



Original Article

수질지표 및 식물플랑크톤을 이용한 금강 하구 해역의 수생태계 건강성 평가

박상준¹ · 신용식^{1,†} · 김재성²
¹목포해양대학교 해양시스템공학과
²주위터앤에코바이오

The Assessment of Aquatic Ecosystem Health, Based on Phytoplankton Indicators and Quality Parameters, in the Seawater Zone of Geum River Estuary

Sangjun Park¹, Yongsik Sin^{1,†}, and Jaeseong Kim²

¹Department of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea
²Water & Eco-Bio Co., Ltd., 501 Jungboo Building, Miryong-dong, Kunsan 54156, Korea

요 약

금강 하구는 연안지역에 하굿둑이 건설되면서 인공적으로 환경이 변화된 닫힌 하구에 속한다. 또한 간헐적으로 하굿둑의 수문을 통해 해수역으로 담수가 방류되면서 인근 해역의 수질에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 아직까지 생태계 차원의 건강성 평가는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 금강 하구 해역에서 조사된 해양환경 및 부유생물 자료(2014~2017년, 총 14회)를 활용하여 수생태계 건강성을 평가하였다. 건강성 평가를 위하여 WQI, TRIX 및 P-IBI 기법을 활용하였으며 P-IBI 기준 설정을 위해 수집된 모든 자료를 이용하였다. 평가 결과 공간적으로 하굿둑 인근 정점을 포함한 내측 해역에서 건강성 등급이 낮았으며, 외측 해역으로 갈수록 등급이 높아져 해역의 건강성 상태가 양호해지는 것으로 나타났다. 시간적으로는 풍수기인 여름철에 건강성이 악화되는 결과를 보였다. 다만 P-IBI는 담수 방류와 같은 인위적 스트레스(stressor)가 수생태계에 미치는 영향을 다른 기법에 비해 잘 표현하는 것으로 나타나, 금강 하구와 같이 인위적으로 급변하는 환경에서는 식물플랑크톤 군집을 지표로 하는 P-IBI의 활용도가 높은 것으로 확인되었다.

Abstract – The Geum River estuary is a closed estuary where a weir built at the mouth of estuary and the environment has changed artificially. Closed estuaries discharge intermittently freshwater through the floodgates of the weir and the freshwater discharge can affect the water quality and health of the sea areas. However, the status of aquatic ecosystem health has not been reported for the estuary. In this study, we used the data of water properties and phytoplankton communities collected from total 14 samplings during 2014~2017 in Geum River estuary. We utilized WQI (Water Quality Index), TRIX (Trophic Index) and P-IBI (Phytoplankton Index of Biotic Integrity) method for assessment of aquatic ecosystem health, and we used all the data for P-IBI standard selection. The results of three methods of assessment showed that the aquatic ecosystem health in the outer zone was better than in the inner zone including the stations near the estuarine weir. P-IBI especially reflected better the effect of freshwater discharge suggesting that P-IBI can be used to assess the health of aquatic ecosystem for the closed estuaries such as Geum River estuary.

Keywords: Assessment of ecosystem health(생태계 건강성 평가), Geum River estuary(금강 하구), Phytoplankton(식물플랑크톤), Water Quality Index(수질평가지수), Trophic Index(TRIX), Phytoplankton Index of Biotic Integrity(P-IBI)

†Corresponding author: yongsik@mmu.ac.kr

1. 서 론

하구는 담수와 해수가 혼합되는 전이수역으로 하구순환에 따른 복잡한 수계환경이 조성되어 있으며, 인간의 경제활동에 의한 환경 오염부하의 영향을 가장 많이 받는 지역이다. 그러나 동시에 다양한 환경에서 많은 해양생물이 서식지로 활용하는 공간으로 생태계에 비해 생산성이 가장 높은 생태계라고 알려져 있다(McLusky and Elliot[2004]). 하구의 생태적, 환경적 가치는 1 ha당 22,832달러로 추정되며(Costanza *et al.*[1997]), 연간 최소 약 10조원에 달하는 경제적 가치를 가지는 것으로 보고되었다(Kauffman[2011]). 이에 선진국에서는 하구의 보전과 지속 가능한 관리를 위한 프로그램(Humpries & Robinson[1995]; TEP[1999])을 수립하여 시행하고 있다.

다양한 환경구배를 가지고 있는 하구 생태계는 육상에서 배출되는 오염원 외에도 해수면 및 수온상승과 같은 기후변화로 인한 거시적 압력 혹은 스트레스를 동시에 받고 있다. 이러한 압력이 지속적으로 가해지거나 돌발적 혹은 인위적으로 가해지면 생태계의 구조는 물론 기능까지 영향을 받게 된다. 본래의 구조와 기능이 빠르게 회복되는 경우도 있지만, 압력의 세기가 수용한계를 초과하게 되면 회복 속도가 느려지거나 회복불능 상태가 되기도 한다(e.g. Kim [2016]). 결국 복잡하고 동시 다발적 압력이 하구 생태계에 미치는 영향을 파악하고 관리하기 위해서는 하구 생태계 차원에서 건강성 평가하는 기법 개발이 매우 필요한 상황이다.

수생태계 건강성 평가는 1980년대 초에 생태계 건강이라는 이론적인 개념이 도입된 후(Rapport *et al.*[1980]; Rapport[1998]; Rapport [1999]), 지난 30년간 많은 학자들의 논의 대상이 되어왔다. 그 동안 보고된 건강성 평가의 기법으로 해역의 영양상태를 평가하는 TRIX (Trophic Index; Vollenweider *et al.*[1998]), 식물플랑크톤 자료를 토대로 해역의 건강성을 평가하는 P-IBI (Phytoplankton Index of Biotic Integrity; Lacouture *et al.*[2006]), 저서생물을 지표로 하는 AMBI (Azti's Marine Biotix Index; Borja *et al.*[2000]), M-AMBI (Multivariata Azti's Marine Biotix Index; Muxika *et al.*[2007]), 국내 연안해역을 평가하는 수질평가지수(WQI; Water Quality Index) 등이 있다. 국내에서 수행된 수생태계 건강성 평가에 대한 연구는 주로 하천과 호소를 대상으로 연구되었으며, 어류 및 저서생물을 이용한 평가가 주로 제안되었다(Jeon *et al.*[2010]; Jeong and An[2012]; Kwon and An[2006]). 그러나 하구나 만을 대상으로는 매우 제한적으로 수행되었으며, 부유생물 및 박테리아 지표를 활용한 마산만과 진해만의 건강성 평가(Baek *et al.*[2010]; Kim *et al.*[2007])와 수질 및 식물플랑크톤 지표를 활용한 영산강 하구의 건강성 평가(Lee *et al.*[2017]) 등이 보고된 바 있다. 특히 금강 하구와 같이 하굿둑으로 변형된 하구에서의 수생태계 건강성 평가에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구지역인 금강 하구는 1994년부터 하굿둑의 수문 조작에 의해 간헐적으로 인위적인 담수 유입이 발생하는 지역으로, 하굿둑이 건설된 이후 생태계의 급격한 변화를 겪고 있으며, 수질도 악화

되는 것으로 나타났다(Kim[1998]; Yang *et al.*[1999]). 또한 금강 하구 해역에는 항만, 산업단지, 양식장 등 잠재적인 오염원들이 존재한다. 이렇게 복잡하고 다양한 스트레스(stressor)가 존재하는 금강 하구 해역에 대한 생태계 관리를 위해서는 생태계 차원의 건강성 평가 기법 개발 및 건강성 파악이 중요하지만 아직까지 이에 대해 보고된 바가 없다. 금강과 유사한 형태의 영산강 하구 해역을 대상으로 실시된 선행연구(Lee *et al.*[2017])에서 담수 유입 전·후 단기간(4일)의 건강성 평가에 P-IBI (Phytoplankton Index of Biotic Integrity) 기법이 활용도가 높은 것으로 확인되었다. 하지만 계절 혹은 연간 건강성 비교 평가는 아직까지 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 식물플랑크톤을 지표로 건강성을 평가하는 기법을 활용하여 금강 하구 해역의 수생태계 건강성을 평가하고, 이를 기존의 기법(WQI, TRIX)과 비교함으로써 P-IBI의 적용성을 검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 현장시료 채집 및 자료 분석

본 연구에서는 금강 하구 해역의 수생태계 건강성 평가를 위하여 금강 하구를 대상으로 수행된 ‘하구역 종합관리시스템 개발 연구’의 현장조사를 통해 확보된 자료(2014~2017년, 총 14회)를 활용하였다. 현장조사 시기 및 정점은 Table 1과 Fig. 1, 2에 제시하였다. 추가적으로 하굿둑의 수문을 통한 담수 유입 영향을 파악하기 위하여 조사지역의 강수량(군산) 및 담수 방류량 자료를 이용하였고, 강수량 자료는 기상청(www.kma.go.kr), 방류량 자료는 한국농어촌공사(www.ekr.or.kr)에서 제공되었다.

2.2 시료 분석방법

2.2.1 물리·화학적 환경인자

물리적 환경인자인 수온, 염분, 용존산소, 투명도는 YSI-Model Pro30과 Secchi disk를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 용존 무기영양염류(NH_4^+ , $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, PO_4^{3-} , SiO_2)는 각 정점의 해수를 GF/F 여과지(Ø 47 mm, pore size 0.7 μm , Whatman®)에 여과하여 냉장보관 운반하였고, 시료 채집 2주일 이내에 해양환경공정시험 방법에 따라 분석하였다.

2.2.2 식물플랑크톤 생체량(chlorophyll-a)

채집된 시료 일정량(100~200 mL)을 GF/F 여과지(Ø 47 mm,

Table 1. Sampling dates in the Geum River estuary (1st to 14th survey)

Survey	Sampling date	Survey	Sampling date
1 st	2014.12.19	8 th	2015.12.20
2 nd	2015.02.13	9 th	2016.04.19
3 rd	2015.04.11	10 th	2016.07.18
4 th	2015.05.26	11 th	2016.10.13
5 th	2015.06.23	12 th	2016.12.12
6 th	2015.08.24	13 th	2017.03.29
7 th	2015.10.26	14 th	2017.10.17

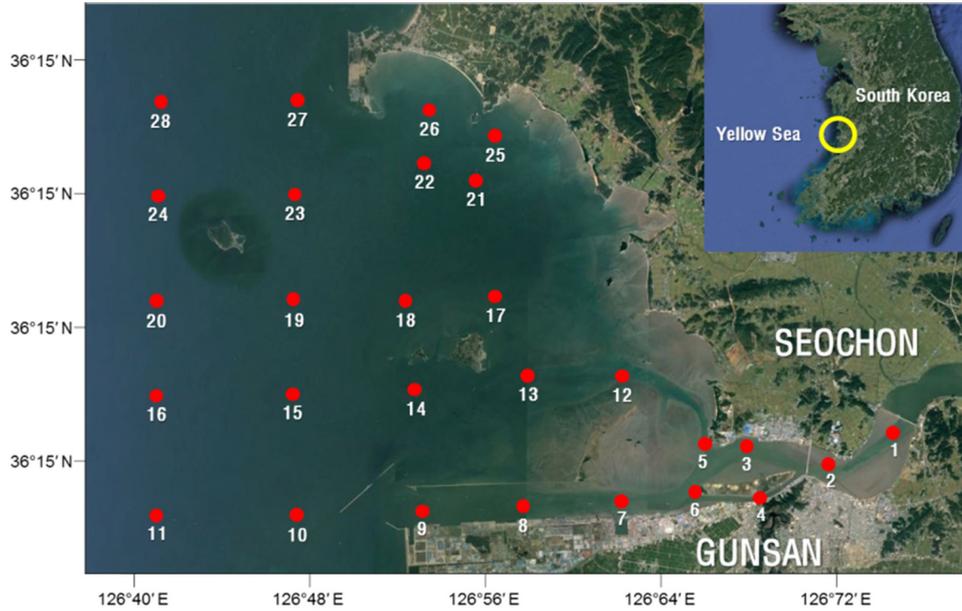


Fig. 1. Sampling stations in the Geum River estuary from 1st to 5th survey.

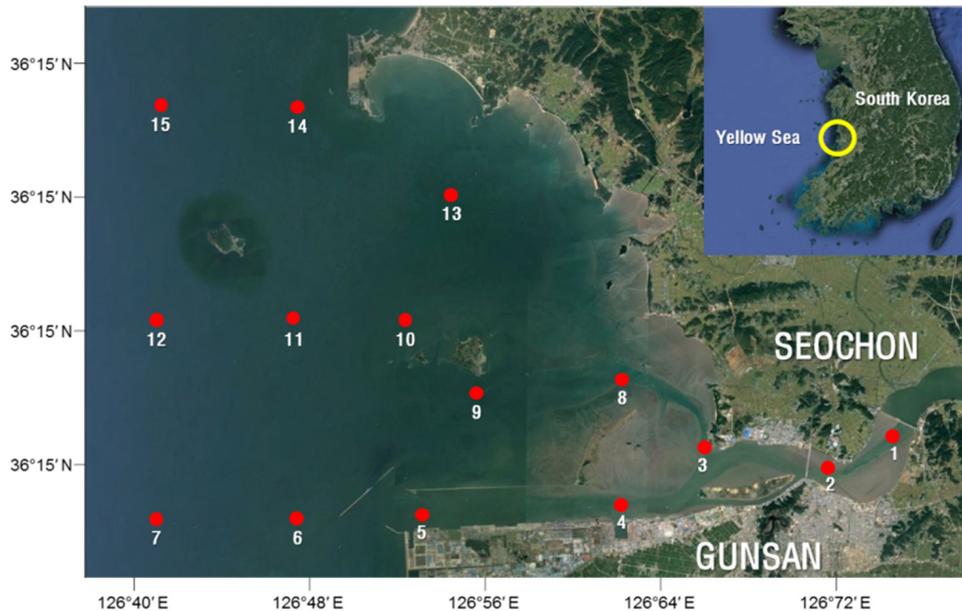


Fig. 2. Sampling stations in the Geum River estuary from 6th to 14th survey.

pore size 0.7 μm , Whatman[®])에 여과한 후, 여과에 사용된 여과지를 클로로필 추출 용액인 90% Aceton이 담긴 8 mL 차광 시험관에 넣고 12~24시간 냉장 보관하였다. 추출이 완료된 시료들을 시험관에 옮겨 담아 10-AU fluorometer (Turner Designs[®])을 이용하여 측정하였다.

2.2.3 식물플랑크톤 동정 및 군집 생태지수 분석

식물플랑크톤의 계수 및 동정을 위해 채집된 시료를 500 mL 채수병에 담아 Lugol's solution 5 mL를 넣어 고정한 후 암실에서 약 1~2일 정도 자연 침전시켰다. Siphon을 이용해 침전시킨 시료의 상

등액을 제거하고, 남은 여액을 잘 혼합하여 약 1 mL를 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣고 분석하였다. 계수 및 동정에는 광학현미경 Nikon Eclipse Ci를 이용하였다.

생태지수 분석은 출현한 모든 종을 기준으로 종수(S), 개체수(N), 풍부도지수(Margalef index; d), 균등도지수(Pielou index; J'), 다양성지수(Shannon Weiner Index; H'(log)), 우점도지수(Simpson index; λ')를 계산하였으며, 각 지수는 다음식에 의해 산출하였고 (Simpson[1949]; Margalef[1958]; Whittaker[1972]; Ludwig and Reynolds[1988]), PRIMER 6 를 이용하여 분석하였다.

Margalef index: $d = \frac{s-1}{\ln(N)}$ (1)

Pielou index: $J' = \frac{H'}{\ln S}$ (2)

Shannon Weiner index: $H'(\log_e) = -\sum_{i=1}^S P_i * \ln P_i$ (3)

Simpson index: $\lambda' = \sum_{i=1}^S \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)}$ (4)

여기서 $P_i = i$ 번째 종의 점유율

$S =$ 출현종수

$N =$ 총 개체수

$N_i = i$ 번째 개체

2.3 건강성 평가기법

2.3.1 수질평가지수(WQI)

금강 하구의 수질을 평가하기 위해 『해양환경관리법』 제8조에 따른 해양환경기준에 따라 현재 국가에서 시행되고 있는 해역별 수질등급기준(Water Quality Index, WQI; 해양수산부 고시 제2016-207호)을 활용하였다. 본 연구지역에 해당되는 서해중부 평가 기준을 적용하여 아래와 같은 계산식을 통해 지수값을 산출하였다.

$$WQI = 10 * [bottom\ dissolved\ oxygen\ saturation\ (DO\%) + 6 * [(chlorophyll-a\ (chl-a) + transparency\ (SD)) / 2] + 4 * [(dissolved\ inorganic\ nitrogen\ (DIN) + dissolved\ inorganic\ phosphorus\ (DIP)) / 2]$$
 (5)

평가 항목에는 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP), chlorophyll-

a, 투명도(secchi disk depth), 저층 용존산소 포화도가 이용되며 생태기반 해수수질 기준에 따라 등급을 나타냈다(Table 2). 등급은 양호한 수질 상태를 나타내는 1등급부터 수질이 악화되었음을 보여주는 5등급까지 구분되어 있다.

2.3.2 TRIX (Trophic Index)

TRIX는 해역의 영양상태를 평가할 수 있는 영양상태지수(Vollenweider *et al.*[1998])로 표층 chlorophyll-a와 용존산소 포화도, 용존 무기질소(DIN), 총인(TP)을 아래와 같은 계산식에 넣어 산출하였다. TRIX scale에 따라 양호한 수질 및 빈영양 상태를 나타내는 1등급부터 악화된 수질 및 부영양 상태를 나타내는 4등급까지 구분되며 등급기준은 Table 2에 제시하였다.

$$TRIX = \frac{(\log_{10}(chlorophyll-a(\mu gL^{-1}) * abs\%DO(\%) * DIN(\mu gL^{-1})) * DIP(\mu gL^{-1}) + 1.5}{1.2}$$
 (6)

2.3.3 P-IBI (Phytoplankton Index of Biotic Integrity)

P-IBI는 Lacouture *et al.*[2006]에 의해 제안된 생물보전지수(IBI)를 서식지별로 구분하여 평가하며 식물플랑크톤과 환경인자(DIN, DIP, 투명도(SD))를 지표로 이용하였다. 본 연구에서는 환경인자 지표 항목으로 DIN, DIP, SD를 활용하였고, 식물플랑크톤 지표항목으로는 chlorophyll-a와 생태지수(풍부도, 균등도, 다양도, 우점도)를 이용하였다. 기준설정에는 조사된 모든 자료(2014~2017년, 총 14 회)를 활용하였으며, 환경인자의 등급 기준과 chlorophyll-a 및 생태지수의 등급 기준은 Table 3과 4에 제시하였다. 평가된 환경인자와 식물플랑크톤 등급 값의 평균치로 최종 평가하였다(Table 2). 최종

Table 2. Grades and ranges of indices for WQI (water quality index), TRIX (trophic index) and P-IBI (phytoplankton index of biotic integrity)

WQI		TRIX			P-IBI	
Grade	Range	Grade	Range	Trophic level	Grade	Range
1 (very good)	≤ 23	1 (high)	0~4	Low	1 (good)	1~1.75
2 (good)	24~33	2 (good)	4~5	Medium	2 (moderate)	1.75~2.5
3 (moderate)	34~46	3 (moderate)	5~6	High	3 (poor)	2.5~3.25
4 (bad)	47~59	4 (Poor)	6~10	Very High	4 (bad)	3.25~4
5 (very bad)	≥ 60	-	-	-	-	-

Table 3. Scoring criteria for P-IBI (phytoplankton index of biotic integrity) using data of water properties

Factor (criteria)	DIN (<0.194)	DIP (<0.018)	SD (<1.000)
1 st grade	TRUE	TRUE	TRUE
2 nd grade	either TRUE or both FALSE		TRUE
3 rd grade	either TRUE or both TRUE		FLASE
4 th grade	FLASE	FLASE	FLASE

Table 4. Scoring criteria for P-IBI (phytoplankton index of biotic integrity) using phytoplankton data

	Chlorophyll-a	Richness	Evenness	Diversity	Dominance
1 st grade	<1.527	>2.301	>0.542	>1.483	<0.149
2 nd grade	1.527~2.932	2.301~2.952	0.542~0.687	1.483~1.944	0.149~1.944
3 rd grade	2.932~5.436	2.952~3.525	0.687~0.760	1.944~2.241	1.944~2.241
4 th grade	>5.436	<3.525	<0.760	<2.241	<2.241

적으로 지수가 낮을수록 등급이 높고(최고 1등급) 건강성이 양호하며, 지수가 높을수록 등급이 낮고(최저 4등급) 건강성이 악화된 것으로 평가한다.

2.4 상관분석

환경인자(염분, 방류량), 영양염류(용존무기질소, 용존무기인), 식물플랑크톤(생체량, 풍부도, 균등도, 다양도, 우점도) 등과 평가지수(WQI, TRIX, P-IBI)의 연관성을 파악하기 위해 SPSS 25.0을 이용하여 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시하였다. 담수 방류량은 현장조사 전 5일 동안의 양을 합한 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물리·화학적 환경특성

금강 하구 해역의 조사시기별 물리·화학적 환경인자 변동을 살

피해보면, 2014년부터 2017년까지 강수량은 갈수기인 겨울철에 감소하였다가 풍수기인 여름철에 양과 빈도수가 증가하는 전형적인 몬순적 특징을 보였다(Table 5). 조사 기간 및 조사 전 5일 동안 담수 방류량은 16.4~120.3×10⁶m³ 분포를 나타냈으며 16년 7월에 가장 높은 값을, 17년 10월 가장 낮은 값을 보였다(Table 5). 또한 전반적으로 강수량이 많았던 시기에 담수 방류량이 증가하였고, 모든 조사시기에는 방류가 없었지만 조사 5일 전에는 최소 한번의 방류가 발생한 것으로 나타났다.

조사 기간 동안 수온은 0.0~28.2 °C의 분포를 보였으며 겨울철에 가장 낮고, 여름철에 높은 계절적인 경향을 나타냈다(Fig. 3A). 금강 하구 해역에서 500일간 일 평균기온과 수온을 관측했던 Lee and Yang[1997]의 연구결과에서 수온과 기온의 변화가 비슷하여 금강 하구 해역의 수온이 외양이나 대양에 비해 기온의 영향을 크게 받는다고 제시하였다. 수온의 공간적 분포를 살펴보면 하구둑 인근 내측 해역에서 그 변동 범위가 크고 외측 해역으로 갈수록 감소하는

Table 5. Total amount of discharge (5 days) and precipitation (7 days) before the sampling date in the Geum River estuary (1st to 14th survey)

Sampling date	Discharge from dike (×10 ⁶ m ³)					Total	Precipitation (mm)
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5		
1 st 2014.12.19	-	-	36.9	-	-	36.9	0.2
2 nd 2015.02.13	-	29.1	-	-	-	29.1	0.1
3 rd 2015.04.11	30.5	-	-	36.0	-	66.5	20.7
4 th 2015.05.26	-	-	-	25.3	-	25.3	0.5
5 th 2015.06.23	-	31.5	-	18.2	-	49.7	35.1
6 th 2015.08.24	-	-	14.1	-	6.6	20.7	15.9
7 th 2015.10.26	-	-	23.9	-	-	23.9	1
8 th 2015.12.20	-	-	38.2	-	-	38.2	14.2
9 th 2016.04.19	31.2	29.4	-	-	22.2	82.8	72.6
10 th 2016.07.18	32.9	26.6	-	33.7	27.1	120.3	28.6
11 th 2016.10.13	-	24.2	-	-	27.4	51.6	48.1
12 th 2016.12.12	-	-	-	18.1	-	18.1	5.3
13 th 2017.03.29	-	-	-	18.5	-	18.5	0.6
14 th 2017.10.17	-	-	-	16.4	-	16.4	3.1

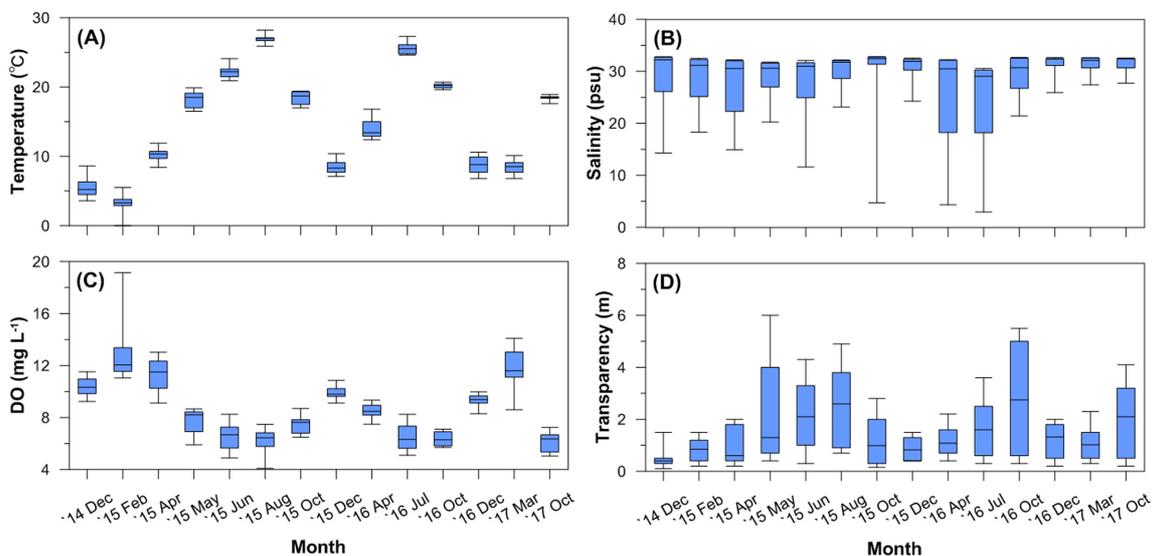


Fig. 3. Physical and chemical environmental factors of surface water during sampling date in the Geum River estuary.

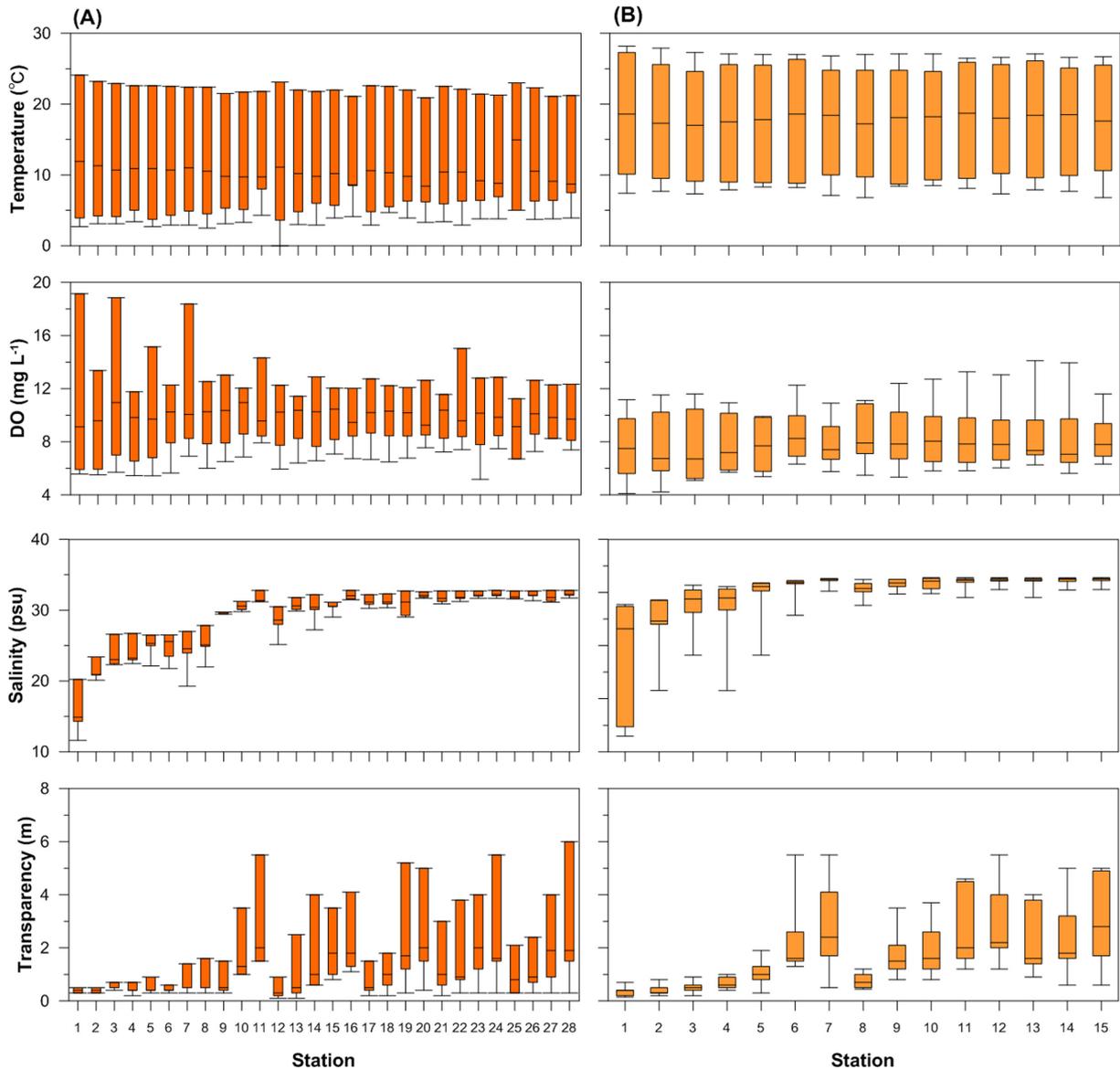


Fig. 4. Physical and chemical environmental factors of surface water in the Geum River estuary (left panels (A): spatial variations during 1st to 5th survey; right panels (B): spatial variations during 6th to 14th survey).

것으로 나타났다(Fig. 4).

염분은 담수 유입의 영향을 직접적으로 판단할 수 있는 지표로 조사 기간 동안 2.95~32.82 psu의 분포를 보였다(Fig. 3B). 또한 외측 해역으로 갈수록 염분이 증가하는 경향을 보였고 그 변동의 범위 역시 감소하는 것으로 나타났는데(Fig. 4), 이는 담수의 영향이 하굿둑에서 멀어질수록 감소함을 보여주는 결과라 할 수 있다. 동일 해역에서 현장조사를 실시한 Kwon *et al.*[2000]과 Kwon *et al.*[2001]의 결과에서도 유사한 경향을 보였으며, 특히 금강 하구의 염분은 하굿둑의 수문을 통해 방류되는 담수의 양에 크게 영향을 받는다고 보고된 바 있다(Lee and Yang[1997]; Lee *et al.*[1999]; Yih *et al.*[2005]). 본 조사 지역에서도 염분과 담수 방류량이 음의 상관관계로 유의하게($P < 0.01$) 나타났으며(Table 6), 조사 기간 동

안 2~3일간의 연속적인 담수 방류로 인해 방류량이 매우 많았던 16년 4월과 7월에 하굿둑 인근 해역에서 염분이 낮은 값을 보였다(Fig. 3B). 결국 조사시기 동안의 염분은 조사 전에 방류된 담수의 양에 의해 직접적인 영향을 받았을 것으로 사료된다.

용존산소의 경우, 수온과 반대로 겨울철에 높고, 여름철에 낮은 경향을 보였으며(Fig. 3C), 모든 계절에서 표층이 저층에 비해 약간 높은 것으로 나타났지만 수층 간에 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(자료 미제시). 투명도(SD)는 조사시기별로 뚜렷한 경향을 보이지 않았으나(Fig. 3D), 염분, 용존산소와 마찬가지로 내측 해역에서 외측 해역으로 갈수록 높아지는 결과를 보였다(Fig. 4). 이는 염분과 유사하게 하굿둑에서 인근 내측 해역으로 유입되는 담수의 영향 때문인 것으로 사료된다.

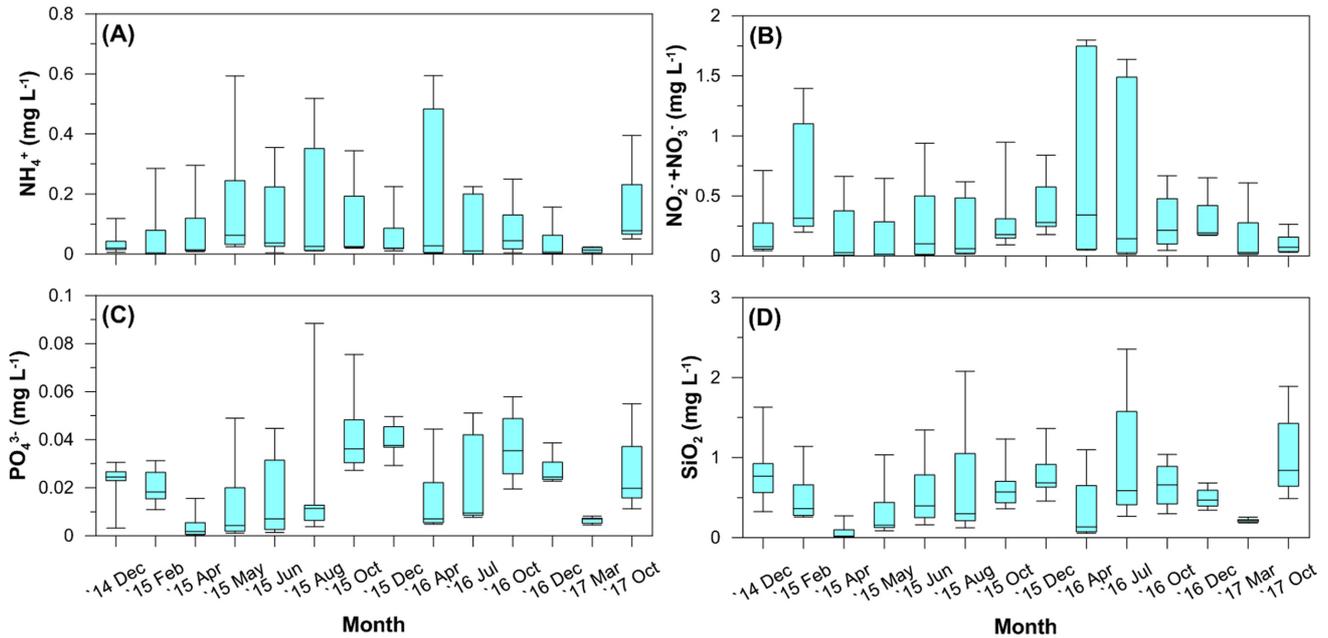


Fig. 5. Nutrient concentrations of surface water during sampling date in the Geum River estuary.

3.2 영양염류

조사 기간 동안, 암모니아성 질소(NH_4^+)와 아질산+질산성 질소($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$)는 각각 $0.00\sim 0.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.00\sim 1.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, 겨울철에 낮고 봄과 여름철에 높아지는 경향을 보였다 (Fig. 5). PO_4^{3-} 와 SiO_2 는 각각 $0.00\sim 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.00\sim 2.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 분포를 나타냈고, N계열 영양염류와는 다른 계절 경향을 보였다 (Fig. 5). 조사 기간 동안의 N:P ratio 분포를 확인한 결과, 하굿둑 인근 내측 해역에서 redfield ratio인 16:1 이상의 분포를 보여 P 제한 가능성을 보였다 (Fig. 6). 따라서 P가 금강 하구 식물플랑크톤 성장의 제한인자로 작용할 가능성이 있는 것으로 사료된다. 일반적으로 해양에서 식물플랑크톤 성장을 제한하는 영양염은 질소(DIN)로 알려져 있으나 육상기원 영양염 공급이 많은 하구의 경우 DIN이 아닌 DIP가 식물플랑크톤 성장의 제한인자로 작용하는 것으로 보고되어 있으며 (Jeong *et al.*[2005]; Jeong *et al.*[2016]), 과거 선행 연구 (Kim *et al.*[1998]; Sin *et al.*[2005])에서도 유사한 결과를 보였다.

공간적으로 모든 영양염류는 하굿둑 인근 내측 해역에서 높은 농도를 나타내고 외측 해역으로 갈수록 감소하였다 (Fig. 6). 이는 방류되는 담수에서 영양염류가 공급되고 있음을 보여주는 결과로 사료되며, 상관성 분석에서도 DIN은 방류량과 유의한 양의 상관관계 ($R=0.19$, $P<0.01$)를 보였고 특히 염분과는 DIN ($R=0.88$, $P<0.01$), DIP ($R=0.29$, $P<0.01$) 모두 유의한 음의 상관성을 보였다 (Table 6). 이와 유사한 형태의 분포는 Choi *et al.*[2002]의 연구결과에서도 제시된 바 있다.

3.3 식물플랑크톤 생체량(Chlorophyll-a)

식물플랑크톤 생체량은 겨울철에 $0.42\sim 2.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 낮은 분포를 보였고, 수온이 높아지는 봄, 여름철에 증가하는 경향($0.79\sim 21.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

을 나타냈다 (Fig. 7A). 또한, 하굿둑 인근 내측 해역에서 높은 분포 ($1.34\sim 21.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)를 보였으며 염분과 반대의 경향을 나타냈다 (Fig. 3A, 7B, 7C). 식물플랑크톤 생체량은 16년 7월(여름철)에 가장 높았으며 (Fig. 7A) 해당 시기에 방류량이 매우 높은 점을 볼 때 (Table 5), 담수 방류에 의한 영향으로 사료된다. 즉, 담수 방류로 인해 유입된 영양염류와 수온이 달린 후 증가한 투명도가 식물플랑크톤 생체량 증가에 기여했을 가능성이 있다.

3.4 수질 및 건강성 평가

3.4.1 수질평가지수(WQI)

14년 12월 조사부터 15년 6월 조사까지 st. 1~9는 4~5등급으로 수질이 양호하지 않은 것으로 평가되었으며, 육지에 인접한 해역 (st. 12, 25)에서도 4등급으로 나타났다. 외측 해역에서는 1~3등급으로 수질이 양호한 것으로 나타났다 (Fig. 8).

15년 8월 조사부터 17년 10월 조사까지의 자료 분석결과, 하굿둑 인근 정점 (st. 1)을 포함한 내측 해역 (st. 2~4, 8)에서는 모든 시기에 수질이 양호하지 않은 것으로 나타났다. 외측 해역의 경우 겨울철 (15년 12월, 16년 12월)에 1~2등급으로 수질이 양호한 것으로 나타났으며, 여름철 (15년 8월, 16년 7월)에는 모든 정점에서 3~4등급의 낮은 결과를 보였다 (Fig. 8).

결과적으로 하굿둑 인근 내측 해역과 여름철(고수온기)에 낮은 수질 등급(4~5등급)을 나타냈다. 이는 본 연구지역인 금강 하구가 하굿둑의 수문 조절로 인한 방류량, 방류시간 및 방류수의 수질 등에 좌우되는 하구 해역의 특성을 보이기 때문으로 사료된다. 내측 해역의 낮은 등급은 담수 방류에 따른 투명도 감소, 높은 영양염류 등에 의한 것으로 판단된다. 또한 여름철 가장 낮은 등급을 보이는 원인은 수온 증가에 따른 용존산소 포화율 감소와 비교적 높은 식

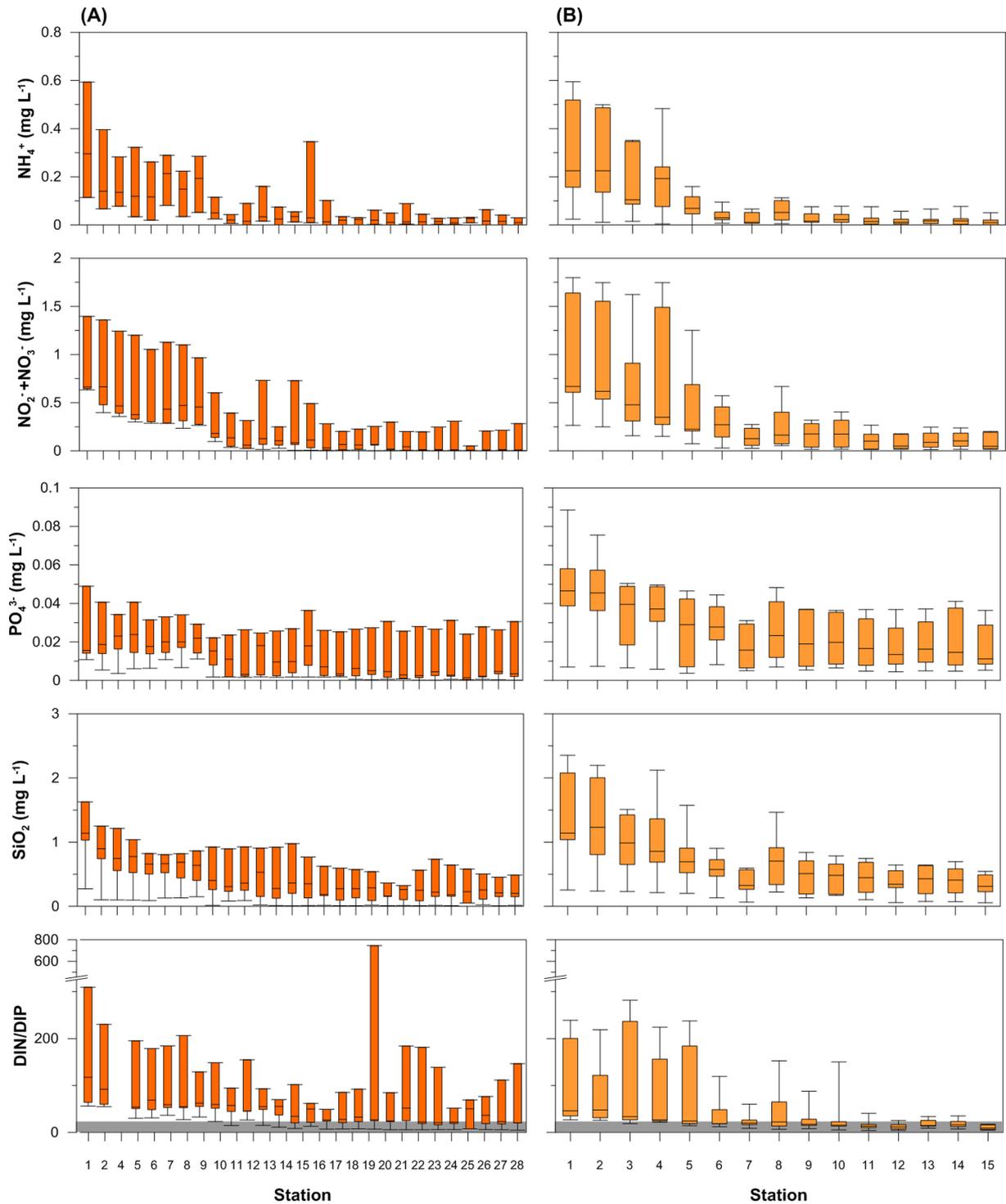


Fig. 6. Nutrient concentrations of surface water at each station in the Geum River estuary (left panels (A): spatial variations during 1st to 5th survey; right panels (B): spatial variations during 6th to 14th survey). The shaded area denotes a potential N limitation in the DIN/DIP ratio.

물플랑크톤 생체량(chlorophyll-a) 때문인 것으로 판단된다.

자연형 하구에서 나타나는 이러한 강 연속성 즉 river continuum (Minshall *et al.*[1985]; Vannote *et al.*[1980])은 결국 하굿둑으로 변형된 국내 하구에서도 수문 개방 시에 제한적으로 나타난다고 할 수 있다(Sin *et al.*[2015]). 하지만 수문이 닫힌 상태에서는 유입된

오염물질들이 수질이나 건강성에 지속적으로 영향을 미칠 가능성이 존재한다. Yu *et al.*[2007]와 KEI[2006]의 연구결과에 따르면, 하구의 특성인 육지의 오염원을 정확하고 해수의 염분을 희석하는 기수역의 기능이 상실된 닫힌 하구는 오염원의 집중 현상이 일어나 WQI 수질이 3~5등급의 낮은 수준을 보인다고 보고된 바 있다.

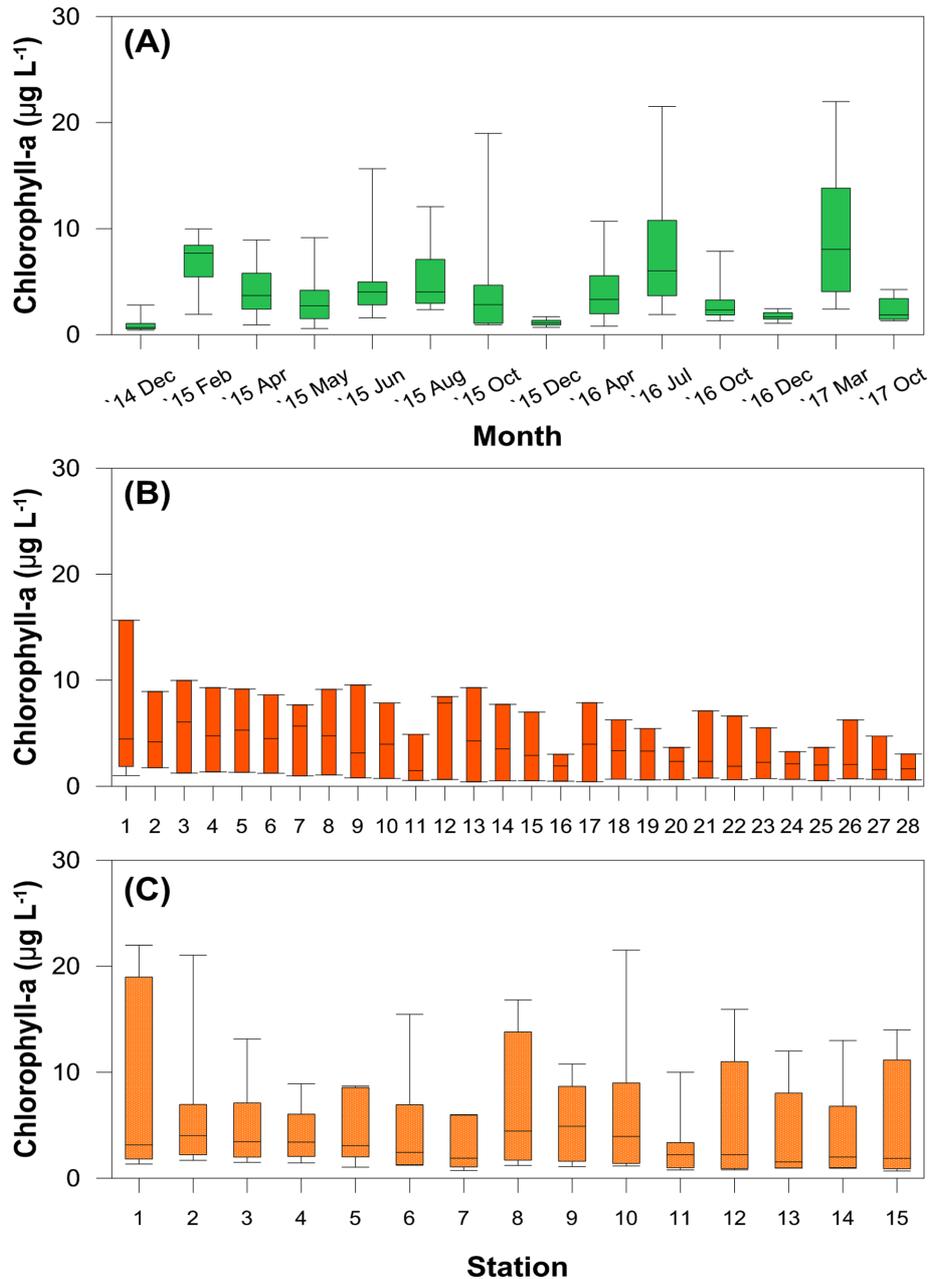


Fig. 7. Chlorophyll-a of surface water in the Geum River estuary ((A): temporal variations; (B): spatial variations during 1st to 5th survey; (C): spatial variations during 6th to 14th survey).

3.4.2 TRIX (Trophic Index)

14년 12월부터 15년 6월 조사는 전체적으로 3~4등급 이상의 결과를 나타냈으며, 내측 해역에서 TRIX scale 6이상으로 부영양화 상태(4등급)로 평가되었다(Fig. 9). 외측 해역에서는 TRIX scale이 5이상 6이하의 분포를 보여 보통(3등급)으로 평가되었다. 15년 8월부터 17년 10월 조사결과 또한 외측 해역보다 내측 해역에서 상대적으로 부영양 상태를 나타냈다(Fig. 9). 시간적으로는 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았으며, 대부분 4등급으로 부영양 상태를 나타냈다(Fig. 9).

결과적으로 금강 하구 해역은 대부분의 시기에 부영양화 되어 있

음을 알 수 있었다. 이는 방류 시 유입된 영양염류가 지수 값 증가(수질 및 영양상태 악화)에 영향을 주었기 때문으로 사료된다. 영산강 하구에서도 담수 방류 이후에 TRIX scale이 증가하는 형태를 보여주고 있다(Sin *et al.*[2013]). 또한, 금강 하구 해역은 하굿둑의 수문 개방 이후 부유물질의 농도 감소 및 영양염류 농도 증가에 따른 식물플랑크톤 대량 번식 가능성이 있다고 알려져 있으며(Yang *et al.*[1999]), Kim *et al.*[1998]의 COD, TIN 및 DIP를 이용한 부영양도 평가에서도 항상 적조가 발생할 수 있는 가능성을 가진 부영양 상태의 해역으로 보고되었다.

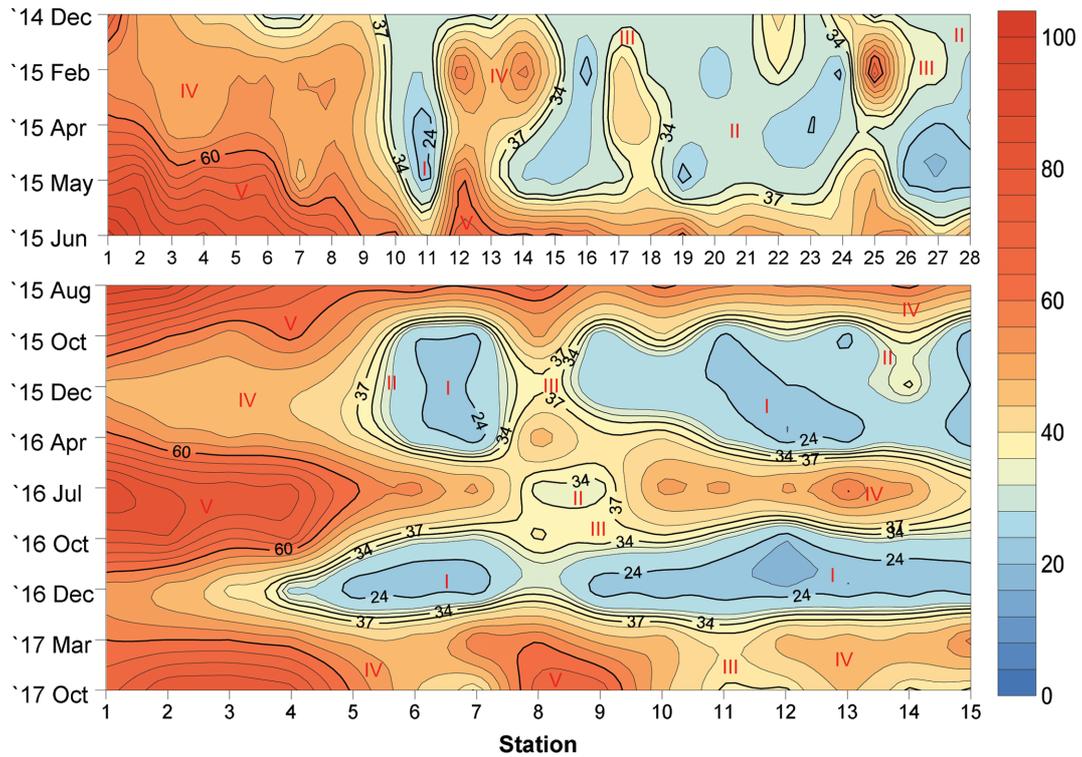


Fig. 8. Assessment of ecosystem health using WQI (water quality index) in the Geum River estuary.

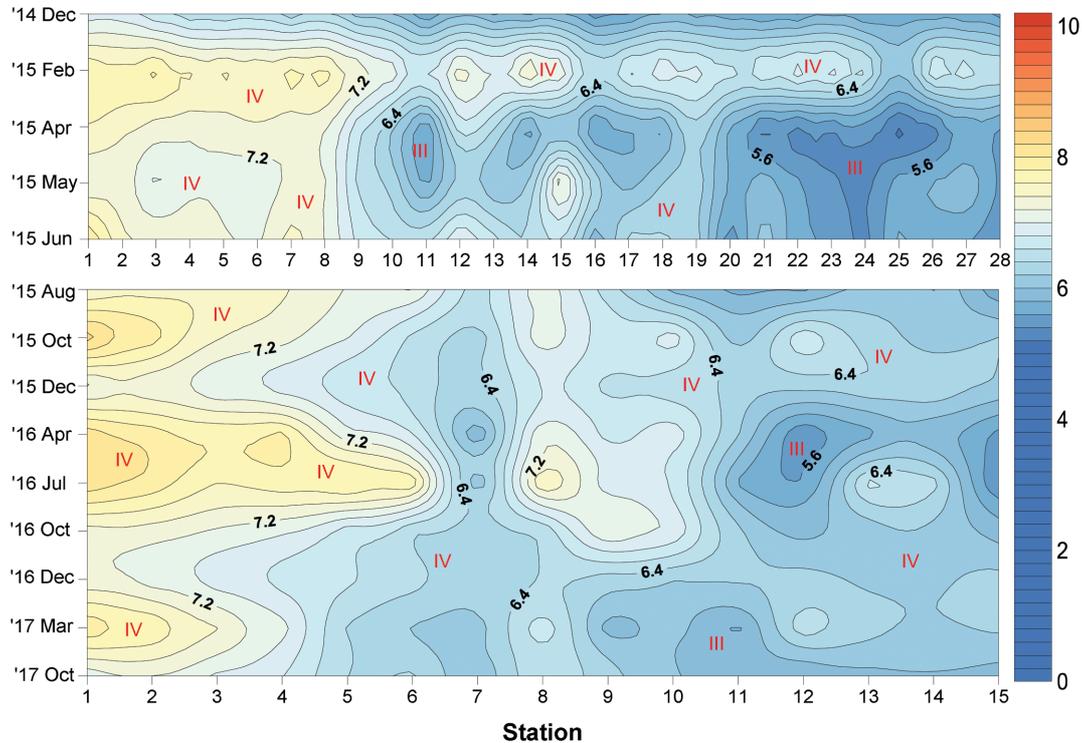


Fig. 9. Assessment of ecosystem health using TRIX (trophic index) in the Geum River estuary.

3.4.3 P-IBI (Phytoplankton Index of Biotic Integrity)

P-IBI를 활용한 건강성 평가결과를 보면, 시간적으로 WQI와 유사하게 겨울철(2~3등급)을 제외한 대부분의 시기에 낮은 등급(3~4

등급)을 보였다(Fig. 10). 공간적으로는 대체적으로 3~4등급을 나타내면서 내측 해역에서 낮은 등급, 외측 해역에서 높은 등급을 보이는 WQI(Fig. 8), 대부분의 정점에서 낮은 등급을 보인 TRIX(Fig.

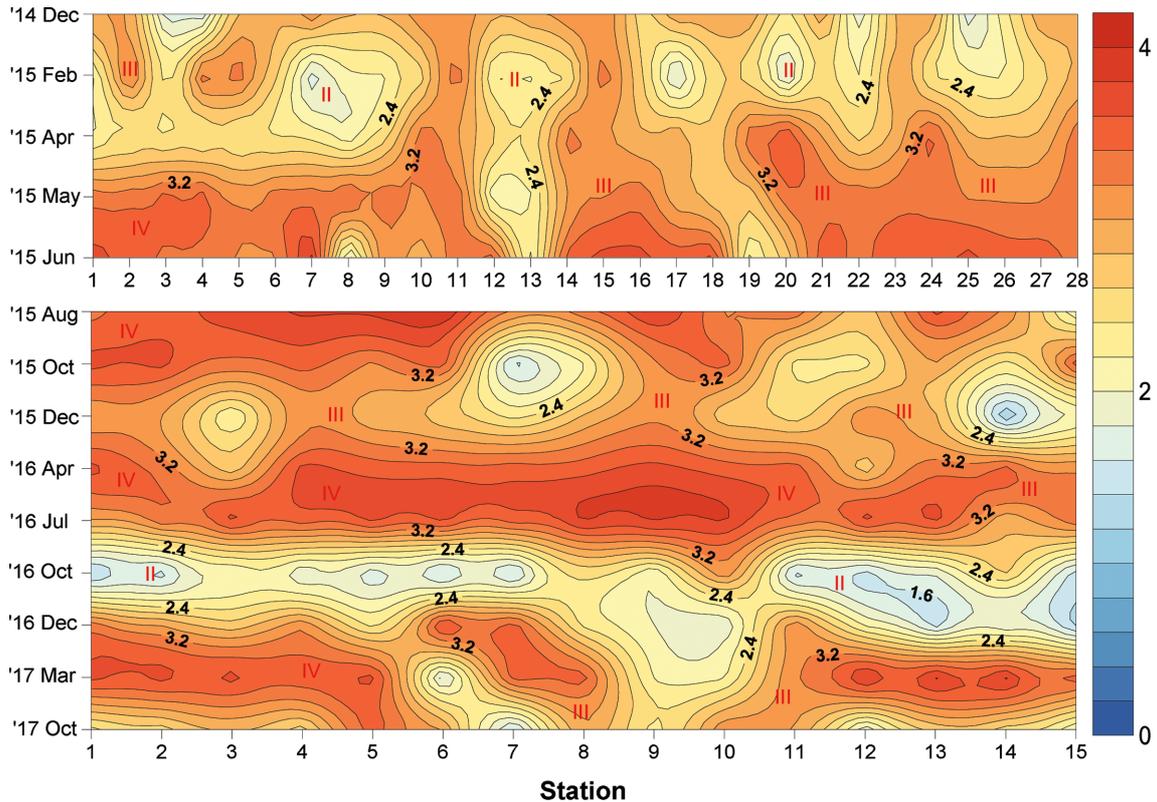


Fig. 10. Assessment of ecosystem health using P-IBI (phytoplankton index of biotic integrity) in the Geum River estuary.

9)와는 다소 상이한 결과가 확인되었다. 특히, 담수 방류량이 가장 많았던 16년 4월과 7월 조사시기에 WQI, TRIX와 달리 하구 인근 해역뿐만 아니라 외측 해역(st. 8, 9)까지 P-IBI가 낮은 등급(건강성 악화)을 나타냈는데 이는 담수 유입의 결과로 사료된다. Choi *et al.*[2002]의 연구 결과에 의하면, 금강 하구 해역에 담수가 유입되었을 때 개야도(본 연구에서 st. 8, 9) 인근 해역까지 영향을 미치는 것으로 제시된 바 있다.

이러한 결과는 다른 평가지수(WQI, TRIX)와 다르게 P-IBI만이 지표항목으로 수생태계의 환경변화에 민감하게 반응하는 식물플랑크톤 군집(종조성, 생태지수)이 포함되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 일반적으로 부유생물은 수중의 환경과 가장 밀접한 관계를 보여주는 생물군으로 알려져 있다. 그 중에서도 식물플랑크톤은 생태계의 항상성을 유지하기 위해 필요한 일차생산을 담당하고 있으며 동시에 환경 변화에 대해 빠르고 민감하게 반응하여 오염 지표성이 높은 것으로 보고되고 있다(Hellawell[1986]; Suthers and Rissik[2009]).

부유생물 특히 식물플랑크톤을 건강성 지표로 활용한 Beak *et al.*[2010]의 연구 결과에서도 chlorophyll-a가 해역의 수질 및 건강성 파악에 주요한 인자가 될 수 있음을 제시하였다. 또한, 국내의 하구 해역에서는 담수가 유입된 이후에 일부 유해 식물플랑크톤의 개체수가 증가하면서 풍부도, 균등도, 다양도는 감소하는 반면 식물플랑크톤 생체량, 우점도는 증가하는 경향을 보이는데(Jeong *et al.*[2011]; Sin *et al.*[2012]; Sin and Jeong[2014]; Yang *et al.*[2014]), 변

형하구에서의 이러한 일부 식물플랑크톤 종의 우점과 다양성 감소는 최종적으로 건강성 악화에 기여하는 것으로 보고된 바 있다(Lee *et al.*[2017]).

3.5 조사항목 및 평가지수 간 상관특성

금강 하구에서 환경인자, 영양염류, 식물플랑크톤, 평가지수(WQI, TRIX, P-IBI) 간의 상관성을 분석한 결과를 Table 6에 제시하였다. 상관분석 결과, 염분(Sal.)은 DIN, DIP, 방류량(Dis.), chl-a와 유의한($P < 0.01$) 음의 상관성을 보였다. 식물플랑크톤 생체량(chl-a)은 방류량, DIN, 우점도(Domin.), 평가지수(WQI, TRIX, P-IBI)들과 유의한($P < 0.01$, $P < 0.05$) 양의 상관관계로 나타났으며 염분, 균등도(Even.), 다양도(Diver.)와는 유의한($P < 0.01$) 음의 상관관계를 보였다(Table 6). 이는 하굿둑 수문을 통한 담수 유입이 금강 하구의 환경특성뿐만 아니라 일차생산자인 식물플랑크톤의 생체량 그리고 종조성에도 영향을 미치고 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다. 결국 담수 유입으로 인한 chl-a와 종조성 변화는 건강성 지수의 증감을 결정하고 최종적으로 하구 건강성 평가 결과에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이러한 인위적 담수 유입이 식물플랑크톤의 생체량과 종조성에 미치는 단기적 영향 그리고 건강성에 대한 영향은 영산강 하구에서도 보고된 바 있다(Sin and Jeong[2014]; Lee *et al.*[2017]).

본 연구의 상관분석 결과에서도 P-IBI는 담수 방류량, 식물플랑크톤 생체량, 우점도와 유의한($P < 0.01$) 양의 상관관계를 보였으며

Table 6. Correlation matrix of environmental factors, nutrient, phytoplankton and ecosystem integrity status in the Geum River estuary ($N=274$)

	Sal.	DIN	DIP	Dis.	Chl-a	Rich.	Even.	Diver.	Domin.	P-IBI	WQI	TRIX
Sal.	1											
DIN	-.86**	1										
DIP	-.29**	.45**	1									
Dis.	-.33**	.19**	-.14*	1								
Chl-a	-.40**	.33**	-.13*	.15*	1							
Rich.	.10	-.12*	-.06	-.27**	-.04	1						
Even.	.08	.02	.26**	-.12	-.35**	.37**	1					
Diver.	.03	.01	.08	-.17**	-.20**	.67**	.87**	1				
Domin.	-.03	-.02	-.15*	.11	.23**	-.51**	-.93**	-.95**	1			
P-IBI	-.12*	.07	-.19**	.19**	.27**	-.62**	-.75**	-.76**	.71**	1		
WQI	-.57**	.52**	.25**	.06	.44**	-.10	-.26**	-.16**	.21**	.06	1	
TRIX	-.70**	.80**	.45**	.05	.61**	.03	-.06	.02	.00	.05	.58**	1

** $P<0.01$, * $P<0.05$, Sal: salinity, DIN: dissolved inorganic nitrogen, DIP: dissolved inorganic phosphate, Dis: discharge, Chl-a: chlorophyll-a, Rich: richness, Even: evenness, Diver: diversity, Domin: dominance, P-IBI: phytoplankton index of biotic integrity, WQI: water quality index, TRIX: trophic index

염분, 풍부도(Rich.), 균등도, 다양도와는 유의한($P<0.01$, $P<0.05$) 음의 상관성을 나타냈다(Table 6). 특히, 다른 평가지수와 다르게 담수 방류량과 유의한($R=0.19$, $P<0.01$) 양의 상관관계를 보였다(Table 6). 이는 상대적으로 P-IBI를 이용한 해역의 건강성 평가 결과가 인위적이고 간헐적인 담수 방류에 따른 해역의 환경변화와 생태적 변화를 잘 표현하고 있음을 암시한다.

따라서 금강 하구와 같이 인위적으로 유입되는 담수로 인해 급변하는 환경에서의 건강성 평가 방법으로 변화에 민감하게 반응하는 부유생물인 식물플랑크톤 군집이 지표로 포함된 P-IBI와 같은 기법이 유용할 것으로 판단된다. 다만 담수환경이나 자연하구에서는 강우나 담수 유입이 많아 수환경이 급변하는 풍수기에는 건강성 평가를 실시하지 않는 것으로 알려져 있어 이를 고려할 필요가 있을 것이다. 또한, 향후에는 하구 전체 생태계 즉, 수질이나 부유생물만을 활용한 기법뿐 아니라 저서환경 및 생물이 포함된 지표도 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

금강 하구는 연안지역에 건설된 하굿둑으로 인해 완전 혼합형 하구에서 부분 혼합형 하구로 변화된 하구이다. 또한 해역 인근에 다양한 잠재적 오염원들이 존재하며, 간헐적으로 하굿둑의 수문을 통해 해수역으로 담수가 방류되면서 해역의 수질에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 이러한 하구를 관리하기 위해서는 생태계 차원의 접근이 필요하지만 아직까지 하구의 생태계 건강성 평가는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유사한 환경에서 수행된 선행연구의 결과를 바탕으로 금강 하구 해역에서 수집된 장기적 해양환경 및 부유생물 자료를 활용하여 수질 및 건강성을 평가하고자 하였다. 수생태계 건강성 평가를 위해 WQI, TRIX, P-IBI 등의 기법을 활용하였다. 평가결과, 시간적으로 WQI와 P-IBI는 겨울철에 비해 여름철에 건강성이 악화된 것으로 나타났으나, TRIX는 뚜

렷한 경향을 보이지 않았다. 공간적으로는 WQI, TRIX는 하굿둑 인근 내측 해역에서 외측 해역으로 갈수록 건강성이 양호해지는 경향을 보인 반면 P-IBI는 다른 경향성을 나타냈다. 특히, 16년 4월과 7월 조사시기에 하구 인근 해역뿐만 아니라 외측해역(st.8, 9)까지 건강성이 악화된 것으로 나타났는데 이는 담수 유입에 의한 결과로 사료된다. 또한, P-IBI는 평가지표 중의 하나인 식물플랑크톤 생체량, 생태지수 외에도 염분, 방류량과 같은 담수 방류와 관련된 환경인자들과 유의한 상관관계를 보여 인위적 환경변화(stressor)에 따른 영향을 잘 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에 적용한 식물플랑크톤 군집을 지표로 활용하는 P-IBI는 금강 하구 해역과 같이 인위적 요소로 급변하는 변형 하구의 수생태계 건강성을 평가하는데 필요한 방법이라 판단된다.

후 기

본 연구는 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(하구역 종합관리시스템 개발 연구)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Beak, S.H., Choi, H.W. and Kim, Y.O., 2010, A Preliminary Study for Marine Ecosystem Health Assessment Using the Planktonic Organism in Jinhae Bay, Korean J. Environ. Biol., 28(3), 125-132.
- [2] Borja, A., Franco, J. and Perez, V., 2000, A Marine Biotic Index to Establish the Ecological Quality of Soft-Bottom Benthos Within European Estuarine and Coastal Environments, Mar. Pollut. Bull., 40(12), 1100-1114.
- [3] Choi, Y.K., Yang, W.S. and Jeong, J.Y., 2002, Nutrient Front Relating to the Hydrography in the Outflow Region of the Keum River, J. Korean Fish. Soc., 35(3), 289-296.

- [4] Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. and van den Belt, M., 1997, The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital, *Nature*, 387, 253-260.
- [5] Hellawell, J.M., 1986, Biological indicator of freshwater pollution and environmental management, Elsevier Applied Science Publishers, 546.
- [6] Humphries, R. and Robinson, S., 1995, Assessment of the success of the Peel-Harvey estuary system management strategy - A Western Australian attempt at integrated catchment management, *Water Science and Technology*, 32, 255-264.
- [7] Jeon, D.Y., Lee, S.L., Son, J.W., Cha, Y.U., Kwon, K.W. and Yoo, P.J., 2010, Aquatic Ecosystem Health Assessment in Middle Reach of Suyoung River using Characteristics of Benthic Macroinvertebrate and Fish Fauna, *J. Korean Soc. Water Environ*, 26(6), 934-942.
- [8] Jeong, B.K., Sin, Y.S., Yang, S.Y. and P, C., 2011, Monthly Variation of Phytoplankton Community in Asan Bay, Korea, *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 16(4), 238-245.
- [9] Jeong, H.H. and An, K.G., 2012, The Applications of a Multi-metric LEHA Model for an Environmental Impact Assessments of Lake Ecosystems and the Ecological Health Assessments, *J. Environ. Impact Assess.*, 21(3), 483-501.
- [10] Jeong, Y.H., Cho, M.K., Lee, D.G., Doo, S.M., Choi, H.S. and Yang, J.S., 2016, Seasonal Variations in Seawater Quality Due to Freshwater Discharge in Asan Bay, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 22(5), 454-467.
- [11] Jeong, Y.H., Kim, Y.T., Chae, Y.Z., Rhee, C.W., Ko, K.R., Kim, S.Y., Jeong, J.Y. and Yang, J.S., 2005, Analysis of Long-Term Monitoring Data From the Geum River Estuary, *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 10(3), 139-144.
- [12] Kauffman, G.J., 2011, Economic Value of the Delaware Estuary Watershed, Delaware Univ., IPA, USA
- [13] Kim, J.G., You, S.J., and Kwon, J.N., 1998, Variation of Water Quality after Construction of Keum River Estuary Barrage, *J. Korean Fish. Soc.*, 31(5), 685-694.
- [14] Kim, Y.O., Choi, H.W., Jang, M.C., Jang, P.K., Lee, W.J., Shin, K.S. and Jang, M., 2007, A Brief Review of Approaches Using Planktonic Organisms to Assess Marine Ecosystem Health, *Ocean and Polar Res.*, 29(4), 327-337.
- [15] Kim, Y.O., International Trend on Health Assessment of Marine Ecosystem, https://kiost.ac.kr/cop/bbs/BBSMSTR_00000000331/selectBoardArticle.do?sessionid=34DEBD562B2D32B22FB73A0A8C01C04E?nttId=15449&pageIndex=2&searchCnd=&searchWrd=, 2016 (accessed 2016.03.31)
- [16] Korea Environment Institute (KEI), 2006, Sustainable estuary management III -3, Research Report.
- [17] Kwon, J.N., Kim, J.G. and Ko, T.S., 2001, The Estimation of Water Quality Changes in the Keum River Estuary by the Dyke Gate Operation Using Long-Term Data, *J. Korean Fish. Soc.*, 34(4), 345-354.
- [18] Kwon, J.N., Kim, J.G. and You, S.J., 2000, Characteristics of Water Quality and Factor Analysis on the Variations of Water Quality in Coastal Sea around the Keum River Estuary in Summer, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, 3(4), 3-22.
- [19] Kwon, Y.S. and An, K.G., 2006, Biological Stream Health and Physico-chemical Characteristics in the Keum-Ho River Watershed, *Korean J. Ecol. Environ.*, 39(2), 145-156.
- [20] Lacouture, R.V., Johnson, J.M., Buchanan, C. and Marshall, H.G., 2006, Phytoplankton Index of Biotic Integrity for Chesapeake Bay and its Tidal Tributaries, *Estuaries & Coasts*, 29(4), 598-616.
- [21] Lee, D.H., Park, G.W., Lee, C.H. and Shin, Y.S., 2017., Assessment of Ecosystem Health during the Freshwater Discharge in the Youngsan River Estuary, *Korean J. Ecol. Environ.*, 50(1), 46-56.
- [22] Lee, S.H., Kwon, H.K., Choi, H.Y., Yang, J.S. and Choi, J.Y., 1999, Physical Environment Changes in the Keum River Estuary by the Dyke Gate Operation II. Salinity Structure and Estuary Type, *The sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 4(4), 255-265.
- [23] Lee, Y.H., and Yang, J.S., 1997, 500-days Continuous Observation of Nutrients, Chlorophyll Suspended Solid and Salinity in the Keum Estuary, Korea., *The sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 2(1), 1-7.
- [24] Ludwig, J.A. and Reynolds, J.F., 1988, *Statistical Ecology : A Primer on Methods and Computing*, John Wiley and Sons, New York.
- [25] Margalef, R., 1958, Temporal succession and spatial heterogeneity in phytoplankton, *Perspectives in Marine biology*, Buzzati Traverso ed., Univ. Calif. Press, Berkeley.
- [26] McLusky, D.S. and Elliott, M., 2004, *The Estuarine Ecosystem; Ecology, Threats and Management*, third ed., Oxford Univ, Oxford, 216.
- [27] Minshall, G.W., Cummins, K.W., Petersen, R.C., Cushing, C.E., Bruns, D.A., Sedell, J.R. and Vannote, R.L., 1985, Developments in Stream Ecosystem Theory, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42(5), 1045-1055.
- [28] Muxika, I., Borja, A and Bald, J., 2007 Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive, *Mar. Pollut. Bull.*, 55, 16-29.
- [29] Rapport, D.J., 1998, Dimensions of Ecosystem Health, *Ecosystem health*, 34-40.
- [30] Rapport, D.J., 1999, Epidemiology and Ecosystem Health : Natural bridges, *Ecosystem health*, 5,174-180.
- [31] Rapport, D.J., Thorpe, C. and Regier, H.A., 1980, Commentary: Ecosystem medicine, *Praeger*, 180-189.
- [32] Simpson, E.H., 1949, Measurement of Diversity, *Nature*, 163, 688.
- [33] Sin, Y. and Jeong, B.K., 2014, Short-term variations of phytoplankton communities in response to anthropogenic stressors in

- a highly altered temperate estuary, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 156, 83-91.
- [34] Sin, Y., Hyun, B.G., Bach, Q.D., Yang, S.G. and Park, C., 2012, Phytoplankton Size and Taxonomic Composition in a Temperate Estuary Influenced by Monsoon, *Estuaries & Coasts*, 35(3), 839-852.
- [35] Sin, Y.S., Hyun, B.G., Jeong, B.K. and Soh, H.Y., 2013, Impacts of eutrophic freshwater inputs on water quality and phytoplankton size structure in a temperate estuary altered by sea dike, *Mar. Environ. Res.*, 85, 54-63.
- [36] Sin, Y.S., Lee, C.H., Cho, K.A. and Song, E.S., 2005, Trends of Phytoplankton Community and Water Quality and Implications for Management in Estuarine River Systems, *Korean J. Limnol.*, 38(2), 160-180.
- [37] Sin, Y.S., Lee, E.J., Lee, Y.J. and Shin, K.H., 2015, The river-estuarine continuum of nutrients and phytoplankton communities in an estuary physically divided by a sea dike, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 163, 279-289.
- [38] Suther, I.M. and Rissik, D., 2009, *Plankton: A Guide to Their Ecology and Monitoring for Water Quality*, CSIRO Publishing, 272.
- [39] Thames Estuary Partnership (TEP), 1999, *Management Guidance for the Thames Estuary*, Strategy.
- [40] Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. and Cushing, C.E., 1980, The River Continuum Concept, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37(1), 130-137.
- [41] Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G. and Rinaldi, A., 1998, Characterization of the Trophic Conditions of Marine Coastal Waters with Special Reference to the NW Adriatic Sea : Proposal for a Trophic Scale, Turbidity and Generalized Water Quality Index, *Environmetrics*, 9, 329-357.
- [42] Whittaker, R.H., 1972, Evolution and Measurement of Species Diversity, *Taxon*, 21(2/3), 213-251.
- [43] Yang, E.R., Jeong, B.K., Lee, E.J., Ryu, D.K. and Shin, Y.S., 2014, Size and Species Composition of Phytoplankton Related to Anthropogenic Environmental Changes in Doam Bay, *J. Environ. Sci. Int.*, 23(6), 1183-1197.
- [44] Yang, J.S., Jeong, J.Y., Heo, J.Y., 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.*, 4(1), 71-79.
- [45] Yih, W.H., Myung, G.O., Yoo, Y.D., Kim, Y.G. and Jeong, H.J., 2005, Semiweekly variation of Spring Phytoplankton Community in Relation to the Freshwater Discharges from Keum River Estuarine Weir, *Koera, The sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 10(3), 154-163.
- [46] Yu, K.B., Kim, S.H. and Shin, Y.H., 2007, *Estuaries in Korea : Geomorphic Changes After the Construction of the Estuary Dams*, Seoul National University Press, Seoul.

Received 22 June 2018

Revised 23 August 2018

Accepted 24 August 2018