Article

고해상도 해양예보모형 HYCOM에 재현된 쓰시마난류

서성봉^{1,2} · 박영규^{1*} · 박재훈¹ · 이호진³ · N. Hirose⁴

¹한국해양과학기술원 해양순환 · 기후연구부

(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

²과학기술연합대학원대학교 해양환경시스템과학

(305-350) 대전광역시 유성구 가정로 217

³한국해양대학교 해양과학기술대학 해양환경 · 생명과학부

(606-791) 부산광역시 영도구 태종로 727

⁴Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

The Tsushima Warm Current from a High Resolution Ocean Prediction Model, HYCOM

Seongbong Seo^{1,2}, Young-Gyu Park^{1*}, Jae-Hun Park¹, Ho Jin Lee³, and N. Hirose⁴

¹*Ocean Circulation and Climate Research Division, KIOST*

Ansan 426-744, Korea

²*Marine Environmental System Science, University of Science & Technology*

Daejeon 305-350, Korea

³*Division of Marine Environment & Bioscience, College of Maritime Science, Korea Maritime University*

Busan 609-791, Korea

⁴*Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*

6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka, 816-8580, Japan

Abstract : This study investigates the characteristic of the Tsushima Warm Current from an assimilated high resolution global ocean prediction model, 1/12° Global HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). The model results were verified through a comparison with current measurements obtained by acoustic Doppler current profiler (ADCP) mounted on the passenger ferryboat between Busan, Korea, and Hakata, Japan. The annual mean transport of the Tsushima Warm Current was 2.56 Sverdrup (Sv) ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), which is similar to those from previous studies (Takikawa et al. 1999; Teague et al. 2002). The volume transport time series of the Tsushima Warm Current from HYCOM correlates to a high degree with that from the ADCP observation (the correlation coefficient between the two is 0.82). The spatiotemporal structures of the currents as well as temperature and salinity from HYCOM are comparable to the observed ones.

Key words : Tsushima Warm Current, Korea Strait, HYCOM, high resolution, ocean prediction model

*Corresponding author. E-mail : ypark@kiost.ac

1. 서 론

대한해협은 한반도와 일본 열도 사이에 위치한 황해, 남해 및 동중국해와 동해를 연결하는 폭이 약 200 km 정도인 수로이다. 대한해협은 쓰시마섬을 기점으로 동수도와 서수도로 나누어진다. 동수도는 폭이 약 140 km이고 수심은 약 110 m인 비교적 넓고 얕으며 평평한 모양이며, 서수도는 폭이 약 40 km이고 수심은 약 150~200 m인 좁고 깊게 움푹 들어간 모양이다(Fig. 1). 이 해협을 통과하는 주 흐름은 쓰시마난류로 동중국해의 열과 염을 동해로 전달한다. 동해로 유입된 쓰시마난류는 동해를 통과한 후 쓰가루 해협과 소야 해협을 통하여 태평양과 호츠크해로 빠져나가는 동해통과류를 만들어내며 동해의 해수 순환에 주요한 역할을 한다(Moriyasu 1972; Cho and Kim 2000; Lee et al. 2000). 쓰시마난류는 가을에 가장 강하며, 서수도를 통과하는 흐름이 동수도를 통과하는 흐름보다 강하다(Miita and Ogawa 1984; Egawa et al. 1993). 대한해협은 수심이 얕기 때문에 해역의 표층에 작용하는 바람응력이 월변동이하의

Fig. 1. Bottom topography of Korea Strait. The Ferryboat ADCP observation line is indicated by orange (Western Channel) and green (Eastern Channel) lines. Red dots indicate NFRDI (KODC) observation stations on 208 and 209 observation lines

단주기 수송량의 변화를 결정하는 중요한 요인으로 알려져 있다(Lyu et al. 2002; Jacobs et al. 2005).

대한해협의 각 수도가 가지는 지형적 특성으로 인한 흐름의 영향과 주변 해역과의 시·공간적 상호 관계 등을 수치모델링으로 파악하기 위해서는 쓰시마섬과 그 주변 지형이 자세히 포함된 고해상도 격자와 정확도 높은 개방경계조건을 필요로 할 것이다. Seung et al. (2007)은 1/36°의 고해상도 Research Institute for Applied Mechanics Ocean Model(RIAMOM)을 이용하여 대한해협 해류의 시·공간적 분포 특성을 고찰하였는데, 월 평균한 ADCP 관측 자료와의 비교를 통해 모델이 모사한 결과가 대한해협 해류의 계절적 변동을 비교적 잘 모사하였음을 보여준다. 하지만 계절적 변동보다 짧거나 긴 경월 혹은 경년변동과 같은 다양한 주기의 변동을 재현하기에는 그들의 수치모형에는 개방경계조건에 기인한 한계가 있었다.

최근 HYbrid Coordinate Ocean Model(HYCOM) 컨소시엄(www.hycom.org)은 전 지구 규모의 해황예보 시스템을 구축하여 실시간으로 이용 가능한 모든 위성 및 현장 관측자료가 동화된 모델결과를 2003년 11월부터 현재까지 하루 간격으로 제공하고 있다. 자료동화는 현장 관측 자료를 이용하여 끊임없이 변화하는 해역을 실제 상태에 가깝도록 재현한다. HYCOM은 위성으로부터 제공되는 해수면의 시·공간적 변화를 포함하여 여러 가지 관측 자료를 모델에 동화시키기 때문에 다양한 해양 연구에 활용할 수 있다. HYCOM 컨소시엄에서 제공하는 자료의 수평해상도는 1/12°로 대한해협의 각 수로의 지형적 특징을 표현하기에 충분하며, 지역에 국한된 모델이 아닌 전 지구 규모의 모델이어서 개방경계조건에 의한 제약이 없다. 하지만 전 지구 규모의 수치모델이기 때문에 우리나라 근해의 연구에 활용되기 위해서는 먼저 모델결과와 정확성에 대한 검증이 필요하다.

이 연구에서는 HYCOM 결과를 대한해협을 주기적으로 왕복 횡단하는 여객선으로부터 얻어진 acoustic Doppler current profiler(ADCP) 유속 관측 자료와 정선 관측된 수온, 염분 자료와 비교하여 검증하였고, 관측 및 모델 결과를 이용하여 대한해협 해류의 시·공간적 변화 특성을 파악하였다.

2. 자 료

HYCOM

본 연구에 이용된 모델 자료는 Navy Coupled Ocean Data Assimilation(NCODA)가 적용된 HYCOM(Chassignet et al. 2007)을 이용한 전 지구 규모의 실시간 해황 예보 시스템의 결과이다. 원시방정식을 사용하는 HYCOM은 수평방향으로는 해상도가 1/12°인 Arakawa C 격자를 사

용하며, 수직방향으로는 이름이 나타내듯 혼성격자를 사용한다. 성층화된 대양내부에서는 밀도면을 따르는 좌표계가, 수심이 얇은 연안에서는 해저지형을 따르는 좌표계가 사용된다. 혼합층 혹은 비성층 해양에서는 수심을 따르는 좌표계가 사용된다. 하지만 제공되는 자료의 수직 좌표는 원시좌표가 아니라, 32개 층의 Levitus 표준 수심이다 (Levitus 1982). 바람응력, 바람세기, 열 수지, 강우 등 표층 외력은 Navy Operational Global Atmosphere Prediction System(NOGAPS)의 자료가 사용되었다.

자료동화에는 기본적으로 위성을 이용하여 얻은 표층수온 및 고도 관측자료가 사용되고, 해수면 아래의 물성 특성을 나타내는 XBT, CTD 그리고 Argo 프로파일러로부터 얻어지는 연직 관측자료 등도 사용된다. 해양예보시스템은 미국 Navy DoD Supercomputing Resource Center에서 하루 간격으로 시행된다. 결과물은 마이애미 대학교, 미 해군연구소(NRL), 로스앨러모스 국립연구소(LANL) 간 결성된 HYCOM 컨소시엄에서 웹을 통해 일반 사용자에게 제공한다. 하루 간격의 자료는 일반적으로 48시간 이내에 이용 가능하다.

HYCOM 컨소시엄에서는 2003년 11월부터 V.60.5을 시작으로 자료를 공개하였고, 현재는 2011년 1월부터 V.90.8으로 개선된 자료를 제공한다. 우리는 OPeNDAP (www.opendap.org)을 이용하여 대한해협 영역의 일 간격 자료를 획득하여 분석하였다. 자료 분석에서는 대한해협 ADCP 관측 자료와 동일한 시기인 2005년부터 2010년까지의 월 평균 자료를 이용하였다.

ADCP

본 연구에서는 2005년부터 2010년까지 부산-하카타를 주 6~7회 약 21 knot로 운행한 뉴카멜리아호에 장착된 ADCP를 통하여 얻은 유속자료가 사용되었다. 선박의 바닥에 설치된 장비는 Multilevel ADCP(VMBBADC, 300 kHz, RD Instruments)로 표층부터 수심 14 m 사이의 자료는 획득되지 않았다. Transducer beam의 각도가 20도가량 경사진 탓에 바닥으로부터 발생하는 반향으로 바닥으로부터 전체수심의 6% 정도 범위의 자료는 사용되지 않았다. 나머지 부분에서 시간적으로 24초 간격으로 연직 방향으로 수심 14 m로부터 8 m 간격으로 자료를 얻었다. 수평방향으로는 $1/96^\circ$ 간격으로 관측 지점을 따라 130개 정점으로 나누어 평균하였다(Fukudome et al. 2010).

수송량 계산에서 관측되지 않은 영역에 대한 계산을 위해서 표층 14 m 범위의 수송량은 바로 아래의 유속이 관측된 첫 번째 층의 유속과 같은 유속으로 고려하여 수송량에 포함하였고, 바닥의 수송량은 ADCP 관측의 최하층과 실제 수심과의 차이가 ADCP의 수직관측간격(8 m)의 절반보다 큰 경우(difference > 4 m)에는 그 차이만큼을 바

로 위층인 유속이 관측된 마지막 층의 유속과 같은 유속으로 계산하여 수송량에 포함하였고, 관측의 최하층과 실제 수심과의 차이가 ADCP의 수직관측간격의 절반보다 작거나 같은 경우(difference ≤ 4 m)에는 수송량 계산에서 제외하였다.

대한해협은 좁고, 얇아 조류의 세기가 평균해류와 비슷하다. 평균해류에 대한 분석이 이 연구의 목적이기 때문에 조화 분석을 통하여 Takikawa et al. (2003)의 10개의 분조(Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , N_2 , M_2 , S_2 , K_2 , M_{sf} , 그리고 M_f) 이외에도 추가적으로 4개 분조(μ_2 , NO_1 , ϕ_1 , 그리고 J_1)를 제거한 자료(Ostrovskii et al. 2009; Fukudome et al. 2010)를 분석에 사용하였다.

3. 결 과

대한해협 수송량 비교

2005년 1월부터 2010년 12월까지 월 평균된 HYCOM

Fig. 2. Climatological monthly mean volume transport through the Korea Strait from (a) HYCOM output and (b) ADCP observation during 2005-2010. Black, green and orange lines indicate total, Eastern Channel and Western Channel volume transports, respectively

결과와 ADCP 관측 자료를 이용하여 대한해협 전체와 각 수도에서의 수송량을 분석하여 Fig. 2에 나타내었다. 수송량은 ADCP 자료에서는 관측선에 수직방향 유속을 이용하여 계산하였고, HYCOM에서는 위도 34.7°에서의 남북방향 유속을 이용하여 서수도, 즉 대한민국과 쓰시마섬 사이의 수송량을, 위도 34.1°에서의 남북방향 유속을 이용하여 동수도, 즉 쓰시마섬과 일본 사이의 수송량을 계산하였다. HYCOM 자료의 경우 이미 수직적으로 재격자화된 자료이므로 ADCP 관측선에 맞춰 수평적으로 다시 재격자화 할 경우 오류가 생길 수 있기 때문에 수송량 계산시에는 자료의 손실을 줄이기 위해 획득한 원본 자료를 이용하였다. ADCP 관측선은 쓰시마섬을 가로지르지 않기 때문에 ADCP자료에서 서수도와 동수도를 명확하게 나누는 것은 불가능하다. 여기에서는 Fukudome et al. (2010)에서 수행한 방법과 동일하게 쓰시마섬에서 가장 가까운 점을 찾고, 이 점과 대한민국 사이는 서수도로, 이 점과 일본 사이는 동수도로 정의하여 수송량을 구하였다. 기준점을 ADCP 관측선을 따라 수 km 변경하면 동수와 서수도 수송량이 5% 미만으로 약간 변하지만 다음에 기술하는 전체적인 경향에는 영향을 미치지 않았다.

HYCOM(Fig. 2a)과 ADCP(Fig. 2b)에서 2005년부터 2010년 기간 동안 대한해협을 통과하는 평균 수송량은 각각 2.56 Sv와 2.55 Sv($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)이며, 이는 Takikawa et al. (1999)의 2.6 Sv, Teague et al. (2002)의 2.7 Sv와 유사한 값이다. ADCP 자료에서 수송량이 최소와 최대인 시기는 각각 1월(1.89 Sv)과 8월(2.91 Sv)이다. HYCOM에서 수송량이 최소인 시기는 1월(1.84 Sv)이고 최대인 시기는 8월(3.08 Sv)이다. 두 자료 모두에서 유량은 겨울에 최소가 된 후 여름까지 서서히 증가하여 늦여름에 최대가 되었다가 겨울철로 접어들면서 다시 줄어드는 매우 유사한 특징을 보인다. 그리고 두 자료에서 6년 기간동안의 월별 시계열 상관관계는 매우 높게 나타났다(Fig. 3, 상관계수는 0.82이며 95% 신뢰수준 값은 0.73이다).

수송량을 각 수도별로 나누기 위하여, ADCP의 자료를 관측선에서 위도 34.75°를 기준으로 북쪽은 서수도, 남쪽은 동수도 정의하며(Fig. 1) 동수도의 수송량은 1월에 0.93 Sv으로 최소, 4월에서 1.26 Sv으로 최대이고, 서수도의 수송량은 1월에 0.96 Sv으로 최소, 10월에 1.88 Sv으로 최대이다. 그리고 각 수도의 최대-최소 수송량 차이는 동수도에서 0.33 Sv, 서수도에서 0.91 Sv이다. HYCOM에서는 동수도의 수송량이 1월에 0.92 Sv으로 최소, 8월에 1.41 Sv으로 최대이고, 서수도에서는 1월에 0.92 Sv으로 최소, 10월에 1.71 Sv으로 최대이다. 동수도의 경우 ADCP에서는 전반적으로 수송량이 여름철에 낮게 나타나지만 HYCOM에서는 여름철 최대를 보인다. 각 수도에서의 최소-최대 수송량의 차이는 동수도에서 0.49 Sv, 서수도에서

Fig. 3. Monthly-mean volume transport time series through the Korea Strait calculated from HYCOM output (blue) and ADCP observation (red) during 2005-2010. The correlation coefficient between the two time series is 0.82 with a lower bound of the 95% confidence limit of 0.73

Fig. 4. Monthly-mean volume transport time series through the Western Channel of Korea Strait (orange line), Eastern Channel of Korea Strait (green line) and Jeju Strait (blue line) calculated from HYCOM output. The correlation coefficient between the Jeju Strait and Western Channel of Korea Strait time series is 0.89 with a lower bound of the 95% confidence limit of 0.83, the correlation coefficient between the Jeju Strait and Eastern Channel of Korea Strait time series is 0.55 with a lower bound of the 95% confidence limit of 0.36

0.79 Sv로 나타나며 기존에 보고된 결과(Miita and Ogawa 1984; Mizuno et al. 1989; Egawa et al. 1993)와 동일하게

두 자료 모두 동수도에 비해 서수도에서 더 큰 계절 변동이 나타난다. 이러한 서수도의 큰 계절변동은 제주해협을 통과하여 연안을 따라 유입되는 해류의 영향으로 판단된다(Fig. 4). HYCOM 결과로부터 계산된 동기간 제주해협의 수송량과 서수도의 수송량은 평균적으로 약 1 Sv 차이가 나지만 그 변화 폭은 0.8~1 Sv로 비슷하며 상관관계도 0.89로 높게 나타난다. 반면 동수도도 수송량의 변화 폭은 비슷하지만 상관관계는 0.55로 낮게 나타난다.

서수도에서는 두 자료 모두 전체 해협 수송량의 변화와 마찬가지로 겨울에 최소 수송이 나타났고, 봄-여름 동안 강해지며 가을에 최대를 보이는 쓰시마난류의 특징이 잘 나타난다. 하지만 동수도의 경우 HYCOM에서는 서수도와 같은 변화를 보이는 반면, ADCP에서는 봄에 가장 강하고 여름-가을 동안 낮은 수치가 나타났다. 이러한 결과는 전반기(1월~6월)에 HYCOM에서 나타난 낮은 대한해협 수송량이 동수도 수송량의 차이에 의한 것임을 나타낸다.

HYCOM은 계절주기가 강한 서수도의 변화는 잘 재현했지만 변화가 적은 동수도의 특성은 잘 재현하지 못하였다. 관측 결과는 서수도와 동수도 수송량의 계절변화 특성이 다름을 보여준다. 이런 결과는 각 수도에서 계절변화를 일으키는 원인이 다름을 의미한다. 하지만 HYCOM에서는 두 수도에서 수송량의 계절변화특성이 같게 나타

나 모형이 동수도의 미세한 변화까지는 잘 재현하지 못함을 보여준다. 서수도와 동수도의 계절변화가 다른 원인을 ADCP 자료만을 이용하여 분석하는 것은 불가능하기 때문에 이 연구에서 그 원인에 대한 분석은 수행하지 않았다.

수심별 유속 비교

Fig. 1에 표시된 ADCP 관측선에서 수심별(20, 50, 75 m) ADCP와 HYCOM 자료의 월별 유속을 관측선과 평행한 방향의 유속 성분(이하 U_l)과 관측선에 수직 방향 유속 성분(이하 V_l)으로 나누어 산점도를 이용하여 비교하고 회귀 직선을 함께 표시하였다(Fig. 5).

전체 해협을 비교하면 유속의 세기에서 U_l 는 흐름의 크기는 강한 상층에서도 -0.3~0.3 m/s 이내의 범위로 V_l 의 범위(-0.2~0.9 m/s)에 비해 약한 흐름이다. 이는 관측선을 통과하는 흐름인 쓰시마난류가 주로 해협의 방향에 평행한 방향으로 강하게 흐름을 보인다. 그리고 V_l 도 동수도보다 서수도에서 더 강한 유속이 나타나며 산점도도 동수도보다 서수도에서 넓게 분포한다. V_l 는 서수도의 수심 75 m를 제외한 동수도와 서수도의 모든 수심에서 두 자료간의 상관관계 계수가 95% 신뢰수준에서 유의한 0.75 이상으로, 해협을 통과하는 흐름을 잘 재현한다. U_l 는 모든 수심과 수도에서 0.4 이하로 낮다. 각 지점에서의 U_l 는 흐름이

Fig. 5. Scatter plots of velocity components (along observation track (U_l), across observation track (V_l)) between ADCP measurements and HYCOM predictions. Each couple of columns show (a) total, (b) Eastern Channel, and (c) Western Channel volume transports. The upper, middle, and lower rows show results at 20-, 50- and 75-m depths, respectively. Red lines represent regression lines. Lb is lower bound for a 95% confidence limit for correlation coefficient

관측선을 통과할 때의 각도를 결정한다. ADCP와 HYCOM 데이터에서 나타나는 U 의 차이를 모델과 관측간의 오차라고도 볼 수 있겠지만, 쓰시마난류는 해협에 평행한 형태로 강하게 나타나고 수직인 방향으로의 흐름은 상대적으로 약하고 변화도 작으므로 관측선을 통과할 때 흐름 방향의 차이는 모형의 경우 그 해상도에 따라 좁은 해역에서 연안선의 모양이나 국지적인 기상 등 외력의 영향에 따라 생길 수 있다. 산점도의 형태에서 동수도의 경우 상층에서는 ADCP 자료가 더 넓은 유속 범위를 보이고, 서수도의 경우 전체 층에서 비교적 HYCOM이 더 강한 유속을 나타낸다. 그리고 동수도의 전 수심과 서수도 수심 20 m에서는 ADCP 유속이 HYCOM 유속에 비하여 음의 유속 성분이 강하게 나타나는데, 이는 HYCOM에서 쓰시마섬 동쪽에 나타나는 남서향의 반류가 관측에 비해 약하게 재현됨을 의미한다.

수직 유속 분포 비교

ADCP 관측선(Fig. 1)을 따라 2005년부터 2010년까지의 월별 평균된 HYCOM과 관측에서 얻은 속도의 수직 단면을 Fig. 6에 나타내었다. 두 자료 모두 겨울에서 봄까지는 순압(barotropic) 구조, 즉 수심에 따른 변화가 적은 구조를 보이고, 여름에는 상층에서는 강하고 하층에서는 약한 경압(baroclinic) 구조를 갖는 쓰시마난류의 특성이 잘 나타난다. 대한민국 연안에서부터 서수도 중심까지는 양의 값(북동향), 서수도의 끝부분인 쓰시마섬 오른쪽에서는 음의 값(남서향), 동수도 중심부에서는 양의 값, 일본 연안에서 약한 음의 값이 나타난다. 수송량에서도 나타나듯 ADCP 관측과 HYCOM에서 해협의 평행한 흐름인 양의 방향으로의 유속은 겨울철에 약하고, 여름에서 가을이 되면서 서서히 강해지는 모습이 유사하게 나타난다. 수로에서 가장 강한 유속이 나타나는 위치는 약간의 차이는

Fig. 6. Six-year-averaged monthly-mean vertical sections of the current normal to the Ferryboat-ADCP track from (a) HYCOM and (b) observation

있지만 HYCOM과 ADCP 모두 서수도에서는 수심이 가장 깊은 지역의 상층이고, 동수도에서는 중앙부로, 두 자료 모두에서 해협에서의 특성이 잘 나타난다.

ADCP 자료에서는 서수도의 수심 150 m 아래에서 남서향의 흐름이 나타나지만 HYCOM에서는 보이지 않는다. 기존의 보고된 결과에서 대한해협 서수도 저층냉수 분석을 통해 HYCOM 결과가 저층 남서향류를 어느 정도 모의함을 보여 주었지만(Fig. 10) 본 연구의 전년 월별 평균과 ADCP 관측점에 맞게 재 격자화된 HYCOM 결과에서는 150 m 부근의 남서향의 해류의 표현이 잘 되지 않았다(민 등 2011). 민 등 (2011)의 연구에서 나타난 지점은 본 연구의 관측 지점보다 더 남쪽에 위치한 서수도의 깊은 골이며, 본 연구는 일치하지 않는 위치에서 ADCP 관측선을 따라 HYCOM 결과를 분석하였기 때문이다. 그리고 차이가 나타나는 다른 요인으로 수직 단면과 함께 관측선을 따른 실제 지형과 HYCOM에서 표현한 지형의 차이에서 볼 수 있는데(Fig. 6. 각 그림의 검은 실선), ADCP 관측의 실제지형은 서수도에서 150 m보다 깊은 수심을 표현하지만 재격자화된 HYCOM에서 표현하는 해당 위치의 수심은 150 m 정도이며, ADCP 관측에서도 볼 수 있듯이 남서향의 흐름은 주로 서수도의 150 m보다 깊은 수

심에서 나타난다.

수평 유속 분포 비교

ADCP와 HYCOM 모두 수심 20 m에서 변동성이 가장 크게 나타나므로 이 깊이에서 유속의 수평분포를 비교하였다. 수심 20 m에서 월별 평균된 유속 벡터를 Fig. 7에 나타내었고, 유속의 시간변화를 파악하기 위하여 주성분 분석(Principal component analysis)을 수행하고 그 결과를 타원으로 Fig. 8에 나타내었다.

두 자료 모두에서 수송량과 유사한 계절적 변화를 보인다. 서수도에서 HYCOM의 경우 전 월에 걸쳐 해협의 가운데 부분에서 가장 강한 흐름이 존재하며 수도 끝부분인 대한민국 연안부분에서는 약해지는 모습을 보인다. ADCP 자료에서는 해협 가운데 부분에서 가장 강한 흐름이 나오지만 5월부터 11월에 걸쳐 한반도 연안에 가까운 부분에서도 강한 흐름이 존재한다. 서수도의 중심에서 흐름이 강한 6월부터 10월까지의 두 경우 모두 흐름이 수도의 축과 평행하지만, 흐름이 비교적 약한 1월부터 5월 사이 HYCOM에서는 북동동방향 흐름이, ADCP에서는 북북동방향 흐름이 나타난다. 유속이 강해지는 6월부터 10월 사이 ADCP에서는 서수도 전체에 넓고 강한 흐름이 발견되

Fig. 7. Six-year-averaged monthly-mean currents at 20 m from HYCOM (blue) and ADCP observation (red)

Fig. 8. Principal component ellipses at 20 m from HYCOM (blue) and ADCP observation (red)

는데, HYCOM에서는 비교적 좁고 강한 흐름이 나타났다.

또한 주성분 분석을 결과에서는 두 자료 모두 대부분의 계절에서 그 유속의 변동성은 수로의 가운데 부분에서 크게 나타난다. 하지만 ADCP에 비해 HYCOM의 변동성이 흐름의 주축방향으로 좁고 긴 형태로 나타난다. 즉 HYCOM에서는 변동이 주로 대한해협을 따라 나타난다. 이런 경향은 동수도서 더욱 강화되어 장축과 단축의 길이의 차이, 즉 타원의 이심률이 더욱 커진다. 서수도의 가장 서편인 부산근처에서 ADCP 자료에 나타난 변동성은 겨울철에는 약하지만 봄과 여름철에는 수도의 가운데와 유사하거나 더 커지기도 하지만 HYCOM 자료에서는 이러한 특성이 발견되지 않는다.

쓰시마섬 동쪽의 반류(counter current)

월별 수직 분포(Fig. 6)와 공간적 벡터 비교(Fig. 7)에서 나타나듯 HYCOM과 ADCP 관측 모두에서 6월~7월 각 수로에서 유속이 강해질 때 서수도 끝부분인 쓰시마섬 동편 북위 34.5° 부근에서 나타나는 반류(counter current)도 강해지는 것을 볼 수 있다. 수직적 분포와, 수평 벡터장에서도 비슷한 위치에서 반류를 확인할 수 있는데, 앞서 산

점도를 이용하여 설명한 것과 같이 HYCOM에서는 반류가 약하게 나타난다. 이 반류로 인해 ADCP 자료에서 볼 수 있듯이 쓰시마섬 부근에서 봄과 여름 특히 8월에 큰 변동성이 나타난다.

수온 및 염분 비교

HYCOM에서 나타나는 계절별 쓰시마난류의 수온과 염분을 국립수산물과학원(National Fisheries Research and Development Institute, NFRDI) 해양자료센터(Korea Oceanographic Data center, KODC)에서 온라인을 통하여 제공하는 정선해양관측 자료(2005~2010)와 Fig. 9와 Fig. 10에서 비교하였다. 비교 정점은 대한해협을 통과하는 쓰시마난류가 동해로 유입되는 부분인 208, 209 정선(Fig. 1)이다. 관측결과와 비교하여 모형이 재현한 수온은 전반적으로 약 2°C 정도, 염분은 약 0.3 psu 정도 차이가 났다. 이런 차이는 바닥부근에서 더 크게 나타났는데 이는 모형이 동해의 심층구조를 잘 재현하지 못하기 때문이다(민 등 2011). 하지만 모형이 공간분포특성과 계절변화는 관측과 비슷하게 재현하였다. 208 정선에서 겨울과 봄에 관측된 두꺼운 혼합층이 모형에서 재현되었고, 여름과 가을

Fig. 9. Seasonal-mean vertical sections of temperature (1st, 2nd column), difference of temperature (3rd column), salinity (4th, 5th column), and difference of salinity (6th column) along NFRDI (KODC)-208 observation line shown in Fig. 1 during 2005-2012 (NFRDI data - 1st & 4th - column, HYCOM data - 2nd & 5th - column, differences of temperature - 3rd column, differences of salinity - 6th column) (MAM: March-May, JJA: June-August, SON: September-November; DJF: December-February)

Fig. 10. Seasonal-mean vertical sections of temperature (1st, 2nd column), difference of temperature (3rd column), salinity (4th, 5th column), and difference of salinity (6th column) along NFRDI (KODC)-209 observation line shown in Fig. 1 during 2005-2012 (NFRDI data - 1st & 4th - column, HYCOM data - 2nd & 5th - column, differences of temperature - 3rd column, differences of salinity - 6th column)

에 수심 50 m 부근에서 관측된 수온약층도 모형이 재현하였다. 연안으로 갈수록 알아지는 등온선의 분포형태도

모형이 재현하였다. 209 정선에서도 겨울과 봄에 관측되는 혼합층, 여름과 겨울철에 약 50 m 부근에서 형성되는

수온약층이 재현되었다. 모형은 여름철에 수온약층 아래 100~150 m 층에서 발견되는 고염의 쓰시마난류수도 잘 재현하였다. 하지만 앞서 언급하였듯이 모형이 재현한 쓰시마난류수의 염분은 관측에 비해 0.2 psu 정도 낮게 나타났다.

4. 요약 및 토론

자료 동화된 전 지구 규모 고해상도 해양예보모델인 HYCOM이 재현한 쓰시마난류의 특성을 2005년부터 2010년까지 부산과 일본 하카다를 왕복하며 얻은 ADCP 관측자료와 비교하여 검증하였다. HYCOM에서 재현한 쓰시마난류의 수송량과 유속분포는 평균과 계절변화 모두 전반적으로 관측과 유사하다. 동수도와 서수도에서 수도의 가운데 수심이 깊은 지점 부근에서 수도를 따라 북동쪽으로, 즉 동해로 유입되는 빠른 흐름 나타났다. 하지만, HYCOM 결과 분석에 있어 결과는 원시자료 형태가 아닌 Levitus 표준 수심으로 제공되기 때문에, 분석 시 발생할 수 있는 저층에서의 깊이 차이나 실제 지형 등 깊이 에 따른 제약이 있다. 그리고 1/12° 격자의 모형이 대한해협이나 남해의 복잡한 지형 및 외력을 세세하게 모의하지는 못하기 때문에 그러한 부분에서는 관측과 차이를 보이는 것으로 판단된다. 따라서 전체적인 흐름의 양은 유사하지만 각 지점에서의 유속의 세기나 방향에는 약간의 차이가 나타났고, 차이가 가장 크게 나타나는 부분이 쓰시마섬 동쪽의 반류, 부산근처의 연안류, 대한해협 서수도 골에 나타나는 남향류 등이다.

총 수송량(혹은 barotropic transport)는 해수면 높이에 의해 주로 결정된다(Toulany and Garrrt 1984; Pedlosky 1987). Lyu and Kim (2003)과 Takikawa and Yoon (2005)의 연구결과는 대한해협의 표층 해류는 대한민국 연안과 일본연안의 해수면 고도 차이와 높은 관계성을 가지고, 이 고도 차이를 이용하여 대한해협의 수송량을 측정할 수 있음을 보여준다는 점을 고려한다면 이런 연구 결과는 모델에서 쓰시마난류의 수송량과 그 변화가 관측과 유사하게 재현되는 주된 이유는 HYCOM에 동화된 해수면 고도의 효과인 것으로 사료된다. HYCOM은 쓰시마난류의 수직 구조도 잘 재현하였다. 모형에 동화된 수온염분자료가 온도풍(thermal wind) 관계를 통하여 모형의 해류의 수직구조를 재현하는데 기여했을 것으로 사료된다. 해수면 고도나 수온 염분의 동화가 모형 결과에 미치는 영향을 정확히 평가하려면 민감도 실험을 수행해야 한다. 본 연구의 목적은 자료동화를 얻어진 결과를 검증하는 것이기 때문에, 여기서 동화된 각 변수가 모형결과에 미치는 영향에 대한 분석은 수행하지 않았다. 하지만 민감도 분석은 추후에 수행되어야 할 중요한 연구주제이다. 국립수산과학원 정선 관측자료와의 비교하여 HYCOM 결과가 대한해협 동쪽에서 수온과 염분의 계절적 변동성도 잘 재현함을 파악하였다. 하지만 모형이 재현한 절대값은 수온은 2°C, 염분은 0.3 psu 정도 범위에서 차이를 보였다.

HYCOM이 쓰시마난류의 특성을 잘 재현한다는 점을 감안할 때, HYCOM 결과를 이용하여 대한해협과 주변해역의 순환특성을 파악할 수 있을 것으로 예상된다. 2005년부터 2012년 사이 HYCOM이 재현한 대한해협을 포함

Fig. 11. Seasonal-mean sea surface temperature and current vectors during 2005-2012

Fig. 12. Seasonal-mean sea surface salinity and current vectors during 2005-2012

Fig. 13. Wintertime-mean (December-February) (a) temperature and (b) salinity sections along 127° 45.6'E during 2005-2012

하는 남해역(동중국해 북부해역)의 계절별 해수면수온과 염분 및 표층 흐름을 계절별로 Fig. 11과 Fig. 12에 나타냈다. HYCOM 결과는 해수면수온과 염분 분포 및 해협을 통과하는 해류나 연안을 따라 흐르는 연안류를 잘 재현한다. 황해와 동중국해는 전 계절에 걸쳐 저온-저염을 나타내고, 일본 큐슈 서편을 거쳐 북상하여 동해로 유입되는 해수는 전 계절에 걸쳐 상대적으로 고온-고염이다. 여름철 중국 연안에서 제주해협과 남해 전역으로 유입되는 저온 저염의 표층 해수나, 겨울에 봄까지 제주도 서쪽에서 동중국해에서 황해로 뻗어나간 혀 모양의 강한 고온 고염수의 전선도 기존에 알려진 것(Lie et al. 2001)과 유사한 형태를 보인다. 겨울철 남해안(127°45.6'E)에 해안선에 평행하게 나타나는 강한 전선이 발달하며 나타나는 연안의 저온수가 사면을 따라 하강하는 듯한 등온선의 구조도 선행연구(손 등 2003)와 유사한 모습이다(Fig. 13). 하지만 HYCOM에 조석이 포함되어 있지 않기 때문에, 조석의 영향이 큰 황해 및 동중국해 연안에서의 조류 혼합과 조석 잔차류, 그리고 이와 관련된 현상은 재현할 수 없다. 따라서 HYCOM 결과를 이 해역에 적용할 때에는 이런 모형의 한계점을 고려하여야 한다. HYCOM 결과가 재현한 남해 및 동중국해의 순환에 대한 자세한 분석 결과는 추후에 보고할 예정이다.

사 사

원고를 심사해주신 심사자들에게 고마움을 전합니다. 이

연구는 해양수산부(Ministry of Ocean and Fisheries)의 ‘기후변화가 남해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능평가 기술 개발 사업(PM57090)’ 및 ‘CO₂ 해양 지중 저장기술 개발(PMS266B)’과 한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science and Technology, KIOST)의 ‘동해 해양환경 및 생태계 변동감시 체제 구축(PE98921)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 민홍식, 박재훈, 최아라, 박영규, 신경순, 장풍국 (2011) 2006~2010년 기간 동안 대한해협 서수도에서 관측된 해수 물성변동. *Ocean and Polar Res* **33**(3):325-336
- 손영태, 이상호, 이재철, 김정창 (2003) 동중국해 북부해역의 겨울철 수계와 전선구조. *한국해양학회지 「바다」* **8**(3): 327-339
- 한국해양자료센터 (2013) 정션해양관측자료. <http://kodc.nfrdi.re.kr> Accessed 18 Jun 2013
- Chassignet EP, Hurlburt HE, Smedstad OM, Halliwell GR, Hogan PJ, Wallcraft AJ, Baraille R, Bleck R (2007) The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *J Marine Syst* **65**(1-4):60-83
- Cho Y, Kim K (2000) Branching mechanism of the Tsushima Current in the Korea Strait. *J Phys Oceanogr* **30**(11):2788-2797
- Egawa T, Nagata Y, Sato S (1993) Seasonal variation of the current in the Tsushima Strait deduced from ADCP data of ship-of-opportunity. *J Oceanogr* **49**(1):39-50
- Fukudome K, Yoon JH, Ostrovskii A, Takikawa T, Han IS (2010) Seasonal volume transport variation in the tsushima warm current through the Tsushima Straits from 10 Years of ADCP observations. *J Oceanogr* **66**(4):539-551
- Jacobs GA, Ko DS, Ngodock H, Preller RH, Riedlinger SK (2005) Synoptic forcing of the Korea Strait transport. *Deep-Sea Res Pt II* **52**(11-13):1490-1504
- Lee DK, Niiler PP, Lee SR, Kim K, Lie HJ (2000) Energetics of the surface circulation of the Japan/East Sea. *J Geophys Res* **105**(C8):19561-19573
- Levitus S (1982) Climatological atlas of the world ocean. NOAA Prof Pap 13, U S Govt printing Off, Washington DC, pp 173
- Lie HJ, Cho CH, Lee JH, Lee S (2001) Does the Yellow Sea Warm Current really exist as a persistent mean flow? *J Geophys Res* **106**(C10):22199-22210
- Lyu SJ, Kim K, Perkins HT (2002) Atmospheric pressure-forced subinertial variations in the transport through the Korea Strait. *Geophys Res Lett* **29**(9):1294. doi:10.1029/2001GL014366
- Lyu SJ, Kim K (2003) Absolute transport from the sea level difference across the Korea Strait. *Geophys Res Lett* **30**(6):1285. doi:10.1029/2002GL016233
- Miita T, Ogawa Y (1984) Tsushima currents measured with current meters and drifters. In: Elsevier Oceanography Series, Vol 39. Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas, Elsevier, Amsterdam, pp 67-76
- Mizuno S, Kawatate K, Nagahama T, Miita T (1989) Measurements of East Tsushima current in winter and Estimation of its Seasonal Variability. *J Oceanogr Soc Japan* **45**(6):375-384
- Moriyasu S (1972) The Tsushima Current. In: H. Stommel and K. Yoshida (Eds.). Kuroshio. University of Tokyo Press 353-369
- Ostrovskii A, Fukudome K, Yoon JH, Takikawa T (2009) Variability of the volume transport through the Korea/Tsushima Strait as inferred from the shipborne acoustic Doppler current profiler observations in 1997-2007. *Oceanology* **49**(3):338-349
- Pedlosky J (1987) *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, 710 p
- Seung YH, Kim YJ, Yoon JH (2007) Seasonal characteristics of the Tsushima Current in the Tsushima/Korea Strait obtained by a fine-resolution numerical model. *Cont Shelf Res* **27**(1):117-133
- Takikawa T, Yoon JH, Hase H, Cho KD (1999) Monitoring of the Tsushima Current at the Tsushima/Korea Straits. In *Proceedings 3rd CREAMS International Symposium*, Fukuoka, Japan, pp 15-18
- Takikawa T, Yoon JH, Cho KD (2003) Tidal current in the Tsushima Straits estimated from ADCP data by ferryboat. *J Oceanogr* **59**(1):37-47
- Takikawa T, Yoon JH (2005) Volume transport through the Tsushima Straits estimated from sea level difference. *J Oceanogr* **61**(4):699-708
- Teague WJ, Jacobs GA, Perkins HT, Book JW, Chang KI, Suk MS (2002) Low frequency current observations in the Korea Strait. *J Phys Oceanogr* **32**:1621-1641
- Toulany B, Garrett C (1984) Geostrophic control of fluctuating barotropic flow through strait. *J Phys Oceanogr* **14**(4):649-655

Received Mar. 25, 2013

Revised May 20, 2013

Accepted Jun. 18, 2013