ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/273879754

Study on Lateral Flow Distribution and Momentum Analysis at Flood season and Neap tide of the Seokmo Channel in the Han River estuary

Article *in* Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers · December 2012

DOI: 10.9765/KSCOE.2012.24.6.390

CITATION
1

READS
106

2 authors, including:



Seung Buhm Woo
Inha University
108 PUBLICATIONS **874** CITATIONS

SEE PROFILE

All content following this page was uploaded by Seung Buhm Woo on 06 June 2017.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

한국해안 · 해양공학회논문집
제 24 권 제 6 호, pp. 390~399, 2012년 12월
http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2012.24.6.390

소조기 홍수시 한강하구 석모수로에서의 횡 방향 2차 흐름 및 운동량 분석

Study on Lateral Flow Distribution and Momentum Analysis at Flood season and Neap tide of the Seokmo Channel in the Han River estuary

최낙용* · 우승범*
Nak Yong Choi* and Seung-Buhm Woo*

요 지 : 본 연구에서는 지속적인 담수유입이 존재하고 S자의 수로형태를 가진 경기만 석모수로에서 소조기 홍수시 13시간 동안 7개의 정선에서 단면유속 및 염분을 관측하였다. 각 단면의 최강 창조와 낙조시의 유속 크기와 방향을 파악하였고, 단면 내의 유속 분포 및 염분구조를 분석하였다. 또한 정선 별로 나타나는 횡 방향 흐름이 어떠한 운동량에 의해 지배되는지 파악하고자 횡 방향의 운동량 분석을 수행하였다. 운동량 분석에서는 석모수로의 S자 형태의 영향을 고려하기 위해서 원심력을 고려하였다. 분석 결과 소조기 홍수시 석모수로는 횡 방향 압력 경도력과 수직적 마찰력이 가장 우세하기 때문에 염분 분포와 성층에 의한 흐름이 주로 나타났다. 수로의 특성은 크게 북단과 남단으로 나누어 볼 수 있는데 상대적으로 조간대가 넓게 형성되고 담수의 영향이 큰 석모수로 북단의 4개 정선중에서 수심이 깊은 정선에서는 횡 방향 압력 경도력이 우세하지만 수직적으로 크기가 다르며, 수심이 낮은 정선에서는 수직 마찰항이 우세하였다. 이와는 달리 수심이 깊고 수로의 굴곡이 심한 석모수로 남단에서는 낙조시 지형학적 원인과 담수의 영향에 따라 이류 가속항과 원심력이 강해지게 된다. 이와 같은 결과를 종합할 때, 석모수로는 위치와 수심, 수로의 굴곡 등에 따라 운동량 분포가 각기 달리 나타나며 이러한 영향으로 인해 횡 방향 흐름 특성이 발생했음을 알 수 있다.

핵심용어 : 횡 방향 운동량 분석, 횡 방향 흐름 분포, 원심력, 경기만 석모수로

Abstract : This research observed the cross section current of 7 survey lines in Seokmo Channel of Gyeonggi bay with a lot of freshwater inflow and S-shaped for 13 hours during flood season and neap tide. We indicated the distribution of the current velocity by comprehending the speed and direction of the current velocity of each line during maximum flood, ebb tide and observed the distribution of salinity. Moreover, in order to understand what lateral momentum causes the lateral flow in each survey line, we practiced the momentum analysis through the observation data. As a result, the lateral baroclinic pressure gradient force and vertical friction of the Seokmo channel during neap tide were the strongest, and this is why the flow by the distribution of salinity and stratification most often occurs. In north of the Seokmo channel, where have wide intertidal and a lot of freshwater inflow, the secondary circulation is caused by balance of lateral baroclinic pressure gradient force and other forces, and the vertical friction was strong in the lines with small depth. On the other hand, in the southern part of the Seokmo channel where the water is deep and the waterway is curved, the advective acceleration and centrifugal force become stronger by the geographical causes during ebb and the influence of fresh water. Therefore, the lateral flow in the Seokmo channel was caused by the distribution of the momentum that differs by location, depth, curve, etc.

Keywords : lateral momentum analysis, secondary circulation, centrifugal forcing, Gyeonggi bay, Seokmo channel

1. 서 론

단면 유속 관측을 통하여 관측된 2차적(secondary flow) 흐름은 수로의 횡 단면(cross-channel) 또는 횡 방향(transverse)의 흐름으로서 주 수로 방향 흐름의 직각인 흐름을 의미한다. 2차적 흐름이 주 수로 방향 흐름 유속세기의 10%보다 약할지라도 운동량의 혼합과 분배에 영향을 미치게 되고(Fischer, 1973; Chant, 2002) 잔차류의 형성과 분포 등의 변화를 일으키게 된다(이 등, 2012).

조석이 우세한 하구역 수로에서는 복잡한 수심과 지형이 중요한 2차적 흐름을 만들 수 있는데(Lacy and Monismith, 2001), 수심에 따른 염분의 변화가 측면의 경압류(baroclinic

* 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)

flow)를 흐르게 하고, 굽은 채널에서의 원심 가속도(centrifugal acceleration) 및 전향력(coriolis force)이 2차적 흐름의 경향을 만들 수 있다(Buijsman and Ridderinkhof, 2008). 이와 같은 경압력이 수심에 종속적인 원심력과 운동학적 균형을 이루고 있다는 이전 연구(Kalkwijk and Booij, 1986; Geyer, 1993)를 통하여 횡 방향 흐름에 대한 운동학적 분석을 이해하는 것이 횡 방향의 운동량, 염분, 다른 물질의 확산 및 분배를 이해하는데 중요하게 된다(Fischer et al., 1979; Geyer, 1993).

과거 횡 방향 순환(lateral circulation)에 관한 연구는 굽은 채널(bend channel)과 곶(headlands)에서 곡률에 의한 기작(Geyer, 1993; Seim and Gregg, 1997; Chant, 2002), 경압류와 지형간의 상호작용(Li and O'Donnell, 1997; Valle-Levinson et al., 2000), 종 방향 밀도 경사도의 이류 차이(Lacy et al., 2003; Lerczak and Geyer, 2004; Ralston and Stacey, 2005) 등과 같은 다양한 기작(mechanism)에 의해 이 일어나게 된다. 하지만 이러한 다양한 기작 중에서도 본 연구지역과 같이 강한 조류가 발생하는 지역에서의 횡 방향 운동량 분석은 수행되지 않았다.

이러한 강한 조류가 발생하는 석모수로는 대한민국 서해 경기만에 위치하여 반일주조가 우세한 지역으로 한강, 임진강 그리고 예성강으로부터 유입되는 담수가 하구순환에 많은 영향을 미치고, S자형 굴곡을 가진 지형학적 특성으로 인해 독특한 순환 형태를 보인다(Park et al., 2002). 또한 조력 발전 사업을 포함한 각종 개발이 추진되고 있고, 교각 공사 등 사업이 진행되어 환경에 대한 변화가 나타나고 있기 때문에 사업 이전에 해수의 흐름과 담수 유입으로 인한 영향, 운동학적 특성 등에 대해 면밀하게 파악해야 할 필요성이 있다. 특히 발전 사업 및 에너지 분야에 있어서 어떠한 기작에 의한 유동의 세기와 분포를 연구하는 과정은 조력 및 조류 발전 이전의 기초 자료로서 반드시 필요하다.

석모수로의 이전 연구는 지리적 위치 때문에 접근이 쉽지 않고, 수심이 얕으며 조류가 강해 관측에 어려움이 많았다. 김 등(2010)에 의해 수행된 연구에서는 강화 석모수로 남단 해저 면에서 음파식 유속계의 장기 관측된 자료를 이용하여 조석 잔차류를 산정하였고, 최 등(2012)는 석모수로 북단과 남단에서 단면 잔차류와 성층간의 관계를 수행하였으며, 이 등(2012)은 경기만 염하수로에서의 운동학적 특성을 연구하였다.

이전 연구 결과가 부족한 상태에서 강화 석모수로는 S자형 굴곡이 나타나는 지형적 특성과 조류가 매우 강한 특징이 있기 때문에 횡 방향 2차 흐름 특성을 유발 할 수 있어 이에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 2011년 8월 소조기 홍수시 석모수로에서 수행된 관측 자료를 이용하여 소조기 최강 창조시와 낙조시 기본적인 석모수로 내에서의 유속 흐름과 염분 분포를 제시하였고, 운동학적 분석을 실시하여 어떠한 운동량으로 균형을 이루고 있는지, 어떠한 기작에 의하여 이러한 분포가 나타나는지에 대하여 논의하고자 한다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1 현장 관측 방법 및 자료 획득

관측은 강화도와 석모도 사이에 위치하는 석모수로 지역에서 2011년 8월 24일과 25일 2일 동안 각각 11시간과 13시간 동안 수행되었다(Fig. 1). 관측 장비는 석모수로의 정선 1부터 정선 7까지 7개 정선에서 RDI사의 600 kHz Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)를 사용하였다. 단면 유속 관측(Bottom tracking observation)은 선박에 ADCP를 장착하고 수로를 횡단하면서 관측하는 방법으로 장비와 GPS가 연동되어 실시간 관측위치를 전송 받으며 습득한 데이터로 유속을 출력한다. 관측은 1시간 간격으로 진행되었으며 해수면 하 1 m 이내에 ADCP를 장착하였고, 자료는 1 m의 수심 간격으로 층별 유속 및 유향 자료를 획득하였다. 이와 함께 ADCP를 장착한 선박외의 다른 선박에서는 동일한 정선을 따라 주요 정점에서 Conductivity Temperature Depth(CTD)를 이용하여 층별 수온 및 염분을 관측하였다.

관측은 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 소조기시 실시되었으며 이때의 조차는 2.5 m이다. 석모수로는 군사 경계 지역일 뿐만 아니라 조류의 유속이 강해 장시간 단면 연속 관측이 불가능하다. 또한 정선별 수심이 15~50 m로 다양하고 담수와 함께 유입되는 부유물질로 인해 관측에 어려움이 많다. 대조기시의 결과는 관측의 한계로 인하여 본 연구에서 분석되지 않았으며 추후 연구를 통하여 비교 및 분석할 예정이다. 이와 함께 담수의 유입이 해수 흐름에 많은 영향을 미치는 경기만의 특성상 한강과 임진강에서 유입되는 담수량의 비교를 위해 자료를 수집하였다. 담수의 자료는 한강홍수통제소에서 10분 간격으로 제공되고 있는 팔당댐 방류량 자료를 이용하여 한강의 담수량으로 정의하였고 임진강에서 유입되는 담수량은 군남댐과 전곡댐의 방류량 자료를 합친 값으로 정의하

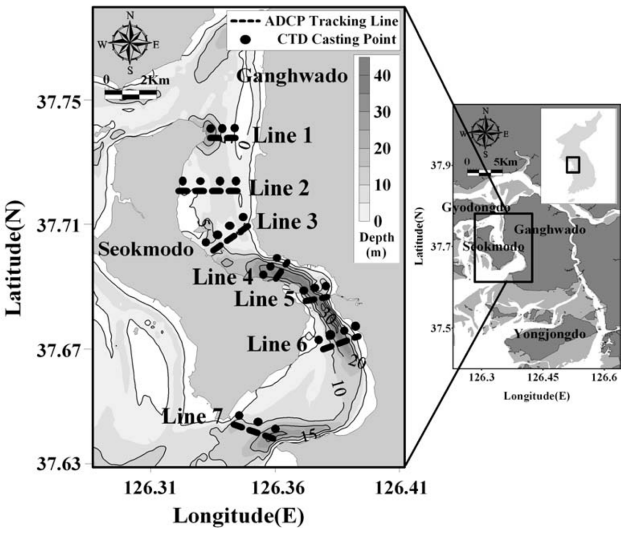


Fig. 1. Map of study area. Left panel is shown an enlarged view of the Seokmo channel showing the location of the survey lines.

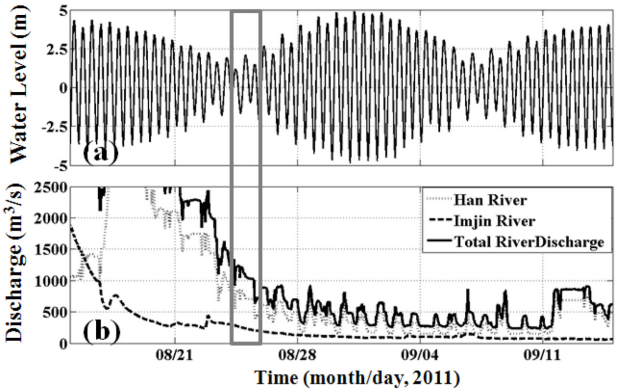


Fig. 2. Series of graphs illustrating the daily variability at Seokmo channel. Observation period of the survey lines used for this study. (a) The water level from Inchoen, (b) River discharge from Han River and Imjin River at Paldang dam, Gunnam dam, Jeongok dam.

였다(Fig. 2). Fig. 2에서 실선은 관측을 수행한 일시의 조석과 담수 조건을 나타내고, 이때의 담수 유입량은 Fig. 2(b)에서 나타나듯 9월의 평균 담수 유입량인 405.35 m^3/s에 비하여 2배 이상 많기 때문에 평수시보다는 홍수시에 가깝다.

2.2 자료 처리

ADCP에서 관측된 원시자료는 연구 목적에 맞게 자료 처리가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 기존의 Valle-Levinson (1999) 등이 사용한 방법인 원시자료에서 획득되는 수평적 10개의 자료 평균을 하였다. 또한 ADCP의 4개 빔의 상관관계가 낮은 구간에 대한 척도 값과 4개 빔에서 관측된 유속 차이를 나타내는 오차 값을 이용하여 이상 자료를 보정하였다.

편각 보정과 Joyce(1989)등이 사용한 방법인 선속 보정(Joyce correlation)을 하였으며 수로를 대표할 수 있는 종축방향의 유속을 추출하고자 Principal Component Analysis (PCA)분석의 과정을 거쳤다(Fig. 3). PCA분석은 유속자료(ADCP)에서 추출한 동서방향, 남북방향의 성분을 수로에 대한 종 방향과 횡 방향의 새로운 좌표계로 선형변환 하는 기법으로 분석 전 자료인 회색 점보다 PCA분석 후인 검은색 점을 통해 지배적인 성분의 분석이 가능하다(Preisendorfer and Mobley, 1988).

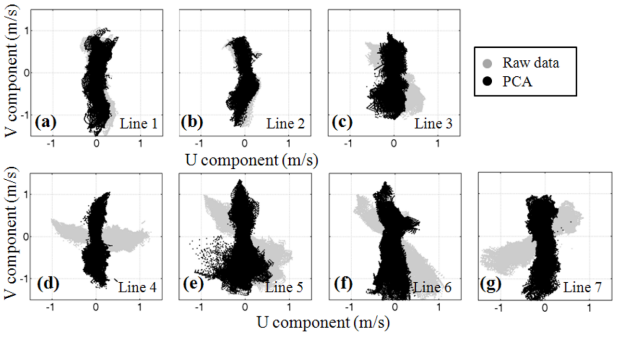


Fig. 3. PCA analysis results.

유속 자료는 이 등(2012)의 연구에서 수행된 방법인 수직 및 수평적 시그마 좌표 변환을 수행하였다. 본 연구지역은 정선 별 관측이 수행된 거리와 수심이 다양하기 때문에 운동량 분석을 수행할 때 정선 및 거리별 차이를 구하는데 통일성을 기하고 층별 간 분석을 수행하기 위해서 관측된 수심을 시그마 좌표의 수심으로 변환하는 무차원화(normalize) 과정을 수행하였다.

2.3 종 방향 운동량 분석

본 연구에서는 횡 방향 단면에서의 유속 분포 및 흐름을 관측하는 것이 첫 번째 목적이고, 이를 통하여 석모수로에서의 횡 방향 유속 흐름을 만드는 횡 방향 운동학적 분석이 목적이기 때문에 종 방향 운동량에 대해서는 대략적인 크기만을 파악하기 위하여 간략하게 분석하였다.

데카르트 방정식(Cartesian equation)에서 이류 가속항과 전향력, 수평 및 수직 마찰항을 고려한 일반적인 종 방향 운동방정식은 다음과 같다(Webb et al., 2007).

$$u\frac{\partial \upsilon}{\partial x}+\upsilon\frac{\partial \upsilon}{\partial y}-fu+\frac{g}{\rho_0}\int\frac{\partial \rho}{\partial y}dz'-\frac{\partial}{\partial y}\left(A_h\frac{\partial \upsilon}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\frac{\partial \upsilon}{\partial z}\right)=0 \quad (1)$$

이 때, x, y, z는 좌표축을 나타내고, u, v는 x, y좌표의 유속을 나타낸다. f는 전향력 변수(Coriolis parameter), ρ는 밀도(density), A_h는 수평적 와동 점성계수(horizontal eddy viscosity), A_z는 수직적 와동 점성계수(vertical eddy viscosity)를 의미한다. $\rho=\rho_0+\rho'(x,y,z,t)$, $\rho_0=1000$ kg m^{-3}으로 밀도를 구분하였고, η는 해수면 수위(water level)를 의미하는데 $z>>\eta$이므로 순압력은 무시되었으며, $u>>\omega$이므로 z좌표의 유속인 ω는 무시되었다.

이전 연구(이 등, 2012)에서 진행된 바와 같이 종 방향 운동량의 단면 평균 분석을 수행한 결과, 석모수로에서 가장 우세한 힘은 수직 마찰항으로 대략적인 크기는 약 7.13×10^{-5} m/s^2으로 나타났고, 이류 가속항은 4.08×10^{-5} m/s^2, 경압력과 수평 마찰항은 각각 4.34×10^{-5} m/s^2, 4.97×10^{-5} m/s^2이었으며 전향력이 2.23×10^{-6} m/s^2으로 분석되었다. 최강 창조에 비해 낙조 시 모든 항이 약 1.32~9.12배 커지고 최강 창조시 이류 가속항과 경압력, 전향력, 수직 마찰항, 수평 마찰항의 비율은 1:20:1:17:12, 낙조시 1:19:1:41:53으로 나타나 비율은 크게 변하지 않았다.

이를 통한 석모수로에서의 종 방향 운동량 분석은 추후 연구에서 진행될 예정이다.

2.4 곡선 좌표계의 횡 방향 운동량 분석

성층이 강하고 굽은 채널에서의 옆 방향 흐름에 관여하는 주요 힘을 추정하기 위해서는 직교 곡선 좌표계(orthogonal curvilinear coordinate system)의 옆 방향 운동 방정식(transverse momentum balance)을 사용하는데 여기에서 굽은 채널

과 경압력, 단면 지형 간 상호작용에 의한 영향을 보이게 된다.

직교 곡선 좌표계의 옆 방향 운동 방정식은 이전 연구에서 다음과 같이 사용되었다(Kalkwijk and De Vriend, 1980).

$$\underset{A}{\frac{\partial u_n}{\partial t}}+\underset{B1}{u_s\frac{\partial u_n}{\partial s}}+\underset{B2}{u_n\frac{\partial u_n}{\partial n}}+\underset{B3}{u_z\frac{\partial u_n}{\partial z}}-\underset{C1}{\frac{u_s^2}{R_s}}+\underset{C2}{\frac{u_s u_n}{R_n}}+\underset{D}{fu_s}+\underset{E}{\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial n}}-\underset{F}{\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial u_n}{\partial z}\right)}=0 \quad (2)$$

이 때, s, n, z는 주 수로 방향(streamwise), 횡 단면 방향(transverse), 수직 방향(vertical) 좌표 축을 나타내고, u_s, u_n, u_z은 각 좌표 방향의 유속을 나타낸다. R_s과 R_n는 주 수로 방향과 횡 단면 방향에 대한 곡률(radius of curvature)을 나타내며 P는 압력(pressure), K_z는 수직적 와동 점성계수(vertical eddy viscosity)를 의미한다.

곡선 좌표계는 기존의 데카르트 방정식(Cartesian equation)에 비교하여 주 수로 방향과 횡 단면 방향의 원심력(centrifugal acceleration term)인 C1과 C2항이 포함되어 있다는 점이 다르고 나머지 항은 그대로 남아있다. A는 국지 가속도항(local acceleration term), B1, B2, B3는 주 수로, 횡 단면, 수직 방향의 이류 가속항(advection term), D는 전향력(Coriolis term), E는 압력 경도항(pressure term), F는 마찰항(friction term)을 의미한다. 주 수로 방향 좌표 축은 창조 방향인 북쪽 방향을 양의 방향으로 두었고, 횡 단면 방향 좌표 축은 동쪽 방향을 양의 방향으로 두었다. 이 때, 압력 경도항(E)은 순압력(barotropic; E1)과 경압력(baroclinic; E2)으로 나누어질 수 있다(Chant and Wilson, 1997).

$$\underset{E}{\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial n}}=\underset{E1}{g\frac{\partial \eta}{\partial n}}+\underset{E2}{\frac{g}{\rho_0}\int_z^0\frac{\partial \rho(z')}{\partial n}dz'} \quad (3)$$

이 때, 종 방향 운동 방정식과 마찬가지로 $\rho=\rho_0+\rho'(x, y, z, t)$, $\rho_0=1000$ kg m^{-3}으로 밀도를 구분하였고, 단면 유속 관측의 한계로 순압력은 무시되었다. 본 연구에서는 횡 단면 방향의 순환에 있어서 휘어진 수로에서 성층의 효과와 원심력을 포함한 다른 운동 방정식 항이 어떠한 흐름을 만들어내는가에 대한 분석을 수행한다.

2.5 곡률(Radius of curvature)

원심력 항을 계산하기 위해서는 주 수로 방향과 횡 단면 방향에 대한 곡률인 과 을 추정해야 하는데 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 기하학적 방법(geometrical argument)을 사용하였다(Chant and Wilson, 1997). Chant and Wilson의 연구에서 수행된 방법과 같이 정선 1과 3에서 흐름의 각도 변화와 거리를 사용하여 정선 2에서의 곡률을 구하였고, 이와 같은 방법으로 정선 3~6에서의 곡률을 추정하였다.

식 (2)의 C1과 C2에서 나타나듯 원심력은 곡률에 반비례하게 된다. 원심력이 커지면 횡 방향 흐름에 있어서 표층은

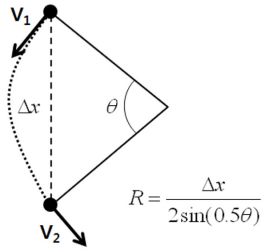


Fig. 4. Cartoon depicting scheme used to estimate radius of curvature. θ is the change in direction between the two current measurements. Δx is the distance between the two measurements, and R is the estimated radius of curvature.

곡률을 만드는 원의 바깥 방향을 향해 흐르게 된다. 따라서 저층은 안쪽 방향을 향해 흐르는 기작이 되어 유속의 흐름과 수로의 방향 및 곡률에 따라 시계 또는 반 시계 방향의 옆 방향 흐름을 만들게 된다.

3. 관측 결과 및 분석 결과

3.1 수로에서의 유속 벡터 및 염분 분포

석모수로 내 여러 정선에서 최강 창조와 낙조시 어떠한 흐름의 세기와 방향을 보이는지 나타내기 위해 각 정선에서의 유속 벡터도를 나타내었고, 이와 함께 염분 등고선을 표층, 중층, 저층에 대하여 도시하였다. 이 때, 표층, 중층, 저층은 정선에서의 유속 및 염분 결과를 Sigma 좌표로 나타내었을 때의 결과이다.

관측 수행 당시의 석모수로는 담수의 유입이 많았기 때문에 표층과 저층간의 유속 및 염분의 차이가 크게 나타난다. 최강 창조시의 유속 벡터도 및 염분 등고선을 그린 Fig. 5에서 나타나듯 담수에 의한 영향은 북단인 정선 1에서 남단인

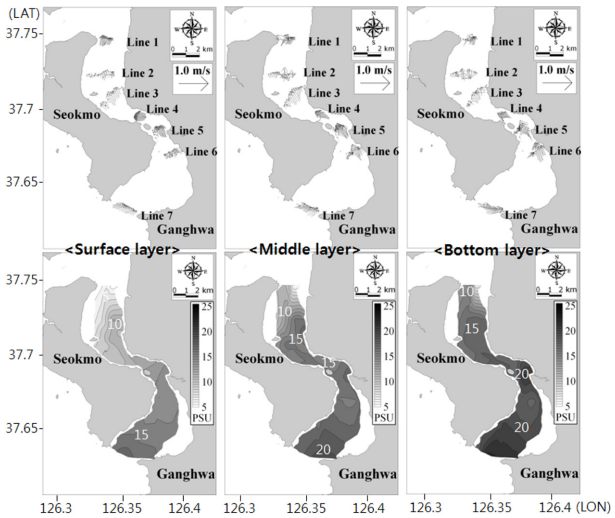


Fig. 5. Top layer in the figure shows current vector at observation lines during maximum flood tide. Bottom panel of the same period shows horizontal distribution of salinity at Seokmo-channel. Isohalines are drawn in black and salinity values are printed in white.

정선 7에 가까워질수록 줄어들게 된다. 이는 정선 1과 2의 경우, 표층 담수의 영향으로 인해 창조 방향의 벡터가 아닌 여러 유향을 보이는 모습과 북단의 표층에서 약 5PSU로 나타나는 염분의 영향이 남단에 가까워질수록 줄어들게 되는 점으로 유추할 수 있다.

북단 표층에서의 낮은 염분의 모습을 보았을 때, 동쪽의 조간대와 지형의 굴곡을 고려하면 동쪽보다 서쪽에서 먼저 유입되는 점을 알 수 있고, 표층과 저층간의 염분 차이가 모든 정선에서 5PSU 이상 나타나므로 성층을 무시 할 수 없는 지역임을 알 수 있다. 정선 2는 평균 수심이 약 8 m로 다른 정선의 평균 수심인 30 m보다 낮기 때문에 표층과 저층간의 큰 차이가 나타나지 않고, 넓은 조간대로 인하여 수로의 동쪽과 서쪽에서 일정한 창조방향의 모습을 나타내지 않는다.

정선 4, 5, 6에서는 수로의 폭이 줄어들기 때문에 유속이 다른 정선에 비해 강하게 흐르고, 이때의 유속은 최대 0.95 m/s에 이른다. 담수의 유입과 바닥 마찰의 영향으로 인하여 표층과 저층에 비해 중층에서 비교적 강하게 흐르고, 정선 5와 6에서 나타나듯 굴곡을 보이는 수로의 지형을 따라 동쪽에 치우쳐서 흐르게 된다. 정선 6의 경우 흐름이 좁아지는 지형의 영향으로 수렴하는 형태이며, 정선 3, 4, 5의 경우 넓어지는 지형으로 인하여 발산하는 형태의 흐름이 나타난다. 정선 7에서는 얕은 수심의 조간대로 이루어져 있는 강화 남단보다 수심이 깊은 석모도 남단을 통해 북쪽 방향의 흐름이 아닌 서쪽에서 동쪽 방향으로 흐르는 모습이 나타난다.

Fig. 6에는 최강 낙조시의 유속 벡터도 및 염분 등고선을 나타내었다. 최강 낙조시에는 북쪽에서 유입되는 담수 흐름으로 인하여 최대 1.30 m/s에 이르는 유속으로 최강 창조시보다 더 강한 흐름이 나타났다. 창조시의 담수의 영향으로 나타나는 난류의 모습과 달리 최강 낙조시에는 보다 일정하게 흐르는 층류의 형태를 띠게 되고, 창조시와 반대로 정선 6에서는 발산하며 정선 3, 4, 5에서는 수렴하는 흐름이 나타난다.

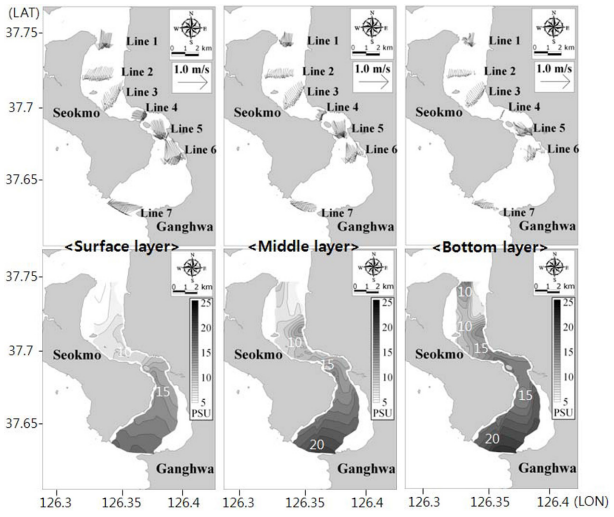


Fig. 6. Top layer in the figure shows current vector at observation lines during maximum ebb tide. Bottom panel of the same period shows horizontal distribution of salinity at Seokmo-channel. Isohalines are drawn in black and salinity values are printed in white.

최강 창조시에는 표층과 저층에 비하여 중층에서 상대적으로 가장 빠른 흐름을 보이지만 최강 낙조시에는 담수의 흐름과 바닥 마찰로 인하여 표층에서 가장 강하게 흐른다. 정선 4에서의 저층 흐름은 바닥 마찰의 영향으로 판단된다. 염분 형태를 살펴보면 담수 흐름의 영향으로 창조시에 비하여 최강 낙조시 표층에서의 낮은 염분 분포가 남쪽으로 치우치게 되고, 북단에서는 표층과 저층간의 염분 차이가 상대적으로 적게 나타난다.

북단인 정선 1, 2, 3의 표층을 살펴보면, 창조시와 마찬가지로 동쪽에 비해 서쪽에서 낮은 염분이 관측되는데 이는 담수의 유입이 서쪽에 치우쳐서 유입되는 점을 알 수 있다. 이는 수로의 굴곡을 따라 담수가 유입된다는 점을 유추할 수 있고, 이에 맞도록 수로 동쪽에는 넓은 조간대가 형성되어 있다.

지형학적 굴곡이 보다 심한 정선 3, 4, 5에서는 낮은 염분의 흐름이 원심력이 강한 수로의 동쪽을 따라 나타나게 되고, 유속 벡터 또한 동쪽 방향의 성분이 더 강하게 나타나는데 이는 수로의 지형을 고려하면 원심력에 의하여 나타나는 흐름이라 유추되며 이는 제3장 운동 방정식 분석을 통해 나타나게 된다. 수로의 남단인 정선 7에서는 최강 창조와 최강 낙조시의 염분 차이가 크지 않고, 최강 창조와 마찬가지로 남북 방향의 흐름보다는 동서 방향으로 흐른다.

이때의 단면을 통과하는 유량은 모든 정선에서 약 10,000 m^3/s로 나타나고, 낙조시에는 창조에 비하여 강한 유속으로 인하여 2,000~3,000 m^3/s 더 많게 나타난다. 또한 수심이 더 얕은 북단이 남단보다 더 짧은 관측이 수행되기 때문에 10,000 m^3/s보다 적은 유량이 관측된다. 하지만 이러한 유량은 단면 연속 관측이 수심과 유속을 고려하였을 때, 모든 정선을 동쪽 끝에서 서쪽 끝까지 일직선으로 횡단하지 못하기 때문에 오차가 나타난다.

3.2 각 단면에서의 옆 방향 유속 구조 및 염분 분포

Fig. 7에는 최강 창조시 정선 1~4에서의 옆 방향 유속 및 염분 분포를 도시하였다. 석모수로의 수심은 정선 별로 매우 다양하기 때문에 수심의 좌표 축을 통일하지 않고 정선 별로 다양하게 나타내었다. 유속 분포의 그림에서, 흰색을 나타내는 영역은 동쪽 방향으로 흐르게 되고, 검은색을 나타내는 영역은 서쪽 방향으로 흐르게 된다.

정선 2를 살펴보면 표층에서는 동쪽으로 흐르는 성분이 강하고 그 아래에는 반대 방향의 흐름이 강한데 이는 동쪽에서 표층의 염분이 상대적으로 크고, 중층의 염분은 서쪽에서 크기 때문에 위와 같은 흐름이 생긴다. 다른 정선에 비해 수로의 굴곡이 적고, 담수의 영향이 가장 크기 때문에 운동량 분석에서 설명되듯이 옆 방향 염분의 경사도와 유속의 흐름이 일치하게 된다.

정선 3을 살펴보면 정선 2와 반대로 표층에서 서쪽 방향

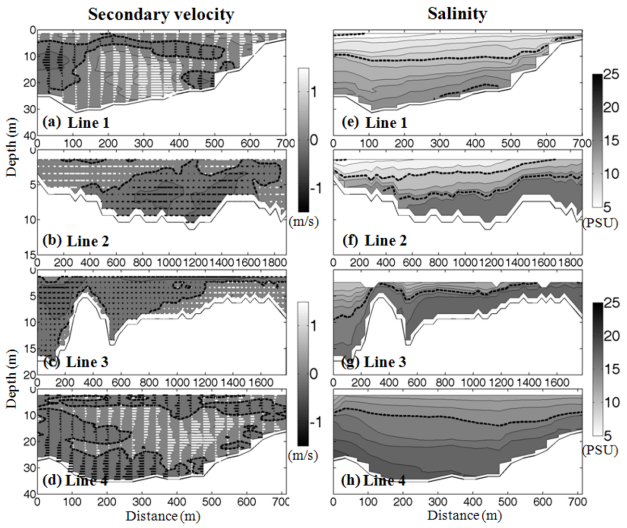


Fig. 7. In line 1~4, the secondary velocity (left column) and salinity (right column) distribution for maximum flood tide on August 24, 2011 (looking toward north). Dark (light) shades of grey refer to westward (eastward), high (low) salinity, respectively.

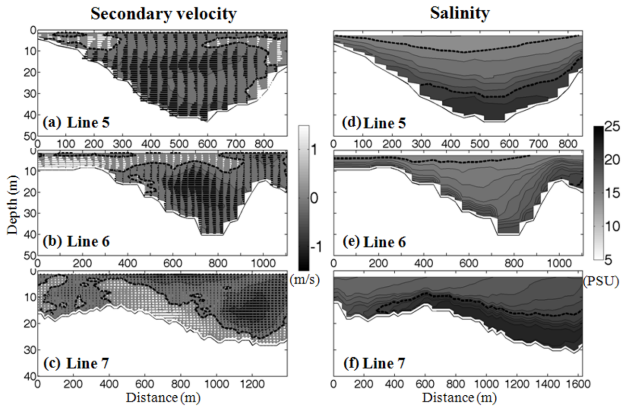


Fig. 8. In line 5~7, the secondary velocity (left column) and salinity (right column) distribution for maximum flood tide on August 25, 2011 (looking toward north). Dark (light) shades of grey refer to westward (eastward), high (low) salinity, respectively.

의 유속이 관측되고, 중층에서 동쪽 방향의 흐름이 관측되는데 이는 상대적으로 염분이 동쪽에서 무거워 서쪽으로 기운 염분의 경사도와 수로 지형의 영향으로 반 시계 방향의 흐름이 나타난 것으로 유추할 수 있다.

Fig. 8은 정선 5~7 에서의 유속과 염분 분포를 나타내었다. 정선 5의 경우, 정선 3, 4와는 다른 수로의 굴곡으로 인하여 반대 방향의 원심력이 작용하게 되는데 서쪽 표층에서만 동쪽으로 흐르게 되고 전체적으로 서쪽 방향의 유속 분포가 나타나게 된다. 이는 창조류가 넓은 폭에서 좁아지는 수로로 흐르고, 동쪽의 튀어나온 지형의 영향으로 서쪽 방향의 유속 분포가 우세하게 된다.

정선 6의 경우 마찬가지로 수렴하는 형태의 흐름이지만 수로의 굴곡으로 인한 원심력의 영향과 서쪽으로 기운 염분 경사도의 영향으로 시계 방향의 흐름이 나타나게 된다.

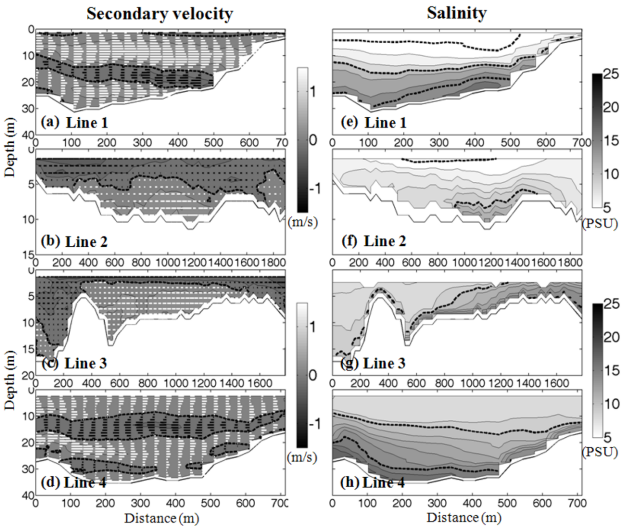


Fig. 9. In line 1~4, the secondary velocity (left column) and salinity (right column) distribution for maximum ebb tide on August 24, 2011 (looking toward north). Dark (light) shades of grey refer to westward (eastward), high (low) salinity, respectively.

최강 낙조시 정선 1~4에서의 유속 및 염분 분포를 Fig. 9에 도시하였다. 유입되는 담수의 방향과 같기 때문에 창조시보다 더 강하게 흐르고, 염분 또한 더 낮게 나타난다.

정선 1과 4의 경우, 염분의 경사도에 의해 표층과 중층, 저층에서 서로 반대 방향의 흐름을 보이는 3층 구조를 보이는데 정선 1의 경우, 최강 창조와 낙조시 횡 방향 흐름은 서로 동일한 형태를 보인다. 창조에 비해 낙조시 표층 염분이 조금 더 낮아진 점이 다를 뿐 동쪽의 표층에서 염분이 상대적으로 크고 서쪽의 중층에서 무거운 염분이 분포되어 있는 형태가 같기 때문에 이 지역은 창, 낙조의 흐름보다 염분의 경사도에 영향을 받는 지역임을 유추할 수 있다.

정선 2와 3은 최강 창조에 비해 유속의 흐름이 더 강해졌기 때문에 수로 곡률에 의한 원심력이 더 강해지게 되고 이와 함께 염분의 경사도의 영향으로 반 시계 방향 흐름이 나타난다. 두 정선과 함께 석모수로 북단 저층에서는 낙조임에도 불구하고 저층에서 상대적으로 높은 염분이 관측되는데 이는 표층과 저층간의 흐름 시간차가 존재하게 되고 이로 인해 표층과 저층간의 전단이 매우 큰 지역임을 유추할 수 있다.

Fig. 10에는 정선 5~7에서 최강 낙조시 유속 및 염분의 분포를 도시하였다. 정선 1~4와는 반대 방향으로 수로가 휘어져 있기 때문에 최강 낙조시 횡 방향으로 작용하는 원심력이 반대 방향으로 작용하게 된다.

정선 5의 경우 강화도 서쪽의 튀어나온 지형으로 인하여 표층에서는 수렴하는 형태의 흐름이 나타나고, 저층에서는 이와 반대로 발산하는 형태의 흐름이 나타난다. 수로의 굴곡 보다는 폭에 영향을 많이 받게 되어 반 시계 방향의 흐름이 매

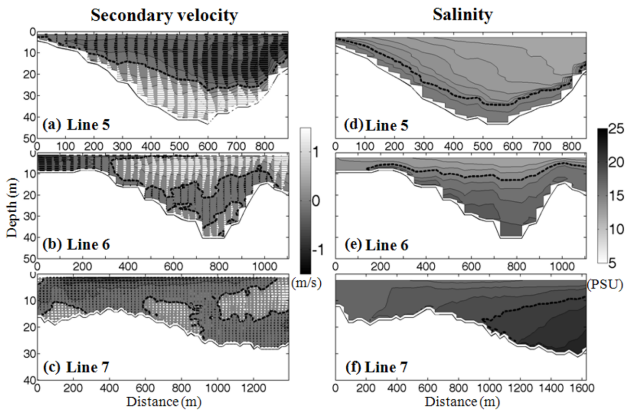


Fig. 10. In line 5~7, the secondary velocity (left column) and salinity (right column) distribution for maximum ebb tide on August 25, 2011 (looking toward north). Dark (light) shades of grey refer to westward (eastward), high (low) salinity, respectively.

우 강하게 나타나는데 이는 염분의 경사도와도 일치하여 흐르고 있고, 표층과 저층간의 전단(shear) 또한 매우 강하게 나타난다.

정선 6의 경우 표층과 저층에서 서쪽과 동쪽 방향의 흐름이 모두 나타나게 되는데 이는 정선 5와 다르게 표층과 저층 모두 발산하는 형태의 흐름이 횡 방향 유속 분포를 통해 보여지고 있다. 정선 7은 강화도 남단보다 수심이 상대적으로 깊은 석모도 남단으로 흐르게 되기 때문에 서쪽 방향의 흐름이 우세하게 된다.

3.3 횡 방향 운동량 분석 결과

하구역에서는 수로의 지형과 곡률의 형태에 따라 큰 영향을 받는다. 원심력은 이러한 곡률에 의해 생성되는 힘으로 표층에서 굴곡이 있는 지형의 바깥쪽을 향한다(Kalkwijk and Booij, 1986). 특히 본 연구지역인 석모수로는 성층이 강하고(최 등, 2012) S자형 굴곡을 가진 수로이기 때문에 이러한 특징으로 인해 나타나는 횡 방향 유속 분포와 원심력을 표현하기 위해 횡 방향 운동량 분석이 필요하다. 정의에 의해 수직 평균된 옆 방향의 유속은 0이 되고, 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다(Kalkwijk and Booij, 1986; Geyer, 1993; Seim and Gregg, 1997; Lacy and Monismith, 2001).

$$\overline{u_s\frac{\partial u_n}{\partial s}}-\frac{\overline{u_s^2}}{R_s}+f\overline{u_s}+\frac{g}{\rho_0}\overline{\int_z^0\frac{\partial\rho(z')}{\partial n}}-\overline{\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\frac{\partial u_n}{\partial z}\right)}=0 \qquad (4)$$

식 (1)에서 식 (3)을 빼면 수직 평균된 성분이 제거되어 옆 방향 흐름을 나타내는 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial u_n}{\partial t}=-\left(u_s\frac{\partial u_n}{\partial s}-\overline{u_s\frac{\partial u_n}{\partial s}}\right)-u_n\frac{\partial u_n}{\partial n}+\frac{u_s^2-\overline{u_s^2}}{R_s}-f(u_s-\overline{u_s}) \qquad (5)$$

$$-\frac{g}{\rho_0}\left(\int_z^0\frac{\partial\rho(z')}{\partial n}dz'-\overline{\int_z^0\frac{\partial\rho(z')}{\partial n}dz'}\right)+\left\{\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial u_n}{\partial z}\right)-\overline{\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial u_n}{\partial z}\right)}\right\}$$

이 때, $u_s > u_n >>> u_z$이므로 식 (1)의 B3, C2는 생략하였다. 본 연구에서는 첫 번째 항(A)을 국지 가속항(이하 LC), B1과 B2를 이류 가속항(AC), C1을 원심력(CT), D를 전향력(CF), E2를 압력 경도항(BC), F를 수직 마찰항(FD)으로 표현하였다.

주 수로 방향의 변화율을 구할 때에는 곡률을 추정한 방법과 같이 두 정선 간의 변화율을 이용한 뒤, 둘 사이에 있는 정선에서의 유속을 곱하여 주 수로 방향 운동량을 나타내었다. 마찰항을 구하기 위한 K_z는 석모수로에서의 수직 마찰 계수가 산정된 바 없기 때문에 이전 연구(이 등, 2012; Csanady, 1975; Pacanowski and Philander, 1981)에서 수행된 방법을 통해 각 정선에 대하여 추정하였고, 각 정선에서 0.0033~0.0103 m^2/s의 값을 사용하였다.

본 연구에서는 운동량 분석을 수행한 뒤, 수로 단면을 서쪽과 중앙, 동쪽으로 나누어 분할된 구역에서의 평균된 운동량 크기를 비교하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 그림은 분할된 구역의 평균을 한 운동량의 크기를 수심별로 나타낸 것이다. 운동량 분석 그림 또한 유속 그림과 마찬가지로 정선별 수심에 대한 다양성을 고려, 서로 다른 수심의 크기에 따라 도시하였다. Fig. 11에는 최강 창조시 정선 1~4의 분할된 구역에서 수심별 각 항의 운동량 분석을 나타내었고 대부분의 정선에서 압력 경도항인 BC항과 마찰항인 FD가 가장 우세하게 나타났다.

정선 1과 4의 경우, 표층에서 동쪽 방향의 흐름과 중층에

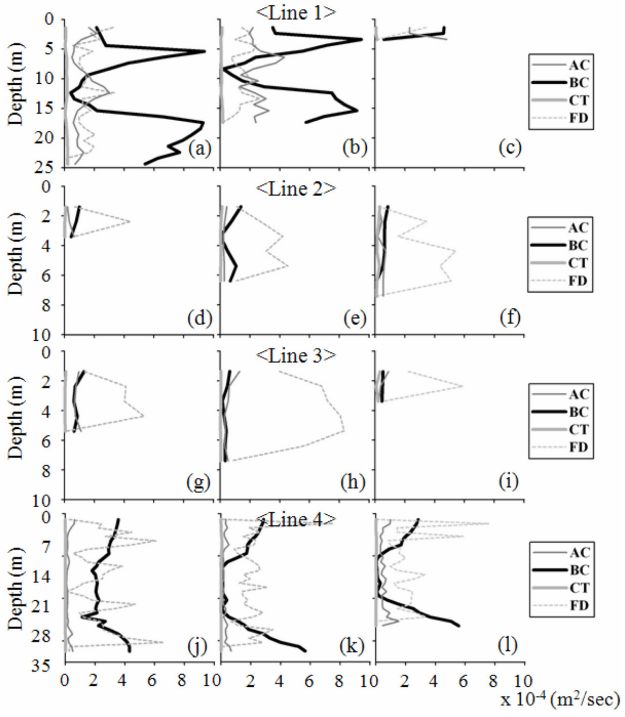


Fig. 11. In line 1~4, vertical variation of the lateral momentum terms during maximum flood tide. The west (left column), center (central column) and east (right column) of section are represented the terms using black or gray lines.

서 서쪽 방향, 그리고 다시 저층에서 동쪽 방향으로 흐르는 3층 구조의 흐름을 보이는데 동쪽 방향의 흐름이 나타나는 표층과 저층에서 BC항이 가장 크고, 서쪽 방향의 흐름이 나타나는 중층에서는 FD가 가장 우세한 점이 일치하는 점으로 보아 BC항과 FD항 사이 균형에 의한 흐름임을 알 수 있다. 이때, Fig. 11의 (a)와 (b)를 살펴보면 정선 1에서는 중층에서 AC항이 크게 나타나 수심 10 m 지점에서 AC항과 BC항과 FD항의 비율이 1.70:1:1.46이 되기 때문에 수심에 따라 다른 운동량의 비율을 보여주고 있다.

Fig. 11의 (d)~(i)에서 나타나듯 정선 2와 3에서는 FD항이 매우 커지는데 이는 수심이 약 30~40 m인 다른 정선에 비해 두 정선에서는 수심이 10 m 안팎으로 얕아지기 때문에 이로 인한 수직적 전단 응력(vertical shear stress)이 커지고 따라서 FD항이 커지게 되었음을 유추할 수 있다. 얕은 수심에서의 많은 담수의 유입 또한 이러한 성층을 크게 만들고 이러한 지형적 원인에 의한 FD항의 우세는 낙조시에도 나타나게 된다.

Fig. 12는 최강 창조시 정선 5~7에서 운동량 각 항의 크기를 수심별로 나타내었다. Fig. 12의 (a)에 나타낸 정선 5의 서쪽에서 운동량 분석을 살펴보면 수심이 상대적으로 낮은 정선 5의 서쪽에서 FD항이 매우 크게 나타난다. (b)와 (c)인 단면 중앙과 동쪽을 살펴보면 표층과 저층에서는 상대적으로 BC항이 크게 나타나지만 동쪽 중층의 약 25 m에서 AC항과 BC항, FD항의 비율이 6.08:3.01:1로 AC항이 크게 나타난다. 따라서 중층에서 서쪽방향의 흐름이 더욱 강하게 나타나는 것은 AC항의 크기와 관련 있음을 유추할 수 있고, 최강 창조시 정선 5에서의 흐름은 AC항과 BC, FD항의 균형으로 이루어진다.

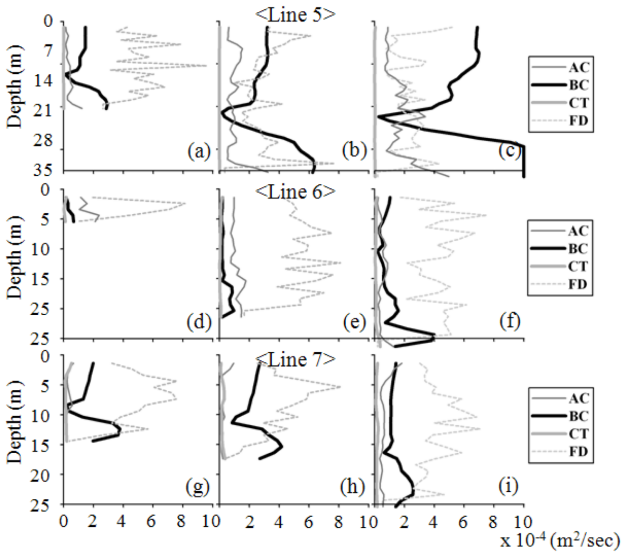


Fig. 12. In line 5~7, vertical variation of the lateral momentum terms during maximum flood tide. The west (left column), center (central column) and east (right column) of section are represented the terms using black or gray lines.

Fig. 12의 (d)~(i)에서 나타나듯 정선 6과 7에서는 FD항이 매우 크게 나타난다. 이 때, 정선 7에서는 BC항이 중층에서 줄어들었다가 저층으로 갈수록 다시 커지게 되는데 이때는 BC항과 FD항의 비율은 단면의 서쪽에서 1.06:1, 중앙에서 1.84:1로 FD항보다 BC항이 더 커지게 된다.

Fig. 13에는 정선 1~4에서의 최강 낙조시 수심별 운동량 분석을 수행한 결과를 나타내었다. 정선 1에서는 단면 평균된 BC항과 FD항의 비율이 2.13:1을 보여 비율이 2.76:1인 최강 창조시와 비교하여 BC항이 상대적으로 작아지고 FD항이 커지게 된다. 이와 비슷한 옆 방향 흐름을 보이는 정선 4에서는 최강 창조와 마찬가지로 표층과 저층에 비하여 중층에서 BC항이 작아지지만 이때의 크기는 창조에 비하여 매우 커지게 된다.

정선 1과 4에서는 3층 흐름 구조를 보이는데 이는 최강 창조시와 마찬가지로 주로 BC항과 FD항의 수심별 균형에 의한 흐름으로 보인다. Fig. 13의 (d)~(i)에 나타난 정선 2와 3의 경우, 최강 창조시와 마찬가지로 FD항이 매우 크게 나타난다. 이러한 모습은 두 조시에 대하여 비슷한 분포와 크기를 나타내는 것으로 보아 석모수로의 정선 2와 3은 수심과 조간대로 인하여 마찰항이 매우 우세한 지역임을 알 수 있다.

Fig. 14는 최강 낙조시 정선 5~7에서의 운동량 분석의 크기를 나타내었다. 정선 5는 관측이 수행된 정선 북쪽에 곶이 있는데 이로 인하여 낙조시 수렴하는 형태가 되고, 표층에서 서쪽 방향의 성분과 저층에서 동쪽 방향의 성분을 보이는 반

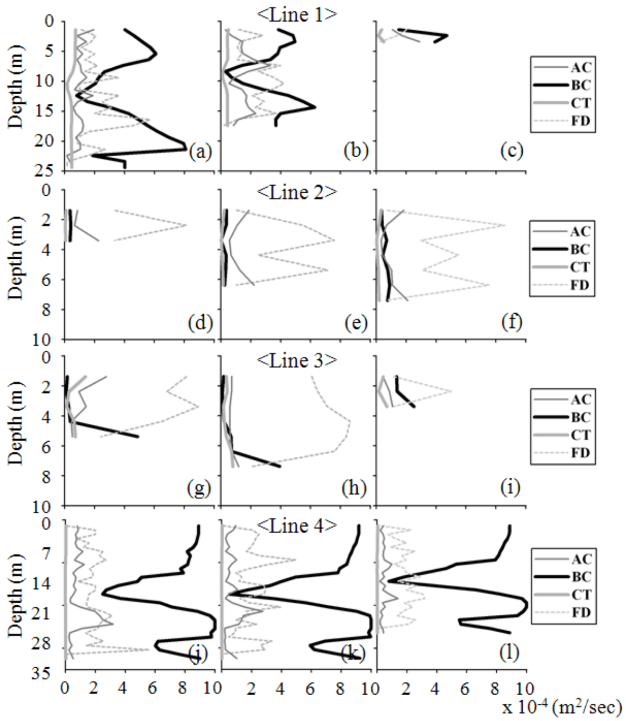


Fig. 13. In line 1~4, vertical variation of the lateral momentum terms during maximum ebb tide. The west (left column), center (central column) and east (right column) of section are represented the terms using black or gray lines.

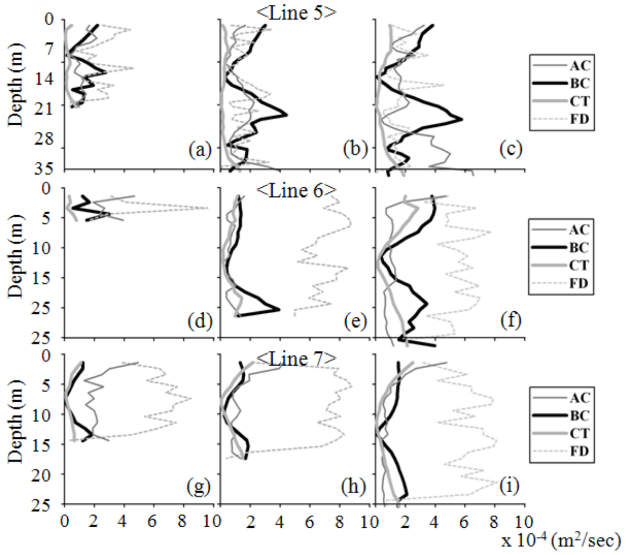


Fig. 14. In line 5~7, vertical variation of the lateral momentum terms during maximum ebb tide. The west (left column), center (central column) and east (right column) of section are represented the terms using black or gray lines.

시계 방향의 횡 방향 흐름이 뚜렷이 나타난다. Fig. 14의 (a)에서 나타난 수로의 서쪽에서는 FD항이 우세하지만 중앙의 경우 AC항과 BC항, CT항, FD항의 단면 평균 비율이 4.04:5.65:1:4.38이고, 동쪽의 경우 AC항과 BC항, CT항, FD항의 비율이 3.81:3.51:1:2.39로 나타난다. 이는 상대적으로 BC항과 FD항의 균형으로 운동량 분포가 형성되었던 다른 정선과 달리 AC항과 CT항이 커졌음을 의미한다.

반 시계 방향의 흐름이 분명하게 나타난 점은 낙조시 주 수로 방향의 흐름에 있어서 오른쪽으로 휘는 수로의 지형임에도 불구하고, CT항의 영향이 예상보다 작게 나타났음을 의미하며 이전 연구(Kim and Voulgaris, 2008)에서 나타나듯이 BC항이 우세한 점과 정선 북쪽 곶의 영향으로 판단된다.

정선 6의 서쪽과 중앙, 동쪽에서는 FD항이 우세하지만 서쪽의 단면 평균된 크기의 AC항과 BC항, FD항이 1.96:1:2.68의 비율로 AC항이 BC항보다 크게 나타나는 점을 알 수 있다. 단면의 동쪽의 경우 AC항과 BC항, CT항, FD항의 비율이 1:2.17:1.24:4.76의 비율을 보이고, 특히 표층에서는 1:2.19:1.31:2.85로 CT항의 비율이 더욱 크게 나타난다. 따라서 이전 연구(Kim and Voulgaris, 2008)와 같이 낙조시 오른쪽으로 휘는 수로의 지형에서의 힘의 균형에 의한 시계 방향의 횡단면 흐름이 나타나게 된다.

정선 7은 FD항이 매우 우세하지만 표층인 수심 5 m 부근에서는 AC항과 CT항이 커지게 된다. 또한 남북 방향의 흐름보다 동서 방향으로 흐르게 되기 때문에 낙조시 석모도 남쪽 지형의 영향을 받게 되는데 FD항이 매우 우세한 점을 고려하여 AC항과 BC항, CT항의 비율을 살펴보면 2.15:1.45:1로 다른 정선에 비해 AC항이 크게 나타나는 점을 알 수 있다.

4. 결 론

횡 방향 흐름을 나타내는 2차적 흐름(secondary flow)은 종 방향 유속에 비해 상대적으로 작지만, 운동량 분포 및 잔차류 등의 흐름에 있어서 영향을 미치게 된다. 이러한 석모수로의 2차적 흐름은 한강을 통하여 유입되는 많은 담수의 영향을 받게 될 것이고, S자형 수로 굴곡과 변하게 되는 수심 또한 영향을 미치게 될 것이다. 본 연구에서는 석모수로 각 정선에서의 횡 방향 흐름의 세기와 분포를 파악하고, 이를 일으키는 기작을 운동량 분석을 통해 파악하고자 하였다.

석모수로는 창조시 굴곡이 상대적으로 작고 폭이 넓으며 수심이 얕은 북단의 정선 1과 2를 지나 굴곡이 크고 폭이 좁으며 수심이 깊은 남단으로 흐르게 되는데 정선 3~5와 정선 6~7은 수로의 휘어진 방향이 반대이기 때문에 서로 다른 원심력을 갖는 S자형 수로이다. 소조기시임에도 불구하고 낙조시에는 폭이 좁은 정선에서 최대 1.3 m/s의 유속이 나타나며 북단에 비해 남단에 가까워질수록 담수의 영향이 작아지기 때문에 낮은 염분의 분포를 보인다.

이처럼 강한 유속과 굴곡, 담수의 영향으로 인하여 횡 방향 유속 또한 강하게 나타나게 되고 석모수로의 횡 방향 흐름에서는 마찰항과 경압력이 우세하지만 정선에 따라 다른 분포를 보이게 되어 창조와 낙조시 서로 다른 2차적 흐름을 만들게 된다. 2차적 흐름이 3층 흐름 구조를 나타나게 되는 북단의 정선에서는 경압력과 마찰항의 분포가 이러한 흐름을 만들게 된다. 이와는 달리 수심이 낮은 정선에서는 창조시와 낙조시에 따라 시계 방향, 또는 반 시계 방향의 2차적 흐름을 보이는데 수심의 영향으로 마찰항이 매우 우세하게 된다. 남단에서는 이와는 다른 분포를 보이는데 창조시 수로의 동쪽과 서쪽에서의 경압력과 마찰항의 분포에 따라 시계 방향의 2차적 흐름을 만들게 되고, 낙조시에는 수심에 따라 이류 가속항과 경압력, 마찰항, 원심력의 균형에 따라 시계 또는 반 시계 방향의 횡 방향 흐름을 보이게 된다.

조력 및 조류 발전에 대한 관심이 집중되고, 다양한 공사가 진행되고 있는 석모수로에서는 관측의 어려움으로 인한 이전의 연구가 매우 부족한 상태이고 개발 이전의 수리 역학적 분석이 필요하기 때문에 본 연구 이후에도 대조기 관측 및 상세한 종 방향 운동량 분석 등 추후 연구가 진행되어야만 한다.

감사의 글

이 논문은 2012년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(2012년도 경기씨그랜트사업).

참고문헌

이동환, 윤병일, 김종욱, 구본호, 우승범 (2012). 단면 관측을 통

한 경기만 염하수로의 대조기 평수시와 홍수시 유출입량 변화특성 조사. 한국해안 · 해양공학회, 24(1).

최낙용, 윤병일, 김종욱, 송진일, 임은표, 우승범 (2012). 대, 소조기시 한강하구 석모수로에서 단면 잔차류와 성층간의 관계 연구. 한국해안 · 해양공학회, 24(3).

Buijsman, M. C. and Ridderinkhof H. (2008). Variability of secondary currents in a weakly stratified tidal inlet with low curvature. Continental Shelf Research, 28, 1711-1723.

Csanady, G. T. (1975). Lateral momentum flux in boundary currents. Journal of Physical Oceanography 5, 705-717.

Chant, R. J. and Wilson, R. E. (1997). Secondary circulation in a highly stratified estuary, J. Geophys. Res., 102, 23,207-23,215.

Chant, R. J. (2002). Secondary circulation in a region of flow curvature: Relationship with tidal forcing and river discharge. J. Geophys. Res., 107(C9), 3131.

Fischer, H. B. (1973). Longitudinal Dispersion and Turbulent Mixing in Open-Channel Flow. Annual Review of Fluid Mechanics 5, 59-78.

Fischer, H. ., List, E. J., Koh, H. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. A. (1979). Mixing in inland and coastal waters. Academic' Press, 483 pp.

Geyer, W. R. (1993). Three-dimensional tidal flow around headlands. J. Geophys. Res., 98, 955-966.

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

Kalkwijk, J. P. T. and De Vriend, H. J. (1980). Computation of the flow in shallow river bends. Journal of Hydraulic Research 18, 327-342.

Kalkwijk, J. P. T. and Booij, R. (1986). Adaptation of secondary flow in a nearly-horizontal flow. J. Hydraul. Res., 24, 19-37.

Kim, C. S., Lim, H. S. and Kim, S. J. (2009). Residual flow and its implication to macro-tidal flats in Kyunggi Bay estuary of Korea. Journal of Coastal Research, Special Issue 56.

Kim, Y. H. and Voulgaris, G. (2008). Lateral Circulation and Suspended Sediment Transport in a Curved Estuarine Channel, Winyah Bay, South Carolina, USA. Journal of Geophysical Research, Oceans, 113.

Lacy, J. R. and Monismith, S. G. (2001). Secondary currents in a curved, stratified, estuarine channel. J. Geophys. Res., 106, 31,283-31,302.

Lacy, J. R., Stacey, M. T., Burau, J. R. and Monismith, S. G. (2003). Interaction of lateral baroclinic forcing and turbulence in an estuary. J. Geophys. Res., 108(C3), 3089.

Lerczak, J. A. and Geyer, W. R. (2004), Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. J. Phys. Oceanogr., 34, 1410-1428.

Li, C. Y. and O'Donnell, J. (1997). Tidally driven residual circulation in shallow estuaries with lateral depth variation. J. Geophys. Res., 102, 27,915-27,929.

Park, K., Oh, J. H., Kim, H. S. and Im, H. H. (2002). Case study: Mass transport mechanism in Kyunggi Bay around Han River Mouth, Korea. J. Hydraulic Eng, 128(3), 257-267.

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

Ralston, D. K. and Stacey, M. T. (2005). Longitudinal dispersion and lateral irculation in the intertidal zone. J. Geophys. Res., 110 (C7), C07015.

Pacanowski, R. C. and Philander, S. G. H. (1981). Parameterization of vertical Mixing in numerical model of Tropical Oceans. Journal of Physical Oceanography 11, 1443-1451.

Seim, H. E. and Gregg, M. C. (1997). The importance of aspiration and channel curvature in producing strong vertical mixing over a sill. J. Geophys. Res., 102, 3451-3472.

Valle-Levinson, A. and Atkinson, L. (1999). Spatial Gradients in the Flow Over an Estuarine Channel. Estuaries 22, 179-193.

Valle-Levinson, A., Wong, K. C. and Lwiza, M. M. (2000). Fortnightly variability in the transverse dynamics of a coastal plain estuary, J. Geophys.Res., 105, 3413-3424.

Webb, B. M., King, J. N., Tutak, B. and Valle-Levinson, A. (2007). Flow Structure at a Trifurcation near a North Florida inlet. Continental Shelf Research, 27, 1528-1547.

원고접수일: 2012년 10월 22일
수정본채택: 2012년 12월 14일
게재확정일: 2012년 12월 21일

View publication stats