

ARGO 뜰개에 의한 2003-2005년 울릉도 주변 해역의 수온-염분 구조

김 응¹ · 노영재^{2*} · 윤용훈³

¹충남대학교 기초과학연구소, ²충남대학교 해양학과
³기상연구소 해양지진기상실

Structure of the Temperature and Salinity in 2003-2005 Profiled by the ARGO floats around the Ulleung-do area in the East Sea

EUNG KIM¹, YOUNG JAE RO^{2*}, AND YONG HUN YOUN³

¹Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²Department of Oceanography, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³Marine Meteorology & Earthquake Research Lab., METRI, Seoul 156-720, Korea

본 연구는 2003년 10월부터 2005년 8월까지의 ARGO 뜰개에 의해 수집된 CTD 자료를 이용하여 울릉도 주변 해역의 수온-염분의 시공간 변동 양상을 분석하였다. 울릉도 주변 해역 상층 700 m에서의 수괴는 5 종류로 세분할 수 있으며, 가을 표층에는 여름의 고온저염수에 비해 더 저온저염화 된 수괴가 존재한다. 염분최소층을 갖는 동해중층수는 평균적으로 수심 265 m에 존재하며, 수온은 1~5 °C 염분 34.06 psu 이하이고 평균 두께는 175 m이다. 동해중층수의 두께는 시공간적으로 크게 변하지 않지만, 울릉난수성 소용돌이가 존재하는 경우 동해중층수의 위치 수심은 더 깊어지고, 이 영향으로 상부동해고유수의 수심 또한 저층으로 침강하게 된다. 본 자료에 의하면, 울릉난수성 소용돌이가 갖는 볼록렌즈 모양의 수온 구조는 700 m 수심까지 존재한다. ARGO 뜰개들이 수집한 약 2년의 측정 기간과 짧은 시간 간격의 수직 수온-염분 프로파일 자료는 연구 해역의 상세 수직 구조 및 단기 시간-공간 변동성을 이해하는데 대단히 유용하였다.

This study investigated the temperature-salinity spatio-temporal variability around the Ulleung-do Island (UI) by using CTD profiles obtained by the ARGO floats for the period of Oct., 2003 to Aug., 2005. The waterbody in the upper 700 m around the UI could be classified into five water masses, which is consistent to traditional water characteristics in the East Sea. In the upper surface layer, the temperature and salinity in fall season became even lower than those properties in the summer time. The East Sea Intermediate Water (ESIW) characterized by the salinity minimum layer shows the range of potential temperature between 1 to 5 °C and salinity lower than 34.06 psu. The ESIW lies approximately at 265 m depth with average thickness of 175 m. This thickness of the ESIW continues to be relatively uniform regardless of spatio-temporal space. However, the depth of the ESIW shows vertical variation influenced by the Ulleung warm eddy (UWE). Since the UWE lies in the upper layer, the Upper Portion of the Japan Sea Proper Water (UPJSPW) is also affected to show the vertical variation. The influence exerted by the UWE reached down to 700 m depth in terms of temperature. The CTD profiles obtained with the high sampling rate by ARGO floats over two-year period provided with very useful and detailed informations in investigating the spatio-temporal variability in the study area.

Keywords: ARGO Float, Hydrographic Condition, Ulleung Warm Eddy, ESIW, UPJSPW, East Sea, Ulleung-do Island

들어가는 말

오늘날 전지구적인 기후변화에서 해양의 역할을 규명하기 위하여 중, 심층수의 거동과 물성 변동에 대한 전지구적 규모의 관측

필요성이 증가하고 있다. 이때의 해양 관측은 과거와는 달리 전 대양을 대상으로 한 광역성과 동시성이 요구 된다. 이러한 목표를 구현하기 위하여 세계기상기구(WMO)와 국가 간 해양과학위원회(IOC)는 최초의 무인 통합 국제관측 프로그램인 ARGO(Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 사업을 전 세계 대양을 대상으로 추진하게 되었다. 이 ARGO 사업은 국제적인 협조체계를

*Corresponding author: royoungj@cnu.ac.kr

통하여 궁극적으로 3000개 이상의 ARGO 뜰개를 대양에 투입하여 공간해상도 $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ 으로 표층 및 중층(0~2000 m)의 수온과 염분을 실시간으로 측정하는 것이다(Argo Science team, 2000). 한국도 현재 이 사업에 해양수산부, 기상연구소 그리고 한국해양연구원 등이 참여하여 동해와 북서태평양 및 남극해에서 ARGO 뜰개(2005년 현재 57개)를 운용하고 있다.

지금까지 전 지구적으로 측정되어지고 있는 ARGO 뜰개는 2005년 11월 현재 전 세계적으로 약 2126 개가 운용되고 있다. ARGO 뜰개가 운용되었던 초기에는 주로 뜰개에 탑재된 센서의 정확성과 안정성에 관한 연구가 이루어졌으며, 이 결과 뜰개에서 큰 문제로 발생하는 생물오염과 기계적인 오류에 따른 전기전도도 센서의 측정 오차를 보정할 수 있는 다양한 방법들이 기후학적인 자료와 뜰개 측정 자료를 이용하여 개발되었다(Bacon *et al.*, 2001; Iwasaka *et al.*, 2003; Wong *et al.*, 2003; 오 등, 2004; Oka and Aado, 2004; Böhme and Send, 2005; Durand and Reverdin, 2005). 그와 더불어 ARGO 뜰개의 표층 표류 기간 동안의 정점좌표를 이용하여 해류 속도를 추정하는 연구들이 수행되었다(Fischer and Schott, 2002; Chapman *et al.*, 2003; Iwao *et al.*, 2003; Yanagimoto and Taira, 2003; Lavender *et al.*, 2005). ARGO 뜰개를 이용한 해수 물성 연구로는 Ohno *et al.*(2004)가 북태평양 혼합층의 분포와 시간적인 변동에 관한 물성 분석을 수행하여 기후학적인 자료들로부터 계산된 혼합층 구조와는 큰 차이가 있다는 것을 규명하였고, Guinehut *et al.*(2004)는 대서양에서 원격탐사에 의해 추정된 3 차원 수온 자료에 ARGO 수온 자료를 합성하여 수심 200 m 상층의 대규모 현상이면서 단주기 변동성을 가지는 3 차원 수온 자료를 추정하였다. Shimizu *et al.*(2004)는 오야시오와 쿠로시오 확장역에 투하된 중층 뜰개의 궤적과 물성 자료를 이용하여 북태평양중층수의 형성과정을 연구하였으며, Freeland and Cummins (2005)는 ARGO 뜰개 자료를 이용하여 해양환경을 모니터링 하는 방법 및 가능성에 관한 연구를 하였다.

기존의 연구 결과들처럼, ARGO 뜰개의 품질보정 및 중층순환 연구는 ARGO 사업의 초기 단계에서 활발히 이루어졌다. 이 결과 연구들에 의해 뜰개에서 발생하는 자료의 오차는 준실시간으로 보정이 가능해지고, 해양의 중층 순환에 대한 이해가 가능해지고 있다. 그러나 ARGO 뜰개 자료로부터 해양의 물성을 이해한다는 것은 특정한 해역에서 측정되어지는 뜰개 자료의 부족과 시공간적으로 변화하는 뜰개의 궤적으로 인하여 현실적으로 여러 가지 어려움이 있다. 이러한 한계로 인하여 ARGO 뜰개 자료를 이용한 해수 물성 연구는 아직 미흡한 실정이다.

동해 남서부에 위치한 울릉도 주변의 연구 해역은 동한난류가 한반도 동안을 따라 북상하면서 고온 고염의 쿠로시오 기원 해수를 공급하게 되며(Chang *et al.*, 2004), 다시 위도 $38\sim 40^{\circ}\text{N}$ 부근에서 이안하면서 동해 극전선역과 만나게 되고, 울릉 분지에서 발

생하는 중규모 난수성 소용돌이(An *et al.*, 1994; Ro, 2001)와 상호작용하는 곳이다. 이 해역에 존재하는 경계류와 난수성 소용돌이, 극전선이 위치하는 상황은 이곳에 분포하는 물성의 변동을 파악하는데 큰 어려움을 주는 요인이 되고 있다. 일반적으로 울릉 난수성 소용돌이는 남북 방향의 타원형의 형태로 직경 100~150 km이며, 소용돌이의 최대수심은 약 400 m 이상이고, 소용돌이내의 수심 200 m의 평균 수온은 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ 이다(An *et al.*, 1994). 특히 동해 남서해역은 하계에 집중적으로 유출되는 낙동강 하천수와 양자강 담수에 의해 형성되는 황해 저염수의 영향(Delcroix and Murtugudde, 2002; Isobe *et al.*, 2002)으로 여름철 표층에는 저염수가 출현하고, 북한 연안을 따라 남하하는 냉수계의 북한한류(김, 1996)와 동해 북부로부터 저온의 해수가 관입하는 곳이다(Chang *et al.*, 2004). 이 해역에 출현하는 수괴는 하계에 수온 $21\sim 24^{\circ}\text{C}$ 염분 31.3~34 psu 인 표층수(Surface Water; SW)가 존재하고(Kang *et al.*, 1997), 수심 100~300 m 층에 동해중층수(East Sea Intermediate Water; ESIW)가 염분 34.06 psu 이하 수온 $1\sim 5^{\circ}\text{C}$ 로 존재하며(Shin *et al.*, 1998; Kim and Kim, 1999), 동해중층수 이심에는 수온 0.6°C 이하 염분 34.04~34.07 psu의 상부동해고유수(Upper Portion of the Japan Sea Proper Water; UPJSPW)가 존재한다(Senju and Sudo, 1994).

본 연구에서는 ARGO 뜰개에서 측정되어진 해수 물성 자료를 이용하여 울릉도 주변 해역의 수괴 및 수괴의 시공간 분포 특성을 파악하고, 울릉 난수성 소용돌이가 중층에서 염분최소층을 갖는 동해중층수와 수심 500 m 이심에서 항염성을 갖는 상부동해고유수에 미치는 영향을 파악하고, 이 수괴들의 시공간적인 변동 구조를 이해하고자 하였다.

자료 및 방법

본 연구에서는 한국기상연구소에 의해 동해 울릉도 주변 해역에 투하된 3개의 ARGO 뜰개들(WMO ID 2900298, 2900299, 2900300)에 의해 2003년 10월부터 2005년 8월까지 측정된 CTD 자료를 이용하였다(Table 1). 이 ARGO 뜰개 자료는 최대 수심 800 m(parking depth)에서 약 6일 동안 저층 표류 후 표층으로 상승하면서 수온과 염분을 측정하고, 해수 표면에서 측정된 자료를 위성으로 송신하는 측정 주기 7 일의 자료이다. 본 연구에서는 측정된 수심 700 m 상층의 수온(온위; potential temperature)과 염분 자료를 이용하였다.

본 연구에서 사용한 ARGO 뜰개들은 Sea-Bird CTD 모델 41를 장착한 것으로 CTD 전기전도도 센서의 정확도는 0.005 psu이다. 이 ARGO 뜰개 자료의 염분은 기계적 혹은 생물체의 오염 등에 의해 자료의 오류가 발생할 수 있기 때문에 염분의 변동이 시공간적으로 거의 발생하지 않는 체류 수심층의 자료를 대상으로 참값

Table 1. Inventory of ARGO floats and number of cycles.

ARGO WMO ID	Period of Observation	Cycles	Deployed Point		Last Observed Point	
			Long. ($^{\circ}\text{E}$)	Lat ($^{\circ}\text{N}$)	Long. ($^{\circ}\text{E}$)	Lat ($^{\circ}\text{N}$)
2900298	2003.10.12-2005.07.24	88	130.308	37.497	130.715	35.686
2900299	2003.10.12-2005.08.07	83	130.320	37.880	131.060	37.402
2900300	2003.10.12-2005.08.07	87	130.221	38.114	132.314	38.106

과의 차이를 계산하여 전 수심 자료에 일괄적으로 그 차이만큼 염분을 보정하는 기법(기상연구소, 2002; 오 등, 2004)으로 보정되었다. 이때 염분 보정을 위한 기준 수심은 오 등(2004)이 사용한 수심 700 m와 동일 수심이다. 울릉도 주변 해역의 수심 700 m 층의 염분은 CTD 정밀 측정 결과 평균 34.069 ± 0.0029 psu 이고(기상연구소, 2002), 기후학적 자료인 World Ocean Atlas 2001에서는 34.070 ± 0.0024 psu이다. 이것은 오 등(2004)이 ARGO 뜰개에 의해 측정된 평균 염분 34.069 psu 와도 일치한다. 따라서 본 연구에서는 수심 700 m 층의 현장 염분의 참값을 34.069 psu로 가정하고, 이 염분을 기준으로 보정을 하였다.

ARGO 뜰개 자료로부터 동해 울릉도 주변 해역의 수온과 염분의 3 차원 변동을 기술하기 위하여 편의상 수심 500 m를 기준으로 상하층 구분하였다. 또한 해역에 따라 달리 나타나는 뜰개들의

거동 양태를 크게 울릉난수성 소용돌이를 따라 시계방향으로 회전 운동을 하는 시기(Ulleung Warm Eddy; UWE)와 울릉도 서부 해역에서 뜰개의 움직임이 정체된 시기(No movement; NM)로 구분하고, 계절적으로는 춘계(3월~5월), 하계(6월~8월), 추계(9월~11월), 동계(12월~2월)의 4개 그룹으로 세분하여 분석하였다.

결 과

뜰개의 거동 양상과 울릉도 주변 해역의 물성

ARGO 뜰개에 의해 2003년 10월부터 2005년 8월 사이에 CTD 측정이 동해 남서 해역에서 이루어진 시기의 뜰개 거동을 보면(Plate 1, Fig. 1), 뜰개가 투입된 2003년 10월 이후 약 10 개월간은 세 뜰개 모두 울릉도 주변 해역을 시계방향으로 선회하는 원운동의

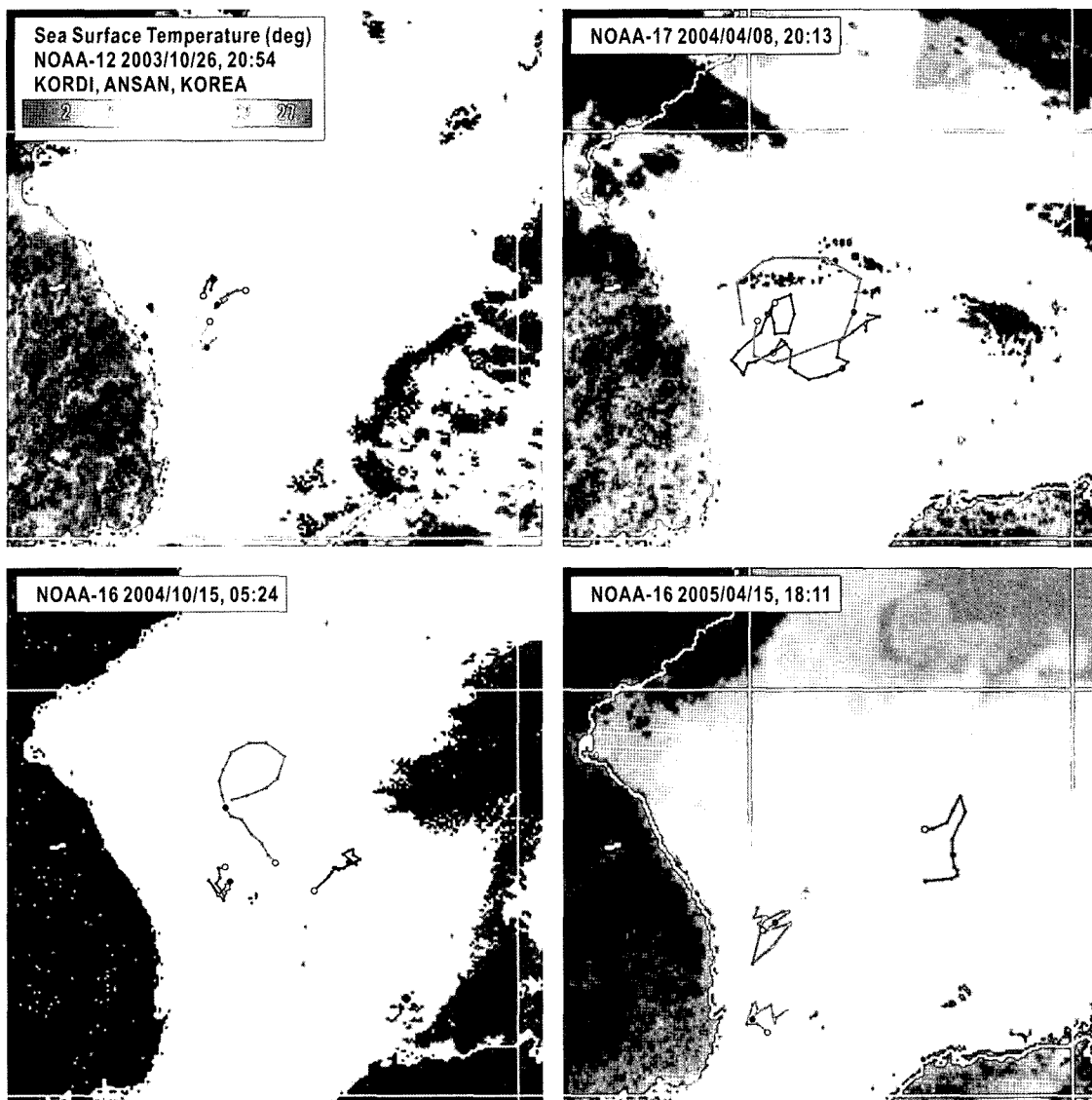


Plate 1. Satellite images from NOAA/AVHRR show the SST and other surface features such as meso-scale warm eddies during the ARGO floats observation period. The observation stations by ARGO floats are indicated by the lines; gray line for ID 2900298, dark gray line ID 2900299, and black line represent ID 2900300 respectively before/after two months at satellite observation time. The solid black circles on the image indicate the observation stations at same time with satellite.

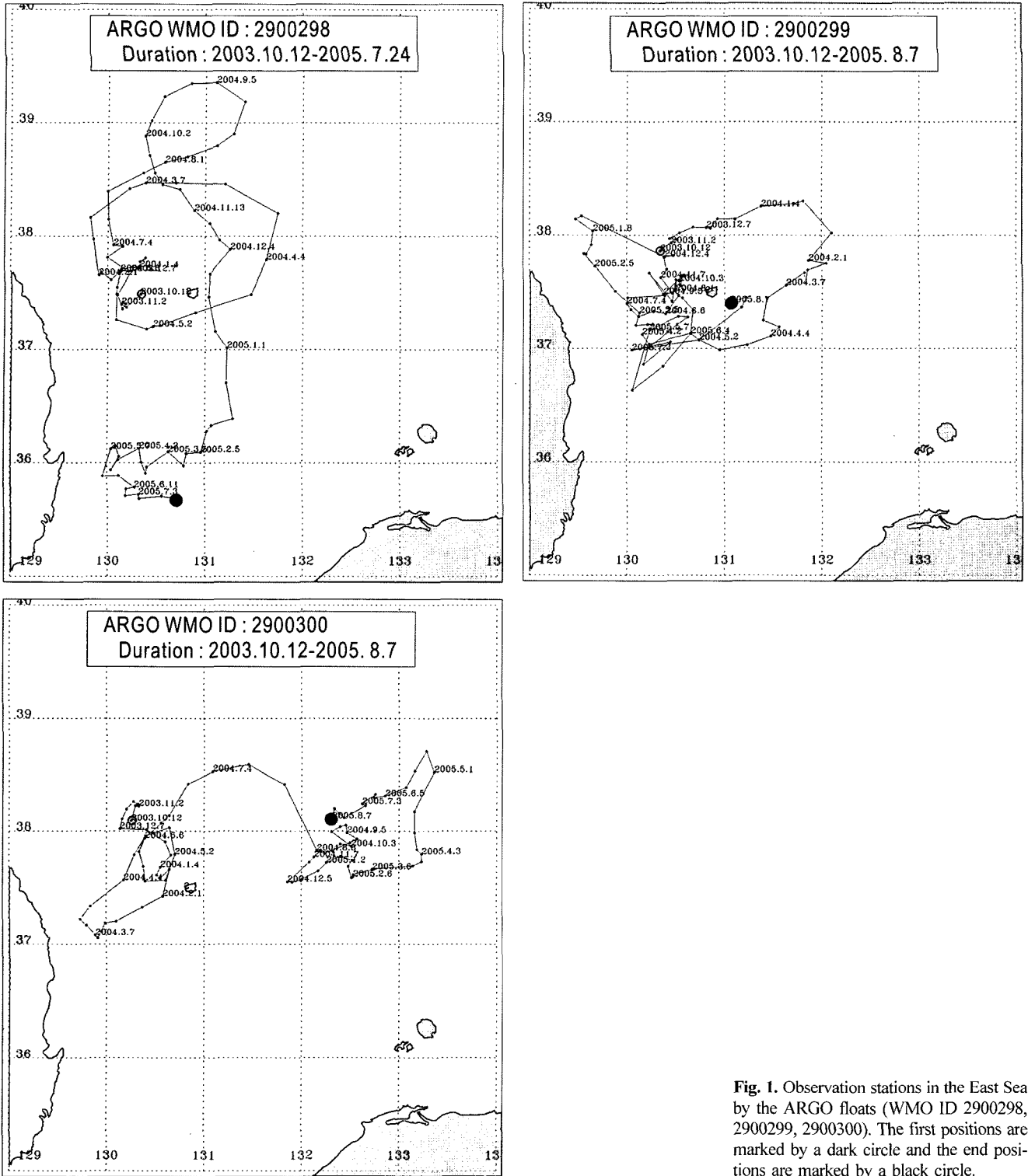


Fig. 1. Observation stations in the East Sea by the ARGO floats (WMO ID 2900298, 2900299, 2900300). The first positions are marked by a dark circle and the end positions are marked by a black circle.

유사한 거동 양상을 보이고 있는데, 이때의 원운동의 동서방향 장경은 약 200 km, 남북방향의 단경은 150 km이다. 그 이후 세 뜰개는 전혀 다른 거동 양상을 보인다. 뜰개 2900298은 반시계 방향의 회전을 하면서 북상을 하다가 2004년 9월 위도 39.4°N에서 남하하기 시작하여 2005년 2월경에는 위도 36°N에 위치하고, 뜰개 2900299는 울릉도 서쪽 해역에서 2004년 12월부터 2005년 2

월 시기를 제외하고는 거의 정체된 모습을 보이고, 뜰개 2900300은 2004년 8월 이후 경도 132°E의 동쪽해역에서 반시계 방향의 회전 운동을 보인다. 측정 기간 내의 울릉분지 부근 해역의 해황은 Plate 1에 보이는 것처럼, 연구기간 동안 계속 존재하는 울릉난수성 소용돌이와 동한난류의 계절적인 변동 그리고 동해 북부해역의 냉수 세력이 울릉도 동편 해역으로 남하하고 있어 대단히

복잡한 양상을 나타내고 있다. 이러한 양상에 따라 동일시기에 인접한 장소에 투하된 3개의 뜰개가 상이한 거동 양상을 보인다.

이 시기에 측정된 수온과 염분의 변동은 Fig. 2(a)에 제시된 것처럼 수심별 계절별 차이가 크다. 계절별 표층 수온은 하계에 평균 $21.5 \pm 2.4^\circ\text{C}$ 로 가장 높으나, 수심 80~200 m 층에서는 다른 계절에 비해 평균 수온이 가장 낮은 특징이 있다. 하계의 이러한 수직적인 수온 구조는 Plate 1에 보이는 뜰개들의 상이한 거동과 관련이 있다. 이것을 살펴보면 뜰개 2900298은 2004년 하계에 울릉난수성 소용돌이의 북쪽 해역으로 부상하고, 뜰개 2900300은 극전선의 사행에 의해 냉수의 영향을 받는 동해 남부 해역에서 표류하였기 때문이다. 표층 염분은 봄에 34.37 ± 0.13 psu로 높고, 가을에 33.42 ± 0.22 psu로 가장 낮다. 고온저염수가 출현하는 Fig. 2(a)의 하계와 추계의 염분 수직 분포에서 염분 최대는 하계에 평균 34.36 ± 0.15 psu로 수심 40 m에 존재하나, 추계는 평균 염분이 하계보다 낮은 34.18 ± 0.14 psu로 수심 120 m 층에 존재한다. 동해 중층에 출현하는 염분최소층은 춘계와 하계에 평균 34.06 ± 0.01 psu, 추계에 평균 34.05 ± 0.02 psu인 해수가 수심 약 300 m 층에 존재하였으나, 동계에는 평균 34.05 ± 0.02 psu인 해수가 수심 약 280 m 층에 존재한다. 수심 500 m 이심에서 염분은 평균(34.069 psu)에 대한 표준편차가 ± 0.001 psu로 작아지면서 염분의 시공간적인 변동이 거의 없는 안정된 수괴를 보인다. 이에 비해 수온은 동일 수층에서 수직적인 변동뿐 아니라 시공간적인 변동도 크게 발생하면서 평균값은 $0.4 \sim 0.6^\circ\text{C}$ 이다.

뜰개에서 측정된 수온 염분의 계절별 평균 분포 구조에서 제시된 것처럼 울릉도 주변 해역의 물성은 Fig. 2(b)의 θ -S diagram에

서 크게 고온고염수, 고온저염수, 그리고 냉수의 수괴로 대별된다. 연구해역 수심 40 m 이천의 표층수는 Fig. 2(a)처럼 계절적으로 수온($5 \sim 25^\circ\text{C}$)과 염분 ($33.03 \sim 34.63$ psu)의 변동이 매우 크며, 표층에 출현하는 고온저염수는 하계에 수온 평균 21.5°C 염분 평균 33.9 psu이고, 추계에 수온 평균 18.5°C 염분 평균 33.4 psu이다. 추계는 하계에 비교해 상대적으로 표층에 저온저염화된 해수가 존재한다. 이러한 하·추계의 표층 수괴의 변동은 대기에 의한 표층 냉각에 의해 수온이 하강하는 것과 하계에 출현한 표층저염수의 확산에 의해 나타난다. 측정 시기 동안에 동한난류의 영향을 받는 수온 15°C 염분 34.3 psu의 고온고염수는 평균적으로 수심 100 m 이천에서 전 계절에 걸쳐 존재한다. 이 고온고염수는 다른 계절에 비해 대마난류(Chang *et al.*, 2004)가 강해지는 하계와 추계에 계절적인 표층 저염수층 아래에서 가장 발달한다. 수심 약 250 m 이천의 상층역(Fig. 2(a))에서 시공간에 따라 넓은 분포 범위를 보이던 대마난류의 고온고염수는 점차 수심이 깊어지면서 수온은 일정한 0.4°C 로 수렴하면서 하강을 하고, 염분은 수심 약 300 m 층을 중심으로 34.06 psu 이하의 염분 최소가 나타난 이후에 34.069 psu으로 수렴한다. 이 염분최소층에서의 수온은 평균 약 $1 \sim 5^\circ\text{C}$ 범위이다. 본 연구해역에서 염분최소층의 수괴는 Shin *et al.*(1998)이 제시한 바와 같이 동해 북부해역으로부터 남하한 해수일 가능성이 높다.

이러한 결과로부터 울릉도 주변 해역의 수괴를 5 가지로 세분할 수 있다(Fig. 2(b)). 첫째는 동해의 수심 500~700 m 층에 존재하는 수온 $0.4 \sim 0.6^\circ\text{C}$, 염분 $34.06 \sim 34.07$ psu의 상부동해고염수(UPJSPW), 둘째는 동해북부 해역의 냉수로부터 유래되어 염분최

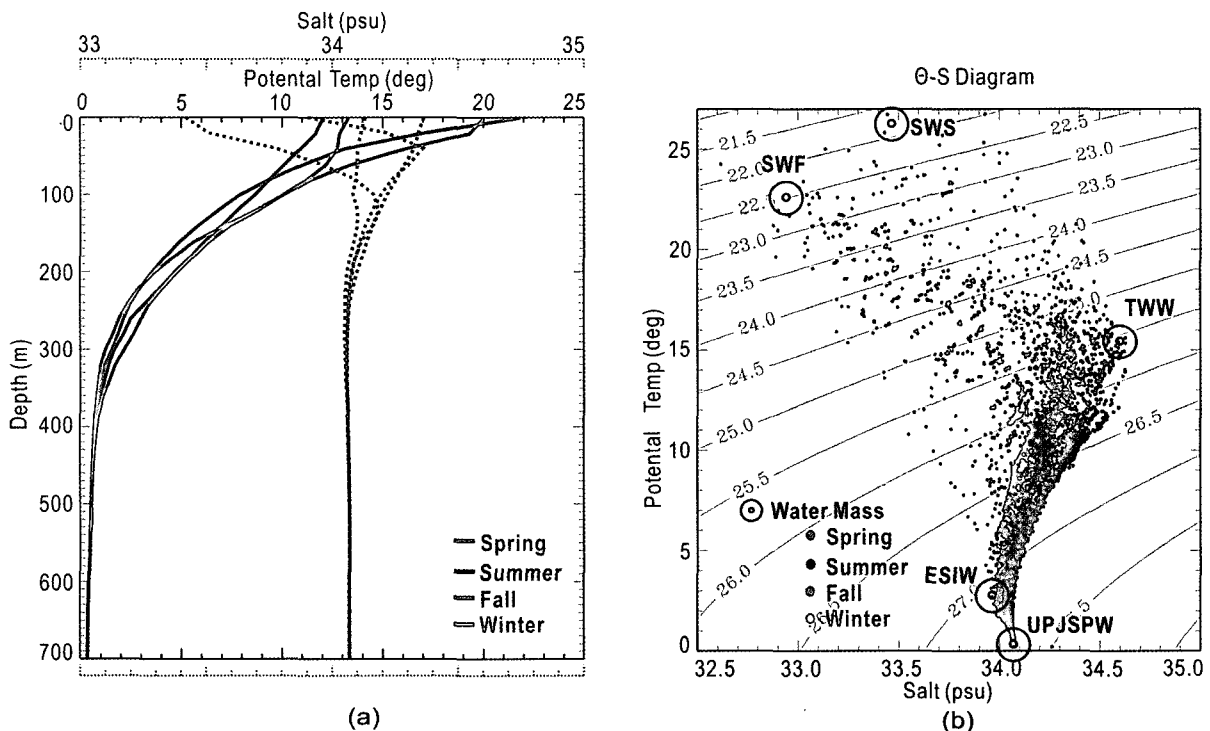


Fig. 2. (a) Vertical profiles of seasonally-averaged potential temperature and salinity. (b) θ -S diagram from ARGO floats. In averaging, the profiles in spring (Mar.-May), in summer (June-Aug.), in fall (Sept.-Nov.), and in winter (Dec.-Feb.) were used. Solid lines represent potential temperature and dotted lines represent salinity profiles respectively. Acronyms such as SWS (Surface Water in Summer), SWF (Surface Water in Fall), TWW (Tsushima Warm Water), ESIW (East Sea Intermediate Water), and UESPW (Upper East Sea Proper Water) UPJSPW (Upper Portion of the Japan Sea Proper Water) indicate water masses.

소층을 갖는 수온 1~5°C 염분 34.06 psu 이하의 동해중층수(ESIW), 셋째는 대마난류의 고온고염수로부터 유래한 평균 수온 15°C 염분 34.3 psu의 대마난류수(Tsushima Warm Water; TWW)이다. 추가적으로 하계에 연구해역의 계절적인 수온 상승과 표층저염수에 의해 TWW가 고온저염화된 하계표층수(Surface Water in Summer; SWS)가 출현하고, 추계에 하계의 동해 남부해역에 출현한 저염수가 동해 내부로 넓게 확산되면서 울릉도 부근 해역이 하계보다 더 저염화되고 수온이 낮은 추계표층수(Surface Water in Fall; SWF)

가 출현한다. 본 연구에서 동해의 수괴 분석을 위하여 자료를 사계절로 구별하여 수괴를 분석한 결과, 울릉도 주변 해역은 하계보다 추계에 더 저염인 표층 수괴가 존재하는 것으로 나타났다.

울릉도 주변 해역의 동해중층수(ESIW)의 분포 구조

본 연구는 울릉도 주변 해역의 물성 분석을 위해 ARGO 뜰개들에 의해 측정된 CTD 자료를 이용하였다. 측정된 수온과 염분은 뜰개 거동상의 측정 시간에 대한 수심으로 Fig. 3에 제시하였

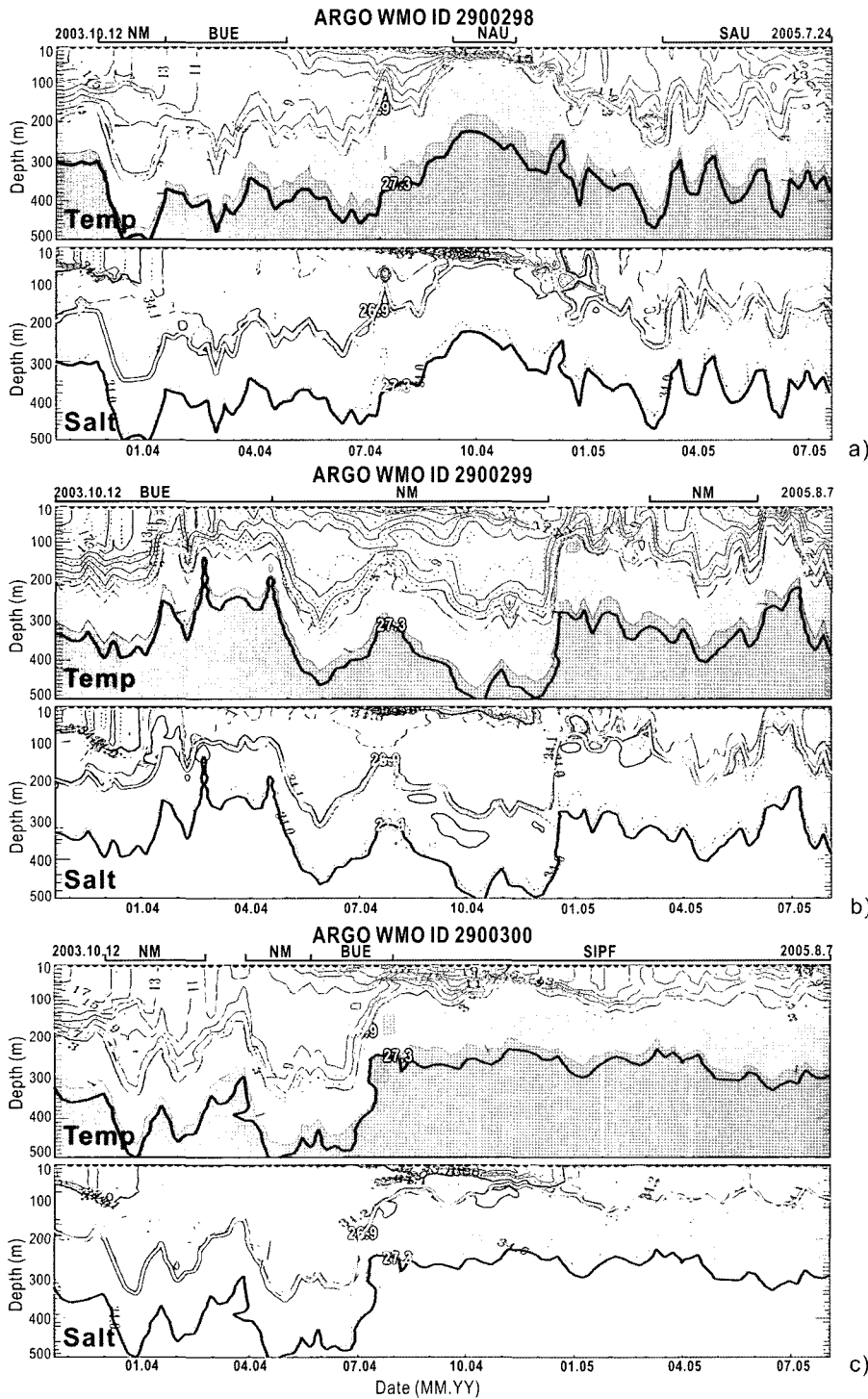


Fig. 3. Vertical distributions of potential temperature and salinity measured by ARGO floats (WMO ID a: 2900298, b: 2900299, c: 2900300). Acronyms such as NM (no-movement), BUE (Boundary of Ulleung Warm Eddy), NPU (Northward Area of the Ulleung Warm Eddy), SAU (Southward Area of the Ulleung Warm Eddy), and SIPF (Southward Intrusion of the Polar Front) indicate the directional movements of the floats. Gray shaded areas represent the salinity lower than 34.06 psu over which the white and the black lines indicate 26.9 and 27.3 σ_{θ} isopycnal lines, respectively.

다. 이 Fig. 3의 결과는 물성의 시공간적인 변동을 모두 포함한다. 기존 연구들(Shin *et al.*, 1998; Kim and Kim, 1999)에 의하면, 동해중층수의 밀도는 26.9~27.3 σ_θ 이다. 동해중층수의 변동을 파악하기 위하여 동해중층수의 경계에 해당하는 등밀도선을 수온과 염분의 결과에 함께 제시한 Fig. 3을 보면, 밀도 26.9 σ_θ 등치선은 동해중층수의 상부 경계에 해당하는 수온 5°C와 염분 34.06 psu에 일치하고, 상층의 복잡한 수괴와 하층의 균질 해수 사이의 경계이다(Fig. 3). 물성 파악을 위하여 상하층간 해수 경계의 변동과 뜰개에서 측정된 정점들을 기준으로 울릉 난수성 소용돌이의 가장자리(Boundary of Ulleung Warm Eddy; BUE)를 따라 흐르는 궤적상의 자료와 비교적 뜰개의 움직임이 작은 시기(No movement; NM)로 나누어 분석하였다. 뜰개가 투하된 2003년 10월 추계의 울릉도 서부 해역의 해황은 Plate 1처럼 고온수인 동한난류의 영향으로 모든 뜰개에서 공통적으로 표층으로부터 수심 약 40 m 층까지 수온 18°C 이상의 고온수가 존재하고, 동 수층에서 염분 33.8 psu 이하의 저염수가 출현한다(Fig. 3).

2003년 10월부터 2005년 8월 사이에 울릉도 부근 해역에서 표류한 뜰개가 울릉도를 중심으로 시계 방향으로 움직이는 초기 측정 정점들(Fig. 1)은 본 연구 해역에 존재하는 울릉난수성 소용돌이의 가장자리 경계부와 비교적 잘 일치한다(Plate 1). 동일한 해역을 표류하면서 시기적으로 다소 차이가 있는 2003년 동계 및 2004년 춘계(ID 2900298, 2900299)와 2004년 하계(ID 2900300)에 측정된 UWE 가장 자리의 물성에 해당하는 Fig. 3의 BUE 단면을 보면, 공통적으로 밀도 26.9 σ_θ 상의 수온과 염분의 변화 구조는 측정 정점이 울릉도의 서부에서 울릉도 동부로 바뀌면서 수온은 하강하고 염분은 증가하는 양상을 보인다. 이 시기에 밀도 26.9 σ_θ 의 분포 수심이 뜰개들에 따라 약 50~200 m 정도 상승한다. 이것은 Plate 1과 Fig. 2(b) 보이는 것처럼 울릉도 서부 해역의 해수가 추계에 나타난 표층의 고온저염의 동한난류 및 이 동한난류에 의해 형성되는 난수성 소용돌이의 영향을 강하게 받고, 동부 해역은 동해북부 해역으로부터 남부해역으로 남하하는 저온고염수의 영향을 받기 때문이다.

본 연구 해역에서 뜰개 거동의 상대적인 정체(Fig. 1)는 울릉 난수성 소용돌이의 중심이 존재(Plate 1)하는 울릉도 서부해역에서 발생한다. 이 뜰개 정체기(NM)의 공통된 물성 변화는 밀도 26.9 σ_θ 의 등치선의 위치가 급격히 침강하는 것이다. 특히 2004년 5월 정체기의 뜰개 2900299와 2900300의 등밀도 26.9 σ_θ 는 최대 200 m 정도 침강한 수심 약 300 m 이심에 존재한다. 이 등밀도선의 상층에는 수온 8~11°C의 균질 해수가 약 170 m의 두께로 존재한다. 이 균질수의 염분은 춘계 및 하계에는 34.2 psu 이상의 고염수이나(Fig. 3(b,c)), 동계에는 34.1 psu로 낮다. 이 염분 차이는 하계에 출현하는 동해남부해역의 저염수(이와 김, 1998; Isobe *et al.*, 2002)가 동해 내부로 확산되면서 하계 및 추계에 표층 하부의 고염수와 희석되는 과정에서 중층의 염분이 낮아진 결과로 보인다. 이러한 저염수의 희석은 뜰개 2900300의 2004년 8월부터 11월초까지 반경 20 km 이내에서 측정되어진 염분 결과(Fig. 3(c))에서 확인할 수 있다. 2004년 8월의 염분을 보면, 표층은 33.4 psu의 저염수가 존재하고, 저염수 하층에는 34.2 psu 이상의 고염수가 존재한다. 시간의 경과에 따라 표층의 하계 저염수는 점차 고염화되면서 분포 두께가 두꺼워지고, 하층의 고염수는 저염수와 희

석에 의해 분포 두께가 얇아지면서 사라진다.

Fig. 3에서 회색으로 표시된 염분 34.06 psu 이하인 염분최소층(Salinity Minimum Layer; SML)은 밀도 26.9~27.3 σ_θ 의 등치선 내에 존재하고, 수온 1~5°C와 일치한다. 이 SML의 물성은 Shin *et al.*(1998)과 Kim and Kim(1999)이 구분한 동해중층수(ESIW)의 물성과 일치한다. SML로 대별되는 동해중층수의 분포 수심은 연구 해역내에서 시공간적으로 변동한다. 동해중층수의 중심층은 측정기간 동안 수심 265±77 m에 존재하고, 두께는 175±32 m이다. 결과적으로 ESIW 층의 두께 변동폭이 ESIW의 중심층의 분포 변동폭보다 작다. 시공간적으로 울릉 난수성 소용돌이가 동해중층수의 상층에 존재하는 뜰개 정체기(NM)에 ESIW의 중심 수심은 평균 350 m 층에 존재하고, 평균적인 ESIW의 분포 수심보다 약 100 m 정도 침강한다. 동해중층수의 하부에 해당하는 밀도 27.3 σ_θ 등치선은 세 뜰개 모두에서 최대 수심 510 m까지 침강한다. 이때 ESIW의 두께는 약 170 m 정도로 ESIW 층의 평균 두께와 거의 차이가 없다(Fig. 3). 이것은 울릉 난수성 소용돌이를 이루는 균질해수의 영향으로 동해중층수의 분포 수심이 전체적으로 침강한 결과이다.

울릉 난수성 소용돌이 이외의 해역에서 나타나는 동해중층수의 변동을 보면, 뜰개가 가장 복잡한 뜰개 2900298의 NAU(Northward Area of the Ulleung Wam Eddy) 단면(Fig. 3)에서 ESIW의 상층 경계는 수심 약 60 m에 위치하나, 동해극전선의 사행에 의해 북부해역의 냉수가 남쪽으로 남하(Plate 1)하는 시기의 울릉도 동부해역에서 측정되어진 뜰개 2900300의 SIFP(Southward Intrusion of the Polar Front) 단면에서 ESIW의 상층 경계는 평균적으로 수심 약 100 m 층에 위치한다. 울릉도 서남부 해역에서 측정된 뜰개 2900298의 SAU(Southward Area of the Ulleung Wam Eddy) 단면에서 ESIW의 상층 경계는 평균 약 170 m 층에 위치한다. 연구해역의 북쪽에서 남쪽 해역으로 갈수록 동해중층수의 존재 수심이 깊어지는 것으로 보아 동해 북부 해역에서 생성된 동해중층수가 동해 남부로 이동하면서 침강하는 것으로 판단된다.

울릉도 주변 해역의 상부동해고염수(UPJSPW)의 분포 구조

울릉도 주변 해역의 수심 500 m 이심의 물성 구조를 파악하기 위하여 ARGO 뜰개로부터 측정되어진 수온과 염분을 수심 500 m, 600 m 그리고 700 m에 대해 Fig. 4에 제시하였다. 수층별 수온 평균값은 뜰개 2900298은 각각의 수심에 대하여 0.60, 0.48, 0.39°C이고, 뜰개 2900299는 0.58, 0.47, 0.38°C이며, 뜰개 2900300은 0.55, 0.45, 0.37°C이다. 수직적인 평균 수온 차는 세 뜰개 모두 수심 500 m와 700 m 사이에 약 0.2°C이다. 이것은 Fig. 4에 제시된 것처럼 동일 수층내에서 수온의 시공간적인 변동은 존재하지만, 수직적인 수온의 구배는 일정하다는 것을 의미한다.

염분은 세 뜰개 모두 수심 500 m 이심에서 시공간적인 변동에 거의 없지만, 수심 500 m 층에서는 울릉 난수성 소용돌이의 경계부와 뜰개의 궤적이 일치하던 시기와 울릉도 서부해역에서 뜰개가 정체되었던 시기에 상대적으로 염분이 낮아진다. 이 시기의 염분은 평균 34.068 psu 보다 약 0.08 psu 정도 낮은 동해중층수에 해당하는 34.06 psu이다. 그러나 수심 600 m와 700 m 층의 염분은 34.069 psu로 일정하다.

수심 500 m 이심에 존재하는 해수는 수온 0.6°C 이하 염분

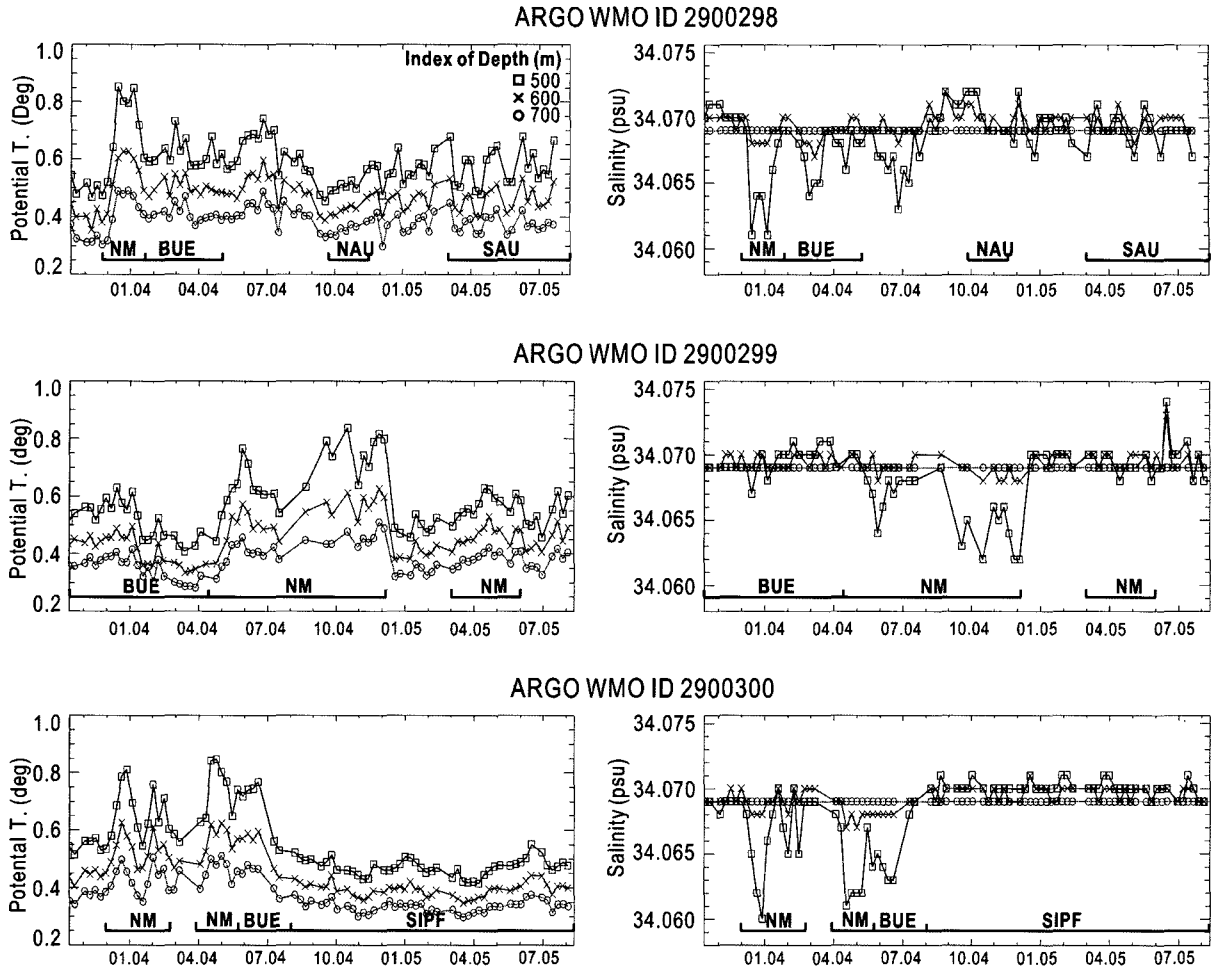


Fig. 4. Time series of potential temperature and salinity at the three depths (500, 600, 700 m) measured by the ARGO floats. Acronyms such as NM (no-movement), BUE (Boundary of Ulleung Warm Eddy), NPU (Northward Area of the Ulleung Warm Eddy), SAU (Southward Area of the Ulleung Warm Eddy), and SIFP (Southward Intrusion of the Polar Front) indicate the directional movements of floats.

34.06~34.07 psu로 Senju and Sudo(1994)가 정의한 상부동해고유수(UPJSPW)에 해당한다. 상부동해고유수의 시공간적인 변동 구조는 연구해역의 염분이 갖는 항염성과 염분 변동폭 0.001 psu 이하로 인해 염분에 의해서는 파악되기 어렵지만, 수온은 염분에 비해 상대적으로 수심에 따른 수온 구배가 크기 때문에 UPJSPW의 분포 구조를 이해하는데 유리하다. 세 개의 뜰개에서 각 수층별 평균 수온은 뜰개의 측정정점이 울릉 난수성 소용돌이 상에 있을 때 주위의 측정정점들보다 상승하고, 이 시기는 Fig. 3에서 동해중층수 하부의 밀도 $27.3 \sigma_{\theta}$ 등치선이 침강하는 시기와 일치한다. 결과적으로 수온 0.4~0.6°C의 상부동해고유수는 본 수층에서 수직적으로 수괴 두께의 변화는 거의 없지만, 상층의 동해중층수의 영향으로 이 수괴의 위치 수심은 변화하게 된다.

토의 및 요약

본 연구에서는 동해 울릉도 주변 해역의 울릉난수성 소용돌이에 의한 물성 구조를 파악하기 위하여 2003년 10월부터 2005년 8월까지 기상연구소의 ARGO 뜰개에 의해 측정되어진 물성 자료

를 분석하였다. ARGO 뜰개 자료의 전처리 과정으로 염분 자료의 보정을 위해 수심 700 m 층의 평균 염분 34.069 psu를 현장 참값으로 가정하고 보정하였다. 본 연구는 제한된 울릉도 주변 해역을 대상으로 하였기 때문에 단일 값을 기준으로 보정이 가능하였으나, 특정한 타 해역이나 연구해역이 광역화되는 경우에는 보정 기준 수심의 상부동해고유수의 물성에 따라 다양한 염분 보정 기준을 설정할 필요가 있다.

물성 분석에 의한 울릉도 주변 해역의 수괴는 기존의 연구자들에 의해 구분되어진 것과 같은 상부동해고유수(Senju and Sudo, 1994), 동해중층수(Kim and Chung, 1984), 대마난류수(이, 1992)가 있다. 또한 하계의 표층에는 담수의 유입영향으로 수온 21~24°C 염분 31.3~34 psu의 표층수(이, 1992; Kang et al., 1997)가 출현한다. 본 연구 결과에 의하면, 이 표층수는 기연구된 하계저염수(Delcroix and Murtugudde, 2002; Isobe et al., 2002)와 유사하며 추계로 이어지는 과정에는 울릉도 주변 동측해역 외해로 넓게 확산되며 또한 표층의 냉각이 심해지면서 하계표층수와 추계표층수로 세분된다. 하계표층수는 수온 21.5°C 염분 33.9 psu 이고, 추계표층수는 수온 18.5°C 염분 33.4 psu이다. 따라서 계절적으로 울

릉도 주변 해역의 수심 700 m 이천의 수괴는 총 5 종류로 세분될 수 있다. 하계에 비해 추계에 저염수를 갖는 본 연구 해역의 결과는 국립수산과학원의 정기정선 관측에 의한 2004년도 8월과 10월의 208 정선과 105 정선의 표층 염분 결과와도 일치한다(국립수산과학원, 2005). 대한해협 부근에 위치한 208 정선의 표층 해수의 염분이 8월에 32.4 psu로 10월의 33.8 psu 보다 저염이었으나, 본 연구 해역에 해당하는 울릉도 부근의 105 정선에서는 8월의 33.4 psu 보다 더 저염인 평균 33.1 psu가 10월의 표층에 존재한다. 이는 하계저염수가 동해 남부의 대한해협부근 해역과 울릉도 주변 해역에 영향을 주는데 시간적인 차이가 있음을 보여준다.

염분최소층을 갖는 수괴로 Kim and Chung(1984)에 의해 제시된 동해중층수는 평균적으로 수심 265 m 층에 존재하며, 수온은 1~5°C 염분 34.06 psu 이하이다. 이 동해중층수의 두께는 시공간적으로 크게 변화하지 않지만, 동해중층수의 분포 수심은 시공간적으로 변화가 크다. 동해중층수 분포 수심은 ESIW의 상부에 수온 8~11°C 염분 34.1 psu 이상인 울릉 난수성 소용돌이가 존재하면서 침강하고, 해황에 영향을 주는 소용돌이가 없는 해역에서도 표층수의 영향으로 변화한다. 본 연구 결과, 북부 해역에서는 동해중층수의 상부경계가 수심 50 m에 위치하나, 남부해역에서는 수심 100 m로 차이가 있다. Kim and Chung(1984)과 Shin *et al.*(1998)은 동해 북부해역에서 기원된 동해중층수가 동해 남부로 이동하는 과정에서 침강하였을 것으로 추정하였으며, 동해 북부해역의 평균 밀도 27.2 σ_θ 의 중층수는 동해 남부 해역에 존재하는 대마난류수 기원의 고온고염수와 울릉 난수성 소용돌이의 깊은 수온약층에 의해 등밀도면(26.9 σ_θ 기준) 하층으로 관입되는 것으로 이해된다.

울릉도 주변 해역에서 나타나는 수심 500 m 이심의 상부동해고유수의 물성 변동은 계절적인 동한난류의 강도 변화에 따라 발생하는 울릉 난수성 소용돌이의 시공간적인 규모와 직접적인 관련이 있다. 울릉도 주변 해역의 상층에 난수성 소용돌이가 출현하면서 동해중층수의 분포 수심이 하층으로 침강하게 된다. 동해중층수의 변화에 의한 상부동해고유수의 변동이 수온에서는 본 연구의 최대 수심인 700 m 까지 나타났으며, 염분에서는 수심 500 m 층까지 나타났다. 표층역의 해황 변화에 의해 상부동해고유수의 염분 변화 수심이 수온보다 깊지 않은 것은 염분최소층의 동해중층수 이심에서는 염분이 평균 34.069 psu로 항염성을 갖기 때문이다.

동해 남서 해역에 존재하는 울릉 난수성 소용돌이의 영향은 본 연구에서 기존의 국립수산과학원의 정선 자료의 분석을 통해 얻어진 울릉 난수성 소용돌이의 최대 수심 500 m(An *et al.*, 1994)를 초과하고, 신 등(1995)이 밀도에 의한 울릉난수성 소용돌이의 구조가 수심 1500 m까지 나타난다고 한 사실과도 비슷한 자료의 분석 수심 700 m까지 나타났다. 결과적으로 울릉 난수성 소용돌이와 같이 해황을 크게 변화시키는 요인이 표층에 작용하는 경우, 상층의 밀도 구조와 유사한 구조가 하층에서도 나타난다. 수직적으로 일정한 밀도 분포 구조를 볼 때, 수심 800 m 층에서 표류하는 ARGO 뜰개의 거동 궤적이 표층에서의 거동과 유사할 것으로 짐작할 수 있다.

기존 연구들(Kim and Chung, 1984; Shin *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1999; Senju, 1999)에 의해 동해중층수가 갖는 물성과 기원이 제시되었고, 특정 시점에 측정된 이 자료들을 분석해 ESIW의

중심 위치 수심이 100~200 m에 존재하는 것이 밝혀졌으나 변동 구조는 자세히 알려지지 않았다. 본 연구에서는 기존의 수산과학원 정선관측망을 통해 관측할 수 없었던 것을 ARGO 뜰개로부터 약 2년 동안 7일 주기로 관측된 CTD 시계열 자료를 분석하여 동해중층수와 상부동해고유수가 상층 해황의 시공간적인 변동에 의해 크게 영향을 받는 사실을 규명하였다. 이때 동해중층수의 수괴 두께는 크게 시공간적으로 변동하지 않으나 그 중심 수심은 상대적으로 크게 변동하는 구조를 보이고 있다.

ARGO 자료의 활용은 전 세계적으로 대단히 빠른 속도로 진행되고 있다. 전 세계 대양과 대륙 주변부 연해에서 생산되고 있는 ARGO 자료는 다양한 방식으로 활용이 가능하며, 특히 우리나라 동해에서 생산되는 그것은 중규모 소용돌이의 특성과 시공간 변동을 이해하는데 아주 소중한 자료원이 된다. 그것은 기존 국립수산과학원 자료가 갖는 관측망과 관측주기(측정 최대 수심 500 m, 측정 주기 2월)의 한계를 극복할 수 있는 대체 수단(7일 측정주기와 수심 10 m 간격 및 측정 최대 수심 700 m)이 될 수 있기 때문이다. 특히 본 연구에서는 울릉도 주변해역에서 빈번히 발생하는 난수성 울릉 소용돌이와 연관된 자세한 해황변동을 이해하는데 유용하게 활용한 사례로서 연구 결과를 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상연구소의 주요사업 “전지구 해양/기후 변화감시 및 예측연구(ARGO)”의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구의 일부는 2002년 충남대학교 자체연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 본 논문을 세밀하게 심사해주신 익명의 두 분 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 국립수산과학원, 2005. 해양조사연보 제53권. 국립수산과학원, 285pp.
- 기상연구소, 2002. 전 지구 해양/기후 변화 감시 및 예측에 관한 연구-ARGO자료 활용도 제고 기반 연구. 기상연구소, 141 pp.
- 김철호, 1996. 동해 북서해역의 표층해황 특성. 한국해양학회지, 8: 215-220.
- 신홍렬, 변상경, 김철수, 황상철, 신창용, 1995. 1992년 울릉도 북서부해역에서 관측된 난수성 소용돌이의 구조 특성. 한국해양학회지, 30: 39-56.
- 이동섭, 김기현, 1998. ^{228}Ra 를 이용한 이상 저염 대마난류수의 기원 추적 연구. 한국해양학회지-바다, 3: 175-182.
- 이석우, 1992. 한국근해해상지. 집문당, pp 128-131.
- 오경희, 박영규, 석문식, 2004. 자동수직물성관측뜰개(ARGO)로 얻은 수온과 염분의 정확도와 안정도. 한국해양학회지-바다, 9: 204-211.
- An, H. S., K. S. Shim, and H. R. Shin, 1994. On the warm eddies in the southwestern part of the East Sea (the Japan Sea). *J. Oceanol. Soc. Korea*, 29: 152-163.
- 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. R. Centurioni, and W. J. Gould, 2001. The evaluation

- of salinity measurements from PALACE floats. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**: 1258–1266.
- Böhme, L., and U. Send, 2005. Objective analyses of hydrographic data for referencing profiling float salinities in highly variable environments. *Deep-Sea Res. II*, **52**: 651–664.
- 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. *Progress in Oceanography*, **61**: 105–156.
- Chapman, P., S. F. DiMarco, R. E. Davis, and A. C. Coward, 2003. Flow at intermediate depths around Madagascar based on ALACE float trajectories. *Deep-Sea Res. II*, **50**: 1957–1986.
- Delcroix, T. and R. Murtugudde, 2002. Sea surface salinity changes in the East China Sea during 1997–2001: Influence of the Yangtze River. *J. Geophysical Res.*, **107**: 8008, doi:10.1029/2001JC000893.
- Durand, F., and G. Reverdin, 2005. A Statistical Method for Correcting Salinity Observations from Autonomous Profiling Floats: An ARGO Perspective. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, **22**: 292–301.
- Fischer, J., and F. A. Schott, 2002. Labrador Sea Water Tracked by Profiling Floats—From the Boundary Current into the Open North Atlantic. *J. Physical Oceanography*, **32**: 573–584.
- Freeland, H. J., and P. F. Cummins, 2005. Argo: A new tool for environmental monitoring and assessment of the world's oceans, an example from the N.E. Pacific. *Progress in Oceanography*, **64**: 31–44.
- Guinehut, L., P. Y. Le Traon, G. Larnicol, S. Philipps, 2004. Combining Argo and remote-sensing data to estimate the ocean three-dimensional temperature fields—first approach based on simulated observations. *J. Marine Systems*, **46**: 85–98.
- Isobe, A., M. Ando, T. Watanabe, T. Senjyu, S. Sugihara and A. manda, 2002. Freshwater and temperature transports through the Tsushima-Korea Straits. *J. Geophysical Res.*, **107**: doi:10.1029/2000JC000702.
- Iwasaka N., T. Suga, K. Takeuchi, K. Mizuno, Y. Takatsuki et al., 2003. Pre-Japan-ARGO: Experimental Observation of Upper and Middle Layers South of the Kuroshio Extension Region Using Profiling Floats. *J. Oceanography*, **59**: 119–127.
- Iwao, T., M. Endoh, N. Shikama, and T. Nakano, 2003. Intermediate circulation in the northwestern North Pacific derived from subsurface floats. *J. Oceanography*, **59**: 893–904.
- Kang, D. J., S. C. Chang, H. K. Suk, K. R. Kim, H. H. Gi, 1997. Distribution of ¹³⁷Cs and ^{239, 240}Pu in the Surface Waters of the East Sea (Sea of Japan). *Marine Pollution Bulletin*, **35**: 305–312.
- Kim, K. and J. Y. Chung, 1984. On the salinity-minimum and dissolved oxygen-maximum layer in the East Sea (Sea of Japan). In: Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Seas, edited by Ichiye, T., Elsevier Science Publisher, Amsterdam, pp 55–65.
- Kim, K., Y. G. Kim, Y. K. Cho, M. Takematsu, and Y. Volkov, 1999. Basin-to-Basin and Year-to-Year variation of temperature and salinity characteristics in the East Sea (sea of Japan). *J. Oceanography*, **55**: 103–109.
- Kim, Y.-G. and K. Kim, 1999. Intermediate waters in the East/Japan Sea. *J. Oceanography*, **55**: 123–132.
- Lavender, K. L., W. B. Owens, and R. E. Davis, 2005. The mid-depth circulation of the subpolar North Atlantic Ocean as measured by subsurface floats. *Deep-Sea Res. I*, **52**: 767–785.
- Ohno, Y., Y. Sato, and N. Iwasaka, 2004. The mixed layer depth in the North Pacific as detected by the ARGO floats. OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04, 1491–1495.
- Oka, E. and K. Ando, 2004. Stability of temperature and conductivity sensors of ARGO profiling floats. *J. Oceanography*, **60**: 253–258.
- Ro, Young Jae, 2001. Interactions of Coastal Boundary Currents with Mesoscale Eddies in the East Sea, pp 75–88 in Recent Advances in Marine Science and Technology edited by N. Saxena, Pacon International 2001, Isbn 0-9634343-4-9.
- Senjyu, T. and H. Sudo, 1994. The upper portion of the Japan Sea Proper Water; its source and circulation as deduced from isopycnal analysis. *J. Oceanography*, **50**: 663–690.
- Senjyu T., 1999. The Japan Sea intermediate water; Its characteristics and circulation. *J. Oceanography*, **55**: 111–122.
- Shin, C. W., S. K. Byun, C. S. Kim, and Y. H. Seung, 1998. Southward intrusion of the East Sea Intermediate Water into the Ulleung basin: Observations in 1992 and 1993. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **33**: 146–156.
- Shimizu, Y., T. Iwao, I. Yasuda, S-I, Ito, T. Watanabe, K. Uehara, N. Shikama, and T. Nakano, 2004. Formation Process of North Pacific Intermediate Water Revealed by Profiling Floats Set to Drift on 26.7s Isopycnal Surface. *J. Oceanography*, **60**: 453–462.
- Wong, A. P. S., G. C. Johnson, and W. B. Owens, 2003. Delayed-Mode Calibration of Autonomous CTD Profiling Float Salinity Data by -S Climatology. *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, **20**: 308–318.
- Yanagimoto, D., and K. Taira, 2003. Current measurements of the Japan Sea proper water and intermediate water by ALACE floats. *J. Oceanography*, **59**: 359–368.

2005년 6월 28일 원고접수

2006년 2월 20일 수정본 채택

담당편집위원: 이재학