

# METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

기상기술정책

## 기상기술정책 기상기술정책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

2020.12

2020.

12

특집 유관부처 기상정보 관측·예측기술 현황

칼럼 | 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다 |

- 정책초점 | 국립해양조사원 해양예보서비스 현황 |  
 | 동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링 시스템 |  
 | 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언 |  
 | 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용 |  
 | 국가대기오염측정망과 명예대기관리원 제도 |  
 | 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측 |  
 | 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측 기술 |  
 | 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황 소개 |

Volume 13, Number 2

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea  
TEL. 064-780-6545 | FAX. 064-738-6513  
<http://www.kma.go.kr>

기상청



# 『기상기술정책』

Vol.13, No.2(통권 제31호)

2020년 12월 31일 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 연구 개발 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 기술 혁신과 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

발행인: 박광석

편집기획: 국립기상과학원(책임운영기관) 연구기획재정과

편집위원장: 주상원

편집위원: 정관영, 신동현, 이은정, 박성찬,

박록진, 반기성, 홍진규, 김도우

편집간사: 임병환, 이대근, 김인겸

## 발행처

주소: (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원(책임운영기관)

전화: 064-780-6545 팩스: 064-738-6513

E-mail: dglee7@korea.kr

# CONTENTS

특집: 유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황

**칼럼** 03 \_ 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해  
부처협업이 필요한 때입니다 / 박광석

- 정책초점** 06 \_ 국립해양조사원 해양예보서비스 현황 / 이준식
- 17 \_ 동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링 시스템 / 신충훈
- 32 \_ 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언 / 경기원
- 44 \_ 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용 / 권오순
- 55 \_ 국가대기오염측정망과 명예대기관리원 제도 / 박지해
- 64 \_ 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측 / 손성원
- 73 \_ 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측 기술 / 홍석영
- 87 \_ 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황 소개 / 현명숙





# 소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다.



박광석  
기상청장

과거에 소금은 화폐 이상의 가치를 지닌 자원이었다. 고대 로마제국 시절, 병사들은 소금으로 월급을 받을 정도였다. 중국에서는 세금이나 통행세로 소금을 받았으며, 프랑스에서는 소금세를 걷어 왕실 운영에 사용했다고 한다. 이처럼 가치 있던 '소금'은 여전히 중요한 자원이지만, 과거의 화폐만큼의 가치는 지니지 못한다. 이제 소금은 소금 자체보다 소금을 통해 맛을 내고, 다른 것에 쓰일 때에서야 그 가치를 인정받는다.

기상청에서 국민에게 서비스하는 '기상정보'는 소금과 같다. 여전히 없어서는 안 될 중요한 정보이지만, 기상정보의 단순 제공이 가치가 있던 시절과는 다르다. 오늘날 이 소금과 같은 기상정보는 사용자의 다양한 요리에서 '활용'되면서 가치를 제공할 수 있을 때 의미가 있다.

현재의 기후변화는 기후위기(또는 비상)로까지 인식되며 정확한 정보란 무엇인가에 대한 질문을 제기하고 있다. 이는 지구온난화로 인해 정확도 높은 정보를 기술적으로 생산하는 것이 어려워지기 때문만은 아니다. 바로 국민의 기상기후정보 활용에 대한 인식 변화, 다양한 정책고객·이해당사자들의 맞춤형 정보와 협력 확대에 대한 요구, 소셜미디어 혹은 정보통신 기술 발달로 인한 빠른 정보전달과 피드백 증가 등은 기상청으로 하여금 시의적절하고 정확한 정보의 제공에 대해 끊임없이 고민하게 하고 있다. 이제는 서비스 고객으로부터 높은 점수를 받기 위해서는 수많은 상황에서 '정확한' 정보가 무엇인지 아는 것이 중요한 시점이다.

이를 위한 '정확한' 정보에 대한 고민은 기상청이 타 부처와의 협력을 강화한 계기가 되었다. 최근 환경부-국방부와 '돌발집중홍수 예측', 행정안전부-한국도로공사 등 7개 기관이 협력하여 '도로살얼음 예측' 능력 제고 등 국민의 안전과 생활에

큰 영향을 줄 수 있는 대표적 분야로부터 외부협력을 강화해 나가고 있다. 하지만 기상이 미치는 분야와 영역이 더욱 다양한 만큼 타 부처의 보유자원과 서비스에 대한 파악이 필요하다.

특히 환경부의 유역별 홍수통제소 등 수문 관련 기관과의 협력을 통해 기상재난에 대한 공동 대응이 가능하며, 여름철 홍수 예방 등에 활용중인 기상청의 자동기상관측장비, 종관기상관측장비 자료의 활용률 제고에도 도움이 될 수 있다. 해양 분야의 경우 해양수산부의 해양예측시스템, 이안류 감시시스템, 해무 예측시스템, 해양예보방송, 해양예보지수, 해양예보도 기술 및 서비스들은 기상청과의 유기적 협력을 통해 부처 간의 중복투자를 막고, 더 나은 서비스를 개발하는데 도움을 줄 수 있다. (주)한국수력원자력의 원전해역 주변에 배치된 해양환경관측부이는 기상청의 해양환경 실시간 모니터링을 통하여 태풍, 고수온, 냉수대 등 특이현상 분석을 위한 기초자료로 활용될 수 있다. 해양환경 관측을 위한 고정식 또는 이동식 플랫폼 구축 시 국가 차원의 체계적인 통합시스템 구축과 연구개발에도 한국해양과학기술원과 같은 전문기관과의 협력이 요구된다.

도로 분야의 경우 도로 관리기관에서 어려움을 겪고 있는 기상관측장비의 국산화 노력은 물론, 한국도로공사 등과의 기존 협력을 유지강화하며 관련 제도 및 인프라를 구축하고 있다. 이에 기상청의 도로기상 예측기술 개발이 지속되도록 노력할 필요가 있다. 국민 건강에 직접적 영향을 주는 미세먼지와 황사·연무의 효과적 감시를 위해 한국환경공단이 운영하고 있는 국가대기오염측정망의 공동활용과 함께 국민참여의견 청취를 실행한 주민참여형 명예대기관리원 제도의 추진사례도 수요파악 방법으로서 참고해 볼 만 하다. 마지막으로, 기후변화의 지표로서 식물의 개화 시기 같은 식생지수 개발에 산림청과 협력할 수 있고, 디지털 농업관측에 기상위성 활용기술의 지원도 가능하다.

부처 간 협업은 2020년 전국을 덮친 코로나 시대의 효과적 방역에만 국한되지 않는다. 과거 정부로부터 ‘협업 행정’, ‘중복투자 방지’, ‘부처 이기주의 해소’ 등 다양한 목적으로 사용되어왔다. 그 중요성이 현재에도 강조되고 있는 것은 복잡한 환경변화에 빠르게 적응하고, 정부 기관으로서 국민의 삶의 질 향상에 이바지하는 가시적 방법이기 때문이다. 기후위기 시대 기상청이 보유한 자원의 효과를 극대화하고 그 활용성을 높이기 위해 ‘부처 간 협력’이 중요한 때이다. 이와 병행해 국민참여자원 공유의 확대에 서비스 수요에 대한 폭 넓은 이해도 필요하다. 소금과 같은 기상정보가 부처 간 협력으로 가치 있는 정보가 되길 바라본다.

# 정책 초점

국립해양조사원 해양예보서비스 현황

| 이준식

동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링 시스템

| 신충훈

도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언

| 경기원

해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용

| 권오순

국가대기오염측정망과 명예대기관리원 제도

| 박지해

식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측

| 손성원

드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측 기술

| 홍석영

홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황 소개

| 현명숙

# 국립해양조사원 해양예보서비스 현황

이준식 국립해양조사원 해양예보팀장 ljs7979@korea.kr

- I. 바다를 말하다
- II. 해양예측시스템
- III. 이안류 감시시스템
- IV. 해무 예측시스템
- V. 해양예보방송, On바다
- VI. 해양예보지수 및 해황예보도 서비스

국립해양조사원은 70년간 바다를 관찰한 기관이다. 해도를 제작하기 위해 수심을 측량하고, 정확한 수심을 측량하기 위해 해수면(조석)을 관측하고, 정확한 조석현상을 밝혀내기 위해 다양한 해양요소를 관측하다 바다를 예측하기까지 이르렀다. 국민들에게 필요로 하는 정보를 제공하는데 중점을 둔 국립해양조사원만의 핵심 예측기술을 소개하고 우리 기관의 해양예보서비스에 대해 기술한다. ■

“ 규칙성만으로는  
해양예측을 할 수  
없는 경우가 생긴다 ”

## 1. 바다를 말하다

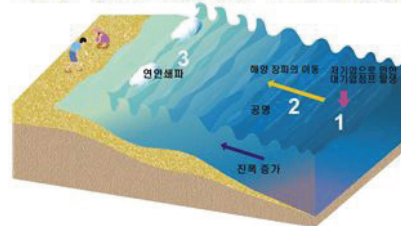
안전한 해양활동을 위해서는 정확한 해양예보가 필수적이다. 예보는 시민들이 사전에 위험을 인지하고 대비할 수 있는 시간을 벌어주기 때문에 국민의 안전과 직결되어 있다. 그러나 끊임없이 변화하는 바다에서 해양현상을 미리 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 해양현상은 다양한 규칙적인 요인과 불규칙적인 요인들이 혼재되어 나타나는데, 가까운 미래에 벌어질 해양현상을 예측하기 위해서는 복잡한 현상 속에서 규칙성을 찾아야 한다.

과거의 해양예보는 규칙성을 찾는데 집중하는 결정론적인 과학방법에 의존했다. 규칙성을 찾게 되면 역학 방정식을 통해 이를 수치화해서 예측이 가능하다. 그러나 예측하고자 하는 현상이 역학 방정식을 통해 재현할 수 없는 불규칙한 경우라면 예측의 정확도가 현저하게 감소한다. 규칙성만을 가지고는 예측할 수 없는 경우가 종종 발생한다. 너울성의 높은 파도(고파)로 인해 방파제 주변을 거닐던 시민이 피해를 입기도 하고, 갯바위에서 낚시를 하다가 갑자기 들이닥친 이상고파에 휩쓸리는 등 피해사례가 많이 보고되고 있다. 특히 동해안에서는 10월과 2월 사이에 너울성 고파로 인한 인명피해가 발생하며, 서해안과 남해안에서는 2월과 5월 사이에 이상 고파에 따른 피해사례가 보고되고 있다. 갑자기 발생한 이안류에 해수욕객이 휩쓸리는 아찔한 상황이 발생하기도 한다[그림 1].

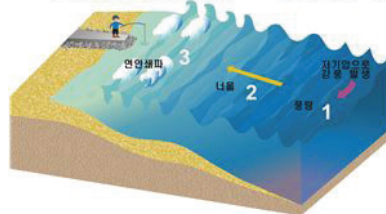
[그림1] 이안류(상), 이상고파(중), 너울성 고파(하) 발생 원리



○ 이안류 : 해안(산)을 따라 형성되는 흐름(연안류)이 서로 만나서 바다쪽으로 이동하는 좁고 긴 흐름을 이안류라 하며, 해운대에서 보고됨



○ 이상 고파 : 바다에서 갑작스런 기압변화로 발생한 장파가 연안으로 이동하면서 대기 및 연안지형 등의 영향으로 연안에서 높아지는 파도임



○ 너울성 고파 : 먼 바다에서 저기압으로 인해 강풍이 지속되면서 발생한 파랑이 연안쪽으로 접근하여 높아지는 파도임

“국립해양조사원은  
해양현상 관측 위해  
국가해양관측망  
구성”

규칙성에 기반한 결정론적 수치모델에 의존하는 예보의 한계를 넘는 방법으로 카오스 이론이나 인공지능을 활용한 확률론적인 과학방법이 제시되고 있다. 2010 년대에 등장한 4차 산업혁명은 인공지능과 빅데이터를 결합하여 예보의 정확도를 획기적으로 높일 수 있는 계기를 마련하였다. 지난 수십 년간 장기간에 걸쳐 축적되어 온 관측 빅데이터를 기반으로 해양현상의 불규칙한 패턴을 찾아낼 수 있는 과학 기술 방법이 등장한 것이다.

국립해양조사원은 1951년 진해조위관측소를 시작으로 국가해양관측망을 구성하여 다양한 해양현상을 관측하고 있다. 특히, 지난 10년 동안 국가해양관측망을 2배 가량 늘렸는데 2020년 현재 135개소의 국가해양관측망에서 해양현상, 해양 기상 등을 실시간으로 관측하여 자료를 꾸준히 축적해오고 있다. 또한 조사선을 이용하여 먼 바다에 나아가 거센 파도를 이겨내며 우리나라 관할해역 전체에 대한 해양관측자료를 수집하고 있는데, 이렇게 수집한 해양관측 및 수로측량 자료는 4 차 산업혁명 시대를 맞이하여 인공지능 예측시스템을 만들 수 있는 해양 빅데이터의 중요한 부분을 구성한다.

증가하고 있는 해양 재난에 대응하고 해양이용자의 편의를 높이기 위해 여러 과에서 담당하고 있던 해양예보업무를 통합하고 보다 정확한 해양예보를 수행하기 위하여 2015년 5월에 해양예보과를 신설하였다. 본격적으로 해양예측시스템을 가동하고 이를 통해 생산된 예측정보를 국민들에게 서비스할 수 있는 조직을 갖추게 된 것이다. 해양예보를 전담하는 조직이 설치됨으로써 국립해양조사원에서는 예측정보의 정확성을 높이고, 국민들이 안심하고 즐겁게 바다를 이용할 수 있는 다양한 해양예측정보를 생산하기 위하여 노력하고 있다.

해양예보는 크게 2가지의 업무로 나눌 수 있다. 하나는 정확한 예측정보를 생산하는 예측시스템을 갖추는 것이고, 다른 하나는 생산된 정보를 국민들에게 신속하고 적절하게 서비스하는 것이다. 해양예보 업무는 이러한 예보의 두 가지 기본방향에 맞추어 추진되고 있으며, 정확한 예측정보를 생산하는 업무를 우선적으로 다루고, 생산된 예측정보를 제공하는 업무를 다음으로 서술하였다.

## II. 해양예측시스템

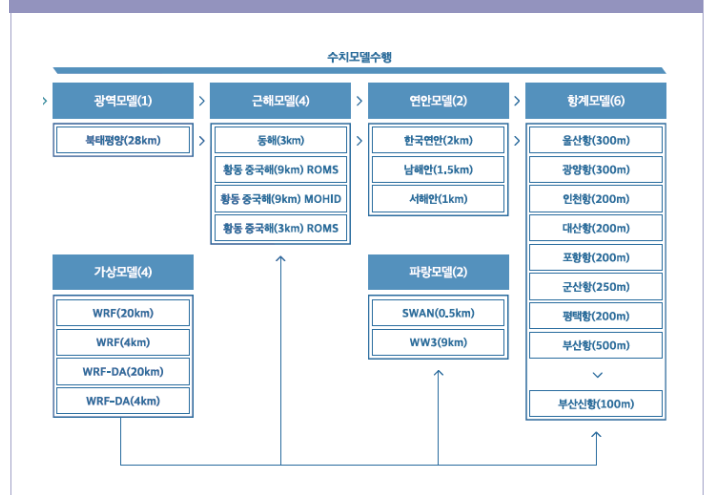
2020년 현재 국립해양조사원에서는 국가해양관측망 135개소에서 보내오는 정보를 이용하여 해수유동, 수온, 염분, 해수면 높이 등 주로 물리적 해양현상을 예측하는 해양예측시스템을 구축하여 운영하고 있다(그림 2). 국립해양조사원이 보유하고 있는 예측시스템은 크게 세 부분으로 구성된다. 예측공간의 범위와 해상도에 따라 북태평양 광역 수치예측모델(해상도 28km), 동해/황동중국해와 연안을 대상으로 모의하는 연근해 수치예측모델(1~9km), 항계·항만 고해상도 수치예측모델(1km 이하)이 그것이다. 이러한 모델들은 먼 바다에서 육지에 가까워질수록 예측정보의 해상도가 조밀해지도록 설계되어 있다.

광역 수치예측모델은 북태평양에서 일어나는 해양현상을 28km의 해상도로 모의한다. 이렇게 모의된 자료들은 연근해 수치모델의 외곽 경계값으로 사용된다. 연근해 수치예측모델은 1~9km 정도의 해상도로 우리나라 주변 연안의 해양현상을 모의한다. 연근해 수치예측모델에서 모의된 값은 항계·항만 고해상도 수치모델의 외곽 경계값으로 사용된다. 항계·항만 고해상도 수치모델은 1km 이하의 해상도를 가지고 해양현상을 모의하

여 선박 항행, 해양레저 등 안전한 해양활동에 필요한 예측자료를 제공한다. 해양현상은 해양기상과 밀접하게 연관되어 있기 때문에 해양수치모델에서 정확한 예측값을 얻기 위해서는 정확한 기상예측자료가 입력되어야 한다. 해양수치모델에 필요한 기상자료는 해상도 4~20km의 기상청 기상모델로 재가공하여 얻고 있다. 또한 북태평양 광역 수치예측모델의 정확도를 높이기 위해서 미국, 영국에서 운영하는 전지구(Global) 모델에서 예측된 값을 외곽 경계값으로 사용하고 있다.

“ 해양예측시스템은 북태평양 광역 수치예측모델, 연근해 수치예측모델, 항계·항만 고해상도 수치예측모델로 구성 ”

[그림 2] 국립해양조사원 해양예측시스템 수치예측모델





“향후 미국의 MOM3 예측모델 개발 예정”

해양예측시스템의 개발 진행상황을 살펴보면 2012년에 황동중국해 모델과 연안예측 모델(경기만, 평택-예산, 서해접적해역 등 4곳)을 시작으로 2013년에 동해와 울산항(태안항), 2014년에 부산항과 광양항, 2015년에 인천항, 대산항 그리고 부산신항, 2016년에 평택·당진항, 군산항, 포항항 등을 대상으로 수치모델이 차례로 구축되었다. 2017년에는 한반도 근해와 울릉도 모델을 구축하였고, 2020년에는 울릉도-독도 고해상도 수치예측모델을 구축하여 2021년 운영 예정 중이다.

2016년에는 한국해양과학기술원에서 구축한 운용해양시스템 2단계 성과물(수치예측모델)의 기술이전을 시작하였으며, 2017년에는 이 시스템의 현업화와 자료동화를 테스트하였고 2018년에 자동화체계를 구축하여 남해안 연안에 대한 고해상도 예측모델을 안정적으로 운용할 수 있게 되었다. 또한 황동중국해 및 동해 수치예측모델에 자료동화 체계를 적용하여 수온과 해수유동 예측자료의 정확도를 높였다. 이렇듯 예측기술이 발전함에 따라 2019년에는 중기 해양예보를 위해 해양예측 기간을 3일에서 7일로 연장하였다. 향후 고해상도 예측모델을 서해안으로

확장할 계획이며, 미국에서 운용하는 MOM3(Modular Ocean Model 3)기반의 예측모델을 개발하여 예측정확도를 높여 나갈 것이다.

정확도 높은 해양예측 정보를 생산하기 위해서는 실제 현장 관측자료와 예측자료를 꾸준히 비교하여 수치예측모델을 개선해 나가야 한다. 현장자료와 예측자료가 맞지 않는 원인은 여러 가지가 있다. 가장 주요한 원인

[그림 3] 국립해양조사원 해양예측자료 검증·평가 시스템



“ 해양예측자료 검증평가 시스템을 구축하여 예측정확도 향상 도모 ”

은 모델의 상태방정식이 해양현상의 규칙성과 주기성을 기반으로 구성되어 있다는 점이다. 그러나 해양현상은 규칙성과 불규칙성을 동시에 갖고 있기 때문에 이러한 불규칙한 요인들이 모델의 예측자료와 실제 현장자료 간에 불일치를 만들어 낸다. 따라서 모델은 한번 구축되면 끝나는 것이 아니라 현장 관측자료를 이용해 지속적으로 검보정 작업을 수행해야만 예측의 정확도와 신뢰도를 높일 수 있다. 이러한 목적으로 2017년 2월에 해양예측자료 검증평가 시스템을 구축하여 해양예측의 정확도를 계속 높이고 있다.

2017년부터는 해양예측을 지원하기 위한 해양관측에 업무 중점을 두고 있으며, 2018년에는 주요해역에 설치된 대형 해양관측부이와 정기 해류 관측망을 재배치하기 위한 세부계획을 수립하였다. 또한 수치예측모델에서 해저지형을 재현하거나 수괴의 부피를 계산하기 위해 필요한 해양수치예측모델 전용 수심 데이터셋(BADA Ver.1)을 구축하였고 이를 계속 업데이트 해오고 있다. 2017년에는 상시적인 예측자료를 안정적으로 생산하기 위해 21종의 수치모델을 유지보수하였고, 2018년에는 12종의 연안-항계수치모델을 개선하는 등 해양예측시스템의 예측 정확도를 향상시키기 위한 노력을 지속적으로 경주하고 있다.

해양예측모델의 해상도를 높이고, 예측 공간범위를 확대하고, 예측해야할 항목들을 늘리기 위해서는 이에 걸맞는 컴퓨터 성능이 요구된다. 특히 바다에서는 조류나 해류와 같은 해수유동 뿐만 아니라 바람이나 기압 등 해양기상, 강물의 유입으로 인한 밀도 변화 등이 복잡하게 얽혀 있다. 현재의 해상도를 더 높이려면 컴퓨터의 연산 능력이 급절로 늘어나야 하기 때문에 해양분야에서 슈퍼컴퓨터가 절실히 필요한 상황이다. 이에 따라 2015년 10월~2016년 3월까지 해양슈퍼컴퓨터센터 입지 타당성 검토 연구용역이 추진된 바 있으나 아직 도입이 결정되지 않고 있다. 조난 사고가 발생할 경우 정확한 구조지점을 결정하기 위해서는 고해상도의 해양예측모델이 반드시 필요하며 이를 위해서는 고성능의 해양 슈퍼컴퓨터의 도입이 실현되어야 한다.

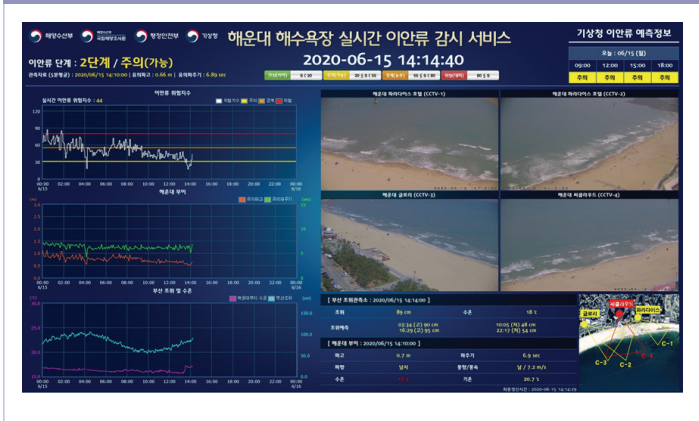
“국립해양조사원의  
이안류 감시시스템,  
해무 예측시스템”

### III. 이안류 감시시스템

이안류는 해안 가까이 밀려오는 파도가 부서지면서 한 곳으로 몰려든 바닷물이 바다방향으로 빠르게 돌아나가는 흐름을 말한다. 주로 주변이 탁 트인 바다에서 짧은 시간에 갑작스럽게 발생하기 때문에 해수욕객을 수심이 깊은 먼바다로 순식간에 휩쓸고 갈 수 있다. 국립해양조사원은 국민들이 안전하게 해수욕을 즐길 수 있

도록 2011년 해운대 해수욕장을 시작으로 충남 대천(2014년), 제주 중문(2015년), 강원 경포(2016년), 부산 송정(2017년), 강원 낙산(2018년), 부산 임랑(2019년), 강원 속초(2020년) 해수욕장에서 여름철 6월~9월까지 실시간 이안류 감시시스템을 가동하고 있다. 시스템에서 제공되는 정보를 이용하여 2020년부터는 부산 해운대, 송정을 시작으로 8개 해수욕장에 대한 실시간 이안류 감시서비스를 제공하고 있다(그림 4).

[그림 4] 실시간 이안류 감시시스템 웹페이지



### IV. 해무 예측시스템

해무(바다 안개)는 항해안전과 항만의 효율적 운영에 가장 큰 장애 요인이기 때문에 정확한 예측정보를 미리 예보하는 것이 매우 중요하다. 국립해양조사원에서는 2016년부터 부산지방기상청과 협업하여 부산항, 울산항 등 전국 11개 항에 해무 관측소를 구축하여 실시간 영상을 제공하고 해무예측 시스템 개발을 추진해 왔다. 그리하여 2018년에 기온, 수온, 풍향, 풍속 등 기상 관측자료와 시정거리 간 상관관계를 파악하여 해무 발생 가능성 예측기술을 개발하고 인천항과 해운대 앞바다 해역에 대해 시범 서비스를 시작하였으며, 2018년 말에 목포항, 여수·광양항, 군산항, 대신항 등 총 6개항 인근 해역으로 서비스 대상지역을 확대하였다. 2019년에는 인

“ 2015년 국내유일  
해양예보방송  
On바다 개국 ”

공지능 기술을 이용하여 3시간 후 해무예측 정확도를 최대 20%까지 높였고, 2020년에는 부산항신항을 새롭게 포함시켜 총 8개항을 대상으로 해무예측 서비스를 제공하고 있다(그림 5). 2020년 현재 해무관측소 11개소를 운영하고 있으며, 노후되거나 불량한 장비를 교체하고 조위관측소의 실시간 관측자료와 CCTV 영상을 지속적으로 수집하고 있다. 이를 통해 해무 예측시스템의 성능 향상에 필요한 관측 정보를 안정적으로 확보해 나가고 있다. 해무 정보는 국립해양조사원 누리집 '개방해-항계안전(www.khoa.go.kr/oceanmap/pois/)'에서 확인할 수 있으며, 시간별 해무 발생확률을 볼 수 있다.



## V. 해양예보방송, On바다

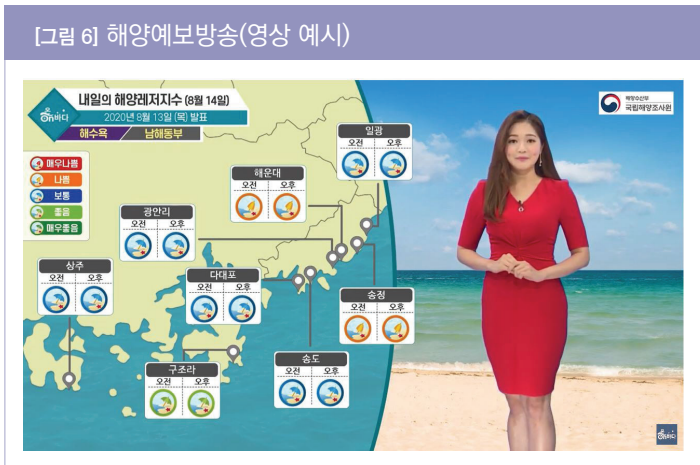
국립해양조사원에서는 해양활동 및 안전에 대한 국민적 관심이 높아짐에 따라 해양정보의 확대 보급을 위한 해양 전문 채널확보를 위하여 2015년 국내유일 해양예보방송, On바다를 개국하였다. On바다에서는 전문적인 해양정보를 일반인의 눈높이에 맞추어 알기 쉬운 콘텐츠를 제공함으로써 해양예보방송이 국민들의 생활에 필수요소로 자리매김하길 도모하고 있다. 효율적인 On바다 운영을 위하여 원내에 스튜디오를 구축하고 방송 전문 인력을 투입하여 매일 예보방송을 서비스 하고 있다.

근래에 국민의 여가시간이 증가하면서 해양관광 및 레저활동이 늘어나고 있으며, 이에 따른 국민들의 안전한 해양활동을 위한 해양정보의 필요성이 날로 증가하고 있다. 하지만 흩어져 있는 해양정보에 일반인들이 접근하기란 매우 어려우며, 전문적인 해양정보를 생활에 직접적으로 활용하는 것도 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 해양정보를 보급하기 위한 해양전문 신규 채널을 확보하고, 과

“ On바다는 해양자료,  
기상청 날씨정보를  
융합하여 제공 ”

학적으로 산출된 해양정보를 이해하기 쉬운 콘텐츠로 서비스하여 재해피해를 예방하고 국민의 해양활동 편의를 증진하는 것이 중요하다. 국립해양조사원은 국민에게 유용한 해양정보를 제공함으로써 날씨방송과 같이 해양예보방송이 국민의 생활에 필수요소로 자리매김할 수 있도록 해양예보정보의 대중화를 꾀하고 있다

[그림 6] 해양예보방송(영상 예시)



[그림 6].

해양예보방송은 스튜디오 및 야외에서 촬영한 영상에 해양자료 및 기상청 날씨정보를 융합하여 제공한다. 이를 위해 해양정보 수집 시스템을 구축했으며, 이 시스템은 방송용 자료 수집 기능과 방송용 자료 생성 기능으로 구분할 수 있다. 방송용 자료 수집 기능에는 기상청의 예보자료와 우리 원의 수치예측모델 결과를 기초자료로 수집한다. 방송용 자료 생성 기능은 수집된 방

송용 자료를 기반으로 영상 제작에 필요한 자료를 xml 형태로 생성하여 저장한다. 위의 과정을 통해 가공된 자료는 해양캐스터가 등장하는 템플릿으로 사용되거나 자동코더 영상으로 제작되어 자막, BGM 삽입 등의 편집 과정을 거쳐 홈페이지를 통해 서비스 된다. 해양예보방송 시스템을 통해 제작된 콘텐츠는 국립해양조사원의 스토리지에 저장되며, 유튜브에 업로드 되고 업로드 된 영상은 관리자 페이지를 통해 웹 DB에 유튜브 URL이 저장된 후 홈페이지를 통해 사용자에게 제공된다.

## VI. 해양예보지수 및 해황예보도 서비스

우리나라의 경제적 성장에 따라 여가에 대한 국민의 관심이 증가하면서 점차 다양한 분야의 해양레저활동이 나타나고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해 국립해양조사원에서는 해양예측시스템을 통한 해양정보를 제공하고 있으며, 해양레저를



“ 해양예보지수는  
생활해양예보지수 6종,  
선박운항지수 4종,  
항만해양지수 2종 ”

즐기는 국민의 안정성 확보와 해양관광 산업의 활성화를 위한 ‘해양예보지수’를 개발하여 사용자 편의에 맞춰 지수화하여 제공하고 있다.

2015년부터 개발된 해양예보지수는 해수욕지수, 갯벌체험지수, 바다갈라짐 체험지수, 스킨스쿠버지수, 뱃멀미지수, 바다낚시지수인 6종의 생활해양예보지수와 4종의 선박운항지수, 2종의 항만해양지수가 있다. 해수욕지수는 전국 해수욕장을 대상으로 권역별 해수욕장별 정보를 제공한다. 갯벌체험지수와 바다갈라짐 체험지수는 체험가능시간과 날씨를 알려준다. 스킨스쿠버 지수는 동남해의 13개 다이빙 포인트에 대한 지수를 알려준다. 뱃멀미지수는 여객선 항로상의 파도높이, 바람 등 해양정보와 선박의 크기 등을 종합하여 여객선의 운항 중에 승객들이 느낄 수 있는 체감 지수로서 2018년에 특허를 취득하였다. 각각의 지수는 ‘매우 좋음, 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨’의 5단계로 구분된다.

매우 좋음, 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨’의 5단계로 구분된다.

생활해양예보지수는 물때, 파고, 유속, 수온, 바람, 기온 날씨 등의 해양과 기상에 대한 예측정보를 활용하며 국민들의 안전한 바다체험을 위한 정보로써 인터넷 해양방송, 홈페이지를 통해 제공된다. 국립해양조사원 생활해양예보지수는 2020년 해수욕장 48개소, 바다낚시 25개소, 스킨스쿠버 13개소, 갯벌체험 15개소, 바다갈라짐체험 14개소, 뱃멀미 22개 노선에 대하여 서비스하고 있다. 생활해양예보지수는 국립해양조사원과 기상청 관측자료를 활용하여 예보 품질을 관리하고 있다[그림 7]. 예보 품질 관리를 위해 참고하는 관측자료 항목은 기상 상황을 나타내는 기온, 풍속, 날씨 정보와 해양상황을 나타내는 수온, 파고자료 등을 포함한다.

선박운항지수는 선박의 유형, 규모별 과거 해양사고 현황을 분석하여 선택한 안전항해에 필수적으로 필요한 대표 해양요소들(조류, 파랑, 바람)의 예측자료를 이용하여 매일 하루 중 매 6시간마다 시간대 별 지

[그림 7] 생활해양예보지수 아이콘

지수 (지표점수)	매우좋음 (4.7~5)	좋음 (4~4.7)	보통 (3~4)	나쁨 (2~3)	매우나쁨 (1~2)
뱃멀미지수					

“ 해양예보지수에  
사용된 수치예측모델은  
72시간 예측  
가능자료 활용 ”

수가 산출되는 방식으로 1단계부터 4단계까지 제공된다[그림 8]. 1단계는 물결이 비교적 잔잔하고 바람이 약하여 선박의 흔들림이 적은 상태를 나타내며, 4단계는 바람이 강하고 파도가 매우 높아 선박 운항이 어려운 상태를 말한다.

항만해양지수는 항만과 관련된 업종에 종사하는 사람들이 주변 해역의 해황과

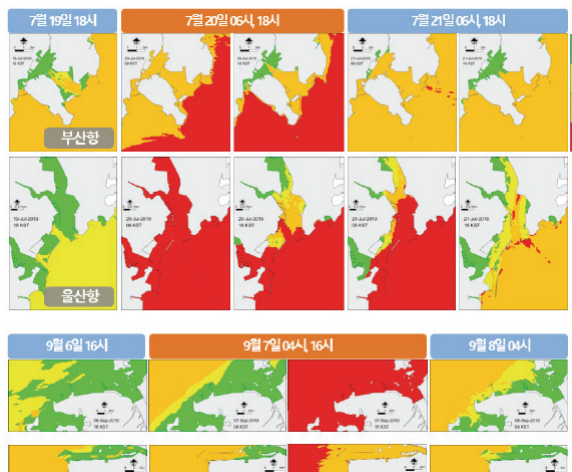
기상의 변화들을 고려하여 안전하게 활동할 수 있는 환경을 제공하기 위해 제작되었다. 이러한 해양지수를 통해 제공되는 다양한 예보 내용들과 사후에 관측자료를 비교 분석하고 항만 이용자들에게 대한 설문조사 등을 병행하여 정확성을 높이고 있다. 항만 해양지수는 2017년 특허를 출원하여 같은

[그림 8] 선박운항지수 아이콘



해 9월에 특허 등록이 완료되어 기술력의 독창성과 유용성을 인정받고 있으며, 국립해양조사원의 개방해-항계안전([www.khoa.go.kr/oceanmap/pois/](http://www.khoa.go.kr/oceanmap/pois/))의 해양 정보 메뉴에서 확인할 수 있다[그림 9].

[그림 9] 항만해양지수



해양예보지수 개발에 사용된 수치예측모델은 기본적으로 72시간 예측이 가능한 자료를 활용하였다. 해수유동, 해수면 높이, 수온, 염분자료는 해양수치모델 결과를 활용하였고, 기압, 해상풍, 기온, 일사량 자료는 기상청 기상모델 결과를 활용하였다. 또한 예보지수의 검증을 위해서는 국가해양 관측망의 조위, 파고, 유향-유속, 수온, 염분, 기온, 기압, 풍향-풍속 등의 관측자료와 기상청 지상기상 관측소(기상대, AWS) 및 해양기상관측(해양기상 부이, 등표, 파고부이) 지점에서 관측되고 있는 날씨, 기온, 일사량, 풍향-풍속, 파고, 수온 등 관측자료를 활용하였다.



# 동해연안 원전주변해양환경변화 실시간 모니터링시스템

문형태 한국수력원자력(주) 책임연구원 moonht915@khnp.co.kr

신충훈 한국수력원자력(주) 선임연구원 choonghun@khnp.co.kr

장성태 지오시스템리서치 책임 stjang@GeoSR.com

- I. 원전주변 해양환경 변화 대응시스템
- II. 동해 연안 원전주변의 해양 관측 시스템
- III. 해양환경 및 해양기상 관측 결과 및 활용
- V. 맺으며

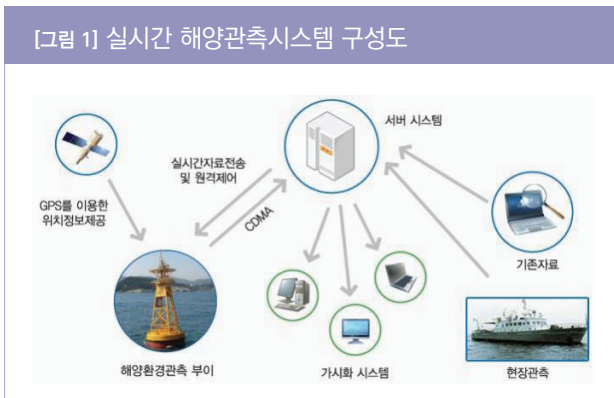
최근 지구온난화 및 기후변화 등으로 다양한 해양환경의 변화가 발생되고 있는 실정으로 동해 연안 해양환경 및 기초생태계의 장기적인 모니터링 필요성이 증대되고 있다. 원자력발전소의 안전운영과 주변 해역의 해양환경변화에 대처할 수 있는 기틀을 마련하고 동해 연안환경 변화 문제에 대한 과학적인 관측자료 생산·제공을 목적으로 한국수력원자력(주)은 원자력발전소 주변해역의 해양환경변화를 실시간으로 모니터링하기 위한 총 9기의 해양환경관측부이를 설치·운영하고 있다. ■

“ 한수원은 원전 주변  
해양환경변화  
감시에 총 9기의  
부이 운영 ”

## I. 원전주변 해양환경 변화 대응시스템

최근 지구온난화로 인해 동해 연안은 이상 고수온 현상 및 냉수대 발생, 이상기 후에 의한 수온변화 등의 환경변화가 빈번하게 나타나고 있으며, 이러한 환경변화에 대한 우려의 목소리가 커지고 있다. 따라서 동해 연안 해양환경 및 기초생태계의 장기적인 모니터링의 필요성이 증대하고 있는 실정이다. 우리나라의 동해 연안에 건설되어 있는 원자력발전소 주변해역의 해양환경변화를 실시간으로 모니터링하기 위해 한국수력원자력(주)(이하 한수원)은 고리, 월성, 울진 해역에 총 9기의 해양환경관측부이를 운영하고 있다. 동해 연안의 해양환경관측부이는 원전주변 해양환경 변화 대응시스템의 일부로 원자력발전소의 운영이 해양환경 및 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위한 목적으로 설치 운영 중에 있다. 이를 기반으로 해양환경 및 생태계의 현황을 진단하는 시스템을 구축·운영함으로써 원자력발전소의 안전운영과 원전 주변해역의 해양환경변화에 적절하게 대처할 수 있는 기반을 마련하고 있다. 또한 원전의 지속적 발전과 원전 주변의 해양환경 감시뿐만 아니라 동해 연안환경 변화 문제에 대한 과학적인 관측자료 생산 및 제공을 목적으로 하고 있다. 본고에서는 한수원에서 구축·운영 중인 「동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템」과 이를 활용한 관측 결과 및 해양특이현상에 대해 소개하고자 한다.

[그림 1] 실시간 해양관측시스템 구성도



## II. 동해 연안 원전주변의 해양 관측 시스템

한수원은 2008년 1월부터 동해 연안 원전주변의 고리, 월성해역과 2013년 8월부터는 울진해역까지 포함하여 총 9기의 해양환경관측부이로 해양환경변화를 실시간 모니터링하고 있다. 다음 [그림 1]은 실시간 해양관측시스템의 구성을 보여주는 것으로

“ 해양관측시스템은 관측부이, 서버, 가시화 시스템으로 구성 ”

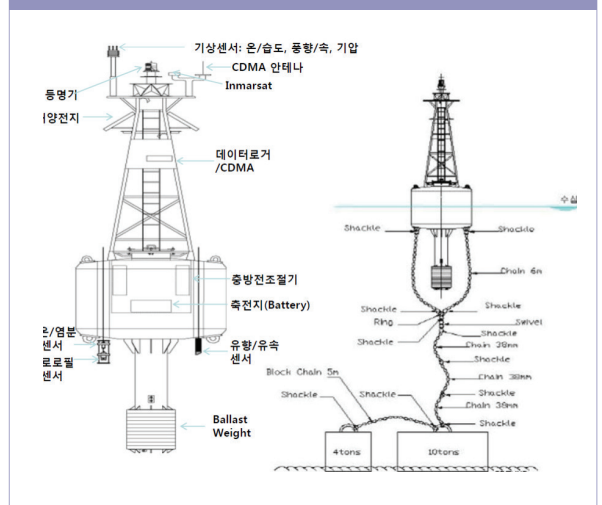
실시간 해양관측시스템은 현장에 계류되어 실시간 해양자료를 전송하는 해양관측 부이와 기존자료 및 현장 관측자료들을 통합 관리하는 서버, 저장된 자료들을 보여 주는 가시화 시스템으로 구성되어 있다.

실시간 해양관측부이는 연안 해양환경의 실시간 관측과 항로표지로서의 기능을 수행하기 위하여 다음 [그림 2]와 같이 국토해양부 표준형등부표 LL-28을 활용해 해양환경 모니터링 목적 및 관측 환경에 적합하게 설계/제작/설치하였다. 해양관측부이의 높이는 10m, 무게는 7ton이며 전원시설로는 80W 태양전지 4EA, 12V 100AH 8EA가 구성되어 있다. 관측부이의 전원은 등명기 점등 및 관측시스템의 무중단 운영을 위해 일조량 부족시에도 최소 1주일 이상 운영이 가능하도록 설계되어 있으며, 관측장비 및 각종 기기의 전원 공급은 태양전지를 이용하며 일조량 부족 시 비상전지를 이용하도록 제작되어 있다. 무선 통신망은 CDMA/LTE 통신모듈 및 인공위성통신(InMarSat/Iridium)모듈의 시스템을 갖추고 있으며 다양한 해양관측자료들을 실시간으로 전송하고 있다.

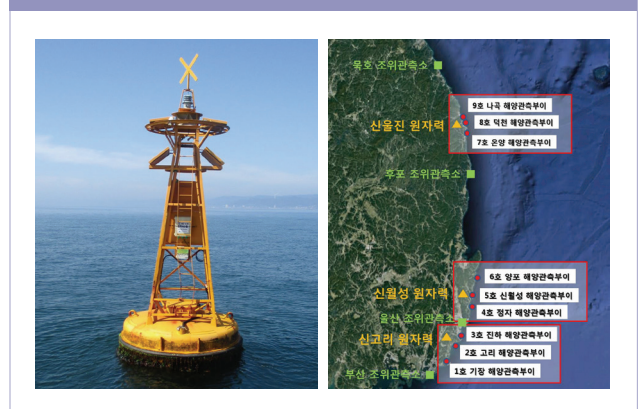
해양관측부이에 부착된 센서들을 통해 측정된 자료는 데이터로거에 저장됨과 동시에 통신제어기를 거쳐 GPS에서 수신되는 정확한 위치정보와 함께 무선 통신망을 통해 실시간으로 서버에 전송된다. 해양관측부이의 감시는 인공위성과 내부 GPS를 이용하고 있으며 위치를 실시간으로 추적해 지정된 위치를 이탈하였을 경우 즉각 경보를 줄수 있는 WatchDog 시스템이 갖추어져 있다.

총 9기의 해양환경관측부이는 [그림 3]과 같이 원자력발전소가 위치하고 있는 고리, 월성, 울진 해

[그림 2] 해양환경관측부이 구성도



[그림 3] 해양환경관측부이 위치도



“ 관측자료 검사에는  
팀 값, 내적일치성,  
고정값 검사  
등이 있음 ”

역에 각각 3기씩 위치하고 있으며, 3기 중 1기는 기상(기온, 기압, 습도와 풍향/풍속)과 해양(수온, 염분, 클로로필, 유속/유향)환경을 나머지 2기는 해양환경만 실

시간으로 관측-전송하고 있다. 해양환경관측부이의 실시간 관측항목은 다음 [표 1]과 같다. 해양환경 변화를 파악하기 위해 충분히 적합한 장비들로 관측시스템을 구축하였으며 관측자료의 신뢰도 유지 및 양질의 자료 취득을 위하여 매월 1회 이상 기본점검 및 센서 정비를 수행하고 항로표지 관련 규정에 의거하여 등부표류의 인양정비를 매 2년마다 수행하고 있다.

〈표 1〉 실시간 해양환경관측 항목

Parameter	Model	Range	Accuracy
Air Temperature	Vaisala WXT-520	-52 ~ 60℃	±0.3℃
Humidity		0 ~ 100%RH	±3%RH
Wind		0 ~ 60m/s	±0.3m/s
Pressure		600 ~ 1100hPa	±1hPa
Intensity		0 ~ 200mm/h	±0.1mm/h
Water temperature	Plusdronaut CTD316	-3 ~ 50℃	±0.003℃
Salinity		0 ~ 47PSU	±0.01PSU
Dissolved Oxygen		0 ~ 50mg/L	±0.1mg/L
Turbidity		0 ~ 100FTU	±0.1FTU
Chlorophyll-a	Nortek Aquadopp	0 ~ 100ug/L	±0.1ug/L
Current		0 ~ 500cm/s	±0.5cm/s

실시간으로 수집되는 관측자료는 항목별로 품질관리(QC, Quality Control)가 자동으로 수행되며, 자동으로 품질관리된 관측자료를 과학적 분석기법(국립해양조사원 해양관측과 업무메뉴얼 참조)에 따라 반자동으로도 품질 관리를 수행하고 있다. 반자동 품질관리 절차는 수집된 관측자료를 과학적 분석처리 기법에 의거하여 전문인력이 직접 확인 후 비정상 자료를 제거한다. 검사 방법에는 팀 값 검사, 내적일치성 검사, 고정 값 검사 등이 있으며, 자세한 내용 및 예시는 [표 2]와 [그림 4, 5]에 제시하였다. 또한 관측항목 중 수온과 유속, 해양기상 항목은 팀 값이 주

로 발생하며, 염분과 클로로필의 경우 생물부착(bio-fouling)으로 인한 오측이 자주 발생하고 있어 이를 제거함으로써 관측자료의 품질을 향상코자 하였다.

〈표 2〉 품질관리 방법

검사 방법	기본 개념
팀 값 검사 (Spike, Gradient)	연속된 데이터 값의 변화율이 비정상적으로 큼
내적일치성 검사 (Internal Consistency)	관측 항목과 관련된 다른 관측 항목들과 상호 비교
고정(변화율) 값 검사 (Variation)	일정시간동안 동일한 값이 지속적으로 들어오면 확인

“ 실시간 관측자료는 국가해양관측망 연계로 일반인에게 공개 ”

그림 4 품질관리 방법 중 틱 값 검사 예시

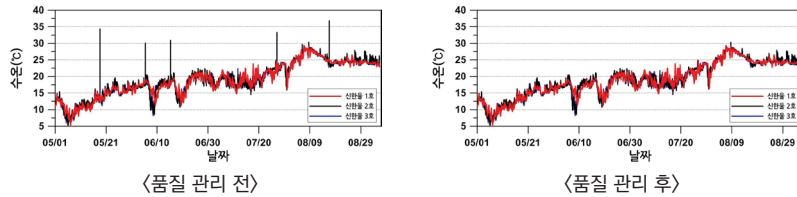


그림 5 품질관리 방법 중 내적일치성 검사 예시

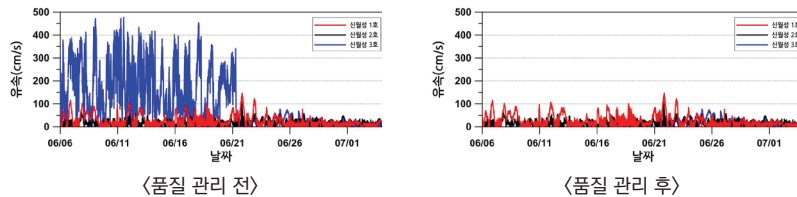
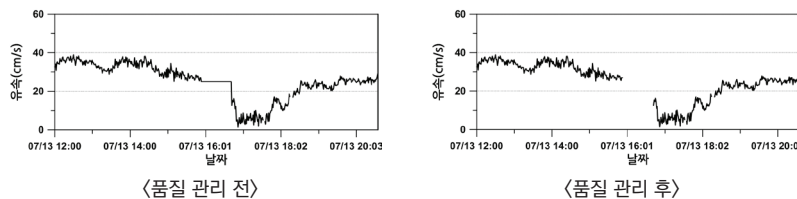


그림 6 품질관리 방법 중 고정(변화율) 값 검사 예시



품질처리를 통해 정확도가 향상된 실시간 관측자료 중 수온, 염분, 유향/유속, 기상자료는 현재 국립해양조사원의 국가해양관측망에 연계되어 일반인에게 공개 되고 있으며, 국립수산과학원의 실시간 연안 수온 정보 제공에도 활용되고 있다.

### III. 해양환경 및 해양기상 관측 결과 및 활용

본고에서는 고리해역 실시간 해양관측시스템의 관측 결과를 대표적으로 분석 하였다. 고리해역 실시간 해양관측시스템(신고리 1~3호)의 해양환경 관측 결과(수

“ 2019년 최고수온은  
신고리 2호에서  
관측 ”

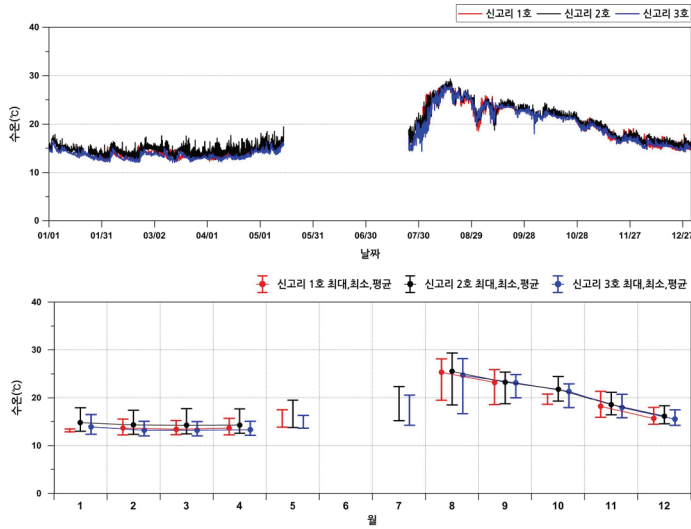
온, 염분, 클로로필, 유속/유향)와 월별 통계 자료를 [그림 7]~[그림 10]에 도식화하였으며, 관측자료에 대한 통계 및 월평균 값은 [표 3]에 정리하였다. 관측자료 중 해양관측부이의 인양점검 기간(2019.05.15.~2019.07.23.)은 제외하였으며, 신고리 1호는 제17호 태풍 ‘타파’로 인한 결측기간(2019.09.22.~2019.10.28.)도 제외하였다.

〈표 1〉 신고리 1~3호에서 관측된 2019년 1월~12월의 수온, 염분, 클로로필, 유속/유향 통계

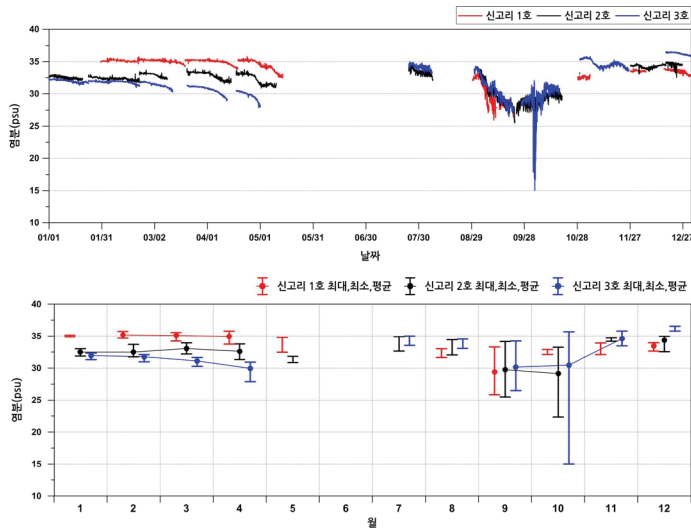
항목	최소		최대		평균	표준편차	
	관측일시	관측값	관측일시	관측값			
수온 (°C)	신고리 1호	02/02 22:52	12.24	08/12 14:52	28.13	17.25	4.51
	신고리 2호	02/19 06:04	12.36	08/16 21:17	29.34	18.11	4.21
	신고리 3호	02/19 07:16	12.04	08/13 20:53	28.17	17.21	4.39
염분 (PSU)	신고리 1호	09/22 06:36	25.85	04/23 12:15	35.79	33.89	2
	신고리 2호	10/04 11:38	22.34	12/18 07:08	34.97	32.1	1.8
	신고리 3호	10/03 21:57	15.03	12/17 17:38	36.56	31.95	2.16
클로로필 (µg/L)	신고리 1호	10/31 12:11	0.00	12/27 10:20	39.90	3.66	3.96
	신고리 2호	07/24 11:02	0.00	08/21 12:44	39.90	2.37	3.76
	신고리 3호	11/20 10:30	0.20	05/14 04:14	46.00	3.95	3.49
유속/유향 (cm/s, Deg.)	신고리 1호	01/03 16:55	0.10/103.40	08/03 01:12	179.40/33.00	30.16	22.5
	신고리 2호	01/31 20:12	0.10/142.90	07/31 22:39	144.00/57.00	23.31	16.49
	신고리 3호	01/06 20:55	0.10/72.70	08/19 05:23	133.40/267.00	19.73	13.81

신고리 1~3호의 수온은 12.04~29.34°C의 범위를 보였으며, 신고리 2호에서 최대 수온이 관측되었다. 세 정점의 수온 시계열 분포는 유사하였으며, 계절적 경향을 보였다. 즉, 동계인 2월에 최소, 하계인 8월에 최대 수온을 기록하였으며 월평균 수온은 13.21~25.50°C의 범위로 나타났다. 염분의 경우 15.03~36.56PSU의 범위를 보이고 있으며 신고리 1호는 제17호 태풍 ‘타파’, 신고리 2호와 3호는 제18호 태풍 ‘미탁’의 영향으로 최소값을 기록하였다. 월평균 클로로필은 1.14~7.44µg/L의 범위를 보였으나 연평균은 2.37~3.95µg/L의 범위를 보였다. 평균유속은 신고리 1호에서 30.16cm/s, 신고리 2호에서 23.31cm/s, 신고리 3호에서 19.73cm/s로 나타났고, 신고리 1호에서 신고리 2호와 3호에 비해 비교적 강한 유속을 보였다.

[그림 기] 신고리 1~3호 수온 관측 결과

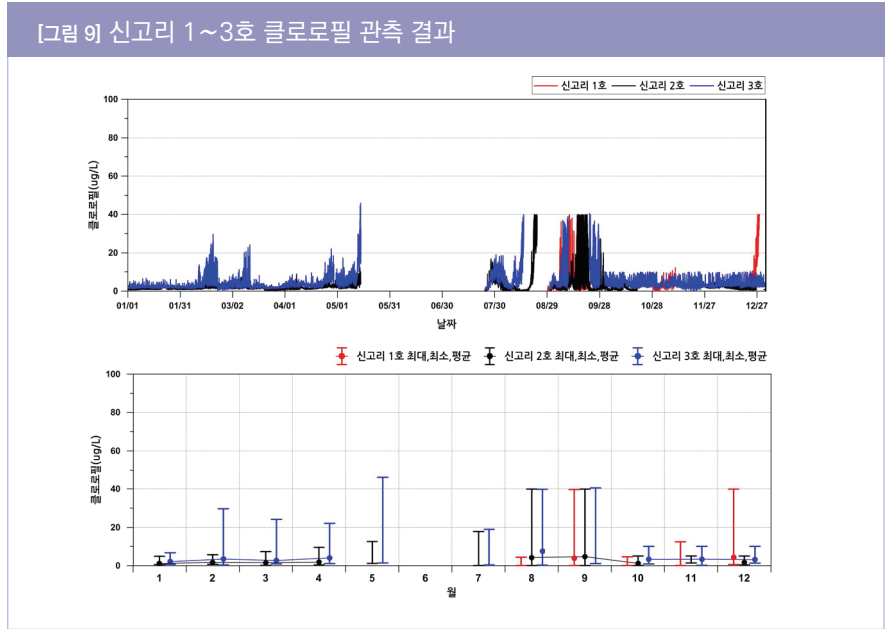


[그림 이] 신고리 1~3호 염분 관측 결과

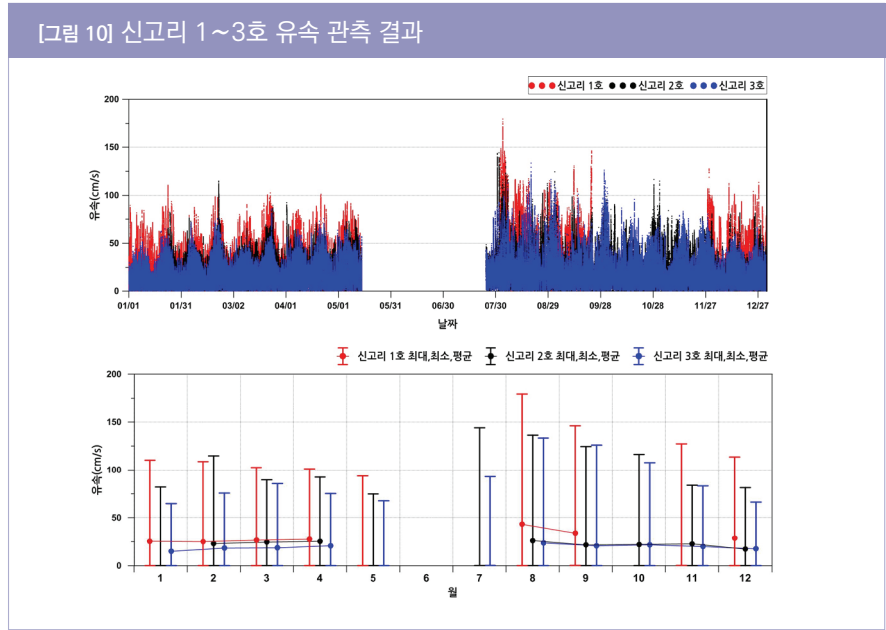




[그림 9] 신고리 1~3호 클로로필 관측 결과



[그림 10] 신고리 1~3호 유속 관측 결과



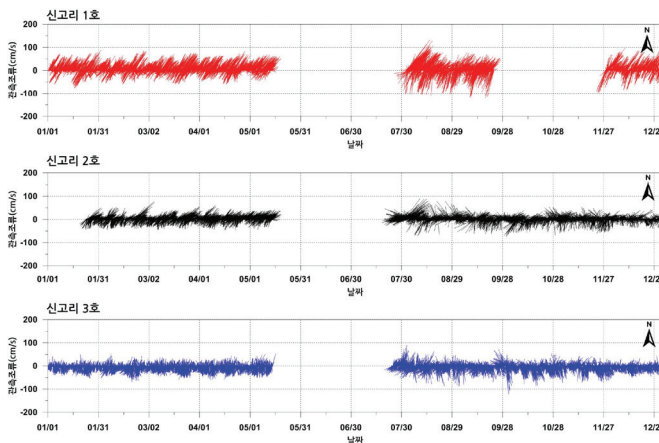
“ 신고리 1, 2호는  
최강 낙조류,  
신고리 3호는  
최강 창조류 ”

신고리 1~3호에서 관측된 해수유동 특성을 살펴보기 위해 [그림 11]에 유속/유향 시계열, [그림 12]에 유속분산도를 도시하였으며 조류 분석 결과를 [표 4]에 정리하였다. 신고리 1, 2호는 최강 낙조류가, 신고리 3호는 최강 창조류가 강하게 나타났다. 최강창조류 범위는 97.5~119.8cm/s로 신고리 1호에서 가장 강한 유속을 보이고 있으며, 신고리 1호와 3호는 남서향, 신고리 2호는 북서향으로 나타났다. 최강 낙조류의 범위는 69.1~151.7cm/s로 신고리 1호에서 유속이 가장 빠르게 나타났으며, 신고리 1호와 2호에서 북동향, 신고리 3호는 남향 혹은 북서향의 주된 흐름을 보였다. 잔차류는 신고리 1호에서 11.30cm/s로 그 흐름이 가장 강하게 나타났고 신고리 1호와 2호는 북동향, 신고리 3호는 남서향하였다. 유속분산도에서도 신고리 1호와 2호에서는 북동향, 신고리 3호는 남서향하는 흐름을 보이고 있다.

〈표 4〉 신고리 1~3호에서 관측된 조류 분석 결과

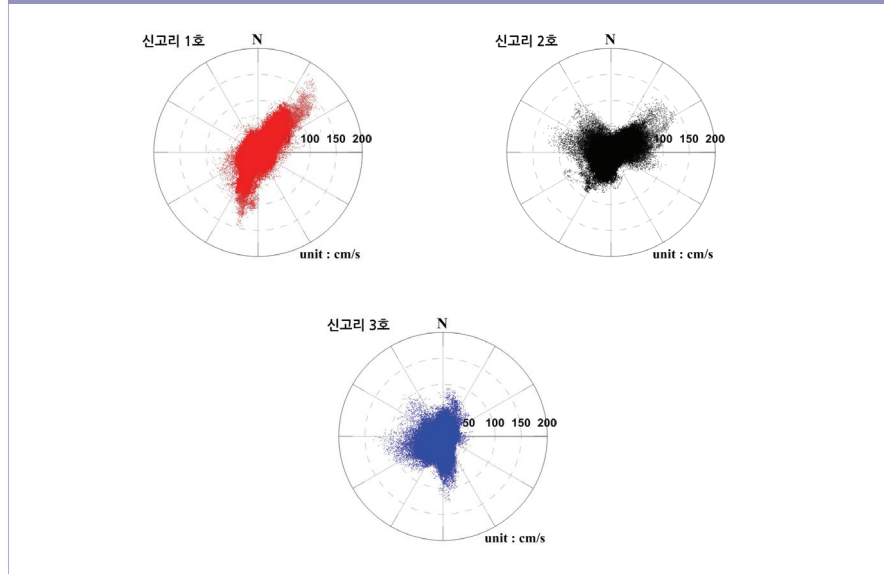
항목	잔차류		최강 창조류 (Max. flood current)		최강 낙조류 (Max. ebb current)	
	유속(cm/s)	유향(Deg.)	유속(cm/s)	유향(Deg.)	유속(cm/s)	유향(Deg.)
신고리 1호	11.3	41.88	119.8	194.5	151.7	40.7
신고리 2호	5.23	75.71	102.4	284.7	121.3	60.9
신고리 3호	9.35	196.68	97.5	257	69.1	301.4

[그림 11] 신고리 1~3호 유속/유향 관측 결과



“ 태풍 '타파', '미탁' 영향으로 풍속, 기압 변동폭이 크게 나타남 ”

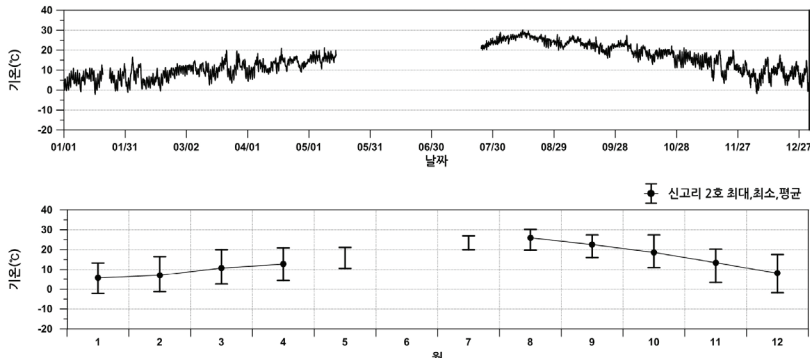
[그림 12] 신고리 1~3호 유속분산도



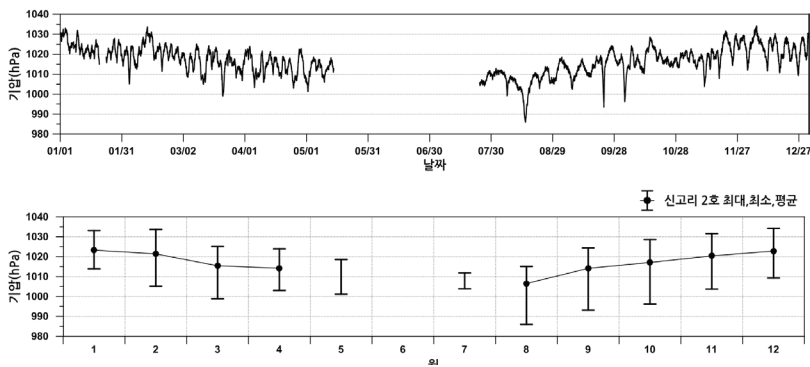
실시간 해양관측시스템(신고리 2호)의 해양기상 관측 결과(기온, 기압, 습도, 풍속/풍향)와 월별 통계 자료를 [그림 13]~[그림 16]에 제시하였으며 관측자료에 대한 통계 및 월평균 값은 [표 5]에 정리하였다. 2019년에는 6<sup>1)</sup>개의 태풍이 우리나라에 내습하여 직·간접적으로 영향을 미쳤다. 특히 제17호 태풍 '타파'와 제18호 태풍 '미탁'의 영향으로 풍속과 기압의 변동폭이 크게 나타났다. 평균 기온은 14.47°C로 나타났고, 최솟값은 -2.10°C(1월 16일), 최댓값은 30.20°C(8월 13일)로 관측되었다. 월평균 기온은 5.65°C~25.96°C의 범위로 여름철 8월에 가장 높은 값을, 겨울철 1월에 가장 낮은 값을 보여 계절적 특성이 나타났다. 기압은 평균 1016.60hPa, 최소 986.00hPa(8월 15일), 최대 1034.20hPa(12월 6일)을 보였으며 월평균 기압은 8월에 최소, 1월에 최대를 기록하였다. 풍속은 제17호 태풍 '타파'의 영향으로 9월 22일에 최댓값인 26.30m/s이 관측되었으며, 평균 풍속은 4.66m/s, [그림 17]과 같이 고리해역에서의 주 풍향은 북북서향으로 확인되었다.

1. 제5호 '다나스'(7/18~7/20), 제8호 '프란시스코'(8/5~8/6), 제10호 '크로샤'(8/15), 제13호 '링링'(9/6~9/8), 제17호 '타파'(9/21~9/23), 제18호 '미탁'(10/2~10/3).

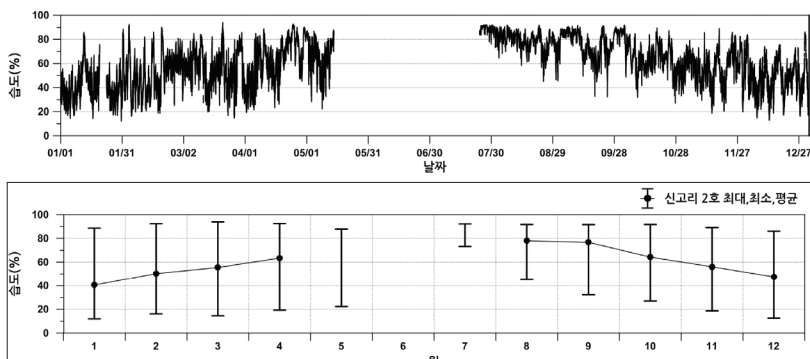
[그림 13] 신고리 1~3호 기온 관측 결과



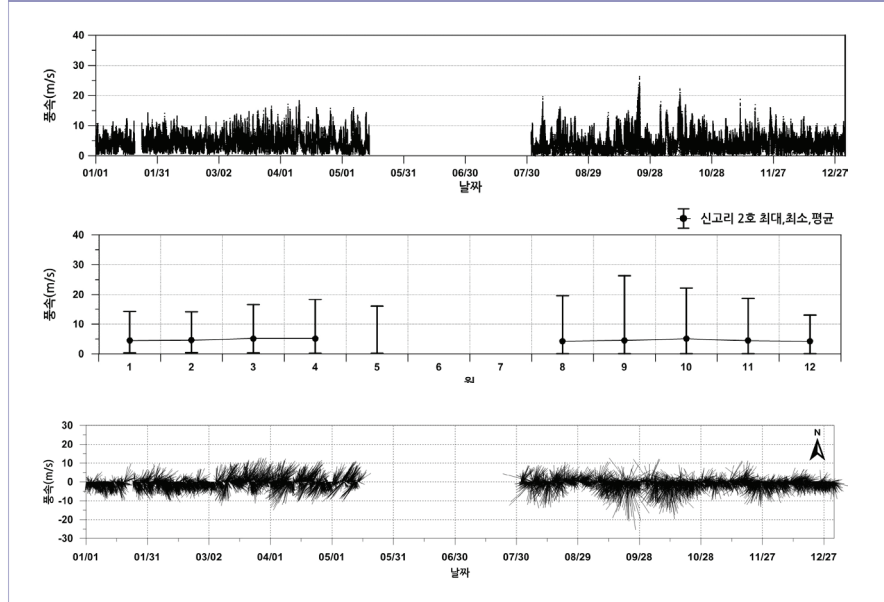
[그림 14] 신고리 1~3호 기압 관측 결과



[그림 15] 신고리 1~3호 습도 관측 결과



[그림 16] 신고리 1~3호 풍속/풍향 관측 결과

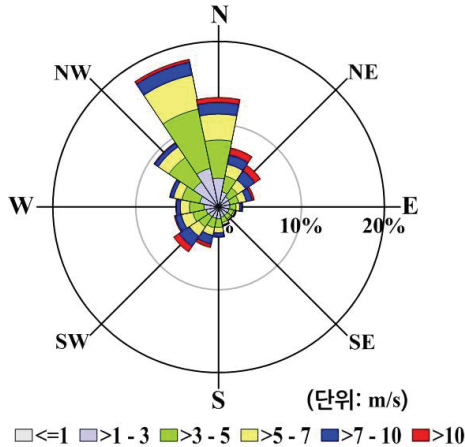


<표 5> 신고리 1~3호에서 관측된 2019년 1월~12월의 기온, 기압, 습도, 풍속/풍향 통계

항목	최소		최대		평균	표준편차
	관측일시	관측값	관측일시	관측값		
기온 (°C)	01/16 06:50	-2.10	08/13 17:52	30.20	14.47	7.19
기압 (hPa)	08/15 17:18	986.00	12/06 09:06	1034.20	1016.60	7.07
습도 (%)	01/30 13:10	12.10	03/21 01:14	94.00	60.72	18.24
풍속/풍향 (m/s, Deg.)	08/06 22:03	0.10/332.00	09/22 20:03	26.30/14.40	4.66	2.75

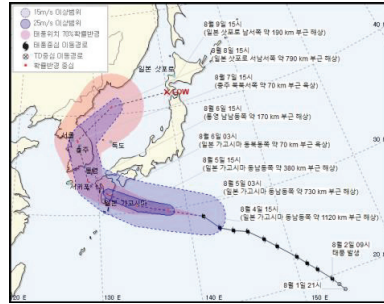
“ 실시간 해양관측시스템  
자료는 원전 주변  
해양현상 분석자료로  
활용 가능 ”

그림 17) 신고리 2호 바람장미도

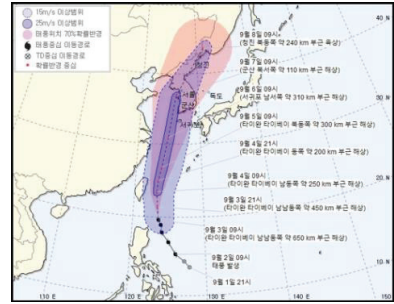


실시간 해양관측시스템의 관측자료는 원전 주변 해역에서 발생한 태풍, 고수온, 냉수대 등과 같은 특이한 해양현상을 분석하기 위한 자료로 활용할 수 있다. 2019년 8월에 국립수산과학원은 실시간 해양환경어장정보시스템 분석 결과를 바탕으로, 강원 연안(고성~삼척)에 냉수대 주의보를 발령하였다. 동일한 시기에 울진 해역에 설치된 실시간 해양관측시스템의 관측자료(그림 19) 참조)를 살펴보면 제8호 태풍 ‘프란시스코’와 제9호 태풍 ‘링링’의 영향으로 수온이 매우 큰 폭으로 변동하고 태풍의 직접적인 영향 시기에는 약 5~8℃ 정도가 하락하는 것을 확인할 수 있다. 이는 태풍의 직간접적인 영향으로 연안용승 현상이 발생하여 나타난 결과로 예상된다. 이와 같이 실시간 해양관측시스템을 활용하면 냉수대 발생과 소멸에 따른 급격한 수온 변화로 인한 동해연안의 양식생물 피해 발생 가능성을 낮추는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

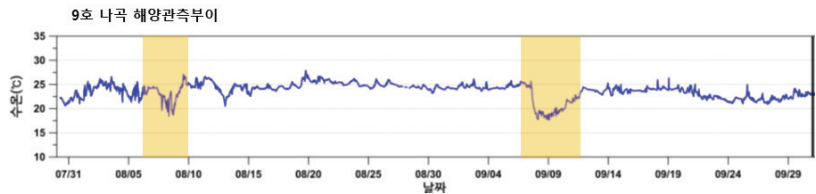
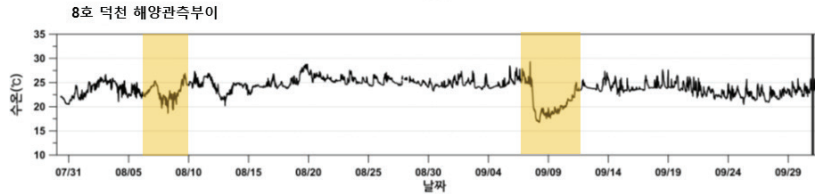
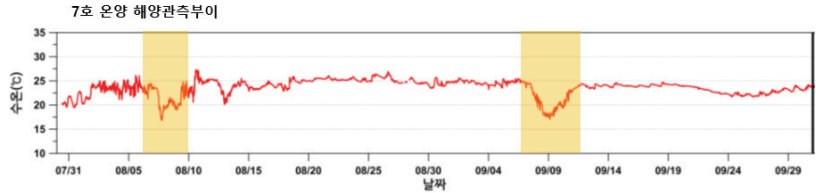
[그림 19] 특이해양현상 분석 예시



제8호 태풍 '프란시스코' 이동경로



제9호 태풍 '링링' 이동경로



울진해역의 2019년 8~9월 수온 관측자료



“ 실시간 모니터링시스템  
관측자료는 해양예보 및  
기후변화 대응 연구  
기초자료로 활용 가능 ”

## V. 맺으며

동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템을 구축함으로써 원전 주변의 해양환경 감시뿐만 아니라 동해 연안환경 변화 문제에 대한 과학적인 관측 자료를 상시 제공할 수 있게 되었다. 또한 한수원에서 구축·운영한 실시간 모니터링시스템 관측자료는 원전 주변 해역의 특이한 해양현상을 분석하기 위한 자료로 활용할 수 있다.

본 실시간 모니터링시스템 관측자료는 기상청이 해양 관련 종사자들을 위해 구축·운영 중인 해양기상정보 전달시스템의 해상특보 및 해상예보 정확도 향상에 활용 가능할 것으로 기대된다. 장기간 관측자료는 기상청의 기후변화 대응 연구의 기초자료로도 활용할 수 있을 것으로 보인다. 한편, 장기간 모니터링시스템 운영을 통해 해양환경 변화를 유추할 수 있는 다양한 정보를 실시간으로 투명하게 제공함으로써 환경시민단체가 원자력발전소의 문제점으로 꼽고 있는 온배수 배출에 따른 바다 생태계 변화를 공개한다는 의미도 있다. 품질관리를 거친 신뢰성 높은 관측자료를 국립해양조사원의 국가 해양관측망을 통해 제공함으로써 우리나라 연안환경 변화 대책 수립 및 관련 연구에 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

# 도로기상정보를 활용한 도로 살얼음 사고예방 사례와 제언

경기원 한국도로공사 전북본부 차장대우 jido@ex.co.kr

- I. 도로노면의 특성
- II. 도로관리기관의 기상예보에 따른 제설대응
- III. 도로기상정보를 활용한 제설대응 사례
- IV. 도로기상 발전방향 제언

겨울철 도로 노면(路面)은 운전자가 인지하기가 힘든 블랙아이스(Black Ice)로 인해 대형 교통사고가 발생하였다. 2000년 초·중반기 고속도로 폭설<sup>1)</sup>로 인한 교통대란 발생 이후 도로제설 기준이 강화되었고, 제설방식도 변화<sup>2)</sup>하였다. 하지만 자동차 기술의 발전, 운전문화 및 도로노면의 배수특성 등 다양한 문제점으로 인해 도로 살얼음 사고는 여전히 발생하고 있는 실정이다. 이에 겨울철 도로노면 특성, 도로관리기관의 제설절차, 살얼음 예방을 위한 도로기상관측 및 활용사례 그리고 도로관리기관의 실무자 관점에서 느낀 발전방향을 기술하고자 한다. ■

“ 도로설계에는 정지시거를 반영 ”

## 1. 도로노면의 특성

도로설계는 운전자가 도로의 15cm 높이에 있는 물체(고장차, 장애물 등) 또는 위험요소를 인지하여 정지하거나, 장애물을 우회하여 주행할 수 있도록 정지시거를 설계에 반영한다. 정지시거는 설계속도를 통해 산정이 되지만, 포장표면에 형성된 블랙아이스는 정지시거에 관계없이 운전자의 감속 등 안전한 주행을 어렵게 하고, 미끄럼사고를 유발하는 원인이 된다[그림 1].

자동차 주행속도가 낮아수록 노면마찰계수는 증가되고 정지시거가 줄어드는 양상을 보이지만, 압설(壓雪)된 타이어 또는 블랙아이스가 발생하면 노면마찰계수는 현저히 떨어지기 때문에 겨울철 도로기상 악화(강우, 강설 등) 시에는 감속운전을 통해 안전거리를 확보하여야 한다[그림 2]

**[그림 1] 정지시거의 의미**

정지시거 = ① + ②

- ① 장애물을 인지하고 위험하다고 판단하여 제동장치를 작동시키기까지 주행거리
- ② 제동장치를 작동하여 정지할 때까지의 거리

운전자의 눈높이를 고려하여 오르막(내리막) 및 곡선구간에서는 도로의 설계 속도별운전자가 제동거리 등을 확보할 수 있도록 도로를 설계·시공하고 있음

**[그림 2] 자동차의 미끄럼저항 고려 정지시거**

설계속도(km/hr)	...	100	110	120
횡방향미끄럼마찰계수( $f_s$ )	...	0.11	0.1	0.1
종방향미끄럼 마찰계수( $f$ )	노면습윤	0.30	0.30	0.29
	노면동결*	0.15	0.15	0.15
정지시거(m)	...	155	185	215

\*노면동결 종방향 미끄럼마찰계수는 스노우 타이어, 체인 등을 사용할 때 값 적용

1. 강원 영동 대설(93cm, 2001), 충청 3월 100년만의 폭설(2004), 호남 폭설(2005)  
 2. 과거 : 제설제 섞인 모래살포, 현재 : 습염제설(염화칼슘수용액을 적신 소금살포)

“도로는 노면과 자동차 관계를 고려하여 설계,,”

[그림 3] 도로노면에서의 물의 흐름과 사고 발생 형태



도로노면 물의 흐름

미끄럼사고 발생형태

[그림 4] 살얼음 사고 방지를 위한 추진 사례

항목	평균	표준편차
배수포장		
	* 포장 내로 배수가 되어 노면 표면수 최소화	
도로열선		
	* 포장에 히팅케이블을 매설하여 직접가열	
결빙 방지포장		
	* 염화물(Anti-icing Filler)를 첨가하여 빙점 강하(-10℃)	
자동염수 분사시설		
	* 눈·비를 자동 감지하여 노면에 염수 자동분사	
고성능 표면처리		
	* 노면 미끄럼 마찰저항과 배수 향상	

도로는 도로선형(道路線型)에 따라 중앙분리대나 갓길로 배수되는 특성을 가지고 있으며, 이로 인해 겨울철에는 노면결빙에 취약한 특성을 가지고 있다. [그림 3]은 물의 흐름과 곡선구간에서 노면결빙 시 사고가 발생하는 형태를 표현한 것이다.

강수 시 안전한 도로주행 및 노면결빙을 해결하고자 포장내로 배수가 되는 배수성포장을 도로취약구간에 우선적용하고 있다. 도로는 노면과 자동차 즉 타이어와의 관계를 고려하여 설계하고 있으며, 이때 노면의 상태는 습윤상태 또는 결빙된 상태를 조건으로 한다. 하지만 노면이 결빙된 상태에서의 분석은 스노우타이어(체인 등)를 정착된 조건이 전제되어 있어 일반타이어를 정착할 경우에는 미끄럼사고가 발생할 가능성이 높다. 이에 도로관리기관에서는 미끄럼방지를 위해 포장면 요철(그루빙)도 추가로 설치하고 있다. [그림 4]는 살얼음 사고가 없는 도로를 만들기 위해 추진되고 있는 사례들이다.

“ 도로상 적설상태보다  
서리/결빙시 치사율이  
2배 높게 나타남 ”

## II. 도로관리기관의 기상예보에 따른 제설대응

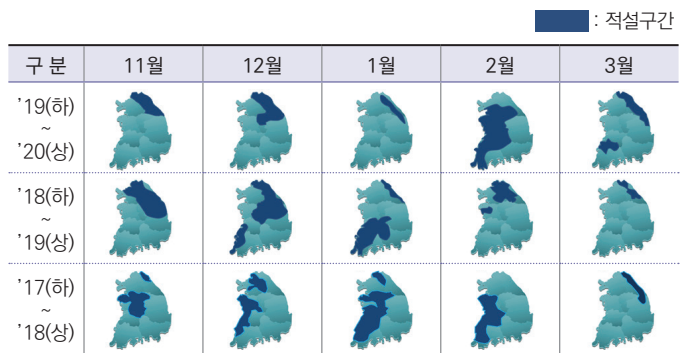
겨울철 기상변화, 지구 온난화에 따른 이 상기온 상승 등의 기후적인 요건의 변화와 통행속도 감속규정을 준수하고, 기상예보에 따른 급변화 사전인식하고 대응할수 있는 운전자의 태도 변화 등으로 도로기상을 고려한 안전운전이 필요로 하고 있으며 도로관리기관별로 제설대응은 11월 중순 이후부터 익년 3월 중순까지 추진 중에 있다. [그림 1]은 겨울철 적설구간 변화이고, [표 1]은 기온특성을 보여준다.

최근 도로 기상여건에 따른 교통사고 치사율을 분석한 결과 도로에 눈이 쌓여있는 적설된 상태보다 서리/결빙시의 치사율이 2배 가까이 높게 나타났다[ 표 2]. 이는 제설작업 시 강설량에 따른 평균통행속도 자료와도 밀접한 관계가 있을 것으로 판단 된다[그림 6].

또한, 자동차 스노우타이어 장착추세는 경기도 북부지역과 강원도지역을 제외하고는 과거에 비해 상당히 급감하였다. 스노우타이어는 타이어 홈(트레드)과 재질이 기온저하 시에도 부드러운 상태를 유지하여 제동거리가 20~40% 짧아지는 효과가 있으나, 일반적인 도로환경에서는 주행소음 및 승차감 저하 발생으로 이용률이 낮

[그림 5] 11월-3월 적설구간 변화

(제설대응 변화추이: 영동→영동·서해안→서해안→영동지역)



[표 1] 겨울철 기온 특성(작년 및 평년 대비 상승 1.8~2.5℃)

구분	2019년 겨울(a)	2018년 겨울(b)	겨울 평년값 (1981-2010)(c)	작년대비 (a-b)	평년대비 (a-c)
평균기온(℃)	3.1	1.3	0.6	증1.8	증2.5
평균 최고기온(℃)	8.3	6.8	6.1	증1.5	증2.2
평균 최저기온(℃)	-1.4	-3.6	-4.2	증2.2	증2.8
일최저기온 영하 10℃ 미만일수	1.7	7	10.6	△6.2	△8.9
일최고기온 0℃ 미만일수	1.7	5.1	8.4	△3.4	△6.7

[표 2] 기상여건에 따른 교통사고 치사율(교통공단)

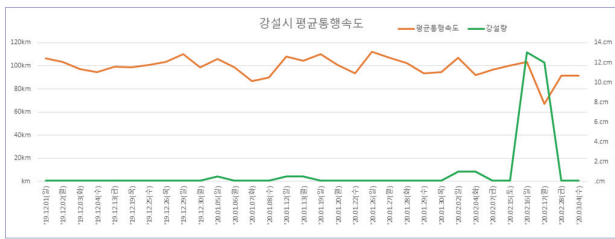
구분	계	연평균 (2012~2019, 8개년 연평균)				
		도로 표면 기상상태				
		건조	젖음/습기	서리/결빙	적설	기타
사고건수	27,738	24,511	2,673	208	99	247
부상자수	41,814	36,750	4,168	373	170	352
사망자수	552	465	74	6	2	5
치사율(건수대비)		1.90%	2.80%	3.10%	1.70%	1.90%
적설대비				1.8배		

정책 초점

“ 스노우타이어 장착 추세는 대부분 지역 과거에 비해 급감 ”

은 실정이다[표 3]. 따라서, 노면결빙을 고려한 운전문화 확산, 안전운전홍보 및 도로기상예보를 통한 적기 제설대응이 필요하다.

[그림 6] 2019년 제설작업 시 강설량에 따른 평균통행속도 예시

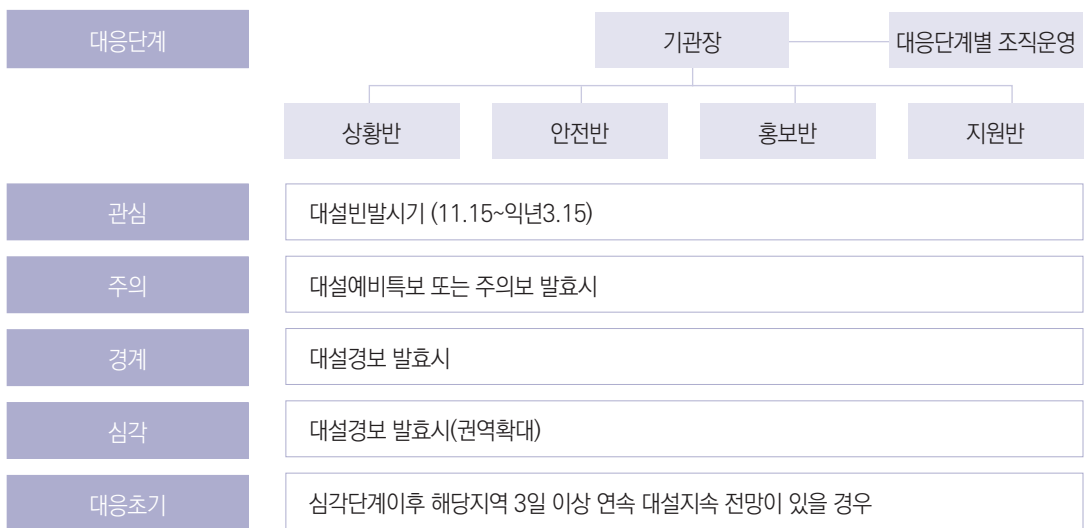


또한, 자동차 스노우타이어 장착추세는 경기도 북부지역과 강원도지역을 제외하고는 과거에 비해 상당히 급감하였다. 스노우타이어는 타이어 홈(트레드)과 재질이 기온저하 시에도 부드러운 상태를 유지하여 제동거리가 20~40% 짧아지는 효과가 있으나, 일반적인 도로환경에서는 주행소음 및 승차감 저하 발생으로 이용률이 낮은 실정이다[표 3]. 따라서, 노면결빙을 고려한 운전문화 확산, 안전운전홍보 및 도로기상예보를 통한 적기 제설대응이 필요하다.

[표 3] 약천후 시 감속주행 규정(도로교통법)

구분	최고속도 20%감소	최고속도 50%감소
조건	눈 20mm 미만 적설 시	눈 20mm 이상 적설 시
속도 100km/hr 구간	80km/hr	50km/hr

[그림 7] 강설 예보별 대응단계(예시)





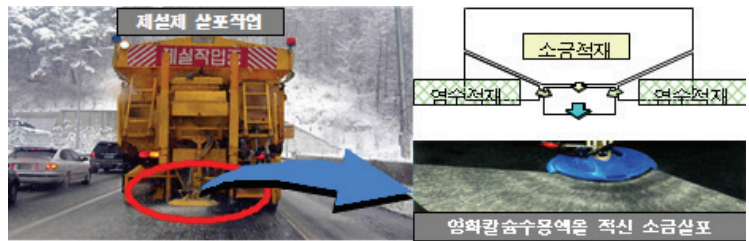
“ 도로 제설은 습염 살포 방식으로 운영 ”

도로의 제설은 습염살포 방식으로 고체소금과 염화칼슘 30% 용액을 70:30의 중량비로 살포하여, 용설효과와 마찰효과를 동시에 만족하는 방식이다. 하지만 염분

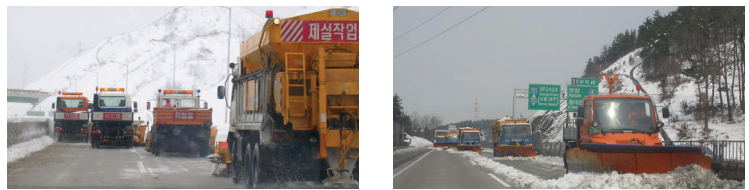
으로 인한 주변 환경과 콘크리트 구조물에 피해가 있어 최근에는 친환경 제설제 및 소금수용액 도입 등이 추진되고 있다.

제설제 살포 주기는 강설량, 염분농도에 따라 용설과 결빙 방지지속시간의 한계로 주기적인 살포를 시행하며, 차량바퀴에 의한 지면에서 고체소금의 튕(Bounding)현상, 액상 제설제의 희석 및 소멸이 발생한다. 따라서 강수 전 사전(예비)살포는 전 구간 살포 완료시간 등을 고려 시행되고 있다(그림 9). 즉 제설제 살포가 너무 빨리 시행되면 제설효과가 저하되며, 너무 늦게 시행되면 적설 및 살얼음 발생으로 미끄럼사고 발생가능성이 높다. 최적의 예비살포와 제설 적정대응을 위해서는 '강수시작 전 1~2시간'의 신뢰도 있는 도로 기상예보가 매우 중요하다.

그림 8 단계별 도로 제설



[1단계] 제설제살포 (3cm이하)

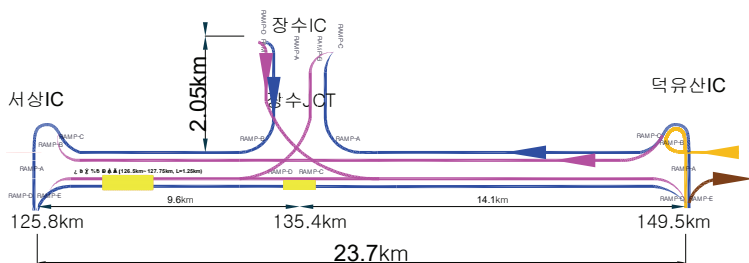


[2단계] 밀어내기(리무빙)+ 제설제 살포 (3cm이상)



[기타] 취약구간 염수분사 살포

그림 9 고속도로 1회 제설작업구간 예시(제설차량 주행거리 약 50km)





[참고]

예비살포 기준

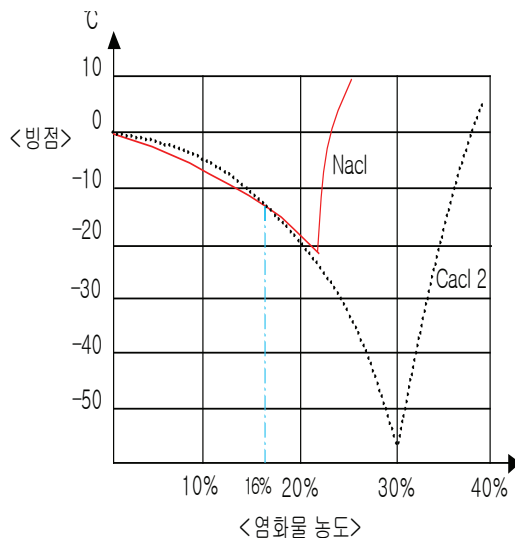
- 제설제 예비살포 : 강설·결빙 전 또는 시작시 압설 및 결빙 예방을 위해 예비 살포 실시
- 시행 시기
  - 눈, 진눈깨비가 흩날리기 시작할 때
  - 기상예보시 강설, 강우 등으로 도로살얼음 우려가 있을 때
  - 도로순찰시 대기 온도 4℃ 이하, 노면 온도 2℃ 이하로 온도하강이 예상되고 비가 내리기 시작할 때
  - 어는비(영하에서 0℃로 온도 상승하는 새벽시간)로 결빙이 예상될 때
  - 기타 안개, 서리 등으로 결빙이 우려되는 경우 또는 관리자가 필요하다고 판단되는 경우

제설제 살포기준

도로의 제설방식은 습염살포 방식(Pre-Wetted Salt)으로 고체소금과 염화칼슘 30% 용액을 70:30의 중량비로 살포하여, 염화칼슘 수용액이 눈과 반응하여 신속히 눈을 녹이고, 고체 소금이 지속적으로 반응하여 재 결빙을 방지한다.

- 수용액 농도별 어는점 및 장단점 비교
  - 어는점 비교시 소금보다 염화칼슘이 낮은 온도에서는 효과적임
  - 두 용설제 모두 일정수준 이상의 농도에서는 그 어는점 하강 효과가 떨어짐(염화칼슘은 약 30% 이상, 소금은 약 20% 이상의 짙은 농도로는 사용할 필요가 없음)
- 농도별 염화칼슘과 소금 수용액의 어는점 비교

최저 빙점: (소금)-21℃(22% 농도), (염화칼슘)-55℃(30% 농도)  
 ※ 저농도에서 소금의 빙점이염화칼슘보다 낮음(변곡점: 16% 농도)



“ 도로표면 온도는 새벽~이른아침에 대기보다 낮음 ”

### Ⅲ. 도로기상정보를 활용한 살얼음 사고예방 제설대응 사례

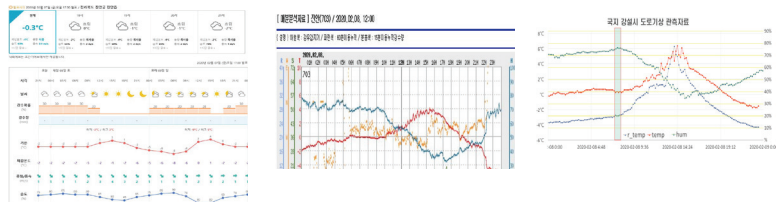
제설대응은 기상청 예보를 근거로 인원과 장비를 사전배치하고 있으나, 산악지역, 하천부 및 계곡부의 지형적 특성으로 인해 발생하는 예측되지 못한 강설로 도로관리기관에서는 제설대응에 어려움을 겪고 있다(그림 10) [그림 11].

도로표면의 온도는 대기온도보다 새벽~이른아침에 낮으며 대부분의 어는비 발생시간대와 일치된다. [그림 12]는 2005년 미국에서 관측한 자료와 2019년 2월 전북본부 관내 도로기상 관측 자료이다. 미국자료에서는 이른 아침에 1~2℃ 낮은 기온을 보였으나, 관측자료에서는 3~4℃ 낮은 도로 노면온도로 관측되었다. 겨울철에는 기상청 대기온도가 4℃이상이라도 교량 등의 취약지점에서는 영하의 온도일 가능성이 높다.

[그림 10] 고속도로 지형적 특성

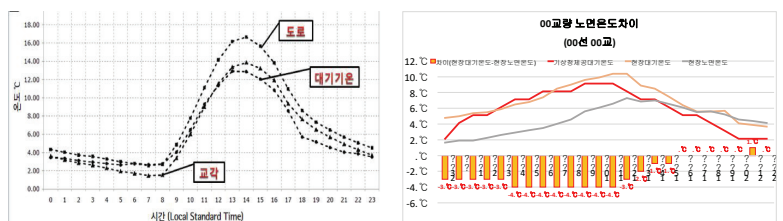


[그림 11] 기상예보 및 강설사례



기상예보와 관측자료에도 없는 약한 강수(강설, 강우 등)는 국지적으로 계속발생

[그림 12] 미국(좌)과 한국(우)의 도로기상 관측자료



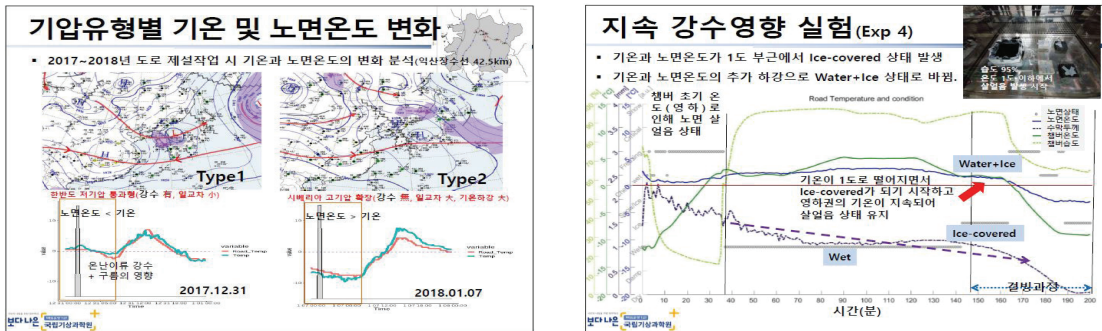
<Rathke and McPherson(2005)>

<00고속도로 00교량(2019.2.3.)>

“ RWIS를 26개소에  
18km 간격으로  
설치하여  
노면/대기온도,  
습도, 대기압 관측 ”

[그림 13]은 기압유형별 관측된 도로기상(기온, 노면온도)과의 변화로 발해만 저기압과 시베리아 고기압이 각기 도로기상에 미치는 차이로 발해만 저기압에서 이른 아침의 기온이 0°C 주변에서 노면온도가 더 낮은 양상을 보였으며, 살얼음 실험 실험결과에서는 기온과 노면온도가 1°C아래로 지속하강 시 살얼음 상태를 유지되는 것으로 나타났다.

[그림 13] 기압유형별 도로기상 변화와 지속 강수영향 실험



산지계곡부 등의 교량구간 등에 RWIS를 7개 노선 26개소에 약18km 평균 간격으로 설치 하였으며 관측정보는 도로의'노면온도','대기온도','습도', '대기압'이다 [그림 14]. 관측된 도로기상정보는 전주기상지청과 2016년부터 협업하여 2단계로 추진 중에 있다.

[그림 14] 도로기상 관측시설 현황(전북본부 구축)



“ 기상청과 제설대응 의사결정 체계 협력 ”

(1단계) 노면결빙 영향예보 시범운영

5년동안 협업 추진함에 있어 1단계로 전주기상지청에 실시간 도로 기상관측 정보제공하면 수치예보모델과 비교 분석 후 고속도로 노면결빙이 예상될 경우 노면결빙 위험수준정보를 관심, 주의, 경보 3단계로 구분 제공하는 시스템을 3개 노선에 시범 적용 하였다(그림 15).

(2단계) 기상청 기상정보와 도로기상 변화의비교를 통한 의사결정체계

기상청에서 제공하는 기상정보(레이더영상, 동네예보, 어는비 경보)를 통한 전반적인 기상 흐름과 전주기상지청에서 제공하는 취약지점의 맞춤기상정보와 현장관측기상정보와의 상호 비교를 통해 노면온도의 지속하강(4°C이하로 지속↘)과 습도의 지속상승(70%이상 지속↗)시 제설대응의 신속한 의사결정을 할 수 있도록 하는 가칭 BIPA(Black Ice Prevention & Alarm)체계를 운영하였다(그림 16).

그림 15) 노면결빙 영향예보 흐름도



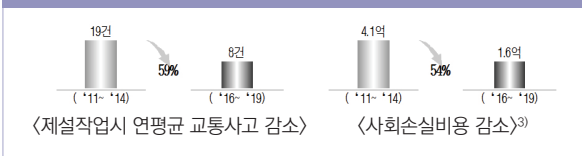
그림 16) 제설대응 의사결정 체계



“ 도로기상 인프라 구축, 예측기술 개발 필요 ”

운영분석결과와 교통사고 감소효과는 크나, 제설제 사용량은 증가되어 최적의 제설대응체계 확보, 운전자에게 신뢰도 있는 도로기상 정보제공과 더불어 제설작업 효율화를 통한 경제적이며 친환경 도로 제설관리에 기여토록 도로 살얼음 예방기술은 지속 발전되어야 할 것이다[그림 17].

[그림 17] 도로기상정보시스템 운영 결과



#### IV. 도로기상 발전방향 제언

필자는 2019년 겨울철 살얼음 사고 발생으로 범부처 TF인 ‘도로살얼음 기상정보 서비스’ 과제에 참여한 것에 작은 보람을 느낀다. 도로 살얼음 발생 사고는 몇 해 간격 또는 국지적으로 발생하고 있어 관리기관, 산·학 등에서 연구와 활용기술 개발에 지속적이고 체계적이지 못한 요인으로 작용한 것 같다. 또한 금번 TF 참여시 기상관련 기관에서는 과거 도로기상 관측자료와 운영 중인 도로기상 관측시설의 부족, 도로관리기관에서는 관측시설 설치기준과 예측 및 활용기술이 부족함을 느껴 다음과 같이 도로기상 발전방향을 제시하며 글을 마치고자 한다.

##### • 도로기상 관련 제도 및 교육 등 인프라 구축

도로기상 관련 규정이 거의 전무하여 기상법 등에서 체계적인 도로기상 관련 제도 정비가 이루어 져야 할 것으로 판단되며, 도로관리자의 기상관련 교육프로그램이 운영되기를 희망한다. 방재기상정보시스템을 통해 세부 기상정보가 제공되고 있으나, 도로관리 실무자의 기상관련 지식은 많이 부족한 상태로 이를 충분히 활용하지 못하고 있는 실정이다. 또한, 기상관계자 분들도 도로 특성에 대한 이해가 요구된다. 이에 도로기상 기술발전을 위해서는 교육과 소통의 장이 꼭 필요할 것으로 판단된다.

##### ○ 도로기상 예측기술은 지속 개발되어야 한다

국토의 70%가 산지인 우리나라에서 지역적, 지형적 특성에 따라 도로기상 다양

3. 비용 산정 : 부상(1,905만원/인), 차량손해(163만원/건) [도로부문 예타표준지침('17), 한국개발연구원]



성이 존재할 것으로 판단된다. 따라서, 도로기상 자료 축적을 통한 예측기술의 고도화를 이룰 수 있도록 금번 TF 기간(2년)에 한정되지 않고 충분한 기간에 걸쳐 개발되어야 한다.

### 참고문헌

- Safety Audit Roads SAS, 2007: Safety Aspects of Rural Roads
- 대한토목학회, 2000: 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설
- 기상청, 2017: 기상기술정책
- 기상청, 2014: 손에 잡히는 예보기술
- 한국기상학회, 2019: 한국기상학회 가을학술대회 초록집
- 한국기상학회, 2020: 도로살얼음 예측 및 대응 포럼

# 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용

권오순 한국해양과학기술원 책임연구원 oskwon@kiost.ac.kr

- I. 해양로봇
- II. 탐사용 해양로봇
- III. 작업용 해양로봇
- IV. 스마트 해양 관측

해양로봇은 바다 밑의 환경을 수중카메라, 소나 등을 이용하여 시각적으로 관찰하기 위해 주로 활용되어 왔지만, 최근에는 좀 더 많은 정보의 획득과 복잡한 상황에서 다양한 목적으로 활용되기 시작했다. 유선으로 활용되는 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 함께 무선으로 광역의 해역을 자유롭게 관측하는 AUV(Autonomous Underwater Vehicles), 글라이더(underwater glider), 다양한 작업을 위한 작업용 수중로봇 등이 활발하게 사용되면서 기존에는 많은 시간이 소요되거나 불가능했던 해양 관측과 조사가 가능해지고 있다. 최근 무선통신, 인공지능, 수중가시화, 로봇기술의 접목으로 실제 바다에 가지 않더라도 양질의 더 많은 정보를 확보할 수 있게 되면서 인간이 바다에 대해 좀 더 이해할 수 있는 계기가 되고 있다. ■



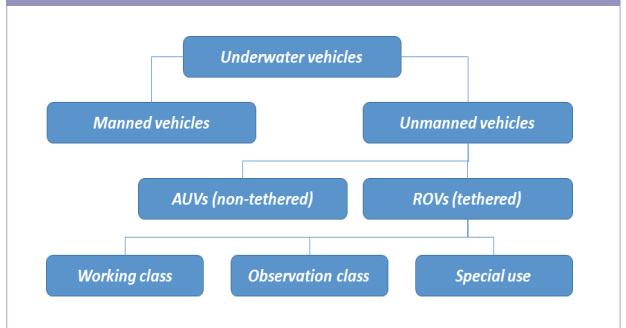
“ 해양로봇이나 수중 로봇은 수중 이동체와 동일한 의미로 사용 ”

## 1. 해양로봇

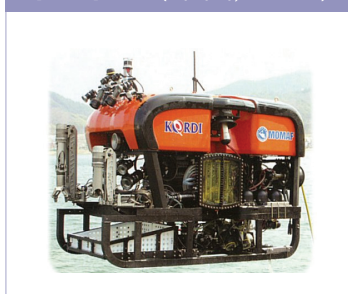
최근 드론의 폭넓은 활용으로 인해 '수중드론'이란 용어가 사용되면서 수중로봇 또는 해양로봇에 대한 관심도 증가하고 있다. 물론 드론이라는 형태의 이동체가 이름을 얻기 훨씬 이전부터 해양로봇은 해양관측, 해양산업 특히 해저플랜트(subsea plant) 분야에서 많이 사용되어 왔다. 구동형태나 외형으로 볼 때 수중드론이라는 용어는 적절하지 않다는 것이 필자의 개인적인 생각이지만, 명칭이라는 것이 대중이 불러주면서 그 의미가 정해지므로 가볍게 받아들여질 수 있기도 하다. 처음으로 해양로봇이라 부를 수 있는 수중에서 활약하는 이동체를 처음 본 것은 제임스 카메론 감독의 대표작인 '타이타닉(Titanic, 1997)'이라는 영화에서이다. 아마 세계적으로 가장 확실하게 '해양로봇이란 이런 것이다'라는 것을 보여준 장면이면서, 영화적인 상상력이라는 점을 감안하더라도 25년이 지난 지금도 침몰된 타이타닉호를 조사하고 다니는 정도의 작업성을 발휘하는 해양로봇은 기술적인 측면과 해양 환경의 복잡성으로 인해 구현이 매우 어렵다.

해양로봇 또는 수중로봇(underwater robots)은 대부분 이동체의 형태를 가지기 때문에 수중 이동체(underwater vehicle)와 동일한 의미로 사용되고 있다. 해양 관련 과학 및 기술자들을 중심으로 구성된 해양기술협회(MTS: Marine Technology Society)는 해양로봇을 다음 [그림 1]과 같이 분류하고 있는데, 유인 이동체와 무인 이동체로 크게 구분하고 무인 이동체는 다시 유선과 무선으로 구분한다. 유선 해양로봇인 ROV는 작업용, 관측용 그리고 특수 목적용으로 구분하여 제시하고 있다. [그림 2]와 [그림 3]은 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연

[그림 1] 해양로봇의 분류(MTS, 1983)



[그림 2] ROV(해미래, KRISO)



[그림 3] AUV(이심이, KRISO)



“ 해양로봇은 목적과 적용수심에 따라 크기와 규모에 차이 ”

구소(KRISO)에서 자체 개발한 대표적인 ROV와 AUV인데, 외형부터 매우 다른 형태를 가진 것을 알 수 있다.

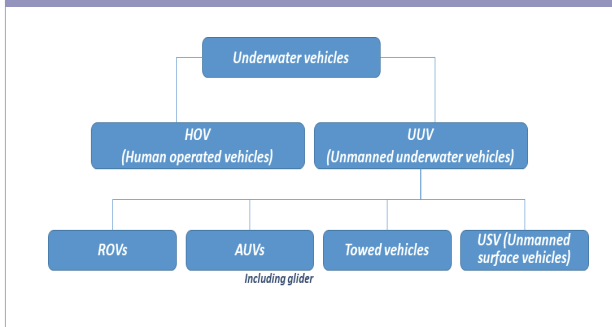
[표 1] 해양로봇의 규모와 목적에 따른 일반적인 분류(MTS, 1983)

Class	Type	Power (hp)
Micro Observation (<100m)	Low Cost Small Electric ROV	<5
Mini Observation (<300m)	Mini (Small & Electric)	<10
Light/Medium Work Class (<2,000m)	Medium (Electro/Hyd)	<100
Observation/Light Work Class (<3,000m)	High Capacity Electric	<20
Heavy Work Class / Large Payload (<3,000m)	High Capacity (Electro/Hyd)	<300
Observation/Data Collection (>3,000m)	Ultra-Deep (Electric)	<25
Heavy Work Class / Large Payload (>3,000m)	Ultra-Deep (Electro/Hyd)	<120
Trenching and Burial	Bottom Crawlers and Plows	
Towed Systems	Towed Systems	
Autonomous Underwater Vehicles	Untethered AUVs	

활용목적에 따라 좀 더 세부적으로 구분할 수 있는데, 목적과 적용 수심에 따라 해양로봇의 크기와 규모가 달라지며, 큰 힘을 필요로 하는 경우에는 전기식보다 유압식을 활용하고 있다[표 1].

최근에서는 전통적으로 많이 활용해오던 ROV뿐만 아니라 해상조건과 적용목적에 따라 다양한 형태가 활발하게 사용되는데, 대표적인 것이 AUV의 한 형태인 수중글라이더(glider)이다. 수중글라이더는 기존의 AUV가 탑재한 배터리의 용량으로 인해 상대적으로 짧은 시간 동안 운용하게 되는 단점을 보완하기 위해 부력이나 파도의 물리적인 힘을 이용하여 장기간 운용하면서 해양환경을 광범위하게 조사할 수 있는 장점을 가지기 때문에 광역의 해양모니터링 체계 구축에서 필수적인 해양로봇으로 자리 잡고 있다. [그림 4]는 이러한 경향을 반영하여 정리한 해양로

[그림 4] 최근의 일반적인 해양로봇의 분류



봇의 분류방법이다. 여기에는 해상에서 운영되는 USV나 선박의 견인줄에 연결한 뒤 각종 센서가 장착된 이동체로 해양조사를 수행하는 Towed vehicle도 해양로봇의 일종으로 구분하고 있다. 그리고 HOV(Human Operated Vehicles)로 통칭되는 유인 잠수정은 원격 조정되는 ROV나 AUV가 확보하는 광학영상만으로는 만족하지 못하고 과학자가 직접 해저 공간에 진입하여 직

“ 탐사용 해양로봇은 마이크로급, 미니급, 소형급, 경작업용급 ”

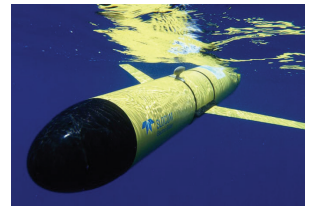
접 연구 활동을 수행할 수 있게 해 준다는 장점이 있다. HOV를 활용해 세계 각국에서는 기록적인 수심 도달에 도전하고 있다. 일본의 유인 잠수정인 ‘신카이 6500’, 중국의 심해 유인잠수정 ‘자오룽(蛟龍)’은 수심 6,000m 이상의 해저 도달에 성공하였으며, 제임스 카메론 감독은 자체 개발한 ‘Deepsea challenger’라는 심해 유인 잠수정을 이용하여 2012년 최대 10,000m 잠수에 성공한 바 있다.

[그림 5] Sentry(AUV)



출처: <https://www.whoi.edu>

[그림 6] Slocum(glider)

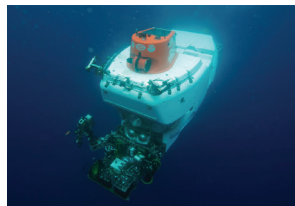


출처: <https://www.whoi.edu>

## II. 탐사용 해양로봇

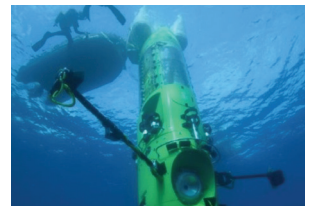
해양을 탐사하기 위한 해양로봇은 적용 수심과 활용할 수 있는 조류나 해류 조건에 따라 크기와 규모가 달라지는데, 가장 작은 마이크로급, 미니급, 소형급 그리고 매니플레이터(다관절 로봇

[그림 7] Alvin(HOV)



출처: <https://www.whoi.edu>

[그림 8] Deepsea Challenger



출처: <https://www.whoi.edu>

팔)를 장착하여 간단한 시료의 채취가 가능한 경작업용급까지 다양하게 활용하고 있다. 해양로봇의 등급은 본체뿐만 아니라 운용을 위한 부속장치와 진회수를 위한 장치, 그리고 이를 운용할 수 있는 선박(모선)까지 구성이 달라지는데, 마이크로, 미니급은 소형선박에서 운용할 수 있지만, 중형급부터 통상 일반 소형선에서는 활용하기 어렵고 전용 ROV 지원 선박이나 특수목적의 선박이 필요하다. 마이크로, 미니, 소형급은 대부분 장착할 수 있는 장치나 센서의 중량에 제한이 크기 때문에 다양한 장치를 탑재할 수는 없고 간단한 관측장비를 탑재하기 때문에, 대부분 조사(inspection)와 관측(observation)에 활용된다. 국제 해양공사 및 건설과 관련된 단체인 IMCA(International Marine Contractors Association)에서 규정하는 Class I, Class II로 분류하고 있다. 과학 분야 또는 해양 구조구난(salvage) 분

“ AUV는 해양환경  
감시, 해양 구조조난  
분야에 필수적인  
해양로봇 ”

야의 요구에 의해 만들어진 경량급은 일반적으로 4,000m를 초과하는 대수심을 목적으로 제작된 ROV이며, 출력보다는 대수심에 도달하는 것에 주안점을 두고 제작되었기에 규모나 출력 면에서 작업용급보다는 컴팩트한 형태가 주류를 이룬다.

[표 2] 대표적인 탐사용 해양로봇 및 사양

수중로봇	사진	항목	내용
Micro observation class 대표모델 및 사양			
AC-ROV		제작사	AC-CESS, UK
		Size	203mm x 152mm x 146mm
		Weight (In Air)	3kg (6.6lbs)
		Depth Rating	100msw
		Thrusters	6
		Camera	Colour CCD, 800 Line X 0.1Lux, Focus
		System Power	300watt (0.4hp)
		Payload	200g (8oz)
Mini observation class 대표모델 및 사양			
VideoRay		제작사	VideoRay LLC USA
		Size	37.5cm x 28.9cm x 22.3cm
		Weight (In Air)	6.1kg
		Depth Rating	305m (1,000ft)
		Thrusters	3 thrusters (2 horizontal/1 vertical)
		Bollard Thrust	10kgf - 21lbs
Camera	High Resolution - NTSC Format		
Observation/Light Work Class 대표모델 및 사양			
Cougar		제작사	Saab seaeye, Sweden
		Size	1,515mm x 790mm x 1,000mm
		Weight (In Air)	409
		Depth Rating	2,000
		Payload	80
Thrust Fw/Vt	170/110		
Light/Medium Work Class 대표모델 및 사양			
Leopard		제작사	Seaeye SAAB, Sweden
		Size	2,150mm x 1,174mm x 1,160mm
		Weight (In Air)	1,200kg
		Depth Rating	2,000/3,000m
		Thrusters	7 or 11 vectored
		Payload	200kg
Bollard Thrust	500kgf		


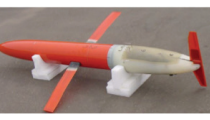

AUV는 특수목적의 수중환경 연구용(SPURV: special purpose underwater research vehicles)으로 개발이 진행되었으며, 특히 음향학 및 잠수함 기동 시 형성되는 음압특성 등을 연구할 목적이었지만, 지금은 해양환경 모니터링 및 해양 구조조난 분야에서 필수적인 해양로봇이 되었다. 탑재된 배터리의 용량에 따라 운용

“ 최근 다수의 AUV 동시 운용으로 작업 효율 극대화 방식 도입 ”

시간이 다르지만 일반적으로 1~20시간 정도의 운용시간으로 해저매핑, 각종 측정 센서를 장착하여 환경조사, 침몰물체 탐지 등의 작업을 수행한다. 수중통신기술의 발전으로 단거리 수중통신방법을 이용하여 임무결과 보고 및 작업지시가 가능하지만 일반적으로는 미리 설정된 임무를 수행하며 인공지능의 도입으로 자율운항이 가능한 수준이다. 최근에는 다수의 AUV를 동시에 운용하면서 작업효율을 극대화하는 운용방식이 도입되어 활용되고 있다.

일반적인 AUV가 전기추진기를 동력으로 운용하는 것에 반하여, 수중 글라이더는 부력엔진을 이용하여 최소한의 전력을 소비하면서 수개월에서 1년 단위의 장기간 동안 운용할 수 있도록 개발된 부력 구동식 AUV라고 할 수 있다. 많은 연구자들에 의해 다양한 형태의 구동장치가 개발되고 있고, 항법기술 및 운용기술이 개발되고 있어 활용범위가 급격하게 증가하고 있다. 세계적으로 가장 활발히 활용되고 있는 수중글라이더는 Teledyne Webb Research社에서 개발한 Slocum glider, Scripps/WHOI에서 공동 개발한 Spray glider, 워싱턴 대학에서 개발하고 Kongsberg社에서 판권을 가지고 있는 Sea glider 등이 있는데, 국내에서도 최근 개발과 운용 경험이 축적되고 있다.

[표 3] 대표적인 탐사용 해양로봇 및 사양



모델	Slocum-electric	Spray	Seaglider
			
제원	1.5(L) × 0.22m(d) 54kg in air	2.1m(L) × 0.2m(d) 52kg in air	1.8m(L) × 0.3m(d) 52kg in air
성능	운용수심: 30m~1,000m 운용시간: 1년 이내 최대속도: 0.7kts	운용수심: 1,500m 운용시간: 1년 이내 최대속도: 0.5kts	운용수심: 1,000m (6,000m급 개발 됨) 운용시간: 1년 이내 최대속도: 0.5kts

“ 해양플랜트 시장  
증가로 중작업용  
해양로봇  
필요성 증가 ”

### III. 작업용 해양로봇

해양자원개발과 신재생에너지 개발이 활발해지며 해양플랜트 시장이 급격히 증가하고 있다. 해양플랜트란 바다 속에서 자원을 채취하는 시설을 말하는데, 이와 함께 채취한 자원을 운송하기 위한 해저 파이프라인 시장이 급증하고 해저 통신 및 전력케이블 시장도 덩달아 확대되고 있어 깊은 바다에서 구조물을 만들고 관리하는 중작업용 해양로봇의 필요성도 증가하고 있다. 초기 중작업용 해양로봇은 다관절의 로봇팔(매니퓰레이터)을 이용하여, 밸브를 열고 잠그거나 연결, 절단, 분리작업을 수행하는 작업이 주를 이루었지만, 해저 광케이블, 해저 전력케이블, 해저 파이프라인의 매설, 설치 작업에 특화된 트랜처, 해저 광물자원의 채광을 위한 해양로봇도 등장하여 활용되고 있다. 통상 2,500m의 잠수가능 수심과 100~250마력의 출력을 가지고 있으며, 5,000kg 견인하중을 견딜 수 있는 강도로 제작된다.

[표 4] 대표적인 중작업용 해양로봇 및 사양

Model	사진	항목	내용
XLX200		제작사	Forum USA
		Size	2,282mm x 3,605mm x 1,905mm
		HPU Power	200hp
		Weight (In Air)	5,500kg
		Depth Rating	3,000msw
		Payload	300kg
		Bollard Fwd/Ltl	1050kgf
		Bollard U/Dwn	940kgf
		Nexxus	
Size	3.2m x 1.7m x 1.9 m		
HPU Power	250hp		
Weight (In Air)	4,750kg		
Depth Rating	3,000msw		
Payload	455kg		
Bollard Fwd/Ltl	1,050kgf		
Bollard U/Dwn	1,400kgf		

국내에서도 중작업용 해양로봇이 개발되어 활용되고 있는데, 해저 열수광상에서 양광작업을 위해 개발된 미내로(KRISO)를 비롯하여, 항만건설에서 필요한 수



“ 중작업용 해양로봇의  
 틀은 작업 속도와  
 능률, 완성도에 매우  
 중요한 역할을 함 ”

중사석 고르기 작업에 사용하기 위해 개발된 UX-100(KIOST)과 해양수산부 수중 건설로봇사업단에서 개발한 해양로봇인 URI-L, URI-T, URI-R 등이 대표적이다. 대표적인 중작업인 수중건설은 육상건설작업과 같이 다양한 공정들이 존재하며, 대상구조물과 현장상황에 따라 다양한 작업성능이 요구된다. 해양로봇을 작업할 목적지까지 안전하게 이동-작업-복귀할 수 있는 신뢰성 높은 플랫폼 운용 성능과 높은 수준의 자기위치추정능력, 소나(SONAR, sound navigation and ranging, 초음파방출 탐지시스템)를 이용한 수중환경인식, 다양한 외부 환경을 견디는 강인한 기계 및 제어 기술 등이 필요하다. 또한 작업 공정상황에 알맞는 툴이 필요한데, 트랜치 커팅을 위해 휠커터, 체인커터, 워터제트 등이 필요한 것처럼 주어진 임무에 따라 필요한 도구를 툴이라 한다. 작업의 속도와 능률, 완성도를 높일 수 있는 툴은 중작업용 해양로봇의 임무를 신속-정확하게 수행하는 데 매우 중요한 역할을 한다.



#### IV. 스마트 해양 관측

무인 해양관측은 이동하는 플랫폼에 부착된 센서를 통해 해양의 시-공간적 변동성을 동시에 측정하는 라그랑지(Lagrangian) 방식과 고정된 플랫폼에 부착된 센서를 통해 시간적 변동만을 측정하는 오일러식(Eulerian) 방식으로 구분한다. 이동식 플랫폼에는 표류병부터 표층 뜰개(surface drifter)와 중층 뜰개 또는 플로트(subsurface float, e.g., ARGO floats)를 거쳐 최근 급격히 사용이 늘어나고 있는

정책  
 전문





“ 지구환경 연구지원 목적의 ONC 프로젝트 ”

캐나다 ONC(Ocean Networks Canada)는 2007년 빅토리아 대학의 과학발전 계획 중 하나로 운영되고 있는 프로젝트로서 지구환경에 대한 연구지원을 목적으로 해양 데이터의 수집·분석·관리를 위해 추진되고 있다. ONC는 NEPTUNE 및 VENUS 관측소를 통해 지진, 쓰나미에 대한 경고와 해양 상태, 해양 포유류 위치 및 선박 통행량에 대한 모니터링 정보 제공을 통해 정책적 의사 결정을 지원하고 있다. 조지아 해협 등 동북 태평양과 북극해 7개 해역에 2개 광역관측소 및 4개 지역관측소가 설치되어 있으며, 400개 계측기에서 5,000가지 이상의 센서를 24시간 운용하여 온라인으로 정보를 제공하고 있다(그림 14).



우리나라에서도 다양한 해양 현상을 관측하기 위해 고정식 플랫폼을 활용하거나 기관별/연구자별로 이동식 플랫폼을 활용하고 있지만, 국가 차원의 체계적인 통합시스템 구축과 일원화된 자료관리 및 공개가 중요하며 매우 시급하다. 스마트 해양 관측은 다양한 기획으로 시도되었고, 연구개발과제로도 추진하려는 노력이 있지만 실질적으로 아직까지 성과가 미미한 실정이다.

다기능 통신부이, AUV, Glider, Wave-glider, 해저관측 케이블 등을 활용한 해양공간 통합관측을 통해 실시간으로 송신 및 수집되는 해양 빅데이터의 효율적인 수집·관리 체계가 필요하며, 수집된 빅데이터를 융합하여 새로운 가치를 찾는 분석 기술이 개발되어야 한다. 특히, 스마트 통합관측은 4차산업 기술의 핵심인 인공지능, 수중로봇, 빅데이터, 해양 IoT 기술을 융합한 종합적인 해양관측을 의미하며, 해양공간에서의 시·공간 관측역량 확대, 실시간 모니터링, 빅데이터의 실시간 서비스, 인공지능 기반 스마트 분석 및 가시화 기술이 핵심이라 할 수 있다. 즉, 전통적인 고정식 해양관측 부이에 해양 IoT 기술을 접목함으로써 해양공간에서의 장기 모니터링, 모바일 해양로봇을 활용한 조사관측 영역 확대, 고정-이동식 복합관측, 시·공간 빅데이터의 스마트 서비스 기술로 대표할 수 있는 스마트 해양 관측에 대한 국가적

인 관심은 물론 추진 로드맵 구축과 함께 집중적인 투자가 시급하다.

### 참고문헌

- 한국로봇융합연구원, 2014: 국내외 수중로봇 산업 현황 및 전망.
- 한국해양과학기술원, 2014: 항만 수중공사용 무인 다목적 기계화 시공장비 개발 최종보고서.
- 한국해양과학기술원, 2017: 해양과학기지 항로준설 및 수중 모니터링을 위한 수중로봇 공용플랫폼 구축.
- 한국해양과학기술원, 2018: 해양로봇 ICT융합기술 개발사업 기획연구 최종보고서.
- 한국해양과학기술원, 2019: 해양개발용 수중건설로봇사업단-최종보고서.
- 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 2007: 차세대 심해용 무인잠수정 개발(1단계)-최종 연구보고서.
- 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 2008: 심해저 광물자원 집광시스템 및 채광 운용기술 개발.
- <https://www.mtsociety.org/>
- <https://www.who.edu>
- <https://oceanobservatories.org>
- <https://www.oceannetworks.ca/>
- <http://www.kiost.ac.kr>
- <http://www.kriso.re.kr>

# 국가대기오염측정망 운영과 명예대기관리원 제도

박지해 한국환경공단 대기측정망부 대리 jihaepark@keco.or.kr

- I. 국가대기오염측정망 운영
- II. 국내외 미세먼지 감시체계 구축
- III. 주민참여형 명예대기관리원 제도 운영
- IV. 맺으며

국가 차원에서 대기오염측정망 설치·운영을 시작한 이래로 한국환경공단은 전국의 대기질을 상시 측정하여 대기보전정책 수립의 기초자료를 확보해 왔다. 또한 국민이 쉽게 대기오염 현황을 파악할 수 있도록 Airkorea 홈페이지, 우리동네 대기정보(모바일 앱)와 같은 대국민 정보공개 서비스를 제공하고 있다. 올해에는 우리나라를 둘러싸는 형태로 도서, 접경, 항만, 선박측정망을 구축하여 국내뿐만 아니라 국외로부터 유입되는 미세먼지 감시체계를 도입하였다. 대기오염측정망이 점차 확대됨에 따라 측정소 인근 지역주민을 명예대기관리원으로 위촉하여 측정소 긴급상황 발생 시 공단 인력을 대체하여 신속한 대응이 이루어지도록 비상연락체계를 마련하였다. 명예대기관리원 제도를 도입함으로써 대기오염측정소를 안정적으로 운영하고 대기측정자료의 누락을 방지하여 대국민 대기질 정보를 원활하게 제공할 수 있을 것이다. 또한 대기오염도 측정뿐만 아니라 기상상황 변화에 따른 대기오염의 상관관계에 대한 연구를 추가적으로 수행한다면 대기오염의 확산과 경향 파악을 통해 대기오염에 대한 예방 및 방지 대책을 수립하는 기초자료로 활용이 가능할 것이다. ■

“ 국가대기오염측정망은 환경기준 설정, 대기보전정책 추진 위한 기초자료 생산 ”

## 1. 국가대기오염측정망 운영

환경부는 1973년 최초로 우리나라의 대기오염측정망을 설치하여 운영을 시작하였다[그림 1]. 2000년에 들어서부터는 대기환경보전법 시행령 제66조(권한의 위탁)에 의해 환경부에서 한국환경공단(이하 “공단”)에 국가대기오염측정망 유지관리업

[그림 1] 대기오염측정소 전경(외연도 측정소)



무를 위탁하여 현재에 이르기까지 전국의 대기오염도를 상시 측정하여 환경기준을 설정하는 등 대기보전정책 추진을 위한 기초자료를 활용하고 있다. 특히, 최근 미세먼지 및 초미세먼지에 대한 우려와 관심이 증대함에 따라 2014년 PM2.5측정망 구축 운영을 시작하였고, 2020년에는 국외로부터 우리나라에 유입되는 미세먼지를 측정·분석하기 위해 국외 유입 미세먼지 감시체계를 도입하였다[그림 2].

[그림 2] 대기오염측정망 운영체계(환경부, 2020)



현재 국가 및 지자체에서 전국 780개의 측정망이 운영 중이며, 각 지자체에서 운영 중인 측정망을 제외하고 국가배경농도, 교외대기, 유해대기물질측정망 등 197개의 측정망을 공단에서 운영·관리하고 있다[표 1].

측정항목은 SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>로 구성된 일반대기오염물질과 VOCs(휘발성 유기화합물), PAHs(다환방향족탄화수소), 중금속, 이온성분 등의 특수대기오염물질이며, 측정망별로 측정항목을 구분하여 실시간으로 농도를 측정하고 있다[표 2].

[표 1] 대기오염측정망 설치현황 (2020년 11월 기준, 에어코리아 표준 참고)

구분	총계	도시 대기	교외 대기	국가 배경	도로변 대기	항만	유해 대기	대기중 금속
합계	780	462	27	9	48	15	43	65
구분	국가+ 지자체	지자체	국가	국가	지자체	국가	국가	지자체

[표 1] 대기오염측정망 설치현황 (2020년 11월 기준, 에어코리아 표준 참고)

구분	운영주체	측정방법	설치목적	측정항목		
일반 대기오염측정망	도시 대기	지자체	연속	도시지역의 평균대기질 농도를 파악하여 환경기준 달성여부 판정	SO2, CO, NOx, O3, PM10, PM2.5, 풍향, 풍속, 온도, 습도	
	교외 대기	국가	연속	광범위한 지역의 배경농도 파악	SO2, CO, NOx, O3, PM10, PM2.5, 풍향, 풍속, 온도, 습도	
	국가 배경농도	국가	연속	국가적인 배경농도를 파악하고 외국으로부터의 오염물질 유입·유출 상태, 장거리이동 현황 등 파악	SO2, CO, NOx, O3, PM10, PM2.5, 풍향, 풍속, 온도, 습도	
	도로변 대기	지자체	연속	자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기질 파악	SO2, CO, NOx, O3, PM10, PM2.5, 풍향, 풍속, 온도, 습도※ 필요시 Pb, HC, 교통량 추가	
	선박 측정망	국가	자동	장거리 이동 미세먼지의 경로, 농도 등을 확인	PM2.5, BC(Black Carbon), 풍향, 풍속, 온도, 습도	
	항만 측정망	국가	자동	항만지역 등의 대기질 현황 및 변화에 대한 실태조사	SO2, CO, NOx, O3, PM10, PM2.5, 풍향, 풍속, 온도, 습도	
	특수 대기오염측정망	유해 대기물질	국가	수동 (월2회) → 순차적으로 자동전환 (VOCs)	도시지역, 주요 산단, 배경농도지역에서 특정유해대기물질에 의한 오염 실태 파악	VOCs(휘발성유기화합물) : 16종 PAHs(다환방향족탄화수소) : 16종
		대기 중금속	지자체	월5회 (매월2째주)	도시지역 또는 산단 인근지역에서 중금속에 의한 오염실태 파악	Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be, Al, Ca, Mg
		광화학 대기오염물질	국가	연속	도시지역의 오존생성의 원인물질인 휘발성유기화합물(VOCs)의 농도를 파악하여 오존오염현상을 규명하고 오존예보 등을 위한 기초 자료로 활용	NOx, NOy, PM10, PM2.5, O3, CO, VOCs(ethane 등 56종), 풍향, 풍속, 온도, 습도, 일사량, 자외선량, 강수량, 기압, 카르보닐화합물
		산성 강하물	국가	건성 : 6일 간격 습성 : 강수시 수은 : 2시간 연속 ※수은습성 침적량은 수동	대기로부터 오염물질의 건성침착량 및 강우·강설 등에 의한 오염물질의 습성침착량 파악	건성: PM2.5, PM2.5 중 이온성분(Cl-, NO3-, SO42-, NH4+, Na+, K+, Ca2+, Mg2+) 습성: pH, 이온성분(Cl-, NO3-, SO42-, NH4+, Na+, K+, Ca2+, Mg2+), 전기전도도, 강수(설)량 수은(총가스상 수은), 수은 습성침착량
		지구 대기	국가	연속	지구온난화물질, 오존층파괴물질의 대기 중 농도 파악	CO2, CFC(-11, -12, -113, -114), N2O, CH4
		PM2.5 성분 측정망	국가	1회/1일 (농도) 1회/6일 (성분)	인체위해도가 높은 미세먼지(PM-2.5)의 농도 파악 및 성분파악을 통한 배출원 규명	PM2.5 질량, 탄소성분(OC, EC), 이온성분(SO42-, NO3-, Cl-, Na+, NH4+, K+, Mg2+, Ca2+), 중금속성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be)
집중 측정망	국가	연속	국가 배경지역과 주요권역별 대기질 현황 및 유입·유출되는 오염물질 파악, 황사 등 장거리 이동 대기오염물질을 분석하고 고농도 오염현상에 대한 원인 규명 * 백령도, 수도권, 제주도는 장거리 이동 대기오염물질 감시	SO2, CO, NOx, PM10, O3, 풍향, 풍속, 온도, 습도, PM2.5 질량농도, 탄소성분(OC, EC), 이온성분(SO42-, NO3-, Cl-, Na+, NH4+, K+, Mg2+, Ca2+), 중금속성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be) 장거리이동 대기오염물질(불화수소, 시안화수소, 염화수소, 포름알데히드) 등		



“ 대기오염측정망 관측 자료는 정보공개서비스 통해 일반국민에도 공개 ”

또한 공단 기준으로 47개소의 측정소에 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수량 등 기상 측정장비가 설치되어있어 기상상황에 따른 대기오염물질의 이동경로와 농도 분석 시 참고 자료로 활용하고 있다. 기상측정장비 별로 3년 또는 5년마다 검정을 실시하고 측정소 현장을 방문하여 정기적으로 점검과 정도관리를 수행하고 있으며, 기상관측장비를 운영하는 공공기관 및 지자체를 대상으로 실시하는 데이터 품질진단에서 매해 ‘우수’ 등급을 부여받고 있다.

대기오염측정망에서 실시간으로 대기오염도를 측정한 결과는 내부적인 분석과 활용에만 그치지 않고 대국민 정보공개서비스를 통해 일반 국민에게도 제공된다. 공단에서 운영하는 누리집인 대기오염실시간공개시스템(이하 ‘Airkorea’)은 한일 월드컵의 열기가 한창이었던 2002년, 월드컵 경기장 주변 16개 지점을 대상으로 대기오염 정보를 공개하기 시작하였다. 이후 국민들의 대기질에 대한 관심 증대와 양질의 대기환경정보를 제공하고자 전국에 위치한 모든 측정소를 대상으로 대기오염도 공개를 확대하였다. Airkorea에서는 대기환경기준물질 6개 항목(SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)의 대기오염도를 인체 영향과 체감오염도를 반영한 통합 대기환경지수(CAI, Comprehensive Air-quality Index)에 적용하여 대기오염의 상황을 한눈에 알기 쉽게 전달한다. 또한 ‘우리동네 대기정보’를 스마트폰으로 확인하고 미세먼지 쉼터에 대한 정보를 얻을 수 있도록 앱을 개발하여 어린이·노약자 등의 정보접근 취약계층이 대기정보를 손쉽게 접할 수 있는 대국민 알림 서비스를

제공하고 있다(그림 3). 이러한 정보 공개서비스를 통해 유명 포털 사이트 검색창에 ‘미세먼지’만 입력해도 전국의 미세먼지 현황을 실시간으로 확인할 수 있도록 인터넷 서비스와 어플리케이션에서도 다양하게 활용되고 있다(공공데이터 활용 31,156건, 2019년 기준).

[그림 3] 공단에서 운영 중인 Airkorea와 우리동네 대기정보 모바일 앱



Airkorea 홈페이지 (초기화면)

실시간 자료공개 (24시간 농도, CAI 등 제공)

우리동네 대기정보 (모바일 앱)



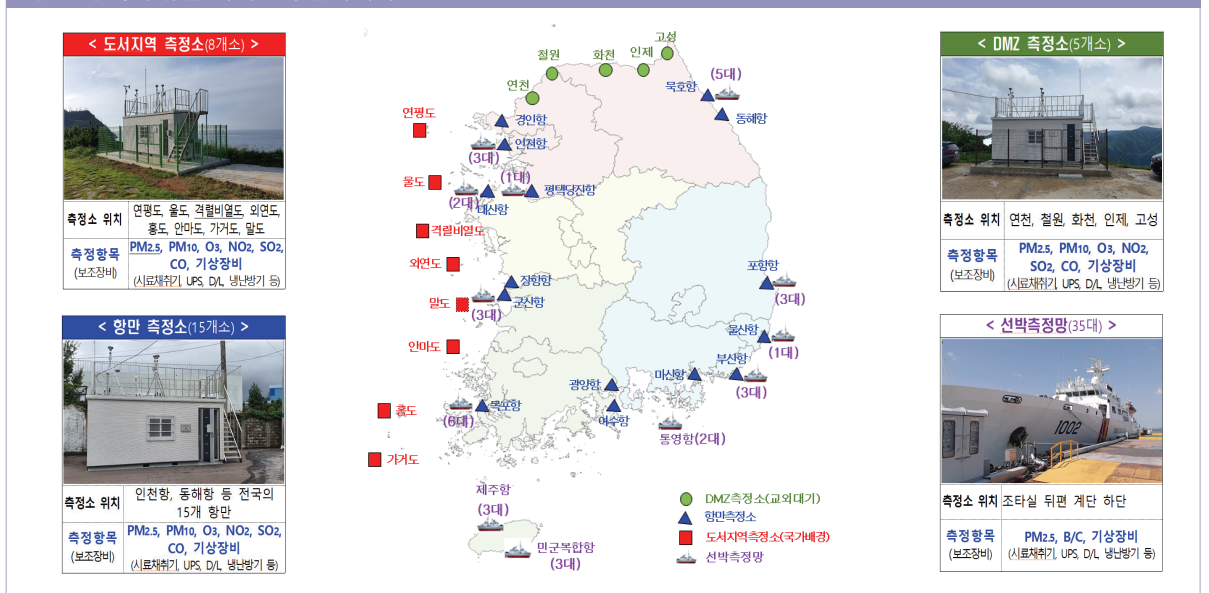
“ 2014년 한·중 환경 협력 MOU에 따라 대기질 실시간 관측자료 공유 ”

## II. 국내외 미세먼지 감시체계 구축

2019년 「재난 및 안전관리 기본법」이 개정되어 사회재난의 정의에 ‘미세먼지’가 추가되었고, 미세먼지 저감에 대한 정부 차원의 노력과 국민적 요구가 증대됨에 따라 ‘미세먼지 계절관리제’를 시행하고 있다. 미세먼지가 고농도를 보이는 시기인 12월부터 이듬해 3월까지 평소보다 강화된 미세먼지 배출 저감과 관리 조치로 미세먼지 강도와 빈도를 완화하기 위한 제도이다. 2019년에 이어 올해 제2차 계절관리제가 시행되었다. 제도를 통해 전국 배출가스 5등급 차량 중 저공해 조치를 취하지 않은 차량에 대해 수도권에서의 운행시간을 제한하고, 대형·공공사업장은 미세먼지 배출 감축에 자발적 참여를 유도한다. 또한, 석탄발전 가동정지가 확대되고공단에서는 영농폐기물 수거처리 활동을 지원하여 영농폐기물 불법 소각을 방지하고 있다.

공단에서는 국내에서의 미세먼지 저감 대책 수립뿐만 아니라 중국발 미세먼지에 대한 분석, 통계자료 활용을 통한 미세먼지 저감 조치의 일환으로 2014년 ‘한·중 환경협력 양해각서’에 따라 양국의 대기질 실시간 측정자료를 공유하고 있다(韓)공

[그림 4] 국외 유입 미세먼지 감시체계 분포



“ 국외 유입 미세먼지  
감시 측정망 63개소  
도입 ”

단↔(中)국가모니터링센터). 현재 기준 우리나라 전국 15개소의 대기측정자료와 중국 35개소의 대기측정자료를 공유하고 있으며, 양국의 예보정보도 공유하여 중국 발 황사와 미세먼지 모니터링을 수행 중이다.

또한 중국뿐만 아니라 우리나라와 밀접히 위치한 국외로부터 유입되는 미세먼지 농도와 이동경로를 파악하고 주요 배출원을 관리하기 위해 2020년 신규 측정망인 ‘국외 유입 미세먼지 감시 측정망’ 63개소를 도입하였다(그림 4). 우리나라를 둘러싸고 있는 형태로 서해에서부터 남해안-동해안-비무장지대(DMZ)에 이르기까지 도서, 접경, 항만, 선박측정망을 구축하였다. 연평도 등 서해상 8개 도서지역에 측정소를 구축하여 ‘장거리 미세먼지’를 감시하고 기존 백령도 측정망 1곳에 불과했던 서해상 측정망의 미비점을 보완하였다. 인천항, 동해항 등 전국 항만 15개소와 해양경찰청 대형경비정 선박 35개소의 측정소에서는 항만지역의 배출원인 선박과 해상의 미세먼지에 대한 영향을 파악하며, 연천, 철원 등 비무장지대(DMZ) 접경지역 5개소의 측정소에서는 북한지역과 군부대의 배출원을 감시하는 역할을 한다. 국외 유입 미세먼지 감시 측정소 구축으로 북한지역 및 중국 등 국외의 영향을 파악하고, 장거리 이동 미세먼지의 이동경로 추적 및 농도 경향 분석을 통해 미세먼지의 국내 영향을 사전에 파악하는 등 향후 능동적 초동 대처가 가능해질 것으로 판단된다.

### III. 주민참여형 명예대기관리원 제도 운영

2020년 신규 측정소 구축으로 전국의 국가 대기오염측정망이 확충됨에 따라 효율적이고 안정적으로 측정소를 운영하기 위해 공단에서는 2020년 9월, 주민참여형 「명예대기관리원」 제도를 도입하였다. 매년 태풍과 같은 자연재해로 대기오염측정소의 건물 누수, 장비파손 등의 피해가 발생하고 있으며, 현재 공단의 인력만으로는 측정소 피해 발생 시 현장을 방문하여 피해 상황을 파악하고 대응하기 위한 신속성에 한계가 있다. 또한 태풍과 같이 기상상황이 악화되었을 때 도서지역의 입도가 불가하거나, 접경지역이나 항만과 같이 일반인의 출입이 자유롭지 않은 지역에

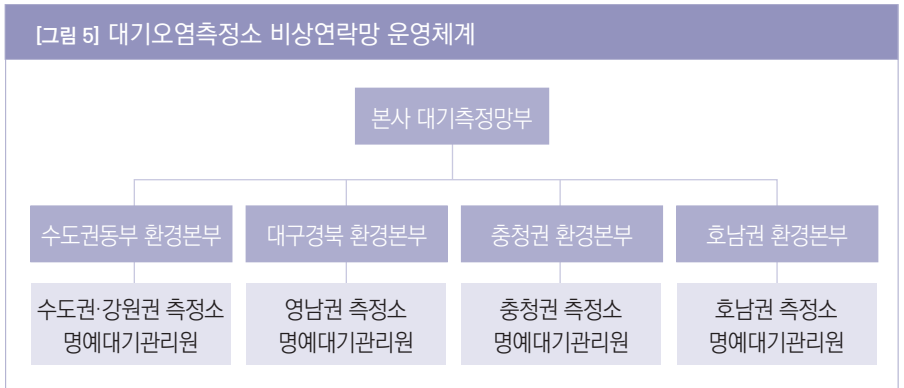
“ 명예대기관리원 제도로  
측정소의 신속 대응  
가능 ”

위치한 측정소 역시 주기적인 점검이나 즉각적인 수시 점검에 어려움을 겪고 있다. 따라서 상시 접근이 어려운 대기오염측정소에서 긴급상황 발생 시 신속한 현장 점검을 위해 대기오염측정소 인근 지역주민(또는 기관)을 명예대기관리원으로 위촉하여 측정소 피해상황에 대한 신속한 확인·점검조치를 수행하도록 비상연락체계를 마련하였다[그림 5].

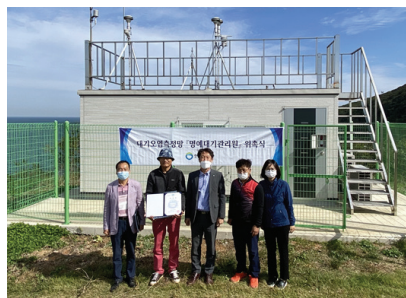
도서·산간지역 풍수해 등 피해가 발생하거나 기상상황 악화 등으로 공단

인력의 현장 방문이 불가할 때 즉각적인 원인파악과 조치가 불가능하고, 장기간의 측정기 미운영으로 대기오염측정에 공백이 발생할 수 있다. 그러나 명예대기관리원 제도를 효율적으로 이용한다면 피해 발생 시 신속한 대응이 이루어짐에 따라 측정소의 안정적인 운영이 가능할 것이다. 명예대기관리원의 특별한 자격요건은 없으며 대기오염측정소의 관할 공단 환경본부, 해양수산청, 군부대 등의 추천을 받아 환경보전 활동에 관심을 갖고 자발적으로 활동할 수 있는 측정소 인근 지역주민(또는 기관)은 누구나 참여할 수 있다. 명예대기관리원은 측정소 관할 공단 환경본부의 요청이 있을 때 화재, 풍수해 등 자연재해나 외부의 장애요인(인근 지역 공사, 소각, 야생동물에 의한 손상) 발생 시 피해 상황을 확인하고 점검하는 활동을 위촉 일로부터 2년간 수행하게 된다[그림 6].

[그림 5] 대기오염측정소 비상연락망 운영체계



[그림 6] 명예대기관리원 위촉식(외연도 및 격렬비열도 측정소)

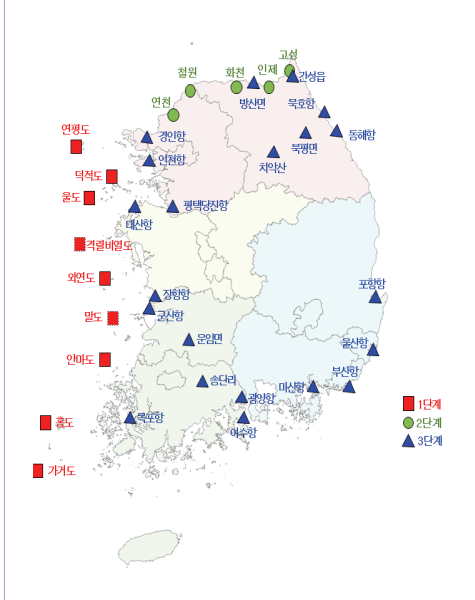


“ 국가대기질관리정책 수립 기초자료로 대기 오염 측정자료 활용 ”

명예대기관리원 위촉 대상 지역별로 도서지역 7개소(1단계), 접경지역 5개소(2단계), 향만-산간지역 21개소(3단계)로 구분하여 순차적으로 위촉할 예정이며, 현재까지

(2020년 11월 기준) 도서지역 측정소 9개소를 대상으로(도서지역 가거도 측정소 등 6개소, 산간지역 치악산 측정소 등 3개소) 명예대기관리원 10명이 위촉되었다(그림 7).

[그림 7] 명예대기관리원 위촉 대상 지역



#### IV. 맺으며

국가 차원에서 최초로 대기오염측정이 시작된 지 올해로 48년째이다. 1973년부터 현재에 이르기까지 한국환경공단은 대기오염측정망 운영계획에 따라 전국의 대기오염측정망을 체계적으로 확충·개선해왔다. 이에 공단은 측정망 운영을 통해 축적된 대기오염 측정자료를 국가대기질관리정책 수립의 기초자료로 활용할 수 있도록 지원하는 역할을 하였다. 또한 국내 대기오염도를

측정하는 것에 그치지 않고, 국외로부터 우리나라 대기질에 미치는 영향을 분석하고 오염실태를 파악하기 위한 측정망을 확대하였다. 이로써 국내외의 대기질을 한눈에 파악할 수 있는 시스템이 구축되었다.

한편, 전국적으로 확대 구축한 대기오염측정소를 안정적으로 운영하기 위해 명예대기관리원 제도를 도입하여 대기오염측정이 누락되지 않도록 빠른 시일 내에 정상가동하여 국민들에게 대기질 정보를 제공할 수 있게 되었다. 명예대기관리원으로 위촉된 지역주민의 대기환경보전에 대한 적극적인 참여를 독려하고, 대기오염 측정망 인지도 상승과 홍보 효과 또한 기대해볼 수 있겠다.

측정망이 확충될수록 측정소로부터 생산되고 있는 대기측정자료 역시 방대하게 증가하고 있는데, 이 측정자료에 대한 신뢰도와 정확도를 확보하기 위해 정기·수시 점검과 정도관리를 수행하고 있으며, 측정망의 종류별로 각각 다른 기상측정장비를 설치·운영하여 기상자료를 수집하고 있다. 대기오염도 측정뿐만 아니라 기상

“ 대기오염 개선 위해  
정부 정책과 민간  
대응조치의 합동  
노력이 필요 ”

변화에 따른 대기오염의 상관관계에 대한 연구를 추가적으로 수행한다면 대기오염의 확산과 경향 파악을 통해 대기오염에 대한 예방 및 방지 대책을 수립하는 기초 자료로 활용이 가능할 것이다. 코로나19로 인한 전세계의 인구 활동 감소로 대기질이 예전과 비교하여 나아졌다는 보도가 있었다. 인구 활동으로 인해 대기오염이 발생한다는 것이 입증된 셈이다. 우리나라 전역뿐만 아니라 전 세계적으로 미세먼지, 오존과 같은 대기오염물질로 인한 피해가 발생하고 있는 현재, 대기질 정보에 관심을 기울이고 대기오염을 개선하기 위해 각 정부 부처의 실효성 있는 정책 수립과 이에 따른 민간의 적절한 대응조치 등 합동 노력 필요하다.

### 참고문헌

- 환경부, 국립환경과학원, 2019.6: 대기오염측정망 설치·운영지침  
환경부 보도자료, 2020.11.30.: 푸른 하늘을 위한 모두의 발걸음, 미세먼지 계절관리제 시행  
한국환경공단, 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)

# 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측

손성원 산림청 국립수목원 임업연구사 ssw80@korea.kr

- I. 기후변화와 생물계절
- II. 국내·외 동향
- III. 산림식물계절 관측 네트워크
- IV. 식물계절 예측모델 개발 가능성
- V. 맺으며

식물계절 변화는 도시 및 자연 생태계에서 가장 쉽게 확인할 수 있는 기후변화 지표 중 하나이다. 산림청과 국립수목원 10개 기관은 2009년부터 우리나라 산림의 식물 계절현상 현장 관측 모니터링을 통해 DB를 구축하고 있으며, 이를 활용하여 최근 10년간 산림의 '생태시계'가 빨라지고 있음을 확인하였다. 또한 관측자료 기반으로 국내에서는 최초로 머신러닝 기반의 인공지능 기법을 적용한 식물계절 예측모델 개발 가능성을 확인하였다. 향후 지속적인 DB 구축이 이루어진다면 예측모델의 정확성 확보뿐만 아니라 기후변화에 따른 한반도 산림생태계 영향을 이해하는데 매우 중요한 자료가 될 것으로 기대된다. ■



“ 기후변화 인한 식물의 계절적 변화는 성장 기간 변화를 초래 ”

## I. 기후변화와 식물계절

식물계절(phenology)은 주기적으로 반복되는 식물의 생활사로 계절적 변화(개엽, 개화, 단풍, 낙엽 등) 현상을 바탕으로 기후 및 기상과의 관련성을 연구하는 학문이다. 기후변화에 의한 식물의 계절적 변화는 식물의 성장 기간 변화를 초래하여 광합성과 호흡을 통해 이루어지는 대기-생태계 사이의 물, 에너지, 탄소순환 과정의 평형상태를 변화시킬 수 있으며, 또한 수분 매개충, 동물 활동 등 산림생태계 전반에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 이처럼 식물계절 자료는 기후와 밀접한 피드백 관계를 가지는 산림생태계 변화를 이해하기 위한 핵심자료로 이용될 수 있으며 더불어 종다양성 보전을 위한 기초자료로도 활용될 수 있다. 식물계절 현상 관측은 크게 지상관측과 원격탐사관측으로 나누어 볼 수 있다. 원격탐사관측은 주로 인공위성이 측정하는 식생지수를 이용하여 식물의 계절활동을 추정하는 방식이다. 현재 인공위성을 이용하는 방식은 자료 및 방법이 고도화되고 30년 이상 관측자료가 축적되어 있어 기후변화에 따른 식물계절활동 변화를 이해하는데 큰 도움을 주고 있다. 하지만 위성자료를 이용한 경관단위의 식물계절 접근은 전반적인 육상생태계 변화를 보기에는 용이하지만 경관을 하나의 층으로 인식하기 때문에 산림지역의 다층적 식생구조의 변화를 반영하기 어렵다. 이에 반하여 지상관측은 주로 사람이 매일 수기로 기록하는 방식으로 식물 종 또는 개체별로 관측이 가능하여 산림생태계 내의 다양한 규모에서의 변화를 보기에 적합하다고 볼 수 있다.

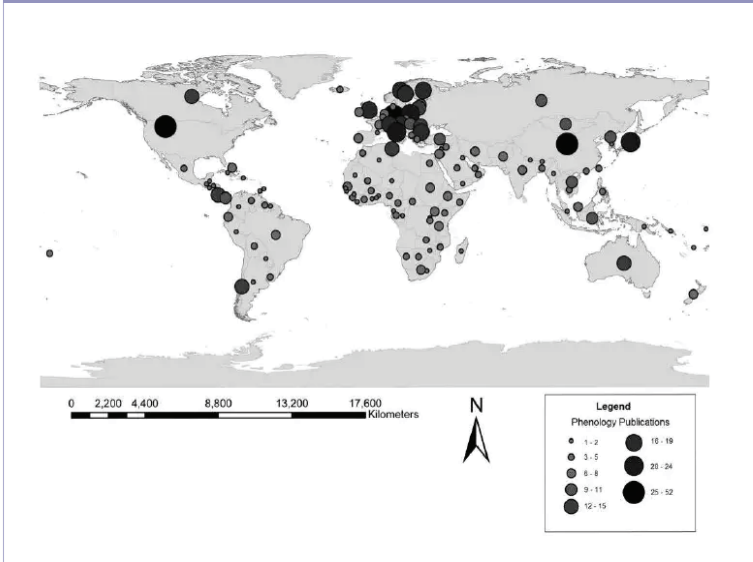
## II. 국내·외 동향

식물계절 관측은 전 세계에서 활발히 이뤄지고 있다(그림 1). 특히 미국과 유럽에서는 지역별 네트워크를 적극적으로 활용하여 자료공유를 통해 시너지 효과를 기대하고 있다. 미국의 대표적인 생물계절 관측 네트워크인 ‘The USA National Phenology Network(US-NPN)’는 2007년 설립되었으며, 식물뿐만 아니라 새, 포유류, 파충류 등 다양한 생물들의 계절현상 자료를 수집, 보관 및 정보공유를 하

“ 국내는 기상청 중심의 식물계절 관측 수행 ”

고 있다. USA-NPN은 정부기관(public agency), 과학자, 교육자뿐만 아니라 시민 과학자(citizen scientist) 등 다양한 그룹들이 네트워크에 참여하고 있다. 관측자

[그림 1] 전 세계 관측 기반의 식물계절 연구 및 네트워크 현황(Fitchett et al., 2015)



료와 정보는 National Coordinating Office에 의해 표준화되어 관리되고 있으며, Natures Notebook이라는 프로젝트를 통해 관측방법, 자료습득 및 관리체계에 대한 지속적인 교육이 이루어지고 있다. 이렇게 다양한 방법으로 관측된 생물계절 관측자료들은 NPDB(National Phenology Database)에 기록·디지털화하여 연구자들에게 공유된다.

유럽의 대표적인 식물계절 관측네트워크는 ‘Pan European Phenology

Database(PEP-725)’이다. 1751년 칼 린네가 표준화한 식물계절 모니터링 방법을 기반으로 자료가 수집되기 시작했고, 1950년을 기점으로 유럽의 여러 국가가 참여하여, 현재는 20여 개의 정부기관과 교육기관이 네트워크에 참여하고 있다. 역시 관측된 자료들은 서로 공유하고 비교·분석할 수 있도록 BBCH 기준(Zadoks et al., 1974)에 따라 수집, 관리되고 있다. 2013년까지 20,375개 장소에서 254종의 식물계절현상이 38단계로 구분되어 기록되었다.

국내에서는 기상청을 중심으로 식물계절 관측이 주로 이루어져 왔다. 기상청의 개화시기 관측자료는 국내에서 가장 긴 관측기록을 가지고 있으며 매화, 개나리, 진달래, 벚나무, 복숭아, 배나무, 아카시아 등을 대상으로 90년 이상 관측이 이루어져 왔다. 하지만 관측 대상식물이 매우 제한적이며, 주로 기상대를 중심으로 관측이 이루어지고 있어 산림이 60% 이상을 차지하는 한반도의 육상생태계를 대변하기에는 다소 한계가 있다. 또한, 국내에서 산림지역에 자생하는 식물을 대상으로 한 계절 관측자료도 매우 제한적이다. 일부 산림지역을 대상으로 관측이 이루어지고 있

“ 산림청은 한국생물  
계절관측네트워크로  
우리나라 식물계절  
현상을 관측 ”

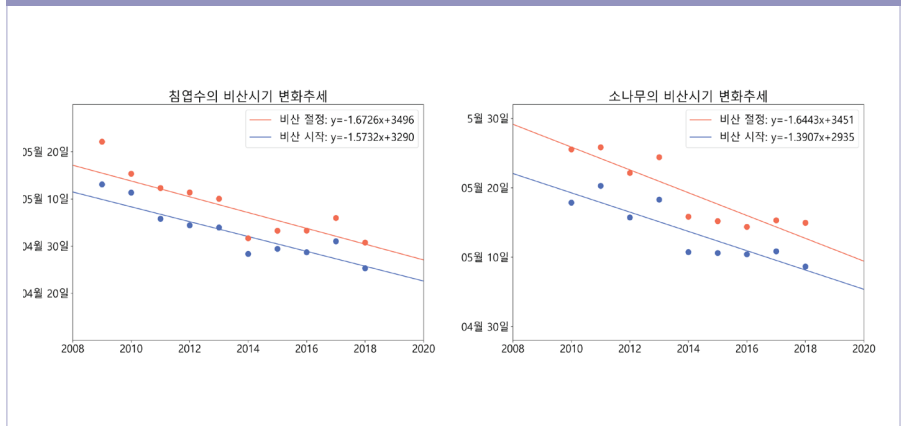
으나 관측 기간이 짧고 관측장소와 대상식물의 수가 적어 기후변화에 따른 우리나라 전반의 산림생태계 영향을 분석하는 데는 한계를 가진다.

### III. 산림식물계절 관측 네트워크

산림청은 「기후변화 취약 산림식물종 보전·적응 사업」<sup>1)</sup>의 한국생물계절관측네트워크(Korea National Phenology Network, K-NPN)를 통해 2009년부터 우리나라 산림에 자생하는 식물을 대상으로 식물계절 현상을 관측하고 있다. 특히 전문요원에 의한 현장관측을 원칙으로 하고 있으며, 이를 위해 각 지역을 대표하는 국·공립수목원(국립수목원, 강원도립화목원, 경기물향기수목원, 충북 미동산수목원, 충남 금강수목원, 대구수목원, 경남수목원, 전북 대아수목원, 전남 완도수목원, 제주 한라수목원) 10개 기관이 참여하고 있다. 2010년부터 지금까지 전국 50개의 관측지역에서 256종을 대상으로 총 12개(잎눈파열, 개엽, 성장시작, 단풍, 낙엽, 꽃눈파열, 개화시작, 개화, 낙화, 화분비산, 열매생성, 열매성숙) 항목에 대한 약 82,000여 건의 식물계절현상이 관측되었다. 가장 많은 관측이 이루어진 식물은 진달래였으며 생강나무, 산철쭉 순으로 식물계절 관측자료가 수집되었다(그림 2).

관측된 자료 중에서 우리나라 산림을 대표할 수 있는 낙엽활엽수 20종과 침엽수 4종의 지난 10년간의 식물계절 현상 변화 경향을 분석해 보았다. 현장 관측자료의 신뢰성 검증을 위해서 인공위성에서 관측된 자료와 교차

[그림 2] 권역별/관측 항목별 식물계절 현상 관측자료 현황



1. 기후변화 취약 산림식물종 보전·적응 사업: 산림청 주관으로 10개 국·공립수목원이 참여하고 있으며, 기후변화에 따른 한반도 산림의 영향을 분석·예측 및 취약 식물종 보전 등 한반도 산림의 기후변화 대응 전략을 마련하는 목적으로 2009년부터 수행되고 있다.

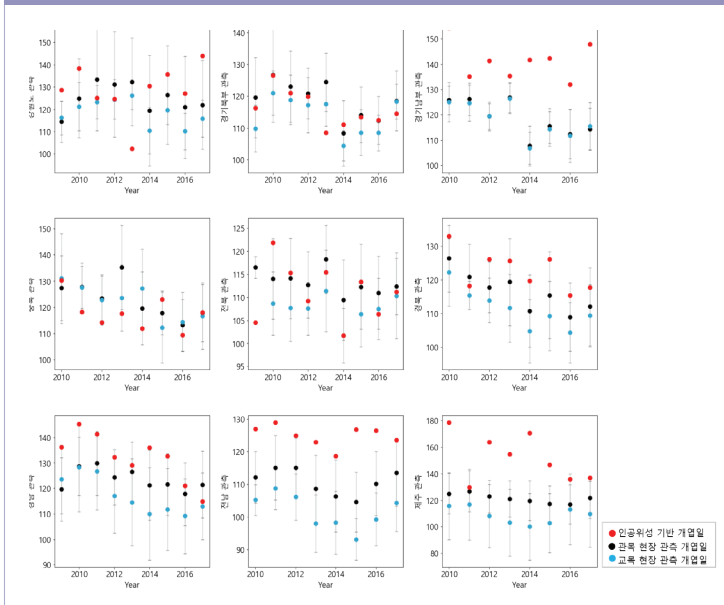
“ 봄의 계절현상이 빨라지고, 가을은 늦어져 연평균 생장기간이 증가 ”

비교를 수행한 결과, 두 개 관측값은 연도별로 매우 동일한 패턴으로 나타나 관측 자료의 신뢰성은 충분하다 할 수 있다(그림 3).

[표 1] 수행기관별 식물계절 현상 관측 자료 수집 현황

관측기관	관측권역	최초관측	관측종	총 관측수
국립수목원	경기북부 권역	2009~	124	8,107
강원도립화목원	강원 권역	2009~	97	6,884
물향기수목원	경기남부 권역	2010~	156	9,261
미동산수목원	충북 권역	2009~	122	7,901
금강수목원	충남 권역	2014~	82	2,976
대구수목원	경북 권역	2009~	97	4,566
경남수목원	경남 권역	2009~	146	10,082
대아수목원	전북 권역	2009~	130	8,764
완도수목원	전남 권역	2010~	142	9,228
한라수목원	제주 권역	2010~	170	14,850

[그림 3] 식물계절현상 현장 관측값과 위성 관측값 비교(2015)

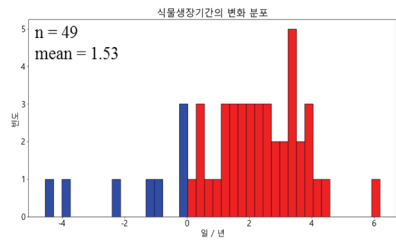
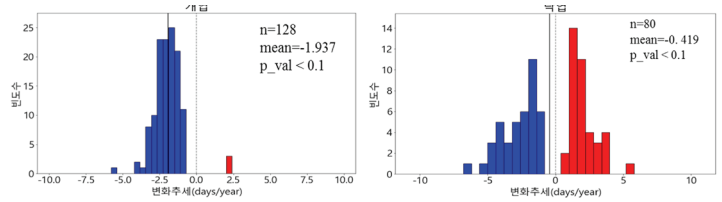


한반도 산림에 자생하는 낙엽활엽수 20종은 지난 10년간 봄철 계절현상인 개엽과 개화가 각각 연평균 13.4일, 9.4일로 빨라지고 있었으며, 가을철 계절현상인 단풍은 연평균 4.2일로 늦어지는 것으로 확인되었다. 특히 봄의 전령으로 알려진 진달래(*Rhododendron mucronulatum* Turcz.)의 개엽은 연평균 13.5일 빨라졌으며, 단풍은 연평균 2.5일 늦어졌다. 우리나라 산림의 대표적인 관목류인 산철쭉(*Rhododendron yedoense* Maxim. f. *poukhanense* (H.Lév.) Sugim. ex T.Yamaz.) 역시 개엽은 연평균 10.6일 빨라지고, 단풍은 연평균 10.1일 늦어졌으며, 우리나라 전국의 산림에 대부분 자생하고 있는 생강나무 (*Lindera obtusiloba* Blume)의 경우도 개엽은 무려 연평균 13.8일, 단풍은 연평균 8.2일 늦어지고 있었다. 이처럼 봄의 계절현상이 빨라지고 가을의 계절현상이 늦어짐으로써 낙엽활엽수 20종의 1년 평균 생장기간은 연평균 1.8일 정도 길어지는 것으로 나타났다(그림 4).

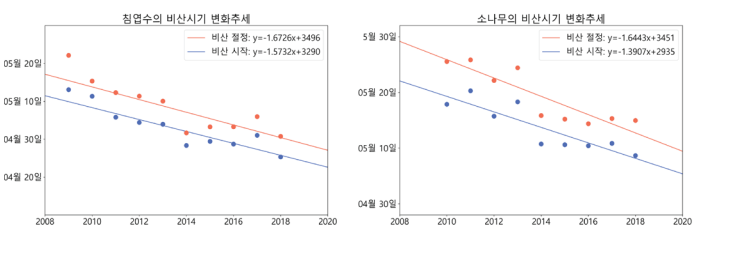
“ 식물계절 변화는 기온, 위도, 고도와 높은 상관관계 ”

낙엽활엽수 뿐만 아니라 침엽수도 비슷한 경향을 보여주었다. 특히 봄철 불청객인 송화가루가 날리는 시기가 점점 빨라졌는데, 우리나라 산림의 대표 침엽수 4종(소나무, 구상나무, 잣나무, 주목)의 화분비산 시작시기와 화분비산 절정시기가 각각 연평균 1.67일 1.57일로 빨라지는 것으로 나타났으며, 특히 전국적으로 가장 많은 관측지점이 있는 소나무의 경우 화분비산 시작과 절정이 모두 연평균 1.39일, 1.64일로 빨라졌다(그림 5). 이러한 현상들은 특히 기온, 위도, 고도와 매우 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 특히 봄철 평균 기온은 개엽과 개화에 매우 밀접한 상관관을 보이고 있으며, 봄철 평균기온이 1℃ 올라갔을 때 개엽은 3.86일 빨라지는 것으로 나타났다. 실제로 최근 10년 동안 한반도의 봄철 평균기온은 약 1.96℃ 상승한 것으로 확인되고 있다.

[그림 4] 지난 10년간 산림의 식물계절 변화 경향(낙엽활엽수 20종 평균)



[그림 5] 소나무 등 침엽수의 화분비산 시기 변화



#### IV. 식물계절 자료를 활용한 예측모델 개발(머신러닝 기법 적용)

앞서 살펴보았듯이 식물계절현상은 기후변화의 지표(indicator)로 매우 유용한 자료이다. 따라서 장기적인 데이터가 축적된다면 현상에 대한 분석뿐만 아니라 다양한 예측모델 개발에도 활용될 수 있을 것이다. 지금까지 대부분의 식물계절 예측모델들은 유효적산온도(growing degree days, GDD)나 냉방도일(cooling degree days, CDD) 계산 등과 같이 전통적으로 선형회귀 모델을 주로 사용해 왔

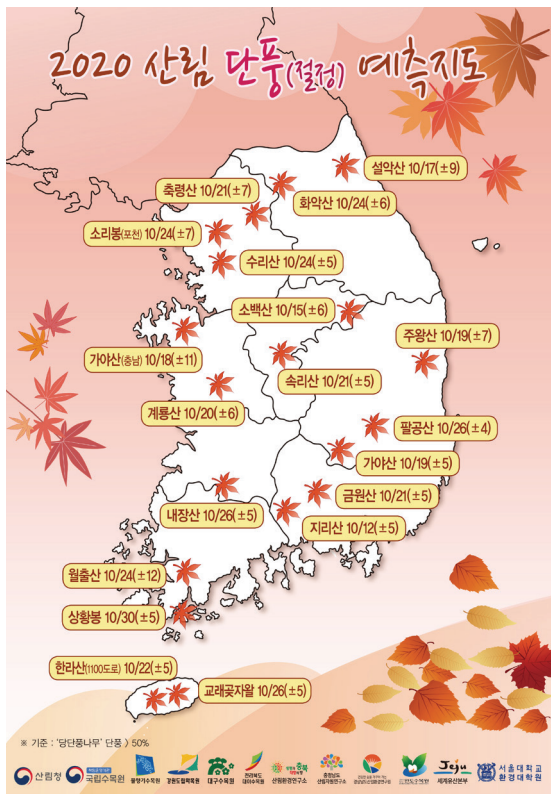
“ 비선형적 관계로  
전통적 예측모델  
정확성에 한계 ”

다. 하지만 식물계절과 환경 요인들 사이에는 단순 선형 관계뿐만 아니라 다양한 비선형적 관계도 존재하고 있어, 이러한 전통적 예측모델들은 정확성에 한계를 가질 수밖에 없었다. 이런 한계를 극복하기 위해, 최근 인공지능 기법을 예측모델에 적용하는 시도가 이루어지고 있다. 그 중, 머신러닝은 인공지능 기술의 대표적인 한 분야로 알고리즘을 통해 데이터를 스스로 분석하고 학습한 후 그 내용을 기반으로 판단이나 예측을 한다. 머신러닝은 복잡한 상호작용을 하는 고차원, 비선형적인 자료를 다루는데 능통하기 때문에 식물계절 예측에 유용하게 사용될 수 있다.

지금까지 구축된 식물계절 관측 DB를 활용하여 식물계절 예측모델 개발에 머신러닝 기법을 적용해 보았다. 우리나라 산림의 대표적 관목류인 당단풍나무(*Acer pseudosieboldianum* (Pax) Kom.)의 단풍 예측을 위해 머신러닝 기법 중 랜덤포

레스트(random forest) 알고리즘을 적용하였다. 랜덤포레스트 알고리즘은 높은 예측력을 가지는 동시에 모델이 데이터에 과적합 되는 것을 방지한다. 예측 변수로는 여름철 평균 온도(6,7,8월), 고도, 개엽일을 사용했다. 1년에 한 번 관측할 수 있는 자료의 특성상 관측자료가 200개 정도로 개수가 많지 않았기 때문에, 관측자료의 손실을 최소화하기 위해 모든 관측자료를 모델의 학습과 검증에 이용할 수 있는 k-fold 교차 검증 방법을 이용하여 모델을 학습시켰다. 먼저 2009년부터 2017년까지의 데이터를 이용하여 모델을 개발하고 이 모델을 이용하여 2018년 단풍일을 예측한 후 실제 관측값과 비교해보았다. 2018년 당단풍나무의 단풍 예측 평균값은 실제 관측 평균값과 단 2일의 차이를 보여 매우 높은 예측력을 보였다. 이러한 과정을 통해 2020년 당단풍나무의 단풍예측지도가 작성되었다(그림 6).

그림 6 머신러닝(기계학습)을 이용한 단풍예측지도





“ 전통적 예측모델  
개선 위해 다양한  
환경요인 추가한  
머신러닝기법 활용 ”

머신러닝을 이용한 당단풍나무의 단풍일 예측을 통해 식물과 기후 사이의 비선형적인 관계를 고려할 수 있는 식물계절 예측모델 구축의 발판을 마련했다. 이 모델에서는 예측변수로 온도, 위도, 고도 단 세 가지만 이용했지만 일사량, 강수량, 토양 수분도 등도 가을 식물계절에 영향을 주는 주요 환경요인들로 알려져 있다. 향후에는 더 많은 환경요인 추가를 통해 모델의 예측도와 신뢰성을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이 모델의 경우 지역적 차이를 고려하지 않고 10개 국공립 수목원에서 관측하고 있는 모든 당단풍나무 자료를 사용했지만 제주도의 경우 아열대 기후대와 온대의 전이대에 위치하고 있으며, 완도 수목원의 경우 해양의 영향을 많이 받아 타 지역에 비해 높은 평균온도 값을 보인다. 따라서 추후에는 기후대에 따라 관측자료를 구분하여 더 세밀한 예측모델을 구축할 필요성이 있다.

## V. 맺으며

신기후체제(Post-2020)가 논의된 파리협정에서 채택된 제5차 보고서에 따르면, 1880년부터 2012년까지 133년간 지구의 평균온도는 0.85℃ 상승했으며, 앞으로 온실가스 감축 노력을 하지 않는다면(RCP 8.5시나리오) 2100년 평균온도는 3.7℃, 해수면은 63cm 상승할 것으로 예측하고 있다. 이처럼 기후변화는 이제 사실 여부 논쟁을 떠나 우리 지구가 직면한 가장 도전적인 환경 과제인 것은 분명해 보인다. 기후변화는 우리 생활 곳곳에서 다양하게 영향을 미치고 있지만, 정확하게 원인을 진단하는 대응기술 개발은 아직까지 더딘 것이 현실이다. 따라서 기후변화를 지속적으로 관측하고 대응하기 위한 노력들은 무엇보다 중요하다.

식물계절의 변화는 도시 및 자연 생태계에서 가장 쉽게 확인할 수 있는 기후변화의 지표 중 하나로 중요한 역할을 가진다. 또 식물계절 현상은 성장활동의 시작과 끝을 포함하는 생태계의 시간개념을 포함하고 있다. 식물계절을 관측하고 이해하는 것은 증발산과 지표면 거칠기 등 다양한 방면으로 대기와 밀접한 피드백 관계가 있는 육상생태계의 시간을 이해할 수 있다. 마지막으로 식물계절 관측으로 인한 데

“ 기상청의 장기 식물  
계절자료들은  
도시 기후변화 영향  
예측에 매우 유용 ”

이터들은 기후변화로 인한 적합한 종별 보전정책을 수립함으로써 기후변화 대응을 위한 귀중한 자료로 사용될 수 있을 것으로 보인다.

그런 의미에서 기상청에서 장기간 관측되고 있는 식물계절 자료들은 도시지역의 기후변화 영향을 예측할 수 있는 매우 귀중한 자료이다. 이와 더불어 우리 국토의 60% 이상을 차지하는 산림에서의 자연식생 식물계절 자료가 함께 구축된다면 기후변화에 따른 한반도의 육상생태계를 이해하고, 대응 전략을 마련하는데 핵심 자료가 될 것으로 확신한다. 이를 위해서는 산림청과 기상청의 유기적인 협업이 필요하다.

# 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측기술

홍석영 농촌진흥청 국립농업과학원 syhong67@korea.kr

- I. 농업원격탐사
- II. 농업환경관측
- III. 작황관측
- IV. 맵으며

정부 차원에서 쏠 산업 디지털 혁신을 위한 'D.N.A.(Data-Network-AI) 생태계 강화가 강조되는 가운데 농업 분야의 디지털 전환이 요구되고 있다. 기후변화와 동식물 전염병의 확산으로 AI·센서·로봇 등 첨단기술을 접목한 자동화와 정보 수집 및 관측의 디지털 전환이 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 이에, 드론·위성영상을 활용하여 농업환경과 작황을 비트(bit)의 세계로 구현하는 디지털화는 국내외 작황 변동, 농업재해, 병충해 등의 위기에 선제적으로 정보를 수집하는 수단으로 자리매김하고, 농업정책과 영농현장에서 체계적인 의사결정 수단이 될 것이다. 농촌진흥청이 추진하는 농업분야 위성개발 사업과 드론의 농업적 활용 사업을 통해 디지털 관측기술과 서비스를 개발하고 민간의 참여를 확대하여 농산업 분야 발전에 기여하고자 한다. ■

“ 농업원격탐사는 빛과 열 등 물리적 매체를 활용하여 농업관측에 활용되는 기술 ”

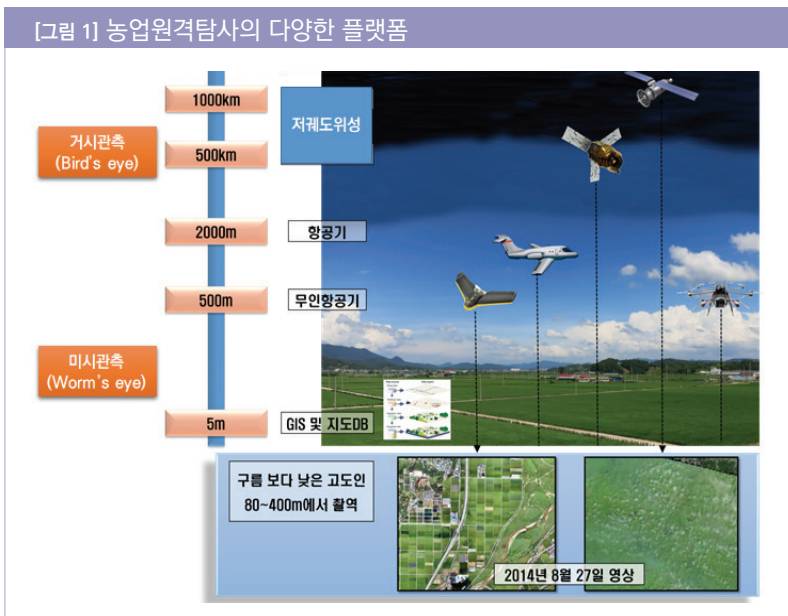
## 1. 농업원격탐사

농업원격탐사는 빛과 열 등 물리적 매체를 이용하여 토양, 물, 작물 등을 대상으로 태양에 대한 분광반사(reflectance)와 지구복사에너지 방사(emission)의 강약을 측정하고, 그 물리적 신호를 생물현상으로 해석하는 과정이다. 즉, 빛의 특성을 이용하여 경지면적·재배면적 등 농경지 이용, 토양수분 및 농업재해 모니터링, 국내의 작물의 생육상황과 진척도를 모니터링하는 농업관측(observation)에 활용되는 기술이다. 지표면에 도달하는 전자기에너지 스펙트럼의 파장(wavelengths) 영역을 감지하는 다양한 센서(sensors)를 이용하여 넓은 면적을 주기적으로 촬영하여 시·공간 데이터를 축적할 수 있다. 농업관측에는 가시광선(visible), 적외선(infrared)이 가장 많이 활용되고 구름 낀 날에도 데이터 획득이 가능한 극초단파(microwave)도 유용하게 활용되고 있다.

농업분야 식생에 대해서는 식물 잎 엽육세포(mesophyll cell)의 엽록소가 가시광선(청색광·적색광)을 흡수하여 광합성을 하고, 책상조직(palisade parenchyma)에서 근적외선을 반사하는 광반응 원리에 따라 엽록소 및 엽질소 함량, 엽면적지

수, 바이오매스 및 수량을 추정한다. 한편, 물의 에너지 흡수, 대기의 산란, 토양·물의 반사특성과 복사온도 등의 원리에 따라 토지 이용, 표면온도, 수질, 수표면, 토양수분 등을 추정한다. 이들 센서를 탑재하는 플랫폼은 고도에 따라 다양하게 나뉜다. 우선 정지궤도(~36,000km)와 저궤도(500~1,500km)에서 지구를 조망·통시하며 지구, 국가, 지역단위의 관측을 하는 위성 거시관측(새의

[그림 1] 농업원격탐사의 다양한 플랫폼

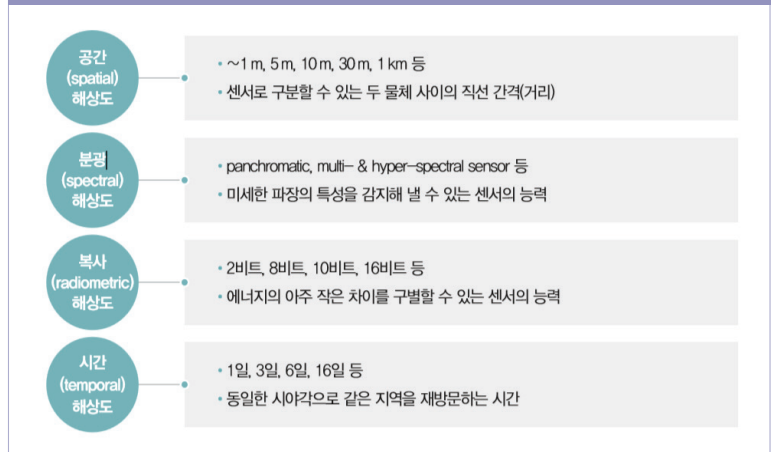


“ 영상의 해상도는 공간, 분광, 복사, 시간에 따라 4종으로 구분 ”

눈, 망원경)이 있다. 또한, 구름 아래에서 수십 미터(m)에서 수 킬로미터(km) 높이로 현장에서 세밀하게 필지·들녘단위로 지표면을 촬영하는 드론·항공기 미시관측(벌레의 눈, 현미경)이 있다(그림 1). 활용하고자 하는 목적과 공간규모에 맞게 플랫폼과 센서를 선택하여 데이터를 수집한다.

영상의 정밀도 또는 선명도의 척도가 되는 해상도(resolution)은 공간, 분광, 복사, 시간에 따라 4종류로 나뉜다(그림 2). 공간해상도를 높이는 경우 시간해상도는 낮아지는 등 센서 설계에 있어 해상도간 요구가 상충되기도 하므로, 주로 관측하고자 하는 대상이나 목적에 따라 센서를 디자인하고 활용하게 된다.

[그림 2] 영상의 정밀도·선명도를 나타내는 해상도(resolution)의 개념과 종류



드론 또는 위성영상을 통해서 지표면 현상(phenomena)의 파악은 가능하지만 현장에 대한 경험과 조사 자료가 없는 상태에서 그 원인에 대해서는 알기 힘들다는 점과 날씨 등의 영향으로 원하는 시기에 영상을 촬영할 수 없는 경우가 많다는 것은 관측의 제한요인으로 작용한다. 촬영된 영상뿐만 아니라 현지 조사자료 및 통계, 지식 및 전문성, 분석 알고리즘 및 시스템이 함께 작동해야 농경지 또는 작물의 상태에 대한 정확한 해석이 가능하다.

## II. 농업환경 관측

토지, 토양, 물을 대상으로 광학 또는 레이더 영상을 이용하여 농경지 분류와 면적 산정, 표면온도, 토양수분, 토양양분, 병충해, 농업재해, 농업용수 수질 등을 파악할 수 있다. 농업에 활용된 몇 가지 예를 들어 살펴해보도록 하겠다.

“ 벼 재배면적 추정  
레이더 위성 영상,  
벼 흰잎마름병 피해  
추정에 드론 활용 ”

### 가. 레이더 위성 영상을 활용한 벼 재배면적 추정

전국 농경지를 대상으로 정부 차원의 미곡 생산 조정을 위한 벼 재배면적을 조기에 파악할 수 있는 기술을 개발하기 위해, 벼 이앙 전후에 촬영된 레이더 위성(Sentinel-1)의 시계열 후방산란계수 영상분석을 통해 관개 논에서 자라는 벼 재배면적을 추정하였다. 마이크로파(microwave)를 송·수신하여 만든 레이더 영상은 구름을 투과할 수 있는 긴 파장대역(long wavelengths)을 이용하여 기상 조건에 큰 영향 없이 지상을 관측할 수 있으며 수분에 민감한 특성을 가지고 있다. 벼 이앙

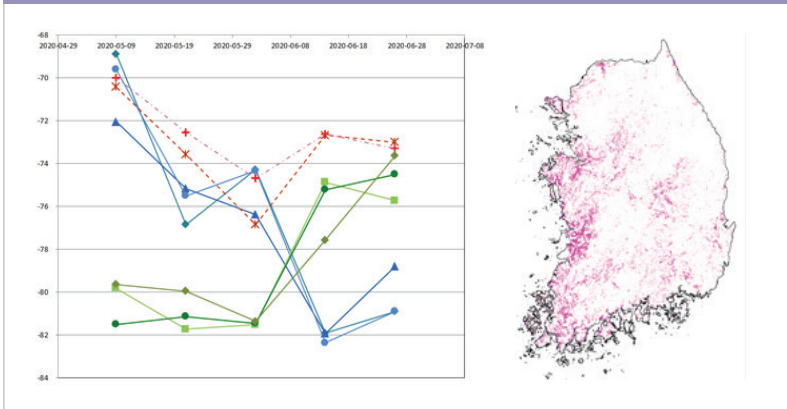
을 위해 논에 관개(irrigation)를 하면 물의 영향으로 레이더 영상 자료값(후방산란계수)은 크게 감소했다가 벼가 성장하면서 다시 증가한다. 시계열 각 영상별로 관개한 벼논과 타 작물을 분류하는 임계값을 정하여 “1(true)”과 “0(false)”값으로 분류하였고, 이들 분류영상을 시계열로 중첩하여 화소별로 벼생물계절에 따라 “1”값이 1회 이상

나오는 필지를 벼 재배지로 판단하여 면적을 산정하였다. 영상에서 논으로 활용될 모집단으로 1차 증화한 후, 레이더 영상에서 벼 재배지를 분류하였다.

### 나. 드론 영상을 활용한 벼 흰잎마름병 피해 추정

벼의 생육 및 수량 피해를 주는 병충해 중 하나인 흰잎마름병 피해를 감지하고 병반률을 파악하기 위하여 농촌진흥청 구내 시험포장에서 인위적으로 시기별로 병을 접종하였다. 그리고 드론을 활용하여 가시-근적외광선 영상을 주기적으로 촬영하였다. 벼 흰잎마름병(K3a균계) 감수성 품종인 신동진, 밀양23호의 병반률과

[그림 3] 벼 이앙기 전후 레이더 영상 시계열 후방산란계수 변화(왼쪽)와 벼 재배지 분류(오른쪽)





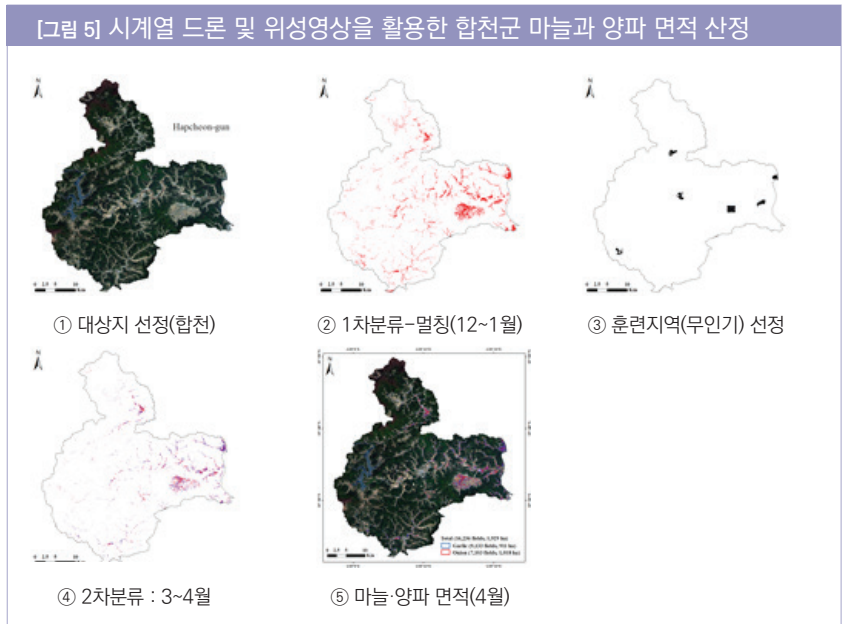
9월 상순의 식생지수(NDVI)는 음의 상관성(0.8이상)이 높게 나타났다. 벼 흰잎마름병 발생 포장의 식생지수 값 차(difference)를 이용하여 병 발생 분포를 추정할 수 있었다. 흰잎마름병에 감수성인 벼 품종의 경우는 기상조건이 달라져도 드론 영상정보를 이용하여 병 발생 추정이 가능하였다(그림 4).



#### 다. 드론과 위성영상을 활용한 마늘·양파 재배면적 추정

우리나라에서 마늘과 양파는 가장 많이 소비되는 양념채소류다. 재배면적과 작황에 따라 가격이 결정되고 이에 따라 농가의 소득과 국민이 체감하는 물가가 결정된다. 정부의 수급조절 정책과 가격안정을 위해서는 정확한 면적과 작황의 파악이 요구된다. 유럽연합(EC)에서

발사한 Sentinel-2A(공간해상도 10m) 광학영상을 이용하여 주산지인 합천군의 양파·마늘 재배면적을 추정하였다. 가을에 파종·정식한 후 비닐 피복하는 재배특성을 이용하여 12월~1월에 취득한 겨울 영상에서 멀칭<sup>1)</sup> 된 부분을 1차 분류하였다. 3월~5월 영상의 시계열 분광반사특성을 이용한 '계층기반 기계학습(SVM,



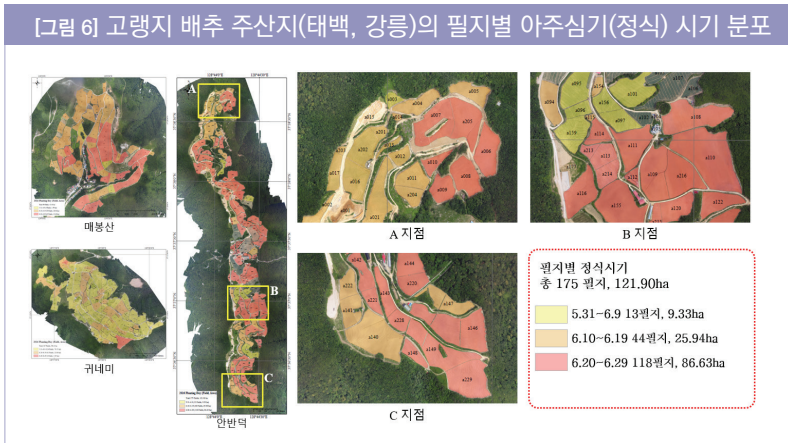
1. 멀칭: 작물의 잎이나 줄기, 짚, 기타 유기물이나 폴리에틸렌 필름 등을 자상에 덮어 우적침식을 방지하고, 토양 수분보존, 온도조절, 표면고결 억제, 잡초방지, 유익한 박테리아의 번식 촉진 등의 효과를 얻는 농경법(출처: 위키백과)

“ 드론 활용한 배추 정식일자 추정 ”

support vector machines) 분류기법'으로 2차 분류하여 재배면적을 산정하였다. 이때, 3월에 취득한 무인비행체 영상으로 분류한 마늘·양파 재배필지 정보는 위성 영상 분류를 위한 훈련자료(training samples)로 활용하였다. 합천군 양파·마늘 재배면적은 1,076ha(7,343필지), 967ha(6,997필지)로 분류되었고, 4월 상순부터 추정이 가능하였다(그림 5).

라. 드론영상을 활용한 고랭지 배추 재배시기 추정

[그림 6] 고랭지 배추 주산지(태백, 강릉)의 필지별 아주심기(정식) 시기 분포



고랭지 배추는 작황에 따른 가격 변동성이 매우 큰 작목으로, 강릉 안반덕과 태백 매봉산, 귀네미 주산지에서 여름배추 재배면적의 5~7%가 재배되는데 8~9월 출하량의 60% 이상을 차지하고 있어 면적과 재배시기 추정이 중요하다. 배추의 생육단계는 파종기, 육묘기, 정식기, 생육기, 수확기로 나눌 수 있

는데 파종 후 20~25일에 본밭에 정식하고, 정식 후 60~65일의 생육기를 거쳐 수확에 이른다. 즉 필지의 정식시기를 알면 해당 필지의 수확시기를 추정할 수 있다. 필지별 작황 비교는 동일시기보다는 정식이후 날짜(day after planting; DAP)가 동일한 식생지수를 이용하는 것이 정확한 평가 기준으로 생각된다. 따라서 정식시기의 추정은 중요한 작황 평가 요인이기도 하다. 드론을 활용하여 수집한 영상과 현장 표본조사 필지의 정식일자를 상호 대조하여 분석한 결과를 토대로 추정식을 도출하였다. 그 결과를 재배단지 전체에 적용하여 필지별 정식시기를 추정하였다(그림 6).

마. 위성영상을 활용한 논벼 증발산량 추정

증발산(ET, evapotranspiration)은 지표 에너지 수지를 통해 육상-대기 간 물

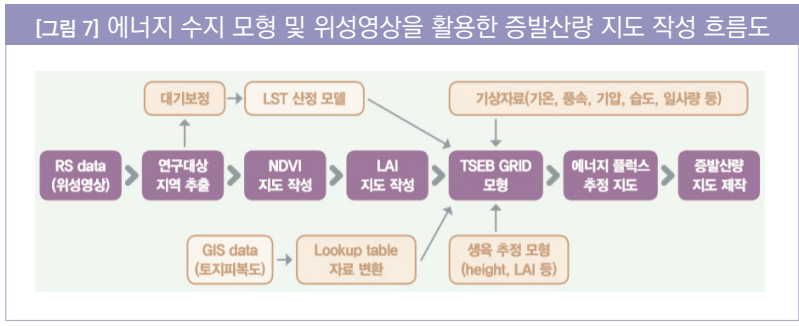
“ 고해상도 토양수분 분포도 생산에 JAXA, 농진청 자료 활용 ”

과 에너지 교환을 조절하고, 작물 생산 및 생리학적 상태를 반영하는 중요한 수문학적 현상이다(그림 7). 수자원의 효율적 관리를 지원하기 위해 에너지 수지 모

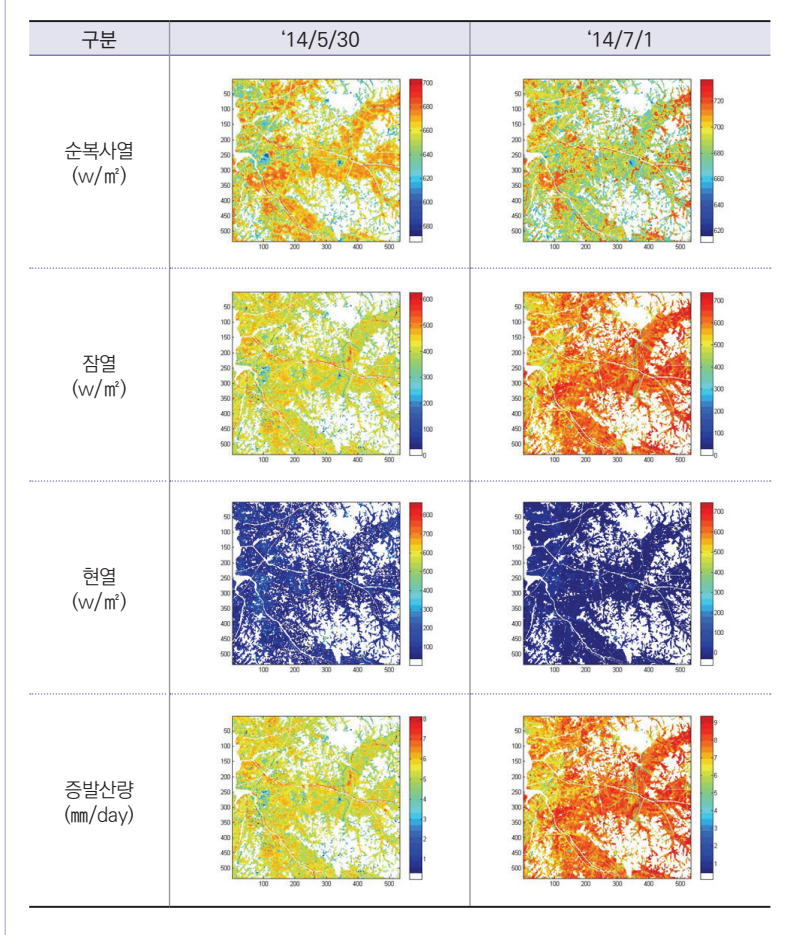
형(TSEB: Two-Source Energy Budget model)과 지표면 복사온도 제공이 가능한 LANDSAT 위성 영상을 활용하여 광역 논의 증발산량 분포를 추정하였다(그림 8).

**바. 수동형 레이더 영상을 활용한 농경지 토양수분 분포 추정**

토양수분은 토양입자나 공극사이에 존재하는 수분을 말하며 지표면과 대기에서의 물과 에너지 교환에 결정적인 역할을 한다. 특히, 식물의 성장과 관련된 농경지 토양수분의 사공간적 변이에 대한 지역규모의 정보 생산이 중요하다. 일본항공우주국 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)에서 제공하는 공간해상도 10km의 수동형(passive) 레이더 위성에서 추출한 AMSR-2 토양수분 데이터를 농촌진흥청 정밀토양도의 토성정보 및 농촌진흥청 토양수분 관측망 측정값과 연계하여 공간해상도 30m의 고해상도 토양수분 분포도를 생산하였다(그림 9).



[그림 8] 위성영상을 활용한 논의 복사에너지 및 증발산량 분포



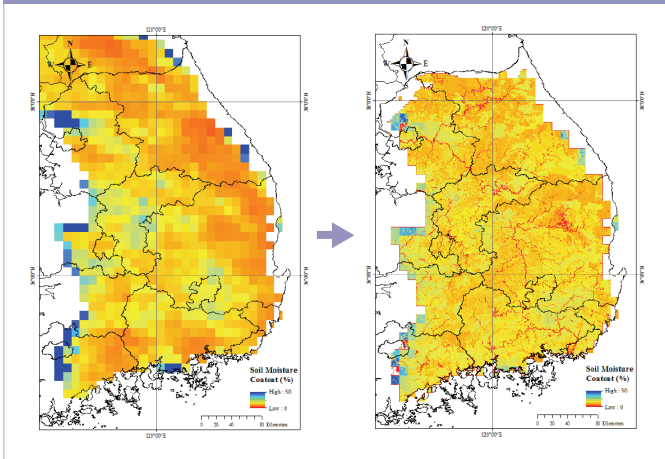
정책서면

“ MODIS 위성영상과  
기상자를 활용한  
벼 수량 추정 ”

### 바. 수동형 레이더 영상을 활용한 농경지 토양수분 분포 추정

토양수분은 토양입자나 공극사이에 존재하는 수분을 말하며 지표면과 대기에서의 물과 에너지 교환에 결정적인 역할을 한다. 특히, 식물의 성장과 관련된 농

[그림 9] AMSR-2 토양수분 데이터 공간 상세화 결과



경지 토양수분의 시-공간적 변이에 대한 지역 규모의 정보 생산이 중요하다. 일본항공우주국 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)에서 제공하는 공간해상도 10km의 수동형(passive) 레이더 위성에서 추출한 AMSR-2 토양수분 데이터를 농촌진흥청 정밀토양도의 토성정보 및 농촌진흥청 토양수분 관측망 측정값과 연계하여 공간해상도 30m의 고해상도 토양수분 분포도를 생산하였다[그림 9].

### Ⅲ. 작황 관측

식량의 안정적 공급과 자급률 향상, 가격 및 소득 안정, 기후변화 영향 평가 등을 위한 시의성 있고 정확한 작황정보의 파악이 요구되는 바, 드론과 위성을 활용하여 주요 작물의 생육상황 및 수량 추정 등에 응용된 몇 가지 사례를 살펴보도록 하겠다.

#### 가. 위성영상과 기상자료를 활용한 우리나라 벼 수량 추정

2002년부터 2019년까지의 MODIS NDVI 영상과 기상청 기상관측소 및 자동기상관측장치를 통해 관측되는 일별 기상자료를 수집하고 MODIS NDVI와 평균 및 최저기온, 강수량, 일사량을 이용하여 벼 수량 추정 모형을 각각 작성하였다. 또한, 벼 수량의 변화 추세를 분석하고 제거한 detrended yield값을 이용하여 같은 방법



“ 드론, 기상자료, 현지 생육조사 자료 활용한 양파·마늘 생육상황 추정 ”

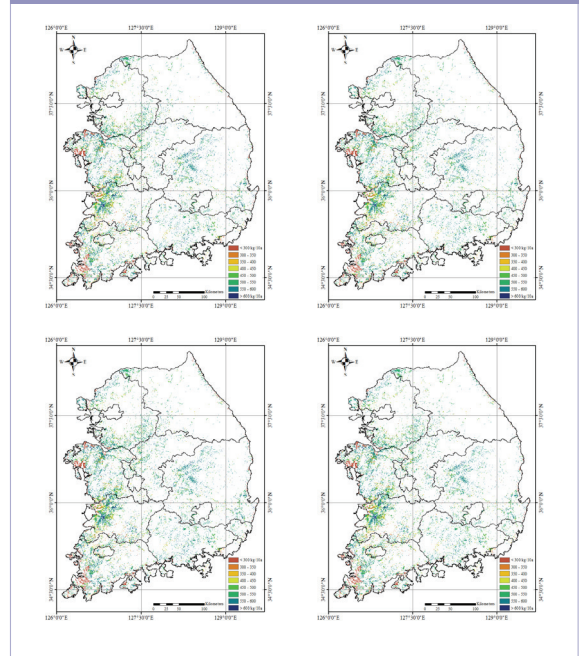
으로 수량 추정 모형을 작성하고 결과를 비교하였다(그림 10). 그 결과, 벼 수량 평균의 변화 추세를 통계적으로 제거하고 보완하여 작성한 벼 수량 추정 모형의 결정계수는 각각 0.78\*\*, 0.80\*\*, 0.80\*\*, 0.77\*로, RMSE는 12~13kg10a<sup>-1</sup>로 나타났다.

#### 나. 드론 영상을 활용한 양파·마늘 생육상황 추정

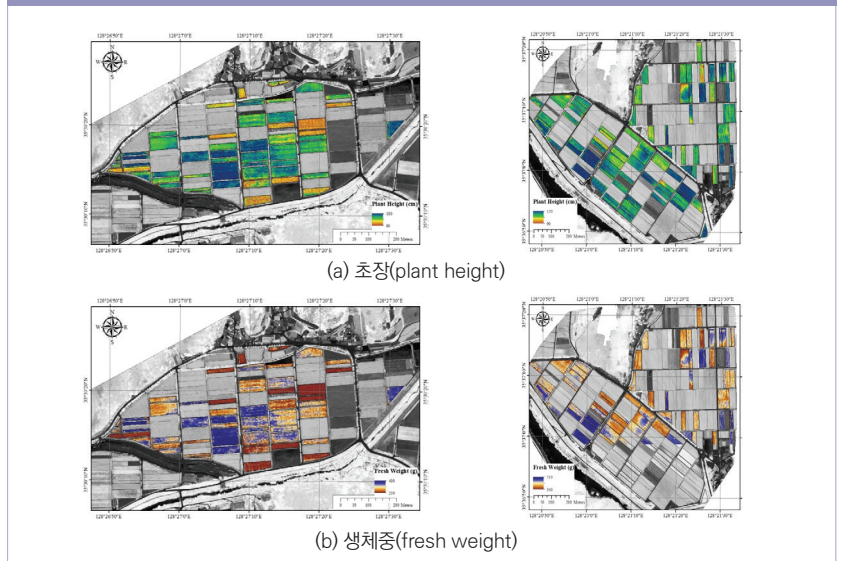
양파가 많이 생산되는 창녕군, 합천군 및 무안군을 대상으로 고정익 드론으로 촬영한 영상의 시계열 NDVI와 기상자료, 현지 생육조사 자료를 이용하여 양파 생육을 추정하였다. 드론 영상은 2015과 2016년 각각 2월 중순부터 6월 상순까지 2주 간격으로 총 16회에 걸쳐 촬영하였다. 기상요인은 농촌진흥청 농업기상정보시스템(<http://weather.rda.go.kr/>)을 통해 각 지역별로 시간단위 적산 온도, 누적 강우량 및 누적 일사량을 추출·수집하였다. 현장 생육조사는 5개 필지를 대상으로 생

육단계별 초장(plant height), 엽수(leaf number) 및 생체중(fresh weight) 등 일반 생육 특성을 재생기부터 수확기까지 2주 간격으로 20주씩 조사하였다. 양파의 생육단계별 NDVI와 기상요인을 이용하여 초장 및 생체중을 각각 추정하고 그 분포도를 지역별로 작성하였다(그림 11).

[그림 9] AMSR-2 토양수분 데이터 공간 상세화 결과



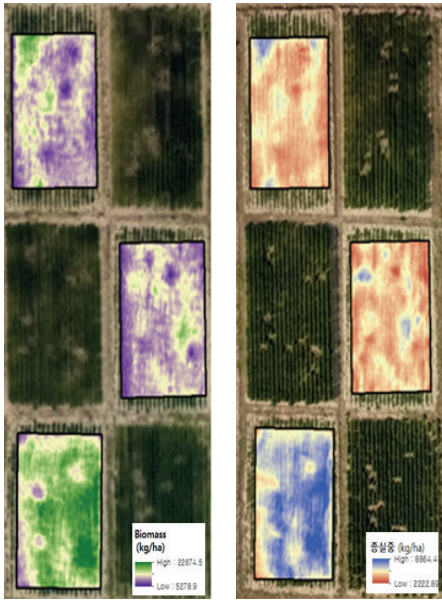
[그림 11] 양파 생육(초장, 생체중) 상황 분포(왼쪽: 창녕군, 오른쪽: 합천군)



“북한지역 대상으로 MODIS 식생지수와 기상요인 anomaly map작성 및 변이 분석”

다. 드론 영상을 이용한 봄파종 밀·보리 생육 모니터링

[그림 12] 봄 파종 맥류의 건물중(dry biomass) 및 종실중(grain weight)



(a) 건물중

(b) 종실중

정부는 식량자급률 향상 및 식량확보의 일환으로 벼를 수확한 후, 밀, 보리 등 맥류를 파종하여 월동 후 이듬해 봄까지 재배하여 모내기 전에 수확한다. 파종시기에 잦은 강우로 맥류의 파종이 늦어지거나 습해의 발생으로 자라지 못한 경우는 이듬해 이른 봄에 파종하여 재배하기도 한다. 드론을 이용하여 봄철의 맥류 생육을 모니터링하였다. 재배단지를 대상으로 주요 생육시기에 영상을 촬영하고 동시에 현장에서 표본으로 수집한 생육인자(건물중, 종실중 등)와 상관분석을 수행하여 포장 내 생육인자를 추정하고 변화를 공간적으로 평가하였다(그림 12).

마. 위성영상을 활용한 북한의 생산환경 모니터링

방문조사가 힘들거나 농업현황에 대한 자료가 충분하지 않은 상황에서 작황에 대한 판단을 해야 할 경우에 위성영상을 이용한 식생지수와 기상자료를 이용하여 작물의 생육진척도를 직·간접적으로 모니터링할 수 있다. 북한의 농업 현황과 생산기

반, 식량 상황의 파악이 요구되는 가운데 직·간접적으로 정보가 발표되고 있으나 이에 대한 객관적 판단 자료가 여전히 부족한 실정이다. 이에 북한지역을 대상으로 MODIS 식생지수와 주요 기상요인에 대해 순별 anomaly map을 작성하고 시·공간적 변이를 분석해오고 있다(그림 13).

바. 위성영상을 활용한 미국 주요 곡물지대 작물 면적 산정 및 수량 추정

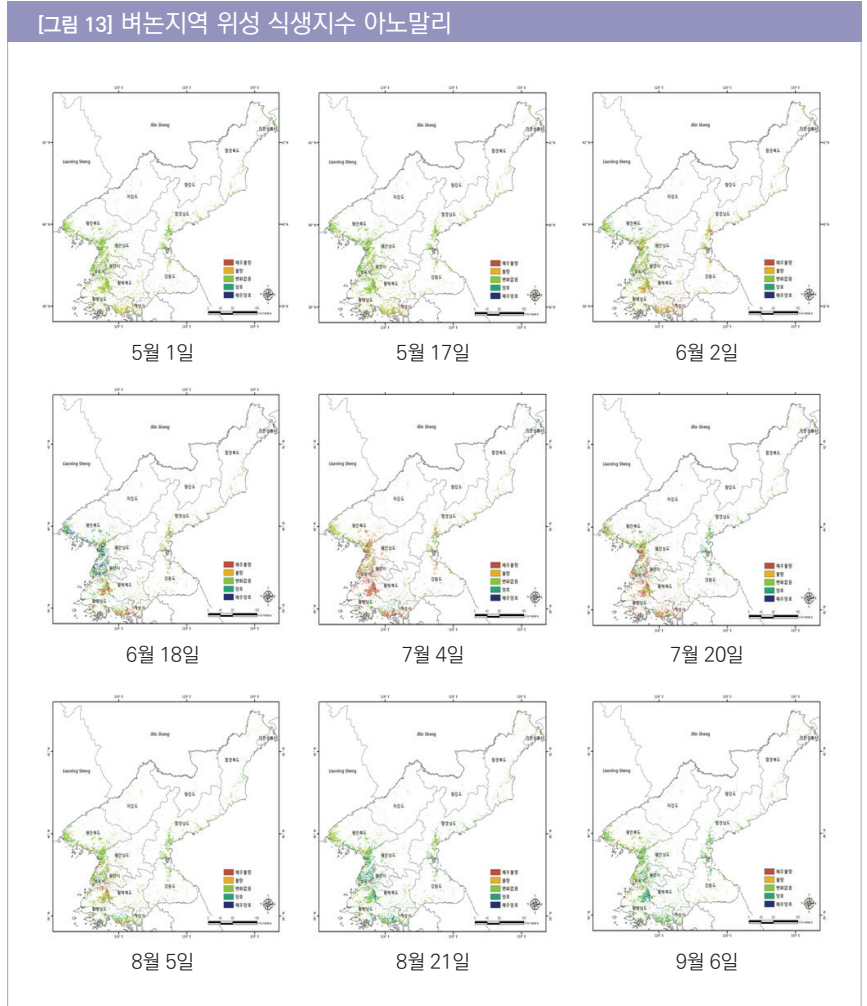
옥수수·콩 등 주요 곡물의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라는 이상기상 등으로 인한 국제 곡물 생산량 변동에 의해 사회경제적인 영향을 받을 수 있다. 주요 작물 수출국인 미국, 유럽, 중국 등과 더불어 주요 수입국인 일본은 자체 관측위성



“ 자체 국외 작황 파악 기술 필요 ”

을 발사하여 독자적인 농업 생산환경정보 분석 시스템을 구축하고 식량 안보를 위해 적극적으로 활용하고 있다. 원격탐사 자료 기반 작물분류를 통해 추출할 수 있는 경지, 재배면적 등의 정보는

수급정책 판단과 작황 추정의 기초자료로 활용될 수 있다. 작물 구분도 제작을 위한 기법은 분류 대상 지역의 재배작물, 재배규모, 재배특성 및 가용자료에 따라 달라질 수 있으므로 지역별로 특화된 분류기술 개발이 필요하다. 미국 주요 곡물생산지역 대상으로 위성영상 자료를 활용하여 자기학습 기반의 작물분류기술을 개발하고 재배면적을 추정하였다(그림 14). 그리고 MODIS 영상의 식생지수와 기상자료를 이용하여 미국 중서부 콩, 옥수수 수량을 추정하였다(그림 15). 이때 작물분류 영상을



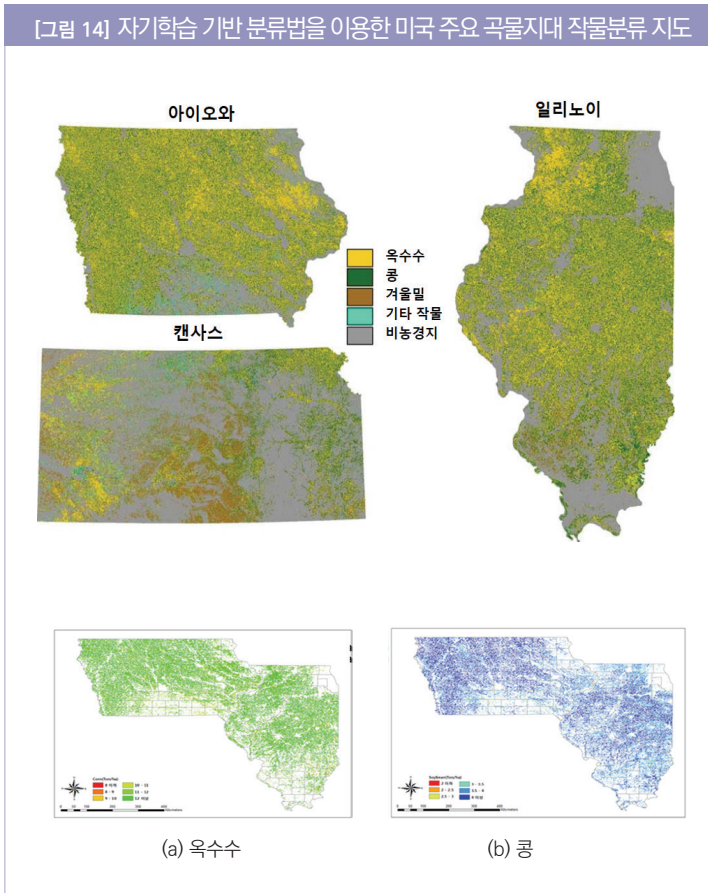
을 각각 콩과 옥수수 mask 영상으로 활용하였다. 주요 곡물의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라는 현지의 작황정보를 국외에서 제공되는 자료에 의존하는 실정이다. 적시에 수급 및 유통과 관련된 올바른 판단을 위해서 자체적으로 국외 작황을 파악할 수 있는 기술이 필요하다.

“ 원격탐사 기반 경지, 재배면적 자료는 수급정책과 작황 추정 기초자료로 활용 가능 ”

### 바. 위성영상을 활용한 미국 주요 곡물지대 작물 면적 산정 및 수량 추정

옥수수·콩 등 주요 곡물의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라는 이상기상 등으로 인한 국제 곡물 생산량 변동에 의해 사회경제적인 영향을 받을 수 있다. 주

[그림 14] 자기학습 기반 분류법을 이용한 미국 주요 곡물지대 작물분류 지도



요 작물 수출국인 미국, 유럽, 중국 등과 더불어 주요 수입국인 일본은 자체 관측위성을 발사하여 독자적인 농업 생산환경정보 분석 시스템을 구축하고 식량 안보를 위해 적극적으로 활용하고 있다. 원격탐사 자료 기반 작물분류를 통해 추출할 수 있는 경지, 재배면적 등의 정보는 수급정책 판단과 작황 추정의 기초자료로 활용될 수 있다. 작물 구분도 제작을 위한 기법은 분류 대상 지역의 재배작물, 재배규모, 재배특성 및 가용자료에 따라 달라질 수 있으므로 지역별로 특화된 분류기술 개발이 필요하다. 미국 주요 곡물생산지역 대상으로 위성영상 자료를 활용하여 자기학습 기반의 작물분류기술을 개발하고 재배면적을 추정하였다(그림 14). 그리고 MODIS 영상의 식생지수와 기상자료를 이용하여 미국 중

서부 콩, 옥수수 수량을 추정하였다(그림 15). 이때 작물분류 영상을 각각 콩과 옥수수 mask 영상으로 활용하였다. 주요 곡물의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라는 현지의 작황정보를 국외에서 제공되는 자료에 의존하는 실정이다. 적시에 수급 및 유통과 관련된 올바른 판단을 위해서 자체적으로 국외 작황을 파악할 수 있는 기술이 필요하다.

“ 농진청은 차세대 중형 농림위성 개발을 추진 중 ”

## IV. 맺으며

농촌진흥청은 1995년에 원격탐사연구실을 신설하여 태양 빛의 작물, 물, 토양의 분광반사특성에 관한 기초연구를 시작한 이래, 다양한 위성센서로 관측한 영상데이터를 기반으로 농작물 작황과 농업환경자원에 대한 과학적 분석기술을 꾸준히 축적하여 왔다. 벼, 주요 채소, 동계 맥류 등 수급안정과 자급률 향상을 뒷받침하기 위한 농작물 작황 추정, 농경지 토지이용과 토양·물의 특성과 변동에 대한 농업환경자원의 관측 성과를 이루었다.

농촌진흥청은 관련 부처와 함께 농업분야 관측을 主 목적으로 하는 차세대 중형 위성 4호(농림위성) 개발을 추진하고 있다. 가시광선, 근적외선을 파장영역으로 하는 5개 밴드를 가지는 전자광학카메라를 탑재하고 관측 폭 120km 이상, 3일 주기로 전국을 촬영하게 된다. 농경지와 작물 정보를 수집하고 분석하는 활용체계에 큰 변화를 가져오고 현업화에 기여할 것이다. 또한 정책현장의 문제를 풀고, 농업 현장의 노동력을 대체하기 위한 드론의 역할이 급속히 부상하고 있어 이러한 노력은 농업생산의 혁신을 가지고 올 것으로 예상된다.

기후변화와 동식물 전염병의 확산으로 AI·센서로봇 등 첨단기술을 접목한 자동화와 정보 수집 및 관측의 디지털 전환이 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 이에, 드론·위성영상을 활용하여 농업환경과 작황을 비트(bit)의 세계로 구현하는 디지털화는 국내외 작황 변동, 농업재해, 병충해 등의 위기에 선제적으로 정보를 수집하는 수단으로 자리매김하고, 농업정책과 영농현장에서 체계적인 의사결정 수단이 될 것이다.

### 참고문헌

나상일, 박찬원, 이경도, 2016: 무인비행체 기반 고랭지배추 작황 모니터링을 위한 재배현황맵 활용방안, 한국토양비료학회, 49(5). 469-479.

나상일, 박찬원, 소규호, 박재문, 이경도, 2017: UAV NDVI와 기상요인을 고려한 양파 작황 모니터링, 한국토양비료학회, 50(4). 306-317.

- 나상일, 민병걸, 박찬원, 소규호, 박재문, 이경도, 2017: UAV NDVI와 기상요인을 고려한 필지단위 마늘 작황 평가 모델 개발, 한국도양비료학회, 50(5), 422-433.
- 나상일, 이경도, 안호용, 박찬원, 홍석영, 소규호, 2020: 위성영상 기반 국내 벼 단수추정 모형 고도화 방안, 2020년 기후변화학회 학술발표회, 27p.
- 농촌진흥청 국립농업과학원, 2020: 하늘에서 농업을 보다; 위성·항공 영상을 활용한 농업환경 관측, 108, 120p.
- 박재문, 나상일, 박찬원, 소규호, 이경도, 2017: 위성영상 기반 양파, 마늘 재배지 분류, 2017 한국농공학회 학술대회초록집, 195.
- 이경도, 박찬원, 소규호, 김기덕, 나상일, 2017: 무인비행체 영상을 활용한 고랭지배추 정식시기 추정, 한국농공학회, 59(6), 39-50.
- 이경도, 나상일, 홍석영, 박찬원, 소규호, 박재문, 2017: MODIS NDVI와 기상자료를 이용한 미국 일리노이, 아이오와주 옥수수, 콩 수량 추정, 대한원격탐사학회, 33(5-2), 741-750.
- 이경도, 김상민, 박찬원, 안호용, 나상일, 홍석영, 소규호, 2020: 무인비행체 영상 기반 연차 간 벼 생육 및 흰잎마름병 병해 추정, 한국농공학회, 62(4), 75-87.
- 이경도, 홍석영, 김숙경, 박찬원, 안호용, 나상일, 소규호, 2020: S1 위성영상 임계값을 이용한 우리나라 벼 재배면적 추정, 한국도양비료학회, 53(3), 345-354.

# 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황

서해엽 환경부 한강홍수통제소 수자원정보센터 센터장 delune@korea.kr  
현명숙 환경부 한강홍수통제소 수자원정보센터 기상연구사 mshyun@korea.kr

- I. 서론
- II. 수문조사와 홍수예보
- III. 강우레이더 현황
- IV. 기상청 예측자료 활용 현황
- V. 강수예측 기술 개선 현황
- VI. 기상청간 협업
- VII. 마무리 및 제언

환경부 홍수통제소는 강수관측을 통해 수집된 자료를 홍수예보에 활용하고 있다. 지점 관측의 한계를 극복하고 고해상도의 하천유역별 강수분포를 홍수예보에 활용하기 위하여 강우레이더를 설치·운영하고 있다. 한편, 기상청에서 제공받는 AWS, ASOS 등 지상 관측자료와 실시간 예·특보를 포함한 통보문 등은 실제 홍수대응과 물관리에 유용하게 활용되고 있다. 기후변화에 따라 급변하는 강수와 이로 인해 발생하는 홍수 대응을 위해서는 기상청과의 긴밀한 협조체계 필요성이 증대하고 있다. 많은 기상예보모델의 결과를 수집하고 이에 대한 활용을 적재적소로 하기 위해서는 장비(수치예보모델), 기술자(예보관), 재료(관측자료의 품질)에 대한 적극적인 투자, 노력, 지원이 계속되어야겠다. ■

“ 수문조사는 물의  
순환과정을  
규명하여  
정량화하기  
위한 것 ”

## I. 서론

올 여름은 기상관측(73년) 이래 최장기간 장마(중부 54일, 제주 49일)와 역대 2위의 강수량(687mm), 연이은 태풍으로 큰 인명피해(46명)와 재산피해(1.3조 원)가 발생하였다. 특히, 전국적으로 하천 범람, 급경사지 붕괴, 도시 침수 등 피해가 심각했다. '74년 개소한 한강홍수통제소를 포함한 환경부 홍수통제소는 최우선적으로 여름철 홍수를 잘 관리하고, 생활용수·공업용수·농업용수의 효율적인 배분을 통해 홍수와 가뭄피해를 최소화하기 위한 기관이다. 이를 위해서 강수량, 하천수위 및 유량 등 물과 관련된 기초조사와 고품질의 수문 및 하천정보를 서비스한다. 그리고 신속·정확한 홍수예보를 실시하여 국민의 생명과 재산을 보호하고 상·하류의 적절한 물배분을 통하여 안정적인 물공급을 목표로 한다. 최근 기후변화에 따라 급변하는 강수와 이로 인해 발생하는 홍수 대응을 위해서는 기상청과의 긴밀한 협조 체계 필요성이 증대하고 있다. 본 고에서는 홍수관리에 사용되는 강수 관측 및 예측자료와 최적의 자료를 활용하기 위한 개선 현황 등을 소개하고자 한다.

## II. 수문조사와 홍수예보

### 가. 수문조사

수문조사는 물의 순환과정을 과학적으로 규명하여 정량화하기 위한 것이다. 수문조사로 생산된 자료는 물 관련 재해관리뿐만 아니라, 실시간 물관리에 활용되며, 국가 수자원 관리를 위한 계획 수립에 기초자료가 된다. 수문조사 항목은 하천의 수위, 유량, 유사량 및 유역의 강수량, 토양수분량, 증발산량 등으로 환경부는 4개 홍수통제소와 국립환경과학원에서 수문조사를 실시하고 있다.

홍수통제소에서는 홍수예보를 위하여 수위 관측소(총 557지점), 강수량 관측소(426개소), 자동유량 관측소(64개소) 및 유량 측정(176개소), 유사량 측정(44개



“ 유역별 강수량 관측위한 강우레이더 총 9기 운영 중 ”

소) 등의 수문조사시설을 운영하고 있다[표 1]. 수문조사시설들은 관할지역의 한강, 낙동강, 금강, 영산강 홍수통제소에서 운영·관리한다. 또한 유역별 내리는 비의 양을 관측하기 위하여 운영 중인 강우레이더는 총 9기로 대형 7기, 소형 2기를 운영하고 있다. 이 또한 홍수통제소별로 관할하여 운영하고 있다. 통제소별로 강수량 관측과 강우레이더 관측을 수행하고 있으나, 관측된 자료를 통합 품질관리하는 시스템은 한강홍수통제소에서 운영·관리하고 있다. 강수량 관측자료는 수문자료 품질관리시스템을 통해 품질관리과정과 공인심의위원회 등을 거쳐 수문조사연보에 공식적인 자료로 제공된다.

[표 1] 수문조사 시설

(단위: 개소수)

구분	수위관측소	강수량 관측소	자동유량 관측소	유량 측정	유사량 측정	계
계	557	426	64	176	44	1,266
한 강	169	147	19	49	9	393
낙동강	162	138	23	55	19	397
금 강	110	71	10	37	8	236
영산·섬진강	115	70	12	35	8	240

#### 나. 홍수예보

WMO(세계기상기구)는 ‘하천상의 대상지점에서 강우 혹은 용설에 의해서 발생하는 홍수의 수위, 유량, 발생 시각, 지속시각을 미리 알리는 것’을 홍수예보로 정의한다. 홍수예보는 주요지점별 수위를 예측하고 이에 대한 피해를 최소화하기 위하여 홍수특보 지점에 대하여 홍수주의보, 경보 등의 홍수예보를 발령한다[표 2]. 이와 함께 제공되는 홍수정보는 고수부지, 천변주차장 등 하천범람 전에도 침수피해가 발생하는 지역에 대한 침수정보를 실시간 하천수위를 바탕으로 제공하는 것으로 침수위험 정보는 4단계(관심-주의-경계-심각)로 구분된다[표 3].

[표 2] 홍수특보 지점

(단위: 개소)

구분	계	한강	낙동강	금강	영산·섬진강
계	65	19	20	11	15
국가하천	58	15	18	10	15
지방하천	7	4	2	1	-

“ 지점관측 한계 극복,  
고해상도 홍수예보  
위해 강우레이더  
설치·운영 ”

「기후변화에 따른 풍수해 대응 혁신 종합대책(20.11)」에 따라, 현재 65개인 홍수특보지점을 중소규모 하천까지 홍수대응이 가능한 수준인 218개(국가 79, 지방 139) 지점으로 확대할 예정이다. '12년부터 '20년까지 홍수피해 하천은 총 1,008개 하천

중 유역면적 100km<sup>2</sup> 이상에 달한다. 이에 따라 예보 강화 필요성 등을 검토하여 152개 하천에 대해 홍수예보가 가능한 현재의 수위관측소 557개소에서 781개소로 확대·설치할 예정이다.

[표 3] 홍수정보 지점

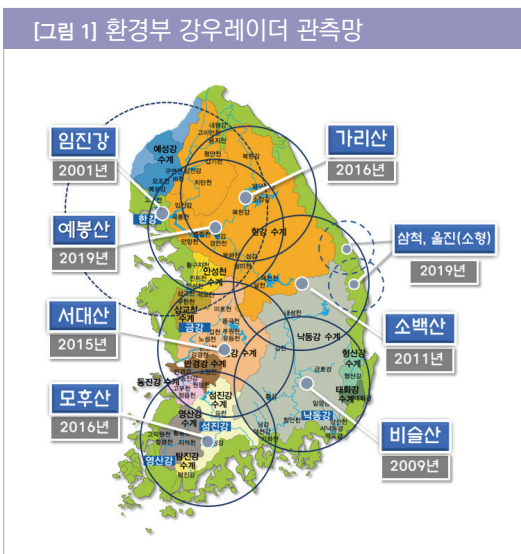
구분	계	(단위: 개소)			
		한강	낙동강	금강	영산·섬진강
수위관측소	557	169	162	110	116
홍수정보제공지점	409	158	104	62	85
제공비율	73.40%	93%	64%	56%	73%

### Ⅲ. 강우레이더 현황

강수관측은 환경부 홍수통제소에서 실시하고, 수집된 자료는 홍수예보에 활용된다. 홍수예보에서 강수관측은 기상청에서 운영하는 강수량계와 유사한 장비를 이용한다. 지점 관측의 한계를 극복하고 고해상도의 하천유역별 강수분포를 홍수예보에 활용하기 위하여 강우레이더를 설치하여 운영하고 있다. '99년 수해방지 대책의 일환으로 유역면적의 2/3 이상은 관측이 불가능한 임진강 유역의 홍수예보를

위해 임진강 강우레이더(인천시 강화 소재)를 설치·운영하였다. 이후, 전국 하천유역을 대상으로 지상에 가까운 강수 관측자료를 홍수예보에 활용하기 위하여 '02~'04 전국 강우레이더 관측망 구축계획을 수립하였다. '09년에는 국내 최초의 이중편파레이더인 비슬산강우레이더 관측소를 시작으로, 소백산(11년), 서대산(15년), 가리산(16년), 모후산(16년), 그리고 '19년에는 소형레이더 2기(삼척, 울진)와 예봉산강우레이더를 개소하여 전국 강우레이더 관측망(대형7기, 소형2기)을 완료하였다(그림 1). 또한 현재 노후화된 임진강 강우레이더의 효율적인 관측을 위해 C밴드를 S밴드로 교체하여 감악

[그림 1] 환경부 강우레이더 관측망



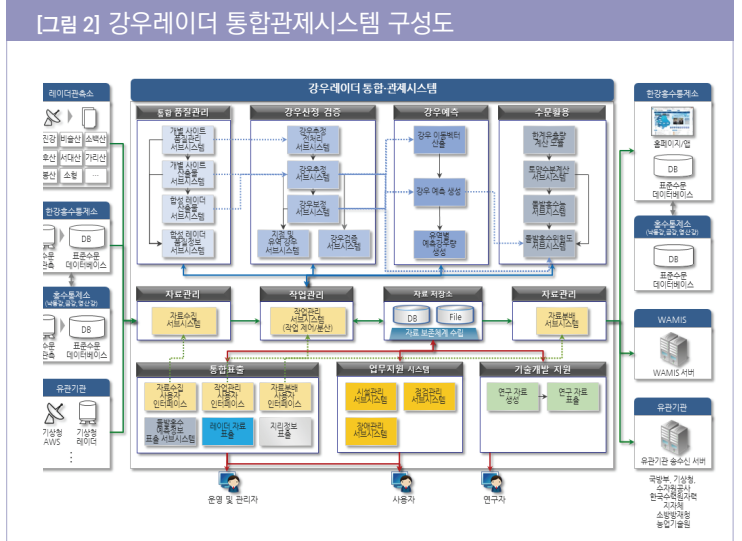
“ 한계, 불확실성에도  
홍수예보에 강수  
예측자료는 필수 ”

산으로의 이전 설치를 추진하고 있다. 강우레이더 통합관제시스템은 각 관측소의 강우레이더 관측자료를 취합·분석·처리하여 유역별 면적강수량을 산정하고, 홍수예보의 입력자료로 투입하는데 활용된다(그림 2).

#### IV. 기상청 예측자료 활용 현황

기상청에서 제공받고 있는 AWS, ASOS 등 지상 관측자료와 실시간 예보보를 포함한 통보문 등은 실제 홍수대응과 물관리에 유용하게 활용되고 있다. 그

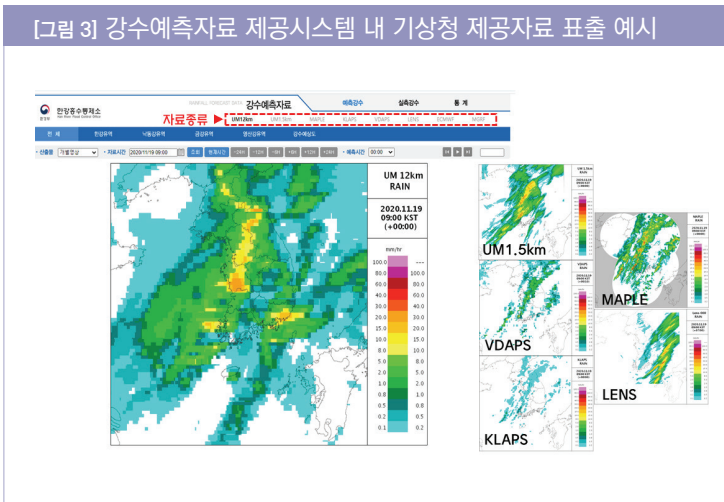
중 홍수예보에 중요한 자료는 강수예측자료이다. 현재 기상청의 다양한 자료들은 모형의 특성, 한계, 예측 불확실성 등이 존재한다. 그러나, 홍수예보시에는 해당지역의 예상 강수량을 고려하여 홍수에 대응해야 하므로 강수예측은 꼭 필요하고 중요한 자료임에 틀림없다. '04년 이후 기상청과의 협업을 통해 홍수예보에 활용 가능한 강수예측자료를 수집하고 매년 신규자료에 대한 협의 및 실시간 수집을 추진하고 있다. 이를 위해 기상청과 한강홍수통제소간 전용회선을 지속적으로 증속하였고, 다양한 기상자료 및 강수자료를 상호 교환하고 있다. 기상청으로부터 전용회선을 통해 수집되는 다양한 자료는 한강홍수통제소에서 운영 중인 강수예측자료 제공시스템(내부망)에서 강수요소만을 추출하여 홍수예보에 활용할 수 있도록 격자형 혹은 표준유역별 강수자료로 재처리되어 저장된다. 저장된 강수자료는 홍수예보 모형 수행시에 예측강수로 활용된다. 강수예측자료 제공시스템은 단순히 기상청에서 제공되는 격자형태의 예측강수자료를 홍수예보에 활용할 수 있도록 가공하고 이를 DB화하여 저장하게 된다(그림 3). 이와 함께, 수집자료에 대한 현황을 파악하기 위한 영상, 수계별 표준유역 면적강수량, 강수예상도, 지상관측 표준유



“ 지역예보모델 자료의  
한계 극복 위해  
기상청 동네예보자료  
고려 ”

역강수량 등을 표출할 수 있도록 구성되어 있다. 기상청에서 신규로 생산·수집되는 자료에 대한 적용도 지속적으로 추진되고 있다.

[그림 3] 강수예측자료 제공시스템 내 기상청 제공자료 표출 예시



‘19년 기상청-ECMWF(유럽중기예보센터)와의 협약 규정을 변경하여 ECMWF 고해상도 예측자료를 기상청으로부터 실시간으로 수집받아 내년 홍수기에 활용할 수 있도록 자료를 재처리하고 있다. 또한 홍수 및 가뭄예보시 활용가능한 기상청 국지양상블모델의 결과와 예보관의 의견이 반영된 동네예보 자료도 수집중으로 ’21년부터 활용할 예정이다. 다만, 현재 ECMWF에서 생산하는 자료(일 4회,

10km×10km 해상도)보다는 해상도가 낮은(일 2회, 25km×25km) 자료를 수집하여 외부 날씨앱에서 확인할 수 있는 자료에 비해서는 해상도가 낮은 상황이다. WMO 협약 등을 따라 기상청에서 자료를 수집하고 있으나, 가장 최신의 양질의 자료를 제공할 수 있는 환경이 구축될 필요가 있다.

홍수예보에서 강수예측자료의 한계는 몇 가지 측면에서 발생한다. 지역예보모델에서의 결과 활용시에는 업데이트 주기가 길어 하루 4번에 걸쳐 업데이트되고 단순히 모델결과를 그대로 홍수예보에 반영하게 된다. 그러나 상황에 따른 수치모델별 특성 및 예보 전반을 파악하기 어렵고, 기상청에서 제공하는 통보문에서는 하천 홍수예보시 활용하기에는 한계가 존재한다. 예를 들어 예상강수량이 중부지방 많은 곳 500mm로 예보된 상태에서 강원도는 400mm 이상의 강우가 발생한 반면, 그 이외의 지역에는 비가 적게 내리는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 이 차이를 좁히기 위하여 여러 가지를 고민하고 시도하고 있다. 그 중 하나의 방법으로 기상청에서 제공하는 동네예보를 활용하는 방안이다. 동네예보는 수치예보결과를 바탕으로 예보관의 의견을 반영하여 결과를 재가공하여 제공된다. 기상청 홈페이지상에

“홍수예보 개선에 강우레이더 기반 초단기 강수예측과 수치예보 강수자료 병합 결과 활용”

서는 6시간 간격의 행정구역별로 예측자료가 제공되고 있으나, 홍수예보 활용을 위해 격자형으로 가공된 자료를 제공하기로 기상청과 협의된 상태이다. 동네예보 자료는 '21년 홍수기에 활용할 수 있도록 검토 중에 있으나, 격자형 자료의 시간해상도가 성기고 예측시간이 자료생성시간에 따라 변동성이 있어 아직까지는 안정적인 활용에 제약이 있을 것으로 판단된다.

이처럼 다양한 강수예측자료를 홍수예보에 활용하고 있지만, 홍수예보에 최적화된 강수예측자료를 선택하여 활용하는 것은 어렵다. 따라서, 기상청에서 제공하는 자료 중 홍수예보에 활용도가 높은 자료를 선택하고 이를 홍수예보에 적합한 자료로 가공하는 것이 홍수통제소에서 중요하게 요구되는 강수예측 과정이라고 할 수 있다.

## V. 강수예측 기술 개선 현황

홍수통제소에서는 여러 가지 기상 예측자료를 수집하고 이를 홍수예보에 직접 활용할 수 있도록 한다. 많은 기상예보모델의 결과를 수집하고 이에 대한 활용을 적재적소로 하기 위해서는 좀 더 많은 노력이 필요할 것이다. 하지만, 시급을 다룰 수 밖에 없는 현장에서는 어떤 자료를 선택할지에 대한 고민을 최소화하는 것이 절실하고, 이에 대한 판단 경험은 기상예보의 주관부처인 기상청에서 제공하는 공신력 있는 통보문에 의존할 수밖에 없다. 홍수통제뿐만 아니라, 홍수정보를 제공하는 데에도 여러 가지 정보를 수집하게 되지만, 정보들에 대한 신뢰도도 개개인별로 다르게 판단할 수 있다. 이런 고민의 시간을 줄일 수 있도록 여러 가지 자료를 선택하는 것보다 하나의 최적화된 자료를 활용하는 것이 필요하다. 실제 내리고 있는 비의 양을 알고 짧은 시간 내에 내리는 비를 예측하는 것이 홍수예보에서는 가장 중요한 강수예측의 역할이다. 강수예측자료 중 가장 최근에 내리는 강수량과 분포를 활용하기 위해 한강홍수통제소가 개선 중인 방법은 강우레이더 관측자료를 기반으로 하는 초단기 강수예측과 강우레이더와 수치예보 강수자료를 병합한 결과를

“미계측 지역 관측, 고해상도 예측 위해 강우레이더 활용” 활용하는 것이다.

### 가. 강우레이더 기반 초단기 강수예측

국내외를 막론하고 강우레이더 활용에 기대가 높은 분야는 지상관측이 어려운 미계측지역을 포함하여 원하는 지역의 고해상도 강수량과 대상지역에 내리게 될 강수예측자료이다. 하천의 홍수예보를 위해서는 홍수 선행시간 확보가 중요하다. 홍수예보를 보다 빠르고 신속하게 제공하기 위해서 가장 중요한 입력자료는 강수예측자료이다. 홍수예보를 위한 강수예측자료는 3시간까지의 정확도 높은 자료인데, 3시간 이후에도 강수예측성을 최대한 유지할 수 있는 자료가 필요하다. 한강홍수통제소는 강우레이더 기반 초단기 강수예측모형의 현업화를 추진하고 있다. 이 모형은 현재 관측한 강우레이더 합성장을 활용하여 변분에코추적 기법으로 최적의 이동벡터를 산출하고 Semi-Lagrangian 방법으로 매 10분마다 초단기예측강수(0~6시간)자료를 생산한다.

홍수통제소는 '04년부터 기상청 기상레이더를 기반으로 하는 MAPLE 수행결과를 실시간으로 수집하여 레이더 기반 초단기 강수예측자료로 활용했다. 그 이후 강우레이더를 활용한 강수예측을 수행하기 위하여 기상청 기상연구소(현 국립기상과학원)에서 기술을 이전받아 비슬산강우레이더와 소백산강우레이더 합성장을 대상으로 시험 적용하였다. 현재 개선 중인 강우레이더 초단기 강수예측의 초기버전은 '차세대 홍수방어 기술 개발 연구단'에서 개발된 기술을 이전받아 '14년 전국을 대상으로 반영하였고, 강우레이더 통합운영시스템('15)에 탑재되어 현재까지 운영되고 있다.

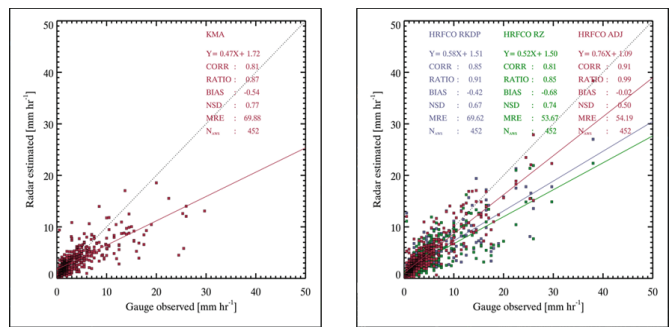
한편, 예봉산 강우레이더가 '19년에 구축됨으로써 전국 강우레이더 관측망 구축이 완료되었다. 현재는 현업 운영을 위한 '강우레이더 초단기 강수예측 기법 개선('19~'22)을 통하여 현업에서 활용할 수 있도록 초기장 개선, 대상영역 확대, 예측 기법 개선 등을 진행하고 있다. 올해는 1차년도로 기존 강우레이더 관측장만으로는 바다로부터 유입되는 강수장 예측에 어려움이 있어, 기상청 기상레이더 합성장



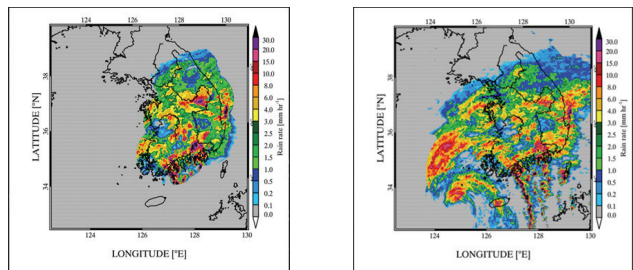
“ '22년까지 기상-강우레이더 융합 강수자료 생성 ”

을 융합하여 강수 예측에 활용하고자 CDF(Cumulative Density Function) 매칭 기법을 이용하여 기상레이더와 강우레이더의 추정강수장의 불연속을 완화하고자 하였다. [그림 4]는 2019년 10월 2일 15시 기상레이더 합성강수와 RZ, RKDP 및 실시간 보정(ADJ)과정을 거친 강우레이더 합성강수, 그리고 452개의 기상청 AWS를 활용하여 검증한 결과이다. 두 기관 합성강수량의 정량평가를 바탕으로 두 개의 강수장을 융합시 환경부 합성강수 기준 강수로 정의하고 불연속 완화를 위해 기상청 합성강수를 CDF 매칭 기법으로 보정하였다[그림 5]. '21~'22년에 걸쳐 기상-강우레이더 융합강수를 생성하고 이를 이용한 강우레이더 기반 초단기 강수예측장을 개선하여 홍수예보에 활용 예정이다.

[그림 4] (좌)기상레이더 (우)강우레이더 합성장에 따른 상관분석

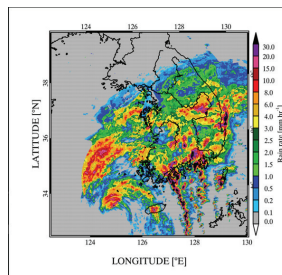


[그림 5] 기상청 및 환경부 레이더를 활용한 융합강수 산출기술 개선 현황



(a) 환경부(CDF매칭 적용 전)

(b) 기상청(CDF매칭 적용 전)



(c) 융합강수(CDF매칭 적용 전)

(d) 융합강수(CDF매칭 적용 후)

#### 나. 예측강수 병합 및 개선

앞서 설명한 강우레이더 기반 초단기 강수예측은 유효한 정확도를 만족시켜야 하기 때문에, 길어야 3시간 이내의 자료를 활용할 수 있다. 홍수예보를 위한 강수예측자료는 3시간까지는 좀 더 정확도 높은 자료를 사용하고, 3시간 이후에도 강수의 예측성을 최대한 유지할 수 있는 자료가 필요하다. 하지만, 단순 외삽 등을 이용한 예측은 강수의 이동, 소멸, 생성 등을 모의할 수 없어 초단기에 대한 수치모

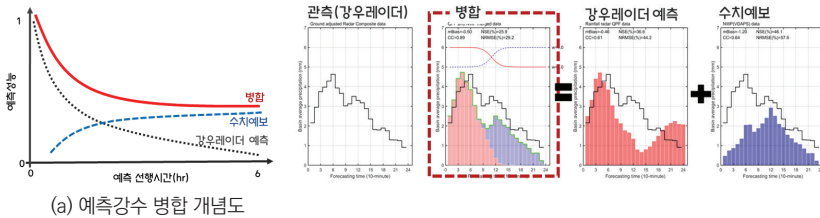
“ '21년부터 강수예측 자료 제공시스템을 현업 활용 예정 ”

델자료를 공동활용하고 기법별 장단점을 고려하여 최적의 강수예측자료를 만들 고자 하였다. 국외에서도 6시간의 강수예측을 위하여 외삽된 레이더 예측자료와 수치예보자료를 상호보완하여 개선하는 병합 기법을 많이 활용하고 있다. 이는 WMO(2017)에서 정의한 실황예보(Nowcasting) 중 하나인 병합(Blending)으로 정의할 수 있다.

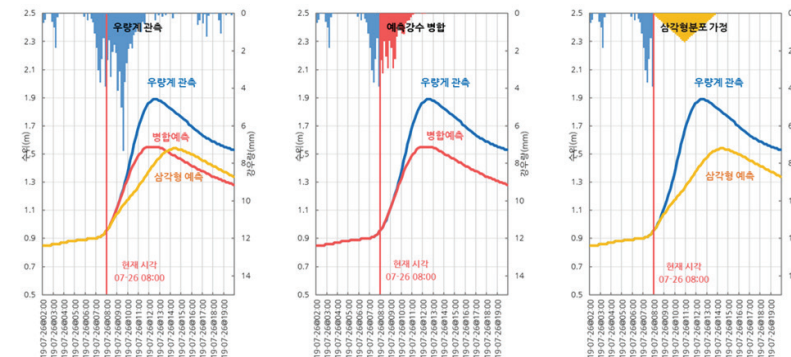
'17년에는 가용한 수치모델 및 레이더 관측자료를 검토·평가하고 '18~'19년 예 측강수 병합 및 재산정 기법을 개발하였고, '20년 8월부터 '강수예측자료 제공시스 템'에서 시험적으로 내부운영 중에 있으며, '21년부터 홍수예보 현업에서 활용될 예 정이다. 본 기법은 외삽된 관측자료와 예측자료 간의 가중치를 통해 수행되며, 예측 초기에는 강우레이더 초단기예측자료를 사용하고 선행시간에 따라 가중치를 감소

시켜 6시간에서는 수치예보 모델(VDAPS)의 가중치가 1 이 되도록 구성하였다. 그림 6은 삼진강댐 유역을 대 상으로 실제 강우레이더에서 관측한 강수량과 병합, 강 우레이더 기반 예측, 수치예 보 자료별 0~4시간의 예측 강수를 나타낸 것으로 가중 치는 sigmoid함수를 사용 하였다. 기존 강우레이더 기 반 예측에 비해 병합으로 재 생산된 예측강수가 홍수예 보에 더 예측 정확도가 높아 홍수예보 활용에 도움을 주 는 것을 확인할 수 있다.

[그림 6] 예측강수 병합 개념 및 기법별 삼진강댐 유역 예측강수(+4시간) 비교



[그림 7] 6시간에 대한 예측강수 적용 결과(서울시 중랑구, 2019. 7. 26. 08시 기준)



“ 홍수통제소와 기상청은  
업무협조 및 실시간  
자료공유가 필요한  
협업기관 ”

‘19년 7월 26일 서울 중량교 지점을 대상으로 지상관측 강수와 재생산된 예측강수, 삼각형 분포의 예측강수를 이용하여 계산된 홍수위는 [그림 7]과 같다. 예측시간이 길어질수록 예측정확도가 낮아지는 형태로 보이나 [그림 6]에서 보는 바와 같이 강우레이더 기반 초단기 예측에 비해 정량적인 강수, 지속시간, 분포 등을 확보해 활용도가 높을 것으로 기대된다. 시간에 따라 예측 정확도가 낮아지는 경향이 있으나, 단순외삽의 단점을 보완하여 3시간 이후의 강수 예측성을 유지하기 위한 개선책이 될 수 있다.

## VI. 기상청간 협업

홍수통제소와 기상청은 긴밀한 업무협조 및 실시간 자료 공유가 필요한 협업기관이다. 홍수예보에서 예보의 판단기준에 중요한 자료 중 강수관측과 강수예측이 포함된다. 홍수통제소는 기상예보의 주무부처인 기상청에서 전문인력들이 노력하여 개발하고 현업적용하여 외부로 제공되는 대부분의 자료를 홍수예보에 활용한다. ‘04년 12월 당시 ‘건설교통부와 기상청간 상호협력증진에 관한 정책협의회’를 구성하여, 홍수예보를 위한 기초자료 등 기상청에서 예측하는 강수장을 실시간 활용하기 위하여 지속 협의하고 현업에 적용하고자 노력하였다. 이와 함께, 기상예보를 위하여 운영하는 기상레이더와 홍수예보를 목적으로 운영하는 강우레이더, 그리고 군 작전에 활용하기 위한 공군 기상레이더를 공동활용하기 위한 협의체인 ‘범정부적 기상-강우레이더 공동활용 협약’을 체결하여 범부처 기상-강우레이더 자료 공동활용을 포함한 정비, 관측전략, 기술개발 공유 등을 통한 적극적인 협업을 추진하였다. ‘18년 물관리 일원화에 따라 국토교통부의 수자원분야가 환경부로 이관됨에 따라, 협약의 확대 강화를 위하여 운영중인 2개의 협약을 ‘국방부-환경부-기상청간 교류 및 협력 증진 협약’으로 통합하여 적극적인 협업을 추진 중에 있다. 이에 따라, ‘19년부터 국방부에서 활용할 수 있는 환경부 수문정보 등에 대한 여러 가지 형태의 자료를 군작전 등에 활용하기 위하여 기초조사 및 프로그램 개발을 위한

“ 정확도 향상 위해  
장비, 기술자, 재료에  
투자, 노력,  
지원 지속 ”

업무협조 등도 적극적으로 추진하고 있다.

'20년에는 연이은 집중호우로 여러 지역에서 많은 피해가 발생하였고, 이와 관련된 다양한 대책들이 제시되었다. 이 중에서도 홍수통제소-기상청-수자원공사 등 유관기관의 협업 강화가 하나의 중심과제로 인식되며 강화를 위한 노력들은 이미 진행되고 있다. 현재는 각 기관이 보유한 정보를 공동활용하는 자원공동활용형 및 공동기술개발형 협업을 진행하고 있다. 그러나, 좀더 활발하고 적극적·효과적인 협업을 지속하기 위해서는 기획·협력 공조형 협업의 형태로 강화하는 것도 필요하다. 범정부적 공동활용을 위하여 각 부처가 공동으로 기획하고 협력하는 형태로 확대되기를 기대한다.

## Ⅶ. 마무리 및 제언

기후변화로 과거에는 경험하지 못한 위험기상들이 빈번하게 발생하고, '20년 여름철 유례없이 길었던 장마로 많은 피해가 있었다. 또한 기상예보에 대한 우리나라 국민들의 이해수준도 점점 높아져 일반인이 전문가용 일기도를 보며 브리핑을 할 수 있을 정도이고, 초등학교도 해외 날씨앱을 매일 접하는 상황이다. 특히 올해에는 뉴스나 대중매체를 통해 기상유목민, 기상망명족이라는 부정적인 여론이 형성되기도 했다. 하지만, 기상청은 기상을 관측하고 예보를 주관하는 대표 기관으로서 기상분야의 전문인력이 집중되어 있고 해외 선진국에 비해서도 기상예보 능력이 뒤쳐지지 않는다. 기상 혹은 홍수 예보정확도에 영향을 미치는 중요한 요소는 장비(수치예보모델), 기술자(예보관), 재료(관측자료의 품질)이다. 앞으로 기후위기시대 위험기상에 보다 유연하게 대처하기 위해서 예보정확도 개선을 위한 3가지에 대한 적극적인 투자, 노력, 지원이 계속되어야겠다. 또한, 범정부적 재난 대응을 위한 기상청의 다양한 협력이 지속되기를 바란다.

## 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
	• 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
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	허은	118-119

## 기상기술정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 전자구관측시스템(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 next 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
	• 기상레이더의 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	배덕호	65-77
	• 이상기름에 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	김익근	42-50
	• [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성	조명희, 조유원, 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?	김연중	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 <sub>2</sub> ) 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
	• 국가기초풍속지도의 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
• 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
칼럼	• 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
칼럼	• 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

칼럼	• 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
	• 라이더 관측기술 활용 방안	김덕현	28-41
	• 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책	배덕호, 이병주	42-53
	• 위성자료의 해양 환경감시 활용	황재동	54-65
논단	• 우리나라의 융합기술발전 정책 방향	이상현	66-72
해외기술동향	• 일본의 원격탐사 활용 및 융합정책	윤보열, 장희욱, 임효숙	73-85
포커스	• 레이더 융합행정 포럼 : 레이더운영과	송원화	86-93

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

칼럼	• 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
논단	• 해양기상서비스 현황과 정책 방향	김유근	48-57
해외기술동향	• 선진 해양기상기술 동향	우승범	58-67
포커스	• 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	허종안, 손흥민	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
• 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	김방업	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
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	김정운	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	양충현	18-29
	• 한파가 농업에 미치는 영향	심교문	30-41
	• 겨울철 한파 대비 건강관리	송경준	42-56
	• 겨울철 위험기상의 예측능력 향상	김주홍	57-68
논 단	• 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
	• 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

## 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
	• 지표홍반자와선정보 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	허창희	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 소화전 계측기술	정태성	41-52
	논 단	• 돌발 기상 예보와 과제	이우진
• 중규모 대류계의 예측		이동규	66-79
• 위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단		손병주	80-90
• 중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제안		이규원	91-105
포 커 스	• 집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험	이보영	106-112

부처 협력을 통한 한정자원의 활용 최적화, 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 모니터링 시스템	신충훈	17-31
	• 도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언	경기원	32-43
	• 해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용	권오순	44-54
	• 국가대기오염측정망과 명예대기관리원 제도	박지해	55-63
	• 식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측	손성원	64-72
	• 드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측 기술	홍석영	73-86
	• 홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황 소개	현명숙	87-98

# 『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