

전지구 수온 및 염분 자료 품질 관리에 관한 논의

장 유 순*

미국 해양 대기청 지구유체역학 연구소, 프린스턴 대학교 포레스탈 캠퍼스,
201 Forrestal Road, Princeton, NJ 08540, USA

A Review of the Quality Control of Global Ocean Temperature and Salinity Data

You-Soon Chang*

Geophysical Fluid Dynamics Laboratory of National Oceanic Atmospheric Administration,
Princeton University Forrestal Campus, 201 Forrestal Road, Princeton, NJ 08540, USA

Abstract: High-density temperature and salinity profiles from the successful international Argo project made it possible to reproduce the three-dimensional global ocean state in near-real time, which also increased much attention on the data analysis studies of global ocean. This paper reviewed several important issues on the recent data analysis studies such as systematic biases of XBT (eXpendable BathyThermograph) and Argo data, sea level budget discrepancy between steric height and satellite observed data, heat content change, and the current status of the development of objective analysis fields. This study also emphasized that it is required to carry out very cautious ocean data quality control and understand global-scale ocean variability prior to analyzing the regional-scale ocean climate change, particularly, in the East Asian marginal Seas.

Keywords: Argo, XBT, sea level, heat content, objective analysis

요약: 성공적인 국제 Argo¹⁾ 사업을 통해 얻어진 고해상도의 수온 및 염분 프로파일들을 이용하여 준실시간으로 3차원 전지구 해양 상태의 재현이 가능해졌으며, 전지구 해양 자료 분석 연구에 대한 관심 또한 크게 증가하였다. 본 연구에서는 XBT와 Argo 자료의 계통 오차, 열염분 해수면 높이 및 인공위성 관측 자료와의 해수면 수지 불일치, 해양 열용량 변동 및 객관 분석장 개발 현황 등 최근의 자료 분석 연구의 주요 쟁점들에 관해 정리하였다. 특히 동아시아 해역에서의 지역 규모 해양 기후 변화 분석에 앞서 매우 신중한 해양 자료의 품질 관리 및 전구 규모의 해양 변동에 관한 이해가 필요하다는 것을 강조하였다.

주요어: Argo, XBT, 해수면 높이, 열용량, 객관 분석

서론

해양물리 연구 분야에서 수치 모델링을 하는 이유를 다음과 같이 크게 세 가지로 정리할 수 있다. 첫째는 현상의 물리적 원인 규명을 위한 조건 실험을 위함이며, 둘째는 부족한 관측 자료를 역학적으로 보완하여 과거부터 현재까지의 해양 상태를 정확하게 재현하기 위함이며, 셋째는 현상의 예측을 위함이다.

그러나 수치 모델을 구성하는 기본 방정식들이 현상을 완벽하게 표현하지 못하고 해양 현상의 비선형성과 관계된 초기장에 대한 민감한 의존성을 가지기 때문에 해양 상태의 정확한 재현 및 예측에는 근본적인 한계를 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 다양한 관측 자료를 수치 모델과 결합하는 자료동화(data assimilation) 기법이 꾸준히 연구되어 왔으며, 이를 통해 얻어진 재분석 자료(reanalysis data)가 전지구

*Corresponding author: You-Soon.Chang@noaa.gov
Tel: +1-609-452-5318
Fax: +1-609-987-5063

1) 본 논문에서는 국제 Argo 과학자 위원회의 권고 사항에 따라 “ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography)” 대신 “Argo”로 사용함.

Table 1. A summary of the major feature of operational ocean reanalysis. List of abbreviations can be found at the appendix. Detailed description of the model and assimilation systems can be also found in each reference

Country	Center (Name)	Model	Assimilation Method	Reference
USA	NCEP (GODAS)	MOM3	3D Var	Behringer and Xue (2004) Behringer (2007)
	NCEP (CFSR)	CFSv2/MOM4	3D Var	Xue et al. (2011)
	GFDL (ECDA)	CM2.1/MOM4	EnKF	Zhang et al. (2007) Chang et al. (2012)
	NASA (GMAO)	GEOS5/MOM4	EnOI	Vernieres et al. (2011)
	JPL (ECCO)	MITGCM	Kalman filter	Fukumori (2002) Lee et al. (2002)
	UMD (SODA)	POP2.1	OI	Carton and Giese (2008)
Europe	ECMWF (ORAS3)	HOPE	3D OI	Balmaseda et al. (2008)
	Hamburg Univ. (G-ECCO)	MITGCM	Adjoint	Köhl and Stammer (2008)
	MERCATOR (MERCATOR2)	NEMO	SEEK	Drévillon et al. (2008)
Japan	JMA (MOVE-G)	MRI.COM	3D Var	Usui et al. (2006)
Australia	BMRC (POAMA)	MOM2	EnKF	Yin et al. (2011)

해양 상태의 “관측값”으로 대표되어 해황 분석 및 예측 모델의 초기 자료로 사용되어 왔다. 그러나 재분석 자료에도 수치 모델 자체 및 동화 기법의 한계 뿐만 아니라, 부정확한 모델 초기값 및 경계값 사용, 관측 자료 자체의 오차 및 비연속성 등 수 많은 오차 요인이 존재한다. 이러한 이유로 특히 해양의 3차원 수온, 염분 재분석 자료들에 관한 평가가 지속적으로 이루어지고 있다(Carton and Santorelli, 2008; Lee et al., 2010; Stammer et al., 2010; Xue et al., 2012; Zhu et al., 2012).

대표적인 해양 재분석 자료 현황을 살펴보면 Table 1과 같다. 미국과 유럽을 선두로 일본, 호주에서 다양한 해양 재분석 자료들이 서로 다른 모델 및 동화 기법을 이용하여 생산되고 있으며, 향후 해상도와 품질을 높인 자료 생산을 꾸준히 계획하고 투자하고 있다. 그러나 21세기에 들어 대양 관측 국제 협력 사업의 일환으로 추진된 Argo 사업의 성공적인 결과로 약 3,000개 이상의 무인 해양관측 기기(Argo float)가 해양 2,000 m 상층의 수온, 염분 자료를 실시간으로 제공하기 시작하면서, 전지구 해양의 3차원 수온 및 염분 분포의 재현이 객관 분석(objective analysis) 과정을 통해 관측 자료 자체만으로 가능해졌다(http://www.argo.ucsd.edu/Gridded_fields.html (검색일: 2012. 9. 20.)). 최근에 생산되고 있는 전지구 해양 수온, 염분 자료에 대한 객관 분석장의 종류는 Table 2와 같다. 해양 재분석 자료가 관측 자료 수집 및 품질 관리, 운영 모델 구축 및 자료동화 알고리즘 적용 등의 복잡한 과정을 통해 수십 년 이상의 연구 인프

라 축적으로 얻어진 것에 비해, 수치 모델에 의존하지 않고 비교적 간단한 알고리즘을 통해 얻어지는 객관 분석장에 대한 연구는 최근의 해양 관측 자료의 증가와 더불어 비약적으로 발전하고 있다. 또한 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 Argo 관측 자료를 이용한 국제 논문의 발표 건수가 2010년 이후 기존의 2배 이상인 200편 이상으로 급격히 증가하였다(<http://www.argo.ucsd.edu/Bibliography.html>(검색일: 2012. 9. 20.)). 그러나 관측 자료 분석에 있어서도 각각의 프로파일 자료의 품질 관리 방법, 가용 자료의 샘플링 문제, 적용된 객관 분석 알고리즘 및 공간 스케일(de-correlation length scale) 차이에 따라 다양한 오차 요인이 존재하기 때문에, 방대한 양의 자료를 동시에 분석하고자 할 때는 특별한 주의를 요한다.

그러므로 본 연구에서는 현재 활발히 진행 중인 전지구 해양 관측 자료의 분석 연구에 있어서 관측 자료에서 나타나는 계통 오차(systematic bias), 열염분 해수면 높이(steric height) 및 인공위성 관측 자료와의 해수면 수지(sea level budget) 불일치 문제, 해양의 열용량 변동 및 21세기 객관 분석 자료 개발 현황 등의 몇 가지 주요 쟁점들에 관해 정리하고자 한다.

XBT 자료의 계통 오차

Fig. 2는 Domingues et al.(2008)에 의해 제시된 해양 상층부(0-700 m) 열용량 변동 시계열이다. 대기에 비해 긴 열적 관성을 가지고 있는 해양 내부의 열용

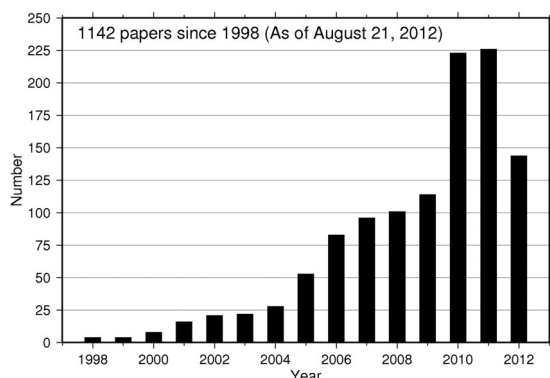


Fig. 1. Number of papers published on profiling floats each year (as of August 21, 2012, Data source: <http://www-argo.ucsd.edu/Bibliography.html> (search date: 2012. 9. 20)).

량 변동은 기후 변화와 관련한 매우 중요한 인자로서 선행 연구들을 통해 꾸준히 감시되어 왔다. 대표적으로 미국 NODC (National Oceanographic Data Center)의 Levitus 및 일본 JAMSTEC (Japan Agency for Marine Science and Technology)의 Ishii 그룹에 의해서 전지구 해양 열용량 자료가 제공돼 왔다. Domingues et al.(2008)의 결과에 따르면 1961년부터 2003년까지 해양 상층부의 열용량 증가는 약 $16 \pm 3 \times 10^{22}$ J 로 계산되었으며, 이는 전지구 해양 열용량이 지구 온난화 효과로 인해 꾸준히 증가해 오고 있다는 기존의 연구 결과와 일치하였다(Levitus et al., 2005; Ishii et al., 2006). 그러나 기존의 자료에서 보여졌던 1970-1990년대의 급격한 열용량 증가 패턴이 Domingues et al.(2008)의 결과에서는 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 주로 20세기 대양 관측의 50% 이상을 차지하고 있는 XBT 자료 처리 방법에 기인한다고 발표되었다.

XBT는 수압 센서가 없기 때문에 XBT가 수면에 투하된 직후 낙하 시간의 경과에 의하여 수심이 산정된다. 시간-수심 보존 방정식(time-depth conversion equation) 또는 낙하 비율식(fall rate equation)이라 불리는 $Z(t)=At-Bt^2$ 의 관계식에서 시간(t) 경과에 따른 수심(z(t))이 계산되는데, A, B는 각각의 XBT 모델 및 관측 해역의 특성에 따라 경험적으로 산정된 계수를 이용한다. 이 계수들의 정확성에 대한 문제는 선행 연구들을 통해 꾸준히 제기되어 왔지만(Seaver and Kuleshov, 1982; Heinmiller et al., 1983; Hanawa et al., 1995; Kizu and Hanawa, 2002; Kizu et al.,

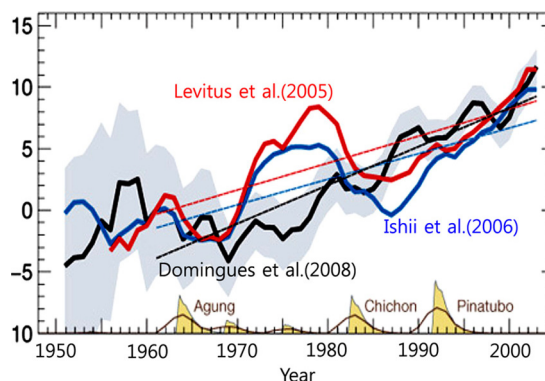


Fig. 2. Comparison of upper-ocean heat content (unit: 10^{22} J) with three different estimates for upper 700 m. Gray shading indicates an estimate of one standard deviation error. The straight lines are linear fits to the estimates. The global mean stratospheric optical depth at the bottom indicates the timing of major volcanic eruption. All time series were smoothed with a three-year running average and are relative to 1961 (After Domingues et al. (2008)).

2005), 최근의 CTD (Conductivity, Temperature and Depth)와 Argo 자료 비교를 통해 전지구 XBT 수온 자료가 평균 $0.2-0.4^{\circ}\text{C}$ 정도의 양의 편차를 나타낸다는 Gouretski and Koltermann(2007)의 정량적인 연구 결과가 발표된 이후 많은 연구 그룹에서 XBT 계통 오차에 대해 새롭게 관심을 가지기 시작하였다.

Fig. 2에 제시한 Domingues et al.(2008)의 결과는 Wijffels et al.(2008)에 의해 개발된 새로운 보정 계수를 사용하였으며, Levitus 및 Ishii 그룹 등도 Domingues et al.(2008)의 결과가 발표된 이후에 XBT 보정식을 새롭게 적용하여 1970-1990년대의 열용량 증가 패턴이 감소된 새로운 시계열 자료를 제시하였다(Ishii and Kimoto, 2009; Levitus et al., 2009). 그 후 DiNezio and Goni(2010), Gouretski and Reseghetti(2010), Good(2011), Gouretski(2012) Hamon et al.(2012) 등의 후속 연구들을 통해 XBT 계통 오차에 관한 다양한 보정 방법이 제시되고 있다. 그러나 아직까지 공식적인 방법에 관한 합의에 도달하지 못했으며, XBT fall-rate workshop (<http://www.aoml.noaa.gov/phod/goos/meetings/2008/XBT/index.php> (검색일: 2012. 9. 20.)), XBT science workshop (<http://www.aoml.noaa.gov/phod/goos/meetings/2011/XSW/> (검색일: 2012. 9. 20.)) 등의 국제 협력 연구 활동을 통해 꾸준히 그 해답을 찾고 있다.

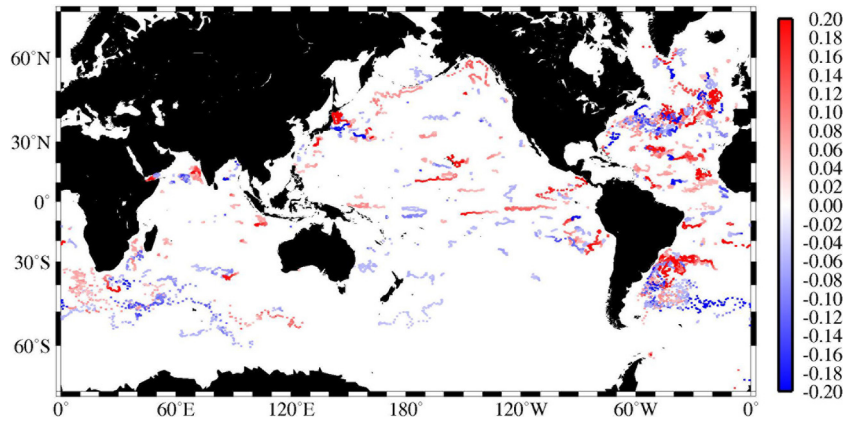


Fig. 3. Spatial distribution of Argo profiles showing the salinity offset of more than 0.05 averaged from surface to paring depth up to December 2007 (After Chang et al. (2009)).

Argo 자료의 계통 오차

2007년 11월 이후로 전구 해양에서 무인으로 관측되고 있는 Argo 플로트가 위경도 3°의 공간 해상도를 유지하기 위한 목표 개수인 3,000개를 넘어 지속적으로 유지되고 있다. Argo 플로트는 일정한 수심(최대 2,000 m)까지 잠수하도록 설계되어 그 수심에서 해류를 따라 일정기간 표류하다가 플로트 내부의 동력에 의해 표층으로 부상하면서 수온과 염분을 연속적으로 관측하고, 기록된 모든 정보를 위성에 송신한다. 이렇게 관측된 자료는 국제 Argo 사업 참여 국가에 실시간으로 전달되어 기본적인 품질 관리 과정을 거쳐 미국 GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) (<http://www.usgodae.org/argo> (검색일: 2012. 9. 20.))와 프랑스 Coriolis (<http://www.coriolis.eu.org/Observing-the-ocean/Observing-system-networks/Argo> (검색일: 2012. 9. 20.)) 두 곳의 전구 Argo 자료 관리 센터를 통해서 전세계 모든 연구자들에게 공개되고 있다. 그러나 Argo 플로트는 수년간 센서 보정의 기회 없이 무인으로 관측을 수행하기 때문에 센서에 생물체 흡착(bio-fouling) 등의 원인으로 시간에 따른 염분 센서 편향 현상이 생기기도 한다. 그러므로 Argo 품질검사 메뉴얼(Wong et al., 2006)에서 제시하는 기본적인 실시간(real-time) 품질 검사와 함께 지연 모드(delayed mode) 품질 관리 과정을 거친 양질의 자료를 확보해야 한다.

Fig. 3은 유의미한 염분 편향을 보이는 Argo 플로트의 공간 분포도이다. 2007년 12월을 기준으로 전체 약 8.5%(3%)의 플로트(프로파일)에 대해 평균

0.05 psu 이상의 염분 편향이 발견되었으며, 주로 연안 해역 및 관측 기간이 길었던 대서양 해역에 위치한 플로트에서 염분 편향이 많이 발견되었다(Chang et al., 2009). 현재까지 Argo 지연 모드 품질 관리 기법에 대한 방법으로 Wong et al.(2003), Böme and Send(2005), Owens and Wong(2009)의 연구 결과가 공식적으로 사용되고 있으며, 한반도 주변 해역에 대해서는 Park and Kim(2007)이 동해 플로트 자료를 분석한 사례가 있다. 또한 Chang et al. (2009)의 연구 결과는 대양 규모의 평균값 산정에 오차 요인으로 작용할 수 있는 동해, 지중해 등 연근해 해역의 모든 플로트는 제외되었기 때문에 향후 이 해역에 대한 지속적인 보충 결과가 필요한 실정이다.

지연 모드 품질 관리 과정에서 발견되는 염분 편향 외에 최근 특정 Argo 플로트에서 유의미한 수온 편차가 새롭게 발견되었다. Lyman et al.(2006)은 2003년부터 2005년까지의 전지구 해양의 열용량이 약 $32(\pm 11) \times 10^{21}$ J 정도의 순 감소를 보인다는 결과를 발표하여 크게 주목 받았으나, 이러한 큰 감소 폭은 주로 Argo 플로트 중 FSI (Falmouth Scientific Incorporated) CTD 센서를 부착한 SOLO (Sounding Oceanographic Lagrangian Observer) 플로트에서 발견된 수압 오차에 기인한다고 밝혀졌다(Willis et al., 2007). Willis et al.(2009)에 의해 새롭게 발표된 최근의 전지구 해양 상층(0-750 m) 열용량 변동을 살펴보면(Fig. 4), 모든 관측 자료를 별도의 보정없이 사용하였을 경우 2003년부터 2006년까지 약 77×10^{21} J의 열용량이 감소하였으며, 모든 가용 관측 자료에서 문제가 되었던 SOLO 플로트만 제거하였을 경우

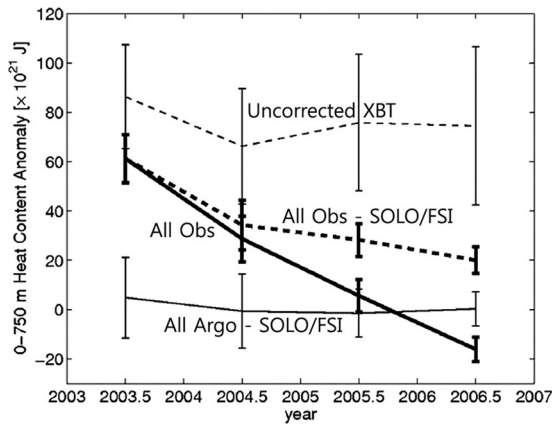


Fig. 4. Annual values of globally integrated ocean heat content anomaly in the upper 750 m using all available data (After Willis et al. (2009)).

41×10^{21} J로 감소폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 SOLO 플롯을 제거한 Argo 자료만을 이용하여 계산하였을 때는 4년간 평균 열용량이 변동폭이 $4(\pm 18) \times 10^{21}$ J로 매우 낮게 계산되었으나, 2절에서 언급한 보정이 안된 XBT 자료만 사용하였을 경우에는 Argo 자료만 사용하였을 때보다 평균 열용량이 75×10^{21} J이나 높게 계산되었다. 이 연구는 전지구 열용량 산정에 있어서 약 $20\text{-}30 \times 10^{21}$ J 범위의 자료 추출 오차(sampling error)보다 XBT 또는 Argo 자료에서 나타나는 계통 오차가 유의미하게 크다는 결과를 제시함으로써 보다 주의 깊은 XBT 및 Argo 자료 사용을 강조하였다.

해수면 수지 불일치

XBT, CTD, Argo 등의 현장 관측 수온, 염분 프로파일 자료 뿐만 아니라 해양학에서 중요한 관측 도구로 사용되는 것이 인공위성 자료이다. 특히 해수면 높이 자료는 물리적으로 해양의 아표층(subsurface) 변동 신호도 함께 포함하고 있으므로, 1992년부터 관측된 TOPEX/Poseidon (TOPography EXperiment Poseidon) 위성을 시작으로 Jason-1, 2, 3으로 이어지는 해양 관측 위성은 지구의 해수면 상승과 기후 변화에 대한 해양의 역할에 관해 중요한 정보를 제공하고 있다. 또한 2002년 3월에 성공적으로 발사되어 운영되고 있는 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 위성은 지구 규모의 해수면 질량 변동 정보를 함께 제공하고 있다.

총 해수면 상승(total sea level)은 해양의 열염 변동 성분(steric component)과 담수 및 해빙의 유입 등에 의한 질량 변동 성분(mass component)의 합으로 계산될 수 있다. 이러한 해수면 수지는 서로 다른 관측 시스템을 통해 독립적으로 얻어질 수 있다. 즉 총 해수면 상승은 Jason 위성 관측으로, 해양의 해빙 및 담수 유입에 의한 질량 변동은 GRACE 위성 관측으로, 또한 열염 변화에 의한 해수면 변동은 Argo 프로파일을 통해 계산될 수 있다. 이론적으로 위의 두 가지만의 관측으로 나머지 해수면 성분을 추정할 수 있는 것이다. 정부간 기후변화 위원회(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 보고서에 따르면, 1993년부터 2003년까지 전지구 해수면은 약 3.1 ± 0.7 mm/yr의 상승률을 보이고 있으며, 그 중 열염 변동에 의한 해수면 상승은 1.6 ± 0.5 mm/yr이며 기타 담수 및 해빙의 유입에 의한 질량 변동 부분까지 합하며 2.8 ± 0.7 mm/yr으로, 편차 범위를 고려하면 해수면 수지간 균형을 이루는 것을 알 수 있다 (Bindoff et al., 2007).

그러나 최근의 독립 관측 시스템을 이용한 해수면 수지 검증에 관한 연구에서는 각 관측 시스템간의 계산 결과가 서로 불일치한다는 문제가 제기되고 있다. Lombard et al.(2007)에 의하여 최초로 발표된 결과를 살펴보면(Fig. 5), Jason과 GRACE 자료간의 차이로 계산된 해수면 열염 변동 성분(derived steric component)은 수온 및 염분 프로파일 자료로부터 직접 계산된 결과(observed steric component)와 매우 다른 패턴을 보임을 알 수 있다. 2003년 이후로 해수면 열염 변동 패턴은 약 -2.8 ± 0.2 mm/yr의 순 감소 형태를 보였으나, 인공위성 관측자료로 역산된 변동 패턴은 모두 유의미한 증가율을 유지하고 있다. 이러한 불일치의 가장 큰 요인으로는 3절에서 언급된 Argo 자료의 계통 오차를 들 수 있다. 수압이 보정되지 않은 Argo 자료를 그대로 사용하였을 때 전지구 해수면 열염 성분이 큰 폭으로 감소할 수 있는 것이다. 2, 3절에서 소개된 XBT 및 Argo 관측 자료의 문제점을 모두 보정하여 Willis et al.(2008)은 해수면 수지에 대한 검증을 다시 실시하였다. 그러나 여전히 유의미한 범위에서 해수면 수지가 불일치한다는 결과를 보였으며, 각각의 해수면 관측 요소들에서 아직까지 밝혀지지 않은 계통 오차가 존재할 수 있다고 주장하고 있다. 이후로 특히 GRACE 자료의 후빙기 조륙 운동 보정(GIA, Glacial Isostatic

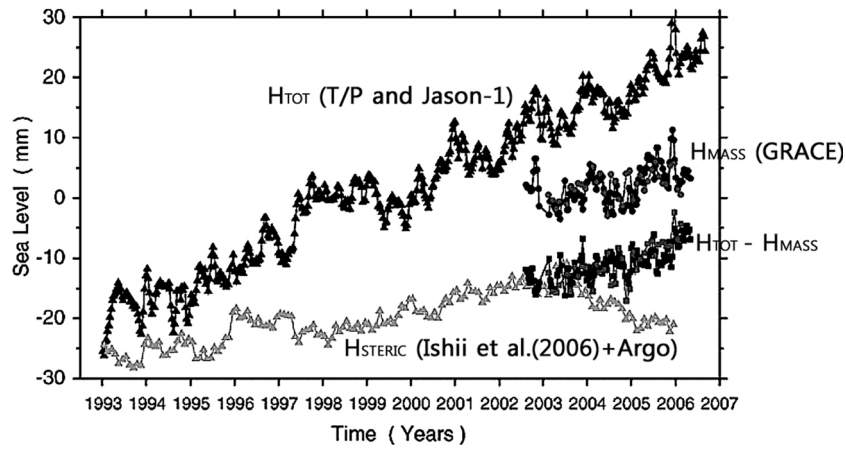


Fig. 5. Time series of each sea level component (upper curve: total sea level derived from T/P and Jason-1, middle curves: Mass sea level from GRACE using GRGS (GFZ) geoids, lower gray curve: Steric sea level from Ishii et al. (2006) data and additional Argo profiles). Derived steric component (Jason-1 minus GRACE) is also present denoted as “ $H_{TOT}-H_{MASS}$ ” (After Lombard et al. (2007)).

Adjustment)에 관한 새로운 계수를 적용하여 해수면 수시간 균형을 맞추려는 시도들이 있었으며(Cazenave et al., 2009; Leuliette and Miller, 2009), Chang et al.(2010)은 해수면 수지의 불균형이 주로 남인도양 및 남극해에서 크게 나타난다는 결과를 새롭게 제시하기도 하였다. 전지구 해수면 수지의 불균형에 관한 논의는 여전히 진행 중이며, 최근에는 해양 심층의 열용량 증가 또는 지구 복사 에너지의 불균형 등에서 그 원인을 찾으려는 노력 또한 활발히 진행되고 있다(Purkey and Johnson, 2010; Trenberth and Fasullo, 2010; Leuliette and Willis, 2011).

객관 분석장 개발 현황 및 비교 분석

서론에서 최근의 해양 관측 자료의 증가와 더불어 비약적으로 발전하고 있는 객관 분석장에 대해 간단히 소개하였다(Table 2). 본 절에서는 해양 모델의 초기, 경계 자료 및 결과 검증에 사용되고 있으며, 효율적인 관측 자료 분석에 매우 중요한 요소인 객관 분석장 개발 현황 및 비교 결과에 대해 언급하고자 한다.

전지구 해양 기후 지도(Climatological Atlas of the World Ocean) 사업의 일환으로 수온, 염분에 관한 기후 평균 분석장이 미국 NODC의 Levitus 그룹에 의해 1982년에 최초로 작성되었다(Levitus, 1982). WOA (World Ocean Atlas)로 명명되어 개발된 해양 기후 평균장은 지속적인 대양 관측 사업들로부터 얻

어진 실측 자료가 꾸준히 확보됨에 따라 1994년(WOA94), 1998년(WOA98), 2001년(WOA01), 2005년(WOA05), 2009년(WOA09)에 주기적으로 갱신되고 있다. WOA는 기본적으로 표준 수심에 위경도 1°의 등 간격의 수평 해상도를 유지하고 있으며, 연평균, 계절평균, 월평균의 평균장을 제공하고 있다. 그러나 연근해 및 동해, 지중해, 페르시아만 등의 중관 규모의 해양 상태를 위경도 1°의 WOA 자료로 모사하기에는 해상도의 한계가 존재한다. 이에 Boyer et al.(2005)은 0.25°의 보다 세밀한 기후 평균장(WOA01q)을 제공하여, 현재까지 많은 연구에 사용되고 있다. 또한 미국 해군 연구소에서는 0.25° 해상도를 가지는 GDEM (Generalized Digital Environmental Model) 자료를 만들어 GDEM2 (Teague et al., 1990), GDEM3 (Carnes, 2009), GDEM4 (Carnes et al., 2010) 버전을 차례로 발표하였다. 이러한 기후 평균 자료들은 대부분의 해양순환 모델의 초기, 경계 조건 및 결과 검증에 사용되고 있지만, 사용 자료에 대한 품질 관리 방법, 객관 분석장 구성 방법, 적용된 위·경도 스케일 및 배경 평균장 차이에 의해 각각의 고유한 특성을 가진다. 그러나 이와 관련된 비교, 검증에 관한 연구가 현재까지 활발히 진행되지 못하고 있다. 최근 Chang and Shin(2012)은 동해 남서해역에서 기존의 객관 분석장들을 서로 비교하여 이러한 문제점을 지적하였다. Fig. 6은 동해 남서해역의 100 m 연평균 수온, 염분 기후 평균장 분포도이다. 기존의 WOA01q, GDEM3, WOA05, WOA09

Table 2. The same as Table 1 except for operational objective analysis

Country	Center	Data Source	OA method	Reference
USA	GFDL	Argo	Optimal interpolation with topographic following scheme	Chang et al. (2009)
	IPRC	Argo plus AVISO altimetry	Variational interpolation	http://Apdrc.soest.hawaii.edu/projects/Argo (search date: 2012. 9. 20.)
	NODC	WOD09	Objective analysis (Barnes method)	Levitus et al. (2009)
	SIO	Argo	Weighted least square fit with topographic following scheme	Roemmich and Gilson (2009)
Europe	Met Office	Argo plus others	Analysis correction	Ingleby and Huddleston (2007)
	Coriolis	Argo plus others	Optimal interpolation	http://www.coriolis.eu.org (search date: 2012. 9. 20.)
	IFREMER	Argo plus others	Optimal interpolation	Gaillard et al. (2009)
Japan	JAMSTEC	Argo plus others	Optimal interpolation	Hosoda et al. (2008)
Australia	CSIRO	Argo plus others	Loss filter	Ridgway et al. (2002)

각각의 자료가 매우 다른 특성을 보임을 알 수 있다. 특히 1° 해상도의 WOA05, WOA09 자료는 동해 연안 및 큐슈 북서 해안의 해황을 전혀 모사하지 못하는 것을 확인할 수 있으며, 0.25° 해상도를 가지는 WOA01q 과 GDEM3 기후 평균 자료도 수온 및 염분의 수평 분포도에서 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다. 이에 Chang and Shin(2012)은 양질의 관측 자료 및 해저 지형 변동에 따른 해양 구조 변화를 반영한 최적 내삽(optimal interpolation) 알고리즘을 사용하여 동해 남서해역의 고해상도 기후 평균장을 개발하였다. 최근 NODC 에서도 멕시코 만(<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/GOMclimatology/> (검색일: 2012. 9. 20.)) 및 동아시아 해역(<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/KPRclimatology/> (검색일: 2012. 9. 20.))을 대상으로 고해상도 기후 평균장을 새롭게 작성하여 발표하였으며, 향후 관련 연구에서의 다양한 응용이 예상된다.

Fig. 7에서는 Table 2에 소개된 5종류의 대표적인 객관 분석장(GFDL, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; IPRC, International Pacific Research Center; SIO, Scripps Institution of Oceanography; Met Office, JAMSTEC)에 대하여 해양 상층부(0-700 m)의 수온 변동 패턴을 비교, 분석한 결과를 제시하였다. 3절에서 언급하였듯이, 2007년 11월 이후로 전구 해양의 Argo 플롯트가 3,000개를 넘어 지속적으로 유지되고 있으므로, 특히 남반구에서의 자료 추출 오차를 최소화하기 위해 모든 분석 기간을 최근 4년(2008-2011년)으로 제한하였으며, 모든 공간 해상도는 기존의 WOA 자료와 같이 위경도 1°로 재구성 하였

다. 시계열 결과를 살펴보면, 각 자료 간 변동 패턴 및 선형 증가폭은 전체적으로 일치하지만, 전구 해양의 각 자료 간 표준 편차는 0.03°C로 계산되었으며(Fig. 7a), 이러한 차이는 아직까지도 관측 자료가 부족한 남극해에서 0.08°C로 비교적 크게 나타났다(Fig. 7b). 남극해의 경우 일본 JAMSTEC의 결과가 가장 높은 평균 수온 분포를 나타냈으며, 반면에 영국 Met Office의 자료는 가장 낮은 평균 수온 분포를 보였다. JAMSTEC의 경우 다른 분석장들(GFDL: 8-15°, SIO: 140-1,111 km)에 비해 비교적 큰 공간 스케일(8-15°)이 적용되었으며(White, 1995), Met Office의 경우는 21세기 해양 상태가 포함되지 않은 WOA98 자료를 배경 평균장으로 사용하여 부족한 남반구 해역의 자료를 생산함에 따라 최근의 온난화된 해양 평균 상태를 반영하기에는 한계를 가진다고 판단할 수 있다. 또한 동아시아 해역(120-150°E, 30-60°N)의 비교 결과를 살펴보면(Fig. 7c), 각 자료 간에 0.22°C의 매우 큰 수온 편차를 보임을 알 수 있다. 이 결과는 현재까지 개발된 객관 분석장들이 쿠로시오 사행 등 종관 규모의 변동 패턴 모사에 있어서 많은 한계점과 불확실성이 존재함을 반영한다. 특히 GFDL, SIO, IPRC 결과들은 비교적 비슷한 평균 값 및 변동 패턴을 유지하고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 사용된 객관 분석 알고리즘에 기인한다고 판단된다. 위 세 가지 분석장들은 수심에 따른 공간 스케일 변화 및 해수면 정보를 객관 분석 과정에 추가로 적용함으로써 등수심면을 따라 흐르는 해류 구조를 효과적으로 유지하면서 분석장을 생산할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구 결과를 바탕으로

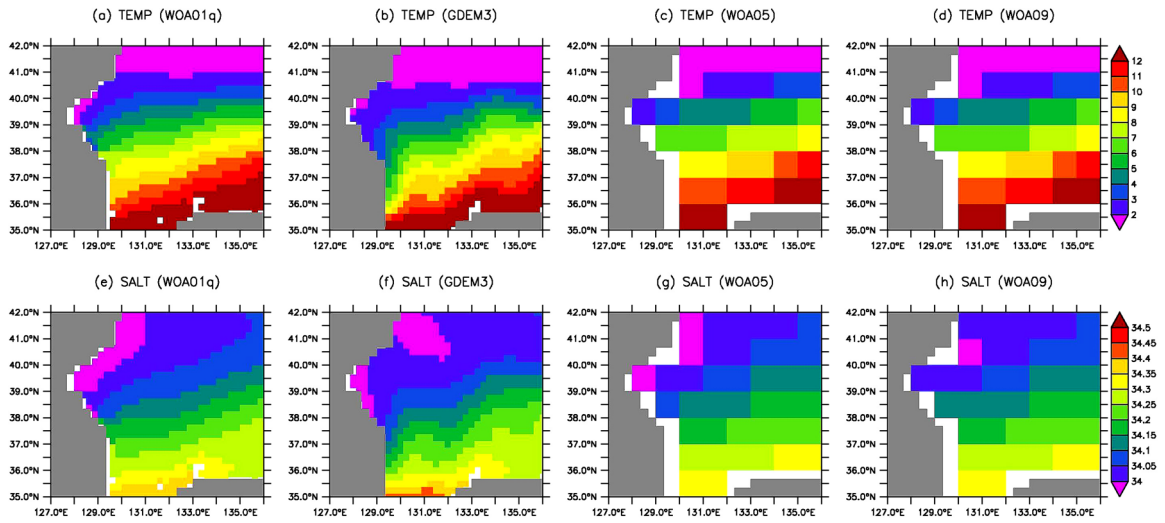


Fig. 6. Annual mean (top, unit: °C) temperature and (bottom, unit: psu) salinity distribution at 100 m depth in the southwestern East Sea from the (a, e) WOA01q, (b, f) GDEM3, (c, g) WOA05, and (d, h) WOA09 climatology, respectively (After Chang and Shin(2012)).

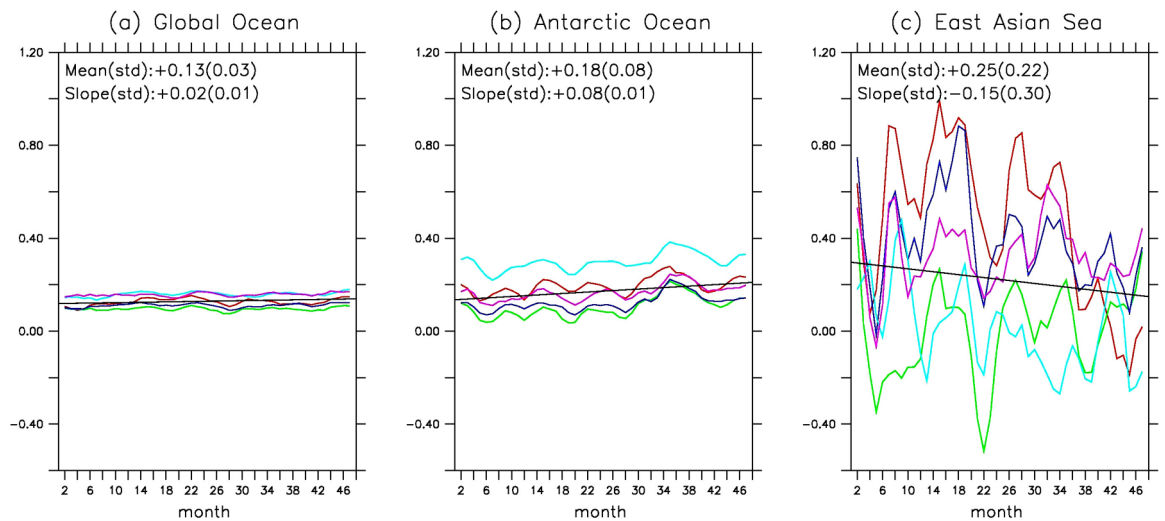


Fig. 7. Time series of averaged ocean temperature (unit: °C) to the depth of 700 m and linear trend from 2008-2011 in (a) global ocean, (b) Antarctic ocean, and (c) East Asian Sea derived from five different objective analyzed fields (red: GFDL, blue: IPRC, purple: SIO, green: Met Office, light blue: JAMSTEC. For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this article).

향후 다양한 독립 관측 자료 확보 및 연구 해역을 대상으로 지속적으로 개발되고 있는 객관 분석장들에 대해 꾸준한 검증이 필요할 것이라 사료된다.

전지구 해양의 염분 변동에 있어서는, 특히 21세기 Argo 관측 기간 이전의 절대적인 염분 관측 자료 부족으로 인하여 그 정확성이 많이 떨어지는 문제가 존재한다. 최근 Chang et al.(2011a, 2011b)은 20세기

의 부족한 염분 자료들에 대하여 수온, 염분간 연직 경험 직교 함수(empirical orthogonal function) 및 해수면 자료와의 선형 결합을 이용하여 유사 염분(pseudo salinity) 프로파일 자료를 개발하여 검증하였다. 이 결과는 향후 보다 정확한 염분 기후 평균장 작성 및 4절에서 언급된 열염 변동에 기인한 해수면 변화 분석을 위해 효과적으로 사용될 수 있는 기초

자료가 될 것이다. 또한 Argo 플로트로 관측된 염분의 지연 모드 품질 관리를 위해서는 기존의 선상 관측 결과 범위를 이용하기 때문에, Argo 플로트 자료를 이용한 염분의 장기 변동 분석에는 근본적인 한계점이 존재한다. 따라서 염분 장기 변동에 관한 보다 효과적인 분석 방법에 관한 연구가 필요할 것이다.

요약 및 제언

본 연구에서는 XBT 및 Argo 자료에서 나타나는 계통적 오차, 전지구 해수면 수지간 불일치 문제 및 21세기 객관 분석 자료 개발 현황 등 최근의 전지구 수온 및 염분 자료 분석 및 품질 관리에 있어서 쟁점이 되고 있는 부분들에 대해 정리하였다. 정확한 품질 관리가 선행되지 않은 방대한 양의 관측 자료를 사용하여 전지구 해양 변화에 대한 시계열 분석을 실시하였을 때는 자연 변동 신호가 크게 왜곡될 수 있다는 것을 다양한 연구 사례들을 통해서 확인하였으며, 기타 관측 요소들에서 아직까지 밝혀지지 않는 계통적 오차가 존재할 수 있기 때문에 자료 분석에 큰 주의가 필요하다. 성공적인 국제 협력 Argo 사업의 결과로 전지구 해양 관측 자료의 샘플링 문제가 많이 줄어든 21세기의 객관 분석장 비교 결과에서도, 객관 분석 알고리즘, 적용된 공간 스케일 및 배경 평균장의 특성에 기인한 유의미한 차이가 여전히 존재함을 본 연구를 통해서 확인할 수 있었다.

최근 기후 변화와 관련된 동아시아 해역의 해황 변동성에 대한 연구가 국내외에서 매우 활발히 진행 중이다. 동해 및 쿠로시오 해역을 포함한 동아시아 해역은 XBT, Argo 자료가 비교적 방대하게 축적되어 있기 때문에, 해양 평균장 작성 및 공간 평균 시계열 분석에 있어 본 연구에서 소개된 관측 자료의 계통 오차에 민감하게 반응할 수 있다. 또한 해역별 해수면 수지 검증 및 객관 분석장 비교 분석에 관한 내용은 전지구 분석 결과와 비교하여 동아시아 해역의 지역적 특성을 판단할 수 있는 중요한 연구 과제가 될 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 고찰된 전구 규모의 해양 변동 패턴에 관한 최근의 중요 쟁점에 대한 이해를 바탕으로, 관련 연구들이 국내외적으로 보다 활발히 진행되어 양질의 관측 자료에 기반한 동아시아 해양 기후 변동에 대한 정량적 분석 결과가 갖춰지기를 기대한다. 더불어 장기 해황 변동 분석을 위해 충분한 해양 관측 자료가 확보되지 못한

서해, 남해를 포함한 한반도 주변 해역에 대해 지속적인 관측 투자 및 관련 연구가 보다 활발히 이루어져야 할 것이다.

사 사

본 논문에 대한 귀중한 의견을 주신 서울대학교의 박경애, 조양기 교수님과 미국 우즈홀 해양연구소의 박종진 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- Balmaseda, M., Vidard, A., and Anderson, D., 2008, The ECMWF system 3 ocean analysis system. *Monthly Weather Review*, 136, 3018-3034.
- Behringer, D.W., 2007, The global ocean data assimilation system at NCEP. 11th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface, AMS 87th Annual Meeting, Henry, B., Gonzales Convention Center, San Antonio, Texas, 12 p.
- Behringer, D.W. and Xue, Y., 2004, Evaluation of the global ocean data assimilation system at NCEP: The Pacific Ocean. Eighth Symposium on Integrated Observing and Assimilation System for Atmosphere, Ocean, and Land Surface, AMS 84th Annual Meeting, Washington State Convention and Trade Center, Seattle, Washington, 11-15.
- Bindoff, N., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., LeQuéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C.K., Talley, L., and Unnikrishnan, A., 2007, Observations: Oceanic climate change and sea level. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L. (eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 385-428.
- Böme, L. and Send, U., 2005, Objective analyses of hydrographic data for referencing profiling float salinities in highly variable environments, deep sea research part II. *Tropical Studies in Oceanography*, 52, 651-664.
- Boyer, T., Levitus, S., Garcia, H., Locarnini, R., Stephens, C., and Antonov, J., 2005, Objective analysis of annual, seasonal, and monthly temperature and salinity for the world ocean on a 0.25 grid. *International Journal of Climatology*, 25, 931-945.
- Carnes, M.R., 2009, Description and evaluation of GDEM-

- V 3.0. Naval Research Lab, memorandum 7330-09-9165, 21 p.
- Carnes, M.R., Helber, W.R., Barron, C.N., and Dastugue, J.M., 2010, Validation test report for GDEM4. Naval Research Lab, A343035, 66 p.
- Carton, J.A. and Giese, B.S., 2008, A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 146, 2999-3017.
- Carton, J.A. and Santorelli, A., 2008, Global upper ocean heat content as viewed in nine analyses. *Journal of Climate*, 21, doi:10.1175/2008JCLI2489.1.
- Cazenave, A., Dominh, K., Guinehut, S., Berthier, E., Liovel, W., Ramillien, G., Ablain, M., and Larnicol, G., 2009, Sea level budget over 2003-2008: A reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo. *Global Planetary Change*, 65, doi:10.1016/j.glophacha.2008.10.004.
- Chang, Y.-S. and Shin, H.-R., 2012, Objective analysis of monthly temperature and salinity around the southwestern East Sea (Japan Sea) on a 0.1° grid. *Continental Shelf Research*, 45, doi:10.1016/j.csr.2012.06.001.
- Chang, Y.-S., Rosati, A., and Vecchi, G.A., 2010, Basin patterns of global sea level changes for 2004-2007. *Journal of Marine Systems*, 80, doi:10.1016/j.jmarsys.2009.11.003.
- Chang, Y.-S., Rosati, A., and Zhang, S., 2011a, A construction of pseudo salinity profiles for the global ocean: Method and evaluation. *Journal of Geophysical Research*, 116, doi:10.1029/2010JC006386.
- Chang, Y.-S., Rosati, A., Zhang, S., and Harrison, M.J., 2009, Objective analysis of monthly temperature and salinity for the world ocean in the 21st century: Comparison with World Ocean Atlas and application to assimilation validation. *Journal of Geophysical Research*, 114, doi:10.1029/2008JC004970.
- Chang, Y.-S., Zhang, S., and Rosati, A., 2011b, Improvement of salinity representation in an ensemble coupled data assimilation system using pseudo salinity profiles. *Geophysical Research Letter*, 38, L13609, doi:10.1029/2011GL048064.
- Chang, Y.-S., Zhang, S., Rosati, A., Delworth, T.L., and Stern, W.F., 2012, An assessment of oceanic variability for 1960-2010 from the GFDL ensemble coupled data assimilation. *Climate Dynamics*, online first, doi:10.1007/s00382-012-1412-2.
- DiNezio, P.N. and Goni, G., 2010, Identifying and estimating biases between XBT and Argo observations using satellite altimetry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27, 226-240.
- Domingues, C.M., Church, J.A., White, N.J., Gleckler, P.J., Wijffels, S.E., Barker, P.M., and Dunn, J.R., 2008, Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*, 453, 1090-1094.
- Drévilion, M., Bourdalle-Badie, R., Derval, C., Drillet, Y., Lellouche, J.-M., Remy, E., Tranchant, B., Benkiran, M., Greiner, E., Guinehut, S., Verbrugge, N., Garric, G., Testut, C.-E., Laborie, M., Nouel, L., Bahurel, P., Bricaud, C., Crosnier, L., Dombrowsky, E., Durand, E., Ferry, N., Hernandez, F., Le Galloudec, O., Messal, F., and Parent, L., 2008, The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: Results, applications and prospects. *Journal of Operational Oceanography*, 1, 51-57.
- Fukumori, I., 2002, A partitioned kalman filter and smoother. *Monthly Weather Review*, 130, 1370-1383.
- Gaillard, F., Autret, E., Thierry, V., Galaup, P., Coatanoan, C., and Loubrieu, T., 2009, Quality control of large Argo data sets. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 337-351.
- Good, S.A., 2011, Depth biases in XBT data diagnosed using bathymetry data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28, doi:10.1175/2010JTECHO773.1.
- Gouretski, V., 2012, Using GEBCO digital bathymetry to infer depth biases in the XBT data. *Deep Sea Research Part I*, 62, 40-52.
- Gouretski, V. and Reseghetti, F., 2010, On depth and temperature biases in bathythermograph data: Development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database. *Deep Sea Research Part I*, 57, doi:10.1016/j.dsr.2010.03.011.
- Gouretski, V.V. and Koltermann, K.P., 2007, How much is the ocean really warming? *Geophysical Research Letters*, 34, doi:10.1029/2006GL027834.
- Hamon, M., Reverdin, G., and Le Traon, P.-Y., 2012, Empirical correction of XBT data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29, doi:10.1175/JTECH-D-11-00129.1.
- Hanawa, K., Rual, P., Bailey, R., Sy, Y., and Szabados, M., 1995, A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT). *Deep Sea Research Part I*, 42, 1423-1451.
- Heinmiller, R.H., Ebbesmeyer, C.C., Taft, B.A., Olson, D.B., and Nikitin, O.P., 1983, Systematic errors in expendable bathythermograph (XBT) profiles. *Deep Sea Research Part I*, 30, 1185-1196.
- Hosoda, S., Ohira, T., and Nakamura, T., 2008, A monthly mean dataset of global oceanic temperature and salinity derived from Argo float observations. *JAMSTEC Report of Research Development*, 8, 47-59.
- Ingleby, B. and Huddleston, M., 2007, Quality control of ocean temperature and salinity profiles - historical and real-time data. *Journal of Marine Systems*, 65, doi:10.1016/j.jmarsys.2005.11.019.
- Ishii, M. and Kimoto, M., 2009, Reevaluation of historical ocean heat content variations with an XBT depth bias correction. *Journal of Oceanography*, 65, doi:10.1007/

- s10872-009-0027-7.
- Ishii, M., Kimoto, M., Sakamoto, K., and Iwasaki, S.-I., 2006, Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses. *Journal of Oceanography*, 62, 155-170.
- Kizu, S. and Hanawa, K., 2002, Recorder-dependent temperature error of expendable bathythermograph. *Journal of Oceanography*, 58, 469-476.
- Kizu, S., Yoritaka, H., and Hanawa, K., 2005, A new fall-rate equation for T-5 expendable bathythermograph (XBT) by TSK. *Journal of Oceanography*, 61, 115-121.
- Köhl, A. and Stammer, D., 2008, Decadal sea level changes in the 50-year GECCO ocean synthesis. *Journal of Climate*, 21, 1876-1890.
- Lee, T., Awaji, T., Balmaseda, M., Ferry, N., Fujii, Y., Fukumori, I., Giese, B., Heimbach, P., Kohl, A., Masian, S., Remy, E., Rosati, A., Schodlok, M., Stammer, D., and Weaver, A., 2010, Consistency and fidelity of Indonesian-throughflow total volume transport estimated by 14 ocean data assimilation products. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50, doi:10.1016/j.dynatmoce.2009.12.004.
- Lee, T., Fukumori, I., Menemenlis, D., Xing, Z., and Fu, L.-L., 2002, Effects of the Indonesian throughflow on the Pacific and Indian Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 32, 1404-1429.
- Leuliette, E.W. and Miller, L., 2009, Closing the sea level rise budget with altimetry, Argo, and GRACE. *Geophysical Research Letter*, 36, doi:10.1029/2008GL036010.
- Leuliette, E.W. and Willis, J.K., 2011, Balancing the sea level budget. *Oceanography*, 24, 122-129.
- Levitus, S., 1982, Climatological atlas of the world ocean, US. Government Printing Office, NOAA professional paper 13, 190 p.
- Levitus, S., Antonov, J., and Boyer, T., 2005, Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophysical Research Letter*, 32, doi:10.1029/2004GL021592.
- Levitus, S., Antonov, J., and Boyer, T., 2009, Global ocean heat content 1955-2007 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophysical Research Letter*, 36, doi:10.1029/2008GL037155.
- Lombard, A., Garcia, D., Ramillien, G., Cazenaver, A., Biancale, R., Lemoine, J.M., Flechtner, F., Schmidt, R., and Ishii, M., 2007, Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data. *Earth and Planetary Science Letter*, 254, doi:10.1016/j.epsl.2006.11.035.
- Lyman, J., Willis, J.K., and Johnson, G.C., 2006, Recent cooling of the upper ocean. *Geophysical Research Letter*, 33, doi:10.1029/2006GL027033.
- Owens, W.B. and Wong, A.P.S., 2009, An improved calibration method for the drift of the conductivity sensor on autonomous CTD profiling floats by theta-S climatology. *Deep Sea Research Part I*, 56, 450-457.
- Park, J.J. and Kim, K., 2007, Evaluation of calibration salinity from profiling floats with high resolution conductivity-temperature-depth data in East/Japan Sea. *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2006JC003869.
- Purkey, S.G. and Johnson, G.C., 2010, Warming of global abyssal and deep Southern Ocean waters between the 1990s and 2000s: Contributions to global heat and sea level rise budgets. *Journal of Climate*, 23, 6336-6351.
- Ridgway, K.R., Dunn, J.R., and Wilkin, J.L., 2002, Ocean interpolation by four-dimensional least squares - application to the waters around Australia. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19, 1357-1375.
- Roemmich, D. and Gilson, J., 2009, The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity and steric height in the global ocean from Argo program. *Progress in Oceanography*, 82, doi:10.1016/j.pocean.2009.03.004.
- Seaver, G.A. and Kuleshov, A., 1982, Experimental and analytical error of the expendable bathythermograph. *Journal of Physical Oceanography*, 12, 592-600.
- Stammer, D., Köhl, A., Awaji, T., Balmaseda, M., Behringer, D., Carton, J., Ferry, N., Fischer, A., Fukumori, I., Giese, B., Haines, K., Harrison, E., Heimbach, P., Kamachi, M., Keppenne, C., Lee, T., Masina, S., Menemenlis, D., Ponte, R., Remy, E., Rienecker, M., Rosati, A., Schroeter, J., Smith, D., Weaver, A., Wunsch, C., and Xue, Y., 2010, Multi-model ensemble ocean synthesis in support of climate diagnostics. In Hall, J., Harrison, D.E., and Stammer, D. (eds.), *Proceedings of the "OceanObs09: Sustained ocean observations and information for society" conference*. ESA Publication WPP-306, Venice, Italy, doi:10.5270/OceanObs09.cwp.16.
- Teague, W.J., Carron, M.J., and Hogan, P.J., 1990, A comparison between the generalized digital environmental model and levitus climatologies. *Journal of Geophysical Research*, 95, 7167-7183.
- Trenberth, K.E. and Fasullo, J.T., 2010, Tracking earth's energy. *Science*, 328, 316-317.
- Usui, N., Ichizaki, S., and Fujii, Y., 2006, Meteorological Research Institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results natural hazards and oceanographic processes from satellite data book series. *Advances in Space Research*, 37, 806-822.
- Vernieres, G., Keppenne, C., Rienecker, M.M., Jacob, J., and Kovach, R., 2011, The GEOS-ODAS, description and evaluation. *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, NASA/TM-2012-104606.
- White, W.B., 1995, Design of a global observing system for gyre-scale upper ocean temperature variability.

- Progress in Oceanography, 36, 169-217.
- Wijffels, S.E., Willis, J.K., Domingues, C.M., Barker, P., White, N.J., Gronell, A., Ridgway, K., and Church, J.A., 2008, Changing expendable bathythermograph fall rates and their impact on estimates of thermohaline sea level rise. *Journal of Climate*, 21, doi:http://dx.doi.org/10.1175/2008JCLI2290.1.
- Willis, J.K., Chambers, D.P., and Nerem, R.S., 2008, Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales. *Journal of Geophysical Research*, 113, doi:10.1029/2007JC004517.
- Willis, J.K., Lyman, J.M., Johnson, G.C., and Gilson, J., 2007, Correction to "Recent cooling of the upper ocean". *Geophysical Research Letter*, 34, doi:10.1029/2007GL030323.
- Willis, J.K., Lyman, J.M., Johnson, G.C., and Gilson, J., 2009, In situ data biases and recent ocean heat content variability. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26, 846-852.
- Wong, A., Keeley, K., and Carvel, T., 2006, Argo data management quality control manual, version 2.2. ARGO, ar-um-04-01, 33 p.
- Wong, A.P.S., Johnson, G.C., and Owens, W.B., 2003, Delayed-mode calibration of Autonomous CTD profiling float salinity data by Theta-S climatology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 308-318.
- Xue, Y., Balmaseda, M., Boyer, T., Ferry, N., Good, S., Ishikawa, I., Kumar, A., Rienecker, M., Rosati, A., and Yin, Y., 2012, A comparative analysis of upper ocean heat content variability from an ensemble of operational ocean reanalyses. *Journal of Climate*, 25, doi:10.1175/JCLI-D-11-00542.1.
- Xue, Y., Huang, B., Hu, Z.Z., Kumar, A., Wen, C., Behringer, D., and Nadiga, S., 2011, An assessment of oceanic variability in the NCEP climate forecast system reanalysis. *Climate Dynamics*, 37, doi:10.1007/s00382-010-0954-4.
- Yin, Y., Alves, O., and Oke, P.R., 2011, An ensemble ocean data assimilation system for seasonal prediction. *Monthly Weather Review*, 139, 786-808.
- Zhang, S., Harrison, M.J., Rosati, A., and Wittenberg, A., 2007, System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic studies. *Monthly Weather Review*, 135, 3541-3564.
- Zhu, J., Huang, B., and Balmaseda, M.A., 2012, An ensemble estimation of the variability of upper-ocean heat content over the tropical Atlantic Ocean with multi-ocean reanalysis products. *Climate Dynamics*, online first, doi:10.1007/s00382-011-1189-8.

2012년 9월 25일 접수
 2012년 9월 28일 수정원고 접수
 2012년 10월 13일 채택

Appendix 1. Table 1, 2에서 소개된 약어에 대한 정보는 다음과 같다.

Acronyms	Full name in English
BMRC	Bureau of Meteorology Research Center
CM	Coupled Model
CSFR	Climate Forecast System Reanalysis
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
ECCO	Estimation of the Circulation and Climate of the Ocean
ECDA	Ensemble Coupled Data Assimilation
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EnKF	Ensemble Kalman Filter
EnOI	Ensemble Optimal Interpolation
GEOS	Goddard Earth Observing System model
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GMAO	Global Modeling and Assimilation Office
HOPE	Hamburg Ocean Primitive Equation
IFREMER	French Research Institute for Exploration of the Sea
IPRC	International Pacific Research Center
JMA	Japan Meteorological Agency
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NODC	National Oceanographic Data Center
SIO	Scripps Institution of Oceanography
MERCATOR	French Operational Oceanography Center
MOM	Modular Ocean Model
MOVE	Multivariate Ocean three-dimensional Variational Estimation
MRI	Meteorological Research Institute
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MITGCM	Massachusetts Institute of Technology General Circulation Model
NEMO	Nucleus for European Modeling of the Ocean
ORAS	Ocean ReAnalysis System
POAMA	Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia
POP	Parallel Ocean Program
SEEK	Singular Evolutive Extended Kalman filter
SODA	Simple Ocean Data Assimilation
UMD	University of Maryland