

## 인공시설물 건설 이후 낙동강 하구 환경인자의 시·공간적 분포특성

윤상철 · 윤석현<sup>†</sup> · 서영상  
국립수산과학원 기후변화연구과

### The Characteristics of Spatio-temporal Distribution on Environmental Factors After Construction of Artificial Structure in the Nakdong River Estuary

Sang Chol Yoon, Suk Hyun Youn<sup>†</sup> and Young Sang Suh

Oceanic Climate & Ecology Research Division, NIFS, Busan 46083, Korea

#### 요 약

낙동강 하구는 최근 하구둑, 보 등의 인공시설물 건설과 매립 및 준설 등 인위적인 활동에 많은 영향을 받고 있다. 따라서 이러한 인위적 영향에 대한 낙동강 하구의 해양환경 변화를 확인하고자 2013년부터 2015년까지 하구로 유입되는 담수를 비롯하여 해수역을 중심으로 연구하였다. 그 결과 하구로 유입되는 방류량은 보 건설전에 비해 현저히 감소하였고, 평균 염분은 증가하여 기수역이 감소한 것을 확인하였다. 질산염과 규산염의 주요 공급원은 유입되는 담수로 나타났다. 인산염은 저층과 외해에서 공급되었다. 인산염과 용존산소의 농도는 춘계와 하계에 급격히 감소하는 양상을 나타냈다. 담수의 인산염은 하구둑에 의한 영향으로 제거되었고, 해수의 인산염은 식물플랑크톤에 의해 제거 되는 것을 확인하였다. 낮은 용존산소 농도는 식물플랑크톤의 대번성 이후 미생물에 의해 분해되면서 저층에서 소모되어 나타난 결과로 판단된다. 일반적으로 춘계와 추계에 대번성하는 식물플랑크톤의 일반적인 특성에 비해 낙동강 하구에서는 하계에 높은 경향을 보였다. 따라서 낙동강 하구의 생태계 변화는 유입되는 담수의 유량 감소에 의한 것으로 보에 의해 또 다른 환경변화에 직면해 있다.

**Abstract** – Nakdong River Estuary is affected by the dam, barrage construction and dredge and reclaim worked artificially. So, we have studied the area input both freshwater and sea water to understand marine environment of Nakdong River estuary related to the effect of artificial work from 2013 to 2015. As a result, The discharge flow to the estuary remarkably decreased before barrage construction and the average of salinity at the estuary increased. So, the brackish water zone reduced under the influence of decreased discharge flow. The major sources of nitrate and silicate were freshwater, phosphate supplied from bottom and the open sea water. The concentration of phosphate and dissolved oxygen (DO) decreased remarkably in spring and summer. we investigated that phosphate in freshwater was removed under the influence of the estuary dam and phosphate in sea water was removed under the influence of phytoplankton. The low concentration of DO was due to decomposition of the organic compound by microorganism after phytoplankton blooms. Generally, the concentrations of chlorophyll-*a* in summer was higher than spring and fall. Therefore, the change of ecosystem in Nakdong river estuary was due to decrease of freshwater influx, the other change is facing because of the barrage.

**Key words:** Nakdong river estuary(낙동강 하구), Estuary dam(하구둑), Barrage(보), Nutrients(영양염), Chlorophyll-*a*(엽록소-*a*)

<sup>†</sup>Corresponding author: younsh@korea.kr

## 1. 서 론

하구로 유입되는 하천수는 지형과 기상 등의 영향으로 다양한 환경 특성을 나타내며, 하천의 오염도와 식물플랑크톤의 군집과 성장 그리고 하구환경을 조절하는 역할을 한다. 전형적인 하구는 인위적인 영향 없이 담수의 풍부한 영양염이 하구로 유입되어 조석작용을 통해 생산적인 해양환경을 조성한다. 하구 생태계는 크게 인공 구조물, 오염 등과 같은 인간 활동의 결과와 기후변화 같은 요인에 의해 영향을 받는다(Jennerjahn and Mitchell[2013]). 특히, 하구로 유입되는 하천에 설치된 댐, 독 그리고 보와 같은 인공시설물은 하천수의 유량에 영향을 미친다(Domingues *et al.*[2014]). 인공구조물의 설치에 유량감소에 따른 탁도 감소와 체류시간 증가 등 다양한 원인에 의해 부영양화가 발생하여 식물플랑크톤의 대번성 이후 용존산소를 감소시켜 하구 생태계를 더욱 악화시키는 원인이 된다(Zhu *et al.*[2011]; Liu *et al.*[2012]). 연안을 비롯한 저산소 해역의 확산은 부영양화의 영향인 것으로 알려졌으며, 발생 범위와 빈도는 증가하고 있다(Turner *et al.*[2005]). 실제로 하천에 인공시설물이 설치된 하구는 부유물질 감소에 의한 투명도 증가로 식물플랑크톤 증식의 제한인자로 작용했던 빛의 투과량이 증가하면서 하구 인근에 규조류와 와편모조류 등에 의한 적조 발생빈도와 면적이 증가하고 있다(Kim *et al.*[1998]). 하구 독 건설 후 담수역에서는 암모니아 질소가 증가하고, 해수역에서는 질산 질소가 증가한 반면에 인산 인의 농도는 감소하는 경향이 확인되었고, 식물플랑크톤 중 규조류의 종수는 감소한 반면에 녹조류와 와편모조류의 종수는 증가하는 양상을 보였다(Humborg *et al.*[1997]; Domingues *et al.*[2005]; Shin and Yoon[2011]). 하구독이 건설되지 않은 섬진강에 비해 하구독이나 수중보가 건설된 낙동강, 한강, 영산강, 금강의 식물플랑크톤의 생체량이 증가하는 결과도 보고되었다(Sin *et al.*[2005]). 이러한 인공시설물은 육지와 해양의 연결을 단절 시키는 역할을 하며, 다량의 담수가 일시적으로 방류되어 물리·화학적 변화뿐만 아니라 서식하는 생물에도 부정적인 영향을 나타낸다. 그 예로 낙동강 하구에서는 하계에 다량의 담수가 일시적으로 방류된 후 서식하던 조개류(개량조개)가 집단 폐사하는 현상이 보도 되었다(www.kookje.co.kr).

낙동강 하구는 바닷물이 주변 농경지에 유입되는 피해를 막기 위해 1987년 낙동강 하구에 독을 설치하여 인위적으로 담수 방류량을 조절하고 있으며, 2012년에는 강의 본류에 8개의 보(이하 낙동보로 표현함)를 설치하여 자연 하천으로서의 기능이 소실되고 있다. 하구독 건설이후 담수에서는 식물플랑크톤의 대발생이 일반적인 춘계와 추계가 아닌 하계와 동계에 각각 *Microcystis*와 *Stephanodiscus*에 의해 나타나고 이때 담수역의 암모니아 질소와 인산 인 그리고 규산 규소 등의 영양염 변동이 발생하였으며, 중·하류에서는 엽록소-*a*의 농도가 하구독이 건설되기 전에 비해 4배 이상 증가하는 부영양화 현상도 관측되었다(Cho and Shin[1995]). 식물플랑크톤 생물량의 간접적인 지표인 엽록소-*a*의 농도는 갈수기에 비해 풍수기에 높게 나타나지만, 일차생산력은 일시적인 담수 방류로 인한 염

분의 변화, 영양염류 그리고 탁도 등에 의한 생리적인 스트레스로 오히려 갈수기에 더 높은 것으로 나타났다(Yang *et al.*[2001]). 이처럼 낙동강 하구독 건설에 대한 하구환경에 미치는 영향에 대한 연구는 수행되었으나, 보(barrage) 건설 이후 하구환경에 대한 영향 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 하구독 건설과 보 건설에 의한 하구환경에 대한 영향을 구명하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구해역

낙동강 하구는 조사 시기와 위치에 따라 다른 특성을 나타내므로 조사정점을 기준에 보고된 해역특성에 따라 다음과 같이 구분하였다. 하구독 건설전에는 동계와 하계에 최대 13~14의 염분을 나타내어 기수역의 특성을 보였으나(Kim[1970]; Yoon *et al.*[1987]), 하구독 건설에 의해 담수의 특성을 나타내는 정점 1과 2에서 낙동강 하구로 유입되는 담수의 특성을 조사하였으며, 기수역의 특성을 나타내는 정점 3과 4, 그리고 담수와 해수가 완전히 혼합되는 정점 5를 통해 기수역의 환경변화를 조사하였다(Choe and Chung[1972]; Yang *et al.*[2001]; Jang and Kim[2006]). 담수가 유입되는 해수역을 중심으로 6개의 정점을 선정하여 연안의 환경변화를 조사하였다. 또한 서 낙동강에서 하구로 유입되는 담수의 영향을 구명하고자 정점 12, 13 그리고 14를 선정하였다. 다시 이들 정점을 하구로부터 거리와 특성에 따라 6개의 해역으로 구분하였는데, 담수역 정점 1과 2는 site A, 하구독 하류와 인접한 기수역 정점 3과 4는 site B, 사주가 발달해 있으며, 담수와 해수가 완전히 혼합되는 정점 5는 site C, 연안에서 가까운 정점 6, 7 그리고 8은 site D, 하구독과 가장 멀리 떨어진(약 20 km) 정점 9, 10 그리고 11을 site E, 서 낙동강 정점 12, 13 그리고 14를 site F로 구역화 하여 해역간의 변화를 확인하였다(Fig. 1).

### 2.2 조사 및 분석방법

낙동강 하구를 6개 site의 정점 14개에 대한 현장조사는 2013년 2월부터 2015년 12월까지 격월로 연 6회로 총 18회 현장 조사를 실시하였다(Fig. 1). site A와 site F는 2015년 1년간의 조사 자료를 이용하였으며, 그 외의 정점(site B, C, D, E)은 3년간의 현장조사 자료를 이용하였다. 영양염과 용존산소, 엽록소-*a* 시료는 니스킨 채수기를 이용하여 표층과 저층(바닥에서 1m상층)에서 채수하였다. 해수역의 수온과 염분은 CTD(SeaBird 19 plus), 담수역은 YSI professional plus를 이용하여 측정하였다. 용존산소 시료는 윙클러-아지드화나트륨 적정법을 이용하여 분석하였다. 영양염 분석을 위한 시료는 선상에서 0.45 µm membrane 여과지로 여과한 후 분석 전까지 냉동보관하고, 실온에서 해동 후 암모니아 질소, 아질산 질소, 질산 질소, 인산 인과 규산 규소는 영양염자동분석기(QuAAtro, Germany)를 이용하여 측정하였으며, 부유물질, 투명도와 함께 해양환경공정시험기준(MOF[2013])에 준하여 분석하였다. 엽록소-*a*(total, nano size)는 선상에서 해수를 20 µm 거름망과 0.45 µm

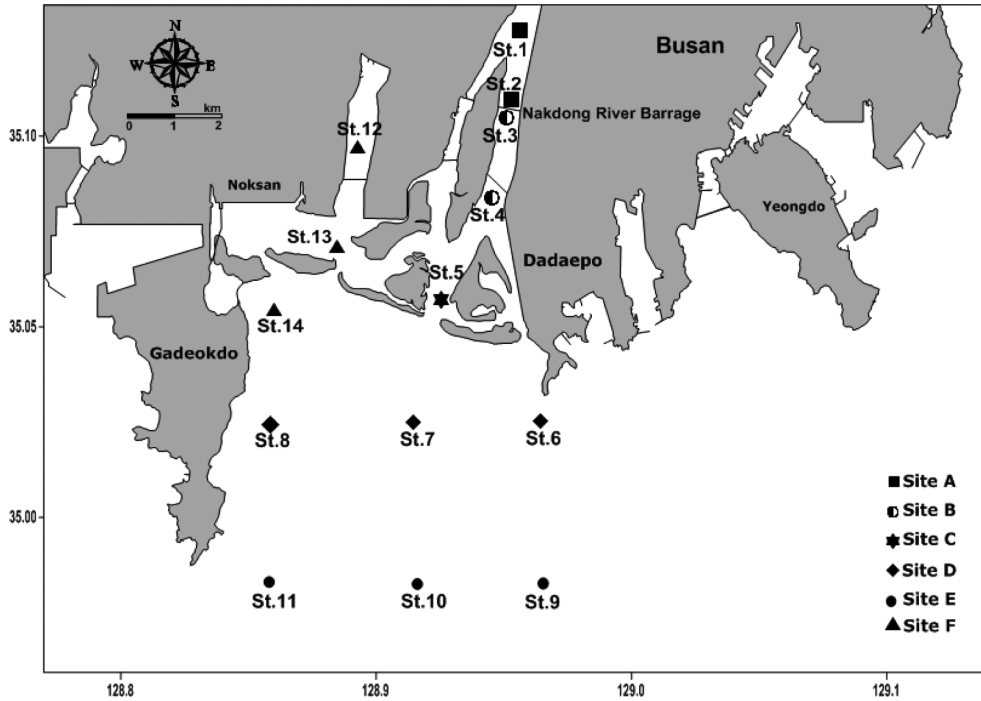


Fig. 1. The map of the study site and stations (st.1, 2 : site A, st.3, 4 : site B, st.5 : site C, st.6~8 : site D, st.9~11 : site E, st.12~14 : site F).

membrane 여과지에 여과한 후 90% 아세톤으로 추출하고 Turner 10 Fluorometer를 이용하여 측정하였다. 하구둑을 통해 방류되는 방류량(www.kwater.or.kr)을 이용하여 방류량 변화를 분석하였고, 환경요인간의 상관성을 확인하기 위한 통계분석은 SAS Enterprise Guide 4.2를 이용하여 검증하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 낙동강 하구둑 방류량 변화

낙동강 유역은 1987년에 하구둑이 완공되면서 해수와 담수의 흐름이 인위적으로 차단되었으며, 2000년대에는 하구 인근에 매립장, 하수처리장 그리고 분뇨처리장 등이 증설되어 하구에 영향을 미치고 있다. 또한 2012년에는 낙동강 분류에 8개의 보가 건설되어 하구환경의 또 다른 변동 요인이 될 수 있다. 특히, 보 건설에 따라 하구로 유입되는 담수 양이 변동되었을 것으로 예측된다. 따라서 낙동강 하구둑에서 방류되는 담수의 월평균 방류량(www.kwater.or.kr)을 이용하여 담수 유입량의 변동을 확인하였다(Fig. 2). 분석기간은 2008년 1월부터 2015년 12월까지 8년으로 월평균 방류량은 545 m<sup>3</sup>

·sec<sup>-1</sup>로 분석되었다. 낙동보가 완공된 2012년을 기준으로 월평균 방류량을 보면 보가 건설되기 전 2010년부터 2012년까지 3년 동안 월평균 979 m<sup>3</sup>·sec<sup>-1</sup>에서 하구보가 완공된 2013년부터 2015년까지의 월평균 방류량은 242 m<sup>3</sup>·sec<sup>-1</sup>으로 약 75% 이상 급격히 감소한 것으로 나타나 낙동보 건설과 방류량 감소는 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다(Fig. 2). 계절에 따라 방류량을 비교하면 보 건설 전에 비해 하계와 추계, 춘계의 순으로 각각 82%, 80%, 62% 감소하였으며, 동계에는 보 건설 후 방류량이 약 13% 증가하는 양상을 나타냈다. 따라서 낙동보 건설 전·후 변동된 방류량 변화는 하구의 영양염 변동뿐만 아니라 영양염을 이용하는 식물플랑크톤 군집구조 및 종조성과 생산력 등 생태계를 변화시키는 주요 요인으로 작용할 것으로 판단된다(Yang *et al.*[2001]).

#### 3.2 하구의 물리 환경 변화

하구 환경은 조사 시기와 장소에 따라 다른 특성을 나타낸다. 따라서 낙동강 하구의 물리 환경특성을 구명하기 위해 2013년부터 2015년까지 수온, 염분 및 용존산소 농도를 계절과 해역에 따라 분석하였다(Figs. 3~6).

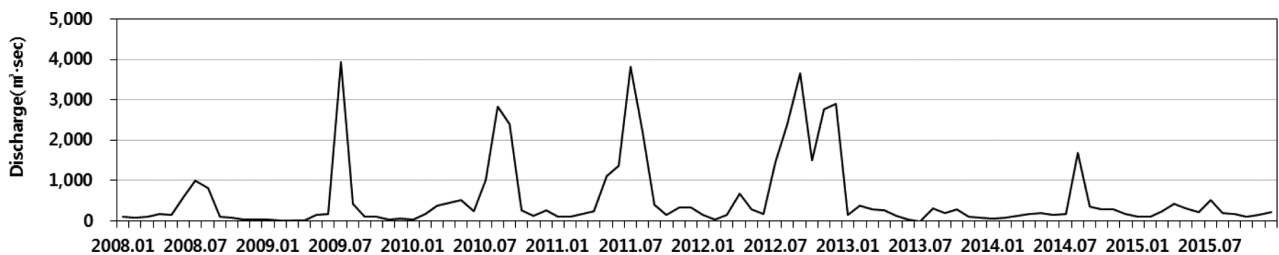


Fig. 2. The change of discharge flow from dam in Nakdong river estuary.

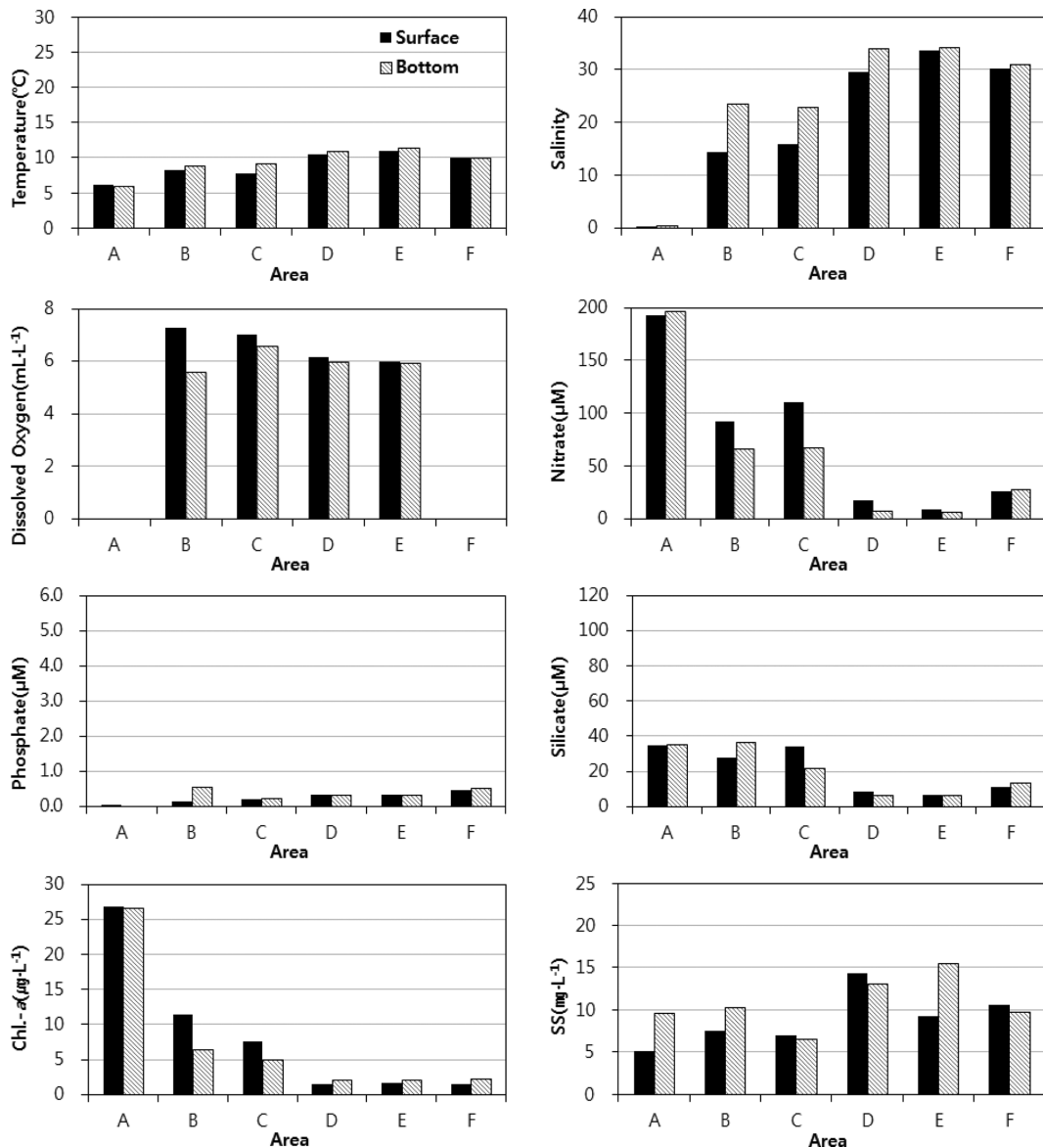


Fig. 3. The distribution of environmental factors in Nakdong river estuary in winter (st.1, 2 : site A, st.3, 4 : site B, st.5 : site C, st.6~8 : site D, st.9~11 : site E, st.12~14 : site F).

낙동강 하구는 하구둑 건설 전에는 담수유입과 조석에 의한 일 반적인 하구의 해수유동에서 하구둑 완공 후 담수 유입량에 의해 조절되는 양상으로 변경되었다(Jang and Kim[2006]). 따라서 하구 둑과 보 건설에 의해 감소된 담수 유입량에 의해 염분 변동이 클 것으로 판단된다. 계절에 따른 염분 분포는 일반적인 하구에서처럼 하계에 가장 낮은 염분 분포를 보이나 동계 염분과의 차이는 평균 1이하로 큰 차이를 보이지 않았으며, 춘계에 비해 추계에 연중 가장 높은 염분을 나타냈다. 하계 표층 site C에서의 염분은 상류인 site B에서 보다 낮은 염분을 보여 site C 인근에서 담수가 집중적으로 유입되고 있는 것으로 생각된다. site C의 담수 유입원은 크게 두가지 영향을 받는 것으로 판단된다. 첫째, 인근 유역에 설치된 하수처리장 및 지천의 영향 둘째, 낙조시 남하하던 담수와 해수의 혼합수가 외해로 빠져나가기 전에 창조류의 영향으로 수로상에

정체되어 나타나는 현상으로 유추된다(Jang and Kim[2006]). 하구 둑 건설전에 담수와 해수가 완전히 혼합되었던 site B와 C에서 표 층과 저층간의 염분 차이가 모든 계절에서 관측되었는데(Figs. 3~6), 이는 표층의 담수 유입과 저층의 해수 유입으로 강한 성층이 형성 되었기 때문이다(Jang and Kim[2006]). 그러나 site D와 E에서는 표층과 저층간의 염분차가 감소하는 경향을 보여 해수와 담수가 혼합되는 해역이 하구둑 건설전(site C)에 비해 하구둑으로부터 외해 역(site D)에 형성되는 양상을 나타냈다(Kim *et al.*[1996]). 담수가 하구로 유입되는 경로를 확인하기 위하여 정점 6과 정점 8의 환경 인자를 비교하면, 4월을 제외하고 다대포 해역에 비해 가덕도 인근 해역에서 염분은 낮고 영양염과 엽록소-*a*의 농도가 높은 분포를 나타낸다(Fig. 7). 따라서 담수의 주 유입 경로는 가덕도 방향으로 판단된다(Kim *et al.*[1996]; Jang and Kim[2006]). 또한 하구둑이 건

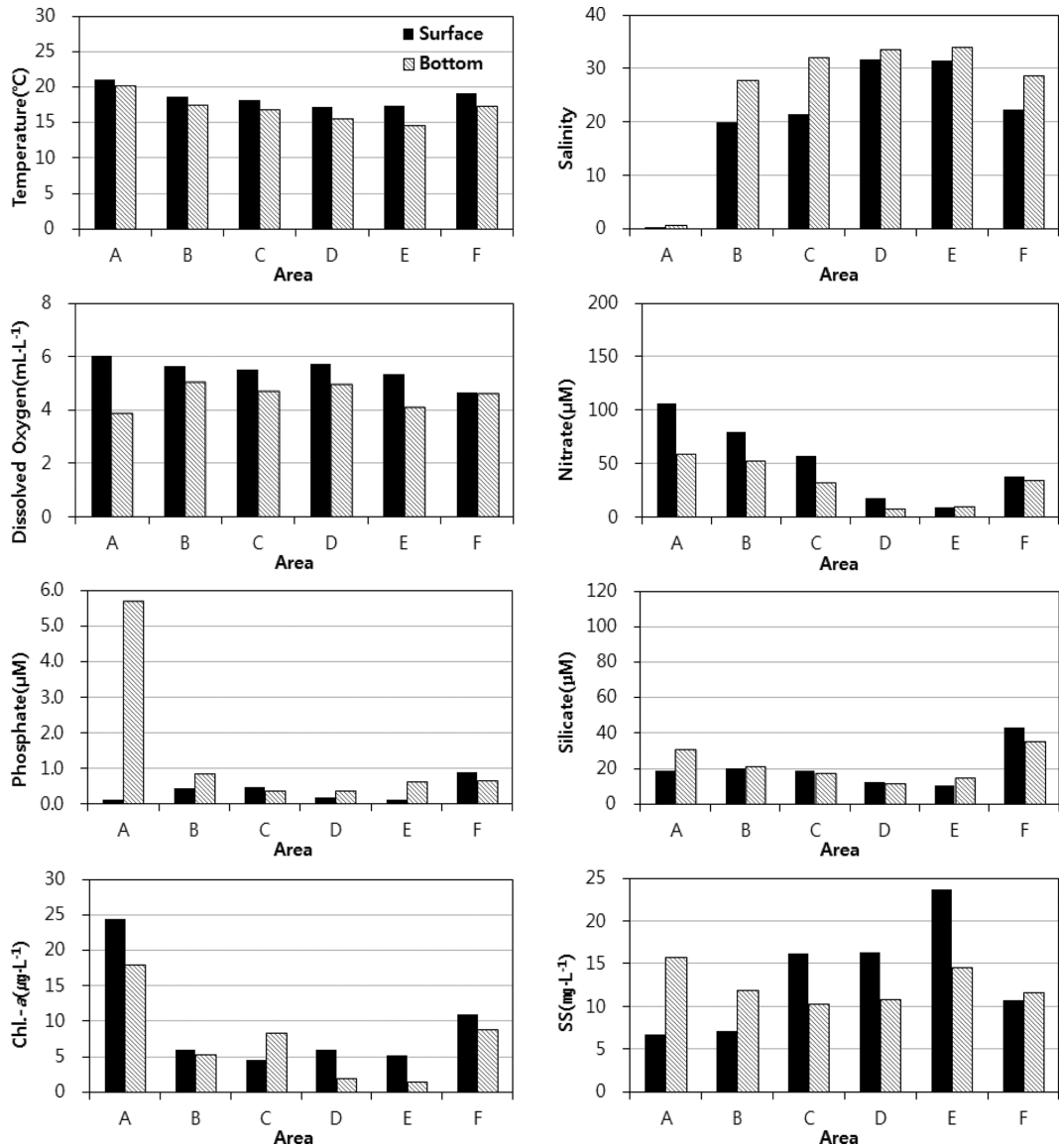


Fig. 4. The distribution of environmental factors in Nakdong river estuary in spring (st.1, 2 : site A, st.3, 4 : site B, st.5 : site C, st.6~8 : site D, st.9~11 : site E, st.12~14 : site F).

설되기 전(1970년) site B해역의 염분은 평균 12.36 내외의 염분을 보였으나, 본 연구기간에는 평균 19.57로 기수역의 특성을 보였던 해역의 염분이 상승하여 연안화 되어가는 양상을 보였다(Choe and Chung[1972]; Moon and Choi[1991]).

용존산소의 경우 2013년 춘계의 site E에서는 1.0 mL·L<sup>-1</sup> 이하, 2014년 춘계에는 site D와 E해역의 저층에서 각각 2.96 mL·L<sup>-1</sup>, 1.51 mL·L<sup>-1</sup>의 평균 농도를 보였으며, 2015년 춘계에 site C에서 3.23 mL·L<sup>-1</sup>의 낮은 용존산소가 관측되어 주로 춘계에 하구둑 인근보다 외해의 저층에서 낮은 용존산소 수위가 형성되는 것으로 판단된다. Lee *et al.*[2012]등은 하계에 높은 수온으로 인해 미생물의 대사가 증가함에 따라 용존산소가 소모되며, 동계에는 저서미세조류의 광합성에 의해 수계의 산소가 증가한다고 보고하였다. 또한 Chen *et al.*[2007], Ning *et al.*[2011]과 Zhu *et al.*[2011]은 장강 하

구에서 담수 방류량 증가에 따른 성층 형성으로 산소가 저층으로 공급되지 못하고, 부영양화로 인한 식물플랑크톤 대발생으로 인해 저층에서 산소가 소모되어 빈산소 해역이 발생한 것으로 보고하였다. 따라서 하계에 비해 방류량이 감소한 춘계 저층에서 용존산소의 농도가 감소하는 원인은 식물플랑크톤의 번성 이후 동물플랑크톤에 의해 섭식되지 않고 저층에서 분해될 때 용존산소가 소모되기 때문으로 판단된다. 용존산소의 농도가 2.5 mL·L<sup>-1</sup> 이하일 때와 5.0 mL·L<sup>-1</sup> 이상일 때 엽록소-a의 농도는 각각 7.3 μg·L<sup>-1</sup>, 4.6 μg·L<sup>-1</sup>으로 용존산소의 농도가 감소했을 때 식물플랑크톤의 생물량은 증가한 것으로 나타났다. 또한 용존산소의 농도가 낮았던 2013년 6월(평균 1.1 mL·L<sup>-1</sup>)과 상대적으로 높았던 2015년 6월(평균 5.8 mL·L<sup>-1</sup>)의 동물플랑크톤의 생체량(건조중량)은 각각 2,354 ind·m<sup>3</sup>, 1,404 ind·m<sup>3</sup>으로 용존산소의 농도가 낮은 시기에 더 높은 생체량을

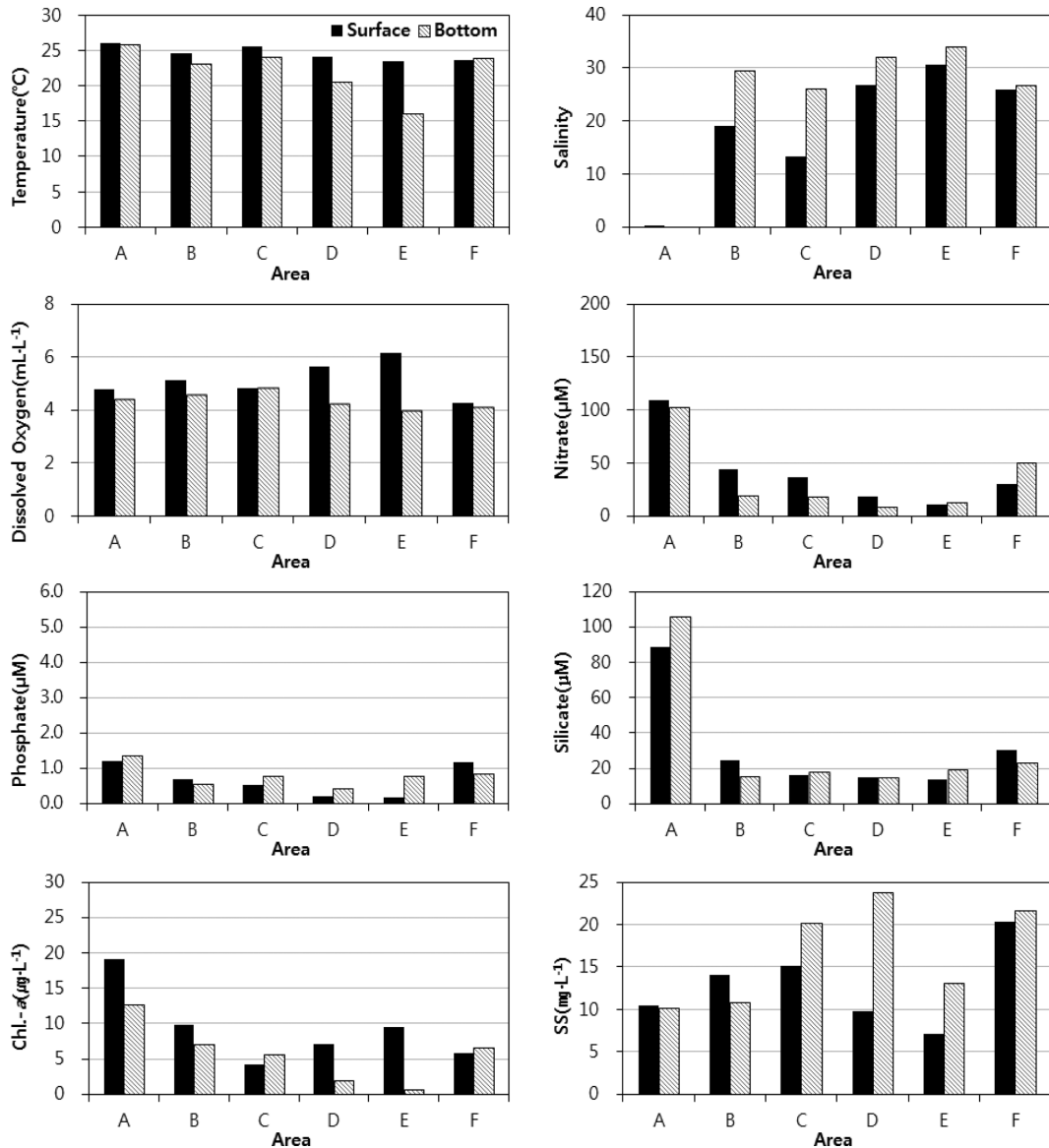


Fig. 5. The distribution of environmental factors in Nakdong river estuary in summer (st.1, 2 : site A, st.3, 4 : site B, st.5 : site C, st.6~8 : site D, st.9~11 : site E, st.12~14 : site F).

나타냈다(http://kocd.nifs.go.kr). 이러한 결과는 장강 하구에서 저 산소 발생 시기에 엽록소-*a*, 일차생산력, 동·식물 플랑크톤의 생물량이 증가한 결과와 일치하였다(Ning *et al.*[2011]). 또한 해역의 부영양화 외에도 전 지구적인 수온상승과 성층 강화 등으로 인해 대기로부터 표층으로 용해되는 산소의 양도 감소할 것으로 예측된다.

### 3.3 인공시설물 건설 후 하구의 영양염과 엽록소-*a* 변화

하구 영양염의 주요 공급원은 유입되는 담수이며, 영양염은 식물플랑크톤의 성장에 이용된다. 또한 영양염의 상대적 비율에 따라 식물플랑크톤의 성장이 제한되기도 한다. 따라서 암모니아 질소, 질산 질소, 인산 인 그리고 규산 규소의 시·공간 분포특성과 식물플랑크톤의 생물량을 대변하는 엽록소-*a*의 분포특성을 분석하였다(Figs. 3~6).

관측된 용존무기질소 중 암모니아 질소의 함량이 증가하면 질산 질소의 함량은 감소하는 상반된 경향을 보였다(Fig. 8). 담수역인 site A에서 용존무기질소 중 암모니아 질소의 비율은 동계와 추계에 낮은 비율을 보였으나, 하계에는 18% 이상으로 상대적으로 높은 비율을 보였다. 해수역에서는 모든 계절에서 담수에 비해 상대적으로 낮은 비율을 나타냈다. 이러한 결과는 하계에 담수역에서 남조류(*Microcystis aeruginosa*) 대발생에 의해 암모니아의 농도가 다른 계절에 비해 낮게 나타나는 결과와 다른 양상을 보였다(Cho and Shin[1998]). 또한 조사시기는 다르지만 같은 연구해역에서 보고된 하계의 식물플랑크톤의 종조성에서 *Microcystis spp.*은 1% 이하의 낮은 현존량을 나타내 큰 영향이 없는 것으로 사료된다(Chung and Youn[2013]).

질산 질소는 하구둑에서 외해로 갈수록 농도가 감소하는 경향이

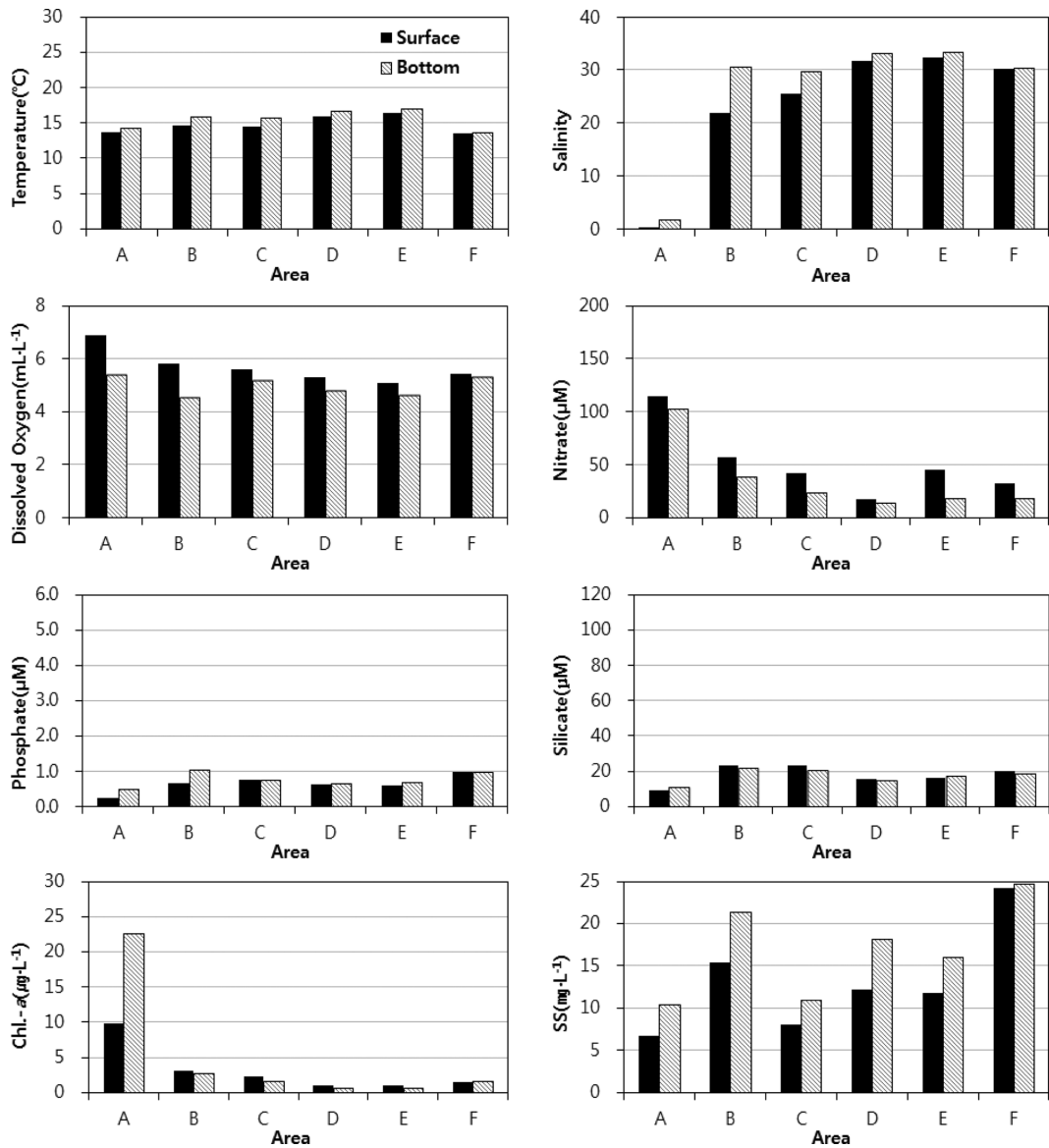


Fig. 6. The distribution of environmental factors in Nakdong river estuary in autumn (st.1, 2 : site A, st.3, 4 : site B, st.5 : site C, st.6~8 : site D, st.9~11 : site E, st.12~14 : site F).

뚜렷하게 나타났으며 이러한 결과는 낙동강 하구역의 질산 질소의 공급원이 주로 담수에 의한 것으로 해석된다. 특히 동계 하구둑 상류에서 200 μM 이상의 농도를 보여 다른 계절에 비해 동계에 낙동강 하구로 유입되는 질산염이 더 높은 것을 알 수 있다. 또한 site B와 C에서는 저층에 비해 표층에서 상대적으로 높은 농도를 보였다가 site D 이후 표층과 저층의 농도차가 급격하게 감소하는 양상을 보였다. 따라서 하구둑이 건설되기 전 주로 site C 인근에서 표층과 저층이 혼합되던 양상이 하구둑 건설 이후에는 site D 해역에서 해수와 완전히 혼합되는 것으로 사료된다(Jang and Kim[2006]). 이러한 결과는 거리에 따른 염분 분포와 동일한 양상을 보였다. 하구둑이 건설되기 전(1970년) site B해역의 질산 질소의 농도는 평균 25.24 μM 이하의 농도를 보였으나, 본 연구기간에는 평균 67.99 μM으로 하구둑과 낙동보가 건설된 후 농도가 증가하였다(Choe and

Chung[1972]; Sin *et al.*[2005]).

인산 인의 분포는 표층에 비해 저층에서 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. 질산 질소의 경우와는 달리 하계를 제외 한 다른 계절에는 site A에 비해 하류의 site B와 site C에서 높은 농도를 나타내고, 표층에 비해 저층에서 높은 농도를 보여 담수를 통한 유입보다 저층을 통해 주로 공급되는 것으로 판단된다. 외해의 저층에서 인산 인의 농도가 높은 원인은 저층에서 용존산소의 농도가 낮은 조건이 형성되면 질소와 인이 퇴적물로부터 용출되어 저층의 높은 농도에 기여하는 것으로 판단된다(Yang *et al.*[1990b]; Kim *et al.*[1996]). 0.2 μM 이하의 낮은 인산 인 농도는 춘계에 담수역을 비롯한 해수역의 표층을 중심으로 관측되었다. 이때 해수역에서 인산 인과의 상관성을 분석하면 염분과 음의 유의한 상관성(p<0.05, n=32)을, DIN과 높은 양의 상관성(p<0.01, n=34)을 나타냈다(Table 1). 또한

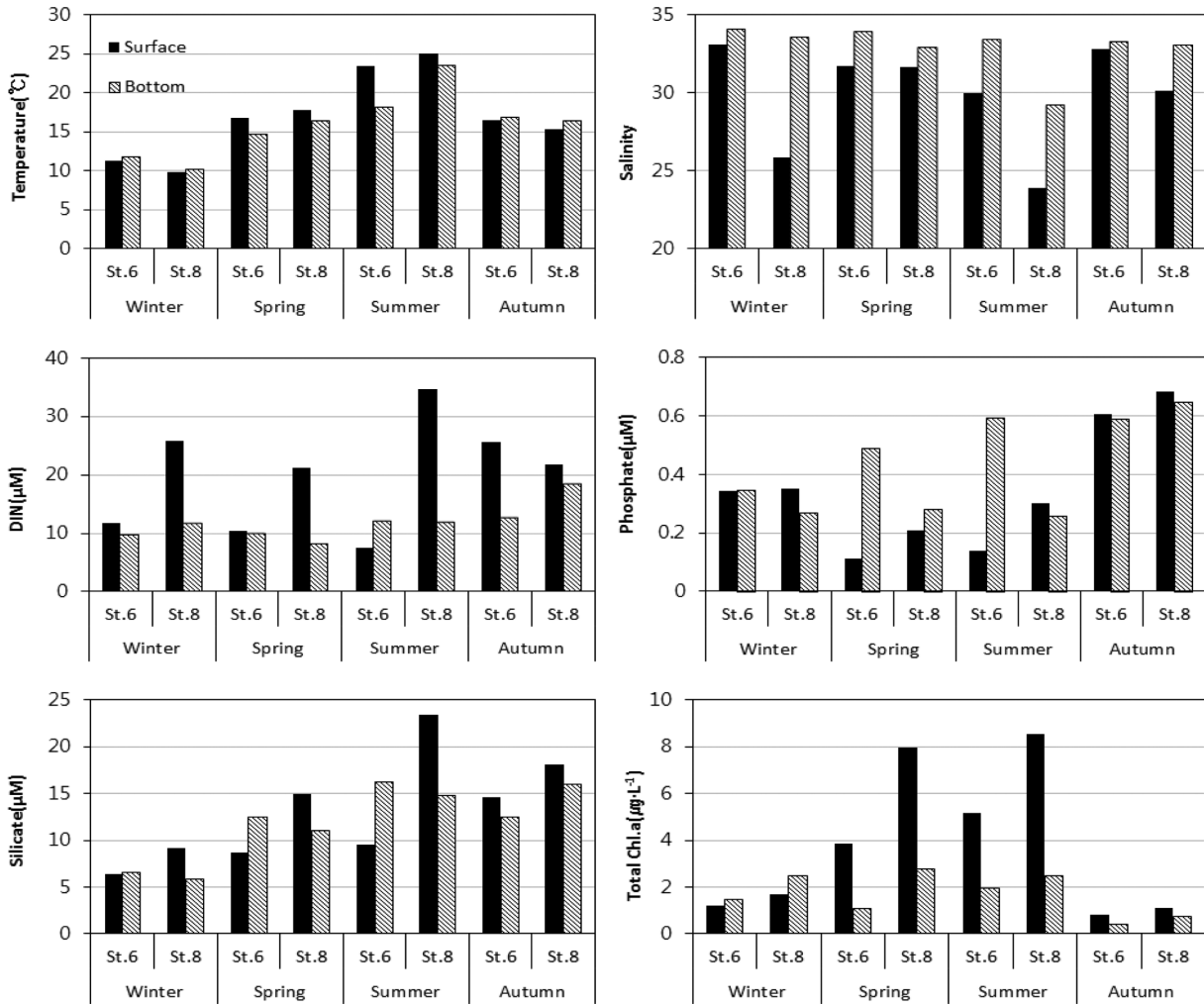


Fig. 7. The comparison of environmental factors under the influence of influx direction in Nakdong river estuary (St. 6: east part, St. 8 : west part).

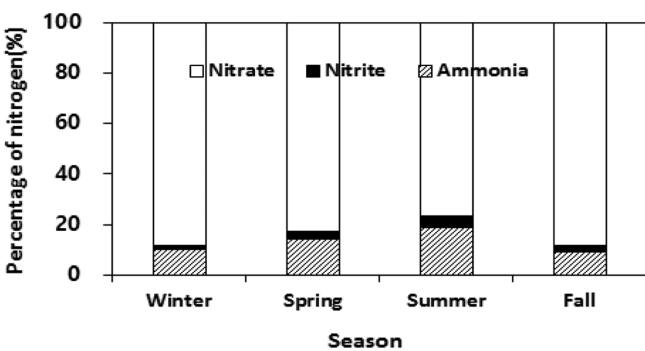


Fig. 8. The relative component ratio of nitrite, ammonia and nitrate in upper freshwater in Nakdong river estuary.

결보기산소요구량(AOU)과 비교하면 DIP/AOU은 음의 값을 나타내어 주로 산소가 외부로부터 유입되거나, 수계내에서 생산될 때 낮아지는 것으로 보인다. 즉, 식물플랑크톤에 의한 광합성에 의해 인산 인의 농도가 낮아지는 특성을 보였다. 담수역에서 인산 인의 농도가 낮은 원인은 침강되는 부유토사의 표면에 흡착되거나, Fe 과 Al과 공침되어 제거되기 때문으로 판단된다(Yang *et al.*[1990a]).

또 담수역은 동계에 낮은 인산 인의 농도를 나타내는데 이는 규조류에 속하는 *Stephanodiscus*가 대번성하면서 인과 규소를 이용하기 때문이다(Cho and Shin[1997]; Chung and Youn[2013]). 실제로 Chung and Youn[2013]은 같은 연구해역에서 *Stephanodiscus* 속에 의한 수화현상을 1월부터 4월까지 확인하였다. 또한 하계에 site B와 C에서 다른 계절에 비해 높은 원인은 방류량 증가에 따라 침강되는 인의 양에 비해 방류되는 비율이 더 증가하여 하계에 농도가 높은 것으로 판단된다. 따라서 낙동강 하구의 인산 인은 하계에는 담수를 통해 주로 공급되나, 그 외의 계절에는 하구 독 하류의 정체된 수역의 저층을 통해 유입되며, 외해로 갈수록 광합성에 의해 낮은 농도를 보이는 것으로 판단된다.

하구독으로부터 거리에 따른 규산 규소의 분포는 외해로 갈수록 농도가 감소하는 경향으로 특히, 하구독 상류의 site A에서 높은 농도를 나타냈다. 저층보다는 표층에서 높은 농도를 보여 표층을 통해 유입되는 양상을 보였으며 따라서 연구해역의 규산 규소의 공급은 담수에 의해 조절되는 것으로 판단된다(Moon and Kwon [1994]).

엽록소-*a*는 식물플랑크톤의 크기에 따라 0.45 µm 보다 큰 식물



**Table 1.** Person's Coefficient Correlation of environmental factors in 0.2 μM>phosphate of seawater in the Nakdong river estuary (Temp: Temperature (°C), Sal.: Salinity, DO: Dissolved Oxygen (mL·L<sup>-1</sup>, Nitrate, Phosphate, Silicate: μM)

	Temp.	Sal.	DO	Nitrate	Phosphate	Silicate
Temp.	1	0.557**	-	-0.687**	-	-0.560**
Sal.		1	-	0.861**	-0.435**	-0.744**
DO			1	-	-	-0.423*
Nitrate				1	0.452**	0.844**
Phosphate					1	-
Silicate						1

플랑크톤의 생물량을 나타내는 총 엽록소-a와 20 μm보다 작고 0.45 μm보다 큰 식물플랑크톤(nano phytoplankton)의 농도를 함께 분석하였다. 낙동강 하구로 유입되는 담수의 엽록소-a의 평균 농도는 춘계에 가장 높고 추계에 낮게 나타났다. 춘계의 높은 식물플랑크톤의 생물량은 추계에 비해 높은 수온과 갈수기에 하구둑 상부에서 체류시간이 증가하기 때문으로 판단된다(Sin *et al.*[2005]). 반면에 해수역에서는 하계에 가장 높은 평균 농도를 보였고 추계에 낮은 농도를 보였다. 조사 시기는 다르지만 같은 연구해역에서 보고된 식물플랑크톤의 종조성은 춘계에 낮고, 추계에 높은 농도를 보여 본 연구결과와 차이를 보였다(Chung *et al.*[2000]; Chung and Youn[2013]). 이러한 원인은 조사 시기 외에도 식물플랑크톤의 종조성과 크기에 따라 엽록소-a의 농도가 다르기 때문이다. 즉, 총 엽록소-a에 대한 20 μm 이하의 식물플랑크톤의 기여도 차이 때문이며(Chung *et al.*[2000]), 실제로 총 엽록소-a에 대한 20 μm 이하의 식물플랑크톤의 엽록소-a의 기여도는 동계와 하계에는 60% 내외였고, 춘계에는 67%, 추계에는 78%를 나타내었다. 추계에 하구둑으로부터 거리에 따른 농도 변화는 동계와 추계에 외해로 갈수록 농도가 감소하는 경향을 보인 반면에 하계에는 가장 외해의 정점에서 높은 분포를 나타내었다. 하구둑에서 가장 먼 해역에서 식물

플랑크톤의 생물량이 증가하는 것은 유입되는 담수에 다량의 영양염을 함유하고 있지만, 하구둑에 인접할수록 담수의 빠른 유속이 식물플랑크톤 성장에 제한 요인으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다(Sin *et al.*[2005]).

부유물질의 농도는 영양염과 엽록소-a의 분포와는 달리 해수역(평균 14.1 mg·L<sup>-1</sup>)에서 담수역(9.5 mg·L<sup>-1</sup>)에 비해 높은 농도를 나타냈다. 수층에 따라서는 춘계를 제외하면 표층에 비해 저층에서 부유물질의 농도가 높은 특성을 보였다. 따라서 이러한 결과는 표층의 담수 유입으로 인한 저층의 해수 유입에 의한 퇴적물 유입의 결과로 생각된다.

본 연구결과와 조사정점이 유사한 조사결과를 비교하면, 보 건설전을 기점으로 염분은 증가하는 경향을 보이거나 암모니아 질소, 인산 인, 규산 규소 그리고 엽록소-a의 농도는 감소하는 경향을 확인하였다(Table 2). 인산 인과 규산 규소의 감소는 하구둑 및 보의 영향으로 체류시간의 증가와 담수 방류량의 감소로 하구로 공급되어야 할 영양염이 하구둑 상류에서 부유토사에 흡착되어 제거되는 양이 증가하기 때문으로 판단된다(Morris *et al.*[1981]). 이러한 결과는 영산강과 장강 하구에서 하구둑 건설 후 인산 인의 농도가 낮아지는 경향과 일치하였으며(Chen[2000]; Shin and Yoon[2011]),

**Table 2.** Comparison of averages of environmental factors at surface in the Nakdong river estuary (Sal.: Salinity)

Year	sal.	DO (mL·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N (μM)	NO <sub>3</sub> -N (μM)	PO <sub>4</sub> -P (μM)	Si(OH) <sub>4</sub> -Si (μM)	Chl.a (μg·L <sup>-1</sup> )	SS (mg·L <sup>-1</sup> )	Site	Res.
1983.08-'84.07	9.33	-	98.57	128.36	1.94	97.68	-	-	A	2
1996.09-'97.08	0.46	5.61	31.07	42.71	1.65	-	47.86	-	A	4
<b>2013-2015</b>	<b>0.27</b>	<b>6.15</b>	<b>7.12</b>	<b>123.99</b>	<b>0.32</b>	<b>29.98</b>	<b>19.05</b>	<b>7.11</b>	<b>A</b>	<b>6</b>
1970.02-'70.12	12.36	7.9	3.65	25.24	1.27	66.70	-	-	B	1
1983.08-'84.07	18.56	-	34.71	68.07	1.52	64.86	-	-	B	2
1994.12-'96.12	20.11	5.67	60.00	72.36	0.84	-	10.57	-	B	3
<b>2013-2015</b>	<b>16.33</b>	<b>5.79</b>	<b>6.42</b>	<b>67.99</b>	<b>0.50</b>	<b>23.17</b>	<b>6.78</b>	<b>11.45</b>	<b>B</b>	<b>6</b>
1983.08-'84.07	23.17	-	28.50	63.71	1.23	53.79	-	-	C	2
1994.12-'96.12	25.79	5.32	25.79	31.64	0.68	-	6.95	-	C	3
<b>2013-2015</b>	<b>20.49</b>	<b>5.61</b>	<b>6.32</b>	<b>57.21</b>	<b>0.54</b>	<b>22.36</b>	<b>4.28</b>	<b>11.47</b>	<b>C</b>	<b>6</b>
1983.08-'84.07	28.37	-	8.36	47.50	0.45	41.65	-	-	D	2
2011-2013	29.88	6.31	2.70	27.20	0.53	16.64	-	-	D	5
<b>2013-2015</b>	<b>30.59</b>	<b>5.59</b>	<b>2.42</b>	<b>17.57</b>	<b>0.35</b>	<b>13.59</b>	<b>3.91</b>	<b>13.41</b>	<b>D</b>	<b>6</b>
<b>2013-2015</b>	<b>32.00</b>	<b>5.47</b>	<b>1.82</b>	<b>22.47</b>	<b>0.33</b>	<b>12.49</b>	<b>3.84</b>	<b>14.98</b>	<b>E</b>	<b>6</b>
1983.08-'84.07	25.08	-	17.00	35.71	1.13	50.64	-	-	F	2
1996.09-'97.08	17.33	4.50	14.86	15.93	1.55	-	16.71	-	F	4
<b>2013-2015</b>	<b>26.83</b>	<b>4.94</b>	<b>10.31</b>	<b>32.73</b>	<b>0.89</b>	<b>27.91</b>	<b>5.31</b>	<b>16.81</b>	<b>F</b>	<b>6</b>

1: Choe and Chung[1972], 2: Kim *et al.*[1984], 3: Shin *et al.*[1998], 4: Kim and Lee[1998], 5: Kwon *et al.*[2013], 6: This study

영양염의 농도변화는 영양염의 비의 변화로 이어져 diatom에서 cyanobacteria로의 종천이 현상이 발생할 가능성이 있을 것으로 판단된다(Humborg *et al.*[1997]; Domingues *et al.*[2005]).

#### 4. 결 론

하구는 유입되는 담수에 의해 생산적인 생태계를 유지한다. 그러나 낙동강하구는 상류에 보(barrage)가 건설되었고, 하류에는 뚝(dam)이 건설되어 육지와 해양이 인공시설물로 단절되었다. 따라서 이러한 인공시설물에 대한 하구의 해양환경 변화를 확인하고자 2013년부터 2015년까지 하구로 유입되는 담수를 비롯하여 해수역을 중심으로 연구하였다. 보 건설 후 하구둑에서의 방류량은 낙동강 보 건설전에 비해 약 75%로 급격하게 감소하였다. 따라서 보가 건설되기 전에 비해 염분이 증가하는 양상을 보여 기수역이 감소한 것을 확인하였다. 하구로 유입되는 방류수는 조류의 영향으로 가덕도 해역으로 편향되어 유입되는 특성을 보여 하구의 동쪽에 비해 서쪽에서 영양염 및 엽록소-*a*의 농도가 높게 나타났다. 질산 질소와 규산 규소의 주요 공급원은 유입되는 담수이며, 인산 인은 저층의 퇴적물에 의해 증가하는 것으로 판단된다. 질소계 영양염의 농도는 하구둑 건설전에 비해 증가하였으나, 인산 인과 규산 규소 및 용존산소의 농도는 춘계와 하계에 급격히 감소하는 양상을 나타냈다. 담수역에서 인산 인은 하구둑에 의한 영향으로 부유물질과 흡착 및 공침되어 제거되었고, 해수의 인산 인은 식물플랑크톤에 의해 제거 되는 것으로 사료된다. 낮은 인산 인의 농도는 향후 하구 생태계에 부정적인 요인으로 작용할 가능성이 있다. 용존산소의 농도 감소는 대변성한 식물플랑크톤이 저층에서 분해되는 과정에서 소모되어 나타난 결과로 판단된다. 일반적으로 춘계와 추계에 대변성하는 식물플랑크톤의 특성과는 달리 낙동강 하구에서는 하계에 높은 경향을 보였다. 따라서 낙동강 하구 생태계는 방류량 감소에 따라 염분, 용존산소, 영양염 및 엽록소-*a*의 특성이 변동 되었으며, 이러한 변화는 하구환경 변화로 이어질 것으로 예측된다.

#### 후 기

본 연구는 2017년 국립수산과학원 한국근해 해양변동 모니터링 및 생태계 특성 연구(R2017049)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

- [1] Chen, C.-C., Gong, G.-C. and Shiah, F.-K., 2007, "Hypoxia in the East China Sea: One of the largest coastal low-oxygen areas in the world", *Mar. Environ. Res.*, Vol. 64, 399-408.
- [2] Chen, C.T.A., 2000, "The Three Gorges Dam: Reducing the upwelling and thus productivity in the East China Sea", *Geophysical Res. Lett.*, Vol. 27, No. 3, 381-383.
- [3] Cho, K.-J. and Shin, J.-G., 1995, "Distribution and variation of chlorophyll-a from midstream to downstream of the Nakdong river", *Kor. J. Lim.*, Vol. 28, No. 4, 421-426.
- [4] Cho, K.-J. and Shin, J.-G., 1997, "Dynamics of inorganic N-P nutrient from midstream to downstream of the Nakdong river", *Kor. J. Lim.*, Vol. 30, No. 2, 85-95.
- [5] Cho, K.-J. and Shin, J.-G., 1998, "Dynamics of inorganic N-P nutrient and planktonic algae during summer and winter in downstream of the Nakdong river", *Kor. J. Lim.*, Vol. 31, No. 1, 67-75.
- [6] Choe, S. and Chung, T.W., 1972, "Nutrients and suspended organic particulates in the estuary of Nak-Dong river", *J. Oceanolog. Soc. Kor.*, Vol. 7, No. 1, 1-14.
- [7] Chung, I.K., Kang, Y.J., Kwon, O.-S. and Seo, J.K., 2000, "The ecology of phytoplankton in the Nakdong estuary", *Algae*, Vol. 15, No. 2, 99-110.
- [8] Chung, M.H. and Youn, S.-H., 2013, "Temporal and spatial variability of phytoplankton communities in the Nakdong river estuary and coastal area, 2011-2012", *The Sea*, Vol. 18, No. 4, 214-226.
- [9] Domingues, R.B., Barbosa, A. and Galvao, H., 2005, "Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia)", *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 64, 249-260.
- [10] Domingues, R.B., Barbosa, A.B. and Galvao, H.M., 2014, "River damming leads to decreased phytoplankton biomass and disappearance of cyanobacteria blooms", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 136, 129-138.
- [11] Humborg, C., Ittekkot, V., Cociasu, A. and Bodungen, B.V., 1997, "Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure", *Nature*, 386, 385-388.
- [12] Jang, S.-T. and Kim, K.-C., 2006, "Change of oceanographic environment in the Nakdong Estuary", *The Sea*, Vol. 11, No. 1, 11-20.
- [13] Jennerjahn, T.C. and Mitchell, S.B., 2013, "Pressures, stresses, shocks and trends in estuarine ecosystems-An introduction and synthesis", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 130, 1-8.
- [14] Kim, J.G., You, S.-J. and Kwon, J.-N., 1998, "Variations of water quality after construction of Keum river estuary barrage", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 31, No. 5, 685-694.
- [15] Kim, K.-C., Kim, J.J., Kim, Y.E. and Han, K.M., 1996, "Outflow characteristics of Nakdong river plume", *J. Kor. Soc. Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 8, No. 4, 305-313.
- [16] Kim, I.-B., 1970, "Fundamental studies of the lower part of the NakTong river for fisheries exploitation", *Bull. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 3, No. 1, 65-70.
- [17] Kim, S.H., Yoon, I.-K., Song, S.J., Kim, Y.E. and Kwon, O.-S., 1996, "Environmental factors and benthic microbial distributions in the sediments of Nakdong river estuary", *Kor. J. Lim.*, Vol. 29, No. 3, 205-214.
- [18] Kim, W.-J. and Lee, H.-J., 1998, "The environmental factors and distribution of microorganisms of Nakdong river estuary", *Kor.*

- J. Limnol., Vol. 31, No. 1, 25-31.
- [19] Kim, Y.-G., Shin, H.-K., Cho, H.-R. and You, S.-J., 1984, "Seasonal variations of water quality in the lower part of the Nagdong river", Bull. Kor. Fish. Soc., Vol. 17, No. 6, 511-522.
- [20] Kwon, J.-N., Shim, J.H., Lee, S.Y. and Cho, J.D., 2013, "Effects of meteorological and oceanographic properties on variability of laver production at Nakdong river estuary, south coast of Korea", Kor. J. Fish. Aquat. Sci., Vol. 46, No. 6, 868-877.
- [21] Lee, J.Y., Kwon, J.N. and An, S.M., 2012, "Seasonal variation of nitrogen loads and nitrogen cycling at tidal flat sediments in Nakdong river estuary", The Sea, Vol. 17, No. 2, 120-129.
- [22] Liu, M., Xiao, T., Wu, Y., Zhou, F., Huang, H., Bao, S. and Zhang, W., 2012, "Temporal distribution of bacterial community structure in the Changjiang estuary hypoxia area and the adjacent East China Sea", Environ. Res. Lett., Vol. 7, No. 2, 025001.
- [23] MOF, 2013, "Guideline to standard methods for the marine environment", Ministry of Government Legislation, p. 516.
- [24] Moon, C.-H. and Choi, H.-J., 1991, "Studies on the environmental characteristics and phytoplankton community in the Nakdong river estuary", J. Oceanolog. Soc. Kor., Vol. 26, No. 2, 144-154.
- [25] Moon, C.-H. and Kwon, K.-Y., 1994, "Seasonal variations of particulate biogenic silica in the Nakdong river estuary", J. Kor. Soc., Vol. 29, No. 1, 5-16.
- [26] Morris, A.W., Bale, A.J. and Howland, R.J.M., 1981, "Nutrient distributions in an estuary: Evidence of chemical precipitation of dissolved silicate and phosphate", Estuar. Coast. Shelf Sci., Vol. 12, 205-216.
- [27] Ning, X., Lin, C., Su, J., Liu, C. and Hao, Q., 2011, "Long-term changes of dissolved oxygen, hypoxia, and the responses of the ecosystems in the East China sea from 1975 to 1995", J. Oceanogr., Vol. 67, 59-75.
- [28] Shin, S.-K., Park, C.-K. and Song, K.-O., 1998, "Evaluation of water quality using principal component analysis in the Nakdong river estuary", J. Kor. Environ. Sci. Soci., Vol. 7, No. 2, 171-176.
- [29] Shin, Y.S. and Yoon, B.B., 2011, "Change in taxonomic composition of phytoplankton and environmental factors after construction of dike in Yeongsan river estuary", Kor. J. Environ. Biol., Vol. 29, No. 3, 212-224.
- [30] 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 system", Kor. J. Lim., Vol. 38, No. 2, 160-180.
- [31] Turner, R.E., Rabalais, N.N., Swenson, E.M., Kasprzak, M. and Romaine, T., 2005, "Summer hypoxia in the northern gulf of Mexico and its prediction from 1978 to 1995", Mar. Environ. Res., Vol. 59, 65-77.
- [32] Yang, J.-W., Lee, S.-M. and Park, C.-K., 1990a, "Settling characteristics of phosphorus in Nakdong estuary barrage", Bull. Korean Fish. Soc., Vol. 23, No. 3, 185-191.
- [33] Yang, J.-W., Song, K.-O. and Lee, S.-M., 1990b, "Release characteristics of phosphorus in Nakdong estuary barrage", Bull. Kor. Fish. Soc., Vol. 23, No. 3, 192-197.
- [34] Yang, S.R., Song, H.S., Moon, C.-H., Kwon, K.-Y. and Yang, H.-S., 2001, "Changes in marine environment and primary production due to freshwater input in the Nakdong estuary", Algae, Vol. 16, No. 2, 165-177.
- [35] Yoon, I.B., Bae, K.-S. and Kong, D.-S., 1987, "A study on the physiochemical factors and macrozoobenthos community structure in Nakdong estuary", Kor. J. Lim. Vol. 20, No. 2, 73-99.
- [36] Zhu, Z.-Y., Zhang, J., Wu, Y., Zhang, Y.-Y., Lin, J. and Liu, S.-M., 2011, "Hypoxia off the Chanjiang(Yangtze river) estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition", Mar. Chem., Vol. 125, 108-116.

---

Received 24 August 2016

1st Revised 7 October 2016, 2nd Revised 15 December 2016

3rd Revised 19 February 2017

Accepted 20 February 2017