서해 천수만 중앙부의 하계 조류/비조류 특성

정광영 · 노영재* · 김백진

충남대학교 해양학과

Tidal and Sub-tidal Current Characteristics in the Central part of Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea during the Summer Season

KWANG YOUNG JUNG, YOUNG JAE RO* AND BAEK JIN KIM

Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

이 연구는 서해 천수만에서 2010년 7월 29일부터 8월 30일까지 33일동안 관측한 ADCP 자료와 바람(기상청), 서산AB지구의 방류량(한국농어촌공사 천수만사업단)자료를 분석하였다. 기술통계, 조류의 조화분석을 통해 조류의 특성을 파악했고, 스펙트럼(spectrum)과 코히런스(coherency) 분석, 콤플렉스 코릴레이션(complex correlation)과 진행 벡터(progressive vector) 등을 통해 비조류 특성을 파악하여 바람과 담수 유입이 잔차류에 미치는 영향을 알아보았다. 관측 유속의 범위는 -30~41 cm/sec였고, 표준편차는 저층에서 1.7 cm/sec, 표층에서 18.7 cm/sec로 계산되었다. 조화분석 결과 유향은 북북서-남남서 방향으로 주된 흐름을 보였다. M2의 조류타원 장축과 단축은 각각 9.4~14.8, 0.1~0.5 cm/sec의 범위를 보였고, S2의 경우 각각 4.4~7.0, 0.4~1.4 cm/sec의 범위를 보였다. 잔차류 전 수층의 대한 스펙트럼 분석 결과 3~6개의 유의한 주기가 2~8일 주기에 포함되어 있었으며, 바람도 유사한 결과를 보였다. 바람과 전 수층 잔차류의 코히런스 분석 결과 3~5개의 유의한 주기가 2.8일 이내의 위상차로 나타났고, 담수 유입량과 표층 잔차류의 코히런스 분석 결과 4.6일 주기가 가장 유의했으며, 위상차는 1.2일이었다. 잔차류의 진행 벡터는 전 층에서 북향했고, 표층보다 중층에서 북향하는 거리가 컸다. 잔차류의 북향은 바람의 계절적 요인에 기인했다고 볼 수 있으나, 만 북부에서 남하하는 담수의 영향(밀도류)에 의해 표층 잔차류 일부가 남향하는 흐름을 보였다.

This study analyzed the ADCP records along with wind by KMA and discharge records at Seosan A-, B-district tide embankment by KRC for 33 days obtained in the Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea spanning from July 29 to August 30, 2010. Various analyses include descriptive statistics, harmonic analysis of tidal constituents, spectra and coherence, complex correlation, progressive vector diagram and cumulative curves to understand the tidal and sub-tidal current characteristics caused by local wind and discharge effect. Observed current speed ranges from -30 to 40 (cm/sec), with standard deviation from 1.7 (cm/sec) at bottom to 18.7 (cm/sec) at surface. According to the harmonic analysis results, the tidal current direction show NNW-SSE. The magnitudes of semi-major axes range from 9.4 to 14.8 (cm/sec) for M2 harmonic constituent and from 4.4 to 7.0 (cm/sec) for S2, respectively. And the magnitudes of semi-minor axes range from 0.1 to 0.5 (cm/sec) for M2 and from 0.4 to 1.4 (cm/sec) for S2, respectively. In the spectral analysis results in the frequency domain, we found 3~6 significant spectral peaks for band-passed wind and residual current of all depth. These peak periods represent various periodicities ranging from 2 to 8 (days). In the coherency analysis results between band-passed wind and residual current of all depth, several significant coherencies could be resolved in 3~5 periodicities within 2.8 (days). Highest coherency peak occurred at 4.6 (day) with 1.2-day phase lag of discharge to band-passed residual current. The progressive vector of wind and residual current travelled to northward at all layers, and the travel distance at middle layer was greater than surface layer distance. The Northward residual current was caused by a seasonal southern wind, and the density-driven current formed by fresh water input effected southward residual current. The sub-tidal current characteristics is determined by seasonal wind force and fresh water inflow in the Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea.

Key words: Chunsu bay, tidal and sub-tidal current, residual current, tidal harmonics, spectra, coherency, progressive vector

Received July 6, 2012; Revised May 22, 2013; Accepted May 28, 2013

*Corresponding author: royoungj@cnu.ac.kr

서 론

천수만은 한반도 서해 중부 연안에 위치($36^{\circ}23' \sim 36^{\circ}37'N$, $126^{\circ}20' \sim 126^{\circ}30'E$)한 반폐쇄성 내만으로, 서쪽의 태안군 안면도와 북쪽의 서산 A·B지구 방조제, 동쪽의 보령시 서해지선으로 둘러싸여 있으며, 안면도와 고정리 사이의 좁은 남쪽 수로를 통해 외해와 연결되어 있다. 만의 길이는 남쪽 원산도에서 북쪽 간월도까지 약 25 km이고, 폭은 죽도를 기준으로 약 8.5 km로, 남북 방향으로 길게 놓여 있고, 만 내 평균 수심은 약 10 m이며, 만 입구에서 약 30 m로 최대 수심을 보인다(Fig. 1).

해양 환경이 급변하는 연안에서 담수와 오염물 및 기타 보존성 물질의 유입과 그 거동은 조석잔차류, 취송류와 밀도류 등이 포함된 잔차류에 의해 좌우된다(Yanagi, 1983). 따라서 여름철 간월/부남호로부터 다량의 부영양화된 담수가 유입되어 해양 환경 및 생태계에 여러 문제점을 안고 있는 천수만에서, 물질의 순이동을 좌우하는 잔차류에 대한 자세한 연구가 필요한 실정이다. 과거 전세계적으로 관측과 수치모델을 통해 조석과 조류의 특성, 취송류와 밀도류 등이 포함된 잔차류 등 연안과 하구역에서의 순환과 관련된 다양한 연구가 진행된 바 있고(Imasato, 1983; Goodrech *et al.*, 1987; Dube *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2008; Zhai *et al.*, 2008; Lee

et al., 2013), 잔차류의 발생 기작에 대한 연구(Kashiwai, 1984; Guo and Yanagi 1996; Cai *et al.*, 2003; Foreman *et al.*, 2006)가 다양하게 수행되었다. 또한 비조류 특성 파악을 위해 주파수 도메인에서의 스펙트럼과 코히런시를 분석한 연구도 수행된 바 있으나(Wong, 1998; Fernandes *et al.*, 2004), 천수만에서 유속의 관측과 분석은 국내 타 해역에 비해 많지 않다.

과거 천수만에서 이루어진 유속 관측은 유(1992), 소 등(1998), 최(2004), Ro and Choi (2004) 등에 의해 월도 인근해역의 중층에서 관측된 바 있으나, 모두 단일 층(중층)에서 관측했고, 대부분 천수만 입구에서 관측되었다. 소 등(1998)은 죽도 인근 정점에서 조류를 관측했으나 역시 단층에서만 이루어져 천수만에서의 다층 유속 관측을 통한 수층별 분석은 전무한 실정이다. 여름철 천수만에서의 해수유동은 조석과 바람, 그리고 담수 유입에 의해 좌우되는데, 수심이 깊지 않은 천수만에서의 바람은 저층까지 영향을 미칠 수 있으나 간월/부남호로부터 유입된 담수의 영향은 주로 표층에 국한되어 있으므로 각 외력 성분에 의해 상하층간 해수유동의 차이가 발생되며, 다층 유속 관측을 통해 이를 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 초음파식유속계(ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler)를 설치하여 다층 유속을 관측하였으며, 과거 연구 경험(정, 2007; Ro, 2007; Ro *et al.*, 2007; 정 등, 2010; Ro and Jung, 2010; 정 등, 2012a)을 바탕으로 수심별 조류 특성과 함께 물질의 장주기 순환에 큰 영향을 끼치는 비조류의 특성을 알아보고자 다양한 분석 기법을 통해 상세하게 분석했다.

본 연구의 목표는 1) 천수만 중앙부에서 수층별 조류의 진폭과 위상, 조류타원을 이용하여 조류 특성을 파악하고, 2) 수층별 비조류 성분과 바람에 대한 스펙트럼(spectrum) 및 코히런시(coherency), 특성을 파악하며, 3) 비조류 성분의 수층별 순이동(net drift) 특성을 확인하고, 4) 외력(바람과 담수 유입)이 비조류 성분의 변동에 미치는 영향을 파악하는 것이다.

자료 및 방법

해/조류 관측

천수만에서의 해수유동 특성을 파악하기 위해 해/조류(유향, 유속)와 물성(수온, 염분, DO, Chl. 탁도 등) 조사를 수행했고, 그 중 ADCP를 이용한 다층 유속 관측 정보는 다음과 같다. 2010년 7월 28일부터 8월 31일까지 35일간 천수만 중앙부의 죽도와 홍성군 남당항 사이($36^{\circ}31'57''N$, $126^{\circ}27'6''E$)의 최대 수심(Fig. 1)에서 수직 1 m 간격의 14개 층, 10분의 시간 간격을 설정하여 Nortek사의 ADCP를 해저면에 설치했으며, 자료 분석에는 7월 29일부터 8월 30일까지 33일간의 총 66,258개의 자료를 이용했다. 이후 표기되는 Layer 1~14는 각각 해저면으로부터 첫 번째 ~열네 번째 수층을 의미한다(해저면으로부터 Layer 1이 1.4 m, Layer 14는 14.4 m 이격됨).

바람과 담수 방류 자료

천수만에서 관측한 ADCP 자료의 비조류(nontidal current) 성분에 대한 바람의 영향을 분석하기 위해 해/조류 관측 위치와 약 6.5 km 떨어져 있는 기상청의 서부 645 관측소(충남 홍성군 서부면 이호리, 고도 23 m)의 2010년 7월 29일부터 8월 31일까지 1시간

Fig. 1. The Chunsu Bay in the Yellow Sea with bottom topography. ADCP mooring at Jukdo station and meteorological AWS (KMA, 2010) at Sebu station.

Fig. 2. Time series vector diagram (a), u-(b), v-(c) component and wind-rose diagram (d) of wind records at Seobu station (KMA, 2010) during July 29~August 31, 2010.

간격의 바람 자료(풍향, 풍속)를 사용했으며, 자료의 기간은 천수만 ADCP 자료의 기간과 동일하다. ADCP 관측 지점과 동일한 위치에서 해면 기상 관측 자료를 사용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있으나, 천수만 해역에서의 해상풍 관측 자료가 전무하기 때문에 육상에서 관측한 바람 자료의 일부 오차를 감안하더라도 관측 정점과 가장 가까운 서부 645 관측소의 자료를 선택하게 되었다. Fig. 2는 바람 정보에 대한 시계열 그림과 바람장미를 보여주고 있으며, Table 1은 바람에 대한 기본 통계를 보여주고 있다. 여름철 특성상 남서풍 계열 바람의 분포가 약 40% 이상으로 우세하게 있었으나, 천수만이 2010년 4호 태풍 ‘덴무(DIANMU)’의 간접 영향권에 들어갔던 8월 10일에서 13일에는 북풍 계열의 바람이 우세했다.

서산 A, B 방조제(간월/부남 방조제)의 제원과 2010년 방류량 통계는 Table 2와 같다. 두 방조제를 통해 천수만으로 유입되는 담수의 비조류 성분에 대한 영향을 파악하기 위해 한국농어촌공

사 천수만사업단(2010)의 2010년도 방류 정보(Fig. 3)를 활용했다. 2010년도에는 서산 A, B 방조제를 통해 각각 약 5억톤, 2.7억톤 가량이 천수만으로 유입되었으며, 하계 홍수기인 7~9월에 각각 3.6억톤, 1.8억톤 가량이 유입되었다. ADCP 관측 기간인 8월의 방류 기록을 살펴보면 4호 태풍 ‘덴무(DIANMU)’와 7호 태풍 ‘곤파스(KOMPASU)’의 국내 통과를 전후하여 다량의 담수가 유입되었고, 해당 방류 시간은 저조를 전후하여 약 3~4시간 연속 방류했다.

분석 방법

ADCP 관측 자료의 해/조류 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 분석 방법을 이용했다.

- 1) 조화분석(harmonic analysis) 방법(Foreman, 1978; Pawlowicz *et al.*, 2002)을 이용한 조류타원(tidal ellipse parameters) 특성 및 동-서, 남-북 성분의 진폭(amplitude)과 지각(phase)을 산출했고(3장 조류 특성),
- 2) 관측 자료와 산출된 조화분석 결과에서 잔차류(residual current)를 도출했으며(4장 비조류 특성),
- 3) 분석 자료의 시간 길이의 제한 문제 때문에 도출된 잔차류에 대해 Lanczos band-pass filter (Duchon, 1979)를 적용해 1.5일 이하, 15일 이상 주기를 제거했고,

Table 1. Basic statistics of wind at Seobu 645 station by KMA(2010) during July 29~August 31, 2010.

(m/sec)	Max.	Min.	Mean	Stddev
U-comp.	3.69	-4.53	-0.47	1.35
V-comp.	4.79	-3.46	-0.49	1.11

Table 2. Tide embankment information and basic statistics of discharge volume.

Tide-embankment	A-district	B-district
Length (m)	6,458	1,228
No. of Floodgate	8 gates (102 m)	4 gates (35.6 m)
Open gates during discharge	4~6	2~3
Discharge rate (m ³ /sec)	about 400	about 200
Discharge volume (10 ⁷ m ³) during summer period (Jul.~Sep., 2010)	35.8	18.4
Total discharge volume (10 ⁷ m ³) (2010)	50.7	27.8

Fig. 3. Water discharge information of Seosan A and B tide embankment (KRC, 2010). Daily discharge ($10^7 \text{ m}^3/\text{day}$) during Jul. 29~Aug. 31, 2010 (same period ADCP mooring).

4) Complex correlation analysis (Kundu, 1976)를 이용해 벡터의 상관계수와 편향각, 위상차를 살펴보았으며,

5) FFT 알고리즘을 기반으로 한 스펙트럼(spectrum)과 코히런스(coherency) 분석(Blackman and Tukey, 1958; Jenkins and Watts, 1968)을 통한 비조류 특성 파악과 더불어 바람과 담수의 영향에 대해 분석했으며,

6) 바람과 잔차 성분에 대한 진행 벡터도(progressive vector diagram, 이하 PVD 표기)와 이동 거리 누적 곡선(cumulative travel distance)의 특성을 파악했다.

위와 같은 분석 방법을 통해 도출된 결과는 3장에서 조류의 기본 통계와 조화분석 결과 및 그 특성을 기술했고, 4장에서는 잔차류의 특성에 대해 스펙트럼, 코히런스 분석을 통해 살펴보았으며, 바람과 담수 유입이 비조류 특성에 미치는 영향에 대해 기술했다.

조류 특성

ADCP 관측 자료의 기본 통계

Fig. 4a와 Table 3은 관측 원시 자료의 시계열 유속벡터도와 기본 통계에 대한 표를 보여주고 있다. 기본 통계치는 평균(mean), 표준편차(standard deviation), 최대(maximum)와 최소(minimum) 값을 표현했다.

원시 자료의 평균은 유속의 순이동(net drift)을 의미하며, 동-서 성분의 평균은 표층부터 저층까지 $-0.1 \sim -0.3 \text{ cm/sec}$ 의 범위를 보였고, 전 수층의 평균은 -0.2 cm/sec 로 서향하는 흐름이 우세했다. 평균은 표층이 가장 높았으나, 저층으로 내려갈수록 그 값이 일정하게 감소 또는 증가하는 양상을 보이지는 않았다. 남-북 성분의 평균은 $0.8 \sim 1.4 \text{ cm/sec}$ 로 북향하는 흐름이 우세했으며, 그 크기는

동-서 방향의 약 5~8배 크게 나타났다. 표층에서 저층으로 갈수록 평균 유속은 점차 감소하는 양상을 보였다. 표준편차의 동-서, 남-북 성분의 범위는 각각 $3.4 \sim 5.5$, $7.5 \sim 12.3 \text{ cm/sec}$ 로 남-북 성분이 2배 이상 큰 것으로 나타났으며, 두 성분 모두 표층에서 저층으로 갈수록 표준편차는 감소했다. 수층별 최대유속의 범위는 동향류 $8.5 \sim 19.0 \text{ cm/sec}$, 서향류 $11.8 \sim 15.5 \text{ cm/sec}$, 북향류 $24.6 \sim 41.0 \text{ cm/sec}$ 이며, 남향류는 $16.2 \sim 30.6 \text{ cm/sec}$ 로 관측되었다.

천수만 관측 정점인 죽도 동부해역에서는 동-서 방향보다 남-북 방향의 흐름이 우세하게 나타났다. 방향별 최대 흐름은 표층이 아닌 중층(layer 8~10)에서 나타났는데, 그 원인은 4장 비조류 특성에서 확인할 수 있다. 조화분석 결과(Fig. 4b)는 3.2절에서, 잔차류 기본 통계(Fig. 4c; Table 4b)는 4장에 기술했다.

조화분석 결과

관측 자료의 조류 특성을 살펴보기 위해 조화분석 방법(Foreman, 1978; Pawlowicz *et al.*, 2002)을 이용하여 14개 전 수층에 대해 4대 분조(M2, S2, K1과 O1)를 포함한 총 38개 분조의 진폭과 지각, 조류타원을 계산했다. 조화 분석에는 7월 29일부터 8월 30일 까지 33일 자료를 이용했다. 그 중 주기가 가장 긴 분조는 MSF로 주파수(frequency)는 0.0028219 cph 이며, 가장 짧은 분조는 M10으로 0.402557 cph 였고, 지각의 기준은 그리니치 천문대(Greenwich observatory)를 기준으로 하였다. 조화분석 결과 중 5개 분조(M2, S2, N2, K1과 O1)에 대해 4개 수층(L14, L10, L5, L1)의 진폭과 지각은 Table 4에, 조류타원은 Table 5와 같다.

각 분조의 진폭은 남-북 성분이 동-서 성분에 비해 약 2~10배 가량 크게 나타난 것으로 보아 천수만의 해수 유동은 남-북 방향의 조류 흐름이 동-서 방향의 흐름보다 우세하다고 볼 수 있다. M2

Table 3. Basic statistics of selected ADCP records (in terms mean, standard deviation, mini- and maximal values of u- and v-components).

Layer	u-comp (cm/sec)				v-comp (cm/sec)			
	Mean	St.dev.	Maxi	Mini	Mean	St.dev.	Maxi	Mini
L14	-0.3	5.5	14.9	-15.5	1.4	12.3	33.1	-28.7
L12	-0.2	5.9	18.8	-17.2	1.4	12.9	36.3	-29.6
L10	-0.1	4.8	16.9	-13.7	1.4	14.1	41.0	-30.6
L8	-0.1	5.4	19.0	-14.9	1.3	12.9	35.8	-25.6
L6	-0.3	4.6	14.3	-14.6	1.4	10.8	33.2	-20.3
L4	-0.2	4.1	13.2	-12.3	1.3	9.8	26.2	-23.8
L2	-0.1	3.4	8.5	-11.9	0.9	7.5	24.7	-16.2
Average	-0.2	4.9	15.1	-14.2	1.3	11.5	32.9	-25.0

Fig. 4. Time series vector of raw ADCP records (a1-a7), harmonic analysis results (b1-b7) and residual currents (c1-c7).

Table 4. Harmonic analyses results of u- and v-component for selected layers of ADCP records. Acronym of %Var is used for total variance of records and predicted data.

Comp.	Layer	Amplitude (cm/sec)					Phase (deg.)					% Var
		M2	S2	N2	K1	O1	M2	S2	N2	K1	O1	
U	L14	4.9	3.89	0.5	0.4	0.2	213.7	302.1	202.1	328.8	277.2	90.1
	L10	4.4	1.2	0.4	0.4	0.2	212.0	299.1	198.5	333.0	277.3	83.8
	L5	3.1	2.7	0.4	0.3	0.1	208.9	296.5	195.5	340.9	292.2	83.6
	L1	2.9	0.7	0.4	0.1	0.1	201.2	289.6	189.8	349.9	320.5	81.0
V	L14	13.6	6.2	6.9	1.9	0.5	26.7	103.1	335.6	304.9	95.3	89.8
	L10	12.4	5.9	6.2	1.4	0.4	24.3	101.9	336.2	298.7	67.6	93.9
	L5	9.7	5.0	4.6	2.3	0.3	22.4	100.7	334.8	282.7	32.8	95.9
	L1	9.0	4.5	4.0	2.45	0.3	17.7	96.4	348.6	282.6	116.1	89.1

분조의 남-북 성분 진폭의 범위는 표층에서 13.6 cm/sec, 저층에서 9.0 cm/sec이며, 동-서 성분은 표층에서 4.9 cm/sec, 저층에서 2.9 cm/sec로 상하층간 약 1.5배 가까이 차이가 났다. 표층에서 저층으로 갈수록 유속의 진폭은 K1분조의 남-북 성분을 제외한 나머지 5개 분조가 모두 점차 감소했으며, 지각 역시 K1과 O1의 동-서 성분, N2와 O1의 남-북 성분의 지각을 제외한 다른 분조들은 표층에서 저층으로 갈수록 감소했다.

Table 5는 4개 수층에 대한 5개 분조의 조류타원 조화분석 결

과표로 장축(semi-major), 단축(semi-minor), 경사각(inclination angle; x축(90°) 기준 반시계 방향), 지각(phase lag), 관측과 예측의 총 분산(total variance) 및 총 분산 비율의 정보를 포함하고 있다. 반일주조 성분인 M2분조의 장축과 단축의 범위는 각각 9.4~14.8 cm/sec와 0.1~0.5 cm/sec이며, 경사각은 105.9~107.6°, 지각은 18.0~27.3°이다. S2분조의 장축과 단축의 범위는 각각 4.4~7.0 cm/sec와 0.4~1.4 cm/sec이며, 경사각은 101.4~123.7°, 지각은 103.64~115.16°이다. M2, S2, N2, K1과 O1분조의 평균 장단축

Table 5. Harmonic analyses of tidal ellipses for selected layers of the ADCP records.

Layer	Const.	Semi-major (cm/sec)	Semi-minor (cm/sec)	Inclination angle (deg.)	Phase lag (deg.)	total variance of predicted	total variance of record	% of total variance
L14 (Surface)	M2	14.8	0.5	107.5	27.3	198.4	220.6	89.9
	S2	7.0	1.4	123.7	115.2			
	N2	6.9	0.2	96.1	336.2			
	K1	2.9	-0.3	80.6	310.1			
	O1	0.5	0.1	118.8	95.7			
L10	M2	13.7	0.4	106.0	26.5	166.0	181.9	91.3
	S2	6.0	0.9	122.3	111.6			
	N2	6.6	0.2	92.9	335.3			
	K1	2.7	-0.2	82.7	305.2			
	O1	0.5	0.1	114.2	68.8			
L5	M2	10.1	0.3	107.5	26.1	118.2	129.1	91.6
	S2	5.4	0.9	120.0	107.8			
	N2	4.6	0.2	92.7	334.9			
	K1	2.4	-0.1	88.7	296.9			
	O1	0.4	0.0	108.0	36.6			
L1 (Bottom)	M2	9.4	0.2	107.6	18.0	82.0	93.2	87.9
	S2	4.4	0.4	101.4	103.6			
	N2	4.0	0.2	94.6	348.76			
	K1	2.3	0.0	90.3	286.6			
	O1	0.3	0.0	97.4	18.9			

의 비율은 각각 0.027, 0.149, 0.037, 0.061과 0.123으로 장축이 단축보다 월등히 우세했다. M2, S2, N2, K1과 O1분조의 평균 경사각은 107.1, 116.8, 94.1, 85.5과 109.6°로 계산되었으며, 북북서-남남동 방향으로 왕복성 조류타원의 형태를 보였다.

비조류 특성

물질의 장주기 이동은 순간 유속 보다는 잔차류(residual current)에 의해 결정된다. 잔차류는 바람, 밀도 구배, 담수 유입, 조류의 비선형성 등에 의해 생길 수 있으며, 해안선 부근의 해면 경사효과도 포함된다. 조석에 의한 잔차류는 주로 비선형적인 해저 마찰

이나 지형 때문에 생길 수 있다(Yanagi, 1983). 관측 자료의 비조류(nontidal current) 특성을 파악하기 위한 잔차류의 계산은 관측 자료에서 조화분석 결과를 제거한 자료를 사용했으며, 잔차류에 대한 표층, 중층 및 저층의 그림은 Fig. 5, 기본 통계는 Table 6과 같다.

잔차류의 동-서 성분 평균은 표층부터 저층까지 -0.07~-0.31 cm/sec의 범위를 보였고, 전 수층의 평균은 -0.18 cm/sec로 서향하는 흐름이 우세했다. 평균은 표층이 가장 높았고 저층으로 갈수록 그 값이 감소하였으나, 일부 층(L6)에서는 오히려 증가했다. 남-북 성분의 평균은 0.6~2.3 cm/sec로 북향하는 흐름이 우세했으며, 그 크

Fig. 5. Time series of residual current at surface, middle and bottom layer. Dotted (solid) line represents (band-passed) residual current.

Table 6. Basic statistics of selected layers for residual current in terms mean, standard deviation, mini- and maximal values of u- and v-components.

Layer	u-comp (cm/sec)				v-comp (cm/sec)			
	Mean	St.dev.	Maxi	Mini	Mean	St.dev.	Maxi	Mini
L14	-0.3	3.0	10.8	-9.5	1.3	5.46	21.0	-16.8
L12	-0.2	3.1	11.8	-10.1	1.5	4.9	20.4	-11.6
L10	-0.1	3.6	12.3	-10.2	1.9	4.6	24.4	-9.0
L8	-0.1	3.3	12.8	-10.2	2.3	3.9	19.2	-3.9
L6	-0.3	2.6	9.2	-7.3	2.2	2.9	15.5	-2.0
L4	-0.1	2.5	9.6	-7.0	1.8	2.6	14.0	-1.6
L2	-0.2	1.8	6.5	-6.7	0.6	1.7	7.8	-1.5
Average	-0.2	2.9	10.4	-8.7	1.7	3.8	17.5	-6.6

기는 동-서 방향 보다 약 4~10배 이상 크게 나타났다. 남-북 방향의 중층 평균 잔차류가 표층보다 1.5배 가량 크게 나타났는데, 그 원인은 다음 절에 자세히 기술된 바람과 담수의 영향이라고 판단된다. 표준편차의 동-서, 남-북 성분의 범위는 각각 1.8~3.5, 1.7~5.4 cm/sec로 남-북 성분이 크게 나타났으며, 남-북 성분의 경우 표층에서 저층으로 갈수록 표준편차는 감소했다. 수층별 최대유속의 범위는 동향류 6.5~12.8 cm/sec, 서향류 6.7~10.2 cm/sec, 북향류 7.8~24.4 cm/sec이며, 남향류는 1.5~16.8 cm/sec로 계산되었다.

조화분석 결과를 통해 도출된 잔차류와 기상청 바람 자료에 대해 Lanczos band-pass filter (Duchon, 1979)를 적용하여 1.5일 이상, 15일 이하 주기(중주기)의 특정 주파수대역을 통과한 잔차류(band-passed residual current)와 바람(band-passed wind)은 다음 절의 잔차류와 중주기 풍속의 백터량 상관분석, 스펙트럼분석과 코히런스 분석, 진행 벡터와 누적 이동 거리 산출 등 다양한 분석에 사용되었다.

잔차류의 스펙트럼 특성

비조류 특성을 알아보기 위해 특정 주파수대역을 통과한 잔차류와 중주기 풍속에 대해 FFT 알고리즘을 기반으로 한 스펙트럼 분석(Blackman and Tukey, 1958; Jenkins and Watts, 1968)을 수행했고, 그 중 잔차류의 표층, 중층, 저층과 풍속에 대한 동-서, 남-북 성분의 스펙트럼 분석 결과는 Fig. 6과 같다. 중주기 풍속의

동-서 성분은 2.7, 3.6, 6.4~10.6일, 남-북 성분 역시 2.7, 3.6~4.6, 6.4~8.0일의 주기에서 유의한 결과를 나타냈다. 중주기 풍속과 표층, 중층과 저층의 잔차류는 대부분 2~5일 주기 또는 6~8일 주기를 가지고 변동했다.

잔차 성분에 대한 바람의 영향

천수만에서의 바람은 잔차류의 이동에 중요한 역할을 하지만 복잡한 해안선과 해저지형에 의해 발생하는 조석잔차류, 담수 유입에 의한 밀도류 등 다른 외력과 복합적으로 작용하기 때문에 그 영향을 정확하게 구분해내는 것은 불가능하다. 따라서 이 절에서는

Fig. 7. Time series for band-passed wind and residual current (Layer 14) of V-component during Aug. 11~21, 2010. **Fig. 6.** Spectra of the band-passed time series of residual current at Layer 1 (a: surface), Layer 8 (b: middle) and Layer 1 (c: bottom) from ADCP and wind (d) records from KMA (2010). Solid (dotted) line represents u(v)-component of residual current and wind.

Fig. 8. Progressive vector diagrams and cumulative travel distances for band-passed wind (a) and residual current at Layer 14 (b: surface), Layer 8 (c: middle) and Layer 1 (d: bottom). Solid (dotted) line represents u(v)-component for figures.

시간 도메인에서 중주기 풍속과 잔차류의 진행 벡터도(PVD, Progressive vector diagram)와 누적이동거리(Cumulative Travel Distance), 그리고 complex correlation 분석을 수행했고, 주파수 도메인에서는 두 성분(남-북 성분)에 대한 코히런스(coherency) 분석을 통해 전체 잔차류와 바람과의 주기적 특성과 위상차 등 상호 관계를 살펴보고자 했으며, 바람이 잔차류에 미치는 영향을 파악하고자 했다.

Fig. 7은 중주기 풍속과 표층 잔차류의 남-북 성분에 대한 태풍 통과 이후 약 11일간의 시계열 그림으로, 잔차류의 변동이 풍속의 변동 이후에 발생하는 것으로 보아 천수만에서 바람과 잔차류의 상호 관계가 높음을 의미한다. 2010년 8월 12일 최대 북풍 발생 시기 이후 약 1~2일 후 잔차류의 남향하는 흐름이 최대가 되었으며, 8월 14~16일, 19~20일의 남풍 계열의 바람은 역시 약 1~3일 후 북향하는 잔차류에 영향을 주었다고 판단된다. 바람과 잔차류는 최대 3일 이내의 시차를 가지고 연구해역에서 주기적으로 변동하는 것으로 보인다.

Fig. 8은 동-서, 남-북 성분에 대한 중주기 풍속과 잔차류의 진행 벡터와 누적이동곡선을 보여주고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 관측 기간 중 바람은 태풍 'DIANMU' 통과시를 제외하고는 주로 남서풍 계열이 우세했으며, Fig. 8의 진행 벡터에도 그 특성이 잘 나타나 있다. 32일 동안 표층, 중층과 저층 잔차류의 경우 동-서 성분의 이동 거리는 각각 서쪽으로 1.8, 1.6, 1.5 km, 남-북 성분의 이동 거리는 각각 북쪽으로 4, 6, 2.5 km이었으며, 중주기 풍속의 동-서, 남-북 성분의 총 이동 거리는 각각 동쪽과 북쪽으로 150 km였다. 잔차류의 이동 거리는 바람 이동 거리의 약 1~4%에 해당되었으며, 이는 기존 연구 결과(Bye, 1965; Churchill and Csanady, 1983; Wu, 1983; Weber, 1983; Kim, 2009)에서 제시된 바람과 취송류와의 관계와 유사하게 나타났다. 잔차류의 방향과 이동 거리를 살펴보면, 전 층에서 북향하는 흐름이 우세한 것으로 나타났으며, 이는 바람이 잔차류의 북향에 영향을 미칠 수 있다고 이해가 가능하다.

하지만 여기서 두 가지 특이한 점을 발견할 수 있다. 첫째로는 잔차류의 표층 남-북 성분의 이동 거리가 중층의 약 60% 밖에 되

지 않는다는 것이다. 이는 Fig. 5에서 잔차류 남-북 성분의 시계열 그림 중 표층에서는 남향하는 흐름이 일부 보이지만, 중층과 저층에서는 대부분 북향한 것과 같은 맥락으로 이해할 수 있다. 표층 잔차류의 북향류 감소 및 남향류의 증가는 다음 절에서 언급한 담수 유입의 영향, 즉 천수만 북부에서 유입된 담수에 의해 형성된 남향하는 밀도류의 영향을 받은 것으로 보인다.

둘째로는 동-서 성분에서 중주기 풍속은 동쪽으로, 잔차류는 서쪽으로 이동하여 그 방향이 서로 반대로 나타난 것으로, 바람 관측 위치와 ADCP 관측 위치의 차이, 그리고 관측 정점의 해안선과 수심 등 지리적 요인의 작용과 더불어 조석잔차류 등의 영향으로 추측할 수 있다. 본 연구 해역이 남북으로 형성된 만이므로 바람에 대한 표층류의 편향각은 바람의 방향에 따라 많이 달라질 수 밖에 없으며, 이 현상은 고전 Ekman 이론만으로는 설명이 불가능하다.

중주기 풍속과 잔차류에 대한 벡터량의 상관성을 파악하기 위해 Kundu(1976)의 complex correlation 분석을 통해 계산된 두 벡터량의 최대 상관계수는 표층(L14)에서 0.53이고, 평균 편향각은 -67.2° 로 계산되었다. 중층(L8)의 최대 상관계수는 0.59, 평균편향각은 -58.3° 로 나타났다. 두 변수의 시간차(위상차)는 표층과 중층 모두 바람 발생 이후 약 37~39시간을 전후로 최대 상관계수를 보이는 것으로 보아 중주기 풍속은 약 2일 정도 후 잔차류의 변동에 영향을 미쳤다고 판단된다.

평균 잔차류는 남-북 성분이 동-서 성분의 크기보다 표층에서 약 4배, 중층에서는 15배 이상(Table 6과 Fig. 5) 크게 나타났다. 이는 관측점에서 동-서 성분 보다 남-북 성분이 잔차류에 지배적 영향을 미친다고 볼 수 있다. Complex correlation 결과 잔차류와 바람의 평균 편향각이 차이를 보이고 있기는 하지만 잔차류의 주 흐름인 남-북 성분과 바람과의 주기적 상관성을 추가로 살펴보기 위해 주파수 도메인에서 중주기 풍속과 각 수층 잔차류의 오토스펙트럼(auto-spectrum), 상호스펙트럼(cross-spectrum), 코히런스(coherency)와 위상(phase)을 추정했으며, 추정치에 대한 신뢰구간(Wang and Tang, 2004)을 산출했다. 그 중 표층과 저층의 코히런

Fig. 9. Coherency between the band-passed residual current and wind at surface (a) and bottom (b).

시와 위상은 Fig. 9와 같다. 전체 층에 대해서 동-서, 남-북 성분의 중주기 풍속과 잔차류에 대한 코히런스 분석 결과(신뢰구간 95% 이상) 3~5개의 뚜렷한 주기가 나타났으며, 그 범위는 2.5~10.7일을 보였으나, 대부분 2.8일 이내의 위상차가 주를 이루고 있다. 5일 이상의 위상차는 다른 특정 주기들과의 복합적 영향에 의해 파생된 것으로 큰 의미는 없다. 따라서 벡터량 상관분석과 코히런스 분석 결과를 살펴보면 중주기 풍속과 잔차류의 상호 상관성이 높으며, 그 발생 시간 차이는 3일 이내로 나타났다.

Complex correlation과 코히런스 분석 결과 중 위상차는 각각 37~39시간, 2.8일 이내로 두 분석 결과가 약 하루 정도 차이를 보이는 것은 분석 과정에서 동-서 성분의 고려 유무에 따른 것으로 판단된다. 하지만 두 분석 모두 바람이 잔차류의 변동에 있어 상호 연관이 높다는 결과를 보였다.

잔차류 변동과 간월/부남호 담수 유입의 관계

천수만에서는 2010년 여름 간월/부남호로부터 다량의 담수 유입이 발생했고(Fig. 3), 만의 북부에서 유입된 담수는 표층을 통해 북쪽에서 남쪽으로 평균 5~15 cm/sec의 속도로 이동했다(정 등, 2011a, 2011b; Jung et al., 2011; 정 등, 2012b, 2012c). 앞에서 기술한 바와 같이 잔차류는 대부분 북상하는 양상을 보였으나 표층에서 일부 남하하는 흐름이 나타났다. Fig. 5의 표층 잔차류의 남북 성분을 보면 8월 11~12일 태풍 통과시 바람의 방향과 같은 방향으로 남하하는 흐름이 발생했으며, 방류량이 증가한 13~16일은 태풍이 통과한 후 관측 기간 중 남풍 계열의 바람이 가장 강하게 불었던 시기이지만 잔차류의 북상 속도는 태풍 통과 이전보다 오히려 감소했다.

이와 같은 현상이 발생하는 원인 중 하나로 북쪽에서 유입된 담수의 영향을 고려해 볼 수 있다. 관측 후반부의 대량 방류 시기인 29~31일에는 바람의 세기가 약했으며, 이 시기에 남하하는 흐름이 우세하게 나타난 것으로 보아 다층유속 관측 정점에서 담수 방류의 영향을 받았을 가능성이 있다고 판단된다.

따라서 천수만 만내로 유입된 담수와 표층 잔차류 남하와의 관계를 알아보기 위해 코히런스 분석을 수행했다. 주파수 도메인에서 수행한 코히런스 분석은 남-북 성분의 잔차류 중 특정주파수를 통과한 잔차류(band-passed residual current, Fig. 5)와 일간 방류량 자료(Fig. 3)를 이용했다. 코히런스 분석 결과와 위상차는 각각 Fig. 10과 같다. 잔차류와 방류량의 코히런스 결과는 95% 신뢰구간을 만족하는 4.6일, 2.1일 주기가 유의한 값을 보였고, 그 주기의 위상차는 각각 +1.2일, +10.8시간 이었다. 두 방조제에서 담수를 방류한 8월 13~19일, 29일 사이 남하하는 잔차류의 크기는 5 cm/sec

이상으로 최대 16 cm/sec까지 나타났으며, 이는 하루에 약 4 km 이상, 최대 13 km까지 남하가 가능하다. 관측점과 간월호 배수갑문까지 직선 거리는 약 6.8 km로 남하하는 잔차류가 1일 동안 이동이 가능한 거리의 범위에 포함된다. 이는 남하하는 잔차류의 주기적 변동이 간월/부남호의 방류량 변동과 유의함을 보여주는 것으로, 방류 이후 약 1일 정도 후 죽도 인근의 잔차류에 영향을 주는 것으로 이해할 수 있다.

요약 및 토의

본 연구를 위해 천수만 죽도 동부에서 2010년 7월 29일부터 8월 30일까지 33일간 초음파식속측계(ADCP)를 설치하여 1 m 간격으로 14개 층의 유향, 유속 자료를 10분 간격으로 취득하였다. 관측 자료에 대한 조화분석을 수행했고, 조류의 진폭과 위상, 조류타원 등을 통해 조류 특성을 확인하였다. 또한 수층별 비조류 성분의 특성을 파악하기 위해 동일 기간의 기상청 바람 자료와 한국농어촌공사 천수만사업단의 서산 AB지구 담수 방류 자료를 활용하여 스펙트럼 특성과 코히런스 특성을 파악했고, 진행 벡터를 통해 비조류 성분의 수층별 순이동 특성을 확인했으며, 바람과 담수 유입 등 외력이 비조류 성분의 변동에 미치는 영향에 대해 파악하였다.

천수만 중앙부에서의 흐름은 크게 조류와 비조류로 나눌 수 있으며, 조화분석 결과를 토대로 한 관측 정점의 조류 특성은 북북서-남남동 방향으로 강한 왕복성 흐름을 보였으며, 창조류가 낙조류보다 우세했다. 비조류 성분은 조석잔차류, 취송류와 밀도류 등의 영향이 포함되어 있으나, 관측자료에서 추출한 비조류 성분만을 통해 각 흐름을 명확하게 구분하여 분석하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 잔차류 성분의 변동에 영향을 끼쳤을 것으로 예상되는 바람과 담수 유입과 잔차류와의 관계에 대해 주로 살펴 보았다.

잔차류의 수층별 평균 유속은 남-북 성분이 동-서 성분에 비해 4~10배 이상 컸고 북향하는 흐름이 가장 우세했다. 표준편차 역시 남-북 성분이 2배이상 큰 것으로 보아 관측 정점에서의 잔차류 변동은 주로 남-북 성분에 의해 좌우된다고 볼 수 있다. 또한 저층보다 표층이 변동성이 크게 나타났는데, 이는 주로 표층에서 작용하는 바람과 담수 유입의 영향에 의한 것으로 보인다.

해수 표면 경사가 없고, 유체 내 압력표면이 수평일 때를 가정한 open sea의 경우 바람에 대한 잔차류 발생(변동)의 반응시간 규모가 지구관성주기 정도의 시간이 경과된 후 바람의 영향이 해류 변동에 본격적으로 나타나기 시작한다. 하지만 폭이 좁은 천해 반폐쇄성 해역의 특성을 가지고 있는 천수만에서는 해면 경사, 성

Fig. 10. Coherency (a) and phase lag (b) between daily discharge and v-component of band-passed residual current.

층(담수 유출) 효과와 마찰력 등 다른 여러 가지 역학적 과정을 거치거나 중첩되어 나타나므로 바람에 대한 반응 시간 규모가 관성 주기(약 20시간)보다 길어질 수 있다.

분석 기간 중 잔차류의 순 이동 거리는 동서 방향으로 1.5~1.8 km, 남-북 방향으로 2.5~6.5 km를 이동했으며, 이 거리는 중주기 풍속의 이동 거리(동-서, 남-북 방향 각각 동쪽과 북쪽으로 총 150 km)의 약 1~4%에 해당되었다. 전 수층의 잔차류와 바람에 대한 스펙트럼 분석 결과 잔차류는 2~5일, 8~10일 주기의 변동성을 보였고, 바람의 주기와 대부분 일치한 것으로 보아 남서풍 계열의 바람이 북향하는 잔차류에 부분적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 잔차류와 바람에 대한 코히런스 분석 결과 3~5개의 상호 유의한 주기가 나타났으며, 일부를 제외한 대부분의 위상차 범위는 2.8일 이내로, 바람 발생 이후 약 2.8일 내에 잔차 성분의 주기적 변동에 영향을 주었다고 볼 수 있다.

표층 잔차류의 북상 이동 거리(3.9 km)는 중층의 북상 이동 거리(6.5 km)보다 약 40% 작았는데, 이는 북쪽 간월/부남 방조제로부터 유입된 담수에 의해 발생한 남향 밀도류의 영향으로 판단된다. 표층 잔차류와 담수 유입량과의 관계를 살펴보기 위해 코히런스 분석을 했으며, 그 결과 4.6일, 2.1일 주기가 유의한 상관관계를 보였다. 천수만 북부에 위치한 간월 방조제에서 방류 후 약 1일 뒤 관측 지점의 잔차류 변동에 영향을 주는 것으로 판단된다.

중주기 풍속과 남-북 성분 잔차류, 두 성분의 상관계수를 보면 상호 관계가 있는 것으로 보인다. 하지만 잔차류는 특이하게 바람 방향의 왼쪽 방향인 북북서 방향으로 흘렀는데, 이는 다음 두 가지 경우에 의한 가능성을 생각해 볼 수 있다. 첫째로는 남북으로 좁고 긴 형태의 천수만에서 남서풍이 불 경우 북동 방향으로 발달한 취송류가 해안선에 가로막혀 더 이상 흐르지 못하고 해안선 쪽에 축적되어 해면 경사를 이루며, 이 때 서쪽 방향으로의 반대 흐름이 발생할 수 있다. 두 번째로는 수심과 해안선의 영향을 받아 북북서 방향으로 흐를 수 있는 조석잔차류에 대한 가능성을 생각해 볼 수 있다. 하지만 이 두 가지 모두 이를 뒷받침 할 수 있는 근거 자료가 부족하여 완벽한 설명은 불가능하다.

본 연구에서 다양한 분석 방법을 통해 바람과 담수 유입이 천수만에서의 비조류 성분에 미치는 영향에 대해 살펴보았으나, 중앙부 한 곳의 다층유속 관측 결과만을 토대로 잔차류 변동에 대한 각 외력들의 기여도를 정확하게 파악하고 그 원인을 찾는 것은 많은 제약이 있다. 따라서 저자는 현재 3차원 수치모델을 활용하여 천수만에서 조석, 담수유입, 바람 등의 외력이 해수유동과 염분장에 미치는 영향에 대한 다양한 모델링 실험과 연구를 수행하고 있다. 현장 관측자료 분석과 더불어 수치모델링 실험 결과에 대한 분석을 통해 천수만의 해수 유동 특성에 대해 보다 자세히 이해할 수 있을 것으로 예상된다.

천수만에서는 홍수기에 서산 AB지구 방조제에서 각종 쓰레기와 오염물질 등이 포함되어 있는 부영양화된 담수가 만 북부로 유입된다. 이 때 유입된 각종 물질들은 담수 유입에 의해 발생된 밀도류를 타고 남하하여 1~2 km/tidal cycle의 속도로 10~15일 이내에 천수만 입구를 빠져나가야 한다(이 등, 2011; 정 등, 2011b). 하지만 천수만 중앙부의 비조류 성분에 대한 다양한 분석 결과 북향하는 잔차류가 오랜 시간 지속되었고, 이는 만 내로 유입된 물질들이 쉽게 외해로 빠져나가지 못하게 하여 천수만 북부에서의

체류시간을 증가시킬 가능성이 있다. 천수만에서의 각종 오염물질의 장기간 체류는 기존 보고된 천수만의 빈산소 수괴의 발생과 지속 등의 문제(Ro and Choi, 2004; 최, 2004; 정, 2012c) 뿐만 아니라 생물상 변화, 생산량 감소 등의 생태 환경과 직결되는 문제(이 등, 2011)로써 해양 생물을 이용하는 인간들에게 더 큰 영향을 미칠 수 있으므로 더욱 다양한 방법을 통한 총체적 연구가 이루어져야 한다.

사 사

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었으며, 2010년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받은 충청씨그랜트 사업에 의해 수행되었습니다. 이 논문을 검토하고 조언을 해 주신 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌(References)

- 기상청, 2010. 지역별 상세관측자료(AWS)-http://www.kma.go.kr/weather/observation/aws_table_popup.jsp.
- 김창식, 1996. 천수만의 물리적 해양환경. 충남대학교 해양연구소, 충남대학교 해양연구소 심포지움 논문집, 1-21.
- 박동원, 1976. 원격탐사에 의한 서해안 천수만 간척지 지형 연구. 과학기술서 R-76-72, 83p.
- 소재귀, 정경태, 채장원, 1998. 천수만 방조제 건설로 인한 조석 현상 변화. 한국해양·해양공학회지, 10(4): 151-164.
- 유익환, 1992. 천수만 및 연근해역의 해수유동과 확산 수치모델링. 충남대학교 대학원 석사학위논문, 64p.
- 이태원, 1996. 천수만 어류의 종조성 변화 1. 저어류. 한국수산학회지, 29: 71-83.
- 이태원, 1998. 천수만 어류의 종조성 변화 3. 부어류. 한국수산학회지, 31: 654-664.
- 이태원, 문형태, 최진석, 1997. 천수만 어류의 종조성 변화 2. 대천 해빈 쇄파대 어류. 한국어류학회지, 9: 79-90.
- 이태원, 최만식, 양성렬, 마채우, 노영재, 박수철, 2011. 천수만해역 환경조사 및 어장 이용방안 연구용역 최종보고서. 충청남도, 95p.
- 정광영, 2007. 남해 강진만에서의 바람과 담수 유입에 의한 하계 해수순환 수치모델링, 충남대학교 대학원 석사학위논문.
- 정광영, 노영재, 2010. 남해 강진만에서 성층 형성과 성층 파괴 과정. 한국해양학회지 '바다', 15(3): 97-109.
- 정광영, 노영재, 김백진, 2011a, 서해 천수만의 하계 해수유동 수치모델링 실험. 2011 한국해양과학기술협의회 초록집, 146.
- 정광영, 노영재, 김백진, 2011b, 하계 담수 유입이 서해 천수만의 해수순환 변동에 미치는 영향. 2011 한국해양학회 추계학술발표대회 초록집, 105-106.
- 정광영, 노영재, 김백진, 2012a. 남해 강진만에서 남강댐 방류수의 거동 특성 및 체류시간 추정. 한국해양·해양공학회논문집, 24(2): 97-108.
- 정광영, 노영재, 김백진, 2012b. 하계 담수 유입에 따른 천수만 염분장 변동과 성층 형성. 2012 한국해양과학기술협의회 공동 학술대회 초록집, 188.
- 정광영, 노영재, 김백진, 2012c. 2010-2011년 천수만 하계 해/조류 및 물성 관측과 분석. 2012 한국해양과학기술협의회 공동 학술대회, 198.

- 최양호, 2004. 천수만의 수질 예측 모델 개발. 충남대학교 대학원 박사학위논문. 132p.
- 충남대학교 해양연구소, 1996. 천수만의 해양환경. 해양연구소 심포지움 논문집, 67p.
- 한국농어촌공사 천수만사업단, 2010. 서산 A/B 지구 방조제 배수갑문 조작 현황.
- 한국해양연구소, 1978. 고정리 화력발전소 건설지점 부근해역에 대한 해양생태학적 기초조사 연구, BSPI 00014-14-3, 138p.
- Blackman, R.B. and K.W. Tukey, 1958. The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering. *Dover Publications*, 190 p.
- Bye, J.A.T., 1965. Wind-driven circulation in unstratified lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **10**: 451–458.
- Cai, S., Q. Huang and X. Long, 2003. Three-dimensional numerical model study of the residual current in the South China Sea. *Oceanol. Acta*, **26**(5): 597–607.
- Churchill, J.H. and G.T. Csanady, 1983. Near-surface measurements of quasi-Lagrangian velocities in open water. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**: 1669–1680.
- Dube, S.K., A.D. Rao, P.C. Shinha and I. Jain, 1995. Implications of climatic variations in the fresh water outflow in the wind-induced circulation of the Bay of Bengal. *Atmospheric Env.* **29**(16): 2133–2138.
- Duchon, C.E., 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Appl. Meteor.*, **18**: 1016–1022.
- Fernandes, E.H.L., I. Mario-Tapia, K.R. Dyer and O.O. Miller, 2004. The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patis Lagoon estuary. *Ocean Dynamics*, **54**: 328–359.
- Forman, M.G.G., 1978. Manual for tidal current analysis and prediction. *Pacific Marine Sci. Report 78-6. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C.*, 39 p.
- Forman, M.G.G., D.J. Stocchi, Y. Zhang and A.M. Baptista, 2006. Estuarine and tidal currents in the Broughton Archipelago. *Atmos. Ocean*, **44**(1): 47–63.
- Goodrich, D., W. Boicourt, P. Hamilton and D. Pritchard, 1987. Wind-induced destratification in Chesapeake Bay. *J. of Phys. Oceanogr.*, **17**: 2232–2240.
- Guo, X. and A. Valle-Levinson, 2008. Wind effects on the lateral structure of density-driven circulation in Chesapeake Bay. *Cont. Shelf Res.*, **28**: 2450–2471.
- Guo, X. and T. Yanagi, 1996. Seasonal variation of residual current in Tokyo Bay, Japan-diagnostic numerical experiments. *J. Oceanogr.*, **52**: 597–616.
- Imasato, N., 1983. What is tide-induced residual current?, *J. Phys. Oceanogr.*, **13**: 1307–1317.
- Jenkins, G.M. and D.G. Watts, 1968. Spectral analysis and its applications. *Holden-Day*, 525p.
- Jung, K.Y., Y.J. Ro and B.J. Kim, 2011. Impact of the freshwater release on the tidal circulation in the Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea based on numerical modeling. *PICES 2011 Annual Meeting Abs.*, 192.
- Kashiwai, M., 1984. Tidal residual circulation produced by a tidal vortex. Part1. Life-history of a tidal vortex. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**(6): 279–294.
- Kim, S.Y., 2009. Anisotropic Response of surface Current to the Wind in a Coastal Region. *J. Phys. Oceanogr.*, **39**: 1512–1533.
- Kundu, P.K., 1976. Ekman veering observed near the ocean bottom. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**: 238–242.
- Lee, J.S., K.H. Kim, J.H. Sim, J.H. Han, Y.H. Choi and B.J. Khang, 2012. Massive sedimentation of fine sediment with organic matter and enhanced benthic-pelagic coupling by an artificial dyke in semi-enclosed Chonsu Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, **64**: 153–163.
- Lee, S.H., C.Y. Kang, B.J. Choi and C.S. Kim, 2013. Surface current response to wind and plumes in a bay-shape estuary of the eastern Yellow Sea: Ocean radar observation. *Ocean Sci. J.*, **48**(1): 117–139.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley and S. Lentz, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.*, **28**: 929–937.
- Ro, Y.J. and Y.H. Choi, 2004. Application of realtime monitoring of oceanic conditions in the coastal water for environmental management. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **39**(2): 148–154.
- Ro, Y.J., 2007. Tidal and sub-tidal current characteristics in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. *Ocean Sci. J.*, **42**(1): 19–30.
- Ro, Y.J., W.S. Jeon, K.Y. Jung and H.M. Eom, 2007. Numerical Modeling of tide and tidal current in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. *Ocean Sci. J.*, **42**(3): 153–163.
- Uncles, R.J., 2002. Estuarine physical processes research: some recent studies and progress. *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, **55**: 829–856.
- Wang, S.Y. and M.X. Tang, 2004. Exact confidence interval for magnitude-squared coherency estimates. *IEEE Signal. Proc. Lett.*, **11**(3): 326–329.
- Weber, J.E., 1983. Steady wind- and wave-induced currents in the open ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**: 524–530.
- Wong, K.C., 1998. The Seasonal and Subtidal variability in the source region of the Delaware Coastal Current. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **47**: 1–19.
- Wu, J., 1983. Sea-surface drift currents induced by wind and waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**: 1441–1451.
- Yanagi, T., 1983. General mechanism of the tidal residual circulation. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **35**(6): 241–252.
- Yasuda, H., 1980. Generating mechanism of the tidal residual current due to the coastal boundary layer. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **35**: 241–252.
- Zhai, L., J. Sheng and R.J. Greatbatch, 2008. Baroclinic dynamics of wind-driven circulation in a stratified bay: A numerical study using models of varying complexity. *Cont. Shelf Res.*, **28**: 2357–2370.

2012년 7월 6일 원고접수

2013년 5월 22일 수정본 접수

2013년 5월 28일 수정본 채택

담당편집위원: 이상호