

태평양 Argo 자료의 지연모드 품질관리 및 검증연구

양준용 · 강성윤 · 고우진 · 서영상 · 서장원* · 석문식**

국립수산과학원 환경연구부 해양연구과, *국립기상연구소 지구환경시스템연구팀,

**한국해양연구원 해양기후변화연구사업단

(2008년 9월 4일 접수; 2008년 10월 20일 수정; 2008년 10월 26일 채택)

Delayed Mode Quality Control of Argo Data and Its Verification in the Pacific Ocean

Joon-Yong Yang, Seongyun Kang, Woo-Jin Go, Young-Sang Suh,
Jang-Won Seo* and Moon-Sik Suk**

*Ocean Research Division, Environment Research Department, National Fisheries
Research and Development Institute, Busan 619-705, Korea*

**Global Environmental System Research Laboratory, National Institute of
Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea*

***Ocean Climate Change Research Division, Korea Ocean Research and Development
Institute, Ansan 426-744, Korea*

(Manuscript received 4 September, 2008; revised 20 October, 2008; accepted 26 October, 2008)

Abstract

Quality control of Argo(Array for Real-time Geostrophic Oceanography) data is crucial by reason that salinity measurements are liable to experience some drift and offset due to biofouling, contamination of sensor and wash-out of biocide. The automated Argo real-time quality control has a limit of sorting data quality, so that WJO program is adopted as standardized method of Argo delayed mode quality control (DMQC) in the world that is a precise quality control method. We conducted DMQC on pressure, temperature and salinity measured by Argo floats in the Pacific Ocean including expert evaluation. Particularly, salinity data were corrected using WJO program. 4 salinity profiles of Argo delayed mode were compared with nearby in situ CTD data and other Argo data in deep layer where oceanographic conditions are stable in time and space. The differences of both salinities were lower than target accuracy of Argo. As compared with the difference of salinities before DMQC, those after DMQC decreased by 60-80 percent. Quality of delayed mode salinity data seemed to be improved correcting salinity data suggested by WJO program.

Key Words : Argo, Pacific Ocean, Delayed mode, Quality control, WJO program

1. 서 론

1961년 이후의 관측에 의하면 최소한 수심 3000 m까지 평균 수온이 상승하였으며, 연평균 3.1 mm의 해수면 상승과 극지방 해빙 면적 감소 등 전 지구적

인 기후변화가 나타나고 있다¹⁾. 특히 해양은 기후시스템에 추가된 열의 80% 이상을 흡수하여¹⁾, 1955년 이후 전 지구적으로 수온은 연간 0.037°C 상승하였다²⁾. 이러한 기후변화를 정확하게 예측하기 위하여 전 지구적인 해양관측이 필요하지만 많은 비용이 발생한다. 정부간해양학위원회(IOC)가 세계기상기구(WMO)와 공동으로 해양기후변동에 대한 이해와 예측, 그리고 전 지구 해양자료동화를 위하여 국제 공동 해양관측사업인 Argo를 추진하고 있다³⁾.

한국, 프랑스, 미국, 중국, 일본 등 세계 20여 개국이 이 사업에 참여하여 2007년 11월 현재 3000여개의 플로트가 전 세계 대양에서 작동하고 있으며, 관측된 자료는 전 세계적으로 공유하고 있다. 한국은 한국해양연구원과 기상청 국립기상연구소가 동해, 태평양과 남극해에 2007년까지 200여개의 Argo 플로트를 투하하였다. 획득한 자료는 국가별로 실시간모드(Real-time mode)와 지연모드(Delayed mode)로 나누어 관리하고 있으며, 실시간 품질관리과정을 거친 자료는 24시간 내에 세계 Argo 자료센터를 통하여 배포되고 있다⁴⁾.

Argo 플로트는 자체적으로 밀도를 조절하여 표층과 수심 2000 m 사이를 10일 단위로 왕복하는 무인 자동 관측기로 표층에 머무를 때 인공위성을 통해 관측한 자료와 플로트의 위치를 전송하고 다시 침강한다(Fig. 1). Argo 사업은 관측 오차의 목표를 압

력은 5 dbar 이내, 수온은 0.005°C 이내, 염분은 0.01 이내로 하고 있다³⁾. 압력과 수온은 플로트의 작동 예상기간인 4년 동안 안정적인 반면에 염분은 생물오손(Biofouling), 센서의 오염, 살생물제(Biocide)의 용해 등에 의해 관측 오류가 발생한다⁵⁻⁹⁾. 따라서 관측한 자료의 품질관리가 필요하므로 날짜, 위치, 구간, 관측치의 기술기 검사 등 제한적이고 자동화된 19개의 실시간 품질관리(Real-time quality control) 과정을 거친 후 국제 Argo 자료센터(GDAC, Global Data Assembly Center)로 보내진다¹⁰⁾.

그러나 이러한 실시간 자료품질관리만으로는 양질의 자료를 선별하는 것이 어려우므로 최대 1년간의 축적된 자료를 한꺼번에 이용하는 정밀 품질관리 과정을 거친 후 세계 Argo 자료센터에 보고한다. 이를 지연모드 품질관리(Delayed mode quality control)라고 하며, 세계 Argo 자료관리팀 회의에서 표준화된 방법(WJO 프로그램)이 제시되었다¹¹⁾. 본 연구에서는 태평양의 해양기후변동을 정밀하게 분석할 수 있도록 국내 기관이 태평양에 투하하여 획득한 3차원적인 Argo 자료에 대하여 지연모드 품질관리를 수행하였으며, 국내 전문가 검증체계를 확립하였다. 또한 지연모드 품질관리를 한 자료와 실측치를 비교함으로써 품질관리 결과를 검증하는 연구를 수행하였다.

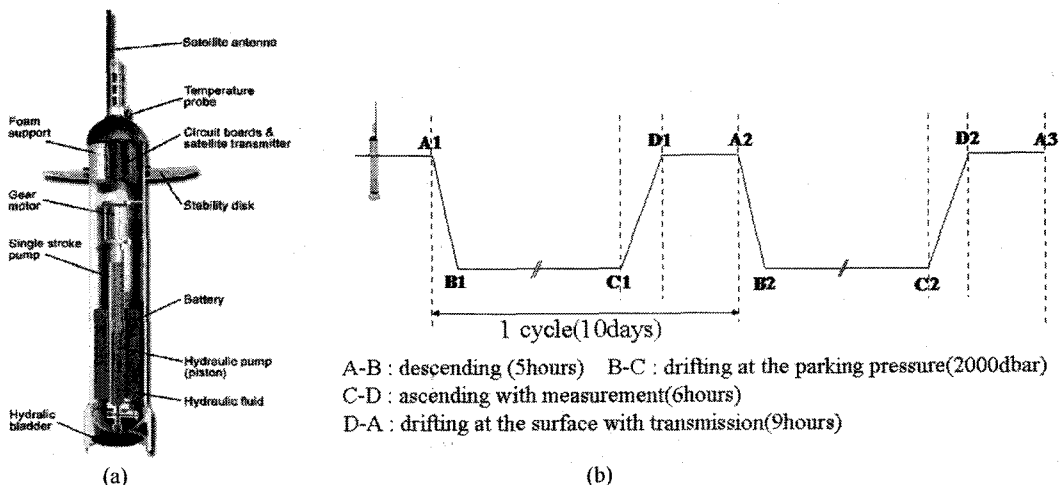


Fig. 1. Cross-section of a typical Argo float(a) and schematic diagram of Argo float in operation (b).

Table 1. Locations and observation periods of Argo floats used in this study

WMO ID	Period of Observation	Profile	Location of the first observation		Location of the last observation	
			Longitude (°E)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Latitude (°N)
2900307	2003.10.27 - 2006.05.24	95	136.836	19.190	138.256	17.944
2900429	2004.11.15 - 2007.04.15	89	138.597	10.812	130.889	9.137
2900430	2004.11.13 - 2006.08.26	66	132.500	21.639	130.177	22.536
2900522	2005.10.22 - 2007.04.14	55	132.862	13.958	125.592	11.629
2900523	2005.10.22 - 2007.05.14	58	132.748	14.509	126.118	11.444
5900189	2002.09.25 - 2005.07.12	103	126.576	21.329	131.637	22.057

2. 재료 및 방법

2.1. 태평양 Argo 및 CTD 자료

지연모드 품질관리에 적용한 Argo 자료는 국립기상연구소에서 태평양에 투하하여 획득한 자료를 실시간 자료품질관리 거친 후 NetCDF 형식으로 GDAC에 보고한 것으로 GDAC의 웹사이트¹²⁾에서 다운로드받았다. APEX(SBE 41 장착)인 Argo 플로트로 관측한 자료이며, 표층부터 수심 약 2000 m 사이를 표층~200 m는 10 m 간격, 200~800 m는 20 m 간격, 800~1000 m는 25 m 간격, 1000~1100 m는 50 m 간격, 1100 m 이하는 100 m 간격으로 압력, 수온과 염분을 측정된 자료이다. 본 연구에 이용한 6개 Argo 플로트에 관한 자세한 정보는 Table 1에 정리하였다.

지연모드 품질관리 결과를 검증하기 위하여 일본 기상청이 선박을 이용하여 북서태평양의 필리핀 동부 해역에서 관측한 2개 정점의 현장관측자료인 CTD 자료를 이용하였다¹³⁾. 자료는 1 m 간격이며 수심 2000 m까지 관측한 것이다. 자세한 정보는 Table 2에 정리하였다.

2.2. WJO 프로그램

해양에서 수괴(Water Mass)는 온위(Potential Temperature)와 염분으로 정의되며 두 항목 사이에 일정한

Table 2. Locations and observation dates of CTD data used in this study

Station	Observation Date	Longitude (°E)	Latitude (°N)
KS 1481_1	2006.01.26	136.9805	17.9978
RF 2477_1	2005.07.17	136.9923	10.9917

한 관계가 있으므로 어떤 해역에서 온위로부터 수괴 특성을 이용하여 염분을 추정할 수 있다. 이러한 관계를 이용하여 WJO 프로그램은 미리 설정한 50개 온위에 대한 염분을 플로트가 관측한 위치에서 과거 자료로 구성된 기준데이터베이스(Reference Database)로부터 구한다. 태평양 해역의 지연모드 품질관리에 WOD(World Ocean Database) 2001과 일본 JAMSTEC의 modHB(modified North Pacific HydroBase)로 구성된 기준데이터베이스 SeHyD(Selected Hydrographic Database)를 이용하였다^{9,14)}. 기준데이터베이스에서 자료를 선택하기 위하여 두 가지 단계로 구성된 Objective Mapping 기법을 적용하였다. 첫 번째 단계는 큰 규모의 해양기후(Ocean climate)적인 관계를 고려하였으며, 두 번째 단계는 상대적으로 작은 규모로 지역적이며 수괴의 환기시간(Ventilation time)도 함께 고려하였다. 이 과정에서 플로트가 관측한 위치를 중심으로 기준데이터베이스로부터 300개의 자료를 선택한다. Table 3에 태평양 Argo 자료 지연모드 품질관리를 위하여 설정한 WJO 프로그램의

Table 3. Parameters used in WJO program, delayed mode quality control program, applied to the Pacific

Parameter		Values
Large spatial scale	mapscale_longitude_large	8°
	mapscale_latitude_large	4°
Small spatial scale	mapscale_longitude_small	4°
	mapscale_latitude_small	2°
Maximum of data selected		300
Number of profiles for the least square fit		18

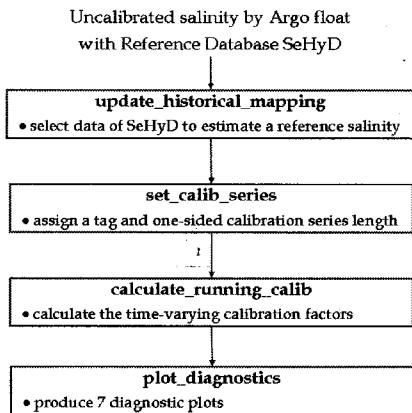


Fig. 2. The five processes of WJO program, Delayed mode quality control program.

변수들을 정리하였다.

온위별로 선택한 자료로부터 구한 평균 염분과 플롯트 관측치의 차이를 최소로 하는 가중최소자승

법(Weighted least squares method)으로 플롯트가 관측한 염분을 보정한다¹⁵⁾. 가중치는 OM에 의해 추정된 오차에 대해 반비례하도록 하였다. 일반적으로 변동이 적은 깊은 층이 상대적으로 변동이 큰 표층이나 중층에 비해 플롯트의 염분 보정에 많은 영향을 미친다⁹⁾. 또한 센서의 관측오류가 갑자기 발생하기보다는 서서히 발생하므로 연속한 여러 개의 프로파일을 함께 가중최소자승법에 적용함으로써 프로파일별로 적용하여 발생할 수 있는 일시적인 오차를 최소화한다. Fig. 2에 WJO 프로그램을 구성하는 코드와 그 역할을 도시하였다.

3. 지연모드 품질관리

표준 지연모드 품질관리인 WJO 프로그램을 전 세계적으로 적용하여 전 대양의 일관성이 있는 양질의 지연모드 자료를 제공할 수 있다(Fig. 3). 우선

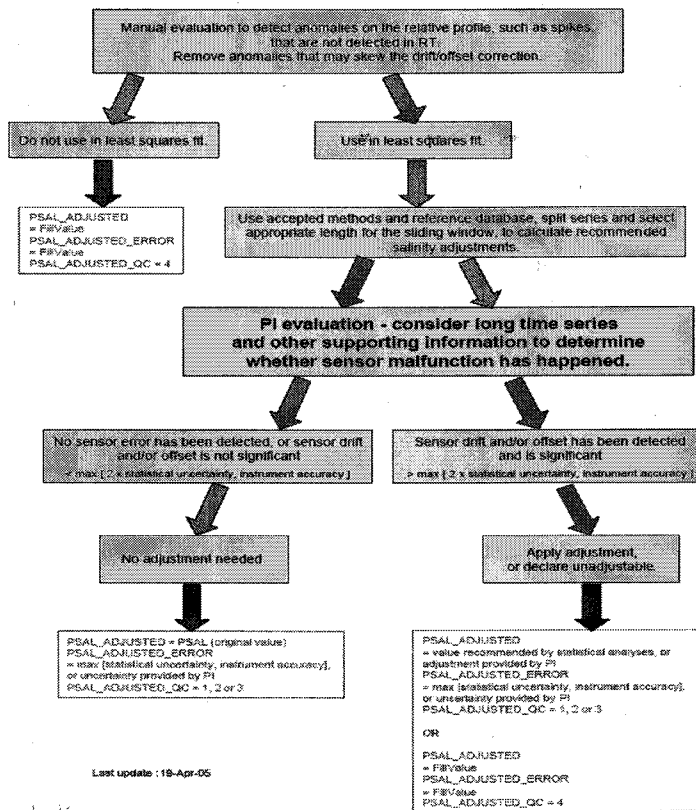


Fig. 3. Delayed mode quality control procedure¹⁰⁾.

WJO 프로그램을 실행하기 전에 압력, 수온과 염분에 대한 사전검증을 실시한다. 사전검증에는 그래픽을 이용하여 실시간 품질관리에서 제거되지 않은 이상치(스파이크, 동일 값 등)를 눈으로 확인한다(Fig. 4). 이 단계에서 확인된 이상치는 품질관리번호(QC Flag)인 ‘4’를 적용하여 WJO 프로그램의 입력 자료에서 제외한다(Table 4). 사전검증을 통과한 Argo 자료를 기준데이터베이스 SeHyD를 포함한 WJO 프로그램(Weighted least squares fit)에 입력하여 보정치를 구하게 된다(Fig. 3). 이후 WJO 프로그램 결과에 대한 해당 해역 전문가의 검증을 포함하여 결과의 정확성을 재고한다.

Fig. 5는 국립기상연구소에서 각각 2003년 10월과 2004년 11월에 서태평양 해역에 투하한 WMO ID 2900307(95개 프로파일)과 2900429(89개 프로파일)의 지연모드 품질관리 결과 중 보정적용 여부 판단에 중요한 것을 제시하였다. 왼쪽 그림(a, c)은 Argo 플롯의 이동궤적 및 기준데이터베이스로부터 선택한 기준자료의 위치이며, 오른쪽 그림(b, d)은 온도 2.2℃의 프로파일별 플롯의 관측치(파란

색 별표), 기준데이터베이스로부터 Objective Mapping 한 값과 그 오차(붉은색 실선)와 WJO 프로그램이 계산한 보정치(녹색 구간)이다. 프로그램 보정치의 채택 기준은 참값이 염분 보정치의 보정오차 범위 내에 있고 보정오차는 Argo 프로그램의 염분 오차 목표치인 0.01 보다 작은 것이다. 그러나 대부분의 경우 해당 해역의 플로트가 관측한 기간 동안에 참값을 알 수 없으므로 기준자료가 충분하거나 오차가 적은 경우(붉은 색 실선의 오차가 0.01보다 작은 경우는 참값이 보정오차 내에 있다고 판단한다. WMO ID 2900429의 경우(Fig. 5b) Argo 자료(파란색 별표)가 보정오차 내(녹색 구간)에 있으므로 프로그램의 보정치보다 실제로 관측한 Argo 플롯의 염분을 지연모드 염분 자료로 선택하고 품질관리번호는 ‘1’을 부여한다. WMO ID 2900307의 경우(Fig. 5d)는 보정치가 Argo 플롯의 관측치에 비해 일관성 있게 염분이 낮으므로 염분센서의 오차가 투하 초기부터 일어난 것으로 판단하여 보정치를 지연모드 자료로 선택하고 품질관리번호는 ‘1’을 부여한다(Table 4).

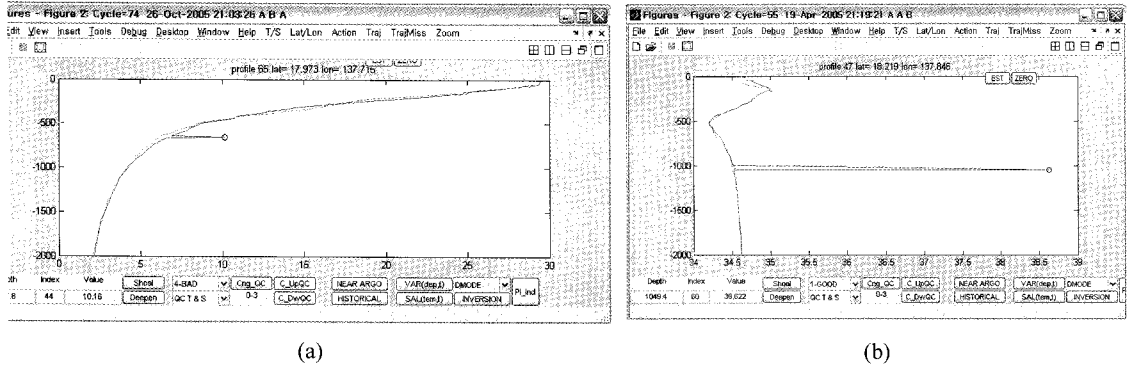


Fig. 4. Visual inspection of temperature (a) salinity (b) versus pressure using a graphic tool.

Table 4. Quality Control Flags (Argo Data Management Team, 2007)

QC Flag	Meaning	Comment
0	No QC was performed	No QC was performed
1	Good data	The adjusted value is statistically consistent and a statistical error estimate is supplied
2	Probably good data	Probably good data
3	Probably bad data that are potentially correctable	An adjustment has been applied, but the value may still be bad
4	Bad data	Bad data, not adjustable

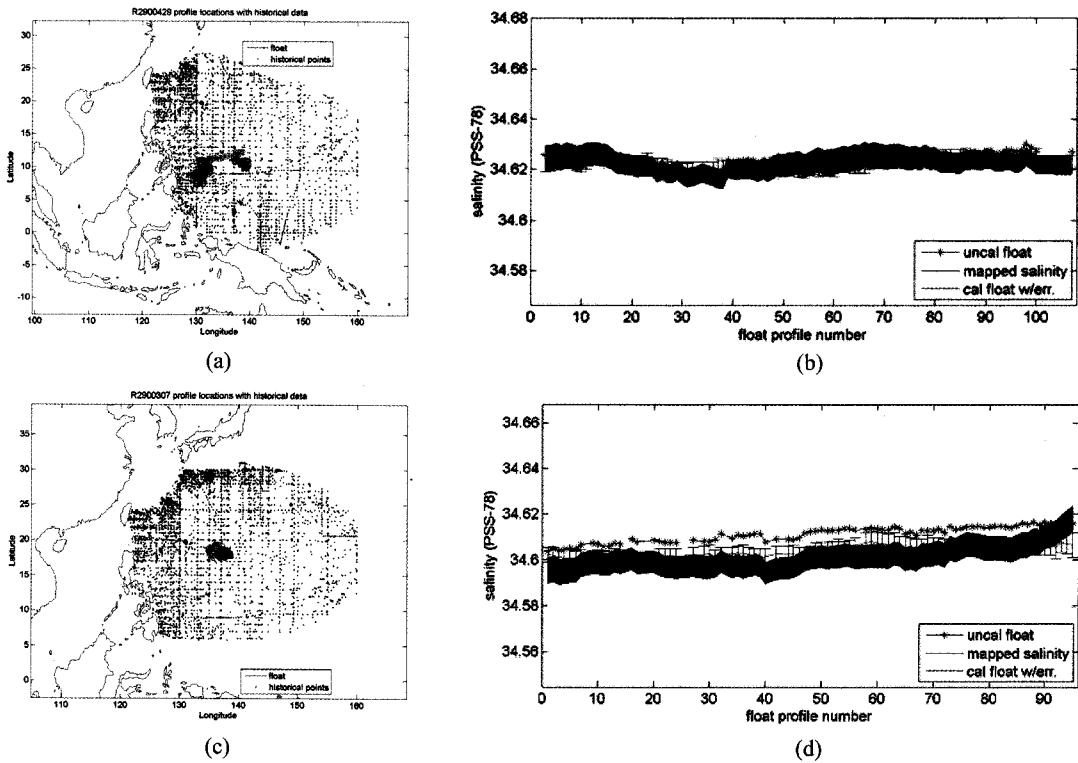


Fig. 5. Salinity calibration of the float WMO ID 2900429 (a, b) and WMO ID 2900307 (c, d) on 2.2°C . Left panels: Argo float measurement location are shown by colorful line. Blue dots represent locations of historical reference data. Right panels: Center of green belt represents optimal values of calibrated salinity and half of its width does calibration error. Line with asterisks denotes measured salinity by Argo float and solid line with vertical bars the estimated climatological salinity and its mapping errors.

4. 품질관리 결과 검증

필리핀의 동부해역에서 작동한 2개 Argo 플로트의 자료와 시공간적으로 가까운 일본 기상청의 2개 정점의 해양관측자료(CTD 자료)와, 시공간적으로 서로 가까운 Argo 자료 두 쌍을 비교하여 지연모드 품질관리 결과를 검증하였다(Fig. 6, Table 1, 2).

4.1. Argo와 CTD 자료 비교

WMO ID 2900429의 25번째 프로파일은 일본 기상청에서 선박을 이용하여 관측한 정점 RF2477_1과 비교하였으며(Fig. 6의 A), WMO ID 2900307의 83번째 프로파일은 정점 KS1481_1의 자료와 비교하였다(Fig. 6의 B). 그림 6의 A 경우 Argo 플로트 관측 위치와 현장관측정점사이에 시간적으로는 3일(각각 2005년 7월 14일과 7월 17일)의 차이가 나

고, 공간적으로는 50 km 떨어져 있다. 그리고 Fig. 6의 B 경우는 시간적으로 2일(각각 2006년 1월 24일과 1월 26일)의 차이가 나고, 공간적으로는 40km 떨어져 있다. 앞선 지연모드 품질관리 결과와 같이 2900429는 관측한 자료를 지연모드 자료로 채택한 반면에 2900307은 WJO 프로그램이 제시한 보정치를 채택하였다(Fig. 5). Fig. 7a는 A의 Argo 염분자료와 CTD 염분의 수직 구조를 도시한 것이다. 상대적으로 시공간적인 변화가 심한 표층부분은 다소 맞지 않으나 안정적인 저층으로 갈수록 일치하였으며, 1500 - 2000 dbar 사이의 염분차이 평균치는 0.003으로 Argo 프로그램의 목표 오차인 0.01이하이다(Fig. 9). Fig. 7b는 B의 보정 전후의 Argo 염분자료와 CTD 염분의 수직 구조를 도시한 것이다. 심층의 염분차이는 0.01이하였으며, 특히 1500 - 2000 dbar

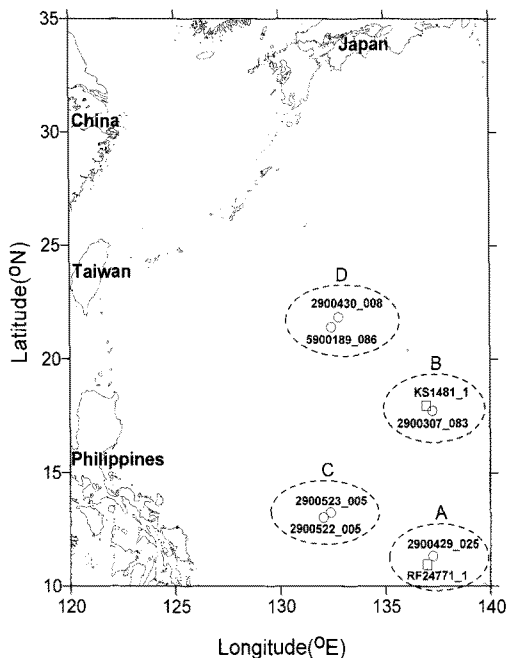


Fig. 6. Locations of Argo float profiles and CTD stations used in verification of results of delayed mode quality control.

사이의 염분차이 평균치가 보정 전후로 2/5로 감소하여 품질관리 결과가 좋은 것을 확인하였다(Fig. 9).

4.2. Argo 자료간 비교

WMO ID 2900522의 5번째 프로파일과 WMO ID 2900523의 5번째 프로파일을 비교하였으며(Fig. 6의 C), WMO ID 2900430의 8번째 프로파일과 WMO ID 5900189의 86번째 프로파일을 비교하였다(Fig. 6의 D). Fig. 6의 C 경우 시간적으로는 같은 날(2005년 12월 1일)에 관측되었고 공간적으로는 46 km 떨어져 있으며, Fig. 6의 D 경우 시간적으로는 같은 날(2005년 1월 23일), 공간적으로 62 km 떨어져 있다. 2900522, 2900523과 2900430은 WJO 프로그램의 결과를 전문가의 검토를 거친 후 원래 관측한 자료를 지연모드 자료로 채택한 반면에 5900189는 보정치를 채택하였다. Fig. 8a는 C의 두 Argo 염분자료의 수직 구조를 도시한 것이다. 800 - 1500 dbar 사이의 두 프로파일간의 염분차이가 0.003로 0.01이하였다(Fig. 9). Fig. 8b는 D의 2900430의 8번째 프로파일의 염분자료와 5900189의 86번째 프로파일의 보정 전후 염분

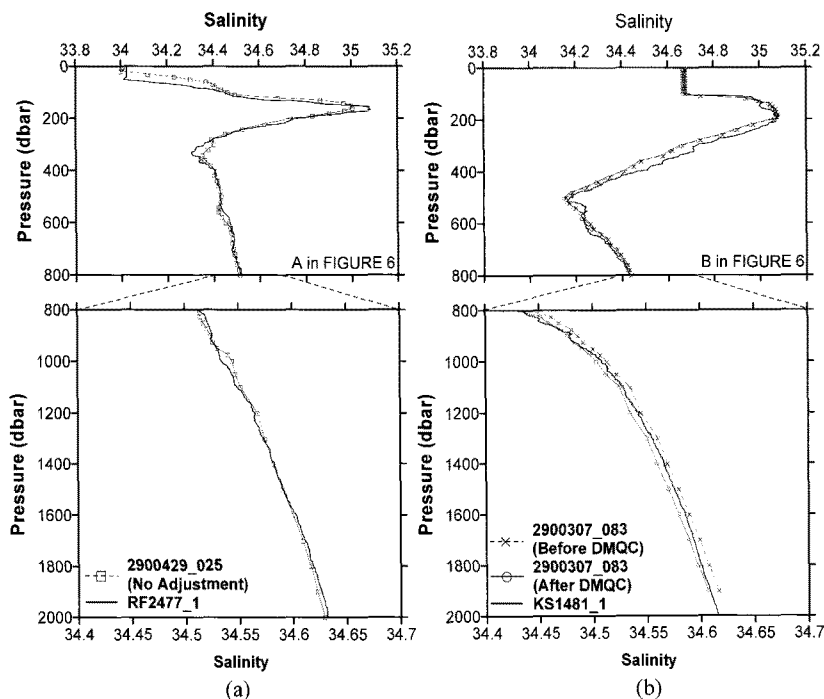


Fig. 7. Vertical salinity profiles of an Argo float (2900429) with no adjustment and spatially and temporally nearby CTD (a), and an adjusted Argo float (2990307) and spatially and temporally nearby CTD (b).

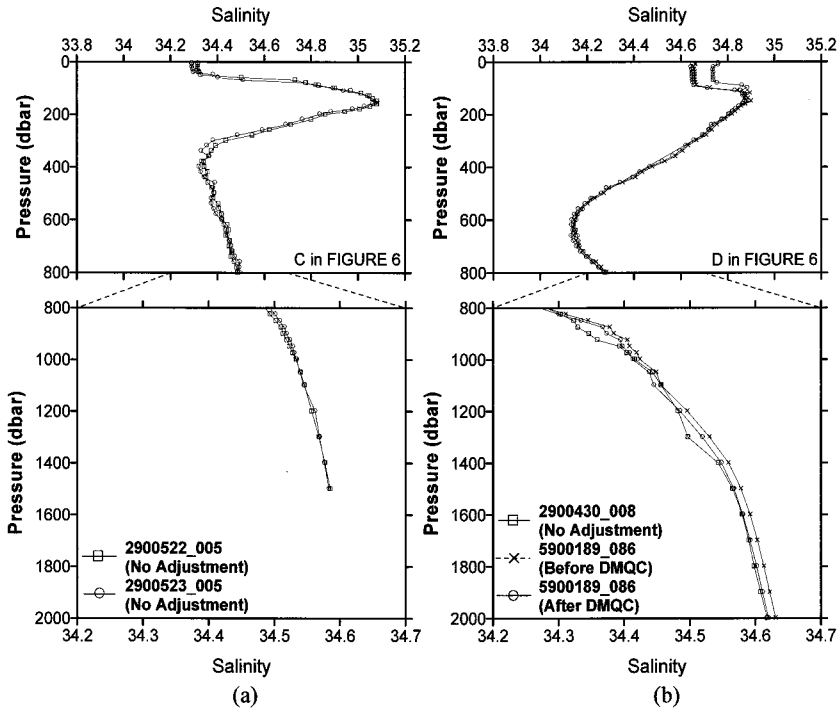


Fig. 8. Vertical salinity profiles of two spatially and temporally nearby Argo floats (2900522 and 2900523) with no adjustment (a), and an Argo float (2900430) with no adjustment and an adjusted Argo float (5900189) (b).

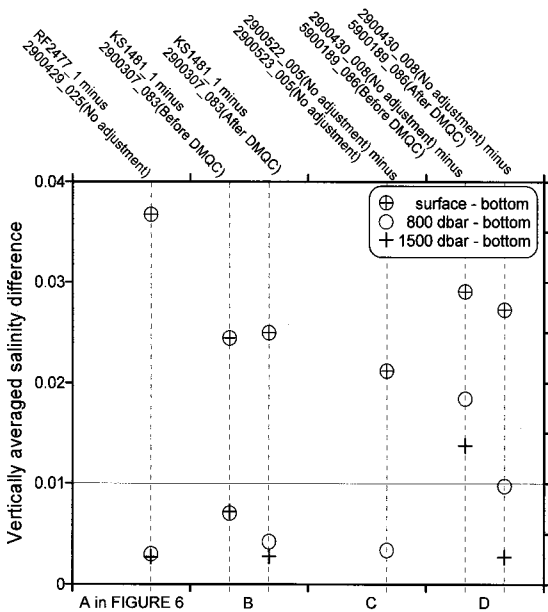


Fig. 9. Vertically averaged salinity difference between 4 pairs of nearby salinity data in Fig. 6.

자료를 도시한 것이다. 1500 -2000 dbar 사이의 두 프로파일간의 염분차이가 보정 전에는 0.01보다 컸으나 보정 후에는 0.003(1/5로 감소)으로 자료의 품질이 개선되었다.

5. 결론

전 지구적인 기후변화를 정확하게 예측하기 위하여 정부간해양학위원회가 세계기상기구와 공동으로 전 지구적인 해양관측체계인 Argo 사업을 추진하고 있다. 획득한 자료는 국가별로 실시간모드와 지연모드로 나누어 관리하고 있으며, 실시간 품질관리과정을 거친 자료는 24시간 내에 세계 Argo 자료센터를 통하여 배포되고 있다. 관측 자료 중 압력과 수온은 플로트의 작동 예상기간인 4년 동안 안정적인 반면에 염분은 생물오손, 센서의 오염, 살생물제의 용해 등에 의해 관측 오류가 발생하므로 자동화된 실시간 품질관리 과정은 거치지 않지만, 이러한 실시간 자료품질관리만으로는 양질의 자료를 선별하

는 것이 어려우므로 최대 1년간의 축적된 자료를 한꺼번에 이용하는 정밀 품질관리 과정인 지연모드 품질관리를 수행한다. 세계 Argo 자료관리팀 회의에서 표준화된 방법인 WJO 프로그램을 제안하여 전 세계적으로 공통으로 적용하고 있다.

태평양의 해양기후변동을 정밀하게 분석할 수 있도록 하기 위하여 국내 기관이 태평양에 투하하여 획득하여 실시간 품질관리 과정을 거친 Argo 자료에 대하여 압력과 수온 그리고 염분에 대하여 지연모드 품질관리를 수행하였으며 전문가의 검토 과정을 거쳤다. 특히 염분은 WJO 프로그램을 이용한 보정치를 제시함으로써 지연모드 자료의 품질을 개선하였다. 또한 Argo 지연모드 염분 자료와 시공간적으로 가까운 현장관측 염분자료를 비교하여 시공간적인 변화가 거의 없는 심층(1500-2000 dbar)에서 두 자료간의 차이가 Argo 프로그램의 목표 오차인 0.01 이하인 0.003이었고, 보정하기 전보다 보정한 후의 염분이 훨씬 차이가 작았다. 따라서 WJO 프로그램을 이용한 Argo 염분자료는 지연모드 품질관리를 통하여 자료의 품질이 향상되었다. 아울러 지연모드 품질관리 과정에 염분의 보정치 채택 여부를 판단하는 과정에 참값에 해당하는 현장관측자료가 결정적인 역할을 하므로 지연모드 품질관리를 위하여 전 세계적으로 현장관측자료를 공유하는 체계가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립수산물과학원의 한국해양자료센터의 운영(RP-2008-ME-056)과 한국해양연구원의 국제공동해양조사연구(PE98001) 과제의 일환으로 수행하였습니다.

참고 문헌

- 1) IPCC, 2007, Summary for Policymakers. In : Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marguis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18pp.
- 2) Levitus S., Antonov J., Boyer T., 2005, Warming of the world ocean, 1995-2003, *Geophys. Res. Lett.* 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- 3) Argo Science Team, 2000, Report of the Argo Science Team 2nd Meeting, 7-9 March 2000, Southampton Oceanography Center, Southampton, U.K.
- 4) 양준용, 석문식, 서영상, 정희동, 허승, 2008, Argo 자료를 이용한 해외어장 실시간 해양정보제공시스템 개발연구, *한국환경과학회지* 17(4), 461-468.
- 5) 오경희, 박영규, 석문식, 2004, 자동수직물성관측틀개(ARGO Float)로 얻은 수온과 염분의 정확도와 안정도, *한국해양학회지 바다*, 9(4), 204-211.
- 6) Freeland H., 1997, Calibration of the conductivity cells on PALACE floats. U.S. WOCE Implementation Report No. 9, U.S. WOCE Office, 37-38.
- 7) Freitag H. P., McCarty M. E., Nosse C., Lukas R., McPhaden M. J., Cronin M. F., 1999. COARE Seacat data: Calibrations and quality control procedures. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-115, 89pp.
- 8) Oka E., Ando K., 2004, Stability of temperature and conductivity sensors of Argo profiling floats, *Journal of Oceanography*, 60, 253-258.
- 9) Kobayashi T., Minato S., 2005, Importance of reference dataset improvements for Argo delayed-mode quality control, *Journal of Oceanography*, 61, 995-1009.
- 10) Argo Data Management Team, 2007, Argo quality control manual v2.3, 33pp.
- 11) Argo Data Management Team, 2002, Report of Argo data management Meeting. Argo data management 3rd Meeting, 18-20 September 2002, Marine Environmental Data Service, Ottawa, Canada.
- 12) <http://ftp.ifremer.fr/ifremer/argo/>
- 13) <http://www.jma.go.jp/jma/>
- 14) Kobayshi T., 2004, Historical salinity dataset for Argo delayed-mode quality control: Selected Hydrographic Dataset (SeHyD). *Report of Japan Marine Science and Technology Center*, 49: 51-71 (in Japanese with English abstract).
- 15) Wong A. P. S., Johnson G. C., Owen W. B., 2003, Delayed-mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by Θ -S climatology, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 20, 308-318.