한국해안 · 해양공학회논문집
제 24 권 제 3 호, pp. 149~158, 2012년 6월

대 · 소조기시 한강하구 석모수로에서 단면 잔차류와 성층간의 관계 연구

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

최낙용* · 윤병일* · 김종욱* · 송진일* · 임은표** · 우승범*
Nak Yong Choi*, Byung Il Yoon*, Jong Wook Kim*, Jin Il Song*, Eun Pyo Lim**
and Seung-Bhum Woo*

요 지 : 본 연구는 강화도 서측에 위치한 조력 발전 유력 후보지인 석모수로의 북단과 남단의 2개 정선에서 13시간 연속으로 단면 유속과 염분 관측을 대,소조기시 각각 수행하여 단면 내 잔차류의 변화와 성층간의 관계를 분석하였다. 석모수로의 염분 분포는 대,소조기에 따라 서로 다른 염분 구조 형태를 보이며, 염분의 침입 범위 또한 다르게 나타난다. 잔차류 성분은 13시간 유속 성분에서 최소 자승법을 이용하여 추출한 M_2분조와 M_4분조를 제거하여 구하였고, 석모수로 북단과 남단에서 표층의 잔차류 성분은 모두 남쪽 방향의 잔차류 성분을 보인다. 그러나 두 정선의 단면 저층에서는 표층과 저층간의 2층 흐름 구조를 만드는 북쪽 방향의 잔차류가 관측되는데 그 위치는 대,소조기에 따라 다르게 나타나 시,공간적으로 다른 결과를 보인다. 북쪽 방향의 잔차류와 성층의 관계를 분석하기 위해서 Richardson number와 Simpson-hunter index를 분석하였다. 이러한 결과를 종합할 때, 석모수로의 단면 잔차류 패턴은 Richardson number가 상대적으로 급격하게 커지고 Simpson-hunter index가 4 이상 나타나는 지역, 즉 성층이 강하게 나타나는 지역에서 2층 흐름 구조를 보인다.

핵심용어 : 한강하구 석모수로, 잔차류, 성층, 연직 혼합

Abstract : This study analyzed cross-sectional variations in residual current and strengths of stratification by observing cross-sectional velocity and salinity during spring tide and neap tide, respectively, for continuous 13-hour periods at 2 observation lines at northern and southern end of Seokmo Channel, which is located west of Ganghwado. Salinity distribution of channel depends on not only neap and spring tide but also impact of salinity. The residual current component was obtained by removing M_2 and M_4 tidal components that were extracted using the least squares method on 13-hour velocity component. Cross-section of residual velocity at northern and southern end of Seokmo Channel exhibited southward residual components at channel's surface layer, but northward residual current was observed at channel's bottom layer, clearly showing a 2-layer tidal circulation between surface and bottom layers. The variation in location of appearing northward residual current according to changes in spring and neap tidal cycle and its correlation with stratification were analyzed using the Richardson number and Simpson-hunter index. At northern and southern end of Seokmo Channel, northward residual current appears in the location where Richardson number is large, Simpson-hunter index appears as a value greater than 4.

Keywords : Seokmo channel, Han River estuary, residual current, stratification, Richardson number, Simpson-hunter index

1. 서 론

대한민국 서해 중부 연안에 위치한 경기만 한강 하구역은 반일주조가 우세한 반 폐쇄성 해역으로 대조차가 약 7.9 m 이고, 소조차가 약 3.5 m인 지역이다. 이러한 큰 조차로 인하여 조간대가 넓게 발달되어 있고, 복잡한 해안선과 여러 수로로 연결되어 있어 독특하고 복잡한 하구 순환 형태를 보인다 (Park et al., 2002; 윤, 2006; 송과 우, 2010). 한강, 임진강 그리고 예성강으로부터 유입되는 담수는 하구순환에 많은 영향을 미치며, 육지에서 유입되는 오염물질은 한강 하구역의

* 인하대학교 해양과학과 (Corresponding auther : Seung-Buhm Woo, Department of Oceanography, College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea. sbwoo@inha.ac.kr)
** (주)한국해양과학기술 부설연구소 (Korea Ocean Science&Engineering Corp. Rm 503, Byucksan Digital Valley III, Guro-Dong, Guro-Gu, Seoul, 152-775, Korea)

해양환경 변화에 아주 밀접하게 관련되어 있다.

한강 하구는 간척 사업과 인천 대교, 국제 공항 건설로 인해 해수 유동과 해저 지형이 지속적으로 변해왔다. 이 중에서도 한강 하구의 강화도 석모수로는 조력 발전 사업을 포함한 각종 개발이 추진되고 있어 사업 이전에 해수의 흐름과 담수 유입으로 인한 영향, 염분 분포 등의 특성에 대해 면밀하게 파악해야 할 필요성이 있다. 본 연구지역인 강화도 서쪽에 위치한 석모수로는 평균 폭 1.4 km, 길이는 15.9 km에 이르고 S자형 굴곡을 가진 수로로서 수로의 중앙이 가장 좁고 남북단의 넓은 특성을 보이며, 수로의 북단 동쪽에는 사주가 길게 분포하고 있다.

해수 흐름의 대표적인 특성 중 하나인 조석 잔차류는 일반적으로 해수 흐름에서 조석 성분을 제거한 흐름으로 정의되고(Kreeke, 1992), 연안 환경의 수리 특성에서 해양오염과 환경 변화에 대한 거동을 해석하기 위한 기본적 수단으로 사용된다. 경기만에서의 조석 잔차류 연구는 윤(2006), 송과 우(2011)와 이 등(2012)에 의해 연구된 바 있으며, 김 등(2010)은 본 연구 지역 주변인 강화 석모수로 남단 해저 면에서 음파식 유속계의 장기 관측된 자료를 이용하여 조석 잔차류를 산정하였다.

석모수로의 경우에는 지리적 위치 때문에 접근이 쉽지 않고, 수심이 얕으며 조류가 강해 관측에 어려움이 많다. 기존 연구에서 수행된 정점 조류관측 위치는 석모수로의 S자형 수로의 바깥에 존재하여 석모수로에서의 잔차류 등의 변화를 알 수 없다. 또한, 정점 관측은 한 정점에서만의 관측 자료를 획득할 수 있으므로 수로 단면에서의 물리적 특성에 대한 공간적인 분포를 파악할 수 없다는 한계가 있다.

수치 모델을 이용한 기존의 연구 역시 입력 자료와 계수 등에 의한 예측의 한계성이 존재한다(윤, 2006; 송과 우, 2011; 이 등, 2012). 그러나 정점 조류 관측의 경우, 단면 조류 관측에 비해 장기적인 자료 획득이 가능하고, 수치 모델의 경우에는 관측의 시간적, 공간적 한계성을 보완할 수 있다는 장점이 있다.

대,소조기시 2회의 관측 자료가 대표성을 나타내기에는 한계가 있지만 13시간 단면 연속 관측을 통하여 잔차류 산정을 한 과거 연구(Nepf and Geyer, 1996; Elias and Stive, 2006; Framinan et al, 2008; 이 등, 2012)와 같이 본 연구의 목적인 석모수로 단면에서의 공간적인 분포를 파악할 수 있고 잔차류 특성을 정량적으로 산정할 수 있다.

2. 연구 지역 및 방법

2.1 현장 관측 방법 및 자료 획득

본 연구를 위한 관측은 2011년 8월 24일부터 31일 사이

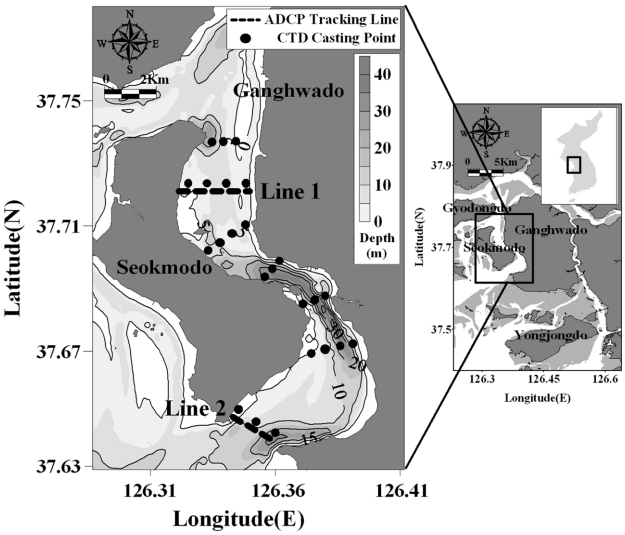


Fig. 1. Map of study area. Left panel is shown an enlarged view of the Seokmo channel showing the location of the survey lines.

강화도와 석모도 사이에 위치하는 석모수로 지역에서 13시간 동안 4일간 수행되었다(Fig. 1). 관측 장비는 석모수로의 북단인 정선 1(Line 1)과 남단인 정선 2(Line 2)에서 RDI사의 600 kHz Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)를 사용하였다(Table 1). 단면 유속관측은 선박에 ADCP를 장착하고 수로를 횡단하면서 관측하는 방법으로 장비와 GPS가 연동되어 실시간 관측위치를 전송 받으며 습득한 데이터로 유속을 출력한다. 관측은 1시간 간격으로 13시간 동안 2개의 정선에서 총 13회 관측하였으며 안정된 자료 획득을 위하여 선박의 이동속도는 평균 4~5 knot를 유지하였다. 선박에 장착된 ADCP는 해수면 하 0.8 m에 설치 되었고, 자료는 1 m의 수심 간격으로 층별 유속 및 유향 자료를 획득 하였다. 이와 함께 ADCP를 관측한 정선과 동일한 위치 및 석모수로 정점에서 Conductivity Temperature Depth(CTD)를 이용하여 층별 수온 및 염분을 13시간 동안 1시간 간격으로 관측하였다.

관측은 소조와 대조기시 실시되었으며 이 때의 조차는 소조기 2.5 m, 대조기 9.3 m이다. 또한 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 정의하였다(Fig. 2). Fig. 2에서 회색 실선은 관측을 수행한 일시의 조석과 담수 조건을 나타내고, 소

Table 1. Bottom tracking observation information

Observated Line	Date	Duration (hour)	Instrument	Interval (min)
Line 1	Neap tide (2011/08/24)	11	ADCP(600kHz)/CTD	60
	Spring tide (2011/08/30)	13		
Line 2	Neap tide (2011/08/25)	13		
	Spring tide (2011/08/31)	13		

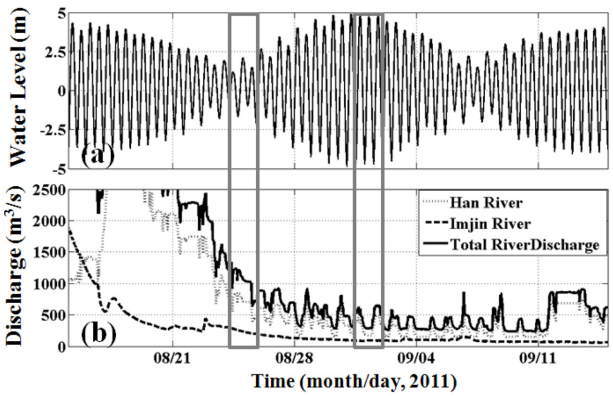


Fig. 2. Series of graphs illustrating the daily variability at Seokmo channel. Observation period of the survey lines used for this study. (a) The water level from Inchoen, (b) River discharge from Han River and Imjin River at Paldang dam, Gunnam dam, Jeongok dam.

조기의 담수 유입량은 Fig. 2(b)에서 나타나듯 홍수시이기 때문에 대조기에 비해 3배 가량 많다. 이러한 담수 유입량의 차이에 의해 대,소조기에 따라 해수 흐름이 다르게 나타나고, 다른 염분 구조를 보이게 된다.

2.2 자료처리

ADCP에서 관측된 원시자료는 연구 목적에 맞게 자료 처리가 수행되어야 한다. 본 연구에서는 기존의 Vall-Levinson and Atkinson (1999) 등이 사용한 방법인 원시자료에서 획득되는 수평적 10개의 자료를 1개의 값으로 평균하는 방법을 사용하였다. 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 종 방향과 횡 방향의 새로운 좌표계로 선형변환 하는 기법으로 가장 지배적인 성분의 분석이 가능하다(Preisendorfer and Mobley, 1988).

이 등(2012)의 연구에서 수행된 방법으로 수직 및 수평적 Sigma 좌표 변환을 수행하였다. 본 연구지역과 같이 대조차가 8 m이상 되는 지역에서 z-level상의 데이터(표층에서 저층까지 관측된 절대 수심)만을 이용하여 조화분해를 하게 되면 저조시의 표층 값이 고조시의 표층 하 8 m의 값, 즉 표층 이하의 중층 값과 조화분해를 하게 되는 오류를 범할 수 있기 때문에 관측된 수심을 Sigma좌표의 수심으로 변환하는 무차원화(normalize) 과정을 수행하였다.

3. 관측 결과 및 분석 결과

3.1 최강 창조 및 최강 낙조시의 유속

Fig. 4(a)~(d)는 석모수로 정선 1에 대한 대,소조기시 주 수로 방향의 최강 창조 및 낙조의 유속이고 Fig. 4(e)~(h)는 정선 2에 대한 유속을 보여준다. 유속 그림 및 본 연구에서 제시하는 모든 단면 그림은 외해(남쪽)에서 바라본 수로의 단면이기 때문에 그림의 왼쪽은 서쪽을 의미하고, 오른쪽은 동쪽을 의미한다. 또한 Fig. 4의 단면은 실제 관측이 수행된 단면으로 매 조시마다 동일한 경로와 유속으로 관측을 수행하는데 어려움이 있기 때문에 수심이 다르게 나타낸다.

소조기 정선 1의 경우 최대 0.89 m/s의 창조 유속(Fig. 4(a))이 1.36 m/s의 낙조 유속(Fig. 4(c))보다 더 약하게 나타난다. 대조기시에는 소조기에 비하여 더 강한 유속이 나타나게 되는데 1.84 m/s의 창조 유속(Fig. 4(b))과 2.41 m/s의 낙조 유속(Fig. 4(d))이 관측되었다. 정선 2의 경우 소조기시 0.98 m/s의 창조 유속(Fig. 4(e))과 1.56 m/s의 낙조 유속(Fig. 4(g)), 대조기시 2.39 m/s의 창조 유속(Fig. 4(f))과 2.53m/s의 낙조 유속(Fig. 4(h))이 관측 되었다. 주 수로 방향의 유속이 아닌 속도를 살펴보면 단면에 대한 최대 유속은 정선 2에서 정선 1에 비해 더 강하지만 대조기시 단면 평균 유속은 정선 1에서 정선 2에 비해 강하게 나타남을 알 수 있다(Table 2).

바닥 마찰과 담수 유입으로 인하여 저층에서보다 표층에서의 유속이 상대적으로 강하게 나타나고, 정선 2의 경우, 단면의 왼쪽인 서쪽보다 단면의 오른쪽인 동쪽에서 상대적으로 더 강한 유속이 나타난다. 이는 정선 2의 PCA분석 결과(Fig. 3)에서 나타나듯 단면의 방향이 남북을 향하지만, 해수는 남서와 북동으로 흐르기 때문에 동쪽에서 더 강하게 흐르게 된다. 점선으로 표시한 부분은 단면 해수의 흐름과 반대방향으로 흐르는 지역을 구분하는 경계선인데 최강 유속임에

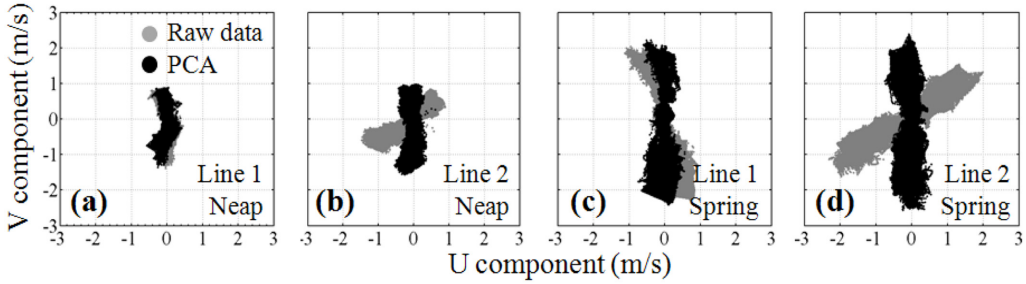


Fig. 3. PCA analysis results. (a) Line 1 during neap tide, (b) Line 2 during neap tide, (c) Line 1 during spring tide, (d) Line 2 during spring tide.

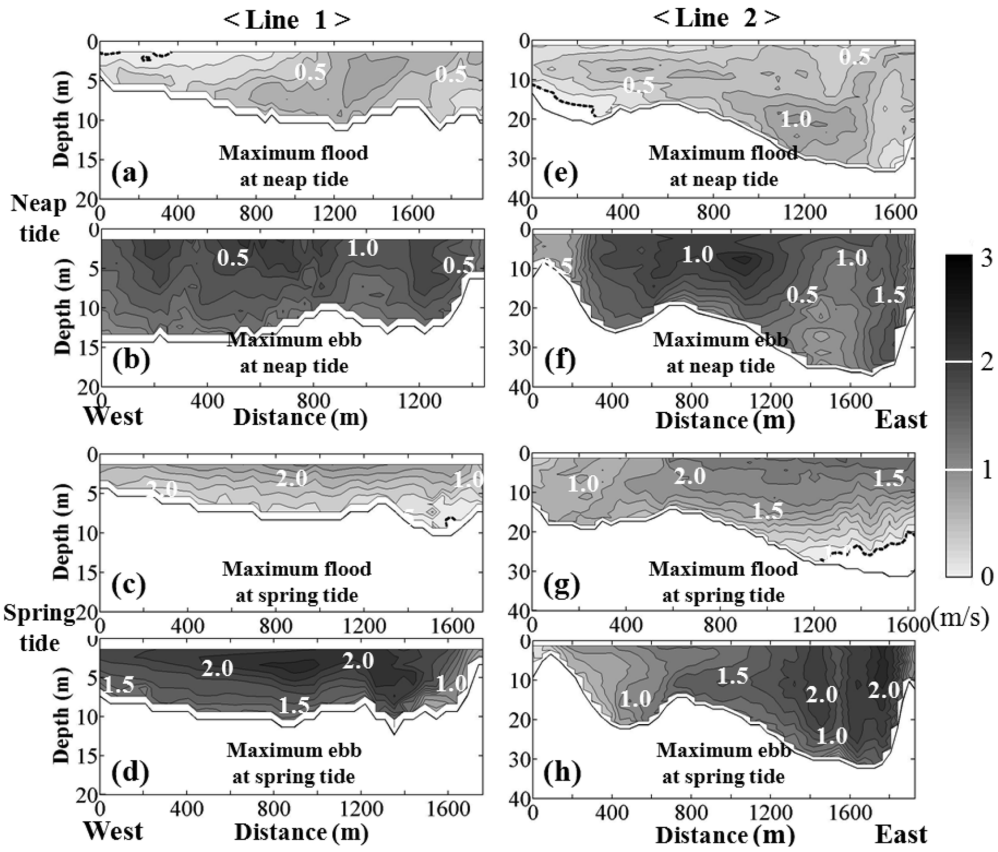


Fig. 4. The along-channel velocity distribution at line 1 and 2 (looking toward the north). Left panel is a figure of line 1, right panel is a figure of line 2.

Table 2. Speed at line 1, line 2. Cross-sectional averaged flow speed and maximum speed values are shown during maximum flood and ebb

Observated Line	Moon age	Time	Mean speed (m/s)	Maximum speed (m/s)
Line 1	Neap tide	Maximum flood	0.43	0.90
		Maximum ebb	0.62	1.36
	Spring tide	Maximum flood	1.65	2.24
		Maximum ebb	1.76	2.41
Line 2	Neap tide	Maximum flood	0.45	0.99
		Maximum ebb	0.81	1.63
	Spring tide	Maximum flood	1.52	2.40
		Maximum ebb	1.35	2.47

도 불구하고 반대방향으로 흐르는 유속이 나타나는 이유는 강한 담수의 유입 또는 지형적인 원인에 인한 흐름으로 판단되지만 추후 지속적인 연구가 필요하다. 각 단면 유속의 최강창, 낙조와 평균 유속을 비교할 때, 담수 유입과 S자 지형의 영향으로 인한 유속 차이는 대,소조기 및 위치에 따라서 단면의 표층과 저층, 동쪽과 서쪽에서 분명하게 나타난다.

3.2 평균 염분

유속 관측과 더불어 염분을 정선 1의 4개, 정선 2의 3개를 포함한 총 24개 정점에서 관측하였고(Fig. 1), 대조기와 소조기시 표층과 저층에 대한 수평적인 평균 염분분포를 선형 보간법(Interpolation)을 이용하여 석모수로 전체에 나타내었다(Fig. 5). 등염분선은 5~25 psu의 범위에서 1 psu의 간격을 실선으로 표시하였다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 소조기 염분 분포를 보면 표층에서 5~16 psu, 저층에서 15~21 psu의 분포가 나타난다. 표층에서는 정선 1과 정선 2의 염분 차이가 저층에 비해 더 많이 나타난다. 이는 정선 2에 비해 정선 1에서 담수 유입의 영향이 클 뿐만 아니라 해수의 영향이 더 적게 나타나게 되고, 석모수로의 북단에서 남단으로 갈수록 표층과 저층간의 염분 차가 줄어들게 됨을 의미한다. 대조기시 Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)를 비교해 보면, 표층에서 12~19 psu의 분포를 나타내고 저층의 경우 13~21 psu의 분포가 나타나며, 표층과 저층간의 염분차이는 소조기에 비해 크지 않다. 그러나 소조기와 마찬가지로 북단인

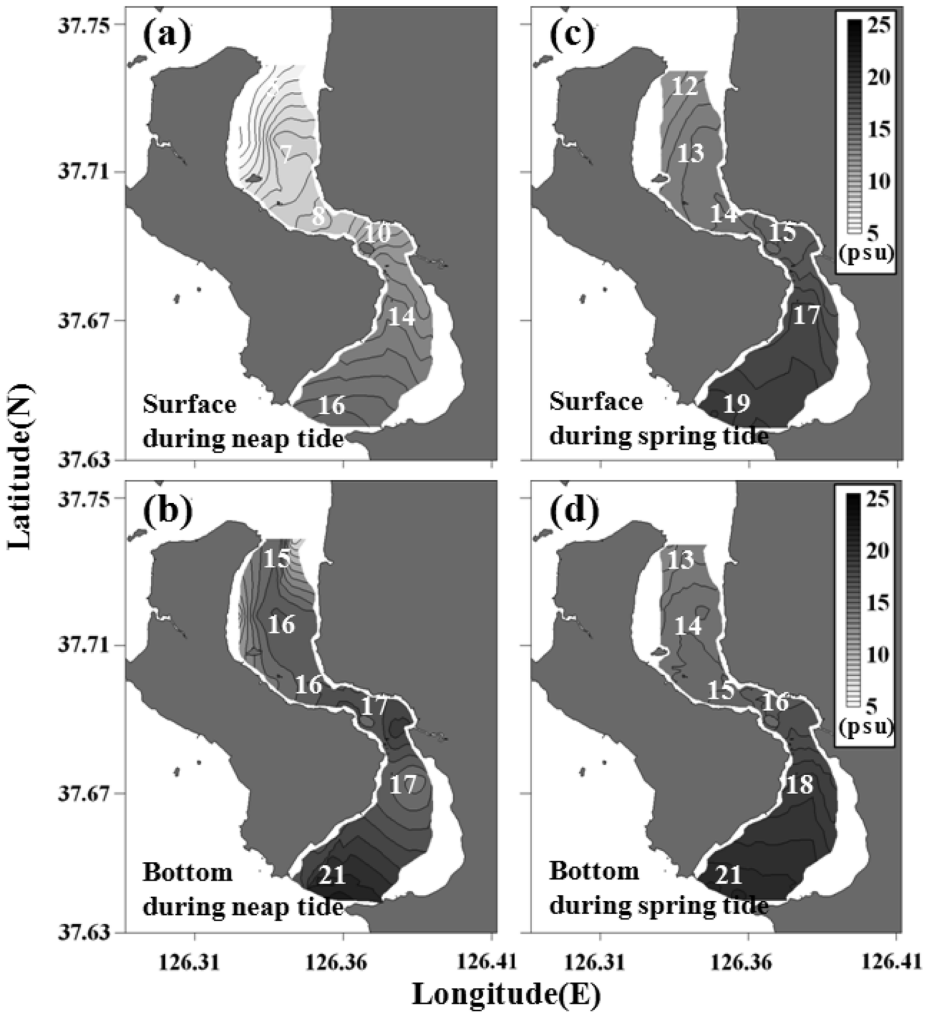


Fig. 5. Tidally averaged horizontal distribution of salinity at Seokmo-channel. Isohalines are drawn in black and salinity values are printed in white.

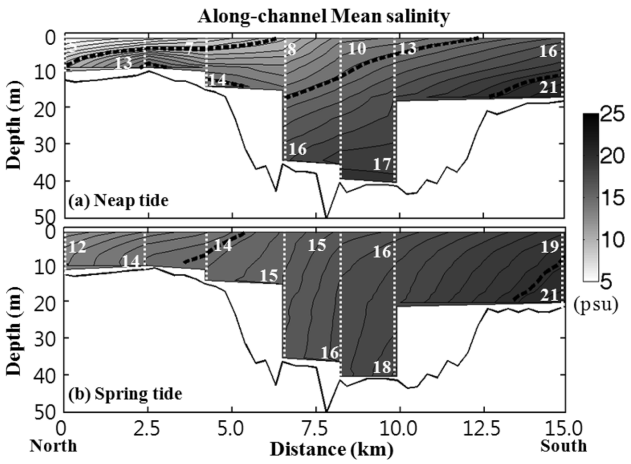


Fig. 6. Tidally averaged vertical distribution of salinity in the middle of Seokmo-channel. Isohalines are drawn in black and salinity values are printed in white. The measurement points are drawn in white. (a) mean salinity during neap tide, (b) mean salinity during spring tide.

정선 1에 비해 남단인 정선 2에서는 높은 염분이 관측되었다.

Fig. 6에는 수로 전체의 수직적인 분포를 나타내기 위해 주수로 방향의 평균 염분을 나타내었다. 수평적인 분포와 마찬가지로 등염분선은 5~25 psu의 범위에서 1 psu의 간격을 실선으로 표시하였다. Fig. 6의 노란 점선은 실제 관측된 정점을 나타내고 평균 염분이 나타나지 않는 공간은 관측이 이루어지지 않았기 때문에 도시하지 않았다. 소조기에는 대조기보다 많은 담수의 유입으로 인하여 염수쐐기의 형태가 석모수로에서 나타나고, 대조기에는 담수량이 적었기 때문에 염분의 수직적 분포가 소조기에 비해 혼합이 상대적으로 강한 형태를 보인다.

3.3 13시간 잔차류 및 평균 염분

잔차류란 조석 현상에 의해 생긴 해수의 흐름에서 조석 성분을 제거한 순수 해수의 이동을 의미한다(Kreeke, 1992). 본 연구에서의 정선 관측 자료는 13시간 동안의 단기간 관측 자료이기 때문에 전 관측 기간 동안 자료의 평균으로 잔차류를 정의하기엔 무리가 있으며, 일 단위 주기로 변하는 단주기 전 파특성을 파악 할 수가 없다. 따라서 주기가 13시간 이하인 M_2와 M_4분조를 최소자승법(Least squares method)를 이용하여 추출 한 후 반복 관측된 각 셀의 값에서 이를 제거한 값

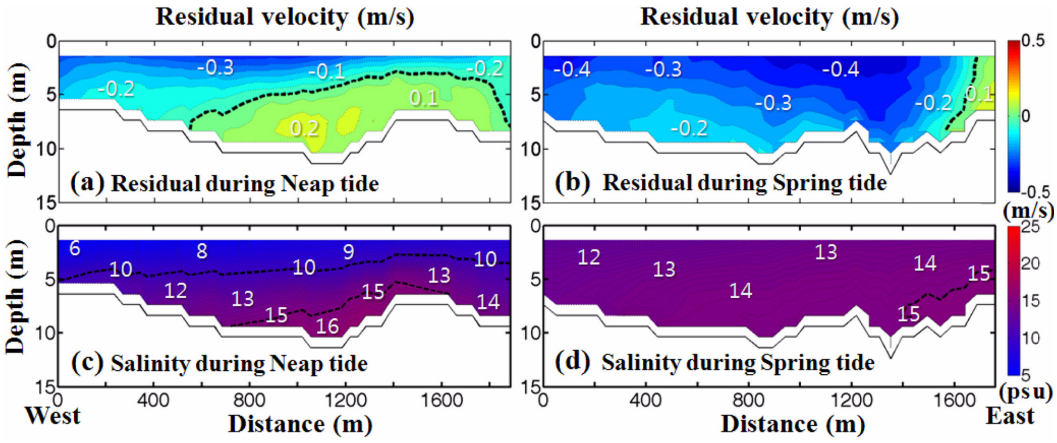


Fig. 7. Across-channel distribution of along-channel residual flow at line 1 in the middle region of the figure (looking toward the north). (a) residual flow at line 1 during neap tide, (b) residual flow at line 1 during spring tide. Positive value is northward residual current. Residual current velocity is shown in the upper panel and tidally averaged salinity distribution is shown the lower panel(c, d).

을 잔차류라 정의 하였다(Lwiza et al., 1991). 이러한 방법은 Valle-Levinson and Atkinson(1999), Webb et al.(2007)에서 제시된 것으로 13시간 평균 유속에서 반일주조 성분과 배조를 분리해낸 유속이라 할 수 있다. 또한 국내 염하수로에서 이 등(2012)이 이와 같은 방법으로 연구 된 바 있다. M_2와 M_4분조 이외의 크기가 상당한 S_2분조는 최소자승법을 이용하여 분리해내기 위해서 15일 이상의 관측 기간이 필요한데 본 연구의 관측 기간인 13시간의 자료만으로는 S_2분조를 제거하는데 한계가 있다.

$$v_0 = v - \sum A_n cos(w_n - \Phi_n) \quad (1)$$

여기서 v는 13시간 평균된 주 수로 방향의 유속(along-channel velocity)이고, v_0는 잔차류 유속(residual current)이다. A_n은 진폭, w_n은 각속도 그리고 Φ_n은 위상각을 나타낸다. CTD 관측은 ADCP 관측과 동시에 수행하였기 때문에 염분 및 수온 결과를 유속 격자와 마찬가지로 Sigma격자로 표현한 뒤 평균 염분 값을 구하였다.

Fig. 7에는 정선 1의 소조와 대조기시 단면 잔차류 분포를 나타내었고, 이와 함께 13시간 평균 염분의 분포를 도시하였다. 북쪽을 향하여 바라본 단면이기 때문에 양의 유속 값은 북쪽 방향을 향해 흐르는 잔차류가 되고, 음의 유속 값은 남쪽을 향해 흐르는 잔차류가 된다. 또한 잔차류 분포에서의 검은 점선은 0 m/s의 경계를 나타내고, 평균 염분 분포의 검은 점선은 5 psu 단위의 경계를 나타낸다. 소조기시 정선 1에서의 잔차류는 표층의 담수 유입으로 인해 표층 전체에서 최대 0.34 m/s의 남쪽 방향 잔차류가 우세하였지만 저층에서는 이와 반대로 최대 0.13 m/s의 북쪽 방향의 잔차류가 나타난다. 이 때 북쪽 방향의 잔차류는 수로 단면의 중앙 지역에서 나타났다(Fig. 7(a)). 평균 염분 또한 북쪽 방향의 잔차류가 나타나는 구역인 중앙에서 높게 관측되었다(Fig. 7(c)). 이와 같은 잔차류의 경향은 수로 단면에 대한 낙조시와 창조시의 유속 분포가 서로 다르기 때문인데 소조기시 정선 1의 경우, 전 단면에서 비슷한 낙조 유속을 갖는 반면 단면의 중앙에서 창조 유속이 가장 강하기 때문에 중앙의 저층에서 창조 방향인

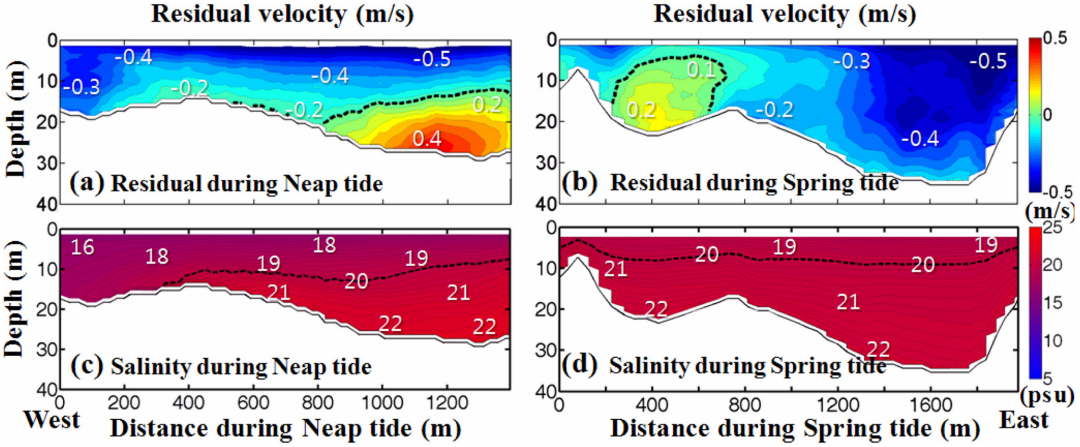


Fig. 8. Across-channel distribution of along-channel residual flow at line 2 in the middle region of the figure (looking toward the north). (a) residual flow at line 2 during neap tide, (b) residual flow at line 2 during spring tide. Positive value is northward residual current. Residual current velocity is shown in the upper panel and tidally averaged salinity distribution is shown the lower panel(c, d).

북쪽 방향의 잔차류가 분포하게 된다.

대조기의 경우, 평균 염분이 높은 구역에서 최대 0.13 m/s의 북쪽 방향 잔차류 성분과 그 외 구역에서 최대 0.40 m/s의 남쪽 방향 잔차류 성분이 분석되었다(Fig. 7(b)). 이 때 저층의 북쪽 방향 잔차류가 나타나는 구역은 소조기에 비해 더 동쪽으로 이동하여 나타난다. 이는 대조기의 창조 유속이 단면에 대하여 비슷한 분포를 갖는 반면, 수로의 동쪽에서 낙조 유속이 약하게 흐르기 때문에 북쪽 방향의 잔차류는 동쪽에서 나타난다. 정선 1의 동쪽 지역은 사주로 인하여 관측하지 못하였는데 이 사주의 마찰이 원인이라 추측되어 진다.

Fig. 8에는 정선 2에서의 소조와 대조기시 평균 염분 및 잔차류의 분포를 도시하였다. 소조기에는 0.54 m/s의 남쪽 방향 잔차류와 수로의 동쪽에서 최대 0.43 m/s의 북쪽 방향의 잔차류가 나타난다(Fig. 8(a)). 평균 염분 역시 수로의 동쪽에서 높게 관측되는데 이는 단면에 대하여 비슷한 낙조 유속 분포를 갖고 동쪽에서 창조 유속이 상대적으로 강하게 흐르기 때문이다.

Fig. 8(b)와 Fig. 8(d)에 나타난 대조기의 경우에는 최대 0.22 m/s의 북쪽 방향의 잔차류 성분과 0.68 m/s의 남쪽 방향의 잔차류 성분이 관측되고, 평균 염분이 고르게 분포될 만큼 혼합된 형태이다. 정선 2의 대조기시에는 남쪽 방향의 잔차류 성분이 매우 강하게 나타나고, 북쪽 방향의 잔차류 성분이 소조기와 다르게 수로 단면의 왼쪽인 서쪽에 치우쳐져서 나타난다.

3.4 성층과 잔차류의 관계

관측 결과에서 나타나듯이 본 연구지역인 석모수로는 북단과 남단 간의 거리차이가 약 12 km 임에도 불구하고 두 정선간의 염분차이가 크게 나타나고(Fig. 5), 이러한 공간적인 염분 차이에 의한 밀도 차이는 해수에 많은 영향을 미친다(Geyer and Smith, 1987). 담수의 영향을 많이 받는 지역이기 때문에 수평적인 영향과 마찬가지로 수직적으로 염분차이가 나타나게 되어 2층 염분 구조가 확연히 나타난다. 잔차류의 분포를 살펴보면, 정선 1과 정선 2에서 대,소조기에 따라 잔차류 분포 경향이 달라지는 점을 알 수 있다. 정선 1의 경우, 대조기시 저층의 북쪽 방향 잔차류가 소조기에 비하여 상대적으로 동쪽에서 나타나고, 정선 2의 경우에는 대조기시 저층의 북쪽 방향 잔차류가 소조기에 비하여 서쪽에서 나타나게 된다. 이러한 잔차류 위치 변화에 성층이 미치는 영향을 알아보기 위해 성층과 연직 혼합의 척도를 나타내는 지표(index)를 분석하였다.

수로 단면에 대한 성층의 정도는 부력진동수(N^2)와 수직적 유속 전단응력(S^2)의 비를 나타낸 척도인 Richardson number(Ri)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$Ri = \frac{g}{\rho}\frac{\partial\rho/\partial z}{[(\partial U/\partial z)^2+(\partial V/\partial z)^2]} = \frac{N^2}{S^2} \quad (2)$$

이 때, g는 중력 가속도, ρ는 밀도, U는 횡 방향 유속(across-channel velocity), V는 주축 방향 유속(along-channel velocity)를 의미한다. 실험과 관측을 통한 연구에 의하면 Ri의 전단 불안정성(shear instability)의 한계점으로 0.25~0.33의 값이 제시되었다(Simpson and Briiter, 1979). 임계 값보다 작게 되면 성층 구간은 깊이에 따라 선형적인 모습을 나타나게 되지만(Geyer and smith, 1987) 임계 값보다 크게 되면 유속의 방향이 다르게 나타나거나 속도 값의 차이가 크게 나타난다.

이를 본 연구지역인 석모수로 잔차류의 변동 특성과 함께 비교하기 위하여 관측 결과를 통해 Ri를 구하였다. 이 때의 밀도는 보간법을 이용하여 계산된 밀도가 아닌 CTD Casting 시 관측된 염분 값을 이용하였다. 또한 Ri를 구하기 위해서

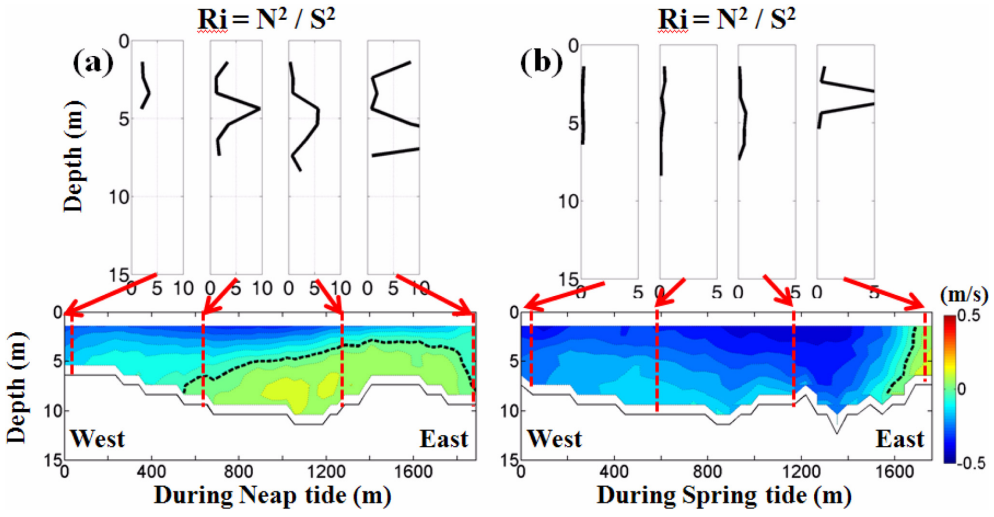


Fig. 9. Top layer in the figure shows that tidal averaged Richardson number calculated at CTD casting (red dotted line) at line 1. Results during neap tide are shown on left panel, during spring tide are shown on right panel. Bottom panel shows residual velocity in along-channel direction for comparison (looking toward north). In line 1, (a) Richardson number during neap tide, (b) Richardson number during spring tide.

는 밀도뿐만 아니라 유속 결과가 필요한데 이 때의 유속은 CTD 관측이 수행된 위치에 해당하는 유속 결과를 이용하여 Ri를 구하였다.

Fig. 9에 13시간 평균 된 Ri와 잔차류의 분포를 함께 도시하였다. 13시간 평균을 의미하는 잔차류와 비교를 하고, 단면의 어느 구역에서 성층의 강도가 더 큰지 알아 보기 위하여 Ri를 13시간 평균하였다. 그림의 왼쪽은 소조기시이고(Fig. 9(a)), 오른쪽은 대조기시를 나타낸다(Fig. 9(b)). 안정도를 나타내는 Ri가 크게 변하게 되면 유속의 방향이 변하게 되는데(Framinan et al, 2008) 이는 성층의 변화가 잔차류에 영향을 미치는 점을 의미한다(Prandle, 1981). 저층에서 북쪽 방향의 잔차류가 나타나는 지역은 Ri가 상대적으로 커지는데 이는 정선 1과 정선 2에서 소조기 및 대조기시 모두 비슷한 결과를 나타내고 있다. 13시간 평균 값인 Ri를 사용하였기 때문에 사전 연구에서 진행된 임계 값을 이용할 수는 없지만 저층의 북쪽 방향 잔차류가 발생하는 지역은 성층이 크다는 점을 알 수 있다.

Fig. 10에는 정선 1과 마찬가지로 정선 2에서의 13시간 평균 Ri와 잔차류를 도시하였다. 수로 단면에 대하여 저층의 북쪽 방향의 잔차류가 발생하는 지역에서는 Ri가 매우 크고 성층의 강도가 크다는 점을 알 수 있다. 단면 내 횡 방향의 연직 안정도 변화는 대조기에 비해 소조기시 더욱 크게 나타난다.

본 연구에서의 Ri와 잔차류의 비교는 안정도와 잔차류를 비교하는 사전 연구에서 나타나듯이 수로 단면에 대하여 발생하는 잔차류가 표층과 저층에서 서로 다른 양상을 보일 때 Ri

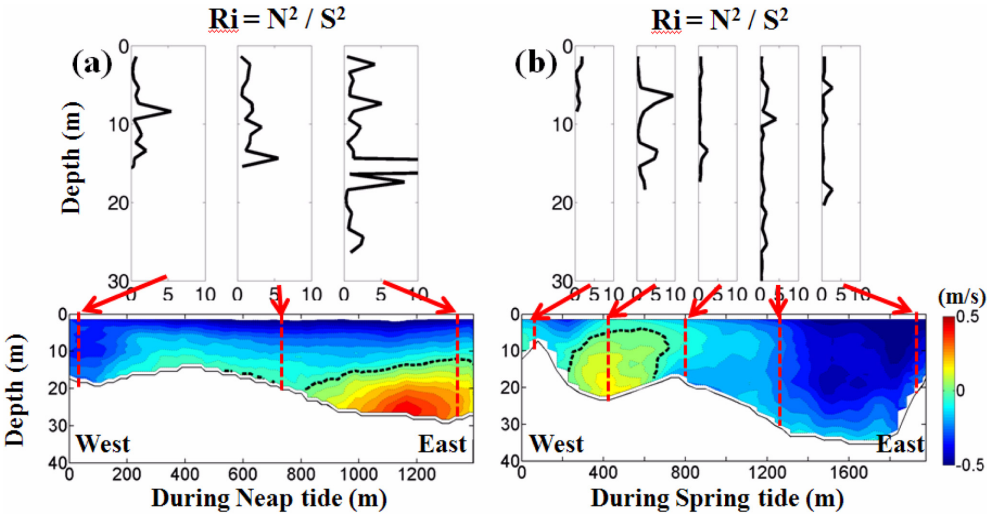


Fig. 10. Top layer in the figure shows that tidal averaged Richardson number calculated at CTD casting (red dotted line) at line 2. Results during neap tide are shown on left panel, during spring tide are shown on right panel. Bottom panel shows residual velocity in along-channel direction for comparison (looking toward north). In line 2, (a) Richardson number during neap tide, (b) Richardson number during spring tide.

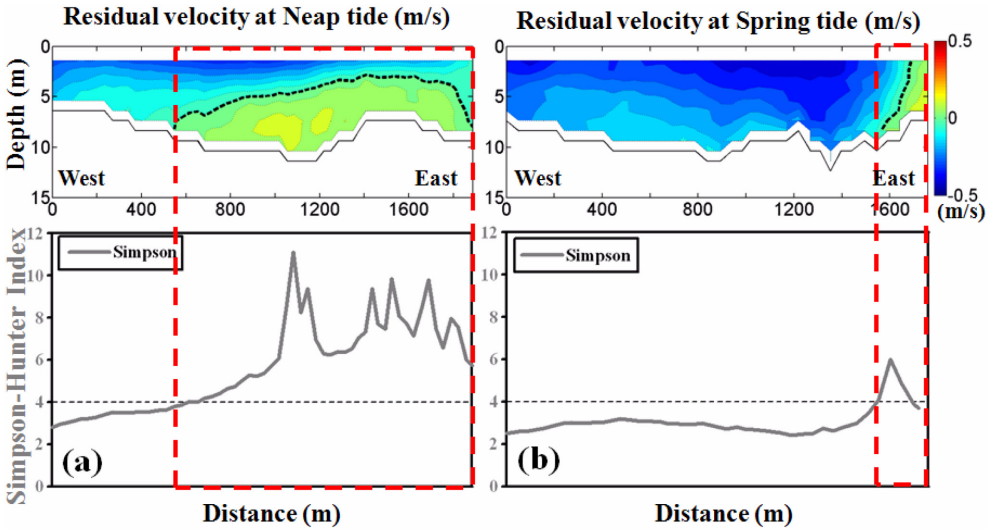


Fig. 11. In line 1, the figure shows the relationship between along-channel residual velocity and the Simpson-hunter index. In the lower panel, Simpson-hunter index (gray solid line) shows according to across-channel distance. The red dotted box shows the section of across estuary that indicates northern residual current. (a) value during neap tide, (b) value during spring tide.

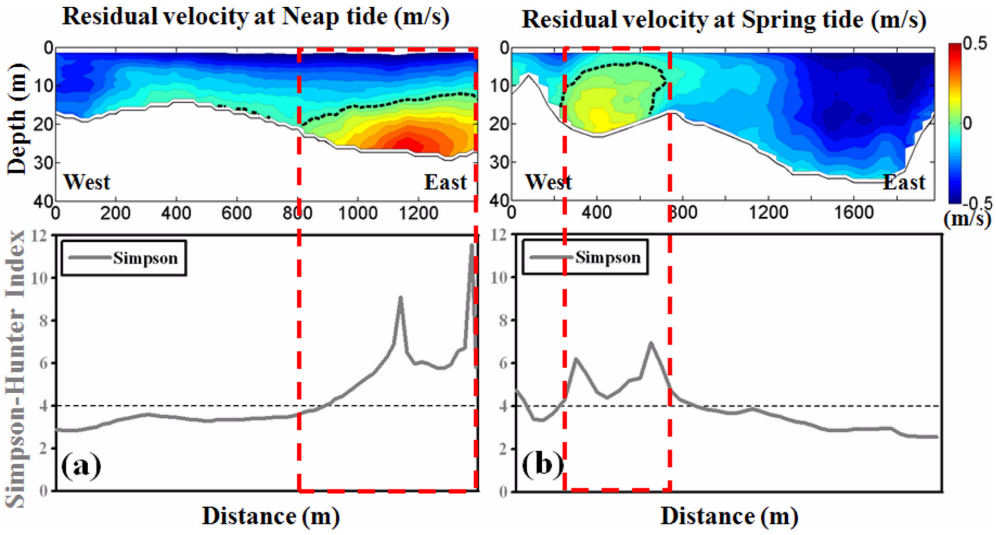


Fig. 12. In line 2, the figure shows the relationship between along-channel residual velocity and the Simpson-hunter index. In the lower panel, Simpson-hunter index (gray solid line) shows according to across-channel distance. The red dotted box shows the section of across estuary that indicates northern residual flow. (a) value during neap tide, (b) value during spring tide.

가 큰 지역임을 나타내고 있다. 단면 관측을 통하여 저층에서 북쪽 방향의 잔차류가 발생하는 원인이 안정도가 될 수는 없지만 이와 같은 석모수로에서 잔차류 변화 특성 중 하나가 성층을 통해 나타나게 된다.

3.5 연직 혼합과 잔차류의 관계

연직 혼합의 정도는 Simpson-hunter index(Si)로 표현 할 수 있다.

$$Si = log\frac{H}{\overline{U}^3} \quad (3)$$

H는 수심을 나타내고, $\overline{U}$는 수직적으로 평균된 유속으로 본 연구에서는 연구 지역에서 우세한 주축 방향 유속(along-channel velocity)을 사용하였다. 지표의 수치가 낮을수록 연직혼합이 활발히 일어남을 의미하고(Simpson et al., 1974), 보통 조석 전선을 분석하는데 있어서 혼합과 연관되어 있는 Si값이 영향을 나타내게 된다(Hearn, 1985). 조석의 영향을 크게 받는 연안에서 계절적 성층의 발생에 대한 Si는 과거 연구에서 임계점을 통해 알려지게 되었다(Simpson and Hunter, 1974). 이러한 지표는 혼합하려는 힘을 설명하는데 유용한 표현으로 수치가 낮을수록 그 힘이 더 강하다는 것을 의미한다.

Fig. 11에는 정선 1에서 주 수로 방향의 잔차류 분포와 각 위치 별 Si값을 도시하였다. 그림의 하단에 위치에 Si(회색 실선)을 격자 별로 분석하였고, 빨간 점선은 북쪽 방향의 잔차류가 나타난 위치를 보여준다. 단면에 대하여 이러한 북쪽 방향의 잔차류가 나타나는 지역에서는 Si가 일정 값인 4 이상으로 나타나게 된다. 북쪽 방향의 잔차류가 나타나는 지역에서는 지표가 비정상적으로 높기 때문에 성층이 강하게 나타남을 의미한다.

마찬가지로, 정선 2에서의 주 수로 방향 잔차류와 Si의 관계를 도시하였다(Fig. 12). 정선 2에서는 정선 1과 마찬가지로 대,소조기시 Si가 4 이상인 지역에서 북쪽 방향의 잔차류가 나타난다.

석모수로에서 관측한 유속과 염분 자료를 분석한 결과, 북단(정선 1)과 남단(정선2)에서 대,소조기별 독특한 잔차류 패턴을 보여준다. 이러한 원인을 연직 혼합의 강도를 나타내는 Si의 분석 방법을 통해 정량적으로 제시하였다. 따라서 표층에서 남쪽 방향으로 흐르고, 저층에서 북쪽 방향으로 흐르는 2층 흐름 구조의 잔차류는 상대적으로 성층이 강하게 일어나는 지역에서 나타날 수 있다. Si의 경우 상대적으로 연안에서 많이 사용되지 않았기 때문에 타 지역에서의 이러한 지표와 주 수로 방향의 잔차류간 관계는 추후 분석할 필요성이 있다.

4. 결 론

본 연구는 경기만 강화도 서측에 위치한 석모수로의 두 단면(북단, 남단)에서 13시간 연속 단면 유속과 염분 관측을 수행하였다. 수로의 전체적인 염분 분포를 파악하기 위하여 13시간 평균 염분의 분포를 살펴보면, 소조기시 담수의 유입이 대조기에 비해 많았기 때문에 북단의 표층에서 차이를 보이지만 북단의 저층과 남단에서는 대,소조기시 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 해수의 침입 범위가 대,소조기에 따라 다르게 나타나며 이로 인해 서로 다른 등밀도선 분포를 보이게 되는데 소조기시 염수쐐기형, 대조기시 연직혼합 형태를 나타낸다.

단면에서의 평균 잔차류 유속은 석모수로의 북단에서 소조기시 0.05 m/s, 대조기시 0.21 m/s의 남쪽 방향 성분을 보이고, 남단 정선에서는 소조기시 0.14 m/s, 대조기시 0.17

m/s의 남쪽 방향 성분을 보인다. 하지만 모두 수로 단면의 저층에서 북쪽 방향의 잔차류가 나타나 2층 흐름 구조가 뚜렷하게 나타난다.

2층 흐름구조의 북쪽 방향 잔차류 성분이 나타나는 위치는 대,소조기에 따라 달라지는데, 북단의 경우 대조기시 북쪽 방향의 잔차류가 소조기에 비하여 상대적으로 동쪽으로 이동하였고, 남단의 경우, 대조기시 북쪽 방향의 잔차류가 소조기시보다 서쪽에서 나타난다. 이러한 변화는 담수의 영향과 지형학적 영향 등 다양한 원인이 작용하여 창조와 낙조시 유속의 분포 변화가 일어났기 때문이다. 본 연구에서는 저층의 북쪽 방향의 잔차류와 성층간의 관계를 정량적으로 분석하였다.

잔차류와 성층관계에 대한 정량적인 분석은 통계적인 방법보다는 주로 무차원 파라미터(Parameter)를 이용하여 수행되었다(Framinan et al, 2008; Prandle, 1981). 본 연구에서도 이러한 파라미터를 이용하여 두 물리적 특성간의 관계를 파악하고자 하였다. 특히 과거 연구와 달리 공간적인 잔차류의 분포와 성층간의 관계를 규명하기 위해 Richardson number와 잔차류의 상관 관계를 비교하였고, 수직적 성층 강도를 평가하는 Simpson-hunter index를 정량적으로 분석한 뒤, 잔차류의 분포와 비교하였다.

수로 단면에 대하여 안정도를 나타내는 척도인 Richardson number를 분석한 결과, 창조와 낙조시 모두 저층의 북쪽 방향 잔차류가 나타나는 지역에서 커지게 되어 성층의 정도가 크다는 점을 알 수 있다. 또한 이 지역에서 연직혼합의 정도를 나타내는 Simpson-hunter index를 단면 내에서 분석한 결과, 저층의 북쪽 방향의 잔차류는 일정 값인 4 이상 나타나는 지역에서 발생한다.

이와 같은 결과를 종합하면 단면 내 북쪽 방향의 잔차류가 나타나는 지역에서 성층이 강하게 나타나고, 연직혼합이 활발히 일어나지 않음을 의미한다. 대,소조기별 석모수로의 북단과 남단에서 저층의 북쪽 방향 잔차류의 분포 패턴이 달라지는 이유를 성층이라 단정 지을 수는 없다. 그러나 본 연구 지역에서는 성층의 정도를 나타내는 Richardson number가 상대적으로 크고, Simpson-hunter index가 4 이상 되는 지역에서 저층의 북쪽 방향 잔차류가 나타나는 점이 분석되었다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

송용식, 우승범 (2010). 한강하구에서 조석 변형의 시공간적인 변화에 의한 잔차류 변동 특성. 한국해안·해양공학회논문집, 한국해안해양공학회, 23(5), 393-400.

윤병일 (2006). 경기만 한강하구 조석/조류 전파특성 및 비선형 천해분조에 대한 수치모델링. 인하대학교 석사학위논문

이동환, 윤병일, 김종욱, 구본호, 우승범 (2012). 단면 관측을 통한 경기만 염하수로의 대조기 평수시와 홍수시 유출입량 변화특성 조사. 한국해안·해양공학회논문집, 한국해안해양공학회, 24(1), 16-25.

Elias, E.P.L. and Stive, M.J.F. (2006). The effect of stratification on the residual flow in a mixed-energy tide-dominated inlet. In A Sanchez-Arcilla (Ed.), Coastal Dynamics 2005: proceedings of the 5th international conference, 1-13.

Framinan, Mariana B., Valle-Levinson, A., Seplveda, Hctor H. and Brown, Otis B. (2008). Tidal variations of flow convergence, shear and stratification at the Rio de la Plata estuary turbidity front. Journal of Geophysical Research, 113, C8.

Geyer, W.R. and Smith, J. (1987). Shear instability in a highly stratified estuary. J. Phys. Ocean., 17, 1668-1679.

Hearn, C.J. (1985). On the Value of the Mixing Efficiency in the Simpson-Hunter h/u^3 Criterion. Deutsche Hydrographisches Zeitschrift, 38(H.3), 133-145.

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

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. Joirnal of Coastal Research, Special Issue 56, 976-980.

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

Nepf, H. and Geyer, W.R. (1996). Intra-tidal variations in stratification and mixing in the Hudson Estuary. J. Geophys. Res., 101, 12079-12086.

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.

Prandle, D. (1981). Salinity intrusion in estuaries. J. Phys. Ocean., 11, 1311-1324.

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

Simpson, J.H., and Britter, R. (1979). The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. J. Fluid Mech., 94(3), 477-495

Simpson, J.H and Hunter, J.R. (1974). Fronts in the Irish Sea. Nature, 250, 404-406.

Van de Kreeke, J. (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.

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

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: 2011년 4월 3일
수정본채택: 2012년 4월 26일
게재확정일: 2012년 5월 2일