

Review

해양 글라이더에 관하여: 한국 근해에서의 적용 가능성

박종진*

경북대학교 생태환경대학 해양학과
(742-711) 경북 상주시 경상대로 2559

Underwater Glider: Its Applicability in the East/Japan Sea

Jong Jin Park*

Department of Oceanography, College of Ecology and Environmental Science,
Kyungpook National University, Sangju 742-711, Korea

Abstract : The underwater glider is an autonomous vehicle that can glide through the ocean interior by using a pair of wings attached to its body and can move up and down through the water column by changing its buoyancy. As of now, there are three widely-used gliders, namely, the Spray that was co-developed by Scripps Oceanographic Institution and Woods Hole Oceanographic Institution, the Slocum produced by the Webb Research Cooperation, and the Seaglider that was produced by the University of Washington. In this paper, I will introduce these three gliders and discuss the principles and procedures related to glider operation as well as the application and extendability of modern physical and bio-geochemical sensors to gliders. My experiences in developing a glider for measuring ocean turbulence and testing it 7 times during 12 days are shared in this paper. On the basis of my experiences and knowledge, different kinds of aspects that should be considered for successful glider operation are discussed. In addition, a suggestion is made as to what would be the ideal way to operate underwater gliders in the East/Japan Sea. At the end, the current status of active glider operation teams is presented and the efforts to proceed toward future gliders are briefly introduced.

Key words : underwater glider, Argo float, bio-geochemical sensor

1. 글라이더란?

해양 글라이더는 바다 속 표층과 심층을 오가면서 날개를 이용하여 활강함으로써 원하는 지점으로 이동할 수 있도록 고안된 무인 해양 관측 로봇이다(Fig. 1). 따로 추진 시스템이 필요없이 오직 부력을 조정하여 움직이기 때문에 요구 전력이 매우 낮아 수개월에서 수년 동안 넓은 해역에 대해 자동 관측이 가능하다. 따라서 최근 구축되고 있는 해양 모니터링 시스템에서 수백 km 정도의 영역을 수 km의 해상도로 시공간 연속관측을 수행하는 중요한

역할을 담당하고 있다. 해양 글라이더의 개념은 미국 우즈홀 해양연구소의 헨리 스톰웰(Henry Stommel) 박사가 1989년 해양학(Oceanography) 학술잡지에 미래 해양학을 언급하면서 최초로 세상에 알려지게 되었다. 그는 1000개의 작은 중성 부력을 갖는 기기들이 자동으로 관측을 수행할 것이며, 이 기기들은 부력을 바꿈으로써 날개를 이용해 비행기처럼 물속에서 활강하여 수평적으로 약 0.5 노트(25 cm/s)의 속력으로 이동할 수 있을 것이며, 이동하는 동안 연속 관측을 수행하고 얻어진 자료는 인공위성을 통해 전송할 수 있을 것으로 예견했다(Stommel 1989). 스톰웰 박사는 스프레이(Spray)라는 이름의 요트를 이용하여 최초로 혼자서 세계 일주한 조슈아 슬로컴(Joshua Slocum)

*Corresponding author. E-mail : jjpark@knu.ac.kr

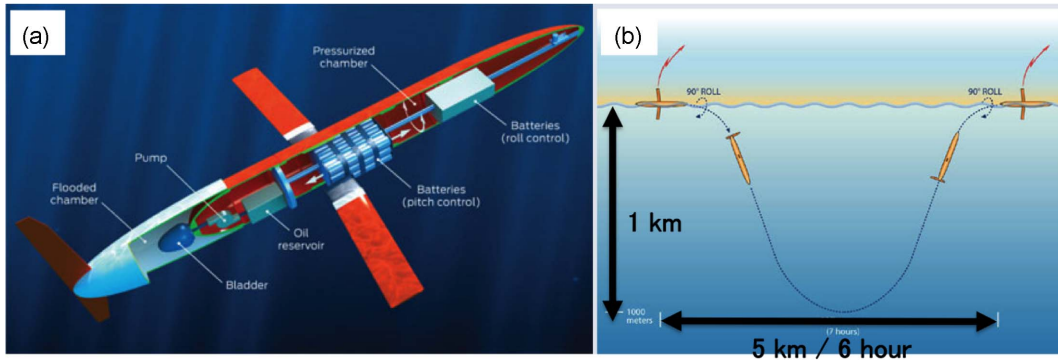


Fig. 1. (a) Schematic diagram of Spray glider, (b) Schematic diagram of Spray glider operation (www.whoi.edu/main/spray-glider)

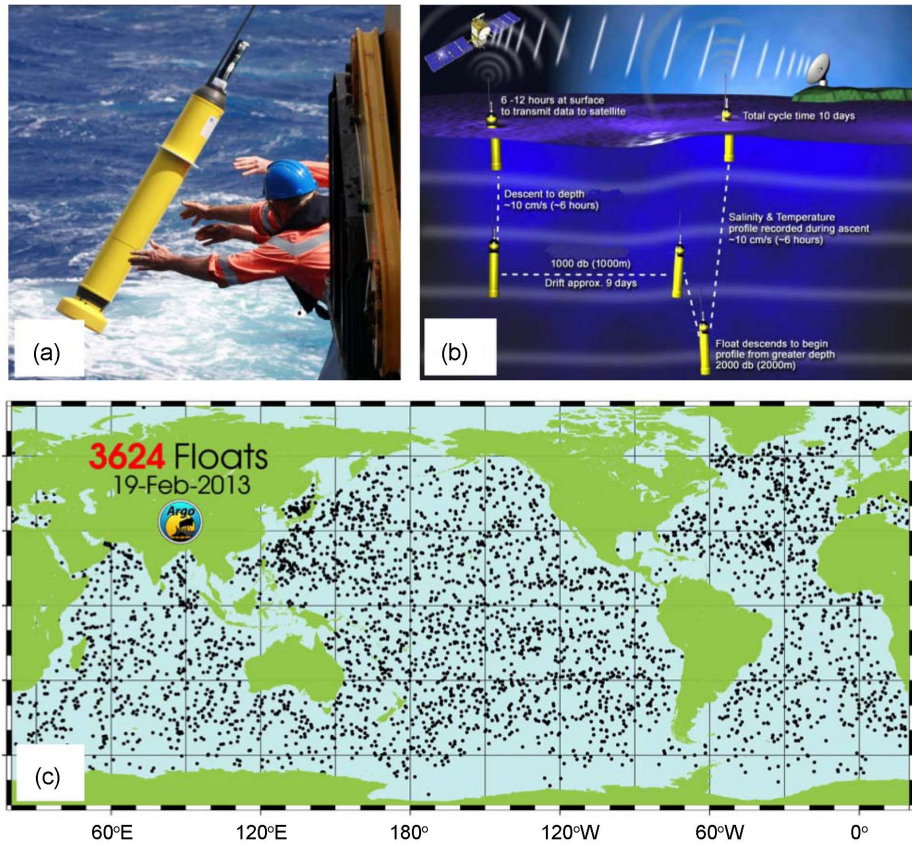


Fig. 2. (a) Deployment of an Argo float, (b) Schematic diagram of Argo float operation, (c) Locations of active Argo floats on Feb. 19, 2013 (www.argo.ucsd.edu)

의 이름을 따라 이 글라이더 기기를 슬로컴이라고 명명하였다. 스톰웰 박사는 미래의 해양 관측은 저렴하면서 소형인 다량의 무인 로봇에 의해 지배될 것으로 보았고 이러한 그의 예견은 많은 부분 현실화 되고 있다.

90년대 후반부터 관측 해양학은 저렴한 무인 관측 로봇의 등장에 의해 비약적인 발전을 이룩했다. 그 대표적인 기기가 아르고(Argo) 플로트이다(Fig. 2). 아르고 플로트

는 스톰웰 박사가 이야기했던 것과 유사하게 중성 부력을 갖으며 부력을 조정하면서 물속을 수직적으로 이동하며 자료를 수집하는 비교적 단순한 로봇이다. 날개나 다른 추진시스템이 없어서 스스로 특정 지점으로 이동하지는 못하지만, 그 단순성으로 인해 다른 특별한 관리없이 내장 배터리를 이용하여 바다에서 4-5년 동안 스스로 관측을 수행할 수 있다는 큰 장점이 있다. 2000년부터 시작된 국

제 아르고 프로그램은 이 플로트라는 소형 무인 관측 로봇을 전 세계 바다에 투하하여 자료를 수집하는 실시간 관측 체계를 수립하였다. 2013년 1월 현재 한국을 포함하여 50여 개국이 참여하고 있고 프로그램이 시작한 후부터 9000여기 이상의 플로트가 투하되어 백 만개 이상의 수온/염분 구조 자료를 획득하였으며 매년 일정 수준의 플로트를 투하함으로써 2013년 3월 현재 3600여기가 활발하게 실시간으로 자료를 전송하고 있다. 아르고 플로트는 일반적으로 1000 m 혹은 2000 m의 심층에서 떠다니다가 10일에 한 번씩 부력을 조정하여 표층으로 올라오면서 수온/염분 등을 측정하고 그 자료를 인공위성에 전송하는 시스템으로 자기 추진 능력은 없고 해류의 흐름에 따라 이동하기 때문에 10일 동안 이동한 거리를 바탕으로 심층 해류 또한 측정할 수 있다(Park et al. 2005; Park and Kim 2013).

이러한 플로트에 날개를 달아서 해표면에서 심층으로 떨어질 때 그리고 심층에서 표층으로 올라올 때 활강하도록 고안된 것이 해양 글라이더이다. 플로트와 같이 물속에서 부력을 조정하기 때문에 실제로도 대부분의 해양 글라이더의 부력 엔진은 플로트의 엔진을 활용한다. 플로트의 경우 Argo 프로그램으로 인해 절대적으로 많은 수가 생산되고 전 세계적으로 소비되고 있기 때문에 최근 10년동안 플로트 기기의 많은 발전이 있었으며 특히 보다 효율적이고 정확한 부력 엔진이 개발됨으로써 글라이더에서도 활용될 수 있게 되었다. 그러나 활강하면서 특정방향으로 이동하기 위해서는 자세제어 문제나, 에너지 소비 문제에서 플로트보다 훨씬 복잡한 연산 체계 및 구조가 필요하기

때문에 실제 형태, 크기, 내부 기능 및 알고리즘은 완전히 달라 플로트와는 별개의 기기로 보아야 한다.

2. 글라이더의 종류

스톰웰 박사의 창의적인 아이디어는 우즈홀 해양연구소와 해군의 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 세워 아르고 플로트와 글라이더를 제조, 판매하는 큰 회사로 성장시켰다. 글라이더와 플로트 개발은 20여년전 거의 비슷한 시기에 이루어졌다. 글라이더는 1991년에 최초로 실험에 성공하였고 오히려 수온 관측 기기를 부착한 플로트는 이보다 5년 뒤인 1996년 한국 동해에서 처음 시험 운영하였다. 그러나 기기 시험의 시기는 늦었지만, 단순하고 운영이 상대적으로 간편한 플로트가 먼저 대중화되었고, 글라이더는 운용기술이 현대화되는 2000년대 중반에 들어서부터 활발하게 활용되기 시작하였다. 우즈홀 해양연구소와 스크립스 해양연구소가 공동으로 개발한 스프레이 글라이더는 2004년 11월 미국 동부 연안에 투하되어 아주 강한 해류(최대 속도가 2.5 m/s로 글라이더 이동 속도의 10배에 이른다)인 멕시코 만류를 가로질러 버뮤다 섬까지 도착하는 1000 km 여정을 무인으로 완주하는데 성공했다. 이듬해 미국 워싱턴 대학에서 개발한 씨글라이더(Seaglider)가 3500 km를 주파하는데 성공했으며 2009년에 WRC 회사에서 개발한 슬로컴 글라이더를 미국 럽터

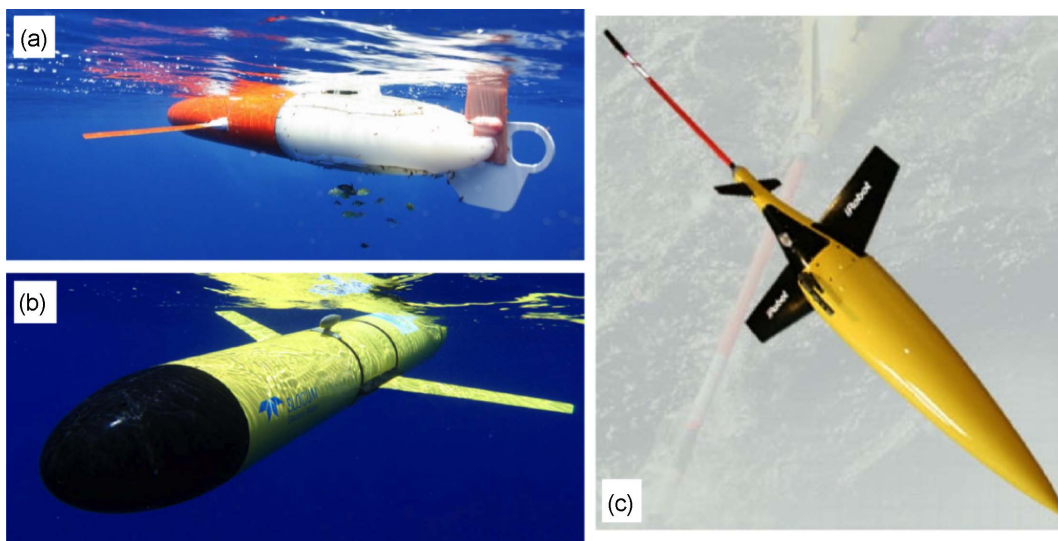


Fig. 3. Three types of widely-used gliders. (a) Spray glider co-developed by Scripps Oceanographic Institute and Woods Hole Oceanographic Institution, USA. Bluefin Robotics has commercial license of it, (b) Slocum glider of Webb Research Co., (c) Seaglider developed by University of Washington, USA. IRobot Corporation had commercialized Seaglider, but gave up its license recently

스(Rutgers) 대학이 운용하여 7000 km에 달하는 대서양을 221일만에 횡단하는데 성공하게 된다. 글라이더는 플로트처럼 한번 투하한 뒤에 잊어버릴 수 있는 단순 소모성 기기가 아니고 대부분의 실제 해양 관측이 그러하듯 운영과정의 노하우가 쌓이고, 그에 맞는 기기의 발전이 축적되어야 했기 때문에 상용화가 늦어진 것으로 생각된다. 오랫동안 운영경험의 축적을 통해 안정성이 입증되어 널리 활용되고 있는 글라이더가 바로 스크립스/우즈홀의 스프레이 글라이더, 워싱턴 대학의 씨글라이더, 그리고 WRC사의 슬로컴 글라이더이다(Fig. 3).

세 가지 글라이더는 각자 독특한 특징이 있다. 자세한 스펙 비교는 Davis et al. (2001)과 Ruddick et al. (2004)를 참고하자. 스프레이와 씨글라이더는 최대 수심이 1000-1500 m이며 대양, 즉 수심이 깊은 곳에서 운용할 수 있도록 고안된 글라이더이다. 모든 글라이더가 그렇듯이 내장 배터리만을 이용하여 작동해야 하기 때문에 물의 저항을 최소로 줄임으로써 에너지 소모를 최소화하고 최대한 멀리 이동하며 그리고 오래 작동할 수 있도록 최적화되어 있다. 스프레이 글라이더(Fig. 3a)는 저전력 설계를 바탕으로 하고 외장의 형태가 어뢰 모양이면서 가장 유선형에 가까운 얇은 원통 모양이기 때문에 유사한 슬로컴 글라이더보다 50% 이상 물의 저항이 작다(Sherman et al. 2001). 물의 저항이 작기 때문에 적은 전력을 소모하면서도 빠르게 이동할 수 있으며, 강한 해류를 만나더라도 글라이더 운영에 큰 차질이 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 스프레이 글라이더는 다른 글라이더와 같이 이리듐(Iridium) 위성안테나와 아르고스(Argos) 위성안테나를 동시에 갖추고 있으며, 전자는 날개에 각각 하나씩, 후자는 꼬리 날개에 부착되어 있다. 일반적인 통신 즉 글라이더가 자료를 전송하거나 사용자가 명령을 전달할 때 이리듐 안테나를 사용하며, 아르고스 안테나는 인공위성으로부터 정보를 수신하지 못하고 송신만 할 수 있어, 응급상황 발생 시 글라이더 회수용으로 사용된다. 이리듐 안테나가 양쪽 날개에 두 개가 장착되어 있기 때문에 통신 성공 확률을 높여준다. 과학 센서(CTD 포함)들은 주로 꼬리 날개 부근의 부력 조절 장치가 있는 쪽에 장착된다. 이러한 형태의 디자인 때문에 글라이더에 의해서 발생하는 항적(wake)으로 인해 센서 관측값에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 글라이더 비행에 의해 영향을 받지 않는 곳인 앞부분에도 필요한 센서를 탑재할 수 있도록 디자인의 개선이 필요하다.

스프레이는 다른 글라이더와 같이 내부 배터리를 무게 추로 활용, 앞뒤로 움직이게 함으로써 피치(Pitch)를 조절하고, 좌우로 움직여 롤(roll)을 조절한다. 이렇게 내부 배터리를 앞뒤, 전후로 움직이면서 글라이더의 무게중심을 바꾸게 되면 행글라이더가 방향을 바꾸는 원리와 동일하

게 활강을 하면서 원하는 방향으로 이동할 수 있게 된다. 그러나 이렇게 방향을 바꾸는 방식은 이동 경로를 바꾸는데 너무 오랜 시간이 걸리기 때문에 구조물이 많고 수심이 복잡하게 변화하는 연안에서 활용할 때 위험할 수 있다.

반면에 슬로컴 글라이더(Fig. 3b)는 연안 등 천해에서 운용할 수 있도록 최적화되어 있어, 수평, 수직 방향을 빠르게 전환할 수 있는 시스템을 갖추고 있다(Webb 2001). 신속한 수평 방향 전환을 위해서 슬로컴 글라이더에는 비행기처럼 움직이는 꼬리날개 방향타를 갖추고 있어서 7 m 정도 내에서 선회가 가능하다(스프레이의 경우 대략 30 m~수백미터의 회전반경을 갖는다). 그리고 글라이더 앞부분의 노즐을 통해 물을 빠르게 밀어내거나 빨아들임으로써 신속한 부력 변환이 가능하여 급격히 변화할 수 있는 천해 환경에 맞게 글라이더의 수직 속도를 제어할 수 있는 능력을 갖추고 있다. 이것은 해양의 내부파나 파랑 등에 의해서 발생할 수 있는 강한 수직 운동에 의해 글라이더가 바닥이나 암초에 부딪히지 않도록 해준다. 따라서 천해와 외해에서 활용하는 글라이더는 엄밀히 구분하여 용도에 맞게 적용하여야 한다. 슬로컴 글라이더는 비록 천해용으로 개발되었으나, 부력엔진 등의 몇 가지 기능을 바꿈으로써 대양용으로 활용할 수 있다. 즉, 범용성이 뛰어나 여러 가지 센서를 부착하여 시험 운용할 때도 비교적 용이하다. 이미 개발된 센서들을 부가적으로 장착하여 활용할 수 있도록 글라이더 내에 따로 공간 및 전원, 입출력 단자들을 확보해 놓았다는 측면에서 사용자가 활용하기 수월한 반면에, 새롭게 개발된 센서를 장착할 때는 다른 글라이더에 비해 적용성이 매우 떨어진다는 단점이 있다.

씨글라이더(Fig. 3c)는 스프레이와 유사하게 대양에서 운용하도록 개발되었는데 스프레이와는 다른 방식으로 사용 전력량을 줄인다. 씨글라이더의 몸체는 해수와 유사한 압축성을 갖는 유리섬유 소재로 이루어져 있어 글라이더가 수심을 바꿈에 따라 발생하는 부력의 손실을 막아서 압축성이 매우 낮은 재질로 몸체를 구성했을 때 보다 적은 에너지를 소모해도 심해까지 잠수할 수 있다(Eriksen et al. 2001). 이러한 방식을 통해 절약되는 에너지는 잠항 수심의 제공에 비례한다(Davis et al. 2001). 씨글라이더의 통신 안테나는 꼬리 부분에 긴 막대 형태로 부착되어 있어서 해표면에 도달했을 때 공기 중으로 쉽게 노출되기 때문에 안정적인 통신이 가능하다. 그러나 몸체가 압력에 따라 수축 팽창을 반복한다는 단점 때문에 몸체 주변에 부가적인 기기를 탑재하는 것이 불가능하다. 더구나 씨글라이더는 구조적으로 추가적인 센서들을 꼬리날개 근처 부분에만 국한하여 탑재할 수 밖에 없어 다양한 센서를 활용하기 어렵다는 문제로 스프레이나 슬로컴에 비해 범용성이 떨어진다.

위 세 글라이더는 저마다 다른 점이 있지만, 외형적인 스펙은 유사하다고 볼 수 있다. 약간의 차이가 있지만, 크기는 모두 대략 2m 내외이며 무게도 50 kg 남짓, 최대 이동속도는 40 cm/s이고, 수평 이동속도는 25-30 cm/s 정도 서로 유사하다. 적재 용량은 대략 4-5 kg이고 활강하는 각도 역시 17-20도 정도로 비슷한 범위에서 결정된다. 최대 잠항 수심의 경우, 1000 m 정도로 (심지어 슬로컴 글라이더 역시 1000 m) 유사한데, 스프레이는 1500 m까지 내려갈 수 있도록 고안되었지만, 실제 운용시에는 1000 m를 한계점으로 두고 있다. 외형적 스펙이 세 글라이더 간에 큰 차이가 없는 이유는 현재 활용가능한 기술력을 통해 최소한의 에너지로 최대 효과를 얻어 내기 위한 글라이더 구조를 고안하였기 때문이다. 그러나 글라이더 활용에 있어서 어떤 부분을 중시하느냐에 따라 기기 성능과 하드웨어 구성이 달라질 수 있다.

3. 글라이더 항해 기법

대부분의 글라이더는 심층과 표층을 오가면서 매번 표층에 도달했을 때 인공위성에 자료를 전송하면서 GPS로부터 위치 정보를 얻는다. 이 위치 정보로부터 글라이더 궤적이 산출되고 현재 위치를 바탕으로 목적 지점까지의 루트가 자동으로 다시 갱신된다. GPS로부터의 위치 수신은 수 분 내로 이루어지기 때문에 표층에 머무는 동안 글라이더가 이동한 거리는 흔히 무시된다. 사전에 입력된 루트 혹은 인공위성을 통해 전송된 루트 좌표는 글라이더가 배경 해류에 의해 떠내려간 만큼 실제 위치와는 다르게 되는데 이 차이만큼이 배경 해류의 수직 평균값이 되어 예상되는 좌표와 실제 좌표의 차이를 가지고 간접적으로 해류를 측정하기도 한다.

스프레이는 배경 해류를 고려하지 않고 방향을 설정함으로써 부가적으로 해류 정보를 얻을 수 있는 반면에 특정 루트를 정확하게 따라가도록 설정할 수 없으며, 따라서 특정 루트를 기준으로 지그재그 형태로 움직이게 되는 것이 일반적이고 슬로컴도 이와 크게 다르지 않다. 특정 루트를 제대로 따라가게 만드는 여부는 글라이더가 표층을 떠나 심층에 도달한 후 다시 오는데 걸리는 주기와 배경 해류의 세기에 의해 좌우된다. 대략적인 수치를 제공하자면, 만일 수심 200 m까지 글라이더가 잠항한다고 하고, 배경 해류가 20 cm/s라고 할 경우, 한 주기 동안 걸리는 시간이 대략 1시간 남짓이므로 이 배경 해류에 의해 글라이더는 원래 도달해야 하는 위치보다 800 m 떨어진 지점에 도착하게 된다. 하지만 1000 m를 잠항하도록 설정한다면, 이의 5배, 즉 4 km 만큼 원래 지정된 루트에서 벗어날 수 있다. 그러나 씨글라이더의 경우에는 이 두 글라이더보다 진보한 항해 기법을 가지고 있다. 씨글라이더는 칼만

필터라는 자료동화 알고리즘을 이용하여(이 기법은 미사일이나 로켓의 경로를 수정 보완하는데 주로 사용되기도 한다) 간접적으로 측정된 해류의 세기와 축적된 위치 정보를 바탕으로 해류에 의해 글라이더가 정해진 루트를 얼마나 벗어나는지 산출하고 이를 보정할 수 있도록 물속에서 자동으로 방향을 조정한다.

물속에서 글라이더의 항적을 결정하는 기준은 글라이더 내부에 장착된 디지털 나침반이다. 따라서 이 나침반은 정밀하게 사전에 테스트 되어야 한다. 글라이더 내부는 전자 기기들로 가득차 있기 때문에 특히 배터리에 의해서 자체 자기장을 만들어 낸다. 일반적으로 디지털 나침반은 이 자기장을 보정하도록 조정되어 있지만, 시간이 지날수록 편향될 수 있으며 특히 배터리를 교환하였을 때나, 새로운 센서 혹은 기기를 부착하였을 경우에는 반드시 나침반을 보정하는 디가우징(degaussing) 과정을 수행해야 한다.

미션을 수행하기 전에 글라이더의 루트를 미리 결정하는 것은 매우 중요하다. 글라이더는 자료의 전송과 시공간 정보를 얻기 위해 자주 표층에 머물기 때문에 배가 지나 다니는 항로라든지 어로 활동이 잦은 지역을 미리 알고 있는 것이 중요하며 될 수 있는 한 이러한 지역을 피해서 루트를 설정하는 것이 필요하다. 이와 관련하여 5절에서 좀 더 자세히 다루도록 한다.

4. 글라이더 센서

CTD 센서

글라이더는 수직적으로 표층과 심층을 이동하여야 하므로 해수 밀도와 압력을 지속적으로 측정하는 것이 기본이다. 즉 수온, 염분, 압력을 측정하는 CTD 센서가 기본으로 탑재되어 있는데, 일반적으로 안정성이 뛰어난 씨버드(Sea-Bird)사의 제품을 이용한다. 아르고 플로트에 가장 많이 탑재되어 있는 CTD가 바로 이 회사 제품이며, 8000여기의 플로트에 운용된 경험을 바탕으로 그 안정성이 입증되었기 때문이다. GPCTD(Glider Payload CTD)는 아르고 플로트에서 사용하던 SBE-41cp의 글라이더 개량형이며, 최근에 개발된 것은 175 mW의 저전력을 소모하면서 1초당 한번씩 연속 관측이 가능하다. 글라이더에 탑재된 CTD는 글라이더 중심부 혹은 꼬리날개 부근에 위치하기 때문에, 글라이더에 의해 발생된 미세한 물방울 등에 의해 염분센서가 영향을 받을 수 있다. 실제로 이리듐 통신 시스템을 탑재한 아르고 플로트가 개발된 초기에는 넓적한 안테나 모양 때문에 발생한 미세 물방울들이 CTD의 전도도 측정 셀(conductivity cell)에 유입됨으로써 염분 자료에 문제를 일으킨 적이 있었다. 현재는 이리듐 안테나를 짧게 설계하고 비스듬히 설치함으로써 이러한 문제를 최소화하였다. 스프레이 글라이더의 경우에는 글라이더가 발생시

킬 수 있는 미세 물방울 영향을 줄이기 위해서 글라이더가 표층으로 올라올 때만 자료를 저장하여 자료의 질을 높이고 저장 공간 및 자료 전송 비용을 절약하기도 한다.

해류 측정 센서

글라이더에서 해류를 측정하기 위한 센서도 개발되었다. 초음파를 이용한 해류계인 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)는 물리 해양학에서 널리 이용되는 관측 기기이다. 글라이더에 탑재할 수 있을 만큼 작은 크기의 ADCP는 거의 10년전에 개발되었지만, 아직까지도 그 안정성이 제대로 입증되지는 못했다. 현재는 콜라 캔만큼 전체 크기가 작아졌으며 대표적으로 Teledyne RDI 사의 ADCP가 슬로컴에 장착되어 테스트 중에 있고, 노르텍(Nortek) 사의 ADCP인 아쿠아돔(Aquadop)이 스프레이와 씨글라이더에 장착되어 성능 시험 중에 있다.

생물/화학 센서

아르고 프로그램의 성공에 힘입어 플로트에 탑재할 수 있도록 소형화되고 저전력을 소모하는 생물 및 화학 센서들이 다양하게 개발되고 있는데 이렇게 플로트용으로 개발된 센서들은 비교적 수월하게 글라이더에 탑재될 수 있다. 현재 많이 쓰이고 있는 센서 중 하나는 용존산소를 측정하는 센서로 씨버드사의 SBE-43F가 널리 이용되고 있다. 이 센서는 아르고 플로트에 장착되어 하와이 인근에서 2002년도에 시험 운영되었고 현재 활발하게 활용되고 있으며, 동일한 센서가 글라이더에도 장착될 수 있다. 그 다음 많이 이용되는 센서는 플랑크톤의 염록소량을 측정할 수 있는 광학 센서인데 470 nm 혹은 695 nm 파장대의 빛을 이용한다. 글라이더와 같은 움직이는 무인 관측 기기에 많이 활용되는 생물/화학 센서가 바로 이 광학 센서인데, 파장이 다른 여러 가지 빛을 이용하여 다양한 해수의 생물, 화학적 특성을 측정한다. 몇가지 예를 들자면, 200 nm 파장의 빛을 활용하여 해수의 탁도를 측정하는 turbidity 센서가 있고, 최근 Wet Lab에서 개발한 BAM(Beam Attenuation Meter)라는 광학 센서는 470, 532, 650 nm의 빛을 이용하여 해수의 탁도 뿐 아니라 플랑크톤, 부유물질, 용존 유기물질, 박테리아의 총 농도를 추산하는데 활용할 수 있다. 광학센서 중에는 370 nm 혹은 460 nm의 빛을 이용하여 용존 유기물량을 측정하는 CDOM 센서, 700 nm의 backscattering 센서 등이 있으며 400 nm에서 700 nm 사이의 광량을 측정함으로써 광합성에 필요한 광량을 산출할 수 있는 Satlantic의 광합성 유효 방사(PAR: Photosynthetic Active Radiation) 센서도 활용 가능하다. 또한 해수 중의 질소량을 측정할 수 있는 UNA(Ultraviolet Nitrate Analyzer)가 상용화되어 있는데, 용존유기물의 자외선 흡수 정도를 기준으로 하여 해수중의 질소량을 측정

하는 시스템이다(Teledyne Webb Research 2013).

이밖에도 아르고 플로트 용으로 개발된 pH 센서가 있으며 미국 Washington 대학의 Steve Riser 교수가 아르고 플로트에 장착하여 실험 중에 있다.

그 밖의 센서

해수의 미세한 움직임을 초당 수백번 관측하여 해수 혼합(mixing)을 측정함으로써 확산정도(diffusivity)를 제공할 수 있는 센서가 이미 그 안정성을 입증받았다. 락클랜드 사이언티픽(Rockland Scientific)이라는 회사가 마이크 로라이더(MicroRider)라는 해양의 초미세 난류 구조 측정 기기를 시판 중이다. 글라이더 몸체에 부착하여 활용할 수 있는 이 기기는 기존의 프로파일러 타입의 기기와 동일한 센서 부품을 활용함으로써 정확도가 매우 높다. 난류를 측정하는 기기는 아주 미세한 움직임을 감지하는 것이기 때문에 선상 관측시에도 배의 진동을 배제하기 위하여 자유 낙하 형태로 측정을 수행한다. 그러나 글라이더는 진동이 적은 매우 조용한 기기이기 때문에 난류 센서를 부착하여 활용하는데 있어서도 적합한 플랫폼이다. 이 분야의 선도적인 역할을 담당하고 있는 곳이 우즈홀 해양연구소이다.

또한 해양 포유류 및 특정 소리를 발산하는 물고기의 위치를 추적하는데 활용할 수 있는 수중음집기(hydrophone)도 이용가능하다. 실제로 Beaked Whale 종이 내는 소리를 추적하여 글라이더로 이 고래의 위치를 실시간으로 파악할 수 있는 시스템이 이미 개발되었으며, 산업화에 따른 해양 포유류의 생태 변화를 연구하는데 활용되고 있다(Klinck et al. 2011). 음파를 이용한 센서는 이 밖에도 동물플랑크톤의 생태연구에도 활용되고 있다(Baumgartner and Fratantoni 2008) 글라이더 운용 측면에서도 음파를 활용한 센서는 그 활용도가 높다. 여러 글라이더를 동시에 운용할 때 서로의 상대적인 위치를 조정함으로써 최대한의 영역을 최소한의 비용으로 운용할 때 이 수중음집기와 음파모뎀을 활용할 수도 있으며(Fiorelli et al. 2003; Chen et al. 2012), 수중에서 운용중인 글라이더의 위치를 인공 위성 없이 추적하는데도 이 음집기를 활용할 수 있다(Kinsey et al. 2006).

새로운 센서 부착 시 고려할 사항

글라이더는 다양한 관측을 수행할 수 있는 플랫폼이다. 다른 연구자들이 원하는 관측이 있을 경우 해당 센서를 추가하여 원하는 지역에서 계획된 기간 동안 비교적 손쉽고 적은 비용으로 자료를 획득할 수 있다. 따라서 동해에서 글라이더는 관측 인프라를 구축하기 위한 범용성을 가지는 것이 필요하다. 이것은 글라이더에 부착할 수 있는 센서들을 단순히 구매하여 설치한다고 끝나는 것이 아니라 여러 차례 시험을 통해서 글라이더 운용에 문제가 없

음을 확인하는 절차가 필요하다. 새로운 센서를 부착할 때 고려하여야 하는 것은 여러 가지가 있겠지만, 가장 중요한 두 가지는 다음과 같다. 새로운 센서가 글라이더 운용에 영향을 주는가와 글라이더 운용이 센서가 얻는 자료에 영향을 주는가 하는 점이다. 이 두 가지 문제를 확인하고 해결하는 과정이 필연적으로 포함되어야 하는데 글라이더는 그 작동 과정이 육안으로 확인되지 않는 물속에서 운용되기 때문에 글라이더 작동에 관련된 기술 데이터와 과학 데이터를 면밀히 분석하여 위 두 가지 문제점을 확인하는 과정이 필수적이다. 이 밖에도 센서와 글라이더 간 정보 교환 문제, 센서의 전력 사용 문제, 센서에서 얻은 자료를 인공위성으로 전송하는 전략 등에 대해 점검하고 기술적으로 해결하기 위한 충분한 시간을 확보해야 한다.

새로운 센서를 갖추어 종합적인 관측을 수행할 수 있는 바탕이 마련되면 어떤 자료를 어떻게 실시간으로 전송할 것인가에 대한 고민이 필요하다. 예를 들어 난류를 측정하는 센서의 경우 하루동안 300 MByte에 달하는 엄청난 양의 자료가 수집된다. 이것 이외에도 해양에서 글라이더를 통해 얻는 자료의 양은 앞으로 급격하게 증가할 것으로 기대되기 때문에 많은 자료를 효율적으로 전송하는 기술에 대한 고민도 요구된다. 논의되고 있는 방법 중 하나는

글라이더가 계류된 정점 근처로 이동하여 초음파 모뎀을 활용, 자료를 계류되어 있는 기기로 전송하고 계류선에서 육상으로 이어진 케이블이나 대용량 자료 전송이 가능한 전파를 활용하여 전송하는 시스템을 생각해 볼 수 있다. 동해의 경우에는 울릉도와 독도 근처에 글라이더가 머물면서 휴대폰 전파를 활용해서 대용량 자료를 전송하는 시스템을 구축할 수 있을 것으로 생각한다.

5. 글라이더 운용의 예

저자는 우즈홀 해양연구소에 재직하는 동안, 난류 측정 글라이더 개발 사업을 기획하고 수행하였다. 이 사업을 진행하면서 우즈홀 해양연구소의 글라이더 팀과 함께 어떻게 글라이더를 준비하고 운용하였는지 간략하게나마 소개하면서 글라이더 운용에 필요한 사항들을 정리하고자 한다.

난류 측정 글라이더 개발

난류 측정 글라이더는 두 가지 서로 다른 센서를 탑재하여 상호 보완적으로 자료를 얻을 수 있도록 디자인하였다. 첫 번째 센서는 앞서 언급했던 락클랜드사이언티픽에

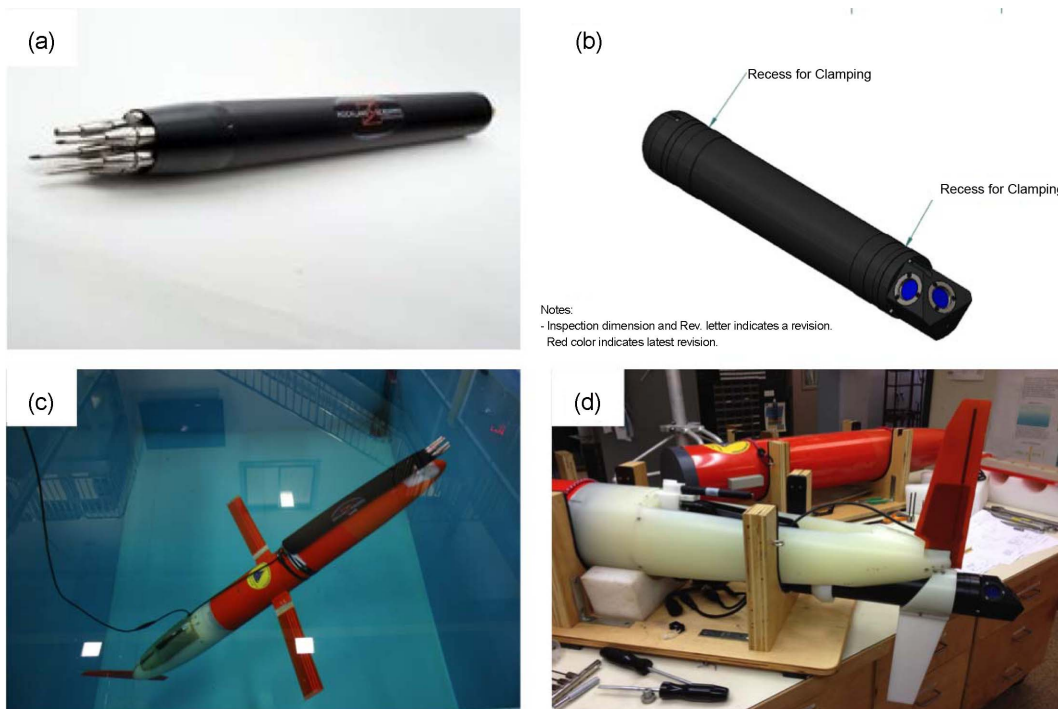


Fig. 4. Development of turbulence glider (a) Turbulence measuring instrument, MicroRider-1000 from Rockland Scientific. The expendible 5 sticking probes at its head are microstructure sensors detecting small scale turbulent eddies. The other one is a LED light showing status of the instrument, (b) High Resolution Aquadopp is an acoustic doppler current profiler with 2 MHz which can measure small scale eddies with length scale of O (cm), (c) Test of Spray glider equipped with MicroRider-1000 in a water tank, (d) High Resolution Aquadopp is installed in the tail section of Spray glider

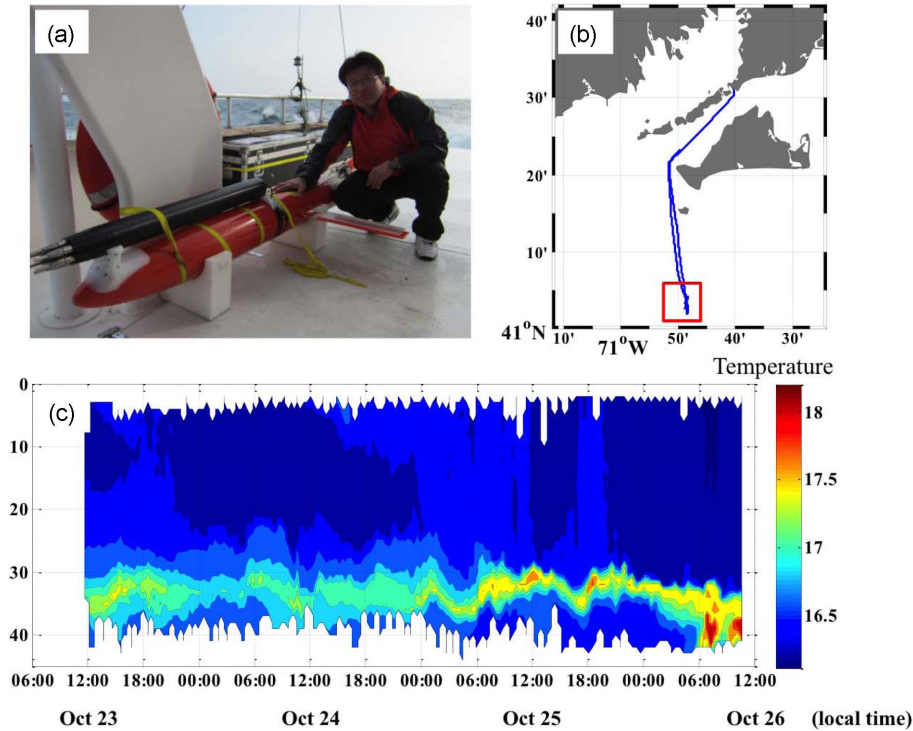


Fig. 5. Tests of turbulence glider at sea. (a) A picture at the first sea-test of the glider equipped with MicroRider, **(b)** The third sea-test after correcting hardware problem. Mooring and profiling turbulence measurements were conducted at the same time. Blue line denotes ship-track and red box shows the third test area, **(c)** Temperature timeseries obtained from the turbulence glider under development. The glider was set up as virtual mooring type and stayed within 5 km radius from the deployment location. Intrusion of warm and salty water from offshore is remarkable. The turbulent data from the glider showed that the intrusion layer typically has high eddy diffusivity although the figure is not shown here

서 개발한 마이크로라이더이며 다른 하나는 노르텍에서 개발한 High Resolution Aquadopp(HRA)이다(Fig. 5). HRA는 음파를 이용하여 해류를 측정하는 ADCP의 일종이지만, 고해상도로 해류를 측정함으로써 해수속의 미세 흐름 구조를 잡아낼 수 있도록 특별히 고안된 기기이다.

이 두 가지 센서를 선정 한 이유는 마이크로라이더의 경우 매우 정밀하게 해수의 혼합정도를 측정할 수 있으며 현재로서는 가장 관측값의 안정도가 높은 기기로 인정받은 센서를 사용하고 있기 때문에 믿을 수 있다는 장점을 가지고 있었지만, 단점은 이 기기에 부착되어 있는 센서가 소모품이기 때문에 글라이더 운용 중에 쉽게 망가질 수 있다는 것이고, 총 5 부품으로 이루어진 센서 패키지를 한번 교체하는데 대략 800만 원 정도 소모되기 때문에 비용 측면에서도 효율적이지 못하다. 반면에 노르텍의 HRA는 음파를 이용하여 혼합정도를 측정하는 기기이기 때문에 마이크로라이더의 센서들에 비해 반영구적으로 사용할 수 있고 취급도 수월하다는 장점도 있지만, 센서의 정확도가 낮고 아직 그 안정성이 제대로 검증되지 않았다는 단점이 있었다. 따라서 두 센서를 동시에 탑재하여 충분한 자료를

획득하고 마이크로라이더관측 결과를 이용해 HRA를 검증하고 동시에 확립되지 않은 자료 처리 기법을 제시하기로 계획하였다.

난류 글라이더 실험

난류를 측정하는 글라이더를 시험하기 위하여 총 7번에 걸쳐 투하 실험을 실시하였다. 초기 3차례 실험은 우즈홀 해양연구소 연안 수심 40 m에 해당하는 곳에서 이루어졌고 다른 3차례 실험은 남대서양 남위 40도, 수심 5000 m 이상의 대양에서 진행되었으며 마지막 실험은 버뮤다 섬 근처 해역에서 이루어졌다. 초기 글라이더 실험은 부피가 큰 난류 센서를 부착하여도 글라이더 수직 운동에 영향은 없는지를 확인하며, 난류 센서와 글라이더 간의 통신이 실험실에서 시험한 것과 같이 바다에서도 원활하게 작동되는지의 여부를 확인하는 것이었다. 특히 연안에서 수행된 3차례 시험중 마지막 실험은 향후 글라이더에 부착하게 될 HRA 센서를 시험하기 위한 것으로 글라이더 시험과 동시에 HRA 센서 2기를 계류하여 자료를 수집하고, 락랜드 사이언티픽(Rockland Scientific) 회사의 미세구조 프

로파일러(microstructure profiler)인 VMP-500에 부착하여 HRA 센서의 정확도를 시험하는 종합적인 미션이었다 (Fig. 5).

이 실험들을 계획하면서 글라이더의 연안 운용에 대해 중요하게 고려하였던 것은 무엇보다 해저면과의 충돌을 피하는 것이었다. 글라이더 운용 해역이 암초가 있는 곳은 아닌지 해저 지질의 종류를 파악하고, 수심의 변화 정도를 숙지하면서 글라이더 투하해역을 선정하였으며, 글라이더 운용 중에도 정밀 해도를 이용하여 지속적으로 모니터링 하였다. 우즈홀 연안 해저는 가는 모래로 이루어져 있어 글라이더가 설사 바다와 충돌하더라도 큰 손상이 없을 것임은 이미 알고 있었으나 문제는 글라이더에 탑재된 난류 측정 센서가 조그만한 충격에도 쉽게 손상될 수 있기 때문에, 충돌을 피하기 위한 여러 가지 설정값을 수정하였다. 스프레이 글라이더는 초음파를 이용하여 바다과의 거리를 측정할 수 있는 고도계 센서가 장착되어 있으나, 가용한 전력의 제한으로 20-30 m 이상을 감지하기 어렵다. 게다가 고도계 센서가 100% 정확도를 가지고 있지 않기 때문에, 센서 만을 신뢰하여 글라이더 미션을 계획하는 것은 위험하다고 판단하였다. 또한 스프레이 글라이더는 대양용으로 설정되어 있는 상태였기 때문에, 수직 운동의 반응 속도가 느려 바닥을 감지하더라도 수직 방향을 바꾸는데 시간이 걸려 자칫 충돌할 수 있는 가능성이 있었다. 일단 해역의 대략적인 수심 정보를 알고 있었고 New England Shelf가 매우 넓고 수심 변화가 적어 충돌 가능성을 최소화하기 위해 수심 30 m부터 수직 방향 전환을 하도록 설정을 변경하였다. 또한 고도계 센서 값도 동시에 참고하여 바닥에서 10 m 이하로 내려가지 않도록 설정하였다. 스프레이 글라이더를 천해용으로 설정을 바꾸는 것은 가능하지만, 많은 시간과 노력이 들었기 때문에 간단한 시험을 위해서 이러한 설정 변경만으로도 충분하였다.

그 다음으로 고려하였던 부분은 여객 혹은 화물선의 항로이다. 글라이더는 특성상 인공위성으로 자료를 전송하고, 위치를 할당받으며 명령을 수신하여야 하기 때문에 해 표면에 자주 노출되게 된다. 한 번 표층에 도달하면 통상 20-30분 정도 머물게 되는데, 아르고 플로트의 경우 표층에 10-12시간 머무는 것에 비교하면 매우 짧은 시간이라 생각할 수도 있다. 그러나 플로트는 일반적으로 7-10일에 한번씩 표층에 노출되는 반면에 글라이더는 훨씬 짧은 간격으로 자주 표층에 도달한다. 예를 들어 200 m 수심을 왕복 운동한다고 생각했을 때 7일 동안 총 표층에 머무는 시간을 종합해보면 최대 약 20시간 정도 되기 때문에 플로트보다 표층에 노출되는 시간이 오히려 더 긴 것을 알 수 있다. 따라서 글라이더를 배가 자주 다니는 곳에서 운용을 하게 되면 그 해역을 지나가는 선박과의 충돌 가능성이 상대적으로 높을 수 있다. 글라이더 실험을 계획할

때 표층의 머무는 시간을 최소한으로 줄이기 위해서 다중 잠항(수직 왕복을 여러 차례 반복한 뒤에 표층에 올라오는 방식)을 하도록 설정하기도 한다. 그러나 이것은 글라이더가 아무런 문제없이 작동함을 확실히 하고 난 다음에 진행하여야 글라이더 손실의 위험성을 낮출 수 있다.

세 번째는 배경해류의 고려이다. 스프레이 글라이더의 경우 배경해류가 강하더라도 글라이더 운용에 심각한 문제를 비교적 발생시키지 않는 기기이다. 이유는 해류에 의해 글라이더의 자세가 무너지더라도 정밀하고 폭넓은 롤링 조절이 가능하기 때문에 쉽게 자세를 고칠 수 있어서 관측 수행에 큰 무리가 없다. 실제로 우즈홀 해양연구소 남쪽 연안은 조류가 50 cm/s 이상으로 종종 강해지는데, 이 경우에도 큰 무리없이 원하는 대로 관측이 이루어졌었다. 연안 실험의 경우에는 잠항 수심이 정해져 있었지만, 대양에서 실험할 경우에는 잠항 수심이 깊을수록 정해진 궤도를 글라이더가 제대로 따라가지 못하기 때문에 궤도를 정하고 글라이더의 잠항 수심을 정하는데 배경 해류에 대한 조사는 필수적이다.

네 번째 고려한 사항이 어로활동이다. 어로활동을 맨 마지막에 고려하였던 이유는 대부분의 어로활동이 외해 즉 대륙붕사면에서 이루어지기 때문이었기도 하지만 어로 방법이 통발형태의 작업을 통해 랍스터를 잡는 것이 대부분이었기 때문이다. 만일 어로활동이 많은 해역에서 글라이더를 운용한다면 어떠한 종류의 어로활동이 있는지 반드시 점검해야하는 것은 당연하다. 그러나 일반인이 생각하는 것처럼 글라이더가 그물에 걸릴 확률이 높은 것은 아니다. 글라이더가 수평적으로 이동하긴 하지만, 잠수함 혹은 프로펠러 추진 시스템을 가지고 있는 AUV 처럼 배경 해류 속도보다 훨씬 빠르게 움직이는 기기가 아니다. 오히려 수직적으로 주로 움직이면서 수평적으로 해류에 의해 떠밀려 다니는 플로트와 유사하다고 생각하는 것이 더 적합할 수도 있다. 글라이더는 느리지만 플로트와 달리 원하는 지점으로 기기를 이동시킬 수 있다는 점이 다를 뿐이다. 플로트가 어선의 그물에 걸려서 잡히는 확률이 낮은 것처럼 글라이더도 수평적으로 느리게 움직이기 때문에 그물에 걸릴 확률은 높지 않은 것으로 판단하고 있다. 하지만, 어로 활동이 많은 해역은 어선이 여러 방향으로 움직일 수 있기 때문에 배와 부딪힐 수 있는 확률이 더 높을 수 있어 될 수 있는한 해당 해역을 피하는 것이 좋다.

글라이더 운용

글라이더 운용은 글라이더 준비 작업과 해상 운용 작업, 후처리 작업으로 크게 나뉘볼 수 있는데, 이 때 점검해야하는 사항은 프로토콜로 정해져 있으나 내용이 방대하고 외부에 유출할 수 없도록 되어 있기 때문에 본 논문에서 다루지 않는다. 대신 앞선 실험의 예를 소개하면서

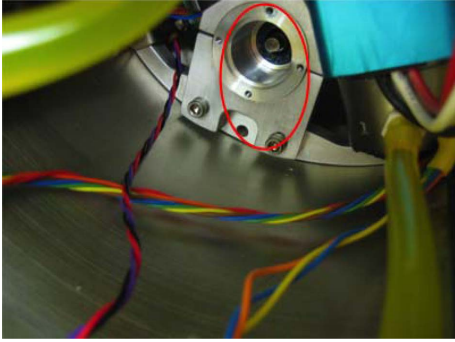


Fig. 6. Inside of spray glider. Small oil leakage was found. If it weren't fixed, a glider might have been lost due to the leakage

부분적으로 언급하도록 한다. 글라이더 운용에 있어 중요한 점은 글라이더가 일반 해양 관측기기 보다 복잡하고 정교하다는 것을 이해하고, 매번 글라이더 미션을 수행할 때마다 기본적인 것부터 철저히 점검하는 과정을 거쳐야 한다는 점이다. 이러한 점검과정은 미션 수행 전에 그리고 미션이 끝나고 난 다음에 각각 수행하여 기록으로 남겨야 한다. 한가지 예를 들어보겠다. Fig. 6은 첫 번째 실험을 마치고 스프레이 글라이더의 내부를 촬영한 것이다. 얼핏 보면 전혀 문제가 없는 듯이 보이지만, 실제로 빨간색으로 표시한 주변에 미세하게 기름이 새어 나온 흔적이 있다. 이러한 기름은 부력을 조절하기 위해 펌프를 통해 부력 역할을 하는 주머니에 들어가는 것인데, 기름 유출이 일단 발생하면 연안에서 운용할 때는 큰 문제가 없지만, 압력이 높은 심해까지 잠항 할 때 유출이 급격히 증가할 수 있고, 심각한 경우 부력 조절을 할 수 없어 글라이더 손실을 가져올 수 있다. 이러한 눈에 잘 띄지 않는 작은 문제들이 글라이더를 장기간 심해에서 운용할 때 오작동이나 분실

가능성을 높이는 것이다. 따라서 글라이더를 처음 운용할 때는 천해에서 여러 차례, 미션 기간을 바꾸어 운용하여 경험을 쌓고 글라이더 내부에 문제가 없는지 지속적으로 확인하는 절차가 필요하다. 글라이더를 개발하고 운용한 경험이 20년 가까이 축적된 우즈홀 해양연구소는 글라이더 준비 및 점검 과정에 대한 독자적인 프로토콜을 가지고 있다. 스크립스 연구소도 유사한 과정이 있는 것으로 알고 있는데, 글라이더는 플로트처럼 한번 쓰고 버리는 기기가 아닐뿐더러 내부 작동 과정이 복잡하기 때문에 국내에서 글라이더를 활용하기 위해서는 분실률을 줄이기 위한 운영 노하우의 축적이 요구된다.

글라이더 투하는 상대적으로 수월하다. 바다 상태가 그리 좋지 않아도 큰 어려움 없이 투하하는 것이 가능하다. 단지 바다 표면에 강하게 부딪히지 않도록 주의하여야 한다(Fig. 7). 일단 투하하고 난 다음에는 반드시 글라이더 작동 여부를 초기에 눈으로 확인할 수 있어야 하며, 인공위성을 통해 초기 자료가 잘 수집되어 있는지 확인하여야 한다. 그러기 위해서는 글라이더가 눈에 보이는 곳에 배가 머물러 있어야 하고, 통상 일몰 4시간 전에는 투하를 완료한다. 초기에 얕은 수심으로의 잠항을 2-3차례 실시하여 특별히 문제가 없는 것을 확인한 뒤 점차적으로 수심을 늘려서 목표로 하는 수심까지 운용을 한다. 얕은 수심에서의 잠항 시험을 완료할 때까지 배는 글라이더 근처에서 가능한 한 머물며 대기한다. 2012년 8월에 진행된 7번째 실험은 버뮤다 섬 주변에서 실시하였는데, 글라이더 투하 후 인공위성과의 통신이 제대로 이루어지지 않아 급히 다시 회수한 적이 있었다. 만약 일몰 후라면 글라이더를 회수하는 것이 매우 어려워 그대로 글라이더를 분실하게 되었을 것이다.

글라이더 회수는 보다 복잡하고 위험하다. 대양에서 실

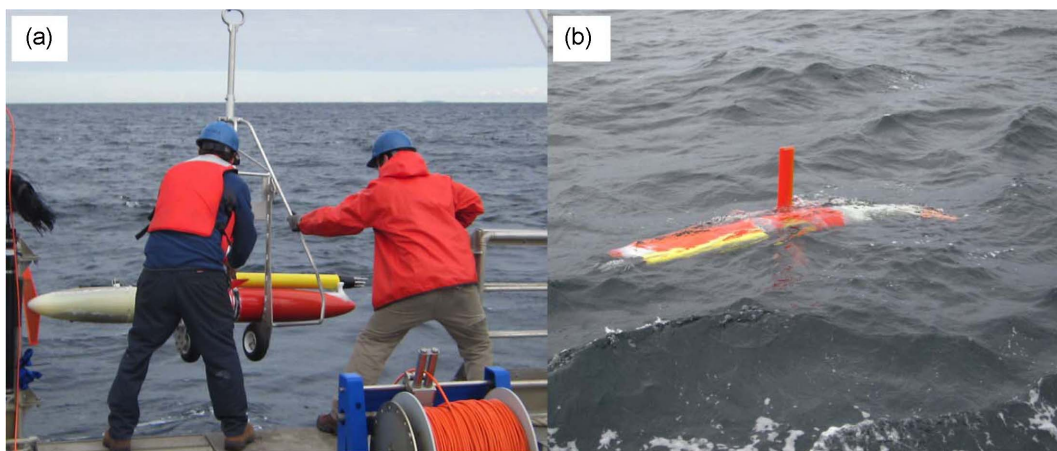


Fig. 7. Glider deployment at the third sea test. The microRider was colored yellow to be easily found at sea. (a) Specially-designed rack for carrying and deploying the glider, (b) The glider communicating with satellite after deployment

험하는 경우 파도 때문에 선체가 글라이더에 충격을 가할 수 있고 대부분의 대양용 관측선은 해수면 위 수 m 높이에 갑판이 있어서 회수에 시간이 걸리기 때문에 글라이더가 파손될 가능성이 높다. 스프레이 글라이더의 경우에는 작은 보트를 내려서 회수하는 안전한 방법을 채택하고 있고, 슬로킵 글라이더의 경우에는 회수용 부이가 튀어나와 큰 선박에서도 안전하게 회수할 수 있도록 하는 시스템을 따로 부착할 수 있다.

글라이더를 준비하고 미션을 수행함에 있어서 무엇보다 중요한 것은 세 부분으로 역할을 구분하여 각 역할의 담당 책임자를 정하고 서로 원활하게 소통하는 것이라고 볼 수 있다. 그 중 하나는 Shore Operator라고 하며 일반적으로 글라이더가 물속에서 운용중일 때 육상에서 글라이더가 보내준 정보를 분석하고 이를 바탕으로 계획한 미션을 완수하기 위해 글라이더에 추가 명령을 내리는 역할을 담당한다. 우즈홀 연구소에서는 글라이더 운영 경험을 갖고 있는 해양학자 (PI)가 일반적으로 글라이더 전체 미션을 계획하고, Shore Operator를 담당한다. 따라서 PI가 글라이더 운영 전반에 대해 최종 결정을 내리고 글라이더 미션의 시작과 끝을 결정하는 역할을 해야 하므로 Shore Operator를 담당하는 것이 타당하다. 또한 글라이더에서 보내준 기술자료 및 과학자료를 판독하여 글라이더 오작동 여부를 판단할 수 있는 경험을 갖추고 있어야 하기 때문에 운영 경험자를 이 역할에 배정하여야 한다. 두 번째는 Lab. Engineer로 글라이더를 준비하고 시험하며 글라이더 회수 후 검사 및 자료 추출을 담당한다. 특히 중요한 부분은 글라이더 준비 과정인데 한 번의 미션을 위해서 필요한 준비과정은 숙련된 사람이라고 하더라도 7-10일은 소요된다. 이 준비 과정은 글라이더 내의 전자장비 검사 및 부력 엔진 검사, 나침반 검사, 통신 상태 점검 등 많은 내용을 포함하고 있다. PI는 전문성을 갖춘 Engineer가 철저하게 프로토콜에 입각하여 준비과정에 집중할 수 있도록 도와주고, 준비 과정을 단계적으로 모니터링하여 재확인하는 역할을 수행하여야 한다. 마지막은 Field Operator로 바다에서 관측한 경험이 있는 해양학자가 맡게 된다. 바다에서 운용하는 글라이더 미션은 많은 경우 다른 관측과 병행하여 진행될 수 밖에 없다. 따라서 글라이더 투하와 회수에 대한 책임을 지고 공동관측을 수행하는 다른 팀과의 조율을 하는 중요한 역할을 담당하는 사람이 필요하다. 바다에서 이루어지는 관측은 때때로 예상치 못한 문제에 직면할 수 있는데, 이 때 Shore Operator와 즉각적인 소통이 어려운 경우가 대부분이기 때문에 시기 적절하게 글라이더 미션에 대한 결정을 내리는 책임을 가지고 있다. 프로젝트의 성격에 따라 필요한 경우 PI가 Field Operator를 맡는 경우도 많이 있다.

여기서 중요한 점은 세 부분의 역할을 맡은 사람들 사

이에 원활하고 긴밀한 소통이 이루어져야 한다는 것이다. 어느 한 부분이 제대로 진행되지 않으면 계획한 미션을 완수할 수 없거나 극단적인 경우에 글라이더 분실로 이어질 수 있다. 난류 측정 글라이더를 개발하면서 여러 번의 실험 중 소통의 문제로 어려움을 겪었던 예를 간단하게 소개하고자 한다. 초반 3차례 연안에서 진행되었던 실험은 우즈홀 해양연구소의 글라이더 전문가인 브렉 오웬즈 (Breck Owens) 박사가 Shore Operator를 맡아 주었고 저자는 Field Operator를 맡아 Lab. Engineer와 함께 글라이더 투하 및 회수를 담당하였다. 이 때는 참여한 모든 인원이 글라이더에 대해 잘 이해하고 있으며 실험의 목적과 내용을 모두 숙지하고 있는 상태였기 때문에 계획한 실험은 완벽하게 끝났다. 나머지 4차례 실험에서는 저자가 Shore Operator를 맡고 다른 선상 실험을 담당하는 다른 과학자에게 Field Operator를 부탁하였다. 특히 남대서양에서 글라이더를 투하하는 실험의 경우 켈트 폴진(Kurt Polzin) 박사(남대서양 난류 관측과제의 공동 PI였다)에게 Field Operator를 부탁하였는데, 글라이더 자체에 대한 이해 부족과 전체 미션에 대해 자세한 소통이 이루어지지 않아 4개의 계획된 정점 관측 중 하나는 실행하지 못하기도 하였다. Lab. Engineer와의 소통 실패는 더욱 큰 문제를 불러 일으킨다. 2012년 8월 버뮤다 섬 주변에서 계획되어 있었던 글라이더 실험에서 발생한 일이다. 이 때는 Shore Operator를 저자가 맡고 있었으나, 한국에 출장을 와 있었던 관계로 Engineer가 글라이더를 준비하는 과정에 대해 직접 점검하고 확인하지 못하였다. 그동안 여러차례 실험을 같이 진행했었기 때문에 복잡한 준비과정이지만, 무리없이 진행할 수 있을 것으로 오산했던 것이 문제였다. 이러한 이유로 글라이더 준비 일정에 크고 작은 차질이 발생했으며, 실제 버뮤다에 글라이더를 투하하였을 때 글라이더가 오작동을 일으켜 인공위성과 통신에 실패하게 되었다. 글라이더에 문제가 생겼을 시의 프로토콜에 따라 조치를 취하였으나 결국 분실하고 말았다. Fig. 8은 이 당시 분실한 글라이더를 지나가는 요트에서 누군가 촬영한 사진이 버뮤다 지역 신문에 게재된 것이다. 이렇게 소통의 실패로 인해 글라이더 준비과정에 대한 검토가 이루어지지 않으면, 바로 글라이더 분실로 이어질 수 있다는 것을 배울 수 있었다. 개발 중에 있던 글라이더는 분실했으나, 다행히도 글라이더 실험에 들어둔 보험 덕분에 큰 재정적 손실을 발생하지 않았다. 보험은 글라이더 운영에 있어서 중요한 부분 중에 하나이다. 그러나, 보험회사와 글라이더 운영팀과의 신뢰가 쌓이기 전까지는 보험을 들 수가 없거나 보험 비용이 매우 높게 산정될 것이다. 일시적으로 외국 보험 회사를 활용하고, 해양 기기 활용 실험의 안정성을 점진적으로 높여 해양 실험을 지원하는 보험 회사를 유치하고자 하는 노력이 장기적으로 필요하다.

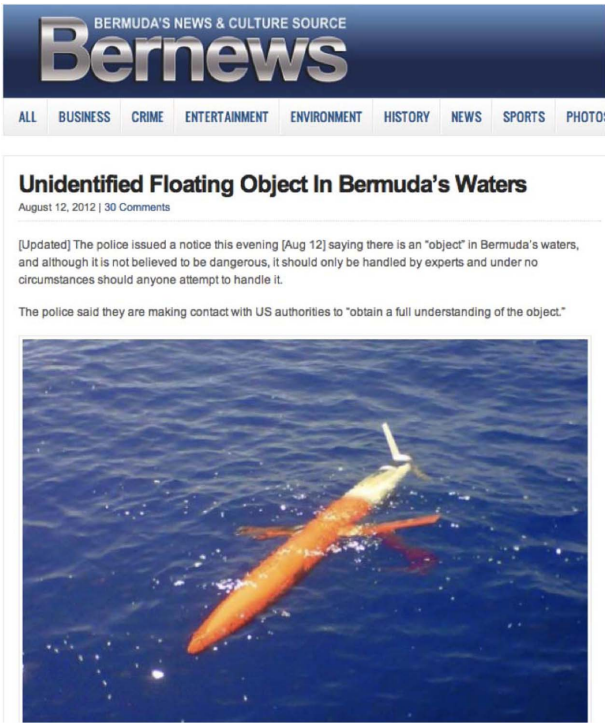


Fig. 8. The glider picture published in a Bermuda local news, under the title, “Unidentified Floating Object”. The spray glider was lost during a test near Bermuda. A reason of its malfunctioning is still unclear. A person on a yacht accidentally found the glider and took a picture 10 hour after our team officially determined its lost. Glider operation requires close communications among teammates and extensive preparations

6. 한국 연근해에서의 글라이더 적용 가능성

한국 연근해에서 글라이더를 활용하기 위해서는 먼저 글라이더의 역할을 분명히 하여야 할 것이다. 무엇을 관측할 것인지, 복잡한 센서를 사용하여 관측할 것인지, 정기적으로 관측을 수행할 것인지, 관측 해역은 어디인지 등에 따라서 글라이더에 필요한 부품들이 달라지고, 알고리즘을 변경해야 하며, 심지어는 글라이더 자체를 목적에 맞게 선택해야 하기 때문이다. 앞서서 언급했던 바와 같이 스프레이 글라이더와 씨글라이더는 해저 지형을 고려할 필요가 없고 급격한 수직 운동이 발생하지 않는 그리고 1000 m 이상의 심층까지 내려갈 수 있는 대양에서 운용하도록 개발되었기 때문에 사용하는 부력 엔진이 천해용과는 다르다. 심해용 글라이더 부력 엔진은 최대로 바꿀 수 있는 부피 정도가 900 cc로 천해용 엔진에 비해 2배 정도 크지만, 전력 소모를 줄이고 오랫동안 안정적으로 관측을 수행하도록 하기 위해서 부력 조절량은 125 g으로 천해용에 비해 반 정도 밖에 되지 않는다. 즉 천해용은 해양의

급격한 수직 운동에 유연하게 반응하기 위해서 빠른 부력 조절이 필요하기 때문에 한 번에 조절 가능한 부력이 심해용에 비해 큰 반면에 전력 소모량도 크다. 따라서 동해 연안과 같이 준관성주기 내부파나 내부 조석과 등에 의해 만들어지는 비선형 내부파가(Kim et al. 2001; Nam and Park 2008) 밀도층의 급격한 수직운동을 발생시키는 해역에서는 천해용 글라이더를 활용하는 것이 좋다. 슬로컴 글라이더도 천해용, 심해용 부력엔진을 따로 만들어서 엔진만 교체하면 심해에서도 쓸 수 있도록 하였으나 운용기간이 비교적 짧기 때문에, 동해 외해에서 글라이더를 이용하기 위해서는 12-18개월 동안 연속 관측의 안정성이 높은 심해용 글라이더(씨글라이더 혹은 스프레이 글라이더)를 사용하는 것이 장기 관측에 유리하다.

앞서서 지적한 바와 같이 글라이더 실험을 계획함에 있어서 반드시 염두하여야 하는 것이 해저지형, 다른 선박 항로, 배경 해류, 어로 활동 등이 있는데, 이 중 동해 연근해에서 가장 심각하게 고려해야 하는 것은 어떻게 선박 항로를 피해서 글라이더를 운용하느냐 하는 것이다. 대부분의 동해 연근해는 어업활동이 이루어져 많은 어선이 돌아다니고 있고, 울릉도-독도 여객선, 해군/해경 순찰 감시선, 컨테이너선 등 다양한 선박이 운용되어 있기 때문에 선박과의 충돌 가능성을 낮추는 것이 가장 큰 숙제로 판단된다. 선박과의 충돌 문제를 피하는 방법은 글라이더가 해표면에 도달하는 횡수를 줄이는 다중 잠항법을 적용하는 것이 상대적으로 수월하게 채택할 수 있는 대안이다. 이 다중 잠항법은 글라이더가 잠항한 뒤 다시 표층으로 올라오지 않고 얇은 수심까지만 올라온 다음에 다시 잠항하는 것을 반복하도록 하는 방법으로 Shore Operator가 글라이더 투하 후 인공위성을 통해 내린 명령으로 실행할 수 있다. 글라이더는 표층에 올라왔을 때만 위치를 얻고 명령을 하달 받을 수 있기 때문에 배경 해류가 강하여 글라이더의 비행 방향을 자주 수정해 주어야 하는 경우나, 시험 운영과 같이 글라이더 작동에 확신이 없는 경우에는 응급 상황 발생 시 빠른 조치를 취하기 어려운 다중 잠항법은 피해야 한다.

동해처럼 운용되는 선박이 많은 해역에서 장기적으로 특정 루트를 반복 관측하고자 할 때는 해표면으로 노출되는 횡수를 극단적으로 낮추어 안정성을 확보하는 것이 필요하다. 대안으로 제시될 수 있는 방법은 음파를 활용하여 글라이더의 위치를 추적하는 것이다. 해양학에서 음파를 이용하여 위치를 추적하는 기술은 그 역사가 40년 이상 되었다. SOFAR(Short for Sound Fixing and Ranging channel) 채널을 이용하여 계류한 음원에서 나오는 저주파 소리를 들을 수 있는 플로트를 바다 심층에 투하하여 음파를 이용해 위치를 추적하게 되고 이렇게 축적된 플로트의 움직임은 바로 심층 해류의 움직임을 나타내게 된다. 그 대

표적인 기기가 RAFOS라고 하는 플로트이다. 앞서 소개했던 아르고 플로트는 인공위성을 통해 위치가 추적되기 때문에 글라이더처럼 항상 일정시간 표층에 머물러야 한다. 그러나 RAFOS 플로트는 자신의 위치를 음파를 통해 얻기 때문에 해표면에 올라올 필요가 없다. 관측이 완전히 끝난 후 표층으로 올라와 인공위성에 자료를 전송하고 그대로 소실된다. 이러한 개념은 이미 최근에 글라이더에 적용된 사례가 있다. 워싱턴 대학의 크래그 리 (Craig Lee) 박사가 이끄는 글라이더팀은 해표면이 얼음으로 덮혀 있어 인공위성으로 위치 추적이 되지 않는 북극에서 음파를 활용한 추적 시스템을 씨글라이더에 장착하여 성공적으로 미션을 수행한 바가 있다. 마찬가지로 동해에서 글라이더를 운영하기 위해서는 음파를 이용하여 위치를 추적함으로써 표층에 글라이더가 머무는 시간을 최소한으로 줄이고 안정적으로 정해진 루트를 따라 관측을 수행하도록 하는 방법을 채택하는 것이 이상적이라고 생각한다.

글라이더 운용은 다른 해양 관측 기기를 운용할 때 보다 많은 노력이 들어가고 전문성을 필요로 하기 때문에 반드시 글라이더 운용팀이 구축되어야 한다. 적어도 3명으로 구성된 전담팀이 각자의 역할에 책임을 지고 유기적으로 협력하여 미션을 수행하여야 성공 가능성을 높일 수 있기 때문이다. 또 하나 필요한 것은 수심이 깊은 해역의 접근 용이성이다. 글라이더가 표층에서 잠항하고 난 다음 일정 수심까지 내려가야 최적의 비행 성능이 얻어질 수 있다. 따라서 30-40 m의 얇은 수심에서는 비행 성능 시험을 완벽하게 수행하기 어렵기 때문에 비교적 폐그물이나 어로활동이 적은 수심이 깊은 해역의 접근성이 용이한 지역에 글라이더 팀을 구성하는 것이 유리하다. 마지막으로 글라이더 구매와 관련된 부분을 지적하면, 글라이더를 완제품 형태로 구매할 때 대략 원가의 2배 가량을 요구한다. 저자가 우즈홀 연구소의 글라이더 팀에 합류하여 연구를 수행했던 3년동안 단 한번도 글라이더를 완제품 형태로 구매한 적이 없다. 글라이더의 몸체는 업체를 통해 필요한 부분만 제작하고, 내부 전자 부품이나 중요한 부력 엔진 등은 부품만 구매하였다. 글라이더 미션을 시작하기 전에 준비 단계에서 사실상 글라이더는 완전히 분해했다가 다시 조립하기 때문에 사용기간이 지났거나 고장이 난 부분은 그때그때 부품만 교환할 수 있어, 훨씬 저렴한 비용으로 글라이더 한 대를 마련할 수 있다. 한국에서 글라이더를 본격적으로 활용한다면, 단순 부품들은 자체 제작하고 중요 부품들만 따로 구매하는 루트를 확보하여야 경쟁력이 있을 것으로 생각한다.

7. 최근 글라이더 운용 현황 및 미래의 글라이더

현재 글라이더는 전 세계 바다에서 다양한 종류의 관측

에 활용되고 있다. 우즈홀 해양연구소에서는 Coastal Pioneer array라는 Ocean Observatories Initiatives(OOI) 프로젝트의 일환으로 종합 연안 관측망을 구축하고 있으며 이 계획에서 6기 이상의 글라이더가 투입되어 정기 관측을 수행할 예정이다. OOI는 해양 관측 연구를 위한 인프라 구축사업으로 2011년 2천만 달러의 예산이 편성되었으며 2012년 요구 예산이 1억 달러에 달하는 미국 해양과학 역사상 단일 과제 중 가장 큰 규모의 사업이다. 이 인프라 구축사업은 10년간 준비 작업을 진행하였으며 향후 20-30년 동안 지속 유지될 사업으로 미국 과학 재단에서 지원하고 있다(www.oceanobservatories.org). 유럽에서도 큰 규모의 글라이더 관측 연합을 구성하여 글라이더를 활용한 지중해 정기 관측 뿐 아니라 대서양 주변 국가들과의 공동 연구를 진행하고 있으며, 글라이더를 활용한 자료가 필요한 유저들에게 해당 관측을 수행해주고 획득한 자료를 서비스하는 조직을 만들었다(Everyone's Gliding Observatories 2013). 이 유럽 글라이더 관측 연합 (Everyone's Gliding Observatories)은 2004년 이후로 200여 회의 글라이더 미션을 여러 해역에서 수행하였고 거의 모든 미션을 성공적으로 완수하였다(Testor et al. 2009). 미국 남부 캘리포니아 연안에는 스크립스 해양연구소의 글라이더 팀이 운용하는 연안관측 시스템(Southern California Coastal Ocean Observing System)이 있어 정기적으로 특정 루트를 지속관측하고 있다(Todd et al. 2009). 그리고 워싱턴 대학의 응용물리실험실의 Crag Lee 박사가 운영하는 글라이더 팀이 있으며, 남중국해에서 대서양, 북극지역에 이르는 다양한 해역에서의 글라이더 관측 연구를 수행하고 있다. 남미시시피 대학과 러터스 대학에서는 남극지역에 생물량을 측정하는 광학센서를 탑재한 글라이더를 투입하여 남극 해역에서 식물 플랑크톤 번성의 요인을 찾는 연구를 진행하고 있다. 이 외에도 글라이더를 이용하여 관측에 활용한 예는 매우 많은데 중요한 점은 모든 글라이더 운용 기관들이 전문 엔지니어와 글라이더 전담 해양학자 들로 구성된 운영팀이 구성되어 있다는 것이며 특히 큰 규모의 글라이더 팀은 정기 관측 프로그램에 참여하면서 동시에 여러 나라의 다양한 연구에 참여하여 글라이더를 운용한다는 점이 주목할 만하다. 우리나라에서도 한국해양과학기술원에서 3기의 글라이더를 도입하여 동해에서 시험한(박 등 2012) 예가 있어, 국내에서 해군을 비롯한 연구기관에서 글라이더에 대한 관심이 높아지고 있음을 알 수 있고, 앞으로 이를 활용하고자하는 인구가 늘어날 것으로 기대하고 있다. 그러나 글라이더를 일반적인 해양 센서나 Argo 플로트 유사 기기로 생각하여 주먹구구식으로 접근하는 방식을 자제하고, 전문가들과의 긴밀한 협력을 통해 글라이더 운용 경험을 체계적이고 점진적인 노력을 통해 축적해야 이 가능성 높은 미래의 해

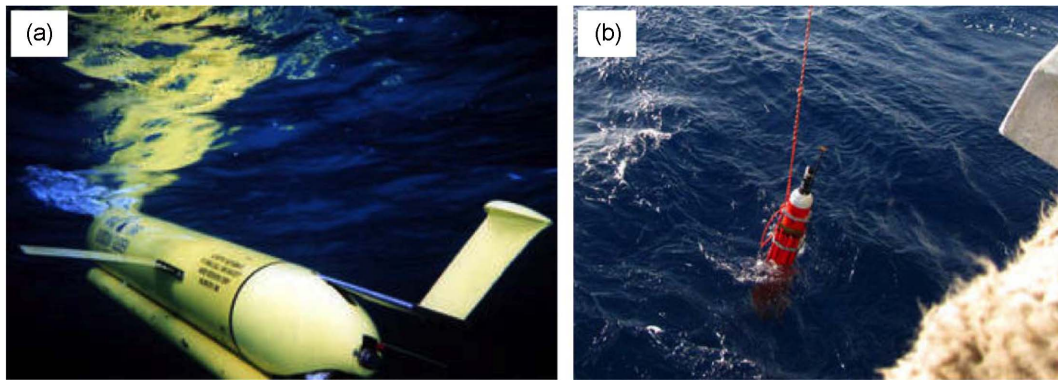


Fig. 9. Development of thermal energy harvesting system (a) Slocum Thermal glider operating buoyancy engine using ocean thermal energy, which was developed by Webb research co. It has two pipes containing wax-type material with a low melting point. (b) SOLO float equipped with thermal energy harvesting system developed by Jet Propulsion Lab., USA. The system called as SOLO-TREC have tens of pipes filled with special wax changing its volume with temperature and producing electricity. The SOLO-TREC carries rechargeable battery and operates semi-permanently

양 관측 기기를 제대로 활용할 수 있다는 점을 다시 한 번 강조하고 싶다.

미래의 글라이더는 무인 멀티 플랫폼으로 발전하게 될 것이다. 앞서 살펴본 것처럼 글라이더에는 다양한 센서가 탑재될 수 있고, 이를 활용한 종합 관측을 수행할 수 있게 될 것으로 본다. 여기서 당면한 과제는 역시 많은 센서를 운용하면서 장기간 관측하기 위해 필요한 에너지를 확보하는 것이다. WRC 사는 일찍부터 해양의 온도차를 활용하여 에너지원으로 활용하기 위한 글라이더 개발을 진행해 왔다(Webb et al. 2001). 압력이 높고 수온이 낮은 심층에서는 고체가 되어 부피가 팽창하고 압력이 낮고 수온이 높은 표층에서는 액체가 되는 물질을 개발하여 부력 엔진을 돌리는데 활용하였다. 그러나 슬로컴 써멀(Slocum Thermal)이라고 하는 이 글라이더(Fig. 9a)는 2000년대 초반에 개발되었으나 10여년이 지난 지금까지 안정성이 확보되지 못하였다. 반면에, 미국 제트 추진 연구소(Jet Propulsion Lab.)에서는 WRC에서 개발한 녹는점이 낮은 물질을 독자적으로 찾아내어 이로부터 전력을 생산하는 시스템을 개발하였다. 2005년부터 개발에 착수하여 2009년에 아르고 플로트(SOLO 기종)에 시스템을 장착하여 성공적으로 실험을 완수하였다(Fig. 9b). 일반적으로 아르고 플로트는 250여 번의 수직 구조 관측을 수행하면 전력을 모두 소진하게 되는데, 바다의 온도차를 이용하여 전력을 생산하는 시스템을 탑재한 플로트는 2만번의 관측을 수행할 만큼 효율적으로 작동하였다. 현재는 수년에 걸쳐 이 플로트를 운용함으로써 이 시스템의 내구도를 시험하는 중이다.

글라이더는 많은 장점을 가진 최첨단 무인 관측 기기가

다. 바다 속을 스스로 이동하면서 미션을 수행한다는 것은 다른 해양 관측기기가 가지지 못한 중요한 장점이지만, 그만큼 일반적인 해양 관측 기기보다 운영에 많은 주의가 필요하다. 아르고 플로트처럼 단순한 기기도 초기에 도입하여 운용할 때 얻어진 자료에 많은 문제점이 있었으며, 심지어는 투하 기술의 부족으로 일본에서는 수 십기의 플로트를 한꺼번에 소실하기도 하였다. 그러나 최근에는 약간의 교육만 받은 사람도 손쉽게 플로트를 투하할 수 있고 자료를 얻을 수 있게 되었다. 글라이더도 마찬가지로 기술이 발달함에 따라서 글라이더를 운영할 때 발생하는 문제들이 빠르게 줄어들고 있다. 미래에는 아르고 플로트처럼 손쉽게 활용할 수 있는 해양 관측 기기가 될 가능성이 높다. 실제로 우리나라 주변국인 중국, 일본 등도 이미 독자적인 글라이더 개발을 진행하고 있다. 그러나 소프트웨어 격에 해당하는 운용기술이 없는 하드웨어 개발은 명백히 한계에 부딪힐 수 밖에 없다. 특히 글라이더는 군사용으로 활용될 수 있다는 이유로 중요 글라이더 운용 기술은 거의 공유되지 않는다(실제로 미국 우즈홀 연구소에서는 글라이더 운용 매뉴얼이 있으나 외부로의 유출을 엄격히 금하고 있으며, 난류 글라이더는 군사적으로 활용 가능한 기술이기 때문에 관련 전문가와의 교류를 금하고 있다). 따라서 우리나라 주변에서 글라이더를 제대로 활용하기 위해서는 각 분야의 전문가들이 연합하여 긴밀한 협조 속에 운영될 수 있도록 글라이더 전담팀이 구성되어야 한다. 이러한 인력과 협력 체제를 바탕으로 글라이더를 활용하고 그 운영 경험을 축적해야 미래 글라이더를 우리나라 주변 해역에 맞게 최적화하고 나아가 동아시아 전체로 글라이더 활용을 확대할 수 있는 역량을 키울 수 있을 것으로 생각한다.

사 사

본 논문은 2012학년도 경북대학교 신임교수정착연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Baumgartner MF, Fratantoni DM (2008) Diel periodicity in both sei whale vocalization rates and the vertical migration of their copepod prey observed from ocean gliders. *Limnol Oceanogr* **53**(5):2197-2209
- Chen B, Pompili D (2012) Team formation and steering algorithms for underwater gliders using acoustic communications. *Comput Commun* **25**:1017-1028
- Davis RE, Eriksen CC, Jones CP (2002) Autonomous Buoyancy-driven underwater gliders. In: Griffiths G (ed) *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, Taylor and Francis, London, pp 37-58
- Eriksen CC, Osse TJ, Light RD, Wen T, Lehman TW, Sabin PL, Ballard JW, Chiodi AM (2001) Seaglider: a long range autonomous underwater vehicle for oceanographic research. *IEEE J Oceanic Eng* **26**(4):424-436
- Everyone's Gliding Observatories (2013) Everyone's Gliding Observatories <http://www.ego-network.org> Accessed 4 Jun 2013
- Fiorelli E, Bhatta P, Leonard NE, Shulman I (2003) Adaptive sampling using feedback control of an Autonomous Underwater Glider Fleet. In: *Proceedings of 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Aug 2003
- Kim HR, Ahn S, Kim K (2001) Observations of highly nonlinear solitons generated by near-inertial internal waves off the east of Korea. *Geophys Res Lett* **28**(16):3191-3194
- Kinsey JC, Eustice RM, Whitcomb LL (2006) A survey of underwater vehicle navigation: recent advances and new challenges. In: *Proceedings of the IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft*, September 2006, pp 1-12
- Klinck H, Mellinger DK, Roch MA, Klinck K, Bogue NM, Luby JC, Jump WA, Pyle JM, Shilling GB, Litchendorf T, Wood AS (2011) Passive-acoustic monitoring of odontocetes using a Seaglider: first results of a field test in Hawaiian waters. *J Acoust Soc Am* **129**(4):2536
- Nam SH, Park JH (2008) Semidiurnal internal tides off the east coast of Korea inferred from synthetic aperture radar images. *Geophys Res Lett* **35**(5):L05602. doi:10.1029/2007GL032536
- Rudnick DL, Davis RE, Eriksen CC, Fratantoni DM, Perry MJ (2004) Underwater gliders for ocean research. *Mar Technol Soc J* **38**(1):48-59
- Sherman J, Dave RE, Owens WB, Valdes J (2001) The autonomous underwater glider Spray. *IEEE J Oceanic Eng* **26**(4):437-446
- Stommel H (1989) The slocum mission. *Oceanography* **2**(1): 22-25
- Testor P, Meyers G, Pattiaratchi C, Bachmayer R, Hayes D, Pouliquen S, Petit de la Villeon L, Carval T, Ganachaud A, Gourdeau L, Mortier L, Claustre H, Taillandier V, Lherminier P, Terre T, Visbeck M, Krahman G, Karstensen J, Alvarez A, Rixen M, Poulain PM, Osterhus S, Tintor J, Ruiz S, Garau B, Smeed D, Griffiths G, Merckelbach L, Sherwin T, Schmid C, Barth JA, Schofield O, Glenn S, Kohut J, Perry MJ, Eriksen C, Send U, Davis R, Rudnick D, Sherman J, Jones C, Webb D, Lee C, Owens B, Fratantoni D (2010) Gliders as a component of future observing systems. In: Hall J, Harrison DE, Stammer D (eds) *Proceedings of the OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conference (Vol. 2)*, Venice, Italy, 21-25 September 2009
- Teledyne Webb Research (2013) Slocum Glider <http://www.webbresearch.com/slocumglider.aspx> Accessed 4 Jun 2013
- Todd RE, Rudnick DL, Davis RE (2009) Monitoring the greater San Pedro Bay region using autonomous underwater gliders during fall of 2006. *J Geophys Res* **114**(C6): C06001. doi:10.1029/2008JC005086
- Webb DC, Simonetti PJ, Jones CP (2001) SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy. *IEEE J Oceanic Eng* **26**(4):447-452

Received Apr. 1, 2013

Revised May 13, 2013

Accepted May 20, 2013