

낙동강 하구의 담수 방류와 표층 수온 및 염분 반응 : 계류형 센서 연속관측 결과

김상일* · 윤석현**†

*, ** 국립수산과학원 기후변화연구과

Effect of Freshwater Discharge on the Nakdong River Estuary: Mooring Observations of Water Temperature and Salinity

Sangil Kim* · Seok-Hyun Youn**†

*, ** Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46073, Korea

요 약 : 낙동강 하구에서 연속관측 자료를 바탕으로 담수의 방류와 수온 및 염분의 시간에 따른 반응을 조사하였다. 낙동강 하구 서쪽 해역에 계류형 센서를 설치하고 2017년 4월 1일부터 2018년 3월 31일까지 10분 간격으로 수온과 염분을 측정하였다. 담수의 방류량은 평상시에 $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 이하로 유지되었으나, 풍수기에는 $500 \sim 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 이상의 많은 양의 담수가 빈번하게 방류되었다. 담수의 방류는 대조기에는 간조를 전후하여 발생하였고, 소조기 동안에는 계속적으로 일어났다. 평상시에 수온과 염분은 소조기 동안 큰 변동 없이 안정되는 경향을 보이는 반면에, 대조기에는 방류주기에 따라 규칙적인 변동을 나타내었다. 연구기간 동안 염분은 평균 29이었으며, 평상시에 염분 농도는 평균 이상으로 유지되었고 일시적인 감소 이후에도 빠르게 회복되었다. 풍수기에는 약 3개월 동안 평균 이하의 저염환경이 지속되었다. 이러한 결과는 담수의 방류량뿐만 아니라 방류의 지속시간과 대량 방류의 빈도가 낙동강 하구의 표층 수온과 염분의 변동성에 영향을 미치는 중요한 요인이 된다는 것을 의미한다.

핵심용어 : 염분, 수온, 낙동강 하구, 담수방류, 연속관측

Abstract : Mooring observations of water temperature and salinity were conducted to investigate the effects of freshwater discharge patterns on the mouth of Nakdong River from April 2017 to March 2018. More than $500 - 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ of freshwater was frequently discharged into the estuary throughout the rainy season, but less than $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ was discharged through the normal season. Sluice gates of the estuarine barrage operated depending on the tide level during spring tide, but they were constantly open during neap tide. Water temperature and salinity fluctuated regularly with intermittent discharges of freshwater, whereas they were stable while freshwater discharge was continuous. Mean salinity was 29 during the study period. Salinity exceeded the mean value in the normal season and rapidly recovered after a temporary reduction. In contrast, water with salinity below the mean value prevailed in the estuary for three months over the rainy season. These results indicate that water temperature and salinity were affected by the amount of freshwater discharge, as well as the frequency of discharge on a large scale and the time over which the freshwater discharge continued.

Key Words : Salinity, Sea surface temperature, Nakdong River Estuary, Freshwater discharge, Mooring

1. 서 론

낙동강 하구는 우리나라에서 조석과 파랑의 작용으로 유일하게 삼각주와 사주가 잘 발달한 하구였으나, 하구둑 건설과 산업단지 개발, 4대강 사업 등 높은 개발압력 때문에

많은 환경변화를 겪어왔다. 특히 1987년 하구둑 건설은 낙동강 하구 수계의 혼합과 순환 체제를 변환시키는 분기점이 되었으며, 이에 따른 하구의 환경 변화를 이해하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. 하구둑에서 방류되는 담수의 확산(Yu and Lee, 1993; Yu et al., 1993)과 이에 영향을 미치는 요인(Han et al., 1993)이 논의 되었고, Kim et al.(1996)과 Jang and Kim(2006)은 조석 주도에서 담수의 방류에 의해 주도되

* First Author : kelpkim@gmail.com, 051-720-2248

† Corresponding Author : younsh@korea.kr, 051-720-2233

는 수계 혼합 체제의 변환과 염분의 시·공간적 분포와 구조에 대해 제시하였다. Kim et al.(1999)은 방류량 변화에 따른 하구의 수온과 염분 분포에 대해 보고하였다. 이러한 선행 연구들을 통해 하구둑 건설 이후 변화된 하구의 해양환경에 대한 이해와 지식들이 축적되어왔으나, 하구 수계의 거동은 계속되는 담수의 방류와 조석의 상호작용으로 연속성이 있는 반면에, 대부분의 선행 연구들에서 측정된 자료는 순간적이고 일회적이었다. 따라서 담수 방류 이후 염분이 회복되는 과정이나 여름철 풍수기 동안 저염환경의 지속시간, 방류량 변화에 따른 수온과 염분의 연속적인 반응 등에 대해 세부적으로 이해하는데 어려움이 있었다.

하구에서 수온 및 염분의 거동은 하구의 환경적 특성을 이해하기 위해 필요한 가장 기본적인 요소이다(Monsen et al., 2002; Lerczak et al., 2006; Chevailer et al., 2014). 전형적인 하구는 주로 조석에 의해 수계의 순환과 혼합이 조절된다. 반면에, 댐과 같은 인공구조물이 설치된 닫힌 하구에서는 인위적으로 조절되는 담수의 방류에 의해 수력학적 거동이 발생한다. 닫힌 하구의 수온과 염분은 담수의 간헐적인 방류로 인해 짧은 시간 동안 급격하게 변동되며, 저염환경의 지속시간과 회복 속도 등 수온과 염분의 반응 양상이 달라진다(Chen et al., 2000; Lane et al., 2007; Chevailer et al., 2014). 이러한 하구 수계의 복잡한 거동을 해석하기 위해서는 시간의 경과에 따른 보다 세밀한 자료가 필요할 것이다.

하구의 해양환경 조사는 선상에서 CTD와 같은 측정 장비를 사용하거나 채수한 시료를 분석하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 그리고 특정한 조사시점의 자료가 해당 계절과 당시의 환경 특성을 대표하는 것으로 해석된다. 그러나 하구 수계의 환경 변동성을 지배하는 요인은 시간적으로 매우 다양하게 발생하기 때문에 순간적으로 측정된 자료만으로는 해석이 제한 될 수 있다. 일시적인 요인에 대해서는 과소평가 될 수 있는 반면에, 빈번하게 발생하는 요인은 과대평가 될 수 있다(Magnuson, 1990; Johnson et al., 2007). 또한 변동 요인의 발생과 그 영향의 시간차를 충분히 반영하기가 어렵다(Johnson et al., 2007). 따라서 연속적인 장기 관측 자료가 하구역의 환경 변동성에 대한 이해도를 높이는데 매우 유용하게 사용될 수 있다(Lane et al., 2007; Jannasch et al., 2008).

이번 연구는 연속 관측을 통해 낙동강 하구의 표층 수온 및 염분의 변동 양상을 이해하고자 하였다. 이를 위해 계류형 센서를 이용하여 하구둑의 방류량에 따른 염분의 변화와 담수의 대량 방류 이후 염분의 회복 양상을 파악하였다. 그리고 담수의 방류와 조석, 수온 및 염분과의 상호관계를 분석하여 평상시와 풍수기의 수온과 염분 변동 특성을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 장소 및 기간

하구둑 건설 이후 낙동강 하구에는 크게 세 개의 저염층이 형성되는 것으로 알려져 있다; 가덕도 인근 해역, 장자도 남쪽 해역, 다대포 인근 해역(Kim et al., 1996; Jang and Kim, 2006). 방류된 담수는 주로 표층에서 성층화 된 채 주로 장자도 남쪽 해역으로 이동하지만, 밀물 때 상층부의 담수가 서쪽으로 이동하면서 서쪽 해역에는 혼합수가 머물게 된다. 여기에 코리올리효과(Coriolis effect)가 더해지면서 가덕도 인근 해역에는 두터운 저염층이 형성되는 것으로 보고되었다(Kim et al., 1996; Jang and Kim, 2006). 따라서 가덕도 인근 해역은 낙동강 하구에서 담수의 영향을 잘 반영할 수 있는 곳 중 하나로 여겨진다. 이번 연구는 이러한 낙동강 하구의 특성과 계류형 센서의 설치 및 관리를 위한 접근성, 주변의 어업 시설 등을 고려하여 가덕도 동쪽 연안 해역(35° 02.637' N, 128° 51.078' E)의 표층수를 대상으로 수행되었다(Fig. 1). 이번 연구는 2017년 4월 1일부터 2018년 3월 31일까지 수행하였다. 연구 기간 동안의 방류량 결과를 바탕으로, 담수의 방류가 500 m³ s⁻¹ d⁻¹ 이상 빈번하게 발생하는 기간을 풍수기, 방류량의 변동이 크지 않고 평균값이하로 지속되는 시기를 평상시로 구분하였다. 그리고 방류량이 많을 때(풍수기)와 방류량이 일반적일 때(평상시)의 방류 양상과 수온 및 염분 반응을 파악하기 위해 평상시(2017년 12월 24일~2018년 1월 6일)와 풍수기(2017년 8월 7일~20일)를 대표할 수 있는 기간을 선정하여 분석하였다.

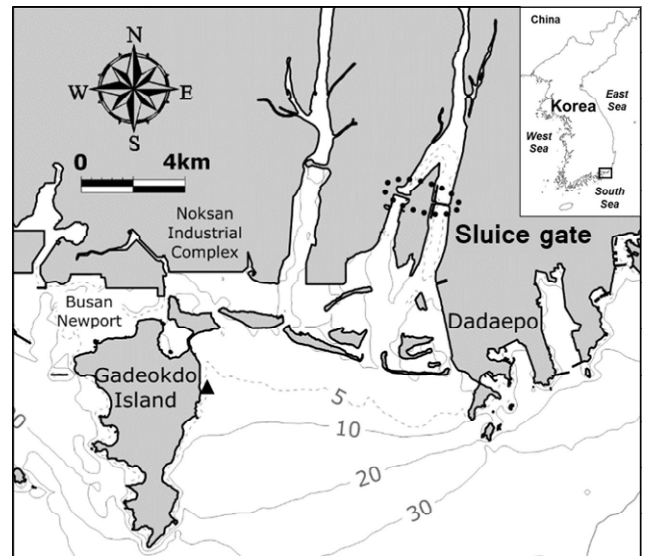


Fig. 1. Study site at the Nakdong River estuary. Black triangle indicates mooring station.

2.2 자료의 수집

낙동강 하구둑의 방류량($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)은 한국수자원공사 물정보 포털 서비스의 수문현황 정보를 통해 일일 평균($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{d}^{-1}$)과 시간별 평균($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{h}^{-1}$) 자료를 수집하였다(MyWater 운영관측, <http://www.water.or.kr>). 조석 주기는 국립해양조사원의 가덕도 조위관측소의 조석 성과 자료를 사용하여 분석하였다. 수온과 염분은 연구 장소에 앵커부이를 고정하고 계류형 센서(수온: HOBO Pendant Temperature/Light Data Logger, Onset Computer Corp., USA; 염분: HOBO U24 Conductivity Logger (U24-002-C), Onset Computer Corp., USA)를 수면아래 30 cm에 설치하였다. 염분 센서의 민감도에 영향을 줄 수 있는 이물질 또는 부착생물의 착생을 방지하기 위해 2~3주 간격으로 수온과 염분센서를 교체하였다. 수온과 염분자료는 10분 간격으로 측정하여 일일 평균값과 시간별 평균값을 산출하였다. 센서 자료의 신뢰성을 위해 교체 시점마다 현장에서 별도로 수질측정기(YSI-professional plus, YSI Inc., USA)와 CTD (RBR concerto, RBR Ltd., Canada)로 수온과 염분을 측정하여 센서의 자료와 대조 및 검증 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 낙동강 하구둑의 담수 방류 양상

연구기간 동안 낙동강 하구둑의 하루 평균 방류량은 $171.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 이었으며, 2017년 8월 16일에 가장 많은 1336.9

$\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 가 방류되었다(Fig. 2). 방류량이 가장 많은 시기는 장마와 태풍이 발생하는 6월 말부터 9월이었으며 $500 \sim 1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 이상의 많은 양의 담수가 빈번하게 방류되었다. 특히 이 기간 동안은 방류량의 변화가 매우 급격하게 나타나는 특성을 보였다. 봄에 일시적으로 $300 \sim 500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 의 담수가 방류 되는 것을 제외한 다른 기간에는 방류량이 $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 보다 낮게 유지되었다. 2012년 4대강 사업 이후 하구둑의 방류량 자체는 감소하였으나, 이번 연구에서 나타난 계절적인 방류양상은 과거와 크게 다르지 않았다(Park et al., 2008; Yoo et al., 2016; Yoon et al., 2017).

이번 연구에서 담수의 방류는 조석 주기에 따라 일어나며, 대조기와 소조기의 방류 시간이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다(Table 1; Fig. 3, 4). 대조기에는 하구둑의 담수가 간조를 전후하여 방류되고, 만조 때 중단되어 조석 주기에 따른 규칙적인 방류 양상을 보였다. 반면에, 하구둑 외측의 수위가 내측보다 낮게 유지되는 소조기에는 조위에 관계없이 담수의 방류가 지속되었다. 이러한 현상은 평상시와 풍수기에 공통적으로 나타났다. 평상시에는 소조기 동안 담수의 방류가 6~7일 동안 계속되었고, 풍수기에는 이보다 짧은 2일 동안 이루어졌다. 하구둑 수문의 개폐는 외측의 조위 변동과 담수 유입량에 따른 내측 수위에 따라 결정된다. 낙동강 하구둑은 내측 수위 EL +0.51 ~ +1.01 m의 범위를 유지하도록 수문을 개방하고, 내측과 외측의 수위차가 0.2 m 이하일 경우 염분 침투를 막기 위해 수문을 폐쇄하도록 운영

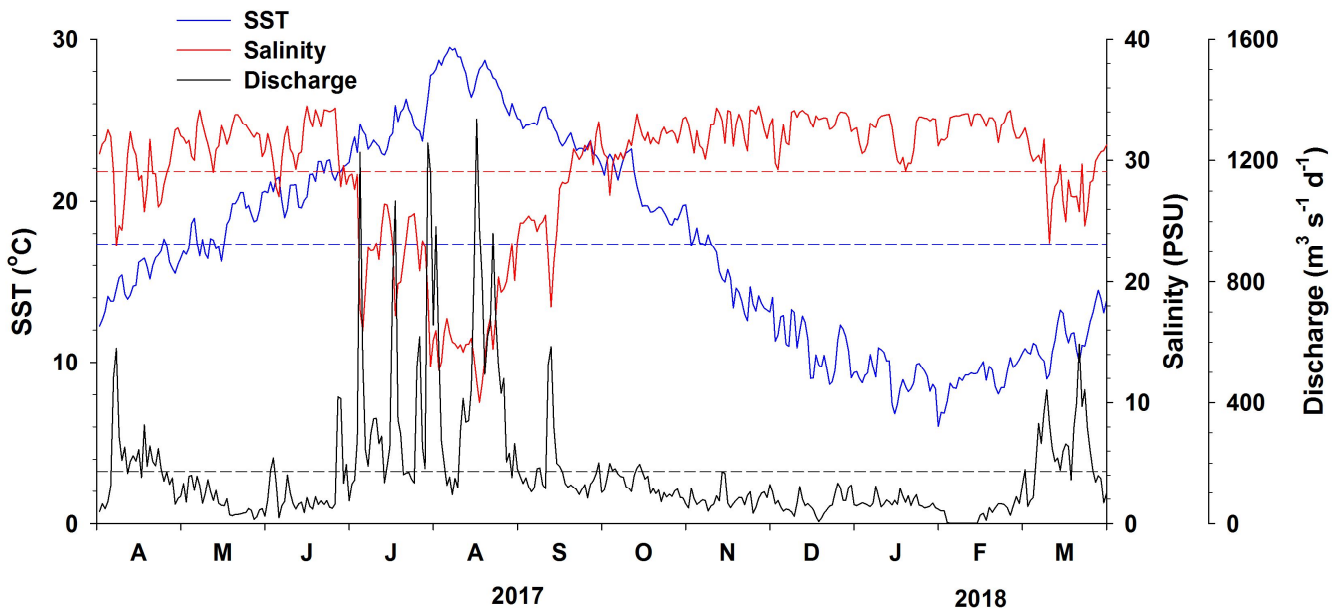


Fig. 2. Sea surface temperature (SST) and salinity in the Nakdong River estuary, and the discharge from the barrage of the estuary. Dashed lines indicate mean values of each measurements during study period. Data represent daily mean values from April 2017 to March 2018.

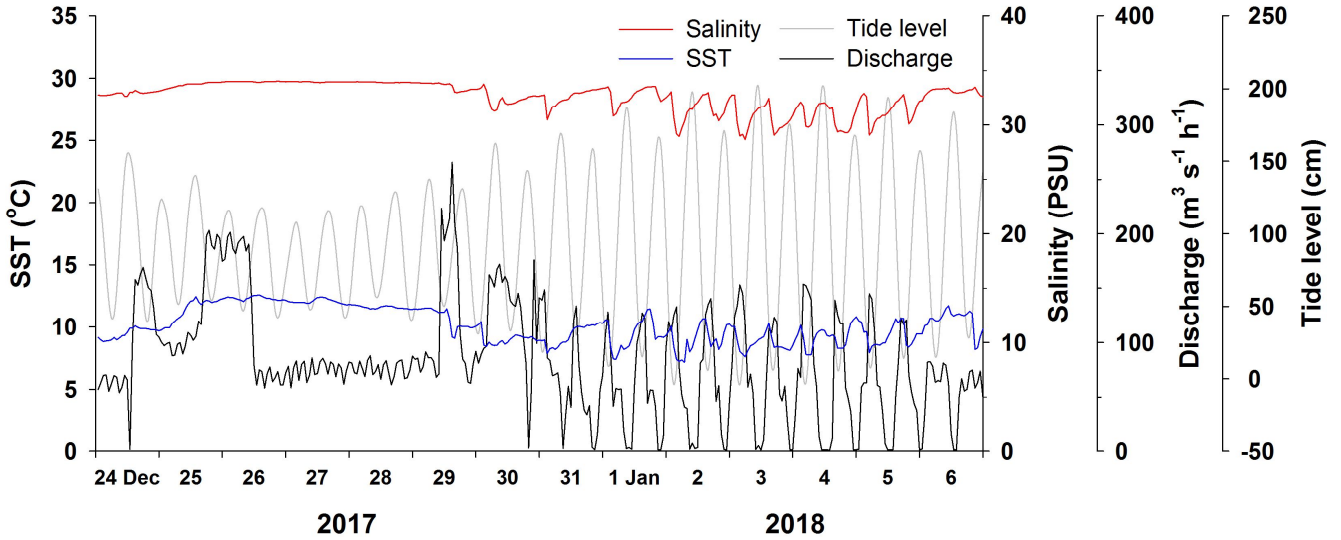


Fig. 3. Tide-induced fluctuations of the discharge and the responses of sea surface temperature (SST) and salinity in the Nakdong River estuary during the normal season, from 24 December 2017 to 6 January 2018. Data represent mean values per hour.

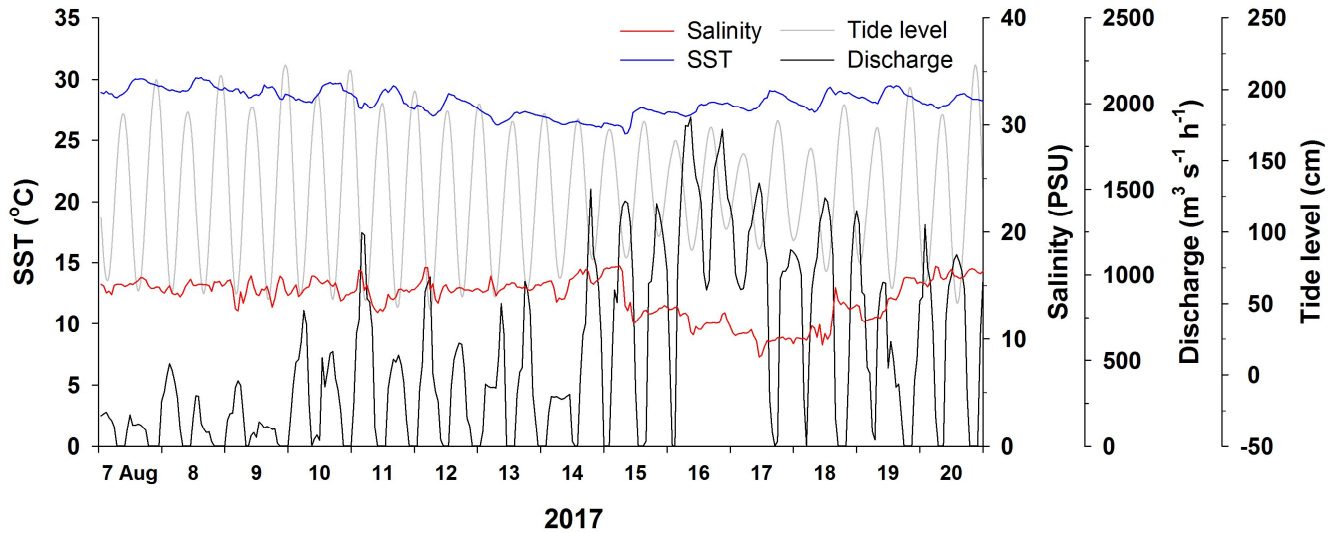


Fig. 4. Tide-induced fluctuations of the discharge and the responses of sea surface temperature (SST) and salinity in the Nakdong River estuary during the rainy season, from 7 August 2017 to 20 August 2017. Data represent mean values per hour.

되고 있다(K-water, 2015). 이번 연구에서 풍수기(여름) 소조기의 조위는 평상시(겨울) 소조기의 조위보다 높았다(Fig. 3, 4). 소조기라 하더라도 풍수기에는 만조 시 조위가 평상시보다 높았기 때문에 하루동안 수문운영 방침에 따라 풍수기의 소조기 동안에는 담수의 연속적인 방류시간이 평상시보다 짧았던 것으로 보인다.

3.2 표층 수온 및 염분 변동

연구기간 동안 일일 평균 표층 수온은 6.0~29.5(평균 17.4°C)

의 범위로 뚜렷한 계절적 경향성을 보였으며(Fig. 2), 동시에 하루 동안 2~4°C의 변동이 주기적으로 나타났(Fig. 3, 4). 특히 풍수기(여름) 보다는 평상시(겨울)에 대조기동안 방류가 시작되면 수온이 감소하고, 방류가 멈추면 수온이 다시 증가하는 경향이 뚜렷하였다(Fig. 3). 연안에서 수온의 순간적인 변동은 파도나 바람, 수층간의 혼합, 조류 등 다양한 요인에 의해 나타날 수 있다. 낙동강 담수의 수온은 겨울에 해수보다 낮고, 여름에는 해수보다 높다(Moon and Choi, 1991; Yoon et al., 2017). 이 결과는 단시간의 급격한 수온 변

화가 하구둑 방류수의 영향인 것을 제시한 기존의 연구와 일치한다(Kim et al., 1999). 한편, 평상시 소조기 동안 담수의 방류가 지속 될 때에는 수온이 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다(Table 1; Fig. 3). 이 결과는 낙동강 하구에서 표층 수온의 급격한 단기적 변동은 담수가 방류되는 지속시간에 영향을 받고 있다는 것을 의미한다.

표층수의 염분농도는 담수의 방류에 따라 급격하게 변동되었다. 하구둑의 방류량이 $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 미만 일 때 염분 농도는 평균값(29.1) 이상인 29~34의 범위를 보였고, 방류량이 그 이상 때 29 이하로 감소하였다(Fig. 2). 방류량이 $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 이상이면 염분이 20까지 감소하고, $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 이상 방류되면 20 미만으로 급격하게 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2). 이번 연구에서 측정된 표층의 염분 분포는 과거 측정된 결과와 유사하였다(Kim et al., 1999; Jang and Kim, 2006). 2012년 이후 담수의 방류량 감소에도 불구하고, 낙동강 하구 서쪽 해역 표층수의 계절적인 염분 농도 자체는 큰 변화가 없는 것으로 사료된다.

평상시 염분의 시간별 변동은 평상시 수온 거동과 유사한 양상을 나타내었으며, 담수의 유입에도 불구하고 염분이 크게 낮아지지 않았다. 평상시 대조기 동안 표층의 염분은 간헐적인 담수의 방류에 따라 28~34범위에서 규칙적인 변동이 관찰되었다(Table 1; Fig. 3). 소조기 때는 계속되는 담수의 방류에도 불구하고 오히려 염분은 32~34범위에서 안정적으로 유지되었다(Table 1; Fig. 3). 이러한 현상은 평상시 담수의 방류량, 그리고 방류의 지속시간과 연관된 것으로 보인다. 평상시에는 담수의 방류량이 적기 때문에 밀물 때 표층의 담수가 가덕도에 도달하기 전에 혼합되고, 따라서 낙동강 하구 서쪽 해역은 평상시에 상대적으로 높은 염분 농도를 나타내는 것으로 보고되었다(Kim et al., 1999; Jang and Kim, 2006). 또 한편으로는 소조기 동안 방류가 계속되면서 혼합수역이 현재보다 더 상부에서 형성되어 하부 쪽에서는 염분이 안정되었기 때문으로 해석될 수 있다(Vijith et al., 2009). 자연하구의 경우, 담수의 유출량이 적은 평상시에 담수와 해수의 혼합수역이 상류로 이동하기 때문에 하부의 염분은

안정화된다(Vijith et al., 2009). Lee et al.(2008)은 낙동강 하구에서 담수의 방류시간이 길어질수록 하구의 염분은 증가하고 안정되는 것으로 보고하였다. 즉 담수의 방류가 계속되는 동안에는 낙동강 하구에서 자연하구와 유사한 환경이 조성되는 효과가 나타날 수 있다는 것을 시사한다. 이러한 결과는 낙동강 하구의 염분 변동이 담수의 방류량뿐만 아니라 방류의 지속시간에도 영향을 받는다는 것을 보여주었다.

풍수기 때 염분은 평상시와 달리 방류 주기에 따른 변동이 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 염분은 20 이하로 낮게 유지되었다(Table 1; Fig. 4). 낙동강 하구는 장마기간 동안 방류되는 많은 양의 담수로 인해 성층상태가 계속 유지되며, 표층은 조시에 관계없이 담수의 영향을 받아 가덕도 인근 해역의 표층 염분 농도는 12~19의 분포를 나타낸다(Kim et al., 1999; Jang and Kim, 2006). 뿐만 아니라, 소조기 동안에도 평상시와 같이 염분이 안정되지 않고 불규칙한 변동이 계속되었다(Table 1; Fig. 4). 이것은 많은 양의 담수와, 외해로 빠져나가지 못하고 밀물 때 서쪽으로 편향된 혼합수, 저층의 해수가 가덕도 인근 해역에서 서로 복잡하게 혼합되고 있다는 것을 나타낸다(Jang and Kim, 2006). 풍수기에 담수 방류에 따른 수온 변동이 평상시 보다 불규칙한 것도 이와 같은 맥락에서 해석될 수 있을 것이다.

3.3 염분의 회복 양상

방류수의 영향으로 감소된 염분의 회복 속도는 방류량과 대량 방류의 빈도에 따라 다르게 나타났다. 예를 들면, 평상시인 2017년 4월, 방류량이 일시적으로 증가했을 때 염분은 급격히 감소하였으나, 방류량이 감소하면 수 일 내에 30 이상으로 회복되었다(Fig. 2). 그러나 시기적으로 유사한 2018년 3월에는 두 주 이상 $200 \sim 500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 의 방류가 반복되는 동안 염분은 23~29에 머물렀다. 많은 선행 연구를 통해 낙동강 하구의 계절별 염분 특성을 제시되었으나, 단기적 조사의 한계 때문에 풍수기외 다른 시기의 저염환경에 대해서는 잘 알려지지 않았다(Moon and Choi, 1991; Kim et al., 1996; Jang and Kim, 2006). 이번 연구에서는 낙동강 하구에서

Table 1. Freshwater discharge patterns and the responses of water temperature and salinity

Season	Age of the tide	Freshwater discharge	Water temperature	Salinity
Normal (24 Dec 2017 - 6 Jan 2018)	Spring tide	Regularly discharge depending on tide level (inverse relationship)	Fluctuated	Fluctuated (28 - 34)
	Neap tide	Continuous discharge (for 6 - 7 days)	Stable	Stable (32 - 34)
Rainy (7 - 20 Aug 2017)	Spring tide	Regularly discharge depending on tide level (inverse relationship)	Fluctuated	Fluctuated (13 - 17)
	Neap tide	Continuous discharge (for 2 days)	Fluctuated	Fluctuated (8 - 13)

풍수기 이외의 시기에 일정 수준 이상의 담수가 반복적으로 방류되면 수일 동안 저염환경이 발생한다는 것을 보여주었다.

500 m³ s⁻¹ d⁻¹ 이상의 담수가 빈번하게 방류되는 풍수기 동안에는 염분이 85일간 29 미만으로 유지 되었으며, 대량 방류의 빈도가 높았던 2017년 8월에는 염분이 30일 동안 20 이하에 머물렀다(Fig. 2). 이 기간 동안은 방류량이 200 m³ s⁻¹ 이하로 낮아져도 염분은 평상시 수준으로 회복되지 않았다. 낙동강 하구에는 방류량이 많을 때 외해로 빠져 나가지 못한 혼합수가 머무르게 된다(Jang and Kim, 2006). 반복되는 대량 방류로 인해 하구역에 남아있는 혼합수의 양과 체류시간이 증가하며, 염분의 성층 구조는 더욱 강화될 것이다(Monsen et al., 2002). 낙동강 하구에 여름철 풍수기 동안 저염환경이 조성된다는 것은 기존의 많은 연구들에서 보고되었다(Park et al., 1986; Kim et al., 1996; Jang and Kim, 2006; Yoon et al., 2017). 그러나 대부분의 연구가 단기적으로 이루어져 저염환경의 지속시간과 염분의 회복양상을 파악하는 데는 어려움이 있었다. 이번 연구결과는 여름철 풍수기 동안 표층수의 저염 환경이 평균 수준 이하로 상당히 오랜 시간 지속되며, 염분의 회복 속도는 담수의 방류량뿐만 아니라 대량 방류의 빈도에 영향을 받는다는 것을 보여주었다.

4. 결론

이번 연구는 낙동강 하구에서 담수의 방류와 표층 수온 및 염분의 반응을 연속적인 시간의 흐름에 따른 관점에서 제시하였다. 낙동강 하구의 표층 수온과 염분은 방류량뿐만 아니라 방류의 지속시간에도 민감한 반응을 보였다. 이번 연구에서 주목할 점은 두 가지로 요약된다. 첫째, 담수의 방류가 지속적으로 이루어지는 동안 제한적으로 자연하구와 같이 하구의 수온과 염분이 안정되는 것이 관찰되었다. 둘째, 저염환경의 지속시간과 염분의 회복은 방류량과 대량 방류의 빈도에 영향을 받는다. 담수의 대량 방류로 급격히 감소한 염분은 비교적 빠르게 평상시 수준으로 회복되나, 이러한 방류가 반복적으로 발생할 경우에 염분의 회복 속도는 매우 느리게 진행되었다. 이러한 특성 때문에 평상시에도 염분 29 이하의 저염수괴가 장시간 발생할 수 있으며, 특히 풍수기 동안에는 수십 일간 저염환경이 지속될 수 있는 것으로 보인다. 이 연구는 낙동강 하구의 수온 및 염분 거동에 대한 보다 세부적인 정보를 제공하고, 하구 수계의 물리·화학적 특성 및 주변 생태계 변화에 대한 이해를 높이는 데 도움이 될 것이다.

사 사

이 연구는 2019년도 국립수산물과학원 수산시험연구 ‘환경 변화에 따른 하구 생태계 모니터링(R2019043)’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Chen, X., M. S. Flannery and D. L. Moore(2000), Response times of salinity in relation to changes in freshwater inflows in the lower Hillsborough River, Florida, *Estuaries*, Vol. 23, No. 5, pp. 735-742.
- [2] Chevalier, C., M. Pagano, D. Corbin and R. Arfi(2014), The salinity responses of tropical estuaries to change in freshwater discharge, tidal mixing and geomorphology: case study of the man-affected Senegal River Estuary (West Africa), *Marine and Freshwater Research*, Vol. 65, Nov. 11, pp. 987-1002.
- [3] Han, K. M., K. C. Kim and J. J. Kim(1993), A study on the flow patterns on the Myunggi-Noksan region due to Reclamation, *Journal of ocean engineering and technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 81-91.
- [4] Jannasch, H. W., L. J. Coletti, K. S. Johnson, S. E. Fitzwater, J. A. Needoba and J. N. Plant(2008), The land/ocean biogeochemical observatory: A robust networked mooring system for continuously monitoring complex biogeochemical cycles in estuaries, *Limnology and oceanography: Methods*, Vol. 6, pp. 263-276.
- [5] Jang, S. T. and K. C. Kim(2006), Change of oceanographic environment in the Nakdong Estuary, *The Sea*, Vol. 11, No. 1, pp. 11-20.
- [6] Johnson, K. S., J. A. Needoba, S. C. Riser and W. J. Showers(2007), Chemical sensor networks for the aquatic environment, *Chemical Reviews*, Vol. 107, pp. 623-640.
- [7] Kim, K. C., J. J. Kim, Y. E. Kim, K. M. Han, K. K. Choi and S. T. Jang(1996), Outflow characteristics of Nakdong River Plume, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 8, No. 4, pp. 305-313.
- [8] Kim, K. C., H. S. Yang, C. K. Kim, C. H. Moon and S. T. Jang(1999), Variations of physical oceanographic environment caused by opening and closing the floodgate in Nakdong Estuary, *Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 45-59.
- [9] K-water(2015), Manual for operating the Nakdong Estuary Barrage.

- [10] Lane, R. R., J. W. Day Jr, B. D. Marx, E. Reyes, E. Hyfield and J. N. Day(2007), The effects of riverine discharge on temperature, salinity, suspended sediment and chlorophyll *a* in a Mississippi delta estuary measured using a flow-through system, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 74, pp. 145-154.
- [11] Lerczak, J. A., W. R. Geyer and R. J. Chant(2006), Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 36, No. 12, pp. 2296-2311.
- [12] Lee, S. J., K. S. Ryoo, M. H. Hwang and S. U. Lee(2008), Analysis of the water quality by various gate operation effects at Nakdong Estuary Barrier, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 24, No. 6, pp. 651-658.
- [13] Magnuson, J. J.(1990), Long-term ecological research and the invisible present, *BioScience*, Vol. 40, pp. 495-501.
- [14] Monsen, N. E., J. E. Cloern, L. V. Lucas and S. G. Monismith(2002), A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales, *Limnology and Oceanography*, Vol. 47, No. 5, pp. 1545-1553.
- [15] Moon, C. H. and H. J. Choi(1991), Studies on the environmental characteristics and phytoplankton community in the Nakdong River estuary, *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, Vol. 26, No. 2, pp. 144-154.
- [16] Park, C. K., K. D. Cho, S. H. Huh, S. K. Kim and C. H. Kim(1986), Ecological Survey of the Nakdong River Estuary, *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 22, No. 4, pp. 1-20.
- [17] Park, S., H. S. Yoon, I. C. Lee and H. T. Kim(2008), Correlation between Meteorological Factors and Water Discharge from the Kakdong River Barrage, Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 14, No. 2, pp. 111-117.
- [18] Vijith, V., D. Sundar and S. R. Shetye(2009), Time-dependence of salinity in monsoonal estuaries, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 85, No. 4, pp. 601-608.
- [19] Yoo, M. H., S. H. Youn, K. W. Park, A. R. Kim, S. C. Yoon and Y. S. Suh(2016), The Characteristics of Spatio-Temporal Distribution on Phytoplankton in the Nakdong River estuary, during 2013-2015, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22, No. 6, pp. 739-749.
- [20] Yoon, S. C., S. H. Youn and Y. S. Suh(2017), The characteristics of spatio-temporal distribution on environmental factors after construction of artificial structure in the Nakdong River estuary, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Energy*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-11.
- [21] Yu, H. S. and J. Lee(1993), A hydrodynamic solution for the lateral spreading of a river plume, *The Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp. 302-306.
- [22] Yu, H. S., J. Lee, H. J. Kang, S. R. Kang, K. S. Choi and J. S. Kim(1993), Lateral spreading of a river plume and transport of suspended sediments in the Nakdong estuary, *The Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 4, pp. 296-301.

Received : 2019. 01. 15.

Revised : 2019. 02. 22.

Accepted : 2019. 02. 25.