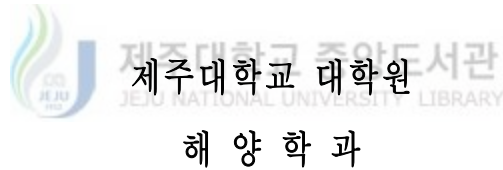


박사학위논문

Argo 뜰개 자료의 검증과
이를 이용한 동해 남부 해역의 중심층순환 연구



오 경 희

2005년 6월

Argo 뜰개 자료의 검증과
이를 이용한 동해 남부 해역의 중심층순환 연구

指導教授 方益燦

吳京姬

이 論文을 理學 博士學位 論文으로 提出함



2005년 6월
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

吳京姬의 理學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長

高有峰



委

員

유영호



委

員

성영호



委

員

백영규



委

員

방익찬



濟州大學校 大學院

2005년 6월

Assessment of profiles
and intermediate to deep level circulation of
the southern part of the East Sea from Argo floats

Kyung-Hee Oh

(Supervised by Professor Ig-Chan Pang)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE
OF DOCTOR OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

June 2005

목 차

List of Figures	i
List of Tables	viii
Summary	x
I. 서 론	1
II. Argo 뜰개에서 얻은 수온·염분 자료의 정확도 검증	6
1. 연구배경	6
2. 자료 및 방법	9
2.1. 자료	9
2.2. 방법	15
3. 결 과	16
3.1. 정선관측 자료와 뜰개 자료의 비교	16
3.2. 뜰개간 상호 비교	28
3.3. 염분의 시간적 변동	32
3.4. 염분보정	39
4. 토 의	45
III. Argo 뜰개 자료를 이용한 동해 남부 해역의 중층순환	47
1. 연구배경	47
2. 자료 및 방법	50
3. 결 과	55
3.1. 유속오차	55
3.2. 평균유속	60

3.3. 유속의 정량적 비교	64
3.4. 중층순환	67
3.4.1. 평균해류	67
3.4.2. 동해 남서부 해역	70
3.4.3. 동해 남동부 해역	75
3.4.4. 일본분지 남부 해역	78
4. 토 의	78
IV. Argo 뜰개 자료를 적용한 여름철 동해 남부 해역의 북향물질수송과 열수송	81
1. 연구배경	81
2. 자료 및 방법	82
3. 결 과	84
3.1. 물질수송과 순환	84
3.1.1. 울릉분지	84
3.1.2. 38-40°N 단면	94
3.2. 열수송	103
4. 토 의	105
V. 결 론	108
참고 문헌	112
요 약	118
감사의 글	120

List of Figures

Figure 1-1. Operating cycle of an Argo float.	2
Figure 1-2. Sketch of Argo float (APEX type).	2
Figure 1-3. Horizontal distribution of data from Argo floats in the southern part of the East Sea.	5
Figure 2-1. (a) Horizontal map of salinity on potential temperature 0.4°C surface in July 1994. (b) Potential temperature–salinity diagram obtained in the Ulleung Basin from 1994 to 1996 (from Min, 2002).	8
Figure 2-2. Duration of Operation of the floats launched into the East Sea by KORDI (Korea Ocean Research & Development Institute) and METRI (Meteorological Research Institute) since 1998 listed in Table 2-1. X and Y axes denote observation period in Julian days and WMO ID of the floats, respectively.	13
Figure 2-3. Monthly distribution of float data shown in Fig. 2-2.	14
Figure 2-4. Locations of CTD profiles by the <i>R/V Roser Revelle</i> and <i>Professor Khromov</i> (closed circle), and by Argo floats (square). When the distance between the location of a CTD profile and that of is less than 13 km an Argo profile. They are paired and numbered from 1 to 25.	17
Figure 2-5. Vertical profiles of (a) potential temperature and (b) salinity from CTD and float data of the pairs in Fig. 2-4.	19
Figure 2-6. Vertical profiles of (a) potential temperature and (b) salinity between 500 m and 700 m depth of the pairs in Fig. 2-4. Solid and dotted lines denote CTD and float data, respectively.	21
Figure 2-7. Differences in (a) potential temperature and (b) salinity between CTD and float of each pair shown in Fig. 2-6.	22
Figure 2-8. Vertical profiles of temperature and salinity from CTD (SBE	

911 <i>plus</i>) and Floats observed at similar time and at similar location. (a) WMO ID 2900205 (12-Sep-2002), (b) WMO ID 2900205 (30-May-2003), (c) WMO ID 2900207 (12-Sep-2002) and (d) WMO ID 2900207 (30-May-2003).	25
Figure 2-9. Differences of salinity (a, c, e, g) and temperature (b, d, f, h) between the data from CTD and Floats, (a) and (b) WMO ID 2900205 (12-Sep-2002), (c) and (d) WMO ID 2900205 (30-May-2003), (e) and (f) WMO ID 2900207 (12-Sep-2002), and (g) and (h) WMO ID 2900207 (30-May-2003) in Fig. 2-8.	26
Figure 2-10. Horizontal distributions of (a) potential temperature and (b) salinity at 700 m depth from CTD data by the <i>R/V Roser Revelle</i> and <i>Professor</i> from June 25 to August 8, 1999 in the East Sea.	27
Figure 2-11. Trajectories from floats, WMO ID's 2900225, 2900209, 2900205 and 2900207.	29
Figure 2-12. 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.	29
Figure 2-13. Differences in (a) salinity and (b) temperature 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.	31
Figure 2-14. The time series of salinity on potential temperature 0.4°C surface from WMO ID's 2900225, 2900205, 2900207, 2900209, 2900299, 2900302, 5900194, 2900325 and 2900326. X and Y axes denote the number of profiles and salinity, respectively. The dotted line represents mean value of salinity from CTD data in the southern part of the East Sea.	33

Figure 2-15. The same as Fig. 2-14, but for WMO ID's 2900201, 2900202, 2900203, 2900204 and 2900298.	34
Figure 2-16. The same as Fig. 2-14, but for WMO ID's 2900202, 2900203, 2900204, 5900195, 2900298, 2900300, 2900302, 2900328 and 2900329.	36
Figure 2-17. The time series of salinity on potential temperature 0.4°C surface from (a) WMO ID 2900204 and (b) ONR CTD data.	37
Figure 2-18. (a) Trajectory of WMO ID 2900204 float, and (b) stations of CTD by ONR.	38
Figure 2-19. The same as Fig. 2-14, but for WMO ID's 5900196, 2900170 and 2900171.	40
Figure 2-20. Deviation of differences between the salinity from floats and average value of salinity from CTD data. All the data in (a) Fig. 2-14, (b) Fig. 2-15, (c) Fig. 2-16 and (d) Fig. 2-19 are used.	40
Figure 2-21. 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.	42
Figure 2-22. Θ -S diagrams from WMO ID 2900201. Asterisks denote data from the first five profiles and dots from the remaining profiles. Θ -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.	43
Figure 2-23. Vertical profiles from CTD and floats in Fig. 2-6(b). Dotted and solid lines denote data from floats and CTD, respectively. Dark grey lines are shown after the calibration. Light grey line represents average value of salinity from CTD data in the southern part of the East Sea.	44
Figure 3-1. Bathymetry of the East Sea. Abbreviations for the area are as	

follows; DI: Dok Island, JB: Japan Basin, KP: Korea Plateau, KS: Korean Straits, OS: Oki Spur, SS: Soya Straits, TS: Tsugaru Straits, TTS: Tatar Straits, UB: Ulleung Basin. UI: Ulleung Island, UIG: Ulleung Interplain Gap, YB: Yamato Basin and YR: Yamato Rise. 48

Figure 3-2. Schematic map for surface currents in the East Sea (after Naganuma, 1977). C: Cold-water regions, W: Warm-water regions, H: relatively high temperature regions, NB: Nearshore Branch, LCC: Liman Current, EKWC: East Korean Warm Current, NKCC: North Korean Cold Current, S: Soya straits, SPF: Subpolar Front, T: Tsugaru straits. 49

Figure 3-3. Vertical diagram of the float. DT: Time between the beginning of descent and the beginning of ascent, UT: Time between the beginning of ascent and the beginning of descent, Sat: Surfacing time, Ss₁: First position determination after surfacing, Sf_n: Last position determination before descent, Ss₁~Sf_n: Drifting position and time at the surface, Sf₁~Ss₁: Observation current velocity estimates at the parking depth from the float data, Ps~Pf: True current velocity estimates at the parking depth from the float data, at: ascent time, dt: descent time, (1): Error due to drifting on the surface, (2): Error caused by drifting during ascent and descent. 52

Figure 3-4. Number of data points in 0.5°×0.5° bin. A bin with 3 more data points are made with a gray stick whose height represents the number of data. Triangle means less than 3 data points. 54

Figure 3-5. Histogram of the time (a) between the surfacing and the first fix, (b) between the last fix and the beginning of descent. 56

Figure 3-6. Difference of distance between recorded positions and calculated positions by linear interpolation. 59

Figure 3-7. Estimated error ratio in case of the error(1) in Fig. 3-3. 59

Figure 3-8. Schematic of the error (2) estimation for the period from the

ascent/descent time. Sat: Surfacing time, V_t : True current velocity at the parking depth, V_p : Current velocity at the parking depth, which is estimated based on surfacing time and positions.

.....	61
Figure 3-9. Estimated error ratio in case of the error(2) in Fig. 3-3.	61
Figure 3-10. Velocity vector estimates at the parking depths using 2325 displacement data from 41 floats. Different color means different parking depth.	62
Figure 3-11. Mean velocity estimates at each bin. Results from bins containing three or more data are shown, using 93% of the total displacement data. Arrows are contoured at the center of each bin.	63
Figure 3-12. Mean current vectors observed below 600 m depth in the East Sea (from Chang <i>et al.</i> , 2002). The measurements are based on Chang <i>et al.</i> (2002) in the Ulleung Basin, Kitani (1987) in the Yamato Basin, Takematsu <i>et al.</i> (1999) in the Japan Basin, and Lie <i>et al.</i> (1989) at position L. A1~A13 represents the mean current vectors from the Argo floats in Fig. 3-11.	66
Figure 3-13. Mean velocity estimates at each bin along with their standard deviation ellipses and the bottom relief in color shadings. Arrows and ellipses are contoured at the center of each bin.	68
Figure 3-14. Schematic of intermediate level circulation pattern inferred from the Argo floats data over the southern part of the East Sea.	69
Figure 3-15. Trajectories from floats, Telecom ID's 18418 and 18419, and WMO ID 2900443. Filled gray circles denote the deployment points.	72
Figure 3-16. Trajectories from floats, WMO ID's 2900202, 2900298, 5900193, 2900302, 2900328, 2900329 and 2900299. The same as Fig. 3-15.	73
Figure 3-17. Trajectories from floats, WMO ID's 2900206, 2900327, 2900209, 2900225, 2900205, 2900207, 2900203, 2900326, 5900195 and 5900196.	

The same as Fig. 3-15.	74
Figure 3-18. Trajectories from floats, Telecom ID's 18418 and 18419, WMO ID's 2900204, 2900205, 2900207 and 2900203. The same as Fig. 3-15.	77
Figure 4-1. Stations CTD from the <i>R/V Roser Revelle</i> and <i>Professor Khromov</i> from June 25 to August 8, 1999. Geostrophic calculations were performed along the gray line.	83
Figure 4-2. Vertical distributions of geostrophic velocity of section A, section L, section H and section F. Gray color means negative value. ..	87
Figure 4-3. Volume transports across the section A, section L, section F and section H as a function of potential temperature. Transports are determined over potential temperature intervals of 0.1°C.	88
Figure 4-4. Volume transports across the section A, section L, section F and section H as a function of potential temperature below 1°C. Transports are determined over potential temperature intervals of 0.1°C.	89
Figure 4-5. Volume transports across the section A, section L, section H and section F around the Ulleung Basin.	90
Figure 4-6. Water masses transports of across the section A, section L, section F and section H in the Ulleung Basin.	93
Figure 4-7. Distribution of geostrophic velocity to 38-40°N section. Gray color means negative value.	95
Figure 4-8. Mass transports across the section A, section B, section C and the sum as a function of potential temperature. Transports are determined over potential temperature intervals of 1°C	96
Figure 4-9. Mass transports across the section A, section B, section C and the sum as a function of potential temperature below 1°C. Transports are determined over potential temperature intervals of 0.1°C.	97
Figure 4-10. Meridional mass transports across the 38-40°N section as a function of (a) depth. (b) vertical profile of potential temperature	

averaged at along the 38-40°N section. Meridional mass transports across the 38-40°N section as a function of (c) potential temperature interval of 1°C and (d) 0.1°C.	100
Figure 4-11. Ekman transport and mean wind stress estimated from ECMWF wind data from July 1 to 10, 1999.	102
Figure 4-12. Vertical profile of heat transport per unit depth($10^{12}W/M$) across the 38-40°N section.	104
Figure 5-1. Distribution of volume transport with the flow pattern in the southern part of the East Sea.	111



List of Tables

Table 2-1. Characteristics of the floats launched into the East Sea by KORDI from 1998 to 2004 and METRI from 2001 to 2004. Parking depth is the descending (or drifting) depth of a float (point 2 in Fig. 1-1). Cycle is a period of float (from point 1 to point 6 in Fig. 1-1). DT (Down Time)(from point 1 to point 3 in Fig. 1-1) and UP (Up Time)(from point 3 to point 6 in Fig. 1-1) is a moving time of float at parking depth and surface. RT (Repetition rate) means time interval transmitting data. Floats made with grey shading had or have been working for more than one year and used in the estimate of accuracy and stability	10
Table 2-2. Accuracy of Sea-Bird CTD's Model 41	15
Table 2-3. Locations and distances of profile pairs of CTD and Float profiles shown in Fig. 2-4	18
Table 2-4. Dates and locations of CTD and Float (WMO ID's 2900205 and 2900207) profiles	23
Table 2-5. Statistics of the differences in temperature and salinity between the data from CTD and Float, WMO ID's 2900205 and 2900207	24
Table 2-6. Dates and locations of launch and profiles by floats, WMO ID's 2900225 (Float 1), 2900209 (Float 2), 2900205 (Float 3) and 2900207 (Float 4)	30
Table 2-7. Statistics of the differences in temperature and salinity between the data from Float 1 and Float 2, and Float 3 and Float 4	30
Table 3-1. Number of floats in operation and displacement data in each year between October 1998 and December 2004	51
Table 3-2. The ARGOS system uses the "location classes" to represent the	

accuracy of calculated locations	53
Table 3-3. Compared with the velocity of the current meters and Argo floats in Fig. 3-12	65
Table 4-1. Water masses and potential temperature range in Ulleung Basin	91



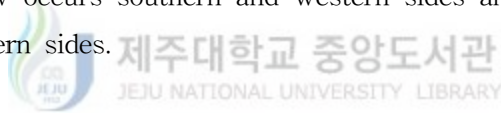
SUMMARY

Assessment of profiles and intermediate to deep level circulation of the southern part of the East Sea from Argo floats

This study consists of two parts. In the first part, accuracy and stability of profiles from Argo floats deployed into the southern part of the East Sea have been assessed. Autonomous profiling CTD floats (Argo floats) are a useful tool for observing the oceans. However, it is impossible to perform post-deployment calibration of the CTD sensor 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. Variations in salinity in the intermediate level of the East Sea is smaller than the accuracy of salinity data required by the international Argo Program, which is 0.01. The assessment of the credibility of salinity data from the floats deployed in the East Sea are performed using three independent methods while considering the East Sea as a constant salinity bath. The methods utilized here are 1) comparison of high quality CTD data and float data obtained at similar locations at similar time, 2) mutual comparison of float data obtained at similar locations at similar time, and 3) investigation of long-term stability and accuracy of salinity data. All three methods show that without any calibration, the salinity data could satisfy the accuracy criterion by the Argo Program.

In the second part, the circulation of the southern East Sea is investigated using trajectory data from Argo floats (PALACE, APEX and PROVOR) and hydrography CTD data. The surface circulations are controlled by the Tsushima Warm Current, while the subsurface to deep circulations are caused by its own thermohaline circulation. A velocity section across 38–40°N shows that barotropic components are dominant especially below the thermocline, since the vertical stratification is very low. The velocity section

reflects the meander of the flow along the polar front well. The total northward mass and heat transports across the section are 1.7 Sv and 0.16 PW, respectively. These numbers are smaller than those estimated at the Korea Strait by 30 to 40%, because the CTD section does not capture the strong and narrow currents along the Korean and Japanese coasts. The main flow patterns over the southern part of the East Sea at the intermediate levels, which is consistent with moored current meter data obtained at a few locations, is strongly controlled by the bottom topography. The dominant components in the flow are 1) a anticyclonic circulation around the Korea Plateau and Ulleung Basin, which introduces cold water from the Japan Basin into the Ulleung Basin through the Ulleung Interplain Gap, 2) a cyclonic circulation along the Korean coast and the continental break around the Ulleung Basin and the western side of Oki Spur to the Yamato Rise or the Yamato Basin, and 3) an eastward flow along the Polar Front. Around the UB, the net inflow occurs southern and western sides and the net outflow at northern and eastern sides.



Key Word : Autonomous profiling CTD floats (Argo floats), Accuracy, Intermediate/deep level circulation, Northward mass transport, Heat transport, East sea

I. 서 론

사회경제활동에 직접적으로 영향을 미치는 기후 변화를 예측하기 위해서는 해양현상에 대한 정확한 예측이 필요하며 이에 따라 전 지구 규모의 해양기상관측 시스템이 요구된다 (Argo brochure, 1999). 해양의 표층은 인공위성을 이용한 실시간 관측이 가능하지만, 정확한 해황과 기후 예보에 중요한 해양의 중심층 물성구조는 일반적인 방법으로는 실시간 관측이 불가능하다. 전 세계 해양을 중심층까지 실시간으로 관측하기 위하여 유네스코 산하의 정부간해양학위원회 (Intergovernmental Oceanographic Commission)와 세계기상기구 (World Meteorological Organization)에서는 국제 Argo 프로그램 (이하, Argo 프로그램)을 시작하였다 (Argo Science Team, 2000). Argo 프로그램은 2001년부터 2006년까지 전 세계 대양에 3000여대의 뜰개를 투하하는 것을 목표로 하고 있으며, 우리나라를 포함하여 19개국이 참여하고 있다.

Argo 프로그램에서 사용되는 관측 장비는 인공위성을 이용한 위치추적 기능에 해수물성 기능을 포함한 자동수직물성관측 뜰개 (Autonomous profiling CTD floats)인데, 보통 Argo (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 뜰개 (이하, 뜰개)라 불린다.

해양에 투하된 뜰개는 제작 시 지정된 시간에 따라 표층에서 특정깊이까지 침강하여 해류를 따라 이동하다가 지정된 시간 후에 표층으로 상승하는 수직운동을 한다 (Fig. 1-1). 뜰개 내부에 있는 유압펌프를 이용하여 아래 부분에 있는 부력의 부피를 조절하면서 지정된 시간에 맞춰 상승과 하강을 한다. 뜰개 자체의 밀도를 변화시키면서 밀도가 작을 때는 표층에, 밀도가 클 때는 지정된 깊이에 머무른다. 상승하는 동안에 뜰개의 머리 부분에 부착된 CTD 센서를 이용하여 수심에 따른 해수물성자료 (수온, 염분 등)를 관측한다 (Fig. 1-2). 표층에 도달한 뜰개는 지정된 시간동안 (8~12시간) 표류하다가 다시 침강한다. 보통 10일을 주기로 수직왕복운동을 하며 4~5년간 해양조사를 수행한다. 뜰개는 표층에서 표류하는 동안 관측한 자료를 ARGOS 위성으로 전송한다. ARGOS사에서는 수집된 뜰개 자료를 Argo 프로그램 참여자에게 실시간으로 배포하고 있으며, Argo 프로그램에서는 누구나 쉽게 이용할 수 있도록 전 세계 대양에서 수집된 뜰개 자료를 Argo 자료센터를 통해 제공하고 있다.

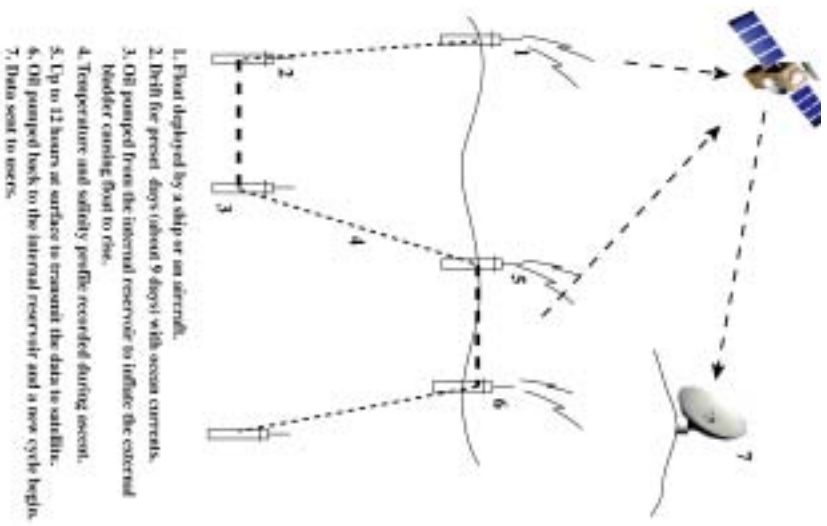


Figure 1-1. Operating cycle of an Argo float.

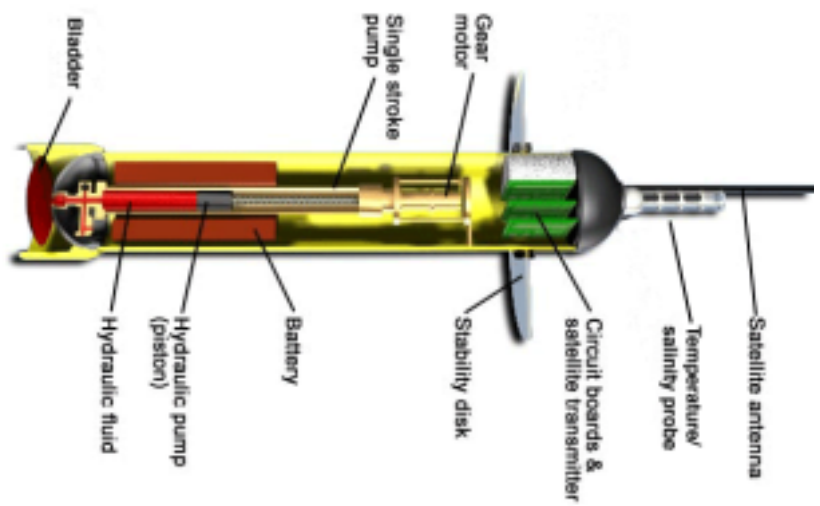


Figure 1-2. Sketch of Argo float (APEX type).

뜰개 자료에는 해수물성자료와 뜰개가 표층에서 표류하는 동안 위성이 파악한 뜰개의 위치자료가 포함되어 있다. 이 위치자료를 이용하여 체류수심에서의 해류를 추정할 수 있다 (Mizuno, 2000). 뜰개는 최대 2000 m까지 침강할 수 있으며, 각 해역의 특징에 맞게 설계된다. 한국해양연구원에서 투하한 뜰개는 수심의 기록이 심한 동해에서는 700 m에서, 남극해에서는 2000 m에서 체류하도록 설계하였다.

현재 동해 남부 해역에서는 한국해양연구원과 기상연구소에서 투하한 37대의 뜰개가 활동 중이며, 활동이 중지된 뜰개를 포함하면 1998년 이후 51대의 뜰개로부터 2500개 이상의 해수물성자료와 위치자료가 생산되었다 (Fig. 1-3).

뜰개의 해수물성자료를 활용하는데 있어 중요시 되고 있는 것 중 하나는 부착된 센서의 오류에 대한 검증이다. 뜰개는 장기간 해양에서 생활하기 때문에 부착된 센서에 대한 직접적인 검증이 불가능하다. 그러므로 뜰개로부터 얻은 해수물성자료의 이용에 앞서 자료에 대한 검증과 보정이 필요하다. 기존 연구에 의하면 뜰개에 부착된 CTD의 수온 센서는 비교적 안정적인데 반해, 전기전도도 센서는 계통오차나 시간에 따른 표류 등의 문제를 갖고 있다 (Davis 1998; Bacon *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2003; Oka and Ando, 2004; Riser and Swift, 2003).

동해에서 활동하는 뜰개에서 얻은 수온 자료의 정확도는 동해 중심층의 수온 변동폭 안에 포함되기 때문에 수온의 정확도는 비교가 어렵다. 반면 동해 중심층의 염분은 시공간적인 변화가 거의 없는 안정적인 분포를 보이기 때문에 뜰개 자료의 염분 보정에 적합하다. 동해 북부 해역에서 수집된 일부 뜰개 자료에 대해 검증을 수행한 바 있으나 (기상연구소, 2002), 뜰개 자료의 시간에 따른 장기간 변동에 대해서는 아직 보고 된 것이 없다. 따라서 이 논문에서는 검증된 자료와의 비교와 시간에 따른 염분의 장기간 변동을 통해 뜰개 자료의 정확성과 안정도를 검증하였다.

뜰개 자료에서 추출된 위치자료를 이용함으로써 유속을 추정할 수 있다. 뜰개는 외부 조건을 받지 않는 중층에서 해류를 따라 표류하기 때문에 중심층의 해수순환을 파악하는데 매우 유용하다.

동해는 대양과 유사한 해양특성을 가지고 있어 많은 연구가 이루어지고 있는 중요한 해역이다. 그런데 표층과 달리 동해의 중심층수는 거의 동질한 수괴특성을 가지고 있기 때문에 해수물성자료만으로는 해류특성을 파악하기 어려워 많은 해양조사관측에도 불구하고 해수순환에 대해서는 뚜렷하게 알려진 바가 없다.

최근 뜰개 자료를 이용하여 동해 중심층의 해수순환을 파악하고자 하는 노력이 이루어지고 있다 (Park, 2001; Yanagimoto *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2004). 동해 북부 일본분지의 심층 순환은 반시계 방향의 순환을 보이며, 일본분지의 동쪽과 서쪽이 서로 다른 계절적 특성을 보인다 (Park, 2001; Yanagimoto *et al.*, 2003). Park *et al.*, (2004)은 동해 남서부 해역에서 활동하는 뜰개를 이용하여 중층의 해수순환에 대해 언급했다. 그러나 동해 남부 해역 전반에 걸친 중심층의 일반적인 해수순환에 대해서는 구체적으로 알려진 바가 없다. 따라서 이 논문에서는 뜰개 자료를 이용하여 동해 남부 전 해역에 대한 중심층수의 순환에 대해 살펴보았다. 또한 중심층수의 순환에 따른 물질수송을 파악하기 위해 뜰개 자료로부터 얻은 유속자료와 CTD 자료를 이용하여 동해 남부 해역을 가로지르는 북향물질수송과 열수송을 계산하였다.

이 논문은 국제 Argo 프로그램의 일환으로 한국해양연구원과 기상연구소에서 동해 남부 해역에 투하한 뜰개를 대상으로 하고 있으며, 뜰개 자료의 활용을 위해 뜰개에서 얻은 해수물성자료의 정확도와 안정도를 검증하고 뜰개 자료를 이용하여 동해 남부 해역 중심층수의 순환을 파악하는데 목적을 두고 있다.

다음 장에서는 뜰개에 부착된 센서의 오류를 검증하기 위해 뜰개에서 얻은 수온·염분 자료의 정확도 검증과 보정에 대해 설명하였다. 3장에서는 뜰개 자료를 이용하여 추정된 동해 남부 해역의 중층 순환에 대해 기술하였으며, 4장에서는 뜰개 자료를 적용하여 여름철 동해 남부 해역의 북향물질수송과 열수송에 대해 기술하였다. 전체적인 결론은 5장에서 기술하였다.

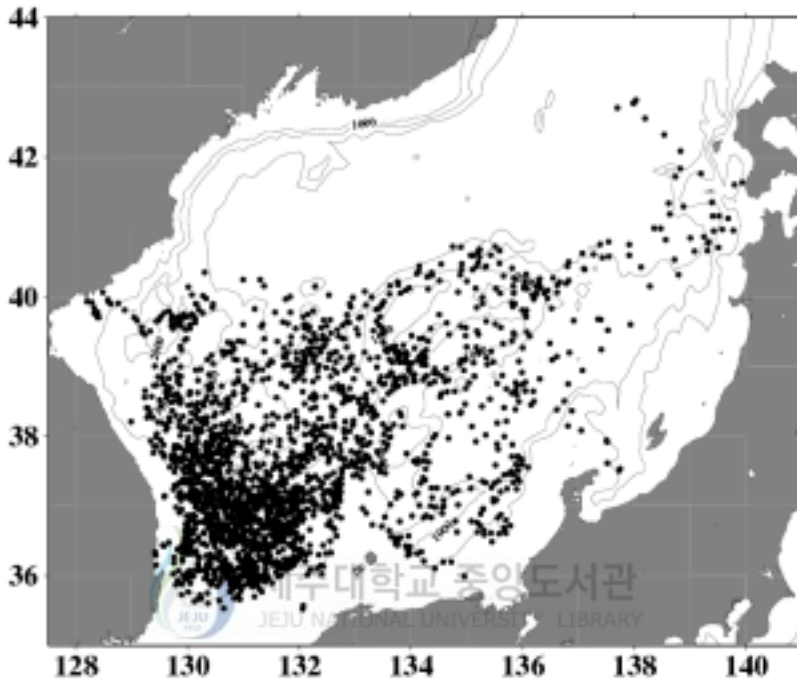


Figure 1-3. Horizontal distribution of data from Argo floats in the southern part of the East Sea.

II. Argo 뜰개에서 얻은 수온·염분 자료의 정확도 검증

1. 연구배경

Argo 프로그램에서는 수온은 0.005°C , 염분은 0.01의 정확도를 목표로 하고 있다. 뜰개에 부착된 CTD 센서는 정확한 보정과정을 거친 후에 부착되지만 장기간 해양에서 활동하는 동안 주변 환경과 센서의 결합으로 인해 CTD 센서가 변질 될 가능성이 있다. 지금까지의 연구결과에 의하면 수온 센서는 비교적 안정한데 반해 전기전도도 센서는 표류가 일어 날 수 있다 (Davis, 1998; Bacon *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2003; Oka and Ando, 2004; Riser and Swift, 2003).

뜰개 자료를 보정하는 가장 정확한 방법은 투하된 뜰개를 수거하여 직접 부착된 센서를 검증하는 것이다. Oka and Ando (2004)는 일본 남부 해역에서 투하 후 4개월에서 9개월 동안 작동한 3대의 뜰개를 회수하여 부착된 센서에 대한 재검증을 수행하였다. 회수된 뜰개 중 두 대의 뜰개 (APEX, Autonomous Profiling EXplorer)에서는 수온과 압력 센서가 Argo 프로그램에서 제시한 정확도를 만족하였으나, 한 대의 뜰개 (PROVOR)에서는 Argo 프로그램에서 제시한 정확도를 벗어난 염분값을 보였다. 그러나 투하된 뜰개를 회수하는 것은 많은 비용이 소요될 뿐만 아니라, 회수 가능성도 현실적으로 매우 낮아 직접적으로 뜰개 센서에 대한 보정을 수행하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 일반적으로 뜰개에서 얻은 자료와 고해상도로 관측된 기존의 관측 자료를 비교분석함으로써 간접적으로 센서를 검증하는 방법을 이용한다.

Bacon *et al.* (2001)은 Irminger해에 투하된 PALACE (Profiling Autonomous Lagrangian Circulation Explorer) 뜰개가 관측한 염분값을 정선 CTD 관측결과와 비교하여 뜰개 자료에 나타난 계통오차와 시간에 따른 표류를 보정하였다. 이 때 600 dB 이심에서 얻은 자료만 이용하였다. 또한 Bacon *et al.* (2001)은 정선 CTD 관측 자료를 이용하여 보정된 뜰개 자료를 가지고 다른 뜰개 자료에 대한 보정도 수행하였다. Wong *et al.* (2003)은 objective mapping 방법을 이

용하여 기존 관측 자료로부터 기준이 되는 자료를 만들고 이를 이용하여 뜰개 자료를 보정하였다. 기준자료를 구성할 때 관측 해역에 대한 일반적인 특성도 반영되기 때문에 자료가 부족한 해역에서도 보정을 수행할 수 있으나, 보정의 정확도는 관측 자료의 양과 질에 의해 결정된다. 그러나 변동이 큰 해역이나 관측 자료가 부족한 해역에서는 신뢰성 있는 기준자료를 만들 수 없기 때문에, Wong *et al.* (2003)의 보정방법을 적용하는 데는 한계가 있다. 또한 이와 같이 광범위한 해역을 대상으로 만든 기준자료에는 국소해역의 변동성을 포함시킬 수 없기 때문에, 기준자료와 뜰개 자료만을 비교해서는 뜰개 자료의 변화가 센서의 오류에 의한 것인지, 자연적인 현상에 의한 것인지를 판단하기 어렵다 (Bacon *et al.*, 2001). Iwasaka *et al.* (2003)은 뜰개 자료와 비슷한 해역에서 비슷한 시기에 얻은 CTD 자료를 비교하여 최소한 투하 후 약 4개월 동안은 정확한 자료가 생산됨을 보여주었다. 기상연구소 (2002)에서는 동해 북부 해역에서 수집된 뜰개의 해수물성자료에 대해 검증을 수행한 바 있으며, 그 결과 수온은 비교적 안정된 반면 염분은 심층수의 형성 기작에 따라 보정이 필요함을 보였다.

기존의 연구들은 대부분 수개월에서 1년 이내의 짧은 기간 동안에 관측된 뜰개 자료에 대해 검증을 수행했기 때문에 뜰개가 해양에서 장기간 활동하는 동안의 수온과 염분 자료에 대한 특성 변화는 파악할 수 없었다.

여기서는 2001년 이후 동해 남부 해역에 투하된 뜰개 중 1년 이상 활동한 뜰개를 대상으로, 뜰개에서 얻은 자료를 비슷한 시기에 비슷한 위치에서 얻어진 고해상도 CTD 자료나 또 다른 뜰개 자료와 비교함으로써 뜰개 자료의 정확도와 안정도를 검증하였다. 분석은 동해 중층의 시공간적 염분 변화 (Fig. 2-1)가 Argo 프로그램에서 요구하는 염분의 정확도보다 작다는 사실에 기초하였다.

동해 남부 해역에서 활동하는 뜰개에서 얻은 수온의 정확도는 Argo 프로그램에서 요구하는 수온의 정확도가 연구해역 수온값의 변동성 범위 안에 포함되기 때문에 정확도를 비교할 수 없다. Wong *et al.*, (2003)에 의하면 수온 센서는 염분 센서에 비해 안정되어 있다. 따라서 검증은 주로 염분 자료를 대상으로 하였으며, 보정방법을 제시하였다.

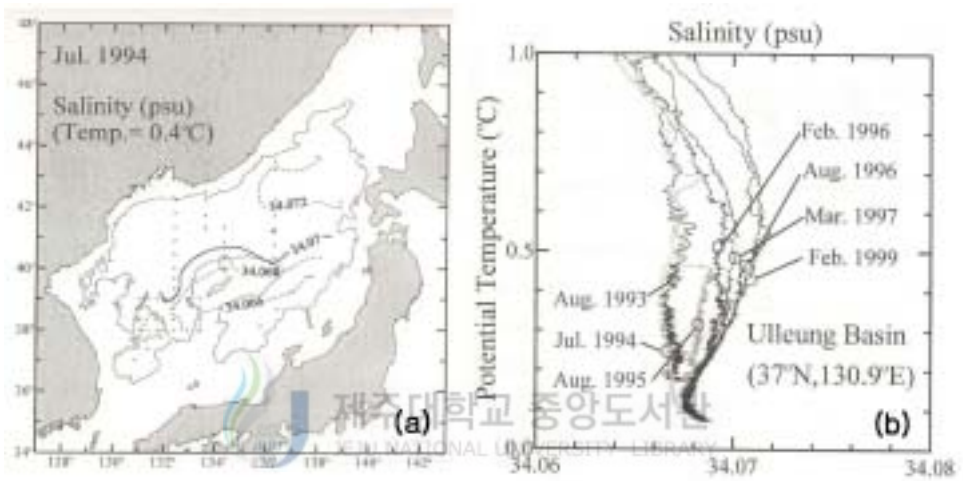


Figure 2-1. (a) Horizontal map of salinity on potential temperature 0.4°C surface in July 1994. (b) Potential temperature-salinity diagram obtained in the Ulleung Basin from 1994 to 1996 (from Min, 2002).

2. 자료 및 방법

2.1. 자료

한국해양연구원에서는 1998년 10월부터 2004년 10월까지 총 34대의 Argo 뜰개 (PALACE 2대, APEX-TD 2대, APEX-SBE 41 CTD 21대, APEX-SBE 43 CTD 4대, PROVOR 4대)를 동해에 투하했으며, 기상연구소에서는 2001년 11월부터 2004년 11월까지 총 17대의 APEX-SBE 41 CTD 뜰개를 동해에 투하하였다 (Table 2-1). Table 2-1에는 한국해양연구원 (1998년~2004년)과 기상연구소 (2001년~2004년)에서 동해에 투하한 뜰개의 투하 일시와 관측 정보를 나타내었다. 표에서 회색으로 표시된 부분은 관측기간이 1년 이상인 뜰개로 뜰개 자료의 신뢰도와 정확도를 평가하기 위해 이용된 뜰개를 뜻한다. Parking depth는 뜰개가 침강하는 수심이며 (Fig. 1-1에서 point 2), Cycle은 뜰개가 상승과 하강을 반복하는 주기 (Fig. 1-1에서 point 1부터 point 6까지), DT (Down Time)는 뜰개가 침강 후 다시 상승을 시작하기 전까지 저층에서 머무는 시간 (Fig. 1-1에서 point 1부터 point 3까지), UT (Up Time)는 뜰개가 상승을 시작한 순간부터 표층에서 표류 후 다시 침강하기 직전까지의 시간 (Fig. 1-1에서 point 3부터 point 6까지), RT (Repetition rate)는 자료를 위성에 전달하는 시간 간격을 의미한다. 이 값들은 뜰개 제작 시 지정된다.

초기에 제작된 자동수직물성관측 뜰개인 PALACE에는 수온과 압력 센서만이 장착되어 있었지만 지금은 수온과 염분, 압력, 용존산소, 탁도 등 다양한 센서들을 장착할 수 있다. 가장 많이 이용되고 있는 것은 수온과 염분, 압력 센서로, 제작사에서 보정 한 후 뜰개에 장착된다. 분석에 이용된 뜰개는 Table 2-2에 나타낸 바와 같이 수온의 정확도가 0.002°C 이고 염분의 정확도가 0.005인 Sea-Bird사의 SBE-CTD 41를 부착한 뜰개이다.

대부분의 뜰개가 80% 이상의 수신율을 보이며 (Fig. 2-2), 현재 활동 중인 뜰개는 37대 (한국해양연구원 26대, 기상연구소 11대)이다. Figure 2-2에서 가로축은 관측기간 -1998년 1월 1일을 기준으로 하는 Julian 일시-을, 세로축에는 뜰개를 나타냈다. 숫자는 뜰개 고유번호인 WMO (World Meteorological Organization) ID를 뜻한다. 수신된 자료의 월별분포현황은 Fig. 2-3에 나타냈다.

Table 2-1. Characteristics of the floats launched into the East Sea by KORDI from 1998 to 2004 and METRI from 2001 to 2004. Parking depth is the descending (or drifting) depth of a float (point 2 in Fig. 1-1). Cycle is a period of float (from point 1 to point 6 in Fig. 1-1). DT (Down Time)(from point 1 to point 3 in Fig. 1-1) and UP (Up Time)(from point 3 to point 6 in Fig. 1-1) is a moving time of float at parking depth and surface. RT (Repetition rate) means time interval transmitting data. Floats made with grey shading had or have been working for more than one year and used in the estimate of accuracy and stability (To be continued)

WMO ID	Telecom ID	Deployment data	Deployment point		Observation period	Float Type	Sensor Type	Parking depth (m)	Cycle (day)	DT (hour)	UT (hour)	RT (sec)	Remark
			Longitude	Latitude									
-	08173	1998.10.25	130°02.60 ′	36°44.00 ′	1998.10.25 ~ 2001.01.12	PALACE	R1-TD	800	5	100	20	90	KORDI
-	10029	1998.05.24	131°10.30 ′	37°17.00 ′	1999.05.24 ~ 2002.02.11	PALACE	R1-TD	800	5	100	20	90	KORDI
-	18418	2000.11.06	130°58.32 ′	37°28.26 ′	2000.11.06 ~ now	APEX	TD	500	10.5	240	12	90	KORDI
-	18419	2000.11.06	131°03.30 ′	37°28.32 ′	2000.11.06 ~ now	APEX	TD	500	10.5	240	12	90	KORDI
-	18420	2003.08.13	130°18.81 ′	37°03.52 ′	2003.08.13 ~ now	APEX	TD	500	10.5	240	12	90	KORDI
2900201	18543	2001.10.13	131°26.00 ′	37°20.00 ′	2001.10.23 ~ 2002.08.29	APEX	SBE41	700	10	228	12	90	KORDI
2900202	18544	2001.10.14	131°43.00 ′	37°18.00 ′	2001.10.14 ~ now	APEX	SBE41	700	10	229	11	90	KORDI
2900203	18545	2001.10.13	130°50.00 ′	36°45.00 ′	2001.10.12 ~ now	APEX	SBE41	700	10	229	11	90	KORDI
2900204	23734	2001.10.19	129°30.00 ′	38°31.00 ′	2001.10.18 ~ now	APEX	SBE41	700	10	229	11	90	KORDI
2900205	04664	2002.09.02	130°30.14 ′	35°59.80 ′	2002.09.02 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI
2900206	04665	2002.09.03	130°10.89 ′	36°09.99 ′	2002.09.02 ~ 2003.03.11	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900207	04666	2002.09.03	130°20.53 ′	36°10.38 ′	2002.09.02 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	45	KORDI
2900208	04670	2002.09.03	130°10.53 ′	36°00.38 ′	2002.09.02 ~ 2002.09.22	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI
2900209	04684	2002.09.03	130°20.19 ′	36°00.03 ′	2002.09.02 ~ 2004.05.04	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI
2900225	04252	2002.09.03	130°29.91 ′	35°59.74 ′	2002.09.03 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI

Table 2-1. To be continued

WMO ID	Telecom ID	Deployment data	Deployment point		Observation period	Float Type	Sensor Type	Parking depth (m)	Cycle (day)	DT (hour)	UT (hour)	RT (sec)	Remark
			Longitude	Latitude									
2900324	42552	2003.11.13	130°18.20 '	37°03.50 '	2003.11.13 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900325	42553	2003.11.14	130°37.69 '	37°03.50 '	2003.11.13 ~ 2004.08.29	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI
2900326	42554	2003.11.14	130°56.20 '	37°03.65 '	2003.12.03 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900327	42555	2003.11.14	131°15.24 '	37°03.53 '	2003.11.13 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI
2900328	19859	2003.12.04	130°16.26 '	37°35.64 '	2003.12.14 ~ now	PROVOR	SBE41	700	10	232	8	45	KORDI
2900329	19860	2003.12.04	130°00.00 '	37°34.20 '	2003.12.14 ~ now	PROVOR	SBE41	700	10	232	8	45	KORDI
5900397	21940	2003.08.13	130°56.39 '	37°03.53 '	2003.08.13 ~ now	PROVOR	SBE41	700	10	232	8	45	KORDI
5900398	21941	2003.08.13	130°37.76 '	37°03.54 '	2003.08.13 ~ 2003.10.02	PROVOR	SBE41	700	10	232	8	45	KORDI
2900442	16846	2004.08.13	130°56.41 '	37°03.00 '	2004.08.13 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900443	16847	2004.08.12	131°14.26 '	37°33.42 '	2004.08.12 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900444	18542	2004.08.13	131°16.11 '	37°03.20 '	2004.08.13 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900445	18543	2004.08.12	131°33.05 '	37°33.08 '	2004.08.12 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900446	23210	2004.08.12	130°18.99 '	37°33.33 '	2004.08.22 ~ now	APEX_Do	SBE43	700	10	229	11	44	KORDI
2900447	23212	2004.08.12	130°37.31 '	37°33.53 '	2004.08.22 ~ now	APEX_Do	SBE43	700	10	229	11	44	KORDI
2900448	23213	2004.08.13	130°37.75 '	37°03.45 '	2004.08.23 ~ now	APEX_Do	SBE43	700	10	229	11	46	KORDI
2900449	23215	2004.08.13	130°18.97 '	37°03.47 '	2004.09.02 ~ now	APEX_Do	SBE43	700	10	229	11	46	KORDI
2900451	43787	2004.10.08	130°27.58 '	36°28.21 '	2004.10.07 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	46	KORDI
2900452	43788	2004.10.08	130°42.36 '	36°28.58 '	2004.10.08 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI
2900453	43789	2004.10.08	130°59.60 '	36°40.41 '	2004.10.08 ~ now	APEX	SBE41	700	10	232	8	44	KORDI

Table 2-1. To be continued

WMO ID	Telecom ID	Deployment data	Deployment point		Observation period	Float Type	Sensor Type	Parking depth (m)	Cycle (day)	DT (hour)	UT (hour)	RT (sec)	Remark
			Longitude	Latitude									
2900169	24889	2001.11.02	130°32.16'	36°08.34'	2001.11.02 ~ 2001.12.28	APEX	SBE41	800	7	158	10	62	METRRI
2900170	24890	2001.11.02	130°18.60'	37°44.40'	2001.11.02 ~ 2002.10.05	APEX	SBE41	800	7	158	10	62	METRRI
2900171	24892	2001.11.02	130°38.28'	37°17.10'	2001.11.02 ~ 2003.07.08	APEX	SBE41	800	7	158	10	62	METRRI
5900193	24680	2002.08.08	129°23.16'	38°19.86'	2002.08.08 ~ 2004.08.12	APEX	SBE41	800	7	157	11	46	METRRI
5900194	24681	2002.08.08	130°12.42'	38°05.64'	2002.08.08 ~ 2003.10.16	APEX	SBE41	800	7	157	11	46	METRRI
5900195	24682	2002.08.07	131°42.12'	37°26.52'	2002.08.07 ~ now	APEX	SBE41	800	7	157	11	44	METRRI
5900196	24683	2002.08.06	131°51.18'	37°30.30'	2002.08.06 ~ now	APEX	SBE41	800	7	157	11	44	METRRI
5900197	24851	2002.08.06	131°08.64'	36°25.44'	2002.08.06 ~ 2002.11.05	APEX	SBE41	800	7	157	11	44	METRRI
2900298	19378	2003.10.12	130°20.52'	37°29.46'	2003.10.12 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	44	METRRI
2900299	19383	2003.10.12	130°20.94'	37°52.14'	2003.10.12 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	44	METRRI
2900300	19446	2003.10.12	130°13.86'	38°06.12'	2003.10.12 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI
2900302	19460	2003.10.12	129°38.52'	38°06.90'	2003.10.12 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI
2900437	29804	2004.11.22	130°43.20'	37°57.00'	2004.11.29 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI
2900438	29808	2004.11.23	129°17.73'	37°59.87'	2004.11.29 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI
2900439	29812	2004.11.22	130°16.80'	37°16.80'	2004.11.29 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI
2900440	29814	2004.11.22	130°16.80'	37°16.80'	2004.11.29 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI
2900441	29802	2004.11.23	129°39.60'	37°43.20'	2004.11.29 ~ now	APEX	SBE41	800	7	158	12	46	METRRI

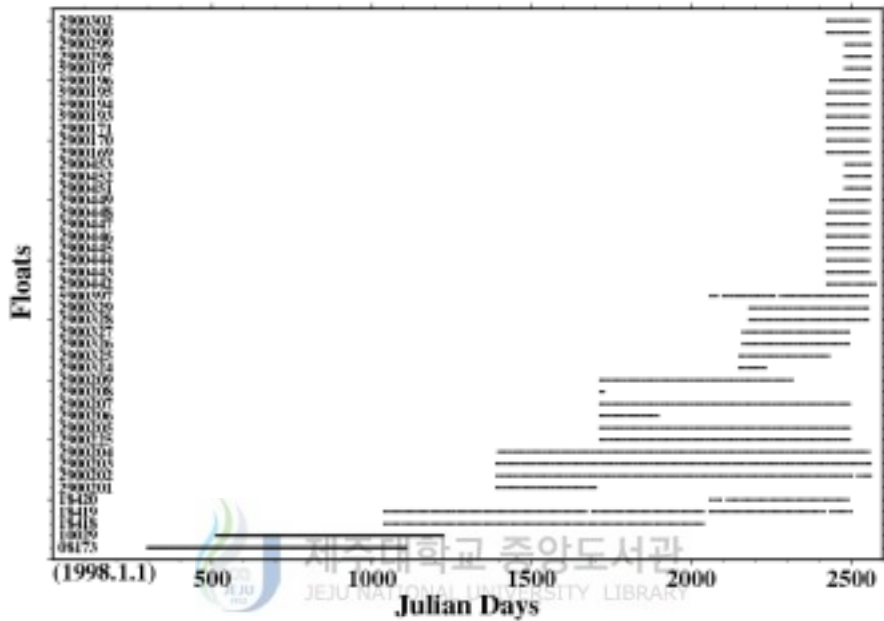


Figure 2-2. Duration of Operation of the floats launched into the East Sea by KORDI (Korea Ocean Research & Development Institute) and METRI (Meteorological Research Institute) since 1998 listed in Table 2-1. X and Y axes denote observation period in Julian days and WMO ID of the floats, respectively.

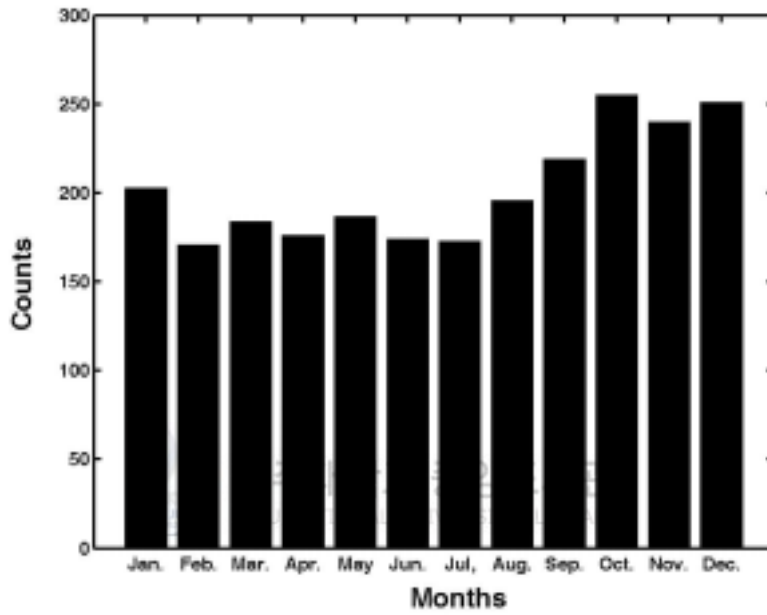


Figure 2-3. Monthly distribution of float data shown in Fig. 2-2.

Table 2-2. Accuracy of Sea-Bird CTD's Model 41

Sensor	Calibration	Accuracy
Temperature	ITS-90	0.002 °C
Conductivity	Standard Seawater	0.005 psu
Pressure	Deadweight tester & pressure reference	2.4 dbars

비교검증을 위해 사용된 CTD 자료는 동해 남부 해역에서 2002년 9월과 2003년 6월에 국립해양조사원에서 관측한 자료와 1999년 6월부터 8월에 걸쳐 *R/V Roser Revelle* (US; Scripps Institution of Oceanography)와 *R/V Professor Khromov* (Russia; Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute)에 의해 관측된 ONR (Office of Naval Research) 자료이다.

2.2. 방법



뜰개가 관측한 수온·염분 자료의 안정도와 정확도는 세 가지 방법에 의해 평가되었다. 첫 번째로 정선관측을 통해 얻은 (보정을 거친) 정확도가 높은 CTD 자료를 참값으로 취급하면서 뜰개 자료와 비교하거나, 비슷한 위치와 시간에 얻은 뜰개 자료와 정선관측 자료를 비교하였다 (Bacon *et al.*, 2001; 기상연구소, 2002; Iwasaka *et al.*, 2003).

그러나 뜰개 자료와 비교 가능한 정선관측 자료가 항상 있는 것은 아니기 때문에 두 번째 방법으로 비슷한 시기에 비슷한 위치에서 얻은 뜰개 자료를 서로 비교하였다. 이 경우는 서로 다른 뜰개의 성능이 동시에 비슷한 경향으로 저하될 가능성은 매우 낮다는 것을 전제로 하고 있다. 이 방법으로는 뜰개간 상대비교만 가능하지만, 동해 남부 해역에서 중층 염분의 시공간적 변화가 Argo 프로그램에서 요구하는 염분의 정확도 0.01 이하라는 사실을 고려하면 절대평가도 가능하다 (Fig. 2-1). Bacon *et al.* (2001)은 정선 CTD 자료를 이용하여 검증한 뜰개 자료를 바탕으로 또 다른 뜰개 자료를 검증한 바 있다.

마지막으로 뜰개가 관측한 중층 염분의 시간적 변동을 통해 염분의 안정도와 정확도를 파악하였다. 이 방법도 위와 같이 동해 남부 해역에서 중층 염분의 시공간적 변화가 거의 없음을 전제로 한다. 동해에서 활동하고 있는 뜰개 중 1년 이상 활동했거나 활동 중인 뜰개 (Table 2-1에서 회색으로 표시된 부분)의 염분 자료를 사용함으로써 뜰개에 부착된 센서의 장기간에 걸친 안정도와 정확도를 파악하였다.

3. 결과

3.1. 정선관측 자료와 뜰개 자료의 비교

뜰개 자료를 정확하게 검증하기 위해서는 같은 시기에 같은 위치에서 관측한 자료가 필요하지만 이 조건을 만족하는 관측 자료는 많지 않다. 따라서 우선 관측 일시는 다르지만 관측 정점이 유사한 자료를 비교하였으며, 다음으로 관측 일시와 관측 정점이 유사한 자료를 비교하여 뜰개 자료의 정확도를 살펴보았다.

관측 정점이 유사한 자료 비교

분석을 위해 관측 일시는 다르지만 CTD 관측 정점과 일치하는 뜰개 자료를 선택하였다 (Fig. 2-4). Figure 2-4에는 ONR의 CTD 관측 정점 (●)과 뜰개의 관측 정점 (□)을 나타냈다. 두 관측점이 일치하는 곳에는 일련의 숫자 (1~25)를 부여했으며, 자세한 정보는 Table 2-3와 같다.

Figure 2-5(a)에는 Fig. 2-4에서 뜰개와 CTD 관측이 일치하는 점에서 수심에 대한 잠재온도값을, Fig. 2-5(b)는 염분값을 나타내었다. CTD와 뜰개의 수온과 염분 모두 비슷한 구조를 보이고 있으며, 저층으로 갈수록 일치된 값을 보인다. 표층 자료는 시공간적 변동이 매우 크기 때문에 자료의 정확도나 안정도를 비교하기에 적당하지 않다. 그러므로 여기서는 수심 500 m이하의 저층 자료를 이용하였다.

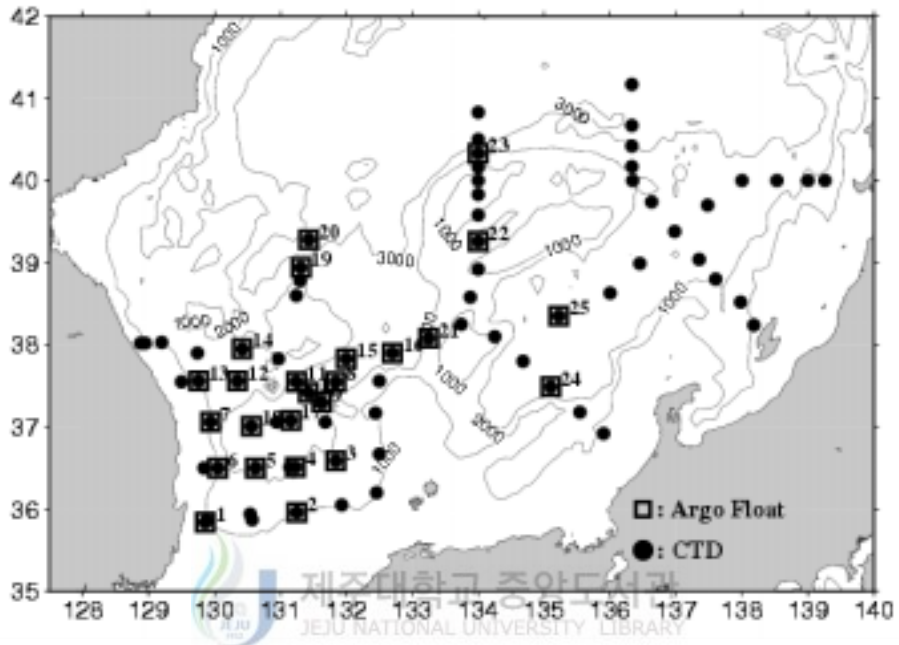


Figure 2-4. Locations of CTD profiles by the *R/V Roser Revelle* and *Professor Khromov* (closed circle), and by Argo floats (square). When the distance between the location of a CTD profile and that of is less than 13 km an Argo profile. They are paired and numbered from 1 to 25.

Table 2-3. Locations and distances of profile pairs of CTD and Float profiles shown in Fig. 2-4

Pair number	Location		Distance (km)
	CTD	Float	
1	129.86°E 35.84°N	129.855°E 35.822°N	2.05
2	131.25°E 35.96°N	131.269°E 35.956°N	1.77
3	131.84°E 36.59°N	131.780°E 36.594°N	5.37
4	131.23°E 36.51°N	131.273°E 36.530°N	2.31
5	130.62°E 36.50°N	130.639°E 36.522°N	2.98
6	130.05°E 36.50°N	130.065°E 36.489°N	1.81
7	129.94°E 37.06°N	129.880°E 37.073°N	5.52
8	131.84°E 37.55°N	131.844°E 37.527°N	2.58
9	131.63°E 37.30°N	131.666°E 37.331°N	4.69
10	131.42°E 37.42°N	131.435°E 37.438°N	2.40
11	131.24°E 37.55°N	131.230°E 37.529°N	2.39
12	130.35°E 37.56°N	130.397°E 37.553°N	4.22
13	129.76°E 37.56°N	129.797°E 37.617°N	7.13
14	130.42°E 37.95°N	130.439°E 37.960°N	2.00
15	132.00°E 37.83°N	132.006°E 37.863°N	3.71
16	132.70°E 37.90°N	132.692°E 37.878°N	2.57
17	131.16°E 37.08°N	131.189°E 37.056°N	3.71
18	130.56°E 37.01°N	130.557°E 37.049°N	4.34
19	131.31°E 38.94°N	131.310°E 38.939°N	0.11
20	131.43°E 39.28°N	131.385°E 39.374°N	11.14
21	133.25°E 38.08°N	133.272°E 38.075°N	2.00
22	134.00°E 39.26°N	134.048°E 39.255°N	4.17
23	134.00°E 40.33°N	134.050°E 40.303°N	5.19
24	135.10°E 37.49°N	135.003°E 37.414°N	12.03
25	135.22°E 38.35°N	135.121°E 38.367°N	8.84

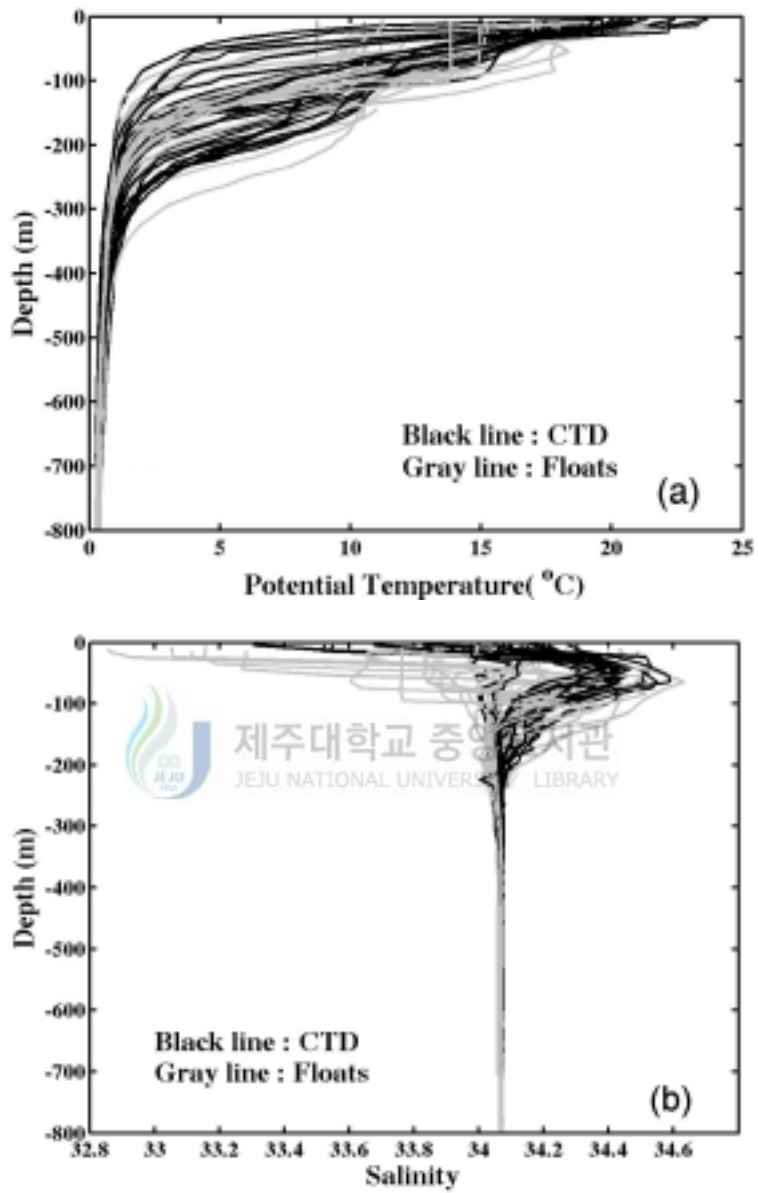


Figure 2-5. Vertical profiles of (a) potential temperature and (b) salinity from CTD and float data of the pairs in Fig. 2-4.

Figure 2-6(a)는 Fig. 2-5(a)에서 수심 500 m에서 700 m에 대한 잠재온도의 수직변화를 나타낸 것으로, 실선은 CTD 관측값을, 점선은 뜰개의 관측값을 나타낸다. Figure 2-6에 표시된 숫자는 Fig. 2-4에 표시된 CTD 관측정점과 뜰개 관측정점이 일치하는 정점을 뜻한다. 두 값은 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ 이내의 수온차를 보여, Argo 프로그램에서 요구하는 정확도를 만족하지 않는다. 반면 염분의 수직분포 형태는 서로 일치하는 정점도 있지만 대부분 수직적으로 일정한 차를 보인다 (Fig. 2-6(b)). 두 값은 ± 0.008 이내의 오차 범위를 보이며, Argo 프로그램에서 요구하는 정확도 안에 포함된다. 이렇게 수직변화가 일정한 경우는 비교 값의 차에 대한 평균값을 알면 보다 쉽게 염분값을 보정할 수 있다. Figure 2-7에는 Fig. 2-6에 나타낸 수온과 염분 자료에서, CTD값에서 뜰개값을 뺀 수온 차 ($T_{ctd} - T_{float}$)와 염분 차 ($S_{ctd} - S_{float}$)의 분포를 나타냈다. 두 자료는 서로 관측일시가 다르지만 수온은 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$, 염분은 ± 0.008 이내의 정확도를 보인다.

관측 일시와 관측 정점이 유사한 자료 비교

비슷한 시간 비슷한 정점에서 관측된 정선 CTD 관측 자료와 뜰개 자료는 Figs. 2-8과 2-9에서 비교하였다. WMO ID's 2900205와 2900207 뜰개에서 얻어진 자료를 검증하기 위해 국립해양조사원에서 관측한 정선 CTD 관측 자료를 이용하였다. 정선관측은 뜰개가 관측을 수행한 약 4일 후 뜰개의 관측점에서 약 1.2 km와 2.4 km 정도 떨어진 곳과 뜰개 관측일시 10일 후 약 5.2 km와 13.1 km 떨어진 곳에서 수행되었다. 정확한 관측 정점과 시간은 Table 2-4에 정리하였다.

정선관측에 사용된 CTD는 Sea-Bird's 911plus로 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 뜰개 자료의 정확도를 파악할 수 있다.

정선관측 자료와 2900205와 2900207 뜰개 자료를 이용한 수온과 염분의 수직분포도는 Fig. 2-8에서 비교하였다. 뜰개 자료와 CTD 자료는 전 층에 걸쳐 아주 비슷한 구조를 보인다. 그러나 표층은 외부의 영향을 많이 받기 때문에 동일 시간 동일 관측점에서 관측되지 않는 한 표층 자료를 이용하여 정확도를 비교 분석하는 것은 적절하지 않다. 따라서 수심 500 m 이심 자료만을 이용하였는데, Fig. 2-9에는 Fig. 2-8의 (a), (b), (c), (d) 각각의 경우에 대해 CTD 자료에서 뜰개 자료를 뺀 염분의 차이 ($S_{diff} = S_{CTD} - S_{float}$)와 수온의 차이 ($T_{diff} = T_{CTD} -$

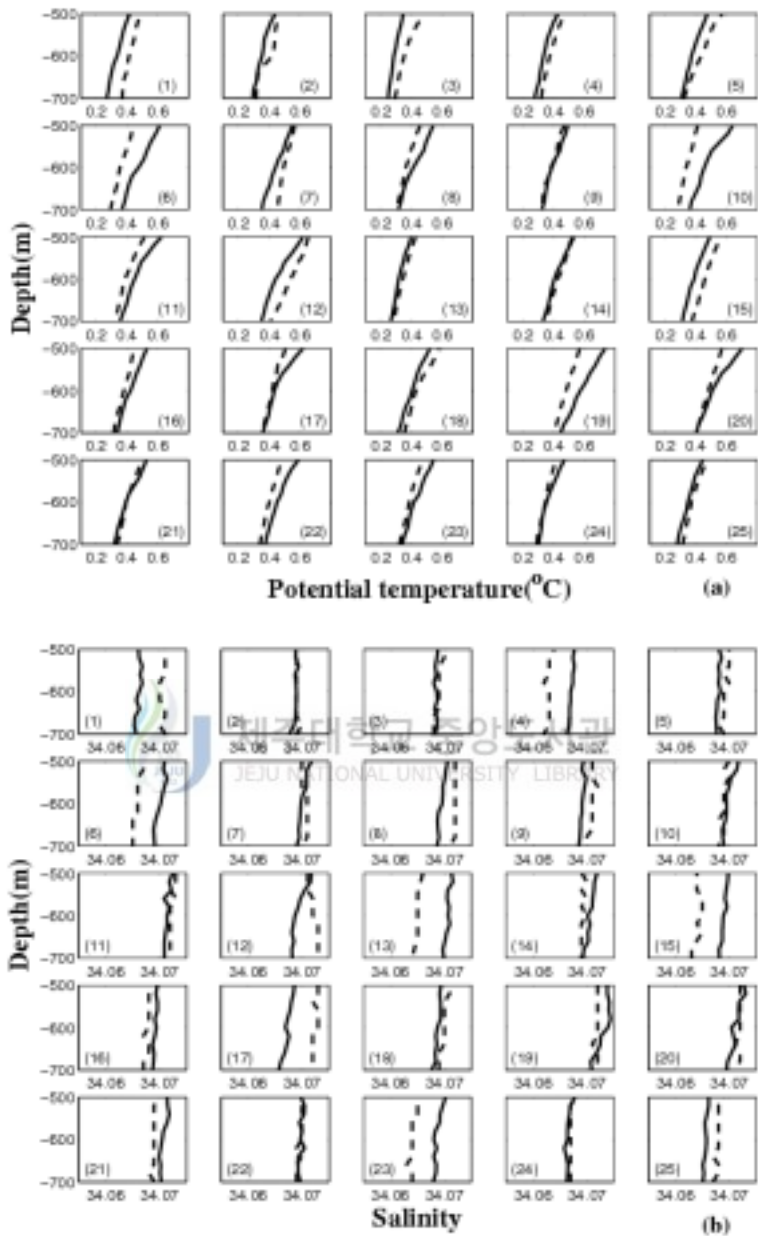


Figure 2-6. Vertical profiles of (a) potential temperature and (b) salinity between 500 m and 700 m depth of the pairs in Fig. 2-4. Solid and dotted lines denote CTD and float data, respectively.

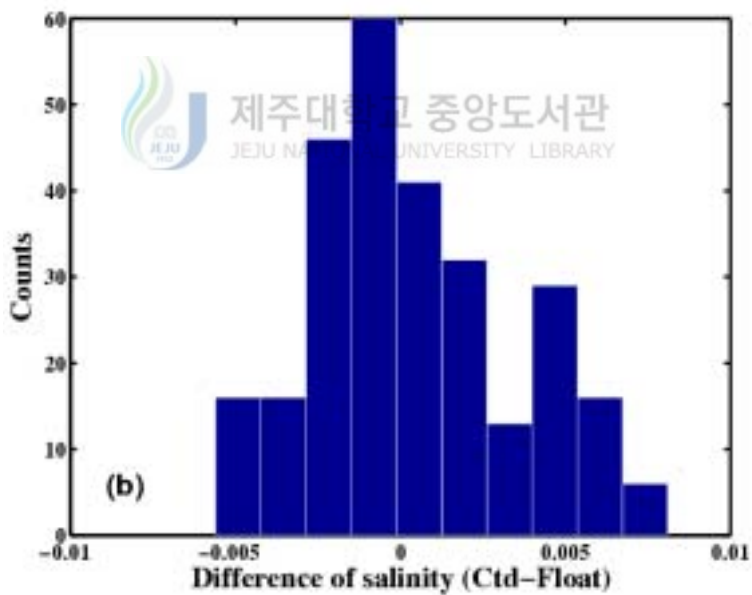
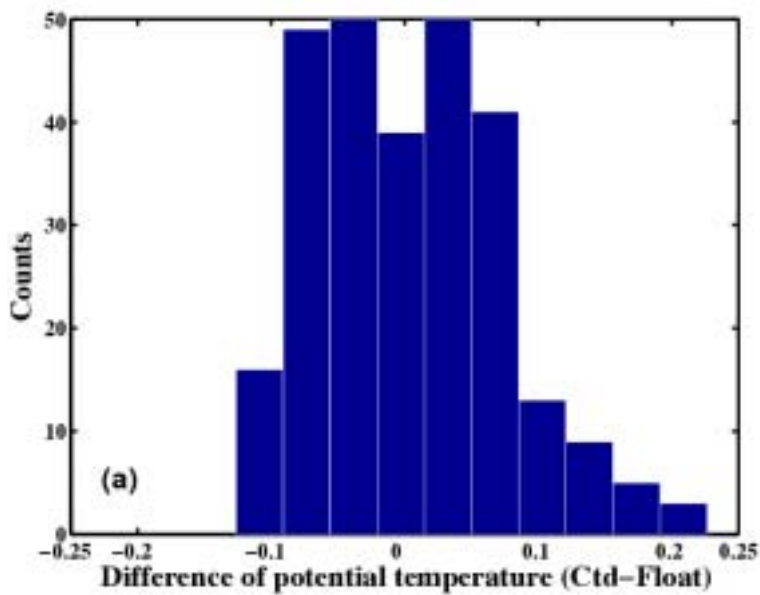


Figure 2-7. Differences in (a) potential temperature and (b) salinity between CTD and float of each pair shown in Fig. 2-6.

Table 2-4. Dates and locations of CTD and Float (WMO ID's 2900205 and 2900207) profiles

Type	Date	Location
CTD hydrocast (SBE911 <i>plus</i>)	02-Sep-02	130.004°E, 35.999°N
(a) Float (2900205)	12-Sep-02	130.032°E, 35.958°N
Difference	10 days	≒ 5.21 km
CTD	02-Jun-03	131.527°E, 36.456°N
(b) Float (2900205)	30-May-03	131.619°E, 36.445°N
Difference	4 days	≒ 1.22 km
CTD	02-Sep-02	130.343°E, 36.173°N
(c) Float (2900207)	12-Sep-02	130.487°E, 36.191°N
Difference	10 days	≒ 13.07 km
CTD	02-Jun-03	132.027°E, 36.340°N
(d) Float (2900207)	30-May-03	132.048°E, 36.354°N
Difference	4 days	≒ 2.44 km

T_{float} 를 나타내었다. Figure 2-9의 (a)와 (c), (e), (g)는 염분의 차를 (b)와 (d), (e), (h)는 수온의 차를 보인다.

염분의 경우, CTD 자료와 뜰개 자료 차의 평균은 $-0.0001 \sim 0.0088$, 표준편차는 $0.0003 \sim 0.0011$, rms (root mean square)는 $0.0003 \sim 0.0089$ (Table 2-5)를 보임으로써 뜰개 염분 자료의 정확도는 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도보다 높게 나타난다.

CTD 자료와 뜰개 자료의 차는 계통적 오차의 특성을 보이기 때문에, 정선 관측 자료를 참값이라고 가정하고 두 값의 차의 평균 (\bar{S}_{diff}) 만큼 보정하면, 정

Table 2-5. Statistics of the differences in temperature and salinity between the data from CTD and Float, WMO ID's 2900205 and 2900207

	Type	Average	Standard deviation	RMS
(a)	Temperature (°C)	0.0016	0.0027	0.0031
	Salinity	0.0013	0.0004	0.0013
(b)	Temperature (°C)	0.0336	0.0079	0.0344
	Salinity	0.0088	0.0005	0.0089
(c)	Temperature (°C)	-0.0251	0.0089	0.0265
	Salinity	-0.00011	0.0003	0.0003
(d)	Temperature (°C)	-0.00016	0.0099	0.0095
	Salinity	0.0065	0.0011	0.0065



확도 약 0.001의 염분을 얻을 수 있다. 더욱이 1년 이상 장기간에 걸쳐 뜰개가 관측한 염분값이 매우 안정적이라면 이 계통오차 보정은 전 관측기간에 걸쳐 적용될 수 있다.

수온의 경우, 두 자료 차이의 평균은 $-0.0251 \sim 0.0336^{\circ}\text{C}$, 표준편차는 $0.0027 \sim 0.0099^{\circ}\text{C}$, rms는 $0.0031 \sim 0.0344$ (Table 2-5)로 단순히 수치만 비교할 경우 수온 자료의 정확도는 Argo 프로그램에서 요구하는 값 0.005°C 의 최대 여섯 배 정도이다. 그러나 Fig. 2-10에 표시된 것과 같이 동해 남부 해역에서 중층 수온의 공간적 변화는 염분의 공간적 변화에 비해 20배 이상 높고 해류의 변동성이 크다는 점을 고려한다면, 같은 시간 같은 위치가 아니라면 상당한 온도 변화가 있을 수 있다. 이 해역의 수평온도구배는 약 $5 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 로, 관측지점간 거리차이 2.4 km에 의해 최소 0.0012°C 의 수온 차가 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 0.035°C 의 수온 변화를 초래할 수 있다. 즉 뜰개에서 얻은 수온과 정선관측에서 얻은 수온의 차이는 뜰개 자료의 부정확성에 의한 것이라기보다는 동해 수온의 시공간적 변화로 인한 것이다.

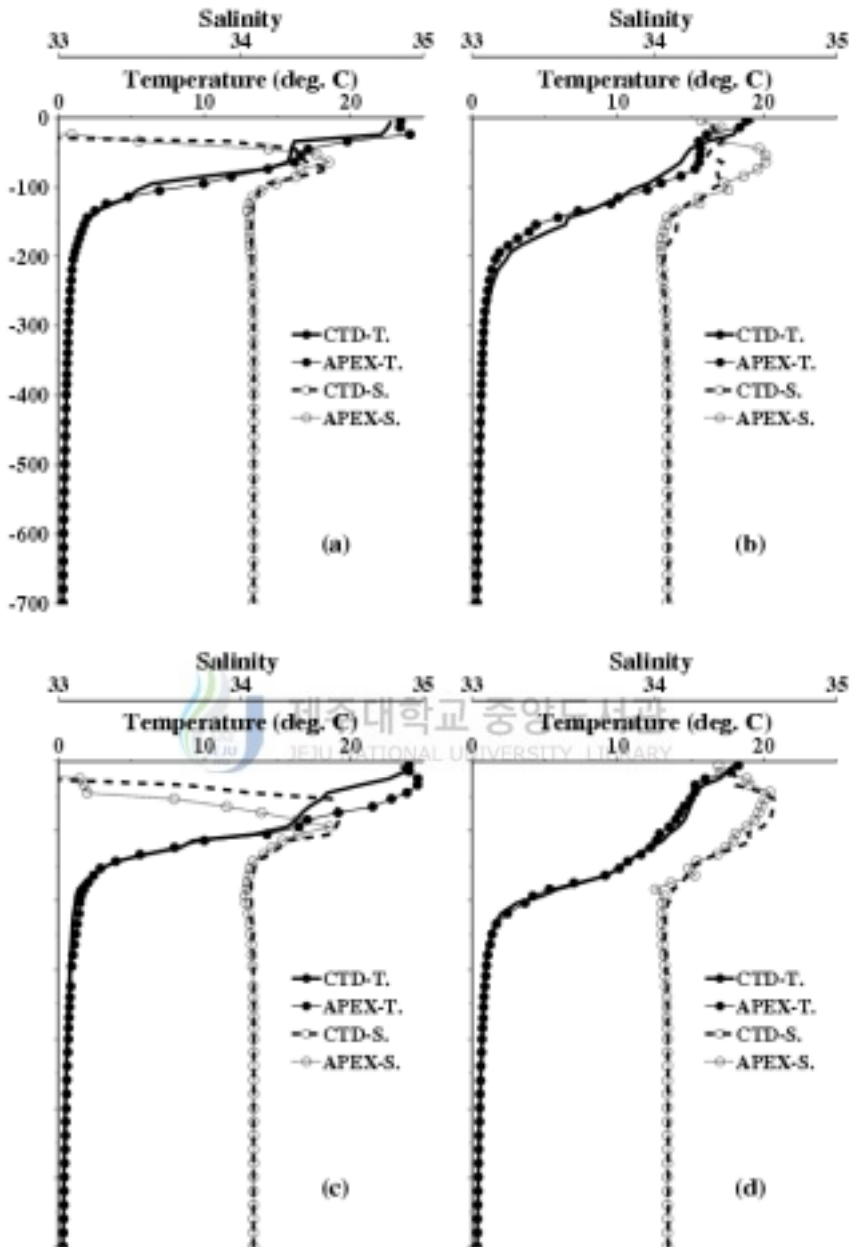


Figure 2-8. Vertical profiles of temperature and salinity from CTD (SBE 911*plus*) and Floats observed at similar time and at similar location. (a) WMO ID 2900205 (12-Sep-2002), (b) WMO ID 2900205 (30-May-2003), (c) WMO ID 2900207 (12-Sep-2002) and (d) WMO ID 2900207 (30-May-2003).

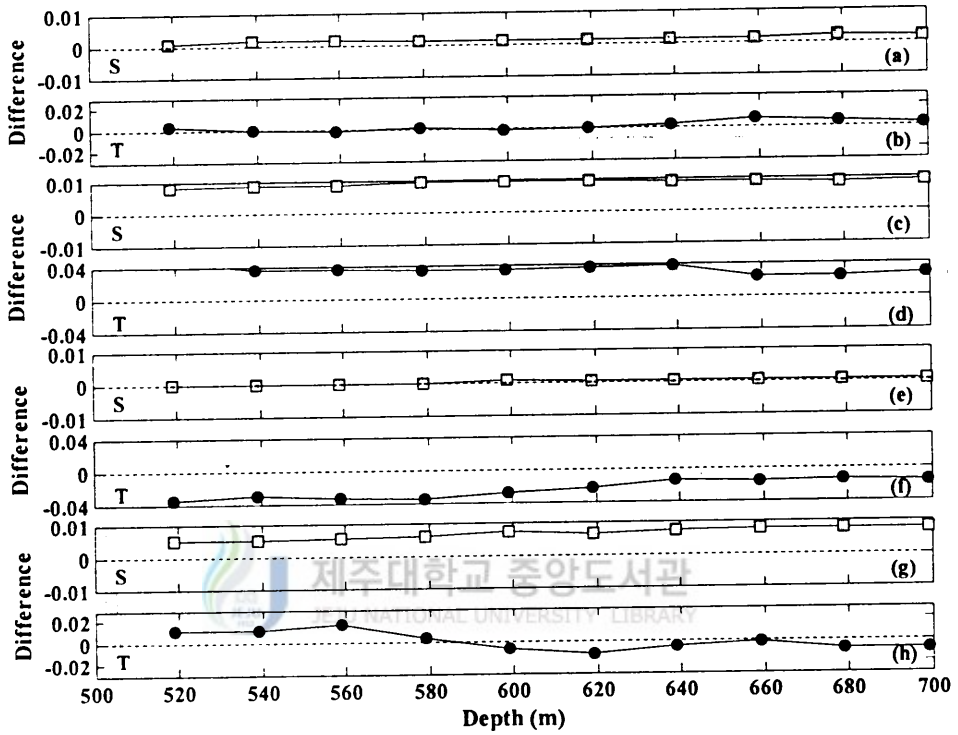


Figure 2-9. Differences of salinity (a, c, e, g) and temperature (b, d, f, h) between the data from CTD and Floats, (a) and (b) WMO ID 2900205 (12-Sep-2002), (c) and (d) WMO ID 2900205 (30-May-2003), (e) and (f) WMO ID 2900207 (12-Sep-2002), and (g) and (h) WMO ID 2900207 (30-May-2003) in Fig. 2-8.

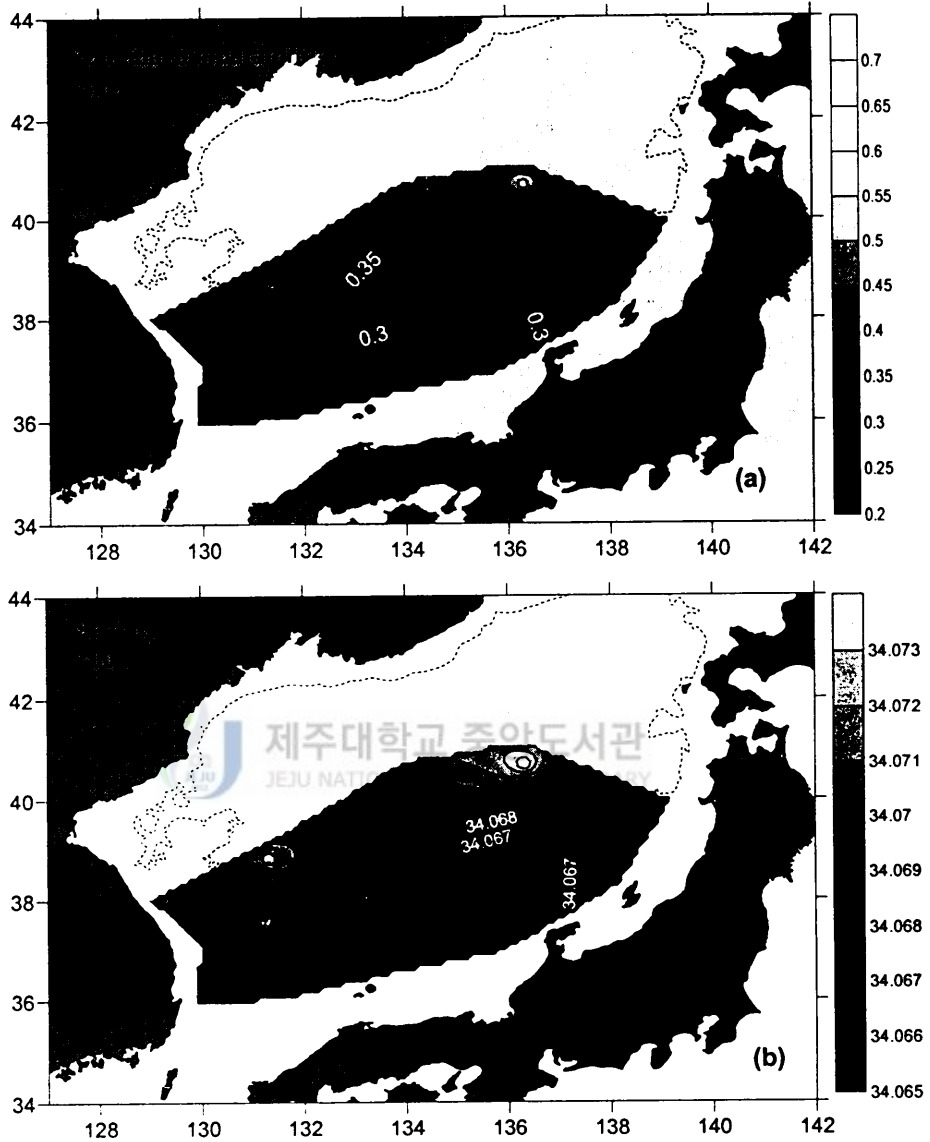


Figure 2-10. Horizontal distributions of (a) potential temperature and (b) salinity at 700 m depth from CTD data by the *R/V Roser Revelle* and *Professor* from June 25 to August 8, 1999 in the East Sea.

3.2. 뜰개간 상호 비교

뜰개간 자료 비교는 투하 후 약 2년 이상 안정된 염분 변화를 보이면서 비슷한 해역에서 거동한 뜰개를 선택하여 수행하였다. 2002년 9월에 동해 남서부 해역에 투하된 WMO ID's 2900225 (이하, 뜰개 1)와 2900209 (이하, 뜰개 2), WMO ID's 2900205 (이하, 뜰개 3)와 2900207 (이하, 뜰개 4)는 Fig. 2-11에 표시된 것처럼 아주 비슷한 경로를 따라 움직였다. 특히, 뜰개 1과 뜰개 2는 투하 2개월 후와 17개월 후에, 뜰개 3과 뜰개 4는 투하 2개월 후에 Table 2-6에 나타난 것과 같이 매우 근접한 해역을 통과함으로써 상호 비교에 아주 좋은 자료를 제공하였다.

뜰개 1과 뜰개 2의 투하 2개월 후에 관측된 자료는 Fig. 2-12(a)에, 17개월 후에 얻은 자료는 Fig. 2-12(b)에서 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 다른 구조를 보이는데, 이 기간 동안 동해 해상에 폭풍주의보가 발효된 점과 이 해역의 큰 변동성을 고려한다면 이 차이는 설명가능 하다.

뜰개 3과 뜰개 4의 투하 2개월 후 관측된 자료는 Fig. 2-12(c)에서 비교하였는데, 중간에 자료가 없는 부분이 있지만 전체적인 구조는 비슷하다. 변화가 적은 500 m 이심의 자료를 Fig. 2-13에서 자세히 비교하였다. 투하 2개월 후 뜰개 1과 뜰개 2의 염분값의 차 (뜰개 1 - 뜰개 2)는 Fig. 2-13(a)에, 수온 차는 Fig. 2-13(b)에, 투하 17개월 후 염분 차는 Fig. 2-13(c)에, 수온 차는 Fig. 2-13(d)에 나타냈으며, 뜰개 3과 뜰개 4의 염분 차 (뜰개 3 - 뜰개 4)는 Fig. 2-13(e)에, 수온 차는 Fig. 2-13(f)에 나타냈다.

염분의 경우, Table 2-7에 정리된 것과 같이 뜰개 1과 뜰개 2, 뜰개 3와 뜰개 4 모두 투하 2개월 후나 17개월 후에 모든 값이 평균 0.002 범위 이내에서 일치한다. 수온의 경우는 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 이내에서 일치하는데, 앞에 언급하였듯이 이는 동해 남서부 해역 중층 수온의 시공간적 변동성에 의한 것으로 추정된다. 여기서 뜰개 1과 뜰개 2는 17개월 후의 수온 차이가 2개월 후의 수온 차이보다 크게 나타난다. 이것은 17개월 후의 관측 위치와 관측 시간의 차이가 2개월 후에 비해 크기 때문으로 생각된다.

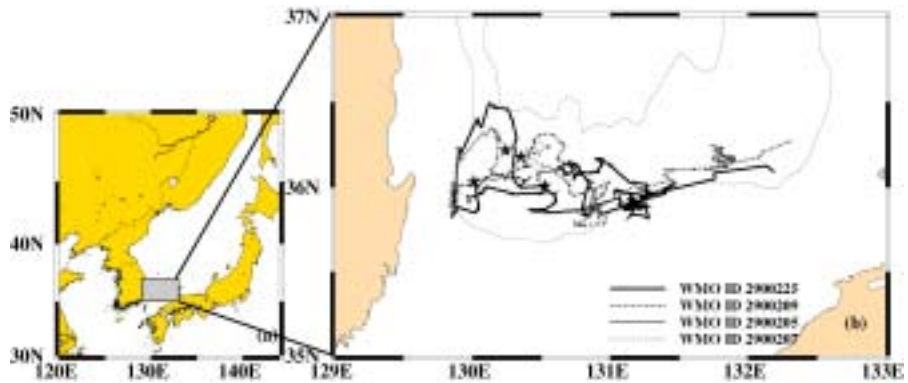


Figure 2-11. Trajectories from floats, WMO ID's 2900225, 2900209, 2900205 and 2900207.

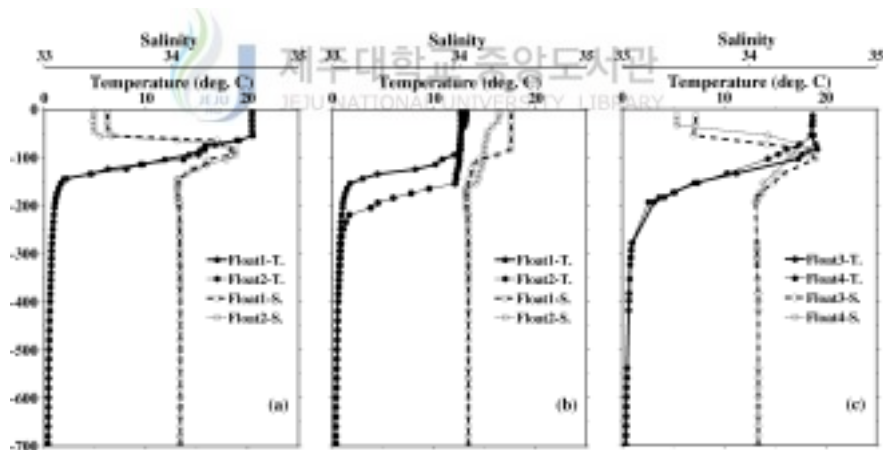


Figure 2-12. Vertical profiles of temperature and salinity from Float 1 (WMO ID 2900225) and Float 2 (WMO ID 2900209) (a) 2 months, and (b) 17 months after the deployment, and (c) from Float 3 (WMO ID 2900205) and Float 4 (WMO ID 2900207), 2 months after the deployment.

Table 2-6. Dates and locations of launch and profiles by floats, WMO ID's 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)	02-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)	02-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)	02-Sep-02	130.009°E 36.032°N	11-Nov-02	130.421°E 36.061°N		
2900207 (Float 4)	02-Sep-02	130.241°E 36.218°N	01-Nov-02	130.479°E 36.062°N		
Difference	-	≅ 29.35 km	10days	≅ 5.2 km		

Table 2-7. 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
Aveage	0.0077	0.0012	-0.0024	0.0001	0.0024	0.0001
Standard deviation	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

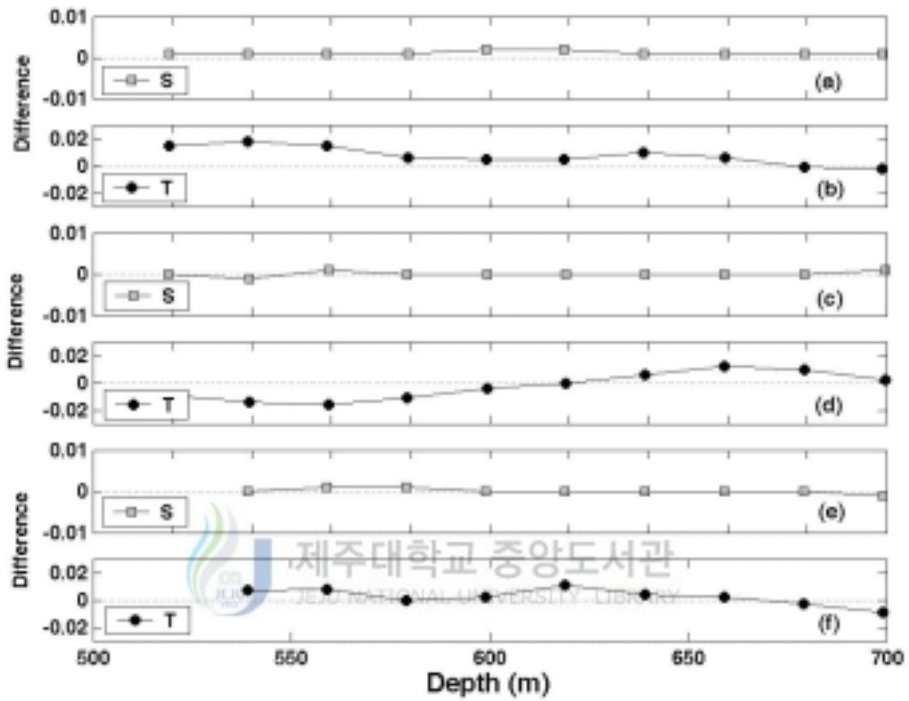


Figure 2-13. Differences in (a) salinity and (b) temperature between the data from Float 1 and Float 2, 2 months after the deployment, and (c) salinity and (d) temperature 17 months after the deployment, and (e) salinity and (f) temperature between the data from Float 3 and Float 4, 2 months after the deployment.

3.3. 염분의 시간적 변동

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

동해 중층에서의 염분 변화를 살펴보면, 동해 남서부 울릉분지 해역에서 관측된 잠재온도 0.4°C면에 해당되는 염분값은 34.066~34.072 분포 범위를 보이며, 평균 염분은 34.0691이다. 반면 동해 남동부 해역인 야마토해령과 야마토분지에서 관측된 염분값은 야마토해령 해역에서는 34.0695의 평균 염분값을 보이지만, 그 아래에 위치한 야마토분지에서 관측된 염분값은 34.0669의 평균값을 보여 다른 해역과 약 0.002 정도의 차를 보인다 (Fig. 2-10(b)).

Figures 2-14~2-19까지는 프로파일에서 잠재온도 0.4°C면에 해당하는 염분값의 시간적 변화를 나타내었으며, X축은 프로파일 번호를 Y축은 염분값을 나타낸다. 점선은 ONR의 CTD (Neil Brown Instrument Systems MKIIB CTD) 결과로 동해 중층의 평균 염분값이다. CTD 센서의 보정은 SIO (Scripps Institution of Oceanography)에서 이루어졌으며, 염분 센서의 정확도는 0.002이상이고, 정밀도는 0.0005에 근사하여 심층의 염분 변화를 비교하는데 용이하다 (Talley *et al.*, 2004).

동해에서 거동 중인 뜰개의 염분 변화는 Figs. 2-14~2-19에 나타낸 것처럼 크게 4가지 특성에 의해 분류된다. ① 동해 중층의 평균 염분값에 일치하는 것 (Fig. 2-14), ② 생물체 오염방지 물질 (biocide)에 의해 일시적으로 오염되어 생기는 현상으로 뜰개 투하 초기에는 낮은 값을 보이다가 시간이 지남에 따라 biocide가 세척되어 약 2개월 후에는 정상적인 값을 보이는 경우 (Fig. 2-15), ③ 어느 시기 이후 갑자기 염분이 증가하거나 감소하는 경우 (Fig. 2-16), ④ 염분값이 전체적으로 평균에 미치지 못하고 낮거나 높은 값을 보이는 경우 (Fig. 2-19)이다.

Figure 2-14의 경우는 뜰개 자료가 염분 평균값에 잘 일치하고 있다. 이와 같은 경우는 특별한 염분보정 없이도 자료의 사용이 가능하다. 일부 뜰개인 경우

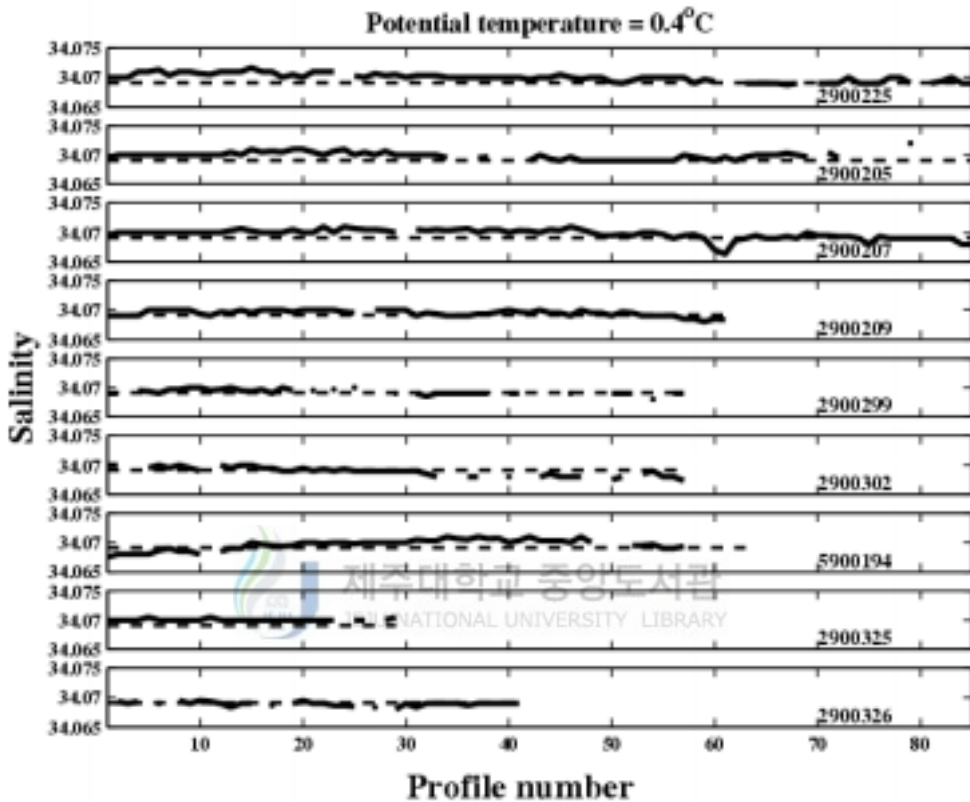


Figure 2-14. The time series of salinity on potential temperature 0.4°C surface from WMO ID's 2900225, 2900205, 2900207, 2900209, 2900299, 2900302, 5900194, 2900325 and 2900326. X and Y axes denote the number of profiles and salinity, respectively. The dotted line represents mean value of salinity from CTD data in the southern part of the East Sea.

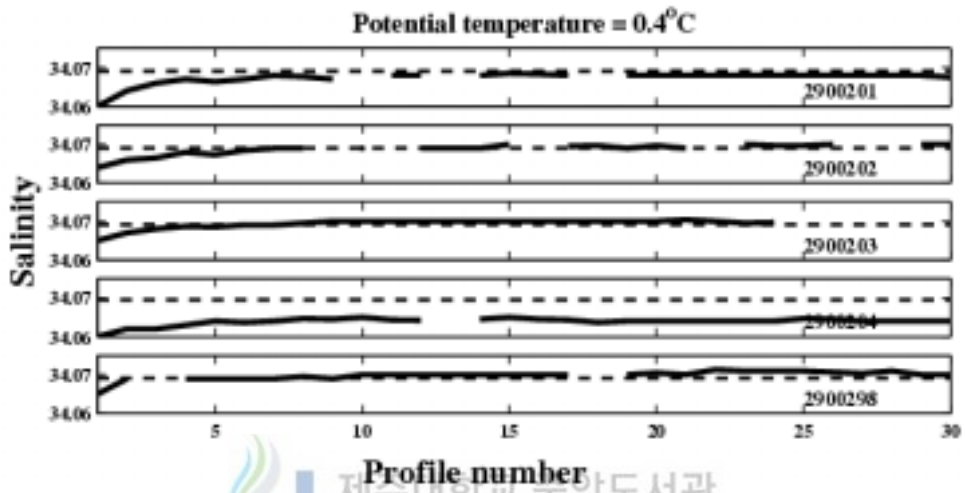


Figure 2-15. The same as Fig. 2-14, but for WMO ID's 2900201, 2900202, 2900203, 2900204 and 2900298.

는 시간이 지남에 따라 조금씩 감소하는 경향, 0.0005/yr을 보이지만 그 변화는 아주 작아 갑자기 다른 요인들에 의한 센서의 변화가 없는 한, Oka and Ando (2004)가 제시한 바와는 달리 뜰개의 최대 수명인 4년이 지나더라도 Argo 프로 그래미 요구하는 0.01를 벗어나지 않을 것으로 판단된다.

Figure 2-15에서는 생물체 오염방지 물질에 의한 염분의 저하를 볼 수 있다. 생물체 오염방지 물질에 의한 염분의 저하는 투하 초기에 나타나는 현상으로 생물체의 부착을 막기 위해 센서에 biocide 처리를 하게 되는데 이것이 센서에 잔재해 있으면서 센서의 작동을 방해하게 된다. 그러나 biocide는 시간이 지남에 따라 씻겨나가 그 이후에는 별다른 영향을 주지 않으며 그림에서 볼 수 있듯이 보통 1~2개월이면 안정된 값을 보인다.

Figure 2-16에는 안정적이던 염분값이 어느 시기 이후 갑자기 증가하거나 낮아지는 경우를 나타냈다. 이와 같은 현상의 원인은 아직 정확하게 알려지지 않았지만, 센서의 질 저하에 의한 것과 지역적인 특성에 의한 것으로 생각해 볼 수 있다. 유사한 해역을 거동하는 뜰개 자료를 비교분석한 결과 Fig. 2-16에 나타난 뜰개는 센서의 특성 변화에 의해 염분 변화가 일어나는 것으로 판단된다. 그러나 WMO ID 2900204 뜰개처럼 일부 뜰개는 지역적인 특성에 의한 영향이 나타난다. 2900204 뜰개 자료의 특성을 파악하기 위해 CTD 관측 자료와 뜰개 자료를 비교하였다 (Fig. 2-17).

Figure 2-17(a)에는 2900204 뜰개의 시간에 따른 염분 변화를 나타냈고, Fig. 2-17(b)에는 ONR CTD 자료의 정점별 염분 변화를 나타냈다. 두 자료는 모두 잠재온도 0.4°C면에 해당하는 염분값이다. 2900204 뜰개는 초기에 biocide에 의한 염분저하가 나타나며 이후 안정된 값을 보이다가 40번째 프로파일 이후부터 염분값이 급격히 낮아진다. CTD 관측 자료는 17번 정점을 전후로 서로 다른 염분 분포를 보인다. 정점 1번부터 17번까지 CTD 자료의 염분은 다소 변화폭이 크게 나타나지만, 전반적으로 뜰개 자료와 CTD 자료의 염분 변화는 유사한 구조를 보인다. 2900204 뜰개의 궤적을 살펴보면 극전선을 따라 이동하던 뜰개는 야마토해령을 시계 방향으로 선회해서 야마토해령과 야마토분지의 경계면을 따라 이동하다가 야마토해령 중심부를 선회하여 야마토분지로 유입된다 (Fig. 2-18(a)). 뜰개가 야마토해령 남쪽의 야마토분지 경계면을 선회하는 시기에 염분값의 저하가 나타난다. CTD 자료는 Fig. 2-18(b)처럼 야마토해령과 야마토분지에서 관측되었으며, 두 해역의 염분 변화는 Fig. 2-17(b)와 같다. 따라서 2900204 뜰개의 염분

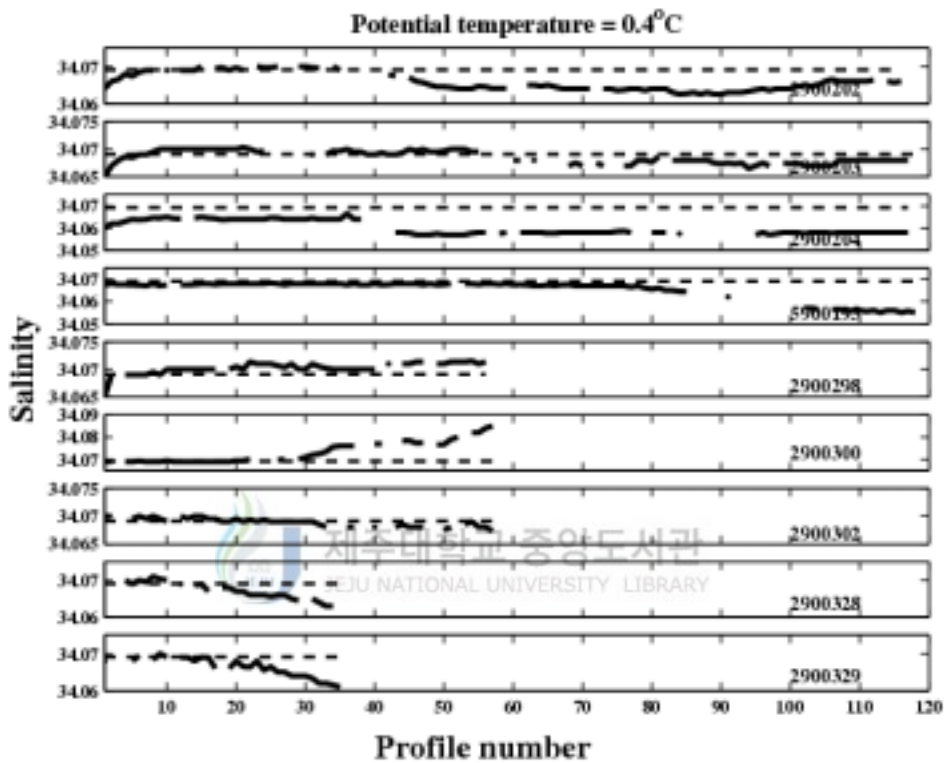


Figure 2-16. The same as Fig. 2-14, but for WMO ID's 2900202, 2900203, 2900204, 5900195, 2900298, 2900300, 2900302, 2900328 and 2900329.

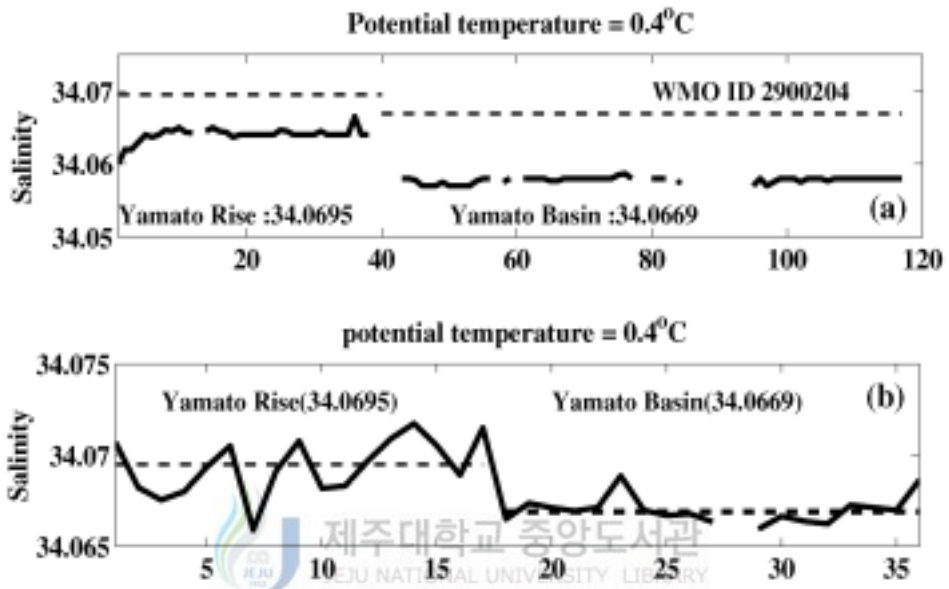


Figure 2-17. The time series of salinity on potential temperature 0.4°C surface from (a) WMO ID 2900204 and (b) ONR CTD data.

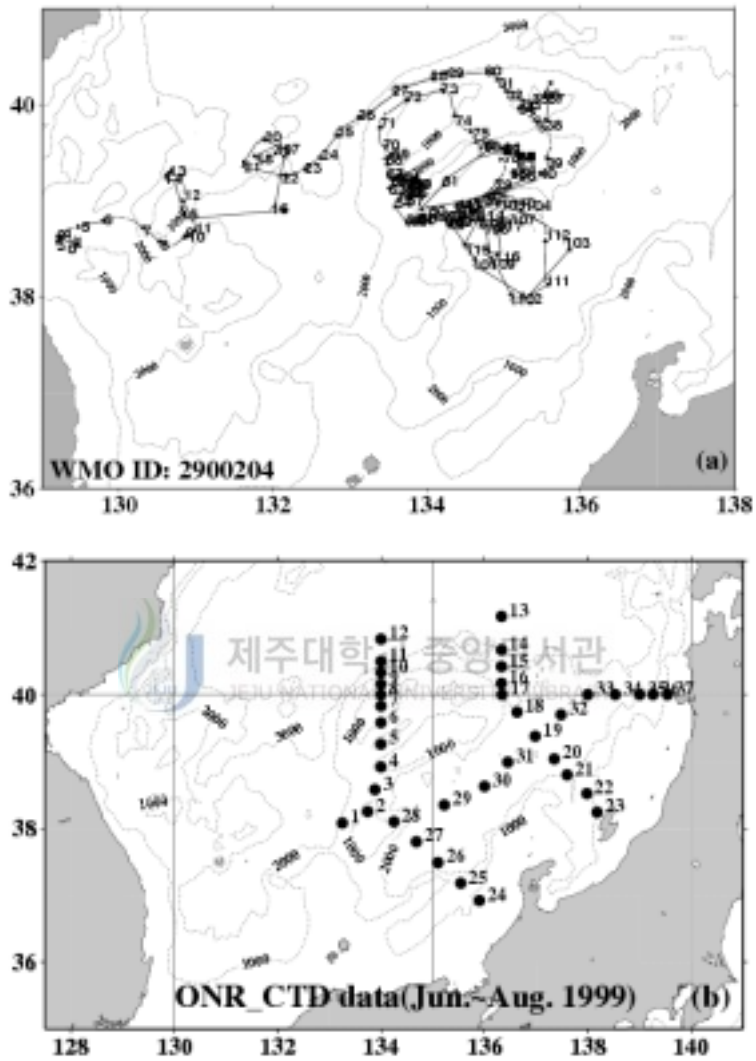


Figure 2-18. (a) Trajectory of WMO ID 2900204 float, and (b) stations of CTD by ONR.

변화는 야마토해령과 야마토분지사이의 염분차에 의해 일어날 수 있음을 암시한다.

그러므로 2900204 뜰개처럼 일부 야마토분지에서 거동하는 뜰개의 경우는 지역적 특성을 고려할 수 있다. 그러나 이 뜰개도 거동하고 있는 해역의 평균값에 미치는 못하는 값을 보임으로써 센서의 오류에 의한 영향을 배제할 수 없다.

Figure 2-19에 나타난 뜰개의 염분값은 평균 염분값과는 동떨어진 결과를 보인다. 이 경우 또한 센서의 오류에 의한 것으로 판단된다. 그러나 초기에 biocide에 의한 염분저하를 제외하고는 관측기간 동안 뜰개의 염분 변화가 거의 일정하게 변하는 것으로 볼 때 센서 보정 시 계통오차가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 이처럼 염분값이 전체적으로 표류가 된 경우는 염분보정도 용이하기 때문에 보정과정만 거친다면 자료의 사용에는 문제가 없다고 판단된다.

Figure 2-20에는 위 네 가지 경우에 대해 염분 평균값에서 뜰개의 각 프로파일 자료를 뺀 염분차의 분산을 나타냈다. 각 경우마다 약간의 차이는 있으나 대부분의 염분값이 정확도 0.01 범위 내에 속하고 있어 뜰개 자료의 효용성이 높음을 시사한다.

3.4. 염분 보정



Figure 2-14에 나타난 뜰개처럼 일부 뜰개는 보정이 필요 없는 비교적 정확한 염분값을 생산해낸다. 이에 반해 Figs. 2-15와 2-16처럼 생물체 오염방지 물질에 의해 초기 염분값이 저하되는 경우나 일정하던 염분값이 갑자기 변화된 경우는 일정하게 유지되는 염분값을 기준으로 평균을 정한 후 평균값에서 각 프로파일의 염분값을 뺀 차만큼 변화를 줌으로써 평균값에 근접한 염분값을 얻을 수 있다. Figure 2-21은 WMO ID 2900201 뜰개의 체류수심에서의 염분 변화를 나타낸 것으로, Wong *et al.* (2003)이 보고한 전기전도도 센서가 생물체 오염방지 물질에 의해 일시적으로 오염되어 생기는 현상 (biocide leakage)을 보인다. Bacon *et al.* (2001)이 보고한 것과 같이 투하직후에 전체 평균값보다 낮은 값을 보이다가 시간이 지남에 따라 증가하면서 평균값에 접근하여 약 2개월 후에는 정상적인 값을 나타낸다. 투하된 지 2달 뒤인 6번째 프로파일부터 체류수심의 염분이 프로파일 1~5번 자료를 제외하고 얻은 평균값인 34.0673 (Fig. 2-21에서 점선으로 표시됨)에 근사한다. 이런 오차는 Fig. 2-22에 나타난 것과 같은 H-S 분포

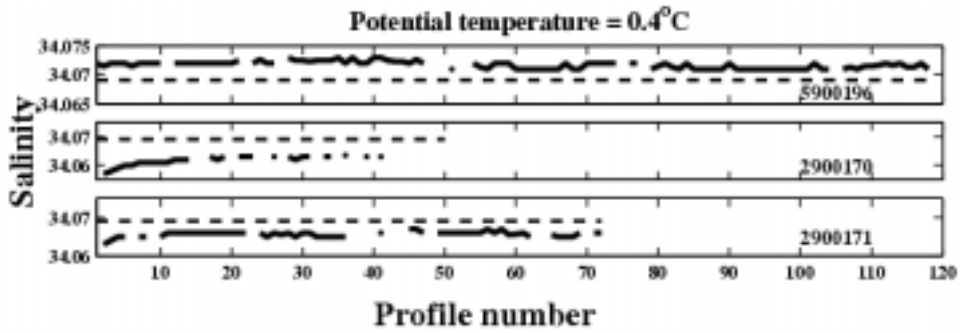


Figure 2-19. The same as Fig. 2-14, but for WMO ID's 5900196, 2900170 and 2900171.

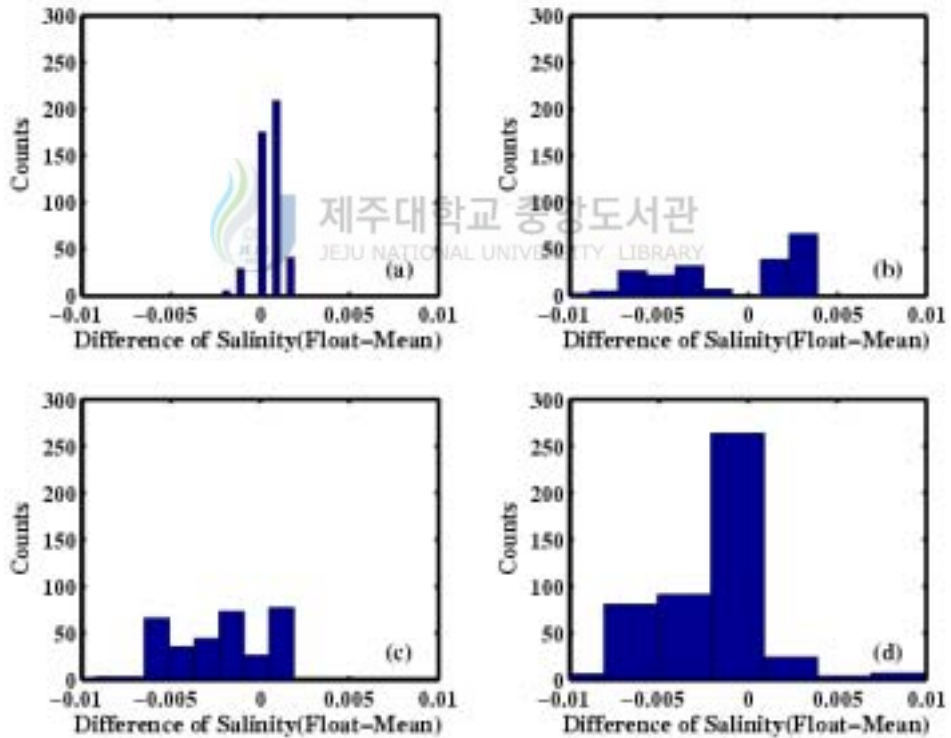


Figure 2-20. Deviation of differences between the salinity from floats and average value of salinity from CTD data. All the data in (a) Fig. 2-14, (b) Fig. 2-15, (c) Fig. 2-16 and (d) Fig. 2-19 are used.

도에서도 쉽게 발견할 수 있다. 그림에서 십자 (+)로 나타낸 첫 번째에서 다섯 번째까지 프로파일자료는 점 (·)으로 나타낸 나머지 자료에 비해 낮은 염분을 보인다. 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 관측 자료를 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. 2-22(b)에 표시된 화살표). 이 방법으로 보정한 자료를 이용한 H-S 분포도 (Fig. 2-22(c))에서는 처음 다섯 프로파일과 나머지가 구별되지 않는다.

Figure 2-19와 같이 뜰개의 염분값이 전체적으로 평균값에서 표류된 경우에는 평균과의 차를 고려함으로써 보다 용이하게 염분보정을 할 수 있다 (Fig. 2-23). Figure 2-23은 Fig. 2-6(b)의 결과를 보정한 것으로, 뜰개의 염분값이 평균에 일치하거나 평균값과 일정한 간격을 유지한 경우의 보정 결과를 보인다. 점선은 뜰개값을, 실선은 CTD값을 나타내고, 짙은 회색 선은 보정한 결과를 보여 준다. 얇은 회색 선은 CTD 관측 자료에서 얻은 동해 평균 염분값을 나타낸다.

보정은 뜰개 자료에서 평균 염분값을 뺀 차를 평균한 후, 뜰개 염분값에서 평균값을 제외하였다.

$$S_{diff} = S_{float} - S_{mean}$$

$$S_{corr} = S_{float} - \overline{S_{diff}}$$

이렇게 해서 얻은 염분값은 ± 0.002 이내의 오차 범위를 보인다. 비록 이 보정 방법은 평균값을 이용한 가장 단순한 과정이지만, 염분의 변동이 적은 동해의 경우 이 과정만으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다.

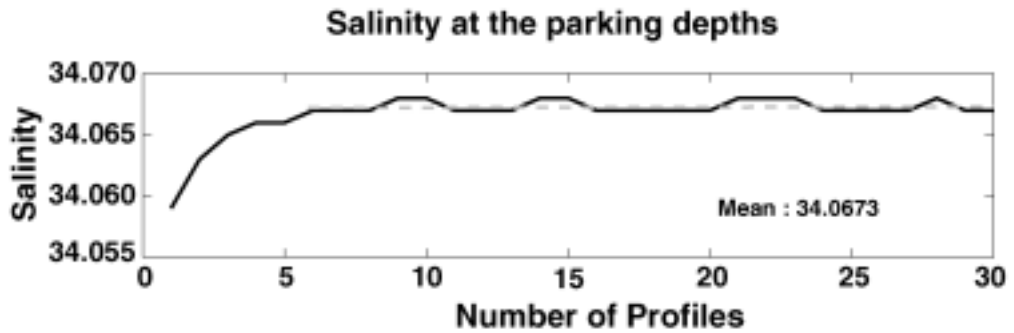
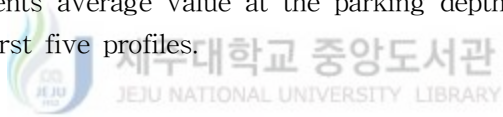


Figure 2-21. The time series of salinity at the parking depths from WMO ID 2900201. Here the horizontal axis is the number of profiles made. The profiles were made at every 10 days, approximately. The dashed line represents average value at the parking depth excluding the data from the first five profiles.



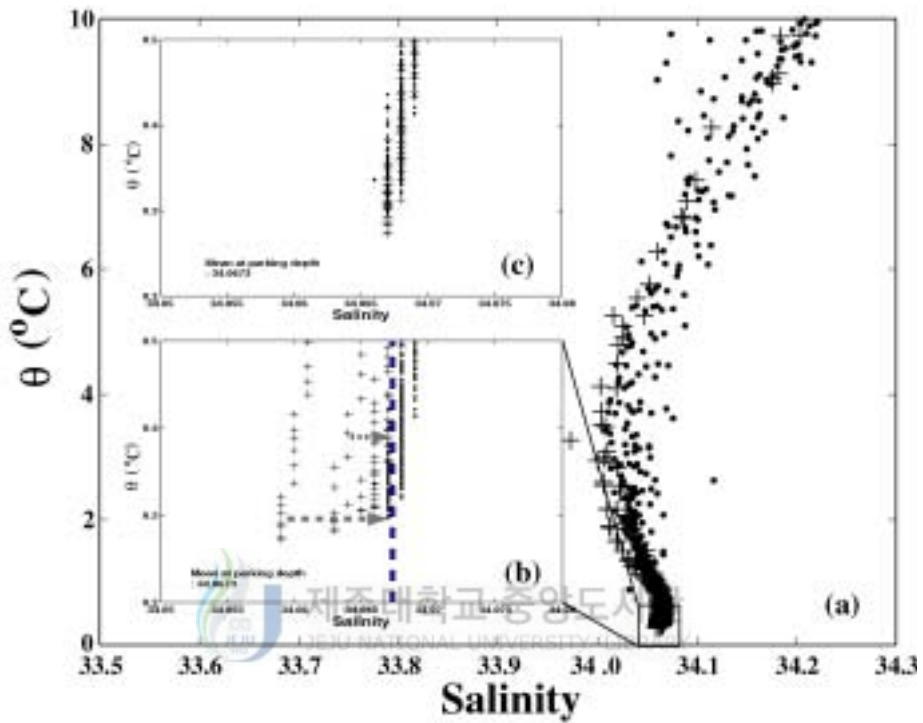


Figure 2-22. Θ -S diagrams from WMO ID 2900201. Asterisks denote data from the first five profiles and dots from the remaining profiles. Θ -S diagrams before and the calibration of salinity are shown in (a) and (b), and that after the calibration in (c). In (b) and (c), data from levels deeper than 500 m are used.

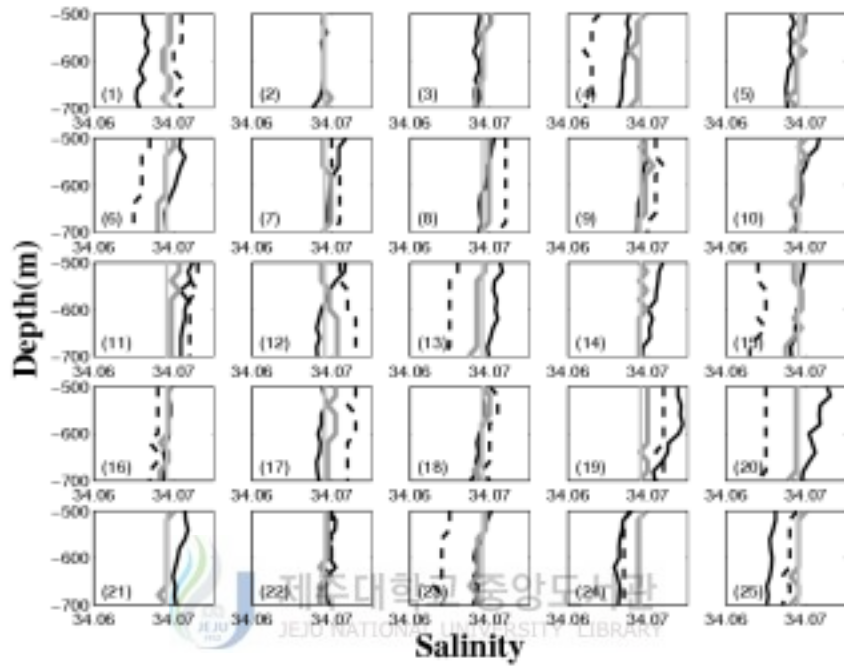


Figure 2-23. Vertical profiles from CTD and floats in Fig. 2-6(b). Dotted and solid lines denote data from floats and CTD, respectively. Dark grey lines are shown after the calibration. Light grey line represents average value of salinity from CTD data in the southern part of the East Sea.

4. 토 의

국제 Argo 프로그램에서는 뜰개에 부착된 CTD에 대하여 수온은 0.005°C , 염분은 0.01의 정확도를 요구한다. 뜰개에 부착된 CTD를 회수하여 사후보정을 실시하는 것은 거의 불가능하기 때문에, 일반적으로 뜰개가 관측한 자료의 정확도와 안정도 검증은 간접적인 방법을 통하여 수행된다. 동해 남부 해역의 중층 수온과 염분은 변화 폭이 매우 작다. 특히 염분의 경우 그 변화폭이 Argo 프로그램에서 요구하는 0.01 이하이므로, 동해 중층을 항염분수조라고 가정할 수 있다.

뜰개 자료의 검증을 위해 2001년 이후에 투하되어 동해 남서부 해역에서 활동 중인 뜰개에서 얻은 자료와 고해상도 CTD로 관측한 자료를 비교하였으며, 서로 비슷한 시기에 비슷한 해역을 통과한 뜰개 자료를 상호 비교하였다. 두 비교 결과 모두 염분의 정확도는 Argo 프로그램이 요구하는 0.01 이상을 보였다. 수온의 경우는 $\pm 0.025^{\circ}\text{C}$ 범위 내에서 정선관측 자료와 뜰개 자료가 일치하였다. 이는 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도보다 낮은 값이지만, 동해중층의 수온 변화폭을 고려하고, 각각의 관측이 수행된 위치와 시간의 차이를 고려할 때 매우 타당한 수온의 변화 범위이다.

약 1년 이상 작동한 뜰개에서 얻은 염분 자료의 시간적 변동을 분석하여 뜰개 자료의 정확도와 안정도를 살펴본 결과 잠재온도 0.4°C 에 해당되는 염분의 변화폭은 일부 뜰개를 제외하고는 약 ± 0.005 로 높은 안정도와 정확도를 보였다.

이와 같이 뜰개가 활동하는 동안 전기전도도 센서의 성능저하로 인한 염분의 표류가 없는 경우는 뜰개에 부착된 CTD가 초기에 정확히 보정만 되어 있다면 뜰개가 관측한 자료는 특별한 보정없이 사용할 수 있다. 보정이 필요하다고 판단되어 보정과정을 거친 뜰개도 기계적인 오류나 생물체 오염방지 물질로 인해 전기전도도 센서에 문제가 없는 한 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도에 크게 벗어나지 않는다.

동해 북부 해역에서 얻은 뜰개 염분 자료의 정확도 검증 결과 또한 이와 유사한 결과를 보인다 (기상연구소, 2002). 관측 결과가 충분하지 않으나 북부 해역에서 관측된 CTD 자료와 뜰개 자료의 염분 차는 $0.002\sim 0.004$ 로 Argo 프로그

램에서 요구하는 정확도를 만족하였다. 서로 다른 뜰개간 비교 결과도 표준편차 0.005로 일관성이 있음을 보였다.

이렇게 뜰개가 장기간 운용되고 있음에도 불구하고 뜰개에 부착된 CTD 센서가 높은 정확도와 안정도를 보이는 것은 뜰개가 대부분의 시간을 환경변수의 변화가 매우 작고 생물의 활동이 미약한 심층에서 보내기 때문인 것으로 생각된다.

모든 뜰개가 같은 특성을 갖는다고 할 수 없기 때문에 자료 활용에 앞서 먼저 각각의 뜰개 자료에 대한 특성 분석이 필요하다. 동해에 투하된 뜰개의 경우에는 동해 중층의 염분 변화가 매우 작다는 특성 때문에, 이 논문에서 사용한 방법, 특히 체류수심에서 얻은 염분 자료의 평균과 시간적추이 분석만으로도 뜰개가 얻은 자료의 신뢰성과 정확도를 쉽게 검증할 수 있다.



III. Argo 뜰개 자료를 이용한 동해 남부 해역의 중층 순환

1. 연구배경

동해는 대한해협을 통해서 동중국해와 연결되며, 쓰가루해협을 통해서 북서태평양과, 소야와 타타르해협을 통해서 오호츠크해와 연결된다. 최대수심은 4049 m, 평균수심은 약 1684 m이다 (한국해양연구원, 2002a). 4개의 해협을 제외하고는 육지로 둘러싸여 있으며, 해협의 수심 또한 200 m 이내로 매우 낮아 외부와는 차단된 독립적인 구조를 가진다 (Fig. 3-1).

이런 지형적 특징으로 인해 인접해역과의 심층수 상호교환은 일어날 수 없으며, 동해 전체 해수의 약 10% 정도인 표층수만이 인접해역과 교환된다 (한국해양연구원, 2002a). 동해의 표층순환은 대한해협을 통해 유입되는 대마난류수에 의해 지배되며 (Fig. 3-2), 심층수는 동해 내에서 형성되고 변천된 후 순환된다 (Senjyu and Sudo, 1993; Seung and Yoon, 1995). 따라서 동해에서 200 m 이심의 중심층순환은 열염분순환에 의해 일어나며 이것은 북서태평양에서의 열염분순환과는 독립적이다 (Park *et al.*, 2004).

표층순환에 비해 동해의 중심층순환에 대한 연구는 부족한 상태이다. 해수물성자료를 이용해서 동해 중심층수의 순환을 이해하려는 노력이 이루어지고 있지만 동해 중심층은 수직성층이 매우 약하고, 심층수피가 거의 동일하기 때문에 수온과 염분 자료로부터 해수순환 구조를 정의하기는 매우 어렵다 (Senjyu and Sudo, 1994). Kim *et al.* (1991)은 CTD 관측 결과를 통해 울릉분지의 영구수온약층 아래에 시계 방향의 순환이 있음을 보였다. 반면 해류계를 이용한 관측결과에 의하면 울릉분지의 심층순환은 반시계 방향이며, 작은 규모의 시계 방향과 반시계 방향의 흐름이 나타난다 (Chang *et al.*, 2002; Teague *et al.*, 2004). 이렇게 동해 중심층수의 순환을 이해하기 위해서는 해수물성자료 관측과 더불어 직접적인 해류 관측이 이루어져야 하지만 중심층에 대한 관측이 어렵기 때문에 관측결과는 그다지 많지 않다.

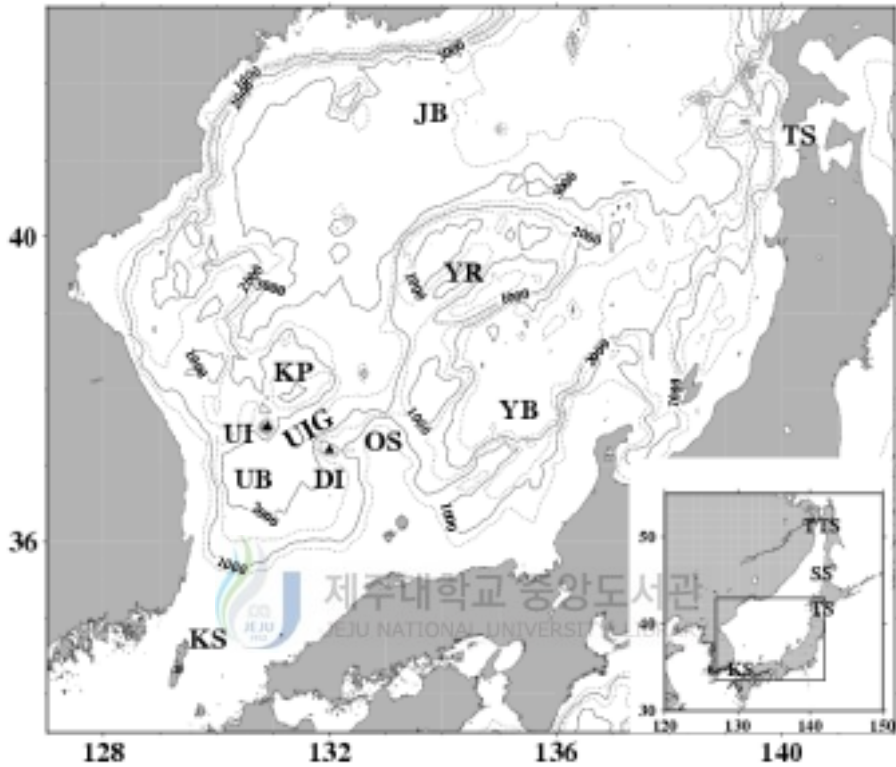


Figure 3-1. Bathymetry of the East Sea. Abbreviations for the area are as follows; DI: Dok Island, JB: Japan Basin, KP: Korea Plateau, KS: Korean Straits, OS: Oki Spur, SS: Soya Straits, TS: Tsugaru Straits, TTS: Tatar Straits, UB: Ulleung Basin. UI: Ulleung Island, UIG: Ulleung Interplain Gap, YB: Yamato Basin and YR: Yamato Rise.

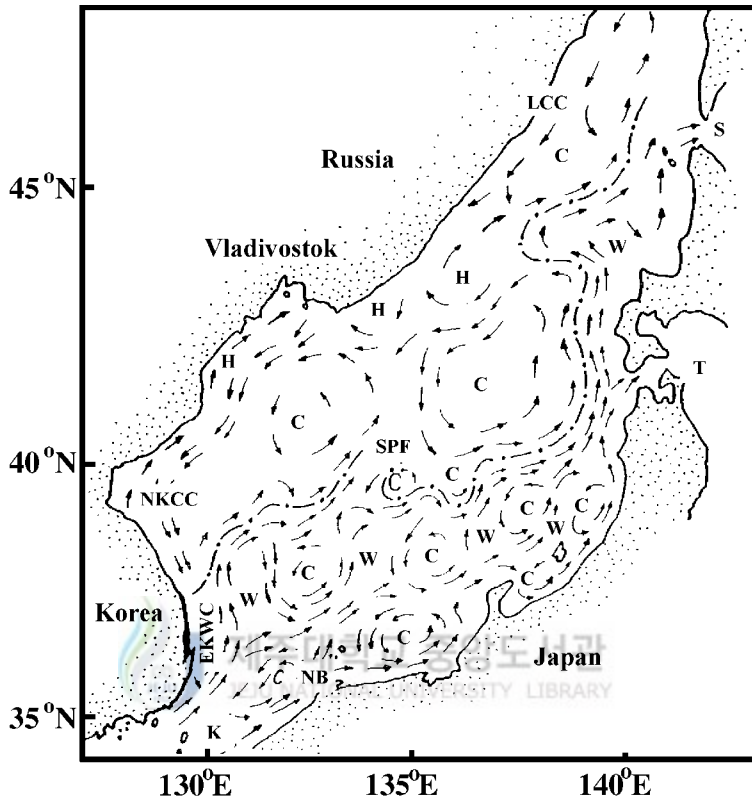


Figure 3-2. Schematic map for surface currents in the East Sea (after Naganuma, 1977). C: Cold-water regions, W: Warm-water regions, H: relatively high temperature regions, NB: Nearshore Branch, LCC: Liman Current, EKWC: East Korean Warm Current, NKCC: North Korean Cold Current, S: Soya straits, SPF: Subpolar Front, T: Tsugaru straits.

Kitani *et al.* (1987)와 Takematsu *et al.* (1999)는 해류계를 이용하여 야마토분지와 일본분지의 중심층에 대한 해류를 관측하였다. 최근에는 동해 남서부 해역에서 해류계와 PIES (pressure-sensor-equipped inverted echo sounders)를 이용한 직접적인 해류 관측 결과가 보고되었다 (Chang *et al.*, 2002; Teague *et al.*, 2004). 그러나 관측 결과가 충분하지 않아 각 정점에서의 해류만을 파악할 수 있을 뿐 구체적인 해류의 거동을 설명하지는 못했다. 해류계는 고정된 지점에 계류하기 때문에 그 지점을 통과하는 해류를 관측하기에는 유용하나 해수순환을 파악하기 위해서는 시공간적으로 충분한 관측이 이루어져야 한다.

1990년대 후반부터 동해 중심층수의 순환을 연구하기 위해 뜰개를 이용한 해류 관측이 수행되고 있다. 앞서 언급했듯이 뜰개는 해수물성자료뿐만 아니라 해류도 관측할 수 있기 때문에 중심층수의 특성과 거동을 파악하는데 매우 유용하다. 2001년 이후부터는 Argo 프로그램이 시작되면서 보다 많은 뜰개 자료를 얻을 수 있게 되어 동해 중심층수에 대한 해수순환 연구가 활발해졌다. Park (2001)은 동해 북부 해역의 뜰개 자료를 이용하여 일본분지의 심층수가 계절변화를 하며, 표층순환 (Fig. 3-2)처럼 반시계 방향의 순환을 나타냄을 보였다. 일본분지 동쪽 해역에서는 반시계 방향의 순환이 존재하며, 서쪽 해역에서는 시계 방향과 반시계 방향의 순환이 나타난다. 야마토해령 주변에서는 시계 방향의 순환이 관측되었다 (Yanagimoto *et al.*, 2003). Park *et al.* (2004)은 동해 남서부 해역의 뜰개 자료를 이용하여 울릉분지 해역의 중층순환이 울릉분지 북쪽의 시계 방향의 순환과 동해 연안과 울릉분지 남단을 따르는 반시계 방향의 순환에 의해 일어남을 밝혔다.

그러나 동해 남부 해역 전반에 대한 중층수의 순환에 대해서는 아직까지 명확하게 알려지지 않았다. 따라서 여기서는 동해 남부 해역에서 얻은 뜰개 자료를 이용하여 중층의 해수순환을 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 방법

동해 남부 해역 중층수의 순환을 파악하기 위해 1998년부터 2004년 12월까지 한국해양연구원에서 투하한 34대의 뜰개 중 29대의 뜰개와 기상연구소에서 투

하한 17대의 뜰개 중 12대의 뜰개에서 수신된 2325개의 위치자료를 이용하였다. 사용된 뜰개와 위치자료의 개수는 Table 3-1에 연도별로 구분해서 나타냈으며, 투하된 뜰개에 대한 자세한 정보는 Table 2-1에서 언급하였다.

Table 3-1. Number of floats in operation and displacement data in each year between October 1998 and December 2004

Year	Number of floats in operation	Number of displacement data
1998	1	14
1999	2	115
2000	4	98
2001	10	147
2002	18	405
2003	26	622
2004	34	924

동해 남부 해역에 대한 중층순환은 뜰개의 위치자료에서 산출된 평균해류를 바탕으로 추정하였다. 평균해류를 구하기 위해, 우선 뜰개 자료로부터 얻은 시간과 위치자료를 이용하여 체류수심에서의 실제유속 (Fig. 3-3에서 Ps_1 에서 Pf_1 까지의 유속)을 추정하였다.

Figure 3-3에서 Sf_1 에서 Ss_1 은 기록된 시간과 위치자료로부터 계산된 관측 유속을 나타내며, Ps_1 에서 Pf_1 은 실제 체류수심에서의 유속을 나타낸다. DT는 뜰개가 저층에서 머무는 시간으로, 뜰개가 하강을 시작한 후 체류수심에서 상승을 시작하기 직전까지의 시간을 뜻한다. UT는 뜰개가 표층에서 머무는 시간으로, 체류수심에서 뜰개가 상승을 시작한 후 표층에서 표류하던 뜰개가 다시 침강하기 직전까지의 시간을 뜻한다. DT와 UT는 뜰개 제작 시 설계된다. Sat는 뜰개가 표층에 도달한 직후의 시간이다. dt는 뜰개가 체류수심까지 하강하는데 걸리는

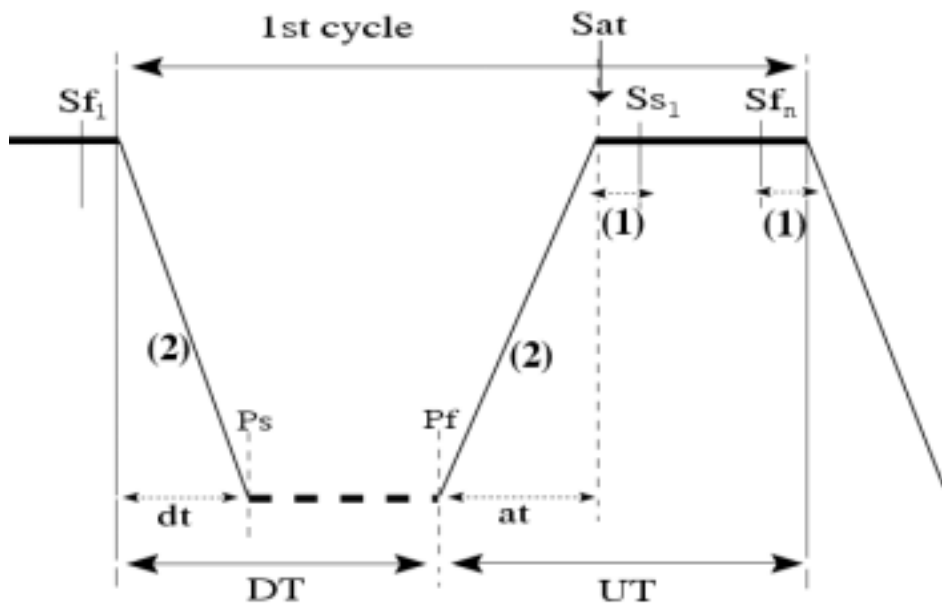


Figure 3-3. Vertical diagram of the float. DT: Time between the beginning of descent and the beginning of ascent, UT: Time between the beginning of ascent and the beginning of descent, Sat: Surfacing time, Ss_1 : First position determination after surfacing, Sf_n : Last position determination before descent, $Ss_1 \sim Sf_n$: Drifting position and time at the surface, $Sf_1 \sim Ss_1$: Observation current velocity estimates at the parking depth from the float data, $P_s \sim P_f$: True current velocity estimates at the parking depth from the float data, at : ascent time, dt : descent time, (1): Error due to drifting on the surface, (2): Error caused by drifting during ascent and descent.

시간이며, at는 체류수심에서 표층까지 상승하는데 걸리는 시간이다.

Lagrangian 방식에 의해 표류하는 Argo 뜰개를 이용하여 정확한 유속을 추정하려면 먼저 뜰개의 위치를 정확하게 파악해야 한다. Figure 3-3에서 보인 것처럼 뜰개의 위치가 파악되는 시간이 뜰개가 상승한 직후이거나 하강하기 직전이 아니기 때문에 그림에서 (1)로 나타낸 부분만큼의 유속 오차가 발생한다. ARGOS 시스템은 표층에 떠오른 뜰개에서 보내오는 시그널을 바탕으로 뜰개의 위치를 추정하며, 수신된 자료의 위치를 4개의 Class로 나누어 정의하고 있다 (Table 3-2). 이 Class 중 1, 2, 3 값을 뜰개의 위치자료로 이용하고 있다 (Ichikawa *et al.*, 2001).

Table 3-2. The ARGOS system uses the "location classes" to represent the accuracy of calculated locations

Class	Precision
3	Precision <150 m
2	150 m ≤ Precision < 350 m
1	350 m ≤ Precision < 1000 m
0	1000 m ≤ Precision

또한 상승 직후나 하강 직전의 위치를 알 수 있더라도 체류수심까지 하강하는 동안과 체류수심에서 상승하는 동안 표류된 거리 - Fig. 3-3에서 (2)로 표시한 부분 - 를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 뜰개의 위치를 이용하여 추정한 체류수심에서의 유속에는 오차가 포함될 수밖에 없다 (Ichikawa *et al.*, 2001; Park, 2001).

따라서 체류수심에서의 정확한 유속을 얻기 위해서는 뜰개가 표층에서 표류함에 따라 발생하는 오차와 뜰개가 상승하는 동안과 하강하는 동안에 해류에 의해 표류되는 오차, 그리고 동해에 투하된 뜰개가 모두 같은 체류수심을 가지고 있지 않기 때문에 나타나는 (Table 2-1 참조) 체류수심의 차이에 의한 오차를 평

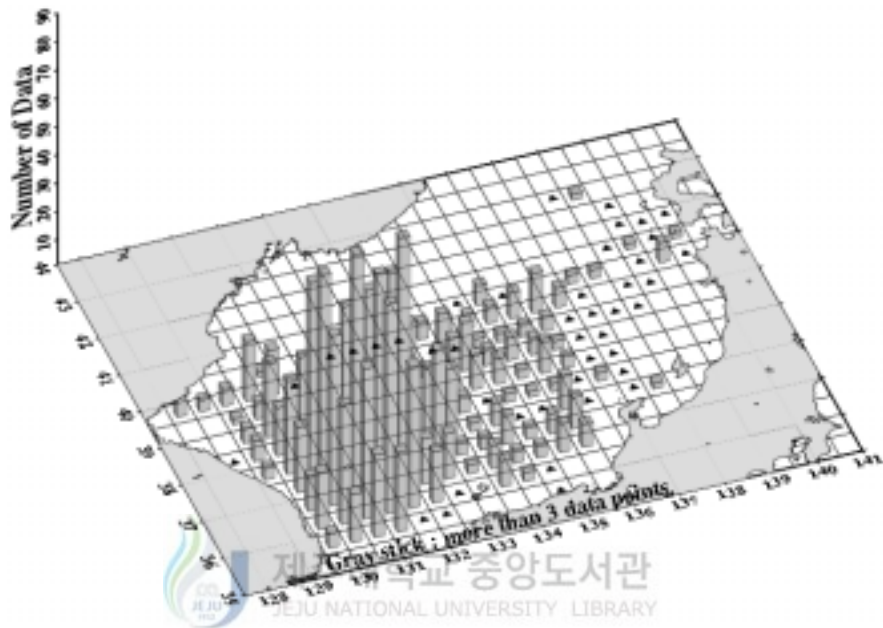


Figure 3-4. Number of data points in $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ bin. A bin with 3 more data points are made with a gray stick whose height represents the number of data. Triangle means less than 3 data points.

가해야 한다.

체류수심에서의 유속을 산정한 후, Fig. 3-4처럼 연구해역을 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 격자로 구분한 후 각 격자에 포함되는 유속값을 평균하여 평균해류를 얻었다. Park (2001)은 동해 북부 해역인 일본분지를 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 격자로 구분하여 심층순환을 정의하였다. 그러나 동해 남부 해역은 북부 해역보다 지형구조가 복잡하고, 일본분지보다 작은 규모의 울릉분지와 야마토분지가 존재하고 있기 때문에 보다 정밀한 해상도가 요구되며, 뜰개 자료의 분포상황을 고려하여 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 격자로 구분하였다. 평균값은 3개 이상의 자료를 포함하고 있는 격자에서 얻었다. Figure 3-4에서 3개 이상의 자료를 갖는 격자는 막대그래프를 이용해 나타냈고, 삼각형으로 표시된 격자는 자료가 3개 미만인 곳이다.

3. 결 과

3.1. 유속오차



표층에서 표류에 의한 유속오차

표층에서 표류에 의한 유속의 오차는 뜰개가 상승한 직후와 하강하기 직전의 기록되지 않은 시간과 위치자료에 의해 발생한다 (Fig. 3-3의 (1)). 뜰개의 상승과 침강은 뜰개 제작 시 미리 정해진 시간에 따라 규칙적으로 작동한다. 따라서 뜰개가 실제로 표층에서 보내는 시간은 체류수심에서 상승을 시작한 뜰개가 처음으로 표층에 도달한 시간 (Surfacing time, Fig. 3-3의 ‘Sat’)을 안다면 더 정확히 추정할 수 있다. 뜰개가 표층에 도달한 시간과, 표층에서 표류하는 동안에 기록된 시간과 위치를 이용하면 뜰개가 표층에 도달한 직후의 위치를 파악할 수 있기 때문에, 유추된 시간과 위치자료를 이용하여 유속을 추정할 수 있다.

뜰개가 처음으로 표층에 도달한 시간은 Ichikawa *et al.* (2001)와 APEX 매뉴얼에서 소개된 방법을 이용하여 계산하였다. 메시지 전송주기 (Repetition rate)와 수신된 메시지의 블록 (자료의 소실을 최소화하기 위해 블록단위로 자료를 전송) 수를 이용하여 상승 직후의 시간을 추정할 수 있다.

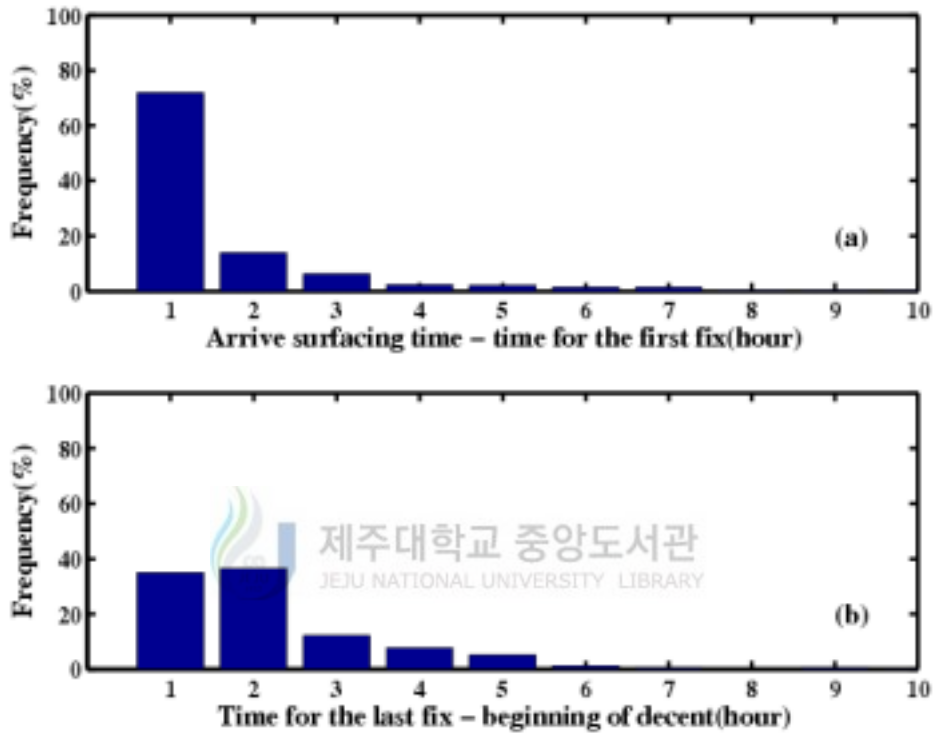


Figure 3-5. Histogram of the time (a) between the surfacing and the first fix, (b) between the last fix and the beginning of descent.

뜰개가 표층에 올라온 직후 처음으로 위치자료가 기록되기까지 걸리는 시간은 70% 이상이 1시간 이내이며 (Fig. 3-5(a)), 마지막으로 기록된 위치자료와 뜰개가 침강하기 직전까지의 추정된 시간은 70% 이상이 2시간 이내이다 (Fig. 3-5(b)). 이것은 Ichikawa *et al.* (2001)의 결과와 유사하다.

뜰개가 표층에 도달한 직후의 위치는 외삽법을 이용하여 추정하였다. 기록된 시간과 위치자료를 이용하여 함수를 구한 후 뜰개가 표층에 도달한 직후의 시간을 적용하여 뜰개가 표층에 도달한 직후의 위치를 산출하였다. 이렇게 산출된 위치를 실제 관측된 위치와 비교하면 대부분의 뜰개가 ± 10 km 이내에 속한다 (Fig. 3-6). 수신된 위치자료의 개수가 많을수록 오차가 작다. Ichikawa *et al.* (2001)는 표층에 도달한 직후의 위치를 기록된 값과 같게 취급하였으며, Park (2001)은 CELIC (Curve Estimation including Linear and clockwise-circular motion) 외삽법을 적용하여 뜰개가 표층에 도달한 직후의 위치를 추정하였다. Park(2001)에 따르면 표층에서 표류되는 거리는 최대 27 km로 위의 결과보다 크다. 분석결과 표층에서 표류되는 유속은 70% 이상의 뜰개가 10% 이내의 오차 범위에 속하며 약 0.07 cm/s의 유속값을 갖는다 (Fig 3-7).

상승과 하강하는 동안 해류에 의해 표류되는 유속오차

뜰개가 상승과 하강하는 동안 해류에 의해 표류되면서 유속의 오차가 발생한다 (Fig. 3-8). 뜰개가 상승하는 동안의 유속 (Fig. 3-8에서 (2)로 나타낸 부분)은 다음과 같이 뜰개에서 추정된 유속과 지형류를 이용하여 산정할 수 있다. 이 방법은 Ichikawa *et al.*, (2001)가 제시한 방법을 이용하였는데, 기존 방법은 뜰개가 표층에 떠오른 후 기록된 시간과 위치값을 가지고 오차를 고려하지 않은 체류수심에서의 관측유속을 계산하였는데, 여기서는 표층에서 발생하는 오차를 고려하여 계산된 체류수심에서의 관측유속을 사용하였다. Figure 3-8에서,

$$DL = \int_0^{Dt} (V_z + V_t) dt = \int_0^{Dt} (V_z) dt + V_t Dt \quad (1)$$

체류수심의 실제유속 (Fig. 3-8에서 V_t)은 관측유속 (Fig. 3-8에서 V_p)에서 뜰개가 상승하는 동안 생기는 유속 오차를 제외함으로써 추정할 수 있다.

$$V_t \propto \frac{L_p - DL}{t_p - Dt} \quad (2)$$


(1)과 (2)에 의해,

$$V_t = \frac{1}{(t_p - Dt)} \times (L_p - \int_0^{DL} V_z dt - V_t DL)$$

$$V_t = \frac{1}{t_p} \times (L_p - \int_0^{Dt} V_z dt)$$

$$V_t = V_p - \frac{1}{t_p} \times \int_0^{Dt} V_z dt$$

이다. 실제유속과 관측유속사이의 오차는



$$\epsilon_2 = \frac{1}{t_p} \times \int_0^{Dt} V_z dt$$

JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이다. 여기서 $z=at$ 이며, a 는 0.08 dB/s로 일정하다고 가정하였다. V_z 는 해류에 의해 표류될 수 있는 유속을 나타낸다. 표층과 저층을 오르내리는 뜰개는 자체적인 힘을 가지고 있지 않기 때문에 외력에 의해 쉽게 영향을 받는다. 동해는 조류의 영향이 크지 않기 때문에 대부분의 뜰개는 바람과 해류에 의해 움직인다. 표층에 비해 저층은 유속이 작기 때문에 상대적으로 뜰개는 안정된 움직임을 보인다. 그러나 표층에 근접할수록 강한 해류와 더불어 바람의 영향을 받아 외력에 의한 표류가 발생한다. 저층에 위치했던 뜰개가 그 위치에서 그대로 표층으로 상승해서 그 정보를 제공한다면 보다 정확한 저층유속을 구할 수 있다. 뜰개가 해류에 의해 받을 수 있는 영향을 파악하기 위해 지형류를 계산하여 수심에 대한 유속의 변화를 살펴보았다.

$$V_{shear} = \int |V(z) dt| = \int |V(z)| d(z/a)$$

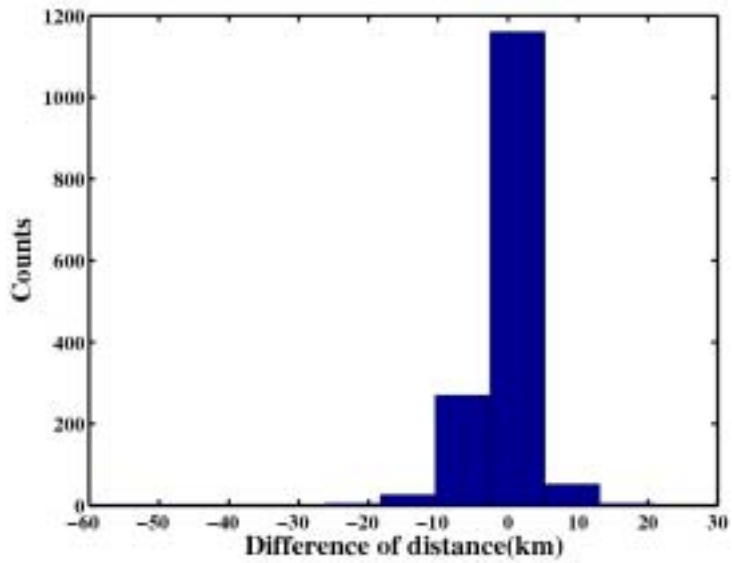


Figure 3-6. Difference of distance between recorded positions and calculated positions by linear interpolation.

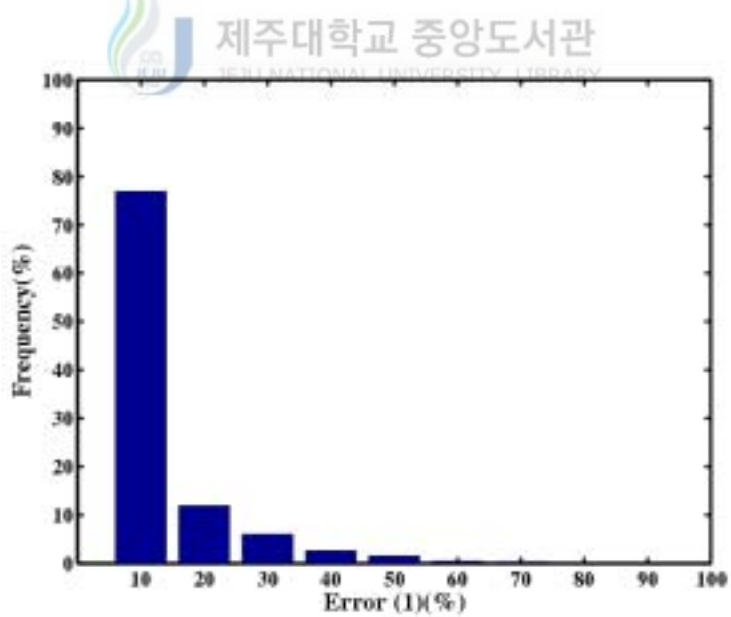


Figure 3-7. Estimated error ratio in case of the error(1) in Fig. 3-3.

표층에 근접할수록 강한 유속이 나타나며, 유속변화도 저층보다 표층에서 크게 나타난다. 뜰개의 상승속도를 고려하여 뜰개가 상승하면서 해류에 의해 표류될 수 있는 거리를 지형류 계산을 통해 분석한 결과 최소 12 m에서 최대 470 m의 거리차를 보인다.

따라서 뜰개가 상승하는 동안의 오차는

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{t_p} \times \frac{1}{a} \times \int_{-700}^0 V_z dz$$

으로 정의할 수 있다. 80% 이상의 뜰개가 10% 이내의 오차 범위에 속하며, 이로 인해 생길 수 있는 유속오차는 약 0.06 cm/s 이다 (Fig. 3-9).

실제유속과 관측된 유속사이에는 뜰개가 상승한 후 위성과 접촉하기 전까지의 유속 (Fig. 3-3에서 (1))과 뜰개가 상승하는 동안의 유속 (Fig. 3-3에서 (2))에 의해 $\varepsilon = \sqrt{2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2}$ 의 오차가 생긴다. 80% 이상의 대부분의 뜰개가 30% 이내의 오차 범위 안에 포함된다.

동해에 투하된 뜰개는 500 m, 700 m, 800 m의 체류수심을 갖는다. 따라서 평균유속을 구하기 위해서는 체류수심의 차이에 의한 오차를 고려해야만 한다. 그러나 동해의 중심층수는 거의 동일한 수괴를 이루고 있어 500 m에서 800 m 사이의 수직 shear는 거의 없다 (Chang *et al.*, 2002). 위의 지형류 계산에 의하면 동해 남부 해역에서 수심 500 m에서 800 m 사이의 지형류는 약 0.005 cm/s 차를 보인다. 따라서 체류수심의 차에 의한 유속은 무시할 수 있다.

3.2. 평균유속

위치보정을 거친 후 얻은 체류수심에서의 속도벡터는 Fig. 3-10에 나타냈다. 동해에 투하된 뜰개는 500 m와 700 m, 800 m등의 체류수심을 갖는다 (Table 2-1 참조). 각기 다른 수심을 갖지만 분석된 뜰개 중 63%가 700 m에서 거동하며, 앞서 언급했듯이 500~800 m에서는 유속 차가 없기 때문에 체류수심에서의 속도는 700 m에서의 유속으로 고려하였다.

Figure 3-10에서 나타낸 것처럼 이 유속벡터분포를 통해서는 분석이 용이하지 않기 때문에 Fig. 3-4와 같이 연구 해역을 0.5°×0.5° 격자로 구분하였다. 3개

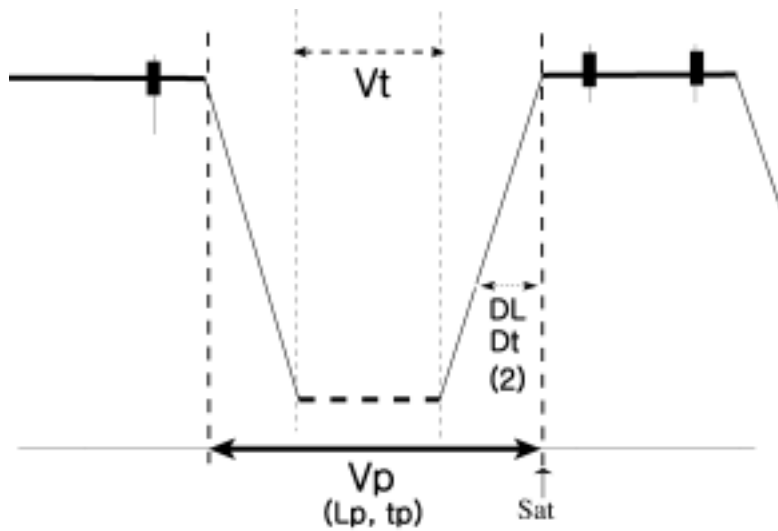


Figure 3-8. Schematic of the error (2) estimation for the period from the ascent/descent time. Sat: Surfacing time, V_t : True current velocity at the parking depth, V_p : Current velocity at the parking depth, which is estimated based on surfacing time and positions.

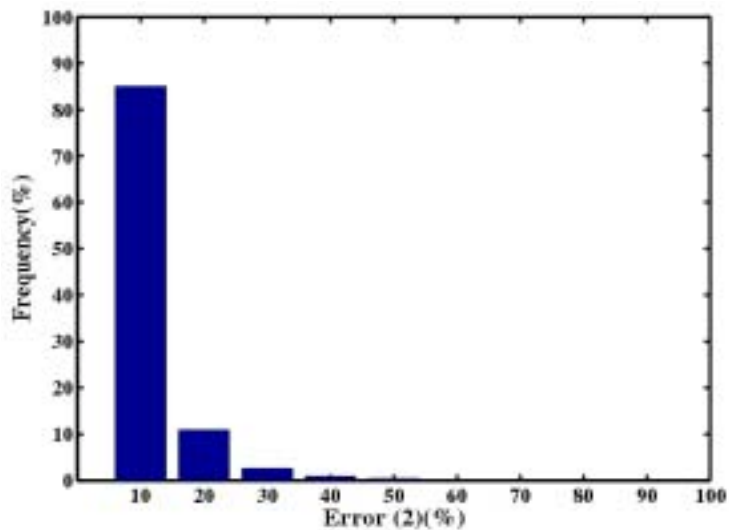


Figure 3-9. Estimated error ratio in case of the error(2) in Fig. 3-3.

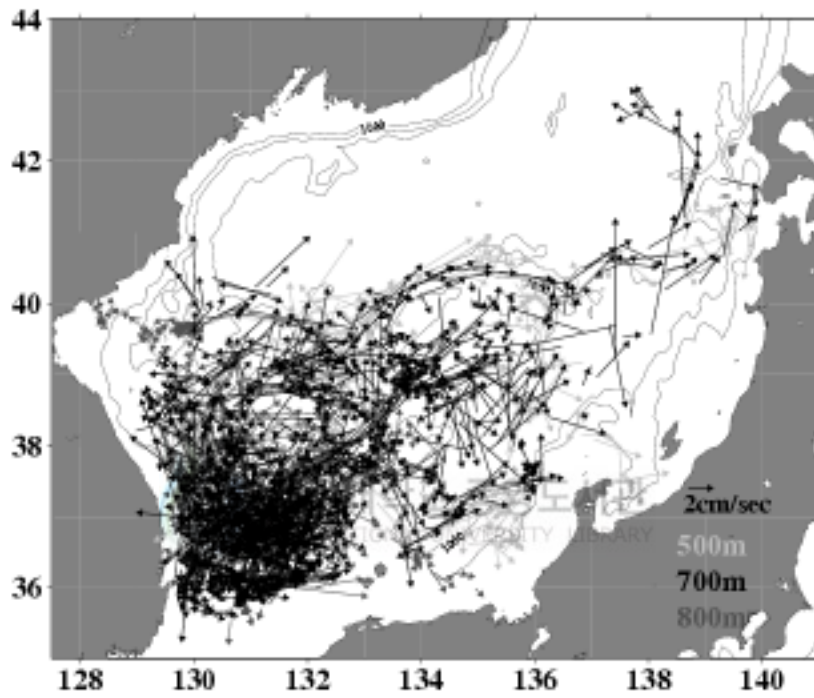


Figure 3-10. Velocity vector estimates at the parking depths using 2325 displacement data from 41 floats. Different color means different parking depth.

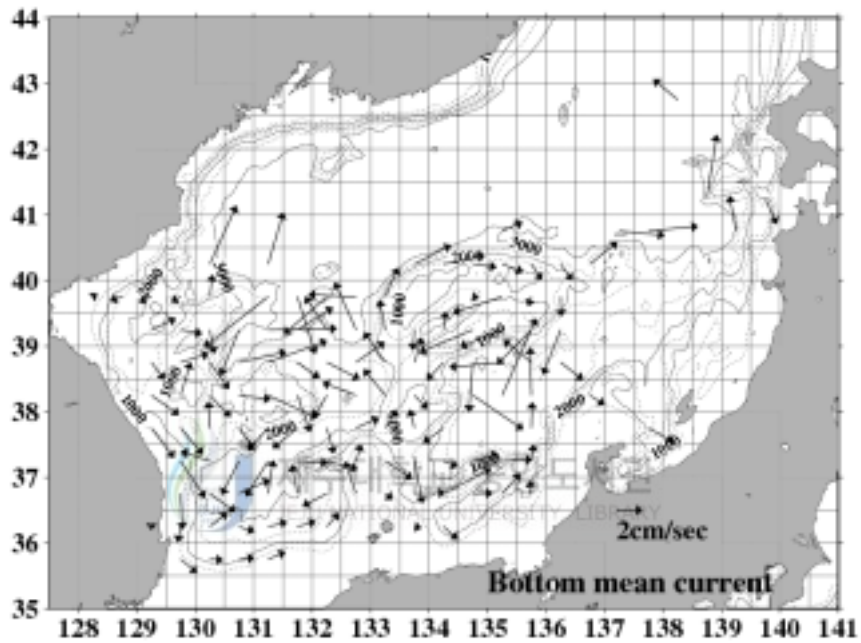


Figure 3-11. Mean velocity estimates at each bin. Results from bins containing three or more data are shown, using 93% of the total displacement data. Arrows are contoured at the center of each bin.

이상의 자료를 갖는 격자에 대해서 평균유속을 구했으며, 각 격자에 대한 평균유속벡터는 Fig. 3-11과 같다. 위치자료의 93% 이상이 이용되었으며, 평균유속벡터는 각 격자의 중심에 나타냈다. 야마토분지의 북동부 해역에서는 자료 부족으로 인해 평균 유속값을 얻을 수 없었다.

3.3. 유속의 정량적 비교

뜰개 자료에서 추정된 유속을 평가하기 위해 뜰개 자료에서 얻은 평균해류와 해류계에서 얻은 자료를 비교하였다 (Fig. 3-12). Figure 3-12는 600 m 이심에서 관측된 동해 평균해류를 나타낸 것이다. 일본분지에 위치한 정점 M1~M7은 Takematsu *et al.* (1999)에 의해 관측된 결과로 1993년부터 1996년에 걸쳐 11개월에서 길게는 2년 동안 관측되었다. 야마토분지에서 관측된 정점 X, Y, Z는 1986년 10월부터 1997년 4월까지 600 m 이심에서 관측된 것이고, U, V, W정점은 1987년 10월부터 1988년 5월까지 1000 m 이심에서 관측된 것이다 (Kitani, 1987). L은 Lie *et al.* (1989)에 의해 약 70일 동안 관측된 해류계 결과이다. A1~A13으로 표시된 정점은 Fig. 3-11에 나타난 뜰개에서 추정된 평균유속으로 해류계 관측점과 유사한 격자의 결과를 추출하였다.

뜰개 자료와 해류계 자료가 같은 지점, 같은 수심에서 관측된 것이 아니기 때문에 모든 비교정점에서 같은 유속과 유향을 기대할 수 없다. 하지만 유량은 전반적으로 상당히 유사하게 나타난다. 비슷한 수심에서 관측된 경우에는 뜰개에서 추정된 유속과 해류계를 통해 관측된 유속이 상당히 유사하게 나타난다 (Table 3-3).

동해 연안 외해의 L로 표시된 지점에서는, Lie *et al.* (1989)에 의해 790 m 수심에서 3.8 cm/s의 남동류가 관측되었다. 이 격자에 해당되는 뜰개에서 얻어진 평균유속 (A8)은 2.9 cm/s로 남동류의 흐름을 보인다.

Chang *et al.* (2002)에 의하면 EC4 지점에서는 동해 연안을 따라 1210 m의 저층에서 6.2 cm/s의 강한 남향류가 나타나며, 770 m에서는 3 cm/s의 유속값을 보인다. 이 격자에 해당되는 뜰개 자료 (A7)는 2.7 cm/s의 유속을 나타내며 해류계 자료와 같은 방향을 보인다.

UIG (EC1)에서, Chang *et al.* (2002)은 390 m에서는 2.4 cm/s, 1380 m에서는 1.4 cm/s의 남서류를 관측했고, 뜰개 자료 (A4)에서는 3.2 cm/s의 남서류가

관측되었다. Teague *et al.* (2004)에 의하면 정점 EC1의 777 m 수심에서 1.87 cm/s 유속이 관측되었다. 400 m 이심에서의 평균유속은 0.8~2.7 cm/s 범위를 갖는다 (Chang *et al.*, 2004).

Table 3-3. Compared with the velocity of the current meters and Argo floats in Fig. 3-12

Measurement station		Velocity (measurement depth)	
Current meter	Argo float	Current meter	Argo float
L (Lie <i>et al.</i> , 1989)	A8	3.8 cm/s (790 m)	2.9 cm/s (700 m)
EC4 (Chang <i>et al.</i> , 2002)	A7	3 cm/s (770 m)	2.7 cm/s (700 m)
EC1 (Teague <i>et al.</i> , 2004)	A4	2 cm/s (700 m)	3.2 cm/s (700 m)
M5 (Takematsu <i>et al.</i> , 1999)	A2	3.9 cm/s (900 m)	4.3 cm/s (700 m)



울릉분지에 위치한 정점 EC3에서는 해류계 관측 결과 2200 m에서 0.67 cm/s의 북동류가, 뜰개 자료 (A5)에서는 700 m에서 2.6 cm/s의 유속이 관측되었다. Teague *et al.* (2004)는 669 m에서 평균 0.14 cm/s, 최대 9.4 cm/s의 유속을 관측했다. 정점 EC2에서는 해류계 결과 1670 m에서 0.9 cm/s, 669 m에서는 0.14 cm/s (Teague *et al.*, 2004)의 북동류가 관측되었으며, 뜰개 자료 (A6)에서는 평균 1.3 cm/s의 남동류가 관측되었다.

일본분지 남서부해역에 위치한 M5 정점의 900 m 수심에서, Takematsu *et al.* (1999)는 3.9 cm/s의 약한 남향류의 특징을 보이는 서향류를 관측했고, 뜰개 자료에서는 (A2, A3) 4.3 cm/s와 3.6 cm/s의 서향류와 남서향류가 관측되었다.

야마토해령인 M2 지점에서는 Takematsu *et al.* (1999)에 의해 2000 m에서 0.4 cm/s의 남동류가 관측되었다. 이 지점에서는 관측된 뜰개 자료가 없기 때문에 근접한 바로 아래쪽 격자결과를 보면 (A1) 700 m에서 1.5 cm/s의 남서류가 관측되었다.

이 해역은 계절변동과 중규모변동에 의한 영향이 나타나는 곳이기 때문에

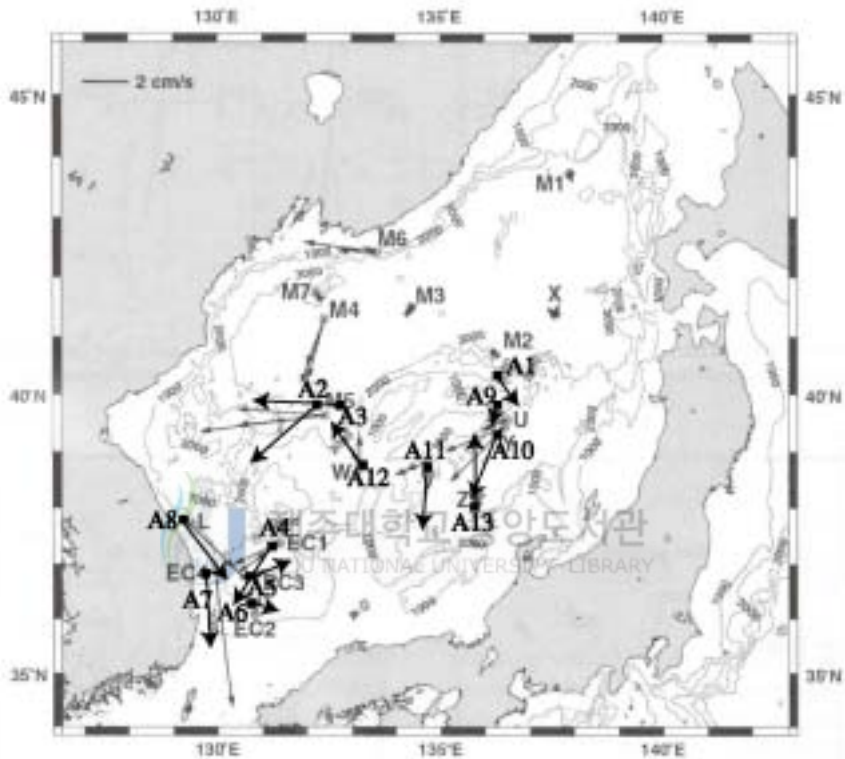


Figure 3-12. Mean current vectors observed below 600 m depth in the East Sea (from Chang *et al.*, 2002). The measurements are based on Chang *et al.* (2002) in the Ulleung Basin, Kitani (1987) in the Yamato Basin, Takematsu *et al.* (1999) in the Japan Basin, and Lie *et al.* (1989) at position L. A1~A13 represents the mean current vectors from the Argo floats in Fig. 3-11.

(Takematsu *et al.*, 1999; Chang *et al.*, 2002), 해류계 자료에서의 변동을 고려하면, 뜰개 자료에서 얻은 유속과 견줄 만하다.

3.4. 중층순환

3.4.1. 평균해류

Figure 3-13에 해저지형과 함께 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 격자에 해당되는 평균유속벡터와 이에 대한 표준편차 (Standard deviation)를 나타내었다. 평균유속벡터와 표준편차는 모두 격자 중심에 나타냈다. 평균유속의 변동성이 전반적으로 평균유속 크기와 유사하게 나타나며, 동해 연안을 따라서는 남북성분의 변동이 더 크게 나타난다. 이와 같은 결과는 해류계에 의한 관측결과에서도 볼 수 있다 (Chang *et al.*, 2002). Figure 3-14는 평균해류로부터 유추된 동해 남부 해역 중층순환의 모식도이다.

울릉분지 북동쪽 한국퇴 해역에서는 한국퇴를 선회하는 시계 방향의 흐름이 나타나며, 이 흐름은 울릉분지와 독도사이의 좁은 골 (UIG)을 통해 울릉분지 안으로 이어지고 있다. 3 cm/s 이상의 비교적 강한 흐름이 UIG를 통해 울릉분지로 유입되고 있다. 울릉도 서쪽 해역에서는 북향하는 해류가 나타난다. 이 흐름구조는 한국퇴를 시계 방향으로 선회한 흐름이 UIG를 통해 울릉분지로 유입된 후 울릉분지 서쪽 해역을 통해 빠져나가면서 한국퇴와 울릉도를 포함하는 시계 방향의 흐름이 있음을 시사한다 (Fig. 3-14). 모델결과에서도 이와 유사한 결과를 찾을 수 있다. Hogan and Hurlburt (2000)의 mean abyssal circulation 모델은 한국퇴를 시계 방향으로 선회하는 흐름을 모사한다.

동해 연안을 따라 흐르는 남향류와 남동향류는 3 cm/s 이상의 유속값을 보인다. 해류계 관측결과에서도 동해안을 따라 남하하는 흐름이 관측된다 (Lie *et al.*, 1989). 북위 36°N 해역에서는 2 cm/s 미만의 해류가 울릉분지 남단을 따라 동쪽방향으로 흐른다. 이 해류는 Oki Spur 서쪽 해역에서 북상하는 흐름을 보인다. 동해 연안을 따라 남하하는 흐름은 Fig. 3-14에서 볼 수 있듯이 동해 연안과 울릉분지 남단, Oki Spur로 이어지는 반시계 방향의 순환을 갖는다.

야마토분지에서는 분지남단을 따라 해류의 흐름이 나타난다. 야마토분지 중앙에서는 북상하는 흐름이 나타나면서 Oki Spur를 빠져나온 해류가 야마토분지를

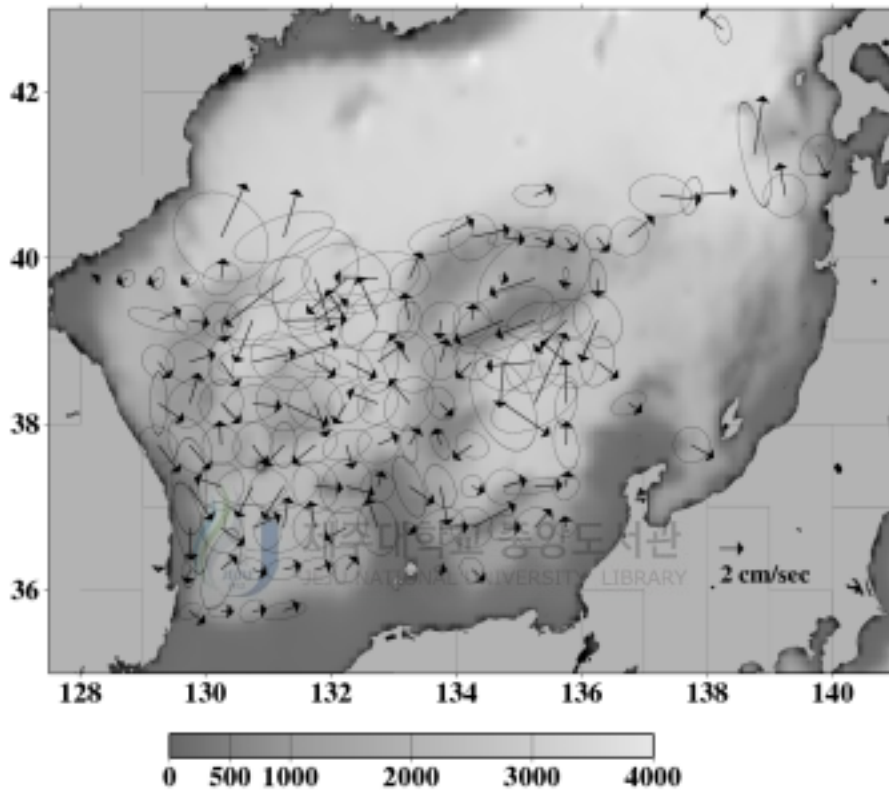


Figure 3-13. Mean velocity estimates at each bin along with their standard deviation ellipses and the bottom relief in color shadings. Arrows and ellipses are contoured at the center of each bin.

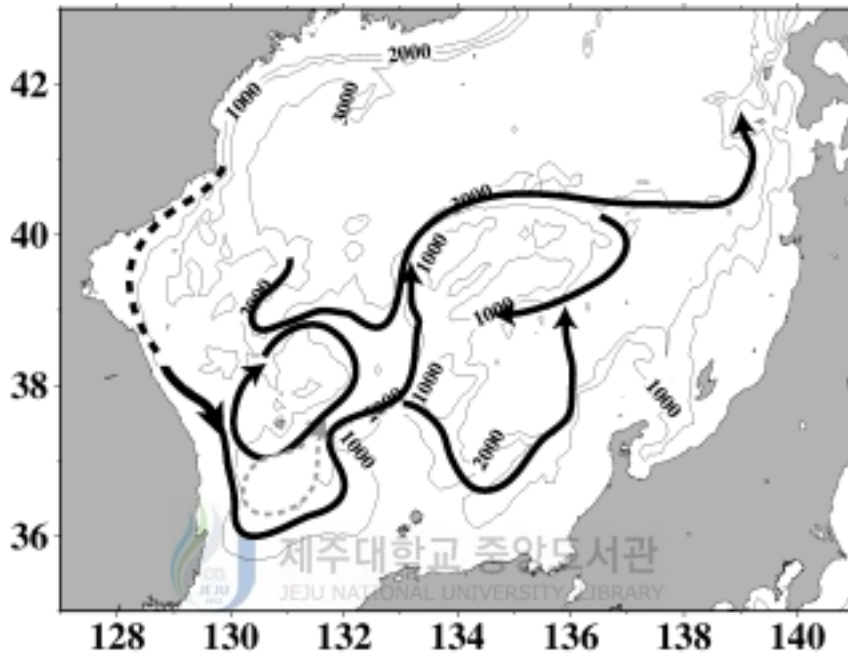


Figure 3-14. Schematic of intermediate level circulation pattern inferred from the Argo floats data over the southern part of the East Sea.

반시계 방향으로 순환하는 흐름을 보인다 (Fig. 3-14). 야마토해령에서는 해령 끝단을 따르는 흐름이 나타나며, 이 흐름은 전향하여 야마토해령 주위를 선회하거나 동진하여 야마토해령을 빠져나가고 있다. 다시 말해, 야마토해령으로 유입된 흐름은 야마토해령을 시계 방향으로 선회하여 야마토분지와 야마토해령으로 유입되거나 동진하여 야마토해령을 빠져나간다. 야마토분지와 야마토해령으로 유입되는 해류는 Oki Spur 북쪽 해역에서 분지되고 있다.

일본분지 남부 해역에서는 일본분지 남단 지형을 따르는 해류의 흐름이 나타나고 있다. 이 흐름은 야마토해령을 지나 동진하는 흐름으로 (Fig. 3-14), 표층순환에서 극진선이 존재하는 곳이다.

동해 남부 해역의 중층순환은 해역에 따라 다양한 순환형태를 보이는데, 평균해류 (Fig. 3-12)와 함께 각 해역에서의 중층순환 구조를 자세히 파악하기 위해 뜰개의 궤적을 살펴보았다. 해역은 크게 울릉분지가 있는 동해 남서부 해역과 야마토분지와 야마토해령을 포함한 동해 남동부 해역, 일본분지 남부 해역으로 구분하였다.

3.4.2. 동해 남서부 해역



동해 남서부 해역의 울릉분지에서는 크게 ① 울릉도와 한국퇴를 중심으로 선회하는 시계 방향의 흐름과 - 이 흐름은 UIG를 통해 울릉분지로 유입된 해수가 울릉도 서쪽 해역에서 북상한 후 한국퇴를 선회하여 다시 울릉분지로 유입된다. ② 동해 연안과 울릉분지 남단을 따르는 반시계 방향의 흐름이 나타난다.

① 울릉도와 한국퇴를 중심으로 선회하는 시계 방향의 흐름

울릉분지에서의 평균해류는 (Fig. 3-13), UIG에서는 남서향을 나타내며, 울릉도 서쪽 해역에서는 한국퇴로 빠져나가는 북향류가 나타난다. 울릉도 북서쪽 해역은 표층에서 동한류와 북한한류가 만나는 곳이며, 울릉분지 북쪽 끝단을 따라서 동-북동류의 흐름이 생성된다 (Preller and Hogan, 1998). 울릉도 북동쪽의 한국퇴에서는 한국퇴를 따라 선회하는 시계 방향의 흐름을 보인다.

뜰개의 궤적을 살펴보면, 울릉도 주변에 투하한 뜰개는 대부분 UIG를 통해 울릉분지로 유입되며 남서향의 흐름을 보인다 (Fig. 3-15). Figure 3-15에 나타난 Telecom ID's 18418, 18419 뜰개와 WMO ID 2900443 뜰개의 궤적에서 볼

수 있듯이 울릉분지로 유입된 뜰개는 시계 방향과 반시계 방향의 순환이 나타나면서 특정한 순환구조를 말하기 어렵다. Figures 3-15~3-18에는 지형적인 효과를 고려하기 위해 $(\xi+f)/H$ 와 함께 뜰개 궤적을 나타내었다. $(\xi+f)/H$ 에서 ξ 는 일반적으로 f 보다 작기 때문에 무시하고, H 와 f 만을 고려한 $\log(f/H)$ 를 나타냈다.

평균해류를 살펴보면, 울릉분지로 유입된 해류는 울릉분지 서쪽 끝단에서 울릉분지 남단을 따르는 남동향류와 북상하는 북향류가 나타난다 (Fig. 3-13). 이런 흐름은 UIG로 유입된 해수가 울릉분지의 서쪽단면을 만난 후 발산하는 등심선으로 인하여 일관된 흐름을 유지하기 어렵기 때문으로 생각된다. 따라서 시계 방향의 성향이 강한 흐름은 한국퇴 방면으로 향하고 (Fig. 3-15의 Telecom ID 18418 뜰개), 일부는 반시계 방향의 흐름에 따라 울릉분지 남단으로 향하는 것으로 생각된다 (Fig. 3-15의 Telecom ID 18419 뜰개). Lie *et al.* (1995)에 의하면 이 해역은 지형평형을 이루는 시계 방향과 반시계 방향의 와류가 존재한다.

UIG로 유입되는 흐름은 한국퇴를 선회하는 흐름의 일부가 유입되는 것으로 생각된다. Figure 3-16에서 WMO ID's 5900193 뜰개와 2900202 뜰개를 보면, 이 두 뜰개는 초기 투하위치는 다르지만 유사한 시기에 유사한 경로를 따라 한국퇴를 시계 방향으로 선회한다. 이외에도 Fig. 3-16에 나타낸 뜰개는 한국퇴를 선회하면서 울릉분지로 유입된다. 한국퇴를 선회하는 흐름은 일본분지의 해수를 끌어당기는 역할을 한다. 울릉분지의 1500m 이하 저층에는 0.1°C이하의 저층냉수가 존재하는데 (Chang *et al.*, 2002), 이 냉수는 일본분지에서 형성된 심층수 (Senjyu and Sudo, 1993; Seung and Yoon, 1995)에서 기인하며, 한국퇴 (Cho and Kim, 1995; Shin *et al.*, 1998; Teague *et al.*, 2004)와 야마토해령의 북서쪽 해역 (Isobe and Isoda, 1997), 그리고 동해 연안을 따라 유입된다 (Yun *et al.*, 2004). Chang *et al.* (2002)에 의하면 울릉도와 독도사이의 UIG는 울릉분지의 저층수를 공급하는 유일한 통로이다.

WMO ID's 2900298 뜰개와 2900202 뜰개인 경우 (Fig. 3-16), 130.5°E, 38.5°N 부근에서 한국퇴를 벗어난 뜰개가 일본분지를 반시계 방향으로 선회한 후 다시 한국퇴를 시계 방향으로 선회한다. 이 과정에서 일본분지의 저층냉수가 울릉분지로 유입되는 것으로 판단된다.

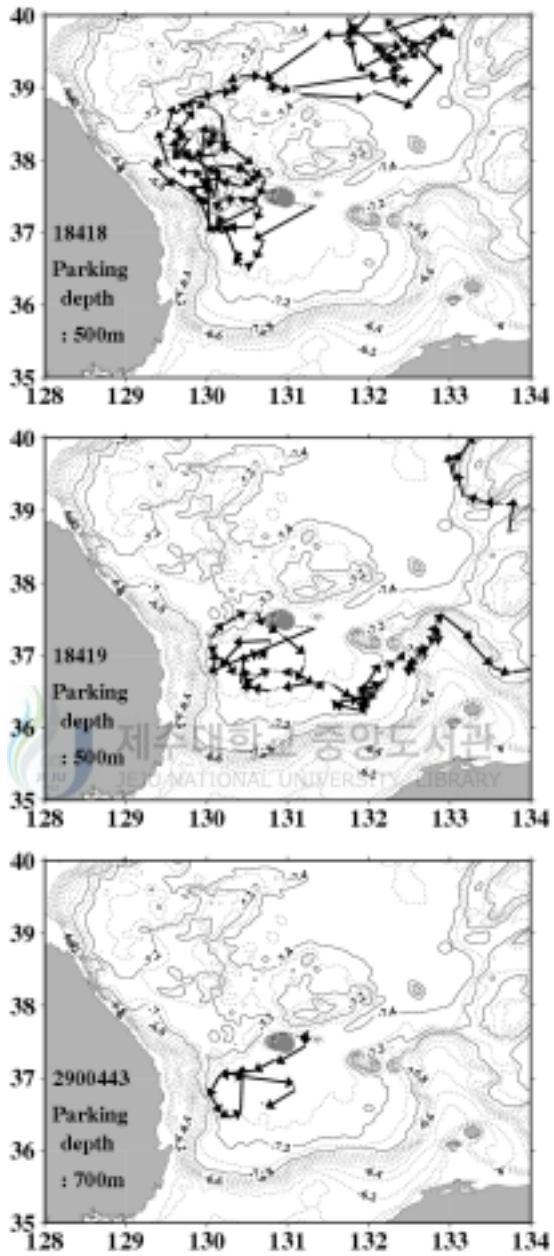


Figure 3-15. Trajectories from floats, Telecom ID's 18418 and 18419, and WMO ID 2900443. Filled gray circles denote the deployment points.

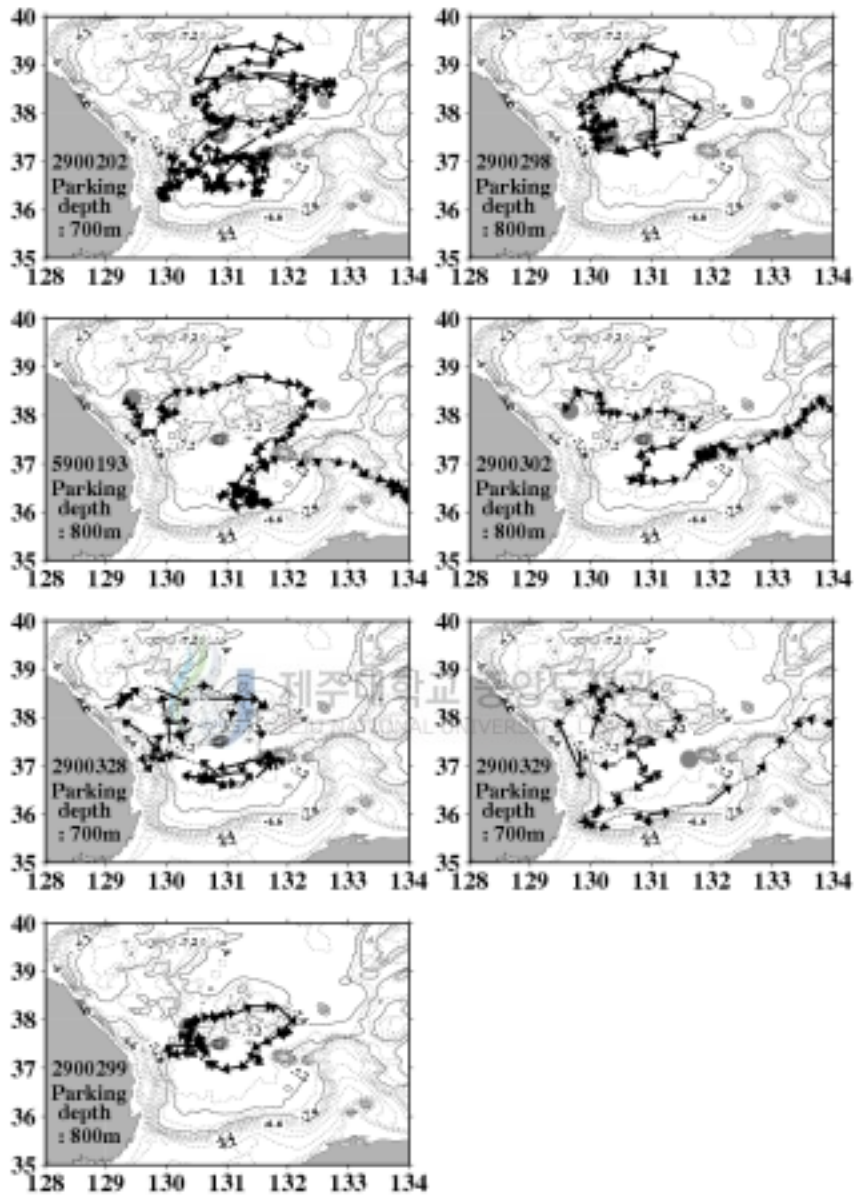


Figure 3-16. Trajectories from floats, WMO ID's 2900202, 2900298, 5900193, 2900302, 2900328, 2900329 and 2900299. The same as Fig. 3-15.

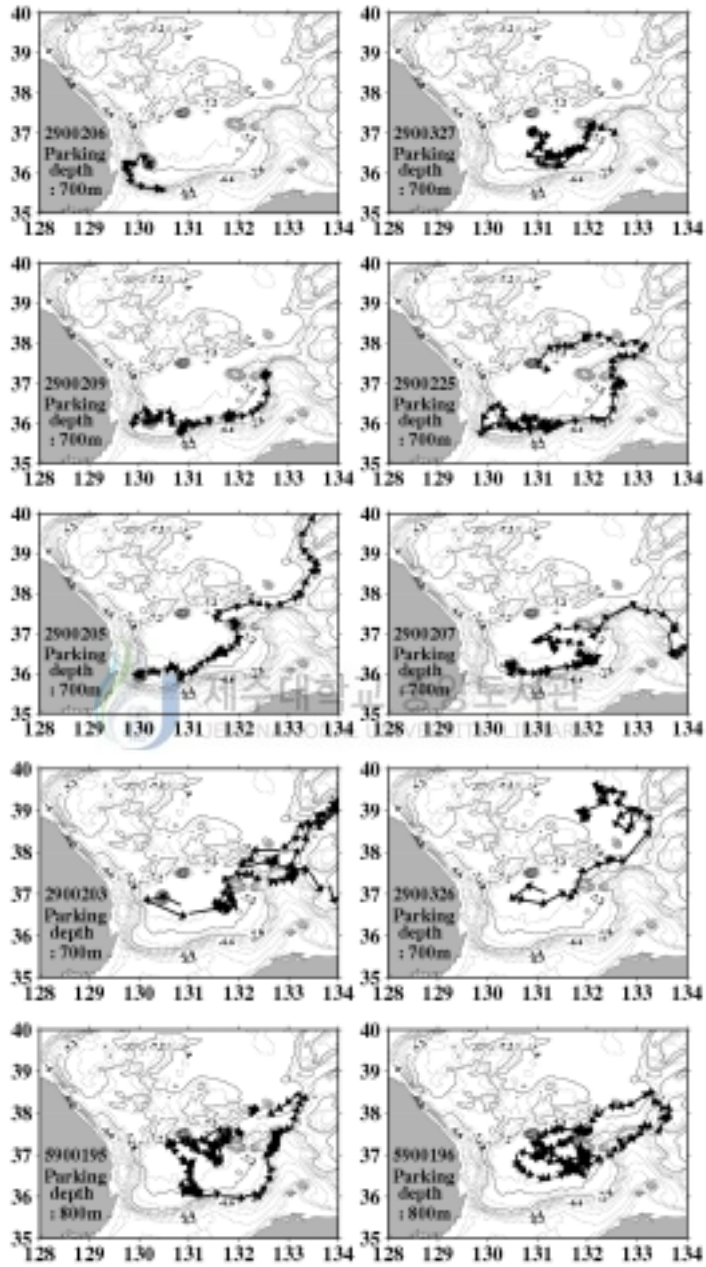


Figure 3-17. Trajectories from floats, WMO ID's 2900206, 2900327, 2900209, 2900225, 2900205, 2900207, 2900203, 2900326, 5900195 and 5900196. The same as Fig. 3-15.

② 동해 연안과 울릉분지 남단을 따르는 반시계 방향의 흐름

동해 연안에서 관측되는 뜰개의 궤적 (Fig. 3-15의 Telecom ID 18418 뜰개)을 살펴보면, 동해 연안을 따라 남하하는 흐름이 관측된다. 해류계 관측결과에서도 동해 연안에서 3 cm/s 이상의 남향류가 관측되었다 (Lie *et al.*, 1989; Chang *et al.*, 2002). 남향류는 여름철보다는 겨울철에 뚜렷하게 나타난다.

울릉분지의 남쪽 해역에 투하된 뜰개와 울릉분지의 서쪽 끝단에서 남하하는 뜰개는 남쪽으로 지형을 가로질러 흐르다가 낮은 지형을 만나 작동이 중단되는 것이 있긴 하지만 대부분 울릉분지 남단에서 동진하는 흐름을 보인다. Figure 3-17에 나타난 뜰개는 모두 울릉분지 남단을 따르고 있으며, 대부분 $-7.2 \sim -7.8$ ($\log(f/H)$)의 등심선을 따라 지형과 유사한 경로로 거동하고 있다. 울릉분지 남단의 평균흐름을 보면 북위 36°N 해역에서 넓은 범위에 걸쳐 띠 형태를 이루고 있다 (Fig. 3-13). 이는 동해 연안과 울릉분지 남단을 따라 동진하는 반시계 방향의 흐름을 이룬다.

동해 연안을 따라 남하하는 흐름은 3 cm/s 이상의 유속값을 나타내며 울릉분지 남단을 따라 동진하는 흐름은 2 cm/s 이하의 유속값을 보인다. 이것은 폭이 좁은 동해 연안을 따라 남하하던 흐름이 비교적 넓은 지형을 만나 방향을 전환하면서 흐름의 폭은 넓어지고 유속은 약해지는 현상으로, Stommel and Arons (1972)의 이론적 모델 결과와 일치한다.

울릉분지 남단을 반시계 방향으로 선회하는 이 흐름은 Oki Spur 서쪽 해역에서 북상하여 독도주변에서 UIG를 통하거나 독도 남쪽 해역을 통해 Oki Spur를 빠져나간다.

3.4.3. 동해 남동부 해역

동해 남동부 해역의 야마토분지와 야마토해령에서는 ① 야마토분지의 남단을 따르는 반시계 방향의 흐름과 ② 야마토해령을 선회하는 시계 방향의 흐름이 나타난다. 이 두 흐름은 Oki Spur의 북쪽 해역에서 분지된 흐름에 의해 형성된다.

① 야마토분지의 남단을 따르는 반시계 방향의 흐름

울릉분지 남단을 선회한 후 Oki Spur로 유입된 뜰개는 약 133°E, 37.5°N

해역에서 분지되어 북상하거나 남하한다 (Fig. 3-18). Figure 3-18에서 WMO ID's 2900205 뜰개와 2900203 뜰개인 경우는 Oki Spur 북쪽 해역에서 북상하여 야마토해령 쪽으로 향한다. 반면 Telecom ID 18419 뜰개와 WMO ID 2900207 뜰개는 남동쪽으로 남하하여 야마토분지를 향하고 있다.

북동쪽으로 북상하는 흐름은 8월에서 11월까지 주로 여름철에 나타나며, 남동쪽으로 남하하는 흐름은 1월에서 3월까지 주로 겨울철에 나타나면서 계절변화를 보인다. 1996년부터 1999년까지 ERS-2 고도자료와 수치모델결과로 계산된 지형류 흐름을 보면 12월부터 4월까지 겨울철에는 주로 북상하는 흐름이 나타나고, 5월부터 11월까지 여름철에는 북상하는 흐름과 남하하는 흐름이 모두 나타나고 있다 (Akihiko and Yanagi, 2001). 이것은 분지되는 현상이 일시적인 계절변화에 의해 나타남을 암시한다.

Oki Spur 중층에서의 이런 흐름 경향은 관측값에 의해서는 보고되고 있지만 (Katoh *et al.*, 1996), 중심층 모델결과에서는 거의 나타나지 않는 현상이다. 동해 저층 흐름을 잘 모사한 Hogan and Hurlburt (2000)의 모델 결과에서도 북상하는 흐름은 보이지만, 남하하는 흐름은 재현되고 있지 않다. 그러나 지형적인 영향을 고려한 모델결과에서는 북상과 남하하는 흐름이 뚜렷하게 재현되고 있다 (Holloway *et al.*, 1995). 이는 중층 뜰개의 거동이 지형적인 영향을 그대로 반영하고 있음을 암시한다.

② 야마토해령을 선회하는 시계 방향의 흐름

Oki Spur에서 분지된 뜰개는 북동쪽으로 전향하여 야마토해령으로 유입된다 (Fig. 3-18). 야마토해령으로 유입된 WMO ID 2900205 뜰개는 야마토해령 외곽을 따라 시계 방향으로 선회하는 움직임을 보인다. 외곽을 따라 선회하던 흐름은 야마토해령을 빠져나와 동진하다가 일본분지로 유입되고 있다. Telecom ID 18419 뜰개인 경우는 야마토분지를 거쳐 야마토해령으로 유입되는데, 이 뜰개는 야마토해령을 시계 방향으로 선회하여 다시 야마토분지로 유입되고 있다. WMO ID 2900204 뜰개인 경우는 일본분지 남부 해역을 따라 동진하다가 야마토해령을 따라 시계 방향으로 거동하고 있다.

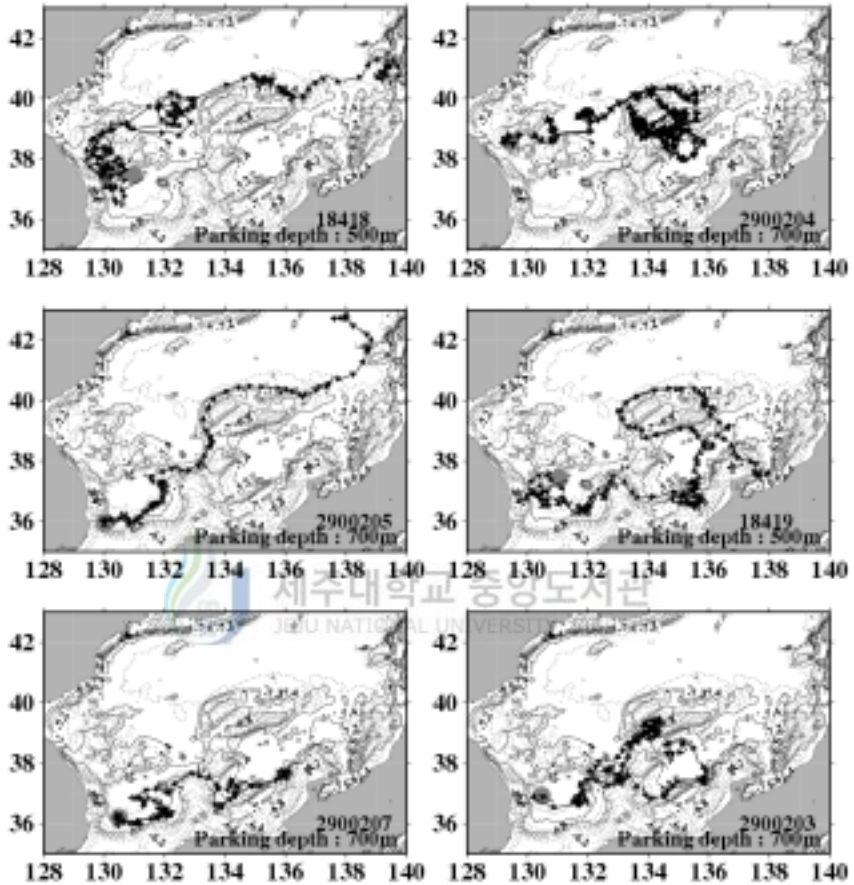


Figure 3-18. Trajectories from floats, Telecom ID's 18418 and 18419, WMO ID's 2900204, 2900205, 2900207 and 2900203. The same as Fig. 3-15.

3.4.4. 일본분지 남부 해역

129.3°E, 38.5°N 지점에 투하된 WMO ID 2900204 뜰개는 일본분지 남부 해역을 따라 동진하면서 야마토해령으로 유입된다 (Fig. 3-18). 2900204 뜰개가 투하된 지점은 표층에서 동한난류 (EKWC)와 북한한류 (NKCC)가 만나는 해역으로 극전선이 시작되는 해역이다. 극전선을 따라 움직이던 뜰개는 135.5°E, 40°N 지점에서 전향하여 야마토해령으로 유입된다. 울릉분지에 투하된 Telecom ID 18418 뜰개는 울릉분지를 빠져나와 북진하다가 130°E, 38.5°N 지점에서 북동진하기 시작하여 극전선을 따라서 움직이고 있다.

WMO ID 2900204 뜰개와 Telecom ID 18418 뜰개는 동진하던 뜰개가 131.0°E, 39°N, 132°E, 39.5°N 해역에서 반시계 방향의 순환을 보이고 있는데, 이곳은 일본분지에서 동해 남부 해역으로 저층냉수가 공급되는 해역이다 (Yun *et al.*, 2004). 따라서 반시계 방향의 순환에 의해 일본분지의 저층냉수가 남부 해역으로 유입되는 것으로 판단된다.

Isobe와 Isoda(1997)에 의하면 일본분지에서 기원한 회전력이 작고 저염인 수괴가 반시계 방향의 순환을 따라 중층으로 이동하는데 이 수괴는 야마토해령의 북서쪽 끝에서 관측된다. 추적자를 이용한 관측에 의하면 일본분지의 해수가 남쪽으로 확장되면서 야마토해령 위에서 극전선을 가로지르는 것이 확인되었다 (Senjyu and Isobe, 1996).

4. 토 의

표층순환에 비해 동해 중심층수의 순환에 대해서는 그다지 알려지지 않았다. 이는 동해의 중심층수는 거의 동일한 수괴로 이루어져있어 해수물성자료만으로는 해수의 순환을 정의하기 어려우며, 관측된 해류자료 또한 매우 부족하기 때문이다.

여기서는 동해 남부 해역에 투하된 Argo 뜰개 자료를 이용하여 중층순환을 파악하는데 초점을 맞추었다. Argo 뜰개는 시공간적인 분포 제약이 없으며, 해수물성자료를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 중층에서 해류를 따라 이동하기 때문

에 관측이 용이하지 않은 중층의 해수순환을 파악하는데 매우 유용하다.

동해 남부 해역의 중층순환을 살펴보기 위해 뜰개에서 얻은 위치자료를 이용하여 체류수심에서의 유속을 추정하였다. 수신된 뜰개 자료를 이용하여 추정된 유속에는 뜰개가 표층에서 표류하는 동안 생기는 오차와 뜰개가 상승하거나 하강하는 동안 해류에 의해 표류되는 오차가 포함되어 있다. 체류수심에서의 실제유속과 관측유속사이에는 약 30%의 오차가 있다. 유사한 방법을 사용한 Ichikawa *et al.* (2001)의 보고에 의하면 10~25% 정도의 오차가 나타난다. 그러나 Ichikawa *et al.* (2001)은 표층에서 뜰개가 표류한 시간에 따른 거리는 고려하지 않았다.

유속자료를 이용하여 추정된 평균해류와 뜰개의 궤적자료를 바탕으로 동해 남부 해역의 중층순환을 유추하였다. 동해 연안을 따르는 38°N 이남에서는 남하하는 흐름이 나타나며, 주변보다 상대적으로 낮은 냉수괴가 나타난다. 동해 남서부 해역에서는 냉수괴의 근원이 없기 때문에 이 냉수는 북쪽에서 밖에 올 수 없다. 따라서 관측된 남향류는 일본분지에서 기원된 북한한류의 연속이라고 생각된다. 동해 북부 해역에서 침강한 냉수괴가 동해 연안을 따라 남하하는 흐름은 (Yun *et al.*, 2004) Fig. 3-14에서 보이는 것처럼 동해 연안을 따라 점선으로 나타났다. 이 흐름은 매우 좁아서 1°×1° 격자를 이용한 평균해류에서는 확인할 수 없다. 북쪽에서 남하한 냉수는 북위 36°N에서 동쪽으로 방향을 전환해서 울릉분지 남단의 비교적 넓은 등수심선을 따라 반시계 방향으로 흐른다.

울릉분지 중심에서는 Teague *et al.* (2004)의 모델결과에 의하면 저층의 평균흐름은 큰 변동과 함께 반시계 방향의 경향을 띤다. 하지만 뜰개 자료에서는 이와 같은 순환구조가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 울릉분지 중심에서 뜰개는 시계 방향과 반시계 방향의 궤적이 동시에 나타나는데, 이 해역에서는 표층부터 수심 약 1000 m까지 영향을 주는 와류가 존재하는 (An *et al.*, 1994; Shin *et al.*, 1995) 것으로 보아 뜰개의 거동이 와류에 의해 영향을 받기 때문에 해수순환을 파악하기 어려운 것으로 판단된다.

동해 남부 해역에서 중층순환에 대한 흥미있는 논쟁 중 하나는 일본분지에서 울릉분지 안으로 울릉도와 독도 사이의 골 (UIG)를 통해서 유입되는 저층냉수이다. 앞서 뜰개 궤적을 통해 확인한 바와 같이 일본분지 남서쪽 해역인 한국 퇴 북부에서는 동향류가 관측된다. 3000 m 등수심선을 따르는 약한 남향성분을 지닌 이 흐름은 Hogan and Hurlburt (2000)에 의해 모사된 것처럼, 울릉분지의

바깥돌레를 따르는 반시계 방향 순환의 일부여야만 한다. 또한 UIG를 따르는 남서향류는 UIG의 서쪽부분을 따라 남하하고, 동쪽부분을 따라서는 북향하는 흐름이다. 남향류는 2000 m 등수심선을 따르는 한국퇴 주위를 선회하는 시계 방향 순환의 일부이며, 이것은 지형의 vortex column shrinking에 의해 야기되는 Taylor column이다.

일부 울릉분지를 빠져나가 한국퇴 주변을 선회하는 시계 방향의 흐름은 다시 UIG를 통해 울릉분지로 유입되는데 이와 함께 UIG의 동쪽 해역에서는 UIG를 빠져나가는 북동향류가 관측된다. 이 흐름은 울릉분지 남단을 따라 반시계 방향으로 흐르는 흐름과 관련이 있는 것으로 생각된다.

뜰개 자료에서 추정된 흐름에 의하면 울릉분지로 유입되는 시계 방향의 흐름은 일본분지의 저층냉수를 울릉분지로 공급하는 역할을 한다. 저층냉수의 유입 경로는 정확하게 알려진바 없지만, 울릉도와 독도사이의 좁은 골 (UIG)를 통해 유입된다 (Chang *et al.*, 2002; Teague *et al.*, 2004; Yun *et al.*, 2004). Chang *et al.* (2002)에 의하면 울릉분지내 0.1°C 이하의 저층냉수는 약 67×10^{14} m³/s의 용승률을 보인다. 그러나 뜰개 자료와 ONR의 CTD 자료를 이용하여 울릉분지를 둘러싼 단면에 대해 심층수의 물질수송량을 계산한 결과, 심층수의 수송량은 약 0.2 Sv으로 Chang *et al.* (2002)이 계산한 0.5 Sv보다 작으며, 용승률도 10배정도가 작은 약 5.6×10^{14} m³/s를 보인다. 두 결과가 큰 차이를 보이는 것은 Chang *et al.* (2002)의 결과와 달리 여기서는 울릉분지를 완전히 포함하는 단면에 대한 수송량과 면적을 고려했기 때문이다.

이상과 같이 뜰개 자료에서 추정된 동해 남부 해역의 중층순환 구조는 해수물성자료나 일반적인 수치모델 결과에서는 확인할 수 없었으나, Holloway *et al.* (1995)의 모델결과에서는 같은 순환구조를 찾아볼 수 있었다. 이 모델은 동해의 순환구조를 이해하기 위해 에디와 지형 (Topographic Stress)을 고려해서 구성되었다.

일본분지의 심층은 계절적 변화를 보이지만 울릉분지에서는 아주 약하거나 거의 계절변화를 보이지 않는다 (Takematsu *et al.*, 1999; Teague *et al.*, 2004). 계절변화가 약하다는 것은 표층바람에 의한 직접적인 영향이 없으며, 대마난류수의 유입으로 인해 발생하는 상층의 강한 성층 변화에 따른 영향이나 겨울철 대류 (convection)의 영향이 없음을 의미한다.

IV. Argo 뜰개 자료를 적용한 여름철 동해 남부 해역의 북향물질수송과 열수송

1. 연구배경

해수순환을 이해하기 위해서는 해수수송과 함께 열수송에 대한 정량화가 중요하다 (Chang *et al.*, 2002). 동해의 표층 해수에 대한 해수수송량 (Isobe and Isoda, 1997; Katoh *et al.*, 1996)과 열수지 (Han and Kang, 2003; Hirose *et al.*, 1996; Park, 1994)에 대한 연구 결과는 다수 보고 되었지만, 동해 중심층수를 고려한 결과는 동해 남서부 일부 해역을 제외하고는 거의 없다. Shin *et al.* (1999)은 CTD 자료를 이용하여 Inverse method를 적용함으로써 동해 남서부 해역의 중심층 수괴에 대한 수송량을 계산한 바 있다. 이에 따르면 동한난류수는 약 1.2 Sv의 유량을 보이며, 동해 연안을 따르는 남동류는 동해중층수의 저염을 울릉분지로 공급한다. Chang *et al.* (2002)은 CTD 자료와 해류계 자료를 이용하여 동해 남서부 해역의 중심층 수괴에 대한 수송량을 계산하였다. 그 결과 울릉도와 독도사이의 단면을 가로지르는 동한난류수와 동해중층수, 동해고유수의 수송량은 각각 4.0 Sv 과 0.4 Sv, 1.5 Sv이다. 그러나 이 연구들은 모두 동해 남서부 울릉분지의 일부 해역에 대해서만 수행되어졌기 때문에 울릉분지에서 유출입되는 물질수송량에 대해서는 정확하게 알 수 없다.

울릉분지 뿐만 아니라 동해 전반에 대한 북향물질수송과 열수송에 대해서도 구체적으로 알려진 것이 없다. Isoda (1999)는 극전선을 중심으로 남부와 북부 해역을 구성한 이상적인 박스모델을 이용하여 동해 표층에서 대마난류수가 통과하는 경로에 대한 열수지의 계절변화를 분석했다. 이에 따르면 여름철 동중국해에서 동해로 유입된 열은 주로 대마난류수 해역에 저장되고, 겨울철에 표층의 냉각에 의해 열을 잃는다. 하지만 이 결과는 표층 특성만을 고려했기 때문에 중심층수에 의한 영향은 알 수 없다.

동해의 북향물질수송량과 열수송량을 파악하기 위해서는 서쪽 끝에서 동쪽 끝까지 동해를 완전히 포함하는 단면에 대한 관측 자료가 필요하다. 그러나 이 조

건을 만족하는 자료는 매우 부족하다. ONR에서는 1999년 여름철 (6~8월)에 동해의 해양조사를 실시하는 중, 동해 남부 해역의 38-40°N 단면에 대한 관측을 수행한 바 있다 (Fig. 4-1). 이 논문에서는 ONR의 CTD 자료와 뜰개 자료를 이용하여 여름철 동해 남부 해역의 북향물질수송과 열수송을 살펴보고자 한다. 표층에 한해 연구되었던 기존 연구와 달리 여기서는 중심층수의 특성을 고려하였다. 앞서 언급했듯이 동해의 심층수는 지형적 특징으로 인해 외부로부터 유입되지 않기 때문에 동해의 심층순환은 외부와는 독립된 내부의 열염분순환에 의해 일어난다고 알려져 있는데 이 특징에 대해서도 살펴보았다.

2. 자료 및 방법

뜰개 자료로부터 추정된 평균유속과 ONR의 CTD 자료, ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasting)에서 제공하는 바람 자료를 이용하여 여름철 동해 남부 해역의 북향물질수송과 열수송을 계산하였다.

1999년 6월부터 8월까지 *R/V Roser Revelle*와 *R/V Professor Khromov*에서 관측한 CTD 자료를 이용하여 지형류계산을 수행하고 3장에서 계산된 평균 유속자료를 700 m 수심에서의 절대속도로 처리하여 수직유속분포를 구하였다 (Fig. 4-1). Figure 4-1에서 CTD 정점 (●) 사이의 실선은 지형류를 계산한 단면을 뜻하며, 화살표는 3장에서 계산된 700 m 층의 평균유속이다. 가는 실선으로 나타낸 화살표는 Fig. 3-4에서 ▲'으로 표시된 격자의 평균유속이다. CTD 단면에 대한 절대속도는 각 단면과 일치하는 격자에 해당하는 유속값을 적용했다. 일부 CTD 단면에 대해서는 정점과 일치하는 평균 유속값이 없는데, 이 경우에는 가장 가까운 격자의 유속값을 이용하였다.

분석은 울릉분지 해역과, 동해 남부 해역을 동서방향으로 가로지르는 38-40°N 단면에 대해 실시하였다. 먼저, Fig. 4-1에 나타난 것처럼 울릉분지를 둘러싼 북쪽단면인 A 단면 (정점 A3~A7)과 서쪽단면인 H 단면, 남쪽단면인 F 단면, 동쪽단면인 L 단면에 대해서 지형류를 계산하고, 이를 바탕으로 수송량을 계산하였다. 이렇게 울릉분지를 완전히 포함하는 단면에 대한 물질수송량은 아직 보고 된 바 없다. 단면을 통해 유출입되는 평균수송량과 함께 울릉분지의 수괴별

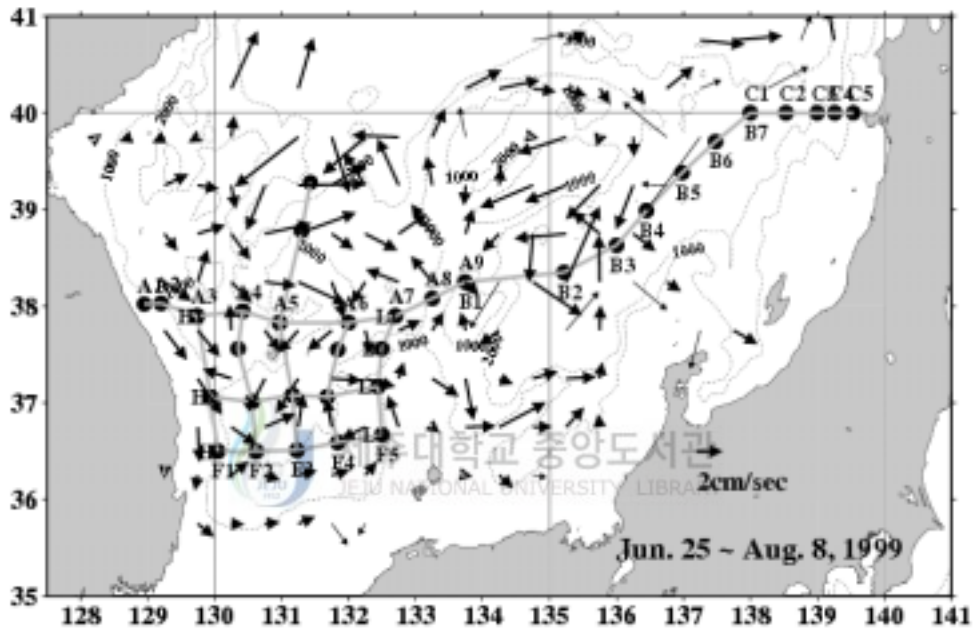


Figure 4-1. Stations CTD from the *R/V Roser Revelle* and *Professor Khromov* from June 25 to August 8, 1999. Geostrophic calculations were performed along the gray line.

수송량을 계산하여 해수의 분포와 순환을 살펴보았다. 수송량은 각 단면에 수직
한 성분을 고려하였다.

동해 남부 해역을 가로지르는 38-40°N 단면에 대해서는 북향물질수송량이
외에 열수송량도 계산하였다. 38-40°N 단면은 Fig. 4-1에서 보면 울릉분지에 위
치한 A 단면과 야마토분지를 가로지르는 B 단면, 그리고 일본 서해 연안에 위치
한 C 단면으로 구성되어 있다. 각 해역의 특징을 살펴보기 위해 A, B, C 각 단
면에 대한 북향물질수송량을 계산했으며, 단면 전체를 가로지르는 북향물질수송
량과 물질수송에 따른 열수송량을 살펴보았다.

3. 결과

3.1. 물질수송과 순환

3.1.1. 울릉분지



흐름과 물질수송

울릉분지를 둘러싸고 있는 A 단면과 H 단면, F 단면, L 단면에 대한 지형
류와 수온분포의 수직단면도는 Fig. 4-2에 나타났다. Figure 4-2에서 회색으로 나
타낸 부분은 남하하는 흐름을 뜻하며, 가는 실선은 1°C 이상의 수온을, 가는 점선
은 1°C 미만의 수온을 나타낸다. 지형류를 바탕으로 각 단면을 가로지르는 물질수
송량을 산정하였으며, 물질수송의 온도별 분포특성을 살펴보기 위해 잠재온도를
기준으로 계산된 수송량을 Figs. 4-3와 4-4에 나타내었다. Figure 4-3에는 수온을
1°C 간격으로 구분한 후 각 온도에 대한 수송량을 나타냈고, Fig. 4-4의 온도별
수송량은 저층수의 특징을 보기위해 1°C 이하의 해수를 0.1°C의 수온 간격으로 세
분화했다. X축은 물질수송량을, Y축은 잠재온도를 뜻한다. 각 단면을 통과하는 평
균 물질수송량과 인접한 두 정점간의 수송량은 Fig. 4-5에 나타났다.

A 단면에서, 동해 연안에 근접한 정점 A1~A2, 울릉도 북동쪽지점인 정점
A5~A6에서 남하하는 흐름이 나타나며, 정점 A3~A4 사이에서는 강한 북향류가
나타난다 (Fig. 4-2). 이 흐름은 뜰개 자료에서 얻은 평균해류에서도 확인 할 수

있다. 정점 A1~ A2와 비슷한 위도에서 동해안을 따라서 남하하는 흐름이 관측된다 (Fig. 4-1). 동해안과 울릉도 사이에서는 북향류가 나타나며, 울릉도 북동쪽 정점 A5와 A6에서는 남서향류가 나타난다 (Fig. 4-2). 온도별 분포를 보면 A 단면에서는 5°C 이상의 표층수는 대부분 북상하는 성분을 보이며, 5~9°C사이의 해수는 남하하는 성분이 우세하다 (Fig. 4-3(a)). 1°C 이하의 저층수는 남하하는 성분이 우세하다 (Fig. 4-4(a)). A 단면의 평균 수송량을 보면 정점 A5와 A6 사이를 통해서 약 4.0 Sv의 해수가 울릉분지 내로 공급되면서 이 단면을 통해 울릉분지 내로 해수의 유입이 있음을 시사한다 (Fig. 4-5). 이 해역은 3장에서 언급했듯이 일본분지에서 기원된 저층냉수가 울릉분지로 유입되는 경로의 일부이다. A 단면에서는 표층과 저층이 같은 해류구조를 보임으로써 순압성분이 강하게 나타난다 (Fig. 4-2). 단면 전체에서는 북쪽으로 향하는 유량성분이 강하게 나타나며 (Fig. 4-3), 단면 (정점 A3~A7)을 통해서 유출되는 물질수송량은 평균 1.28 ± 0.3 Sv이다 (Fig. 4-5).

동해 연안을 따라 동경 130°E에 위치한 H 단면에서는, 표층에서 울릉분지로 유입되는 동향류가 나타난다. 반면 저층에서는 서쪽으로 향하는, 울릉분지를 빠져나오는 흐름이 있다 (Fig. 4-2). 1°C 이하의 저층수를 제외한 모든 해수는 동쪽 성분이 강하게 나타난다 (Figs. 4-3(d)와 4-4(d)). 이 흐름은 저층에서 북상류가 나타날 수도 있음을 암시하지만, F 단면과 연결해서 본다면 북쪽에서 (정점 A1~A3) 남하하는 강한 흐름에 의해 북상하지 못하고 다시 울릉분지로 유입되거나 동해 연안을 따라 남하할 수도 있다. Figure 4-5의 평균 물질수송량 분포에 의하면 H 단면의 각 정점에서 울릉분지 내로 유입되는 구조를 보임으로써 H 단면을 빠져나온 흐름이 북상하는 흐름이 아니라 남하하면서 다시 울릉분지 내로 유입됨을 시사한다. H 단면 전체를 통해서 평균 1.40 ± 0.3 Sv의 유량이 울릉분지로 유입된다.

울릉분지 남단의 F 단면에서, 동해 연안에 가까운 정점에서는 전층에 걸쳐 남하하는 흐름이 나타나고 Oki Spur에 가까운 정점에서는 북향류가 나타난다 (Fig. 4-2). 온도별 분포를 보면 (Figs. 4-3(c)과 4-4(c)), 15°C 이상의 해수에서는 북상하는 성분이 강하게 나타나며, 15°C 이하 1°C 이상의 해수는 남하하는 성분이 뚜렷하다. 15°C 이상의 해수는 대한해협을 통해 유입되는 대마난류수를 나타내며, 동해 연안을 따라 북상하는 대마난류수의 특성을 보여준다. 1°C 이하의 저층수는 북상하는 성분이 강하게 나타난다. F 단면의 정점 F3~F5사이에서는 약 1.03 Sv

의 해수가 울릉분지로 유입되는데, 이는 대한해협 의 동수도를 통해 유입되는 대마난류수가 Oki Spur 서쪽 해역을 지나 북상하는 유량 1.5 Sv (Katoh et al., 1996) 과 견줄 만 하다. F 단면 전체를 통해서는 평균 1.41 ± 0.4 Sv의 유량이 울릉분지로 유입된다 (Fig. 4-5).

Oki Spur 서쪽에 위치한 L 단면에서, 정점 L1과 L2, 정점 L3와 L4사이의 표층에서는 울릉분지를 빠져나가는 흐름이 있고, 정점 L2~L3, 정점 L3와 L4 저층에서는 울릉분지 내로 유입되는 흐름이 존재한다 (Fig. 4-2). 온도에 따른 물질수송량은 대부분 단면에 대해 동쪽성분이 우세하다 (Figs. 4-3(b)과 4-4(b)). L 단면을 통해서는 평균 1.45 ± 0.4 Sv의 유량이 울릉분지를 빠져나간다.

H 단면과 F 단면, L 단면을 연결해서 흐름을 살펴보면 동해 연안을 따라 남하하는 흐름이 나타나며, 북위 36°N의 울릉분지 남단에서는 서쪽 해역으로는 남하하는 흐름이 동쪽 해역으로는 북상하는 흐름이 나타난다 (Fig. 4-2). 이 흐름 구조는 울릉분지 남단을 따라 움직이는 뜰개가 Oki Spur 서쪽 해역에서 북상하는 궤적 (Fig. 3-18에서 WMO ID 2900207 뜰개)과 동해 연안과 울릉분지 남단, Oki Spur 서쪽 해역에서 북상하는 반시계 방향의 흐름에 의해 뒷받침 된다 (Fig. 3-14 참조).

울릉분지 남단은 대한해협으로 유입된 대마난류수의 2차 경로 (Katoh, 1994)로 알려진 곳으로 표층에서는 동진하는 대마난류수의 흐름이 나타난다. 표층 아래에서는 동진하던 해류가 Oki Spur 서쪽 해역에서 울릉분지를 향해 북상한다 (Katoh et al., 1996).

각 단면에 대한 울릉분지의 물질수송은 F 단면과 H 단면을 통해 울릉분지로 유입된 해수가 L 단면과 A 단면을 통해 유출되면서 균형을 이룬다 (Fig. 4-5). 이 순환에 의하면 울릉분지 내에서 약 0.08 Sv의 유량의 오차가 생긴다. 그러나 이것은 극히 작은 양이며, 단면의 발생할 수 있는 오차 범위 내에 포함됨으로 무시할 수 있다. 각 단면을 가로지르는 물질수송량은 평균 0.3~0.4 Sv의 오차를 포함하고 있다. 이 값은 지형류를 계산하는 과정에서 뜰개 자료에서 추정된 평균유속을 700 m 수심에서의 절대유속으로 고려함으로써 생겨난 것이다. 뜰개 자료에서 추정된 유속은 30%의 오차를 갖고 있다.

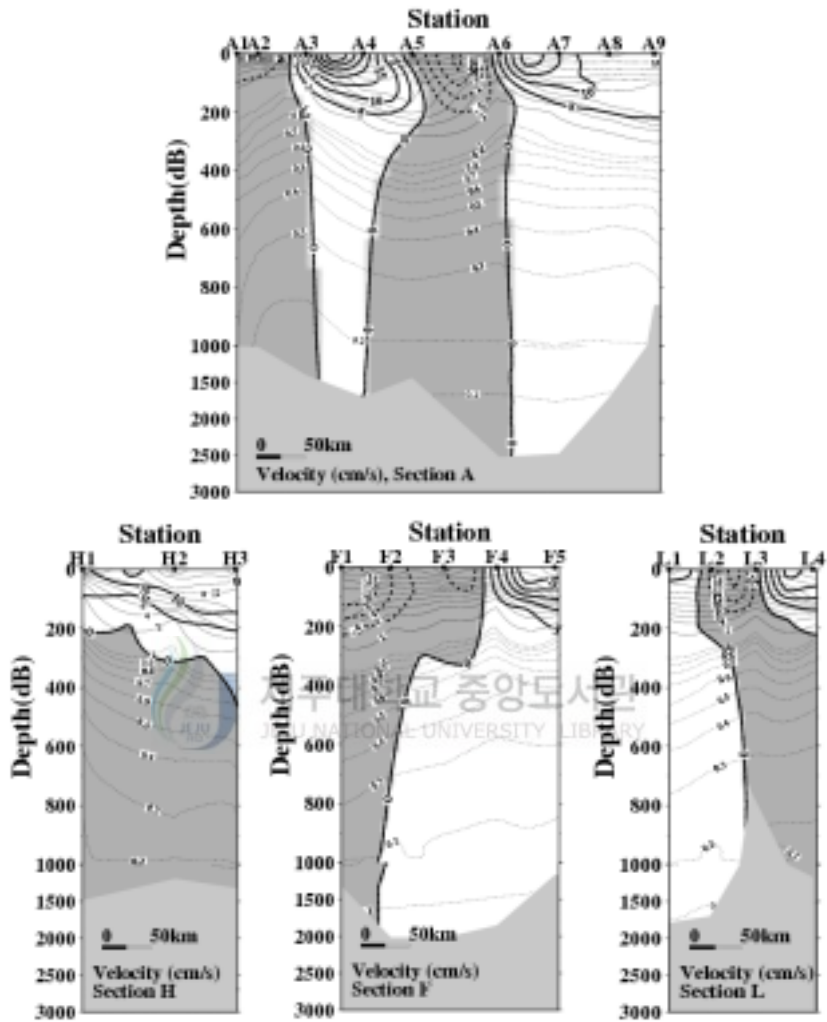


Figure 4-2. Vertical distributions of geostrophic velocity of section A, section L, section H and section F. Gray color means negative value.

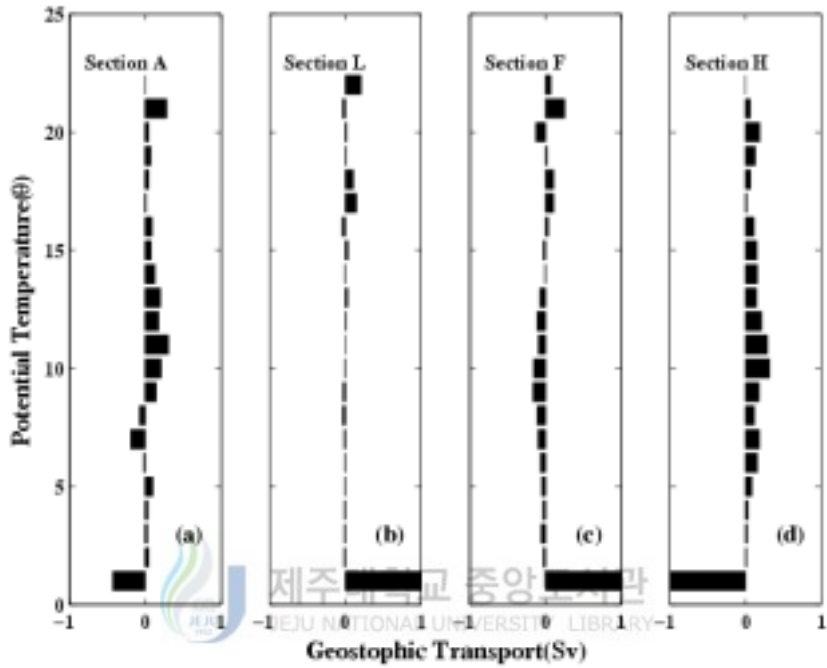


Figure 4-3. Volume transports across the section A, section L, section F and section H as a function of potential temperature. Transports are determined over potential temperature intervals of 0.1°C.

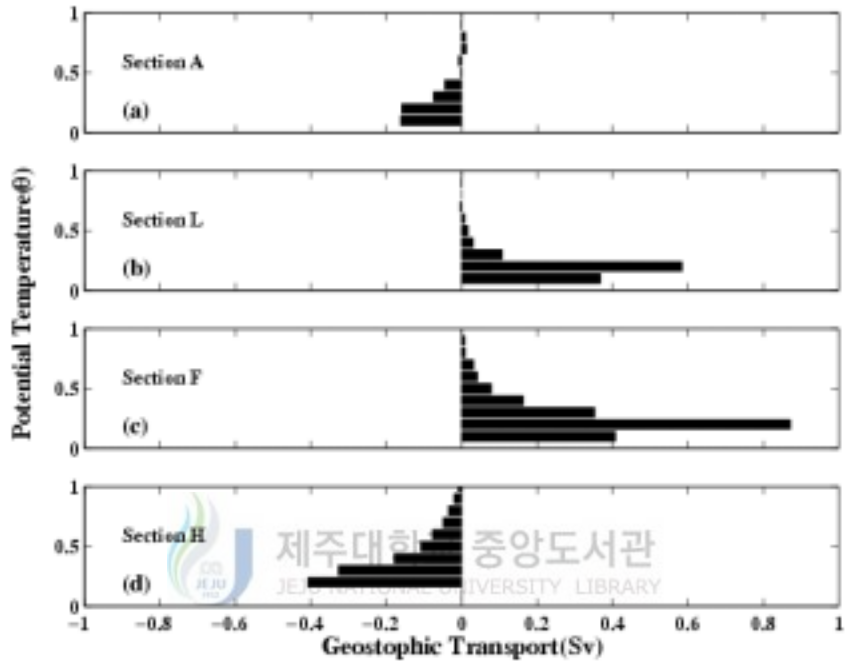


Figure 4-4. Volume transports across the section A, section L, section F and section H as a function of potential temperature below 1°C. Transports are determined over potential temperature intervals of 0.1°C.

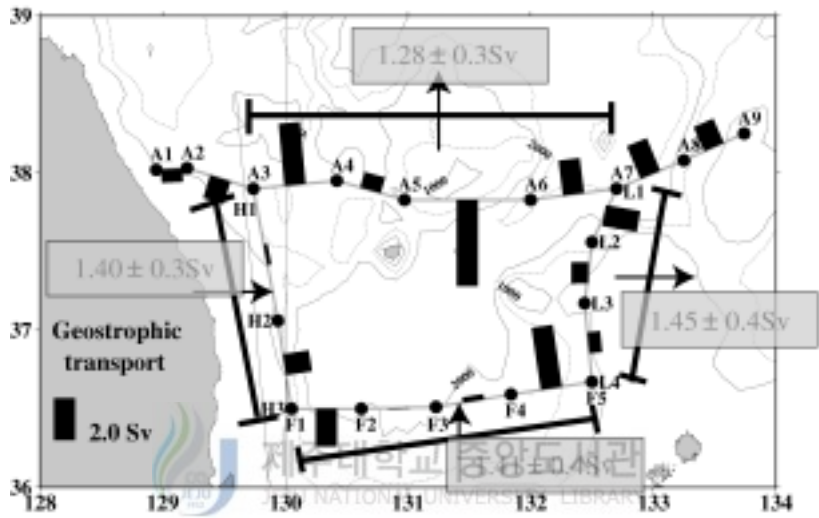


Figure 4-5. Volume transports across the section A, section L, section H and section F around the Ulleung Basin.

수괴별 특성

울릉분지내 해수의 온도에 따른 수괴별 물질수송량과 순환을 파악하기 위해 해수를 크게 4개의 수괴로 구분하였다 (Table 4-1). 동해 남부 해역에서 알려진 일반적인 수괴는 대마난류수 (TWCW, Tsumima Warm Current Water)와 동해중층수 (ESIW, East Sea Intermediate Water), 동해고유수 (ESPW, East Sea Proper Water)이다. 대한해협을 통해 유입되는 대마난류수는 분지되어 일본연안과 한국연안을 따라 흐르는데 한국연안을 따르는 흐름은 동한난류수 (EKWC, East Korean Warm Current; Uda, 1934)라 하며, 잠재온도 5°C 이상의 해수특성을 갖는다. 동해중층수는 34.06의 저염분층이 발견되는 곳으로 수온범위는 잠재온도 1~5°C이다 (Kim and Kim, 1999). 잠재온도 1°C 이하의 동해고유수 (Uda, 1934)는 하나의 거대한 수괴덩어리로 알려져 왔는데, 70년대 이후 하나이상의 수괴로 구분되기 시작하였다 (Nitani, 1972; Sudo, 1986). 여기서는 1°C 이하의 동해고유수를 상층동해고유수 (UPESCW, Upper Portion East Sea Proper Water)와 0.1°C 이하의 심층수 (DW, Deep Water; Sudo, 1986)로 구분하여 정의하였다. 동해 남부 해역 표층수는 대한해협을 통해 유입되는 대마난류수가 차지하고 있는데, 표층수에서 대마난류수의 영향을 살펴보기 위해 평균 10°C 이상의 해수를 대마난류수로 정의하여 분석하였다.

Table 4-1. Water masses and potential temperature range in Ulleung Basin.

Water mass	Potential temperature range
EKWC(East Korea Warm Current)	5°C < θ
ESIW(East Sea Intermediate Water)	1°C < θ < 5°C
UPESPW(Upper Portion East Sea Proper Water)	0.1°C < θ < 1°C
Deep(Deep Water)	θ < 0.1°C

울릉분지를 둘러싼 각 단면에 대한 해수의 수괴별 수송량은 Fig. 4-6에 나타내었다. 동한난류수는 H 단면을 통해 울릉분지로 들어오고 A 단면과 F 단면, L 단면을 통해 빠져나간다. 이 흐름은 H 단면을 통해 들어온 해수가 F 단면을

통해 유출되거나 북상해서 A 단면과 L 단면을 통해 유출되는 순환형태를 보인다. Katoh (1994)에 의하면 대한해협을 서수도로 유입된 대마난류수는 동해 연안을 따라 북상한 후 울릉분지를 시계 방향으로 선회하는 흐름과 북위 36°N을 따라 사행하는 흐름으로 구분된다. 울릉분지로 유입되는 유량은 2.45 Sv이며, 이 중에서 대마난류수는 1.68 Sv로 전체 유량의 약 69%를 차지한다. 이것은 Chang *et al.*, (2002)과 Shin *et al.*, (1999)이 보고한 울릉분지 동한난류수의 유량 1.4 Sv 과 1.2 Sv보다 1.0 Sv이 크다. 대마난류수는 F 단면과 H 단면을 통해 유입되고, A 단면과 L 단면을 통해 유출된다.

동해중층수는 H 단면과 L 단면을 통해 0.2 Sv이 유입되고 F 단면과 A 단면을 통해 0.38 Sv이 유출된다. 북쪽에서 남하한 해류가 H 단면을 통해 울릉분지로 유입된 후 F 단면과 L 단면을 지나 A 단면을 통해 빠져나가는 반시계 방향의 순환형태를 보인다.

상층동해고유수는 F 단면과 A 단면을 통해 1.83 Sv의 유량이 들어오고 H 단면과 L 단면을 통해 1.94 Sv의 유량이 빠져나간다. A 단면을 통해 들어온 해수가 H 단면을 통해 나가고, 다시 F 단면을 통해 들어와서 L 단면을 통해 나가는 반시계 방향의 순환을 보인다. 이것은 울릉분지 저층수가 반시계 방향의 순환구조를 가지며, 1°C 이하의 냉수가 북쪽에서 울릉분지로 유입됨을 시사한다.

심층수는 A 단면과 F 단면을 통해 0.57 Sv이 유입되고 L 단면을 통해 0.37 Sv이 빠져나가면서, A 단면을 통해 유입된 해수가 F 단면을 거쳐 L 단면으로 나가는 동해고유수와 같은 순환구조를 보인다.

울릉분지 내에서 북상하는 흐름의 대마난류수를 제외한 나머지 수괴는 반시계 방향의 순환형태를 유지하고 있다. 동한난류수는 대한해협을 통해 유입된 후 북상하면서 반시계 방향으로 울릉분지를 빠져나가고, 동해중층수는 동해 연안을 따라 북쪽에서 남하하는 흐름이 울릉분지를 반시계 방향으로 선회하고 있다. 이 흐름은 동해 평균해류 순환과 일치하는 것으로, 중층순환모식도 (Fig. 3-14)에서 보면 동해 연안을 따라 남하하는 흐름은 울릉도 남단을 선회하여 울릉분지를 빠져나가고 있다. 동해고유수와 심층수는 울릉분지 북쪽 단면을 통해 공급되고 있으며 울릉도 내부를 반시계 방향으로 선회한다.

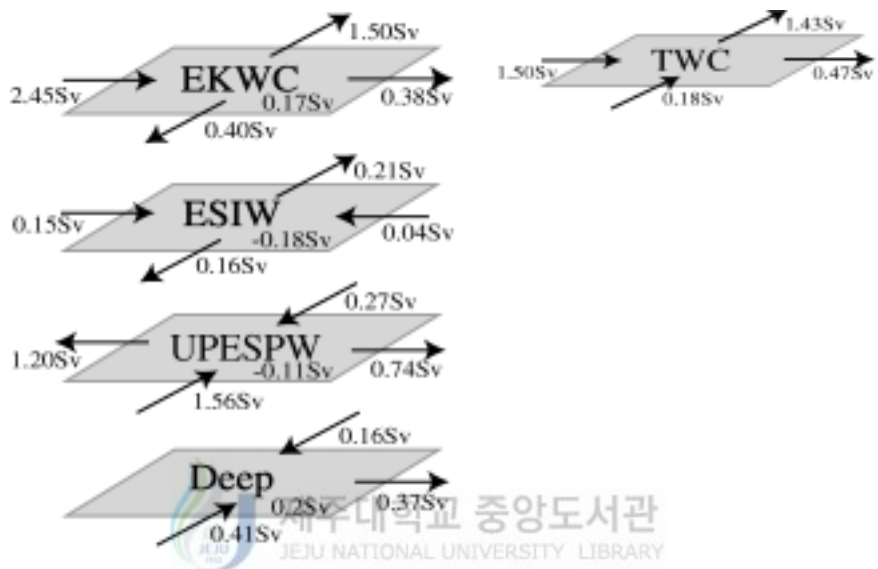


Figure 4-6. Water masses transports of across the section A, section L, section F and section H in the Ulleung Basin.

3.1.2. 38-40°N 단면

흐름과 물질수송

동해 남부 해역을 서에서 동으로 가로지르는 38-40°N 단면에 대한 지형류와 수온분포의 수직단면도는 Fig. 4-7과 같다. Figure 4-7에서 회색으로 나타낸 부분은 남하하는 흐름을 뜻하며, 1°C 이상의 수온은 가는 실선으로, 1°C 미만의 수온은 가는 점선으로 나타냈다. A, B, C 각 단면의 수괴별 물질수송량을 살펴보기 위해 Figs. 4-8과 4-9처럼 물질수송량을 온도함수로 나타내었다. Figure 4-8에는 잠재온도 1°C 간격으로 구분한 수송량을 나타냈고, Fig. 4-9에는 동해 저층의 대부분을 차지하는 1°C 이하의 저층수의 특성을 파악하기 위해 수송량을 0.1°C 온도 간격으로 구분하여 나타냈다. X축은 물질수송량을, Y축은 잠재온도를 뜻한다.

A 단면에서는 앞서 언급한 것처럼 정점 A1~A3 (동해 연안에 인접한 해역)과 정점 A5~A6 (울릉도 북동쪽 해역)에서 10 cm/s와 25 cm/s로 비교적 강한 남하하는 흐름이 존재하고, 정점 A3~A5에서는 35 cm/s, 정점 A6~A9에서는 20 cm/s 이상의 강한 북향류가 나타난다 (Fig. 4-7). 온도별 분포를 보면, 표층수의 대부분이 북상하는 성분이 강하게 나타나고 있으며 다른 단면에 비해 10°C 이상 해수의 북상이 뚜렷하다 (Fig. 4-8(a)). 다른 단면보다 대마난류수의 영향이 큼을 알 수 있다. 1°C 이하의 해수는 남하하는 성분이 주를 이루는데, 0.1°C 이하의 심층수는 북상하는 성분이 나타나고 있다 (Fig. 4-9(a)).

야마토분지 중앙을 남서방향에서 북동방향으로 가로지르는 B 단면에서는 전체적으로 남하하는 흐름이 지배적이다. 정점 B4~B6사이에서는 20 cm/s 이상의 강한 북상류가 나타난다 (Fig. 4-7). 이 흐름은 뜰개의 거동과 아주 흡사한 형태를 이룬다. 야마토분지 남단에서 반시계 방향으로 거동하던 뜰개는 136°E 부근에서 지형을 따라 북상하여 야마토해령으로 유입되는데, 이때 정점 B2 해역을 통과하거나 정점 B4 해역을 지나 북상한다 (Fig. 3-17 참조). 온도에 따른 수송량의 분포는 대부분의 해수가 남하하는 성분이 강함을 보인다. 특히 5~10°C사이 해수와 1°C 이하의 저층수의 남하가 두드러진다 (Figs. 4-8(b)과 4-9(b)).

일본 서해 연안에 인접한 북위 40°N에 위치한 C 단면에서는 30 cm/s 이상의 강한 북상류가 나타난다 (Fig. 4-7). 표층에서 대한해협을 통과하면서 분지된 대마난류수는 일부는 한국 동해 연안을 따라 북상하고, 다른 일부는 일본 서해 연안을 따라 북동진한다 (Fig. 3-2 참조). 일본 서해 연안을 따라 북상하는 대마난류

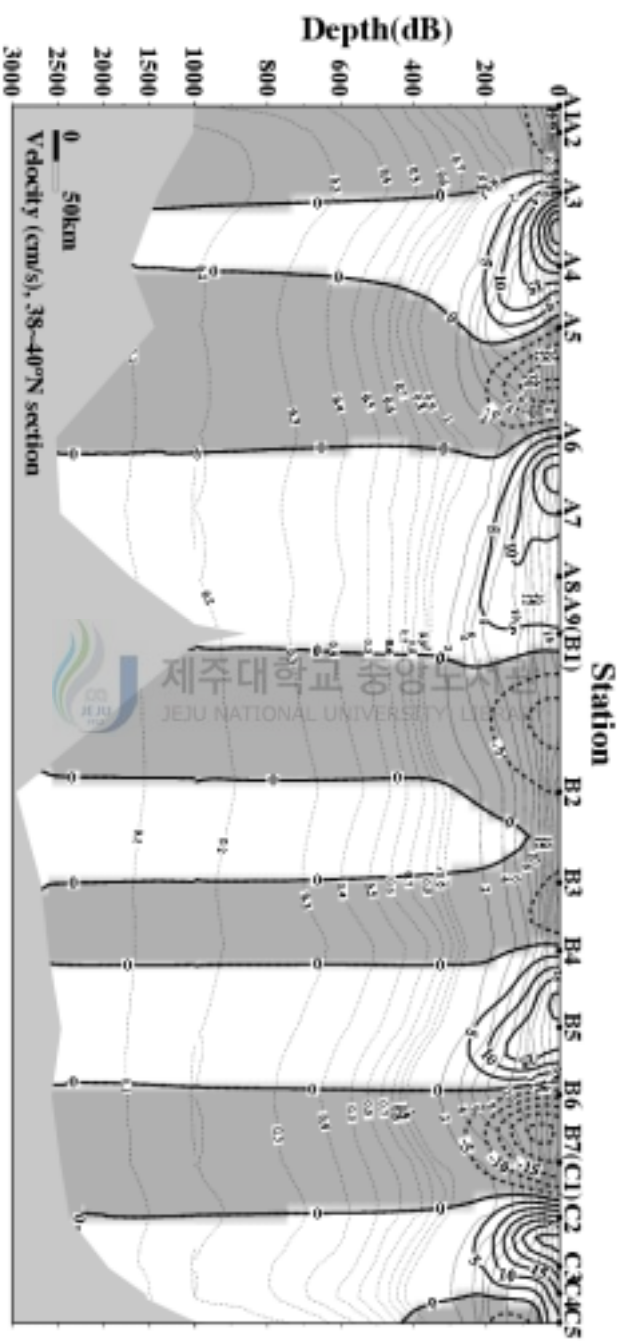


Figure 4-7. Distribution of geostrophic velocity to 38-40°N section. Gray color means negative value.

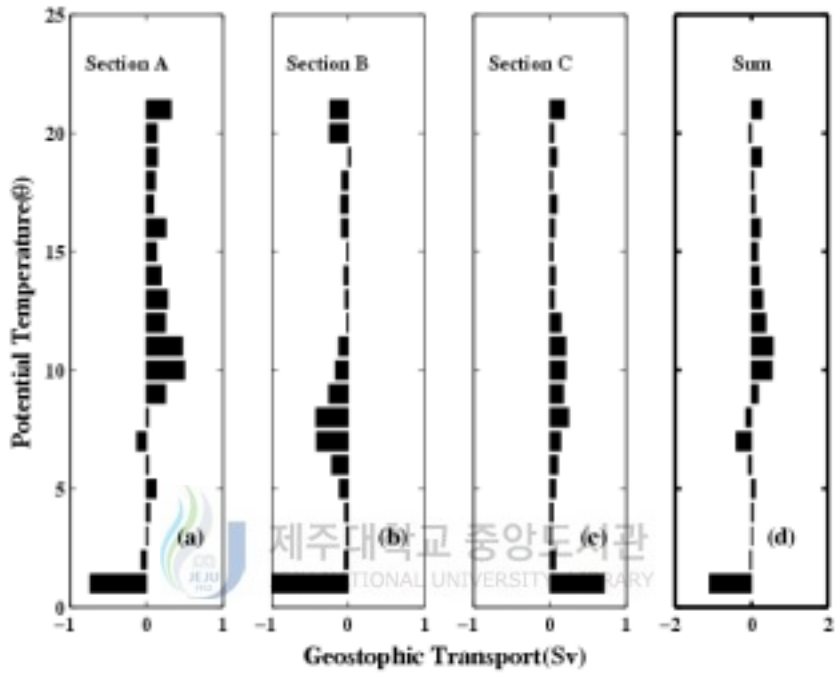


Figure 4-8. Mass transports across the section A, section B, section C and the sum as a function of potential temperature. Transports are determined over potential temperature intervals of 1°C.

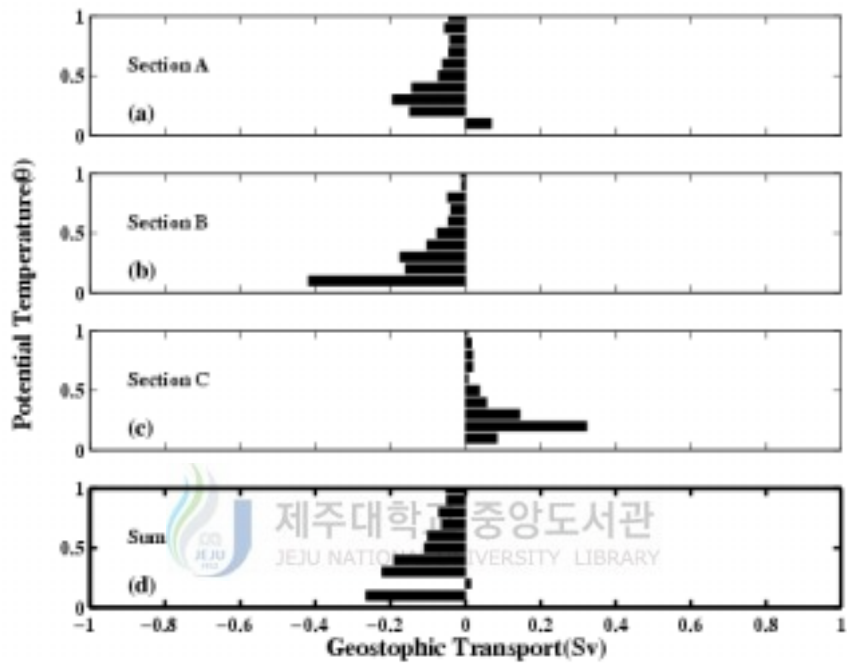


Figure 4-9. Mass transports across the section A, section B, section C and the sum as a function of potential temperature below 1°C . Transports are determined over potential temperature intervals of 0.1°C .

수는 일부는 쓰가루해협을 통해 태평양으로 빠져나가고, 일부는 북상하여 소야해협과 타타르해협을 통해 동해를 빠져나간다. C 단면에서 강한 북상류가 나타나는 것은 이곳이 일본 서해 연안을 따르는 대마난류수가 지나가는 경로임을 시사한다. 정점 C4와 C5의 수심 200 m 지점에서 남하하는 흐름이 보이는데, 정점 C5보다 일본 서해 연안에 근접한 정점의 해수특성구조를 보면 연안에 근접한 곳에서 강한 북상류가 생길 가능성이 있다 (Talley *et al.*, 2004). 단면을 가로지르는 수송량은 모든 온도에서 북상하는 성분이 강하게 나타난다. 특히 5°C 이상 12°C 미만의 해수와 1°C 미만의 해수에서 북상하는 성분이 뚜렷하다 (Figs. 4-8(c)와 4-9(c)).

단면 전체적으로 표층과 저층이 같은 구조를 보이는 순압성분이 강하게 나타나고 있고, A 단면부터 C 단면까지 남하하는 흐름과 북상하는 흐름이 반복되는 구조를 보임으로써 사행하는 흐름이 있음을 시사한다. 전체 단면에 대한 온도별 특성을 보면 (Figs. 4-8(d)와 4-9(d)), 9°C 이상의 표층수는 북상하는 성분이 강하고, 5°C에서 8°C사이의 표층수는 남하하는 성분이 강하다. 1~5°C사이의 동해중층수는 작지만 북상하는 성분이 우세하며, 1°C 이하의 저층수는 남하하는 성분이 강하게 나타난다. 단, 0.2~0.3°C사이의 해수는 북상하는 성분이 나타난다.

Overtuning Stream function

동해 남부 해역을 동서로 가로지르는 38-40°N 단면에 대한 물질수송량과 해수순환의 특성을 살펴보기 위해 단면을 가로지르는 흐름에 대한 overturning stream function과 수직수온분포도를 Fig. 4-10과 같이 나타냈다. Figure 4-10(a)는 단면을 가로지르는 수송량을 저층을 영으로 두고 수심에 대해 적분한 overturning stream function을 나타내며,

$$\psi(y, z) = - \int_{west}^{east} dx \int_{Z-H}^{Z_0} v(x, y, z') dz'$$

로 정의된다. Figure 4-10(b)에는 수심에 대한 잠재온도 분포를 나타냈다. Figure 4-10(c)는 온도에 대해 적분한 overturning stream function을 나타내며,

$$\psi(y, \theta) = - \int_{west}^{east} dx \int_{Z-H}^{Z_0(\theta)} v(x, y, z') dz'$$

로 정의된다. 온도는 1°C 간격으로 구분하였으며, 수심에 따라 수온이 지수함수적으로 증가하기 때문에 편의를 위해 수온축을 로그함수로 나타냈다. Figure 4-10(d)는 Fig. 4-10(c)에서 1°C 이하의 저층수를 확대해서 나타낸 것으로, 잠재 온도 0.1°C 간격으로 나타냈다.

Figure 4-10(a)에서 보면, 38-40°N 단면의 물질수송은 수심 230 m 보다 낮은 표층에서는 북상하는 성분이 강하며, 수심 230 m에서 1250 m까지는 남하하는 성분이 나타난다. 수심 1250 m에서 1760 m사이에서는 다시 북상하는 성분이 나타나고, 수심 1760 m에서 저층까지는 또 다시 남하하는 성분이 나타나면서 수심 전 층에서 약 230 m 지점과 1760 m 지점에서 두 번의 최대치가 나타난다. 이와 같은 특성은 온도별 수송량 분포에서도 확인 할 수 있다 (Figs 4-10(c)과 4-10(d)).

수심별 수송량과 온도별 수송량을 비교해 보면, 최대 수송량이 나타나는 수심 230 m 지점에서의 잠재온도는 약 2.73°C이며, 수송량은 약 1 Sv이다. 저층의 북상하는 성분은 잠재온도 약 0.14°C (수심 1250 m 지점)에서 잠재온도 0.09°C (수심 1760 m 지점)사이에서 나타나며, 이 때 최대 수송량은 약 0.3 Sv이다. 잠재온도 0.14°C (수심 약 1250 m)에서 수송량이 감소되어 나타나는 것은 Fig. 4-9에서 보인 것처럼 1°C 이하의 저층수는 남하하는 흐름이 지배적인데 반해 일본 서해 연안에 근접한 해역 (Fig. 4-9(c))에서는 북상하는 흐름이 강하기 때문이며, 특히 0.1~0.2°C 해수에서 북상흐름이 강하게 나타난다.

단면을 가로지르는 북향물질수송량은 약 1.6 Sv인데, 전 층에 대한 물질수송의 분포 구조를 보면 수심 3000 m와 수심 74 m에서 ‘영’을 나타내며, 수심 74 m 이천에서의 물질수송량이 단면을 가로지르는 물질수송량을 대표한다. 이때 잠재온도는 10°C이다.

동해 남부 해역 표층에서 10°C 이상의 해수는 대한해협으로부터 유입되는 대마난류수가 대부분을 차지하고 있다. 대한해협을 통해 유입된 대마난류수는 극전선을 중심으로 남부 해역에 고온고염의 해수를 공급하면서 동해 남부 해역 표층수의 주된 흐름을 구성한다 (Moriyasu, 1972). 따라서 수심 74 m 이천 (10°C 이상)의 표층에서 나타나는 북향물질수송은 대마난류수에 의해 지배됨을 알 수

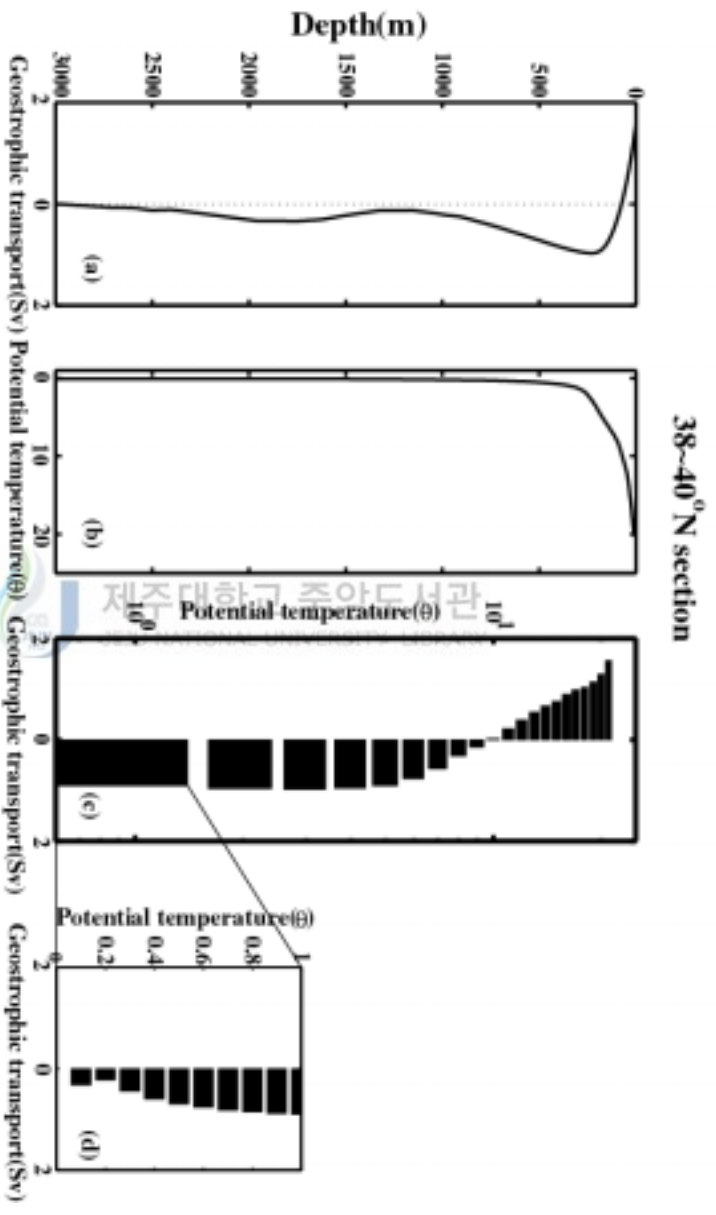


Figure 4-10. Meridional mass transports across the 38-40°N section as a function of (a) depth. (b) vertical profile of potential temperature averaged at along the 38-40°N section. Meridional mass transports across the 38-40°N section as a function of (c) potential temperature interval of 1°C and (d) 0.1°C.


있다.

수심 74m 이하 (10°C 이하)의 해수는 북상하는 흐름과 남하하는 흐름이 반복되어 나타나면서 중심층순환이 표층과 달리 동해 내부의 해수순환에 의해 일어남을 시사한다. 중심층순환에 의한 물질수송량은 최대 1 Sv이며, 순환은 크게 10°C 이하 0.14°C 이상의 해수와 0.14°C 이하의 해수의 순환으로 구성된다. 0.1°C 이하의 저층냉수의 남하는 일본분지로부터 동해 남부 해역으로 저층냉수의 유입이 있음을 뒷받침해준다. 이 흐름은 앞서 언급한 일본 서해 연안을 따라 북상하는 흐름에 의해 순환이 일어난다.

Ekman 수송량

동해 남부 해역을 가로지르는 단면에 대한 순물질수송량은 물질수송량과 함께 에크만 수송량 (Ekman transport)을 고려함으로써 얻을 수 있다.

38-40°N 단면에 대해 바람에 의한 수송량을 계산하기 위해 에크만층에 대한 수송량 (E_T),


$$E_T = - \int \frac{\tau^x}{\rho f} dx$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

으로 정의하였다. 여기서 τ^x 는 ECMWF 바람자료에서 얻은 바람응력 (wind stress)이며, ρ 는 밀도, f 는 코리올리 파라미터 (coriolis parameter)이다. 바람응력은 단면에서 CTD 관측이 이루어진 기간 동안의 바람자료를 평균하여 얻었다. CTD 관측이 이루어진 시기 - 1999년 7월 1일부터 7월 10일까지 - 에 추출된 바람자료를 평균한 바람응력과 에크만 수송량은 Fig. 4-11에 나타났다. 단면에 대한 에크만 수송은 대부분 북서 또는 북상하는 성향을 띤다. 에크만 수심(D_E)은,

로 정의되며 (Pond and Pickard, 1983), 여기서 A_z 은 와류점성계수 (eddy viscosity), W 는 풍속(m/s)을 뜻한다. 따라서 위도에 따른 풍속을 알면 에크만 수심을 얻을 수 있다.

이렇게 계산된 38-40°N 단면에 대한 에크만 수송량은 약 0.13 Sv으로 무

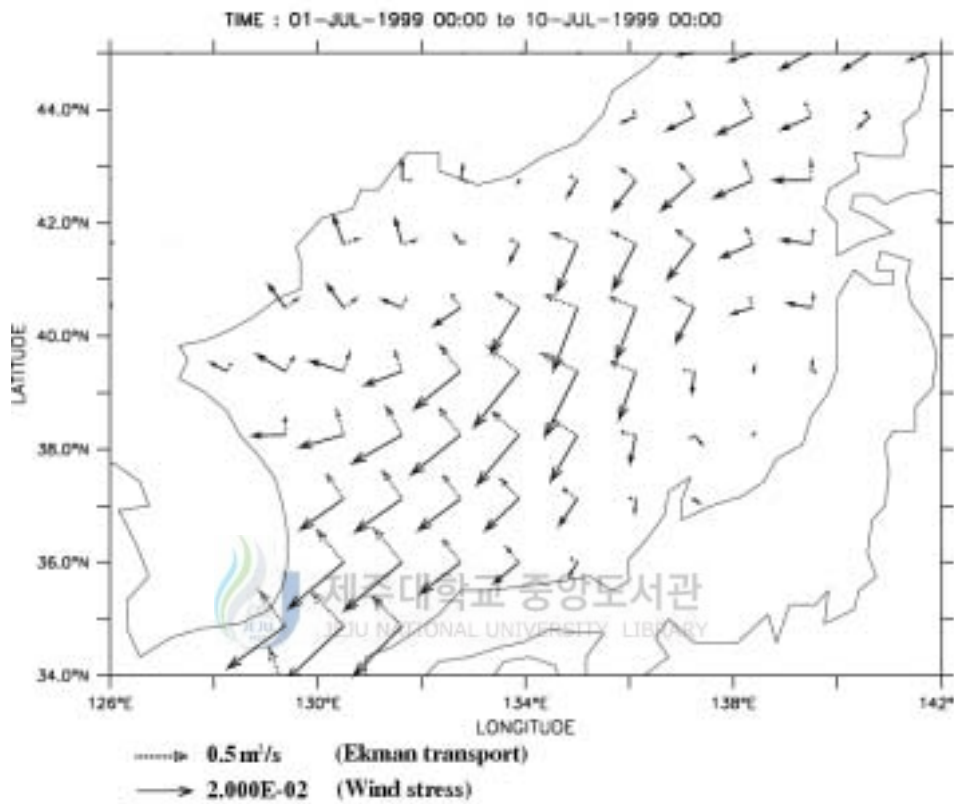


Figure 4-11. Ekman transport and mean wind stress estimated from ECMWF wind data from July 1 to 10, 1999.

시할 정도로 작은 값이며, 에크만 수심은 25 m 이다. 에크만 수송량을 고려한다면 동해 남부 해역의 38-40°N 단면을 가로지르는 순물질수송량은 약 1.7 Sv이다.

3.2. 열수송

동해 남부 해역에서 38-40°N 단면에 대한 열수송량은 에크만 수송량과 물질수송량을 이용하여 계산하였다. 단면을 가로지르는 열수송량 (H_T)은

$$H_T = \int \rho C_p T v dx dz$$

로 정의된다. 여기서 ρC_p 는 $4.1 \times 10^6 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-3}$ 으로 비열을 나타내며, T는 수온, v는 유속을 나타낸다.

앞 절에서 살펴보았듯이 38-40°N 단면의 에크만 수송량은 0.13 Sv이며, 에크만 수심은 25 m이다. 에크만 수심에서의 평균수온은 약 19.23°C이므로, 이에 따른 열수송량은 $0.13 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s} \times 19.23^\circ\text{C} \times 4.1 \times 10^6 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ m}^{-3} = 0.01 \text{ PW}$ 이다.

지형류에 의해 계산된 단면의 물질수송량 1.6 Sv에 해당하는 단면을 가로지르는 전체 평균 열수송량은 약 0.15 PW이다. 그러므로 38-40°N 단면에 대한 순 열수송량은 에크만 층에서 바람에 의한 수송량인 0.01 PW와 물질수송량에 의한 0.15 PW을 합하면 약 0.16 PW이다. 단면을 가로지르는 열수송은 대부분 표층에서 일어나고 있으며, 전체 열수송량에서 에크만 수송에 의한 영향은 무시할 정도로 작다 (Fig. 4-12). 열수송이 대부분 표층에서 일어난다는 것은 동해 남부 해역의 열수송이 동해로 유입되는 대마난류수에 의해 좌우됨을 시사한다. 대마난류에 의한 열량유입은 여름철에 해표면을 통해 유입되는 열량보다 크게 나타나 해양 내부의 열유동에 영향을 준다 (Park, 1994). 동해 남동부 해역에서 해류에 의해 공급되는 열은 표층에 의해 공급되는 열의 60% 이상을 차지한다 (Han *et al.*, 2003). Teague *et al.*, (2003)에 의하면 대한해협을 통해 동해로 유입되는 물질수송은 3.17 Sv이며, 이에 따른 열수송량은 0.24 PW으로 95% 이상이 쿠로시오에 의한 영향이다. 이 결과는 위의 결과와 2배 정도의 차를 보인다. 이는 위에서 산정된 38-40°N 단면을 가로지르는 물질수송량이 대한해협을 통과하는 대마난류수

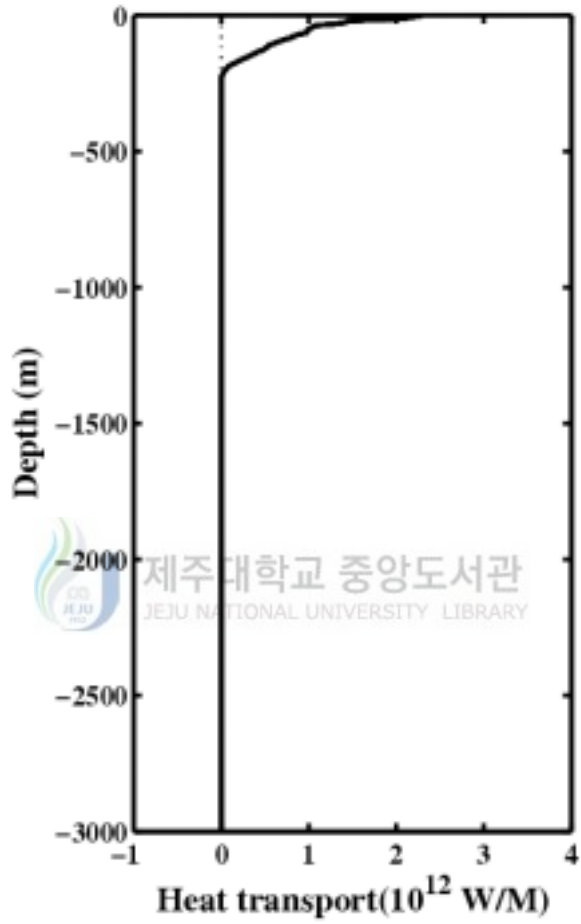


Figure 4-12. Vertical profile of heat transport per unit depth($10^{12}W/M$) across the 38-40°N section.

의 평균수송량, 약 2.0 Sv보다도 작게 평가된 데 있는 것으로 판단된다.

4. 토 의

1999년 6월부터 8월에 걸쳐 관측된 ONR의 해양조사자료와 Argo 뜰개에서 추정된 평균유속, ECMWF의 바람자료를 이용하여 울릉분지의 물질수송과 동해 남부 해역 38-40°N 단면을 가로지르는 북향물질수송과 열수송에 대해 살펴보았다. 뜰개 자료에서 추정된 평균유속을 수심 700 m에서의 절대유속으로 고려하여 지형류를 계산하였다. 울릉분지를 둘러싼 단면의 물질수송량은 남쪽단면과 서쪽단면에서는 약 1.41 ± 0.4 Sv와 1.40 ± 0.3 Sv을, 북쪽단면과 동쪽단면을 통해서는 1.28 ± 0.3 Sv과 1.45 ± 0.4 Sv을 나타내면서 남쪽과 서쪽단면으로 유입된 해수가 북쪽과 동쪽단면을 통해 유출되는 순환형태를 가지면서 균형을 이룬다.

울릉분지로 유입되는 해수 중 대마난류수와 동한난류수가 전체 유량의 80% 이상을 차지한다. 대마난류수를 제외한 나머지 수괴는 울릉분지에서 반시계 방향으로 순환하며, 동한난류수는 대한해협을 통해 유입된 후 북상하고 일부는 반시계 방향으로 울릉분지를 선회한다. 동해중층수는 북쪽에서 남하하는 흐름이 울릉분지를 반시계 방향으로 순환한다. 동해고유수와 심층수는 울릉분지 내에서 반시계 방향의 순환형태를 보이며, 울릉분지 북쪽단면을 통해 공급되고 있다.

동해 남부 해역 38-40°N 단면에서는 순압성분이 강하게 나타나며, 남하하는 흐름과 북상하는 흐름이 반복해 나타나고 있어 사행현상이 있음을 암시한다. 단면의 서쪽과 동쪽에서는 북상하는 흐름이 지배적이며, 야마토분지를 가로지르는 단면에서는 남하하는 흐름이 지배적이다. 단면을 가로지르는 북향물질수송량은 평균 1.6 Sv이다. 이 값은 대한해협을 통해 유입되는 대마난류수의 평균유량에는 미치지 못한다.

1999년 7월에 관측된 ADCP 결과에 의하면 대한해협의 평균유량 약 2.5 Sv이며 (Jacobs *et al.*, 2001), Teague *et al.* (2003)에 의하면 대한해협을 통해 동해로 유입되는 수송량과 열수송량은 3.17 Sv과 0.24 PW이다. 이 결과와 논문에서 산정된 값을 비교해 보면 약 0.9 Sv에서 1.6 Sv의 오차가 생기는데, 이는 몇 가지 원인에 의해 나타난다.

우선 단면을 가로지르는 흐름을 계산할 때 고려되는 절대유속에 의한 오차이다. 뜰개 자료에서 추정된 유속은 위치자료의 부정확성으로 인한 약 30%의 오차가 포함된다. 이로 인해 발생할 수 있는 단면을 가로지르는 물질수송량의 오차는 약 0.5 Sv이다. 다음으로 북향물질수송량을 계산한 단면이 동해 남부 해역을 완전히 포함하지 못하고 있음으로 인해 생기는 오차이다. 단면의 서쪽은 한국 동해 연안과 약 25 km 정도 떨어져 있고, 동쪽 끝은 일본 서해 연안과 약 50 km 정도가 떨어져 있다. 한국 동해 연안 38°N 해역은 북쪽에서 북한한류가 남하하는 곳이며, 일본 서해 연안 40°N 해역은 북상하는 대마난류수가 지나가는 주요 경로이다. 위성추적뜰개에 의해 관측된 동해 평균 표층해류를 보면 한국 동쪽 연안(38°N)에서는 2 cm/s 이하의 매우 약한 남하류가 존재하고 일본 서해 연안(40°N)에서는 10 cm/s 이상의 북상류가 존재한다 (한국해양연구원, 2002b). 따라서 해역의 폭이 50 km이고 표층유속이 10 cm/s이기 때문에, 연안 수심이 300 m 이라면 1.5 Sv의 유량이 발생할 수 있다. 한국 동해 연안의 수송량은 일본 서해 연안에서 나타날 수 있는 수송량의 1/10 정도 밖에 되지 않는다.

단면에서 나타나는 해류의 사행현상도 정확한 물질수송량을 파악하는데 어려움을 주는 요인이다. 단면에서의 지형류 분포를 보면 남하하는 흐름과 북상하는 흐름이 지속적으로 나타나며, 와류에 의한 흐름구조도 보인다. 이것은 대한해협을 통해 동해로 유입된 대마난류수의 흐름과 관련이 있다. 동해로 유입된 대마난류수의 일부는 동해 연안을 따라 북상하며 동한난류수를 이룬다 (Uda, 1934). 동한난류수는 38°N지점에서 동쪽으로 전향하여 극전선을 따라 사행운동을 하면서 동해 남부 해역을 가로지른다 (Choi *et al.*, 2004). 사행운동은 동한난류수의 북상하는 정도에 따라 달라지는데 1999년은 동한난류수의 북상이 뚜렷하게 나타나는 시기이다 (Choi *et al.*, 2004).

북향물질수송량과 함께 에크만 수송량을 고려하면 38-40°N 단면을 가로지르는 순수수송량은 약 1.7 Sv이며, 에크만 수송량에 의한 영향은 무시할 수 있다. 단면을 가로지르는 북향물질수송은 표층수는 북상하는 성분이 강하게 나타나며, 대부분 10°C 이상의 대마난류수에 의해 나타난다. 이는 동해 남부 해역의 표층순환은 대마난류수의 흐름에 의해 강하게 지배됨을 시사한다. 반면 10°C 이하의 중심층수는 북상하는 흐름과 남하하는 흐름이 반복되는 순환구조를 보인다. 10°C 이하 3°C 이상의 해수에서는 북상하는 흐름이 나타나며, 3°C 이하 0.14°C 이상에서는 남하하는 흐름이 나타난다. 0.14°C 이하 0.09°C 이상의 해수에서는 북상하는 흐

름이 나타나며 그 이하에서는 남하하는 흐름이 나타나면서 동해 중심층순환이 내부의 순환에 의해 일어난다. 이것은 북서태평양과는 독립적으로 동해 심층순환은 동해 자체내의 열염분순환에 의해 일어남을 시사한다. 단면을 가로지르는 열수송도 대부분 표층에서 일어난다. 북향물질수송에 의한 열수송량은 약 0.16 PW이며, 이 중 90% 이상이 대마난류수에 의해 일어난다. 따라서 동해 남부 해역의 북향물질수송과 열수송은 대마난류수의 변동에 좌우된다고 판단된다.



V. 결 론

해양을 시공간적으로 실시간 모니터링 하기 위해 투하된 Argo 뜰개는 지정된 시간에 따라 수직운동과 수평운동을 반복하면서 해수물성자료와 위치자료를 생산해 내기 때문에 해수특성과 해류를 파악하는데 매우 유용하다. 한국해양연구원과 기상연구소에서는 2001년부터 국제 Argo 프로그램에 참여하면서 동해에 다수의 Argo 뜰개를 투하하기 시작했다. 이 논문에서는 먼저 동해 남부 해역에 투하한 Argo 뜰개에서 얻은 물성자료의 정확도와 안정도를 검증하고, 뜰개 자료를 이용하여 동해 남부 해역의 순환과 물질수송 및 열수송을 파악하였다.

일단 해양에 투하된 뜰개는 4~5년간 해양에서 활동하면서 관측을 수행하기 때문에 센서에 대한 검증을 할 수 없다. 그러므로 뜰개에 부착된 수온과 전기전도도 센서가 오류를 일으킬 가능성이 있다. 수온 센서는 약 $0.0005^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 정도로 거의 표류를 일으키지 않고 안정적인 반면에 전기전도도 센서는 계통오차나 시간에 따른 표류가 나타날 가능성이 높기 때문에 염분 자료를 활용하기 위해서는 염분 자료의 정확도 검증과 필요한 경우 보정이 요구된다 (Wong *et al.*, 2003). 자료의 정확도를 파악하기 위해서는 직접 센서를 검증하는 것이 가장 좋은 방법이지만 뜰개를 회수하는 것이 현실적으로 매우 어렵기 때문에, 뜰개 자료를 기존 자료와 비교함으로써 검증을 수행하였다. 동해 남부 해역에 투하된 뜰개 중 1년 이상 활동한 뜰개 자료를 분석한 결과 염분은 국제 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도 안에 포함되며 일부 뜰개를 제외하고는 안정도도 매우 높다. 따라서 동해에서 뜰개 자료의 대부분은 특별한 보정 없이 이용가능하다. 뜰개 자료의 정확한 검증은 연구해역의 시공간적 변동과 뜰개의 특성에 좌우되기 때문에 분석에 앞서 먼저 이에 대한 규명이 필요하다.

뜰개는 물성자료 이외에도 표층과 체류수심에서 궤적자료를 제공한다. 이 궤적자료와 정선관측 CTD 자료를 이용하여 동해 남부 해역의 순환을 파악하였다. 동해 남서부 해역 중층에서는 울릉도와 한국퇴를 중심으로 선회하는 시계 방향의 흐름과 동해 연안과 울릉도 남단을 따르는 반시계 방향의 흐름이 주된 순환을 형성한다. 동해 남동부 해역에서 나타나는 주요 순환은 지형을 따라 야마토 분지를 선회하는 반시계 방향의 흐름과 야마토해령을 따라 선회하는 시계 방향의 흐름이다. 두 흐름은 Oki Spur의 북쪽 해역에서 분지되어 나타나며, 일부 계

절적인 영향을 받는다. 주요 흐름이 모두 지형을 따라 나타나면서 동해 남부 해역의 중층 순환이 지형에 강하게 지배되고 있음을 알 수 있다. 뜰개 자료에서는 울릉분지 내에서 뚜렷한 흐름구조가 관측되지 않아 울릉분지내 순환이 독립적으로 일어난다기보다 울릉분지를 포함하는 시계 방향과 반시계 방향의 흐름에 의해 일어난다고 판단된다.

이와 같은 순환구조는 동해 남부 해역에서 산정된 평균 물질수송량의 분포에서도 잘 나타난다 (Fig. 5-1). Figure 5-1에는 4장에서 살펴본 38-40°N 단면의 평균북향물질수송량과 울릉분지의 각 단면에 대한 평균물질수송량을 순환구조와 함께 나타냈다. 동해 남서부 해역의 물질수송량 분포는 울릉도와 한국퇴를 중심으로 시계 방향의 흐름이 있음을 보이며, 동해 연안과 울릉분지 남단, Oki Spur 북쪽 해역을 따르는 반시계 방향의 순환을 보이면서 위에서 언급한 중층순환을 뒷받침한다. 38-40°N 단면을 따라서는 남하하는 성분과 북상하는 성분의 물질수송량이 반복해서 나타나는데 이는 38°N 해역에서 서쪽에서 동쪽으로 사행하면서 진행되는 대마난류수의 흐름과 일치한다.

북향물질수송량 분포를 보면, 동해 남부 해역의 해수 순환은 10°C 이상의 등온선을 기준으로 상부는 대마난류수에 의해, 하부는 외부와는 독립된 1 Sv 정도의 크기를 갖는 자체 열염분순환에 의해 일어난다. 38-40°N 단면을 가로지르는 순북향물질수송량은 약 1.7 Sv이며 이에 따른 열수송량은 약 0.16 PW인데, 열수송은 표층의 대마난류에 의해 일어난다. 이 논문에서 산정된 물질수송량과 열수송량은 기존에 보고된 대한해협에서의 값보다 30~40% 정도 낮게 평가되었는데 이는 수송량을 산정하는 과정에서 적용된 절대유속값의 오차와 단면에 포함되지 않은 한국 동해 연안과 일본 서해 연안을 따르는 좁고 강한 흐름에 의해 나타난다.

동해 중심층은 거의 동질한 수괴로 구성되어 있어 직접적인 해류 관측이 수행되지 않고서는 해수물성자료만으로는 정확한 해류를 파악하기가 어려웠다. 이 논문에서는 뜰개 자료를 이용함으로써 그 동안 많은 조사에도 불구하고 구체적으로 알려지지 않은 동해 남부 해역 중심층수의 순환과 물질수송 및 열수송을 파악할 수 있었다. 그러나 뜰개 자료가 동해 남서부 해역에 집중적으로 편중되어 있어서, 일부 해역에 대해서는 정확한 유속과 순환구조를 얻을 수 없었다. 이로 인해 뜰개 자료에서 얻은 유속을 이용하여 산정된 물질수송량과 해류계를 이용하여 얻은 관측치 사이에 오차가 생겼다. 그러므로 보다 정확한 해수순환과 물질

수송 및 열수송량을 산정하기 위해서는 앞으로 지속적인 자료 수집과 다양한 방법을 통한 해수물성자료의 분석이 이루어져야 한다.



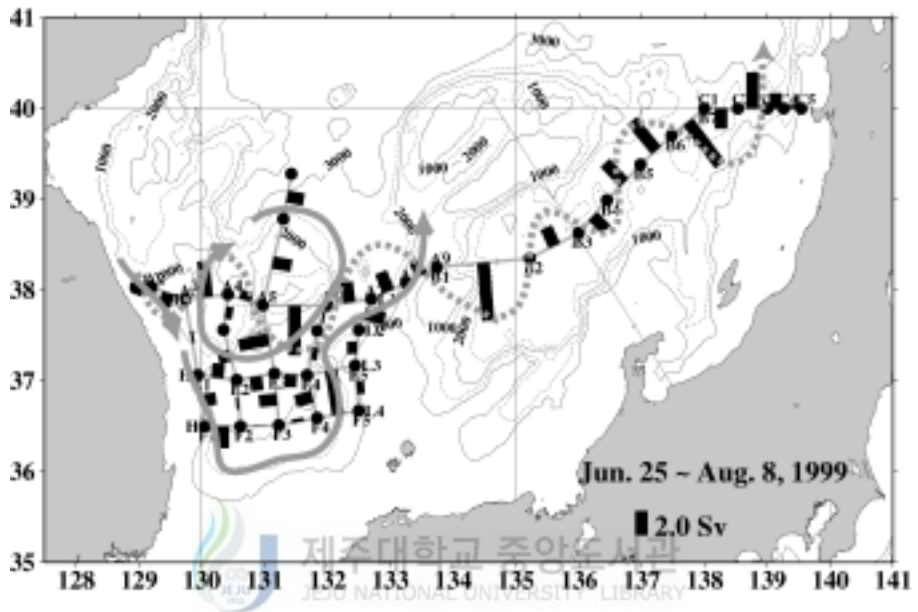


Figure 5-1. Distribution of volume transport with the flow pattern in the southern part of the East Sea.

참 고 문 헌

- 기상연구소, 2002. 전지구 해양변화 감시시스템 구축(Argo) I. MR020M11, 289 pp.
- 한국해양연구원, 2002a. 동해기후변동예측과 진화연구. BSPE817-00-1396-1, 549 pp.
- 한국해양연구원, 2002b. 해양관측 및 예보시스템. BSPM155-00-1477-1, 312 pp.
- An, H.S., K.S. Shim and H.R. Shin, 1994. On the warm eddies in the southwestern part of the East Sea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 29, 152-163.
- Akihiko, M. and T. Yanagi, 2001. Variability of sea surface circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr.* 57, 1-13.
- 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.
- Chang, K.-I., N.G. Hogg, M.-S. Suk, S.-K. Byun, Y.-G. Kim and K. Kim, 2002. Mean flow and variability in the southwestern East Sea. *Deep Sea Res. Part I*, 49, 2261-2279.
- 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. in Oceanogr.*, 61, 105-156.
- Cho, Y.-K. and K. Kim, 1995. Two modes of the salinity minimum layer water in the Ulleung Basin. *La Mer*, 3, 33-40.
- Choi, B.-J. and D.B. Haidvogel, 2004. Nonseasonal sea level variations in the

- Japan/East Sea from satellite altimeter data. *J. Geophys. Res.*, 109, C12028, doi:10.1029/2004JC002387.
- Davis, R.E., 1998. Autonomous floats in WOCE. *Int. WOCE Newsletter* 30, 48pp.
- Gille, S.T., E.J. Metzger and R. Tokmakian, 2004. Seafloor topography and ocean circulation. *Oceanography*, 17, 47-54.
- Han, I.-S. and Y.-Q. Kang, 2003. Supply of Heat by Tsushima Current in the East Sea(Japan Sea). *J. Oceanogr.*, 59, 317-323.
- Hirose, N. C.-H. Kim and J-H. Yoon, 1996. Heat budget in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 52, 553-574.
- Holloway, G., E. Sou and M. Eby, 1995. Dynamics of circulation of the Japan Sea. *J. Mar. Res.*, 53, 539-569.
- Hogan, P.J. and H.E. Hurlburt, 2000. Impact of upper ocean-topographical coupling and isopycnal outcropping in Japan/East Sea models with 1/8° to 1/64° resolution. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 2535-2561.
- Ichikawa Y., Y. Takatsuki, K. Mizuno, N. Shikama and K. Takeuchi, 2001. *ARGO Technical Report FY 2001*. 68-77.
- Isobe, A. and Y. Isoda, 1997. Circulation in the Japan Basin, the northern part of the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 53, 373-381.
- Isoda Y., 1999. Cooling-Induced current in the Upper Ocean of the Japan sea. *J. Oceanogr.*, 55, 585-596.
- 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.
- Jacobs, G.A., H.T. Perkins, W.J. Teague and P.J. Hogan, 2001. Summer transport through the Tsushima/Korea Straits. *J. Geophys. Res.*, 106, 6917-6929.
- Katoh, O., 1994. Structure of the Tsushima Current in the southwestern Japan

- Sea. *J. Oceanogr.*, 50, 317-338.
- Katoh, O., K. Morinaga, K. Miyaji and K. Teshima, 1996. Branching and joining of the Tsushima Current around Oki Islands. *J. Oceanogr.*, 52, 747-761.
- Kim, K., K.-R. Kim, J.-Y. Chung, H.-S. Yoo and S.G. Park, 1991. Characteristics of Physical Properties in the Ulleung Basin. *J. Oceanolo. Soc. Korea*, 16(1), 83-100.
- Kim, Y.-G. and K. Kim, 1999. Intermediate waters in the East/Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 55, 123-132.
- Kitani, K., 1987. Direct current measurements of the Japan Sea proper Water. *Report of Japan Sea National Fisheries Research Institute*, 341, 1-6 (in Japanese).
- Lie, H.-J., M.-S. Suk and C. Kim, 1989. Observations of southeastward deep currents off the east coast of Korea. *J. Oceanolo. Soc. Korea*, 24, 63-68.
- Lie, H.-J., S.K. Byun, I.K. Bang, and C.H. Cho, 1995. Physical structure of eddies in the southwestern East Sea. *J. Oceanolo. Soc. Korea*, 30, 170-183.
- Min, H.-S., 2002. Long-term Variations of Water Properties at the intermediate depth in the East Sea. *Ph. D. Thesis, Seoul National Univ.*, pp. 97.
- Mizuno, K., 2000. A plan of the establishment of Advanced Ocean Observation System (Japan ARGO) (in Japanese), *Techno Marine*, 854, 485-490.
- Moriyasu, S., 1972. The Tsushima Current. p.353-369. In *Kuroshio, its physical aspects. ed. by H.Stommel and K. Yoshida, Univ. of Tokyo Press.*
- Naganuma, K., 1973. On discussions on the existence of the third branch of the Tsushima Current. *New Japan Sea Reg. Fisher. Res. Lab.*, 266, 1-3 (in Japanese).
- Nitani, H., 1972. On the deep and the bottom waters in the Sea of Japan. In

- D. Shoji(Ed.), *Research in Hydrography and Oceanography*, pp. 151-201. Tokyo: Hydrographic Department of Japan, Maritime Safety Agency.
- Oka, E. and K. Ando, 2004. Stability of temperature and conductivity sensors of Argo profiling floats. *J. Oceanogr.*, 60: 253-258.
- Park, W.S., 1994. Temporal and spatial variations of heat fluxes in the East Sea (Sea of Japan) (in Korean). *M.S. Thesis of Seoul National University*, pp. 96.
- Park, J.-J., 2001. Deep Currents from APEX in the East Sea. *MS. Thesis, Seoul National Univ.*, pp. 79.
- 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, doi:10.1029/2004GL020424.
- Pond, S. and G.L. Pickard, 1983. *Introductory dynamical oceanography*. 2nd edition. pp.329
- Preller, R.H. and P.J. Hogan, 1998. Oceanography of the sea of Okhotsk and the Japan/East Sea. In A.R. Robinson and K.H. Brink (Eds.). *The Sea*. 11, pp. 429-481. New York: Wiley.
- Riser, S. and D. Swift, 2003. Long-term measurements of salinity from profiling floats. *J. Atmos. Ocean. Technol.* (submitted).
- Senjyu T. and H. Sudo, 1993. Water characteristics and circulation of the upper portion of the Japan Sea Proper Water. *J. Marine Sys.* 4, 349-362.
- 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. Oceanogr.*, 50, 663-690.
- Senjyu, T. and A. Isobe, 1996. Preliminary observation at the eastern part of Ulleng(Tsushima) Basin. *Proc. of Fourth CREAMS Workshop*, 77-80.
- Seung, Y.-H. and J.-H. Yoon, 1995. Some features of winter convection in the Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 51: 61-73.
- 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 on 1992 and 1993. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 33, 146-156.
- Shin, C.-W., S.-K. Byun, Y.-H. Seung and J.-H. Lee, 1999. Circulation in the southwestern East Sea(Japan Sea) in July, 1993 determined by an inverse method. *Ocean Res.*, 21, 87-97.
- Shin, H.-R., S.-K. Byun, C.S. Kim, S.C. Hwang and C.-W. Shin, 1995. The characteristics of structure of warm eddy observed to the northwest of Ullungdo in 1992. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30, 39-56. (in Korean with English abstract)
- Sudo, H., 1986. A note on the Japan Sea Proper Water. *Prog. in Oceanogr.*, 17, 313-336.
- Stommel, H. and A.B. Arons, 1972. On the abyssal circulation of the world ocean-V. The influence of bottom slope on the broadening of inertial boundary currents. *Deep Sea Res.*, 19, 707-718.
- Takematsu, M., Z. Nagano, A.G. Ostrovskii, K. Kim and U. Volkov, 1999. Direct measurement of Deep Currents in the Northern Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 55, 207-216.
- Talley L.D., P. Tishchenko, V. Luchin, A. Nedashkovskiy, S. Sagalaev, D.-J. Kang, M. Warner and D.-H. Min, 2004. Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999. *Prog. in Oceanogr.*, 61, 277-348.
- Teague, W.J., G.A. Jacobs, D.S. Ko, T.Y. Tang, K.-I. Chang and M.-S. Suk, 2003. Connectivity of the Taiwan, Cheju, and Korea straits. *Continental Shelf Research*, 23, 63-77.
- Teague, W.J., K.L. Tracey, D.R. Watts, J.W. Book, K.-I. Chang, P.J. Hogan, D.A. Mitchell, M.-S. Suk, M. Wimbush and J.-H. Yoon, 2004. Observed deep circulation in the Ulleung basin. *Deep Sea Res.*, in press.
- Toba, Y., H. Kawamura, F. Yamashita and K. Hanawa, 1984. Structure of horizontal turbulence in the Japan Sea. In T. Ichiye (Ed.), *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea*, pp. 317-332.
- Uda, M. 1934. The results of simultaneous oceanographical investigations on the Japan Sea and its adjacent waters in May and June, 1932. *Japan*

- Imperial Fishery Experimental Stations*, 5, 57-190 (in Japanese).
- Wong, A.P.S., G.C. Johnson and W.B. Owens, 2003. Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling floats salinity data by θ -S climatology. *J. Atmos. Ocean.* 20, 308-318.
- Yanagimoto, D. and K. Taira, 2003. Current measurements of the Japan sea proper water and the intermediate water by ALACE Floats. *J. Oceanogr.*, 59, 359-368.
- Yun, J.-Y., L. Magaard, K. Kim, C.-W. Shin, C. Kim and S.-K. Byun, 2004. Spatial and temporal variability of the North Korean Cold Water leading to the near-bottom cold water intrusion in Korea Strait. *Prog. in Oceanography*, 60, 99-131.



요 약

Argo 뜰개 자료의 검증과 이를 이용한 동해 남부 해역의 중심층순환 연구

논문은 크게 두 부분으로 구성하였다. 우선, 동해 남부 해역에 투하된 뜰개에서 얻은 프로파일의 정확도와 안정도에 대해 검증을 수행하였다. 자동 수직 물성관측 뜰개는 매우 유용한 해양관측장비이지만 이에 부착된 CTD 센서의 사후 보정이 불가능하기 때문에 뜰개 자료의 정확도 검증이 사후자료 관리나 자료 활용에 있어 중요한 문제 중 하나이다. 동해 중심층의 염분 변화가 국제 Argo 프로그램에서 요구하는 정확도 0.01과 유사하기 때문에 동해를 항염분수조로 취급하여 동해에 투하된 뜰개가 관측한 염분 자료의 신뢰성을 세 가지 방법을 통하여 검증하였다. 각각의 방법은 1) 부근 해역에서 얻은 정확도가 높은 정선 CTD 자료와 뜰개 자료의 비교, 2) 비슷한 시각에 비슷한 해역에서 얻은 뜰개 자료의 상호 비교, 3) 염분 자료의 장기간에 걸친 안정도 및 정확도 검증이다. 세 방법 모두 뜰개에서 얻은 염분 자료가 아무런 보정 없이도 Argo 프로그램이 요구하는 정확도를 만족함을 보여주었다.

두 번째로 Argo 뜰개 (PALACE, APEX and PROVOR)에서 얻은 궤적자료와 정선관측 CTD 자료를 이용하여 동해 남부 해역의 중층순환을 살펴보았다. 표층순환은 대마난류수에 의해 지배되는 반면 심층순환은 동해 내부의 자체 열염분순환에 의해 일어난다. 38-40°N 단면을 가로지르는 수직 단면은 수직성층이 매우 낮으며, 수온약층 아래에서는 순압성분이 뚜렷하게 나타남을 보인다. 수직 단면은 극전선을 따라서 사행하는 흐름을 잘 반영한다. 단면을 가로지르는 총 북향물질수송량과 열수송량은 1.7 Sv과 0.16 PW이다. 이 수치는 대한해협에서 산정된 값보다 30~40% 작다. 이는 CTD 단면이 한국과 일본 연안을 따르는 좁고 강한 해류를 포함하지 못하기 때문이다. 동해 남부 해역의 중층순환은 해저지형에 강하게 지배되며, 일부 해역에서 얻은 해류계 관측결과와 잘 일치한다. 주요 흐름은 1) 한국퇴와 울릉분지를 시계 방향으로 선회하는 흐름, 이 흐름은 일본분지의 저층냉수를 울릉도와 독도사이의 좁은 골을 통해 울릉분지로 유도한다. 2)

동해 연안을 따라 남하하는 흐름이 울릉분지 남단과 Oki Spur 서쪽 해역을 거쳐 야마토분지와 야마토해령으로 유입되는 반시계 방향의 순환, 3) 극전선을 따라 동진하는 흐름이다. 울릉분지를 둘러싼 단면의 물질수송은 남쪽과 서쪽 단면을 통해 울릉분지 안으로 유입되고, 북쪽과 동쪽 단면을 통해 유출되면서 균형을 이룬다.

주요어 : Argo 뜰개, 정확도 검증, 중심층순환, 북향물질수송, 열수송, 동해



감사의 글

다시 한 번 긴 여정의 끝에 서서 제 자신을 돌아보게 됩니다. 설레임으로 시작한 길이였기에 충만함만이 가득할 줄 알았는데 지금 이 시간 이렇게 아쉬움을 느끼는 건 왜일까요? 그러나 이게 끝이 아니라 또 다른 시작임을 알기에 다시 한 번 초심으로 돌아갈 것을 다짐 해봅니다. 미흡한 논문이지만 이 자리에 설 수 있도록 항상 격려해 주신 방익찬 교수님께 진심으로 감사드립니다.

바쁘신 와중에도 논문심사를 위해 애써 주신 고유봉 교수님과 윤석훈 교수님, 그리고 관심을 가져주시고 심사를 위해 먼 길을 해주신 한국해양연구원 석문식 박사님과 논문지도에 애써주신 박영규 박사님께 깊이 감사드립니다. 부족한 논문이지만 많은 관심과 조언을 해주신 윤정수 교수님과 최영찬 교수님, 이준백 교수님께도 마음을 다해 감사 인사드립니다. 여전히 배움의 길을 걷고 있는 해양학과 대학원생들에게도 항상 좋은 일이 함께 하길 진심으로 기원합니다. 또 다시 배움의 길을 준비 하고 있는 재홍이와 새로운 길을 찾은 희종이, 열심히 자신의 세계를 찾고 있는 성준이, 어려운 고비를 넘기고 다시 씩씩한 모습으로 돌아온 지미, 언제나 열정을 간직하고 계신 유종인 선생님, 함께 고생한 태희선배님에게도 고마움을 전합니다. 그리고 긴 시간동안 관심으로 지켜봐주신 한국해양연구원 물리부 식구들에게도 깊이 감사드립니다. 여러모로 힘이 되어 주신 이석 박사님과 장성태 박사님, 민홍식 박사님, 유주형 박사님, 박성혜 박사님, 은표, 창수, 정언, 정진이에게 고마운 마음을 전합니다. 언제나 힘을 주는 은주, 재철, 정훈, 혜금, 상운, 창희, 윤정, 영태, 요혜언니에게 사랑을 전하며, 바쁘다는 이유로 같이 하지 못했던 SR 동생들에게도 고마움을 표하며 행복한 일만 가득하길 빕니다.

항상 미안한 마음 가득하지만 사랑하는 가족들이 있기에 제가 있음을 잊지 않고 있습니다. 묵묵히 지켜봐준 오빠와 언니, 훈이와 미나, 진아와 제부 그리고 귀여운 조카들에게 사랑하는 마음을 전합니다. 마지막으로 떠올리기만 해도 눈시울이 뜨거워지는 사랑하는 어머니와 아버지에게 항상 걱정만 끼쳐드려 죄송한 마음과 함께 작지만 이 논문을 드립니다. 지켜봐주셔서 감사합니다.

이 논문은 한국해양연구원의 기본연구사업인 국제공동해양조사연구(PE92700)와 해양수산부의 해양관측 및 예보시스템(PM31702)의 지원으로 수행되었습니다.