Registration No. 75-6470000-000703-01

경북대학교
울릉도·독도연구소

독도의 자연이야기

기 상 / 해 류

문화재청 경상북도

독도의 **자연**이야기 | **기상/해류**

인쇄일 2017년 6월 10일
발행일 2017년 6월 15일
발행인 경상북도
경상북도 안동시 풍천면 도청대로 455 경상북도청
T 054-880-2114 | **F** 054-880-4999 | www.gb.go.kr
기획 경북대학교 울릉도·독도 연구소 | **T** 053-950-7874 | www.dokdoknu.com
지은이 김종석, 박종진
편집디자인 한림커뮤니케이션 | **T** 053-425-6667

ISBN 978-89-965641-8-8
정부간행물 발간 등록번호 75-6470000-000703-01

독도의 자연이야기 해류

독도 주변 해류 변동 조사

〈그림 1〉 독도로 향하는 수중글라이더

독도의 해양

독도가 위치한 동해는 태양으로부터 열이 공급되는 적도 해역으로부터 에너지를 북쪽으로 이동시키는 길목에 해당하는 중위도에 위치하고 있으며, 아시아 대륙과 태평양 사이에서 일어나는 물질 교환의 통로역할을 한다.
동시에 동아시아 몬순의 영향으로 상층에서는 계절적으로 뚜렷하게 다른 해양학적 특징을 가지고 있다. 또한 해류의 시공간적 변화가 심해 사행과 소용돌이를 수반하기도 한다.
이러한 특징으로 인해 독도의 해류는 위치적 특성상 단일형태로 특정지어지지 않고 난류와 한류가 공존하는 상태로 이루어져 있다.

〈그림 2〉 하늘에서 본 독도 사진

독도의 기후는 대한해협에서 들어오는 난류의 영향과 동해북부지역에서 내려오는 차가운 소용돌이의 영향을 받아 변화할 것으로 기대된다. 특히 대한해협으로부터 기원하는 동한난류는 자주 변화하여 이에 따른 독도 및 주변 생물상의 적응과정도 달라질 수 있다. 이를 지속적이며 자동적으로 모니터링 하는 것이 필수적이다.
그러나 독도 주변은 1년의 입도가능 일수가 50일 이하로 기상상태가 좋지 않아 선박을 활용한 관측이 어려운 해역이다.

이를 해결하기 위해서 무인로봇 관측기를 활용한 자동 해양수중환경관측 기술개발이 필요하다.
직접적인 추진 장치 없이 저전력으로 장기간동안 장거리 이동을 하며 바닷속을 탐사하는 무인장비로 최적화된 수중글라이더가 이를 가능케 한다.
특히 수중글라이더는 수심의 변화가 급격하며 투명도가 높은 동해 해역에서 해류 정기 모니터링을 수행하는데 적합한 장비라 할 수 있다.

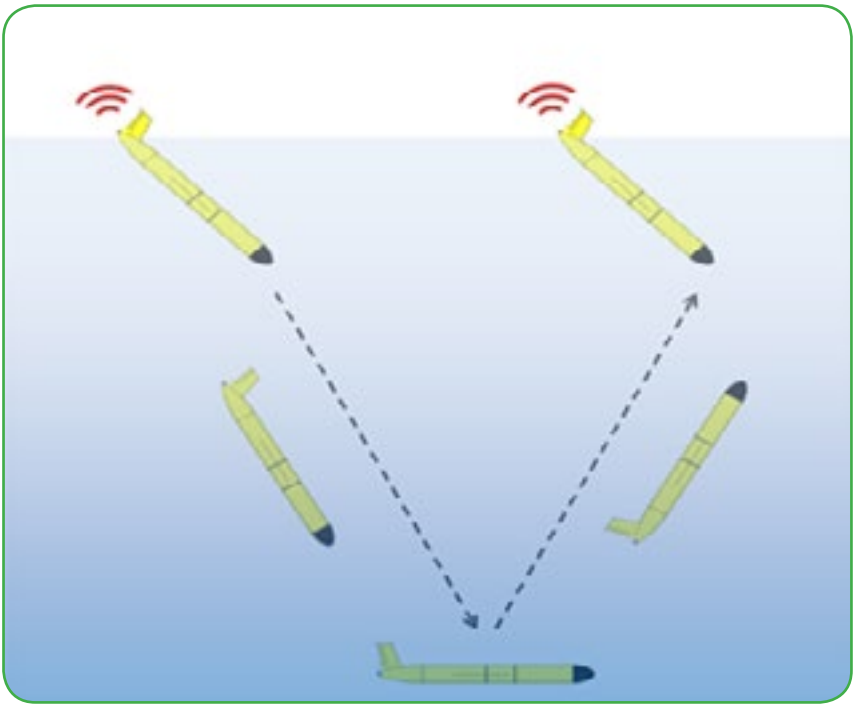
〈그림 3〉 기존 해양 관측의 한계

물 속을 날아다니는 해양관측로봇 : 수중글라이더

수중글라이더는 바닷속 얕은 곳과 깊은 곳을 오가면서 날개로 활강하여 원하는 지점으로 이동하는 해양관측 로봇이다.
프로펠러로 추진력을 얻는 기존의 무인잠수정에 비해, 별개의 추진 장치 없이 부력을 제어하여 움직이기 때문에 수개월에서 수년 동안 넓은 해역을 거의 실시간으로 관측하는 것이 가능하다.

일반적으로 해양관측에 많이 활용되는 수중글라이더는 수심 1000m까지 내려갈 수 있으며, 한 번 내려갔다가 올라오는 데까지 걸리는 시간은 6시간정도이고 수평적으로 이동하는 거리는 5km 정도이다. 수평이동속도는 대략 35cm/s로 포항에서 울릉도까지 이동하는데 이론적으로 7~10일 정도가 소요된다. 설정을 통해 작동시간은 줄어들지만 일정범위 내에서 이동속도를 증가시킬 수도 있다.

수중글라이더가 움직이는 힘, 부력



〈그림 4〉 수중글라이더의 이동 모식도

일반적으로 프로펠러로 추진력을 얻는 다른 수중 무인기는 프로펠러가 돌지 않으면 움직이지 않으며, 프로펠러가 물의 저항을 받으며 작동하므로 상대적으로 에너지 소모가 클 수밖에 없다.

그러나 선채내로 해수 유출입을 통해 부력을 조정하여 침강하거나 상승하면서 활강하며 이동하는 수중글라이더의 동작은 몸체 내에 해수를 끌어들임을 통해 물보다 무거워져 가라앉으면서 날개를 이용하여 활강할 수 있도록 함으로써 마치 행글라이더처럼 방향을 바꿀 수 있다. 활강하는 동안은 작동부가 물의 저항을 받지 않고 동력의 소모 없이 오랜 시간 수중에서 활동할 수 있다.

수중글라이더는 글라이더 항공기만큼 빠르게 움직일 수는 없지만, 글라이더 항공기는

동력을 갖는 비행기가 글라이더를 일정 수준 높이로 올려주어야 하지만, 수중글라이더는 수중에서 침강을 반복하며 날개로 활강해 움직인다는 점에서 항공기 글라이더보다 실질적으로 유용하다.

단순히 밀도만 조정하면 중력과 부력의 힘을 활용할 수 있으므로 적은 에너지로 먼 거리를 이동할 수 있으며, 전기에너지만 있으면 되고 이산화탄소 배출이 전무하기 때문에 친환경적인 기기라 할 수 있다.

〈그림 5〉 수중글라이더의 원동력 : 부력

다양한 센서를 부착할 수 있는 수중글라이더는 한 번의 실험으로 수온, 염분, 수심, 해류속도, 엽록소, 용존 산소 등을 측정할 수 있다. 또한 하이브리드 형으로 사용이 가능하며 프로펠러를 장착하여 필요시 사용할 수 있다. 비행제어, 센서 제어 파트로 나누어져 있으며 2,100여 가지의 설정 값을 설정할 수 있다.

기존의 무인관측기기와 달리 수중글라이더는 장기간 운용이 가능한데, 한 예로 221일 간 자료를 수집하며 대서양을 횡단했던 실험사례가 있다.

울릉도–독도 수중글라이더 운용을 통한 독도 주변 해류 분석

수중글라이더 운용의 국내 최장거리(총 150km), 최장시간(191시간) 무인비행과 45시간 연속 정지 관측 제어에 성공한 성과를 통해 알아보는 독도 주변 해류

〈그림 6〉 최적의 실험해역으로 향하는 수중글라이더

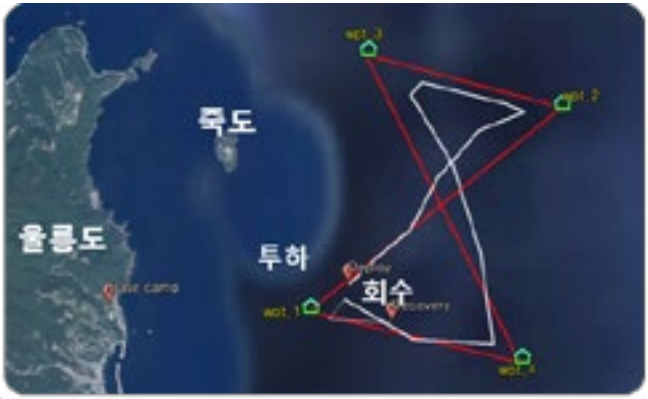
독도 주변해역에 대한 임무를 설계하여 수중글라이더를 통한 독도 주변 해류 및 물성환경을 모니터링을 바탕으로 독도 해류에 대해 분석하여 수중글라이더의 활용 가능성을 높일 수 있었다. 우선, 주요 임무를 수행하기 전에 수중글라이더 운용 능력을 테스트하기 위해서 Butterfly 경로 비행 실험을 수행하였으며 이후 울릉도에서 출발하여 독도 부근까지 이동한 후 다시 울릉도로 돌아오는 왕복 비행 실험을 수행하였다.

1) 최적화 임무설계

수중글라이더 운용에 방해가 될 수 있는 특징(선박현황, 어업현황, 강한 해류)을 고려하여 해당 피해가 가장 적은 수직/수평 경로를 파악하여 미션을 설계하는 기술로 수중글라이더 운용에서 중요한 기술이다.

대상해역의 공간 규모에 따라 환경특성 분석자료 결과를 반영하여 운용환경의 위험요소를 최소화하고 운용안정성 높은 경로를 선택해 경로를 설정한다.

수중글라이더의 운용목적에 적합하고 안전성을 보장하는 수평/수직경로를 설정하더라도 그 경로가 실제로 효율적인 경로인지 검증이 필요하다. 검증 시 사용되는 오차율은 결정된 경로를 따라 수회 반복 시뮬레이션 함으로써 얻어질 수 있으며, 조건을 만족하지 못하는 경우 일차적으로 수직경로를 재설정 보완할 수 있다.



- 총 항해 거리 : 17 km
- 총 항해 시간 : 25시간
- 잠항 수심 : 400 m

〈그림 7〉 Butterfly 경로로 임무 완료한 수중글라이더

Butterfly 경로 비행과 울릉도–독도 왕복 비행 임무 설계 시에도 다양한 요소를 고려하여 설계하였다.

Butterfly 경로 비행 임무 설계 시 실험해역인 울릉도와 독도를 오가는 주변의 정기여객선과 어선들의 경로 및 빈도, 배경해류속도 등의 다양한 상황을 고려하여 운용 안정성이 높은 최적의 경로로 울릉도 동편 죽도 부근의 경로를 수평경로로 설정하였다. 운용안정도 기반 경로 프로시저를 활용하여 최대 잠항 수심은 400m, 다양한 형태로 움직임을 확인할 수 있는 Butterfly 경로로 울릉도 동편 죽도 바깥쪽 해역을 최종 설정하였다.

2) 이동형 수중무인기를 활용한 울릉도–독도 실해역 실험

〈그림 8〉 임무 수행하는 수중글라이더

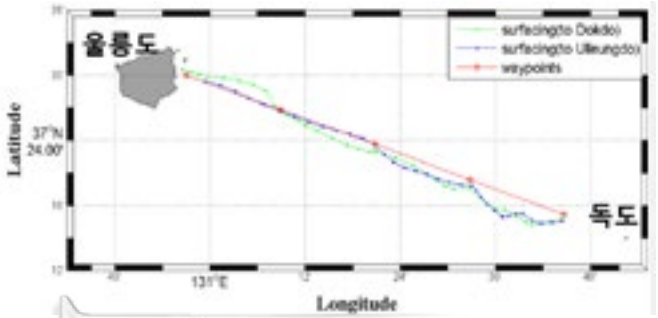
(1) 경로 이동 실험

운용안정도 기반으로 최적항로로 결정된 죽도 바깥쪽에서 Butterfly 형태로 임무를 수행하였다.
2016년 7월 3일에 투하하여 7월 4일에 회수하였으며 시간은 약 25시간 소요되었다.
Butterfly 경로 비행 실험에서 수중글라이더는 400m 단일잠항으로 비행하였으며 평균 수평이동속도가 약 0.23m/s로 나타났다.

〈그림 9〉 임무수행 후 복귀하는 수중글라이더

(2) 장거리 및 장기운용실험

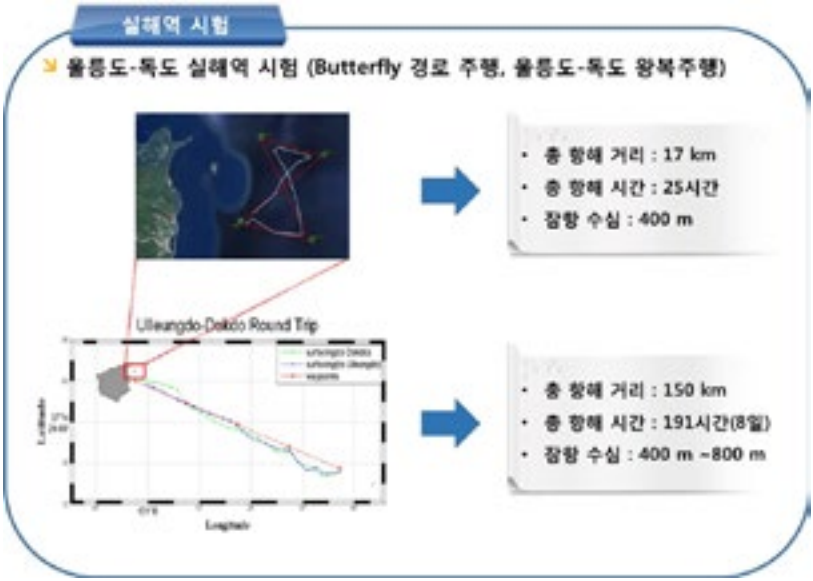
울릉도–독도 왕복 비행실험 경로는 독도방향으로 약 74km지점까지를 왕복 주행하도록 하였다.
추측항법기능을 활성화하여 진행방향 설정 시 해류를 고려하였으며, 강한 해류를 만나 목표궤적으로 조금씩 벗어나기 시작할 때에는 잠항수심과 잠항형태에 변화를 주어 해류의 영향을 적게 받는 결과를 얻었다.



- 총 항해 거리 : 150 km
- 총 항해 시간 : 191시간 (8일)
- 잠항 수심 : 400 m ~ 800 m

〈그림 10〉 울릉도–독도 간 왕복 임무를 성공한 수중글라이더

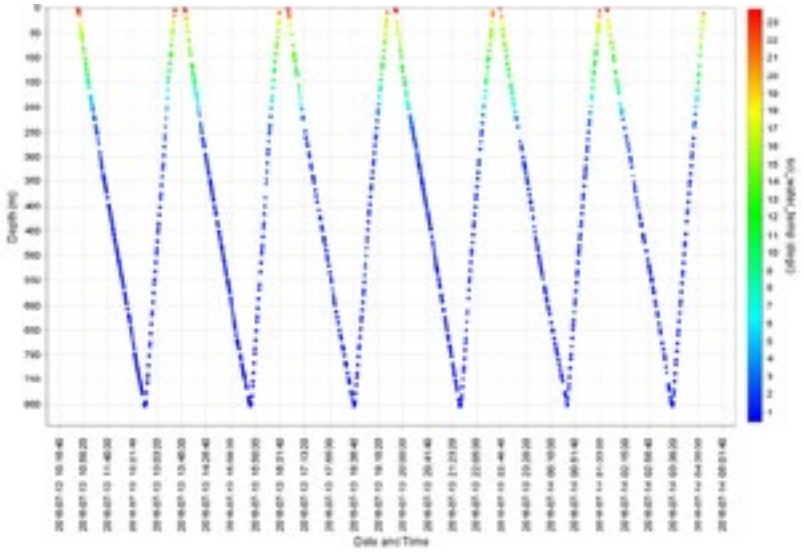
3) 수중글라이더를 활용한 관측 결과



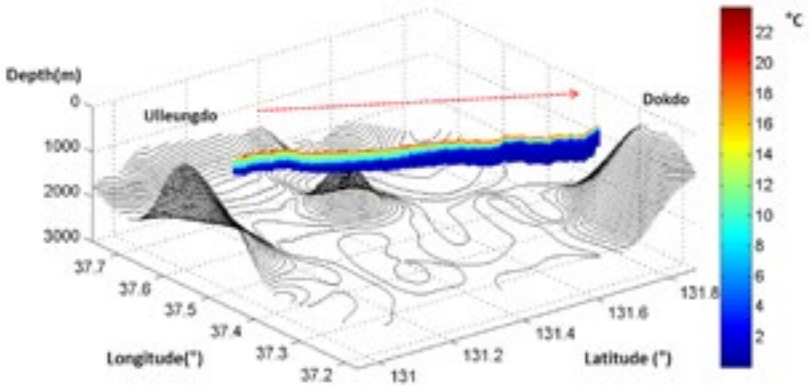
〈그림 11〉 울릉도–독도 실해역 시험 국내 최초 최장거리, 최장시간 성공

(1)환경자료 수집

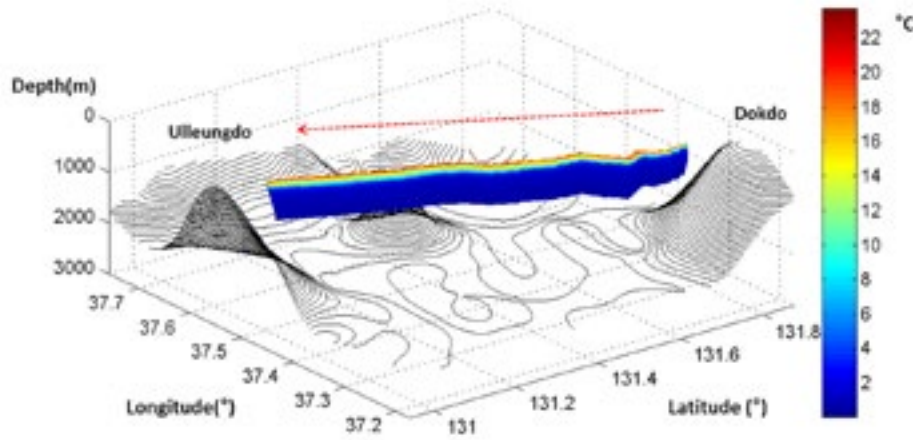
울릉도–독도 왕복실험 중 샘플링 주기는 초당 1회(1Hz)로 설정한 CTD로 수온 및 염분을 측정하였다.



〈그림 12〉 CTD로 측정한 수심별 수온 분포



〈그림 13〉 수중글라이더가 울릉도에서 독도로 이동하며 측정한 수온

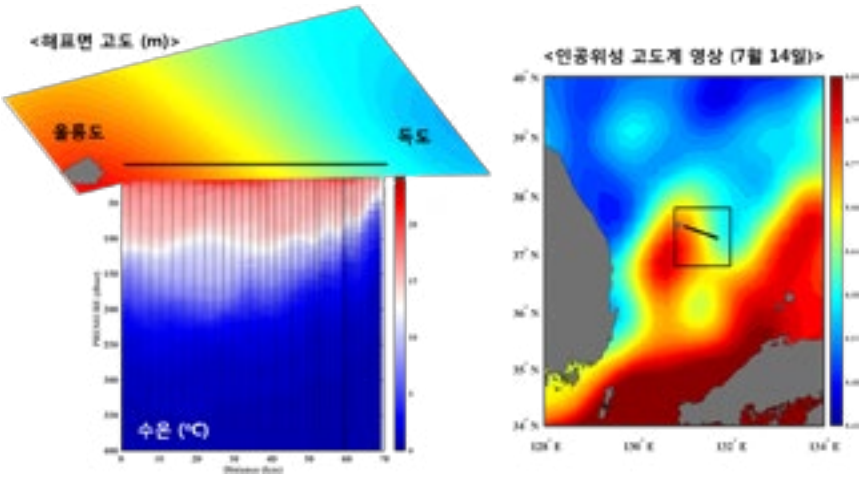


〈그림 14〉 수중글라이더가 독도에서 울릉도로 이동하며 측정한 수온

수온뿐만 아니라 염분자료도 측정하였으며 수중글라이더에 추가 센서를 장착할 경우 다양한 환경자료를 수집하고 분석할 수 있음을 확인하였다.

수중글라이더에서 얻어지는 관측 값들은 수중글라이더 이동 경로에 따라 톱날 모양으로 확보되므로 물리해양학적 공간규모를 고려하여 적합한 방법으로 격자화하여 연구자 혹은 일반인이 활용할 수 있도록 제공한다.

울릉도–독도 해역에서 수중글라이더가 측정한 수온자료를 격자화하여 도시한 그림을 보면 독도 방향으로 갈수록 차가운 물이 존재하는 뚜렷한 수온의 공간구조가 존재함을 알 수 있다. 인공위성에서 측정한 해수면 고도 자료와 같이 도시한 결과를 보면, 해수면 고도가 높은 해역을 가로질러 수중글라이더가 관측을 수행했음을 알 수 있다. 인공위성 자료에 타원 형태로 해수면이 언덕 모양으로 높게 나타난 해역이 바다의 소용돌이가 존재하는 해역이다. 특히 언덕 모양의 해수면 구조는 난수성 소용돌이로 따뜻한 물덩어리가 소용돌이 형태로 돌고 있는 현상이 존재함을 의미한다. 이 난수성 소용돌이는 울릉 에디(**Eddy**. 소용돌이)라는 이름을 가지고 있으며, 울릉도–독도 해역에 종종 나타나는 해류로 동해에 존재하는 해류들 중에 가장 빠른 속도로 회전하는 해류로 볼 수 있다.



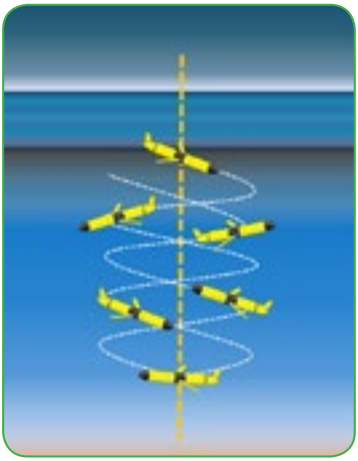
〈그림 15〉 수중글라이더로 관측한 울릉 에디(Eddy, 소용돌이)

수중글라이더가 이렇게 빠른 해류를 가로질러 관측을 수행했다는 사실은 동해 어떤 해역에서도 효과적으로 운용할 수 있음을 단적으로 보여주는 것이다.

(2) 위치유지실험(Virtual mooring)

위치유지실험이란 설정된 특정해역에서 벗어나지 않고 정지관측을 수행하는 실험으로써 일반적으로 특정 위치의 환경데이터를 수집하기 위한 목적으로 수행된다. 수중글라이더가 특정 위치를 유지하면서 지속적으로 관측하도록 제어하는 기술은 해양환경을 모니터링함에 있어 매우 중요한 기술이다.

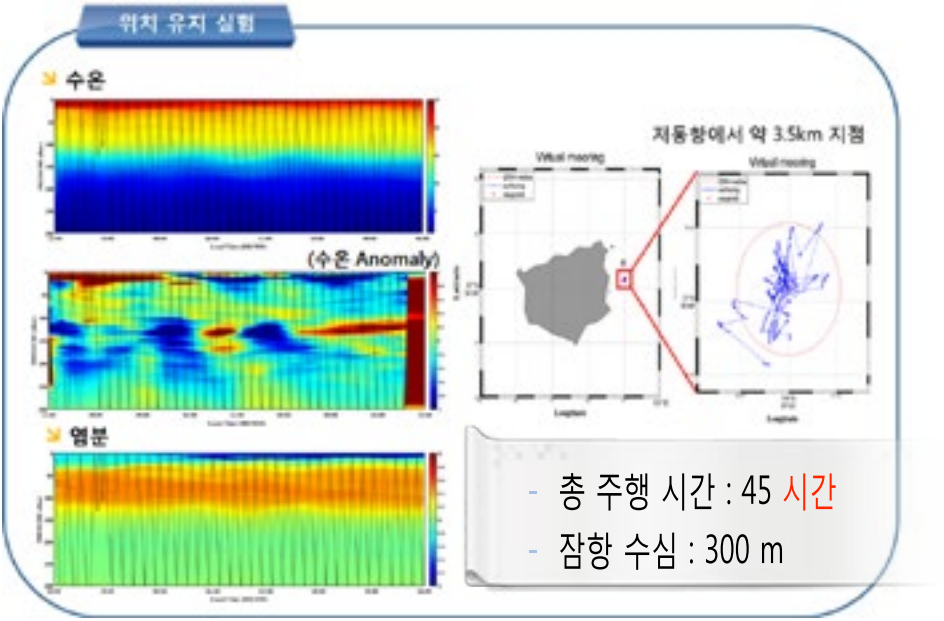
특히 수심이 깊은 해역에서 정지관측을 위해서 현재까지는 높은 비용이 소요되는 심해 부이를 활용해왔다. 그러나 수중글라이더를 활용하게 되면 심해 부이 운용비용을 기준으로 1/5 ~ 1/200



〈그림 16〉 위치유지실험 모식도

수준으로 저렴하게 해양 환경을 모니터링할 수 있기 때문에 더욱 효과적으로 더욱 정확하게 넓은 해역의 해양 정보를 수집할 수 있다.

울릉도 부근에서 진행한 위치 유지실험은 이러한 제어 가능성을 살펴보기 위한 실험이었다. 울릉도 저동항에서 약 3.5km 떨어진 지점에서 위치 유지 제어 알고리즘을 실행한 결과 지정한 위치에서 200m 반경 안에서 성공적으로 위치 유지가 진행되었다. 해양 환경을 모니터링함에 있어 200m 내에서 위치 유지가 되었다는 것은 거의 한 위치와 차이가 없음을 의미한다. 실제로 심해 부이로 모니터링 하는 경우에도 심해 부이 역시 해류에 따라 수백m 정도는 위치가 변화한다는 사실을 고려하면, 수중글라이더가 위치유지를 성공적으로 해내었음을 판단할 수 있다.



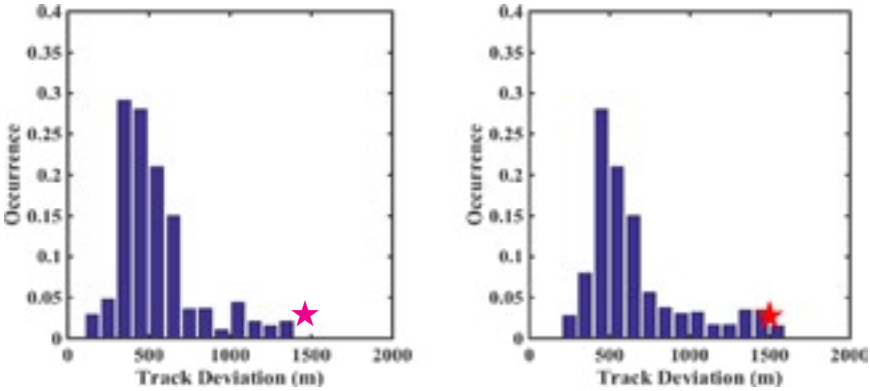
〈그림 17〉 수중글라이더 울릉도–독도 실해역 실험 중 위치유지 실험 결과

위치유지실험은 총 45시간 동안 진행되었으며 해당 위치에서의 수심별 수온 및 염분의 시간에 따른 변화를 관찰할 수 있다.

분석 자료 중 수온의 anomaly자료를 보면 해당지역은 반일주조 내부조석파가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 내부조석파와 같은 내부파가 수중글라이더의 virtual mooring 모드에서 제대로 관측되었다는 것과 수중글라이더를 정지관측용도로도 활용할 수 있음을 보여주었다.

(3) 시뮬레이션 검증

실제 경로 오차가 시뮬레이션 오차분포에서 끝부분에 위치하는데 오차가 난 이유는 실해역 실험 중 실험 해역 부근에 강한 **Eddy**가 존재하기 때문이라는 것을 알아내었다. 강한 **Eddy**는 수중글라이더의 이동에 영향을 미치며 해류에 의해 많이 떠내려가게 되므로 오차를 크게 만들었다. 실측 자료를 활용하여 비행 모델을 개선하였으며 개선한 비행모델을 적용한 결과 오차가 줄어든 것을 확인하였다.



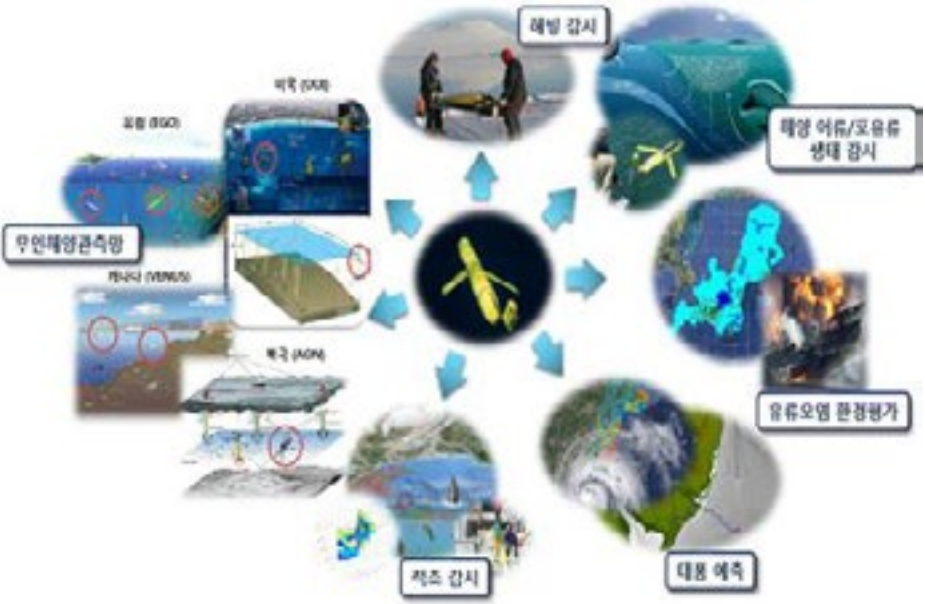
〈그림 18〉 개선 전 비행 모델로 시뮬레이션 하여 산출한 경로 오차의 분포(좌) 및 비행 모델을 개선 후 시뮬레이션 하여 산출한 경로 오차의 분포 및 실제 실해역 시험의 경로 오차(우)(★)

기존의 시뮬레이션 횟수보다 많은 횟수의 시뮬레이션을 수행하여도 실해역 시험과 같은 장소 및 시기에 규모가 큰 **Eddy**(소용돌이)가 발생할 확률은 전체의 5% 미만정도 될 것으로 예상되며 이 작은 확률 안에 실해역 시험 결과가 포함되는 것으로 판단하였다. 그러나 강력한 소용돌이가 존재하는 해역에서도 경로 유지율이 1%로 얻어진 것은 개발한 운용기술을 활용하면 어떤 조건에서도 동해에서 수중글라이더를 운용하는데 문제가 없음을 보여준다.

수중글라이더를 활용한 해역 모니터링의 미래

독도의 불규칙한 기상상태로 인한 기존의 선박을 활용한 유인 관측이 매우 어려운 한계점이 있었다.
그러나 수중무인기인 수중글라이더를 이용하여 기상상태에 크게 구애받지 않으며 좀 더 정밀하고 폭넓은 관측을 수행하였다. 독도 주변의 수심별 수온 및 염분 환경자료 등을 얻었고, 본 수중글라이더의 실험 수행을 위해 최적화 임무 설계 기술을 개발하였다.

확률 분석을 통한 운용안정도를 분석하여 최적화 임무 설계를 수행하였으며 이를 토대로 수행한 실해역 테스트를 통해 선정된 최적 경로와 시뮬레이션 경로 오차율이 1% 미만으로 개발된 최적화 임무 설계 기술의 정확도가 검증되었다. 또한 virtual mooring 실험을 통해 독도 해역에 반일주조 내부조석파가 나타나는 것을 확인하였으며, virtual mooring이 제대로 관측되는 것으로 보아 수중글라이더가 이동형에 국한된 관측기기가 아닌 정지관측용도로 활용할 수 있음을 보여주었다.



〈그림 19〉 수중무인기의 활용성

이러한 결과로 수중글라이더를 정지관측용도로 기술 연구와 추가적인 개발과 연구를 통해 독도 주변 해역 모니터링에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

〈그림 20〉 수중글라이더 투하 · 회수 모습

〈그림 21〉 독도로 향하는 수중글라이더