorganic Phosphorus)(Parsons *et al.*[1984]), NO₂-N(Parsons *et al.*[1984]), NO₃-N(Parsons *et al.*[1984]), NH₄-N(Solórzano[1969]), DISi(Dissolved Inorganic Silicon)(Parsons *et al.*[1984])를 분석하였다. Chl-*a*는 90% 아세톤 추출법을 사용하여 분석하였으며(Parsons *et al.*[1984]), 비색법에 의한 정량 측정은 분광광도계(UV-160A/1750, SHIMADZU)를 사용하였다. 화학적 산소요구량(COD)은 여과하지 않은 시료를 알카리성으로 하여 유기물을 분해하고 남은 과망간산칼륨의 양을 티오황산나트륨으로 적정하여 농도로 환산하였다(MMAF[2005]). 해수 내 총유기탄소(TOC) 분석은 여과하지 않은 시료에 대하여 총유기탄소분석기(TOC-V, SHIMADZU)를 이용하여 분석하였으며, 용존유기탄소(DOC)는 산세척된 0.45 µm membrane 여과지를 사용하여 여과수를 분석하였다. 표층 퇴적물의 강열감량(IL; Ignition Loss)은 63 µm 체를 통과한 건조시료를 전기로에서 550 °C로 2시간 가열하여 정량하였다. 표층 퇴적물의 총유기탄소(TOC)는 63 µm 체를 통과한 건조시료를 총유기탄소분석기(TOC-V/SSM-5000A, SHIMADZU)를 이용하여 분석하였다. 표준물질(SRM 1944, NIST)을 이용한 TOC의 회수율은 106±8%(n=5)이었고, 상대표준편차는 7.5%였다. 퇴적물 내 공극수의 DOC는 질소 대기상에서 추출하여 해수시료와 동일한 방법으로 분석하였다.

2.3 자료 분석

새만금 방조제 끝물막이 전후의 수질변화는 선행 연구인 Yang *et al.*[2008]과 연계성을 갖기 위해 2002년부터 2010년까지 기간을 3개의 기간으로 나누어 각 수질 항목들의 평균을 비교 분석하였다. Yang *et al.*[2008]은 방조제 끝물막이 이전인 2002~2003년에 측정된 자료가 총 5회(2002년 6월, 8월, 12월, 2003년 5월, 8월)이므로 방조제 건설 이후인 2006~2007년에 측정된 자료 중 방조제 건설 이전에 측정된 자료와 계절적인 특성에 의한 오류를 줄이기 위해 동일한 달에 측정된 자료(2006년 5월, 8월, 12월, 2007년 5월, 7월)를 이용하여 방조제 끝물막이 전후를 비교하였다. 이에 따라 이 연구에서는 Yang *et al.*[2008]이 비교한 2002~2003년 자료를 방조제 건설 이전(Before)으로 설정하고, 2006~2007년 자료를 방조제 건설 이후 초기 기간(After 1)으로 설정하였으며, 2008~2009년에 관측된 자료 중 총 5회(2008년 6월, 8월, 12월, 2009년 5월, 8월) 자료를 방조제 건설 이후 3~4년이 경과된 기간(After 2)으로 설정하였다. 장기변화는 one-way ANOVA를 수행하여 각 3개의 기간들에 대하여 평균의 유의성을 파악한 뒤 Tukey test를 수행하여 그룹간의 차이를 분석하였다. 그밖에 수질 항목들의 평균비교는 paired t-test

를 통해 분석하였다.

새만금 방조제 건설 전후 수질의 분포 특성을 알아보기 위해 군집분석을 수행하여 각 관측지점을 군집화 하였다. 군집분석은 각각의 대상간의 거리에 의하여 가장 가까운 대상들을 하나씩 포함해 가는 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis) 방법을 사용하였으며, 대상간의 유사성은 일반적으로 사용되는 유클리안 제곱거리(Squared euclidean distance) 척도를 이용하여 분석하였다. 모든 통계분석은 SPSS(ver., 12.0)을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 방조제 건설 전후 표층수의 시간적 변화

새만금 방조제의 최종 끝물막이 이전과 이후의 각 기간(Before: 2002~2003, After 1: 2006~2007, After 2: 2008~2009) 사이에 표층수의 각 항목별 평균을 비교한 결과가 Table 1에 있다. 염분은 Before가 After 1과 After 2 보다 높았고, After 1과 After 2는 유의한 차이가 없었다. SPM은 Before와 After 2가 After 1보다 높았고, Before와 After 2는 유의한 차이가 없었다. Chl-*a*는 After 1과 After 2가 Before 보다 높았고, After 1과 After 2는 유의한 차이가 없었다. NO₃-N과 NO₂-N은 각 기간들 사이에 평균의 차이가 유의하지 않았고, NH₄-N은 After 2가 Before와 After 1 보다 높았고, Before와 After 1은 유의한 차이가 없었다. DIP에 대한 각 기간들의 평균 비교에서는 After 2가 Before와 After 1 보다 높았고, Before와 After 1은 유의한 차이가 없었다. DISi는 After 1과 After 2가 Before 보다 높았고, After 1과 After 2는 유의한 차이가 없었다. DIN/DIP 비율은 Before와 After 2가 After 1 보다 낮았고, Before와 After 2는 유의한 차이가 없었다.

3.2 방조제 건설 전후 표층수의 공간적 변화

3.2.1. 평균비교

새만금 방조제의 최종 끝물막이 이전과 이후 3 기간(Before, After 1, After 2) 동안 강하구에 위치한 정점들(정점 B7, 정점 B8, 정점

Table 1. Comparison of mean of water quality parameters among the three periods by one-way ANOVA (p<0.05)

Parameter	Periods
Salinity	Before(28.1) > After 1(22.3) = After 2(22.4)
Chl- <i>a</i> (µg/L)	Before(5.6) < After 1(16.4) = After 2(11.7)
SPM(mg/L)	Before(41.4) = After 2(42.2) > After 1(16.2)
NH ₄ -N(mg/L)	Before(0.10) = After 1(0.11) < After 2(0.19)
NO ₃ -N(mg/L)	Before(0.17) = After 1(0.26) = After 2(0.31)
NO ₂ -N(mg/L)	Before(0.03) = After 1(0.03) = After 2(0.04)
DIP(mg/L)	Before(0.02) = After 1(0.01) < After 2(0.05)
DISi(mg/L)	Before(1.62) < After 1(2.13) = After 2(2.27)
DIN/DIP	Before(15.4) = After 2(29.8) < After 1(119.7)

*Before: 2002-2003, After 1: 2006-2007, After 2: 2008-2009.

*Values in parentheses indicate the mean concentrations of each parameter.

Table 2. Comparison of mean of water quality parameters between river and dike sides by the paired t-test ($p < 0.05$)

Parameters	Before	After 1	After 2
Salinity	R(26.3) < D(29.9)	R(22.8) < D(26.5)	R(18.5) < D(28.0)
Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	R(8.3) > D(3.6)	R(13.6) > D(7.1)	R(21.9) > D(9.5)
SPM(mg/L)	R(78.4) = D(33.0)	R(15.8) = D(18.4)	R(39.1) < D(50.6)
NO ₃ -N(mg/L)	R(0.26) > D(0.07)	R(0.31) > D(0.05)	R(0.53) > D(0.11)
NO ₂ -N(mg/L)	R(0.04) > D(0.01)	R(0.03) > D(0.01)	R(0.05) > D(0.01)
NH ₄ -N(mg/L)	R(0.16) = D(0.07)	R(0.10) = D(0.09)	R(0.19) > D(0.10)
DIP(mg/L)	R(0.03) > D(0.02)	R(0.02) = D(0.01)	R(0.05) > D(0.02)
DISi(mg/L)	R(1.61) = D(1.63)	R(2.05) = D(1.95)	R(2.52) > D(1.85)

*Before: 2002-2003, After 1: 2006-2007, After 2: 2008-2009.

*R: river side, D: dike side.

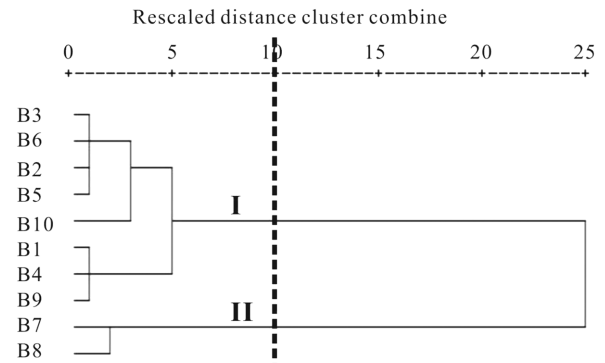
*Values in parentheses indicate mean concentrations of each parameter.

B9, 정점 B10, 정점 A4, 정점 A7, 정점 MK1, 정점 DJ2)과 방조제에 위치한 정점들(정점 B1, 정점 B2, 정점 B3, 정점 A2, 정점 A5, 정점 ML3, 정점 DJ7) 사이의 수질 항목들의 평균을 비교하였다 (Table 2). 방조제 끝물막이 이전인 Before(2002~2003) 기간에 염분은 방조제 쪽이 강하구 쪽보다 높았고, Chl-*a*, NO₃-N, NO₂-N, DIP는 강하구 쪽이 방조제 쪽보다 높았으며, SPM, NH₄-N, DISi는 강하구와 방조제 쪽의 평균의 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 방조제 끝물막이 직후인 After 1(2006~2007) 기간에 염분은 방조제 쪽이 강하구 쪽보다 높았고, Chl-*a*, NO₃-N, NO₂-N은 강하구 쪽이 방조제 쪽보다 높았으며, SPM, NH₄-N, DIP, DISi는 강하구와 방조제 쪽의 평균의 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 방조제 끝물막이 이후 3-4년이 지난 After 2(2008~2009) 기간에 염분과 SPM은 방조제 쪽이 강하구 쪽보다 높았고, Chl-*a*, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, DIP, DISi는 강하구 쪽이 방조제 쪽보다 높았다.

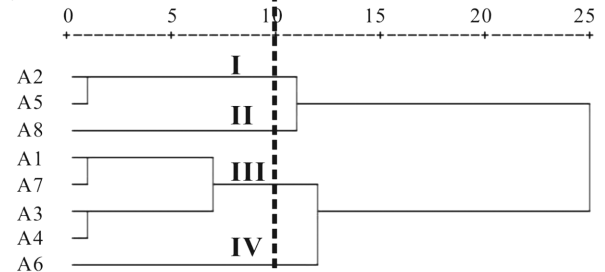
3.2.2. 군집분석

새만금 방조제 끝물막이 이전과 이후 3 기간(Before, After 1, After 2) 동안 조사 정점들의 수질 특성을 그룹화 하기 위해 군집 분석을 수행하였다. 군집분석에 사용된 수질 항목은 염분, Chl-*a*, SPM, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, DIP, DISi이며, 수질 항목들 간에 농도 단위가 서로 달라 Z값으로 표준화하여 분석하였다. 각 조사 정점들이 군집화되어 가는 과정을 보여주는 수지도(dendrogram)를 Fig. 2에 도시하였다. Rescaled distance가 10인 곳을 기준으로 군집을 분류하면, Before(2002~2003) 기간은 두 군집으로 나뉘어 만경강하구에 위치한 정점 B7과 정점 B8과 그 이외 나머지 정점들로 군집화된다. After 1(2006~2007) 기간에는 4가지 군집으로 분류되고, I 군집은 방조제와 인접한 정점 A2와 정점 A5, II 군집은 조사 정점 중 가장 남쪽에 위치한 정점 A8, III 군집은 가장 북쪽에 위치한 정점과 강하구를 포함하는 정점 A1, A3, A4, A7가 속하며, IV 군집은 호의 중심에 위치한 정점 A6로 군집화된다. After 2(2008~2009) 기간에는 2가지 군집으로 분류되고, 만경강과 동진강하구에 위치한 정점 MK1과 정점 DJ2와 그 이외 나머지 정점들로 나누어진다.

a) Before



b) After 1



c) After 2

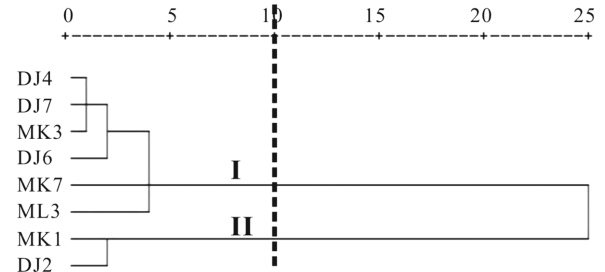


Fig. 2. Dendrograms showing clustering of the sampling stations.

3.3 방조제 건설 이후 표층과 저층간 수직적 변화

3.3.1 평균비교

새만금 방조제 끝물막이 이후인 2008~2010년에 관측된 자료를 사용하여 표층수와 저층수간의 각 수질 항목들의 평균을 비교하였다

Table 3. Differences of water quality parameters between surface and bottom water by the paired t-test

Parameters	2008	2009	2010
Temp _{Sur} - Temp _{Bot} (°C)	24.0-23.0=1.0 [†]	23.2-22.3=0.9 [†]	23.1-22.3=0.8 [†]
DO _{Sur} - DO _{Bot} (mg/L)	8.0-6.2=1.8 [†]	8.1-6.4=1.7 [†]	7.9-5.7=2.2 [†]
Salinity _{Sur} - Salinity _{Bot}	21.3-27.2=-5.9 [†]	22.4-27.4=-5.0 [†]	23.7-27.3=-3.6 [†]
COD _{Sur} - COD _{Bot} (mg/L)	5.6-3.9=1.7 [†]	4.0-2.8=1.2 [†]	3.3-2.5=0.8 [†]
Chl- <i>a</i> _{Sur} - Chl- <i>a</i> _{Bot} (µg/L)	12.5-5.1=7.4 [†]	17.6-8.5=9.1 [†]	12.1-5.1=7.0 [†]
SPM _{Sur} - SPM _{Bot} (mg/L)	57.5-75.0=-17.5 [†]	46.6-57.8=-11.2 [†]	6.1-13.9=-7.8 [†]
NO ₃ -N _{Sur} - NO ₃ -N _{Bot} (mg/L)	0.25-0.07=0.18 [†]	0.38-0.17=0.21 [†]	0.11-0.05=0.06
NO ₂ -N _{Sur} - NO ₂ -N _{Bot} (mg/L)	0.03-0.01=0.02 [†]	0.03-0.02=0.01 [†]	0.02-0.01=0.01
NH ₄ -N _{Sur} - NH ₄ -N _{Bot} (mg/L)	0.18-0.17=0.01	0.15-0.15=0.00	0.11-0.15=-0.04 [†]
DIP _{Sur} - DIP _{Bot} (mg/L)	0.05-0.05=0.00	0.04-0.04=0.00	0.04-0.05=-0.01
DISi _{Sur} - DISi _{Bot} (mg/L)	2.35-2.00=0.35	2.41-2.79=-0.38	1.47-1.45=0.02

*Subscripts, Sur and Bot represent surface water and bottom water.
†: p<0.05

(Table 3). 조사 기간 동안 수온, DO, COD, Chl-*a*는 표층수가 저층수보다 높았으며, 염분과 SPM은 저층수가 표층수보다 높았다. NO₃-N, NO₂-N은 2008년과 2009년에는 표층수가 저층수보다 높았으나, 2010년에는 통계적으로 표층수와 저층수간의 차이가 없었다. NH₄-N은 2008년과 2009년에는 통계적으로 표층수와 저층수간의 차이가 없었으나, 2010년에는 저층수가 표층수보다 높았다. DIP와 DISi는 2008~2010년에 통계적으로 표층수와 저층수간의 차이가 없었다.

3.3.2 염분, 수온, DO의 수직적 농도 변화

새만금 방조제의 끝물막이 이후 새만금호에서 염분, 수온, 용존 산소(DO)의 수직적인 분포를 알아보기 위해 2010년 3월부터 10월 까지 0.3~1 m 간격으로 측정한 결과를 Fig. 3~5에 도시하였다.

염분은 만경강과 동진강하구에 위치한 정점들(정점 M1, 정점 D1)에서 수직적 성층구조가 4월부터 10월까지 지속되었고, 방조제와 인접한 정점들(정점 M3, 정점 D3)에서는 5월에서 9월까지 강하구에 위치한 정점들보다는 상대적으로 약한 수직적 성층구조를 보였다. 특히 8월에는 강하구에 위치한 정점들의 표층 1 m 내외에서 강한 염분 성층이 관찰되었다. 수온도 염분과 유사한 기간 동안 수직적인 성층구조를 보였고, 강하구에 위치한 정점들과 방조제와 인접한 정점들도 유사한 성층구조를 보였다. DO는 염분과 유사하게 만경강과 동진강하구에 위치한 정점들에서 표층과 저층간의 농도차이가 크게 나타났으며, 특히 8월에 수심 1 m 내외에서 급격한 농도변화가 관측되었다. 방조제와 인접한 정점들의 DO의 성층은 6월에서 9월 사이에 관측되었으나, 강하구에 위치한 정점들보다 상대적으로 약한 성층을 보였다.

3.4 방조제 건설 이후 표층 퇴적물 화학 조성

새만금 방조제 끝물막이 이후 2010년도에 새만금호의 6개 정점에서 퇴적물 조사를 수행하였다. 표층 퇴적물의 입도 조성은 2010년 3월과 5월만 수행되었으며, 63 µm 체를 이용하여 sand와 silt+clay로 나누어 구분한 결과, silt+clay의 비율이 평균 26.4%로 나타났

으며, 강하구에 위치한 정점들(정점 M1, 정점 D1)에서 silt+clay의 비율이 26.2~91.6%를 보였고, 방조제와 인접한 정점들(정점 M3, 정점 D3)에서는 3.8~39.1%로 나타나 상대적으로 강하구 쪽에서 silt+clay의 함량이 더 높았다.

조사 기간 동안 표층 퇴적물의 TOC는 1.3±0.7%, IL는 6.6±2.9%를 보였으며, 전반적으로 강하구 쪽이 방조제 인근보다 높은 함량을 보였다(Fig. 6). 공극수 내 DOC의 농도는 상대적으로 다른 시기에 비하여 8~10월에 높은 농도를 보였다(Fig. 7).

4. 토 의

4.1 새만금 방조제 건설 이후 표층수의 장기적 수질변화 해석

새만금 방조제 끝물막이 직후 호 내 염분은 감소하였다. 이러한 결과는 외해수의 교환율이 감소하고(Kim *et al.*[2007]), 만경강과 동진강으로부터 유입되는 담수의 영향이 확대되면서 발생한 결과이다(Yang *et al.*[2008]). 그러나 방조제 끝물막이 이후 3~4년이 경과된 After 2 기간의 염분은 방조제 끝물막이 직후 기간인 After 1 과 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 현상은 외해역과의 유일한 연결 통로인 신시, 가력배수갑문으로 두 기간 동안 유사하게 외해수가 유·출입되었기 때문으로 판단된다. 이 두 기간 동안 강수량의 차이도 통계적으로 유의하지 않았다(t-test, p>0.05). 따라서 방조제 끝물막이 이후 조사 기간 동안 외해수에 의한 희석효과는 동일하게 작용했을 것이다.

방조제 끝물막이 직후 SPM은 이전에 비하여 40% 감소하였으나(Yang *et al.*[2008]), 방조제 끝물막이 이후 3~4년이 지난 After 2 기간에 관측된 SPM의 농도는 After 1 기간 보다 160.5% 증가하였다. 새만금호의 신시배수갑문의 내측에서 관측된 호 내 수위는 2007년에 평균 0.02±0.39 m, 2008년에 평균 -0.22±0.54 m, 2009년에 평균 -0.07±0.40 m, 2010년에 평균 -0.10±0.43 m로 2008년에 가장 낮은 수위와 가장 큰 변동폭을 보였다(person. comm.). 호 내의 달평균 수위와 표층수의 SPM 농도는 음의 상관성을 보였고 (r=-0.336, p=0.045), 수위의 편차와 SPM의 농도는 양의 상관성을

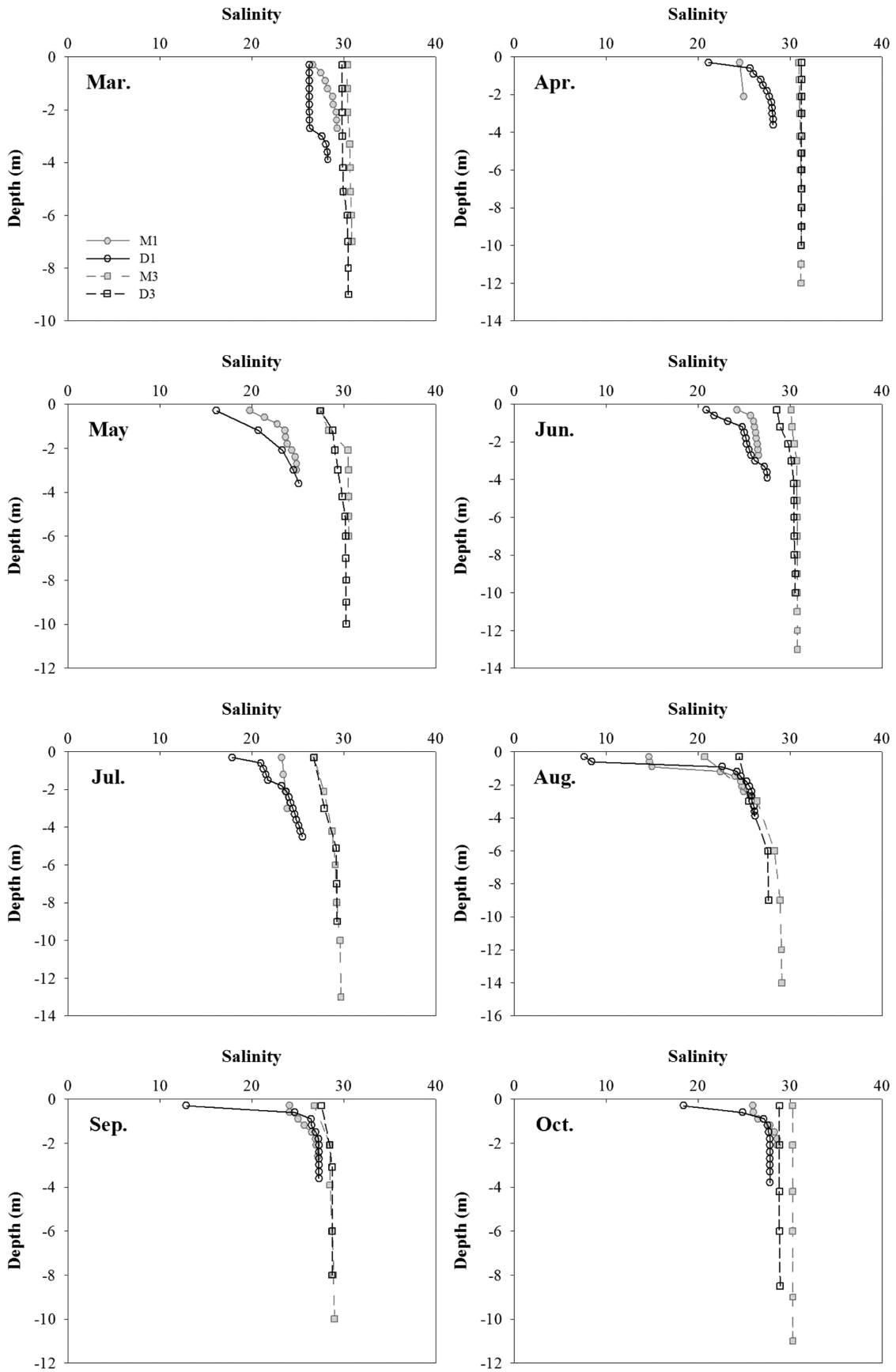


Fig. 3. Vertical profiles of salinity at river (M1, D1) and dike (M3, D3) stations in 2010.

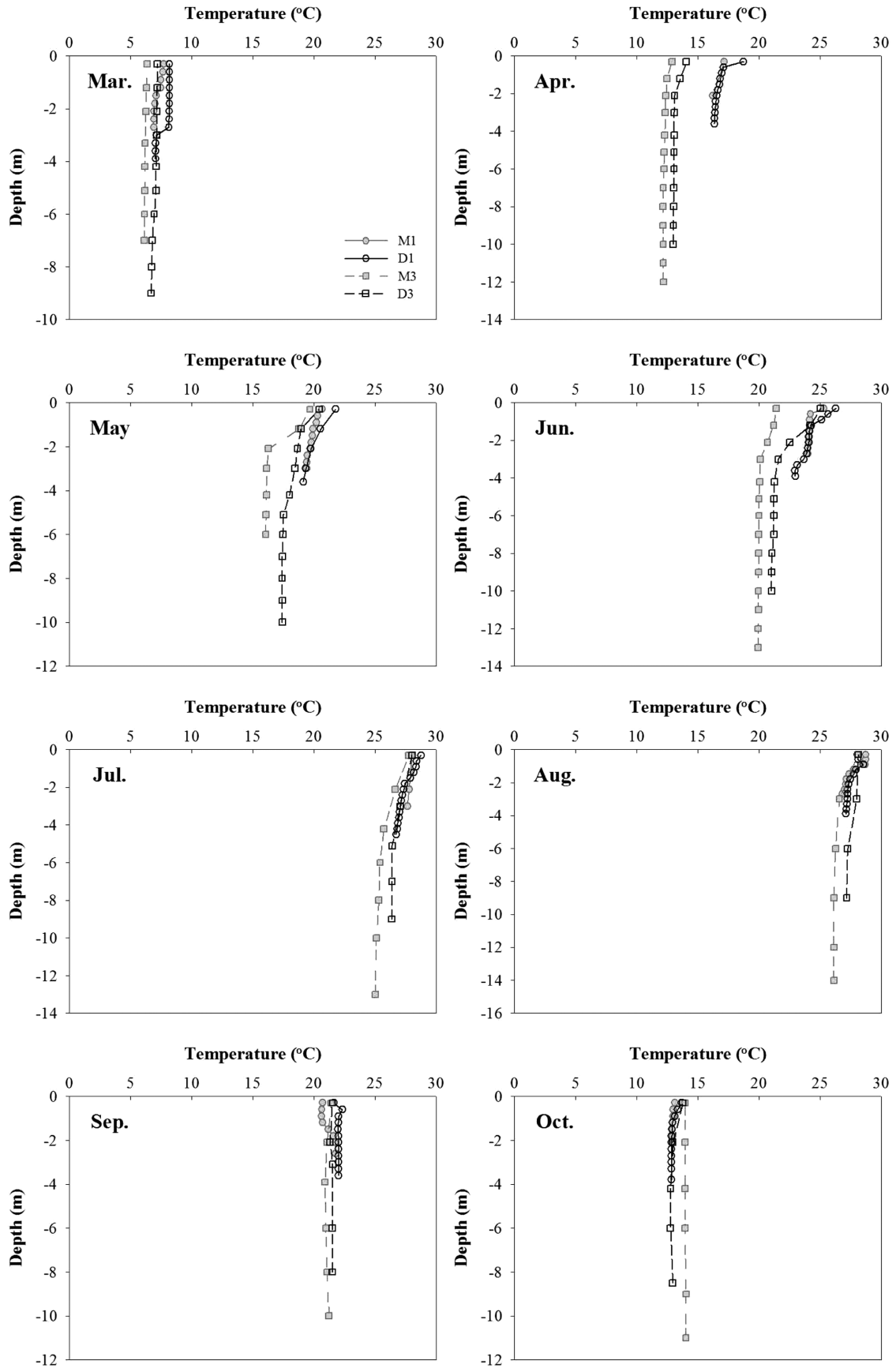


Fig. 4. Vertical profiles of temperature at river (M1, D1) and dike (M3, D3) stations in 2010.

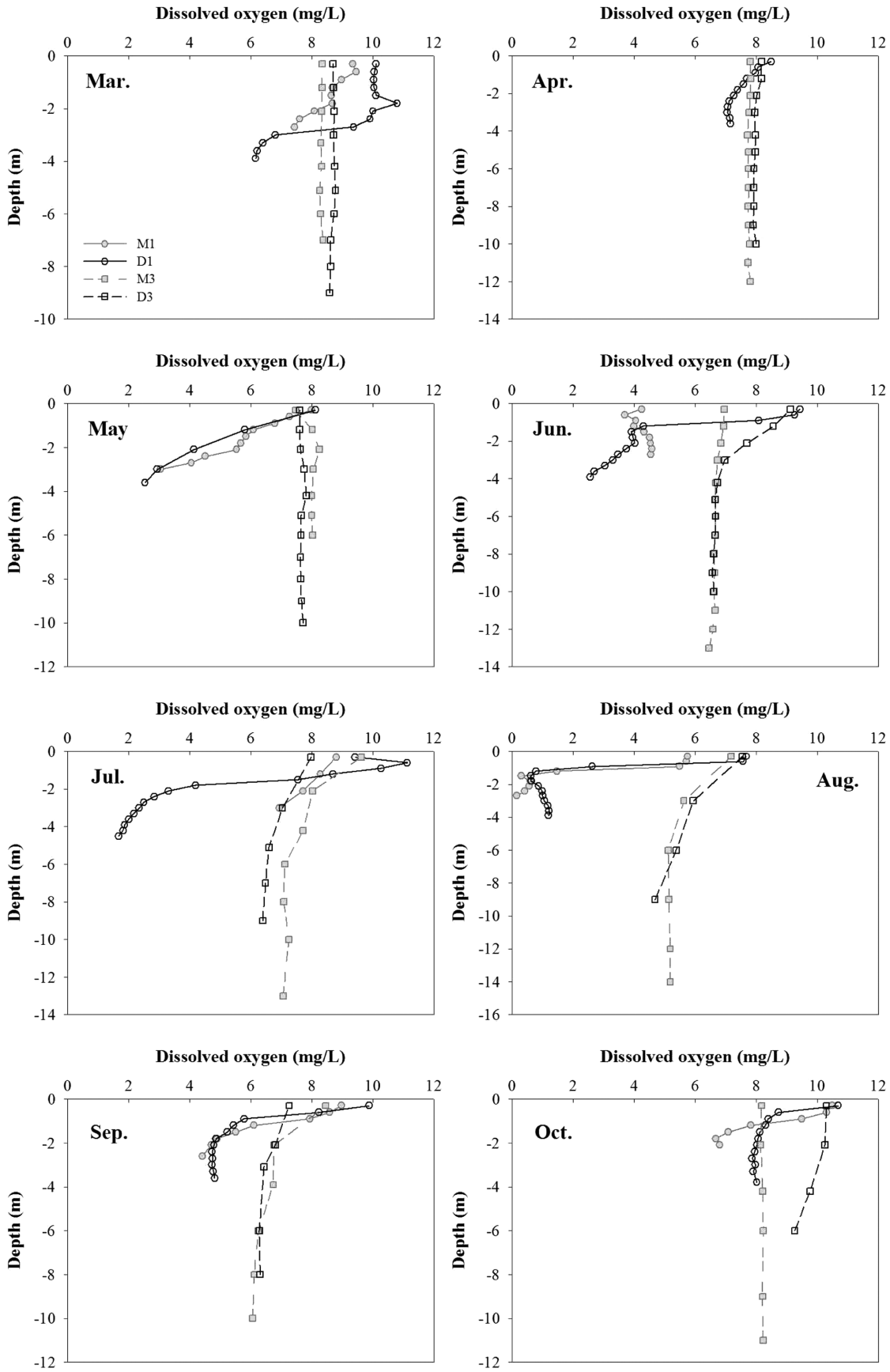


Fig. 5. Vertical profiles of dissolved oxygen at river (M1, D1) and dike (M3, D3) stations in 2010.

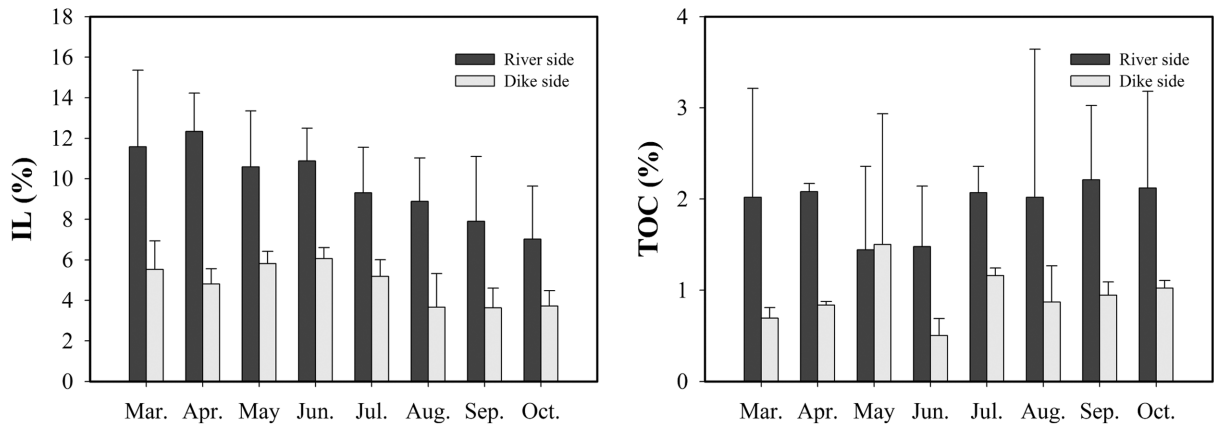


Fig. 6. Seasonal variations of IL and TOC from surface sediment in 2010.

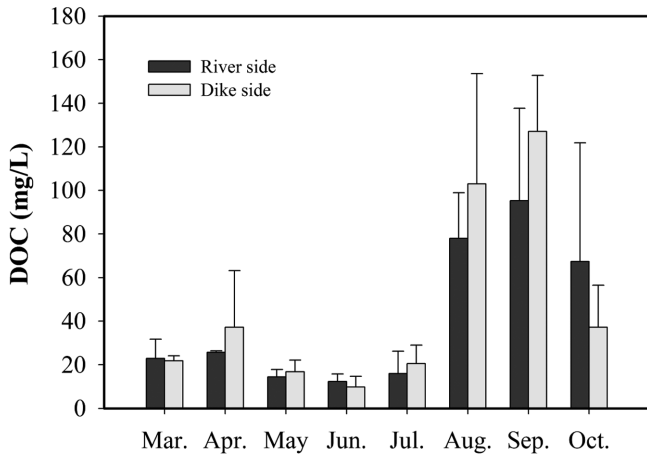


Fig. 7. Seasonal variations of DOC from pore-water in 2010.

보였다($r=0.338$, $p=0.044$). 이러한 결과들은 호 내 SPM의 농도가 수위가 낮아지면 증가하고, 수위의 변동폭이 커지면 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 After 2 기간 중에 증가된 SPM의 농도는 호 내의 수위변동에 의해서 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 방조제 끝물막이 이후 방조제 도로 포장 공사 및 기타 부대시설 공사 과정에서 발생한 비산먼지 및 토사의 유입으로 인해 SPM이 증가되었을 가능성도 있다. 이러한 이유는 방조제 도로 포장 공사가 완료된 2010년 조사에서 SPM의 농도가 다시 급격히 감소된 것으로 관측되었기 때문이다(Jeong *et al.*[2014]).

Chl-*a*는 방조제 끝물막이 직후 SPM의 감소로 인한 투명도의 증가와 담수의 flushing time의 증가로 197% 증가하였고(Yang *et al.*[2008]), 이후 3~4년이 지난 이후에도 여전히 증가된 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 방조제 끝물막이 이후 3~4년이 지난 이후에 SPM의 농도가 증가 했으나, Chl-*a*의 농도 증가를 억제할 정도로 영향을 미치지 못했기 때문으로 판단된다.

Yang *et al.*[2008]은 방조제 끝물막이 이후 DIN의 농도가 증가한 것으로 보고하였으나, 장기적으로 분석한 결과에서는 NO₃-N과 NO₂-N은 방조제 끝물막이 전후 3 기간들 사이에 평균의 차이가 유의하지 않았고, NH₄-N은 방조제 끝물막이 이전(Before)과 끝물막

이 직후(After 1)에는 유의한 차이가 없었으나, 3~4년이 지난 이후(After 2)에는 증가한 것으로 나타났다. 선행 연구 결과와 이 연구에서 DIN의 평균을 비교한 결과들이 차이가 나타나는 이유는 선행 연구에서는 통계분석의 유의수준을 0.10 기준으로 평가하였으나, 이 연구에서는 유의성을 더 확보하기 위해 유의수준을 0.05 기준으로 평가했기 때문이다. 결과적으로 DIN 중 NH₄-N은 새만금 방조제 끝물막이 이후 호 내에서 장기적으로는 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 원인은 새만금호 내 표층 퇴적물의 유기물질 함량 증가(MLTMA[2011])와 저층에서 과잉의 NH₄-N의 생성과 관련이 있을 것으로 판단된다(Jeong *et al.*[2014]).

새만금 방조제 끝물막이 직후 DIP는 SPM의 감소와 Chl-*a*의 증가로 인해 감소한 결과를 가져왔으나(Yang *et al.*[2008]), 장기적으로 보면 NH₄-N과 마찬가지로 서서히 증가하는 것으로 보인다. 특히 끝물막이 이후 3~4년이 경과한 After 2 기간에 DIP는 이전에 비하여 92.4% 증가하였고, 끝물막이 직후인 After 1 기간보다는 263.8% 증가하였다. 장기적으로 DIP의 증가는 동 기간에 증가된 SPM과 관련성을 고려해 볼 수 있으나, 이 기간에 DIP와 SPM이 상관성이 없는 것으로 나타났고($r=-0.061$, $p=0.691$), NH₄-N과 마찬가지로 표층 퇴적물의 유기물질 함량 증가와 저층에서 DIP의 과잉 생성에 따른 결과로 판단된다(MLTMA[2011]; Jeong *et al.*[2014]). 결과적으로 DIP는 방조제 끝물막이 직후 일시적으로 SPM의 감소와 Chl-*a*의 증가에 따라 감소되지만, 장기적으로는 호 내 유기물질의 생산과 축적에 의해 증가되는 것으로 판단된다.

DISi는 방조제 끝물막이 직후부터 증가하기 시작하여(Yang *et al.*[2008]) 이후 3~4년이 더 경과된 이후에도 여전히 증가된 상태를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 특이한 점은 NO₃-N과 DISi가 주로 담수로부터 기원한다는 것을 감안한다면(Edmond *et al.*[1985]; Yang *et al.*[1999]; Yin[2002]), NO₃-N과는 달리 DISi가 방조제 끝물막이 직후부터 증가된 것은 담수로 인한 공급 이외에 추가적인 다른 공급원에 의해서 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. Jeong *et al.*[2014]은 새만금호의 저층에서 과잉의 DISi가 지속적으로 공급되고 있음을 보고하였고, 이러한 추가적인 공급원으로 퇴적물로부터 분자확산에 의한 공급 이외에 해서 지하수 유출 등 다른 유입

원이 있음을 제시하였다.

DIN/DIP 비율은 Before와 After 2가 After 1 보다 낮았고, Before와 After 2는 유의한 차이가 없었다. 방조제 끝물막이 직후 DIN/DIP 비율은 DIP의 감소로 인해 급격하게 증가하였으나(Yang *et al.*[2008]), 방조제 끝물막이 이후 3~4년이 경과된 이후에는 DIN 보다 상대적으로 DIP가 더 증가하면서 DIN/DIP 비율이 감소하는 결과를 가져왔다. 그러나 DIN/DIP 비율은 After 2 기간에 평균 29.8(중량비)을 나타내고 있어 여전히 새만금호에서 DIP는 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 인자로 작용하고 있는 것으로 판단된다.

4.2 새만금호 수질 분포 특성

새만금 방조제 끝물막이 전후를 3 기간으로 나누어 강하구와 방조제 인근에 위치한 정점들에서 수질 항목들의 평균을 비교한 결과는 공간적으로 염분, Chl-*a*, NO₃-N, NO₂-N은 계속해서 동일한 특성을 보여주고 있으나, SPM, NH₄-N, DIP, DISi는 각 기간마다 다른 공간적 특징을 보여주고 있다. 그러나 끝물막이 이후 3~4년이 경과된 이후에는 상대적으로 Chl-*a*와 영양염류가 높은 강물이 유입되는 강하구 쪽이 방조제 쪽보다 높은 농도를 보이고, 외해수의 유입에 영향을 받는 방조제 쪽이 염분과 SPM이 높은 뚜렷한 공간적인 특징을 보인다. 이러한 결과는 군집분석의 결과에서도 잘 나타나고 있다(Fig. 2). 방조제 끝물막이 이전인 Before 기간에 새만금 수역은 만경강의 영향을 받는 지역과 그 이외의 지역들로 수질 특성이 나누어지며, 끝물막이 직후인 After 1 기간에는 새만금호 내부가 매우 복잡한 5 가지의 수질 특성을 갖는 지역들로 나누어지고, 끝물막이 이후 3~4년이 경과된 이후에는 만경강과 동진강 하구 지역과 나머지 지역들로 공간적으로 분리된 수질 특성을 보인다. 이러한 시간에 따른 공간적인 수질 특성의 변화는 방조제 끝물막이 직후에 호 내에서 공간적으로 다양한 수질 특성이 혼재되어 있다가 시간이 지나면서 뚜렷이 분리되는 경향을 보여준다.

4.3 새만금호의 성층 특성

Yang *et al.*[2008]은 방조제 끝물막이 이전과 이후에 방조제 내측에서 하계에 13시간 이상 고정관측을 통해 방조제 끝물막이 이후 염분 성층의 정도가 강화되었음을 보고하였고, 한국해양연구원(KORDI[2003], [2007])의 연구결과에서도 동일한 결과를 보였다. 이 연구에서 표층과 저층의 평균 농도를 비교한 결과(Table 3)에서도 방조제 끝물막이 이후 지속적으로 염분은 저층이 표층보다 높게 나타나고 있다. COD와 Chl-*a*는 염분과 반대로 표층이 저층보다 높게 나타나고 있어, 이들 항목들은 주로 표층에서 유기물 생성과 관련되어 있는 것으로 판단된다. 그러나 SPM은 표층보다 저층에서 높게 나타나고 있어, 주로 저층 퇴적물로부터 재부유에 의해 영향을 받는 것으로 보인다. NO₃-N과 NO₂-N은 2008년과 2009년에는 표층에서 더 높은 농도를 보였으나, 2010년에는 표층과 저층간의 평균 농도차이가 없는 것으로 나타남으로써 점차 표층과 저층의 농도차이가 줄어들고 있는 것으로 보인다. NH₄-N은 2008년과 2009년에는 표층과 저층간의 농도차이가 나타나지 않았으나,

2010년에는 저층이 표층보다 더 높은 농도를 보였다. 그러나 DIP와 DISi의 농도는 모든 기간 동안 통계적으로 표층과 저층간에 차이가 나타나지 않았다. 방조제 끝물막이 이전에는 상대적으로 해수의 수직교환이 원활하게 이루어져 방조제 내측에서 관측된 영양염류들은 표층과 저층 사이에 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 방조제 끝물막이 직후에는 해수의 교환율이 감소하고 담수의 flushing time이 증가하여 DIP, DISi의 농도는 표층에서 더 높게 관측되었다(Yang *et al.*[2008]). 따라서 방조제 끝물막이 이전보다 염분의 수직 성층이 강화된 상태에서 고농도의 영양염류를 함유한 담수의 영향을 받는 표층수의 DIP와 DISi의 농도가 저층수와 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않는 것은 저층수에서 추가적으로 과잉의 농도가 발생하는 것을 지시한다고 판단된다. 이러한 현상은 새만금호의 저층수에서 과잉의 NH₄-N, DIP, DISi의 농도가 공급되고 있다는 기존의 연구결과와 동일하다(Kim *et al.*[2009]; Jeong *et al.*[2014]). 또한 국내·외에서도 방조제가 건설된 이후 영양염류의 농도가 저층수에서 높게 관측된 바 있다(Ohtake *et al.*[1982]; Mori *et al.*[1987], Park *et al.*[1997]).

2010년에 관측된 염분, 수온, DO의 수직적 농도 변화는 새만금호의 공간적인 성층 특성을 잘 나타내고 있다. 강하구에 위치한 정점들은 방조제와 인접한 정점들보다 상대적으로 강한 염분 성층을 보였으며, 이와 함께 DO의 강한 성층도 관측되었다. 특징적인 것은 강하구에 위치한 정점들의 수심이 약 4 m 정도에 불과하지만 여름철에는 표층 1 m 이하에서 강한 염분 성층과 함께 DO의 성층이 동반되어 관측되었고, 특히 DO의 농도가 2 mg/L 이하의 저산소층(hypoxia: 2.8 mg/L 미만; Diaz and Rosenberg[1995]; Wu[2002])이 나타났다. 이러한 원인은 강하구에 위치한 정점들이 상대적으로 하천을 통해 유입되는 담수의 영향을 더 크게 받고 있고, 방조제의 배수갑문으로부터 멀리 떨어져 있어 외해수에 의한 수층의 혼합이 약하기 때문으로 판단된다. 염분 성층으로 인하여 표층과 저층의 수직적인 혼합이 약화되고, 표층에서의 활발한 생물활동 등으로 인한 유기물질의 침강은 저층의 무산소 또는 저산소 환경을 발달시키는 주된 요인으로 알려져 있다(Park *et al.*[1997]; Hodoki and Murakami[2006]). 동일 시기에 관측된 염분에 대한 SPM, TOC, DOC의 분포를 보면 SPM은 호 내에서 체거 기작을 보이고 있으나, TOC와 DOC는 첨가 기작을 보이고 있어 호 내에서 유기물질이 생성되고 있음을 지시한다(Fig. 8). 또한 식물플랑크톤의 밀도를 간접적으로 지시하는 Chl-*a*의 농도는 하계에 높게 관측되고(Jeong *et al.*[2014]), TOC와 Chl-*a*가 양의 상관관계($r=0.500$, $p=0.000$, $n=89$)를 보이고 있어 하계에 생물활동에 의한 유기물의 생산이 높게 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 결과적으로 하계에 표층에서 높은 유기물 생산과 이들의 침전은 퇴적물 또는 저층에서 지속적인 용존산소의 소모를 유발하고, 이 시기에 강하구 쪽의 강한 염분성층은 표층과 저층간의 수직교환을 약화시킴으로써 저층에 저산소층의 형성을 유발시키는 것으로 판단된다. 저층에 저산소 또는 무산소 환경이 조성되면 퇴적물로부터 NH₄-N, DIP 및 중금속이 용출되는 것으로 보고되어 있어(Bates and Neafus[1980]; Löfgren

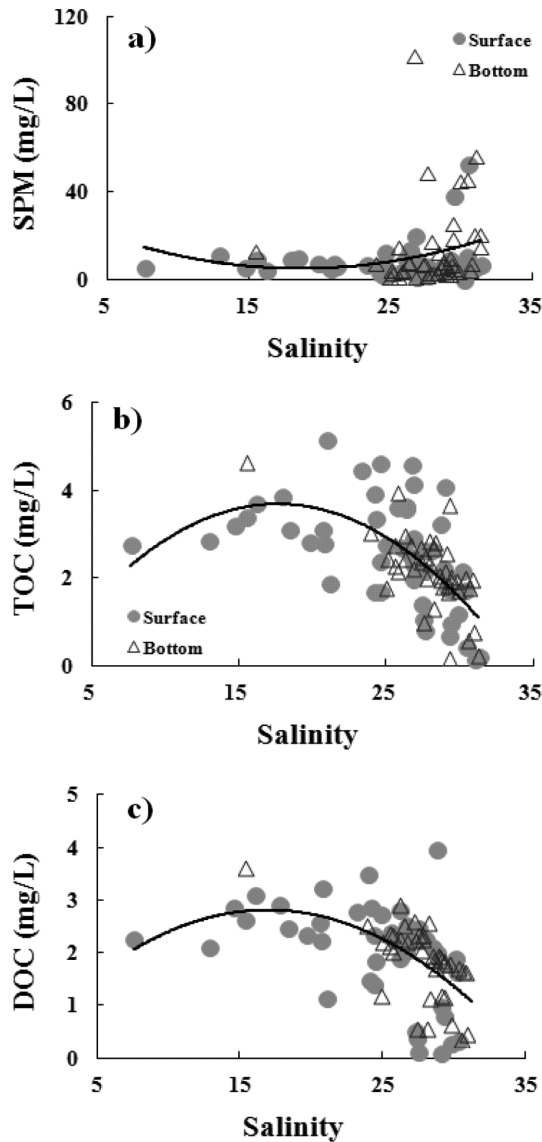


Fig. 8. Relationships between a. SPM vs. salinity, b. TOC vs. salinity, c. DOC vs. salinity in 2010.

and Boström[1989]; Park *et al.*[1997]; Mayer *et al.*[1999]; Ji *et al.*[2009]), 이러한 저산소층이 관찰되는 시기에 퇴적물은 이들 물질들의 중요한 공급원으로써 역할을 할 것으로 판단된다. 특히 2010 년도에 관측된 저층수의 DO와 NH₄-N, DIP가 강한 음의 상관관계 (NH₄-N: r=-0.696, p=0.000, n=43, DIP: r=-0.731, p=0.000, n=43)를 보이는 것은 퇴적물로부터 이들 영양염의 용출을 강하게 암시하고 있다.

퇴적물로부터 영양염의 용출과 용존산소 소모는 퇴적물의 조성에 의해 영향을 받는데, Kim *et al.*[2009]은 방조제가 건설되기 이전에 표층 퇴적물의 silt+clay의 함량은 10%(1989년) 미만이었으나, 방조제 끝물막이 이후에는 11~93%(2007년)로 증가하였고, 특히 강하구 쪽에서 이러한 세립화가 더 심화되고 있다고 보고하였다. 이 연구의 결과에서도 silt+clay의 함량이 유사한 지역에서도 편

차가 크게 나타나고는 있지만, 강하구에 위치한 정점들이 방조제에 위치한 정점들보다 더 높게 나타나고 있다. 유사한 지역들 간에 입도의 범위가 크게 나타난 것은 기존의 연구에서도 보고되고 있으며, 이러한 이유는 배수갑문의 조작 현황 등에 따라서 입도가 영향을 받기 때문으로 보인다(KRC[2009]). 표층 퇴적물 내 TOC와 IL의 함량은 강하구 쪽이 방조제 인근보다 높게 나타나고 있으며(Fig. 7), silt+clay 함량과 TOC는 상관성이 잘 나타나지 않지만, silt+clay 함량과 IL(r=0.715, p=0.009), IL과 TOC(r=0.686, p=0.002)는 강한 양의 상관관계를 나타내고 있어 상대적으로 입도가 더 세립한 강하구 쪽의 표층 퇴적물에 유기물 함량이 높다는 것을 알 수 있다. 특히 동일 시기에 관측된 식물플랑크톤의 현존량이 강하구 쪽에서 7월과 8월에 가장 높고(MLTMA[2011]), 호 내 표층 퇴적물의 유기물질이 주로 해양성조류에서 기인하고 있으므로(KRC[2009]), 이 시기에 수층에서 생산된 유기물질이 표층 퇴적물의 유기물질 함량에 영향을 미칠 수 있을 것이다. 또한 공극수 내 DOC의 농도는 다른 시기에 비하여 상대적으로 8월~10월에 높은 농도를 보이고 있어 수온이 높은 이시기에 미생물의 분해활동이 활발하게 진행되고 있음을 보여준다(Fig. 7). 결과적으로 수온이 높은 하계에 활발한 미생물의 분해활동과 이와 동시에 강하구 쪽에서 강하게 발달한 염분성층은 저층의 용존산소를 결핍시키는 원인으로 작용했을 것이다.

5. 결 론

새만금 방조제 끝물막이 이후 조성된 새만금호의 장기적인 표층 수질의 변화를 Table 4에 정리하였다.

새만금 방조제 끝물막이 직후 해수의 교환을 감소와 함께 염분은 감소하였고, 이후 장기간 동안 염분은 감소된 상태를 유지하였다. 호 내의 SPM의 농도는 방조제 끝물막이 직후 조석의 차단으로 인하여 감소하였으며, Chl-*a*는 증가하였다. 그러나 끝물막이 이후 3~4년이 경과된 이후에 SPM의 농도는 다시 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 SPM의 변동은 호 내 수위 변동과 관련된 것으로 판단된다. 반면 Chl-*a*는 방조제 끝물막이 이후 장기간 계속 증가된 상태를 유지하였다. DIN의 모든 항목들은 방조제

Table 4. Summary of water qualities in the Saemangeum Lake due to the sea-dike construction

Condition		Descriptions
Current velocity		Decreased locally increased through sluice gate
Freshwater residence time		Increased
Stratification		Intensified (especially river side, observed hypoxia)
Surface water	Salinity	Early decreased, then continued
	Chl- <i>a</i>	Early increased, then continued
	SPM	Early decreased, then up and down
	DIN	Early on changed, then increased
	DIP	Early decreased, then increased
	DISi	Early increased, then continued

끝물막이 이전과 직후에 변화가 없었으나, 끝물막이 이후 3~4년이 경과된 이후에는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 이 끝물막이 이전보다 증가된 것으로 나타남으로써 $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 끝물막이 이후 서서히 증가되는 수질 인자로 판단된다. DIP는 방조제 끝물막이 직후 SPM의 감소와 Chl- α 의 증가로 인하여 감소하였으나(Yang *et al.*[2008]), 이후 3~4년이 경과된 시기에는 $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 마찬가지로 증가된 것으로 나타나고 있어, 호 내에서 유기물질의 생산 및 축적과 관련된 것으로 판단된다. DIS는 방조제 끝물막이 직후부터 증가하였으며, 이후 장기간 증가된 상태를 유지하였다. 이러한 DIS의 특징은 방조제 끝물막이 이전과 이후에 변화가 없었던 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 비교하면, 새만금호의 DIS는 담수 기원 이외에 다른 유입 기원이 있음을 암시해 주는 것으로 판단된다. 최근 연안역에서 해저지하수를 통한 영양염의 공급이 중요할 수 있음이 보고되고 있어(Kim *et al.*[2005], Beck *et al.*[2007], Kim *et al.*[2008]) 이와 관련된 연구가 필요할 것이다.

한편, 새만금 방조제 끝물막이 이후 새만금호의 공간적인 수질 특성이 강하구와 나머지 지역들로 뚜렷하게 구분되고 있으며, 수직적인 성층도 강하구 쪽에서 상대적으로 더 강하게 관측되었다. 특히 하계에 강하구 쪽에서 강한 염분 성층과 함께 수심 약 1m 이하에서 저산소 상태가 발견되었다. 저산소층의 형성은 퇴적물로부터 영양염 및 중금속 등의 용출을 유발시켜 수질을 악화시키고, 저서생물의 생존을 위협함으로써 이에 대한 대책이 시급하게 필요하다.

후 기

이 연구의 수질분석은 군산대학교 해양생물연구교육센터의 분석장비를 사용하였으며, 시료 채집과 분석에 도움을 준 군산대학교 화학해양학실 식구들의 노고에 감사드립니다.

References

- [1] Bates, M.H. and Neafus, N.J., 1980, "Phosphorus release from sediment from Lake Carl Blackwell, Oklahoma", *Wat. Res.*, Vol. 14, 1477-1481.
- [2] Beck, A.J., Tsukamoto, Y., Tovar-Sanchez, A., Huerta-Diaz, M., Bokuniewicz, H.J. and Sanudo-Wilhelmy, S.A., 2007, "Importance of geochemical transformations in determining submarine groundwater discharge-derived trace metal and nutrient fluxes", *Appl. Geochem.*, Vol. 22, 477-490.
- [3] Diaz, J.R. and Rosenberg, R., 1995, "Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioral responses of benthic macrofauna", *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, Vol. 33, 245-303.
- [4] Edmond, J.M., Spivack, A., Grant, B.C., Ming-Hui, H., Zexiam, C., Sung, C. and Xiushau, Z., 1985, "Chemical dynamics of the Changjiang estuary", *Continental Shelf Res.*, Vol. 4, 17-36.
- [5] Han, M.W., Park, Y.C. and Huh, S.-H., 1997, "Benthic fluxes of ammonia and lead in Lake Shihwa", *The Sea*, J. Korean Soc. Oceanogr., Vol. 2, 69-77.
- [6] Hodoki, Y. and Murakami, T., 2006, "Effects of tidal flat reclamation on sediment quality and hypoxia in Isahaya Bay", *Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst.*, Vol. 16, 555-567.
- [7] Jeong, Y.H., Kim, C.S. and Yang, J.S., 2014, "Estimation of addition and removal processes of nutrients from bottom water in the Saemangeum salt-water lake by using mixing model", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 17, 306-317.
- [8] Ji, K.H., Jeong, Y.H., Kim, H.S. and Yang, J.S., 2009, "The responses of particulate phosphorus exposed to the fresh water in marine sediment", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 12, 84-90.
- [9] Kim, G., Ryu, J.W. and Hwang, D.W., 2008, "Radium tracing of submarine groundwater discharge (SGD) and associated nutrient fluxes in a highly-permeable bed coastal zone, Korea", *Mar. Chem.*, Vol. 109, 307-317.
- [10] Kim, G., Ryu, J.W., Yang, H.S. and Yun, S.T., 2005, "Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by ^{228}Ra and ^{226}Ra isotopes: Implications for global silicate fluxes", *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 237, 156-166.
- [11] Kim, H., Lee, H., Choi, J.H. and Park, S.S., 2007, "A modeling study for change of tidal zone and flushing rate by the construction of sea dike", *J. of KSEE.*, Vol. 29, 1106-1113.
- [12] Kim, S.-H., Kim, K., Lee, M., Jeong, H.-J., Kim, W.-J., Park, J.-G. and Yang, J.S., 2009, "Enhanced benthic nutrient flux during monsoon periods in a coastal lake formed by tideland reclamation", *Estuar. Coast.*, Vol. 32, 1165-1175.
- [13] KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 2003, Integrated Preservation Study on the Marine Environments in the Saemangeum Area (1st Year) - Water Quality Monitoring, 298p.
- [14] KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 2004, Integrated Preservation Study on the Marine Environments in the Saemangeum Area (4st Year) - Water Quality Monitoring, 266p.
- [15] KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 2005, Integrated Preservation Study on the Marine Environments in the Saemangeum Area (3st Year) - Water Quality Monitoring, 360p.
- [16] KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 2006, Integrated Preservation Study on the Marine Environments in the Saemangeum Area (4st Year) - Water Quality Monitoring, 314p.
- [17] KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), 2007, Integrated Preservation Study on the Marine Environments in the Saemangeum Area(1st Year of 2nd phase, 2007) - Water Quality Monitoring, 321p.
- [18] KRC (Korea Rural Community Corporation), 2007, Water Quality Study for the Saemangeum Reclaiming Area (III).
- [19] KRC (Korea Rural Community Corporation), 2009, Water Quality Study for the Saemangeum Reclaiming Area (IV), 425p.
- [20] Lee, C.H., Kang, D.S., Nam, C.H., Lee, B.G. and Ryu, H.G.,

- 2001, Integrated Management Strategies for Estuarine Environments in Korea, Korea Maritime Institute, 369p.
- [21] Löfgren, S. and Boström, B., 1989, "Interstitial water concentrations of phosphorus, iron and manganese in a shallow, eutrophic Swedish lake-implications for phosphorus cycling", *Wat. Res.*, Vol. 23, 1115-1125.
- [22] Mayer, T., Ptacek, C. and Zanini, L., 1999, "Sediments as a source of nutrients to hypereutrophic marshes of Point Pelee, Ontario, Canada", *Wat. Res.*, Vol. 33, 1460-1470.
- [23] MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Saemangeum Coastal System Research for Marine Environmental Conservation, 893p.
- [24] MMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries), 2005, Analytical Standard Methods for Marine Environmental Parameters.
- [25] MMAF (Ministry of Maritime Affairs and Fisheries), 2007, A Study on the Improvement of Coastal Management System, 484p.
- [26] Mori, T., Ohtake, H., Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y., 1987, "Significance of a halocline to nutrient cycles in shallow brackish Lake Nakanoumi, Japan", *Hydrobiologia*, Vol. 146, 181-186.
- [27] Ohtake, H., Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y., 1982, "Seasonal and areal features of the lagoonal environment in Lake Nakanoumi, a shallow coastal lagoon in Japan", *Hydrobiologia*, Vol. 97, 15-26.
- [28] Park, Y.C., Park, J.K., Han, M.W., Son, S.K., Kim, M.K. and Huh, S.H., 1997, "Biogeochemical study of dissolved organic and inorganic compounds under oxic/anoxic environment in Lake Shihwa", *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 2, 53-68.
- [29] Parsons, T.R., Maita, Y. and Lalli, C.M., 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, 173 pp.
- [30] Sato, S., 2006, "Drastic change of bivalves and gastropods caused by the huge reclamation projects in Japan and Korea", *Plankton Benthos Res.*, Vol. 1, 123-137.
- [31] Sawaragi, T., 1988, "Current shore protection works in Japan", *J. Coastal Res.*, Vol. 4, 531-541.
- [32] Solórzano, L., 1969, "Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 14, 799-801.
- [33] Wu, R.S.S., 2002, "Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses", *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 45, 35-45.
- [34] Yang, J.S., Jeong, J.Y., Heo, J.T., Lee, S.H. and Choi, J.Y., 1999, "Chemical mass balance of materials in the Keum River Estuary 1. Seasonal distribution of nutrients", *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, Vol. 4, 71-79.
- [35] Yang, J.S., Jeong, Y.H., Ji, K.H., Kim, H.S., Choi, J.H. and Kim, W.J., 2008, "The early-stage changes of water qualities after the Saemangeum sea-dike construction", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 11, 199-213.
- [36] Yin, K., 2002, "Monsoonal influence on seasonal variations in nutrients and phytoplankton biomass in coastal waters of Hong Kong in the vicinity of the Pearl River estuary", *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 245, 111-122.

Received 16 July 2014

1st Revised 24 September 2014, 2nd Revised 12 May 2015

Accepted 14 May 2015