

평균역학고도장과 인공위성고도계 자료를 이용한 동해 표층해류 추산

이상현^{1,3} · 변도성^{1*} · 최병주² · 이은일¹

¹국립해양조사원 해양조사연구실

²군산대학교 해양학과

³한국해양조사협회

Estimation of the Surface Currents using Mean Dynamic Topography and Satellite Altimeter Data in the East Sea

SANG-HYUN LEE^{1,3}, DO-SEONG BYUN^{1*}, BYOUNG-JU CHOI² AND EUNIL LEE¹

¹Ocean Research Division, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration

²Department of Oceanography, Kunsan National University

³Korea Oceanographic and Hydrographic Association

인공위성 고도계로 측정된 해수면 높이 자료를 사용하여 준 실시간 동해 표층해류를 추정하기 위해, 세 가지 방법으로 평균 역학지형(또는 평균 해류장)을 계산하고 각각의 특징들을 살펴보았다. 프랑스 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)는 인공위성 고도계 자료와 수치모델을 이용하여 전 지구 해양에 대하여 수평적으로 0.25°의 해상도를 갖는 평균 역학지형을 계산하고 지형류 방정식을 적용하여 평균 해류장을 만들어 제공하고 있다. 동해에서 장기간 관측한 수온과 염분 자료를 사용하여 500 dbar를 기준면으로 사용한 역학적 해면(steric height)을 계산하고 이를 평균 역학지형으로 환산하였다. 또한 14년 동안 동해의 표층을 이동한 표층뜰개들(ARGOS)의 궤적을 이용하여 평균 해류장을 구하였다. 인공위성 고도계로 관측한 해수면 편차와 세 가지 평균 역학지형을 합하여 절대 역학지형을 얻고, 각각의 절대 역학지형에 지형류 방정식을 적용하여 세 가지 표층해류를 추정하였다. 각 방법으로 추정된 표층해류를 2005년에 동해 남서부 해역에서 선박장착 초음파 해류계(ADCP)로 관측한 해류 자료와 정량적으로 비교하였다. 육지에서 50 km 이상 떨어진 해역에서는 인공위성 고도계로 측정된 해수면 자료에 지형류 방정식을 적용하여 구한 표층해류와 현장 관측 해류의 상관관계수(R)가 0.58~0.73이며 두 자료의 제곱 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Deviation, RMSD)는 17.1~21.8 cm s⁻¹이다. 육지에서 50 km 이내의 연안에서는 두 자료의 R이 0.06~0.46로 상대적으로 낮고 RMSD는 15.5~28.0 cm s⁻¹이다. 이처럼 연안에서는 인공위성 고도계로 관측한 해수면 높이 자료의 오차가 크므로 향후 연안에 대해서는 새로운 표층해류 추정 방법에 대한 추가 연구가 필요하다.

In order to estimate sea surface current fields in the East Sea, we examined characteristics of mean dynamic topography (MDT) fields (or mean surface current field, MSC) generated from three different methods. This preliminary investigation evaluates the accuracy of surface currents estimated from satellite-derived sea level anomaly (SLA) data and three MDT fields in the East Sea. AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) provides a MDT field derived from satellite observation and numerical models with 0.25° horizontal resolution. Steric height field relative to 500 dbar from temperature and salinity profiles in the East Sea supplies another MDT field. Trajectory data of surface drifters (ARGOS) in the East Sea for 14 years provide another MSC field. Absolute dynamic topography (ADT) field is calculated by adding SLA to each MDT. Application of geostrophic equation to three different ADT fields yields three surface geostrophic current fields. Comparisons were made between the estimated surface currents from the three different methods and *in-situ* current measurements from a ship-mounted ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) in the southwestern East Sea in 2005. For offshore areas more than 50 km away from the land, the correlation coefficients (R) between the estimated versus the measured currents range from 0.58 to 0.73, with 17.1 to 21.7 cm s⁻¹ root mean square deviation (RMSD). For coastal ocean within 50 km from the land, however, R ranges from 0.06 to 0.46 and RMSD ranges from 15.5 to 28.0 cm s⁻¹. Results from this study reveal that a new approach in producing MDT and SLA is required to improve the accuracy of surface current estimations for the shallow costal zones of the East Sea.

Keywords: Satellite Altimeter data, Mean Dynamic Topography, East Sea, Surface Current

*Corresponding author: dsbyun@korea.kr

서론

해양에서 해류는 열과 염을 운반할 뿐만 아니라 물질을 수송하는 역할을 하기 때문에 해류순환을 이해하는 일은 일차적으로 기후변화와 날씨, 해양생태계의 변동성을 이해하는데 있어서 매우 중요하다. 또한 해류 정보는 효율적이고 안전한 항해와 물류수송, 연안 양식업과 원양 수산업에 유용하다(Santos, 2000). 오늘날에는 인공위성에서 관측한 해수면 높이 자료가 제공되므로 준 실시간으로 전 세계의 표층해류순환을 한 눈에 볼 수 있다. 인공위성에서 관측한 해수면 높이 자료를 이용하여 준 실시간으로 표층해류정보를 제공하는 국외의 대표적 인터넷 서비스 기관으로는 미국 해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)과 프랑스 AVISO(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)가 있다. 우리나라의 경우 국립해양조사원에서 준 실시간 동해 표층해류도를 제공하고 있다. 국립해양조사원은 프랑스 AVISO로부터 준 실시간 해수면 높이 편차자료(sea level anomaly, SLA)를 제공 받아 독자적인 알고리즘을 사용하여 표층 해류장을 추정하고 있으며, 추산된 표층 해류장에 일일 평균 표층 뜰개(Argos tracked drifters) 레저 자료를 추가하여 웹서비스(<http://www.khoa.go.kr>)를 실시하고 있다.

인공위성에 장착된 고도계로 관측한 해수면 높이 자료를 이용하여 해양의 표층해류를 추정하기 위하여 미국과 유럽 국가들은 공동으로 1992년 10월에 T/P (TOPEX/Poseidon)와 ERS-1(European Remote sensing Satellite-1) 해양탐사위성을 발사하였다. 2002년 9월부터 2005년 10월 사이에는 4대의 탐사위성들(T/P, Jason-1, Geosat Follow-On, ENVISAT)이 동시에 해수면 높이를 관측하고 그 자료를 제공하였다(Fig. 1a). 이와 같이 2002년 이후에는 3대 이상의 인공위성이 동시에 관측을 수행하여 공간적으로 고해상도의 자료를 얻을 수 있다. 공간적인 해수면 높이(편차) 자료 생산에 있어서 각기 다른 궤도와 주기를 가진 최소 2대 이상의 인공위성 고도계자료를 사용함으로써 궤적오차(trackiness error)를 현저히 줄일 수 있다(Nam *et al.*, 2004). 3대 이상의 인공위성 자료를 사용하여 추산한 지형류가 2대의 인공위성 자료를 사용하여 구한 표층해류 보다 표층을 이동하는 뜰개들의 궤적을 더 잘 설명한다(Pascual *et al.*, 2006).

그러나 여러 개의 인공위성에서 얻어진 해수면 높이 자료의 합성자료(merged dataset)라 할지라도 일반적으로 조석 및 대기압의 효과를 제거하고 지오이드(geoid) 정보를 활용하는 과정에서 발생한 다양한 오차를 포함한다. 또한 인공위성의 해수면 높이 자료에는 인공위성의 정확한 높이를 계산하는 과정에서 발생하는 인공위성 궤도오차, 인공위성에서 발사된 극초단파(microwave)가 전리층(ionosphere)을 통과하는 동안 전자와 양이온들에 의하여 속도가 느려지는 효과에 의한 오차, 대류권(troposphere)에 분포하는 수증기에 의하여 각 지역마다 극초단파의 속도가 달라져서 발생하는 오차 등이 포함되어 있다(Schreiner, 1997; Lagerloef *et al.*, 1999; 윤과 서, 2003).

Fig. 2a는 미국 NOAA에서 제공하는 4 km×4 km 격자 간격의 인공위성 표층 수온자료를 1985년부터 2007년까지 23년간 평균한 값으로 동해의 표층해류순환의 결과로 나타난 표층수온 분포를 보여준다. 동해의 대표적인 표층해류들과 해류순환체계를 Fig.

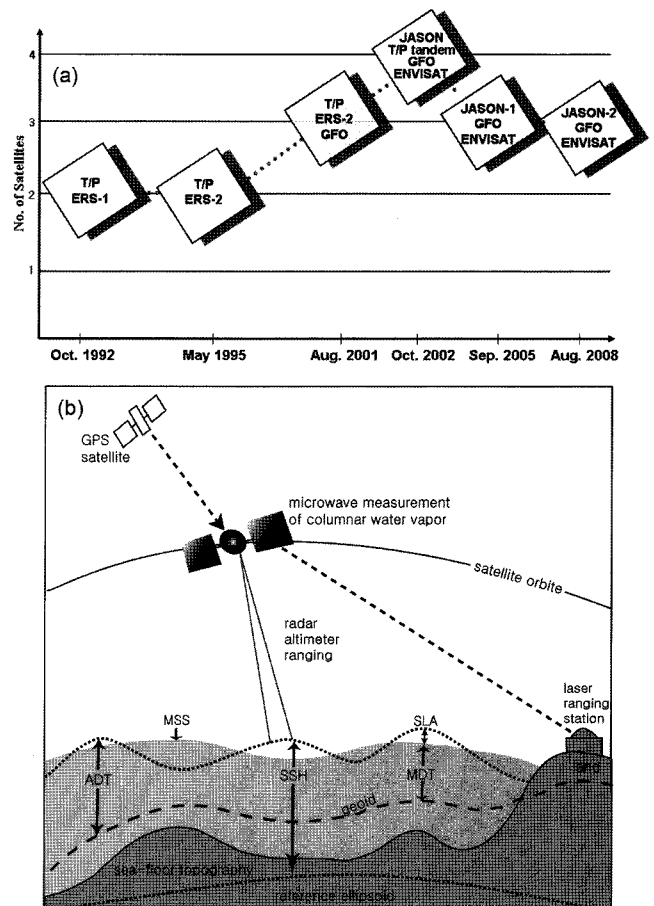


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) the chronicle of the launched altimetric satellites, and (b) their observation system and terminology definitions (the grey area indicates mean sea surface; MSS, the dashed line is the geoid, and the dotted line is the mean dynamic topography; MDT).

2a에 나타내었다. 대마난류(Tsushima Warm Current, TWC)가 대한해협을 통해 동해로 유입되어 한 분지(branch)는 한국 동해안을 따라 북쪽으로 흐르는 동한난류(East Korean Warm Current, EKWC)가 된다. 동한난류는 북한한류(North Korean Cold Current, NKCC)와 38°N 부근에서 만나 극전선(polar front)을 이루어 쓰가루해협 쪽으로 흐른다(Chang *et al.*, 2004). 또한 울릉분지 내부 또는 울릉분지 북쪽에서 울릉난수성 소용돌이(Ulleung Warm Eddy)가 뚜렷하게 관측된다(Mitchell *et al.*, 2005). 대마난류의 다른 한 분지는 일본연안을 따라 흐르며, 이는 근해 분지(Nearshore Branch, NB)가 된다. 대한해협을 통하여 유입된 대마난류는 결국 쓰가루해협과 쏜야해협을 통해서 태평양으로 빠져나간다(Hase *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 2004; Danchenkov *et al.*, 2006; Mooers *et al.*, 2006).

동해의 해양 순환 특성은 대양과 같으나 그 지리적 특성이 대양과 달리 반폐쇄성 해역이므로 인공위성 해수면 높이 자료의 오차가 대양에 비해 상대적으로 크다(Morimoto *et al.*, 2000). 동해와 비슷한 지형학적 구조를 갖는 지중해에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 지역 정밀 수치모델과 현장 관측 해수면 자료를 이용하여 보정이 이루어진 재분석 인공위성 고도자료를 사용한다. 아

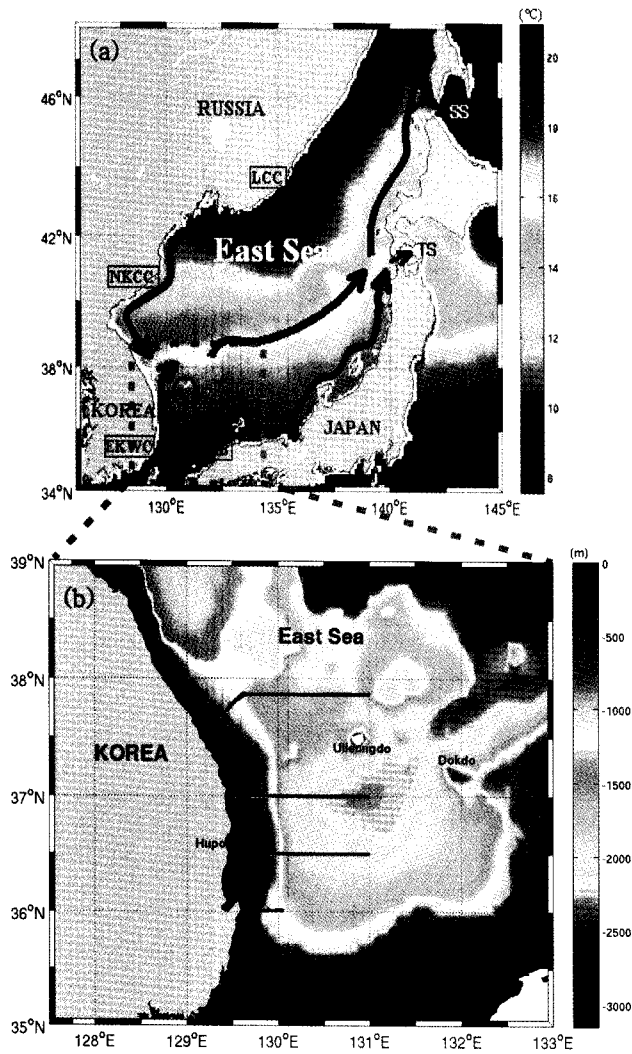


Fig. 2. (a) Schematic surface current system in the East Sea and the climatologic mean sea surface temperature derived from NOAA's AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer Oceans) data averaged from 1985 to 2007 and (b) KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Administration) current observation lines of the ship-mounted ADCP with bathymetry(color). EKWC, NKCC, LCC, UWE, NB, KS, SS and TS stand for the East Korea Warm Currents, North Korea Cold Currents, Liman Cold Currents, Ulleung Warm Eddy, Nearshore Branch, Korea Strait, Soya Strait and Tsuru Strait, respectively.

직까지 동해에서는 인공위성 고도자료로부터 추산된 지형류와 실제 현장 관측 결과와의 비교가 미흡한 실정이다.

이 연구에서는 인공위성 고도계 자료를 이용하여 동해의 표층 해류를 준 실시간으로 추정하는 데 가장 기본이 되는 평균역학지형(Mean Dynamic Topography, MDT) 생성방법에 관하여 설명하고, 각기 다른 세 가지 동해 평균 역학지형과 인공위성 해수면 높이 편차 자료를 사용하여 추정된 지형류 특성을 살펴보고자 한다. 각 평균 해류장의 비교를 통해 프랑스 AVISO에서 전 지구 규모로 제공하고 있는 평균 해류장을 동해에서 사용하였을 때의 문제점을 정리하고, 동해의 특성을 고려하여 구한 보다 정확한 평균 해류장을 추정하고자 한다. 각각의 평균역학지형을 사용하여 계산된

동해 표층해류는 2005년에 동해 남서부에서 선박장착 초음파 해류계(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)를 이용하여 관측한 해류 자료와 정량적 비교를 통하여 동해(특히 우리나라와 일본의 동해연안)에서 인공위성자료의 활용 한계를 찾고 향후 개선 방향을 제시하고자 한다. 자료 및 방법에서는 이 연구에 사용된 자료를 소개하였고, 평균 역학지형들을 생성하는 방법을 설명하였다. 이어서 결과 및 토의에서는 평균역학지형에 지형류 방정식을 적용하여 구한 평균 표층해류장이 관측된 해류들과 일치하는 정도를 정성적으로 살펴보았다. 각각의 평균역학지형을 이용하여 구한 표층해류가 ADCP로 관측한 현장 관측 해류와 일치하는 정도를 정량적으로 비교하였다.

자료 및 방법

해수면, 수온, 염분 및 해류 자료

인공위성 해수면 높이 자료는 크게 두 가지 형태로 AVISO로부터 제공된다. 그 하나는 인공위성의 지상 케적(ground tack)을 따라 만들어진 자료이고 다른 자료는 일정한 수평 격자 간격으로 최적합 보간(Optimal Interpolation)된 자료이다. 이 연구에서는 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 격자 간격으로 최적합 보간된 자료를 AVISO로부터 제공받아 사용하였다(<ftp://ftp.cls.fr>). 인공위성 고도계에서 관측된 자료들은 사용자들에게 공급되기 전에 미리 AVISO에서 다양한 보정(corrections)을 실시한다. 이러한 보정과정을 통해서 인공위성 케도 오차, 대기 통과하는 동안의 전파속도 감쇠효과, 바다 표면의 상태에 의해 발생한 오차 등을 최소화로 만든다.

평균 열염분 해수면 높이(steric height)를 계산하기 위하여 한국 해양 자료 센터(Korea Oceanographic Data Center)와 일본 해양 자료 센터(Japan Oceanographic Data Center)가 수집한 1961년부터 2000년까지 약 40년간의 수온과 염분 자료를 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자 간격으로 평균하여 사용하였다. 각 격자별로 40년 평균자료를 생산하기 위하여 수온과 염분 자료를 두 달 간격, 즉 1~2월, 3~4월, 5~6월, 7~8월, 9~10월, 11~12월로 나누어서 평균자료를 만들었다. 이렇게 두 달마다 격자별로 하나의 평균값을 만든 이유는 특정 계절이 장기평균(long term mean)에 영향을 주지 않도록 하기 위함이다. 그리고 6개의 두 달 평균값을 다시 평균하여 장기 평균자료를 생성하였다.

이 연구에 사용된 뜰개는 Surface Velocity Program-type 뜰개 116개, US Navy-CMOD 뜰개 71개와 MINI-METs 뜰개 39개이다. 동해에서 1988년부터 2001년까지 투하된 226개의 뜰개(Argos) 케적 자료를 사용하였다(Lee and Niiler, 2005). 동해의 표층을 이동하는 뜰개들의 자료는 튀는 값을 제거(de-spike)한 후에 6시간 간격으로 그 위치와 평균 이동 속도를 내삽하여 사용자에게 제공된다(www.aoml.noaa.gov/envids/gld/). 동해의 평균 표층해류분포를 얻기 위하여 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 격자 간격으로 나누어 각 격자에서 계산한 일평균 속도를 시간적으로 평균하였다.

인공위성 고도계 자료를 이용하여 추정한 표층해류와 정량적 비교를 위하여 해류의 현장 관측을 선박장착 ADCP를 이용하여 2005년에 약 2개월에 한 번씩(3월, 5월, 6월, 8월, 10월, 12월) 실시하였다. Fig. 2b에 표시된 바와 같이 한국의 동해안에서 동해 내부로 향하는 4개의 동해 해류관측 횡단선들(동해, 죽변, 후포, 포항)

을 따라서 해류 관측이 이루어졌다. 여러 층의 해류를 선박에 장착된 RDI(Teledyne RD Instruments)의 ADCP(75kHz)를 이용하여 동시에 관측하였다. 현장 관측 해류자료는 수심이 깊은 외해뿐만 아니라 연안에서 50 km 이내인 천해 연안역에서도 얻어졌다. 현장 관측 자료 중에서 90% 이상의 양호 백분율(percent good)을 보인 자료만을 사용하여 현장 관측 해류 자료와 인공위성자료로부터 추산한 해류자료를 비교하였다. 선박에 장착된 ADCP는 8 m 간격으로 수심 약 200 m까지 해류를 관측하였다.

해수흐름 추정

해양에서 공간적인 해수면 높이 차이를 알면 정수압 방정식과 지형류(geostrophic current)방정식으로부터 지형류(u, v)를 계산할 수 있다.

$$u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{g \partial h}{f \partial y}, v = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{g \partial h}{f \partial x} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도, h 는 전체 수층의 두께 또는 해수면의 높이, $\partial p / \partial x$ 와 $\partial p / \partial y$ 는 각각 x 방향과 y 방향의 수압경도, f 는 $2\Omega \sin \phi$ (Ω 는 지구자전 각속도이고, ϕ 는 위도)이다. 식 (1)에서 지형류 방정식은 운동방정식에서 해수 운동이 평형 상태(steady state)에 이르러 속도가 시간적으로 거의 일정하며, 비선형 이류항의 크기가 전향력의 크기보다 작은 경우 즉 로스비수(Rossby number)가 1보다 매우 작다고 가정하여 얻어진다. 또한 바람응력과 다른 마찰력이 무시될 만큼 작다고 가정할 경우에 계산된 지형류가 실제 해류의 크기와 방향을 나타낼 수 있다.

인공위성 고도계 자료의 해수면 높이(Sea Surface Height, SSH)는 기준타원체에 대한 인공위성의 궤적과 인공위성과 해수면사이의 거리로부터 측정된다. SSH는 대기상태(바람, 열)와 외력(조석)에 의해 시간 t 에 따라 영향을 받는 표층의 변동을 나타내는 절대역학지형(Absolute Dynamic Topography, ADT)과 지오이드(Geoid)의 합으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$SSH(x,y,t) = \text{Geoid}(x,y) + \text{ADT}(x,y,t) \quad (2)$$

또한 SSH는 평균 해수면(Mean Sea Surface, MSS)과 해수면 편차(Sea Level Anomaly, SLA)의 합으로 표현할 수 있다(Fig 1b). 이론적으로 지오이드(Geoid)와 평균역학지형(Mean Dynamic Topography, MDT)의 합인 MSS는 인공위성에서 수년간 관측한 해수면 높이 자료를 평균하여 구할 수 있다. 이들 관계식을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} SSH(x,y,t) &= \text{MSS}(x,y) + \text{SLA}(x,y,t) \\ &= \text{Geoid}(x,y) + \text{MDT}(x,y) + \text{SLA}(x,y,t) \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 해수의 흐름은 Geoid면 위에서 일어나는 현상이므로 식 (2)의 ADT에 지형류 방정식을 적용하여 표층해류를 구할 수 있다. ADT는 MDT와 SLA의 합이다. 해수면의 시간적인 변화(SLA)는 인공위성 고도계 자료로부터 비교적 정확(~ 2 cm)하게 산출할 수 있다(Vignudelli *et al.*, 2005). 그러나 해수면의 평균적 분포(MDT)는 여러 가지 방법으로 산출되고 있으나 현재까지 그 오차가 상대적으로 크다(Ducet *et al.*, 2000; Vignudelli *et al.*, 2005; Pascual *et al.*, 2007). 인공위성 고도계(altimeter) 자료로부터 상대적으로

정확한 SLA를 얻을 수 있으므로 동해의 표층해류를 추정하기 위해서 동해의 정확한 평균역학지형을 구하는 것이 중요하다. 이 연구에서는 각기 다른 방법으로 산출된 세 개의 평균역학지형들을 비교하여 동해 표층해류 서비스에 적합한 평균역학지형을 파악하고자 한다.

평균역학지형(MDT) 추정

동해의 평균 표층흐름장은 먼저 장기간의 인공위성 고도계를 이용하여 관측한 해수면 자료의 시간 평균값(MSS)에서 지오이드(Geoid) 성분을 제거하여 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 평균역학지형(AV_MDT)에 지형류 방정식을 적용하여 평균 지형류장을 구할 수 있다. 두 번째 방법으로는 동해에서 장기간 관측한 연직 수온과 염분 자료로부터 계산된 표층 열염분 해수면 높이(steric height, SH_MDT)에 지형류 방정식을 적용하여 구할 수 있다. 세 번째 방법으로 장기간 동해 표층 위를 움직이던 뜰개들(drifters)의 궤적을 통계 처리하여 평균 표층해류장을 직접 계산(SD_MSC) 할 수 있다.

이들 평균역학지형에 대한 구체적인 추산방법은 다음과 같다. 첫 번째 방법으로 인공위성 고도계 자료는 1992년 10월부터 현재까지 계속 얻어지고 있으며 AVISO는 엘니뇨와 라니냐 현상 없었던 1993년부터 1999년까지 7년 동안의 자료를 처리하여 기준자료(reference data)로 사용하고 있다(Hernandez and Schaeffer, 2000). 현재는 기술적으로 인공위성 고도계 자료의 15년 평균을 구하여 기준 자료로 사용할 수 있다. 이 연구에서 사용된 MDT는 T/P 인공위성 자료를 바탕으로 추정된 값으로 AVISO로부터 직접 제공받았다.

AV_MDT에 이어서, 평균역학지형을 구하는 두 번째 방법으로는 장기간 관측한 수온과 염분 자료를 이용하여 계산할 수 있다. 수십 년 동안 관측된 수온과 염분 자료를 각 지점별로 평균하고 수평 밀도 경도가 없는 수심(수압 p_1)에서부터 표층(수압 p_2)까지 비체적(specific volume: $\alpha = 1/\rho$, ρ 는 해수밀도)을 적분하여 열염분 해수면 높이(steric height, h_s , SH_MDT)를 계산하여 구할 수 있다(Siegismund *et al.*, 2007). 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$h_s(p_1, p_2) = -\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \alpha dp \quad (4)$$

식 (4)에서 구한 h_s 을 식 (1)의 h 에 대입하여 평균 지형류를 계산할 수 있다. 마지막으로 장기간 관측된 뜰개들의 이동 궤적 자료를 평균하여 직접 평균 표층해류를 산출할 수 있다. 국립해양조사원에서 현재 동해 표층해류 정보 생산에 사용되고 있는 평균 해류장은 14년간 동해에 투하된 226개의 뜰개 궤적자료를 바람에 의한 취송류 성분 제거 등 전처리 과정을 거친 후 통계 처리하여 계산한 평균 표층해류장이다(국립해양조사원, 2003).

결과 및 토의

동해 평균흐름장 비교

AVISO는 장기간의 인공위성 고도계로 관측한 해수면 높이 자료와 지오이드 모델을 이용하여 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 해상도로 전 지구 해양에 대하여 평균역학해면(AV_MDT)을 계산하고 표층해류를 추

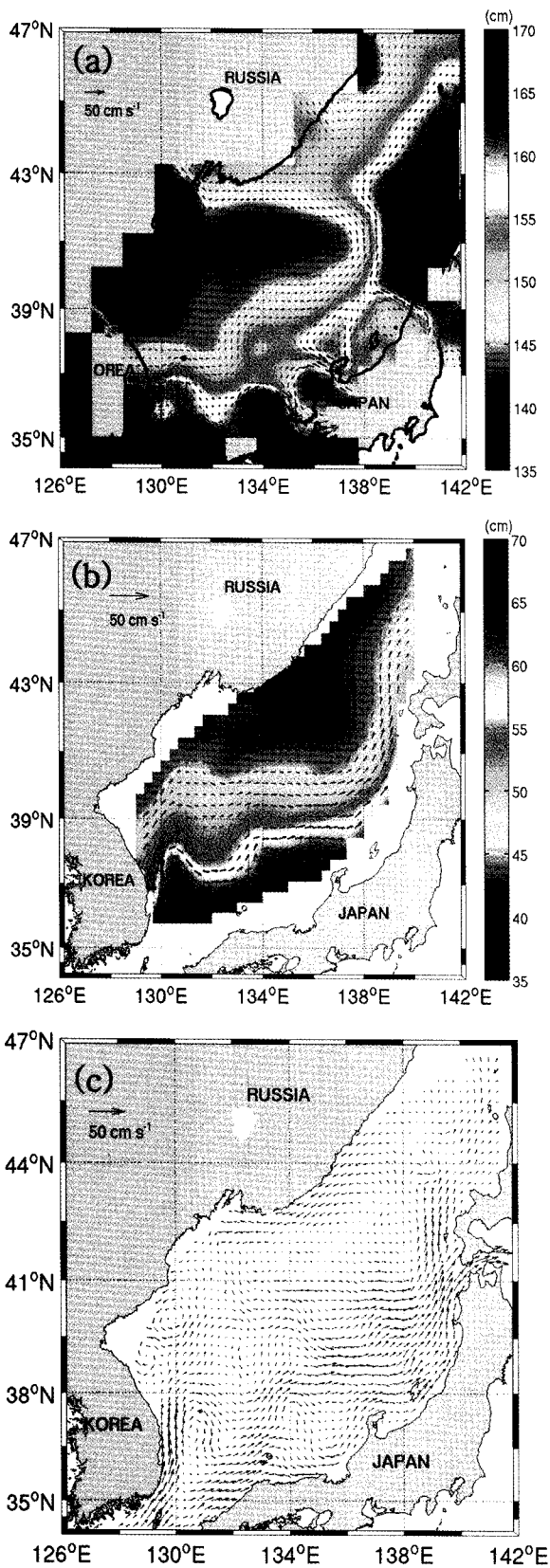


Fig. 3. The mean dynamic topography (MDT) and estimated mean sea-surface currents (MSC) for the East Sea derived from (a) AVISO MDT (AV_MDT), (b) steric height (SH_MDT) data and (c) surface drifter MSC (SD_MSC), respectively.

정하는 데 사용하고 있다(Fig. 3a). 이 연구에서는 전 지구 해양 자료 중에서 동해에 해당하는 자료만을 추출하여 사용하였다. 또한 이 연구에서는 수온과 염분 자료를 이용하여 동해에서 평균 열염분 해수면 높이(steric height, SH_MDT)를 계산하기 위하여 KODC와 JODC가 수집한 1961년부터 2000년까지 약 40년간의 자료를 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자 간격으로 평균하여 사용하였다(Fig. 3b). 수온과 염분의 장기 평균을 구한 후에 수심 500 dbar에서 해표면까지의 자료를 사용하여 열염분 해수면 높이를 계산하였다. 처음부터 수평적으로 0.25° 간격의 평균값을 구하면 동해 내의 작은 해류구조들도 볼 수 있어서 좋으나 0.25° 간격의 격자 내에 존재하는 자료의 수가 작아서 대표성이 떨어지므로 1° 해상도 자료를 생산하였다. 수십 년 동안의 자료를 사용하고 1° 해상도로 평균된 값이기 때문에 동해의 평균해류장이 복잡하지 않고 전체적인 흐름만을 보여준다. 동해 북부 해역의 경우, 북한 가까운 곳에 자료가 없고 블라디보스토크 남쪽에는 자료가 있다. 이곳은 일본이 한국을 강점하고 있을 시기와 그 이전의 자료 그리고 최근 1980년대와 1990년대의 XBT 자료들이 사용되었다. *Chu et al.*(2001a, 2001b)도 이 연구에 사용된 자료를 토대로 동해 해류의 평균적 흐름과 변동성에 관한 연구를 수행하였다. 수온과 염분 자료로부터 계산된 $1^\circ \times 1^\circ$ 간격의 평균역학적 해면 자료를 내삽하여 인공위성자료와 동일한 격자 간격인 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 간격으로 평균역학적 해면을 내삽(interpolation)한 격자 자료를 만들고 지형류 방정식을 사용하여 평균 지형류장을 만들었다(Fig. 3b). 마지막으로, 동해에서 1988년부터 2001년까지 투하된 226개의 뜰개 궤적자료로부터 일평균 속도를 계산하여 평균 해류(SD_MSC)를 산출한 후 내삽하여 인공위성자료와 동일한 격자 간격인 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 평균 해류장을 만들었다(Fig. 3c). 이 방법은 *Lin et al.*(2007)과 *Rio and Hernandez*(2003)이 각각 멕시코만과 전지구 해양의 표층 지형류장을 구하는데 사용하였다. 뜰개 자료로부터 평균 해류장 산출과 관련한 자세한 설명은 국립해양조사원(2003)과 *Lee and Niiler*(2005)를 참고하기 바란다. 앞으로 이 논문에서 이들 평균역학 해면장(또는 평균 해류장)들을 편의상 순서대로 각각 AV_MDT, SH_MDT, SD_MSC로, 이들 평균장과 고도편차 자료를 더하여 추산한 해류를 각각 AV, SH, SD로 사용한다. Table 1에 위에서 설명한 각 평균역학장(또는 평균 해류장)에 대한 특성을 정리하였다. 세 자료들 모두 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 간격으로 내삽된 자료라는 공통점을 갖는다. 육지로부터 50 km 이내로 떨어진 연안 해역에서 AV_MDT는 인공위성 자료의 오차가 커서 물리적으로 올바르지 않은 표층해류가 계산되고, SH_MDT는 수심이 얇은 곳에서 흐름이 없는 기준면을 결정하기 힘들므로 수온과 염분자료로부터 역학적 해면을 구할 수 없어서 표층 평균해류 추산이 불가능하다. 그러나 SD_MSC는 표층뜰개들이 연안지역을 자유로이 이동할 수 있어서 뜰개들이 여러 개 통과한 지역은 믿을만한 표층해류자료를 얻을 수 있는 장점이 있다.

동해 평균 표층해류장(Fig. 2a)과 동해 평균흐름장 비교에서 세 가지 방법으로 추산한 평균 지형류장들을 정성적으로 비교해보면, AV_MDT는 35°N ~ 40°N 영역에서 일본 연안을 따라 남쪽에서 북쪽으로 가면서 높고 낮음을 반복하는 형태를 보인다. 그 결과 AV_MDT에 지형류 방정식을 적용하여 구한 평균 지형류가 연안 쪽으로 수렴하거나 연안에서 외해로 발산하는 비정상적인 흐름형

Table 1. Details of the three mean dynamic topography (or surface current) fields: AV_MDT, SH_MDT and SD_MSC

MDT/MSC	Raw resolution	Interpolated Resolution	Coastal zone (<500 m)	Property	Source	Reference
AV_MDT	0.25°×0.25°	0.25°×0.25°	bad	Satellite observation	AVISO Delayed mode (1993-1999)	Rio and Hernandez (2004)
SH_MDT	1°×1°	0.25°×0.25°	none	Hydrographic observation	KODC & JODC (1961-2000)	Choi <i>et al.</i> (2004)
SD_MSC	0.5°×0.5°	0.25°×0.25°	good	Surface drifter observation	surface drifters (1988-2001)	Lee <i>et al.</i> (2005)

태를 보인다. 또한 AV_MDT는 쓰가루해협 부근인 40.5°N-42.5°N에서 동쪽에서 높고 서쪽으로 가면서 낮아지는 경사를 보여, 평균 지형류가 북쪽으로 강하게 흐른다. 이는 유입된 대마난류가 쓰가루해협으로 대부분(약 70%) 빠져나가고 그 나머지(약 30%)가 쓰야해협으로 빠져나가는 전체적인 동해 표층해류순환(Chu *et al.*, 2001a)과 일치하지 않는다(Fig. 2a, Fig. 3a). AV_MDT에 지형류 방정식을 적용하여 구한 평균 표층해류는 우리나라 동해안을 따라서도 해류가 육지에서 바다 쪽으로 해안선의 직각방향으로 흘러나가 해안선을 따라 북쪽으로 흐르는 동한난류의 흐름특성과 다르다. 이 처럼 동해 연안역에서 해류의 왜곡현상이 나타나는 이유는 AVISO에서 인공위성 고도계를 이용하여 관측한 MSS로부터 MDT를 계산할 때 1° 격자간격의 낮은 해상도를 갖는 지오이드모델 결과를 사용하고, 연안에서 50 km이내 연안 해역에서 관측한 인공위성 고도계 자료(SLA)의 오차가 크게 발생하기 때문이다(Madsen *et al.*, 2007).

반면에 SH_MDT(Fig. 2b)와 SD_MSC(Fig. 2c)는 동해의 전체적인 해류 흐름 형태를 비교적 잘 표현하고 있다. SH_MDT는 흐름이 없는 기준면을 동일하게 500 dbar로 잡았기 때문에 동해 연안을 따라 수심 500 m 이하인 천해역에 대해서는 평균 흐름장을 구할 수 없다. 또한 격자 구성이 1°×1° 간격으로 평균된 표층 흐름을 제공하여 반경 100 km 이하 규모의 상세구조를 볼 수 없는 단점이 있다. SD_MSC는 장기간에 걸쳐 계속적으로 투하된 많은 양의 뜰개 레직자료가 동해에 거의 균일하게 분포하였을 때 통계적으로 신뢰할 만한 평균흐름장을 제공하지만, 동해 북부해역에서는 뜰개 레직자료가 많지 않아 평균값을 구하는데 현실적인 문제가 있다(Lee and Niiler, 2005).

관측 표층해류와 인공위성 결과 비교

인공위성 고도계 자료를 이용하여 구한 표층해류의 정확도를 정량적으로 계산하기 위하여 인공위성 고도계 자료를 사용하여 계산한 지형류와 현장에서 관측한 해류 자료를 비교하였다. 정량적인 비교를 위하여 앞 절에서 소개한 각 평균 역학 지형에 인공위성 고도편차(SLA) 자료를 더하여 0.25°×0.25° 격자 간격으로 절대 역학지형(ADT)을 구성하였다. 또한 각 절대 역학지형에 지형류 방정식을 적용하여 표층해류장을 산출하고 현장 관측 해류 자료와 비교하였다. 비교를 위해서 선박장착 ADCP를 이용하여 관측한 해류 자료를 인공위성 고도계 자료를 사용하여 추정한 해류와 동일한 수평 격자 간격(0.25°)으로 평균하였다.

현장 해류 관측자료에는 지형류 성분뿐만 아니라 바람 마찰에 의하여 직접 형성된 표층 에크만 해류도 포함되어 있다(Ekman, 1905). 바람 마찰의 직접적 효과는 수심이 깊어지면 줄어든다. 표

면의 바람 마찰 효과가 없어지는 수심을 찾기 위하여 인공위성 고도계 자료를 이용하여 구한 추정해류와 ADCP로 현장 관측한 각 층별 해류를 비교하였다. 표층 해류 비교를 위하여 표층 뜰개자료로부터 구한 평균 해류장(SD_MSC)을 사용하고, 인공위성 고도편차(SLA)자료에 지형류 방정식을 적용하여 지형류 편차(anomaly in geostrophic current)를 구하였다. 평균해류와 지형류 편차를 더하여 표층해류를 계산하였다. 이와 같은 방법으로 계산된 해류와 ADCP로 6개 수심에서 현장 관측한 해류를 비교하였다 (Table 2). 계산된 표층해류와 6개 층별 현장 관측 해류의 차이를 구하고, 제곱 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Deviation, RMSD)를 구한 결과 수심 56 m에서 u의 RMSD는 20.3 cm s⁻¹ 이고 v의 RMSD는 19.7 cm s⁻¹로서 다른 수심에 비하여 상대적으로 작았다. 계산된 표층해류와 현장 관측된 수심 56 m 해류의 상관관계수(R)는 u와 v에 대해서 각각 0.58과 0.60으로 수심이 깊어짐에 따라 상관관계가 떨어지는 것을 알 수 있었다. ADCP자료 중에서 수심 56 m에서 관측한 자료를 사용하여 비교한 이유는 풍속이 10 m s⁻¹ 일 때 에크만 수심(Ekman Depth)이 약 50 m 이므로 수심 56 m는 바람에 의한 영향을 받지 않는 수심이기 때문이다. 따라서 바람에 의해 직접 형성된 에크만 취송류를 배제하기 위해서 56 m 수심에서의 관측 해류를 인공위성 고도계로부터 관측된 자료를 이용하여 추정한 표층해류와 비교하였다. 이와 유사하게, 동해와 비슷한 위도에 위치한 북태평양 중위도 캘리포니아 해류시스템에서도 인공위성 고도 자료를 이용하여 계산된 표층해류와 48 m부터 60 m 수심 사이의 현장 관측 해류가 가장 높은 R을 보였다(Strub *et al.*, 1997). 앞으로 이 연구에서 현장 관측 해류와 인공위성 고도계 자료를 이용하여 추정한 해류를 비교할 때 현장 관측 해류는 수심 56 m에서 관측된 해류를 의미한다.

육지로부터 50 km 이내인 연안에서도 표층해류 정보를 추정할 수 있는 AV_MDT와 SD_MSC에 인공위성 해수면 높이 편차를 더하여 계산한 지형류의 동서 방향 해류 성분(u)과 남북 방향 해

Table 2. Comparisons between ADCP currents observed at depths of 24, 40, 56, 72, 88 and 104 m versus surface currents estimated using the SD_MSC field and sea level anomalies

ADCP depth(m)	Velocity		RMSD (cm s ⁻¹)		Correlation	
	u	v	u	v	u	v
24			20.6	21.1	0.58	0.65
40			18.9	20.6	0.62	0.62
56			20.3	19.7	0.58	0.60
72			23.1	20.5	0.54	0.55
88			21.8	19.9	0.45	0.55
104			25.3	21.6	0.37	0.48

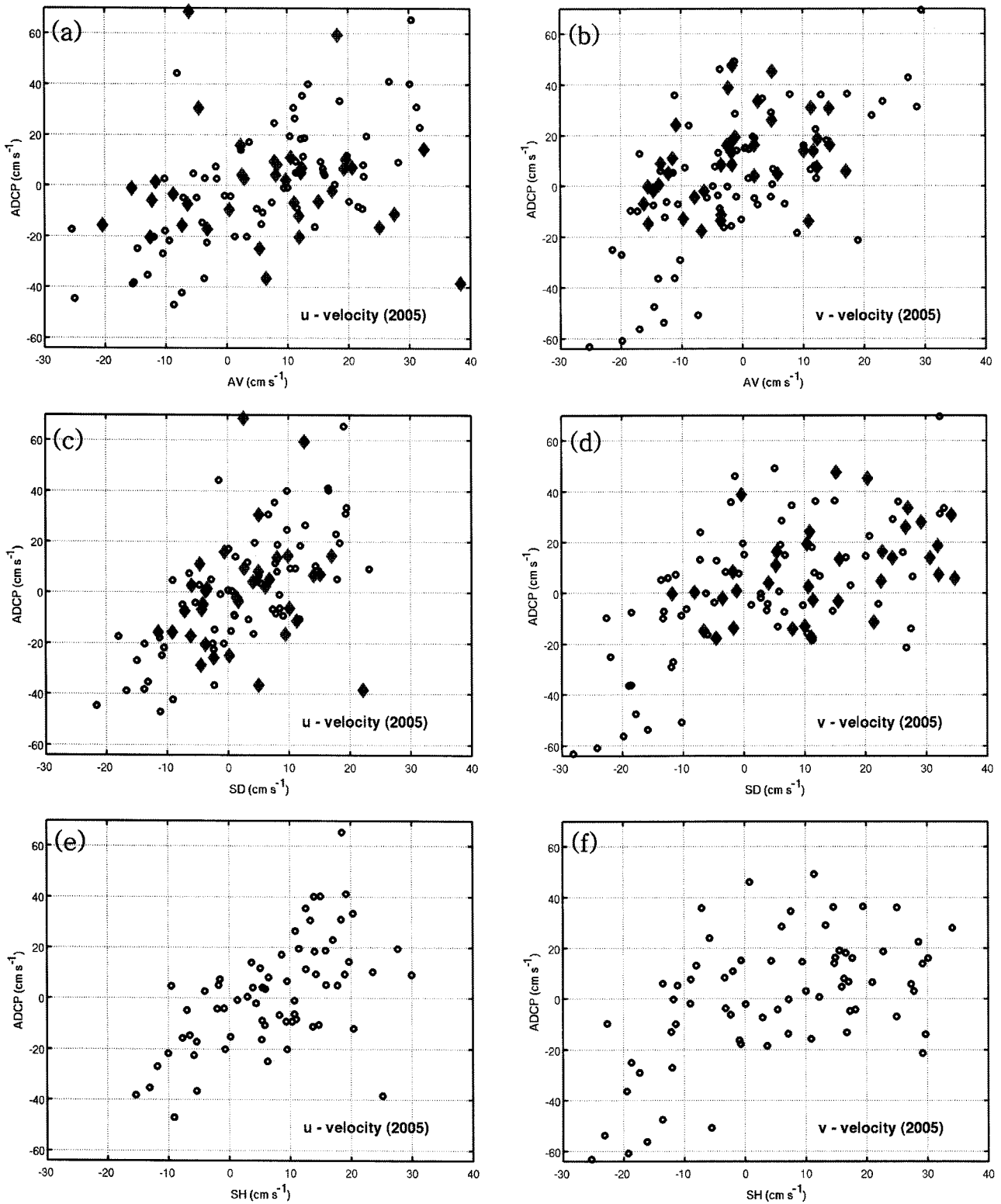


Fig. 4. Comparisons of u- and v-velocities measured by the ADCP (y-axes) in the southwestern East Sea in 2005 versus those estimated from the AV_MDT and SLA (a and b), those estimated from SD_MDT and SLA velocities (c and d), and those estimated from SH_MDT and SLA (e and f). Coastal current data (in areas within 50 km from the land) are indicated by solid diamond symbols while offshore current data are indicated by open circles.

류 성분(v)성분을 ADCP 현장 관측자료와 비교하였다(Fig. 4 a-d). 세로축은 2005년에 ADCP를 이용하여 관측한 값이고 가로축은

인공위성 고도계 자료를 이용해서 구한 추정 값이다. 동그라미들 (open circles)은 육지로부터 50 km 이상 떨어진 외해 지역에서 관

Table 3. Comparisons between the surface currents estimated from the AV_MDT, SD_MDT and SH_MDT and sea level anomalies with the ADCP currents measured at 56 m depth

MDT/MSC used	DataNo.	RMSD (cm s ⁻¹)		Correlation		Linear regression (y = ax + b)			
		u	v	u	v	u		v	
						a	b	a	b
All data	AV_MDT	22.0	20.2	0.43	0.57	0.75	-3.68	1.20	6.15
	SD_MDT	20.3	19.7	0.58	0.60	1.45	-2.00	0.88	-1.71
Coastal data (<50 km)	AV_MDT	28.0	15.5	0.06	0.39	0.11	1.67	0.66	10.97
	SD_MDT	25.2	16.6	0.28	0.46	0.92	-0.32	0.55	1.94
Offshore data only (>50 km)	AV_MDT	17.8	21.8	0.65	0.63	1.08	-6.33	1.39	3.30
	SD_MDT	17.1	21.1	0.73	0.62	1.61	-2.42	1.04	-1.65
	SH_MDT	17.5	20.9	0.58	0.61	1.18	-7.17	0.93	-3.85

측된 해류 자료와 인공위성 고도계 자료를 이용하여 추정된 해류를 비교하였다. 두 가지 방법으로 추정된 값들이 큰 차이 없이 유사하였다. 육지로부터 50 km 이상 떨어진 외해 지역에서는 u의 추정 값이 v의 추정 값보다 관측 자료와 상대적으로 더 잘 일치한다.

그러나 육지로부터 50 km 이내 연안지역의 자료를 표시하는 마름모들(solid diamonds)의 분포는 두 개의 추정 값들에 상대적으로 더 큰 차이가 있음을 보인다. AV_MDT에 인공위성 해수면 높이 편차를 더하여 계산한 지형류의 동쪽으로 흐르는 성분(u)은 더 강하게 계산되어 u가 일반적으로 현장 관측 값보다 양의 방향으로 치우침(bias)을 보이고, 북쪽으로 흐르는 성분(v)은 약화되어 v가 현장 관측 값에 비하여 음의 방향으로 치우침을 보인다(Fig. 4 a and b). SD_MSC에 인공위성 해수면 높이 편차를 더하여 계산한 지형류의 u 성분은 관측 값에 대하여 치우침이 작으나 상관성 또한 작다(Fig. 4c). 계산한 지형류의 v 성분은 더 강화되어 현장 관측 값에 비하여 양의 방향으로 치우침을 보인다(Fig. 4d).

두 가지 방법으로 구한 표층해류는 ADCP 현장 관측유속 자료와의 R이 0.43~0.60이고, RMSD는 19.7~22.0 cm s⁻¹이다(Table 3). SD_MSC의 평균 해류장을 사용한 경우가 AV_MDT의 평균 해류장을 사용한 경우에 비하여 u와 v성분에 대하여 모두 RMSD는 작고 R은 약간 더 높다. 즉, u성분의 경우 RMSD는 1.7 cm s⁻¹ 작고 R은 0.15 더 높으며, v성분의 경우 RMSD는 0.5 cm s⁻¹ 작고 R은 0.03 더 높았다. 육지로부터 50 km 이내 해역에서는 u성분과 v성분값 모두 R 값이 0.5 보다 낮다. 인공위성 고도계에서 관측한 원 자료(raw data)를 처리하고 보정하는 과정에서 육지와 인접한 격자점들에서는 보정 오차가 크고, 이로 인해 연안에서의 인공위성 고도계 자료로부터 구한 해수면의 기울기는 많은 오차를 포함하게 된다. 인공위성 해수면 높이 자료의 오차가 큰 육지로부터 50 km 이내인 해역을 제외한 자료를 비교하면 RMSD는 더 작아지고, R은 더 높아진다. RMSD는 17.1~21.8 cm s⁻¹로 연안과 비교할 때 최대 10 cm s⁻¹ 이상 낮아졌으며, R은 0.62~0.73으로 전 해역을 포함한 R과도 최대 0.2 만큼 더 좋다. v성분보다 u성분에 대한 R 값의 차이가 크게 나타나며 두 자료 모두 연안을 포함한 경우와 v성분에 대해서는 차이가 거의 없다.

또한 육지로부터 50 km 외해 해역에 대해서만 표층해류를 추정할 수 있는 해수 밀도자료를 이용한 SH_MDT에 인공위성 해수면 높이 편차를 더하여 계산한 지형류도 비교하였다(Fig. 4e and f). u성분의 경우, 상관계수가 0.58이고 RMSD는 17.5 cm s⁻¹이다

(Table 3). AVISO의 AV_MDT를 이용한 경우보다 RMSD는 대체적으로 낮으나 SD_MDT를 이용한 경우보다는 좋지 않다. 그 이유는 해수 밀도자료를 이용한 SH_MDT의 해상도가 1°로 대부분의 관측 해류의 공간적 변화가 평활화(smoothing)되어 계산되며, 특별히 공간적 변동성이 상대적으로 큰 u성분의 유속을 충분히 분해하지 못하기 때문이다. v성분의 경우 상관계수가 0.61이고 RMSD는 20.9 cm s⁻¹로 다른 두 경우와 거의 유사한 상관관계를 나타냈다.

인공위성 고도계 자료를 사용하여 지형류를 구하면 동해 전체적인 표층해류를 구할 수 있다. 이 연구에서는 동해 남동 해역에서 1년 동안 ADCP로 현장 관측 해류 자료만을 이용하여 검증하였다. 보다 정확하고 넓은 지역을 검증하기 위해서는 표층플게자료를 사용하여 표층해류를 구하고 인공위성 고도계로 추정된 표층해류와 비교할 수 있다(Uchida *et al.*, 1998; Boebel and Barron, 2003). 또한 해류계를 계류하여 관측한 자료와 시계열을 비교하면 인공위성 고도계를 이용하여 추정된 표층해류의 질(quality)을 정밀하게 확인할 수 있을 것이다.

결론

이 연구는 준 실시간 동해 표층해류 정보제공 시스템의 정확도를 향상시키기 위한 기초 연구로서, 인공위성에서 관측한 해수면 높이 편차 자료를 이용하여 계산된 지형류 편차를 평균 해류장(MDT)에 합성하여 동해의 표층해류를 추정하였다. 추정된 표층해류값을 현장 관측값과 비교하여 각기 다른 평균 해류장(MDT)로부터 추산된 표층해류의 정확도를 계산하였으며 향후 정확도 향상을 위하여 개선할 점을 파악하고자 하였다. 인공위성 고도계 자료를 사용하여 추정된 표층해류를 2005년에 동해 남서부 해역에서 선박장착 초음파 해류계(ADCP)로 현장 관측한 해류자료와 비교하였다. 세 가지 방법으로 구한 평균해류장 중에서 현재 국립해양조사원에 사용하고 있는 평균 해류장(SD_MSC)을 이용하여 추정된 표층해류가 실제 관측자료와 가장 유사한 값을 나타냈다(Table 3). 연안에서 50 km 이상 떨어진 해역에서 인공위성 고도계 자료로부터 추정된 해류와 현장 관측 해류의 상관계수(R)는 0.62~0.73이며 RMSD는 17.1~21.1 cm s⁻¹이었다. 육지에서부터 50 km 이내 거리에 위치한 연안 지역에서 인공위성 고도계 자료로부터 추정된 해류와 현장 관측 해류의 R은 0.28~0.46 로서 감소하며 RMSD는 16.6~28.0 cm s⁻¹ 이었다.

동해 표층해류정보의 정확도를 향상시키기 위해서는 우선 표층 해류추산에 기본이 되는 정확한 평균 역학지형장의 확보가 필요하다는 사실을 알게 되었다. 뜰개 자료에서 구한 평균 해류장(SD_MSC)의 경우 매년 추가로 동해에 투하되는 표층뜰개들의 궤적정보를 기존의 평균 해류장을 구하는 뜰개 자료에 추가하여 다시 통계적 처리를 수행하면 더 정확도가 뛰어난 새로운 평균 해류장(SD_MSC)을 생산할 수 있을 것이다. 수온과 염분 자료에서 열염분 해수면 높이를 구하여 만든 평균 역학지형(SH_MTD)의 경우에도 전 지구적으로 일어나고 있는 해황변동을 고려하여 최근 지난 40년 동안의 평균을 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 간격으로 계산하기 보다는 최근 20년간 동해에서 관측된 수직 수온염분 자료를 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 간격으로 평균하여 계산하면 현재의 동해의 표층 순환을 반영할 수 있고 해상도가 더 좋은 평균 역학지형(SH_MTD)을 생산할 수 있을 것이다.

인공위성으로부터 관측되는 해수면 높이 편차는 또한 육지(한국, 일본, 러시아)로부터 약 50 km까지의 연안 해역에서 약 50% 이상의 오차를 포함하고 있어 정확한 표층해류 추산에 사용하기 어렵다는 사실을 알게 되었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 향후 연안 조위관측소의 해수면자료로부터 해수면 높이 편차를 계산하여 동해 연안의 표층해류 정보를 생산할 예정이다. 미국 오레곤 연안에서도 해안선으로부터 25~50 km 이내 연안에서 AVISO에서 제공하는 고도계 자료만으로 추정된 지형류를 10 m 수심의 ADCP 관측 해류 자료와 HF-radar로 관측한 표층해류 자료와 비교하였을 때 큰 오차를 보였다(Saraceno *et al.*, 2008). 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 인공위성 고도계들에서 관측한 해수면 높이 자료를 연안의 조위관측소 자료와 함께 최적화 보간하여 표층해류장을 생산하는 연구가 수행되었다. 인공위성과 연안 조위관측소의 해수면 자료를 이용하여 추정된 표층해류를 여러 종류의 현장 관측 해류자료와 비교하여 그 정확도가 검증되면 동해 평균해류도 제작뿐만 아니라 해양 예보모델의 초기장 생산과 동해 해수면 자료의 동화(assimilation)에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 국토해양부 시험연구비(일반 126-2000-2033-307-210-13) 지원에 의해 국립해양조사원 해양조사연구실에서 수행되었습니다. 인공위성 해수면 높이 자료는 AVISO에서 제공 받았습니다. ADCP를 이용한 동해 현장 해류관측을 수행하여주신 국립해양조사원 관측반원과 '바다로2호'와 '해양2000호' 승무원들께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

국립해양조사원, 2003. 실시간 해류모니터링 시스템 구축 결과보고서, 44 pp.
 윤홍주, 서영상, 2003. 복합위성자료(Topex/Poseidon, ERS1)를 이용한 남인도양의 해수면 변화와 와동류 연구. *Korean J. Remote Sensing*, **19**(4): 271-276.
 Boebel, O. and C. Barron, 2003. A comparison of in-situ float velocities with altimeter derived geostrophic velocities. *Deep-Sea Res.*

(II Top. Stud. Oceanogr.) **50**: 119-139.
 Chang, K.I., W.J. Teague, S.J. Lyu, H.T. Perkins, D.K. Lee, D.R. Watts, Y.-B. Kim, D.A. Mitchell C.M. Lee and K. Kim, 2004. Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea. Overview and review. *Prog. Oceanogr.*, **61**: 105-156.
 Choi, B.J., D.B. Haidvogel and Y.K. Cho, 2004. Nonseasonal sea level variations in the Japan/East Sea from satellite altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **109**: C12028, doi:10.1029/2004JC002387.
 Chu, P.C., J. Lan and C. Fan., 2001a. Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part I: Climatology, *J. Phys. Oceanogr.*, **31**: 244-271.
 Chu, P.C., J. Lan and C. Fan, 2001b. Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part II: A variational P-vector method. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**: 2886-2902.
 Danchenkov M.A., V.B. Lobanov, S.C. Riser, K. Kim, M. Takematsu and J.-H. Yoon, 2006. A History of Physical Oceanographic Research in the Japan/East Sea. *Oceanogr.* **19**(3): 18-31.
 Ducet, N., P.Y. Le Traon and G. Reverdin, 2000. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2, *J. Geophys. Res.*, **105**(C8): 19,477-19,498.
 Ekman, V.W., 1905. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Ark. Mat. Fys.*, **2**: 1-53.
 Hase, H., J.-H. Yoon and W. Koterayama, 1999. The current structure of the Tsushima Current along the Japanese coast. *J. Oceanogr.*, **55**: 217-235.
 Hernandez, F. and P. Schaeffer, 2000: Altimetric Mean Sea Surfaces and Gravity Anomaly maps inter-comparisons. Rapport AVI-NT-011-5242-CLS, CLS Ramonville St Agne. pp. 48.
 Lagerloef, G.S.E., G.T. Mitchum, R.B. Lukas and P.P. Niiler, 1999. Tropical Pacific near-surface currents estimated from altimeter, wind, and drifter data. *J. Geophys. Res.*, **104**(23): 23,313-23,326.
 Lee D.-K. and P.P. Niiler, 2005. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea. *Deep-Sea Res. II*, **52**: 1547-1563.
 Lin, X.-H., L.-Y. Oey and D.-P. Wang, 2007. Altimetry and drifter data assimilations of loop current and eddies, *J. Geophys. Res.*, **112**, C05046, doi:10.1029/2006JC003779.
 Madsen, K.S., J.L. Hoyer and C.C. Tscherning, 2007. Near-coastal satellite altimetry: Sea surface height variability in the North Sea-Baltic Sea area, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L14601, doi:10.1029/2007GL029965.
 Mitchell, D.A., D.R. Watts, M. Wimbush, W.J. Teague, K.L. Tracey, J.W. Book, K.-I. Chang, M.-S. Suk and J.-H. Yoon, 2005. Upper circulation patterns in the Ulleung Basin. *Deep-Sea Res.* **52**: 1617-1638.
 Morimoto, A., T. Yanagi and A. Kaneko, 2000. Tidal correction of altimetric data in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, **56**: 31-41.
 Mooers, C.N.K., H.-S. Kang, I. Bang and D.P. Snowden, 2006. Some lessons learned from comparisons of numerical simulations and observations of the JES circulation. *Oceanogr.*, **19**(3): 86-95.
 Nam, S.H., S.J. Lyu, Y.H. Kim, K. Kim, J.-H. Park and D.R. Watts, 2004. Correction of TOPEX/POSEIDON altimeter data for non-stostatic sea level response to atmospheric pressure in the Japan/East Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(2): L02304.
 Pascual, A., Y. Faugère, G. Larnicol and P.-Y. Le Traon, 2006. Improved description of the ocean mesoscale variability by com-

- binning four satellite altimeters, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L02611, doi:10.1029/2005GL024633.
- Pascual, A., M.I. Pujol, G. Larnicol, P.Y. Le Traon and M.H. Rio, 2007. Mesoscale mapping capabilities of multisatellite altimeter missions: First results with real data in the Mediterranean Sea. *J. Marine Systems*, **65**: 190–211.
- Rio, M.-H. and F. Hernandez, 2003. High-frequency response of wind-driven currents measured by drifting buoys and altimetry over the world ocean, *J. Geophys. Res.*, **108**(C8): 3283, doi:10.1029/2002JC001655.
- Rio, M.-H. and F. Hernandez, 2004. A mean dynamic topography computed over the world ocean from altimetry, in situ measurements, and a geoid model. *J. Geophys. Res.*, **109**, C12032, doi:10.1029/2003JC002226.
- Santos, A.M. 2000. Fisheries oceanography using satellite and airborne remote sensing methods: a review, *Fish. Res.*, **49**: 1–20.
- Saraceno, M., P.T. Strub and P.M. Kosro, 2008. Estimates of sea surface height and near surface alongshore coastal currents from combinations of altimeters and tide gauges. *J. Geophys. Res.*, **113**, C11013, doi:10.1029/2008JC004756.
- Schreiner, W.S., R.E. Markin and G.H. Born, 1997. Correction of single-frequency altimeter measurements for ionosphere delay. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35**(2): 271–277.
- Siegismund, F., J. Johannessen, H. Drange, K.A. Mork and A. Korabely, 2007. Steric height variability in the Nordic Seas, *J. Geophys. Res.*, **112**, C12010, doi:10.1029/2007JC004221.
- Strub, P.T., T.K. Chereskin, P.P. Niiler, C. James and M.D. Levine, 1997. Altimeter-derived variability of surface velocities in the California Current System 1. Evaluation of TOPEX altimeter velocity resolution, *J. Geophys. Res.*, **102**(C6): 12,727–12,748.
- Uchida, H., S. Imawaki and J.-H. Hu, 1998. Comparison of Kuroshio surface velocities derived from satellite altimetry and drifting buoy data. *Journ. of Oceanogr.*, **54**: 1152000122.
- Vignudelli, S., P. Cipollini and L. Roblou, 2005. Improved satellite altimetry in coastal systems: Case study of the Corsica Channel (Mediterranean Sea), *Geophys. Res. Lett.*, **32** (7): L07608, doi:10.1029/2005GL022602.

2008년 7월 2일 원고접수

2009년 8월 26일 수정본 채택

담당편집위원: 서영상