

<Note>

## 자동 수직물성관측 뜰개(ARGO Float)로 얻은 수온과 염분의 정확도와 안정도

오경희 · 박영규\* · 석문식

한국해양연구원 해양기후·환경연구본부

### Accuracy and Stability of Temperature and Salinity from Autonomous Profiling CTD Floats (ARGO Float)

KYUNG-HEE OH, YOUNG-GYU PARK\* AND MOON-SIK SUK

*Ocean Climate and Environment Research Division, Korea Ocean Research & Development Institute,  
Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

자동 수직물성관측 뜰개는 매우 유용한 해양관측장비이지만 이에 부착된 CTD의 사후 보정이 불가능하기 때문에 뜰개자료의 정확도 검증이 사후자료관리나 자료활용에 있어 중요한 문제 중 하나이다. 동해 중심층의 염분변화가 국제 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도 0.01과 유사하기 때문에 동해를 항염분수조로 취급하여 동해에 투하된 뜰개가 관측한 염분자료의 신뢰성을 세 가지 방법을 통하여 검증하였다. 각각의 방법은 1) 부근 해역에서 얻은 정확도가 높은 정선 CTD 자료와 뜰개자료의 비교, 2) 비슷한 시각에 비슷한 해역에서 얻은 뜰개자료의 비교, 3) 체류수심에서 얻은 염분자료의 장기간에 걸친 안정도 및 정확도 검증이다. 세 방법 모두 뜰개에서 얻은 염분자료가 아무런 보정없이도 Argo 프로그램이 요구하는 정확도를 만족함을 보여주었다. 동해의 심층 수온이 일정하다는 가정 하에 위의 세 가지 방법을 적용하여 얻은 수온값의 정확도 0.01°C는 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도의 2배 정도이다. 하지만 동해의 중층 수온은 Argo 프로그램이 요구하는 정확도 이상으로 시공간적으로 변화하기 때문에, 위의 결과는 수온 자료가 부정확하다는 것을 의미하지는 않는다. 동해 중층수온의 시공간적 변화를 고려한다면 수온 자료의 정확도도 Argo 프로그램이 요구하는 것과 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서 검증된 뜰개가 관측한 수온 염분자료 모두 특별한 보정 없이 사용할 수 있다.

Autonomous profiling CTD floats are a useful tool for observing the oceans. We, however, cannot perform post-deployment calibration of the CTD's attached to the floats, and the assessment of the accuracy and stability of the profile data from the floats is one of the important issues in the delayed mode quality control of the profiles. Variations in salinity in the intermediate level of East Sea is comparable to the accuracy of salinity data required by the international Argo Program, which is 0.01. Therefore, we can assess the credibility of salinity data from the floats deployed in the East Sea using three independent methods while considering the East Sea as a salinity calibration bath. The methods utilized here are 1) comparison of high quality CTD data and float data obtained at similar locations at similar time, 2) comparison of float data obtained at similar locations at similar time, and 3) investigation of long term stability and accuracy of salinity data from parking depths. All three methods show that without any calibration, the salinity data satisfy the accuracy criterion by the Argo Program. While assuming that the intermediate level temperature in the East Sea is as homogeneous as the salinity, we have applied the three methods to temperature data. We found that the accuracy of temperature reading is 0.01°C, which is about twice larger than the requirement by the Argo Program, 0.005°C. This does not mean that the temperature readings are inaccurate, because the intermediate level temperature does vary spatially and temporally more than the accuracy interval required by the Argo Program. If we take into account the variation in the intermediate level temperature, the accuracy of temperature data from the floats is not significantly different from that proposed by the Argo Program. Therefore, one could use both temperature and salinity profiles from the floats assessed in this study without calibration.

**Key words:** Autonomous Profiling CTD Floats, Delayed Mode Quality Control, Accuracy and Stability of Salinity Sensor, Argo Program

\*Corresponding author: ypark@kordi.re.kr

## 서론

해양은 다양한 사회 경제 활동과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 해양을 관측하고 예측하는 것은 매우 중요한 일이다. 해양을 예보하기 위해서는 해양에 대한 실시간 관측이 필요하나 이는 경제적 기술적으로 어려운 문제이다. 이를 해결하기 위한 방법의 하나로 인공위성으로 위치를 추적할 수 있는 뜰개가 개발되었고, 위치추적 기능에 수온과 염분 수직 관측 기능을 추가한 것이 자동 수직물성관측 뜰개(ARGO 뜰개, 이하 뜰개)이다(Argo brochure, 1999).

유네스코 산하의 정부간해양학위원회(IOC)와 세계기상기구(WMO)에서는 국제 Argo 프로그램(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)을 통하여 2001~2006년에 걸쳐 약 3000대의 뜰개를 이용하여 전 세계 대양을 실시간으로 관측하고자 한다(Argo Science Team, 2000). 현재 국제 Argo 프로그램에는 대한민국을 포함하여 18개 국가가 참여하고 있다. 우리나라에서는 한국해양연구원과 기상연구소가 참여하고 있는데, 주요 뜰개 투하 해역은 동해와 북서태평양, 남극해이다. 여타 해양관측 장비와 달리 간단한 조작으로도 뜰개의 투하가 가능하기 때문에 연구선 뿐만 아니라 대상해역을 지나는 선박이나 항공기를 이용하여 누구나 쉽게 뜰개를 투하할 수 있으며, 현장에 투하한 이후에는 관측과 자료수집이 자동으로 이루어지기 때문에 초기에 자료 처리 및 획득 시스템만 구성하면 최소한의 인력으로 관측된 자료를 처리할 수 있어 경제적으로도 가치가 높다.

뜰개 제작시 부착된 CTD에 대한 정확한 보정이 실시되지만, 투하된 뜰개가 관측을 수행하는 동안 생물의 영향이나 자체의 결함으로 인하여 전기전도도 센서가 계통오차나 시간에 따른 표류 등의 문제를 일으킬 가능성이 있다(Davis 1998; Bacon *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2003; Oka and Ando 2003). 따라서 뜰개자료 활용에 있어 중요한 안전 중 하나가 염분 자료의 신뢰도 검증과 보정이다. 국제 Argo 프로그램은 염분의 경우 0.01의 정확도를 요구하고 있다.

뜰개자료를 검증하기 위한 가장 직접적이고 정확한 보정방법은 투하된 뜰개를 수거하여 부착된 센서를 검증하는 것이다. Oka and Ando(2003)는 일본 남부해역에서 투하 후 4~9개월 동안 작동한 3대의 뜰개를 회수하여 부착된 센서에 대한 재검증을 수행하였다. 회수된 뜰개 중 두 대의 뜰개(APEX 모델)에서는 수온과 압력 센서가 국제 Argo 프로그램에서 제시한 정확도를 만족하였으나, 한 대의 뜰개(PROVOR 모델)에서는 Argo 프로그램에서 제시한 정확도를 벗어난 염분값을 보였다. 그러나 이처럼 투하된 뜰개를 회수하는 것이 현실적으로 매우 어렵기 때문에 뜰개의 염분값에 대한 보정을 수행하는 것은 거의 불가능하여, 보통은 뜰개에서 얻은 자료와 기존 관측자료를 비교하여 검증하는 방법을 이용한다.

Bacon *et al.*(2001)은 Irminger 해에 투하된 PALACE(Profiling Autonomous Lagrangian Circulation Explorer) 뜰개가 관측한 염분값을 정선 CTD 관측결과를 비교하여 뜰개자료에 나타난 계통오차와 시간에 따른 표류를 보정하였다. 이 때 600db 이심에서 얻은 자료들만 이용되었다. Bacon *et al.*(2001)은 정선 CTD관측을 이용하여 보정된 뜰개자료를 이용하여 다른 뜰개자료에 대한 보정도 수행하였다. Wong *et al.*(2003)은 objective mapping 방법을

이용하여 기존 관측자료로부터 기준자료를 만들고 이를 이용하여 뜰개자료를 보정하였다. 기준자료를 구성할 때 관측 해역에 대한 일반적인 특성도 반영되기 때문에 자료가 부족한 해역에서도 보정을 수행할 수 있으나, 보정의 정확도는 최근에 얻은 관측자료의 양과 질에 의해 결정된다. 변동이 큰 해역이나 기존자료가 부족한 해역에서는 신뢰성 있는 기준자료를 만들 수 없기 때문에, 이 Wong *et al.*(2003)의 보정방법을 적용할 수 없다. 또한 기준자료에 변동성을 포함시킬 수 없기 때문에, 기준자료와 뜰개자료의 비교를 통해서 뜰개자료의 변화가 센서의 오류에 의한 것인지, 자연적인 현상에 의한 것인지를 판단하기 어렵다(Bacon *et al.*, 2001). Iwasaka *et al.*(2003)은 뜰개자료와 비슷한 해역에서 비슷한 시각에 얻은 정선 CTD 자료를 비교하여 최소한 투하 후 약 4개월 동안 정확한 자료가 생산됨을 보여주었다.

앞서 언급된 기존의 연구들은 뜰개 투하 후 최대 1년 이내에 얻어진 자료들을 이용하여 염분변화의 특성을 파악하거나 보정을 수행하여, 장기간에 걸친 염분값의 특성변화는 파악할 수 없었다. 이 논문에서는 2001년 이후 동해에 투하된 뜰개가 관측한 자료를 비슷한 시각에 비슷한 위치에서 얻어진 정선 CTD 자료나 다른 뜰개자료와 비교하여 뜰개 자료의 정확도와 안정도를 검증하였다. 체류수심에서 얻은 자료의 변화추이를 통해 중심층의 시공간적 염분 변화가 Argo 프로그램에서 요구하는 염분의 정확도보다 작다

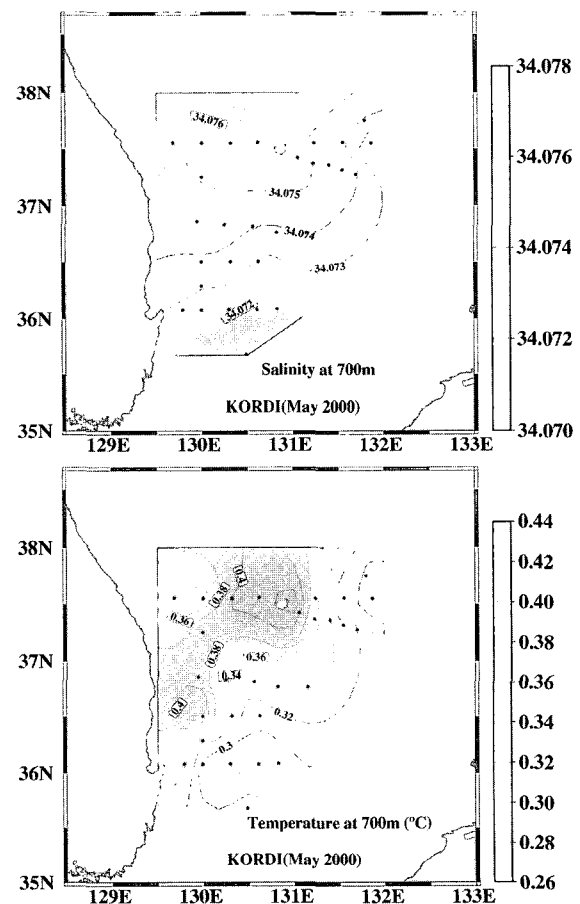


Fig. 1. Horizontal maps of salinity and temperature at 700 m level in May 2000 (KORDI, 2000).

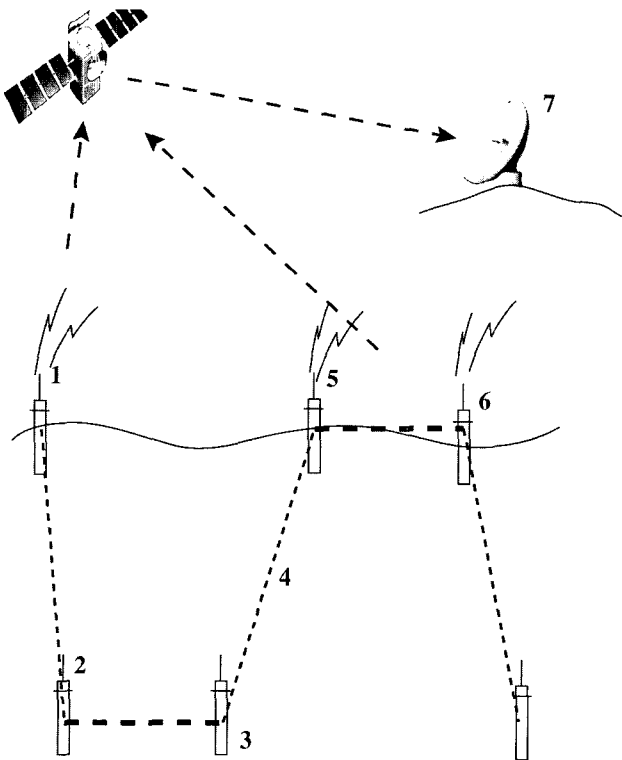
는 사실에 기초하여 분석함으로써 약 2년간에 걸친 뜰개자료의 변화특성을 파악하였다. 보정이 필요한 경우 그 방법을 제시하였다.

이 논문의 전체적인 순서는 다음과 같다. 먼저 뜰개의 자료수집 방법과 부착된 센서에 대한 특징 및 분석방법을 설명한후, 구체적인 분석결과를 기술하였다. 마지막으로 간단한 요약과 결론을 도출하였다.

### 재료 및 방법

#### 뜰개

바다에 투하된 뜰개는 지정된 깊이로 침강하여 해류를 따라 지정된 시간 동안 움직이다가 표층으로 상승한다(Fig. 2). 표층에 떠오른 뜰개는 지정된 시간동안(8~12시간) 체류하면서, 상승할 때 측정된 CTD 자료 등을 인공위성으로 송신한다. 송신된 자료는 기지국에서 수집하여 사용자의 요구에 맞게 배포한다. 지정된 시간 후 뜰개는 다시 지정된 깊이로 침강하여 해류를 따라 움직인다(참고로, 한국해양연구원에서는 남극해에 대해서는 2000 m, 동해에 대해서는 700 m를 침강 수심으로 정하였다). 뜰개의 침강과 상승은 내부의 압력펌프에 의해 조절되며, 3~4년간 침강과 상승을 거



1. A float deployed by a ship or an aircraft.
2. Drift for preset days (about 9 days) with ocean currents.
3. Oil pumped from the internal reservoir to inflate the external bladder causing the float to rise.
4. Temperature and salinity profiles recorded during ascent.
5. Up to 12 hours at surface to transmit the data to satellite.
6. Oil pumped back to the internal reservoir and a new cycle begins.
7. Data sent to users.

Fig. 2. Operating cycle of an Argo float.

Table 1. Accuracy of Sea-Bird CTD's Model 41 and 911plus

Sensor	Sea-Bird's 41	Sea-Bird's 911 plus
Temperature	0.002°C	0.001°C
Conductivity	0.005 psu equivalent	0.001
Pressure	2.4 dbars	0.015%

듭하면서 해양조사를 수행한다.

초기에 제작된 뜰개에는 수온과 압력 센서만이 장착되어 있었지만 지금은 수온과 염분, 압력, 용존산소, 탁도 등 다양한 센서들을 장착할 수 있다. 가장 많이 이용되고 있는 것은 CTD로, 제작사에서 보정을 한 후 뜰개에 장착된다. 분석에 이용된 뜰개는 모두 Table 1에 나타난 바와 같이 수온의 정확도가 0.002°C이고 염분의 정확도가 0.005인 Sea-Bird사의 SBE-41 CTD를 부착한 뜰개(APEX 모델)이며, 500 m 이심에서 얻은 자료만 분석에 사용하였다.

#### 분석 방법

뜰개가 관측한 수온·염분 자료의 안정도와 정확도를 평가하기 위해 다음과 같이 세 가지 방법을 이용하였다. 첫 번째 방법은 정선관측을 통해 얻은(보정을 거친) 정확도가 높은 CTD 자료를 참값으로 취급하면서 비슷한 위치와 시간에 획득된 뜰개자료와 정선관측자료를 비교하는 것이다(Bacon *et al.*, 2001; 기상연구소, 2002; Iwasaka *et al.*, 2003). 대부분은 압력과 수온이 안정적이라는 판단하에 염분을 대상으로 분석이 이루어졌는데 여기서는 수온의 변화까지 살펴보았다.

뜰개자료와 비교 가능한 정선관측자료가 많이 존재하는 것은 아니기 때문에 첫 번째 방법을 항상 적용할 수는 없다. 서로 다른 뜰개의 성능이 동시에 비슷한 경향으로 저하될 가능성은 매우 낮기 때문에, 두 번째 방법은 비슷한 시간에 비슷한 위치에서 얻은 뜰개자료를 비교하는 것이다. 이 방법으로는 뜰개간 상대비교만 가능하지만, Fig. 1에 나타난 것처럼 동해 남서부해역에서 중층 염분의 시공간적 변화가 Argo 프로그램에서 요구하는 염분의 정확도 0.01 이하라는 사실을 이용하면 절대평가도 가능하다. Bacon *et al.*(2001)은 정선 CTD 자료를 이용하여 검증한 뜰개자료를 이용하여 다른 뜰개자료를 검증하였다.

세 번째 방법은 뜰개가 관측한 심층 염분의 시간적 변동을 통해 염분의 안정도와 정확도의 변화를 파악하는 것이다. 이 방법도 동해 남서부해역에서 중층 염분의 시공간적 변화가 Argo 프로그램에서 요구하는 염분의 정확도 0.01 이하라는 점에 기초한다. 여기서 약 2년 이상 동해에서 활동하고 있는 뜰개에서 얻은 자료를 사용함으로써 장기간에 걸친 뜰개의 안정도와 정확도를 파악할 수 있었다.

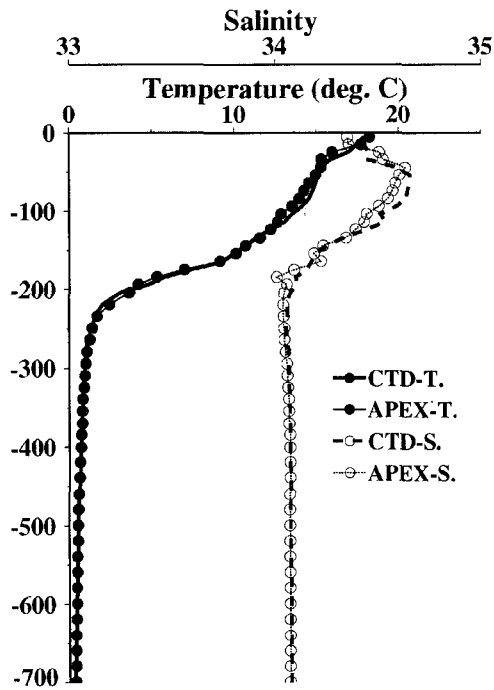
### 결 과

#### 정선관측자료와 뜰개자료의 비교

WMO ID 2900207 뜰개에서 얻어진 자료를 검증하기 위해 정선 CTD 관측을 수행(국립해양조사원)하였다. 정선관측은 뜰개가 관측을 수행한 약 4일 후 뜰개의 관측점에서 약 2.4 km 정도 떨어진 곳에서 수행되었다. 정확한 관측 정점과 시간은 Table 2에 정리되어 있다. 정선관측에 사용된 CTD는 Sea-Bird's 911plus로

**Table 2.** Dates and locations of CTD hydrocast and Float (WMO ID 2900207) profile

Type	Date	Location
CTD hydrocast (SBE911plus)	03-Jun-03	132.027°E, 36.340°N
Float (2900207)	30-May-03	132.048°E, 36.354°N
Difference	4 days	≅ 2.44 km



**Fig. 3.** Vertical profiles of temperature and salinity from Float 2900207 and CTD (Sea-Bird's 911plus).

Table 1에 정리한 바와 같이 수온의 정확도는 0.001°C, 염분의 정확도는 0.001로, Argo 프로그램에서 요구하는 정확도(수온 0.005°C, 염분 0.01)보다 높기 때문에, 이 자료를 이용하여 뜰개자료의 정확도를 파악할 수 있다.

정선관측자료와 2900207 뜰개자료를 이용한 수온과 염분의 수직분포도를 Fig. 3에서 비교하였다. 뜰개자료와 CTD 자료는 전층에 걸쳐 아주 비슷한 구조를 보인다. 그러나 표층은 외부의 영향을 많이 받기 때문에 동일시간 동일 관측점에서 관측되어지지 않

**Table 3.** Statistics of the differences in temperature and salinity between the data from CTD and Float 2900207

Type	Average	Standard deviation	Root mean square
Temperature (°C)	-0.00016	0.01	0.0095
Salinity (psu)	0.0065	0.0011	0.0065

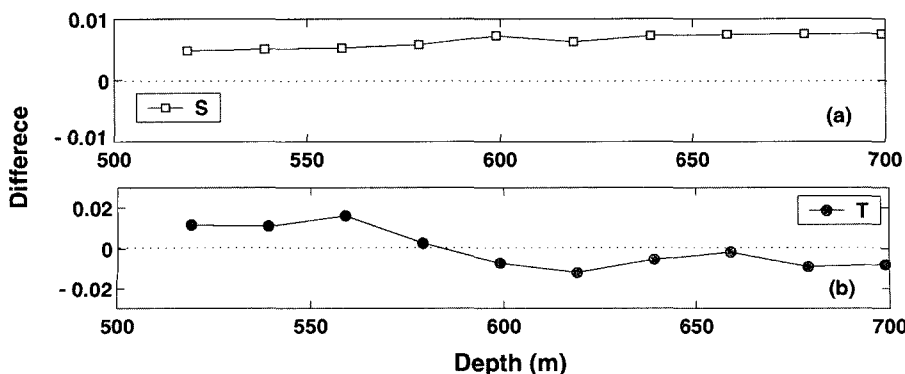
는 한 표층 자료를 이용하여 정확도를 비교 분석하는 것은 적절하지 않다. 따라서 여기서는 수심 500 m 이심 자료만을 이용하였는데, Fig. 4(a)에는 염분의 차이( $S_{diff}=S_{CTD}-S_{float}$ )를, Fig. 4(b)에는 수온의 차이( $T_{diff}=T_{CTD}-T_{float}$ )를 나타내었다.

염분의 경우, CTD 자료와 뜰개자료의 차이는 0.005~0.008 이내에서 분포하며, 차이의 평균은 0.0065, 표준편차는 0.0011, rms는 0.0065(Table 3)로 뜰개 염분자료의 정확도는 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도보다 높게 나타난다. CTD와 뜰개의 차이는 계통적 오차의 특성을 보이기 때문에, 정선관측자료를 참값이라고 가정하고 두 값의 차이의 평균 만큼 보정하면, 정확도 약 0.001의 염분을 얻을 수 있다. 더욱이 뒤에서 기술한 바와 같이 약 2년 동안 뜰개가 관측한 염분값이 매우 안정적이기 때문에 이 계통오차 보정은 전 관측기간에 걸쳐 적용될 수 있다.

수온의 경우, 두 자료의 차는 -0.012~0.016°C내에서 나타내며, 차이의 평균은 -0.00016°C, 표준편차는 0.01°C, rms는 0.0095°C (Table 3)로 단순히 수치만 비교할 경우 수온자료의 정확도는 Argo 프로그램에서 요구하는 값 0.005°C의 두 배 정도이다. 그러나 Fig. 1에 표시된 것과 같이 동해 남서부해역에서 중층수온의 공간적 변화는 염분의 공간적 변화에 비해 10배 이상 높고 해류의 변동성이 크다는 점을 고려한다면, 같은 시간 같은 위치가 아니라면, 상당한 온도변화가 있을 수 있다. 이 해역의 수평온도구배는 약  $10^{-6}C/m$ 로(Fig. 1참조), 관측지점간 거리차이 2.4 km에 의해 최소 0.0024°C의 수온차가 생길 수 있다. 이 해역의 평균해류는 약 2 cm/s 정도이고 변동성도 이와 유사하여(Park et al., 2004), 해류와 변동성에 의해 동일한 지점에서라도 4일의 시간차는 약 0.007°C의 수온변화를 초래할 수 있다. 즉 뜰개에서 얻은 수온과 정선관측에서 얻은 수온의 차이는 뜰개자료의 부정확성에 의한 것이기보다는 동해 수온의 시공간적 변화로 인한 것이다.

**뜰개간 상호 비교**

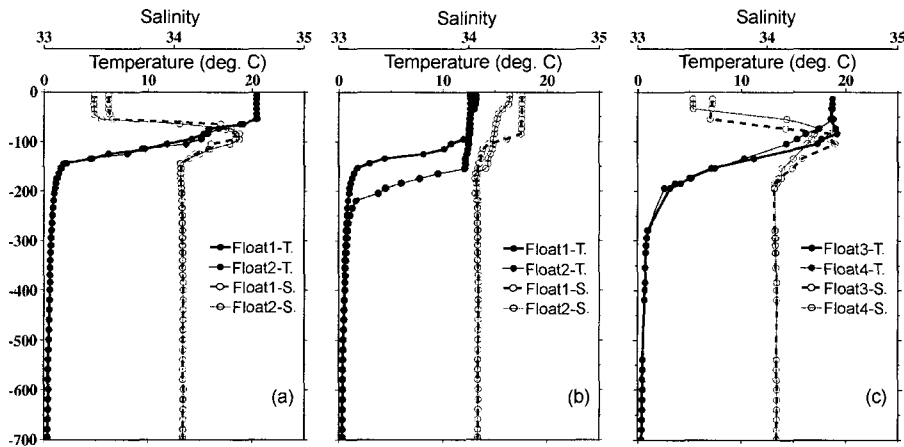
2002년 9월 동해 남서부 해역에 투하된 뜰개 중 WMO ID 2900225(이하 뜰개 1)와 2900209(이하 뜰개 2), WMO ID 2900205



**Fig. 4.** Differences in (a) salinity and (b) temperature in °C between the data from CTD (Sea-Bird's 911plus) and Float (WMO ID 2900207).

**Table 4.** Dates and locations of launch and profiles by floats, WMO IDs 2900225 (Float 1), 2900209 (Float 2), 2900205 (Float 3) and 2900207 (Float 4)

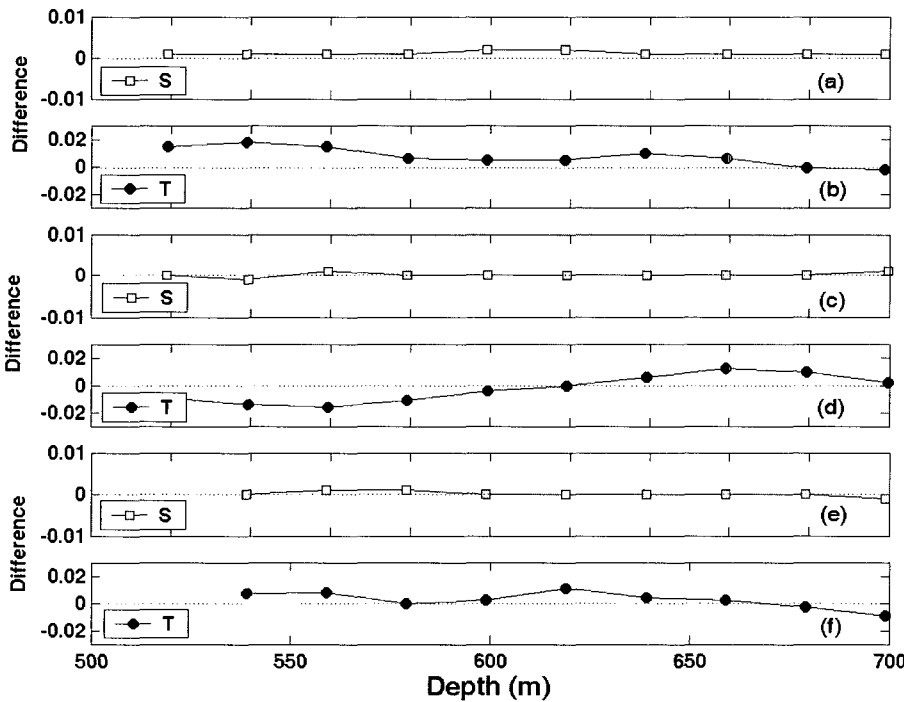
WMO ID	Launch		2 months after		17 months after	
	Date	Location	Date	Location	Date	Location
2900225 (Float 1)	03-Sep-02	130.523°E, 36.008°N	02-Nov-02	129.899°E, 36.170°N	05-Feb-04	132.127°E, 36.125°N
2900209 (Float 2)	03-Sep-02	130.350°E, 36.178°N	02-Nov-02	129.916°E, 36.160°N	26-Jan-04	132.089°E, 36.178°N
Difference	-	≃ 24.47 km	-	≃ 1.89 km	10 days	≃ 6.8 km
2900205 (Float 3)	03-Sep-02	130.009°E, 36.032°N	11-Nov-02	130.421°E, 36.061°N		
2900207 (Float 4)	03-Sep-02	130.241°E, 36.218°N	01-Nov-02	130.479°E, 36.062°N		
Difference	-	≃ 29.35 km	10 days	≃ 5.2 km		



**Fig. 5.** Vertical profiles of temperature and salinity from Float 1 (WMO ID 2900225) and Float 2 (WMO ID 2900209) (a) 2 months, and (b) 17 months after the deployment, and (c) from Float 3 (WMO ID 2900205) and Float 4 (WMO ID 2900207), 2 months after the deployment.

(이하 뜰개 3)와 2900207(이하 뜰개 4)는 비슷한 경로를 따라 움직였다. 특히, 뜰개 1과 뜰개 2는 투하 2개월 후와 17개월 후, 뜰개 3과 뜰개 4는 투하 2개월 후에 Table 4에 나타낸 것과 같이 매우 근접한 해역을 통과함으로써 상호비교에 아주 좋은 자료를 제공하였다.

뜰개 1과 뜰개 2의 투하 2개월 후에 관측된 자료는 Fig. 5(a)에, 17개월 후에 얻은 자료는 Fig. 5(b)에 비교하였다. 투하 2개월 후 표층의 혼합층에서는 두 뜰개가 조금 다른 값을 보이나 그 이심에서는 거의 같은 값을 보인다. 뜰개 투하 17개월 후에 관측된 자료도 저층에서는 아주 잘 일치한다. 250 m보다 얇은 깊이에서는 다



**Fig. 6.** Differences in (a) salinity and (b) temperature in °C between the data from Float 1 and Float 2, 2 months after the deployment, and (c) salinity and (d) temperature 17 months after the deployment, and (e) salinity and (f) temperature between the data from Float 3 and Float 4, 2 months after the deployment.

**Table 5.** Statistics of the differences in temperature and salinity between the data from Float 1 and Float 2, and Float 3 and Float 4

	2 months after (Float 1 & Float 2)		17 months after (Float 1 & Float 2)		2 months after (Float 3 & Float 4)	
	T (°C)	S	T (°C)	S	T (°C)	S
Ave.	0.0077	0.0012	-0.0024	0.0001	0.0024	0.0001
SD	0.0067	0.0004	0.01	0.0006	0.006	0.0006
RMS	0.01	0.0013	0.01	0.0005	0.0057	0.0005

른 구조를 보이는데, 이 기간동안 동해 해상에 폭풍주의보가 발효된 점과 이 지역의 큰 변동성을 고려한다면 이 차이는 설명가능하다. 뜰개 3과 뜰개 4의 투하 2개월 후 관측된 자료는 Fig. 5(c)에서 비교하였는데, 중간에 자료가 없는 부분이 있지만 전체적인 구조는 비슷하다. 변화가 적은 500 m 이심의 자료를 Fig. 6에서 자세히 비교하였다. 투하 2개월 후 뜰개 1과 뜰개 2의 염분값의 차(뜰개1-뜰개2)는 Fig. 6(a)에, 수온의 차는 Fig. 6(b)에, 투하 17개월 후 염분의 차는 Fig. 6(c)에, 수온의 차는 Fig. 6(d)에 나타내었으며, 뜰개 3과 뜰개 4의 염분의 차(뜰개3-뜰개4)는 Fig. 6(e)에, 수온의 차는 Fig. 6(f)에 나타내었다.

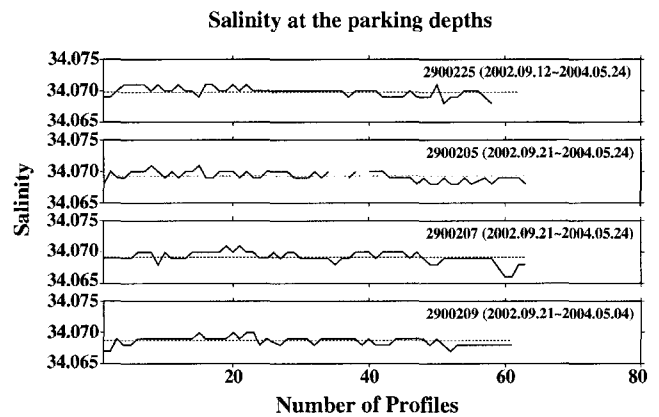
염분의 경우, Table 5에 정리된 것과 같이 뜰개 1과 뜰개 2, 뜰개 3과 뜰개 4 모두 투하 2개월 후나 17개월 후 모든 값이 0.002 범위 이내에서 일치한다. 수온의 경우는  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 이내에서 일치하는데, 앞절에 언급하였듯이 이는 동해 남서부해역 중층수온의 시공간적 변동성에 의한 것으로 추정된다. 여기서 뜰개 1과 뜰개 2는 17개월 후의 수온 차이가 2개월 후의 수온 차이보다 크게 나타나는데, 이는 17개월 후의 관측위치와 시각의 차이가 2개월 후에 비해 크기 때문으로 추정된다.

**염분의 시간적 변동**

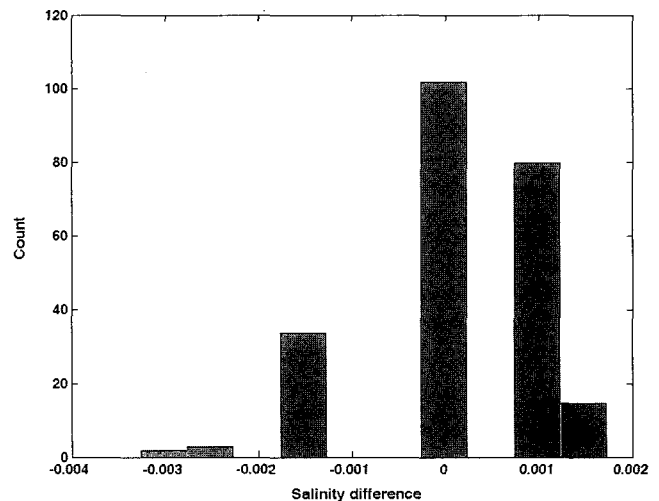
Oka and Ando(2004)는 투하된 지 4-9개월이 지난 뜰개 3대를 회수하여 부착된 CTD의 재보정을 수행하여, 2대(APEX 모델)의 CTD는 작동기간동안 Argo 프로그램이 요구하는 정확도를 만족하였다. 이 기간 동안 보인 염분값의 표준차가 약 4년간 지속된다면, 이 CTD가 Argo 프로그램이 요구하는 정확도 범위를 벗어날 수 있을 가능성을 제시하였으나, 뜰개자료의 장기간에 걸친 안정도는 아직 직접적으로 검증되지 않았다.

Fig. 7에 2002년 한국해양연구원에서 동해 남서부해역에 투하한 6대의 뜰개 중 약 2년간 안정적으로 작동하고 있는 4대의 뜰개가 체류수심(700 m)에서 얻은 염분자료의 시계열을 나타냈다. 그림에서 관측수심의 오차는  $\pm 40$  m이다. 일부 뜰개에서 중간에 자료가 끊긴 것을 볼 수 있는데 이는 뜰개가 체류수심까지 침강을 하지 못한 경우나, 자료가 수신되지 않은 경우에 의한 것이다. 그러나 이것은 전체 자료의 10% 미만으로 전체적인 자료수집 상태는 매우 좋으며 수집된 자료의 90%이상이 분석에 이용되었다.

모든 뜰개가 34.069~34.070의 평균값(Table 6)을 가지면서 거



**Fig. 7.** The time series of salinity at the parking depths from floats, WMO IDs 2900225, 2900205, 2900207, and 2900209. Here the horizontal axis is the number of profiles made. Since the profiles were made at every 10 days, approximately, 60 profiles means 600 days of operation. The dotted line represents average value in each case as listed in Table 6.



**Fig. 8.** Deviation from the mean salinity. All the data in Fig. 7 are used.

의 일정한 매우 안정적인 값을 보인다. Fig. 8에는 Fig. 7에 표시된 전체 염분자료에 대한 전체 평균 34.0693으로부터의 분산을 나

**Table 6.** Statistics of salinity at the parking depths(700 m) from the floats deployed to the southwestern East Sea by KORDI in 2002

WMO ID	Duration	Number of profiles	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation
2900225	12-Sep-02~24-May-04	62 (59)	34.0680	34.0710	34.0698	0.00078
2900205	12-Sep-02~24-May-04	63 (59)	34.0680	34.0710	34.0693	0.00077
2900207	12-Sep-02~24-May-04	63 (62)	34.0660	34.0710	34.0692	0.00092
2900209	12-Sep-02~04-May-04	61 (56)	34.0670	34.0700	34.0687	0.00069

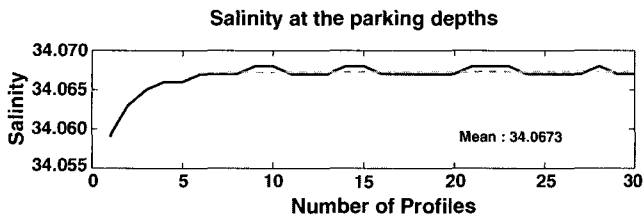


Fig. 9. The time series of salinity at the parking depths from WMO ID 2900201. Here the horizontal axis is the number of profiles made. The profiles were made at every 10 days, approximately. The dashed line represents average value at the parking depth excluding the data from the first five profiles.

타내었다. 90% 이상의 자료가  $\pm 0.002$  범위 안에 포함되어 있어 이 분석에 사용된 염분자료의 안정도가 매우 높음을 확인할 수 있다. 일반적으로 우려되는 전기전도도 센서의 질 저하에 의한 심각한 염분의 표류는 발견되지 않았으나 시간이 지남에 따라 생물체에 의한 전기전도도 센서의 오염으로 염분이 서서히 감소함을 알 수 있다. 그러나 감소하는 정도가 2년간 약 0.001~0.002로, Oka and Ando(2004)가 제시한 바와는 달리 뜰개의 최대 수명인 4년이 지나더라도 Argo 프로그램이 요구하는 0.01를 벗어나지 않을 것으로 판단된다.

2002년에 투하한 뜰개가 보정이 필요 없는 비교적 정확한 염분값을 생산해내는데 반해, 2001년도에 투하한 뜰개인 WMO ID 2900201 경우는 Fig. 9에 나타난 것처럼 체류수심에서 염분이 Bacon *et al.*(2001)이 보고한 것과 같이 투하직후에 전체 평균값보다 낮은 값을 보이다가 시간이 지남에 따라 증가하여 약 2개월 후에는 정상적인 값을 나타낸다. 이는 Wong *et al.*(2003)이 보고한 전도도 센서가 생물체오염방지물질에 의해 일시적으로 오염되

어 생기는 현상(biocide leakage)이다. 투하된 지 2달 뒤인 6번째 프로파일부터, 체류수심의 염분이 프로파일 1~5번 자료를 제외하고 얻은 평균값인 34.0673(Fig. 9에서 점선으로 표시됨)에 근사한다. 이런 오차는 Fig. 10에 나타난 것과 같은 T-S 분포도에서도 쉽게 발견할 수 있다. 그림에서 십자(‘+’)로 나타난 첫 번째에서 다섯 번째까지 프로파일자료는 점(‘.’)으로 나타난 나머지 자료에 비해 낮은 염분을 보인다. 이 초기 오차가 0.01 이내에서 나타나, 단지 Argo 프로그램의 정확도만을 고려한다면 보정할 필요가 없을 수도 있지만 좀 더 정확한 자료를 얻기 위하여 처음 5개 프로파일에 대한 보정을 수행하였다. Wong *et al.*(2003)은 축적된 기존 관측자료를 이용하여 보정을 수행하였으나, 여기에서는 동해 중층의 염분이 매우 안정적이라는 사실을 이용하였다. 체류수심에서 각 프로파일의 염분과, 프로파일 1~5번 자료를 제외하고 얻은 전체평균 사이의 차이를 구한 후 이를 전 수심에 적용하였다(Fig. 10(b)에 표시된 화살표). 이 방법으로 보정한 자료를 이용한 T-S 분포도(Fig. 10(c))에서는 처음 다섯 프로파일과 나머지가 구별되지 않는다. 비록 이 보정 방법은 평균값을 이용한 가장 단순한 과정이지만, 동해의 경우 이 과정만으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다.

## 요약 및 결론

국제 Argo 프로그램에서는 뜰개에 탑재된 CTD에 대하여 수온은  $0.005^{\circ}\text{C}$ , 염분은 0.01의 정확도를 요구하고 있는데, 뜰개에 탑재된 CTD를 회수하여 사후보정을 실시하는 것은 거의 불가능하기 때문에, 일반적으로 뜰개가 관측한 자료의 정확도 파악과 신뢰성 검증은 간접적인 방법을 통하여 수행된다. 동해 남서부 해역의 중층 수온과 염분은 그 변화 폭이 매우 작다. 특히 염분의 경우 그

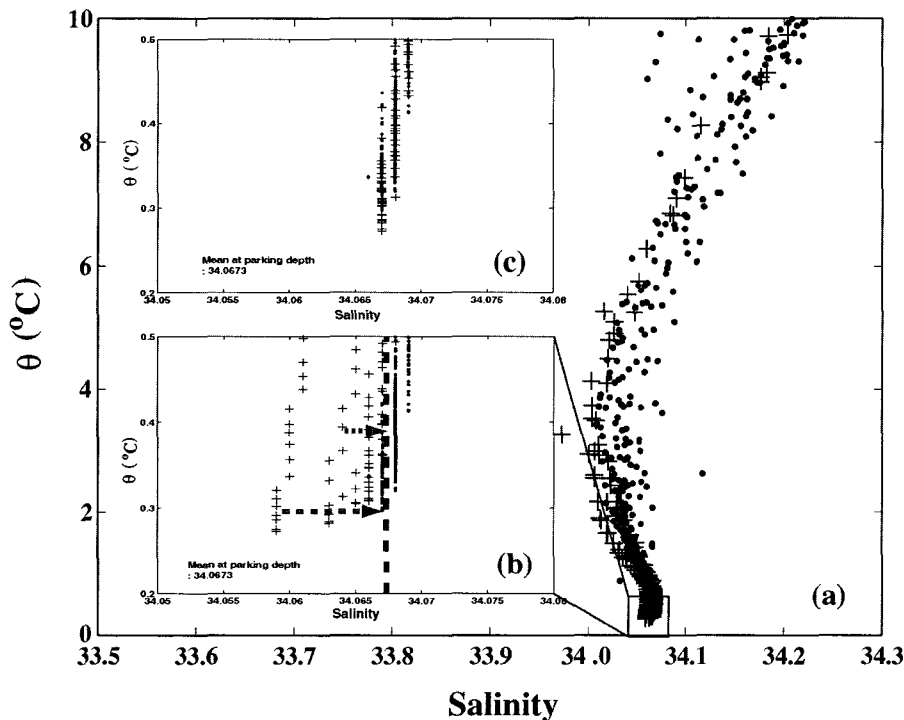


Fig. 10.  $\theta$ -S diagrams from WMO ID 2900201. Asterisks denote data from the first five profiles and dots from the remaining profiles.  $\theta$ -S diagrams before and the calibration of salinity are shown in (a) and (b), and that after the calibration in (c). In (b) and (c), data from levels deeper than 500 m are used.

변화폭이 Argo 프로그램에서 요구하는 0.01 이하이므로, 동해 중층을 항염분수조라고 가정할 수 있다. 이 논문에서는 2002년에 투하한 동해 남서부 해역에서 활동 중인 뜰개에서 얻은 자료와 정선 관측한 CTD 자료를 비교하고, 서로 비슷한 시기에 비슷한 해역을 통과한 뜰개의 자료를 상호 비교하고, 약 2년 동안 작동한 뜰개가 체류 수심에서 얻은 염분자료의 시간적 변동을 분석함으로써 뜰개자료의 정확도와 안정도를 분석하였다. 2001년도에 투하한 뜰개 중 염분 보정이 필요한 자료는 보정방법을 제시하였다.

정선관측자료와 뜰개자료의 비교와 뜰개간 상호 비교 모두 염분의 정확도는 Argo 프로그램이 요구하는 0.01 이상임을 보여주었다. 수온의 경우는 0.01°C 범위 이내에서 정선관측자료와 뜰개자료가 일치하는 것으로 나타났다. 이는 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도보다 낮은 값이지만, 동해 중층의 수온 변화폭을 고려하고, 각각의 관측이 수행된 위치와 시간의 차이를 고려할 때 매우 타당한 수온의 변화 범위이다.

체류수심에서 염분의 변화폭은 2년간 약  $\pm 0.002$ 로 매우 안정적이다. 각 뜰개간 평균의 차이도 이 범위를 벗어나지 않는다. 뜰개가 활동하는 동안 전기전도도 센서의 성능저하로 인한 염분의 표류가 없기 때문에 뜰개에 부착된 CTD가 초기에 정확히 보정만 되어 있다면, 뜰개가 관측한 자료를 특별한 보정없이 사용할 수 있다. 이렇게 뜰개가 장기간 운용되고 있음에도 불구하고 뜰개에 부착된 CTD가 높은 정확도와 안정도를 보이는 것은 뜰개가 대부분의 시간을 환경변수의 변화가 매우 작고 생물의 활동이 미약한 심층에서 보내기 때문인 것으로 생각된다.

이 논문에서 사용된 뜰개자료 중 2002년도에 투하된 뜰개는 다행히 모두 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도를 만족시키면서 특별한 보정이 필요하지 않았다. 하지만 2001년도에 투하한 뜰개자료에서는 초기값에서 생물체 오염방지 물질(biocide)로 의한 전도도 센서의 일시적 오염으로 염분값이 낮게 나타나 보정이 필요하다. 모든 뜰개가 같은 특성을 갖는다고 할 수 없기 때문에 자료활용에 앞서 먼저 각각의 뜰개자료에 대한 특성분석이 필요한데, 동해에 투하된 뜰개의 경우에는 동해 중층의 염분변화가 매우 작다는 특성 때문에, 이 논문에서 사용한 방법, 특히 체류수심에서 획득한 염분자료의 평균과 시간변화추이 분석만으로도 뜰개가 획득한 자료의 신뢰성과 정확도를 쉽게 검증할 수 있을 것이다.

## 사 사

논문을 심사해주신 이상호 교수님과 두 분의 심사위원님께 감사드립니다. 이 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업인 국제공

동해양조사연구(PE87800)와 기후변화 모니터링 및 예측을 위한 요소기술개발 (PE87000), 해양수산부의 해양관측 및 예보시스템 (PM25802)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 기상연구소, 2002. 전지구 해양변화 감시시스템 구축(Argo) I. MR020M11, 289pp.
- 한국해양연구소, 2000. 동해기후변동예측과 진화연구. BSPE00783-11-1306-1, 435pp.
- Argo Brochure, 1999. Observing the ocean in real time. Woods Hole Oceanographic Institution.
- Argo Science Team, 2000. Report of the Argo science team 2nd meeting (AST-2) March 7-9, 2000, Southampton Oceanography Centre, Southampton, U.K.
- Bacon, S., L. Centurioni, and W. Gould, 2001. The evaluation of salinity measurements from PALACE floats. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **18**: 1258-1266.
- Davis, R. E., 1998. Autonomous floats in WOCE. *Int. WOCE Newsletter* **30**, 48pp.
- Iwasaka, N., T. Suga, K. Takeuchi, K. Mizuno, Y. Takatsuki, K. Ando, T. Kobayashi, E. Oka, Y. Ichikawa, M. Miyazaku, H. Matsuura, K. Izawa, C.-S. Yang, N. Shikawa, and M. Aoshima, 2003. Pre-Japan-Argo: Experimental observation of upper and middle layers south of the Kuroshio extension region using profiling floats. *J. Oceanogr.*, **59**: 119-127.
- Oka, E. and K. Ando, 2004. Stability of temperature and conductivity sensors of Argo profiling floats, *J. Oceanogr.*, **60**: 253-258.
- Park, Y.-G. K.-H. Oh, K.-I. Chang and M.-S. Suk, 2004. Intermediate level circulation of the southwestern part of the East/Japan Sea estimated from autonomous isobaric profiling floats, *Geophys. Res. Letters*, **31**: L13213.
- Wong, A. P. S., G. C. Johnson and W. B. Owens, 2003. Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling floats salinity data by  $\Theta$ -S climatology. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **20**: 308-318.

2004년 7월 8일 원고접수

2004년 8월 24일 수정본 채택

담당편집위원: 이상호