

## 계절별로 조사한 조석에 따른 아산만의 수질 변동

김세희 · 신용식\*

목포해양대학교 해양시스템공학과

## Semidiurnal Tidal Variation in Water Quality in Asan Bay during four Seasons

Se Hee Kim, Yong Sik Shin\*

Department of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

### Corresponding Author

Yong Sik Shin

Department of Ocean System  
 Engineering, Mokpo National Maritime  
 University, Mokpo 58628, Korea  
 E-mail : yongsik@mmu.ac.kr

Received : May 14, 2020

Revised : June 02, 2020

Accepted : June 03, 2020

아산만은 방조제 갑문을 통한 담수 유입과 외해인 서해로부터 해수가 유입되는 하구의 특성을 나타내는 곳으로, 반일주조형 조석을 가진 조수간만의 차가 크게 발생하는 해역이다. 하구에서 조석은 단기적인 물리·화학적 수질 특성 변화 및 생물학적 반응에 영향을 미칠 수 있어 조석에 따른 수질 변화를 파악하는 것은 중요하다. 본 연구는 아산만의 고정 정점에서 계절별로 2시간 간격으로 24시간 동안 조사하여 조석에 따른 수질 변동을 파악하고자 하였다. 연구 결과, 조위에 따른 수온과 염분의 변동이 확인되었고, 염분은 특히 조위와 유의한 양의 상관성을 보였다. 총부유물질의 경우 표층보다 저층의 농도가 높고, 조석에 따라 농도의 차이가 특히 저층에서 크게 나타났으며, 간조 시 높아지는 경향을 보였다. 영양염류인 아질산+질산성 질소도 조위 양상과 반대의 분포로 나타났으며, 상관성 분석 결과에서도 유의한 음의 상관성을 보였다. 나머지 영양염류들도 다소 약하지만 유사한 형태의 변동을 보였고, 담수 유입의 영향을 받은 7월에는 반대 경향이 더욱 명확하게 나타났다. 유기물 및 총질소, 총인의 경우 조석 주기 동안의 시간 변동이 다소 크게 나타났고, 대체적으로 조위와 반대의 분포를 보여 주었다. 입자 유기물을 제외하고 대부분 염분과 유의한 음의 상관성을 보여 무기질 영양염류와 유사하게 담수 유입이 공급원임을 암시하고 있다. 결국 아산만에서는 용존산소, pH 등 일부를 제외한 수질 인자와 영양염류 및 유기물의 시간적 변동에 조석이 관여하여 단기적 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

The Asan Bay, which has semi-diurnal tide with macro-tidal range, is affected by both freshwater discharge from the sluice gates in the sea dikes and tidal seawater inputs from the Yellow sea. Understanding water quality change in response to tides is important since tides can impact the short-term variations in physical and chemical water properties as well as the response of biological properties. The diel variations in water quality were seasonally investigated at 2 hour intervals from a fixed station in the Asan Bay. In the results, water temperature and salinity consistently fluctuated in phase or out of phase with tidal height. Especially salinity was positively correlated with tidal height. The concentrations of total suspended solids were higher in the bottom water than in the surface and fluctuated greatly over the tidal cycle recording higher values at low tide than at high tide. Nitrite+nitrate levels also fluctuated out of phase with tidal height and correlated negatively with tidal height. Other nutrients also showed a similar pattern. The pattern was distinct in July when freshwater was discharged before the field sampling. The concentrations of organic materials, total nitrogen and total phosphorus greatly fluctuated over the tidal cycle and were generally out of phase with tidal height. Most materials except particulate organic forms were correlated with salinity indicating that freshwater inputs were sources for the materials similarly to the dissolved inorganic nutrients. The results suggest that water quality (except dissolved oxygen and pH) and nutrients including organic materials was largely affected by tides in the Asan Bay.

**Keywords:** Asan Bay(아산만), Tide(조석), Water quality variation(수질 변동), Nutrient(영양염류)

## 서론

하구는 담수와 해수가 혼합되는 전이수역으로 조석, 파랑, 담수 유입 등과 같은 수리적 작용의 영향을 받아 물리·화학적, 생물학적으로 매우 복잡한 환경이다. 또한, 육상에서 전달되는 영양물질로 인해 해양생태계 중에서 가장 생산적인 시스템 중의 하나이지만(Ryther, 1969), 반대로 인간의 경제활동에 의한 환경오염부하의 영향을 가장 많이 받기 때문에 부영양화가 발생할 수도 있는 해역이다.

해양 조석은 주로 달·태양의 인력에 의한 천문 조석으로 발생하며, 지역에 따라 일주조(Diurnal tide), 반일주조(Semidiurnal tide) 등의 조석 형태를 띠게 된다. 조석은 하구에서 조석 주기 동안 단기적인 물리·화학적 수질 특성 변화(Montani et al., 1998) 및 생물학적 반응에 영향을 미칠 수 있다고 알려져 있다(Davies and Ugwumba, 2013). 하구의 경우, 조석의 영향이 큰 시스템으로 그 영향이 짧게는 만조와 간조 등 조위에 따른 시간 간격(diurnal or semidiurnal), 그리고 길게는 대조와 소조의 반월 즉 2주 간격(fortnight)으로 수층 혼합과 성층이 반복되어 나타난다(Haas, 1977). 하구의 영양염류 분포는 일반적으로 물리적인 작용과 생지화학적 과정에 의해 조절되는데, 조석 주기 동안에도 창조류와 낙조류에 의한 수괴의 교환 정도에 따라 영양염류의 양이 달라지고, 물리적 혼합 과정을 통해서 영양염류의 분포가 달라진다고 보고된 바 있다(Ande and Xisan, 1989).

아산만은 국내에서 가장 조수간만의 차가 큰 개방형 만으로 조류가 강하게 나타나는 대조차 해역(Park, 2000)이지만 1970년대부터 건설된 방조제(아산만, 삼교천, 화웅, 석문, 남양, 해바라기, 송산, 탄도, 대호)에 의해 해안선이 단조로워졌다. 이로 인해, 만 내에는 해수 유동 변화, 토사 축적, 조석 변화 등 많은 해양환경 변화가 보고된 바 있다(Park, 2008; Kim, 2012). 아산만은 방조제의 갑문을 통해 만 내로 유입되는 담수가 인위적으로 조절되고 있는 상태이다(Gyeonggi-do, 1994; K-Water, 2002). Li et al. (2013)의 연구 결과에 따르면, 방조제와 같은 인공구조물 건설은 하구에서 담수의 흐름을 정체시켜 수질 악화의 원인이 될 수 있으며, 서식하는 생물상의 변화를 초래할 수 있다. 또한, 부영양화된 담수가 방조제를 통해 만으로 유입될 경우 수질과 생태계에 영향을 미칠 수 있다(Sin et al., 2012; Sin and Jeong, 2015).

현재까지 아산만의 수질 및 조석에 대한 선행연구는 영양염류 변동(Moon et al., 1993; Park et al., 2007; Jeong et al., 2016a) 및 담수 유입에 따른 수질 변화(Seo, 2010; Jeong et al., 2016b), 방조제 건설에 따른 조석 변화(Park, 2008; Kim, 2012), 조석에 따른 식물플랑크톤의 변동(Sin et al., 2015) 등의 연구가 진행되었다. 그러나 조석 작용에 따른 수질 변화에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구는 아산만의 고정 정점에서 24시간(2시간 간격) 동안 계절별로 조사된 자료를 활용하여 조석에 따른 수질 변동을 파악하고자 하였다. 이러한 연구는 큰 조차로 인해 조석의 영향이 많

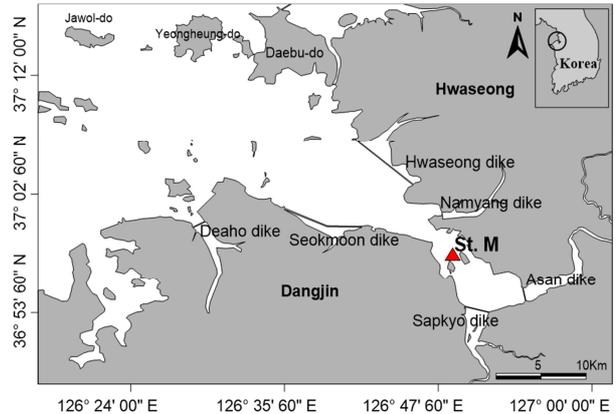


Fig. 1. Sampling station in the Asan Bay.

을 것으로 예상되는 아산만 생태계를 이해하고 관리하는데 필요한 정보 및 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 재료 및 방법

본 연구의 현장조사는 아산만 내의 고정된 정점(St. M; Fig. 1)에서 2007년 2월 7일, 5월 2일, 7월 31일, 11월 13일에 일 2회 조석 주기 동안 2시간 간격으로 실시되었다. 조사는 조수간만의 차가 큰 대조(사리; Spring Tide)에 실시되었으며, 조위(Tidal Height)는 평택항을 기준으로 국립해양조사원(www.khoa.go.kr, 2007) 자료를 활용하였다. 담수 방류량 자료는 한국농어촌공사(www.ekr.or.kr, 2008)에서 제공된 자료를 이용하였다.

수심(Water depth), 수온(Temperature), 염분(Salinity), 용존산소(Dissolved Oxygen), pH는 CTD (YSI® - model 6600) 장비를 이용하여 측정된 자료를 이용하였다. 총부유물질(Total Suspended Solids)은 GF/C(직경 47 mm, pore size 1.2  $\mu\text{m}$ , whatman®)에 여과 전·후의 건조 중량 차이로 계산되었다. 영양염류(아질산+질산성 질소;  $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ , 암모니아성 질소;  $\text{NH}_4^+$ , 인산염;  $\text{PO}_4^{3-}$ , 규산염; DSi)는 GF/F(직경 25 mm, pore size 0.7  $\mu\text{m}$ , whatman®)로 여과된 시료를 Parsons et al. (1984)에 준하여 Auto-analyzer (TRACCS 2000, Bran Luebbe®)를 이용하여 측정된 자료를 분석하였다. 총유기탄소(Total Organic Carbon), 입자성유기탄소(Particulate Organic Carbon), 입자성유기질소(Particulate Organic Nitrogen), 총질소(Total Nitrogen), 총인(Total Phosphorus)은 해양환경공정시험법(MOMAF, 2002)에 따라 측정된 자료를 활용하였다.

조석과 수질인자의 상관성을 파악하기 위해 SPSS 26.0을 이용하여 조위와 물리·화학적 환경인자 간의 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시하였다.

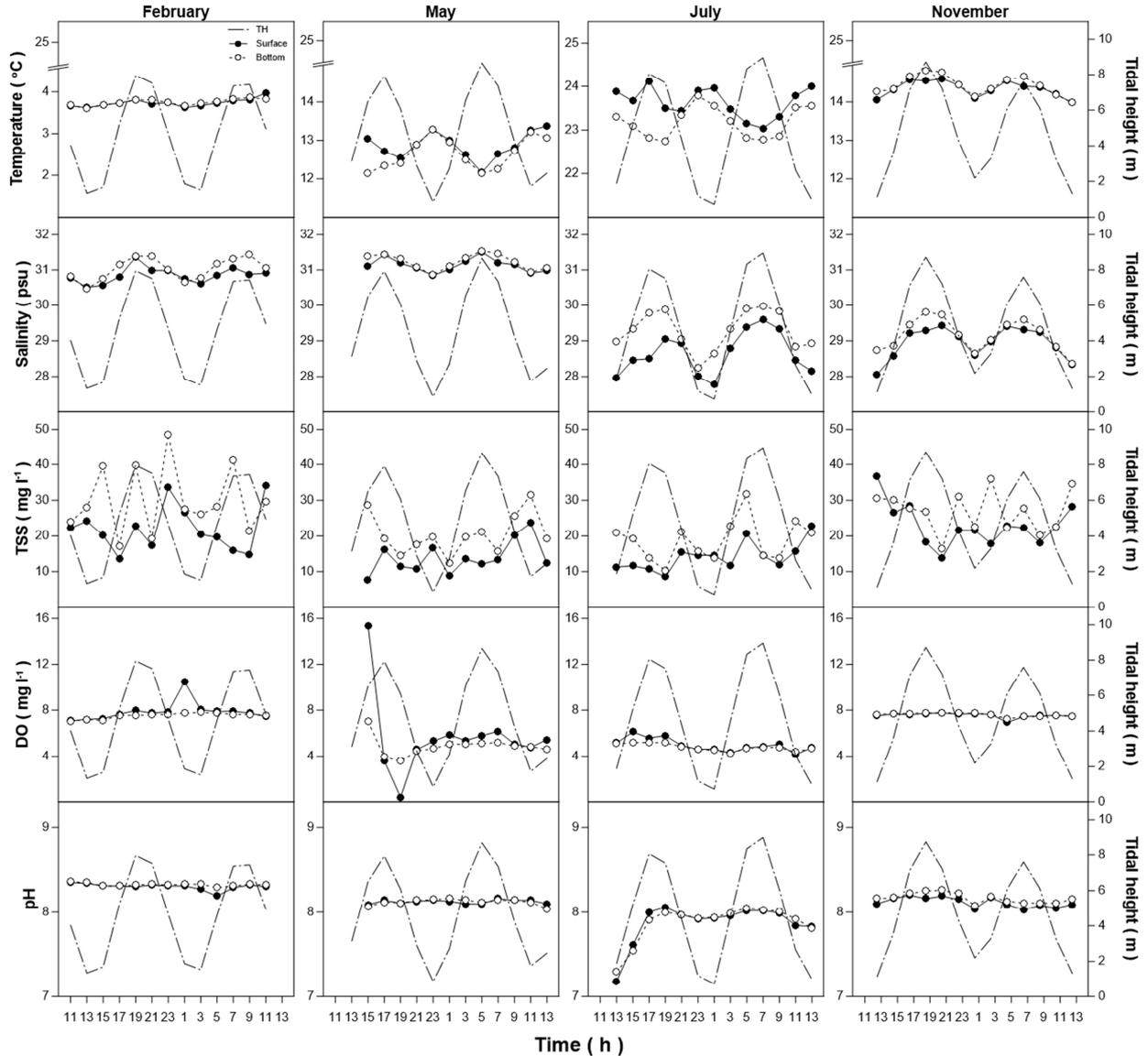


Fig. 2. Semidiurnal variations in tidal height (TH), temperature, salinity, total suspended solids (TSS), dissolved oxygen (DO) and pH.

## 결과

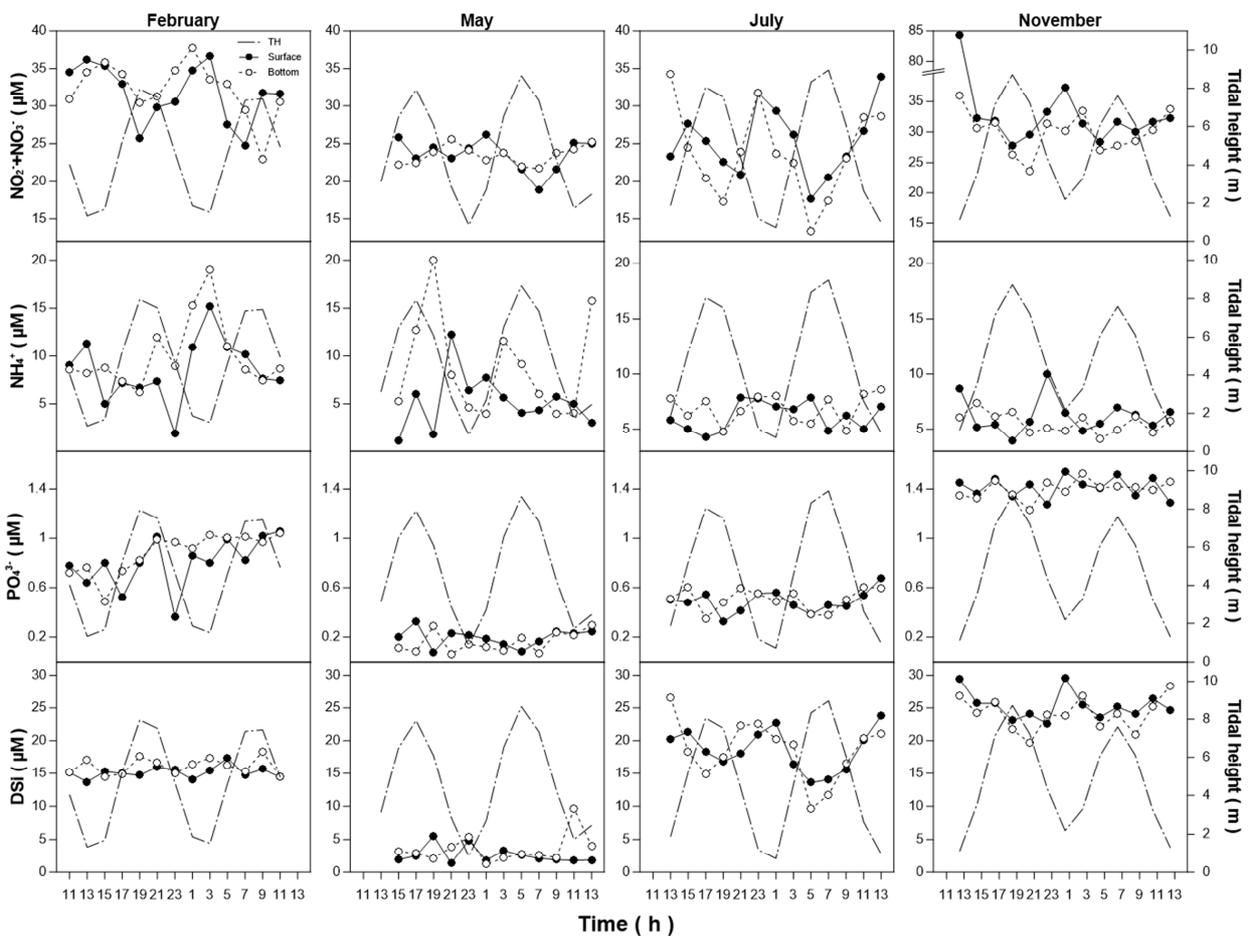
### 1. 조위, 담수 방류량 및 물리·화학적(수온, 염분, TSS, DO, pH) 환경 특성

연구 기간 동안 조위(TH)는 0.72~8.96 m의 범위로 나타났다(Fig. 2). 담수 방류량은 조사 기간 및 조사 전 5일 동안 0~13.90×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 분포를 나타냈다. 5월에는 담수 방류가 없었으며 풍수기인 7월에 20.72×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>으로 가장 많은 방류량을 보였다(Table 1). 수온은 동계인 2월에 평균 3.74±0.09°C로 가장 낮았고, 하계인 7월

에 23.40±0.41°C로 가장 높아 뚜렷한 계절적 분포를 보였다(Fig. 2). 표·저층간 수온 차는 7월에 0.09~1.31°C로 발생하였으나, 5월 15시를 제외하고 다른 계절에는 미미하게 나타났다. 수온의 시간적 변동은 5월과 7월의 경우 만조 시 낮은 값을 보이고, 간조 시 높은 값을 나타내 조위 반대 양상을 보였으나 2월과 11월은 매우 미세한 차이는 하지만 조위 양상에 따라 변동하였다. 염분은 모든 계절 동안 조위 양상과 일치하여 만조 시 높은 값을 나타냈고, 간조 시 낮은 값을 보였다(Fig. 2). 염분의 분포는 27.77~31.54 psu 범위로, 7월의 표층에서 평균 농도 28.97±0.65 psu로 낮은 값을 보였으며, 표·저층 염분차(0.14~1.29 psu)가 발생하였다. 총부유물질

**Table 1.** Total amount of discharge (5 days) before the sampling date in the Asan Bay

Sampling date	Discharge from dike ( $\times 10^6$ m <sup>3</sup> )					
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	Total
February (2007.02.07)					13.90	13.90
May (2007.05.02)						
July (2007.07.31)	12.22		4.35		4.15	20.72
November (2007.11.13)	8.13					8.13



**Fig. 3.** Semidiurnal variations in tidal height (TH) and nutrients ( $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , DSi).

(TSS)은 표·저층 각각  $7.70 \sim 36.70$  ( $18.34 \pm 6.73$ )  $\text{mg l}^{-1}$ ,  $10.30 \sim 48.60$  ( $24.04 \pm 8.17$ )  $\text{mg l}^{-1}$ 로 저층에서 높은 값을 보였으며, 시간에 따른 변동이 다소 크게 나타났다(Fig. 2). 계절적으로는 봄, 여름철(5월, 7월)에 평균 농도  $16.76 \pm 5.66$   $\text{mg l}^{-1}$ 로 낮은 경향을 보였다. 용존산소(DO)는  $0.41 \sim 15.37$   $\text{mg l}^{-1}$ 의 범위로, 대부분의 연구 기간 동안

평균  $6.37 \pm 1.80$   $\text{mg l}^{-1}$  내 미미한 변동을 보였으나 5월에 15~19시 동안 표층 분포가  $15.37$   $\text{mg l}^{-1}$ 에서  $0.41$   $\text{mg l}^{-1}$ 로 급격히 감소하여 일시적인 시간적 변동이 나타났다(Fig. 2). pH는 7.18~8.36의 분포를 보였으며, 표·저층 염분차가 크게 발생했던 7월에 13~15시 동안 pH 농도가 7.18~7.61로 가장 낮게 나타났다(Fig. 2).

### 2. 영양염류 및 유기물

영양염류 중 아질산+질산성 질소( $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ )는 13.29~37.79  $\mu\text{M}$  범위로 나타났다(Fig. 3). 2월과 11월에 평균 농도  $31.96 \pm 3.46 \mu\text{M}$ ,  $32.76 \pm 10.93 \mu\text{M}$ 로 높은 분포를 보였으며, 11월의 11시~13시 동안 표층 농도가 84.37  $\mu\text{M}$ 로 급증하였다. 전반적인 아질산+질산성 질소 분포는 만조 시 낮고, 간조 시 높은 조위 반대 양상의 경향을 보였다. 암모니아성 질소( $\text{NH}_4^+$ )는 1.14~20.06  $\mu\text{M}$  분포 범위를 나타냈으며, 2월과 7월은 조위 반대 양상을 보였으나 다른 계절에는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다(Fig. 3). 11월에는 일부

시간대(13시, 23시) 동안 표층 농도가 8.73~9.97  $\mu\text{M}$ 로 급증하였으나, 평균 농도는  $5.90 \pm 1.33 \mu\text{M}$  분포로 다른 계절에 비해 낮은 분포를 보였다. 인산염( $\text{PO}_4^{3-}$ )은 0.07~1.54  $\mu\text{M}$  범위로 나타났다(Fig. 3). 암모니아성 질소와 반대로 11월에 평균 농도  $1.40 \pm 0.08 \mu\text{M}$ 로 높은 분포를 보였으며, 5월에  $0.18 \pm 0.08 \mu\text{M}$ 로 낮은 분포를 나타냈다. 조위 양상과 반대의 경향을 보인 7월을 제외하고 대부분 조석에 따른 특이적 양상을 보이지 않았다. 규산염(DSi)은 1.21~29.65  $\mu\text{M}$  범위로 가을철( $24.73 \pm 2.39 \mu\text{M}$ )에 높고 봄철( $3.09 \pm 1.83 \mu\text{M}$ )에 낮은 분포를 보이며, 인산염과 유사한 계절적 경향을 나타냈다(Fig. 3). 7월의 경우, 모든 영양염류(아질산+질산성 질소, 암모

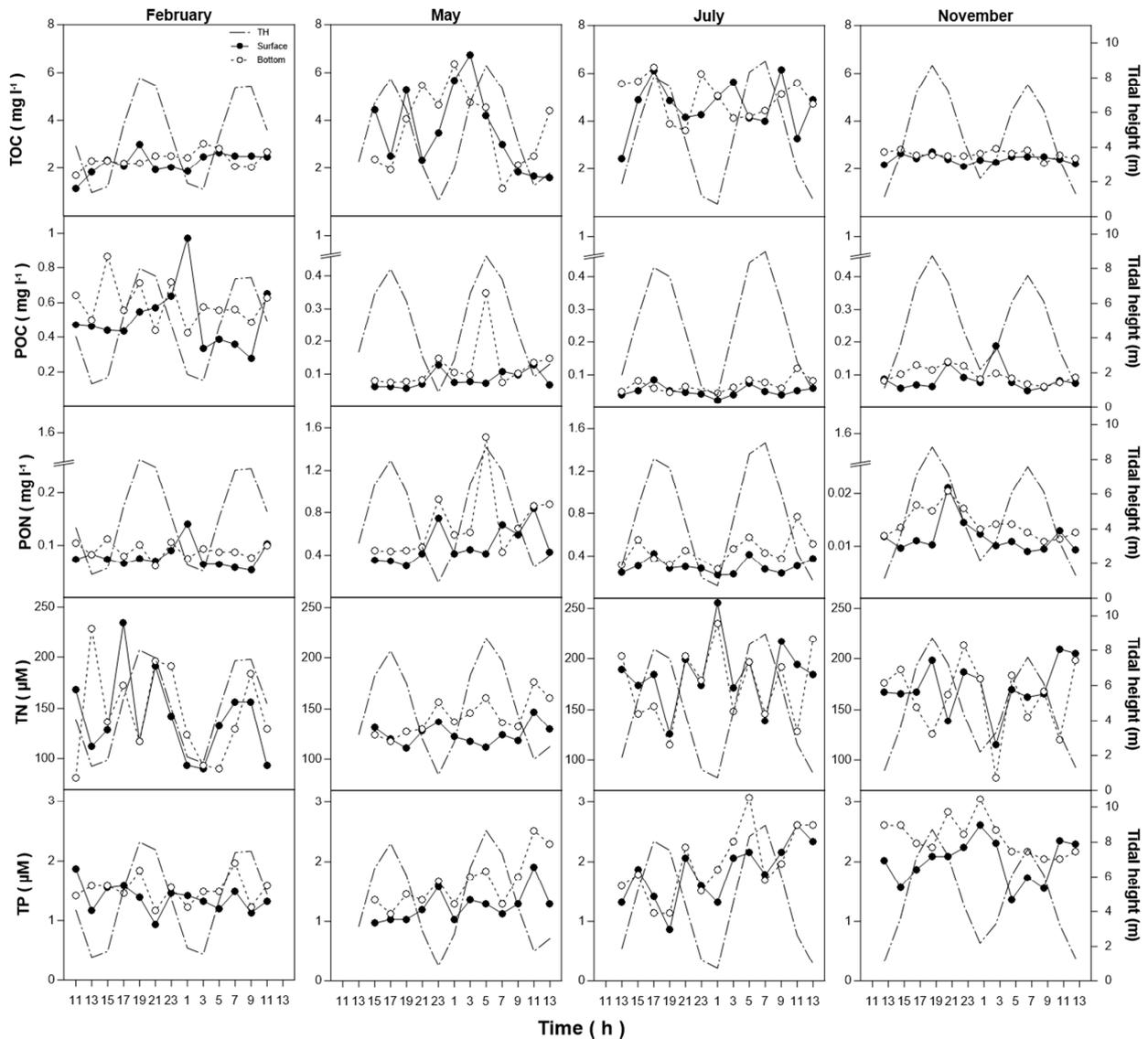


Fig. 4. Semidiurnal variations in tidal height (TH), total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP).

**Table 2.** Correlation of tidal height, physical-chemical properties and nutrients of the Asan Bay during the sampling period ( $N=102$ )

	TH	Depth	Temp.	Sal.	TSS	DO	pH	NOx	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	DSi	TOC	POC	PON	TN
Depth															
Temp.															
Sal.	.31**	.27**	-.69**												
TSS		.38**	-.41**												
DO			-.52**		.32**										
pH			-.79**	.56**	.37**	.44**									
NOx	-.43**		-.31**	-.25*	.45**	.39**									
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		.25*	-.32**	.23*				.20*							
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>				-.45**	.45**	.58**	.23*	.51**							
DSi			.21*	-.78**	.31**	.32**		.48**		.82**					
TOC			.62**	-.22*	-.46**	-.48**	-.52**	-.32**		-.46**					
POC		.24*	-.79**	.50**	.49**	.43**	.60**	.28**	.33**			-.42**			
PON			.32**	.30**	-.27**	-.57**	-.30**	-.47**		-.76**	-.67**	.46**	-.26**		
TN			.39**	-.52**			-.33**				.41**		-.27**		
TP			.36**	-.53**	.35**					.43**	.50**		-.27**		.39**

\*\* $p < 0.01$ , \* $p < 0.05$ , TH: tidal height, Depth: water depth, Temp.: water temperature, Sal.: salinity, TSS: total suspended solids, DO: dissolved oxygen, NOx: nitrite+nitrate, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: ammonium, DSi: dissolved silicate, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>: phosphate, TOC: total organic carbon, POC: particulate organic carbon, PON: particulate organic nitrogen, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus

니아성 질소, 인산염, 규산염)가 조위와 반대 양상으로 만조 시에 낮고, 간조 시에 높아지는 경향을 보였다.

총유기탄소(TOC)의 분포는 1.14~6.75 mg l<sup>-1</sup>로 나타났으며, 5월과 7월에 평균 3.63±1.63 mg l<sup>-1</sup>, 4.77±0.96 mg l<sup>-1</sup>의 높은 값을 보였다(Fig. 4). 7월에는 간조 시(13시) 일시적으로 표층에서 2.44 mg l<sup>-1</sup>의 낮은 값을 보이다 만조 시(17시)에 6.26 mg l<sup>-1</sup>로 증가하여 높은 분포를 나타냈다. 입자성유기탄소(POC)는 0.02~0.97 mg l<sup>-1</sup>의 분포를 보였으며, 평균 농도 0.55±0.16 mg l<sup>-1</sup>로 2월에 높은 분포를 나타냈다(Fig. 4). 유기탄소는 연구 기간 동안 만조 또는 간조 시에 일시적인 변동은 발생하였으나, 조석에 의한 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 입자성유기질소(PON)는 2월과 11월에 0.01~0.14 (0.048±0.038) mg l<sup>-1</sup>의 낮은 분포를 보였으며, 5월과 7월에 0.22~1.51 (0.48±0.24) mg l<sup>-1</sup>의 높은 분포를 나타냈다(Fig. 4). 2월과 5월 표층의 경우, 조위 양상과 반대의 분포를 보였지만 조석에 따른 명확한 형태는 나타나지 않았다. 총질소(TN)의 분포는 81.39~255.44 μM 범위를 보였다(Fig. 4). 2월에는 21~11시 동안 총질소 분포가 조위 양상과 일치하여 변동하였으나 저층의 경우 일부 시간차가 발생하였다. 나머지 계절에는 대체적으로 조위와 반대의 분포를 보였다. 7월에는 간조 시(1시) 235.07~255.44 μM로

연구 기간 중 가장 높은 값을 나타냈다. 총인(TP)은 0.86~3.07 μM의 범위를 보였으며, 11월에는 간조 시(1시) 2.60~3.05 μM로 가장 높은 값을 나타냈다(Fig. 4). 총인의 경우 전체적으로 조위 양상과 반대의 형태를 보였다.

### 3. 상관분석

조석과 영양염류를 포함한 수질인자들의 상관성 분석 결과는 Table 2에 제시되었다. 조위는 염분과 유의한( $p < 0.01$ ) 양의 상관관계를 보인 반면, 수질항목에서는 유일하게 아질산+질산성 질소와 유의한( $p < 0.01$ ) 음의 상관성을 보였다. 염분은 pH, 입자성유기탄소, 입자성유기질소 및 암모니아성 질소와 유의한( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ) 양의 상관관계를 나타냈다. 또한, 아질산+질산성 질소, 총유기탄소 및 수온, 인산염, 규산염, 총질소, 총인과 음의 상관성( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )을 보이며, 염분은 모든 영양염류와 상관관계를 나타냈다. 수온은 총부유물질, 용존산소, pH, 아질산+질산성 질소, 암모니아성 질소, 입자성유기탄소와 모두 유의한( $p < 0.01$ ) 음의 상관성을 보였으며, 규산염 및 총유기탄소, 입자성유기질소, 총질소, 총인과 유의한( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ) 양의 상관성을 나타냈다. 수온은 인산염

을 제외한 영양염류와 모두 상관관계를 보였다. 총부유물질은 용존산소, pH, 아질산+질산성 질소, 인산염, 규산염, 입자성유기탄소, 총인과 유의한( $p < 0.01$ ) 양의 상관성을 나타냈으며, 총유기탄소, 입자성유기질소와 유의한( $p < 0.01$ ) 음의 상관성을 보였다. 용존산소는 pH, 아질산+질산성 질소, 인산염, 규산염, 입자성유기탄소와 유의한( $p < 0.01$ ) 양의 상관성을 나타냈으며, 총유기탄소, 입자성유기질소와 유의한( $p < 0.01$ ) 음의 상관성을 보였다. 용존산소는 총인을 제외하고 총부유물질의 상관관계 결과와 유사한 상관성 결과를 나타냈다. 아질산+질산성 질소는 암모니아성 질소 및 인산염, 규산염, 입자성유기질소와 유의한( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ) 양의 상관성을 보였으며, 총유기탄소, 입자성질소와 유의한( $p < 0.01$ ) 음의 상관관계를 나타냈다. 인산염은 규산염, 총인과 유의한( $p < 0.01$ ) 양의 상관성을 보였으며, 규산염은 총질소, 총인과 유의한( $p < 0.01$ ) 양의 상관관계를 나타냈다. 총질소와 총인은 서로 유의한( $p < 0.01$ ) 양의 상관성을 보였다. 영양염류간의 상관분석 결과, 아질산+질산성 질소는 가장 많은 영양염류와 상관성을 나타내고, 암모니아성 질소는 가장 적은 상관관계를 보였다.

## 고찰

아산만은 방조제 갑문을 통한 담수 유입과 외해인 서해로부터 해수가 유입되는 하구의 특성을 나타내는 곳으로 12시간 25분의 주기를 가지는 반일주조형 조석이 우세하게 나타나고 조수간만의 차(9 m)가 크게 발생하는 해역이다. 아산만의 해수 유동은 조석이 지배적이며(Choi, 1996), 창조·낙조 시 수괴의 평균 이동거리는 약 13 km로 보고되었다(OHA, 1992). 이렇게 조석이 우세한 만에서는 조석에 의한 수층 혼합이 활발할 것으로 예상된다. 실제로 본 연구 결과에서도 표층과 저층 간의 염분차가 최대 1.29 psu였던 7월을 제외하고 대부분의 조사에서 1 psu 미만으로 나타났다. 특히 현장 모니터링 조사가 당일 방류가 없었던 대조 시에 이루어졌기에 더욱 이러한 결과가 도출되었을 것으로 판단된다. 조위에 따른 수온의 변화는 추운 계절보다는 따뜻한 계절인 봄과 여름에 다소 높게 나타났다. 특히 7월에는 표·저층 간의 차이가 다른 조사 시기에 비해 높게 나타났는데 이는 조사 전 발생한 높은 수온의 담수 방류로 인한 영향으로 사료된다.

하구에서 발생하는 염분 변동은 담수 유입량, 조석의 진폭과 위상 변화, 수직·수평적 혼합 작용, 해안 지형 등 시·공간적인 영향에 의해 나타난다(Savenije, 2005). 본 연구의 상관분석 결과에서 염분은 조위, 수심과 양의 상관성을 보였으며, 수온과 음의 상관성을 나타냈다. 이러한 상관성은 아산만에서 염분 변동이 풍수기인 여름철 유입된 담수와 조석의 영향을 받는다는 사실을 의미한다. 아산만의 염분은 일반적으로 담수의 영향을 받는 방조제 인근 해역에서 외해로 나갈수록 증가하는데, 담수 유입이 증가하는 풍수기에는 그 증가 폭이 큰 것으로 나타났다(Sin et al., 2015). 따라서 저위에서 고위로 가는 만조 시에는 창조류에 의해 염분이

증가하고 반대로 간조 시에는 낙조류에 의해 염분이 감소하는 것으로 보인다. 수온은 계절에 따라 다소 차이를 보이는데 여름철에는 방조제 인근 해역의 수온이 높고, 겨울철에는 오히려 외양에서 높은 수평적 분포를 보이면서 조석 동안 나타나는 변동이 계절별로 상이하게 나타나게 되었을 것으로 추정된다. 이러한 창조류, 낙조류가 물리적 환경에 미치는 영향은 선행연구를 통해 보고된 바 있다(Huzzey and Brubaker, 1988; Wong, 1995; Arndt et al., 2007). 물리적 환경 변동과 더불어 화학적 수질인자들도 이들 조석에 의한 창조류, 낙조류의 영향을 받을 것으로 예상된다. 본 연구에서 조위는 염분( $r = 0.31$ ,  $p < 0.01$ ), 아질산+질산성 질소( $r = -0.43$ ,  $p < 0.01$ )와 상관성을 보였으며, 조위 위상에 따라 염분이 위상과 일치하는 변동과 아질산+질산성 질소의 시간차 변동(위상과 반대)이 발생하였다. 염분과 영양염류의 상관관계는 대부분 음의 상관관계를 보이며, 그 중에서 아질산+질산성 질소와 음의 상관성은 선행연구(Moon et al., 1993)의 결과와 일치한다. 또한, 조위에 따라 간조 시 높고, 만조 시 낮은 아질산+질산성 질소의 분포는 Seo (2010)의 연구와 유사한 결과로, 조사 전 발생한 담수 방류는 아질산+질산성 질소의 공급원으로 작용하였으며, 조석에 따른 변동이 나타난 것으로 사료된다.

규산염은 아질산+질산성 질소와 같은 다른 영양염류보다 상대적으로 수온의 영향을 크게 받으며(Rahm et al., 1996), 표층에서 주로 식물플랑크톤의 섭취에 의해 제거되고 퇴적층에서 규산질(Siliceous shell) 분해에 의해 생성되어 표층으로 공급된다고 보고되었다(Kim and Kim, 2008). 선행연구(Sin et al., 2015)에 따르면 본 연구 기간 동안 아산만에서 우점종은 규조강으로 나타났으며, 조위에 따른 영향을 받아 개체수가 변동하는 경향을 확인할 수 있다. 본 연구에서 또한 여름과 가을 시기에 높게 나타난 규산염 분포와 조위에 따른 변동(위상과 일치)을 보이며, 규산염과 수온은 서로 상관성( $r = 0.21$ ,  $p < 0.05$ )을 나타냈다. 그러나 염분과 더 높은 상관성( $r = -0.78$ ,  $p < 0.01$ )을 보인 규산염은 화학적, 생물학적 작용보다는 조위에 따라 변동하는 물리적 유동 영향이 크게 작용한 것으로 사료된다.

총부유물질 역시 조위에 따른 시간적 변동이 관찰되었고, 특히 간조 시에 농도가 증가하는 것은 수심 감소에 따른 퇴적층의 총부유물질이 재부유되면서 영향을 주기 때문(Herbert, 1999)인 것으로 추정된다. 용존산소, pH 등은 조석에 따른 뚜렷한 변동이 나타나지 않았고, 이러한 결과는 이들 분포가 조석보다는 생지화학적 작용에 의한 영향이 더 크게 받을 수 있음을 암시한다. 총유기탄소, 입자성유기탄소, 입자성유기질소의 경우 조석에 따른 변동이 상당히 크게(특히, 5월의 저층에서) 나타났으며, 조위 변화 양상과 다소 반대의 분포를 보이면서 조석의 영향이 어느 정도 작용하고 있음을 제시하고 있다. 총질소와 총인도 무기질 영양염류와 같이 조석에 따른 변동이 크고, 조위와 반대 분포를 나타내고 있어 무기질 영양염류와 동일하게 어느 정도 조석의 영향을 받는 것으로 사료된다. 특히 총부유물질과 입자성유기탄소의 양의 상

관성을 토대로 조석 주기 동안 재부유 시의 부유물질 증가는 입자성유기탄소의 증가로 이어질 수 있는 것으로 사료된다. 그러나 총부유물질이 총유기탄소 및 입자성유기질소와는 음의 상관성을 보여 이들의 거동에 대한 해석이 어려운 상황이다. 향후 이에 대한 추가적인 조사를 통해 더 정확한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

요약하면 수질인자 중 수온과 염분은 시간별 조석 주기에 따라 변동하는 형태를 보였고, 염분은 특히 조위와 유의한 양의 상관성을 나타냈다. 총부유물질의 경우 표층보다 저층의 농도가 높고 조석에 따라 농도의 차이가 크게 나타났으며(특히 저층에서), 간조 시 높아지는 경향을 보였는데 이는 퇴적층에서의 재부유 때문인 것으로 추정된다. 용존산소와 pH는 조석 주기 동안 일시적인 변동을 제외하고 전체적으로 미미한 변동이 나타나 조석의 영향이 상대적으로 적다는 것을 보여주고 있다. 영양염류인 아질산+질산성 질소도 조위 양상과 반대의 분포로 나타났으며, 상관성 분석 결과에서도 유의한 음의 상관성을 보였다. 나머지 영양염류들도 약하기는 하지만 유사한 형태의 분포를 보였고, 담수 유입의 영향을 받은 7월에는 그 반대의 분포 형태가 더욱 명확하게 나타났다. 이들 영양염류는 대부분(암모니아성 질소 제외) 염분과 유의한 음의 상관성을 보임으로써 담수 유입이 아산만의 영양염류 공급원으로 작용하고 있음을 시사한다. 유기물 및 총질소, 총인의 경우 조석 주기 동안의 변동이 다소 크게 나타났고, 대체적으로 조위와 반대의 분포를 보여 주었다. 입자성유기물을 제외하고 대부분 염분과 유의한 음의 상관성을 보여 무기질 영양염류와 같이 담수 유입이 공급원으로 작용할 가능성이 크다고 할 수 있다. 결론적으로 반일주조형 조석으로 단기간에 조차가 크게 나타나는 아산만에서는 용존산소, pH 등을 제외한 수질인자와 영양염류 및 유기물의 시간적 변동에 조석이 일정 부분 관여하여 단기적 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Ande F, Xisan J. 1989. Tidal effect on nutrient exchange in Xiangshan Bay, China. *Mar Chem* 27: 259-281.
- Arndt S, Vanderborcht JP, Regnier P. 2007. Diatom growth response to physical forcing in a macrotidal estuary: coupling hydrodynamics, sediment transport, and biogeochemistry. *J Geophys Res* 112: 1-23.
- Choi Y. 1996. A Numerical Modeling of Tidal and Wind-Driven Current in Asan Bay. Department of Oceanography. Master of Science. Graduated school Chungnam National University.
- Davies OA, Ugwumba OA. 2013. Tidal Influence on Nutrients Status and Phytoplankton Population of Okpoka Creek, Upper Bonny Estuary, Nigeria. *J Mar Biol* 1-16.
- Gyeonggi-do. 1994. Basic Plan for Water System Improvement of Balan Donghwacheon River (Balancheon, Donghwacheon, Namjeoncheon, Geomgokcheon, Hadeungcheon, Eocheon, Gupocheon). Korea.
- Haas LW. 1977. The effect of the spring-neap tidal cycle on the vertical salinity structure of the James, York and Rappahannock Rivers, Virginia, USA. *Estuar Coast Shelf S* 5: 485-496.
- Herbert RA. 1999. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. *FEMS Microbiol Rev* 23: 563-590.
- Huzzey LM, Brubaker JM. 1988. The formation of longitudinal fronts in a coastal plain estuary. *J Geophys Res* 93: 1329-1334.
- Jeong Y, Cho M, Lee D, Doo S, Choi H, Yang J. 2016a. Nutrient Budget and Dam Effluence in Asan Bay. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 22: 468-482.
- Jeong Y, Cho M, Lee D, Doo S, Choi H, Yang J. 2016b. Seasonal Variations in Seawater Quality Due to Freshwater Discharge in Asan Bay. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 22: 454-467.
- Kim D, Kim K. 2008. Tidal and Seasonal Variations of Nutrients in Keunso Bay, the Yellow Sea. *Ocean Polar Res* 30: 1-10.
- Kim T. 2012. Long-term Effects of Seadikes on Estuarine Environment-Development of Numerical Modeling of Asan Bay. *KEI* 1-47.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA). 2007. [www.khoa.go.kr](http://www.khoa.go.kr).
- Korea Rural Community Corporation (KRC). 2008. [www.ekr.or.kr](http://www.ekr.or.kr).
- Korea Water Resources Corporation (K-Water). 2002. Guide map of the Korea River 'Uri Garam Gillajabi'. Ministry of Construction and Transportation, Korea.
- Li J, Dong S, Liu S, Yang Z, Peng M, Zhao C. 2013. Effects of cascading hydropower dams on the composition, biomass and biological integrity of phytoplankton assemblages in the middle Lancang-Mekong River. *Ecol Eng* 60: 316-324.
- Ministry of Maritime Affairs & Fisheries. 2002. Official method to test marine environment.
- Montani S, Magni P, Shimamoto M, Abe N, Okutani K. 1998. The effect of a tidal cycle on the dynamics of nutrients in a tidal estuary in the Seto Inland Sea, Japan. *J Oceanogr* 54: 65-76.
- Moon C-H, Park C, Lee S. 1993. Nutrients and Particulate Organic Matter in Asan Bay. *Korean J Fish Aquat Sci* 26: 173-181.
- Office of Hydrographic Affairs (OHA). 1992. Technical Reports. Office of Hydrographic Affairs, Korea, 111 pp.
- Park M-J. 2000. Modeling of Sediment Transport and Sand Bank Formation in a Macrotidal. *Korea J Kor Soc Oceanogr* 35: 1-10.
- Park M-J. 2008. Tidal Characteristics Change in the Asan Bay due to the Hwaong (Namyang Bay) Tidal Barrier. *Korea J Kor*

- Soc Oceanogr 13: 320-324.
- Park S-Y, Kim H-C, Kim P-J, Park G-S, Park J-S. 2007. Long-term Variation and Characteristics of Water Quality in the Asan Coastal Areas of Yellow Sea, Korea. *J Environ Sci Int* 16: 1411-1424.
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Method for Seawater Analysis*. Pergamon Press Inc., New York, pp 173.
- Rahm L, Conley D, Sanden P, Wulff F, Stalnacke P. 1996. Time series analysis of nutrient inputs to the Baltic Sea and changing DSi:DIN ratio. *Mar Ecol Prog Ser* 130: 221-228.
- Ryther JH. 1969. Photosynthesis and Fish Production in the Sea. *Science* 166: 72-76.
- Savenije HHG. 2005. *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Elsevier, Amsterdam.
- Seo Y-D. 2010. The seasonal monitoring and changes in physico-chemical environments of coastal aquatic ecosystem in Asan Bay. Department of Environmental Engineering. Master of Engineering. Graduate School of Industry, Gwangju University.
- Sin Y, Hyun B, Bach QD, Yang S, Park C. 2012. Phytoplankton Size and Taxonomic Composition in a Temperate Estuary Influenced by Monsoon. *Estuar Coast* 35: 839-852.
- Sin Y, Jeong B, Park C. 2015. Semidiurnal Dynamics of Phytoplankton Size Structure and Taxonomic Composition in a Macrotidal Temperate Estuary. *Estuar Coast* 38: 546-557.
- Sin Y, Jeong B. 2015. Short-term variations of phytoplankton communities in response to anthropogenic stressors in a highly altered temperate estuary. *Estuar Coast Shelf S* 156: 83-91.
- Wong KC. 1995. The Hydrography at the Mouth of Delaware Bay: Tidally Averaged Distribution and Intratidal Variability. *Estuar Coast Shelf S* 41: 719-736.