

여름철 황해 동부 연안을 따라 흐르는 연안 경계류: 수치 모델 실험

권경만¹ · 최병주^{1,*} · 이상호¹ · 조양기² · 장찬주³

¹군산대학교 해양과학대학 해양학과

²서울대학교 지구환경과학부

³한국해양연구원 기후변화연안재해연구부

Coastal Current Along the Eastern Boundary of the Yellow Sea in Summer: Numerical Simulations

KYUNG MAN KWON¹, BYOUNG-JU CHOI^{1,*}, SANG-HO LEE¹, YANG-KI CHO², AND CHAN JOO JANG³

¹Department of Oceanography, College of Ocean Science and Technology, Kunsan National University, Gunsan 573-701, Korea

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

³Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI, Ansan 425-600, Korea

여름철 황해 동부 연안 저층에 형성되는 수온전선을 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 크기와 위치에 영향을 주는 요소들을 3차원 수치모델인 ROMS를 이용하여 살펴보았다. 여름에 수심이 깊은 외해에서는 태양 가열로 강한 성층이 존재하지만 수심이 얇은 연안에서는 조류가 일으키는 저층 혼합으로 해수물성이 연직으로 잘 혼합된다. 이 과정에서 성층화된 외해와 연직 혼합이 잘되고 수온이 높은 연안 사이에서 수온전선이 형성되며, 수온전선을 가로 지르는 방향의 밀도 구배에 의해 수온전선을 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류가 발생함을 확인하였다. 해류계를 이용한 현장 관측에서도 약 10 cm/s로 북상하는 연안 경계류가 관측되었다. 이러한 수온전선을 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류는 주로 조류와 바람의 영향을 크게 받는다. 조류에 의한 저층 혼합과 바람에 의한 표층 혼합이 여름철 황해 동부 경계류에 가장 큰 영향을 주는 요소다. 바람에 의한 표층 혼합은 북쪽으로 흐르는 황해 동부 연안 경계류의 폭을 더 넓게 하여 수송량을 증가시킨다. 강물의 유입과 일사량의 변화는 연안 경계류의 세기와 위치 변화에 큰 영향을 주지 않는다. 성층이 강하게 이루어지는 여름철 황해 동부 연안 36°N에서는 대조기(소조기) 동안 강한(약한) 조류가 북쪽으로 흐르는 해류의 수송량을 증가(감소)시키지만, 동안 경계류의 위치를 크게 변화시키지는 않는다. 연안 경계류의 평균적인 위치는 바람의 세기 변화에 따라 변화하였다.

Coastal boundary current flows along the eastern boundary of the Yellow Sea and its speed was about 0.1 m/s during the summer 2007. In order to find major factors that affect the coastal boundary current in the eastern Yellow Sea, three-dimensional numerical model experiments were performed. The model simulation results were validated against hydrographic and current meter data in the eastern Yellow Sea. The eastern boundary current flows along the bottom front over the upper part of sloping bottom. Strength and position of the current were affected by tides, winds, local river discharge, and solar radiation. Tidal stirring and surface wind mixing were major factors that control the summertime boundary currents along the bottom front. Tidal stirring was essential to generate the bottom temperature front and boundary current. Wind mixing made the boundary current wider and augmented its northward transport. Buoyancy forcing from the freshwater input and solar radiation also affected the boundary current but their contributions were minor. Strong (weak) tidal mixing during spring (neap) tides made the northward transport larger (smaller) in the numerical simulations. But offshore position of the eastern boundary current's major axis was not apparently changed by the spring-neap cycle in the mid-eastern Yellow Sea due to strong summer stratification. The mean position of coastal boundary current varied due to variations in the level of wind mixing.

Keywords: Yellow Sea, coastal boundary current, tidal stirring, wind mixing

서 론

강한 조류가 경사진 해저지형 위를 왕복운동하면 운동방향식의 비선형 항들에 의해 조류로부터 평균 해류로 운동량(momentum)

*Corresponding author: bjchoi@kunsan.ac.kr

이 전이되어 조석 잔차류(tidal residual current)가 형성된다 (Huthnance, 1973). 황해의 해저지형은 가운데가 깊고 동쪽과 서쪽 경계로 가면서 수심이 얕아진다. 2차원 조석 모델을 이용하여 황해의 해양 순환을 재현하면 한국 연안, 중국 연안 그리고 양자강 천퇴 경계를 따라 조석 잔차류가 발생한다(최, 1990). 조류가

해저지형에 의해 정류되어(tidal rectification) 발생하는 조석 잔차류는 주로 조류의 속력이 빠른 곳에서 뚜렷하게 나타난다. 조석 잔차류는 한국 남서 해안에서 주로 해안선을 오른쪽에 끼고 돌면서 북쪽으로 흐르고, 경기만에서는 만 안쪽에서 황해 중앙부를 향하여 남서쪽으로 흐른다(Lee and Beardsley, 1999). 또한 황해 남서부에서는 조석 잔차류가 양자강 천퇴의 사면을 따라서 남동쪽으로 흐른다.

밀도가 공간적으로 변화하는 해양에서는 조류의 수직혼합으로 만들어진 수온전선이 수평적인 밀도차를 만들어 수직적 해류의 속도차이를 만들어 낼뿐만 아니라 전선을 가로지르는 방향으로 압력 경도를 생성하여 평균 순환에 영향을 준다. 또한 밀도성층은 해저지형에 의한 조류의 정류에도 영향을 준다. 성층이 발달된 미국 동부 메인주 동쪽에 위치한 조지스 뱅크(Georges Bank)와 황해에서 조류에 의한 혼합이 평균 해류를 미치는 영향에 대하여 3차원 해양 수치 모델을 이용하여 연구되어왔다(Chen and Beardsley, 1995; Chen *et al.*, 1995; Lee and Beardsley, 1999). 3차원 해양 순환 모델로 황해 저층의 밀도를 일정하게하고, 상층의 밀도는 강한 성층이 되도록 초기조건을 설정하여 황해 순환을 재현하였을 때 밀도가 모든 층에서 일정하게 설정한 때보다 조류의 정류는 더 빠른 평균해류를 만들었다(Lee and Choi, 1997; Lee and Beardsley, 1999). 해저지형이 경사지고 성층화된 해양에서 조류가 흐를 때 (1) 조류에 의한 난류적인 혼합으로 전선이 생성되고, (2) 해저 경사면 부근에 조석주기와 그 보다 짧은 주기의 내부파가 발생하며, (3) 바다 혼합층 위에 강한 잔차류가 형성된다(Chen and Beardsley, 1995; Lee and Beardsley, 1999; Xia *et al.*, 2006).

천해에서는 해양표층으로 공급되는 태양 복사에너지에 의해 위치 에너지(potential energy)가 감소하게 되고 수층이 안정화된다. 그러나 조석혼합이 수층에 공급하는 난류 운동에너지(turbulence kinetic energy)가 태양 복사에 의해 줄어든 위치에너지보다 더 크게 되면 수층이 수직적으로 혼합된다. 수심이 깊고 태양 복사에너지에 의해 수층이 성층화된 외해와 수직적으로 잘 혼합된 천해 사이에는 표층에서 관측이 가능한 수온전선이 형성된다. Simpson and Hunter(1974)는 아일랜드 해(Irish Sea)에 형성되는 수온전선의 위치와 전선 주변의 영양염 분포 그리고 유속을 관측하였고, 전선의 위치는 조류의 속력과 수심에 따라 결정됨을 이론적으로 제시하였다. 그러나 조석전선의 위치는 대조기와 소조기에 따라 변화하는 조류의 속도 변화에 따라서는 크게 변화하지 않음을 수치 모델 실험과 전선의 위치 변화를 찍은 인공위성 적외선 영상 자료를 통해 알게 되었다(James, 1977; Simpson and Bowers, 1979). Simpson *et al.*(1978)은 조석뿐만 아니라 바람에 의한 수직 혼합도 전선의 위치를 결정하는 데 중요함을 이론적으로 제시하였고, Bowers and Simpson(1987)은 조석혼합에 의해 형성된 전선의 위치를 결정하는 여러 가지 이론적 식들을 정리하고 그 식들의 이론적 결과들을 유럽연안의 바다에서 얻은 관측 자료와 비교하였다.

조석혼합으로 형성된 전선을 가로지르는 방향으로 발생하는 2차적 순환에 의해 일어나는 영양염의 공급, 플랑크톤의 성장 그리고 바다 새들의 적응에 관한 연구가 계속 진행되고 있다. 조석전선은 바다 생태계를 유지 하는데 기본이 되는 식물 플랑크톤의 성장, 생산력 및 분포에 큰 영향을 주고 또한 보다 상위단계 생물들의 성장과 분포에도 영향을 주고 있다(Pingree *et al.*, 1978, 1983;

Simpson *et al.*, 1982). Sun and Cho(2010)는 연안에서 조석전선을 정의하는 지수와 조석전선이 형성되고 유지되는 역학 그리고 이와 관련된 생물학적 과정들에 대해 그 동안의 연구들을 정리하였다.

Lie(1989)는 황해 동남부에서 수온과 염분 관측 자료를 이용하여 수층의 위치 에너지를 계산하고, 수치 모델 결과와 적외선 영상을 이용하여 표면에서 관측이 가능한 수온전선의 위치를 추정하였다. 황해 동부를 촬영한 적외선 영상에서는 조류의 혼합이 활발한 태안반도 서쪽 연안에 조석전선이 4월부터 형성되기 시작하여 8월에 가장 뚜렷하고 11월에 소멸된다(Seung *et al.*, 1990). 여름철 황해 중앙부와 동부는 성층 수역, 전선 역 및 연안 수역으로 이루어져있고, 이러한 물리적 환경은 식물플랑크톤의 분포와 1차 생산력에 크게 영향을 준다. Choi(1991)는 황해 동중부에 위치한 태안반도 서쪽 연안에 형성되는 조석전선 주변에서 높은 일차생산력을 관측하였다.

Uda(1934), Niino and Emery(1961), Yuan and Su(1984) 등의 해류 모식도에 의하면 여름철 황해의 해수순환은 기본적으로 황해 중앙부를 따라 북상하는 황해난류와 한국연안 및 중국연안을 따라 남하하는 연안류로 구성되어 있다. 그러나 Beardsley *et al.*(1992)은 인공위성으로 추적하는 부표 실험을 통하여 여름철 황해 동부에서 북쪽으로 흐르는 순환을 발견하였다. Yanagi and Takahashi(1993)는 장기 평균 수온과 염분 자료를 사용하고 진단 방정식을 풀어 해를 구하는 해양 순환 수치 모델을 이용하여 여름철 황해 표층과 중층의 해류가 반시계방향으로 순환함을 보였다. Yanagi *et al.*(1997)도 인공위성 고도계를 이용하여 관측한 해수면 높이 자료와 해양 순환 수치 모델의 결과를 사용하여 여름철에 황해에서 반시계 방향 순환이 나타남을 제시하였다.

Seung(1987)은 단순화된 지형조정(geostrophic adjustment) 이론 모델을 이용하여 황해 동부 연안의 혼합수가 북쪽으로 흐름을 보이고, 그 부피 수송량은 약 $0.01 \text{ Sv}(10^6 \text{ m}^3/\text{s})$ 로 추정하였다. Naimie *et al.*(2001)은 3차원 해양 순환 모델에 월평균 바람과 4대 분조의 조석 그리고 양자강 담수의 유입을 외력으로 주어 황해의 순환을 계절적으로 재현하고 분석하였다. 이때 표층 수온을 강제로 장기 월평균 값으로 치환(nudging)하여 수층의 성층을 형성시키고 대기와의 열교환량을 조정하였다. 수치 실험 분석 결과 여름철 황해 동부의 순환은 수직적 밀도 성층과 조석의 혼합에 의해 발생하는 경압적 압력 경도력(baroclinic pressure gradient)이 지배적인 힘이라고 주장하였다. Xia *et al.*(2006)은 월평균 바람과 1개 분조(M2)의 조석 그리고 양자강 담수의 유입을 외력으로 사용한 3차원 해양 순환 수치 모델로 황해 동부에서 조석전선을 따라 흐르는 연안 경계류를 재현하였다. 또한 Xia *et al.*(2006)은 운동방정식의 각 항들의 크기를 역학적으로 분석하여 여름철 황해 동부 연안에서 북쪽으로 흐르는 경계류는 전향력과 압력 경도력의 균형(quasi-geostrophic balance)으로 유지됨을 보였다. 이때 조석혼합이 저층에 형성된 수온전선을 가로지르는 방향으로 경압적 압력 경도력을 만드는데 가장 중요한 역할을 하였다.

수온전선의 위치가 시간적으로 변화하므로 현장에 해류계를 계류하여 전선을 따라 흐르는 해류를 관측하는 데 큰 어려움이 있다(Simpson and Hunter, 1974; Sun and Cho, 2010). 이러한 이유로 황해 동부 바다 경사면 위에 조류의 강한 혼합으로 형성되는

전선을 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류는 현장에 해류계를 계류하여 관측한 결과가 제시된 적이 없다. 또한 황해 동부에서 바닥 경사면 위에 형성된 전선을 따라 흐르는 연안 경계류의 수평 분포, 수직구조 및 변동성에 관한 연구가 부족하다.

본 연구에서는 기존 수치 실험 연구들을 보완하기 위하여 수직적으로 30개 층으로 이루어진 s -좌표계를 사용하여 수온약층이 더 잘 재현되도록 하였다. 개방경계에서 M_2 , S_2 , O_1 , K_1 , N_2 , K_2 , P_1 및 Q_1 등 총 8개 조석 분조를 사용하여 수치 모델 영역 안에서 조석에 의한 혼합이 더 잘 재현되도록 하였다. 또한 일평균 바람자료를 사용함으로써 장기 월평균 바람 자료를 사용한 경우보다 더욱 많은 표층 혼합이 일어나도록 시도하였다.

표층을 통한 대기와의 열교환은 해양 수치 모델에서 직접 계산하였다. 또한 본 연구에서는 해류계를 현장에 계류하여 연안 경계류를 관측한 결과를 제시하였다. 본 연구의 첫 번째 목적은 여름철 황해 동부 연안에서 바닥의 경사면 위에 조류의 혼합으로 형성되는 전선을 따라 북쪽으로 흐르는 해류를 2007년 여름에 해류계를 계류하여 관측한 자료로부터 확인하고, 3차원 해양 순환 수치 모델 실험을 통하여 북쪽으로 흐르는 연안 경계류 주변의 표층 수온과 해류의 공간적인 분포를 재현하는 것이다. 두 번째 목적은 조석, 바람 및 강물의 유입이 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 발생 위치와 세기에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 마지막으로 대조기와 소조기에 조석혼합의 크기가 달라짐에 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 발생 위치와 세기변화를 알아보았다.

자료 및 방법

자료

황해 동부 연안역 해수유동 특성을 파악하기 위해 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, KHOA)은 2007년 2월 27일부터 12월 23일까지 총 75개 정점에서 유향과 유속 및 수온을 관측하였다(국립해양조사원, 2007). 각 관측점에서 해류계(RCM 7, 9)를 표층 부이로부터 5 m 아래 수중에 설치하거나 ADCP를 해저 바닥에 설치하여 유향과 유속을 1개월간 10분 간격으로 기록하였다. 본 연구에서는 황해 동부에 위치하고 수심이 20 m 이상인 13개 정점에서 2007년 7월부터 8월 사이에 관측한 해류 자료를 사용하였다(Fig. 4).

미국 해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)은 극궤도 기상위성에 탑재된 고분해능 복사계(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)를 이용하여 전지구 해표면 수온자료를 관측하고 있다. 본 연구에서는 국립수산과학원(National Fisheries Research and Development Institute, NFRDI)이 미국 해양기상청 기상위성으로부터 전송받은 자료를 처리하여 계산한 해표면 수온 자료를 사용하였다. 황해 동부 연안을 따라 형성된 수온전선과 냉수역들이 잘 나타나는 시기인 2007년 7월 14일의 고해상도 인공위성 해표면 수온자료(Fig. 2a)와 모델이 모사한 표층 수온분포를 비교하였다(Fig. 2b).

국립수산과학원(NFRDI)은 황해 동부에서 2007년 6회에 걸쳐 수온, 염분, 용존산소, 영양염류 및 동식물 플랑크톤 등 17개 항목을 관측하였다. 수치모델의 결과를 검증하기 위하여 이 중 2007년 8월에 308정선을 따라 관측한 수온 수직 분포를 사용하였다(Fig. 1).

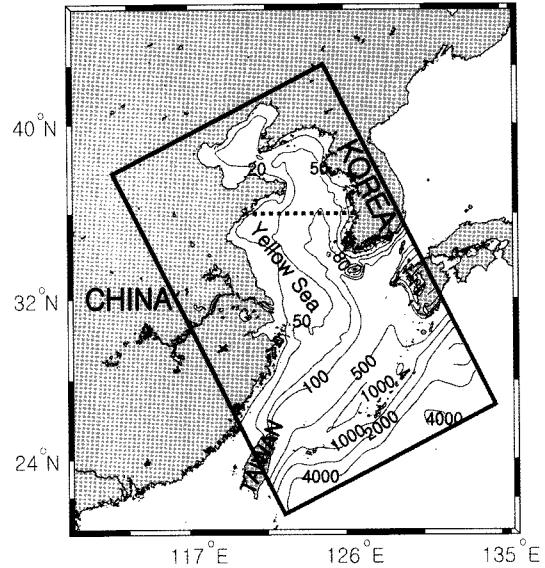


Fig. 1. A nested modeling domain (solid rectangle with 8 km horizontal grid spacing over the Yellow Sea). Bottom depths (in meters) are indicated by contours. Dotted line denotes the zonal transect, approximately along 36°N, where vertical sections of temperature and velocity are compared.

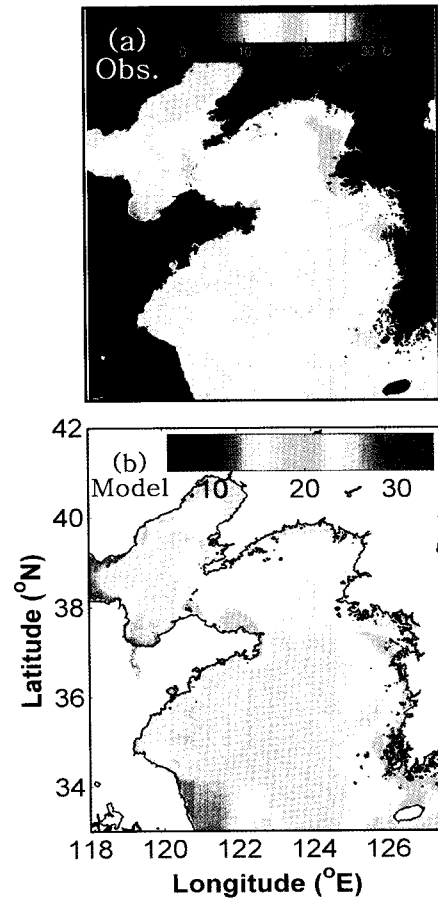


Fig. 2. Horizontal distribution of temperature on 14 July 2007 (a) sea surface temperature from satellite measurement and (b) 5-m depth temperature from model simulation with tides, winds and river inflow forcing. The satellite AVHRR SST data were supplied by NOAA and processed by NFRDI of Korea.

3차원 해양 순환 모델

본 연구에 사용한 해양 순환 모델은 연안과 더불어 대양의 수 치모사에 널리 사용되는 Regional Ocean Modeling System (ROMS; Song and Haidvogel, 1994)이다. ROMS에 사용된 지배 방정식은 원시방정식이고, 정수압 근사와 부씨네스크 근사 (Boussinesq approximation)를 사용한다. 대기와 해양의 상호작용에 큰 영향을 미치는 열수지의 변화를 모사하기 위해 바람에 의한 표층의 운동, 현열 및 잠열 등의 요소들을 이용하여 대기와 해양의 열수지를 계산하는 bulk parameterization(Fairall *et al.*, 1996) 방법을 사용하였다.

연직좌표계는 s-좌표계(stretched terrain-following coordinate)를 사용하였다. s-좌표계는 상층 경계층 재현이 용이한 z-좌표계의 장점과 바닥경계층 구현이 용이한 σ -좌표계의 장점만을 살린 좌표계다. s-좌표계는 수온약층이나 바닥경계층에서 현상과약이 적절하며, 지형에 민감하게 반응하는 압력구배항의 계산 오차가 작도록 개발되었다(Song and Haidvogel, 1994; Shchepetkin and McWilliams, 2000). ROMS는 계산 시간을 효율적으로 분배하기 위해 순압모드와 경압모드를 분리하여 계산하는 시간 분할법(split-explicit time-stepping scheme)을 사용한다.

수치모델의 영역(24°~42.5°N, 113.9°~133.5°E)은 황해, 한국의 남해, 동중국해 그리고 북서태평양의 일부를 포함한다(Fig. 1). 중심 자료는 NGDC(National Geophysical Data Center)의 ETOPO5를 사용하였으며, 황해와 한국의 남해는 수평 격자 30초 간격으로 만들어진 Seo(2008)의 자료를 사용하였다. 수평격자의 간격은 약 1/12°이며, 수직적으로는 30개 층으로 구성되었다. 바닥 마찰력은 속도의 제곱에 비례하는 식(quadratic drag law)을 사용하였으며, 이때 바닥 마찰계수(drag coefficient, Cd)는 0.003를 사용하였다.

모델 영역 내의 초기 수온과 염분은 Seo *et al.*(2009)이 1993년부터 수치 적분한 북서태평양 중규모 해수순환 모델의 2007년 결과를 사용하였다. 개방경계역의 자료 또한 Seo *et al.*(2009)의 북서태평양 해수순환 결과를 사용하여 매달 변화하도록 하였다. 해양 수치 모델의 개방 경계조건으로 0.25° 수평 격자 크기를 갖는 Oregon global tide model version 6 (TPXO6)의 조석자료를 황해 해양 순환 수치 모델의 격자에 맞게 내삽 하였다. TPXO6는 TOPEX/Poseidon 인공위성의 관측 자료를 이용한 전 지구 모델 (Oregon global model) 결과이며(Egbert and Erofeeva, 2002), 본 연구에서는 8개 분조(M₂, S₂, O₁, K₁, N₂, K₂, P₁ 및 Q₁)를 이용하였다.

해양 수치 모델에서 사용한 대기 입력 자료는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecast, ECMWF)에서 전 세계의 기상 관측 자료를 4-DVAR(4-dimensional variational)

자료동화기법으로 수치예보모델에 동화하여 생산한 것이다. 대기 입력 자료는 수평적으로 약 0.35° 간격으로 제공되며, 시간적으로는 매 12시간 간격으로 제공된다. 본 연구에서는 1일 평균한 해상 풍, 기온, 상대 습도, 해면기압 및 단파 복사량을 모델 격자에 맞게 내삽하여 사용하였다.

양자강의 방류량은 방류량 관측 자료와 강수량과의 관계식을 이용하여 구한 월평균 자료로 사용하였다(Yang, 2006). 황하강의 방류량은 양자강 방류량의 5%로 사용하였다. 그리고 황해 동부 연안의 염분 분포에 큰 영향을 미치는 한강, 금강 및 영산강의 담수 방류량은 국토해양부 홍수통제소에서 추산한 자료를 사용하였으며, 만경강과 동진강의 담수 방류량은 각각 금강 담수 방류량의 15%와 12%를 사용하였다(Table 1).

관측 자료와 모델 결과 비교

해류, 수온 및 염분의 시-공간적 변화를 모사하는 3차원 해양 순환 수치 모델에 조석, 바람 및 강물의 유입을 외력으로 사용하여 여름철 황해 동부의 순환을 재현하고 그 결과를 현장 관측 자료와 비교하였다(Table 2, EXP-TWR).

해표면 수온 분포 비교

인공위성에서 관측한 해면수온을 같은 시기에 수치모델이 재현한 수심 5 m의 일평균 수온 분포와 비교하였다(Fig. 2). 수치모델 결과에서 해표면 근처의 값을 사용하여 수평 수온 분포를 나타낼 수 있으나, 황해 동부 연안과 같이 조차가 큰(5 m 이상) 해역에서는 해수면 높이가 시간적으로 크게 변화하고, 해면 근처의 수온이 하루 동안에 시간적으로 변화하므로 비교적 시간적으로 안정적인

Table 2. Forcing combination for 8 numerical experiments. T, W and R represent tide, wind and river inflow, respectively. S and N stand for spring and neap tides, respectively. 10P and 10N represent 10% increase and 10% decrease of solar radiation, respectively.

Experiment	Forcing	Tide	Wind	River	Solar Radiation
EXP-T		○	×	×	Daily
EXP-TW		○	Daily	○	Daily
EXP-TR		○	×	○	Daily
EXP-TWR		○	Daily	○	Daily
EXP-WR		×	Daily	○	Daily
EXP-SN		○	Monthly	○	Monthly
EXP-10P		○	Daily	○	Daily × 1.1
EXP-10N		○	Daily	○	Daily × 0.9

Table 1. Monthly mean freshwater discharge (m³/s) for the seven rivers flowing into the numerical model domain.

River	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Han	156	161	160	246	467	638	5647	1100	261	173	185	180
Keum	40	46	82	40	65	104	308	461	819	125	64	55
Mankyong	6	7	12	6	10	16	46	69	123	19	10	8
Dongjin	5	6	10	5	8	12	37	55	98	15	8	7
Youngsan	13	23	43	11	14	13	73	143	435	52	21	15
Changjiang	14951	17125	22780	27089	25381	37336	39304	49309	37186	26415	22558	23235
Huangho	748	856	1139	1354	1269	1867	1965	2465	1859	1321	1128	1162

값을 나타내는 수심 5 m의 수온 값을 수치모델에 재현된 표층 수온 값으로 사용하였다. 2007년 7월 14일 황해 내부의 전체적인 해면수온은 22~26°C이다. 인공위성에서 관측한 해표면 수온 자료를 살펴보면 한국의 남서쪽 연안, 태안반도 북서쪽 및 웅진반도 북쪽부터 서한만 연안을 따라 표층 수온이 주변보다 낮다(Fig. 2a). 해양 순환 수치 모델의 결과에도 같은 지역에서 주변보다 낮은 표층 수온이 재현되었다(Fig. 2b). 인공위성이 관측한 자료의 해면수온은 한 순간의 해표면 관측 값이고, 수치 모델이 재현한 결과 값은 수심 5 m에서의 일평균이기 때문에 두 수온 값 사이에 차이가 있으나 그 공간적인 분포 형태는 유사하다. 수치 모델로 재현된 수심 5 m의 수온을 살펴보면 황해 동부 연안을 따라 수온이 낮은 띠가 나타나며, 이러한 저수온 띠는 저층에서 조류에 의한 수직혼합이 강하여 수온이 낮은 물이 표층까지 혼합되어 해표면에 수온 전선이 형성되는 위치를 보여준다.

연직 수온 분포 비교

국립수산과학원이 2007년 8월에 황해 동부에 위치한 308 정선에서 관측한 수온 자료와 해양 순환 수치 모델이 재현한 수온의 수직 분포를 비교하였다(Fig. 3). 관측 수온은 2007년 8월 16일의 자료이며 이것과 비교하는 데 사용된 수치 모델의 수온은 2007년 8월 16일의 일평균 자료이다. 관측된 수온 자료를 살펴보면 외해에서 수온약층은 10~30 m 사이 수심에 형성되며, 수심이 40 m 이하인 연안 가까이에서는 조류의 강한 혼합에 의하여 물이 수직으로 잘 혼합되어 저층에서 등온선이 외해에서 연안으로 오면서 해저 바닥 쪽으로 기울어져 있는 것을 볼 수 있다.

해양 순환 수치 모델의 결과에서도 외해에서는 표층수와 저층수 사이에 강한 성층이 생기며 수심이 얇은 연안에서는 강한 조류의 혼합으로 물이 연직방향으로 잘 섞여 저층에서 등온선이 해저 바닥 쪽으로 기울어져 있다. 수심 15 m 이하로 얇은 해안 근처에서는 수온 관측이 이루어지지 않았으나 수치 모델 결과에 의하면 해안 근처에서는 물이 수직적으로 표층부터 저층까지 섞여 있으며 수온은 약 26 이상이 된다. 같은 장소에서 1989년 8월에 이루어진 수온 관측에서도 수심이 15 m 보다 얇은 해안 근처는 수온이 가장 높고 수직적으로 혼합이 잘 되어 있었다(Seung *et al.* 1990의 Fig. 11).

수치 모델로 재현한 수온 분포와 관측된 수온 분포의 가장 큰 차이점은 표층 혼합층의 두께가 관측된 값보다 얇고 해저 경사면

근처에서 조류에 의한 혼합으로 만들어진 전선의 수온 구배가 관측 값보다 큰 것이다. 이와 같은 차이점은 수치 모델 실험에서 조류에 의한 저층 혼합이 실제보다 강해서 발생할 수 있다. 또한 해양 순환 수치 모델에서 표층 혼합을 위하여 일평균 바람을 사용하였으며, 일평균 바람 자료에는 하루 주기 이하의 바람 변동성이 포함되어 있지 않았다. 그 결과 해양 수치 모델에서 바람에 의한 표층 혼합이 실제 보다 작게 묘사되고, 표층의 두께는 관측 자료의 경우보다 얇으며 수온 약층의 깊이는 관측 자료의 경우보다 전체적으로 얇게 나타났다.

해류 관측 자료와 비교

국립해양조사원은 2007년 7월부터 8월까지 황해 중부 동쪽 연안 13개 지점에서 표층(5 m) 해류를 현장 관측하였다(Fig. 4). 수심 20~60 m 사이에 위치한 8개 지점에서 북쪽, 북서쪽 또는 북동쪽으로 흐르는 해류가 관측되었다. 해양 순환 수치 모델에 재현된 해류도 관측 자료와 같이 동수심선을 따라 북쪽 또는 북서쪽으로

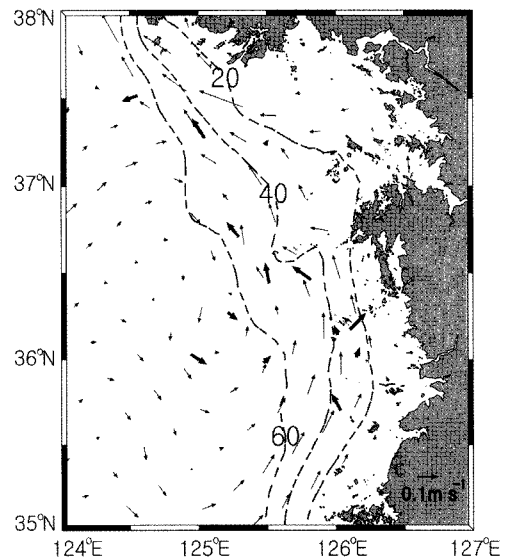


Fig. 4. Comparison of mean currents from observation (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration) and model simulation with tides and river inflow. Thick vectors are observation and thin vectors are model simulation result at 5 m from the surface. Isobaths of 20, 40 and 60 m are indicated by dashed lines.

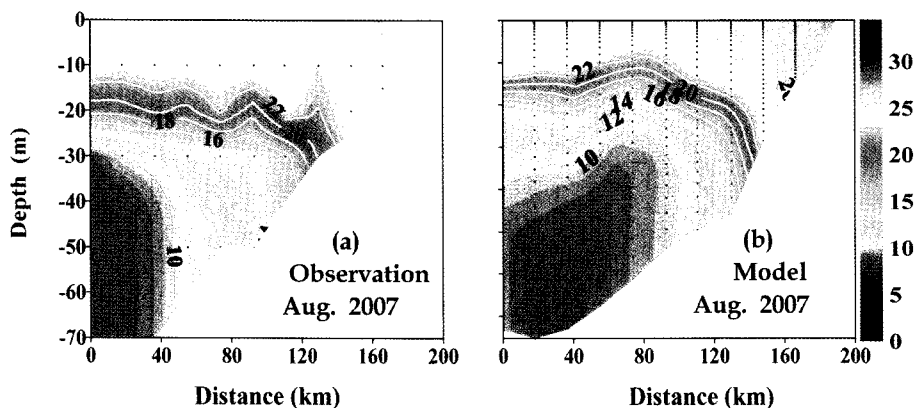


Fig. 3. Vertical temperature (°C) section along the line 308 of NFRDI (approximately along 36°N) in August 2007 from (a) observation and (b) model simulation with tides, winds and river inflow. Contour interval is 2 °C.

흐르는 연안 경계류를 재현하고 있다. 이러한 해류는 저층에 형성된 전선을 따라 전선 상부에 흐르는 해류다. 해류의 크기와 방향은 지역에 따라 다르지만 그 크기가 약 2~10 cm/s 정도다. 각 지점에서 해류의 방향과 크기는 관측 자료와 수치모델이 재현한 값이 서로 약간씩 다르다. 이러한 차이는 관측 해류가 한 지점에서 관측한 값이고, 수치모델의 결과는 모델의 격자 간격(약 8 km) 내의 평균값이기 때문에 나타날 수도 있다. 또한 해양 순환 수치 모델에 재현된 수온전선의 위치가 실제 수온전선의 위치와 다른 곳에 재현되기 때문에 해류의 유속과 방향이 현장 관측 자료와 다르게 나타날 수도 있다.

해양 순환 수치 실험 결과

해양 순환 수치 모델로 재현한 2007년 여름철 황해의 순환 특성을 먼저 살펴보고, 해양 순환 수치 모델의 외력으로 사용되는 조석, 바람 및 강물의 유입이 각각 황해 동부 연안에서 복사하는 연안 경계류의 위치와 세기에 미치는 영향을 조사하였다(Table 2). 또한 일사량의 변화 그리고 대조기와 소조기 동안 조류의 세기가 달라질 때 연안 경계류의 위치와 세기 변화를 살펴보았다.

순환특성

조석, 바람 및 강물의 유입을 3차원 해양 순환 수치 모델에 외력으로 주어(EXP-TWR) 황해의 해양 순환을 재현하면, 표층(5 m) 해류는 황해의 동쪽 연안을 따라 전 연안에서 북상하며 이 해류가 용진반도를 지나 황해 북부 해역에서 반시계방향으로 순환하여 산둥반도 연안까지 연장된다(Fig. 5a). 산둥반도 연안을 따라 남향류가 존재하며 이 연안류는 중국 양자강 하구로부터 북상하는 해류와 만나서 약 36.2°N에서 동남쪽방향으로 흘러 제주해협을 향한다. 황해 중앙부 35°~38°N에서는 표층해류가 주로 동쪽방향으로 흐르며 황해 동쪽 연안의 연안류에 물을 공급한다. 이 황해 중앙부의 표층해류는 황해 동부에서 북상하는 연안류에 비해 유속이 약하다.

중층(20 m)에서도 황해 동부 연안에 형성된 뚜렷한 저층 수온 전선을 따라 해류가 황해 전역에서 반시계 방향으로 순환한다(Fig. 5b). 수치 모델로 재현된 20 m 수심 수온의 수평적 분포에는 14

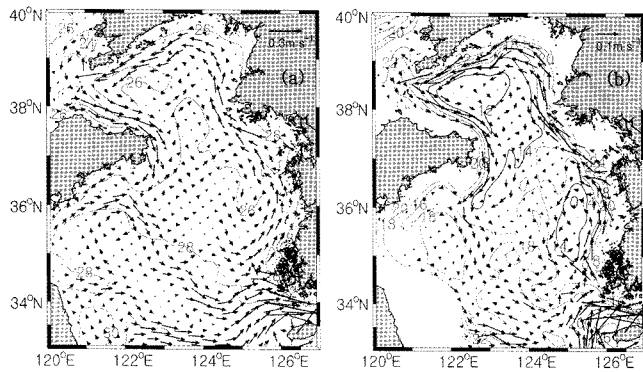


Fig. 5. Horizontal distribution of monthly mean currents (vectors) and temperature (contours) at (a) 5 m and (b) 20 m depths from the numerical simulation with tides, winds and river inflow. Note that different vector scales are used for clarity for each depth. Contour interval is 2 °C.

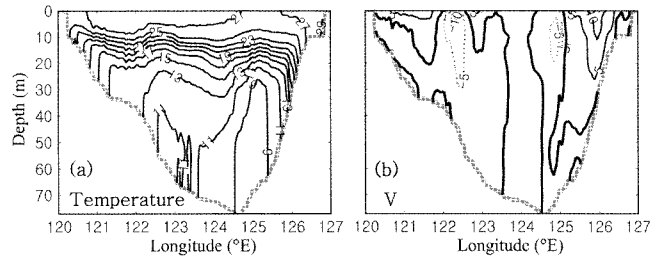


Fig. 6. (a) Monthly mean temperature and (b) northward component of velocity along the 36°N transect in August 2007 from the numerical simulation with tides, winds and river inflow. Unit of temperature and velocity are °C and cm/s, respectively.

이하의 냉수가 황해 북부와 황해 남동부에 나타난다. 20 m 수심에서 연안 경계류는 표층 연안 경계류보다 유속이 더 작고 폭도 더 좁다.

3차원 해양 순환 모델로 재현된 해류는 전반적으로 Yanagi and Takahashi(1993)가 진단방정식(diagnostic equation)을 수치 적분으로 풀 모델 결과와 유사하게 표층과 중층에서 반시계방향의 순환을 보이지만, 수평-수직 격자 간격이 작은 3차원 해양 순환 모델로 재현한 해류의 세부적인 구조가 더 자세하다(Fig. 5). 2007년 8월에 36°N을 따라 지른 동서 단면에서 수온의 수직 분포를 살펴 보면 외해에서는 수온이 높은 표층과 낮은 하층 사이에 수온약층이 형성되고, 수층이 수직적으로 강한 성층 구조를 갖는다(Fig. 6a). 황해 동부 연안에서는 수심이 알아 지는 경사면 위에서 조석 혼합으로 해저경계층 근처의 수온이 수직적으로 거의 일정하게 된다. 성층이 강한 외해와 연직 혼합이 활발한 황해 동부 연안 사이의 바다 근처에서 강한 수온전선이 형성되고 이 전선을 따라 북상하는 연안 경계류가 형성된다(Fig. 6b). 이러한 해류의 발생은 이상적인 황해의 성층과 조석 조건에서 해양 순환 수치 실험을 수행한 Chen and Beardsley(1995)와 Lee and Beardsley(1999)의 실험 결과와 유사하다.

조석혼합 효과

조류에 의한 연직 혼합이 황해 동부 여름철 순환에 미치는 영향을 알아보기 위하여 외력 중에서 조석을 제거하고 바람과 강물 유입만을 이용하여 해양 순환 수치 실험을 수행하였다(EXP-WR). 이 실험도 2007년 1월 1일에 같은 초기 조건에서 시작하여 황해의 순환을 재현하였다. 2007년 8월 평균 해류와 수온 분포를 구하고(Fig. 7, 8) 이 결과와 조석을 외력으로 포함한 실험의 결과(Fig. 5a, 6a)와 비교하였다. 조석을 외력으로 포함하지 않은 경우에도 해표면 수온 분포는 전체적으로 조석을 외력으로 포함한 경우와 비슷하다. 그러나 저층에 황해 동부 연안을 따라 수온전선이 형성되지 않으며 북상하는 연안 경계류도 발생하지 않는다(Fig. 7). 또한 여름철 황해 남부에서는 전체적으로 시계방향의 순환을 나타낸다. 황해 북동부 해역에서 반시계방향의 순환이 나타나지만 그 크기가 조석을 외력으로 포함한 경우(Fig. 5a)보다 작다. 여름철 강한 태양 복사와 바람에 의한 표층 혼합으로 외해와 연안 근처에서 모두 수온 약층을 중심으로 상부는 따뜻하고 하부는 수온이 낮아 수직적으로 강한 성층구조를 갖는다(Fig. 8). 바다경계층 주변에는 조류에 의한 혼합이 없어 뚜렷한 바다 혼합층이 형성되지

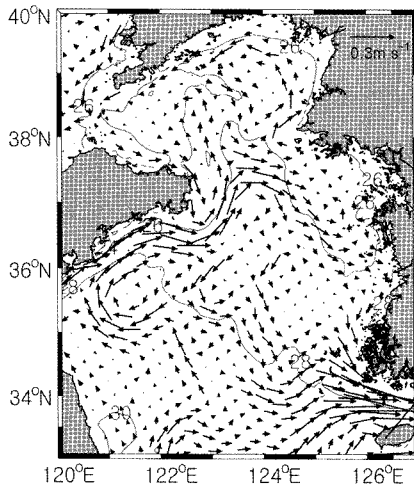


Fig. 7. Monthly mean surface (5 m) temperature and current distributions in August 2007 from the model simulation with winds and fresh water inflow from rivers in August 2007 (EXP-WR).

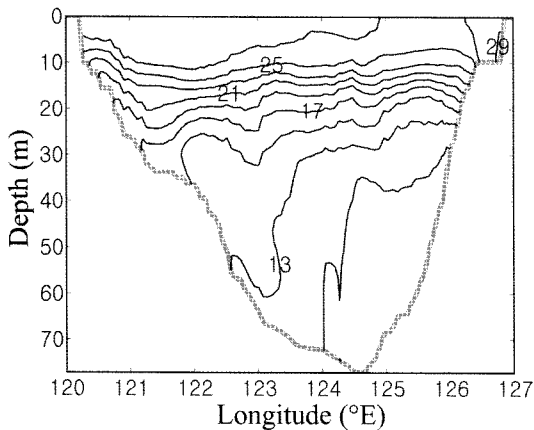


Fig. 8. Vertical sections of monthly mean temperature (°C) along 36°N from the model simulation forced by winds and freshwater inflow from rivers in August 2007 (EXP-WR).

않으며, 저층의 수온이 조석을 포함하여 실험한 결과(Fig. 6a)에서 보다 약 2 °C 높다.

바람의 혼합과 강물 유입

앞 절에서 강한 조류의 혼합 효과로 인해 여름철에 수심이 50 m 이상인 외해와 수심이 얇은 황해 동부 연안사이 해저 경사면위에 전선이 형성되고 동서 방향 밀도 구배에 의해 전선을 따라 경계류가 발생한다는 것을 수치 모델 실험을 통하여 보았다. 또한 2007년 여름철에 관측된 해류 자료에서도 황해 동부 연안에서 북쪽으로 흐르는 해류가 나타났다(Fig. 4).

연안을 따라 북쪽으로 흐르는 경계류가 조석과 바람 그리고 강물에 어떤 영향을 받는지 살펴보기 위하여 네 가지 수치 실험(EXP-T, EXP-TW, EXP-TR, EXP-TWR) 결과를 비교하였다. 네 가지 실험은 모두 공통적으로 같은 월평균 개방 경계 자료, 일평균 기온과 일평균 일사량을 사용하였다. 또한 동일한 초기조건에서 2007년 1월 1일부터 9월 1일까지 실험을 진행하였다(Table 2). 네 가지 실험은 각각 외력으로 조석만 사용한 경우(EXP-T), 조석과 바

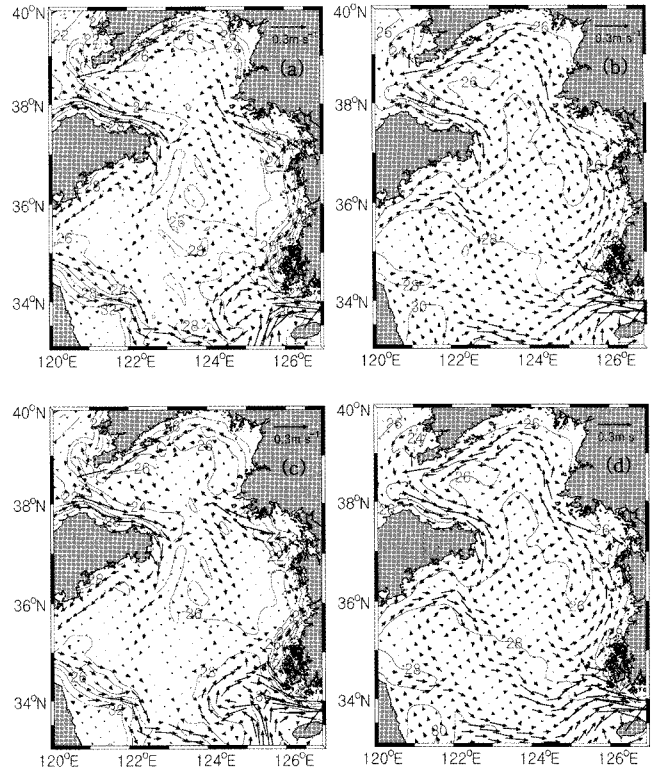


Fig. 9. Monthly mean surface (5 m) temperature (°C) and currents distribution in August 2007 from model simulation forced by (a) tides, (b) tides and winds, (c) tides and river inflow, and (d) tides, winds and river inflow. Contour interval is 2 °C.

람을 사용한 경우(EXP-TW), 조석과 강물의 유입을 사용한 경우(EXP-TR)와 조석과 바람과 강물의 유입 모두 사용한 경우(EXP-TWR)다. 각 수치 모델 실험의 결과를 이용하여 8월 평균 표층 수온과 해류분포를 비교하였다(Fig. 9). 그리고 36°N을 따라서 군산부터 산둥반도 남쪽까지의 수직적인 수온 분포와 남북방향 유속(v)의 분포를 살펴보았다(Fig. 10). 또한 각 조건별 차이를 정량적으로 살펴보기 위하여 36°N을 따라서 군산부터 산둥반도 남쪽까지 동서 단면을 통과하여 북쪽방향으로 흐르는 수송량(volume transport)과 남북방향 유속(v)을 비교하였다(Table 3).

조석만을 외력으로 고려한 해양 순환 수치 실험(EXP-T)에서 황해 동부 연안부터 황해 북부 역까지 뚜렷한 수온전선이 형성된다(Fig. 9a). 조류에 의하여 해저면 근처에 바다 경계층이 형성되고 바다 경계층에서 연직 혼합이 활발하다. 수심이 깊은 곳에서는 바닥 경계층이 하층에만 형성되지만 해안에 가까이 오면 수심이 낮아져 바다 경계층의 두께가 수심과 같아지고 해수의 강한 수직혼합으로 표층 수온이 낮아진다. 이와 같이 바다 경계층의 두께가 수심과 거의 같아지는 곳에서 표층(5 m) 수온이 공간적으로 최저 수온을 보인다(Fig. 9a). 태양으로부터 오는 단파 복사량은 황해 전체적으로 수심이 깊은 외해와 얇은 연안 모두 비슷한 양이 공급되지만 수심이 10 m 보다 얇은 곳은 수층의 두께가 얇아서 표층 수온이 다른 곳에 비하여 상대적으로 더 높다. 해표면의 수온 분포를 살펴보면 외해에서 수온이 높고 조류에 의한 혼합이 활발한 곳에서 수온이 가장 낮아졌다가 해안에 가까워지면 다시 수온이 가장 높아진다. 황해 동부 연안에서 연안 경계류는 해저 경사

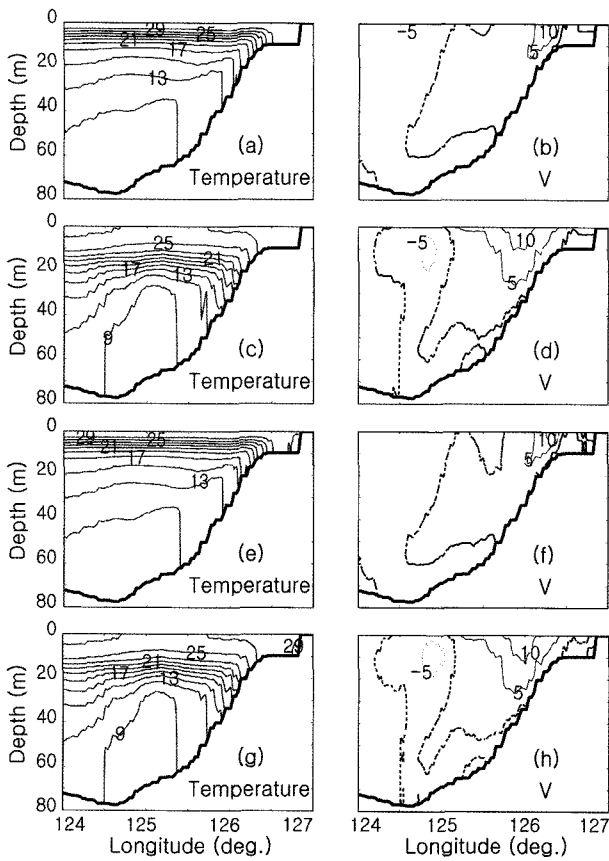


Fig. 10. (left panels) Monthly mean temperature and (right panels) northward component of velocity in August 2007 from model simulation forced by (a, b) tides, (c, d) tides and winds, (e, f) tides and river inflow, and (g, h) tides, winds and river inflow.

Table 3. Transport and maximum surface speed of northward current across 36°N for each experiment with different forcing in August 2007.

Case	Northward volume transport (Sv)	Relative value	Maximum northward velocity (m/s)
EXP-T	0.091	1.00	0.126
EXP-TW	0.259	2.85	0.133
EXP-TR	0.098	1.08	0.128
EXP-TWR	0.267	2.93	0.130

면 바닥 근처에 형성된 수온전선을 따라 좁은 띠를 이루며 북쪽으로 흐른다.

조석과 바람을 해양 수치 모델의 외력으로 사용한 수치 실험 (EXP-TW)에서도 황해 동부 연안부터 황해 북부 연안까지 남쪽에서 북쪽으로 해서 경사면 위에 수온전선이 형성된다(Fig. 9b, 10c). 이때 조류는 해저면 근처의 해수를 혼합하여 바다 경계 혼합층을 형성하고 바람은 표면 혼합층을 형성한다. 바람에 의한 표층 혼합은 수온약층의 수심을 더 깊어지게 만들고 태양의 단파복사열을 많이 흡수하는 해표면 근처(0~1 m)의 물과 표층(1~10 m)의 물을 잘 섞어준다. 그 결과로 표층(5 m)의 수온은 바람에 의한 표층 혼합이 없을 때 보다 더 높아진다. 수온약층의 깊이가 더 깊어져서 표층 (5 m)에서 수온전선의 수온구배는 EXP-T의 경우보다 작아

지만 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 주축이 외해 쪽으로 이동하며 그 폭이 더 넓어지고 깊이도 깊어진다.

조석과 강물의 유입을 해양 수치 모델의 외력으로 사용하고 바람에 의한 표층 혼합이 없는 수치 실험(EXP-TR)에서 황해 동부 연안과 황해 북부 역까지 수온전선이 뚜렷하게 형성된다(Fig. 9c). 수심이 상대적으로 깊은 외해에서는 바람에 의한 표층 혼합이 없어서 수온약층의 깊이가 얕아지고 태양의 단파 복사 에너지가 대부분 해표면 근처(0~1 m)에서 흡수되고 그 아래로 열전달이 적으므로 수심 5 m의 수온이 EXP-TW의 경우 보다 낮다. 그러나 수심이 얕은 해안선 근처에서는 표층(5 m) 수온이 높다. 해안선 근처의 수온이 가장 높고 다음으로 외해의 수온이 높으며 연안 경계류를 따라서 수온이 가장 낮다. 황해 동부 연안에서 북쪽으로 흐르는 연안 경계류는 수온전선을 따라 북쪽으로 흐르며 EXP-TW의 경우보다는 상대적으로 더 연안 쪽에서 좁은 띠를 이루며 흐른다. 표층 해류는 EXP-T의 경우와 거의 비슷한 분포를 보인다. 그러나 한강 담수가 영향을 주는 백령도 부근과 웅진반도 서쪽 그리고 황해 북동부 지역에서 표층 해류가 EXP-T의 결과와 다르다.

조석과 바람 그리고 강물의 유입을 모두 해양 수치 모델의 외력으로 사용한 수치 실험(EXP-TWR)에서도 황해 동부 연안부터 황해 북부 역까지 해서 경사면 바닥 근처에 수온전선이 형성되고 그 위에 연안 경계류가 흐른다(Fig. 9d). 표층 5 m 수심에서는 외해 쪽의 수온이 높고 연안 경계류를 따라서 수온이 낮아졌다가 해안에 가까워지면 다시 수온이 높아진다. EXP-T와 EXP-TR의 결과 보다 황해 동부 연안 경계류가 전선을 따라 상대적으로 넓은 폭을 갖고 북쪽으로 흐른다. EXP-TWR의 경우에 표층 해류의 분포와 크기는 EXP-TW와 비슷하지만 한강 담수의 직접적인 영향을 받는 경기만 북서부, 백령도 주변과 웅진반도 서쪽에서 해류의 세기가 EXP-TW보다 상대적으로 강하다.

다음으로 수온과 남북방향 유속(v)의 수직 분포를 비교하였다(Fig. 10). 36°N을 따라 만든 동서단면에서 수온과 남북방향 유속의 분포를 비교하면 황해 동부에서 저층 수온전선의 위치와 연안 경계류의 위치 및 크기가 각 외력에 의하여 변화되는 것을 판단할 수 있다. 조석만을 외력으로 사용한 수치 실험(EXP-T)에서 황해 동부 수심 10~30 m 사이에 저층 수온전선이 형성되고 연안 경계류가 해저 경사면이 시작되는 경사면의 상부를 따라 북쪽으로 흐른다(Fig. 10a, b). 여름에 강한 태양의 단파복사에 의하여 수온 약층 상부 특히 해표면 근처(0~1 m)의 수온이 크게 증가하며 표층의 혼합이 작다. 그러나 저층 바닥 부근에서는 강한 조류의 혼합으로 혼합층이 형성된다. 수온 약층의 수심이 매우 얕아서 태양 단파 복사 에너지에 의한 열 공급이 해표면 근처에 갇히게 된다. 다른 실험들에 비하여 해표면 근처(0~1 m)에서 수온이 높고, 수심 5 m에서는 다른 실험들에 비하여 수온이 오히려 낮다.

조석과 바람을 해양 수치 모델의 외력으로 사용한 수치 실험 (EXP-TW)에서 황해 동부 수심 20~60 m 사이에 저층 수온전선이 형성되고 연안 경계류가 북쪽으로 흐른다(Fig. 10c, d). 바람에 의한 표층 혼합으로 수온약층의 수심이 깊어지고, 저층에서 조류에 의한 혼합으로 만들어진 수온전선의 위치가 더 외해 쪽으로 이동한다. 저층의 수온전선 위치가 더 외해로 이동하고 수심이 깊어짐에 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 주축이 EXP-T의 경우보다 더 외해 쪽으로 이동하고 그 폭이 넓어졌으며 0.05 m/s 이상의

속도를 갖는 해류가 해표면부터 수심 25 m까지 발생한다. 8월 해표면의 최저 수온이 저층 수온전선의 위치보다 더 외해 쪽에서 나타나고 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 주축은 저층의 수온전선 상부에 위치한다.

조석과 강물 유입을 해양 수치 모델의 외력으로 사용한 수치 실험(EXP-TR)에서 황해 동부 수심 10~30 m 사이 저층에 전선이 형성되고 연안 경계류가 해저 경사면이 시작되는 사면의 상부를 따라 북쪽으로 흐른다(Fig. 10e, f). 황해 동부에서 수온의 수직구조와 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 위치, 폭, 세기가 EXP-T의 경우와 유사하다. 강물의 유입은 황해 동부 연안을 따라 북쪽으로 흐르는 해류에 공간적인 부분에 큰 영향을 주지 않으며 세기에는 미소한 영향을 준다.

조석과 바람 그리고 강물의 유입을 모두 해양 수치 모델의 외력으로 사용한 수치 실험(EXP-TWR)에서는 황해 동부 수심 20~60 m 사이의 연안 저층에 수온전선이 형성되고 수온전선 상부에 연안 경계류가 북쪽으로 흐른다(Fig. 10g, h). 북쪽으로 흐르는 해류의 중심에서 해류의 세기는 약 0.12 m/s이며, 0.05 m/s 이상의 속도를 갖는 해류가 해표면부터 수심 25 m까지 발생한다.

바람에 의한 표층의 수직적인 혼합은 황해 동부 연안에서 복사하는 연안 경계류의 수평적 분포(Fig. 9)뿐만 아니라 수직적인 구조(Fig. 10)에까지 영향을 준다. 또한 바람을 외력으로 사용하지 않은 해양 순환 수치 실험 결과에서는 황해 중앙 골에 형성되는 황해저층냉수의 수온이 9°C 보다 높다(Fig. 10).

각 조건별 수치 실험 결과에 나타난 북쪽 방향 부피 수송량과 북쪽방향의 최대 유속은 Table 3과 같다. 조석만을 외력으로 사용한 해양 순환 수치 실험에서는 여름철 강한 일사량과 조석의 혼합으로 만들어진 저층 수온전선을 따라 황해 동안 경계류가 형성되고 이 해류가 36°N를 가로 질러 북쪽으로 흘러갈 때 부피 수송량은 약 0.09 Sv(10⁶ m³/s)이며, 북쪽으로 흐르는 해류의 최대 유속은 약 0.126 m/s이다(Fig. 10b). 이때는 바람에 의한 표층 혼합이 없어서 표층 혼합층의 두께가 얇다(Fig. 10a). 수치 실험에 조석뿐만 아니라 바람을 외력으로 추가하면 바람에 의한 표층 혼합으로 표층에서의 혼합층 두께가 깊어지며, 북쪽으로 흐르는 황해 연안 경계류의 주축이 외해 쪽으로 더 이동하고 수송량이 약 185% 증가하여 0.26 Sv이 된다(Fig. 10d). 또한 바람은 북쪽으로 흐르는 최대 유속을 0.133 m/s로 증가시킨다. 조석에 의한 혼합작용에 해안에서 나오는 담수유입을 추가하면 북쪽으로 흐르는 해류의 수송량이 11% 증가하나, 해류의 주축과 북쪽 방향으로 흐르는 최대 유속에는 큰 변화가 없다(Fig. 10f). 수치 실험의 외력으로 조석과 바람 그리고 강물의 유입을 모두 사용한 경우는 외력으로 조석과 바람만을 사용한 경우와 거의 비슷한 표면 혼합층의 두께, 동안 경계류의 위치와 폭, 북쪽으로 흐르는 수송량 및 북쪽으로 흐르는 최대 유속을 갖는다(Fig. 10 c, d, g, h).

일사량의 변화

황해에 밀도성층이 없는 경우에도 조석 잔차류의 형태로 황해 동부 연안에서는 해저 지형과 조류의 상호 작용으로 연안을 따라 북쪽으로 흐르는 잔차류가 발생한다. 그러나 여름철에 황해 동부 연안에 밀도 성층이 있으면 수심이 깊은 외해와 얇은 연안 사이에 저층 수온전선이 형성되고 그 수온전선을 따라 세기가 더 큰

해류가 북쪽으로 흐른다(Lee and Beardsley, 1999). 밀도성층에 영향을 주는 요인 중의 하나가 태양으로부터 오는 단파 복사량으로 본 절에서는 황해 동부에서 태양 복사 에너지양의 증가에 따라 성층과 연안 경계류의 세기와 위치 변화를 분석하였다(EXP-10P, EXP-10N).

일평균 태양 단파 복사 에너지양을 2007년 여름 값보다 10% 증가(EXP-10P)시키거나 또는 감소(EXP-10N)시켜 2007년 6월 1일부터 8월 31일까지 실험하였다. 초기 조건은 2007년 6월 1일 값으로 동일하며 외력은 조석, 바람 및 강물의 유입을 모두 사용하였다. 두 개의 실험 결과를 2007년 여름 단파 복사량을 사용한 경우(EXP-TWR 또는 Control)와 비교하였다.

태양으로부터 오는 단파 복사량을 10% 감소 시켰을 때 표층 수온은 낮아지지만 표층 해류의 공간적인 분포에는 큰 변화가 없다(Fig. 11a). 황해 동부 36°N에서 연안 경계류의 위치와 세기에도 큰 변화는 없지만(Fig. 11c) 북쪽 방향 수송량과 최대 유속은 약 1%정도 줄어든다(Table 4). 단파 복사량을 10% 증가 시켰을 때 표층 수온이 높아지지만 표층 해류의 공간적인 분포는 큰 변화가 없다(Fig. 11b). 황해 동부 36°N에서 연안 경계류의 위치와 세기에도 큰 변화가 없다(Fig. 11d). 이때는 북쪽 방향 수송량과 최대 유속이 약 1%정도 늘어난다(Table 4). 단파 복사량을 10% 증가시키거나 감소시켰을 때 (Fig. 11) 단파 복사량을 변화시키지 않은 경우(Fig. 10g)에 비하여 수온의 수직 분포가 해표면부터 수심 10 m까지의 수온이 감소하거나 증가한 것을 제외하고 큰 차이가 없어서 Fig. 11에 수온의 수직 분포를 수록하지 않았다.

대조기와 소조기의 영향

황해의 동부 연안에 형성되는 수온전선의 위치와 수평적 밀도 구배는 조류의 세기에 영향을 받는다(Simpson *et al.*, 1978; Cho

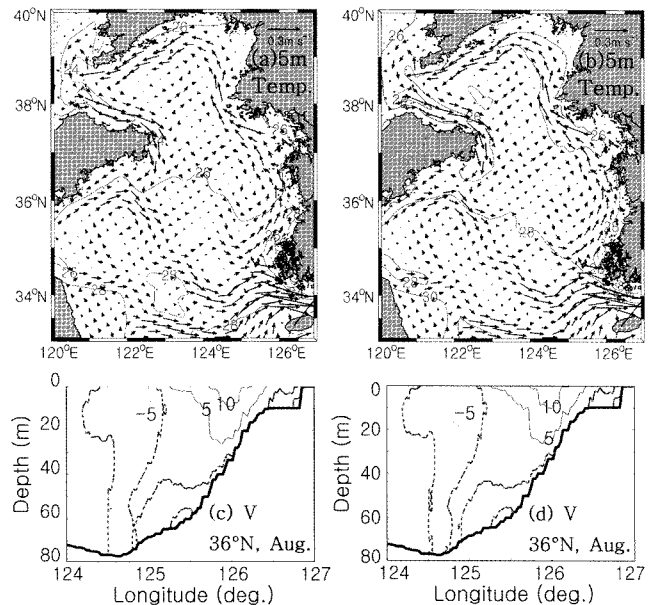


Fig. 11. Monthly mean sea surface (5 m) temperature and currents distribution for the 10% (a) decrease and (b) increase of solar radiation in August 2007. Vertical sections of monthly mean northward velocity along 36°N for the 10% (c) decrease and (d) increase of solar radiation.

Table 4. Transport and maximum surface speed of northward velocity across 36°N for each experiment with different solar radiation amount in August 2007. The numerical model was forced by tides, winds and river inflow.

Case	Northward volume transport (Sv)	Relative value	Maximum northward velocity (m/s)
EXP-10N	0.263	0.99	0.123
EXP-10P	0.271	1.01	0.135
EXP-TWR	0.267	1.00	0.130

et al., 1995). 영국 주변 얇은 해역에 형성되는 전선들은 인공위성 적외선 영상으로 그 위치 변화를 분석해보면 소조기에서 대조기로 가면서 조류의 속력이 약 1.8배 정도 커지더라도 전선의 위치는 작게(약 4 km 이내에서) 변화함을 발견하였다(Simpson and Bowers, 1979, 1981). 대조와 소조기간의 조류 세기 변화에 따라 수온전선과 황해 동안 경계류의 변화를 살펴보기 위하여 바람과 태양 복사 에너지를 2007년 8월 평균값으로 일정하게 유지하면서 8월 1일부터 9월 1일까지 수치 모델 실험(EXP-SN)을 실시하였다. 해양 순환 수치 모델을 이용한 실험에서는 2007년 8월 6일에서 10일까지 소조기, 8월 13일에서 17일까지 대조기, 8월 20일에서 24일까지 소조기 그리고 8월 28일에서 9월 1일까지 대조기가 나타났다. 각 기간 동안 평균 수온과 해류를 이용하여 수온의 수직 분포와 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 세기를 비교하였다(Fig. 12).

소조기 동안은 조류의 속도가 느려 저층의 연직 혼합이 상대적으로 작아진다(Fig. 12a, 12e). 북쪽으로 흐르는 연안 경계류는 황해 동부 연안에서 전체적으로 북쪽으로 흘러갔으며, 126°E에서 126.5°E 사이에서 최대 유속을 갖는다(Fig. 12b, 12f). 소조기간에

는 황해 중부 36°N를 가로질러 북쪽으로 수송되는 수송량이 0.19~0.20 Sv이다(Table 5). 수심이 깊은 황해 중앙부 124.2°E부터 125.1°E 사이에는 남쪽으로 흐르는 해류가 있다.

대조기간에는 조류의 속도가 빨라지고 저층의 연직 혼합이 커진다(Fig. 12c). 해류는 황해 동부 연안에서 전체적으로 북쪽으로 흘러갔으며 126°E에서 126.5°E 사이에서 최대 유속을 갖는다. 대조기에는 황해 중부 36°N를 가로질러 북쪽으로 수송되는 수송량이 0.25~0.32 Sv이다(Table 5). 수심이 깊은 황해 중앙부 124.2°E부터 125.1°E 사이에서도 남쪽으로 흐르는 해류도 강화되었다. 대조기인 8월 28일부터 9월 1일까지는 Fig. 12c 그리고 12d와 비슷한 수온과 해류 분포를 보여 그림으로 나타내지 않았다.

대조기와 소조기에 36°N를 따라 수직적인 수온분포와 북쪽방향 유속분포의 차이를 구하였다(Fig. 13). 수치실험(EXP-SN)에 사용한 일사량이 8월 평균값이기 때문에 소조기(Fig. 12a)에서 대조기(Fig. 12c)로 시간이 경과하면서 수온이 전체적으로 증가했다. 특별히 125.2°E에서 126.6°E까지 수온약층부분에서 수온이 0.5이상 증가하였다. 북쪽 방향으로 흐르는 연안 경계류의 크기가 125°E에서 126.5°E 사이에서 더 커지고, 남쪽으로 흐르는 해류도 124.2°E에서 125°E 사이에서 그 유속이 증가하였다. 특별히 북쪽 방향으로 흐르는 해류의 유속은 125°E에서 126.5°E 사이 표층(0~10 m)에서 크게 증가하였다.

바람의 세기와 태양복사에너지의 양이 시간에 따른 변화가 없이 일정한 경우(EXP-SN) 대조기와 소조기 사이에 수온의 수직수평적인 구배에는 큰 변화가 없었다. 그리고 황해 동안 경계류의 주축은 대조기에 소조기와 비교하여 외해나 연안 쪽으로 크게 움직이지 않았다. 북쪽으로 흐르는 황해 동안 경계류는 상대적으로 대조기에 소조기보다 수평적인 폭이 더 넓어지고 깊이도 더 깊어졌다. 대조기에 북쪽 방향으로 흐르는 황해 동안 경계류의 유속 증가 그리고 폭과 깊이 증가로 그 수송량이 약 67%증가하였다(Table 5).

2007년 8월에 조석, 일평균 바람 그리고 매일 변화하는 태양복사량을 고려하여 실험한 EXP-TWR 경우는 수온전선의 위치와 북쪽으로 수송되는 해수의 양이 시간에 따라 달라진다(Fig. 14; Table 6). EXP-TWR 경우는 일평균 바람을 사용하였으므로 바람에 의한 표층 혼합이 강하여 월평균을 사용한 EXP-SN보다 표층 수온이 더 낮아지고 표면 혼합층의 두께가 더 두꺼워지며 수온약층의 안정도가 더 크다(Fig. 12 and 13). 해저 경사면 상부를 따라 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 유속은 일평균 바람을 사용한 경우에 월평균 바람을 사용한 경우보다 더 크며, 그 위치가 각 시기별로 크게 변화한다.

EXP-TWR 실험에서 소조기인 8월 6일부터 10일 사이에는 연안 경계류의 주축이 126.2°E에서 나타난다(Fig. 14a, b). 연안 경계류가 나타나는 곳을 중심으로 해수면 높이가 외해 쪽에서 낮고 연안 쪽으로 가면서 높아진다. 125°E부터 126.5°E까지 해수면의 기울기가 5.3×10^{-9} 로서 상대적으로 작다. 대조기인 13일부터 17일 사이에는 연안 경계류의 주축이 더 외해 쪽인 126°E로 이동하여 표층 최대 유속이 0.25 m/s 이상이 된다(Fig. 14c, d). 그리고 125°E부터 126.5°E까지 해수면의 기울기가 9.3×10^{-9} 로서 상대적으로 커지고 최대 유속의 크기가 더 커진다. 소조기인 20일부터 24일 사이에는 연안 경계류의 유속이 가장 작아지며 주축이 더 외

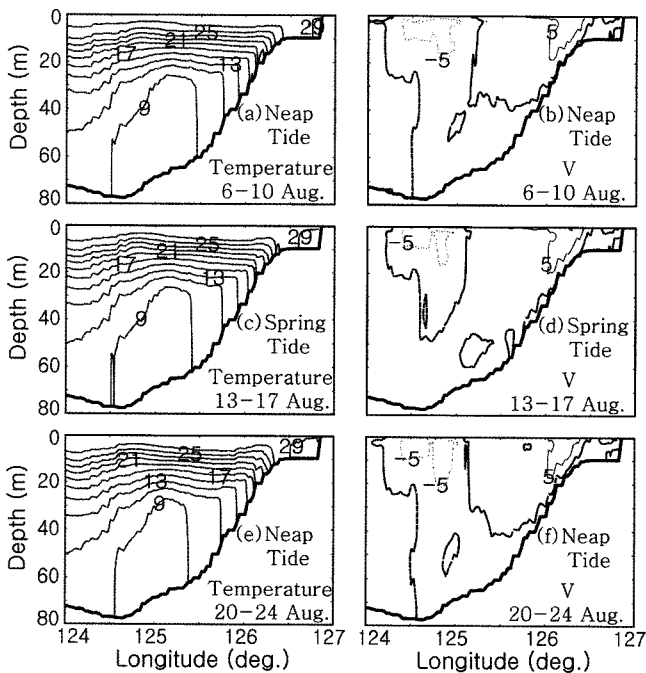


Fig. 12. (left panels) Mean temperature and (right panels) northward component of velocity along 36°N during spring and neap tides in August 2007. The numerical model was forced tides, monthly mean wind and monthly mean river inflow (EXP-SN). Thick solid lines in right panels represent zero velocity contours.

Table 5. Transport and maximum surface speed of northward velocity across 36°N during neap and spring tidal periods in August 2007. The numerical model was forced by tides, monthly mean winds and monthly mean river inflow.

EXP-SN	Northward volume transport (Sv)	Relative value	Maximum northward velocity (m/s)
Neap tide (6-10 Aug.)	0.196	0.82	0.105
Spring tide (13-17 Aug.)	0.324	1.36	0.113
Neap tide (20-24 Aug.)	0.189	0.79	0.109
Spring tide (28 Aug.-1 Sep.)	0.253	1.06	0.109
One month	0.238	1.00	0.110

Table 6. Transport and maximum surface speed of northward velocity across 36°N during neap and spring tidal periods in August 2007. The numerical model was forced by tides, daily mean winds and monthly mean river inflow.

EXP-TWR	Northward volume transport (Sv)	Relative value	Maximum northward velocity (m/s)
Neap tide (6-10 Aug.)	0.422	1.58	0.231
Spring tide (13-17 Aug.)	0.299	1.12	0.236
Neap tide (20-24 Aug.)	0.246	0.92	0.114
Spring tide (28 Aug.-1 Sep.)	0.304	1.14	0.148
One month	0.267	1.00	0.13

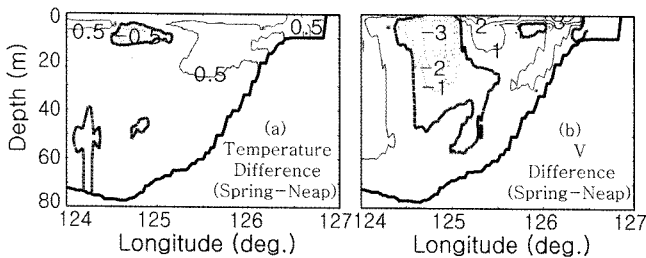


Fig. 13. Difference in temperature and northward velocity between spring and neap tides. (left panel) Vertical section of temperature difference and (right panel) that of northward velocity difference along 36°N in August 2007. Thick solid lines represent zero temperature (velocity) difference contours.

해 쪽으로 이동하여 125.9°E에 가까이 다가간다.

2007년 8월에 황해 동부 36°N에서 조류의 세기 변화는 북쪽으로 이동하는 해수의 수송량에 영향을 주지만(EXP-SN), 바람의 변화는 연안 경계류의 위치 변화에 큰 영향을 준다(Fig. 12-15). 8월 7일부터 13일까지 강한 남서풍이 불었으며(Fig. 15), 16일부터 25일까지는 상대적으로 약한 남서풍이 불었다. 바람에 의한 혼합과 표층 에크만 수송이 동안 경계류의 위치 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 바람의 세기가 변화함에 따라 표층 혼합층의 두께가 변화하고 그에 따른 동안 경계류 세기의 변화와 바람의 방향 변화에 따른 표층 에크만 수송이 동안 경계류 발생 위치에 미치는 영향에 대해서는 차후에 다른 연구를 통하여 자세히 수행하는 것이 필요하다.

연안 경계류의 동서 방향 수직 구조

황해 동부 연안을 따라 남북방향으로 길게 분포하는 수온전선의 동서 방향 수직 구조와 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 구조를 알아보기 위하여 해양 수치 모델 결과로부터 36°N을 따라서 2007년 8월 평균 수온, 해류 및 해수면 높이를 얻어 그 동서 단면 구조를 살펴보았다(Fig. 16). Fig. 16의 상단(upper panel)에서 실선은 월평균 해수면 높이이다. 해수면의 높이는 125.2°E에서 가장 낮고 해안선 근처(126.8°E)에서 가장 높다. 두 곳의 해수면 높이

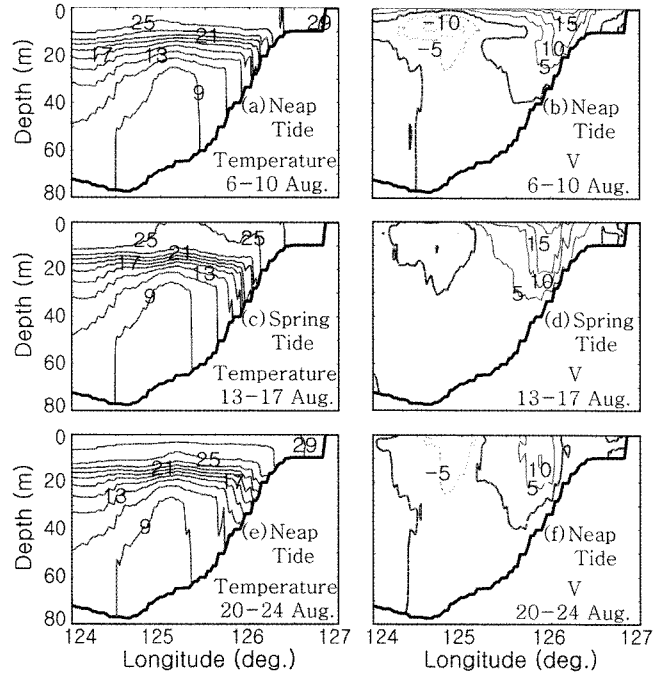


Fig. 14. Vertical section of temperature (left panels) and northward velocity (right panels) along 36°N during spring and neap tides in August 2007. The numerical model was forced tide, daily mean winds, and monthly mean river inflow (EXP-TWR). Thick solid lines in right panels represent zero velocity contours.

차이는 약 7 cm다. 또한 Fig. 16의 상단(upper panel)에서 점선과 파선은 상층의 평균 수온이다. 수심이 20 m 보다 깊은 곳은 해표면부터 20 m까지의 수온을 평균하여 점선(dotted line)으로 나타내었고, 수심이 20 m 보다 얕은 곳은 해표면부터 10 m까지의 수온을 평균하여 파선(dashed line)으로 나타내었다. 표층의 수온은 125.2°E에서 가장 낮고 해안선 근처(126.8°E)에서 가장 높다. 표층 평균 수온의 동서 방향 변화는 해수면 높이의 변화와 유사하다. Fig. 16의 하단(lower panel)에서 색(color)은 36°N 단면에서 수온 분포를 나타낸다. 수온 전선이 해표면에서 뚜렷하게 나타나

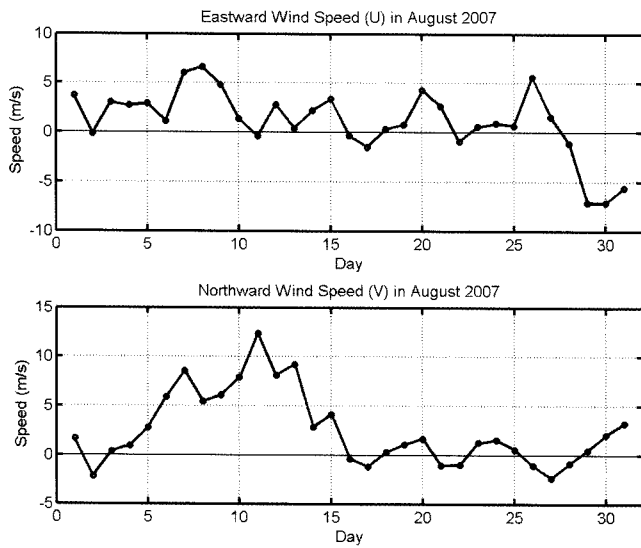


Fig. 15. Spatially averaged daily mean wind vectors over the eastern Yellow Sea from August 1 to 31, 2007. (a) Top panel is eastward wind speed and (b) bottom panel is northward wind speed.

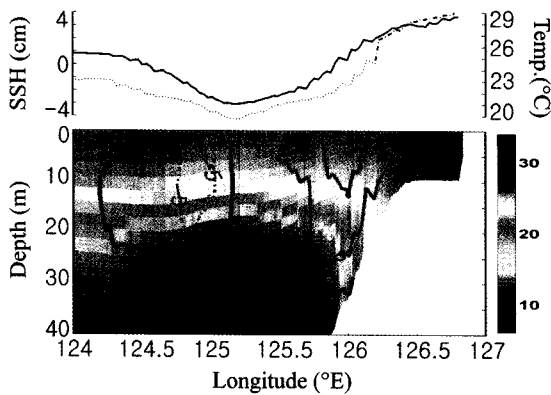


Fig. 16. Upper panel displays monthly mean sea surface height (thick line) and sea surface temperature (dotted line) along 36°N. Lower panel shows vertical section of temperature (color shading) and northward component of velocity (contours, cm/s) along 36°N. Contour interval is 5 cm/s and solid lines represent northward direction.

지 않고 중층에서 더 뚜렷하다. Fig. 16의 하단에서 등치선들은 남북방향 유속의 크기를 나타내며 실선은 북쪽 방향으로 흐르는 해류이고, 점선은 남쪽방향으로 흐르는 해류를 표시한다. 10 cm/s 이상의 유속을 갖고 북쪽으로 흐르는 연안 경계류의 중심축은 해수면과 상층 수온의 구배(gradient)가 가장 큰 곳(125.9°E)에서 나타나고 해저 경사면의 상부가 아니라 중부 근처에 나타난다. 해양 순환 수치 모델 실험에서는 연안 경계류가 황해 동부에서 수심 20~40 m인 곳의 상부에 강하게 나타난다.

토 의

연안 경계류의 위치는 해수의 성층 강도, 조류의 세기, 바람의 강도 그리고 수심의 영향을 받는다(Simpson and Hunter, 1974; Simpson et al., 1978). Simpson et al.(1978)은 수층의 포텐셜 에너지(potential energy)의 시간적인 변화(좌변)를 태양 복사 에너지

유입에 의한 포텐셜 에너지 감소항(우변 첫 번째 항), 조류의 저층 혼합으로 증가하는 항(우변 두 번째 항) 그리고 바람의 표층 혼합으로 증가하는 항(우변 세 번째 항)으로 표현하였다.

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\alpha g \dot{Q} h}{2c} + \epsilon k_b \rho \langle u_b^3 \rangle + \delta k_s \rho_s \langle W_s^3 \rangle \quad (1)$$

이 식에서 V 는 수층의 포텐셜 에너지, α 는 부피 팽창 계수, g 는 중력 가속도, \dot{Q} 는 열의 시간당 유입량, h 는 수심, c 는 해수의 비열이다. 그리고 u_b 는 해저 바닥 근처의 유속, W_s 는 해수면 근처의 풍속, ρ 와 ρ_s 는 해수와 공기의 밀도, k_b 와 k_s 는 마찰 계수, ϵ 과 δ 는 조류와 바람에너지가 수층을 혼합하여 포텐셜 에너지를 줄이는 효율이다. 수층의 포텐셜 에너지의 시간적인 변화식의 양변을 태양 복사 에너지 유입항으로 나누어 무차원화 하면 Simpson et al. (1978)의 식 (1)과 같이 정리되어

$$R = \frac{dV/\alpha g \dot{Q} h}{dt \ 2c} = 1 - \frac{2\epsilon c k_b \rho \langle u_b^3 \rangle}{\alpha g \dot{Q} h} - \frac{2c \delta k_s \rho_s \langle W_s^3 \rangle}{\alpha g \dot{Q} h} \quad (2)$$

이 된다. 무차원 상수 R 이 양수인 곳에서는 수층이 층을 이루고 안정화되며, $R=0$ 이 되는 곳에 수온전선이 형성된다. (2)에서 조류의 속도가 커지거나 풍속이 커지면 R 이 작아져서 해수의 전 층이 혼합되는 상태가 된다. EXP-SN은 우변의 세 번째 항을 고정시키고 두 번째 항인 조석에 의한 혼합항을 시간에 따라 변화시킨 실험이다. 월평균 바람을 사용한 경우(EXP-SN)은 우변의 세 번째 항이 작고 일평균 바람을 사용하면(EXP-TWR) 바람에 의한 혼합 에너지 유입항이 상대적으로 더 커진다.

Fig. 10 a와 b는 조류의 수직 혼합으로 만들어지는 바닥 혼합층을 보여주고, 그 연직 혼합이 연속적으로 생성된 바다에 수평적인 온도(밀도) 구배를 만들며 이 전선을 따라 흐르는 해류를 보여준다. 여기에 월평균 바람을 넣어서 작은 양의 표층 혼합이 이루어질 때는 Fig. 12와 같으나 W_s 가 작아서 수온과 해류의 수직 구조가 크게 변화하지 않는다. Chen and Beardsley(1995)는 선형적으로 생성된 바다에 바람의 혼합, 수평적 마찰과 이류, 강물의 유입이 없을 때를 가정하여 조석혼합이 강할 때 바닥 혼합층의 두께를 다음과 같이 $h_m = (16k_b \delta \Delta T U^3 / N^2 \pi)^{1/3}$ 로 유도하였다. 여기서 k_b 는 바닥 마찰 계수이고, δ 는 조석의 운동에너지를 수층의 혼합을 위한 에너지로 바꾸는 과정에서의 효율로서 약 0.0037이다. ΔT 는 조석 혼합 시간이고 U 는 조류의 크기이며 N 은 Brunt-Väisälä 진동수이다. 여기에 일평균 바람에 의한 표층 혼합이 추가되면 Fig. 14와 같이 표층의 두께가 더 두꺼워지고 수온 약층의 깊이가 더 깊어진다. 그리고 수온전선을 따라 흐르는 연안 경계류의 폭이 더 넓어진다.

Naimie et al.(2001)과 Xia et al.(2006)은 장기 월평균 바람(climatological monthly mean wind)을 사용하여 해양 순환 수치 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 2007년 여름의 일평균 바람 자료를 사용하여 해양 순환 수치 실험을 수행하였다. 바람 자료로 월평균, 일평균, 3시간 평균, 1시간 평균을 사용하여 수치 모델 실험들을 실시하여 각각의 경우 바람의 표층 혼합 에너지가 변화하는 정도와 그 표층 혼합 에너지 변화가 연안 경계류의 위치와 크기에 미치는 영향을 향후에 연구할 필요가 있다. 또한 수온약층의 깊이 그리고 황해저층냉수가 수온전선과 연안 경계류의 위치와 세기에 미치는 영향에 대해서도 자세한 연구가 필요하다.

조석만을 외력으로 주어서 실험(EXP-T)한 결과에서 연안 경계류의 위치가 조석과 바람을 외력으로 주어 실험(EXP-TW)한 결과에서 보다 약 30 km 내해 쪽에 위치한다(Fig. 10). 이러한 결과는 Cho *et al.*(1995)이 2차원 조석모델에 조석만을 외력으로 사용하여 추정된 황해 동부 조석전선 위치가 실제 위치보다 약 10~30 km 내해 쪽에 위치했던 이유를 설명한다. 바람에 의한 표층혼합이 수치 실험에 고려되면 수온전선과 연안 경계류의 위치가 외해 쪽으로 이동한다(Fig. 10).

조석만을 외력으로 고려한 Cho *et al.*(1995)의 2차원 수치 실험에서 $\log_{10}(H/U^{\beta})$ 값이 1.5~2.0인 범위가 조석전선이 뚜렷한 황해 남동부에서 대조기에 소조기보다 약 30~50 km 외해 쪽으로 이동하였다. 그리고 밀도가 시공간적으로 변화하는 본 연구의 3차원 수치 모델 실험의 황해 남동부에서도 $\log_{10}(H/U^{\beta})$ 값은 대조기와 소조기에 2차원 수치 실험과 같은 변화를 보였다. 그러나 본 연구에서 실시한 3차원 수치 모델 실험에서 황해 남동부뿐만 아니라 황해 동부 연안에서 연안 경계류의 위치는 소조기 또는 대조기 기간에 따라 크게 변화하지 않았다(Fig. 12). 이와 같이 대조기에 조류의 세기가 커지거나 소조기에 조류의 유속이 작아져도 전선과 그 위에 형성되는 연안 경계류의 위치가 크게 변화하지 않는 이유는 8~9월에는 성층 효과가 충분히 크기 때문에 조류에 의한 혼합효율(ϵ)이 줄어들고 조류의 세기(u_b)가 증가하여도 수직 혼합되지 않고 성층이 그대로 유지되기 때문으로 알려져 있다(James, 1977; Simpson and Bowers, 1979, 1981). 해수의 성층이 충분히 형성되지 않는 봄과 초여름에는 대조기와 소조기에 연안 전선의 위치가 조류의 세기에 따라 크게 변화할 수 있다.

Naimie *et al.*(2001)의 3차원 해양 순환 모델 실험에서는 황해 동부에서 북쪽으로 흐르는 경계류의 부피 수송량이 7월에 약 0.2 Sv 그리고 9월에 약 0.3 Sv이 었다. 본 연구의 수치 모델 실험에서는 황해 중부(36°N)를 가로질러 북쪽으로 흘러가는 물의 양을 모두 합하여 약 0.27 Sv이다(Table 3). 이 중에서 동안 경계류에 의한 수송은 주로 124°E 동쪽에서 일어나고 북쪽으로 수송되는 양의 약 72%이며, 나머지 28%는 황해 중앙부와 서부에서 북쪽으로 수송되는 양이다. 두 수치 모델 실험 결과에서 구한 연안 경계류의 부피 수송량은 Seung(1987)이 이론적인 모델에서 구한 값보다 약 10배 정도 크다. 수치 모델로 재현된 연안 경계류의 수송량은 실제 관측 자료를 통해서 추산해서 비교해 볼 필요가 있다.

황해 동부 연안 경계류는 여름철에 열, 영양염 및 플랑크톤을 황해 동남부에서 황해 동북부로 이동시키는 데 큰 기여를 할 수 있다. 황해 동안경계에서 여름에 발생하는 수온전선의 위치와 수온전선을 따라 흐르는 해류의 세기를 정확하게 이해하면 부유물의 이동 경로 등과 같은 환경정보를 더 명확히 제공할 수 있을 것이다. 향후 이러한 북향류가 플랑크톤 번성, 부유물 또는 해양 생물의 이동 등 해양환경에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하리라 판단된다(Choi, 1991). 본 연구에서는 황해 중동부(36°N) 연안에서 연안 경계류의 위치와 세기를 주로 분석하였으나 황해 북부, 태안 반도부근과 황해 남동부에서는 수온전선과 연안 경계류의 구조와 특성이 다를 수 있으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

결론

여름철 황해 동부 연안에서 저층에 형성된 수온전선을 따라서 북상하는 연안 경계류를 국립해양조사원에서 관측한 해류 자료와 3차원 해양 순환 모델 실험으로 재현한 해양순환 결과에서 그 위치와 세기를 확인하였다. 황해 동부에서 수심이 깊은 외해에서는 수온약층을 중심으로 성층이 강하지만 연안에서는 수심이 얕아지면서 강한 조류로 인해 저층에 강한 연직 혼합이 일어난다. 수치 모델 실험 결과 외해의 성층해역과 저층에서 연직 혼합된 연안 사이에 수온전선이 형성되고, 수온전선을 가로지르는 동서방향의 밀도 구배에 의해 수온전선을 따라 북상하는 연안 경계류가 발생한다.

황해 동부에 발생하는 연안 경계류의 위치와 세기를 결정짓는 요소가 무엇인지 살펴보기 위해 해양 순환 수치 모델 실험을 실시하였다. 수직적으로 밀도가 연속적으로 변화하는 황해에서 조류에 의한 저층 혼합이 일어나면 바닥 경계층에서 수직적으로 수온이 일정해지며, 바닥 경계층의 두께가 수심과 거의 같은 크기를 갖는 곳에서는 수온전선을 해표면에서도 관측이 가능하다. 이 수온전선을 따라 폭이 좁은 연안 경계류가 형성된다. 조류에 의한 바닥 경계 부분의 혼합은 황해 동부 연안을 따라 나타나는 수온전선 및 연안 경계류의 형성에 필수요소다. 조류뿐만 아니라 바람을 외력으로 추가하면 표면 혼합층이 두꺼워지고 수온약층의 수심이 깊어진다. 표면 혼합층 두께와 바닥 혼합층 두께의 합이 수심과 거의 같은 크기를 갖는 해저 경사면의 상부에 전선이 형성된다. 또한 연안 경계 해류의 위치가 더 외해로 이동하고 그 수평적인 폭이 커지며 그 수직적 범위도 넓어진다. 하지만 강물의 유입을 외력으로 추가한 해양 순환 수치 실험에서는 황해 동부 연안에 큰 강이 없어 북쪽으로 흐르는 연안 경계류에 큰 영향을 미치지 않는다.

표층 수온과 수직 성층에 영향을 미치는 일사량을 여름 3개월 동안 변화시킨 실험에서 일사량을 10% 증가시켰을 때 연안 경계류가 1% 강화되고, 10% 감소시켰을 때는 연안 경계류가 1% 약화되었다. 성층이 강하게 이루어지는 여름철에는 황해 동부 36°N를 가로지르는 단면에서 조류의 혼합 작용이 큰 대조기와 상대적으로 작은 소조기에 황해 동부 연안 경계류의 위치에 큰 변화가 없었다. 그러나 북쪽으로 수송되는 해수의 수송량은 대조기에 소조기 때보다 상대적으로 더 컸다. 수치 모델 실험 결과에 의하면 황해 동부 전 해역에서 연안 경계류의 동서방향 위치 이동은 바람의 변화에 영향을 더 많이 받는 것으로 추정된다. 본 연구에서는 36°N의 동서 단면에서만 바람의 영향으로 연안 경계류의 위치가 변화하는 것을 제시하였으나 황해 동남부와 황해 북동부에서도 바람의 영향으로 주로 이동하였다.

황해 동부에서 바람의 방향과 세기가 황해 동부에 형성된 연안 경계류의 위치 변화에 미치는 영향은 더 자세한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 수치 실험을 이용하여 황해 동부 저층에 형성되는 수온전선을 따라 흐르는 연안 경계류에 관한 연구를 수행하였으나, 현장 관측 자료와 원격 탐사 자료를 이용하여 본 연구의 결과를 검증하는 연구가 필요하다.

사사

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업 '운용해양(해양예보) 시스템 연구'의 연구비와 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한

국연구재단 기초연구사업의 지원(2009-0077986)을 받아 수행되었습니다. 해류 관측 자료는 국립해양조사원에서 제공받았으며, 수온 관측 자료는 국립수산물품질관리원에서 제공받았습니다.

참고문헌

- 국립해양조사원, 2007. 해양조사기술연보 2007.
- 최병호, 1990. 세력자체계의 황해 및 동지나해 조석모형의 개발. 한국해양해양공학회지, **2**: 231-244.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim, and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China Sea, Yellow and Japan Seas. *La Mer*, **30**: 297-314.
- Bowers, D.G., J.H. Simpson, 1987. Mean position of tidal fronts in European-shelf seas. *Cont. Shelf Res.*, **7**: 35-44.
- Chen, C. and R.C. Beardsley, 1995. A numerical study of stratified tidal rectification over finite-amplitude banks, I, Symmetric banks. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**: 2090-2110.
- Chen, C., R.C. Beardsley, and R. Limeburner, 1995. A numerical study of stratified tidal rectification over finite-amplitude banks, II, Georges Bank. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**: 2111-2128.
- Cho, Y.K., B.H. Choi, and H.W. Chung, 1995. Variation of tidal front in the southwestern sea of Korea. *J. Korean Soc. Coast. ocean Eng.*, **7**: 170-175.
- Choi, J.K., 1991. The influence of the tidal front on primary productivity and distribution of phytoplankton in the mid-eastern coast of Yellow Sea. *J. Oceano. Soc. Korean*, **26**: 223-241.
- Egbert, G.D., and S.Y. Erofeeva, 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmo. Ocean. Technol.*, **19**: 183-204.
- Fairall, C.W., E.F. Bradley, D.P. Rogers, J.B. Edson, and G.S. Young, 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes in TOGA COARE. *J. Geophys. Res.*, **101**: 3747-3767.
- Huthnance, J.M., 1973. Tidal current asymmetries over the Norfolk sandbanks. *Estuarine, Coastal Mar. Sci.*, **1**: 89-99.
- James, I.D., 1977. A model of the annual cycle of temperature in a frontal region of the Celtic Sea. *Estuarine, Coastal Mar. Sci.*, **5**: 339-353.
- Lie, H.J., 1989. Tidal fronts in the southern Hwanghae (Yellow Sea), *Cont. Shelf Res.*, **9**: 527-546.
- Lee, S.H., and R.C. Beardsley, 1999. Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, **104**: 15679-15701.
- Lee, S.H., and H.Y. Choi, 1997. A numerical model study of residual tidal currents in the mid-eastern Yellow Sea - initial stratification. *The Yellow Sea*, **3**: 58-70.
- Naimie, C.E., C.A. Blain, and D.R. Lynch, 2001. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea: A model-generated climatology. *Cont. Shelf Res.*, **21**: 667-695.
- Niino, H. and K. O. Emery, 1961. Sediments of shallow portions of East China Sea and South China Sea. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **72**: 731-762.
- Pingree, R.D., P.M. Holligan, and G.T. Mardell, 1978. The effects of vertical stability on phytoplankton distributions in the summer on the northwest European shelf. *Deep Sea Res.*, **25**: 1011-1028.
- Seo, G.-H., S. Kim, B.-J. Choi, Y.-K. Cho, and Y.-H. Kim, 2009. Implementation of the Ensemble Kalman Filter into a Northwest Pacific Ocean Circulation Model, in *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*. edited by S.K. Park and L. Xu, Springer, Berlin, pp. 341-352.
- Seo, S.N., 2008. Digital 30sec Gridded Bathymetric Data of Korea Marginal Seas - KorBathy30s. *J. Korean Soc. Coast. ocean Eng.*, **20**: 110-120.
- Seung, Y.H., 1987. A summer circulation inferred from the density (temperature) distribution in the eastern Yellow Sea. *J. Ocean. Soc. of Korea*, **22**: 63-70.
- Seung, Y.H., J.H. Chung, and Y.C. Park, 1990. Oceanographic studies related to the tidal front in the mid-Yellow Sea off Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **28**: 121-131.
- Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams, 2000. The regional ocean modeling system: a split-explicit, free surface, topography-following coordinate ocean model. *Geophys. and Planet. Phys. UCLA*, Los Angeles, CA, 31 pp.
- Simpson, J.H., and J.R. Hunter, 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, **250**: 404-406.
- Simpson J.H., C.M. Allen and N.C.G. Morris, 1978. Fronts on the continental shelf. *J. Geophys. Res.*, **83**: 4607-4614.
- Simpson J.H. and D. Bowers, 1979. Shelf sea fronts' adjustment revealed by satellite IR imagery. *Nature*, **280**: 648-651.
- Simpson J.H. and D. Bowers, 1981. Models of stratification and frontal movement in shelf seas. *Deep Sea Res.*, **28**: 727-738.
- Simpson J.H., P.B. Tett, M.L. Argote-Espinoza, A. Edwards. K.J. Jone and G. Savidge, 1982. Mixing and phytoplankton growth around an island in a stratified sea. *Cont. shelf Res.*, **1**: 15-31.
- Song, Y., and D.B. Haidvogel, 1994. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *J. Comput. Physic.* **115**: 228-244.
- Sun, Y.-J., and Y.-K. Cho, 2010. Tidal front and its relation to the biological process in coastal water. *Ocean Sci. J.* **45**: 243-251.
- Uda, M., 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *J. Imperial Fishery Experimental Station*, **5**: 57-190.
- Xia, C., F. Qiao, Y. Yang, J. Ma, and Y. Yuan, 2006. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model. *J. Geophys. Res.*, **111**: C11S03, doi:10.1029/2005JC003218.
- Yanagi, T., A. Morimoto, and K. Ichikawa, 1997. Seasonal variation in surface circulation of the East China Sea and the Yellow Sea derived from satellite altimetric data. *Cont. Shelf Res.*, **17**: 655-644.
- Yanagi, T., and S. Takahashi, 1993. Seasonal Variation of Circulations in the East China Sea and the Yellow Sea. *J. Oceanogr.*, **49**: 503-520.
- Yang, J.Y., 2006. Path variability of the Changjiang Diluted Water in summer. Ph. D. Thesis, Seoul National University, Seoul, 99 pp.
- Yuan, Y.C., and J. Su, 1984. Numerical modelling of the circulation in the East China Sea. In: Ichiye, T. (Ed.), *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*. Oceanography Series, 39, Elsevier, Amsterdam, pp. 167-186.

2011년 7월 6일 원고접수

2011년 11월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 이호진