Vol.17, No.1(통권 제38호) 2024년 6월 30일 [등록번호 : 11-1360620-000097-09] ISSN 2092-5336

기상기술정책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

2024. 6

특집 해양기후변화 대응과 해양 감시 · 관측 기술

칼럼 | 미래를 위한 항해: 해양기상 · 기후 서비스 강화 |

정책초점 | 해양기후변화의 이해와 예측 |
| 아르고 플로트 기반 전지구 해양감시 · 관측 |
| 웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용 |
| 해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안 |

포커스 | 수요자 중심의 해양기상서비스 |

기상청

기상기술정책

제17권 제1호(통권 제38호)
2024년 6월 30일 발행

CONTENTS

칼럼 03 _ 미래를 위한 항해: 해양기상 · 기후 서비스 강화 / 유희동

정책초점 08 _ 해양기후변화의 이해와 예측 / 안중배

25 _ 아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측 / 김백조, 조형준, 이철규

36 _ 웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용 / 김대현

50 _ 해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안 / 박종진

포커스 70 _ 수요자 중심의 해양기상서비스 / 박승균

미래를 위한 항해: 해양 기상 · 기후 서비스 강화

유희동
기상청장

제58차 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC) 총회에서 승인된 6차 보고서에는 '인간이 초래한 기후변화는 이미 전 지구 모든 지역의 날씨와 극한 기후에 많은 영향을 주었다'라고 기술되어 있다. 실제로 지난 2023년은 지구 평균기온이 관측 사상 가장 높은 14.98℃에 달하며 가장 더운 해로 기록되었고, 세계기상기구(WMO)는 최근 보고서를 통하여 2028년까지 적어도 한 해에는 지구 평균기온이 산업화 이전 수준보다 1.5℃를 초과할 확률이 80%에 이른다고 경고하였다. 이는 파리협정의 목표, 즉 지구 온난화를 1.5℃ 이내로 제한하자는 국제사회의 합의가 점점 어려워지고 있음을 의미한다.

해양은 기후변화의 영향을 크게 받는 영역 중 하나이다. 해양과 기후의 상호작용은 해수면 온난화와 해수면 상승, 극단적 기상현상의 증가를 초래한다. 일례로 우리나라 주변 해역의 해수면 온도는 이번 봄에 평균 14.1℃를 기록하여 최근 10년간의 평균값 13.0℃보다 1.1℃ 높았고, 이는 관측 이래 가장 높은 수치이다. 이러한 기온상승은 해안 지역의 침수 위험을 높이고, 냉수성 어종인 명태가 거의 전멸에 이를 정도로 생태계에 큰 변화를 불러왔다. 또한, 해양 산성화는 조개류와 같이 탄산칼슘을 이용하여 껍데기를 만드는 해양 생물에 심각한 피해를 주는 등

양식업에도 상당한 영향을 미치고 있다.

최근 몇 년간 우리나라에는 마이삭, 하이선, 힌남노와 같은 강한 태풍이 잦아지면서 많은 인명과 재산 피해가 발생하였다. 이는 해양기상·기후 서비스의 중요성을 보여주는 사례로, 우리 국민의 생계와 식량 안보, 생명과 재산을 보호하기 위한 적극적인 대응이 필요함을 시사한다. 이제 해양기상·기후 서비스의 강화는 선택이 아닌 필수가 되었으며, 이는 앞으로 더 체계적이고 효과적인 대응책을 마련하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

기후변화에 효과적으로 대응하기 위하여 해양관측은 필수적이다. 전통적인 선박 활용 관측은 비용이 많이 들고 지속적인 관측에 한계가 있어, 웨이브 글라이더와 오션 글라이더와 같은 무인 해양관측 장비의 역할이 점차 중요해지고 있다. 이 장비들은 기존의 유인 선박이나 고정된 부이 시스템보다 효율적이고 정확한 자료를 제공하며, 해양기상 관측망의 중요한 구성 요소로서 해양 열용량 모니터링과 태풍 예측력 향상 등을 통해 기후변화 대응에 기여하고 있다.

그리고 해양기상·기후 서비스 강화와 관련하여 아르고(ARGO) 프로그램은 전지구 해양관측의 핵심 요소로 자리 잡고 있다. 이 프로그램은 전 세계 20여 개국이 참여하고 있는 전지구 해양관측 네트워크로 해양 상층부의 변동을 모니터링하여 기후변화 연구에 활용하는 것을 목표로 한다. 아르고 플로트는 원격으로 수온, 염분, 압력 등의 자료를 전송하며, 생지화학적 요소들까지 포함한 실시간 자료 제공이 가능하다. 국내•외 기후 예측과 해양 연구에 필수적인 자료를 제공함으로써, 해양기후변화에 대한 국제 협력과 정보 교류 강화에 주요한 역할을 하고 있다.

해양기후변화 예측정보는 우리가 직면한 기후위기에 효과적으로 대응하기 위하여 꼭 필요한 조치이다. 고해상도 해양 정보는 국내 해양 환경의 변화를 보다 정밀하게 예측하는 데 중요한 역할을 한다. 한반도 주변 해역의 해수면 온도와 표층 염분 변화 등 해양 기후요소의 전망을 통하여 태풍 및 해양 위험기상의 발생 가능성에 대한 예측이 가능하며, 이는 해양 및 연안 지역의 위험성 평가와 예방적 조치에 필요한 주요 정보를 제공한다.

국민의 안전한 해상활동을 지원하기 위하여 기상청은 '해양기상정보포털'의 서비스를 확대 및 강화하고 있다. 지리정보체계(GIS)를 기반으로 한 맞춤형 해양기상정보를 제공하고 있으며, 여기에는 해상 및 해안 여행객을 위한 고품질 정보, 어업 맞춤형 정보 등이 포함되어 있다. 또한, 다양한 관측 장비와 수치 모델을 통하여 해양 안전과 기후변화 대응을 위한 정보도 제공 중이다. 이 모든 노력은 국민의 생명과 재산을 보호하고, 지속 가능한 해양 활용 정책을 수립하는 데 필수적이다.

해양기상·기후 서비스의 강화는 단순히 기술적 진보에 그치지 않고, 해양과 인간 생활의 균형을 이루며 미래 세대를 위한 지속 가능한 환경을 조성하는 근본적인 기반을 마련할 것이다. 기상청은 이러한 노력을 통하여 해양기후변화에 대한 깊은 이해와 효과적인 대응 전략 수립에 이바지할 것이며, 국민의 생명과 재산을 보호하는 든든한 지킴이이자 다가올 미래로의 안전한 항해를 위한 나침반이 될 것이다.

정 책 초 점

해양기후변화의 이해와 예측

| **안중배**

아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측

| **김백조, 조형준, 이철규**

웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용

| **김대현**

해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안

| **박종진**

해양기후변화의 이해와 예측

안중배 부산대학교 대기환경과학과 명예교수 jbahn@pusan.ac.kr

Ⅰ. 해양기후의 변화와 이해
Ⅱ. 해양기후 예측기술 향상을 위한 제언

기후변화에 따른 해양기후의 변화는 해양온난화, 해수면상승, 해양산성화, 해양생태계변화 그리고 해양순환의 변화 등의 양태로 최근 더욱 가시화되고 있다. 기후변화에 따른 해양의 이러한 변화들 중에서 기상학적인 관점에서 특히 주목해야할 변화는 해양온난화와 해양순환 변화 그리고 해수면상승 등일 것이다. 본 주제에서는 기상과 기후변화와 직접적인 연관이 있는 이들 해양변화에 대한 이해와 해양기후와 더 나아가 지구시스템에 대한 예측기술의 이슈와 향후 발전방안에 관해서 살펴보고자 한다. ■

“ 해양기후변화, 여러 형태로 인류에 직접적 영향 ”

Ⅰ. 해양기후의 변화와 이해

1. 해양기후변화의 양태

현재 진행 중인 해양기후변화의 주된 원인은 산업화와 벌목 등 인간의 활동에 의해 대기 중에 방출된 이산화탄소와 같은 온실기체에 의한 것으로 해양기후변화는 해양의 수온이나 화학 그리고 순환 등의 장기적 변화를 불러온다. 해양기후변화는 다음과 같이 크게 몇 가지 양태로써 인류에게 직접적인 영향을 미친다.

ㅇ 해양온난화: 해양은 대기 중 온실기체에 의한 온실효과로 지구 대류권에 갇힌 열의 일부를 흡수한다. 이는 해양 수온을 직접적으로 끌어올리는데, 온난화 초기에는 주로 해양 상층부의 수온이 증가하지만 시간이 지나면서 열은 표층수 침강과 해양 혼합 등의 과정을 통해서 서서히 심해로 전달된다. 해양온난화는 해양생태계를 심대하게 교란시켜 백화현상, 어종 이동이나 변화 그리고 해류의 변화 등을 야기한다.

ㅇ 해수면상승: 온난화가 진행되면 수온의 상승으로 해수가 열팽창하여 해수면이 상승하게 된다. 이러한 열팽창 이외에도 만년설이나 빙하와 빙상의 녹음도 해면상승에 일조하게 된다. 해면 상승은 해안에 공급되는 해안표사의 양보다 유실되는 양을 더 많이 증가시켜 전구적인 해안침식을 일으킨다. 특히 해안저지대의 상습적 범람과 호우나 태풍 등에 의한 침수피해는 해안에 인접한 도시나 생태계에 다양한 피해와 사회적 문제를 일으킨다.

ㅇ 해양산성화: 대기 중 이산화탄소가 증가함에 따라 물에 용해되는 이산화탄소의 양도 증가하게 되는데, 바닷물에 용해된 이산화탄소는 탄산이 되어 이온화되면서 바닷물의 수소이온 농도를 높이게 된다. 이러한 과정을 통해 바닷물의 산도(pH)는 낮아지고 산성화가 진행된다. 바닷물의 산성화, 즉 바닷물 속의 수소이온 농도가 증가하게 되면 어패류의 골격을 구성하는 탄산칼슘의 생성에 쓰일 탄산이온이 부족하게 되어 해양생태계에 부정적인 영향을 미치게 된다.

"'해양온난화', '해양순환변화', '해수면상승'이 기상·기후학적 관점에서 가장 주목해야 할 변화"

ㅇ 해양생태계 변화: 해양기후변화는 해양생태계와 생물다양성에 부정적인 영향을 미친다. 특히 산호초와 같이 수온과 해양산성화에 민감한 해양생물들은 이러한 변화들에 더욱 취약하다. 기후변화에 따른 해양 상태의 변화는 어족자원의 분포와 어획량에도 영향을 미쳐 어업과 연안 공동체의 사회·경제적인 부분에 영향을 미칠 수 있다.

ㅇ 해양순환의 변화: 기후변화는 여러 가지 방식으로 해양순환에 영향을 줄 수 있다. 즉, 기온 상승에 따른 바다얼음(해빙)의 녹음은 해양으로의 담수유입을 증가시켜 해양 밀도유도 순환(density-driven circulation)에 영향을 미친다. 또한 따뜻해진 해수의 열팽창도 해수 밀도를 변화시킴으로써 해류의 방향과 강도를 변화시킨다. 지구온난화에 따른 기압패턴의 변화는 바람의 변화를 불러와 해양의 바람유도 순환(wind-driven circulation)을 직접적으로 변화시킨다. 해양의 산성화에 따른 플랑크톤 등 해양유기체군 분포의 변화는 영양순환(nutrient cycling)을 변화시키고 해양순환에도 어느 정도의 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

기후변화에 따른 이러한 해양의 변화들 중에서 기상·기후학적인 관점에서 가장 주목해야할 변화는 해양온난화와 해양순환 변화 그리고 해수면상승일 것이다. 따라서 이들의 변화에 주목하여 해양변화의 실태와 이해 그리고 미래와 예측기술에 관해서 살펴보고자 한다.

해양산성화와 바다사막화

온실기체인 이산화탄소는 물에 잘 용해되는 성질을 가지고 있다. 따라서 대기 중 이산화탄소가 증가함에 따라 물에 용해되는 이산화탄소의 양도 증가하게 되는데 용해된 이산화탄소의 일부가 탄산(H_2CO_3)으로 되는데 탄산은 다시 수소이온(H^+)과 탄산수소이온(HCO^{-3}) 그리고 탄산이온(CO_3^{-2}) 등으로 이온화된다. 이 중 탄산이온은 어패류의 체내에서 칼슘이온(Ca^{+2}), 마그네슘(Mg^{+2})이나 칼륨(K^+) 등 금속성 원소들과 반응하여 골격을 만들어내는 데 사용된다. 그러나 바닷물 속의 수소이온이 증가하게 되면 수소이온은 탄산이온과 곧바로 결합하여 이산화탄소가 되어 다시 대기 중으로 방출되기 때문에 어패류가 골격을 이루는 데 필요한 탄산이온이 부족하게 된다. 따라서 해양의 산성화는 해양생태계에 악영향을 미치게 된다.

산업혁명 이후 대기중에 방출된 이산화탄소의 약 20~30% 가량을 해양이 흡수한 것으로 추정하는데 이로 인해 약알칼리성인 바닷물의 산성도도 꾸준히 증가하여 산업혁명 전에 약 8.180이었던 pH지수가 최근에는 약 8.050까지 낮아진 상태이다. 바닷물의 pH가 조금만 낮아져도 특히 주 골격이 탄산칼슘으로 이루어진 산호, 패류 등은 치명적인 피해를 입게 된다. 현재 진행되는 바닷물의 산성화는 과거 5500만년 동안의 변화보다 10배 이상 빠른 속도이며 21세기 말에는 현재보다 pH지수가 0.2~0.4 정도 더 낮아질 것으로 추정된다. 특히 그 정도 높아진 산성도에서 열대 해양의 산호는 자취가 사라질 것으로 예상된다.

해양산성화에 의해서 연안생태계가 불안정해지고 어패류가 사라지면 흰색의 석회 조류가 연안 암반에 달라붙게 되어 암반 지역이 흰색으로 변하는 현상이 나타나는데 이를 백화현상이라 한다. 갯녹음이라고도 하는 백화현상이 나타나는 암반 지역은 해조류가 없고 흰색을 띄고 있기 때문에 이러한 현상을 바다사막화라 부른다.

2. 해양의 온난화

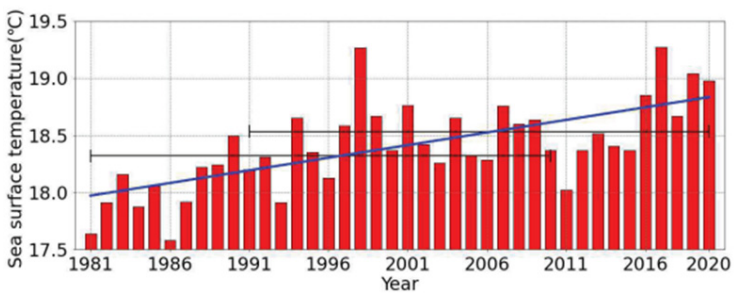
“한반도 주변해역, 10년 간 0.221℃ 점진적 상승 중”

해양은 지난 세기 동안 온실효과에 의해서 대기 중에 갇힌 과잉의 열에너지 중 90% 가량을 흡수한 것으로 추정된다. 이에 따라 전 세계 해양의 수온도 모든 층에 걸쳐서 상승하였다. 전 세계적으로 해수 온도의 증가는 해역의 위치와 깊이 등에 따라 다양하다. 그러나 전반적으로 지구온난화로 인해 지난 세기 동안 해수 온도는 전 해역에 걸쳐 측정가능한 정도로 꾸준히 증가하고 있다.

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 평가보고서(2014)에 따르면, 해양은 1970년대부터 일관되게 따뜻해지고 있으며, 특히 최근 수십 년 동안 해양의 온난화 속도는 가속화되고 있다고 한다. 평가보고서는 해양 상층부(0-700m)가 1971년 이후 10년마다 평균 약 0.11℃ 정도 따뜻해지고 있으며, 700m 이하의 심해에서도 상층부에 비해 속도는 느리지만 꾸준히 열을 흡수하고 있는 것으로 보고하였다. 지역적으로는 북극과 서태평양이 다른 지역에 비해 상대적으로 급격한 해양온난화를 겪고 있다고 한다.

해양온난화는 자연적인 기후 변동성으로 인해 매년 차이가 있을 수 있으나 장기적인 추세를 보면 전 세계적으로 해양의 온난화는 뚜렷하다. 한반도 주변 해역도 예외는 아니라서 1981년 이후 표층 수온은 수년 주기로 변동하는 모습을 보이지만 전체적으로는 10년에 약 0.221℃ 정도로 점진적으로 상승하고 있으며 이는 전지구

그림1. 한반도 연근해(위도 28°N~45°N, 경도 120°E~135°E)의 연평균 표층 수온의 변화(기상청 해양기후 분석보고서, 2021)



“ 해양온난화, 태풍에 더 많은 에너지 제공 ”

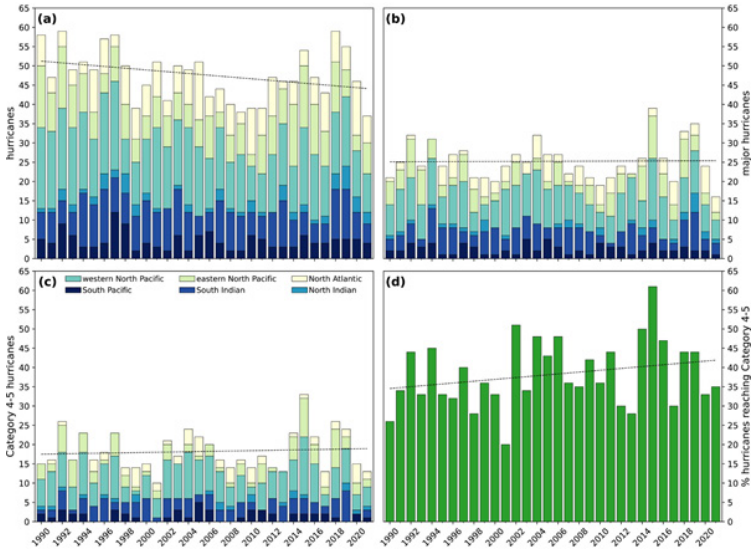
평균인 0.120℃/10yr보다 높은 상승률이다[그림 1].

해양온난화는 여러 가지 방식으로 기상 및 기후 시스템에 영향을 미칠 수 있는데 이들 중 주요한 몇 가지를 간추려보면 다음과 같다.

2.1 태풍과 적도저기압 강도의 증가

따뜻해진 해양은 태풍과 열대저기압에 더 많은 연료를 공급할 수 있는 물리적 환경을 제공한다. 결과적으로, 온난화된 해양은 태풍이나 적도저기압이 더 많은 수증기와 열을 흡수하게 하여 강도나 지속 시간을 증가시킴으로써 더 파괴적인 영향을 미치게 하고 있다. 최근 연구에 의하면 지난 수십년 동안의 허리케인과 열대저기압 수의 전반적인 경향은 크게 변화가 없거나 다소 감소하였지만 강한 허리케인의 수는 거의 동일하게 유지됨으로써 카테고리 4 또는 5에 해당하는 허리케인의 비율은 증가했고[그림2] 이러한 경향은 북태평양 태풍의 경우도 크게 다르지 않다. 태풍의 경우에는 온난화에 따라 따뜻한 해면온도의 수역이 넓어지고 이에 따라 태풍이 자주 통과하는 진로의 수온이 상승함에 따라 태풍이 진행 중에도 충분한 열과 수

그림2. 지난 40년간 발생한 (a)열대저기압, (b)강한 열대저기압, (c)카테고리 4-5 허리케인, (d)카테고리 4-5 허리케인의 비율 (Klotzbach et al., 2022)



“ 해양 온도 변화는 강우 빈도·강도와 대기순환에도 영향을 미침 ”

증기를 해수면으로부터 공급받는다. 이 때문에 최근 태풍이 육지에 상륙할 때까지도 세력이 크게 약화되지 않는 경우가 빈번하다.

한반도 영향태풍의 변화 추이

한반도 영향태풍의 경우, 태풍의 개수에 있어서는 지난 40여년간 유의한 변화는 없는 것으로 보인다. 그러나 북서태평양에서 발생하는 태풍의 개수가 감소하는 추세에 있다는 점을 고려하면 실제로는 북서태평양에서 발생한 태풍에 대한 한반도에 영향을 미치는 태풍의 비는 증가했다고 볼 수 있다. 최근의 연구결과는 지구온난화가 가속화된 미래 기후에는 동남아시아나 남중국해 쪽으로 영향을 미치는 태풍의 개수는 감소하는 반면 한반도와 일본 쪽으로 향하는 태풍의 개수는 증가할 것으로 예상하고 있다(Kim and Ahn, 2024). 실제로 지난 40년간 가을철에 발생한 태풍의 경우, 한반도나 일본에 영향을 미치는 태풍은 증가하고 동남아시아나 남중국해 쪽으로 향하는 태풍의 개수가 감소하는 경향이 있다(Basconcillo and Moon, 2022). 해면온도가 증가한 해역을 따라 태풍의 진로가 바뀔 수 있으나 기후적인 관점에서는 해양의 온난화에 따른 기압분포의 변화가 보다 더 직접적으로 태풍의 경로에 변화를 준다고 본다. 한반도의 경우 북태평양 고기압이 어느 정도 서쪽으로 확장하는지가 영향태풍의 빈도를 결정짓는 가장 큰 요인이 된다.

태풍의 강도도 한반도 영향태풍의 경우, 지난 40년간 유의할만한 증가를 볼 수 있는데(Basconcillo and Moon, 2023) 이는 한반도 주변 및 태풍이 올라오는 길목인 북서태평양의 수온이 지난 수십년간 꾸준히 상승하고 있는 것과 깊은 관련이 있다. 해양온난화에 따라 태풍의 발생지역도 넓어지고 있는데 이는 이전보다 더 넓은 지역에서 발생한 태풍도 영향태풍이 될 수 있다는 것을 뜻한다.

2.2 강수 패턴의 변화

따뜻한 해양 온도는 구름의 형성과 대기 중의 수증기 분포와 더불어 대기안정도에 영향을 주어 강수 패턴을 변화시킬 수 있다. 이러한 강수 패턴의 변화는 다양한 지역의 강우 빈도와 강도의 변화로 이어져 잠재적으로 이상 가뭄이나 홍수를 일으킬 수 있게 한다(Held and Soden, 2006). 강수 패턴 변화의 영향은 시간과 공간적으로 일정한 것이 아니라 지역적인 큰 변동성을 보이게 된다. 즉, 해양온난화가 강수 패턴에 미치는 영향은 지리, 지형 및 해류 근접성과 같은 지역적 요인에 따라 달라진다. 일부 지역은 해양온난화로 인해 강수에 더 뚜렷한 변화를 경험할 수 있는 반면, 다른 지역은 상대적으로 적은 영향을 받는 등 시간과 공간적 편차가 증가하고 있다.

2.3 대기순환의 변화

해양온난화는 적도수렴대(Intertropical Convergence Zone, ITCZ), 해들리와 페렐 그리고 극 세포순환, 태평양과 대서양 그리고 인도양 등 대양의 중위도고기압대, 인도와 아시아 및 호주의 몬순순환 등의 강도와 위치를 변화시켜 대기대순환에

"해양온난화가 대기대순환 변화에 미치는 영향은 시간 및 공간규모에 따라 다양"

전반적인 변화를 일으킨다. 이러한 대기대순환 변화의 결과는 중위도에서 기상시스템을 조종하는 데 중요한 역할을 하는 제트 기류나 중위도 종관저기압 이동경로의 북진(northward shift)을 포함한 기상 패턴의 변화로 이어진다(Kim and Ahn, 2024). 해양온난화가 대기대순환 변화에 미치는 영향은 시간 및 공간규모에 따라 다양할 뿐만 아니라 그 과정에 해양과 대기간의 상호작용이 포함되어 있어서 그 메커니즘을 완벽히 이해하기는 쉽지 않지만 간단히 요약하면 아래와 같다.

가. ITCZ의 강화와 위치변화: 해양온난화는 ITCZ의 위치를 변화시키고 폭을 좁히며 강도를 강하게 한다. 이러한 대기순환 및 열대강수의 분포와 패턴의 변화는 적도지역의 생태계와 농업 및 수자원에 큰 영향을 미친다(Bryne et al., 2018).

나. 자오면 순환의 강도와 위치변화: 해들리 세포가 확장됨과 동시에 약화되며, 극쪽으로의 이동 등으로 말미암아 지역적인 이상 기상현상이 빈번히 나타난다(Seidel et al., 2008).

다. 중위도 고기압대의 강도와 위치변화: 아열대 고기압대의 북향 이동과 빈도의 변화, 그리고 극한 날씨의 발생빈도나 강수패턴의 변화는 지역 기후에 중대한 영향을 미친다(Hu and Fu, 2007).

라. 몬순순환의 변화: 해양온난화는 남아시아, 동남아시아, 동아시아 그리고 호주, 아프리카와 아메리카 일부 지역에서 연간 강수량의 상당 부분을 차지하는 몬순 시스템의 강도와 시기에 영향을 미칠 수 있다. 해면온도의 변화는 육지와 바다 사이의 온도 차이에 영향을 미쳐 몬순성 강수의 강도와 시기를 변화시킨다(Song and Zhou, 2014).

2.4 물순환의 강화

따뜻해진 해양 온도는 해양에서의 수증기 증발을 증가시켜 대기 중 수증기 함량을 증가시킬 수 있다. 이것은 특정 지역에서의 대기불안정을 유도하여 집중적인 강우 현상을 유발시킬 수 있는데, 이는 높은 기온에서는 공기가 수증기를 포함할 수 있는 최대함유량(포화수증기량)이 온도에 기하급수적으로(exponentially) 비

> “해양온난화, 지구 물순환을 강화시키고 수문기후의 강도를 증가시킴”

례하기 때문이다. 반면 증발이 증가한 지역에서는 강수량이 증발량만큼 증가하지 않는다면 가뭄 상태가 나타나게 된다. 우리나라뿐 아니라 전 세계적으로 관측된 자료에서도 볼 수 있듯이 지난 세기 동안에 전 세계적으로 강수 강도의 증가와 함께 가뭄의 발생빈도도 증가하는 경향이 뚜렷했으며 이에 따라 소위 수문기후 강도(hydroclimate intensity)가 증가하였다(Im et al., 2017).

2.5 해빙의 녹음

해양온난화는 남극과 북극의 해빙(sea-ice)을 감소시키는 주된 요인 중의 하나이다. 최근 남극과 북극에서 모두 전례 없는 해빙의 손실이 진행되고 있다(IPCC, 2014). 특히 남극 대륙을 덮고 있는 거대한 빙상이 지속적으로 녹고 있는 것은 매우 우려스러운 상황이다. 위성 관측을 포함한 연구 결과들은 따뜻해진 바닷물이 해빙의 아래를 녹임으로써 빙상들의 가장자리가 녹는 속도가 가속되고 있음을 보여준다. 해양 빙상 불안정성은 해면 상승에도 크게 기여한다. 북극도 상황이 마찬가지로 심각하다. National Snow and Ice Data Center (NSIDC)에 따르면 북극 해빙의 경우, 위성관측이 시작된 1979년 이후 매 10년 마다 약 13%정도 해빙의 면적이 감소하고 있고 남극의 경우는 2014년 이래 해빙의 면적이 꾸준히 감소하고 있

해빙의 역할

해빙은 시기와 장소에 따라 다양한 비율로 지구 표면을 덮고 있다. 평균적으로 해빙은 매년 지구 표면의 약 4~6%를 덮고 있다. 그러나 이 범위는 계절에 따라 변동하며 최대 범위는 늦겨울에, 최소 범위는 늦여름에 나타난다. 북극의 해빙 면적은 겨울 동안 약 1,300~1,800만㎢에 이르는 반면 여름 용융기 동안에는 약 260~520만㎢ 이하로 줄어든다. 남극의 해빙 면적은 일반적으로 북극보다 덜 광범위하고 더 가변적이며 최대 범위는 남반구 겨울 동안 약 1,800~2,000만㎢에 이른다. 해빙이 기후에 미치는 영향은 지대한데 지구대순환의 관점에서 몇 가지 살펴보면 다음과 같다.

먼저 얼음은 훌륭한 단열재로써 극지방의 해양이 지나치게 대기로 열을 잃어 냉각되지 않도록 열을 보존해주는 역할을 한다. 이는 지구에너지 균형뿐만 아니라 극지 해양의 생태계의 보존에도 매우 중요하다. 둘째로 극지방과 적도지역 간의 온도의 차이는 중위도 지역에 남북간 기온의 기울기를 유지시켜서 종관규모시스템의 활동을 강화시키고 남북 간의 에너지 및 모멘텀의 교환을 가능하게 해준다. 예를 들어 극지방에 해빙의 많은 경우는 남북 간의 기온경도가 강해지고, 이는 중위도에 경압불안정을 증가시키고 바람의 연직시어를 강화시켜 활발한 종관규모 저기압 활동을 유도한다. 이는 극쪽으로의 열과 모멘텀의 수송을 활발하게 하여 페렐순환을 강화시키며 연이어 극세포와 해들리순환도 강화시킨다. 셋째로 해빙의 생성은 극지방 해수의 염도를 변화시켜 염염순환(themohaline circulation)에 큰 영향을 준다. 예를 들어 해빙이 얼면 바닷물의 염도가 증가하는데 이렇게 무거워진 염도 높은 해수는 심층수로 가라앉으며 심해 바닥으로 서서히 흘러내려가게 되어 해양 콘베이어벨트(Great Ocean Conveyor Belt)와 같은 전구적인 해양순환을 유도한다. 이러한 순환은 해양의 열을 재분배하기 때문에 전지구 에너지 순환과 기후적인 관점에서 매우 중요하다. 동시에 이러한 순환은 심해에 산소와 영양분을 공급하는 중요한 역할도 담당한다.

"해양기후변화, 열염순환 등 해양 순환에도 상당한 영향 미쳐"

는데 2017년에 해빙의 면적이 가장 적었다고 한다. 이러한 해빙의 감소는 해수면상승뿐만 아니라 이 지역의 생태계, 야생동물 및 공동체 등에 광범위한 영향을 미친다. 해빙이 녹는 과정에 나타나는 리드(Lead, 해빙과 해빙 사이의 갈라진 틈)를 통해서 많은 양의 열이 대기로 방출되는데 이 열은 특히 막대한 양의 탄소를 저장하고 있는 북극의 영구 동토층을 녹일 수 있다. 동토층에서 방출되는 온실가스는 기후변화를 더욱 가속시키고 있다. 해양온난화에 따른 남극과 북극의 지속적인 빙하의 용융 결과는 극지방뿐만 아니라 지구 전체에 영향을 미칠 정도로 깊고 광범위하다.

3. 해양순환의 변화

해양기후변화는 전지구 규모의 기후를 변화시키는 데 중요한 역할을 담당하는 열염순환 등 해양순환에 상당한 영향을 미친다. 온도와 염도의 변화는 열염순환은 물론이고 더 나아가 지구 기후 패턴에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 만년설이나 빙상이 녹고 강수의 증가로 바다로 유입되는 담수가 증가하는 경우에는 해양 지표수의 염도가 감소하여 바닷물의 침강이 약화된다. 해수 침강의 약화는 해양순환을 변화시켜 지역 기후에 영향을 미칠 뿐만 아니라 잠재적으로 급격한 기후변화를 일으킬 수 있다. 온난화와 관련한 해양기후변화가 해양순환에 미치는 주요 영향을 몇 가지 살펴보면 다음과 같다.

3.1 열염순환의 변화

열염순환은 적도 서대서양의 따뜻한 바닷물이 멕시코만류를 따라 북대서양으로 수송되는 과정에서 대기로 열을 잃고 북극해에 도달하여 침강한 후, 깊고 차가운 해류로 전지구 심해를 돌다가 용승하여 다시 적도 서대서양으로 돌아오는 일련의 해양순환 시스템이다. 해양의 온난화는 적도해양의 열을 재분배함으로써 전구 기후를 조절하는 데 중요한 역할을 담당하는 열염순환의 고리를 약화시키는 요인으로 작용한다(박스 글 참조).

"해양온난화, 대서양 자오면 역전순환의 구동력을 약화시켜"

3.2 심층수 형성의 약화

열염순환은 극지방의 높은 밀도의 차가운 물이 가라앉음으로써 구동력을 갖게 되는데 이 구동력이 해양 컨베이어벨트(Great Ocean Conveyor Belt, GOCB)를 작동하게 한다. 그러나 해양온난화가 진행되면 극지방의 표층수온이 상승하여 밀도가 낮아지고, 이와 더불어 상승한 수온이 해빙의 생성을 방해함으로써 표층수의 침강이 약화된다. 이에 따라 침강에 의한 열염순환의 구동력이 약화되면서 대양의 심층수 형성이 방해된다.

3.3 표층 해류의 변화

바다가 따뜻해지면 표층 해류가 변할 수 있는데, 대서양 자오면 역전순환(Atlantic Meridional Overturning Ccirculation, AMOC)과 같은 열염순환이 해양온난화에 따라 약화되면 북대서양해류(North Atlantic Drift)와 같이 벨트와

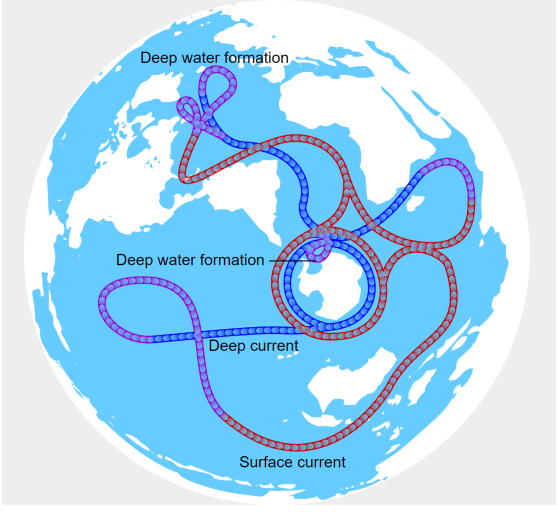
열염순환의 이해

열염순환은 온도와 염도의 차이에 의해 움직이는 전구적인 해양순환이다. 이 순환은 대기와 해양 상층 및 심층의 열을 재분배함으로써 지구의 기후를 조절하는 데 중요한 역할을 한다. 열염순환은 기온과 염도의 변화에 의해 유도된다. 즉, 물은 4℃에서 가장 밀도가 높은데 수온이 낮은 극지방에서는 밀도가 높은 표층수가 가라앉으면서 해류의 심해 순환을 유도하게 된다. 또한 바닷물의 염분농도가 높아지면 밀도는 높아지는데(소금과 물의 분자량은 각각 58.4, 18이다), 극지방으로 수송된 바닷물은 증발과 결빙으로 표층수의 염도가 크게 높아지고 밀도가 높아진 무거운 물은 침강을 시작하게 된다. 열염순환은 극지방, 특히 북대서양과 남극대륙 주변에서 밀도가 높고 차가운 물이 생성되는 것으로 시작된다. 해양 컨베이어벨트(Great Ocean Conveyor Belt, GOCB)는 전 해양 규모의 열염순환으로 대서양에서는 자오면 역전순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)이라고도 불리는데 이 순환의 과정은 다음과 같다. 따뜻한 멕시코만류는 북태평양고기압의 가장자리를 따라 멕시코만에서 북극해로 향하게 된다. 이 해류를 북대서양 drift라고 하는데 해류라는 용어보다는 drift를 사용하는 이유는 이 해류는 바람으로 유도되는 흐름(wind-driven current)이기 때문이다. 이 따뜻한 해류는 북대서양을 통과하면서 대기로 많은 열을 내놓는데 이 열은 북대서양 기후를 온화하게 하는데 기여한다. 북유럽이 우리나라보다도 고위도에 위치하지만 상대적으로 온화한 기후를 갖는 이유도 바로 이 해류 덕분이다. 해류가 북극해의 스발바르제도 근해에 도달하면 매우 차가워지고 표층수 온도가 영하 1.9도 정도되면 결빙을 하게 된다. 물은 얼음이 되어 바다표면을 덮게 되고 소금기는 얼음에서 빠져나와 주변의 바닷물과 섞이며 더욱 염도가 높은 무거운 표층수가 된다. 더불어 극지방의 높은 증발율은 바닷물의 밀도를 높이는 데 일조를 한다. 이 무거워진 표층수는 서서히 침강하면서 북대서양의 심해를 따라 매우 느린 속도로 남하하여 북대서양심층수(North Atlantic Deep Water, NADW)를 형성한다. 이 해류는 남대서양까지 내려오면서 아프리카 남단의 해저로 흘러가며가면서 남극저층수(Antarctic Bottom Water, AABW)를 형성한다. 이 후 심해류의 대부분은 인도양과 태평양을 돌게 되는데 차고 밀도가 높은 물은 해안용승(coastal upwelling)이나 여러 가지 형태의 혼합(mixing) 등의 과정을 거쳐 결국 다시 수면 위로 떠오른다. 수면으로 용승한 차가운 한류는 태양에너지나 대기로부터 현열 등을 공급받으며 따뜻한 해류가 되어 다시 적도 서대서양에 도달함으로써 순환 고리가 완성된다(그림 3 참조). 이 순환의 순수효과(net effect)는 남북간 그리고 해양 상하층간의 열교환인데 이를 통해 전구 및 전구해양의 열균형이 유지된다. 뿐만 아니라 저위도에서 고위도로 향하는 해류는 열을 극지방으로 운반하는 과정에 열의 일부를 대기로 방출하기 때문에 지역적인 기후 체계형성에 기여한다. 또한 극지방에서 돌아오는 차갑고 깊은 해류는 바다의 더 깊은 층에 영양분과 산소를 보충하는 역할을 담당하기도 한다.

"열염순환의 약화는 북반구의 과거 빙기와 밀접하게 연관되어 있어"

연관된 해류는 약해진다. 온난화에 따른 기압패턴의 변화에 의한 바람의 패턴의 변화, 해빙의 녹음, 그리고 빙하와 빙상의 녹음에 따른 담수의 유입 등은 표층 해류

그림3. Great Ocean Conveyor Belt의 모식도. 붉은색과 파란색은 각각 표층해류와 심층해류를 표시한다(Wikipedia)



열염순환과 갑작스런 빙기의 도래

지구 프록시자료(proxy data)에 의하면 AMOC가 약해졌을 때는 북대서양 drift를 통해 북반구로 전달되는 열이 감소하면서 추운 기간이 도래했고 반대로 AMOC가 강했을 때는 북반구가 상대적으로 온화했다. 가장 최근의 빙기인 2만여 년 전에 종료된 Last Glacial Maximum(LGM)와 약 12,900~11,700년 전 사이의 비교적 짧고 급격한 냉각기간인 영거 드라이아스기(Younger Dryas) 동안에 AMOC는 매우 약하거나 거의 중단됐었다. 특히 영거 드라이아스기의 원인으로 AMOC의 갑작스런 둔화가 지목되고 있는데 영거 드라이아스기는 마지막 빙기인 LGM 이후에 점진적인 진행되던 온난화 추세를 방해한 것으로 보인다. 담수 플럭스 가설(Freshwater flux hypothesis)에 의하면 LGM 이후에 온난화가 진행되면서 북아메리카의 많은 지역을 덮고 있는 로렌타이드 빙상(Laurentide Ice Sheet)이 빠르게 녹으면서 많은 양의 담수가 북대서양으로 방출되었고 당시 진행되던 온난화에 따른 상승된 수온과 더불어 갑작스러운 담수의 대규모 대서양 유입이 바닷물이 극지방에서 침강하는 것을 억제함으로써 AMOC가 약화되거나 거의 정지되었다는 것이다. AMOC의 급격한 약화 또는 정지는 적도지방에서 북대서양 지역으로의 열 수송을 감소시켜 결국 북반구의 기온이 급격히 낮아지고 이로 말미암아 Younger Dryas 빙기가 시작되었다는 가설이다. Younger Dryas 기간 동안 AMOC가 현저하게 약화되거나 심지어 일시적인 셧다운 되었음을 시사하는 증거들은 있지만 AMOC와 영드라이아스 시대 사이의 관계는 아직도 과학적으로 상당한 관심과 논쟁의 대상이다. 그럼에도 불구하고 최소한 AMOC의 강약이 북대서양과 북유럽의 온난화와 한랭화에 직접적인 연관성이 있는 것은 분명하다.

대서양 자오선 역전 순환은 지구 기후를 조절하는 중요성 때문에 집중적인 연구 대상이 되어 왔다. 그러나 최소 수백년 이상의 장기간에 걸친 직접 관측의 부재로 인하여 빙기와 AMOC 간의 정확한 관계를 평가하는 것은 어려우며 예측 모형으로 AMOC를 시뮬레이션하는 데 있어서도 모델과 외부 강제력에 대한 불확실성 때문에 AMOC가 기후에 미치는 영향을 이해하는 데는 아직 한계가 있다. 그러나 20세기 중반 이래로 AMOC의 강도가 약화되었음을 보여주는 증거들은 많은데 지금과 같이 지속적으로 북극의 해빙이 사라지고 수온이 올라가 그 지역에서의 해수침강이 약화된다면 AMOC는 분명히 약화될 것이고 결국 북반구가 급격한 빙기로 돌아설 수 있다는 과학적 추측은 충분히 가능하다.

에 영향을 미칠 수 있고, 표층 해류의 변화는 다시 심해 해류의 세기와 방향에 영향을 미치게 된다.

> “지난 세기 동안, 해수면 약 15~25㎝ 상승, 1990년대 초~현재까지 약 8~9㎝ 상승”

3.4 열 수송의 변화

열염순환은 지역 기후를 조절하는 데 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 전 해양에 걸쳐 열을 수송함으로 기후의 조정자로써 중요한 역할을 한다. 온난화에 따른 열염순환의 강도나 구조의 변화는 걸프 해류나 쿠로시오 해류의 변화를 가져와 열 수송 패턴의 변화로 이어질 수 있으며, 전지구 또는 지역 기후시스템에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 온난화에 의해 AMOC가 둔화되면 걸프해류를 통한 북대서양으로의 열 수송이 감소하여 북유럽 지역은 차갑고 건조한 기후체계로 돌아서게 되고 반면에 중남미 지역에는 폭염 등 이상 승온 현상이 빈번할 수 있다.

4. 해수면상승

지난 수십 년 동안 해수면상승 속도는 가속화되고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)와 다른 연구들에 의하면 1900년부터 1993년까지 전 세계 평균 해수면은 연평균 약 1.7㎜씩 상승하였고 위성고도계와 같은 첨단장비에 의한 추정에 따르면 1993년부터 최근까지 해수면은 연간 약 3.3㎜로 증가하였다. 이에 따라 1900년과 2000년 사이에 약 15~25㎝ 해수면이 상승하였으며 1990년대 초부터 현재까지는 약 8~9㎝ 상승했을 것으로 추정된다. 이러한 가속의 주된 원인은 먼저 해양온난화에 따른 열팽창이고 그 다음으로는 그린란드와 남극대륙의 빙하와 만년설 그리고 빙상이 녹은 것이 해수면상승에 상당한 기여를 했을 것으로 추정한다.

해수면상승의 영향은 광범위하며 자연 생태계뿐만 아니라 해안에 근접한 공동체에 미치는 악영향도 지대하다. 해수면상승은 특히 태풍의 내습이나 만조 때 해안지역의 사회기반시설이나 주거지에 피해를 줄 수 있다. 또한 해안침식을 악화시켜 해변, 습지 및 기타 해안 서식지를 파괴한다. 또한 해수면이 상승함에 따라 저지대에

"해양기후변화 이해와 예측을 위해서 접합대순환 모형 이용"

서는 담수 대수층에 염수가 침입하여 식수를 오염시키고 농업 관개에 영향을 줄 수 있다. 맹그로브 숲, 습지, 산호초와 같은 해안 생태계를 위협하기도 한다. 해수면상승은 해변에 인접한 도로, 교량, 하수도, 핵발전소와 같은 기반시설을 보호하기 위한 경제적 비용도 증가시킨다. 더불어 해수면상승은 국가간의 지정학적 긴장을 증가시킬 수 있어 국가 간의 마찰의 원인을 제공하기도 한다. 열거한 이러한 여러 가지 악영향들은 단순히 예상이 아닌 지금 현재 지구촌에서 일어나고 있는 사례들이다.

II. 해양기후 예측기술 향상을 위한 제언

1. 해양기후 예측기술의 발전과 한계점

위에서 언급한 해양온난화와 관련된 모든 변화들은 각각 나타나는 양상은 다르지만 사실은 모두 하나의 틀 안에서 연결되어 있는 현상들이다. 가령 해양온난화에 따른 태풍 강도의 강화는 물순환의 강화와 연결되어 있으며 이는 또한 강수패턴의 극단적 변화와 연결되어 있고 이는 다시 대기순환의 변화와도 연결되어 있다. 해류는 기본적으로 바람에 의한 강제가 중요하기 때문에 대기순환의 변화는 해양순환의 변화와도 관련될 수 밖에 없으며 이는 해양생태계의 변화와도 연결된다. 이러한 논리적 흐름에 따르면 앞서 언급한 바와 같이 해양온난화는 해양에 국한된 변화가 아니기 때문에 대기와 생권(biosphere), 빙권(cryosphere), 암권(lithosphere)과의 긴밀한 상호작용에 의해서 변화되는 총체적인 틀 안에서 이해되어야 한다는 것이다. 즉, 기후의 변화는 대기나 해양 등 각 아시스템(subsystem)내에서의 긴밀하고 다양한 되먹임(feedback)과 아시스템 간의 복잡한 상호작용에 의한 결과물이라는 것이다. 따라서 해양의 기후와 기후변화를 이해하고 궁극적으로 예측하기 위해서는 대기와 해양, 해빙, 지면과 생태계 각각의 변화와 상호작용을 동시에 다룰 수 있는 지구시스템 모형, 즉 접합대순환 모형(Coupled General Circulation Model, CGCM)을 이용하는 방법이 유일하다.

> “섬세하게 해양의 초기장 자료를 생산하는 것이 중·장기 기상 및 기후 예측 성패 좌우”

1980년대 초반 적도 동태평양과 중앙태평양 전체에 걸쳐 광범위하게 나타난 해면온도의 이상 상승 현상인 82/83 엘니뇨현상이 위성으로 관측되고 또한 이러한 현상이 대기와 해양 간의 상호작용에 의한 것이라는 이론적 근거에 따라 이 현상을 이해하고 예측하기 위한 수단으로 대기대순환 모형(AGCM)과 해양대순환 모형(OGCM)을 결합한 접합대순환 모형의 개발이 시작되었다. 미국 오레곤주립대와 독일의 Max Plank 연구소에서 시작된 접합대순환 모형의 개발은 그러나 곧 커다란 문제에 봉착하게 되는데 그것은 AGCM과 OGCM 등 각 성분모형과 결합과정에 아무런 기술적 결함이나 이상이 없음에도 불구하고 결합된 모형이 만들어내는 모형기후가 실제 관측되는 대기와 해양의 상태와 점차 멀어지는 현상을 발견한 것이다. 모든 결합모형에서 나타나는 이런 현상은 접합대순환 모형을 구성하는 성분모형들 간의 완벽하지 못한 에너지와 모멘텀 그리고 수증기의 교환 때문이라는 것을 후에 이해하게 되었으며 이를 기후표류(climate drift)라 명명하였다. 1990년대 이후에 선진 기관들을 중심으로 보다 정교하고 자유도가 크고 분해능이 좋은 접합대순환 모형들이 많이 개발되어 기후변화에 따른 미래의 예측이나 계절 규모의 장기예측에 활용되고 있지만 아직도 기후표류의 문제는 완전히 해결되지 않고 있다.

해양기후와 해양기후변화를 이해하고 예측하기 위해서는 모형의 기후표류 뿐만 아니라 다른 문제점도 많이 있는데 그 중 대표적인 것은 해양 등 각 성분모형들의 초기장을 생산하는 문제에서의 어려움이다. 특히 접합모형의 경우 긴 열적 관성을 갖고 있는 해양의 초기장을 생산하는 문제는 오랜 난제이다.

2. 해양의 이해를 통한 한반도 및 전지구 기상·기후 예측력 향상을 위한 제언

접합대순환 모델에 의한 예측은 전적으로 초기치의 문제(initial value problem)이다. 동시에 해양은 대기보다 훨씬 긴 열적관성을 가지고 있기 때문에 해양에서의 3차원적인 실시간 또는 준실시간으로 관측된 자료를 활용하여 섬세하게 해양의 초기장 자료를 생산하는 것은 중·장기 기상 및 기후예측의 성패를 좌우하는 중요한 과정이다. 또한 최근 ROMS와 같은 지역해양모델을 WRF와 같은 지역기상·기후모

"기상·기후 선진국답게 보다 적극적이고 내실있게 ARGO 프로그램에 참여해야"

형과 결합하여 상세 지역 기상기후를 예측하려는 시도들이 있는데 이 경우에는 측면경계값(lateral boundary condition)을 구하는 것도 마찬가지로 중요한 과정이 된다. 더불어 앞에서 언급한 바와 같이 해양과 대기 모형을 접합하는 경우 일반적으로 발생하는 기후표류나 적분초기충격(initial shock)의 문제를 최소화하고 의미있는 모형결과를 도출하기 위해서는 다음과 같은 과학적 연구와 기술적 접근 방안이 필요하다.

2.1 한반도 주변 해역과 전구 해양에 대한 조밀한 해양관측

해양의 로스비변형반경(Rossby radius of deformation)은 대기의 변형반경보다 대략 한 차수가 낮다. 이는 해양의 관측은 대기의 관측보다도 훨씬 촘촘해야 한다는 것을 의미한다. 그러나 해양관측은 비용이 많이 소요되는 관계로 충분한 관측은 사실상 거의 불가능했었다. 그런데 원격 통신과 탐사기술의 발전과 상대적으로 저렴한 ARGO 플로트의 개발로 2000년 초부터 밀도 높은 전구 해양의 관측이 가능해지기 시작했다. ARGO 프로젝트는 인류최초로 3차원적으로 전구 해양을 실시간 또는 준실시간으로 들여다볼 수 있는 발판을 마련해줬으며 그 임팩트는 가히 혁명적이라 할 수 있었다. ARGO 자료를 활용한 해양초기장은 2000년 이전에는 불가능했던 엘니뇨와 같이 대기-해양 상호작용에 의해 발생하는 현상의 수개월 전 예측을 가능하게 했고, 장기예보에도 적극 활용되기 시작했다. 우리나라도 기상청을 중심으로 2000년부터 지금까지 한반도 근해에 161기, 북서태평양에 103기의 ARGO 플로트를 투하함으로써 사업에 일부 기여하고 있지만 현재 작동 중인 플로트는 전 세계를 떠도는 3,700여 기의 ARGO 플로트 중 10기에 불과하다. 우리나라는 APCC와 같은 세계적으로 영향력이 있는 기후전문 연구기관과 WMO 장기예보 선도센터(LC-LRFMME)를 운영하고 있으며 국내 기상·기후학자들에 의해서 많은 높은 수준의 학술성과를 내는 기후선진국이다. 우리나라의 국제적 위상에 걸맞는 플로트 투하와 연구자들의 적극적인 ARGO프로그램 참여가 아쉽다. 이와 더불어 한반도 중심의 기상예측 능력을 향상시키기 위해서는 보다 더 밀도있는 연안관측

이 필요하고, 특히 우리나라의 서해와 남해는 ARGO를 투하하여 관측을 하기에는 상대적으로 수심이 낮기 때문에 천해용 ARGO 플로트나 해양 글라이더 등을 활용한 입체적인 연근해 관측이 매우 효율적이고 필요하다.

> “결합 자료동화에 대한 적절한 기술이 개발되고 상용화 된다면 중 · 장기 예측에 획기적인 진전이 예상”

2.2 해양 및 결합 자료동화기술 확보 및 결합 방안 연구

충분한 관측 자료를 확보했다 하더라도 접합모형을 위한 초기화에 대한 기술이 부족하다면 모형은 심한 초기충격이나 기후표류를 겪게 될 것이고 이는 예보의 질을 현격하게 떨어뜨리고 의미없는 자료를 생산하게 된다. 따라서 이 두 가지 현상을 최소화하기 위한 섬세한 초기치 생산 기술은 접합모형을 이용한 예측의 핵심이라 하겠다. 이 기술을 확보하기 위해서는 먼저 각 성분별 모형, 즉 해양과 대기, 해빙, 지면모형 등의 초기화 기술에 대한 이해가 필요하며 더불어 안정적인 결합을 위한 섬세한 결합 전략에 대한 연구가 필요하다. 지난 20년간 결합 자료동화(coupled data assimilation)는 접합대순환 모형을 이용한 지구시스템 예측의 신뢰성과 정확성을 담보하기 위한 최첨단 분야로써 선진 기관에서는 적지않은 연구를 진행해 왔지만 아직도 뚜렷한 성과나 진전은 없는 상황이다. 그러나 결합 자료동화에 대한 적절한 기술이 개발되고 상용화 된다면 계절 및 장기예측에 획기적인 진전이 예상된다. 따라서 우리도 이 분야에 대한 연구를 선도적으로 진행하기 위한 노력이 필요하다.

2.3 기후예측을 위한 선도적 기술 혁신

지구시스템 구성 성분 간에 일어나는 보다 작은 규모의 상호작용을 적절히 모사할 수 있는 접합모형의 고해상도화와 모형의 오차와 편향(model bias)을 최소화 시켜나가는 노력은 지속적이어야 한다. 동시에 접합모형 운용과 관련한 방대한 양의 자료와 엄청난 양의 계산을 처리할 수 있는 확장 가능하고 효율적인 알고리즘 개발, 그리고 자료동화 과정과 모델 성능 향상을 위한 머신러닝이나 딥러닝 같은 인공지능(AI)기법의 개발에 대한 노력과 지원이 필요하다.

참고문헌

기상청 종합 기후변화감시 정보, 2021: 해양기후 분석보고서.

http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/marine/sst_main

Bryne, M. P., Pendergrass, A. G., Rapp, A. D., & Wodzicki, K. R., 2018: Response of the Intertropical Convergence Zone to Climate Change: Location, Width, and Strength. Current Climate Change Reports, 4, 355-370.

Held, I. M., & Soden, B. J., 2006: Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. Journal of Climate, 19, 5686-5699.

Hu, Y. and Fu, Q., 2007: Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979, Atmos. Chem. Phys., 7, 5229–5236, https://doi.org/10.5194/acp-7-5229-2007.

Im ES, Y. W. Choi and J. B. Ahn, 2017: Robust intensification of hydroclimatic intensity over East Asia from multi-model ensemble regional projections, Theoretical and Applied Climatology, 129, 1241–1254 DOI 10.1007/s00704-016-1846-2.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds. Cambridge University Press.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, doi:10.1017/9781009157896.001.

Kim, S. H., and Ahn, J. B., 2024: Daily temperature variation in March in East Asia from 1979 to 2020. Climate Dynamics, 62, 4237-4251.

Kim, S. H., and Ahn, J. B., 2024: Tropical Cyclone Landfalls in the Northwest Pacific under Global Warming. International Journal of Climatology, submitted.

Klotzbach, P. J., Kimberly M. Wood,Carl J. Schreck III,Steven G. Bowen,Christina M. Patricola,Michael M. Bell, 2022: Trends in Global Tropical Cyclone Activity: 1990–2021. Geophysical Research Letters vol 49, Issue 6 https://doi.org/10.1029/2021GL095774.

Seidel, D. J., Fu, Q., Randel, W. J., & Reichler, T. J.A, 2008: Widening Tropical Belt. Nature Geoscience, 1, 21-24.

Song, F., & Zhou, T., 2014: Interannual Variability of East Asian Summer Monsoon Simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill Dependence on Indian Ocean–Western Pacific Anticyclone Teleconnection. Journal of Climate, 27, 1679-1697. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00248.1.

아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측

김백조, 조형준, 이철규 국립기상과학원 관측연구부

Ⅰ. 전지구해양감시 공동연구(Argo) 사업이란?
Ⅱ. 국립기상과학원 아르고 사업의 추진현황
Ⅲ. 아르고 사업에 대한 우리의 대응 및 향후 계획

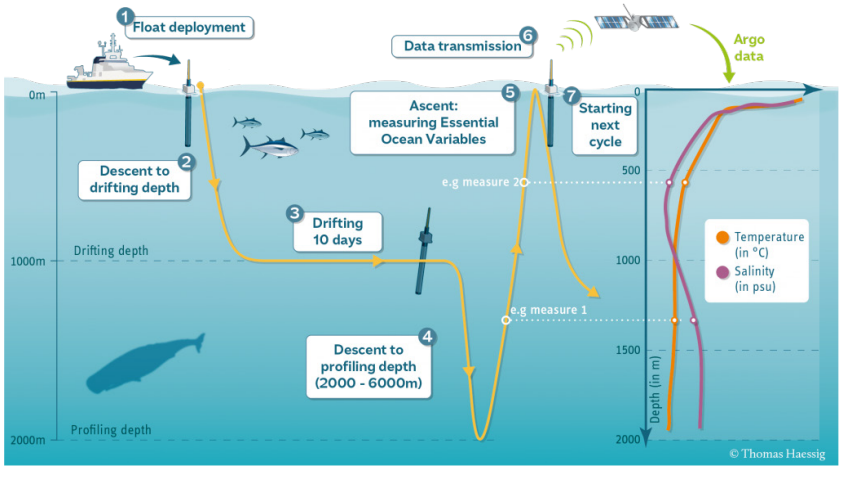
아르고(Argo) 프로그램은 세계기상기구(WMO)와 국가 간 해양과학위원회(IOC)가 공동으로 추진하는 전지구 해양관측 사업으로, 전지구 해양 상층부의 변동 감시와 기후변화에 대한 이해를 목적으로 한다. 국립기상과학원은 2001년부터 아르고 프로그램에 참여해 한반도 근해와 태평양에 플로트를 투하하고, 이를 통해 해양환경 변화와 태풍의 영향을 감시하고 있다. 2023년까지 한반도와 태평양에 총 264기의 플로트를 투하했으며, 이를 통해 동아시아 해역에서 일본, 중국과 함께 관측망을 구축하고 있다. 향후 아르고 플로트 관측자료의 활용과 공유체계를 강화하고, 해양기후변화 대응 역량을 강화해야 할 것이다. ■

"전 세계 20여 개국 연구기관 또는 대학에서 800여 기 이상의 플로트를 투하하여 해양관측 자료 생산"

1. 전지구해양감시 공동연구(Argo) 사업이란?

ARGO(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, 이하 아르고) 프로그램은 세계기상기구(WMO)와 국가 간 해양과학위원회(IOC)가 공동으로 추진하는 전지구 해양관측 사업이다. 이 프로그램은 전지구 기후/해양관측시스템(GCOS/GOOS), 기후변동 및 예측성(CLIVAR), 전지구 해양 자료동화실험(GODAE) 등 다양한 국제 해양관측 프로그램들과 연결되어 추진되고 있다. 이 사업은 월 단위에서 십 년 이상 규모에 대한 해양 상층부의 변동 감시와 해양기후변화에 대한 정량적인 이해를 주요 목적으로 한다. 2000년부터 본격적으로 시작된 아르고 사업으로 한국, 미국, 일본 등 전 세계 20여 개국 30여 개 이상의 연구기관 또는 대학에서 매년 800여 기 이상의 플로트를 전지구 해양에 투하하여 해양관측 자료를 생산하고 있다.

그림1. 전지구해양감시를 위한 아르고 플로트 관측원리(https://argo.ucsd.edu)



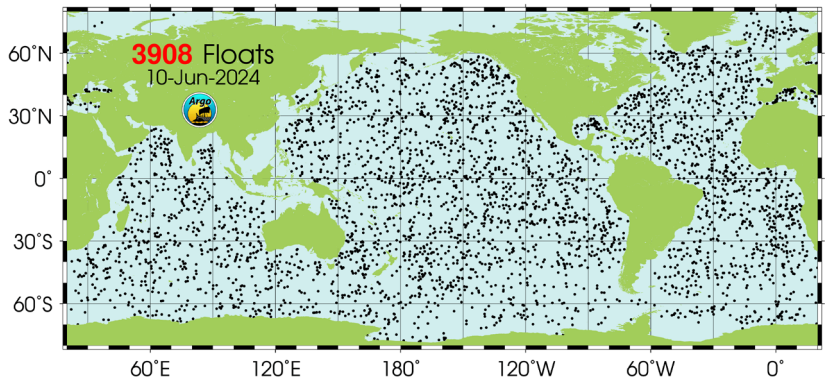
아르고 플로트(Argo float)는 아르고 프로그램에서 사용되고 있는 플로트를 말하는데, 일반적으로 로켓 모양을 하며 해양에 투하되면 지정된 수심까지 하강/상승을 반복하며 해양환경 요소를 관측한다. 관측된 자료는 위성으로 전송되

“2024년 6월 현재 3,908기의 아르고 플로트가 관측 수행 중”

어 전지구 또는 지역 자료센터로 보내어져 사용자에게 제공된다. 아르고 플로트는 수온과 염분 등 물리요소 뿐만 아니라 용존산소, 클로로필, 질산염 등 생지화학적 요소들까지 준 실시간으로 관측한다. 아르고 플로트의 유형은 Core Argo, BGC(BioGeoChemical) Argo, Deep Argo로 크게 3가지로 분류된다. 기본이 되는 Core Argo는 아르고 프로그램의 원래 목표였던 수온, 염분, 압력을 수심 2,000m까지 관측하는 플로트이고 BGC Argo는 Core 관측 요소에 추가적으로 생지화학적 요소를 측정하는 플로트이다. 그리고 Deep Argo는 Core와 동일한 요소를 측정하지만, 수심 4,000~6,000m까지 관측하는 플로트이다.

아르고 플로트의 임무는 10일 주기로, 깊은 해류를 따라 표류하는 데 대부분의 시간이 소요되며, 그 후 해수면 위로 다시 올라가면서 일련의 관측을 수행한다(그림 1). 플로트가 해수면까지 올라가면 위치를 파악하고, GPS를 통해 10일 주기로 신호를 보낸 다음 위성과 통신하여 데이터를 보내게 된다. 이후, 플로트는 약 9일 동안 표류 깊이 1,000m까지 가라앉은 다음 전도율, 온도, 압력을 측정하면서 천천히 표면으로 올라간다. 이 주기는 보통 4~5년 후에 플로트가 수명을 다할 때까지 반복된다. 그림 2는 현재 전지구에서 관측을 수행하고 있는 아르고 플로트의 현황을 나타냈으며, 총 3,908기가 관측을 수행하고 있다.

그림2. 아르고 플로트를 활용한 전지구해양감시 현황(2024.06.10.)(https://argo.ucsd.edu)



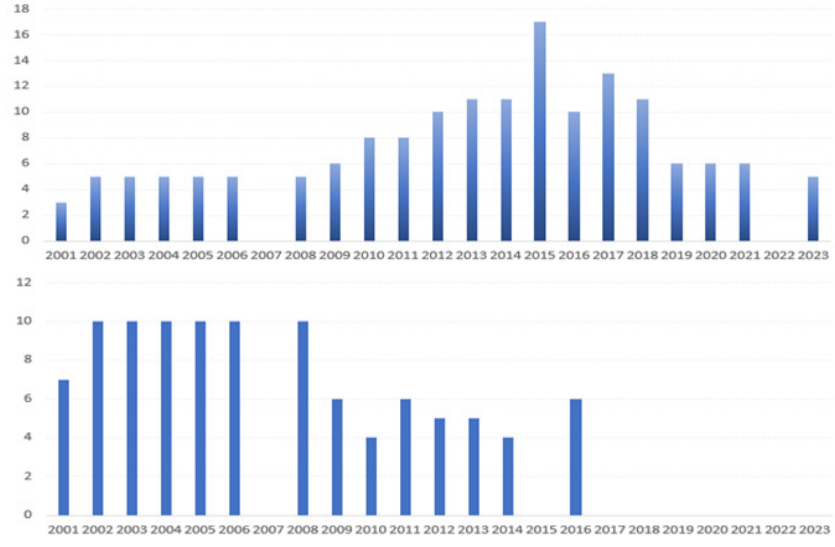
“국립기상과학원, 2023년까지 총 264기의 아르고 플로트 투하”

2. 국립기상과학원 아르고 사업의 추진현황

2.1 아르고 플로트 투하 및 홈페이지 운영

국립기상과학원은 2001년부터 전지구해양감시 공동연구(Argo) 프로그램에 참여하고 있다. 전 세계 해양환경을 실시간으로 감시·관측하는 프로그램에 지속적인 아르고 플로트 투하와 관측자료 품질관리 개선 및 지역 자료센터 운영 등으로 기여하고 있다. 2023년까지 총 264기의 아르고 플로트를 한반도 근해와 태평양에 투하하였고, 이를 기반으로 동아시아 해역에서 일본, 중국과 함께 관측망을 구축하고 있다. 한반도 근해에는 2001~2023년 기간에 동해 139기, 천해인 서·남해 22기로 총 161기를 투하하였고 태평양에는 2001년부터 2016년까지 북서태평양 79기, 북태평양 24기로 총 103기의 플로트를 투하하였다(그림 3).

그림3. 국립기상과학원 아르고 플로트 투하현황: (위) 한반도 근해, (아래) 북서태평양



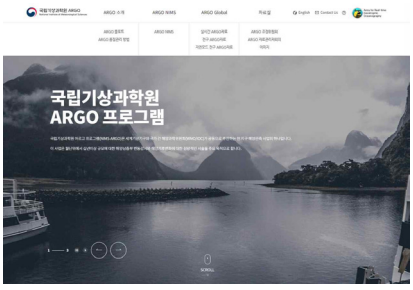
한반도 근해(천해용)에서 아르고 플로트 투하 위치는 태풍 통과 전·후의 해양환경 변화 연구와 양자강 유출수에 따른 저염 확산을 감시하여 우리나라 해역에 영

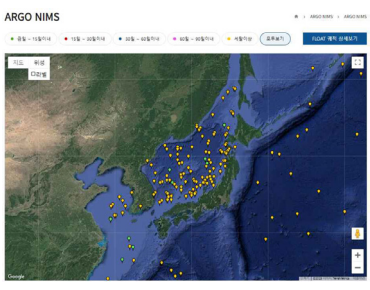
> “2023년 생산된 우리나라 아르고 플로트 관측자료, 24시간 내 자료 전송률 100%”

향을 미칠 수 있는 저염수의 거동을 파악하기 위하여 선정하였다. 주로 사용하는 아르고 플로트 모델은 프랑스 NKE 사에서 제작한 장비로 센서는 Seabird 사의 SBE41CP로 장착하였다. 위성 통신 시간을 고려하여, 표층에서 머무는 시간은 충분히 고려하였고 표류 수심(parking depth)과 관측 수심(sampling depth)을 동일하게 설정하였다. 이렇게 투하한 아르고 플로트에서 생산된 자료들은 실시간 품질관리를 거쳐 국제자료수집센터(Global Data Assembly Center)로 전송하였다. 일정 기간 경과 후에는 지연모드 품질관리를 수행하여 국제 공동연구 프로그램 내의 규격에 맞춰 생산·전송이 이루어진다. 실시간으로 생산되는 자료는 24시간 내에 전송을 목표로 하고 있으며, 2023년에 생산된 우리나라의 아르고 플로트 관측자료는 24시간 내 자료전송률이 국제 평균 88%보다 높은 100%에 달하고 있다.

이렇게 생산된 자료들은 국립기상과학원 아르고 홈페이지(http://argo.nims.go.kr)를 통해서도 서비스되고, 전지구 아르고 플로트 자료와 함께 표출된다(그림 4). 우리나라에서 관측한 자료에 대해서는 연직 프로파일과 T-S 다이어그램 등을 통해 대외적으로 서비스되고 있다. 최근 6년간 홈페이지 접속자 수는 2018년 336,851명에서 2023년 1,865,466명으로 약 6배 증가하였으며(표 1), 주요 홈페이지 접속기관은 정부기관, 연구기관, 대학교, 고등학교 등이다. 최근 해양환경에 대한 관심이 높아지면서 고등학교 과학 교재에도 소개되어 중·고등학교 관계자들이 꾸준히 방문하고 있는 추세이다.

그림4. 국립기상과학원 아르고 홈페이지(http://argo.nims.go.kr)





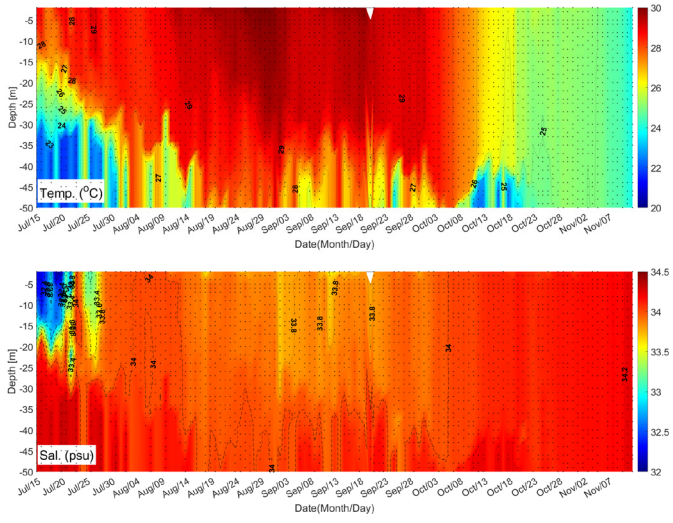
2.2 아르고 플로트 관측자료 활용연구

표1. 최근 6년간 아르고 홈페이지(argo.nims.go.kr) 접속자 수

구분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년
접속자 수	336,851	482,838	362,051	909,058	1,980,305	1,865,466

국립기상과학원은 2023년에 우리나라로 내습하는 태풍이 지나가는 길목인 북위 30도와 32도에 총 5기의 아르고 플로트를 투하하였다. 태풍 통과에 따른 해양 환경변화를 분석할 수 있는 해역을 아르고 플로트 투하 지역으로 선정하였다. 태풍이 빈번히 발생하는 시기를 고려하여 7월에 투하하였으며, 단주기 변동을 보기 위해 1일 또는 2일로 관측 주기를 설정하였다. 그림 5는 태풍 독수리 북상 시 동중국해에 투하한 1일 주기로 관측하는 1902661 플로트에서 관측된 수온·염분 시계열이다. 관측 초기 표층 가열에 의한 28℃ 이상의 고수온이 관측되었으며, 양자강 저염수 확장에 따른 32psu의 낮은 염분도 나타났다.

그림5. 아르고 플로트로 관측된 수온과 염분 시계열(7.13.~11.13., WMO ID: 1902661)

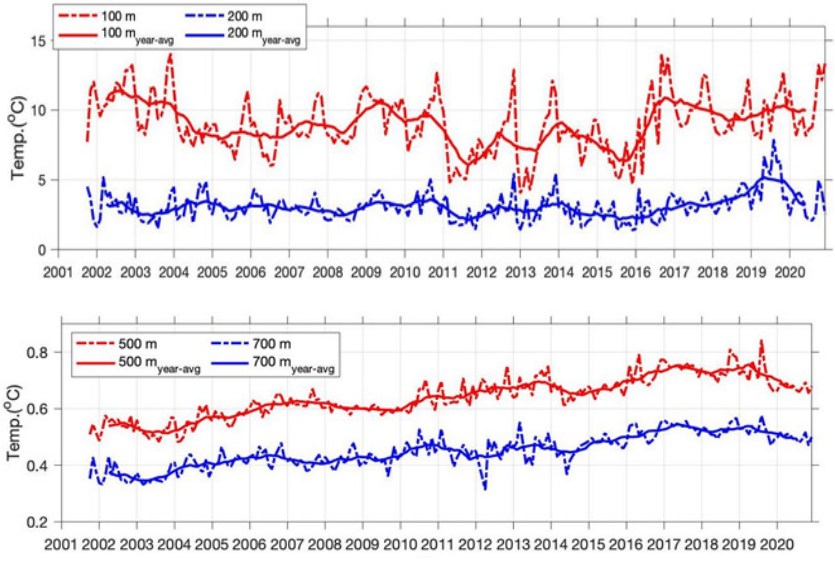


“2001~2020년까지 아르고 플로트 관측자료 활용하여 해양환경 장기 변동성 분석”

또한 5호 태풍 ‘독수리’가 해당 관측 영역과 다소 멀리 떨어졌지만, 간접적인 영향을 받아 해당 시기(7.23.~7.27.)에 평년에 비해 다소 낮은 염분이 수심 35m까지 확장하는 형태를 보였다. 해당 해역은 33.8~34psu를 유지하는 해역이나, 해당 시기에는 33.4psu까지 확인되었다. 5호 태풍의 이동 경로가 다소 일반적이지 않아 직접적인 태풍 영향권에서 관측이 되지 않았지만, 200km 이상 떨어진 해역에서도 태풍의 간접영향으로 해양환경이 변화함을 확인할 수 있었다.

한편, 2001년에서 2020년까지 아르고 플로트 관측자료를 활용한 해양환경 장기 변동성을 분석하였다. 울릉도-독도 주변 해역(36~39N°, 130~133E°)에 대해 월별 아르고 플로트 관측 프로파일 6,130개를 활용하였다. 그림 6은 중층(100~200m)과 심층부(수심 500~700m)에서의 월별 수온과 12개월 이동평균값의 변화를 나타낸 것이다. 연주기 변화는 수심 증가에 따라 급격히 감소하는 것을 볼 수 있고 최댓값을 나타내는 시차에 있어 표층은 늦여름 또는 초가을(8~9월)에 나타나 수심이 증가함에 따라 – 예를 들어 수심 100m - 시간지연이 나타나 늦가을에서 초겨

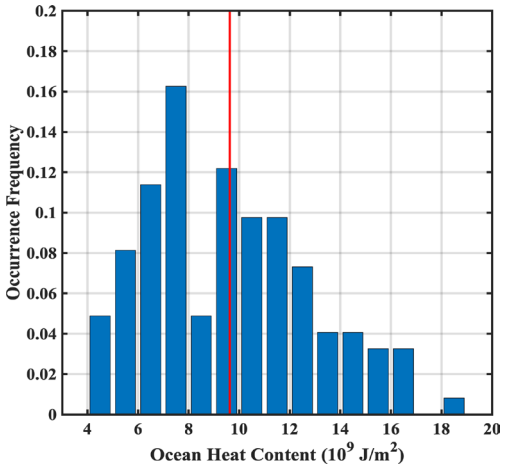
그림6. 2001~2020년 울릉도-독도 주변해역 (위) 중층(100~200m)과 (아래) 심층(500~700m) 수온 변화(실선: 12개월 이동 평균값)(국립기상과학원, 2021)



“ 2023년 울릉도-독도 주변 해역 연평균 열용량, 9.6×10^{9}J/㎡ ”

울이 되어서 최댓값을 보인다. 수심 200m의 경우, 여름철 상승과 겨울철 하강 패턴은 매우 약하고, 다른 형태의 패턴이 혼재되어 있음을 알 수 있다. 수심 200m 층에서 5년 이상의 장기 변동 경향은 100m 층에 비해 그 변화 폭은 작지만 여전히 존재함을 알 수 있다. 심해 수온의 경우, 500~700m에서 절대적인 값은 작지만 (약 0.2℃ 정도) 2001년부터 2020년까지 일정하게 증가하는 경향이 나타났다. 또한 5년 이상의 장기변동 경향도 뚜렷하게 보였다. 이러한 변동의 위상을 보면, 깊은 곳에서 먼저 시작하는 경향이 일부 나타났다. 예를 들어 700m의 12개월 이동 평균값을 보면, 2003년 초에 최저를 보인 반면 500m 층은 2003년 말부터 이러한 경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 2009년과 2014년의 경우 비슷한 패턴이 나타남을 알 수 있다.

그림7. 2023년 울릉도-독도 주변 해역 열용량 히스토그램



경북대와 공동으로 아르고 플로트를 통하여 산출한 2023년의 울릉도-독도 주변 해역의 연평균 열용량은 9.6×10^{9}J/m²으로 2017~2020년의 평균적 열용량 (10.2×10^{9}J/m²) 보다 약간 낮은 정도였으며, 2011~2016년 평균(8.52×10^{9}J/m²) 보다는 높았다(그림 7). 또한, 낮은 열용량과 높은 열용량의 극값은 각각 겨울철과 여름철에 관측되었으나, 대한해협을 통해 들어오는 난류와 북쪽에서 내려오는 한류의 영향을 받는 해역의 특성상 위도별로 열용량 차이는 크게 나타났다.

2.3 아르고 사업 관련 국제협력

국립기상과학원은 아르고 사업 관련 국제회의에 적극적으로 참여하고 있다(그림 8). 아르고 조정회의(Argo Steering Team, AST)는 매년 초 아르고 사업에 대한 정책적 결정을 위한 자리로 각 참여국의 투하 계획과 프로그램 전반적인 개선사항 등을 논의한다. 우리나라의 신규 아르고 플로트 투하 계획과 함께 실시간 및 지연

“ 2024년 5월 30일, 부산에서 ‘ARGO 전문가 워크숍’ 개최 ”

모드 품질관리 현황 등을 보고하고 있다. 아르고 사업 홈페이지 운영현황을 공유하고 국내에서 아르고 사업에 대한 관심이 증가하고 있음을 소개하였다. 아르고 자료관리회의(Argo Data Management Team, ADMT)에서 천해 관측에 대한 성공적인 사례를 기반으로 동중국해 해역에서의 단주기 관측 결과를 발표하였다. 향후 아르고 사업 관련 AST 또는 ADMT 유치를 통한 한국의 아르고 사업성과의 홍보 강화를 통한 국가 위상 제고에도 기여하고자 한다.

그림8. 아르고 조정회의(AST-25)(좌)와 아르고 자료관리회의(ADMT-24)(우)

3. 아르고 사업에 대한 우리의 대응 및 향후 계획

전지구해양감시의 국제적 역할 강화를 위한 국립기상과학원 아르고 사업 발전 방안 모색 및 전문가 정보교류와 협력체계를 마련하고자 ’24년 5월 30일에 부산 APEC 기후센터에서 ‘전지구해양감시 공동연구(Argo) 전문가 워크숍’을 개최하였다(그림 9). 국립기상과학원뿐만 아니라 국립수산과학원, 국립해양조사원, APCC, 한국해양과학기술원, 극지연구소, 경북대, 부경대, 부산대 등 40여 명이 참석하였다.

이번 워크숍에서 국제 아르고 프로그램의 새로운 슬로건인 ‘OneArgo’ 하에서 아르고 플로트 공동 관측 목표인 2030년까지 총 4,700기(Coro 2,450기, Deep 1,250기, BGC 1,000기)와 매년 800기 이상 투하를 목표로 하고 참여국에 장기 관측계획 요청함을 공유하였다. 특히 일본은 ’25~34년 동안 매년 120~220기 투하하기 위한 예산을 확보하였고 도호쿠대학/일본해양과학기술원(JAMSTEC)이 공

“ (가칭)K-OneArgo 협의체’ 구성하여, 정보 생산, 위험기상 선제적 대응, 관측·분석·활용 역량 강화 필요 ”

동 운영하는 AIMEC(Advanced Institute for Marine Ecosystem Change) 설립('24.1)과 일본정부 지원 대규모 학술연구 프로그램 'Japan OneArgo Center' 설립을 제시함을 발표하였다. 중국은 해양대학교와 Laoshan㈜ 협력으로 Deep 아르고를 지속적으로 개발 및 개선하고 '23년 8기를, '24년 20기를 투하할 계획을 발표하였다. 아르고 플로트 관측자료 활용연구는 태풍에 의한 해양의 열용량 변화와 태풍-해양 상호작용 연구(제주대, KIOST), 기후예측시스템(Glosea6) GODAPS2의 입력자료(국립기상과학원), 해양예측시스템의 입력자료(부경대), 남극해 해양순환 현장조사(극지연), 해양순환예측모델 검증, 재분석자료 생산과 중층 동해해류모식도 제작(해조원), 위성관측자료와 융합으로 입체적 해양기후변화 감시기술 개발(부산대) 등과 같이 해양 위험기상(태풍) 영향, 해양환경 변화, 기후예측에 활용되고 있었다. 이번 워크숍을 통해 기상청(국립기상과학원) 주도로 20여 년만의 전지구해양감시(Argo) 전문가 모임을 처음으로 개최하였고 협업체계 구축에 대한 공감대를 형성하였다. 국립기상과학원의 아르고 관측자료 활용과 품질관리 기술개발 결과를 공유하고 학계와 공동연구 및 협력 분야의 지속적인 확대가 추진되어야 한다. 국제 아르고 커뮤니티에 국내 기관의 입지 및 기술·정책 정보에 대한 국내 허브 역할 확대를 위한 관련 국제회의(AST, ADMT)에 지속적인 참여가 요구된다.

향후, 국제 아르고 커뮤니티에서 관측 참여와 협력 확대를 강조하고 국내 참여 기관 간 역할 분담으로 체계적 대응을 위하여 '(가칭)K-OneArgo 협의체'를 구성할 필요가 있다. 이를 통해 해양기후변화 과학적 정보 생산과 위험기상(태풍 등) 선제적 대응과 전지구해양감시 공동연구(Argo) 사업 운영과 관측·분석·활용 역량 향상이 가능할 것이다. 또한 학·연·관 협력으로 아르고 플로트 관측자료 활용과 공유체계 강화가 요구된다. 특히 아르고 홈페이지 개선을 통한 자료제공을 효율화하고 대국민 홍보를 강화하여야 한다. 나아가 세계기상기구(WMO OceanOPS), 아르고 지역센터 등과 연계하면서 아르고 플로트 관측자료의 기후값 개발 및 산출자료 생산·분배로 Pacific Argo Regional Center 역할을 강화하고 해양기후변화 대응을 위한 아르고 플로트 관측·분석·예측 분야 전문가 양성 프로그램도 개발할 필요

가 있다. 해양글라이더 부력엔진 국산화 기술을 토대로 천해용 아르고 플로트 국산화가 시급하다.

그림9. 전지구해양감시 공동연구(Argo) 전문가 워크숍

참고문헌

국립기상과학원, 2021: 국립기상과학원 ARGO 플로트 운영보고서(2001-2020), pp.45.
국립기상과학원, 2024: 전지구해양감시 공동연구(ARGO) 전문가 워크숍 자료집, pp.176.
국제 아르고 커뮤니티 공식 홈페이지, https://argo.ucsd.edu
기상청, 2024: 2023 연 기후특성 보고서, pp.102.

웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용

김대현 오션테크(주) 오션시스템연구소 소장 daehyun@gmail.com

Ⅰ. 무인해양관측장비
Ⅱ. 웨이브 글라이더란?
Ⅲ. 웨이브 글라이더 활용 사례
Ⅳ. 전망 및 제언

지구 온난화 영향으로 나타나는 기후변화로 전지구 시스템을 이해하기 위해서는 해양의 역할과 장기간 모니터링하는 것이 중요하다. 해양관측 중에서 직접적인 관측은 선박을 이용하는 것으로 높은 비용과 전문인력 탑승이 필수적이고 장기간 관측이 어렵다는 단점이 있다. 직접적인 관측의 단점을 극복하기 위해 무인에 대한 필요성이 강조되었고 기술의 발전으로 무인해양관측장비는 해양, 기상 관측의 새로운 가능성을 열어주었다. 무인으로 개발된 장비들은 기존의 유인 선박이나 고정된 부이 관측 시스템보다 더 효율적이고 정확한 자료를 제공하고 있다. 다양하게 개발되고 활용되는 장비 중에서 초기 개발된 무인해양관측장비로 현재까지 널리 활용되고 있는 웨이브 글라이더(Wave Glider)를 소개하고자 한다. ■

“ 해양, 지구 온난화의 90% 이상의 열 흡수 ”

Ⅰ. 무인해양관측장비

해양관측에는 선박이나 관측 장비를 계류하는 직접적인 방법과 위성, 레이더를 이용하는 간접적인 방법이 있다. 아주 오래전에는 간접적인 방법보다는 바다로 직접 나가는 직접적인 관측만이 있었다. 최초 관측은 해양을 목적으로 한 것은 아니지만 선박을 이용해 제임스 쿡 선장이 1768년에 플리머스항에서 출항하며 시작했다. 순수 해양과학에 목적을 두고 해양탐사를 한 것은 1872년 증기 범선인 챌린저호를 이용하여 약 4년간 약 127,000 km 항해한 것이 시작이다(이상룡 등, 2006). 대양으로 실제 관측을 시작한 이후로 현재까지 대부분 연구선이나 조사선을 이용한 선박 관측 위주로 조사가 진행되고 있다. 선박을 이용한 해양관측(해수면 아래, 해수면, 해양 기상 관측 포함)은 비용이 많이 들고 선박 운영에 필요한 인원 외 관측 장비 운용에 따른 전문인력이 탑승하는 것이 필수적이다. 또한 해상 상태에 따라서 선박 운항이 불가능하여 계획된 장기간 연속 관측이 어려워질 수 있다.

최근 지구 온난화 영향으로 발생하는 기후변화에 대한 전지구 시스템을 이해하기 위해서 해양의 역할과 장기간 변화에 대한 모니터링이 중요하게 대두되었다. 즉, 해양의 변화는 지구 전체 기후 시스템에 큰 영향을 미치며, 이에 대한 이해와 대응은 시급한 과제이다. 해양은 지구 온난화의 90% 이상의 열을 흡수하고 있으며, 이는 해양 생태계와 인간 사회에 직접적인 영향을 미치게 된다.

전 지구 시스템에서 해양을 이해하기 위해 장기간 관측을 하면서 동시에 비용과 인력 절감을 위한 목적과 최근에 자율 주행과 같은 기술 발달로 무인해양관측장비 개발에 많은 시도가 있었다. 현재는 성공적인 개발을 통해 운용 중인 장비가 증가하는 추세이다. 여기에 관측된 자료는 위성통신을 이용해 실시간으로 전송하기 때문에 신속하게 자료를 확보할 수 있는 것도 중요한 장점 중의 하나이다.

무인해양관측장비 산업은 빠르게 성장하고 있다. 주요 시장 조사 보고서(Expert Market Research)에 따르면 2023년부터 2032년까지 연평균 성장률을 최소 7.9%로 예상하고 있다. 이러한 성장률은 무인해양관측장비의 중요성과 수요가 지속적으로 증가할 가능성을 보여주는 것이다. 해양기상 연구, 군사 응용, 상업적 해양 활

"웨이브 글라이더, 파도의 에너지를 활용하여 자율적으로 이동하는 혁신적 무인수상장비"

동 등 다양한 분야에서의 수요 증가로 인해 꾸준히 성장할 것으로 예상한다. 특히, 기후변화 대응 및 해양 환경 보호와 관련된 연구가 확대되면서 이러한 장비들의 활용도는 더욱 높아질 것으로 예상된다.

무인에 대한 필요성과 기술 발전으로 무인해양관측장비는 해양, 기상 관측의 새로운 가능성을 열어주었다. 무인으로 개발된 장비들은 기존의 유인 선박이나 고정된 부이 관측 시스템보다 더 효율적이고 정확한 자료를 제공하고 있다. 다양하게 개발되고 활용되는 장비 중에서 초기 개발된 무인해양관측장비로 해수면에서 작동하면서 현재까지 널리 활용되고 있는 웨이브 글라이더(Wave Glider)를 소개하고자 한다. 여기서 웨이브 글라이더에 대해 자세히 소개하는 것은 앞으로 다양한 무인해양관측장비에 대한 국내 활용성을 높이고, 더 나아가 국내에서 무인해양관측장비가 개발되고 성공적으로 바다에 투입되어 이 분야 산업을 선도할 수 있기를 바라기 때문이다.

II. 웨이브 글라이더란?

웨이브 글라이더는 파도의 에너지를 활용하여 자율적으로 이동하는 혁신적인 무인수상장비이다. 이 장비의 작동 원리는 파도의 상하운동을 전진 운동으로 변환하는 독특한 메커니즘을 가지고 있다.

장비는 그림 1과 같이 해수면에 위치한 플로트(float)와 해수면 아래 위치한 서브(sub)가 있으며 두 개를 연결하는 케이블(umbilical cable)로 구성된다. 플로트에는 태양 패널과 기상, 해양관측에 필요한 다양한 센서가 탑재되어 있으며 위성통신 및 GNSS 안테나도 설치되어 있다. 서브는 해역 특성에 따라 케이블 길이를 선택하여 플로트 아래 4, 6, 8m에 위치하며 서브에는 6쌍의 날개가 부착되어 있다.

웨이브 글라이더는 해양 표면에서 지속적으로 발생하는 파랑 에너지를 활용하여 추진력을 얻기 때문에 연료가 필요하지 않다. 파랑의 원 궤적 운동에 의해 해수면에 위치한 플로트가 상승, 하강하고 아래 연결된 서브에 부착된 날개가 상하운동

“ 파랑 에너지를 활용하여 추진력을 얻고, 태양광 에너지를 통해 관측을 수행하는 친환경적 장비 ”

을 하게 된다(그림 2). 이렇게 발생한 상하 운동이 전진 운동으로 변환되어 서브가 앞으로 나가면서 플로트를 끌고 가는 시스템으로 자연으로부터 발생하는 에너지를 활용하는 친환경 장비이다. 플로트에 설치된 태양광 패널은 위성통신 등 전자장비와 각종 관측 센서에 필요한 전력을 공급하는 역할을 한다. 파랑 운동에너지와 태양광 에너지를 통해 다른 장비와 비교해 장기간 지속적인 관측을 수행할 수 있는 장점이 있다.

그림1. 웨이브 글라이더 모식도 (Liquid Robotics, Inc.)

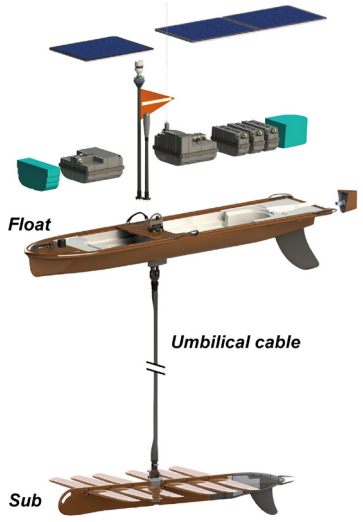
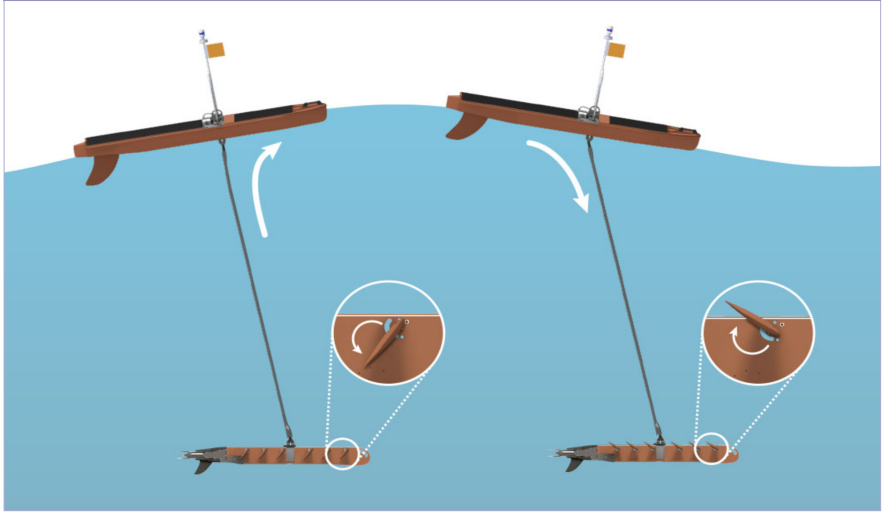


그림2. 파랑 운동으로 웨이브 글라이더 추진력 변환하는 모식도 (Liquid Robotics, Inc.)



“ 해양, 해양 대기 상호작용, 태풍 관측, 수산자원 관리, 수중 생물 추적, 환경 모니터링 등에서 활용 ”

모든 관측장비에는 각 장비에 대한 장점도 있지만 한계점도 있다. 최근에 개발하여 운용 중인 무인해양관측장비의 경우에도 특징을 잘 파악하여 관측 목적에 잘 맞게 장비를 선택하는 것이 중요하다. 웨이브 글라이더의 한계는 제한된 추진력이다. 앞에서 설명한 파랑 에너지를 사용하여 추진력을 얻는 것은 장기간 지속적인 관측에는 장점이 있지만 파고가 낮은 시기에는 추진력이 약해지게 된다. 이는 특정 해역에서는 운영 제한요소가 되며 또한 강한 해류에 의한 원하는 경로 유지가 어려울 수 있다. 다른 한계로는 장기간 태양광 에너지를 이용하지 못하는 상황이 발생하게 되면 장비 운용과 센서 작동에 필요한 전력 공급에 영향을 주게 된다. 최근에는 배터리를 환경 조건에 따라 추가 설치하거나 저전력 장비를 적용하고자 노력하고 있다.

Ⅲ. 웨이브 글라이더 활용 사례

웨이브 글라이더는 해양, 해양 대기 상호작용, 태풍 관측 등 해양기상 분야에서 활용되고 있으며 그 외 분야인 수산자원 관리, 수중 생물 추적, 환경 모니터링 등에서도 활용도가 높아지고 있다. 여기서는 국내외 몇 가지 활용 사례를 소개하고 이를 통해 앞으로 관측 목적과 해역에 따라서 웨이브 글라이더를 포함한 무인수상장비를 관측에 투입, 활용 방안 수립에 도움이 되기를 바란다.

1. 해외 활용 사례

태평양 횡단 프로젝트

웨이브 글라이더 태평양 횡단 프로젝트는 해양관측의 새로운 시대를 열기 위해 Liquid Robotics사에 의해 추진된 혁신적인 프로젝트로 자율적으로 태평양을 횡단하며 다양한 해양 자료를 수집하는 것을 목표로 하였다.

웨이브 글라이더는 2011년 11월 17일에 미국 샌프란시스코에서 출발해 하와이를

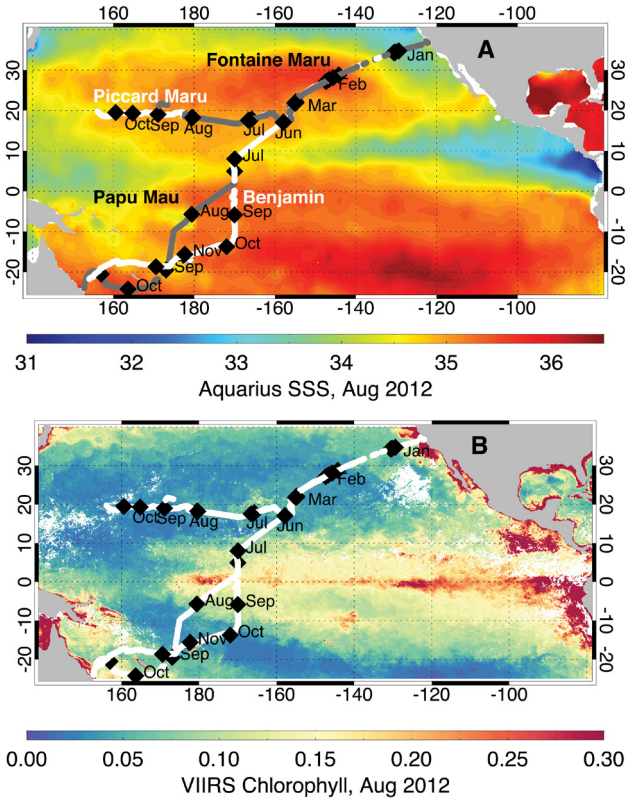
> “ 웨이브 글라이더, 2011년 약 300일 동안 태평양 횡단하며 관측 수행 ”

걸쳐 호주, 일본까지 이동, 횡단하였으며 총 이동 거리는 약 16,668㎞이고 약 300일 동안 운영되었다(그림 3). 운영 중에는 해수면 수온 및 염분, 기상 자료, 클로로필-a, 해류 관측을 연속적으로 수행하였다.

주요 기술적인 성과는 파랑과 태양광을 에너지원으로 하여 장기간 자율 운용 가능성을 확인하였고, 변동성 높은 해수면에서는 장기간 운용으로 장비의 높은 내구성을 입증하였다. 그리고 모든 관측 자료를 다양한 해양 및 기상 조건에서도 수집하여 위성통신을 통해 실시간 전송할 수 있음을 보여주었다.

태평양 횡단 프로젝트는 웨이브 글라이더의 성능과 잠재력을 입증하는 최초의 중요한 임무로 이를 통해 무인해양관측장비와 관련된 기술 향상의 계기가 되었다. 이 프로젝트를 통해 수집된 데이터는 해양 연구와 기후변화 모델링에 이바지하였으며, 이후 다양한 해역과 조건에서 장기적인 배치를 통해 더 많은 자료를 수집하고, 해양 관측 기술을 더욱 발전시키는 데 큰 몫을 하였다.

그림3. 웨이브 글라이더 이동 경로 및 수온, 염분 위성 영상 (Villareal, et al., 2014)



태풍 관측

해양과 대기 사이의 상호작용을 이해하는 것은 열대성 저기압, 특히 태풍의 영향에 대한 정확한 모델 결과를 만들기 위해서 필수적이다. 2016년에 Mitarai et al.은 웨이브 글라이더를 사용하여 태풍의 중심에서 표면 바람과 해류를 동시에 관

> “2013년 태풍 다나스 중심에서 15㎞ 떨어진 지점까지 접근하여 관측 수행”

측하였다. 관측은 일본 오키나와 동쪽 150㎞ 해상에서 이루어졌으며, 태풍 다나스(2013년)의 중심에서 15㎞ 떨어진 지점까지 접근했다(그림 4, 5).

주요 연구 결과로는 해수면 바람과 해류의 비대칭성, 해류의 회전 운동, 바람에 의한 에너지 전달을 확인하였으며 태풍이 지나간 후 해류 관성 운동이 오랫동안 지속되는 것을 알게 되었다. 이 연구를 통해 태풍의 중심에서 대기와 해양 사이의 상호작용을 실시간 모니터링에 성공하여 웨이브 글라이더의 유용성을 확인하였으며 대기 - 해양 상호작용에 대한 이해를 더욱 높였다.

그림4. 웨이브 글라이더가 태풍 다나스(2013년)의 중심에 가까이 접근한 후 시계 방향으로 회전하는 궤적 (Mitarai et al., 2016)

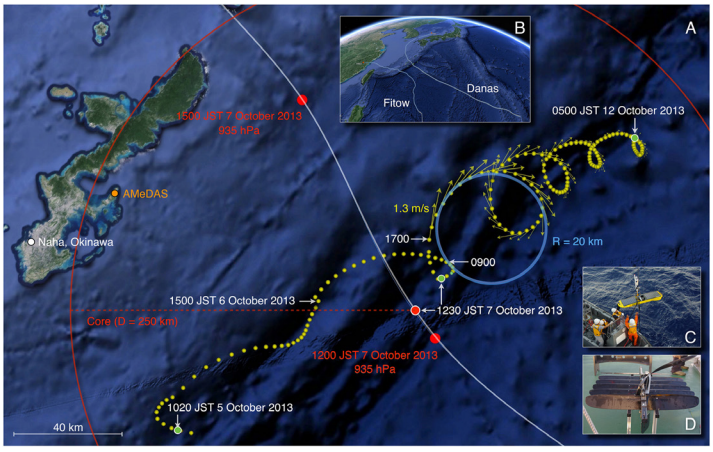
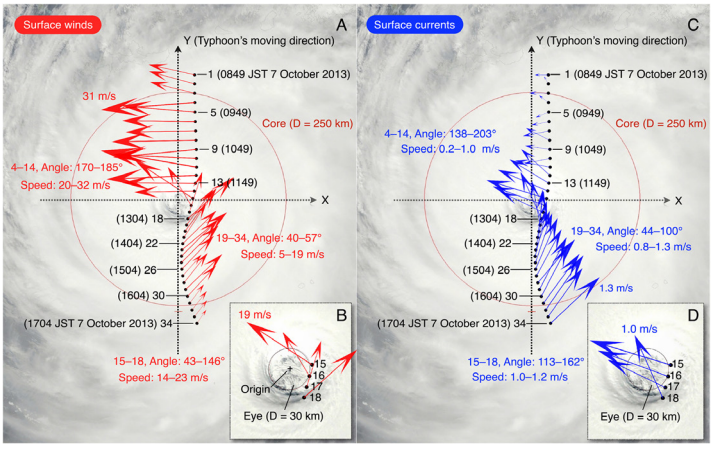


그림5. 태풍의 눈 주변에서 해수면 바람과 표층 해류의 비대칭적인 형태를 관측한 결과 (Mitarai et al., 2016)



해양기상 관측-기존 관측 부이와 비교

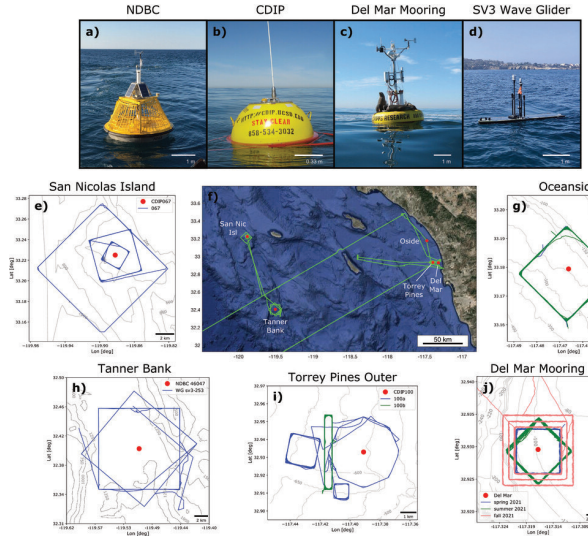
해양과 대기 간의 상호작용을 이해하는 것은 기후와 날씨 모델링에 필수적이다. 특히, 해양 표면에서의 열, 질량, 운동량, 에너지 교환은 지구 기후 시스템에서 중요한 역할을 한다. 이를 위해 정확한 해양 및 대기 관측이 필요하며, 최근에는 무인수상관측장비를 활용한 새로운 기술들이 도입되고 있다. Amador et al. (2023)은 기상, 파랑, 해류 자료 관측을 통해 웨이브 글라이더의 관측 능력을 평가하였고 WMO(세계기상기구) 기준에 맞는 정확한 자료를 수집할 수 있는지 검증하였다(그림 6, 7). 이를 위해 캘리포니아 남부 연안에서

웨이브 글라이더와 고정된 부이의 관측 자료를 비교, 평가하였다.

웨이브 글라이더로 관측된 파랑 스펙트럼, 주요 파랑 정보, 수온, 해류, 바람 자료 정확하게 관측된 것으로 확인했으며, 각 관측 자료는 세계기상기구(WMO)의 관측 자료에 요구되는 오차 범위 이내였다. 이 결과로 웨이브 글라이더가 정확하고 신뢰할 수 있는 해양 및 대기 자료를 수집할 수 있음을 확인하였다.

> “ 웨이브 글라이더와 관측 부이 자료 비교 결과, 웨이브 글라이더 관측자료 정확한 것으로 확인 ”

그림6. 미국 캘리포니아 남부 연안에 위치한 해양기상관측 부이와 관측 자료 비교를 위한 웨이브 글라이더 이동 경로 (Amador et al., 2023)

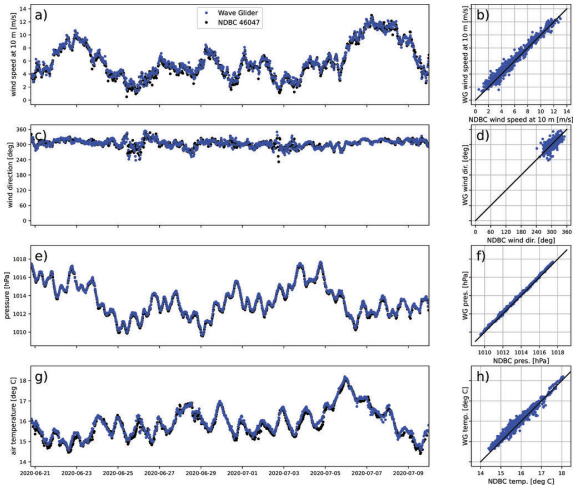


극지 해역 관측

극 해역은 전지구 기후변화에 중요한 역할을 하며, 특히 열과 이산화탄소의 흡수 및 방출에 크게 기여한다. 이러한 과정은 해양-대기 상호작용과 밀접한 관련이 있으며, 이를 이해하기 위해서는 고해상도의 미세 규모 관측이 요구되고 있다. 2023년 Swart et al.은 남극 해역에서의 혼합층 및 경계 플럭스 관측을 위해 웨이브 글라이더를 포함한 무인수상 관측장비와 무인수중관측장비(AUV: Autonomous underwater Vehicle) 등 다양한 자율 운항 플랫폼을 이용하였다.

다양하게 투입된 무인해양장비 중에서 웨이브 글라이더가 수행한 역할은 해양표면과 대기 사이의 상호작용을 실시간으로 모니터링하는 것으로 해양 표면 온도 및 염분 측정, 대기-해양 플럭스 관측, 폭풍 영향 분석을 하였다.

그림7. 웨이브 글라이더와 NDBC 부이에서 관측된 풍속, 풍향, 해면기압, 기온을 비교한 결과(Amador et al., 2023)



“ 2016~2017년, 웨이브 글라이더 이용하여 제주 남부해역 수온·염분 관측 ”

2. 국내 활용 사례

제주도 남부 해역 저염분 및 고수온 현상

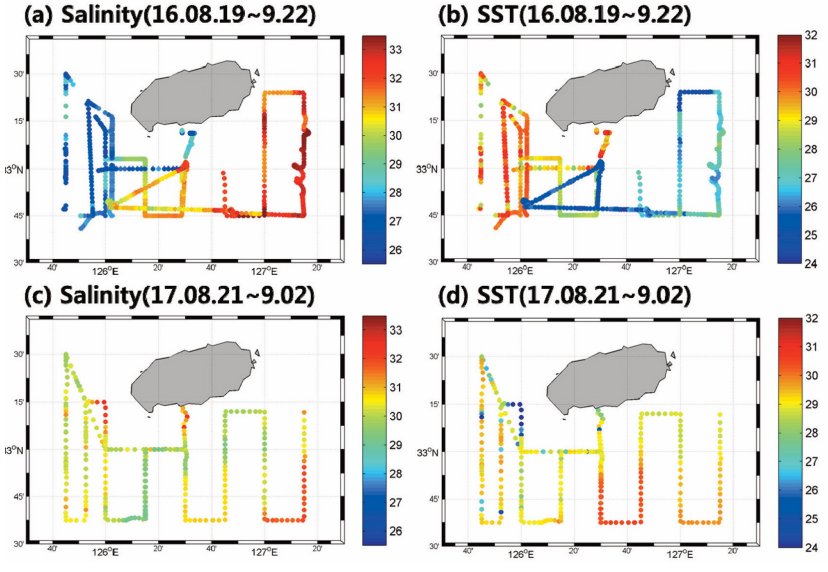
우리나라 주변 해역 해양 환경에 영향을 미치는 저염분과 고수온 현상을 파악하고자 손영백 등(2018)은 2016년과 2017년에 웨이브 글라이더를 이용하여 제주도 남부 해역에서 그림 8과 같은 이동 경로에서 수집된 수온, 염분 자료를 분석하였다.

2016년 동중국해에서 저염분수와 고수온 현상이 관측되었으며(그림 8), 이는 장강 희석수가 해양 성층화와 물리적 특성 변화에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 이 연구는 웨이브 글라이더를 이용해 우리나라 주변 해역의 다양한 해양 환경 조건에서도 자율 운항 가능성과 신뢰성 있는 자료를 수집할 수 있음을 확인하였다.

파랑관측

우리나라 기상청에서는 웨이브 글라이더를 이용하여 해역별로 운영 중인 해양

그림8. 제주 남부 해역에서 웨이브 글라이더를 이용해 수온과 염분 공간분포도 (손영백 등, 2018)



> “기상청, 2018~2020년, 2022년 제주 남부, 남해 서부, 서해 중부에서 웨이브 글라이더 활용 관측 수행”

기상관측 부이, 파고 부이와 비교 및 위험기상현상에 대한 특성을 파악하기 위해 2018~2020년, 2022년에 제주 남부해역, 남해 서부, 서해 중부에서 관측을 실시하였다.

2022년에는 수도권 집중감시 기간에 서해에서 약 20일간 관측을 수행하였다. 서해는 조류가 강하기 때문에 웨이브 글라이더 운영에 제한요소가 있는 해역으로 장기간 관측은 국내에서 처음으로 실시한 것이다. 관측 기간 전반에 걸쳐 계획된 경로를 이탈하지 않고 운용되었으며 간헐적으로 이탈한 경우 다시 원래 경로로 복귀하였다. 관측 결과, 하계 계절풍의 영향으로 남풍이 우세하였고 바람에 의해 남쪽에서 오는 파의 발생빈도가 높았다. 고파 발생 시 반응하는 순서는 상대적으로 외해에 위치한 웨이브글라이더가 주변 인천 및 외연도 해양기상부이보다 유의파고

그림9. 거문도 주변해역에서 웨이브 글라이더 관측 경로 (기상청, 2022)

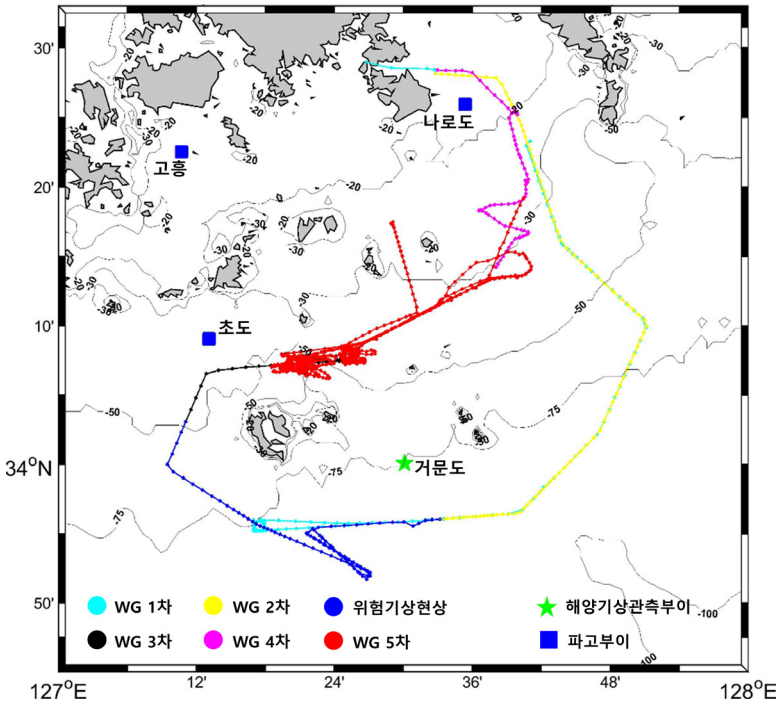
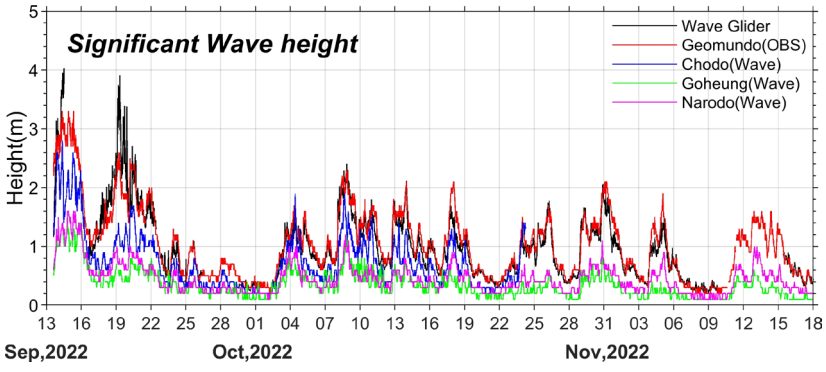


그림10. 거문도 주변 기상청 부이(해양기상부이, 파고부이)와 웨이브 글라이더로 관측한 파고 비교 (기상청, 2022)



가 약 2시간 정도 빨리 증가하고 평균 0.4m 높았다.

거문도 주변해역의 고파에 대한 조사 결과는 웨이브글라이더와 거문도 해양기상부이가 가장 빨리 증가하였고 그 다음으로 초도 파고부이, 이후 연안의 나로도 및 고흥 파고부이 순으로 관측되었다(그림 9, 10). 유의파고의 발생빈도 분석 결과, 초도 부이는 연안의 파고부이보다는 고파 발생빈도가 높지만 웨이브글라이더와 외해의 거문도 부이보다는 고파 빈도가 낮았다.

초도 파고부이 주변은 거문도를 비롯한 섬이 많이 분포해 있고 수심은 30~40m로 외해보다 0.3m 정도 낮다. 이러한 지형에서는 파랑의 섬 효과가 나타날 수 있고 외해에서 전파된 파랑이 수심 효과로 에너지가 감쇄할 수 있기 때문에 지형적인 원인으로 초도 파고부이의 유의파고가 외해의 거문도 해양기상부이 및 웨이브글라이더 보다 낮은 것으로 추정된다.

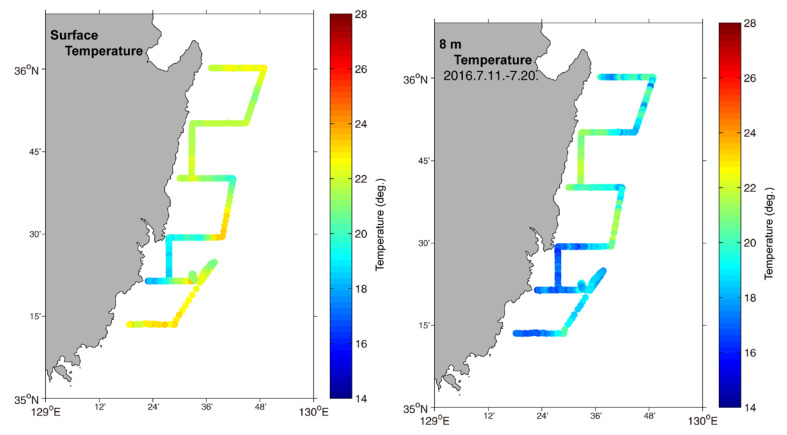
냉수대 관측

우리나라 남동해역은 매년 계절풍의 영향으로 남풍 계열이 지속적으로 우세할 경우 표층의 해수가 외해로 밀려가고 저층의 차가운 수괴가 표층으로 상승하는 연안용승이 발생하는 해역이다. 차가운 수괴가 표층으로 상승하게 되면 하계에 상승한 기온과 온도 차로 인해 해무가 발생하여 항해나 수상레저에 지장을 주고, 인근

수산 양식장에서는 급격한 수온 하락으로 양식 생물 활동에 영향을 주거나 심할 경우 폐사하는 경우도 발생한다.

그림 11은 국립수산과학원에서 2016년에 웨이브 글라이더를 활용한 냉수괴 관측 결과이다. 울산 인근 해안과 가까운 해역에 표층 수온이 외해보다 약 5℃ 낮은 수괴가 관측되었으며, 이때 바람은 남풍 계열이 우세한 것으로 조사되었다.

그림11. 남동연안에서 웨이브 글라이더로 관측한 표층, 수심 8m 수온 공간분포도 (국립수산과학원, 2016)



Ⅳ. 전망 및 제언

웨이브 글라이더와 유사한 방식으로 자연으로부터 에너지를 얻어서 활용하는 무인해양관측장비의 제일 큰 장점은 장기간 운용이 가능한 것으로 이 때문에 상세한 해양기상 자료를 장기간 수집할 수 있다. 장기간 관측이 가능한 장점은 기후변화 모니터링, 해양생태계연구, 해양 보안 등 다양한 분야에서 활용될 것이며 특히, 극한 기상 조건에서도 안정적인 자료를 수집할 수 있어 기후 모델링 및 예측에 중요한 역할을 할 수 있다. 그리고 해양보호구역 모니터링 및 불법 어업 감시 등 환경 보호를 위한 분야에서도 활용성이 증가할 것으로 예상한다.

이처럼, 무인해양관측장비는 해양 및 기상 연구와 모니터링에 있어 매우 중요한 관측 도구로 활용될 것이 분명하다. 앞으로 무인해양관측장비는 웨이브 글라이더와 같이 파랑 에너지를 사용하는 것이 아니라 다양한 재생 가능 에너지를 활용하여 에너지 효율성을 더욱더 높이고, 장기간 자율 운용이 가능한 장비로 개발될 것이다. 또한, 장비의 모듈화 설계를 통해 센서와 장비를 관측, 연구 목적에 맞게 쉽게

"무인해양관측장비, 해양 및 기상 연구와 모니터링에 매우 중요한 관측 도구로 활용될 것"

구성하고 교체할 수 있으며 유지보수 및 업그레이드가 쉬워질 것이다. 그리고 극한 환경에 대응 능력이 강화되어 극한 기상 조건 및 극지방 환경에서 안정적으로 작동할 수 있는 내구성을 갖춘 장비 개발 및 자율 운용 능력 강화로 사람의 개입이 전혀 없어도 복잡한 환경에서 장기간 임무를 수행할 것으로 기대한다.

앞으로 웨이브 글라이더 자체 기능도 향상이 되겠지만, 또 다른 형태의 차세대 무인해양관측장비가 계속 개발하기 위해 전 세계 주요 업체들은 경쟁하고 있다. 우리나라의 경우는 아직 해외 장비를 도입하여 활용하는 초기 단계이고 단편적인 관측에만 활용되는 실정이다. 삼면이 바다인 우리에게는 기후변화에 따른 기후 재해 강도가 높아지는 것에 대비하고 국민 안전과 생활에 도움을 주기 위해 해양 환경 변화를 모니터링하는 국내 장비 개발이 빠르게 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

국립수산과학원, 2016. Wave Glider를 이용한 냉수대 발생역 해양기상자료 수집/분석 최종보고서.

기상청, 2022. 2022년 웨이브글라이드 운영을 통한 해양기상 특성분석 및 조사 연구용역 결과보고서.

손영백, 모태준, 정섬규, 황재동, 오현주, 김상현, 유주형, 조진형, 2018. 무인해상자율로봇 Wave Glider을 이용한 해양관측 현황. Korean Journal of Remote Sensing, 34(2-2), 419-429. DOI: 10.7780/kjrs.2018.34.2.2.9

이상룡, 강효진, 김대철, 이동섭, 이재철, 정익교, 허성회, 2006. 해양의 이해 3판. 28-34.

Amador, A., Merrifield, S. T., & Terrill, E. J., 2023. Assessment of Atmospheric and Oceanographic Measurements from an Autonomous Surface Vehicle. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 40, 305-319. doi:10.1175/JTECH-D-22-0060.1

Expert Market Research, Global Unmanned Sea System Market Outlook, https://www.expertmarketresearch.com/reports/unmanned-sea-system-market

Liquid Robotics Inc., How It Works. https://www.liquid-robotics.com/wave-glider/how-it-works/

Mitarai, S., & McWilliams, J. C., 2016. Wave glider observations of surface winds and currents in the core of Typhoon Danas. Geophysical Research Letters, 43, 11,312–11,319. doi:10.1002/2016GL071115

Swart, S., et al., 2023. The Southern Ocean mixed layer and its boundary fluxes: fine-scale observational progress and future research priorities. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 381(2249), 20220058. doi:10.1098/rsta.2022.0058

Villareal, T. A., & Wilson, C. (2014). A Comparison of the Pac-X Trans-Pacific Wave Glider Data and Satellite Data (MODIS, Aquarius, TRMM and VIIRS). PLoS ONE, 9(3), e92280. doi:10.1371/journal.pone.0092280

해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안

박종진 경북대학교 지구시스템과학부/경북해양과학연구소 교수 jjpark@knu.ac.kr

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 해양글라이더의 개발 및 개념
Ⅲ. 국내 해양글라이더 활용 현황
Ⅳ. 태풍 강도 예측력 향상을 위한 해양글라이더 활용 방안

해양글라이더는 적은 에너지로 오랫동안 해양 데이터를 수집할 수 있는 효율적인 관측 로봇으로, 기존의 해양 데이터 부족 문제를 해결하는데 있어 혁신적인 플랫폼이다. 선진국에서는 해양글라이더를 중심으로 무인 해양 관측망을 구축하고 다양한 목적으로 임무에 활용하고 있으며, 특히 외해역의 아르고 플로트와 연안 해역의 해양글라이더를 연계함으로써 태풍 예측력 향상을 위한 해양 열용량 실시간 모니터링에 활용되고 있다. 국내에서도 2015년부터 전문적인 인적, 물적 인프라를 구축해오고 있으며 다양한 기관에 운용 지원을 하고 있다. 최근 관측 자료에 따르면 천해역에서의 태풍 강화 속도가 외해역보다 뚜렷하게 증가되고 있어 동중국해를 통해 한반도로 들어오는 태풍 강도 예측력 향상을 위한 해양기상 관측망 구축이 어느때 보다 시급한 상황이며, 이를 구현하기 위한 현실적 방안을 제시하였다. ■

“기상 및 기후 예측력 향상 위해 필요한 해양 데이터 수집, 해양 특성 및 기술적 한계로 많은 어려움 따라”

Ⅰ. 서론

기상 및 기후 예측의 정확성은 다양한 실측 데이터 소스에 의존하며, 그 중에서도 해양 데이터는 특히 중요하다. 해양은 대기와 끊임없이 상호작용하고, 해양의 온도, 열용량, 해류 등은 대기 상태에 직접적인 영향을 미치며(Park and Nam, 2017), 기상과 기후 모델의 정확성을 좌우한다. 특히, 태풍과 해무와 같은 극단적인 기상 이벤트에 있어서 해양 데이터의 중요성은 더욱 부각된다. 열대 저기압인 태풍은 해양의 따뜻한 수온과 습한 공기에 의해 성장하기 때문에, 태풍 직하점에서의 해수면 온도는 태풍의 강도를 결정짓는 중요한 요소(Emanuel, 2004; Park et al., 2011; Potter et al., 2017)이며 심지어 태풍의 경로에도 영향을 끼칠 수 있다. 항공 및 해상 교통에 심각한 영향을 끼치는 해무 역시 해표면의 온도와 습도가 중요한 역할을 한다. 그러나 이러한 극단적 기상 이벤트의 예측력을 향상시키는 문제에서 단순히 해수면 온도를 대기 모형의 경계조건으로 활용한다고 해결되는 것은 아니다. 해수면 온도는 해양의 수직 혼합 및 이류에 의해서도 급격하게 변화할 수 있을 뿐 아니라 대기 조건에 의해서도 쉽게 변화할 수 있기 때문에, 경계조건으로서의 독립성을 갖추기 어렵다. 따라서 기상 및 기후 예측력을 향상시키기 위한 해양 데이터는 단순히 인공위성을 통해 얻은 해수면 온도뿐 아니라 해양의 수직적인 온도로 부터의 해양 열용량과 수층 안정도에 기여하는 염분 분포, 수평 이류를 정량화하기 위한 해류 등의 물리적 변수이어야 한다. 이런 변수들은 기상 현상과 기후변화에 중대한 영향을 미치기 때문에 보다 정교하고 경제적인 해양 관측 방안을 모색하는 것이 기상 및 기후 예측력 향상을 위한 필수적 과제이다.

이러한 해양 데이터를 수집하기 위한 관측은 해양의 현상학적 특성과 기술적 한계로 많은 어려움이 따른다. 첫째, 해양 현상의 규모는 대기의 그것에 비해 대략적으로 1/10정도의 크기를 가지고 있다. 예를 들어 대기의 중규모는 약 1,000㎞인 반면 해양은 약 100㎞로 일반적인 해양의 중규모 현상은 대기에 비해 훨씬 작다.

동일한 범위의 영역에서 중규모의 현상을 분해할 수 있는 관측소를 구상한다고 할 때 해양은 대기에 비해 약 100배 많은 관측소를 필요로 함을 의미한다.

“ 바닷속 관측용 전자장비 수명, 육상 장비에 비해 훨씬 짧아 ”

둘째, 해양은 선박을 활용하여 접근할 수밖에 없기 때문에, 기본적인 관측 비용이 높다. 선박에 의존하는 전통적인 관측 방식은 수집되는 데이터의 양도 적을 뿐 아니라 그나마 얻어진 데이터도 좋은 기상조건 하에서만 얻어진다는 날씨편향(Weather Bias) 문제가 존재한다. 셋째, 해양은 생명으로 가득 차 있어, 바다 속에서 관측용 전자장비의 수명은 1~2년 정도로 육상 장비에 비해 훨씬 짧다. 게다가 수집된 센서 데이터는 생물체 오염(Biofouling)으로 인해 편향이 발생될 수 있기 때문에 전문적인 편향 평가 및 보정 기술이 요구된다. 이러한 어려움 때문에 지속적인 해양 수중 모니터링이 제한되어 왔고, 해양의 고품질 실시간 실측 데이터는 여전히 매우 부족하며, 이는 기상 및 기후 예측의 정확성을 저해하는 주요 요인 중 하나로 여겨진다.

해양의 부족한 데이터로 인하여 현상을 정확하게 분석하는 데 한계가 있으며, 필연적으로 제대로 된 현상 이해가 제한되게 되며, 이것은 예측 결과를 잘못된 방향으로 해석하게 할 뿐만 아니라 예측 시스템의 정확도 개선도 어렵게 하는 요인이 된다. 게다가 부족한 데이터를 기반으로 자료동화 과정을 통해 얻은 Nowcast(현재 상태) 결과는 부정확성이 높을 수밖에 없으며, 이것은 Forecast(미래 상태) 예측성을 떨어뜨리는 결과로 이어지고 있다. 그러나 그동안 부족한 해양 데이터를 보완함으로써 Nowcast의 정확성을 높이고자 하는 논의는 충분하지 않았고, 해양 정보는 인공위성에서 얻어진 해표면 데이터와 같이 추가적인 비용과 노력없이 활용 가능한 데이터만 있으면 된다는 개념을 고집하며, Forecast 예측성이 낮은 문제를 대기-해양 시스템의 복잡성으로 치부하는 경우가 많았다. 이것은 대기-해양 모델링 전체 분야가 이제까지 가지고 있었던 문제점이며, 현실적으로 해양 관측 데이터를 비약적으로 늘리는 것은 천문학적인 비용이 소요되는 탓에 더 많은 해양 데이터를 얻고자 하는 노력을 경주하기 보다는, 단순히 선진국의 더 나은 버전의 모델을 사용하거나 슈퍼컴퓨터를 도입하여 높은 해상도의 모델을 구성하거나, 더 고도화된 자료동화 기법을 시도하는 등 근본적인 해결 방법과 거리가 먼 방법만을 지난 수십년간 반복해 왔다.

> “기상 및 기후 예측 정확도 개선 위해서는 현재 해양 환경에 대한 데이터 부족 문제 해결 필수”

해양 예측 문제뿐 아니라 기상 및 기후 예측 문제는 복잡한 대기-해양 상호작용의 결과물이기 때문에, 해양의 정확한 열적 상태를 파악하는 것은 매우 중요하며, 인공위성 극표면 수온(skin temperature) 정보는 대기 강제력에 의해 쉽게 변화하기 때문에 해양의 혼합 과정을 유발할 수 있는 강한 바람 하에서는 해양 열적 수직 구조 정보 혹은 열용량 정보 또한 중요하다. 캘리포니아 연안의 해양 현상과 영국 서쪽 바다의 해양 조건이 각각 미서부와 영국 내륙의 기상 예보에 미치는 영향(Beaudin et al., 2023; Bhattacharya et al., 2023; Buchan et al., 2014)이 크고 이를 위해 다양한 종류의 실시간 해양 관측이 이루어지고 있다는 것은 우리에게 시사하는 바가 크다.

기상 및 기후 예측 모형의 정확도를 평가하고 개선하기 위해서는 만성적인 해양 데이터 부족 문제를 해결하는 것이 필수적이고, 이를 위해서 선박 기반 혹은 부이 기반에 의존하는 전통적인 관측 체계를 진화시킬 필요가 있다. 해양글라이더는 해양 관측 시스템의 혁신을 가져오고 있는 플랫폼으로 전통적인 관측 체계의 빈공간을 채울 뿐 아니라, 기존에 별개로 운용 되어왔던 선박 및 부이 관측을 연계하여 하나의 관측 시스템으로 결합함으로써 시너지를 창출할 수 있도록 하는 관측 플랫폼이 바로 해양글라이더이다. 해양글라이더의 출현과 상용화로 인해 전 세계적으로 통합 해양 관측망이라는 신개념이 출현할 수 있었고, 선박-인공위성-부이-플로트들이 해양글라이더로 인해 결합되면서 체계적으로 연계되는 하나의 관측 시스템이 되었다. 본 고에서는 이러한 해양글라이더의 개념과 국내 운용 사례, 한반도 기상 예측력 향상을 위한 해양 관측 체계 발전 방향에 대해 살펴보고자 한다.

II. 해양글라이더의 개발 및 개념

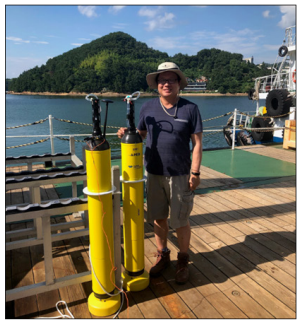
해양 데이터의 부족은 많이 알려진 문제이기 때문에, 이를 해결하기 위해서 해양과학 분야에서는 일찍부터 로봇을 활용하기 위한 많은 노력을 해왔고, 그 결과물 중 가장 성공적인 해양 관측 로봇이 바로 아르고 플로트이며, 이 아르고 플로트의

“미국 우즈홀 해양연구소, 1989년 물의 밀도를 역으로 이용하는 부력 기반 이동체 구상하여 해양 글라이더 개념 발표”

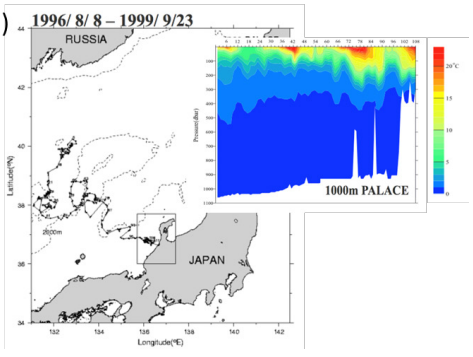
진화한 형태의 로봇이 바로 해양글라이더이다(Rudnick, 2016). 해수의 밀도는 공기보다 훨씬 무거워 수중에서 움직이는 이동체에 높은 저항이 발생하므로 이를 이동시키기 위해서는 많은 에너지가 소모된다. 미국 우즈홀 해양연구소의 스톰웰 박사는 이러한 높은 물의 밀도를 역으로 이용하는 부력 기반 이동체를 구상하였고, 적은 에너지로도 오랫동안, 멀리 이동할 수 있는 획기적인 해양글라이더 개념을 처음 발표하였다(Stommel, 1989). 그러나 처음부터 해양글라이더 개발에 바로 착수한 것이 아니었다. 먼저 이동체의 밀도를 바꿀 수 있도록 하는 부력 엔진을 개발하여 중성 부력을 갖는 플로트 장치에 탑재함으로써 실제적 운용 가능성을 시험함과 동시에 지속적인 보완을 통해서 해표면과 심층을 오가면서 관측을 할 수 있는 프로파일링 플로트(현재 아르고 플로트) 장비로 개발하고 상용화하였다(그림 1a). 초기 아르고 플로트의 해양 관측 능력을 입증하기 위한 시험은 공교롭게도 미국 워싱턴 대학과 서울대학교가 공동으로 우리나라 동해에서 1996년에 최초 실시되었다(그림 1b). 또한 1999년에 동해에서 36대의 아르고 타입 플로트가 동해 북부해역에 투하되어 성공적으로 데이터가 수집됨에 따라 같은 해 국제 아르고 프로그램이 발족하면서 한국을 포함한 30개국에서 2024년 현재까지 약 20,000여 대의 플로트를 전 세계 바다에 투하하는 거대 해양 관측 프로그램이 되었다(Park, 2013). 아르고 프로그램은 매 10일에 한 번 전지구 해양에서 4,000여 개의 수온, 염분 프로

그림1.(a) 아르고 플로트와 경북대학교 박종진 교수(글쓴이), (b) 동해에 최초로 투하된 아르고 플로트의 경로와 수온 관측 데이터

(a)



(b)



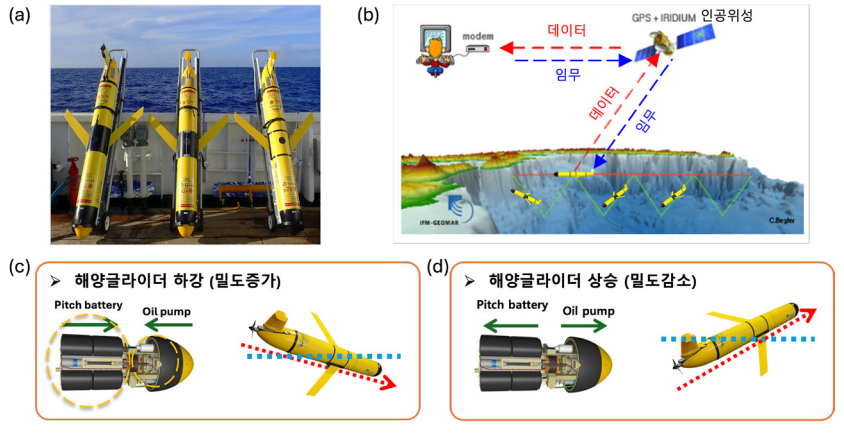
> “아르고 플로트 시험 성공, 해양글라이더 개발에 박차를 가하게 된 계기”

파일 데이터를 실시간으로 생산하는 해양 과학 역사상 가장 성공적인 지구 규모 해양 관측 프로그램이며, 전지구 기후 예측력 향상에 혁신적인 기여를 하게 되었다.

아르고 플로트 시험의 성공은 해양글라이더 개발에 박차를 가하게 되었고, 플로트에 적용했던 부력엔진이 완성되자마자 1년도 채 안되어 해양글라이더 프로토타입이 만들어졌다는 것은 부력엔진이 얼마나 핵심적인 장치인가를 보여주는 대목이다. 공식적인 해양글라이더 개발은 미 해군의 지원으로 2000년까지 추진되었고, 3개의 서로 다른 기관에서 3가지 종류의 해양글라이더가 개발되었다. 해양글라이더 개발은 많은 실해역 시험 과정을 거쳐서 이루어졌지만, 개발 이후 5년 이상 실질적 시험 운용을 반복하면서 운용 기술을 확보해야 했으며, 그 이후에나 해양글라이더가 현업 관측에 활용되기 시작했다.

해양글라이더는 잠수함 원리와 유사하게 내부로 해수를 끌어들여 자체 부피를 줄임으로써 밀도를 증가시키거나, 해수를 내보내 부피를 증가시켜 밀도를 감소시키는 작동만으로 기본적인 상하 운동을 한다(그림 2). 이때 작용되는 밀도가 해수보다 가벼운 경우에는 부력이, 반대의 경우에는 중력이 크게 작용하는데 이렇게 수직적으로 이동하려는 힘을 이용하여, 부착된 날개를 통해 수중을 활강하여 수평적으로 이동할 수 있도록 고안되었다. 이러한 원리로 매우 적은 에너지로

그림2. (a) 경북대학교 해양글라이더 모습, (b) 해양글라이더의 수층에서 비행, 표층에서 자료 및 임무 송수신 과정을 나타낸 그림, (c) 해양글라이더 하강 동작 원리, (d) 해양글라이더 상승 동작 원리



"해양글라이더, 부력 추진 방식과 추가 배터리 등으로 장시간, 장거리 관측 가능"

오랫동안 기동할 수 있는데, 프로펠러로 추진력을 발생시켜 동작하는 일반적인 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)에 알칼라인 배터리를 장착하여 운용할 경우 연속적으로 약 12시간 정도만 운용이 가능하며, 이동거리는 약 20~30㎞가 한계이다. 반면, 부력 엔진을 이용해 추진력을 발생시키는 해양글라이더는 이론적으로 약 720시간동안 연속운용이 가능하고 600㎞ 이상 이동할 수 있어, 부력 엔진을 이용한 추진 방식이 얼마나 효율적인지 가늠해 볼 수 있다. 해양글라이더는 기종에 따라 그리고 장착한 센서에 따라 운용 기간이 크게 달라지지만, 리튬 배터리를 활용할 경우 약 3,000시간 연속 운용이 가능하며, 약 3,000㎞ 이상 운용도 가능하며, 추가 배터리를 장착하고 센서 사용을 제한할 시 한번 투하 후 7,000~10,000㎞까지 이동할 수 있다. 실제로 미국 럿커스 대학과 미국 워싱턴 대학, 서호주 대학 등에서 한번 투하 후에 최대 1년까지 연속 운용하기도 하였고, 7,000~10,000㎞ 이상 이동할 수 있음을 입증하였다.

해양글라이더는 플로트와 달리 기기 자체가 조향 및 이동능력을 가지고 있기 때문에 특히 연안 환경에서의 해양 관측 어려움을 해결하기 위한 혁신적인 도구로 부상하고 있다. 해양글라이더는 무인잠수정의 일종으로 분류되지만, 전통적인 프로펠러 추진 방식의 무인잠수정과는 달리 부력 엔진을 이용한 추진 방식이기 때문에, 해양 관측 분야에 있어서 여러가지 장점을 갖고 있다. 첫째, 해양글라이더는 부력의 변화를 통해 수중을 활강하면서 이동하기 때문에 위에서 언급한 바와 같이 에너지 효율성이 높아 장기간의 해양 관측이 가능하다. 둘째, 해양글라이더 이동 방식 자체가 중력과 부력을 이용하여 하강 및 상승을 반복해야 수평적으로 이동할 수 있는데, 이러한 이동 방식이 수직적인 구조를 관측해야 하는 해양 관측 방식에 자연적으로 부합한다. 반면에 프로펠러 추진 방식의 무인잠수정은 수평적으로 이동하는 것이 기본적인 이동 방식이므로, 이를 활용하여 수직적인 구조 관측을 하기 위해서는 수직적인 이동을 강제해야 한다. 그러므로 프로펠러 추진 방식 무인잠수정의 수직적인 이동은 더 많은 에너지 손실이 발생하여 비효율적으로 운용할 수 밖에 없다. 셋째, 해양글라이더는 자동화된 시스템으로 운영되며, 원격 제어가 가능

> “어떠한 센서를 탑재하느냐에 따라 활용 분야 결정”

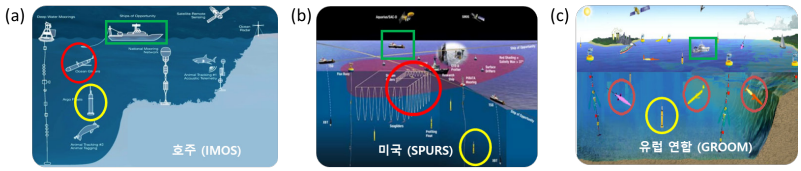
하여 넓은 해역을 지속적으로 모니터링하고 실시간으로 인공위성을 통해 관측된 데이터를 전송할 수 있다. 이러한 장점들로 인해 해양글라이더가 해양 데이터 수집의 효율성을 크게 향상시키고 있다.

Ⅲ. 국내 해양글라이더 활용 현황

1. 해양글라이더 활용 분야

해양글라이더는 해양 데이터를 수집하기 위한 관측 로봇이다. 능동적으로 이동하면서 탑재되어 있는 센서를 활용하여 해양 환경을 측정하는데, 어떠한 센서를 탑재하느냐에 따라 활용 분야가 결정된다. 따라서 해양글라이더의 저변 확대는 탑재 가능한 센서의 다양성이 큰 영향을 미치는데, 이 부분에도 국제 아르고 프로그램이 매우 큰 기여를 하였다. 전례 없는 대 성공을 거둔 아르고 프로그램은 새로운 해양 센서 장비 시장을 열었고, 전 세계 기업들은 아르고 플로트에 탑재 가능한 센서를 앞다투어 개발하였다. 기본적으로 플로트와 해양글라이더는 기동 방식이 거의 동일하기 때문에, 플로트에 탑재 가능한 센서는 모두 해양글라이더에 탑재할 수 있었다. 결국 이것이 해양글라이더의 활용분야를 크게 넓힐 수 있는 바탕이 되었다.

그림3. 선박(초록색), 아르고 플로트(노란색), 해양글라이더(빨간색)를 활용한 국외 해양 관측망 예시: (a) 호주 (Integrated Marine Observing System, IMOS), (b) 미국 (Salinity Processes in the Upper Ocean Regional Study, SPURS), 그리고 (c) 유럽 연합 (Gliders for Research, Ocean Observation and Management Infrastructure and Innovation, GROOM)

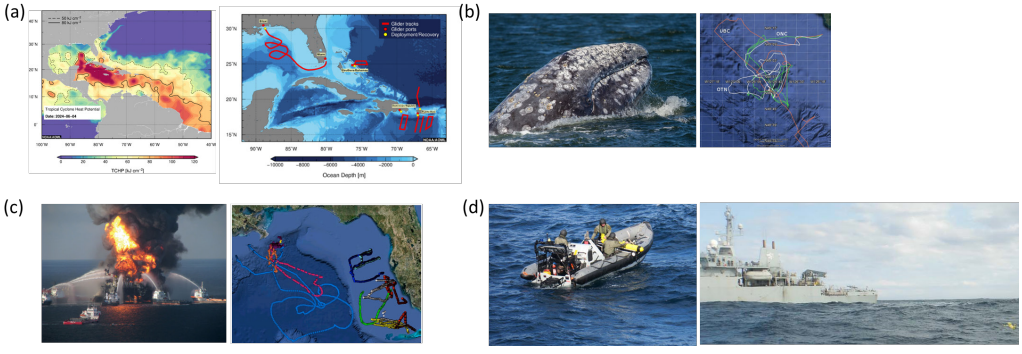


해양글라이더의 활용 범위는 매우 넓다. 현존하는 어떠한 관측 장비 보다도 범용성이 뛰어나다고 해도 과언이 아니다. 글라이더의 활용은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 무인 해양 관측망 구축 용도이다. 무인 해양 관측망의 핵심은 선

"국내 해양글라이더 활용, 무인 해양 관측망 분야로 발전하는 단계"

박 기반 관측이라는 전통적인 틀을 벗어나서 적은 비용으로 기상상태와 무관하게 지속적으로 3차원 해양 데이터를 얻는 것에 있다. 선진국에서는 계류 부이와 해양글라이더를 핵심으로 무인 해양 관측망의 중추를 구성하고, 이를 전통적인 인공위성 관측과 선박 관측, 그리고 새로운 관측 장비나 로봇을 추가하는 형태로 통합 해양 관측망을 구성하여 운영하고 있다(그림 3). 기본적인 센서들을 설정하여 탑재한

그림4. 다양한 분야에서 해양글라이더 활용 예시: (a) 미국 해양대기청(NOAA)에서 허리케인 강도 및 경로 예측에 해양글라이더 활용, (b) Ocean Networks Canada에서 회색고래 추적에 해양글라이더 활용, (c) 2010년 멕시코만에서 Deepwater Horizon 유류 유출 사고 당시 활용된 해양글라이더 경로, (d) 영국 해군이 Survey ship과 함께 해양글라이더 활용



후, 정기적이고 지속적인 공간 관측 용도로 여러 대의 해양글라이더가 동시에 활용되는 방식이 하나의 큰 방향이다.

두 번째는 특정한 정보를 추출하기 위한 임무 중심형 활용이다. 이러한 예는 태풍 감시, 해양 오염 추적, 해양 생물 추적, 수산업 관련, 해군 활용 등 매우 다양하다(그림 4). 사실상 해양글라이더에서 활용 가능한 센서는 십 수종에 달하고, 기본적으로 여러 대의 해양글라이더를 동시 군집 운용 할 수 있어, 실제 선진국에서 활용되고 있는 사례만 보더라도 활용분야는 사실상 무궁무진하다.

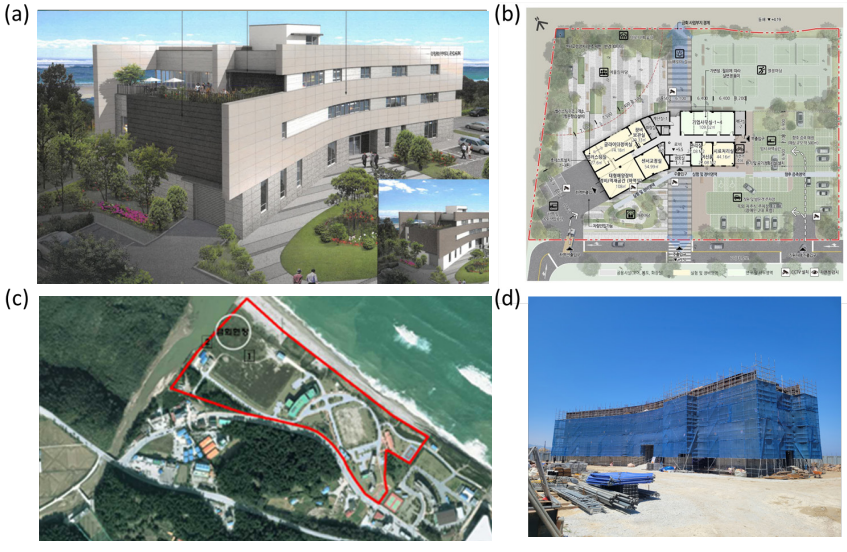
2. 국내 해양글라이더 활용 현황

국내의 해양글라이더 활용은 무인 해양 관측망 분야로 발전하는 단계에 있다. 선진국 사례의 경우에는 임무 중심형 분야에서 시작하여, 이후에 무인 해양 관측망

> “국내, 기술과 지식 지원 인프라 부족, 도전적 연구 기피, 분야간 협업 연구 문화 부족 등 문제 존재”

분야로 발전이 되어 왔으나, 국내의 경우에는 이와 반대로 무인 해양 관측망이 먼저 개발되기 시작하였다. 이러한 이유는 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 핵심적인 세 가지만 언급하면 다음과 같다. 첫 번째는 해양글라이더는 다른 장비들과 달리 전문적인 운용기술과 설비를 필요로 하기 때문에, 적합한 기술과 지식을 보유하지 못한 개인이나 기관이 활용하기 어렵고, 이를 지원하는 인프라가 구축되어 있지 않았기 때문이다. 두 번째는 새로운 플랫폼을 통해 새로운 연구를 도모하려는 의지가 필요한데, 국내 연구 성과의 평가 방식이 논문 개수에 치중하다 보니 도전적이고 혁신적인 연구를 기피하고 논문을 쉽게 작성할 수 있는 늘 하고 있던 연구에 치중하려는 분위기가 팽배했다는 점이다. 마지막은 분야간 협업이 잘 이루어지지 않는 국내 연구 문화로 인해 새로운 플랫폼에 대한 이해 부족으로 활용이 제한되는 문제도 있었다. 이러한 이유로 국가 주도 사업을 통해 무인 해양 관측망을 목표로 개발을 진행하고 연구자뿐 아니라 해양 활동을 하는 일반 국민을 대상으로 하는 데이터 서비스 부분을 강화함과 동시에, 개인이나 기관이 해양글라이더를 임무 중심형으로 활용하고자 할 때 지원할 수 있는 인프라 구축이 추진되고 있다(2015년부터 대구 경북

그림5. (a) 울진 해양무인기 운용지원센터 조감도, (b) 운용지원센터의 1층 평면도, (c) 건설 현장 부지 (빨간 선), (d) 2024년 05월 03일 건축 현장



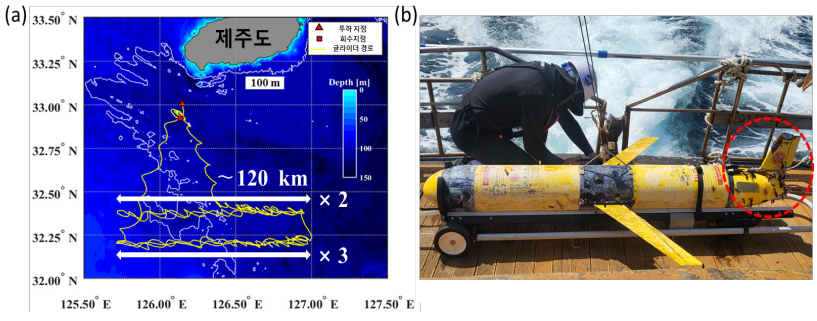
“ 임무 중심형 분야로 해양글라이더 활용 조금씩 증가하는 추세 ”

대학교 내에 임시 해양글라이더 운용지원센터가 운영되어 왔으며, 이를 확장하여 경북 울진에 대형 센터 건물이 건설 중이고 25년 2월 완공될 예정임, 그림 5). 이로 인해 임무 중심형 분야로의 활용도 조금씩 증가하는 추세에 있으며, 본고에서는 국내의 임무 중심형 해양글라이더 활용 사례 중 태풍 예측력 향상에 기여하기 위한 노력과 관련된 부분을 중점을 두어 간략히 제시한다.

2.1. 동중국해 해양글라이더 운용 사례

국립기상과학원에서는 한반도로 들어오는 태풍의 경로가 되고 있는 동중국해 해역의 해양 열적 구조를 해양글라이더로 수집하기 위한 관측 운용을 2023년 8월 13일 ~ 9월 19일까지 37일간 진행하였다. 해당 운용은 앞서 언급한 해양글라이더 운용에 관한 인적 물적 인프라를 활용함으로써 가능할 수 있었다. 몇몇 해양글라이더에 대해 잘 알지 못하는 비전문가들은, 동중국해 해역과 같이 평균 수심이 약 105m (운용 대상 해역 범위 내 경우)에 불과한 천해역에서는 조류의 흐름이 해양글라이더 수평 이동 속도보다 빨라 운용이 불가능하다며 비관적인 의견을 제시하곤 했었으나, 실제로 해양글라이더 무인잠수정과 달리 기본 운용 기간이 수주일~수개월로 약 12시간동안 순환하는 조류에 의해 진동하며 원하는 경로에 대한 관측이 가능하다. 그림 6a은 GPS로 얻어진 해양글라이더의 이동 경로를 도시한 것으로 궤적

그림6. (a) 해양글라이더 투하지점(빨간색 삼각형), 회수지점(빨간색 사각형)과 이동 경로(노란색 선)를 나타냄(흰색 선: 수심 100 m), (b) 해양글라이더가 회수된 뒤의 모습(빨간색 점선: 해양글라이더의 꼬리 날개 부분)

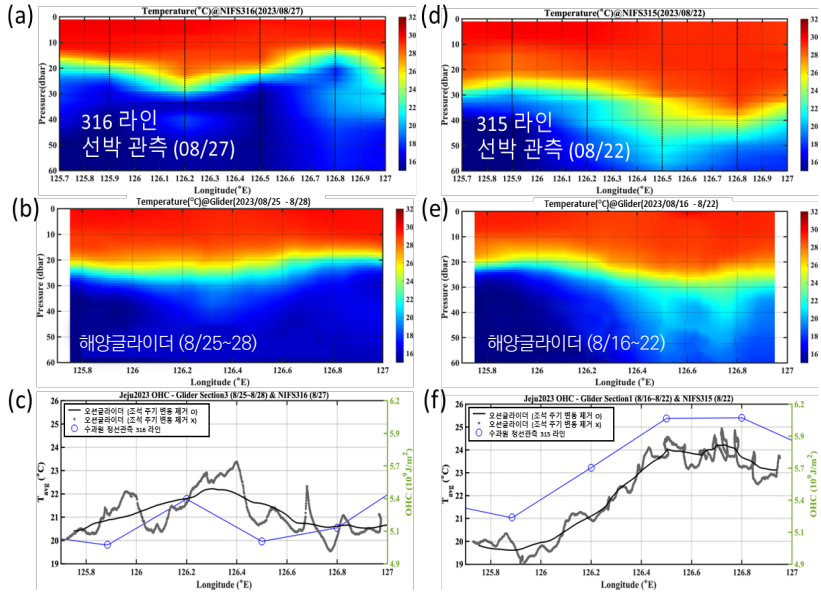


> “ 국립기상과학원, 2023년 8월 13일~9월 19일 동안 동중국해 해양글라이더 관측 운용 ”

이 조류에 의해서 진동은 하지만 원하는 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 해양글라이더는 모슬포항에서 약 20㎞ 남쪽에 투하하여 목표로 하는 단면 관측을 위해 위도 32°12.00’N으로 이동하였고, 약 120㎞ 동서 방향을 왕복하면서 3회 단면 관측을 수행하고, 북쪽으로 약 20㎞ 이동한 뒤 2회 단면 관측을 수행하였으며 회수지점으로 이동시켜 회수하였다. 그림 6b는 회수한 뒤의 해양글라이더 사진이며 꼬리 날개 부근에 일부 Goose Barnacle의 일종으로 생각되는 생물이 부착되어 있어, 해당 해역에서 장기 운용 시 생물체 오염에 관한 대책이 요구됨을 알 수 있다.

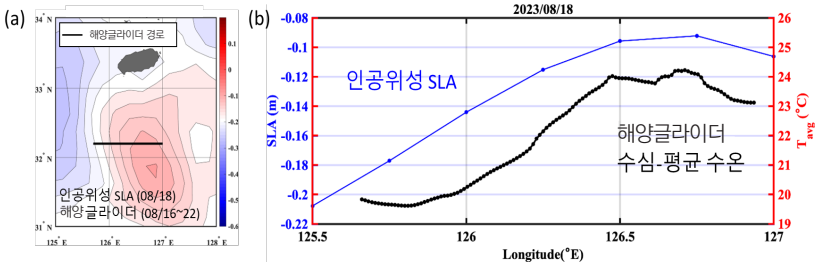
본 운용은 태풍이 통과하기 전 해양의 열용량 상태를 모니터링하기 위한 목적으로 수행되었는데, 안타깝게도 관측 기간동안 태풍이 통과하지는 않았다. 미국에서 허리케인을 감시하는 목적으로 해양글라이더 선단을 활용하는 것과 같이 태풍 시즌에 항시적으로 운용하는 체계 마련이 중요함을 확인하였다.

그림7. 수온 단면과 열용량을 나타냄. (a, d) 국립수산과학원(수과원)의 정선315, 316 라인에서 8월 27일, 22일에 선박으로 관측한 수온 단면, (b, e) 8월 25일~28일, 8월 16일~22일에 해양글라이더로 관측한 수온 단면, (c, f) 수과원 선박 관측 (파란색)과 해양글라이더 관측(검은색: 조석 주기 변동 제거 O, 회색: 조석 주기 변동 제거 X) 데이터로 산출한 열용량



본 관측으로부터 3가지 중요한 정보를 얻을 수 있었는데, 첫 번째는 조석 주기의 수온약층 진동이 강하게 존재하고 있어 전통적인 선박 관측으로는 해양 열용량 공간 구조를 왜곡할 수 있다는 것이다. 해양글라이더는 4분 간격으로 수온 및 염분의 수직 구조 관측이 수행되었기 때문에 조석 주기 진동을 제거할 수 있어 해당 진동이 없는 바다 상태를 알 수 있었는데, 같은 시기에 관측된 선박 데이터와 비교를 해보니 조석을 제거할 수 없는 선박 관측 데이터는 에일리어징 문제로 약 100㎞ 규모의 공간 구조가 마치 존재하는 것처럼 표현되는 오류가 발견되었다(그림 7a, b, c). 두 번째는 동중국해 해역에서도 간혹 해양 중규모 현상이 강하게 존재한다는 점이다. 해양글라이더 관측 중 8월 16일에서 22일 동안 얻어진 단면 데이터에는 조석 주기 진동이 약한 소조기로 파악되었는데, 이 시기에는 해양글라이더 관측 데이터와 선박 데이터가 유사한 특징을 보여주며 강한 중규모 현상이 나타남을 확인하였다(그림 7d, e, f). 마지막은 인공위성 고도계(Sea Level Anomaly, SLA) 데이터와의 비교에서 조석을 제거한 글라이더 수직 평균 수온의 공간 분포가 SLA의 공간분포와 매우 유사하다는 점이다. 해양글라이더 데이터와 같이 조석을 제거할 수 있는 공간 관측 데이터를 활용하면 (한 지점에서의 시계열 자료만으로는 매우 어렵다) 인공위성 고도계 데이터를 열용량으로 환산하는 관계식을 개발할 수 있으며, 이를 통해 2차원 열용량 공간분포를

그림8. (a) 8월 16일부터 22일까지 해양글라이더 경로 (검은색 선)와 8월 18일 인공위성 Sea Level Height Anomaly (SLA)를 색으로 나타냄, (b) 해양글라이더 경로에서의 SLA (파란색)과 해양글라이더로 관측한 수심 평균 수온 (검은색)

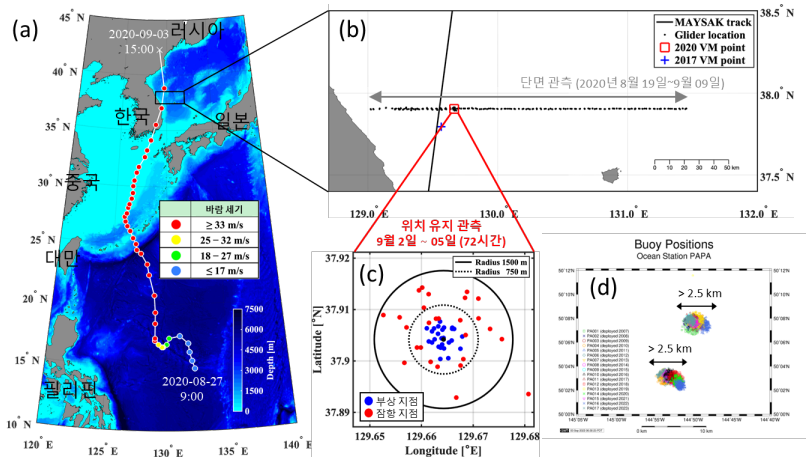


실시간으로 얻을 수 있다는 가능성을 확인하였다(그림 8).

2.2. 2020년 9월 태풍 마이삭 통과 시 해양글라이더 위치 유지(Virtual Mooring) 관측

2020년 9월 3일에 한반도를 통과한 태풍 마이삭은 동해로 진입하였으며, 이 당시 동해에서 단면 관측 임무를 수행하던 해양글라이더를 태풍 경로로 이동시켜 72시간동안 위치 유지(Virtual Mooring, VM) 관측을 수행함으로써 국내 최초로 태풍 통과 시 0~800m까지의 고정밀 수온, 염분, 클로로필-a, 용존산소 변화를 관측한 시계열 데이터를 획득하였다. 해당 관측은 당초 계획에 없었으나, 태풍 마이삭이 북상한다는 예보와 항시 관측 중이던 해양글라이더의 관측 영역을 통과함을 확인하여 새로운 임무를 부여한 경우이다. 실제로 대부분의 태풍 예측력 향상을 위한 해양글라이더 관측은 위와 같은 방식으로 진행되며 항시 관측하고 있는 데이터는 대기-해양 모형의 초기치 데이터를 생산하는 데 활용됨으로써 전반적인 예측력을 향상하는 목적으로 활용되다가, 태풍 시기에 태풍에 집중된 관측을 수행한다.

그림9. (a) 2020년 9월 태풍 마이삭의 경로(흰색 선), 위치(흰색 원), 그리고 4개 색으로 바람 세기를 나타냈고, 해양글라이더 관측 영역(검은색 사각형)을 함께 표시함. (b) 태풍의 경로(검은색 선), 해양글라이더 GPS 위치(검은색 점)와 위치 유지 관측 지점(빨간색 박스)을 나타냄. (c) 위치 유지 관측 동안 해양글라이더 GPS 위치(파란색 점: 부상, 빨간 점: 잠항지점). (d) Ocean Station PAPA (심해 부이)의 GPS 위치



"2020년 9월 태풍 마이삭 통과시 해양글라이더 관측 통해 태풍으로 인한 해양 수직 혼합 확인"

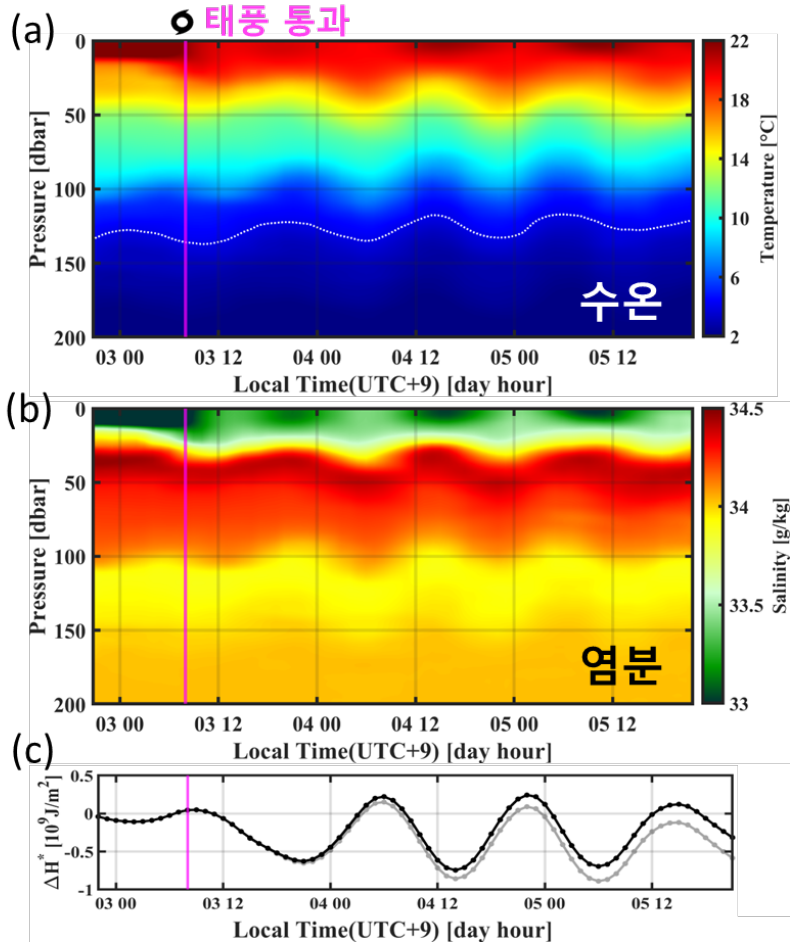
해당 임무에서 수행한 위치 유지 제어는 해양글라이더가 표층과 심층을 오가면서 관측을 수행하지만, 특정 지점을 벗어나지 않고 마치 부이과 같은 계류형 관측을 수행하도록 하는 기술이다. 해당 VM 제어 운용은 2017년에 Root-Mean-Square (RMS) 거리로 반경 60m내에서 위치 유지를 약 10일간 지속한 사례가 있었으며, 2020년에는 반경 270m 내에서 정밀한 위치 유지를 달성할 수 있었다(그림 9). 태풍에 의해 발생되는 표층 해류가 1.6㎧가 넘었음에도 일반적인 심해 부이의 이동 범위가 수백m ~ 수㎞ 까지 되는 것을 감안해보면 매우 정밀하게 위치 유지가 이루어졌음을 알 수 있다(해양글라이더 항법에 영향을 주는 해류는 표층 해류만이 아니다).

태풍 마이삭 통과 후 해양글라이더에 관측된 표층 수온은 25.3℃에서 19.2℃로 6.1℃만큼 감소하였으며, 표층 염분은 33.5g/kg에서 32.3g/kg으로 1.2g/kg만큼 증가되었고, 해양 혼합층은 6m에서 19m로 13m만큼 증가되었다. 이러한 표층 수온과 염분의 변화는 대부분 태풍에 의한 해양의 수직 혼합의 결과로 해석된다(그림 10a,b). 특히 해표면 수온의 변화는 불과 수 시간 이내에 급격하게 일어난다는 것이 확인되었는데, 하루에 1~2회 관측만 수행되고, 구름이 있는 경우 관측이 안되는 인공위성 데이터로는 이 변화를 제대로 확인하기 어렵다.

해당 관측을 통해 수심 60m 아래에는 수온이 점진적으로 낮아지는 현상이 발견되었고, 이것은 등수온면 변화로 봤을 때 수층이 상승함에 따라 나타난 것으로 4℃의 등수온면으로 봤을 때 약 0.15m/hr 속도로 상승하였다. 이러한 변동이 태풍 통과 이후에 나타난 이유에 대해서는 자세한 분석이 필요하지만, 태풍 중심 부근에서 흔히 발생하는 에크만 용승과 관련이 있을 것으로 사료된다(Jansen et al., 2010).

태풍의 통과 전 상태를 기점으로 하여 해양의 열용량 변화를 분석해보면, 태풍 통과 후 열용량의 큰 진동이 보이며, 이것은 태풍에 의해서 발생되는 내부파인 준관성주기 너울에 의해서 만들어진 진동임을 알 수 있다(그림 10c). 흔히 태풍 통과 전후의 선박 관측데이터를 활용하여 열용량 변화를 산출하고, 이렇게 변화된 열용량으로 태풍에 공급된 열량을 산출하기도 하는데, 본 관측 결과는 준관성주기 너울이 이러한 계산 방법에 큰 오차를 야기할 수 있음을 보여준다. 이 밖에도 용승과

그림10. 해양글라이더가 위치를 유지하는 동안 태풍 통과(마젠타 색)에 따른 표층부터 수심 200m까지 (a) 수온(흰색 점선: 4℃ 등수온수심), (b) 염분과 (c) 0~800m에 대한 열용량변동(검은색: 선형 추세선 제거, 회색: 선형 추세선 제거하지 않음)을 나타냄



같은 수직 이류와 해류 등의 수평 이류 역시 해양의 열용량 변화로 태풍에 공급된 에너지량을 산출하는 데 있어서 오차의 원인이 되기 때문에, 해양에서 태풍으로 유

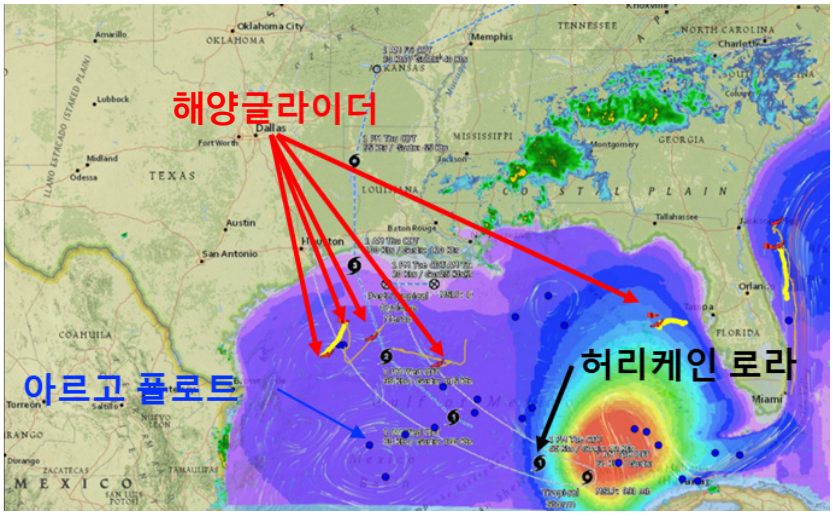
“ 태풍 예측력 강화 위해 해양글라이더와 아르고 플로트 연계 활용 ”

입되는 에너지량의 정량화를 위해서는 한 지점에서의 관측이 아니라 시간적으로 고해상도의 3차원 관측이 요구된다.

Ⅳ. 태풍 강도 예측력 향상을 위한 해양글라이더 활용 방안

해양글라이더는 기상 조건에 상관없이 운용 가능한 무인 로봇으로 특히 태풍과 같은 악기상 상황에서 해양의 수직 구조를 리스크없이 관측할 수 있기 때문에 태풍 예측력 향상을 위한 해양 관측에 적극적으로 활용되는 장비이기도 하다. 유사한 개념의 아르고 플로트 역시 악기상에 영향을 받지 않고 해양을 관측할 수 있지만, 능동 이동 능력이 없기 때문에 특정 기상 현상에 초점을 맞춘 관측은 제한적일 수 밖에 없다. 그러나 육지에서 멀리 떨어진 넓은 외해역에 대해 태풍 시기에 해양을 관측할 수 있는 수단은 아르고 플로트가 유일하므로, 태풍에 대한 예측력을 높이기 위한 해양 관측은 해양글라이더와 아르고 플로트를 연계 활용하는 형태로

그림11. 2020년 8월 24일, 미국 해양대기청(NOAA)이 멕시코만에서 운용하는 위험기상 관측 시스템(Gulf of Mexico Coastal Ocean Observing System, GCOOS)운용 현황(빨간색 화살표: 해양글라이더, 파란색 화살표: 아르고 플로트, 검은색 화살표: 허리케인)

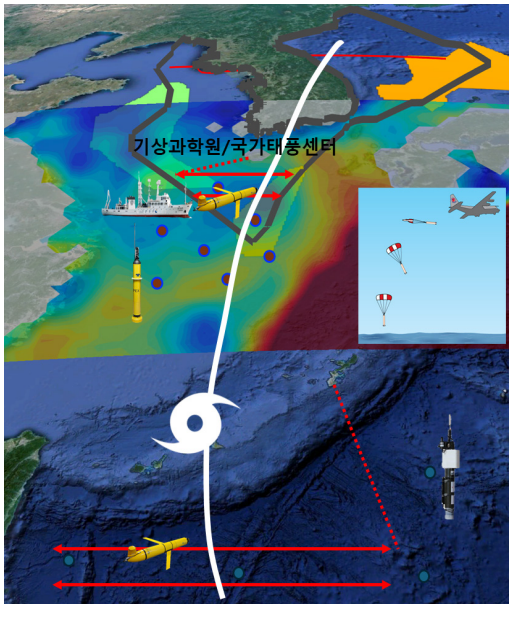


> “한반도에 태풍 예측을 위해서는 국제 아르고 플로트와 연계하고, 공해상에서 해양글라이더 운용하는 방안 마련 필요”

진행하고 있으며, 이 두가지 플랫폼을 주축으로 하는 무인 해양 관측망이 운용되고 있다. 대표적인 미국 멕시코만 해양 관측 시스템은 연안의 해양글라이더와 외해의 아르고 플로트가 연계된 형태의 관측망이며 멕시코만을 거쳐서 미국 본토로 들어오는 허리케인의 강도 예측력 향상을 위해 해당 시스템이 현업에서 활용되고 있다(그림 11).

만약 유사한 관측 시스템을 국내에 구축하려 한다면 어떠한 것을 고려해야 하는가? 먼저 한반도로 들어오는 태풍은 천해역인 동중국해를 통과하는 경우가 대부분이기 때문에, 조석 주기 진동을 분해할 수 있는 관측 시스템이 있어야 한다. 또한 동중국해는 한국, 일본, 중국의 배타적 경제 수역 문제가 복잡하게 얽혀 있기 때문에, 한국 영해와 공해에서만 운용이 가능한 해양글라이더 만으로는 한계가 있고, 천해용 아르고 플로트를 한국 영해 밖에서 같이 운용하는 방식이 필요하다. 천해용 아르고 플로트는 국산화를 통해 비용을 낮추어 다수의 플로트를 투하하는 방식으로 진행해야 하며, 또한 선진국 경우와 같이 기상 관측용 항공기 혹은 해군 항공기를 활용하여 태풍 경로 상에 아르고 플로트를 항공 투하 방식으로 발전하는 것이 이상적이라고 할 수 있다. 마지막으로 동중국해로 들어오기 전의 태풍 상황을 예측할 수 있도록 하기 위해 국제 아르고 플로트와 연계할 수 있으면서 태풍의 길목이 되는 공해상에서 해양글라이더를 운용하는 방안 마련이 필요하다. 국내 관측선이 북서태평양으로 직접 진출하여 해양글라이더를 투하할 수도 있지만, 대만 혹은 일본의 관측선을 활용하여 투하하기 위한 국제 협력도 좋은 방안이 될 수 있다. 위에서 설명한 관측 체계를 모식화 한 것이 그림 12이다. 해양글라이더는 해양에서 운용되는 장비들 중 가장 복잡한 운용 체계를 가지고 있기 때문에, 전문적인 교육을 받은 인력과 인프라를 보유하여 운용하는 것이 필요한데, 미국 및 유

그림12. 동중국해에서 선박, 아르고 플로트와 해양글라이더 등을 활용한 통합 해양기상 관측망 모식도



> 해양글라이더의 체계적 활용 위한 장기 계획 수립 및 기관간 협력 시스템 구축 필요

럽, 호주 등에서는 해양글라이더 전문운용센터를 구축하여 현업기관과 긴밀한 협업 체계 속에서 운용되고 있다. 국내에서도 해양글라이더 운용센터와 인프라를 구축해오고 있으며, 국립기상과학원뿐 아니라 한국해양과학기술원, 해군 등의 요구에 맞는 해양글라이더 운용 업무를 지원하고 있다. 특히, 해군의 경우에는 울진 해양무인기 운용지원센터 내에 전용 보안 관제실을 구축하도록 계획함으로써 향후 해양글라이더 운용 규모를 확대해나갈 예정이다.

최근 급격히 체감되고 있는 지구 온난화와 기후변화는 한반도에 들어오는 태풍의 특성에도 영향을 주고 있으며, 특히 연안에 접근하는 태풍의 강도가 증가되고 있다는 연구결과가 보고 되고 있다(Balaguru et al., 2024). 이는 한반도로 들어오는 태풍 강도 예측력 향상을 위한 해양기상 관측 체계 구축의 시급성을 강조하며, 해양글라이더는 이러한 해양관측 체계 구축에 있어 전 세계적으로 필수불가결한 요소로 자리잡고 있다. 국내에서도 체계적인 활용을 위한 장기 계획 수립 및 전문 운용 기관과의 협력 시스템 구축이 필요한 시점이다.

참고문헌

Balaguru, K., Chang, C. C., Leung, L. R., Foltz, G. R., Hagos, S. M., Wehner, M. F., ... & Xu, W. (2024). A global increase in nearshore tropical cyclone intensification. Earth's Future, 12(5), e2023EF004230.

Beaudin, E., Di Lorenzo, E., Miller, A. J., Seo, H., & Joh, Y. (2023). Impact of Extratropical Northeast Pacific SST on US West Coast Precipitation. Geophysical Research Letters, 50(3), e2022GL102354.

Bhattacharya, T., Feng, R., Maupin, C. R., Coats, S., Brennan, P. R., & Carter, E. (2023). California margin temperatures modulate regional circulation and extreme summer precipitation in the desert Southwest. Environmental Research Letters, 18(10), 104048.

Buchan, J., Hirschi, J. J. M., Blaker, A. T., & Sinha, B. (2014). North Atlantic SST anomalies and the cold North European weather events of winter 2009/10 and December 2010. Monthly Weather Review, 142(2), 922-932.

Emanuel, K., DesAutels, C., Holloway, C., & Korty, R. (2004). Environmental control of tropical cyclone intensity. Journal of the atmospheric sciences, 61(7), 843-858.

Jansen, M. F., Ferrari, R., & Mooring, T. A. (2010). Seasonal versus permanent thermocline warming by tropical cyclones. Geophysical Research Letters, 37(3).

Park, J. J. (2013). Underwater glider: Its applicability in the East/Japan Sea. Ocean and Polar Research, 35(2), 107-121.

Park, J. J., & Nam, S. H. (2018). Interannual variability of winter precipitation linked to upper ocean heat content off the east coast of Korea. International Journal of Climatology, 38, e1266-e1273.

Park, J. J., Kwon, Y. O., & Price, J. F. (2011). Argo array observation of ocean heat content changes induced by tropical cyclones in the north Pacific. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(C12).

Potter, H., Drennan, W. M., & Graber, H. C. (2017). Upper ocean cooling and air□sea fluxes under typhoons: A case study. Journal of Geophysical Research: Oceans, 122(9), 7237-7252.

Rudnick, D. L. (2016). Ocean research enabled by underwater gliders. Annual review of marine science, 8, 519-541.

Stommel, H. (1989). The slocum mission. Oceanography, 2(1), 22-25.

수요자 중심의 해양기상서비스

박승균 기상청 기후과학국 해양기상과장 pskk@korea.kr

Ⅰ. 수요자 중심 해양기상서비스의 필요성
Ⅱ. 기상청 해양기상서비스 전달체계 현황
Ⅲ. 연안 지역 해양위험기상 대응 기술 개발 현황
Ⅳ. 맺음말

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 「해양과 빙권 특별보고서(2019)」는 기후변화로 인해 해양 부문에서 해수면 상승, 해양 산성화 등 극한 해양 현상의 빈도와 강도가 증가할 것으로 전망하고 있다. 해수면 상승은 연안 지역에서 파랑 및 폭풍해일 강도의 증가로 이어지며, 이로 인해 최근 5년간(2019~2023) 해양사고는 2,972건에서 3,092건으로 증가하는 등 위험성이 심화하고 있다. 기상청에서는 수요자 중심의 해양기상서비스 제공을 위해 해양기상정보포털을 통해 기상청의 해양기상 정보를 통합적으로 제공하며, 매년 대국민 수요조사를 통해 신규 수요를 발굴하고 기술개발을 통해 발빠르게 대응하고 있다. 특히 기후변화로 인한 연안재해 증가에 선제적으로 대응하기 위해 너울, 총수위 등 연안에서의 해양위험기상 현상의 예측기술 개발을 수행 중이며, 올해는 너울 예측정보 제공 지점을 확대하고 주요 방파제를 중심으로 총수위 예측지수를 시험운영하는 등 신규 정보에 대한 전달체계를 구축할 계획이다. ■

Ⅰ. 수요자 중심 해양기상서비스의 필요성

1. 기후변화와 해양기상

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 2023년 3월 스위스 인터라켄에서 열린 제58차 총회를 통해 통합적인 단기 기후 행동의 시급성을 강조한 「IPCC 제6차 평가보고서 종합보고서」를 만장일치로 승인했다. IPCC는 1988년 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 이래 매 5~6년 주기로 기후변화의 현황, 전망 및 영향 등을 과학적으로 분석하여 종합보고서를 발간하고 있으며, 이는 유엔기후변화협약(UNFCCC)과 국제 기후변화 협상의 주요 근거자료이자 전지구적 이행점검의 투입자료로 활용되는 신뢰성 높은 과학적 보고서이다.

IPCC 제6차 보고서에 따르면 현재와 미래의 기후변화는 인간의 활동에 의한 것임이 거의 확실하며, 지속되는 온실가스 배출로 인해 거의 모든 시나리오에서 전지구 평균기온이 가까운 미래(2021~2040년)에 산업화 이전 대비 1.5℃ 이상 상승하여 파리협정의 목표를 달성하지 못할 것으로 전망되고 있음을 지적하고 있다. 또한, 전지구 평균기온 상승을 억제한다 하더라도, 해수면 상승이나 남극 빙상 붕괴, 생물다양성의 손실 등 지구시스템의 비가역적인 변화와 이로 인한 인간 사회의 손실과 피해는 여전히 심화될 것으로 전망되는 등 기후위기의 시대는 더 이상 부정할 수 없는 현실이다.

전지구 기후변화의 과거와 현재, 미래를 과학적으로 진단하는 데에 있어 해양의 중요성은 점차 증대되고 있다. 지구 전체 표면적의 71%에 달하는 해양은 기권, 생물권, 지권 등 다른 기후시스템들과 물, 에너지, 탄소를 교환하면서 상호작용하는 중요한 구성요소이다. IPCC에서도 제6차 평가보고서 준비기간 중 「해양과 빙권 특별보고서(2019)」를 발간하여 해양의 중요성을 강조하였으며, 해양 온난화, 해양 산성화, 해수면 상승, 해양생태계 붕괴 등 극한 해양 현상의 빈도가 증가할 것이라고 경고하였다.

해양은 기후체계 내에서 초과 방출된 열의 90% 이상을 흡수하면서 대기온난화의 속도를 완화하는 조절자의 역할을 하는 것으로 알려져 왔다. 하지만 지속적인 온난화로 인해 1970년 이후로 해양의 회복력은 한계에 다다랐음을 나타내는 지표가 최근 들어 나타나고 있다. IPCC 「해양과 빙권 특별보고서」에 따르면 해양 고수온[1] 현상의 빈도가 2배로 늘었으며, 강도와 발생

범위도 증가했다. 또한 기상청 해양기상부이 9개소에서 관측된 해수면온도를 기반으로 분석한 결과 2023년 9월 동해와 남해에서는 한달 내내 최근 10년(2014~2023년)의 일별 평균 해수면온도 극값을 갱신하였으며, 2024년 봄철(3~5월)에도 봄철 평균 해수면온도 극값을 갱신하는 등 우리나라 주변 해역의 해수면온도도 급격하게 높아지고 있다.

해양의 온난화는 해수의 열팽창과 빙하의 용융을 유발해 결국 해수면의 상승으로 연결될 수 있다. 이에 따라 IPCC 「해양과 빙권 특별보고서」는 2081~2100년 기간의 1986~2005년 대비 전지구 평균 해수면 상승이 가장 낮은 시나리오(RCP2.6)에서도 39㎝, 가장 높은 시나리오(RCP8.5)에서는 71㎝까지 나타날 것으로 전망하였다. 국립해양조사원에서 발표한 바에 따르면 현재까지 우리나라 연안에서의 해수면 상승률은 2.74㎜/yr으로 전지구 평균 상승률인 1.8±0.5㎜/yr에 비해 더 높게 나타나고 있으며, 실제로 지역 고해상도 기후모델을 적용한 고해상도 시나리오에서는 최대 82㎝까지 상승하는 것으로 전망되는 등 우리나라는 해양 기후변화에 취약한 지역 중 하나이다.

해수면 상승의 영향은 연안 지역에서 파랑 및 폭풍해일 강도의 증가로 이어진다. 원해상에서 발생한 파도는 수심이 얕은 연안으로 접근하는 과정에서 굴절, 감쇄, 소산되면서 강도가 낮아지는데 반해, 해수면이 상승하면 평균 수심이 깊어져 파랑의 에너지가 감쇄되지 않은 채로 해안까지 도달할 가능성이 높아지기 때문이다. 이로 인해 고파랑, 너울, 폭풍해일 등 해양위험기상으로 인한 연안재해의 정확한 감시 및 예측은 해양 기후변화에 대응하기 위한 핵심 기술이다.

2. 해양위험기상 예측 서비스의 중요성

기후변화로 인한 해양기상 부문의 위험성 증대는 최근 들어 현실화되는 추세이다. 최근 5년간(2019~2023년) 해양사고는 총 14,802건(16,446척)이 발생하였고, 해양사고로 인한 사망·실종자는 총 537명으로 집계되었다. 전체 해양사고 중 9,602건(64.9%)이 어선에서 발생하였고, 수상레저기구에서 2,871건(19.4%), 비어선에서 2,329건(15.7%)이 발생해 어선의 사고 비중이 가장 높았다. 해상에서의 사고 건수 대비 인명 피해(사망·실종)는 3.63%로 육상에서 발생하는 교통사고 건수 대비 사망사고 발생 비율인 1.29%보다 약 3배 높았다. 이는 육상과는 달리 피할 곳 없는

1) 해양고수온 현상은 일별 해수면 온도가 1982~2016년 기간 동안의 99분위를 초과할 때로 정의됨

바다에서 발생하는 사고가 매우 치명적임을 말해 준다.

최근 5년간 육상 교통사고는 약 23만 건에서 약 20만 건으로 지속적인 감소 경향을 보여 주고 있으나, 해양사고는 2,971건에서 3,092건으로 오히려 증가한다. 이는 같은 기간 어선 등록 척수는 감소(65,835→64,385)하나, 어선사고가 증가(1,951→2,047)한 영향이 크다. 또한, 수상 레저기구의 등록 선박이 약 2만3천 척에서 3만6천 척으로 큰 폭으로 증가하고, 이와 더불어 낚시, 서핑, 스킨스쿠버 등 해양레저활동의 증가로 인해 관련 해양기상정보에 대한 국민의 요구가 다양해지고 있다. 따라서 이러한 수요증가에 대응하고 해양사고로 인한 인명사고를 선제적으로 예방하기 위해서는 관련 기술의 개발과 함께 해양기상정보를 체계적으로 제공할 수 있는 수단의 중요성이 점점 높아지고 있다.

II. 기상청 해양기상서비스 전달체계 현황

기상청은 「기상법」 제14조에 따라 선박의 안전운항과 해양 관련 활동 지원을 위해 풍속, 파고 등에 대한 예보를 발표하고, 위험이 예상되는 경우 풍랑 및 폭풍해일특보를 발표함으로서 해양재난에 대응하고 있다. 해양기상예보는 기간에 따라 4일째 되는 날까지의 단기예보와 4일째 되는 날부터 11일째 되는 날까지의 중기예보로 구분되며, 단기예보의 경우 앞바다와 먼바다를 35개 지역별로 세분화한 해상국지예보구역에 대해 날씨·풍향·풍속·파고를 포함하여 상세한 해상날씨 정보를 제공한다.

기상청에서는 풍랑 및 폭풍해일 예·특보 외에도 해상 안전과 어업, 레저, 관광 등 국민들의 다양한 해양 활동을 지원하기 위해 다양한 해양기상 정보를 생산하고 있다. 다양한 정보에 대한 대국민 수요에 대응하고 이를 효율적으로 제공하기 위해서는 재난대응 위주의 경직된 해양기상 예·특보 체계에 더해서 통합적인 해양기상서비스 전달체계가 필요하다. 이에 따라 기상청에서 운

표1. 기상청 해양기상예보

구분	단기예보(오늘~4일)	중기예보(4일~11일)
예보구역/요소	35개 지역/날씨 · 풍향 · 풍속 · 파고	13개 권역/날씨 · 파고
예보기간	오전/오후	8일까지 오전/오후, 9~11일까지 일단위

영 중인 해양기상서비스 전달체계 현황에 대해 살펴보았다.

1. 해양기상정보포털

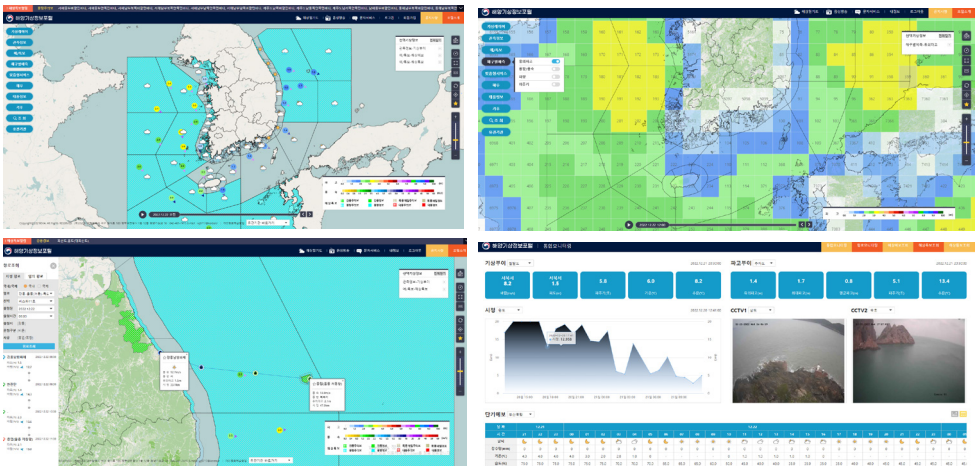
기상청은 날씨누리(웹), 날씨알리미(앱), 무선FAX, 언론을 통한 날씨 정보 제공 등 다양한 수단을 통해 해양기상정보를 직·간접적으로 제공하고 있다. 특히, 수요자 중심의 맞춤형 해양기상정보를 제공하기 위해 2019년부터 (구)해양기상정보포털을 운영하며, 여가생활, 해상교통, 어업 등 해상활동이 증가함에 따라 각종 해양기상정보를 제공하였다. 그러나 사용자들이 다양한 해양기상정보를 편리하게 한눈에 확인하기에는 한계가 있었고, 사용자 경험에 기반한 인터페이스(UI/UX)를 반영하지 못하는 한계가 있어 개선 필요성이 제기되었다.

이러한 점을 해소하기 위해 지도 기반으로 관측 실황과 예보(예측)를 동시에 표출하기 위한 중첩 기능, 사용자가 원하는 임의 지점의 해양기상정보 제공과 해양경찰청, 수협중앙회, 여객선 운항관리실 등 관계기관이 해양 위험기상 감시 기능 등을 활용할 수 있도록 2022년 12월에 새로운 해양기상정보포털로 전면 개편하여 현재까지 이르고 있다.

표2. 해양기상정보포털 수요자 맞춤형 서비스 현황

분야		주요내용	비고
기본 콘텐츠		○ 해상구역도, 해구별예측, 동네예보	-
		○ 관측 실황 및 예·특보, 태풍정보	
		○ 기타(해상일기도, 음성방송, 문자서비스, 게시판)	
맞춤형 서비스	항만	○ 항만, 정박지에 대한 맞춤형 정보 제공	'19/20
	항로	○ 국내 및 국제 항로 지점에 해양기상 및 여객선 운항 통제정보	
	레저	○ 낚시방파제, 서핑, 스킨스쿠버, 배낚시출조 지점별 정보	
	어업	○ 기상부이, 파고부이 및 관계기관 관측지점에 대한 수온 관측/예측 정보 제공	
	안전	○ 너울, 이안류 발생 지점에 대한 예측 정보	
	안보	○ WMO 및 해경기준의 위험 단계별 예측정보 제공(해구별)	
	바다안개	○ 관측(위성, 시정계, CCTV 등) 및 예측(해무예측분포도, 대교맞춤형 정보 등)	'21
	해양기후	○ 월별해양기상도(분포도), 수온전망(30일)	'22
	여행	○ 주요 섬, 해안 전망대 맞춤형 기상정보 제공	'23
	갯벌	○ 서해안 주요 갯벌 체험 지점에 대한 맞춤형 기상정보 제공	'24
지방청 서비스	별도 페이지	○ 각 지방청(지청)별 관계기관에 정보를 제공하기 위한 맞춤형 페이지	'21
		○ 해안사고 예방 수도권 해무 정보 맞춤형(갯벌) 페이지 시험운영	'22

그림1. 해양기상정보포털(https://marine.kma.go.kr): 메인화면(왼쪽 위부터 시계방향), 해구별 예측, 항로예측, 통합모니터링



즉, 해양기상정보포털은 최근 증가하는 국민들의 다양한 해양 활동을 지원하기 위해 해양기상정보를 한눈에 볼 수 있도록 꼭 필요한 분야를 선정해 수요자 중심의 맞춤형 해양기상정보를 제공하는 기상청의 해양기상 전문 서비스(누리집)를 말한다. 수요자의 요구를 반영해 항만, 항로, 여가생활(레저), 어업, 안전, 안보, 바다안개, 해양기후, 여행 등 9개 분야별 수요자 중심의 맞춤형 해양기상정보를 제공하고 있다. 이러한 수요자 중심의 맞춤형 정보는 의견수렴을 통해 지속적으로 발굴·개선해 제공할 예정이며, 올해는 서해안 갯벌 지역에서 조석 정보와 바다 안개 실황과 예측정보를 함께 제공해, 짙은 바다 안개로 인한 갯벌 조난사고 등 연안 사고 예방에 기여할 예정이다.

2. 해양기상 위성방송

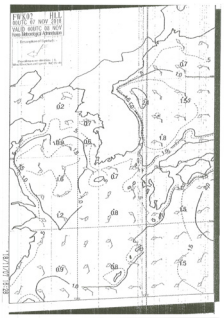
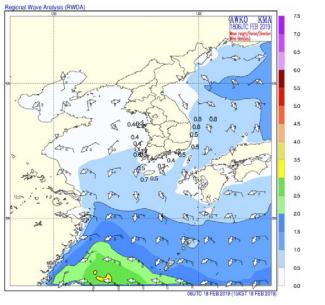
선박에 해양기상정보를 제공하는 방법으로 WMO에서 제시하는 방법은 DCS(VHF/MF/HF), NAVTEX, RADIO-FACSIMILE, HF NBDP(Narrow Band Direct Printing, 협대역인쇄전신)의 4종류가 있다. 이 중 기상청은 1966년 이래 RADIO FACSIMILE(무선FAX 또는 해양기상방송)를 활용하고 있다.

최근 통신 기술이 급격히 발전하고, 국가간 해양 안전이 강조됨에 따라 해양통신 환경도 이에 맞게 급격한 변화를 맞고 있다. 국제해사기구(IMO; International Maritime Organization)

는 국제해상인명안전협약(SOLAS; Safety of Life At Sea) 제4장(무선통신) 관련 개정을 통해 선박이 의무적으로 갖춰야 할 무선설비에서 NBDP의 기능은 더 이상 의무요건이 아니게 변경되며, NAVTEX 수신기도 해사안전정보(Maritime Safety Information, MSI) 및 수색구조(Search And Rescue, SAR)로 그 표현이 변경될 예정이다. 또한, 현재 운영하는 선박자동식별시스템(Automatic Identification System, AIS)의 단순 통신 방식(VHF 또는 위성의 단방향/양방향 저속통신)을 초단파의 지상 및 위성통신을 이용한 다중접속 방식의 양방향 통신서비스(초단파 데이터 교환 시스템, VDES; VHF Data Exchange System)로 대체하고, 이에 따른 표준화된 표출 방법(S-100)을 순차적으로 개발해 2020년대 후반부터 SOLAS 대상 선박에 의무적용을 예고하고 있다.

기상청은 이러한 통신 환경변화에 대응하고, VHF 통신을 활용하는 무선 FAX의 한계인 전파간섭, 종이 출력의 낮은 품질, 수신 거리 제약 등을 극복하고자 2020년부터 천리안-2A(GK2A)

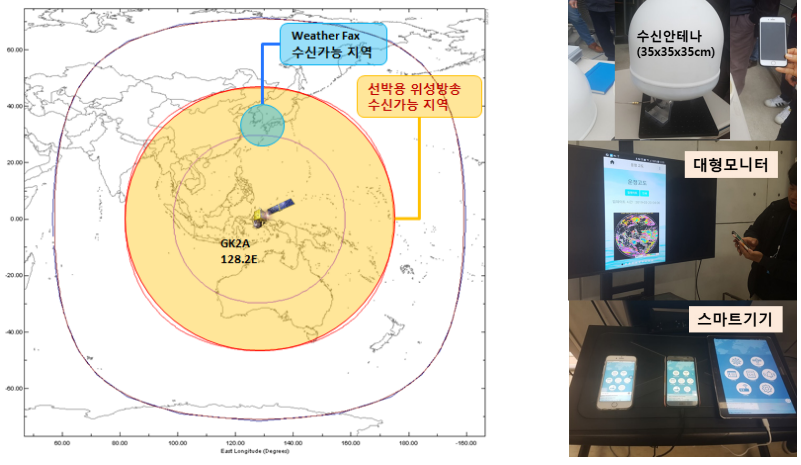
표3. 무선FAX 방송과 해양기상 위성방송 비교('24.6.1. 기준)

구 분	무선FAX 방송	비고
전송방식	3~13MHz 아날로그 방송	1.69GHz, L-band 디지털 방송
서비스 영역	740km 해상(동해, 동중국해)	5,200km 해상(동아시아, 서태평양 등)
서비스 품질	아날로그, 흑백 종이 출력	컬러 영상, 문자, 음성 등 디지털 자료
긴급방송	불가능	알람 및 팝업 기능
주요 콘텐츠	85개/일('24년 2월 현재)	543개/일('24년 6월 현재)
콘텐츠 확장성	콘텐츠 확장 한계	해양교통안전, 어업정보 등 콘텐츠 확장 가능
방송시간	19:27:00 (공백 시간 활용 불가능)	11:46:42(공백 시간 **콘텐츠 추가 용이**)
표출 매체	무선 팩스	스마트폰, 테블릿, 프린터, 대형모니터 등
아시아파랑예상도	12h 간격 +3일 예측(12개 이미지)	**3h 간격 +3.6일 예측**(60개 이미지)
전구파랑예상도	3일 예측(00/12UTC)(2개 이미지)	**6h 간격 +12일 예측**(98개 이미지)
위성안개영상	제공 불가	**03~12시(3시간 간격) 제공**
추가비용	수신용지 비용(최대 120만 원/월)	없음
산출물(예시): 파랑실황도		

호의 위성통신을 활용해 해양기상 위성방송 서비스를 신규로 제공하고 있다. 해양기상 위성방송은 정지궤도기상위성에서 위성관측영상 외에 해양관측 및 예측 정보, 실시간 위험기상정보 등 다양한 기상정보를 제공하는 공공 위성서비스이다. 매년 선박에 도움이 되는 다양한 정보를 발굴해 제공할 예정이며, 올해는 연근해, 원양 등 먼바다에 위치한 어선의 조업 지원을 위해 지난 5월부터 수심별 수온 예측 분포도(+10m, +20m, +50m / +3일까지)를 추가로 제공하였다.

해양기상 위성방송은 기술적으로 정지궤도 기상위성에서 제공하는 방송서비스 중 LRIT(Low Ratio Information Transmission)를 이용해 선박에 설치가 적합한 소규모수신시스템(SDUS, Small-scale Data Utilization Station) 사용자에게 해양기상정보를 제공하는 방법이다. 이는 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization) 우주 프로그램(WSP, World Space Programme)에서 정한 형식으로써, 정지궤도 위성에서 생산하는 디지털 데이터를 방송을 통해 사용자에게 직접 전파하기 위해 국제적으로 협의한 CGMS(기상위성 조정그룹, Coordination Group for Meteorological Satellites)의 국제 표준이다. 즉, 정지궤도 기상위성에서 LRIT를 통해 전 세계 선박에 손쉽게 해양기상정보를 제공하기 위한 수단이 이미 마련되어 있는 셈이다.

그림2. 해양기상 위성방송 수산 영역(좌) 및 신 수단(우)



Ⅲ. 연안 지역 해양위험기상 대응 기술 개발 현황

1. 너울 위험 예측정보

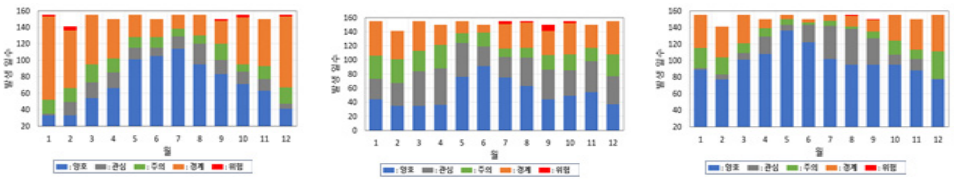
너울성 파랑은 우리나라 연안에서 나타나는 대표적인 자연재해로, 매년 인명과 재산피해를 발생시킨다. 너울(Swell)은 먼 해상에서 바람에 의해 발생한 풍파(Wind wave)가 바람이 부는 영역을 벗어나서 전파되는 긴 파장의 파랑 성분을 말한다. 너울은 풍파에 비해 파장이 길고 파고가 낮기 때문에 상대적으로 잔잔해보이지만, 처음 발생한 풍파의 에너지를 유지한 채 전파되기 때문에 수심이 낮은 연안에 접근하는 순간 순식간에 높은 파도로 변해 해안가를 급습할 수 있는 침묵의 습격자이다.

연안에서 너울로 인한 피해는 수심이 깊고 섬 등의 장애물이 적어 먼바다에서 발생한 파랑에너지가 감소되지 않고 연안까지 그대로 도달할 가능성이 높은 동해안에서 주로 발생한다. 최근 10년(2012~2023년) 간 기상청 해양기상부이 9개소에서 관측된 유의파고(2m 이상)와 파주기(8초 이상)를 활용해 해역별 너울 발생일수를 비교하면 동해상에서는 연평균 88.6일 발생하였으며, 전해역 평균인 연평균 55.9일을 크게 상회한다. 이로 인해 2022년 12월 23일 삼척항 정박 어선 11척이 전복되는 등 최근까지도 큰 피해가 발생하고 있다. 기상청에서는 세계기상기구에서 정한 WMO Douglas scale을 준용하여 파고 2m 이상, 파주기 8초 이상의 파랑을 너울로 정의하고 있으며, 너울로 인한 연안 지역 피해를 선제적으로 예측하고 대응하기 위해 국립재난안전연구원이 선정한 너울성 파랑 위험판단 기준과 주요 위험 지역을 기준으로 강원· 경북·경남 해안가 19개 지점에 대해 관심-주의-경계-위험 4단계의 너울 위험 예측정보를 생산하여 해양기상정보포털(marine.kma.go.kr)을 통해 지속적으로 정보를 제공하고 있다.

표4. 해역별·월별 해양기상부이 너울 발생 일수 단위: 일 (■ 8일 이상, ■ 10일 이상)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
전해역	7.7	6.5	5.5	3.5	1.8	1.3	2.4	3.1	3.5	5.9	6.3	8.4	55.9
서해	4.4	3.8	3.4	1.2	0.5	0.2	0.8	1	1	3.3	4.3	6.2	30.1
남해	4.7	4.3	4.3	4	1.9	1.4	4.2	4.8	4.7	5.7	3.9	5	48.9
동해	14.1	11.5	8.7	5.3	3	2.2	2.1	3.6	4.7	8.8	10.5	14.1	88.6

그림3. 해안별·월별 너울 예측지수 단계별 발생일수

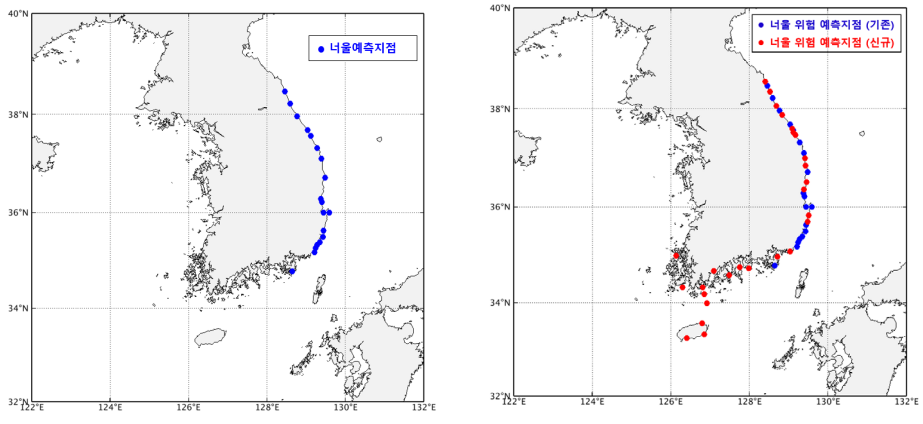


너울 위험 예측정보는 한국기상청의 현업 국지파랑 예측모델인 CWW3(Coastal WaveWatch-III)와 앙상블 파랑 예측모델 EWW3(Ensemble WaveWatch-III)를 활용하여 3시간 단위로 3일 뒤(+72시간)까지 제공된다.

올해는 여름철 태풍 시기를 중심으로 남쪽에서부터 유입되는 강한 너울성 파랑에 의한 피해를 예방하고 대응하기 위해 남해안과 제주 해안으로 대상 구역을 확장하고, 기존에 운영하던 동해안에 대해서도 예측 공백을 해소하기 위해 지자체 및 지방기상청 수요를 반영하여 기초지자체별 1개소 이상씩을 선정하여 너울 위험 예측정보 제공지점을 확대한다.

또한 기상청 공식 홈페이지인 날씨누리(www.weather.go.kr)와 공식 어플인 날씨알리미를 통해 너울 예측지수를 서비스함으로써 대국민 정보 제공 창구를 확대하고, 날씨알리미 어플을 활용하여 위험이 예상되는 지점 주변에 푸시 알림으로 위험 정보를 전달하는 직접 전달 체계를 구축할 계획이다.

그림4. 너울 위험 예측정보 제공지점 확대 계획



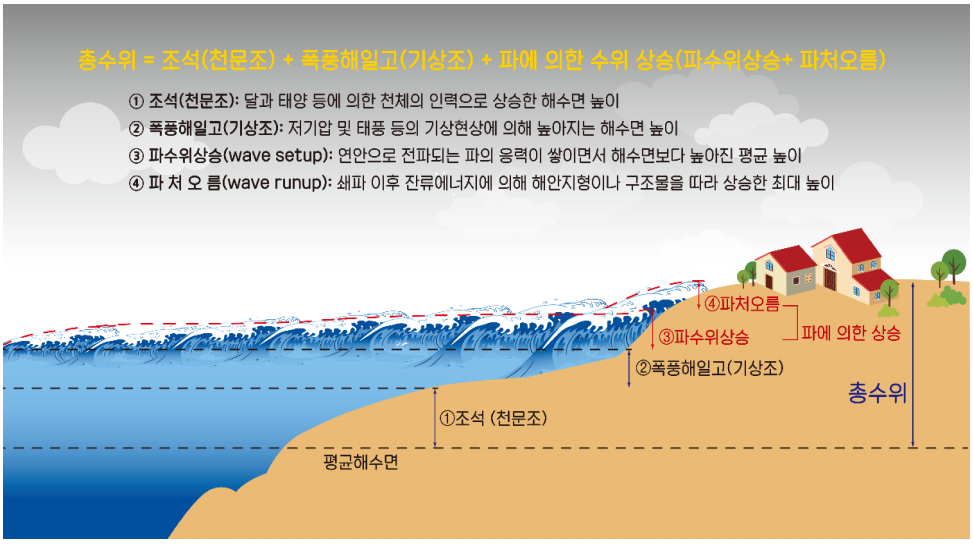
2. 연안 총수위 예측정보

기상청의 연안재해 대응 체계는 폭풍해일 특보를 중심으로 운영된다. 폭풍해일은 태풍과 같이 강한 저기압에 의해서 높아진 해수면이 강한 바람을 타고 해일의 형태로 연안으로 밀려드는 현상으로, 기상청에서는 현업 폭풍해일 예측모델인 RTSM(Regional Tidal Surge Model)과 CTSM(Coastal Tidal Surge Model)을 통해 폭풍해일고(Tidal Surge Height)를 1시간 단위로 예측하고, 이를 바탕으로 주의보와 경보를 발령하고 있다.

하지만 복잡한 연안 수심 및 지형의 효과가 더해지는 경우 파랑의 응력이 쌓이면서 해수면이 상승하는 파수위상승고, 파랑이 쇄파되면서 발생한 잔류에너지에 의해 해안지형이나 구조물을 따라 상승한 최대 높이인 파처오름높이 등 파랑에너지와 지형의 상호작용에 의해 수십 ㎝에서 최대 수 m까지도 수위가 더욱 상승할 수 있다. 이처럼 조석(천문조)과 폭풍해일고(기상조)에 파수위상승고와 파처오름높이를 고려한 최대 높이를 총수위(Total Water Level)로 정의하며, 기상청에서는 2016년 태풍 차바로 인한 해운대 마린시티 침수 사례 이후 총수위 예측정보 제공을 위한 기술개발을 수행해 왔다.

기상청의 총수위 예측모델은 고해상도(500m)의 파랑, 폭풍해일, 조석 및 처올림높이 모델로 구성되며, 파랑은 SWAN(Simulating WAve Nearshore), 폭풍해일과 조석 예측자료는

[그림 5] 총수위(Total Water Level) 개념도

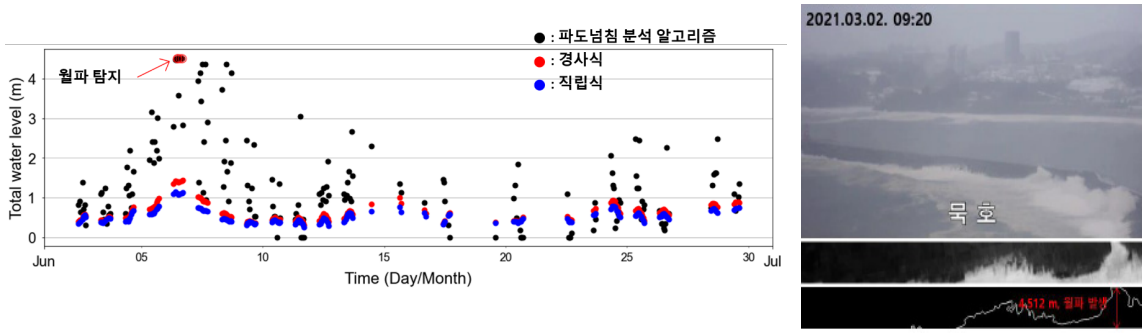


MOHID(MOdel HIDrodynamic), 처올림높이 모델은 지형과 각종 인공구조물과 연관된 파랑의 거동을 모의할 수 있는 EUROTOP(2008) 경험식을 기반으로 개발되었다. 이 과정에서 우리나라의 해안 유형을 크게 자연해안과 인공경사해안, 인공직립해안으로 분류하여 유형별 상세 경험식을 적용하였다.

국지적인 지형의 영향을 고려한 총수위는 파랑계, 수위계, 조위관측소 등 특정 지점에 대한 관측값을 생산하는 전통적인 방식의 해수면 관측 방법으로는 적절히 관측하기 어렵다. 이에 따라 인공지능 기법을 적용하여 영상을 통해 실시간으로 파처오름높이로 인한 월파를 탐지하고, 해당 영역의 최대 총수위 값을 산출하는 인공지능 영상분석 기술을 개발하였다.

이를 기반으로 2023년까지 총수위 예측모델에 대한 검증·분석을 진행하였으며, 2024년에는 주요 항만과 방파제를 중심으로 총수위 예측지수를 생산하여 해양기상정보포털(marine.kma.go.kr)을 통해 시험운영하고, 시험운영 결과를 바탕으로 검증·고도화를 지속하여 정식운영을 추진할 계획이다.

그림 6. 총수위 예측자료 검증을 위한 영상분석 기술 적용 사례



Ⅳ. 맺음말

기후변화에 따라 해수면 상승, 해양산성화, 극지 빙하 붕괴 등 극한 해양 현상이 증가할 것이라는 점은 이제 명백한 과학적 사실이다. 특히 해수면 상승의 영향은 연안으로 전파하는 파랑의 감쇄 효과를 감소시켜 연안재해의 빈도·강도 증가로 이어질 가능성이 제기되고 있음을 살펴보았다. 또한 해수면온도의 상승은 태풍 등 열대 저기압의 평균 강도를 증가시키고, 파고의 상승으로 이어지며, 이로 인해 해양 사고의 빈도는 더욱 증가할 것으로 전망된다.

기상청은 「탄소중립기본법」에 따른 기후위기 감시·예측의 총괄·지원 기관이며, 「기후변화감시예측법」 제정(2024.10.25. 시행)을 통해 해양을 포함한 지구시스템 전반의 기후·기후변화 감시·예측을 위한 구체적인 법적 근거를 마련하였다. 이때 기후위기란, 기후변화가 극단적인 날씨뿐만 아니라 물 부족, 식량 부족, 해양산성화, 해수면 상승, 생태계 붕괴 등 인류 문명에 회복할 수 없는 위험을 초래하여 획기적인 온실가스 감축이 필요한 상태를 말한다. 이에 따라 기상청에서는 기후변화로 인한 해양기상 분야의 변화 추세를 감시하고 그 전망을 예측하고 있으며, 더 나아가 해양위험기상으로 인해 초래될 수 있는 회복할 수 없는 위험을 감시하고 예측할 책무가 있다. 너울, 총수위 등은 해안 지역에서 인명·재산 피해를 유발하며, 해수면 상승 등으로 인해 심화될 것으로 전망되는 대표적인 해양 기후위기 현상이다. 기상청에서는 풍랑, 폭풍해일 등 전통적인 해양기상 현상의 예측에서 더 나아가 연안 지역을 포괄하는 통합적인 해양기상 감시 및 예측 체계로 확장·고도화 하여야 할 것이다.

해양기상으로 인한 재해를 예방하기 위해서는 예측 기술뿐만 아니라 전달체계의 고도화도 필수적일 것이다. WMO에서 해양기상정보를 제공하기 위한 수단으로 제시하는 4종의 방법은 향후, 국제 통신망의 변화에 따라 일부는 쇠퇴하거나, 혹은 사용자가 급격히 감소할 가능성이 있어 이에 대한 보완의 방법으로 해양기상 위성방송을 고려해 볼 수 있다. 정지궤도 기상위성을 운영하는 국가는 LRIT 표준을 활용해 기술적 변경 없이 손쉽게 '해양기상 위성방송'과 유사한 서비스를 제공할 수 있어 선박 및 저개발 국가에 위험기상정보를 제공하는 수단으로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

KOREA REGISTER(한국선급), 2023: Technical Information 2024.1.1.부로 시행되는SOLAS Ⅳ장(무선통신) 관련 개정사항

N.Chini. et.al., 2010: The impact of sea level rise and climate change on inshore wave climate: Acase study of for East Anglia(UK)

WMO, 2014: WMO No.9 Weather Reporting Volume D(Information For Shipping)

경찰청, 2024: 「2023년 교통사고 통계 현황(교통안전)」

관계부처 합동 보고서(총괄 : 기상청), 2024: '2023년 이상기후 보고서'

관계부처 합동 보도자료(총괄 : 기상청), 2023: 「향후 10년의 기후 행동이 온난화 제한을 결정한다 – 기후변화에 관한 정부 간 협의체, 제6차 평가보고서 종합보고서 승인」

국립기상과학원, 2022: 가까운 미래부터 먼미래까지 한반도 주변 해역 변화 분석

국립해양조사원, 2023: '신(新)기후변화 시나리오 적용 우리나라 주변 해수면 상승, 2100년까지 최대 82cm 상승 전망'

국립재난안전연구원 2017: 너울성 파랑 예측기술 신뢰성 검증과 재해위험개선지구 선정기준 설정

기상청, 2016: 「2016년 해양기상 맞춤형 서비스 기술개발」 최종보고서

기상청, 2017: 「2017년 해양기상 맞춤형 서비스 기술개발」 최종보고서

기상청, 2018: 「2018년 해양기상 맞춤형 서비스 기술개발」 최종보고서

기상청, 2020: 「먼바다에서도 기상정보를 해양기상 위성방송으로 손쉽게 받으세요!」

기상청, 2022: 「바다 날씨를 한눈에, 새로워진 '해양기상정보포털'」

기상청, 2023: 「2023년 해양기상 맞춤형 서비스 기술개발」 최종보고서

기상청, 2024 :[2024년 봄철 기후특성] 봄철 기온 2위, 일평균기온이 평년보다 높은 날은 가장 많아 IPCC 해양과 빙권 특별보고서(2019)

기상청 블로그 생기발랄, 2023: 바다로 여행을 떠나신다고요? 해양기상정보포털의 여행 맞춤형 서비스 개시 https://blog.naver.com/kma_131/223277778063

중앙해양안전심판원, 2024: 2023 해양사고 통계

해양수산과학기술진흥원, 2021: VDES 기반 해상문선통 신망 구현 및 시험검증 기술개발 기획연구

기상기술정책지 발간 목록

창간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월

칼 럼	• 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할	권원태	3-11
정책초점	• 기후변화감시 발전 방향	김진석	12-18
	• 미국의 기상위성 개발현황과 향후전망	안명환	19-38
	• 기상산업의 위상과 성장가능성	김준모	39-45
	• 최적 일사 관측망 구축방안	이규태	46-57
	• 국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의	김백조, 김경립	58-61
논 단	• A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities	L.S. Kalkstein, S.C. Sheridan, Y.C.Au	62-68
해외기술동향	• 프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술	김상우	69-79
	• 일본의 우주기상 기술	김지영, 신승숙	80-84

기상산업의 현황과 전략, 제1권 제2호(통권 제2호), 2008년 6월

칼 럼	• 기후변화시대, 기상산업 발전상	봉종헌	1-3
정책초점	• 기상산업의 중요성과 전략적 위치	이중우	5-13
	• 기후변화가 산업에 미치는 경제적 영향과 적응대책	한기주	14-22
	• 기후경제학의 대두와 대응 전략	임상수	23-33
	• 기후변화와 신재생에너지 산업	구영덕	34-45
	• 기상산업 육성을 위한 정책대안 모색	김준모, 이기식	46-54
	• 미국 남동부의 응용기상산업 현황	임영권	55-64
	• 최근 황사의 특성 및 산업에 미치는 영향	김지영	65-70
논 단	• A brief introduction to the European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST)	Radan Huth	71-81
	• 우주환경의 현황과 전망	안병호	82-92
해외기술동향	• 유럽의 기후변화 시나리오 불확실성 평가 : EU(유럽연합) 기후변화 프로젝트를 중심으로	임은순	93-103
	• 미국 NOAA의 지구 감시 현황	전영신	104-107

항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월

칼 럼	• 기상 관측·연구용 항공기 도입과 활용	정순갑	1-4
정책초점	• 무인항공기 개발 현황 및 응용 방안	오수훈, 구삼옥	6-18
	• 해외 기상관측용 항공기 운영 및 활용 실태	김금란, 장기호	19-34
	• 항공기를 이용한 대기물리 관측 체계 수립 방안	오성남	35-45
	• 효과적인 항공기 유지 관리 방안	김영철	46-56
	• 공군에서의 항공관측 현황과 전망	김종석	57-66
	• 항공기를 이용한 대기환경 감시	김정수	67-74
	• 항공/위성 정보를 활용한 재해 피해 조사	최우정, 심재현	75-84
논 단	• 유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시	윤순창, 김지영	85-93
해외기술동향	• 미국의 첨단 기상관측 항공기(HIAPER) 운영 현황	김지영, 박소연	94-99
	• 미국의 탄소 추적자 시스템 개발 현황 및 전략	조천호	100-108
	• 미국의 우주기상 예보와 발전 방향	곽영실	109-117
뉴스 포커스	• 한국, IPCC 부의장국에 진출	허 은	118-119

기상기술정책지 발간 목록

전지구관측시스템 구축과 활용, 제1권 제4호(통권 제4호), 2008년 12월

칼 럼	• 전지구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	• GEO/GEOSS 현황과 추진 계획	엄원근	6-21
	• GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안	김병수	22-31
	• GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안	허 은	32-39
	• 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안	신동철	40-41
	– 재해 분야	박덕근	42-44
	– 보건 분야	이희일	45-47
	– 에너지자원 분야	황재홍, 이사로	48-50
	– 기상 및 기후 분야	이병렬	51-53
	– 수문 및 수자원 분야	조효섭	54-56
	– 생태계와 생물다양성 분야	장임석	57-58
	– 농업 분야	이정택	59-62
	– 해양 분야	김태동	63-67
	– 우주 분야	김용승, 박종욱	68-71
논 단	• Taking GEOSS to the nest level	José Achache	72-75
해외기술동향	• GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향	강용성	76-83
	• 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황	이경미	84-95
뉴스 포커스	• 한국, GEO 집행 이사국 진출	이용섭	96-97

기상장비의 녹색산업화 전략, 제2권 제1호(통권 제5호), 2009년 3월

칼 럼	• 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기상장비의 산업여건과 국산화 전략	김상조	4-13
	• 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략	이종국	14-21
	• 기상레이더 국산화 추진 방안	장기호, 석미경, 김정희	22-29
	• 기상라이더의 상용화 현황과 육성 방안	조성주	30-41
	• 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향	이부용	42-51
논 단	• 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원	52-72
해외기술동향	• 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로	방기석	73-80
	• 세계의 기상장비 및 신기술 동향	김지영, 박소연	81-89

기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

칼 럼	• 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화와 물환경정책	김영훈	4-15
	• 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향	노재화	16-27
	• 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰	김문모, 정창삼, 여운광, 심재현	28-37
	• 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안	문영일, 오태석	38-50
	• 수문기상학적 기후변화 추세	강부식	51-64
	• 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책	배덕효	65-77
	• 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안	차기욱	78-89
논 단	• 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석	90-110
해외기술동향	• 미국의 기상-수자원 연계기술 동향	정창삼	111-121
	• NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황	김지영·박소연	122-131
	• 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기	김용상	132-140

기상기술정책지 발간 목록

기상·기후변화와 경제, 제2권 제3호(통권 제7호), 2009년 9월

칼 럼	• 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화에 따른 에너지정책	박현종	4-18
	• 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향	박종현	19-29
	• 기후변화가 농업경제에 미치는 영향	김창길	30-42
	• 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정	김정인	43-52
	• 기상산업 활성화와 과제	이만기	53-59
	• 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언	김동식	60-69
논 단	• 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정	김지영	79-85
	• 강수의 경제적 가치 평가 방법론	유승훈	86-96
뉴스 포커스	• 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기	이영곤	97-103

날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월

칼 럼	• 날씨공감포럼의 의의와 발전방향	전병성	1-2
정책초점	• [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향	고상백	4-19
	• [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향	이재학	20-29
	• [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안	차두송	30-41
	• [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향	김의근	42-50
	• [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성	조명희, 조윤원, 김성재	51-60
	• [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성	김정배	61-72
	• [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안	김명주	73-88
논 단	• 국민과의 '소통' – 어떻게 할 것인가?	김연종	89-97
뉴스 포커스	• 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기	김정윤	98-101

기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월

칼 럼	• 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책	박광준	1-2
정책초점	• 기상이변의 경제학	이지훈	4-11
	• 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고	한기주	12-21
	• 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언	이종인	22-32
	• 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향	이상현, 정상기, 이상훈	33-45
	• 기후변화와 건설 산업	강운산	46-56
	• 코펜하겐 어코드와 탄소시장	노종환	57-66
	• 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영	이서원	67-77
	• 이산화탄소(CO_2) 저감기술 개발동향: DME 제조기술	조원준	78-84
논 단	• 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로	양용석	85-99
	• 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임	김창섭	100-109
뉴스 포커스	• 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

기상기술정책지 발간 목록

국가 기후정보 제공 및 활용 방안, 제3권 제2호(통권 제10호), 2010년 6월

칼 럼	• 국가기후자료 관리의 중요성	켄 크로포드	1-2
정책초점	• 기후변화통합영향평가에대한 국가기후정보의 역할	전성우	4-11
	• 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안	권영아	12-22
	• 기상정보의 농업적 활용과 전망	심교문	23-32
	• 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스	원명수	33-45
	• 경기도의 기상·기후정보 활용	김동영	46-57
	• 국가기본풍속지도의 필요성	권순덕	58-62
	• 국가기후자료센터 구축과 기상산업 활성화	김병선	63-74
	• 국가기후자료센터 설립과 민간의 역할 분담	나성준	75-83
	• 가치있는 기후정보	김윤태, 정도준	84-99
논 단	• 기상청 기후자료 활용 증대 방안에 관한 제언	최영은	100-110
뉴스 포커스	• 국가기후자료센터의 역할	임용한	111-119

장기예보 정보의 사회경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월

칼 럼	• 장기예보 투자 확대해야	박정규	1-2
정책초점	• 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용	정응수	4-15
	• 기상 장기예보에 대한 소고	박창선	16-23
	• 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용	손미영	24-33
	• 장기예보의 사회·경제적 가치와 서비스 활성화 방안	김동식	34-43
	• 기상 장기예보의 농업적 가치와 활용	한점화	44-53
	• 장기예보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용	우수민, 김태국	54-64
	• 기상예보와 재해관리	박종윤, 신영섭	65-81
	• 장기예보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래	김지영, 이현수	82-89
해외기술동향	• 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후 영향에 관한 서비스 현황	조경숙	90-101
	• WMO 장기예보 다중모델 앙상블 선도센터(WMO LC-LRFMME)	윤원태	102-106
뉴스 포커스	• 영국기상청과의 계절예측시스템 공동 운영 협정 체결	이예숙	107-109

사회가 요구하는 미래기상서비스의 모습, 제3권 제4호(통권 제12호), 2010년 12월

칼 럼	• 시대의 요구에 부응하는 기상·기후서비스	권원태	1-3
정책초점	• 기상학의 역사	윤일희	6-16
	• 지질학에서 본 기후변동의 과거, 현재, 그리고 미래	이용일	17-29
	• 예보기술의 성장 촉진을 위한 광각렌즈	변희룡	30-44
	• 전쟁과 기상	반기성	45-55
	• 날씨와 선거	유현종	56-64
	• 기후변화와 문학	신문수	65-74
	• 기후변화와 문화 I (문명의 시작과 유럽문명을 중심으로)	오성남	75-87
	• 비타민 D의 새로운 조명	김상완	88-96
	• G20서울정상회담과 경호기상정보 생산을 위한 기상청의 역할	이선제	97-105
논 단	• 기상정보의 축적과 유통 활성화를 통한 국부 창출	김영신	106-115
	• 날씨의 심리학	최창호	116-122
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 평가에 관한 해외동향	김정윤, 김인겸	123-130

기상기술정책지 발간 목록

신규 시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안, 제4권 제1호(통권 제13호), 2011년 6월

발간사	• G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향	조석준	1-3
칼 럼	• 대학과 공공연구소의 기상기술 이전 활성화 및 사업화 촉진을 위한 기술이전센터(TLO) 발전 방안	박종복	4-13
	• 새로운 기상산업 시장창출과 연계된 금융시장 활성화에 대한 소고 – 보험산업의 입장에서	조재린, 황진태	14-23
정책초점	• 신규 기상시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안 연구	국립기상연구소 정책연구과	26-63

도시기상관측 선진화방안, 제4권 제2호(통권 제14호), 2011년 12월

발간사	• 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.	조석준	1-3
칼 럼	• 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래	최광용	6-18
	• 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안	박민규, 이석민	19-30
	• 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안	김해동	31-42
	• 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계	이순환	43-50
	• 도시 기상 관측 연구 현황	박영산	51-62
정책초점	• 도시기상 관측 선진화 방안 연구	이영곤	64-73

원격탐측기술(레이더, 위성, 고층) 융합정책 실용화 방안, 제5권 제1호(통권 제15호), 2012년 6월

칼 럼	• 원격탐측의 융합정책과 기상자원 가치 확산	Kenneth Crawford	3-8
정책초점	• 레이더-위성 융합 강수정보 생산 기술	신동빈	10-18
	• 위성과 첨단기술 융합을 통한 미래 기상서비스 발전 방향	은종원	19-27
	• 라이다 관측기술 활용 방안	김덕현	28-41
	• 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책	배덕효, 이병주	42-53
	• 위성자료의 해양 환경감시 활용	황재동	54-65
논 단	• 우리나라의 융합기술발전 정책 방향	이상현	66-72
해외기술동향	• 일본의 원격탐사 활용 및 융합정책	윤보열, 장희욱, 임효숙	73-85
포 커 스	• 레이더 융합행정 포럼 : 레이더운영과	송원화	86-93

해양기상서비스의 현황 및 전망, 제5권 제2호(통권 제16호), 2012년 12월

칼 럼	• 해양기상서비스의 의미 및 가치 확산	박관영	3-7
정책초점	• 해양기상 융합서비스의 필요성	김민수	10-20
	• 수자원 변동에 따른 해양기상서비스의 강화	김희용	21-29
	• 해양기상정보 관리의 선진화 방안	정일영	30-39
	• 해양기상·기후변화 대응을 위한 정책제언	양홍근	40-47
논 단	• 해양기상서비스 현황과 정책 방향	김유근	48-57
해외기술동향	• 선진 해양기상기술 동향	우승범	58-67
포 커 스	• 제4차 WMO/IOC 해양학 및 해양기상 합동기술위원회(JCOMM) 총회	해양기상과	68-73

기상기술정책지 발간 목록

국민의 행복 증진을 위한 "기상기후서비스 3.0", 제6권 제1호(통권 제17호), 2013년 6월

칼 럼	• 국민이 원하는 기상기후서비스	이일수	3-4
정책초점	• 기상기후분야 과학과 서비스 발전 방향	전종갑	6-14
	• 지진조기경보 역량 강화를 위한 정책적 제언	최호선	15-30
	• 기상기후 서비스 혁신을 위한 기술경영 전략	박선영	31-47
	• 자연재해 대응 서비스 기술 및 정책변화	허종완, 손홍민	48-59
논 단	• 수요자 맞춤형 서비스를 위한 기상기술 고도화 방안	김영준	60-72
포 커 스	• 국민행복서비스 포럼 개최 후기	국립기상연구소 정책연구과	73-78

빅데이터 활용 기상융합서비스, 제6권 제2호(통권 제18호), 2013년 12월

칼 럼	• 정부3.0에 따른 기상기후 빅데이터 활용	고윤화	3-4
정책초점	• [정책] 정부3.0 지원을 위한 빅데이터 융합전략	안문석	6-13
	• [정보] 스마트국가 구현을 위한 빅데이터 활용방안	김현곤	14-31
	• [서비스] 빅데이터 분석 기반 기상예보의 신뢰도 향상 방안	이기광	32-46
	• [경영] 빅데이터 기반 날씨경영 성과 제고 방안 – 공항기상정보 활용사례 –	방기석	47-58
	• [농업] 기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략	김창길, 정지훈	59-76
	• [재난] 재난관리의 새로운 해결방안, 빅데이터	최선화, 김진영, 이종국	77-87
논 단	• 기상기후데이터를 품은 빅데이터	이재원	88-97
	• 한국형 복지국가의 전략적 방향성안	안상훈	98-111

기상기후 빅데이터와 경제, 제7권 제1호(통권 제19호), 2014년 6월

칼 럼	• 기상기후 빅데이터를 활용한 날씨경영	고윤화	3-4
정책초점	• 기상기후정보의 사회경제적 역할	안중배	6-11
	• 미래 재난재해 해결을 위한 기상기후 서비스	김도우, 정재학	12-19
	• 빅데이터의 사회경제적 파급효과	김진화	20-30
	• 기상기후 빅데이터의 산업경영 활용과 전략	김정인	31-41
	• 기상기후 빅데이터 기반 기상산업육성	송근용	42-56
논 단	• 빅데이터 기반의 미래 산업	황종성	57-71
	• 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구	이성종	72-77
포 커 스	• 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용	국립기상연구소 정책연구과	78-93

위성 기술과 활용, 제7권 제2호(통권 제20호), 2014년 12월

칼 럼	• 위성을 활용한 전 지구적 관측 방안	고윤화	3-4
정책초점	• 기상위성 운영기술의 선진화 방안	김방엽	6-15
	• 관측위성기술의 현황 및 전망	김병진	16-24
	• 연구개발용 위성의 현업 활용성 제고 방안	안명환	25-43
	• 위성을 이용한 국가재난감시 체계 구축	윤보열, 염종민, 한경수	44-56
	• 위성영상서비스 시장 빅뱅과 새로운 관점	조황희	57-67
논 단	• 우주기상의 연구 현황 및 발전 방향	김용하	68-81
해외기술동향	• 기상위성 기술·정책 정보 동향	국가기상위성센터 위성기획과	82-92
	• 위성기반 작전기상 소개	안숙희, 김백조	93-100

기상기술정책지 발간 목록

장마의 사회경제적 영향, 제8권 제1호(통권 제21호), 2015년 6월			
칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	• 수자원 확보에 있어서 장마의 역할	박정수	8-16
	• 장마가 농업생산에 미치는 영향	최지현	17-24
	• 장마의 변동성과 예측성 향상	서경환	25-30
	• 장마기간 유통산업 영향 및 전략	김정윤	31-40
	• 장마철 유의해야할 건강 상식	이준석	41-51
논 단	• 장마-몬순 예측기술 향상 방안	하경자	52-59
해외기술동향	• 동아시아 여름강수 예측기술 현황	권민호	60-65

겨울철 위험기상의 영향과 대응, 제8권 제2호(통권 제22호), 2015년 12월			
칼 럼	• 겨울철 위험기상 예보의 중요성	고윤화	3-4
정책초점	• 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책	김두천	6-17
	• 한국의 동절기 도로제설 현황	양충헌	18-29
	• 한파가 농업에 미치는 영향	심교문	30-41
	• 겨울철 한파 대비 건강관리	송경준	42-56
논 단	• 겨울철 위험기상의 예측능력 향상	김주홍	57-68
	• 미래 겨울철 위험기상의 변화	차동현	69-75

영향예보의 현황 및 응용, 제9권 제1호(통권 제23호), 2016년 6월			
칼 럼	• 영향예보를 통한 기상재해 리스크 경감	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 비전과 추진 방향	정관영	6-22
	• 재해기상 영향예보시스템 현황 소개	최병철	23-31
	• 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향	김동준	32-40
	• 영향예보를 위한 수문기상정보 지원	이은정	41-51
논 단	• 재해영향예보의 효과	손철, 김건후	52-63
포 커 스	• 확률 예보를 위한 앙상블예측 기술 소개 및 현황	강지순	64-74

인공지능을 접목한 기상 분야 활용, 제9권 제2호(통권 제24호), 2016년 12월			
칼 럼	• 기상서비스를 변화시키는 인공지능	고윤화	3-4
정책초점	• 인공지능의 발달이 몰고 오는 변화상	진석용	6-20
	• 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신	최혜봉	21-30
	• 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은?	구본권	31-50
	• 인공지능의 기상정책 개발 활용	국립기상과학원	51-63
논 단	• 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보	고한석	64-77

기상기술정책지 발간 목록

영향예보 서비스 확대, 제10권 제1호(통권 제25호), 2017년 6월

칼 럼	• 영향예보 서비스 개발과 활성화	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 서비스 확대를 위한 제언	예상욱	6-17
	• 교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용	손영태	18-30
	• 태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보	이은주	31-40
	• 기상, 기후 그리고 숲과 사람	박주원	41-55
	• KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개	조민수	56-70
논 단	• 기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보	최진용, 홍민기, 이성학, 이승재	71-81
	• 화재 기상예보 서비스	류정우, 권성필	82-92
포 커 스	• 오픈데이터와 일본기상비즈니스 컨소시엄	정효정	93-107

4차 산업혁명과 미래 기상기술, 제10권 제2호(통권 제26호), 2017년 12월

칼 럼	• 기후변화 저감을 위한 미래 기상기술	남재철	3-4
정책초점	• 4차 산업혁명과 미래 기후변화 대응기술	김형주	6-15
	• 4차 산업혁명 시대의 기후변화 대응	채여라	16-25
	• 인공지능 기술 발전을 위한 제도 및 정책	김윤정	26-43
	• 기후변화 대응을 위한 에너지 정책	전재완	44-54
논 단	• 기후변화에 대응하기 위한 농업과 과학기술의 융합	이현숙	55-65
포 커 스	• 4차 산업혁명과 미래 전문직	윤상후	66-73

여름철 위험기상의 영향과 대응, 제11권 제1호(통권 제27호), 2018년 6월

칼 럼	• 국민의 안전을 위협하는 여름철 폭염과 대응	남재철	3-4
정책초점	• 기후변화로 심화되는 폭염 대응을 위한 경보체계의 개발	이명인	6-18
	• 재난정보관리 표준화 기술 개발	김병식	19-34
	• 지표홍반자외선정보 제공 및 향후 대응	박상서	35-43
	• 스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할	권용석	44-53
	• 인공지능을 활용한 재해기상 저감·예측 기술	김동훈	54-69
논 단	• 미래 여름철 기온변화에 의한 건강영향 예측	이재영, 김호	70-77
포 커 스	• 폭염 피해와 정책 동향	김도우	78-85

기상정보 활용 확대와 기상청의 역할, 제12권 제1호(통권 제28호), 2019년 6월

칼 럼	• 날씨, 국민 생활의 시작과 끝	김종석	3-4
정책초점	• 기상조건에 따른 이동수요의 변화	이재호, 전재영	6-14
	• 기상데이터로 알려주는 국민건강 알람서비스	한성욱, 전예슬	15-23
	• 신재생에너지 발전량 예측에서의 기상정보 활용	이영미, 박다빈	24-32
	• ICT수목원과 기상기술	이상용	33-43
	• 기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향과 대응	문경환	44-57
	• 4차 산업혁명 기술을 활용한 친환경 건축/도시 설계 기술	이호영	58-69
	• 실시간 수(水)재해 예측을 위한 기상정보 활용 방안	이병주	70-80
포 커 스	• 복합재난대응 연구사례 중 도심지 침수 현상을 중심으로	백용, 이동섭, 김형준	81-87

기상기술정책지 발간 목록

겨울철 위험기상의 사회경제적 영향, 제12권 제2호(통권 제29호), 2019년 12월			
칼 럼	• 겨울철 안심사회 건설과 기상청의 기여	김종석	3-4
정책초점	• 도로에서의 기상정보 활용 및 시스템 구축 사례	윤덕근	6-16
	• 정확한 산불위험 예보를 위한 노력	이병두	17-24
	• 기해년 4월 산불 이후, 「산불극복 뉴딜 전략」 제안	김경남	25-39
	• 미세먼지 개선을 위한 국가 정책 및 기술 방향	심창섭	40-48
	• 2019년 겨울철 대설·한파 종합대책	최병진	49-59
	• 건강한 겨울나기, 겨울철 질환에 대한 예방 및 대응	임도선	60-68
논 단	• 서울시 미세먼지 저감정책의 효과: 차량 배출량 관점	허창회	69-80

중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응, 제13권 제1호(통권 제30호), 2020년 6월			
칼 럼	• 호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다	김종석	3-4
정책초점	• 코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측	홍진규	6-23
	• 도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합	황석환, 이동률	24-40
	• 기후변화 대응과 소하천 계측기술	정태성	41-52
논 단	• 돌발 기상 예보와 과제	이우진	53-65
	• 중규모 대류계의 예측	이동규	66-79
	• 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단	손병주	80-90
	• 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언	이규원	91-105
포 커 스	• 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험	이보영	106-112

유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황, 제13권 제2호(통권 제31호), 2020년 12월			
칼 럼	• 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다	박광석	3-4
정책초점	• 국립해양조사원 해양예보서비스 현황	이준식	6-16
	• 동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템	신충훈	17-31
	• 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언	경기원	32-43
	• 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용	권오순	44-54
	• 국가대기오염측정망 운영과 명예대기관리원 제도	박지해	55-63
	• 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측	손성원	64-72
	• 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측기술	홍석영	73-86
	• 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황	현명숙	87-98

미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책, 제14권 제1호(통권 제32호), 2021년 6월			
칼 럼	• 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 '기상정보'	박광석	3-4
정책초점	• 도심항공교통을 위한 기상관측 제언	이규원	6-19
	• 도심항공기상을 위한 중미기상학	강성락	20-31
	• 안전한 UAM을 향한 제언	홍진규	32-41
	• 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템	박문수	42-55
논 단	• K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용	김재진	56-66
포 커 스	• UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언	구성관	67-76

기상기술정책지 발간 목록

2050 탄소중립 대응 전략, 제14권 제2호(통권 제33호), 2021년 12월			
칼 럼	• 탄소중립을 위한 청량음료 한 모금	박광석	3-4
정책초점	• 2050년 탄소중립 달성 전략	노동운	6-18
	• 2050 탄소중립 추진전략(에너지기술)	김현구	19-25
	• '2050 탄소중립'과 기후변화 과학	전의찬	26-32
	• 탄소중립 이행을 위한 신재생에너지 발전 분야의 이음새 없는(Seamless) 기후예측정보의 활용 제언	오지현	33-44
	• 2050 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할	이동근	45-55
	• 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리	이우균	56-65
포 커 스	• 기후위기 극복을 위한 탄소중립과 기후변화 적응	박진한	66-74

기상특보의 사회경제적 효과, 제15권 제1호(통권 제34호), 2022년 6월			
칼 럼	• 기상재해 리스크 경감을 위한 기상청의 도전	유희동	3-4
정책초점	• 폭염특보 현황 및 선진화	이명인	6-20
	• 폭염과 건강영향, 그리고 대응정책	홍윤철	21-29
	• 폭염(열파)이 국민 건강에 미치는 영향을 고려한 폭염특보 개선 방향 제언	최광용	30-41
	• 호우특보와 재난관리	조재웅	42-54
	• 도시 기후변화 재해취약성분석 제도의 이해와 기상분야 과제	권용석	55-62
논 단	• 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안	문일주	63-73
포 커 스	• 자연재난에 안전한 지자체 구축을 위한 기상특보의 활용	허종배	74-83

지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향, 제15권 제2호(통권 제35호), 2022년 12월			
칼 럼	• 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다	유희동	3-4
정책초점	• 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측	이준기	6-16
	• 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진	김광희	17-25
	• 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제	손상영	26-42
	• 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언	신성원	43-55
	• 화산기술과 화산특화연구센터	윤성효	56-70
포 커 스	• 백두산 화산 재해	이윤수	71-81

선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석, 제16권 제1호(통권 제36호), 2023년 6월			
칼 럼	• 기상기술의 퀀텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술	유희동	3-5
정책초점	• 메커니즘 기반의 장마 이해	장은철	8-19
	• 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구	이규원	20-35
	• 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로	방승현	36-47
	• 수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구	안도현	48-58
포 커 스	• 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석	김득갑	59-71

기상기술정책지 발간 목록

기후전망·기상조절 기술동향 및 선진국 투자 동향, 제16권 제2호(통권 제37호), 2023년 12월

칼 럼	• 기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할	유희동	3-5
정책초점	• 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언	최영은	8-22
	• IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망	차동현	23-35
	• 기상조절기술 현황 및 전망	김병곤	36-48
	• 구름물리챔버: 미래로 전진을 위한 실험실	엄준식	49-67
포 커 스	• 기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석	김득갑	68-89

해양기후변화 대응과 해양 감시 · 관측 기술, 제17권 제1호(통권 제38호), 2024년 6월

칼 럼	• 미래를 위한 항해: 해양기상 · 기후 서비스 강화	유희동	3-5
정책초점	• 해양기후변화의 이해와 예측	안중배	8-24
	• 아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측	김백조, 조형준, 이철규	25-35
	• 웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용	김대현	36-49
	• 해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안	박종진	50-69
포 커 스	• 수요자 중심의 해양기상서비스	박승균	70-83

『기상기술정책』 투고 안내

투고방법

1. 본 정책지는 기상기술 분야와 관련된 정책적 이슈나 최신 기술정보 동향을 다룬 글을 게재하며, 투고된 원고는 다른 간행물이나 단행본에서 발표되지 않은 것이어야 한다.
2. 원고의 특성에 따라 다음과 같은 5종류로 분류된다.
   (1) 칼럼 (2) 정책초점 (3) 논단 (4) 해외기술동향 (5) 뉴스 포커스
3. 본 정책지는 연 2회(6월, 12월) 발간되며, 원고는 수시로 접수한다.
4. 원고를 투고할 때는 투고신청서, 인쇄된 원고 2부, 그림과 표를 포함한 원본의 내용이 담긴 파일(hwp 또는 doc)을 제출하며, 일단 제출된 원고는 반환하지 않는다. 원고접수는 E-mail을 통해서도 가능하다.

원고심사

1. 원고는 편집위원회의 검토를 통하여 게재여부를 결정한다.

원고작성 요령

1. 원고의 분량은 A4용지 10매 내외(단, 칼럼은 A4용지 3~5매 분량)로 다음의 양식에 따라 작성한다.
   1) 워드프로세서는 '아래한글' 또는 'MS Word' 사용
   2) 글꼴 : 신명조
   3) 글자크기 : 본문 11pt, 표·그림 10pt
   4) 줄간격 : 160%
2. 원고는 국문 또는 영문으로 작성하되, 인명, 지명, 잡지명과 같이 어의가 혼동되기 쉬운 명칭은 영문 또는 한자를 혼용할 수 있다. 학술용어 및 물질명은 가능한 한 국문으로 표기한 후, 영문 또는 한문으로 삽입하여 표기한다. 숫자 및 단위의 표기는 SI규정에 따르며, 복합단위의 경우는 윗 첨자로 표시한다.
3. 원고 첫 페이지에 제목, 저자명, 소속, 직위, E-mail 등을 명기하고, 저자가 다수일 경우 제1저자를 맨 위에 기입하고, 나머지 저자는 그 아래에 순서대로 표시한다.
4. 원고의 계층을 나타내는 단락의 기호체계는 Ⅰ, 1, 1), (1), ①의 순서를 따른다.
5. 표와 그림은 본문의 삽입위치에 기재한다. 표와 그림의 제목은 각각 원고 전편을 통하여 일련번호를 매겨 그림은 아래쪽, 표는 위쪽에 표기하며, 자료의 출처는 아랫부분에 밝힌다.
   예) 〈표 1〉 〈표 2〉 [그림 1] [그림 2]
6. 참고문헌(reference)
   1) 참고문헌 표기 양식
      - 참고문헌은 본문의 말미에 첨부하되 국내문헌(가나다 순), 외국문헌(알파벳 순)의 순서로 정리한다.
      - 저자가 3인 이상일 경우, '등' 또는 'et al.'을 사용한다.
      - 제1저자가 반복되는 경우 밑줄(_)로 표시하여 작성한다.
   2) 참고문헌 작성 양식
      - 단행본 : 저자, 출판년도: 서명(영문은 이탤릭체). 출판사, 총 페이지 수.
      - 학술논문 : 저자, 출판년도: 논문명. 게재지(영문은 이탤릭체), 권(호), 수록면.
      - 학술회의(또는 세미나) 발표논문 : 저자, 발표년도: 논문명, 프로시딩명(영문은 이탤릭체), 수록면.
      - 인터넷자료 : 웹 페이지 주소

『기상기술정책』

Vol.17, No.1(통권 제38호)
2024년 6월 30일 발행
등록번호 : 11-1360620-000097-09
ISSN 2092-5336

『기상기술정책』지는 범정부적인 기상·기후 분야의 정책 수요에 적극적으로 부응하고, 창의적인 기상기술 혁신을 위한 전문적인 연구 조사를 통해 기상·기후업무 관련 분야의 발전에 기여할 목적으로 발간 기획되었습니다.

본 『기상기술정책』지는 기상·기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상 정책입안과 연구개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행되고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지에 게재된 내용은 출처와 저자를 밝히는 한 부분적으로 발췌 또는 인용될 수 있습니다.

원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 기술혁신과 관련된 원고를 모집하고 있습니다. 뜻있는 분들의 많은 참여를 부탁드립니다. 편집위원회의 심사를 통하여 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

▶ 원고매수: A4 용지 10매 내외
▶ 원고마감: 수시접수
▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.
☞ 더 자세한 투고방법은 맨 뒷편의 투고요령을 참고바랍니다.

『기상기술정책』 편집위원회

발 행 인 : 유희동
편 집 기 획 : 국립기상과학원 기획운영과
편집위원장 : 박영연
편 집 위 원 : 박영연, 이철규, 부경온, 변영화, 김용석
편 집 간 사 : 우남철, 이경미, 김혜민

발행처

주소 : (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33
국립기상과학원(책임운영기관)
전화 : 064-780-6505 팩스 : 064-738-9071
E-mail : leekm80@korea.kr

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

Volume 17, Number 1

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea
TEL. 064-780-6505 | FAX. 064-738-9071
http://www.kma.go.kr