

국립기상과학원 Argo 사업의 현황 및 추진 방향

김백조^{1)*} · 조형준¹⁾ · 강기릉²⁾ · 이철규¹⁾

¹⁾국립기상과학원 관측연구부, ²⁾기상청 지진화산국 지진화산기술팀

(접수일: 2023년 10월 13일, 수정일: 2023년 11월 4일, 게재확정일: 2023년 11월 13일)

Current Status and Future Direction of the NIMS/KMA Argo Program

Baek-Jo Kim^{1)*}, Hyeong-Jun Jo¹⁾, KiRyong Kang²⁾, and Chul-Kyu Lee¹⁾

¹⁾Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences,
Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea

²⁾Earthquake and Volcano Technology Team, Earthquake and Volcano Bureau,
Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 13 October 2023; revised 4 November 2023; accepted 13 November 2023)

Abstract In order to improve the predictability of marine high-impacts weather such as typhoon and high waves, the marine observation network is an essential because it could be rapidly changed by strong air-sea interaction. In this regard, the National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration (NIMS/KMA) has promoted the Argo float observation program since 2001 to participate in the International Argo program. In this study, current status and future direction of the NIMS/KMA Argo program are presented through the internal meeting and external expert forum. To date, a total of 264 Argo floats have been deployed into the offshore around the Korean Peninsula and the Northwestern Pacific Ocean. The real-time and delayed modes quality control (QC) system of Argo data was developed, and an official regional data assembling center (call-sign 'KM') was run. In 2002, the Argo homepage was established for the systematic management and dissemination of Argo data for domestic and international users. The future goal of the NIMS/KMA Argo program is to improve response to the marine high-impacts weather through a marine environment monitoring and observing system. The promotion strategy for this is divided into four areas: strengthening policy communication, developing observation strategies, promoting utilization research, and activating international cooperation.

Key words: High-impacts weather, Argo Float Observation Program, Promotion strategy

1. 서론

최근 지구 온난화 및 급격한 기후변화에 따른 해양 위험기상에 대한 대응력 및 예측력을 높이기 위한 다양한 노력이 요구된다. 특히 지구온난화로 인한 해양

열파(marine heat-wave)가 급증하고 태풍 강도와 진로에 미치는 해양열용량 변화 분석을 위해서는 해양 내부의 관측자료 생산이 시급한 실정이다. 이를 통해 해양 상에서 발생하는 자연재해를 최소화하고 해양 안전사고로 인한 인명과 재산 손실 등의 피해를 줄이기 위한 해양기상 관측정보의 중요성이 크게 부각되고 있다.

해양 내부의 관측자료를 생산하기 위하여 2000년부터 WMO (World Meteorological Organization)와 IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission)가 공동으로 주관하는 전지구 Argo (Array for Real-time

*Corresponding Author: Baek-Jo Kim, Observation Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6591, Fax: +82-64-738-0996
E-mail: swanykim@korea.kr

Geostrophic Oceanography) 공동연구 프로그램이 추진되어 왔다(Wong et al., 2020). Argo 플로트를 통한 전 지구 해양의 수온, 염분 및 해류의 준 실시간 감시 및 관측하는 국제 Argo 공동연구 프로그램은 현재까지 약 30여 개국이 참여하고, 한국, 미국, 프랑스, 호주, 일본 등 11개의 지역자료센터가 운영되고 있다.

국립기상과학원은 우리나라 주변의 해양환경 감시를 위해서 2001년부터 국제 Argo 공동연구 프로그램에 참여하여 무인 자동 해양관측기기인 Argo 플로트를 지속적으로 투하하여 운영하고 있다. Argo 플로트는 동해를 중심으로 북서태평양 일대에 투하해 왔으며, 최근에는 서·남해에 투하하여 성공적으로 운영하고 있다. 또한, 수집된 자료는 24시간 이내에 처리하는 실시간 품질관리와 3~6개월 이후에 편향 등을 보정하는 지연모드 품질관리 기술을 개발하여 왔다. 실시간 품질관리는 국제 Argo 공동연구 프로그램에서 권장하는 품질관리 매뉴얼(Wong et al., 2023)에 기초하며, 위치 검사, 정상 범위 검사, 밀도 역전 검사 등 관측 값이 해양에서 일반적인 범위에서 관측되었는지 점검을 말한다. 이와 달리 지연모드 품질관리는 실시간 품질관리된 자료를 6개월에서 1년 주기로 상세한 품질관리 기법을 도입하여 자료의 이상 여부를 확인한다. 또한, 해양 전문가가 직접 눈으로 자료의 이상 유무를 확인하는 Visual QC, 염분 편향이 발생하는 자료에 대해 실시간 자료를 사용하지 않도록 하는 목록인 “grey list” 포함 여부 검토 과정 등이 있다.

국내에서 Argo 사업을 수행하고 있는 NIMS (2021)는 처음으로 Argo 사업과 품질관리 과정 소개, 연도별 투하된 플로트 위치 및 이동궤적, 관측 현황을 정리하였고, Argo 플로트 자료의 활용성을 높이기 위한 연구사례를 소개하였다. 한편 KIOST (2013)는 Argo 활용 연구 기획을 통해 동해, 남극해에서의 Argo 플로트 투하를 재개하여 전 세계 37개국이 참여하는 국제공동조사 프로그램에 기여하기 위한 연구 추진 방향을 설정하였다. 여기에는 Argo 플로트 투하 계획 및 전략과 함께 한불 열수지 국제공동연구, 저위도 북서태평양 열용량, 저위도 해역이 전구 기후에 미치는 영향 연구 등 활용연구 방향도 제시하고 있다. 뿐만 아니라 Argo 테크놀로지 연구를 통한 바이오센서 국산화와 조립병행. 글라이더 관측의 필요성을 밝혔다.

국립기상과학원 Argo 사업이 Lee et al. (2004)에 의하여 소개된 이래, Argo 관측자료를 사용한 해양 상태를 분석하는 연구가 진행되었다(Youn et al., 2006; Jeong et al., 2016). 하지만 국제 Argo 공동연구 프로그램에 장기간 기여하고 있는 국립기상과학원 Argo 사업에 대해 2021년에 발간한 국립기상과학원 Argo 플로트 운영 보고서(2001~2020) (NIMS, 2021)을 제외하고 전체적으로 사업 추진 방향에 대해 깊이 있게

연구되거나 논의가 부족한 실정이다. Argo 플로트 운영 보고서에는 Argo 프로그램 소개, Argo 플로트 관측 이력 및 현황이 소개되었으며, 동해 울릉분지 주변 수온과 염분 그리고 열용량의 장기 변동 경향에 대해 분석한 결과가 소개되었다.

본 연구에서는 지난 23년간의 국립기상과학원의 Argo 사업에 대한 추진현황과 앞으로의 추진 방향과 정책 제언을 제시하였다. Argo 사업의 추진현황에서는 사업의 시작, Argo 플로트의 투하 및 관측, 품질관리, 활용 연구 등을 다루었으며 지금까지 사업을 추진하면서 개선이나 강화가 되어야 할 부분을 토대로 추진 목표와 내용 그리고 최근 Argo 플로트 관측 및 활용 전문가 포럼에서 논의되었던 다양한 정책 제언도 포함하였다.

2. Argo 사업의 추진현황

2.1 Argo 사업의 시작

국립기상과학원 Argo 사업은 2001년의 ‘한반도 약 기상 집중관측(Korea Enhanced Observing Period, KEOP)’ 사업의 세부 연구내용에 포함되어 시작하였다(Fig. 1). 한반도 약기상 집중관측(KEOP) 사업은 첨단 고층기상 관측 장비(Aerosonde, Autosonde) 등을 활용한 중규모 기상관측망을 통하여 태풍 및 집중호우의 3차원 입체 기상관측과 태풍의 에너지원인 해양 기상 관측 자료의 생산, 위성과 레이더의 원격탐사 자료를 이용하여 장마, 집중호우 그리고 태풍의 발생과 발달 현상을 규명하고 예측하는 연구를 목표로 하고 있다(METRI, 2002).

2001년 당시에 우리나라의 해양 기상관측은 1996년 7월 기상청에서 해양 기상관측 부이를 설치 운영한 이래 4기의 부이를 관측하는 자료가 전부라 할 수 있다. 더욱 태풍의 에너지원인 해수온을 관측한 자료는 수산진흥원에서의 격월 정선 관측자료, 1일 1회 관측하는 연안 정점 관측 자료에 불과하며, 이러한 자료들은 실시간으로 수집되지 않아 짧은 시간에 신속하게 대처하는 태풍 등의 위험 기상현상 예측에 적용할 수 있는 자료의 구성이 되어 있지 않은 실정이었다. 또한 1999년 서울대학교 해양연구소는 미국 워싱턴 대학교와 공동으로 36개의 중층 부이를 동해에 투하하여 장주기 해류와 수온·염분 등을 관측하고 있었을 뿐이다. 그러나 현업에서 태풍 같은 위험 기상요소의 예측성 향상을 위해서는 실시간으로 파랑, 해상풍, 해수온 관측자료 생산이 요구되어 왔다.

KEOP 사업에서는 국제 Argo 프로그램과 연계하여 전 지구 해양자료 수집을 강화하고 기상관측선, 해양 기상부이, 표류부이를 이용한 해양기상 준 실시간 감시를 위한 종합적인 해양기상 관측체계를 구축하고자



Fig. 1. Introduction brochure to Korea Enhanced Observing Period (KEOP) in 2000.

하였다. 이를 통해 정확한 해수면 온도와 해상 바람의 예측을 위한 해양 기상 수치모델링 연구를 추진하는 체계를 마련하였다. KEOP 사업의 첫 해인 2001년에 Argo 플로트에 의한 실시간 해양 기상-해양기후 감시를 위하여 전 세계적으로 활용되고 있는 Argo 플로트 관측 기술을 도입하여 동해에 3기를, 북서 태평양에 7기를 투하하여 태풍 발생에 따른 해양환경 변화 특성을 밝히는 데 기여하였다.

2.2 Argo 플로트 투하

Figure 2는 국립기상과학원에서 2001년부터 2023년까지 한반도 주변 해역과 북태평양에 투하한 Argo 플로트 개수이다. 한반도 근해에 161기와 북서태평양에 103기를 더해 총 264기의 Argo 플로트를 투하하여 해양환경 관측자료를 확보함으로써 해양관측망 구축에 기여하고 있다(NIMS, 2022). 한반도 주변 해역별로 보면 동해에 139기와 2017년부터 시작된 천해인 서해와 남해에 22기를 투하하였다. 북서태평양에 투하한 103기는 북서태평양 79기와 북태평양 24기이었다. Argo 프로그램은 20 여 개국이 참여하는 국제 공동 관측 사업이기 때문에 Argo 플로트의 관측 영역에 대

한 역할이 분배되어 있다. 동해를 비롯한 한반도 근해는 우리나라가 유일하게 Argo 플로트 관측을 수행하고 있으며, 지속적인 관측이 요구되고 있다. 하지만 최근 Argo 플로트 투하 대수의 감소로 북서태평양 보다 한반도 근해인 동해 투하에 집중하고 있다. 또한 한반도 주변 해역에서 발생하는 해양 위험기상의 선제적 대응을 위해 서해 냉수대 및 저염수 관측에 대한 요구가 커지고 있어 서해 및 제주 근해, 즉 천해 관측에 집중하게 되었다. 향후 Argo 플로트 투하 대수가 증가하게 되면 북서태평양 가장자리를 따라 북상하는 태풍 등 해양 위험기상의 이동 및 발달 지역에도 Argo 플로트의 투하를 계획하고 있다. 2023년 동아시아에서 한국은 7기, 일본은 41기, 중국은 30기를 투하할 예정이다.

2023년 9월 현재 전 세계 해양에서 정상으로 운영되고 있는 Argo 플로트는 3,854기이며 이 중에 절반은 미국이 약 2,900기, 프랑스와 독일은 200~300기, 일본은 119기, 중국은 50여기, 인도는 22기로 참여하고 있다. 지금까지 국립기상과학원에서 투하한 264기 중에서 10기와 한국해양과학기술원의 9기를 포함하여 우리나라는 현재 19기가 정상 운영되어 있다. 국립기

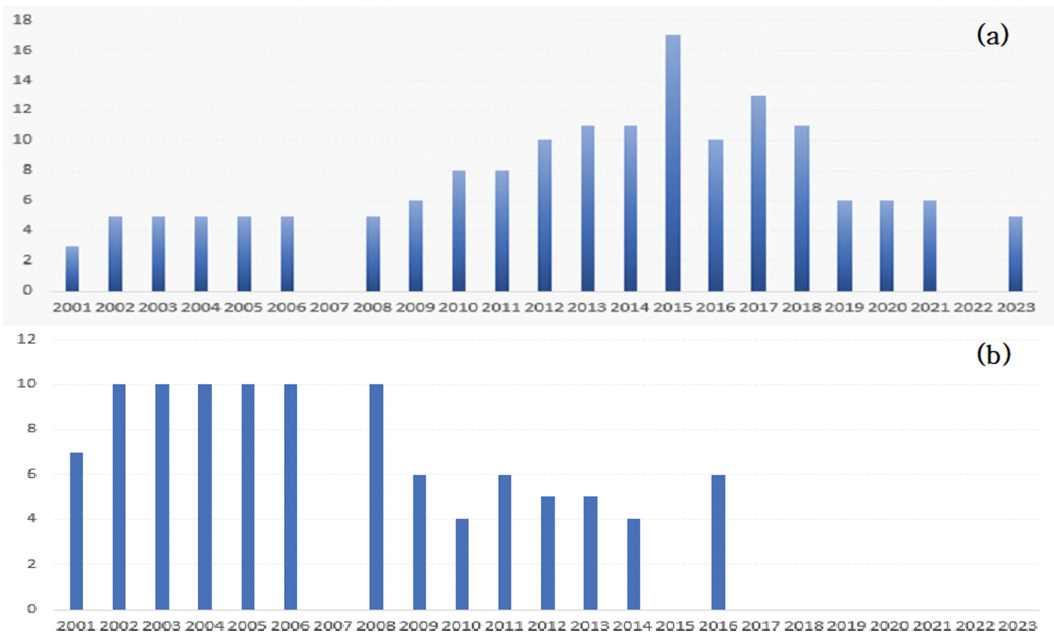


Fig. 2. Interannual variations of Argo floats deployment in Korea: (a) offshore Korean peninsula and (b) Northwestern Pacific ocean.

상과학원에서 투하하는 Argo 플로트는 프랑스 nke 사의 ARVOR-L과 미국의 TWR 사의 APEX 모델이다. Argo 플로트는 기상청의 기상 1호, 극지연구소의 아라온호, 한국해양과학기술원의 이사부호를 이용하여 과학원 직원(2~3인)이 1~2주 항해하면서 목표지점에 투하하게 된다. Argo 플로트의 수명과 관련이 높은 관측 주기는 해역의 수심, 장주기 변동 등을 고려하여 동해는 7일, 서·남해는 1~2일, 북서태평양은 10일이다. 수심 2,000 m까지 표류가 가능한 통상적인 Argo 플로트로 우리나라의 서·남해의 수중 열염구조 자료를 생산하여 천해(서해/남해 평균 수심: 44 m/100 m) 플로트 투하 및 운영 기술을 확보하였다.

또한 북서태평양에서 북상하는 태풍에 따른 해양환경 변화 감시나 서해 냉수대 변화 특성을 이해하기 위하여 짧은 관측 주기(1일)의 Argo 플로트 관측 기술을 개선하고 있다. 기존 지연모드 품질관리 방법은 대양 관측자료에 최적화되어 있어 서해 관측자료에 적용하는 것은 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위하여 지연모드 품질관리에 대한 개선연구를 지속적으로 수행하였다. Argo 플로트 투하 후 1년에 두 차례에 걸쳐 지연모드 품질관리 후 프로파일(profile)을 GDAC(Global Data Assembly Center)에 업로드하게 된다. Argo 플로트 프로파일은 매년 Argo 플로트 투하 개수와 관계없이 이전에 투하된 플로트에서 관측된 자료도 활용 가능하므로 자료 생산이 제외된 해가 없다

(그림 미제시). Argo 플로트 투하 개수에 비례하여 2015년에 2,926회로 가장 많았으며 이 해를 정점으로 이전과 이후의 시간으로 갈수록 점차 감소하는 패턴을 보였다. 2001년과 2022년에 Argo 플로트 프로파일 생산은 각각 44회와 1,053회였다.

2.3 Argo 관측자료 품질관리 및 홈페이지 운영

국립기상과학원은 국제 Argo 공동연구 프로그램 참여 시기인 2001년에 Argo 관측자료 품질관리 프로그램을 개발 및 운영하고 있다. ADMT(Argo Data Management Team) 매뉴얼을 준용하여 품질관리 프로그램을 개발하고 상시 업데이트하며 동해 및 서해 등 지역 해역의 특성을 고려하여 해역별 품질관리 기법도 개발·적용하고 있다. 또한 경북대와 공동으로 Argo 관측자료 지연모드 품질관리를 수행하고 있다. 지연모드 품질관리 수행을 통해 Outlier 및 Spike QC flag 검토 및 수정, 염분 편향 보정과 수심이 깊은 곳(저온) 구간에서 안정적인 염분 구조를 갖는 동해의 특성에 맞게 자료를 처리하게 된다. 앞으로도 해양 감시를 통한 고품질 관측자료를 생산하기 위해서는 해양기상 관측망의 운영을 통한 관측자료 수집 및 자료분배, 그리고 품질관리 기법 개선에 대한 지속적인 연구개발이 이루어져야 한다.

국립기상과학원은 자체적으로 Argo 사업의 홈페이지(<http://argo.nims.go.kr>)를 2002년 12월에 구축하여

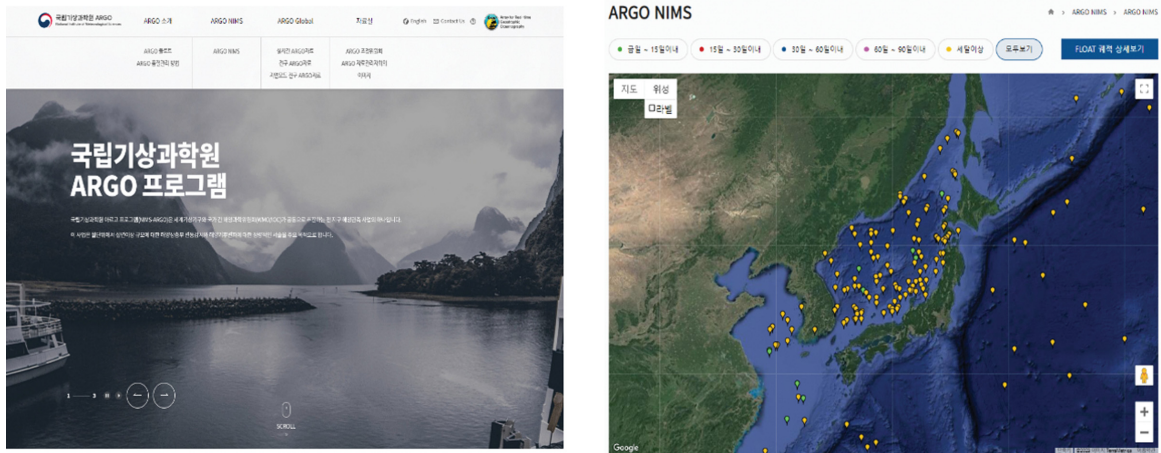


Fig. 3. NIMS/KMA Argo observation program homepage.

Table 1. Number of recent 5 years' Argo homepage visitors.

Year	2018	2019	2020	2021	2022
No. of visitor	336,851	471,062	323,455	909,058	1,980,305

Argo 프로그램 및 장비 소개, 실시간 자료 위치 및 프로파일 제공, 전지구 Argo 모니터링 상태 등을 소개하고 있다(Fig. 3). Argo 지역자료센터 운영을 통해 동해와 서해에서의 수온과 염분자료를 실시간으로 수집하고 품질관리를 통해 전 세계로 분배하였다. 최근 5년간 Argo 홈페이지 접속자(페이지 뷰) 수를 살펴보면 2018년에 336,851명에서 2022년에 1,980,305명으로 약 6배 정도 증가하였다(Table 1). 국립기상과학원 Argo 홈페이지에 접속하여 다양한 자료나 정보를 다운로드하는 기관은 대부분 연구기관이나 대학교, 고등학교 등이었다. 특히 고등학교에서는 Argo 플로트를 통한 해양 내부 수온과 염분 프로파일을 이해와 관련된 내용이 고등학교 과학교재의 탐구교실에 포함되어 있어 방문자가 많은 것으로 판단된다.

2.4 Argo 관측자료 활용연구

지난 23여 년간 국립기상과학원 Argo 사업을 통해 지속적인 Argo 플로트 투하 및 관측 플로트를 통해 수집된 수온과 염분자료는 전 세계로 실시간 분배되고 있으며, 이러한 자료는 현업 예보, 과학, 그리고 교육 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. KIOST (2013)에서 조사한 자료에 따르면 2012년까지 23여 건의 논문으로 동해, 남극해, 태평양 연구로 구분하였다. 동해의 경우 전체 9편으로 약 1편/년으로 타 해역에 비해 상대적으로 많으나, 전체적으로는 국내 Argo 플로트 관측자료 활용연구는 취약한 상태라고 밝힌 바 있

다(Fig. 4). 하지만 전 세계적으로 Argo 플로트 관측자료 활용연구가 2010년부터는 획기적으로 증가하는 점을 고려하면 이에 대한 연구 활성화 노력이 필요하다. 최근에 Oke et al. (2022)는 해빙 아래에서 관측된 Argo 궤적자료의 보정 기법을 개발하여 잠재적 소용돌이도, 해수면, 수심 1,000 m 수심 밀도를 사용하여 검증하였고, Rykova (2023)는 Argo 관측자료를 기반으로 해양 특성을 그룹화하여 해역별 Eddy 예측력을 향상시키는 연구를 수행하였다. 또한 20년여 동안 생산된 방대한 해양관측 프로그램의 운영 결과를 활용하여 전 지구 규모의 연직 2,000 m이상의 생지화학적 요소 관측을 통한 해양 생태계 이해도를 높인 연구(Roemmich, 2019)와 해양 환경 장기 변동성과 향후 기상 예측에 대한 활용 가능성(Johnson et al., 2022) 연구를 수행한 바 있다.

우리나라가 위치한 북서태평양에서 Argo 플로트 영향에 대한 연구가 이루어져 왔는데, Fu et al. (2013)에 따르면 프린스턴 해양모델(Princeton Ocean Model, POM)을 이용한 단기예보에서 Argo 자료를 사용함으로써 수온과 염분의 예측 오차가 각각 24%와 50% 감소하는 효과가 있음을 제시하였다. Shao et al. (2015)은 Argo 관측 자료동화로 인하여 해양의 연직 구조와 중규모 순환의 모의 성능을 개선하는 효과를 보였다. 국외의 북서 태평양에 투하된 Argo 관측자료 활용연구에서는 해양 분석장의 모의 성능을 향상시키거나 예측 성능을 개선하는 데 관측자료의 효과가 있음

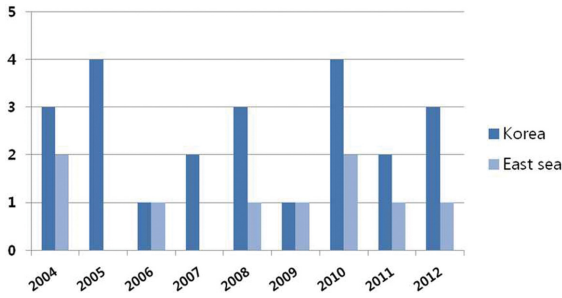


Fig. 4. Number of published papers associated with application of Argo floats data in Korea and East Sea (from KIOST (2013)).

을 보여주었다.

국립기상과학원 Argo 관측자료 활용연구 분야는 주로 동해 표·중층 흐름 및 혼합층 변화 등 순환 구조 연구(서해 양쯔강 저염수 및 냉수대 발달 등), 위험기상(태풍)에 따른 해양환경(SST, 염분, 해수면 고도 등) 변화 등 대기-해양 상호작용 연구, 기상청 계절예측시스템의 해양 초기장 개선, 한반도 주변 해역의 해양환경 장기 변동성 분석 연구 등이 있다(Yang and Ishida, 2004; Youn et al., 2006; Kang et al., 2016; Park and Lim, 2018; Kang et al., 2020; Choo et al., 2021; Hyun et al., 2022). 국립기상과학원에서도 수집된 자료를 바탕으로 북태평양을 중심으로 해양 혼합층 및 열용량 변동 등을 분석한 바 있으며, 현업 기후예측시스템의

해양초기화 과정에도 활용하고 있다. 여기서는 국립기상과학원 Argo 사업 연구진들에 의해 수행된 Argo 관측자료 활용연구의 주요 성과를 간략히 언급하고자 한다. 태풍에 따른 해양환경 변화를 수온, 염분의 변동을 1일 주기 천해 Argo 관측자료를 분석한 Kang et al. (2020)의 연구에서는 태풍 내습에 따른 표층 수온이 약 2°C 하강하고 수온 약층이 약 10 m 깊어지는 해양 반응이 나타남을 밝혔다(Fig. 5a).

한편 관측시스템 실험을 통한 한반도 근해 Argo 플로트 관측자료의 자료동화 효과를 평가한 연구(Choo et al., 2021)에서 NIMS/KMA 투하 Argo 플로트를 자료동화하여 모델 배경장의 오차가 개선됨을 확인하였다. 동해에서 Argo 수온 자료의 효과가 뚜렷하였고 서해에서 Argo 수온과 염분 자료의 효과가 크게 나타났다(Fig. 5b). 이와 유사한 연구로 중국 연안을 비롯한 북서태평양 해역의 재분석장을 생산하는 과정에서 수온과 염분의 오차를 약 10% 감소시킨다고 밝힌 바 있다(Shao et al., 2015).

3. Argo 사업의 추진 방향

지금까지 국립기상과학원 Argo 사업을 추진하면서 제기된 문제점을 개선하고 나아갈 방향을 정하는 것은 무엇보다 중요하다. 제1차 해양기상업무 추진계획(안) 발전목표(23.2)에서 제시한 ‘세계 Top3 수준의 해양기상·기후정보 서비스 실현’을 위하여 Argo 사업을 통해 기상청 정책과 현업 지원을 강화하고 해양환경

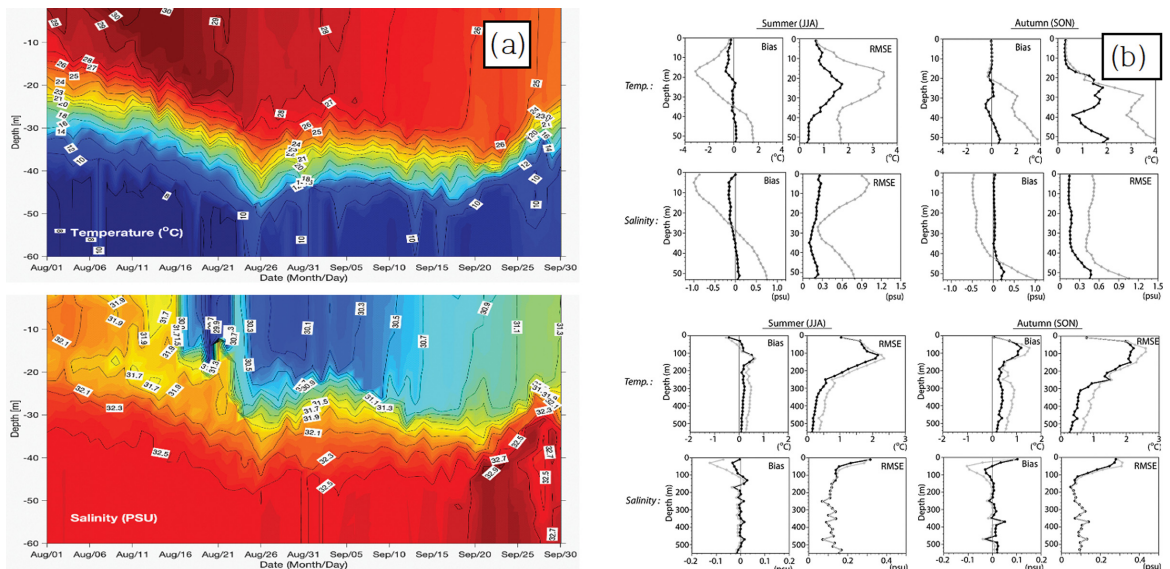


Fig. 5. Examples of major application related papers based on NIMS/KMA Argo data: (a) Ocean response to TC (from Kang et al., 2020) and (b) Assimilation Impact of Argo Float Observations (from Choo et al., 2021).

Reaching the World Top3 Level of Marine Weather&Climate Information Service

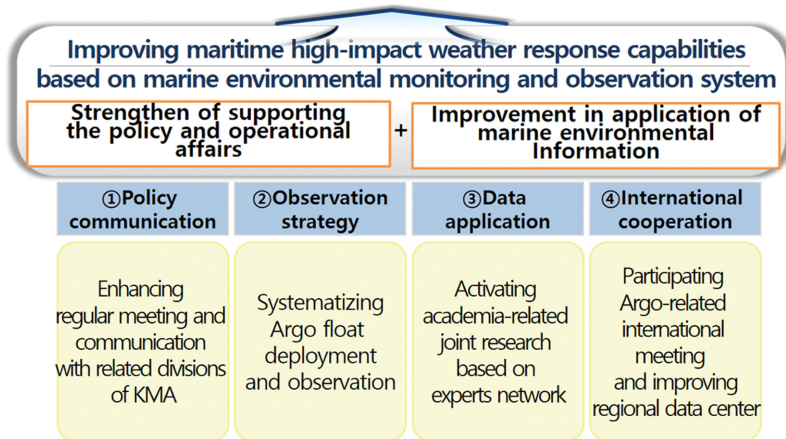


Fig. 6. Future direction of the NIMS/KMA Argo observation program.

정보 활용 및 가치를 향상하고자 한다(Fig. 6). 이를 토대로 Argo 사업 기반 해양환경 감시·관측 체계로 해양위험기상 대응력 제고를 추진목표로 설정하였다.

이와 같은 추진체계를 위해 정책소통 강화, 관측전략 개발, 자료활용 증진 그리고 적극적인 국제협력과 같은 세부 추진내용을 제시하였다. 먼저 정책 소통 분야에서는 해양기상업무 규정 제9조(해양기상업무 관련 기술개발)에 근거하여 본청(관측정책과, 해양기상과)-국립기상과학원 해양기상관측분야(Argo 등) 업무 협력회의를 정례화할 필요가 있다. 이 협력회의에서는 해양기상 관련 정책의 추진계획과 연계성을 강화하기 위해 Argo 사업의 추진현황 및 향후 계획에 대한 주기적 분석 결과 공유와 Argo 플로트 관측자료 협력 네트워크(예, ARGO 전문가 포럼)를 강화해 나가야 한다. 일본기상청과 같이 Argo 사업의 유관기관 협력체계를 구축하는 것도 고려해 볼 만하다. 일본 기상청은 일본 Argo 사업을 총괄하고 예산 확보와 실시간 품질관리를 수행한다. 일본 해양연구개발기구는 Argo 플로트를 투하하고 지연모드 품질관리 개발을 담당하고 일본 기상연구소는 Argo 플로트 관측 자료 동화 연구와 관측 전략을 개발한다. 또한 대변인실 협조를 통해 Argo 사업의 대내외 홍보 전략 개발이 필요하다. 둘째는 관측 전략 분야로 범 국가 차원의 연도별/기관별 Argo 플로트 투하(선택과 집중) 계획 마련을 위해 사전 부처 간의 협의를 통해 Argo 플로트 적정 투하 개수, 최적 투하 지점&지역 등이 선정되어야 한다. 이를 위해 국립기상과학원 Argo 사업 자문위원회(청내·외 부서장 또는 전문가 4~5인)를 구성 및 운영하고 있다. Argo 플로트 관측에 대한 관측시스템

실험(Observation System Experiment)을 통한 투하 전략 개선과 Argo 플로트의 다변화(Core Argo, BGC Argo, Deep Argo)를 통한 관측 전략도 고려하여야 한다. 북태평양고기압 국제공동 프로젝트와 같은 미래 정책 이슈와 연계된 해양 환경 목표관측 기술 개발도 시급하다. 특히 입체적 해양기상관측망(Argo 플로트, 해양글라이더, 기상관측선)을 활용한 태풍 집중관측 계획 수립도 중요한 연구과제가 될 수 있다. 셋째는 경북대 등과 협력하여 Argo 플로트 관측자료 품질관리(실시간, 지연모드) 기술을 고도화하고 과학원 자체 Argo 플로트 관측자료 활용 연구를 수행하는 자료 활용 분야이다. Argo 플로트 관측자료 활용연구는 해양 위험기상 실험 및 분석 예측정보 및 기술개발(예, 태풍 예상 경로상의 표층 및 저온 수온, 해양 열용량 등), 기후변화 대응 한반도 주변 해양기상의 역할 규명 등이 있으며 Argo 플로트 관측자료 기반 학·연·관 공동 연구를 지속적으로 추진할 필요가 있다. 체계적인 학·연·관 공동연구를 위해 기상청에서 일본해양연구개발기구 Argo 산출 자료관리 및 프로젝트 개발이나 중국의 전 지구 해양 Argo 시스템의 관측 및 연구소 설립도 적극적으로 검토하여야 한다. 이와 같은 Argo 플로트 관측 및 분석 연구는 향후 투하 전략에 적용이 가능하다. 마지막으로 Argo 사업은 국제 공동연구 프로그램의 일원으로 참여하고 있으므로 무엇보다 적극적인 국제협력이 중요하다. Argo 관련 국제회의(AST, ADMT 등) 참여와 함께 국립기상과학원이 운영하고 있는 국제공인 지역자료센터(KM) 등을 Joint WMO-IOC Collaborative Board (JCB)을 통한 한국의 Argo 사업성과 홍보가 이루어져야 한다.

4. 정책제언 및 결론

국립기상과학원은 2001년부터 Argo 국제공동사업에 참여하면서 우리나라 주변 해역과 북서태평양에 플로트를 투하하였고, 또한 이 해역에서 관측된 자료의 품질관리와 GDAC에 체계적으로 제공하기 위하여 지역자료센터(Regional Data Assembling Center)를 운영하고 있다. 지금까지 Argo 사업을 추진하면서 국내외 전문가들의 의견을 수렴하는 기회가 거의 없었다. Argo 플로트 관측 및 자료 분석·활용 현황 공유와 Argo 사업의 추진 방향 및 발전 방안을 모색하기 위한 학·연·관 토론회의 장인 ‘Argo 플로트 관측 및 활용 전문가 포럼’을 2023년 9월 22일 서울에서 개최하였다(Fig. 7). 이번 포럼에는 기상청, Argo 사업 자문위원, 부산대, KIOST, 국립수산과학원 등이 참석하였다. 본 장에서는 포럼의 패널 토론자로 참석한 국립기상과학원 Argo 사업에 참여하고 있는 연구자와 학계의 자문위원들의 정책제언을 소개하였다.

- 한국 Argo 소위원회를 새롭게 구성하여 Argo 플로트를 어디에, 어떻게 투하할지 등을 부처 간 협력이 필요하다고 하였다. 특히 Argo 플로트의 관측 주기, 관측 수신 등이 통일되지 않아 기관 간의 공동 활용이 어려움이 있는 것이 사실이다. 또한 일본기상청이 지역자료센터를 운영하면서 실시간 Argo 자료를 수집하고 있는 상황이라 한국기상청도 마찬가지로 실시간 Argo 관측자료 수집 및 기상예보에 활용하고 반면에 해양과학 분야에서 고품질 자료 생산으로 해양재분석 자료로 활용하는 기상·해양분야 역할 분담을 제안하였다.
- 동중국해는 태풍 및 북태평양 고기압의 구조와

변동성에 중요하므로 Argo 플로트의 관측 주기를 1일로 변경했듯이 목적성을 가지고 투하하는 것이 관측자료 활용 측면에서 중요하므로 이 점을 고려한 전략적 투하가 이루어져야 한다고 하였다.

- 한국의 Argo 관측자료만 가지고 연구하기에는 한계가 있으므로 전 세계적 Argo 자료와 통일화하기 위한 지연모드 품질관리 등 연구가 지속적으로 이루어져야 하고 국립기상과학원 Argo 홈페이지를 통한 대국민과 중·고등학생에 대한 홍보 강화를 언급하였다.
- 한반도 인근 해역의 Argo 플로트 투하에서 동해도 중요하지만, 기상시스템이 서쪽에서 이동해 오고 동해에 비해 서해는 1/4 정도밖에 선박 관측이 되지 않으므로 Argo 플로트 등을 활용해야 함을 밝혔다. 수심이 얇은 서해의 경우, Argo 플로트의 최대 관측수심을 60 m으로, 연직 관측 해상도를 2 m로 설정하고, 해당 해역의 밀도를 고려한 플로트의 부력을 조정하여 운영하고 있다. 또한 서해에 운행하는 선박과의 충돌 가능성을 줄이기 위해 Argo 플로트의 통신방식을 Iridium 위성 통신으로 전환하고자 한다. 이를 통해 위성 통신을 통한 Argo 플로트의 표층 표류 시간을 8시간에서 약 1시간으로 획기적으로 줄여 선박 충돌 가능성을 낮출 수 있다.
- 기상청에서는 Argo 사업의 대내외적 성과를 점검하여 향후 사업 추진전략을 마련하고 한국 Argo 소위원회를 통한 유관기관과의 협력 방안, 한반도 주변 해역의 수온 자료 생산에 Argo 관측자료 활용 방안 등을 마련하여야 함을 제시하였다.
- 그 밖에 중국이나 일본과 같이 Argo 플로트 자체 개발과 수명 연장을 위한 태양전지 설치 등 Argo 플로트 국산화 및 개선, 태풍과 같은 해양 위험기상에 대한 해양-대기 상호작용 등에 Argo 플로트 활용을 확대하는 방안 등도 논의되었다.

국내 대학과 연구기관의 Argo 활용 연구 활동을 강화하기 위하여 Argo 관측자료 활용 세부연구 프로그램을 개발하여 국내 기상 및 해양 전문가의 연구 활성화에 기여하고, 궁극적으로 해양기후 및 기후변화 반응 연구와 지구 온난화와 관련된 전 세계 해양의 글로벌 이슈 연구에 선도할 필요가 있다. 최근에 Argo 플로트 관측자료를 이용하여 해양 온난화가 가속화되고 앞으로도 지속될 것이라는 연구 결과가 발표되었다(Wong et al., 2020). 또한 Argo 플로트와 선박 관측에 기반한 우리나라 근해 해양 관측망을 강화하여 장기 축적된 관측자료는 한반도 근해에서의 해양환경 변동성과 대기-해양 상호작용 기작연구, 현업 기후에



Fig. 7. The 1st Argo float observation and application forum (Sept. 22, 2023, Seoul).

측시시스템 예측력 향상을 위한 실시간 자료동화 기법 개선 등 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「해양기상 및 차세대 해양예측시스템 개발」(KMA 2018-00420)의 일부 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Cheong, L., J. Abraham, Z. Hausfather, and K. E. Trenberth, 2019: How fast are the oceans warming? *Science*, **363**, 128-129, doi:10.1126/science.aav7619.
- Choo, S.-H., P.-H. Chang, S.-O. Hwang, H.-J. Jo, J. Lee, S.-M. Lee, Y.-K. Hyun, and J.-H. Moon, 2021: Assessment of assimilation impact of Argo float observations in marginal seas around Korean peninsula through observing system experiments. *Atmosphere*, **31**, 283-294, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.283 (in Korean with English abstract).
- Fu, H., P. C. Chu, G. Han, Z. He, W. Li, and X. Zhang, 2013: Improvement of short-term forecasting in the northwest Pacific through assimilating Argo data into initial fields. *Acta Oceanol. Sin.*, **32**, 57-65, doi:10.1007/s13131-013-0332-2.
- Hyun, S.-H., S.-O. Hwang, S.-M. Lee, and S.-H. Choo, 2022: Verification of the KMA ocean model NEMO against Argo floats and drift buoys: a comparison with the up-to-date US navy HYCOM. *Atmosphere*, **32**, 71-84, doi:10.14191/Atmos.2022.32.1.071 (in Korean with English abstract).
- Jeong, Y. Y., I.-J. Moon, and P.-H. Chang, 2016: Accuracy of short-term ocean prediction and the effect of atmosphere-ocean coupling on KMA Global Seasonal Forecast System (GloSea5) during the development of ocean stratification. *Atmosphere*, **26**, 599-615, doi:10.14191/Atmos.2016.26.4.599 (in Korean with English abstract).
- Johnson, G. C., and Coauthors, 2022: Argo-two decades: Global oceanography, revolutionized. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **14**, 379-403, doi:10.1146/annurev-marine-022521-102008.
- Kang, K.-R., H. J. Jo, and Y.-J. Kim, 2020: Ocean Responses to Typhoon Soulik (1819) around Korea. *Ocean Sci. J.*, **55**, 445-457, doi:10.1007/s12601-020-0030-x.
- Kang, S.-K., Y.-H. Seung, J.-J. Park, J.-H. Park, J.-H. Lee, E.-J. Kim, Y.-H. Kim, and M.-S. Suk, 2016: Seasonal variability in mid-depth gyral circulation patterns in the central East/Japan Sea as revealed by long-term Argo data. *J. Phys. Oceanogr.*, **46**, 937-946, doi:10.1175/JPO-D-15-0157.1.
- KIOST, 2013: *Argo application research plan*, BSPE-9917B-10280-7, Korea Institute of Ocean Science and Technology, 180 pp.
- Lee, H., Y.-S. Chang, T.-H. Kim, J.-H. Kim, Y.-H. Youn, J.-W. Seo, and T.-G. Seo, 2004: Global ocean observation with ARGO floats: Introduction to ARGO program. *Atmosphere*, **14**, 4-23 (in Korean with English abstract).
- METRI, 2002: *Korea Enhanced Observing Period (I)*, Meteorological Research Institute, 234 pp.
- NIMS, 2021: *Report of NIMS/KMA ARGO Float Operation (2001~2020)*, National Institute of Meteorological Sciences, 45 pp [Available online at <http://nims.go.kr>].
- _____, 2022: *Research and Development for KMA Weather, Climate, and Earth system Services: Development of Marine Meteorology Monitoring and Next-generation Ocean Forecasting System (VII)*. National Institute of Meteorological Sciences, 83 pp.
- Oke, P. R., T. Rykova, G. S. Pilo, and J. L. Lovell, 2022: Estimating Argo float trajectories under ice. *Earth Space Sci.*, **9**, e2022EA002312, doi:10.1029/2022EA002312.
- Park, J.-J., and B.-H. Lim, 2018: A new perspective on origin of the East Sea intermediate water: Observations of Argo floats. *Progress in Oceanogr.*, **160**, 213-224, doi:10.1016/j.pocean.2017.10.015.
- Roemmich, D., and Coauthors, 2019: On the future of Argo: A global, full-depth, multi-disciplinary array. *Frontiers in Marine Science*, **6**, doi:10.3389/fmars.2019.00439.
- Rykova, T., 2023: Improving forecasts of individual ocean eddies using feature mapping. *Sci. Rep.*, **13**, 6216, doi:10.1038/s41598-023-33465-9.
- Shao, C., L. Xuan, Y. Cao, X. Cui, and S. Gao, 2015: Impact of Argo observation on the regional ocean reanalysis of China coastal waters and adjacent seas: A twin-experiment study. *Adv. Meteorol.*, **2015**, 1-15, doi:10.1155/2015/793825.
- Wong, A. P. S., and Coauthors, 2020: Argo data 1999~2019: Two million temperature-salinity profiles and subsurface velocity observations from a global array of profiling floats. *Frontiers in Mar. Sci.*, **7**, doi:10.3389/fmars.2020.00700.
- _____, R. Keeley, T. Carval and Argo Data Management Team, 2023: *Argo Quality Control Manual for CTD*

- and Trajectory Data*. IFREMER, doi:10.13155/33951.
- Yang, C.-S., and A. Ishida, 2004: Argo project: on the distribution prediction of drifting Argo floats. *J. Korean Soc. Marine Environ. Engin.*, **7**, 22-29.
- Youn, Y.-H., Y.-S. Chang, Y.-K. Hyun, C.-W. Cho, J.-O. Ku, M.-K. Cho, Y.-S. Ban, S.-J. Park, and S.-J. Kim, 2006: Variability of ocean status around Ulleung Basin and Dok-do by using ARGO data. *Atmosphere*, **16**, 379-385 (in Korean with English abstract).