글로벌 무인해양관측 네트워크 현황과 전망

남성현^{1,4} · 김윤배² · 박종진³ · 장경일^{4,*}

¹스크립스 해양연구소 기후/기상/물리해양학과

²한국해양과학기술원 동해연구소 울릉도-독도해양연구기지

³경북대학교 해양학과

⁴서울대학교 지구환경과학부

Status and Prospect of Unmanned, Global Ocean Observations Network

SUNGHYUN NAM^{1,4}, YUN-BAE KIM², JONG JIN PARK³ AND KYUNG-IL CHANG^{4,*}

¹CASPO, Scripps Institution of Oceanography/UCSD, La Jolla, CA 92093-0230, USA

²Ulleungdo-Dokdo Ocean Research Station, East Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ulleung-Gun 799-823, Korea

³Department of Oceanography, Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

⁴RIO/School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

급격히 증가하고 있는 무인해양관측 체계들의 현황을 글로벌 관점에서 조명하고, 이를 범국가적 차원에서 통합, 조정, 관리하기 위한 네트워크에 대해 고찰하였다. 3차원 시공간적으로 변동이 심한 해양환경을 관측/감시하기 위해 무인해양관측 플랫폼들은 점차 다양화되고 있는데, 여기서는 이동형(표층 뜰개, 중층 플로트, 수중 글라이더)과 고정형(표층 및 수중 계류선, 바닥장착형 관측)으로 구분하여 각각의 목적, 역사, 현황을 조사하고, 향후 변화를 전망했다. 이들을 활용하여 글로벌 해양관측체계에 기여하고 있는 대표적인 고정형과 이동형 무인해양관측 네트워크(ARGO와 OceanSITES) 프로그램들의 현황에 대해서 알아보고, 글로벌 해양관측/모니터링 체계를 위한 시너지 효과를 창출하기 위한 운용 및 활용 증가를 전망했다. 마지막으로 더욱 효과적인 해양관측/모니터링 체계를 설계하기 위해 다종의 플랫폼을 동시에 사용하는 것을 제안하였고, 그 대표적인 예로 미 국립과학재단의 OOI(Ocean Observatories Initiative) 프로그램을 소개하였다. 아울러 심해 및 남반구와 같이 글로벌 관점에서 존재하는 자료의 틈을 줄여나가기 위한 노력과 글로벌 경계류 관측 네트워크와 같은 새로운 해양관측 네트워크를 위한 노력, 그리고 생지화학/음향/광학 센서들을 포함한 센서 기술들의 개발 노력과, 자료의 표준화 및 센서 검/교정을 위한 노력에 대한 제언을 추가하였다.

We introduce status and prospect of increasingly utilizing, unmanned, global ocean observing systems, and the global network to integrate, coordinate, and manage the systems. Platforms of the ocean observing system are diversified in order to resolve/monitor the variability occurring at multiple scales in both three-dimensional space and time. Here purpose, development history, and current status of the systems in two kinds - mobile (surface drifter, subsurface float, underwater glider) and fixed platforms (surface and subsurface moorings, bottom mounts), are examined and the increased future uses to produce synergies are envisioned. Simultaneous use of various mobile and fixed platforms is suggested to more effectively design the observing system, with an example of the NSF-funded OOI (Ocean Observatories Initiative) program. Efforts are suggested 1) to fill the data gap existing in the deep sea and the Southern Ocean, and toward 2) new global network for oceanic boundary currents, 3) new technologies for existing and new sensors including biogeochemical, acoustic, and optical sensors, 3) data standardization, and 4) sensor calibration and data quality control.

Key words: Unmanned ocean observation, Global ocean observation network, ARGO, OceanSITES

배 경

지속적인 사회적 수요 증가에 따라 세계 각국은 국가 통합 해양 관측망과 같은 국가적 차원의 해양관측 네트워크를 구성하고 있으며, 이미 한국을 포함한 많은 나라에서 국가적 차원의 해양관측을 통합 조정, 관리하는 능력의 보유가 매우 중요하다는 것을 인지하고 있다. 더구나 지구촌 곳곳의 이상기후 등 기후변화와 이에 따른 범국가적 자연재해 발생, 지구환경의 전반적인 오염, 자원/에너지의 고갈 등으로 인하여 범국가적인 해양관측 수요 또한 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 전 지구적 차원의 글로벌 지구관측 그룹(GEO; Group on Earth Observations) 혹은 글로벌 해양관측체계(GOOS; Global Ocean Observing System) 구축과 같은 노력이 인류의 지속적인 성장을 위해 필수적이라는 공감대가 형성되고 있다.

전자, 통신, 기계, 소재 등의 여러 기술 분야 진보에 따른 해양관측 기술의 급격한 발전에 따라 해양(특히 수중 혹은 심해)에 대한 접근성은 최근 비약적으로 개선되었고, 전통적인 방식의 해양관측에 더하여 자동화된 로봇 등의 플랫폼을 사용하는 무인해양관측이 급격히 증가하고 있다. 이렇게 최근 급격히 증가했거나 증가가 예상되는 무인해양관측 체계들을 활용한 글로벌 해양관측 또한 범국가적(국제적) 파트너십을 통해 네트워크로 구성되어 통합 조정, 관리될 필요가 있다. 특히 지역적 혹은 국가적 차원에서 해양관측망으로 통합 관리되는 연안의 해양관측과 달리 대양 혹은 심해 무인관측망의 경우 국제적인 파트너십을 구축하여 범국가적 차원에서 조정, 관리해야만 할 것이다.

미 해양대기청(NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration)이 후원하는 관측체계감시센터(Observing System Monitoring Center)에 따르면, 2013년 8월 11일부터 8월 13일까지 총 3,538개의 플랫폼으로부터 2,090,751개의 관측 자료가 수집되었다(Fig. 1 상단). 인공위성을 통한 관측 자료와 수중에서 자료를 수집하고 있는 무인 플랫폼들까지 고려하면 더욱 많은 해양 관측 자료가 실시간으로 수집되면서 글로벌 해양에 대한 모니터링이 이루어지고 있는 상태라고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 글로벌 해양관측이 충분하다고 할 수 없는 이유가 있다.

해양환경의 변동은 3차원 공간적인 구조만으로 설명될 수 있는 것이 아니라 시간에 따른 변동까지 고려해야만 하며, 더구나 Fig. 1과 같은 2차원 공간을 무인 플랫폼들로 채우는 것만으로는 해양의 모든 변동성을 모니터링하기에 여전히 부족하다. Fig. 1에서 수심별로 표층에서부터 심해까지 자료를 수집하고 있는 플랫폼들만을 헤아린다면 실시간으로 수집되는 해양자료의 수는 급감한다. 더구나 해양환경은 시시각각 변화하기 때문에 이동형 플랫폼만으로 글로벌 해양을 모니터링 하기에는 빠르게 일어나는 시간적인 해양환경 변화를 감지할 수 있는 능력에 한계가 발생하게 된다. 반대로 고정형의 플랫폼의 경우에는 다른 공간에서 일어나고 있는 해양환경 변화를 전혀 감지할 수 없는 한계가 있다. 이런 이유로 두 종류의 접근이 동시에 이루어지고 있는데, Fig. 1(중앙 및 하단)에는 2013년 7월 현재 이동형과 고정형의 해양부이(buoy) 총 1,683개의 분포가 그 종류와 해당 국가별로 표시되어 있다.

해양부이 외에도 다른 형태의 무인 해양관측 체계들이 있는데, 이 논문에서는 주요 무인해양관측 플랫폼 각각의 목적, 역사, 현

황과 전망에 대해서 간략하게 소개하고, 이어 각각의 글로벌 무인 해양관측 네트워크 구축을 위한 노력들과 그 전망에 대해 토의하기로 한다. 마지막으로 향후 글로벌 무인 해양관측 네트워크 방향에 대한 전망과 제언을 포함하였다.

무인 해양관측 체계

무인 해양관측은 크게 두 가지 종류의 접근 방법으로 나눌 수 있다. 하나는 이동하는 플랫폼에 부착된 센서들을 통해 해양의 시공간적 변동성을 동시에 측정하는 라그랑지(Lagrangian) 방식의 접근이고, 다른 하나는 고정된 플랫폼에 부착된 센서들을 통해 시간적인 변동만을 측정하는 오일러식(Eulerian) 방식의 접근이다. 표류병으로부터 시작해서 표층 뜰개(surface drifter)와 중층 뜰개 혹은 플로트(subsurface float, e.g., ARGO floats)를 거쳐 최근 급격히 사용이 늘어나고 있는 수중 글라이더(glider)와 자율주행 수중운동체(AUV; autonomous underwater vehicle) 등은 대표적인 이동형 플랫폼이라고 할 수 있다. 이동형 플랫폼을 이용하여 수집한 해양관측 자료는 시공간적 변동성을 동시에 포함하고 있기 때문에 해석에 주의가 필요하고 자료 분석이 다소 용이하지 않은 반면, 운용과 비용면에서 효율적인 장점이 있어서 AUV를 제외한 대부분의 플랫폼이 글로벌 무인해양관측에 널리 활용되고 있는 추세이다.

오일러식 해양관측의 경우에는 계류선(mooring)이나 바닥장착형(bottom mounts) 플랫폼을 사용하여 고정점에서 짧은 시간 간격으로 연속적인 시계열 자료를 수집하기 때문에 단주기 변동을 포함한 많은 해양과정들을 감지할 수 있고, 자료 분석이 용이한 편이지만, 인력과 예산 등 소요되는 비용이 큰 편이다. 특히 공간적으로 여러 개의 고정형 플랫폼을 동시에 사용하여 시공간적 변동성을 함께 파악하기 위해서는 비용이 크게 증가하기 때문에 일부 제한된 해역에서만 특정 목적을 위해 간헐적으로 활용되어 왔다. 지속적으로 유지되는 해양 시계열 플랫폼의 운용은 유지/보수하는 노력과 비용 문제로 몇몇 장기 해양 시계열 프로그램들을 통해서 제한된 일부 해역에서만 운용되고 있는 상태이다. 그러나 단주기 변동 현상들을 감지할 수 있는 거의 유일한 방법이고, 많은 다종의 센서들을 통합할 수 있다는 장점과 자료 보정을 통해 가장 정밀한 측정값을 얻을 수 있다는 강점 때문에 적지 않은 비용에도 불구하고 고정형 플랫폼의 사용도 계속 늘어나고 있는 추세이다.

Fig. 2는 해양환경의 변동을 유발하는 대표적인 해양학적 과정들을(수평 2차원) 공간 규모와 시간 규모에 따라 나타낸 그림이다. 전 지구적으로 수 년에서부터 수 십년 규모로 나타나는 기후변동(우측상단)에서부터 수십 meter 내지는 수십 kilometer의 공간 규모로 수 분(minute)에서 수십 시간(hour)의 규모로 나타나는 내부파(internal waves)에 이르기까지 다양한 해양학적 과정들이 여러 시공간 규모로 해양환경의 변동을 만들어 내고 있다. 각각의 플랫폼들은 그 접근 방법에 따라 특정 시공간 규모의 현상들을 감지할 수 있는데, 예를 들면 표층 뜰개나 플로트가 100 km 이상의 비교적 큰 공간 규모의 해양변동을 감지하는 반면 수중 글라이더의 경우에는 주로 그 이하의 비교적 작은 공간 규모의 변동을 감지한다. 그러나 두 플랫폼 모두 서서히 이동하기 때문에 수 일(day)의

Fig. 2. Oceanographic processes in a (horizontal) space and time domain. Approaches with different platforms cover specific areas/processes. Modified from the original figure made by Prof. Dudley B. Chelton (Oregon State University, OR, USA).

시간 규모로 일어나는 현상들 혹은 내부파와 같이 수 일 이내의 짧은 시간 규모로 일어나는 현상들을 감지하기 위해서는 계류선과 같은 고정형의 플랫폼을 필요로 하고 있다¹⁾. 계류선과 같은 고정형의 플랫폼을 사용하여 조밀한 시간간격으로 장기간 자료를 수집하도록 운용하면, 시간적으로는 거의 모든 시간 규모의 현상들을 감지할 수 있으나, 단일 플랫폼의 경우 수평적으로는 한 점에 불과하기 때문에 공간적인 제약이 크다. 여러 개의 고정형 플랫폼을 동시에 사용하면(mooring network) 이러한 공간적인 한계를 넘어설 수 있으나 공간적인 해상도를 높이기 위해서는 많은 플랫폼이 필요하게 되어 비용 대비 효과 등의 문제가 발생하게 되므로 역시 이동형의 플랫폼과 함께 사용하는 것이 필요하다. 또, 수 km에서부터 수십 km에 이르는 공간 규모의 현상들을 조밀한 시간간격으로 관측하여 비교적 넓은 범위의 시간 규모로

일어나는 현상들을 감지할 수 있는 연안레이더(HF; High-Frequency Radar)의 경우에는 비용이 비교적 저렴하고 상대적으로 용이한 운용 방법 때문에 널리 활용되고 있으나, 표층과 연안 부근으로만 국한되는 한계가 있어 역시 다른 플랫폼과 함께 병행하여 사용하는 것이 필요하다. 결국 다종의 플랫폼의 특성을 고려하여 시너지(synergy) 효과를 높이는 방향으로 효과적인 해양관측/모니터링이 이루어지도록 관측망을 잘 설계해야 할 것이다. 주요 이동형 및 고정형 플랫폼들의 좀 더 구체적인 특성은 아래에 기술하였다.

이동형 무인해양관측

이동형 무인해양관측은 특히 최근 수중 로봇 기술의 발달로 그 플랫폼이 점차 다양화되고 있으며, 통합되는 센서도 늘어나는 등 그 활용도가 크게 증가하고 있다. 물론 프로펠러와 같은 추진체를 가진 AUV도 이에 포함될 수 있으나 여기서는 가장 널리 활용되는 표층 뜰개와 중층 뜰개 혹은 플로트, 그리고 수중 글라이더에 대해서만 다루도록 한다.

¹⁾단, 표층 뜰개나 플로트를 이용해서도 관성주파수 혹은 일주기/반일주기의 내부파 특성을 일부 추출하기도 하며, 최근에는 글라이더를 이용해서도 부분적인 내부파 특성을 연구하기도 하지만, 고정형 플랫폼을 전혀 사용하지 않은 상태에서는 내부파와 같은 단주기 현상들의 세밀한 시간적 변화나 조밀한 수직적 구조 등을 파악하는 데에 한계가 있다.

표층 뜰개(Surface drifter): 표류병과 같은 물체를 바다에 띄어 해류를 측정하는 시도는 이미 오래 전에 있었지만 인공위성을 통해 위치를 추적하는 물체를 사용하기 시작한 것은 1970년대의 일이다. 이후 초기에는 다종의 표층 뜰개들이 설계되었으나, 1982년 World Climate Research Program(WCRP)을 통해 글로벌 해양관측의 필요성이 제기되고, Tropical Ocean Global Atmosphere(TOGA) 실험과 World Ocean Circulation Experiment(WOCE)의 Surface Velocity Program(SVP)을 거치면서 현재와 같이 표준화/경량화 된, 저비용의 표층 뜰개가 개발될 수 있었다. 미 국립과학재단(NSF; National Science Foundation)과 NOAA 및 미 해군연구국(ONR; Office of Naval Research)에서 주로 이러한 프로그램들을 지원하면서 무인해양관측의 분야에서 선도적인 역할을 담당했다. 1992년에 다종의 표층 뜰개들을 서로 비교/평가하여 표층 해수의 움직임을 가장 잘 정량화하는 오늘날의 SVP 표층 뜰개 설계가 제안되었다(Niiler *et al.*, 1987, 1995; Sybrandy and Niiler, 1992). 그 이전인 1979년 이후부터 투하되었던 표층 뜰개들을 포함하여 1988년에는 적도태평양 표층 해류 mapping을 목표로 최초의 표준 SVP 표층 뜰개 투하가 있었고, 이후 1992년까지 태평양과 대서양 전역으로 확대, 1994년까지 인도양과 남반구로 확대되며 투하된 표층 뜰개의 수가 증가해왔다(Niiler, 2001). 오늘날에는 열대 및 남반구 대서양도 포함하는 등 글로벌 무인해양관측의 중요한 부분을 담당하고 있으며(Lumpkin and Garzoli, 2005; Lumpkin and Pazos, 2006), 2005년 9월에는 글로벌 해양관측체계(Global Ocean Observing System) 일환으로 NOAA에서 5도 격자 간격의 표준 해상도로 1,250개의 SVP 표층 뜰개를 투하하는 배열을 구성하였다. 2013년 7월 현재 1,155기의 표층 뜰개(이 중 800기 이상은 미국에서 기여)가 자료를 수집하고 있는 중이다(Fig. 1 중앙 및 하단).

중층 플로트(Subsurface float): 중층 플로트는 수중에서 중성 부력을 가져 중/심층 해류와 함께 이동하면서 그 순환 패턴을 관측함으로써 전 지구 해양 순환을 연구하는데 핵심적인 기기로 활용되어 왔다. 게다가 뒤에 더 자세히 소개할 국제 ARGO(Array for Real-time Geostrophic Oceanography) 프로그램이 시작되면서 활발히 투하된 ARGO 플로트는 전대미문의 수직 수온/염분 프로파일 관측 자료를 생산하고 있으며, 이미 기후 관측 시스템의 핵심 부분으로 자리 잡고 있는 상태이다(Gould, 2005).

ARGO 플로트는 앞서 개발된 중층 플로트의 개량형으로 볼 수 있다. 캠브리지 대학의 John Shallow는 음파를 활용하여 중층 플로트의 위치를 추적함으로써 심층 해류를 측정하는 시스템을 처음 고안하였다. 이 플로트는 1955년에 처음 시도되었고 그 결과는 Swallow(1955)에 의해 발표되었으며, Stommel(1955)는 Sound Fixing and Ranging (SOFAR) 채널을 활용하여 중층 플로트의 위치를 추적할 수 있다고 제안하였다. 이후 Swallow와 Stommel은 같이 협력하여 이 플로트를 활용한 연구를 발전시켰다. 이후 Rossby and Webb(1970)은 이 플로트를 개량하여, 선박을 활용한 위치 추적 시스템 대신 수중청음기(hydrophone)를 계류하여 활용하는 SOFAR float로 발전시켰다. 그러나 이 SOFAR float는 저주파를 발생시키기 위한 음원의 크기와 무게를 줄이기 어려워 운용이 용이하지 않았다. 따라서 음원을 독립적으로 계류하고 플로트 자체에는 수중청음기만 부착함으로써 더 오랫동안 활용할 수 있는 저비용의 경량화된 많은 플로트를 한꺼번에 투하할 수 있는

RAFOS(RAFOS는 SOFAR를 반대로 쓴 것) float 시스템이 고안되었다(Rossby *et al.*, 1986). 이 RAFOS float는 계류한 음파 발생장치로부터 정보를 수집하고 관측 임무가 종료되었을 때 표층으로 올라와 인공위성을 통해 모든 자료를 전송하는 시스템이다. 이 플로트는 작고 간편하여 바닥에 계류한 시스템을 통해서 연속적으로 한 위치에서 투하하는 것이 가능하며(Zenk *et al.*, 2000), 현재까지도 널리 활용되고 있다.

ARGO 플로트는 SOFAR나 RAFOS와 달리 인공위성을 통해 위치를 추적하는 중층 플로트이다. 수중에서 정밀한 해수의 움직임을 알 수는 없지만, 10일에 한 번씩 해표면에 떠올라와서 전송하는 인공위성에 의한 10일 동안의 위치 변화를 계산하면 평균 이동 속도를 추정할 수 있다(Park *et al.*, 2005). 전 세계 바다의 해류를 추적하기 위해서는 음파를 이용하는 기존의 플로트는 한계가 있으며, 더구나 임무가 종료되었을 때만 자료가 수집되기 때문에 실시간으로 해류 정보를 알 수 없다는 한계가 있었다. Russ Davis와 Doug Webb은 Autonomous Lagrangian Circulation Explorer(ALACE)를 처음 개발하여 1988년 시험에 성공하였으며(Davis *et al.*, 1992), 이후 수온센서를 탑재한 2기의 Profiling ALACE(PALACE)가 1996년 한국 동해에서 처음 시도되었다. 이 후 국제 ARGO 프로그램을 통해 2000년 처음 ARGO 플로트가 투하된 이래, 2013년 9월 현재까지 9,000여기 이상의 ARGO 플로트가 전 세계 바다에 투하되었다. 오늘날 ARGO 플로트는 기존의 수온/염분 및 해류관측을 넘어서, 생지화학 변수(Emerson *et al.*, 2002; Bishop *et al.*, 2002) 및 해양 혼합 과정(Whalen *et al.*, 2012)을 관측하거나, 심지어 해빙 아래까지 그 관측범위를 넓히고 있다.

ARGO 플로트 이외에도 수중청음기를 부착하고 특정 수층의 두께 변화를 측정할 수 있는 Bobber float(Price, 1996)과 밀도층의 두께를 추적하거나 등밀도면을 따라서 이동하도록 고안된 f/H RAFOS float(Rossby *et al.*, 1994), 그리고 해수의 3차원적인 움직임을 추적함으로써 난류적 환경을 측정하도록 고안된 Lagrangian float(D'Asaro *et al.*, 1996) 등 다양한 중층 플로트들이 활용되고 있다.

수중 글라이더(Underwater glider): 수중 글라이더는 중층 플로트로부터 진화한 기기이다. 중층 플로트와 유사하게 바다 속 표층과 심층을 오가면서 관측을 수행하지만, 날개를 이용하여 활강함으로써 원하는 지점으로 수평적으로도 이동할 수 있도록 고안된 것이 수중 글라이더이다. 추진 시스템이 필요 없이 오직 부력만을 조절하여 움직이기 때문에 요구 전력이 매우 낮아 수개월에서 1년 동안 넓은 해역에 대해 자동 관측이 가능하다. 구축되고 있는 해양관측망 시스템에서 고정형 관측의 단점을 보완하여 공간적인 해양 변동 측정하는데 활발하게 활용되고 있다. 수중 글라이더의 개념은 미국 우즈홀 해양연구소의 헨리 스톰멜(Henry Stommel) 박사가 1989년 Oceanography 학술지에 미래 해양학을 언급하면서 최초로 세상에 알려지게 되었다. 그는 부력을 이용하여 활강하는 1,000개 이상의 수중글라이더가 미래 바다를 관측할 것이며, 수평적으로 약 0.5 노트(25 cm/s)로 이동할 수 있을 것으로 전망했다(Stommel, 1989). 스톰멜 박사는 스프레이(Spray)라는 이름의 요트를 이용하여 최초로 혼자서 세계 일주한 조슈아 슬로컴(Joshua Slocum)의 이름을 따 물속에서 활강하는 능력은 지닌 글라이더를 슬로컴이라고 명명하였다.

스톰멜 박사의 창의적인 아이디어는 우즈홀 해양연구소와 미 해

군 연구국의 지원에 힘입어 현실화 될 수 있었다. 당시 우즈홀 글라이더 개발 연구의 핵심 인물이었던 더글라스 웹(Douglas Webb)은 슬로컴이라 명명된 글라이더 개발에 성공하였고 현재 WRC(Webb Research Cooperation) 회사를 설립하여 ARGO 플로트와 글라이더를 제조, 판매하는 회사로 성장시켰다. 글라이더와 플로트 개발은 20 여년전부터 거의 비슷한 시기에 이루어졌다. 글라이더는 1991년에 최초로 실험에 성공하였으나, 글라이더는 운용기술이 현대화되는 2000년대 중반에 들어서부터 활발하게 활용되기 시작하였다. 현재 해양 연구 관련에서 활발하게 활용되고 있는 글라이더는 WRC의 슬로컴 글라이더(Webb *et al.*, 2001)와 워싱턴 대학의 씨글라이더(Eriksen *et al.*, 2001), 그리고 우즈홀 해양연구소와 스크립스 해양연구소가 공동으로 개발한 스프레이 글라이더(Sherman *et al.*, 2001)의 3가지 종류이다. 이밖에도 군용으로 개발된 X-Ray와 ANT Littoral glider, 일본에서 개발된 ALBAC 등 다양한 글라이더들이 있다. 글라이더의 속도는 대략 30-40 cm/s 정도이고 수평 이동속도는 25 cm/s 정도로 최적화되어 있다. 전력소모를 최소화 하면서 가장 먼 거리를 이동할 수 있도록 고안된 경우에 이러한 수평이동 속도를 갖으며, 전력 소모를 높이면 글라이더 속도를 증가시킬 수 있다.

글라이더는 기존의 해양 관측 기기들과 달리 오랜 기간 동안 수중을 유영하는 시스템으로서 높은 내구력과 정밀한 운영 기술을 요구하기 때문에, 충분한 노후화를 축적하기 전에는 기기 손실률이 매우 높을 수밖에 없다(Park, 2013; Park *et al.*, 2012). 그러나 작동 시간이 매우 제한적인 무인 잠수정들과 달리 오랜 기간 먼 바다로 단독 항해가 가능하기 때문에 추가적인 대형 선박이 필요치 않아 그 활용범위가 매우 넓고 잠재 시장도 매우 크다. 따라서 종합 해양 관측망 시스템의 구축을 위한 핵심 기기 중 하나로 활용되고 있으며, 물리 뿐만아니라 생지화학 센서들도 부착하여 다학제적 분야로 그 활용 범위가 확대되고 있는 추세이다(Rudnick *et al.*, 2004).

고정형 무인해양관측

고정형 무인해양관측에는 이어도 기지와 같은 해양 구조물이나 연안 피어 등을 이용한 관측도 포함되고, 연안 검조소의 해면 고도 측정 등도 포함될 수 있으나 여기에서는 표층 및 수중 계류선을 플랫폼으로 활용하는 계류 관측과 바닥장착형(bottom mounts) 장비를 이용하는 무인해양관측에 대해서만 다루기로 한다.

표층 및 수중 계류선(Surface and subsurface moorings): 계류선을 이용한 고정형 무인해양관측은 특정지점에서 수초 혹은 수분 이상의 조밀한 시간간격으로 연속적인 자료를 얻는데 가장 유용한 관측방법이다. 특히, 표층 부이에 장착된 통신장치를 이용하면 실시간으로 자료를 획득할 수 있어 광범위하게 사용되고 있다. 표층부이를 사용하는 고정형 계류 관측(surface mooring)의 경우, 크게 표층부이, 계류선, 앵커로 구성된다. 표층부이는 풍향풍속계, 온-습도계, 기압계 등 기상센서가 장착되며, 실시간 통신을 위한 통신 및 자료 제어장치 그리고 등명기, 레이더 반사판, 위치추적 시스템, 전원공급을 위한 태양열 전지판, 충전기 등이 설치된다. 또한 표층부이 하부로부터 앵커에 이르는 계류선에는 해류, 수온, 염분, 용존산소량, 클로로필 등을 측정할 수 있는 다양한 해양센서를 부착할 수 있다.

서울대학교 해양연구소에서 1999년 이후 현재까지 운용하고 있는 ESROB(East Sea Real-time Ocean Buoy)는 실시간으로 종합적인 해양자료를 수집하는 고정형 계류 관측의 대표적인 예로서(Nam *et al.*, 2005), 동해시 외해 약 10 km 지점의 수심 130 m 해역에 설치되어 조밀한 시간 간격의 연속적인 자료를 획득함으로써 내부파 등을 포함한 다양한 해양현상을 관측하고 있다. 2013년 현재 동해에는 기상청(11), 국립해양조사원(10), 국립수산물과학원(5), 서울대(2), 한국해양과학기술원(1), 포항공대(1) 등에서 약 30개의 실시간 해양 관측부이를 운용하고 있으며, 대부분 연안 혹은 표층에 집중하여 관측 장비를 설치하고 있다. 국외의 경우, 버뮤다 섬 주변의 BTM(Bermuda Testbed Mooring; 1994년 이래), 하와이 주변의 WHOTS(WHOI-Hawaii Ocean Time-series Site; 2004년 이래), 노르웨이해의 Staion-M(Station Mike; 1948년 이래), 북서태평양 일본 외해의 JKEO(JAMSTEC Kuroshio Extension Observatory; 2007년 이래), 대서양의 NTAS(Northwest Tropical Atlantic Station; 2001년 이래)를 비롯한 수 십개의 실시간 해양 관측 부이가 운용 중이다.

표층부이 대신에 수중 부이를 사용하는 수중 계류선(subsurface mooring)의 경우, 어업활동이 활발한 지역이나 심층 관측에 주로 사용되고 있으며, 관측된 자료는 일반적으로 계류선을 회수한 후에야 얻게 된다. 회수를 위해서는 계류선의 가장 아래 부분에 특정 주파수의 음파를 이용한 음향회수장치(acoustic releaser)를 부착한다. 대표적인 국내의 수중계류선으로는 1996년 11월부터 울릉도-독도 사이의 심층해류를 관측하기 위해 서울대학교에서 운용 중인 EC1이 있다(Chang *et al.*, 2009). 국외의 경우 북서태평양에 위치한 일본 JAMSTEC의 S1 및 K2 Sediment trap 계류선, 북대서양의 Line-W 계류선(2004년 이래) 등이 있다. 최근에는 청음기를 부착한 수중글라이더를 활용하여 계류선을 회수하지 않고도 수중 계류선의 자료를 회수하는 방식의 운용이 가능해졌다. 스크립스 해양연구소에서 캘리포니아 해역에 2008년부터 운용 중인 CORC(Consortium on the Ocean's Role in Climate) 수중 계류선의 경우에는 계류선에 부착된 수중 모델을 이용하여 수중 통신 방식으로 수중 글라이더에 자료를 전송하고, 이를 수중 글라이더가 표층에 떠오를 때마다 인공위성을 통해 전송하는 방식으로 실시간 수중 계류선 자료를 수집하고 있다.

계류선에 부착된 센서들을 통해 시계열 자료들을 수집하는 방식으로는 수직적으로 조밀한 간격의 수직 프로파일 자료를 얻기 곤란한데, 최근에는 수직 자동 관측장비의 반복적인 상하 왕복을 통해 수직적인 관측 해상도를 높일 수 있는 프로파일러 무어링(profiler mooring)들이 개발되고 있다. 상용화된 McLane Moored Profiler 시스템을 비롯하여, 수중 윈치 시스템(e.g., InterOcean Systems, Inc.), 해표면 파랑을 활용하는 Wirewalker 시스템(Pinkel *et al.*, 2011), 롤렛의 원리를 이용한 SeaCycler 시스템(Send *et al.*, 2013) 등 다종의 프로파일러 무어링 시스템들이 최근 개발되어 운용되고 있는 중이다.

바닥장착형 관측(Bottom mounts): 바닥장착형 관측은 수중의 계류선에 해양관측장비를 부착하는 대신 해저면에 해양관측장비를 장착하는 계류 방식이다. 바닥장착형 관측은 때때로 해저케이블을 통한 자료전송을 통해서 실시간으로 자료 획득이 가능하다. 이 방식은 왕성한 어로활동(트롤이나 저인망 등)에 의한 수중 관측 장

비의 훼손을 줄이기 위해 혹은 수중 통신기술의 발달과 함께 지진, 해저면 영상관측 등 해저면 근처의 해양현상을 안정적으로 관측하기 위해 주로 사용되고 있다. 최근에는 수중통신기술 및 해저 케이블을 활용한 연구가 해양연구에 적용되면서 바닥 장착형 관측이 다시 주목 받고 있다.

바닥장착형 관측으로 역음파탐지기(IES: Inverted Echo Sounder) 해저면 계류가 있다. 수중에서의 음파 전달속도를 이용하여 수온 약층을 모니터링 할 수 있음은 1969년에 제안되었으며(Rossby, 1969), 이를 위하여 고안된 장비가 IES로서 바닥에 계류된 IES로부터 송신된 음파는(10 kHz or 12 kHz) 해저면으로부터 해표면을 거쳐 다시 해저면으로 되돌아 와 IES에 수신되며, 음파 전달속도는 주로 수온의 함수이므로 음파가 왕복하는데 소요되는 시간을 정확히 측정하면 수온 구조의 변화를 파악할 수 있다. 또한 수온 변화는 많은 경우에 해류 변화에 연관되므로 IES는 해류의 시간적인 변화를 파악하는 데도 활용된다. 실제 관측된 음파 전달속도와 장기간 수집된 역사적 수온, 염분 자료를 이용하면 전 층에 걸친 수온, 염분, 밀도(혹은 역학적 고도) 수직구조의 시계열을 구성할 수 있다(Meinen and Watts, 2000). MODE(Mid-Ocean Dynamics Experiment) 프로그램에서 최초로 7개의 IES가 사용된 이래(Watts and Rossby, 1977), IES 및 PIES(Pressure gauge-equipped IES, Watts and Wimbush, 1981), CPIES(Current meter-Pressure gauge-equipped IES, Andres *et al.*, 2008)를 통해 전 세계 해양에서 성공적으로 자료가 수집되었으며, 이 자료는 다양한 연구에 활용되었다(e.g., Donahue *et al.*, 2010).

수심 200 m 미만인 연안역에서는 어업 활동이 왕성하여 계류선에 의한 해양관측이 종종 어로작업에 의해 방해 받는다(Kawatate *et al.*, 1988). 어로 작업이 왕성한 연안역에서 어구에 의한 해양관측을 최소화 하면서 시계열 자료를 얻기 위하여 1990년대 중반 트롤영향 방지용 해저면 계류장치(TRBM: Trawl-Resistant Bottom Mount)가 개발되었다(Kery and Irish, 1996). 바닥에 계류되는 TRBM은 그물이 그 위를 지나가더라도 그물이 TRBM에 걸리지 않고 TRBM을 통과할 수 있는 모양으로 만들어져 있으며, TRBM 내부에는 음파식 유속계(ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)나 압력계 등을 설치하여 전 층에 걸친 유속 및 해저면 압력 등을 관측할 수 있다. 유럽연합 NURC(NATO Undersea Research Center)와 미국 해군연구소(NRL: Naval Research Laboratory)가 공동으로 제작한 따개비 형태의 TRBM은 Barny라고 불리는데(Perkins *et al.*, 2000a), Barny TRBM은 개발된 이 후 대한해협을(Perkins *et al.*, 2000b) 포함한 여러 연안역에서 성공적으로 운용되었다(Perkins *et al.*, 2009). 최초 모델의 TRBM은 해저면에 계류된 ADCP를 이용하여 층별 유속을 관측하는데만 주로 사용된 반면 이후 개선된 TRBM 모델은 내부에 윈치가 장착되어 있어 주기적으로 pop-up 부이가 해면으로 상승하면서 해수유동 외에 층별 물리적, 생지화학적 변수들을 측정하여 자료를 실시간으로 전송하는 것도 가능하게 되었다(Grandi *et al.*, 2005). 국내의 경우 한국해양과학기술원에서 TRBM 시스템을 1997년부터 도입하여 운용하고 있다(황 등, 2002).

기상청에서는 해저지진 감시를 위해 울릉도 부근 육상과 해저 광케이블로 연결된 해저면 지진계를 2006년부터 설치 운영하고 있으며, 별도의 해양관측장비를 해저면에 설치하지는 않았지만 대

한해협을 가로질러 부산-일본 하마다간 설치된 대한해협 해저통신케이블 repeater를 활용한 대한해협 해저면 수온변동 연구(Kim *et al.*, 2006) 및 대한해협 통신케이블의 전압차를 이용한 대한해협 해수수송량 연구(Lyu and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2004) 등이 간접적인 바닥장착형 관측에 속한다. 최근에는 독도의 안정적 전력수송 필요성에 의해 울릉도-독도간 해저케이블 설치 문제가 제기되면서 전력수송과 함께 실시간으로 울릉도-독도 해역의 다양한 해양현상을 감시할 수 있는 해저면 해양관측장비와 연결된 울릉도-독도간 다목적 해저케이블 설치가 제안되기도 하였다(한국해양과학기술원, 2012).

국외의 경우 바닥장착형 관측과 수중통신기술 및 해저 광케이블을 접목한 다양한 해양관측 네트워크가 운용중이거나 기획되고 있다. 미국의 MARS(Monterey Accelerated Research System), 캐나다의 Neptune(North East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments), 유럽의 ESONET(European Sea Floor Observatory Network), 일본의 해저지진 및 쓰나미 관측네트워크인 DONET(Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis) 등이 있다. 이러한 해양관측네트워크는 바닥장착형 장비 뿐만 아니라 수중 글라이더, 자율제어 수중운동체 등 이동형의 수중 관측 장비와 수중통신으로 연결됨으로써 실시간 해양 환경 정보를 실시간으로 파악/감시하는데 기여할 것으로 기대된다.

글로벌 무인해양관측 네트워크

글로벌 해양관측체계(Global Ocean Observing System) 범주 안에는 선박을 이용하는 Repeated Hydrography 네트워크와 Voluntary Observing Ship 프로그램을 통한 thermosalinograph 혹은 XBT(expendable bathythermograph) 네트워크 등도 있지만 여기에서는 유지, 보수 목적 외에는 선박을 이용하지 않는 대표적인 이동형과 고정형 무인해양관측 네트워크인 ARGO(Array for Real-time Geostrophic Oceanography)와 OceanSITES(Ocean Sustained Interdisciplinary Time-series Environment Observation System) 두 프로그램들에 대해서만 기술하기로 한다.

ARGO 현황과 전망

대표적인 이동형 플랫폼인 수온/염분 수직 프로파일 플로트(ARGO float)의 국제적 네트워크인 ARGO는 GOOS의 파일럿 프로그램이 될 정도로 성공적으로 구축된 네트워크이며, 다른 해양관측 네트워크들의 표본이 되고 있다. 어떻게 자료관리 체계 등을 구축하고, 어떻게 국제적으로 협력하며, 해양과학자들의 자료 수집 방법에 대한 생각을 어떻게 바꾸게 되었는지 등이 그 좋은 예이다. 2000년부터 투하되기 시작되어 현재 해마다 약 800기 정도의 비율로 오늘날까지 플로트 투하를 지속하고 있다. 참가국들은 이 네트워크를 통해 국제 및 국가별 ARGO 프로그램에 기여하고 있으며, 실시간으로 제공되는 자료들은 프로그램 사무소를 통해 제공되고 있다(<http://www.argo.ucsd.edu>, <http://argo.jcommops.org>). 특히 ARGO 자료는 인공위성 해면고도계(satellite altimeter, e.g., Jason-1) 자료와 함께 글로벌 해양자료동화 실험(GODAE; Global Ocean Data Assimilation Experiment)에도 잘 활용되고 있다. 2013년 2월 현재 3,568기(한국은 이 중 80기 기여)의 플로트가 활

Fig. 3. Map of global ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) profiling float network as of February 2013. Source: Wikipedia - ARGO (Oceanography), [http://en.wikipedia.org/wiki/Argo_\(oceanography\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Argo_(oceanography)).

발하게 자료를 수집하고 있으며(Fig. 3), 이는 평균적으로 약 3도 간격의 격자에 해당된다.

ARGO 자료는 프랑스 Brest와 미국 캘리포니아 몬터레이(Monterey)에 소재한 IFREMER/CORIOLIS와 US-GODAE의 글로벌 자료수집센터(GDAC; Global Data Assembly Centers)를 거쳐 자동 자료 질 관리(automated quality control)를 통해 준 실시간으로 공개되고, 이후 과학적 수준의 자료 질을 위한 지연 모드 자료(delayed mode data)도 6개월 이내에 공개된다. 이 자료는 열과 염의 수송을 포함하여 수 개월에서부터 수 십년 시간 규모의 해양 기후 변동 양상, 특히 상층 해양의 변화하는 상태를 정량적으로 기술할 수 있도록 해 준다. 인공위성 해면고도계 자료만으로는 해석하기 어려운 수층의 수온, 염분 및 유속 자료를 충분한 범위와 해상도로 제공한다. 또, 이 자료는 해양 모델 혹은 대기-해양 접합 모델의 초기화 또는 자료동화나 모델 시험 등에도 활용되고 있다. 양질의 ARGO 자료는 다양한 방향으로 계속 응용될 것으로 기대된다.

OceanSITES 현황과 전망

장기적인 심해 고정형 플랫폼들을 통해 표층 대기-해양 상호작용에서부터 5,000 m 수심에 이르는 대양 해저면까지 전체 수심의 다중 환경 파라미터 모니터링을 위해 구축된 네트워크인 OceanSITES(<http://www.oceansites.org>) 또한 GOOS의 한 부분을 담당하게 되었다. 1999년 이래로 국제 OceanSITES 과학팀은 계류선을 이용하는 잠재적인 해양 시계열 자료 관측을 위한 비용과

자료를 공유해왔다. 이러한 네트워크는 점차 성장하여 30개의 표면 및 30개의 수층 계류선들로 구성되기에 이르렀다. 특히 표층 계류부이들은 인공위성과의 교신을 통해 자료를 실시간으로 전송하여 과학자들과 일반에 제공하고 있다. 2013년 8월 현재 51 정점에서 실시간, 126개 정점에서 지연 모드의 시계열 자료가 활발하게 수집되고 있다(Fig. 4).

OceanSITES는 가능하면 고급의 센서들과 자료 전송/통신 기법을 사용하여 자동화된 체계를 사용하도록 하고 있으며, 이를 통해 매우 조밀한 시간간격의 연속 시계열(중중 실시간) 자료를 장기간 운용하도록 하고 있다. 관측 내용은 기상학, 물리해양학, 해수수송량, 생지화학과 탄소순환, 해양산성화, 생태계와 지구물리를 포함한다. 국제 OceanSITES 프로그램에서는 공간적으로는 조밀하지 않지만 해당 해역에 대한 대표성을 가지면서 사회적으로나 과학적으로 중요한 위치에 새로운 site를 수립하는 방향을 취한다. 또한 향후 다학제간(multidisciplinary) 프로그램으로 발전할 수 있는 방향으로도 계획한다. 1958년 스크립스 해양연구소 과학자 킬링(Charles David Keeling) 박사가 대기 중 이산화탄소 농도를 연속적으로 측정하는 하와이 Mauna Loa Observatory의 site를 수립하여 장기간의 시계열 자료 수집을 지속함으로써 오늘날 잘 알려진 이산화탄소 농도 증가의 중요한 증거를 최초로 제시할 수 있었던 것처럼(e.g., The Keeling Curve), OceanSITES의 목표는 주요 대표적인 지점에서 장기간의 해양 시계열 자료 수집을 지속하는 것이다.

OceanSITES는 WMO(World Meteorological Organization)²⁾-

Fig. 4. Global network for ocean time series observation (OceanSITES). 2013 Aug. Source: OceanSITES, <http://www.oceansites.org/network/index.html>.

IOC(Intergovernmental Oceanographic Commission)³⁾ Joint Technical Commission on Oceanography and Marine Meteorology(JCOMM)⁴⁾의 Data Buoy Cooperation Panel (DBCP)⁵⁾의 활동 그룹이다. OceanSITES에는 효율적인 자료관리팀(Data Management Team)이 있는데, 두 개의 글로벌 자료수집센터(GDAC; Global Data Assembly Center), 미 해양대기청의 국가 자료 부이 센터(NDBC; National Data Buoy Center), 유럽 코리올리(Coriolis at IFREMER)에서 통일된 자료형식을 갖추어 자료가 제공되도록 하고 있다. OceanSITES의 주요 특성은 다음과 같다.

- 1) 대양의 중요한 정점 혹은 특성화된 정점에 위치한다.
- 2) 장기간 운송을 계획한다.
- 3) 시간적으로 조밀한 간격의 측정이 이루어져 수 일(day) 이내 시간 규모의 일시적인 변동이나 단주기 변동 성분을 포함한다.

²⁾지구의 기상, 해양-기상 상호작용, 이들이 만드는 기후와 그 결과로 나타나는 수자원의 분포에 대한 상태와 그 행동에 대한 유엔 차원의 권위를 가지는 발언을 위해 1950년에 처음 세워졌다가 1951년에 기상, 수로, 및 관련 지구과학 분야를 위한 특수 조직이 되었다. 2013년 1월 1일 현재 191개 회원국을 보유하고 있다. <http://www.wmo.int/>.

³⁾해양 과학, 해양 관측, 해양 자료와 정보 교환, 쓰나미 경보와 같은 해양 서비스를 위해 세워진 유네스코 산하의 유엔 조직으로, 국제적인 협력을 증진하고 연구, 서비스, 해양 및 연안의 자연과 자원에 대한 이해력 향상과 이러한 지식을 활용하여 해양환경 보호와 지속가능한 개발 및 관리 능력을 개선하기 위한 프로그램들을 조정하는 임무를 가진다. <http://ioc-unesco.org/>.

⁴⁾해양학과 해양기상학을 위한 공동기술위원회(the Joint Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology)는 비정부간 기술 전문가 그룹으로서 해양학적, 해양기상학적 관측, 자료 관리와 서비스, 전문가 연합, 기상학 및 해양학 커뮤니티를 위한 기술과 개발능력에 대한 국제적 조정을 담당한다. WMO와 유네스코 IOC의 전문성 및 기술적 능력들을 합하여 효율성과 조정 능력을 증진시키기 위해 만들어졌다. <http://www.jcomm.info/>.

⁵⁾해양기상과 해양학적 상태를 관측하는 자동화된 자료 부이들의 사용을 조정하는 JCOMM의 국제 프로그램이다. <http://www.jcommops.org/dbcp/>.

4) 가능하면 다학제간(multidisciplinary) 센서들을 사용한다.

5) 수집된 자료는 OceanSITES의 글로벌 자료수집센터(GDAC; Global Data Assembly Center)를 통해 실시간 및 지연모드로 제공된다.

OceanSITES는 GOOS의 공식 해양시계열 관측 부분을 담당하는 프로그램이면서 글로벌 해양과 해양기상 관측을 조정하는 JCOMM DBCP의 활동 그룹이기 때문에 이에 참여하는 것은 글로벌 해양 관측에 동참하는 활동으로서 중요한 의미를 가진다. 동시에 이것은 또한 OceanSITES가 더 중요한 역할과 책임을 담당하게 됨을 의미하기도 한다. JCOMM을 통해서, 그리고 POGO(the Partnership for the Observation of the Global Oceans, <http://www.ocean-partners.org>), Ocean-United(<http://www.Oceans-United.org>), Group on Earth Observations (GEO; <http://www.earthobservations.org>)를 통해서 각국은 OceanSITES의 현황을 파악할 수 있다.

OceanSITES 웹페이지를 통해 통합 조정된 지속적인 장기 해양 시계열 관측의 장점과 결과물이 공유되며, 사용자들의 수요와 필요를 진단하게 된다. 특히 각각의 해양 시계열 관측 프로그램들이 지속되어야 하는 중요한 근거를 제시해 줄 수 있다. OceanSITES는 해양 시계열 자료의 공유와 통합, 그리고 조정 기능 뿐 아니라 인력과 예산, 플랫폼, 경험, 장비와 선박 사용 등의 공유 또한 증진시키기 위한 노력을 지속하고 있다. 각각의 장기 해양 시계열 프로그램들은 OceanSITES를 통해 같은 자료가 더 큰 틀의 네트워크에서 가지는 새로운 가치를 추구하게 되며, OceanSITES에서 요구하는 자료형식과 자료처리 과정을 거쳐게 됨에 따라 아직까지 확정되지 못한 해양자료 및 해양 메타자료의 표준화에도 기여하게 된다. 두 곳 이상의 자료수집센터로 링크하여 여타의 해양 시계열 자료 활용도를 더욱 증진하도록 하고 있다. 1999년 OceanObs99 회의⁶⁾ 이후 국제 OceanSITES 커뮤니티는 비전과 경

험, 자료 등을 서로 공유하여 해양 시계열 관측 네트워크가 가지는 큰 잠재성을 살리는 노력을 지속하고 있다. 여기에는 표준화된 자료 관리 체계에 대한 합의, 사용자들을 위한 성과물과 정보 제공 방법, 그리고 글로벌 해양의 변화에 대한 이해를 빠르게 증진시키기 위한 방법 등이 포함된다.

전망과 제언

주요 무인해양관측 플랫폼들의 목적, 역사, 현황과 전망에 대해 소개하고, 대표적인 이동형과 고정형 글로벌 무인해양관측 네트워크라고 할 수 있는 ARGO와 OceanSITES에 대해 기술하였다. 여기에서는 마지막으로 향후 글로벌 무인 해양관측 네트워크 방향에 대한 전망과 제언을 추가하고자 한다.

앞에서 살펴보았듯이 해양관측을 위한 다양한 플랫폼들을 사용

하는 각각의 해양관측 접근방식은 저마다 고유한 특성이 있고, 강점과 약점이 동시에 존재하므로 다종의 플랫폼을 함께 병행하여 동시에 사용하는 접근을 통해 시너지 효과를 높이는 방향으로 효과적인 해양관측/모니터링을 설계해야 한다. 국가별 혹은 지역별로 구축된 해양 관측망에서도 다종의 플랫폼들을 동시에 사용하여 네트워크로 구성하고 전체를 통합하고 있는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 글로벌 무인해양관측 네트워크에서도 각 플랫폼별로 구축되어 있거나 구축 중인 네트워크들을 통합, 조정하여 글로벌 해양관측체계(GOOS) 차원의 시너지 효과를 높이는 방향으로 무인 해양관측에 기여하는 것이 중요할 것이다.

오랜 과정을 거쳐 해양학 역사상 최대 규모로 장기 해양 시계열 관측을 위해 진행되고 있는 미 국립과학재단(NSF; National Science Foundation)의 OOI(Ocean Observatories Initiative) 프로그램 경우에도 다종의 플랫폼을 동시에 사용하고 있다. OOI 프로

Fig. 5. Three fixed moorings and three mobile gliders deployed at Station PAPA (<http://oceanobservatories.org/infrastructure/ooi-station-map/station-papa/>).

⁶⁾(물리, 생지화학, 생태 등) 해양 변동에 대한 기술, 이해와 예측/예보, 기상, 계절변화부터 수 십년의 기후변동, 기후변화, 해양자원의 지속적 관리, 및 더 장기적인 경향 등의 사회적 수요에 부응하는 전지구적 해양환경에 대한 지속적인 정보를 제공하는 것에 대한 공동의 비전을 세우기 위해 열린 회의이다. 36개국 600명 이상의 과학자들이 모여 회의를 통해 서로 의견과 비전을 교환하고, 회의 후 99편의 커뮤니티 백서와 47편의 일반 논문들을 출판하였다.

그럼(<http://oceanobservatories.org>)은 1) Coastal & Global Scale Nodes, 2) Regional Scale Nodes, 3) Cyberinfrastructure, 4) Education & Public Engagement의 4개 구성요소가 있는데, 1) 연안과 대양 규모의 각 노드마다 고정형의 플랫폼들(surface mooring, subsurface mooring, hybrid profiler mooring)과 이동형의 플랫폼들(gliders)를 동시에 사용하여 넓은 시공간 관측 범위의 고해상 자료를 수집하고 있다. 예를 들면 2013년 7월에 설치된 Global Scale Node 중 하나인 알래스카 해역의 Station Papa(OceanSITES의 노드 중 하나임)에는 기존에 유지되고 있던 미 해양기상청(NOAA PMEL; Pacific Marine Environmental Laboratory)의 표면 계류선(surface mooring)외에 두 기의 수중 계류선(subsurface mooring)과 3개의 profilers(1 surface piercing profiler와 2 wire-following profilers)로 구성된 1기의 hybrid profiler mooring이 계류되었다(Fig. 5). 동시에 3기의 WRC 슬로프 글라이더가 투하되어 이들 고정형 플랫폼들 사이를 이동하면서 수중음향 통신을 통해 수중 센서들의 자료를 수집 교환 후 표층에서 서버로의 전송을 담당하고 있다. 이 Station Papa 하나의 노드에만 총 57개의 관측 장비들이 새로 부착되었다.

앞에서도 언급한 것처럼 심층에서는 수집되고 있는 해양 자료의 수가 급감하게 된다. 부족한 심해 관측을 개선하기 위해서도 다방면의 노력이 진행 중이다. ARGO의 경우에는 좀 더 깊은 수심까지 profiling할 수 있는 플로터를 개발하고 있으며, OceanSITES의 경우에는 기존의 플랫폼에 심해 관측용 센서를 추가하는 노력을 진행 중이다(Fig. 4의 별 표시). 또한 공간적으로 비교적 조밀하게 구성될 수 있었던 ARGO에 비해 OceanSITES는 그 공간 범위가 크게 제약되어 있는데, 특히 남반구에는 연속 해양 시계열 관측 자료가 매우 부족한 편이다. 새로 계획된 OceanSITES의 정점들(Fig. 4 주황색)이 남반구에 많이 분포하는 것도 이처럼 부족한 남

반구 관측을 늘리기 위한 노력의 일환이다.

기존 해양 관측 네트워크에 존재하는 틈(gap)을 메우기 위한 노력 못지않게 새로운 해양관측 네트워크를 수립하는 노력 또한 필요하다. 향후 새로운 관측 네트워크로 전망되는 것 중 하나는 바로 글로벌 경계류 관측 네트워크(Fig. 6)이다. 기후 변동 메커니즘 관점에서 특히 중요한 것으로 알려져 있는 서안경계류(쿠로시오 해류 등)와 그 생태적 효과 관점에서 중요하다고 알려진 동안경계류(캘리포니아 해류 등)에 대한 종합적인 관측망이 아직 부족한 상태이기 때문에 꾸준히 늘어나고 있는 다종의 무인 해양관측 체계들을 종합 구성하여 효과적으로 이 경계류들을 관측/모니터링하는 국제적 노력이 필요하다. 이 경계류 관측에는 다종의 이동형과 고정형 플랫폼을 사용한 무인 해양관측은 물론 기존의 선박 관측과 인공위성을 통한 원격탐사 방식의 모니터링도 포함될 수 있을 것이다. 해수 수송량을 포함하여 열, 염, 물질, 에너지 플럭스와 경계류 생태계 등의 지속적인 모니터링은 해양 및 전체 지구환경과 기후를 이해하고 활용하는 데에 매우 중요하다. 2009년 OceanObs09 회의에서 Send *et al.*(2009)는 이를 위한 새로운 글로벌 해양관측 네트워크를 제안한 바 있다. 이러한 경계류 모니터링이 기후와 해양 변화에 대한 이해와 예측 능력을 높일 수 있고, 향후 크게 활용될 수 있음은 자명해 보인다.

향후 해양관측 플랫폼과 더불어 새로운 센서 혹은 기존 센서의 개선을 위한 기술들이 개발될 것으로 예상된다. 특히 해류, 수온, 염분과 같은 전통적 물리 환경 센서보다도 용존산소, pH, pCO₂, 영양염, 엽록소 등의 다양한 생지화학 센서들, 그리고 음향 및 광학 센서들이 더 많이 개발될 것으로 보인다. 특히 음향과 광학 센서를 동시에 사용하고 수중카메라 등의 영상 자료들을 함께 수집하여 해양생태계와 지구물리/지질학적 관측에도 큰 진전이 있을

Fig. 6. Conceptual locations for a global network of boundary current arrays. Subpolar boundary currents are shown in yellow, poleward subtropical western boundary systems in blue, equatorward low-latitude boundary systems in black, major eastern boundary systems in pink, Green show the possible locations of arrays to monitor key inter-basin exchanges. The background field is surface dynamic height from Maximenko *et al.* (2009) (Source: Send *et al.*, 2009).

것으로 기대된다. 새로 개발되는 센서들이 기존 및 새로 개발되는 이동형과 고정형 플랫폼에 잘 통합되어 기존 센서들의 자료와 함께 잘 전송하기 위한 연구들이 추가적으로 필요할 것이다. 또한 센서들이 다양화되면서 기존 센서들과의 융합 및 자료의 관리와 형식 등의 표준화 또한 중요한 이슈로 부각될 수 있다.

다양한 해양환경에서 운용되는 무인 해양관측의 경우 수집되는 자료의 양 못지않게 그 질의 관리와 지속적인 운용에 많은 노력을 들여야 한다. 특히 자동측정 장비들이 자료를 수집하고 있는 위치에서 정기적으로 선박 관측을 통한 해수 시료 수집과 정밀한 실험실 분석을 통한 정밀 측정값들이 함께 수집/분석되어 센서들의 검교정이 주기적으로 이루어져야 할 것이다. 배터리와 메모리 같은 전자기적인 부분들 뿐 아니라 체인과 샤클 등의 기계적인 부분들의 마모 및 생물부착 등을 고려하여 계류 장비들 또한 정기적으로 점검/교체하는 것이 필요한데, 계류 장비들을 점검하기 위해 연구선이 접근할 때마다 계류 장비에 부착했던 모든 센서들을 정밀한 해수 시료 분석 자료와 비교하여 각 센서들의 검/교정에 사용해야 한다. 즉, 무인 해양관측망을 통해 수집되는 자료들의 질을 유지하기 위해서는 전통적인 선박 관측을 통한 해수 시료의 수집과 정밀한 실험실 분석을 통한 센서 자료의 검/교정이 또한 매우 중요하다고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 해양수산부가 지원하는 EAST-I 프로그램과 서울대학교 신입교수 연구정착금으로 지원되는 연구비에 의해 수행되었습니다. 김윤배는 한국해양과학기술원 ‘동해 해양환경 및 생태계 변동 감시체계 구축’(PE98921)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌(Reference)

- Andres, M., M. Wimbush, J.-H. Park, K.-I. Chang, B.-H. Lim, D.R. Watts, H. Ichikawa, and W.J. Teague, 2008. Observations of Kuroshio flow variations in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **113**, doi:10.1029/2007JC004200.
- Bishop, J.K.B., R.E. Davis, and J.T. Sherman, 2002. Robotic observations of dust-storm enhancement of carbon biomass in the north Pacific. *Science*, **298**: 817–821.
- Chang, K.-I., K. Kim, Y.-B. Kim, W.J. Teague, J.C. Lee and J.-H. Lee, 2009. Deep flow and transport through the Ulleung Interplain Gap in the southwestern East/Japan Sea. *Deep-Sea Res. I*, **56**: 61–72.
- Davis, R.E., D.C. Webb, L.A. Regier and J. Dufour, 1992. The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE). *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **9**: 264–285.
- D’Asaro, E.A., D.M. Farmer, J.T. Osse, and G.T. Dairiki, 1996. A Lagrangian float. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **13**: 1230–1246.
- Donohue, K.A., D.R. Watts, K.L. Tracey, A.D. Greene and M. Kennelly, 2010. Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of Current and Pressure recording Inverted Echo Sounders. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**: 507–527.
- Emerson, S., C. Stump, B. Johnson, and D.M. Karl, 2002. In-situ determination of oxygen and nitrogen dynamics in the upper ocean. *Deep-Sea Res. I*, **49**: 941–952.
- Eriksen, C.C., Osse, T.J., Light, R.D., Wen, T., Lehman, T.W., Sabin, P.L., Ballard, J.W., Chiodi, A.M., 2001. Seaglider: a long-range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *IEEE J. Ocean. Eng.*, **26**(4): 424–436.
- Gould, J. 2005. From Swallow floats to Argo: The development of neutrally buoyant floats. *Deep-Sea Res. II* **52/3–4**: 529–543.
- Grandi, V., A. Carta, L. Gualdesi, F. de Strobel and S. Fioravanti, 2005. An overview of SEPTR: Shallow water environmental profiler in a trawl-safe real-time configuration. In: *Proceedings of the IEEE/OES Eighth Working Conference on Current Measurement Technology*, IEEE, 142–146.
- Hwang, S.-C., K.-I. Chang, M.-S. Suk, and Y.-S. Jang, 2002. Moored current observation: Shallow-water mooring. *The Sea - J. Korean Soc. Oceanogr.*, **7**(4): 286–303.
- Kawatate, K., T. Miita, Y. Ouchi and S. Mizuno, 1988. A report on failures of current meter moorings set east of Tsushima Island from 1983 to 1987. *Prog. Oceanogr.*, **21**: 319–327.
- Kery, S. and J.D. Irish, 1996. Trawl resistant bottom mounted instrumentation: Developments and results to date. In: *Proceedings of the OCEANS ’96. MTS/IEEE, Prospects for the 21st Century Conference*, 640–645.
- Kim, K., S.J. Lyu, Y.-G. Kim, B.H. Choi, K. Taira, H.T. Perkins, W.J. Teague, and J.W. Book, 2004. Monitoring volume transport through measurement of cable voltage across the Korea Strait. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **21**: 671–682.
- Kim, Y.H., Y.-B. Kim, K. Kim, K.-I. Chang, S.J. Lyu, Y.-K. Cho and W.J. Teague, 2006. Seasonal variation of the Korea Strait Bottom Cold Water and its relation to the bottom current. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, doi:10.1029/2006GL027625.
- KIOST (Korea Institute of Marine Science and Technology), 2012. Study on development of multi-purpose submarine cable between Ulleung-do and Dokdo. Report of Korea Institute of Marine Science and Technology. BSPG47840-10183-7 (in Korean).
- Lumpkin, R. and Z. Garraffo, 2005. Evaluating the decomposition of tropical Atlantic drifter observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**(9): 1403–1415.
- Lumpkin, R. and M. Pazos, 2006. Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results. In: *Chapter two of Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics (LAPCOD)*, edited by A. Griffa, A. D. Kirwan, A. J. Mariano, T. Ozgokmen, and T. Rossby.
- Lyu, S.J. and K. Kim, 2005. Subinertial to interannual transport variations in the Korea Strait and their possible mechanisms, *J. Geophys. Res.*, **110**, C12016, doi:10.1029/2004JC002651.
- Maximenko, N., P.P. Niiler, L. Centurioni, M.-H. Rio, O. Melnichenko, D. Chambers, V. Zlotnicki and B. Galperin, 2009. Mean dynamic topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**(9): 1910–1919.
- Meinen, C.S. and D.R. Watts, 2000. Vertical structure and transport on a transect across the North Atlantic Current near 42 N: Time series and mean. *J. Geophys. Res.*, **105**: 21,869–21,892.
- Nam, S., G. Kim, K.-R. Kim, K. Kim, L. Oh, K.-W. Kim, H. Ossi, and Y.-G. Kim, 2005. Application of real-time monitoring buoy

- systems for physical and biogeochemical parameters in the coastal ocean around the Korean peninsula, *Mar. Tech. Soc. J.*, **39**(2): 54–64.
- Niiler, P.P., R.E. Davis and H.J. White, 1987. Water-following characteristics of a mixed layer drifter, *Deep-Sea Res. Part a-Oceanographic Research Papers*, **34**(11): 1867–1881.
- Niiler, P.P. and J.D. Paduan, 1995. Wind-driven motions in the north-east Pacific as measured by Lagrangian drifters. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**(11): 2819–2830.
- Niiler, P.P., 2001. The world ocean surface circulation. In: *Ocean Circulation and Climate*, edited by G. Siedler, J. Church and J. Gould, Academic Press, Volume 77 of International Geophysics Series, 193–204.
- Park, J.J., K. Kim, B.A. King, and S.C. Riser, 2005. An advanced method to estimate deep currents from profiling floats. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**: 1294–1304.
- Park, J.J., 2013. Underwater glider: Its applicability in the East/Japan Sea. *Ocean and Polar Res.*, **35**(2): 107–121. doi:10.4217/OPR.2013.35.2.10.
- Park, Y.-S., S.-J. Lee, Y.-K. Lee, S.-K. Jung, N.-D. Jang, and H.-W. Lee, 2012. Report of East Sea crossing by underwater glider. *The Sea*, **17**(2): 130–137.
- Perkins, H.T., F. de Strobel and L. Gualdesi, 2000a. The Barny sentinel trawl-resistant ADCP bottom mount: Design, testing, and application. *IEEE J. Ocean. Engin.*, **25**: 430–436.
- Perkins, H.T., W.J. Teague, G.A. Jacobs, K.I. Chang and M.-S. Suk, 2000b. Currents in Korea-Tsushima Strait during summer 1999. *Geophys. Res. Lett.*, **27**: 3033–3036.
- Perkins, H.T., J.W. Book, F. de Strobel, L. Gualdesi, E. Jarosz and W.J. Teague, 2009. The Barny Program: fourteen years of NURC-NRL collaboration. NURC Technical Report, NURC-SP-2009-001, 31 pp.
- Pinkel, R., M.A. Goldin, J.A. Smith, O.M. Sun, A.A. Aja, M.N. Bui, and T. Huguen, 2011. The wirewalker: A vertically profiling instrument carrier powered by ocean waves. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **28**: 426–435.
- Price, J.F., 1996. Bobber floats measure currents' vertical component in the Subduction Experiment. *Oceanus*, **39**: 26.
- Rossby, T., 1969. On monitoring depth variations of the main thermocline acoustically. *J. Geophys. Res.*, **74**: 5542–5546.
- Rossby, T., J. Fontaine and E.C. Carter, Jr., 1994. The f/h float - measuring stretching vorticity directly, *Deep-Sea Res.*, **41**: 975–992.
- Rudnick, D.L., R.E. Davis, C.C. Eriksen, D.M. Fratantoni, and M.J. Perry, 2004. Underwater gliders for ocean research. *Mar. Tech. Soc. J.*, **38**: 73–84.
- Send, U., R. Davis, J. Fischer, S. Imawaki, W. Kessler, C. Meinen, B. Owens, D. Roemmich, T. Rossby, D. Rudnick, J. Toole, S. Wijffels, and L. Beal, 2009. A global boundary current circulation observing network. *Ocean Obs.* 09 Community White Paper.
- Send, U., G. Fowler, G. Siddall, B. Beanlands, M. Pittman, C. Waldmann, J. Karstensen, and R. Lampitt, 2013. SeaCycler: A moored open-ocean profiling system for the upper ocean in extended self-contained deployments. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**(7): 1555–1565.
- Sherman, J., R.E. Davis, W.B. Owens, and J. Valdes, 2001. The autonomous underwater glider “Spray”. *IEEE J. Oceanic Eng.*, **26**: 437–446.
- Stommel, H., 1955. Direct measurement of subsurface currents. *Deep-sea Res.*, **2**(4): 284–285.
- Stommel, H., 1989. Why we are oceanographers. *Oceanography*, **2**(2): 48–54.
- Swallow, J.C., 1955. A neutrally-buoyant float for measuring deep currents. *Deep-Sea Res.*, **3**(1): 74–81.
- Sybrandy, A.L. and P.P. Niiler, 1991. WOCE/TOGA Lagrangian drifter construction manual. WOCE Rep. 63, SOI Ref. 91/6, 58pp, Scripps Inst. of Oceanogr., La Jolla, California.
- Watts, D.R. and H.T. Rossby, 1977. Measuring dynamic heights with inverted echo sounders: Results from MODE, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**: 345–358.
- Watts, D.R. and M. Wimbush, 1981. Sea surface height and thermocline depth variations measured from the sea floor. In: *Proceedings of the International Symposium on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans*, 33–47.
- Webb, D.C., P.J. Simonetti, and C.P. Jones, 2001. SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE J. Oceanic Eng.* **26**: 447–452.
- Whalen, C.B., L.D. Talley, and J.A. Mackinnon, 2012. Spatial and temporal variability of global ocean mixing inferred from argo profiles. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi:10.1029/2012GL18612.
- Zenk, W., A. Pinck, S. Becker, and P. Tillier, 2000. The float park: A new tool for a cost-effective collection of Lagrangian time series with dual release RAFOS floats. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**: 1439–1443.

2013년 10월 10일 원고접수

2013년 12월 3일 수정본 접수

2014년 8월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 박재훈