한국해안 · 해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 26(3), pp. 184~195, Jun. 2014
http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2014.26.3.184

낙동강 하구역의 홍수기 방류에 의한 수로별 유속 잔차 및 염분 분포
Spatial and Temporal Variability of Residual Current and Salinity Distribution according to Freshwater Discharge during Monsoon in Nakdong River Estuary

송진일* · 윤병일* · 김종욱* · 임채욱* · 우승범*
Jin Il Song*, Byung Il Yoon*, Jong-Wook KIM*, Chae Wook Lim* and Seung-Buhm Woo*

요 지 : 낙동강 하구역은 하구둑이 건설된 이후, 담수는 갑문 개폐에 의해서 인위적으로 방출되고 해수유입은 하구둑에 의해 억제되어왔다. 이로 인해 인위적인 수문 개방에 의한 해수와 담수의 수렴 및 혼합은 낙동강 하구역의 해수순환에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 홍수기 방류 중 낙동강 하구역의 수로별 유동 환경과 하구 흐름 특성을 조사하기 위해 유속 및 염분 관측을 수행하였다. 분석 결과 지형적 특징 및 방류의 영향에 의해 수로별 유속 및 염분 분포 특징이 상이하게 나타났다. 낙동강 하구역의 홍수기 방류에 의한 영향은 각 수로별 잔차유속 및 염분 수직분포에 다르게 작용하며, 지형적 특징은 염분침투 범위에 영향을 미침으로써 상대적으로 고염의 물이 정체되는 구간이 존재한다.

핵심용어 : 염분분포, 낙동강하구, 잔차류, 방류, 홍수기

Abstract : After building the dyke in Nakdong River Estuary, mixing of freshwater inflow to ocean and seawater to upstream is controlled by operating the sluice gates. Mixing and convergence of seawater and freshwater by opening the sluice gates, have a major impact on the circulation of seawater in the Nakdong River Estuary. Field measurement was carried out to study the characteristics of the estuary flow and environment of each channel of the Nakdong River Estuary. Vertical salinity distribution and residual current is different from each channel by the river discharge and topographic changes.

Keywords : salinity distribution, nakdong estuary, residual current, river discharge, monsoon

1. 서 론

1987년 홍수 조절 및 용수 공급 등의 이유로 낙동강의 동쪽 지류에 총 길이 2,230 m의 하구둑이 완공되었으며, 하구둑 건설 후 기존 수로의 변경을 위해 매립과 준설이 이루어지면서 낙동강 하구는 새로운 해양환경이 형성되었다. 이렇듯 연안에 방조제를 건설하거나 매립공사를 실시하는 경우 평형 상태의 해양환경이 평형을 상실하여 새로운 역학 평형을 이루려는 방향으로 변화가 일어나게 된다(Kim, 1992).

하구둑이 건설된 이후 낙동강 유역 유동환경은 수문의 운영에 따라 변화하게 되었으며, 하구둑 건설에 따른 영향을 파악하기 위해 다양한 연구가 이루어졌다. 하구둑 건설 이후 장자도와 백합등 부근에서 조시에 따른 수문 개폐로 인해 담수와 해수와 급작스럽게 만나면서 밀도류와 지형적인 영향, 조류의 영향 등으로 순환과정이 복잡하게 되었다(Ryu and Chang, 1979). 또한, 수치모델을 이용한 연구 또한 수행되었으며, 하구둑이 건설되기 전의 염분의 침투(Han et al., 2011) 및 오염물 확산에(Kim, 2004) 대한 모의가 수행되었다.

낙동강 하구둑의 수문개폐에 따른 담수의 간헐적 방출에 따라 저염의 담수플룸이 표층을 따라 하구 아래로 모양을 유지하며 퍼진다고 제시되었으며(Kim, 1992), 퍼져나가는 담수에 대한 플룸의 수평확산 방정식에 대한 연구가 진행되었다(Yu et al., 1993). 조석 주기의 유속과 염분의 관측을 통한 낙동강 담수플룸 연구에서 조석과 바람에 의한 영향이 논의되었으며, 담수플룸은 간헐적인 방출에 의해 연속적으로 그 구조를 유지하지 못하고 패치(patch) 형태를 띤다고 하였다(Han et al., 1993). 개폐에 따른 낙동강 하류부의 해양 물리환경 변화 및 하구둑에서 유출된 담수의 유동 특성이 연구되었다(Jang and Kim, 2006). 담수플룸에 대한 연구를 통해 낙동강 하구에 대체적으로 3개의 저염축이 존재하며 주된 저염의 축은 하구둑 건설 후 을숙도를 절개하여 새로 만든 수로를 따라 장자도와 백합등을 거쳐 나오는 담수 플룸임을 밝혔다(Kim et al., 2006).

기존 연구에서는 방류에 의한 하구 외측으로의 유출 특성에 대한 연구가 주로 이루어져 상대적으로 수로 내측에 대한 연구는 충분하지 못한 부분이 있다. 또한, 고정 정점에서의 대조, 소조시 수온, 염분에 대한 연구가 이루어져 수로 내에서 공간적인 유동 및 수온, 염분 분포를 볼 수 없는 단점이 있다.

*인하대학교 해양과학과 (Corresponding author : Seung-Buhm Woo, Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon, 402-751, Korea. Tel: 032-860-8255, Fax: 032-862-5236, sbwoo@inha.ac.kr)

이러한 3차원적인 수로내측의 특성 파악을 위해, 단면 유속과 CTD의 동시적인 관측수행이 필요하며, 이를 통해 얻은 수온 및 염분, 유속자료를 활용한 3차원 관측자료를 구축하여 자료분석을 수행하였다.

2. 연구 해역 현황 및 연구 방법

Fig. 1에 연구지역 및 관측정점을 도식화하였다. 지형은 해양조사원에서 제공하는 수치 해도를 사용하였으며, 수심정보는 수치해도와 종단유속관측시의 자료를 활용하였다. 낙동강 하구역에서 2011년 7월 16일, 7월 18일에 RDI사의 600 kHz Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)와 IDRONAUT사의 Ocean Seven 304 CTD를 이용하여 단면 유속 관측 및 수층별 염분 관측을 수행하였다(Fig. 1; Line 1, Line 2, Line 3). 단면 유속관측은 선박에 ADCP를 장착하고 수로를 횡단하면서 관측하는 방법으로 장비와 GPS가 연동되어 실시간 관측위치를 전송받고, 취득한 자료로 선속을 산출한다. 관측은 1시간 간격으로 13시간 동안 총 13회 왕복 관측하였으며, 안정된 자료 획득을 위하여 선박의 이동속도는 평균 4~5 knot를 유지하였다. 선박에 장착된 ADCP는 수면 하 1 m에 설치되었고, 0.5 m의 수심 간격으로 층별 유속 및 유향자료를 획득하였다. Line 1은 우안 배수문부터 장자도 부근까지의 수로의 종단면 관측을 수행하였으며, Line 2는 을숙도부터 신자도까지 관측을 수행하였다. Line 3은 맹금머리등부터 도요등 동쪽 끝단까지 수행하였다.

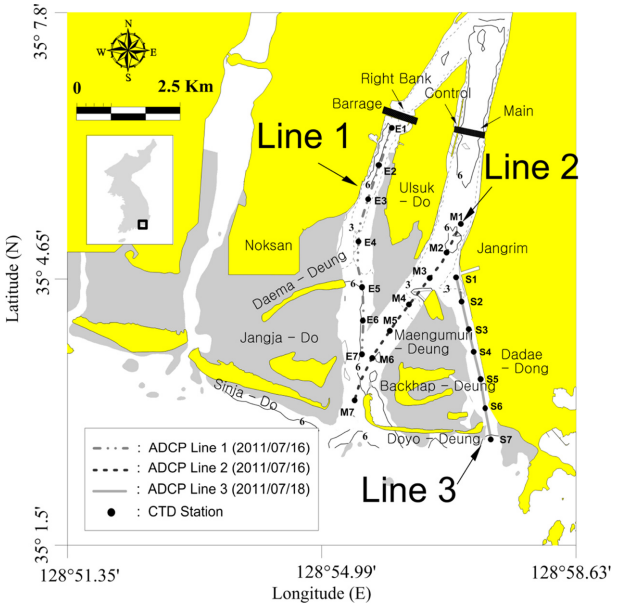


Fig. 1. Study area in the Nakdong Estuary and the ship track during the experiments of July 16, 2011 and July 18, 2011.

Line 1은 우안 배수문 전면에서 최대 7 m의 수심이 나타나며 장자도 부근으로 갈수록 점차 낮아져 약 3 m의 수심 변화를 보였다. 우안 배수문으로부터 지속적인 방류에 의해 담수가 지속적으로 나타나며, 염분성층 구조를 보였다. Line 2는 맹금머리등 북단에서 최대 약 8 m의 수심이 나타나며 맹금머리등과 백합등 사이에서 수심이 약 3 m까지 점차 낮아진 후, 신자도 부근에서 다시 약 6 m까지 수심이 깊어지는 변화를 보였다. 주수문 방류에 의해 담수의 영향이 뚜렷이 나타나는 것이 관측되었으며, 조석변화에 따른 유속 및 염분 변화의 지역적인 차이를 보였다. Line 3은 맹금머리등과 백합등 사이에서 약 7 m의 최대 수심이 나타나며, 도요등 부근에서 3 m에서 7 m로의 급격한 수심 변화가 나타났다. 주수문 방류에 의한 담수 영향이 나타나며, 조석변화에 따른 물리환경 변화가 급격히 나타났다.

연구지역 유동 환경 조사를 위하여 한국수자원공사에서 제

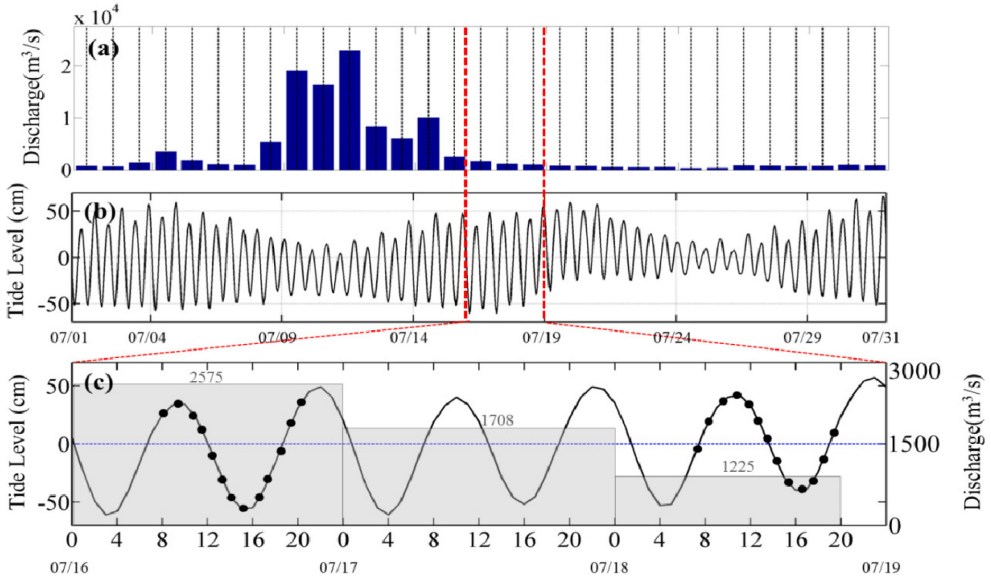


Fig. 2. Daily-mean freshwater discharge from the main + the control sluice gates (a), tide levels in July 2011 at Busan tide station(b), and expanded tide levels between July 16 and 18 (c), where the filled circles represent the bottom-tracking times and the gray box designates the daily-mean freshwater discharge.

공된 낙동강 하구둑 방류량 자료 Fig. 2(a)와 인근의 부산조위관측소에서 측정된 조위 관측 자료 Fig. 2(b)를 도식화하였다. Fig. 2(c)에 2011년 7월16일부터 2011년 7월18일에 관측된 조석 및 관측 수행 시간, 방류량을 도식화하였다. 낙동강 인근 조위관측소는 가덕도(35°1'4.03"N, 128°49'6.63"E)와 부산(35°4'56.28"N, 129°2'6.01"E)에 위치하며, 조위관측소로부터 신자도와 도요등 사이의 정점(Fig. 1(M7))까지의 거리는 각각 9 km, 10 km이다. 가덕도 및 부산 조위 관측소에서 1998~2012년까지의 조위자료를 이용하여 산정한 M_2분조의 위상은 각각 242.7°, 239.9°로 2.8°의 차이가 나타났다. 위상차 산정 결과 부산 조위 관측소와 낙동강 하구역의 조시차는 10분 이내일 것으로 예상된다. 관측 시기의 가덕도 조위자료에 결측 자료가 존재하여 부산 조위관측소의 조위 자료를 사용하였다.

관측 시기의 많은 강수로 인해 7월 16일에 하구둑에서 24시간 동안 상시 방류가 이루어졌으며 7월 18일은 각 수문별로 차이가 있지만, 최대 약 20시간 동안 방류가 이루어졌다. 7월 1개월 조석자료에서의 최대 조차는 1.19 m이고, 최소 조차는 0.22 m로 대조기와 소조기 차이는 0.97 m로 나타났다. 관측이 이루어진 대조기 16일 및 18일의 조차는 각각 0.9 m, 0.95 m로 각 관측을 수행할 때의 조차는 크지 않았다.

관측 시기의 환경을 정의하기 위해 과거 방류량 자료를 활용하여 홍수기/비홍수기를 정의하였다. Fig. 3에 1990~2009년의 연간 월별 평균 방류량을 산정한 후, 월별로 20년 평균한 자료를 도식화하였다. 과거에 비해 최근 20년간 월별 방류량의 차이는 있었으나 7, 8, 9월에 가장 많은 방류가 이루어지는 경향은 일치했다. 1990~2009년 월별 평균 방류량 자료로부터 중앙값을 산정하였다. 중앙값은 약 239 m^3/s로 이 값을 평수기로 정의하였으며, 중앙값의 400%인 956 m^3/s보다 더 큰 방류가 있는 시기를 홍수기로 정의하였다.

Table 1에 관측일별 담수 방류량을 제시하였다. 관측 기간 동안의 배수량을 비교해 보면 16일의 주수문, 조절수문, 우안 배수문의 일 평균 배수량은 각각 1555 m^3/s, 959 m^3/s, 61 m^3/s로 총 2575 m^3/s이며, 18일은 639 m^3/s, 526 m^3/s, 60 m^3/s로 총 1225 m^3/s의 담수가 배출되었다. 16일과 18일 모두 956 m^3/s보다 큰 방류가 이루어졌으며, 이에 따라 관측이 이루어진 시기를 홍수기로 정의하였다.

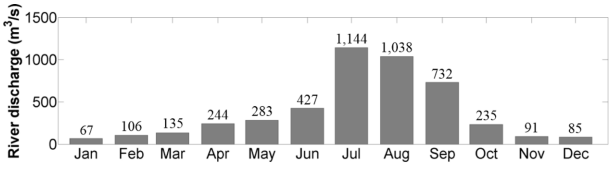


Fig. 3. Monthly-mean freshwater discharge in 1990 to 2009.

Table 1. Daily-mean freshwater discharge from Nakdong River (Unit : m^3/s)

Date	Main Gate	Control Gate	Right Bank Gate	Total
2011/07/16	1555	959	61	2575
2011/07/18	639	526	60	1225

관측으로부터 얻어진 ADCP 자료는 자료의 정확도 및 신뢰성 향상을 위하여 에러값 제거, 진북 방향 보정, 주축 방향 보정, Sigma 좌표로 변환하는 과정을 거쳐 처리되었다. ADCP 단면 유속 관측 시 배의 움직임이나 기타 다른 요인에 의해 쏘아진 빔에 대한 정보를 받지 못해 결측 자료가 나타나게 된다. 이런 점을 보완하기 위해 원시 자료로부터 획득되는 수평적 10개의 자료를 앙상블 평균하여 사용하였다. ADCP에 의한 유속 관측 시 유속은 U, V 성분으로 나뉘어 정보를 취득하게 되는데 U는 동서 방향 성분, V는 남북 방향 성분을 의미한다. 하지만 ADCP 내에서 기준으로 사용되는 북쪽은 자북 방향이기 때문에 이를 진북방향으로 보정해 주는 처리를 하였으며, 유향과 유속은 선박의 속도에 의해 변할 수 있기 때문에 이를 보정하기 위해 선속 보정(Joyce, 1989)의 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 PCA(Principal Component Analysis)를 통해 원시 자료의 유속을 주축 방향이 기준이 될 수 있도록 회전시켜 지배적인 성분의 분석을 수행하였다 (Preisendorfer and Mobley, 1988).

마지막으로, 낙동강 유역은 조차가 크지는 않으나 전체적으로 낮은 수심과 지형 변화로 인해 조석 주기 동안 유속 자료가 있는 영역만 취할 경우 표층의 자료가 대거 누락되어 잔차류를 계산하는데 어려움이 있다. 따라서 조석 성분의 제거 및 물질수송량의 산정의 용이를 위해 정규화 방법(Sigma 좌표)을 사용하였다(Lee et al., 2012; Choi et al., 2012; Kim et al., 2013). 정규화 방법 사용시, 조석 변화에 따른 수심변화로 표층의 절대적인 수심은 다르게 나타나며, 잔차류 산정 시 이러한 변화를 고려하기 위해 주축방향의 유속 성분을 수직, 수평적으로 정규화하였다. 정규화된 자료를 이용한 잔차류 산정 이후 지형변화에 따른 유속변화 파악을 위해 관측정선을 대표할 수 있는 정선의 수심을 선정하여, 그 위에 유속 관측결과를 도식화하였으며, 0 m 수심은 관측순간의 해면을 의미한다.

3. 결 과

3.1 시공간적 조류 변화

Fig. 4는 우안 배수문 전면 Line 1의 대조기 각 (a)저조, (b)최강창조, (c)고조, (d)최강낙조의 순으로 나타낸 주축방향 유속 관측 결과이다. 유속의 양의 값은 창조, 음의 값은 낙조방향을 의미하며 검은 점선은 유속이 0 m/s인 부분을 의미한다.

Line 1과 Line 2의 고조 및 저조 자료는 부산 조위관측소로부터 얻어진 고조 및 저조 시간에 관측된 자료를 사용하였으며, 최강창조 및 최강낙조는 관측자료에서 최대 유속 및 최소 유속이 나타나는 자료를 사용하였다. 각 관측이 수행된 시기는 저조, 최강창조, 고조, 최강낙조의 순으로 15시 30분~16시 30분, 19시 30분~20시 30분, 08시 30분~09시 30분, 12

시 30분~13시 30분의 관측자료를 사용하였다.

Line 1의 우안 배수문의 일 배수량은 61 m^3/s로 관측 기간 중 지속적으로 상시 방류가 이루어졌지만 주 수문의 1/25배의 작은 방류량으로 방류에 의한 유속 변화는 크게 나타나지 않는다. 저조시(Fig. 4(a)) 전체적으로 낙조 방향의 유속이 나타나며, 0~–0.4 m/s의 유속 분포를 보였다. 고조시(Fig. 4(c)) 지역별로 창조와 낙조 유속이 반복적으로 나타났다. 유속의 크기는 창조 방향의 경우 약 0~0.1 m/s로 나타났으며, 낙조 방향의 유속은 약 0~–0.2 m/s로 낙조 방향의 유속이 더 우세하게 나타났다. 최강창조시(Fig. 4(b)) 0~1500 m 구간에서 표층에서 창조, 중층에서 낙조, 저층에서 창조하는 유속이 나타났으며, 1500~4800 m 구간에서는 약 0~0.3 m/s의 창조 방향의 유속을 보였다. 0~1500 m 구간의 유속 구조는 다층 구조가 나타나는데, 표층의 창조 유속은 최강창조시 조석변화에 의한 영향으로 생각되며, 저층의 낙조방향 유속은 우안배수문으로부터 배출되는 담수의 영향, 창조 방향 유속은 염수의 유입에 따른 유속분포로 추정된다. 최강낙조시(Fig. 4(d)) 적은 방류량에 따라 방류에 의한 유속 변화는 크게 나타나지 않으며 조석에 의한 영향이 비교적 크게 나타났다. 유속 분포는 약 0.1~–0.5 m/s로 대부분의 관측 영역에서 낙조 방향의 유속이 관측되었으며, 하구둑에서 멀어질수록 유속의 크기가 커지는 특징이 나타났다.

Line 1은 우안 배수문의 지속적인 방류에 의해 낙조가 우세한 특징이 나타나며, 조석 변화시 창조 방향의 유속은 1500~4800 m 구간까지 제한적으로 나타났다.

Fig. 5는 주 수문으로부터 장자도와 백합등 사이를 지나는 Line 2의 대조기 각 (a)저조, (b)최강창조, (c)고조, (d)최강낙조의 순으로 나타낸 주축방향의 유속이다. Line 2는 주배수문과 조절수문의 운영에 따라 방류의 영향을 받으며, 7월 16일의 주배수문과 조절수문 방류량의 합은 약 2514 m^3/s로 7월 연평균

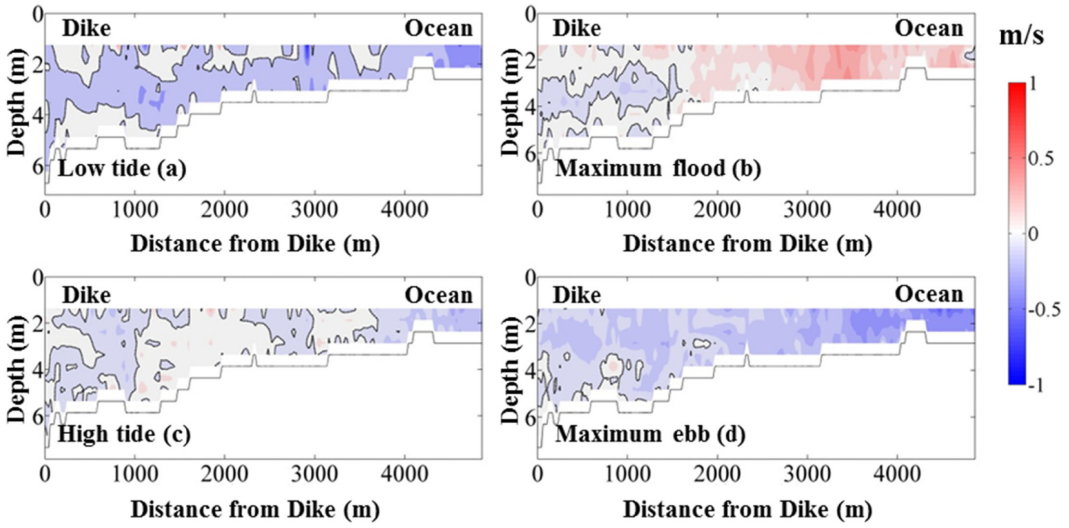


Fig. 4. The along-channel velocity at (a) low tide, (b) maximum flood, (c) high tide, (d) maximum ebb along the Line 1. Red color represents increasingly positive value and blue color decreasingly negative value. Dashed contour represents zero velocity.

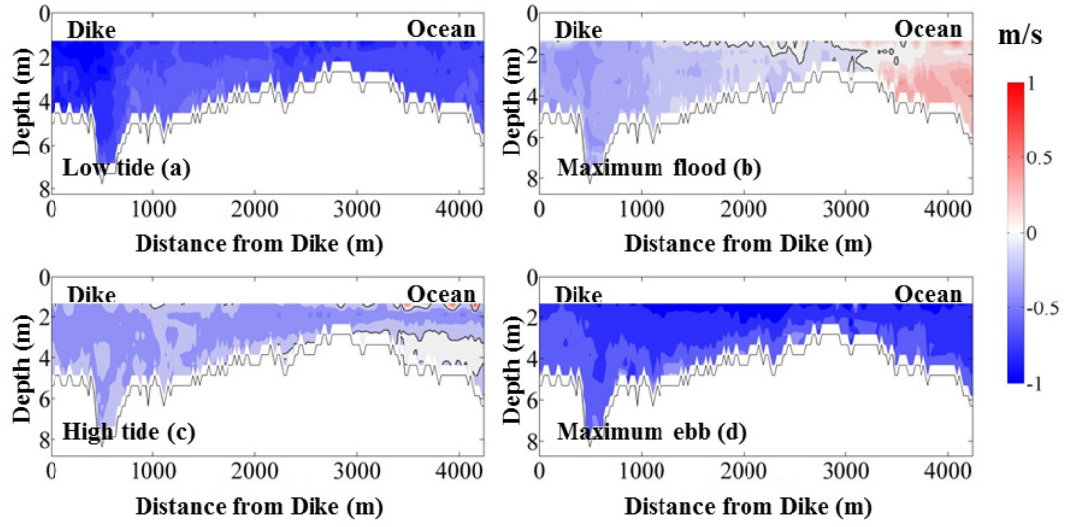


Fig. 5. The along-channel velocity at (a) low tide, (b) maximum flood, (c) high tide, (d) maximum ebb along the Line 2. Red color represents increasingly positive value and blue color decreasingly negative value. Dashed contour represents zero velocity.

방류량 1279 m^3/s의 약 2배 많은 양이 방류되었다. 관측 당일 방류는 상시 방류로, 관측이 진행되는 동안 지속적으로 이루어졌다.

저조시(Fig. 5(a)) 하구둑에 가까운 0~500 m 구간에서 약 –1 m/s의 최대 유속이 나타났으며, 평균 유속은 약 –0.6 m/s로 전 영역에서 낙조 방향의 유속이 나타났다. 고조시(Fig. 5(c)) 조석의 영향에 의해 낙조 방향의 유속 크기가 감소하여 약 –0.2~–0.4 m/s의 낙조방향 유속이 나타났다. 부산 기상관측소에서 제공된 2011년 7월 16일의 바람자료에서, 최강창조 관측시기인 15~16시 사이에 약 7m/s의 남서풍이 지속적으로 나타났으며, 3000~4000 m 구간의 표층에서 나타나는 창조 방향의 유속은 바람의 영향으로 추정된다. 최강창조시(Fig. 5(b)) 방류의 영향에 의해 0~3000 m 영역까지 약 –0.1~–0.4 m/s 낙조방향 유속이 나타나며, 3000~4300 m 구간에서 약 0~0.2 m/s의 창조 방향의 유속이 나타났다. 최강낙조시(Fig. 5(d)) 2000~3000 m의 수심이 얕아지는 구간에서 최대 약 –1.2 m/s의 낙조 방향의 유속이 나타났으며, 유속 분포는 약 –0.6~–1.2 m/s로 나타났다.

Line 2의 유동환경은 많은 방류량으로 인해 조석에 의한 영향보다 방류에 의한 영향이 더 지배적인 것으로 나타났고, 방류시 낙조 방향의 흐름이 강하게 나타났다. 또한 지속적인 방류에도 최강창조시 조석의 영향이 3000 m 부근까지 나타났으며, 이것은 지형적인 영향에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 백합등 동쪽의 수로 Line 3의 대조기 각 (a)저조, (b)최강창조, (c)고조, (d)최강낙조의 순으로 나타낸 주축방향 유속 관측 결과이다. 각 관측이 수행된 시기는 저조, 최강창조, 고조, 최강낙조의 순으로 15시 30분~16시 30분, 18시 30분~19시 30분, 10시 30분~11시 30분, 13시 30분~14시 30분의 관측자료를 사용하였다. Line 3은 주배수문과 조절수문의 운영에 따라 방류의 영향을 받을 것으로 예상되며, 7월 18일의 주배수문과 조절수문 방류량의 합은 약 1165 m^3/s로 7월 연평균 방류량 1279 m^3/s와 비슷한 방류가 이루어졌다. 관측 당일 방류는 수문별로 차이가 있지만, 약 9~20시간동안 방류가 이루어졌다. 방류시간 파악을 위해 수자원공사에서 제공된 내측 수위자료를 사용하였으며, 내측 수위 자료는 7월 18일에 0시부터 20시까지 조석과 같은 수위 변화를 나타내는 것으로 보아 관측 기간동안 배수갑문이 지속적으로 개방된 것으로 추정된다.

저조시(Fig. 6(a)) 0~3300 m 구간에서 약 –0.2~–0.6 m/s의 낙조방향 유속이 나타났으며, 1200~2000 m 및 3000~3300 m 구간의 저층에선 0~0.1 m/s의 창조방향 유속이 나타나면서 이층흐름 구조가 나타났다. 이층 흐름구조는 저조시 수로내로 유입되는 담수에 의한 영향으로 생각되며, 하구 입구 부근에서 나타나는 것은 수심의 급격한 변화에 의한 것으로 생각된다. 고조시(Fig. 6(c)) 약 0.1~0.3 m/s의 창조방향 유속이 우세하게 나타나며, 표층에서 0~–0.2 m/s의 낙조방향 유속이 나타났다. 최강창조시(Fig. 6(b)) 0~3300 m 구간에서 0.4~1 m/s의 창조 유속이 나타났으며, 3000~3300 m 구간의 저층에서 약 1 m/s의 강한 창조방향 유속이 나타났다. 최강낙조시(Fig. 6(d)) 0~3300 m 구간 또한 저조시와 마찬가지로 이층 흐름 구조가 나타났다. 표층에서 –0.1~–1 m/s의 낙조 방향의 유속과 동시에 3000~3300 m 구간의 저층에서 0~0.2 m/s의 창조방향 유속이 나타났다.

Line 3은 조석변화에 따른 유속변화가 크며, 조석에 의한 영향을 지배적으로 받는 것으로 생각된다. 창조시 최대 유속은 하구 입구인 3000~3300 m 구간에서 나타나며, 급격한 수심 변화에 의해 수로 내측으로의 영향이 제한되고 있는 것으로 생각된다. 낙조시 수로 내의 해수가 빠져 나가면서 담수가 유입되는 것으로 추정되며, 이에 따라 낙조 방향의 유속이 강화되는 것으로 생각된다.

3.2 시공간적 염분 변화

Fig. 7은 Line 1의 대조기 (a)저조, (b)최강창조, (c)고조,

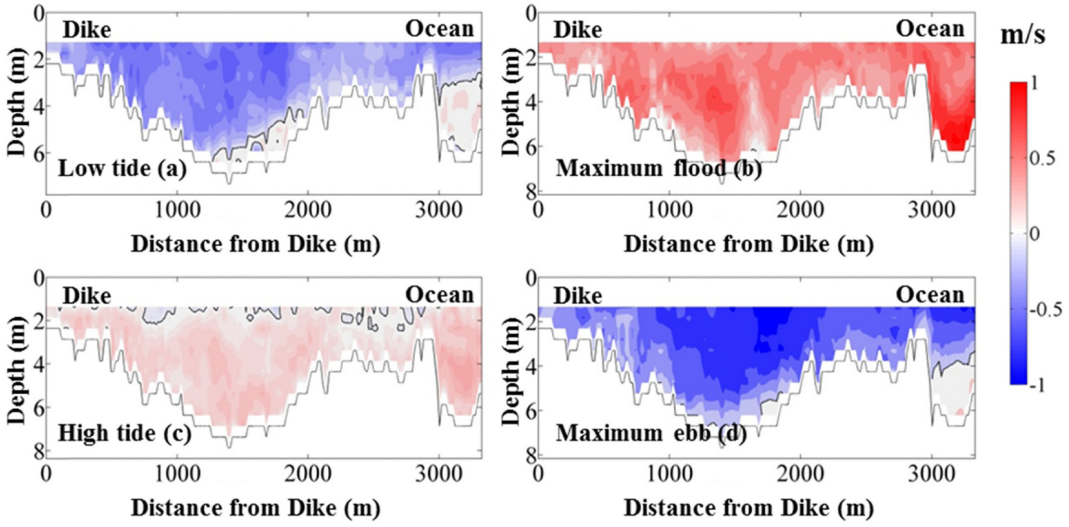


Fig. 6. The along-channel velocity at (a) low tide, (b) maximum flood, (c) high tide, (d) maximum ebb along the Line 3. Red color represents increasingly positive value and blue color decreasingly negative value. Dashed contour represents zero velocity.

(d)최강낙조 때의 염분 관측 결과이다. 점선은 수로 내에서의 염분 관측 정점을 나타내며, 붉은색이 고염수, 파란색이 저염수를 의미한다. 관측 기간 동안 수로의 0~1000 m 구간의 저층에서 지속적으로 20~30 psu의 염수가 관측되었고, 1000~4900 m 구간에서는 약 0 psu의 담수가 분포하였다. 하지만 고조시(Fig. 7(c)) 수로의 4200~4900 m 구간의 저층에서 15~20 psu의 염수 유입이 나타났다.

Line 1은 하구둑으로 막혀 있는 환경이기 때문에 해수의 유동이 제한적이며, 조석변화에 따른 염분의 변화 또한 크지 않았다. 우안배수문의 지속적인 방류로 인해 조석변화에도 약 0psu의 담수가 지속적으로 나타났으며, 하구둑 전면의 저층에 고염수가 지속적으로 나타났다. 고염수의 유입은 창조시부터 고조시 사이에 수로의 입구를 통해 유입되는 것으로 생각되며, 이로 인해 수로 서측의 깊은 수심까지 고염수의 정체가 나타나는 것으로 예상된다.

Fig. 8에 Line 2의 대조기 각 (a)저조, (b)최강창조, (c)고조, (d)최강낙조 때의 염분 관측 결과를 도식화하였다. 저조시(Fig. 8(a))와 최강낙조시(Fig. 8(d)) 하구둑으로부터 담수 방류로 인해 수로내 평균 염분은 약 0.1psu로 나타났다. 최강낙조시(Fig. 8(d)) 수로의 500~700 m 구간의 깊은 수심에서 10~20 psu의 염분이 나타났다. 최강창조시(Fig. 8(b)) 수로의 0~3000 m 구간은 방류된 담수에 의해 약 0 psu를 유지하였으며, 3000~4300 m 구간에서 창조가 진행됨에 따라서 저층을 통해 10~20 psu의 염수가 쐐기 형태로 유입되는 것을 보였다. 고조시(Fig. 8(c)) 또한 수로의 1500~4300 m 구간에서 10~25 psu의 해수가 쐐기 형태로 저층을 통해 유입되는 것이 관측되었다.

Line 2는 하구둑의 지속적인 방류에도 창조시 및 고조시 저층을 통해 고염수가 유입 되는 것이 나타났으며, 염수의 영

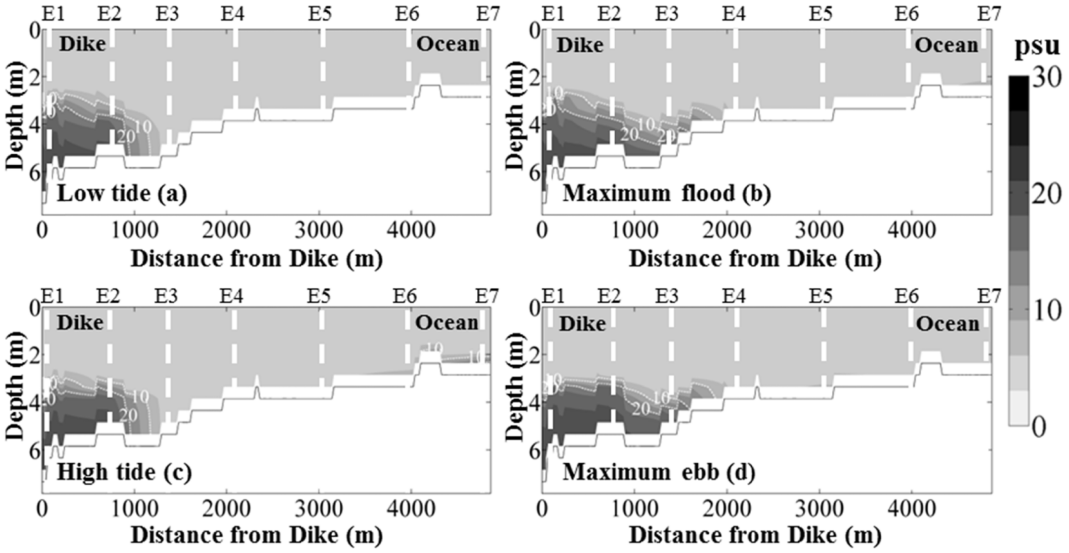


Fig. 7. The along-channel salinity contour at (a) low tide, (b) maximum flood, (c) high tide, (d) maximum ebb along the Line 1. E1 to E7 are the CTD casting stations. Dashed contour represents 10 and 20 psu, respectively.

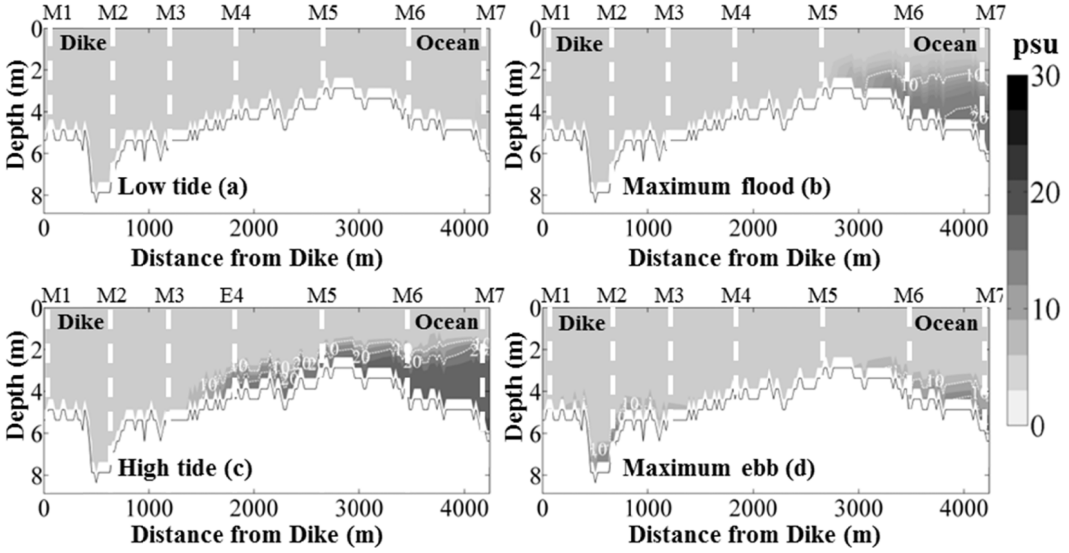


Fig. 8. The along-channel salinity contour at (a) low tide, (b) maximum flood, (c) high tide, (d) maximum ebb along the Line 2. M1 to M7 are the CTD casting stations. Dashed contour represents 10 and 20 psu, respectively.

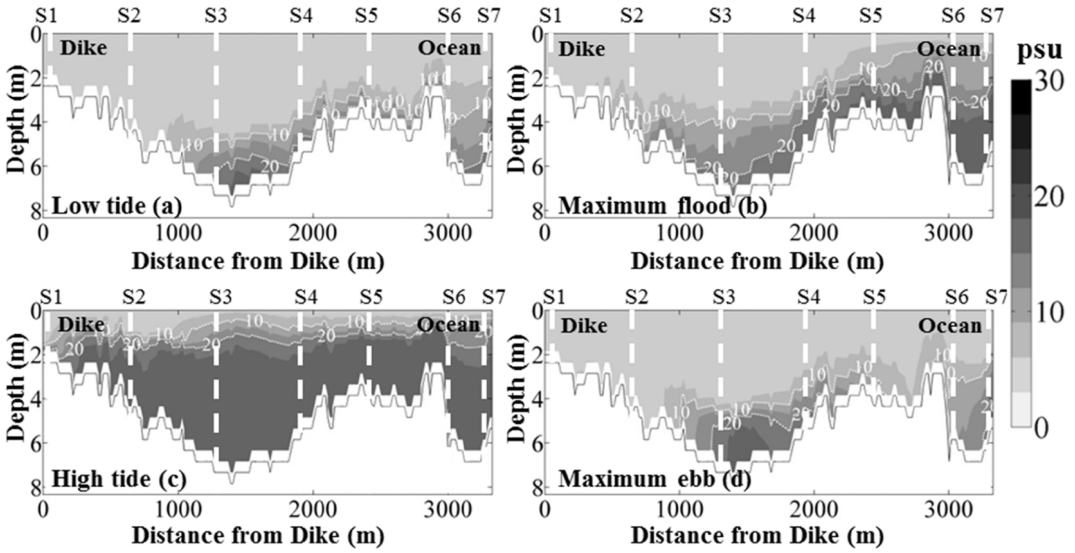


Fig. 9. The along-channel salinity contour at (a) low tide, (b) maximum flood, (c) high tide, (d) maximum ebb along the Line 3. S1 to S7 are the CTD casting stations. Dashed contour represents 10 and 20 psu, respectively.

향은 약 500 m 구간까지 나타났다.

Fig. 9는 Line 3의 대조기 (a)저조, (b)최강창조, (c)고조, (d)최강낙조 때의 염분 관측 결과이다. 저조 시(Fig. 9(a))와 최강낙조시(Fig. 9(d)) 방류에 의해 표층은 약 0 psu의 담수 분포가 나타났으며, 수로의 900~3200 m 구간 저층에서는 10~25 psu의 고염수 유입이 관측되었다. 최강창조시(Fig. 9(b)) 바다로부터 염수쐐기 형태로 저층을 통해 500 m까지 염수가 유입되었으며, 고조시(Fig. 9(c)) 표층으로부터 약 1.5 m 이하의 수심에서는 대부분 25 psu 이상의 고염수 분포로 강한 염분 성층이 형성 되었다.

Line 3은 Line 1, Line 2 와 달리 방류에 의한 영향과 동시에 조석변화에 따른 염분 변화가 크게 나타났다. 관측 기간 동안 주수문 및 조절수문에서의 지속적인 방류로 인한 담수의 유입으로, 저조시 및 낙조시에 수로 내측의 담수 유입량이 많아지면서 담수의 영향이 크게 나타나는 것으로 생각된다. 고조시 및 창조시 조석의 영향이 커지면서 수로 내측으로의 담수 유입량이 작아지며, 담수는 주로 표층을 통해 배출되는 것으로 추정된다.

3.3 잔차류 산정 및 결과

잔차류는 해수유동 흐름에서 조석 성분을 제거한 흐름으로 정의된다(Kreeke, 1992). 특히 잔차류는 해역의 특성에 따라 조석 전파 특성이 다르고, 지형적 영향으로 인한 비선형 분조 및 담수의 유입, 바람과 같은 외력조건에 의하여 변동되는 특성을 보인다(Yanagi et al., 2003). 본 연구에서의 정선 관측은 13시간 동안의 단기간 관측자료이기 때문에 자료의 평균을 통한 잔차류 정의는 한계가 있으며, 일 단위(K_1, O_1 등) 주기로 변하는 단주기 전파특성을 파악하기 어렵다. 하지만 13시간 이하의 주기를 갖는 M_2 와 M_4 분조는 원시 자료로부터 분해 가능하며, 원시자료와 M_2, M_4 분조와의 차이를 잔차류로 정의하여 공간적인 잔차류 분포 특성을 확인할 수 있다(Valle-Levinson, 1999; 이 등, 2012; 최 등, 2012).

$$u = u_0 + \sum A_{M2}\cos(\omega_{M2} - \phi_{M2}) + \sum A_{M4}\cos(\omega_{M4} - \phi_{M4}) \quad (1)$$

식 (1)에서 u는 주축 방향의 유속(along-channel velocity)이고, u_0는 조석 평균된 유속(residual)을 의미한다. A는 M_2와 M_4의 진폭, ω는 각속도, ϕ는 위상 각을 나타낸다. 잔차류 산정을 위한 조화분해는 최소자승법(Least square method)을 이용하여 수행하였으며(Lwiza et al., 1991), 13시간동안 관측된 자료를 sigma좌표로 전환하여 시간 별로 공간적인 정점이 일치된 좌표(각 셀 별로 13개의 자료구성)로부터 M_2, M_4 분조를 추출하였다. M_2와 M_4 분조의 진폭과 위상을 고려하여, 원시자료(u)에서 M_2, M_4 성분을 제거한 u_0를 잔차류로 정의하였다(Valle-Levinson, 1999).

Fig. 10의 (a)에 Line 1의 한 조석 주기 동안의 수직유속 분포(회색)와 그 평균(검은색)을 도식화하였고, (b)는 M_2, M_4 분조의 조석성분을 제거한 단면 잔차류를 도식화 하였다. 빨간색은 창조방향, 파란색은 낙조 방향의 유속을 의미하며, 검은색 점선은 0 m/s 유속을 의미한다. E1~E7은 CTD 관측이 이루어진 정점을 의미한다. 정점 별로 보면 (a)의 E7 에서 한 조석 주기 동안 유속이 최대 약 –0.5~0.4 m/s까지 변화하였다. E7에서 E1으로 갈수록 즉, 바다에서 멀어질수록 유속변화의 크기가 점차 작아지는 공간변화를 보였다. 잔차유속은 전체적으로 낙조하는 패턴으로 5000 m에서 약 –0.25 m/s의 최대값을 보였다. Line 1의 잔차류 산정 결과, 적지만 지속적인 우안배수문의 방류량은 Line 1 내측의 잔차유속에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 잔차유속의 평균은 0.05 m/s로 전체적으로 낙조하는 패턴이 나타났다.

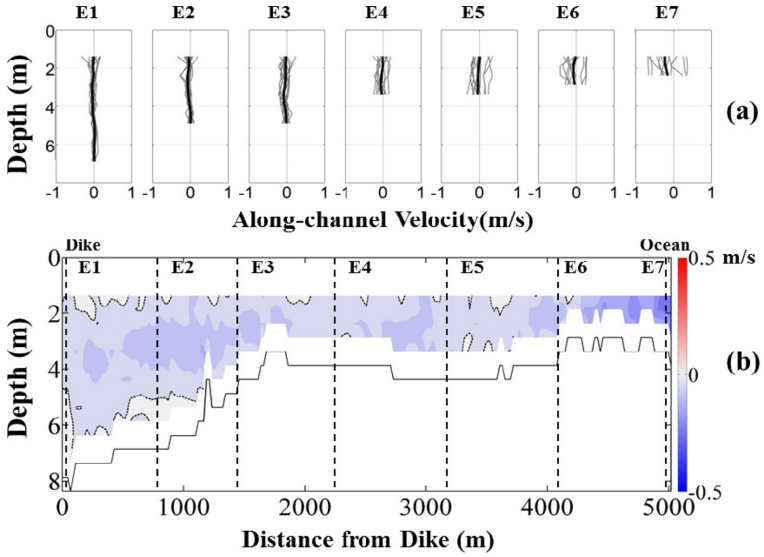


Fig. 10. Hourly vertical profiles of along-channel current velocity for 13 hours (thin line in (a)) and vertical profile of along-channel residual current (thick line in (a)), and longitudinal distribution of along-channel residual current (b) along the Line 1. E1 to E7 are the CTD casting stations. Dashed contours designate zero residuals.

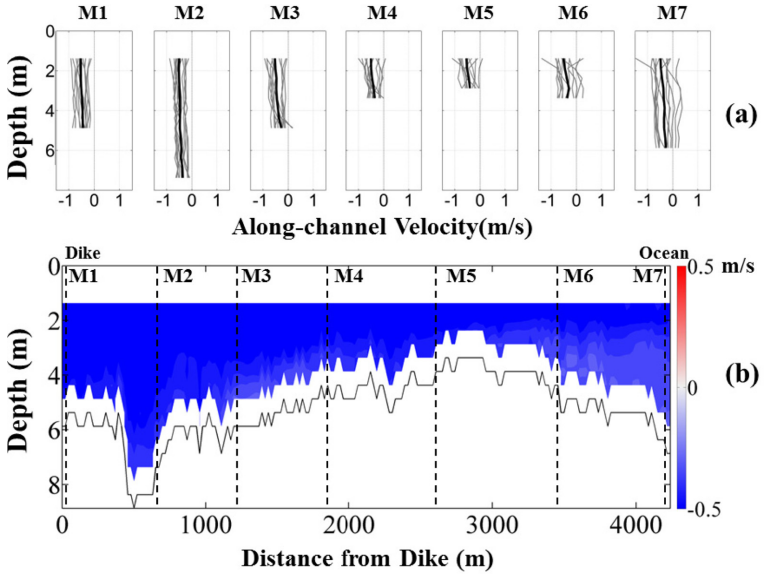


Fig. 11. Hourly vertical profiles of along-channel current velocity for 13 hours (thin line in (a)) and vertical profile of along-channel residual current (thick line in (a)), and longitudinal distribution of along-channel residual current (b) along the Line 2. M1 to M7 are the CTD casting stations. Dashed contours designate zero residuals.

Fig. 11의 (a)는 Line 2의 한 조석 주기 동안의 수직유속분포(회색)와 그 평균(검은색)을 도식화하였고, (b)는 M_2, M_4 분조의 조석성분을 제거한 단면 잔차류를 도식화 하였다. 한 조석 기간 중 (a)의 M6~M7 구간에서 창조하는 유속이 일부 나타나며, M1~M5 구간에서는 모두 낙조하는 유속이 관측되었다. 최대 잔차유속 크기는 약 –0.6 m/s로 M1~M2 사이의 구역에서 나타났으며, 평균 잔차류는 약 –0.45 m/s로 수로 내에서 모두 낙조 방향의 흐름이 나타났다.

Line 2에서의 유동 환경은 하구둑 개방에 의한 영향을 지배적으로 받는 것으로 판단되며, 지속적인 방류에 의해 낙조 방향의 흐름이 우세하게 나타났다.

Fig. 12의 (a)에 Line 3의 한 조석 주기 동안의 수직유속분포(회색)와 그 평균(검은색) 을 도식화하였고, (b)에 M_2, M_4 분조의 조석성분을 제거한 단면 잔차류를 도식화하였다 . Line 3은 표층과 저층간의 뚜렷한 이층 잔차흐름 구조가 나타났으며, 전 구간의 표층에서 낙조, 저층에서는 창조하는 잔차류 분포를 보였다. S7의 경우 한 조석주기 동안 가장 큰 표/저층 유속 차이를 보였고, 잔차유속 또한 표층에선 낙조, 저층에서 창조하는 이층 흐름구조를 보였다. S6~S7 구간에서 약 0.3 m/s의 창조방향 최대 잔차유속이 나타났으며, 이것은 지형적인 영향으로 생각된다. 상류로부터 유입되는 담수는 주로 표층을 통해 빠져 나가며, S6~S7 사

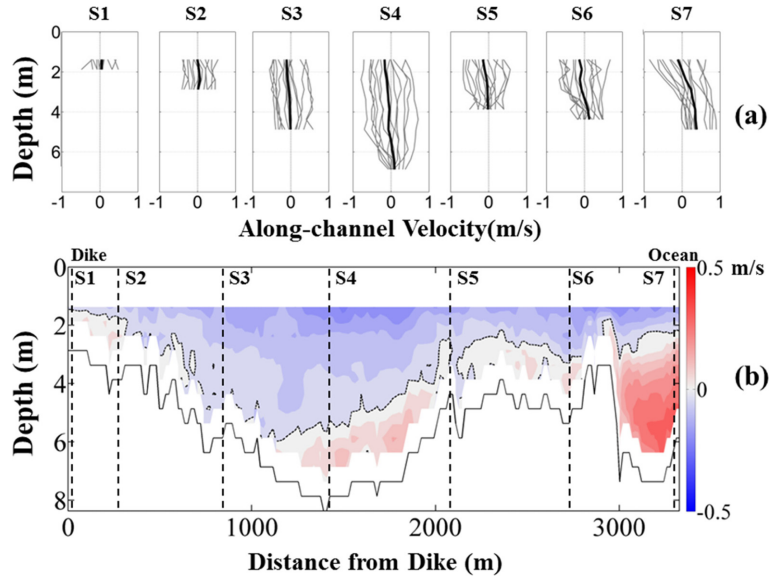


Fig. 12. Hourly vertical profiles of along-channel current velocity for 13 hours (thin line in (a)) and vertical profile of along-channel residual current (thick line in (a)), and longitudinal distribution of along-channel residual current (b) along the Line 3. S1 to S7 are the CTD casting stations. Dashed contours designate zero residuals.

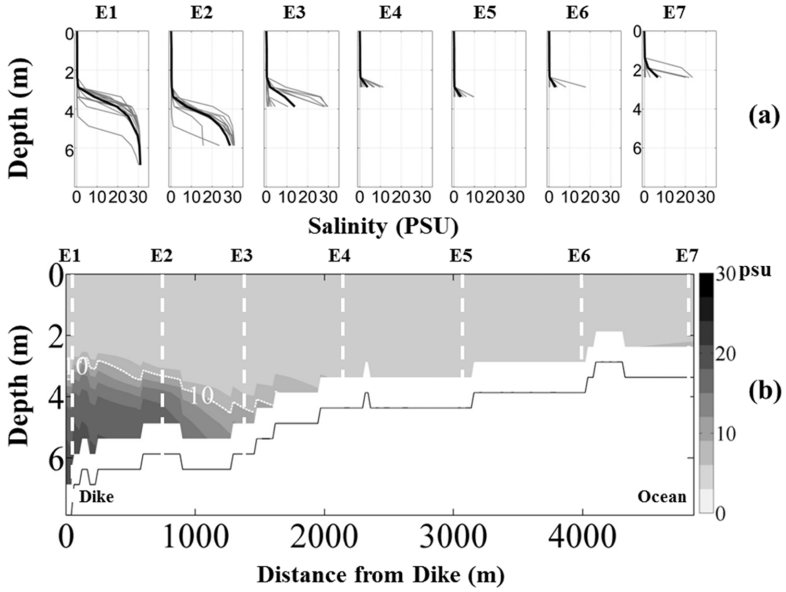


Fig. 13. Hourly vertical profiles of salinity for 13 hours (thin line in (a)) and vertical profile of tidal period-averaged salinity (thick line in (a)), and longitudinal distribution of tidal period-averaged salinity (b) along the Line 1. E1 to E7 are the CTD casting stations. Dashed contour designates 10 psu.

이의 급격한 수심변화로 저층 유속변화에 미치는 영향이 작은 것으로 생각된다. 또한 저조시 및 낙조시 담수 배출로 인한 이층흐름구조 형성으로 저층에서 지속적인 창조방향 유속이 나타나 S6~S7구간에서 창조방향의 잔차 유속이 크게 나타난 것으로 생각된다.

Line 3의 잔차류 산정 결과, 표층에서 낙조, 저층에서 창조하는 이층흐름구조가 뚜렷이 나타났으며, 방류보다 조석에 의해 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 창조시 및 고조시에는 조석에 의한 창조방향 유속이 크게 나타나며, 낙조시 및 저조시에는 방류의 영향이 크게 나타나 낙조방 향의 유속이 크게 나타났다.

3.4 조석평균 염분 결과

Fig. 13(a)에 Line 1의 한 조석 주기 동안의 수직 염분 분포(회색)와 조석 평균된 염분(검은색)을 도식화하였고, (b)에 조석 평균된 염분 공간분포를 나타내었다. E1~E7 구간에서 표층부터 약 2 m 수심까지는 약 0psu에 가까운 염분 분포가 나타났다. 한 조석주기 동안 고염수가 E1~E3 구간에서 수면하 3 m 이하에 정체되어 있는 것이 나타났다.

E1~E3 구간의 저층에서 15~30 psu의 고염수가 정체되는 것은, 한 조석 주기 동안 고조시 E7 및 관측 정선의 서측 깊은 수심으로부터 유입되어 누적된 염수의 영향으로 추측되며, 지속적인 저층의 고염수 정체는 수질악화를 발생시킬 것으로 예상된다.

Fig. 14(a)에 Line 2의 한 조석 주기 동안의 수직 염분 분포(회색)와 조석 평균된 염분(검은색)분포를 나타내었으며, (b)는 조석 평균된 염분 공간분포를 의미한다. (a)를 보면 조석 주기 동안 최대 약 20 psu의 고염수가 M2~M7까지 저층을 통해 유입되었으며, M1에서는 약 0 psu의 담수만이 관측되었다. 조석 평균된 염분농도 (b)에서 약 10 psu 이상의 고염수는 M6 부근까지 유입되는 것으로 나타났으며, 이는 지형 변화에 따른 영향으로 추측된다.

M5에서 M7까지 지형의 변화는 약 3 m 수심 차이가 나타나며, 이러한 지형적 특징 및 담수 방류는 M1~M5 구간의 조석에 의한 영향을 억제하는 것으로 생각된다.

Fig. 15(a)는 Line 3의 한 조석 주기 동안의 수직 염분 분포(회색)와 조석 평균된 염분(검은색)을 도식화하였고, (b)는 조석 평균된 염분 공간분포를 나타내었다. Line 3은 조석에 의한 영향이 크게 나타나며, S1~S7 구간 내에서 저층의 염분이 약 20 psu 이상까지 변화하는 것이 관측되었다. S4 지점에서 염분성층이 발생하는 수심의 변화가 가장 컸으며, 성층 발달 수심은 최저 2 m에서 최고 6 m까지 조석 변화에 따라 크게 변하는 것으로 나타났다. S4 지점에서 13시간 관측 중 1시간을 제외한 나머지 12시간동안 저층에 25 psu 이상

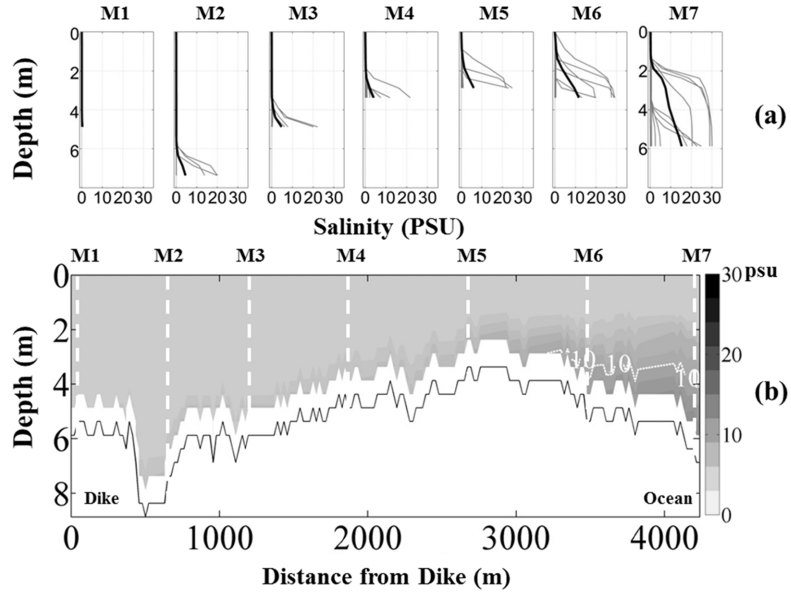


Fig. 14. Hourly vertical profiles of salinity for 13 hours (thin line in (a)) and vertical profile of tidal period-averaged salinity (thick line in (a)), and longitudinal distribution of tidal period-averaged salinity (b) along the Line 2. M1 to M7 are the CTD casting stations. Dashed contour designates 10 psu.

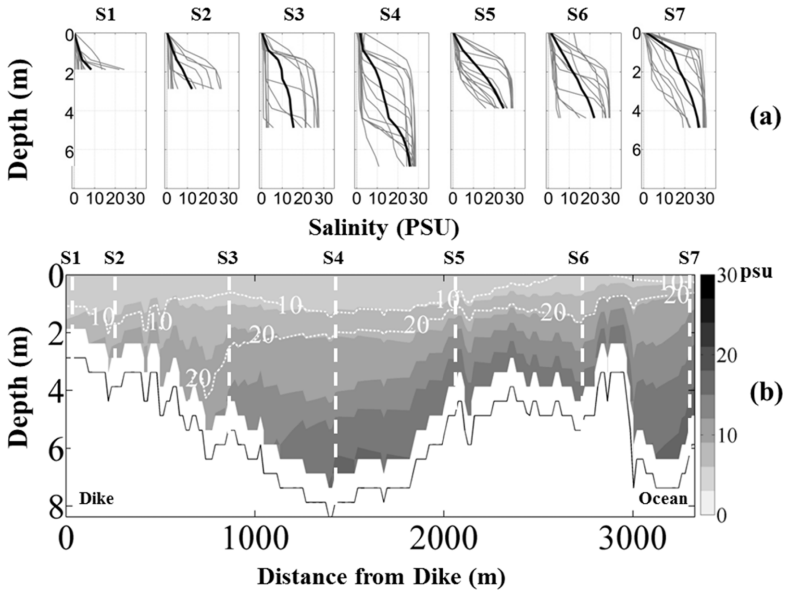


Fig. 15. Hourly vertical profiles of salinity for 13 hours (thin line in (a)) and vertical profile of tidal period-averaged salinity (thick line in (a)), and longitudinal distribution of tidal period-averaged salinity (b) along the Line 3. S1 to S7 are the CTD casting stations. Dashed contour designates 10 psu.

의 염분이 지속적으로 나타났다. 저층의 고염수 정체는 해수와 담수의 밀도차와 S3~S5 구간의 깊은 수심에 의한 지형적인 영향으로 생각된다.

조석평균 염분 분포 결과 주수로로부터 유입되는 담수는 주로 표층을 통해 외해로 배출되며, 저층을 통해 유입되는 해수에 의해 염분의 이층 구조가 뚜렷하게 나타났다.

4. 토의 및 결론

홍수 시 낙동강 하구역의 해수환경 변화를 파악하기 위하여 유속과 염분의 시공간적인 변화를 조사하였다. 유속변화를 보면, Line 1은 우안배수문으로부터 방류되는 담수 양이 크지 않아 유속에 대한 영향이 Line 2, Line 3 보다 크지 않지만, 낙조가 더 우세한 잔차흐름을 보였다. Line 2는 주 수문으로부터 큰 방류에 의해 낙조류가 우세하게 나타났다. Line 3은 방류와 조석에 의한 영향 때문에 표층에서는 낙조우세, 저층에서 창조우세의 이층 흐름구조를 보였다. 염분의 경우 Line 1은 표층에는 담수가 지속적으로 분포하였지만, 하구둑 전면의 저층에서 고염수가 정체되고 있는 것이 관측되었다. Line 2에서는 강한 방류에 의해 담수가 지속적으로 분포하였지만, 창조 시 저층을 통해 염수쐐기의 형태로 염수가 침입하는 것이 나타났다. Line 3에서는 염수와 담수에 의한 염분 성층이 강하게 나타났으며, 고조시 맹금머리등까지 염수가 침투하는 것이 나타났다.

Fig. 16은 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에서 제시한 조석평균 염분 자료를 통해 낙동강 지역에서 10 psu 이상의 수평면 염분 분포도를 도식화한 것이다. (b), (c), (d)는 조석 평균된 염분 자료에서 10 psu 이상의 염분 수직 분포를 표시한 것이다. Fig. 16(b)에서 조석기간 동안 E1~E3 구간의 저층에서 고염수가 지속적으로 분포하고 있는 것이 나타났다. Fig. 16(c)를 보면, 저층에서 10 psu 이상의 염수의 영향은 M6~M7 구간에서 나타난다. M1에서 M5로 갈수록 수심이 낮아지고 M5~M7에서 다시 수심이 깊어지면서, M3~M5 구간의 낮은 수심에 의해 염수의 유입이 방해받는 것으로 생각된다. Fig. 16(d)에서, Line 3은 Line 2에 비해 수로 폭이 좁으며, Line 2로부터 남동쪽 방향으로 갈라져 나온 수로로서 갑문 운영에 따른 담수의 유입이 Line 2 만큼 크지는 않다. 이에 따라 Line 3 은 Line 2 에 비해 담수의 유입량이 적고, 조석에 의한 해수유입의 영향이 더 큰 것으로 생각되며, Line 2에 비해 더 상류까지 10psu 이상의 염분이 유입되는 것이 나타났다(Fig. 16(d)). 염수가 상류까지 유입됨에 따라 수로 내에서 전반적으로 성층이 형성되며 이층 구조를 이루는 것이 나타났다. 하지만 Line 1, Line 2는 2011년 7월 16일, Line 3은 2011년 7월 18일에 관측이 수행되었고, 일방류량은 각각 2575 m^3/s, 1225 m^3/s로 7월 16일의 방류량이 약 2배 이상 크게 나타났으며, 상류까지의 염분 유입은 담수 방류량에 따른 차이일 가능성 또한 고려해야 할 필요가 있다.

종합하면, 낙동강 하구에서의 염분 분포 변화는 담수 방류와 조석, 지형변화 의해 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났으며, 지속적인 방류로 인해 수로별 염분 침투 범위가 상이하게 나타나는 것이 확인되었다. 유속 또한 조석변화와 방류에 의해 수로별 차이가 나타났으며, 결과적으로 잔차류의 분포 또한 수로별로 상이하게 나타났다. 이러한 3차원적인 수로별 염분 및 유속 잔차의 변화는 낙동강 하구역에 서식하는 생물 및 울타리섬 사주의 이동, 발달에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

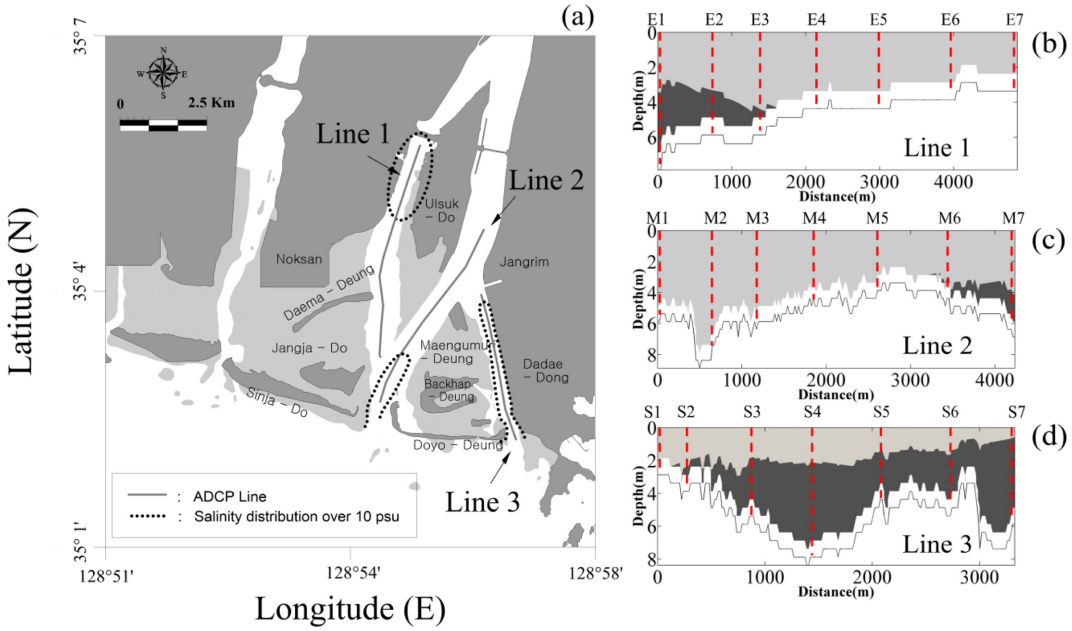


Fig. 16. Spatial distribution of tidal period-averaged salinity over 10psu (a), and longitudinal profile along the Line 1 (b), Line 2 (c) and Line 3 (d), where the boundary between light and darkness is 10 psu.

감사의 글

이 논문은 2013년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원(하구역종합관리시스템 개발연구)과 인하대학교 교내 연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

Choi N. Y., Yoon B. I., Kim J. W., Song J. I., Lim E. P., Woo S. B. (2012). The Relation of Cross-sectional Residual Current and Stratification during Spring and Neap Tidal Cycle at Seokmo Channel, Han River Estuary Located at South Korea. J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng, 24(3), 149-158.

Han K. M., Kim K. C., Kim J. J. (1993). A Study on the Flow Patterns on the Myunggi-Noksan Region due to Reclamation. Journal of Ocean Engineering and Technology, 7(1), 441-454.

Han J. S., Park S. K., Jung S. W., Roh T. Y. (2011), The Study of Salinity Distribution at Nakdong River Estuary. J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng, 23(1), 101-108.

Jang S. T., Kim K. C. (2006). Change of Oceanographic Environment in the Nakdong Estuary. Journal of the Korean Society of Oceanography, 11(1), 11-20.

Joyce, T.M.(1989). On In Situ “Calibration” of Shipboard ADCPs. J.Atmos. Oceanic Technol., 6, 169-172.

Kim J. W., Yoon B. I., Song J. I., Lim C. W., Woo S. B. (2013). Spatial and Temporal Variability of Residual Current and Salinity according to Freshwater Discharge in Yeoungsal River Estuary. J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng, 25(2), 103-111.

Kim, K.C., Kim, J.J., Kim, Y.E., Han, K.M., Choi, K.K. and Jang, S.T. (1996). Outflow characteristics of Nakdong River plume. J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng., 8(4), 305-313.

Kim, Y. E. (1992). Hydrological research of Nakdong river estuary. Institute for Environmental Studies, Inje University, Vol 1. 77-86.

Kim, Y. J. (2004). study on the characteristics of seawater movement and diffusion of pollutants due to the freshwater inflow in the Nakdong estuary. MS Thesis, Inje University.

Kreeke, J. van de (1992). Residual flow in Naples Bay and its effect on constituent concentration, constituent flux and residence time. Dynamics and Exchanges in Estuaries and the Coastal Zone (D. Prandle, Ed.), AGU, 117-133.

Lee D. H., Yoon B. I., Kim J. W., Gu B. H., Woo S. B. (2012). The Cross-sectional Mass Flux Observation at Yeomha Channel, Gyeonggi Bay at Spring Tide During Dry and Flood Season. J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng, 24(1), 16-25.

Lwiza, K. M. M., D. G. Bowers, and J. H. Simpson (1991). Residual and tidal flow at a tidal mixing front in the North Sea, Continental Shelf Research, 11(11), 1379-1395.

Preisendorfer, R. W. and C. D. Mobley (1988). Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography. Elsevier, 425p.

Ryu C. R., Chang S. D. (1979). Tide and Tidal Current in the Estuary of The Nakdong River. Journal of The Korean Society of Oceanography, 14, 71-77.

Valle-Levinson, A (1999). Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. Estuaries, 22, 179-193.

Yanagi, T., Manabu, M., Nomuram M. and Furukawa, K. (2003). Spring-neap tidal variation of residual flow in Tokyo Bay, Japan. Continental Shelf Research, 23, 1087-1097.

Yu, H. S. and Lee, J., Kang, H.J., Kang, S.R., Shoi, K. S. and Kim, J. S. (1993). Lateral spreading of a river plume and transport of suspended sediments in the Nakdong estuary. J. Kor. Soc. Coast. Ocean Eng., 5(4), 296-301.

원고접수일: 2014년 1월 3일
수정본채택: 2014년 3월 31일(1차)
2014년 5월 14일(2차)
2014년 6월 19일(3차)
게재확정일: 2014년 6월 27일